

ВВЕДЕНИЕ

Роль электрических машин в промышленности и на транспорте. Электрические машины неотъемлемо связаны с электрической энергией.

Ее преимущества перед другими видами энергии:

- наиболее универсальная энергия, легко преобразуется в другие виды: механическую, тепловую, химическую, лучистую энергию;
- возможность передавать ее на большие расстояния с малыми потерями;
- возможность доставлять электрическую энергию в любую точку на Земле.

Электрическую энергию вырабатывают на электростанциях, где механическая энергия пара, воды преобразуется в электрическую с помощью электрогенераторов (везде переменного тока). Обратное преобразование энергии – с помощью электродвигателей (электромоторов).

Трансформаторы – статические машины, но электромагнитные законы те же, что и у вращающихся машин.

Классификация электрических машин:

1) в зависимости от рода тока вращающиеся электрические машины делятся на машины постоянного и переменного тока;

2) в зависимости от мощности машины бывают:

- микромашины – до 0,5 кВт;
- малой мощности – 0,5–20 кВт;
- средней мощности – 20–250 кВт;
- большой мощности – более 250 кВт.

На железнодорожном транспорте электрические машины используются как тяговые электрические двигатели на подвижном составе, в автоматике, телемеханике и в других службах.

Краткая история развития электрических машин. Электромашиностроение началось чуть более 150 лет назад. В основу работы электрических машин заложены два физических явления: магнетизм и электричество.

В 1820 г. Эрстед показал связь между магнитным полем и током.

В 1822 г. английский физик Майкл Фарадей впервые ввел принцип преобразования электрической энергии в механическую энергию (принцип вращения).

В 1824 г. Барлоу создал первую принципиальную модель электродвигателя (униполярного) (рисунок), а также сформулировал так называемое «правило левой руки».

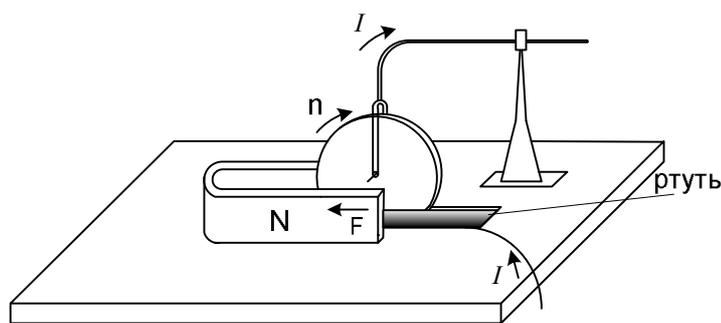


Рисунок. Модель униполярного двигателя

В 1831 г. М. Фарадей открыл закон электромагнитной индукции – получение электрического напряжения на концах проводника, перемещаемого в магнитном поле (модель генератора).

После чего русские физики Э.Х. Ленц и Б.С. Якоби в 1833 г. сформулировали принцип обратимости электрических машин.

Генераторостроение. Первыми источниками электрической энергии были гальванические элементы постоянного тока, поэтому и электрические машины стремились выполнить на постоянном токе.

В период 1831–1886 гг. генератор приобрел все основные черты современной машины. Этот период проходил в четыре этапа.

1. Создание магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами с выпрямлением переменного тока в пульсирующий, “коромысло” Ампера, вывернутый коллектор (1831–1851 гг.).

2. Применение электрических магнитов с независимым возбуждением (1851–1867 гг.), кольцевого якоря.

3. Применение электрических магнитов с самовозбуждением и кольцевым якорем (1867–1871 гг.).

4. Электрические машины с барабанными якорями и многополюсной магнитной системой (1871–1886 гг.). 1876 г. – генератор переменного тока: однофазный синхронный генератор П.Н. Яблочкова для питания электрических свечей переменного тока. Далее переход к трехфазному генератору переменного тока в 1890 г.

Электромоторостроение. Параллельно с разработкой генераторов (1822–1834 гг.) ведется создание физических моделей двигателей. Наряду с униполярной электрической машиной создавались электрические машины, повторяющие схему работы паровой машины с возвратно-поступательным движением (втягивание железного стержня вовнутрь соленоида).

Одну из таких машин в 1851 г. установили на локомотив и развили скорость до 30 км/ч используя батарею. Это дало начало развитию электрической тяги. Но русский физик Б.С. Якоби еще в 1834 г. создал электрический двигатель с вращательным движением якоря мощностью $P = 500$ Вт, который был установлен на катере в 1838 г.

В 1888 г. югославский изобретатель Тесла создал асинхронный двухфазный двигатель переменного тока.

В 1889 г. русский электротехник М.С. Доливо-Добровольский создал трехфазную систему и трехфазный асинхронный двигатель.

В 1910 г. немецкие ученые Шраге и Рихтер создали шунтовой трехфазный коллекторный двигатель.

В 1930 г. – электромашинный усилитель с поперечным полем.

Разработаны линейные, дугостаторные и другие электрические машины. В настоящее время электрические машины в основном приобрели окончательную форму. Проводится большая работа по увеличению мощности в единице объема.

Номинальные данные электрических машин. Номинальными, определяющими параметрами электрических машин, называют ток, напряжение, мощность и кпд, соответствующие определенному режиму работы, установленному стандартом. Для тяговых двигателей, например, установлены два таких режима: часовой и продолжительный.

Часовой режим определяется наибольшим током, который при работе тягового двигателя на испытательном стенде в течение одного часа с возбуждением, предусмотренным для этого режима, и нормально действующей вентиляцией не вызывает превышения температуры его частей над температурой окружающего воздуха выше норм, установленных для изоляции соответствующего класса. Напряжение на зажимах двигателя при таких испытаниях должно быть номинальным, а температура его частей перед испытаниями – практически равной температуре окружающего воздуха.

Продолжительный режим определяется так же наибольшим током, как и часовой, но при работе двигателя на испытательном стенде в течение неограниченного времени. Температура частей двигателя перед испытаниями в этом случае может быть любой, но в пределах допустимых норм.

Значения тока, мощности, частоты вращения и кпд двигателя, соответствующие часовому режиму, называют часовыми и обозначают их соответственно $I_{\text{ч}}$, $P_{\text{ч}}$, $n_{\text{ч}}$, $\eta_{\text{ч}}$, а значения этих величин, относящиеся к продолжительному режиму, называют продолжительными и обозначают их I_{∞} , P_{∞} , n_{∞} , η_{∞} .

Номинальные (часовой и продолжительный) токи обычно ограничены нагреванием обмоток якоря и катушек полюсов, а иногда и нагреванием коллектора. Часовой ток двигателя зависит от теплоемкости его частей и отдачи тепла с его поверхности (теплоотдающей способности), а продолжительный ток зависит только от теплорассеивающей способности машины, и поэтому он меньше часового.

Номинальное напряжение электрической машины – это напряжение, на которое она рассчитана, и которому соответствуют ее типовые характеристики.

Номинальные данные электрических машин приводят на специальных табличках, которые укрепляют на видном месте их несъемной части. В этих табличках указывают: товарный знак предприятия – изготовителя; род (двигатель, генератор) и тип машины; род тока; номинальные режимы работы, наибольшую рабочую (допустимую в эксплуатации) частоту вращения, номинальную степень возбуждения (постоянную шунтировку обмоток возбуждения, когда она предусмотрена); массу машины (без зубчатой передачи); год выпуска машины; обозначение стандарта, которому соответствует машина; класс изоляции.

ЛЕКЦИЯ 1

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

План лекции

- 1.1. Область применения машин постоянного тока.
- 1.2. Принцип действия генератора постоянного тока, основное уравнение эдс и напряжения.
- 1.3. Принцип действия двигателя постоянного тока, основное уравнение напряжения и эдс.

1.1. Область применения машин постоянного тока

Машина постоянного тока как и любая электрическая машина обратима: может работать как генератор и как двигатель. Причем двигатели нашли большее применение, чем генераторы.

В табл. 1.1 приведены характеристики некоторых электрических машин постоянного тока.

Таблица 1.1

Характеристики электрических машин постоянного тока

Назначение	Использование	P, кВт	I, А	U, В	Примечание
Двигатели	Трамвай	40÷50	75÷100	550	Имеют преимущества перед двигателями переменного тока: 1) широкое регулирование частоты вращения; 2) развивают большой пусковой момент
	Электровоз	600÷900	400÷600	1500	
	Прокатный стан	11500	11500	1000	
	Атомоход «Ленин»	18000	18000	1000	
Генераторы	Для электролиза	60÷120	10000	6÷12	Чаще используются генераторы переменного тока с выпрямителями
	Тепловоз (старые модификации)	2700	3600	750	

1.2. Принцип действия генератора постоянного тока, основное уравнение эдс и напряжения

Возможность построения механического генератора появилась после открытия Фарадеем закона электромагнитной индукции в 1831 г.

Если проводник перемещать в магнитном поле так, чтобы он пересекал магнитные линии, то на концах проводника появится разность потенциалов – эдс (электродвижущая сила).

Простейшим генератором является рамка на оси, помещенная в магнитном поле (рис. 1.1), которую вращают.

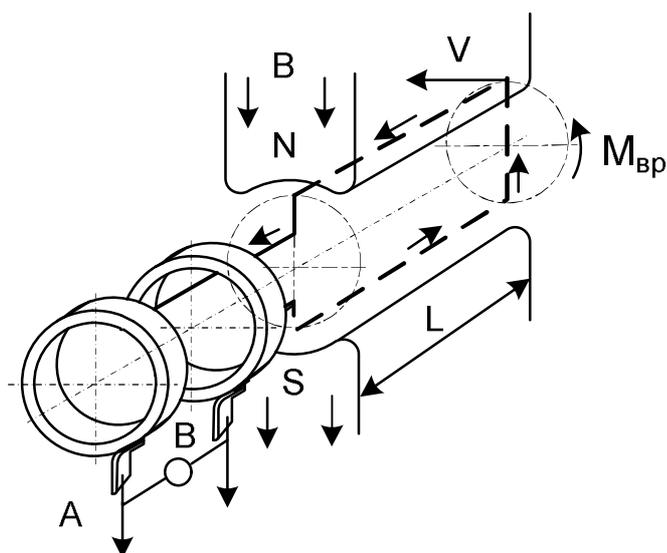


Рис. 1.1. Схема работы машины переменного тока

Концы проводников соединены с кольцами, которые вращаются вместе с рамкой. На кольцах помещены неподвижные щетки. Присоединенный к щеткам вольтметр покажет разность потенциалов, т.е. эдс рамки, которая будет изменяться как по величине, так и по направлению. Направление эдс определяется по правилу правой ладони, состоящему в следующем.

Ладонь правой руки располагают в магнитном поле так, чтобы линии магнитной индукции были направлены в ладонь, а большой палец отводят относительно других пальцев в плоскости ладони на 90 градусов и направляют по движению проводника; тогда остальные пальцы руки покажут направление наведенной в проводнике эдс.

В общем случае $e = BIV$, если $IV = \text{const}$, то $e \equiv B$. С некоторым приближением допускаем, что индукция под полюсами изменяется по синусоидальному закону, тогда

$$e = BIV \sin \alpha = E_{\max} \sin \omega t,$$

где α – угол поворота, так как $\alpha = \omega t$, то при $\omega = \text{const}$ вместо α можно горизонтальную ось обозначать осью времени t .

Частота наводимой переменной эдс

$$f = \frac{1}{T},$$

где T – период полного цикла изменения эдс (рис. 1.2).

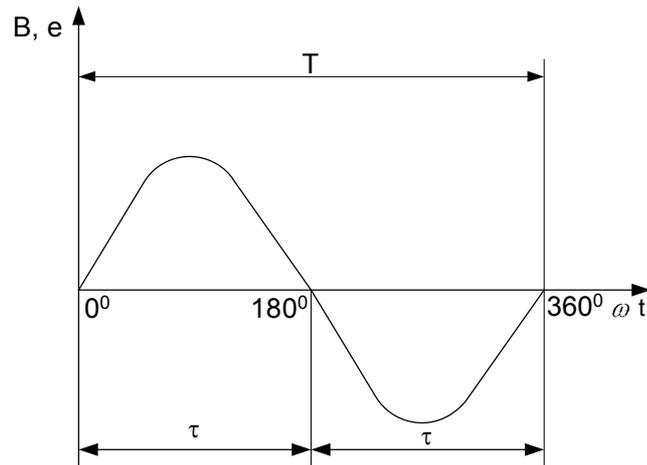


Рис. 1.2. Синусоида индукции или эдс

Для преобразования переменного тока в постоянный применяют коллектор. Для этого проводники простейшего генератора соединяют с двумя медными полукольцами, названными коллекторными пластинами (рис. 1.3).

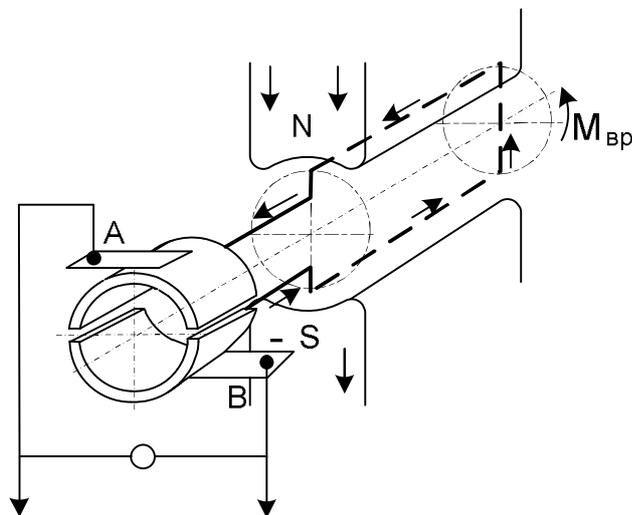


Рис. 1.3. Схема работы машины постоянного тока

Пластины жестко связаны с валом рамки, но изолированы друг от друга. Щетки на коллекторных пластинах устанавливаются так, чтобы они переходили с одной коллекторной пластины на другую в тот момент, когда эдс равна нулю. Таким образом, щетка контактирует с полукольцом одного направления эдс. В этом случае ток на щетках и по внешнему участку цепи, через потребитель, протекает в одном направлении, но величина его изменяется с течением времени; эдс и ток имеют пульсирующую форму (рис. 1.4). Если взять n рамок (обмотка якоря) и $2n$ коллекторных пластин (коллектор), то увеличится и число пульсирующих эдс за период времени T (рис. 1.5). Если пульсаций менее 2 %, то ток считается постоянным.

