

Інв. № 23

Удост.

Міністерства образования Рэспублікі Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Y 23
26.11.2013 Исаев В.С. АР-26
03.12.2013 Чемеров В.Д. 11
08.02.2017 Голубчук В.В. 27-21
23.03.15 Бончук В.Д.-11
11.03.16 Наметчукова О.В.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПІДАВЕРАНА

Рекомендовано УМО вузов Республики Беларусь 2014
по образованию в области информатики и радиоэлектроники
в качестве учебно-методического пособия для студентов
учреждений, обеспечивающих получение высшего образования
по специальности
«Программное обеспечение информационных технологий»

УК 8769

Установка залукаціі
«Гомельскі дзяржаўны ўніверсітэт
імя Францішка Скаріны»
БІБЛІЯТЭКА

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2011

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ им. Ф. Скорины

УДК 621.3 (076.5)
ББК 31.211 я73
Т 338

Рецензенты:

д-р техн. наук В. Г. Кудин,
канд. техн. наук С. Л. Курилин,
кафедра радиофизики и электроники
УО «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»

Теория электрических цепей : Лабораторный практикум :
Т 338 учебно-методическое пособие для студентов учреждений,
обеспечивающих получение высшего образования по
специальности «Программное обеспечение информационных
технологий». — В. И. Богданович, А. И. Егоров,
В. Н. Мищковец, Н. Н. Федосенко; М-во образования РБ,
Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. — Гомель : ГГУ
им. Ф. Скорины, 2011. — 120 с.
ISBN 978-985-439-590-6

В настоящем практикуме рассмотрены теоретические вопросы по основным
разделам курса «Теория электрических цепей», исследуются электрические
цепи постоянного тока, электрические цепи однофазного синусоидального
тока, трехфазные цепи и асинхронные цепи электрических фильтров
переводные процессы в линейных электрических цепях, трехфазные цепи при
разных способах соединения параллель.

Содержатся описание девяти лабораторных работ. Принципы
исследования скрыты порядок выполнения работ, требования к содержанию
итогов контрольные вопросы, методические указания по выполнению
Адресовано студентам вузов по специальности «ПОИТ», а также студентам
физических факультетов

УДК 621.3 (076.5)
ББК 31.211 я73

ISBN 978-985-439-590-6 © Богданович В. И., Егоров А. И.,
Мищковец В. Н., Федосенко Н. Н., 2011
© УО «Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины», 2011

Содержание

Введение	4
Техника безопасности при выполнении лабораторных работ	5
Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ	7
1 Исследование разветвленной цепи постоянного тока	9
Лабораторная работа 1	18
2 Исследование сложной цепи постоянного тока	22
Лабораторная работа 2	28
3 Исследование электрических цепей однофазного синусоидального тока	33
Лабораторная работа 3	39
Лабораторная работа 4	47
4 Дифференцирующие и интегрирующие цепи	50
Лабораторная работа 5	57
5 Электрические фильтры	61
Лабораторная работа 6	69
6 Переходные процессы в электрических цепях	75
Лабораторная работа 7	86
7 Трехфазные цепи	90
Лабораторная работа 8	106
Лабораторная работа 9	109
Приложение А. Описание универсального лабораторного стенда	113
Литература	119

Введение

Дисциплина «Теория электрических цепей» по своему существу требует полного сочетания теории и практики. Для ее понимания необходимо научиться самостоятельно решать разнообразные электротехнические задачи, что может быть получено, как известно, аналитическим или экспериментальным методами. Аналитические методы решения задач изучаются на практических занятиях, а экспериментальным методом исследования учат студентов при проведении лабораторных занятий.

В настоящем учебном пособии рассмотрены теоретические вопросы по основным разделам дисциплины «Теория электрических цепей»: электрические цепи постоянного тока, электрические цепи однофазного синусоидального тока, электрические цепи трехфазного тока, переходные процессы в линейных электрических цепях.

Лабораторные работы играют важную роль при изучении дисциплины «Теория электрических цепей», так как они позволяют на практике проверить теоретические расчеты с результатами экспериментального исследования конкретных электротехнических устройств, аналогии которых являются исследуемые цепи.

Учебное пособие содержит 9 лабораторных работ. Перечень лабораторных работ соответствует предложенной тематике лабораторных работ в типовой учебной программе по дисциплине «Теория электрических цепей», утвержденной Министерством образования Республики Беларусь 03 июня 2008 г., регистрационный № ТД-1.32/тип.

Применение универсальных лабораторных стендов обеспечивает возможность проведения лабораторных занятий фронтальными методами.

При описании каждой лабораторной работы определяется ее цель, даются основные понятия по теме, приводится детальный ход эксперимента, правила оформления отчета, вопросы для самоконтроля. Некоторые лабораторные работы имеют расчетное задание.

Практикум может быть использован при проведении лабораторных занятий по дисциплине «Теория электрических цепей» также и для всех специальностей физического факультета и в самостоятельной работе студентов при подготовке к практическим занятиям и экзаменам.

Техника безопасности при выполнении лабораторных работ

При выполнении лабораторных работ студент должен выполнять следующие правила техники безопасности:

– после ознакомления с правилами внутреннего распорядка и инструктажа по технике безопасности студент должен расписаться в соответствующем журнале;

– при работе в лаборатории категорически запрещается приносить с собой вещи и предметы, загромождающие рабочие места, способствующие созданию условий, которые могут привести к нарушению правил техники безопасности;

– в лаборатории запрещается громко разговаривать, покидать рабочее место и переходить от одного стендса к другому;

– студенческая группа делится на подгруппы (не более 8 студентов), а подгруппы – на бригады, которые затем распределяются по лабораторным стендам. В бригаде должно быть не менее двух студентов. Работа одного студента на лабораторном стенде категорически запрещена;

– сборку электрической цепи производят соединительными проводами при выключенном напряжении питания в строгом соответствии со схемой, представленной в лабораторном практикуме, обеспечивая при этом надежность электрических контактов всех разъемных соединений;

– приступая к сборке электрической цепи, необходимо убедиться в том, что к стеклу не подано напряжение;

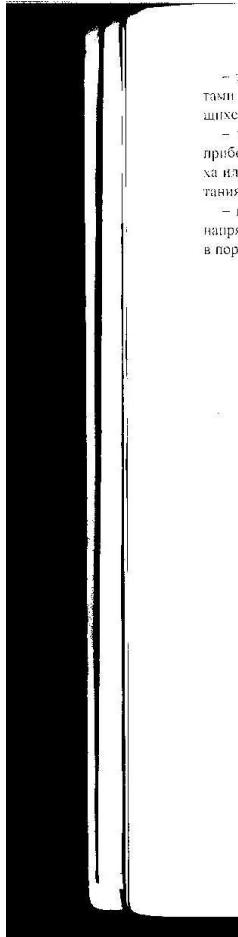
– при сборке электрической цепи необходимо следить за тем, чтобы соединительные провода не перегибались и не скручивались;

– собранная электрическая цепь продвигается для проверки преподавателю;

– включение электрической цепи под напряжением производится только с разрешения преподавателя и в его присутствии;

– при обнаружении неисправностей в электрической цепи необходимо немедленно отключить ее от питающей сети и доложить об этом преподавателю;

– переключения и исправления в собранной электрической цепи разрешается производить только при отключенном напряжении питания;



– запрещается прикасаться пальцами, руками и другими предметами изолированных поковедущих частей электрической цепи, находящихся под напряжением;

– при обнаружении поврежденной электрического оборудования и приборов стенда, а также при появлении дыма, специфического запаха или искрения необходимо немедленно выключить напряжение питания стенда и известить об этом преподавателю;

– после выполнения лабораторной работы необходимо выключить напряжение питания стенда, разобрать исследуемую цепь и привести в порядок рабочее место.

Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ

Подготовка к лабораторным работам. Лабораторные работы в группах проводятся в соответствии с расписанием учебных занятий в университете и в течение определенного времени. Поэтому для выполнения лабораторных работ студент должен руководствоваться следующими положениями:

– предварительно ознакомиться с графиком выполнения лабораторных работ;

– внимательно ознакомиться с описанием соответствующей лабораторной работы и установить, в чем состоит основная цель и задача этой работы;

– по лекционному курсу и соответствующим литературным источникам изучить теоретическую часть, относящуюся к данной лабораторной работе;

– до проведения лабораторной работы подготовить в рабочей тетради соответствующие схемы, таблицы и расчетные формулы;

– неподготовленные студенты к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Выполнение лабораторных работ. Успешное выполнение лабораторных работ может быть достигнуто в том случае, если экспериментатор отчетливо представляет себе цель эксперимента и ожидаемые результаты, поэтому важным условием обстоятельства проведения исследований является тщательная подготовка студентов к лабораторной работе. При этом необходимо соблюдение следующих требований:

– перед сборкой электрической цепи студенты должны предварительно ознакомиться с электрическим оборудованием и его поминальными данными (поминальными данными являются значения тока, напряжения и мощности, на которые рассчитаны соответствующие устройства), а также с измерительными приборами, предназначенными для проведения соответствующей лабораторной работы;

– сборку электрической цепи необходимо производить в точном соответствии с заданием;

– после окончания сборки электрическая цепь должна быть представлена преподавателю. Включать цепь под напряжением можно только с разрешения преподавателя;

– запись показаний всех приборов в процессе выполнения лабораторной работы следует производить по возможности одновременно и быстро;

– результаты измерений заносятся студентом в свою рабочую тетрадь;

– после выполнения лабораторной работы результаты эксперимента вместе с простейшими контрольными расчетами предъявляются для проверки преподавателю до разборки электрической цепи;

– после окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в порядок;

– в течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах. Выходить из помещения лаборатории можно только с разрешения преподавателя.

Оформление отчета по лабораторным работам. Составление отчета о проведенных исследованиях является важнейшим этапом выполнения лабораторной работы. По каждой выполненной лабораторной работе составляется отчет (листы формата А4). Схемы и графики выполняются с соблюдением принятых стандартных обозначений. Требования по содержанию отчета приводятся в каждой лабораторной работе.

1 Исследование разветвленной цепи постоянного тока

1 Схемы соединений, схемы замещения электрических цепей и режимы их работы

2 Основные законы теории электрических цепей

3 Методы анализа электрических цепей постоянного тока с одним источником ЭДС. Метод эквивалентных преобразований. Метод единичного тока

Основные понятия по теме

Графическое изображение электрической цепи с помощью стандартных условных обозначений ее элементов, отражающее характер соединения этих элементов, называется схемой электрической цепи [1–4].

Схема электрической цепи, через все участки которой проходит один и тот же ток, представляет собой последовательное соединение приемников. При параллельном соединении приемников они всегда находятся под одним и тем же напряжением. Если приемники соединены последовательно параллельно, такую схему называют схемой со смешанным соединением приемников. Такую электрическую цепь также называют разветвленной, и она является многоконтурной.

Простейшая электрическая цепь показана на рисунке 1.1, где источник питания с внутренним сопротивлением R_s образует так называемый внутренний участок цепи, а соединительные провода с приемником (сопротивление R) – внешнюю часть цепи. Выходные зажимы 1 и 2 источника питания подключены с помощью соединительных проводов к входным зажимам приемника a и b . Таким образом, в электрической цепи можно выделить участки, содержащие как активные, так и пассивные элементы.

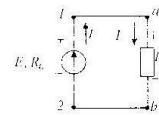


Рисунок 1.1 – Простейшая электрическая цепь

Для анализа электрической цепи необходимо выделить отдельные ветви и узлы. **Ветвь** – это участок электрической цепи, вдоль которого протекает один и тот же ток. **Узлы** называют точки в электрической цепи, в которой соединяются три и более ветвей. Любой замкнутый путь в электрической цепи, состоящий из нескольких ветвей, называют контуром.

На рисунке 1.2 показаны электрические схемы с обозначениями узлов, ветвей и контуров.

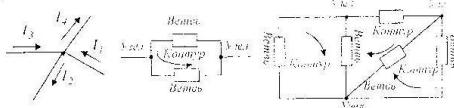


Рисунок 1.2 – Электрические схемы с обозначениями узлов, ветвей и контуров

При анализе электрических цепей рассматривают не цепи с реальными генераторами, электрическими двигателями, лампами и т. п., а схемы отражающих свойства реальных элементов цепей при определенных условиях. **Т. е.** реальные электрические цепи заменяют схемами замещения или эквивалентными схемами, которые являются инделигированными расчетными моделями реальных цепей. **Схема замещения** есть графическое изображение реальной цепи с помощью идеализированных элементов, параметры которых отражают характеристики замещаемых элементов. Так, источник с ЭДС E и внутренним сопротивлением R_0 можно представить в виде схемы замещения, состоящих либо из идеального источника тока и резистивного элемента, либо из идеального источника тока и параллельного элемента.

Рассмотрим, например, электрическую схему на рисунке 1.1 и представим ее двумя эквивалентными схемами. Из уравнения $E = U_1 + U_2 = I(R_0 + R)$ следует, что ток в цепи ограничен сопротивлением источника питания R_0 и сопротивлением приемника R , поэтому источник питания может быть заменен источником ЭДС E (рисунок 1.3, а) и последовательно включенным сопротивлением R_0 , которое равно внутреннему сопротивлению реального источника или источником тока с параллельно включенным сопротивлением R_0 (рисунок 1.3, б). Рассмотрим баланс мощностей источников питания для схем, приведенных на рисунках 1.3, а, б.

Для схемы рисунка 1.3, а имеем

$$EI = I^2 R_0 + UI \quad (1.1)$$

а для схемы рисунка 1.3, б

$$UI = \frac{U^2}{R_0} + UI \quad (1.2)$$

где EI – мощность источника напряжения;

$I^2 R_0$ – мощность потерь в источнике напряжения;

UI – мощность нагрузки или мощность, отдаваемая источником во внешнюю цепь;

U_I – мощность источника тока;

$\frac{U^2}{R_0}$ – мощность потерь в источнике тока.

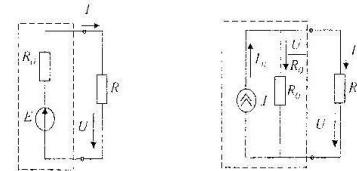


Рисунок 1.3 – Эквивалентные схемы, электрической цепи изображенной на рисунке 1.1, в которых источник питания заменен:
а) источником ЭДС E и последовательно включенным сопротивлением R_0 ; б) источником тока с параллельно включенным сопротивлением R_0

Если $I_b = \frac{E}{R_0}$, то, согласно уравнениям (1.1) и (1.2), источники напряжения и тока создают одинаковые напряжения, токи и мощности, отдаваемые во внешнюю цепь. Следовательно, теоретически безразлично, с каким из идеальных источников питания использовать схему замещения. Однако на практике реальный источник питания обычно заменяют источником ЭДС, так как в этом случае через все элементы схемы замещения проходит реальный ток и идеальный

источник развивает мощность $P = EI$, соответствующую мощности действительного источника. В самом деле, действительные источники питания работают в режимах, близких к режиму идеального источника ЭДС ($E \approx U$), если их внутреннее сопротивление достаточно мало в сравнении с сопротивлением нагрузки. В режимах же идеального источника тока действительные источники питания могут работать тогда, когда имеют дело с режимами короткого замыкания или близкими к ним.

Электрическая цепь и ее элементы могут работать в различных режимах. В зависимости от частоты токов и напряжений различают режимы работы электрических цепей при постоянных и переменных ЭДС и токах, а также импульсные режимы, когда воздействие электрических сигналов не прерывно в течение времени работы устройства. В зависимости от характера электромагнитных процессов, имеющих место в электрических цепях, различают стационарные (установившиеся) и нестационарные (переходные) режимы. В зависимости от нагрузки режимы могут быть номинальными, согласованными, холостого хода и короткого замыкания.

Номинальный режим характеризуется тем, что все элементы цепи работают при условиях, указанных в паспорте данного элемента. Работа устройства при номинальном режиме характеризует наиболее длительную безотказную его работу и экономичность. Поэтому при расчете электрических цепей за основу берут именно номинальные значения параметров элементов, основными из которых являются напряжение U_{nom} , токи I_{nom} и мощность P_{nom} . Чрезмерное и длительное превышение номинальных значений может привести к перегрузке цепи и выходу устройства из строя, т. е. может возникнуть аварийный режим. О нагрузке можно судить по току I_n , проходящему через нее или по ее сопротивлению R . Например, для неразветвленной цепи (рисунок 1.1) ток нагрузки $I_n = \frac{E}{(R_n + R)}$ будет тем больше, чем меньше сопротивление приемника R .

Согласованный режим характеризуется тем, что источник питания отдает приемнику наибольшее количество энергии, что возможно при определенном соотношении (согласованности) между параметрами элементов цепи. Для цепи на рисунке 1.1 это осуществляется при $R = R_n$.

Режим, когда через источник питания и приемники не протекает ток, т. е. когда нагрузка отключена, называется холостым ходом. При холостом ходе напряжение на зажимах источника питания максимально и равно ЭДС источника $U_n = E$ (рисунок 1.4).

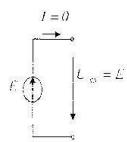


Рисунок 1.4 – Режим холостого хода

Режим короткого замыкания – это режим, при котором сопротивление внешней цепи и напряжение между зажимами источника питания равны нулю; $R = 0$; $U_n = 0$ (рисунок 1.5).

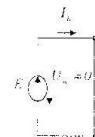


Рисунок 1.5 – Режим короткого замыкания

Режим короткого замыкания может возникнуть в электрической цепи при соединении накоротко разнотенциальных зажимов источников питания проводником с нулевым сопротивлением. При коротком замыкании ток I_n максимальен и во много раз превышает номинальный. Поэтому в энергетических цепях режим короткого замыкания обычно является аварийным.

Основными законами электрических цепей, устанавливающими соотношения между ЭДС, напряжениями, токами и сопротивлениями, являются закон Ома и правила Кирхгофа. При помощи закона Ома и правил Кирхгофа можно провести анализ и расчет любых электрических цепей. [1–2] Так, в неразветвленной замкнутой электрической цепи (рисунок 1.1) под действием ЭДС E будет возникать ток I , значение которого определяется законом Ома:

$$I = \frac{E}{(R_n + R)}, \quad (1.3)$$

где $R_i + R$ – полное сопротивление замкнутой цепи;

R_m – внутреннее сопротивление источника;

R – сопротивление приемника (нагрузки).

Для участка электрической цепи, сопротивление которого R , а напряжение на котором U , закон Ома можно записать в виде

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{или} \quad U = IR. \quad (1.4)$$

Произведение IR называют падением напряжения, причем под напряжением на любом участке электрической цепи понимают разность потенциалов между крайними точками этого участка. Например, в схеме, если через участок ab с сопротивлением R_1 не имеющий источника ЭДС, ток проходит от точки a к точке b (ток на участке цепи без ЭДС всегда проходит от точки более высокого потенциала к точке с более низким потенциалом), потенциал φ_a точки a будет всегда выше потенциала φ_b , точки b на значение падения напряжения на сопротивлении R_1 :

$$\varphi_a + \varphi_b = IR_1. \quad (1.5)$$

а напряжение между точками a и b

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = IR_1. \quad (1.6)$$

Таким образом, напряжение на любом участке электрической цепи не содержащем источника ЭДС, равно произведению тока, протекающего через участок, на сопротивление этого участка.

Рассмотрим Закон Ома для участка цепи, изображенного на рисунке 1.6.

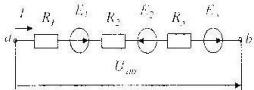


Рисунок 1.6 – Участок электрической цепи

Если положительное направление тока I на участке ab принято от точки a к точке b , то потенциал φ_b , выраженный через потенциал φ_a , определяется как

$$\varphi_b = \varphi_a - IR_1 + E_1 - IR_2 + E_2 - IR_3 + E_3.$$

Из этого выражения следует, что

$$I = \frac{(\varphi_a - \varphi_b) + E_1 + E_2 - E_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{U_{ab} + \sum_{i=1}^3 E_i}{\sum_{i=1}^3 R_i}, \quad (1.7)$$

где $\sum_{i=1}^3 E_i = E_1 + E_2 - E_3$ – алгебраическая сумма ЭДС, действующая на участке ab , причем ЭДС записывается со знаком плюс, если она совпадает по направлению с направлением тока и со знаком минус – если не совпадает:

$$\sum R_i = R_1 + R_2 + R_3 – сопротивление участка;$$

$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ – напряжение между зажимами a и b . Выражение (1.7) называют обобщенным законом Ома.

В цепях постоянного тока величину, обратную сопротивлению, называют электрической проводимостью:

$$g = \frac{1}{R}. \quad (1.8)$$

Анализ и расчет разветвленных цепей обычно проводят с помощью правил Кирхгофа. Первое правило Кирхгофа можно сформулировать следующим образом: сумма всех токов, приходящих к узлу электрической цепи, равна сумме всех токов, выходящих из этого узла или алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum I = 0. \quad (1.9)$$

Второе правило Кирхгофа применяют к замкнутым контурам. Оно может быть сформулировано следующим образом: алгебраическая сумма напряжений на сопротивлениях участков замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС источников, входящих в контур:

$$\sum IR = \sum E. \quad (1.10)$$

В уравнении (1.10) ЭДС записываются со знаком плюс, если их направления совпадают с направлением обхода контура, и со знаком минус, если их направления противоположны направлению обхода.

Для анализа электрической цепи с одним источником электрической энергии воспользуемся методом эквивалентных преобразований («методом свертки») [1, 2].

Суть метода рассмотрим на примере электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 1.7. Пусть известны значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 , ЭДС E_1 и ее внутреннее сопротивление $R_{\text{вн}}$. Требуется определить токи во всех участках цепи и напряжение, которое покажет вольтметр (сопротивление его бесконечно велико), включенный между точками a и d .

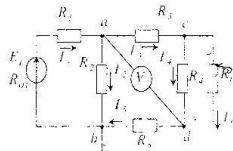


Рисунок 1.7 – Схема замещения развитой цепи с одним источником электрической энергии

Для решения такой задачи отдельные участки электрической цепи с последовательно или параллельно соединенными элементами заменяют одним эквивалентным элементом. Так, резисторы R_3 и R_5 соединены последовательно, а резистор R_6 к ним параллельно, поэтому их эквивалентное сопротивление записывается как

$$R_{356} = \frac{R_3 R_5}{R_3 + R_5},$$

где $R_{356} = R_3 + R_5$.

Сопротивления R_2 и R_{356} соединены последовательно, поэтому общее сопротивление будет равно $R_{2356} = R_2 + R_{356}$.

Сопротивления R_1 и R_{2356} соединены параллельно, следовательно

$$R_{12356} = \frac{R_1 (R_2 + R_{356})}{R_1 + R_2 + R_{356}},$$

Эквивалентное (входное) сопротивление всей цепи находят по уравнению

$$R_{\text{вн}} = R_{\text{вн}} + \frac{R_1 (R_2 + R_{356})}{R_1 + R_2 + R_{356}},$$

16

Ток I_1 в неразветвленной части схемы определяют из закона Ома:

$$I_1 = \frac{E_1}{R_{\text{вн}}}.$$

Токи I_2 и I_3 определяют

$$I_2 = I_1 \frac{R_1 + R_{356}}{R_1 + R_2 + R_{356}}; \quad I_3 = I_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_{356}}.$$

Токи I_4 , I_5 , I_6 определяют по следующим формулам:

$$I_4 = I_5 = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_5}; \quad I_6 = I_1 \frac{(R_2 + R_3)}{R_2 + R_3 + R_5}.$$

Зная ток I_7 , можно найти ток I_8 по-другому. На основании второго правила Кирхгофа определяем напряжение на участке ab : $U_{ab} = E_1 - I_1 (R_{\text{вн}} + R_{2356})$, тогда значение тока будет равно $I_8 = \frac{U_{ab}}{R_3}$.

