

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЕЛЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И.А. БУНИНА»

Т.М. Боброва, Л.Н. Ипполитова,
Д.В. Кузнецов, В.В. Токарев

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Учебно-методическое
пособие

Елец – 2012

УДК 621.313
ББК 31.261
Б 72

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Елецкого государственного университета имени И.А. Бунина
от 02. 11. 2012 г., протокол № 4*

Рецензенты:

*Л.Н. Разинкова, кандидат педагогических наук, доцент
(Старооскольский филиал ФГАОУ ВПО «Белгородский
государственный национальный исследовательский университет»),*

*А.В. Сидоров, кандидат физико-математических наук, доцент
(Елец, Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина)*

Т.М. Боброва, Л.Н. Ипполитова, Д.В. Кузнецов, В.В. Токарев
Б 72 Физические основы электрических машин: учебно-методическое
пособие. – Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2012. – 89 с.

Учебно-методическое пособие содержит основные сведения о постоянном токе, тепловых действиях электрического тока, электромагнетизме и электромагнитной индукции, однофазном и трехфазном переменном токе, трансформаторах, асинхронных двигателях, машинах постоянного тока, генераторах, электропроводке. Пособие содержит методические указания к выполнению лабораторных работ, порядок выполнения работы, указания по оформлению отчёта, контрольные вопросы для проверки усвоенного материала. В методичке большое внимание уделено физическим основам действия той или иной электрической машины. Для проверки степени усвоения материала при его самостоятельной проработке приведены контрольные тестовые задания.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся на инженерных специальностях.

УДК 621.313
ББК 31.261

© Елецкий государственный
университет им. И. А. Бунина, 2012

Все неисправности в электрике и электронике
сводятся к двум вариантам...
Либо есть контакт, где его быть не должно,
либо нет контакта там, где он должен быть.
Остается мелочь - найти это место.

ВВЕДЕНИЕ

Знание физических законов и, главное умение их применять, способствовало развитию научно-технического прогресса.

В данной работе рассмотрены наиболее распространенные устройства и машины: трансформаторы, асинхронная машина, машина постоянного тока, а также различные коммутационные устройства, позволяющие защитить человека от поражения электрическим током. При постоянном росте электровооруженности труда важное значение приобретают вопросы электробезопасности в производственных и бытовых условиях.

Впервые с техническими целями трансформатор был применен П.Н. Яблочковым в 1876 г. для питания электрических свечей. Но особенно широко трансформаторы стали применяться после того, как Доливо-Добровольским была предложена трехфазная система передачи электроэнергии и разработана конструкция первого трехфазного трансформатора (1891 г.).

Самой распространенной современной электрической машиной является асинхронная. Она была изобретена М.О. Доливо-Добровольским в 1888 г. и до настоящего времени сохранила ту же конструкцию, которую ей придал изобретатель. Причины исключительно широкого распространения асинхронного двигателя (а вместе с ним и трехфазной системы) – его простота и дешевизна. Асинхронные машины малой мощности часто выполняются однофазными, для устройств, питающихся от двухпроводной сети. Такие машины находят широкое применение в бытовой технике.

Электрические машины постоянного тока (двигатели и генераторы) находят широкое применение в различных областях техники. Основное достоинство двигателей постоянного тока заключается в возможности плавного регулирования частоты вращения и получения больших пусковых моментов, что очень важно для тяговых двигате-

лей на электрическом транспорте и приводах различного технологического оборудования.

Генераторы постоянного тока входят в состав электропитания специального оборудования (радиотехнические устройства, питание электролитических ванн, зарядка аккумуляторов и т.д.).

Данное методическое пособие предназначено для изучения теоретической части курса общей физики и подготовке к выполнению лабораторных работ по ФОЭМ (физическим основам электрических машин).

Предлагаемое пособие ориентировано на студентов, обучающихся по естественнонаучному и техническому направлениям.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Система уравнений Максвелла для электромагнитного поля

Согласно представлениям теории поля всякий движущийся электрический заряд создает в окружающем пространстве магнитное поле, способное действовать на другие движущиеся электрические заряды. Электрические и магнитные поля порождаются одними и теми же источниками – электрическими зарядами, а, значит, между этими полями существует определенная связь.

В 1831 году английский физик М. Фарадей в результате настойчивых и многочисленных попыток открыл явление, которое укрепило представление о связи между электричеством и магнетизмом. Фарадей считал, что электрические и магнитные взаимодействия передаются промежуточной средой и что именно в этой среде происходят электрические и магнитные процессы. Идея Фарадея подверглась дальнейшему углублению и развитию в работах другого английского физика М. Максвелла и была превращена им в строгую математическую теорию.

В середине 19 века М. Максвелл обобщил и дополнил уравнения электрических и магнитных полей. Теория Максвелла позволяет с единой точки зрения охватить электромагнитное поле.

Система уравнений Максвелла в интегральной форме:

$$\int_L \vec{E} dl = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} dS$$
$$\oint_S \vec{D} dS = \int_V \rho dV$$
$$\oint_L \vec{H} dl = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) dS$$
$$\oint_S \vec{B} dS = 0$$

Для того, чтобы эта система уравнений была полной ее необходимо дополнить такими соотношениями, в которые входили бы величины, характеризующие индивидуальные свойства среды, в которой возбуждаются электрические и магнитные поля. Эти соотношения называются материальными соотношениями:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad \vec{j} = \gamma \vec{E}$$

где ε_0 и μ_0 — соответственно электрическая и магнитная постоянные, ε и μ , — соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости, γ — удельная проводимость вещества.

Из уравнений Максвелла следует, что

— источниками электрического поля являются либо электрические заряды, либо изменяющиеся во времени магнитные поля (ток смещения),

— источники магнитного поля отсутствуют, т.е. нет магнитных зарядов.

— магнитные поля могут возбуждаться либо движущимися электрическими зарядами (электрическими токами), либо переменными электрическими полями,

— переменное магнитное поле всегда связано с порождаемым им электрическим полем, а переменное электрическое поле всегда связано с порождаемым им магнитным, т.е. электрическое и магнитное поля неразрывно связаны друг с другом — они образуют единое электромагнитное поле.

Для стационарных полей ($\vec{E} = const$ и $\vec{B} = const$) уравнения Максвелла имеют вид

$$\oint_L \vec{E} dl = 0 \quad \oint_S \vec{D} dS = q \quad \oint_L \vec{H} dl = I \quad \oint_S \vec{B} dS = 0$$

В этом случае электрические и магнитные поля независимы друг от друга, что позволяет изучать отдельно постоянное электрическое и магнитное поля.

Используя теоремы Стокса и Гаусса, можно представить полную систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме (характеризующих поле в каждой точке пространства):

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{D} &= \rho, \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0. \end{aligned}$$

Уравнения Максвелла не симметричны относительно электрического и магнитного полей. Это связано с тем, что в природе существуют электрические заряды, но нет зарядов магнитных.

Уравнения Максвелла — наиболее общие уравнения для электрических и магнитных полей в покоящихся средах. Они играют в учении об электромагнетизме такую же роль, как законы Ньютона в механике.

Электрический ток

Практический интерес представляют явления, связанные не с покоящимся зарядом, а явления связанные с их упорядоченным движением, которое называется электрическим током. Количественной характеристикой электрического тока служат:

- сила тока – это величина заряда, переносимого через поверхность в единицу времени $I = \frac{dq}{dt}$,

- плотность тока – это вектор, численно равный силе тока dI через расположенную в данной точке, перпендикулярную к направлению движения носителей заряда, площадку dS_{\perp} , отнесенной к величине этой площадки $\vec{j} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \vec{n}$, где \vec{n} - вектор нормали к площадке dS , совпадающий с направлением вектора скорости положительных носителей заряда. Тогда сила тока через любую поверхность:

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S}.$$

Если сила тока и плотность тока не меняются во времени, то говорят, что в проводнике имеется постоянный электрический ток. Если сила тока не остается постоянной, то говорят об изменяющемся токе. Его частным случаем является переменный синусоидальный ток, называемый коротко переменный ток.

Вольт-амперная характеристика $I = f(U)$ для проводников, состояние которых остается неизменным, описывается законом Ома:

$$I = \frac{1}{R} U,$$

где R – электрическое сопротивление, зависящее от формы, материала и размера проводника. Для однородного цилиндрического проводника

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где l - длина проводника, S - площадь его поперечного сечения, ρ - удельное электрическое сопротивление (зависит от рода вещества и его состояния, в частности от температуры).

Зависимость удельного сопротивления от температуры можно охарактеризовать, если задать температурный коэффициент сопротивления вещества:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

Он дает относительное приращение сопротивления при увеличении температуры на один градус. Для многих металлов изменение α с температурой не очень велико. Если интервал изменения температуры достаточно мал, то можно считать α постоянным.

Если ρ_0 - удельное сопротивление при 0°C , а ρ - его значение при $t^\circ\text{C}$, то можно положить

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t).$$

Закон Джоуля-Ленца

Если проводник неподвижен и химических превращений в нем не совершается, то работа тока затрачивается на увеличение внутренней энергии проводника, в результате чего в проводнике выделяется количество теплоты, определяемое законом Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R t.$$

Согласно классической теории металлов электроны проводимости ведут себя подобно молекулам идеального газа. Электроны сталкиваются преимущественно не между собой, а с ионами, образующими кристаллическую решетку металла. Эти столкновения приводят к увеличению кинетической энергии ионов, переходящей во внутреннюю энергию кристаллической решетки и установлению теплового равновесия между электронным газом и кристаллической решеткой.

Согласно закону Джоуля-Ленца за время dt в элементарном объеме в виде цилиндра dV выделится тепло:

$$dQ = I^2 R dt = \rho j^2 dV dt, \quad (1)$$

где ρ - удельное сопротивление проводника, j - плотность тока. Отсюда удельная тепловая мощность:

$$Q_{y\partial} = \frac{dQ}{dVdt} = P_{y\partial} = \rho j^2. \quad (2)$$

Закон Джоуля-Ленца справедлив и для однородного участка (1), и для неоднородного участка (2).

Магнитное поле. Характеристики магнитного поля

Магнитное поле – это особый вид материи, специфической особенностью которой является действие на движущийся электрический заряд, проводники с током, тела, обладающие магнитным моментом. Магнитные поля создаются движущимися заряженными частицами или переменными электрическими полями.

Основной силовой характеристикой магнитного поля является магнитная индукция \vec{B} .

Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока на длину проводника:

$$B = \frac{F_{mtx}}{Idl}.$$

Направление силы \vec{F} , вектора индукции \vec{B} и направление тока $I\vec{dl}$ связано соотношением:

$$\vec{F} = I[\vec{dl}, \vec{B}].$$

Индукция магнитного поля, создаваемого произвольным тонким проводом, по которому течет ток, $I\vec{dl}$ в произвольной точке определяется по закону Био-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I [\vec{dl}, \vec{r}]}{4\pi r^3},$$

где \vec{r} - радиус-вектор. Единица измерения магнитной индукции 1 Тл (тесла). $1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}$.

Аналогом электрического смещения \vec{D} является напряженность магнитного поля \vec{H}

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{j},$$

где \vec{j} – намагниченность магнетика. В каждой точке магнетика намагниченность связана с напряженностью поля соотношением:

$$\vec{j} = \chi \vec{H},$$

где χ - магнитная восприимчивость вещества. Подставив выражение для \vec{j} получим

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \chi \vec{H}$$

откуда

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0(1 + \chi)} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0}.$$

Безразмерная величина $\mu = 1 + \chi$ называется относительной магнитной проницаемостью вещества или просто магнитной проницаемостью. Магнитная проницаемость вакуума $\mu = 1$, следовательно, напряженность поля в вакууме (внешнее поле)

$$\vec{H}_0 = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}.$$

В однородном и изотропном магнетике, внесенном во внешнее поле \vec{B}_0 , возникающая намагниченность \vec{j} создает внутреннее поле, равное

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{j}.$$

Результирующее поле внутри магнетика станет равным

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{j}.$$

Напряженность поля внутри магнетика:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{j} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \vec{H}_0.$$

Из последней формулы следует, что напряженность магнитного поля в магнетике совпадает с напряженностью внешнего магнитного поля.

Магнитная индукция внутри магнетика:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} = \mu_0 \mu \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \mu_0 \mu \vec{H}_0.$$

Магнитная проницаемость μ показывает во сколько раз усиливается магнитное поле в магнетике.

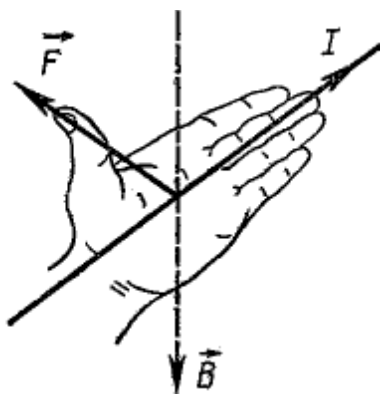


Рис. 1. Правило левой руки

Магнитным потоком или потоком вектора магнитной индукции \vec{B} сквозь площадь \vec{S} называется величина Φ :

$$\Phi = \vec{B}\vec{S} = BS\cos\alpha = B_n S,$$

где α - угол между направлением нормали \vec{n} к площадке S и направлением вектора индукции \vec{B} . Во всех электромаг-

нитных явлениях всегда приходится рассматривать магнитный поток во взаимосвязи с током, обтекающим контур, ограничивающий рассматриваемую поверхность. Считают, что положительное направление к площадке совпадает с направлением перемещения буравчика с правой резьбой, вращаемого в направлении тока. Таким образом, магнитный поток характеризуется не только величиной, но и знаком.

Действие магнитного поля на проводники с током и движущиеся заряженные частицы

Опыт показывает, что электрические токи взаимодействуют между собой. Это объясняется тем, что вокруг проводников существуют создаваемые электрическим током магнитные поля. Экспериментальные исследования и теоретические расчеты Ампера и других ученых позволили найти выражение для магнитной силы, названной силой Ампера, действующей на элемент тока $I\vec{dl}$:

$$d\vec{F} = I[\vec{dl}, \vec{B}].$$

Модуль силы Ампера вычисляется по формуле:

$$dF = IBdl\sin\alpha,$$

где α - угол между векторами \vec{dl} и \vec{B} .

Применяя закон Ампера для вычисления силы взаимодействия двух, находящихся в вакууме параллельных бесконечно длинных прямых токов, находящихся на расстоянии b друг от друга, можно получить:

$$F_{21} = I_2 B_1 = \frac{\mu_0 2I_1 I_2}{4\pi b}.$$

При одинаковом направлении токов они притягивают друг друга, а при разном – отталкивают.

Направление силы можно определить по «правилу левой руки».

Путем обобщения экспериментальных данных Х. Лоренцом было получено выражение силы, действующей на заряженную частицу, находящуюся одновременно в электрическом и магнитном полях.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}],$$

где q - заряд частицы, \vec{E} - напряженность электрического поля, \vec{B} - индукция магнитного поля.

Первое слагаемое определяет действие электрического поля на частицу. Второе – магнитного поля. Эта сила работы не совершает. Направление силы, действующей на положительную заряженную частицу, определяется по «правилу левой руки».

Электромагнитная индукция

В замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток, получивший название индукционного. Это явление получило название электромагнитной индукции.

Возникновение индукционного тока указывает на наличие в цепи электродвижущей силы (ЭДС). Эта ЭДС называется электродвижущей силой электромагнитной индукции. Она численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\xi_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Если контур, в котором индуцируется ЭДС состоит из N витков, то ξ_i будет равна сумме ЭДС, индуцируемых в каждом из витков в отдельности

$$\xi_i = -\sum \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\sum \Phi),$$

где $\sum \Phi = \Psi$ - полный магнитный поток или потокосцепление. Если поток, пронизывающий каждый из витков, одинаков, то

$$\sum \Phi = N \cdot \Psi$$

и ЭДС, индуцируемая в сложном контуре, определяется формулой

$$\xi_i = - \frac{d\Psi}{dt}$$

Вихревые токи (токи Фуко)

Индукционный ток возникает не только в линейных проводниках, но и в массивных сплошных проводниках, помещенных в переменное магнитное поле. Эти токи замкнуты в толще проводника и называются вихревыми или токами Фуко.

Токи Фуко подчиняются правилу Ленца: их магнитное поле направлено так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующему вихревые токи. Поэтому массивные проводники тормозятся в магнитном поле. Кроме того, вихревые токи вызывают сильное нагревание проводников. В электрических машинах, для того чтобы минимизировать влияние токов Фуко, сердечники трансформаторов и магнитные цепи электрических машин собирают из тонких пластин, изолированных друг от друга специальным лаком или окалиной.

Джоулево тепло, выделяемое токами Фуко, используется в индукционных металлургических печах.

Взаимодействие вихревых токов с высокочастотным магнитным полем приводит к неравномерному распределению магнитного потока по сечению магнитопроводов — вытеснение магнитного потока из объема в приповерхностные области проводника. Это явление называется магнитным скин-эффектом.

Вихревые токи возникают и в самом проводнике, по которому течет переменный ток, что приводит к неравномерному распределению тока по сечению проводника - вытеснение токов высокой частоты в приповерхностные области проводника. Это явление называется электрическим скин-эффектом.

Индуктивность контура

Электрический ток, текущий в замкнутом контуре, создает вокруг себя магнитное поле, индукция которого, по закону Био-Савара-Лапласа пропорциональна току. Поэтому сцепленный с контуром магнитный поток пропорционален току в контуре:

$$\Phi = LI,$$

где коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью контура.

Потокоцепление соленоида (полный магнитный поток сквозь соленоид): $\Psi = LI$ и

$$\Psi = N\Phi = n l B S = \mu \mu_0 n^2 l S I$$

откуда

$$L = \mu \mu_0 n^2 l S = \mu \mu_0 n^2 V$$

где N - число витков соленоида, l - его длина, S - площадь, μ - магнитная проницаемость сердечника, $V = Sl$ - объем соленоида, $n = N/l$ - число витков в единице длины.

Индуктивность контура в общем случае зависит только от геометрической формы контура, его размеров и магнитной проницаемости той среды, в которой он находится.

В этом смысле индуктивность контура — аналог электрической емкости уединенного проводника, которая также зависит только от формы проводника, его размеров и диэлектрической проницаемости среды.

Соленоид

Соленоидом называют катушку цилиндрической формы из проволоки, витки которой намотаны в одном направлении.

Магнитное поле соленоида представляет собой результат сложения полей, создаваемых несколькими круговыми токами, расположенными рядом и имеющими общую ось. Внутри длинного соленоида поле оказывается практически однородным, вне соленоида - неоднородным и сравнительно слабым. Внешнее поле соленоида подобно полю стержневого магнита имеет северный и южный полюсы и нейтральную зону.

Напряженность магнитного поля внутри длинного соленоида:

$$H = \frac{IN}{l},$$

где l - длина соленоида, N – число его витков, I – сила тока нем. Таким образом, внутри достаточно длинного соленоида напряженность магнитного поля практически везде одинакова, она направлена вдоль оси соленоида в соответствии с правилом правого винта.

Так как индуктивность соленоида или катушки определяется по формуле

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l},$$

то видно, что при наличии в нем ферромагнитного сердечника индуктивность соленоида возрастает.

Самоиндукция

При изменении силы тока в контуре будет изменяться и сцепленный с ним магнитный поток, а это, в свою очередь будет индуцировать ЭДС в этом контуре. Возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока называется самоиндукцией.

Единица индуктивности — генри (Гн): 1Гн — индуктивность такого контура, магнитный поток самоиндукции которого при токе в 1А равен 1Вб (1Гн = 1Вб/А=1В · с/А).

$$\text{Из закона Фарадея ЭДС самоиндукции } \xi_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI).$$

Если контур не деформируется и магнитная проницаемость среды не изменяется, то $L = const$ и ЭДС самоиндукции:

$$\xi_i = -L \frac{dI}{dt},$$

где знак минус, обусловленный правилом Ленца, показывает, что наличие индуктивности в контуре приводит к замедлению изменения тока в нем.

Если ток со временем возрастает, то $\xi_s < 0$, т.е. ток самоиндукции направлен навстречу току, обусловленному внешним источником, и замедляет его возрастание.

Если ток со временем убывает, то $\xi_s > 0$, т.е. ток самоиндукции имеет такое же направление, как и убывающий ток в контуре, и замедляет его убывание.

Таким образом, контур, обладая определенной индуктивностью, приобретает электрическую "инертность".

Токи при размыкании и замыкании цепи

При всяком изменении силы тока в проводящем контуре возникает ЭДС самоиндукции, в результате чего в контуре появляются дополнительные токи, называемые экстратоками самоиндукции.

