

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Т.Н. Мармус, Л.Н. Горбунова, С.А. Гусева

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

**Учебное пособие для выполнения
лабораторных работ**

**Благовещенск
Издательство ДальГАУ
2012**

УДК 621.3

Мармус Т.Н., Горбунова Л.Н., Гусева С.А. Электротехника и электроника учебное пособие для выполнения лабораторных работ. ДальГАУ, 2012.- 136 с.

Учебное пособие предназначено для студентов очного и заочного обучения ДальГАУ по направлениям: 110800.62 – агроинженерия (технологические системы в агробизнесе); 190600.62 – эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов; 250300.62 – технология и оборудование лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств; 260100.62 – продукты питания из растительного сырья; 260200.62 – продукты питания животного происхождения; 260800.62 – технология продукции и организации общественного питания; 270800.62 – строительство; 280100.62 - природообустройство и водопользование в соответствии с требованиями ФГОС ВПО по дисциплине «Электротехника и электроника».

Рецензент: Ижевский А.С. – к.с.-х.н., доцент кафедры ЭААПКтЭТиА.

Рекомендовано к печати методическим советом института электрификации и автоматизации сельского хозяйства Дальневосточного государственного аграрного университета (Протокол № 9 от 14 мая 2012 г.)

Издательство ДальГАУ
2012

ВВЕДЕНИЕ

Правила ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ при работе в электротехнической лаборатории

Перед началом работы следует проверить, выключены ли рубильники или пакетные выключатели на рабочем месте.

1. Сборку схемы проводить только при выключенном рубильнике или пакетном выключателе.
2. При сборке схемы запрещается пользоваться проводами с поврежденной изоляцией, приборами и оборудованием с неисправными клеммами.
3. Не включать схему в сеть без предварительной проверки её преподавателем. Включить источник питания и произвести предварительное опробование цепи можно только с разрешения преподавателя.
4. При перемещениях движков и рукояток пускорегулирующей аппаратуры необходимо следить за тем, чтобы рука была в соприкосновении только с изолированной рукояткой.
5. Перед включением схемы под напряжение необходимо предупредить всех работающих на данном рабочем месте.
6. После включения схемы не прикасаться к клеммам к другим частям оборудования, находящегося под напряжением.
7. Не разрешается оставлять без наблюдения схему, находящуюся под напряжением.
8. Любые изменения в схеме можно производить только после отключения её от сети; включение в сеть после введенных изменений производится с разрешения преподавателя и предупреждения об этом всех работающих на данном рабочем месте.
9. В случае возникновения аварийного режима немедленно обесточить цепь.
10. Разборку схемы производить только после отключения ее от сети.

11. Работая с машинами, необходимо следить, чтобы посторонние предметы не касались вращающихся частей машины.
12. Запрещается снимать кожухи и другие ограждения с оборудования.
13. Не загромождать рабочее место ненужным оборудованием и предметами.
14. Включение главных рубильников на щите производится только преподавателем или лаборантом.

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Подготовка к лабораторным работам

Предварительно ознакомиться с графиком выполнения лабораторных работ. Лабораторная работа, пропущенная студентом по неуважительной причине, отрабатывается по разрешению заведующего кафедрой по отдельному расписанию.

Для выполнения лабораторных работ по электротехнике необходимо предварительно подготовиться: изучить теоретический материал(относящийся к данной лабораторной работе) по лекционному курсу и соответствующим литературным источникам. До проведения лабораторных работ выполнить подготовку, содержащую: схемы, таблицы измерений и расчетные формулы, порядок выполнения. Уяснить последовательность операций при выполнении работы.

К выполнению лабораторных работ *допускаются только предварительно подготовившиеся студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.*

Требования к выполнению лабораторных работ

1. Перед сборкой схемы ознакомиться с электрическим оборудованием и измерительными приборами, предназначенными для проведения данной лабораторной работы.

2. Приступая к сборке схемы, необходимо, прежде всего, убедиться в том, что напряжение на стенде отключено.

3. При сборке схемы строго руководствоваться порядком выполнения лабораторной работы.

4. При сборке схемы необходимо обеспечивать достаточную плотность и надежность контактов.

5. Собранная схема обязательно проверяется всеми членами бригады, выполняющими данную работу, а затем уже преподавателем или лаборантом.

Схема включается под напряжение только с разрешения преподавателя, ведущего занятия, или дежурного лаборанта.

6. Не разрешается включать рубильники, вращать рукоятки аппаратов, нажимать на кнопки и совершать подобные вышеуказанные действия с приборами и аппаратами, имеющимися в лаборатории и не предназначенными для выполнения работы.

7. Запись показаний приборов в процессе выполнения лабораторной работы следует проводить по возможности одновременно и быстро, строго соблюдая при этом правила эксплуатации измерительных средств.

8. Результаты измерений заносятся каждым студентом в отчет.

9. После выполнения лабораторной работы результаты предъявляются для проверки преподавателю до разборки схемы.

10. После окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в надлежащий порядок: с разрешения преподавателя, схема должна быть разобрана, провода убраны, приборы расставлены.

11. В течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах.

12. Выходить из помещения лаборатории во время занятий студенты могут только с разрешения преподавателя.

Во время работы в лаборатории студенты обязаны выполнять все правила техники безопасности и правила внутреннего распорядка.

Требования к отчетам по лабораторным работам

При составлении отчета по лабораторной работе необходимо руководствоваться следующими положениями:

1. В отчете должны быть указаны порядковый номер и название лабораторной работы, а также кратко сформулирована цель работы, приведен теоретический материал по основным вопросам работы.

2. Отчет по лабораторным работам должен содержать краткое описание работы, схемы соединения, перечень аппаратуры и приборов с краткой технической характеристикой, таблицы наблюдения и графические построения, которые требуется выполнить согласно программе работы. Кроме того, в отчете следует привести формулы, с помощью которых будут производиться расчеты и написать выводы по работе.

3. Схемы и графики должны быть вычерчены карандашом с помощью чертежных инструментов с соблюдением буквенных и графических условных обозначений или выполнены на персональном компьютере.

Оформляться отчет должен аккуратно. Электрические схемы должны вычерчиваться с помощью чертежных инструментов. При вычерчивании схем следует применять условные обозначения в соответствии с ГОСТом 2.721-74... ГОСТом 2.758-81.

Построение экспериментальных кривых производится в прямоугольной системе координат. На всех осях должны быть указаны обозначения и размерность наносимой величины, а также масштаб, выраженный цифрами, поставленными в крупных делениях.

При построении кривой предварительно по опытным данным строятся точки, а затем проводится плавная кривая через возможно большее число

точек. Если в одних координатных осях строят несколько графиков функций одной независимой переменной, то следует провести дополнительные шкалы параллельно основным, каждую со своим масштабом. Если "разброс" точек оказался значительным, то опыт следует повторить. Для построения криволинейного графика необходимо иметь не менее пяти точек. Графическая часть выполняется в соответствии с ГОСТом 2.319-81.

В конце отчета студент должен дать оценку эксплуатационным свойствам объекта исследования.

Отчет в целом должен быть составлен таким образом, чтобы для понимания содержания и результатов проведенной работы не требовалось дополнительных устных пояснений. Составление подобных отчетов первый шаг к оформлению технических отчетов по экспериментальным исследованиям, которые предстоит проводить будущему инженеру.

Каждый студент должен самостоятельно обработать данные опыта и подготовить отчет по проделанной работе.

4. Если при выполнении лабораторной работы применяется персональный компьютер и соответствующие программные средства, то в отчет должна вклеиваться распечатка результатов.

Студенты, не предъявившие в начале лабораторного занятия оформленного отчета по предыдущей работе, к выполнению следующей работы не допускаются.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Электроизмерительные приборы

Цель работы: Познакомиться с устройством, принципом действия электромеханических и цифровых измерительных приборов.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Измерение - это процесс определения физической величины с помощью технических средств. *Мера* - это средство измерения физической величины заданного размера. *Измерительный прибор* - это средство измерения, в котором вырабатывается сигнал, доступный для восприятия наблюдателем.

Меры и приборы подразделяются на образцовые и рабочие. Образцовые меры и приборы служат для поверки по ним рабочих средств измерений. Рабочие меры и приборы служат для практических измерений.

1.1 Классификация электроизмерительных приборов

1) по физическим явлениям, на которых основана работа, измерительные приборы можно разделить на *электромеханические* и *электронные*. Классификация электромеханических приборов зависит от способа преобразования электромагнитной энергии в механическую.

Электронные электроизмерительные приборы представляют собой сложные устройства, содержащие большое число преобразователей электрических сигналов, выполняющих различные функции. Электронные приборы разрабатываются на активных элементах (электронные лампы, транзисторы, микросхемы) и на пассивных элементах (конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности).

2) по характеру и виду измеряемых величин электроизмерительные приборы подразделяются на измерители:

- тока (амперметры, миллиамперметры и т.д.);

- напряжения (вольтметры, мили- и кило- вольтметры и т.д.);
- мощности (ваттметры);
- энергии (счетчики);
- сдвига фаз (фазометры).

3) по виду выдаваемой информации:

Аналоговый прибор – измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины. В этих приборах непрерывная измеряемая величина вызывает подобное ей непрерывное отклонение указателя по шкале, т.е. аналоговая величина представляет собой подобие другой величины. К аналоговым приборам относятся приборы, у которых указатель жестко связан с подвижной частью измерительного механизма.

Цифровой прибор - измерительный прибор, автоматически выдающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представлены в цифровой форме.

4) по способу выдачи измерительной информации

Показывающий прибор - измерительный прибор, допускающий отсчет показаний.

Регистрирующий прибор – прибор, в котором происходит регистрация показаний. Регистрирующие приборы, в которых предусмотрена запись показаний в форме диаграммы, называют самопишущими.

5) по характеру установки на месте применения измерительные приборы могут быть *стационарные* и *переносные*.

6) по степени защищенности: обыкновенные, пыле-водо- защищенные , герметические и др.

1.2 Основные характеристики электроизмерительных приборов

Уравнение преобразования $Y = f(X)$ - зависимость между входной X и выходной Y величиной. Вид уравнения преобразования определяется конструктивными параметрами прибора.

Чувствительность измерительного прибора определяется из уравнения преобразования и равна отношению изменения сигнала ΔY на выходе прибора к его изменению ΔX на входе:

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (1.1)$$

Обратная чувствительности величина $\alpha = \frac{1}{S}$ является *ценой деления*.

Порог чувствительности - минимальное значение входной величины, которое можно обнаружить с помощью данного прибора.

Диапазон измерений - область значений измеряемой величины, для которой показания прибора соответствуют его классу точности. Диапазон измерений может состоять из нескольких поддиапазонов.

Область рабочих частот - полоса частот, в пределах которой погрешность измерительного прибора, вызванная изменением частоты, соответствует паспортному значению.

Класс точности - обобщенная характеристика, определяемая пределами допустимых основных и дополнительных погрешностей. Класс точности γ - отношение абсолютной погрешности ΔX к предельному значению шкалы прибора X_{np}

$$\gamma = \pm \frac{\Delta X}{\Delta X_{np}} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

Следует отличать класс точности прибора от его *относительной погрешности*, определяемой

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%, \quad (1.3)$$

где X - текущее значение измеряемой величины.

Основные параметры измерительного прибора указаны на шкале или в его паспортных данных.

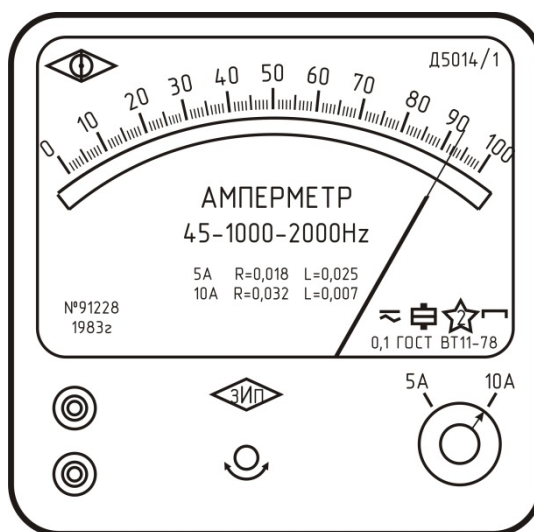


Рис.1.1- Внешний вид шкалы с нанесенными на неё обозначениями

Обозначения, наносимые на шкалы электроизмерительных приборов и их вспомогательные части, нормируются ГОСТ 23217-718 и СТ СЭВ 1052-78 и приведены в приложении 1 (таблицы 1 и 2).

1.3 Принцип действия некоторых электроизмерительных приборов

1.3.1 Аналоговые электромеханические приборы

Измерительный механизм аналоговых электромеханических приборов имеет, как правило, подвижную и неподвижную части. Электромагнитная энергия, подведенная к прибору из измерительной цепи, преобразуется в механическую энергию углового перемещения подвижной части относительно неподвижной. По перемещению подвижной части судят об измеряемой величине.

В зависимости от того, какое физическое явление положено в основу работы прибора, различают системы: магнитоэлектрическую, электростатическую, электромагнитную, электродинамическую, тепловую и др.

Расшифровка условных обозначений, нанесенных на шкалы электромеханических приборов, приведены в приложении 1.

Магнитоэлектрическая система (МЭ)

Работа приборов этой системы основана на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля измеряемого тока, проходящего по обмотке подвижной катушки (рамки).

Магнитное поле создается между полюсными наконечниками постоянного магнита 2 и цилиндрическим

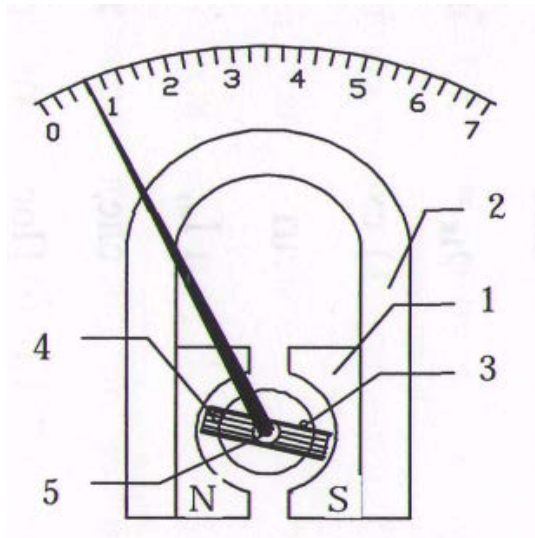


Рис.1.2 - Устройство прибора магнитоэлектрической системы

сердечником 3 из магнитомягкого материала (рис. 1.2). Легкая подвижная рамка 4 насажена на ось 5 и может поворачиваться вокруг сердечника в сильном и достаточно однородном радиальном магнитном поле зазора. К рамке прикреплена стрелка (или зеркальце), которая удерживается в нулевом положении двумя пружинами. При любом угле поворо-

та рамки нормаль к плоскости, в которой находятся витки, перпендикулярна вектору магнитной индукции B магнитного поля постоянного магнита. При протекании по рамке постоянного тока I на ее витки действует пара сил, создающая вращающий момент $\vec{M}_{BP} = [\vec{m}\vec{B}]$, где $\vec{m} = w \cdot I \cdot \vec{S}$ — магнитный момент рамки, w и S - число витков и площадь соответственно. Противодействующий момент M_{IP} создают пружины $M_{ID} = k \cdot \varphi$ (k - коэффициент упругости пружины, φ - угол поворота рамки).

В положении равновесия $M_{AD} = M_{ID}$, поэтому $\varphi = \frac{w \cdot S \cdot B}{k} \cdot I$. Отсюда следует, что угол поворота рамки (и стрелки прибора) пропорционален измеряемому току, поэтому шкала прибора магнитоэлектрической системы равномерная.

При изменении направления тока изменяется направление вращающегося момента и соответственно отклонение стрелки. Поэтому для измерения тока различной полярности используют приборы, имеющие нулевую отметку на середине шкалы.

Достоинства МЭ приборов: большая точность, обусловленная высокой стабильностью элементов измерительного механизма и незначительным влиянием внешних полей (изготавливаются вплоть до самого высокого 0,05 класса точности); нечувствительны к влиянию внешних магнитных полей; высокая чувствительность и малое собственное потребление энергии; хорошее успокоение и равномерность шкалы.

К *недостаткам* следует отнести: сложность изготовления, плохую перегрузочную способность, влияние температуры на точность измерения и невозможность (без дополнительных устройств) использования в цепях переменного тока.

Электромагнитная система (ЭМ)

Работа приборов электромагнитной системы основана на взаимодействии магнитного поля измеряемого тока с подвижным ферромагнитным сердечником. При прохождении по неподвижной катушке 1 (рис. 1.3) измеряемого тока I возникает магнитное поле, пропорциональное току. Магнитное поле, действуя на сердечник 2, намагничивает его. В результате он втягивается внутрь катушки. При этом сердечник, эксцентрично насаженный на ось 3, поворачивается до тех пор, пока вращающий момент $M_{\Delta D}$ не уравнивается противодействующим моментом M_{iD} пружин 4. Магнитное поле катушки пропорционально измеряемому току $H \sim I$. Намагниченность сердечника в рабочих диапазонах частоты и амплитуды пропорциональна магнитному полю, а, следовательно, току. Поэтому вращающий момент $M_{\Delta D}$ будет пропорционален квадрату тока.

Противодействующий момент пружин $M_{iD} = k_1 \cdot \varphi$. Равновесие стрелки будет достигнуто при равенстве моментов $M_{AD} = M_{iD}$, тогда угол отклонения равен $\varphi = k \cdot I^2$.

Отсюда следует, что шкала прибора должна быть квадратичной, но подбором сердечника специальной формы добиваются более равномерной шкалы на большей части диапазона измерения. Однако начальная часть шкалы прибора при этом выходит за класс его точности и считается нерабочей. Поскольку φ является функцией I^2 , знак угла поворота не зависит

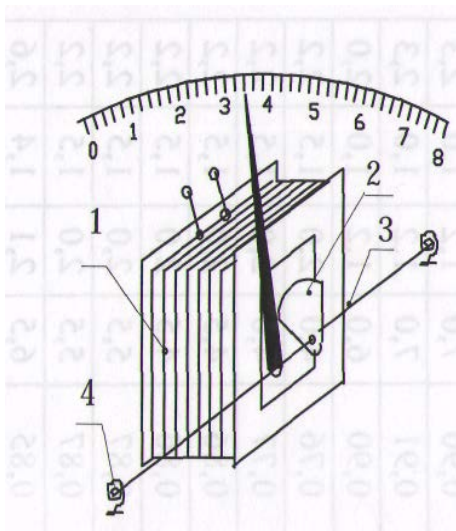


Рис.1.3 - Устройство прибора электромагнитной системы

от направления тока в катушке. Поэтому приборы электромагнитной системы одинаково пригодны для измерений в цепях постоянного и переменного тока.

К достоинству приборов электромагнитной системы можно отнести: возможность измерения постоянных и переменных токов, простоту конструкции, прочность.

Недостатки: неравномерность шкалы, малая точность, малая чувствительность, малый частотный диапазон, влияние внешних магнитных полей, невозможность измерения на начальном участке шкалы.

Электростатическая система (ЭС)

Принцип действия электростатического прибора основан на взаимодействии электрически заряженных проводников. Измерительная часть представляет плоский воздушный конденсатор, состоящий из неподвижного 1 и подвижного 2 электродов (рис. 1.4).

При подаче напряжения U на электроды между ними возникает сила электростатического взаимодействия $F = k' \cdot q^2 = k \cdot U^2$. Под действием этой силы подвижная пластина 2, закрепленная вместе со стрелкой (зеркальцем) на оси 3, втягивается в пространство между неподвижными пластинами, создавая вращающий момент $M_{BP} \sim U^2$. Движение пластины прекращается, когда противодействующий момент закрученной пружины $M_{ID} \sim k_1 \cdot \varphi$ становится равным вращающему моменту. Из условия равенства моментов

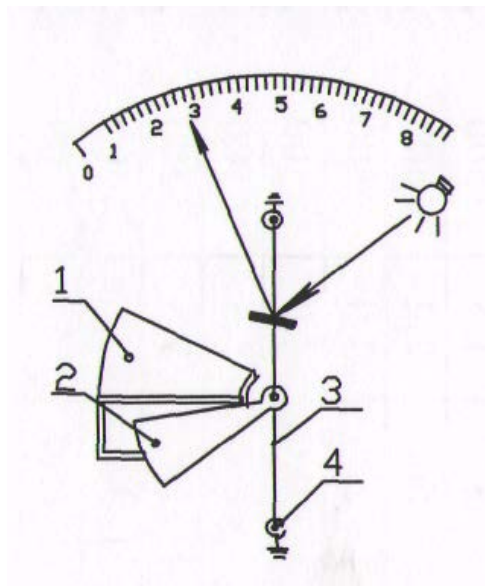


Рис.1.4 - Устройство электростатического вольтметра

следует, что угол отклонения φ определяется квадратом измеряемого напряжения $\varphi = k \cdot U^2$.

Квадратичная зависимость показаний электростатического прибора вносит те же особенности в его характеристику, что и для приборов электромагнитной системы: возможность измерения постоянных и переменных напряжений; неравномерность шкалы; наличие нерабочего участка в начале шкалы.

Достоинством приборов электростатической системы является высокое входное сопротивление ($>10^{10}$ Ом), возможность измерения постоянных и переменных напряжений, достаточно широкий частотный диапазон.

Недостатки: низкая чувствительность; невысокая точность; необходимость экранировки от внешних электрических полей; чувствительность к чистоте и влажности воздуха и чистоте поверхности изоляторов входных клемм; неравномерность шкалы; наличие нерабочего участка в начале шкалы.

Электродинамическая система (ЭД)

Эта система представляет собой две катушки (рис. 1.5), одна из которых неподвижная 1, а другая – подвижная 2. Обе катушки подключаются к сети, и взаимодействие их магнитных полей приводит к повороту подвижной катушки относительно неподвижной.

Из уравнения $\alpha = k' \cdot I_1 \cdot I_2$ видно, что шкала электродинамической системы имеет квадратичный характер. Для устранения этого недостатка подбирают геометрические размеры катушек таким образом, чтобы получить шкалу, близкую к равномерной шкале.

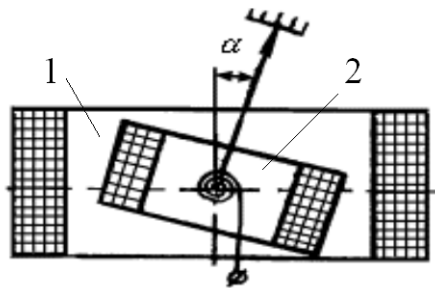


Рис.1.5 - Устройство электродинамической системы

Эти системы чаще всего используются для измерения мощности, т.е. в качестве ваттметров. В этом случае шкала ваттметра равномерная.

Достоинства электродинамических приборов: высокая точность (класс точности до 0,05); возможность использования в цепях постоянного и переменного тока. К *недостаткам* относятся: меньшая по сравнению с магнитоэлектрическими приборами чувствительность; ощутимое влияние внешних магнитных полей; сравнительно большое потребление энергии из измерительной цепи.

На базе измерительных механизмов электродинамической системы выпускают амперметры, вольтметры, ваттметры, частотомеры и фазометры.

Разновидностью электродинамических приборов являются *ферродинамические приборы*, принцип действия которых такой же, как и приборов электродинамической системы, но магнитное поле неподвижной обмотки значительно усилено за счет введения в него магнитопровода из листовой электротехнической стали.

Индукционная система

Приборы индукционной системы получили широкое распространение для измерения электрической энергии. Принципиальная схема прибора приведена на рисунке 1.6.

Электрический счетчик содержит магнитопровод 1 сложной конфигурации, на котором размещены две катушки; напряжения 2 и тока 3. Между полюсами электромагнита помещен алюминиевый диск 4 с осью вращения 5. Принцип действия индукционной системы основан на взаимодействии магнитных потоков, создаваемых катушками тока и напряжения с вихревыми токами, наводимыми магнитным полем в алюминиевом диске.

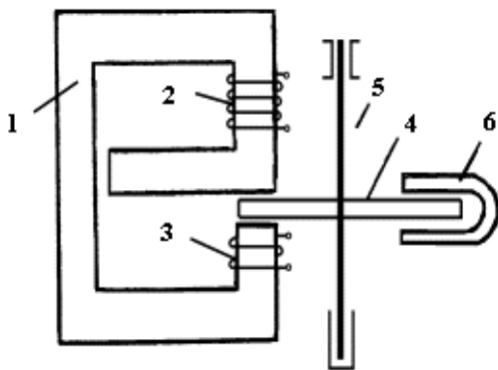


Рис. 1.6 - Устройство индукционной системы

Вращающий момент, действующий на диск

$$M_{BP} = k_i \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot \sin \psi, \quad (1.4)$$

где $\hat{\Phi}_U$ - часть магнитного потока, созданного обмоткой напряжения и проходящего через диск счетчика, Вб;

$\hat{\Phi}_I$ - магнитный поток, созданный обмоткой тока, Вб;

ψ - угол сдвига между Φ_U и Φ_I .

Магнитный поток Φ_U пропорционален напряжению $\Phi_U = k_3 \cdot U$

Магнитный поток Φ_I пропорционален току $\Phi_I = k_3 \cdot I$.

1.3.2 Цифровые измерительные приборы

Цифровые измерительные приборы автоматически преобразуют непрерывную измеряемую величину в дискретную форму, подвергают цифровому кодированию и выдают результат измерения в цифровом виде. Любая непрерывная величина, ограниченная некоторыми предельными

значениями, может быть дискретизирована во времени и квантована по уровню.

Дискретизация - преобразование непрерывной величины ($x(t)$) в дискретную (x_i), при этом сохраняются её мгновенные значения только в определенные моменты времени (t_i), следовательно, при дискретизации теряется часть информации.

Шаг дискретизации - промежуток времени Δt между соседними отсчетами. Преобразование мгновенного значения напряжения в цифровой код осуществляется аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Основными характеристиками АЦП являются количество разрядов и быстродействие. Шаг дискретизации не может быть меньше времени, затраченного АЦП на одно преобразование. Количество разрядов АЦП определяет динамический диапазон оцифрованного сигнала.

Цифровые измерительные приборы многопредельны, универсальны, предназначены для измерения постоянного и переменного напряжения, тока, сопротивления, частоты, фазы, мощности, интервалов времени, ёмкости и т. д.

Достоинства (в сравнении с аналоговыми приборами): более широкий рабочий диапазон частот; высокую точность; быстродействие; получение результатов измерения в удобной для считывания форме; возможность ввода измерительной информации в ЭВМ.

Широкое применение имеют комбинированные цифровые приборы типа вольтамперметров, которые, как правило, имеют высокое входное сопротивление в режиме измерения напряжения и низкое в режиме измерения тока.

Мультиметр

Мультиметр является универсальным прибором для измерения постоянного и переменного тока и напряжения, сопротивления постоянному то-

ку, проверки р-п переходов. Мультиметр имеет преобразователь средне-квадратичного значения, поэтому он обеспечивает измерение истинного среднеквадратичного значения переменного напряжения (тока) произвольной формы, с постоянной и без постоянной составляющей.

Органы управления мультиметра

Кнопки: P/ON - включение / выключение питания прибора;

V, mA, Ω - режим измерения напряжения, тока, сопротивления соответственно.

Гнезда: COM - общий (для отрицательного провода).

COM - V, Ω - для измерения напряжения, сопротивления.

Выбор функций и предела измерений производится с помощью переключателя.

При измерении постоянных напряжений/токов переключатель пределов устанавливается на требуемый предел. Если измеряемое значение заранее неизвестно, необходимо установить на максимальный предел, а затем уменьшать его до тех пор, пока не получится необходимая точность измерений.

Диапазон рабочих частот 45-450 Гц.

Точность меняется при изменении предела измерений (см. паспортные данные прибора).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как классифицируются электроизмерительные приборы?
2. Что такое мера?
3. Как определить класс точности прибора?
4. Опишите принцип действия магнитоэлектрической системы.
5. Что такое шаг дискретизации?

6. Принцип действия электромагнитной системы.
7. Назовите основные характеристики электроизмерительных приборов.
8. Как по виду выдаваемой информации делятся приборы?
9. Что такое измерение?
10. Что называется чувствительностью прибора?
11. Как на панели прибора обозначается принцип действия всех систем?
12. Как определить цену деления прибора?
13. Что такое вольтамперная характеристика?
14. Каким прибором измеряется напряжения, как он включается в цепь?
15. Каким прибором измеряется ток, как он включается в цепь?
16. Для чего используются рабочие меры и приборы?
17. Как в электродинамической системе приборов устраняют квадратичный характер шкалы?
18. Принцип действия индукционной системы.
19. Принцип действия электродинамической системы.
20. Расскажите, как работает мультиметр.