Показания вольтметра можно определить, составив уравнение по второму правилу Кирхгофа, например, для контура $ahca$:

$$R_4 I_4 + R_5 I_5 = U_{ah}.$$

Правильность вычисленных значений можно проверить, воспользовавшись первым правилом Кирхгофа или уравнением баланса мощностей, которые для схемы, изображенной на рисунке 1.7, имеют вид:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5 + I_6;$$

$$E_1 I_1 = (R_{\text{вн}} + R_1) I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + (R_4 + R_5) I_4^2 + R_6 I_6^2.$$

Если заданы значения сопротивлений ветвей электрической цепи (рисунок 1.7) и ЭДС источника E_1 , то для нахождения токов в ветвях можно воспользоваться методом подобия (методом пропорциональных величин). Этот метод применим только для расчета линейных цепей, т. е. цепей с постоянными значениями сопротивлений.

Воспользуемся свойствами линейных цепей для определения токов схемы, изображенной на рисунке 1.7 в такой последовательности: зададимся произвольным значением тока I'_6 в резисторе R_6 , наиболее удаленном от источника питания. Как правило, это значение тока берут равным единице. По заданному току I'_6 и сопротивлению R_6

определяем напряжение $U'_{ab} = R_2 I'_2$. Далее определяем параметры цепи от действия тока $I'_2 = 1 \text{ A}$.

$$I'_4 = I'_3 + \frac{U'_{ab}}{R_4 + R_5}; \quad I'_3 = I'_1 + I'_2; \quad I'_2 = \frac{I'_1 R_1 + I'_2 (R_2 + R_3)}{R_2}; \quad I'_1 = I'_2 + I'_3.$$

После этого находим значение ЭДС E'_1 , как $E' = i R_{12} + R_3 I' + R_2 I'_2$.

Однако найденное значение ЭДС E'_1 в общем случае отличается от заданной величины ЭДС E_1 . Поэтому для определения действительных значений токов и напряжений вычисляем так называемый коэффициент подобия $K = \frac{E'_1}{E_1}$. Умножая на него полученные при расчете значения токов и напряжений, находим действительные значения токов и напряжений цепи. Метод пропорциональных величин особенно эффективен при расчете разветвленных линейных электрических цепей с одним источником.

Лабораторная работа 1

Цель работы: освоить методы расчета цепей постоянного тока с одним источником ЭДС – метод эквивалентных преобразований («метод свертки») и метод пропорциональных величин («метод подобия»); приобрести навыки в измерении основных параметров электрических цепей постоянного тока.

Материалы и оборудование: блок питания (БП), цифровой мультиметр DT-58, ламель монтажная, набор резисторов, набор проводов со штекерами.

Расчетное задание

1 Изучить методы расчета цепей постоянного тока с одним источником ЭДС – метод эквивалентных преобразований и метод пропорциональных величин.

2 Выполнить расчет токов в ветвях электрической цепи, схема замещения которой приведена на рисунке 1.8 методом эквивалентных преобразований и методом пропорциональных величин для параметров, приведенных в таблице 1.1. (Вариант задания получить у преподавателя).

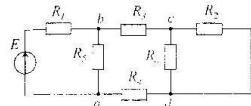


Рисунок 1.8 – Схема для исследования разветвленной электрической цепи с одним источником электрической энергии

3 Вычислить значения напряжений U_{ad} и U_{cd} .

- 4 Проверить правильность рассчитанных токов и напряжений в ветвях схемы:
 – сравнением результатов расчета токов в ветвях двумя методами;
 – выполнением первого правила Кирхгофа для узлов схемы;
 – соблюдением баланса мощностей.

Таблица 1.1 – Параметры электрической цепи для схемы рисунка 1.8

№ вари. брн.	№ ветвь	R_1, Ω	R_2, Ω	R_3, Ω	R_4, Ω	R_5, Ω	R_6, Ω	$E, В$
1	1	100	200	270	330	680	470	5
	2	200	270	330	680	470	100	10
	3	270	680	330	470	100	200	5
	4	680	330	470	100	200	270	10
2	1	330	680	100	200	270	470	5
	2	680	100	470	200	330	270	10
	3	100	680	200	330	270	470	5
	4	680	200	330	270	470	100	10
3	1	200	330	270	680	100	470	5
	2	330	270	680	100	470	200	10
	3	680	270	200	470	330	100	5
	4	270	200	680	330	100	470	10
4	1	200	680	330	100	470	270	5
	2	680	330	100	470	270	200	10
	3	330	100	680	270	200	470	5
	4	200	100	330	680	270	470	10

Ход работы

1 Измерить сопротивления резисторов с помощью генератора. Сравнить их значения со значениями резисторов, используемых при теоретическом расчете.

2 Собрать на лицевой панели лабораторного стенда схему рисунка 1.2. Параметры резисторов должны соответствовать значениям заданного варианта.

3 На источнике питания, с помощью вольтметра выставить значение заданного напряжения. Проверить правильность выставленных значений напряжения с помощью тестера. Подсоединить источник питания к входу собранной схемы.

4 Подключить поочередно тестер с помощью проводников, в ветвях схемы, содержащих резисторы R_1, R_2, R_3, R_4 , измерить и занести в таблицу 1.2 значение токов в этих ветвях. Значение токов в резисторах R_5, R_6 вычислить по первому правилу Кирхгофа. Если после включения прибора в схему стрелка отклоняется в обратную сторону, т. е. влево, то следует поменять местами зажимы на схеме либо на тестере (т. е. поменять полярность включения прибора) и занести значение тока со знаком «-».

5 Подключите поочередно тестер с помощью проводников, в ветвях схемы, измерить и записать в таблицу 1.3 значения напряжений на резисторах $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$.

6 С помощью тестера измерить напряжение между точками a и b U_{ab} и точками c и d U_{cd} . Вычислить токи I_3 и I_6 и сравнить их с токами, вычисленными по первому правилу Кирхгофа.

Таблица 1.2 – Значения токов в ветвях схемы рисунка 1.8

$E, В$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$	$I_4, мА$	$I_5, мА$	$I_6, мА$

Таблица 1.3 – Значения напряжений на резисторах схемы рисунка 1.8

$E, В$	$U_{R_1}, В$	$U_{R_2}, В$	$U_{R_3}, В$	$U_{R_4}, В$	$U_{R_5}, В$	$U_{R_6}, В$

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

- 1) пустойный лист;
- 2) название и цель работы;
- 3) порядок расчета электрической цепи рисунка 1.8 двумя методами:
- 4) таблицы значений токов в ветвях и значений напряжений на резисторах электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 1.8, т. е. таблицы 1.2, 1.3;
- 5) таблицу сравнения результатов численных расчетов и результатов эксперимента, т. е. таблицу 1.4;
- 6) выводы по лабораторной работе.

Таблица 1.4 – Таблица сравнения значений численного расчета и экспериментальных данных

Способ определения токов	$I_{1, \text{расч}}$	$I_{2, \text{расч}}$	$I_{3, \text{расч}}$	$I_{4, \text{расч}}$	$I_{5, \text{расч}}$	$I_{6, \text{расч}}$
Расчет токов по методу пропорциональных величин						
Расчет токов по методу эквивалентных преобразований						
Измеренные токи						
Погрешности						

Вопросы для самоконтроля

- 1 Дайте определение электрической цепи.
- 2 Что такое источник ЭДС и источник тока? Чем отличаются реальные источники ЭДС и тока от идеальных источников?
- 3 Дайте определение следующих понятий: узел, ветвь, контур.
- 4 Дайте определение основных законов электрических цепей.
- 5 Приведите основные методы эквивалентного преобразования электрических цепей.
- 6 Как можно преобразовать треугольник сопротивлений в эквивалентную звезду?
- 7 Как можно преобразовать звезду в эквивалентный треугольник?
- 8 Что такое энергетический баланс в электрических цепях?
- 9 Как можно использовать метод пропорциональных величин для расчета электрических цепей?
- 10 Как можно использовать метод эквивалентных преобразований для расчета электрических цепей?

2 Исследование сложной цепи постоянного тока

- 1 Метод расчета электрических цепей постоянного тока с применением правила Кирхгофа
- 2 Метод контурных токов
- 3 Метод наложения

Основные понятия по теме

Для расчета электрических цепей постоянного тока с применением правила Кирхгофа рекомендуется следующий порядок составления уравнений [1–4]:

- произвольно выбирают направление токов во всех ветвях. Если принятное направление тока не совпадает с действительным, то при решении такие токи получаются со знаком минус;
- составляют $(N - I)$ уравнения по первому правилу Кирхгофа, где N – число узлов;

– недостающие уравнения в количестве $M - (N - I)$, где M – число ветвей, составляют по второму правилу Кирхгофа; при этом обход контура можно производить как по часовой стрелке, так и против нее. Все значения ЭДС, направления которых совпадают с направлением обхода контура, записываются со знаком плюс, а те ЭДС, направления которых не совпадают – со знаком минус. Направление действия ЭДС внутри источника всегда принимают от минуса к плюсу;

- число составленных уравнений по первому и второму правилам Кирхгофа должно быть равно числу неизвестных токов;
- полученную систему уравнений решают относительно неизвестных токов.

На примере электрической цепи, схема которой изображена на рисунке 2.1, составим систему уравнений по правилам Кирхгофа.

Эта схема имеет шесть ветвей и четыре узла, поэтому по первому правилу Кирхгофа для нее нужно составить три уравнения, например:

- для узла a : $I_1 + I_2 - I_3 = 0$;
- для узла b : $I_3 + I_4 + I_5 = 0$;
- для узла c : $I_4 - I_5 + I_6 = 0$.

Выбрав направления обхода контура, составляем три уравнения по второму правилу Кирхгофа для трех произвольно выбранных контуров, например:

- контура abc : $E_1 - I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_3 R_3 = 0$;

- контура bed : $E_2 + I_3 R_3 - I_4 R_4 - I_5 R_5 = 0$;
- контура acd : $0 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_6 R_6$.

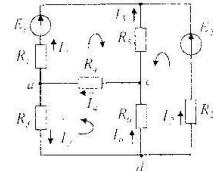


Рисунок 2.1 – Схема замещения разветвленной электрической цепи с двумя источниками ЭДС для расчета с применением правил Кирхгофа

Решая совместно записанные уравнения, вычисляют все шесть неизвестных токов. Если в результате решения этих уравнений получаются токи со знаком минус, то это означает, что истинные направления токов в ветвях цепи противоположны тем направлениям, для которых составлены уравнения.

Правильность вычисленных значений можно проверить, воспользовавшись первым правилом Кирхгофа или уравнением баланса мощностей.

Рассмотрим метод контурных токов. Этот метод заключается в том, что вместо действительных токов в ветвях на основании второго правила Кирхгофа определяются так называемые контурные токи. Контурный называется такой расчетный ток, который замыкается только по своему контуру, оставаясь之外 него неизменным. Тогда действительный ток в любой ветви, принадлежащий только одному контуру, численно равен контурному току, а в ветви, принадлежащей нескольким контурам, равен алгебраической сумме контурных токов, проходящих через эту ветвь.

Число уравнений, составленных по второму правилу Кирхгофа, в этом случае равно числу независимых контуров. Контур считается независимым, если в нем имеется хотя бы одна ветвь, не принадлежащая другим контурам. Число независимых контуров можно определить $M - (N - I)$, где M – число ветвей, N – число узлов. Направление обхода контура выбирают произвольно, обычно это направление

совпадает с направлением контурного тока. Значение ЭДС берется с знаком плюс, если направление обхода контура совпадает с положительным направлением ЭДС, и со знаком минус, если не совпадает.

Рассмотрим электрическую цепь на рисунке 2.2.

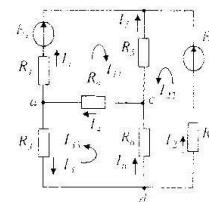


Рисунок 2.2 – Схема замещения разветвленной электрической цепи с двумя источниками электрической энергии для расчета методом контурных токов

Составим уравнения для трех независимых контуров по методу контурных токов:

- для контура abc : $E_1 = I_{11}R_1 + R_3 + R_4) + I_{21}R_4 + I_{31}R_2$;
- для контура bcd : $E_2 = I_{12}R_5 + I_{22}(R_3 + R_6 + R_5) - I_{32}R_6$;
- для контура aed : $0 = I_{11}R_1 - I_{22}R_6 + I_{31}(R_4 + R_5 + R_6)$.

Решая совместно уравнения, определяем контурные токи. В том случае, когда контурный ток получается со знаком минус, это означает, что его направление противоположно выбранному на схеме. Затем контурные токи определяем действительные токи в ветвях схемы следующим образом:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{11} + I_2 \\ I_2 &= I_{21} + I_{22} \\ I_3 &= I_{31} + I_{32} \end{aligned}$$

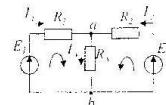
Рассмотрим метод наложения. Этот метод применим только в линейных электрических цепях, т. е. в цепях, в которых сопротивление элементов не изменяется при прохождении через них тока или приложенного к ним напряжения. Расчет основывается на том, что в ветвях цепи определяют токи от действия каждого источника в отдельности (частичные токи), а затем действительные токи определяют

как алгебраическая сумма частичных токов. Рассмотрим схему на рисунке 2.3, а. Исключим из нее источник E_2 , т. е. $E_2 = 0$. Тогда схема примет вид рисунка 2.3, б.

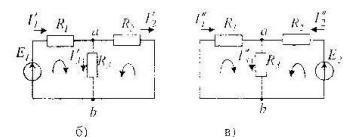
Ток в неразветвленной части цепи будет равен общему току от действия первой ЭДС, т. е.

$$I'_{\text{общ}} = I'_1 = \frac{E_1}{R'_{\text{общ}}},$$

$$\text{где } R'_{\text{общ}} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}.$$



а)



б)

Рисунок 2.3 – Схема замещения разветвленной электрической цепи с двумя источниками электрической энергии (а) и схемы замещения электрической цепи для определения частичных токов от действия ЭДС E_1 (б) и ЭДС E_2 (в)

Ток I'_1 определим как $I'_1 = \frac{E_1 - I'_2 R_2}{R_1}$, а $I'_2 = I'_1 - I'_1$.

Токи I'_1 , I'_2 можно определить и так

$$I'_2 = I'_1 - \frac{R_1}{R_2 + R_3}, \quad I'_1 = I'_1 - \frac{R_2}{R_2 + R_3}.$$

Исключим источник E_1 , т. е. $E_1 = 0$. Тогда схема примет вид, указанный на рисунке 2.3, в. Ток в неразветвленной части цепи определим как

$$I_{\text{общ}}'' = I_2'' = \frac{E_2}{R_{\text{общ}}'}$$

$$\text{где } R_{\text{общ}}' = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}.$$

Ток I_1'' определим как $I_1'' = \frac{E_2 - I_2'' R_3}{R_1}$, и $I_1'' = I_1' + I_2''$.

Токи I_1' , I_2' можно определить и так:

$$I_1' = I_2' \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad I_2' = I_2'' \frac{R_1}{R_1 + R_3}$$

Действительные токи определим как алгебраическую сумму чистых токов (рисунок 2.3):

$$I_1 = I_1' + I_1'', \quad I_2 = I_2' + I_2'', \quad I_3 = I_1' + I_2''$$

Для анализа работы электрических цепей и улучшения режима их работы, особенно в схемах электроники, важно знать распределение потенциала в цепи. Графическое изображение распределения потенциала в цепи называется потенциальной линией напряжения (рисунок 2.3).

Потенциальная линия строится следующим образом. Начнем обход электрической цепи с точки a , потенциал которой в цепи включен источник ЭДС, разность потенциалов на его зажимах равна нулю, т. е. $\varphi_a - \varphi_b = IR_1$. Тогда потенциал в точке b будет равен $\varphi_b = \varphi_a - IR_1 = 0 - 2 \cdot 5 = -10 \text{ В}$. Между точками b и c в цепи включен источник ЭДС, разность потенциалов на его зажимах равна E_2 , т. е. $\varphi_b - \varphi_c = E_2$, откуда $\varphi_c = \varphi_b - E_2 = -10 - 12 = -22 \text{ В}$. Потенциал в точке d ниже потенциала точки c на величину падения напряжения IR_2 , т. е. $\varphi_c - \varphi_d = IR_2$, откуда $\varphi_d = \varphi_c - IR_2 = -22 - 2 \cdot 4 = -30 \text{ В}$. Потенциал в точке e выше потенциала точки d на величину падения напряжения IR_3 , т. е. $\varphi_d - \varphi_e = IR_3$, откуда $\varphi_e = \varphi_d + IR_3 = -30 + 34 = 4 \text{ В}$. Потенциал точки f выше потенциала точки e на величину ЭДС E_4 , т. е. $\varphi_e - \varphi_f = E_4$, откуда $\varphi_f = \varphi_e + E_4 = -30 + 34 = 4 \text{ В}$. Потенциал точки g выше потенциала точки f на величину ЭДС E_1 , т. е. $\varphi_f - \varphi_g = E_1$, откуда $\varphi_g = \varphi_f - E_1 = 4 - 2 = 2 \text{ В}$. Находим потенциал точки h как разницу потенциалов точек g и a : $\varphi_h = \varphi_g - \varphi_a = IR_1$, т. е. $\varphi_h = \varphi_g + IR_1 = 2 + 2 = 20 \text{ В}$.

Начнем обход контура цепи с точки a , потенциал которой приведена на рисунке 2.4, если известны следующие значения:

$E_1 = 12 \text{ В}; \quad E_2 = 34 \text{ В}; \quad E_3 = 22 \text{ В};$
 $R_1 = 5 \Omega; \quad R_2 = 4 \Omega; \quad R_3 = 3 \Omega; \quad R_4 = 8 \Omega; \quad R_5 = 2 \Omega.$

Внутренним сопротивлением источника ЭДС пренебрежем. Естественно, что направление обхода контура совпадает с направлением ЭДС (точка a — положительный полюс источника, точка g — отрицательный). По результатам вычислений строим потенциальную диаграмму (рисунок 2.5).

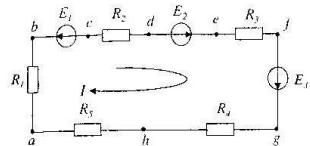


Рисунок 2.4 – Схема замещения электрической цепи для построения потенциальной диаграммы

Определяем величину тока в цепи:

$$I = \frac{-E_1 + E_2 + E_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} = \frac{-12 + 34 + 22}{5 + 4 + 3 + 8 + 2} = 2 \text{ А.}$$

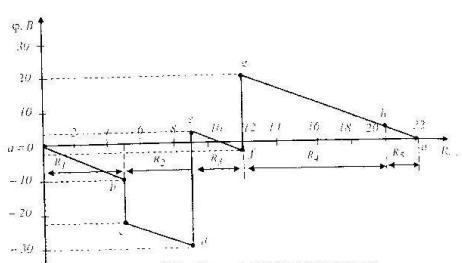


Рисунок 2.5 – Потенциальная диаграмма для электрической цепи рисунка 2.4

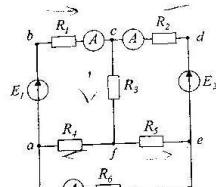


Рисунок 2.6 – Схема для исследования электрической цепи с двумя источниками электрической энергии

3 Рассчитать потенциалы узлов контура $a; b; c; d; e; a$, приняв потенциал точки a за нулевой, т. е. ($\varphi_a = 0$). Результаты расчета занести в таблицу 2.3.

4 Проверить правильность расчета токов в ветвях схемы:

- сравнением результатов расчета токов тремя методами;
- выполнением первого правила Кирхгофа для узлов схемы;
- соблюдением энергетического баланса мощностей.

Таблица 2.1 – Параметры электрической цепи для схемы рисунка 2.6

№ посл.	№ брн.	R_1 , Ω	R_2 , Ω	R_3 , Ω	R_4 , Ω	R_5 , Ω	R_6 , Ω	E_1 , В	E_2 , В
1	1	100	200	270	330	680	470	5	10
	2	200	270	330	680	470	100	10	5
	3	270	680	330	470	100	200	5	5
	4	680	330	470	100	200	270	10	5
2	1	330	680	100	200	270	470	5	10
	2	680	100	470	200	330	270	10	5
	3	100	680	200	330	270	470	5	10
	4	680	200	330	270	470	100	10	5
3	1	200	330	270	680	100	470	5	10
	2	330	270	680	100	470	200	10	5
	3	680	270	200	470	330	100	5	10
	4	270	200	680	330	100	470	10	5
4	1	200	680	330	100	470	270	5	10
	2	680	330	100	470	270	200	10	5
	3	330	100	680	270	200	470	5	10
	4	200	100	330	680	270	470	10	5

Ход работы

1 Собрать на монтажной панели стенда схему рисунка 2.6 с параметрами, соответствующими номеру вашего варианта, из таблицы. Выставить значения ЭДС E_1 и E_2 .

2 Подсоединить источник питания E_1 к точкам схемы a и b . Записать значение E_1 в таблицу 2.2.

3 Подключая попарно тестер с помощью проводников, измерить и записать в таблицу 2.2 значения токов в ветвях с резисторами $R_1; R_2; R_3$. Значения токов в ветвях с резисторами $R_3; R_4; R_5$ вычленяются по первому правилу Кирхгофа. Если после включения прибора в схему стрелка отклоняется влево, то следует поменять места зажимы на схеме, либо на тестере (т. е. поменять полярность подключения прибора). В ходе измерений клещи d и e должны быть соединены перемычкой.

4 Отсоединить источник E_1 от схемы, соединив точки a и b перемычкой, подключить источник E_2 соблюдая полярность (взяв из таблицы 2.2 значение из таблицы 2.2) между точками d и e . Измерить токи в ветвях с резисторами $R_1; R_2; R_3$, записав полученные результаты в таблицу 2.2. Значения токов в ветвях с резисторами $R_3; R_4; R_5$ вычисляются по первому правилу Кирхгофа.

5 Подключив источник E_1 к точкам a и b , а источник E_2 к точкам d и e , измерить токи в ветвях с резисторами $R_1; R_2; R_3$, данные за в таблицу 2.2. Значение токов в ветвях с резисторами $R_3; R_4; R_5$ вычисляются по первому правилу Кирхгофа.

6 Измерить с помощью тестера (в режиме вольтметра) потенциалы точек $a; b; c; d; e$; a в электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 2.6. Результаты занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Значения потенциалов в схеме рисунка 2.6

Обозначение точек	$\varphi_a . B$	$\varphi_b . B$	$\varphi_c . B$	$\varphi_d . B$	$\varphi_e . B$	$\varphi_f . B$
	Способ определения потенциалов	Рассчитанные	Измеренные	Вычлененные	Измеренные	Вычлененные

Таблица 2.4 – Таблица сравнения значений численного расчета и экспериментальных данных

Метод наложения						
	I_1, mA	I_2, mA	I_3, mA	I_4, mA	I_5, mA	I_6, mA

Метод контурных токов						
	I_1, mA	I_2, mA	I_3, mA	I_4, mA	I_5, mA	I_6, mA

Таблица 2.2 – Значения напряжений и токов в схеме рисунка 2.6

Задания	Выставить	Измерить	Вычислить	Рассчитанные значения токов			
				I_1, mA	I_2, mA	I_3, mA	I_4, mA
Включен источник E_1, B	E_2, B	I_1, mA	I_2, mA	I_3, mA	I_4, mA	I_5, mA	I_6, mA
Включен источник E_1, a	E_2, B	I_1, mA	I_2, mA	I_3, mA	I_4, mA	I_5, mA	I_6, mA
Включен источник E_2, a	E_1, B	I_1, mA	I_2, mA	I_3, mA	I_4, mA	I_5, mA	I_6, mA
Включены два источника E_1 и E_2	E_1, B	E_2, B	I_1, mA	I_2, mA	I_3, mA	I_4, mA	I_5, mA

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) название и цель работы;
- 3) алгоритм и результаты расчета токов в электрической цепи, которой приведена на рисунке 2.6 троям методами;
- 4) результаты расчета потенциалов в узлах электрической цепи, которой приведено на рисунке 2.6;
- 5) таблицы 2.2, 2.3, 2.4;
- 6) графики теоретически рассчитанной и экспериментально полученной потенциальных диаграмм;
- 7) выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение электрической цепи, ветви, контура?
2. Что такое узел электрической цепи?
3. Что понимается под источником ЭДС (реальным, идеальным)? Отличаются вольтамперные характеристики реального и идеального источников ЭДС?
4. Что понимается под источником тока (реальным, идеальным)? Отличается вольтамперная характеристика реального и идеального источников тока?
5. Дайте формулировку первого и второго правил Кирхгофа.
6. Как составляется система уравнений для разомкнутой цепи из двух контуров?
7. Какой контур называется независимым?
8. Какое сопротивление называется собственным сопротивлением контура, а какое общим?
9. Как составляется система уравнений по методу контурных токов?
10. Илюстрируйте методикой расчета разомкнутой цепи постоянного тока по методу наложения.
11. Как определять потенциал двух точек в электрической цепи, между которымиключен источник ЭДС, сопротивление?
12. Что понимается под энергетическим балансом электрической схемы?
13. Объясните принцип построения потенциальной диаграммы.

