

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Майкопский государственный технологический университет»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Учебно-методическое пособие для студентов очной и заочной формы
обучения по направлению подготовки бакалавров 21.03.01

Нефтегазовое дело

Майкоп – 2019

УДК 621.3(07)

ББК 31.2

Э 45

СОСТАВИТЕЛЬ: Старков Н.Н., кандидат технических наук, доцент

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по направлению подготовки бакалавров 21.03.01 Нефтегазовое дело

Оглавление

РАЗДЕЛ 1. ПОСТОЯННЫЙ ТОК	4
1.1. ПРОСТЕЙШАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА	4
1.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ПРОСТЕЙШЕЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	8
1.3. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ.....	10
1.4. РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	17
2. ПРОСТЕЙШИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	21
2.1. АКТИВНАЯ, РЕАКТИВНАЯ И ПОЛНАЯ МОЩНОСТИ.....	29
РАЗДЕЛ 3. ТРЕХФАЗНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.....	30
3.1. ЭЛЕМЕНТЫ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ	30
3.2. СОЕДИНЕНИЕ ФАЗ ЗВЕЗДОЙ.....	32
3.3. СОЕДИНЕНИЕ ФАЗ ТРЕУГОЛЬНИКОМ.....	35
3.4. МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ ИЗМЕРЕНИЕ	37
РАЗДЕЛ 4. ТРАНСФОРМАТОРЫ	41
4.1. НАЗНАЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ	41
4.2. УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА	42
4.3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	43
4.4. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД ТРАНСФОРМАТОРОВ.....	44
4.5. РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА.....	44
4.6. РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.....	45
4.7. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ.....	46
4.8. ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА И РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	47
РАЗДЕЛ 5. АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ	50
5.1. ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОТКОЗАМКНУТОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	50
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ.....	64

РАЗДЕЛ 1. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Электротехника как наука теоретическая и прикладная вначале развивалась на основе постоянного тока, поскольку первыми источниками электрического тока были гальванические элементы. В этот период (1800 — 1850 гг.) были открыты основные закономерности электрических явлений: законы электрической цепи (Г. Ом и Г. Кирхгоф), тепловое действие электрического тока и его практическое использование (Э. Ленц, Д. Джоуль, 15. И. Петров), законы электромагнитной индукции и электромагнитных сил (М. Фарадей, Д. Максвелл, Э. Ленц, Л. Ампер, Б. С Якоби и др.), электрохимическое действие тока и т.д.

В дальнейшем по мере развития электроэнергетических установок и роста их мощности все больше выявлялся основной недостаток системы постоянного тока — трудность экономичной передачи электрической энергии на значительные расстояния. Возможность передачи электрической энергии на дальние расстояния, большая простота машин и другие преимущества обеспечили системе переменного тока широкое развитие. Однако и теперь, когда переменный ток занимает центральное место в электроэнергетике, многие потребители электрической энергии нуждаются в постоянном токе, который является для них либо единственным приемлемым по технологическим условиям родом тока (электрохимия), либо родом тока, обеспечивающим ряд технико-экономических преимуществ (электротранспорт, некоторые промышленные электродвигатели). Источниками питания для большинства современных установок постоянного тока являются различные преобразователи переменного тока в постоянный (электромашинные, = электронно-ионные, полупроводниковые) и в меньшей мере аккумуляторы, генераторы постоянного тока и термоэлектрические батареи.

В электрических цепях как постоянного, так и переменного тока при любых возможных режимах одновременно происходит непрерывный процесс получения электрической энергии и преобразование ее в другие виды энергии.

1.1 ПРОСТЕЙШАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основные понятия.

Электрические цепи в общем случае представляют собой сочетание следующих элементов:

- 1) источников электрической энергии — генераторов;
- 2) электроприемников, преобразующих электрическую энергию в другие виды энергии;
- 3) устройств, связывающих источники электрической энергии с электроприемниками.

Простейшая электрическая цепь постоянного тока, представлена на рис. 1.1, состоит из электрического генератора G , электрической нагрузки (электроприемника) H и двухпроводной линии L соединяющей источник G с нагрузкой H .

Линия L и присоединенная в ее конце нагрузка $Я$ образуют вместе внешнюю цепь генератора.

Под действием электродвижущей силы (э.д.с.) E генератора в замкнутой цепи возникает и поддерживается направленное движение электрических зарядов — электрический ток I .

Величина тока I , протекающего по проводнику, определяется количеством электрических зарядов, проходящих через поперечное сечение проводника в единицу времени (1 сек). Если режим электрической цепи таков, что величина тока во времени не меняется, то

$$I = \frac{q}{t}$$

где q — количество электричества, прошедшего за t сек

Единицей измерения электрического тока является *ампер*:

$$1 \text{ ампер} = 1 \frac{\text{кулон}}{\text{секунда}} \left(1 \text{ А} = \frac{1 \text{ к}}{1 \text{ сек}} \right)$$

Когда величина тока непостоянна и меняется во времени, зависимость (1,1) выражается в дифференциальной форме:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

В металлических проводниках электрический ток представляет собой движение отрицательных зарядов (электронов). В других случаях (например, в электролитах) электрический ток осуществляется движением как положительных, так и отрицательных зарядов в противоположных направлениях. Движение положительных зарядов в одном направлении равноценно перемещению отрицательных зарядов в противоположном направлении. Для определенности условились за направление тока в проводниках считать направление движения положительных зарядов.

Действием электродвижущей силы генератора обеспечивается определенная разность потенциалов на его зажимах. Зажим с более высоким потенциалом называется положительным и обозначается знаком «плюс». Зажим с более низким потенциалом называется отрицательным и обозначается знаком «минус». Направление электрического тока внутри источника совпадает с направлением э.д.с, т.е. от зажима (—) к зажиму (+).

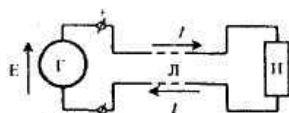


Рис. 1.1 Простейшая цепь постоянного тока

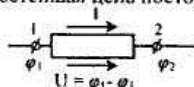


Рис. 1.2. Участок цепи, не содержащий э.д.с.

Во внешней цепи ток направлен от зажима (+) к зажиму (—), т.е. от точки с более высоким потенциалом к точке с более низким потенциалом.

Прохождение электрического тока в цепи связано с затратой энергии. Эта энергия доставляется в цепь генератором и преобразуется здесь в тепло или в иные виды энергии (механическая работа, химическая энергия и др.).

Элемент цепи, в котором происходит необратимый процесс преобразования электрической энергии в тепловую, называется электрическим сопротивлением и на схемах обозначается в виде прямоугольника с двумя зажимами (рис. 1.2).

Рассмотрим участок электрической цепи, не содержащий э.д.с. Прохождение электрического тока на рассматриваемом участке обусловлено наличием разности потенциалов ($\phi_1 - \phi_2$) на его концах, или напряжением U на этом участке. Направление напряжения принимается от точки 1 с более высоким потенциалом к точке 2, где потенциал ниже, т.е. оно совпадает с направлением тока на рассматриваемом участке цепи.

Закон Ома. Основные электроэнергетические соотношения для участка цепи устанавливаются законами Ома и Джоуля—Ленца.

Согласно закону Ома, ток I на участке цепи пропорционален напряжению U на этом участке:

$$I = Ug \quad (1.2)$$

Коэффициент пропорциональности g называется электрической проводимостью участка. Величина, обратная электрической проводимости.

$$r = \frac{1}{g}$$

количественно определяет значение сопротивления участка цепи. Сопротивление измеряется в Омах, а проводимость — в сименсах (сим, или 1/Ом).

Закон Ома для участка цепи часто выражают в следующем виде:

$$I = \frac{U}{r} \quad (1.2 \text{ а})$$

В замкнутой электрической цепи (рис. 1.3) каждый элемент (генератор, провода линии, электроприемник) обладает определенным электрическим сопротивлением.

Через все последовательно соединенные элементы цепи протекает один и тот же ток I . Величина этого тока прямо пропорциональна э.д.с. генератора E и обратно пропорциональна общему сопротивлению всей цепи:

$$I = \frac{E}{r_g + r_l + r_n} = \frac{E}{r_g + r_{\text{общ}}} \quad (1.3)$$

где r_g — сопротивление генератора;

r_l — сопротивление проводов линии;

r_n — сопротивление нагрузки (электроприемника);

$r_{внеш}=r_{л}+r_{н}$ — общее сопротивление внешней цепи.

Электродвижущая сила E , так же как и напряжение U , измеряется в вольтах (В).

Формула (1.3) представляет собой закон Ома для замкнутой электрической цепи.

Напряжения на зажимах генератора и нагрузки

Выражение (1.3) можно привести к следующему виду:

$$E = Ir_2 + Ir_A + Ir_n = Ir_2 + Ir_{внеш} \quad (1.3a)$$

Часть э.д.с, которая затрачивается на преодоление внутреннего сопротивления генератора, называется падением (потерей) напряжения в генераторе:

$$\Delta U_2 = Ir_2$$

Остальная часть э.д.с. затрачивается на преодоление сопротивления внешней цепи, присоединенной к зажимам генератора, и называется напряжением на зажимах генератора:

$$U = E - Ir_2 = E - \Delta U_2 \quad (1.4)$$

При уменьшении внешнего сопротивления $r_{внеш}$ ток I в цепи увеличивается, а напряжение на зажимах генератора U_2 уменьшается.

Зависимость $U_2(I)$ называется внешней характеристикой генератора (рис. 1.4).

Внутреннее сопротивление большинства источников, используемых в энергетических установках, как правило, во много раз меньше сопротивления внешней цепи. Чем больше мощность генератора, тем меньше при прочих равных условиях его внутреннее сопротивление.

Если $r_г \ll r_{внеш}$, то допустимо пренебречь потерей напряжения в источнике и принять $U_2 = E$.

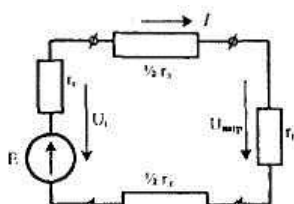


Рис. 1.3. Не разветвленная цепь постоянного тока

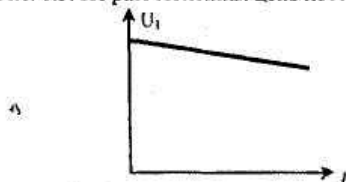


Рис. 1.4. Внешняя характеристика генератора

В том случае, когда генератор соединен с нагрузкой линией передачи (рис. 1.3), при прохождении нагрузочного тока по линии в ней теряется часть напряжения $\Delta U_{\text{л}} = I r_{\text{л}}$. В связи с этим напряжение

$U_{\text{нагр}}$ на зажимах нагрузки меньше, чем напряжение генератора $U_{\text{г}}$ на величину ΔU :

$$U_{\text{нагр}} = U - \Delta U_{\text{л}} = E - (r_{\text{г}} + r_{\text{л}})I$$

Линии передачи, как правило, выполняются медными, алюминиевыми и реже стальными проводами.

Сопротивление металлического проводника зависит от его длины l , площади поперечного сечения s и электропроводящих свойств металла, из которого выполнен проводник:

$$r = \rho \frac{l}{s} \quad (1.5)$$

где l — длина проводника, м;

s — площадь поперечного сечения проводника, мм²,

ρ — удельное сопротивление проводника, Ом*мм²/м,

Величина, обратная удельному сопротивлению,

$$\gamma = \frac{1}{\rho};$$

называется удельной проводимостью, выражается в м/(Ом*мм²)

Сопротивление металлического проводника зависит от температуры: с повышением температуры сопротивление r увеличивается. Зависимость электрического сопротивления от температуры выражается формулой

$$r_{\theta_2} = r_{\theta_1} [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)], \quad (1.6)$$

1.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ПРОСТЕЙШЕЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Преобразование электрической энергии в тепловую. Электрическая мощность. При прохождении электрического I по участку цепи с сопротивлением r происходит преобразование электрической энергии в тепловую.

Количество электрической энергии W , преобразуемой в тепловую энергию за время t , определяется по закону Джоуля — Ленца:

$$W = I^2 r t \quad (1.7)$$

Мощность P представляет собой количество энергии, преобразуемой в единицу времени:

$$P = \frac{W}{t} = I^2 r \quad (1.7a)$$

или

$$P = \frac{U^2}{r} \quad (1.76)$$

Заменяв в выражении (1.7a) произведение $I r$ напряжением U , получим формулу для мощности P , характеризующей интенсивность процесса преобразования электрической энергии в тепло или другие виды энергии:

$$P = UI \quad (1.8)$$

Основными единицами измерений являются: для мощности — ватт (*вт*), а для электрической энергии—ватт-секунда (*вт-сек*) или джоуль (*дж*). На практике чаще применяют укрупненные единицы измерения:

1 киловатт (*кВт*) = 1000 *Вт*,

1 киловатт-час (*кВт ч*) = 3,6*10⁶.Ватт-сек *Дж*).

Рассмотрим баланс мощностей в простейшей цепи (см. рис. 1.3). Для этого умножим все члены уравнения (1.3 а) на I .

$$EI = I^2 r_1 + I^2 r_2 + I^2 r_n \quad (1.9)$$

Произведение EI представляет собой полную электрическую мощность $P_э$, развиваемую источником. Часть этой мощности $\Delta P_2 = I^2 r$ теряется в самом источнике в виде тепла. Разность $P_э - \Delta P_2$ представляет собой мощность, отдаваемую источником во внешнюю цепь. В проводах линии также теряется в виде тепла часть мощности $\Delta P_л = I^2 r_л$. Остальная мощность $P_{нагр} = I^2 r_n = U_{нагр} * I$ потребляется нагрузкой. Баланс мощностей рассмотренной цепи можно наглядно иллюстрировать энергетической диаграммой (рис. 1.5).

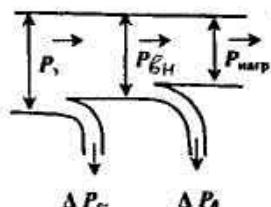


Рис. 1.5. Энергетическая диаграмма простейшей цепи постоянного тока

Потери мощности в источниках питания современных электроэнергетических установок относительно невелики. Мощные электрические генераторы имеют высокий к.п.д., достигающий значения 0,95 и выше.

При передаче потребителям одной и той же мощности $P_{нагр} = U_{нагр} I$ ток, протекающий по линии, будет тем меньше, чем выше напряжение установки. Потеря мощности в линии, как известно, пропорциональна квадрату тока. В связи с этим повышение напряжения, например в 10 раз, приводит к снижению потери мощности в линии передачи в 100 раз, и следовательно, к повышению ее экономичности. Этим объясняется использование все более высоких напряжений в электроэнергетических установках.

1.3. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ

Соединение источников и потребителей электроэнергии.

В рассмотренной ранее простейшей электрической цепи (см. рис. 1.3) генератор, электроприемник и связывающие их провода, по которым электрическая энергия передается от генератора к приемнику, соединены между собой последовательно. Этот способ соединения применяется для того, чтобы связать в общую электрическую систему разнохарактерные с энергетической точки зрения элементы цепи генераторы, электроприемники и линии передачи электрической энергии. Однородные в энергетическом отношении элементы системы, например, генераторы или электроприемники, как правило, соединяются между собой параллельно. При таком способе соединения достигается относительная независимость в управлении и работе отдельных источников и потребителей электроэнергии. Между тем при последовательном соединении практически невозможно включать и отключать отдельно каждый генератор или электроприемник, а также устанавливать для любого из них требуемый режим, работы. Кроме того, при последовательном соединении приемников, например, электрических ламп, перегорание одной из них влечет за собой погасание всех остальных.

Совместная параллельная работа генераторов на общую электрическую нагрузку имеет значительные преимущества в сравнении с раздельной работой каждого генератора на свою нагрузку. Во-первых, повышается надежность питания потребителей,

так как в случае аварийного отключения одного из генераторов оставшиеся в работе генераторы могут обеспечить бесперебойное электроснабжение наиболее ответственных нагрузок. Во-вторых, при параллельной работе можно в случае снижения нагрузки (например, в ночное время или в выходные дни) отключать часть генераторов, что повышает экономичность эксплуатации энергетических установок.

В тех случаях, когда один источник (например, электрохимический аккумулятор с э.д.с. $E = 1,25—2,4\text{ В}$) не обеспечивает требуемого напряжения (110 или 220 В), приходится применять последовательное соединение однотипных источников.

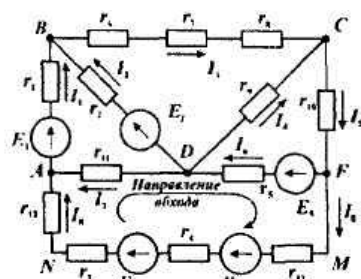


Рис. 1.6 Схема сложной цепи постоянного тока

Последовательное включение однотипных приемников (например, электрических ламп) применяется в исключительных случаях, когда напряжение источника значительно превышает номинальное напряжение отдельных электроприемников.

Законы Кирхгофа. При анализе и расчете электрических цепей, образуемых путем последовательного и параллельного соединения источников и потребителей электроэнергии, составляют электрическую схему, на которой показывают, как осуществляются эти соединения (рис 1.6).

Несколько последовательно соединенных элементов, по которым проходит один и тот же ток, образуют ветвь. В частном случае в ветви может быть лишь один элемент. Некоторые ветви (например, AB , $ANMF$) содержат как сопротивления r , так и э.д.с. E . Другие ветви (например, AD , DC , BC) имеют только сопротивления r .

Место соединения трех или более ветвей называют узловой точкой, или узлом. Так, например, в узловой точке A сходятся три ветви: AB , AD и $ANMF$.

Ряд ветвей, образующих замкнутую электрическую цепь, называют к о н т у р о м (например, $ABDA$, $ADFMNA$).

К узловым точкам схемы применим первый закон Кирхгофа, а к контурам — второй закон Кирхгофа.