Пусть в цепи сопротивлением R и индуктивностью L под действием внешней ЭДС течет постоянный ток $I_0 = \xi/R$. В момент времени $t = 0$ выключим источник тока. Возникает ЭДС самоиндукции $\xi_s = -L \frac{dI}{dt}$, препятствующая уменьшению тока. Ток в цепи определяется

законом Ома $IR = \xi_s$, или $IR = -L \frac{dI}{dt}$. Разделяем переменные:

$\frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt$, и интегрируем по I (от I_0 до I) и по t (от 0 до t):

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{Rt}{L}, \text{ или } I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где $\tau = \frac{L}{R}$ - постоянная, называемая временем релаксации — время, в течение которого сила тока уменьшается в e раз.

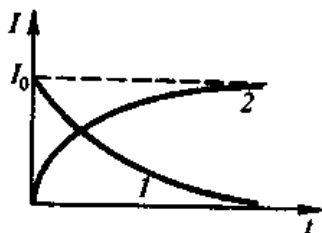


Рис. 2. Изменение силы тока в проводнике при замыкании и размыкании цепи.

Таким образом, при выключении источника тока сила тока убывает по экспоненциальному закону (а не мгновенно), рис. 2 кривая 1.

Оценим значение ЭДС самоиндукции при мгновенном увеличении сопротивления от R_0 до R :

$$I = \frac{\xi}{R_0} \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) \quad \xi_s = -L \frac{dI}{dt} = \frac{R}{R_0} \xi \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right)$$

Т.е. при резком размыкании контура ($R \gg R_0$) ЭДС самоиндукции ξ_s может во много раз превысить ξ , что может привести к пробое изоляции и выводу из строя измерительных приборов.

При замыкании цепи помимо внешней ЭДС возникает ЭДС самоиндукции $\xi_s = -L \frac{dI}{dt}$, препятствующая возрастанию тока. По зако-

ну Ома, $IR = \xi + \xi_S$, или $IR = \xi - L \frac{dI}{dt}$. Можно показать, что решение этого уравнения имеет вид:

$$I = I_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right)$$

где $I_0 = \frac{\xi}{R}$ установившийся ток (при $t \rightarrow \infty$).

Таким образом, при включении источника тока сила тока возрастает по экспоненциальному закону (а не мгновенно), рис. 2 кривая 2.

Взаимная индукция

Взаимной индукцией называется явление возбуждения ЭДС электромагнитной индукции в одной электрической цепи при изменении электрического тока в другой цепи или при изменении взаимного расположения этих двух цепей.

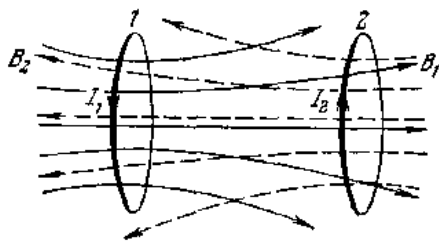


Рис. 3. Силовые линии двух расположенных рядом контуров.

Рассмотрим два неподвижных контура 1 и 2 с токами I_1 и I_2 , расположенных достаточно близко друг от друга, рис. 3. При протекании в контуре 1 тока I_1 магнитный поток пронизывает второй контур:

$$\Phi_{21} = L_{21} I_1, \text{ аналогично } \Phi_{12} = L_{12} I_2$$

Коэффициенты пропорциональности L_{21} и L_{12} равны друг другу $L_{12} = L_{21} = L$ называются взаимной индуктивностью контуров.

При изменении силы тока в одном из контуров, в другом индуцируется ЭДС:

$$\xi_{i2} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L \frac{dI_1}{dt}, \quad \xi_{i1} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L \frac{dI_2}{dt}$$

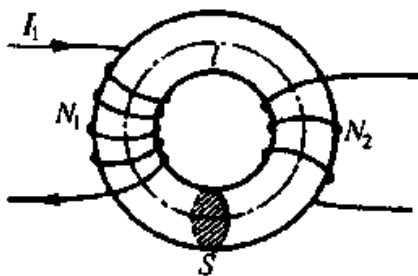


Рис. 4. Тороидальный сердечник.

Взаимная индуктивность контуров зависит от геометрической формы, размеров, взаимного расположения контуров и от магнитной проницаемости среды, окружающей контуры.

Для примера рассчитаем взаимную индуктивность двух катушек, намотанных на тороидальный сердечник (рис. 4).

Первая катушка с числом витков N_1 и током I_1 создает поле $B = \mu\mu_0 \frac{N_1 I_1}{l}$. Магнитный поток сквозь один виток второй катушки

$$\Phi_2 = BS = \mu\mu_0 \frac{N_1 I_1}{l} S,$$

где l - длина сердечника по средней линии. 11

Тогда полный магнитный поток (потокосцепление) сквозь вторичную обмотку, содержащую N_2 витков:

$$\Psi = \Phi_2 N_2 = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S I_1$$

Поскольку поток Ψ создается током I_1 , то

$$L = \frac{\Psi}{I_1} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S$$

Данное устройство является примером трансформатора.

Трансформаторы

Принцип действия трансформаторов, применяемых для повышения или понижения напряжения переменного тока, основан на явлении взаимной индукции. Переменный ток I_1 создает в первичной обмотке переменное магнитное поле. Это вызывает во вторичной обмотке появление ЭДС взаимной индукции. При этом:

$$\xi_2 = -\frac{N_2}{N_1} \xi_1$$

где N_1 и N_2 — число витков в первичной и вторичной обмотках, соответственно.

Отношение $k = \frac{N_2}{N_1}$, показывающее, во сколько раз ЭДС во вторичной обмотке трансформатора больше (или меньше), чем в первичной, называется коэффициентом трансформации.

Если $k > 1$, то трансформатор — повышающий, если $k < 1$ — понижающий.

Энергия магнитного поля

Проводник, по которому протекает электрический ток, всегда окружен магнитным полем. Магнитное поле появляется и исчезает вместе с появлением и исчезновением тока. Магнитное поле, подобно электрическому, является носителем энергии. Энергия магнитного поля равна работе, которую затрачивает ток на создание этого поля.

Рассмотрим контур индуктивностью L , по которому течет ток I . С данным контуром сцеплен магнитный поток

$$\Phi = LI.$$

При изменении тока на dI магнитный поток изменяется на

$$d\Phi = LdI.$$

Для такого изменения магнитного потока необходимо совершить работу

$$dA = Id\Phi = LI dI.$$

Тогда работа по созданию магнитного потока Φ будет равна

$$A = \int_0^I LI dI = \frac{LI^2}{2}.$$

Энергия магнитного поля, связанного с контуром,

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

На примере однородного магнитного поля внутри длинного соленоида выразим энергию магнитного поля через величины, характеризующие это поле в окружающем пространстве. Индуктивность соленоида:

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l}.$$

Отсюда:

$$W = \mu_0 \mu \frac{N^2 I^2}{l} S.$$

Магнитная индукция поля соленоида:

$$B = \frac{\mu_0 \mu N I}{l}.$$

Отсюда:

$$I = \frac{Bl}{\mu_0 \mu N}$$

По определению вектора напряженности магнитного поля

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}.$$

Используя эти соотношения получаем

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} V = \frac{BH}{2} V,$$

где $Sl=V$ — объем соленоида.

Магнитное поле длинного соленоида однородно и сосредоточено внутри него, поэтому энергия заключена в объеме соленоида и распределена в нем с объемной плотностью

$$w = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{BH}{2}.$$

Эти соотношения носят общий характер и справедливы и для неоднородных полей, но только для сред, для которых связь между \vec{B} и \vec{H} линейная (т.е. для пара- и диамагнетиков).

Выражение для объемной плотности энергии магнитного поля аналогично соответствующему выражению для объемной плотности энергии электростатического поля:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2},$$

с той разницей, что электрические величины заменены в нем магнитными.

Вращение рамки в магнитном поле

Явление электромагнитной индукции применяется для преобразования механической энергии в энергию электрического тока. Для этой цели используются генераторы, принцип действия которых рассмотрим на примере плоской рамки, вращающейся в однородном ($B = const$) магнитном поле.

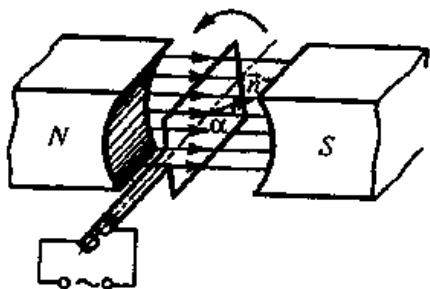


Рис. 5. Рамка в однородном магнитном поле.

Пусть рамка (рис. 5) вращается равномерно с угловой скоростью $\omega = const$.

Магнитный момент, сцепленный с рамкой площадью S , в любой момент времени t равен

$$\Phi = B_n S = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t,$$

где $\alpha = \omega t$ — угол поворота рамки в момент времени t .

При вращении рамки в ней возникает переменная ЭДС индукции:

$$\xi_i = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t.$$

Максимальное значение ЭДС индукции $\xi_{max} = BS\omega$. Тогда

$$\xi_i = \xi_{max} \sin \omega t.$$

При равномерном вращении рамки в однородном магнитном поле в ней возникает переменная ЭДС, изменяющаяся по гармоническому закону.

Для повышения ЭДС необходимо увеличить магнитный поток Φ , а для этого сопротивление магнитной цепи нужно сделать возможно меньшим. Поэтому магнитную систему генераторов делают из двух железных сердечников: наружного неподвижного кольцеобразного сердечника (статор), в пазах которого с внутренней стороны размещается обмотка и внутреннего вращающегося цилиндрического сердечника (ротор), в пазах которого находится вторая обмотка. Воздушный зазор между ними доводят до минимальных размеров. Одна из обмоток используется для создания магнитного потока, а другая является рабочей обмоткой, в которой индуцируется переменная ЭДС.

Процесс превращения механической энергии в электрическую обратим. Если по рамке, помещенной в магнитное поле, пропускать

электрический ток, то на нее будет действовать вращающий момент

$$\vec{M} = IS[\vec{n}, \vec{B}]$$

и рамка начнет вращаться. На этом принципе основана работа электродвигателей.

Если в генераторе содержится две независимые обмотки, повернутые относительно друг друга на $\pi/2$, то при вращении ротора в каждой из обмоток будет наводиться переменная ЭДС с разностью фаз $\pi/2$, т.е.

$$\begin{aligned}\xi_1 &= \xi_m \sin(\omega t), \\ \xi_2 &= \xi_m \sin(\omega t - \pi/2).\end{aligned}$$

Соединив каждую из обмоток с нагрузочным сопротивлением, получим две цепи, в каждой из которых будет протекать переменный ток. Оба эти тока будут согласованы, между ними будет существовать разность фаз. Такая система называется двухфазной системой токов или двухфазным током.

Подобным образом можно представить не два, а n переменных согласованных токов, получаемых в одном генераторе с n обмотками, обладающих определенной разностью фаз, или систему многофазных токов. Наибольшее распространение получил трехфазный ток.

Генератор трехфазного тока имеет три обмотки, смещенные друг относительно друга на $1/3$ окружности. Поэтому, если колебания ЭДС в первой обмотке выражаются формулой

$$\xi_1 = \xi_m \sin(\omega t),$$

то для ЭДС в других обмотках относительно первой имеем:

$$\xi_2 = \xi_m \sin(\omega t - 2\pi/3),$$

$$\xi_3 = \xi_m \sin(\omega t - 4\pi/3).$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Виды и характеристики проводов

Электротехнические материалы по способности проводить электрический ток разделяются на 3 группы:

1. проводниковые, по которым может проходить электрический ток (все металлы, уголь, растворы электролитов);
2. электроизоляционные или диэлектрические, по которым не может проходить электрический ток (воздух, инертные газы, минеральное масло, смолы, парафин, сухая древесина, ткани, бумага, пластмассы, стекло, керамика);
3. полупроводниковые, которые занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками.

Важнейшим электрическим свойством проводников является способность оказывать сопротивление прохождению по ним электрического тока, оно характеризуется удельным электрическим сопротивлением.

Важнейшие физические свойства металлических проводников характеризуются плотностью и точкой плавления.

При выборе и применении проводниковых металлических материалов учитываются их следующие химические свойства: стойкость против коррозии и способность соединяться сваркой или пайкой.

Электрические свойства электроизоляционных материалов характеризуются удельным объемным электрическим сопротивлением и электрической прочностью. Удельное объемное электрическое сопротивление данного вещества численно равно сопротивлению, которое оказывает куб с ребром в единицу длины, сделанный из этого вещества, току, проходящему через две противоположные грани перпендикулярно к ним. Электроизоляционные материалы обладают очень большим удельным объемным электрическим сопротивлением:

- газообразные – 10^{20} - 10^{22} Ом·м
- жидкие – 10^{16} - 10^{19} Ом·м
- твердые – 10^{12} - 10^{24} Ом·м

Поэтому электрический ток практически не проходит через диэлектрики.

Под действием высокого напряжения, приложенного к электроизоляционному материалу определенной толщины, по нему может пройти большой ток. Это явление называется электрическим пробоем (например, грозовой разряд). Электрической прочностью называется величина, численно равная напряжению, при котором может быть пробит электроизоляционный материал толщиной в единицу длины. Она определяется опытным путем

$$E_{np} = \frac{U}{h},$$

где E_{np} - электрическая прочность, В/мм, U - напряжение, В, h - толщина образца, мм.

Физико-механические свойства электроизоляционных материалов характеризуются:

- плотностью,
- смачиваемостью,
- гигроскопичностью,
- влагопроницаемостью,
- нагревостойкостью,
- морозостойкостью,
- вязкостью,
- твердостью,
- хрупкостью,
- пределом прочности на растяжение, изгиб и удар.

Виды проводов:

1. Установочные провода. Применяются для монтажа электрических проводок. Токоведущая часть провода называется жилой. Жилы делают из меди, алюминия или стали. Они имеют стандартные сечения в мм²: 0,5, 0,75, 1, 1,5, 2,5, 4, 6, 10, 16, 25, 35, 50, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300, 400. Жилы покрыты изолирующей оболочкой. Каждый провод рассчитан на допустимую длительную токовую нагрузку, т.е. на ток, который проходя длительное время по проводам, не вызывает их перегрева. Величина этого тока и сечение жилы должны соответствовать друг другу (таблица 1).
2. Обмоточные провода. Применяют для изготовления обмоток (катушек) трансформаторов, электрических приборов и машин. Их выпускают одножильными (жила может состоять из не-

скольких тонких проволочек), причем жилы изолированы друг от друга. Жилы обмоточных проводов изготавливают, главным образом, из меди, имеющей небольшое сечение. Поэтому обмоточные провода различают не по сечению, а по диаметру жилы и толщине слоя изоляции.

Расчет проводов

Электрические проводки должны соответствовать требованиям экономичности, безопасности и надежности. Поэтому важно правильно рассчитать длину и сечение проводов.

Длину провода рассчитывают по монтажной схеме. Измеряют расстояния между соседними местами расположения щитков, розеток, выключателей, ответвительных коробок и т.п. К длине каждого отрезка прибавляют не менее 100 мм для учета необходимости присоединения проводов.

Сечение провода рассчитывают по потере напряжения и допустимой длительной токовой нагрузке. Если рассчитанные значения оказываются неодинаковы, то за окончательный результат принимают величину большего сечения.

Потеря напряжения обусловлена падением напряжения в соединительных проводах. Она не должна превышать 2-5% номинального напряжения источника питания. Сечение проводов по потере напряжения рассчитывают при проектировании электрических сетей промышленных предприятий, крупных жилых и общественных зданий. При расчете небольших сетей (например, отдельных помещений) потерей напряжения в проводах можно пренебречь, т.к. она очень мала.

Для расчета проводов по допустимой длительной токовой нагрузке необходимо знать номинальный ток, который должен проходить по проектируемой проводке. Зная номинальный ток можно найти сечение по таблице 1. Например, номинальный ток равен 50 А, тогда сечение медной жилы провода должно быть 6 мм². Если номинальный ток заранее неизвестен его можно рассчитать по формуле:

$$I_H = \frac{P_p}{U_H},$$

где I_H - номинальный ток, А, P_p - расчетная мощность, т.е. фактическая мощность одного или группы приемников Вт, U_H - номинальное напряжение В.

Таблица 1. Допустимые длительные токовые нагрузки

Сечение жилы, мм ²	Токовая нагрузка, А	
	Медные жилы	Алюминиевые жилы
0,5	11	-
0,75	15	-
1	17	-
1,5	23	-
2,5	30	24
4	41	32
6	50	39
10	80	55
16	100	80
25	140	105
35	170	130
50	215	165

Короткие замыкания в электропроводке чаще всего происходят из-за нарушения изоляции токопроводящих частей в результате механического повреждения, старения, воздействия влаги и агрессивных сред, а также неправильных действий людей. При возникновении короткого замыкания возрастает сила тока, а количество выделяющейся теплоты, как известно, пропорционально квадрату тока. Так, если при коротком замыкании ток увеличится в 20 раз, то выделяющееся при этом количество тепла возрастет примерно в 400 раз.

При перегрузке электропроводок также возникает аварийный режим. Из-за неправильного выбора, включения или повреждения потребителей суммарный ток, проходящий в проводах, превышает номинальное значение, т. е. происходит повышение плотности тока (перегрузка). Например, при прохождении тока в 40 А через последовательно соединенные три куска провода одинаковой длины, но различного сечения — 10; 4 и 1 мм² плотность его будет различна: 4, 10 и 40 А/мм². В последнем куске самая высокая плотность тока, и соответственно, самые высокие потери мощности. Провод сечением 10 мм² слегка нагреется, температура провода сечением 4 мм² достигнет допустимой, а изоляция провода сечением 1 мм² просто сгорит.

Основное отличие короткого замыкания от перегрузки заключается в том, что при коротком замыкании нарушение изоляции

является причиной аварийного режима, а при перегрузке — его следствием. При определенных обстоятельствах перегрузка проводов и кабелей в связи с большей длительностью аварийного режима более пожароопасна, чем короткое замыкание.

На электроустановочных устройствах (розетках, выключателях, патронах и т. д.) указаны предельные значения токов, напряжений, мощности, а на зажимах, разъемах и других изделиях, кроме того, наибольшие сечения присоединяемых проводников. Для безопасного пользования этими устройствами необходимо уметь расшифровывать эти надписи. Например, на выключателе нанесено «6,3 А; 250 В», на патроне — «4 А; 250 В; 300 Вт», а на удлинителе-разветвителе — «250 В; 6,3 А», «220 В. 1300 Вт», «127 В, 700 Вт». «6,3 А» предупреждает о том, что ток, проходящий через выключатель, не должен превышать 6,3 А, иначе выключатель перегреется. Для любого меньшего тока выключатель годится, так как чем меньше ток, тем меньше нагревается контакт. Надпись «250 В» указывает, что выключатель может применяться в сетях напряжением не выше 250 В. Если умножить 4 А на 250 В, то получится 1000, а не 300 Вт. Как связать вычисленное значение с надписью? Надо исходить из мощности. При напряжении в сети 220 В допустимый ток: 1,3 А (300:220); при напряжении 127 В — 2,3 А (300—127). Току 4 А соответствует напряжение 75 В (300:4). Надпись «250 В; 6,3 А» указывает, что устройство предназначено для сетей напряжением не более 250 В и для тока не более 6,3 А. Умножая 6,3 А на 220 В, получаем 1386 Вт (округленно 1300 Вт). Умножая 6,3 А на 127 В, получаем 799 Вт (округленно 700 Вт). Возникает вопрос: не опасно ли так округлять? Не опасно, так как после округления получились меньшие значения мощности. Если мощность меньше, то меньше нагреваются контакты.

При протекании через контактное соединение электрического тока из-за переходного сопротивления на контактном соединении падает напряжение, мощность и выделяется энергия, которая вызывает нагрев контактов. Чрезмерное увеличение тока в цепи или возрастание сопротивления ведет к дальнейшему повышению температуры контакта и подводных проводов, что может вызвать пожар. Для отвода тепла от контактов и рассеивания его в окружающую среду изготавливают контакты определенной массы и поверхности охлаждения. Особое внимание уделяют местам соединения проводов и подклю-

ния их к контактам вводных устройств электроприемников. На съемных концах проводов применяют наконечники различной формы и специальные зажимы. Надежность контакта обеспечивается обычными шайбами, пружинящими и с бортиками. Через 3—3,5 года сопротивление контакта увеличивается примерно в 2 раза. Значительно увеличивается сопротивление контактов и при коротком замыкании в результате краткого периодического воздействия тока на контакт. Испытания показали, что наибольшую стабильность при воздействии неблагоприятных факторов имеют контактные соединения с упругими пружинящими шайбами.

Электрические предохранители

Плавкие предохранители предназначены для обеспечения нормальной работы потребителей электроэнергии при длительном прохождении по ним номинального тока и немедленно отключать их при коротком замыкании.

