АНО ВО «РОССИЙСКИЙ НОВЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт информационных систем и инженерно-компьютерных технологий
Кафедра информационных технологий и естественно-научных дисциплин

Э.В. Кондратьева

ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ ОП 02. «ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

Учебно-методическое пособие

Основная профессиональная образовательная программа
по специальностям СПО

09.02.06. «Сетевое и системное администрирование»
10.02.05. «Обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем»
13.02.11 «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям)»

Москва
2025г.

УДК 621.3
ББК 31.2
К 642

Рецензент: Дьякова Елена Анатольевна – доктор педагогических наук, профессор кафедры математики и естественно-научных дисциплин ФГБОУ ВО «Армавирский государственный педагогический университет».

Кондратьева, Элеонора Владимировна
К 642 Практические работы по дисциплине ОП 02. «Основы электротехники». Учебно-методическое пособие для студентов СПО – М.: Мир науки, 2025. – Сетевое издание. Режим доступа: https://izd-mn.com/PDF/75MNNPU25.pdf – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-908044-37-0
DOI: 10.15862/75MNNPU25

В учебно-методическом пособии представлены методические рекомендации к проведению практических занятий с решением задач по дисциплине «Основы электротехники» (включены компоненты Модуля «Физика») в ПОУ. При решении задач по разделам общепрофессиональной дисциплины «Основы электротехника» применяются знания по дисциплине «Физика», изученной студентами ранее, то для организации самостоятельной работы обучаемых предлагаются дополнительные рекомендации и материалы, основанные на взаимосвязи дисциплин «Физика» и «Основы электротехники», которые позволяют актуализировать необходимые знания по физике. Пособие предназначено для обучающихся направлений подготовки: «Сетевое и системное администрирование»; «Обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем»; «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям)».

ISBN 978-5-908044-37-0

© Кондратьева Элеонора Владимировна
© ООО Издательство «Мир науки», 2025

Оглавление

Пояснительная записка....4
Перечень практических работ....6
Практическая работа №1. Электрическое поле....8
Практическая работа №2. Электрические цепи постоянного тока....11
Практическая работа №3. Законы Кирхгофа....16
Практическая работа№ 4. Электромагнетизм. Магнитное поле....20
Практическая работа № 5. Расчет электрических параметров трансформаторов....24
Практическая работа № 6. Расчёт трёхфазной электрической цепи....28
Практическая работа № 7. Расчет выпрямителя....33
Практическая работа № 8. «Расчет переходных процессов классическим методом в цепях первого и второго порядка»....41
Практическая работа № 9. «Погрешности измерений и средств измерений»....50
Практическая работа № 10. Расчет четырехполюсника....61
Список литературы....72

Пояснительная записка

Курс электротехники - дисциплины о техническом применении электрических и магнитных явлений – требует сочетания теории и расчетной практики. Изучение данной дисциплины направлено на формирование у студентов технических направлений подготовки профессиональных компетенций. Применение знаний, полученных при изучении естественно-научной дисциплины «Физика», позволяет обучающимся понять принцип действия технических устройств и технологические процессы, которые рассматриваются общепрофессиональной дисциплиной «Основы электротехники».

Цель практических работ по электротехнике:

- сформировать умений рассчитывать основные параметры и строить характеристики зависимостей величин для наиболее важных электротехнических аппаратов и машин и их составляющих на основе физических знаний;

- развить практические навыки расчета и анализа электрических цепей в соответствии с показаниями различных электроизмерительных приборов, расчета характерных электрических величин.

В образовательном процессе при изучении дисциплины ОП2. «Основы электротехники», наряду с теоретическим обучением. значительное место отводится практическим работам. Правильное сочетание теоретических знаний и практических расчетов обеспечивает высокое качество подготовки специалистов.

Учебно–методическое пособие представляет собой руководство по выполнению практических работ, составленное в соответствии с программой дисциплины «Основы электротехники» для основной профессиональной образовательной программы СПО.

Оно содержит краткие теоретические сведения по дисциплине «Физика», а также указания по решению задач по дисциплине «Основы электротехники» на основе знаний по физике. В каждом описании практической работы необходимое внимание уделено информации по дисциплине «Физика», которые необходимы при выполнении практических работ по «Основам электротехники».

1. Перечень образовательных результатов, заявленных в соответствии с требованиями актуализированных ФГОС СПО

Практические работы являются одним из важнейших компонентов учебного процесса. При выполнении практических работ преследуется три основные цели: возможность на практике убедиться в теоретических положениях; развитие творческого мышления (критическое осмысление результатов эксперимента); пробудить любознательность и воображение студента.

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен **уметь**:

– выбирать электрические, электронные приборы и электрооборудование;

– правильно эксплуатировать электрооборудование и механизмы передачи движения технологических машин и аппаратов;

– производить расчеты простых электрических цепей;

– рассчитывать параметры различных электрических цепей и схем;

– снимать показания и пользоваться электроизмерительными приборами и приспособлениями.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен **знать:**

- основные законы и понятия по Физике, которые описывают технологические процессы
– классификацию электронных приборов, их устройство и область применения;
– методы расчета и измерения основных параметров электрических цепей;
– основные законы электротехники;
– основы теории электрических машин, принцип работы типовых электрических устройств;
– параметры электрических схем и единицы их измерения;
– принципы составления простых электрических и электронных цепей;
– способы получения, передачи и использования электрической энергии;
– основы физических процессов в проводниках, полупроводниках и диэлектриках;
– характеристики и параметры электрических и магнитных полей; параметры различных электрических цепей.

Практические работы носят репродуктивный и частично-поисковый характер. При выполнении работ репродуктивного характера студенты пользуются подробными теоретическими материалами по дисциплине «Физика».

Выпускник, освоивший образовательную программу по дисциплине «Основы электротехники», должен обладать следующими профессиональными компетенциями, соответствующими основным видам деятельности для специальностей: «Сетевое и системное администрирование»; «Обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем»; «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям)».

Формируемые компоненты компетенций

ПК 1.1. Выполнять наладку, регулировку и проверку электрического и электромеханического оборудования;

ПК 1.2. Организовывать и выполнять техническое обслуживание и ремонт электрического и электромеханического оборудования;

ПК 1.3. Осуществлять диагностику и технический контроль при эксплуатации электрического и электромеханического оборудования;

ПК 2.1. Организовывать и выполнять работы по эксплуатации, обслуживанию и ремонту бытовой техники;

ПК 2.2. Осуществлять диагностику и контроль технического состояния бытовой техники;

ПК 2.3. Прогнозировать отказы, определять ресурсы, обнаруживать дефекты электробытовой техники.

ПК 4.1. Осуществлять наладку, регулировку и проверку сложного электрического и электромеханического оборудования с электронным управлением;

ПК 4.2. Организовывать и выполнять техническое обслуживание сложного электрического и электромеханического оборудования с электронным управлением;

ПК 4.3. Осуществлять испытания нового сложного электрического и электромеханического оборудования с электронным управлением.

Перечень практических работ

№ п/п	Тема практической работы	Количество часов	Формируемые умения и компетенции
1	Практическая работа 1 «Электрическое поле»	2	**Умения и владения:** 1) умениями решать физические задачи; 2) умениями применять полученные знания для объяснения условий протекания физических явлений в природе и для принятия практических решений в повседневной жизни; 3) собственной позицией по отношению к физической информации, получаемой из разных источников. **Компетенции:** **ПК-4.** способностью организовать и планировать физические исследования и способностью использовать полученные знания по физике в процессе учебной деятельности для решения профессиональных задач.
2	Практическая работа 2 «Электрические цепи постоянного тока»	2	
3	Практическая работа 3. «Законы Кирхгофа»	2	
4	Практическая работа 4 «Электромагнетизм. Магнитное поле»	2	
5	Практическая работа 5. «Расчет электрических параметров трансформаторов»	2	
6	Практическая работа 6. «Расчёт трёхфазной электрической цепи»	2	
7	Практическая работа 7. «Расчет выпрямителей»	2	
8	Практическая работа 8. «Расчет переходных процессов классическим методом в цепях первого и второго порядка»	2	
9	Практическая работа 9. «Погрешности измерений и средств измерений»	2	
10	Практическая работа 10. «Расчет четырехполюсника»	2	

Инструкция по решению задач

1. Прочитайте условие задачи.
2. Представьте процессы и явления, описанные в задаче.

3. Выделите основной вопрос задачи, заданные величины, опираясь на которые можно вести поиск решения.
4. Произведите краткую запись условия задачи с помощью принятых буквенных обозначений.
5. Выполните рисунок или чертёж к задаче, если это необходимо.
6. Определите, каким методом будет решаться задача, составьте план её решения.
7. Запишите основные уравнения, описывающие процессы, предложенные в задаче.
8. Найдите решение в общем виде, выразив искомые величины через заданные.
9. Проверьте правильность решения задачи, произведя действия над наименованиями величин.
10. Произведите вычисления с заданной степенью точности.
11. Произведите оценку реальности полученного решения. Запишите ответ.

Практическая работа №1. Электрическое поле

Теоретические сведения

Электрическое поле— особая форма материи, существующая вокруг ***тел или частиц***, обладающих ***электрическим зарядом***, а также в свободном виде в электромагнитных волнах.

Точечный заряд – заряженное тело, размер которого много меньше расстояния его возможного действия на другие тела.

Закон Кулона. Сила взаимодействия двух точечных неподвижных зарядов в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

$$F = k\,(|q1|\,|q2|)/r^2 \quad (1)$$

Для количественного определения электрического поля вводится силовая характеристика - напряженность электрического поля.

Напряженностью электрического поля называют векторную физическую величину, равную отношению силы, с которой поле действует на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку пространства, к величине этого заряда

Направление вектора напряженности совпадает в каждой точке пространства с направлением силы, действующей на положительный пробный заряд (рис.1).

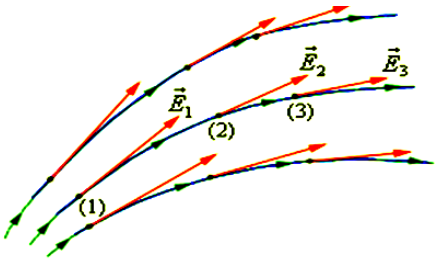


Рис.1.1.Направление вектора напряженности

Напряженность – силовая характеристика электрического поля

Если в точке *A* заряд ***q*> 0**, то векторы напряженности и силы направлены **в одну и ту же сторону** (рис. 1.2.)

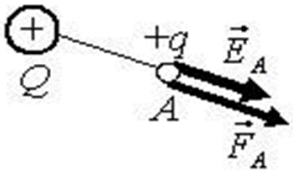


Рис.1.2. Направление векторов напряженности при q>0

при ***q*< 0** эти векторы направлены **в противоположные стороны** (рис.1.3.).

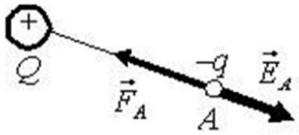


Рис.1.3 Направление векторов напряженности при q<0

Теоретический материал по данной теме рекомендуется изучить, используя следующие учебные пособия

Вопросы для самоконтроля:

1. Дайте определение электрического поля.
2. Что называется напряженностью электрического поля?
3. Какое действие электрического поля характеризует данная величина?
4. Что такое электрический потенциал? Что характеризует данная величина?
5. Что называется электрическим напряжением ? В каких единицах измеряется?
6. В чем заключается отличие проводников и диэлектриков?

Качественные задачи по теме «Электрическое поле»

1.Почему проводник, покрытый пылью, быстро теряет заряд?

2.При транспортировке жидких горючих материалов корпус автоцистерны заземляют. Почему не заземляют автоцистерны, в которых перевозят воду или цементный раствор?

3.Почему наблюдается искрение между шкивами и проводным ремнем? Как ликвидируют искрение?

4.Почему провода электрической сети прикрепляют к столбам при помощи фарфоровых держателей, а не прямо к металлическим крюкам?

5. Какой способ используется при устройстве электростатической защиты?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. С какой силой взаимодействуют два заряда по 10нКл находящиеся на расстоянии 3 см друг от друга?

Дано:	Си:
$q_1=q_2=q=10$ нКл	10^{-8} Кл
r=3 см	10^{-2} м

Найти: F

Решение:

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2} = 9\cdot 10^9 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}\cdot\frac{10^{-8}\text{Кл}\cdot 10^{-8}\text{Кл}}{\left(3\cdot 10^{-2}\text{м}\right)^2} =$$

$$= 10^{-3}\ \text{Н} = 1\ \text{мН}.$$

Задача 2. Найти напряженность поля заряда 36 нКл в точках, удаленных от заряда на 9 и 18 см.

Дано:

q=36 нКл = $3{,}6*10^{-8}$ Кл

r1=9 см = 0,09 м

r_2=18 см = 0,18 м

Найти E_1, E_2.

$$E_1 = k\frac{|q|}{r_1^2} = 9\cdot 10^9\,\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}\cdot\frac{3{,}6\cdot 10^{-8}\text{Кл}}{(0{,}09\ \text{м})^2} =$$

$$= 4\cdot 10^4\text{В/м} = 40\ \text{кВ/м}$$

$$E_2 = k\frac{|q|}{r_2^2} = 9\cdot 10^9\,\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}\cdot\frac{3{,}6\cdot 10^{-8}\,\text{Кл}}{(0{,}18\,\text{м})^2} =$$

$$= 10^4\,\text{В/м} = 10\ \text{кВ/м}$$

Ответ: E_1 = 40 кВ/м, E_2 = 10 кВ/м

Задачи для самостоятельной работы

1.На расстоянии r = 5 м друг от друга находятся два точечных положительных заряда $q_1 = 4\cdot 10^{-7}$ Кл и $q_2 = 9\cdot 10^{-7}$ Кл. Определите в какой точке необходимо расположить заряд q_0, чтобы все три заряда оказались в равновесии. Найдите величину и знак этого заряда.

2.Найдите величину E напряженности поля, создаваемого точечным зарядом $Q = 5\cdot 10^{-9}$ Кл на расстоянии r = 0,1 м от заряда. Среда, окружающая заряд – вода. Относительная диэлектрическая проницаемость воды ε = 81

3.Во сколько раз надо изменить расстояние между зарядами при увеличении одного из них в 4 раза, чтобы сила взаимодействия осталась прежней?

4.Два шарика , расположенные на расстоянии 10см друг от друга, имеют одинаковые отрицательные заряды и взаимодействуют с силой 0,23мН.Найдите число избыточных электронов на каждом шарике.

5. Заряды 10 и 16нКл расположены на расстоянии 7 мм друг от друга. Какая сила будет действовать на заряд 2 нКл, помещенный в точку удаленную на 3 мм от меньшего заряда и на 4 мм от большего?

6. Два заряда по 25 нКл, распложены на расстоянии 24 см друг от друга образуют электростатическое поле. С какой силой поле действует на заряд 2 нКл, помещенный в точку , удаленную на 15 см от каждого из зарядов, если заряды, образующие поле, одноименные? Разноименными?

Практическая работа №2. Электрические цепи постоянного тока

Теоретические сведения

Электрическая цепь - совокупность устройств, предназначенных для передачи, распределения и взаимного преобразования энергии. Основными элементами электрической цепи являются источники и приемники электрической энергии, которые соединены между собой проводниками. Источник ЭДС характеризуется величиной ЭДС равной напряжению (разности потенциалов) на зажимах при отсутствии тока через источник. ЭДС определяют как работу сторонних сил, присущих источнику, на перемещение единичного положительного заряда внутри источника от зажима с меньшим потенциалом к зажиму с большим потенциалом (рис.2.1.).

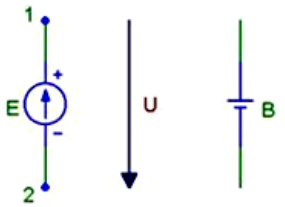


Рис2.1. Обозначение источника ЭДС и гальванического элемента в схемах

Источник тока характеризуется током I при короткозамкнутых зажимах (при отсутствии напряжения). Если ток не зависит от напряжения - такой источник называют идеальным (рис.2.2.)

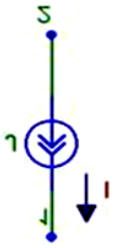


Рис.2.2. Обозначение источника тока

Закон Ома для участка цепи

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению

$$I = \frac{U}{R}$$

Закон Ома для полной цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Последовательное соединение сопротивлений

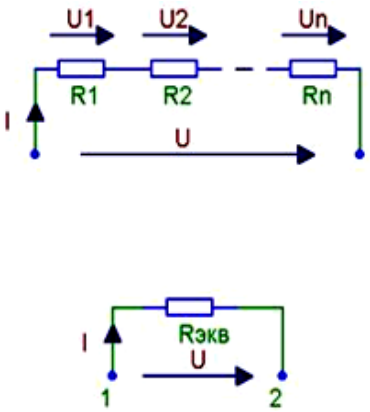


Рис.2.3. Последовательное соединение сопротивлений

Ток, идущий в цепи, одинаков в любой точке

$$U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n$$

$$I = \frac{U}{R_{экв}}$$

$$I \cdot R_{экв} = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + \ldots + R_n \cdot I$$

$$R_{экв} = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$$

Эквивалентное сопротивление последовательно соединенных элементов цепи равно сумме сопротивлений отдельных элементов

Параллельное соединение сопротивлений

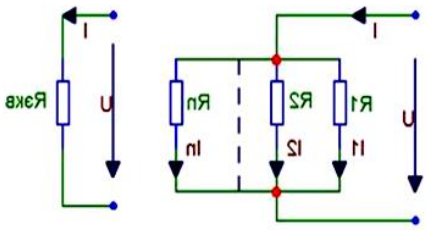


Рис.2.4 Параллельное соединение сопротивлений

$$\frac{1}{R_{экв}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$$

$$R_{экв} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$g_{экв} = \frac{1}{R_{экв}}$$

Эквивалентное сопротивление цепи, состоящей из параллельных составляющих, всегда меньше меньшего из сопротивлений цепи.

Следовательно, при параллельном соединении эквивалентная проводимость цепи равна сумме проводимостей отдельных ветвей.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение электрического тока?

2. Что принято за направление тока?
3. Что характеризует сила тока?
4. Что характеризует плотность тока? В каких единицах измеряется?
5. Что называется электрическим сопротивлением? От каких величин зависит электрическое сопротивление?
6. Как электрическое сопротивление проводников зависит от температуры?
7. Что называется проводимостью? В каких единицах измеряется?
8. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Для цепи (рис. 1), ***определить эквивалентное сопротивление*** относительно входных зажимов *a*−*g*, если известно: $R_1 = R_2 = 0{,}5$ Ом, $R_3 = 8$ Ом, $R_4 = R_5 = 1$ Ом, $R_6 = 12$ Ом, $R_7 = 15$ Ом, $R_8 = 2$ Ом, $R_9 = 10$ Ом, $R_{10} = 20$ Ом.

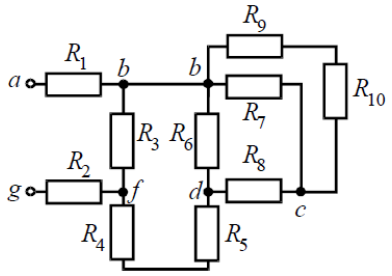


Рис1. Схема электрической цепи к задаче 1

Решение

Начнем *эквивалентные преобразования* схемы с ветви наиболее удаленной от источника, т.е. от зажимов *a*-*g*:

$$R_{11} = R_9 + R_{10} = 10+20 = 30 \text{ Ом}; \qquad R_{12} = \frac{R_{11} \cdot R_7}{R_{11} + R_7} = \frac{30 \cdot 15}{30 + 15} = 10 \text{ Ом};$$

$$R_{13} = R_8 + R_{12} = 2+10 = 12 \text{ Ом}; \qquad R_{14} = \frac{R_6 \cdot R_{13}}{R_6 + R_{13}} = \frac{12 \cdot 12}{12 + 12} = 6 \text{ Ом};$$

$$R_{15} = R_{14} + R_5 + R_4 = 6+1+1 = 8 \text{ Ом}; \qquad R_{16} = \frac{R_3 \cdot R_{15}}{R_3 + R_{15}} = \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} = 4 \text{ Ом};$$

$$R_э = R_1 + R_{16} + R_2 = 0{,}5+4+0{,}5 = 5 \text{ Ом}.$$

Задача 2. *Определить эквивалентное сопротивление* относительно зажимов *a*–*b*, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 10$ Ом (рис.9, *а*).

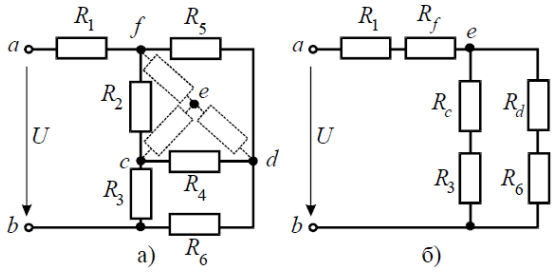


Рис 2. Схема электрической цепи к задаче 2.

Решение

Преобразуем соединение «треугольник» *f-d-c* в эквивалентную «звезду». Определяем величины преобразованных сопротивлений (рис.9, *б*):

По условию задачи величины всех сопротивлений равны, а значит:

$R_f = R_d = R_c$=3,33 Ом.

На преобразованной схеме получили параллельное соединение ветвей между узлами *e–b*, тогда *эквивалентное сопротивление* равно:

$$R_{eb} = \frac{(R_c + R_3)\cdot(R_d + R_6)}{(R_c + R_3)+(R_d + R_6)} = \frac{(3{,}33+10)\cdot(3{,}33+10)}{(3{,}33+10)+(3{,}33+10)} = 6{,}67 \text{ Ом.}$$

И тогда *эквивалентное сопротивление* исходной схемы представляет последовательное соединение сопротивлений

$$R_{ab} = R_1 + R_f + R_{eb} = 10+3{,}33+6{,}67=20 \text{ Ом.}$$

Задачи для самостоятельной работы

1.В цепь, изображенную на рисунке, подано напряжение 7,2 В. Сопротивления всех резисторов одинаковы и равны 6 Ом. Найдите силу тока, идущего через источник.

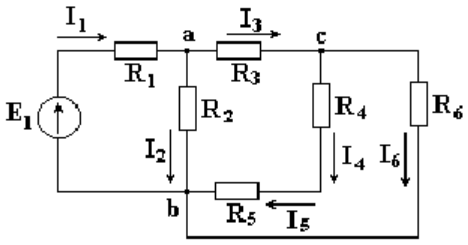


Рис.3. Схема электрической цепи к задаче 1

2.Начертите схему последовательного соединения 2 резисторов сопротивлением 1 Ом и 2 Ом. Определите в каком из них сила тока больше.

3.Определите сколько одинаковых резисторов было соединено параллельно, если каждый из них имеет сопротивление 600 Ом, а их общее сопротивление составило 50 Ом.

4.Какого сечения должен быть медный провод для передачи электроэнергии длиной 300км при силе тока 20А. Напряжение на линии 2кВ?

5.Определите силу тока, который протекает по графитовому стержню длиной 20 см, подключенный к батарейке напряжением 1,5В. Площадь поперечного сечения 0,01 мм^2.