Тестовое задание № 1**Тема: Электроизмерительные приборы**

1. Магнитоэлектрическими приборами измеряют
 - а) электрический ток;
 - б) магнитную индукцию;
 - в) магнитодвижущую силу;
 - г) электрический потенциал.
2. Какой измерительный механизм называют электродинамическим?
 - а) измерительный механизм, в котором вращающий момент возникает в результате взаимодействия магнитного поля, создаваемого электромагнитом, и подвижного контура с током;
 - б) измерительный механизм, в котором вращающий момент создается путем взаимодействия двух контуров с током, одна из которых подвижная;
 - в) измерительный механизм, в котором вращающий момент создается благодаря действию магнитного поля неподвижной катушки на ферромагнитное тело, являющееся подвижной частью механизма.
3. Какую величину измеряет вольтметр?
 - а) напряжение;
 - б) мощность;
 - в) силу тока;
 - г) сопротивление.
4. Какую погрешность показывает класс точности?
 - а) относительную;
 - б) абсолютную;
 - в) приведенную.
5. Как определяется цена деления прибора?
 - а) отношение предела измерений к количеству измерений;
 - б) отношение количества делений шкалы к пределу измерений;
 - в) отношение предела измерений к количеству делений шкалы;

- г) отношение абсолютной погрешности к текущему значению измеряемой величины.
6. Какой показатель нельзя определить из условных обозначений на шкале прибора?
- а) абсолютную погрешность;
 - б) приведенную погрешность;
 - в) условия применения прибора в работе;
 - г) измерительную систему прибора.
7. Что не является недостатком электростатической системы электроизмерительных приборов?
- а) низкая чувствительность;
 - б) влияние температуры на точность измерения;
 - в) необходимость экранировки от внешних электрических полей;
 - г) невысокая точность.
8. Для какой измеряемой величины используются приборы индукционной системы?
- а) электрической энергии;
 - б) мощность;
 - в) силу тока;
 - г) напряжение.
9. К какой системе электроизмерительных приборов относятся ферродинамические приборы?
- а) магнитоэлектрической;
 - б) электродинамической;
 - в) электромагнитной;
 - г) электростатической.
10. Какая из основных характеристик электроизмерительных приборов может иметь несколько подвеличин?
- а) область рабочих частот;
 - б) порог чувствительности;
 - в) диапазон измерений;
 - г) чувствительность.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Исследование линейной электрической цепи постоянного тока с последовательным и смешанным соединением приемников электрической энергии.

Цель работы: 1. Проверить экспериментальным и расчетным путем закон Ома.
2. Проверить экспериментальным и расчетным путем первый и второй закон Кирхгофа.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Любая электрическая цепь включает в себя источники электрической энергии и потребители (приемники) электрической энергии. Источники питания постоянного тока являются гальванические элементы, аккумуляторы, машины постоянного тока, различные устройства преобразующие (выпрямляющие) переменный ток в постоянный ток. При подключении источника энергии постоянного тока к замкнутой цепи возникает постоянный электрический ток.

Электрическим током называется направленное перемещение электрических зарядов. За положительное направление тока принято условно считать направление движения положительных зарядов от плюса источника к минусу. На схеме направление тока совпадает с направлением ЭДС и указывается стрелкой (рис. 2.1).

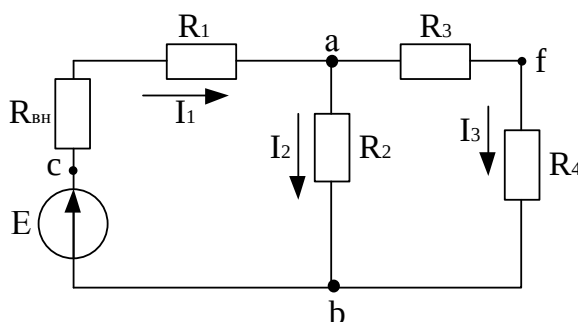


Рис. 2.1 –Схема разветвленной электрической цепи

Схемой называется графическое изображение электрической цепи с помощью условных обозначений ее элементов. Электрические схемы состоят из узлов, ветвей и контуров (рис 2.1).

Узлом электрическим называется точка соединения трех и более ветвей. На электрической схеме (рис. 2.1) представлены узлы «а» и «b».

Ветвью называется часть электрической схемы состоящей из одного или нескольких элементов соединенных последовательно, начинающихся и заканчивающихся в узлах.

Контуром называется замкнутый путь, проходящий по отдельным ветвям электрической схемы, где не один элемент не повторяется дважды. На электрической схеме (рис. 2.1) представлены три контура: «*bсab*», «*afba*», «*afbca*».

Приемниками электрической энергии называются устройства, в которых электрическая энергия преобразуется в энергию другого вида: световую, тепловую, механическую и т.п. *Потребители* в электрических цепях постоянного тока характеризуются активным сопротивлением R , Ом. Они могут быть подключены к источнику питания последовательно, параллельно и смешано. На схемах приемники электрической энергии обозначаются прямоугольниками и представляют собой сопротивления постоянному электрическому току (рис. 2.1).

Расчеты электрических схем (т.е. определение силы протекающей по ветви тока, значения падения напряжений на отдельных элементах схемы и т.д.) осуществляются по основным законам электротехники.

Зависимость тока от ЭДС для разветвленной цепи (рис 2.1) с одним источником питания определяется законом Ома, согласно которому *сила тока прямо пропорциональна ЭДС и обратно пропорциональна сопротивлению всей цепи*

$R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление источника питания;

При *последовательном* соединении элементов конец первого потребителя соединяются с началом второго, конец второго с началом третьего и т.д. (рис. 2.3). Начало цепи первого и конец последнего потребителей подключается к зажимам источника. Эквивалентное сопротивление рассчитывают по формуле

Эквивалентное сопротивление при параллельном соединении

4. Включить электрическую цепь на постоянное напряжение при замкнутом ключе K_1 и K_2 , выполнить измерение токов и напряжений на каждом элементе цепи. Записать показания в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

[illegible]

6. Включить электрическую цепь на постоянное напряжение, при разомкнутом ключе K_1 и замкнутом ключе K_2 выполнить измерения токов и напряжений на каждом элементе цепи. Записать показания в таблицу 2.3.

Таблица 2.3

[illegible]

...											
n											

8. Составить уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов 4 и 5. Подставить значения токов из таблицы 2.3 и проверить выполнение этого закона. Сделать выводы.

9. Составить уравнения по второму закону Кирхгофа для контуров схемы изображенной на рис. 2.4. Подставить значения величин из таблицы 2.3 и проверить выполнение этого закона. Сделать выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Напишите закон Ома для участка цепи?
2. Первый закон Кирхгофа, формула, определение.
3. Как определяется эквивалентное сопротивление при последовательном соединении элементов электрической цепи?
4. Что называется электрическим током?
5. Дайте понятие контура?
6. Как выполнить параллельное соединение элементов?
7. Назовите закон Ома для полной цепи?
8. Запишите формулу для определения эквивалентного сопротивления при параллельном соединении элементов цепи?
9. Запишите второй закон Кирхгофа?
10. Дайте определение понятия «узел»?
11. Дайте определение понятия «ветвь»?
12. Дайте определение понятия «контур»?

Тестовое задание № 2

Тема: Электрические цепи постоянного тока

1. 1) сколько независимых контуров в цепи?

2) сколько уравнений по второму закону

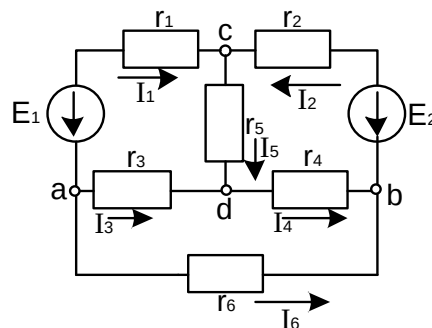
Кирхгофа нужно составить для расчета этой цепи?

а) 1) 7; 2) 3

б) 1) 3; 2) 3

в) 1) 3; 2) 4

г) 1) 4; 2) 7



2. Чему равно значение второго тока, если $I_1 = 5\text{ A}$,

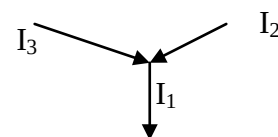
$I_3 = 3\text{ A}$.

а) 2 A;

б) 8 A;

в) - 2A;

г) -8A.



3. Назовите единицу измерения электрического сопротивления

а) Сименс;

г) Ом;

б) Ватт;

д) Ампер.

в) Вольт;

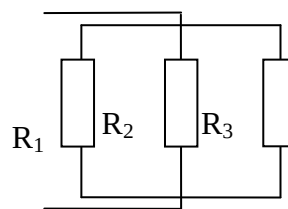
4. Найти эквивалентное сопротивление разветвления, если сопротивления равны $R_1=4\text{ Ом}$, $R_2=2\text{ Ом}$, $R_3=3\text{ Ом}$.

а) $R_{\text{экв}} = 1,1\text{ Ом}$;

б) $R_{\text{экв}} = 0,9\text{ Ом}$;

в) $R_{\text{экв}} = 2,7\text{ Ом}$;

г) $R_{\text{экв}} = 1,1\text{ Ом}$.

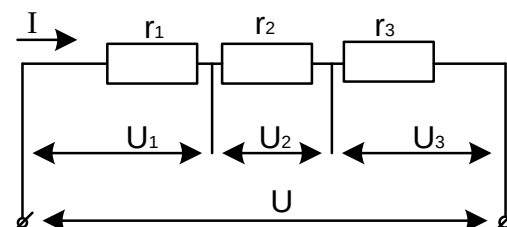


5. Найдите значения напряжений U_1 , U_2 , U_3 , если $U=110\text{ В}$, $r_1=2\text{ Ом}$, $r_2=4\text{ Ом}$, $r_3=5\text{ Ом}$

а) $U_1=20\text{ В}$, $U_2=40\text{ В}$, $U_3=50\text{ В}$;

б) $U_1=40\text{ В}$, $U_2=50\text{ В}$, $U_3=20\text{ В}$;

в) недостаточно данных.



6. Что называется работой сторонних сил, затрачиваемой на перемещение единичного положительного заряда внутри источника от зажима с меньшим потенциалом к зажиму с большим потенциалом?

- а) электрическим напряжением;
- б) электрическим током;
- в) ЭДС.

7. Участок электрической цепи, образованный последовательно соединёнными элементами и характеризующийся собственным значением тока в данный момент времени называют.....

- а) ветвью;
- б) узлом;
- в) контуром.

8. Какому закону соответствует определение: «Ток на участке электрической цепи прямо пропорционален напряжению на этом участке и обратно пропорционален его сопротивлению»?

- а) закон Ома;
- б) первый закон Кирхгофа;
- в) второй закон Кирхгофа.

9. Какая величина измеряется в амперах?

- а) сила тока;
- б) электрическое напряжение;
- в) электрическое сопротивление;
- г) электрическая проводимость;
- д) мощность.

10. Соединения трёх и более ветвей называют.....

- а) ветвью;
- б) контуром;
- в) узлом.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Последовательное соединение реальной катушки индуктивности и конденсатора переменной емкости

Цель работы: 1. Исследование режимов работы в цепи переменного тока при последовательном соединении элементов.
2. Анализ явления резонанса напряжений.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основными элементами электрической цепи переменного тока являются активное сопротивление (резисторы), катушка индуктивности и конденсатор емкости. Их можно соединить последовательно (рис.3.1). Последовательное соединение элементов – это такой вид соединения, при котором к концу предыдущего элемента присоединяется начало следующего.

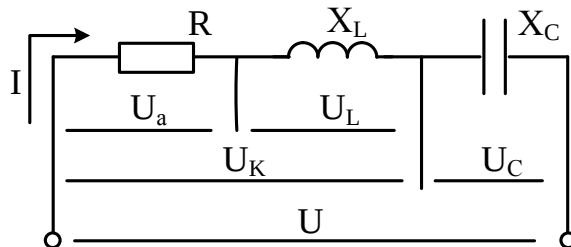


Рис.3.1 – Схема цепи при последовательном соединении R , L , C .

Реальная катушка индуктивности обладает активным сопротивлением R и индуктивностью L . Примером может служить катушка двигателя, трансформатора, прибора и т. д.

Любой элемент цепи, обладающий индуктивностью, создает определенное сопротивление при прохождении через него переменного тока. Это можно пояснить тем, что в индуктивном элементе при прохождении переменного тока происходит возбуждение ЭДС самоиндукции e_L , индукционный ток которой направлен против основного тока. Это приводит к появлению дополнительного индуктивного сопротивления. Это индуктивное сопротивление пропорционально частоте тока f и индуктивности цепи L

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L, \quad (3.1)$$

где ω - угловая частота, $\omega = 2\pi \cdot f$.

При промышленной частоте f равной 50 Гц угловая частота равна

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

Полное сопротивление реальной катушки индуктивности Z_K при переменном токе, состоящее из последовательно соединенных активного R и индуктивного X_L сопротивлений, в комплексной форме (приложение 2) выражается формулой

$$\underline{Z}_K = R + jX_L = Z_K \cdot e^{j\varphi}, \quad (3.2)$$

где Z_K - модуль сопротивления катушки, $Z_K = \sqrt{R^2 + X_L^2}$;

φ - угол сдвига фаз между напряжением и током, $\varphi = \arctg \frac{X_L}{R}$.

Конденсатор обладает емкостным сопротивлением. Емкостное сопротивление - это сопротивление переменному току, которое оказывает электрическое поле, возникающее вокруг зарядов, накапливаемых на пластинах конденсатора.

Емкостное сопротивление обратно пропорционально угловой частоте тока и ёмкости цепи, C

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (3.3)$$

Следует отметить, что ёмкостное сопротивление по существу своего действия противоположно индуктивному сопротивлению, поэтому при определении результирующего реактивного сопротивления X индуктивное сопротивление $X_L > 0$, а емкостное $X_C < 0$, из чего следует

$$X = X_L - X_C \quad (3.4)$$

Поэтому при последовательном соединении реальной катушки индуктивности и конденсатора полное сопротивление цепи в комплексной форме

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = Z \cdot e^{j\varphi}, \quad (3.5)$$

где Z - модуль входного (полного) сопротивления цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.6)$$

Данную формулу (2.6) можно представить в следующем виде

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3.7)$$

По закону Ома ток в цепи с последовательным соединением реальной катушки индуктивности и конденсатора (рис. 3.1) находится по формуле

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (3.8)$$

Значение тока является одинаковым для всех элементов, соединенных последовательно.

Напряжения элементов в схеме (рис.3.1) определяются следующим образом:

на реальной катушке индуктивности - $U_K = Z_K \cdot I$;

активная составляющая напряжения (на резисторе) - $U_a = R \cdot I$;

индуктивная составляющая напряжения - $U_L = X_L \cdot I$;

емкостное напряжение (на конденсаторе) - $U_C = X_C \cdot I$;

входное, общее напряжение (всей цепи) - $U = Z \cdot I$.

В такой цепи сдвиг фаз между напряжением U и током I определяется

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} \quad (3.9)$$

Необходимо отметить, что индуктивное X_L и емкостное X_C сопротивления элементов являются реактивными сопротивлениями. Эти две величины связаны с понятием реактивной мощности Q . Реактивная мощность характеризует энергию обмена между источником и приемником, которая не преобразуется в другие виды энергии. Для индуктивности это магнитная энергия, для емкости – электрическая. Реактивная мощность Q , измеряется в вольт-амперах реактивных, *Var* и рассчитывается

$$Q = I^2 \cdot X = I^2 \cdot (X_L - X_C) = I^2 \cdot X_L - I^2 \cdot X_C = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (3.10)$$

Сопротивление резистивного элемента R называется активным сопротивлением. Эта величина связана с активной мощностью P . Активная мощность – энергия обмена между источником и приемником, которая преобразуется в другой вид энергии (в резистивном элементе преобразование электрической энергии в тепловую, у лампы накаливания - электрическая преобразуется в световую энергию). Процесс передачи активной энергии необратим. Активная мощность измеряется в ваттах, $Вт$ и рассчитывается следующим образом

$$P = I^2 \cdot R = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.11)$$

Величина, связывающая активную и реактивную мощности, называется полной мощностью цепи S , измеряется в вольт амперах, $ВА$

$$S = Z \cdot I^2 = \sqrt{P^2 + Q^2} = U \cdot I \quad (3.12)$$

Из формулы (3.11) можно выразить величину, называемую коэффициентом мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{R}{Z} \quad (3.13)$$

Коэффициент мощности, $\cos \varphi$ – важный эксплуатационный параметр электроприемники. Эта величина показывает, какую часть от полной мощности составляет активная мощность. Чем выше $\cos \varphi$, тем при меньшем значении тока в цепи может быть произведено преобразование электроэнергии в другие виды энергии. Это приводит к уменьшению потерь электроэнергии, ее экономии и удешевлению устройств электропередачи.

Необходимо обратить внимание на следующий момент - при последовательном соединении катушки индуктивности и конденсатора (рис.3.1) возможен один из видов нагрузки: а) при $X_L > X_C$ ($\varphi > 0$) цепь носит активно-индуктивный характер, ток отстает по фазе от входного напряжения; б) при $X_L < X_C$ ($\varphi < 0$) цепь носит активно - ёмкостный характер, ток опережает по фазе входное напряжение; в) при $X_L = X_C$ возникает резонанс напряжения, цепь носит активный характер ($\varphi = 0$).

Анализ цепи значительно упрощается и получает большую наглядность, если использовать построение векторных диаграмм (рис.3.2, а). Результатом построения векторной диаграммы при последовательном соединении элементов является вектор входного напряжения цепи. Вектор суммарного (входного) напряжения цепи получают путём сложения активной, индуктивной и ёмкостной составляющих напряжения (рис.3.2,а)

$$\vec{U} = \vec{U}_a + \vec{U}_L + \vec{U}_C \quad (3.14)$$

Векторная диаграмма для последовательной цепи (рис.3.1) строятся с учётом следующих правил (для условия $X_L > X_C$):

1. Строится в масштабе вектор тока $\vec{I}$, так как ток во всех элементах цепи один и тот же (последовательное соединение), направление вектора тока выбирается произвольно (чаще всего по горизонтальной, действительной оси).

2. Выбирается масштаб для построения вектора напряжений. Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током, поэтому вектор активной составляющей напряжения $\vec{U}_a$ откладывают на той же прямой, что и ток - из начала координат.

3. Напряжение на индуктивном элементе опережает ток на 90° , поэтому вектор индуктивной составляющей напряжения $\vec{U}_L$ откладывается под углом 90° к вектору тока в сторону опережения (все векторы вращаются против часовой стрелки с угловой частотой ω) из конца вектора $\vec{U}_a$.

4. Напряжение на катушке $\vec{U}_\Sigma$ есть сумма векторов напряжений $(\vec{U}_a + \vec{U}_L)$.

5. Напряжение на ёмкостном элементе отстает по фазе от тока на 90° , поэтому вектор ёмкостного напряжения $\vec{U}_C$ откладывается от вектора тока под углом 90° в сторону отставания из конца вектора $\vec{U}_L$.

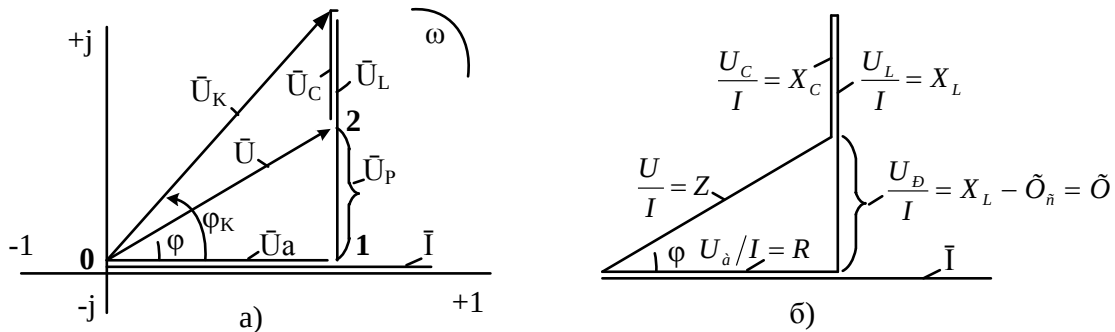


Рис.3.2 – а) векторная диаграмма напряжений для рисунка 3.1 при условии $X_L > X_C$;
б) треугольник сопротивлений при условии $X_L > X_C$

Как видно из векторной диаграммы (рис.3.2,а), модуль результирующего напряжения находят из прямоугольного треугольника «012»

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} \quad (3.15)$$

На векторной диаграмме треугольник «012» есть треугольник напряжений. Если разделить каждую сторону треугольника «012» на величину входного тока, можно получить треугольник сопротивлений (рис.3.2,б).

Если в последовательной цепи (рис.3.1) сделать равными величины сопротивлений X_L и X_C , то возникает явление резонанса напряжений $U_L = U_C$. При резонансе напряжений величина полного сопротивления (формула 3.6) становится минимальной, равной только активному сопротивлению цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R \quad (3.16)$$

Поэтому основным условием резонанса является равенство индуктивного и ёмкостного сопротивлений $X_L = X_C$, при котором ток в цепи становится максимальным $I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R} = I_{\max}$, а коэффициент мощности равен единице $\cos \varphi = 1$ (формула 3.13).

Из условия резонанса напряжений видно, что его осуществление может быть выполнено любым из трёх способов:

а) подбором величины ёмкости, исходя из условия резонанса $\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}$, откуда $C = \frac{1}{\omega^2 L}$; б) подбором величины индуктивности $L = \frac{1}{\omega^2 C}$; в) подбором частоты $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ или комбинацией этих трех способов.

Векторная диаграмма для цепи (рис.3.1) при резонансе напряжения, представлена на рисунке 3.3.

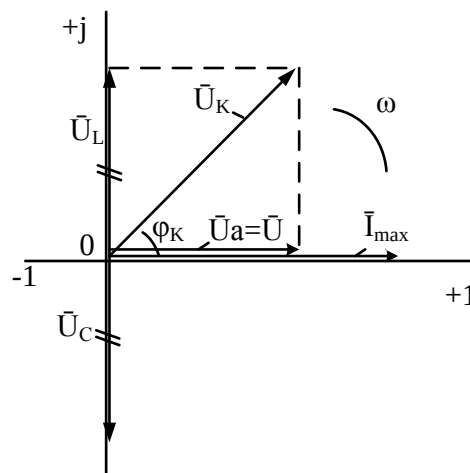


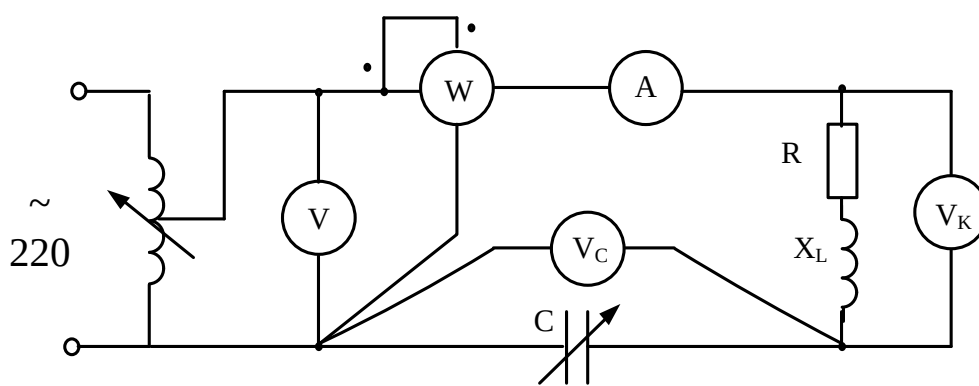
Рис.3.3 - Векторная диаграмма цепи при резонансе напряжений

При резонансе индуктивное напряжение U_L равно ёмкостному напряжению U_C по величине и противоположно по фазе, поэтому реактивное напряжение $U_p = U_L - U_C = 0$, а общее напряжение (формула 3.15) при резонансе равно активному $U = U_a$.

Практическое применение резонанса напряжений находит в радиотехнике (колебательные контуры), автоматике (регулирование частоты), измерительной технике (измерение неэлектрических величин), для компенсации реактивной мощности. Потому что при резонансе происходит непрерывный обмен энергией между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора.

Однако, следует отметить, что при резонансе напряжения могут возникнуть опасно большие напряжения на индуктивности и емкости ($U_L = X_L \cdot I$ и $U_C = X_C \cdot I$), если величины X_L и X_C много больше, чем вели-

1. Собрать электрическую цепь согласно рисунку 3.4.
2. Включить электрическую цепь на переменное напряжение (не более 65В). Изменяя ёмкость конденсатора записать показания всех приборов в таблицу 3.1.



3. Произвести расчет всех величин, указанных в таблице 3.1 по формулам $Z = \frac{U}{I}$; $R = \frac{P}{I^2}$; $X_C = \frac{U_C}{I}$; $Z_K = \frac{U_K}{I}$; $X_L = \sqrt{Z_K^2 - R^2}$; $L = \frac{X_L}{2\pi f}$;

$$U_L = X_L \cdot I; \cos \varphi = \frac{P}{UI}; \varphi = \arccos \frac{P}{UI}$$
[illegible]

4. По данным таблицы 3.1 в масштабе построить векторные диаграммы для трех случаев: $X_L > X_C$; $X_L = X_C$; $X_L < X_C$.

5. В одной системе координат построить резонансные кривые

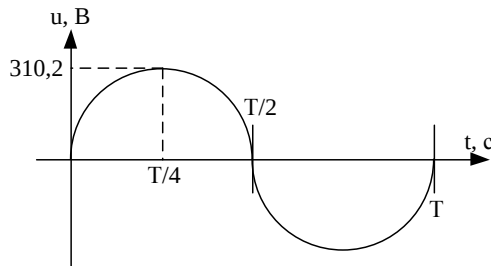
$$I=f_1(C), \quad Z=f_2(C), \quad U_C=f_3(C), \quad U_K=f_4(C), \quad U=f_5(C), \quad \cos\varphi=f_6(C).$$

Примечание: при построении векторной диаграммы значение напряжения катушки строится с использованием формулы

Тестовое задание № 3

Тема: Электрические цепи переменного тока

1. Действующее значение напряжения составляет.....



а) 310,4 В;

б) 220 В;

в) 110 В;

г) 437,4 В.

2. Угловая частота ω при периоде $T = 0,01$ с составит.....

а) $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$;

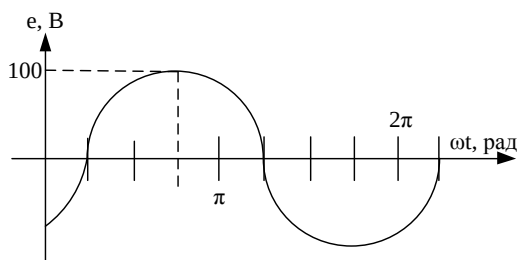
б) $\omega = 0,01 \text{ с}^{-1}$;

в) $\omega = 628 \text{ с}^{-1}$;

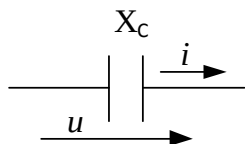
г) $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$.

3. Частота синусоидального тока f определяется в соответствии с выражением.....

а)



6. В выражениях для мгновенных значений однофазного синусоидального тока



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Параллельное соединение реальной катушки индуктивности и конденсатора переменной ёмкости

Цель работы: 1. Исследование режимов работы в цепи переменного тока с параллельным соединением реальной катушки индуктивности и конденсатора.

2. Анализ явления резонанса токов.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из параллельно соединенных реальной катушки индуктивности и конденсатора (конденсаторная батарея). Схема такой цепи представлена на рисунке 3.1. Полные сопротивления параллельных ветвей определяются с учетом активной R и реактивной X составляющих сопротивлений.

Сопротивление первой ветви (реальная катушка индуктивности) в комплексной форме

$$\underline{Z}_1 = R + jX_L = Z_1 \cdot e^{j\varphi_1}, \quad (4.1)$$

где Z_1 - модуль сопротивления первой ветви, $Z_1 = \sqrt{R^2 + X_L^2}$;

φ – угол сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = \arctg \frac{X_L}{R}$.

Сопротивление второй ветви (конденсатор) в комплексной форме

$$\underline{Z}_2 = -jX_C = X_C \cdot e^{-j\varphi_2} = X_C \cdot e^{-j90^\circ}, \quad (4.2)$$

где X_C - сопротивление второй ветви.

В схеме с параллельным соединением (рис.4.1) входное напряжение U является общим для параллельных ветвей. Токи в параллельных ветвях цепи рассчитываются по закону Ома в комплексной форме

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1}, \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2}. \quad (4.3)$$

Эти токи будут сдвинуты по отношению к напряжению U на угол φ_1 и φ_2 соответственно, причём величина этих углов определяется параметрами сопротивлений цепи

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1}, \quad \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} \quad (4.4)$$

Так как в цепи на рисунке 4.1 активное сопротивление второй ветви R_2 равно нулю, то угол сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = 90^\circ$.