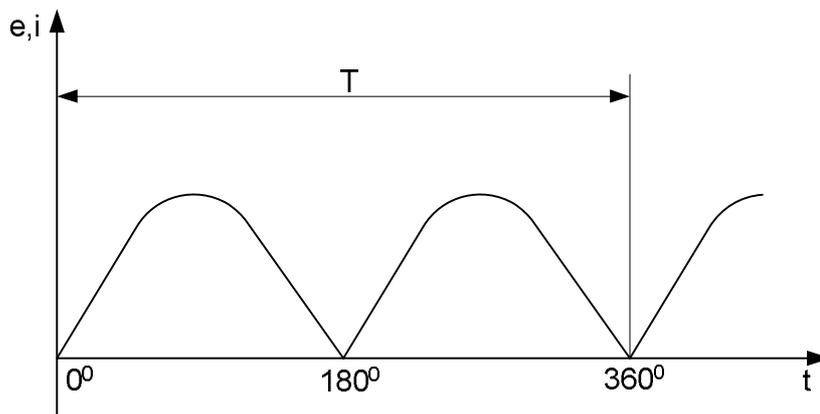


Рис. 1.4. Выпрямленная эдс и ток

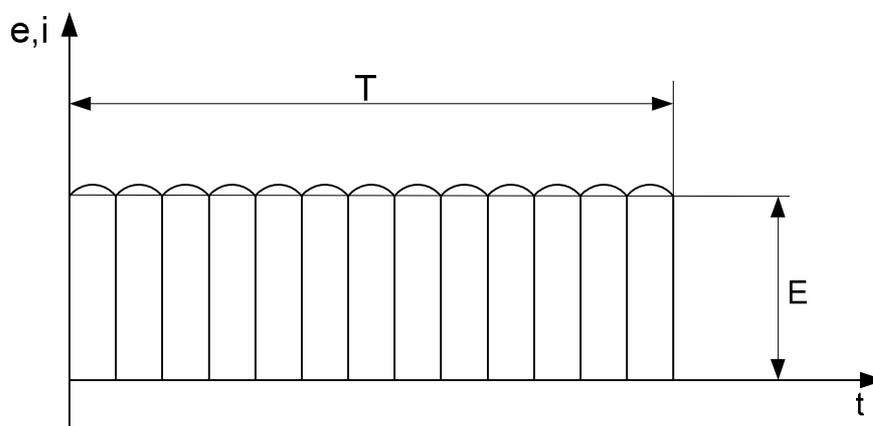


Рис. 1.5. Выпрямленная эдс и ток в реальном генераторе

Таким образом, в генераторе коллектор является механическим выпрямителем, который преобразовывает переменную эдс витков якоря в постоянную эдс на щетках и цепи. Совокупность витков составляет обмотку якоря.

Если к щеткам подсоединить потребитель электрической энергии, то потечет электрический ток, который в обмотке якоря будет создавать падение напряжения. Вследствие этого напряжение на зажимах генератора будет меньше эдс на величину падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря

$$U = E_a - I_a r_a, \quad (1.1)$$

где a – индекс параметров якорной обмотки.

Формула (1.1) является основным уравнением эдс и напряжения генератора. Но на проводник с током в магнитном поле действует выталкивающая сила F , направленная навстречу вращению. Ток в обмотке якоря будет создавать противодействующий вращению момент $M_{пр}$. Чем больше I_a , тем больше необходимо усилий для преодоления противодействующего момента

$$M_{\text{пр}} = F \frac{D_a}{2}, \quad (1.2)$$

где D_a – диаметр якоря;

$$F = B I I_a. \quad (1.3)$$

1.3. Принцип действия двигателя постоянного тока, основное уравнение напряжения и эдс

В силу обратимости электрических машин принцип действия электрического двигателя можно рассмотреть по рис. 1.3, только к щеткам необходимо подвести напряжение сети.

На проводник с током, помещенный в магнитное поле действует выталкивающая сила, определяемая правилом левой руки (см. рис. 1.3)

$$F = B I I_a,$$

Это действие можно проследить по рис. 1.6.

С правой стороны магнитные линии складываются (поле усиливается), с левой – наоборот, появляется сила F согласно правилу левой руки.

Если поместить рамку с током в магнитное поле, то появляется вращающий электромагнитный момент (рис. 1.7)

$$M_{\text{эм}} = F \frac{D_a}{2}.$$

Рамка повернется только до горизонтального положения. Чтобы направление вращения было в одну сторону, необходимо периодически менять направление тока.

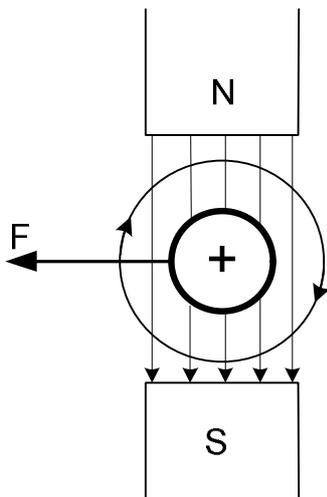


Рис. 1.6. Выталкивающая сила, действующая на проводник с током

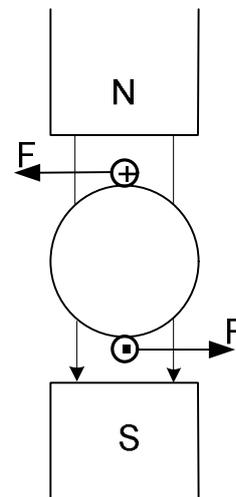


Рис. 1.7 Вращающий момент, действующий на рамку с током

В режиме двигателя коллектор превращает потребляемый из внешней цепи постоянный ток в переменный в обмотке якоря и работает таким образом в качестве механического инвертора.

Так как проводники все время пересекают магнитное поле, то в них наводится эдс, величина которой определяется равенством $e = B l v$ и которая направлена встречно подводимому напряжению, поэтому эту эдс еще называют противоэлектродвижущей силой (противоэдс) в двигателе.

Основное уравнение эдс и напряжения двигателя

$$U = E_a + I_a r_a. \quad (1.4)$$

ЛЕКЦИЯ 2 ОБМОТКИ ЯКОРЕЙ

План лекции

- 2.1. Обмотки кольцевого якоря и их недостатки.
- 2.2. Якорные обмотки барабанного типа.
- 2.3. Простая петлевая обмотка.
- 2.4. Простая волновая обмотка.

2.1. Обмотки кольцевого якоря и их недостатки

На начальном этапе электромашиностроения использовался кольцевой якорь. Это полый цилиндр, по внешней и внутренней поверхности которого наматываются витки обмотки; каждый виток соединен с коллекторной пластиной.

Недостатки такого якоря:

- а) плохое использование меди, ибо активной частью витка является та часть его, которая расположена на внешней поверхности якоря;
- б) невозможно механизировать процесс намотки;
- в) завышенные габариты (внутренние слои в несколько витков).

2.2. Якорные обмотки барабанного типа

Якорные обмотки барабанного типа отличаются от кольцевого тем, что обе стороны одного витка располагаются на его внешней поверхности; увеличивается использование меди обмотки; механизмуется процесс намотки.

Витки заготавливаются заранее на шаблонах, и обмотчик не обматывает якорь машины, а укладывает готовые элементы обмотки в пазы.

В витке индуцированные эдс должны действовать согласовано, а для этого активные стороны витка должны находиться под полюсами разной полярности. Необходимо чтобы ширина витка составляла

$$y_1 \cong \tau,$$

где τ – полюсное деление;

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}. \quad (2.1)$$

Полюсное деление – это часть длины поверхности якоря, приходящаяся на один полюс (рис. 2.1).

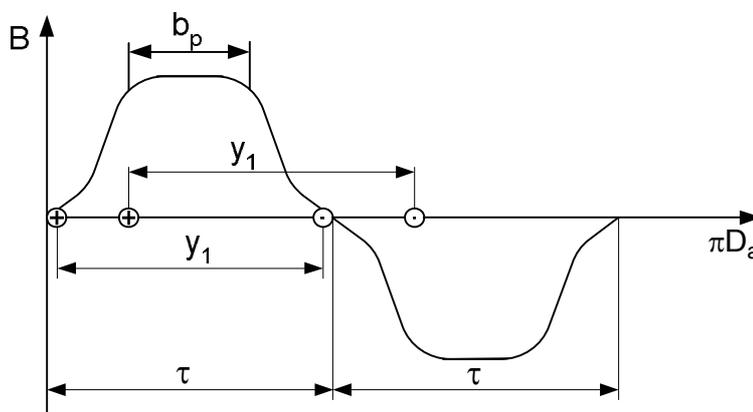


Рис. 2.1. Секции барабанного якоря

Но лучше чтобы $y_1 \leq \tau$ (экономия меди).

Коэффициент полюсного перекрытия

$$\alpha_\delta = \frac{b_p}{\tau}, \quad (2.2)$$

$$\alpha_\delta = 0,7 \div 0,75,$$

где b_p – ширина полюсного наконечника.

Нельзя чтобы наконечники полюсов соприкасались.

Секция обмотки – часть обмотки, находящаяся между двумя следующими друг за другом при обходе обмотки коллекторными пластинами. Секция может состоять из одного витка и множества витков.

Обмотки барабанного типа в основном – двухслойные. В пазу может располагаться несколько активных сторон секций (рис. 2.2). Одна сторона секции располагается в верхней части, другая – в нижней части другого паза (двухслойная обмотка). Здесь обмотки расположены в два

слоя, но в одном реальном пазу (рис. 2.2, в) располагаются три элементарных пазы ($1Z = 3Z_э$)

$$Z_э = u Z, \quad (2.3)$$

где u – количество элементарных пазов в одном реальном.

Элементарный паз включает одну верхнюю и одну нижнюю стороны секции.

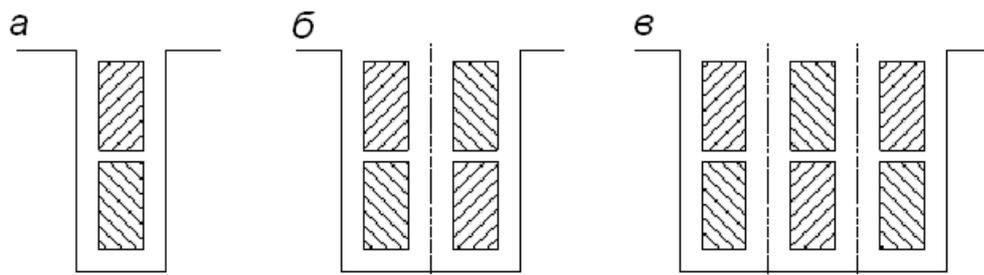


Рис. 2.2. Пазы якоря, состоящие из элементарных пазов: а – одного; б – двух; в – трех

Если все стороны секции одного слоя переходят вместе из одного реального пазу в другой, их объединяют общей изоляцией и называют катушкой обмотки.

Обмотки якорей подразделяются на петлевые и волновые (рис. 2.3). Существуют так же обмотки, которые представляют собой сочетание этих двух обмоток.

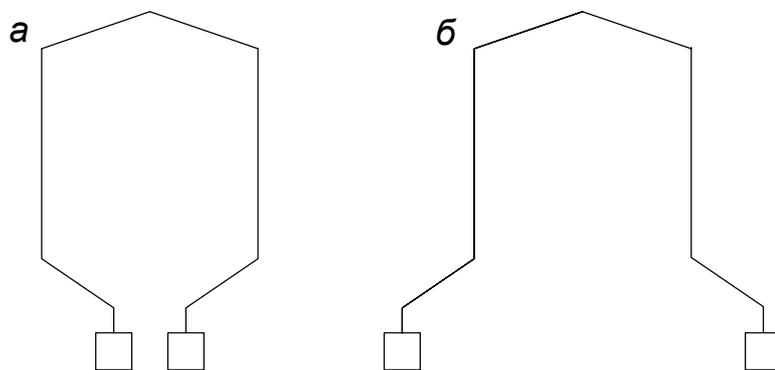


Рис. 2.3. Одновитковая секция: а – петлевой обмотки; б – волновой обмотки

Если число активных проводников обмотки N , то витков всего $N/2$, а если в секции ω витков, то число секций

$$N / 2\omega = S . \quad (2.4)$$

Число секций в машине должно быть равно числу коллекторных пластин K и числу элементарных пазов $Z_э$:

$$S = K = Z_э. \quad (2.5)$$

2.3. Простая петлевая обмотка

Чтобы эдс второй секции действовала согласно с эдс первой секции, надо чтобы начальные стороны обеих секций находились под полюсом одинаковой полярности. При петлевой обмотке начальные стороны обеих секций находятся под одним полюсом (рис. 2.4).

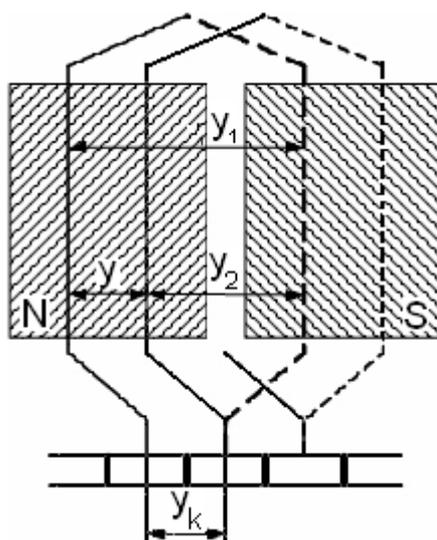


Рис. 2.4. Простая петлевая обмотка

Ширина секции, выраженная в элементарных пазах, называется первым частичным шагом – y_1 , т.е. это расстояние между начальной и конечной сторонами секции; y_2 – второй частичный шаг, расстояние между конечной стороной одной секции и начальной следующей секции; y_k – шаг по коллектору измеряется в коллекторных (пластинах) делениях, показывает смещение мест отпаек секций

$$y = y_k = y_1 - y_2, \quad (2.6)$$

где y – результирующий шаг, показывает смещение следующих друг за другом секций в пазах.

При $y_k = 1$ – обмотка простая. При $y_1 > y_2$ – обмотка получается правой неперекрещивающейся. При $y_1 < y_2$ – обмотка получается левой перекрещивающейся

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2P}.$$

В случае, если первый частичный шаг y_1 равен целому числу, то $y_1 = \tau$ и если же y_1 не равен целому числу, то его округляют до ближайшего целого числа, лучше в сторону уменьшения, так как тогда обмотка получается укороченной

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2P} \pm \xi = \text{целое число.}$$

Реальные обмотки могут быть представлены в виде схем: радиальные, плоские развернутые.

2.4. Простая волновая обмотка

Волновые обмотки это такие обмотки, у которых начальная сторона второго витка помещена под следующий полюс той же полярности (рис. 2.5).

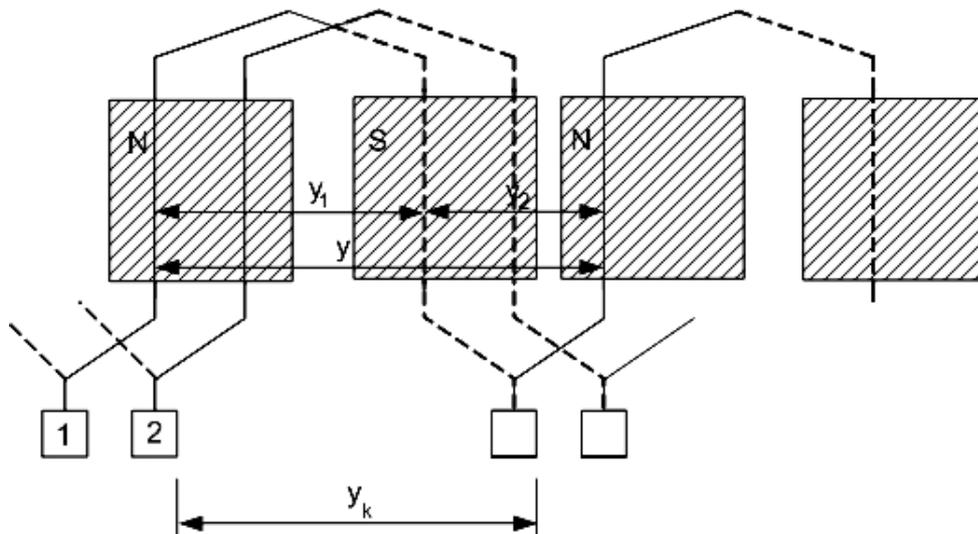


Рис. 2.5. Простая волновая обмотка

В результате за один обход по якорю укладывается P секций с результирующим шагом y

$$y_1 + y_2 = y = y_k. \quad (2.7)$$

Результирующий шаг не должен быть равным 2τ , ибо за P результирующих шагов происходит один обход всей окружности якоря, и если $y = 2\tau$, то обмотка замкнется сама на себя, а остальные секции останутся вне ее. Поэтому надо, чтобы конец первого обхода не совпадал с ее началом, и происходило смещение хотя бы на один элементарный паз и коллекторное деление

$$yP \pm 1 = Z_{\text{э}},$$

где «+» – перекрещивающаяся правоходовая; «-» – неперекрещивающаяся левоходовая обмотка.

