

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского

федерального университета

Дата подписания: 06.09.2025 11:40:26

Уникальный программный ключ:

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a218e198

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕ-
РАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего об-
разования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Колледж Пятигорского института (филиал) СКФУ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению практических работ

по дисциплине «ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

для студентов направления подготовки/специальности

08.02.01 СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ И СООРУ-
ЖЕНИЙ

Методические указания для практических работ по дисциплине «Основы электротехники» составлены в соответствии с требованиями ФГОС СПО. Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 08.02.01 «Строительство и эксплуатация зданий и сооружений».

Пояснительная записка

Данные методические указания предназначены для закрепления теоретических знаний и приобретения необходимых практических навыков и умений по программе дисциплины " Основы электротехники " для специальности СПО 08.02.01 Строительство и эксплуатация зданий и сооружений.

Практические занятия составлены в соответствии с требованиями ФГОС по специальности.

Целями проведения практических занятий являются:

- обобщение, систематизацию, углубление, закрепление полученных теоретических знаний
- формирование умений применять полученные знания на практике, реализацию единства интеллектуальной и практической деятельности;

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

- читать электрические схемы;
- вести оперативный учет работы энергетических установок.

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

- основы электротехники и электроники;
- устройство и принцип действия электрических машин и трансформаторов, аппаратуры управления электроустановками.

Практическая работа №1

Тема 1. Электрические заряды и электрическое поле.

Решение задач по теме: «Электрические заряды и электрическое поле»

Цель работы: закрепление основных понятий по теме «Электрические заряды и электрическое поле».

Перечень используемого оборудования

Плакаты по теме: «Электрические заряды и электрическое поле»

Теоретическая часть:

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \text{ Коэффициент пропорциональности в СИ}$$

С помощью эксперимента обнаруживаем, что вокруг всякого заряженного проводящего тела, которое находится в покое, возникает особого рода материя – электрическое поле (органами чувств человека не обнаруживается). Напряженность поля – силовая характеристика электрического поля равная отношению силы, действующей на пробный положительный заряд q_0 к величине этого заряда.

$$E = \frac{F}{q_0} \text{ - формула напряженности электрического поля в векторной форме, где}$$

$$\left[\frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right] E \text{ - вектор напряженности}$$

$$[\text{Кл}] q_0 \text{ - пробный положительный заряд}$$

$$E = \frac{U}{\Delta d} \text{ - связь между напряженностью и напряжением}$$

Напряженность одного электрического поля равна отношению разности потенциалов (напряжения U) между двумя точками поля, к расстоянию Δd между ними.

Докажем, что $1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$, Для этого числитель и знаменатель умножим на (м) получим

$$1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл} \cdot \text{м}} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

$$E = \frac{k|q|}{\epsilon r^2} \quad -$$

Результирующая напряженность поля созданного несколькими зарядами равна геометрической сумме напряженностей, созданных каждым зарядом в отдельности.

Формула напряженности поля точечного заряда на расстоянии r от него или шара радиусом r .

Например.

1. Построить результирующий вектор напряженности и дать ответ.

$$2q \oplus \mapsto \rightarrow \oplus q$$

Ответ: $\vec{E}_{\text{рез}}$ равен разности и направлен в сторону меньшего заряда.

Ход работы

1. Решить задачи:

Задача №1

Найдите напряженность поля системы двух зарядов $q_1 = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ и $q_2 = -3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ в точке А, соединяющей эти заряды (рис.)

Решение. Согласно принципу суперпозиции, напряженность результирующего поля $\vec{E}$ равна сумме $\vec{E}_1 + \vec{E}_2$ напряженностей полей, созданных зарядами q_1 и q_2 . Модули $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ напряженностей находим по формулам:

$$E_1 = \frac{kq_1}{r_1^2}, \quad E_2 = \frac{kq_2}{r_2^2}, \quad \text{где } r_1 = 0,2 \text{ м, } r_2 = 0,1 \text{ м.}$$

Задача №2

Между горизонтальными пластинами заряженного конденсатора, напряжённость которого 49 Н/Кл , находится в равновесии пылинка, имеющая заряд $2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$. Какова её масса?

Задача №3

Удаётся ли зарядить металлический стержень натиранием о мех или бумагу, если не удаётся, объясните, когда это возможно и сделайте это.

Задача №4. Почему нити прилипают к гребням чесальных машин, применяющихся в текстильной промышленности, и при этом путаются и часто рвутся? Для борьбы с этим явлением в цехах искусственно создают повышенную влажность воздуха. Зачем это делают?

Задача №5. Цинковые опилки просеивают через медное сито. Что произойдет с листочками электроскопа, если струю этих опилок направить на шарик электроскопа?

Задача №6. Потрите стержень электроскопа не наэлектризованной каучуковой палочкой. Электроскоп обнаруживает заряд. Почему?

Задача №7. Почему при переливании бензина из одной цистерны в другую он может воспламениться, если не принять специальных мер предосторожности?

Задача №8. На предприятиях резиновой промышленности при вальцовке каучук пропускают между двумя вращающимися валами. Если поднести руку к такому каучуку, то появится искра. Почему?

Задача №9. Если ножовкой распиливать лист какого-нибудь полимера (полиэтилен, полистирол, винипласт, плексиглас и др.), то опилки прилипают к ножовке, к столу, на котором укреплена обрабатываемая деталь, и другим предметам. Чем это объясняется?

Задача №10. Можно ли на концах стеклянной палочки получить два одновременно существующих разноименных заряда?

Практическая работа № 2

Тема 2. Электрические цепи постоянного тока

Изучение закона Ома для полной цепи

Цель работы: измерить ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока.

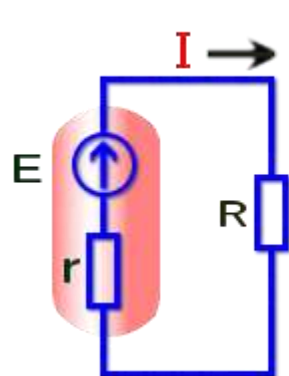
Перечень используемого оборудования

1) источник питания, 2) проволочный резистор сопротивлением 2 Ом , 3) амперметр, 4) ключ, 5) вольтметр, 6) соединительные провода.

Теоретическая часть:

Рассмотрим **Закон Ома** для полной электрической цепи постоянного тока. Здесь нас прежде всего интересует его практическое отношение к постоянному току (*direct current*).

Различают две формулировки **Закона Ома**, одна для участка цепи, а другая для полной цепи. В последней учитывается источник тока, точнее его внутреннее сопротивление. Простейшая электрическая цепь постоянного тока состоит из источника тока и одной единственной резистивной нагрузки, а попросту из — активного сопротивления.



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

Закон Ома для полной цепи

где I - сила тока в цепи (Ампер)
 E - ЭДС источника тока (Вольт)
 r - внутреннее сопротивление источника тока E (Ом)
 R - общее активное сопротивление цепи (Ом)

	Источник постоянного тока (ЭДС), который имеет внутреннее сопротивление r (выходной импеданс). Например, это может быть аккумуляторная батарея	
	Внутреннее сопротивление источника тока (ЭДС). Чем лучше источник тока, тем меньше его внутреннее сопротивление r. Зависит от действия сторонних сил	?
	Активная омическая нагрузка R. В ней происходит преобразование электрической энергии в другой вид энергии. Обычно это тепло.	

зависит от сторонних сил создающих ЭДС в источнике

Закон Ома — закон пропорциональности

Формулировка **Закона Ома** для полной цепи и для участка цепи — это утверждение пропорциональности. Устанавливается достаточно простая алгебраическая связь между величинами силы тока, суммы сопротивлений ($r+R$) и ЭДС источника тока.

Сила тока в электрической цепи, прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна сумме внутреннего сопротивления этого источника и общего сопротивления цепи.

Наиболее понятное и простое применение **Закона Ома** в такой формулировке — это электрическая цепь с одним источником тока в ветви (контуре). Кроме **Закона Ома**, для расчёта электрических цепей, необходимо знать правила Кирхгофа, а также иметь базовые представления об элементах цепей, таких как узлы, ветви, контуры, двухполюсники и т. п.

Потери на внутреннем сопротивлении источника ЭДС

Самый простой пример иллюстрирующий влияние внутреннего сопротивления источника тока — это гальванические элементы (батареи) и аккумуляторы. Способность источника тока выдавать большое значение силы тока напрямую зависит от его внутреннего сопротивления. Чем оно больше, тем меньший ток способен выдать источник ЭДС.

Правильное понимание **Закона Ома для полной цепи** позволяет правильно рассчитать и выбрать источник тока по нагрузке, а также позволяет своевременно выявить дефекты источников тока. Тот источник тока, который не пригоден для низкоомной нагрузки, потому как его внутреннее сопротивление в больше или равно сопротивлению нагрузки, будет вполне пригоден в эксплуатации для питания электрической цепи с нагрузкой в 10 раз большим сопротивлением, чем его собственное.

Чем большую мощность нужно получить на нагрузке при малом значении ЭДС, тем меньше должно быть внутреннее сопротивление источника. Поэтому самыми лучшими источниками постоянного тока (DC) в настоящее время остаются химические аккумуляторы, хотя вполне возможно, что их могут превзойти в этом полупроводниковые источники тока — солнечные батареи.

Оптимальным считается, когда падение напряжения на внутреннем сопротивлении, более чем в 10 раз меньше чем падение напряжения на полезной нагрузке. Если говорить языком пропорциональности, то это означает, что зная сопротивление нагрузки или её мощность, нужно выбирать источник тока, где его внутреннее сопротивление (*импеданс*) будет более чем в 10 раз меньшим.

Согласно закону Ома сила тока I в замкнутой цепи с одним источником питания определяется выражением: $I = \frac{\xi}{r + R}$ (1)

Отсюда: $Ir + IR = \xi$ (2)

Из формулы (2) можно найти внутреннее сопротивление r источника тока, ЭДС которого предварительно измеряют вольтметром:

$$r = \frac{\xi - IR}{I} = \frac{\xi}{I} - R \quad (3)$$

Оборудование, средства измерения: 1) источник питания, 2) проволочный резистор сопротивлением 2 Ом, 3) амперметр, 4) ключ, 5) вольтметр, 6) соединительные провода.

Экспериментальная установка изображена на рисунке 1. К источнику тока 1 подключается резистор 2, амперметр 3 и ключ 4. ЭДС источника тока непосредственно измеряется вольтметром 5.

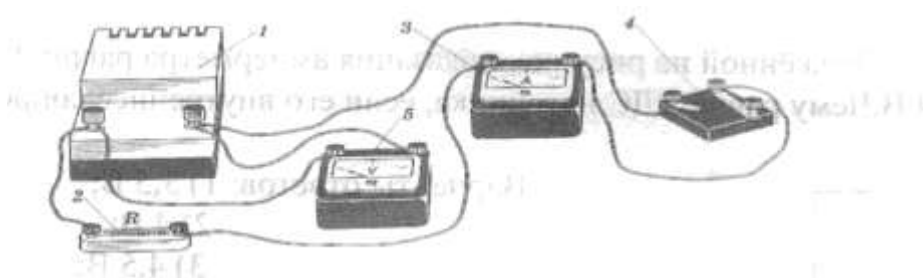


Рис 1

Сила тока I измеряется амперметром.

Ход работы:

1. Начертите схему цепи.
2. Соберите цепь по схеме.
3. Измерьте вольтметром ЭДС источника тока при разомкнутой цепи $\mathcal{E} = V$.
4. Снимите показания вольтметра и амперметра при замкнутой цепи.
5. Все измерения занесите в таблицу.
6. Вычислите r (внутреннее сопротивление источника тока).

Таблица.1

$\xi, В$	$U, В$	$I, А$	$R, Ом$	$r, Ом$	Класс точности амперметра	Класс точности вольтметра	$\Delta \xi$	ΔI	ΔR	Δr	$U_{изм}, В$	$I_{изм}, А$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Таблица.1

7. Рассчитайте погрешности:

$$а) \Delta \xi = U_{\max} \times \frac{k_V}{100} =$$

$$\xi \pm \Delta \xi =$$

$$б) \Delta I = I_{\max} \times \frac{k_A}{100} =$$

$$в) \Delta R = R \times \varepsilon = R \times \frac{\Delta R}{R} = R \times 0,03$$

$$\Delta r = \frac{\xi}{I} \left(\frac{\Delta \xi}{\xi} + \frac{\Delta I}{I} \right) + \Delta R =$$

$$r \pm \Delta r =$$

8.Решите задачу:

В цепи, изображённой на рисунке 2, показания амперметра равно 0,5 А, вольтметра - 4 В. Чему равна ЭДС источника, если его внутреннее сопротивление 1 Ом? Варианты ответов: 1) 3,5 В; 2) 4 В; 3) 4,5 В; 4) 5 В

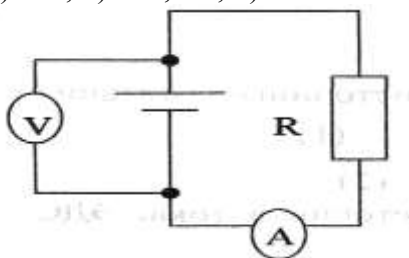


Рис №2

9. Ответить на вопросы

1. Определение электрической цепи.
2. Из чего состоит простая электрическая цепь?
3. Как узнать сопротивление нагрузки при устойчивом режиме работы, то есть когда лампа горит в полный накал?

Практическая работа №3

Параллельное и последовательное соединение резисторов

Цель работы: изучить законы протекания тока через параллельно и последовательно соединенные проводники (резисторы) и экспериментально проверить закон Ома.

Перечень используемого оборудования

1. Блок генераторов напряжений ГН2, в данной работе используется генератор регулируемого постоянного напряжения 0...15 В (в генераторе обязательно включить его внутреннее сопротивление $R_{вн}$).
2. Блок амперметра-вольтметра АВ1.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ЭТ01, в данной работе используются

резисторы $R1 = 150 \text{ Ом}$ и $R4 = 270 \text{ Ом}$.

Теоретическая часть

Устройствами, образующими электрическую цепь, являются: источники (генераторы) электромагнитной энергии или электрических сигналов, приемники (потребители) электромагнитной энергии и устройства передачи и преобразования энергии (провода, трансформаторы и др.).

Каждый генератор и приемник имеют два зажима (полюса) выходные для генератора и входные для приемника через а, с помощью которых через систему передачи осуществляется связь между ними. Их называют двухполюсники.

В общем случае источники и приемники могут объединять несколько двухполюсников, соединенных последовательно или параллельно.

Двухполюсник называют *активным*, если он содержит источник эдс; при отсутствии источника эдс двухполюсник будет *пассивным*.

Соединение элементов электрической цепи может быть последовательным, параллельным и смешанным.

Участок электрической цепи, по которому проходит ток одного и того же значения и направления, называют ветвью.

Узел электрической цепи на схеме отмечается жирной точкой. Если на схеме место скрещивания ветвей точкой не отмечено, это означает, что электрического соединения между ними в месте их пересечения нет.

Замкнутую электрическую о цепь, образуемую одной или несколькими ветвями, называют контуром.

Контур, внутри которого не лежат другие ветви, связывающие между собой его узлы, называют простым (или ячейкой). Например, в схеме рис. 8 содержится шесть ветвей, четыре узла и три простых контура.

Анализ электрической цепи может быть произведен или экспериментально, или решением уравнений ее электрического состояния.

Основными физическими законами, позволяющими описать любые режимы электрической цепи, являются законы Ома, сохранения заряда и сохранения энергии, на основе которых составляются уравнения электрического состояния ветви, узла и контура.

При последовательном соединении резисторов $R_{об} = R1 + R2$.

Общее сопротивление цепи при параллельном соединении $R_{об} = \frac{R1R2}{R1+R2}$

Величину, обратную сопротивлению ($1/R$) называют электрической проводимостью.

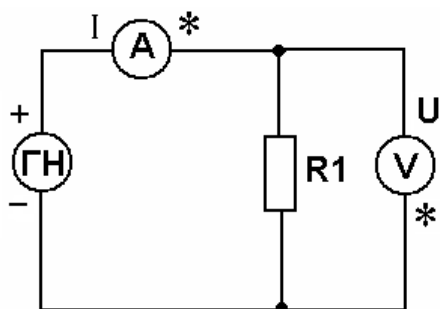
Если параллельно соединено n равных между собой сопротивлений R , то общее сопротивление $R_{об} = \frac{R}{n}$

Смешанное соединение элементов цепи означает, что одна часть ветвей цепи соединена параллельно, а другая —последовательно. В этом случае для определения общего сопротивления рекомендуется всю цепь привести к наиболее простому виду — последовательному соединению, а затем вычислить общее сопротивление.

Ход работы:

Параллельное соединение резисторов.

Опыт №1. 1.1. Собрать электрическую схему, показанную на рисунке №1:



1.2. **Предъявить собранную схему для проверки преподавателю!**

1.3. На блоке амперметра-вольтметра нажать кнопку «Сеть», остальные три кнопки выбора: мА, мкА, = и $\approx$ должны быть отжаты.

1.4. Пределы на амперметре и вольтметре установить на 20 мА и 20В.

1.5. На блоке генераторов ГН нажать кнопку «Сеть» и в генераторе 0...15 В включить его внутреннее сопро-

Рис. №1

1.7. Показания приборов записать в таблицу №1 (столбцы 2 и 4).

Опыт №2. 2.1. Сделать следующее изменение в схеме: вместо резистора R1 подключить резистор R4.

2.2. Вновь выполнить пункты с 1.3. по 1.8.

Опыт №3. 3.1. Собрать электрическую схему, показанную на рисунке №2.

3.2. Предъявить собранную схему для проверки преподавателю!

3.3. Вновь выполнить пункты с 1.3. по 1.8. Если будет необходимо, то предел амперметра установить на 200мА.

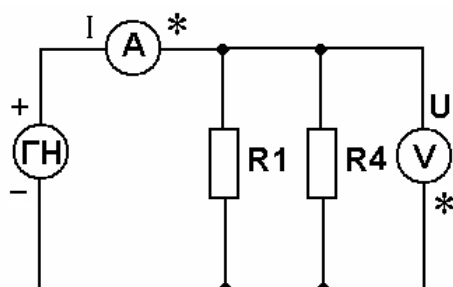
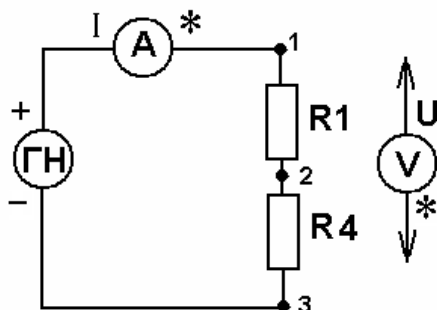


Рис. №2

Последовательное соединение резисторов

Опыт №4. 1.1. Собрать электрическую схему, показанную на рисунке №4:

Рис. №4



4.2. Подсоединить вольтметр к точкам 1 и 3 схемы.