6.Определите эквивалентное сопротивление цепи, напряжение на входе и токи в ветвях (рис.11), если I_4=0,05А, R_1=30Ом,R_2=90Ом,R_3=R_6=100Ом,R_4=R_5=160Ом,R_7=50Ом

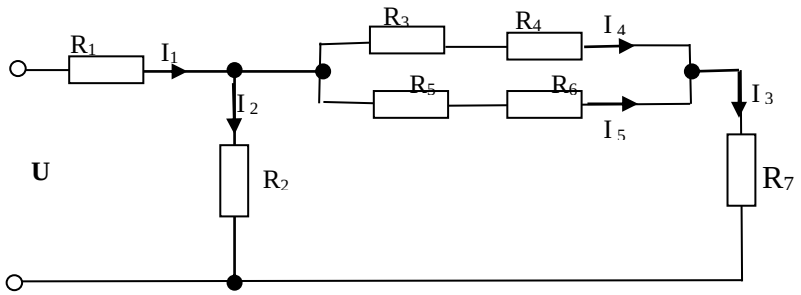


Рис.4. Схема электрической цепи к задаче 6

Качественные задачи

1. Как изменятся показания приборов после размыкания рубильника. Какой из ответов правильный?

1. I_1 не изменится. 2. I_1 уменьшится. 3. I_2 не изменится. 4. I_2 увеличится .

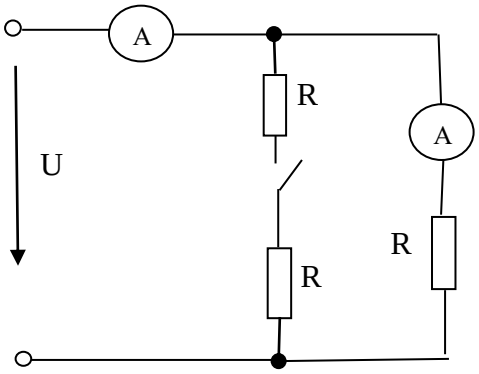


Рис.5. Схема электрической цепи к задаче 1.

2. В схеме на рисунке сопротивление резистора и полное сопротивление реостата равны R.ЭДС батарейки равна ε, ее внутреннее сопротивление мало (r=0).Как ведут себя (увеличиваются, уменьшаются, остаются постоянными) показания идеального вольтметра при перемещении движка реостата из крайнего верхнего в крайнее нижнее положение? Ответ поясните , указав, какие физические закономерности были использованы при объяснении.

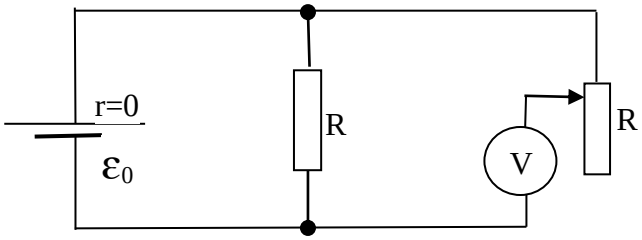


Рис.6. Схема электрической цепи к задаче 2.

3. На рисунке 7 изображена схема, содержащая источник тока с некоторым внутренним сопротивлением , резистор, реостат, амперметр и вольтметр. Как изменятся показания вольтметра и амперметра, если передвинуть ползунок реостата влево?

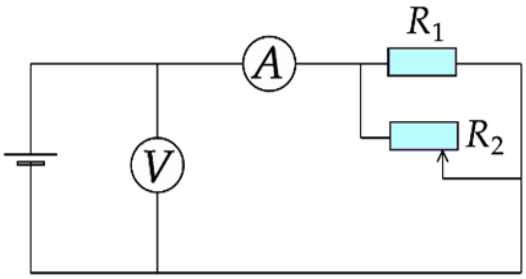


Рис.7. Схема электрической цепи к задаче 3.

Практическая работа №3. Законы Кирхгофа

Теоретические сведения

Узел – место соединения трех и более ветвей или проводов.

Ветвь – участок электрической цепи между двумя узлами, по которому протекает один и тот же ток.

Замкнутый контур – любой замкнутый путь электрической цепи, проходящий по нескольким ветвям

Первый закон Кирхгофа

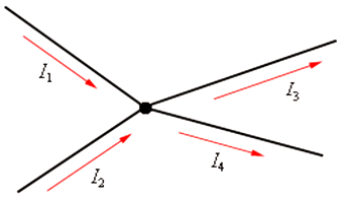


Рис.3.1. Направление токов в узле цепи

Токи, втекающие в узел, принято считать положительными; токи, вытекающие из узла отрицательными.

Формулировка I закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма сил токов для каждого узла в разветвленной цепи равна нулю $I_1 + I_2 + I_3 + ... + I_n = 0$, $\sum I = 0$

В разветвленной цепи всегда можно выделить некоторое количество замкнутых путей, состоящих из однородных и неоднородных участков, которые называются **контурами.**

Цепь содержит два узла *a* и *d*, в которых сходятся одинаковые токи

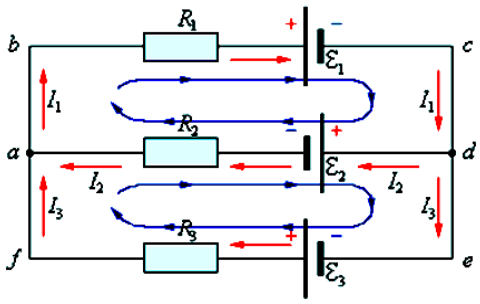


Рис.3.2. Направление токов в ветвях и контурах электрической цепи

В цепи можно выделить три контура *abcd*, *adef* и *abcdef*

Задаем положительное направление тока и положительное направление обхода контура.

Для участков контура *abcd* обобщенный закон Ома записывается в виде:

$$I_1R_1 + I_2R_2 = = -E_1 - E_2$$

Аналогично, для контура *adef* можно записать

$$-I_2R_2 + I_3R_3 = E_2 + E_3$$

Формулировка II закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма ЭДС в любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме падений напряжений на всех элементах этого контура.

$$\sum \mathcal{E} = \sum I R$$

Вопросы для самоконтроля:

1.Что называется ветвью, узлом, контуром электрической цепи?

2.Сформулируйте и запишите формулу , выражающую I закон Кирхгофа

3. Какая электрическая цепь называется сложной?

4.Сформулируйте и запишите формулу, выражающую II закон Кирхгофа

5. Определите, сколько всего уравнений необходимо составить для расчета токов в сложных цепях по законам Кирхгофа. Сколько уравнений по первому и сколько по второму законам Кирхгофа?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Рассчитать токи в ветвях схемы показанной на рис. 3.3. Если E1=100В, E2=75В, E3=50В R1=100 Ом, R2=50 Ом, R3=20 Ом, R4=40 Ом, R5=40 Ом

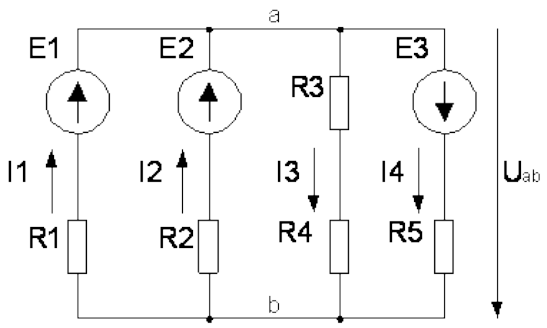


Рис.3.3. Схема электрической цепи к задаче 1

Решение:

Перед началом расчета необходимо расставить направление токов, определить количество узлов и ветвей. Так как в схеме несколько источников ЭДС используем условно-положительные направления токов. На схеме направление токов соответствует направлению ЭДС в активных ветвях, а в пассивной ветви выбрано произвольно (см. рис. 3.3), схема содержит четыре ветви и два узла (a, b). Так как в схеме два узла и несколько источников ЭДС, то расчет целесообразно вести методом двух узлов. Обозначим направление межузлового напряжения U_{ab} . Рассчитаем проводимости ветвей:

$$G1 = \frac{1}{R1} = \frac{1}{100} = 0.01 \text{ См}$$

$$G2 = \frac{1}{R2} = \frac{1}{50} = 0.02 \text{ См}$$

$$G34 = \frac{1}{R3 + R4} = \frac{1}{20 + 40} = 0.0167 \text{ См}$$

$$G5 = \frac{1}{R5} = \frac{1}{40} = 0.025 \text{ См}$$

В соответствии с методом двух узлов межузловое напряжение будет равно

$$U_{ab} = \frac{G1 \cdot E1 + G2 \cdot E2 - G5 \cdot E3}{G1 + G2 + G34 + G5} = \frac{0.01 \cdot 100 + 0.02 \cdot 75 - 0.025 \cdot 50}{0.01 + 0.02 + 0.0167 + 0.025} = 17.43\ В$$

Зная межузловое напряжение, определяем токи в ветвях, используя второй закон Кирхгофа

$$I1 = \frac{E1 - U_{ab}}{R1} = \frac{100 - 17.43}{100} = 0.826\ A$$

$$I2 = \frac{E2 - U_{ab}}{R2} = \frac{75 - 17.43}{50} = 1.151\ A$$

$$I3 = \frac{U_{ab}}{R3 + R4} = \frac{17.43}{20 + 40} = 0.291\ A$$

$$I4 = \frac{E3 + U_{ab}}{R5} = \frac{50 + 17.43}{40} = 1.686\ A$$

Выполняем проверку правильности решения с помощью первого закона Кирхгофа для узла а:

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0.826A + 1.151A - 0.291A - 1.686A$$

Так как законы Кирхгофа выполняются, то расчет выполнен правильно.

Задачи для самостоятельной работы

Задача 1. Найдите токи в ветвях схемы, приведенной на рисунке 3.4., пользуясь *законами Кирхгофа*. Сопротивления приемников: $R_1 = R_2 = R_3 = 1$ Ом, $R_4 = R_5 = R_6 = 2$ Ом. Величины ЭДС источников: $E_1 = 50$ В, $E_2 = 20$ В, $E_3 = 40$ В.

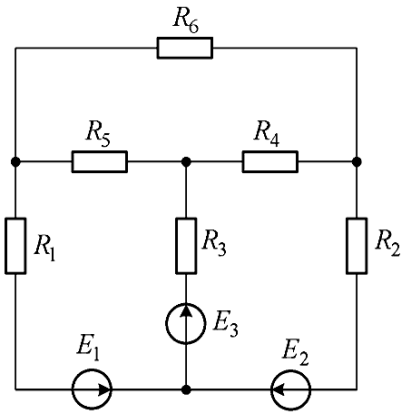


Рис.3.4. Схема электрической цепи к задаче 1

Задача 2. Два элемента с одинаковыми ЭДС $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2$В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 1$ Ом, $r_2 = 2$ Ом замкнуты на внешнее сопротивление R. Через первый элемент течет ток $I_1 = 1$ А. Найдите сопротивление R, ток I_2, текущий через второй элемент, и токI, текущий через сопротивление R. Схема соединения показана на рисунке3.5.

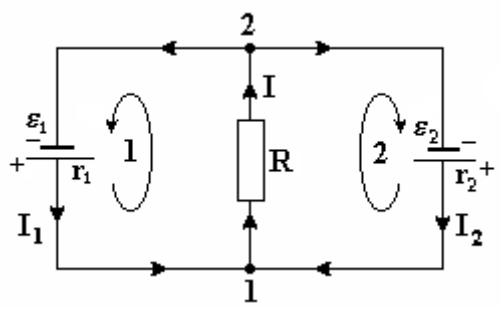


Рис.3.5. Схема электрической цепи к задаче 2.

Задача 3. В электрической цепи постоянного тока (рис.3.6) показание амперметра А: I5 = 5 А. Определить токи $I_1 \div I_4$ во всех ветвях цепи, пользуясь законами Кирхгофа. Сопротивления резисторов: R_1 = 1 Ом, R_2 = 10 Ом, R_3 = 10 Ом, R_4 = 4 Ом, R_5 = 3 Ом, R_6 = 1 Ом, R_7 = 1 Ом, R_8 = 6 Ом, R_9 = 7 Ом; ЭДС $Ɛ_1$ = 162 В, $Ɛ_2$ = 50 В, $Ɛ_3$ = 30 В. Внутренним сопротивлением источников питания пренебречь.

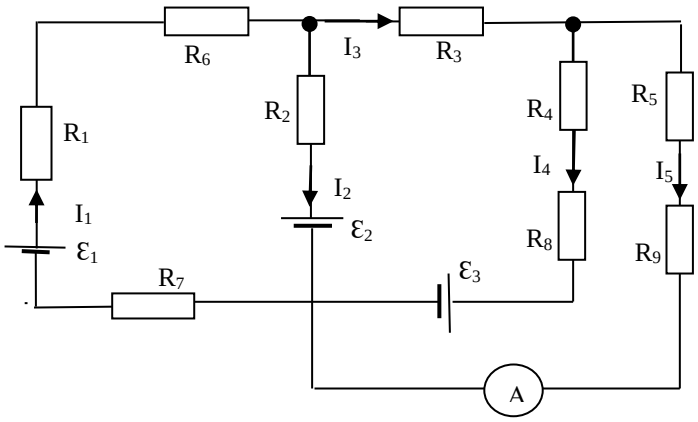


Рис.3.6. Схема электрической цепи к задаче 3.

Практическая работа№ 4. Электромагнетизм. Магнитное поле

Теоретические сведения

Электромагнитное поле – физическое поле посредством которого осуществляется взаимодействие электрически заряженных частиц и частиц обладающих магнитным моментом. Условно делится на: электрическое и магнитное поля.

Магнитное поле – одна из форм проявления электромагнитного поля, отличающаяся только тем, что действует только на движущиеся электрически заряженные частицы и тела, на проводники с током и тела, обладающие магнитным моментом. Магнитное поле имеет количественные характеристики : магнитную индукцию и напряженность магнитного поля. В-вектор магнитной индукции – силовая характеристика магнитного поля равная отношению силы, действующей со стороны магнитного поля dF на малый элемент проводника с электрическим током, и произведения силы тока I на длину элемента dl

$$\overline{B} = \frac{1}{I}\left(\frac{d\overline{F}}{d\overline{l}}\right)_{\max}$$

Магнитная индукция – в точке однородного магнитного поля определяется максимальным вращающим моментом, равным единице, когда нормаль к контуру перпендикулярна направлению поля. Так как магнитное поле является силовым, то его, как и электрическое изображают с помощью линий магнитной индукции – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора. Их направление задается с помощью правила правого винта.

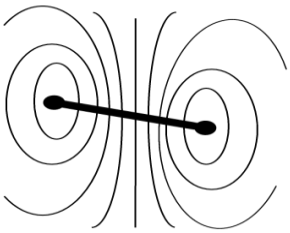


Рис. 4.1. Направление линий магнитной индукции

Магнитное поле макротоков описывается вектором напряженности магнитного поля.

Для однородной изотропной среды вектор магнитной индукции связан с вектором напряженности соотношением:

$$\overline{B} = \mu\mu_0\overline{H}$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{Гн}{м}$ - магнитная постоянная

μ- магнитная проницаемость среды, показывающая во сколько раз магнитное поле макротоков усиливается за счет магнитного поля микротоков среды.

Закон Ампера

Сила, с которой магнитное поле действует на элемент проводника с током , находящийся в магнитном поле, равна произведению силы тока на векторное произведение элемента длины проводника на магнитную индукцию поля.

$$d\overline{F} = Id\overline{l}\,\overline{B}$$

Закон Ампера в скалярной форме

$$dF = IBdl\sin\alpha$$

Сила действующая на электрический зарядq, движущийся в магнитном поле B со скоростью $\overline{\upsilon}$ называетсясила Лоренца

$$\overline{F} = q\overline{\upsilon}\,\overline{B}$$

Абсолютное значение Силы Лоренца:

$$F = q\upsilon B\sin\alpha$$

α угол между $\overline{\upsilon}$ и $\overline{B}$

Вопросы для самоконтроля

1.Что такое магнитное поле и каким образом оно обнаруживается?

2.Что называется магнитной индукцией? Как направлен вектор магнитной индукции?

3.Как определяется модуль вектора магнитной индукции? В каких единицах измеряется?

4.Какое поле называется однородным? Каким поле называется вихревым?

5.Сформулируйте правило левой руки для силы Ампера

6. Каким образом определяется модуль силы Амперы?

7.Каким образом определяется сила Лоренца?

Качественные задачи

1.Как взаимодействуют два проводника с одинаковым направлением тока?

2.Объясните, как используется сила Ампера в электроизмерительных приборах

3.Опишите траекторию, по которой движется в магнитном поле заряженная частица, влетающая в поле перпендикулярно линиям магнитной индукции.

4.В каких приборах и машинах используются явления поворота рамки в магнитном поле?

5.Будет ли обычный компас работать в автомобиле?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Между полюсами магнита подвешен горизонтально на двух невесомых нитях прямой проводник длиной l = 0,2 м и массой m = 10 г. Вектор индукции однородного магнитного поля перпендикулярен проводнику и направлен вертикально; B = 49 мТл.На какой угол α от вертикали отклонятся нити, поддерживающие проводник, если по нему пропустить ток? Сила тока I = 2 А

Решение

На проводник действуют следующие силы: силы упругости двух нитей , сила тяжести и сила Ампера (рис.4.2.) .

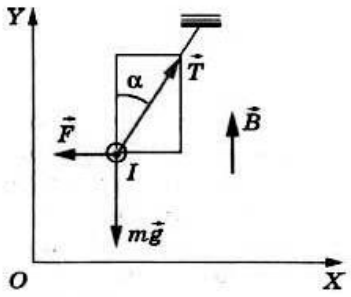


Рис. 4.2. Направление сил, действующих на проводник с током

Модуль силы Ампера $F = IBl$. При равновесии проводника суммы проекций сил на вертикальное и горизонтальное направления (с учетом их знаков) равны нулю:

$$-mg + T\cos\alpha = 0$$
$$-F + T\sin\alpha = 0$$

Отсюда

$$\mathrm{tg}\alpha = F/mg = IBl/mg \approx 0{,}2$$

Следовательно, угол α = 11,3°

Задача 2. Прямоугольный контур ABCD перемещается поступательно в магнитном поле тока, идущего по прямолинейному длинному проводнику (рис.4.3.). Определите направление тока, индуцированного в контуре, если контур удаляется от провода. Какие силы действуют на контур?

Решение

Вектор магнитной индукции магнитного поля тока I направлен перпендикулярно плоскости контура от нас. При удалении контура от провода магнитный поток через площадку ABCD убывает (ΔФ < 0). Следовательно, вектор магнитной индукции ' магнитного поля тока Ii, согласно правилу Ленца направлен от нас, как и вектор B. Применяя правило буравчика, находим, что индукционный ток в контуре направлен по часовой стрелке.

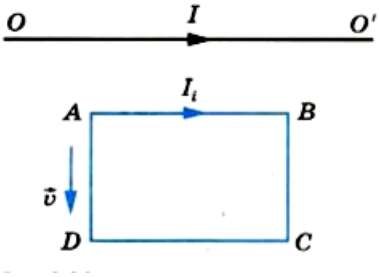


Рис. 4.3. Перемещение прямоугольного контура в магнитном поле

Взаимодействие тока в контуре с прямолинейным током приводит к появлению сил, действующих на проводники контура. Применив правило левой руки, можно выяснить, что эти силы, во-первых, растягивают рамку, стремясь увеличить площадь контура, и, во-вторых, создают результирующую силу, направленную к прямолинейному проводнику. Оба действия будут препятствовать уменьшению магнитного потока через контур.

Задачи для самостоятельной работы

Задача 1.В однородном магнитном поле (B=0,1 T) равномерно с частотой n=10 об/с вращается рамка, содержащая N=1000 витков, плотно прилегающих друг к другу. Площадь

рамки S=150 см2. Определить мгновенное значение э.д.с, индукции , соответствующее углу поворота рамки в 30°.

Задача 2.Соленоид с сердечником из немагнитного материала содержит N=1200 витков провода, плотно прилегающих друг к другу. При силе тока I=4 А магнитный поток Ф равен 6 мкВб. Определить индуктивность L, соленоида и энергию W магнитного поля соленоида.

Задача 3.Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов U=400 В, попал в однородное магнитное поле напряженностью H=103 А/м. Определить радиус R кривизны траектории и частоту обращения υ электрона в магнитном поле. Вектор скорости перпендикулярен линиям поля.

Задача 4. Два параллельных бесконечно длинных провода, по которым текут в одном направлении токи I=60 А, расположены на расстоянии d=10 см друг от друга. Определить магнитную индукцию B в точке, отстоящей от одного проводника на расстоянии r_1=5 см и от другого — на расстоянии r_2=12 см

Практическая работа № 5. Расчет электрических параметров трансформаторов

Теоретические сведения

Трансформатор –это электромагнитный аппарат, который преобразует электрическую энергию переменного тока, имеющую одни величины, в электрическую энергию с другими величинами.

В трансформаторе преобразуются:

- напряжение,
- ток,
- начальная фаза

Простейший трансформатор имеет магнитопровод (сердечник) и обмотки.

По количеству обмоток различают трансформаторы двухобмоточные и многообмоточные.

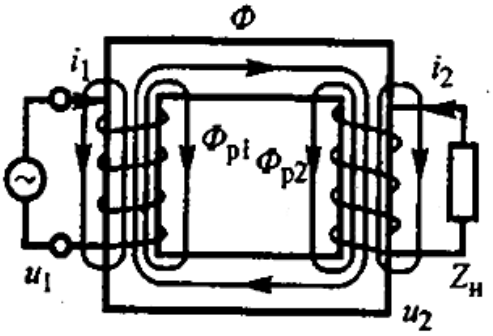


Рис. 5.1. Электромагнитная схема трансформатора

Обмотка, к зажимам которой *подводится* напряжение, называется первичной. На зажимы вторичной обмотки *включается* потребитель Zн. (рис.5.1.)

Принцип действия трансформатора. *Ток* в первичной катушке *создается* магнитное поле *силовые* линии, которого *пронизывают* катушки I и II. Катушка II является магнитно связанной с катушкою I при посредстве магнитных силовых линий. По *закону* электромагнитной индукции при *изменении* пронизывающего катушку магнитного потока (за счет переменного тока) в *катушке* индуктируется *переменная* ЭДС. В *катушке I* индуктируется ЭДС самоиндукции, в *катушкеII* индуктируется ЭДС взаимоиндукции. Если к *катушке II* подсоединить приемники электроэнергии в *цепи* появится ток, *приемники* получат электроэнергию.

Основное свойство трансформатора

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k_т \quad (5.1)$$

W_1, W_2 — числа витков обмоток

Коэффициент трансформации в обычном случае определяется как отношение *высшего* напряжения к низшему в *режиме* холостого хода.

Коэффициент трансформации для *понижающего* трансформатора:

$$Кт = E1/E2 = U1/U2 = w1/(w2) = (I1)/I2 \quad (5.2)$$

Трансформатор *снижает* напряжение и во *столько* же раз *повышает* ток(и наоборот).

КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P2}{P1} \quad (5.3)$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\phi_2 \quad (5.4)$$

$$P_1 = U_1 I_1 \cos\phi_1 \quad (5.5)$$

Коэффициент нагрузки трансформатора

$$\beta = \frac{I1}{Iном1} = \frac{I2}{Iном\ 2} \quad (5.6)$$

Вопросы для самоконтроля:

1.Принцип работы трансформатора

2.Какие параметры можно определить по результатам опыта холостого хода?