Предохранители выбирают с учетом следующих обстоятельств:

1) номинальный ток плавкой вставки должен удовлетворять требованию $I_{вст} \geq I_n$,

2) соотношение номинального тока плавкой вставки и пускового тока электроприемника должно отвечать условию $I_{вст} \geq \frac{I_{пуск}}{2,5}$,

3) каждый предохранитель должен срабатывать лишь тогда, когда произойдет короткое замыкание на участке цепи, который он защищает, т.е. предохранители должны работать селективно (избирательно).

Предохранители при длительной эксплуатации изменяют свои характеристики - "стареют". Поэтому их необходимо периодически заменять новыми. Обслуживание предохранителей сводится к контролю за состоянием контактных соединений и к замене перегоревших плавких вставок запасными заводского изготовления. На практике плавкую вставку часто заменяют медной проволокой, которую укрепляют на наружной поверхности патрона, - так называемые "жучки". При перегорании "жучка" может произойти разрушение фарфоровых предохранителей, а также нагрев деталей предохранителей, в результате может возникнуть пожар. Использование некалиброванной медной проволоки вместо плавкой вставки недопустимо и с точки зрения

безопасности обслуживания предохранителей, так как при случайном ее перегорании во время осмотра предохранителя легко получить травму глаз или ожог руки.

Коммутационная аппаратура

Классификация:

1) Аппараты, которые служат преимущественно для включения и отключения главных цепей в системах, генерирующих электрическую энергию и передающих ее потребителю. Они называются коммутационными аппаратами распределительных устройств. Эти аппараты производят включение или отключение цепи. У некоторых аппаратов автоматическое срабатывание осуществляется при воздействии на их вспомогательную электрическую цепь, замыкаемую или размыкаемую с помощью других автоматических аппаратов — реле.

2) Аппараты, осуществляющие защиту и управление работой генераторов, трансформаторов, линий передачи и приемников путем воздействия на разные вспомогательные цепи.

3) Аппараты управления, осуществляющие управление работой приемников электрической энергии, например: пуск, регулирование числа оборотов, торможение, реверсирование двигателей. К аппаратуре управления относятся, например: контакторы, пускатели, контроллеры, реостаты, реле, осуществляющие защиту и управление работой электропривода.

4) Аппараты, специально предназначенные для автоматизации технологических процессов. К ним относятся датчики, которые создают в цепях управления сигналы, соответствующие определенным параметрам протекающего технологического процесса, а также аппараты, которые преобразуют эти сигналы, вырабатывают, осуществляют, контролируют программу, определяющую желательный ход технологического процесса, и направляют сигналы аппаратам управления, которые управляют электродвигателями исполнительных механизмов.

Контакторы переменного тока с замыкающими главными контактами, рассчитанные на малую мощность, и контакторы на большую мощность, имеющие встроенную тепловую защиту от перегрузок, называются магнитными пускателями. Магнитные пускатели использу-

ют для местного и дистанционного включения и выключения электродвигателей и других токоприемников, а также для защиты от перегрузок или самопроизвольного включения после снятия напряжения. Реверсивные (сдвоенные) магнитные пускатели предназначены для изменения направления вращения ротора двигателя. В них имеется механическая или электрическая блокировка от одновременного включения.

Пускатель электромагнитный — это низковольтное электромагнитное (электромеханическое) комбинированное устройство распределения и управления предназначенное для пуска и разгона электродвигателя до номинальной скорости, обеспечения его непрерывной работы, отключения питания и защиты электродвигателя и подключенных цепей от рабочих перегрузок. Пускатель представляет собой контактор, комплектованный дополнительным оборудованием: тепловым реле, дополнительной контактной группой или автоматом для пуска электродвигателя, плавкими предохранителями. Наибольшее распространение получили магнитные пускатели серий ПАЕ, ПМ, ПМА, ПМЕ, ПМЛ.

Магнитные пускатели обеспечивают нулевую защиту, т.е. при исчезновении напряжения или его снижении до 50—60% от номинального катушка не удерживает магнитную систему пускателя, и силовые контакты размыкаются. При восстановлении напряжения токоприемник остается отключенным. Это исключает возможность аварий, связанных с самопроизвольным пуском электродвигателя или другой электроустановки. Пускатели с тепловыми реле осуществляют также защиту электроустановки от длительных перегрузок. Реверсивные пускатели наряду с пуском, остановкой и защитой электродвигателя изменяют направление его вращения. В магнитные пускатели встраиваются тепловые реле ТРН (двухполюсные) и ТРП (однополюсные). Они срабатывают под влиянием протекающего по ним тока перегрузки электродвигателя и отключают его от сети.

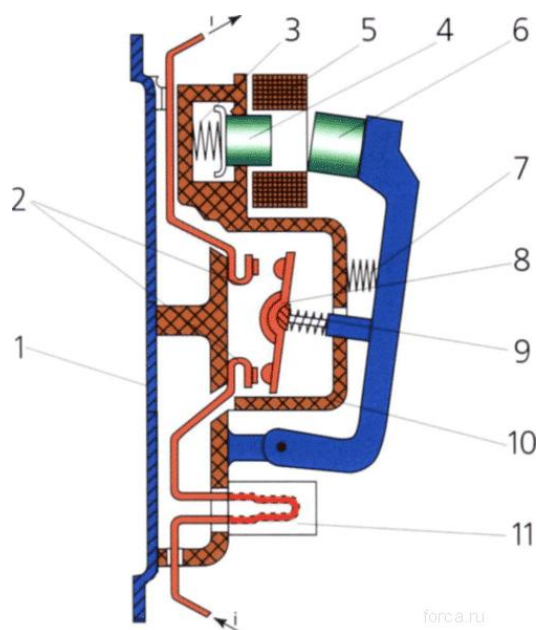


Рис. 6. Магнитный пускатель.

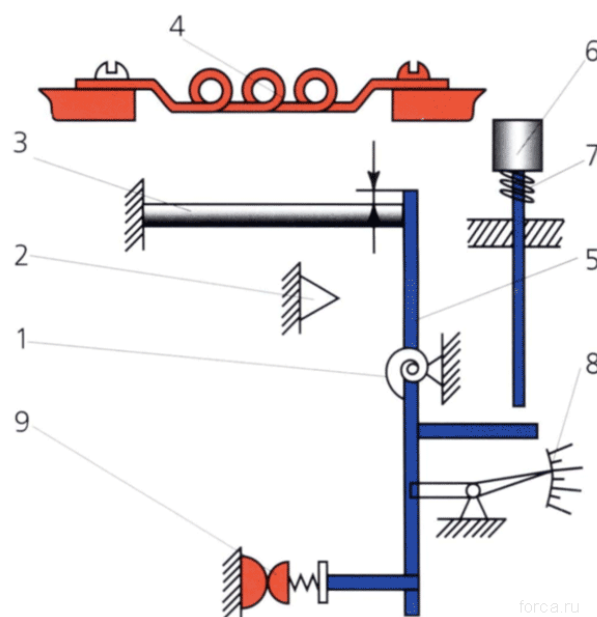


Рис. 7. Тепловое реле.

Устройство магнитного пускателя (рис. 6): 1 - основание; 2 - неподвижные контакты; 3 - пружина; 4 - магнитный сердечник; 5 - катушка; 6 - якорь; 7 - возвратная пружина; 8 - контактный мостик; 9 - пружина; 10 - дугогасительная камера; 11 - нагревательный элемент.

Принцип действия пускателя заключается в следующем: при включении пускателя по катушке проходит электрический ток, сердечник намагничивается и притягивает якорь, при этом главные контакты замыкаются, по главной цепи протекает ток. При отключении пускателя катушка обесточивается, под действием возвратной пружины якорь возвращается в исходное положение, главные контакты размыкаются. При отключении магнитного пускателя вследствие перебоев в электроснабжении размыкаются все его контакты, в том числе и вспомогательные. При появлении напряжения в сети пускатель не включается до тех пор, пока не будет нажата кнопка "Пуск". То же происходит, если напряжение в сети снижается до 50-60% номинального.

Если электродвигатель включается рубильником, пакетным выключателем или контроллером, то при перебое в электроснабжении и остановке двигателя схема не нарушится, при восстановлении напряжения двигатель самопроизвольно включится в сеть. Такой самопроизвольный пуск двигателя может явиться причиной аварии или несча-

стного случая. При выборе магнитных пускателей прежде всего необходимо обращать внимание на наибольшую допустимую мощность электродвигателя, работой которого будет управлять пускатель. Если магнитный пускатель управляет работой двигателя большей мощности, чем указано в паспорте пускателя, то контактная система пускателя быстро выйдет из строя. Кроме того, необходимо обращать внимание на напряжение, указанное на втягивающей катушке. Если подать напряжение большее, чем номинальное напряжение катушки, то последняя сгорит при первом же включении магнитного пускателя.

Автоматические выключатели (автоматы) предназначены для включения и отключения асинхронных электродвигателей и других приемников электроэнергии, а также для защиты их от токов перегрузки и короткого замыкания.

Автоматы обеспечивают одновременное отключение всех трех фаз в случае возникновения аварийных ситуаций. В рабочем режиме включение и отключение производится вручную; в аварийном режиме они отключаются автоматически электромагнитным или тепловым расцепителем. Важной составной частью автомата является расцепитель, который контролирует заданный параметр защищаемой сети и воздействует на расцепляющее устройство, отключающее автомат. Наибольшее распространение получили расцепители следующих типов:

- электромагнитные для защиты от токов КЗ;
- тепловые для защиты от перегрузок;
- комбинированные.

Наибольшее распространение в электроустановках получили автоматические выключатели серий А 3100, А 3700, АЕ 2046, АЕ 2056, АП 50, ВА 5135, ВА 5139, ВА 5237, ВА 5735.

Электромагнитный расцепитель состоит из катушки с подвижным сердечником и возвратной пружины. При протекании по катушке тока короткого замыкания сердечник мгновенно втягивается и воздействует на отключающую рейку механизма свободного расцепления.

Устройство теплового реле (рис. 7): 1 - пружина; 2 - упор; 3 - биметаллическая пластина; 4 - нагревательный элемент; 5 - защелка; 6 - кнопка; 7 - пружина; 8 - регулировочный рычаг; 9 - контакты

Биметаллическая пластина теплового реле состоит из двух пластин, одна из которых имеет больший температурный коэффициент

линейного расширения, другая — меньший. Если закрепить неподвижно такую пластину и нагреть, то произойдет изгиб пластины в сторону материала с меньшим коэффициентом линейного расширения. Широкое распространение в тепловых реле получили материалы инвар и немагнитная или хромоникелевая сталь. Нагрев биметаллического элемента теплового реле может производиться за счет тепла, выделяемого в пластине током нагрузки. Очень часто нагрев биметалла производится от специального нагревателя, по которому протекает ток нагрузки. Прогибаясь, биметаллическая пластина своим свободным концом воздействует на контактную систему теплового реле.

УЗО и принцип его работы

Принцип работы УЗО основан на измерении баланса токов между входящими в него токоведущими проводниками с помощью дифференциального трансформатора тока. Если баланс токов нарушен, то УЗО немедленно размыкает все входящие в него контактные группы, отключая, таким образом неисправную нагрузку. УЗО измеряет алгебраическую сумму токов, протекающих по контролируемым проводникам (двум для однофазного УЗО, четырем для трехфазного и т. д.): в нормальном состоянии ток, «втекающий» по одним проводникам, должен быть равен току, «вытекающему» по другим, то есть сумма токов, проходящих через УЗО равна нулю (точнее, сумма не должна превышать допустимое значение). Если же сумма превышает допустимое значение, то это означает, что часть тока проходит мимо УЗО, то есть контролируемая электрическая цепь неисправна — в ней имеет место утечка.

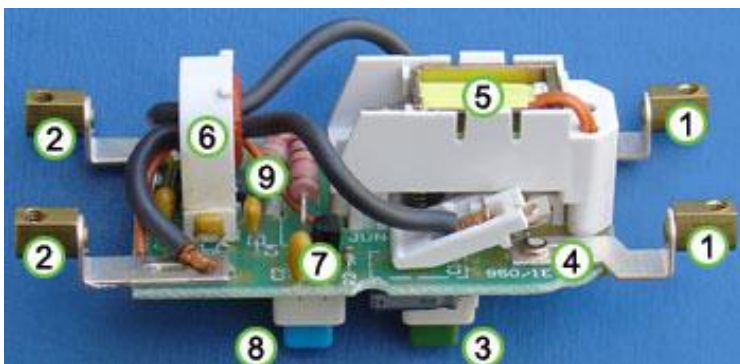


Рис. 8. Устройство УЗО.

С точки зрения электробезопасности УЗО принципиально отличаются от предохранителей тем, что УЗО предназначены именно для защиты от поражения электрическим током, поскольку они срабаты-

вают при утечках тока значительно меньших, чем предохранители (обычно от 2 ампер и более для бытовых предохранителей, что во много раз превышает смертельное для человека значение). УЗО должны срабатывать за время не более 25-40 мс, то есть до того, как возникнет поражение электрическим током.

На рисунке 8 показано внутреннее устройство одного из типов УЗО. Данное УЗО предназначено для установки в разрыв шнура питания, его номинальный ток 13 А, отключающий дифференциальный ток 30 мА.

Фазный и нулевой проводники от источника питания подключаются к контактам (1), нагрузка УЗО подключается к контактам (2). При нажатии кнопки (3) контакты (4) (а также еще один контакт, скрытый за узлом (5)) замыкаются, и УЗО пропускает ток. Соленоид (5) удерживает контакты в замкнутом состоянии после того, как кнопка отпущена. Катушка (6) на тороидальном сердечнике является вторичной обмоткой дифференциального трансформатора тока, который окружает фазный и нулевой проводники. Проводники проходят сквозь тор, но не имеют электрического контакта с катушкой. В нормальном состоянии ток, текущий по фазному проводнику, точно равен току, текущему по нулевому проводнику, однако эти токи противоположны по направлению. Таким образом, токи взаимно компенсируют друг друга и в катушке дифференциального трансформатора тока ЭДС отсутствует. Любая утечка тока из защищаемой цепи на заземленные проводники (например, прикосновение человека, стоящего на мокром полу, к фазному проводнику) приводит к нарушению баланса в трансформаторе тока: через фазный проводник «втекает больше тока», чем возвращается по нулевому (часть тока утекает через тело человека, то есть помимо трансформатора). Несбалансированный ток в первичной обмотке трансформатора тока приводит к появлению ЭДС во вторичной обмотке. Эта ЭДС сразу же регистрируется следящим устройством (7), которое отключает питание соленоида (5). Отключенный соленоид больше не удерживает контакты (4) в замкнутом состоянии, и они размыкаются под действием силы пружины, обесточивая неисправную нагрузку. Устройство спроектировано таким образом, что отключение происходит за доли секунды, что значительно снижает тяжесть последствий от поражения электрическим током. Кнопка проверки (8) позволяет проверить работоспособность устрой-

ства путем пропускания небольшого тока через оранжевый тестовый провод (9). Тестовый провод проходит через сердечник трансформатора тока, поэтому ток в тестовом проводе эквивалентен нарушению баланса токонесущих проводников, то есть УЗО должно отключиться при нажатии на кнопку проверки.

Электромеханические УЗО производит ряд ведущих европейских фирм - Siemens, ABB, Schupa, Legrand, Merlin-Gerin и др. В России наибольшее распространение получили электромеханические устройства - АСТРО*УЗО, производимые предприятием - ОАО "Технопарк-Центр". Основными техническими параметрами УЗО являются: Номинальное напряжение (U_n) - действующее значение напряжения, при котором обеспечивается работоспособность УЗО: $U_n = 220, 380$ В. Номинальный ток нагрузки (I_n) - значение тока, которое УЗО может пропускать в продолжительном режиме работы: $I_n = 16; 25; 40; 63; 80$ А. Номинальный отключающий дифференциальный ток ($I_{\Delta n}$) - значение дифференциального тока, которое вызывает отключение УЗО при заданных условиях эксплуатации.

Трехфазная цепь

Трехфазная система – это совокупность трех однофазных электрических цепей переменного тока (называемых фазами), в которых действуют три переменных напряжения одинаковой частоты, сдвинутых по фазе друг относительно друга. Наиболее распространены симметричные трехфазные системы, напряжения в которых синусоидальные, равны по величине и имеют сдвиг фаз, равный 120° .

Трехфазная цепь состоит из трехфазного генератора, соединительных проводов и приемников или нагрузки, которые могут быть однофазными или трехфазными. Трехфазный генератор представляет собой синхронную машину. На статоре генератора размещена обмотка, состоящая из трех частей или фаз, пространственно смещенных относительно друг друга на 120° . ЭДС в неподвижных обмотках статора индуцируются в результате пересечения их витков магнитным полем, создаваемым током обмотки возбуждения вращающегося ротора. При вращении ротора с равномерной скоростью в обмотках фаз статора индуцируются периодически изменяющиеся синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но отличающиеся вследствие пространственного сдвига друг от друга по фазе на 120° .

Трехфазная система называется электрически несвязанной, если отдельные фазы представляют собой независимые электрические цепи, и электрически связанной, если ее отдельные фазы электрически соединены между собой. Практическое применение имеют электрически связанные трехфазные системы, образованные (в простейшем случае) фазными обмотками трехфазного генератора, тремя приемниками электроэнергии (фазами нагрузки) и соединительными (линейными) проводами. Если фазные обмотки генератора и фазы нагрузки соединены звездой, то трехфазная цепь, кроме линейных проводов, может включать нейтральный (нулевой) провод, соединяющий нейтральные точки генератора и нагрузки. Наличие нейтрального провода уменьшает взаимное влияние режимов работы фаз трехфазной цепи и обеспечивает возможность подключения к трехфазной цепи однофазной нагрузки.

Напряжения между линейными проводами и протекающие по этим проводам токи называются линейными; токи, протекающие по фазным обмоткам генератора и фазам нагрузки, а также напряжения на них — фазными. В общем случае линейные токи и напряжения отличаются от соответствующих фазных.

На практике широкое распространение получили трехфазные цепи с нейтральными проводами при напряжениях $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$; $U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}$ или $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$; $U_{\text{ф}} = 127 \text{ В}$.

Нейтральный провод необходим для выравнивания фазных напряжений нагрузки, когда сопротивления этих фаз различны. По этой причине никогда не ставят предохранитель в нейтральный провод, так как перегорание предохранителя может вызвать недопустимые перенапряжения на отдельных фазах.

Благодаря нейтральному проводу, каждая фаза нагрузки оказывается включенной на фазное напряжение генератора, которое практически не зависит от величины тока нагрузки, так как внутреннее падение напряжения в фазе генератора незначительно. Поэтому напряжение на каждой фазе нагрузки будет практически неизменным при изменениях нагрузки.

Если сопротивления фаз нагрузки будут равными по величине и однородными, то нейтральный провод не нужен. Примером такой нагрузки являются симметричные трехфазные токоприемники.

Однофазные потребители электроэнергии могут получить питание и от трехфазного источника. При этом обязательно используется четырехпроводная линия (3 фазных провода и один нейтральный), а однофазные потребители подключаются одним полюсом к фазному проводу, другим – к нейтральному.

Чтобы образовать из независимых однофазных систем единую трехфазную систему, необходимо определенным образом электрически соединить отдельные фазы. Существует два основных способа соединения: звездой и треугольником (рис. 9).

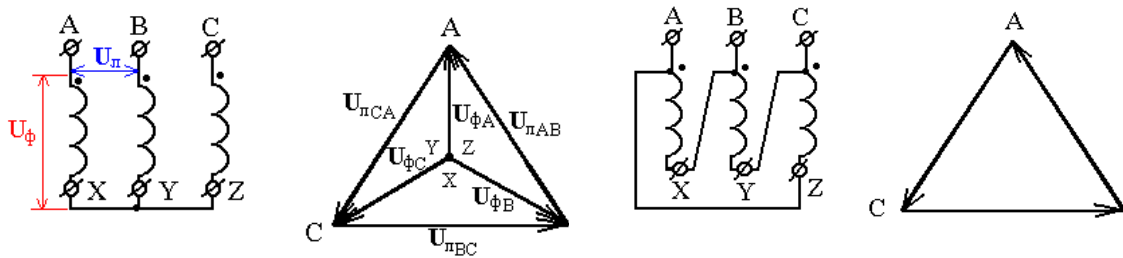


Рис. 9. Способы соединения

а) звездой

б) треугольником

Активной мощностью трехфазной системы называют сумму активных мощностей ее отдельных фаз

$$P = P_A + P_B + P_C = I_{\phi A} U_{\phi A} \cos \varphi_A + I_{\phi B} U_{\phi B} \cos \varphi_B + I_{\phi C} U_{\phi C} \cos \varphi_C.$$

При симметричной нагрузке мощности отдельных фаз равны между собой, а общая мощность, а общая мощность определяется как

$$P = 3 I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi.$$

На практике мощность трехфазной системы чаще выражают через линейные, а не через фазные токи и напряжения. Фазовые и линейные значения напряжения (тока) связаны между собой следующими соотношениями:

а) при соединении звездой: $U_{\pi} = \sqrt{3} U_{\phi}$, $I_{\pi} = I_{\phi}$

б) при соединении треугольником: $U_{\pi} = U_{\phi}$, $I_{\pi} = \sqrt{3} I_{\phi}$

Отсюда при любом типе соединения справедливо соотношение:

$$I_{\pi} U_{\pi} = \sqrt{3} I_{\phi} U_{\phi}.$$

Для трехфазной системы также справедливы следующие соотношения для а) полной мощности $S = \sqrt{3} U_{\pi} I_{\pi}$, Вт

б) активной мощности $P = \sqrt{3} U_{\pi} I_{\pi} \cos \varphi$, В·А

в) реактивной мощности $Q = \sqrt{3} U_{\Gamma} I_{\Gamma} \sin \varphi$, ВАр

Существует несколько методов измерения мощности трехфазной системы, у каждого из них своя область применения. Для измерения мощности используются в основном однофазные ваттметры электродинамической системы. Они содержат 2 обмотки – токовую, которая включается последовательно с объектом измерения, и обмотку напряжения, включаемую параллельно.