Откуда результирующий шаг

$$y = \frac{Z_{\text{э}} \mp 1}{P}. \quad (2.8)$$

Первый частичный шаг определяется так же, как и у простой петлевой обмотки:

$$y_1 = \frac{Z_3}{2P} \pm \xi. \quad (2.9)$$

Если смещение за один обход составляет $x = 1$, то она носит название простой волновой обмотки, а число пар параллельных ветвей $a = 1$, тогда выражение (2.8) заменяем:

$$y = \frac{Z_3 \pm a}{P}. \quad (2.10)$$

Таким образом, результирующий шаг должен соответствовать двум полюсным делениям.

ЛЕКЦИЯ 3 ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОСТЫХ ЯКОРНЫХ ОБМОТОК

План лекции

3.1. Пример выполнения простой петлевой обмотки.

3.2. Пример выполнения простой волновой обмотки.

3.1. Пример выполнения простой петлевой обмотки

Дано: число активных проводников $N = 48$. Число витков в секции обмотки $\omega = 2$. Элементарных пазов в одном реальном $u = 1$ (рис. 3.1).

Число полюсов $2p = 4$. Обмотка – простая петлевая $y_k = 1 = y$;

число секций: $S = N/2\omega = 48/2 \cdot 2 = 12$;

число элементарных пазов: $Z_3 = S = 12$;

число коллекторных пластин: $K = Z_3 = S = 12$;

число реальных пазов: $Z = Z_3/u = 12/1 = 12$.

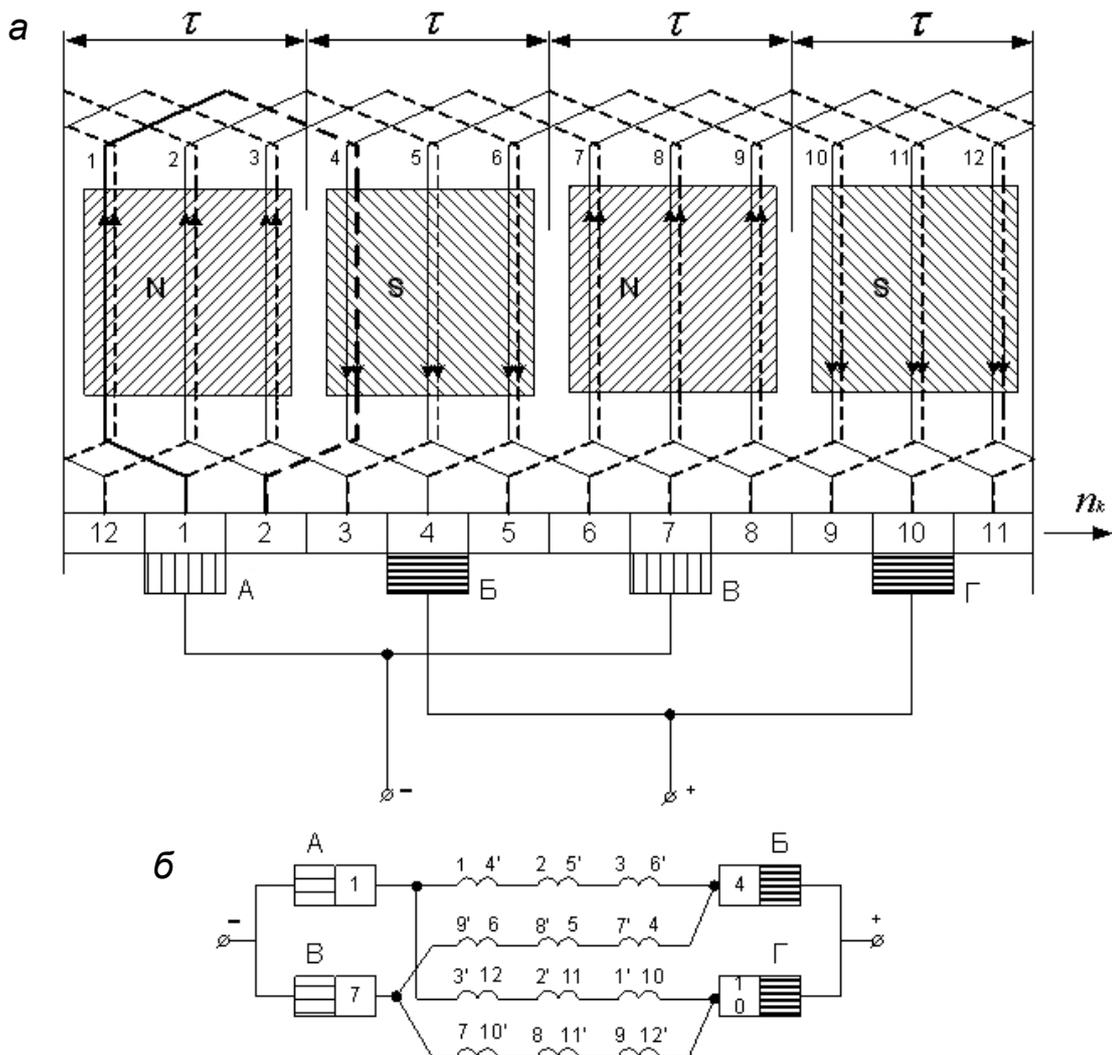
Первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{Z_3}{2P} \pm \xi = \frac{12}{4} \pm \xi = 3,$$

где $\xi = 0$;

$$y_2 = y_1 - y = y_1 - y_k = 3 - 1 = 2.$$

Так как $y_1 > y_2$, то обмотка правая неперекрещивающаяся.



2) щетка ставится там, где секция переходит в другую полярность магнитного потока, когда стороны секций находятся на геометрической нейтрали.

3.2. Пример выполнения простой волновой обмотки

Дано: $Z = 15$; $u = 1$; $2P = 4$.

Построить схему-развертку простой волновой обмотки (рис. 3.2).

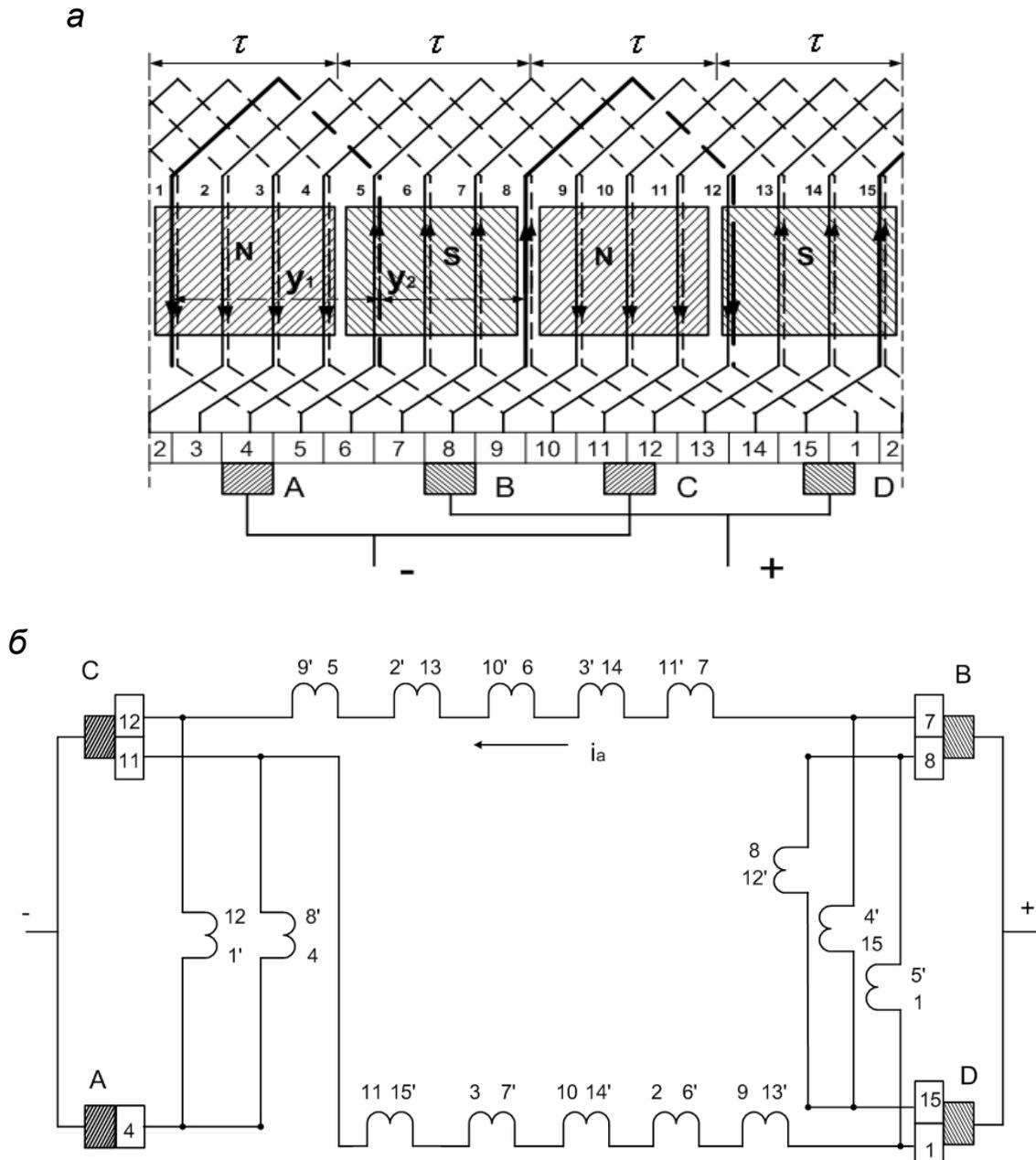


Рис. 3.2. Схема простой волновой обмотки: а – плоская развернутая схема; б – схема параллельных ветвей

Решение:

$$Z_{\text{э}} = Z_{\text{у}} = 15 \cdot 1 = 15; \quad S = K = Z_{\text{э}} = 15.$$

Первый частичный шаг $y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2P} \pm \xi = \frac{15}{4} + \frac{1}{4} = 4$ паз.

Результирующий шаг $y = \frac{Z_{\text{э}} \pm 1}{P} = \frac{15 \mp 1}{2} = 8 \div 7$ пазов.

Принимаем $y = 7$ пазам.

Второй частичный шаг $y_2 = y - y_1 = 7 - 4 = 3$ паз.

На плоскости показываем 15 пазов с расположенными в пазах верхним (-----) и нижним (-----) слоями обмотки. Верхний слой обмотки первого паза соединяется с первой коллекторной пластиной. Нижний слой этой секции расположен в ($y = 1$ паз + $y_1 = 1 + 4$) пятом пазу и присоединяется к восьмой коллекторной пластине. Так как результирующий шаг $y = 7$ пазам, то восьмая коллекторная пластина соединяется с верхним слоем восьмого паза; далее нижний слой 12-го паза, 15-я коллекторная пластина и т.д. пока обмотка не замкнется нижним слоем на 1-ю коллекторную пластину.

Определяем полюсное деление в пазах

$$\tau = \frac{Z_{\text{э}}}{2P} = \frac{15}{2 \cdot 2} = 3,75 \text{ паз}$$

и показываем на схеме. В пределах τ располагаем очертания полюсов N–S–N–S, шириной $b_p = \alpha_{\delta} \tau$, где α_{δ} – коэффициент полюсного перекрытия, дается в задании. В зоне одного полюсного деления токи протекают в обмотках одного направления, которое определяется для двигателя правилом левой ладони, согласно принятому направлению вращения. Как устанавливаются щетки см. подразд. 3.1. Выполняем обозначение полярности щеток.

Далее выполняем схему параллельных ветвей (см. рис. 3.2) и определяем направление токов в ветвях.

В простой волновой обмотке при любом $2P$ получается только пара параллельных ветвей $a = 1$, ($2a = 2$). В тех случаях, когда $y = \frac{Z_{\text{э}} \pm 1}{P}$ дает не целое число, и при этом $\frac{Z_{\text{э}}}{P} \neq$ целому числу, то принимают $k = Z_{\text{э}} - 1$, тогда одна секция не присоединяется к коллектору и называется «мертвой» [1, 2].

Случается, что при $y = \frac{Z_{\text{э}} \pm 1}{P} \neq$ целому числу, а $\frac{Z_{\text{э}}}{P} \neq$ целое число, тогда одна секция выполняется короткозамкнутой [1, 2].

ЛЕКЦИЯ 4 КОМБИНИРОВАННЫЕ И СЛОЖНЫЕ ОБМОТКИ. УСЛОВИЯ СИММЕТРИИ. УРАВНИТЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

План лекции

- 4.1. Понятие о комбинированной обмотке.
- 4.2. Сложные обмотки.
- 4.3. Условия симметрии обмоток.
- 4.4. Уравнительные соединения.

4.1. Понятие о комбинированной обмотке (лягушачья)

Комбинированная обмотка – это сочетание двух обмоток петлевой и волновой, расположенных в одних и тех же пазах и присоединенных к одному коллектору. Здесь уравнительным соединением первого рода для петлевой обмотки является волновая, а для волновой второго рода – петлевая (рис. 4.1).

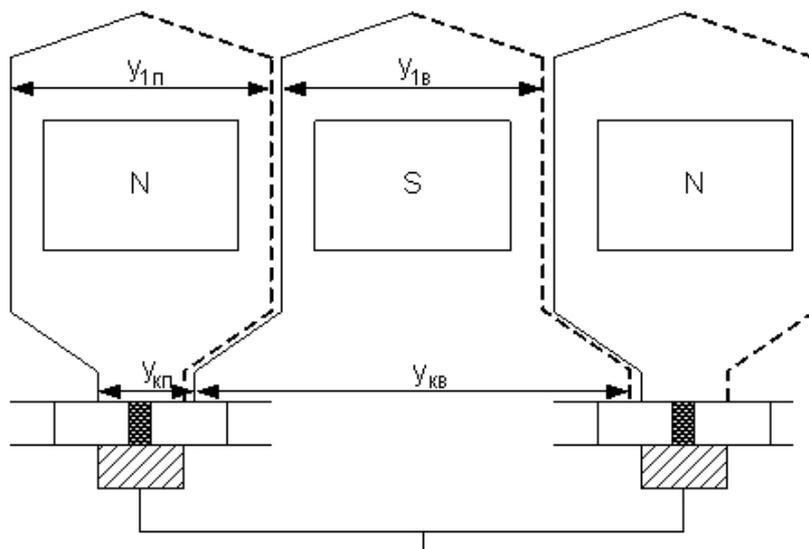


Рис. 4.1. Комбинированная обмотка

4.2. Сложные обмотки

Сложную обмотку рассмотрим на примере петлевой обмотки (рис. 4.2). Ток в параллельной ветви:

$$i_a = \frac{I}{2a} = 250 \dots 350 \text{ A}.$$

При $U = \text{const}$ увеличение мощности возможно за счет увеличения числа пар полюсов. В петлевых обмотках за счет увеличения числа $2P$ увеличивается $2a$, но иногда это выполнять нежелательно, поэтому переходят к сложным петлевым обмоткам, у которых $y_k > 1$, как правило, $y_k = 2 = y$.