Согласно первому закону Кирхгофа, сумма токов, притекающих к любой точке разветвления (узловой точке), равна сумме токов, уходящих от нее. Если токи, притекающие к точке разветвления, считать положительными, а уходящие от нее, — отрицательными, то первый закон Кирхгофа можно сформулировать так: *алгебраическая сумма токов в узловой точке равна нулю*:

$$\Sigma I = 0 \quad (1.10)$$

В качестве примера напомним уравнение первого закона Кирхгофа для узловой точки A электрической схемы, представленной на рис. 1.6:

$$\begin{aligned} I_7 + I_8 &= I_1 \\ I_7 + I_8 - I_1 &= 0 \end{aligned}$$

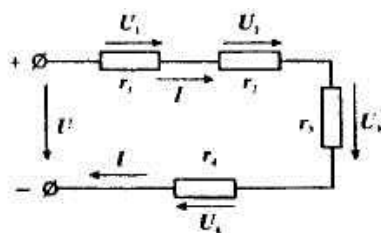


Рис. 1.7 Цепь с последовательным соединением сопротивлений

Согласно второму закону Кирхгофа, во всяком замкнутом контуре алгебраическая сумма э.д.с. равна алгебраической сумме падений напряжения на всех сопротивлениях, входящих в этот контур:

$$\sum E = \sum Ir \quad (1.11)$$

При обходе замкнутого контура по часовой стрелке (или против часовой стрелки) э.д.с. и токи, направления которых совпадают с принятым направлением обхода, следует считать положительными, а э.д.с. и токи, направленные встречно, — отрицательными.

Для примера рассмотрим замкнутый контур $ADFMNA$ (рис. 1.6). При указанных на рисунке направлениях токов и э.д.с. и принятом обходе этого контура по часовой стрелке уравнение второго закона Кирхгофа принимает следующий вид:

$$-E_5 + E_4 + E_3 = -I_7 r_{11} - I_6 r_5 + I_8 (r_{13} + r_4 + r_3 + r_{12})$$

В некоторых расчетах оказывается более удобным пользоваться уравнением второго закона Кирхгофа, записанным как

$$\sum E = \sum U + \sum Ir \quad (1.12)$$

Здесь часть слагаемых Ir , относящаяся к определенным участкам контура, заменена напряжениями U на этих участках.

Цепи с последовательным соединением. Если электрическая цепь состоит из нескольких последовательно соединенных участков с сопротивлениями r_1, r_2, r_3, r_4 (рис. 1.7), то через все участки протекает один и тот же ток I .

При отсутствии на участках цепи собственных э.д.с. общее напряжение U , приложенное к зажимам всей цепи, равно сумме падений напряжения на отдельных элементах цепи (второй закон Кирхгофа):

$$U \pm U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \quad (1.13)$$

или

$$U = Ir_1 + Ir_2 + Ir_3 + Ir_4 = I(r_1 + r_2 + r_3 + r_4) \quad (1.14)$$

Из этого выражения следует, что общее сопротивление r равно сумме сопротивлений всех последовательно соединенных элементов цепи, а напряжения между элементами распределяются прямо пропорционально их сопротивлениям.

Если уравнение (1.14) умножить на I , то получим

$$\Rightarrow U = I^2 r_1 + I^2 r_2 + I^2 r_3 + I^2 r_4 \quad (1.15)$$

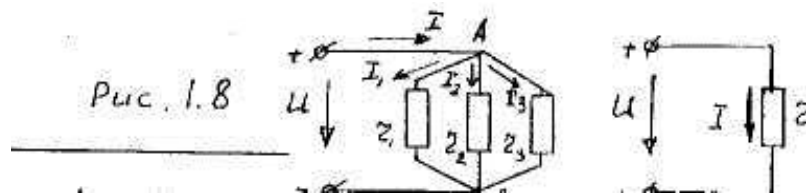
или

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (1.16)$$

т. е. общая мощность P , потребляемая цепью, равна сумме мощностей, потребляемых отдельными ее элементами.

Цепи с параллельным соединением.

При параллельном соединении электроприемников (рис. 1.8) все они находятся под одинаковым напряжением U .



Обозначим сопротивления отдельных электроприемников через r_1 , r_2 , r_3 , их проводимости - соответственно через g_1 , g_2 , g_3 , а токи — через I_1 , I_2 , I_3 .

Общий ток I в неразветвленной части цепи равен сумме токов, потребляемых отдельными электроприемниками:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2} + \frac{U}{r_3} U \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right) = U \frac{1}{r_3} \quad (1.17)$$

или

$$I = U g_1 + U g_2 + U g_3 = U (g_1 + g_2 + g_3) = U g_3 \quad (1.18)$$

Эквивалентная проводимость разветвленной цепи равна сумме проводимостей отдельных ее ветвей:

$$\frac{1}{r_3} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \quad (1.19)$$

или

$$g = g_1 + g_2 + g_3 \quad (1.9a)$$

В частном случае, когда цепь содержит два параллельно включенных сопротивления r_1 и r_2 , эквивалентное сопротивление r_3 , удобно определять по формуле, вытекающей из выражения (1.19):

$$r_3 = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (1.20)$$

Умножив уравнения (1.17) на U , получим

$$\frac{U^2}{r_3} = \frac{U^2}{r_1} + \frac{U^2}{r_2} + \frac{U^2}{r_3} \quad (1.21)$$

или

$$P_1 = P_1 + P_2 + P_3 \quad (1.22)$$

Из изложенного следует что мощность, расходуемая в разветвленной цепи, равна сумме мощностей, потребляемых отдельными приемниками или одним эквивалентным приемником. Проводимость эквивалентного приемника равна сумме проводимостей всех параллельно включенных электроприемников. Токи в этих приемниках так же, как и мощности, распределяются всегда пропорционально проводимостям.

При включении нескольких генераторов для совместной параллельной работы (рис. 1.9) они соединяются между собой одноименными зажимами, а к общим узловым точкам присоединяется внешняя цепь (нагрузка).

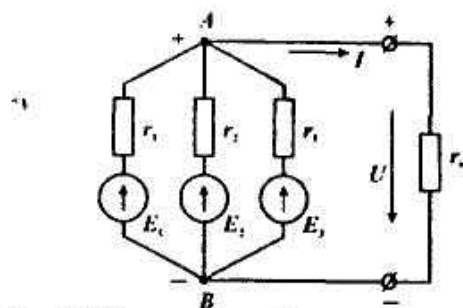


Рис. 1.9 Параллельная работа источника питания

При этом э.д.с. всех генераторов будут иметь одинаковое направление относительно их общей нагрузки.

Расчет смешанной цепи с одной э.д.с. Основная задача расчета электрических цепей — определить токи и мощности в различных элементах цепи (генераторах, электроприемниках и линиях, соединяющих источники энергии с потребителями), а также напряжения на отдельных элементах исследуемой цепи.

Исходными данными для расчета обычно являются заданные Э.Д.С., действующие в этой цепи, и характеристики (параметры) различных элементов цепи, т. е. либо их сопротивления, либо номинальные напряжения и мощности. При условии постоянства (по величине и направлению) действующих в цепи э.д.с. и неизменности сопротивлений, образующих эту цепь, картина распределения напряжений, токов и мощностей в данной схеме может быть только одна, т. е. задача имеет однозначное решение.

Если электрическая цепь представляет собой сочетание последовательно и параллельно включенных сопротивлений (смешанная схема соединений) и при этом имеет один источник питания (одну э.д.с), то она рассчитывается в следующем порядке: 1) путем последовательного упрощения схемы находят общее сопротивление цепи; 2) по закону Ома определяют общий ток; 3) находят распределение токов и напряжений в схеме. Методику расчета подобных цепей поясним на числовом примере.

Пример 1.1. Рассмотрим цепь, изображенную на рис 1.10. Исходные данные:

$U = 240 \text{ В}$, $r_1 = 10 \text{ Ом}$, $r_2 = 20 \text{ Ом}$, $r_3 = 60 \text{ Ом}$, $r_4 = 9 \text{ Ом}$, $r_5 = 30 \text{ Ом}$, $r_6 = 4 \text{ Ом}$, $r_7 = 2 \text{ Ом}$.

Найти распределение токов в схеме.

Решение. Определяем эквивалентное сопротивление между точками А В:

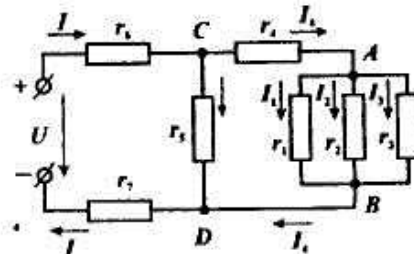


Рис. 1.10. Смешанная цепь постоянного тока

Складывая последовательно соединенные сопротивления r_{AB} и r_4 , получаем сопротивление

$$r' = r_{AB} + r_4 = 6 + 9 = 15 \text{ Ом}$$

Сопротивление r' в свою очередь оказывается соединенным параллельно сопротивлением r_5 :

$$\frac{1}{r_{CD}} = \frac{1}{r'} + \frac{1}{r_5} = \frac{1}{15} + \frac{1}{30} = \frac{1}{10}; r_{CD} = 10 \text{ Ом}$$

Общее сопротивление цепи

$$R = r_6 + r_{CD} + r_7 = 4 + 10 + 2 = 16 \text{ Ом}$$

Общий ток

$$I = \frac{U}{R} = \frac{240}{16} = 15 \text{ А}$$

Напряжение между точками С и D

$$U_{CD} = I r_{CD} = 15 \cdot 10 = 150 \text{ В}$$

Токи в сопротивлениях r' и r_5 :

$$I = \frac{U_{CD}}{r'} = \frac{150}{15} = 10 \text{ А}, I = \frac{U_{CD}}{r_5} = \frac{150}{30} = 5 \text{ А}$$

Напряжение между точками А и В

$$U_{AB} = I_4 r_{AB} = 10 \cdot 6 = 60 \text{ В}.$$

Токи в сопротивлениях r_1 , r_2 и r_3 .

$$I_1 = \frac{U_{AB}}{r_1} = \frac{60}{10} = 6a, I_2 = \frac{U_{AB}}{r_2} = \frac{60}{20} = 3a, I_3 = \frac{U_{AB}}{r_3} = \frac{60}{60} = 1a$$

Во избежание встречающихся ошибочных представлений необходимо обратить внимание на следующее. В электрической цепи всегда устанавливается ток I такой величины, при которой приложенное к этой цепи напряжение U полностью уравнивает (компенсирует) потери напряжения во всех последовательно включенных элементах цепи. Изменение величины сопротивления любого участка электрической схемы неизбежно влечет за собой изменение как общего тока, так и токов, протекающих в отдельных элементах этой схемы. Так, например, изменение величины или отключение сопротивления r_3 в схеме рис. 1.10 вызывает изменение величин всех токов.

Метод контурных токов.

При расчете сложных цепей с большим числом узловых точек предпочтителен метод контурных токов, который позволяет освободиться от составления уравнений по первому закону Кирхгофа и тем самым значительно сократить общее число совместно решаемых уравнений.

Сущность этого метода поясним на рис. 1.13, на котором представлена сложная цепь с узловыми точками A, B, C, D . Заданную схему разбиваем на три смежных контура I, II, III с произвольно выбранными направлениями токов. Если считать, что в каждом из этих контуров протекает свой контурный ток (I_I, I_{II}, I_{III}), то в ветвях, являющихся общими для двух смежных контуров, протекающие токи равны алгебраической сумме двух контурных токов (в ветви AB протечет ток $I_2 = I_{II} - I_I$, в ветви BC - ток $I_5 = I_I - I_{III}$ и в ветви DB - ток $I_4 = I_{II} - I_{III}$).

Применяя к отдельным контурам второй закон Кирхгофа, получим систему с числом уравнений, равным числу контурных токов :

$$\begin{aligned} E_1 + E_2 &= I_I (r_1 + r_2) + (I_I - I_{II}) r_3 + (I_I - I_{III}) r_4 \\ E_3 - E_2 &= I_{II} (r_5 + r_6) + (I_{II} - I_{III}) r_7 + (I_{II} - I_I) r_3 \\ E_4 - E_1 - E_3 &= I_{III} r_3 + (I_{III} - I_I) r_4 + (I_{III} - I_{II}) r_7 \end{aligned}$$

Эти уравнения можно представить в виде, более удобном для их совместного решения:

$$\left. \begin{aligned} E_1 + E_2 &= I_I (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) - I_{II} r_3 - I_{III} r_4 \\ E_3 - E_2 &= I_{II} (r_5 + r_6 + r_7 + r_3) - I_I r_3 - I_{III} r_7 \\ E_4 - E_1 - E_3 &= I_{III} (r_4 + r_7 + r_8) - I_I r_4 - I_{II} r_7 \end{aligned} \right\} (1.23)$$

Определив контурные токи I_I, I_{II}, I_{III} , нетрудно найти токи в смежных ветвях AB, BC и DB .

1.4. РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Сложными называются разветвленные электрические цепи с несколькими источниками питания.

Универсальным методом анализа и расчета сложных цепей является метод непосредственного применения первого и второго законов Кирхгофа соответственно для узловых точек и замкнутых контуров.

Однако при значительном числе ветвей и узловых точек использование этого метода усложняется необходимостью совместного решения большого числа уравнений. В этих и некоторых других случаях может оказаться целесообразным применение иных методов расчета, основанных на тех же законах Кирхгофа. В зависимости от конфигурации расчетной схемы и поставленной задачи следует применять тот метод расчета, который в данном случае является наиболее эффективным.

Непосредственное применение законов Кирхгофа для расчета сложных цепей.

Все э.д.с, токи и сопротивления любой цепи связаны между собой уравнениями, выражающими законы Кирхгофа. Эти уравнения могут быть записаны, если известны не только величины э.д.с. и токов, но и их направления.

Если известными являются величины э.д.с. и их направления, а также величины сопротивлений сложной цепи, то, применяя законы Кирхгофа, можно составить столько независимых уравнений, сколько различных неизвестных токов имеется в этой цепи. Однако для составления этих уравнений необходимо предварительно задаться произвольными направлениями неизвестных токов, которые принято считать положительными.

Если в результате решения составленной системы уравнений найденная величина тока имеет знак «плюс», то это означает, что его направление совпадает с ранее выбранным положительным направлением. В противном случае фактическое направление тока противоположно выбранному положительному направлению.

Для получения требуемого числа независимых уравнений следует применить первый закон Кирхгофа ко всем узловым точкам, кроме одной, т. е. составить $(n-1)$ уравнений, если число узлов равно n . Недостающие уравнения должны быть составлены по второму закону Кирхгофа так, чтобы каждое следующее уравнение не могло быть получено из предыдущих.

Расчет сложной цепи при помощи уравнений Кирхгофа проводят в следующей последовательности:

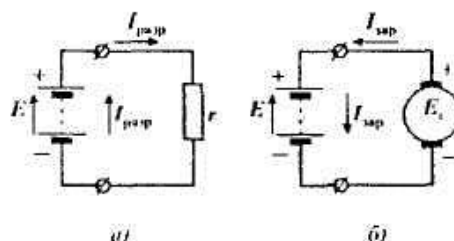


Рис. 1.11. Схема разряда (а) и заряда (б) аккумулятора

1) по возможности упрощают расчетную схему (заменяв, например, несколько параллельно соединенных сопротивлений одним эквивалентным сопротивлением);

2) наносят на схеме известные направления э.д.с;

3) задаются произвольными положительными направлениями токов;

4) составляют уравнения по первому закону Кирхгофа для всех узловых точек схемы, кроме одной;

5) составляют недостающие уравнения по второму закону Кирхгофа, обходя замкнутые контуры по часовой стрелке или против часовой стрелки. При этом э.д.с. и токи, совпадающие с направлением обхода, принимаются положительными, а э.д.с. с. и токи, противоположные (т. е. встречные) этому направлению, — отрицательными;

6) решают составленную систему уравнений и определяют неизвестные токи. Если некоторые значения токов получаются со знаком «минус», то это означает, что они имеют направления, обратные тем, которые были условно приняты для этих токов в начале расчета.

Необходимо отметить следующее: если в результате расчета сложной цепи фактическое направление тока в энергопреобразующем

устройстве (электрической машине или аккумуляторе) совпадает с направлением его э.д.с, то это свидетельствует о том, что рассматриваемое устройство работает в качестве источника электроэнергии, а не электроприемника. Если направление тока обратно направлению э.д.с, то это означает, что устройство является электроприемником. Для пояснения сказанного на рис. 1.11 приведена схема разряда (а) и заряда (б) аккумулятора. В схеме (а) аккумулятор работает как генератор, в схеме (б) он является потребителем электрической энергии.

В отдельных случаях могут быть заданы лишь некоторые значения э.д.с, токов и сопротивлений. Общее число неизвестных величин должно соответствовать возможному числу независимых уравнений, составляемых по законам Кирхгофа для рассматриваемой схемы. В таких случаях приходится в начале расчета задаваться положительными направлениями не только неизвестных токов, но и неизвестных э.д.с. (или напряжений).

Фактические направления этих э.д.с, напряжений и токов находятся в зависимости от полученного знака (+ или —) у каждой из величин, найденных в результате решения составленной системы уравнений.

Пример 1.2. Найти токораспределение в схеме, изображенной на рис. 1.12,а. Исходные данные: $E_1=72$ в, $E_2 = 48$ в, $r_1= 3$ ом, $r_2=4$ ом, $r_3 = 6$ Ом, $r_4= 10$ ом, $r_5= 15$ ом.

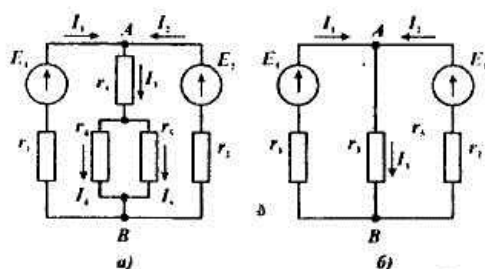


Рис. 1.12. Расчетные схемы к примеру 1.2:
а—исходная; б—упрощенная

Решение. Предварительно упрощаем схему и находим эквивалентное сопротивление, заменяющее сопротивления: r_3, r_4, r_5 :

$$r_2 = r_3 + \frac{r_4 \cdot r_5}{r_4 + r_5} = 6 + \frac{10 \cdot 15}{10 + 15} = 12 \text{ Ом.}$$

На упрощенной схеме (рис. 12. б) наносим заданные положительные направления э.д.с. E_1 и E_2 и произвольно намечаем направления неизвестных токов I_1, I_2 и I_3 . Применяя к этой схеме законы Кирхгофа, составляем три уравнения:

$$\begin{array}{l|l} I_1 + I_2 = I_3 & I_1 + I_2 = I_3 \\ E_1 - E_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2 & 72 - 48 = 3 I_1 - 4 I_2 \\ E_1 = I_1 r_1 + I_3 r_3 & 72 = 3 I_1 + 12 I_3 \end{array}$$

Решая эту систему уравнений, находим:

$$I_1 = 6 \text{ А}; I_2 = -1,5 \text{ А}; I_3 = 4,5 \text{ А}$$

Полученный отрицательный знак у величины тока I_2 означает, что в действительности этот ток направлен в противоположную сторону. Ток I_3 распределяется между параллельными ветвями r_4 и r_5 ; обратно пропорционально этим сопротивлениям.