3 Исследование электрических цепей однофазного синусоидального тока

- 1 Особенности электромагнитных процессов в электрических цепях во времени по синусоидальному закону, называются цепями гармонического синусоидального тока.
- 2 Законы Ома и правила Кирхгофа в электрической цепи однофазного синусоидального тока
- 3 Резонансы в электрических цепях

Основные понятия по теме

Электрические цепи, в которых ЭДС, напряжения и токи изменяются во времени по синусоидальному закону, называются цепями гармонического синусоидального тока. Значение переменного тока в любой заданный момент времени называют мгновенным током и обозначают как i [1, 3].

Преобладающим видом периодического процесса в электрических цепях является синусоидальный режим, при котором все напряжения отличаются волтамперные характеристики реального и идеального источников ЭДС? Это возможно только при за jakiенных синусоидальных ЭДС и токах источников ЭДС?

Рассмотрим последовательное соединение резистивного R , индуктивного L и емкостного C элементов в электрической цепи (рисунок 3.1).

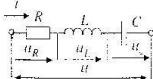


Рисунок 3.1 – Схема электрической цепи с последовательным соединением элементов

Пусть по цепи протекает ток $i = \sin \omega t$. Определим приложенное к цепи напряжение по второму правилу Кирхгофа $u = u_R + u_L + u_C$. В рассматриваемой цепи напряжение u_R совпадает по фазе с током i и сопротивлением R , напряжение u_L опережает ток i на индуктивности L , а напряжение u_C отстает от тока i на ёмкости C на угол $\frac{\pi}{2}$.

Напряжение на выводах всей цепи записывается так:

$$U_m \sin(\omega t + \phi) = RI_m \sin(\omega t) - \omega L I_m \cos(\omega t) - \frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t) = RI_m \sin(\omega t) + (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \cos(\omega t) = I_m [R \sin(\omega t) + X \cos(\omega t)],$$

где X – полное реактивное сопротивление цепи, которое выражается по формуле

$$X = X_L + X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C},$$

Уравнение представляет собой тригонометрическую форму записи, где Z – модуль комплексного числа, равный $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, а угол второго правила Кирхгофа для мгновенных значений напряжения токов

Если полное реактивное сопротивление цепи $X > 0$, цепь имеет индуктивный характер, если же $X < 0$, цепь имеет емкостной характер. Активное сопротивление R всегда положительно.

Амплитудное значение напряжения записывается так

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + X^2},$$

откуда $U_m = ZI_m$, где $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ – модуль полного сопротивления цепи, а угол сдвига фаз между током и напряжением для электрической цепи рисунка 3.1 можно определить из треугольника сопротивлений как

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{X}{R}, \quad \phi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}.$$

Запишем второе правило Кирхгофа в комплексной форме:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C,$$

Второе правило Кирхгофа для амплитудных значений токов и напряжения имеет вид

$$\dot{U}_m = RI_m + j\omega L I_m + \frac{1}{j\omega C} I_m,$$

Если комплексное сопротивление рассматриваемой цепи равно

$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = R + jX,$$

то закон Ома для амплитудных значений примет вид $\dot{U}_m = Z \dot{I}_m$.

С учетом того, что действующие значения напряжения и тока связаны зависимостью

$$\frac{U_m}{\sqrt{2}} \text{ и } \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad \text{закон Ома для действующих значений}$$

примет вид

$$\dot{U} = ZI.$$

Запишем полное сопротивление цепи в тригонометрической и полярной формах

$$Z = Z \cos \phi + j Z \sin \phi = Z e^{j\phi},$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad \text{где фаза равен } \phi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}.$$

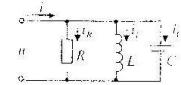


Рисунок 3.2 – Схема электрической цепи с параллельным соединением элементов

Мгновенное значение тока определим по первому правилу Кирхгофа

$$i = i_R + i_L + i_C,$$

$$i = \dot{i}_R + \dot{i}_L + \dot{i}_C,$$

Ток i_R в резисторе R совпадает по фазе с напряжением U , ток i_L в индуктивности L отстает, а ток i_C в ёмкости опережает напряжение на угол $\frac{\pi}{2}$. Суммарный ток в цепи равен

$$I_m \sin(\omega t + \psi) = \frac{1}{R} U_m \sin \omega t - j \frac{1}{\omega L} U_m \cos \omega t + j \omega C U_m \cos \omega t$$

$$= U_m \left[\frac{1}{R} \sin \omega t - j \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \cos \omega t \right] = U_m (g \sin \omega t - j b \cos \omega t)$$

где $g = \frac{1}{R}$ – активная;

$b = \frac{1}{X}$ – реактивная проводимости.

Закон Ома в комплексной форме примет вид $\vec{I} = \underline{Y} \vec{U}$, где $\underline{Y} = Y \cos \phi - j Y \sin \phi$ или $\underline{Y} = Y e^{-j\phi}$, где $Y = |\underline{Y}|$ – модуль комплексного числа, Y – полная проводимость цепи, $\phi = \arctg \frac{b}{g}$ – угол метрическую форму записи первого правила Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений.

Если полная реактивная проводимость цепи $b > 0$, то цепь имеет индуктивный характер, если $b < 0$ – ёмкостной характер. Активная проводимость $g > 0$ всегда положительна.

Амплитудное значение тока записывается как

$$I_m = \sqrt{g^2 + b^2} U_m; \quad I_m = Y U_m,$$

где $Y = \sqrt{g^2 + b^2}$ – модуль полной проводимости рассматриваемой цепи. Действующее значение тока равно $I = \sqrt{g^2 + b^2} U; \quad I = Y U$.

Угол сдвига фаз между током I и напряжением U определяется

$$\phi = \arctg \frac{b}{g} = \arctg \frac{\frac{1}{\omega L} - \omega C}{\frac{1}{R}},$$

Запишем первое правило Кирхгофа в комплексной форме

$$\vec{I} = \vec{I}_R + \vec{I}_L + \vec{I}_C = g \vec{U} + \frac{1}{j \omega L} \vec{U} + j \omega C \vec{U},$$

где $\vec{I} = g \vec{U}$ – ток в сопротивлении R ;

$$\vec{I}_L = -j \frac{1}{\omega L} \vec{U} – ток в индуктивности L ;$$

$$\vec{I}_C = j \omega C \vec{U} – ток в ёмкости C .$$

Если комплекс полной проводимости цепи записать как

$$\underline{Y} = g - j \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) = g - j b,$$

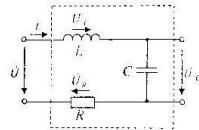


Рисунок 3.3 – Схема последовательного колебательного контура

В такой цепи можно наблюдать резонанс напряжений. При резонансе напряжений индуктивное и ёмкостное сопротивления взаимно компенсируются и в результате этого реактивные сопротивления и активная мощность цепи равны нулю.

При резонансе напряжений ток и напряжение совпадают по фазе. В этом случае угол сдвига фаз между током и напряжением равен $\phi = 0$ и полное сопротивление цепи носит чисто активный характер и равно ее активному сопротивлению.

Если $\phi = \arctg \frac{X}{R}$, то угол $\phi = 0$ при $X = 0$. Следовательно, при резонансе модуль полного сопротивления электрической цепи $= \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$, так как $X_L - X_C = 0$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, откуда частота при резонансе равна $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ или $\phi = -\frac{1}{(2\pi\sqrt{LC})}$.

Таким образом, условием возникновения резонанса напряжения является равенство реактивных сопротивлений $X_L = X_C$, как в этом случае частота колебательного контура ω_0 равна частоте, питающей данную цепь.

Мгновенные значения энергии магнитного и электрического полей соответственно записываются:

$$W_L = \frac{L I^2}{2}; \quad W_C = \frac{C U^2}{2}.$$

Т. е. в электрической цепи происходит непрерывное перераспределение энергии магнитного и электрического полей, суммарное значение которых постоянно. Вся энергия, поступающая от источника в момент резонанса расходуется в сопротивлении R .

Отношение напряжения на индуктивности или емкости к напряжению, приложенному к цепи при резонансе, называют добротностью контура или коэффициентом резонанса

$$Q_L = \frac{U_{L0}}{U_0} = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega_0 L}{R}; \quad Q_C = \frac{U_{C0}}{U_0} = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R};$$

$$Q_L \cdot Q_C = \frac{\omega_0 L}{R} \cdot \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\rho}{R},$$

где $\rho = \frac{\pi L}{\sqrt{C}}$ – характеристическое (волнистое) сопротивление контура.

Относительной расстройкой частоты по отношению к резонансной частоте контура называют величину $\delta = \omega - \omega_0$.

Величину обратную добротности называют коэффициентом расстройки контура $d = \frac{R}{\rho}$.

Полное сопротивление цепи минимизируется при резонансе напряжений, так как ток в цепи достигает своего максимального значения.

Полосу частот вблизи резонанса (рисунок 3.4), на границах которой ток снижается в $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ раз от максимального значения, принято называть полосой пропускания резонансного контура $2\Delta f = f_2 - f_1$, где f_1, f_2 – нижняя и верхняя граничная частоты.

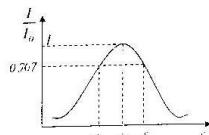


Рисунок 3.4 – Полоса пропускания резонансного контура

Величина добротности Q характеризует остроту резонансной кривой (рисунок 3.5).

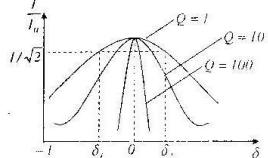


Рисунок 3.5 – Резонансные кривые тока в относительных единицах

Внутреннее сопротивление источника ЭДС R_s влияет на добротность и полосу пропускания колебательного контура. Чем больше R_s , тем ниже добротность и шире полоса пропускания.

В условиях, близких к резонансу, напряжения U_L и U_C могут быть велики.

Векторная диаграмма тока и напряжения при резонансе напряжений представлена на рисунке 3.6.

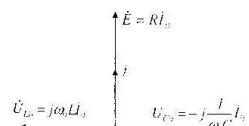


Рисунок 3.6 – Векторная диаграмма при резонансе напряжений

Зависимость напряжений на емкости и индуктивности от δ при резонансе напряжений показана на рисунке 3.7.

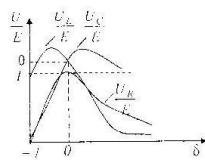


Рисунок 3.7 – Частотные зависимости напряжений на индуктивности и емкости в относительных единицах

Рассмотрим параллельный колебательный контур, простейший видом которого является параллельное соединение индуктивности L , емкости C и конденсатора (рисунок 3.8).

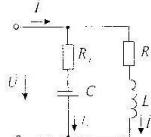


Рисунок 3.8 – Параллельный колебательный контур

Резонансом токов называют такой режим параллельного колебательного контура, при котором ток в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением ($\varphi = 0$), а мощность, потребляемая из сети, равна активной мощности контура. Реактивная мощность резонанса из сети не потребляется.

При резонансе токов полная реактивная проводимость $b = b_L - b_C = 0$.

Определим резонансную частоту контура:

$$b = b_L - b_C = -\frac{I_0(C\omega_0)}{R_1^2 + (I_0/C)^2} + \frac{\omega_0 L}{R_1^2 + (\omega_0 L)^2} = 0.$$

После преобразования получаем, что

$$\frac{R_1^2 + (\omega_0 L)^2}{L} = \frac{1 + R_1^2(\omega_0 C)^2}{C},$$

$$\text{откуда } \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - R_1^2}{L/C + R_1^2}} = \omega_0 \sqrt{\frac{|\rho|^2 - R_1^2}{|\rho|^2 + R_1^2}},$$

$$\text{где } \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \rho = \sqrt{L/C}.$$

Как видно из выражения для резонансной частоты ω_p , резонанс возможен при одновременном выполнении условий $\rho > R_1$ или $\rho < R_1$; $\rho < R_1$. Если эти условия не выполняются, то $\omega_p > R_1$ или $\rho > R_1$; $\rho < R_1$. В случае, когда $R_1 \geq R_2$; $\omega_0 = \omega_p$, а при $\rho = 0$ – это линейное число. В случае, когда $R_1 \leq R_2$; $\omega_0 = \omega_p$, а при $\rho = 0$ – это источник. При этом эквивалентное сопротивление контура зависит от частоты:

$$Z = \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(p + j\omega L)(p - j\frac{1}{\omega C})}{p + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} = \frac{p^2/p^2 - j\frac{\omega L}{\omega C} - j\frac{1}{\omega C}}{p(2 + j\frac{1}{\omega C})} = \frac{p - j\frac{\omega L}{\omega C}}{p + j\frac{1}{\omega C}} = \rho.$$

Следовательно, в ток в неразветвленной части цепи не зависит от частоты. Если R_1 и R_2 – сопротивления, учитывающие потери реальных конденсаторов и индуктивной катушки ($R_1 = R_t$; $R_2 = R_s$), то, как правило, $\rho >> R_1$; $\rho >> R_2$ при этом, $\omega_p = \omega_0$.

В контуре без потерь ($R_1 = R_2 = 0$), $I = bU = 0$, токи I_L и I_C равны по величине и противоположны по фазе.

Эквивалентные сопротивления контура с потерями

$$Z' = \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(R_1 + jX_1)(R_2 - jX_2)}{R_1 + R_2 + j(X_1 + X_2)} = \frac{(R_1 + jX_1)(R_2 - jX_2)}{R + jX},$$

$$\text{где } X_1 = -\frac{1}{\omega C};$$

$$X_2 = \omega L;$$

$$R = R_1 + R_2;$$

$$X = X_1 + X_2.$$

В идеальном случае, например в радиотехнических устройствах где применяют контуры с малыми потерями, когда практически $R_L = R_s = 0$ (или они очень малы по сравнению с сопротивлением ρ), резонансную частоту можно определить и при резонансе в последовательном колебательном контуре по формуле $\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$.

Частотные характеристики, т. е. зависимость тока, реальной проводимостей от частоты при резонансе тока изображены на рисунке 3.9.

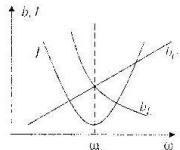


Рисунок 3.9 – Частотная зависимость тока, реактивных проводимостей при резонансе токов

Комплекс полной мощности однофазной цепи синусоидального тока можно определять как

$$\tilde{S} = UI'' = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ,$$

где $\tilde{I} = I e^{j\varphi}$;

$$U' \approx U e^{j\varphi/2};$$

$\varphi = \Psi_I - \Psi_2$ – фазовый сдвиг;

$P = UI \cos \varphi$ – активная мощность электрической цепи;

$Q = UI \sin \varphi$ – реактивная мощность электрической цепи.

Лабораторная работа 3

Цель работы: экспериментальное исследование пассивных элементов (резисторов, катушек индуктивностей, конденсаторов) в цепях однофазного синусоидального тока; исследование и измерение (в обесточенной схеме) активное сопротивление R , катушки напряжений в последовательной электрической цепи при различных индуктивности.

Материалы и оборудование: генератор трехфазного напряжения ГТН, цифровой мультиметр DT-58, осциллограф С1-101, панель монтажная, набор резисторов, конденсаторов, индуктивностей, набор проводов со штекерами.

Ход работы

1 Собрать на монтажной панели стенд схему рисунка 3.10, подключив ее к клеммам A и B генератора трехфазного напряжения (ГТН).

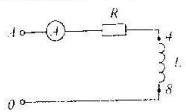


Рисунок 3.10 – Схема для исследования RL -цепи:
 A – тестер; L – катушка индуктивности трансформатора 7V...1;
 R – резистор 100 Ом

2 Включить питание стенда и осциллографа, подать сигнал от ГТН в клеммы A и B на вход осциллографа, установив переключатель режима работы осциллографа в положение « \rightarrow ».

3 Пользуясь органами управления осциллографа (см. лабораторную работу 1 или техническое описание), получить на экране устройство изображение нескольких (одного, двух) периодов синусоиды, имеющей ручку «ЧАСТОТА кН» ГТН, установить частоту f , по таблице 3.1 (используя связь частоты с периодом колебания и определяя период по положению переключателя «ВРЕМЯ/ДЕЛ»). Значение своего варианта взять у преподавателя.

Таблица 3.1 – Значения частоты

№ подгруппы	1			2			3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
бригады	1	2	3	1	2	3	1	2	3
кГц	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9

5 Собрать на монтажной панели стенд схему рисунка 3.11

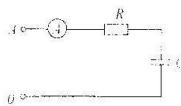


Рисунок 3.11 – Схема для исследования RC-цепи:
A – тестер; R – резистор 470 Ом; C – конденсатор 0,1 мкФ.

6 Подключив вход схемы к клеммам *A* и *B* генератора трехфазного напряжения ГТН, измерить на заданной частоте f_r синусоиды в цепи, напряжение U на входе схемы, напряжение U_C на катушке индуктивности, напряжение U_R на сопротивлении

7 Собрать схему рисунка 3.12, выбрав резистор по таблице согласно своего варианта.

Таблица 3.2 – Значения сопротивлений резисторов

№ подгруппы	1	2	3	4	5	6	7	8
№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
R , Ом	0	25	50	75	100	125	150	175

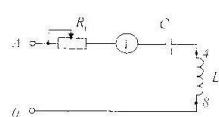


Рисунок 3.12 – Схема для исследования резонанса напряжения:
A – тестер; L – катушка индуктивности трансформатора 3Вт;
R – резистор (номинал по таблице 3.2); C – конденсатор 0,1 мкФ.

8 Измерить активное сопротивление R_L катушки индуктивности в обеспеченной схеме. Выставить величину сопротивления ωX_L . Построенную векторную диаграмму электрической цепи;

9) для электрической схемы рисунка 3.11 результаты измерений тока I , напряжений U ; U_C ; U_R , результаты расчёта параметров цепи Z ; X_C ; R ; P ; Q ; S ; ϕ на частоте f_r , а также величину емкости

по таблице 3.2, применяв переменный резистор в режиме реального тока I , напряжений U ; U_C ; U_R , на резонансной частоте,

9 Подключив схему к клеммам *A* и *B* генератора трехфазного напряжения ГТН, вращая ручку частоты ГТН, добиться резонанса в цепи (по максимуму тока I в цепи). Измерить и записать ток в цепи, напряжение на входе U цепи, напряжение на конденсаторе U_C , напряжение на катушке U_L и напряжение на сопротивлении U_R , измерить с помощью осциллографа резонансную частоту f_r .

10 Вращая ручку частоты ГТН (сначала против часовой стрелки, затем – по часовой стрелке), снять зависимость тока I в цепи от частоты. Результаты измерений записать в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Таблица измеренных параметров схемы рисунка 3.12

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) название и цель работы;
- 3) для электрической схемы рисунка 3.10 результаты измерения тока I , напряжений U ; U_C ; U_R , активного сопротивления R_L катушки индуктивности, результаты расчёта параметров цепи Z ; $Z = \frac{U_L}{I}$;
- 4) для электрической схемы рисунка 3.11 результаты измерений тока I , напряжений U ; U_C ; U_R , результаты расчёта параметров цепи Z ; X_C ; R ; P ; Q ; S ; ϕ на частоте f_r , а также величину емкости

зависимости тока I от частоты (таблица 3.3), результаты
 $Z_k = U_k/I$; $R = U_R/I$; $X_C = U_C/I$; $X_L = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$; P, Q, S ; в
 зависимости I_s/I , от частоты и результаты расчёта следующих
 членов $Q; d; f_0; \rho; 2\Delta f$. Построенную векторную диаграмму элек-
 тро-
 ской цепи.

Вопросы для самоконтроля

1 Перечислите основные величины, характеризующие синусоидальный ток. В каких единицах они измеряются?

2 Сформулируйте понятия мгновенного, амплитудного, действующего и среднего значений синусоидального тока. Укажите связь между ними?

3 Как и для чего вводятся комплексные амплитуды (комплексные значения) тока, напряжения и ЭДС?

4 Дайте определение индуктивности. В каких единицах измеряется? Как реализуется на практике индуктивность как элемент электрической цепи?

5 Дайте определение емкости. В каких единицах измеряется емкость?

6 Как зависит от частоты индуктивное и емкостное сопротивления? Запишите эти соотношения?

7 Что такое векторная диаграмма электрической цепи, как строится и для чего применяется?

8 Запишите второе правило Кирхгофа для цепи, содержащей последовательное соединение R, L, C элементов и подключение источнику напряжения с мгновенным значением ЭДС равным ε .

9 Запишите закон Ома для комплексных значений тока, напряжения и сопротивления?

10 Дайте определение активной, реактивной, полной мощности однофазного синусоидального тока. Что такое треугольник мощностей?

11 Дайте определение резонанса напряжений? В какой цепи это явление может наблюдаться?

12 Как по показаниям миллиамперметра в последовательностях в режиме реостата на 470Ω определить наступление резонанса?

13 Какую опасность представляет резонанс напряжений для технических устройств?

14 Дайте определение обратности, коэффициента затухания, характеристического сопротивления, резонансной частоты и периода пропускания колебательного контура.

Лабораторная работа 4

Цель работы: исследование параллельного колебательного контура при возбуждении в нем колебаний источником синусоидального напряжения.

Материалы и оборудование: генератор трехфазного напряжения стаканная, набор резисторов, конденсаторов, индуктивностей, набор проводов со штекерами.

Ход работы

Собрать схему рисунка 3.13.

2 Включить питание стенда и осциллографа, подать сигнал от ГПШ

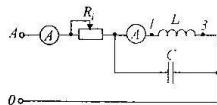


Рисунок 3.13 – Схема для исследования резонанса токов:

A – тестер; L – катушка индуктивности трансформатора $TV - I$;

R – резистор (номинал по таблице 3.2); C – конденсатор 3300 pF

РЕПОЗИТОРИЙ ГУИИ

подгруппы брегамы	1			2			3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ом	0	25	50	75	100	125	150	175	200

4 Изменяя частоту ГТН, настроить схему в резонанс (по минимуму тока в неразветвлённой части схемы). Измерить напряжение U на входе схемы, ток I_L катушки, ток I_C конденсатора, ток I_R в неразветвлённой части схемы, резонансную частоту f_r (с помощью осциллографа). Измерить активное сопротивление катушки R_k в обесточенной схеме.

5 Вращая ручку частоты ГТН, снять зависимость тока от частоты. Полученные значения записать в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 - Таблица измеренных параметров схемы рисунка 3.13

T , мс				
f , кГц				
I , мА				

5. Какое явление называют резонансом токов в электрической цепи? В каких цепях это явление может наблюдаться?

6 Дайте определение добротности, коэффициента затухания, характеристического сопротивления, резонансной частоты и полосы пропускания колебательного контура.

7 Как связаны между собой величины Q ; f_r ; $2\Delta f$?

8 Чем отличается резонанс токов от резонанса напряжений?

9 Оказывает ли влияние на потребляемую активную мощность параллельно включенная емкость?

10 Можно ли по показанию одного амперметра определить момент появления резонанса токов?

11 Как можно повысить коэффициент мощности электрической цепи при параллельном включении емкости и потребителя с активно-индуктивной нагрузкой?

12 Какое практическое значение имеют явления резонанса токов? Приведите примеры применения колебательных контуров.