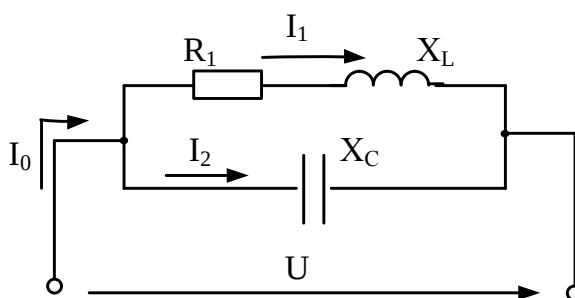


Рис.4.1 - Схема цепи при параллельном соединении реальной катушки индуктивности и конденсатора емкости

Анализ такой цепи удобно проводить с использованием векторных диаграмм.

Векторную диаграмму (рис.4.2,а) для цепи параллельного соединения элементов (рис.4.1) строят следующим образом:

1. В качестве исходного вектора при параллельном соединении берут вектор входного напряжения $\vec{U}$ (напряжение в этом случае является одно и то же для всех параллельных ветвей). Откладывают $\vec{U}$ по горизонтальной оси из начала координат (начальная фаза равна нулю).

2. Под углом φ_1 к напряжению откладывают вектор действующего значения тока $\vec{I}_1$, в сторону отставания (т.к. в ветви содержится активное сопротивление R и индуктивность L), а под углом $\varphi_2 = 90^\circ$ из конца вектора $\vec{I}_1$ откладывается вектор действующего значения тока $\vec{I}_2$ в сторону опережения (т.к. ветвь содержит только емкость C).

3. Суммируя эти два вектора тока, получают вектор результирующего (входного) тока цепи.

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 \quad (4.5)$$

Из векторной диаграммы видно, что составляющие токи в ветвях будут определяться:

активные (на активном элементе R)

$$I_{a1} = I_1 \cdot \cos \varphi_1; \quad I_a = I_0 \cdot \cos \varphi; \quad (4.6)$$

реактивные (на реактивных элементах - катушке индуктивности L и конденсаторе емкости C)

$$I_{p1} = I_1 \cdot \sin\varphi_1; \quad I_{p2} = I_2 \cdot \sin\varphi_2; \quad I_p = I_0 \cdot \sin\varphi; \quad (4.7)$$

результатирующий (общий, входной) ток цепи

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} \quad (4.8)$$

где $I_p = I_{p2} - I_{p1} = I_C - I_L$.

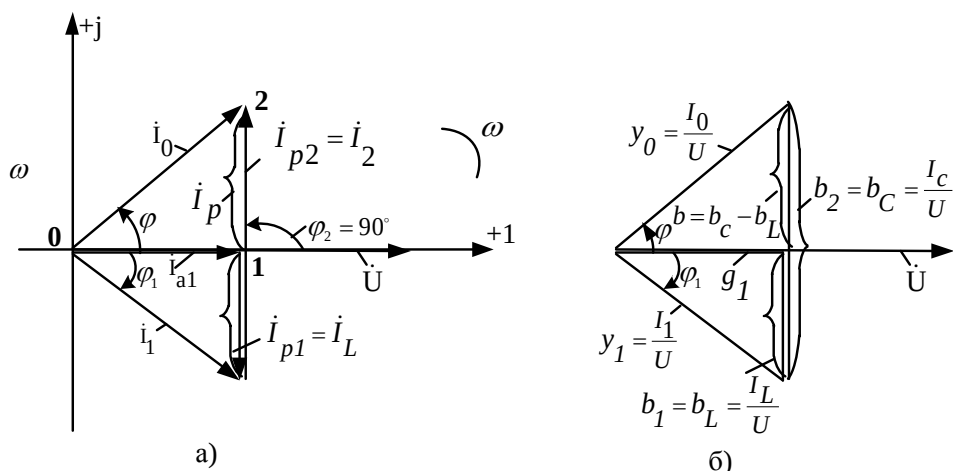


Рис. 4.2 - а) векторная диаграмма параллельного соединения элементов (рис.3.1);
 б) треугольник проводимостей при условии $b_L > b_C$

Формула общего сопротивления всех параллельных ветвей имеет вид

$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_l}{Z^2}\right)^2 + \left(\frac{X}{Z^2}\right)^2}} \quad (4.9)$$

В этой формуле можно сделать замену $\frac{R}{Z^2} = g$; которая представляет собой активную проводимость цепи, а отношение $\frac{X}{Z^2} = b$ - реактивную проводимость (рис.4.2.б), поэтому формула (4.9) может быть упрощена

$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{g^2 + b^2}} = \frac{1}{\sqrt{g_1^2 + (b_1 - b_2)^2}} = \frac{1}{y_0} \quad (4.10)$$

где g_1 - активная проводимость первой ветви;

b_1 - индуктивная проводимость;

b_2 - емкостная проводимость;

y_0 - полная проводимость всей цепи.

Схема, представленная на рисунке 4.1. может иметь следующий вид нагрузки:

а) если $b_1 > b_2$, то цепь носит активно-индуктивный характер; б) если $b_1 < b_2$, то цепь носит активно-емкостный характер; в) при $b_1 = b_2$ характер цепи чисто активный, в цепи наступает явление резонанса токов.

Таким образом, основным условием резонанса токов является равенство реактивных проводимостей $b_1 = b_2$, или равенство отношений

$$\frac{X_1}{Z_1^2} = \frac{X_2}{Z_2^2}. \quad (4.11)$$

При резонансе ток в неразветвленной части цепи ограничен только активной проводимостью (т.к. $b_L - b_C = 0$) и принимает минимальное значение ($I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{I_a^2} = I_a$, т.к. $I_p = I_C - I_L = 0$).

То есть значение входного тока при резонансе тока можно представить следующей формулой

$$I_0 = U \cdot \sqrt{g_1^2 + (b_1 - b_2)^2} = U \cdot g_1 \quad (4.12)$$

При этом явлении реактивные токи в ветвях $I_{p1} = b_1 \cdot U$ и $I_{p2} = b_2 \cdot U$ равны по величине и находятся в противофазе, т.е. противоположны по направлению (рис.4.3).

Из формулы (4.11) видно, что резонанс токов может быть осуществлен одним из четырёх способов: а) изменением емкости C ; б) изменением индуктивности L ; в) изменением угловой частоты $\omega = 2\pi f$; г) изменением активных сопротивлений R .

Рассмотрим поэтапно возникновение явления резонанса тока способом изменения емкости конденсатора (рис. 4.3, а).

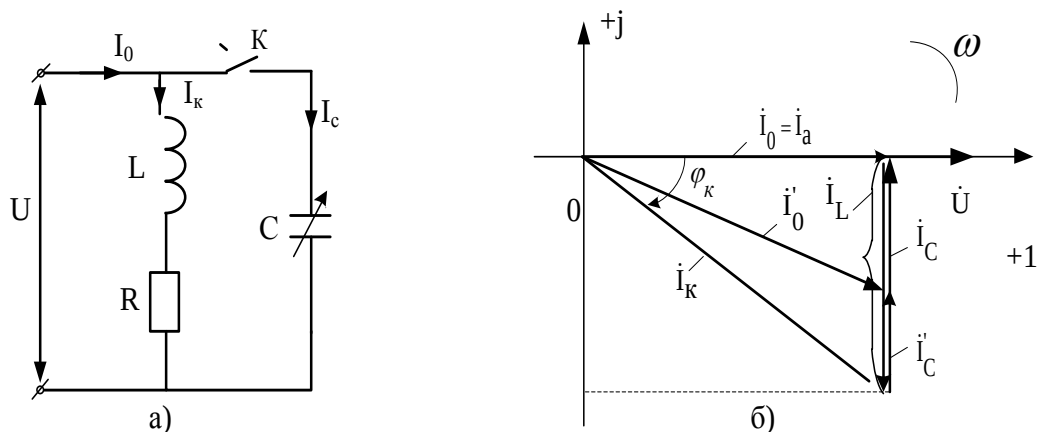


Рис. 4.3 - а) параллельное соединение реальной катушки индуктивности и конденсатора;
б) векторная диаграмма получения резонанса токов

Пока цепь конденсатора разомкнута, общий ток равен току катушки $I_0 = I_{\hat{E}}$. На векторной диаграмме (рис. 4.3,б) показаны постоянные векторы напряжения U и тока I_K . Если включить в цепь конденсатор, то в ветви конденсатора появится ток $I_C^l = \omega \cdot C \cdot U$, опережающий напряжение на угол $\varphi = 90^\circ$. По мере увеличения тока I_C^l общий ток I_0 уменьшается. В момент резонанса токов ($I_L = I_C$) общий ток I_0 достигает минимального значения. Его величина равна активной составляющей тока I_a . Из векторной диаграммы видно, что при резонансе токов коэффициент мощности $\cos \varphi = 1$. Рассмотренный случай параллельного включения емкости к активно-индуктивной нагрузке часто используется на практике с целью повышения $\cos \varphi$. Активно-индуктивную нагрузку в силовых сетях сельского хозяйства и промышленного назначения представляют асинхронные двигатели.

При резонансе токов $I_{\hat{N}} = I_L$ или $\omega \cdot C \cdot U = I_K \cdot \sin \varphi$, значит емкость рассчитывается по формуле

$$C = \frac{I_K \sin \varphi}{\omega U} \quad (4.13)$$

По величине коэффициента мощности $\cos\varphi$ в электроустановках можно судить об использовании энергии и о качестве эксплуатации электрических установок переменного тока. Коэффициент мощности является технико-экономическим показателем работы данного предприятия. Низкий коэффициент мощности в основном есть результат неполной загрузки оборудования или неправильного выбора электрооборудования. Низкий коэффициент мощности $\cos\varphi$ ведет к увеличению потерь энергии. По правилам устройства электроустановок (ПУЭ) средний коэффициент мощности электроустановок, присоединенных к электрическим сетям должен быть не ниже 0,92-0,95.

Следовательно, повышение коэффициента мощности электрических установок является важной технико-экономической проблемой, так как это позволяет экономить электрическую энергию. Одним из основных путей увеличения коэффициента мощности является применение конденсаторов, которые присоединяются в схему параллельно приёмнику (рис. 4.3,а), благодаря чему компенсируется реактивная энергия активно-индуктивного приемника.

Реактивная мощность компенсирующей установки определяется в соответствии с треугольником мощностей (рис. 4.4)

$$Q_K = Q_1 - Q_2 = P_1(tg\varphi_1 - tg\varphi_2), \quad (4.14)$$

где $Q_1 = P_1 \cdot tg\varphi_1$ - реактивная мощность до компенсации при $\cos\varphi_1$;

$Q_2 = P_2 \cdot tg\varphi_2$ - реактивная мощность при заданном значении $\cos\varphi_2$.

Реактивную мощность компенсирующей установки (конденсаторов) можно также определить

$$Q_K = \omega \cdot C \cdot U^2. \quad (4.15)$$

Приравняв правые части формул (4.14) и (4.15), получим

$$C = \frac{P_1(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)}{2\pi f \cdot U^2} \quad (4.16)$$

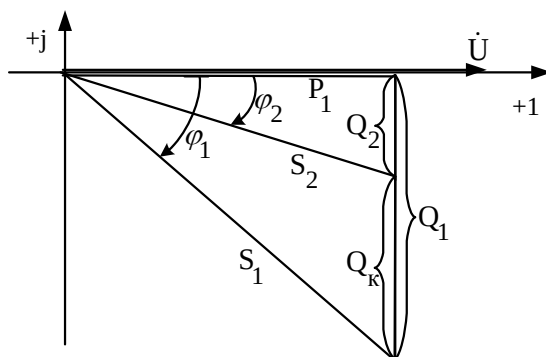


Рис. 4.4. - Треугольник мощностей для определения компенсационной мощности

Для полной компенсации ($\varphi_2 = 0$) необходимо, чтобы

$$C = \frac{P_1 \tan \varphi_1}{2\pi f \cdot U^2} \quad (4.17)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему, приведённую на рисунке 4.5.

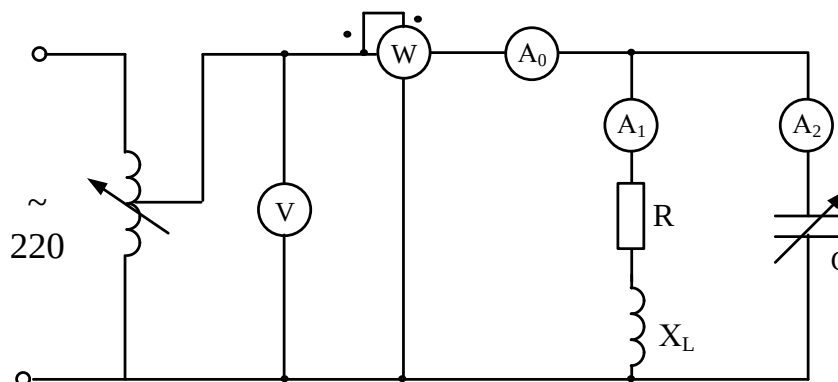


Рис. 4.5 - Электрическая схема экспериментальной цепи

2. При выключенном конденсаторе ($C=0$) включить цепь в сеть на переменное напряжение (не более 220 В), записать показания всех приборов в таблицу 4.1.

3. Изменяя значения емкости на конденсаторе (не менее 5), записать показания всех приборов в таблицу 4.1.

4. По данным таблицы, в одной системе координат построить зависимости: $I_0 = f_1(C)$, $I_1 = f_2(C)$, $I_2 = f_3(C)$, $\cos \varphi = f_4(C)$

5. Построить векторные диаграммы для трех случаев:

$$\varphi > 0 (I_L < I_C); \varphi < 0 (I_L > I_C); \varphi = 0 (I_L = I_C)$$

6. Сделать выводы по работе. Определить ёмкость конденсатора, при которой наступает явление резонанса токов.

Примечание: Для построения векторных диаграмм необходимо рассчитать для катушки индуктивности, которые будут одинаковыми для всех экспериментов

$$I_{a1} = I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad I_L = I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad \cos \varphi_1 = \frac{P}{U \cdot I_1}$$

Таблица 4.1

№	Измеряемые величины						Вычисления	
	U, В	C, мкФ	P, Вт	I ₀ , А	I ₁ = I _к , А	I ₂ = I _с , А	cosφ	φ, град.
1								
...								
n								

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется резонансом токов?
2. При каком условии возникает резонанс токов?
3. Для чего необходимо повышать коэффициент мощности в электрических установках?
4. Почему при резонансе токов ток в неразветвленной части цепи принимает минимальное значение, а при переходе резонанса увеличивается?
5. Как определить реактивную мощность компенсирующей установки и величину ёмкости, необходимую для полной компенсации сдвига фаз между током и напряжением?
6. Объясните, почему значение реактивной мощности в цепи при резонансе тока будет равна нулю?
7. Какими способами можно добиться резонанса токов?
8. Чему равно значение реактивного тока в цепи при резонансе токов? Запишите формулу.
9. Чему равен коэффициент мощности при резонансе тока?
10. Чему равно при резонансе токов значение полной мощности цепи?

Тестовое задание № 4

Тема: Цепи однофазного переменного тока

1. Частота синусоидального тока f определяется в соответствии с выражением.....

а) $f = \frac{T}{2p}$

б) $f = T$

в) $f = \frac{1}{T}$

г) $f = 2pT$

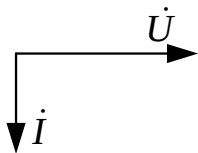
2. В электрической цепи с последовательно включенными активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью наблюдается резонанс.....

а) резонанс мощностей;

б) резонанс токов;

в) резонанс напряжений.

3. По векторной диаграмме определите характер нагрузки.....



а) емкостный ;

б) индуктивный;

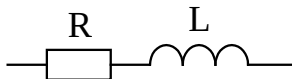
в) активный;

г) активно-индуктивно;

д) активно-емкостный.

4. Активную мощность P цепи синусоидального тока можно определить по формуле....

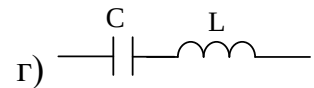
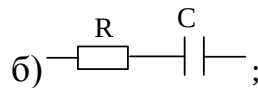
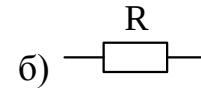
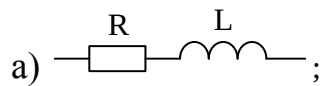
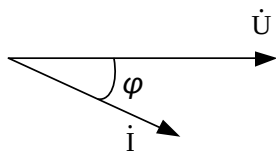
а)



7. В электрической цепи с параллельно включенными катушкой индуктивности и конденсатором наблюдается резонанс. Как он называется?

- а) резонанс токов;
- б) резонанс напряжений;
- в) резонанс мощностей.

8. Векторной диаграмме соответствует схема



9. Резистор с активным сопротивлением $R=10$ Ом, конденсатор емкостью $C=100\text{ мкФ}$ и катушка с индуктивностью $L=100$ мГн соединены последовательно. Тогда полное сопротивление цепи Z при резонансе напряжений равно.....

- а)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

Исследование электрического состояния трехфазной цепи с однофазными приемниками, соединенными звездой

Цель работы: 1. Установить соотношения между линейными и фазными значениями напряжений и токов при соединении потребителя звездой.

2. Изучить влияние параметров одного из трех однофазных приемников, соединенных звездой при их включении в четырёхпроводную и трехпроводную сеть.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Трехфазной системой электрических цепей называется система, состоящая из трёх электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга на $1/3$ периода (то есть на 120°) и создаваемые одним источником электрической энергии.

В качестве источника электрической энергии в трёхфазных цепях используют трёхфазные синхронные генераторы. В трех обмотках синхронного генератора, называемых фазами, индуцируются указанные электродвижущие силы E_A, E_B, E_C .

От трехфазного источника по проводам трехфазной сети получают питание как трёхфазные, так и однофазные приёмники электрической энергии.

Трёхфазный приемник можно рассматривать в общем случае как устройство, имеющее три одинаковых эквивалентных сопротивления, рассчитанные на подключение к трём зажимам трёхфазного источника или проводам трёхфазной сети, между которыми имеются три сдвинутых по фазе напряжения. Отдельные эквивалентные сопротивления трёхфазного

приёмника называются *фазами*. Провода, соединяющие начала фаз приёмников с началами фаз генератора называются *линейными проводами*.

Трёхфазные электрические цепи имеют ряд преимуществ по сравнению с однофазными:

а) возможность использования наиболее простых, надёжных и дешёвых асинхронных электродвигателей; б) меньший расход проводниковых материалов на сооружение линий электропередач и электрических сетей; в) возможность получения двух эксплуатационных напряжений (660/380В; 380/220 В; 220/127 В); г) лучшие экономические показатели трёхфазных генераторов и трансформаторов.

Благодаря своим преимуществам трёхфазные цепи получили более широкое применение по сравнению с другими видами электрических цепей.

Соединение, при котором концы однофазных приёмников или концы трёхфазной нагрузки соединены в одной точке (нейтральная точка), а начала, подключены к линейным проводам, называется *звездой* (рис.5.1). Работа системы не нарушается, если к одной точке подсоединить начала, а концы подключить к линейным проводам. Важно, чтобы в одной точке соединялись одноимённые выводы.

При соединении потребителя звездой трёхфазная цепь может быть четырёхпроводная или трёхпроводная. На рисунке 5.1 показана четырёхпроводная цепь (имеет *нейтральный* (нулевой) провод).

Напряжения между началами и концами фаз генератора (или приёмника) или напряжения между каждым из линейных проводов и нейтральной точкой называются *фазными напряжениями* и обозначаются в общем случае U_ϕ или напряжения отдельных фаз U_a , U_b , U_c . Напряжения между линейными проводами или между началами фаз называется *линейными напряжениями* и обозначаются U_l или U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} .

Соотношение между линейными и фазными напряжениями в векторной форме имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_{ab} &= \bar{U}_a - \bar{U}_b, \\ \bar{U}_{bc} &= \bar{U}_b - \bar{U}_c, \\ \bar{U}_{ca} &= \bar{U}_c - \bar{U}_a. \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

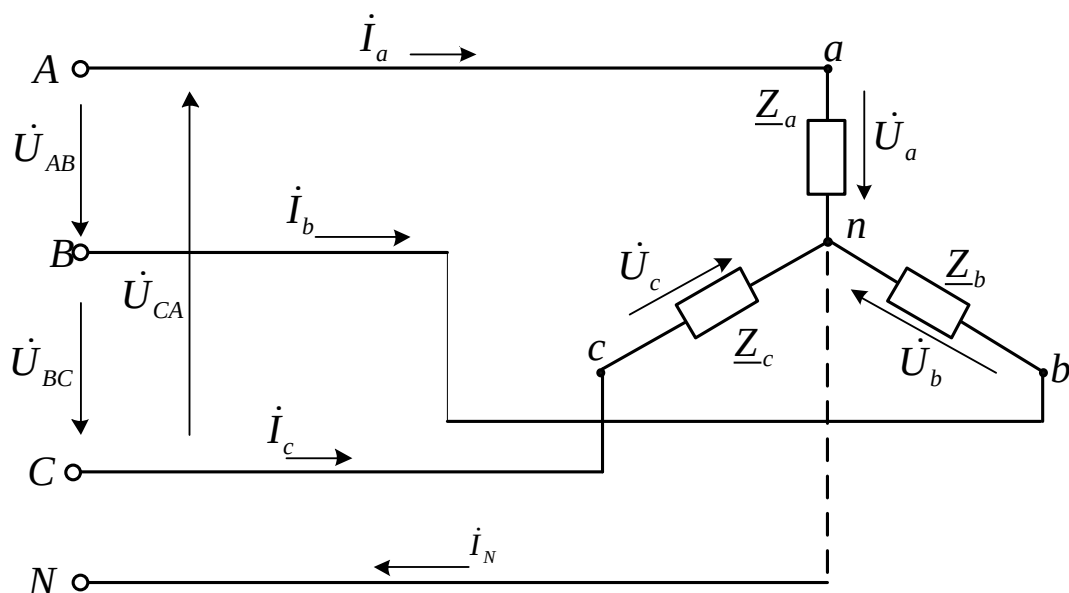


Рис. 5.1 - Соединение потребителя звездой

Линейными токами называется токи $I_{\bar{E}}$, протекающие по линейным проводам. *Фазные токи* – это токи $I_{\bar{\phi}}$, протекающие по фазе приемника.

При соединении звезда соотношение линейных и фазных токов имеет вид

$$I_{\bar{E}} = I_{\bar{\phi}} \quad (5.2)$$

Провод, соединяющий нейтральную точку генератора и приёмника, называется нейтральным проводом. Если сопротивления приемников отдельных фаз Z_a, Z_b, Z_c будут равны между собой, равны и их коэффициенты мощности $\cos \varphi_a = \cos \varphi_b = \cos \varphi_c = \cos \varphi$, то такая нагрузка называется равномерной или симметричной.

На рисунке 5.2, а показана векторная диаграмма напряжений и токов для симметричной активно-индуктивной нагрузки ($\varphi \neq 0$).

Из векторной диаграммы (рис.5.2, а) видно, что

$$\frac{U_L}{2} = U_{\phi} \cos 30^\circ, \text{ откуда } U_{\bar{E}} = \sqrt{3} \cdot U_{\bar{\phi}}. \quad (5.3)$$

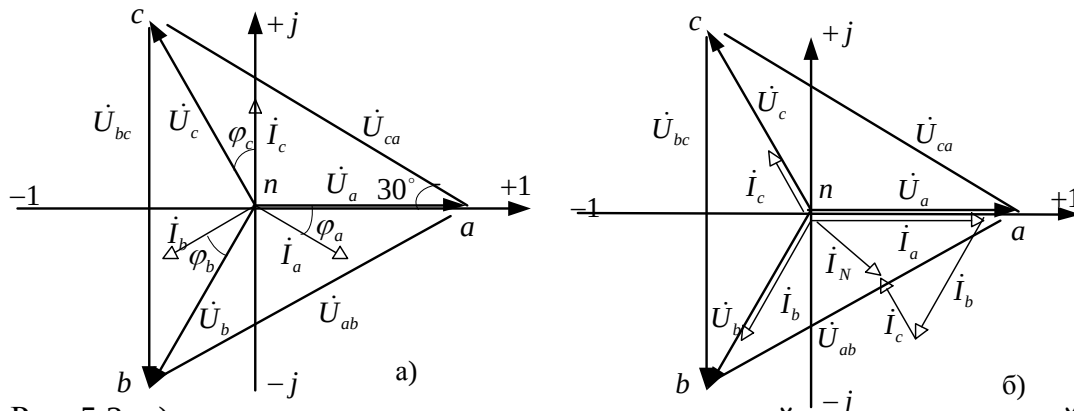


Рис. 5.2 -а) векторная диаграмма токов и напряжений при симметричной активно-индуктивной нагрузке трехпроводной системы; б) векторная диаграмма токов и напряжений при активной несимметричной нагрузке четырехпроводной системы

Фазные токи приёмников определяются так же, как и в однофазных цепях, по закону Ома

$$I_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; I_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; I_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c}; I_\delta = \frac{U}{\sqrt{R_\delta^2 + X_\delta^2}} \quad (5.4)$$

Ток в нейтральном проводе определяется по первому закону Кирхгофа

$$\vec{I}_N = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c \quad (5.5)$$

При равномерной нагрузке надобность в нейтральном проводе отпадает, так как ток в нём будет отсутствовать ($I_N = 0$) и линия в этих случаях выполняется трёхпроводной (рис.5.2,а).

На рисунке 5.2, б показано графическое определение тока в нейтральном проводе для чисто активной ($\cos\varphi = 1$) неравномерной нагрузки фаз. При наличии нейтрального провода и несимметричной нагрузки фаз напряжение на фазах приемников U_ϕ остается неизменным.

Если же случайно произойдет *обрыв нейтрального провода*, то фазные токи при несимметричной нагрузке установятся такими, чтобы их сумма была равна нулю. Вследствие этого напряжения на отдельных фазах будут различными, то есть в наиболее нагруженной фазе (с меньшим сопротивлением), напряжение будет повышено.

Если же произойдёт *обрыв одного из линейных проводов*, то эта фаза отключается, а две другие фазы продолжают нормально работать от трёхфазной системы при наличии нейтрального провода. При отсутствии нейтрального провода происходит перераспределение напряжений на фазах пропорционально их сопротивлениям.

Следует отметить, что соединение звездой без нейтрального провода при несимметричной нагрузке фаз обычно не применяются. Наиболее распространёнными номинальными напряжениями приёмников переменного тока являются напряжения 660, 380, 220 и 127 В.

Напряжения 660 В и 380 В используют преимущественно для питания промышленных приёмников, а напряжения 220 В и 127 В для бытовых приёмников.

Способ включения приёмника в сеть трёхфазного тока зависит от линейного напряжения сети и от номинального напряжения приёмника.

Лампы с номинальным напряжением 220 В в сеть с напряжением 380В должны включаться звездой.

На электрических двигателях указано два напряжения 127/220 В или 220/380В. Это следует понимать так, что данный двигатель может работать в сети с любым из указанных напряжений при условии, что на фазу двигателя должно в каждом случае подаваться номинальное напряжение, соответствующее меньшему значению.

Пример, чтобы обеспечить на фазе двигателя 220/380В номинальное напряжение 220 В при включении его в сеть с напряжением 380 В, его обмотки должны быть соединены звездой, а при включении в сеть 220 В, его обмотки соединяются треугольником.

Каждый трёхфазный двигатель равномерно нагружает все три фазы источника. Это даёт возможность линии, питающие электродвигатели, прокладывать трёхпроводными.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему соединения потребителя звездой согласно рисунку 5.3. В качестве однофазных приемников используются ламповые реостаты (активная нагрузка, $\cos\varphi = 1$).

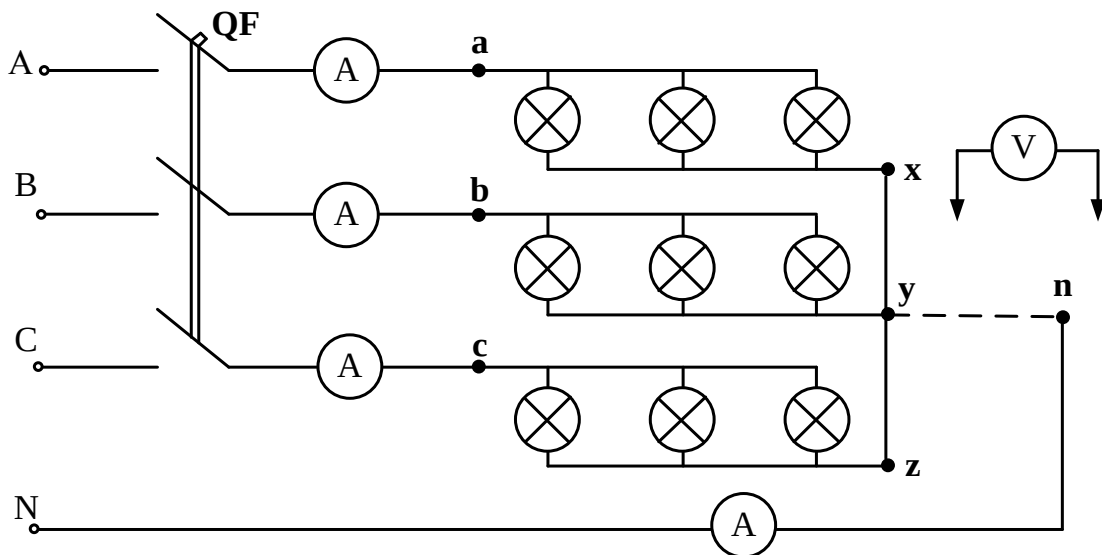


Рис. 5.3 - Электрическая схема экспериментальной цепи

2. Произвести измерение фазных и линейных значений токов и напряжений в четырёхпроводной сети (с нейтральным проводом) для следующих режимов (таблица 5.1):

а) при равномерной нагрузке сопротивления всех трёх фаз одинаковы, поэтому в каждой фазе должно быть включено равное количество ламп (необходимо убедиться, что ток в нейтральном проводе равен нулю);

б) при неравномерной нагрузке сопротивления каждой из трёх фаз должны быть различны, это достигается включением разного количества ламп в каждой фазе;

в) обрыв фазы выполняется выключением всех ламп одной из фаз.