3.Запишите выражение для определения изменения вторичного напряжения трансформатора

4.В каком случае напряжение на вторичной обмотке трансформатора может оказаться выше напряжения холостого хода?

5.Перечислите потери в трансформаторе. Какие из них относятся к постоянным , какие к переменным и почему?

6.На каком явлении основан принцип работы трансформатора?

7. Что показывает коэффициент трансформации и как его рассчитать?

8. Какие режимы работы трансформатора вам известны?

Качественные задачи

1) Поток векторов магнитной индукции В называется …
   Он измеряется в …
2) Все вещества по своим магнитным свойствам делятся на
   1. … - не намагничивающиеся в магнитном поле
   2. … - слабо намагничивающиеся в магнитном поле
   3. … - сильно намагничивающиеся в магнитном поле.
3) Примером сильно намагничивающихся веществ является ...
4) Катушка индуктивности на схемах обозначается так …
5) Однофазный трансформатор на схеме обозначается так …
6) В сердечниках электрических машин и аппаратов, находящихся в переменном магнитном поле, возникают … токи.
7) Они вызывают … энергии и … сердечников.
8) Для уменьшения этих токов в сталь добавляют 4% …
9) Явление электромагнитной индукции заключается в том, что в замкнутом контуре, находящемся в … магнитном поле возникает … индукции.
10) Величина наведенной в катушке ЭДС индукции зависит от …

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Используя приведенное в табл. 1 значения параметров трехфазных масляных трансформаторов серии ТМ (в обозначении марки в числителе указано номинальная мощность трансформатора в кВ•А, в знаменателе — высшее напряжение в кВ), определить для каждого варианта значения параметров, величины которых не указаны в этой таблице. Обмотки соединены по схемам Y/Y. Частота тока в сети

f= 50 Гц

Таблица 1.

Параметр	Тип трансформатора								
	ТМ-1000/35	ТМ-50/6	ТМ-100/6	ТМ-180/6	ТМ-320/6	ТМ-560/35	ТМГ-750/35	ТМ-1000/6	ТМ-10/6
Основной магнитный поток $Ф_{max}$, Вб	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Число витков w_1	1000	1190	—	—	522	2000	—	—	—
Число витков w_2	—	—	72	—	—	—	146	—	—
Сечение стержня магнитопровода $Q_{ст}$, м^2, при B_{max}= = 1,5 Тл	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Напряжение $U_{1ном}$, кВ	35	6	6	6	6	35	35	6	6
Напряжение $U_{2ном}$, кВ	—	0,4	0,5	0,5	0,4	—	3,15	0,4	0,4
Коэффициент трансформации k	5,56	—	—	—	—	5,55	—	—	—

Решение варианта с трансформатором ТМ-1000/35.

1. Напряжение на выводах обмотки НН

$U_{2ном} = U_{1ном}/k$= 35/5,56 = 6,3 кВ

2. Число витков в фазной обмотке НН

$w_2= w_1/k$ = 1600/5,56 = 288 витков

3. Максимальное значение основного магнитного потока

$Ф_{max} = U_{2ном}/(\sqrt{3}\cdot 4{,}44 f\, w_2)$ = 6300/(1,73 • 4,44 • 50• 288) = 0,057 Вб

4. Площадь поперечного сечения стержня магнитопровода

$Q_{ст} = Ф_{max} /(B_{max} k_c)$ = 0,057/(1,5 • 0,95) = 0,04 м^2

Задача 2. Две катушки намотаны на один общий сердечник. Определите их взаимную индуктивность, если при скорости изменения силы тока в первой катушке dI_1/dt = 2 А/с во второй катушке индуцируется ЭДС e_{i2} = 0,6 В.

Решение.

Магнитный поток, пронизывающий поверхность контура второго проводника равен:

$$Ф_{21} = L_{21} I_1, \quad (1)$$

где I_1 – ток в первой катушке, L_{21}- коэффициент взаимной индуктивности.

Изменение магнитного потока $Ф_{21}$ индуцирует ЭДС e_{i2} во втором контуре:

$$Ɛ_{i2} = - d\Phi 21/dt = -L_{21} dI1/dt \quad (2)$$

Выразив величину L_{21} из (2) и, подставив числовые значения, получим

$$L_{21} = Ɛ_{i2} / dI1/dt = 0{,}3$$

Ответ: L_{21} = 0,3 Гн.

Задачи для самостоятельной работы

Задача 1. В табл. 2 приведены данные некоторых параметров трехфазных масляных трансформаторов: номинальная мощность $S_{ном}$; номинальные первичное $U_{1ном}$ и вторичное

$U_{2ном}$ напряжения; номинальный ток первичной стороны $I_{1ном}$; напряжение короткого замыкания $u_к$ и его активная $u_{к.а}$ и реактивная $u_{к.р}$ составляющие; ток холостого хода i_0 ; мощности холостого хода P_0 и короткого замыкания P_k; коэффициенты мощности холостого хода **cos*φ*_0** и короткого замыкания **cos*φ***_к; сопротивление короткого замыкания Z_k и его активная$r_к$ и реактивная $x_к$ составляющие; номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_{ном}$ при коэффициенте мощности нагрузки трансформатора cos*φ*_**2**= 0,8 (характер нагрузки — индуктивный). Соединение обмоток трансформатора Y/Y. Требуется определить параметры трансформатора, значения которых в таблице не указаны.

Таблица 2

Параметр	**Тип трансформатора**					
	ТМ-25/1	**ТМ-40/**	**ТМ-63/1**	**ТМ-100/**	**ТМ-160/1**	**ТМ-250/**
$S_{ном}$, **кВ • А**	25	—	63	—	—	250
$U_{1ном}$,**кВ**	10	6	10	6	10	—
$u_к$ **%**	4,5	—	4,5	—	4,5	—
i_0 **%**	3,2	—	4,5	2,6	2,4	—

Задача 2. Два соленоида с индуктивностями L_1 = 0,5Гн и L_2 =0,3 Гн соответственно, вставлены друг в друга. Длина и сечение соленоидов практически одинаковые. Определите взаимную индуктивность соленоидов.

Задача 3. Трансформатор с коэффициентом трансформации 0,1 понижает напряжение с U_1= 220 В до U_2= 10 В. Сопротивление вторичной обмотки трансформатора составляет R_2 = 4 Ом. Определить силу тока I_2 во вторичной обмотке трансформатора, пренебрегая потерями энергии в первичной обмотке.

Задача 4. Определите напряжение на концах первичной обмотки трансформатора, имеющей N_1=2000 витков, если напряжение на концах на вторичной обмотки , содержащей N_2 = 5000 витков, равно 50 В. Активным сопротивлением обмоток трансформатора можно пренебречь.

Задача 5. Трансформатор, содержащий в первичной обмотке 840 витков, повышает напряжение с 220 В до 660 В. Каков коэффициент трансформации и сколько витков содержится во вторичной обмотке трансформатора? В какой обмотке провод будет иметь большую площадь сечения?

Практическая работа № 6. Расчёт трёхфазной электрической цепи

Теоретические сведения

Под симметричной многофазной системой ЭДС понимается такая, у которой амплитуды , частоты каждой из фаз равны, а каждая из ЭДС фаз отстает или опережает другую на постоянный угол α.

$$\alpha = \frac{2\pi}{m} \text{ (6.1), где m - число фаз}$$

Если m=3, то система ЭДС называется трехфазной. В симметричной трехфазной системе ЭДС $\alpha=120^0$

В трехфазных электрических цепях каждая фаза имеет свое обозначение. Общепринятым считается обозначение одной фазы буквой А, другой буквой В, третьей С.

Симметричная трехфазная система ЭДС

$e_A(t)=E_m\sin\omega t$ (6.2)

$e_B(t)=E_m\sin(\omega t-120°)$ (6.3)

$e_c(t)=E_m\sin(\omega t+120°)$ (6.4)

ЭДС фазы В отстает от ЭДС А на 120^0, а ЭДС фазы С опережает ЭДС А на 120°

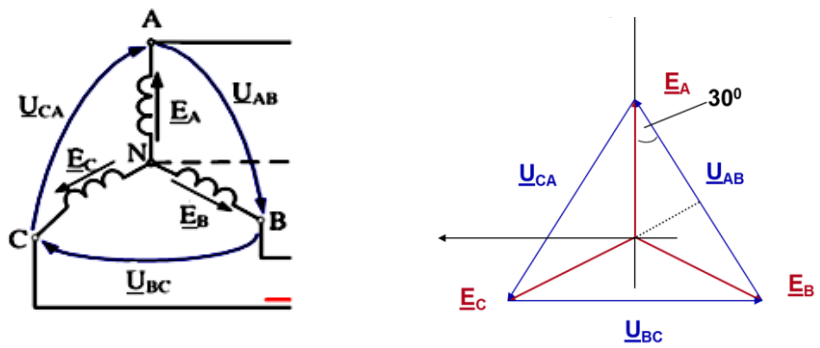


Рис.6.1. Соединение «звезда» и векторная диаграмма

$\underline{E}_A$, $\underline{E}_B$, $\underline{E}_C$ - фазные ЭДС

$\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{cd}$ – линейные напряжения

"0" – нейтральная точка генератора

Линейные напряжения

$\underline{U}_{AB} = \underline{E}_A - \underline{E}_B$ (6.5)

$\underline{U}_{BC} = \underline{E}_B - \underline{E}_c$ (6.6)

$\underline{U}_{CA} = \underline{E}_c - \underline{E}_A$ (6.7)

$$U_{AB} = E_A 2\cos 30^0 = E_A \frac{2\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}E_A$$

$$\underline{U}_{AB} = \sqrt{3}E_{\hat{O}}\angle 30^0$$

$$\underline{U}_{BC} = \sqrt{3}E_{\hat{O}}\angle -90^0$$

$$\underline{U}_{CA} = \sqrt{3}E_{\hat{O}}\angle 150^0$$

Вопросы для самоконтроля:

1.Что такое симметричная трехфазная система напряжений? Чем отличаются друг от друга системы с прямым и обратным следованием (чередованием) фаз? Показать на векторных диаграммах.

2. Как обозначаются (маркируются) начала и концы фаз трехфазных источников и потребителей? Как осуществить их соединение звездой и треугольником?

3. Дать определение фазных и линейных напряжений. Каково соотношение между линейными и фазными напряжениями на зажимах генератора, соединенного по схеме звезда?

4. Дать определение фазных и линейных токов. Каково соотношение между этими токами при соединении приемника по схеме звезда?

5. Какая нагрузка называется симметричной?

6. Как вычислить фазные токи приемника, соединенного звездой, если известны линейные напряжения источника и сопротивления фаз приемника?

7. В каких случаях применяется четырехпроводная система электроснабжения? Каково значение нейтрального провода?

8. Как вычислить ток в нейтральном проводе?

9. Каково соотношение между линейными и фазными напряжениями при соединении фаз источника или приемника треугольником?

10. Как вычислить фазные и линейные токи приемника, соединенного треугольником, если известно линейное напряжение источника и сопротивление фаз приемника?

11. Каково соотношение между линейными и фазными токами симметричного приемника, соединенного треугольником?

12. Как вычислить активную, реактивную и полную мощности симметричной трехфазной нагрузки? Как вычисляются эти мощности при несимметричной нагрузке?

Качественные задачи

1. Может ли ток в нейтральном проводе быть равным нулю?

2. Как изменится режим работы цепи, если в одну из фаз вместо освещения включить двигатель?

3. Какие токи изменятся, если в одной из фаз произойдет обрыв?

4. Как изменится режим работы цепи при обрыве нейтрального провода?

5. Какие токи изменятся при перегорании ламп в фазе "АВ"?

6. Как изменятся токи в схеме при обрыве линейного провода "А"?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Освещение здания питается от четырехпроводной трехфазной сети с линейным напряжением $U_Л$ = 380 В. Первый этаж питается от фазы "А" и потребляет мощность 1760 Вт, второй – от фазы "В" и потребляет мощность 2200 Вт, третий – от фазы "С", его мощность 2640 Вт. Составить электрическую схему цепи, рассчитать токи, потребляемые каждой фазой, и ток в нейтральном проводе, вычислить активную мощность всей нагрузки. Построить векторную диаграмму.

Анализ и решение задачи 1

Схема цепи показана на рис. 6.2

Лампы освещения соединяются по схеме звезда с нейтральным проводом.

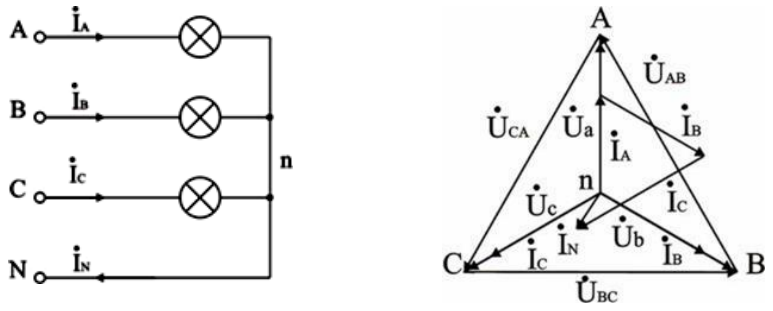


Рис 6.2 Схема электрической цепи к задаче 1

Расчет фазных напряжений и токов. При соединении звездой $U_Л = \sqrt{3}\, U_Ф$, отсюда $U_Ф = U_Л / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220$ В. Осветительная нагрузка имеет коэффициент мощности cos φ = 1, поэтому $P_Ф = U_Ф \cdot I_Ф$ и фазные токи будут равны:

$I_A = P_A / U_Ф = 1760 / 220 = 8$ А; $I_B = P_B / U_Ф = 2200 / 220 = 10$ А; $I_C = P_C / U_Ф = 2640 / 220 = 12$ А.

Построение векторной диаграммы и определение тока в нейтральном проводе.

Векторная диаграмма показана на рис. 27. Ее построение начинаем с равностороннего треугольника линейных напряжений $\acute{U}_{AB}$, $\acute{U}_{BC}$, $\acute{U}_{CA}$, и симметричной звезды фазных напряжений $\acute{U}_a$, $\acute{U}_b$, $\acute{U}_c$. При таком построении напряжение между любыми точками схемы можно найти как вектор, соединяющий соответствующие точки диаграммы, поэтому диаграмму называют топографической.

Токи фаз $\acute{I}_A$, $\acute{I}_B$, $\acute{I}_C$ связаны каждый со своим напряжением; в нашем случае по условию φ = 0, и токи совпадают по фазе с напряжениями. Ток в нейтральном проводе $\acute{I}_N = \acute{I}_A + \acute{I}_B + \acute{I}_C$. По построению (в масштабе) по величине $\acute{I}_N = 2{,}5$ А.

Вычисление активной мощности в цепи.

Активная мощность цепи равна сумме мощностей ее фаз:

$P = P_A + P_B + P_C = 1760 + 2200 + 2640 = 6600$ Вт.

Задача 2. В трехфазную сеть с $U_Л = 380$ В включен соединенный треугольником трехфазный асинхронный двигатель мощностью P = 5 кВт, КПД двигателя равен $\eta_Н = 90\%$, коэффициент мощности $\cos \varphi_Н = 0{,}8$. Определить фазные и линейные токи двигателя, параметры его схемы замещения $R_Ф$, $X_Ф$, построить векторную диаграмму. Включить ваттметры для измерения активной мощности и найти их показания.

Двигатель является активно-индуктивным потребителем энергии, его схема замещения приведена на рис. 6.3.

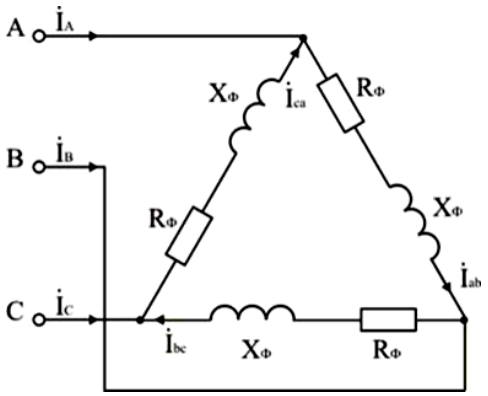


Рис.6.3.Схема замещения двигателя

Расчет активной мощности и токов, потребляемых двигателем из сети.

В паспорте двигателя указывается механическая мощность на валу; потребляемая активная мощности двигателя

$P = P_Н / \eta = 500 / 0.9 = 5560$ Вт.

Для симметричной нагрузки, какой является двигатель,

$P = 3\, U_Ф\, I_Ф \cos\varphi$ и $I_Ф = P / (3\, U_Ф \cos\varphi)$.

$I_Ф = 5560 / (3 \cdot 380 \cdot 0{,}8) = 6{,}09$ А.

$I_Л = \sqrt{3}\, I_Ф = \sqrt{3} \cdot 6{,}09 = 10{,}54$ А.

Расчет параметров схемы замещения двигателя.

$Z_Ф = U_Ф / I_Ф = 380 / 6{,}09 = 62{,}4$ Ом; $R_Ф = Z_Ф \cos\varphi = 62{,}4 \cdot 0{,}8 = 49{,}9$ Ом; $X_Ф = Z_Ф \sin\varphi_Ф = 62{,}4 \cdot 0{,}6 = 37{,}4$ Ом; $\cos\varphi_Ф = \cos\varphi_Н = 0{,}8$.

Построение векторной диаграммы.

Линейные напряжения строятся в виде симметричной звезды, они же являются в данном случае фазными напряжениями. Фазные токи отстают от напряжений на угол $\varphi_Ф$, линейные токи строятся по фазным на основании уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа:

$$\acute{I}_A = \acute{I}_{ab} - \acute{I}_{ca};\ \acute{I}_B = \acute{I}_{bc} - \acute{I}_{ab};\ \acute{I}_C = \acute{I}_{ca} - \acute{I}_{bc}.$$

Векторная диаграмма показана на рис. 6.4

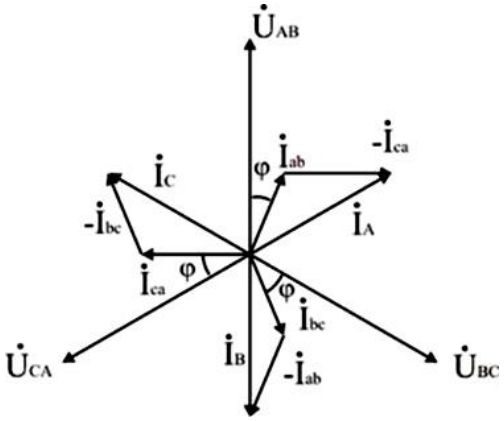


Рис.6.4 Векторная диаграмма токов и напряжений

Схема включения ваттметров.

В трехпроводных сетях часто для измерения активной мощности применяется схема двух ваттметров, один из вариантов которой показан на рис. 6.4. Показания ваттметра определяются произведением напряжения, приложенного к его катушке напряжения, на ток в токовой катушке и косинус угла между ними:

$P_1 = U_{AB}\, I_A \cos(\acute{U}_{AB} * \acute{I}_A) = 380 \cdot 10{,}54 \cdot \cos(\varphi_Ф + 30°) = 1573$ Вт;
$P_2 = U_{CB}\, I_C \cos(\acute{U}_{CB} * \acute{I}_C) = 380 \cdot 10{,}54 \cdot \cos(\varphi_Ф - 30°) = 3976$ Вт.

Активная мощность трехфазной цепи равна алгебраической сумме показаний приборов: $P = P_1 + P_2 = 1573 + 3976 = 5549$ Вт.

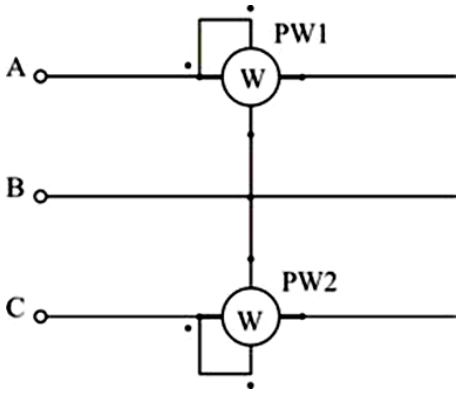


Рис.6.4 Схема измерения активной мощности

Задачи для самостоятельной работы

Задача 1. К источнику с $U_Л$ = 220 В подключена соединенная треугольником осветительная сеть. Распределение нагрузки по фазам: P_{AB} = 2200 Вт, P_{BC} = 3300 Вт, P_{CA} = 4400 Вт. Вычислить активную мощность, потребляемую схемой из сети, фазные и линейные токи приемников.

Задача 2. В трехфазную сеть с $U_Л$ = 380 В включен соединенный звездой трехфазный асинхронный двигатель с $P_Н$ = 3 кВт, $I_Н$ = 10 А, $\eta_Н$ = 90 %. Начертить схему включения двигателя, вычислить параметры его схемы замещения $R_Ф$, $X_Ф$. Построить векторную диаграмму.

Задача 3. В трехфазную сеть с $U_Л$ = 380 В включен по схеме треугольник асинхронный двигатель, имеющий $Z_Ф$ = 19 Ом, cos $\varphi_Ф$ = 0,8. Найти линейные токи и активную мощность, потребляемую двигателем из сети. Построить векторную диаграмму.

Задача 4. Трехфазная печь включена в сеть с $U_Л$ = 380 В по схеме треугольник. Найти линейный ток и мощность печи, если $R_Ф$ = 10 Ом. Как изменятся линейный ток и мощность печи, если ее включить в ту же сеть по схеме звезда?

Задача 5. Трехфазный асинхронный двигатель, соединенный звездой, включен в сеть с $U_Л$ = 380 В. Сопротивление каждой фазы двигателя равно $Z_Ф = 5 + j5$ Ом. Привести схему включения двигателя, определить потребляемую им активную мощность и построить векторную диаграмму.

Задача 6. Три одинаковых резистора $R_A = R_B = R_C$ = 10 Ом соединены звездой и подключены к источнику с $U_Л$ = 220 В. Найти токи в схеме в исходном режиме и при обрыве провода "А" при работе с нейтральным проводом и без него. Построить векторные диаграммы.

Практическая работа № 7. Расчет выпрямителя. [*7]

Теоретические сведения

Выпрямитель – устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное. В зависимости от числа фаз переменного напряжения различают однофазные и многофазные (обычно трехфазные) выпрямители. Структурная схема выпрямителя приведена на рис.

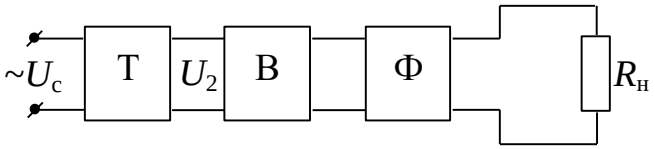


Рис.7.1. Структурная схема выпрямителя

Выпрямитель содержит трансформатор Т, необходимый для преобразования напряжения сети U_c до величины U_2, определяемой требованиями нагрузки; вентильную группу В, которая обеспечивает одностороннее протекание тока в цепи нагрузки, в результате чего переменное напряжение U_2 преобразуется в пульсирующее; фильтр Ф, передающий на выход схемы постоянную составляющую напряжения и сглаживающий пульсации напряжения.