4.3. Предъявить собранную схему для проверки преподавателю!

4.4. На блоке амперметра-вольтметра нажать кнопку «Сеть», остальные три кнопки выбора: мА, мкА, = и $\approx$ должны быть отжаты.

4.5. Пределы на амперметре и вольтметре установить соответственно на 20 мА и 20В.

4.6. На блоке генераторов ГН нажать кнопку «Сеть» и в генераторе 0...15 В включить его внутреннее сопротивление.

ление R_{BH} !.

4.7. Наблюдая за показаниями вольтметра регулятором установить выходное напряжение с генератора $U = 3В$.

4.8. Показания приборов записать в таблицу №2 (столбцы 2 и 3 – вся цепь).

4.9. Измерить напряжение на резисторе R1, для этого подсоединить вольтметр к точкам 1 и 2 схемы. Показания приборов записать в таблицу №2 (столбцы 2 и 3).

4.10. Измерить напряжение на резисторе R2, для этого подсоединить вольтметр к точкам 2 и 3 схемы. Показания приборов записать в таблицу №2 (столбцы 2 и 3).

Таблица №1

[illegible]

2	Рис.№1 с резистором R4									
3	Рис.№2 Вся цепь									

Таблица №2

	R _{зад}	U _{изм}	I _{изм}		P _{расч}	I _{расч}	ΔI	γ
Ед. изм.	Ом	В	mA	A	Вт	A	A	%
Участок цепи	1	2	3	4	5	6	7	8
R1								
R4								
Вся цепь								

Порядок выполнения расчетов.

5.1. Рассчитать **R_{зад}** для всей цепи (расчет должен быть показан в отчете), результат занести в таблицу №1 (столбец 1).

5.2. Перевести значения тока **I_{изм}** из mA в амперы, результаты занести в таблицу №1 (столбец 5).

5.3. Рассчитать силу тока **I_{расч}** по закону Ома для участка цепи (все расчеты должны быть показаны в отчете), результаты занести в таблицу №1 (столбец 7).

5.4. Заполнить все остальные столбцы таблицы, используя дополнительные расчетные формулы:

Параллельное соединение резисторов.

Проводимость участка цепи $g_{расч} = 1 / R_{зад}$;

Расчетная мощность $P_{расч} = U_{изм} * I_{изм}$;

Абсолютная погрешность измерения $\Delta I = I_{изм} - I_{расч}$;

Относительная погрешность измерения $\gamma = (\Delta I / I_{расч}) * 100\%$

(все данные расчеты должны быть показаны в отчете)

5.5. Убедиться, что: $U = const$; $I_{ц} = I_1 + I_2 + I_3$; $1/R_{ц} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$;

$P_{ц} = P_1 + P_2 + P_3$; $g_{ц} = g_1 + g_2 + g_3$

Последовательное соединение резисторов

$I = const$; $U_{ц} = U_1 + U_2 + U_3$;

$R_{ц} = R_1 + R_2 + R_3$; $P_{ц} = P_1 + P_2 + P_3$;

(все данные расчеты должны быть выполнены в отчете).

5.6. Сделать вывод по пункту 5.5. - как выполняются законы параллельного и последовательного соединения.

5.7. Ответить вопросы

1. Что называется электрическим сопротивлением?
2. Дать определение узлу, ветви и контуру цепи.
3. Амперметр назначение, метод подключения.
4. Вольтметр назначение, метод подключения.

5.7. Составить отчет по выполнению лабораторно-практической работы, соблюдая правила оформления и сдать преподавателю.

Практическая работа №4

Тема 2. Электрические цепи постоянного тока

Расчет простых электрических цепей

Цель работы: закрепление основных понятий по теме

Теоретическая часть

В цепи с источниками постоянного тока можно исключить все индуктивности, закоротив их, а все ветви, содержащие конденсаторы, — разомкнуть. В этом случае уравнение электрического состояния контура приобретает вид:

$$\sum RI = \sum E.$$

В уравнении положительные знаки принимаются для тех токов и эдс, направления которых совпадают с произвольно выбранным направлением обхода рассматриваемого контура. При этом в качестве приемников могут быть несколько резисторов, включенных последовательно и параллельно. Если известны эдс генератора, его внутреннее сопротивление и сопротивление резисторов, то токи во всех ветвях можно найти, используя метод преобразования (свертывания) или метод пропорциональных величин (подобия).

Этот метод состоит в замене групп последовательно и параллельно соединенных резисторов эквивалентным R_{Σ} . Затем по уравнению состояния простого контура находят ток в неразветвленной части цепи. Посредством обратного преобразования находят токи во всех ветвях заданной цепи.

Метод пропорциональных величин (подобия)

Сущность метода состоит в том, что в электрической схеме задаются произвольным значением тока в одной из ветвей и затем после определения токов в других ветвях находят эдс E' . Сравнивают полученное значение E' с заданной эдс E , находят коэффициент пропорциональности $K=E/E'$. Для нахождения действительных токов в ветвях схемы полученные значения токов умножают на коэффициент K .

Расчет сложной электрической цепи

Любую ветвь электрической цепи постоянного тока, из скольких бы элементов она ни состояла, можно привести путем преобразования к двум элементам: активному и пассивному (E и R). Общий анализ сложной электрической цепи, когда известны конфигурация цепи и параметры ее элементов, состоит в нахождении токов и напряжений во всех ветвях, а также мощности на участках цепи. Эта задача может быть решена с помощью уравнений электрического состояния.

При составлении уравнений электрического состояния рекомендуется придерживаться определенной последовательности

- 1) задаться произвольно-положительными направлениями токов во всех ветвях;
- 2) составить уравнения для узлов;
- 3) составить уравнения для контуров.

Общее число уравнений должно быть равно количеству неизвестных, т. е. количеству токов ветвей v . Эти уравнения должны быть независимы, т. е. ни одно из них не должно быть следствием других. Так, число уравнений, составленных для узлов, должно быть на единицу меньше общего числа узлов ($y-1$). Действительно, каждая ветвь связывает два узла и поэтому значение тока в одно уравнение войдет со знаком «плюс», а в другое — со знаком «минус». Следовательно, одно узловое уравнение окажется лишним.

Количество контурных уравнений k определяется из выражения $k=b-(y-1)$. При выборе контуров для составления уравнений следует исходить из того же принципа независимости уравнений. Контуров необходимо выбирать так, чтобы в систему составляемых уравнений вошли все ветви схемы, а в каждый из контуров — наименьшее число ветвей.

Наряду с токами и напряжениями характеристикой электрической цепи является также энергетическое состояние: баланс мощностей, выделяемых источниками энергии и потребляемых приемниками.

Из закона сохранения энергии для любой электрической цепи алгебраическая сумма мощностей источников эдс равна сумме мощностей, потребляемых в приемниках (резисторах):

Если направления эдс и тока, действующих в ветви, совпадают, то мощность такого источника эдс будет в уравнении со знаком плюс — источник отдает энергию в цепь (работает в режиме генератора). Если направление действия эдс не совпадает с направлением тока в ветви, то источник эдс потребляет энергию и в уравнении будет знак «минус».

Рационализированные методы общего расчета электрических цепей

Решение системы уравнений электрического состояния узлов и контуров, если количество ветвей в электрической цепи более трех, создает известные трудности.

Упростить расчет сложных электрических цепей возможно двумя методами: наложения (суперпозиции) и с помощью вспомогательных неизвестных.

Метод наложения состоит в предварительных преобразованиях, позволяющих сложную цепь представить несколькими простыми цепями.

Метод вспомогательных неизвестных - контурных токов или узловых потенциалов, заключается во введении этих неизвестных в расчеты, число которых существенно меньше числа ветвей в цепи.

Метод наложения используется для линейной системы. Принцип наложения заключается в том, что если линейная цепь подвергается воздействию нескольких источников эдс одновременно, то реакция (ток) цепи на эти источники равна алгебраической сумме реакций (токов) на каждое воздействие отдельно.

Метод контурных токов

В методе контурных токов в качестве промежуточных переменных выбирают токи, замыкающиеся в каждом контуре и называемые контурными. В этом случае число уравнений уменьшается до числа независимых контуров (ячеек), т. е. до $k=b-(y-1)$. Очевидно, этот метод будет выгоден, когда $k \leq (y-1)$.

При расчете электрических цепей методом контурных токов, следует руководствоваться следующими правилами:

1. Число контурных токов, замыкающихся через каждую из ветвей, должно быть по возможности минимальным, т. е. следует выбирать только простые контуры;
2. Положительные направления контурных токов можно выбирать произвольно, лучше (удобнее) по часовой стрелке.

Метод узлового напряжения

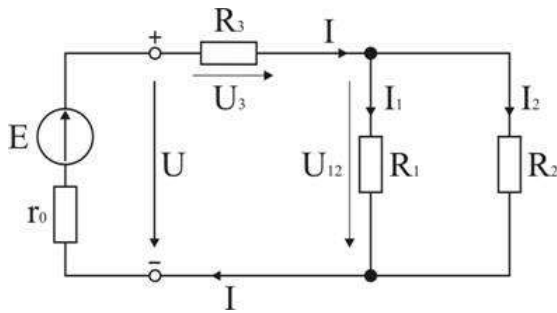
Если разветвленная цепь имеет только два узла или путем несложных преобразований может быть приведена к двум узлам, то анализ таких цепей ведут методом двух узлов, который называют методом узлового напряжения.

Методы анализа режимов отдельной ветви или части электрической цепи

В практике возникает необходимость исследовать режимы отдельных участков или ветвей схемы при изменении их параметров или параметров на других участках (ветвях) схемы, выбрать оптимальные режимы их работы, например при максимальной мощности, заданном коэффициенте полезного действия, получении линейности и стабильности характеристики при изменении режимов источника питания и др.

Воздействие сложной активной электрической цепи (активного двухполюсника) на исследуемую ветвь можно заменить воздействием последовательно соединенных эдс E , и его внутреннего сопротивления R_v .

Расчет цепи с одним источником питания



Задача 1. В цепи, схема которой приведена на рис. 1.29, ЭДС аккумуляторной батареи $E = 78 \text{ В}$, ее внутреннее сопротивление $r_0 = 0,5 \text{ Ом}$. Сопротивления резисторов $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$, $R_3 = 4 \text{ Ом}$. Вычислить токи во всех ветвях цепи и напряжения на зажимах батареи и на каждом из резисторов.

Анализ и решение задачи 1

1. Обозначение токов и напряжений на участках цепи.

Резистор R_3 включен последовательно с источником, поэтому ток I для них будет общим, токи в резисторах R_1 и R_2 обозначим соответственно I_1 и I_2 . Аналогично обозначим напряжения на участках цепи.

2. Определение эквивалентного сопротивления цепи:

$$R_3 = r_0 + R_3 + R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 0,5 + 4 + 5 * 10 / (5 + 10) = 7,8 \text{ Ом}$$

3. Ток в цепи источника рассчитываем по закону Ома:

$$I = E / R_3 = 78 / 7,8 = 10 \text{ А.}$$

4. Определение напряжений на участках цепи:

$$U_{12} = R_{12} I = 3,3 * 10 = 33 \text{ В}; U_3 = R_3 I = 4 * 10 = 40 \text{ В};$$

$$U = E - r_0 I = 78 - 0,5 * 10 = 73 \text{ В.}$$

5. Определение токов и мощностей всех участков:

$$I_1 = U_{12} / R_1 = 33 / 10 = 3,3 \text{ А}; I_2 = U_{12} / R_2 = 33 / 5 = 6,6 \text{ А};$$

$$P_1 = R_1 I_1^2 = U_{12} I_1 = 108,9 \text{ Вт}; P_2 = R_2 I_2^2 = U_{12} I_2 = 217,8 \text{ Вт};$$

$$P_3 = R_3 I^2 = U_3 I = 400 \text{ Вт.}$$

Мощность потерь на внутреннем сопротивлении источника

$$\square P = r_0 I^2 = 50 \text{ Вт.}$$

Мощность источника $P = E I = 780 \text{ Вт}$.

Дополнительные вопросы к задаче 1

1. Как проверить правильность решения задачи?

Правильность вычисления токов можно проверить, составив уравнение на основании первого закона Кирхгофа: $I = I_1 + I_2$.

Правильность расчета мощностей проверяют по уравнению баланса мощностей:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \square P.$$

2. Каким будет напряжение на зажимах источника, при обрыве в цепи резистора R_3 ?

Это будет режим холостого хода источника ЭДС, при котором $U = E$, т.к. ток I равен 0 и $I r_0 = 0$.

3. Каким будет ток в цепи источника при коротком замыкании на его зажимах?

В режиме короткого замыкания $U = 0$ и ток источника ограничивается только его внутренним сопротивлением

$$I_{кз} = E / r_0 = 78 / 0,5 = 156 \text{ А.}$$

4. Как изменятся токи в схеме при увеличении R_1 ?

При увеличении R_1 увеличивается сопротивление параллельного участка схемы R_{12} , поэтому увеличивается сопротивление $R_{экв}$, что приводит к уменьшению тока I . При уменьшении I уменьшаются падения напряжения $I R_3$ и $I r_0$ и, в соответствии со вторым законом Кирхгофа, напряжение на разветвлении $U_{12} = E - I (R_3 + r_0)$ возрастает, что приводит к увеличению тока в резисторе R_2 . Т.к. ток I уменьшается, а ток I_2 возрастает, ток $I_1 = I - I_2$ уменьшается.

Практическая работа №5

Тема 2. Электрические цепи постоянного тока

Расчет сложных электрических цепей

Цель работы: закрепление основных понятий по теме

Теоретическая часть:

Любую ветвь электрической цепи постоянного тока, из скольких бы элементов она ни состояла, можно привести путем преобразования к двум элементам: активному и пассивному $\{E \text{ и } R\}$. Общий анализ сложной электрической цепи, когда известны конфигурация цепи и параметры ее элементов, состоит в нахождении токов и напряжений во всех ветвях, а также мощности на участках цепи. Эта задача может быть решена с помощью уравнений электрического состояния.

При составлении уравнений электрического состояния рекомендуется придерживаться определенной последовательности

- 1) задаться произвольно-положительными направлениями токов во всех ветвях;
- 2) составить уравнения для узлов;
- 3) составить уравнения для контуров.

Общее число уравнений должно быть равно количеству неизвестных, т. е. количеству токов ветвей v . Эти уравнения должны быть независимы, т. е. ни одно из них не должно быть следствием других. Так, число уравнений, составленных для узлов, должно быть на единицу меньше общего числа узлов $(y-1)$. Действительно, каждая ветвь связывает два узла и поэтому значение тока в одно уравнение войдет со знаком «плюс», а в другое — со знаком «минус». Следовательно, одно узловое уравнение окажется лишним.

Количество контурных уравнений k определяется из выражения $k=b-(y-1)$. При выборе контуров для составления уравнений следует исходить из того же принципа независимости уравнений. Контуров необходимо выбирать так, чтобы в систему составляемых уравнений вошли все ветви схемы, а в каждый из контуров — наименьшее число ветвей.

Наряду с токами и напряжениями характеристикой электрической цепи является также энергетическое состояние: баланс мощностей, выделяемых источниками энергии и потребляемых приемниками.

Из закона сохранения энергии для любой электрической цепи алгебраическая сумма мощностей источников эдс равна сумме мощностей, потребляемых в приемниках (резисторах):

Если направления эдс и тока, действующих в ветви, совпадают, то мощность такого источника эдс будет в уравнении со знаком плюс — источник отдает энергию в цепь (работает в режиме генератора). Если направление действия эдс не совпадает с направлением тока в ветви, то источник эдс потребляет энергию и в уравнении будет знак «минус».

Рационализированные методы общего расчета электрических цепей

Решение системы уравнений электрического состояния узлов и контуров, если количество ветвей в электрической цепи более трех, создает известные трудности.

Упростить расчет сложных электрических цепей возможно двумя методами: наложения (суперпозиции) и с помощью вспомогательных неизвестных.

Метод наложения состоит в предварительных преобразованиях, позволяющих сложную цепь представить несколькими простыми цепями.

Метод вспомогательных неизвестных - контурных токов или узловых потенциалов, заключается во введении этих неизвестных в расчеты, число которых существенно меньше числа ветвей в цепи.

Метод наложения используется для линейной системы. Принцип наложения заключается в том, что если линейная цепь подвергается воздействию нескольких источников эдс одновременно, то реакция (ток) цепи на эти источники равна алгебраической сумме реакций (токов) на каждое воздействие отдельно.

Метод контурных токов

В методе контурных токов в качестве промежуточных переменных выбирают токи, замыкающиеся в каждом контуре и называемые контурными. В этом случае число уравнений уменьшается до числа независимых контуров (ячеек), т. е. до $k=b-(y-1)$. Очевидно, этот метод будет выгоден, когда $k \leq (y-1)$.

При расчете электрических цепей методом контурных токов, следует руководствоваться следующими правилами:

1. Число контурных токов, замыкающихся через каждую из ветвей, должно быть по возможности минимальным, т. е. следует выбирать только простые контуры;
2. Положительные направления контурных токов можно выбирать произвольно, лучше (удобнее) по часовой стрелке.

Метод узлового напряжения

Если разветвленная цепь имеет только два узла или путем несложных преобразований может быть приведена к двум узлам, то анализ таких цепей ведут методом двух узлов, который называют методом узлового напряжения.

Методы анализа режимов отдельной ветви или части электрической цепи

В практике возникает необходимость исследовать режимы отдельных участков или ветвей схемы при изменении их параметров или параметров на других участках (ветвях) схемы, выбрать оптимальные режимы их работы, например при максимальной мощности, заданном коэффициенте полезного действия, получении линейности и стабильности характеристики при изменении режимов источника питания и др.

Воздействие сложной активной электрической цепи (активного двухполюсника) на исследуемую ветвь можно заменить воздействием последовательно соединенных эдс E , и его внутреннего сопротивления R_v .

Расчет сложных цепей при помощи уравнений Кирхгофа

Задача 2. Рассчитать схему рис. 1.30, составив систему уравнений на основании законов Кирхгофа.