3. Отключить нейтральный провод (трехпроводная система). Исследования провести в соответствии с таблицей 5.2.

[illegible]

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем преимущества трёхфазной цепи перед однофазной?
2. Что называется фазными и линейными напряжениями?
3. Что называется фазными и линейными токами?
4. Каково назначение нейтрального провода?
5. Как влияет характер и величина нагрузки на ток в нейтральном проводе?
6. Где на практике встречаются четырёхпроводные и трехпроводные системы трехфазной цепи?
7. В чём отличия и преимущества четырёхпроводной и трехпроводной цепей?
8. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями симметричной системы, соединённой звездой?
9. Каково соотношение между линейными и фазными токами в симметричной системе, соединённой звездой?
10. Почему опасно короткое замыкание фазы приёмника в четырёхпроводной цепи?

Тестовое задание № 5

**Тема: Трёхфазная цепь с однофазными приемниками,
соединёнными звездой**

1. Сколько соединительных проводов подходит к генератору, обмотки которого образуют звезду?

- а) 6; в) 3 или 4;
б) 3; г) 4

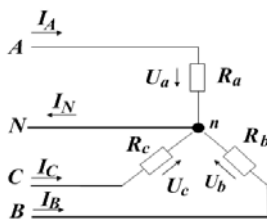
2. Линейный ток симметричного трехфазного потребителя равен I . Линейное напряжение питающей сети U_L . Определить полное сопротивление Z фазы потребителя, если он соединен в звезду.

- а) $Z = \frac{U_{\dot{e}}}{I}$ г) $Z = \frac{U_{\dot{e}}}{3 \cdot I}$
б) $Z = \frac{U_{\dot{e}}}{\sqrt{3} \cdot I}$ д) $Z = \frac{3 \cdot U_{\dot{e}}}{I}$
в) $Z = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\dot{e}}}{I}$

3. Комплексное напряжение фазы А трехфазного генератора $U_A = 220V$. Комплексное напряжение фазы В равно.....

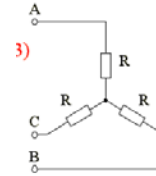
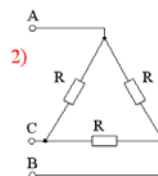
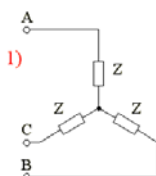
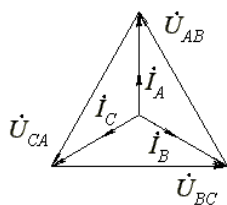
- а) $380e^{-j120} V$;
б) $220 V$;
в) $127e^{-j120} V$;
г) $220e^{-j120} V$.

4. При изменении сопротивления приемника в фазе «б» изменяются токи и напряжения.



- а) все фазные напряжения и все токи;
б) только фазные напряжения;
в) все фазные токи;
г) I_b, I_N .

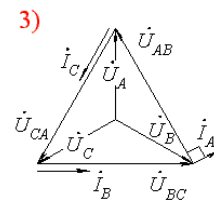
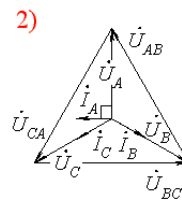
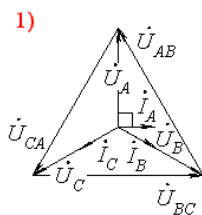
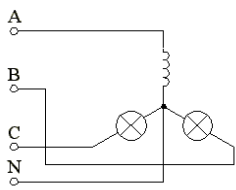
5. Какая схема соответствует данной диаграмме?



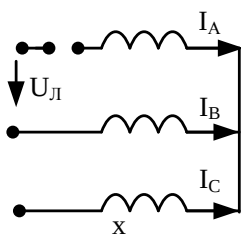
6. Каково назначение нейтрального провода в трехфазной сети?

- а) для выравнивания фазных напряжений при симметричной нагрузке;
- б) для выравнивания фазных токов при несимметричной нагрузке;
- в) для выравнивания фазных напряжений при несимметричной нагрузке;
- г) для выравнивания линейных напряжений при несимметричной нагрузке.

7. Какая векторная диаграмма соответствует данной схеме?



8. Определить ток I_B при обрыве фазы А. Дано: $U_{\text{л}} = 200 \text{ В}$, $X = 20 \text{ Ом}$



а) 5 А;

б) 10 А;

в) 15 А;

г) 20 А.

9. Запишите формулу полной мощности трехфазной цепи, если известны значения активной и реактивной мощностей.

а) $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$;

б) $S = P + Q$;

в) $S = U \cdot I$

10. Каковы соотношения линейных и фазных напряжений при соединении потребителя звездой?

а) $U_a = U_{ab}$; $U_b = U_{bc}$; $U_c = U_{ca}$;

б) $U_a = \sqrt{3} \cdot U_{ab}$; $U_b = \sqrt{3} \cdot U_{bc}$; $U_c = \sqrt{3} \cdot U_{ca}$;

в) $\sqrt{3} \cdot U_a = U_{ab}$; $\sqrt{3} \cdot U_b = U_{bc}$; $\sqrt{3} \cdot U_c = U_{ca}$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

Исследование электрического состояния трёхфазной цепи с однофазными приемниками, соединенными треугольником

Цель работы: 1. Освоить соединение однофазных приёмников по схеме треугольник в трехфазной системе.
2. Изучить влияние изменения параметров одного из трёх однофазных приёмников, соединённых треугольником на соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для соединения трёх однофазных приёмников при включении их в трехфазную сеть треугольником необходимо конец первой фазы соединить с началом второй, конец второй - с началом третьей, конец третьей - с началом первой, а затем к началам фаз подвести линейные провода.

Для однофазных потребителей обозначение начала и концов определяется произвольно. При соединении треугольником обмоток двигателей или трансформаторов необходимо пользоваться маркировкой их выводов.

Как видно из схемы (рис. 6.1) каждая фаза приемника при соединении треугольником подключена к двум линейным проводам. Поэтому независимо от величины и характера сопротивлений приёмника каждое фазное напряжение U_ϕ при соединении треугольником равно соответствующему линейному напряжению U_L

$$U_\phi = U_L \quad (6.1)$$

Если не учитывать сопротивления проводов сети, то напряжения приёмника следует считать равными напряжениям источника. Соединение треугольником следует применять тогда, когда каждая фаза трехфазного

приемника или однофазные приёмники рассчитаны на напряжение, равное номинальному линейному напряжению сети.

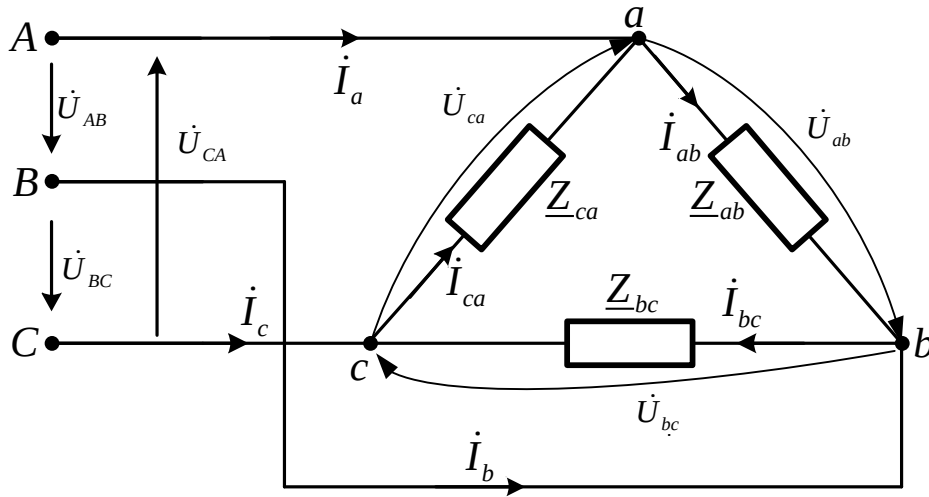


Рис.6.1 - Соединение потребителя треугольником

Фазные токи I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} в общем случае не равны линейным токам I_a , I_b , I_c . Применяя первый закон Кирхгофа к узловым точкам a , b , c (рис. 6.1), можно получить следующие соотношения, между линейными и фазными токами (первый закон Кирхгофа)

$$\bar{I}_a = \bar{I}_{ab} - \bar{I}_{ca}, \quad \bar{I}_b = \bar{I}_{bc} - \bar{I}_{ab}, \quad \bar{I}_c = \bar{I}_{ca} - \bar{I}_{bc}. \quad (6.2)$$

На рисунке 6.2,а показана векторная диаграмма напряжений и токов для активно-индуктивной равномерной нагрузки фаз при соединении приёмников треугольником, а на рисунке 6.2,б топографическая диаграмма для активной равномерной нагрузки. Из векторных диаграмм токов видно, что

$$\frac{I_L}{2} = I_\phi \cos 30^\circ \quad \text{или} \quad I_L = \sqrt{3} I_\phi. \quad (6.3)$$

Зная фазные напряжения и сопротивления, нетрудно по закону Ома найти фазные токи

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}, \quad I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}, \quad I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}, \quad (6.4)$$

Так как $U_{ab}=U_{bc}=U_{ca}$, а сопротивления фаз при симметричной нагрузке $Z_{ab}=Z_{bc}=Z_{ca}=Z_{\phi}$, то токи фаз равны $I_{ab}=I_{bc}=I_{ca}=I_{\phi}$.

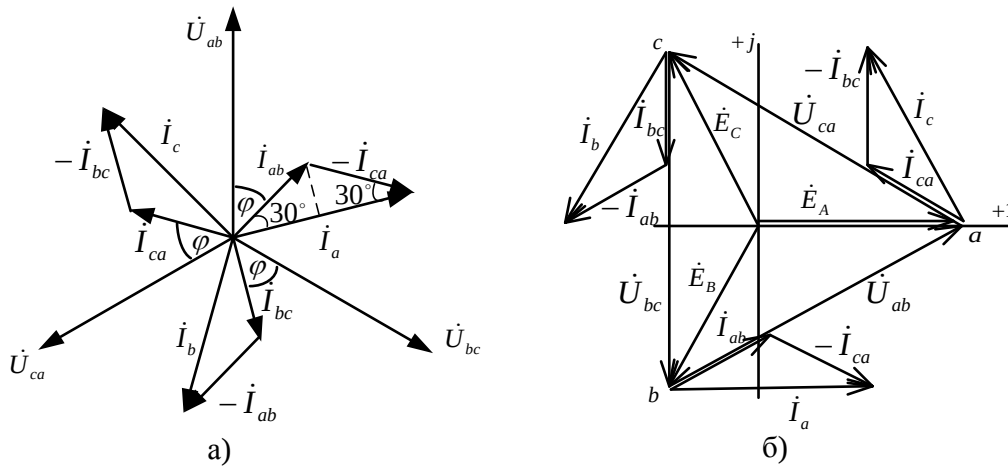


Рис. 6.2 -а) векторная диаграмма токов и напряжений;
б) векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений

Углы сдвига фаз между фазными токами и напряжениями определяются через значения сопротивлений фаз

$$\varphi = \arcsin \frac{X_{\phi}}{Z_{\phi}} \text{ или } \varphi = \arctg \frac{X_{\phi}}{r_{\phi}} \quad (6.5)$$

Коэффициент мощности приемника определяется из соотношения

$$\cos \varphi = \frac{r_{\phi}}{Z_{\phi}} \quad (6.6)$$

При соединении фаз треугольником несимметричных приемников ($Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$) токи в фазах не образуют симметричной системы, значит $I_{ab} \neq I_{bc} \neq I_{ca}$.

Линейные токи определяются графически по уравнениям (6.2), ориентированных относительно соответствующих векторов фазных напряжений.

Особенностью соединения фаз приемника треугольником является то, что *изменение режима одной из фаз приёмника не отражается на режиме других фаз*, так как они подключены к неизменным линейным напряжениям генератора. Изменяться будут лишь линейные токи в проводах, соединённые с данной фазой. Поэтому схему соединения треугольником

используют для включения несимметричных однородных приёмников, в частности осветительных приборов, в трёхпроводную осветительную сеть.

Несимметричная нагрузка возникает обычно при питании от трёхфазной сети однофазных приёмников. Отключение нагрузки одной из фаз можно считать частным случаем несимметричной нагрузки, при которой сопротивление отключенной фазы равно бесконечности. Например, при отключении фазы «са» сопротивление $Z_{ca} = \infty$. При этом, ток по этой фазе приемника не протекает, значит $I_{ca} = 0$, значит токи I_{ab} , I_{bc} , а также углы φ_{ab} , φ_{bc} , φ_b не изменяются, а токи I_a и I_c уменьшаются и будут равны $\bar{I}_a = \bar{I}_{ab}$, $\bar{I}_c = -\bar{I}_{bc}$.

Таким образом, I_a и I_c по значению становятся равными фазным токам. Линейный ток $\bar{I}_b = \bar{I}_{bc} - \bar{I}_{ab}$ определяется так же, как и в исходном режиме, поэтому остается неизменным. На рисунке 6.3 представлена схема обрыва фазы «са» активного приёмника и его векторная диаграмма напряжений и токов.

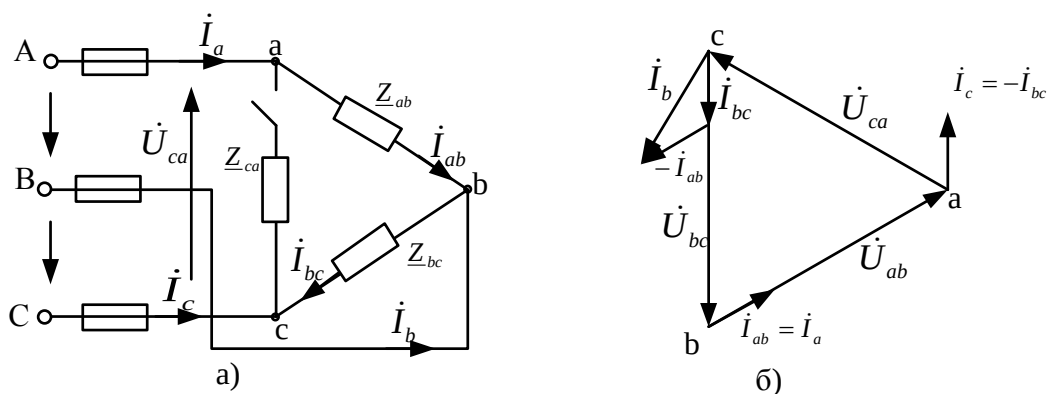


Рис. 6.3- а) схема обрыва фазы «са» активного приёмника;
б) векторная диаграмма токов и напряжений.

При обрыве линейного провода «А» (перегорание предохранителя П) трёхфазная цепь с активно-индуктивной нагрузкой преобразуется в однофазную цепь (рис.6.4,а). Фазы приемника образуют две параллельные ветви, к которым подводится напряжение U_{bc} .

Ток I_{bc} в ветви с сопротивлением Z_{bc} остается неизменным, так как по прежнему определяется тем же напряжением U_{bc} . Ток, протекающий по по-

следовательно соединенным сопротивлениям фаз Z_{ab} и Z_{ca} можно обозначить I_{bac} . Этот ток совпадает по фазе с током I_{bc} , так как тоже определяется напряжением U_{bc} . По значению он в два раза меньше тока I_{bc} из-за $Z_{ab}=Z_{bc}=Z_{ca}$, т.е. $r_{ab}=r_{bc}=r_{ca}$ и $X_{ab}=X_{bc}=X_{ca}$. Линейный ток $\bar{I}_b = \bar{I}_{ab} + \bar{I}_{bc} + \bar{I}_{\tilde{n}a}$ совпадает по фазе с током I_{bc} , а по значению в 1,5 раза больше тока I_{bc} . При этом ток I_c равен по значению I_b , а по фазе ему противоположен. Векторная диаграмма токов такой, однофазной цепи с активно-индуктивными приёмниками изображена на рисунке 6.4, б.

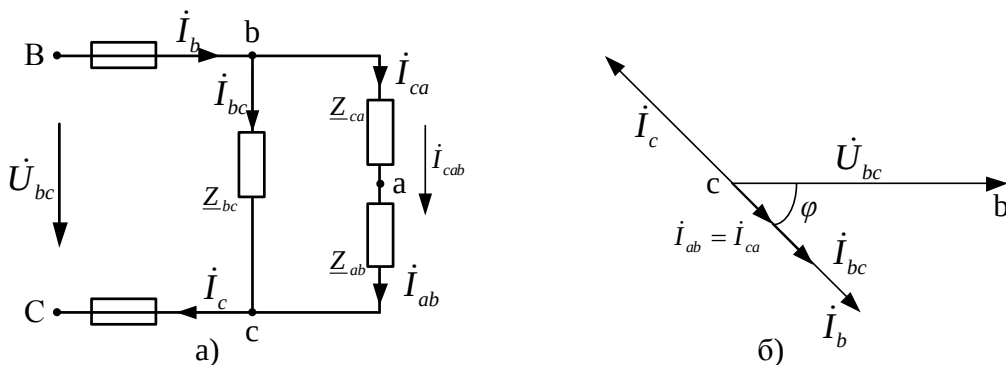


Рис. 6.4 - а) схема обрыва линейного провода «А»;
б) векторная диаграмма при активно-индуктивной нагрузке.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать электрическую схему экспериментальной цепи включения однофазных приёмников треугольником (рис. 6.5).

Примечание: в качестве приёмников использованы ламповые реостаты (активная нагрузка $\cos\varphi = 1$).

2. Произвести измерение линейных и фазных токов и напряжений для случаев нагрузки фаз, указанных в таблице 6.1:

а) в случае равномерной нагрузки сопротивления всех трёх фаз одинаковы, поэтому в каждой фазе должно быть включено равное количество ламп (необходимо убедиться, что токи фаз равны между собой);

б) обрыв фазы выполняется выключением всех ламп в этой фазе (необходимо убедиться, что ток этой фазы равен нулю);

в) обрыв линейного провода выполняется отключение одного из линейных проводов, при равномерной нагрузке в трех ламповых реостатах (необходимо убедиться, что ток в этом линейном проводе равен нулю).

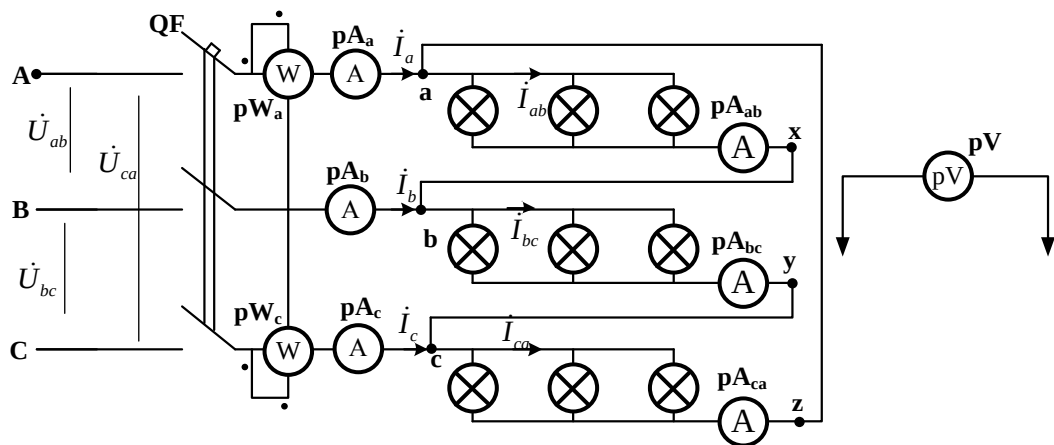


Рис. 6.5 – Электрическая схема экспериментальной цепи

3. При выполнении работы убедиться, что при равномерной нагрузке линейные токи в 1,73 раза больше фазных токов. При изменении сопротивления фазы проследить, оказывает ли влияние это изменение на режим работы других фаз и токов линий. Необходимо убедиться, что геометрическая сумма всех линейных токов равна нулю, а линейный ток равен геометрической разности соответствующих фазных токов

Таблица 6.1

Вид нагрузки	Измеряемые величины								
	$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{ca},$ А	$I_a,$ А	$I_b,$ А	$I_c,$ А
Равномерная									
Обрыв фазы									
Обрыв линейного провода при равномерной нагрузке									

4. Построить для всех опытов таблицы 6.1 векторные диаграммы токов и напряжений.

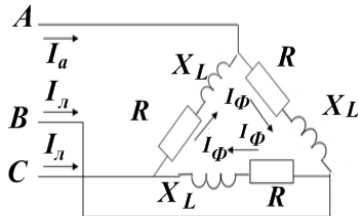
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями в симметричной трёхфазной системе, соединённой треугольником?
2. Каковы соотношения между линейными и фазными токами в симметричной трёхфазной системе, соединённой треугольником?
3. С помощью какого закона можно определить значения линейных токов, зная величину фазных?
4. Почему в соединении потребителя треугольником равны линейные и фазные напряжения?
5. Какие уравнения, выражают зависимость линейных токов, при соединении трёхфазного потребителя треугольником?
6. Изменяются ли фазные напряжения при обрыве одной фазы потребителя при соединении потребителя треугольником?
7. Как изменяются фазные напряжения симметричного потребителя, соединённого треугольником, при обрыве провода в линии?
8. Как изменяется линейный ток, если симметричную активную нагрузку, соединённую треугольником, переключить на звезду?
9. Почему при соединении нагрузки треугольником линейные и фазные напряжения равны?
10. Как изменяются линейные токи при обрыве одной из фаз приемника?

Тестовое задание №6.

Тема: Трёхфазной цепи с однофазными приемниками, соединенными треугольником

1. Какой вид нагрузки данного приемного устройства, если сопротивление фаз равны?



- а) несимметричный;
- б) неоднородный;
- в) симметричный;
- г) симметричный, неоднородный.

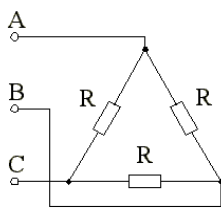
2. Сколько соединительных проводов подходит к генератору, обмотки которого образуют треугольник?

- а) 3;
- б) 3 или 4;
- в) 6;
- г) 4.

3. Симметричная нагрузка соединена треугольником. Линейное напряжение $U_n = 127\text{В}$. Фазное напряжение равно.....

- а) $U_\phi = 127\text{В}$
- б) $U_\phi = 220\text{В}$
- в) $U_\phi = 73,3\text{В}$

4. Найти R , если $U_n=220\text{ В}$, $I_n = 5\text{А}$



- а) 25,4 Ом;
- б) 44 Ом;
- в) 76 Ом;
- г) 88 Ом.

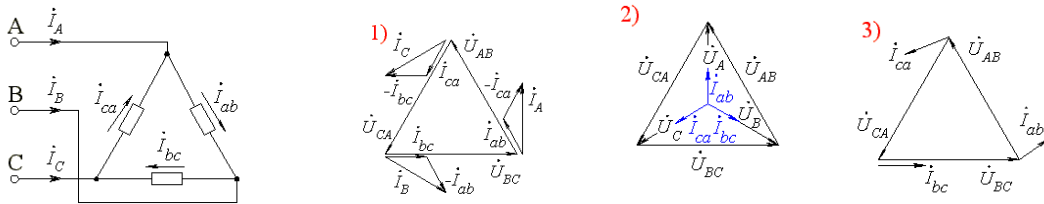
5. Три катушки индуктивности соединены треугольником и подключены к сети с $U_n=380\text{ В}$. Параметры катушек: $R_1=3\text{ Ом}$, $X_1=35\text{ Ом}$, $R_2=2\text{ Ом}$, $X_2=30\text{ Ом}$, $R_3=3,2\text{ Ом}$, $X_3=40\text{ Ом}$. Определить активную мощность потребляемую первой катушкой.

- а) $P_1=2388\text{ Вт}$;
- б) $P_1=4125\text{ Вт}$;
- в) $P_1=353\text{ Вт}$;
- г) $P_1=96\text{ Вт}$.

6. Дано: $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$, $I_{\phi} = 10 \text{ А}$, $P = 3 \text{ кВт}$ Определить коэффициент мощности симметричного трехфазного потребителя, соединенного треугольником.

- а) $\cos \varphi = 0,8$;
- б) $\cos \varphi = 0,6$
- в) $\cos \varphi = 0,722$
- г) нет правильных ответов

7. Какая векторная диаграмма соответствует данной схеме?



8. Симметричный потребитель соединен по схеме треугольник. Найти неверное выражение.

- а) $U_{\text{л}} = U_{\phi}$
- б) $I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}$
- в) $P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi$
- г) $P = 3 \cdot U_{\text{л}} I_{\phi} \cos \varphi$

9. С какой точкой соединяются начало первичной обмотки при соединении потребителя треугольником?

- а) с началом второй;
- б) с концом второй;
- в) с концом третьей;
- г) с началом третьей.

10. Как обозначаются линейные напряжения.

- а) $U_a; U_b; U_c$.
- б) $U_{ab}; U_{bc}; U_{ca}$.
- в) $I_a; I_b; I_c$.
- г) $I_{ab}; I_{bc}; I_{ca}$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

Исследование силового двухобмоточного однофазного трансформатора методом холостого хода и короткого замыкания

Цель работы: 1. Изучить устройство и принцип работы двухобмоточного однофазного трансформатора.
2. Научиться определять потери в трансформаторе по опытам холостого хода и короткого замыкания.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Трансформатором называется статический (т.е. без движущихся частей) электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте.

Трансформатор имеет замкнутый магнитопровод 2 (сердечник) из ферромагнитных материалов (рис.7.1), на котором расположены две обмотки. Обмотка, соединенная с источником 1, называется первичной (высшей), а обмотка, отдающая электрическую энергию потребителю 3 вторичной (низшей) (рис.7.1). Части магнитопровода без обмотки называются ярмом. Сердечник трансформатора для уменьшения потерь на нагрев собирают из листов электротехнической стали толщиной 0,35-0,5 мм, легированной кремнием. Принцип действия трансформатора основан на законе электромагнитной индукции Фарадея – при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего какой-либо проводниковый контур, в нем наводится (индуцируется) электродвижущая сила.

Трансформатор, у которого число витков W_1 первичной обмотки меньше числа витков W_2 вторичной обмотки ($W_2 > W_1$) является повышающим. У понижающего трансформатора $W_2 < W_1$.

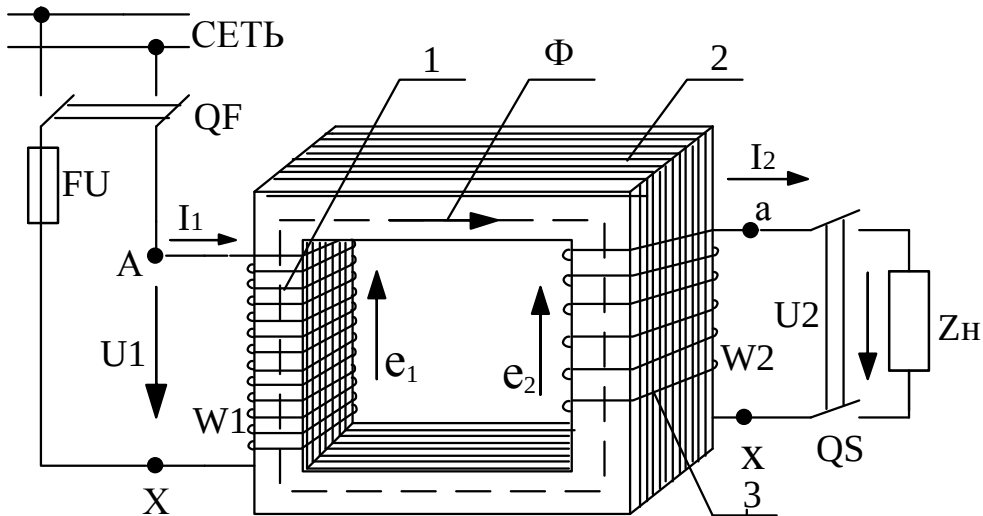


Рис.7.1 - Устройство и схема включения однофазного трансформатора:
1 - первичная обмотка; 2 – замкнутый ферромагнитный магнитопровод (сердечник); 3 – вторичная обмотка

На рисунке 7.2. приведено условно-графическое обозначение трансформатора.