Трехфазные асинхронные двигатели

Асинхронные машины относятся к машинам переменного тока, питаются синусоидальным током и преимущественно преобразуют энергию переменного тока в механическую энергию. Основное применение нашли в качестве двигателей.

Асинхронный электродвигатель имеет две основные части – статор и ротор. Статором называется неподвижная часть машины. Вращающаяся часть машины называется ротором.

В зависимости от конструкции ротора асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым и с фазным роторами.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором является самым распространенным из электрических двигателей, применяемых в промышленности. Устройство асинхронного двигателя следующее. На неподвижной части двигателя (статоре) размещается трехфазная обмотка, питаемая трехфазным током. Начала и концы трех фаз этой обмотки выводятся на общий щиток, укрепленный снаружи на корпусе двигателя. Собранный сердечник статора укрепляют в чугунном корпусе двигателя. Вращающуюся часть двигателя (ротор) собирают также из отдельных листов стали. В пазы ротора закладывают медные стержни, которые с двух сторон припаивают к медным кольцам. Таким образом, все стержни оказываются замкнутыми с двух сторон накоротко. Если представить себе отдельно обмотку такого ротора, то она по внешнему виду будет напоминать «беличье колесо». В настоящее время у всех двигателей мощностью до 100 кВт «беличье колесо» делается из алюминия путем заливки его под давлением в пазы ротора. Вал вращается в подшипниках, закрепленных в подшипниковых щитах. Щиты при помощи болтов крепятся к корпусу двигателя. На один конец вала ротора насаживается шкив для передачи вращения исполнительным механизмам.

Устройство статора асинхронного двигателя с фазным ротором и его обмотка не отличаются от устройства статора двигателя с короткозамкнутым ротором. Различие между этими двигателями заключается в устройстве ротора. Фазный ротор имеет три фазные обмотки, соединенные между собой звездой (реже треугольником). Концы фазных обмоток ротора присоединяют к трем медным кольцам, укрепленным на валу ротора и изолированным как между собой, так и от стального сердечника ротора, вследствие чего этот двигатель получил также название двигателя с контактными кольцами. Три кольца жестко насажены на вал ротора (через изоляционные прокладки). На кольца накладываются щетки, которые размещены в щеткодержателях, укрепленных на одной из подшипниковых крышек. Щетки, скользящие по поверхности колец ротора, все время имеют с ними хороший электрический контакт и соединены, таким образом, с обмотками ротора. Щетки соединены с набором сопротивлений используемых для регулировки скорости вращения ротора.

Неподвижная часть асинхронного двигателя – статор имеет трехфазную обмотку, необходимую для получения вращающегося магнитного поля (рис. 10). Частота вращения магнитного поля может быть рассчитана по формуле

$$n_1 = f \cdot 60 / p,$$

где f – частота (50 Гц), p – число пар полюсов на фазу. Вращающееся поле статора пересекает проводники (стержни) обмотки ротора и наводит в них э. д. с. Но так как обмотка ротора замкнута, то в стержнях возникают токи. Взаимодействие этих токов с полем статора создает на проводниках обмотки ротора электромагнитные силы F , направление которых определяется по правилу «левой руки». Силы F стремятся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Совокупность сил, приложенных к отдельным проводникам, создает на роторе электромагнитный момент M , приводящий его во вращение со скоростью n_2 . Вращение ротора через вал передается исполнительному механизму.

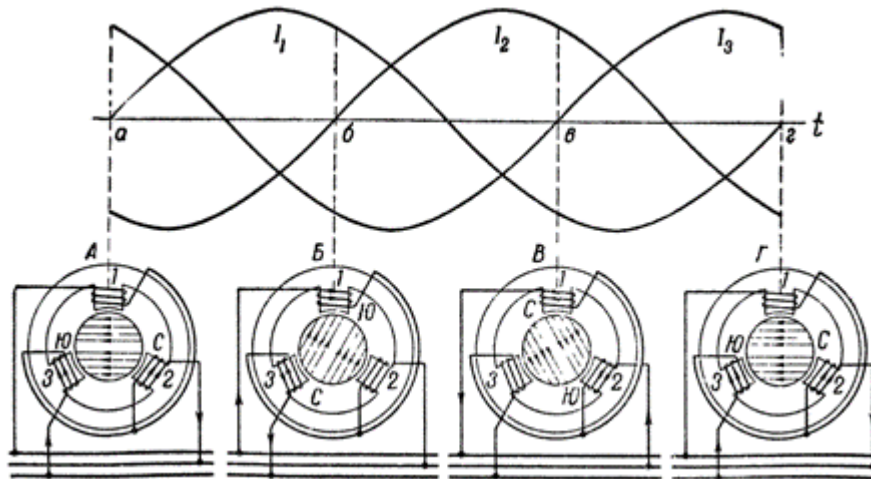


Рис. 10. Формирование вращающегося магнитного поля

Таким образом, электрическая энергия, поступающая в обмотку статора из сети, преобразуется в механическую.

Направление вращения магнитного поля статора, а следовательно, и направление вращения ротора, зависит от порядка следования фаз напряжения, подводимого к обмотке статора. При необходимости изменить направление вращения ротора асинхронного двигателя следует поменять местами любую пару проводов, соединяющих обмотку статора с сетью. Например, порядок следования фаз АВС заменить порядком СВА. Скорость вращения ротора n_2 асинхронного двигателя всегда меньше скорости вращения поля n_1 , так как только в этом случае возможно наведение э.д.с. в обмотке ротора. Если скорость вращения ротора превышает скорость вращения магнитного поля, то асинхронный двигатель работает в режиме генератора. Разность скоростей ротора и вращающегося поля статора характеризуется величиной, называемой скольжением,

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Часто скольжение выражается в процентах:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%.$$

Скольжение асинхронного двигателя может изменяться в пределах от 0 до 1. При этом $S=0$ соответствует режиму холостого хода, когда ротор двигателя не испытывает противодействующих моментов, а $S=1$ соответствует режиму короткого замыкания, когда противодействующий момент двигателя превышает вращающий момент и поэтому

ротор двигателя неподвижен ($n_2=0$). Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, называется номинальным скольжением. Так, например, для двигателей нормального исполнения мощностью от 1 до 1000 кВт номинальное скольжение приблизительно составляет соответственно 0,01-0,06, т.е. 1-6%.

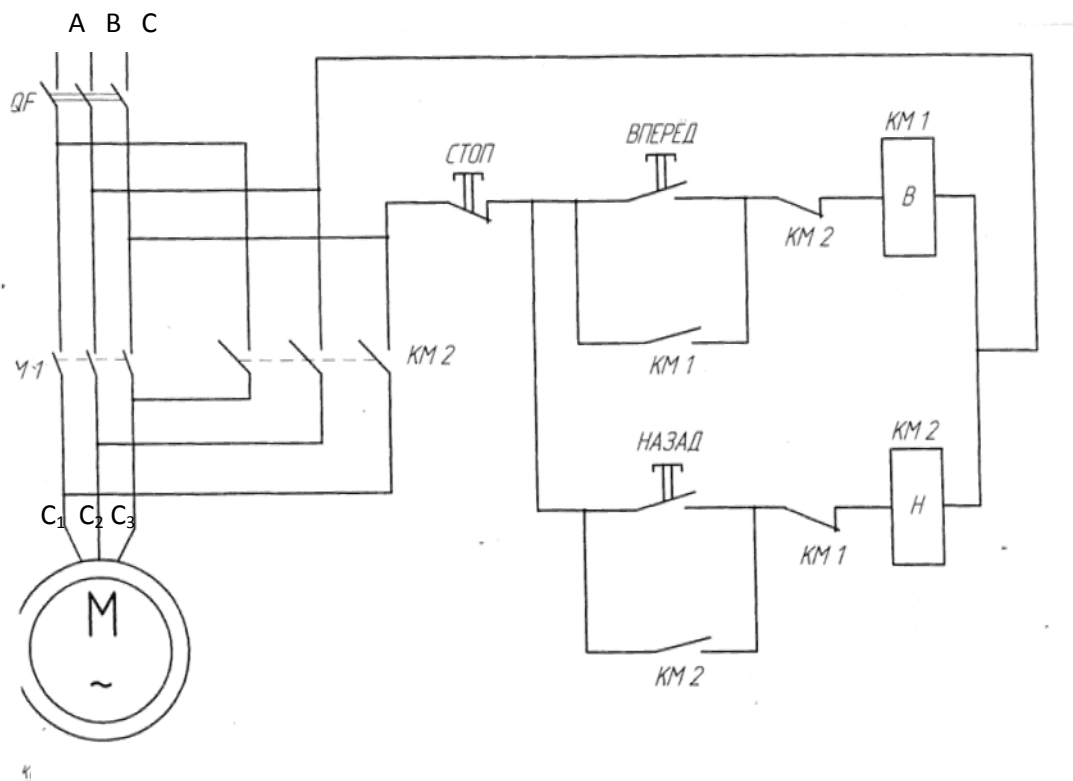


Рис. 11. Схема пуска и реверсирования трехфазного двигателя

Схема пуска и реверсирования трехфазного двигателя (рис. 11) состоит из силовой цепи и цепи управления. Силовая цепь включает в себя трехфазную линию АВС, обмотки двигателя $C_1C_2C_3$, силовые контакты контактора КМ1, КМ2. Цепь управления включает в себя катушки контактора КМ1, КМ2, кнопки пуска «СТОП», «ВПЕРЕД», «НАЗАД» и нормально замкнутые и разомкнутые блок-контакты.

При нажатии кнопки «ВПЕРЕД» замыкается цепь катушки контактора В через нормально замкнутые контакты. Ток, проходящий через катушку В, возбуждает электромагнит контактора В. При этом все его нормально разомкнутые контакты замыкаются, а нормально замкнутые контакты размыкаются. Под «нормальным» состоянием контактов понимается состояние, в котором они находятся при отсутствии воздействия (когда нет тока в катушке, не нажата кнопка и т.п.).

Срабатывание контактора В приводит к подаче на зажимы статора двигателя C_1 , C_2 и C_3 соответственно фаз напряжения сети А, В и С. Кроме того, вспомогательный контакт В блокирует кнопку «ВПЕРЕД» и позволяет её отпустить.

При нажатии кнопки «НАЗАД» всё происходит аналогично, только вместо цепи катушки В замыкается цепь катушки Н. Срабатывание контактора Н подключает фазу сети А к зажиму двигателя C_3 , а фазу сети С к зажиму C_1 . Происходит переключение фаз двигателя, и направление вращения его ротора меняется. Вспомогательный контакт Н блокирует кнопку «НАЗАД» и даёт возможность её отпустить.

Остановка двигателя производится нажатием кнопки «СТОП». При этом размыкается цепь той или иной катушки (В или Н) контактор размыкает цепь двигателя; контакт, блокирующий соответствующую кнопку, размыкается. Повторное включение возможно только при нажатии пусковой кнопки нужного направления.

При исчезновении или при значительном снижении напряжения, включенный контактор разомкнётся и отсоединит двигатель от сети. Одновременно разомкнётся контакт, блокирующий пусковую кнопку (В или Н). Благодаря этому при восстановлении напряжения самопроизвольный пуск двигателя произойти не может. Наличие такой защиты очень важно, так как самопроизвольный запуск двигателя опасен.

Дистанционное управление схемой возможно из нескольких мест. Для этого надо иметь соответствующее число пусковых кнопок, включённых параллельно основным кнопкам «ВПЕРЕД» и «НАЗАД» и кнопок «СТОП», включённых последовательно с основной кнопкой «СТОП».

Проверка правильности соединений выводов трехфазных обмоток сводится к определению начал и концов каждой фазы. Начала и концы фаз можно определить при помощи милливольтметра. Для этого мегомметром или при помощи контрольной лампы определяют принадлежность выводов обмотки отдельным фазам. Затем к обмотке одной из фаз подключают через источник постоянного тока, который выбирают таким, чтобы по обмотке электродвигателя проходил небольшой ток (желателен аккумулятор напряжения 2 В). Для уменьшения тока в цепь включают реостат. В момент включения или отключения источника питания в обмотках двух других фаз будет индуцироваться ЭДС, причем направление этой электродвижущей силы бу-

дет зависеть от полярности концов обмотки фазы, в которую включен аккумулятор. Если к условному "началу" присоединен плюс батареи, а к условному "концу" - минус, то при отключении на других фазах будет плюс на "началах" и минус на "концах", что можно будет определить по направлению отклонения стрелки милливольтметра, присоединяемого поочередно к выводным концам двух других фаз. При включении тока полярность на других фазах будет обратной указанному. В тех случаях, когда электродвигатель имеет три вывода при соединении обмотки звездой или треугольником, правильность соединения фаз можно проверить, если питать два вывода переменным током пониженного напряжения и вольтметром измерить напряжение между третьим выводом и каждым из выводов, присоединенных к сети. В случае правильного соединения эти напряжения будут равны половине напряжения, приложенного к двум выводам, причем это соотношение напряжений сохраняется при питании любых двух выводов. Опыт следует произвести три раза, каждый раз подводя напряжение к различной паре выводов. Если же одна из фаз присоединена неправильно, то при двух опытах из трех напряжения между третьим выводом и каждым из двух других будут неодинаковы. Этот опыт в случае короткозамкнутого асинхронного двигателя следует проводить при напряжении $1/5 - 1/6$ от номинального во избежание перегрева обмоток, в случае фазного ротора, его обмотка должна быть разомкнута.

Работа трехфазного двигателя в однофазном режиме

Трехфазный асинхронный двигатель (АД) может работать в однофазном режиме в двух случаях:

1. АД был включен в трехфазную сеть, работал в установившемся режиме, и в этом режиме произошел обрыв одной из фаз, например, вследствие перегорания плавкой вставки предохранителя;
2. АД, обмотки статора которого соединены в звезду или треугольник, преднамеренно включается в однофазную сеть и разгоняется посредством какого-либо пускового устройства, создавая вращающий момент без принятия специальных мер при питании от сети однофазного тока.

Рассмотрим первый случай более подробно. Работающий АД, оказавшийся в однофазном режиме, будет продолжать вращаться, преодолевая момент сопротивления нагрузки. Если обмотка статора соединена в звезду, то одна из фаз полностью теряет питание, если в треугольник, то происходит уменьшение напряжения на каждой из двух фаз, соединенных последовательно. Скольжение двигателя увеличивается, а его скорость вращения в том и другом случаях снижается.

При неизменной нагрузке на валу АД увеличение его скольжения приводит к значительному возрастанию тока, что в свою очередь приводит к чрезмерному перегреву обмоток статора. Такой режим, называемый неполнофазным, является для АД весьма нежелательным. Обычно двигатель, оказавшийся в неполнофазном режиме, отключается от сети защитной аппаратурой. Для уменьшения перегрева необходимо в длительном режиме снизить нагрузку двигателя до 50...60% от номинальной. Остановив двигатель, в режиме с отключенной фазой снова запустить его в ход включением в сеть невозможно. Двигатель запустится, если при его включении одновременно ротор раскрутить до какой-то небольшой скорости. Тогда двигатель как бы подхватывает движение и разгоняется самостоятельно до скорости, соответствующей нагрузке на его валу. Другими словами, пусковой момент АД в таком режиме равен нулю. Это обстоятельство обусловлено характером магнитного поля статора, которое в однофазном двигателе перестает быть вращающимся, а носит характер пульсирующего.

Пульсирующее магнитное поле представляют в виде двух составляющих полей, вращающихся с одной и той же синхронной частотой в противоположные стороны. Изменение вектора пульсирующего поля и его разложение на потоки прямой $\Phi_{пр}$ и обратной $\Phi_{обр}$ последовательностей представлено на рис.12. Значение каждого из магнитных потоков равно половине амплитуды пульсирующего поля.

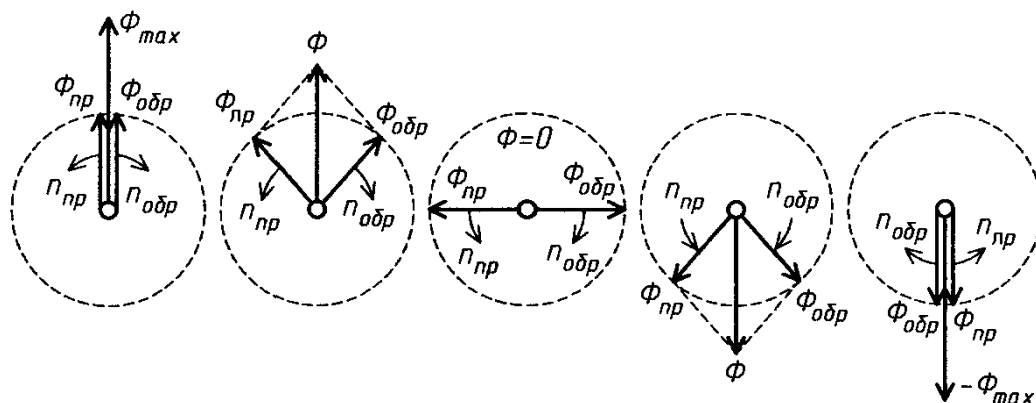


Рис. 12. Изменение вектора пульсирующего поля и его разложение на потоки прямой и обратной последовательностей

Окружность, изображенная на диаграммах пунктиром, обозначает траекторию движения в противоположных направлениях концов векторов магнитных потоков прямой $\Phi_{пр}$ и обратной $\Phi_{обр}$ последовательностей. В каждый момент времени изменяющийся по величине вектор результирующего потока Φ неизменно направлен вдоль вертикальной оси. Он максимален, когда угол поворота $\Phi_{пр}$ и $\Phi_{обр}$ равен 0° или 180° . При повороте потоков $\Phi_{пр}$ и $\Phi_{обр}$ на 90° вектор результирующего потока Φ равен нулю. Вращающиеся поля $\Phi_{пр}$ и $\Phi_{обр}$ наводят в обмотке ротора ЭДС, под влиянием которых возникают токи ротора. Взаимодействие вращающихся полей статора с токами ротора приводит к образованию прямого $M_{пр}$ и обратного $M_{обр}$ вращающихся моментов, так же, как в обычном трехфазном АД, однако в данном случае эти моменты направлены в противоположные стороны.

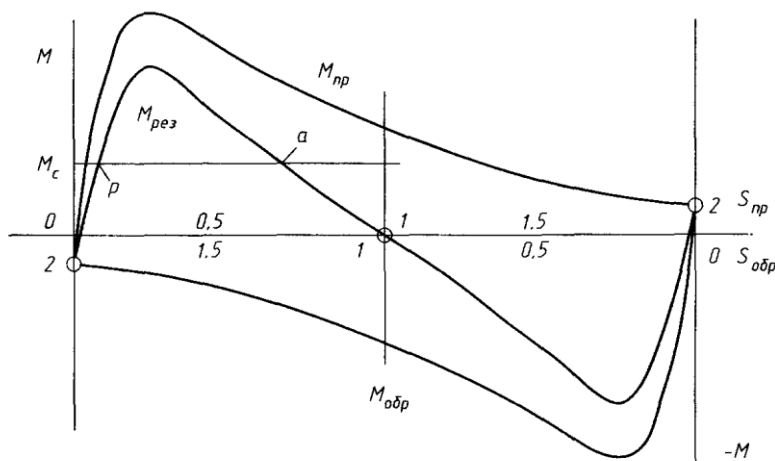


Рис. 13. Механические характеристики АД в однофазном режиме: $M_{пр}$ - от поля прямой последовательности; $M_{обр}$ - от поля обратной последовательности; $M_{рез}$ - результирующая.