Исходные данные к задаче:

$$E_1 = 60 \text{ В}; E_2 = 80 \text{ В}; E_3 = 70 \text{ В};$$

$$R_1 = 20 \text{ Ом}; R_2 = 50 \text{ Ом}; r_{03} = 5 \text{ Ом}; R_4 = 65 \text{ Ом}; R_5 = 85 \text{ Ом}.$$

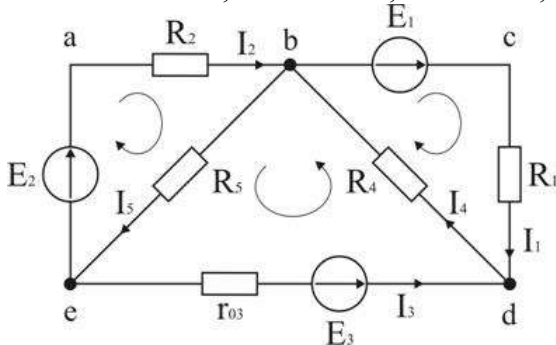


рис. 1.30

Исходные данные к задаче:

$$E_1 = 60 \text{ В}; E_2 = 80 \text{ В}; E_3 = 70 \text{ В};$$

$$R_1 = 20 \text{ Ом}; R_2 = 50 \text{ Ом}; r_{03} = 5 \text{ Ом}; R_4 = 65 \text{ Ом}; R_5 = 85 \text{ Ом}.$$

Анализ и решение задачи 2

1. Определение необходимого числа уравнений.

В схеме рис. 1.30 пять ветвей и для расчета токов в них надо составить пять уравнений. По первому закону Кирхгофа составляются уравнения для всех узлов, кроме одного (уравнение для него будет следствием предыдущих), по второму – для независимых контуров (в каждый последующий контур входит хотя бы одна ветвь, не вошедшая в ранее рассмотренные). Для данной схемы надо составить два уравнения по первому закону и три – по второму.

2. Составление и решение системы уравнений.

Для составления уравнений задаемся произвольно направлениями токов в ветвях и направлениями обхода контуров (рис. 1.30).

Уравнение для узла d: $I_1 + I_3 - I_4 = 0$.

Уравнение для узла e: $-I_2 - I_3 + I_5 = 0$.

Уравнение для контура bcd: $I_1 R_1 + I_4 R_4 = E_1$.

Уравнение для контура abe: $I_2 R_2 + I_5 R_5 = E_2$.

Уравнение для контура bde: $I_3 r_{03} + I_4 R_4 + I_5 R_5 = E_3$.

Подставив в уравнения численные значения величин, получим алгебраическую систему уравнений:

$$I_1 + I_3 - I_4 = 0;$$

$$-I_2 - I_3 + I_5 = 0;$$

$$20 I_1 + 65 I_4 = 60;$$

$$50 I_2 + 85 I_5 = 80;$$

$$5 I_3 + 65 I_4 + 85 I_5 = 70.$$

Решение системы дает значения токов: $I_1 = 1,093 \text{ A}$; $I_2 = 0,911 \text{ A}$; $I_3 = -0,506 \text{ A}$; $I_4 = 0,587 \text{ A}$; $I_5 = 0,405 \text{ A}$.

Дополнительные вопросы к задаче 2

1. Что означает минус перед численным значением тока I_3 ?

Знак «—» говорит о том, что реальное направление тока в данной ветви противоположно принятому в начале расчета.

2. В каких режимах работают элементы схемы, содержащие источники ЭДС?

В ветвях с E_1 и E_2 токи совпадают по направлению с ЭДС, т.е. данные элементы работают источниками, отдавая энергию в схему; в ветви с ЭДС E_3 ток направлен против ЭДС, т.е. данный элемент работает потребителем (например, машина постоянного тока в режиме двигателя).

3. Как проверить правильность решения задачи?

Для проверки правильности расчета можно на основании законов Кирхгофа написать уравнения для узлов и контуров схемы, которые не использовались при составлении исходной системы. Независимой проверкой является уравнение баланса мощностей: сумма мощностей источников равна сумме мощностей, расходуемых в резистивных элементах схемы. Т.к. элемент схемы с ЭДС может работать как в режиме источника, так и в режиме потребителя, соответствующее слагаемое в левой части уравнения берется с плюсом, если E и I совпадают по направлению (источник), и с минусом, если направления противоположны (потребитель).

Мощности элементов схемы с ЭДС:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 - E_3 I_3 = 60 * 1 * 1,093 + 80 * 0,911 - 70 * 0,506 = 104,04 \text{ Вт.}$$

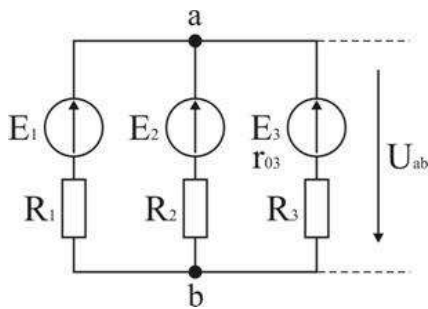
Мощности, расходуемые в резистивных элементах схемы:

$$I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 r_{03} + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 = 1,093^2 * 20 + 0,911^2 * 50 + 0,506^2 * 5 + 0,587^2 * 65 + 0,405^2 * 85 = 103,01 \text{ Вт}$$

$\square EI = \square P$ Баланс мощностей сошелся, следовательно задача решена верно.

Расчет цепи методом узлового напряжения

Задача 1. В схеме рис. 1.31 $E_1 = 60 \text{ В}$, $E_2 = 48 \text{ В}$, $E_3 = 6 \text{ В}$, $R_1 = 200 \text{ Ом}$, $R_2 = 100 \text{ Ом}$, $r_{03} = 0,5 \text{ Ом}$, $R_3 = 9,5 \text{ Ом}$. Определить токи в ветвях схемы.



Анализ и решение задачи 1

1. Вычисление узлового напряжения. Для схемы с двумя узлами напряжение между ними можно подсчитать по формуле

$$U_{ab} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2 + E_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3}, \text{ где } E_i - \text{ЭДС } i\text{-й ветви, } g_i - \text{ее проводимость} \left(g_i = \frac{1}{R_i} \right).$$

Подставляем числовые значения:

$$U_{ab} = \frac{60/200 + 48/100 + 6/(0,5 + 9,5)}{1/200 + 1/100 + 1/(0,5 + 9,5)} = 12 \text{ В.}$$

2. Расчет токов в ветвях

Токи определяем на основании закона Ома для ветви с источником: напряжение на зажимах источника равно его ЭДС минус падение напряжения на его внутреннем сопротивлении:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = \frac{60 - 12}{200} = 0,24 \text{ А;}$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U_{ab}}{R_2} = \frac{48 - 12}{100} = 0,36 \text{ А;}$$

$$I_3 = \frac{E_3 - U_{ab}}{r_{03} + R_3} = \frac{6 - 12}{0,5 + 9,5} = -0,6 \text{ А.}$$

Дополнительные вопросы к задаче 1

1. Как повлияет на порядок расчета изменение полярности ЭДС в одной из ветвей схемы?

В формуле узлового напряжения и при расчете тока в этой ветви данную ЭДС надо брать со знаком «минус».

2. В каких режимах работают источники схемы?

По результатам расчета $U_{ab} < E_1$, $U_{ab} < E_2$, т.е. эти элементы схемы работают источниками; т.к. $U_{ab} > E_3$, т.к. в третьей ветви направлен против E_3 и принятого перед началом расчета направления I_3 , т.е. этот элемент схемы работает в режиме потребления энергии.

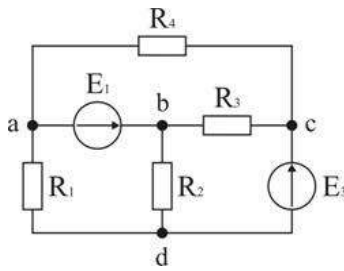
3. В каких режимах будут работать источники, если за счет изменения величины ЭДС E_3 увеличить узловое напряжение U_{ab} до 48 В?

Увеличением E_3 можно установить $U_{ab} = 48 \text{ В} = E_2$, при этом ток I_2 будет равен нулю (режим холостого хода), источник E_1 вырабатывает энергию, E_3 – потребляет. Ток в схеме и необходимую величину E_3 определим на основании второго закона Кирхгофа:

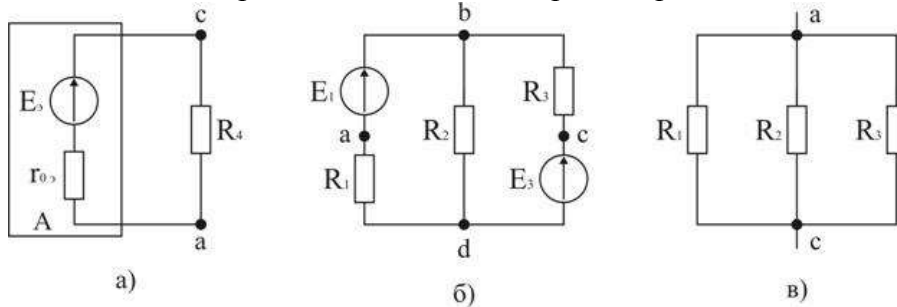
$$I_1 = -I_3 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = \frac{60 - 48}{200} = 0,06 \text{ А;}$$

$$E_3 = U_{ab} + I_3 (r_{03} + R_3) = 48 - 0,06 * 10 = 47,4 \text{ В.}$$

Расчет цепей методом эквивалентного генератора



Задача 2. В схеме рис. 1.32 $E_1 = 10$ В, $E_2 = 25$ В, $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 40$ Ом, $R_3 = 5$ Ом, $R_4 = 6,36$ Ом. Определить ток в ветви с резистором R_4 .



Анализ и решение задачи 2

1. Заменяем по отношению к ветви с резистором R_4 всю остальную схему эквивалентным генератором (активным двухполюсником) с ЭДС E_3 и внутренним сопротивлением r_{03} (рис. 1.33, а). ЭДС E_3 определяется по результатам расчета режима холостого хода генератора как напряжение между точками «а» и «с» схемы рис. 1.32 при разомкнутой ветви с резистором R_4 .

После размыкания ветви с R_4 получается схема с двумя узлами рис. 1.33, б. Узловое напряжение

$$U_{bd} = \frac{E_1 / R_1 + E_3 / R_3}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3} = \frac{10/20 + 25/5}{1/20 + 1/40 + 1/5} = 20 \text{ В.}$$

Ток в ветви с ЭДС E_3

$$I_3 = (E_3 - U_{bd}) / R_3 = (25 - 20) / 5 = 1 \text{ А.}$$

Для расчета напряжения между точками «а» и «с» в схеме рис. 1.33, б примем потенциал точки «а» равным нулю, тогда

$$\varphi_a = 0; \varphi_b = \varphi_a + E_1 = 10 \text{ В}; \varphi_c = \varphi_b + I_3 R_3 = 15 \text{ В}; E_3 = \varphi_c - \varphi_a = 15 \text{ В.}$$

2. Для расчета внутреннего сопротивления генератора в схеме рис. 1.33, б закорачиваются все ЭДС (рис. 1.33, в) и определяется сопротивление по отношению к точкам «а» и «с»:

$$\frac{1}{r_{03}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}; r_{03} = 3,64 \text{ Ом}$$

3. Ток в ветви с резистором R_4 (схема рис. 1.33, а)

$$I_4 = E_3 / (r_{03} + R_4) = 20 / (3,64 + 6,36) = 2 \text{ А.}$$

Дополнительные вопросы к задаче 2

1. Как экспериментально определить параметры эквивалентного генератора?

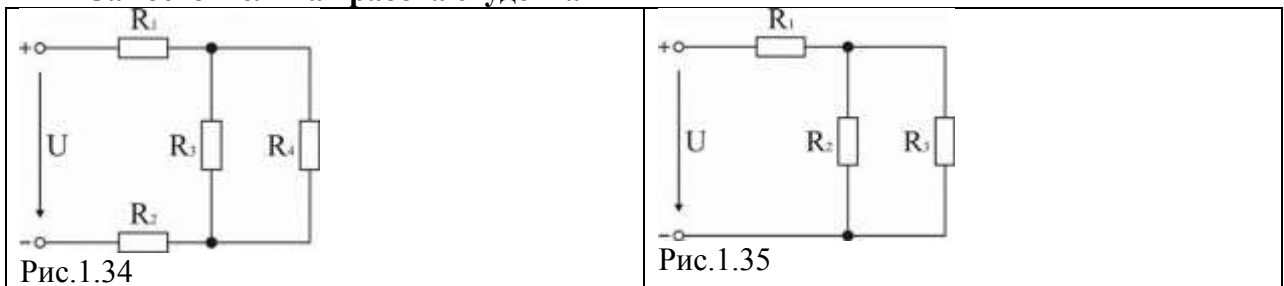
Исходя из эквивалентности схем рис. 1.32, а и рис. 1.33, а, E_3 и r_{03} можно рассчитать по результатам двух опытов. Разомкнув ветвь с R_4 , измеряем напряжение между точками «с» и «а» U_{xx} , равное ЭДС E_3 , (опыт холостого хода). Для определения r_{03} проводится (если это допустимо) опыт короткого замыкания: заданная ветвь замыкается накоротко и измеряется ток в ней (I_k). При этом $r_{03} = E_3 / I_k$.

2. Выбрать величину сопротивления резистора R_4 так, чтобы в нем выделялась максимально возможная мощность.

Для схемы рис. 1.33, а $P_4 = I_4^2 R_4 = \frac{E_s^2 R_4}{(r_{03} + R_4)^2}$. Максимум мощности P_4 определяется

решением уравнения $\frac{dP_4}{dR_4} = 0$: $R_{н.экстр} = r_{03}$, при этом $P_{4max} = \frac{E_s^2}{4r_{03}} = \frac{15^2}{4 \times 3,64} = 17,5$ Вт. Режим, когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника, называется согласованным, он часто используется в маломощных электронных устройствах, когда КПД установки ($\approx 50\%$) не имеет существенного значения, но важно передать в нагрузку максимальную мощность (усилители напряжения, маломощные усилители мощности, линии связи и т.д.). При этом все устройство по отношению к нагрузке представляется в виде эквивалентного генератора, параметры которого определяются по результатам анализа работы и расчета устройства.

Самостоятельная работа студента



Задача 1. В схеме (рис. 1.34) $R_1 = R_3 = 40$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R_4 = 30$ Ом, $I_3 = 5$ А. Вычислить напряжение источника U и ток I_4 . Ответ: 900 В; 6,67 А.

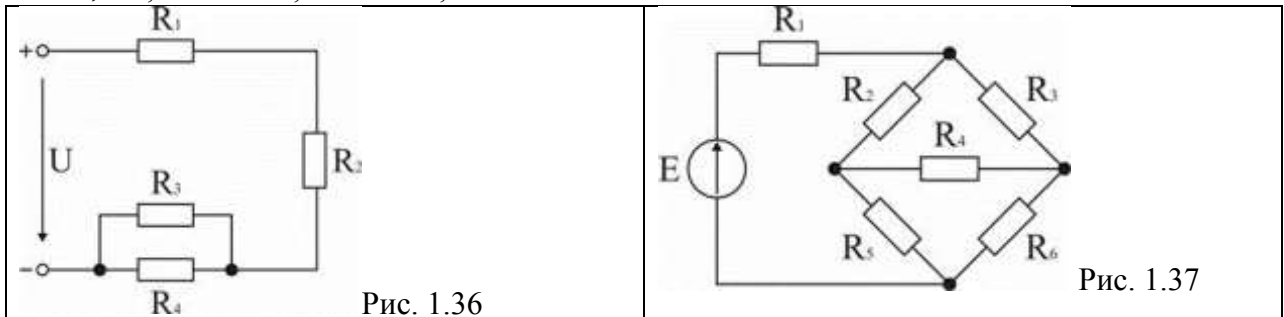
Задача 2. В схеме (рис. 1.34) напряжение $U = 65$ В, напряжение на зажимах резистора R_4 равно 20 В. Определить все токи в схеме, если $R_2 = 15$ Ом, $R_3 = 10$ Ом, $R_4 = 30$ Ом. Ответ: $I_1 = I_2 = 2$ А; $I_3 = 1,5$ А; $I_4 = 0,5$ А.

Задача 3. В схеме (рис. 1.35) – $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 5$ Ом, $R_3 = 10$ Ом, $I_3 = 2$ А. Найти напряжение источника U . Ответ: 80 В.

Задача 4. К схеме (рис. 1.35) приложено напряжение $U = 45$ В, при этом ток источника $I_1 = 1,25$ А. Сопротивления ветвей параллельной части схемы равны: $R_2 = 40$ Ом, $R_3 = 10$ Ом. Найти R_1 и токи I_2 , I_3 . Ответ: $R_1 = 28$ Ом, $I_2 = 0,25$ А, $I_3 = 1$ А.

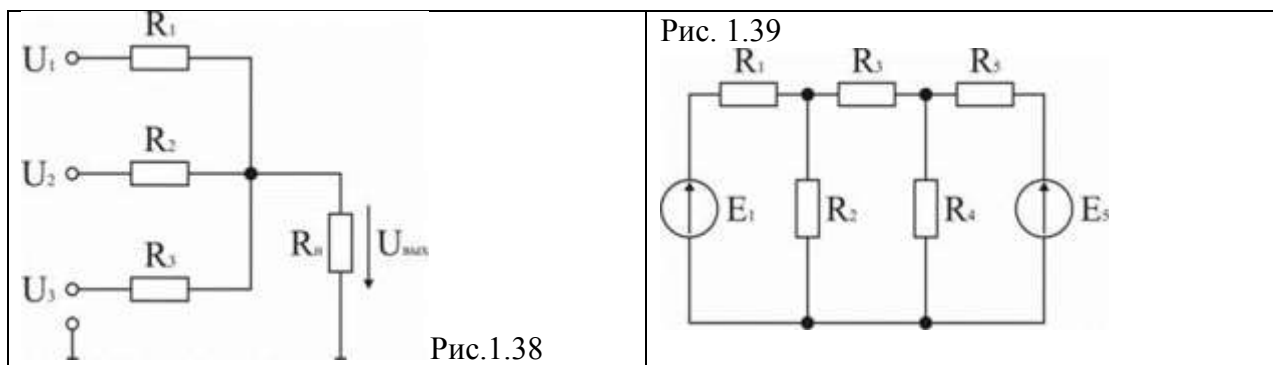
Задача 5. В схеме (рис. 1.36) – $R_1 = 50$ Ом, ток источника $I = 0,6$ А, ток в резисторе R_3 равен $I_3 = 0,4$ А, мощность, расходуемая в резисторе R_4 : $P_4 = 0,4$ Вт; напряжение на резисторе R_2 : $U_2 = 36$ В. Определить напряжение источника U . Ответ: $U = 68$ В.