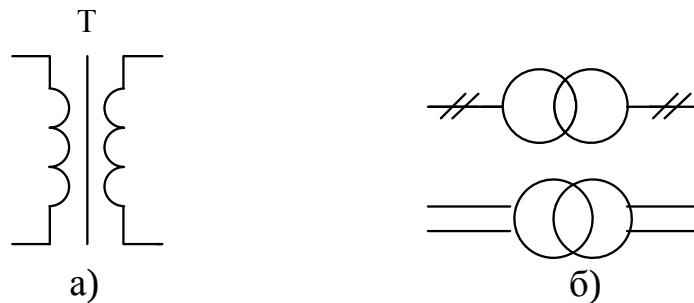


Рис.7.2 - Условно-графическое обозначение однофазного трансформатора:
а) в электрических схемах; б) в схеме электроснабжения

Трансформаторы широко используют в системах передачи и распределения электроэнергии, а также при ее использовании в промышленных и сельскохозяйственных установках.

При работе трансформатора переменный магнитный поток Φ , возбуждаемый в сердечнике током первичной обмотки, пересекая витки обмоток трансформатора, наводит в них ЭДС индукции:

$$\text{для первичной обмотки: } e_1 = -W_1 \frac{d\hat{\Phi}}{dt}; \quad (7.1)$$

$$\text{для вторичной обмотки : } e_2 = -W_2 \frac{d\hat{\Phi}}{dt},$$

где W_1, W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток.

Действующие значения ЭДС первичной и вторичной обмоток равно

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot W_1 \cdot \hat{O}_m; \quad E_2 = 4,44 \cdot f \cdot W_2 \cdot \hat{O}_m \quad (7.2)$$

Отношение $K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}$ называется коэффициентом трансформации.

Экспериментально коэффициент трансформации определяется по данным опыта холостого хода (х.х.).

При опыте холостого хода к первичной обмотке трансформатора подводится напряжение, равное номинальному значению, а вторичная обмотка остается разомкнутой или соединенной с вольтметром (рис.7.4). Так как при опыте х. х. ток во вторичной обмотки отсутствует, то напряжение этой обмотки будет равно ЭДС, то есть $U_{20} = E_2$.

В первичной обмотке при х. х. ток I_0 имеет небольшую величину (3...6%) от номинального значения, поэтому падение напряжения в первичной обмотке при холостом ходе будет незначительное и им можно пренебречь. Следовательно, величину E_1 можно принять равной напряжению первичной обмотки при х.х., т.е. $E_1 \approx U_1$.

Значит, коэффициент трансформации K можно определить при режиме х.х. трансформатора, как отношение напряжений первичной и вторичной обмоток

$$\hat{E} = \frac{U_{20}}{U_1} \quad (7.3)$$

По ГОСТу коэффициент трансформации вычисляется как отношение напряжения обмотки высшего напряжения к напряжению обмотки низшего напряжения $\hat{E} = \frac{U_{\text{вн}}}{U_{\text{нн}}}$.

При нагрузке трансформатора напряжения могут значительно отличаться от соответствующих ЭДС из-за наличия падения напряжения в первичной и вторичной обмотке.

Для анализа работы трансформатора необходимо располагать уравнениями его цепей, составленными по второму закону Кирхгофа, и уравнением намагничивающих сил (уравнением магнитного состояния). Эти уравнения записываются с помощью схемы замещения трансформатора, представленной на рисунке 7.3.

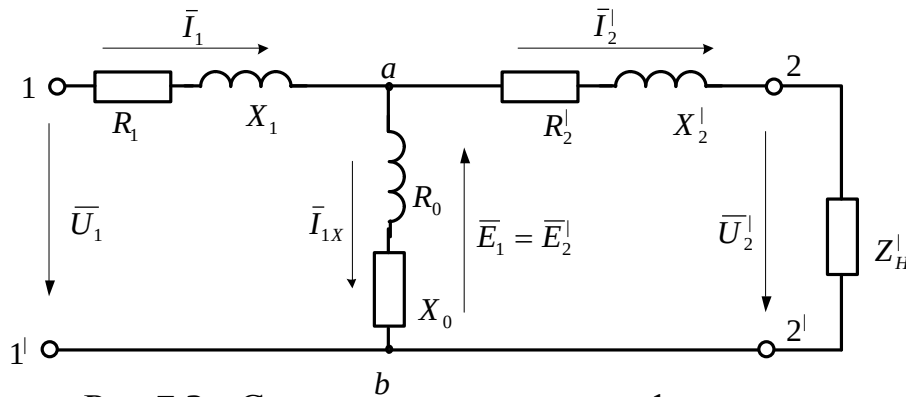


Рис.7.3 - Схема замещения трансформатора

Взяв обход контура по направлению токов (рис.7.3.), получим уравнения электрического состояния (учитывают активную и реактивную составляющие сопротивления схем замещения трансформатора) для

$$\text{первичной цепи: } \bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + R_1 \cdot \bar{I}_1 + jX_1 \cdot \bar{I}_1; \quad (7.4)$$

$$\text{вторичной цепи: } \bar{U}_2 = \bar{E}_2 - R_2 \cdot \bar{I}_2 - jX_2 \cdot \bar{I}_2;$$

$$\text{1-й закон Кирхгофа (для узла «а»)} \bar{I}_1 = \bar{I}_{1x} + \bar{I}_2'.$$

В режиме х. х. величина магнитного потока Φ_m та же, что и при нагрузке, если $U_1 = \text{const}$.

Параметры намагничивающего контура r_0 , X_0 , Z_0 схемы замещения (рис.6.3) определяют показания вольтметра и амперметра, а затем находят величину полного сопротивления $Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_0}$.

$$\text{Активное сопротивление цепи рассчитывается } r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}.$$

Зная эти две величины определяют реактивную составляющую сопротивления цепи X_0 .

Изменение напряжения вторичной обмотки при нагрузке по сравнению с напряжением х. х. выражается в процентах, %

$$\Delta U_{2\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\%, \quad (7.5)$$

где U_{20} -напряжение вторичной обмотки при режиме х.х.;

U_2 - напряжение вторичной обмотки при нагрузке.

При работе трансформатора часть мощности расходуется на нагрев сердечника (магнитные потери ΔP_M), а также на нагрев обмоток (электрические потери ΔP_Y).

Магнитные потери ΔP_M складываются из потерь на гистерезис и вихревые токи. Так как потери ΔP_M зависят от квадрата магнитной индукции B_m^2 , и, следовательно, от квадрата напряжения на первичной обмотке $U_1 = U_{1H}$, то они соответствуют потерям при номинальном режиме, т.е. $\Delta P_M = \Delta P_{MH}$. При $U_1 = U_{1H}$ магнитные потери рассчитываются

$$\Delta P_M = \gamma \cdot P_{0H}, \quad (7.6)$$

где $\gamma = \frac{U_1}{U_{1H}}$ - коэффициент при напряжении;

P_{0H} - потери в сердечнике, полученные по данным опыта х.х.

Ток холостого хода I_o , измеренный амперметром, обычно выражаю в процентах от номинального тока первичной обмотки

$$I_{0\%} = \frac{I_o}{I_{1H}} \cdot 100\% \quad (7.7)$$

Коэффициент мощности в опыте х.х. вычисляют по данным произведенных измерений

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{1H} \cdot I_o} \quad (7.8)$$

Помимо магнитных потерь в трансформаторе имеют место электрические потери ΔP_Y

$$\Delta P_Y = r_1 \cdot I_1^2 + r_2 \cdot I_2^2 \quad (7.9)$$

В режиме х.х. ток во вторичной обмотки трансформатора отсутствует, а в первичной обмотке имеет небольшое значение (ток х.х. I_o).

Следовательно, электрические потери при х.х., будут, ничтожные и потребляемая мощность трансформатора будет расходоваться на преодоление магнитных потерь. Поэтому магнитные потери определяют по показаниям ваттметра при опыте х.х. Электрические потери трансформатора определяют по опыту короткого замыкания.

При опыте короткого замыкания (к.з.) вторичную обмотку замыкают накоротко (рис.7.5). К первичной обмотке подводится пониженное напряжение $U_{KЗ}$ такой величины, чтобы токи в обмотках трансформатора имели номинальные значения $I_{1Н} = I_{1К}$; $I_{2Н} = I_{2К}$.

Величина напряжения $U_{KЗ}$ обычно выражается в процентах от номинального значения напряжения трансформатора

$$U_{K\%} = \frac{U_{KЗ}}{U_{1Н}} \cdot 100\% \quad (7.10)$$

Для силовых трансформаторов эта величина составляет (5,5... 11,5)% от номинального значения напряжения трансформатора. При таком напряжении магнитный поток в сердечнике будет иметь небольшую величину и потери в стали будут незначительны. Поэтому мощность, потребляемая трансформатором при опыте к.з. будет равняться электрическим потерям, которые получаются при номинальной нагрузке

$$P_{KЗ} = \Delta P_Y \quad (7.11)$$

По данным опыта к.з. можно найти параметры упрощенной схемы замещения

$$Z_K = \frac{U_{KЗ}}{I_{1К}}, r_K = \frac{P_{KЗ}}{I_{1К}^2}, \cos \varphi_K = \frac{P_{KЗ}}{I_{1К} \cdot U_{KЗ}}, \quad (7.12)$$

где Z_K - полное сопротивление схемы замещения при режиме к.з.;

r_K - активное сопротивление;

$\cos \varphi_K$ - коэффициент мощности трансформатора в опыте к.з.

Мощность $P_{KЗ}$ - это мощность, измеренная ваттметром при номинальном первичном токе $I_{1Н}$.

Зная Z_K и r_K можно найти реактивное сопротивление

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2} \quad (7.13)$$

Таким образом, общие потери мощности, с которыми будет работать трансформатор при номинальном напряжении и номинальных токах, выражаются суммой показаний ваттметра, получаемых при опытах х.х. и к.з.

$$\Delta P = P_0 + P_{K\zeta} \quad (7.14)$$

Так как электрические потери пропорциональны квадрату тока, то при нагрузке, отличающейся от номинальной, они определяются

$$\Delta P_{\gamma} = \beta^2 \cdot P_{K\zeta}, \quad (7.15)$$

где $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$ - коэффициент загрузки трансформатора.

Метод опытов х.х. и к.з. дает возможность косвенно определить потери и коэффициент полезного действия (КПД) мощных трансформаторов.

В данной лабораторной работе исследуется трансформатор малой мощности и поэтому потери мощности в нем можно определить не только по опытам х.х. и к.з., но и как разность мощностей

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (7.16)$$

где P_1 - мощность, потребляемая трансформатором, измеряется ваттметром (рис.7.7).

P_2 - мощность, отдаваемая трансформатором во вторичную цепь

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = \beta \cdot S_{2H} \cdot \cos \varphi_2 \quad (7.17)$$

Коэффициент мощности потребителя $\cos \varphi_2$ зависит от характера нагрузки (для ламп накаливания и реостатов $\cos \varphi_2=1$)

КПД трансформатора определяется из соотношений мощностей

$$\eta = \frac{D_2}{D_1} = \frac{D_2}{D_2 + D_M + \Delta D_{\gamma}} \quad (7.18)$$

Формула (7.18) может быть другого вида, и позволит найти КПД по паспортным данным трансформатора и результатам опытов х.х. и к.з.

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{2H} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{2H} \cdot \cos \varphi_2 + \gamma \cdot P_0 + \beta^2 \cdot P_{K\zeta}} \quad (7.19)$$

для любых значений $\beta, \gamma, \cos \varphi$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Паспортные данные трансформатора: $S_{ном} = 250 \text{ ВА}$; $U_{1ном} = 220 \text{ В}$;
 $U_{2ном} = 12 \text{ В}$; $I_{1н} = \frac{250}{220} = 1,136 \text{ А}$; $I_{2н} = \frac{250}{12} = 20,83 \text{ А}$.

1. Проведение опыта холостого хода трансформатора

1. Собрать экспериментальную цепь для проведения опыта х.х. трансформатора (рис.7.4).

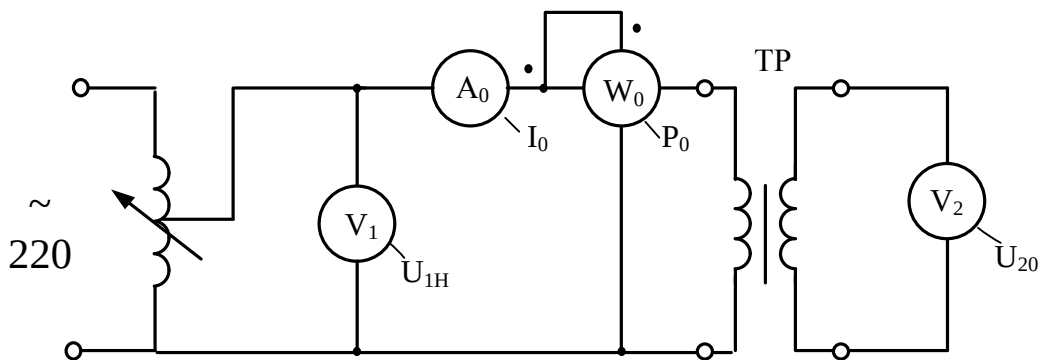


Рис.7.4 - Схема проведения опыта холостого хода трансформатора

2. Сделать не менее пяти замеров через одинаковые интервалы тока х.х., изменяя подводимое к трансформатору напряжение от $0,5U_{1н}$ до $1,15U_{1н}$ (примерно от 180В до 230В, т.к. номинальное напряжение трансформатора, используемого в данной лабораторной работе 220В). Показания измерительных приборов занести в таблицу 7.1.

Примечание: Все необходимые величины рассчитываются по формулам, представленным в общих сведениях. Значение номинального тока первичной обмотки трансформатора (для вычисления $I_{0,\%}$) определяется с помощью паспортных данных трансформатора.

Таблица 7.1

Параметры трансформатора при режиме холостого хода

№ / п.	Измеряемые величины				Вычисления		
	U_1 , В	I_0 , А	P_0 , Вт	U_{20} , В	$I_{0,\%}$, %	$\cos\varphi_0$	К
1							
....							
п							

3. По данным таблицы 7.1 необходимо построить характеристики опыта х.х. трансформатора в одной системе координат $I_0 = f_1(U_1)$, $P_0 = f_2(U_1)$, $\cos\varphi_0 = f_3(U_1)$. Характеристики х. х. приведены на рисунке 7.6, а.

2. Проведение опыта короткого замыкания трансформатора

1. Собрать экспериментальную схему для проведения опыта к. з. трансформатора (рис.7.5).

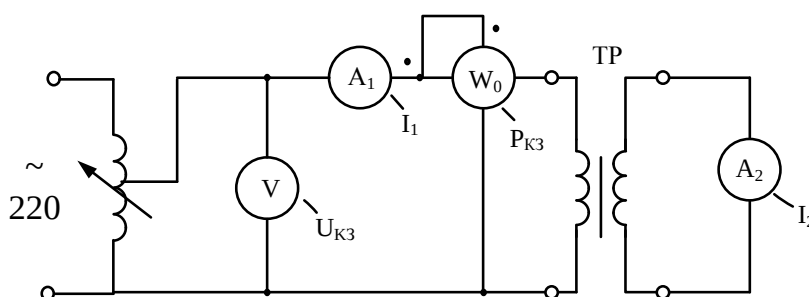


Рис.7.5 - Схема для проведения опыта короткого замыкания трансформатора

2. Перед включением схемы установить движок регулятора напряжения в такое положение, при котором после включения рубильника показание вольтметра равно 0.

3. Включить рубильник и, постепенно повышая подводимое к трансформатору напряжение, установить в первичной обмотке ток номинальной

величины I_{1H} . Показания измерительных приборов снимать через приблизительно одинаковые интервалы тока к.з. Результаты измерений занести в таблицу 7.2.

Таблица 7.2

Параметры трансформатора при режиме короткого замыкания

№/п.	Измеряемые величины				Вычисления				
	$U_{KЗ},$ В	$I_{1К},$ А	$I_{2К},$ А	$P_K,$ Вт	$U_K,$ %	$Z_K,$ Ом	$r_K,$ Ом	$X_K,$ Ом	$\cos \varphi_K$
1									
....									
п									

4. По данным таблицы 7.2 необходимо построить характеристики опыта к.з. трансформатора в одной системе координат: $I_K = f_1(U_{KЗ}), P_{KЗ} = f_2(U_{KЗ}), \cos \varphi_K = f_3(U_{KЗ})$. Характеристики опыта к.з. приведены на рисунке 7.6, б.

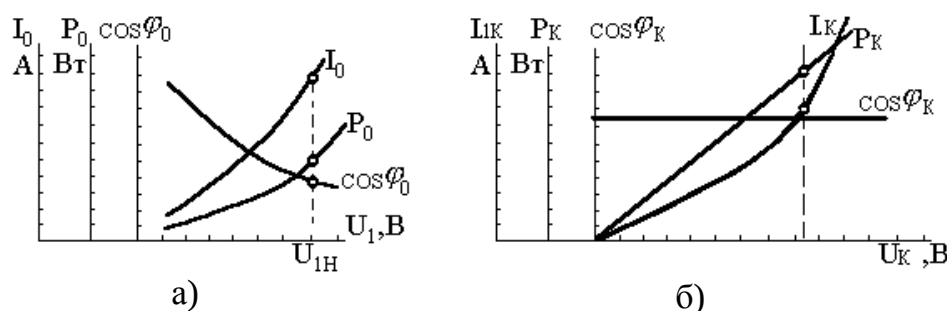


Рис.7.6 - а) характеристики режима х. х.; б) характеристика режима к. з. трансформатора

3. Испытание трансформатора под нагрузкой

1. Подключить к вторичной обмотке трансформатора в качестве нагрузки регулировочный реостат $R_{рег}$ (рис. 7.7).

2. Изменяя нагрузку трансформатора движком реостата, провести 5...6 опытов. Напряжение в первичной цепи во время опытов следует поддерживать постоянным, равным номинальному значению ($U_{1H} = 220V$). Результаты опытов записать в таблицу 7.3.

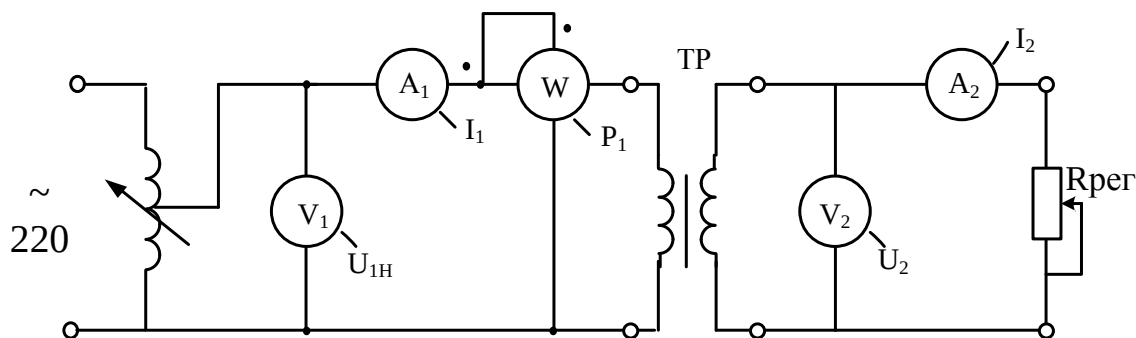


Рис.7.6 - Схема испытания трансформатора под нагрузкой

Таблица 7.3

Параметры трансформатора при работе под нагрузкой

№/п.	Измеряемые величины					Вычисления				
	U_{1H} , В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	ΔU_2 , %	P_2 , Вт	ΔP , Вт	η , %	$\eta_{\text{н\ddot{o}a\ddot{a}}}$, %
1										
....										
п										

3. В таблице 7.3 пользуясь формулами, приведенными в общих сведениях сделать вычисления, при этом учесть:

а) для определения $\Delta U_{2\%}$ значение U_{20} берется из опыта х.х. при $U_1 = 220V$;

б) при расчете мощности, отдаваемой трансформатором во вторичную цепь P_2 формула (7.17) $\cos \varphi_2 = 1$;

в) определить КПД по формуле $\eta = \frac{D_2}{D_1}$ и сравнить полученные значения КПД с расчетом по формуле (7.19) при номинальной нагрузке $\eta_{\text{н\ddot{o}a\ddot{a}}}$.

4. По данным таблицы 7.3 построить в одной системе координат зависимости $I_1 = f_1(I_2)$, $U_2 = f_2(I_2)$, $\Delta U_2 = f_3(I_2)$, $\Delta P = f_4(I_2)$, $\eta = f_5(I_2)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните устройство и назначение трансформатора?
2. Как изменяется коэффициент мощности при опыте холостого хода? Почему?
3. Что называется коэффициентом трансформации?
4. Запишите формулу, по которой определяется коэффициент трансформации.
5. Что такое опыт холостого хода трансформатора. Как экспериментально он проводится?
7. Объясните, какие величины определяются из опыта холостого хода? Для чего?
8. Что называется опытом короткого замыкания трансформатора? Какие величины определяются из этого опыта? Для чего?
9. Объясните, какие величины определяются из опыта короткого замыкания? Для чего?
10. Напишите формулы определения КПД трансформатора. Объясните разницу между этими формулами?
11. От каких величин зависит КПД трансформатора?
12. На чем основан принцип действия трансформатора.
13. С помощью какого опыта можно определить коэффициент трансформации?
14. Почему при изготовлении сердечника трансформатора используются ферромагнитные материалы?
15. Нарисуйте схему замещения трансформатора.

Тестовое задание № 7

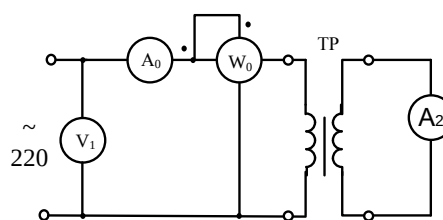
Тема: Трансформаторы

1. Для чего предназначен трансформатор?

- а) для потребления электрической энергии;
- б) для передачи и распределения электрической энергии;
- в) для преобразования механической энергии в электрическую;
- г) для преобразования электрической энергии в механическую при постоянном напряжении.

2. Трансформатор работает в режиме

- а) холостого хода;
- б) рабочий режим;
- в) номинальный;
- г) короткого замыкания.

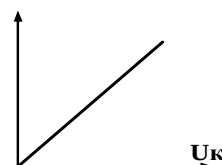


3. При описании магнитного поля используется величина.....

- а) диэлектрической проницаемости;
- б) магнитной индукции;
- в) электрического смещения;
- г) напряженность электрического поля.

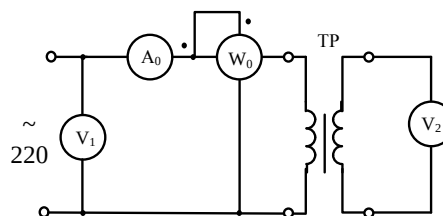
4. Изображена характеристика короткого замыкания трансформатора. Какая величина не обозначена?

- а) P_K ; г) I_K ;
- б) U_K д) U_2 ;
- в) $\cos\varphi_K$.



5. Трансформатор работает в режиме

- а) холостого хода;
- б) рабочий режим;
- в) номинальный;
- г) короткого замыкания.



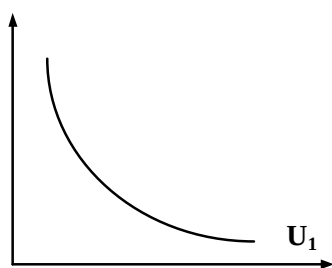
6. Поясните, на каком физическом явлении основан принцип работы трансформатора, как преобразователя электрической энергии?

- а) явление взаимодействия проводников с током и магнитного поля;
- б) явление электромагнитной индукции;
- в) явление гистерезиса;
- г) явление обратимости.

7. Из опыта холостого хода трехфазного трансформатора известны данные: $U_0 = 220\text{В}$; $I_0 = 0,1\text{А}$; $P_0 = 17,6\text{ Вт}$. Определите коэффициент мощности трансформатора.

- а) $\cos\varphi_2 = 0,5$; б) $\cos\varphi_2 = 0,6$;
- в) $\cos\varphi_2 = 0,7$; г) $\cos\varphi_2 = 0,8$; д) $\cos\varphi_2 = 0,9$.

8. Изображена характеристика х.х. трансформатора. Какая величина отложена по оси ординат?



- а) ток холостого хода I_0 ;
- б) мощность холостого хода P_0 ;
- в) коэффициент мощности $\cos\varphi_0$;
- г) КПД трансформатора η ;
- д) активная мощность P_2 .

9. Какой параметр не определяется при опыте короткого замыкания?

- а) напряжение короткого замыкания;
- б) активное сопротивление;
- в) мощность потерь в сердечнике;
- г) индуктивное сопротивление;
- д) нет правильного ответа;

10. При $P_2 = 1000\text{ Вт}$, $P_K = 35\text{ Вт}$, $P_O = 35\text{ Вт}$ КПД трансформатора равно....

- а) 97%; б) 93,45%;
- в) 95,35%; г) 99,9%;
- д) нет решения, так как не известна мощность P_1 .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

Исследование асинхронного электродвигателя трехфазного тока с короткозамкнутым ротором

Цель работы: 1. Изучить устройство и принцип действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

2. Освоить приемы опытной проверки обозначений выводов обмотки статора.

3. Овладеть техникой и методикой снятия рабочих характеристик для асинхронного двигателя.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Асинхронный двигатель (АД) состоит из двух основных частей: неподвижной - статора и вращающейся - ротора (рис.8.1). Статор представляет собой стальной сердечник в виде пустотелого цилиндра, набираемого из отдельных листов электротехнической стали, изолированных между собой лаком. Внутри цилиндра выштампованы пазы, куда укладывают обмотку статора. Обмотка статора состоит из трех фаз, сдвинутых относительно друг друга в пространстве на угол 120° .

Внутри статора помещен ротор, представляющий собой стальной цилиндр, который набирают из отдельных листов электротехнической стали, изолированных между собой. Концы вала ротора через подшипники качения опираются на подшипниковые щиты.

В пазы короткозамкнутого ротора укладывают обмотку в виде беличьей клетки, выполняемую из медных или алюминиевых стержней, которую с торцевых сторон замыкают кольцами (рис.8.2,а). Беличью клетку от статора не изолируют, так как проводимость обмотки в десятки раз больше проводимости стали. При обмотке беличьей клетки из алюминия одновременно отливают боковые кольца вместе с

вентиляционными крыльями (рис.8.2,б). В двигателях большой мощности беличью клетку выполняют из медных стержней, концы которых ввариваются в короткозамкнутые кольца (рис.8.2,в). Различные формы пазов ротора изображены на рисунке 8.2,г.

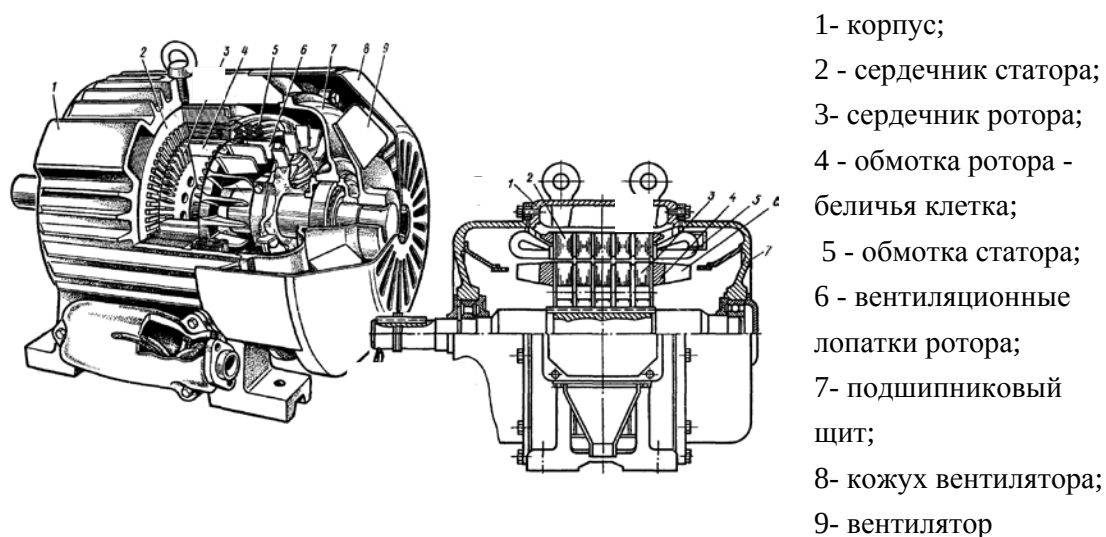


Рис.8.1 -Устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Условные обозначения АД основного исполнения расшифровываются следующим образом: А –асинхронный, О – обдуваемый, 2 – индекс, характеризующий новую серию. Число после первого дефиса означает типоразмер: первая цифра – порядковый номер наружного диаметра сердечника статора; вторая –порядковый номер длины пакета статора двигателя; после второго дефиса число полюсов. Выпускаются специализированного исполнения АД новой серии. Для этих двигателей в конце полного обозначения добавляются буквы, дающие понятие об использовании: Х – химостойкое, ВМС - влаго- и морозостойкое, Т –тропическое, Ш – малошумное.