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

1) титульный лист;

2) название и цель работы;

3) для электрической схемы рисунка 3.13 результаты измерения U , токов I_L , I_C , активного сопротивления катушки индуктивности R_k на резонансной частоте f_r , зависимости тока от частоты (таблица 3.4), результаты расчетов $Z_K = U_K / I_K$; $X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_k^2}$; $X_C = U_C / I_C$; P , Q , S ; ϕ на f_r . Построенную векторную диаграмму электрической цепи.

Вопросы для самоконтроля

1 Дайте определение параллельного соединения участков электрической цепи.

2 Напишите формулы для определения активной, индуктивной емкостной и полной проводимостей электрической цепи?

3 Зависят ли реактивная проводимость катушки индуктивности величины ее активного сопротивления?

4 Запишите второе правило Кирхгофа для цепи, содержащей параллельное соединение R ; L ; C элементов и подключенных к ней напряжения с мгновенным значением ЭДС равным e .

4 Дифференцирующие и интегрирующие цепи

- 1 Основные определения и классификация четырехполюсников
- 2 Дифференцирующие цепи
- 3 Интегрирующие цепи

Основные понятия по теме

Часть электрических цепей или, какое-либо электротехническое устройство, имеющие два входных и два выходных зажимов (то есть передаточных звенев) между источником питания и нагрузкой, называют четырехполюсниками [5–6]. Пару зажимов четырехполюсника, слушающую предполагается, что изменяется, могут называть входными, а пару – выходными. Четырехполюсник, к которому присоединяют источник энергии, называют приемником, к которому присоединяют нагрузку (приемником). Четырехполюсник, в котором присоединяют нагрузку (приемник), называют выходным. Четырехполюсник, принятый изображать в виде четырехугольника, обозначая входные зажимы I_1, I_2 , а выходные – U_1, U_2 .

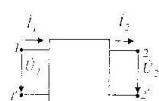


Рисунок 4.1 – Условное графическое обозначение четырехполюсника

Четырехполюсники бывают пассивными и активными. Четырехполюсник, в схеме которого не содержатся источники энергии, называется пассивным. Четырехполюсник, в схеме которого есть источник энергии, называется активным.

К пассивным четырехполюсникам можно отнести трансформаторы, линии передачи электрической энергии, электрические части фильтров, измерительные мосты и ряд других устройств. К активным четырехполюсникам можно отнести, например, усилители, мосфазные схемы, в одну из диагоналей которой включен источник тока и в другую – нагрузка и т. п.

Четырехполюсники могут быть симметричными и несимметричными. Если при замене входных зажимов выходными (и наоборот) режим работы участков цепей, присоединенных к четырехполюснику, не изменяется, то четырехполюсник симметричный (т. е. симметричным, при каких условиях данная цепь будет дифференцирующим четырехполюсником со стороны выходных зажимов предстоит

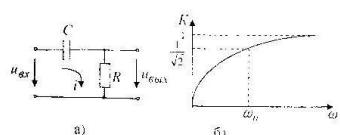
учесть, что и со стороны входных зажимов).

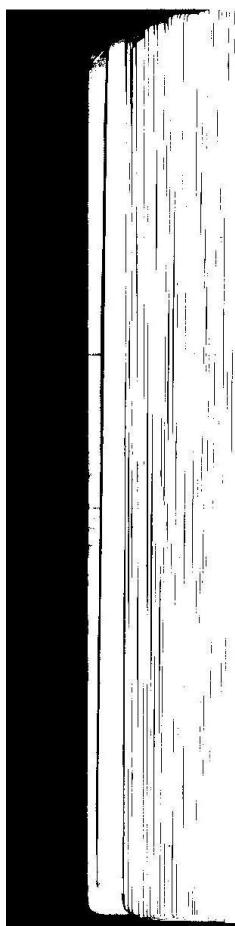
В противном случае четырехполюсник будет несимметричный. Четырехполюсники бывают обратимыми и необратимыми. Четырехполюсники, для которых отношение напряжения на входе к току на выходе или отношение напряжения на выходе к току на входе, т. е. иммые сопротивления входного и выходного контуров, не зависят от того, какие зажимы являются входными, а какие – выходными, называются обратимыми. Отметим, что линейные пассивные четырехполюсники являются обратимыми.

Основной смысл теории четырехполюсника заключается в том, что используя некоторые обобщенные параметры, можно связать между собой напряжения и токи на входе и выходе четырехполюсника, т. е. находить токи и напряжения на его входе и выходе, не производя расчетов токов и напряжений в схеме самого четырехполюсника.

Теория четырехполюсников позволяет при анализе работы цепей оставлять и правильно оценивать передающие свойства различных электрических цепей, а также решать задачи синтеза, т. е. делать структуру и элементы четырехполюсников по заданным характеристикам.

Рисунок 4.2 – Дифференцирующая цепь:
а) схема; б) амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)





Воспользовавшись вторым уравнением Кирхгофа, запишем выражение для всей линейной цепи:

$$u_{ab}(t) = \frac{I}{C} \int i(t) dt + u_{bdc}(t),$$

где $i(t)$ – мгновенное значение тока.

Продифференцируем по времени обе части уравнения (4.1):

$$\frac{d u_{ab}(t)}{dt} = \frac{I}{C} i(t) + \frac{d u_{bdc}(t)}{dt}.$$

Умножив и поделив первое слагаемое в правой части на R , получим, что $u_{ab}(t) = i(t)R$, получим

$$u_{ab}(t) + \tau_c \frac{d u_{ab}(t)}{dt} = \tau_c \frac{d u_{bdc}(t)}{dt},$$

где параметр $\tau_c = RC$ – постоянная времени цепи.

Если постоянная времени τ_c настолько мала, что

$$u_{bdc}(t) \gg \tau_c \frac{d u_{bdc}(t)}{dt},$$

то выражение (4.3) примет вид

$$u_{bdc}(t) = \tau_c \frac{d u_{bdc}(t)}{dt}.$$

Итак, данная RC -цепь, при соблюдении неравенства (4.4), осуществлять линейную операцию дифференцирования входных сигналов.

Чтобы определить частотный коэффициент передачи дифференциющей цепи, запишем комплексную амплитуду тока:

$$I = \frac{\dot{U}}{R + j/(j\omega C)}.$$

Выразив комплексную амплитуду выходного напряжения ток $I_{bdc} = IR$, находим частотный коэффициент передачи:

$$K(\omega) = \frac{\dot{U}_{bdc}}{\dot{U}_{in}} = \frac{IR}{R + j/(j\omega C)} = \frac{R}{1 + j\omega\tau_c} = \frac{j\omega\tau_c}{1 + j\omega\tau_c}.$$

Сначала вычислим модуль частотного коэффициента передачи, делаем АЧХ дифференцирующей цепи:

$$|K(\omega)| = \sqrt{1 + \frac{1}{(\omega\tau_c)^2}}, \quad (4.7)$$

из графика АЧХ (рисунок 4.2, б) следует, что полоса пропускания дифференцирующей цепи ограничена только со стороны нижних частот.

Приняв правую часть формулы (4.7) к значению $1/\sqrt{2}$, вычислим нижнюю частоту полосы пропускания

$$\omega_s = 1/\tau_c. \quad (4.8)$$

Рассмотрим прохождение импульсных сигналов через дифференцирующую цепь, подав на ее вход напряжение в виде прямоугольного видеопульса с амплитудой E и длительностью T_d (рисунок 4.3, а).

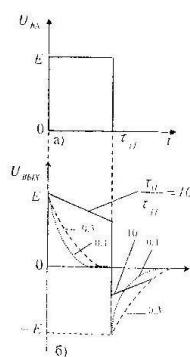
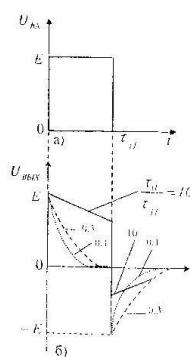


Рисунок 4.3 – Операции дифференцирования:
а) входной сигнал; б) выходной сигнал



В радиоэлектронике верхнюю частоту спектральной полосы ограничивать можно, если постоянная времени настолько велика, что $\omega_a = 2\pi/\tau_a$. Тогда условия для частот $\omega_a > \omega_g$ можно записать $\frac{d u_{BY}(t)}{dt} \gg u_{BY}(t)$, в виде $\tau_a \ll \tau_g/2\pi$, или как $\tau_a \ll \tau_g$. На рисунке 4.3, б показаны графики входного напряжения при различных отношениях τ_a/τ_g и длительности входного импульса τ_g .

Из графических построений нетрудно заметить, что при $\tau_a \ll \tau_g$ интегрирование последнего выражения дает:

$$U_{BY}(t) = \frac{I}{\tau_a} \int_0^t u_{BY}(t') dt' \quad (4.10)$$

Чиски совпадают. С уменьшением отношения τ_a/τ_g увеличивается вершина выходного импульса и его отрицательный хвост. Так, RC -цепь с достаточно большой постоянной времени τ_a пределим частотный коэффициент передачи интегрирующей цепи. Для этого предварительно запишем комплексную амплитуду через комплексное входное напряжение:

При малых значениях отношения τ_a/τ_g форма выходного сигнала представляет собой два разнополярных острокраинных импульса. Считается, что при отношении постоянной времени $\tau_a/\tau_g < 0.1$, такая RC -цепь полностью дифференцирует входной импульс.

Отметим, что в радиоэлектронике при больших значениях отношения τ_a/τ_g RC -цепь применяется как разделительная, разделяющая сигнал с емкостью C (рисунок 4.4, а). Определите, при которых эта цепь может интегрировать входной сигнал?

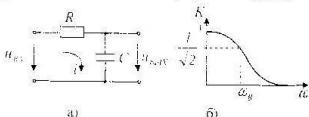


Рисунок 4.4 – Интегрирующая цепь:
а) схема, б) амплитудно-частотная характеристика:

Используя аналогию с формулой (4.1), запишем

$$u_{BY}(t) = \tau_a \frac{du_{BY}(t)}{dt} + U_{BY}(t).$$

54

Поскольку $U_{BY} = I/(j\omega C)$, то, воспользовавшись лессыдним интегрированием, запишем:

$$\omega = \frac{U_{BY}}{U_{BY}} = \frac{I/(j\omega C)}{U_{BY}[R + I/(j\omega C)]} = \frac{I}{1 + j\omega \tau_a}. \quad (4.11)$$

Для числив модели данного частотного коэффициента передачи, АЧХ интегрирующей цепи (рисунок 4.4, б):

$$\omega = \frac{I}{\sqrt{1 + (\omega \tau_a)^2}}. \quad (4.12)$$

Приведя правую часть формулы (4.12) к $1/\sqrt{2}$, можно определить верхнюю граничную частоту полосы пропускания интегрирующей цепи:

$$= 1/\tau_a.$$

Как следует из рисунка 4.4, б, интегрирующие цепи не пропускают высокочастотные составляющие спектров входных сигналов, поэтому в радиоэлектронных устройствах их используют в качестве

55

так называемых сглаживающих или низкочастотных фильтров. подаче на вход рассматриваемой RC -цепи импульсных

форма выходного напряжения будет существенным образом

отношений τ_a/τ_c .

На графиках рисунка 4.5, а, б показаны соответственно форма в виде прямоугольного импульса напряжения и RC -цепи на него при различных значениях отношения постоянного времени и длительности входного импульса τ_a/τ_c .

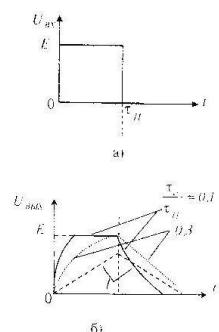


Рисунок 4.5 – Операция интегрирования:
а) входной сигнал, б) выходной сигнал

При значениях отношения $\tau_a/\tau_c = 0,1$ форма выходного сигнала близка к форме входного импульса. Считается, что выходной сигнал практически совпадает по форме с входным при $\tau_a/\tau_c = 0,5$ и более. Выходное напряжение усиливается в τ_a/τ_c раз. При $\tau_a/\tau_c < 0,5$ усиление возрастает до амплитудного значения E и форма выходного сигнала существенно искажается.

Интегрирующие цепи широко применяются в так называемых генераторах пилообразных токов и напряжений.

Лабораторная работа 5

Цель работы: изучить принципы работы дифференцирующих и интегрирующих цепей; определить условия полного дифференцирования и интегрирования входных сигналов; исследовать прохождение

и дифференцирующие и интегрирующие цепи гармонических и

импульсных сигналов.

Материалы и оборудование: генератор сигналов (ГС), цифровой

ультиметр DT-58, осциллограф С1-101, панель монтажная, набор

исторов, конденсаторов, набор проволов со штекерами.

Сод работы

Исследование дифференцирующей цепи:

• для дифференцирующей цепи рассчитать постоянную времени RC . Для расчета взять значения резистора $R = 10 \text{ к}\Omega_m$, конденсатора $C = 0,22 \text{ мкФ}$;

• вычислить нижнюю граничную частоту $f_L = 1/(2\pi R)$;

• вычислить модуль коэффициента передачи для частоты f_H по формуле

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_H}\right)^2}}$$

вычислить из значений $\frac{\tau_a}{\tau_H} = 10; 0,3; 0,1$ значения длительности

импульса τ_H , а затем значения частот;

• собрать схему электрической цепи рисунка 4.6;

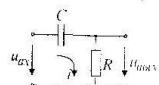


Рисунок 4.6 – Дифференцирующая RC -цепь:
резистор $R = 10 \text{ к}\Omega_m$; конденсатор $C = 0,22 \text{ мкФ}$

при постоянной амplitude входного напряжения импульсного

ал ала U_{av} равного 0,5 В на входе RC -цепи измерить выходное

напряжение $U_{\text{вых}}$ на частотах 0,2; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10 кГц измерений занесите в таблицу 4.1. Зарисовать для каждого

частоты формы выходных сигналов;

Таблица 4.1 – Результаты экспериментальных измерений

$f, \text{kГц}$	0,2	0,5	1	2	3	5	10
$U_{\text{вых}}, \text{В}$							
$U_{\text{вх}}, \text{В}$							

– рассчитать частотный коэффициент передачи:

$$K(\omega) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{I}{\sqrt{I + (\omega \tau_a)^2}}$$

– по полученным данным построить амплитудно-частотную характеристику.

2 Исследование интегрирующей цепи:

– рассчитать для интегрирующей цепи постоянную времени $\tau_a = RC$. Для расчета взять значения резистора $R = 10 \text{ кОм}$, конденсатора $C = 0,22 \text{ мкФ}$:

– вычислить верхнюю граничную частоту $f_c = 1/(2\pi\tau_a)$;

– вычислить модуль коэффициента передачи для частоты $\omega = 0,1, 0,3, 1$ значения длительности импульса τ_H , а затем значения частот;

– собрать схему электрической цепи рисунка 4.7:

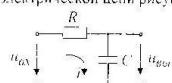


Рисунок 4.7 – Интегрирующая RC-цепь:
резистор $R = 10 \text{ кОм}$; конденсатор $C = 0,22 \text{ мкФ}$

– при постоянной амплитуде входного напряжения импульсного

нагрузки $U_{\text{вх}}$, равного 0,5 В, на входе RC-цепи измерить выходное

напряжение $U_{\text{вых}}$ на частотах 0,2; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10 кГц. Данные изме-

рений занесите в таблицу 4.2. Зарисовать для каждого значения ча-

стоты формы выходных сигналов;

Таблица 4.2 – Результаты экспериментальных измерений

$f, \text{kГц}$	0,2	0,5	1	2	3	5	10
$U_{\text{вых}}, \text{В}$							
$U_{\text{вх}}, \text{В}$							

– рассчитать частотный коэффициент передачи:

$$\zeta(\omega) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{I}{\sqrt{I + (\omega \tau_a)^2}}$$

– по полученным данным построить амплитудно-частотную характеристику.

Правила оформления отчета по лабораторной работе

отчет должен содержать:

– титульный лист;

– название и цель работы;

– рассчитанные значения постоянной времени τ_a , нижней гра-

вой частоты f_b , модуля коэффициента передачи K , длительности

импульса τ_H для интегрирующей цепи;

– исследуемые схемы;

– таблицы экспериментальных значений;

– осциллограммы выходных напряжений;

– построенные амплитудно-частотные характеристики.

Контрольные вопросы

- 1 Какие электрические цепи называют линейными?
 - 2 Что такое четырехполюсник?
 - 3 Какие вчетверхполюсники называют линейными?
 - 4 Какие электрические цепи называют дифференциальными?
 - 5 Запишите уравнения электрического состояния линейющей цепи.
 - 6 При каких условиях RC -цепь может осуществлять операцию дифференцирования входного сигнала.
 - 7 Запишите частотный коэффициент передачи дифференциальной цепи.
 - 8 Какие возможности применения дифференцирующих цепей знаете?
 - 9 Какие электрические цепи называют интегрирующими?
 - 10 При каких условиях RC -цепь может осуществлять операцию интегрирования входного сигнала?
 - 11 Запишите частотный коэффициент передачи интегрирующей цепи?
 - 12 Какие возможности применения интегрирующих цепей знаете?

Электрические фильтры

Классификация электрических фильтров
К-фильтры низких, высоких частот, полосовые и заграждающие
RC-фильтры

Основные понятия по теме

м выше добротность контура, тем уже его полоса пропускания и тем резонансная кривая. Острота резонансной кривой характеризу-

стонную избирательность колебательного контура, т. е. способность пропускать или задерживать электрические колебания только изящной частоты — резонансной или близко к ней. [1]

различных электротехнических устройствах между источником

ции и приемником включают электрические фильтры в виде звукодроссников или цепных схем, чтобы пропускать к приемнику

эксплуатации или цепных схем, чтобы пропускать к приемнику одни токи заданного диапазона частоты. Цепные схемы состоят из одноключевых четырехполюсников, называемых звенями. Этими выходными схемами каждого предыдущего звена соединяются цепными схемами последующего.

дными схемами последующего.
эктрический фильтр – пассивный четырехполюсник, пропуска-
i некоторую определенную полосу частот с малым затуханием,

гой полосы частот затухание велико. Полоса частот, при которых затухание мало, называется полосой скважности фильтра. Остальную область частот называют полосой живления или затухания.

лектрические фильтры классифицируются по пропускным свойствам: НЧ, ВЧ, плавные, запрещающие и

пропускаемым частотам: НЧ, ВЧ, полосные, заграждающие; схемам звеньев: Г, Т, П-образные, мостовые и т. п.; характеристикам: простейшие типа κ , более высокого класса

типаам элементов: реактивные (L и C), пьезоэлектрические цевые пластины), безындуктивные (R и C) и др.

ловием пропускания реактивного фильтра является наименьшее значение равное 2, т. е. это Г-образные фильтры.

и обратимого четырехполюсника справедливо $g = a + jb$,
 $\therefore g = \frac{1}{Z_1} \cdot \text{коэффициент передачи}$

- α – коэффициент передачи или мера передачи (постоянная остранения);
 a – собственное затухание четырехполюсника;

61

Journal of Health Politics, Policy and Law, Vol. 35, No. 4, December 2010
DOI 10.1215/03616878-35-4 © 2010 by The University of Chicago

Digitized by srujanika@gmail.com

65

61

Фильтры обычно собирают по симметричной Т и П-образам, которые в дальнейшем можно представить как комбинации фильтров, в которых производство продольного сопротивления соответствующее поперечное сопротивление представляет собой

В случае симметричного Т и II-образного фильтра коэффициент постоянное для данного фильтра число K , не зависящее от величины ω . Фильтры, в которых это число называют фильтрами типа K . Фильтры, в которых это число называют фильтрами типа m .

$$A = chg = \frac{Z_i}{2Z_j}, \quad sh \frac{g}{2} = \sqrt{\frac{Z_i}{4Z_j}}.$$

Полосой пропускания реактивного фильтра является частоты с $\omega_1 = 0$ до ω_2 . Полоса их затухания находит-
ся от ω_2 до ∞ (рисунок 5.2, в).

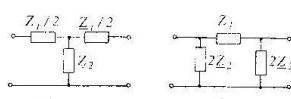


Рисунок 5.1 – Принципиальные схемы Т (а)– и П (б)–образных фильтров

Для любого симметричного реактивного фильтра в полосе зондирования, т. е. при $a \geq 0$:

$$\mathcal{A}(\omega) = \text{ch}g = \text{ch}(a + jb) \approx \text{ch}(jb) = \cos b.$$

Частота, являющаяся граничной между полосой пропускания и полосой затухания, называется частотой среза.

Характер изменения угла b для зоны прозрачности $b = \arccos \alpha$. В полосе затухания $\alpha > 0$, $b = 0$, т. е. при $b = 0$ и при

С изменением частоты ω изменяются коэффициенты B и C .

$$Z_0 = \gamma^B$$

Для того, чтобы фильтр работал на согласованную нагрузку, нужно изменять и сопротивление катушки.

В полосе прозрачности характеристическое сопротивление $\sigma_{\text{сп}} = \sigma_0$, а в полосе затухания – чисто реактивное сопротивление $\sigma_{\text{р}} = j\omega C_0$.

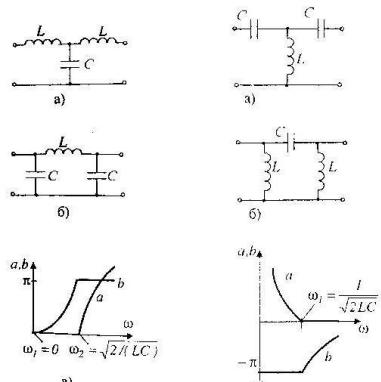


Рисунок 5.3 – Фильтр верхних частот и его характеристики

Простейшие фильтры типа К верхних частот показаны на рисунке 5.3. Фильтры верхних частот (ВЧ-фильтры) слева от ω_1 и справа от ω_2 – две части полосы прозрачности (рисунок 5.3, а). Для Т-образного фильтра верхнее условие: $L_1C_1 = L_2C_2$.

(рисунок 5.3, а) $Z_C = \sqrt{\frac{2L}{C}} - \frac{1}{\omega C^2}$. При $\omega = \omega_2 : 1/\sqrt{2LC}$ за катушек применяют безындукционные фильтры (RC), состоящие из активных сопротивлений и емкостей. RC-фильтры также используют в случае, когда сопротивление нагрузки, на которую подается выходной сигнал, очень велико, т. е. теоретически стремится к бесконечности [1, 6].

Полосовые фильтры это фильтры, пропускающие в полосе частот от ω_1 до ω_2 . Слева от ω_1 и справа от ω_2 находятся полосы затухания (рисунок 5.4, б). Для полосового фильтра можно получить путем последовательного соединения двух фильтров нижних частот, пропускающего частоты до ω_1 и отфильтровывающего частоты выше ω_2 .

Рисунок 5.3 – Принципиальная схема ВЧ-фильтра верхних частот (а) и его векторная диаграмма (б)

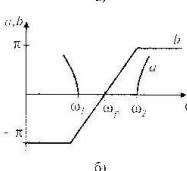
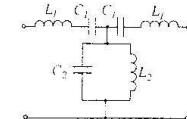


Рисунок 5.4 – Полосовой фильтр

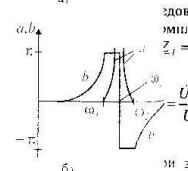
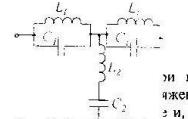


Рисунок 5.5 – Заграждающий фильтр

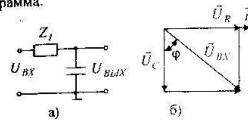


Рисунок 5.6 – Принципиальная схема RC-фильтра нижних частот (ФНЧ) и его векторная диаграмма

или в низких частотах, когда емкостное сопротивление велико, напряжение на выходе фильтра немногим меньше напряжения на его входе, и, следовательно, затухание мало. С повышением частоты емкостное сопротивление убывает, напряжение на выходе уменьшается следовательно, затухание возрастает.

Амплитудный коэффициент передачи напряжения такого фильтра

$$Z_L = R \quad Z_2 = jL = jI/j\omega C \quad \text{может представить в виде} \quad (5.1)$$

и в этом модуле коэффициента передачи выражение (5.1) или, другими словами, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра будет иметь вид

$$|U_R| = \sqrt{a^2 + b^2} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega t)^2}}, \quad (5.2)$$

Заграждающие фильтры (рисунок 5.5, а) это фильтры, у которых полоса прозрачности как бы разрезана на две части полосой затухания $t = RC$ – постоянная времени фильтра.