Задача 6. Мощности, расходуемые в сопротивлениях схемы (рис. 1.36): $P_1 = 15$ Вт, $P_2 = 20$ Вт, $P_3 = 10,8$ Вт, $P_4 = 7,2$ Вт. Определить напряжения на участках схемы и токи в ее ветвях, если приложенное к ней напряжение $U = 106$ В. Ответ: $I = 0,5$ А; $I_3 = 0,3$ А; $I_4 = 0,2$ А; $U_1 = 30$ В; $U_2 = 40$ В; $U_3 = 36$ В.



Задача 7. Для схемы (рис. 1.37) дано: $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 4$ Ом, $R_3 = 10$ Ом, $R_4 = 60$ Ом, $R_5 = 22$ Ом, $R_6 = 5$ Ом, $E = 12$ В. Вычислить ток в диагонали моста R_4 , используя преобразование треугольника резисторов R_2 , R_3 , R_4 в эквивалентную звезду. Ответ: $I_4 = 0,077$ А.

Задача 8. В схеме (рис. 1.37) определить ток источника, используя преобразование звезды резисторов R_2 , R_4 , R_5 в эквивалентный треугольник, если $R_2 = 6$ Ом, $R_3 = 42$ Ом, $R_4 = 12$ Ом, $R_5 = 24$ Ом, $R_6 = 28$ Ом, $I_3 = 0,5$ А. Ответ: $I = 2,75$ А.



Задача 9. Для схемы (рис. 1.38) входные напряжения: $U_1 = +10 \text{ В}$, $U_2 = -15 \text{ В}$, $U_3 = +20 \text{ В}$, $R_1 = R_2 = R_3 = 500 \text{ Ом}$, $R_n = 1000 \text{ Ом}$. Методом узлового напряжения определить выходное напряжение $U_{\text{вых}}$. Ответ: $U_{\text{вых}} = 4,3 \text{ В}$.

Задача 10. В схеме (рис. 1.39) $E_1 = 120 \text{ В}$, $E_2 = 140 \text{ В}$, $R_1 = 70 \text{ Ом}$, $R_2 = 30 \text{ Ом}$, $R_3 = 135 \text{ Ом}$, $R_4 = 210 \text{ Ом}$, $R_5 = 140 \text{ Ом}$. Определить методом эквивалентного генератора величину и направление тока в резисторе R_3 . Ответ: $I_3 = 0,2 \text{ А}$.

1. Что называется электрическим сопротивлением?
2. Дать определение узлу, ветви и контуру цепи.

Практическая работа №6

Тема 3. Электромагнитизм

Исследование катушки со стальным сердечником

Цель работы: изучить явление электромагнитной индукции и самоиндукции в катушке, научиться определять величину индуктивности катушки.

Перечень используемого оборудования

1. Катушка индуктивности L_1 —1 шт.
2. Катушка индуктивности L_2 —1 шт.
3. Вольтметр магнитоэлектрической системы — 1 шт.
4. Постоянный магнит — 1 шт.
5. Стальной сердечник — 1 шт.
6. Лампа накаливания 36 В, 26 Вт — 2 шт.
7. Переменный резистор 5,0 Ом, 3А — 1 шт.
8. Источник постоянного тока (регулируемый) 120 В — 1 шт.

Теоретическая часть:

Согласно явлению электромагнитной индукции при перемещении катушки в магнитном поле в ней наводится электродвижущая сила. Аналогичное явление наблюдается, если перемещать постоянный магнит внутри катушки.

Явление самоиндукции заключается в том, что в катушке при включении ее в электрическую сеть возникают ЭДС самоиндукции и ток, направленный навстречу возрастающему току от внешнего источника питания. Наоборот, при выключении электрической сети в катушке возникает ток, совпадающий по направлению с убывающим током в цепи, т. е. поддерживающим его. Причем если в катушку вставить стальной сердечник, то действие ЭДС самоиндукции резко увеличивается. Электродвижущая сила определяется по формуле

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \omega$$

L - индуктивность катушки;

$\frac{di}{dt}$ - скорость изменения тока в цепи.

Одна из основных электрических характеристик катушки — величина ее индуктивности, которая в практических расчетах определяется по формуле (катушка без сердечника)

$$L = \frac{\mu_0 \omega^2 S}{l} \text{ Гн,}$$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ — магнитная постоянная, Гн/м;

ω — число витков катушки

S — сечение катушки, м^2

l — длина катушки,

Ход работы

1. Собрать схему по рис. 1. Изучить явление электромагнитной индукции, вводя в катушку постоянный магнит.

Повторить опыт с катушкой L_2 с большим числом витков. Вводя и выводя магнит с большей и меньшей скоростью, наблюдать отклонение стрелки вольтметра.

3. Записать результаты наблюдений.

4. Собрать схему по рис. 2 для изучения явления самоиндукции.



5. Включить схему и установить напряжение 60 В.

6. Объяснить, почему при включении цепи лампа L_1 загорается медленнее, чем лампа L_2 .

7. Повторить опыт, вставив в катушку стальной сердечник.

8. Записать результаты измерений.

9. Определить величину индуктивности катушек, использованных в работе. Данные и результаты записать в таблицу.

Катушки	Длина l , м	Сечение s , м^2	Число витков w	Индуктивность L , Гн
L_1				
L_2				

10. Ответить на вопросы.

1. В чем проявляется явление электромагнитной индукции в катушке при: перемещении внутри нее постоянного магнита?

2. Почему при введении постоянного магнита внутрь катушки стрелка вольтметра отклоняется в одну сторону, а при выведении из катушки — в другую?

3. Как определить направление индуктированной ЭДС в катушке?

4. Что называется самоиндукцией и как действует ЭДС самоиндукции в электрических цепях?

5. От каких величин зависит индуктивность катушки?

6. Как влияет наличие стального сердечника на величину индуктивности катушки и на самоиндукцию?

7. Почему при прохождении тока в катушке со стальным сердечником он нагревается?

11. Приступить, к отчету.

Практическая работа № 7

Тема 4. Переменный электрический ток

Исследование трехфазной системы переменного тока при соединении звездой и треугольником

Цель работы: ознакомиться с трехфазными системами переменного тока при соединении потребителей звездой и треугольником, при равномерной и неравномерной нагрузке фаз.

Перечень используемого оборудования

1. Амперметр переменного тока 0 — 3 А — 6 шт.

2. Вольтметр переменного тока 0 — 250 В — 1 шт.

3. Ламповый реостат из трех групп — 1 шт.

4. Соединительные провода.

Теоретическая часть:

От трехфазного генератора переменного тока обычно отходят четыре провода — три линейных А, В, С и один нейтральный, или нулевой, О (рис. 7).

Напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , действующие между соответствующими линейными проводами, обычно равными между собой по величине, сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол 120° носят название линейных, а напряжения U_A , U_B , U_C , действующие между соответствующим линейным и нейтральным проводами, называются фазными.

Отдельные однофазные приемники перед включением их в сеть распределяются на три группы примерно одинаковой мощности, которые нужно соединить между собой звездой или треугольником.

Для соединения трех однофазных приемников Z_A , Z_B , Z_C звездой (рис. 8) необходимо их концы х, у, z соединить в общую нейтральную или нулевую точку, а к оставшимся свободным началам А, В, С подвести электроэнергию линейными проводами от трехфазной сети. Нулевую точку присоединяют к четвертому, нейтральному уравнительному, или нулевому, проводу.

Если полные сопротивления фаз Z_A , Z_B , Z_C отдельных приемников равны между собой и углы сдвига фаз между фазными напряжениями и соответствующими им фазными токами одинаковы $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_\phi$, то такую нагрузку называют симметричной или равномерной. При симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе $I_0 = 0$, что позволяет трехфазную линию выполнить трехпроводной. Если указанные равенства не соблюдаются, т. е. к трехфазной системе присоединены три различных по величине сопротивления или углу сдвига фаз, то такая нагрузка называется несимметричной или неравномерной. При этом в каждой фазе и в каждом линейном проводе потекут различные по величине и углу сдвига фаз токи, симметрия будет нарушена и в нейтральном проводе возникнет ток I_0 , равный геометрической сумме токов трех фаз.

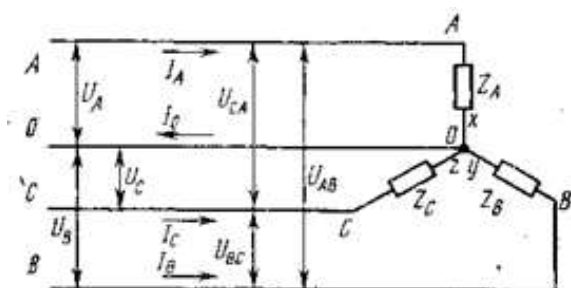


Рис. 8. Схема соединения приемников электроэнергии, включенных в звезду по четырехпроводной схеме с нулевым проводом

При несимметричном режиме и наличии нейтрального провода приемники Z_A , Z_B , Z_C находятся под одинаковыми по величине фазными напряжениями $U_A = U_B = U_C = U_\phi$, при обрыве нейтрального (нулевого) провода нормальный режим работы трехфазной установки нарушается: фазные токи изменяются и устанавливаются такими, чтобы их сумма стала равной нулю. Это приводит к искажению симметрии фазных напряжений, в результате чего приемники оказываются под напряжениями, отличающимися от номинального значения фазного напряжения.

При соединении приемников звездой токи в подводящих проводах — линейные токи I_A , I_B , I_C — становятся одновременно и токами приемников соответствующих фаз, т. е. фазными токами I_ϕ . Поэтому при соединении приемников звездой справедливо равенство $I_l = I_\phi$. Между линейными и фазными напряжениями существует зависимость $U_l = \sqrt{3}U_\phi$.

Это позволяет для трехфазной четырехпроводной системы, например для напряжения 380/ 220 В, присоединять к сети одновременно как трехфазные приемники на 380 В, так и однофазные на 220 В.

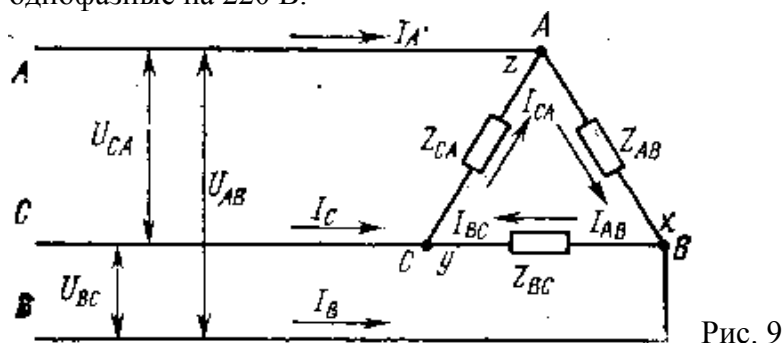


Рис. 9

Схема соединения приемников электроэнергии, включенных в треугольник

Для соединения трех однофазных приемников Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} треугольником (рис. 9) надо конец первого приемника соединить с началом второго, конец у второго — с началом С третьего, конец третьего — с началом первого приемника, а к узлам полученного треугольника подвести линейными проводами энергию от трехфазной сети.

При соединении треугольником каждый приемник включен между подводящими проводами и находится под линейным напряжением $U_{\text{л}}$, которое является одновременно фазным напряжением. Поэтому при соединении треугольником справедливо равенство $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{ф}} = U_{\text{л}}$.

При симметричной нагрузке фазные токи всех фаз одинаковы по величине $I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_{\text{ф}}$ и сдвинуты по отношению к своим фазным напряжениям на одинаковые углы: $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_{\text{ф}}$. Все линейные токи равны между собой и превышают значения фазных токов в $\sqrt{3}$ раз, т. е. $I_A = I_B = I_C = I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}$.

При несимметричном режиме, когда изменяется нагрузка в одной из фаз, происходит одновременное изменение соответствующих фазного и двух линейных токов, но это не влияет на величины фазных напряжений и токов других фаз, а также на величину третьего линейного тока.

Ход работы

1. Собрать схему по рис. 10 (соединение звездой) и дать проверить ее преподавателю. В каждую фазу включить по три лампы одинаковой мощности.

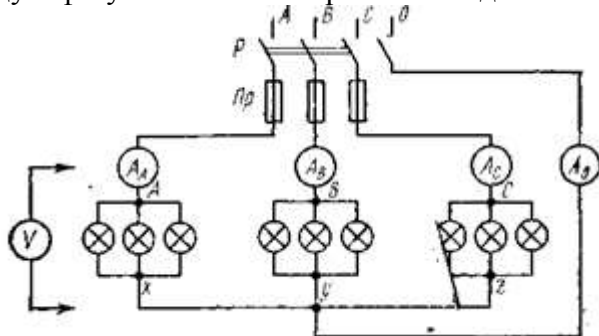


Рис. 10. Схема для исследования цепи трехфазного тока при соединении приемников звездой по четырехпроводной схеме с нулевым проводом

2. Включить схему в электрическую цепь.
3. Снять показания приборов при равномерной нагрузке фаз (измерение линейных и фазных напряжений производить одним переносным вольтметром). Записать результаты измерений в табл. 1. Проверите соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами.

Таблица №1

Схема соединения	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_A	U_B	U_C	I_0	I_A	I_B	I_C
	В	В	В	В	В	В	мА	мА	мА	мА
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Равномерная с нулевым проводом										
Равномерная без нулевого провода							—			
Неравномерная с нулевым проводом										
Неравномерная без нулевого провода										

4. Включить в схему рис. 11 четвертый (нулевой) провод и снять показания для случая «Равномерная нагрузка с нулевым проводом» (табл. 1, п. 2),
5. Создать неравномерную нагрузку, отключить нулевой провод, снять показания приборов (табл. 1, п. 3).
6. При неравномерной нагрузке включить нулевой провод и снять показания приборов (табл. 1, п. 4). Неравномерная нагрузка создается неравным количеством ламп включенных- в каждую фазу (например, в фазе А включены три лампы, в фазе В — две, в фазе С — одна).
7. Сделать вывод о влиянии нулевого провода на работу трехфазной системы при равномерной и неравномерной нагрузках фаз.
8. Собрать схему по рис.10 (соединение треугольником) и дать проверить ее преподавателю.
9. Включить схему в электрическую цепь.
10. Снять показания приборов при равномерной нагрузке фаз (измерение линейных и фазных напряжений производить одним переносным вольтметром). Записать результаты измерений в табл. 2. Проверить соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами.

Таблица 2

Режим нагрузки	Токи нагрузки, А						Напряжение, В		
	Линейные			Фазные			U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
	I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}			
1. Равномерная									
2. Неравномерная									

11. Изменить нагрузку фаз и снять показания приборов при неравномерной нагрузке фаз. Результаты измерений записать в п. 2 табл. 2.
12. Сравнить схемы включения в звезду и треугольник при равномерной и неравномерной нагрузках,
13. Ответить на вопросы
 1. Как соединить три однофазных приемника звездой?
 2. Для чего применяют нулевой провод и в каких случаях можно обойтись без него?
 3. Какой режим работы трехфазной цепи называют равномерным или симметричным?
 4. Как соединить три однофазных приемника треугольником?
 5. Какие существуют зависимости между линейными и фазными токами и напряжениями при соединении приемников звездой и треугольником?
 6. Какой должна быть схема соединений, чтобы в одну трехфазную сеть включить лампы накаливания и трехфазный электродвигатель?
13. Сделать отчет.

Практическая работа № 8

Тема 5. Электрические измерения и электроизмерительные приборы

Ознакомление с электроизмерительными приборами.

Цель работы: Изучение устройства электроизмерительных приборов, условий эксплуатации и других характеристиках стрелочных электроизмерительных приборов.

Перечень используемого оборудования

Стрелочные измерительные приборы

Теоретическая часть:

Контроль работы электрооборудования осуществляется с помощью разнообразных электроизмерительных приборов. Наиболее распространенными электроизмерительными приборами являются приборы непосредственного отсчета. По виду отсчетного устройства различают аналоговые (стрелочные) и цифровые измерительные приборы.

ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

У многих приборов есть общие по назначению части. Это корпус, зажимы, шкала, указательная стрелка, ограничители, винт корректора (рис.1). На корпусе некоторых приборов расположены переключатель пределов измерения и арретир. Внутри каждого прибора находится его главная часть — измерительный механизм. Отдельные приборы, например омметры, снабжены камерой, в которую помещают источник электропитания (гальванический элемент). У интегрирующих приборов, например у электросчетчиков, в отличие от показывающих приборов отсутствует указательная стрелка, но у них есть счетный механизм.

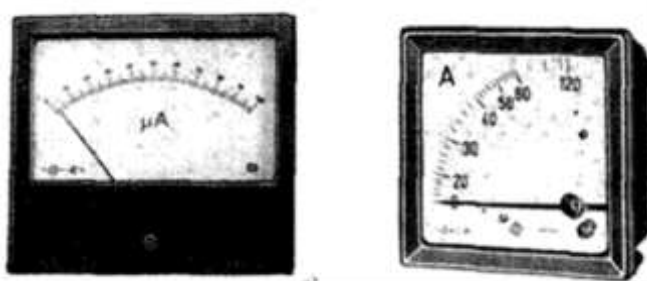


рис.1

Корпус служит для защиты измерительного механизма от механических повреждений, от пыли. В зависимости от способа защиты внутреннего устройства прибора от внешних воздействий корпуса приборов могут быть обыкновенные, водо-, газо- и пылезащищенные, герметические и взрывобезопасные. К зажимам прибора присоединяют провода для включения его в электрическую цепь.

По шкале прибора отсчитывают значение измеряемой величины.

Внешний вид шкалы и нанесенные на нее условные обозначения зависят от назначения и конструкции прибора. На шкалу наносят черточки (вертикальные, горизонтальные, наклонные), называемые о т м е т к а м и. Отметку шкалы, соответствующую нулевому значению измеряемой величины, называют нулевой. Интервал между двумя соседними отметками носит название деления шкалы, а значение электрической величины, приходящееся на одно деление шкалы, — цены деления. Значение измеряемой величины, соответствующее начальной отметке шкалы называют начальным значением шкалы, а значение измеряемой величины, соответствующее конечной отметке шкалы — конечным значением. Разность между конечным и начальным значениями измеряемой величины является рабочим диапазоном измерений. Шкалы бывают равномерными (все деления шкалы одинаковые) и неравномерными (деления шкалы неодинаковы). На шкале многих приборов параллельно отметкам расположена зеркальная полоса, что позволяет уменьшить ошибки при снятии показаний. Глаз, стрелка и ее отражение в зеркальной полосе должны находиться на одной линии.

Указательная стрелка нужна для отсчета по шкале значения измеряемой величины. Стрелку делают из алюминия или его сплавов. Стрелка соединена с измерительным механизмом, под действием которого она отклоняется (перемещается). Чтобы при движении стрелка не касалась корпуса (и в результате не погнулась), на шкале есть амортизирующие ограничители.