Химо-влаго-и морозостойкость достигается применением специальной изоляцией обмоток, защитных покрытий металлических частей, специальной смазкой подшипников. Химо-влаго и морозостойкие двигатели нашли широкое применение в электрификации сельского хозяйства. Нашей электротехнической промышленностью освоена единая серия 4А с

классами изоляции по нагревостойкости В(130⁰С), F(155⁰С) и Н(180⁰С), отвечающая требованиям МЭК (Международная Электротехническая Комиссия).

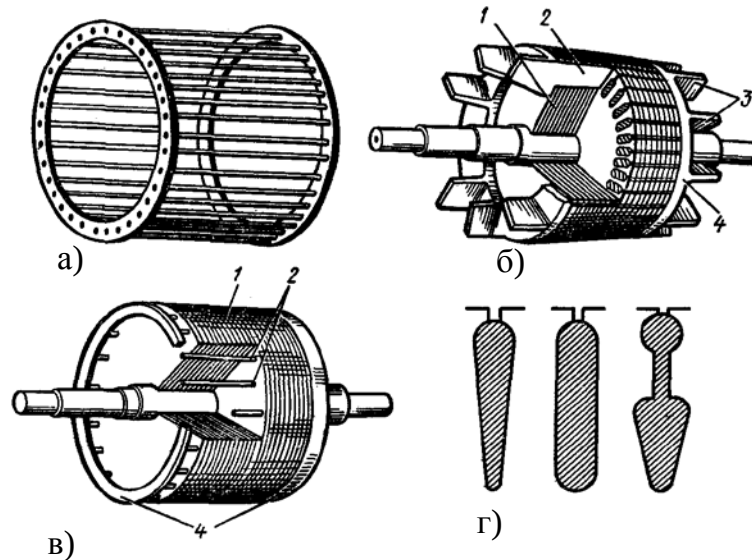


Рис.8.2 - Конструкция короткозамкнутого ротора:
1 - сердечник ротора; 2 - стержни; 3 - лопасти вентилятора;
4 - короткозамыкающие кольца

При подключении статорной обмотки двигателя в сети трехфазного тока по фазам двигателя протекают токи, сдвинутые относительно друг друга по фазе на $\frac{2\pi}{3}$

$$\begin{aligned} i_1 &= I_{1M} \cdot \sin \cdot \omega t; \\ i_2 &= I_{2M} \cdot \sin \cdot (\omega t - \frac{2}{3} \pi); \\ i_3 &= I_{3M} \cdot \sin \cdot (\omega t - \frac{4}{3} \pi) \end{aligned} \quad (8.1)$$

Эти токи возбуждают круговое магнитное поле статора, вращающееся с постоянной частотой n_1

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (8.2)$$

где p - число пар полюсов магнитного поля статора.

Эта частота вращения магнитного поля статора будет постоянна и зависит от числа обмоток статора. Минимальное количество обмоток статора равна трем, что соответствует одной паре полюсов. При своем враще-

нии магнитное поле статора индуцирует ЭДС в проводниках обмотки ротора. Так как обмотка замкнута, то в ней возникают токи, взаимодействующие с магнитным полем статора и создающие вращающий момент, заставляющий ротор вращаться вслед за полем статора.

Ротор вращается с меньшей частотой, чем магнитное поле статора. Эта частота вращения ротора, n_2 называется асинхронной. Если бы ротор вращался с такой же скоростью, что и поле статора, то в проводниках ротора, не индуцировалась бы ЭДС, не возникли бы токи и электромагнитные силы, в результате чего вращающий момент ротора был бы равен нулю.

Отставание скорости ротора от скорости поля статора называется скольжением, S

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (8.3)$$

При неподвижном роторе скольжения равно $S=1$, так как $n_2=0$. Скольжение АД в номинальном режиме обычно находится в пределах 1,5...6%.

Из формулы (7.3) можно вывести формулу частоты вращения ротора

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - S) \quad (8.4)$$

Вращающий момент асинхронного двигателя зависит от скольжения

$$M = \frac{m \cdot p \cdot U_{10}^2 \cdot r_2'}{2\pi \cdot f \cdot [(r_1 + r_2'/S)^2 + (x_1 + x_2')^2 \cdot S]}, \quad (8.5)$$

где m - число фаз;

$U_{1\phi}$ - фазное напряжения обмотки статора;

r_1, x_1 - активное и индуктивное сопротивления обмотки статора;

r_2', x_2' - активное и индуктивное приведенное сопротивление обмотки ротора.

Из формулы (8.5) видно, что вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения $M=U_{1\phi}^2$, то есть АД чувствителен к колебаниям напряжения в сети. Зависимость $M=f(S)$ при посто-

янном напряжении и частоте тока сети, а так же $n_2=f(M)$ называются механической характеристикой (рис.8.3).

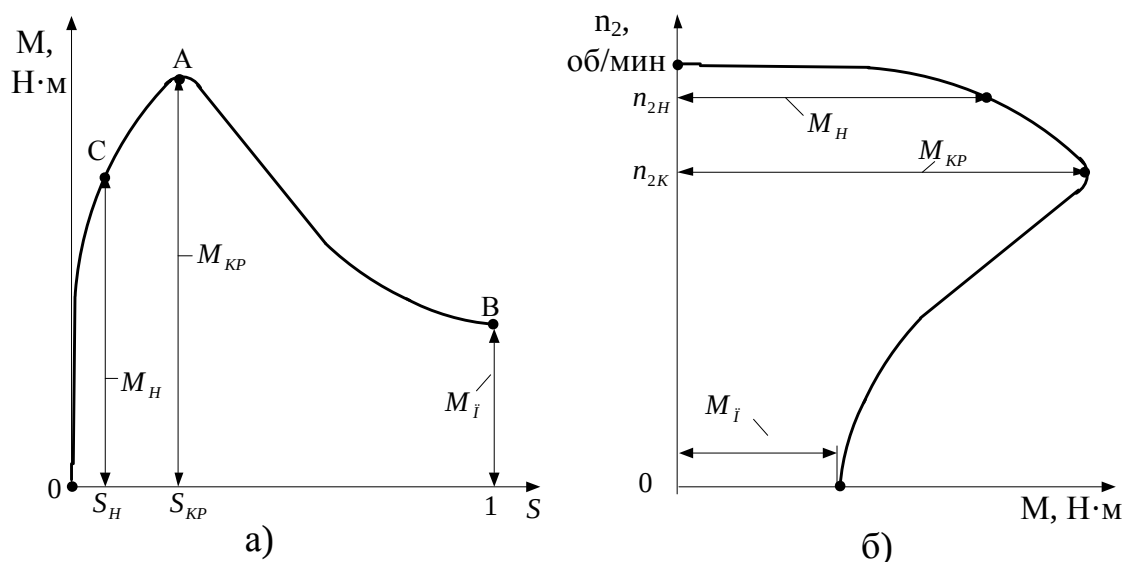


Рис.8.3 - Механические характеристики асинхронного двигателя

При скольжении $S=1$, когда $n_2=0$ двигатель развивает пусковой момент $M_П$, $H\cdot m$. По мере разгона двигателя скольжение уменьшается, а вращающий момент двигателя увеличивается. Устойчиво двигатель работает на кривой ОА (рис.8.3, а). На этом участке кривой и находится точка С, соответствующая номинальному моменту M_H , $H\cdot m$. Перегрузка двигателя моментом сопротивления рабочей машины, равным максимальному моменту двигателя, приводит к остановке двигателя.

Для АД нормального исполнения мощностью до 100 кВт отношение $\lambda = \frac{M_{\max}}{M_f} = \frac{M_{\hat{E}D}}{M_f}$, характеризующее перегрузочную способность двигателя, находится в пределах 1,7...3,5.

Пусковые свойства АД характеризуют отношение пускового момента к номинальному моменту $\hat{E}_f = \frac{M_{\hat{f}}}{M_f}$. Это отношение составляет 1...2,2.

Вращающий момент двигателя M , $H\cdot m$ можно также определить

$$M = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n_2}, \quad (8.6)$$

где P_2 – полезная мощность на валу двигателя.

Зависимость момента от скольжения выражает упрощенная формула Клосса

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{кр}}}{\frac{S}{S_{\text{кр}}} + \frac{S_{\text{кр}}}{S}} \quad (8.7)$$

Зная перегрузочную способность двигателя, можно определить критическое скольжение

$$S_{\text{кр}} = S_H \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \quad (8.8)$$

Подставляя в формулу (8.7) различные значения скольжения S , можно получить соответствующие им значения моментов и построить кривую зависимости момента от скольжения, достаточно точную в области устойчивой работы (рис.8.3, а).

Рабочие характеристики АД отражают зависимости частоты ротора n_2 , коэффициента полезного действия η , полезного момента M_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и тока I_1 от полезной мощности P_2 при постоянных значениях частоты f и напряжение сети U_1 . Зависимость $n_2 = f(P_2)$ называется скоростной характеристикой.

Принципиальная схема установки для снятия рабочих характеристик асинхронного двигателя представлена на рисунке 8.4.

Механической нагрузкой на валу АД служит генератор постоянного тока. В качестве электрической нагрузки на генераторе применяется ламповый реостат. Такая схема испытательной установки позволяет определить основные величины, характеризующие эксплуатационные возможности АД.

Полезная мощность на валу двигателя равна

$$P_2 = \frac{P_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}}, \quad (8.9)$$

где P_{Γ} - мощность, отдаваемая генератором $P_{\bar{A}} = U_{\bar{A}} \cdot I_{\bar{A}}$;

η_{Γ} - КПД генератора для различных нагрузок генератора (приложение 3).

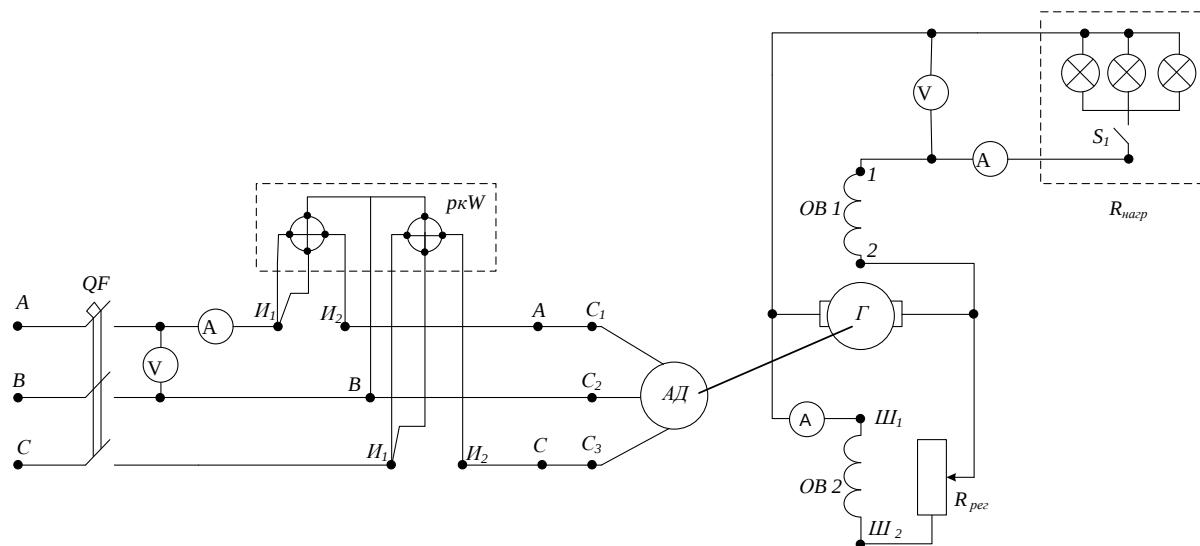


Рис.8.4 - Принципиальная схема установки для исследования АД

Вращающий момент АД определяется по формуле (8.6), в которой скорость вращения ротора измеряется тахогенератором.

КПД асинхронного двигателя определить по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (8.10)$$

где P_1 - показание киловаттметра.

Коэффициент мощности асинхронного двигателя определяется

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1} \quad (8.11)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Разметка фаз обмотки статора

Для того, чтобы произвести разметку фаз обмотки статора необходимо определить разметку зажимов каждой фазы по схеме (рис.8.5,а) с по-

мощью мультиметра. Прикоснувшись концом одного из проводов мультиметра в режиме миллиамперметра какого-либо вывода обмотки статора, концом другого провода касаются поочередно других выводов обмотки. При прикосновении к одному из выводов, на миллиамперметре будут высвечиваться значения. Это свидетельствует о том, что пара выводов, которых касаются в данный момент концы проводов мультиметра, принадлежат одной фазе обмотки. Эту пару выводов отмечают и переходят к нахождению выводов второй, а затем и третьей фазы обмоток.

2. Определение начал и концов фаз обмотки статора

Для этого необходимо последовательно соединить две фазы и к ним подать напряжение переменного тока (рис.8.5,б).

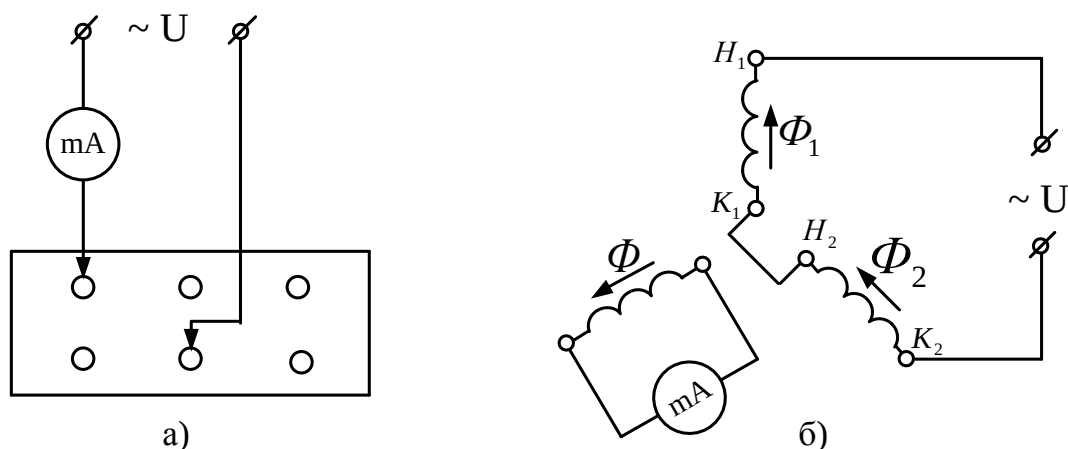


Рис.8.5 - Схема для определения выводов ("начало", "конец") фазных обмоток статора асинхронного двигателя

Если миллиамперметр имеет показания, то это указывает на то, что магнитные потоки, возбуждаемые токами в фазах, направлены согласно и индуцируют в третьей фазе ЭДС. Согласно направление магнитных потоков возможно при соединении проводом конца первой фазы с началом второй или наоборот, т.к. начала и концы фаз выбираются условно. При встречном направлении магнитных потоков показаний на приборе нет, это

1. Собрать электрическую схему, представленную на рисунке 8.4.
2. Для построения рабочих характеристик двигателя необходимо снять значения экспериментальных величин: а) при переменном токе $-U_1, I_1, P_1, n_2$;
3. б) при постоянном токе $-I_G, U_G$. Все эти величины снимаются при $U_1 = \text{const}$ и $f = \text{const}$. Значения получают в следующей последовательности:
 - 1) запустить двигатель и при отключенном выключателе S_1 произвести отсчет по приборам в режиме х. х. - первая точка характеристик;
 - 2) затем возбудить нагрузочный генератор G до номинального напряжения регулировочным реостатом $R_{рег}$;
 - 3) замкнуть выключатель S_1 и нагружая генератор G , снять значения экспериментальных величин. Показания записать в таблицу 8.1.

[illegible]

3. По опытным данным таблицы 8.1. расчетным путем определить M , P_2 , η , $\cos \varphi_1$, S для всех установленных значений механической нагрузки. Результаты расчетов записать в таблицу 8.1.

4. По полученным результатам построить механическую и рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис.8.3 и 8.6)

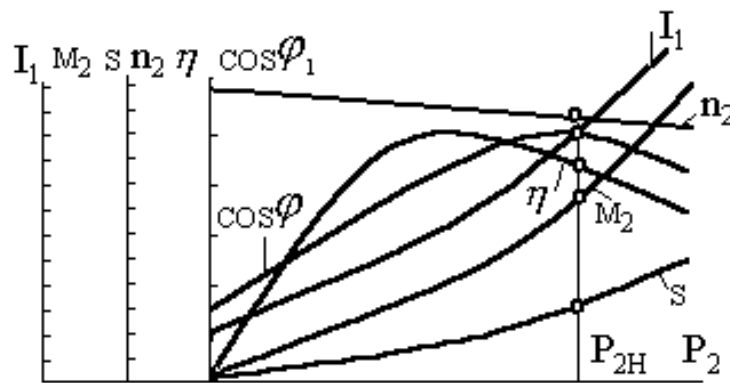


Рис.8.6 - Рабочие характеристики АД

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство асинхронного двигателя.
2. Принцип работы асинхронного двигателя.
3. Что называется скольжением, как оно рассчитывается?
4. Как можно определить вращающий момент асинхронного двигателя?
5. Почему пусковой ток больше номинального?
6. Какие имеются потери мощности в асинхронном двигателе при его работе?
7. Как зависит электромагнитный момент асинхронного двигателя от напряжения в сети?
8. Какие величины должны быть постоянными при построении рабочих характеристик асинхронного двигателя?

9. Каким образом проводят опыт по снятию рабочих характеристик двигателя?

10. Что является механической характеристикой АД?

Тестовое задание № 8

Тема: Асинхронный электродвигатель

1. Какое магнитное поле возникает при питании переменным током однофазной обмотки?

- а) вращающееся;
- б) пульсирующее;
- в) магнитное поле не возникает.

2. На какую мощность должен быть рассчитан генератор, питающий асинхронный двигатель, который развивает на валу механическую мощность 5 кВт при $\cos \varphi = 0,5$?

- а) 5 кВт·А;
- б) 10 кВт·А;
- в) 25 кВт·А.

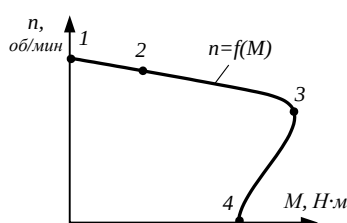
3. Для асинхронного двигателя найти момент на валу двигателя, если $P_2=3$ кВт и $n = 2940$ об/мин.

- а) 0,995 Н·м;
- б) 9750 Н·м;
- в) 9,75 Н·м.

4. Для создания вращения магнитного поля статора асинхронного двигателя необходимы следующие условия:.....

- а) наличие одной обмотки и включение ее в сеть однофазного переменного тока;
- б) включение статора в сеть трехфазного тока, ротора – в цепь постоянного тока;
- в) пространственный сдвиг обмоток и фазовый сдвиг токов в них;
- г) пространственный сдвиг обмоток и включение их в цепь постоянного тока.

5. Какая из характеристик изображена на рисунке?

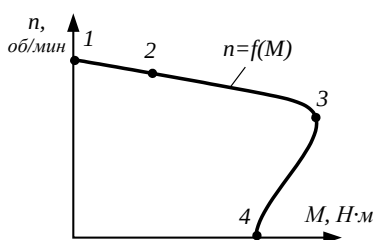


- а) механическая характеристика;
- б) рабочая характеристика;
- в) динамическая характеристика;
- г) регулировочная характеристика.

6. Ваттметр, подключенный к зажимам питания асинхронного двигателя, показывает: при номинальной нагрузке 1 кВт, при холостом ходе 50 Вт, при коротком замыкании 50 Вт. Определить КПД двигателя.

- а) для решения недостаточно данных;
- б) 90 %;
- в) 95%.

7. Какая из точек данной характеристики изображенной на рисунке является точкой пуска?



- а) точка 1;
- б) точка 2
- в) точка 3;
- г) точка 4.

8. На какую мощность должен быть рассчитан генератор, питающий асинхронный двигатель, который развивает на валу механическую мощность 15 кВт при $\cos \varphi = 0,7$?

- а) 15 кВт·А;
- б) 46,6 В·А;
- в) 22 кВт·А.

9. Какова формула для определения скольжения для асинхронных машин

а) $S = \frac{n_2 - n_1}{n_2}$;

б) $S = \frac{n_1 - n_2}{n_2}$

в) $S = \frac{n_2 - n_1}{n_1}$;

г) $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$

10. От какой величины не зависит коэффициент мощности при режиме холостого хода $\cos \varphi_0$ (на холостом ходу)?

- а) от тока;
- б) номинальной мощности;
- в) конструктивного исполнения машины;
- г) регулировочного сопротивления.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

Исследование генератора постоянного тока смешанного возбуждения

Цель работы: 1. Изучить устройство и принцип действия генератора.
2. Овладеть техникой и методикой снятия характеристик.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Машинный агрегат состоит из испытуемого генератора постоянного тока и приводного асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором, соединенных между собой с помощью клиноременной передачи. Генератор имеет две обмотки возбуждения - параллельную Ш1-Ш2 и последовательную С1-С2 (рис.9.1).

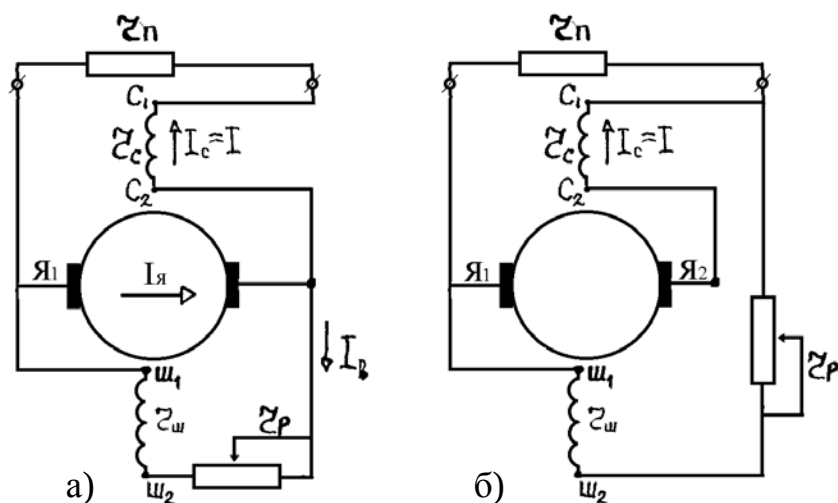


Рис.9.1 - Схемы включения при смешанном возбуждении:

а) «короткий шунт»; б) «длинный шунт»

У генераторов смешанного возбуждения чаще всего применяют схему "короткого шунта", которая обеспечивает наибольшее напряжение на обмотке возбуждения, что позволяет получить максимальный ток возбуждения.

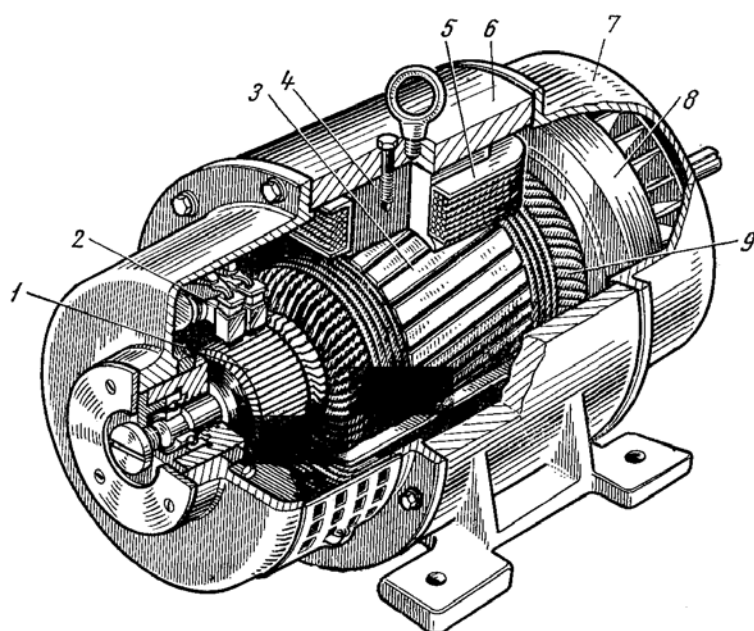
Схема "длинный шунт" используется в двигателях смешанного возбуждения. При этом к параллельной обмотке возбуждения подведено также наибольшее напряжение.

В настоящее время промышленностью изготавливаются машины постоянного тока (МПТ), предназначенные для работы в различных условиях. Поэтому отдельные узлы машин могут иметь разную конструкцию, но общая конструктивная схема этих машин одинакова.

На рисунке 9.2. показано устройство электрической машины постоянного тока.

МПТ состоит из неподвижной части - статора и вращающейся части - якоря, разделенных воздушным зазором. Статор состоит из станины, на внутренней поверхности которой крепятся главные и добавочные полюса с обмотками.

Главные полюса служат для создания в машине основного магнитного потока, а добавочные - для улучшения коммутации.



- 1 - коллектор;
- 2 - щетки;
- 3 - сердечник якоря;
- 4 - сердечник главного полюса;
- 5 - полюсная катушка;
- 6 - станина;
- 7 - подшипниковый щит;
- 8 - вентилятор;
- 9 - обмотка якоря.

Рис.9.2 - Устройство машины постоянного тока

Генератор смешанного возбуждения относится к генераторам с самовозбуждением.

Процесс самовозбуждения начинается с режима холостого хода, когда последовательная обмотка не принимает участия в образовании магнитного потока, так как $I_C=0$.

Для самовозбуждения генератора необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

1) генератор должен иметь магнитный поток остаточного намагничивания Φ_0 ; 2) параллельная обмотка возбуждения должна быть подключена к якору так, чтобы ею создавался магнитный поток, совпадающий по направлению с потоком остаточного намагничивания.

Процесс самовозбуждения можно пояснить следующим образом. Магнитным потоком Φ_0 , в обмотке якоря индуцируется остаточная ЭДС E_0 , под действием которой в обмотке возбуждения возникает ток, возбуждающий магнитный поток $\Phi_1 > \Phi_0$. Этим потоком Φ_1 в обмотке якоря индуцируется э.д.с. $E_1 > E_0$, под действием которой в обмотке возбуждения возникает ток $I_{B1} > I_B$, вызывающий увеличение магнитного потока $\Phi_2 > \Phi_1$ и т.д.

Чтобы решить вопрос о том, до каких установившихся значений ЭДС E и тока возбуждения I_B возбудится генератор. По второму закону Кирхгофа уравнение для переходного процесса самовозбуждения имеет вид

$$e = i(r_{\text{я}} + r_B + r_p) + L_{\text{я}} \frac{di_B}{dt} + L_B \frac{di}{dt}, \quad (9.1)$$

где $L_{\text{я}}$, L_B - индуктивности обмоток якоря и возбуждения;

$r_{\text{я}}$, r_B , $r_{\text{дд}}$ - сопротивление цепи якоря, обмотки возбуждения, регулировочного сопротивления;

$L_{\text{я}} \frac{di_B}{dt}$, $L_B \frac{di}{dt}$ - ЭДС самоиндукции, возникающая, в обмотках якоря и возбуждения, вследствие изменения тока i_B .

Когда процесс самовозбуждения закончится $\frac{di_B}{dt}=0$; $i_B=I_B$; $e=E$ и вместо уравнения (9.1) можно записать

$$E = I_B (r_{\beta} + r_{\hat{A}} + r_{\delta\delta\hat{a}}) = I_B \sum r \quad (9.2)$$

Таким образом, процесс самовозбуждения закончится тогда, когда ЭДС будет равна падению напряжения во всех сопротивлениях цепи якоря и обмотки возбуждения $I_B \sum r$.

Установившиеся значения E и I_B при заданном сопротивлении $r_{\delta\delta\hat{a}}$ нетрудно найти графическим путем. Необходимо иметь характеристику холостого хода $E = f(I_B)$ и вольтамперную характеристику $I_B \sum r = E = f(I_B)$ рисунок 9.3.