Механические характеристики АД представлены на рис. 13.

В неподвижном состоянии ротор по отношению к этим полям находится в одинаковых условиях, отчего вращающие моменты полностью уравновешивают друг друга, следовательно, результирующий пусковой момент АД при скольжении, равном единице, равен нулю. Как видно на рис. 13, при $s = 1$ механическая характеристика АД пересекает ось скольжений и пусковой момент равен нулю. По этой причине трехфазный двигатель в однофазном режиме не может самостоятельно начать разгон. Дело существенно меняется, когда АД в однофазном режиме посредством внешнего воздействия разогнался до произвольной скорости. Тогда прямое поле, т. е. поле, направление вращения которого совпадает с направлением вращения ротора, при малых значениях скольжения наводит в обмотке ротора токи небольшой частоты (2...5 Гц).

При стандартной частоте сети 50 Гц токи, индуктированные в обмотке ротора обратным полем, имеют при том же скольжении повышенную частоту, близкую к 100 Гц. Поэтому они становятся почти чисто реактивными и оказывают размагничивающее действие. Это ослабляет обратное поле и уменьшает обратный момент $M_{обр}$. Иначе говоря, индуктивное сопротивление ротора для токов обратной последовательности многократно превышает то же сопротивление для токов прямой последовательности. Сложение двух этих моментов дает результирующую механическую характеристику трехфазного АД в однофазном режиме, которая также представлена на рис. 13.

При скольжении s , равном 1 (т. е. при пуске), $M_{пр} = M_{обр}$, а $M_{рез} = 0$. Если ротор двигателя развернуть в сторону вращения прямого поля, то это равенство нарушается и $M_{пр} \neq M_{обр}$:

$$M_{пр} - M_{обр} = M_{рез},$$

т. е. двигатель развивает вращающий момент и дальше разгоняется самостоятельно.

Однако, если на валу имеется нагрузка (момент сопротивления M_c), то двигатель «застрянет» на восходящем участке механической характеристики в точке пересечения линии M_c с характеристикой $M_{рез}$ - в точке а.

Другими словами трехфазный АД в однофазном режиме не только не развивает пусковой момент, но и не способен разогнаться под нагрузкой, хотя, разогнавшись до скорости, близкой к номинальной, он успешно обеспечивает на валу момент, равный моменту сопротив-

ления, как это видно на рис. 13 (точка р). Отметим, что трехфазный АД в однофазном режиме при включении можно запустить в любую сторону — вперед или назад, что также видно на рис. 13.

Отсутствие пускового момента является существенным недостатком АД в однофазном режиме, из нее вытекает проблема непосредственного пуска АД в однофазном режиме.

Схемы пуска АД в однофазном режиме с пульсирующим полем

Рассмотрим схемы пуска трехфазных АД в однофазном режиме с рабочим пульсирующим полем.

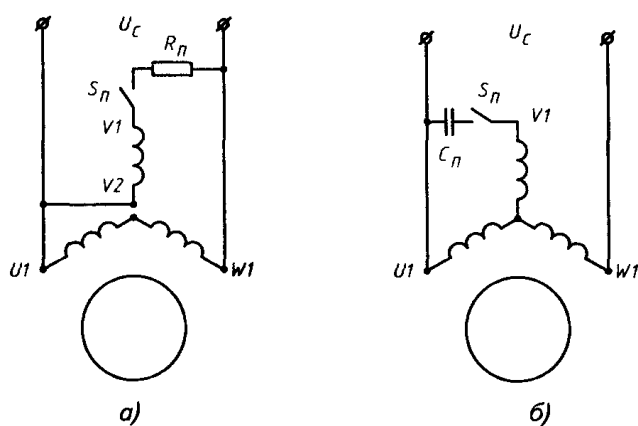


Рис. 14. Схемы включения АД с пусковыми элементами *а* – с резистором, *б* – с конденсатором.

Наиболее простыми являются схемы включения в однофазную сеть с напряжением U_c , в которых в качестве пусковых элементов используются пусковой резистор R_n либо пусковой конденсатор C_n (рис. 14).

Такие элементы позволяют изменить угол сдвига тока пусковой обмотки в сравнении с током рабочей обмотки.

Конденсаторным называют однофазный асинхронный двигатель, в цепь одной из обмоток которого постоянно включен конденсатор. Этот конденсатор называют рабочим C_p . Он служит для создания совместно с рабочей обмоткой эллиптического поля двигателя и, таким образом, несколько повышает КПД и коэффициент мощности АД. Кроме того, пусковой момент такого двигателя не равен нулю. С целью повышения пускового момента АД используют дополнительный пусковой конденсатор C_n . Величину емкости того и другого определяют расчетным путем.

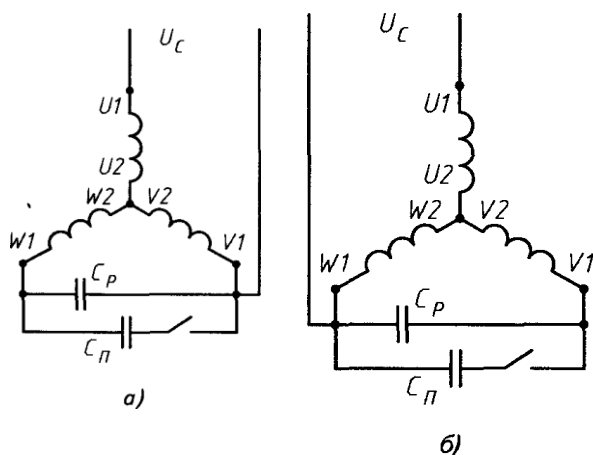


Рис. 15. Схема соединения конденсаторного АД в звезду (а) и схема реверсирования АД (б)

Схема соединения обмотки АД, приведенная на рис. 15,а, используется в тех случаях, когда соединение концов обмоток статора (нейтраль) выполнено внутри машины, т. е. нейтраль недоступна, а напряжение сети равно линейному напряжению. Обмотку статора $U1 - U2$, через которую проходит весь ток двигателя, называют глав-

ной фазой. Обмотку $W1-W2$, соединенную последовательно с конденсатором, — конденсаторной фазой. Третью обмотку $V1-V2$ назовем вспомогательной фазой. Ток главной фазы с уменьшением нагрузки (скольжения) уменьшается, а ток конденсаторной фазы, наоборот, возрастает, достигая наибольшего значения при холостом ходе. Вспомогательная фаза при холостом ходе и незначительной нагрузке находится в генераторном режиме, ее активная мощность отрицательна.

Из-за различия токов активная мощность по фазам также распределяется неравномерно. При номинальной нагрузке главная фаза развивает примерно такую же мощность, как конденсаторная и вспомогательная, вместе взятые. Равенства токов всех фаз номинальному не достигается. Поэтому под номинальной здесь имеется в виду такая нагрузка, при которой токи двух фаз равны номинальному, а ток третьей фазы составляет 70—85% от номинального. Это определение относится и к случаю соединения обмоток статора треугольником.

Характерными особенностями схемы являются относительно небольшие значения пускового момента, не превышающего номинальный, и небольшие напряжения. Напряжение на конденсаторе в номинальном режиме можно принять равным напряжению сети. В режиме холостого хода принимают:

$$U_K \approx 1,15U_H.$$

В случае возникновения резонанса напряжений, когда напряжение на конденсаторе равно напряжению на конденсаторной обмотке, величины их могут достигать недопустимо больших значений, что может привести к пробое изоляции обмотки, либо пробое диэлектрика между обкладками конденсатора. Резонанс напряжений в конденсаторной ветви может возникнуть при равенстве реактивных сопротивлений обмотки фазы и конденсатора:

$$2\pi f L_{обм} = \frac{1}{2\pi f C_P},$$

где $L_{обм}$ — индуктивность обмотки фазы.

Величина емкости рабочего конденсатора определяется выражением:

$$C_P = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \frac{I_H}{\omega U_H}} = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \frac{I_H}{2\pi f U_H}}.$$

Для частоты $f = 50$ Гц получим приближенное расчетное выражение, где емкость измеряется в мкФ:

$$C_P = 2780 \frac{I_H}{U_H}.$$

Пусковую емкость выбирают по соотношению, мкФ:

$$C_{II} = (2,5 \dots 3) C_P$$

Пример. Пусть необходимо выбрать рабочий конденсатор для асинхронного двигателя, с номинальными данными: мощность 1,5 кВт, скорость вращения 1405 об/мин, напряжение 380/220 В, ток 3,7 А при 380 В. Очевидно, фазный ток двигателя равен 3,7 А, номинальное фазное напряжение - 220 В. Следовательно, величина рабочей емкости:

$$C_P = 2780 \frac{3,7}{220} = 46,75 \text{ мкФ}.$$

Выбираем ближайший не меньший по емкости, подходящий конденсатор, например, емкостью 50 мкФ. Соответственно пусковой конденсатор должен иметь емкость 125 мкФ.

Машины постоянного тока

В проводе вращающейся рамки (приводится в движение от первичного двигателя), пересекающем силовые линии магнитного поля неподвижных полюсов N и S (рис. 16, а), наводится ЭДС, направление

которой можно определить по правилу правой руки. Рамка соединена с коллектором, состоящем из двух полуколец. Верхняя щетка А все время соединяется с той стороной витка, которая в данный момент находится под северным полюсом, а нижняя щетка В — со стороной витка, расположенной над южным полюсом. Переключение щетки с одной коллекторной пластины на другую происходит в момент прохождения рамки через нейтральную (горизонтальную) плоскость. Следовательно, напряжение на щетках, хотя и изменяется по значению, остается постоянным по направлению. График выпрямленной коллектором ЭДС показан на рисунке 16, б.

Если ротор объединяет две рамки (рис. 16, в), расположенные под углом 90° (коллектор в этом случае состоит из четырех пластин), то характер изменения ЭДС становится таким, как показан на рисунке 16, г. Нетрудно заметить, что глубина пульсации ЭДС значительно уменьшилась. При шестнадцати коллекторных пластинах (8 рамок) глубина пульсации составляет лишь 0,97% среднего значения напряжения во внешней цепи, то есть практически во внешней цепи протекает постоянный ток.

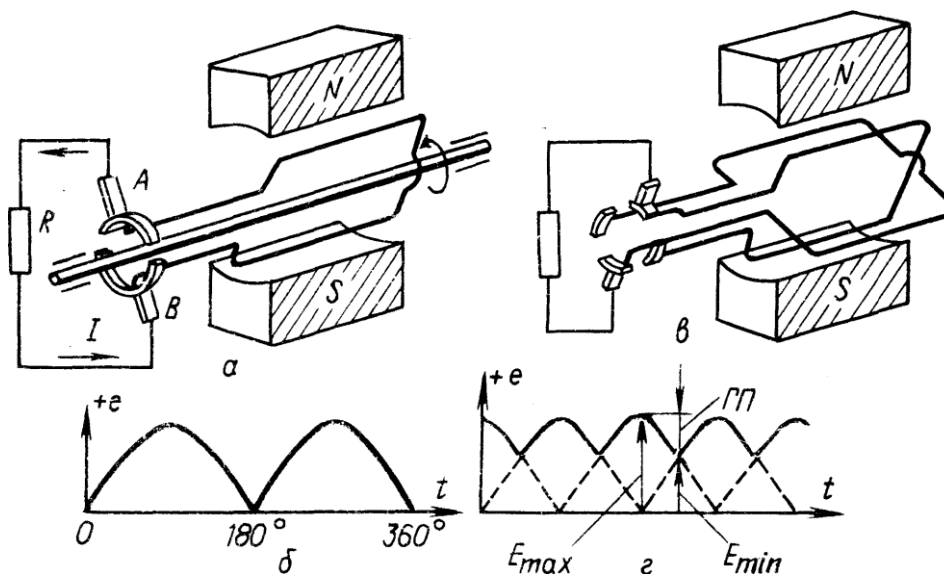


Рис. 16. Схема простейшего генератора с одной рамкой и двумя коллекторными пластинами (а) и с двумя рамками и четырьмя коллекторными пластинами (в) и графики получаемой ЭДС (б и г).

Машины постоянного тока обратимы. Так, если к коллектору подвести напряжение от внешнего источника тока, то рамка начнет вращаться в направлении, которое можно определить по правилу ле-

вой руки. Следовательно, электрическая машина может работать и в генераторном, и в двигательном режимах.

Конструктивно машина постоянного тока состоит из неподвижной части — статора, обычно предназначенного для создания магнитного потока, и вращающейся части — ротора, в котором индуцируется ЭДС, если машина работает как генератор.

В небольших машинах постоянного тока мощностью в несколько ватт магнитное поле статора создается постоянными магнитами, а в машинах мощностью от нескольких десятков ватт до сотен киловатт — электромагнитами. Основные полюса статора называют индуктором, а ротор — якорем.

Кроме основных полюсов индуктора, на статоре устанавливают также добавочные полюса, назначение которых уменьшать искрение щеток на коллекторе. Сердечники полюсов статора набирают из отдельных листов электротехнической стали. Их прикрепляют болтами к станине стана, по которой замыкается магнитный поток полюсов. Так как магнитный поток здесь практически постоянен по значению, станину выполняют литой. Сердечник ротора набирают также из листов электротехнической стали.

Коллектор изготавливают из пластин твердотянутой меди, которые изолируют одну от другой. Щетки — угольные или графитовые с добавками медного порошка — устанавливаются в щеткодержателях, которые укрепляют на щеточных траверсах. Вал якоря опирается на подшипники в подшипниковых щитах, скрепленных статором и удерживающих якорь между полюсами индуктора.

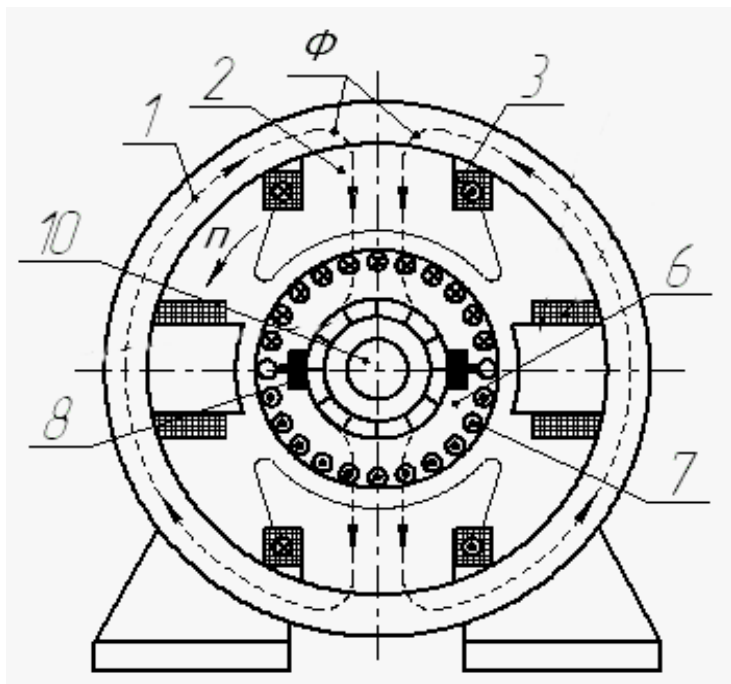
Конструкция двигателей постоянного тока сложнее и их стоимость выше, чем асинхронных двигателей. Недостаток машин постоянного тока — наличие щеточноколлекторного аппарата, который требует тщательного ухода в эксплуатации и снижает надежность работы машины.

Электрический двигатель постоянного тока (рис. 17) состоит из: статора (неподвижная часть), который в свою очередь состоит из: станины 1, выполненной в виде круглой металлической трубы, главных полюсов 2, выполненных из листов электротехнической стали, закреплённых на станине, обмотки возбуждения 3, расположенной на главных полюсах и якоря (подвижная часть), который в свою очередь состоит из: металлического вала 10, на который прессуется пакет, обмо-

ток якоря 7, состоящих из медного провода и уложенных в пазы пакета, коллектора 6, состоящего из медных пластин.

Коллектор также напрессовывается на вал. 8 - щётки электродвигателя постоянного тока.

Подвод электрического тока к коллектору двигателя осуществляется электрографитными щётками, установленными в щеткодержателях.



Если требуется изменить направление вращения якоря, то необходимо пересоединить обмотки электродвигателя так, чтобы ток изменил свое направление в обмотке якоря или в обмотке возбуждения. При одновременном изменении направления тока в обмотках якоря и возбуждения направление

направления вращения не изменится. Индуцируемую в якоре двигателя ЭДС иногда называют противоэлектродвижущей силой потому, что она направлена навстречу подводимому к двигателю напряжению. Величина ЭДС E двигателя прямо пропорциональна магнитному потоку Φ , частоте вращения якоря n и определяется по такой же формуле, что и величина ЭДС генератора:

$$E = C \cdot \Phi \cdot n,$$

где C — постоянный коэффициент, который учитывает число пар полюсов, число витков якоря и другие постоянные для данного электродвигателя величины. Ток в обмотке якоря работающего электродвигателя будет определяться не подводимым напряжением, а разностью между напряжением и наведенной в обмотке якоря ЭДС. Разделив эту разность на сопротивление цепи якоря $R_{я}$, мы получим ток $I_{я}$, проходящий по обмотке якоря:

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я}}.$$

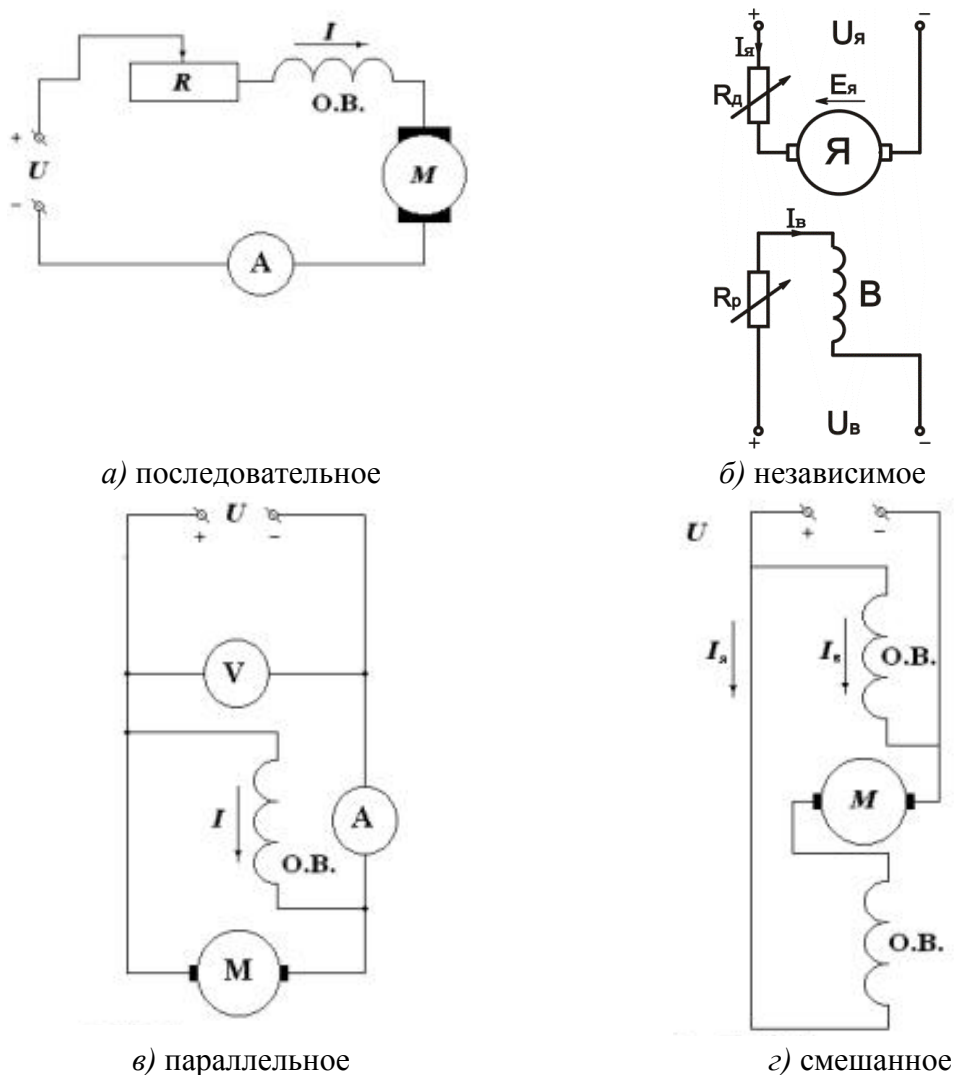


Рис. 18. Схемы возбуждения электродвигателей.