С помощью винта корректора непосредственно перед измерением стрелку устанавливают точно против нулевой отметки шкалы. Для этого винт корректора слегка поворачивают отверткой.

Переключатели пределов измерения установлены у тех приборов, которые служат для измерения электрических величин в нескольких пределах. В этом случае перед включением прибора переключатель устанавливают так, чтобы имеющаяся на нем точка (пометка) оказалась против требуемого предела измерения. Переносные приборы снабжены арретиром, с помощью которого закрепляют в неподвижном положении измерительный механизм, чтобы при транспортировке прибора он не повредился. На лицевой стороне стрелочных приборов изображены условные обозначения, определяющие классификационную группу прибора. Они позволяют правильно выбрать приборы и дают некоторые указания по их эксплуатации.

В цепях постоянного тока для измерений токов и напряжений применяются в основном приборы магнитоэлектрической системы. Принцип действия таких приборов основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и измеряемого тока, протекающего по катушке. Угол поворота стрелки α прямо пропорционален измеряемому току I : $\alpha = K \cdot I$. Шкалы магнитоэлектрических приборов равномерные.

В измерительных механизмах электромагнитной системы, применяемых для измерений в цепях переменного и постоянного тока, вращающий момент обусловлен действием магнитного поля измеряемого тока в неподвижной катушке прибора на подвижный ферромагнитный якорь. Угол поворота стрелки α здесь пропорционален квадрату тока: $\alpha = K \cdot I^2$. Поэтому шкала электромагнитных приборов обычно неравномерная, что является недостатком этих приборов. Начальная часть шкалы не используется для измерений. Для измерений токов и напряжений в цепях переменного тока применяются также приборы выпрямительной системы. Такие приборы содержат выпрямительный преобразователь и магнитоэлектрический измерительный механизм. Они имеют более линейную шкалу, чем приборы электромагнитной системы и достаточно широкий частотный диапазон.

Для практического использования стрелочного измерительного прибора необходимо знать его предел измерений (номинальное значение) и цену деления (постоянную) прибора. **Предел измерений** – это наибольшее значение электрической величины, которое может быть измерено данным прибором. Это значение обычно указано на лицевой стороне прибора. Один и тот же прибор может иметь несколько пределов измерений. Ценой деления прибора называется значение измеряемой величины, соответствующее одному делению шкалы прибора. Цена деления прибора – C легко определяется как отношение предела измерений $A_{ном}$ к числу делений шкалы N :

$$C = A_{ном} / N.$$

На лицевой стороне стрелочных прибора указывается класс точности, который определяет приведенную относительную погрешность прибора $\gamma_{пр}$.

В табл. 1 приведены некоторые условные обозначения, приводимые на лицевых панелях стрелочных измерительных приборов, определяющие их свойства и условия эксплуатации.

При проведении измерений в электрических цепях широкое применение получили цифровые измерительные приборы, например мультиметры – комбинированные цифровые измерительные приборы, позволяющие измерять постоянное и переменное напряжение, постоянный и переменный ток, сопротивления, проверять диоды и транзисторы. Представление результата измерения происходит на цифровом отсчетном устройстве в виде обычных удобных для считывания десятичных чисел. Наибольшее распространение в цифровых отсчетных устройствах мультиметров получили жидкокристаллические и светодиодные индикаторы. В лаборатор-

ном стенде используются цифровые приборы для измерения постоянных и переменных токов, а также цифровой измеритель мощности. Для переключения режима работы цифровых амперметров стенда (РА1, РА2, РА3 и РА4) на его передней панели установлен тумблер, который для измерения постоянного тока следует установить в позицию «=», для измерения действующих значений переменных токов – в позицию «~». Для измерения постоянного тока входная клемма (+) цифрового амперметра выделена красным цветом.

Цифровой измеритель мощности предназначен для измерения параметров электрической цепи:

- действующего значения напряжения U (True RMS) в диапазоне $0 \dots 30$ В;
- действующего значения тока I (True RMS) в диапазоне $0 \dots 300$ мА;
- активной мощности P в диапазоне $0 \dots 600$ Вт;
- частоты f в диапазоне $35 \dots 400$ Гц;
- $\cos \phi$;
- угла сдвига фаз ϕ (F_i) между током и напряжением.

Таблица 1

	прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой
	Логометр магнитоэлектрический
	Прибор электромагнитный
	Логометр электромагнитный
	Прибор электродинамический
	Прибор ферродинамический
	Логометр электродинамический
	Логометр ферродинамический
	Прибор индукционный
	Прибор тепловой с нагреваемой нитью
	Прибор биметаллический
	Прибор вибрационный
	Прибор электростатический
	Прибор астатический
	Прибор или вспомогательная часть под высоким напряжением
	Прибор применять при вертикальном положении шкалы

	Прибор применять при горизонтальном положении
	Прибор применять при наклонном положении шкалы относительно горизонтальной плоскости, например под углом 60°
	Термопреобразователь неизолированный
	Термопреобразователь изолированный
	Преобразователь электронный в измерительной цепи
	Преобразователь электронный во вспомогательной цепи
	Экран электростатический
	Экран магнитный
	Магнитная индукция, выраженная в миллитеслах (2 мТ), вызывающая изменение показаний, соответствующее обозначению класса точности
	Электрическое поле, выраженное в киловольтах на метр (10 к В/м), вызывающее изменение показаний, соответствующее обозначению класса точности
	Корректор
	Зажим для заземления
	Напряжение испытательное 500 В
	Напряжение испытательное выше 500 В (2 кВ)
	Прибор не подлежит испытанию прочности изоляции
	Обозначение класса точности (1,5) при нормировании пределов допускаемых погрешностей в процентах от нормируемого значения, определенного в единицах измеряемой величины, за исключением случая» когда нормируемое значение равно длине шкалы
	Обозначение класса точности (1,0) при нормировании пределов допускаемых погрешностей в процентах от нормируемого значения, когда нормируемое значение равно длине шкалы
	Обозначение класса точности (0,2) при нормировании пределов допускаемых погрешностей в процентах от действительного значения
	Ссылка на соответствующий документ к прибору
	Обозначение, указывающее на ориентирование прибора во внешнем магнитном поле
	Ток постоянный

	Ток переменный однофазный
	Ток постоянный и переменный
	Ток трехфазный переменный. Общее обозначение

Прибор содержит:

- клеммы подачи входного измеряемого сигнала (генератора): клемму «Вх» и общую клемму, клеммы подключения потребителя (нагрузки): клемму «Вых» и общую клемму. Шунт для измерения тока нагрузки подключен между клеммами «Вх» и «Вых»;
- жидкокристаллический четырехстрочный индикатор для вывода информации;
- кнопку «f/cosφ/φ» изменения вывода информации в четвертой строке индикатора (соответственно, частоты, коэффициента мощности cosφ или угла сдвига фаз φ между током и напряжением).

С задней стороны прибора установлены розетка для подключения питания сети и колодка предохранителя.

С помощью кнопки «f/cosφ/φ» можно изменять вывод информации в четвертой строке индикатора. Для вывода требуемого параметра в четвертой строке индикатора кнопку необходимо нажать на 1...2 секунды.

Изменения схемы подключения прибора и лабораторной установки выполнять при выключенном питании прибора. В противном случае возможны изменения показаний прибора, а также возникновение нарушений в работе индикатора прибора.

Ход работы.

1. Изучение паспортных характеристик стрелочных электроизмерительных приборов. Для этого внимательно рассмотреть лицевые панели стрелочных амперметров и заполнить табл. 2.

Таблица 2

Характеристика электроизмерительного прибора		
Наименование прибора	Вольтметр №1	Вольтметр №2
Система измерительного механизма		
Предел измерения		
Цена деления		
Минимальное значение измеряемой величины		
Класс точности		
Допустимая максимальная абсолютная погрешность		
Род тока		
Нормальное положение шкалы		
Прочие характеристики		

4. Содержание отчета

- а) наименование работы и цель работы;
- б) технические данные измерительных приборов;
- г) результаты измерений;
- д) ответить на вопросы

1. Что позволяют правильно выбрать приборы и дают некоторые указания по их эксплуатации.
2. Что такое предел измерения?
3. Как определяется цена деления прибора?

4. Что характеризует класс точности прибора?
5. В какой части шкалы прибора измерение точнее и почему?

Практическая работа № 9

Тема 5. Электрические измерения и электроизмерительные приборы

Измерение сопротивлений.

Цель работы.

Ознакомить студентов с различными, наиболее часто применяемыми методами измерения сопротивлений.

Перечень используемого оборудования

1. Источник питания постоянного тока с регулируемым напряжением и коммутационной аппаратурой.
2. Амперметр магнитоэлектрической системы с пределом измерения тока до 3—5 А с известным сопротивлением
3. Вольтметр магнитоэлектрической системы с пределом измерения 50—75 В с известным сопротивлением ,
4. Три резистора на ток 1,5 А и 40—50 Ом каждый.
5. Многопредельный омметр с нижним пределом измерения сопротивления 1 кОм.
6. Мегомметр на 500 В с двумя шкалами измерения сопротивлений — кОм и МОм.
7. Электродвигатель трехфазного тока любой мощности—1 шт.
8. Провода соединительные многожильные.

Теоретическая часть:

Измерение сопротивлений играет важную роль в электротехнике. Путем измерения сопротивления отдельных участков электрических цепей можно не только сделать вывод об исправности или неисправности аппаратуры, но и точно установить место и характер неисправности.

Наиболее часто для измерения сопротивления применяются методы амперметра и вольтметра; омметра; мегомметра.

Сопротивление участка цепи можно определить с помощью амперметра и вольтметра. Для этого амперметр включают последовательно, а вольтметр— параллельно к нему. Если сопротивление, которое нужно измерить меньше сопротивления вольтметра, то приборы включают по схеме на рис. 34. Если же измеряемое сопротивление больше сопротивления амперметра, то приборы включают по схеме на рис. 35. В первом случае измеряют малые сопротивления, а во втором — большие.

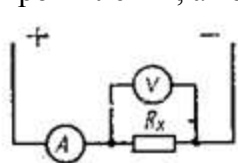


Рис. 34. Схема для измерения сопротивления при $R_x < R_v$

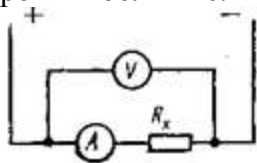


Рис. 35. Схема для измерения сопротивления при $R_x > R_A$

Величина сопротивления может быть определена и с помощью омметра. Омметр — прибор магнитоэлектрической системы, последовательно с которым включен источник постоянного тока (сухой гальванический элемент). Шкала: омметра градуируется непосредственно в омах, поэтому нуль ее находится справа, что соответствует наименьшему сопротивлению и наибольшему току. Цифры на шкале, показывающие омы, возрастают справа налево. Приступая к измерениям с помощью омметра, стрелку прибора надо установить на нуль, пользуясь магнитным шунтом. Вызвано это тем, что в процессе работы напряжение источника электрической энергии, имеющегося в омметре, изменится и градуировка прибора нарушится. Магнитный шунт представляет собой стальную пластинку, которую можно с помощью винта приближать к полюсным наконечникам постоянного магнита прибора или удалять от них. Величина магнитной индукции поля постоянного магнита изменится и градуировка прибора восстановится.

Для измерения сопротивления изоляции отдельных частей электротехнических установок по отношению к «земле» и друг к другу служат мегомметры. Измерение сопротивления изоляции должно производиться напряжением, по возможности равным рабочему, но не меньшим 100 В. Мегомметры состоят из источника напряжения (генератора постоянного тока) и измерительного прибора. Для измерения сопротивления зажим Л мегомметра присоединяют к одному проводу линии, а зажим З — к другому проводу или к «земле». Вращая ручку мегомметра с частотой 120 об/мин, определяют по шкале сопротивление изоляции.

Ход работы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы и собрать схему по рис. 34 или 35.
2. Дать проверить схему преподавателю.
3. Подключая в схему различные резисторы, замерить напряжение и ток в цепи. Данные замеров записать в табл. 1.

Измеряемое сопротивление	Замеры	U в	I , А	$R'_{\text{хОм}}$	$R_{\text{хср}}, \text{Ом}$	$R_{\text{х}}, \text{Ом}$
R_1	1					
	2					
R_2	1					
	2					
R_3	1					
	2					

При проведении измерений по схеме на рис. 35 амперметр покажет величину тока, проходящего через искомое сопротивление $R_{\text{х}}$, а вольтметр будет учитывать кроме напряжения на этом сопротивлении напряжение, приходящееся на амперметр. Поэтому истинное значение сопротивления $R_{\text{х}}$ определяется по формуле $R_{\text{х}} = \frac{U - U_{\text{А}}}{I} = \frac{U - I R_{\text{А}}}{I} = \frac{U}{I} - R_{\text{А}}$, где $U_{\text{А}}$ — напряжение, приходящееся на амперметр, а $R_{\text{А}}$ — сопротивление амперметра.

Если $R_{\text{А}}$ мало по сравнению с $R_{\text{х}}$, последнее можно определить по приближенной формуле $R_{\text{х}}' = \frac{U}{I}$

4. Включив цепь, измерить установленные резисторы омметром и записать данные в табл. 1 (графа $R_{\text{х}}, \text{Ом}$).
5. По данным замеров определить методом амперметра и вольтметра величины сопротивления резисторов. Записать данные в табл. 1 (графа $R'_{\text{хОм}}$).
6. Вычислить среднее значение сопротивления для каждого резистора и записать данные расчетов в табл. 1 (графа $R_{\text{хср}}, \text{Ом}$).
7. Убедиться в приблизительном совпадении $R'_{\text{х}}$, $R_{\text{хср}}$, $R_{\text{х}}$.

Ниже приводятся правила выполнения измерений с помощью мегомметра М1101М:

- 1) проверить исправность прибора при разомкнутых зажимах. При вращении рукоятки стрелка должна установиться на, отметке « ∞ » шкалы мегомметра, если переключатель стоит в положении «М Ω », или на отметке «0» той же шкалы, если переключатель стоит в положении «К Ω »;
- 2) переключатель установить в положение «М Ω » или «К Ω »;
- 3) к зажимам «Линия» и «Земля» подсоединить элемент, сопротивление которого надо измерить;
- 4) равномерно с частотой 2 об/с вращать рукоятку генератора мегомметра и производить отсчет по его шкале;
- 5) для измерения сопротивления изоляции между проводами трехфазной линии и между каждым фазным проводом «землей» потребители электрической энергии должны быть отключены. Измерения проводят согласно пунктам 3 и 4 правил. Результаты измерений записать в табл. 2;

Фаза-земля	$R_{\text{изм}}, \text{МОм}$	фаза — фаза	$R_{\text{изм}}, \text{МОм}$
------------	------------------------------	-------------	------------------------------

А — земля		А—В	
В — земля		В—С	
С — земля		С—А	

б) для измерения изоляции всех обмоток статора трехфазного электродвигателя переменного тока необходимо разомкнуть обмотки. Результаты измерений записать в табл.3

Таблица3

Фаза — корпус	$R_{\text{изм}}, \text{МОм}$	фаза — фаза	$R_{\text{изм}}, \text{МОм}$
С ₁ — корпус		А—В	
С ₂ — корпус		А—С	
С ₃ — корпус		С—А	

4. Ответить на вопросы

1. В чем сущность метода измерения сопротивления с помощью амперметра и вольтметра?
2. Какие существуют схемы включения амперметра и вольтметра для измерения сопротивления и когда какая схема применяется?
3. Какой закон электротехники лежит в основе метода измерения сопротивления с помощью амперметра и вольтметра?
4. Какие условия необходимо соблюдать для повышения точности измерения?
5. Какой прибор (какого типа и класса точности) применяется в омметре?
6. Каково устройство омметра?
7. Каково устройство мегомметра?
8. Для чего измеряют сопротивление изоляции проводов?
9. Чему должно быть равно сопротивление изоляции между жимами различных обмоток, а также между жимами любой обмотки и корпусом, если изоляция не повреждена?
10. Влияет ли на точность измерения изменение частоты вращения рукоятки мегомметра в пределах от 60 до 180 об /мин?

Сделать отчет

Практическая работа № 10.

Тема 6. Трансформаторы

Испытание трехфазного трансформатора.

Цель работы: изучить устройство и основные характеристики трехфазного трансформатора, определить коэффициент трансформации, изучить работу трансформатора при симметричной нагрузке.

Перечень используемого оборудования

Амперметр переменного тока — 6 шт. Вольтметр переменного тока — 2 шт. Ваттметр трехфазный — 2 шт. Трансформатор трехфазный — 1 шт. Резистор переменный — 3 шт. Автомат трехполюсный — 3 шт.

Теоретическая часть:

Основное применение имеют масляные трансформаторы (МТ), например, ТМБГ400/10-VI: трехфазный, масляный, с витым сердечником, герметичный, 400 кВА, 10 кВ, группа габаритных размеров VI.

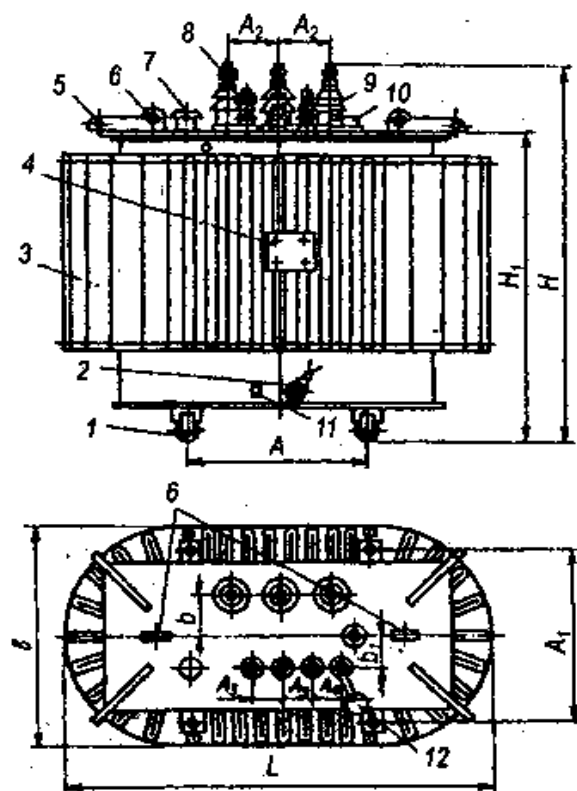


Рис. 95. Силовой масляный трансформатор: 1, 5, 6 — транспортные узлы; 2 — сливная пробка; 3 бак; 4 — паспортная таблица; 7 патрубок

Масло отбирает тепло из обмоток быстрее, чем воздух. Поэтому обмотки масляного трансформатора намотаны более тонким проводом. Это значительно уменьшает его габариты.