Пример 1.3. Найти токораспределение в схеме, изображенной на рис. 1.13. Исходные данные: $E_1 = 10 \text{ В}, E_2 = 10 \text{ В}, E_3 = 110 \text{ В}, E_4 = 120 \text{ В}, r_1 = 5 \text{ Ом}, r_2 = 3 \text{ Ом}, r_3 = 8 \text{ Ом}, r_4 = 4 \text{ Ом}, r_5 = 3 \text{ Ом}, r_6 = 4 \text{ Ом}, r_7 = 5 \text{ Ом}, r_8 = 6 \text{ Ом}.$

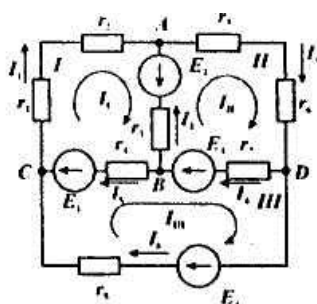


Рис. 1.13. Схема цепи к расчету методом контурных токов

Решение. Подставив в уравнения (1.23) известные значения э.д.с. и сопротивлений цепи и решая совместно эти уравнения, находим

$$I_I = 5 \text{ А}, I_{II} = 8 \text{ А}, I_{III} = 4 \text{ А}$$

Значения действительных токов в рассматриваемой цепи:

$$I_1 = I_I = 5A, \quad I_2 = I_{II} - I_I = 8 - 5 = 3A, \quad I_3 = I_{II} = 8a$$

$$I_4 = I_{II} - I_{III} = 8 - 4 = 4A, \quad I_5 = I_I - I_{III} = 5 - 4 = 1a, \quad I_6 = I_{III} = 4A$$

Метод узлового напряжения. Рассматриваемый метод расчета целесообразно применять к схеме (рис. 1.14), имеющей несколько параллельных ветвей, сходящихся в двух узловых точках, а также к электрическим цепям, которые в результате несложных преобразований могут быть приведены к схеме с двумя узлами.

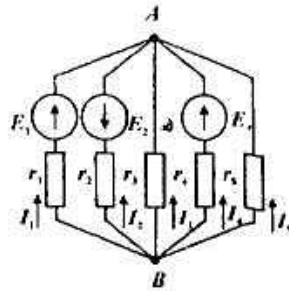


Рис. 1.14 Схема цепи к расчету методом узлового напряжения.

Примем направления токов во всех ветвях одинаковыми — от узла B к узлу A . Напряжение U_{AB} между точками A и B назовем узловым напряжением.

Применим к ветви с э.д.с. E_1 второй закон Кирхгофа:

$$E_1 = U_{AB} + I_1 r_1,$$

откуда

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{AB}}{r_1} = (E_1 - U_{AB})g_1 \quad (a)$$

Аналогичным путем получим:

$$I_2 = \frac{-E_2 - U_{AB}}{r_2} = (-E_2 - U_{AB})g_2 \quad (б)$$

$$I_3 = \frac{0 - U_{AB}}{r_3} = (-U_{AB})g_3 \quad (в)$$

$$I_4 = \frac{E_3 - U_{AB}}{r_4} = (E_3 - U_{AB})g_4 \quad (г)$$

$$I_5 = \frac{0 - U_{AB}}{r_5} = (-U_{AB})g_5 \quad (д)$$

По первому закону Кирхгофа

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = 0$$

или

$$U_{AB} = \frac{E_1 \cdot g_1 - E_2 \cdot g_2 + E_3 g_4}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5} = \frac{\sum_1^n E_k \cdot g_k}{\sum_1^n g_k}. \quad (1.24)$$

Произведение $E_k g_k$ для k -й ветви следует брать со знаком минус, если направление э.д.с. E_k противоположно принятому направлению тока (например, для второй ветви, рис. 1.14).

Определив узловое напряжение U_{AB} по формуле (1.24), нетрудно найти значения токов в отдельных ветвях схемы по формулам (а) -(д).

Пример 1.4. Найти токораспределение в схеме, представленной на рис. 1.14, Исходные данные: $E_1 = 60 \text{ В}$, $E_2 = 50 \text{ В}$, $E_4 = 100 \text{ В}$, $r_1 = 5 \text{ Ом}$, $r_2 = 25 \text{ Ом}$, $r_3 = 50 \text{ Ом}$, $r_4 = 10 \text{ Ом}$, $r_5 = 25 \text{ Ом}$.

Решение. Узловое напряжение

$$U_{AB} = \frac{E_1 g_1 - E_2 g_2 + E_3 g_4}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5} = \frac{60 \cdot 0,2 - 50 \cdot 0,04 + 100 \cdot 0,1}{0,2 + 0,04 + 0,02 + 0,1 + 0,04} = 50 \text{ В}$$

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{AB}}{r_1} = \frac{60 - 50}{5} = 2 \text{ А}, \quad I_2 = \frac{-E_2 - U_{AB}}{r_2} = \frac{-50 - 50}{25} = -4 \text{ А},$$

$$I_3 = \frac{0 - U_{AB}}{r_3} = -\frac{50}{50} = -1 \text{ А}, \quad I_4 = \frac{E_4 - U_{AB}}{r_4} = \frac{100 - 50}{10} = 5 \text{ А},$$

$$I_5 = \frac{0 - U_{AB}}{r_5} = -\frac{50}{25} = -2 \text{ А},$$

Проверка:

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = 2 - 4 - 1 + 5 - 2 = 0$$

2. ПРОСТЕЙШИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Переменными э.д.с., напряжениями и токами называют э.д.с, напряжения и токи, периодически изменяющиеся во времени. Для мгновенного значения периодической величины, например, э.д.с, можно записать:

$$e = f(t + kT)$$

где T - период или время полного цикла изменения э.д.с, k - целое число.

Мгновенные значения электрических величин в цепях переменного тока обозначают строчными буквами.

2. Среди периодических э.д.с. и токов наибольшее распространение получили синусоидальные э.д.с. и токи. Мгновенное значение синусоидальной величины, например, тока, записывается так:

$$i = I_m \sin \omega t$$

где I_m - амплитудное значение тока,

ω - угловая частота,

f - частота изменения тока, связанная с периодом соотношением:

$$\omega = 2 \pi f; f = 1/T$$

3. Синусоидально изменяющаяся величина характеризуется амплитудой, частотой (или периодом) и начальной фазой. Фазой называется аргумент синуса, фаза определяет состояние синусоидально изменяющейся величины в данный момент времени.

Величину аргумента синуса при $t=0$ называют начальной фазой. На графиках начальную фазу отсчитывают от ближайшего к точке с координатой $t = 0$ перехода синусоидальной функции через ось абсцисс от отрицательных значений к положительным. При таком порядке отсчета положительная начальная фаза направлена в положительную сторону оси абсцисс, а отрицательная - в обратную сторону (рис.2.1 б и 2.1 а). Обозначается начальная фаза буквой "кси"

Для синусоидального тока, изображенного на рисунке 2.2 при различных значениях начальной фазы, можно написать следующие выражения мгновенных значений:

для рисунка 2.1а

$$i = I_m \sin \omega t$$

для рисунка 2.1б

$$i = I_m \sin (\omega t + \psi_i),$$

для рисунка 2.1в

$$i = I_m \sin (\omega t - \psi_i),$$

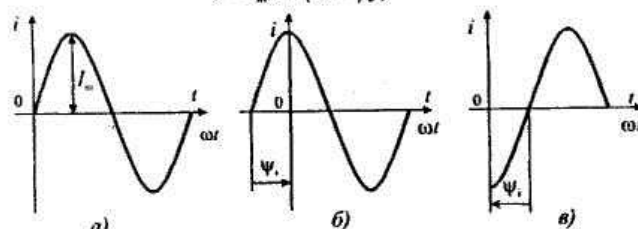


Рис. 2.1. Графики синусоидального тока при различных значениях начальной фазы

4. Если на одном графике изображаются для совместного рассмотрения две синусоидальные функции, то разность их начальных фаз называют углом сдвига фаз или просто сдвигом фаз (φ). При сопоставлении напряжений и токов чаще всего определяют сдвиг фаз, вычитая из начальной фазы напряжения начальную фазу тока:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i$$

Определение сдвига фаз поясняется рисунком 2 .

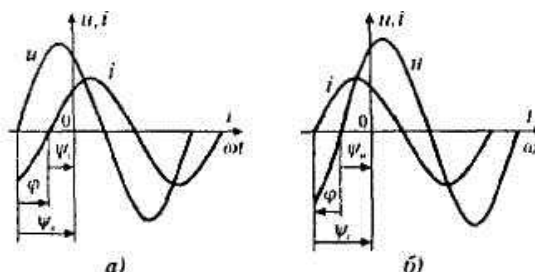


Рис. 2.2. Обозначение сдвига фаз на графиках напряжения и тока

5. Для оценки величин синусоидально изменяющихся токов, э.д.с. и напряжений нельзя применять их средние значения, так как среднее за период значение любой синусоидальной величины равно нулю. В качестве оценки этих величин вводится так называемое действующее значение тока, э.д.с. или напряжения, например,:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

Можно показать, что если переменная величина, в данном случае ток изменяется по синусоидальному закону, то

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}},$$

то есть действующее значение тока равно максимальному, деленному на корень из двух.

Главное преимущество действующего значения синусоидально изменяющейся величины в том, что оно не зависит от времени, следовательно, его удобно изображать на графиках, с его помощью легко проводить всевозможные расчеты. Большинство электроизмерительных приборов сконструировано так, что они фиксируют именно действующие значения синусоидальных токов и напряжений.

6. Синусоидальные токи, э.д.с. и напряжения можно изображать векторами. Это значительно проще, чем изображение с помощью синусоид. Совокупность векторов, изображающих синусоидально изменяющиеся с одинаковой частотой токи, напряжения и э.д.с. и представленных в определенном порядке, называют векторной диаграммой.

Ток и напряжение, представленные на рисунках 2.1, 2.2 в виде синусоид, изображены на рисунке 2.3 с помощью векторов.

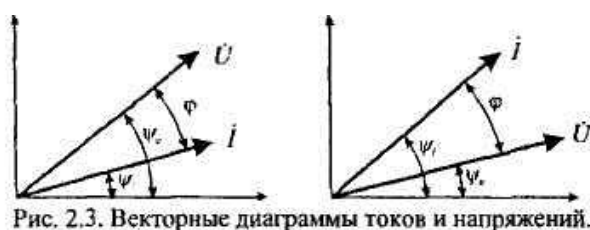


Рис. 2.3. Векторные диаграммы токов и напряжений.

При построении векторных диаграмм положительные углы отсчитываются по направлению против часовой стрелки.

7. Индуктивные катушки и конденсаторы оказывают сопротивление протекающим по ним переменным токам. В этих сопротивлениях не происходит превращения электрической энергии в тепловую. Поэтому в отличие от активных сопротивлений их называют реактивными. Реактивное сопротивление индуктивной катушки называется индуктивным сопротивлением, обозначается X_L и вычисляется по формуле:

$$X_L = \omega L, \text{ Ом}$$

где L - индуктивность катушки, Г(генри).

Реактивное сопротивление конденсатора называется емкостным сопротивлением, обозначается X_C и вычисляется по формуле:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \text{ Ом}$$

где C - емкость конденсатора в фарадах.

8. Известно, что в активном сопротивлении напряжение совпадает с током по фазе. Если ток, текущий по сопротивлению на рисунке 2.4а задан выражением

$$i = I_m \sin \omega t$$

то напряжение на этом сопротивлении изменяется по закону:

$$u = U_m \sin \omega t$$

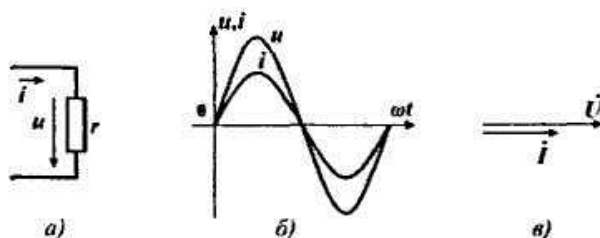


Рис. 2.4 Ток и напряжение в активном сопротивлении.

Синусоиды тока и напряжения, а также их векторная диаграмма представлена на рис.2.4 б, в.

В катушке индуктивности напряжение опережает ток по фазе на угол 90° . Если ток катушки задан выражением:

$$i = I_m \sin \omega t$$

то напряжение на катушке изменяется по закону:

$$u = I_m X_L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Схема цепи, синусоиды тока и напряжения, также их векторная диаграмма приведены на рисунке 2.5.

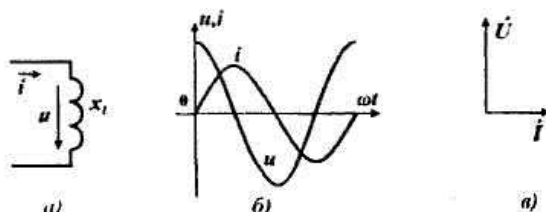


Рис. 2.5 Ток и. напряжение в катушке индуктивности.

В конденсаторе напряжение отстает от тока по фазе на угол 90° Если ток, протекающий через конденсатор, задан выражением:

$$i = I_m \sin \omega t$$

то напряжение на конденсаторе изменяется по закону:

$$u = I_m X_C \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = U_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

Схема цепи, синусоиды тока и напряжения, а также их векторная диаграмма приведены на рисунке 2.6.

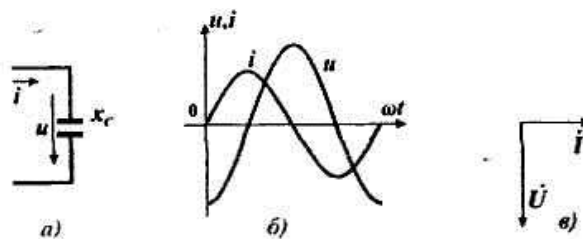


Рис.2.6 Ток и напряжение конденсатора

9. Так как в цепях переменного тока с активными и реактивными элементами токи и напряжения сдвинуты друг относительно друга по фазе, то активные и реактивные сопротивления и проводимости можно складывать только квадратично.

При последовательном соединении элементов (рисунок 2.7а) полное сопротивление цепи определяется по формуле:

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

при параллельном соединении элементов (рисунок 2.7 б) полная проводимость цепи определяется по формуле:

$$y = \sqrt{g^2 + (b_C - b_L)^2},$$

где g, b - соответственно активная и реактивная проводимость цепи.

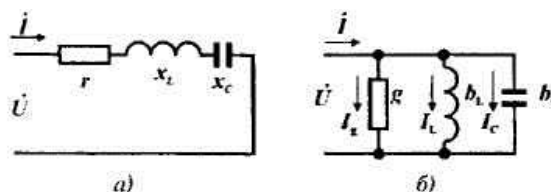


Рис.2.7 Электрическая цепь с последовательным и параллельным соединением элементов.

10. Пусть необходимо построить векторные диаграммы токов и напряжений для схем, представленных на рисунке 2.7.

На схеме рис. 2.7а все сопротивления соединены последовательно, поэтому за основу для построения векторной диаграммы можно принять ток, являющийся общим элементом для сопротивлений. В произвольном направлении в определенном масштабе откладывают вектор тока I (рисунок 2.8а). Известно, что

вектор напряжения на активном сопротивлении совпадает с током по фазе, поэтому откладывают в выбранном масштабе вектор U_r совпадающим по направлению с током.

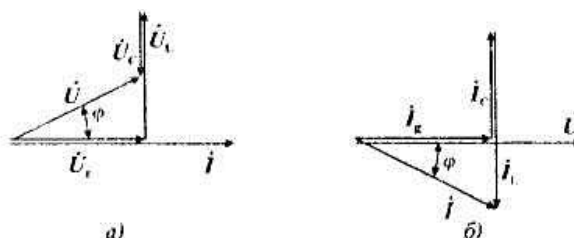


Рис. 2.8 Векторные диаграммы электрических цепей

Так как индуктивное напряжение опережает ток по фазе на угол 90° , то из конца вектора U_r , откладывают вектор U_L в выбранном масштабе и повернутым относительно тока на угол $\pi/2$ против часовой стрелки. Так как емкостное напряжение U_C отстает по фазе от тока на угол 90° , то из конца вектора U_L откладывают вектор U_C . В выбранном масштабе и повернутым относительно тока на угол $\pi/2$ по часовой стрелке.

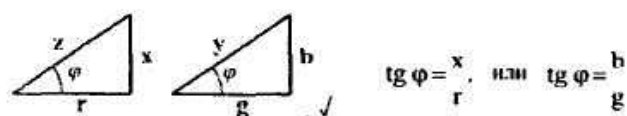
Так как напряжение на входе схемы U согласно второго закона Кирхгофа не может быть ничем иным, как суммой падений напряжений в цепи, то

$$U = U_r + U_L + U_C$$

Поэтому вектор, соединяющий начало U_r и конец, U_C есть вектор сетевого напряжения U .

Векторная диаграмма для цепи по рисунку 2.8 б строится точно так же, но так как все элементы схемы соединены параллельно, то начинают построение с единого для всех сопротивлений элемента - напряжения U .

Угол сдвига по фазе ϕ (фи) между током и напряжением находят из треугольника сопротивлений или треугольника проводимостей.



Например, для схемы на рисунке 2.7 тангенс угла сдвига по фазе между сетевым напряжением и током равен:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{X_L - X_C}{r}$$

11. Пример.

Дана схема, изображенная на рисунке 2.9. Напряжение на зажимах цепи изменяется по закону:

$$U = 10 \sin \omega t$$

Даны параметры: $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 7 \text{ Ом}$, $L = 0,1 \text{ Г}$, $C = 135 \text{ мкФ}$,
 $f = 40 \text{ Гц}$.

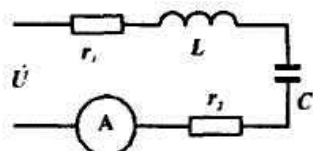


Рис 29 Схема для расчет» цепи

Определить: показание амперметра, закон изменения тока в цепи, построить векторную диаграмму.