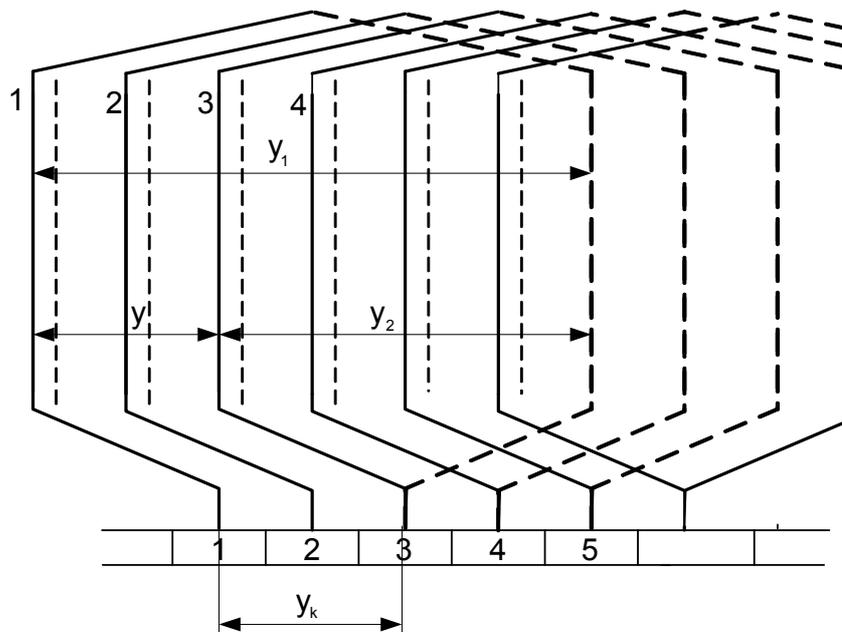


Рис. 4.2. Сложная петлевая обмотка

Сложные обмотки выполняются как две простые, смещенные относительно друг друга. При этом нечетные коллекторные пластины и элементарные пазы принадлежат одной обмотке, а четные – другой (см. рис. 4.2):

$$y = y_k = m,$$

где m – кратность обмотки;

$$y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2P} \pm \xi,$$

$$y = y_1 - y_2 = \pm m .$$

Так как соседние коллекторные пластины принадлежат разным обмоткам, то ширина щетки должна быть такой, чтобы она перекрывала не менее m пластин

$$2a = 2Pm,$$

то есть в m раз больше, чем в простой обмотке.

4.3. Условия симметрии обмоток

Во всякой обмотке есть несколько параллельных ветвей.

Чтобы эдс каждой ветви были одинаковы, ветви должны быть симметричны. А для этого следует выполнить три условия.

1. Число активных сторон по параллельным ветвям должно быть одинаково, то есть

$$\frac{2S}{2a} = \frac{S}{a} = \frac{Z_{\text{э}}}{a} = \frac{K}{a} - \text{целое число.}$$

2. Число реальных пазов, приходящихся на пару параллельных ветвей, должно быть одинаковым, то есть

$$\frac{Z}{a} = \text{целое число.}$$

3. Каждая сторона секции одной параллельной ветви, находящаяся в определенном месте под каким-либо полюсом, должна соответствовать стороне секции другой параллельной ветви, расположенной в том же месте под другим полюсом той же полярности

$$\frac{2P}{a} = \text{целое число.}$$

4.4. Уравнительные соединения

Ввиду того, что машины имеют магнитную несимметрию, распределение потенциала вдоль параллельных ветвей неодинаковое. Например, воздушные зазоры под нижними полюсами меньше чем под верхними, следовательно, магнитный поток под верхними полюсами будет меньше чем под нижними. А следовательно, и эдс в верхних обмотках якоря будет меньше чем в нижних. Это приводит к появлению уравнительных токов, которые будут замыкаться через щетки, загружая при этом одну щетку и разгружая другую.

Для устранения этого явления применяют уравнительные соединения первого рода – это проводники, соединяющие между собой точки нормально одинакового потенциала параллельных ветвей. Конструктивно это выполняется двумя способами:

- 1) припаивают проводники в шлицы коллектора;
- 2) припаивают проводники с противоположной стороны к головкам секций.

В простых петлевых обмотках применяются уравнители первого рода, а в волновых – уравнители второго рода.

ЛЕКЦИЯ 5 ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

План лекции

- 5.1. Эдс обмотки якоря.
- 5.2. Электромагнитный момент.
- 5.3. Линейная нагрузка якоря.
- 5.4. Плотность тока.
- 5.5. Реакция якоря.
- 5.6. Влияние реакции якоря на распределение напряжения между коллекторными пластинами.
- 5.7. Меры борьбы с влиянием поперечной реакции якоря.

5.1. Эдс реакции якоря

Эдс якоря машины определяется алгебраической суммой мгновенных значений эдс проводников одной параллельной ветви:

$$E = \sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} e_i = \sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} B_i l_a V_a = \sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} B_i l_a V_a = \frac{N}{2a} B_{\text{cp}} l_a V_a, \quad (5.1)$$

где $\frac{N}{2a}$ – число проводников в одной параллельной ветви; e_i – мгновенное значение эдс i -го проводника; l_a – активная длина проводника; V_a – линейная скорость вращения.

Исходя из

$$\sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} B_i = \frac{N}{2a} B_{\text{cp}},$$
$$B_{\text{cp}} = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{\tau l_a} = \frac{\Phi}{\frac{\pi D_a l_a}{2P}}, \quad (5.2)$$

$$V_a = \frac{\pi D_a n}{60},$$

где n – число оборотов в минуту.

Получаем

$$E = \frac{N}{2a} \frac{\Phi}{\frac{\pi D_a l_a}{2P}} \frac{\pi D_a n}{60} l_a = \frac{NP}{60a} \Phi n, \quad (5.3)$$

$$E = C_e \Phi n, \quad (5.4)$$

где $\frac{NP}{60a} = C_e = \text{const.}$

5.2. Электромагнитный момент

Уравнение эдс и напряжений для двигателя:

$$U = E + I_a R_a. \quad (5.5)$$

Если левую и правую части уравнения умножить на одну и ту же величину I_a , то

$UI_a = EI_a + I_a^2 R_a$ – уравнение электрических мощностей

$$P_1 = P_{эм} + \Delta P,$$

где P_1 – подведенная мощность; ΔP – потери мощности; $P_{эм}$ – электромагнитная мощность (полезная).

Электромагнитная мощность преобразуется в мощность вращения якоря, то есть в механическую мощность вращения

$$\begin{aligned} P_{эм} &= P_{мех}, \\ EI_a &= M\omega, \end{aligned} \quad (5.6)$$

где M – электромагнитный момент; ω – угловая частота вращения;

$$\omega = \frac{2\pi n}{60},$$

$$M = \frac{EI_a}{\omega} = \frac{Np}{60a} \frac{\Phi n I_a}{2\pi n} = \frac{NP}{2\pi a} \Phi I, \quad (5.7)$$

$$M = C_M \Phi I.$$

Для перевода M в килограмм-метры выражение (5.7) делят на 9,8 м²/с.

Здесь $C_M = \frac{NP}{2\pi a}$ – постоянная машины по моменту.

5.3. Линейная нагрузка якоря

Линейная нагрузка якоря – это величина тока, приходящаяся на единицу длины окружности якоря, $\frac{A}{M}$,

$$A = \frac{Ni_a}{\pi D_a}. \quad (5.8)$$

5.4. Плотность тока

Величина тока, приходящаяся на сечение проводника в один квадратный миллиметр, называется плотностью тока, $\frac{A}{\text{мм}^2}$

$$j_{доп} = \frac{I}{S}. \quad (5.9)$$

Допустимая плотность тока – это такая плотность, при которой проводник нагревается, не превышая допустимых пределов, например:

$$j_{\text{доп}} = 10 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \text{ – для машин с } D_a = 10 \text{ см, тогда } A = (100 \div 150) \text{ А/м;}$$

$$j_{\text{доп}} = 5 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \text{ – для машин с } D_a = 30 \text{ см, тогда } A = (450 \div 500) \text{ А/м.}$$

5.5. Реакция якоря

Кроме основного магнитного потока, в машинах постоянного тока еще наводится поток от тока, протекающего по обмотке якоря. Рассмотрим картину их распределения (рис. 5.1).

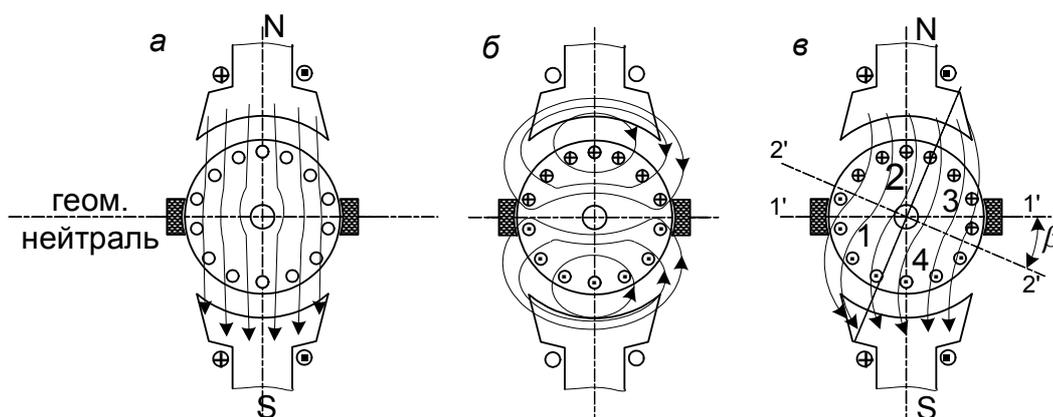


Рис. 5.1. Магнитное поле машины: а – при $I_a = 0$, $\Phi_0 \neq 0(x.x)$; б – при $I_a \neq 0$, $\Phi_0 = 0(x.x)$; в – результирующее

На рис. 5.1, а показана картина распределения только основного магнитного потока от главных полюсов, ток в обмотке якоря при этом отсутствует.

При отсутствии поля главных полюсов, токи в обмотке якоря распределяются по положению щеток, то есть выше линии геометрической нейтрали имеют одно направление, а ниже – другое (рис. 5.1, б). Это позволяет рассматривать обмотку якоря, как некоторую катушку, ось которой совпадает с геометрической нейтралью. Магнитные линии рисуем по правилу “буравчика”. Хотя якорь и вращается, магнитное поле якоря остается неподвижным в пространстве.

Если ось поля якоря перпендикулярна к оси полюсов, то оно носит название поперечного поля реакции якоря.

Для определения результирующего потока воспользуемся методом наложения полей.

Нейтральными точками на якоре являются те, нормальная составляющая индукции в которых равно нулю; то есть действительно нейтральная (физическая 2'-2') ось теперь не совпадает с геометрической (1'-1'):

– у генератора (согласно правилу правой руки) смещается по вращению;

– у двигателя – против вращения;

Физическая нейтраль разбивает катушку на четыре части.

В частях 1 и 3 идет подмагничивание основного магнитного потока, а в частях 2 и 4 – размагничивание, поэтому такое явление называют продольной подмагничивающей реакцией якоря и продольной размагничивающей. Если машина не насыщена, то размагничивающее действие под одной половиной полюса и подмагничивающее под другой взаимно компенсируются, и магнитный поток в машине остается неизменным. А если машина достаточно насыщена, то подмагничивание не компенсирует размагничивание, и общий поток в машине уменьшается.

Итак, влияние магнитного потока обмотки якоря на основной магнитный поток полюсов называется реакцией якоря.

При расположении щеток на геометрической нейтрали вся намагничивающая сила якоря будет поперечной.

При смещении щеток с геометрической нейтрали на физическую появится и продольная реакция при уменьшении поперечной.

5.6. Влияние реакции якоря на распределение напряжения между коллекторными пластинами

При движении секции в магнитном поле в ней индуцируется эдс. Концы секции присоединены к коллекторным пластинам (ламелям), поэтому напряжение между этими пластинами называется межламельным и определяется:

$$U_i = e_i = B_i l v.$$

Очевидно, где больше B_i там и больше величина U_i , которая имеет важное значение в работе щеточно-коллекторного узла.

При образовании “проводящих мостиков” между коллекторными пластинами, последние могут выгорать, что может привести к мощной дуге и “круговому огню”.

Среднее межламельное напряжение может быть определено по формуле

$$U_{\text{ср}} = \frac{U}{\frac{k}{2P}} = \frac{2U_p}{K}.$$

Отношение $\frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{ср}}}$ может достигать $1,8 \div 1,85$, что следует учитывать при проектировании машин.

5.7. Меры борьбы с влиянием поперечной реакции якоря

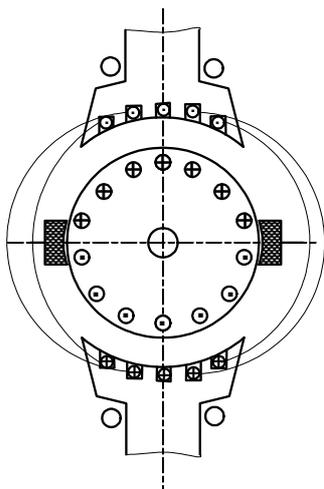


Рис. 5.2. Компенсационная обмотка

1. Компенсационная обмотка – зеркальное отображение якорной обмотки.

То есть магнитный поток от компенсационной обмотки должен быть зеркальным отображением потока реакции якоря, для этого в пазы главного полюса укладывают обмотку с $A_{ко} = A_a$; электрически компенсационная обмотка включается последовательно с якорной обмоткой (рис. 5.2).

2. Выбор величины воздушного зазора. Реакция якоря тем больше, чем меньше величина зазора, но увеличение зазора требует увеличения намагничивающей силы (н.с.) обмоток главных полюсов.

3. Форма наконечника главного полюса.

4. Установка добавочных полюсов, которые компенсируют реакцию якоря в зоне коммутации.

ЛЕКЦИЯ 6

КОММУТАЦИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

План лекции

- 6.1. Степени искрения.
- 6.2. Причины искрения.
- 6.3. Классическая теория коммутации (теория Арнольда).
- 6.4. Реактивная эдс в коммутируемой секции.
- 6.5. Уменьшение реактивной эдс.

Коммутацией называется процесс переключения секций обмотки из одной параллельной ветви в другую с изменением направления тока в них на обратное.