Выпрямитель может быть дополнен схемой стабилизации, подключаемой к выходу фильтра и предназначенной для поддержания напряжения на нагрузке неизменным при изменении напряжения U_2 на трансформаторе.

Основными показателями работы выпрямителя являются средние значения выпрямленного тока I_d и напряжения U_d:

$$I_d = \frac{1}{T}\int_0^T i_{\text{вых}}(t)dt \qquad (7.1)$$

$$U_d = \frac{1}{T}\int_0^T u_{\text{вых}}(t)dt \qquad (7.2)$$

где T – период изменения выходного тока (напряжения);

P_d -мощность нагрузочного устройства

$$P_d = U_d \cdot I_d \qquad (7.3)$$

Коэффициент пульсаций

$$k_{\text{п}} = \frac{U_{\text{осн } m}}{U_d} \qquad (7.4)$$

где $U_{\text{осн } m}$ – амплитуда основной (первой) гармоники выпрямленного напряжения;

коэффициент использования вентилей по напряжению

$$k_{\text{о}} = \frac{U_{\text{обр } m}}{U_{\text{обр доп}}} \qquad (7.5)$$

где $U_{\text{обр } m}$ – максимальное обратное напряжение на вентиле; $U_{\text{обр доп}}$ – допустимое обратное напряжение вентиля;

коэффициент использования вентиля по току

$$k_i = \frac{I_{\text{а}}}{I_{\text{а н}}} \qquad (7.6)$$

где $I_{\text{а}}$ – среднее значение тока, протекающего через диод, $I_{\text{ан}}$ – номинальное значение тока вентиля;

типовая мощность трансформатора

$$S_{\text{тр}} = 0{,}5(S_1 + S_2) \qquad (7.7)$$

где $S_1 = U_1 \cdot I_1, S_2 = U_2 \cdot I_2$

коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_d}{P_d + P_{\text{тр}} + P_{\text{д}}} \qquad (7.8)$$

где $P_{\text{тр}}$ и $P_{\text{д}}$ – потери в трансформаторе и диодах.

Основной характеристикой выпрямителя, как и любого источника питания, является внешняя (нагрузочная) характеристика $U_d = f(I_d)$. Она позволяет определить номинальное значение выпрямленного напряжения и выходное сопротивление выпрямителя

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_d}{\Delta I_d} \qquad (7.9)$$

Свойства выпрямителя в значительной степени зависят от характера нагрузки на его выходных зажимах, которая может быть активной (омической), начинающейся с индуктивности и начинающейся с емкости.

Однофазная мостовая схема (рис.7. 2) строится на однофазном трансформаторе Т. Диодная группа образует мост, к одной диагонали которого подводится переменное напряжение, а в другую диагональ включается нагрузка. Диоды работают парами поочередно (рис.7.3): в положительные полупериоды напряжения U_2 ток проводят диоды *VD*2 и *VD*3, иначе – диоды *VD*1 и *VD*4.

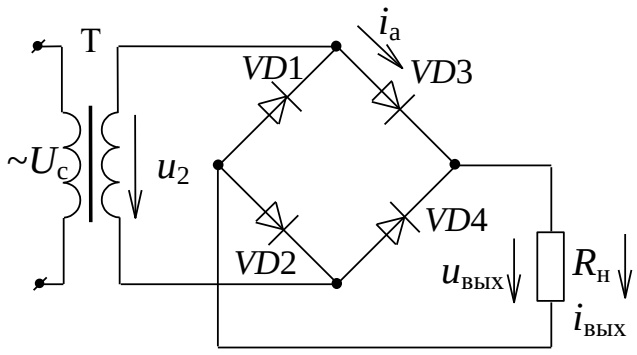


Рис.7. 2. Двухполупериодная мостовая схема выпрямителя

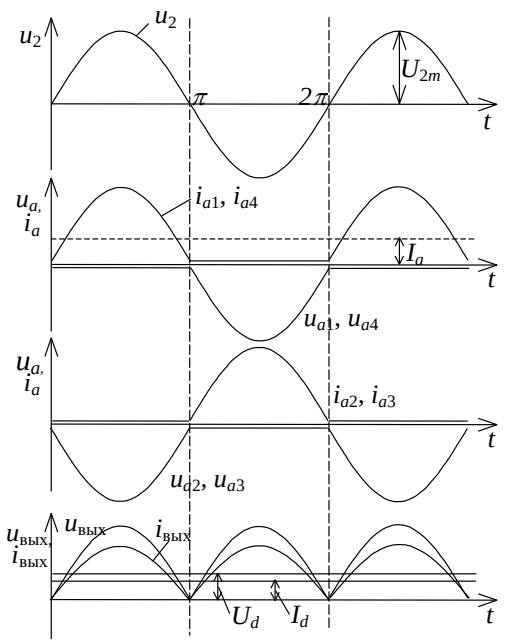


Рис.7. 3. Диаграммы токов и напряжений

Через нагрузку протекает пульсирующий ток в оба полупериода напряжения u_2. Преимуществами данной схемы выпрямления (по сравнению с однополупериодной схемой выпрямления) являются увеличение среднего значения выпрямленного тока и напряжения в два раза и значительное уменьшение пульсаций выпрямленного напряжения, при этом значение обратного напряжения на закрытых диодах такое же, как и в однополупериодной схеме выпрямления.

Схемы выпрямления трехфазного тока применяются в основном для питания потребителей большой и средней мощности. Они равномерно нагружают сеть трехфазного тока и отличаются высоким коэффициентом использования трансформатора, низким уровнем пульсаций. Ниже рассматриваются две часто применяемые схемы.

Трехфазные выпрямители с нейтральным выводом строятся на трехфазном трансформаторе (рис. 4), вторичные обмотки которого соединяются «звездой». Нагрузка включается между объединенными катодами диодов и нулевой точкой трансформатора. Из временных диаграмм (рис. 5) видно, что диоды проводят ток поочередно, каждый – в течение одной трети периода, когда потенциал начала одной фазы более положителен, чем двух других. Два других диода в этот период закрыты. Такая схема нашла применение на средних мощностях (P_d > 1 кВт) при невысоких требованиях к пульсациям выпрямленного напряжения. Достоинство такого выпрямителя – высокая надежность (минимальное число диодов) и низкое значение $k_п$ (по сравнению с однофазной схемой выпрямления).

Обязательной принадлежностью выпрямителя является сглаживающий фильтр, передающий на выход схемы постоянную составляющую выпрямленного напряжения и снижающий его пульсации. Основным параметром, характеризующим работу сглаживающего фильтра, является коэффициент сглаживания S. Он равен отношению коэффициентов пульсаций на входе и выходе фильтра

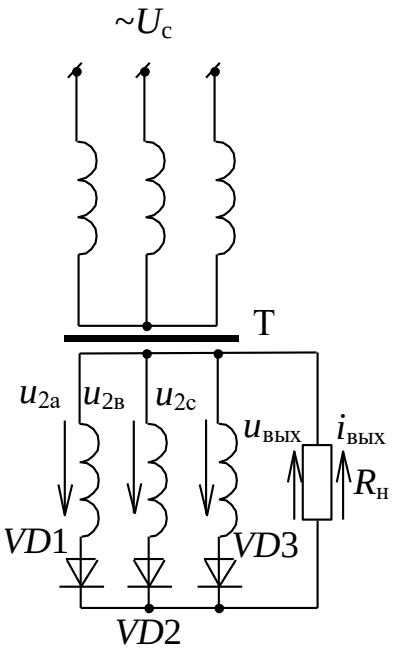


Рис.7. 4. Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом

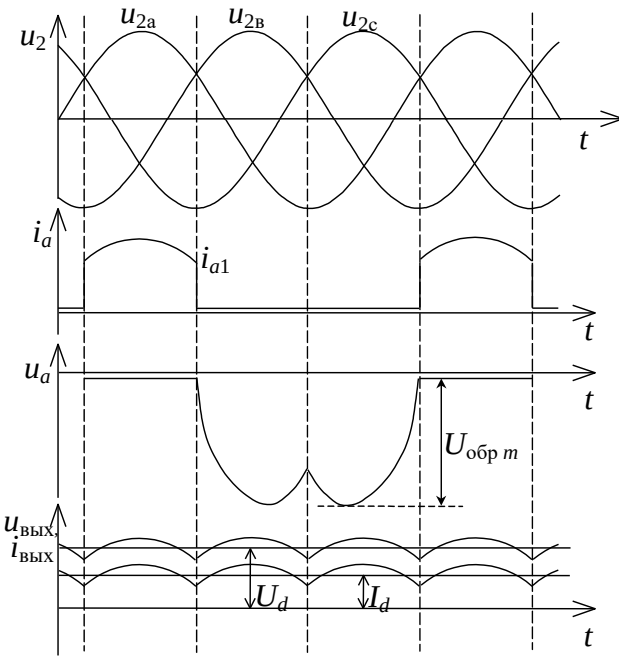
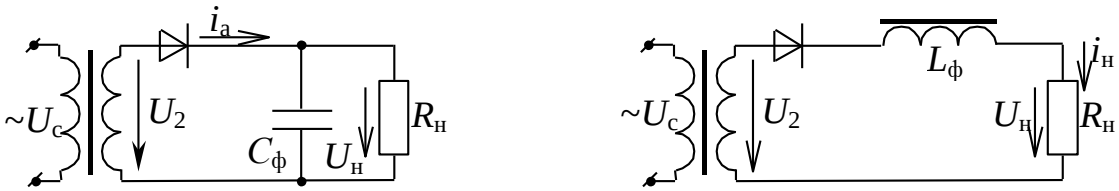


Рис.7. 5. Диаграммы токов и напряжений

Простейшими фильтрами являются конденсатор, включенный параллельно нагрузке (емкостный фильтр, рис. 7.6, а), и дроссель, включенный последовательно с нагрузкой (индуктивный фильтр, рис. 7.6, б).

$$S = \frac{k_{\text{п вх}}}{k_{\text{п вых}}} \qquad (7.10)$$

Пульсации на выходе емкостного фильтра определяются постоянной разряда конденсатора $\tau = C_{\text{ф}} \cdot R_{\text{н}}$, поэтому такие фильтры целесообразно применять с высокоомным нагрузочным резистором при небольшой мощности выпрямителя.



а б

Рис. 7.6. Однополупериодный выпрямитель с различными фильтрами

Эффективность индуктивного фильтра зависит от его постоянной времени $\tau = L_{\text{ф}} / R_{\text{н}}$. Длительность импульса тока увеличивается с ростом τ. Коэффициент сглаживания индуктивного фильтра

$$S = \frac{2\pi f_{\text{о.г}} L_{\text{ф}}}{R_{\text{н}}} \qquad (7.11)$$

Чем больше значение $L_{\text{ф}}$ или меньше $R_{\text{н}}$, тем эффективнее фильтр. Индуктивные фильтры обычно применяют в трехфазных выпрямителях средней и большой мощности с малым значением сопротивления нагрузки.

Пример расчета.

Рассчитать выпрямитель по следующим исходным данным: номинальное выпрямленное напряжение $U_{d\,\text{н}}$ = 1000 В, номинальный выпрямленный ток $I_{d\,\text{н}}$ = 10 А, коэффициент пульсаций на выходе $k_{\text{п вых}}$ = 0,03, напряжение сети $U_{\text{с}}$= 220 В с частотой $f_{\text{с}}$ = 50 Гц.

Выбор схемы выпрямителя

Определим сопротивление нагрузки: $R_{\text{н}} = U_{d\,\text{н}} / I_{d\,\text{н}}$; $R_{\text{н}}$ = 1000 / 10 = 100 Ом.

Выпрямленная мощность $P_d = U_{d\,\text{н}} \cdot I_{d\,\text{н}}$; P_d = 1000 · 10 = 10 000 Вт.

При мощностях, превышающих 1 кВт, рекомендуется применять выпрямители трехфазного тока. Для уменьшения размеров трансформатора и фильтра выбираем схему Ларионова, имеющую высокие технико-экономические показатели.

Выбор вентилей

Для выбранной схемы определим средний ток через диод:

$$I_{\text{а}} = \frac{I_{d\,\text{н}}}{3};\ I_{\text{а}} = \frac{10}{3} = 3{,}33\ \text{А}.$$

Ориентировочное значение обратного напряжения на вентиле $U_{\text{обр}\,m} > 1{,}045\ U_{d\,\text{н}}$. Принимаем $U_{\text{обр}\,m} = 1{,}1 \cdot 1{,}045 U_{d\,\text{н}}$; $U_{\text{обр}\,m} = 1{,}1 \cdot 1{,}045 \cdot 1000 = = 1150$ В.

По справочным данным выбираем тип вентиля из таблицы прил. 2. В данном случае подходит диод типа Д234Б (12 вентилей, по два последовательно соединенных вентиля в каждом плече моста), который имеет следующие параметры: номинальный прямой ток $I_{\text{а н}}$ = 5 А; прямое падение напряжения $U_{\text{а}}$ = 1,5 В; допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр доп}}$ = 600 В; среднее значение обратного тока $I_{\text{обр}}$ = 3 мА.

Рассчитаем значение выравнивающих сопротивлений $R_{\text{ш}}$ = (0,1,...,0,2) $R_{\text{обр}}$, где $R_{\text{обр}} = \frac{U_{\text{обр доп}}}{I_{\text{обр}}}$; $R_{\text{обр}} = \frac{600}{0{,}003} = 200\,000$ Ом = 200 кОм. Выбираем $R_{\text{ш}}$=0,15$R_{\text{обр}}$;

$R_{\text{ш}}$ = 0,15 · 200 = 30 кОм.

Выбор и расчет схемы фильтра

В трехфазных схемах выпрямления средней и большой мощности наиболее целесообразно использовать сглаживающий фильтр с индуктивной реакцией, т. е. начинающийся с дросселя. Необходимый коэффициент сглаживания фильтра с учетом явления коммутации

$$S = (1{,}5,\ldots,2{,}0)\frac{k_{\text{п вх}}}{k_{\text{п вых}}},$$

где $k_{\text{п вх}}$ – коэффициент пульсаций на выходе вентильной группы.

Для трехфазной мостовой схемы выпрямления Ларионова $k_{\text{п}}$ = 0,057.

Тогда коэффициент сглаживания $S = (1{,}5,...,2{,}0)\ \dfrac{0{,}057}{0{,}03} = 4$.

Поскольку значение коэффициента сглаживания несущественно, выбираем простейший однозвенный L-фильтр.

Для схемы Ларионова $f_{о.г} = 300$ Гц. Тогда индуктивность дросселя

$$L_ф = \frac{4 \cdot 100}{2\pi \cdot 300} = 0{,}21 \text{ Гн.}$$

Расчет параметров выпрямителя

Прямое сопротивление вентиля $r_а = \dfrac{U_а}{I_{а\,н}}$; $r_а = \dfrac{1{,}5}{5} = 0{,}3$ Ом

Коэффициенты для значений сопротивлений дросселя и трансформатора определяются по графикам рис.7.7 в зависимости от мощности выпрямителя:

$$R_т = 0{,}037R_н,\ \ R_т = 0{,}037 \cdot 100 = 3{,}7 \text{ Ом};$$
$$r_{др} = 0{,}034R_н,\ \ r_{др} = 0{,}034 \cdot 100 = 3{,}4 \text{ Ом}.$$

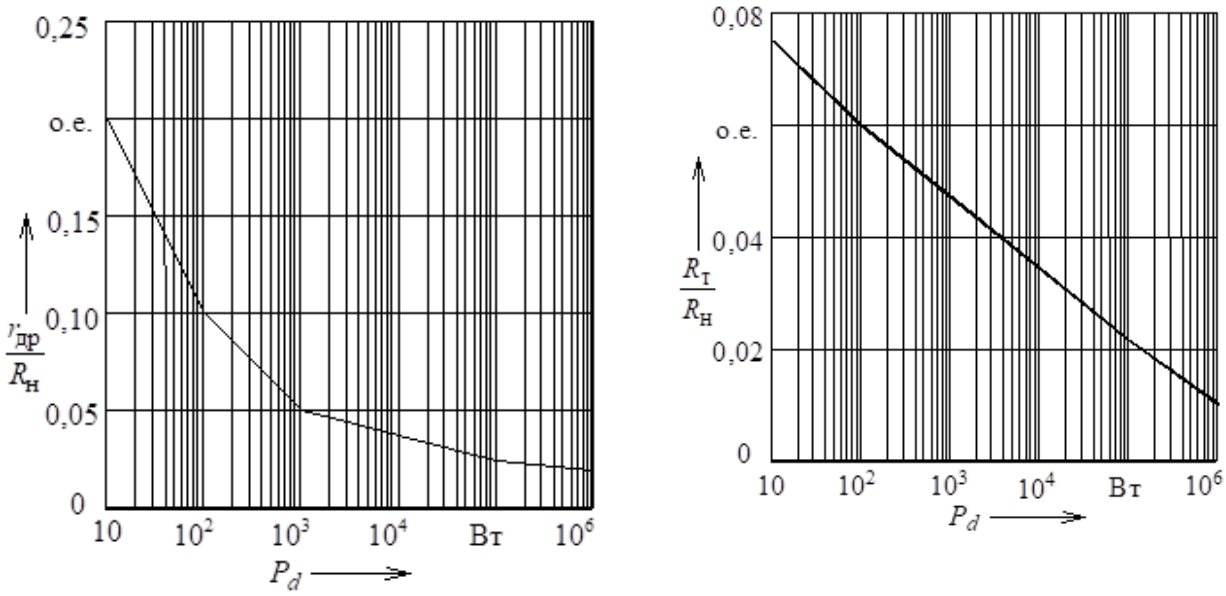


рис.7.7. Коэффициенты значений сопротивлений дросселя и трансформатора

Индуктивное сопротивление рассеивания обмотки трансформатора

$$x_s = (0{,}04 \div 0{,}1)\frac{100 \cdot 0{,}43}{0{,}82} = 2{,}5 \text{ Ом.}$$

Напряжение холостого хода для схемы Ларионова

$$U_{d\,х.х} = 1000 + 10(2 \cdot 2 \times \times 0{,}3 + 3{,}7 + 3{,}4 + \frac{2{,}5 \cdot 3}{2 \cdot 3{,}14}) = 1095 \text{ В.}$$

Параметры трансформатора (с учетом выбранной схемы Ларионова):

– напряжение на вторичной обмотке

$U_2 = 0{,}43U_{d\,х.х}$; $U_2 = 0{,}43 \cdot 1095 = 471$ В

– коэффициент трансформации $k = \dfrac{U_1}{U_2}$; $k = \dfrac{220}{471} = 0{,}467$;

– ток вторичной обмотки $I_2 = 0{,}82\ I_{dн}$; $I_2 = 0{,}82 \cdot 10 = 8{,}2$ А;

– ток первичной обмотки $I_1 = \dfrac{I_2}{k}$; $I_1 = \dfrac{8{,}2}{0{,}467} = 17{,}6$ А

– типовая (габаритная) мощность трансформатора

$$S_{тр} = 1{,}045\ U_{d\,н} \cdot I_{d\,н};\ S_{тр} = 1{,}045 \cdot 1000 \cdot 10 = 10\,450 \text{ Вт.}$$

Проверим нагрузочную способность выбранных вентилей, определив максимальное значение обратного напряжения:

$$U_{обр\,m} = 1{,}045\ U_{d\,х.х};\ U_{обр\,m} = 1{,}045 \cdot 1095 = 1144 \text{ В}$$

В данном примере для двух последовательно включенных диодов Д234Б

$$U_{обр\,m} < 2U_{обр\,доп};\ 2U_{обр\,доп} = 2 \cdot 600 = 1200 \text{ В}$$

Следовательно, тип вентилей и схема их включения выбраны правильно.

Внешнюю характеристику выпрямителя (рис.7.8) $U_d = f\ (I_d)$, которая представляет собой прямую линию, строим по двум точкам: точке холостого хода ($U_d = U_{d\,х.х}$, $I_d = 0$) и точке номинальной нагрузки ($U_d = U_{d\,н}$, $I_d = I_{d\,н}$).

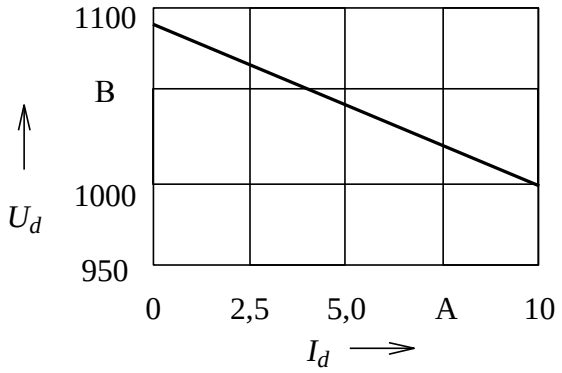


Рис. 7.8. Внешняя характеристика выпрямителя.

Задачи для самостоятельной работы

Расчет параметров выпрямителя и выберете нужного для питания промышленной установки.

В качестве исходных данных используются номинальное значение выпрямленного напряжения $U_{d\,н}$ и выпрямленного тока $I_{d\,н}$, номинальное напряжение питающей сети U_1 и его частота f_1, значение коэффициента пульсаций $k_{п\,вых}$. Общие требования: напряжение сети $U_с$ = 220 В, частота сети $f_с$ = 50 Гц. Остальные исходные данные выбираются по своему варианту из табл. 3.

В процессе выполнения задания необходимо: 1) выбрать схему выпрямителя и фильтра; 2) рассчитать режимы работы элементов; 3) определить тип вентиля, параметры трансформатора; 4) рассчитать значения элементов сглаживающего фильтра; 5) построить внешнюю характеристику выпрямителя.

Таблица 3

Варианты выполнения для самостоятельной работы.

Вариант	$I_{d\,н}$, А	$U_{d\,н}$, В	$k_{п\,вых}$	Вариант	$I_{d\,н}$, А	$U_{d\,н}$, В	$k_{п\,вых}$
1	3	1500	0,003	51	32	180	0,006
2	7	220	0,009	52	21	750	0,004
3	3,8	500	0,005	53	19	315	0,013
4	7	300	0,004	54	5	110	0,003

5	4,2	750	0,005	55	36	445	0,003
6	85	50	0,006	56	29	210	0,008
7	25	400	0,004	57	34	470	0,001
8	4,5	800	0,008	58	125	50	0,008
9	30	60	0,009	59	34	300	0,002
10	50	100	0,013	60	19	350	0,011
11	8,5	100	0,005	61	11	1500	0,002
12	10	900	0,003	62	3	2000	0,003
13	1,5	200	0,003	63	5	14	0,070
14	16	500	0,003	64	28	250	0,006
15	14	200	0,008	65	9	70	0,001
16	3	300	0,005	66	23	740	0,004
17	150	50	0,008	67	9	800	0,011
18	200	50	0,005	68	21	820	0,003
19	300	50	0,010	69	18	400	0,009
20	1,5	500	0,006	70	25	695	0,002
21	50	150	0,002	71	88	190	0,007
22	24	100	0,005	72	96	75	0,003

Вопросы для самоконтроля

1. Поясните назначение выпрямительных устройств.
2. Назовите основные типы однофазных выпрямительных схем
3. Объясните отличие однотактной схемы выпрямления от двухтактной схемы.
4. Назовите основные виды сглаживающих фильтров
5. Поясните, в каких случаях целесообразно использовать индуктивные, а в каких — емкостные фильтры или их сочетания.
6. Каково значение коэффициента пульсаций напряжения или тока исследуемых выпрямительных схем?
7. Изобразите временные диаграммы напряжений и токов нагрузки одно- и двухполупериодной схем выпрямления без сглаживающего фильтра.

Качественные задачи

1. При каскадном соединении фильтров результирующий КПД равен ... КПД отдельных звеньев (произведению)
2. При возрастании индуктивности в LC-фильтре в 2 раза и уменьшении частоты пульсаций в 2 раза сглаживающее действие фильтра уменьшится в ... раза (два)
3. В активно-индуктивном и активно-емкостном фильтрах возникают перенапряжения при … нагрузки. (уменьшении)
4. При каскадном соединении фильтров результирующий коэффициент сглаживания равен ... коэффициентов сглаживания звеньев (произведению)
5. Для защиты вентилей при включении выпрямителя с … фильтром применяются плавкие предохранители, автоматические выключатели и специальные схемы плавного пуска. (ёмкостным)
6. С целью улучшения массогабаритных показателей сглаживающих фильтров, вместо пассивных используют … фильтры.(активные)
7. Резонансные сглаживающие фильтры имеют собственную резонансную частоту, равную, обычно, частоте ... (пульсации)

Практическая работа № 8. «Расчет переходных процессов классическим методом в цепях первого и второго порядка»

Теоретические сведения

Коммутация - это включение, отключение, переключение элементов цепи, изменение параметров элементов цепи и т. п. Для большинства реальных процессов можно считать, что коммутация *происходит мгновенно*.

Переходным процессом в электрической цепи называется процесс изменения во времени токов в ветвях и напряжений на элементах цепи, вызванный коммутацией.

Переходный процесс начинается с момента коммутации (время t=0) и протекает между *установившимся* процессом *до коммутации* и *установившимся* процессом *после коммутации*. Момент времени непосредственно перед коммутацией обозначается $t=0_-$, а сразу после коммутации $t=0_+$ или t=0.

Для индуктивного и ёмкостного элементов справедливы **два закона коммутации.**

1.В индуктивном элементе ток (потокосцепление) в момент коммутации t = 0 сохраняет значение, которое он имел непосредственно перед коммутацией, т. е. при t = 0-, и дальше начинает изменяться с этого значения

$$i_L(0-) = i_L(0+) \qquad (8.1)$$

2.На ёмкостном элементе напряжение (заряд) сохраняет в момент коммутации то значение, которое оно имело непосредственно перед коммутацией, и в дальнейшем изменяется, начиная с этого значения

$$u_C(0-) = u_C(0+) \qquad (8.2)$$

Законы коммутации называются ***независимыми начальными значениями*** и являются следствием закона сохранения энергии электромагнитного поля в индуктивном и ёмкостном элементах. Все остальные токи в резисторах и ёмкостях, а также напряжение на индуктивности в цепи могут изменяться скачком и называются ***зависимыми начальными значениями***. Зависимые начальные значения определяются по законам Кирхгофа, составленным для исследуемой цепи после коммутации в момент времени $t=0_+$ и с учётом законов коммутации.

Переходный, принуждённый и свободный процессы

Любой режим работы цепи, в том числе и переходный, может быть рассчитан по системе уравнений, составленной по законам Кирхгофа. При расчёте законов изменения токов и напряжений после коммутации в линейной цепи, содержащей реактивные элементы (индуктивности и ёмкости), система уравнений Кирхгофа представляет собой систему

неоднородных обыкновенных дифференциальных уравнений. Совместное решение этих уравнений для конкретного тока или напряжения приводит к неоднородному линейному дифференциальному уравнению вида:

$$a_0x^n + a_1x^{n-1} + \ldots + a_{n-1}x^1 + a_nx^0 = f(t) \qquad (8.3)$$

где $a_0,\ldots,$ a_n - постоянные коэффициенты, зависящие от параметров цепи; $x^n,\ldots,$ x^0 - производные искомого тока или напряжения по времени; f(t) - функция, определяемая действием источников напряжения или тока; n - порядок дифференциального уравнения, который определяется числом независимых накопителей энергии (реактивных элементов: индуктивности и ёмкости), n- определяет порядок электрической цепи.

Решение уравнения (8.3) классическим методом представляется суммой двух составляющих

$$x_{ПР}(t) = x_{ПР}(t) + x_{СВ}(t). \qquad (8.4)$$

$x_{ПР}(t)$ - принуждённая составляющая, которая является частным решением дифференциального уравнения (8.3) и определяет установившееся значение тока или напряжения после коммутации.

$x_{СВ}(t)$ - свободная составляющая, которая является общим решением однородного обыкновенного дифференциального уравнения получаемого из (3):

$$a_0x^n + a_1x^{n-1} + \ldots + a_{n-1}x^1 + a_nx^0 = 0 \qquad (8.5)$$

Для решения (5) составляется характеристическое уравнение Для его получения в (5) производная заменяется на оператор – p (т. е. $d/dt \Rightarrow p$)

$$a_0p^n + a_1p^{n-1} + \ldots + a_{n-1}p^1 + a_np^0 = 0 \qquad (8.6)$$

Затем определяются корни характеристического уравнения (6) p_1, …, p_n и записывается решение для свободной составляющей $x_{СВ}(t)$:

$$x_{СВ}(t) = A_1e^{p_1} + A_2e^{p_2} + \ldots + A_ne^{p_n} \qquad (8.7)$$

где $A_1,\ldots,$ A_n - постоянные интегрирования

Постоянные интегрирования определяются из системы уравнений составленной для начальных значений искомой функции – x(0) и её производных - $x^1(0),\ldots,x^n(0)$ в момент коммутации $t=0_+$. Для цепи второго порядка n=2 и действительных отрицательных корней p_1 и p_2 такая система имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} x(0) &= x_{ПР}(0) + A_1 + A_2 \\ x'(0) &= x'_{ПР}(0) + p_1A_1 + p_2A_2 \end{aligned}\right\} \qquad (8.8)$$

Характер свободной составляющей переходного процесса для всех токов и напряжений одной и той же цепи одинаков и зависит только от параметров R, L и C цепи и определяется корнями характеристического уравнения $p_1,\ldots,p_n$.

Свободная составляющая $x_{СВ}(t)$ связывает начальное значение функции x(0) с установившимся после коммутационным значением и обеспечивает непрерывное приближение тока или напряжения к её установившемуся значению. Теоретически, переходный процесс длится бесконечно большое время, но на практике он заканчивается за конечное время, которое определяется конкретными условиями задачи.

Порядок расчёта переходных процессов классическим методом

1. Записывается общее решение для искомого тока или напряжения - x(t):

$$x(t)= x_{ПР}(t)+ x_{СВ}(t). \quad (8.9)$$

2. Определяется принуждённая составляющая искомой величины $x_{ПР}(t)$ из расчёта установившегося режима после коммутации при $t=\infty$

3. Определяется свободная составляющая искомой величины $x_{СВ}(t)$

3.1. Общее решение для свободной составляющей искомой величины определяется из решения характеристического уравнения. Для чего используется схема замещения цепи для режима после коммутации, при составлении которой вместо источников э.д.с. и тока остаются их внутренние сопротивления, а ёмкость и индуктивность заменяются операторными сопротивлениями:

$$Z_C(p) = \frac{1}{pC}. \text{ и } Z_L(p) = pL \qquad (8.10)$$

3.2.Определяются постоянные интегрирования из начальных условий для искомого тока или напряжения

4.Записывается полное решение для искомой величины x(t).

Вопросы для самоконтроля:

1. Какой процесс называется переходным? Дайте определение до коммутационного, принуждённого и свободного режимов.

2. Возможен ли переходный процесс в резистивной цепи?

3. Как определить длительность переходного процесса?

4. Как определяются независимые и зависимые начальные условия?

5.Как составить характеристическое уравнение? Для чего оно необходимо?.

6.Как по графикам определить постоянную времени? Каков её физический смысл?

7. Как определить порядок электрической цепи?

8. Какие составляющие имеет решение для искомых токов или напряжений классическим методом?

9.Каков порядок расчёта переходного процесса в цепи классическим методом?

Качественные задачи.

1.Какая гармоника спектра считается основной?

2.При прохождении сигнала через электрическую цепь его форма и амплитуда не изменилась. Время задержки составило 50 мкс. Какой вид искажений имеет место в данном случае?

3.Характер переходного процесса будет апериодическим если…?

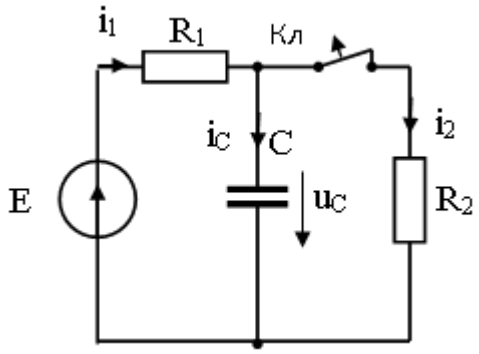
4.Переходной процесс в RLC- цепи носит колебательный характер, в том случае, когда корни характеристического уравнения…?

5.Постоянная времени RC-цепи равна…?

6. Длительность переходного процесса в RL цепи определяется…?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1.



Дана цепь рис 8.1.
E = 12 В; R_1 = 10 Ом; R_2 = 2 Ом; C = 10 мкФ;
Рассчитать закон изменения тока $i_1(t)$ и напряжения $u_C(t)$ после размыкания ключа «Кл».

Рис.8.1 Схема цепи к задаче № 1

Решение

Переходный процесс описывается неоднородным обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка, составленным по 2 закону Кирхгофа

$$R_1 i_1(t) + u_C(t) = E. \qquad (8.1.1)$$

В формуле (1.1) необходимо учесть $i_C(t) = C\dfrac{du_c}{dt}$.

1.Запишем общее решение искомого тока классическим методом:

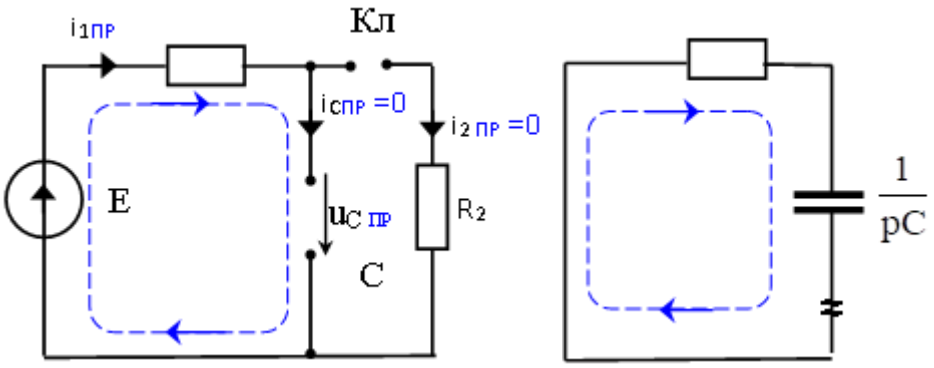
$$i_C(t) = i_{СПР}(t) + i_{ССВ}(t) \qquad (8.1.2)$$

$$u_C(t) = u_{C\,ПР}(t) + u_{C\,СВ}(t)$$

2. Определим по законам Кирхгофа (схема замещения рис. 8.2.а) принуждённые составляющие искомого тока $i_{СПР}$ и $u_{СПР}$, для установившимся режима после коммутации при t=∞

$$i_{1ПР}(t) = i_{СПР}(t) = 0 \qquad (8.1.3)$$

$$u_{C\text{ПР}}(t) = E = 12\ \text{В} \qquad (8.1.4)$$



а) б)

Рис.8.2 Схема замещения электрической цепи

3. Находим свободную составляющую $i_{CB}(t)$ и $u_{C\ CB}(t)$.

Общее решение для $i_{CB}(t)$ и $u_{CCB}(t)$ можно записать после решения характеристического уравнения.

3.1. Составим характеристическое уравнение.

Для чего составляем схему замещения рис. 8.2.б, относительно разрыва в любом месте после коммутационной цепи записываем входное сопротивление и, приравнивая его нулю, получим однородное уравнение:

$$Z_{BX}(p) = R_1 + \frac{1}{pC} = 0 \qquad (8.1.5)$$

Из выражения 1.5 определим корень уравнения: $p = -\dfrac{1}{R_1C} = -10000 = -10^4\ c^{-1}$

Определяем постоянную времени $\tau = 1/|p| = R_1C = 10^{-4}$ с.

Записываем решение для свободной составляющей:

$$i_{CCB}(t) = Ae^{pt} \quad \text{и} \quad u_{C\ CB}(t) = Be^{pt} \qquad (8.1.6)$$

3.2. Определяем постоянные интегрирования А и В.

3.2.1. Записываем решение для тока $i_C(t)$ и напряжения $u_C(t)$ при $t=0_+$, с учётом (8.1.3), (8.1.4) и (8.1.6) получим:

$$i_C(t) = i_{C\text{ПР}}(t) + i_{CCB}(t) = 0 + Ae^{pt}, \quad i_C(0) = A \qquad (8.1.7)$$

$$u_C(t) = u_{C\text{пр}}(t) + u_{C\text{св}}(t) = E + Be^{pt},\ \ u_C(0) = E + B = 12 + B \qquad (8.1.8)$$

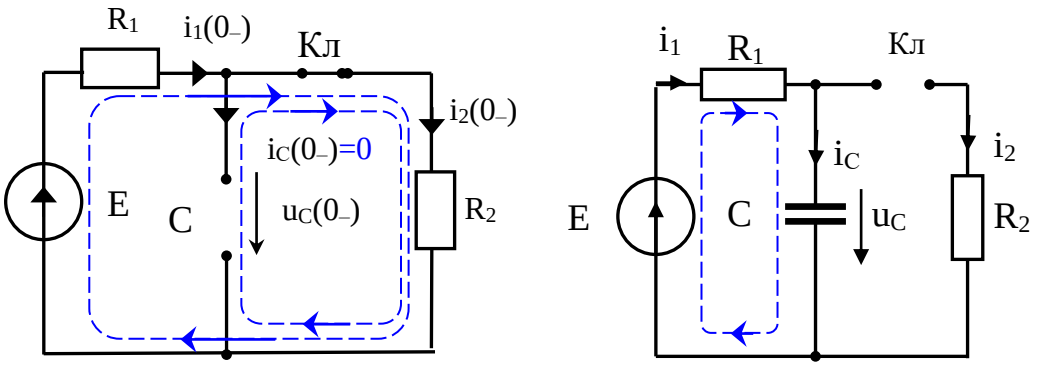


Рис.3.

а) **б)**

Рис.8.3. Схема электрической цепи до и после коммутации

3.2.2. Определяем независимые начальные значения $u_C(0_+) = u_C(0_-)$

До коммутации $t=0_-$ ключ разомкнут (рис. 6а.), ток в ветви с индуктивностью равен нулю и напряжение на конденсаторе равно напряжению на резисторе R_2. В цепи не нулевые начальные условия:

$$u_C(0_-) = u_C(0_+) = R_2 \frac{E}{R_1 + R_2} = 2\ \text{В}. \qquad (8.1.9)$$

3.2.3. Определяем зависимые начальные значения – iC(0+).

После коммутации $t \geq 0+$ ключ разомкнут (рис. 3б.), Составляем уравнение по второму закону Кирхгофа и запишем её при t = 0+:

$$\begin{cases} i_1(0_+) - i_2(0_+) - i_C(0_+) = 0. \\ R_1\, i_1(0_+) + u_C(0_+) = E. \\ i_2(0_+) = 0. \end{cases} \qquad (8.1.10)$$

$u_C(0_+) = 2$ В. $\quad i_2(0_+) = 0 \quad i_1(0_+) = (E - u_C(0_+)) / R_1 = 1$ А.

$$i_1(0_+) = i_C(0_+) = 1 \text{ A}. \qquad (8.1.11)$$

3.2.4. Определяем постоянные интегрирования из (7) и (8) с учётом (8.1.9) и (8.1.10)

$$i_C(0) = 0 + A = (E - u_C(0_+)) / R_1 \quad \text{и} \quad A = 1 \text{ A}, \qquad (8.1.12)$$

$$u_C(0) = E + B = 0 \quad \text{и} \quad B = u_C(0) - E = -10 \text{ B} \qquad (8.1.13)$$

5. Записываем полное решение для рассчитываемых величин i(t) и $u_C(t)$ и строим графики процесса .

$$i_C(t) = ((E - u_C(0_+)) / R_1)e^{pt} = 1\, e^{-10000t} \text{ A}. \qquad (8.1.14)$$

$$u_C(t) = E - Be^{pt} = 12 - 10\, e^{-10000t} \text{ B}. \qquad (8.1.15)$$

Кривые изменения тока $i_C(t)$, и напряжения $u_C(t)$ приведены на рис. 8.4. Из графиков видно, что напряжение на конденсаторе устанавливается постепенно по экспоненциальному закону от нуля до $u_{СПР} = E$.
Ток через ёмкость до коммутации равно нулю, а в момент коммутации устанавливается скачком до значения $i_C(0_+) = (E - u_C(0_+)) / R_1$ и затем плавно по экспоненциальному закону уменьшается до нуля

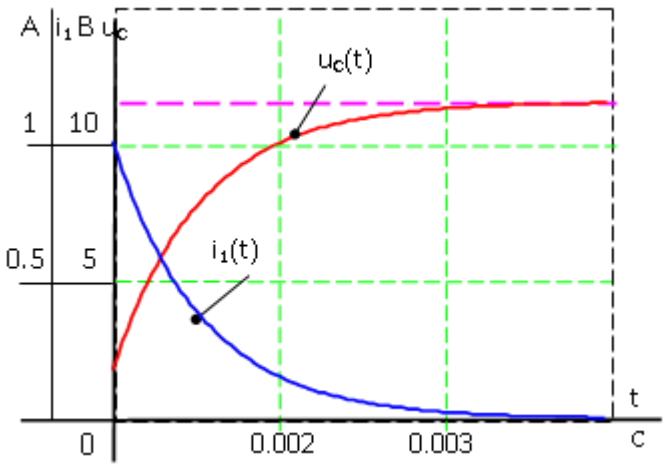


Рис.8.4. Кривые изменения тока $i_C(t)$, и напряжения $u_C(t)$

Задачи для самостоятельной работы

Задача№ 1.

Для цепи рис.1. E=100 В, R=150 Ом, L=0.2 Гн, C=20 мкФ определить корни характеристического уравнения и записать решение в общем виде для напряжения на индуктивности.

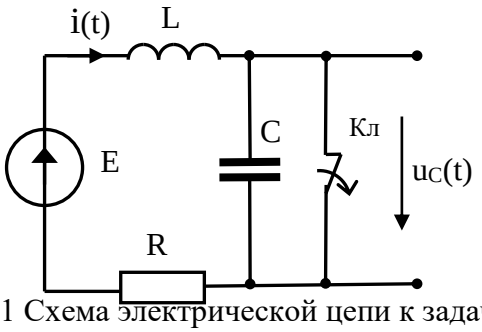


Рис.1 Схема электрической цепи к задаче № 1

Задача№ 2.

Для цепи (рис. 6.) U=20 В, ток источника тока I_K=0.1 А, R=400 Ом, L=0.05Гн, C=2.0мкФ. определить $u_C(0+)$ и $u'_C(0+)$.

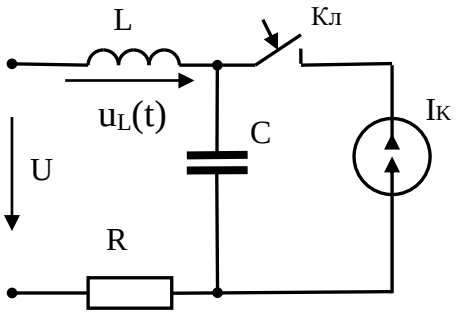


Рис.2. Схема электрической цепи к задаче № 2

Задача№ 3.

Для цепи (рис. 3.) R=25 Ом, L=0.25 Гн, C=20 мкФ. определить корни характеристического уравнения и записать в общем виде решение для тока на конденсаторе.

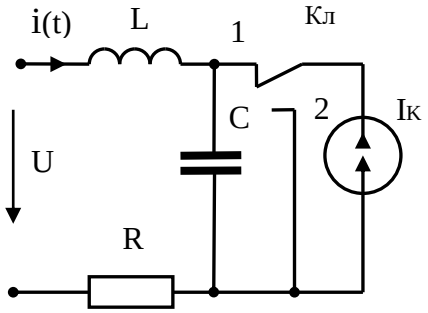


Рис 3. Схема электрической цепи к задаче № 3

Задача 4.

Для цепи (рис. 8), u(t)=25sin(314t+45°) В, R_1=1.2 кОм, R_2=510 кОм, C=2.2мкФ Определить $i_C(0+)$.

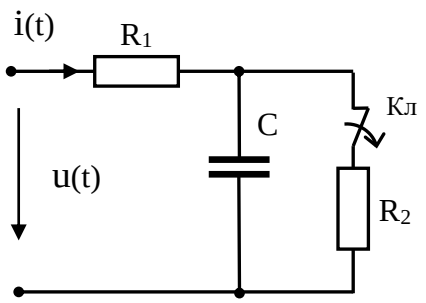


Рис.4.Схема электрической цепи к задаче №4

Задача 5

Для цепи рис. 9, e(t)=220 sin(314t+15°) В. R_1=50 Ом, R_2=10 Ом, L=0.2 Гн определить $u_L(0+)$.

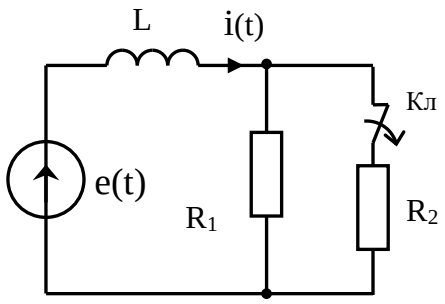


Рис.5. Схема электрической цепи к задаче № 5

Практическая работа № 9. «Погрешности измерений и средств измерений»

Теоретические сведения.

1.1. Классификация погрешностей измерений и средств измерений

Применяемые при измерениях методы и средства измерений не являются идеальными. Поэтому после завершения процесса измерения всегда остается некоторая неопределенность в информации об объекте измерения, т. е. получить истинное значение физической величины невозможно. Однако, это понятие введено в теорию измерений, при этом различают истинное и действительное значения измеряемой величины и результат измерения. Истинное значение физической величины – это значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в количественном и качественном отношении соответствующую физическую величину. Действительное значение физической величины – значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть ис-пользовано вместо него. Результат измерения – значение физической величины, полученное путем ее измерения. Результат измерения представляет собой приближенную оценку истинного значения физической величины. Остаточная неопределенность в информации об объекте измерения может характеризоваться различными мерами не-определенности. В метрологии мерой неопределенности результата измерений является погрешность результата измерения.

Под *погрешностью результата измерения* (*погрешностью измерения*) понимается отклонение результата измерения X от истинного (действительного) значения Q измеряемой величины:

$$\Delta = X - Q \qquad (9.1)$$

Погрешность измерения указывает границы неопределенности значения измеряемой величины. Истинное значение физической величины применяется при решении теоретических задач метрологии. На практике пользуются действительным значением. За действительное значение физической величины при однократных измерениях, как правило, принимают значение, полученное с помощью эталонного средства измерений, а при многократных измерениях – среднее арифметическое ряда отдельных измерений, входящих в данный ряд. В зависимости от решаемой задачи могут использоваться и другие значения.

Погрешностью средства измерений называется разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой величины.

По способу выражения различают абсолютную, относительную и приведенную погрешности.

Абсолютная погрешность – это погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины и определяемая согласно выражению (1). Абсолютная погрешность сама по себе не может служить показателем точности измерений, поэтому вводится понятие относительной погрешности.

Относительная погрешность – это погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины. Она является более наглядной характеристикой оценки качества результата измерения по сравнению с абсолютной погрешностью. Относительная погрешность выражается в относительных единицах (в процентах) и определяется по выражению:

$$\delta = \frac{\Delta}{Q} \cdot 100\ \% = \frac{X - Q}{Q} \cdot 100\ \% \qquad (9.2)$$

Приведенная погрешность – это относительная погрешность, в которой абсолютная погрешность средства измерений отнесена к условно принятому значению Q_N, постоянному на всем диапазоне измерений или его части:

$$\gamma = \frac{\Delta}{Q_N} \cdot 100\ \% = \frac{X - Q}{Q_N} \cdot 100\ \% \qquad (9.3)$$

Условно принятое значение величины Q_N называют нормирующим значением. За нормирующее значение, как правило, принимают верхний предел измерений (максимальное значение измеряемой величины), т. е. $Q_N = Q_{max}$. Указание погрешности измерений в виде приведенной относительной погрешности свидетельствует о том, что абсолютная погрешность измерений Δ постоянна на всем диапазоне измерений.

Проанализировав формулы (2) и (3), можно построить графики зависимости относительных погрешностей δ и γ от показания измерительного прибора с односторонней шкалой (рис. 1). Поделив шкалу прибора на четыре равные части от нуля до Q_{max}, получим, что относительная погрешность δ максимальна в 1-й четверти шкалы и минимальна в 4-й четверти шкалы.

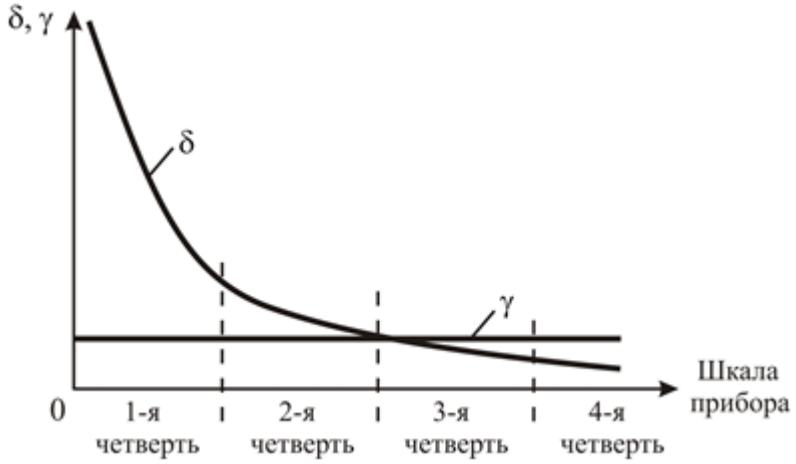


Рис. 1. Графики зависимости относительной и приведенной погрешностей от показания измерительного прибора

На основании анализа полученных графиков зависимости можно сделать следующие выводы.

1. Для получения наименьшей относительной погрешности δ необходимо использовать 4-ю или 3-ю четверть шкалы прибора.

2. Из графика зависимости $\gamma = f(Q)$ следует, что приведенная относительная погрешность не зависит от показания прибора. Поэтому приведенная погрешность γ положена в основу класса точности электромеханических приборов. В соответствии с ГОСТ 8.401–80 электромеханические приборы поделены на девять классов точности (табл. 1).

Таблица 1

Классы точности электромеханических приборов

Класс точности	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й
γ, %	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	4,0

Если в формулу (2) подставить абсолютную погрешность, выраженную через формулу (3), то получим формулу, связывающую относительную и приведенную погрешности:

$$\delta = \gamma \frac{Q_N}{Q} \qquad (9.4)$$

Относительная погрешность косвенных измерений определяется по формуле:

$$\delta = |k_1\delta_1| + |k_2\delta_2| + ... + |k_n\delta_n| \qquad (9.5)$$

где k_1, k_2, …, k_n – показатели степени степенного многочлена; δ_1, δ_2, …, δ_n – относительные погрешности прямых измерений.

Относительная и приведенная погрешности могут быть как положительными, так и отрицательными. На практике формула (5) чаще всего ограничивается двумя слагаемыми.

По характеру проявления различают систематическую и случайную погрешности, а также грубые погрешности (промахи).

Систематическая погрешность – составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной для данного ряда измерений или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях физической величины постоянного размера.

Случайная погрешность – составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в серии повторных измерений физической величины постоянного размера, проведенных с одинаковой тщательностью в одинаковых условиях. В появлении таких погрешностей нет какой-либо закономерности, они проявляются при повторных наблюдениях в виде некоторого разброса полученных результатов.

Грубые погрешности (промахи) – это такие погрешности, которые при исправных средствах измерений и корректных действиях экспериментатора (оператора) не должны появляться. Проявляются они в том, что результаты отдельных измерений резко отличаются от остальных.

Особое место среди погрешностей занимают *прогрессирующие (дрейфовые) погрешности.* Их особенностью является то, что они могут быть скорректированы и учтены только в данный момент времени, а в дальнейшем вновь непредсказуемо изменяются. Прогрессирующая погрешность является понятием, которое не может быть сведено к понятиям случайной и систематической погрешностей, однако в нормативных документах ее определяют как один из видов систематической погрешности.

В зависимости от источника возникновения различают методическую, инструментальную и субъективную погрешности.

Субъективные погрешности связаны с индивидуальными особенностями оператора. Разновидностями субъективных погрешностей являются погрешности отсчитывания, интерполяции и параллакса. *Погрешность отсчитывания* возникает из-за ошибок в отсчете показаний (примерно 0,1 деления шкалы). *Погрешность интерполяции* – это погрешность, вызванная неточностью нахождения промежуточного значения какой-либо изменяющейся величины по ряду соседних известных значений. *Погрешностью параллакса* называется погрешность, обусловленная изменением видимого положения стрелки прибора относительно удаленного фона в зависимости от положения оператора. В основном же, систематические погрешности возникают из-за методической и инструментальной составляющих.

Методическая составляющая погрешности обусловлена метода измерения, приемами использования средства измерений, некорректностью расчетных формул и округления результатов измерений.

Инструментальная составляющая погрешности возникает из-за собственной погрешности средства измерений, определяемой классом точности, влиянием средства измерений на результат измерения и ограниченной разрешающей способности средства измерений.

По условиям возникновения у средств измерений различают основную и дополнительные погрешности. Каждое средство измерений предназначено для работы в определенных условиях, указываемых в нормативно-технической документации. При этом

отдельно указывают *нормальные условия* применения средств измерений, т. е. условия, при которых величины, влияющие на погрешности данного средства измерений, находятся в пределах нормальной области значений, и *рабочие условия* применения – условия работы, при которых значения влияющих величин выходят за пределы нормальных, но находятся в пределах рабочих областей. Погрешность средства измерений, определенная при нормальных условиях, называется *основной.* Погрешность, обусловленная выходом значений влияющих величин за пределы нормальных значений, называется *дополнительной.* Для оценивания дополнительных погрешностей в документации на средство измерений обычно указывают нормы изменения показаний при выходе условий измерения за пределы нормальных.

По характеру поведения измеряемой величины в процессе измерения выделяют статические и динамические погрешности.

Статическая погрешность проявляется при работе средства измерений в статическом режиме, когда показания средства измерений не зависят от его динамических свойств, или когда этой зависимостью можно пренебречь.

Динамическая погрешность возникает при работе средства измерений в динамическом режиме и определяется двумя факторами: динамическими (инерционными) свойствами средства измерений и характером изменения измеряемой величины.

У средств измерений часто можно выделить составляющие погрешности, не зависящие от значения измеряемой величины, и погрешности, изменяющиеся пропорционально измеряемой величине. Такие составляющие называются, соответственно, *аддитивными* и *мультипликативными погрешностями*.

Классификация погрешностей измерений и средств измерений приведена в табл. 2.

Таблица 2

Классификация погрешностей измерений и средств измерений

Классификационный признак	Виды погрешностей	
	измерений	средств измерений
1	2	3
Способ выражения	Абсолютная Относительная	Абсолютная Относительная Приведенная
Характер проявления	Систематическая Случайная Грубая	Систематическая Случайная
Условия возникновения: нормальные рабочие	– –	Основная Дополнительная
Источник возникновения	Методическая Инструментальная Субъективные	– Несовершенство средств измерений Отсчитывания Интерполяции Параллакса
Характер поведения измеряемой величины	–	Статическая Динамическая
По характеру зависимости от измеряемой величины		Аддитивные Мультипликативные

1.2. Случайные погрешности и их вероятностное описание

Когда при проведении в одинаковых условиях повторных измерений одной и той же величины получают результаты, отличающиеся друг от друга, это свидетельствует о наличии в них случайных погрешностей. Каждая такая погрешность возникает вследствие одновременного воздействия на результат измерения случайных возмущений и сама является случайной величиной. В этом случае предсказать результат отдельного измерения и исправить его введением поправки невозможно. Можно лишь с определенной долей уверенности утверждать, что истинное значение измеряемой величины находится в пределах разброса результатов измерений от Q_{min} до Q_{max}. Однако остается неясным, какова вероятность появления того или иного значения погрешности, какое из множества лежащих в этой области значений величины принять за результат измерения и какими показателями охарактеризовать случайную погрешность результата измерения. Для этого требуется принципиально иной подход, чем при анализе систематических погрешностей. Данный подход основывается на рассмотрении результатов измерений и случайных погрешностей как случайных величин. Методы теории вероятностей и математической статистики позволяют установить статистические закономерности появления случайных погрешностей и на основании этих закономерностей дать количественные оценки результата измерения и его случайной погрешности.

Для характеристики свойств случайной величины в теории вероятностей используют понятие закона распределения вероятностей случайной величины. Различают две формы описания закона распределения: интегральную и дифференциальную. В метрологии преимущественно используется дифференциальная форма – закон распределения плотности вероятностей случайной величины. Закон распределения дает полную информацию о свойствах случайной величины и позволяет оценить результат измерения и его случайную погрешность.

Для описания частных свойств случайных величин используются их числовые характеристики. Из числовых характеристик наибольший интерес представляют математическое ожидание и дисперсия случайной величины. Дисперсия характеризует рассеяние отдельных значений случайной величины относительно среднего значения и имеет размерность квадрата случайной величины. Однако на практике чаще всего пользуются положительным квадратным корнем из дисперсии – средним квадратическим отклонением (СКО), которое имеет размерность самой случайной величины.

Задача оценки результата измерения состоит в том, чтобы по полученным экспериментальным путем данным, содержащим случайные погрешности, найти оценку истинного значения измеряемой величины. При этом полагают, что систематические погрешности в результате измерения отсутствуют или исключены.

К оценкам, получаемым по статистическим данным, предъявляются требования состоятельности, несмещенности и эффективности. Оценка называется *состоятельной*, если при увеличении числа наблюдений она стремится к истинному значению оцениваемой величины.

Оценка называется *несмещенной*, если ее математическое ожидание равно истинному значению оцениваемой величины.

В том случае, когда можно найти несколько несмещенных оценок, то лучшей из них считается та, которая имеет наименьшую дисперсию. Чем меньше дисперсия оценки, тем более *эффективной* считают эту оценку.

Способы нахождения оценок результата измерения зависят от вида функции распределения и от имеющихся соглашений по этому вопросу, регламентируемых в рамках законодательной метрологии. На практике встречаются различные формы кривой закона распределения, однако чаще всего имеют дело с нормальным и равномерным распределением плотности вероятностей.

Для количественной оценки случайных погрешностей и установления границ случайной погрешности результата измерения могут использоваться: предельная

погрешность, интервальные оценки, числовые характеристики закона распределения. Выбор конкретной оценки определяется необходимой полнотой сведений о погрешности, назначением измерений и характером использования их результатов. Комплексы оценок показателей точности установлены стандартами.

Наиболее универсальными и информативными являются интервальные оценки. Площадь, заключенная под кривой плотности распределения погрешностей, отражает вероятность всех возможных значений погрешности и по условиям нормирования равна единице. Эту площадь можно разделить вертикальными линиями на несколько частей. Абсциссы таких линий называются квантилями. Так, на рис. 2 абсцисса ΔQ_1 есть 25 %-я квантиль,

т. к. площадь под кривой $f(\Delta Q)$ слева от нее составляет 25 % всей площади, а абсцисса ΔQ_2 соответствует 75 %-й квантили. Между ΔQ_1 и ΔQ_2 заключено 50 % всех возможных значений погрешности, а остальные лежат вне этого интервала.

Рис. 2. Квантильные оценки случайной величины

Квантильная оценка погрешности представляется интервалом от $-\Delta Q(P)$ до $+\Delta Q(P)$, на котором с заданной вероятностью P встречаются $P{\cdot}100$ % всех возможных значений случайной погрешности. Интервал с границами $\pm\Delta Q(P)$ называется *доверительным интервалом* случайной погрешности, а соответствующая ему вероятность – *доверительной вероятностью.* Принято границы доверительного интервала (доверительные границы) указывать симметричными относительно результата измерения.

Так как квантили, ограничивающие доверительный интервал погрешности могут быть выбраны различными, то при оценивании случайной погрешности доверительными границами необходимо одновременно указывать значение принятой доверительной вероятности (например, ±0,3 ед. при P = 0,95).

Доверительные границы случайной погрешности $\Delta Q(P)$, соответствующие доверительной вероятности P, определяются по формуле:

$$\Delta Q(P) = t\sigma, \qquad (9.6)$$

где t – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности P и формы закона распределения; σ – среднее квадратическое отклонение

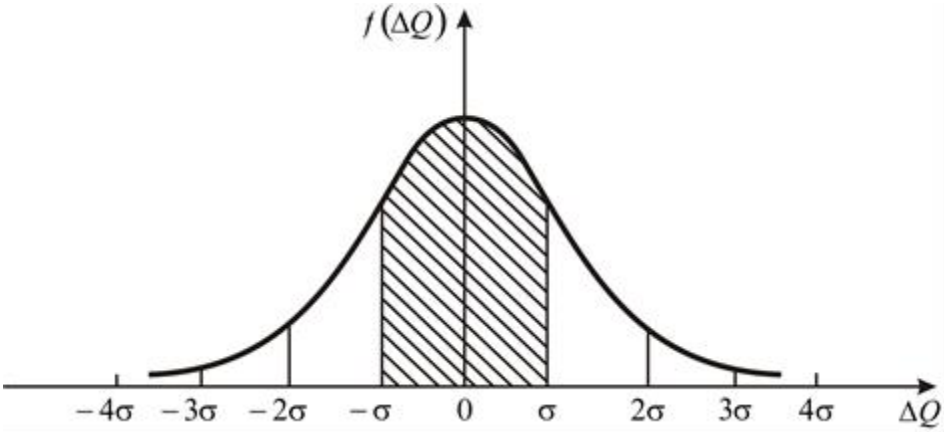


Рис. 3. К понятию доверительных интервалов

На графике нормального распределения погрешностей (рис. 3) по оси абсцисс отложены интервалы с границами ±σ, ±2σ, ±3σ, ±4σ. Доверительные вероятности для этих интервалов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Доверительные интервалы и доверительные вероятности

*t*σ	*P*
±σ	0,68
±2σ	0,95
±3σ	0,997
±4σ	0,999

Как следует из табл. 3, оценка случайной погрешности группы измерений интервалом ±σ соответствует доверительной вероятности P = 0,68. Такая оценка не дает уверенности в высоком качестве измерений, поскольку 32 % от всего числа измерений может выйти за пределы указанного интервала, что неприемлемо при однократных измерениях и дезинформирует оператора. Доверительному интервалу ±3σ соответствует P = 0,997. Это означает, что практически с вероятностью очень близкой к единице ни одно из возможных значений погрешности при нормальном законе ее распределения не выйдет за границы интервала. Поэтому, при нормальном распределении погрешностей, принято считать случайную погрешность с границами ±3σ предельной (максимально возможной) погрешностью. Погрешности, выходящие за эти границы, классифицируют как грубые или промахи.

Вопросы для самоконтроля.

1.Что называется погрешностью результата измерения?
2.Что называется погрешностью средства измерений?
3.Приведите классификацию погрешностей измерений и средств измерений.
4.Каковы основные принципы описания и оценивания погрешностей?
5.Каковы правила округления погрешностей?
6.Каким образом производится обнаружение и исключение отдельных составляющих систематических погрешностей?
7.Что называется поверкой?
8.Что такое поправка?
9.Перечислите основные методы компенсации систематических погрешностей.
10.Что называется неисключенной систематической погрешностью?
11.Каковы основные требования к оценкам случайных погрешностей?

12.Какие числовые характеристики случайных величин применяются для описания случайных погрешностей?
13.Что понимается под квантильной оценкой случайных погрешностей?
14.Что такое доверительный интервал и доверительная вероятность?
15.Поясните правило «трех сигм».

Качественные задачи

1.Чтобы оценить, с какой скоростью упадет на землю мяч с балкона 6-го этажа, используем для вычислений на калькуляторе формулу $\sqrt{2gh}$. По оценке «на глазок» балкон находится на высоте (15 ± 1)м над землей. Калькулятор показывает на экране число 17,320508. Чему равна, с учетом погрешности оценки высоты балкона, скорость мяча при падении на землю? (Ответ дайте в метрах в секунду, значение и погрешность запишите слитно без пробела.)

2. Из куска тонкого медного провода длиной 2 м собираются согнуть окружность. Предварительно вычисляют диаметр окружности с помощью калькулятора и получают на экране число 0,6369426. Чему будет равен диаметр окружности, если точность измерения длины провода равна 1 см? (Ответ дайте в метрах, значение и погрешность запишите слитно без пробела.)

3. Чтобы определить массу гвоздя, на рычажные весы несколько раз кладут по N=50 таких гвоздей. Взвешивание показывает, что их общая массаМ $= (300 \pm 5)$г .Чему равна масса одного гвоздя? (Ответ дайте в граммах, значение и погрешность запишите слитно без пробела.).

4. Толщина пачки из 200 листов бумаги равна (20 ± 1)мм .Чему равна толщина одного листа бумаги? (Ответ дайте в мм, значение и погрешность запишите слитно без пробела.)

5. Тонкий провод намотали на круглый карандаш в один слой так, чтобы соседние витки соприкасались. Оказалось, что N=20 витков такой намотки занимают на карандаше отрезок длиной $L = (15 \pm 1)$мм. Чему равен диаметр провода? (Ответ дайте в мм, значение и погрешность запишите слитно без пробела.)

6. Чтобы оценить, каков будет период малых колебаний математического маятника, используем для вычислений на калькуляторе формулу$= 2\pi\sqrt{(l/g)}$. По оценке «на глазок» длина нити равна $(1{,}5 \pm 0{,}1)$м. Калькулятор показывает на экране число 2,4322335. Чему равен, с учетом погрешности оценки длины нити, период колебаний маятника? (Ответ дайте в секундах, значение и погрешность запишите слитно без пробела.)

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Измерено два значения напряжения (50 и 400 В) вольтметром с номинальным значением 400 В с одной и той же абсолютной погрешность 0,5 В. Какое напряжение будет измерено с меньшей погрешностью?

При решении задач по определению погрешности измерений необходимо правильно обозначить исходные данные. Так, напряжение измеряется рабочим вольтметром и обозначается
U_1 = 50 В, U_2 = 400 В, с одинаковой абсолютной погрешностью $\Delta_1 = \Delta_2 = 0{,}5$ В. О виде шкалы вольтметра ничего не говорится, значит используется вольтметр с односторонней шкалой, у которого $U_{min} = 0$ и $U_{max} = 400$ В, поэтому $U_{ном} = 400$ В.

Погрешность измерения определяем по формуле:

$$\delta_1 = \frac{\Delta}{U_1} \cdot 100\,\% = \frac{0{,}5}{50} \cdot 100\,\% = 1\,\%$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta}{U_2} \cdot 100\,\% = \frac{0{,}5}{400} \cdot 100\,\% = 0{,}125\,\%$$

Ответ: с меньшей погрешностью будет измерено напряжение 400 В.

Задача 2. В результате калибровки вольтметра магнитоэлектрической системы со шкалой 0…50 В и шагом шкалы 10 В получены показания образцового вольтметра (табл. 4).

Таблица 4

Исходные данные для задачи 2

U, В	0	10	20	30	40	50
$U_{изм}$, В	0,2	10,2	19,9	30,3	39,5	50,9

Определить приведенную относительную погрешность и назначить вольтметру класс точности.

Для определения приведенной погрешности γ необходимо воспользоваться формулой

$$\gamma = \frac{\Delta_{max}}{Q_{ном}} \cdot 100\ \%$$

Находим максимальную абсолютную погрешность Δ_{max} = |50,9 – 50| = 0,9 В и номинальное значение $U_{ном}$ = 50 – 0 = 50 В. Тогда

$$\gamma = \frac{0{,}9}{50} \cdot 100\ \% = 1{,}8\ \%$$

Полученная приведенная погрешность γ находится между 7-м (1,5 %) и 8-м (2,5 %) классом точности по ГОСТ 8.401–80, поэтому назначаем вольтметру ближайший больший класс точности – 8-й .

Ответ: γ = 1,8 %; назначаем вольтметру 8-й класс точности

Задача 3. Необходимо измерить напряжение 20 В многопредельным вольтметром 5-го класса точности (0,5 %) с пределами измерения 7,5 – 15 – 30 – 60 В, выбрать оптимальный предел измерения вольтметра и оценить относительную погрешность в выбранном пределе измерения.

При выборе предела измерения целесообразно представить положение стрелки вольтметра в каждом из четырех пределов при измерении заданного параметра (рис. 4).

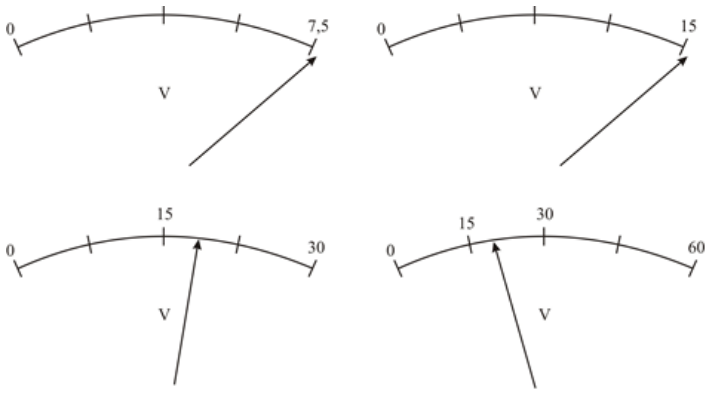


Рис. 4. Пояснение к задаче 3

Из рис. 4 следует, что при выборе пределов измерения 7,5 В или 15 В вольтметр будет зашкаливать. При выборе предела измерения 60 В стрелка вольтметра будет находиться во 2-й четверти шкалы, а, значит, результат измерения будет обладать достаточно высокой погрешностью. Поэтому оптимальным, с точки зрения положения стрелки вольтметра, а,

следовательно, и меньшей погрешности измерения является предел 30 В. Используя формулу, находим:

$$\delta = 0{,}5\,\% \cdot \frac{30}{20} = 0{,}75\,\%$$

Ответ: выбираем оптимальный предел измерения 30 В, при этом погрешность измерения составит 0,75 %.

Задача 4. Измерено напряжение 40 В вольтметром 6-го класса точности (1,0 %) с верхним пределом 50 В. Измерен ток 2 мА с абсолютной погрешностью 0,1 мА. Определить значение измеренного сопротивления резистора, абсолютную и относительную погрешности измерения этого резистора.

Для определения значения сопротивления резистора воспользуемся формулой закона Ома:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{40}{2 \cdot 10^{-3}} = 20000\,\text{Ом} = 20\,\text{кОм}$$

Приведенную формулу расчета сопротивления R представим в виде $R = U^1 I^{-1}$, откуда следует, что $k_1 = 1$, $k_2 = -1$.

Запишем формулу определения погрешности измерения сопротивления на основании формулы (5), вместо δ_1 приняв δ_U, т. к. k_1 относится к напряжению, а вместо δ_2 приняв δ_I, т. к. k_2 относится к току:

$$\delta_R = |k_1 \delta_U| + |k_2 \delta_I|$$

Напряжение и ток были измерены прямым методом, следовательно, используя формулы (2) и (4) для прямых измерений, найдем δ_U и δ_I:

$$\delta_U = \gamma \frac{U_{\text{ном}}}{U} = 1 \cdot \frac{50}{40} = 1{,}25\,\%$$

$$\delta_I = \frac{\Delta_I}{I} \cdot 100\,\% = \frac{0{,}1}{2} \cdot 100\,\% = 5\,\%$$

Тогда

$$\delta_R = |1 \cdot 1{,}25| + |(-1) \cdot 5| = 6{,}25\,\%$$

Рассчитаем абсолютную погрешность измерения сопротивления резистора, воспользовавшись формулой

$$\Delta_R = \frac{\delta_R R}{100\,\%} = \frac{6{,}25 \cdot 20}{100\,\%} = 1{,}25\,\text{кОм}$$

Ответ: значение измеренного сопротивления составило 20 кОм, относительная и абсолютная погрешности измерения сопротивления составили 6,25 % и 1,25 кОм соответственно

Задачи для самостоятельной работы.

1. В каких границах должно находиться значение емкости конденсатора, на котором указано 0,1 мкФ ± 1 %?
2. Проведена поверка вольтметра магнитоэлектрической системы со шкалой 0…10 В и шагом шкалы 1 В. При этом получены показания образцового вольтметра, представленные в табл. 5.

Таблица 5

Показания образцового вольтметра

U, В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{изм}$, В	0,2	1,2	2,3	3,4	4,4	5,4	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5

Определить приведенную погрешность. Что необходимо сделать, чтобы, не отправляя вольтметр в ремонт, использовать его в работе в соответствии с 9-м классом точности (4,0 %)?

3.Электронным цифровым вольтметром В7-16 с переключателем пределов 1 – 10 – 100 – 1000 В и приведенной погрешностью $\gamma_{пр} = \pm(0{,}1 + 0{,}1U_н/U)$ измерено напряжение 2 В. Определить абсолютную и относительную погрешности измерения.

4.В каких границах должна находиться величина сопротивления резистора, на котором указано 1,5 кОм ± 20 %?

5.При определении мощности были измерены: напряжение на резисторе 40 В с вольтметром $U_н$ = 50 В и $\gamma_{пр}$ = ±4%; сопротивление резистора – 10 кОм с абсолютной погрешностью Δ_R = 0,5 кОм. Определить мощность и относительную погрешность ее измерения.

6.При измерении тока величиной 25 мА использовали многопредельный миллиамперметр с пределами 5 – 15 – 30 – 60 мА 7-го класса точности (1,5%). Выбрать оптимальный предел измерения и оценить погрешность измерения.

7.При поверке вольтметра с двухсторонней шкалой 50 – 0 – 50 В получили следующие значения абсолютной погрешности: –0,1; 0,2; –0,3; –0,15 В. Определить приведенную погрешность прибора и назначить класс точности.

8.С какой минимальной погрешностью будет измерено напряжение 5 В многопредельным вольтметром 8-го класса точности (2,5 %) с пределами измерений 7,5 – 15 – 75 – 150 В? Указать выбранный предел измерения.

9.При определении тока измерены мощность 400 мВт ваттметром 5-го класса точности (0,5 %) с номинальным значением 600 мВт и напряжение 5 В вольтметром 7-го класса точности (1,5 %) с номинальным значением 5 В. Найти ток, а также абсолютную и относительную погрешности его измерения.

10.При определении индуктивности катушки колебательного контура измерены частота 8 кГц частотометром 8-го класса точности (2,5 %) со шкалой 0…10 кГц и емкость конденсатора 25 пФ с абсолютной погрешностью 2 пФ. Рассчитать значение измеренной индуктивности катушки, а также абсолютную и относительную погрешности ее измерения.

Практическая работа № 10. Расчет четырехполюсника

Теоретическая часть.

Четырехполюсником называется часть электрической цепи, имеющая две пары зажимов, одна из которых может быть входной, а другая выходной. К входным зажимам четырехполюсников обычно присоединяют источники энергии (сигнала), а к выходам – приемники энергии (сигнала).

Тракт передачи информации, или канал связи, как правило, состоит из ряда четырехполюсников, включенных между генератором (Г) (передатчиком) сигналов и приемником (П) сигналов (рис.10.1)

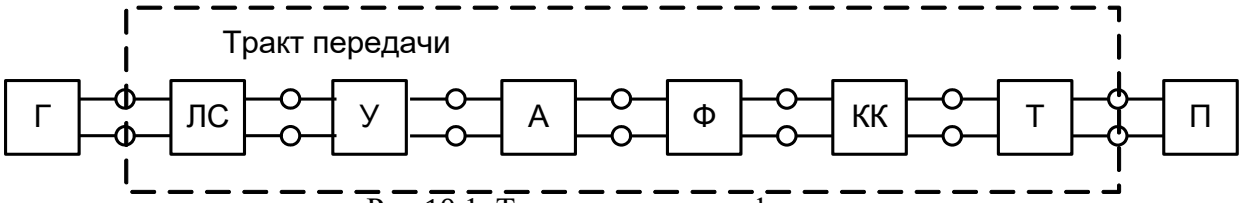


Рис.10.1. Тракт передачи информации

В тракт передачи обычно входят:

- линии связи (ЛС) генератора и приемника, находящихся часть на значительных расстояниях один от другого;
- усилители (У), в которых увеличивается мощность или, как говорят, уровень сигналов;
- фильтры (Ф) для разделения сигналов;
- корректирующие контуры (КК), включаемые для устранения искажений сигналов;
- трансформаторы (Т), при помощи которых изменяются сопротивления отдельных участков тракта передачи информации и устраняется гальваническая связь между этими участками.

Условное изображение четырехполюсника показано на рис. 10.2. Одна пара зажимов 1-1' называется *входной (первичной)*, а другая 2-2' называется – *выходной (вторичной)*. К зажимам 1-1' подключается источник воздействия, а к зажимам 2-2' присоединяется нагрузка.

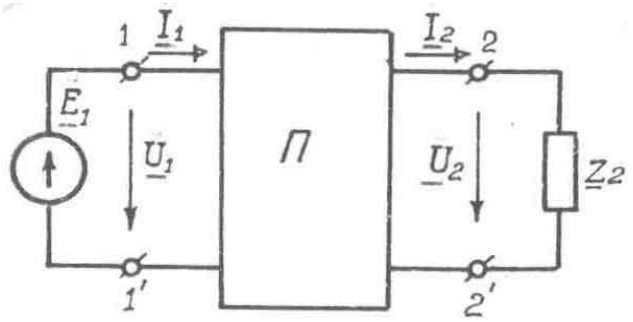


Рис.10.2. Условное обозначение четырехполюсника

Условное положительные направления входного и выходного токов – I_1 и I_2, входного и выходного напряжений – $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$ могут быть различными и зависят от постановки задачи. При этом ток I_1, поступающий в четырехполюсник через вывод 1, будет всегда равен току, вытекающему через вывод 1', а ток I_2, входящий через вывод 2, всегда равен току, вытекающему через вывод 2'.

Возможно шесть форм записи основных уравнений четырехполюсника с комплексными параметрами, приведенных в табл.6.

Таблица 6.

Шесть вариантов записи основных уравнений четырехполюсников

Варианты	1	2	3	4	5	6
Заданные воздействия	$\underline{U}_1,\underline{U}_2$	$\underline{I}_1,\underline{I}_2$	$\underline{U}_2,\underline{I}_2$	$\underline{U}_1,\underline{I}_1$	$\underline{I}_1,\underline{U}_2$	$\underline{U}_1,\underline{I}_2$
Определяемые отклики	$\underline{I}_1,\underline{I}_2$	$\underline{U}_1,\underline{U}_2$	$\underline{U}_1,\underline{I}_1$	$\underline{U},\underline{I}_2$	$\underline{U}_1,\underline{I}_2$	$\underline{I}_1,\underline{U}_2$
Комплексные параметры	$\underline{Y}$	$\underline{Z}$	$\underline{A}$	$\underline{B}$	$\underline{H}$	$\underline{G}$

Любые две величины из четырех ($\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$, $\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$) можно определить через остальные. Так как число сочетаний из четырех по два равно шести, то в соответствии с таблицей 7 возможны следующие шесть форм записи уравнений пассивного четырехполюсника и соответствующие им матрицы комплексных параметров (табл. 7)

Таблица 7

Шесть форм записи уравнений пассивного четырехполюсника.

Форма уравнений, направление токов	Уравнения		Матрица комплексных параметров
Y-форма $\underline{I}_1$ $\underline{I}_2$	$\underline{I}_1 = \underline{Y}_{11}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{12}\underline{U}_2$ $\underline{I}_2 = \underline{Y}_{21}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{22}\underline{U}_2$	(10.1)	$[\underline{Y}] = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix}$
Z-форма $\underline{I}_1$ $\underline{I}_2$	$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{11}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{12}\underline{I}_2$ $\underline{U}_2 = \underline{Z}_{21}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{22}\underline{I}_2$	(10.2)	$[\underline{Z}] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix}$
A-форма $\underline{I}_1$ $\underline{I}_2$	$\underline{U}_1 = \underline{A}_{11}\underline{U}_2 + \underline{A}_{12}\underline{I}_2$ $\underline{U}_1 = \underline{A}_{21}\underline{U}_2 + \underline{A}_{22}\underline{I}_2$	(10.3)	$[\underline{A}] = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} \end{bmatrix}$
B-форма $\underline{I}_1$ $\underline{I}_2$	$\underline{U}_2 = \underline{B}_{11}\underline{U}_1 + \underline{B}_{12}\underline{I}_1$ $\underline{I}_2 = \underline{B}_{21}\underline{U}_1 + \underline{B}_{22}\underline{I}_1$	(10.4)	$[\underline{B}] = \begin{bmatrix} \underline{B}_{11} & \underline{B}_{12} \\ \underline{B}_{21} & \underline{B}_{22} \end{bmatrix}$
H-форма $\underline{I}_1$ $\underline{I}_2$	$\underline{U}_1 = \underline{H}_{11}\underline{I}_1 + \underline{H}_{12}\underline{U}_2$ $\underline{I}_2 = \underline{H}_{21}\underline{I}_1 + \underline{H}_{22}\underline{U}_2$	(10.5)	$[\underline{H}] = \begin{bmatrix} \underline{H}_{11} & \underline{H}_{12} \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{22} \end{bmatrix}$
G-форма $\underline{I}_1$ $\underline{I}_2$	$\underline{I}_1 = \underline{G}_{11}\underline{U}_1 + \underline{G}_{12}\underline{I}_2$ $\underline{U}_2 = \underline{G}_{21}\underline{U}_1 + \underline{G}_{22}\underline{I}_2$	(10.6)	$[\underline{G}] = \begin{bmatrix} \underline{G}_{11} & \underline{G}_{12} \\ \underline{G}_{21} & \underline{G}_{22} \end{bmatrix}$

Коэффициенты основных уравнений четырехполюсника (10.1 – 10.6) называются ***первичными параметрами четырехполюсника***.

Наряду с первичными параметрами при решении целого ряда задач целесообразно использовать и так называемые вторичные параметры: *характеристические сопротивления* и *мера передачи четырехполюсника*.

Рассмотрим связи между токами и напряжениями на входе и выходе четырехполюсника, питаемого от источника ЭДС Ег с внутренним сопротивлением Zг, к выходным зажимам которого подключено сопротивление нагрузки Zн (рис.10.3,а)

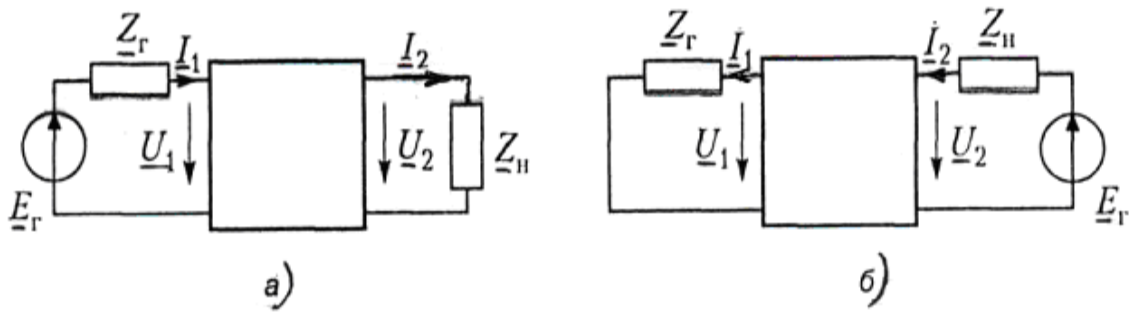


Рис.10.3 Несимметричный четырехполюсник при прямой и обратной передаче

$$U_1 = A_{11}U_2 + A_{12}I_2 \qquad (10.7)$$

$$I_1 = A_{21}U_2 + A_{22}I_2 \qquad 10.8)$$

Входное сопротивление четырехполюсника определяется как отношение входного напряжения к входному току:

$$Z_{BX} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{A_{11}U_2 + A_{12}I_2}{A_{21}U_2 + A_{22}I_2} = \frac{A_{11}Z_H + A_{12}}{A_{21}Z_H + A_{22}} \qquad (10.9)$$

В частных случаях, когда Zн = 0 (режим короткого замыкания) и $Z_H = \infty$ (режим холостого хода), входные сопротивления четырехполюсника определяются соответственно соотношениями:

$$Z_{BX.k.з.} = \frac{A_{12}}{A_{22}} \quad Z_{BX.x.x.} = \frac{A_{11}}{A_{21}} \qquad (10.10)$$

Для определения выходного сопротивления или входного сопротивления со стороны зажимов 2-2’ рассмотрим режим, в котором источник ЭДС Ег включен в выходную цепь, а входные зажимы четырехполюсника замкнуты на сопротивление Zг (рис.10.3,б). Задаваясь при этом условными положительными направлениями токов I1 и I2 в соответствии с обратной передачей, получим уравнения четырехполюсника через А-параметры в следующем виде

$$U_1 = A_{11}U_2 - A_{12}I_2 \qquad (10.11)$$

$$-I_1 = A_{21}U_2 - A_{22}I_2$$

Подставив в первое уравнение системы (9.11) выражение для напряжения на зажимах 1-1’ $U_1 = I_1Z_н$, а ток I_1 из второго уравнения, получим:

$$U_1 = A_{11}U_2 - A_{12}I_2 = I_1 Z_Г = -A_{21}Z_rU_2 + A_{22}Z_ГI_2 \quad \text{или}$$

$$U_2(A_{11} + A_{21}Z_Г) = I_2(A_{12} + A_{22}Z_Г)$$

Отсюда выходное сопротивление (входное сопротивление со стороны зажимов 2-2’) четырехполюсника выражается как отношение:

$$Z_{ВЫХ} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{A_{22}Z_Г + A_{12}}{A_{21}Z_Г + A_{11}} \qquad (10.12)$$

Следовательно, выходное сопротивление четырехполюсника в режимах короткого замыкания и холостого хода определяется соответственно выражениями:

$$Z_{вых\ к.з.} = (A\ 12)/A11 \quad Z\text{"вых х.х.} = \text{" A"22" /A21} \qquad (10.13)$$

В случаях симметричного четырехполюсника Zвх = Zвых, т.к. $A_{11} = A_{22}$.

Сопротивление, включенное во входной цепи четырехполюсника Zс1 = Zг = Zвх, и сопротивление, включенное в его выходной цепи Zс1 = Zн = Zвых, обеспечивающие режим согласованного включения на обеих парах его зажимов, называются соответственно ***входным и выходным характеристическими сопротивлениями четырехполюсника.***

Соединение всех четырехполюсников цепной схемы при соблюдении условий согласования называют *характеристически согласованным соединением*.

Справедливо также следующее определение.

Характеристическими сопротивлениями четырехполюсника называют пару сопротивлений Zс1 и Zс2, которые выбраны таким образом, что при подключении к зажимам 2-2’ сопротивления Zн2 = Zс2 входное сопротивление четырехполюсника со стороны зажимов 1-1’ сопротивления Zн1 = Zс1 входное сопротивление четырехполюсника со стороны зажимов 2-2’ равно Zс2. (рис.9.4)

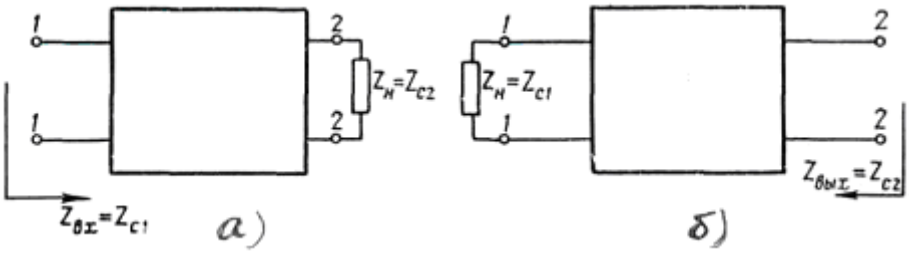


Рис.10.4. Определение характеристических сопротивлений четырёхполюсника

Сопротивление Zс1 называется характеристическим входным, а Zс2 - характеристическим выходным сопротивлением четырехполюсника

Выразим их через А-параметры. Согласование на входе имеет место при Zг = Zвх = Zс1, а на выходе – при Zн = Zвых = Zс2. Запишем эти условия в виде:

$$Z_{c1} = \frac{A_{11}Z_{c2} + A_{12}}{A_{21}Z_{c2} + A_{22}} \quad Z_{c2} = \frac{A_{22}Z_{c1} + A_{12}}{A_{21}Z_{c1} + A_{11}} \qquad (10.14)$$

Приведем полученные соотношения к системе:

$$\left.\begin{aligned} A_{11}Z_{c1}Z_{c2} + A_{22}Z_{c1} = A_{11}Z_{c2} + A_{12} \\ A_{21}Z_{c1}Z_{c2} + A_{11}Z_{c2} = A_{22}Z_{c1} + A_{12} \end{aligned}\right\} \qquad (10.15)$$

Решив совместно эти уравнения, получим значения характеристических сопротивлений:

$$Z_{c1} = \sqrt{\frac{A_{11}A_{12}}{A_{21}A_{22}}} \quad Z_{c2} = \sqrt{\frac{A_{22}A_{12}}{A_{21}A_{11}}} \qquad 10.16)$$

Характеристические сопротивления четырехполюсника можно определить, воспользовавшись соотношениями: (10.10) и (10.12)

$$Z\text{"}c1 = \text{" }\sqrt{(Z\text{"вх к.з} * Z\text{вх х.х"})} \qquad (10.17)$$

$$Zc2 = \sqrt{(Z\text{вых к.з} * Z\text{вых х.х})}$$

Следовательно, **входное характеристическое сопротивление** равно среднему геометрическому из входных сопротивлений при коротком замыкании и холостом ходе,

выходное характеристическое сопротивление равно среднему геометрическому из выходных сопротивлений при коротком замыкании и холостом ходе.

Примеры решения задач.

Задача.

Четырехполюсник (рис. 10.5 а и б), состоит из элементов **Z**$_1$ **,** **Z**$_2$ и **Z**$_3$**.** На входе четырёхполюсника приложено напряжение **Ů**$_1$**.**

Требуется

1.в соответствии с табл. 6.7 нарисовать схему замещения четырехполюсника (**вариант выбирается по двум последним цифрам шифра; нечётный вариант – схема *а*, чётный – схема *б***);

2.в соответствии с табл. 6.8 (**вариант выбирается по последней цифре шифра**) рассчитать сопротивления ветвей электрической цепи и сопротивление взаимоиндукции;

3.рассчитать параметры **A**, **B**, **C**, **D** четырехполюсника (см. табл. 8);

4.рассчитать токи в режиме холостого хода (хх) или короткого замыкания (кз) (табл.9) при питании электрической цепи напряжением **U**$_1$ **(**табл.9**)**;

5.по известным токам в указанном в пункте 5 режиме рассчитать напряжения на элементах электрической цепи при наличии индуктивной связи между катушками, указанными в табл. 6. **(для нечётных вариантов индуктивная связь согласная, для чётных – встречная)** и построить векторную диаграмму токов и потенциальную (топографическую) диаграмму напряжений;

6.рассчитать параметры активного двухполюсника, эквивалентного четырёхполюснику, и ток в согласованной нагрузке.

7.Примечание: по указанию преподавателя для отдельных специальностей расчёт может проводиться без учёта взаимоиндуктивности (при этом КС = 0, М = 0, Xm = 0).

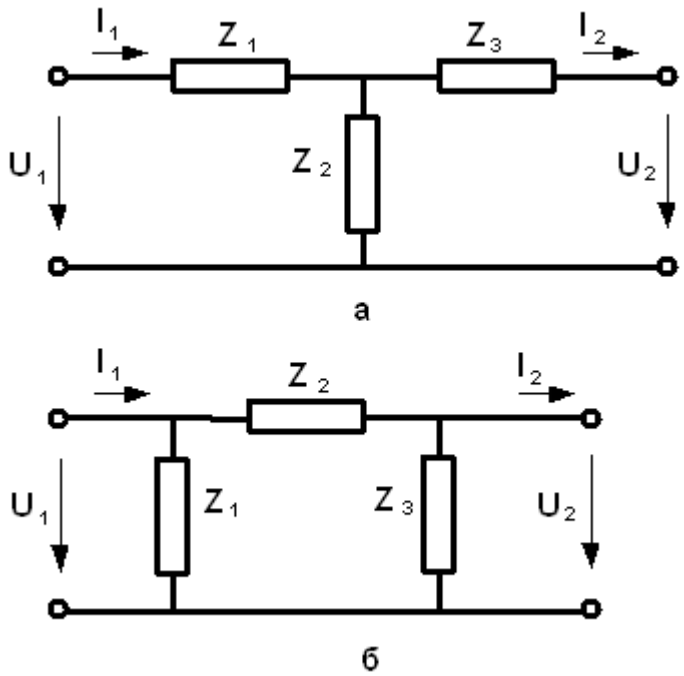


Рис .10.5. Схемы четырехполюсника

Пусть в таблице 8. заданы параметры

Таблица 8

Параметры для расчета четырехполюсника

Вариант	**$\underline{Z}_1$ Ом**	**$\underline{Z}_2$ Ом**	**$\underline{Z}_3$ Ом**	**Режим работы**	**Коэфф связи K_C**	**Катушки с индуктивной связью**
X1	**$R_3 + jX_{L1}$**	**$R_2 + jX_{L2}$**	**$R_1 + jX_{L3}$**	**кз**	**0,65**	**$L_1 – L_2$**

1. Данным таблицы соответствует схема замещения рис. 9.6.

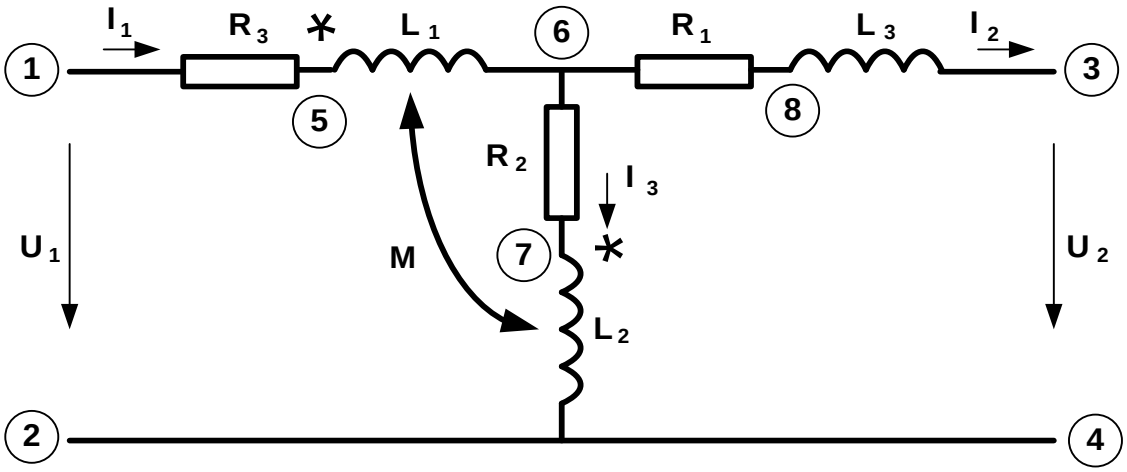


Рис. 10.6. Схема замещения электрической цепи

2. Пусть в таблице 9. параметры элементов схемы имеют следующее значение.

Таблица 9.

Параметры элементов схемы замещения

Вари-ант	**R_1**	**R_2**	**R_3**	**L_1**	**L_2**	**L_3**	**C_1**	**C_2**	**C_3**	**f**	**U_1**
	Ом	Ом	Ом	мГн	мГн	мГн	мкФ	мкФ	мкФ	Гц	В
X	20	25	30	95,54	127,4	111,5	63,7	58	53,1	100	90

Для расчета параметров четырёхполюсника необходимо определить сопротивления всех элементов схемы.

Для резисторов сопротивления заданы в таблице 9.4.

$$\mathbf{R_1} = 20 \text{ Ом}; \quad \mathbf{R_2} = 25 \text{ Ом}; \quad \mathbf{R_3} = 30 \text{ Ом} \qquad (10.18)$$

Сопротивление катушек индуктивности рассчитываются по формулам.

$$\mathbf{X_{L1} = 2\pi f\, L_1} = 60 \text{ Ом}; \quad \mathbf{X_{L2} = 2\pi f\, L_2} = 80 \text{ Ом}; \quad \mathbf{X_{L3} = 2\pi f\, L_3} = 70 \text{ Ом}; \quad (10.19)$$

Комплексное сопротивление ветвей электрической цепи.

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{L1} = 20 + j60 = 63{,}25e^{j\,71{,}6} \text{ Ом}; \quad (10.20)$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_{L2} = 25 + j80 = 83{,}8e^{j\,72{,}6} \text{ Ом}; \quad (10.21)$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + jX_{L3} = 30 + j70 = 76{,}16e^{j\,66{,}8} \text{ Ом}; \quad (10.22)$$

Коэффициент взаимоиндукции **M** определяется через заданный коэффициент связи $\mathbf{K_C}$ и индуктивности магнитно связанных катушек $\mathbf{L_1}$ и $\mathbf{L_2}$ по формуле.

$$M = K_C \cdot \sqrt{\mathbf{L_1 * L_2}} = 0{,}65 \cdot \sqrt{\mathbf{0{,}09554 * 0{,}1274}} = 0{,}07171 \text{ Гн} = 71{,}71 \text{ мГн} \quad (10.23)$$

Сопротивление взаимоиндукции X_M определяется выражени

$$X_M = 2\pi f M = 45 \text{ Ом.} \quad (10.24)$$

3.Связь между напряжениями и токами пассивного четырёхполюсника определяется следующей системой уравнений.

$$\dot{U}_1 = \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2 \quad (10.25)$$

$$\dot{I}_1 = \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{D}\dot{I}_2 \quad 10.26)$$

Параметры $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$ рассчитаем с помощью законов Кирхгофа. По первому закону Кирхгофа для электрической цепи рис. 9.6.

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 . \quad (10.27)$$

Для определения тока $\dot{I}_3$ найдём напряжение между точками 6 и 2 с учётом взаимоиндуктивности катушек L_1 и L_2

$$\dot{U}_{62} = \underline{Z}_2 \bullet \dot{I}_3 + j X_M \bullet \dot{I}_1 \Rightarrow \dot{I}_3 = (\dot{U}_{62} - j X_M \bullet \dot{I}_1) : \underline{Z}_2 \quad (10.28)$$

Напряжение $\dot{U}_{62}$ можно найти, пройдя от точки 6 к точке 2 по другой ветви.

$$\dot{U}_{62} = \underline{Z}_3 \bullet \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \quad (10.29)$$

Подставив его значение в предыдущую формулу, получим выражение для тока $\dot{I}_3$

$$\dot{I}_3 = (\underline{Z}_3 \bullet \dot{I}_2 + \dot{U}_2 - j X_M \bullet \dot{I}_1) : \underline{Z}_2 \quad (10.30)$$

и после преобразований для тока $\dot{I}_1$

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{Z_2 + jX_m} \dot{U}_2 + \frac{Z_2 + Z_3}{Z_2 + jX_m} \dot{I}_2 \quad (10.31)$$

коэффициенты **C** и **D** соответственно определяются выражениями:

$$\underline{C} = \frac{1}{Z_2 + jX_m} = \frac{1}{25 + j80 + j45} = 0{,}007845e^{-j78{,}69} \text{ См;} \quad (10.32)$$

$$\underline{D} = \frac{Z_2 + Z_3}{Z_2 + jX_m} = \frac{25 + j80 + 30 + j70}{25 + j80 + j45} = \frac{55 + j150}{25 + j125} = \frac{159{,}77e^{j69{,}86}}{127{,}48e^{j78{,}69}} = 1{,}2533e^{-j8{,}83} . \quad (10.33)$$

Для нахождения параметров **A** и **B** составим уравнения по второму закону Кирхгофа для контура $\dot{U}_1 \rightarrow \underline{Z}_1 \rightarrow \underline{Z}_3 \rightarrow \dot{U}_2$.

$$\dot{U}_1 = \underline{Z}_1 \bullet \dot{I}_1 + j X_M \bullet \dot{I}_3 + \underline{Z}_3 \bullet \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \quad (10.34)$$

Подставив в это уравнение выражения для $\dot{I}_3$ и для $\dot{I}_1$ после преобразований окончательно получим.

$$\dot{U}_1 = \frac{Z_1 + Z_2 + j2X_m}{Z_2 + jX_m} \dot{U}_2 \frac{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3 + j2X_mZ_3 - (jX_m)^2}{Z_2 + jX_m} \dot{I}_2 \quad (10.35)$$

Таким образом, сопоставляя полученное выражение с уравнением (6.1), можно рассчитать коэффициенты **A** и **B**

$$\underline{A} = \frac{Z_1 + Z_2 + j2X_m}{Z_2 + jX_m} = \frac{20 + j60 + 25 + j80 + j45}{25 + j80 + j45} = \frac{45 + j185}{25 + j125} = \qquad (10.36)$$

$$\frac{190{,}4e^{j76{,}3}}{127{,}48e^{j78{,}69}} = 1{,}494e^{-j2{,}39};$$

$$\underline{B} = \frac{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3 + j2X_mZ_3 - (jX_m)^2}{Z_2 + jX_m} = \frac{-17022 + j13152}{127{,}48e^{j78{,}69}} = \qquad (10.37)$$

$$\frac{21511e^{j142{,}3}}{127{,}48e^{j78{,}69}} = 168{,}74e^{j63{,}61}\ \text{Ом}.$$

4.Для построения потенциальной диаграммы рассчитаем напряжения на элементах электрической цепи.

$\dot{U}_{15} = \dot{U}_{R1} = R_1 \cdot \dot{I}_1 = 20 \cdot 0{,}664e^{-j\,72{,}5} = 13{,}28e^{-j\,72{,}5}$ В

При расчете напряжения на катушке L_1 учтём не только падение напряжения от тока $\dot{I}_1$, но и напряжение, наводимое через взаимоиндуктивность от тока $\dot{I}_3$.

$\dot{U}_{56} = \dot{U}_{L1} = jX_{L1} \cdot \dot{I}_1 + jX_M \cdot \dot{I}_3 = 60e^{j\,90} \cdot 0{,}664e^{-j\,72{,}5} + 45\,e^{j\,90} \cdot 0{,}1625e^{-j\,102{,}8} =$

$= 39{,}84e^{j\,17{,}5} + 7{,}31e^{-j\,12{,}8} = 45{,}1 + j10{,}36 = 46{,}28\,e^{j\,12{,}94}$ В

Остальные напряжения рассчитаем аналогично

$\dot{U}_{67} = \dot{U}_{R2} = R_2 \cdot \dot{I}_3 = 25 \cdot 0{,}1625e^{-j\,102{,}8} = 4{,}06\,e^{-j\,102{,}8}$ В;

$\dot{U}_{72} = \dot{U}_{L2} = jX_{L2} \cdot \dot{I}_3 + jX_M \cdot \dot{I}_1 = 80e^{j\,90} \cdot 0{,}1625e^{-j\,102{,}8} + 45e^{j\,90} \cdot 0{,}664e^{-j\,72{,}5} =$

$= 13e^{-j\,12{,}8} + 29{,}88e^{j\,17{,}5} = 41{,}17 + j6{,}1 = 41{,}62e^{j\,11{,}54}$ В

$\dot{U}_{68} = \dot{U}_{R3} = R_3 \cdot \dot{I}_2 = 30 \cdot 0{,}53\,e^{-j\,63{,}61} = 15{,}9\,e^{-j\,63{,}61}$ В

$\dot{U}_{82} = \dot{U}_{L3} = jX_{L3} \cdot \dot{I}_2 = 70e^{j\,90} \cdot 0{,}53\,e^{-j\,63{,}61} = 37{,}1\,e^{j\,26{,}39}$ В

При построении потенциальной диаграммы примем потенциал точки 2 равным нулю ($\varphi_2 = 0$)

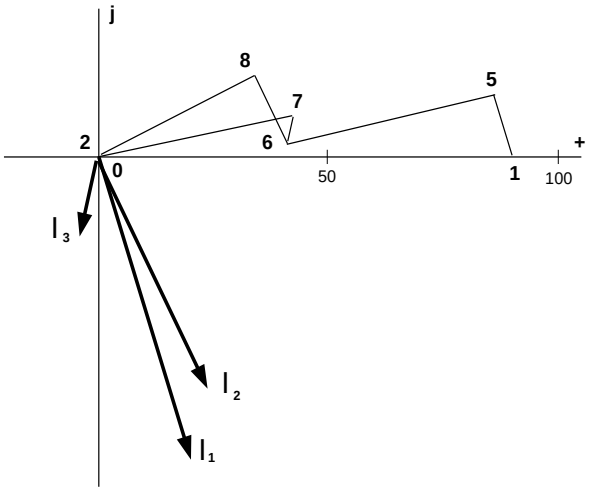


Рис. 10.7. Векторная диаграмма токов и потенциальная диаграмма напряжений

Вопросы для самоконтроля

1.Что понимается под термином четырехполюсник ?

2. По каким параметрам производится классификация четырехполюсников?

3. Какой четырехполюсник называется обратимым? Какой симметричным?
4. Что понимается под первичными параметрами четырехполюсника? Приведите уравнения четырехполюсника используя систему А- параметров.
5.Приведите уравнения четырехполюсника используя систему Z- параметров.
6.Приведите уравнения четырехполюсника используя систему Y- параметров.
7. Приведите уравнения четырехполюсника используя систему Н- параметров.
8. Как определяются первичные параметры четырехполюсника в опытах «холостого хода» и «короткого замыкания»?
9. Как определяются А- параметры четырехполюсника через сопротивления «холостого хода» и «короткого замыкания»?
10 Как определяются первичные параметры составных четырехполюсников?
11. Как определяется комплексная передаточная функция по напряжению через первичные параметры четырехполюсника?
12. Как определяется входное сопротивление нагруженного четырехполюсника через его первичные параметры?

Качественные задачи
1. Методика расчёта (нахождение магнитного потока) одноконтурной магнитной цепи постоянного тока с одной надетой на магнитопровод катушкой и с зазором в нём, если известна МДС обмотки, магнитные свойства и геометрические размеры однородного магнитопровода
2. Изложите методику расчёта электрической цепи при последовательно-параллельном (смешанном) соединении ветвей. Продемонстрировать расчёт при включении конденсатора в последовательную ветвь, а в две параллельно соединенные ветви - соответственно резистора и индуктивной катушки.
3. Перечислите условия самовозбуждения генератора постоянного тока параллельного возбуждения (ГПТ).
4. Характеристики холостого хода, внешняя и регулировочная генератора постоянного тока
5. Допустим, что выходное напряжение $\dot{U}_2$ равно нулю. Какой физический процесс может обеспечить это условие?

Задачи для самостоятельной работы
Задача 1.
Запишите систему уравнений четырехполюсника в форме **А**. Определите напряжение на входе четырехполюсника, если на вход включена нагрузка R_H=100 Ом, а ток I_2 при этом равен 0,1 А. Параметры четырехполюсника: r_1=50 Ом; r_2=50 Ом; r_3=100 Ом.(рис 1)

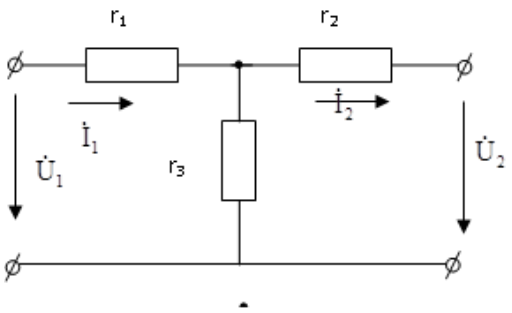


Рисунок 1 Схема электрической цепи к задаче 1

Задача 2.

Запишите систему уравнений четырехполюсника в форме А (рис.2) . Рассчитайте параметры эквивалентной «Т»- схемы, если r=100 Ом ; 1/ωC=200 Ом.

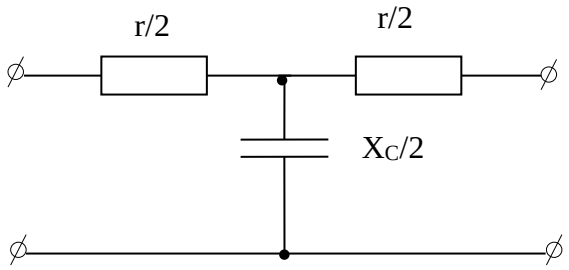


Рисунок 2 .Схема электрической цепи к задаче 2

Задача 3.

Определите повторное сопротивление и коэффициент затухания в неперах и децибелах для симметричного четырехполюсника (рис.3), если r=10 Ом.

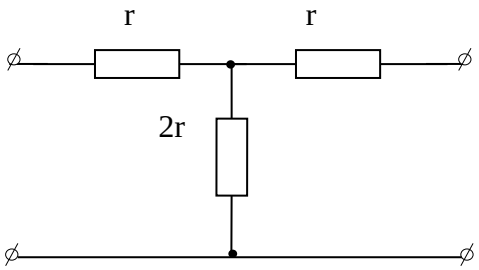


Рисунок 3. Схема электрической цепи к задаче 3

Задача 4.

Дано: L=0,02 Гн; C=45 мкФ. Определите полосу пропускания фильтра (рис. 4.), а также установите, будет ли обеспечен согласованный режим работы, если на выход включить активную нагрузку R_H=100 Ом?

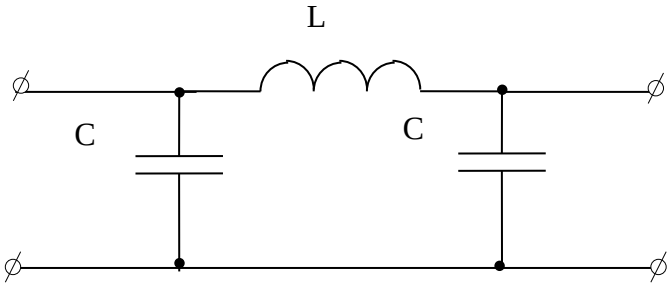
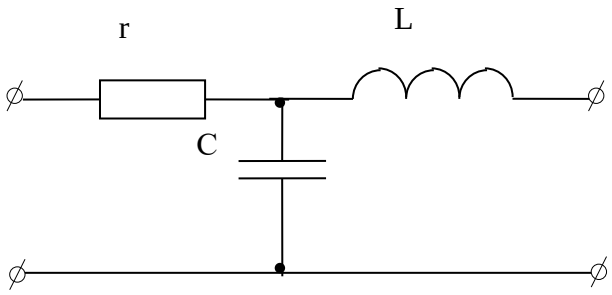


Рисунок 4. Схема электрической цепи к задаче 4

Задача 5.

Дано: r=20 Ом; ωL=20 Ом; 1/ωC=20 Ом. Записать уравнения несимметричного четырехполюсника рис.9.12. в форме **А**.



.

Рисунок 5. Схема электрической цепи к задаче 5

Список литературы

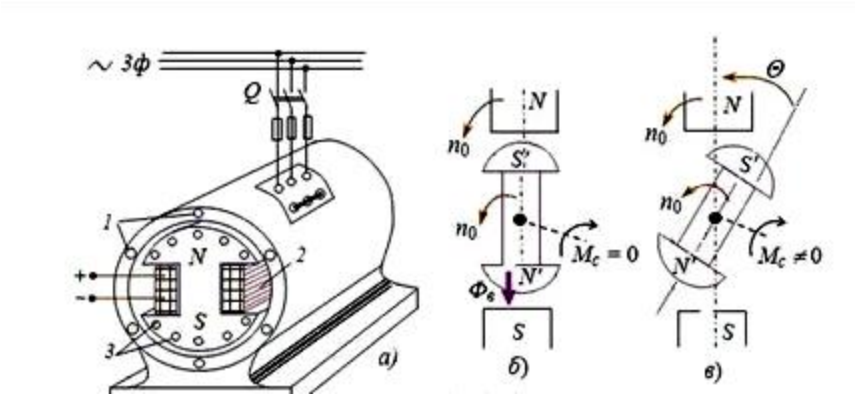
1. Айзенцон А.Е. Физика. Учебник и практикум для СПО. - М.: Издательство « Юрайт», 2023.
2. Апполонский С.М. Электротехника. - М.: Издательство «КноРус», 2018.
3. Арчаков Ю.П. Теоретические основы электротехники в практических работах. УМК МПС России, 2002.
4. Беляевский Р. В. Погрешности измерений и средств измерений [Электронный ресурс] : метод. указания к практическим занятиям по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация» для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» и направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» всех форм обучения / Р. В. Беляевский. – Электрон. дан. – Кемерово : КузГТУ, 2011./ https://studfile.net/preview/3610702
5. Грачев А.В., Погожев В. А. Физика. Базовый и углубленный уровни. 10 класс: учебник. - М.: Вентана-Граф, 2022.
6. Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники. Учебник для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования. - М.: Издательскй центр «Академия», 2004. - 506с
7. Касаткин А.С.Основы электротехники: Учебное пособие для средних профессионально-технических училищ. – М.: Высшая школа, 2022.
8. Кондратьева Э.В. Физика в решении практико-ориентированных задач по курсу «Электротехника» / Физико-математическое и технологическое образование: проблемы и перспективы развития: материалы VII и VIII Международных научно-методических конференций, Москва, 01 марта 2021 года – 02 марта 2022 года. - Москва, 2023. - С. 843-850.
9. Кондратьева Э.В. Применение взаимосвязи физики и общетехнических дисциплин в экосистеме учреждений СПО. / Мультимодальность и экосистемный подход как тренды современного образования : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Армавир, 06 ноября 2024 года. – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2025. – С. 26-30.
10. Мартынова И. О. Электротехника. Учебник. - М.: Издательство « КноРус», 2022.
11. Синдеев Ю.Г. Электротехника (с основами электроники): Учебное пособие для профессиональных училищ и колледжей. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006.
12. Тартаковский, Д. Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений : учеб. для вузов [Текст] / Д. Ф. Тартаковский, А. С. Ястребов. М. : Высш. шк., 2001. – 205 с.
13. Хрусталева, З. А. Электротехнические измерения : учебник / З. А. Хрусталева. – М. : КНОРУС, 2011. – 208 с.

Интернет ссылки. (*)
1. «Класс!ная физика» : http://class-fizika.ru/11_107.html
2.https://toehelp.ru/theory/toe/lecture17/lecture17.html
3.http://em.samgtu.ru›sites/em.samgtu.ru/files/pictures/…
4.ppt-online.org›1511901
5.https://physege.sdamgia.ru/search/….
6. https://studfile.net/preview/
7. https://studfile.net/preview/2893428

Кондратьева Элеонора Владимировна

ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ ОП 02. «ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

Учебно-методическое пособие



Кондратьева Элеонора Владимировна

Практические работы по дисциплине ОП 02. «Основы электротехники»

Учебно-методическое пособие издано в авторской редакции

Сетевое издание

Ответственный за выпуск – Алимова Н.К.

Учебное издание

Системные требования:
операционная система Windows XP или новее, macOS 10.12 или новее, Linux.
Программное обеспечение для чтения файлов PDF.

Объем данных 3,4 Мб

Принято к публикации «12» ноября 2025 года

Режим доступа: https://izd-mn.com/PDF/75MNNPU25.pdf свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

ООО «Издательство «Мир науки»

«Publishing company «World of science», LLC

Адрес:

Юридический адрес – 127055, г. Москва, пер. Порядковый, д. 21, офис 401.

Почтовый адрес – 127055, г. Москва, пер. Порядковый, д. 21, офис 401.

https://izd-mn.com/

ДАННОЕ ИЗДАНИЕ ПРЕДНАЗНАЧЕНО ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ НА ЭЛЕКТРОННЫХ НОСИТЕЛЯХ