Фазовый сдвиг между напряжением на выходе и входом определяется выражением

$$\varphi = \arctg \frac{b}{a} = \arctg(-\omega RC) = -\arctg(2\pi f RC) = -\arctg(-2\pi f_0) = \arctg \frac{I}{\omega RC} = \arctg \frac{I}{2\pi f RC}. \quad (5.6)$$

Границная частота среза определяется по формуле, в которой модуль коэффициента передачи K уменьшается в $\sqrt{2}$ раз при граничной частоте фильтра верхних частот. С учетом сказанного выражение (5.2) дает для граничной частоты

$$\omega_c = \frac{I}{RC} \quad \text{или} \quad f_c = \frac{I}{2\pi RC} = \frac{I}{2\pi c}, \quad \text{где } \omega_c = \frac{I}{RC} \text{ называется граничной частотой фильтра верхних частот, а } f_c = \frac{I}{2\pi RC} = \frac{I}{2\pi c} \text{ называется граничной частотой фильтра нижних частот.}$$

Для RC -фильтров не наблюдается резкого перехода от прозрачности к полосе задержки.

Принципиальная схема RC -фильтра верхних частот (ФВЧ) и его векторная диаграмма приведены на рисунке 5.7.



Рисунок 5.7 – Принципиальная схема RC -фильтра верхних частот (ФВЧ) и его векторная диаграмма

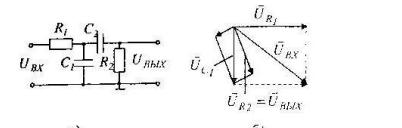


Рисунок 5.8 – Принципиальная схема полосового RC -фильтра (а) и его векторная диаграмма (б)

При низких частотах, когда емкостное сопротивление высоких частот, а второе звено (ФВЧ) не пропускает колебания напряжение на выходе фильтра мало, т. е. получается близким частот. Где-то в области перехода от полосы прозрачности к задержке. С увеличением частоты емкостное сопротивление се задержки обеих звеньев и лежит максимальное значение колебания, и напряжение на выходе возрастает, т. е. затухание убывает.

Комплексный коэффициент передачи ФВЧ по напряжению для коэффициента передачи по напряжению для полосового фильтра искривлено (ФНЧ) не пропускает колебания

$$Z_1 = I/\omega_0 C \text{ и } Z_2 = R \text{ имеет вид } K = \frac{U_{BUX}}{U_{BY}} = \frac{R}{R + \frac{I}{\omega_0 C}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} = \frac{(j\omega RC)^2}{1 + (j\omega RC)^2} + j = \frac{\omega RC}{1 + (\omega RC)^2} \quad \text{и} \quad K = \frac{U_{BUX}}{U_{BY}} = \frac{I}{3 + j(\omega RC - \frac{I}{\omega RC})}. \quad (5.8)$$

АЧХ и ФЧХ такого фильтра, как следует из соотношения (5.8) для модуля коэффициента передачи (АЧХ) выражаются формулами:

$$K = \frac{l}{\sqrt{9 + (\omega RC - \frac{l}{\omega RC})^2}}$$

Максимальная величина модуля коэффициента передачи (5.9) наблюдается при $\omega_0 RC = \frac{1}{\omega_0 RC} = \psi$ и принимает значение

$$K_{f'} = U^2.$$

АЧХ полосового фильтра напоминает резонансную кривую $R_{\text{вн}}$ батарейного контура. Поэтому соответствующую частоту ω_0 называют квантирезонансной. Ее значение может быть получено из (5.9) с учетом соотношения (5.10);

$$\omega_p = \frac{I}{RC} \text{ или } f_p = \frac{I}{2\pi RC} = \frac{I}{2\pi r}$$

Заграждающий RC -фильтр часто называют двойным: $T_{\text{об}} = \frac{1}{RC}$ или $f_p = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi t}$. мостом. Он представляет собой параллельное соединение $T_{\text{об}}$ фильтров верхних и нижних частот (рисунок 5.9, а).

Качественную работу заграждающего фильтра можно объяснить

пересовав схему более наглядно, как показано на рисунке 5.9.5.

$$\frac{R_s}{\sqrt{2}} \quad \frac{R_s}{\sqrt{2}}$$

и приведены на рисунке 5.10 а, б. Если взять векторы напряжений $\vec{U}_{R_0} = \vec{U}_{\text{NPK}}$ и $\vec{U}_{R_0} = \vec{U}_{\text{NPK}}$ из одной и (рисунок 5.10, в), то видно, что они при определенной частоте ω могут быть равны друг другу по величине и противоположны по фазе. На этой частоте, называемой так же, как и в случае полосового фильтра, квазирезонансной, коэффициент передачи фильтра R_1 равен нулю, а фаза меняется скачком на π . Если в рассматриваемом заграждающем фильтре положить $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$, $R/2$ и $C_1 = 2C$, то выражение для его АЧХ и ФЧХ будет иметь

$$\zeta = \frac{t - (\omega RC)^2}{\sqrt{[(t - (\omega RC)^2)^2 + 16(\omega RC)^2]}}, \quad \varphi = \arctg \frac{4\omega RC}{(\omega RC)^2 - t}. \quad (5.12)$$

значение для квазирезонансной частоты будет равно

раздающий RC -фильтр часто называют двойным Т-образным.

Качественно работу заграждающего фильтра можно образовать фильтром верхних и нижних частот (рисунок 5.9, а).

Качественно работу загрязняющего фильтра можно объяснить, пересовав схему более наглядно, как показано на рисунке 5.9.

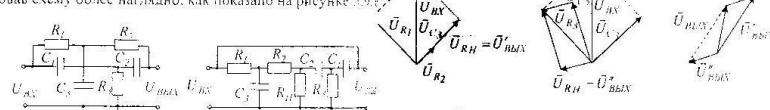


Рисунок 5.10 – Векторные диаграммы загреждающего RC -фильтра

Рисунок 5.9 – Принципиальная схема заграждающего RC -фильтра

лабораторная работа 6

В данном случае считается, что сопротивление нагрузки влияет на работу фильтра, т. е. R_2 имеет достаточно большуючину. Слева и справа подведено переменное входное напряжение одного и того же источника сигнала. В этом случае можно утверждать, что при $\omega \rightarrow K \rightarrow I$ и при $\omega \rightarrow -K \rightarrow -I$. Это означает, что ступень нулевой частоты и бесконечно больших частот K и $-K$, передачи фильтра равен I . Векторные диаграммы для левой и

Цель работы: Изучение принципов работы и методов расчета реческих фильтров типа К. Экспериментальное исследование их, верхних, подсековых и прогрессивных, при фильтрации.

Аппаратура и оборудование: генератор сигналов (ГС), цифровой гиrometer DT-58, осциллограф, электронный коммутатор, панель звуковая, набор резисторов, конденсаторов, индуктивностей, набор проводов со штекерами.

Расчетное задание

1. Рассчитать значение частоты среза f_c (или f_p) для нижних и верхних частот, а также полосового и заграждающего (рисунок 5.11). Номинальные значения резисторов приведены в таблице 5.1. Значение емкости конденсатора $C = 3300 \text{ pF}$.



Рисунок 5.11 – Принципиальные схемы RC-фильтров
а) нижних частот, б) верхних частот, в) полосового фильтра,
г) заграждающего фильтра,

где R – резисторы, значения которых соответствуют номеру варианта, C – конденсатор 3300 pF .

подключить к входу фильтра генератор низкочастотных сигналов, а к выходу – осциллограф для измерения переменных величин;

изменяя частоту входного сигнала в диапазоне от 20 Гц до

20 кГц , снять АЧХ и ФЧХ фильтра;

имечание – При измерении зависимости напряжения на выходе от частоты, необходимо обеспечить постоянную величину зажигания на ГС. Измерения фазового сдвига следует проводить в тех

законах диапазона частот, в которых был рассчитан коэффициент K .

измеренные значения занести в таблицу 5.2;

таблица 5.2 – Таблица экспериментальных измерений фильтра

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_c, \text{ кГц}$	47	40	34	30	26	24	22	20	18	16

Таблица 5.1 – Значения резисторов, по которым рассчитываются

исследование RC-фильтров верхних частот:
собрать на монтажной панели стенда лабораторного схему

фильтра верхних частот (рисунок 5.15, б);
подключить к входу фильтра генератор низкочастотных сигналов

(– 30 дБ), а к выходу – осциллограф для измерения переменных

величин;

2. Рассчитать и построить графики АЧХ и ФЧХ фильтров

и нижних частот. Расчеты выполнить для коэффициентов K , равных соответственно $0,2; 0,4; 0,7; 1,0$. На графике

откладывать в логарифмическом масштабе;

имечание – При измерении зависимости напряжения на выходе от частоты, необходимо обеспечить постоянную величину зажигания на ГС. Измерения фазового сдвига следует проводить в тех

законах диапазона частот, в которых был рассчитан коэффициент K .

измеренные значения занести в таблицу 5.3;

таблица 5.3 – Таблица экспериментальных измерений фильтра

RC-фильтра нижних частот (рисунок 5.15, а);
построить графики АЧХ и ФЧХ фильтров. Частоту на графиках

откладывать в логарифмическом масштабе;

имечание – При измерении зависимости напряжения на выходе от частоты, необходимо обеспечить постоянную величину зажигания на ГС. Измерения фазового сдвига следует проводить в тех

законах диапазона частот, в которых был рассчитан коэффициент K .

измеренные значения занести в таблицу 5.3;

таблица 5.3 – Таблица экспериментальных измерений фильтра

- провести сравнительный анализ результатов расчета

Таблица 5.3 Таблица экспериментальных измерений физиологических показателей верхних частей тела

T, mK					
f, MHz					
U_{BBA}, mV					
Φ					

— схема, содержащая *RC*-фильтра:

Исследование загрязняющего RC-фильтра:
 собрать на монтажной панели схему лабораторного эксперимента, изображающую RC-фильтр (рисунок 5.15, г), параметры которой соответствуют рассчитанным значениям варианта, заданного преподавателем;
 подключить к входу фильтра генератор низкочастотных сигналов (ГС), а к выходу — осциллограф для измерения переменных величин;
 изменяя частоту входного сигнала в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц , снять АЧХ и ФЧХ фильтра;

3 Исследование полосового RC-фильтра:

- собрать на монтажной панели стекла лабораторного полосового RC -фильтра (рисунок 5.15, в), параметры которого соответствуют рассчитанным значениям варианта, заданного в вспомогательном документе;

— подключить к входу фильтра генератор низкочастотных сигналов (ГС), а к выходу — осциллограф для измерения передаваемых напряжений;

Примечание — При измерении зависимости напряжения на выходе фильтра от частоты необходимо обеспечить постоянную в Φ напряжение на ГС. Измерения фазового сдвига следует проводить в пределах диапазона частот, в которых был рассчитан коэффициент K . Построить графики АЧХ и ФЧХ фильтров. Частоту на графиках

– измеренные значения занести в таблицу 5.4; здывать в логарифмическом масштабе; провести сравнительный анализ результатов расчета и эксперимента.

Таблица 5.4 - Таблица экспериментальных измерений полосового фильтра

тает должен содержать:
 титульный лист;
 название и цель работы;
 принципиальные схемы рассчитанных фильтров с указанием их основных параметров.

- построить графики АЧХ и ФЧХ фильтров. Частоту на логарифмическом масштабе; откладывать в логарифмическом масштабе;
- пронести сравнительный анализ результатов расчета и эксперимента;

правила оформления отчета по лабораторной работе

гчет должен содержать:

— Титульный лист;

- название и цель работы;
- принципиальные схемы рассчитанных фильтров с указанием наиминимальных значений элементов;

таблицы экспериментальных значений; результаты сравнительного анализа результатов расчета и эксперимента;

Контрольные вопросы

1. Что понимают под электрическими μ - и κ -фильтрами?
2. Дайте определение полосы прозрачности, полосы заграждения, частоты среза?
3. Как можно классифицировать электрические фильтры?
4. Что вы знаете о фильтрах низких частот?
5. Что представляют собой фильтры высоких частот?
6. В чем различие полосовых фильтров от фильтров заграждения?
7. Как по схеме κ -фильтров определить, к какому типу они надлежат?
8. Определите условия, при которых κ -фильтр может работать согласованную нагрузку.
9. Какой характер носит характеристическое сопротивление κ -фильтра в полосе прозрачности и полосе пропускания?
10. Чем принципиально отличаются RC -фильтры от μ - κ -фильтров?
11. Получите аналитическое выражение для АЧХ и фазы RC -фильтров верхних и нижних частот.
12. Постройте векторные диаграммы исследованных в работе RC -фильтров.

Переходные процессы в электрических цепях

1. Переходной, принужденный и свободный режимы.
2. Переходные процессы в электрической цепи при последовательном соединении RL -элементов.
3. Переходные процессы в электрической цепи при последовательном соединении RC -элементов.
4. Переходные процессы в электрической цепи при последовательном соединении RLC -элементов.

Основные понятия по теме

При переходе от одного установленногося режима к другому в линейных электрических цепях имеют место переходные процессы. Изменения в электрической цепи можно представить в виде тех или иных переключений, называемых в общем случае коммутацией [1–4]. Коммутация – это процесс замыкания или размыкания цепи.

Задача исследования переходных процессов заключается в том, чтобы найти закономерности отклонения токов в ветвях и напряжений по участкам цепи от их установленных значений настрижений и токов. В общем случае анализ переходного процесса в электрических цепях с линейными элементами, имеющими постоянные параметры, сводится к решению линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Чтобы получить однозначное решение, дифференциальные уравнения необходимо решать при заданных начальных условиях. Независимыми начальными условиями называются значения тока в индуктивности и напряжения на емкости в момент коммутации, т. е. при $t = 0$. Принято считать, что коммутация происходит мгновенно за время $t = 0$, тогда ток в индуктивности и напряжение на емкости непосредственно до коммутации обозначают $i_L(0)$ и $u_C(0)$, а непосредственно после коммутации – $i_L(0)$ и $u_C(0)$. Независимые начальные условия характеризуют запасенную в магнитном и электрическом полях энергию к моменту коммутации.

Для анализа и расчета переходных процессов применяют два закона на коммутации.

Первый закон коммутации состоит в том, что ток в ветви с индуктивным элементом в начальный момент времени после коммутации имеет то же значение, которое он имел непосредственно перед коммутацией, а затем с этого значения он начинает плавно изменяться:

$$i_L(\theta_+) = i_L(\theta_-)$$

Этот закон вытекает из невозможности мгновенного изменения энергии магнитного поля $W_M \approx \frac{L^2 i^2}{2}$, запасенной в индуктивном элементе.

Второй закон коммутации состоит в том, что напряжение в ёмкостном элементе в начальный момент после коммутации имеет то же значение, которое оно имело непосредственно перед коммутацией, а затем с этого значения оно начинает плавно изменяться:

$$u_C(\theta_+) \approx u_C(\theta_-)$$

Второй закон коммутации вытекает из невозможности мгновенного изменения энергии электрического поля ёмкостного элемента:

$$W_C = \frac{C^2 u^2}{2}$$

Начальные условия, вытекающие из законов коммутации, называются независимыми. Все остальные начальные условия зависимы.

Применим классический метод расчета переходных процессов для неразветвленной электрической цепи рисунка 6.1. Составим дифференциальное уравнение для мгновенных значений напряжений по второму правилу Кирхгофа:

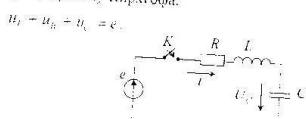


Рисунок 6.1 – Неразветвленная электрическая цепь с RLC-элементами

С учетом того, что

$$u_L = L \frac{di}{dt}, \quad u_C = R i, \quad u_s = \frac{1}{C} \int i dt$$

76

дифференциальное уравнение примет следующий вид

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R i + \frac{1}{C} \int i dt = e.$$

В этой формуле i – ток переходного процесса, называемый первичным.

После окончания переходного режима наступает принужденный (установившийся) режим, который создается источником периодически изменяющейся $\dot{\theta}(t)C$.

При исследовании переходных процессов необходимо установить порядок уравнения электрического состояния цепи, который равен числу независимых начальных условий для токов индуктивностей и напряжений на ёмкостях. Для цепи рисунка 6.1 переходный процесс описывается уравнением второго порядка, так как значения i и u_C можно задать независимо друг от друга:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{de}{dt}.$$

Решение линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами представляет собой сумму двух решений: частного решения неоднородного уравнения и общего решения однородного уравнения. Частное решение описывает принужденный режим, заданный источником энергии, и зависит от вида функции, стоящей в правой части уравнения. Если функция правой части уравнения постоянна или является периодической функцией времени, то принужденный ток будет установившимся. Общее решение однородного уравнения опписывает переходный процесс, протекающий без воздействия внешних источников, т. е. протекающий за счет энергии, накопленной в индуктивных и ёмкостных элементах цепи до начала переходного режима, и имеет одинаковый вид для любого переходного процесса в данной цепи. Это означает, что исследуемая цепь в этом случае освобождается от воздействия внешнего источника энергии. Поэтому токи или напряжения, найденные в результате решения однородного уравнения, называются свободными, составляющими (или просто свободными). При отсутствии внешних источников энергии, запасенная в цепи, постепенно расходуется и свободная составляющая с течением времени уменьшится до нуля. Для определения свободного тока однородное уравнение имеет вид:

$$L \frac{d^2 i_{\text{fr}}}{dt^2} + R \frac{di_{\text{fr}}}{dt} + \frac{1}{C} i_{\text{fr}} = 0.$$

77

При этом соответствующее характеристическое уравнение имеет вид:

$$Lp^2 + Rp + \frac{1}{C} = 0.$$

Определим из характеристического уравнения корни p_1 и p_2 , записем общее решение в виде:

$$i_o = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

где A_1 и A_2 – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий.

Действительное значение тока во время переходного режима равно сумме принужденного и свободного токов:

$$i = i_{sp} + i_{fr}.$$

Аналогично, действительное напряжение на любом участке цепи при переходном режиме равно сумме принужденной и свободной составляющих:

$$u = u_{sp} + u_{fr}.$$

Рассмотрим короткое замыкание RL -цепи, присоединенной к источнику постоянного напряжения $U = U_0$, (рисунок 6.2).

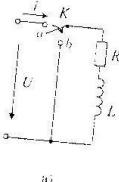


Рисунок 6.2 – Короткое замыкание RL -цепи (а) и график изменения напряжения и тока (б)

Если переключатель K перебросить из положения a в положение b , то возникнет накоротко замкнутый контур, в котором принужденный ток существовать не может, так как RL -цепь отключена

78

воздействия напряжения сети. В этом случае принужденный ток после коммутации равен нулю. Следовательно, в данном случае в цепи существует только свободный ток i_{fr} .

Запишем уравнение электрического состояния KL -цепи по второму правилу Кирхгофа:

$$L \frac{di_{fr}}{dt} + Ri_{fr} = 0.$$

Тогда однородным уравнением, определяющим свободный ток i_{fr} этой цепи, будет уравнение вида:

$$L \frac{di_{fr}}{dt} + Ri_{fr} = 0,$$

Характеристическим уравнением будет уравнение типа:

$$Lp + R = 0,$$

где $p = -\frac{R}{L}$ – корень данного уравнения.

Тогда свободный ток запишется как:

$$i_{fr} = A e^{pt} = A e^{-Rt/L} = A e^{-\alpha t},$$

Полученное выражение графически представляет собой затухающую кривую экспоненту (рисунок 6.2, б). Величина $-\frac{L}{R} = \frac{L}{p} = \tau$ называется

зимеющей разность времени ($\text{Гц}/\text{Ом} = \text{Ом} \cdot \text{с}/\text{Ом} = \text{с}$), называемая постоянной времени.

Постоянная времени τ характеризует скорость протекания переходного процесса, причем, чем больше τ , тем продолжительнее переходный процесс. Величина, обратная постоянной времени ($\alpha = R/L = 1/\tau$), называется коэффициентом затухания, при этом, чем больше коэффициент затухания, тем быстрее происходит уменьшение свободного тока.

Для того чтобы проанализировать переходной процесс при коротком замыкании RL -цепи, необходимо из начальных условий найти постоянную интегрирования A . При $t = 0$, $A = i_{fr}(0)$.

Если при коротком замыкании по цепи проходит постоянный ток $I_0 = U_0/R$, где U_0 – постоянное напряжение, приложенное к цепи (рисунок 6.2, а), то это значение тока сохранится и для первого момента $t=0$ после замыкания цепи. Отсюда можно определить постоянную интегрирования:

79

$$A = i_{\text{ex}}(\theta) = i(\theta) + i_{\text{sp}}(\theta) = i(\theta) = I_v = U_v / R$$

Так как принужденный ток при коротком замыкании цепи $i_{\text{sp}} \approx 0$, следовательно, ток в исследуемой цепи:

$$i = i_{\text{ex}} = A e^{-Rt/L} = I_v e^{-Rt/L} = \frac{U_v}{R} e^{-Rt/L}.$$

В переходный период в такой цепи возникает электродвижущая сила самоиндукции:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \left(-\frac{R}{L} \right) \frac{U_v}{R} e^{-Rt/L} = U_v e^{-Rt/L} = u_L,$$

откуда видно, что ЭДС самоиндукции при коротком замыкании цепи возникает скачкообразно, принимая в момент коммутации симметричное значение, т. е. при $t=0$ $e_L = U_v$ (рисунок 6.2, б). Так как напряжение на индуктивном элементе $u_L = -e_L = -U_v e^{-Rt/L}$, а во время коммутации $u_R = R i = U_v e^{-Rt/L}$, то в замкнутом контуре при коротком замыкании $u_R + u_L = 0$.

При включении RL -цепи на постоянное напряжение $U = U_v$ принужденный ток определяется как $i_{\text{sp}} = U_v / R$, а свободный ток, как в предыдущем случае, равен $i_{\text{ex}} = A e^{-Rt/L}$ (рисунок 6.3, а).

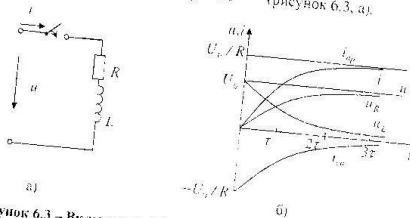


Рисунок 6.3 – Включение RL -цепи на постоянное напряжение (а) и график изменения напряжения и тока (б)

Ток переходного процесса записывается как $i = U_v / R + A e^{-Rt/L}$. Найдем постоянную интегрирования A из начальных условий. Ток же переходного процесса в первый момент после включения равен нулю.

80

$$(0) = U_v / R + A = 0,$$

тогда $A = -U_v / R$.

В результате искомый переходный ток записывается как:

$$i = \frac{U_v}{R} - \frac{U_v}{R} e^{-Rt/L} = \frac{U_v}{R} (1 - e^{-Rt/L}).$$

Напряжение на индуктивном элементе определим как

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \left(-\frac{R}{L} \right) \frac{U_v}{R} e^{-Rt/L} = U_v e^{-Rt/L},$$

напряжение на резистивном элементе определяется как

$$u_R = R i = U_v (1 - e^{-Rt/L}).$$

Графики изменения i ; i_{sp} ; i_{ex} ; u_L ; u_R приведены на рисунке 5.3, б.

До коммутации напряжение на индуктивном элементе было равно нулю, а в момент включения ($t = 0$) стало $u_L = U_v$, т. е. напряжение на индуктивности изменяется скачком. Поэтому в первый момент после включения напряжение целиком сосредоточивается только на индуктивном элементе, а затем постепенно переходит на резистивный элемент, а при $t \rightarrow \infty$ $u_L = 0$; $u_R = U_v$ (рисунок 6.3, б).

Из графика зависимости тока ($i(t)$) на рисунке 6.3, б видно, что ток в цепи не устанавливается мгновенно. Для этого требуется время, чтобы наступил в цепи принужденный режим со значением тока U_v / R . Возрастание переходного тока i при включении будет тем медленнее, чем медленнее затухнет свободный ток, т. е. чем больше постоянное времени $\tau = L/R$, а значит, тем большая энергия передается магнитному полю индуктивного элемента.