Однако масло загорается при нагревании больше $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, а пары масла в смеси с воздухом взрываются. Необходим постоянный контроль уровня масла в баке и его температуры (или давления). Со временем параметры и состав масла меняются. Его необходимо периодически проверять и менять.

Активная часть МТ состоит из обмоток высокого и низкого напряжения, сердечника из стали с большой магнитной проводимостью. Она помещается в масляный бак, который герметично закрывается крышкой.

На крышке установлены выводы обмоток высокого и низкого напряжения, привод переключателя числа витков обмотки ВН, а также патрубок с фильтром для заполнения маслом (рис. 95).

В нижней части бака расположены клемма для заземления и сливной патрубок с пробкой. Смотровое стекло, на баке позволяет контролировать уровень масла, термометр — температуру (рис. 95).

Сухие силовые трансформаторы дороже, занимают больше места, боятся влаги. Поэтому их устанавливают только там, где работают люди и где нельзя установить масляный трансформатор.

Трехфазные трансформаторы преобразуют электрическую энергию в трехфазных цепях с одним соотношением линейных напряжений и токов в электрическую энергию с другим соотношением этих же величин. В таких трансформаторах есть две трехфазные обмотки — высшего напряжения ВН и низшего напряжения НН, в каждую из которых входят три фазные обмотки или фазы. Следовательно, трехфазный трансформатор имеет шесть независимых фазных обмоток и 12 выводов с соответствующими зажимами, причем начальные выводы фаз обмотки высшего напряжения обозначают А, В, С, конечные выводы — Х, У, Z, а для фаз обмоток низшего напряжения применяют аналогичные обозначения — а, б, с и х, у, z. Фазные обмотки высшего и низшего напряжений соединяют

звездой или треугольником, причем при соединении их звездой нейтральные точки обозначают О и о.

Фазный коэффициент трансформации определяется отношением фазных, напряжений при холостом ходе: $K_\phi = \frac{U_{\phi \text{ вн}}}{U_{\phi \text{ вн}}}$

Линейный коэффициент трансформации определяется по аналогичной формуле

$$K_L = \frac{U_{L \text{ вн}}}{U_{L \text{ вн}}}$$

Если соединение фазных обмоток выполнено по схеме Y / Y или Δ/Δ, то оба коэффициента одинаковы, т. е. $K_L = K_\phi$

При соединении по схеме Y/Δ $K_L = \sqrt{3}K_\phi$, а по схеме Δ/ Y

$$K_L = \frac{K_\phi}{\sqrt{3}}$$

Каждому типу соединения фазных обмоток соответствует определенный угол сдвига фаз между соответствующими высшими и низшими напряжениями, отсчитываемый в направлении вращения часовой стрелки от вектора высшего напряжения к вектору низшего напряжения. Величина этого угла зависит от направления навивки обмоток, маркировки их выводов и принятого типа соединения фазных обмоток. При одном и том же направлении навивки, одинаковой маркировке выводов и соединении фазных обмоток по схеме Y / Y угол сдвига фаз между векторами линейных напряжений U_{ab} и U_{AB} равен нулю и такой трансформатор относится к группе О (рис. 43).

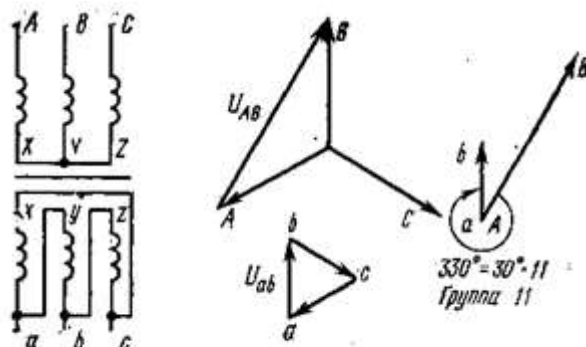


Рис. 44. Схема трехфазного трансформатора Y/Δ

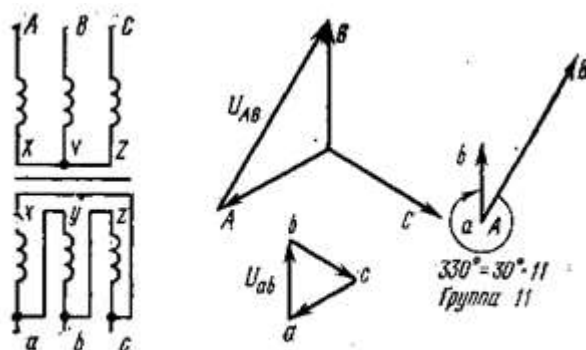


Рис. 44. Схема трехфазного трансформатора Y/Δ

Номинальная мощность трехфазного трансформатора $S = 3U_\phi \times I_\phi$, а активная мощность $P_n = 3U_{\phi n} \times I_{\phi n}$ или $P_n = \sqrt{3}U_{Ln} \times I_{Ln} \cos \varphi_n$

Коэффициент мощности трансформатора $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_{L1}I_{L1}}$, где P_1 — активная мощность со стороны первичной обмотки.

Загрузка трехфазного трансформатора определяется по формуле

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2n}}$$

где β — коэффициент загрузки, а I_2 и $I_{2н}$ — соответственно ток нагрузки вторичной обмотки трансформатора и ее номинальный ток.

Внешняя характеристика трансформатора — это зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки U_2 от тока нагрузки I_2 . Характеристика снимается обычно при значениях $I_2 = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25) I_{2н}$

Ход работы

1. Ознакомиться с устройством и паспортными данными . трехфазного трансформатора и записать их; номинальная мощность S_n , кВ·А; номинальное первичное напряжение $U_{н1}$ номинальное вторичное напряжение
2. Соединить фазные обмотки трансформатора по схеме Y / Y, собрать схему по рис. 45 и дать проверить ее преподавателю.

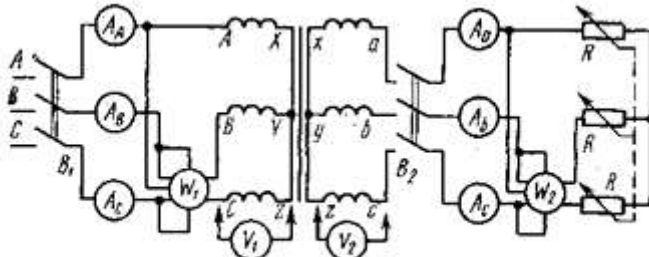


Рис. 45. Схема испытаний трехфазного трансформатора

4. Разомкнуть автомат B_2 , включить трансформатор в сеть и записать показания вольтметров в табл. 1.

№	Схема соединения фаз обмоток	Напряжение, В					
		U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
1	Y/Y						
2	Y/Δ						
3	Δ/Y						
4	Δ/Δ						

4. При выключенном автомате B_1 поочередно соединять фазные обмотки по схемам Y/Δ, Δ/Y и Δ/Δ, после включения этого же автомата сделать отсчеты по вольтметрам и результаты записать в табл. 1.
5. Вычислить коэффициенты трансформации трехфазного трансформатора (фазного K_f и линейного K_L) при соединении фазных обмоток по схемам Y/Y, Y/Δ, Δ/Y и Δ/Δ проверить справедливость формул (1)~(5). Результаты расчетов записать в табл. 2.

№	Схема соединения фаз обмоток	K_f	$U_{лВН}, В$	$U_{лНН}, В$	K_L	
					по опыту	по формуле
1	Y/Y					
2	Y/Δ					
3	Δ/Y					
4	Δ/Δ					

6. Собрать схему по рис. 45, включить автомат B_2 и снять внешнюю характеристику трансформатора: $U_2 = f(I_2)$
Результаты измерений и расчетов записать в табл. 3.

№	Значение коэффициента загрузки β	Измерено						Вычислено	
		U_{A_1} , В	I_{A_1} , А	P_1 , Вт	U_{A_2} , В	I_{A_2} , А	P_2 , Вт	$\cos \varphi_1$	$\cos \varphi_2$
1	0								
2	0,25								
3	0,5								
4	0,75								
5	1								
6	1,25								

7. Составить отчет по работе

Практическая работа № 11

Тема 7. Электрические машины

Ознакомление с устройством асинхронных машин.

Цель работы: Изучение основных частей асинхронных машин. Определение начал и концов фазных обмоток трехфазного асинхронного двигателя.

Перечень используемого оборудования

Асинхронный электродвигатель 220/127 В, 07 кВт — 1 шт., лампа накаливания 36 В — 1 шт., источник переменного тока 36 В, соединительные провода.

Теоретическая часть:

Машины, преобразующие электрическую энергию в механическую, называют двигателями, а преобразующие механическую энергию в электрическую — генераторами. Любую машину образует неподвижный корпус — статор и ротор, расположенный внутри статора на валу вращения в подшипниках боковых крышек.

На внутренней поверхности статора и на роторе расположены обмотки (катушки индуктивности).

Принцип работы электродвигателя основан на взаимодействии магнитных сил токов обмоток ротора и статора, вызывающем вращение ротора.

Различают двигатели переменного и двигатели постоянного тока.

Самый простой, надежный, дешевый — это асинхронный трехфазный двигатель переменного тока. У него нет коллекторно-щеточного узла (рис. 96). Ток намагничивания в замкнутой обмотке ротора создаёт магнитная сила тока обмотки статора (электромагнитная индукция). На намагничивание ротора необходимо время. Поэтому ток в роторе растёт и убывает, отставая во времени от тока статора, т. е. асинхронно (0,02-0,03 от 1/50 сек).

При включении асинхронного двигателя возникает импульс тока обратной индукции из цепи ротора в обмотки статора, а значит, и в электрическую сеть. Это создаёт помехи другим потребителям сети. Поэтому асинхронные двигатели большой мощности оборудуют контактными кольцами и щётками, которые используют только при пуске и остановке двигателя большой мощности.

Через три щётки и три контактных кольца к фазным обмоткам ротора подключены пусковые реостаты (рис. 96).

Реостаты полностью вводят перед включением и медленно выводят по мере набирания ротором оборотов. Медленное намагничивание и размагничивание ротора не вызывает импульса обратной индукции в обмотке статора и сети электропитания.

Простейшая обмотка асинхронного двигателя образует два магнитных полюса в каждой фазе. Ротор при этом делает один оборот за 1/50 сек — 3000 оборотов в минуту. Такая скорость вращения нужна не всегда. Чтобы её снизить, обмотку статора выполняют в виде секций. Образуется 2, 3, 4 пары полюсов в каждой фазе статорной обмотки. Тогда ротор за 1/50 сек повернется только на 1/2, 1/3, 1/4 часть оборота, а скорость, соответственно, составит 1500, 1000, 750 оборотов в минуту.

Ток в обмотках статора трехфазного двигателя зависит от способа включения: в звезду, $I_l \sim 1.71 I_\phi$, в треугольник, $I_l = I_\phi$

Этим, вместо реостата, пользуются при запуске асинхронных двигателей большой мощности (пуск в звезду, работа в треугольник). Также можно выбрать нужную мощность (рис. 97). Для смены направления вращения двигателя достаточно поменять местами провода двух фаз сети питания.

Больше других применяются асинхронные двигатели серии А, ЧА, АЦ. Например, А02-ВМ: асинхронный, обдуваемый, серия 2, влаго-, морозостойкое исполнение; 4АН200- М4УЗ: серия 4, асинхронный, незащищённый, высота оси вращения 200 мм, габаритная группа М, 4 полюса, для умеренного климата, категория размещения 3; АИР100МУ: асинхронный, интерэлектро, группа параметров установки Р, высота оси 100 мм, габаритная группа М, 4 полюса (2 пары), 1500 об/мин.

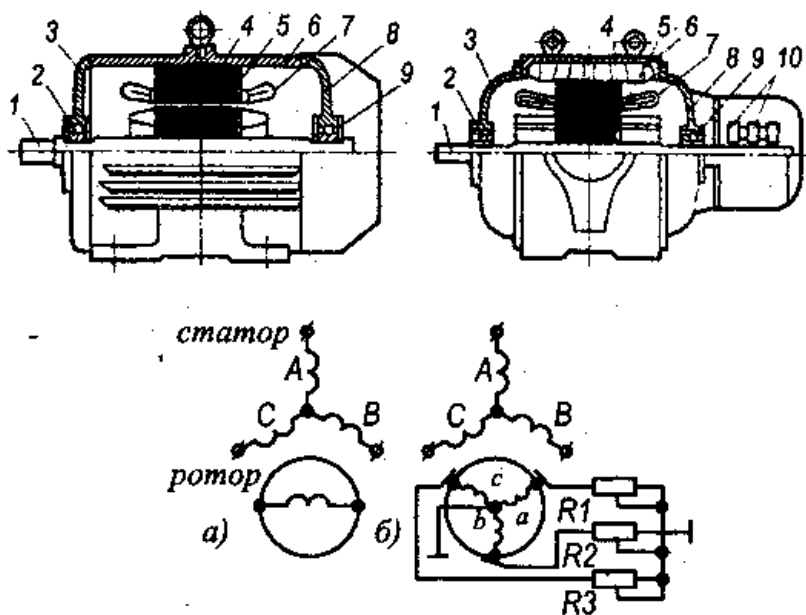


Рис. 96. Устройство и схемы включения асинхронных двигателей: а — с замкнутым ротором; б — с разомкнутым ротором; 1 — вал; 2, 9 — подшипники; 3, 8 — подшипниковые щиты; 4 — статор; 5 — ротор; 6 — корпус; 7 — фазная обмотка; 10 — контактные кольца подключения

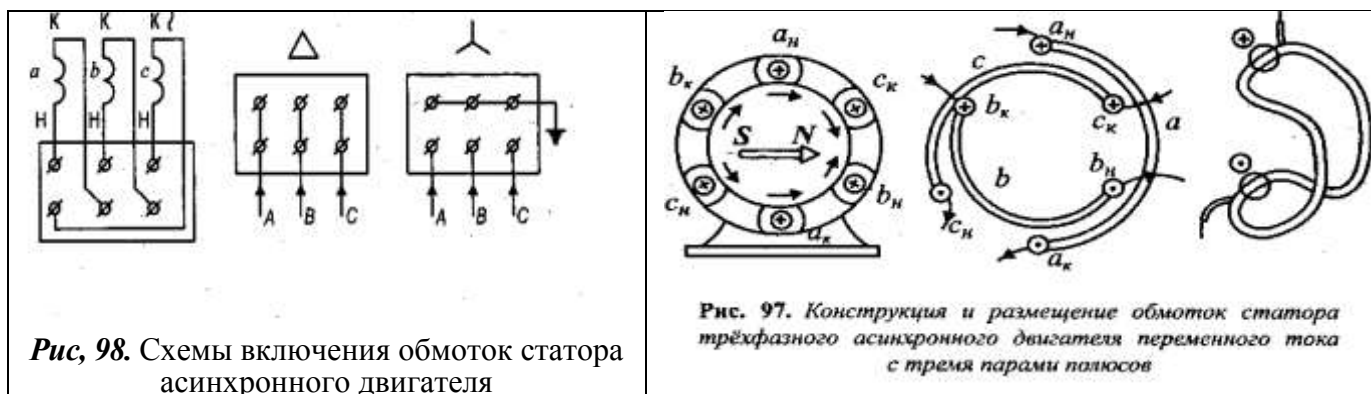


Рис. 98. Схемы включения обмоток статора асинхронного двигателя

Рис. 97. Конструкция и размещение обмоток статора трёхфазного асинхронного двигателя переменного тока с тремя парами полюсов

Асинхронные двигатели мощностью меньше 1 кВт работают от одной фазы (ф-0: 220 В). Чтобы создать пусковой фазовый сдвиг между магнитными силами статора и ротора, на полюсах статора размещают пусковую обмотку, которую включают в сеть через конденсатор емкостью 2-10 мкФ. Развивать номинальную мощность на валу при номинальной частоте вращения трехфазный асинхронный электродвигатель может только в том случае, если три его обмотки на статоре включены правильно. В практике редко случается (осо-

бенно после ремонта двигателя), что концы и начала отдельных обмоток электродвигателя спутаны и вместо клеммной доски для присоединения двигателя к сети выходят шесть концов. В этом случае необходимо разобраться, какие из них — концы, а какие — начала обмоток, так, как если хоть одна из обмоток включена неправильно, двигатель нормально работать не сможет.

Развивать номинальную мощность на валу при номинальной частоте вращения трехфазный асинхронный электродвигатель может только в том случае, если три его обмотки на статоре включены правильно. В практике редко случается (особенно после ремонта двигателя), что концы и начала отдельных обмоток электродвигателя спутаны и вместо клеммной доски для присоединения двигателя к сети выходят шесть концов. В этом случае необходимо разобраться, какие из них — концы, а какие — начала обмоток, так, как если хоть одна из обмоток включена неправильно, двигатель нормально работать не сможет. При правильном соединении обмоток статора двигателя звездой все начала обмоток C_1 , C_2 , C_3 присоединяют к зажимам сети, а все концы C_4 , C_5 , C_6 — к общей нулевой точке (рис. 51, а). При правильном соединении треугольником все начала фазных обмоток C_1 , C_2 , C_3 соединяют с сетью, а концы — с началами других фаз (рис. 51, б). Если неизвестна маркировка выводов статорной обмотки асинхронного трехфазного двигателя, ее можно установить следующим способом. Все обмотки статора намотаны на один стальной сердечник. Если через одну обмотку пропускать переменный ток, то в других обмотках наводится ЭДС взаимной индукции, как во вторичных обмотках трансформатора. Если соединить две обмотки так, чтобы конец одной был соединен с началом другой, то напряжения на этих обмотках будут складываться. Если же соединить начало одной обмотки с началом другой и конец одной с концом другой, то напряжения на них изменяются в противофазе и потому суммарное напряжение меньше напряжения на одной обмотке. Таким образом, при соединении конец — начало напряжение увеличивается, а при соединении конец ~ конец (или начало — начало) — уменьшается. Пользуясь этим, можно маркировать выводы статорных обмоток. При маркировке концов обмоток необходимо пользоваться пониженным напряжением.

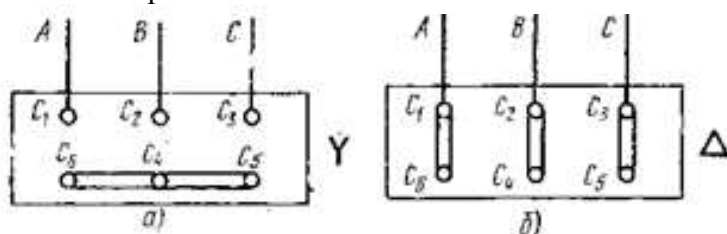


Рис. 51 Схема подключения обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя: а — звездой, б — треугольником

Ход работы

1. Собрать электрическую схему по рис. и показать ее преподавателю. Поочередно включая однополюсные вилки в клеммы выводов фаз статорной обмотки асинхронного двигателя, определить выводы трех обмоток. По загоранию лампы определить (попарно) клеммы — выводы каждой фазы.
2. Произвольно обозначить нумерацию фаз: ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 , а также произвольно обозначить выводы первой, второй и третьей фазы: n_1 , n_2 , n_3 — начала обмоток, K_1 , K_2 , K_3 — концы обмоток.
3. Собрать схему по рис. 53. На этой схеме обозначенный конец первой фазы K подключается к одному из выводов второй фазы, другой вывод второй фазы и обозначенный вывод n_1 подключаются к электролампе. При этом к обмотке третьей фазы подается напряжение 36 В.

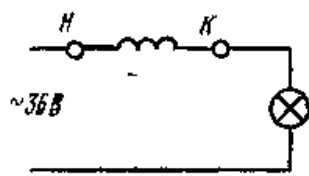


Рис. 52. Схема для определения выводов обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя

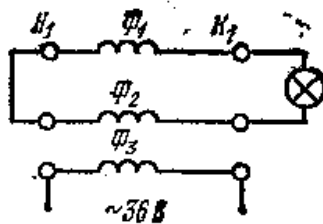


Рис. 53. Схема неправильного соединения первой и второй фаз обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя (лампа не горит)

Ток, проходя по обмотке ϕ_2 , создает в сердечнике статора переменное магнитное поле, которое вызовет индуктивную ЭДС в двух других, фазных обмотках (ϕ_1, ϕ_3).

1. В зависимости от того, как соединены между собой выводы ϕ_1 и ϕ_2 ЭДС в этих обмотках будут либо складываться (тогда электрическая лампа будет гореть), либо вычитаться (электрическая лампа гореть не будет).
2. Если присоединении по схеме рис. 53 лампа горит, то это значит, что клемма K_1 соединена с началом второй фазной обмотки, т. е. с H_2 , тогда ее второй конец есть K_2 .
3. Если лампа не горит, это значит, что K_1 соединен с K_2 . Если поменять местами подключение выводов ϕ_2 (рис. 54), то лампа загорится.
4. Таким же способом определить начало и конец третьей фазы. Для этого собрать схему по рис. 55 или 56. Лампа будет гореть только при условии соединения K_2 с H_3 .

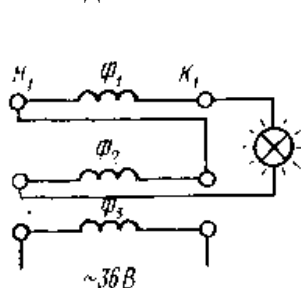


Рис. 54. Схема правильного соединения первой и второй фаз обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя (лампа горит)

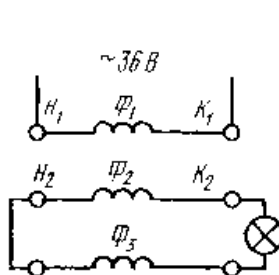


Рис. 55. Схема неправильного соединения второй и третьей фаз обмотки статора (лампа не горит)

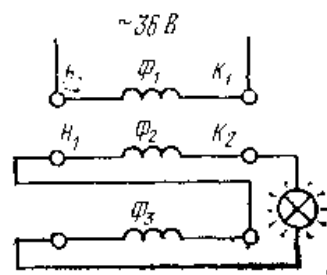


Рис. 56. Схема правильного соединения второй и третьей фаз обмотки статора (лампа горит)

8. Окончательно выводы всех трех обмоток обозначьте согласно ГОСТу.
9. Соединить обмотки двигателя звездой, присоединить к рубильнику. Проверить работу двигателя.
10. Ответить на вопросы
 1. Как нужно включить обмотки статора трехфазного двигателя, чтобы получить соединение звездой, треугольником?
 2. Как определить концы обмоток, принадлежащие одной фазе?
 3. Как определить начала и концы обмоток статора каждой фазы трехфазного асинхронного двигателя?

Практическая работа № 12.

Тема 8. Аппаратура управления и защиты.

Ознакомление с устройством аппаратов управления и защиты.

Цель работы: Изучение устройства аппаратов управления и защиты, ознакомление с маркировкой и правилами выбора.

Перечень используемого оборудования

Автоматический выключатель, предохранители.

Теоретическая часть:

К аппаратам управления относят рубильники, пакетные выключатели, контакторы, кнопочные посты и тумблеры, электромагнитные пускатели, к аппаратам защиты — плавкие предохранители и автоматические выключатели.

Рубильники могут быть одно-, двух-, трехполюсными, с боковой или центральной ручкой, с блокировкой и без блокировки.

Гнёзда и ножи рассчитаны на токи от 100 до 600 А и напряжение до 500 В. Рубильники с боковой ручкой применяются для разрыва цепей без отключения нагрузки.

Рубильником с центральной ручкой снимают напряжение сети после предварительного отключения нагрузки.

Например, рубильник Р-11: один полюс, 100 А; Р-31: три полюса, 100 А. Применяются рубильники-блоки, у которых в ножи вмонтированы предохранители. Например, БПВ-34: блок предохранитель-выключатель, три полюса, 400 А (рис. 87).

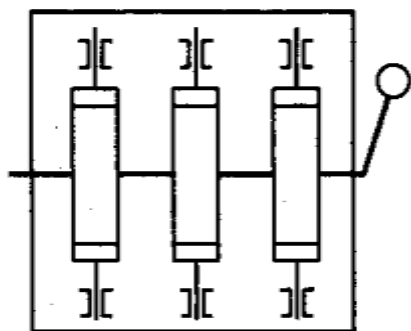


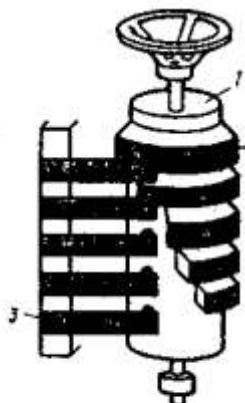
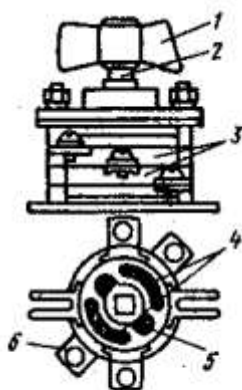
Рис. 87. Схема БПВ

Применение рубильников не допускается в пыльных, влажных и взрывопожароопасных помещениях. Пакетные переключатели применяются для ручного пуска, остановки; изменения направления и скорости вращения электродвигателей; коммутации освещения и сигнализации.

Секции, пакеты состоят из подвижных и неподвижных контактов. Подвижные контакты поворачиваются вместе с пластиной, на которой находятся. Каждый из них соединяет в одну позицию два неподвижных контакта. Сколько пар неподвижных контактов в пакете, столько рабочих позиций в переключателе (рис. 88). Например, ПВМ-2: пакетный выключатель малогабаритный, двухполюсный: одна позиция — рабочая, одна — отключения.

Число пакетов определяется схемой переключения (до 10).

Барабанные и кулачковые переключатели (контроллеры) служат для про-



граммного (ручного или ножного) управления движением электро-транспорта (рис. 88). В каждой позиции переключателя — своя электрическая схема питания электродвигателя; остановка, 1-я, 2-я, 3-я, 4-я скорости движения.

тумблеры применяются для управления простыми схемами коммутации.

Рис. 88. Устройство пакетного и барабанного переключателей

Электромагнитные пускатели служат для дистанционного, ручного и автоматического управления электродвигателями и защищают их от опасных режимов работы.

Пускатель образуют токовая катушка со стальным сердечником, стальной, якорь, на котором расположены силовые и вспомогательные электроконтакты и упругие разрывающие пружины.

Рис. 89. Пускатели с поворотным и прямым приводом: 1, 2, 3, 4, 5; 6 — контакты; 7, 8, 9 — пружины; 10 — тепловое реле; 11—якорь; 12 — токовая катушка

В цепь тока одного или двухфазных проводов включается нагревательный элемент теплового реле. Плавкие предохранители разрывают цепь тока катушки, выключая электродвигатель при пропадании двух фаз напряжения, а контакты теплового реле — при токовой перегрузке и пропадании фазы напряжения сети.

Различают пускатели с поворотным и с прямым якорем (рис. 89). Главными характеристиками пускателя служат величины допустимого тока и напряжения.

Например, ПМЕ-132: пускатель магнитный, европейский стандарт, 100 А, 600 В, с одним тепловым реле.

Два обычных пускателя, включённых в общую схему, образуют *реверсивный электромагнитный пускатель*, который служит для изменения направления вращения электродвигателей (рис. 90). Выбор кнопки включения позволяет менять последовательность подключения фаз сети электроснабжения.

При нажатии кнопки ручного пуска К1 сработает магнитный разъединитель S1 — *прямой ход*. При нажатии кнопки К2 срабатывает разъединитель S2. Во втором случае сменится последовательность подключения к электродвигателю фаз сети В и С. Контакты блокировки К61 или К62 замыкаются вместе с разъединителями S1 или S2 позволяют отпускать кнопку К2 или К1 после включения пускателя.

При перегреве нагревателя теплового реле ТР1 или ТР2 током перегрузки двигателя разомкнётся соответствующий контакт КР1 или КР2, разорвется, цепь тока катушки привода L 1или L2. Катушка размагнитится, а уравнивающая пружина разомкнёт контакты питания обмоток двигателя.

То же произойдёт при плавлении вставки предохранителя F2 или F3 током перегрузки (рис. 90).

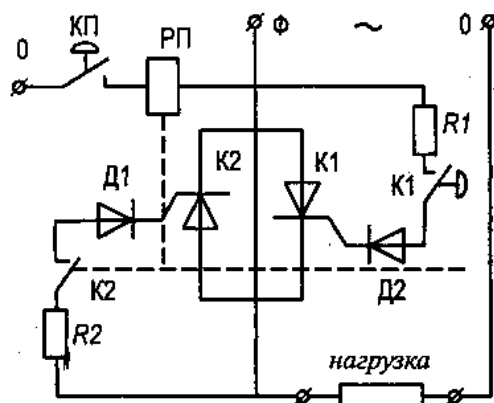
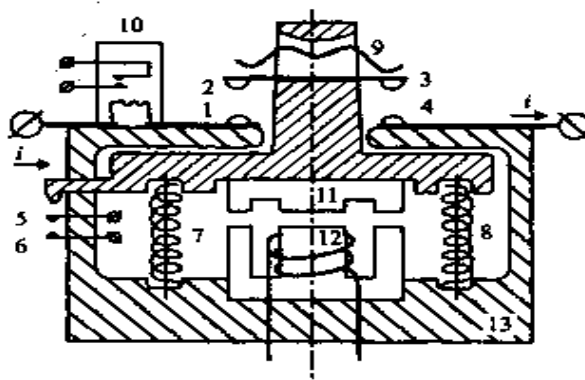
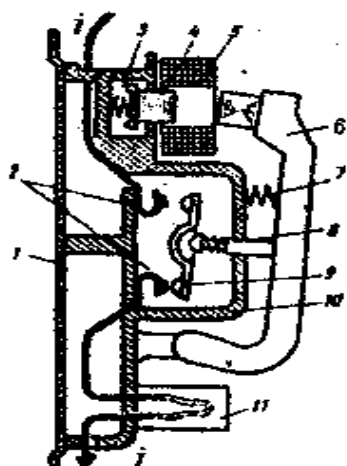


Рис. 90. Схема реверсирования электродвигателя двумя электромагнитными пускателями

Автоматический выключатель

Выключатель защищает потребителя от недопустимого увеличения тока, и уменьшения напряжения сети электроснабжения. Автомат состоит из ручного ме-



ха-
ни-
че-
ского
вы-
клю-
чате-
ля,
раз-
рыв-
ных
и си-
ло-
вых

электрических контактов, дугогасительных камер, минимального и максимального расцепителей (рис. 91).

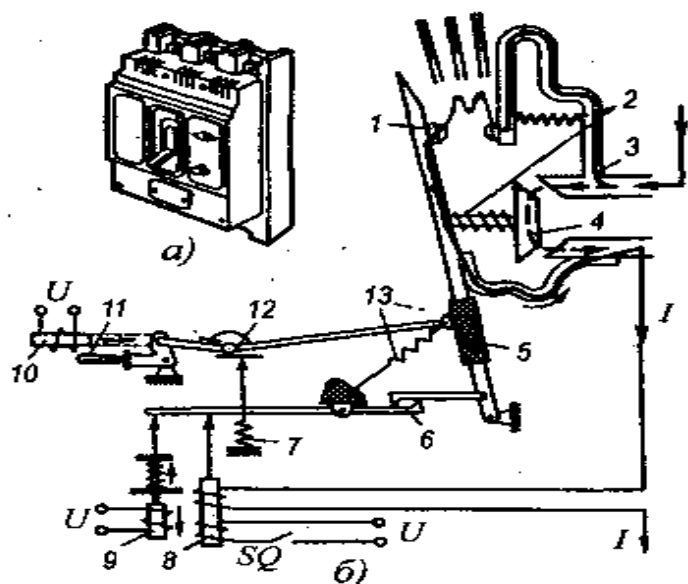


Рис. 91. Схема устройства и включения автоматического выключателя: 1 — разрывной контакт; 2, 7, 13 — пружины; 3, 4 — контакты тока нагрузки; 5 — базовая деталь; 6 — защёлка; 8, 9 — токовые катушки расцепителей; 10 — электромагнит; 11 — ручка включения; 12 — рычаг пружины

Включение аппарата производится рукояткой механического выключателя (привода) или подачей напряжения на обмотку электромагнита. Разрывные и главные контакты автомата остаются замкнутыми, пока реле минимального или максимального тока (расцепитель) не выбьет защёлку пружинно-рычажного механизма.

Реле максимального тока срабатывает, если магнитная сила тока нагрузки станет больше уравновешивающей магнитной силы тока катушки 8 от напряжения сети.

Реле минимального тока срабатывает, когда магнитная сила тока катушки 9 станет меньше силы уравновешивающей механической пружины.

Автоматические выключатели разрывают токи от 10 до 6 000 А. Наибольшее применение имеют автоматы АЕ: например, АЕ2030:25 А, 600 В; АЕ2050: 100 А, 600 В.

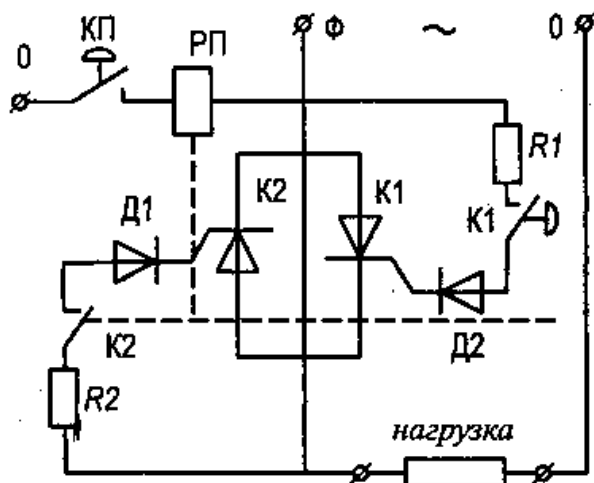


Рис. 92. Электрическая схема ПТ-40-380: пускатель тиристорный, трёхфазный, 40 А, 380 В, три пары тиристоров

Плавкие предохранители защищают цепи от токовых перегрузок и коротких замыканий за счёт сгорания калиброванной проволоки, вставки. Сечение вставки рассчитано на плавление при определенной величине протекающего тока. Прямоугольный или круглый фарфоровый или стеклянный корпус предохранителя заполняется теплоустойчивым кварцевым песком. Например, ПН2-100: прямоугольный, наполненный, 100 А, 500 В.

Тиристорный пускатель размыкает и замыкает цепь без электрических контактов и без образования дугового разряда. Чтобы ток через тиристор и нагрузку проходил оба полпериода напряжения сети, в цепь тока включаются два параллельных тиристора или симистор (рис. 92). Кроме них, схема пускателя содержит пусковое слаботочное электромагнитное реле, через контакты которого на управляющие электроды подается напряжение включения. Резисторы *K1* и *K2* делят напряжение. Диоды *Д1* и *Д2* защищают от случайного включения. Так, пускатель подаёт напряжение на нагрузку, и отключают его с помощью кнопки пуска *КП* и реле *РП*.

Так, пускатель подаёт напряжение на нагрузку, и отключают его с помощью кнопки пуска *КП* и реле

Автоматические выключатели обеспечивают защиту устройств от перегрузки или короткого замыкания и выбираются исходя из характеристик электропроводки, размыкающей способности выключателей, значения номинального тока и характеристики отключения.

Размыкающая способность должна соответствовать значению тока в начале защищаемого участка цепи. При последовательном включении допускается использование устройства с низким значением тока короткого замыкания, если до него ближе к источнику питания установлен автоматический выключатель с током отсечки мгновенного размыкателя ниже, чем у последующих устройств.

Номинальные токи выбираются таким образом, чтобы их значения были как можно ближе к расчетным или номинальным токам защищаемой цепи. Характеристики отключения определяются с учетом того, что кратковременные перегрузки, вызванные пусковыми токами, не должны вызывать их срабатывания. Кроме того, следует учитывать, что выключатели должны иметь минимальное время отключения в случае возникновения короткого замыкания на конце защищаемой цепи.

Прежде всего необходимо определить максимальное и минимальное значения тока короткого замыкания (*КЗ*). Максимальный ток *КЗ* определяется из условия, когда замыкание происходит непосредственно на контактах автоматического выключателя. Минимальный

ток определяется из условия, что КЗ происходит в самом дальнем участке защищаемой цепи. КЗ может произойти как меж нулем и фазой, так и между фазами.

Для упрощенного расчета минимального тока КЗ следует знать, что сопротивление проводников в результате нагрева увеличивается до 50% от номинального значения, а напряжение источника питания снижается до 80%. Следовательно, для случая КЗ между фазами ток КЗ будет:

$I = 0,8 U / (1,5 \rho^2 L / S)$, где ρ – удельное сопротивление проводников (для меди – 0,018 Ом кв. мм/м)

для случая короткого замыкания между нулем и фазой:

$I = 0,8 U_0 / (1,5 \rho (1+m) L / S)$, где m – соотношение площадей поперечного сечения проводов (если материал одинаковый), или соотношение сопротивлений нуля и фазы. Автомат нужно выбирать по величине номинального условного тока КЗ не меньше расчетного.