11.1. Определяют реактивные сопротивления. Индуктивное сопротивление:

$$X_L = \omega L$$

$$X_L = 2 \pi f L = 2 \pi \cdot 40 \cdot 0,1 = 25,1 \text{ Ом}$$

Емкостное сопротивление:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 40 \cdot 135 \cdot 10^{-6}} = 29,4 \text{ Ом}$$

11.2. Так как все элементы цепи на рисунке 2.9 соединены последовательно, то по ним протекает один и тот же ток. Определяют его по закону Ома как частное от деления напряжения на зажимах цепи на полное сопротивление цепи.

11.2.1. Амперметр показывает действующее значение тока, поэтому необходимо воспользоваться действующим значением приложенного напряжения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7,09 \text{ В}$$

11.2.2. Полное сопротивление цепи определяют исходя из следующих соображений. Напряжения на активных сопротивлениях цепи совпадают по фазе, следовательно, активное напряжение цепи

$$U_r = U_{r1} + U_{r2},$$

откуда, разделив правую и левую части равенства на ток, получают

$$r = r_1 + r_2.$$

Напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе противоположны по фазе, следовательно, реактивное напряжение цепи

$$U_p = U_L - U_C,$$

откуда, разделив правую и левую части равенства на ток, получают

$$X = X_L - X_C = \omega L - 1/\omega C.$$

Известно, что активное и реактивное сопротивление цепи с последовательным соединением параметров складываются квадратично, следовательно, полное сопротивление электрической цепи находят по выражению:

$$Z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{(5 + 7)^2 + (25,1 - 29,4)^2} = 13,69 \text{ Ом}$$

11.2.3. Показание амперметра:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{7,09}{13,69} = 0,517 \text{ А}$$

11.3. Прежде, чем написать закон изменения тока в цепи, можно построить векторную диаграмму, из которой можно определить, опережает или отстает ток по фазе от приложенного напряжения.

На векторной диаграмме должны быть представлены в векторной форме все токи и напряжения, реально существующие в цепи. Из рисунка 2.9 видно, что по всем элементам цепи протекает один и тот же ток. На всех сопротивлениях он вызывает падения напряжений, сумма которых равна сетевому напряжению (согласно второму закону Кирхгофа).

Как правило, векторная диаграмма строится для действующих значений токов и напряжений. Ток рассчитан в п. 11.2.3. Определим величины падений напряжений на сопротивлениях:

$$U_{r1} = I r_1 = 0,58 \cdot 5 = 2,9 \text{ В}$$

Выбирают масштабы для тока и напряжения. Пусть, например, в 1 см. содержится 0,1 А, и в 1 см, - 2 В. Построение векторной диаграммы для цепи с последовательным соединением элементов удобнее начать с вектора тока. От произвольной точки плоскости в произвольном направлении откладывают вектор тока I (рисунок 2.10)

Напряжение на активном сопротивлении r_1 совпадает по фазе с током, поэтому вектор U_{r1} совпадает по направлению с вектором тока I .

Напряжение на катушке U_L , опережает ток по фазе на 90° . Из конца вектора U_{r1} откладывают вектор U_L под углом 90° , причем, угол отсчитывают от вектора тока против часовой стрелки.

Напряжение на конденсаторе отстает от тока по фазе на угол девяносто градусов. Поэтому от конца вектора U_L откладывают вектор U_C под углом 90° по отношению к вектору тока, причем, угол отсчитывается по часовой стрелке.

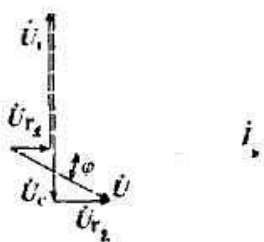


Рис. 2.10. Векторные диаграммы при последовательном и параллельном соединении параметров цепи

Напряжение на сопротивлении r_2 совпадает с током по фазе. Поэтому от конца вектора U_L откладывают вектор U_{r2} , параллельно вектору тока. Направления векторов U_{r2} и I должны совпадать.

Так как по второму закону Кирхгофа можно записать:

$$U = U_{r1} + U_L + U_C + U_{r2}$$

то, соединяя начало вектора U_{r1} с концом вектора U_{r2} , получают вектор сетевого напряжения U . Из рисунка 2.10 видно, что вектор сетевого напряжения отстает по фазе от вектора тока, следовательно, полное сопротивление цепи носит активно-емкостный характер.

11.4. Известно, что в линейных электрических цепях ток изменяется по синусоидальному закону, если по этому же закону изменяется питающее напряжение.

По условию

$$U = U_m \sin \omega t$$

Вектор тока опережает вектор сетевого напряжения на угол φ , следовательно, закон изменения тока в цепи по рисунку 2.10 можно написать так:

$$i = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \phi)$$

Определим численное значение угла ϕ :

$$\phi = \arctg \frac{x}{r} = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r_1 + r_2} = \arctg \frac{25,1 - 29,4}{5 + 7} = -19,7^\circ$$

«Минус» свидетельствует о том, что вектор напряжения является отстающим по фазе. Это равнозначно утверждению: вектор тока является опережающим по фазе. Поэтому в формулу закона изменения тока величина угла войдет со знаком «плюс».

$$i = \frac{10}{13,69} \sin(\omega t + 19,7^\circ) = 0,731 \sin(\omega t + 19,7^\circ)$$

2.1. АКТИВНАЯ, РЕАКТИВНАЯ И ПОЛНАЯ МОЩНОСТИ

При выборе трансформаторов, сечения кабелей, выключающей аппаратуры и т. п. необходимо знать, на какой ток они должны быть рассчитаны. Для этого недостаточно, если известны только напряжение и активная мощность P , следует еще определить $\cos \varphi$ нагрузки. При наличии нескольких приемников энергии с различным $\cos \varphi$ эти расчеты существенно усложняются. Для облегчения подобных расчетов введены две вспомогательные величины: полная $S = UI$ и реактивная $Q = UI \sin \varphi = UI$ мощности.

Соотношения между ними и активной мощностью наглядно показывает треугольник мощностей. Чтобы построить его, можно взять треугольник напряжений и все стороны его умножить на ток I (рис. 2.11). Полученный таким путем треугольник мощностей будет подобен треугольнику напряжений. Его гипотенуза будет изображать полную мощность S , а катеты — активную P и реактивную Q мощности. Соотношения между ними

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; P \cos \varphi; Q = S \sin \varphi; Q = P \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.1)$$

На щитках генераторов и трансформаторов указывается пол мощность. Изоляция генераторов и трансформаторов рассчитывается определенное номинальное напряжение, а сечение проводов обмоток — определенный номинальный ток. Тем самым отдельно ограничивая напряжение и ток, причем эти ограничения не зависят от сдвига фаз ϕ между напряжением и током. Таким образом, произведение действующих значений напряжения и тока определяет полную номинальную мощность S_H генератора, трансформатора и других устройств переменного тока. Как показано выше, активная мощность $P = S_H \cos \varphi$. Следовательно, значение допустимой активной мощности при неизменной полной мощности уменьшается с уменьшением $\cos \varphi$.

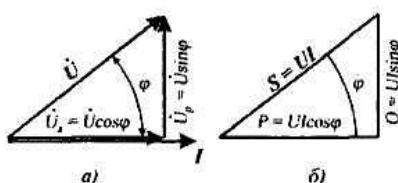


Рис.2.11 Построение треугольника мощностей: а- треугольник напряжений, б - треугольник мощностей

Единицей полной мощности служит вольт-ампер (ВА) и киловольт-ампер (кВА). Это изменение наименования упрощает указания мощности в каталогах, расчетах и т. п.: достаточно написать, например, 500 кВА, чтобы тем самым показать, что рассматривается полная, а не активная мощность.

Понятие реактивной мощности Q используется для расчета полной мощности установки, например, при определении мощности трансформатора, необходимого для промышленного предприятия. Различные приемники электроэнергии потребляют как активную, так и реактивную мощности. Полная мощность, на которую должен быть установлен трансформатор, определяется на основании суммы активных мощностей всех приемников $\sum P$ и суммы их реактивных мощностей $\sum Q$ по формуле:

$$S = \sqrt{(\sum P)^2 + (\sum Q)^2} \quad (2.2)$$

Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (ВАр) и киловольт-амперах реактивных (кВАр).

Условно принято считать реактивную емкостную мощность отрицательной, в соответствии с чем конденсаторы нужно считать генераторами реактивной мощности Q_C , а индуктивные приемники Q_L — ее потребителями. При наличии среди приемников конденсаторов и индуктивных катушек общая полная мощность установки

$$S = \sqrt{(\sum P)^2 + (\sum Q_L - Q_C)^2} \quad (2.3)$$

Посредством емкостной реактивной мощности, компенсирующей индуктивную мощность электродвигателей, повышается $\cos \varphi$ промышленных предприятий.

РАЗДЕЛ 3. ТРЕХФАЗНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

3.1. ЭЛЕМЕНТЫ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ

В настоящее время получение, передача и распределение электроэнергии в большинстве случаев производится посредством трехфазной системы.

Эта система была изобретена и практически разработана во всех основных ее частях выдающимся русским инженером М. О. Доливо-Добровольским.

Как показывает само название, трехфазная система состоит из трех источников электроэнергии и трех цепей, соединенных общими проводами линии передачи.

Источником энергии для всех фаз системы является трехфазный генератор (рис. 3.1). Он отличается от однофазного генератора переменного тока тем, что у него на статоре размещены три изолированные друг от друга одинаковые обмотки. Они расположены так, чтобы индуцируемые в них э.д.с. были сдвинуты по фазе одна относительно другой на 120° .

Если генератор двухполюсный, как на рис. 3.1, то оси катушек обмоток фазы сдвинуты одна по отношению к другой на одну треть окружности статора.

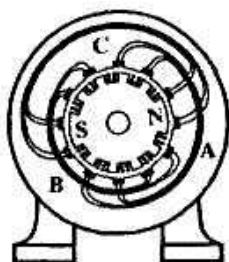


Рис.3.1 Схема устройства трехфазного генератора.

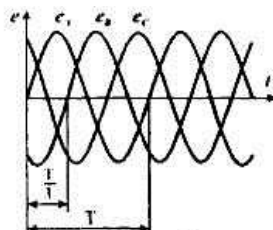


Рис.3.2 Кривые мгновенных значений э.д.с. трехфазной системы.

При вращении ротора его постоянное магнитное поле пересекает проводники обмоток не одновременно. Э.д.с. обмотки А достигает своего максимального значения, когда мимо нее проходит середина полюса ротора. Э.д.с. в следующей обмотке В достигает максимума позже, когда ротор повернется на $1/3$ оборота. В двухполюсном генераторе повороту на $1/3$ оборота соответствует $1/3$ периода индуцируемой э.д.с. Следовательно, э.д.с. в обмотке В отстает по фазе от э.д.с. в обмотке А на $1/3$ периода. В свою очередь, э.д.с. в обмотке С отстает по фазе от э.д.с. обмотки В на $1/3$ периода и от э.д.с. обмотки А на $2/3$ периода. При такой симметрии устройства генератора максимальные значения этих э.д.с. одинаковы. Конструкция генератора должна обеспечивать их синусоидальность.

Уравнения мгновенных значений э.д.с. будут:

$$\begin{aligned} E_A &= E_m \sin \omega t \\ e_B &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) = E_m \sin \left(\omega t - \frac{T}{3} \right) \\ e_C &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2T}{3} \right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Кривые мгновенных значений э.д.с. показаны на рис. 3.2. На рис. 3.3 дана векторная диаграмма для их действующих значений

$$E_{\phi} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

Сумма этих векторов образует замкнутый треугольник: $E_A + E_B + E_C = O$ — это трехфазная симметричная система э.д.с. Алгебраическая сумма мгновенных значений э.д.с. $e_A + e_B + e_C = 0$, что легко проверить, подставив выражения этих значений как синусоидальных функций времени.

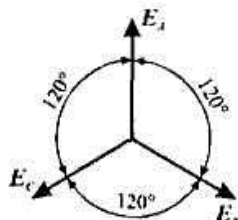


Рис. 3.3 Векторы э.д.с. трехфазной системы.

Изображения э.д.с. трехфазной системы в комплексной форме будут:

$$\begin{aligned} \dot{E}_A &= E_{\phi} \cdot e^{j0} = E_{\phi} \\ \dot{E}_B &= E_{\phi} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} = E_{\phi} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right); \\ \dot{E}_C &= E_{\phi} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}} = E_{\phi} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} = E_{\phi} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right); \end{aligned} \quad (3-2)$$

От последовательности фаз системы зависит направление вращения трехфазных двигателей, поэтому в трехфазных устройствах она проверяется специальными указателями последовательности фаз и обозначается раскраской шин на распределительных устройствах; приняты следующие цвета: фаза *A* — желтый, фаза *B* — зеленый и фаза *C* — красный; незаземленная нейтраль — белый, заземленная нейтраль — черный. Зажимы обмоток генератора различают: начала *L, B, C*, концы *X, Y, Z*.

Два основных способа соединения обмоток генераторов, трансформаторов и приемников в трехфазных цепях: звездой и треугольником.

3.2. СОЕДИНЕНИЕ ФАЗ ЗВЕЗДОЙ

Обмотки фаз генераторов можно было бы соединить с тремя приемниками электроэнергии шестью проводами (рис. 3.4а) и получить таким путем три независимые фазные цепи. Практически подобное соединение применяется лишь в редких случаях, но с помощью такой схемы можно нагляднее представить условия, возникающие при объединении цепей в трехфазную систему. Как и в однофазных цепях переменного тока, стрелки на схеме показывают положительные направления фазных э.д.с. и создаваемых ими токов. Положительные направления определяет разметка зажимов обмоток фаз генератора. Внутри обмоток э.д.с. и токи направлены от «концов» (*X, Y, Z*) к «началам» (*A, B, C*). Во внешней цепи токи направлены от начал обмоток фаз генераторов к приемникам.

Для соединения звездой (условное обозначение Y) зажимы X, Y, Z («концы» обмоток фаз генератора) объединяются в одну общую точку N. Соответственно в точке и объединяются и три конца фазных цепей приемника (рис. 3.4 б) Между нейтральными точками генератора и приемника проложен общий нейтральный провод (или нейтраль) трехфазной системы, образуемый объединением трех обратных проводов.

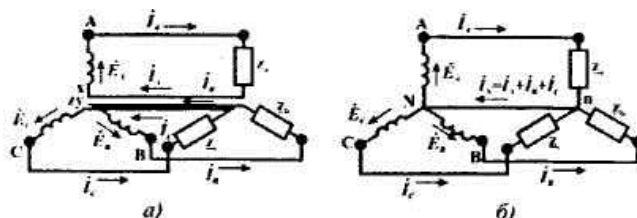


Рис.3.4 Образование соединения фаз звездой:
а — схема не объединенной трехфазной системы.
б — объединенная трехфазная система

Если предположить равными нулю поочередно все фазные эдс, кроме одной (например, проследить в объединенной системе контур тока 1Л при наличии в системе одной э.д.с. E_A) то легко убедиться, что объединение системы не изменит контуры, по которым замыкаются фазные токи. Следовательно, в нейтральном проводе системы ток будет равен векторной сумме фазных токов:

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (3.3)$$

Нагрузка всех трех фаз называется симметричной, если ток во всех фазах одинаков и равны сдвиги фаз между фазными напряжениями и токами, а также полные сопротивления отдельных фаз приемника (т. е. равны комплексные сопротивления фаз приемника).

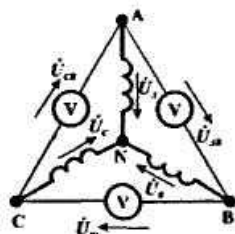


Рис. 3.5. Положительные направления фазных напряжений при соединении фаз звездой.

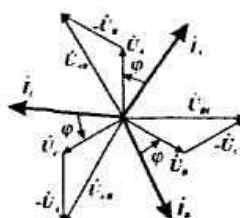


Рис. 3.6. Векторная диаграмма линейных и фазных напряжений для соединения фаз звездой.

При симметричной нагрузке сумма векторов фазных токов образует замкнутый треугольник. Следовательно, в этом случае ток в нейтральном проводе $I_N = 0$. По этой причине для заведомо симметричной трехфазной нагрузки нейтральный провод не нужен. В частности, он не используется для трехфазных двигателей.

При соединении звездой фаз генератора и приемника напряжения на их зажимах называются фазными напряжениями U_ϕ (U_A , U_B , U_C на рис. 3.5). Но в системе имеются также напряжения между линейными проводами, называемые линейными напряжениями $U_\text{л}$ (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}). Положительные направления фазных напряжений противоположны по отношению к приемнику, включенному между линейными проводами (рис. 3.5). Следовательно, каждое из трех линейных напряжений равно векторной разности соответствующих фазных напряжений:

$$\begin{aligned} \vec{U}_{AB} &= \vec{U}_A - \vec{U}_B; \\ \vec{U}_{BC} &= \vec{U}_B - \vec{U}_C; \\ \vec{U}_{CA} &= \vec{U}_C - \vec{U}_A; \end{aligned} \quad (3.4)$$

Численные соотношения между линейными и фазными напряжениями в симметричной системе легко определить на основании векторной диаграммы (рис. 3.6). За основу диаграммы можно взять три вектора фазных напряжений U_A , U_B и U_C . Углы между ними равны 120° . Для построения вектора линейного напряжения U_{AB} следует из U_A вычесть U_B , следовательно, нужно к U_A прибавить $(-U_B)$.

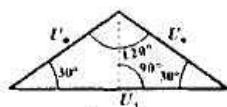


Рис. 3.7. Соотношения между фазными и линейными напряжениями при соединении фаз звездой.

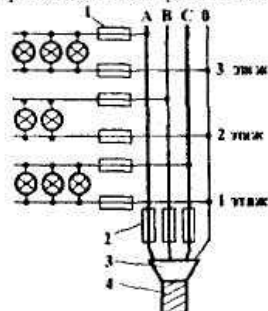


Рис. 3.8. Осветительная нагрузка при соединении приемников звездой с нейтральным проводом (четырёхпроводная система)

1 - квартирные предохранители;
2 - домовые предохранители;
3 - муфта; 4 - кабель.