Рассмотрим короткое замыкание RC -цепи (рисунок 6.4, а), что соответствует разрядке конденсатора.

Пусть цепь находится под постоянным напряжением $U = U_v$ и конденсатор полностью зарядился, т. е. напряжение между его обкладками u_c стало равным напряжению, приложенному к цепи ($u_c = U_v$). После переключения ключа K из положения a в положение b образуется некоторо замкнутый контур, в котором конденсатор будет разряжаться. В цепи будет существовать только свободное напряжение на емкостном элементе и свободный ток, так как процесс после коммутации протекает только за счет энергии $W_s = Cu_c^2 / 2$, запасенной в электрическом поле конденсатора до начала

81

переходного процесса. Принужденное напряжение на ёмкостном элементе и принужденный ток в цепи в этом случае равны нулю.

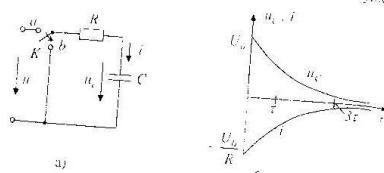


Рисунок 6.4 – Короткое замыкание RC-цепи (а)
и график изменения напряжения и тока (б)

Уравнением для свободного процесса является уравнение вида:

$$Ri_{\text{ss}} + u_{C,\text{ss}} = 0,$$

$$\text{где } i_{\text{ss}} = C \frac{du_{C,\text{ss}}}{dt}.$$

Однородное дифференциальное уравнение для свободного напряжения на ёмкостном элементе можно переписать в виде:

$$RC \frac{du_{C,\text{ss}}}{dt} + u_{C,\text{ss}} = 0,$$

Характеристическим уравнением будет уравнение вида:

$$RCp + 1 = 0,$$

где $p = -1/(RC)$ – корень линейного уравнения.

Напряжение свободное на ёмкости записывается:

$$u_{C,\text{ss}} = A e^{-pt} = A e^{-t/(RC)} = A e^{-t/\tau},$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени цепи, а $\alpha = 1/\tau = 1/(RC)$ называется коэффициентом затухания цепи.

Для нахождения постоянной интегрирования A воспользуемся вторым законом коммутации:

$$u_i(\theta_+) = u_i(\theta),$$

Цепи до коммутации конденсатор был заряжен до напряжения U_0 , поэтому $u_i(\theta^-) = u_i(\theta)$ и при $t = 0$:

$$0 = u_i(\theta) = u_i(\theta^-) - u_{C,\text{ss}}(\theta) + U_0 - \theta = U_0.$$

Итак, окончательно искомое напряжение на ёмкостном элементе имеет вид:

$$u_i = u_{C,\text{ss}} = U_0 e^{-t/(RC)},$$

ток в цепи записывается так

$$i = C \frac{du}{dt} = C \left(-\frac{1}{RC} \right) U_0 e^{-t/(RC)} = -\frac{U_0}{R} e^{-t/(RC)}.$$

Знак минус свидетельствует о том, что ток разряда имеет направление, противоположное напряжению на конденсаторе. Графики изменения напряжения u_i и тока i приведены на рисунке 6.4, б.

Пусть RC-цепь рисунка 6.5, а, включена на постоянное напряжение, что соответствует зарядке конденсатора цепи до принужденного напряжения U_0 :

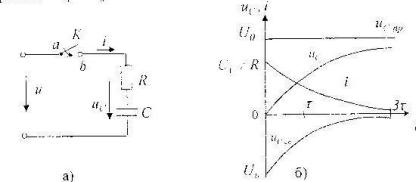


Рисунок 6.5 – Включение RC-цепи на постоянное напряжение (а)
и график изменения напряжения и тока (б)

Запишем уравнение электрического состояния цепи для этого случая:

$$RC \frac{du_{C,\text{ss}}}{dt} + u_{C,\text{ss}} = U_0,$$

где $u_{C,\text{ss}} = A e^{pt}$ – свободное напряжение на ёмкостном элементе.

Тогда переходное напряжение записывается:

$$u_i = u_{C,\text{ss}} + u_{C,\text{sp}} = U_0 + A e^{-t/(RC)},$$

Напряжение на емкостном элементе до коммутации, а следовательно, и в первый момент после включения равно нулю, так как конденсатор не был заряжен, т. е. при $t=0$ напряжение $u_C(0)=U_0$, т. е. $A \approx U_0$, откуда $A=-U_0$ и $u_C=U_0-U_0 e^{-\omega_0 t}=U_0(1-Ae^{-\omega_0 t})$.

Напряжение на емкостном элементе возрастает постепенно, причем тем медленнее, чем больше постоянная времени $\tau=RC$ (см. схему 6.5, б).

Ток при зарядке конденсатора в момент коммутации (при $t=t_{\text{вк}}$) возникает скачком, а затем садает по экспоненциальному закону. Ток садает тем медленнее, чем больше постоянная времени цепи с элементом $U_{C_{\text{вк}}}$.

Рассмотрим апериодическую разрядку конденсатора (рисунок 6.6). Если ключ K переключит из положения a в положение b , то образуется накоротко замкнутый RLC -контур, в котором до коммутации конденсатор заряжен до напряжения источника U_0 .

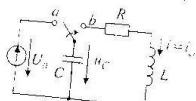


Рисунок 6.6 – Апериодическая разрядка конденсатора

После коммутации в замкнутом RLC -контуре протекает свободный процесс, который, согласно второму правилу Кирхгофа, описывается однородным уравнением:

$$L \frac{di_C}{dt} + RI_C + u_C = 0.$$

Так как $i_C = Cd u_{C_{\text{вк}}}/dt$, то

$$LC \frac{d^2 u_{C_{\text{вк}}}}{dt^2} + RC \frac{du_{C_{\text{вк}}}}{dt} + u_{C_{\text{вк}}} = 0.$$

Характеристическое уравнение имеет вид:

$$LCp^2 + RCP + I = 0, \text{ или } p^2 + Rp/L + I/(LC) = 0,$$

84

где корнями данного уравнения являются два корня:

$$\rho_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{I}{LC}}.$$

Если в колебательном контуре резонансная частота $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ и $(R/2L)^2 = \delta^2$, то выражение для определения корней характеристического уравнения можно переписать:

$$\rho_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}.$$

Характер свободного процесса зависит от вида корней характеристического уравнения, которые, в свою очередь, зависят от соотношения параметров RLC -цепи. Свободный процесс, наблюдаемый в замкнутом RLC -контуре после коммутации, представляет собой апериодическую разрядку конденсатора. Апериодической называется разрядка конденсатора, заряженного до напряжения U_0 , через resistor и индуктивную катушку, когда напряжение на конденсаторе мгновенно садает до нуля. Апериодический процесс разрядки конденсатора имеет место, если корни характеристического уравнения вещественны, т. е. если $R^2/(4L^2) > I/(LC)$ или $R/(2L) > 1/\sqrt{LC}$, или $I > 2\sqrt{LC} = R_{\text{кр}}$, получается пара разных корней.

Сопротивление $R_{\text{кр}} = 2\sqrt{LC}$ называется критическим, так как это является наименьшим сопротивлением RLC -контура, когда еще имеет место апериодический процесс разрядки конденсатора. При $R < 2\sqrt{LC}$ корни характеристического уравнения получаются комплексными и сопряженными. Таким образом, корни характеристического уравнения ρ_1 и ρ_2 будут вещественными и различными, если выполняется условие $R > R_{\text{кр}}$. Если корни различны, то общее решение однородного дифференциального уравнения имеет вид:

$$u_{C_{\text{вк}}} = A_1 e^{\rho_1 t} + A_2 e^{\rho_2 t},$$

где A_1 и A_2 – постоянные интегрирования, а ρ_1 и ρ_2 – вещественные и различные корни, которые должны быть отрицательными, так как свободный процесс должен быть затухающим во времени.

Так как при разрядке конденсатора в накоротко замкнутом RLC -контуре процесс является свободным, то переходные значения напряжения u_C и тока i равны их свободным значениям, т. е. $u_C = u_{C_{\text{вк}}}$ и $i = i_{\infty}$. Так цепь:

85

$$i = i_{\text{ex}} = C \frac{du_{C(t)}}{dt} = CA_1 p_1 e^{p_1 t} + CA_2 p_2 e^{p_2 t},$$

Подставляя начальные условия при $t = 0$: $u_C = U_0$, $i = i_0$ в $i = i_{\text{ex}}$,

$$u_C(0) = A_1 + A_2 = U_0; \quad i(0) = A_1 p_1 + A_2 p_2 = i_0$$

и решая совместно систему уравнений, определяем постоянные интегрирования:

$$A_1 = \frac{p_2 U_0 - i_0}{p_2 - p_1}; \quad A_2 = -\frac{p_1 U_0 - i_0}{p_2 - p_1}.$$

Окончательно получаем, что

$$u_C = u_{C(t)} = \frac{U_0}{p_2 - p_1} \cdot (p_2 e^{p_2 t} - p_1 e^{p_1 t}),$$

$$i = i_{\text{ex}} = \frac{U_0 C p_2 p_1}{p_2 - p_1} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}).$$

Напряжение на индуктивном элементе u_L определяется по формуле

$$u_L = u_{L(t)} = L \frac{di_{\text{ex}}}{dt} = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}).$$

Лабораторная работа 7

Цель работы: освоить методы исследования переходных процессов в линейных электрических цепях при наличии одного и двух накопителей энергии; установить влияние параметров исследуемой цепи на характер переходного процесса.

Материалы и оборудование: блок питания (БП); цифровой мультиметр ДТ-58; осциллограф С1-101; электронный коммутатор; панель монтажки; набор резисторов, конденсаторов, индуктивностей; набор проводов со штекерами.

Ход работы

- Собрать на линевой панели лабораторного стенда схему рисунка 6.7.

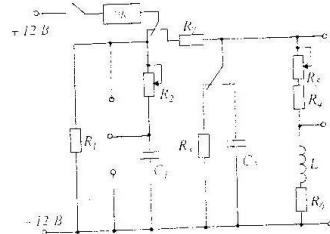


Рисунок 6.7 – Схема для исследования переходных процессов:

R_1 – резистор 1кОм; R_2 – переменный резистор 100 кОм; R_3 , R_4 – резисторы 100 Ом; R_5 – переменный резистор 12 кОм; R_6 – резистор 12 Ом; R_7 – резистор 2кОм; C_1 , C_2 – конденсаторы 0.01 мкФ; L – индуктивность 66 мГн; ЭК – электронный коммутатор 0.01 мкФ; I – индуктивность 66 мГн; ЭК – электронный коммутатор

2 Подключить схему для исследования переходных процессов к источнику постоянного напряжения $U = 12$ В и включить электронный коммутатор.

3 Включить напряжение питания осциллографа, нажав кнопку «сеть» на передней панели прибора, осуществить прогрев его в течение 3–5 минут.

4 Поместить на осциллограф напряжение с резистора $R = 1$ кОм.

5 Установить на экране осциллографа полтора два периода напряжения питания и по полученной временной зависимости $u(t)$ на экране осциллографа определить а) амплитуду напряжения импульса; б) длительность импульса и паузы; в) частоту коммутации электронного коммутатора.

6 Провести исследование переходных процессов в электрической цепи с резистором и конденсатором. Для этого: переключить вход осциллографа с резистора $R = 1$ кОм на конденсатор $C = 0.01$ мкФ; затем при трех различных значениях сопротивления переменного резистора ($R = 20, 60, 100$ кОм) снять осциллограммы напряжений на конденсаторе и на резисторе при переходных процессах.

7 Исследовать переходные процессы в электрической цепи с резистором и катушкой индуктивности.

а) подключить к прямоугольному напряжению электронного коммутатора электрическую цепь, состоящую из переменного резистора и катушки индуктивности; при этом параллельно включенный конденсатор $C = 0.01 \text{ мкФ}$ должен быть отключен;

б) снять осциллограмму, подаваемую на исследуемую цепь поясняющего напряжения и определить его амплитуду;

в) снять с экрана осциллографа осциллограммы напряжений на переменном резисторе и катушке индуктивности при трех значениях сопротивления переменного резистора ($R = 100 \Omega$; $R = 5 \text{ к}\Omega$;

$R = 10 \text{ к}\Omega$).

8 Исследовать переходные процессы в электрической цепи с двухъярусными источниками энергии – конденсатором и катушкой индуктивности:

а) подключить параллельный переменному резистору и катушке индуктивности конденсатор с емкостью $C = 0.01 \text{ мкФ}$, затем провести три опыта при значениях суммарного сопротивления резисторов $R > 2\sqrt{L/C}$; $R = 2\sqrt{L/C}$; $R < 2\sqrt{L/C}$; измерение сопротивления резисторов производить при отключении напряжения питания исследуемой цепи;

б) при выполнении опытов снять осциллограммы напряжения на катушке индуктивности при зарядке и разрядке конденсатора;

в) провести обработку результатов опытов: определить постоянные времени исследуемых RC -цепей при разрядке и зарядке конденсатора по осциллограммам $u_c(t)$ опыта пункта б и сравнить их с соответствующими значениями, рассчитанными по числовым значениям параметров отдельных элементов цепи;

г) определить постоянные времени исследуемых RL -цепей при переходных процессах по осциллограммам $u_L(t)$ опыта пункта 7 и сравнить их с аналогичными расчетными значениями;

д) по осциллограмме $u_L(t)$ опыта пункта 8, соответствующей колебательному переходному процессу, определить частоту собственных колебаний исследуемой цепи и ее коэффициент затухания и сравнить их с аналогичными, рассчитанными по числовым значениям параметрами цепи;

е) по осциллограмме $u_L(t)$ опыта пункта 8, соответствующей прерывистому апериодическому переходному процессу, определить постоянные времени, в течение которых напряжение на катушке индуктивности достигает максимального значения, и сравнить его с рассчитанными по известным параметрам цепи.

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) название и цель работы;
- 3) схему рисунка 6.7;

4) осциллограммы напряжений на конденсаторе и на резисторе при переходных процессах при различиях значений переменного резистора;

5) осциллограммы напряжений на переменном резисторе и катушке индуктивности при $R = 100 \Omega$; $R = 5 \text{ к}\Omega$; $R = 10 \text{ к}\Omega$;

6) осциллограммы напряжения на катушке индуктивности при зарядке и разрядке конденсатора;

7) значения постоянных времени RC -цепей при разрядке и зарядке конденсатора;

8) значения постоянных времени RL -цепей при переходных процессах;

9) значение частоты собственных колебаний исследуемой цепи и ее коэффициент затухания;

10) значение интервала времени, в течение которого напряжение на катушке индуктивности достигает максимального значения.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение установившегося и переходного процессов в электрической цепи?

2. Дайте определение постоянной времени электрической цепи?

3. Напишите, в течение какого промежутка времени практически заканчивается переходный процесс в электрической цепи.

4. Как можно определить постоянную времени электрической цепи по экспериментальным зависимостям тока и напряжения при переходном процессе?

5. Укажите, от каких параметров зависит постоянная времени неравнозначных RC - и RL -цепей.

6. Как определить емкость конденсатора или сопротивление резистора, на который разряжается конденсатор, по кривой его разряда на экране осциллографа если одно из них известно?

7. Напишите выражение для переходного напряжения на конденсаторе при включении RC -цепи на постоянное напряжение.

8. Напишите выражение для переходного тока при включении электрической RL -цепи на постоянное напряжение.

9. Назовите устройства, в которых используются явления, возникающие при переходных процессах в электрических цепях.

10. Дайте определение законов коммутации.

7 Трехфазные цепи

- 1 Способы соединения фаз источника трехфазного тока
 - 2 Соотношения между линейными и фазовыми напряжениями
 - 3 Трехфазные цепи при соединении нагрузки звездой
 - 4 Трехфазные цепи при соединении нагрузки треугольником
 - 5 Активная, реактивная и полная мощности трехфазной системы
- Измерение активной мощности в трехфазной системе

Основные понятия по теме

Трехфазные электрические цепи представляют собой частный случай многофазных цепей. Многофазная система электрических цепей – совокупность нескольких однофазных электрических цепей, в каждой из которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, создаваемые общим источником энергии и сдвинутые друг относительно друга по фазе на один и тот же угол. Следует отметить, что термин «фаза» применяют для обозначения угла, характеризующего стадию периодического процесса, а также для названия однофазной цепи, входящей в многофазную сеть [1–3].

Обычно применяют симметричные многофазные системы, у которых амплитудные значения ЭДС одинаковы, а фазы сдвинуты друг относительно друга на один и тот же угол $\frac{2\pi}{m}$, где m – число фаз. Наиболее часто в электротехнике используют двух-, трех- и шестифазные цепи.

Трехфазные цепи – это совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе на один и тот же угол $\frac{2\pi}{3}$.

Источником электрической энергии в трехфазной цепи является синхронный генератор, в трех обмотках которого, конструктивно сдвинутых друг относительно друга на угол $\frac{2\pi}{3}$ и называемых фазами, индуцируются три ЭДС, фазы которых, в свою очередь, также сдвинуты друг относительно друга на угол $\frac{2\pi}{3}$.

90

Трехфазная система ЭДС, индуцируемых в статоре синхронного генератора, обычно представляет собой симметричную систему. На электрических схемах обмотки статора трехфазного генератора изображают, как показано на рисунке 7.1, а).

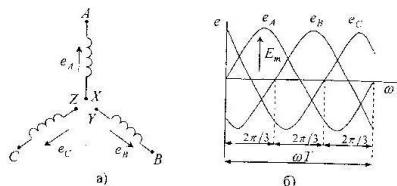


Рисунок 7.1 – Условное изображение обмоток статора трехфазного генератора и трансформатора (а) и графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы (б)

За условное положительное направление направление ЭДС в каждой фазе генератора принимают направление от конца к началу обмотки. Если ЭДС фазы A принять за исходную, равную нулю, то мгновенные значения ЭДС трехфазного генератора (рисунок 7.1, б) можно выразить аналитически:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ e_C &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) = E_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (7.1)$$

Для симметричной трехфазной системы ЭДС согласно (7.1) справедливо равенство

$$e_A + e_B + e_C = 0. \quad (7.2)$$

Учитывая, что вектор ЭДС фазы A совмещен с вещественной осью комплексной плоскости (рисунок 7.2), для комплексных значений ЭДС системы (7.1) можно записать следующим образом:

91

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_A &= E e^0 = E \\ \dot{E}_B &= E e^{-j\frac{2\pi}{3}} = E \cos \frac{2\pi}{3} - j E \sin \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2}E - j \frac{\sqrt{3}}{2}E \\ \dot{E}_C &= E e^{j\frac{2\pi}{3}} = E \cos \frac{2\pi}{3} + j E \sin \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2}E + j \frac{\sqrt{3}}{2}E \end{aligned} \right\} \quad (7.3)$$

Из векторных диаграмм (рисунок 7.2), а также из уравнений (7.3) следует, что

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (7.4)$$

Таким образом, сумма амплитуд или действующих значений ЭДС симметричной трехфазной системы равна нулю.

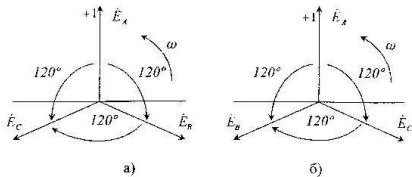


Рисунок 7.2 – Векторные диаграммы прямой (а) и обратной (б) последовательности чередования фаз симметричной трехфазной системы

На рисунке 7.1, б показано изменение мгновенных значений ЭДС трехфазного генератора, а на рисунке 7.2 даны его векторные диаграммы для прямой и обратной последовательности чередования фаз.

Последовательности, с которой ЭДС в фазных обмотках генератора принимает одинаковые значения, называют последовательностью фаз. Если ротор генератора вращает в прямом направлении, получается последовательность чередования фаз $A; B; C$, т. е. ЭДС фазы B отстает по фазе от ЭДС фазы A и ЭДС фазы C отстает по фазе от ЭДС фазы B .

Такую систему ЭДС называют системой прямой последовательности. Если изменить направление вращения ротора генератора на

противоположное, то последовательность чередования фаз будет обратной. У генераторов роторы всегда вращаются в одном направлении, поэтому последовательность чередования фаз никогда не изменяется.

От последовательности чередования фаз зависит направление вращения трехфазных синхронных и асинхронных двигателей. Достаточно поменять местами две любые фазы двигателя, чтобы изменить направление его вращения на противоположное. Последовательность фаз необходимо учитывать при параллельном включении трехфазных генераторов.

С целью уменьшения числа соединительных проводов в трехфазной системе используют связанные цепи, в которых фазы источника или приемника связаны между собой звездой или треугольником.

При соединении фаз источника звездой (рисунок 7.3, а) концы фаз $X; Y; Z$ объединены в общую точку O , называемую нейтральной, а начала фаз $A; B; C$ с помощью проводов соединены с приемником тремя проводами, которые называются линейными. Такую трехфазную систему называют трехпроводной.

При соединении фаз источника треугольником (рисунок 7.3, б) необходимо подключить конец каждой фазы к началу следующей, т. е. конец X первой фазы – с началом B второй фазы, конец Y второй фазы – с началом C третьей фазы и конец третьей фазы X – с началом A первой фазы. Начала фаз $A; B; C$ с помощью проводов соединяют приемниками. При соединении фаз источника треугольником создается замкнутый контур, в котором при отключенных приемниках может возникнуть ток короткого замыкания, однако этого не происходит, так как в симметричной трехфазной системе сумма мгновенных значений ЭДС равна $e_A + e_B + e_C = 0$. Следовательно, при холостом ходе источника ток в его фазах не возникает.

Трехфазные приемники могут быть соединены как звездой, так и треугольником. Если нагрузка несимметричная, т. е. сопротивления фаз приемника не равны между собой, то при соединении источника и приемников звездой необходимо применять помимо трех линейных проводов четвертый, нейтральный провод, соединяющий нейтральные точки O и O' источника и приемника.

Напряжение между началом и концом фазы источника называют фазным. Например, при соединении звездой фазными являются напряжения между началами фаз и нейтральной точкой источника O как показано на рисунке 7.3, а.

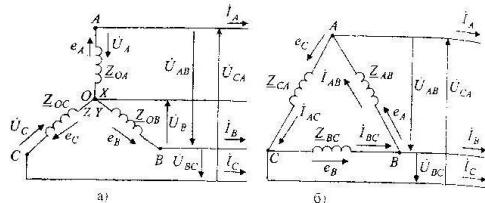


Рисунок 7.3 – Схемы соединения фаз источника звездой (а) и треугольником (б)

Фазными токами называются токи, проходящие через каждую фазу источника или приемника. Напряжения между началами $A; B; C$ фаз источника или между линейными проводами называются линейными напряжениями, а токи в линейных проводах – линейными токами.

При анализе трехфазных цепей важно знать условные положительные направления ЭДС, напряжений и токов, т. к. от их выбора зависят знаки в уравнениях, составляемых по правилам Кирхгофа, а также направления векторов на векторных диаграммах. За условное положительное направление ЭДС в каждой фазе источника принимают направление от её конца к началу, а за условное положительное направление напряжения в каждой фазе источника принимают направление от начала фазы к её концу. Направление же фазных токов совпадает с направлением ЭДС в каждой фазе источника (рисунок 7.3).

За условные положительные направления линейных напряжений принимают направление от начала одной фазы к началу другой, в частности, напряжение U_{AB} направлено от A к B . Линейные токи, проходящие через линейные провода, всегда направлены от источника к приемнику. Фазные напряжения и токи приемников направлены в одну и ту же сторону.

Согласно второму правилу Кирхгофа, ЭДС фазы $A0$ при соединении звездой $E_A = I_A Z_{OA} + U_A$, откуда $U_A = E_A - I_A Z_{OA}$, где Z_{OA} – внутреннее сопротивление фазы A источника. Аналогично находят напряжения в двух других фазах $U_B = E_B - I_B Z_{OB}$; $U_C = E_C - I_C Z_{OC}$, где Z_{OB} – внутреннее сопротивление фазы B источника, Z_{OC} – внутреннее сопротивление фазы C источника.