Предохранитель с плавкой вставкой

Ток плавкой вставки должен быть не меньше максимального тока установки с учетом длительности его протекания: $I_n = I_{\max} / a$, где $a = 2,5$, если T меньше 10 сек. и $a = 1,6$ если, T больше 10 сек. $I_{\max} = I_n K$, где $K = 5 - 7$ кратность пускового тока (из паспортных данных двигателя)

I_n – номинальный ток электроустановки длительно протекающий по защитной аппаратуре
 $I_{\max}$ – максимальный ток, кратковременно протекающий по аппаратуре (например пусковой ток)

T – длительность протекания максимального тока по защитной аппаратуре (например, время разгона двигателя)

У бытовых электроустановок пусковой ток мал, при выборе вставки можно ориентироваться на I_n .

После расчетов выбирается ближайшее большее значение тока из стандартного ряда: 1, 2, 4, 6, 10, 16, 20, 25 А.

Устройства защитного отключения предназначены для защиты человека от поражения электрическим током в групповых линиях, питающих штепсельные розетки. Рекомендованы для установки в цепях питания жилых помещений, а так же любых других помещений и объектов, где могут находиться люди или животные. Функционально, УЗО состоит из трансформатора, первичные обмотки которого подключены к фазным (фазному) и нейтральному проводникам. К вторичной обмотке трансформатора подключено поляризованное реле. При нормальной работе электрической цепи векторная сумма токов через все обмотки равна нулю. Соответственно равно нулю и напряжение на выводах вторичной обмотки. В случае возникновения утечки «на землю» сумма токов изменяется и во вторичной обмотке возникает ток, вызывающий срабатывание поляризованного реле, размыкающего контакт. Раз в три месяца рекомендуется проверять работоспособность УЗО, нажатием на кнопку «ТЕСТ». УЗО подразделяются на низкочувствительные и высокочувствительные. Низкочувствительные (токи утечки 100, 300 и 500 мА) для защиты цепей, не имеющих непосредственного контакта с людьми. Они срабатывают при повреждении изоляции электрооборудования. Высокочувствительные УЗО (токи утечки 10 и 30 мА) рассчитаны на защиту, когда возможно прикосновение к оборудованию обслуживающего персонала. Для комплексной защиты людей, электрооборудования и электропроводки, кроме того, выпускаются, дифференциальные автоматические выключатели, выполняющие функции, как устройства защитного отключения, так и автоматического выключателя.

УЗО должно быть сертифицированным в России. При выборе УЗО учитывается схема подключения нулевого рабочего проводника. В системе заземления ТТ чувствительность УЗО определяется сопротивлением заземления при выбранном предельном безопасном напряжением. Порог чувствительности определяется по формуле:

$I = U / R_m$, где U – предельное безопасное напряжение, R_m – сопротивление заземления. Для удобства можно воспользоваться таблицей .

Чувствительность УЗО мА	Сопротивление заземления Ом	
	Предельное безопасное напряжение 25 В	Предельное безопасное напряжение 50 В
10	2500	5000
30	830	1660
100	250	500
300	83	166
500	50	100
650	38,5	77
1000	25	50
3000	8	16

Для защиты людей используются УЗО с чувствительностью 30 или 10 мА.

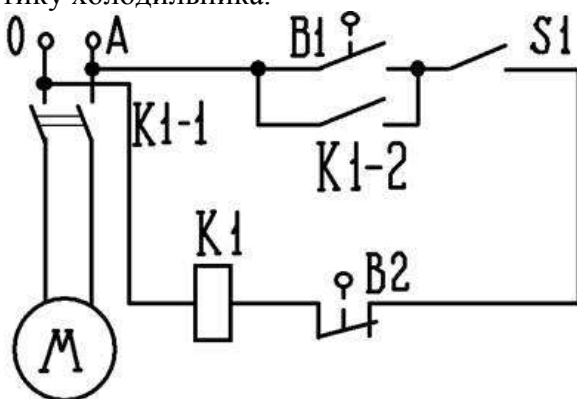
Автоматика

В жизни мы часто сталкиваемся с устройствами, название которых объединяется под общим понятием - «автоматика». И хотя такие системы разрабатывают очень умные конструкторы, обслуживают их простые электрики. Не следует пугаться этого термина. Оно означает всего лишь «БЕЗ УЧАСТИЯ ЧЕЛОВЕКА».

В автоматических системах человек дает только начальную команду всей системе и иногда отключает ее для обслуживания. Всю остальную работу на протяжении очень продолжительного времени система проделывает сама.

Если внимательно присмотреться к современной технике, то можно увидеть большое количество автоматических систем, которые ею управляют, сводя вмешательство человека в этот процесс к минимуму. В холодильнике автоматически поддерживается определенная температура, а в телевизоре заданная частота приема, свет на улице загорается с наступлением сумерек и гаснет на рассвете, дверь в супермаркете открывает перед посетителями, а современные стиральные машинки «самостоятельно» выполняют весь процесс стирки, полоскания, отжима и сушки белья. Примеры можно приводить бесконечно.

По своей сути, все схемы автоматики повторяют схему обычного магнитного пускателя, в той или иной степени улучшая его быстродействие или чувствительность. В уже известную схему пускателя вместо кнопок «ПУСК» и «СТОП» вставляем контакты В1 и В2, которые срабатывают от различных воздействий, например, температуры и получим автоматику холодильника.



При повышении температуры включается компрессор и гонит охладитель в морозилку. Когда температура опустится до нужного (заданного) значения, другая такая кнопка отключит насос. Выключатель S1 в этом случае играет роль ручного выключателя, для включения схемы, например, на время технического обслуживания.

Эти контакты называются «датчиками» или «чувствительными элементами». Датчики имеют различную форму, чувствительность, возможности настройки и назначение.

Например, если перенастроить датчики холодильника и, вместо компрессора подключить обогреватель, то получится система поддержания тепла. А, подключив светильники – по-

лучим систему поддержания освещенности.

Таких вариаций может быть бесконечно много.

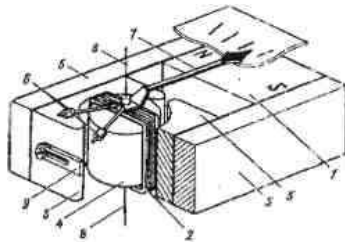
В целом, *назначение системы определяется назначением датчиков*. Поэтому в каждом отдельном случае применяются различные датчики. Изучение каждого конкретного чувствительного элемента не имеет большого смысла, так как они постоянно совершенствуются и изменяются. Целесообразнее понять принцип действия датчиков вообще.

Ход работы:

1. Изучить устройство, рассчитать и выбрать предохранитель с плавкой вставкой.
2. Изучить устройство, рассчитать и выбрать автоматический выключатель.
3. Изучить теоретический материал и выбрать УЗО.

Магнитоэлектрическая система

Работа механизмов основана на взаимодействии магнитного потока постоянного магнита и тока, проходящего по катушке (рамке). Возникающий при этом вращающий момент отклоняет подвижную часть механизма относительно неподвижной.



1 – сильный постоянный магнит; 2 – катушка (рамка) прямоугольной формы; 3 – полюсные наконечники; 4 – цилиндрический сердечник; 5 – магнитопровод; 6 – грузики; 7 – стрелка, 8 – растяжки

Рисунок 1 – Магнитоэлектрический механизм с внешним магнитом

Ток к рамке подводится через две спиральные пружины, которые одновременно служат для создания противодействующего момента. Момент, создаваемый пружиной, пропорционален углу закручивания, поэтому

$$M_{np} = k_2 \cdot \alpha,$$

где k_2 – постоянный коэффициент;

α – угол поворота рамки (равный углу закручивания пружины).

Учитывая, что в момент отсчета, когда стрелка неподвижна, $M_{вр} = M_{пр}$ получаем

$$k_1 \cdot I = k_2 \cdot \alpha.$$

Из этого равенства находим

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} \cdot I = k \cdot I.$$

Таким образом, угол поворота рамки и стрелки-указателя пропорционален току, т.е. прибор может быть отградуирован как амперметр, и иметь равномерную шкалу.

На основании закона Ома имеем,

$$I = \frac{U}{R_n},$$

где U – напряжение на зажимах прибора;

R_n – электрическое сопротивление рамки прибора.

После подстановки получаем

$$\alpha = \frac{k}{R_n} \cdot U.$$

Поскольку отношение $\frac{k}{R_n}$ для данного прибора – величина постоянная, последнее выражение показывает, что прибор может быть отградуирован как вольтметр.

Успокоение в механизме магнитоиндукционное.

Достоинства магнитоэлектрического механизма:

- большая чувствительность;
- малое собственное потребление мощности;
- малое влияние внешних магнитных полей;
- имеет равномерную шкалу.

Недостатки:

- сложность конструкции;
- чувствительность к перегрузкам;
- пригодность работы только на постоянном токе.

Электродинамическая система

Работа механизмов основана на взаимодействии магнитных полей двух катушек с токами – неподвижной 1 и подвижной 2 (рисунок 2).

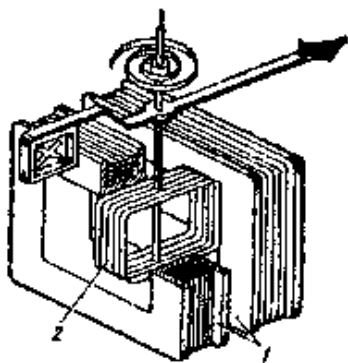


Рисунок 2 – Электродинамический измерительный механизм

Подвижная катушка, укрепленная на оси или растяжках, может поворачиваться внутри неподвижной. При протекании в обмотках катушек токов I_1 и I_2 возникают электромагнитные силы, стремящиеся так повернуть подвижную часть, чтобы магнитные потоки подвижной и неподвижной катушек совпали.

Успокоение – воздушное или магнитоиндукционное.

Достоинства электродинамических механизмов:

- одинаковые показания на постоянном и переменном токе;
- стабильность показаний во времени.

Недостатки:

- невысокая чувствительность;
- большое собственное потребление мощности;
- чувствительность к перегрузкам;
- влияние внешних магнитных полей;
- влияние температуры окружающей среды.

Ферродинамическая система

Механизмы ферродинамической системы отличаются от электродинамических механизмов тем, что неподвижная катушка имеет магнитопровод из магнитомягкого листового материала,

Существует две конструкции ферродинамических механизмов – одно- и двухкатушечные.

Успокоение - жидкостное и магнитоиндукционное.

Достоинства ферродинамических механизмов:

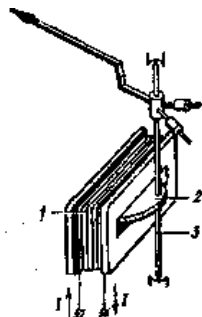
- малая восприимчивость к внешним магнитным полям;
- малое собственное потребление мощности;
- большой вращающий момент.

Недостатки:

- низкий частотный диапазон;
- низкая точность.

Электромагнитная система

Работа механизмов основана на взаимодействии магнитного поля, созданного неподвижной катушкой, по обмотке которой протекает измеряемый ток с ферромагнитным сердечником, эксцентрично укрепленным на оси (рисунок 3).



1 – плоская катушка; 2 – сердечник; 3 – опоры или растяжки

Рисунок 3 – Электромагнитный механизм с плоской катушкой

Вращающий момент пропорционален квадрату тока, так как магнитные поля катушки и сердечника создаются одним и тем же измеряемым током, протекающим по катушке:

$$M_{\text{оп}} = k_1 \cdot I^2; \quad M_{\text{пр}} = k_2 \cdot \alpha;$$

$$k_1 \cdot I^2 = k_2 \cdot \alpha;$$

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} \cdot I^2 = k \cdot I^2 = \frac{k}{R_n^2} \cdot U^2$$

Последнее выражение показывает, что угол отклонения стрелки пропорционален квадрату тока или напряжения. Шкала прибора квадратичная, сжатая в начале, т.е. неравномерная.

Достоинства электромагнитных механизмов:

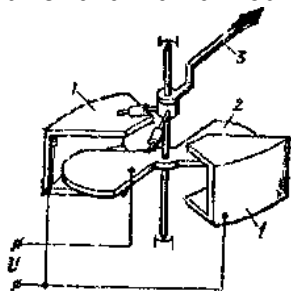
- пригодность для работы на постоянном и переменном токе;
- устойчивость к токовым перегрузкам;
- простота конструкции.

Недостатки:

- влияние внешних магнитных полей;
- неравномерность шкалы;
- большое собственное потребление мощности.

Электростатическая система

Перемещение подвижной части происходит под действием энергии электрического поля системы двух или нескольких электрически заряженных проводников (рисунок 4) и связано с изменением емкости системы.



1 – электроды; 2 – секторообразная пластина; 3 – указатель

Рисунок 4 – Электростатический измерительный механизм

Достоинства электростатических механизмов:

- не влияют частота и форма кривой приложенного напряжения;
- не влияют температура и внешние магнитные поля.

Недостатки:

- оказывают влияние внешние электрические поля;
- малая чувствительность.

Выпрямительная система

Для того чтобы магнитоэлектрические механизмы можно было использовать для измерения на переменном токе, нужно преобразовать переменный ток в постоянный.

В качестве преобразователей переменного тока в постоянный широкое распространение получили полупроводниковые выпрямители. Выпрямительный прибор представляет собой сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма с выпрямителем на полупроводниковых диодах.

Схема измерительного механизма с однополупериодным выпрямителем представлена на рисунке 5.

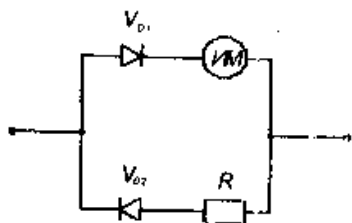
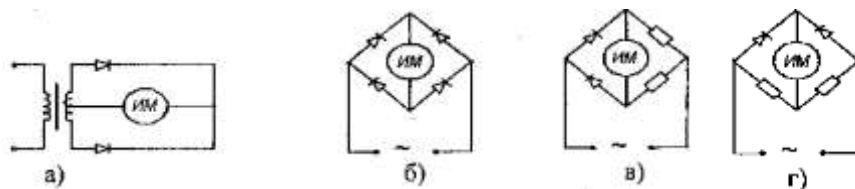


Рисунок 5 – Схема измерительного механизма

Схема измерительного механизма с двухполупериодным выпрямителем представлена на рисунке 5.



а) трансформаторная; б) мостовая; в, г) схемы мостовые с заменой диодов резисторами
Рисунок 5 – Схемы измерительных механизмов

Достоинства приборов:

- высокая чувствительность;
- малое собственное потребление мощности;
- широкий частотный диапазон.

Недостатки:

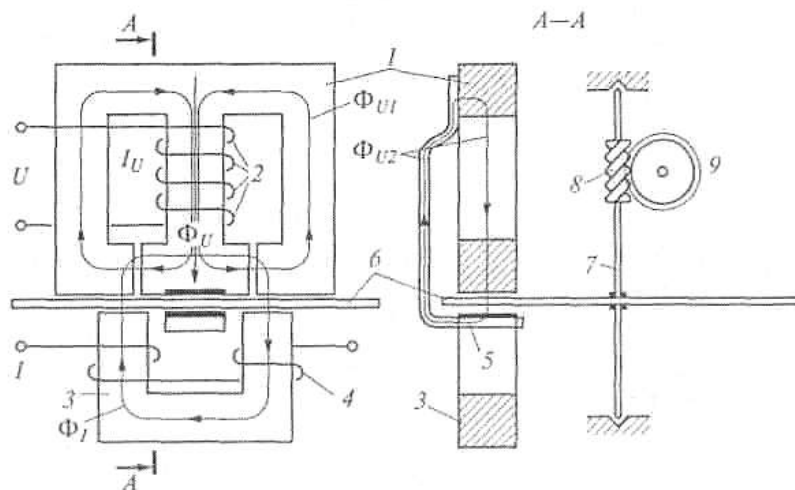
- невысокая точность;
- зависимость показаний от формы кривой измеряемой величины.

Индукционная система

Конструкция и принцип действия. Принцип действия индукционных приборов основан на взаимодействии двух или нескольких переменных магнитных потоков с токами,

индуцированными в подвижном проводнике (например, диске). Типичным представителем этой системы является классический *индукционный счетчик* – измеритель активной энергии.

Рассмотрим устройство и принцип действия индукционного однофазного счетчика активной энергии. На рисунке 6 показана упрощенная конструкция такого прибора. Основными элементами являются два магнитопровода со своими обмотками (напряжения и токовой), вращающийся диск и счетный механизм. Как и ваттметр, счетчик содержит обмотки тока и напряжения. Включается счетчик в цепь так же, как и ваттметр.



1 – магнитопровод обмотки напряжения; 2 – обмотка напряжения; 3 – магнитопровод обмотки тока; 4 – обмотка тока; 5 – противоположный полюс; 6 – диск; 7 – ось; 8 – червячная передача; 9 – счетный механизм

Рисунок 6 – Схема поясняющая принцип действия счетчика

Номинальная постоянная счетчика. Число оборотов диска, приходящееся на единицу учитываемой счетчиком энергии, называют передаточным числом счетчика. Например, в паспорте сказано «2000 оборотов соответствуют 1 кВт · ч». Коэффициент, обратный передаточному числу, т.е. энергия, приходящаяся на один оборот диска, называется *номинальной постоянной счетчика* $C_{ном}$. Например:

$$C_{ном} = 3600 \frac{1000}{2000} = 1800 \frac{Вт \cdot с}{об.}$$

Зная $C_{ном}$ и число оборотов N , можно определить потребленную активную энергию:

$$W = C_{ном} N$$

Классы точности индукционных счетчиков (задаются относительной погрешностью) обычно невысоки: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0.

Рекомендуемая литература

1. Основная литература:

1. Козлова, И. С. Основы электротехники [Электронный ресурс] : учебное пособие для СПО / И. С. Козлова. — Электрон. текстовые данные. — Саратов : Научная книга, 2019. — 159 с. — 978-5-9758-1896-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/87079.html>
2. Проверка и наладка электрооборудования (ПМ.02) / авт.-сост. Н.А. Олифиренко, К.Д. Галанов, И.В. Овчинникова. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2018. — 317 с. : табл., схем. — (Среднее профессиональное образование). — Режим доступа: по подписке. — URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=486057>
3. Сундуков В.И. Общая электротехника и основы электроснабжения [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.И. Сундуков. — Электрон. текстовые данные. — Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. — 96 с. — 978-5-7829-0538-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/73311.html>

2. Дополнительная литература:

1. Крутов, А.В. Теоретические основы электротехники : учебное пособие / А.В. Крутов, Э.Л. Кочетова, Т.Ф. Гузанова. - 2-е изд., стер. - Минск : РИПО, 2016. - 376 с. : схем., ил. - Библиогр.: с. 362. - ISBN 978-985-503-580-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=463626>