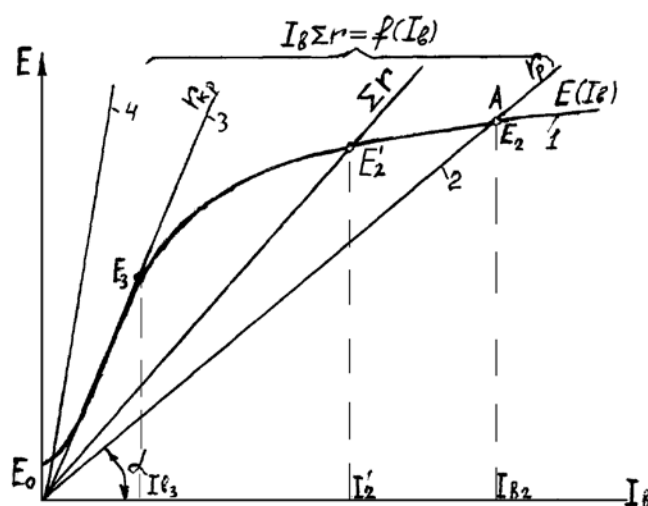


Рис.9.3 - К пояснению процесса самовозбуждения генератора

При различных значениях $\sum r$ получаем соответственно несколько вольтамперных характеристик $I_B \sum r = E = f(I_B)$. Установившиеся значения E и I_B определяются точками пересечения характеристики холостого хода и вольт-амперных характеристик. Изменяя $\sum r$ с помощью сопротивления $r_{рег}$, можно менять величины ЭДС, E и ток I_B , до которых будет возбуждаться генератор. Поэтому еще третьим условием возбуждения бу-

дет выполнение неравенства $\sum r < r_{KP}$. Угол наклона α вольтамперной характеристики зависит от величины суммарного сопротивления возбуждения, так как $\operatorname{tg} \alpha = \frac{U}{I_B} = \sum r$. Процесс самовозбуждения заканчивается в точке А, где пересекаются характеристики 1 и 2 (рис.9.3).

При сопротивлении цепи возбуждения, соответствующем характеристике 4, генератор самовозбудиться не может, поскольку по обмотке возбуждения потечет ток, которому соответствует меньше от E_0 напряжение по характеристике х.х.

При сопротивлении в цепи возбуждения, соответствующем характеристике 3, являющейся касательной к начальной части характеристики х.х., генератор устойчиво напряжение не держит и не возбуждается. Это сопротивление называется критическим.

Для снятия характеристик измерительные приборы, нагрузочные и регулировочные реостаты подбирают в соответствие с номинальными данными испытуемого генератора с учетом пределов регулирования тока и напряжения. Реостаты и амперметры для цепи якоря генератора должны быть рассчитаны на ток $I_P = (1 \dots 1,2) I_H$, а для цепи возбуждения на ток $I_{BP} = (0,05 \dots 0,1) I_H$. Опытные данные для построения характеристики холостого хода (х.х.) $E = f(I_B)$ при $n = n_H = \text{const}$ и $I_A = 0$, получают по схеме рисунка 9.4.

Изменяя с помощью регулировочного реостата r_{pe2} ток возбуждения I_B можно тем самым изменить магнитный поток Φ и, следовательно, ЭДС генератора

$$E = c_E n \Phi \quad (9.3)$$

Характеристика х.х. генератора подобна кривой намагничивания и характеризует магнитные свойства железа.

Электромагнитный момент у генератора является противодействующим моментом, поэтому первичный двигатель, вращающий генератор, должен преодолеть этот момент, и совершить механическую работу

$$M = c_M I_A \Phi_C$$

(9.4)

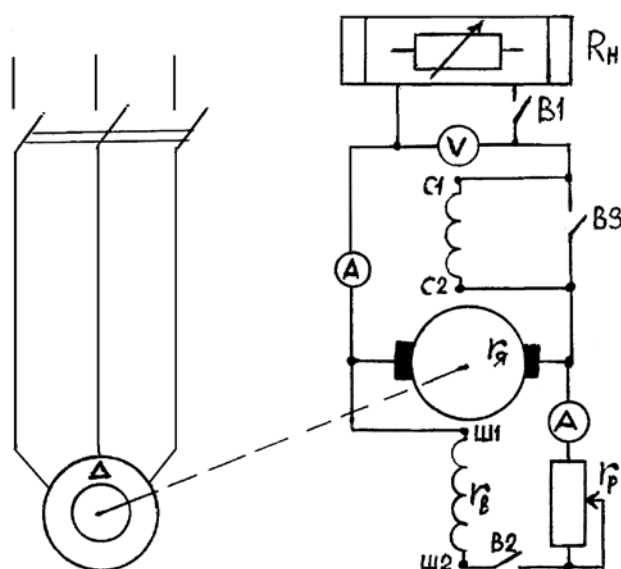


Рис.9.4 - Схема испытаний генератора постоянного тока смешанного возбуждения

Эксплуатационные особенности генераторов оцениваются с помощью внешних характеристик.

Внешняя характеристика $U = f(I)$ представляет собой зависимость напряжения на зажимах генераторов от тока нагрузки при $r_B = const$ и $n = const$.

На рисунке 9.5 показаны внешние характеристики генератора. Кривая 1 соответствует включению одной параллельной обмотки возбуждения. Из графика видно, что с увеличением тока нагрузки напряжение на якоре генератора с параллельным возбуждением уменьшается.

Это объясняется следующими причинами:

1) увеличением падения напряжения в цепи якоря $\Delta U = r_A I_A$;
поэтому напряжение

$$U = E - r_A I_A$$

(9.5)

2) некоторым уменьшением основного магнитного потока и ЭДС генератора за счет реакции якоря;

3) уменьшением тока возбуждения и основного магнитного потока, за счет снижения напряжения на якоре генератора (вследствие первых двух причин).

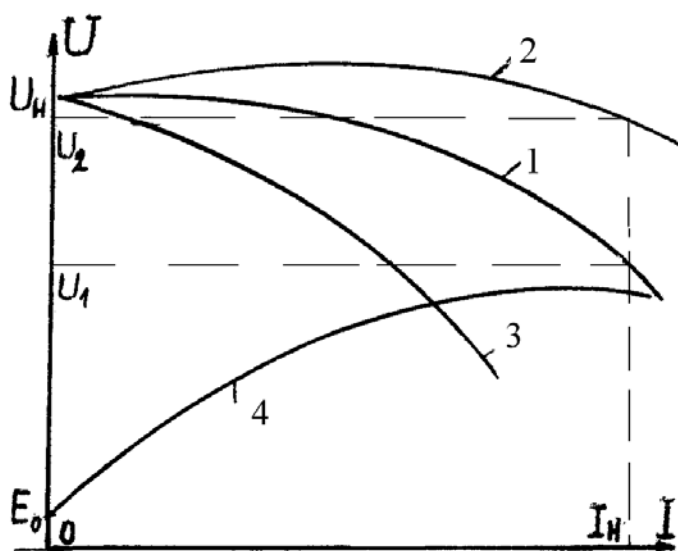


Рис.9.5 - Внешние характеристики генератора

При смешанном согласном возбуждении магнитодвижущая сила (МДС) последовательной обмотки возбуждения, создаваемая током нагрузки совпадает с МДС параллельной обмотки возбуждения и в определенной степени компенсирует действие причин, уменьшающих напряжение по характеристике 1. Поэтому характеристика 2 рисунка 9.5 более жесткая.

При смешанном встречном возбуждении напряжение на якоре генератора с ростом тока нагрузки резко падает (рис.9.5, кривая 3), поскольку МДС последовательной обмотки размагничивает машину.

Изменение напряжения при изменении нагрузки по внешним характеристикам 1 и 2 (рис.9.5) определяют соответственно из соотношений

$$\Delta U_{1\%} = \frac{U_H - U_1}{U_H} \cdot 100, \quad \Delta U_{2\%} = \frac{U_H - U_2}{U_H} \cdot 100 \quad (9.6)$$

При последовательном возбуждении напряжение генератора растет с увеличением нагрузки (рис.9.5 кривая 4), поскольку ток нагрузки является током возбуждения. Внешняя характеристика выходит не из начала координат (наличие остаточного магнетизма), а нелинейность ее объясняется влиянием насыщения магнитной цепи генератора.

Регулировочная характеристика $I_B = f(I)$ при $U = U_H = const$ и $n = n_H = const$ показывает, как необходимо изменять ток возбуждения при изменении тока нагрузки, чтобы поддерживать напряжение постоянным.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с рабочим местом, записать в рабочую тетрадь паспортные данные машинного агрегата, подобрать измерительные приборы и реостаты.

2. Собрать электрическую схему опытов рисунок 9.4. Проверить условия самовозбуждения и добиться возбуждаемости генератора.

3. Сделать измерения и получить данные для построения характеристики холостого хода (х.х.) $E = f(I_B)$ при $I = 0$ и $n = const$.

Опыт проводят следующим образом. При отсутствии тока нагрузки и тока возбуждения (B_1 и B_2 разомкнуты) и введенном регулировочным сопротивлением $r_{рег}$ якорь генератора приводят во вращение с номинальной частотой. Затем замыкают B_2 и увеличивают ток возбуждения до тех пор, пока напряжение на зажимах якоря генератора достигнет значения $(1,1...1,2) U_H$. Эта первая точка характеристики. После этого постепенно уменьшают до нуля так, чтобы получить 5...7 точек для построения характеристики х.х. Последний отсчет по вольтметру производят при разомкнутом выключателе B_2 , когда $I_B = 0$ и контролируют величину ЭДС от потока

остаточного магнетизма. Результаты измерений заносят в таблицу 9.1 и по ним строят характеристику х.х.

Таблица 9.1

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
I_B, A								
U, B								

4. Данные для построения внешних характеристик генератора зависимостей $U = f(I)$ при $n = n_H = const$ получают из опыта по схеме рисунка 9.4 следующим образом: а) якорь генератора приводят во вращение, возбуждают и доводят напряжение на якоре до номинального, при отключенном нагрузочном реостате R_H (B_1 разомкнут) - это первая точка характеристики; б) включают нагрузку (замыкают B_1 при максимальном сопротивлении нагрузочного реостата R_H), постепенно нагружают генератор до $I = (1,1.... 1,2)I_H$ и записывают значения тока нагрузки и напряжения для 5...6 точек характеристики.

Примечание: опыт повторяют три раза, для снятия характеристик: при включенной одной параллельной обмотки возбуждения (B_3 замкнут); при смешанном возбуждении и встречном включении последовательной обмотки возбуждения (B_3 разомкнут и проводники на выводах C_1 и C_2 меняют местами).

в) результаты измерений заносят в таблицу 9.2. По ней строят внешние характеристики на одной координатной оси.

5. Данные для построения регулировочной характеристики генератора $I_B = f(I)$ при $U = U = const$ и $n = n_H = const$ получают из опыта по схеме рисунка 9.4 следующим образом:

а) якорь генератора приводят во вращение, возбуждают и доводят напряжение на якоре до номинального значения при отключенной нагрузке (B_3 разомкнут). Это первая точка характеристики; б) включают нагруз-

ку (замыкают B_1) и постепенно нагружают генератор до номинального тока якоря, поддерживая напряжение неизменным за счет изменения тока возбуждения $r_{рег}$. При этом записывают значение тока возбуждения и тока нагрузки для 5.....6 точек характеристики; в) результаты опыта заносят в таблицу 9.3, строят регулировочную характеристику (способ возбуждения задает преподаватель).

Таблица 9.2

№ п/п	Способ возбуждения					
	параллельное		смешанное согласное		смешанное встречное	
	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А	U, В
1						
....						
п						

Таблица 9.3

Способ возбуждения			№ п/п	1	2		п
			I, А				
			I _В , А				

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Начертить эскиз магнитной цепи 2-х или 4-х полюсной машины постоянного тока.
2. Написать выражение для ЭДС, якоря и электромагнитного момента генератора.
3. Начертить принципиальные схемы цепей генераторов различных способов возбуждения.
4. Что называется реакцией якоря?
5. Назначение дополнительных полюсов.

6. Как по опытным данным определить величину критического сопротивления цепи возбуждения машин?

7. Что делать, если при выведении реостата возбуждения генератор не возбуждается?

8. Назовите условия и объясните процесс самовозбуждения генератора.

9. Чем объясняется нелинейность характеристики х.х.

10. Почему при одном и том же токе якоря напряжение генератора параллельного возбуждения ниже, чем при независимом возбуждении?

Тестовое задание № 9

Тема: Машины постоянного тока

1. Определите коэффициент полезного действия генератора постоянного тока, на щитке которого указана мощность 5 кВт, а суммарные потери при номинальной нагрузке составляют 1,5 кВт

а) $\eta = 67\%$;

б) $\eta = 87,3\%$;

в) $\eta = 75,4\%$;

г) $\eta = 76,9\%$.

2. Какой закон положен в основу работы двигателя постоянного тока?

а) закон Ома;

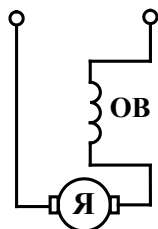
б) закон Ампера;

в) закон электромагнитной индукции;

г) закон Ленца;

д) закон обратимости.

3. На схеме изображен генератор постоянного тока



а) с параллельным возбуждением;

б) с возбуждением от постоянных магнитов;

в) с компаундным возбуждением;

г) с «сериесным» возбуждением;

д) с независимым возбуждением.

4. При холостом ходе генератора постоянного тока установлено минимальное напряжение на его зажимах 115 В. При номинальном токе нагруз-

ки напряжение снизилось до 103,5 В. Определите процентное изменение напряжения.

- а) 5%; б) 8%;
в) 12%; г) 10%

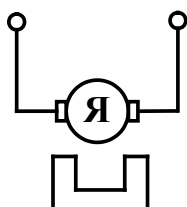
5. Определите, к какому виду потерь энергии в электродвигателях можно отнести потери на трение в подшипниках, щеток о коллектор, потери на охлаждение.

- а) магнитные потери; б) механические потери.
в) магнитные потери; г) магнитные потери.
д) добавочные потери

6. Что такое якорь?

- а) вращающаяся часть машины постоянного тока;
б) та часть машины, в которой индуцируется ЭДС;
в) вращающаяся часть машины постоянного тока, в которой индуцируется электродвижущая сила;
г) вращающаяся часть асинхронной машины.

7. На схеме изображен генератор постоянного тока.....



- а) с параллельным возбуждением;
б) с компаундным возбуждением;
в) с возбуждением от постоянных магнитов;
г) с независимым возбуждением.

8. Укажите неправильную запись формулы для определения момента двигателя постоянного тока

- а) $M = 9,5 \cdot \frac{P_2}{n}$; б) $M = C_M \cdot \Phi \cdot I_a$;
в) $M = 9550 \cdot \frac{P_2}{n}$; г) $M = E_a \cdot I_a$

9. Почему сердечник вращающегося якоря машины постоянного тока, набирают из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга?

- а) из конструктивных соображений;
- б) чтобы увеличить сопротивляемость материала;
- в) чтобы уменьшить тепловые потери в машине;
- г) для уменьшения стоимости машины.

10. По какому правилу определяется направление электродвижущей силы, индуцируемой в проводнике, пересекающем магнитные силовые линии?

- | | |
|------------------------|-------------------------|
| а) правилу левой руки; | б) правилу правой руки; |
| в) правилу буравчика; | г) правилу обратимости. |

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

Исследование вольтамперных характеристик нелинейных элементов

Цель работы: 1. Изучить применение полупроводниковых элементов в электротехнических устройствах.

2. Ознакомиться с вольтамперными характеристиками нелинейных элементов.

3. Снять и построить вольтамперные характеристики нелинейных элементов (полупроводниковых диодов).

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Зависимость тока I и напряжения U на элементе цепи называется вольтамперной характеристикой (ВАХ). В зависимости от ВАХ элементы подразделяются на линейные и нелинейные. У линейных элементов ВАХ представляют собой прямую линию. Элементы, имеющие нелинейную зависимость между током и напряжением $U = f(I)$, называются нелинейными. Электрическая цепь, содержащая хотя бы один нелинейный элемент (НЭ), считается нелинейной.

Для нелинейных резистивных элементов такая характеристика так же называется вольтамперной (ВАХ). Нелинейную вольтамперную характеристику имеют выпрямительные диоды, терморезисторы, термисторы, варисторы, полупроводниковые термисторы. Условные обозначения на схемах и вольтамперные характеристики некоторых нелинейных резистивных элементов представлены в приложении 4.

В зависимости от вида вольтамперной характеристики нелинейные элементы могут быть симметричные и несимметричные (относительно начала координат).

Симметричную ВАХ $I(U) = -I(-U)$ имеет лампа накаливания с металлической нитью, ВАХ приведена на рис. 10.1, а.

Большое применение в технике получили управляемые нелинейные элементы. Вольтамперная характеристика управляемого нелинейного элемента изменяется в зависимости от значения управляющего параметра (температуры, освещенности и т.д.), поэтому управляемый нелинейный элемент характеризуется семейством ВАХ. На рис. 10.1,б показано, например, семейство ВАХ термистора - термоэлектрического полупроводникового прибора.

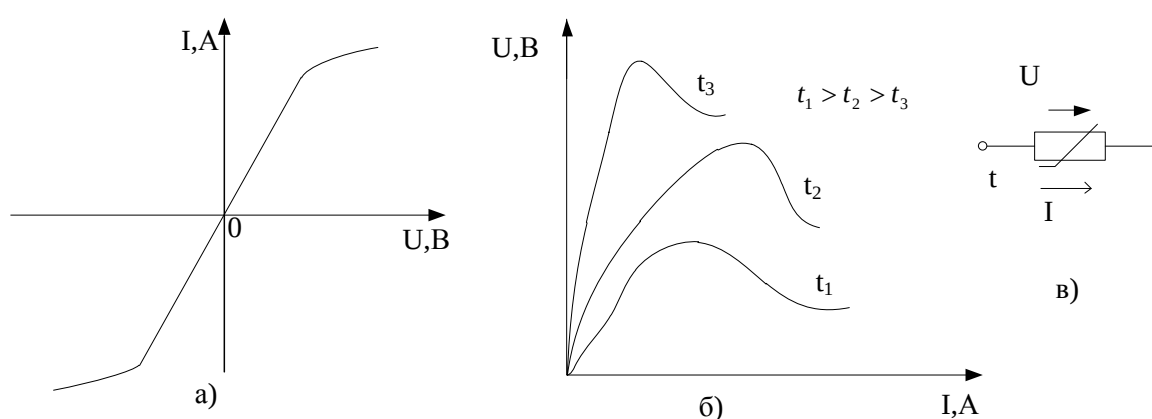


Рис.10.1 – а) симметричная ВАХ для лампы накаливания с металлической нитью;
б) семейство ВАХ термистора; в) условно-графическое обозначение термистора

Широкое распространение управляемые нелинейные элементы получили в устройствах электроники.

При подключении цепи с любым нелинейным элементом к синусоидальному напряжению ток будет изменяться по периодическому несинусоидальному закону.

У нелинейных элементов различают статическое и дифференциальное сопротивление.

Статическое сопротивление НЭ представляет собой отношение постоянного напряжения на НЭ к току

$$R_{cm} = \frac{U}{I} \quad (10.1)$$

Дифференциальное сопротивление - скалярная величина, равная пределу отношения приращения напряжения на НЭ к приращению тока в нем, когда последнее приращение стремится к нулю, характеризующее НЭ при малых отклонениях от рассматриваемой точки нелинейной характеристики.

ки. Дифференциальное сопротивление определяет крутизну характеристики в каждой точке (рис.10.2).

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} \quad (10.2)$$

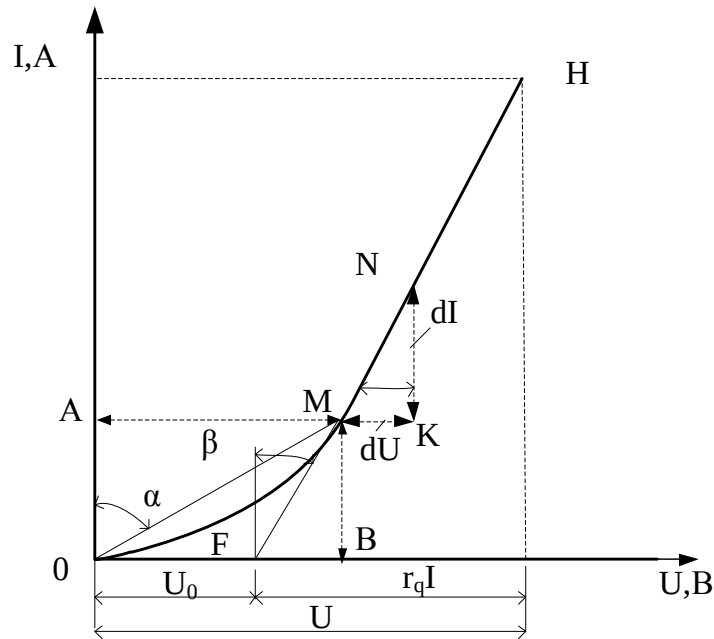


Рис.10.2 – Определение статического и дифференциального сопротивления по ВАХ

Как видно из рисунка 10.2, статическое сопротивление пропорционально тангенсу угла α , образованного секущей, проведенной из начала координат в рассматриваемую точку характеристики, с осью I

$$R_{cm} = \frac{m_U \cdot \overline{OB}}{m_I \cdot \overline{OA}} = m_r \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (10.3)$$

где $m_r = \frac{m_U}{m_I}$ - масштаб сопротивления.

Дифференциальное сопротивление пропорционально тангенсу угла β , образованного касательной в рассматриваемой точке характеристики с осью I .

$$R_{\text{диф}} = \frac{m_U \cdot \overline{MK}}{m_I \cdot \overline{NK}} = m_r \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (10.4)$$

Широкое распространение в устройствах электроники получили полупроводниковые НЭ. К НЭ можно отнести полупроводниковые устройства, которые выполняются из полупроводниковых материалов. К полупроводникам относят материалы, занимающие по своему удельному сопротивлению промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. При производстве полупроводниковых приборов наибольшее применение нашли германий *Ge* и кремний *Si*, имеющие четыре валентных электрона.

При добавлении в кристалл кремния элементов из пятой группы (например, мышьяк *As*) появляется несвязанный, свободный электрон. Таким образом, в кристалле кремния возникает электронная проводимость, а полупроводник называется *n* - типа. Примесь, образующая электронную проводимость, называется донорной.

Добавление в кремний трехвалентной примеси (например, бор *B*) приводит к тому, что три валентных электрона участвуют в образовании ковалентных связей с атомом, а одна связь остается свободной. Таким образом, для образования четвертой ковалентной связи примесным атомам не хватает по одному электрону. В кристалле образуется независимая валентная связь, называемая «дыркой». Такой полупроводник называется полупроводником с дырочной проводимостью или полупроводником *p* - типа, а соответствующая примесь называется акцепторной.

Поэтому принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на явлениях, происходящих на границе двух полупроводников с различными видами проводимости, т.е. электронно-дырочный переход.

Электронно-дырочный переход или *p-n* - переход образуется путем сплавления проводников типа - *n* и типа -*p* в единый монокристалл. На границе электронной и дырочной областей существует градиент концентрации зарядов: в области *p* положительный заряд, обусловленный наличием дырок; в области *n* - отрицательный заряд свободных электронов. Наличие градиента концентрации зарядов вызывает появление диффузи-

онного тока, то есть переноса заряженных частиц (дырок и электронов) через р - n переход. Таким образом, в области р, вследствие ухода дырок возникает не скомпенсированный отрицательный заряд, а в области n, вследствие ухода электронов положительный заряд. На границе р-n-перехода возникает запирающий слой, препятствующий дальнейшему переходу зарядов. Чтобы через р-n-переход возник электрический ток к нему необходимо приложить внешнее поле $E_{ВН}$ (рис.10.3). Если внешнее поле направлено на встречу полю перехода, то через р-n-переход идет электрический ток. Это соответствует прямому включению. Если внешнее поле совпадает с полем перехода, то ток через переход отсутствует. Это соответствует обратному включению (рис.10.3).

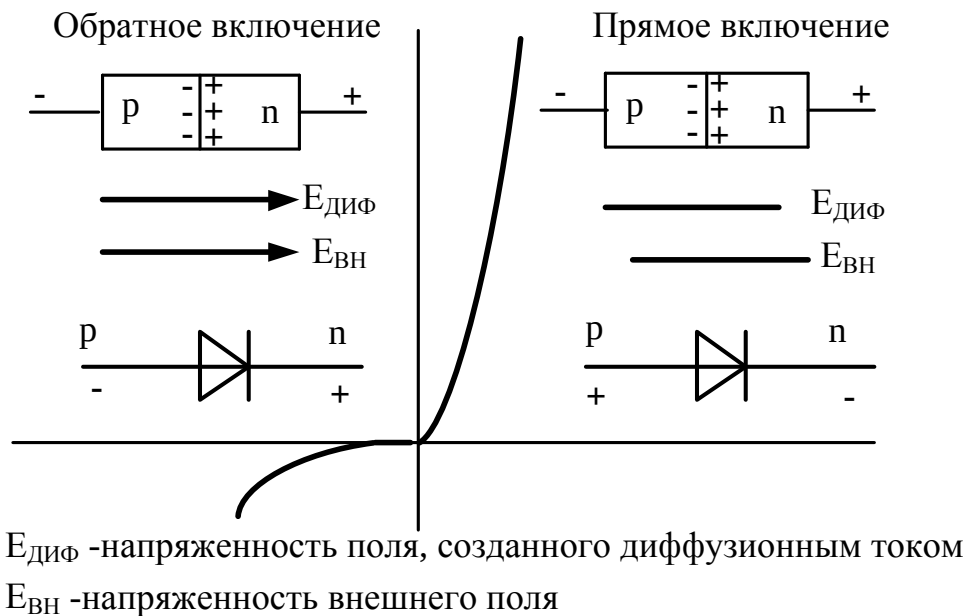


Рис.10.3 - Способы включения полупроводниковых элементов

Рассмотрим полупроводниковые диоды. Полупроводниковым диодом называется двухэлектродный прибор, имеющий один р-n переход.

Условно-графические обозначения полупроводниковых диодов представлены на рисунке 10.4.

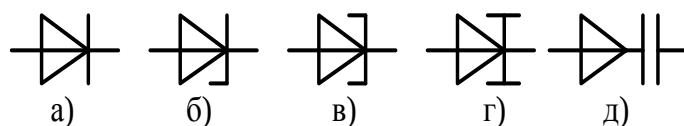


Рис.10.4 – Условно-графические обозначения полупроводниковых диодов
 а) выпрямительные, импульсные и универсальные; б) стабилитроны и стабисторы;
 в) туннельные; г) обращенные; д) варикапы

Односторонняя проводимость полупроводниковых диодов применяется для выпрямления переменного тока. На рисунке 10.5 представлено однополупериодное выпрямление. Данная схема выпрямления называется однополупериодной, так как через нагрузку проходит только один полупериод входного переменного напряжения.

При действии положительной полуволны диод включен в прямом направлении, его сопротивление очень мало. Ток идет через нагрузку.

При действии отрицательной полуволны напряжения диод включен в обратном направлении, его сопротивление во много раз больше сопротивления нагрузки, поэтому все напряжения обратной полуволны падает на диоде, а напряжение на нагрузке практически равно нулю.

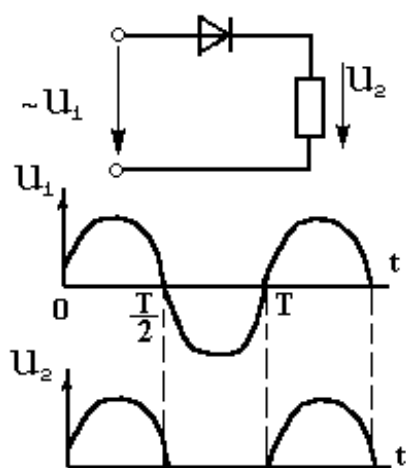


Рис.10.5 – Подключение полупроводниковых устройств и их временные характеристики

Нелинейные свойства полупроводниковых приборов используются в различных устройствах электротехники, автоматики, радиотехники. В частности, полупроводниковые диоды широко применяются для выпрямления переменного тока, стабилитроны - для стабилизации напряжения, динисторы - в релейных устройствах автоматики.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему (рис.10.6) и изменяя напряжение в пределах заданных преподавателем (при прямом ходе напряжение изменяется от 0 до 3 В, при обратном от 0 до 10 В) записать 10 измерений для каждого нелинейного элемента в таблицу 10.1.

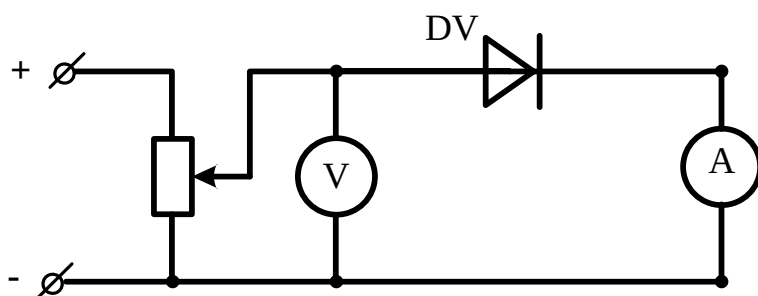


Рис. 10.6 – Экспериментальная схема для снятия ВАХ диодов

Таблица 10.1

№ опыта	Диод №____				Диод №____				Диод №____			
	$U_{пр},$ В	$I_{пр},$ А	$U_{обр},$ В	$I_{обр},$ А	$U_{пр},$ В	$I_{пр},$ А	$U_{обр},$ В	$I_{обр},$ А	$U_{пр},$ В	$I_{пр},$ А	$U_{обр},$ В	$I_{обр},$ А
1												
....												
10												

2. Построить ВАХ характеристики всех нелинейных элементов.
3. Для заданного преподавателем значения ΔU каждого диода определить статическое сопротивление, используя ВАХ и формулу 10.3 из общих сведений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется нелинейной цепью?
2. Как создают полупроводники р-типа?