94

На практике приемники подключают не к отдельному источнику, а к сети, питавшейся от системы параллельно работающих генераторов. Поэтому обычно преобразуют внутренним сопротивлением фаз источников и считают фазные ЭДС равными фазным напряжениям.

Чтобы найти связь между фазными и линейными напряжениями, при соединении источников ЭДС звездой согласно с выбранными условными положительными направлениями фазных и линейных напряжений по второму правилу Кирхгофа можно записать следующие соотношения:

$$U_{AB} + U_B - U_A = 0; \quad U_{BC} + U_C - U_B = 0; \quad U_{CA} + U_A - U_C = 0,$$

откуда

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (7.5)$$

Для симметричных источников

$$\dot{U}_A = \dot{U}_B = \dot{U}_C = \dot{U}_n; \quad \dot{U}_{AB} = \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{CA} = \dot{U}_s.$$

Если принять потенциал нейтральной точки источника $\Phi_0 = 0$, то потенциалы начала его фаз будут равны фазным напряжениям:

$$\dot{U}_A = \dot{\varphi}_A - \dot{\varphi}_0 = \dot{\varphi}_A; \quad \dot{U}_B = \dot{\varphi}_B - \dot{\varphi}_0 = \dot{\varphi}_B; \quad \dot{U}_C = \dot{\varphi}_C - \dot{\varphi}_0 = \dot{\varphi}_C.$$

а линейные напряжения:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{\varphi}_A - \dot{\varphi}_B = \dot{U}_A - \dot{U}_B;$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{\varphi}_B - \dot{\varphi}_C = \dot{U}_B - \dot{U}_C;$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{\varphi}_C - \dot{\varphi}_A = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (7.6)$$

По соотношениям (7.5), зная значения фазных напряжений, можно построить векторные диаграммы фазных и линейных напряжений источника при соединении его фаз звездой (рисунок 7.4), которые будут представлять собой симметричную систему векторов, так как система фазных и линейных напряжений трехфазных генераторов, имеющих электрическую сеть, вследствие их конструктивных особенностей симметрична.

Векторная диаграмма, представленная на рисунке 7.4, в соответствии симметричной системе фазных и линейных напряжений при соединении источников звездой.

Векторную диаграмму фазных и линейных напряжений источника при соединении звездой можно представить, и как показано на

95

рисунке 7.4, б, где линейные напряжения изображены векторами, соединяющими соответствующие векторы фазных напряжений.

Из векторных диаграмм можно получить соотношение, связывающее между собой фазные и линейные напряжения симметричного источника при соединении звездой. Так для фазы А линейное напряжение равно $\dot{U}_{AB} = 2\dot{U}_A \cos 30^\circ = \sqrt{3}\dot{U}_A$. В общем случае при соединении фаз симметричного источника звездой связь между линейными и фазными напряжениями описывается выражением $\dot{U}_L = \sqrt{3}\dot{U}_f$.

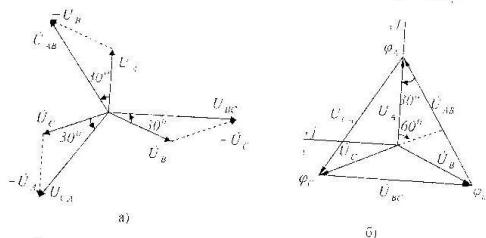


Рисунок 7.4 – Векторная (а) и топографическая (б) диаграммы напряжений трехфазного источника при соединении его фаз звездой

Следует отметить, что в практике эксплуатации синхронных генераторов фазы их трехфазных обмоток соединяют только звездой, так как при отключении ЭДС источника от синусоидальной формы из-за наличия высших гармоник сумма мгновенных значений ЭДС не будет равна нулю. При соединении фаз синхронного генератора треугольником при холостом ходе в его обмотках будут возникать токи, которые будут вытеснять их напряжение и снижать КПД генератора. Из рисунка 7.3, б видно, что при соединении фаз источника треугольником линейные напряжения равны фазным $\dot{U}_L = \dot{U}_f$.

Итак, независимо от способа соединения фаз источника линейные напряжения между линейными проводами трехфазной цепи одинаковы и сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол $\frac{2\pi}{3}$, вследствие чего сумма их мгновенных значений или векторов всегда равна нулю. Однако значение линейных напряжений при соединении фаз

источника треугольником будет в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем значения линейных напряжений при соединении фаз того же источника звездой.

Рассмотрим трехфазную цепь при соединении симметричного приемника звездой. В этом случае концы фаз приемника соединены в общий узел θ' , а концы фаз генератора соединены общий узел θ . Если узлы θ и θ' соединить проводом, называемым нейтральным, с сопротивлением Z_{000} , то получим четырехпроводную цепь (рисунок 7.5, а). Сопротивления проводов, связывающих источник с нагрузкой, можно учесть в сопротивлениях нагрузки Z_a , Z_b , Z_c .

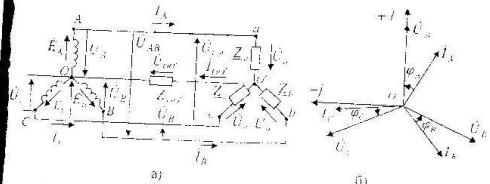


Рисунок 7.5 – Схема четырехпроводной трехфазной цепи (а) и векторная диаграмма (б) напряжений и токов симметричного приемника, соединенного звездой

Так как при соединении звездой фазы генератора соединены последовательно с фазами нагрузки, линейные токи одновременно являются и фазными токами, как в фазах генератора, так и фазах нагрузки $I_f = I_L$.

За условные положительные направления линейных токов \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C примем направления от источника к нагрузке, а за положительное направление тока в центральном проводе – от нагрузки к источнику.

Согласно первому правилу Кирхгофа, ток в нейтральном проводе равен

$$\dot{I}_{000} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

При симметричной нагрузке напряжения $\dot{U}_a = \dot{U}_b = \dot{U}_c$ и сопротивления $Z_a = Z_b = Z_c$, поэтому токи в фазах приемника равны по значению и сдвинуты по фазе на один и тот же угол относительно соответствующих напряжений, т. е. на угол $\Phi_a \approx \Phi_b \approx \Phi_c \approx \varphi$.

Векторная диаграмма напряжений и токов для симметричной нагрузки представлена на рисунок 7.5, б. Из диаграммы видно, что ток в нейтральном проводе равен нулю: $I_A + I_B + I_C = 0$. Таким образом если нагрузка симметричная (равномерная), то необходимость в нейтральном проводе отпадает. Трехфазная цепь без нейтрального провода является трехпроводной цепью.

Рассмотрим четырехпроводную цепь более подробно. Найдем для этой цепи напряжение между нейтральными точками θ и θ' при смещении пейтрана по методу двух узлов

$$U_{\text{обр}} = \frac{\dot{U}_A Y_a + \dot{U}_B Y_b + \dot{U}_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_{\text{обр}}} \quad (7.7)$$

где

$$\dot{U}_A = U_A; \quad \dot{U}_B = U_B e^{j2\pi/3}; \quad \dot{U}_C = U_C e^{-j2\pi/3} \quad - \text{комплексные проекции}$$

$$Y_a = \frac{I}{Z_a}; \quad Y_b = \frac{I}{Z_b}; \quad Y_c = \frac{I}{Z_c} \quad - \text{коэффициенты проводимости фаз приемника}$$

$$Y_{\text{обр}} = \frac{I}{Z_{\text{обр}}} \quad - \text{комплексная проводимость нейтрального провода}$$

Так как при симметричной нагрузке $Y_a = Y_b = Y_c = Y$, то (7.7) можно переписать в виде

$$U_{\text{обр}} = \frac{Y_a (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)}{3Y + Y_{\text{обр}}} \quad (7.8)$$

Для случая симметричной нагрузки имеем: $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$, а значит $\dot{U}_{\text{обр}} = 0$. Так как ток в нейтральном проводе $I_{\text{обр}} = \frac{U_{\text{обр}}}{Z_{\text{обр}}}$, то при симметричной нагрузке $I_{\text{обр}} = 0$.

Согласно второму правилу Кирхгофа, для контуров (рисунок 7.5, а) $OAbO' O, Obb' O' O, OcC' O' O$ находим

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{\text{обр}}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{\text{обр}}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{\text{обр}} \quad (7.9)$$

Так как, при симметричной нагрузке $\dot{U}_{\text{обр}} = 0$, то из (7.9) следует, что $\dot{U}_a = \dot{U}_A; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C$.

Итак, зная фазные напряжения и сопротивления нагрузки, находим токи в каждой фазе приемника

$$I_a = \frac{U_A}{Z_a}; \quad I_b = \frac{U_B}{Z_b}; \quad I_c = \frac{U_C}{Z_c} \quad (7.10)$$

Так как при симметричной нагрузке токи в фазах приемника равны, то достаточно определить ток только в одной из фаз трехфазной цепи.

Рассмотрим трехфазную цепь с несимметричным приемником, соединенным звездой, т. е. для которого $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$. В этом случае для анализа применимы четырехпроводные цепи. Так как напряжения на фазах приемника различны, то нарушается соотношение между фазовыми и линейными напряжениями $U_A = \sqrt{3}U_\phi$, причем на одних фазах приемника напряжение становится большим, а на других – меньшим чем $\frac{U_\phi}{\sqrt{3}}$.

Наличие нейтрального провода в цепи с несимметричным приемником позволяет выравнивать напряжение на фазах приемника и поддерживать их постоянными, равными фазовым напряжениям источника $\frac{U_\phi}{\sqrt{3}}$, т. е. нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника. Иначе говоря, при наличии нейтрального провода, когда $Z_{\text{обр}} \neq 0$, даже при несимметричном приемнике фазовые напряжения равны друг другу и соблюдается соотношение между фазовыми и линейными напряжениями $U_A = \sqrt{3}U_\phi$.

Если сопротивление приемника несимметричны и нейтральный провод имеет конечное сопротивление $Z_{\text{обр}}$, то напряжение $\dot{U}_{\text{обр}}$ между нейтральными точками θ и θ' определяется по формуле (7.7), а напряжения на фазах нагрузки – по формулам (7.9). Тогда токи в элементах рисунка 7.5, а записываются как:

$$I_a = \frac{U_A}{Z_a} = (U_A - U_{\text{обр}}) Y_a; \quad I_b = \frac{U_B}{Z_b} = (U_B - U_{\text{обр}}) Y_b; \quad I_c = \frac{U_C}{Z_c} = (U_C - U_{\text{обр}}) Y_c$$

$$I_{\text{обр}} = \frac{U_{\text{обр}}}{Z_{\text{обр}}} = (U_A - U_{\text{обр}}) Y_{\text{обр}}; \quad I_{\text{обр}} = \frac{U_{\text{обр}}}{Z_{\text{обр}}} = U_{\text{обр}} Y_{\text{обр}} = I_a + I_b + I_c$$

Если напряжения источника $U_A; U_B; U_C$ образуют симметричную систему, то при отсутствии нейтрального провода и при $U_{\text{обр}} \neq 0$ напряжения на фазе нагрузки $\dot{U}_A; \dot{U}_B; \dot{U}_C$ несимметричны, что видно из векторной диаграммы, приведенной на рисунке 7.6. Особенностью

этой диаграммы является то, что каждой точке электрической цепи $A; B; C; \theta; \theta'$ соответствует определенная точка на диаграмме.

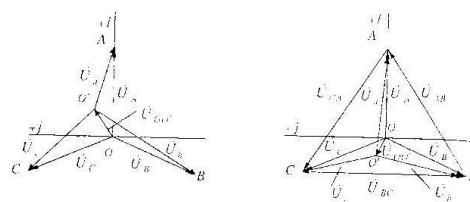


Рисунок 7.6 – Векторные диаграммы напряжений и токов несимметричного приемника, соединенного звездой

Напряжения на фазах нагрузки тем больше отличаются друг от друга, чем больше напряжение $U_{\theta\theta'}$. Из выражения (7.7) и рисунка 7.6 видно, что напряжение между нейтральными точками $U_{\theta\theta'}$ будет изменяться при изменении нагрузки в любой фазе, при этом с изменением $U_{\theta\theta'}$ будет изменяться напряжение всех фаз приемника.

Чтобы напряжения на фазах приемника были одинаковыми, необходимо чтобы $U_{\theta\theta'} = 0$, что может быть получено двумя способами: Во-первых, выравниванием сопротивления в фазах приемника, т. е. чтобы $Y_A = Y_B = Y_C = Y_\phi$, а значит, согласно (7.7),

$$U_{\theta\theta'} = \frac{U_A Y_A + U_B Y_B + U_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_{\theta\theta'}} - \frac{Y_\phi (U_A + U_B + U_C)}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_{\theta\theta'}} = 0,$$

так как $U_A + U_B + U_C = 0$.

Во-вторых, если имеется нейтральный провод с сопротивлением $Z_{\theta\theta'} = 0$, то напряжение $U_{\theta\theta'}$ согласно (7.7), также принимает нулевое значение независимо от нагрузки фаз. Для этого случая построена векторная диаграмма (рисунок 7.7).

При обрыве нейтрального провода к несимметричной нагрузке напряжение $U_{\theta\theta'}$ станет максимальным. В фазах нагрузки могут возникнуть перенапряжения, поэтому в нейтральный провод плавкий предохранитель не ставят.

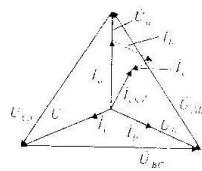


Рисунок 7.7 – Векторная диаграмма напряжений и токов несимметричного приемника, соединенного звездой при $Z_{\theta\theta'} = 0$

Рассмотрим трёхфазную цепь при соединении симметричных приемников треугольником (рисунок 7.8).

Если учесть сопротивление линейных проводов, то потенциалы вершин этого треугольника будут отличаться от потенциалов зажимов источника, поэтому зажимы трёхфазного приемника обозначены a, b, c . Из схемы рисунка 7.8 видно, что каждая фаза приемника непосредственно подключена на линейное напряжение, т. е.

$$U_\phi = U_{\phi\phi} \quad (7.11)$$

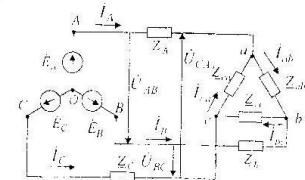


Рисунок 7.8 – Схема трехпроводной трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

Однако, при соединении треугольником, в отличие от соединения звездой фазные и линейные токи не равны между собой. У приемников условно принятые положительные направления линейных напряжений совпадают с условными положительными направлениями

фазных токов. Применяя первое правило Кирхгофа к узловым точкам a, b, c , определяем линейные токи:

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}; \quad I_b = I_{ba} - I_{ac}; \quad I_c = I_{ca} - I_{ab}, \quad (7.12)$$

где I_a, I_b, I_c – линейные токи;

I_{ab}, I_{ca}, I_{ba} – фазные токи.

Из (7.12) следует, что значения линейных токов I_a, I_b, I_c равны геометрической разности векторов соответствующих фазных токов.

Зная сопротивление фаз приемника, можно определить фазные токи по формулам:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}; \quad I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}; \quad I_{ba} = \frac{U_{ba}}{Z_{ba}} \quad (7.13)$$

Из уравнения (7.12) следует, что геометрическая сумма векторов линейных токов в трехпроводной цепи равна нулю:

$$I_a + I_b + I_c = 0.$$

Так как при симметричной нагрузке комплексы полных сопротивлений фаз $Z_{ab} = Z_{ca} = Z_{ba}$ и значения напряжений $U_{ab} = U_{ca} = U_{ba}$ равны, то также равны между собой фазные токи и углы сдвига их фаз по отношению к соответствующим фазным напряжениям:

$$I_{ab} = I_{ca} = I_{ba}; \quad \phi_{ab} = \phi_{ca} = \phi_{ba} = \phi.$$

На рисунке 7.9 изображена векторная диаграмма токов и напряжений при симметричной нагрузке, соединенной треугольником. Из векторной диаграммы видно, что фазные токи сдвинуты относительно друг друга на угол $\frac{2\pi}{3}$ и что линейные токи отстают от соответствующих фазных токов на угол $\frac{\pi}{6}$. Находим соотношение между линейным I_a и фазным I_{ab} токами: $I_a = 2I_{ab} \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{ab}$. Такое же соотношение будет между другими линейными и фазными токами. При симметричной нагрузке линейные токи в $\sqrt{3}$ раз больше фазных токов $I_a = \sqrt{3}I_{ab}$.

Если нагрузка симметрична, то обычно расчет проводят по одной фазе:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}; \quad I_{ba} = I_{ab} e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \quad I_{ca} = I_{ab} e^{j\frac{2\pi}{3}}; \quad I_a = \sqrt{3}I_{ab}.$$

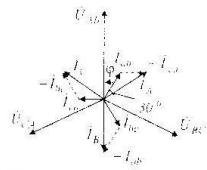


Рисунок 7.9 – Векторная диаграмма токов и напряжений при симметричной нагрузке, соединенной треугольником

Несимметричной нагрузке в общем случае считают, когда сопротивление фаз $Z_{ab} \neq Z_{ca} \neq Z_{ba}$. Однако нагрузка несимметрична и в том случае, когда сопротивление хотя бы одной из фаз не равно сопротивлениям других фаз. При несимметричной нагрузке фазные токи, углы сдвига фаз между фазными токами и напряжениями, а также линейные токи различные. При этом фазные токи определяют, как и при симметричной нагрузке, по формулам (7.13), а линейные токи по формулям (7.12).

Линейные токи можно определить и графическим способом, построив векторную диаграмму напряжений и токов (рисунок 7.10). Построение векторов линейных токов на диаграмме производится в соответствии с выражениями (7.12).

Необходимо отметить, что, согласно (7.12), геометрическая сумма векторов линейных токов в трехфазной цепи при несимметричной нагрузке, соединенных треугольником, также как и при симметричной нагрузке, равна нулю.

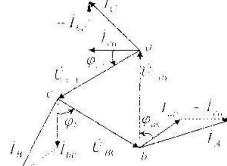


Рисунок 7.10 – Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов при нагрузке соединенной треугольником

Если пренебречь сопротивлением линейных проводов, то напряжения фаз приемника будут равны напряжениям источника. В этом случае фазы приемника независимы друг от друга, т. е. изменение сопротивления в какой-либо одной фазе приемника вызывает изменение тока этой фазы и токов в двух линейных проводах, соединенных с этой фазой, но никак не отражается на токах других фаз. Если же со противления линейных проводов не равны нулю, то из-за падения напряжения в них при соединении треугольником не обеспечивается независимость фаз. Например, изменение сопротивления фазы *ab* зато же изменение фазного тока I_{ab} , а, следовательно, и линейных токов \bar{I}_a и \bar{I}_b . При этом происходит падение напряжения в линейных проводах *A* и *B*, что при измеренных линейных напряжениях на зажимах генератора вызывает изменение напряжений на всех трех фазах приемника, так как потенциалы узлов *a* и *b* изменяются, то изменяются также токи I_a и \bar{I}_a в тех фазах, сопротивление которых осталось неизменным. Следует отметить, что при расчетах трехфазных цепей считают, что генераторы имеют симметричную систему напряжений.

Несимметричные нагрузки практически не влияют на систему напряжений фаз генератора в том случае, если мощность нагрузки очень мала по сравнению с мощностью генераторов (или сети электроснабжения), т. е. тогда, когда рассматривается система с источником бесконечно большой мощности.

Трехфазную цепь можно рассматривать как цепь однофазного синусoidalного тока, с тремя источниками энергии, поэтому комплекс полной мощности трехфазной цепи можно записать в виде

$$\tilde{S} = \tilde{U}_A \tilde{I}_A^* + \tilde{U}_B \tilde{I}_B^* + \tilde{U}_C \tilde{I}_C^* = P + jQ, \quad (7.14)$$

где P – активная мощность трехфазной цепи

$$P = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C = P_A + P_B + P_C, \quad (7.15)$$

а Q – реактивная мощность трехфазной цепи

$$Q = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C = Q_A + Q_B + Q_C. \quad (7.16)$$

По формулам (7.15) и (7.16) можно подсчитать мощность в трехфазной цепи при несимметричной нагрузке, соединенной звездой.

Активная и реактивная мощности при симметричной нагрузке

$$P = 3P_p = 3I_p U_m \cos \varphi_p; Q = 3Q_w = 3I_p U_m \sin \varphi_p.$$

Полная мощность при симметричной нагрузке

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3\sqrt{\tilde{P}_p^2 + \tilde{Q}_w^2} = 3S_p = 3U_p I_p,$$

Обычно в качестве паспортных линий для трехфазных приемников приводят линейные напряжения и токи. Поэтому мощности трех фазовых приемников целесообразно выражать через линейные напряжения и токи. Обычно при таком условии индекс «*p*» у линейного напряжения и тока не указывают.

Так как при соединении симметричной нагрузки треугольником $U_p = U_{eq} = U$ и $I_p = \frac{I}{\sqrt{3}} = \frac{I}{\sqrt{3}}$, а при соединении симметричной нагрузки звездой $U_{eq} = \frac{U_p}{\sqrt{3}} = \frac{U}{\sqrt{3}}$ и $I_p = I_p = I$, то независимо от схемы соединения звездой или треугольником произведение $U_p I_p = \frac{U}{\sqrt{3}}$ оказывается одинаковым. Таким образом, независимо от схемы соединения симметричной нагрузки имеем место следующие выражения для мощностей:

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi; Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi; S = \sqrt{3} UI.$$

Индекс «*ф*» у угла сдвига фаз φ между фазным напряжением и током также опускают.

Для измерения активной мощности трехфазной системы в общем случае (неравномерная нагрузка и наличие нулевого провода) необходимо включить три ваттметра (рисунок 7.11). Активная мощность всей системы равна сумме показаний трех ваттметров.

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C.$$

В случае трехпроводной системы, если нулевой провод отсутствует, то измерение мощности можно производить двумя ваттметрами (рисунок 7.12). Сумма показаний двух ваттметров при этом определяет активную мощность всей системы независимо от того, звездой или треугольником соединена нагрузка (треугольник нагрузки всегда может быть преобразован в эквивалентную звезду).

Показание первого ваттметра равно $P_1 = \text{Re}(U_{eq} \bar{I}_A)$, второго – $P_2 = \text{Re}(\bar{U}_{eq} \bar{I}_B)$, но

$$\begin{aligned} \text{Re}(\bar{U}_{eq} \bar{I}_A) &\neq \text{Re}(\bar{U}_{eq} \bar{I}_B) = \text{Re}((\bar{U}_A + \bar{U}_B) \bar{I}_A) = \text{Re}(\bar{U}_A \bar{I}_A + \bar{U}_B \bar{I}_A) = \\ &= \text{Re}(\bar{U}_A \bar{I}_A + \bar{U}_B \bar{I}_A + \bar{U}_C \bar{I}_A), \\ \text{так как } \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C &= 0. \end{aligned}$$

При равномерной нагрузке фаз достаточно измерить мощность одной фазы и результат умножить на три.

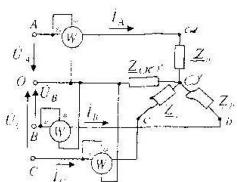


Рисунок 7.11 – Измерение активной мощности трехфазной системы тремя ваттметрами

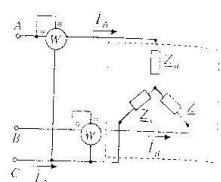


Рисунок 7.12 – Измерение активной мощности трехфазной системы звездой ваттметрами

Лабораторная работа 8

Цель работы: изучить основные способы соединения трехфазных цепей; установить экспериментально взаимосвязь между линейными и фазовыми напряжениями и токами при соединении трехфазных приемников звездой.

Материалы и обо рудование: генератор трехфазного напряжения (ГТН), цифровой мультиметр DF-58, осциллограф С1-101, панель монтажная, набор резисторов, набор катушек индуктивностей, набор проволов со штекерами.

Ход работы

1 Настроить генератор трехфазного напряжения ГТН с помощью осциллографа на частоту, заданную преподавателем из таблицы 7.1.