При увеличении механической нагрузки на валу электродвигателя частота вращения его якоря замедляется, индуцируемая ЭДС уменьшается, увеличивается разность между подводимым напряжением и ЭДС и, следовательно, ток якоря возрастает. При уменьшении механической нагрузки картина будет обратной. Таким образом, ток якоря зависит как от подводимого напряжения, так и от механической нагрузки электродвигателя. Вот почему, например, при движении тепловоза на подъеме, когда уменьшаются скорость движения и частота вращения якорей тяговых электродвигателей, ток в двигателях увеличивается, а при увеличении скорости движения — уменьшается.

Все рабочие характеристики двигателя постоянного тока, как и генератора, зависят от способа включения цепи возбуждения по отношению к цепи якоря. Соединение этих цепей может быть парал-

лельным, последовательным, смешанным и, наконец, они могут быть независимы друг от друга.

Двигатель с последовательным возбуждением. У такого двигателя (рис. 18, а) ток якоря является одновременно и током возбуждения, т.к. обмотка возбуждения включена последовательно с якорем. По этой причине магнитный поток двигателя изменяется с изменением нагрузки. Скорость двигателя:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{в}})}{c\Phi},$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление якоря, $R_{\text{в}}$ – сопротивление обмотки возбуждения.

Скорость якоря двигателя сильно зависит от нагрузки. При увеличении нагрузки увеличивается падение напряжения на сопротивлении обмоток при одновременном увеличении магнитного потока, что приводит к значительному уменьшению скорости вращения. Поэтому такие двигатели не следует пускать вхолостую или с малой нагрузкой. Двигатели с последовательным возбуждением применяют в тех случаях, когда необходим большой пусковой момент или способность выдерживать кратковременные перегрузки. Они используются в качестве тяговых двигателей в трамваях, троллейбусах, метро и электровозах, а также на подъёмных кранах и для пуска двигателей внутреннего сгорания (стартеры).

Двигатели с параллельным и независимым возбуждением. Здесь обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены параллельно, рис 18, в. Обмотка возбуждения имеет большее количество витков, чем обмотка якоря, поэтому ток обмотки возбуждения в большинстве случаев составляет несколько процентов от тока якоря. В цепь обмотки возбуждения может включаться регулировочный реостат. В цепь якоря включается пусковой реостат. Если обмотку возбуждения подключить к другому источнику постоянного напряжения, то получим двигатель с независимым возбуждением, рис. 18, б. Такими же свойствами обладают электродвигатели с постоянным магнитом. Изменение скорости вращения может происходить за счёт изменения нагрузки и магнитного потока. Увеличение тока нагрузки незначительно изменяет внутреннее падение напряжения из-за малого сопротивления цепи якоря и поэтому лишь незначительно уменьшает скорость вращения двигателя. Что же касается магнитного потока, то вследствие реакции

якоря при увеличении тока нагрузки он несколько уменьшается, что приводит к незначительному увеличению скорости двигателя. Таким образом, скорость вращения двигателя с параллельным возбуждением изменяется очень мало. Скорость вращения якоря двигателя определяется формулой:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c\Phi},$$

где c – коэффициент, зависящий от устройства машины.

Скорость вращения якоря двигателя с независимым возбуждением можно регулировать либо изменением сопротивления в цепи якоря, либо изменением магнитного потока. Следует отметить, что чрезмерное уменьшение тока возбуждения и, особенно, случайный обрыв этой цепи очень опасны для двигателей с параллельным и независимым возбуждением, т.к. ток в якоре может возрасти до недопустимо больших значений. При небольшой нагрузке (или на холостом ходу) скорость может настолько возрасти, что станет опасной для целостности двигателя.

Двигатель со смешанным возбуждением. На каждом полюсе такого двигателя (рис. 18, г) имеются две обмотки – параллельная и последовательная. Их можно включить так, чтобы магнитные потоки складывались (согласное включение) или вычитались (встречное включение). Формулы для скорости вращения и вращающего момента для такого двигателя:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c(\Phi_{\text{парал}} \pm \Phi_{\text{послед}})},$$

$$M = cI_{\text{я}}(\Phi_{\text{парал}} \pm \Phi_{\text{послед}}).$$

В зависимости от соотношения магнитных потоков двигатель со смешанным возбуждением по своим свойствам приближается либо к двигателю с последовательным возбуждением, либо к двигателю с параллельным возбуждением. Как правило, у таких двигателей последовательная обмотка является главной (рабочей), а параллельная – вспомогательной. Благодаря наличию магнитного потока параллельной обмотки, скорость такого двигателя не может сильно возрастать на малых нагрузках. Двигатели с согласным включением применяются, когда необходим большой пусковой момент и регулировка скорости при переменных нагрузках. Двигатели со встречным включением

обмоток применяются в тех случаях, когда необходима постоянная скорость при изменяющейся нагрузке.

Для изменения направления вращения якоря двигателя постоянного тока надо изменить направление тока либо в обмотке возбуждения, либо в обмотке якоря. Изменением полярности на клеммах машины можно поменять направление вращения только в двигателе с постоянным магнитом или независимым возбуждением. В других двигателях надо изменить направление тока либо в якорной обмотке, либо в обмотке возбуждения. Двигатель постоянного тока нельзя включать подсоединением полного напряжения. Пусковой ток машин постоянного тока где-то в 20 раз превышает номинальный ток (он тем больше, чем больше и быстрее мотор). В больших машинах пусковой ток может превышать номинальный ток в 50 раз. Большой ток вызывает в коллекторе круговое искрение и разрушает коллектор. Для включения применяют плавное увеличение напряжения или пусковые реостаты. Прямое включение допускается при низких напряжениях в случае маленьких двигателей, у которых сопротивление обмотки якоря большое.

Устройство трансформаторов

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования (понижения или повышения) напряжения в сетях переменного тока.

Первый трансформатор был создан русским инженером П.Н. Яблочковым, который в 1876 г. высказал идею о возможности транс-

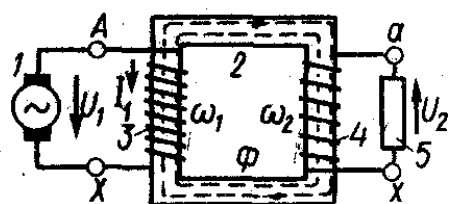


Рис. 19. Схема однофазного трансформатора: 1 - источник энергии – генератор, 2 - стальной сердечник, 4 - первичная и вторичная обмотки, 5 - нагрузка.

формации переменного тока, а в 1885 г. предложил передавать электрическую энергию на большие расстояния, используя для этой цели высокое напряжение переменного тока.

В простейшем виде трансформатор представляет собой устройство, в котором на сердечник 2, собранный из пластин стали, намотаны две обмотки (рис.

19). Одна из них — первичная подключена к источнику энергии 1, к другой – вторичной 4 – присоединен потребитель – нагрузка 5.

Ток, протекающий в первичной обмотке от источника энергии, создает в сердечнике переменный магнитный поток Φ , индуктирующий во вторичной обмотке электродвижущую силу. Для любого трансформатора отношение напряжений первичной U_1 , и вторичной U_2 обмоток при холостом ходе приблизительно равно отношению чисел их витков:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\omega_1}{\omega_2} = k,$$

где ω_1 и ω_2 — соответственно число витков первичной и вторичной обмоток, k принято называть коэффициентом трансформации

Если напряжение вторичной обмотки больше, чем подведенное к первичной, то трансформатор называют повышающим, в противном случае, когда вторичное напряжение меньше первичного, — понижающим. Один и тот же трансформатор можно использовать в качестве понижающего и повышающего. Значение коэффициента трансформации указанное в паспорте трансформатора, определено как отношение высшего напряжения к низшему.

Мощности в первичной и во вторичной обмотках примерно равны между собой. Таким образом, для однофазного трансформатора

$$P = \frac{U_1}{I_1} \approx \frac{U_2}{I_2},$$

где I_1 и I_2 — соответственно ток в первичной и во вторичной обмотках.

Тогда коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

Следовательно, токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны напряжениям, а значит, и числам витков. Поэтому обмотки высшего напряжения всегда делают из большего числа витков провода с меньшей площадью сечения, тогда как обмотку низшего напряжения выполняют из меньшего числа витков провода с большей площадью сечения.

По числу фаз трансформаторы разделяют на однофазные и трехфазные. По назначению различают силовые (предназначены для передачи и распределения электрической энергии) и специальные (свароч-

ные, измерительные, печные, испытательные, инструментальные и др.) трансформаторы. К группе специальных трансформаторов может быть отнесен и автотрансформатор.

По способу охлаждения классификация такова: трансформаторы с воздушным, масляным, а также с масляным и принудительным воздушным охлаждением.

Сердечники и ярма трансформаторов набирают из отдельных листов специальной электротехнической стали, хорошо проводящей магнитные потоки. Листы стали изолируют друг от друга. Это уменьшает вихревые токи в сердечнике, снижает тепловые потери энергии в нем, вследствие этого увеличивается коэффициент полезного действия трансформатора.

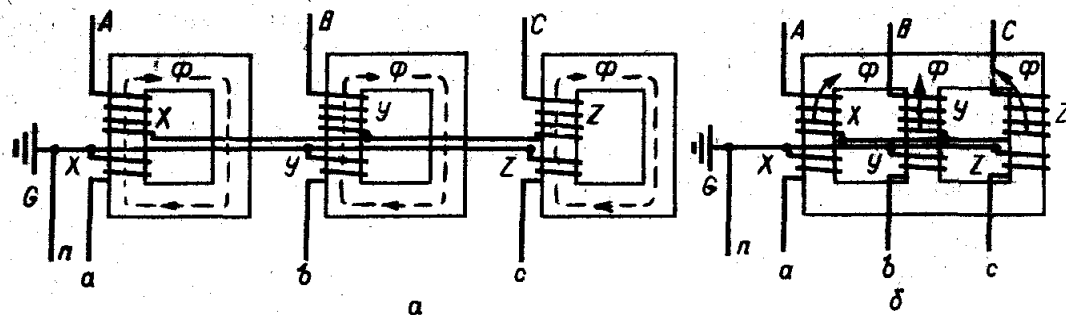


Рис. 20. Группа из трех однофазных трансформаторов (а) и эквивалентный им трехфазный трансформатор (б): А, В, С — выходы фаз высшего напряжения а, б, с — выходы фаз низшего напряжения; n — нулевой провод (нейтраль); G — заземление.

Для трансформирования трехфазного тока можно использовать группу, явленную из трех однофазных трансформаторов (рис. 20, а), или один трехфазный трансформатор (рис. 20, б). Трехфазная группа однофазных трансформаторов имеет ряд существенных недостатков: громкость, большая масса, высокая стоимость. Поэтому такой способ трансформации применяют только при очень больших мощностях (свыше 10 тыс. кВ·А), когда конструкция трехфазного трансформатора оказывается излишне громоздкой.

Сердечник трехфазного трансформатора состоит из трех вертикальных стержней, которые по концам замкнуты стальными ярмами. На каждом из сердечников помещают первичную и вторичную обмотки из трех фаз.

Автотрансформатором называют такой трансформатор, в котором первичная и вторичная обмотки объединены в общую электрическую цепь. Следовательно, число обмоток автотрансформатора вдвое меньше, чем число обмоток трансформатора. В однофазном автотрансформаторе – одна, а в трехфазном — три (на каждую фазу по одной). Таким образом, добиваются уменьшения массы, размеров и стоимости автотрансформатора.

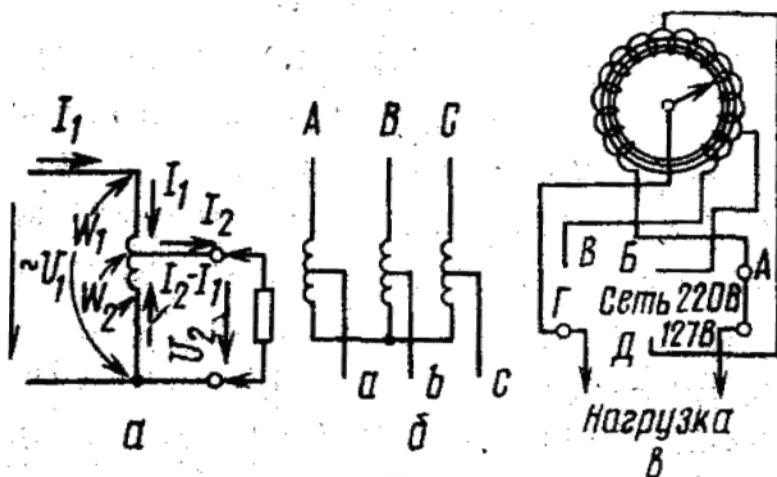


Рис. 21. Схемы автотрансформаторов: *a* - однофазного; *б* - трехфазного; *в* - лабораторного (ЛАТРА).

На рисунке 21 приведены схемы однофазного (*a*) и трехфазного автотрансформаторов.

Если автотрансформатор по схеме *a* понижающий, то первичную обмотку образуют все витки, к которым

подведено напряжение U_1 сети. При этом каждый виток окажется под напряжением

$$U_B = \frac{U_1}{\omega_1},$$

где ω_1 – число витков, включенных в сеть.

Вторичное напряжение U_2 пропорционально числу витков ω_2 с которых снимается это напряжение:

$$U_2 = U_B \omega_2.$$

Таким образом, при холостом ходе, когда потери напряжения на обмотках ничтожны, справедливо соотношение

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = k.$$

Значит, напряжение, снимаемое с автотрансформатора, есть доля первичного сетевого напряжения. В режиме нагрузки ток вторичной обмотки по правилу Ленца ослабляет своим магнитным потоком магнитный поток первичной обмотки. Поэтому ток I_2 направлен проти-

воположно току I_1 , и в общей части обмоток он равен разности токов $I_1 - I_2$. Такое же противоположное направление имеют токи в обычном трансформаторе. Соотношение между токами, как отмечалось выше,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1}{k}$$

Поэтому общую часть обмотки автотрансформатора можно изготовить из провода с меньшей площадью сечения (когда коэффициент трансформации $k < 2$).

Основное преимущество автотрансформаторов перед трансформаторами – меньший расход меди и стали. Уменьшаются также тепловые потери в железе и меди. Однако автотрансформаторам свойственны и существенные недостатки. Изоляция их рассчитывается на наибольшее напряжение, так как обмотки соединены между собой, и поэтому стоимость ее высока. Выполнение условий безопасности усложняется, так как если первичное напряжение высокое, то витки вторичной обмотки будут находиться под высоким потенциалом. Поэтому автотрансформаторы применяют в тех случаях, когда необходимо преобразовать напряжение в небольших пределах. При высоких напряжениях автотрансформаторы выгоднее использовать там, где требуется изменять напряжение в 1,5-2 раза, а при низких — не более чем в 3 раза. Лабораторные автотрансформаторы (ЛАТР) применяют в лабораторной практике для плавного регулирования напряжения U_2 от 0 до 250 В (рис. 21, в).

Трехфазные автотрансформаторы (рис. 21, б) часто вводят в схемы пуска мощных двигателей переменного тока при пониженных токах. Сеть присоединяют к зажимам A, B, C , а двигатель в момент пуска к зажимам a, b, c . После того как двигатель разовьет достаточную частоту вращения, его быстро переключают на сеть, а автотрансформатор отключают.

К основным параметрам трансформатора относят номинальную мощность, номинальное первичное и вторичное напряжение, коэффициент трансформации, напряжение короткого замыкания, потери холостого хода и короткого замыкания.

Номинальная мощность трансформатора определяется его тепловым режимом, это та мощность, которую трансформатор может отда-

вать длительно при номинальных температурных условиях окружающей среды.

Номинальным первичным напряжением трансформатора называют такое напряжение, которое необходимо подвести к его первичной обмотке, чтобы на зажимах разомкнутой вторичной обмотки получить вторичное напряжение, указанное в паспорте трансформатора.

Номинальным вторичным напряжением трансформатора называют напряжение, которое устанавливается на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе трансформатора.

Напряжением короткого замыкания называется напряжение, подводимое к обмотке низшего напряжения, при котором в обмотке высшего напряжения, замкнутой накоротко, протекает номинальный ток.

Потери холостого хода – это мощность, затрачиваемая на нагрев обмоток проходящим по ним током и нагрев стали сердечника (вихревые токи и гистерезис). Потери на нагрев обмоток ничтожно малы, поэтому можно считать, что все потери холостого хода сосредоточены в стали сердечника и идут на его нагрев.

Потери короткого замыкания – это мощность, затрачиваемая на электрические потери в обмотках. Из-за малого напряжения, подводимого к обмотке низшего напряжения, магнитный поток в сердечнике незначителен и сердечник не нагревается.

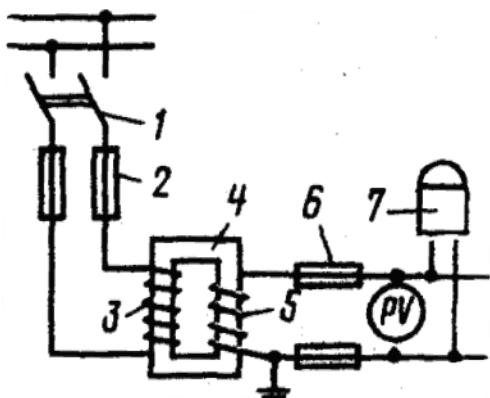


Рис. 22. Схема включения трансформатора напряжения: 1 - разъединители, 2 - предохранитель высоковольтный токоограничивающий, 3 - высоковольтная обмотка; 4 - трансформатор, 5 - обмотка низшего напряжения, 6 - предохранитель низковольтный, 7 - реле напряжения.

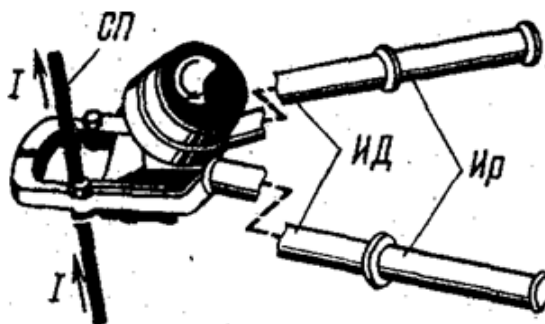


Рис. 23. Измерительные клещи общий вид. СП - силовой провод (до 10 кВ), ИД - изолирующие держатели; Ир - изолирующие ручки.

Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы тока используют как в целях техники безопасности – для отделения измерительной цепи от цепи сетевого напряжения, так и для расширения пределов измерения приборов, которые, как правило, рассчитаны на ток не более 5 А. Первичная обмотка включается в рассечку силовой цепи, а приборы включают во вторичную цепь. Шкалы приборов градуируют с учетом коэффициента трансформации.

Измерительные трансформаторы напряжения используют для понижения напряжения при питании устройств релейной защиты и автоматики, измерительных приборов и установок контроля изоляции.

Трансформатор напряжения 4 (рис. 22) включают в сеть высокого напряжения через разъединители 1, добавочные токоограничивающие сопротивления и предохранители 2. Со стороны низковольтной обмотки 5 с целью защиты трансформатора от коротких замыканий во вторичных цепях и приборах устанавливают предохранители 6.

Для контрольных измерений токов в цепях без их разрыва используют трансформатор тока с разъемным сердечником (измерительные клещи). Первичной обмоткой в этом случае служит токоведущая часть распределительного устройства, охватываемая разъемным сердечником (рис. 23). На этом сердечнике расположена вторичная обмотка, в которую включен амперметр.

Практическая часть

Лабораторная работа №1

Провода и предохранители

Цель работы: изучить предохранители, виды проводников, расчет сечения проводников и предохранителей по мощности нагрузки.

Содержание экспериментальных заданий

Задание 1. Рассчитать сечение медного и алюминиевого проводов, которые можно использовать для подачи электроэнергии для освещения помещения. В помещении необходимо установить: 12 ламп мощностью 150 Вт каждая, 2 лампы мощностью 75 Вт, 6 ламп мощностью 25 Вт, электронагревательный прибор мощностью 1,15 кВт для номинального напряжения 220 и 127 В.

Задание 2. Рассчитать предохранители ($P_{общ}$, P_1 , P_2 , P_3) для защиты электрической цепи, рис. 1. Мощность электроприемников равна 2,4 кВт, 1,2 кВт, 2,8 кВт, 3 кВт. Считать, что пусковой ток равен номинальному. Номинальное напряжение 220 В.