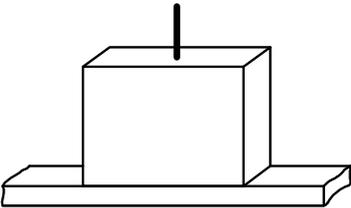
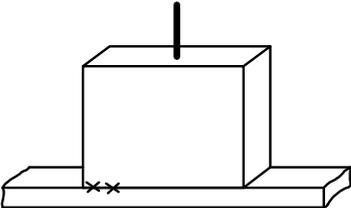
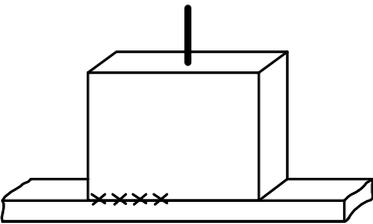
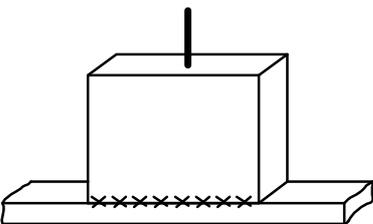
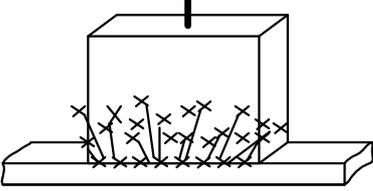
Коммутация считается хорошей, когда процесс изменения тока в секциях не сопровождается искрообразованием между щетками и коллектором и поверхность коллектора остается чистой, не поврежденной при длительной работе машины.

6.1. Степени искрения

На основании ГОСТ 183–74 состояние коммутации оценивается по степени искрения под сбегающим краем щетки, различается пять классов коммутации (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Классы коммутации

Класс коммутации	Степень искрения	Состояние коллектора и щеток
<p>1</p> 	Отсутствие искрения (темная коммутация)	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
<p>1 ¼</p> 	Слабое точечное искрение, примерно на ¼ поверхности щетки	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
<p>1 ½</p> 	Искрение примерно на половине и более поверхности щетки	Появление следов почернения на коллекторе, но легко устранимых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
<p>2</p> 	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки	Появление следов почернения на коллекторе, не устранимых протиранием коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
<p>3</p> 	Значительное искрение с наличием вылетающих крупных искр. Допускается при прямом безреостатном пуске	Значительное почернение на коллекторе, не устранимое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток

Если степень искрения не указана в стандартах на отдельные виды машин, то при номинальном режиме работы должна быть не выше 1 ½.

6.2. Причины искрения

Искрение может быть вызвано:

- а) механическими причинами;
- б) электрическими причинами.

К *механическим* причинам можно отнести геометрическое несовершенство выполнения коллектора и щеточного аппарата:

- эллиптическая форма коллектора;
- выступание отдельных коллекторных пластин;
- недостаточная балансировка коллектора;
- вибрация щеток и другие причины.

К *электрическим* причинам можно отнести:

- повышение напряжения между коллекторными пластинами выше допустимого предела, когда искрение перерастает в круговой огонь;
- повышение напряжения и плотности тока в момент разрыва контура между щеткой и коллекторной пластиной.

Анализ электрических причин искрения представляет наиболее трудную задачу при изучении процессов коммутации.

Коммутация – это весьма сложный процесс, зависящий от большого количества факторов, поэтому точный и строгий анализ этого явления представляет чрезвычайно трудную задачу. Следовательно, существующие теории коммутации имеют ряд условных допущений, позволяющих дать основу некоторой математической модели.

6.3. Классическая теория коммутации (теория Арнольда)

В основу классической теории Арнольда заложены следующие допущения.

1. Полное механическое совершенство коллектора и щеток при любых скоростях вращения.

2. Постоянство удельного сопротивления контакта между щеткой и коллектором, а также независимость его от плотности тока в контакте и величины контактной поверхности.

Обычно анализ коммутации начинают с простейшего случая:

- ширина щетки равна ширине коллекторной пластины;
- сумма эдс в коммутирующем контуре равна нулю.

Коммутируемая секция находится между второй и третьей коллекторными пластинами (рис. 6.1).

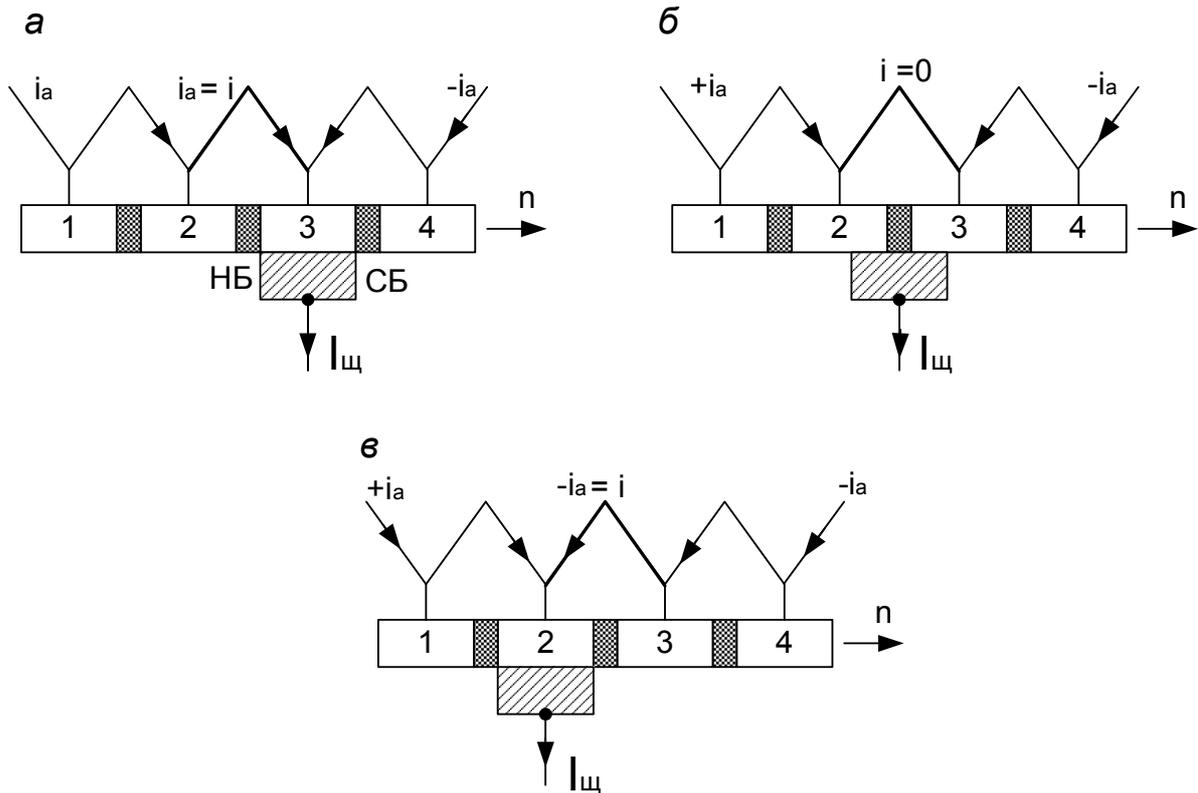


Рис. 6.1. Анализ коммутации: $\pm i_a$ – ток в одной и другой параллельных ветвях; НБ и СБ – набегающий и сбегающий края щетки; i – ток, который протекает в коммутируемой секции; T – период коммутации; а – $i = +i_a$, при $t = 0$; б – $i = 0$, при $t = \frac{1}{2}T$; в – $i = -i_a$, при $t = T$

Если считать что в коммутируемой секции за время изменения тока с $+i_a$ на $-i_a$ не возникает никакой эдс (то есть $\sum e = 0$), то тогда ток будет изменяться по уравнению

$$i = i_a \left(1 - 2 \frac{t}{T}\right),$$

а диаграмма изменения тока i согласно уравнения может быть представлена рис. 6.2. При такой коммутации плотность тока под щеткой получается везде одинаковой

$$j_{щ} = \frac{I_{щ}}{S_{щ}},$$

а коммутация называется прямолинейной.

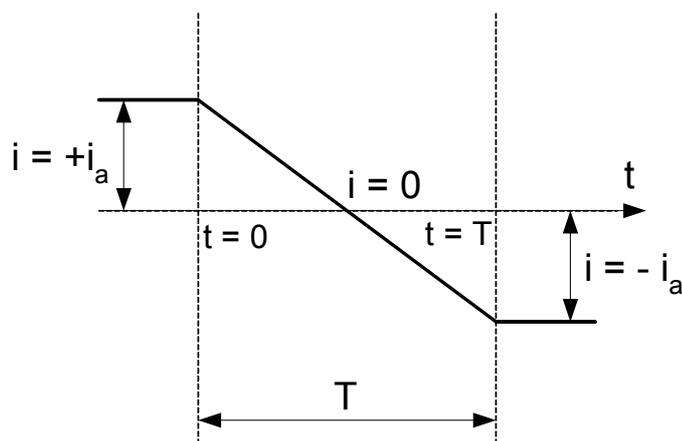


Рис. 6.2. Прямолинейная коммутация

6.4. Реактивная эдс в коммутируемой секции

Величина периода коммутации очень мала, так как $b_{щ} = b_{л}$, а $b_{л} = 4 \div 5$ мм и если линейная скорость коллектора 20 м/с, то процесс коммутации будет длиться всего

$$T = \frac{4 \text{ мм}}{20000 \text{ мм/с}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с} = 0,0002 \text{ с.}$$

Следовательно, ток будет изменяться весьма быстро.

По законам электротехники всякому изменению тока в обмотке препятствует эдс самоиндукции

$$e_L = -L_c \frac{di}{dt},$$

где L_c – индукция секции, при прямолинейной коммутации – величина постоянная

$$e_L = -L_c \frac{2i_a}{T} = -L_c \frac{I_{щ}}{T}.$$

В результате, под влиянием эдс самоиндукции, прямолинейная коммутация замедляется (рис. 6.3). В начальный момент протекает тока меньше через набегающий край, плотность тока под набегающим краем уменьшается, а под сбегающим – наоборот возрастает по сравнению с плотностью тока при прямолинейной коммутации.

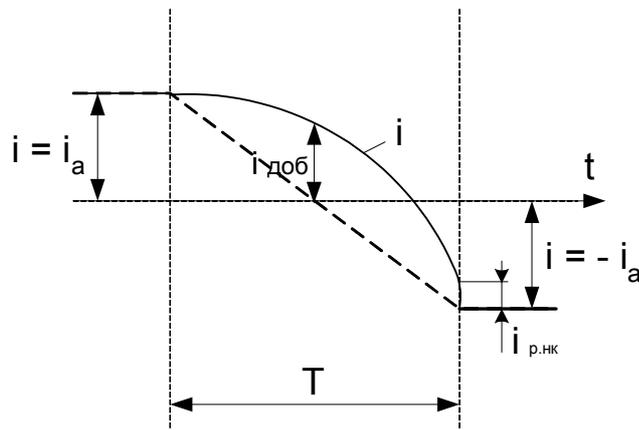


Рис. 6.3. Замедленная коммутация

Теперь уже и эдс e_L не будет постоянной величиной. На сбегающем крае создается условие для повышенного искрообразования:

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{доб}},$$

$$i_{\text{доб}} = \frac{\sum e}{r_k},$$

где r_k – сопротивление коммутируемого контура; $i_{\text{р.нк}}$ – ток разрыва при замедленной коммутации (от недокоммутации).

Основной причиной искрения является добавочный ток.

Если же щетка перекрывает не одну, а несколько коллекторных пластин, ток одновременно коммутируется в нескольких рядом лежащих секциях, поэтому в коммутируемых секциях наводится еще и эдс взаимной индукции e_m , которая также замедляет изменение тока в секции. Кроме этих двух видов эдс могут возникать и другие эдс, вызываемые пульсациями результирующего поля в зоне коммутации.

Сумма всех эдс, способствующих замедлению изменения тока в секции, называется реактивной эдс:

$$e_r = e_L + e_m,$$

$$i_{\text{доб}} = \frac{\sum e}{r_k} = \frac{e_r}{r_k}.$$

Для уменьшения добавочного тока следует уменьшить реактивную эдс e_r или же увеличить сопротивление цепи коммутируемого контура, второе делается подбором щетки с большим сопротивлением.

6.5. Уменьшение реактивной эдс

1. Конструктивные мероприятия.

Так как реактивная эдс определяется формулой

$$e_r = 2\omega_c V_a A I_a \xi_r,$$

где ω_c – число витков в секции; V_a – линейная скорость якоря; A – линейная нагрузка; I_a – длина активного проводника; ξ_r – проводимость магнитному потоку, уменьшить e_r можно за счет уменьшения проводимости ξ_r , ибо другие параметры имеют ограничения.

Для уменьшения проводимости в некоторых машинах ставят пазовые глушители в виде медных экранов, в экранах во время коммутации возникают дополнительные токи, которые уменьшают эдс e_r , но увеличивают потери в машине. Дрейфус предложил глушители, которые работают в период коммутации, но все равно они усложняют конструкцию машины; можно уменьшить или увеличить высоту паза – это так же уменьшит ξ_r .

2. Уменьшить эдс e_r можно за счет создания в зоне коммутации такого коммутирующего магнитного поля, чтобы оно наводило коммутирующую эдс e_k , которая была бы направлена встречно e_r . Такую коммутирующую эдс можно создать посредством добавочных полюсов (рис. 6.4)

$$e_k = \omega_c V_a I_{дп} B_k,$$

где B_k – индукция под дополнительными полюсами.

Добавочные полюса располагаются по линии геометрической нейтрали, т.е. на линии тех секций, которые контактируют со щетками. Количество добавочных полюсов обычно равно количеству главных полюсов $N_{дп} = N_{гл}$, но может быть $N_{дп} = N_{гл}/2$ в машинах малой мощности.

Полярность добавочных полюсов (ДП) выбирают такой, чтобы в коммутируемой секции наводилась эдс e_k , направленная навстречу эдс e_r .

Исходя из условия, что $e_r = e_k$

$$\omega_c V_a A I_a \xi_r = \omega_c V_a I_{дп} B_k,$$

$$B_k = \frac{I_a}{I_{дп}} \xi A = kA.$$

Линейная нагрузка характеризуется током якоря. Поэтому чтобы сохранялась пропорциональность между индукцией под ДП и током якоря, очевидно, обмотку ДП нужно соединить последовательно с обмоткой якоря.

Следует ДП выбирать с такими размерами, чтобы не наблюдалось их насыщение, иначе нарушится пропорциональность между I и B_k .

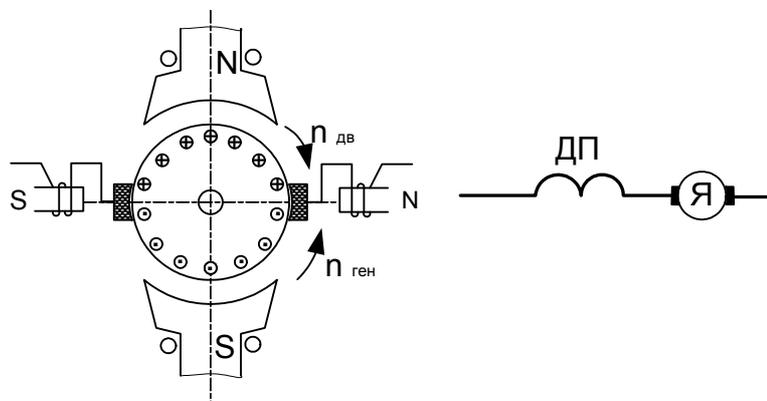


Рис. 6.4. Расположение добавочных полюсов

Если в коммутирующей секции $e_k = e_r$, то коммутация будет прямолинейной, если же добиться условия $e_k > e_r$, то коммутация будет ускоренной, появится добавочный ток другого знака. Лучшей из двух ускоренных коммутаций будет коммутация по кривой 1 (рис. 6.5). На конечной стадии здесь $\frac{di}{dt} \approx 0$.

На конечной стадии здесь $\frac{di}{dt} \approx 0$.

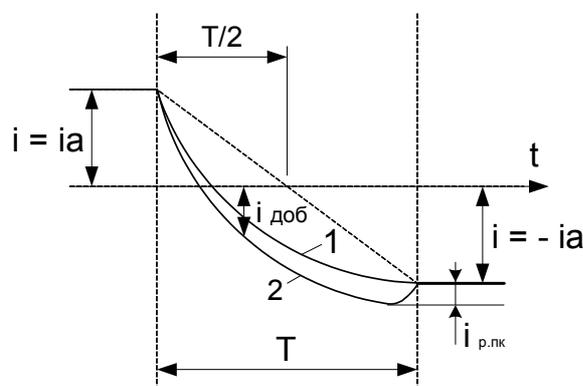


Рис. 6.5. Коммутация: 1 – нормально ускоренная; 2 – сильно ускоренная

При кривой 2 возможно искрение от перекоммутации (т.е. очень сильных ДП), ток разрыва уже будет другого знака, нежели при искрении от недокоммутации (т.е. очень слабых ДП), здесь $I_{р.лк}$ – ток разрыва от ускоренной коммутации.

ЛЕКЦИЯ 7

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

План лекции

- 7.1. Потери мощности в машине постоянного тока.
- 7.2. Коэффициент полезного действия.
- 7.3. Способы возбуждения машин постоянного тока.
- 7.4. Генераторы постоянного тока.
- 7.5. Генератор независимого возбуждения и его характеристики.

7.1. Потери мощности в машине постоянного тока

Классификация потерь мощности:

а) переменные – зависящие от тока нагрузки и постоянные – независящие от тока нагрузки.

б) основные – механические, потери в стали, меди обмотки, контактирующем слое щеток и добавочные.

◆ *Механические потери:*

– в подшипниках

$$P_{\text{пш}} = K_{\text{тр}} \frac{F}{D_{\text{ш}}} V_{\text{ц}},$$

где $K_{\text{тр}}$ – коэффициент трения качения; F – сила давления; $D_{\text{ш}}$ – диаметр окружности по центру ролика или шарика; $V_{\text{ц}}$ – линейная скорость цапфы.

– трение в щетках

$$P_{\text{трщ}} = K_{\text{тр}} f_{\text{щ}} S_{\text{щ}} V_{\text{к}},$$

где $f_{\text{щ}}$ – удельное нажатие щетки; $S_{\text{щ}}$ – сечение щетки; $V_{\text{к}}$ – окружная скорость коллектора;

– от вентиляции

$$P_{\text{вн}} = k V_{\text{в}} V^2,$$

где $V_{\text{в}}$ – объем воздуха.

В итоге получаем, механические потери мощности равны:

$$P_{\text{МЕХ}} = P_{\text{пш}} + P_{\text{трщ}} + P_{\text{вн}}.$$

◆ *Потери в стали (магнитные):*

– за счет перемагничивания железа якоря магнитным полем;

– за счет пульсации магнитного потока вследствие зубчатого строения якоря.

Потери наблюдаются в железе якоря, зубцовой зоне, наконечнике главных полюсов:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{пг}} = P_{\Gamma} + P_{\text{вх}} = P_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B^2 G_{\text{ст}},$$

где P_{Γ} – потери мощности на гистерезис; $P_{\text{вх}}$ – потери мощности на вихревые токи; $P_{1,0/50}$ – удельные потери в ваттах на 1 кг стали при $B = 1$ Тл, $f = 50$ Гц; f – действительная частота; B – действительная индукция; $G_{\text{ст}}$ – вес стали; β – величина, зависящая от марки стали.

♦ *Потери в меди (электрические):*

– в обмотке якоря

$$P_{\text{МА}} = I_a^2 r_a,$$

$$r_a = r_{\text{дн}} + r_{\text{ко}} + r_{\text{якор}},$$

$$r_a = \rho_{15} \frac{Nl}{S_{\text{пр}}} [1 + \alpha(\theta_a - \theta_0)],$$

где ρ_{15} – удельное сопротивление медного провода при 15 °С; N – число проводников; l , $S_{\text{пр}}$ – длина, сечение проводника; α – температурный коэффициент; θ_a – измеренная температура; θ_0 – начальная температура 15 °С.

По-другому можно записать:

$$P_{\text{МА}} = 2,4 i_a G_{\text{М}},$$

где $G_{\text{М}}$ – масса медной обмотки, кг; i_a – плотность тока.

– в обмотке возбуждения

$$P_{\text{В}} = U_{\text{В}} i_{\text{В}};$$

– в контакте “щетка–коллектор”

$$P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} I_a,$$

где $\Delta U_{\text{щ}}$ – двойное падение напряжения между щеткой и коллектором, $\Delta U_{\text{щ}} = 2$ В.

Тогда

$$P_{\text{М}} = P_{\text{эл}} = P_{\text{МА}} + P_{\text{В}} + P_{\text{щ}}.$$

♦ *Добавочные потери* обусловлены вторичными факторами, от перемagnetизирования в обмотках наводится ЭДС и протекают токи

$$P_{\text{доб}} = (0,005 \div 0,01) P_2,$$

где P_2 – полезная мощность.

7.2. Коэффициент полезного действия

Суммарные потери в машине

$$\sum P = P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{СТ}} + P_{\text{М}} + P + P_{\text{доб}};$$

– для генератора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

$$P_1 = P_2 + \sum P,$$

$$P_2 = U_c I_c,$$

$$\eta_{\text{Г}} = 1 - \frac{\sum P}{U_c I_c + \sum P};$$

– для двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1},$$

$$P_1 = U_c I_c,$$

$$\eta_{\text{Д}} = \frac{U_c I_c - \sum P}{U_c I_c} = 1 - \frac{\sum P}{U_c I_c}.$$

При $P_2 = 0$ кпд = 0. Чтобы узнать, где кпд максимальный, требуется взять производную потерь по току (рис. 7.1).

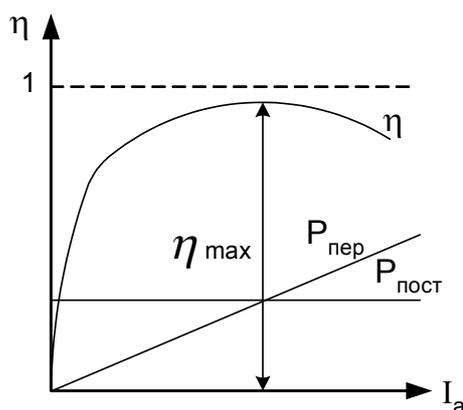


Рис. 7.1. Кривая кпд: $P_{\text{пер}}$ – переменные потери мощности; $P_{\text{пост}}$ – постоянные потери мощности

Кпд достигает максимума, когда потери от тока становятся равными потерям, не зависящим от тока.

7.3. Способы возбуждения машин постоянного тока

Постоянные магниты могут создавать магнитный поток в машинах постоянного тока (МПТ). Их недостатки:

- 1) малая величина индукции;
- 2) не регулируют величину магнитного потока.

Есть другой способ возбуждения магнитного потока – при помощи электромагнитов.

Обмоткой возбуждения называется электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных электромагнитных полюсов, при которых происходит чередование полюсов разной полярности (рис. 7.2).

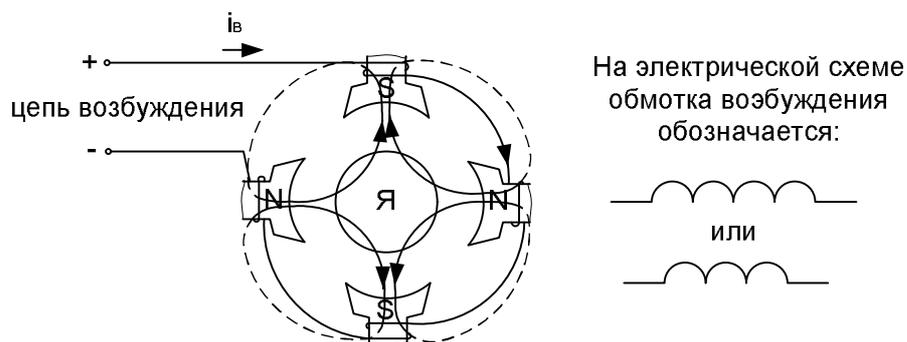


Рис. 7.2. Схема обмотки возбуждения

Если цепь возбуждения включена на напряжение постороннего источника (аккумулятора, батареи), то такая машина называется МПТ с независимым возбуждением (рис. 7.3, 7.4).

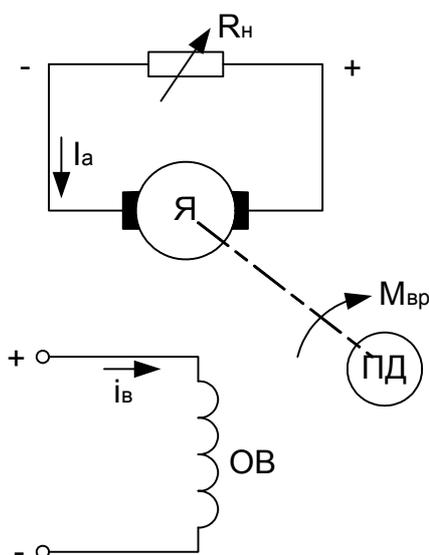


Рис. 7.3. Схема генератора с независимым возбуждением: ПД – первичный двигатель

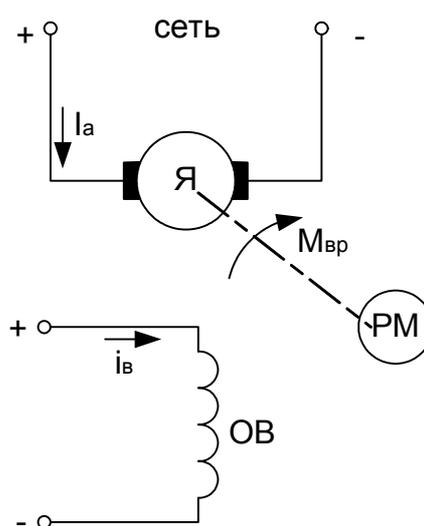


Рис. 7.4. Схема двигателя с независимым возбуждением: РМ – рабочий механизм

Ток, протекающий по обмотке возбуждения, называется током возбуждения. Ток, протекающий по обмотке якоря, называется током якоря.

Если энергия, необходимая для возбуждения полюсов, поступает от якоря этого же генератора, то такие машины называются генераторами с самовозбуждением.

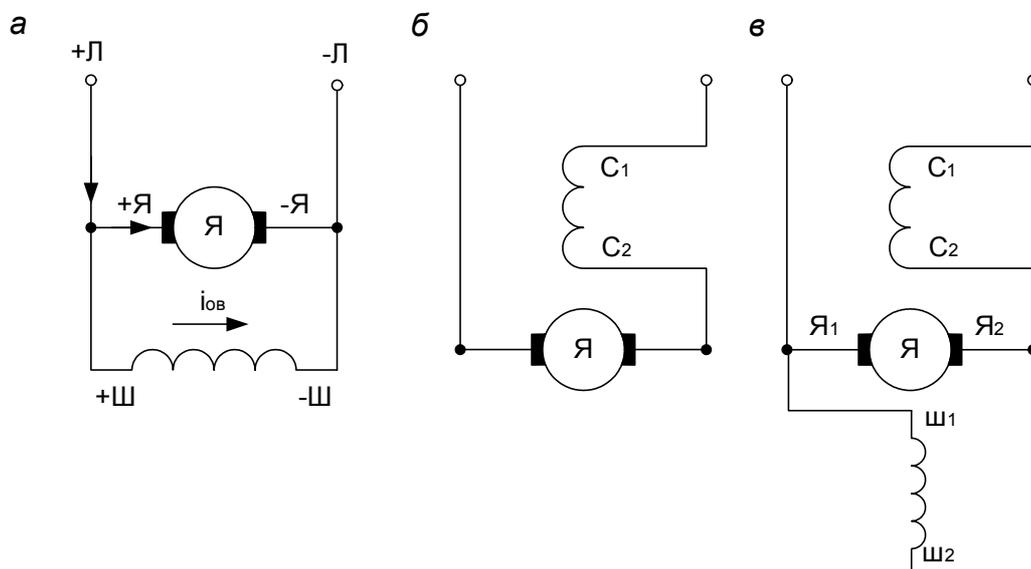


Рис. 7.5. Способы возбуждения магнитного потока: а – параллельное; б – последовательное; в – смешанное возбуждения

По способу электрического соединения обмотки возбуждения и обмотки якоря МПТ подразделяются на следующие:

- параллельного соединения (шунтовые) (рис. 7.5, а);
- последовательного соединения (сериесные) (рис. 7.5, б);
- смешанного соединения (компаундные) (рис. 7.5, в).

У современных двигателей при любом включении обмоток электрическая энергия поступает на ОВ из сети.

7.4. Генераторы постоянного тока

Работа генераторов характеризуется четырьмя основными величинами:

- током возбуждения $i_{\text{в}}$;
- напряжением на зажимах генератора U ;
- током якоря $I_{\text{я}}$;
- частотой вращения n . Обычно n неизменна, так как она задается первичным двигателем: турбиной, дизелем и т.п.

Изменение или зависимость величин друг от друга удобно анализировать с помощью графиков, которые называют характеристиками. Свойства МПТ изучаются по характеристикам.

7.5. Генератор независимого возбуждения и его характеристики

1. Характеристика холостого хода $E = f(i_B)$, $I_a = 0$, $n = \text{const}$.

Ранее мы получили выражение

$$E = C_e \Phi n,$$

$E = f(\Phi)$, а $\Phi = f(i_B)$, следовательно, при $n = \text{const}$ $E \equiv f(i_B)$.

Плавно изменяем i_B от 0 до $i_{B\text{max}}$ и обратно до $i_B = 0$, а затем меняем полярность тока возбуждения переключателем П (рис. 7.6).

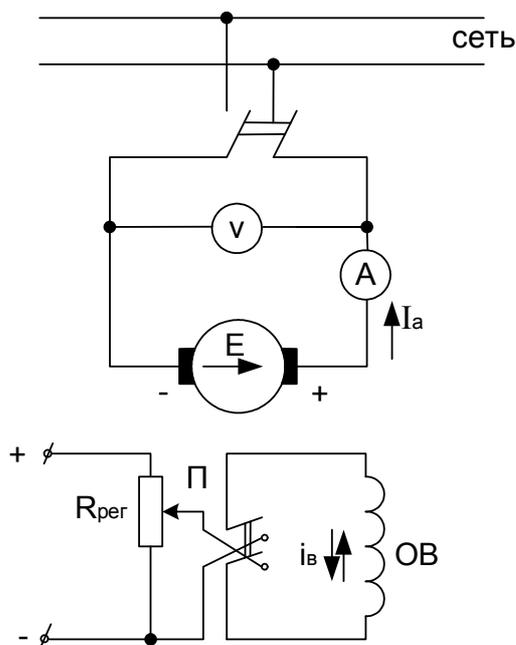


Рис. 7.6. Схема генератора с независимым возбуждением

При токе возбуждения $I_B = 0$ в сердечнике полюсов имеется наличие остаточного магнитного потока $\Phi_{\text{ост}}$, и поэтому в обмотке якоря наводится $E_{\text{ост}}$ (рис. 7.7).

Полученную зависимость также называют характеристикой магнитной цепи машины $\Phi = f(i_B)$.

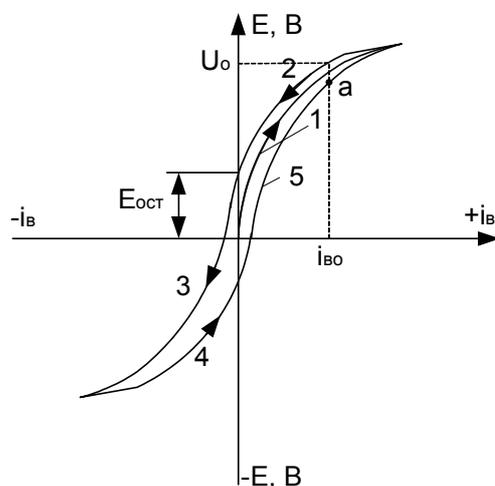


Рис. 7.7. Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением

2. Внешняя характеристика представляет зависимость $U = f(I_a)$ при $n = \text{const}$, $i_b = \text{const}$.

С увеличением I_a напряжение падает. Объясняется это следующим:
 – согласно основного уравнения

$$U = E - I_a R_a \text{ или } U = C_e \Phi_n - I_a R_a.$$

– с увеличением I_a увеличивается $I_a R_a$, но уменьшается U (рис. 7.8, кривая 1);

– реакция якоря влияет на магнитный поток Φ , а $E = C_e \Phi_n$, $U = E - \Delta U$ (рис. 7.8, кривая 2).

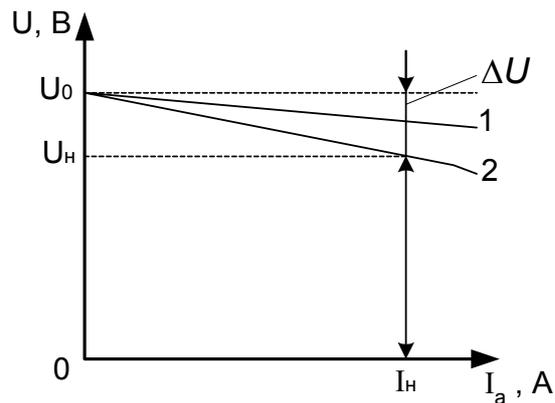


Рис. 7.8. Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением

3. Регулировочная характеристика.

Для поддержания $U = \text{const}$ с изменением I_a необходимо регулировать ток возбуждения.

Зависимость i_b от I_a при сохранении напряжения неизменным называется регулировочной характеристикой; $i_b = f(I_a)$ при $U = \text{const}$, $n = \text{const}$ (рис. 7.9).

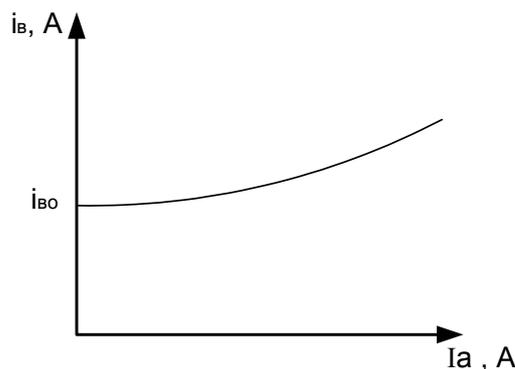


Рис. 7.9. Регулировочная характеристика генератора с независимым возбуждением

Необходимость отдельного источника питания обмотки возбуждения в ряде случаев является недостатком таких генераторов.

4. Нагрузочная характеристика $U = f(I_B)$ при $I_a \neq 0 = \text{const}$.

Эта характеристика имеет вид аналогичной характеристики холостого хода $E = f(i_B)$, но проходит ниже (рис. 7.10).

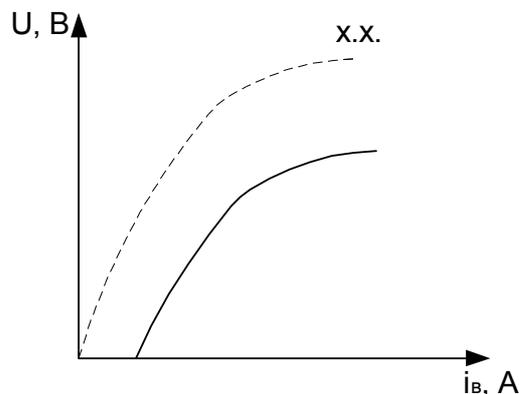


Рис. 7.10. Нагрузочная характеристика генератора с независимым возбуждением

5. Характеристика короткого замыкания $I_a = f(i_B)$ снимается по схеме (рис. 7.11) при замкнутой через амперметр обмотке якоря.

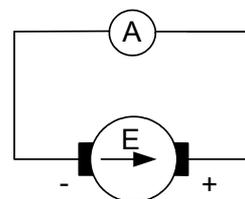


Рис. 7.11. Схема снятия характеристики короткого замыкания

Ток I_B должен быть очень мал и не превышать тока номинального

ЛЕКЦИЯ 8 ГЕНЕРАТОРЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

План лекции

- 8.1. Принцип самовозбуждения в генераторе параллельного возбуждения.
- 8.2. Характеристики генератора параллельного возбуждения.
- 8.3. Генератор последовательного возбуждения.
- 8.4. Генератор смешанного возбуждения.

8.1. Принцип самовозбуждения в генераторе параллельного возбуждения

Характеристики генератора параллельного возбуждения можно снять по схеме (рис. 8.1).

Ток в обмотке возбуждения генератора возникает в процессе самовозбуждения, основанном на использовании существующего в машине небольшого остаточного магнитного потока $\Phi_{\text{ост}}$ – первое условие принципа самовозбуждения.

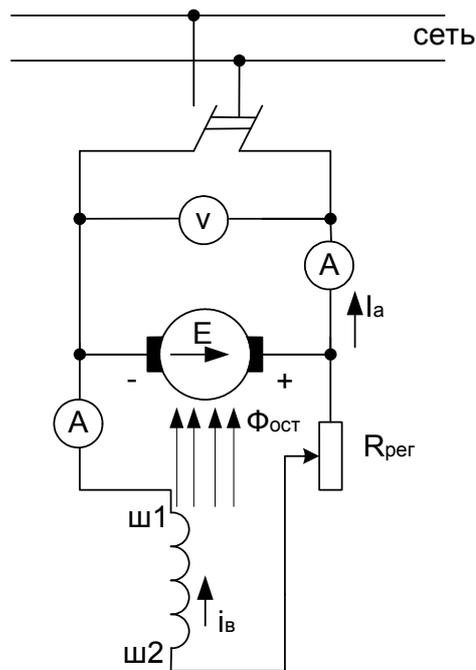


Рис. 8.1. Схема включения генератора с параллельным возбуждением

При вращении якоря от магнитного остаточного потока возникает эдс $E_{ост}$. эдс $E_{ост}$ вызывает ток возбуждения, который вызывает приращение магнитного потока и т.д.:

$$\Phi_{ост} \rightarrow E_{ост} \rightarrow I_B, \text{ от } E_{ост} \rightarrow \Delta\Phi,$$

$$\Phi_{ост} + \Delta\Phi \rightarrow E_{ост} + \Delta E.$$

Процесс самовозбуждения возможен при согласном направлении остаточного потока и потока приращения ($\Phi_{ост}$ и $\Delta\Phi$) – второе условие принципа самовозбуждения.

Увеличение I_B вызывает появление в обмотке возбуждения эдс самоиндукции

$$e_L = -L_B \frac{di_B}{dt}.$$

По второму закону Кирхгофа:

$$E + e_L = i_B R_B,$$

$$E = i_B R_B + L_B \frac{di_B}{dt}.$$

В режиме холостого хода $E = f(I_B)$ – кривая 1 (рис. 8.2).

При $R'_B = \text{const}$ падение напряжения $i_B R'_B = f(I_B)$ – прямая 2 (рис. 8.2).

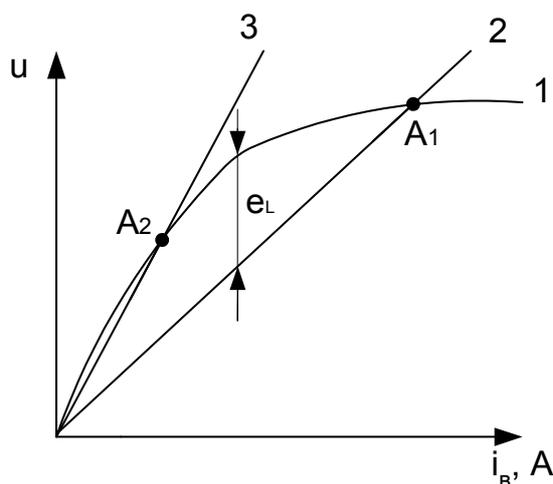


Рис. 8.2. Влияние R_b на процесс самовозбуждения

В точке A_1 процесс самовозбуждения заканчивается. При увеличении $R_b > R'_b$ при том же токе возбуждения $i_b R_b$ увеличится (рис. 8.2, кривая 3), процесс заканчивается в точке A_2 .

При сопротивлении в цепи возбуждения выше некоторого критического $(R_{рег} + R_b) > r_{кр}$ процесс самовозбуждения может не произойти.

8.2. Характеристика генератора параллельного возбуждения

Характеристика холостого хода может быть получена только в одном квадранте, иначе остаточный магнитный поток будет размагничен.

Внешняя характеристика пройдет ниже внешней характеристики генератора с независимым возбуждением (рис. 8.3).

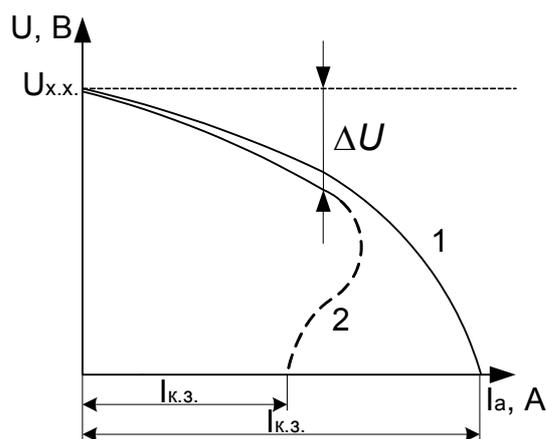


Рис. 8.3. Внешняя характеристика: 1 – генератора с независимым возбуждением; 2 – генератора с параллельным возбуждением

Падение напряжения ΔU обусловлено тремя условиями.

1. С увеличением тока якоря I_a увеличивается $I_a R_a$, но уменьшается U .
2. Реакция якоря уменьшает эдс E и, следовательно, U .
3. Уменьшение U ведет к уменьшению I_b , а следовательно, эдс E и напряжения U и т.д.

Физический смысл регулировочной характеристики такой же как и у генератора с независимым возбуждением.

8.3. Генератор последовательного возбуждения

В генераторе последовательного возбуждения $I_b = I_a = I$, следовательно, характеристики холостого хода короткого замыкания и нагрузочную можно снять только по схеме независимого возбуждения. Эти характеристики имеют вид обычный для генератора независимого возбуждения.

Если $n = \text{const}$, то переменных остаются две: U и I . Поэтому генератор имеет, по существу, одну характеристику – внешнюю $U = f(I)$.

Так как напряжение генератора последовательного возбуждения резко изменяется с нагрузкой, то практически эти генераторы не применяются (рис. 8.4, 8.5).

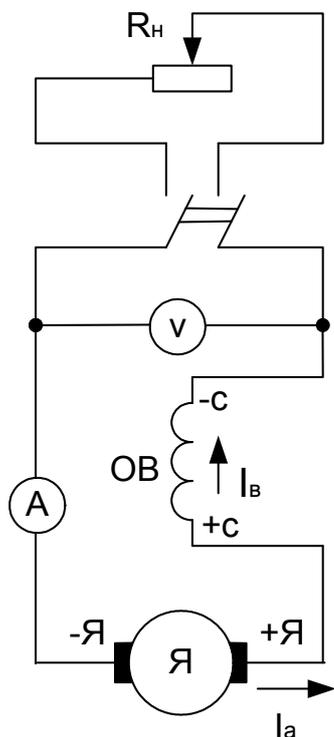


Рис. 8.4. Схема включения генератора с последовательным возбуждением

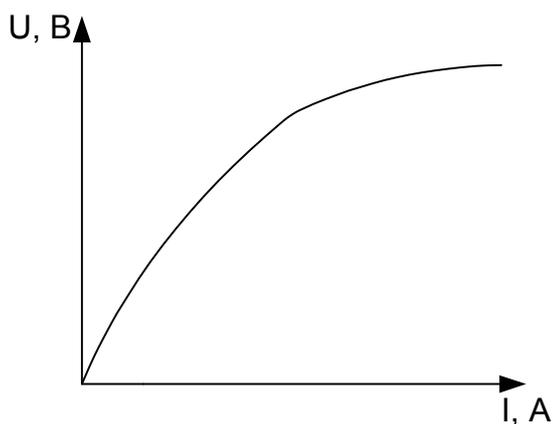


Рис. 8.5. Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением

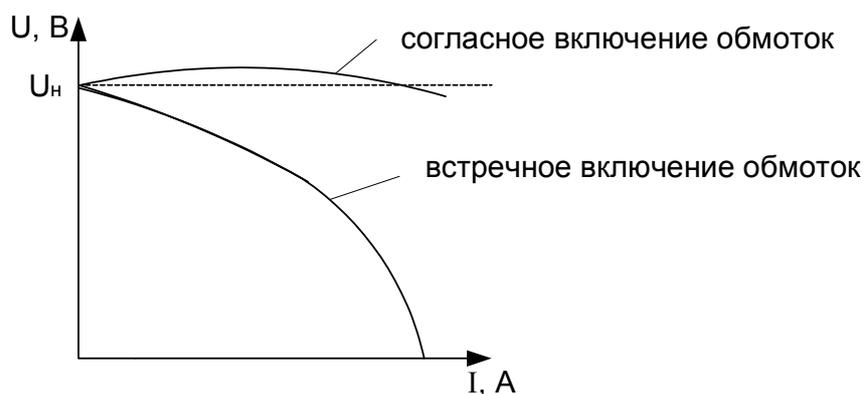


Рис. 8.7. Внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения

Встречное включение обмоток применяется в некоторых типах сварочных генераторов, где нужна крутопадающая характеристика.