Последний равен U_B по величине, но противоположен ему по направлению. Так же строятся U_{BC} и U_{CA} . Так как рассматриваемая система напряжений симметрична, то векторы фазных и линейных напряжений образуют три равнобедренных треугольника с острыми углами по 30° и тупым углом 120° . Опустив из вершины тупого угла любого из треугольников перпендикуляр на противоположную сторону (рис. 3.7), можно найти, что

$$U_\phi \cos 30^\circ = U_\text{л} / 2 \quad \text{или} \quad U_\text{л} = \sqrt{3} U_\phi;$$

В трехфазной системе, соединенной звездой, линейные напряжения больше фазных в $\sqrt{3}$ раз. При смешанной осветительной и силовой нагрузке линейное напряжение 380 В подается на зажимы трехфазных двигателей, а фазное $220 \text{ В} = 380 / \sqrt{3}$ — на осветительные приборы.

При соединении звездой токи в проводах линии передачи — линейные токи I_l равны фазным, так как все части фазной цепи и линейные провода соединены последовательно: $I_l = I_\phi$,

При осветительной нагрузке в случае соединения звездой приемники включаются между линейными проводами и нейтральным проводом,

Часто осветительная нагрузка бывает несимметричной, в этом случае необходим нейтральный провод (рис. 3.8). При отсутствии нейтрального провода в зависимости от отношения сопротивлений фаз приемника одно фазное напряжение может быть ниже необходимого, а другое слишком велико. По этой причине в нейтральном проводе магистралей запрещается устанавливать предохранители или выключатели.

3.3. СОЕДИНЕНИЕ ФАЗ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Несколько реже, чем соединение звездой, в трехфазных устройствах применяют соединение треугольником (условное обозначение Δ).

При соединении треугольником (рис. 3.9) обмотки фаз генератора соединяются так, чтобы начало одной обмотки фазы соединялось с концом предыдущей (A с Z; B с X и C с Y). Положительные направления э.д.с. при таком соединении направлены внутри треугольника обмоток фаз одинаково; следовательно, внутри этого треугольника действует алгебраическая сумма мгновенных значений фазных э.д.с. $e_A + e_B + e_C = 0$ и поэтому уравнительного тока в мотках генератора не возникает⁶. Общие точки, созданные объединением двух зажимов обмоток, соединяются с линейными проводами, к которым подключаются фазы приемника. Ток в каждом из линейных проводов системы равен сумме двух токов, положительные направления которых противоположны (см. рис. 3.9). На основании сказанного ясно, что результирующие токи линейных проводов равны векторной разности соответствующих фазных токов:



В этой системе три фазных напряжения будут вместе с тем линейными, поэтому как линейные, так и фазные токи, ими создаваемые, обозначают двумя индексами узлов («начал» обмоток генератора или фаз приемника).

Три линейных напряжения U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} могут быть исходными при построении векторной диаграммы системы (рис. 10а). Углы между ними равны 120° . Векторы фазных токов I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} симметричной нагрузке сдвинуты по отношению создающим их напряжени-

ям на некоторый угол φ значение которого зависит от отношения реактивного и активного сопротивлений приемника.

На основании соотношений (3.5), чтобы построить вектор линейного тока I_L нужно к I_{AB} прибавить ($-I_{CA}$), т. е. вектор, равный по I_{CA} величине, но противоположный ему по направлению. На этом же основании определяются и два остальных линейных тока.

При симметричной нагрузке фазные токи по величине одинаковы: $I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_\phi$ и должны быть равны между собой линейные токи $I_A = I_B = I_C = I_L$.

На диаграмме векторы фазных и линейных токов образуют три равнобедренных треугольника с острыми углами по 30° и тупым углом 120° . В таком треугольнике, опустив из вершины угла перпендикуляр на противолежащую сторону (рис. 3.10 б), найдем, что

$$I_\phi \cos 30^\circ = I_L / 2 \quad \text{или} \quad I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi \quad (3.6)$$

Следовательно, в трехфазной симметричной системе, соединенной треугольником, фазные напряжения являются одновременно линейными: $U_{\phi\Delta} = U_{LD}$, а линейные токи больше фазных в $\sqrt{3}$ раз:

$$I_{\phi\Delta} = \sqrt{3} I_{\phi\Delta}$$

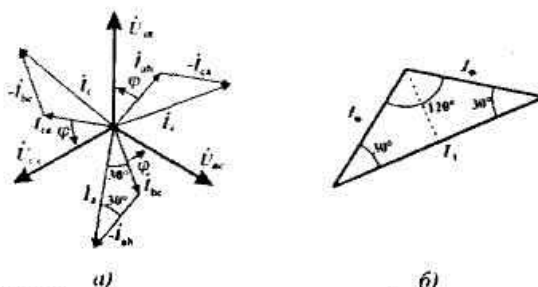


Рис. 3.10 Векторная диаграмма напряжений и токов трехфазной системы, соединенной треугольником (а), и векторные соединения между фазными и линейными токами (б)

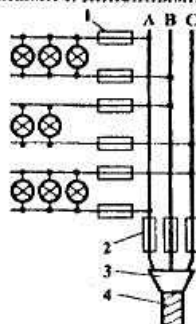


Рис. 3.11 Осветительная сеть, соединенная треугольником:
1 — квартирные предохранители, 2 — ломовые предохранители,
3 — муфт., 4 — кабель.

Некоторым преимуществом соединения фаз треугольником является то, что при несимметричной нагрузке нет необходимости использовать четвертый провод. На рис. 3.11 показана схема осветительной сети жилого дома при соединении фаз приемников треугольником.

Приемники подключаются к трем проводам трехфазной сети, причем они могут быть соединены звездой или треугольником независимо от способа соединения фаз генератора, питающего сеть.

В ряде случаев целесообразно в зависимости от условий работы приемников изменять способ соединения фаз — переключать фазы приемника от звезды на треугольник и обратно. Такое переключение применяется для уменьшения пусковых токов трехфазных электродвигателей, для изменения температуры трехфазных электрических печей, для изменения вторичных напряжений трансформаторов.

При переключении со звезды, на треугольник фаз симметричных приемников, сопротивления которых не зависят от напряжения, линейные токи увеличиваются в три раза:

$$I_{\Delta\Delta} = 3I_{\Delta Y}$$

но фазные токи возрастают в $\sqrt{3}$ раз:

$$I_{\Phi\Delta} = \sqrt{3}I_{\Phi Y}$$

3.4. МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ ИЗМЕРЕНИЕ

Активная мощность трехфазной системы P является суммой фазных активных мощностей, а для каждой из них справедливо основное выражение активной мощности цепей переменного тока. Следовательно, фазная активная мощность $P_{\Phi} = 3U_{\Phi}I_{\Phi}\cos\varphi$ и при симметричной нагрузке активная мощность трехфазного устройства

$$P = 3P_{\Phi} = 3 U_{\Phi}I_{\Phi} \cos \varphi \quad (3.7)$$

Но в трехфазных установках в большинстве случаев приходится выражать активную мощность устройства не через фазные, а через линейные величины. Это легко сделать на основании соотношений фазных и линейных величин, заменив в выражении активной мощности фазные величины линейными. При соединении звездой $U_{\Phi} = U_L / \sqrt{3}$; $I_{\Phi} = I_L$, а при соединении треугольником $U_{\Phi} = U_L$; $I_{\Phi} = I_L / \sqrt{3}$. После подстановки этих выражений в формулу (3.7) получим одно и то же выражение для активной мощности трехфазной симметричной установки:

$$P = 3U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$$

Хотя это выражение относится только к активной мощности симметричной системы, тем не менее им можно руководствоваться в большинстве случаев, так как в промышленных устройствах основная нагрузка редко бывает несимметричной.

Реактивная мощность в симметричной системе, так же как и полная мощность, выражается через линейные величины подобно активной мощности:

$$Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin \varphi$$

и

$$S = 3 U_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}}$$

Простейшие условия измерения активной мощности трехфазной системы имеются в том случае, если фазы приемников соединены звездой с доступной нейтральной точкой. В этом случае для измерения мощности одной фазы цепь тока ваттметра соединяют последовательно с одной из фаз приемника (рис. 3.12 а), а цепь напряжения включают под напряжение той фазы приемника, в которую включена цепь тока ваттметра, т. е. зажимы цепи напряжения ваттметра присоединяются один к линейному проводу, а второй—к нейтральной точке приемника. В подобных условиях измеренная мощность

$$P_{\text{из}} = P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$$

а мощность симметричного приемника

$$P = 3 P_{\text{из}} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$$

Часто нейтральная точка недоступна или фазы приемника соединены треугольником. Тогда применяется измерение с помощью искусственной нейтральной точки (рис. 12 б).

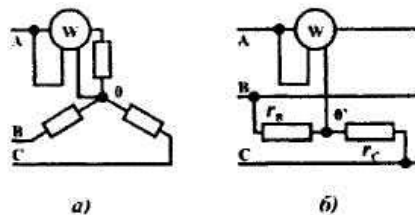


Рис. 3.12 Схема измерения активной мощности в симметричной трехфазной системе:

а — при доступной нейтральной точке,
б — с искусственной нейтральной точкой

Такая точка (точнее узел) составляется из цепи напряжения ваттметра с сопротивлением $r_{\text{нм-н}}$ и двух добавочных резисторов C такими же сопротивлениями. При таком соединении цепь напряжения ваттметра находится под фазным напряжением, а через цепь тока прибора проходит фазный ток. Следовательно, и при таком измерении

$$P = 3 P_{\text{из}}$$

Для измерения активной мощности в четырехпроводной установке (т. е. установке с нейтральным проводом) при несимметричной нагрузке применяют способ трех ваттметров (рис. 3.13). В такой установке каждый из ваттметров измеряет активную мощность одной фазы, а активная мощность установки определяется как сумма мощностей, измеренных тремя ваттметрами:

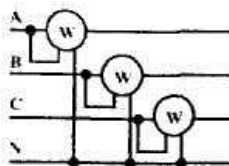


Рис. 3.13 Схема измерения активной мощности в трехфазной четырехпроводной системе (способ трех ваттметров)

В трехпроводных сетях при несимметричной нагрузке мощность измеряют способом двух ваттметров.

Если включить два ваттметра в трехпроводную систему постоянного тока (рис. 3.14), то они будут измерять мощность всей установки. При этом не имеет значения, каковы напряжения отдельных пеньей, объединенных в трехпроводную систему. Если вместо постоянных тока и напряжения рассматривать мгновенные значения напряжений и токов трехфазной системы, то в таких условиях ваттметры будут показывать средние значения мгновенных мощностей, т. е. активные мощности. Но следует иметь в виду, что хотя $P = P_1 + P_2$, мощность системы равна сумме показаний двух ваттметров, но эта сумма алгебраическая, т. е. показание одного из ваттметров может быть отрицательным — стрелка одного из ваттметров может отклоняться в обратную сторону, за нуль шкалы. Чтобы отсчитать в таких условиях показание ваттметра нужно переключить зажимы цепи напряжения. Показания прибора после такого переключения следует считать отрицательными.

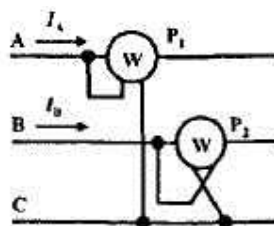


Рис. 3.14 Схема измерения активной мощности в трехфазной трехпроводной системе (способ двух ваттметров)

Пример. Трехфазный симметричный потребитель электроэнергии с сопротивлением фаз $Z_a = Z_b = Z_c = Z_\phi = R = 10 \text{ Ом}$ соединен «звездой» и включен в трехфазную сеть с симметричным линейным напряжением $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ (рис.3.15). Определить токи в фазных и линейных проводах, а также потребляемую активную мощность в режимах:

- при симметричной нагрузке;
- при отключении линейного провода;
- при коротком замыкании той же фазы нагрузки.

Построить для всех трех режимов токографические диаграммы напряжений и показать на них вектора токов.

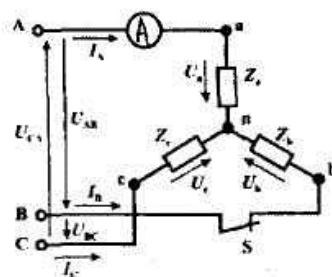


Рис. 3.15.

а) **Решение.** Фазные напряжения при симметричной нагрузке; $U_a = U_b = U_c = U_\phi = U_l/\sqrt{3} = 220/\sqrt{3} = 127 \text{ В}$. Фазные токи при этой нагрузке: $I_\phi = U_\phi/R_\phi = 127/10 = 12,7 \text{ А}$. Линейные токи при симметричной нагрузке: $I_A = I_C = I_l = I_\phi = 12,7 \text{ А}$, так как симметричный трехфазный потребитель электроэнергии соединен «звездой».

Активная мощность трехфазного симметричного потребителя: $P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3 \cdot 127 \cdot 12,7 \cdot 1 = 4850 \text{ Вт} = 4,85 \text{ кВт}$ или $P = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi_\phi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 12,7 \cdot 1 = 4850 \text{ Вт} = 4,85 \text{ кВт}$, где $\cos \varphi_\phi = 1$ при $Z_\phi = R_\phi$.

Векторная диаграмма напряжений и токов приведена на рис.3.16.

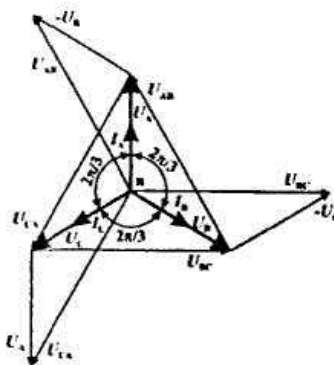


Рис. 3.16.

б) **Решение** Ток в линейных проводах aA и cC при обрыве линейного провода bB (выключатель S разомкнут); так как сопротивление фазы $Z_b = \infty$ ($I_b = 0$), а $Z_a = R$ и $Z_c = R$ включены последовательно на линейное напряжение $U_{CA} = U_l = 220 \text{ В}$; $I_A = I_C = I = U_{CA}/(R + R) = 220/(10 + 10) = 11 \text{ А}$.

Напряжение на фазах потребителя при обрыве линейного провода bB (нейтральная точка и в этом случае соответствует середине вектора линейного напряжения U_{CA}): $U_a = U_c = U_{CA}/2 = 220/2 = 110 \text{ В}$.

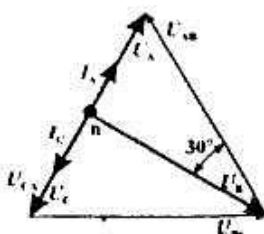


Рис. 3.17.

Напряжение между проводом фазы B и нейтральной точкой n определяют из векторной диаграммы (рис. 3.17): $U_c = U_l \cos \pi/6 = 220 \cdot 0.866 = 190,5 \text{ В}$.

Активная мощность потребителя при обрыве линейного провода bB: $P = P_A + P_C = 2I^2 R_\phi = 2 \cdot 11^2 \cdot 10 = 2420 \text{ Вт} = 2,42 \text{ кВт}$.

в) Для условия задачи определить фазные напряжения U_ϕ и токи I_ϕ , активную мощность P_k потребителя при коротком замыкании фазы Zb, построить векторную диаграмму для этого случая рис. 3.18.

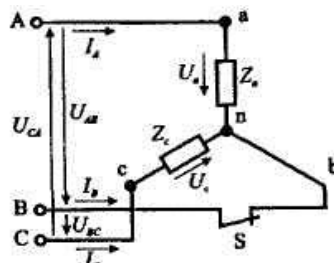


Рис. 3.18

Решение. В данном случае $Z_b = 0$ и $U_b = 0$, нейтральная точка n переместится в точку B , при этом фазные напряжения $U_c = U_{BC}$, $U_A = U_{AB}$, т.е. фазные напряжения равны линейным напряжениям ($U_\phi = U_l$). При этом фазные токи: $I_A = I_c = U_l / R = 220 / 10 = 22 \text{ А}$. Ток I_B при коротком замыкании в соответствии с первым законом Кирхгофа для нейтральной точки n : $I_A + I_B + I_c = 0$ или $-I_B = I_A + I_c$.

Из прямоугольного треугольника на векторной диаграмме рис. 3.19 имеем: $(-I_B/2)^2 + (I_A/2)^2 = I^2_A$, откуда $I_B = \sqrt{3} I_A = \sqrt{3} \cdot 22 = 38 \text{ А}$. При этом $I_A = U_l / Z_a = I_c = U_l / Z_c = U_l / R = 220 / 10 = 22 \text{ А}$.

Активная мощность цепи при коротком замыкании: $P_k = P_A + P_C = 2 \cdot I^2_{\phi} \cdot R = 2 \cdot 22^2 \cdot 10 = 9680 \text{ Вт} = 9,68 \text{ кВт}$. Векторная диаграмма напряжений и токов приведена на рис. 3.19

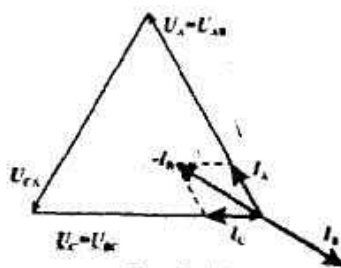


Рис. 3.19

РАЗДЕЛ 4. ТРАНСФОРМАТОРЫ

4.1. НАЗНАЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменных напряжений и токов неизменной частоты при передаче электроэнергии от источника к потребителю.

Трансформация напряжений и токов необходима, прежде всего, для экономичной передачи и распределения электроэнергии. Энергия большой мощности $S = U I$ при не-

большом значении напряжения может быть передана только при большом значении тока. Потери энергии в линии электропередачи определяются по формуле:

$$\Delta P_{\pi} = I^2 R_{\pi} L \quad (4.1)$$

где R_{π} - сопротивление 1 км линии передачи, Ом/км',
 L - длина линии км, а потери напряжения в этой же линии:

$$\Delta U_{\pi} = I R_{\pi} L \quad (4.2)$$

Следовательно, чем меньше ток, тем меньше потери мощности и напряжения в линиях электропередачи. Это достигается повышением напряжения в линии. Чем выше напряжение, тем меньше значение тока, а значит меньше сечение проводов линии передачи. Поэтому в местах производства электрической энергии - на электрических станциях напряжение повышают до 35, 110, 220, 330, 500, 750 кВ и выше, передают энергию по проводам к потребителю, где на понижающих подстанциях трансформируют до 3, 6, 10 кВ. Эти напряжения используют при питании мощных электродвигателей, других приемников, а также трансформаторов, понижающих напряжение до 500, 380, 220 В и ниже.

4.2. УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатор состоит из сердечника (см. рис.4.1), собранного из отдельных листов электротехнической стали и двух обмоток - первичной с числом витков ω_1 и вторичной с числом витков ω_2 .