Таблица 7.1 – Значения ячайстоты

№ подгруппы	1			2			3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
№ бригады	1	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5
f , кГц									9

106

2 Собрать на монтажной панели лабораторного стенда схему трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой (рисунка 7.13) и подключить ее проводниками к клеммам ГТН.

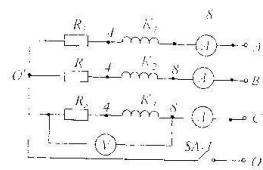


Рисунок 7.13 – Схема для исследования трехфазной цепи

для случая соединения фаз нагрузки звездой:
SA-1 – тумблер; А – тестер; K_1, K_2, K_3 – катушки индуктивности;
 R_1 – резистор 680 Ом/100 Ом; R_2 – резистор 680 Ом/2.2 кОм;
 R_3 – резистор 680 Ом/10 кОм

3 Для симметричной нагрузки, соединенной звездой, измерить и записать линейные и фазовые напряжения и токи на каждой из фаз:
а) без нулевого провода;
б) с нулевым проводом.

4 Для несимметричной нагрузки, соединенной звездой, измерить и записать линейные и фазовые напряжения и токи на каждой из фаз нагрузки. Измерять и записывать напряжения на катушках индуктивности U_R и на резисторах U_R в каждой фазе:
а) без нулевого провода;
б) с нулевым проводом.

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) название и цель работы;
- 3) схему трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой;
- 4) результаты измерений линейных и фазовых напряжений и токов для симметричной нагрузки, соединенной звездой; соотношения между линейными и фазовыми величинами, найденными по

107

результатам измерений; результаты вычисленных значений следующих величин:

$$P_{\phi} = I_{\phi}^2 \cdot R_{\phi}; \cos \varphi_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{S_{\phi}}; Q = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi.$$

$$P = 3P_{\phi}; Q = 3Q_{\phi}; S = 3S_{\phi}; S_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi};$$

построенную векторную диаграмму;

5) результаты измерений линейных и фазовых напряжений и токов для несимметричной нагрузки, соединенной звездой без нулевого провода и с нулевым проводом; соотношения между линейными и фазовыми величинами, найденными по результатам измерений; результаты вычисленных значений следующих величин:

$$U_{\phi}, U_{\phi-2}, U_{\phi-3}, U_{\phi-4}, U_{\phi-5}, U_{\phi-6}, I_{\phi}, I_{\phi-2}, I_{\phi-3},$$

построенную векторную диаграмму;

6) результаты расчета мощности и коэффициента мощности по следующим формулам:

$$R_{\phi\phi} = R_{\phi} + R_{\phi-2}; P_{\phi\phi} = I_{\phi}^2 R_{\phi\phi}; S_{\phi\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sqrt{R_{\phi\phi}}, \cos \varphi_{\phi\phi} = P_{\phi\phi} / S_{\phi\phi},$$

$$R_{\phi\phi} = R_{\phi} + R_{\phi-2}; P_{\phi\phi} = I_{\phi}^2 R_{\phi\phi}; S_{\phi\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sqrt{R_{\phi\phi}}, \cos \varphi_{\phi\phi} = P_{\phi\phi} / S_{\phi\phi},$$

$$R_{\phi\phi} = R_{\phi} + R_{\phi-2}; P_{\phi\phi} = I_{\phi}^2 R_{\phi\phi}; S_{\phi\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sqrt{R_{\phi\phi}}, \cos \varphi_{\phi\phi} = P_{\phi\phi} / S_{\phi\phi},$$

$$P = P_{\phi\phi} + P_{\phi\phi-2} + P_{\phi\phi-3}; S = S_{\phi\phi} + S_{\phi\phi-2} + S_{\phi\phi-3}; Q = \sqrt{S^2 - P^2};$$

7) выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение многофазной системы ЭДС?
2. Что представляет собой трехфазная цепь?
3. Как обозначается трехфазный генератор на схеме?
4. Что такое нулевая точка генератора (нагрузки)?
5. Какой провод в четырехпроводной системе называется нулевым (нейтральным)?
6. Что понимается под фазой генератора (нагрузки)?
7. В чем разница между фазами ЭДС и фазовыми напряжениями?
8. Дайте определение фазовых и линейных напряжений и токов.

9. Что представляет собой соединение фаз генератора (приемника) в звезду, какие соотношения между линейными и фазовыми величинами для этого способа соединения?

10. Что представляет собой соединение фаз генератора (приемника) в треугольник? Какие соотношения между линейными и фазовыми величинами для этого способа соединения?

11. Чем обусловлено широкое применение трехфазных систем в промышленности?

12. Перечислите известные вам способы соединения трехфазного генератора и приемника между собой.

13. К чему приводят обрыв или отсутствие нейтрального провода при несимметричной нагрузке фаз?

14. Как рассчитываются трехфазные цепи «звезда-звезда» для случая симметричной нагрузки?

15. Как рассчитываются трехфазные цепи «звезда-звезда» для случая несимметричной нагрузки?

16. Как рассчитываются трехфазные цепи «звезда-треугольник» для случая несимметричной нагрузки?

17. Как рассчитывается активная, реактивная и полная мощность трехфазной цепи?

18. Что такое коэффициент мощности, и какую роль он играет в электроэнергетике?

19. Как и для чего строятся векторные и легендарные (топографические) диаграммы?

Лабораторная работа 9

Цель работы: изучить основные способы соединения трехфазных цепей; установить экспериментальную взаимосвязь между линейными и фазовыми напряжениями и токами при соединении трехфазных приемников треугольником.

Материалы и оборудование: генератор трехфазного напряжения (ГТН), цифровой мультиметр DFL-58, осциллограф С1-101, панель монтажная, набор резисторов, набор катушек индуктивностей, набор проводов со штекерами

Ход работы

1. Настроить генератор трехфазного напряжения ГТН с помощью осциллографа на частоту, заданную преподавателем из таблицы 7.2.

Таблица 7.2 – Значения частоты

№ подгруппы	1	2	3	4	5	6	7		
№ образцов	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$f_s, \text{ кГц}$	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9

2 Собрать на монтажной панели лабораторного стенда схему трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником (рисунок 7.14) и подключить ее проводниками к клеммам ГТН. Проверить соответствие частоты генератора значению частоты вашего варианта.

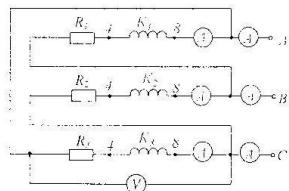


Рисунок 7.14 – Схема для исследования трехфазной цепи

для случая соединения фаз нагрузки треугольником:

A – тестер; K_2 ; K_1 ; K_0 – катушки индуктивности;

R_2 – резистор 680 Ом/100 Ом/2; R_1 – резистор 680 Ом/2,2 кОм/2;

R_0 – резистор 680 Ом/10 кОм/2.

3 Для симметричной нагрузки, соединенной треугольником, измерить и записать линейные и фазовые напряжения и токи на каждой фазе нагрузки.

4 Для несимметричной нагрузки, соединенной треугольником, измерить и записать линейные и фазовые напряжения и токи, напряжение на катушках индуктивности U_k и на резисторах U_R в каждой фазе.

5 В обесточенной цепи измерять и записывать активные сопротивления R_k в каждой из катушек индуктивностей.

Правила оформления отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

1) титульный лист;

2) название и цель работы;

3) схему трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником;

4) результаты измерений линейных и фазовых величин для симметричной нагрузки, соединенной треугольником; соотношения между линейными и фазовыми величинами; результаты вычисленных значений следующих величин:

$$P_p = U_p \cdot R_p \cdot \cos \varphi_p = \frac{P_{\phi}}{S_{\phi}}; Q = U_p I_p \sin \varphi_p;$$

$$P = 3P_p; Q = 3Q_p; S = 3S_p; S_p = U_p I_p;$$

построенную векторную диаграмму.

5) результаты измерений линейных и фазовых напряжений и токов для несимметричной нагрузки, соединенной треугольником; соотношения между линейными и фазовыми величинами; результаты вычисленных значений следующих величин:

$$Y_{\phi\phi} = Y_{\phi\alpha} + Y_{\phi\beta}; U_{\phi\phi} = U_{\phi\alpha} + U_{\phi\beta}; U_{\phi\alpha} = U_{\phi\phi} I_{\phi\alpha}; U_{\phi\beta} = U_{\phi\phi} I_{\phi\beta};$$

построенную векторную диаграмму.

6) результаты расчета мощности и коэффициента мощности по следующим формулам:

$$R_{\phi\phi} = R_\phi + R_{\phi\alpha} + R_{\phi\beta}; S_{\phi\phi} = U_{\phi\phi} I_{\phi\phi}; S_{\phi\alpha} = U_{\phi\alpha} I_{\phi\alpha}; \cos \varphi_{\phi\alpha} = P_{\phi\alpha} / S_{\phi\alpha};$$

$$R_{\phi\beta} = R_\phi + R_{\phi\alpha} + R_{\phi\beta}; P_{\phi\beta} = I_{\phi\beta}^2 R_{\phi\beta}; S_{\phi\beta} = U_{\phi\beta} I_{\phi\beta}; \cos \varphi_{\phi\beta} = P_{\phi\beta} / S_{\phi\beta};$$

$$R_{\phi\alpha} = R_\phi + R_{\phi\beta}; P_{\phi\alpha} = I_{\phi\alpha}^2 R_{\phi\alpha}; S_{\phi\alpha} = U_{\phi\alpha} I_{\phi\alpha}; \cos \varphi_{\phi\alpha} = P_{\phi\alpha} / S_{\phi\alpha};$$

$$P = P_{\phi\phi} + P_{\phi\beta} + P_{\phi\alpha}; S = S_{\phi\phi} + S_{\phi\beta} + S_{\phi\alpha}; Q = \sqrt{S^2 - P^2};$$

7) выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение многофазной системы ЭДС.

2. Что представляет собой трехфазная цепь?

3. Как обозначается трехфазный генератор на схеме?

4. Что понимается под фазой генератора (нагрузки)?
 5. В чем разница между фазами ЭДС и фазными напряжениями?
 6. Дайте определение фазных и линейных напряжений и токов.
 7. Что представляет собой соединение фаз генератора (приемника) в треугольник? Каковы соотношения между линейными и фазовыми величинами для этого способа соединения?
 8. Чем обусловлено широкое применение трехфазных систем в промышленности?
 9. Перепишите известные вам способы соединения трехфазного генератора и приемника между собой.
 10. Как рассчитываются трехфазные цепи «звезда-треугольник» для случая несимметричной нагрузки?
 11. Как рассчитывается активная, реактивная и полная мощность трехфазной цепи?
 12. Что такое коэффициент мощности и какую роль он играет в электроэнергетике?
 13. Как и для чего строятся векторные и потенциальные (графические) диаграммы?

Приложение А (обязательное)

Описание универсального лабораторного стендса

Универсальный лабораторный стенд предназначен для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Теория электрических цепей». В состав лабораторного стендса входит блок питания, генератор трехфазного напряжения, генератор сигналов, набор элементов. Для выполнения лабораторных работ используются цифровые мультиметры типа DT-58, осциллограф универсальный типа С1-101, двухлучевой осциллограф.

Краткие сведения по приборам, входящим в состав стендса

Блок питания стендса. Блок обеспечивает напряжение и ток, указанные в таблице А1.

Таблица А1 – Выходные параметры блока питания

Выходное напряжение, В	Максимально допустимый ток, А	Предел регулирования напряжения, В
5	0.5	Нерегулируемое
+15	0.1	от 5 до 20
-15	0.1	от 5 до 20
+8	0.1	Нерегулируемое
-24	0.1	Нерегулируемое

Включение БП осуществляется тумблером «СЕТЬ ВКЛ.». Контроль постоянных напряжений осуществляется вольтметром, путем его подключения к каждому из выходов «+5 В», «+15 В», «-15 В» переключателем «СТАБ. НАПРЯЖЕНИЯ». Плавная регулировка напряжений выходов «+15 В» и «-15 В» осуществляется переменными резисторами «ПЛАВНАЯ РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЙ».

Генератор трехфазного напряжения (ГТН). Генератор обеспечивает амплитуду выходного напряжения каждой фазы не более 8 В. Диапазон частоты ГТН от 5 кГц до 10 кГц регулируется переменным резистором «ЧАСТОТА, кГц». Включается генератор тумблером «ВКЛ» после включения БП.

Генератор сигналов (ГС). Генератор обеспечивает выходные сигналы следующей формы:

- прямоугольной 
- либообразной 

112

113

- треугольной «»;
- синусоидальной «».

Частота сигналов синусоидальной формы регулируется в пределах от 20 Гц до 20 000 Гц с помощью переключателя «ЧАСТОТА Н». Частота сигнала инвейрной формы в два раза выше. Форма сигналов изменяется переключателем «ФОРМА СИГНАЛА». Плавное и ступенчатое регулирование амплитуды сигналов осуществляется до 5 В на нагрузке 4 кОм переключателем «ВЫХ. НАПРЯЖЕНИЕ, V» и переменным резистором «ГЛАВНО». Включение ТС осуществляется тумблером «ВКЛ» после включения блока питания (БП).

Описание принципа работы. Для выполнения необходимой лабораторной работы на монтажной плате собирается схема с помощью элементов лабораторного набора и измерительных приборов. Электрические соединения элементов схемы, электрических приборов и подключение схемы к гнездам осуществляется с помощью проводов и перемычек. С блока питания получаются необходимые напряжения питания для проведения лабораторной работы:

Дигитовый мультиметр типа DT-58

Прибор предназначен для измерения напряжения при постоянном и переменном токе, переменного и постоянного тока, сопротивления.

Измерение напряжения при постоянном и переменном токе

- 1 Установите переключатель диапазонов функций в требуемую позицию.
- 2 Подключите черный тестирующий провод к терминалу «СОМ», а красный провод к входному терминалу «V/ОНМ».
- 3 Подключите провода к измеряемым точкам и считайте с дисплея показания. Полярность красного провода будет показана в то же время, что и напряжение.

Примечание:

- 1 Если напряжение неизвестно заранее, установите переключатель функций в плавающей позиции и продолжайте работу.
- 2 Когда на дисплее появляется только цифра «+», это означает превышение напряжения и нужно установить переключатель на более высокий диапазон.

Измерение переменного и постоянного тока

- 1 Подключите черный провод к терминалу «СОМ», а красный к терминалу «A», $I_{\text{вх}} = 0,5 \text{ A}$ (DT 5801-3A).
- 2 Установите переключатель диапазона функций в нужную позицию.
- 3 Подключите провода к измерительным точкам и считайте показания с дисплея. Полярность на красном проводе будет определена в одно время с величиной тока.

Примечание:

- 1 Если величина тока величина заранее, установите переключатель на самый высокий диапазон и нажмите на него.

2 Когда значение покажется правильным, то это означает превышение текущего диапазона и нужно установить переключатель на более высокий диапазон.

3 Максимальное значение 10 А постоянного тока и максимальное значение 20 А переменного тока, когда было измерено значение не более 15 с.

Измерение сопротивления

- 1 Подключите черный тестирующий провод к терминалу «СОМ» и красный тестирующий провод к «V/ОНМ» выходному терминалу.

2 Установите переключатель функций в положение ОНМ.

- 3 Подключите тестирующие провода к измеряемому сопротивлению и считайте с дисплея показания.

Напоминание:

- 1 Полностью красного тестирующего провода «+».

2 Когда измерение не подключено, т. е. цепь разомкнута, на дисплее появляется цифра «1», как и для установки более высокой величины.

3 Если величина измеренного сопротивления превышает максимальную величину избранных диапазонов, то дисплее появляется цифра «1» и нужно установить переключатель функций на более высокий диапазон.

Осциллограф универсальный

Перед включением осциллографа изучите его техническое описание и правила работы с ним.

Процедуре измерений с помощью осциллографа

Принцип 1. Предположим, что размах вертикального отклонения составляет 5,6 деления. Используя делитель 1:10, переключатель «УДЕЛ» установлен в положение «0,5» (рисунок А 1).

Напряжение амплитуды составляет: $5,6 \text{ дел} \times 0,5 \text{ В/дел} \times 10 = 28 \text{ В}$.

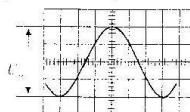


Рисунок А 1 – Измерение полного размаха переменного напряжения (максимум расположжен на градуированной вертикальной линии)

Для измерения мгновенного значения сигнала с постоянной составляющей выполните следующие операции

- а) поставьте переключатель «ВНУТР. ВНЕШН» в положение «ВНУТР»;

б) расположите линию развертки ниже средней линии сетки или другой контрольной линии. Если напряжение отрицательно относительно «ЗЕМЛИ», переместите доч к верхней линии шкалы. Не следует перемещать ручку « \downarrow » после установки контрольной линии;

в) подайте сигнал на входной разъем «+ 1MΩ40pF»;

г) установите переключателем «УДЕЛ» импульс равный по амплитуде 3-5 делений шкалы;

Примечание – Для измерения уровня напряжения относительно другого напряжения, а не корпуса, проделайте следующее.

1) установите переключатель « \downarrow » в положение « \downarrow », подайте вторичное напряжение на разъем «- 1MΩ40pF» усилителя и расположите линию развертки на контрольной линии;

2) установите ручкой «УРОВЕНЬ» стойчивое изображение. Переключатель «ПРЕМЯДЕЛ» установлен в положение, при котором на экране наблюдается несколько периодов исследуемого сигнала;

3) определите расстояние в делениях между контрольной линией и точкой на линии сигнала, в которой можно измерить напряжение. Например, измерение производится между контрольной линией и точкой 4 на рисунке 2;

4) умножьте полученный размер в делениях на коэффициент отклонения. Следует также учитывать коэффициент ослабления высокого напряжения, если он используется.

Пример 2. Допустим, что измеренное расстояние составляет 3 деления (рисунок А 2), сигнал положительной полярности (изображение находится выше контрольной линии). Переключатель «УДЕЛ» находится в положении « \downarrow ». При измерении используется делитель напряжения 1:10. Измеренное многочленное значение напряжения будет: $2 \cdot 3 \cdot 10 = 60 \text{ В}$.

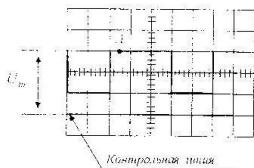


Рисунок А 2 – Измерение переменного напряжения с постоянной составляющей

Для измерения длительности сигнала между двумя его точками произведите следующие операции:

а) подайте исследуемый сигнал на гнездо «+ 1MΩ40pF»;

б) установите переключатель «УДЕЛ» в такое положение, чтобы изображение на экране состояло из 3-5 делений по амплитуде;

116

в) установите переключатель «ВРЕМЯДЕЛ» в такое положение, при котором расстояние между измеряемыми точками будет меньше 8 делений;

г) установите ручкой «УРОВЕНЬ» устойчивое изображение на экране ОИС;

д) переместите ручкой « \downarrow » изображение так, чтобы точки, между которыми измеряется время, находились на горизонтальной линии;

е) установите ручкой « \rightarrow » изображение так, чтобы точки, между которыми измеряется время, находились в пределах восьми центральных делений сетки;

ж) измерьте горизонтальное расстояние между выбранными точками и умножьте измеренное расстояние на коэффициент развертки.

Пример 3. Допустим, что расстояние между измеренными точками А и В составляет 6 делений (рисунок А 3), а переключатель «ВРЕМЯДЕЛ» установлен в положение «0,2 мс». Время $t = 0,2 \text{ мс} \times 6 = 1,2 \text{ мс}$.

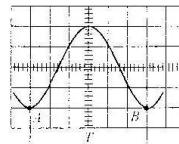


Рисунок А 3 – Измерение длительности и частоты

Для измерения частоты периодических сигналов пределайте следующее:

а) измерьте длительность времени (рисунок А 3) одного периода сигнала;

б) рассчитайте частоту сигнала f_1 по формуле: $f_1 = 1/T$,

где f_1 – частота, Гц;

T – длительность периода, с.

Пример 4. Частота сигнала с длительностью периода 1,2 мс будет равна:

$$f = 1/(1,2 \times 10^{-3} \text{ с}) = 833 \text{ Гц}$$

Измерение времени нарастания основано на том же методе, что и измерение длительности времени. Основная разница только в точках, между которыми производится измерение. Ниже приводится методика измерения времени нарастания между точками импульса на уровне 0,1 и 0,9.

117

Пример 5. С помощью осциллографа можно приблизенно измерить фазовый сдвиг между двумя синусоидальными сигналами. Для этого используется метод линейной развертки и метод эллипса.

Метод линейной развертки. Для проведения фазовых измерений этим методом необходим двухлучевой осциллограф. Подавая сигналы u_1 и u_{12} , сдвиг фаз между которыми необходимо измерить, на входы X_1 и X_2 выбирают частоту развертки такой, чтобы обеспечить удобное измерение по шкале осциллографа отрезков ab и ac (рисунок А 4, а). При этом обычно амплитуды сигналов подбираются одинаковыми. Тогда фазовый сдвиг ϕ в градусах определяется с помощью соотношения

$$\phi = \frac{ab}{ac} \cdot 360^\circ.$$

Метод эллипса. При подаче на входы X и Y (при отключенной развертке) двух напряжений u_1 и u_{12} , сдвинутых друг относительно друга на некоторый угол ϕ , на экране осциллографа появляется фигура Лиссажу в виде определенным образом ориентированного эллипса. Если центр эллипса совмещен с условным началом координат экрана, то фазовый сдвиг ϕ можно определить по формуле

$$\phi = \arcsin \frac{A}{B},$$

где A и B – измеряемые отрезки, показанные на рисунке А 4, б. Для удобства определения их длин коэффициенты усиления усилителей X и Y подбирают таким образом, чтобы эллипс вписался в квадрат. Рассмотренный метод эллипса позволяет лишь приближенно (с погрешностью $5-10\%$) оценить величину фазового сдвига без определения его знака.

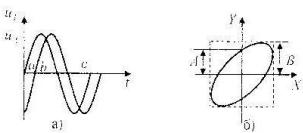


Рисунок А 4 – Измерение фазового сдвига с помощью двухлучевого осциллографа: а) метод линейной развертки; б) метод эллипса

Литература

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л. А. Бессонов – М. : 2006. – 701 с.

2. Атабеков, Г. И. Основы теории цепей: учебник для вузов / Г. И. Атабеков. – 2-е изд. – СПб. : 2006. – 592 с.

3. Капланский, А. Е. Теоретические основы электротехники: учебное пособие / А. Е. Капланский, А. Н. Лысенко, Л. С. Попотовский; под ред. А. Е. Капланского. – М. : 1972. – 448 с.

4. Багура, М. П. Теория электрических цепей: учебник / М. П. Батура, А. П. Кузнецов, А. П. Курулев; под ред. А. П. Курулева. – 2-е изд.– Мин. : 2007. – 606 с.

5. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 3 т. Т. 1: Теоретические основы электротехники / К. С. Демирчиан [и др]. – 4-е изд. – СПб. : 2004. – 576 с.

6. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 3 т. Т. 2 : Теоретические основы электротехники / К. С. Демирчиан [и др]. – 4-е изд. – СПб. : 2004. – 493 с.

Учебное заведение
Томский государственный университет
им. Франца-Иосифа Шварца"
БИБЛИОТЕКА

Учебное издание

БОГДАНОВИЧ Валентина Иосифовна
ЕГОРОВ Александр Иванович
МЫШКОВЕЦ Виктор Николаевич
ФЕДОСЕНКО Николай Николаевич

**ТЕОРИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие
для студентов учреждений, обеспечивающих получение
высшего образования по специальности
«Программное обеспечение информационных технологий»

Редактор *В. И. Шкредова*
Корректор *В. В. Калюша*

Подписано в печать 17.11.2011. Формат 60×84^{1/16}.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 7.0.
Уч.-изд. л. 7.6. Тираж 75. Заказ № 531.

7409 - 00

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»
ЛИ № 02330/0549481 от 14.05.2009.
Ул. Советская, 164, 246019, г. Гомель.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУИ