

Министерство образования и науки Челябинской области

ГБПОУ «Троицкий технологический техникум»

**Методические указания
по выполнению практических работ**

по дисциплине: **ОП.02 Электротехника и электроника**

по специальности **13.02.03 Электрические станции, сети и системы**

г. Троицк, 2023 г.

Методические указания для выполнения лабораторных работ разработаны на основе рабочей программы по дисциплине «Электротехника и электроника» по специальности 13.02.03 Электрические станции, сети и системы.

Разработчик: Перфильева Л.С., преподаватель профессионального цикла, высшей квалификационной категории

Рассмотрено и одобрено на заседании цикловой методической комиссии по программам подготовки специалистов среднего звена технического профиля

Протокол № 6 от «30» мая 2023 г.

Содержание:

1. Пояснительная записка
2. Общие требования по выполнению работы и оформлению отчета; критерии оценивания работ
3. Тематика и содержание практических работ
4. Список используемой литературы.

1. Пояснительная записка

Целью проведения практических работ является:

- лучшее усвоение материала, закрепление полученных теоретических знаний и практических умений по учебной дисциплине;
- формирование умений применять теоретические знания при решении поставленных вопросов;
- формирование общих и профессиональных компетенций

Согласно учебному плану и рабочей программы дисциплины общий объем на выполнение практических работ составляет 28 часов.

2. Общие требования по выполнению работы и оформлению отчета; критерии оценивания работ.

Обучающийся должен:

- строго выполнять весь объем самостоятельной подготовки, указанный в описании соответствующих лабораторных (практических) работ;
- знать, что выполнению каждой работы предшествует проверка готовности обучающегося, которая проводится преподавателем;
- знать, что после выполнения работы обучающийся должен представить отчет о проделанной работе с обсуждением полученных результатов и выводов.

Критерии оценки лабораторных (практических) работ.

Например:

Оценка «5» - работа выполнена в полном объеме и без замечаний.

Оценка «4» - работа выполнена правильно с учетом 2-3 несущественных ошибок, исправленных самостоятельно по требованию преподавателя.

Оценка «3» - работа выполнена правильно не менее чем на половину или допущена существенная ошибка.

Оценка «2» - допущены две (и более) существенных ошибок в ходе работы, которые обучающиеся не может исправить даже по требованию преподавателя или работа не выполнена.

Отчет по практической работе должен включать в себя:

1. Название практической работы.
2. Цель работы.

3. Электрическую схему работы, выполненную в соответствии с требованиями ЕСКД.
4. Расчетные формулы и примеры расчетов. Таблицу с расчетными данными.
5. Выводы по работе.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями СПДС и ЕСКД на листах формата А4 разборчивым почерком чернилами одного цвета (синего или черного). Чертежи, схемы выполняются карандашом с помощью чертежных инструментов.

Каждую практическую работу начинают с нового листа, на который нанесена рамка рабочего поля со штампом (приложение 1). Рамки отстоят от внешней стороны листа слева на 20 мм, от других сторон на 5 мм.

Описки, графические неточности, обнаруженные в процессе выполнения работы, допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой краской и нанесением на том же месте исправленного текста. Титульный лист оформляется в соответствии со стандартом техникума.

4. Тематика и содержание практических работ

Перечень практических работ

№п/п	Наименование работы	Кол-во часов	Тема
1	Расчет параметров и построение нагрузочной характеристики источника э.д.с.	2	2.1
2	Расчет цепи и определение сечения проводников.	2	2.1
3	Расчет параметров цепи при помощи метода узловых потенциалов.	2	2.2
4	Расчет параметров цепи методом наложения токов.	2	2.2
5	Расчет магнитной цепи.	2	3.1
6	Расчет неразветвленной цепи переменного тока.	2	4.2
7	Расчет цепи графоаналитическим методом.	2	4.2

8	Расчет цепей с применением символьического метода	2	5.1
9	. Расчет параметров трехфазной цепи при соединении приемников звездой.	2	6.1
10	Расчет параметров трехфазной цепи при соединении приемников треугольником.	2	6.1
11	Расчет тока и напряжения на элементах цепи в переходном процессе.	2	7.1
12	Разбор схем стабилизаторов.	2	8.2
13	Разбор схем усилителей.	2	8.3
14	Расчет параметров однокаскадного усилителя.	2	8.3

Практическая работа № 1

Расчет параметров и построение нагрузочной характеристики источника ЭДС

Цель работы: изучить способ расчета нагрузочной характеристики источника.

Оснащение: методические указания по выполнению практических работ.

Задание и порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическим материалом и примером.
2. На основании исходных данных рассчитать для своего варианта параметры и построить нагрузочную характеристику источника ЭДС.
3. Составить отчет по работе.

Краткие теоретические сведения

Внешняя (нагрузочная) характеристика источника ЭДС – это график, который показывает, как меняется напряжение на нагрузке в зависимости от тока нагрузки.

Напряжение на зажимах источника меньше ЭДС на величину падения напряжения на **внутреннем сопротивлении источника** (1):

$$U = E - R_0 \cdot I$$

Этому уравнению соответствует внешняя характеристика источника ЭДС (рис. 1) построенная по двум точкам:

- 1) при $I=0$ $E=U$ – холостой ход;
- 2) при $U=0$ $E=R_0I$ – короткое замыкание.

Очевидно, что напряжение на зажимах источника ЭДС тем больше, чем меньше его внутреннее сопротивление.

В идеальном источнике ЭДС $R_0=0$, $U=E$ (напряжение не зависит от величины нагрузки). Однако не всегда при анализе и расчете цепи источник электрической энергии удобно представлять в качестве источника ЭДС. Если внутреннее сопротивление источника значительно превышает внешнее сопротивление цепи, что, например, имеет место в электронике, то получим, что ток в цепи $I=U/(R+R_0)$ и при $R_0 \gg R$ практически не зависит от сопротивления нагрузки. В этом случае источник энергии представляют в качестве источника тока.

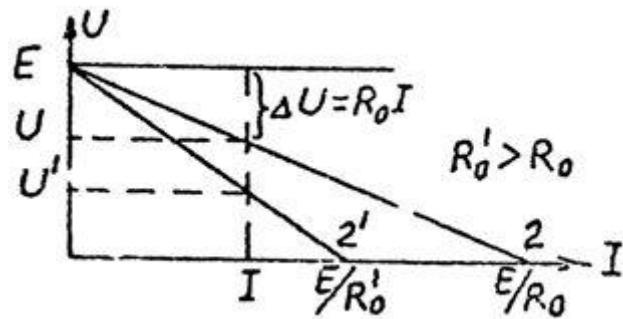


Рис.1.

Разделим уравнение (1) на R_0 (2):

$$\frac{U}{R_0} = \frac{E}{R_0} - I$$

Уравнению (2) соответствует схема замещения, приведенная на рис. 2. Здесь $I_B = U/R_0$ и $I_k = E/R_0$, $I = I_k - I_B$, тогда (3)

$$U = I_k \cdot \frac{R \cdot R_0}{R + R_0}$$

Для идеального источника тока $R_0 = \infty$. Вольтамперные характеристики реального и идеального источников тока показаны на рис. 3.

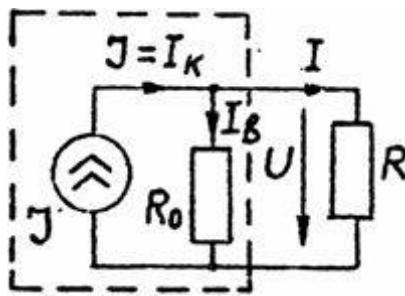


Рис. 2

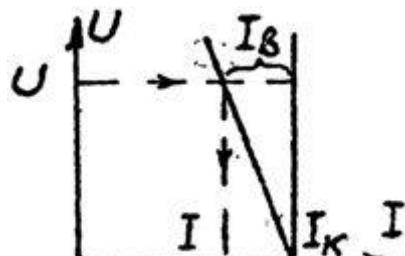


Рис. 3

Когда нет четкого разграничения величин R и R_0 , в качестве расчетного эквивалента источника энергии можно использовать либо источник ЭДС, либо источник тока. В последнем, случае для определения падения напряжения используют выражение (3).

Пример. Построение графика внешней характеристики источника ЭДС.

Построить внешнюю характеристику для источника с параметрами: $E=3\text{В}$, $R_0=1\text{Ом}$

Решение:

График внешней характеристики является прямой линией. Её можно построить по двум точкам. Определим координаты этих точек:

1) холостой ход: $I = 0, U_H = E - IR_0 = E = 3V$

Таким образом, координаты этой точки: 3 вольта по вертикальной оси и ноль ампер – по горизонтальной.

2) короткое замыкание: $I = E/R_0 = 3A, U_H = E - IR_0 = 0$

Координаты второй точки: ток равен 3А, напряжение равно нулю.

Отметив на осях координат точки, соответствующие полученным значениям и соединим их прямой линией. График, построенный по результатам вычислений, показан на рис.4.

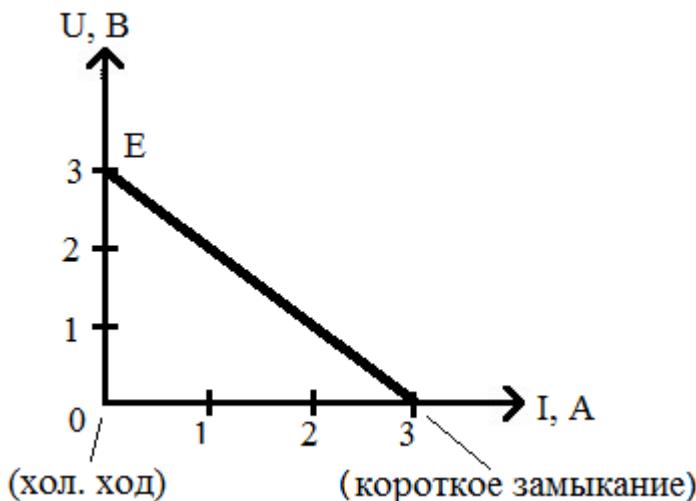


Рис.4. График внешней характеристики источника ЭДС

Варианты заданий

Рассчитать и построить внешнюю характеристику для источника с параметрами из таблицы 1 в соответствии с вариантом.

Порядок выполнения расчета и формулировка как в примере.

Таблица 1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E, В	100	150	200	220	300	350	120	220	250	120
R ₀ , Ом	0,5	1,0	1,5	2,0	1,5	10	0,5	5,0	10	2,5

Контрольные вопросы

1. Какой источник ЭДС называется идеальным?
2. Какой источник ЭДС называется реальным?
3. Какая характеристика источника ЭДС называется внешней (нагрузочной)?

Содержание отчета

1. Тема, цель работы.
2. Задание, расчеты, график характеристики.
3. Контрольные вопросы и ответы.

Практическая работа № 2

Расчет цепи и определения сечения проводников

Цель работы: научиться производить расчет сопротивления проводника по его параметрам; производить выбор сечений проводов по току.

Оснащение: методические указания по выполнению практических работ.

Задание и порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическим материалом.
2. Выполнить расчет, определить сечение провода для своего варианта.
3. Оформить отчет.

Краткие теоретические сведения

Электрическое сопротивление R – это параметр элементов электрической цепи, который характеризует способность элемента поглощать электрическую энергию и преобразовывать ее в другие виды энергии. За единицу сопротивления принят ом (Ом). $1 \text{ Ом} = 1\text{В}/1\text{А}$. Величина электрического сопротивления R зависит от геометрических размеров и свойств материала проводника

$$R = \rho \cdot l / S,$$

где ρ - удельное сопротивление, $\text{Ом}\times\text{м}$ или $\text{Ом}\times\text{мм}^2/\text{м}$; l - длина, м ; S - площадь поперечного сечения, м^2 или мм^2 .

Чем меньше площадь поперечного сечения проводника, тем выше его сопротивление, а значит выше и активная мощность, которая говорит о более сильном нагреве. Исходя из этого, расчет сечения необходим для обеспечения безопасности и надежности проводки.

Как правило, на практике в электротехнике чаще всего встречаются алюминий и медь. Реже применяются стальные проводники, но обычно – лишь в качестве каких-то токонесущих деталей электротехнической арматуры.

Для алюминия удельное сопротивление равно $0,029 \text{ Ом}\times\text{мм}^2/\text{м}$, у меди оно ниже – $0,0175 \text{ Ом}\times\text{мм}^2/\text{м}$.

Сравнение меди и алюминия практически по всем статьям показывает ее преимущество. Удельное сопротивление даже просто в «чистом виде» у меди практически в полтора раза ниже.

При прокладке силовых коммуникаций основной возникающий вопрос – выбор типа и сечения провода, который нужно использовать. При этом тип провода, определяющий материал и количество изоляционных оболочек

(различные виды пластика и других материалов), а также материал (медь или алюминий) и тип (одно- и многожильный) проводника, выбирается исходя из условий, в которых будет проложен провод. Сечение же провода определяется исходя из максимального тока, который будет протекать по проводу продолжительное время. Помочь в выборе сечения провода помогут таблицы 1 и 2.

Таблица 1

Сечение провода для передачи переменного тока в сетях 220/380 Вольт

Ток, А		6	10	13	16	20	25	32	40	50	63	80
Мощность, кВт	220В	1,2	2,2	2,9	3,5	4,4	5,5	7,0	8,8	11,0	13,9	17,6
	380В	2,3	3,8	4,9	6,0	7,6	9,5	12,2	15,2	19,0	23,9	30,4
Сечение мм ²	Cu	0,5	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	4,0	4,0	6,0	10,0	10,0
	Al	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4,0	4,0	6,0	10,0	16,0	25,0

Таблица 2

Сечение медного провода для передачи постоянного тока при напряжении 12 Вольт

Ток, А	16,5	21,5	25,0	32,0	43,5	58,5	77,0	103,0	142,5
Мощность, кВт	0,2	0,26	0,3	0,38	0,52	0,7	0,92	1,24	1,71
Сечение, мм ²	0,5	0,75	1,0	1,5	2,5	0,4	6,0	10,0	16,0

Таблица 3

Таблица удельных сопротивлений проводников

Материал проводника	Удельное сопротивление ρ в $\frac{\text{ом} \times \text{мм}^2}{\text{м}}$
Серебро	0,015
Медь	0,0175
Золото	0,023
Латунь	0,025... 0,108
Алюминий	0,029
Натрий	0,047
Иридий	0,0474
Вольфрам	0,05
Цинк	0,054
Молибден	0,059
Никель	0,087
Бронза	0,095... 0,1
Железо	0,1

Сталь	0,103... 0,137
Олово	0,12
Свинец	0,22
Никелин (сплав меди, никеля и цинка)	0,42
Манганин (сплав меди, никеля и марганца)	0,43... 0,51
Константан (сплав меди, никеля и алюминия)	0,5
Титан	0,6
Ртуть	0,94
Нихром (сплав никеля, хрома, железа и марганца)	1,05... 1,4
Висмут	1,2

Порядок выполнения работы

Задание 1. Выполните расчет по формуле сопротивления. Задание по варианту взять из таблицы 4. Удельное сопротивление выбрать по таблице 3.

Таблица 4

Вариант	Данные для расчета
1	Определите сопротивление алюминиевого провода, длина которого 1800 м и площадь поперечного сечения 10 мм^2 .
2	Площадь сечения медной проволоки равна 2 мм^2 , а длина 55м. Определить ее сопротивление.
3	Никелиновая проволока имеет сопротивление 200 Ом и длину 100 м. Определить площадь поперечного сечения.
4	Сколько метров медного провода сечением 2 мм^2 необходимо, чтобы сопротивление было равно 1 Ом?
5	Электрическая плитка имеет нагревательный элемент из константановой проволоки длиной 0,5м и сечением 0,2 мм^2 . Каково сопротивление спирали?
6	Нужно изготовить реостат с сопротивлением 50 Ом из манганиновой проволоки сечением 0,2 мм^2 . Сколько метров проволоки потребуется?
7	Каково сопротивление алюминиевого провода сечением 2,5 мм^2 и длиной 300м?
8	Сопротивление нагревательной спирали 24Ом. Какой длины должен быть провод из никрома, если сечение его 0,3 мм^2 ?
9	Провод сечением 4 мм^2 и длиной 200м имеет сопротивление 6,5 Ом. Определить материал провода.
10	Нужно изготовить реостат с сопротивлением 20 Ом из манганинового провода. Определить сечение провода, если его длина 5м.

Задание 2. Определить сечение провода по таблицам 1 или 2, исходя из данных варианта приведенных в таблице 5.

Таблица 5

Вариант	Род тока	Напряжение, В	Материал провода	Мощность приемников, кВт
1	постоянный	12	медь	0,2
2	переменный	220	медь	1,2
3	переменный	220	алюминий	2,2
4	постоянный	12	медь	0,52

5	переменный	380	алюминий	3,8
6	постоянный	12	медь	0,3
7	переменный	220	медь	2,9
8	переменный	380	алюминий	9,5
9	постоянный	12	медь	1,24
10	переменный	220	алюминий	5,5

Результаты по заданию 2 записать в таблицу:

Вариант	Род тока	Напряжение, В	Материал провода	Мощность приемников, кВт	Ток, А	Сечение провода, мм ²

Контрольные вопросы:

1. Как обозначается и в каких единицах измеряется электрическое сопротивление?
2. От каких величин зависит электрическое сопротивление?
3. По каким параметрам определяют сечение провода на практике?

Содержание отчета:

1. Тема, цель работы.
2. Задание 1, расчеты.
3. Задание 2, таблица с результатами определения сечения провода.
4. Контрольные вопросы и ответы.

Практическая работа №3

Расчет параметров цепи методом узловых потенциалов

Цель работы: освоить расчет параметров сложных электрических схем постоянного тока методом узловых потенциалов (МУП).

Оснащение: методические указания по выполнению практических работ.

Задание

1. Записать название работы, тему и цель работы
2. Ознакомиться с методическими указаниями, рассмотреть приведенный пример
3. Решить индивидуальное задание. Составить отчет согласно требованиям.

Краткие теоретические сведения

Метод расчета, в котором за неизвестные принимают потенциалы узлов схемы, называют методом узловых потенциалов.

В методе узловых потенциалов независимыми переменными являются потенциалы узлов цепи относительно выбранного базисного (опорного) узла, потенциал которого равен нулю. В качестве опорного узла удобно выбирать заземленный узел или узел, в котором сходится наибольшее число ветвей. Уравнения составляют только на основе первого закона Кирхгофа.

Алгоритм расчета

1. Определяем строение цепи.
 - а) определяем общее число ветвей
 - б) определяем число ветвей с источниками тока
 - в) определяем число ветвей с неизвестными токами p
 - г) определяем число узлов, нумеруем их, при этом один, произвольно выбранный, заземляем. Его потенциал принимается равным нулю.
 - д) выбираем направления токов в ветвях: в ветвях с ЭДС – согласно с ней, в остальных ветвях – произвольно. Обозначаем токи двумя индексами: первый – номер узла, от которого ток утекает, второй – номер узла, к которому ток подтекает.

2. Записываем выражения для токов в ветвях через потенциалы узлов. При этом удобно воспользоваться выражением:

$$I_{ab} = (\varphi_a - \varphi_b + E_{ab}) / R_{ab}$$

3. Составляем уравнения по первому закону Кирхгофа для тех узлов, потенциалы которых неизвестны.

4. В полученной системе заменяем токи в ветвях выражениями, полученными в пункте 2 (через потенциалы)

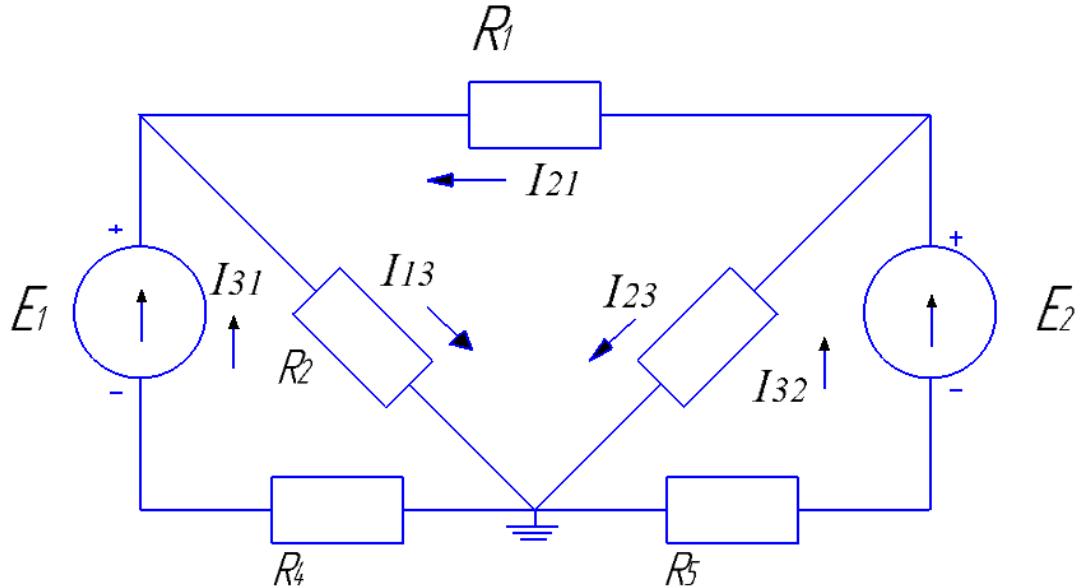
5. Решаем полученную систему уравнений, определяем потенциалы узлов

6. Найденные потенциалы подставляем в выражения токов и находим, таким образом, искомые токи ветвей.

Пример.

Найти токи в цепи методом угловых потенциалов

Дано: $E_1 = 30\text{ В}$; $E_2 = 40\text{ В}$; $R_{01}=R_{02}=0,3 \text{ Ом}$; $R_1=4 \text{ Ом}$; $R_2=R_3=30 \text{ Ом}$; $R_4=R_5=12 \text{ Ом}$



Решение:

1. Определяем строение схемы

а) общее количество ветвей: **в=5**

б) количество ветвей с неизвестными токами: **в=5**

в) количество узлов: $y=3$, потенциалы узлов $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$. Один из узлов заземлим, $\varphi_3=0$

г) обозначаем направление токов в ветвях: $I_{31}, I_{32}, I_{21}, I_{13}, I_{23}$

2. Выражаем токи через потенциалы

$$I_{31} = \frac{\varphi_3 - \varphi_1 + E_1}{R_4 + R_{01}} = \frac{E_1 - \varphi_1}{R_4 + R_{01}}$$

$$I_{32} = \frac{\varphi_3 - \varphi_2 + E_2}{R_5 + R_{02}} = \frac{E_2 - \varphi_2}{R_5 + R_{02}}$$

$$I_{21} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_1}$$

$$I_{13} = \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{R_2} = \frac{\varphi_1}{R_2}$$

$$I_{23} = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{R_3} = \frac{\varphi_2}{R_3}$$

3. Записываем уравнения по 1 закону Кирхгофа для узлов **1** и **2**, т. к. потенциалы их неизвестны

$$1) I_{31} + I_{21} - I_{13} = 0$$

$$2) I_{32} - I_{21} - I_{23} = 0$$

4. Подставим в уравнения токи, выраженные через потенциалы

$$\begin{cases} \frac{E_1 - \varphi_1}{R_4 + R_{01}} + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_1} - \frac{\varphi_1}{R_2} = 0 \\ \frac{E_2 - \varphi_2}{R_5 + R_{02}} - \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_1} - \frac{\varphi_2}{R_3} = 0 \end{cases}$$

5. Решаем систему, определяем потенциалы φ_1 и φ_2

Подставляем значения параметров и вычисляем.

$$\begin{cases} \frac{30 - \varphi_1}{12 + 0,3} + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{4} - \frac{\varphi_1}{30} = 0 \\ \frac{40 - \varphi_2}{12 + 0,3} - \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{4} - \frac{\varphi_2}{30} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{30 - \varphi_1}{12,3} + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{4} - \frac{\varphi_1}{30} = 0 \\ \frac{40 - \varphi_2}{12,3} - \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{4} - \frac{\varphi_2}{30} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{30}{12,3} - \frac{\varphi_1}{12,3} + \frac{\varphi_2}{4} - \frac{\varphi_1}{4} - \frac{\varphi_1}{30} = 0 \\ \frac{40}{12,3} - \frac{\varphi_2}{12,3} - \frac{\varphi_2}{4} + \frac{\varphi_1}{4} - \frac{\varphi_2}{30} = 0 \end{cases}$$

Переводим обыкновенные дроби в десятичные, соблюдаем правила округления, приводим подобные.

Получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} 0,36\varphi_1 - 0,25\varphi_2 = 2,44 \\ -0,25\varphi_1 + 0,36\varphi_2 = 3,25 \end{cases}$$

Из второго уравнения найдём φ_2 :

$$\varphi_2 = \frac{3,25 + 0,25\varphi_1}{0,36}$$

Подставим в первое уравнение:

$$0,36\varphi_1 - 0,25 \frac{3,25 + 0,25\varphi_1}{0,36} = 2,44$$

Найдём значение φ_1 и φ_2 :

$$\varphi_1 = \frac{4,7}{0,19} = 24,7 \text{ В}; \varphi_2 = \frac{3,25 + 0,25 \cdot 24,7}{0,36} = 26,2 \text{ В}$$

6. Находим токи в ветвях:

$$I_{31} = \frac{30 - 24,7}{12,3} = 0,43 \text{ А}$$

$$I_{32} = \frac{40 - 26,2}{12,3} = 1,12 \text{ А}$$

$$I_{21} = \frac{26,2 - 24,7}{4} = 0,38 \text{ А}$$

$$I_{13} = \frac{24,7}{30} = 0,82 \text{ А}$$

$$I_{23} = \frac{26,2}{30} = 0,87 \text{ А}$$

Задание по вариантам:

Определить токи во всех ветвях цепи (рис. 1). Указанные величины E_1 , E_2 , R_{01} , R_{02} , R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 , в зависимости от варианта, даны в табл.1. Расчет произвести методом узловых потенциалов. Схема и порядок расчета согласно приведенного примера.

Таблица 1

№ варианта	E ₁ , В	E ₂ , В	R ₀₁ = R ₀₂ , Ом	R ₁ , Ом	R ₂ = R ₃ , Ом	R ₄ = R ₅ , Ом
1; 6; 11; 16; 21	40	30	0,4	30	10	3,6
2; 7; 12; 17; 22	30	40	0,2	3	30	10
3; 8; 13; 18; 23	20	30	0,5	40	15	5
4; 9; 14; 19; 24	30	20	0,6	50	25	7
5; 10; 15; 20; 25	25	35	0,5	30	5	1,8

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте суть метода узловых потенциалов
2. Из каких соображений выбирается базовый узел в методе узловых потенциалов?
3. Как определяется узловой ток?
4. От чего зависит количество уравнений, входящих в систему, из которой определяются узловые потенциалы?

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Задание, схема, расчеты с пояснениями.
3. Контрольные вопросы и ответы.

Практическая работа №4

Расчет цепи методом наложения токов

Цель работы: научиться рассчитывать сложные электрические схемы постоянного тока методом наложения.

Оснащение: методические указания по выполнению практических работ.

Краткие теоретические сведения

Метод наложения является одним из методов расчета сложных цепей с несколькими источниками энергии.

Сущность данного метода сводиться к следующему.

1. В каждой ветви рассматриваемой цепи направление тока выбирается произвольно.
2. Количество расчетных схем цепи равно количеству источников в схеме.
3. В каждой расчетной схеме действует только один источник, а остальные источники заменяются их внутренним сопротивлением.
4. В каждой расчетной схеме методом свертывания определяют частичные токи в каждой ветви. *Частичным* называется условный ток, протекающий в ветви под действием только одного источника. Направление частичных токов в ветвях вполне определено и зависит от полярности источника.
5. Искомые токи каждой ветви рассматриваемой схемы определяются как алгебраическая сумма частичных токов для этой ветви. При этом частичный ток, совпадающий по направлению с искомым, считается положительным, а несовпадающий- отрицательным. Если алгебраическая сумма частичных токов имеет положительный знак, то направление искомого тока в ветви совпадает с произвольно выбранным, если же отрицательный, то направление тока противоположно выбранному.

Пример расчёта:

Рассмотрим метод наложения на примере данной схемы рисунок 1.

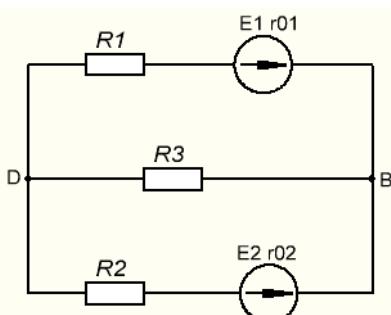


Рисунок 1

Дано:

$E_1=100$ В, $E_2=50$ В; $R_1=4$ Ом, $R_2=10$ Ом; $R_3=12$ Ом, $r_{01}=1$ Ом, $r_{02}=2$ Ом.

Найти: Все токи.

Определяем количество источников в схеме. В данной схеме два источника, значит нам нужно рассчитать две схемы

1. Предположим, что в цепи действует только E_1 (рисунок 2). Укажем на этой схеме направление частичных токов создаваемых источником E_1 (токи обозначим с одним штрихом $I'1$; $I'2$; $I'3$). *Обратите внимание, если у источника (E_1 ; E_2) есть внутреннее сопротивление (r_{01} ; r_{02}), то при исключении данного источника его внутреннее сопротивление остается в схеме.*

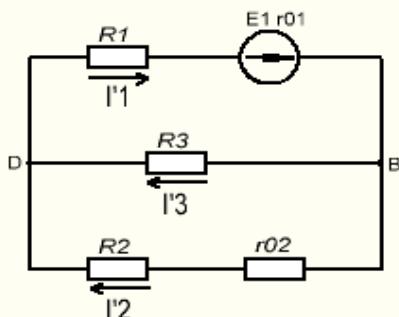


Рисунок 2

2. Найдем ток $I'1$. РЭКВ — сопротивление всей цепи.

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{(R_2 + r_{02}) \cdot R_3}{R_2 + r_{02} + R_3} + R_1 + r_{01} = 11 \text{ Ом.}$$

$$I'1 = \frac{E_1}{R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{100}{11} = 9 \text{ А;}$$

3. Найдем ток $I'2$; $I'3$ по формуле:

$$I'2 = I'1 \cdot \frac{R_3}{R_2 + r_{02} + R_3} = 9 \cdot \frac{12}{10 + 2 + 12} = 4,5 \text{ А.}$$

$$I'3 = I'1 \cdot \frac{R_2 + r_{02}}{R_2 + r_{02} + R_3} = 9 \cdot \frac{10 + 2}{10 + 12 + 2} = 4,5 \text{ А.}$$

4. Мы нашли все частичные токи в первой схеме (рисунок 2).

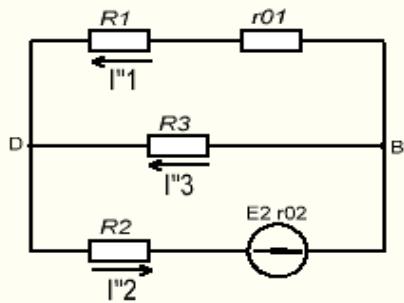


Рисунок 3

1. Рассмотрим вторую схему без Е1, но с Е2 (рисунок 3). Укажем на этой схеме направление частичных токов создаваемых источником Е2 (токи обозначим с двумя штрихами I''1; I''2; I''3)
2. Найдем ток I''2. $R_{ЭКВ}$ рассчитываем заново.

$$R_{ЭКВ} = \frac{(R1 + r01) \cdot R3}{R1 + r01 + R3} + R2 + r02 = 15,5 \text{ Ом.}$$

$$I''2 = \frac{E2}{R_{ЭКВ}} = \frac{50}{15,5} = 3,22 \text{ A};$$

3. Найдем токи I''1; I''3 по формуле:

$$I''1 = I''2 \cdot \frac{R3}{R1 + r01 + R3} = 3,22 \cdot \frac{12}{4+1+12} = 2,27 \text{ A}.$$

$$I''3 = I''2 \cdot \frac{R1 + r01}{R1 + r01 + R3} = 3,22 \cdot \frac{4+1}{4+12+1} = 0,94 \text{ A}.$$

4. Мы нашли все частичные токи для второй схемы (рисунок 3).

5. Найдем действующие (истинные) токи в изначальной схеме (рисунок 1) путем алгебраического сложения частичных токов первой (рисунок 2) и второй (рисунок 3) схемы. Для этого смотрим, как направлены токи в одинаковых ветвях на рисунке 2 и 3. Если токи направлены в одном направлении, то тогда они складываются, а если токи направлены в разные стороны, тогда вычитаем.

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = 9 - 2,27 = 6,73 \text{ A};$$

$$I_2 = I'_2 - I''_2 = 4,5 - 3,22 = 1,28 \text{ A};$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = 4,5 + 0,94 = 5,44 \text{ A};$$

6. Если искомый ток получился положительным, то направление тока в ветви совпадает с произвольно выбранным, а если ток получился отрицательными, то направление противоположно выбранному.

Задание:

Определить токи во всех ветвях цепи. Указанные величины $E_1, E_2, r_{01}, r_{02}, R_1, R_2, R_3$, в зависимости от варианта, даны в табл.1. Расчет произвести методом наложения токов. Схема на рисунке 1.

Таблица 1.

№ варианта	$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$r_{01}, \text{Ом}$	$r_{02}, \text{Ом}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$
1	100	50	1	1	10	20	15
2	20	15	0,5	1	15	5	10
3	60	20	1	0,5	5	10	15
4	150	50	0,3	0,5	10	20	15
5	25	25	0,2	0,8	5	10	12
6	25	10	2	1	4	12	8
7	35	15	2	1	10	5	12
8	50	10	0,5	1	15	10	7
9	55	40	1	1	10	5	15
10	45	25	1	0,5	10	25	14

Контрольные вопросы:

1. Какое правило знаков при определении искомых токов?
2. Что означает, если искомый ток получен с отрицательным знаком?
3. Сколько расчётных схем, если в цепи действует четыре источника?

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Задание, схема, расчеты, контрольные вопросы и ответы.

Практическая работа №5

Расчёт магнитной цепи

Цель работы: усвоение теоретического материала, овладение методикой расчёта неразветвленной неоднородной магнитной цепи.

Оборудование и оснащение: методические указания по выполнению практических работ.

Краткие теоретические сведения

Магнитной цепью называется часть электротехнического устройства, отдельные участки которого выполнены из ферромагнитных материалов, по которым замыкается магнитный поток.

Магнитная цепь, которая выполнена из одного материала и по всей длине имеет одинаковые сечения, называется однородной.

Магнитные цепи, как и электрические, бывают неразветвленными и разветвленными.

Характерной особенностью неразветвленной магнитной цепи является неизменный магнитный поток во всех участках цепи.

Закон Ома для магнитной цепи: $\Phi = \frac{U_m}{R_m}$; $R_m = \frac{1}{\mu_a \times s}$

R_m – магнитное сопротивление

l, s – параметры сердечника.

Первый закон Кирхгофа:

$$\Sigma \Phi = 0$$

Алгебраическая сумма магнитных потоков в точке разветвления равна нулю.

Второй закон Кирхгофа (закон полного тока):

$$\Sigma Iw = \Sigma U_m \text{ или } Iw = \Sigma Hl$$

Алгебраическая сумма МДС любого контура магнитной цепи равна алгебраической сумме магнитных напряжений его участков.

Пример

По заданному магнитному потоку в цепи определить намагничающую силу (МДС), необходимую для создания этого потока.

A, мм	B, мм	a, мм	b, мм	c, мм	d, мм	δ, мм	Bδ, Тл	I, А	материал
300	250	60	50	40	30	9	1,9	0,5	электротех. сталь 1512

Определить число витков w катушки электромагнита, если известны габариты магнитопровода, индукция $B\delta$ в воздушном зазоре, материал магнитопровода и ток I в обмотке электромагнита. Толщина магнитопровода по всей длине одинакова и составляет 100 мм.

Решение

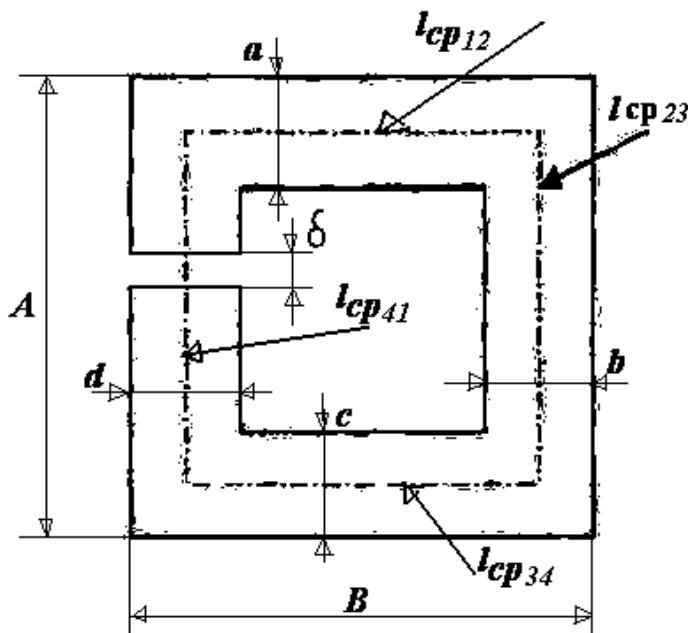
1. Определяем длину средней линии на каждом участке. Учтем, что δ – воздушный зазор

$$l_{cp12} = B - \frac{b}{2} - \frac{d}{2} \text{ (м)}$$

$$l_{cp23} = A - \frac{a}{2} - \frac{c}{2} \text{ (м)}$$

$$l_{cp34} = B - \frac{b}{2} - \frac{d}{2} \text{ (м)}$$

$$l_{cp41} = A - \frac{a}{2} - \frac{c}{2} - \delta \text{ (м)}$$



2. Подставим в формулы значения данных из таблицы и вычислим

$$l_{cp12} = 330 - 40 / 2 - 30 / 2 = 330 - 20 - 15 = 295 \text{ мм} = 0,295 \text{ (м)}$$

$$l_{cp23} = 290 - 70 / 2 - 60 / 2 = 290 - 35 - 30 = 225 \text{ мм} = 0,225 \text{ (м)}$$

$$l_{\text{ср34}} = 330 - 40 / 2 - 30 / 2 = 330 - 20 - 15 = 295 \text{ мм} = 0,295 \text{ (м)}$$

$$l_{\text{ср41}} = 290 - 70 / 2 - 60 / 2 - 4 = 290 - 35 - 30 - 4 = 221 \text{ мм} = 0,221 \text{ (м)}$$

3. Определяем сечение магнитопровода на каждом участке:

$$S_{12} = a \cdot 100 \text{ (мм}^2\text{)}$$

$$S_{23} = b \cdot 100 \text{ (мм}^2\text{)}$$

$$S_{34} = c \cdot 100 \text{ (мм}^2\text{)}$$

$$S_{41} = d \cdot 100 \text{ (мм}^2\text{)}$$

4. Подставим в формулы значения данных и вычислим, при этом учтем:

$$1 \text{ м} = 1000 \text{ мм} = 10^3 \text{ мм}; 1 \text{ м}^2 = 10^6 \text{ мм}^2; \text{ Отсюда, } 1 \text{ мм}^2 = 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$S_{12} = 70 \cdot 100 \text{ (мм}^2\text{)} = 7000 \text{ (мм}^2\text{)} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$S_{23} = 40 \cdot 100 \text{ (мм}^2\text{)} = 4000 \text{ (мм}^2\text{)} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$S_{34} = 60 \cdot 100 \text{ (мм}^2\text{)} = 6000 \text{ (мм}^2\text{)} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$S_{41} = 30 \cdot 100 \text{ (мм}^2\text{)} = 3000 \text{ (мм}^2\text{)} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

5. Определяем основной магнитный поток магнитной цепи.

Подставляя в формулу магнитного потока $\Phi = B_\delta \cdot S_\delta$ (В6), где $S_\delta = S_{41} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^2\text{)}$, находим: $\Phi = 0,5 \text{ Тл} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ (В6)}$

6. Определяем магнитную индукцию на каждом участке цепи при условии, что основной магнитный поток не изменяется. Подставляя в формулы:

$$B_{12} = \Phi / S_{12} \text{ (Тл)}$$

$$B_{23} = \Phi / S_{23} \text{ (Тл)}$$

$$B_{34} = \Phi / S_{34} \text{ (Тл)}$$

$$B_{41} = \Phi / S_{41} \text{ (Тл)}$$

$$B_{12} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ В6} / 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 0,214 \text{ Тл}$$

$$B_{23} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ В6} / 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 0,375 \text{ Тл}$$

$$B_{34} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ В6} / 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 0,25 \text{ Тл}$$

$$B_{41} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ В6} / 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 0,5 \text{ Тл}$$

7. По кривой намагничивания или из таблицы характеристик намагничивания стали, находим напряженность магнитной цепи для чугуна на каждом участке. $H_{12}, H_{23}, H_{34}, H_{41}$

$$H_{12} = 1,60 \text{ A/см} = 1,60 \times 100 = 160 \text{ A/м} \text{ для } B_{12} = 0,214 \text{ Тл}$$

$$H_{23} = 2,4 \text{ A/ см} = 2,4 \times 100 = 240 \text{ A/м} \text{ для } B_{23} = 0,375 \text{ Тл}$$

$$H_{34} = 2,0 \text{ A/ см} = 2,0 \times 100 = 20 \text{ A/м} \text{ для } B_{34} = 0,25 \text{ Тл}$$

$$H_{41} = 4,0 \text{ A/ см} = 4,0 \times 100 = 400 \text{ A/м} \text{ для } B_{41} = 0,5 \text{ Тл}$$

8. По закону полного тока находим МДС на каждом участке МДС обмотки:

$$F_{12} = H_{12} \cdot l_{12} (\text{А}) F_{12} = 160 \text{ A/м} \cdot 0,295 \text{ м} = 47,2 \text{ А}$$

$$F_{23} = H_{23} \cdot l_{23} (\text{А}) F_{23} = 240 \text{ A/м} \cdot 0,225 \text{ м} = 54 \text{ А}$$

$$F_{34} = H_{34} \cdot l_{34} (\text{А}) F_{34} = 20 \text{ A/м} \cdot 0,295 \text{ м} = 5,9 \text{ А}$$

$$F_{41} = H_{41} \cdot l_{41} (\text{А}) F_{41} = 400 \text{ A/м} \cdot 0,221 \text{ м} = 88,4 \text{ А}$$

9. Полная МДС равна $F = F_{12} + F_{23} + F_{34} + F_{41}$

По формуле вычисляем: $F = 47,2 \text{ А} + 54 \text{ А} + 5,9 \text{ А} + 88,4 \text{ А} = 195,5 \text{ А}$

Задание.

Для магнитной цепи (рис. №1) по заданному магнитному потоку рассчитать ток в катушке. Данные в соответствии с вариантом в таблице 1, где e – толщина магнитопровода, одинаковая на всех участках.

Таблица 1

№ Варианта	Магнитный Поток Φ , 10^{-4} Вб	a мм	b мм	c мм	d мм	e мм	δ мм	w	Материал
1	1,6	80	150	10	20	10	0,2	200	1541
2	4	250	300	30	30	20	0,4	600	1512
3	3	200	250	30	30	20	0,3	500	Литая Сталь
4	2,4	100	150	20	20	20	0,25	300	1512
5	2	150	200	30	30	20	0,3	400	Литая сталь

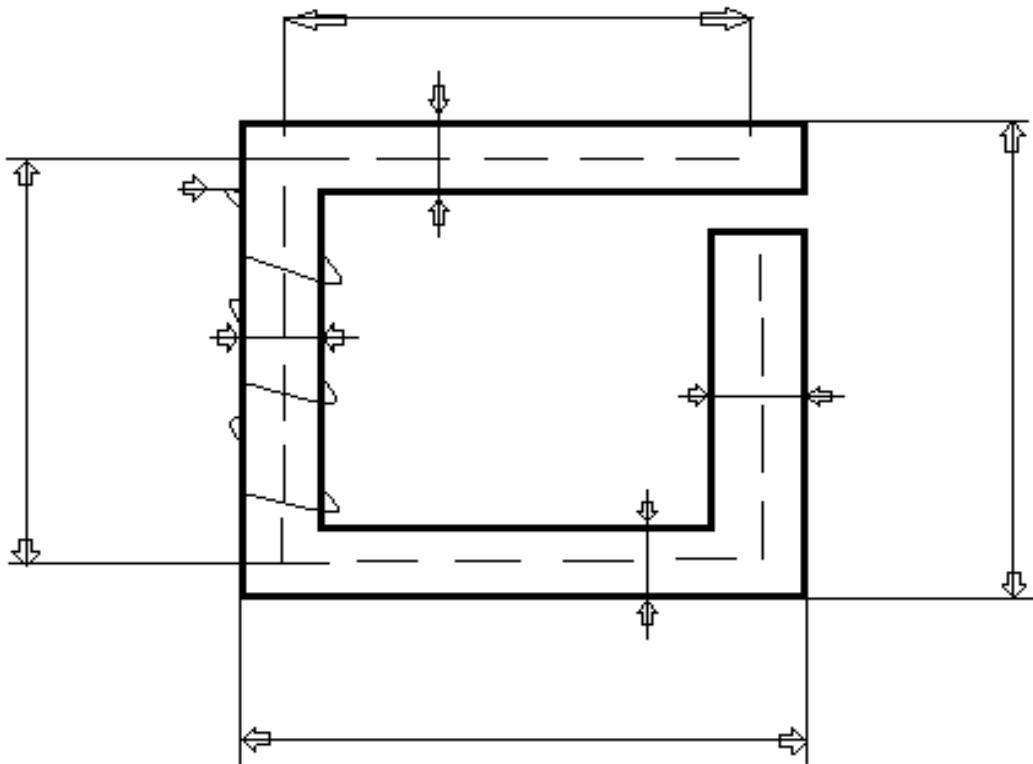


рис. 1

3. Порядок выполнения работы.

1. Начертить схему.
2. Записать исходные данные из таблицы.
3. Рассчитать сечение сердечника участков цепи.
4. Определить магнитную индукцию на каждом участке цепи.
5. Определить напряженность магнитного поля на каждом участке цепи и в воздушном зазоре.
6. Определить ток в катушке используя уравнения закона полного тока.

4. Порядок расчёта

- 4.1. Проводим среднюю магнитную линию.
- 4.2. Разбиваем магнитную цепь на однородные участки с неизменными сечениями и определяем площадь поперечного сечения участков **S** и длины **l** по средней магнитной линии.
- 4.3. По заданному магнитному потоку и рассчитанной площади поперечного сечения **S** находим магнитную индукцию на каждом из участков: $B = \frac{\Phi}{S}$
- 4.4. По Кривым намагничиваниям или по таблице №2 для каждого ферромагнитного участка определениям напряженность, согласно найденной магнитной индукции.

$$\text{Напряженность поля в воздушном зазоре : } H_0 = \frac{B_0}{\mu_0}$$

Но - [А/м], Во – [Тл]

4.5. Складывая магнитные напряжения **Н** всех участков, по закону полного тока определяем МДС, необходимую для создания магнитного потока **Ф**

4.6. Определяем величину тока, используя закон полного тока.

Таблица 2.

Индукция В	Тл	Напряженность магнитного поля Н , А/М		
		Электрическая сталь	Литая Сталь	Чугун
		1211,1212,1321	1541,1512	
0,1		-	40	0,8
0		-	50	1,6
0,3		-	60	2,4
0,4		1,40	70	3,2
0,45		1,52	75	3,6
0,5		1,71	85	4,0
0,55		1,91	94	4,43
0,6		2,11	110	4,88
0,65		2,36	127	5,35
0,7		2,61	145	5,84
0,75		2,87	165	6,32
0,8		3,18	185	6,82
0,85		3,52	210	7,45
0,9		3,97	235	7,98
0,95		4,47	270	8,5
1		5,02	300	9,2
1,1		6,47	395	10,9
1,2		9,76	640	14,3
1,3		11,4	770	15,9
1,4		15,8	1450(1300)	20,9
1,5		25,0	3100(2750)	28,9
				478

Контрольные вопросы

1. В чём заключается прямая задача расчёта магнитной цепи?
2. В чём заключается обратная задача расчёта магнитной цепи?
3. Законы магнитных цепей, их математическое выражение и формулировка.

Содержание отчета

1. Тема, цель работы.
2. Задание, рисунок, расчеты.
3. Контрольные вопросы и ответы.

Практическая работа №6

Расчет неразветвленной цепи переменного тока

Цель работы: научиться рассчитывать параметры неразветвленных электрических цепей переменного тока и строить векторные диаграммы.

Оборудование и оснащение: методические указания по выполнению практических работ.

Задание и порядок выполнения

1. Ознакомиться с методическими указаниями.
2. Выполнить расчеты и построить векторную диаграмму согласно варианту.
3. Оформить отчет.

Краткие теоретические сведения

Реактивное сопротивление цепи рано разности индуктивных и емкостных сопротивлений:

$$X = X_L - X_C \quad (\text{брать все } X \text{ из схемы})$$

Формула для полного сопротивления цепи имеет вид:

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

Эту формулу нужно привести в соответствие со своей схемой, следуя указаниям:

- если одно из этих сопротивлений в схеме отсутствует, то брать его за ноль;
- если каких-то сопротивлений два, то при их подставке в формулу складывают; причем X_L всегда берут с «плюсом», а X_C - с «минусом».

Ток в цепи можно найти несколькими способами:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}; \quad I = \sqrt{\frac{Q}{X}}; \quad I = \sqrt{\frac{S}{Z}}; \quad I = \frac{U}{Z}; \quad I = \frac{U_R}{R}; \quad I = \frac{U_X}{X}$$

Напряжения в цепи также можно найти по нескольким формулам:

$$U_R = IR; \quad U_L = IX_L; \quad U_C = IX_C; \quad U = IZ$$

Коэффициент мощности равен отношению активного сопротивления к полному:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

$\sin \varphi$ находят как отношение реактивного сопротивления к полному:

$$\sin \varphi = \frac{X}{Z}$$

Формулы для мощности цепи имеют вид:

активная $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$

реактивная $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$

полная $S = U \cdot I$

Для построения векторной диаграммы необходимо:

1. Составить уравнение

$$\vec{U} = \vec{U}_+ + \vec{U}_- + \vec{U}_{--}$$

(сложить вектора соответствующих напряжений).

2. Выбрать масштаб для значения напряжений и тока, определить длины векторов в сантиметрах.
3. После этого построить векторную диаграмму по масштабу и в соответствии с уравнением.

ПРИМЕЧАНИЕ:

- a) первым всегда строят ток I ;
- b) вектор U_R всегда идет параллельно току;
- c) вектор U_L перпендикулярно току вверх;
- d) U_C перпендикулярно току вниз;
- e) итоговый вектор U соединяет начало первого вектора с концом последнего.

Проверка: длина вектора U в сантиметрах, измеренная по линейке, должна совпадать с расчетной величиной.

Задание

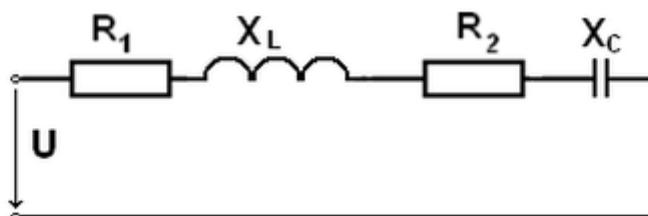
Неразветвленная цепь переменного тока (см. пример) содержит активные и реактивные сопротивления, величины которых заданы в таблице. Кроме того, известна одна из дополнительных величин. Определить следующие величины, если они не заданы в таблице вариантов: полное сопротивление цепи; напряжение, приложенное к цепи: силу тока в цепи; активную, реактивную и полную мощности; $\cos \varphi$; $\sin \varphi$.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1 , Ом	8	10	3	12	4	2	1	1	20	8
R_2 , Ом	4	20	1	20	8	1	3	2	10	4
X_L , Ом	18	50	5	30	18	4	2	8	10	6

X_C, Ω	2	10	2	6	2	8	5	4	50	22
Доп. величина	$I=10A$	$P=120$ Вт	$P_2=100$ Вт	$I=1A$	$U=40$ В	$Q_L=-96$ вар	$Q_C=-125$ вар	$S=80$ ВА	$Q=-640$ вар	$P_1=32$ Вт

Пример выполнения задания

Неразветвленная цепь переменного тока содержит активные и реактивные сопротивления, величины которых: $R_1=2\Omega$, $R_2=6\Omega$, $X_L=12\Omega$, $X_C=6\Omega$, $Q=150$ вар. Определить: полное сопротивление цепи; напряжение, приложенное к цепи; силу тока в цепи; активную и полную мощности; $\cos\phi$; $\sin\phi$. Построить векторную диаграмму.



Вариант	R_1 , Ом	R_2 , Ом	X_L , Ом	X_C , Ом	Дополнительная величина
1	2	6	12	6	$Q = 150$ вар

Решение

1. Найти реактивное сопротивление:

$$X = X_L - X_C = 12 - 6 = 6\Omega$$

2. Найти полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_L - X_C)^2} = \\ = \sqrt{(2 + 6)^2 + (12 - 6)^2} = 10\Omega$$

3. Найти ток:

$$I = \sqrt{\frac{Q}{X}} = \sqrt{\frac{150}{6}} = 5A$$

4. Найти напряжения:

$$\begin{aligned}
 U_{R1} &= IR_1 = 5 \cdot 2 = 10 \text{ В} & U_{R2} &= IR_2 = 5 \cdot 6 = 30 \text{ В} \\
 U_L &= IX_L = 5 \cdot 12 = 60 \text{ В} & U_C &= IX_C = 5 \cdot 6 = 30 \text{ В} \\
 U &= IZ = 5 \cdot 10 = 50 \text{ В}
 \end{aligned}$$

5. Найти $\cos\phi$ и $\sin\phi$:

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} = \frac{R_1 + R_2}{Z} = \frac{2 + 6}{10} = 0,8$$

$$\sin\phi = \frac{X}{Z} = \frac{X_L - X_C}{Z} = \frac{12 - 6}{10} = 0,6$$

6. Найти мощности:

активная

$$P = U \cdot I \cdot \cos\phi = 50 \cdot 5 \cdot 0,8 = 200 \text{ Вт}$$

реактивная

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\phi = 50 \cdot 5 \cdot 0,6 = 150 \text{ вар}$$

полная

$$S = U \cdot I = 50 \cdot 5 = 250 \text{ В} \cdot \text{А}$$

7. Построить векторную диаграмму:

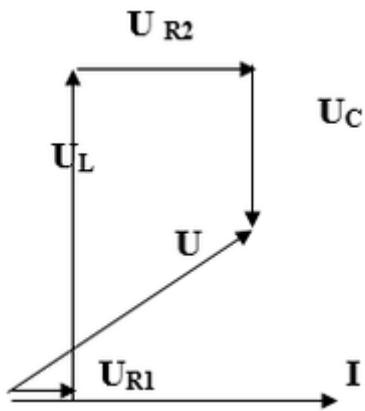
a) Векторно сложить соответствующие напряжения в порядке схемы

$$\vec{U} = \vec{U}_{R1} + \vec{U}_L + \vec{U}_{R2} + \vec{U}_C$$

b) Выбрать масштаб

$U_{R1} = 10 \text{ В}$: 10	1 см
$U_L = 60 \text{ В}$		6 см
$U_{R2} = 30 \text{ В}$		3 см
$U_C = 30 \text{ В}$		3 см
$U = 50 \text{ В}$		5 см
$I = 5 \text{ А}$: 1	5 см

c) Построить векторную диаграмму в соответствии с уравнением.



Описание:

1. Первым строят вектор тока I , горизонтально, длиной 5 см;
2. Вектор U_{R1} идет параллельно току, длиной 1 см;
3. Вектор U_L перпендикулярно току вверх, от конца вектора U_{R1} , длиной 6 см;
4. Вектор U_{R2} идет параллельно току, от конца вектора U_L , длиной 3 см;
5. U_C перпендикулярно току вниз, от конца вектора U_{R2} , длиной 3 см;
6. Итоговый вектор U соединяет начало первого вектора U_{R1} с концом последнего U_C .

Проверка: длина вектора U в сантиметрах, измеренная по линейке, равна 5 см, что совпадает с расчетной величиной.

Содержание отчета

1. Тема, цель, задание.
2. Схема, решение, векторная диаграмма

Практическая работа №7

Расчёт цепи графоаналитическим методом.

Цель работы: овладеть методикой расчёта разветвленной цепи с помощью приведённой векторной диаграммы.

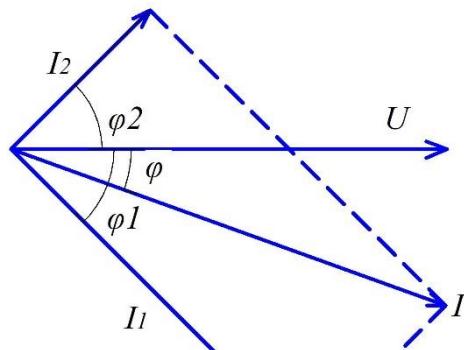
Оснащение: методические указания по выполнению практических работ.

Краткие теоретические сведения.

Графоаналитический метод расчёта – это совокупность графического метода и метода пропорционального перерасчёта.

Метод основан на том, что в линейной цепи токи пропорциональны напряжениям. Векторная диаграмма напряжений и токов, рассчитанная и построенная для одного значения питающего всю цепь напряжения, сохранит свой вид при изменении величины этого напряжения, на диаграмме при этом изменяются лишь масштабы напряжений и токов

Задание. С помощью приведённой векторной диаграммы (рис. 1) составить схему цепи и определить величины, отмеченные знаком вопроса в табл. 1. В масштабе построить векторную диаграмму цепи.



Разветвленная цепь переменного тока состоит из двух параллельных ветвей, полные сопротивления которых равны Z_1 и Z_2 . К цепи приложено напряжение U ; токи в ветвях соответственно равны I_1 и I_2 ; ток в неразветвленной части цепи I . Ветви

Вариант																
1	I2	20	I6	I5	?	?	20	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	?	?	I6	?	?	?	?	?	?	?	I200	I600	I280	-960	?	?
3	8	3	?	?	?	?	80	?	?	?	?	?	?	36°52'	-53°08'	?
4	?	?	?	?	20	25	?	I0	?	?	?	?	?	53°08'	-36°52'	?
5	7	?	24	4	?	5	?	?	?	?	96	?	?	?	?	?

потребляют активные мощности P_1 и P_2 и реактивные Q_1 и Q_2 . Углы сдвига

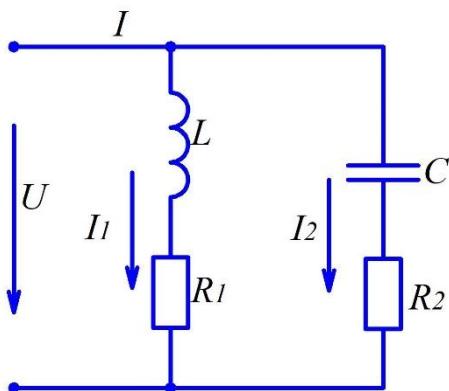
фаз в ветвях соответственно равны ϕ_1 и ϕ_2 . Общая активная мощность цепи P , реактивная Q и полная S . Угол сдвига фаз между напряжением и током в неразветвленной части (Рис. 1)

При выполнении задания использовать приведенный пример.

Пример:

Приведённой выше векторной диаграмме соответствует схема на рис. 2.

Катушка с активным сопротивлением $R_1 = 20$ Ом и индуктивностью $L = 63,7$ мГн включена параллельно ветви, в которой конденсатор ёмкостью $C = \text{мкФ}$ соединён с активным сопротивлением $R_2 = 60$ Ом.



Определить: токи в ветвях и в неразветвленной части цепи; углы сдвига фаз между током и напряжением первой и второй ветвей и всей цепи, если к цепи приложено напряжение $U = 100$ В и частотой тока $f = 50$ Гц. Построить в масштабе векторную диаграмму цепи.

Рис. 2.

Решение:

1. Индуктивное сопротивление катушки

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi * 50 * 63,7 * 10^{-3} = 20 \text{ Ом.}$$

2. Ёмкостное сопротивление конденсатора

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi * 50 * 65 * 10^{-6}} = 49 \text{ Ом.}$$

3. Полные сопротивления ветвей

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2} = \sqrt{20^2 + 20^2} = 28,4 \text{ Ом;}$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (-X_C)^2} = \sqrt{60^2 + (-49)^2} = 77,5 \text{ Ом.}$$

4. Токи в ветвях

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{100}{28,4} = 3,53 \text{ А; } I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{100}{77,5} = 1,28 \text{ А;}$$

5. Коэффициенты мощности ветвей

$$\cos\varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{20}{28,4} = 0,707, \text{ соответственно по таблице Брадиса}$$

$$\varphi_1 = 45^\circ;$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{60}{77,5} = 0,775, \text{ соответственно по таблице Брадиса}$$

$$\varphi_2 = -40^\circ;$$

6. Активные и реактивные составляющие токов ветвей

$$I_{a1} = I_1 * \cos\varphi_1 = 3,53 * 0,707 = 2,5 \text{ А;}$$

$$I_{p1} = I_1 * \sin\varphi_1 = 3,53 * 0,707 = 2,5 \text{ А;}$$

$$I_{a2} = I_2 * \cos\varphi_2 = 1,28 * 0,775 = 0,99 \text{ А;}$$

$$I_{p2} = I_2 * \sin\varphi_2 = 1,28 * (-0,632) = -0,81 \text{ А.}$$

7. Ток в неразветвленной части цепи

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\left(\sum I_a\right)^2 + \left(\sum I_p\right)^2} = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + (I_{p1} - I_{p2})^2} \\ &= \sqrt{(2,5 + 0,99)^2 + (2,5 - 0,81)^2} = 3,81 \text{ А.} \end{aligned}$$

Реактивные токи ветвей имеют противоположные знаки, причём реактивный ток ветви с ёмкостью принимается отрицательным, а ветви с индуктивностью – положительным.

8. Коэффициент мощности всей цепи

$$\cos\varphi = \frac{I_{a1} + I_{a2}}{I} = \frac{2,5 + 0,99}{3,87} = 0,9$$

Соответственно по таблице Брадиса $\varphi \approx 26^\circ$

9. Активные мощности ветвей и всей цепи

$$P_1 = U * I_1 * \cos\varphi_1 = 100 * 3,53 * 0,707 = 250 \text{ Вт}$$

$$\text{или } P_1 = I_1^2 * R_1 = 3,53^2 * 20 = 250 \text{ Вт}$$

$$P_2 = U * I_2 * \cos\varphi_2 = 100 * 1,28 * 0,775 = 98 \text{ Вт}$$

$$\text{или } P_2 = I_2^2 * R_2 = 1,28^2 * 60 = 98 \text{ Вт}$$

$$P = U * I * \cos\varphi = 100 * 3,87 * 0,9 = 348 \text{ Вт}$$

$$\text{или } P = P_1 + P_2 = 250 + 98 = 398 \text{ Вт}$$

10. Реактивные мощности ветвей и всей цепи

$$Q_1 = U * I_1 * \sin\varphi_1 = 100 * 3,53 * 0,707 = 250 \text{ вар,}$$

$$\text{где } \sin\varphi_1 = \sin 45^\circ = 0,707,$$

или $Q_1 = I_1^2 * X_L = 3,53^2 * 20 = 250$ вар.

$$Q_2 = U * I_2 * \sin\varphi_2 = 100 * 1,28 * (-0,632) = -81 \text{ вар.}$$

где $\sin\varphi_2 = \sin -40^\circ = -0,632$,

или $Q_2 = I_2^2 * (-X_C) = 1,28^2 * (-49) = -81$ вар.

$$Q = U * I * \sin\varphi = 100 * 3,87 * 0,437 = 169 \text{ вар,}$$

$$\text{где } \sin\varphi = \frac{I_{P1} - I_{P2}}{I} = \frac{2,5 - 0,8I}{3,87} = 0,437,$$

или $Q = Q_1 - Q_2 = 250 - 81 = 169$ вар.

Реактивные мощности ветвей имеют противоположные знаки, причём реактивная мощность ветви с ёмкостью принимается отрицательной.

11. Полные мощности ветвей и всей цепи:

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{250^2 + 250^2} = 353 \text{ ВА}$$

или $S_1 = U * I_1 = 100 * 3,53 = 353 \text{ В} * \text{А}$.

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{98^2 + (-81)^2} = 128 \text{ ВА}$$

или $S_2 = U * I_2 = 100 * 1,28 = 128 \text{ В} * \text{А}$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{348^2 + 169^2} = 387 \text{ ВА}$$

или $S = U * I = 100 * 3,87 = 387 \text{ ВА}$

12. Поскольку напряжение одинаково для всех параллельных ветвей, то построение диаграммы начинаем с вектора напряжения \vec{U}

Векторы токов $\vec{I}_1, \vec{I}_2, \vec{I}$ строятся относительно вектора напряжения \vec{U} .

Под углом $\varphi_1 = 45^\circ$ к вектору напряжения (в сторону отставания) откладываем вектор тока \vec{I}_1 , который носит активно-индуктивный характер. Под углом $\varphi_2 = -40^\circ$ к вектору напряжения (в сторону опережения) откладываем вектор тока \vec{I}_2 , который носит активно-ёмкостный характер. Геометрическая сумма векторов \vec{I}_1 и \vec{I}_2 представляет ток \vec{I} в неразветвленной части цепи. Проекции токов ветвей на вектор напряжения являются активными составляющими \vec{I}_{a1} и \vec{I}_{a2} ; проекции этих токов на вектор, перпендикулярный вектору напряжения, - реактивными составляющими \vec{I}_{p1} и \vec{I}_{p2} .

Задаёмся масштабом: $m_I = 0,5 \text{ А/см}$; $m_U = 10 \text{ В/см}$

Определяем длины векторов ℓ .

Длина вектора напряжения $\ell_U = \frac{U}{m_U} = \frac{100 \text{ В}}{10 \text{ А/см}} = 10 \text{ см.}$

Длины векторов токов:

$$\ell_{I_{a1}} = \frac{I_{a1}}{m_I} = \frac{2,5 \text{ А}}{0,5 \text{ А/см}} = 5 \text{ см}; \ell_{I_{a2}} = \frac{I_{a2}}{m_I} = \frac{0,99 \text{ А}}{0,5 \text{ А/см}} = 1,98 \text{ см};$$

$$\ell_{I_{p1}} = \frac{I_{p1}}{m_I} = \frac{2,5 \text{ А}}{0,5 \text{ А/см}} = 5 \text{ см}; \ell_{I_{p2}} = \frac{I_{p2}}{m_I} = \frac{0,8I \text{ А}}{0,5 \text{ А/см}} = 1,62 \text{ см};$$

$$\ell_{I_1} = \frac{I_1}{m_I} = \frac{3,53 \text{ А}}{0,5 \text{ А/см}} = 7,06 \text{ см}; \ell_{I_2} = \frac{I_2}{m_I} = \frac{I,28 \text{ А}}{0,5 \text{ А/см}} = 2,56 \text{ см};$$

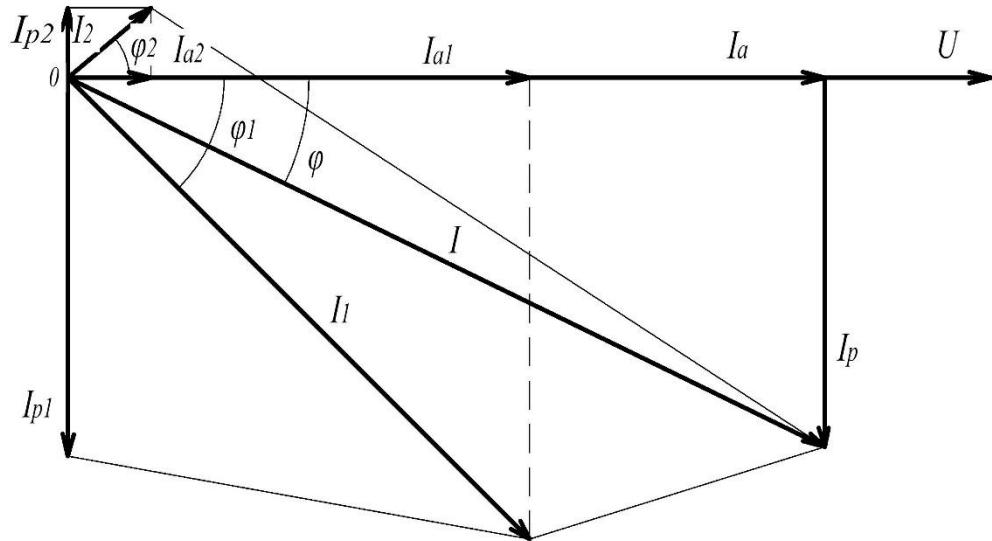
Угол между векторами общего тока и общего напряжения обозначим ϕ . I_a и I_p - проекции общего тока I на оси x и y .

$$\vec{I}_a = \vec{I}_{a1} + \vec{I}_{a2}; \vec{I}_p = \vec{I}_{p1} + (-\vec{I}_{p2});$$

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_{a1} + \vec{I}_{p1}; \vec{I}_2 = \vec{I}_{a2} + \vec{I}_{p2};$$

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2;$$

Стрелки над буквами показывают, что векторы должны складываться геометрически.



Делаем вывод о характере нагрузки: ток \vec{I} отстает от напряжения U на угол $\varphi \approx 26^\circ$ - нагрузка цепи активно-индуктивная.

Содержание отчета

1. Тема, цель, задание.
2. Данные по варианту, схема, расчеты, векторная диаграмма.
3. Выводы по работе.

Практическая работа № 8

Расчет цепей с применением символического метода.

Цель работы: научиться выполнять расчеты цепей переменного тока с применением комплексных чисел.

Оборудование и оснащение: методические указания, средства вычислительной техники, линейка, карандаш.

Краткие теоретические сведения

В технике встречаются различные формы переменного тока, однако наиболее распространен сегодня ток переменный синусоидальный, именно такой используется всюду. При помощи него электроэнергия передается, в виде переменного тока она генерируется, преобразуется трансформаторами и потребляется нагрузками. Синусоидальный ток периодически изменяется по синусоидальному (гармоническому) закону.

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_I)$$

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_U)$$

i , u – мгновенные значения тока и напряжения

I_m , U_m – амплитудные значения тока и напряжения

ψ_I , ψ_U – начальные фазы тока и напряжения

Действующие значения тока и напряжения меньше амплитудных значений в корень из двух раз:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

Одним из способов расчета цепей переменного тока является комплексный, или еще как говорят, символический метод расчета. Этот метод применяется при анализе схем с гармоническими ЭДС, напряжениями и токами. В результате решения получают комплексное значение токов и напряжений.

В комплексном методе действующее значение токов и напряжений записывают так:

$$\dot{I} = I e^{j\psi_I}$$

$$\dot{U} = U e^{j\psi_U}$$

j – мнимая единица в электротехнике.

Из закона Ома определяют комплексное значение сопротивления:

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = Z e^{j\varphi}$$

$$\varphi = \psi_U - \psi_I$$

Z - модуль комплексного сопротивления

Сложение и вычитание комплексных чисел осуществляется в алгебраической форме, а умножение и деление в показательной форме.

Задание

Определить символическим методом ток в цепи (рис. 1) и построить векторную диаграмму. Данные варианта взять из таблицы 1. Расчет цепи выполните, используя пример.

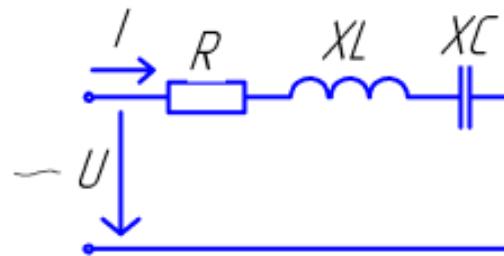


Рис.1

Таблица 1

Вариант	U, В	R, Ом	X _L , Ом	X _C , Ом
1	120	8	12	3
2	60	10	9	6
3	100	10	8	8
4	120	7	2	3

Порядок расчета

1. Определить общее сопротивление цепи в комплексной форме.
2. Определить ток цепи (закон Ома в комплексной форме).
3. Определить напряжения U_R , U_L и U_C в комплексной форме.
4. Построить векторную диаграмму с учетом характера нагрузки и масштаба.

Пример расчета цепи с применением комплексных чисел

Дано: сопротивление резистора $R = 8$ Ом, индуктивное сопротивление катушки $X_L = 6$ Ом, емкостное сопротивление конденсатора $X_C = 8$ Ом, напряжение питания цепи $U = 80$ В. Определить символическим методом ток в цепи, построить векторную диаграмму.

Решение

1. Определяем комплекс полного сопротивление цепи:

$$Z = R + j(X_L - X_C) = 8 + j(6 - 8) = 8 - j2 \text{ (Ом)}$$

Вычисляем модуль и аргумент

$$\underline{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{64 + 4} = 8,25 \text{ Ом}$$

$$X = X_L - X_C; \quad \varphi = \arctg \frac{X}{R} = -\arctg \frac{2}{8} = -14^\circ$$

Записываем в показательной форме

$$\underline{Z} = Z e^{j\varphi} = 8,25 e^{-j14^\circ}$$

2. Определяем комплекс тока в цепи по закону Ома:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{U e^{j0^\circ}}{Z e^{-j14^\circ}} = \frac{80 e^{j0^\circ}}{8,25 e^{-j14^\circ}} = 9,7 e^{j14^\circ}$$

3. Определяем комплексы напряжений:

$$\underline{U}_R = \underline{I} R = 9,7 e^{j14^\circ} \cdot 8 = 77,6 e^{j14^\circ} \text{ В}$$

$$jX_L = X_L e^{j90^\circ}$$

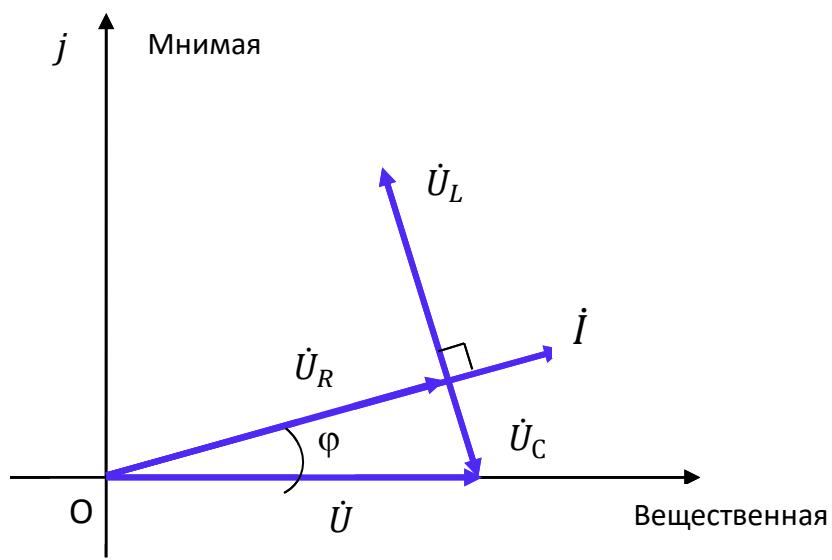
$$\underline{U}_L = jX_L \cdot \underline{I} = 9,7 e^{j14^\circ} \cdot 6 e^{j90^\circ} = 58,2 e^{j104^\circ} \text{ В}$$

$$-jX_C = X_C e^{-j90^\circ}$$

$$\underline{U}_C = -jX_C \cdot \underline{I} = I e^{j14^\circ} \cdot X_C e^{-j90^\circ} = 9,7 e^{j14^\circ} \cdot 8 e^{-j90^\circ} = 77,6 e^{-j76^\circ} \text{ В}$$

4. Для построения векторной диаграммы выбираем масштаб, определяем длины векторов:

$$M_I = 2 \text{ А/см}, \quad M_U = 20 \text{ В/см}, \quad l_{UR} = 3,9 \text{ см}, \quad l_{UL} = 2,9 \text{ см}, \quad l_{UC} = 3,9 \text{ см}$$



Правильность расчета цепи и точность построения векторной диаграммы проверяем измерением длины вектора U и умножением на M_U .

Контрольные вопросы

1. Какие формы комплексных чисел вы знаете?
2. Какая форма комплексного числа используется при сложении, умножении, делении.
3. Что такое аргумент и модуль.
4. Построить треугольник сопротивлений.

Содержание отчета

1. Тема, цель, задание
2. Схема, расчеты, векторная диаграмма.
3. Контрольные вопросы и ответы.

Практическая работа №9

Расчет параметров трехфазной цепи при соединении приемников звездой.

Цель работы: научиться рассчитывать параметры трехфазной цепи при соединении потребителя звездой.

Оборудование и оснащение: методические указания по выполнению практических работ.

Задание и порядок выполнения

1. Ознакомиться с методическими указаниями
2. Выполнить расчеты согласно примеру и варианту.
3. Оформить отчет.

Краткие теоретические сведения

Трехфазная цепь – это совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют три ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе одна относительно другой на 120 °. Трехфазный генератор для получения трехфазного тока имеет три обмотки. Каждая обмотка (A, B, C) называется **фазой**. Фазное напряжение (U_Φ) - это напряжение на фазе, фазный ток - это ток в фазе генератора или нагрузки. Линейное напряжение (U_L) – это напряжение между линейными проводами, линейный ток – это ток в линейном проводе.

При соединении звездой: $I_L = I_\Phi$. Фазные токи $-I_A, I_B, I_C$. По закону Ома:

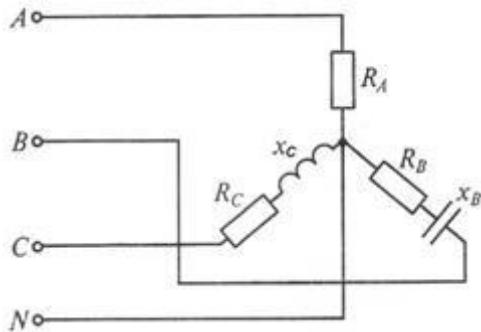
$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}, I_B = \frac{U_B}{Z_B}, I_C = \frac{U_C}{Z_C}$$

Фазные напряжения – напряжения между фазным и нулевым проводом – $U_A = U_B = U_C$, линейное напряжение – напряжение между линейными проводами – $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$ (рис. 4.1). Фазные и линейные напряжения связаны соотношением: $U_{AB} = \sqrt{3}U_A, U_{BC} = \sqrt{3}U_B, U_{CA} = \sqrt{3}U_C$.

Мощность фазы определяется по формуле: $P_\Phi = I_\Phi \times U_\Phi \cos \phi$.

Для определения мощности трехфазной цепи при любом соединении (звездой или треугольником) надо вычислить мощность каждой фазы и сложить мощности.

Пример: В сеть трехфазного тока с линейным напряжением 380В включен потребитель (рис. 1), соединенный звездой, с параметрами $R_A = 12 \text{ Ом}$, $X_{C\Phi} = 6 \text{ Ом}$, $X_{L\Phi} = 10 \text{ Ом}$. Определить линейные и фазные токи и напряжения, активную мощность, затраты на электроэнергию, потребляемую трехфазной цепью за 10 часов работы при стоимости 1кВт×ч 2 руб.



Решение: 1) Определяем нагрузку каждой фазы: Фаза А – $R_A = 12 \text{ Ом}$

Фаза В – $R_B = 12 \text{ Ом}$, $X_B = 6 \text{ Ом}$

Фаза С – $R_C = 12 \text{ Ом}$, $X_C = 10 \text{ Ом}$.

2) Определяем полные сопротивления фаз: $Z_A = R_A = 12 \text{ Ом}$,

$$Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} = \sqrt{12^2 + 6^2} = 13,4 \Omega \quad Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} = \sqrt{12^2 + 10^2} = 15,6 \Omega$$

3) Определяем $\cos\phi$ фаз из треугольника сопротивлений:

$$\cos\phi_A = R_A/Z_A = 1, \quad \cos\phi_B = R_B/Z_B = 12/13,4 = 0,8955, \quad \cos\phi_C = R_C/Z_C = 12/15,6$$

4) Определяем фазное напряжение: при соединении звездой $U_\Phi = \sqrt{3}U_\Phi$

$$U_\Phi = U_A = U_B = U_C = 220 \text{ В}$$

5) Определяем фазные токи:

$$I_A = \frac{U_\Phi}{Z_A} = \frac{220}{12} = 18,3 \text{ А} \quad I_B = \frac{U_\Phi}{Z_B} = \frac{220}{13,4} = 16,4 \text{ А} \quad I_C = \frac{U_\Phi}{Z_C} = \frac{220}{15,6} = 14,1 \text{ А}$$

6) Определяем мощности фаз: $P_A = I_A U_A \cos\phi_A = 18,3 \times 220 \times 1 = 4026 \text{ Вт}$,

$$P_B = I_B U_B \cos\phi_B = 16,4 \times 220 \times 0,8955 = 3231 \text{ Вт},$$

$$P_C = I_C U_C \cos\phi_C = 14,1 \times 220 \times 0,7692 = 2386 \text{ Вт}.$$

7) Определяем мощность трехфазной цепи: $P = P_A + P_B + P_C = 4026 + 3231 + 2386 = 9643 \text{ Вт} = 9,643 \text{ кВт}$

8) Определяем расход электроэнергии $W=P \times t = 9,643 \times 10 = 96,43 \text{ кВт} \times \text{ч}$

9) Определяем стоимость электроэнергии: $96,43 \times 2 = 192,86 \text{ руб.}$

Задание:

Определить затраты на электроэнергию, потребляемую трехфазной цепью за 8 часов работы при стоимости $1 \text{ кВт} \times \text{ч} 2,5 \text{ руб.}$, если линейное напряжение 220 В, $R_\Phi = 5 \text{ Ом}$, $X_{C\Phi} = 6 \text{ Ом}$, $X_{L\Phi} = 10 \text{ Ом}$.

Варианты, схемы для практической работы:

Схема	Рис.1	Рис.2	Рис.3	Рис.4	Рис.5
Варианты	1, 6, 11, 16, 21	2, 7, 12, 17, 22	3, 8, 13, 18, 23	4, 9, 14, 19	5, 10, 15, 20

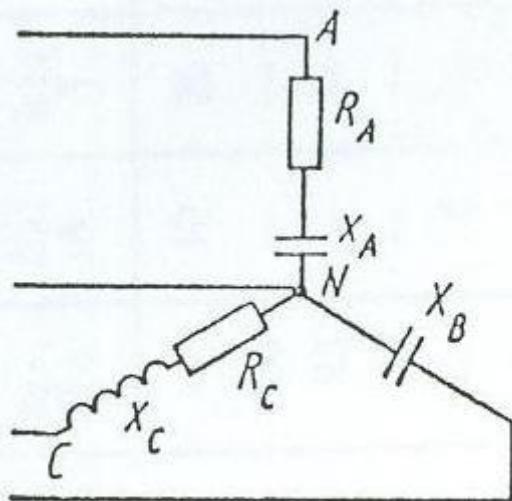


Рис.1

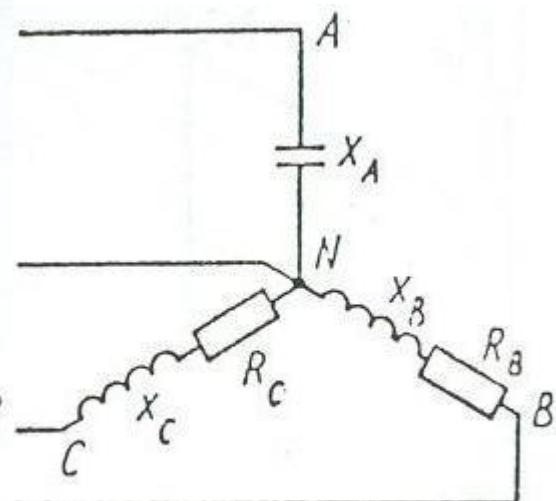


Рис.2

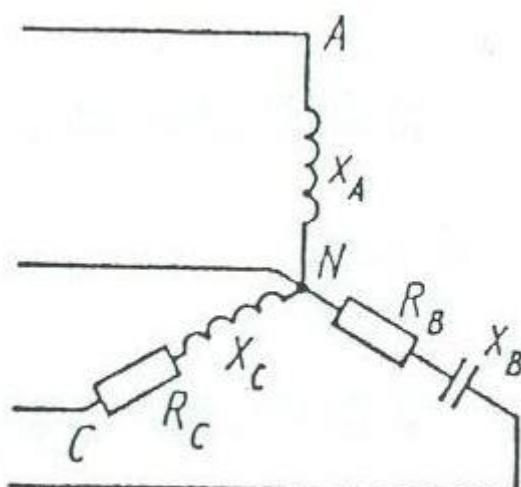


Рис.3

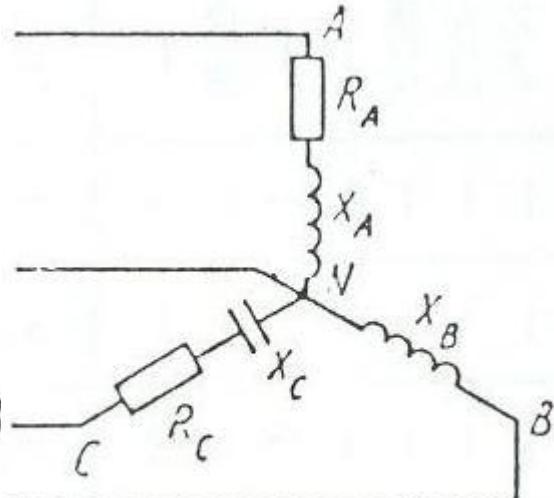


Рис.4

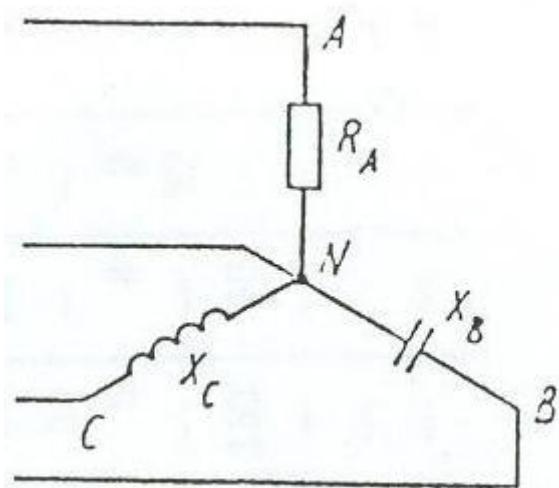


Рис.5

Контрольные вопросы

1. Дать определение фазным и линейным напряжениям и токам.
2. Какая нагрузка называется симметричной?
3. В каких случаях применяется четырехпроводная система электроснабжения? Каково значение нейтрального провода?
4. Сколько ваттметров нужно для измерения активной мощности трехфазной нагрузки в четырехпроводной цепи? Как они включаются?

Содержание отчета

1. Тема, цель, задание.
2. Исходные данные, схема, расчеты с пояснениями действий.
3. Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 10

Расчет параметров трехфазной цепи при соединении приемников треугольником.

Цель работы: научиться рассчитывать параметры трехфазных цепей при соединении потребителя треугольником.

Оборудование и оснащение: методические указания по выполнению практических работ.

Задание:

1. Ознакомиться с методическими указаниями. Изучить примеры решения задач.
2. Самостоятельно решить задачи.
3. Оформить отчет

Краткие теоретические сведения.

При соединении треугольником (рис.1) каждая фаза приемника подключена к двум линейным проводам, поэтому каждое фазное напряжение равно соответствующему линейному напряжению $U_\Phi = U_L$.

Таким образом, соединение треугольником следует применять тогда, когда каждая фаза трехфазного приемника рассчитана на напряжение, равное номинальному линейному напряжению сети.

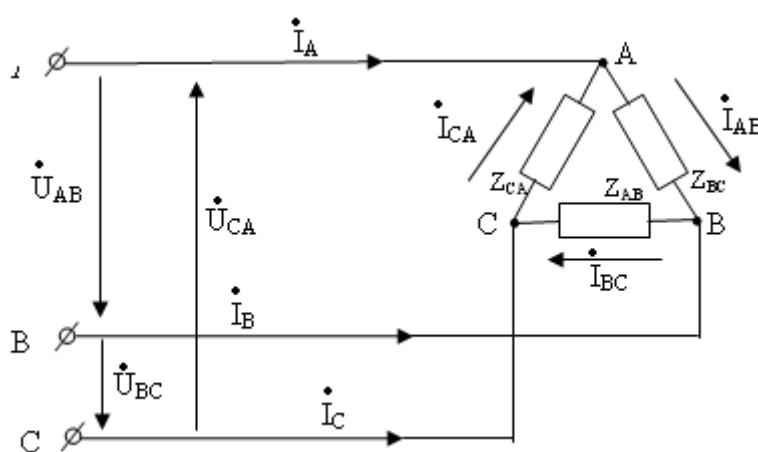


Рис.1

Фазные токи \dot{I}_{AB} , \dot{I}_{BC} , \dot{I}_{CA} в общем случае не равны линейным токам \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C и могут быть найдены по следующим соотношениям:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}}, \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}}, \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}}.$$

Применяя первый закон Кирхгофа к узлам А, В и С трехфазного приемника, получаем следующие соотношения между этими токами:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \quad (4.6)$$

Эти соотношения в виде векторной диаграммы показаны на рис. 2, где представлена симметричная система фазных токов I_{AB} , I_{BC} и I_{CA} и показано, что векторы линейных токов расположены между концами векторов фазных токов.

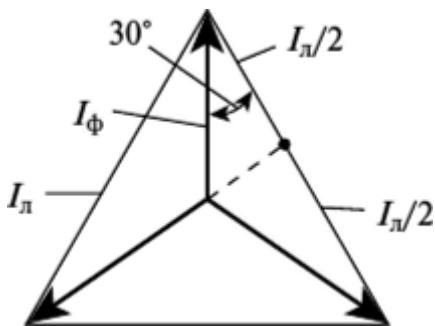


Рис. 2. Векторная диаграмма симметричной цепи, соединенной треугольником.

В частном случае при симметрии системы векторов фазных токов (рис. 2) система векторов линейных токов получается также симметричной и образует равносторонний треугольник, из геометрии которого следует, что действующие значения (длины векторов) линейных токов в $\sqrt{3}$ больше действующих значений фазных токов: $I_L = \sqrt{3}I_\Phi$

Общую активную P , реактивную Q и полную S мощности электроприемников в трехфазной цепи при их соединении треугольником можно при любой несимметрии вычислить как арифметические суммы этих мощностей для отдельных фаз:

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}; \quad Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA}; \quad S = S_{AB} + S_{BC} + S_{CA} = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

где мощности P_Φ , Q_Φ , S_Φ для отдельной фазы вычисляются по следующим формулам:

$$P_\Phi = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi = (U_\Phi)^2 / R_\Phi = (I_\Phi)^2 R_\Phi;$$

$$Q_\Phi = U_\Phi I_\Phi \sin \varphi = (U_\Phi)^2 / X_\Phi = (I_\Phi)^2 X_\Phi; \quad S_\Phi = U_\Phi I_\Phi = (U_\Phi)^2 / Z_\Phi = (I_\Phi)^2 Z_\Phi.$$

Здесь R_Φ , X_Φ и Z_Φ – соответственно активное, реактивное и полное сопротивление одной из фаз.

Для симметричной трехфазной нагрузки мощности вычисляются для одной фазы, а затем утраиваются:

$$P = 3P_\Phi; Q = 3Q_\Phi; S = 3S_\Phi.$$

Для симметричной трехфазной нагрузки мощности P , Q , S можно вычислить через линейные напряжения U_L и токи I_L по формулам:

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

где φ – угол сдвига по фазе между фазными током и напряжением.

Пример №1

Задача: В трехфазную сеть с $U_L = 380$ В включен соединенный треугольником трехфазный асинхронный двигатель мощностью $P_H = 5$ кВт, КПД двигателя равен $\eta_H = 90\%$, коэффициент мощности $\cos\varphi_H = 0,8$. Определить фазные и линейные токи двигателя, параметры его схемы замещения R_Φ , X_Φ , построить векторную диаграмму. Включить ваттметры для измерения активной мощности и найти их показания.

Анализ и решение задачи

Расчетная схема

Двигатель является активно-индуктивным потребителем энергии, его схема замещения приведена на рис. 3

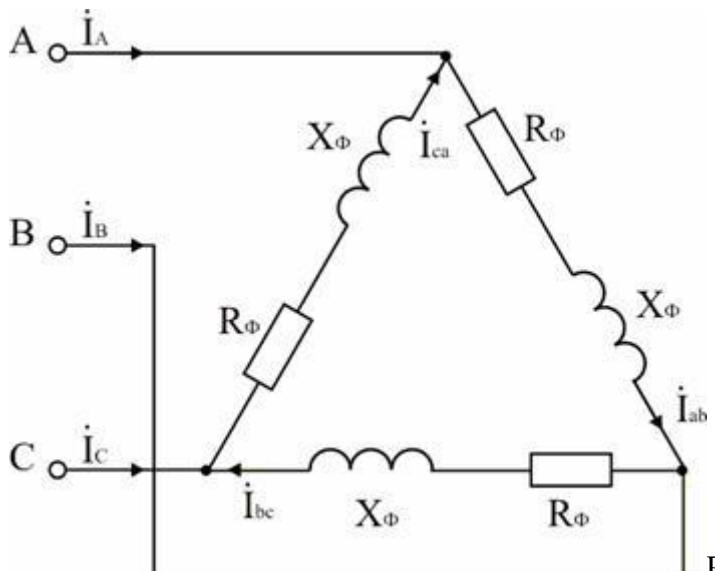


Рис. 3

1) Расчет активной мощности и токов, потребляемых двигателем из сети.

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

$$P = P_H / \eta = 500 / 0.9 = 5560 \text{ Вт.}$$

Для симметричной нагрузки, какой является двигатель,

$$P = 3 U_\Phi I_\Phi \cos \varphi \quad \text{и} \quad I_\Phi = P / (3 U_\Phi \cos \varphi).$$

$$I_\Phi = 5560 / (3 \cdot 380 \cdot 0.8) = 6,09 \text{ А.}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_\Phi = \sqrt{3} \cdot 6,09 = 10,54 \text{ А.}$$

2) Расчет параметров схемы замещения двигателя.

$$Z_\Phi = U_\Phi / I_\Phi = 380 / 6,09 = 62,4 \text{ Ом}; \quad R_\Phi = Z_\Phi \cos \varphi = 62,4 \cdot 0,8 = 49,9 \text{ Ом};$$

$$X_\Phi = Z_\Phi \sin \varphi = 62,4 \cdot 0,6 = 37,4 \text{ Ом}; \quad \cos \varphi_\Phi = \cos \varphi_H = 0,8.$$

3) 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 φ_Φ , линейные токи строятся по фазным на основании уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа:

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

Векторная диаграмма показана на рис. 3

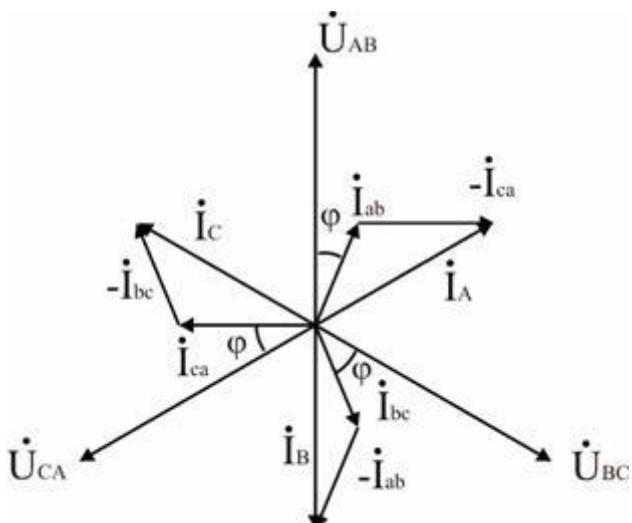


Рис. 3.

Пример № 2

Задача: К источнику с $U_L = 220$ 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.

Решение задачи

Активная мощность всей нагрузки равна сумме мощностей фаз:

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA} = 2200 + 3300 + 4400 = 9900 \text{ Вт.}$$

Расчет фазных токов. Т.к. осветительная сеть имеет $\cos \varphi = 1$, для любой фазы $I_F = P_F / U_F$, поэтому:

$$I_{AB} = P_{AB} / U_{AB} = 2200 / 220 = 10 \text{ А}; I_{BC} = P_{BC} / U_{BC} = 3300 / 220 = 15 \text{ А}; I_{CA} = P_{CA} / U_{CA} = 4400 / 220 = 20 \text{ А.}$$

Аналитический расчет линейных токов выполняется комплексным методом на основании 1-го закона Кирхгофа; определим их графически, построив векторную диаграмму (рис.4, а)

Из диаграммы следует: $I_A = 27,6 \text{ А}$; $I_B = 22,8 \text{ А}$; $I_C = 26,6 \text{ А}$.

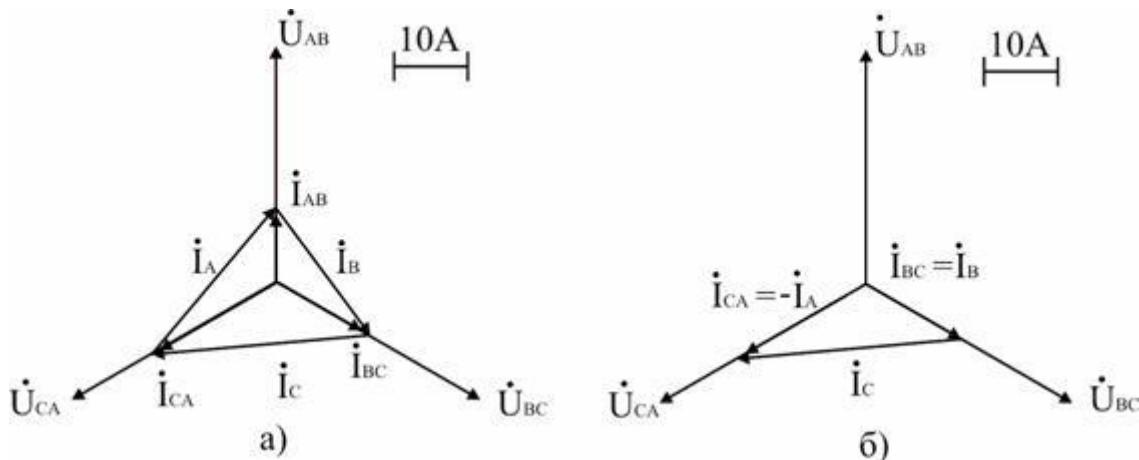


Рис .4

Самостоятельная работа студентов

В процессе выполнения самостоятельной работы студент должен решить все ниже приведенные задачи, используя лекционный материал, примеры расчета и анализа, рассмотренных в теоретических сведениях.

Задание 1. Выполните расчет трехфазной цепи по условиям задачи.

Задача

В трехфазную сеть с $U_L = 380$ В включен по схеме треугольник асинхронный двигатель, имеющий $Z_F = 19$ Ом, $\cos\varphi_F = 0,8$. Нарисовать схему, найти линейные токи и активную мощность, потребляемую двигателем из сети.

Задание 2. Выполните расчет трехфазной цепи по условиям задачи.

Задача

Трехфазная печь включена в сеть с $U_L = 380$ В по схеме треугольник. Нарисовать схему, найти линейный ток и мощность печи, если $R_F = 10$ Ом. Как изменятся линейный ток и мощность печи, если ее включить в ту же сеть по схеме звезды?

Контрольные вопросы

1. Можно ли этот двигатель включать в сеть с $U_L = 660$ В?
2. Можно ли данный двигатель использовать в сети с $U_L = 380$ В при соединении его обмоток звездой?
3. Какое соотношение между фазными и линейными токами и напряжениями симметричного потребителя, соединённого в треугольник?
4. Как отразится отключение одной из фаз на режим работы трёхфазной цепи, соединённой в треугольник?
5. Как повлияет обрыв линейного провода на режим работы потребителей при их соединении по схеме треугольник?

Содержание отчета

1. Тема, цель, задание.
2. Условия задач, схемы, решения.
3. Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа №11

Расчет тока и напряжения на элементах цепи в переходном процессе.

Цель работы: освоить определение начальных условий и установившихся токов и напряжений на элементах цепи.

Оснащение: методические указания по выполнению практических работ.

Краткие теоретические сведения.

Переходный процесс в электрической цепи — это электромагнитный процесс, возникающий в электрической цепи при переходе от одного установившегося (принужденного) режима к другому. Установившимся (принужденным) называется режим работы электрической цепи, при котором напряжение и токи цепи в течение длительного времени остаются неизменными.

Переходный процесс вызывается коммутацией в цепи. *Коммутацией называется процесс замыкания или размыкания рубильников или выключателей.* Переходный процесс может быть вызван изменением параметров электрической цепи R, L или C.

Переходный процесс базируется на двух законах коммутации:

1. *ток в индуктивности не может изменяться скачком;*
2. *напряжение на емкости не может изменяться скачком.*

Действительно, если ток в индуктивности L изменяется скачком, т. е. мгновенно, то ЭДС самоиндукции e_L становится бесконечно большой при $t_{ком}=0$

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \approx \infty$$

В реальных цепях ЭДС самоиндукции может иметь только конечные значения.

Если в цепи с емкостью С напряжение на ее обкладках изменяется скачком, т. е. мгновенно, то появляется бесконечно большой зарядный (или разрядный) ток $t_{ком}=0$:

$$i = C \frac{du_C}{dt} \approx 0$$

Ток в электрических цепях может иметь только конечные значения.

Переходный процесс в линейных цепях можно рассматривать как результат наложения двух процессов:

1. нового установившегося режима, который наступает после коммутации;

2. свободного процесса, обеспечивающего переход цепи от прежнего установившегося режима к новому установившемуся режиму.

Таким образом, ток i цепи в течение переходного процесса можно представить суммой двух токов: нового установившегося i_y и свободного i_{cb} , возникающего после коммутации:

$$i = i_y + i_{cb}$$

Аналогично напряжение в течение переходного процесса равно

$$u = u_y + u_{cb}$$

В результате переходного процесса происходят изменения тока, напряжения, фазы, частоты и т.д.

Если катушку индуктивности (RL) подключить к источнику с постоянным напряжением U (замыкание ключа K), то ток i в неразветвленной цепи за счет ЭДС самоиндукции будет увеличиваться от нуля (в начале переходного процесса) до установившегося значения

$$i_y = I = U/R$$

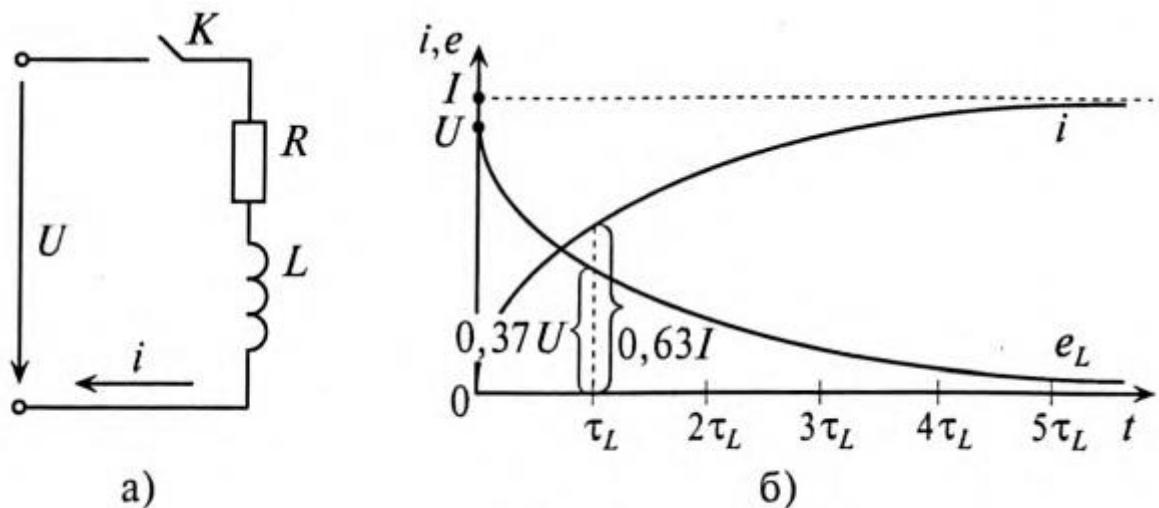


Рис. 20.1

Свободный ток изменяется в этой цепи по закону

$$i_{cb} = -Ie^{-t/\tau}$$

где I – установившийся ток; t – время переходного процесса; e – основание натурального логарифма ($e = 2,718\dots$), знак минус перед током в выражении отражает правило Ленца; τ – постоянная времени переходного процесса в цепи с индуктивностью, $\tau = L/R$ (с).

Следовательно, ток переходного процесса в любой момент времени t при подключении реальной катушки индуктивности к источнику можно определить:

$$i = I (1 - e^{-t/\tau})$$

ЭДС самоиндукции при переходном процессе уменьшается по закону:

$$e_L = - U e^{-t/\tau}$$

Если конденсатор с сопротивлением R и емкостью C подключить к источнику с постоянным напряжением U (замыканием ключа K), то он будет заряжаться и напряжение u_C на конденсаторе будет увеличиваться от нуля до установившегося значения U .

Напряжение свободного процесса $u_{cb} = - U e^{-t/\tau}$, тогда напряжение на конденсаторе в любой момент времени при зарядке конденсатора через резистор определяется:

$$u_C = U (1 - e^{-t/\tau}), \text{ где } \tau = RC - \text{ постоянная времени в цепи с конденсатором.}$$

Ток при зарядке конденсатора уменьшается по закону $i = I e^{-t/\tau}$, где $I = U/R$ – максимальный ток в момент включения конденсатора (при $t = 0$)

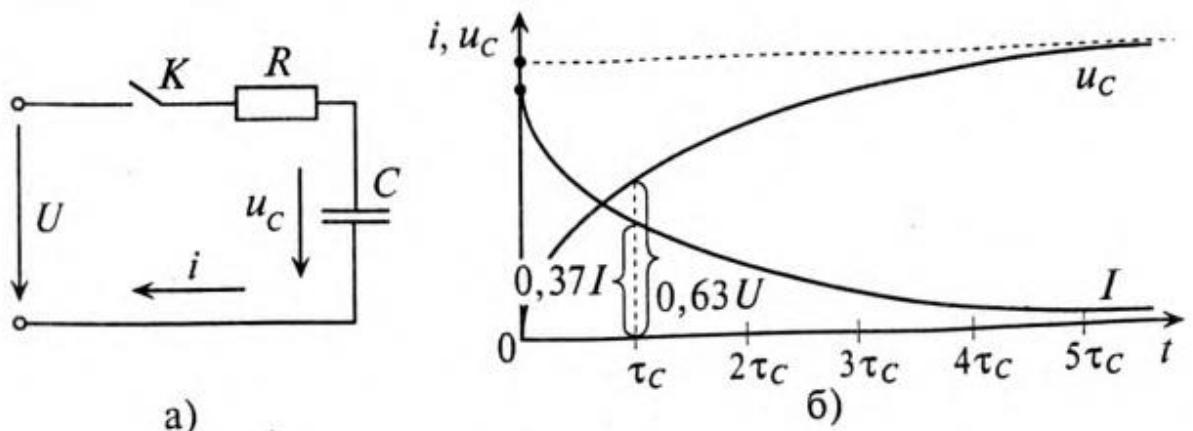


Рис. 20.3

Если конденсатор емкостью C , заряженный предварительно до напряжения U , разряжать через резистор с сопротивлением R , то напряжение u_C и ток в цепи разрядки будут уменьшаться по закону $u_C = U e^{-t/\tau}$, $i = I e^{-t/\tau}$

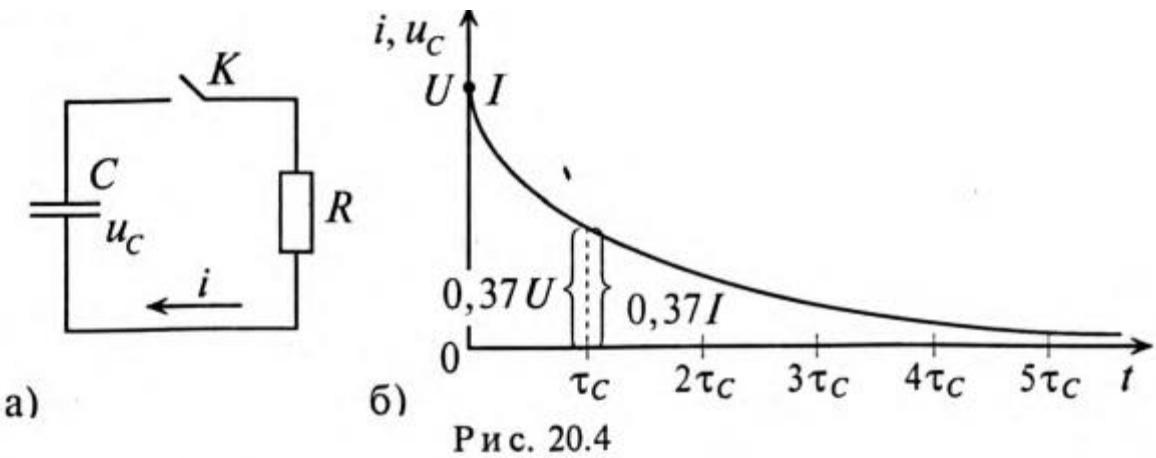


Рис. 20.4

Задание

Определите значение токов в ветвях цепи, напряжений u_L и u_C (рис.1) через время $t = 2$ с после замыкания ключа К. Параметры цепи, согласно варианту, указаны в таблице 1. Расчет цепи выполните, используя пример.

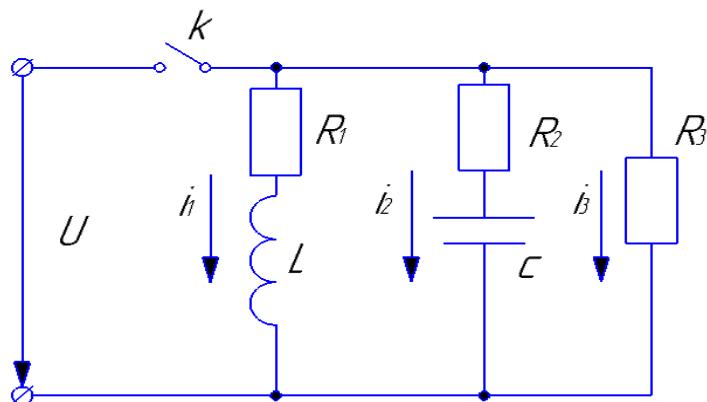


Рис.1

Таблица 1

№ варианта	R_1 , Ом	L , Гн	R_2 , кОм	C , мкФ	R_3 , Ом	U , В
1; 6; 11; 16; 21	6	2	150	15	50	120
2; 7; 12; 17; 22	8	4	250	20	70	140
3; 8; 13; 18; 23	5	2	100	40	50	100
4; 9; 14; 19; 24	10	5	150	20	80	160
5; 10; 15; 20; 25	5	3	200	20	60	120

Пример. Определить значение токов в ветвях через 2с после замыкания ключа. Параметры цепи (рис.1) следующие: $R_1=6$ Ом, $R_2=200$ кОм, $R_3=60$ Ом, $L=3$ Гн, $C=10$ мкФ, $U=120$ В.

Решение

Для ветви (1) с индуктивностью определяются:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{120}{6} = 20 \text{ A}$$

установившийся ток

$$\tau_L = \frac{L}{R} = \frac{3}{6} = 0,5 \text{ с.}$$

и постоянная времени

Тогда ток через 2 с будет равен

$$i_1 = I_1(1 - e^{-t/\tau_L}) = 20(1 - e^{-2/0,5}) = 20(1 - e^{-4}) = \\ = 20(1 - 0,018) = 19,64 \text{ A.}$$

Для ветви (2) с емкостью определяются:

максимальный установившийся ток по окончании переходного процесса

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{120}{200 \cdot 10^3} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$\text{и постоянная времени } \tau_C = R_2 C = 200 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 2 \text{ с.}$$

Тогда ток зарядки через 2 с будет равен

$$i_2 = I_2 e^{-t/\tau_C} = 0,6 \cdot 10^{-3} e^{-2/2} = 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,37 = 0,22 \cdot 10^{-3} \text{ A.}$$

Для ветви (3) с активным сопротивлением R_3 определяется ток ветви

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{120}{6} = 2 \text{ A.}$$

Постоянная времени $\tau_3 = 0$, так как отсутствуют L и C. Через 2 с значение тока будет таким же, т. е. $i_3 = I_3 = 2 \text{ A.}$

Содержание отчета

1. Тема, цель работы.
2. Данные по варианту, схема цепи.
3. Расчеты с пояснениями.

Практическая работа № 12

Разбор схем стабилизаторов

Цель работы: изучить схемы стабилизаторов и провести сравнительную оценку основных параметров.

Оснащение: методические указания по выполнению практических работ.

Задание и порядок выполнения:

1. Изучить материал методических указаний к работе.
2. Составить отчет (смотри содержание отчета)
3. Ответить на контрольные вопросы

Краткие теоретические сведения

Чаще всего радиотехнические устройства для своего функционирования нуждаются в стабильном напряжении, не зависящем от изменений сетевого питания и от тока нагрузки. Для решения этих задач используются компенсационные и параметрические устройства стабилизации.

1. Параметрические стабилизаторы.

Параметрический стабилизатор напряжения включает в себя балластный резистор R_b , нагрузку R_h и полупроводниковый стабилитрон VD , напряжение на котором остается практически постоянным при изменении в некоторых пределах протекающего через него тока (рис. 1).

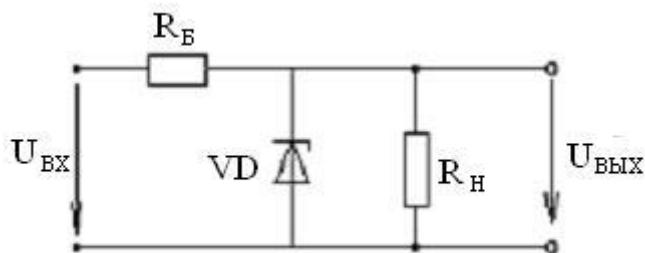


Рис. 1

Принцип действия параметрического стабилизатора постоянного тока поясняется путем совместного анализа ВАХ стабилитрона и балластного резистора, представленных на рис. 1. Пусть входное постоянное напряжение схемы равно $U_{вх1}$, а ток стабилитрона составляет $I_{ст1}$. Положим для упрощения $R_h = \infty$ (нагрузка отключена). Тогда выражение, аналитически описывающее положение характеристики балластного резистора R_b , запишется следующим образом:

$$U_{вх1} = U_{вых1} + I_{ст1}R_b. \quad (1)$$

Если входное напряжение увеличится на величину $\Delta U_{\text{вх}}$ и станет равным $U_{\text{вх}2}$, то характеристика балластного резистора займет положение 2, что соответствует выходному напряжению $U_{\text{вых}2}$ и току стабилитрона $I_{\text{ст}2}$. Как видно из рис. 1, выходное напряжение останется почти неизменным, а приращение входного напряжения $\Delta U_{\text{вх}}$ выделится на балластном резисторе R_b . Аналогичная картина будет иметь место и при уменьшении входного напряжения (в этом случае снизится падение напряжения на балластном резисторе R_b) или изменениях тока нагрузки I_h .

Эффективность действия стабилизаторов оценивают коэффициентом стабилизации, показывающим, во сколько раз относительное приращение выходного напряжения меньше вызвавшего его относительного приращения входного напряжения.

Основные преимущества параметрического стабилизатора - простота конструкции, небольшое количество элементов и высокая надежность, а недостатки - низкие коэффициент стабилизации (менее 25) и КПД, малые токи стабилизации, а также узкий и нерегулируемый диапазон стабилизируемого напряжения.

2. Компенсационные стабилизаторы

Компенсационный стабилизатор напряжения, по сути, является устройством, в котором автоматически происходит регулирование выходной величины, то есть он поддерживает напряжение на нагрузке в заданных пределах при изменении входного напряжения и выходного тока. По сравнению с параметрическими компенсационные стабилизаторы отличаются большими выходными токами, меньшими выходными сопротивлениями, большими коэффициентами стабилизации.

Компенсационные стабилизаторы бывают двух типов: параллельными и последовательными.

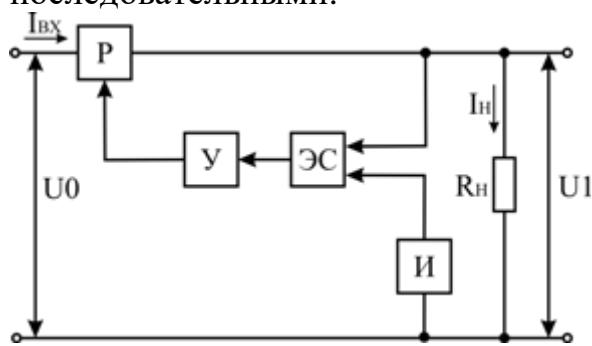


Рис.2 Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа

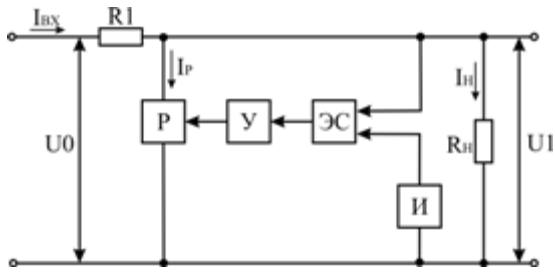


Рис.3 Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения параллельного типа

Основными элементами всех компенсационных стабилизаторов напряжения являются регулирующий элемент **P**; источник опорного (эталонного) напряжения **И**; элемент сравнения **ЭС**; усилитель постоянного тока **У**.

2.1. Компенсационный стабилизатор последовательного типа

В стабилизаторах последовательного типа регулирующий элемент включён последовательно с источником входного напряжения U_0 и нагрузкой R_h . Если по некоторым причинам напряжение на выходе U_1 отклонилось от своего номинального значения, то разность опорного и выходного напряжений изменяется. Это напряжение усиливается и воздействует на регулирующий элемент. При этом сопротивление регулирующего элемента автоматически меняется и напряжение U_0 распределится между P и R_h таким образом, чтобы компенсировать произошедшие изменения напряжения на нагрузке.

Регулирующий элемент в компенсационных стабилизаторах напряжения выполняется, как правило, на транзисторах. Рассмотрим схему компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа.

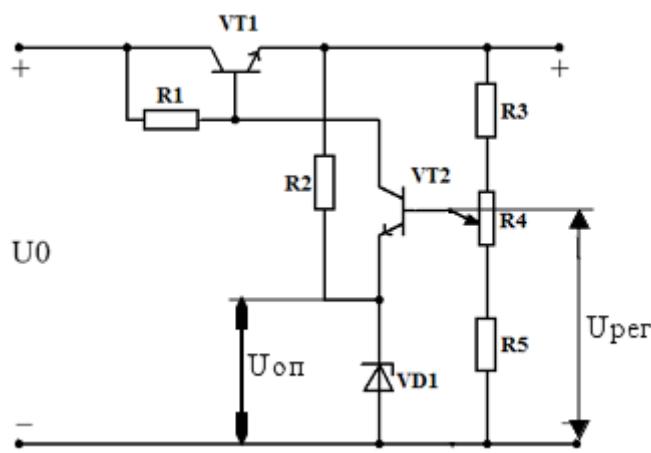


Рис.4 Схема компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа

В этой схеме транзистор VT_1 выполняет функции регулирующего элемента, транзистор VT_2 является одновременно сравнивающим и усилительным

элементом, а стабилитрон VD1 используется в качестве источника опорного напряжения. Напряжение между базой и эмиттером транзистора VT2 равно разности напряжений $U_{\text{оп}}$ и $U_{\text{РЕГ}}$. Если по какой-либо причине напряжение на нагрузке возрастает, то увеличивается напряжение $U_{\text{РЕГ}}$, которое приложено в прямом направлении к эмиттерному переходу транзистора VT2. Вследствие этого возрастают эмиттерный и коллекторный токи данного транзистора. Проходя по сопротивлению R1, коллекторный ток транзистора VT2 создаст на нем падение напряжения, которое по своей полярности является обратным для эмиттерного перехода транзистора VT1. Эмиттерный и коллекторные токи этого транзистора уменьшаются, что приведет к восстановлению номинального напряжения на нагрузке. Точно так же можно проследить изменения токов при уменьшении напряжения на нагрузке.

Ступенчатую регулировку выходного напряжения можно осуществить, используя опорное напряжение, снимаемое с цепочки последовательно включённых стабилитронов. Плавная регулировка обычно производится с помощью делителя напряжения R3, R4, R5, включённого в выходную цепь стабилизатора.

Если пренебречь падением напряжения на эмиттерном переходе транзистора VT2, то выходное напряжение стабилизатора

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}} + (R3 + R4')(I_{b\text{VT2}} + \frac{U_{\text{оп}}}{R5 + R4''})$$

где $R4'$ и $R4''$ соответственно верхняя и нижняя по схеме часть резистора R4.

2.2. Компенсационный стабилизатор параллельного типа

В схеме параллельного стабилизатора при отклонении напряжения на выходе от номинального выделяется сигнал рассогласования, равный разности опорного и выходного напряжений. Далее он усиливается и воздействует на регулирующий элемент, включённый параллельно нагрузке. Ток регулирующего элемента I_p изменяется, на сопротивлении резистора R1 изменяется падение напряжения, а напряжение на выходе $U_1 = U_0 - I_{\text{вх}}R1 = \text{const}$ остаётся стабильным.

Типовая схема компенсационного стабилизатора напряжения параллельного типа приведена ниже. В качестве гасящего устройства в этих стабилизаторах применяются резисторы (R1 на схеме) или при высоких требованиях с стабильности выходного напряжения стабилизатора применяется стабилизатор тока, имеющий большое внутреннее сопротивление.

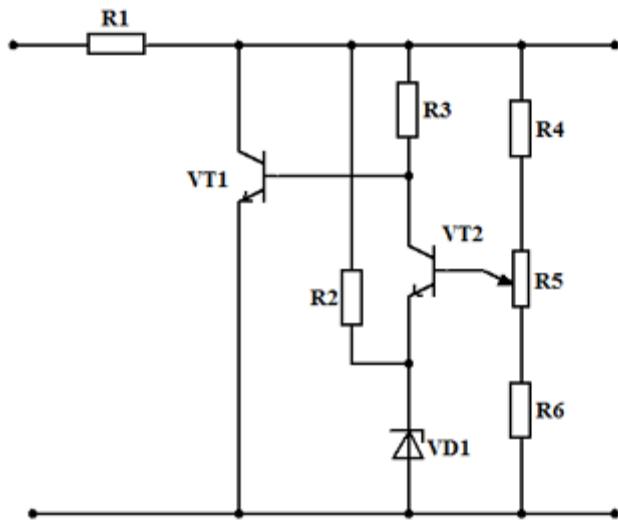


Рис. 5 Схема простого компенсационного стабилизатора напряжения параллельного типа

В основном расчёт элементов компенсационного стабилизатора параллельного типа производится аналогично стабилизатору последовательного типа.

3. Сравнительный анализ последовательных и параллельных компенсационных стабилизаторов напряжения.

Для того чтобы правильно производить выбор типа стабилизатора, необходимо рассмотреть характерные особенности их работы.

1. В стабилизаторах напряжения параллельного типа напряжение на регулирующем элементе равно выходному напряжению и не зависит от изменения входного напряжения. В стабилизаторах последовательного типа напряжение на регулирующем элементе равно разности между входным и выходным напряжениями, то есть значительно меньше, чем у параллельного стабилизатора и зависит от изменения входного напряжения. Это позволяет выполнять стабилизаторы последовательного типа на более высокие выходные напряжения, чем параллельного типа.

2. Коэффициент полезного действия стабилизаторов параллельного типа ниже, чем у последовательных.

3. Коэффициент полезного действия стабилизаторов параллельного типа зависит от типа нагрузки. У последовательных стабилизаторов эта зависимость слабее. Если последовательный и параллельный стабилизаторы имеют одинаковую выходную мощность, то стабилизатор последовательного типа имеет более высокий КПД в режиме неполной нагрузки, а стабилизатор параллельного типа наиболее экономичен в режиме максимальной нагрузки. Таким образом, последовательный стабилизатор более предпочтителен при

работе на сильно изменяющуюся нагрузку, а параллельный стабилизатор – на постоянную нагрузку.

4. Стабилизатор параллельного типа не требует принятия специальных мер защиты от короткого замыкания на выходе. Это объясняется тем, что при коротком замыкании на выходе напряжение на регулирующем транзисторе, а, следовательно, и рассеиваемая мощность равны нулю. В этом случае вся мощность, которую потребляет стабилизатор, будет рассеиваться на балластном резисторе. У последовательных стабилизаторов при коротком замыкании на выходе резко возрастает напряжение на регулирующем транзисторе, и вся мощность рассеивается на нем.

5. Режим холостого хода на выходе опасен для стабилизаторов параллельного типа, так как в этом случае на регулирующем транзисторе рассеивается очень большая мощность. В последовательных стабилизаторах работа в режиме холостого хода тоже не рекомендуется, так как мощные транзисторы неустойчиво работают в режиме малых токов.

Контрольные вопросы

1. Достоинства и недостатки параметрического стабилизатора.
2. Отличительные особенности стабилизаторов последовательного и параллельного типа.
3. Достоинства и недостатки компенсационного стабилизатора напряжения.

Содержание отчета

1. Тема, цель работы.
2. Схемы стабилизаторов и их краткое описание.
3. Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа №14

Расчет параметров однокаскадного усилителя

Цель работы: научиться рассчитывать однокаскадный усилитель напряжения низкой частоты на биполярном транзисторе.

Оборудование и оснащение: методические указания по выполнению практических работ.

Задание и порядок выполнения:

1. Ознакомиться с методическими указаниями.
2. Выполнить расчет однокаскадного усилителя напряжения по варианту.
3. Оформить отчет согласно требованиям.

Краткие теоретические сведения

Известны следующие способы расчета усилителей: графоаналитический, используемый для усиления сигналов большой амплитуды, и аналитический - при малых амплитудах сигналов. В последнем случае можно употреблять систему h -параметров.

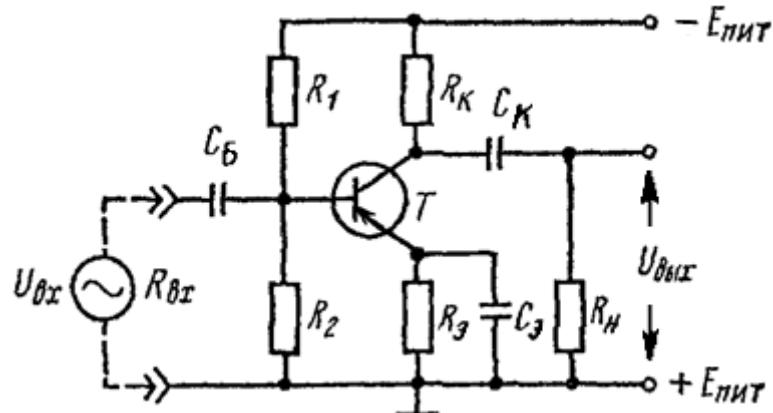


Рис. 1 Схема усилителя низкой частоты на транзисторе

Порядок расчета

1. Определяют падение напряжения на коллекторном резисторе в состоянии покоя: $U_K = R_K I_K$
2. Рассчитывают ток базы транзистора в состоянии покоя: $I_B = I_K / h_{21\alpha}$
3. Ток делителя, протекающий по резисторам $R_1 R_2$, берут в 10 раз больше тока базы: $I_D = 10 I_B$.
4. Рассчитывают напряжение питания схемы как сумму трех напряжений:

$$E_K = U_{K\Theta} + U_K + U_{\Theta}.$$

5. Определяют падение напряжения на резисторе R_2 делителя как сумму двух напряжений: $U_2 = U_{\Theta} + U_{6\Theta}$

Величина U_{Θ} задана в таблице, а величину $U_{6\Theta}$ считают равной для всех вариантов 0,2 В (на практике для германиевых транзисторов она обычно колеблется в пределах 0,2-0,3 В).

6. Определяют падение напряжения на резисторе $R1$ как разность напряжений питания E_K и падения напряжения на резисторе $R2$: $U_1 = E_K - U_2$

7. Рассчитывают сопротивление резистора $R2$ по закону Ома: $R2 = U_2 / I_D$

8. При расчете сопротивления резистора $R1$ нужно учитывать, что через него протекает сумма токов: $R1 = U_1(I_D + I_B)$

9. Находят входное сопротивление усилителя R_{bx} как эквивалентное сопротивление трех включенных параллельно резисторов R_1 , R_2 и $h_{11\Theta}$.

10. Сопротивление нагрузки усилителя берут такой же величины: $R_h = R_{bx}$.

11. Рассчитывают сопротивление R_{Θ} по закону Ома: $R_{\Theta} = U_{\Theta} / (I_K + I_B)$

12. Оценивают величину емкости шунтирующего конденсатора C_{Θ} по приближенной формуле

$$C_{\Theta} \geq \frac{1}{\omega_h r_{\Theta}} = \frac{1}{2\pi f_h r_{\Theta}}, \quad \text{где } r_{\Theta} = 2 \frac{h_{12\Theta}}{h_{22\Theta}}.$$

13. Оценивают емкость разделительного конденсатора на входе схемы по приближенной формуле

$$C_6 \geq 1/f_h R_{bx}.$$

14. Емкость разделительного конденсатора на выходе схемы оценивают по аналогичной формуле, но вместо R_{bx} берут R_h :

$$C_K \geq 1/f_h R_h.$$

15. Определяют коэффициент усиления по напряжению в области средних

$$K_0 = \frac{h_{21\Theta}}{h_{22\Theta}} R_{K_h},$$

частот:

где R_{K_h} - сопротивление, эквивалентное параллельно включенным сопротивлениям R_K , R_h и R_{bx} . R_{bx} – выходное сопротивление транзистора:

$$R_{bx} = 1/h_{22\Theta}$$

16. Рассеиваемая на коллекторе транзистора мощность $P_K = U_{K\Theta} I_K$ не должна превышать максимально допустимой мощности $P_{K\max}$, величина которой приводится также в табл. 1 .

17. Рассчитывают мощность, рассеиваемую отдельно на резисторах R_K и R_Θ . Резисторы выбирают такого типа, чтобы их максимальная рассеиваемая мощность не менее чем в два раза превышала рассчитанную величину мощности.

Пример расчета

Задание

Рассчитать каскад транзисторного усилителя напряжения, принципиальная схема которого изображена на рисунке 1.

Считываются заданными: тип транзистора; схема усилителя по рис. 1; рабочая точка транзистора в состоянии покоя (режим транзистора класса А); ток коллектора I_K ; сопротивление резистора в цепи коллектора R_K ; наименьшая граничная частота усиления f_H и падение напряжения на резисторе R_Θ , которое выбирают в соответствии с требованиями температурной стабильности усилителя.

Данные варианта представлены в таблице 1.

Таблица 1

Транзистор		$h_{11\Theta}$, Ом	$h_{21\Theta}$	$h_{22\Theta}$, Ом ⁻¹	R_K , кОм	I_K , мА	U_Θ , В	f_H , Гц	$P_{K\max}$, Вт
наименование	структура								
МП39	<i>p-n-p</i>	850	28	55×10^{-6}	2,4	10	2,5	50	0,15

Рассчитывают: параметры остальных элементов схемы, напряжения на этих элементах и протекающие через них токи, коэффициент усиления по напряжению в области средних частот K_O . Некоторые из величин являются общими для всех вариантов, поэтому они не указаны в таблицах. Это напряжение между коллектором и эмиттером транзистора $U_{K\Theta} = 5$ В в состоянии покоя. Кроме того, сопротивление нагрузки усилителя R_H берут равным рассчитанному предварительно входному сопротивлению усилителя R_{ex} , т.е. считают, что данный усилитель имеет в качестве нагрузки такой же каскад усиления.

Нужно иметь в виду, что действительные h -параметры транзисторов имеют сильный разброс и значения зависят от положения рабочей точки. В справочниках обычно приводятся предельные значения параметров: наименьшее и наибольшее. В табл. 1 для простоты дается некоторое среднее значение параметров для данного типа транзистора.

Расчет

1. Определяем падение напряжения на коллекторном резисторе в состоянии покоя:

$$U_K = I_K \cdot R_K = 10 \cdot 2,4 = 24 \text{ В.}$$

2. Ток базы транзистора в состоянии покоя

$$I_{E0} = \frac{I_K}{h_{213}} = \frac{10}{28} = 0,357 \text{ мА.}$$

3. Ток делителя, протекающий по резисторам R_1, R_2 (берем в 5 раз больше тока базы)

$$I_d = I_2 = 5I_{E0} = 5 \cdot 0,357 = 1,79 \text{ мА.}$$

4. Напряжение питания схемы как сумма трех напряжений

$$E_K = U_{K3} + U_K + U_3 = 5 + 24 + 2,5 = 31,5 \text{ В.}$$

5. Падение напряжения на резисторе R_2 делителя как сумма двух напряжений

$$U_2 = U_3 + U_{E3} = 2,5 + 0,3 = 2,8 \text{ В,}$$

где значение U_3 задано в таблице, напряжение U_{E3} считаем равным 0,3 В для германиевых транзисторов и 0,6 В для кремниевых.

6. Падение напряжение на резисторе R_1 как разность напряжений питания E_K и падения напряжения на резисторе R_2

$$U_1 = E_K - U_2 = 31,5 - 2,8 = 28,7 \text{ В.}$$

7. Сопротивление резистора R_2 по закону Ома

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{2,8}{1,79} = 1,6 \text{ кОм.}$$

8. При расчете сопротивления резистора R_1 учитываем, что через него протекает сумма токов

$$R_1 = \frac{U_1}{I_d + I_{E0}} = \frac{28,7}{1,79 + 0,36} = 13 \text{ кОм.}$$

9. Входное сопротивление усилителя R_{BX} как эквивалентное сопротивление трех включенных параллельно сопротивлений R_1, R_2, h_{113}

$$\frac{1}{R_{BX}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{h_{113}} = \frac{1}{13} + \frac{1}{1,6} + \frac{1}{0,85} = 1,88 \frac{1}{\text{кОм}},$$

$$R_{BX} = \frac{1}{1,88} = 0,53 \text{ кОм.}$$

10. Сопротивление нагрузки усилителя принимаем

$$R_H = R_{BX} = 0,53 \text{ кОм.}$$

11. Сопротивление резистора R_3 по закону Ома

$$R_3 = \frac{U_3}{I_3} = \frac{U_3}{I_K + I_{50}} = \frac{2,5}{10 + 0,36} = 0,24 \text{ кОм.}$$

12. Емкость шунтирующего конденсатора C_3 в эмиттерной цепи по приближенной формуле

$$C_3 = \frac{1}{2\pi f_H R_3} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,24 \cdot 10^3} \approx 15 \cdot 10^{-6} \Phi = 15 \text{ мкФ.}$$

13. Емкость разделительного конденсатора на входе схемы

$$C_E = \frac{1}{2\pi f_H R_{EX}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,53 \cdot 10^3} \approx 5 \cdot 10^{-6} \Phi = 5 \text{ мкФ.}$$

14. Емкость разделительного конденсатора на выходе схемы принимаем

$$C_K = C_E = 5 \text{ мкФ.}$$

15. Коэффициент усиления по напряжению в области средних частот

$$K_0 = \frac{h_{213} R_{K3}}{R_{EX}} = \frac{28 \cdot 0,42}{0,53} = 22,$$

где R_{K3} – сопротивление, эквивалентное параллельно включенным резисторам R_K , R_H , R_{VYIX} ($R_{VYIX} = 1/h_{223}$ – выходное сопротивление транзистора)

$$\frac{1}{R_{K3}} = \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_H} + h_{223} = \frac{1}{2,4} + \frac{1}{0,53} + 55 \cdot 10^{-3} = 2,36 \frac{1}{\text{кОм}},$$

$$R_{EX} = \frac{1}{2,36} = 0,42 \text{ кОм.}$$

16. Мощность, рассеиваемая отдельно на резисторах R_K и R_3

$$P_K = I_K^2 \cdot R_K = 10^2 \cdot 2,4 = 240 \text{ мВт},$$

$$P_3 = I_3^2 \cdot R_3 = 10,36^2 \cdot 0,24 = 25 \text{ мВт.}$$

Резисторы выбираются таким образом, чтобы их максимальная рассеиваемая мощность не менее чем в 2 раза превышала рассчитанную мощность

$$R_K = 2,4 \text{ кОм, } P = 500 \text{ мВт};$$

$$R_3 = 0,24 \text{ кОм, } P = 50 \text{ мВт.}$$

Рассеиваемая на коллекторе мощность

$$P_K = U_{K3} I_K = 5 \cdot 10 = 50 \text{ мВт} = 0,05 \text{ Вт}$$

не превышает значения максимально допустимой мощности $P_{Kmax} = 0,15 \text{ Вт}$, которая приводится в табл. 1

Задание

При выполнении практической работы использовать формулировку как в приведенном примере. Данные по вариантам выбрать из таблицы 2. Выбранный вариант должен соответствовать номеру или последней цифре номера по журналу.

Некоторые из величин являются общими для всех вариантов, поэтому они не указаны в таблице. Это коллекторный ток транзистора $I_K=1$ мА и напряжение между коллектором и эмиттером транзистора $U_{KE} = 5$ В в состоянии покоя. Кроме того, сопротивление нагрузки усилителя R_H берут равным рассчитанному предварительно входному сопротивлению усилителя R_{Bx} , т.е. считают, что данный усилитель имеет в качестве нагрузки такой же каскад усиления.

В расчетах следует давать величины токов в миллиамперах, величины напряжений в вольтах и величины сопротивлений в Килоомах. Все расчеты следует производить с точностью порядка 1%; однако после расчета величины напряжений округляют с точностью до 0,1 В, а величины сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов - с точностью $\pm 10\%$.

Таблица 2

Вариант	Тип транзистора	h_{11E} , Ом	h_{21E}	h_{22E} , Ом^{-1}	R_K , кОм	I_K , мА	U_E , В	f_H , Гц	$P_{K \max}$, Вт
1; 6	МП40	470	30	$60 \cdot 10^{-6}$	3,1	10	2,2	50	0,15
2; 7	МП41	460	40	$50 \cdot 10^{-6}$	3,6	10	2,8	50	0,15
3; 8	МП14	400	30	$100 \cdot 10^{-6}$	4,8	10	2,3	50	0,15
4; 9	ГТ108А	350	50	$120 \cdot 10^{-6}$	1,8	10	1,1	50	0,075
5; 10	ГТ322Б	200	60	$85 \cdot 10^{-6}$	3,2	10	2,0	50	0,2

Контрольные вопросы

1. Какая схема включения транзистора на рис. 1?
2. В каком режиме включен транзистор в схему.
3. Что обозначают параметрами h_{11E} , h_{21E} и h_{22E} ?

Содержание отчета

1. Тема, цель работы.
2. Задание, схема, решение с пояснениями.
3. Ответы на контрольные вопросы.

5. Список используемой литературы

1. Немцов, М.В., Немцова, М.А. Электротехника и электроника. Учебник для СПО. Академия, 2020.
2. Берикашвили, В.Ш. Основы электроники. Учебное пособие для СПУ. Академия, 2021.
3. Ярочкина, Г.В. Электротехника: учебник для студентов СПО/ Г.В. Ярочкина. – М.: Академия, 2020. – 240 с.
4. Конспекты лекций.