Обмотки обычно выполняют из медного провода круглого или прямоугольного сечения. Начала обмоток обозначают буквами A и a , концы X и x . Обмотки различают также по значению напряжения: обмотка высшего напряжения (ВН), обмотка низшего напряжения (НН). К первичной обмотке подключается генератор, ко вторичной - приемник.

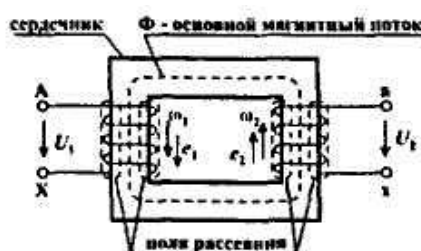


Рис.4.1. Электромагнитная схема трансформатора

Условное обозначение трансформатора приведено на рис.4.2

На табличке трансформатора указывается его номинальные величины: мощность S_N , первичное (U_{1N} и вторичное U_{2N} , напряжения, первичный I_{1N} и вторичный I_{2N} токи, напряжение короткого замыкания U_K и частота f которые соответствуют номинальному тепловому режиму.

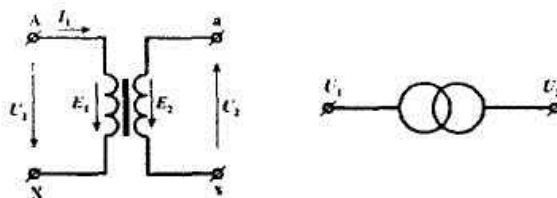


Рис.4.2. Условные обозначения трансформатора на электрических схемах

4.3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Переменное напряжение в подведенное к первичной обмотке трансформатора, вызывают в ней ток i_1 , который возбуждает в сердечнике, являющимся магнитопроводом, переменный магнитный поток Φ . Часть потока замыкается вокруг первичной обмотки по сердечнику и по воздуху, образуя поле рассеяния.

Основной магнитный поток Φ наводит в обмотках э.д.с.

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt}, e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.3)$$

Э.д.с. e_2 имеет такое же направление по отношению к началу вторичной обмотки, как в э.д.с. e_1 , по отношению к первичной обмотке (на рис. 4.1 начала обмоток обозначены точками).

Для гармонически изменяющегося магнитного потока

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (4.4)$$

где Φ и Φ_m - мгновенное и амплитудное значения потока. С учетом выражения магнитного потока формулы (4.3) примут следующий вид:

$$e_1 = \omega_1 \omega \Phi_m \sin (\omega t - \pi/2) = m_1 \sin (\omega t - \pi/2);$$

$$e_2 = \omega_2 \omega \Phi_m \sin (\omega t - \pi/2) = m_2 \sin (\omega t - \pi/2); \quad (4.5)$$

где $E m_1 = \omega_1 \omega \Phi_m$; $E m_2 = \omega_2 \omega \Phi_m$.

Действующие значения первичной и вторичной э.д.с.

$$E_1 = \frac{E m_1}{\sqrt{2}} = \frac{\omega_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \omega_1 \Phi_m = 4,44 f \omega_1 \Phi_m;$$

$$E_2 = \frac{E m_2}{\sqrt{2}} = \frac{\omega_2 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \omega_2 \Phi_m = 4,44 f \omega_2 \Phi_m; \quad (4.6)$$

Отношение э.д.с. первичной обмотки к э.д.с. вторичной обмотки, равное отношению чисел витков этих обмоток, называется коэффициентом трансформации трансформатора

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = k \quad (4.7)$$

Таким образом, для повышения напряжения генератора необходимо выполнить условие $\omega_2 > \omega_1$. Трансформатор с таким соотношением витков называют повышающим. Если трансформатор понижающий, то для него $\omega_1 > \omega_2$.

4.4. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД ТРАНСФОРМАТОРОВ

При трансформации электрической энергии в трансформаторе возникают потери мощности

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (4.8)$$

где $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ - мощность, подводимая к трансформатору;

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

Потерь мощности состоят из потерь в стальном сердечнике P_{cm} и потерь на нагрев обмоток P_m . Последние являются переменными потерями, поскольку зависят от нагрузки, и определяются:

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2, \quad (4.9)$$

где R_1 и R_2 активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора. КПД трансформатора

$$k = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{P_{cm} + P_m}{P_1}; \quad (4.10)$$

и составляет для мощных трансформаторов 98 - 99%.

4.5. РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Это такой режим при котором к первичной обмотке трансформатора подведено напряжение сети, а вторичная обмотка разомкнута.

Поскольку вторичная обмотка разомкнута, то ток в ней отсутствует. Ток первичной обмотки будет равен току холостого хода $I_1 = I_0$, которые составляет 2 - 10% от номинального тока первичной обмотки для силовых трансформаторов. Причем, чем больше мощность трансформатора, тем меньше ток холостого тока.

Вследствие малости тока I_1 , можно считать, что

$$U_1 \approx E_1 \quad (4.11)$$

Учитывая, что в режиме холостого хода $U_{20} = E_2$ коэффициент трансформации трансформатора можно определить как

$$k = \frac{U_1}{U_{20}}; \quad (4.12)$$

Определив потери на нагрев первичной обмотки по формуле

$$P_{м1} = I_{o1}^2 R_1, \quad (4.13)$$

можно найти потери в стали сердечника

$$P_{ст} = P_1 - P_{м1} \quad (4.14)$$

При проведении опыта холостого хода к первичной обмотке подводят напряжение, которое постепенно повышают от 0 до 1,1 $U_{н1}$, При этом снимают показания приборов, а затем строят характеристики холостого хода, представляющие собой зависимости тока I_o мощности P_o и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от напряжения U_1 Построенные характеристики используются для определения значения тока I_o и мощности P_o соответствующих номинальному напряжению $U_{1н}$

4.6. РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Различают короткое замыкание трансформатора в условиях эксплуатации и сопровождающиеся всплесками тока или разрушением обмоток трансформатора, и опыт короткого замыкания, проводимый для определения параметров короткого замыкания.

При опыте короткого замыкания вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко, а к первичной обмотке подводят пониженное напряжение, повышая его от нуля до некоторого значения U_K , при котором токи короткого замыкания равны номинальным токам. В этом случае снимают показания приборов и строят характеристики короткого замыкания:

$$I_{1K} = f(U_K), \quad \cos \varphi_K = f(U_K), \quad P_K = f(U_K).$$

Где I_{1K} ток короткого замыкания в первичной обмотке трансформатора;

P_K - мощность потерь короткого замыкания при номинальных токах в обмотках.

Напряжение короткого замыкания U_K обычно выражается в процентах от номинального напряжения первичной обмотки $U_{1н}$

$$U_K = \frac{U_K}{U_{1н}} \cdot 100\%; \quad (4.15)$$

и составляет 2..8 % от $U_{1н}$.

На рис. 4.3 приведена упрощенная схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания. Величины сопротивлений R_k

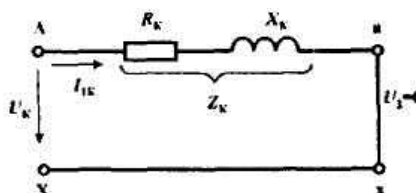


Рис. 4.3. Схема замещения трансформатора при коротком замыкании

X_k , Z_k называют параметрами короткого замыкания. Их значения определяют из опыта короткого замыкания. При номинальных токах в обмотках измеряют ток I_{1k} , напряжение U_k и мощность P_k и рассчитывают значения

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{1k}}; R_k = \frac{P_k}{I_{1k}^2}; X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; \quad (4.16)$$

4.7. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

В режиме нагрузки первичная обмотка трансформатора включена на номинальное первичное напряжение, а ко вторичной обмотке подключен приемник (см рис.4.4). В этом случае можно выделить три потока: основной поток Φ , сцепленный с первичной и вторичной обмотками, поток рассеяния первичной обмотки $\Phi_{рас1}$ и поток вторичной обмотки $\Phi_{рас2}$.

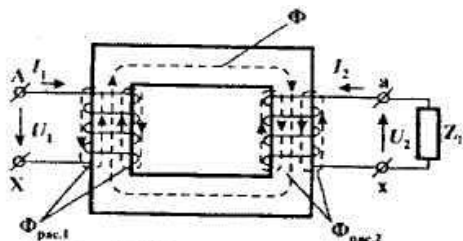


Рис. 4.4. Электромагнитная схема

Работа трансформатора под нагрузкой подчиняется тем же закономерностям, что и работа в режимах холостого хода и короткого замыкания. Эти закономерности выражаются в форме уравнений напряжения, э.д.с. и намагничивающих сил, или могут быть изображены с помощью векторных диаграмм.

Нагрузочный режим позволит построить внешние характеристики и определить *КПД* (η) трансформатора. С увеличением нагрузки изменяется напряжение на вторичной обмотке. Зависимость этого напряжения от нагрузки выражается графически внешними характеристиками трансформатора $U_2 = f(I_2)$. Вид внешней характеристики зависит от характера нагрузки и от величины коэффициента мощности $\cos \varphi_2$. При активной и активно-индуктивной нагрузках внешние характеристики имеют падающий вид, при активно-емкостной нагрузке внешняя характеристика имеет восходящий вид (рис.4.5).

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos \phi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \phi_2 + \beta^2 \cdot P_{KH} + P_0}$$

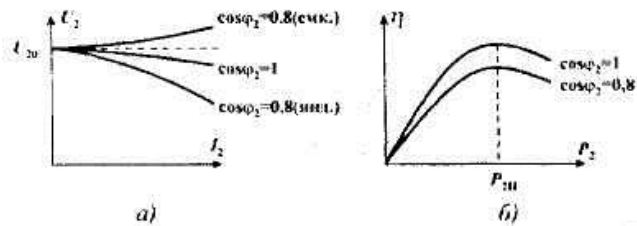


Рис. 4.5 Внешняя характеристика (а) и график зависимости КПД трансформатора от нагрузки (б)

4.8. ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА И РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Описание рабочих процессов относится как к однофазным, так и к трехфазным трансформаторам, в последнем случае—к одной фазе трансформатора, нагруженного симметрично. Трансформирование трехфазной системы токов может осуществляться трансформаторной группой — тремя однофазными трансформаторами, работающими как одни агрегат. Но можно объединить три однофазных трансформатора в один трехфазный аппарат и при этом достигнуть экономии материалов. Это было сделано изобретателем трехфазного трансформатора М. О. Доливо-Добровольским в 1891 г. Покажем наглядно, как создается экономия материала при построении трехфазного трансформатора. Представим себе три однофазных трансформатора (рис. 4.6а). Составляя сердечник для трехфазного трансформатора, оставим без изменения те части сердечников однофазных трансформаторов, на которых расположены обмотки, а свободные части этих трех сердечников соединим в один общий магнитопровод (рис. 4.6 б). Такое построение магнитной системы можно сопоставить с соединением трех электрических цепей звездой. Но в трехфазной системе при равномерной нагрузке нейтральный провод не нужен; отказываясь от него, получаем экономию меди.

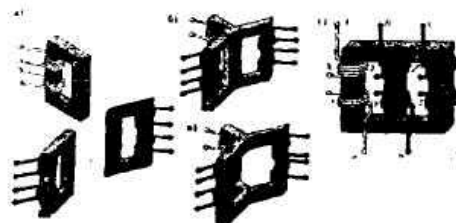


Рис. 4.6 Схема преобразования трех однофазных трансформаторов в один трехфазный

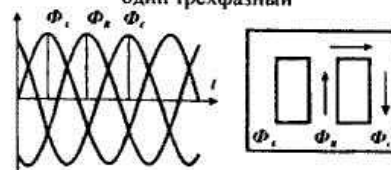


Рис. 4.7 Кривые мгновенных значений магнитных потоков трехфазного трансформатора и распределение потоков в сердечнике

Нейтральному проводу в магнитной системе трехфазного трансформатора соответствует средний общий стержень. При наличии симметричной трехфазной системы магнитных потоков этот стержень не нужен и может быть удален (рис. 4.6в), так как алгебраическая сумма этих магнитных потоков всегда равна нулю. Магнитный поток в стальном сердечнике трансформатора можно считать прямо пропорциональным напряжению и отстающим от него по фазе почти на 90° . Три первичных напряжения трехфазной системы, следовательно, должны обуславливать три потока одинаковой амплитуды, сдвинутых по фазе по отношению друг к другу на одну треть периода (120°).

Показанный на рис. 4.6в симметричный сердечник неудобен для изготовления и в настоящее время заменен несимметричным магнитопроводом (рис. 4.6г), который, можно мыслить как выпрямленный вариант магнитопровода (рис. 4.6в) Симметричная

трехфазная система первичных напряжений трансформатора возбуждает и в каком несимметричном магнитопроводе симметричную систему магнитных потоков. Но из-за неравенства магнитных сопротивлений намагничивающие токи отдельных фаз между собой не равны. Однако эта несимметрия намагничивающих токов для основных соотношений существенного значения не имеет. Физически в каждый данный момент магнитный поток одного стержня замыкается через два других стержня магнитопровода (рис. 4.7).

Отметим, что для фазных напряжений и токов при симметричной нагрузке справедливы те же отношения, что и для однофазного трансформатора. Эти условия нарушаются лишь в некоторых случаях при несимметричной нагрузке трехфазных трансформаторов.

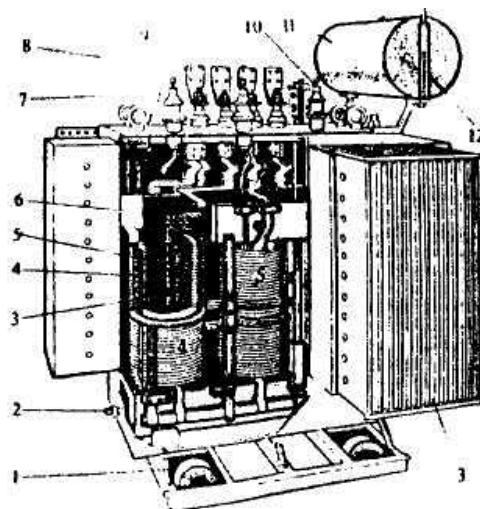


Рис. 4.8.Трехфазный масляный трансформатор с трубчатым баком в частичном разрезе:

1 - катки, 2 — спускной кран для масла, 3 - изолирующий цилиндр, 4 — обмотка высшего напряжения, 5 — обмотка низшего напряжения, 6 — сердечник, 7 — термометр, 8, 9 — выводы низшего напряжения. 10 — выводы обмотки высшего напряжения. 11 — расширитель для масла, 12 — указатель уровня масла, 13 — радиаторы

Группа из трех однофазных трансформаторов дороже, чем трехфазный трансформатор той же мощности, занимает больше места, а кпд несколько ниже. Зато в качестве ре-

зерва на случай аварии или ремонта при такой группе достаточно иметь один однофазный трансформатор, так как маловероятно одновременное повреждение всех трех фаз трансформатора, а периодический ремонт их может осуществляться поочередно. Но при трехфазном трансформаторе в качестве резерва необходим второй трехфазный трансформатор. Таким образом, трехфазная группа обеспечивает большую надежность при эксплуатации; наконец, перевозка и установка трех однофазных трансформаторов при больших мощностях значительно проще перевозки и установки трехфазного трансформатора большой мощности.

Практически большинство трансформаторов малой и средней мощности выполняют трехфазными (рис. 4.8), а больших мощностей — с учетом конкретных условий установки. Трехфазные трансформаторы изготовляют мощностью до 60 000 кВА, но уже начиная с мощности $3 \times 600 = 1800$ кВА допускается применять трехфазные группы трехфазных трансформаторов.

Зажимы трехфазного трансформатора размечаются в порядке чередования фаз: на стороне высшего напряжения зажимы *A, B, C* —

начала обмоток, *X, Y, Z* — их концы; на стороне низшего напряжения — соответственно *a, b, c* и *x, y, z* (см. рис. 4.6г).

Основными способами соединения обмоток трехфазного трансформатора являются соединения звездой и треугольником.

Самым простым и дешевым из них является соединение обеих обмоток трансформатора звездой, при котором каждая из обмоток и ее изоляция (при глухом заземлении нейтральной точки) должны быть рассчитаны только на фазное напряжение и линейный ток; так как число витков обмотки трансформатора прямо пропорционально напряжению, то, следовательно, соединение обмоток звездой требует в каждой из обмоток меньшего количества витков, но большего сечения проводников с изоляцией, рассчитанной лишь на фазное напряжение. Соединение обеих обмоток звездой широко применяют для трансформаторов небольшой и средней мощности (примерно до 1800 кВА). Соединение звездой является наиболее желательным для высокого напряжения, так как при нем изоляция обмоток рассчитывается лишь на фазное напряжение. Чем выше напряжение и меньше ток, тем относительно дороже обходится соединение обмоток треугольником.

Соединение обмоток треугольником конструктивно удобнее при больших токах. По этой причине соединение *Y/Δ* широко применяется для трансформаторов большой мощности в тех случаях, когда на стороне низшего напряжения не требуется нейтрального провода.

При трехфазной трансформации только отношение фазных напряжений $U_{1ф}/U_{2ф}$ всегда приблизительно равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток w_1/w_2 , что же касается линейных напряжений, то их отношение зависит от способа соединения обмоток трансформатора. При одинаковом способе соединения (*Y/Y* или *Δ/Δ*) отношение линейных напряжений также равно коэффициенту трансформации. Однако при различном способе соединения (*Y/Δ* и *Δ/Y*) отношение линейных напряжений меньше или больше этого коэффициента в $\sqrt{3}$ раз. Это дает возможность регулировать вторичное линейное напряжение трансформатора соответствующим изменением способа соединения его обмоток.

Пример. Трехфазный понижающий трансформатор с номинальной мощностью $S_{ном} = 20 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ и номинальными линейными напряжениями: $U_{1ном} = 6000 \text{ В}$, $U_{2ном} = 400 \text{ В}$ при частоте $f = 50 \text{ Гц}$ имеет потери мощности холостого хода $P_0 = 180 \text{ Вт}$, потери мощности короткого замыкания $P_K = 600 \text{ Вт}$ и напряжение короткого замыкания $U_K = 5,5\%$. Соединение обмоток трансформатора выполнено по схеме «звезда». Определить коэффициент трансформации K трансформатора, токи $I_{1ном}$, $I_{2ном}$ в обмотках, фазные напряжения $U_{1ф}$ и $U_{2ф}$, сопротивления обмоток: R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , а также КПД η при $\cos \phi_2 = 0,8$ и нагрузке, равной 75% от номинальной ($\beta = 0,75$).

Решение. Коэффициент трансформации трансформатора при заданной схеме соединения обмоток $K = U_{1ном}/U_{2ном} = 6000/400 = 15$.

Номинальные токи, при $S_{1ном} = S_{2ном} = S_{ном}$: первичной обмотки: $I_{1ном} = S_{ном} / \sqrt{3} U_{1ном} = \frac{20 \cdot 1000}{1,73 \cdot 6000} = 1,93 \text{ А}$; вторичной обмотки: $I_{2ном} = S_{ном} / \sqrt{3} U_{2ном} = \frac{20 \cdot 1000}{1,73 \cdot 400} = 29 \text{ А}$.

Номинальные фазные напряжения трансформатора: $U_{1ф ном} = U_{1ном} / \sqrt{3} = 6000/1,73 = 3470 \text{ В}$; $U_{2ф ном} = U_{2ном} / \sqrt{3} = 400/1,73 = 230 \text{ В}$.

Активные сопротивления

короткого замыкания: $R_K = R_1 + R'_2 = P_K / 3 I_{1ном}^2 = 600/3 \cdot 1,93^2 = 10,3 \text{ Ом}$;

первичной обмотки $R_1 = R'_2 = R_K/2 = 10,35/2 = 5,17 \text{ Ом}$;

вторичной обмотки $R_2 = R'_2 = R_K/K^2 = 5,17/15^2 = 0,023 \text{ Ом}$.

Коэффициент полезного действия трансформатора при $\cos \phi_2 = 0,8$ и $\beta = 0,75$;

$$\eta_{0,75} = \frac{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \phi_2}{\beta \cdot S_{ном} \cos \phi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K} = \frac{0,75 \cdot 20 \cdot 0,8}{0,75 \cdot 20 \cdot 0,8 + 0,18 + 0,75^2 \cdot 0,6} = 0,95$$

Сопротивления короткого замыкания:

$$\text{полное } z_K = \frac{U_K \cdot \% \cdot U_{1ф ном}}{I_{1ном} \cdot 100\%} = \frac{5,5 \cdot 3470}{1,93 \cdot 100} = 99 \text{ Ом};$$

$$\text{индуктивное } X_K = X_1 + X'_2 = \sqrt{z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{99^2 - 10,35^2} \approx 98,8 \text{ Ом}$$

Индуктивные сопротивления:

первичной обмотки $X_1 = X'_2 = X_K/2 = 98,8/2 = 49,4 \text{ Ом}$;

вторичной обмотки $X_2 = X'_2 = X_K/K^2 = 49,4/15^2 = 0,22 \text{ Ом}$.

Для определения годового эксплуатационного КПД учитывать время трансформатора под нагрузкой $n \cdot p = 4200 \text{ час}$. ($\beta \cdot S_n \cdot \cos \phi_2 \cdot 4200$), потери P_K ($\beta^2 \cdot P_K \cdot 4200$) и потери холостого хода, которые определяются временем $365 \text{ д} \cdot 24 \text{ ч} = 8760 \text{ ч}$. и равны $P_0 \cdot 8760 \text{ ч}$.

$$\eta_{год} = \frac{\beta \cdot S_n \cdot \cos \phi_2 \cdot 4200}{\beta \cdot S_n \cdot \cos \phi_2 \cdot 4200 + P_0 \cdot 8760 + \beta^2 \cdot P_K \cdot 4200}$$

РАЗДЕЛ 5. АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

5.1. ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОТКОЗАМКНУТОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

1. Асинхронный электродвигатель является основным видом электродвигателей, выпускаемых электротехнической промышленностью. Своей простотой, надежностью, относительной дешевизной он завоевал преимущественное распространение по сравнению с другими видами электроприводов и находит применение во всех отраслях народного хозяйства.

2. Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося ротора. Роторы бывают двух видов короткозамкнутые и с фазной обмоткой. Так как приблизительно 95% двигателей выпускаются короткозамкнутыми, то рассмотрим их подробнее. Коротко замкнутый ротор представляет собой цилиндр, набранный из листов электротехнической стали. На наружной поверхности ротора выштампованы пазы, которые заливаются расплавленным алюминием, в результате чего образуются продольные проводящие стержни. С обеих сторон (торцов) ротора располагаются алюминиевые кольца, которые замыкают эти стержни.

Статор асинхронного двигателя также представляет собой цилиндр, набранный из листов электротехнической стали. На внутренней поверхности цилиндра выштампованы пазы, в которых размещаются обмотки из изолированного медного провода. Оси обмоток смещены в пространстве на угол 120° друг относительно друга. Начала обмоток маркируются буквами C_1, C_2, C_3 , концы обозначены C_4, C_5, C_6 , (рисунок 5.1 а).

3. При подключении обмоток статора к трехфазной электрической сети в ней возникают токи, действующие значения которых равны, а начальные фазы сдвинуты друг относительно друга на угол 120° , так как обмотки представляют для сети симметричную трехфазную нагрузку.

Можно строго доказать, что если три обмотки, оси которых сдвинуты друг относительно друга в пространстве, запитать системой токов, сдвинутых друг относительно друга по фазе, то образующееся при этом магнитное поле будет вращающимся. Рассмотрим упрощенно процесс образования вращающегося поля, Пусть три обмотки на рисунке 5.1а запитаны системой токов, изображенной на рисунке 5.1б, причем ток i_2 протекает по обмотке $C_3 - C_6$, ток i_3 - по обмотке $C_1 - C_4$. За положительное направление токов примем направление от конца к началу обмоток. Изобразим условно проводники обмоток, лежащие в пазах статора, так, как это сделано на рисунке 5.1а, б, в, расставим направления токов в разные моменты времени и определим направление магнитного поля.

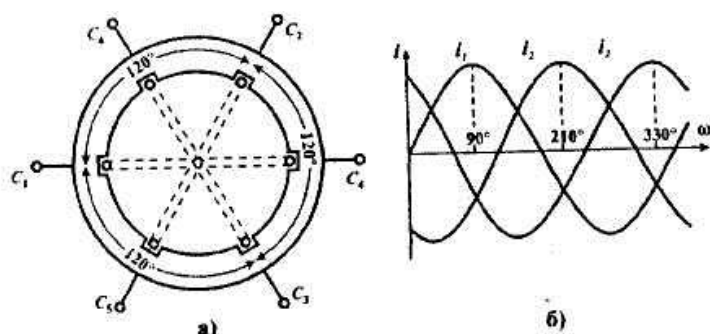


Рис. 5.1 Статор асинхронного двигателя и токи, питающие его обмотки

Направление векторов магнитной индукции определяется правилом правого винта: при движении правого винта в направлении тока магнитная силовая линия, охватывающая этот ток, направлена в сторону вращения головки винта.

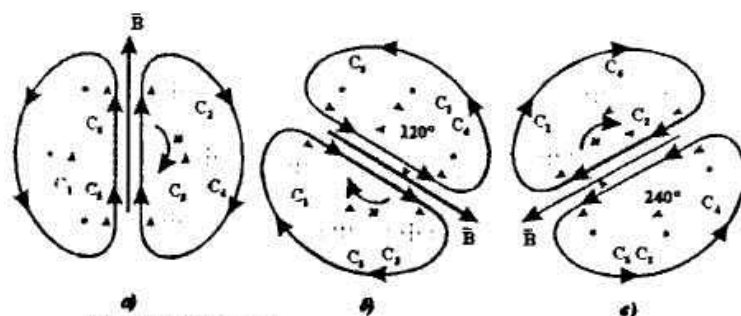


Рис. 5.2 Образование вращающегося магнитного поля

В момент времени $\omega t = 90^\circ$ ток i положителен, а токи i_2, i_3 отрицательны (рисунок 5.16). Для этого момента времени расставляем на рисунке 5.1 а направления токов в проводниках: положительно направленный ток течет от конца C4 к началу C1, (направление «от нас» обозначено крестиком, направление «к нам» - точкой); отрицательно направленные токи текут от начала фазы к концу, т.е. в концах фаз C5 и C6 ток течет «к нам», а в началах C2 и C3 - соответственно «от нас». Образованные этими токами магнитные поля показаны в виде магнитных силовых линий. Суммарный вектор магнитной индукции B направлен вертикально вверх.

Для момента времени $\omega t = 210^\circ$ устанавливаем по рисунку 5.16, что $i_2 > 0, i_1 < 0, i_3 < 0$. Это дает возможность расставить направления токов в обмотках так, как указано на рисунке 5.16. Построив магнитные силовые линии, можно увидеть, что вектор магнитной индукции B повернулся в пространстве на угол 120° .

Для момента времени $\omega t = 330^\circ$, устанавливаем по рисунку 5.16, что $i_1 < 0, i_2 < 0, i_3 > 0$. Построение картины магнитного поля

(рисунок 5.2в) дает возможность установить, что вектор магнитной индукции B повернулся в пространстве на угол 240° .

Продолжая аналогичные рассуждения, можно установить, что за время, равное одному периоду изменения тока, вектор магнитной индукции повернется в пространстве на 360° , т.е. полученное магнитное поле будет вращающимся. Можно показать, что скорость вращения магнитного поля определяется выражением:

$$n_a = \frac{60f}{P}$$

где f - частота тона трехфазной сети, Гц,

P - число пар полюсов двигателя.

Метод получения вращающегося магнитного поля был впервые разработан замечательным русским инженером М.О. Доливо-Добровольским.

4. Поместим внутрь расточки статора ротор. Вращающиеся магнитные силовые линии пересекают стержни роторной обмотки. По закону электромагнитной индукции в стержнях возникнут э.д.с, а так как стержни с торцов замкнуты кольцами, то под влиянием

э.д.с. в них потекут токи. Известно, что на ток в магнитном поле действует механическая сила. Можно сказать, что эта сила направлена в сторону вращения поля. Под влиянием сил, действующих на стержни с током, ротор начинает вращаться.

По мере увеличения числа оборотов ротора ω уменьшается скорость пересечения магнитными силовыми линиями стержней роторной обмотки. При этом уменьшаются роторные э.д.с. и токи. При $\omega = \omega_0$ пересечение прекратится, ток ротора станет равным нулю, исчезнет и вращающий момент.

Под влиянием сил трения ротор начнет уменьшать обороты, снова появится пересечение магнитными силовыми линиями стержней ротора и т.д. Ясно, что вращение ротора возможно лишь со скоростью, несколько меньшей, чем скорость вращения магнитного поля, т.е. всегда соблюдается условие $\omega < \omega_0$. Величина, характеризующая отставание частоты вращения ротора ω от частоты вращения магнитного поля статора ω_0 называется скольжением

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$$

5. В процессе работы асинхронный двигатель преобразует электрическую энергию, полученную из сети, в механическую энергию, отдаваемую нагрузке. Как и в любой реальной машине, это преобразование не обходится без потерь. При протекании токов по обмоткам статора и ротора в последних возникают потери, называемые медными потерями. При прохождении магнитного потока железом магнитопровода возникают стальные потери. Наконец, при вращении ротора возникают механические потери, вызванные трением в подшипниках, трением ротора о воздух, потерями на вентиляцию. Суммарные потери обозначаются ΣP . К.П.Д. двигателя определяется по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1}$$

Коэффициент мощности определяют по формуле:

$$\cos \phi = \frac{P_1}{3U_{\phi} I_{\phi}}$$

Зависимость КПД и $\cos \phi$ от полезной мощности называется рабочими характеристиками асинхронного двигателя. Расчет и опыт показывают, что К.П.Д. и $\cos \phi$ возрастают с увеличением полезной нагрузки на валу двигателя, достигают максимума при нагрузках, близких к номинальным, а при дальнейшем увеличении нагрузки снижаются. Отсюда вывод - асинхронный двигатель невыгодно эксплуатировать при малых нагрузках, ибо его энергетические показатели (К.П.Д. $\cos \phi$) малы.

6. Зависимость вращающего момента на валу двигателя M от скольжения S называется механической характеристикой. Анализ показывает, что в процессе пуска при увеличении числа оборотов (т.е. при уменьшении скольжения от 1 при пуске до некоторой критической величины S_k) вращающий момент увеличивается, а при дальнейшем увеличении оборотов вплоть до 0 (т.е. при уменьшении скольжения от S_k до 0) вращающий момент

снижается до нуля. Типичная для асинхронного двигателя механическая характеристика показана на рисунке 5.3.

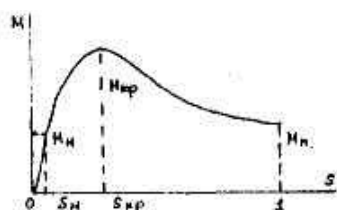


Рис. 5.3 Механическая характеристика асинхронного двигателя

На кривой вращающего момента можно выделить характерные точки. В момент пуска при $s = 0$ и $s = 1$ двигатель развивает пусковой момент $M_{\text{п}}$. Пусковой момент всегда должен быть больше момента сопротивления на валу двигателя, иначе двигатель не сможет тронуться с места. Величина отношения пускового момента к номинальному вращающему моменту $M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$ называется кратностью пускового момента. Она, как правило, обозначается на фирменной табличке двигателя и в каталогах. Для двигателей общепромышленного исполнения кратность пускового момента равна 1,2..1,6.

Вращающий момент, развиваемый двигателем при критическом скольжении, обозначается $M_{\text{кр}}$ и называется критическим или максимальным моментом. Из рисунка 5.3 видно, что это самый большой момент, развиваемый двигателем в процессе разгона. До тех пор, пока момент сопротивления на валу двигателя, создаваемый приводным механизмом, не превосходит максимального момента, еще возможна нормальная работа двигателя, хотя бы кратковременно. Если же тормозной момент на валу станет больше максимального, то двигатель вынужден сбросить обороты до нуля» Это аварийный режим, получивший название «опрокидывания» двигателя.

Отношение величины максимального момента $M_{\text{кр}}$ к номинальному $M_{\text{н}}$ называется кратностью максимального момента

$$k_{\text{м}} = \frac{M_{\text{кр}}}{M_{\text{н}}}$$

и для большинства двигателей общепромышленного исполнения составляет 2,5 .. 3. Величина $M_{\text{кр}}/M_{\text{н}}$ как правило, приводится на фирменной табличке двигателя и в каталогах. Кратность максимального момента называют еще перегрузочной способностью двигателя.

Диапазон ($0 \dots s_{\text{кр}}$) соответствует рабочему участку механической характеристики. На этом участке увеличение нагрузки на валу приводит к снижению числа оборотов и, следовательно, к увеличению вращающего момента, т.е. равновесие тормозного и вращающего моментов восстанавливается. На рабочем участке возможна устойчивая работа двигателя и здесь же выбирается точка

номинального момента, т.е. такого вращающего момента, который двигатель способен развивать длительное время, не перегреваясь.

Диапазон ($s_{\text{кр}} \dots 1$) соответствует неустойчивому участку работы асинхронного двигателя. В этом случае при увеличении нагрузки вращающий момент уменьшается, что приводит к «опрокидыванию»

двигателя.

Пример. Рассчитать по приближенным формулам и построить механические характеристики $M(s)$ и $n = (M)$ асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, с номинальной мощностью $P_{ном} = 3,2$ кВт и номинальным числом оборотов $n_{ном} = 1440$ об/мин. Кратность пускового момента $M_{пуск}/M_{ном} = 1,1$, число пар полюсов двигателя $p = 2$, частота питающего напряжения $f_1 = 50$ Гц. Механическими потерями мощности $P_{мех}$ при расчете пренебречь.

Решение. Синхронная круговая частота вращения магнитного поля двигателя: $\Omega_1 = 2\pi f_1/p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50/2 = 157$ с⁻¹.

Синхронная частота вращения ротора $n_1 = 60f_1/p = 60 \cdot 50/2 = 1500$ об/мин.

Номинальное скольжение ротора:

$$s_{ном} = \frac{\Omega_1 - \Omega_{ном}}{\Omega_1} = \frac{157 - 150,72}{157} = 0,04$$

или

$$s_{ном} = \frac{n_1 - n_{ном}}{n_1} = \frac{1500 - 1400}{150} = 0,04$$

где $\Omega_{ном} = \pi n_{ном}/30 = 3,14 \cdot 1440/30 = 150,72$ с⁻¹

Номинальный момент нагрузки на валу двигателя: $M_{ном} = 9550 \cdot P_{ном}/n_{ном} = 9550 \cdot 3,2/1440 = 21,2$ Н·м.

Пусковой момент двигателя: $M_{пуск} = 1,1 M_{ном} = 1,1 \cdot 21,2 = 23,4$ Н·м.

Максимальное скольжение ротора асинхронного двигателя может быть определено из упрощенного уравнения механической характеристики при пуске:

$$M_{пуск} = \frac{2M_{max}}{\frac{s_{пуск}}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s_{пуск}}} = \frac{2M_{max}}{\frac{1}{s_{кр}} + s_{кр}}$$

Момент на валу при номинальной нагрузке:

$$M_{ном} = \frac{2M_{max}}{\frac{s_{ном}}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s_{ном}}}$$

$$\text{откуда } s_{кр} = \sqrt{\frac{s_{ном} \left(\frac{M_{пуск}}{M_{ном}} - s_{ном} \right)}{1 - \frac{M_{пуск}}{M_{ном}} \cdot s_{ном}}} = \sqrt{\frac{0,04(1,1 - 0,04)}{1 - 1,1 \cdot 0,04}} = 0,21$$

Максимальный момент, развиваемый асинхронным двигателем:

$$M_{max} = M_{пуск}/2 = (1/s_{кр} + s_{кр}) = 23,4/2 (1/0,21 + 0,21) = 58$$
 Н·м.

Кратность максимального момента асинхронного двигателя по отношению к номинальному его значению; $M_{max}/M_{ном} = 58/21,2 = 2,72$.