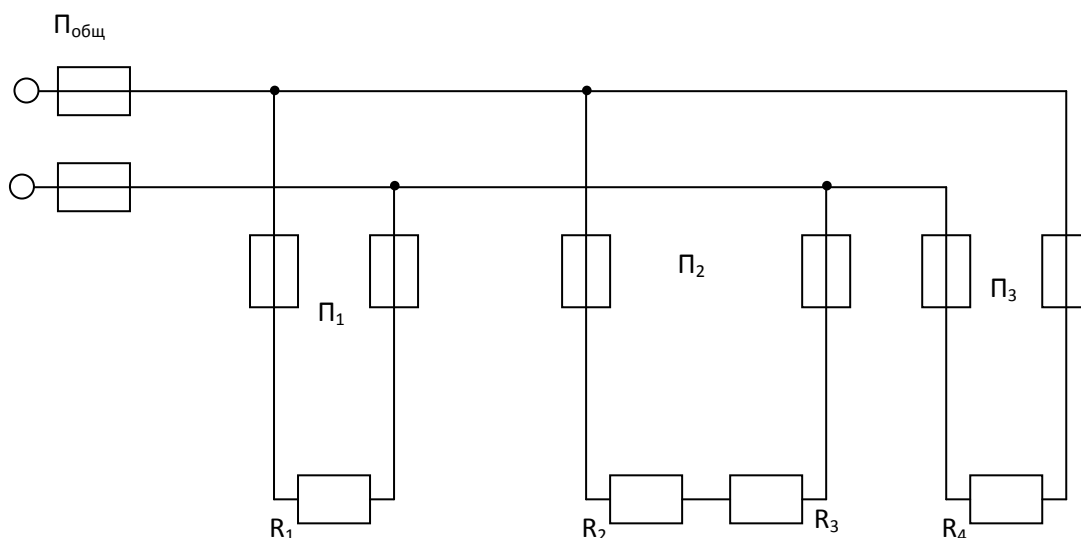


Рис. 1

Контрольные вопросы

1. Объясните механизм проводимости электрического тока в металлах. Что является причиной электрического сопротивления? Какова зависимость электрического сопротивления от температуры?
2. Назовите виды и характеристики проводов.
3. Как осуществляется расчет проводов по допустимой длительной токовой нагрузке?
4. Что называется электрическим предохранителем?
5. Почему ток плавкой вставки должен быть больше тока нагрузки?

Лабораторная работа №2

Коммутационная аппаратура

Цель работы: изучение устройства, принципа действия и применения коммутационных аппаратов.

Приборы и материалы: автоматы защиты, УЗО.

Контрольные вопросы

1. Назначение коммутационной аппаратуры.
2. Опишите устройство и принцип действия котроллера, кнопки, тумблера.
3. Опишите устройство и принцип действия магнитного пускателя.
4. Опишите устройство и принцип действия теплового и магнитного расцепителя.
5. Как осуществляется дугогашение в автоматах?
6. Опишите устройство и принцип действия пакетных выключателей.
7. Опишите устройство и принцип действия УЗО.

Лабораторная работа №3

Измерение мощности в трехфазных цепях переменного тока.

Цель работы: знакомство с трехфазными цепями и методами измерения в трехфазных цепях переменного тока.

Приборы и материалы: понижающий трехфазный трансформатор, 3 амперметра, 3 реостата, вольтметр, ваттметр, соединительные провода.

Ход работы:

Задание 1. Измерение мощности, потребляемой симметричной нагрузкой при соединении звездой.

Соберите схему рис. 1. Отрегулируйте величины сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , так, чтобы токи во всех трех ветвях были равны ($I_1=I_2=I_3=I_k$). Так как нагрузки активные, $\varphi=0$. Присоединяя вольтметр поочередно к точкам 2 и 3, либо к нулевой точке 0, убедитесь, что $P=3P_\phi=2P_1=2P_2$.

Присоединяя вольтметр к точкам 2 и 0, измерьте U_{ϕ} . Измерьте I_{ϕ} и проверьте соотношения: $P = \sqrt{3}I_{\text{л}}U_{\text{л}}$; $P = 3U_{\phi}I_{\phi}$. Измерения повторите при двух - трех различных значениях тока между 0,15 А и 0,35 А.

Результаты измерений и вычислений сведите в таблицу:

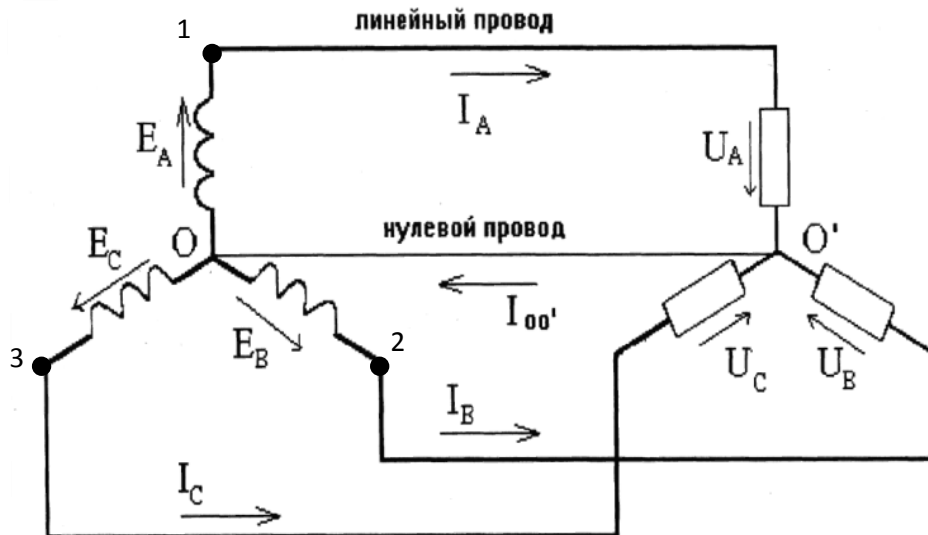


Рис. 2. Соединение звезда-звезда.

Измеренные величины						Вычисленные величины			
$I_{\text{л}}=I_{\phi}$	$U_{\text{л}}$	U_{ϕ}	P_{ϕ}	P_1	P_2	$3P_{\phi}$	P_1+P_2	$3U_{\phi}I_{\phi}$	$U_{\text{л}} / U_{\phi}$

Задание 2. Измерение мощности, потребляемой симметричной активной нагрузки при соединении треугольником.

Соберите схему рис 2. Отрегулируйте сопротивление нагрузочных реостатов так, чтобы токи в ветвях 1, 2 и 3 были одинаковы. Тем же методом, что в задании 1, измерьте мощность. Результаты измерений сведите в таблицу:

Измеренные величины					Вычисленные величины		
$I_{\text{л}}$	I_{ϕ}	U_{ϕ}	P_1	P_2	P_1+P_2	$\sqrt{3}U_{\phi}I_{\phi}$	$I_{\text{л}} / I_{\phi}$

Измерения повторите при трех различных значениях тока между 0,25 А и 0,5А)

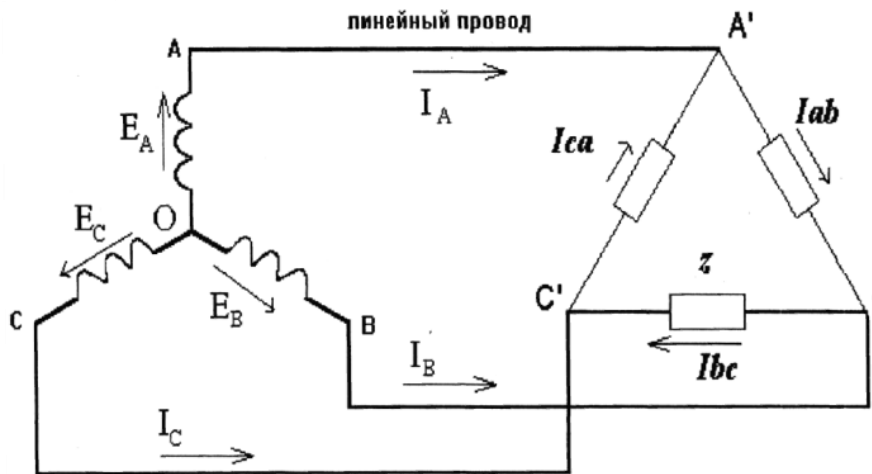


Рис. 2. Соединение звезда-треугольник.

Вопросы к допуску

1. Дайте определение трехфазной системы переменного тока.
2. Какое соединение называется соединением звездой? Треугольником?
3. Для чего служит нулевой провод? В каком случае в нем отсутствует ток?
4. Какова связь между линейными и фазными напряжениями при соединении звездой? Треугольником?
5. В чем преимущество трехфазной системы над однофазной?

Контрольные вопросы

1. Каков порядок построения векторных диаграмм при соединении потребителя звездой; треугольником?
2. Постройте векторные диаграммы напряжений и токов для каждого упражнения.
3. Как подключить к трехфазной сети однофазный потребитель?
4. Почему в нейтральном проводе не ставится предохранитель?
5. Почему в паспортных данных трехфазных двигателей указывается два номинальных напряжения?

Лабораторная работа №4

Пуск и реверсирование трехфазного асинхронного двигателя

Цель работы: изучить устройство и научиться запускать и реверсировать трехфазный асинхронный двигатель.

Приборы и материалы: трехфазный асинхронный двигатель, стенд для пуска и реверсирования трехфазного асинхронного двигателя.

Ход работы

1) Схема управления асинхронным двигателем представлена на рисунке 10. Для пуска двигателя в каком-либо направлении необходимо нажать соответствующую кнопку, при этом с помощью амперметра измерить пусковой ток.

2) Используя паспорт двигателя рассчитать:

- а) ток, потребляемый электродвигателем из сети при полной нагрузке,
- б) напряжения, которые приложены к обмоткам двигателя.

Вопросы к допуску:

1. Какие основные узлы входят в состав асинхронного двигателя?
2. Как получить вращающееся магнитное поле?
3. Опишите схему пуска и реверсирования асинхронного двигателя.
4. В чем отличие двигателя с короткозамкнутым и с фазным ротором.
5. Для чего используются обмотки на валу ротора?

Контрольные вопросы

1. В каком случае используется соединение обмоток двигателя «звезда» и «треугольник»?
2. Что характеризует скольжение? Как оно определяется?
3. Как будет работать асинхронный двигатель, если 1) скорость вращения ротора больше скорости вращения магнитного поля; 2) скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля; 3) скорость вращения ротора меньше скорости вращения магнитного поля?
4. В чем разница в работе асинхронного двигателя: обмотки расположены параллельно валу или находятся под углом к нему?

Лабораторная работа №5

Испытание трёхфазного асинхронного двигателя в однофазном режиме

Цель работы: знакомство с устройством однофазных и трехфазных асинхронных двигателей и схемами их включения; изучение особенностей пуска трехфазного асинхронного двигателя в однофазном режиме и его рабочих характеристик; сравнение свойств однофазного и трехфазного асинхронных двигателей.

Приборы и материалы: трехфазный асинхронный двигатель, батарея конденсаторов, вольтметр, амперметр, соединительные провода.

Ход работы

1. Рассчитать теоретически добавочную ёмкость для двигателя.
2. Запустить двигатель при ёмкости на 6, 4, 2 мкФ меньше расчетной.
3. Запустить двигатель при ёмкости на 6, 4, 2 мкФ больше расчетной.
4. Запустить двигатель при расчетной добавочной ёмкости.

Вопросы к допуску

1. В каких случаях трехфазный двигатель может работать в однофазном режиме?
2. Что используется в качестве пусковых элементов?
3. Какие двигатели называются конденсаторными?
4. Как рассчитывается пусковая емкость?

Контрольные вопросы

1. В чем заключается назначение добавочного и рабочего конденсатора?
2. Каково соотношение между рабочими и добавочными емкостями?

Лабораторная работа №6

Машины постоянного тока

Цель работы: познакомиться с устройством и принципом работы машины постоянного тока.

Приборы и материалы: машина постоянного тока, амперметр, вольтметр, реостат, катушка индуктивности, источник тока.

Содержание экспериментальных заданий

1. Запустить двигатель в режиме последовательного возбуждения. Снять показания амперметра (7-10 измерений) и построить зависимость $I_{я}=f(I_{см})$.
2. Запустить двигатель в режиме параллельного возбуждения. Снять показания амперметра (7-10 измерений) и построить зависимость $I_{я}=f(I_{см})$.
3. Запустить двигатель в режиме независимого возбуждения. Снять показания амперметра (7-10 измерений) и построить зависимость $I_{я}=f(I_{см})$.
4. Рассчитайте для двигателя постоянного тока магнитный поток Φ и постоянную c , используя его в качестве генератора и в качестве серийного двигателя.

Вопросы к допуску

1. Какие основные узлы входят в состав машины переменного тока?
2. Опишите работу машины постоянного тока в режиме двигателя и генератора.
3. Разработайте схемы для последовательного, параллельного и независимого возбуждения электродвигателя с возможностью регулировки скорости вращения и измерения тока якоря и статора.

Контрольные вопросы

1. Какие способы возбуждения двигателя постоянного тока вы знаете?
2. Опишите работу щеточно-коллекторного механизма.
3. Где используются машины постоянного тока?

Лабораторная работа №7

Трансформаторы

Цель работы: познакомиться с устройством и принципом работы трансформаторов.

Приборы и материалы: трансформатор, амперметр, вольтметр, источник переменного тока.

Содержание экспериментальных заданий

1. Подключить трансформатор к источнику переменного тока.
2. Измерить входное напряжение и выходные напряжения на разных обмотках.
3. Рассчитать коэффициенты трансформации.

№	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	k
1			
2			
3			

Вопросы к допуску

1. Каково устройство трансформатора?
2. Почему во вторичной обмотке трансформатора возникает ток?
3. Почему с помощью трансформатора нельзя изменить напряжение постоянного тока?
4. Перечислите виды трансформаторов.
5. Назовите основные параметры трансформатора.
6. Опишите назначение и устройство измерительного трансформатора.

Контрольные вопросы

1. Первичная обмотка трансформатора содержит 800 витков. Сколько витков на вторичной обмотке, если трансформатор повышает напряжение с 220 В до 28 кВ?
2. Электрический прибор мощностью 60 Вт рассчитан на напряжение 36 В. На паспорте трансформатора, от которого питается прибор, указано: 220 В/36 В; КПД прибора — 0,8. Определите силу тока, протекающего по первичной и вторичной обмоткам трансформатора.

Список тестовых заданий

1. Электрический ток в металлах - это...
А) беспорядочное движение заряженных частиц Б) движение ионов
В) направленное движение свободных электронов Г) движение электронов
2. Электрический ток оказывает на проводник действие...
А) тепловое Б) радиоактивное В) магнитное Г) физическое
3. Сопротивление тела человека электрическому току зависит от...
А) роста человека Б) массы человека В) силы тока
Г) физического состояния человека
4. Единицей измерения силы тока является...
А) Ампер Б) Вольт В) Ватт Г) Ом
5. Если напряжение в сети равно 220 В, сопротивление лампы - 20 Ом, тогда сила тока в цепи равна...
А) 4400 А Б) 11 А В) 0,09 А Г) 110 А
6. Наименьшая сила тока, смертельно опасная для человека равна...
А) 0,01 А Б) 0,1 А В) 1 А Г) 0,025 А
7. Закон Ома выражается формулой
А) $U = R/I$ Б) $U = I/R$ В) $I = U/R$ Г) $R = I/U$
8. К диэлектрикам относятся
А) фарфор Б) латунь В) бронза Г) пластмасса
9. Проводниковые материалы используются для изготовления
А) корпусов бытовых приборов Б) проводов
В) якорей электрических машин Г) контактных зажимов

10. К магнитным материалам относятся
А) железо Б) алюминий В) кремний Г) медь
11. Диэлектрики применяют для изготовления
А) магнитопроводов Б) корпусов штепсельных вилок
В) корпусов бытовых приборов Г) обмоток катушек индуктивности
12. К полупроводниковым материалам относятся
А) алюминий Б) кремний В) никель Г) нихром
13. Магнитные материалы применяют для изготовления
А) радиотехнических элементов Б) экранирования проводов
В) обмоток электрических машин Г) якорей электрических машин
14. Установочные провода используются для
А) монтажа аппаратуры и приборов Б) монтажа открытых и скрытых электропроводок
В) обмоток электрических машин Г) прокладки в траншеях
15. На явлении электромагнитной индукции основано действие
А) диода Б) трансформатора В) реостата Г) конденсатора
16. Напряжение, получаемое с помощью генераторов переменного тока, изменяется по закону:
А) линейному Б) квадратичному В) экспоненциальному Г) гармоническому
17. Напряжение, в бытовой сети переменного тока имеет следующие характеристики
А) 370 В, 100 Гц Б) 220 В, 100 Гц В) 220 В, 50 Гц Г) 110 В, 50 Гц
18. Единицами измерения магнитной индукции являются
А) Амперы Б) Теслы В) Вольты Г) Герцы
19. Величина индуцированной э.д.с. зависит от...
А) силы тока Б) напряжения В) скорости вращения витка в магнитном поле Г) длины проводника и силы магнитного поля

20. В бытовой сети переменного тока напряжение
А) фазное, переменное Б) линейное, переменное В) фазное, постоянное Г) линейное, постоянное

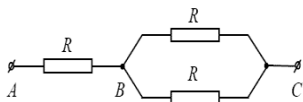
21. Источником магнитного поля является
А) напряжение Б) движущийся электрический заряд
В) покоящийся электрический заряд Г) магнетрон

22. Какое из нижеприведенных утверждений справедливо? Ток в газах обусловлен:

А) Направленным движением электронов и положительными ионами
Б) Направленным движением электронов и отрицательными ионами
В) Направленным движением электронов, положительными и отрицательными ионами
Г) Направленным движением положительными и отрицательными ионами

23. Напряжение на концах резистора увеличилось на 30%. На сколько процентов изменилось сопротивление?

А) Увеличилось на 30% Б) Уменьшилось на 30% В) Увеличилось на 70% Г) Не изменилось



24. Определить эквивалентное сопротивление трех одинаковых резисторов на участке AC, если сопротивление BC равно 12 Ом.

А) 24 Ом Б) 18 Ом В) 6 Ом Г) 36 Ом

25. В каких из нижеприведённых случаях на заряженную частицу действует сила Лоренца?

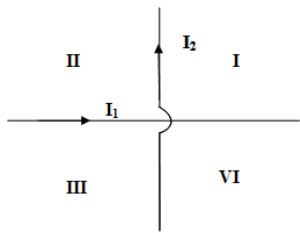
I. При движении заряженной частицы в направлении вектора магнитной индукции.

II. При движении заряженной частицы под углом к направлению вектора магнитной индукции.

III. При движении заряженной частицы в направлении противоположном вектору магнитной индукции.

IV. При движении заряженной частицы в направлении перпендикулярном вектору магнитной индукции.

- А) II, III и IV Б) II и IV В) I Г) I и II



26. Два бесконечно длинных проводника, по которым проходят токи I_1 и I_2 расположены перпендикулярно друг другу в одной плоскости. В каких четвертях могут находиться точки, в которых вектор магнитной индукции равен нулю?

- А) I и III Б) II и IV В) I и IV Г) I, III и IV

27. В цепи переменного тока с ... сопротивлением колебания силы тока совпадают по фазе с колебаниями напряжения.

- А) активным Б) емкостным В) индуктивным Г) активным и емкостным

28. Какое из нижеприведенных утверждений справедливо? При увеличении потока магнитной индукции через контур в 2 раза, его индуктивность:

- А) увеличиться в 2 раза Б) уменьшится в 2 раза В) увеличиться в 4 раза Г) не изменится.

29. К материалам способным проводить электрический ток не относятся:

- А) уголь Б) инертный газ В) парафин Г) хром

30. Допустимой длительной токовой нагрузкой называется:

- А) ток, который проходя длительное время по проводам, вызывает их перегрев
 Б) сопротивление нагрузки, при котором не происходит нагрева проводов
 В) ток, который проходя длительное время по проводам, не вызывает их перегрева
 Г) сопротивление нагрузки, при котором происходит нагрев проводов

31. Найти длину медного провода сечением S , если при подаче на него переменного напряжения U в нем течет сила тока I .

_____ м

32. Определить отношение длин проводов, если при сечении $0,5 \text{ мм}^2$ сила тока 11 А , а при 1 мм^2 – сила тока 17 А . Подаваемое напряжение в обоих случаях одинаково.

33. Соотношение номинального тока плавкой вставки и пускового тока электроприемника должно отвечать условию:

А) $I_{вст} = \frac{I_{пуск}}{2,5}$ Б) $I_{вст} \geq \frac{I_{пуск}}{2,5}$ В) $I_{вст} \leq \frac{I_{пуск}}{2,5}$ Г) $I_{пуск} \geq \frac{I_{вст}}{2,5}$

34. Рассчитать предохранитель для нагрузки $2,2 \text{ кВт}$ в бытовой сети переменного тока. Считать, что пусковой ток равен номинальному.