3. Как создают полупроводники n-типа?
4. Что такое ВАХ характеристика?
5. Какой вид ВАХ имеет для линейного и нелинейного элемента?
6. Как определить статистическое и дифференциальное сопротивление?
7. Назовите виды полупроводниковых диодов, зарисуйте условно-графические изображения.
8. Объясните разницу между прямым и обратным включением полупроводниковых элементов.
9. Где применяются полупроводниковые устройства?
10. Объясните принцип действия полупроводниковых приборов.
11. Что определяет дифференциальное сопротивление?
12. Для чего применяется односторонняя проводимость полупроводниковых диодов?
13. Расскажите принцип действия однополупериодного выпрямления.

Тестовое задание №10

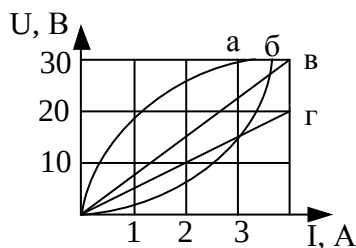
Тема: Нелинейные элементы

1. Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с двумя выводами и одним.....

- а) р-п переходом;
- б) кристаллом с п-типом проводимости;
- в) кристаллом с р-типом проводимости;
- г) управляющим с электродом.

2. На рисунке представлены вольт-амперные характеристики приемников,

из них нелинейные элементы.....



- а) а, б;
- б) б, в, г;
- в) в, г;
- г) все

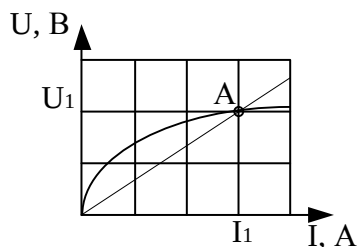
3. На рисунке приведено условное обозначение



- а) полевого транзистора;
- в) биполярного транзистора;
- б) тиристора;
- г) выпрямительного диода.

4. Статическое сопротивление нелинейного элемента в точке А определяется выражением.....

а)



- в) приложить прямое напряжение;
- г) приложить обратное напряжение.

6. Нелинейные свойства полупроводниковых приборов используются в различных устройствах.....

- а) электротехники;
- б) автоматики;
- в) радиотехники;
- г) во всех выше перечисленных.

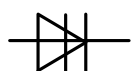
7. Электрическая цепь, у которой электрические напряжения и электрические токи связаны друг с другом нелинейными зависимостями, называется....

- а) принципиальной схемой;
- б) линейной электрической цепью;
- в) схемой замещения;
- г) нелинейной электрической цепью.

8. Что называется зависимостью тока через электроно-дырочный переход от приложенного напряжения?

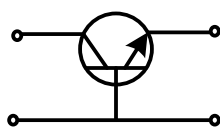
- а) вольт-амперной характеристикой;
- б) кулон-вольтной характеристикой;
- в) потенциальным барьером;
- г) вебер-амперной характеристикой.

9. На рисунке приведено условное обозначение



- а) полевого транзистора;
- б) диодного тиристора;
- в) биполярного транзистора;
- г) выпрямительного диода.

10. На рисунке приведена схема включения транзистора с общей(им)



- а) базой;
- б) эмиттером;
- в) коллектором;
- г) землей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

Исследование последовательного, параллельного и смешанного соединения полупроводниковых диодов

- Цель работы:**
1. Изучить виды соединений полупроводниковых диодов.
 2. Снять вольтамперные характеристики для различных видов соединения.
 3. Сравнить экспериментальные и теоретические ВАХ для всех видов соединения.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вольтамперные характеристики НЭ представлены обычно в графической или табличной форме.

Графический расчёт сводится к построению ВАХ всей нелинейной электрической цепи или её части. Так как нелинейные элементы можно соединить последовательно, параллельно или смешанно, то сам графический метод (в зависимости от вида соединения) имеет некоторые особенности. Рассмотрим основные виды соединения НЭ.

Последовательно соединённые нелинейные элементы

Рассмотрим цепь, состоящую из двух последовательно соединённых нелинейных элементов (рис. 11.1, а). ВАХ элементов заданы следующими зависимостями $I_1 = f(U_1)$ и $I_2 = f(U_2)$ (рис. 11.1, б).

При последовательном соединении ток в обоих элементах одинаков, а значения напряжения на каждом элементе различны. Поэтому напряжение источника, т.е. входное напряжение равно $U_{BX} = U_1 + U_2$. Значит, для построения ВАХ всей цепи при последовательном соединении необходимо:

- 1) задаться значением тока в цепи;

- 2) по ВАХ НЭ₁ и НЭ₂ для заданного значения тока определить напряжения U_1 и U_2 на этих элементах;
- 3) сложить полученные напряжения U_1 и U_2 заданных ВАХ нелинейных элементов, получив $U_{\text{АО}}$;
- 4) задавая следующие значения токов, определяются соответствующие им значения $U_{\text{АО}}$;
- 5) по полученным точкам $U_{\text{АО}}$ строится ВАХ $I = f(U_{\text{ВХ}})$.

Построенная результирующая характеристика $I = f(U_{\text{ВХ}})$ (рис.11.1,б) позволяет заменить цепь с последовательным соединением двух НЭ цепью с одним эквивалентным НЭ_{ЭКВ} (рис.11.1,в).

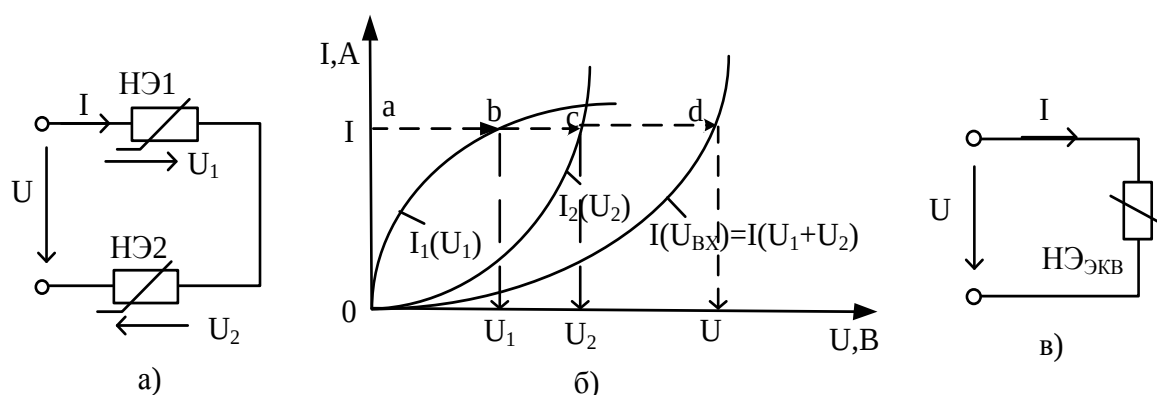


Рис.11.1 – Последовательное соединения нелинейных элементов
а) схема соединения; б) ВАХ; в) эквивалентная схема

Параллельно соединенные нелинейные элементы

При параллельном соединении НЭ (рис. 11.2, а) напряжение на каждом элементе одинаковое, а общий ток в соответствии с законом Кирхгофа $I_{\text{ВХ}} = I_1 + I_2$. ВАХ элементов заданы зависимостями $I_1 = f(U_1)$ и $I_2 = f(U_2)$ (рис. 11.2, б).

Значит, для построения ВАХ всей цепи при параллельном соединении необходимо:

- 1) задаться значением напряжения цепи;

- 2) по ВАХ НЭ1 и НЭ2 для заданного значения напряжения определить токи I_1 и I_2 на этих элементах;
- 3) сложить полученные значения токов I_1 и I_2 , получив I ;
- 4) задавая следующие значения напряжения, определить соответствующие им значения I ;
- 5) по полученным точкам I строится ВАХ $I = f(U_{BX})$.

Построенная результирующая характеристика $I = f(U_{BX})$ позволяет заменить цепь с параллельным соединением НЭ цепью с одним эквивалентным НЭ_{ЭКВ} (рис.11.2,в).

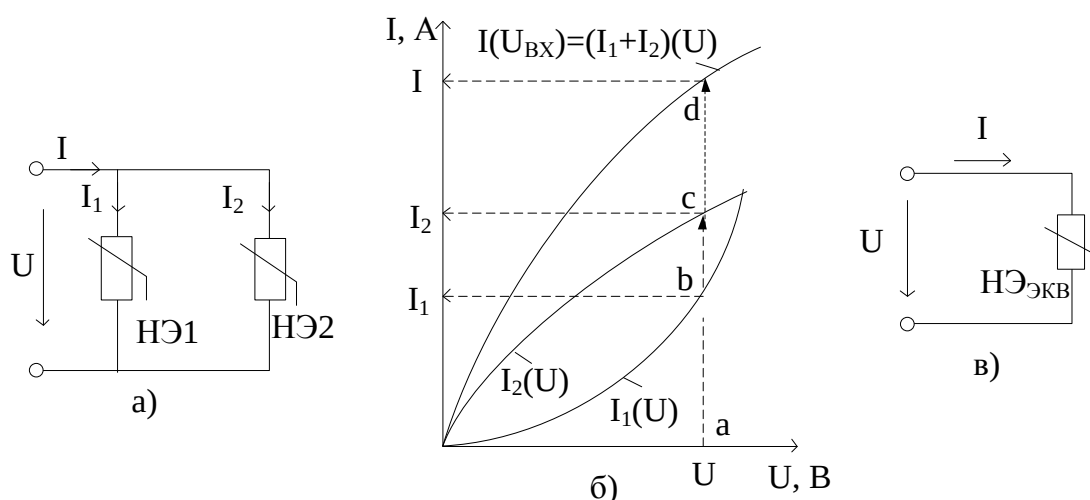


Рис.11.2 – Параллельное соединения нелинейных элементов
а) схема соединения; б) ВАХ; в) эквивалентная схема

Смешанно соединенные нелинейные элементы

При смешанном соединении НЭ характеристика эквивалентного нелинейного элемента НЭ_{ЭКВ} строится при поочередном выполнении рассмотренных ранее построений.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать экспериментальную схему последовательно соединённых двух НЭ (рис. 11.3). Изменяя входное напряжение в пределах от 0 до 3 В, записать значения прямого тока в таблицу 11.1.

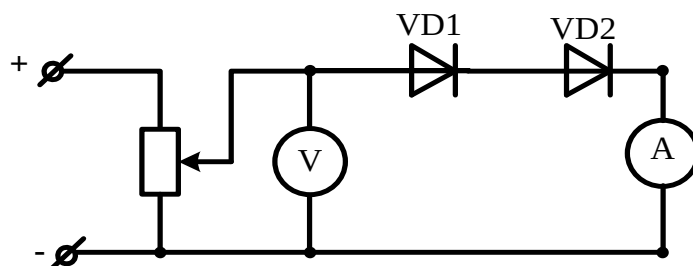


Рис. 11.3 - Последовательное соединение диодов

2. Собрать экспериментальную схему параллельного соединения НЭ (рис.11.4). Изменяя напряжение в пределах от 0 до 3 В, записать измерения в таблицу 11.1.

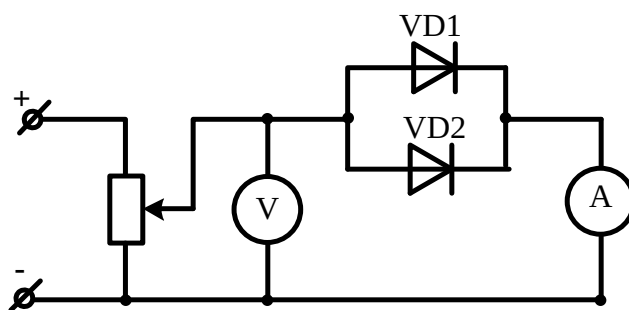


Рис.11.4 - Параллельное соединение диодов

3. Собрать экспериментальную схему смешенного соединения НЭ (рис. 11.5) и изменяя напряжение в пределах от 0 до 3 В, записать 10 измерений в таблицу 11.1.

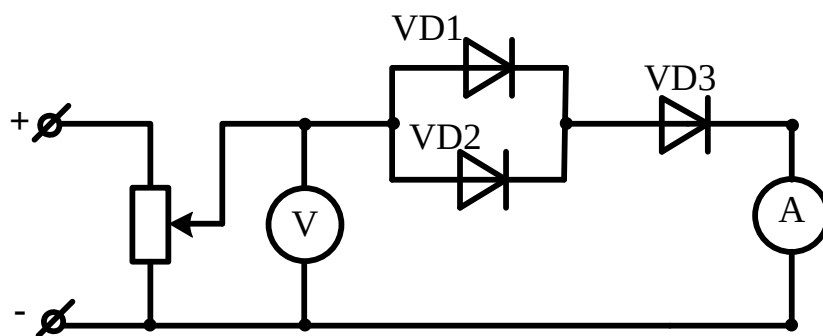


Рис. 11.5 - Смешанное соединение диодов

4. Построить экспериментальные ВАХ для всех видов соединений по табличным данным.

Таблица 11.1.

№ опыта	Вид соединения								
	Последовательное			Параллельное			Смешанное		
	$U_{\text{пр}},$ В	$I_{\text{пр}},$ А	$R,$ Ом	$U_{\text{пр}},$ В	$I_{\text{пр}},$ А	$R,$ Ом	$U_{\text{пр}},$ В	$I_{\text{пр}},$ А	$R,$ Ом
1									
....									
10									

5. Из предыдущей лабораторной работы перенести ВАХ соответствующих НЭ на одну координатную плоскость и сложить их графическим способом. Сложение должно быть характерным для данного вида соединения. Так получите теоретическую ВАХ.

6. Сравнить экспериментальную ВАХ с теоретической ВАХ. Сделать вывод.

7. Рассчитать сопротивления по закону Ома в таблице с измеренными данными НЭ. Проанализировать, как изменяется ток в зависимости от вида соединения (закон Ома).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что является НЭ? Приведите примеры.
2. Перечислите основные виды соединения НЭ. Назовите особенности каждого вида соединения.
3. Какая величина берется за основу построения ВАХ при последовательном соединении НЭ? Почему?
4. Какая величина берется за основу построения ВАХ при параллельном соединении НЭ? Почему?
5. В чем особенность построения ВАХ при смешанном соединении НЭ?

Таблица ответов на тестовые задания

номер теста	Ответы на тесты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№1.	а	б	а	б	в	б	б	а	б	в
№2.	б	а	г	б	а	в	а	а	а	в
№3.	б	г	б	а	в	а	в	б	б	г
№4.	в	в	б	а	а	в	а	а	а	г
№5.	в	б	г	а	з	в	2	б	а	б
№6.	в	а	б	а	в	б	2	г	в	б
№7.	б	г	б	в	а	б	г	в	а	б
№8.	а	б	в	а	а	б	г	в	г	г
№9.	г	б	г	б	б	в	в	г	в	б
№10.	а	а	г	г	б	г	г	а	г	а

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Условные обозначения на шкалах приборов

Таблица 1 – Обозначения единиц, их кратных и дольных значений

Символ по МЭЕ -51	Наименование	Условное обозначение
A-2	Ампер	A
A-3	Миллиампер	mA
A-4	Микроампер	μ A
A-5	Киловольт	kV
A-6	Вольт	V
A-7	Милливольт	mV
A-8	Микровольт	μ V
A-11	Ватт	W
A-17	Герц	Hz
A-18	Мега ом	M Ω
A-19	Кило ом	k Ω
A-20	Ом	Ω
A-22	Тесла	T
-	Вебер	Wb
-	Фарада	F
-	Генри	H
-	Коэффициент мощности	cos φ
-	Градус угла сдвига фаз	φ

Обозначение рода тока

Символ по МЭЕ -51	Наименование	Условное обозначение
B-1	Постоянный ток	-
B-2	Переменный (однофазный) ток	~
B-3	Постоянный и переменный ток	≈
B-4	Трехфазный ток (общее обозначение)	≡

Обозначения прочности изоляции и положения прибора

Символ по МЭЕ -51	Наименование	Условное обозначение
С-1	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением в 500В	
С-2	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, которое превышает 500 В, например 2 кВ	
С-3	Прибор испытанию прочности не подлежит	
С-7	Прибор или его вспомогательная часть под высоким напряжением	
Д-1	Прибор применять при вертикальном положении шкалы	
Д-2	Прибор применять при горизонтальном положении шкалы	
Д-3	Прибор применять при наклонном положении шкалы (например, под углом 60°) относительно горизонтальной плоскости	

Обозначение принципа действия прибора

Символ по МЭЕ -51	Наименование	Условное обозначение
1	2	3
	Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой	
	Электромагнитный прибор	
	Электродинамический прибор	
	Ферродинамический прибор	

Продолжение таблицы 1

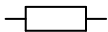
1	2	3
	Тепловой прибор с нагреваемой проволокой	
	Электростатический прибор	
	Вибрационный прибор	
	Выпрямитель	
	Шунт	
	Дополнительное сопротивление	
	Внимание! Смотри дополнительные указания в паспорте и инструкции по эксплуатации	
	Общая вспомогательная часть	

Таблица 2 - Системы электроизмерительных приборов

Наименование системы	Условные обозначения		Род тока для приборов данной системы	Использование данной системы	Эксплуатационные особенности приборов
	с механическим противодействующим моментом	без противодействующего момента			
1	2	3	4	5	6
Магнитоэлектрическая с подвижной рамкой			Постоянный	Гальванометры, амперметры, вольтметры, мегомметры, регистрирующие приборы	Самая чувствительная из всех систем. Самые точные приборы постоянного тока. Шкала равномерная, мало чувствительная к внешним магнитным полям.

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
Электромагнитная			Постоянный, Переменный	Щитовые амперметры, вольтметры, фазометры, частотомеры. Переносные амперметры, вольтметры, фазометры, синхроноскопы.	Шкалы амперметров, вольтметров неравномерны. Относительно низкая чувствительность. Рабочая часть шкалы начинается от 15-20% шкалы. Обладают большой перегрузочной способностью. Самые прочные дешевые приборы.
Электродинамическая			Постоянный, Переменный	Амперметры, вольтметры, ваттметры, фазометры, счетчики в цепях постоянного тока	Самые точные из приборов переменного тока. Чувствительны к влиянию внешних магнитных полей. Шкала амперметров и вольтметров неравномерная. Рабочая часть шкалы этих приборов начинается с 10-15% шкалы. Значительное собственное потребление энергии.
Ферродинамическая			Постоянный, Переменный	Амперметры, вольтметры, ваттметры, фазометры, частотомеры.	Относительно низкая точность. Обладают большим вращающим моментом. Чувствительны к колебаниям частоты. Высокое собственное потребление энергии.
Индукционная			Переменный	Счетчики электрической энергии	Чувствительны к колебаниям частоты.
Электростатическая			Постоянный, Переменный	Вольтметры и Киловольтметры	Слабая чувствительность. Внутреннее сопротивление постоянному току, а переменному достигает больших значений. Собственное потребление энергии равно нулю.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Расчет комплексных величин

Из курса математики известно, что любое комплексное число $\dot{A}$ можно представить:

а) в алгебраической форме

$$\dot{A} = a + jb$$

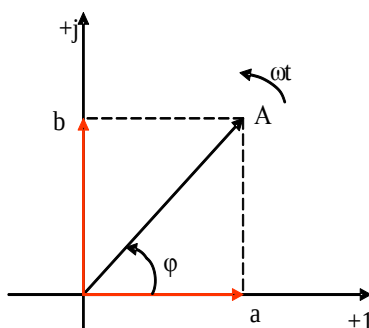
б) в тригонометрической форме

$$\dot{A} = A(\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

в) в показательной форме

$$\dot{A} = A e^{j\varphi}$$

г) вектором на комплексной плоскости (рис.).



Изображение синусоидальных величин вращающимися векторами на плоскости

где $j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица,

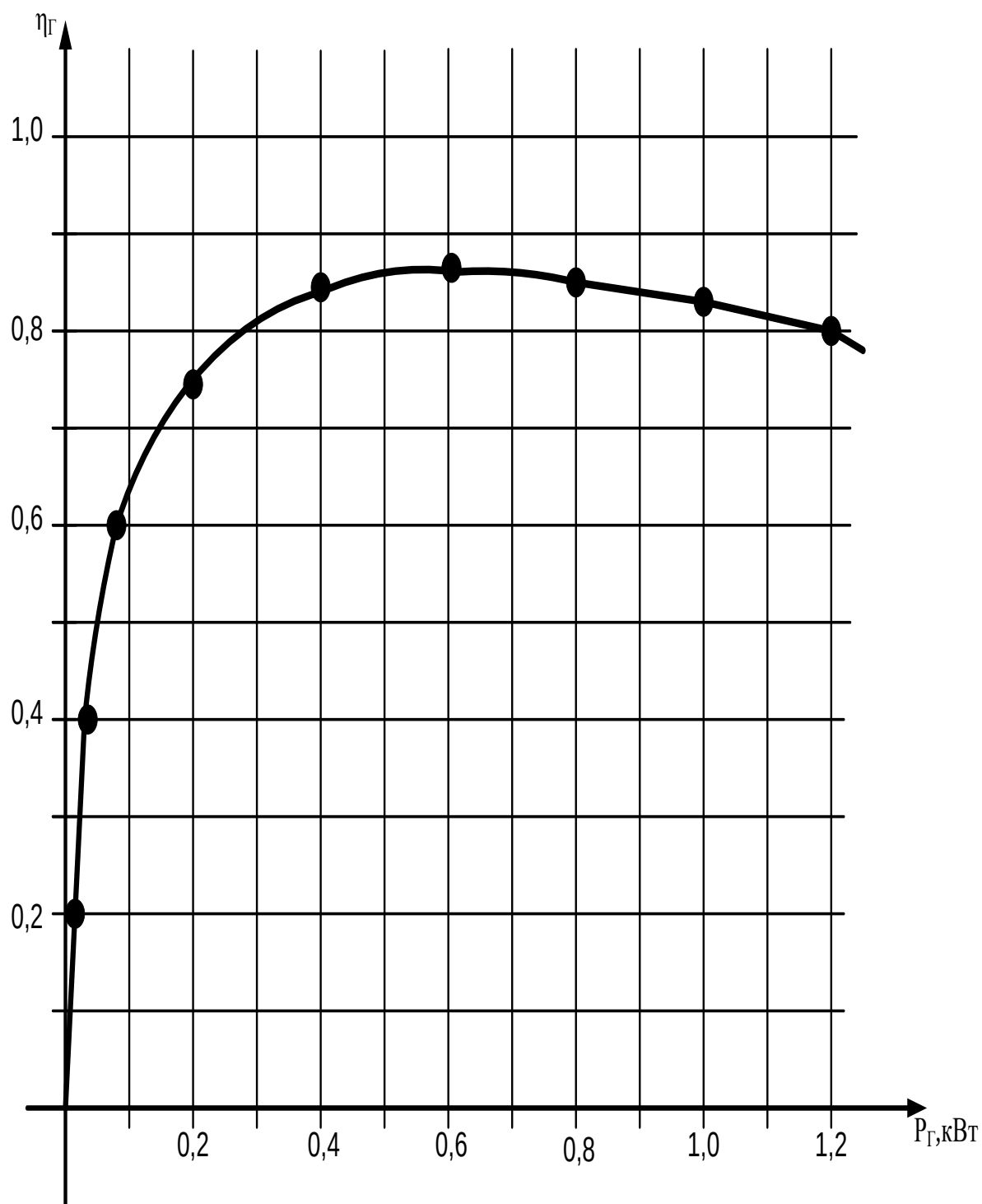
$a = A \cdot \cos \varphi = \operatorname{Re} \dot{A}$ - реальная часть комплексного числа $\dot{A}$ (проекция вектора на ось абсцисс – вещественная ось);

$b = A \cdot \sin \varphi = \operatorname{Im} \dot{A}$ - мнимая часть комплексного числа $\dot{A}$ (проекция вектора на ось ординат – мнимая ось);

$A = |\dot{A}| = \sqrt{a^2 + b^2}$ - модуль комплексного числа;

$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$ - множитель, называется формулой Эйлера;

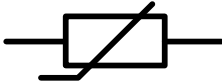
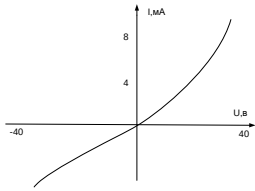
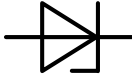
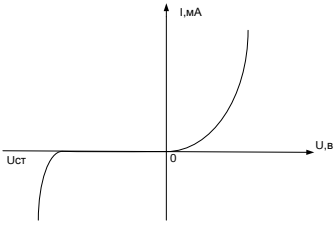
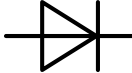
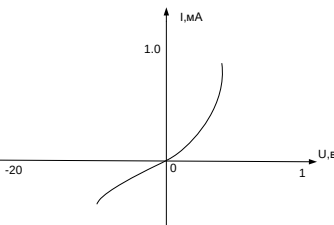
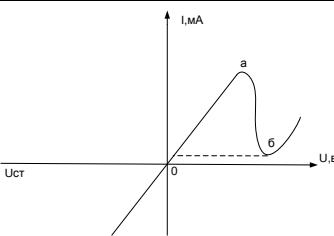
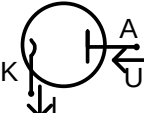
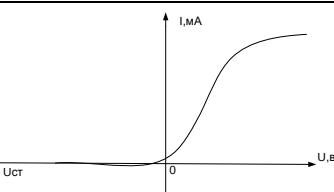
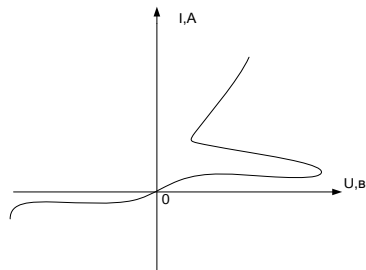
$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{a}$ - главное значение аргумента комплексного числа.



Зависимость КПД генератора от его мощности

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Условно-графическое обозначение в схемах и вольт – амперная характеристика некоторых нелинейных резистивных элементов

Вид элемента	Условное графическое обозначение	Вольт - амперная характеристика
Варистор (компаунд из карбида кремния, железа, фосфора)		
Полупроводниковый стабилитрон		
Выпрямительный полупроводниковый диод		
Туннельный диод		
Электровакuumный диод		
Динистор (двухэлектродный тиристор - четырёхслойный проводниковый диод с тремя р-п переходами)		

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атабеков Г.И. Основы теории цепей: учебник /Г.И.Атабеков.- 2-е изд., испр.- СПб.: Лань, 2006.
2. Бессонов Лев Алексеевич Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник /Л.А.Бессонов.- 10-е изд.- М.: Гардарики, 2002.
3. Иванов, И.И. Электротехника: учебник/ И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.С. Радовников: 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2006. – 496 с.
4. Касаткин А.С. Электротехника: Учебник для вузов.- 8-е изд., стер. 2005, -544 с.
5. Мельников А.С. Линейные электрические цепи [Текст]: учебное пособие; ДальГАУ. ИЭАСХ.-Благовещенск: ДальГАУ, 2004
6. Немцов М.В. Электротехника: учеб. пособ. /М.В.Немцов, И.И.Светлакова.- Ростов н/Д.: Феникс, 2004.
7. Электротехника и электроника: учебное пособие для вузов/ В.В. Кононенко, В.И. Мишкович, В.В. Муханов [и др.]; под ред. В.В. Кононенко. – изд. 4-е – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 779 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа №1	
Электроизмерительные приборы	8
Тестовое задание № 1	21
Лабораторная работа № 2	
Исследование линейной электрической цепи постоянного тока с последовательным и смешанным соединением приемников электрической энергии	23
Тестовое задание № 2	30
Лабораторная работа № 3	
Последовательное соединение реальной катушки индуктивности и конденсатора переменной емкости	32
Тестовое задание № 3	41
Лабораторная работа № 4	
Параллельное соединение реальной катушки индуктивности и конденсатора переменной емкости	43
Тестовое задание № 4	51
Лабораторная работа № 5	
Исследование электрического состояния трехфазной цепи с однофазными приемниками, соединенными звездой	53
Тестовое задание № 5	61
Лабораторная работа № 6	
Исследование электрического состояния трехфазной цепи с однофазными приемниками, соединенными треугольником	63
Тестовое задание № 6	70

Лабораторная работа № 7

Исследование силового двухобмоточного однофазного трансформатора
методом холостого хода и короткого замыкания 72

Тестовое задание № 7 84

Лабораторная работа № 8

Исследование асинхронного электродвигателя трехфазного тока с коротко-
замкнутым ротором 86

Тестовое задание № 8 96

Лабораторная работа № 9

Исследование генератора постоянного тока смешанного
возбуждения 98

Тестовое задание № 9 108

Лабораторная работа №10

Исследование вольтамперных характеристик нелинейных
элементов 110

Тестовое задание № 10 118

Лабораторная работа №11

Исследование последовательного, параллельного и смешанного соедине-
ния полупроводниковых диодов 120

Таблица ответов на тестовые задания 125

Приложения 126

Список рекомендуемой литературы 133

Содержание 134