Координаты естественной механической характеристики асинхронного двигателя для различных значений скольжения ротора рассчитывается по формулам:

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} = \frac{2 \cdot 58}{\frac{s}{0,21} + \frac{0,21}{s}}, \quad \text{и } n = n_1(1 - s).$$

Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Величины, соответствующие работе асинхронного электродвигателя в режимах					Режимы работы двигателя
s	$\frac{s - 0,21}{0,21 - s}$	$M, H \cdot m$	Ω, c^{-1}	$n_2, об/мин$	
0	-	0	157	1500	Идеальный холостой ход
0,21	2,00	58,86	125,6	1200	Нагрузка
0,4	2,43	48,36	94,2	900	Нагрузка
0,6	3,20	36,78	62,8	600	Нагрузка
0,8	4,07	28,94	31,4	300	Нагрузка
1	4,97	23,54	0	0	Нагрузка

Координаты характерных точек механических характеристик асинхронного двигателя в двигательном режиме: $s_{ном} = 0,04$; $M_{ном} = 21,2 H \cdot m$; $s_{кр} = 0,21$; $M_{max} = 58 H \cdot m$; $s_{пуск} = 1$; $M_{пуск} = 23,4 H \cdot m$.

На рис. 5.4, а, б приведены механические характеристики асинхронного двигателя $s(M)$ и $n(M)$, рассчитанные по приближенным формулам.

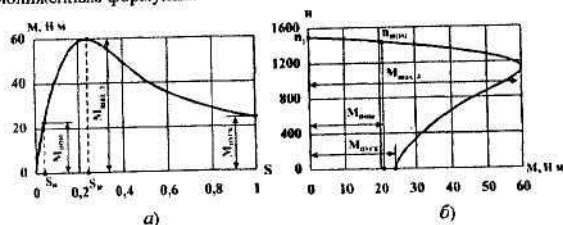


Рис. 5.4 а, б

Для нахождения номинального тока при известных $P_{2н}$, U_n двигателя

$$I_n = \frac{P_{2н}}{\sqrt{3}U_n \cos \phi_n \eta_n} [A]$$

при снижении напряжения в сети на 10% пусковой момент

$$M'_n = \left(\frac{0,9U_n}{U_n} \right) M_n = 0,81 M_n [H \cdot m]$$

и максимальный момент

$$M'_{max} = \left(\frac{0,9U_n}{U_n} \right) M_{max} = 0,81 M_{max} [H \cdot m]$$

критическое скольжение $s_{кр}$ можно определить по формуле

$$s_{кр} = s_n \left(\kappa_n + \sqrt{\kappa_n^2 - 1} \right)$$

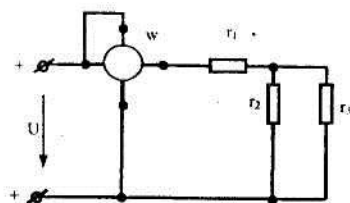


Рис. 2

Ва- ри- ант	Данные к задаче 1.2					Ва- ри- ант	Данные к задаче 1.2				
	U, В	P, Вт	r_1 , Ом	r_2 , Ом			U, В	P, Вт	r_1 , Ом	r_2 , Ом	
1	100	200	20	40		6	120	400	20	30	
2	120	250	30	50		7	100	125	50	40	
3	100	400	10	30		8	120	360	10	50	
4	120	300	15	40		9	100	100	60	50	
5	100	250	25	25		10	120	240	40	30	

Задача 1.3 В цепи (рис. 3) э.д.с. источников питания равны E_1, E_2, E_3 , а сопротивления ветвей соответственно r_1, r_2, r_3, r_4 (включая внутреннее сопротивление источников питания). Определить силы токов во всех ветвях цепи и режим работы каждого из источников. Задачу решить методом узлового напряжения и контурных токов. Составить баланс мощности.

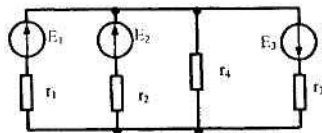


Рис.3

Вариант	Данные к задаче 1.3						
	E1, В	E2, В	E3, В	r1, Ом	r2, Ом	r3, Ом	r4, Ом
1	120	220	100	1	2	4	5
2	220	120	120	5	4	2	1
3	120	220	150	4	2	1	5
4	120	220	100	5	1	2	4
5	220	150	120	2	4	5	1
6	120	220	150	1	2	4	5
7	300	200	120	5	4	2	1
8	400	200	150	4	2	1	5
9	200	300	150	5	1	2	4
10	200	400	120	2	4	5	1

Задача 1.4 В цепи (рис. 4) э.д.с. источников питания равны E_1 и E_2 , а их внутренние сопротивления r_{01} и r_{02} . Сопротивления в ветвях r_1, r_2, r_3, r_4 . Определить силы токов во всех ветвях цепи и режимы обоих источников питания. Составить баланс мощностей. Задачу решить методом контурных токов.

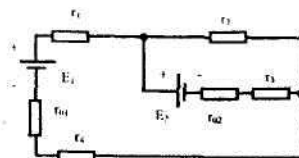


Рис. 4

Вариант	Данные к задаче 1.4							
	E1, В	E2, В	r01, Ом	r02, Ом	r1, Ом	r2, Ом	r3, Ом	r4, Ом
1	90	95	0,1	0,05	2	4	3	2
2	95	100	0,1	0,05	2	5	3	2
3	100	105	0,1	0,05	2,5	4	3	2,5
4	105	110	0,1	0,05	2,5	5	3	2,5
5	110	115	0,1	0,05	3	4	2,5	3
6	115	120	0,15	0,1	3	5	2,5	3
7	120	125	0,15	0,1	2,5	4	2	2,5
8	125	135	0,15	0,1	2,5	5	3	2,5
9	130	135	0,15	0,1	2	4	3	2
10	140	145	0,15	0,1	2	5	3	2

Задача 1.5 В цепи синусоидального переменного тока (рис. 5) включены последовательно две катушки и емкость. Параметры катушек и емкости известны: r_1, L_1, r_2, L_2, C . Кроме того, известна возникающая э.д.с. E_{L1} . Найти напряжение источника, полную активную и реактивную мощности цепи, сдвиги фаз на участках а с и с е. Построить топографическую векторную диаграмму.

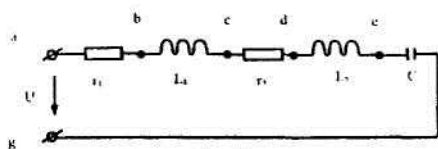


Рис. 5

Указание. Частота переменного тока $f = 50 \text{ Гц}$.

Вариант	Данные к задаче 1.5					
	$E_{\text{Л}}, \text{В}$	$r_1, \text{Ом}$	$r_2, \text{Ом}$	$L_1, \text{Гн}$	$L_2, \text{Гн}$	$C, \text{мкФ}$
1	40	4	5	0,032	0,016	400
2	50	3	4	0,0127	0,032	500
3	30	5	3	0,016	0,0127	400
4	60	6	6	0,016	0,032	320
5	70	3	3	0,32	0,016	500
6	40	5	4	0,0127	0,032	400
7	30	6	5	0,016	0,032	500
8	50	4	6	0,032	0,0127	400
9	60	5	4	0,0127	0,032	320
10	70	4	6	0,032	0,032	320

Задача 1.6 В цепь синусоидального переменного тока частотой $f = 50 \text{ Гц}$ (рис. 6) включены две параллельные ветви. Параметры включенных в них элементов известны: r_1, r_2, L, C . Напряжение на конденсаторе U_C . Найти токи в ветвях и неразветвленной части цепи. Определить сдвиги фаз всей цепи и на обеих ветвях. Построить топографическую диаграмму.

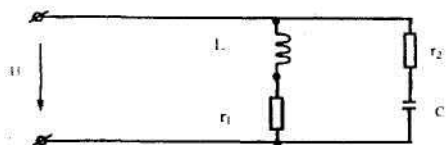


Рис. 6

Вариант	Данные к задаче 1.6				
	Uс,В	L, Гн	C, мкФ	r1 Ом	r2, Ом
1	30	0,096	630	4	5
2	20	0,0127	400	6	3
3	40	0,019	500	3	4
4	50	0,016	680	8	4
5	60	0,032	750	5	6
6	40	0,019	600	7	5
7	30	0,0127	320	6	3
8	20	0,0096	400	5	4
9	50	0,0127	500	3	6
10	60	0,016	320	4	5

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №2

1. К Трехфазной линии с линейным напряжением $U_{\text{л}}$ симметричный приемник, соединенный по схеме «звезда» (рис. 7). Активные и реактивные сопротивления фаз приемника соответственно равны $r_A, x_A, r_B, x_B, r_C, x_C$. Напряжение нейтрального провода пренебрежительно мало. Найти токи в фазах приемника, линейных проводах в трех режимах: а) трехфазном; б) при обрыве в линейном

проводе A ; в) при коротком замыкании фаза A приемника. Определить активную мощность, потребляемую приемником, в указанных выше двух режимах. Построить топографические диаграммы напряжений и на них показать векторы токов для трех режимов.

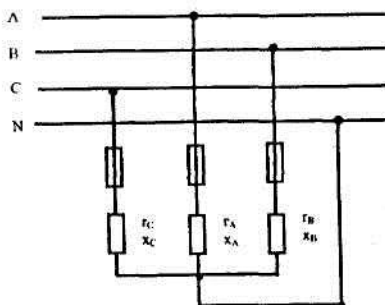


Рис. 7

Вариант	Данные к задаче 2.1						
	Ул, В	r_A , Ом	x_A , Ом	r_B , Ом	x_B , Ом	r_C , Ом	x_C , Ом
1	220	10	0	3	4	9	-12
2	380	10	0	4	-3	12	9
3	220	11	0	6	8	18	-24
4	380	19	0	8	-6	24	18

5	220	20	0	12	16	18	-24
6	380	20	0	16	-12	12	9
7	220	22	0	1,5	2	9	-12
8	380	38	0	2	-1,5	6	8
9	220	20	0	18	24	4	-3
10	380	19	0	24	-18	3	4

У **Задача 2.2.** К трехфазной линии с линейным напряжением $U_{\text{л}}$ подключены три одинаковых приемника, соединенных по схеме «звезда» (рис. 8). Активные и реактивные сопротивления каждого приемника соответственно равны r , x . Определить силы тока в фазах нагрузки и линейных проводах, а также потребляемую нагрузкой активную мощность в следующих режимах: а) симметричном трехфазном; б) при обрыве одной фазы нагрузки; в) при коротком замыкании той же фазы нагрузки. Построить для всех трех случаев топографические диаграммы напряжений и на них показать векторы токов.

Вариант	Данные к задаче 2.2			Вариант	Данные к задаче 2.2		
	Ул, В	r , Ом	x , Ом		Ул, В	r , Ом	x , Ом
1	220	1	3	6	380	6	8
2	380	3	1	7	220	8	6
3	220	3	4	8	380	5	3
4	380	4	3	9	220	2	5

5	220	3	5	10	380	3	7
---	-----	---	---	----	-----	---	---

Задача 2.3. Трехфазный трансформатор характеризуется следующими номинальными величинами: мощность S_n , высшее линейное напряжение U_{lv} , низшее U_{2n} . Схема соединения обмоток трансформатора Y/Y . Мощность потерь холостого хода P_0 (при первичном напряжении, равном номинальному); мощность потерь короткого замыкания $P_{кн}$ (при токах в обмотках, равных номинальным).

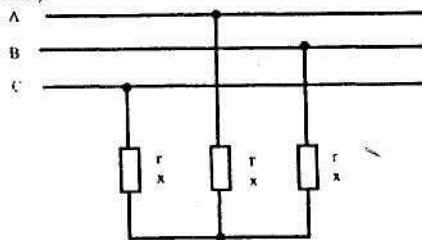


Рис. 8

Определить: а.) коэффициент трансформации; б.) фазные напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе; в.) номинальные токи в обмотках трансформатора; г.) активное сопротивление фазы первичной и вторичной обмоток; д.) к.п.д. трансформатора при $\cos \varphi_2 = 0,8$ и значениях коэффициента загрузки 0,25; 0,5; 0,75; е.) годовой эксплуатационный к.п.д. трансформатора при тех же значениях $\cos \varphi_2$ и коэффициента загрузки при условии, что трансформатор находится под нагрузкой в течении 4200 ч., а остальное время цепь вторичной обмотки разомкнута.

Указание. Принять, что в опыте короткого замыкания мощность потерь делится поровну между первичной и вторичной обмотками.

Вариант	Данные к задаче 2.3				
	S_n , кВ·А	U_{lv} , кВ	U_{2n} , В	P_0 , Вт	$P_{кн}$, Вт
1	20	6	230	180	600
2	20	10	400	220	600
3	30	6	230	250	850
4	30	10	400	300	850
5	50	6	525	350	1325
6	50	10	400	440	1325
7	100	6	525	600	2400
8	100	10	400	730	2400
9	180	6	400	1000	4000
10	180	10	525	1200	4100

Задача 2.4. Трехфазный трансформатор характеризуется следующими данными: номинальная мощность S_n ; высшее линейное напряжение U_{lv} ; низшее U_{2n} ; мощность потерь холостого хода P_0 , изменение напряжения при номинальной нагрузке и $\cos \varphi_2 = 1$ составляет $\Delta U\%$; напряжение короткого замыкания u_k ; соединение обмоток трансформатора Y/Y .

Определить: а.) фазные напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе; б.) коэффициент трансформации; в.) номинальные токи в обмотках трансформатора; г.) активное и реактивное сопротивления фазы первичной и вторичной обмоток; д.) к.п.д. трансформатора при $\cos \varphi_2 = 0,8$ и $\cos \varphi_2 = 1$ и значениях

нагрузки 0,5; 0,8. Построить векторную диаграмму для одной фазы нагруженного трансформатора при активно-индуктивной нагрузке ($\cos \varphi_2 < 1$).

Указание. Считать, что в опыте короткого замыкания мощность потерь распределяется между обмотками поровну.

Вариант	Данные к задаче 2.4					
	$S_{\text{н}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	$U_{2\text{н}}, \text{В}$	$P_{\text{о}}, \text{Вт}$	$\Delta U, \%$	$B_0, \%$
1	5	6	400	60	3,8	5
2	5	6	400	100	4	5,5
3	10	6	400	110	3,5	5
4	10	10	400	140	3,45	4,5
5	10	6	400	160	3,7	5,5
6	25	6	400	180	3,2	5
7	25	10	400	220	3,4	4,5
8	25	10	400	200	3,1	5
9	40	6	400	250	2,9	5,5
10	40	10	400	300	2,8	4,5

Задача 2.5. Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором питается от сети с линейным напряжением 380 В. Величины, характеризующие номинальный режим электродвигателя: мощность на валу $P_{2\text{н}}$; частота вращения ротора $n_{2\text{н}}$; коэффициент мощности $\cos \varphi_1$; к.п.д. $\eta_{\text{н}}$. Обмотки фаз соединены по схеме «звезда». Кратность критического момента относительно номинального $K_{\text{м}} = M_{\text{к}}/M_{\text{н}}$

Определить а) номинальный ток в фазе обмотки статора; б) число пар полюсов обмотки статора; в) номинальное скольжение; г) номинальный момент на валу ротора; д) критический момент; е) критическое скольжение, пользуясь формулой

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}$$

ж) значения моментов, соответствующие значениям скольжения; $s_{\text{к}}$; $s_{\text{к}}$; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 (по формуле п.е.); з) пусковой момент при снижении напряжения в сети на 10%. Построить механическую характеристику электродвигателя $n = f(M)$.

Вариант	Данные к задаче 2.5				
	$P_{2\text{н}}, \text{кВт}$	$n_{2\text{н}}, \text{мин}^{-1}$	$\cos \varphi_1$	$\eta_{\text{н}}, \%$	$K_{\text{м}}$
1	1,1	2800	0,87	79,5	2,2
2	1,5	2825	0,88	80,5	2,2
3	2,2	2850	0,89	83,0	2,2
4	3,0	1430	0,84	83,5	2,2
5	4,0	1430	0,85	86,0	2,2
6	5,5	1440	0,86	88,0	2,2
7	7,5	1440	0,87	88,5	2,2
8	10	960	0,89	88,0	1,8
9	13	960	0,89	88,0	1,8
10	17	960	0,90	90,0	1,8

Задача 2.6. Трехфазный асинхронный электродвигатель с фазным ротором питается от сети с линейным напряжением U . Величины, характеризующие номинальный режим электродвигателя: мощность на валу $P_{2н}$; частота вращения ротора $n_{2н}$, к.п.д. η_n ; коэффициент мощности $\cos \varphi_{1н}$. Номинальное фазное напряжение статора $U_{фн} = 220$ В. Кратность пускового тока $K_I = I_{1к}/I_{1н}$ при пуске без реостата и номинальном напряжении на зажимах статора; коэффициент мощности в этих же условиях $\cos \varphi_{1к} = 0,35$. Обмотки фаз соединены по схеме «звезда».

Определить: а) схему соединения фаз обмотки статора «звезда» или «треугольник»; б) номинальный момент на валу ротора; в) номинальный и пусковой токи электродвигателя; г) сопротивление короткого замыкания (на фазу); д) активное и реактивное сопротивления фазы обмотки статора и обмотки ротора (для ротора - приведенные значения); е) критическое скольжение. Вычислить по общей формуле электромагнитного момента асинхронного двигателя значения момента для следующих значений скольжения: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0. Построить кривую $M = f(s)$.

Указания. Принять $r_1 = r_2' = r_k/2$; $x_1 = x_2' = x_k/2$.

Вариант	Данные к задаче 2.6					
	U, В	$P_{2н}$, кВт	$n_{2н}$, мин ⁻¹	η_n %	$\cos \varphi_{1н}$	K_I
1	220	7,5	1400	82,0	0,84	7
2	380	10	1400	83,5	0,85	7
3	220	13	1400	84,5	0,86	7
4	380	17	950	84,5	0,80	6,5

5	220	22	955	85,0	0,81	6,5
6	380	30	960	87,0	0,82	6,5
7	220	40	720	87,0	0,81	5,5
8	380	55	720	88,5	0,82	5,5
9	380	75	1455	90,0	0,88	6,5
10	380	100	1460	90,5	0,88	6,5

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров. 12 изд., исправ. И доп. М.: Юрайт, 2016, 701 с (Бакалавр. Углублённый курс).
2. ГОСТ Р 52002-2003 Электротехника. Термины и определения основных понятий. Дата введения 2003-07-01.
3. Курс лекций. Электротехника и электроника. Раздел 1 [Электронный ресурс] URL: studfile.net/preview/2803798.
4. Электротехника: трёхфазные электрические цепи [Электронный ресурс]. URL: [stud. urfu.ru >... 1/Электротехника Трёхфазные...цепи.pdf](http://stud.urfu.ru/>.../1/Электротехника%20Трёхфазные...цепи.pdf)