А) $0,1 \text{ А}$ Б) 1 А В) 10 А Г) 100 А

35. При падении напряжения на 60% от номинального на магнитном пускателе, подключенном к электродвигателю происходит:

А) размыкание силовых контактов Б) замыкание силовых контактов
В) реверсирование двигателя Г) остановка двигателя

36. Демпферные кольца на сердечнике электромагнита магнитного пускателя нужны для:

А) увеличения индукции магнитного поля Б) для уменьшения индукции магнитного поля
В) для крепления сердечника Г) для гашения колебания пластин электромагнита

37. Из-за сбоя в аппаратуре происходит срабатывание автоматического выключателя. При включении автомата кнопка может вести себя следующим образом:

А) отключается сразу – короткое замыкание в сети
Б) отключается сразу – перегрузка сети В) не включается – короткое замыкание в сети Г) не включается – перегрузка сети

38. В качестве теплового расцепителя в автомате защиты используется биметаллическая пластина. Коэффициенты теплового расширения α_1 и α_2 . Для них справедливо соотношение:

А) $\alpha_1 > \alpha_2$ Б) $\alpha_1 = \alpha_2$ В) $\alpha_1 = -\alpha_2$ Г) нет верного ответа

39. Что не является характеристиками УЗО:

- А) номинальное напряжение Б) время срабатывания
В) отключающий дифференциальный ток Г) индукция магнитного поля

40. Назначение УЗО и автоматов защиты:

- А) УЗО – защита человека, автомат – защита человека Б) УЗО – защита аппаратуры, автомат – защита аппаратуры
В) УЗО – защита человека, автомат – защита аппаратуры Г) УЗО – защита аппаратуры, автомат – защита человека

41. В дифференциальном трансформаторе УЗО происходит сравнение

- А) напряжений Б) индукционных токов В) сопротивлений Г) мощностей

42. В симметричной трехфазной системе с переменным синусоидальным напряжением сдвиг фаз равен:

- А) 180° Б) 120° В) 60° Г) 0°

43. Подключить к трехфазной сети однофазную нагрузку можно, если соединение генератор-нагрузка представляет собой:

- А) звезда-треугольник Б) треугольник-звезда В) треугольник-треугольник Г) звезда-звезда

44. В трехфазной сети с нулевым проводом фазное напряжение равно 220 В, тогда линейное равно:

- А) 380 В Б) 220 В В) 129 В Г) нет верного ответа

45. В трехфазной сети реактивная мощность определяется:

- А) $Q = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \text{ ВАр}$ Б) $Q = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \cos \varphi \text{ ВАр}$ В) $Q = 3U_{л}I_{л} \sin \varphi \text{ ВАр}$

- Г) нет верного ответа

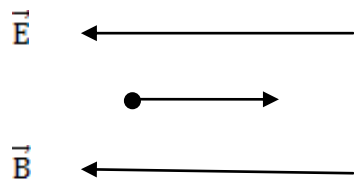
46. Линейное напряжение 380 В, линейный ток 1 А. Фазные напряжения и ток при соединении звездой и треугольником соответственно равны:

- А) З: 220 В и 1 А, Т: 380 В и 1,7 А Б) З: 380 В и 1 А, Т: 220 В и 1,7 А
В) З: 220 В и 0,6 А, Т: 220 В и 1 А Г) З: 220 В и 1 А, Т: 380 В и 0,6 А

47. Определить мощность генератора трехфазного тока, если линейное напряжение 380 В, линейный ток 50 А, $\cos\varphi=0,85$.
А) 16,1 кВт Б) 28 кВт В) 48,4 кВт Г) 19 кВт
48. Какой ток по своей природе опаснее для человеческого организма?
А) постоянный Б) постоянный и переменный одинаково опасны В) переменный
Г) для человеческого организма электрический ток не опасен
49. К материалам способным проводить электрический ток не относятся:
А) уголь Б) инертный газ В) парафин Г) хром
50. Допустимой длительной токовой нагрузкой называется:
А) ток, который проходя длительное время по проводам, вызывает их перегрев
Б) сопротивление нагрузки, при котором не происходит нагрева проводов
В) ток, который проходя длительное время по проводам, не вызывает их перегрева
Г) сопротивление нагрузки, при котором происходит нагрев проводов
51. В электрической схеме два резистивных элемента соединены последовательно. Чему равно напряжение на входе схемы, если $R_1 = 100$ Ом; $R_2 = 200$ Ом; $I = 0,1$ А?
А) 30 В Б) 20 В В) 10 В Г) 100 В
52. Определить сопротивление алюминиевых проводов при температуре 30°C, если известно, что при температуре -20°C их сопротивление 5 Ом. ТКС алюминия равен 0,004 К⁻¹.
А) 4 Ом Б) 5 Ом В) 6 Ом Г) 7 Ом
53. Определить магнитную восприимчивость вещества, если магнитная проницаемость вещества равна двум.
А) 1 Б) 2 В) 3 Г) 4

54. Рассчитать магнитный поток в контуре площадью 1 м^2 , который пересекает магнитное поле перпендикулярно плоскости контура, с магнитной индукцией $0,1 \text{ Тл}$.

- А) $0,1 \text{ Вб}$ Б) 10 Вб В) 0 Вб Г) 1 Вб



55. Определить направление силы, действующей на положительную заряженную частицу движущуюся в электрическом и магнитном полях.

- А) \leftarrow Б) \uparrow В) \rightarrow Г) \downarrow

56. Электрический скин-эффект это явление

- А) вытеснение магнитного потока в приповерхностные области проводника
 Б) возникновение вихревых токов в толще проводника
 В) вытеснения токов высокой частоты в приповерхностные области проводника
 Г) возникновение индукционных токов в проводнике

57. Вихревыми токами или токами Фуко называются:

- А) любые индукционные токи Б) индукционные токи замкнутые в толще проводника В) индукционные токи, возникающие в замкнутом контуре Г) переменный электрический ток

58. Две частицы (с одинаковыми скоростями) влетают под углом 30° к линиям магнитной индукции. Во сколько раз сила Лоренца, действующая на первую частицу, отличается от действия силы на вторую частицу, если её заряд и масса в три раза больше первой?

- А) в 3 раза больше Б) в 9 раз больше В) не отличаются Г) в 3 раза меньше

59. Какое или какие из нижеприведенных утверждений не справедливы?

- I. Увеличение числа витков в соленоиде увеличивает его индуктивность.
 II. Введение в соленоид ферромагнитного сердечника уменьшает его индуктивность.

III. Увеличение потока магнитной индукции через соленоид в 2 раза, приводит к увеличению энергии магнитного поля этого соленоида в 4 раза.

IV. Величина ЭДС самоиндукции, возникающая в соленоиде, прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в этом контуре.

А) Только III Б) Только IV В) I и III Г) II и IV Д) II и III

60. К элементам автоматов защиты относятся

А) электромагнитный расцепитель Б) дифференциальный трансформатор В) статор Г) дугогасительная камера

61. В дифференциальном трансформаторе УЗО происходит сравнение

А) напряжений Б) индукционных токов В) сопротивлений Г) мощностей

62. К основным параметрам трансформатора не относят:

А) коэффициент трансформации Б) напряжение короткого замыкания В) пусковой момент Г) номинальная мощность

63. Нейтральный провод используется при соединении

А) звезда-треугольник Б) треугольник-звезда В) треугольник-треугольник Г) звезда-звезда

64. В трехфазной сети с нулевым проводом фазное напряжение равно 129 В, тогда линейное равно:

А) 380 В Б) 220 В В) 129 В Г) нет верного ответа

65. В трехфазной сети реактивная мощность определяется:

А) $Q = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \text{ВАр}$ Б) $Q = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi \text{ВАр}$ В) $Q = 3U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi \text{ВАр}$ Г) нет верного ответа

66. Линейное напряжение 220 В, линейный ток 2 А. Фазные напряжения и ток при соединении звездой и треугольником соответственно равны:

А) З: напряжение ____ В, ток ____ А,

Т: напряжение ____ В, ток ____ А.

67. В симметричной трехфазной цепи линейное напряжение $U_{\text{л}} = 220$ В, линейный ток $I_{\text{л}} = 5$ А, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,8$. Определить активную мощность.

А) 1110 Вт Б) 1140 Вт В) 1524 Вт Г) 880 Вт.

68. Какой ток по своей природе опаснее для человеческого организма?

А) постоянный Б) постоянный и переменный одинаково опасны В) переменный

Г) для человеческого организма электрический ток не опасен

69. К элементам асинхронного двигателя относятся:

А) катушка индуктивности Б) постоянный магнит В) батарея конденсаторов Г) ротор

70. Вращающееся магнитное поле в статоре создается

А) переменным трехфазным током, подаваемым на три катушки статора

Б) переменным трехфазным током, подаваемым на одну катушку статора

В) постоянным током, подаваемым на три катушки статора

Г) постоянным током, подаваемым на одну катушки статора

71. На электродвигателе указаны следующие характеристики: 3ф~50 Гц, 380 В, 36 А, 4,5 кВт, 1400 об/мин, КПД 77%, $\cos\varphi 0,83$. Рассчитать ток, потребляемый из сети при полной нагрузке.

_____ А

72. На электродвигателе указаны следующие характеристики: 3ф~50 Гц, 380 В, 36 А, 4,5 кВт, 1400 об/мин, КПД 77%, $\cos\varphi 0,83$. Рассчитать напряжения, которые приложены к обмоткам двигателя.

_____ В

73. Если частота вращения магнитного поля n_1 , а частота вращения ротора n , то скольжение S определяется:

А) $S = \frac{n - n_1}{n}$ Б) $S = \frac{n - n_1}{n_1}$ В) $S = \frac{n_1 - n}{n_1}$ Г) $S = \frac{n_1 - n}{n}$

74. Если $0 < S < 1$, то трехфазная асинхронная машина работает в режиме:

А) двигателя Б) генератора В) электромагнитного тормоза Г) нет верного ответа

75. Если $S < 0$, то трехфазная асинхронная машина работает в режиме:

А) двигателя Б) генератора В) электромагнитного тормоза Г) нет верного ответа

76. Если $1 < S$, то трехфазная асинхронная машина работает в режиме:

А) двигателя Б) генератора В) электромагнитного тормоза Г) нет верного ответа

77. Для пуска однофазного асинхронного двигателя необходимо

- А) отключить две обмотки трехфазного двигателя
- Б) в дополнительную обмотку подключить фазосдвигающее устройство
- В) в дополнительную обмотку подключить постоянное напряжение
- Г) нет верного ответа

78. Рассчитать рабочий конденсатор для асинхронного двигателя в однофазном режиме, с номинальными данными: мощность 1,5 кВт, скорость вращения 1405 об/мин, напряжение 380/220 В, ток 3,7 А при 380 В.

_____ мкФ

79. Рассчитать пусковой конденсатор для асинхронного двигателя в однофазном режиме, с номинальными данными: мощность 1,5 кВт, скорость вращения 1405 об/мин, напряжение 380/220 В, ток 3,7 А при 380 В.

80. Шунтовым двигателем постоянного тока называется двигатель, в котором цепь возбуждения относительно цепи якоря включена

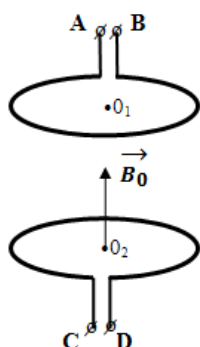
- А) последовательно
- Б) параллельно
- В) последовательно и параллельно
- Г) цепи независимы

81. Серийным двигателем постоянного тока называется двигатель, в котором цепь возбуждения относительно цепи якоря включена

- А) последовательно Б) параллельно В) последовательно и параллельно Г) цепи независимы

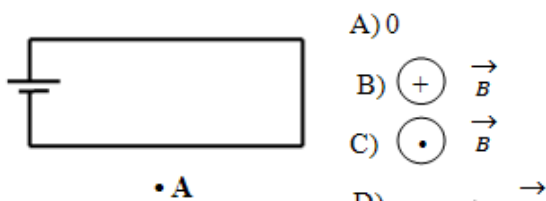
82. Компаундным двигателем постоянного тока называется двигатель, в котором цепь возбуждения относительно цепи якоря включена

- А) последовательно Б) параллельно В) последовательно и параллельно Г) цепи независимы



83. На рисунке изображены два круговых витка с током. По направлению результирующего магнитного поля в центре второго кольца определить полярность клемм, если данные витки притягиваются друг к другу.

- А) А – плюс, В – минус, С – плюс, D – минус
 Б) А – минус, В – плюс, С – минус, D – плюс
 В) А – плюс, В – минус, С – минус, D – плюс
 Г) А – минус, В – плюс, С – плюс, D – минус



84. По контуру, изображённому на рисунке, проходит постоянный ток. Определить направление вектора магнитной индукции в точке А.

85. Второе положение теории Максвелла

- А) всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле
 Б) всякое изменение электрического поля вызывает в окружающем пространстве вихревое магнитное поле В) теорема Гаусса для поля \vec{D} Г) теорема Гаусса для поля \vec{B}

86. Укажите уравнения не входящие в систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме

А) $\text{rot}\vec{E} = -\partial\vec{B}/\partial t$ Б) $\text{div}\vec{D} = \rho$ В) $\text{rot}\vec{H} = \vec{j} + \partial\vec{D}/\partial t$
 Г) $\text{rot}\vec{B} = 0$

87. Третье положение теории Максвелла

- А) всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле
 Б) всякое изменение электрического поля вызывает в окружающем пространстве вихревое магнитное поле В) теорема Гаусса для поля \vec{D}
 Г) теорема Гаусса для поля \vec{B}

88. Укажите уравнения входящие в систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме

А) $\text{rot}\vec{E} = -\partial\vec{B}/\partial t$ Б) $\text{div}\vec{D} = 0$ В) $\text{rot}\vec{B} = -\partial\vec{D}/\partial t$ Г) $\text{div}\vec{B} = 0$

89. Первое положение теории Максвелла

- А) всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле
 Б) всякое изменение электрического поля вызывает в окружающем пространстве вихревое магнитное поле В) теорема Гаусса для поля \vec{D}
 Г) теорема Гаусса для поля \vec{B}

90. Укажите выражения не входящие в уравнения, называемые материальными соотношениями

А) $\vec{D} = \epsilon\epsilon_0\vec{E}$ Б) $\omega = jE^2$ В) $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$ Г) $\vec{j} = \gamma\vec{E}$

91. Сила индукционного тока зависит от

- А) скорости изменения магнитного потока Б) способа изменения магнитного потока В) величины постоянного магнитного потока Г) нет верного ответа

92. Возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока называется

- А) индуктивностью $L = -\frac{dI}{dt}$ Б) электромагнитной индукцией $\xi_i = \frac{d\Phi}{dt}$
 В) самоиндукцией $\xi_S = -L\frac{dI}{dt}$ Г) потокосцеплением $\Psi = \Phi N$

93. В каких из нижеприведённых случаях на заряженную частицу не действует сила Лоренца?

I. При движении заряженной частицы в направлении вектора магнитной индукции.

II. При движении заряженной частицы под углом к направлению вектора магнитной индукции.

III. При движении заряженной частицы в направлении противоположном вектору магнитной индукции.

IV. При движении заряженной частицы в направлении перпендикулярном вектору магнитной индукции.

А) II, III и IV Б) II и IV В) I Г) I, III

94. Какое из нижеприведенных утверждений справедливо? При увеличении потока магнитной индукции через контур в 2 раза, его индуктивность:

А) увеличиться в 2 раза Б) уменьшится в 2 раза В) увеличится в 4 раза Г) не изменится.

95. В каком из нижеприведенных случаях в контуре не возникает ЭДС индукции?

А) в контуре, который движется в магнитном поле, под углом к направлению магнитного поля

Б) в контуре, находящимся в магнитном поле, который изменяет свою площадь

В) в контуре, который двигается в постоянном магнитном поле, параллельно линиям магнитной индукции Г) в контуре, изменяющем свою ориентацию относительно магнитного поля

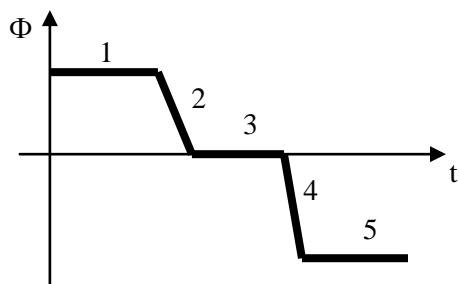
96. Заряженная частица в магнитном поле движется по окружности если:

А) $\vec{v} \parallel \vec{B}$ Б) $\vec{v} \perp \vec{B}$ В) частица движется под углом к линиям \vec{B}

Г) нет верного ответа

97. Выберите окончание утверждения, которое наиболее полно отражает сущность явления самоиндукции: «В замкнутом контуре индукционный ток появляется, если»

А) по контуру течет постоянный ток Б) контур поместить в постоянное однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции В) по контуру течет переменный ток Г) контур поместить в однородное магнитное поле индукция которого изменяется со временем, параллельно линиям магнитной индукции



98. Магнитный поток, пересекающий замкнутый контур, изменяется с течением времени согласно графику. Какие участки графика соответствуют отсутствию тока в контуре?
 А) 1, 5 Б) 3 В) 1, 3, 5 Г) 2, 4

99. По какому закону убывает сила тока в цепи переменного тока при размыкании цепи

А) по линейному Б) по квадратичному В) по экспоненциальному
 Г) мгновенно убывает до нуля

100. Зависимость удельного сопротивления от температуры задается температурным коэффициентом сопротивления

А) $\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$ Б) $\alpha = \rho \frac{d\rho}{dT}$ В) $\alpha = \frac{d\rho}{dT}$ Г) $\alpha = \frac{1}{\rho}$

Список рекомендуемой литературы

1. Волынский В.А. и др. Электротехника / Б.А. Волынский, Е.Н. Зейн, В.Е. Шатерников: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 528 с., ил.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 440 с., ил.
3. Основы промышленной электроники: учебник для неэлектротехн. спец. вузов /В.Г. Герасимов, О М. Князьков, А Е. Краснопольский, В.В. Сухоруков; под ред. В.Г. Герасимова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2006. – 336 с., ил.
4. Электротехника и электроника в 3-х кн.; под ред. В.Г. Герасимова. Кн.1. Электрические и магнитные цепи. – М.: Высшая шк. – 2006.
5. Электротехника и электроника в 3-х кн. Под ред. В.Г. Герасимова Кн.2. Электромагнитные устройства и электрические машины. – М.: Высшая шк., 2007.

Содержание

Введение	3
Основы электромагнетизма	5
Система уравнений Максвелла.....	5
Электрический ток.....	7
Закон Джоуля-Ленца.....	8
Магнитное поле. Характеристики магнитного поля.....	9
Действие магнитного поля на проводники с током и движущиеся заряженные частицы.....	11
Электромагнитная индукция.....	12
Вихревые токи (токи Фуко).....	13
Индуктивность контура.....	13
Соленоид.....	14
Самоиндукция.....	15
Токи при размыкании и замыкании цепи.....	16
Взаимная индукция.....	17
Трансформаторы.....	18
Энергия магнитного поля.....	19
Вращение рамки в магнитном поле.....	21
Электрические машины	23
Виды и характеристики проводов.....	23
Расчет проводов.....	25
Электрические предохранители.....	28
Коммутационная аппаратура.....	29
УЗО и принцип его работы.....	33
Трехфазная цепь.....	35
Трехфазные асинхронные двигатели.....	38

Работа трехфазного двигателя в однофазном режиме.....	43
Схемы пуска АД в однофазном режиме с пульсирующим полем	47
Машины постоянного тока.....	49
Устройство трансформаторов.....	56
Измерительные трансформаторы.....	62
Практическая часть.....	63
№1. Провода и предохранители.....	63
№2. Коммутационная аппаратура.....	64
№3. Измерение мощности в трехфазных цепях переменного тока.....	65
№4. Пуск и реверсирование трехфазного асинхронного двигателя	68
№5. Испытание трёхфазного асинхронного двигателя в однофазном режиме.....	69
№6. Машины постоянного тока.....	70
№7. Трансформаторы.....	71
Список тестовых заданий.....	72
Список рекомендуемой литературы.....	87

Учебно-методическое издание

Боброва Т.М., Ипполитова Л.Н.,
Кузнецов Д.В., Токарев В.В.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Учебно-методическое
пособие

*Технический редактор – Н.П. Безногих
Техническое исполнение – В.М.Гришин*

Лицензия на издательскую деятельность
ИД № 06146. Дата выдачи 26.10.01.
Формат 60 x 84 /16. Гарнитура Times. Печать трафаретная.
Усл.-печ.л. 5,5 Уч.-изд.л. 5,7
Тираж 500 экз. (1-й завод 1-30 экз.). Заказ 181

Отпечатано с готового оригинал-макета на участке оперативной полиграфии
Елецкого государственного университета им. И. А. Бунина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»
399770, г. Елец, ул. Коммунаров, 28