ЛЕКЦИЯ 9 ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

План лекции

- 9.1. Основные уравнения двигателей постоянного тока.
- 9.2. Пуск в ход двигателей постоянного тока.
- 9.3. Регулирование частоты вращения.
- 9.4. Условия устойчивой работы двигателей.

9.1. Основные уравнения двигателей постоянного тока

Основное уравнение выражает, что напряжение сети U уравновешивается падением напряжения в обмотке якоря и противоэдс

$$U = I_a R_a + E, \quad (9.1)$$

где $E = C_e n \Phi$; $C_e = \frac{P N}{60 a}$ – постоянная машины по эдс.

Уравнения (9.1) умножим на I_a

$$U I_a = I_a^2 R_a + E I_a,$$

$$P_1 = P_{эл} + P_{Э},$$

где $P_{эл}$ – электрические потери мощности; $P_{Э}$ – электромагнитная мощность двигателя.

Электромагнитной мощностью называется та часть мощности на входе P_1 , которая в процессе работы преобразуется в механическую мощность вращения якоря

$$P_{\text{Э}} = P_2 + P_{\text{мех}} + P_{\text{мг}},$$

где P_2 – механическая полезная мощность на валу; $P_{\text{мех}}$ – механические потери мощности; $P_{\text{мг}}$ – магнитные потери мощности.

$$P_{\text{Э}} = E I_a = \omega M_{\text{Э}},$$

$$M_{\text{Э}} = \frac{E I_a}{\omega} = \frac{C_e n \Phi I_a}{2 \pi \frac{n}{60}} = \frac{30 C_e}{\pi} \Phi I_a.$$

Таким образом, машина развивает электромагнитный момент

$$M_{\text{Э}} = (M) = C_M I_a \Phi, \quad (9.2)$$

в то же время
$$M_{\text{Э}} = M_2 + M_0 + M_j, \quad (9.3)$$

где M_2 – полезный момент на валу двигателя, определяется моментом сопротивления рабочего механизма; M_0 – момент холостого хода, идущий на преодоление сил трения в самом двигателе; M_j – динамический момент, возникающий при изменении скорости вращения,

$$M_j = J \frac{d\omega}{dt},$$

где J – момент инерции.

Если $\frac{d\omega}{dt} > 0$ – ускорение двигателя;

$\frac{d\omega}{dt} < 0$ – замедление двигателя;

$\frac{d\omega}{dt} = 0$, то и $M_j = 0$, тогда $M_{\text{Э}} = M_C$,

где M_C – момент сопротивления рабочего механизма, Н·м.

Тогда электромагнитный момент определится по формуле:

$$M = \frac{P_{\text{Э}}}{\omega} = \frac{P_{\text{Э}} 30}{\pi n} = 9,55 \frac{P_{\text{Э}}}{n},$$

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}.$$

Анализ выражений (9.2) и (9.3) показывает, что с увеличением момента на валу M_2 , возрастает электромагнитный момент $M_{\text{Э}}$ и электромагнитная мощность $P_{\text{Э}}$, а также входная мощность $P_1 = U I_a$. Но так как $U = \text{const}$, то увеличение нагрузки двигателя сопровождается ростом тока в обмотке якоря I_a .

9.2. Пуск в ход двигателей постоянного тока

Из уравнения (9.1) получим выражение для тока якоря:

$$I_a = \frac{U - E}{R_a} = \frac{U - C_e n \Phi}{R_a}.$$

При пуске двигателя $n = 0$, следовательно, $E = 0$, тогда $I_{\text{пуск}} = \frac{U}{R_a}$.

Пример: $P_{1н} = 10$ кВт; $U_{\text{сети}} = 110$ В; $R_a = 0,08$ Ом.
Определить величину $I_{\text{пуск}}$ при прямом пуске:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{сети}}}{R_a} = \frac{110}{0,08} = 1375 \text{ А}.$$

А номинальный ток:

$$I_n = \frac{P_{1н}}{U} = \frac{10000}{110} = 91 \text{ А},$$

$$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_n} = \frac{1375}{91} = 15 \text{ раз}.$$

Такой пусковой ток весьма опасен для двигателя, так как создает:

- ударный момент;
- искрение на коллекторе;
- падение напряжения в сети;
- нагрев двигателя.

Для ограничения пускового тока на время пуска вводят сопротивление $R_{\text{пуск}}$ такой величины, чтобы ток якоря составлял $(1,5 \div 2) I_{a \text{ ном}}$:

$$I_a = \frac{U}{R_a + R_{\text{пуск}}} = (1,5 \div 2) I_{a \text{ ном}}.$$

По мере разгона двигателя появляется и увеличивается эдс E , следовательно, ток I_a и момент $M = C_M \Phi I_a$ уменьшаются, поэтому $R_{\text{пуск}}$ надо выводить из цепи якоря:

$$I_a = \frac{U - E}{R_a + R_{\text{пуск}}}$$

Устройство реостатов рассмотреть самостоятельно.

9.3. Регулирование частоты вращения

Из уравнения (9.1)

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$$

Из формулы видно, что регулировать частоту вращения можно:

- напряжением;
- магнитным потоком i_B и w .

Частота вращения также зависит от тока I_a , но регулировать им не представляется возможным. Физически это объясняется тем, что увеличение U и уменьшение Φ ведет к увеличению разности $(U - E)$, тока I_a , момента вращения и частоты вращения n .

Для того чтобы осуществить **реверсирование**, т.е. изменить направление вращения, нужно либо изменить направление i_B , либо поменять направление I_a .

9.4. Условия устойчивой работы двигателей

Двигатель работает устойчиво и с постоянной частотой вращения при $M = M_c$ (рис. 9.1), неустойчиво – при $M \neq M_c$ (рис. 9.2).

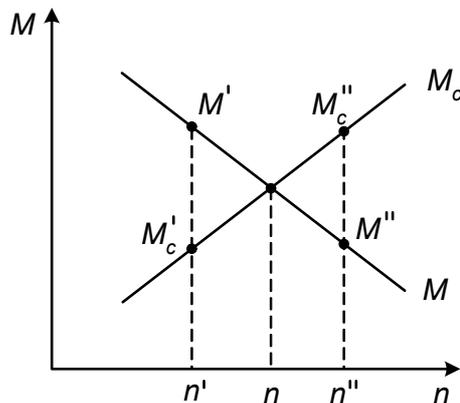


Рис. 9.1. Устойчивая работа двигателя: с увеличением n до n'' возрастает $M_c'' > M''$, произойдет замедление и возвращение в точку n ; с уменьшением n до n' возрастает $M' > M_c'$, начнется ускорение до n ; n – устойчивая точка

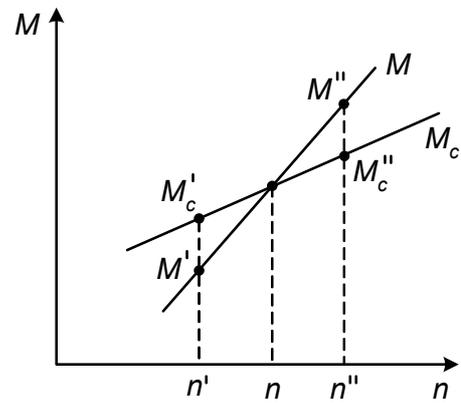


Рис. 9.2. Неустойчивая работа двигателя: с увеличением n до n'' $M'' > M_c''$ произойдет дальнейшее увеличение n ; с уменьшением n до n' $M_c' > M'$, произойдет дальнейшее уменьшение n ; n – неустойчивая точка

Таким образом, установившаяся частота вращения двигателя зависит не только от равенства моментов $M = M_c$, но и от устойчивости в работе двигателя.

ЛЕКЦИЯ 10

ДВИГАТЕЛЬ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

План лекции

- 10.1. Схема управления двигателем.
- 10.2. Характеристики двигателя с параллельным возбуждением.
- 10.3. Частота вращения и переходный процесс при изменении сопротивления в цепи якоря.
- 10.4. Частота вращения и переходный процесс при изменении магнитного потока.
- 10.5. Частота вращения и переходный процесс при изменении питающего напряжения.

10.1. Схема управления двигателем

В схеме управления двигателем используют трехзажимный реостат (рис. 10.1) с выводами Л, Я, Ш. Величина магнитного потока регулируется сопротивлением $R_{\text{рег}}$ в цепи обмотки возбуждения (+Ш) и (-Ш).

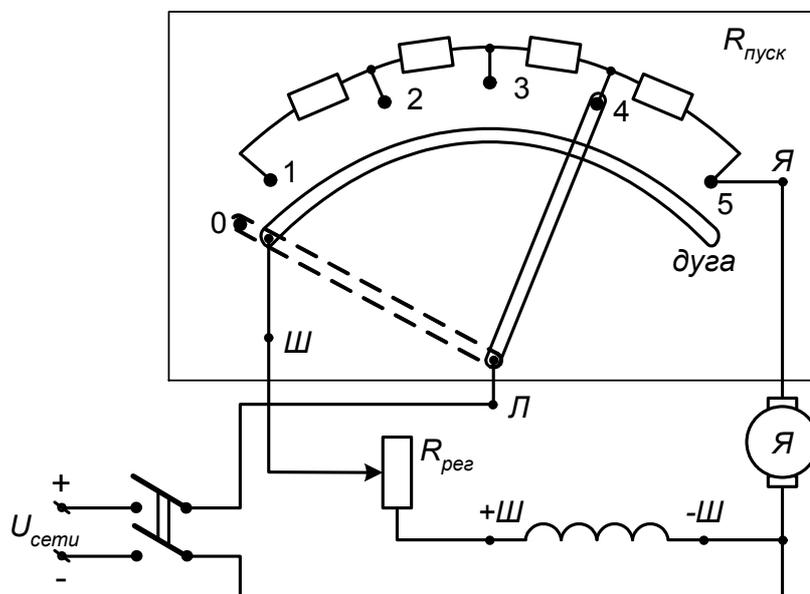


Рис. 10.1. Схема трехзажимного реостата

10.2. Характеристики двигателя с параллельным возбуждением

Пусковые характеристики:

- пусковой ток $I_{\text{п}}/I_{\text{н}}$;
- пусковой момент $M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$;
- время пуска $t_{\text{п}}$;
- экономичность.

Рабочие характеристики $n, M, \eta = f(I_a)$ при $U, I_B = \text{const}$ (рис. 10.2):
 – моментная характеристика $M=f(I_a)$

$$M = C_M \Phi I_a = \text{const } I_a,$$

$$M_2 = M - M_0;$$

– электромеханическая характеристика $n = f(I_a)$ (рис. 10.3):

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi},$$

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_{\text{НОМ}}}{n_0} 100 \% = (2 \div 8) \%.$$

Увеличение I_a ведет к уменьшению n (рис. 10.3, кривая 1).

Но реакция якоря уменьшает основной магнитный поток, что ведет к увеличению n (рис. 10.3, кривая 2);

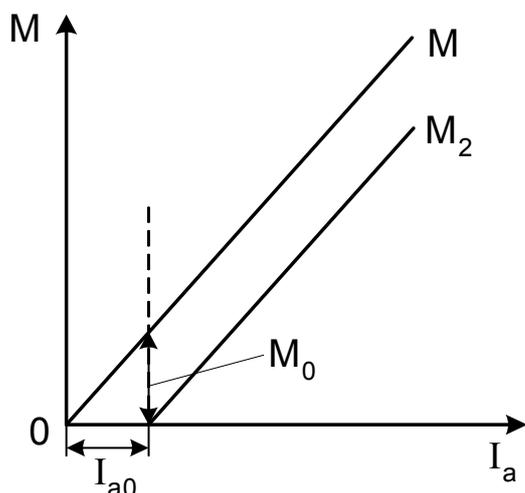


Рис. 10.2. Моментные характеристики двигателя

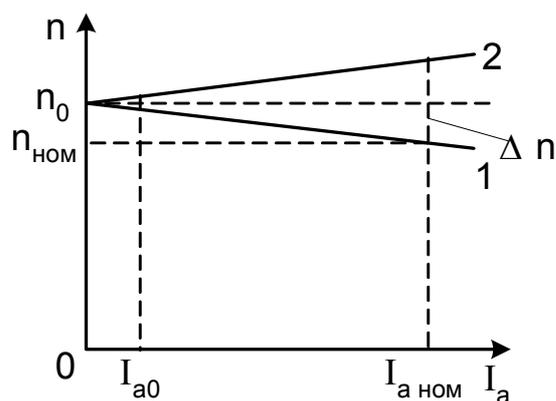


Рис. 10.3. Электромеханические характеристики двигателя

– кпд двигателя $\eta = f(I_a)$ (рис. 10.4).
 Магнитные потери $P_{\text{мг}}$ постоянны.
 Электрические потери $P_{\text{эл}}$ переменны.

Если $P_{\text{эл}} = P_{\text{мг}}$, то $\eta = \eta_{\text{max}}$.

При $n = \text{const}$ $P_{\text{мех}}$ также можно отнести к постоянным потерям.

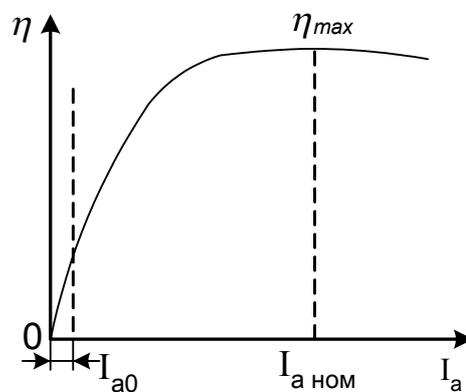


Рис. 10.4. Кпд двигателя

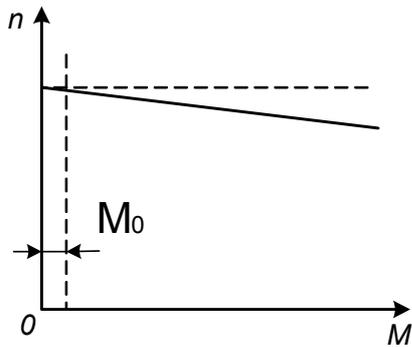


Рис. 10.5. Механическая характеристика двигателя

Механическая характеристика $n = f(M)$
(рис. 10.5).

Из уравнения $M = C_M \Phi I_a$,

$$I_a = \frac{M}{C_e \Phi}, \text{ тогда}$$

$$n = \frac{U - \frac{M}{C_M \Phi} R_a}{C_e \Phi} - \text{ жесткая характеристика.}$$

Регулировочные характеристики

Как следует из предыдущего материала (см. подразд. 9.2), в цепь якоря двигателя можно включать добавочное регулировочное сопротивление R_d , тогда основное уравнение эдс двигателя принимает вид

$$U = C_e n \Phi + I_a (R_a + R_d),$$

откуда

$$n = \frac{U - I_a (R_a + R_d)}{C_e \Phi}.$$

Регулировать частоту вращения можно:

- 1) изменением $\Delta U_a = I_a (R_a + R_d)$ за счет R_d ;
- 2) подводимым напряжением U ;
- 3) основным магнитным потоком Φ .

10.3. Частота вращения и переходный процесс при изменении сопротивления в цепи якоря

Частота вращения двигателя может быть выражена:

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a (R_a + R_d)}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n.$$

10.3.1. Электромеханические характеристики

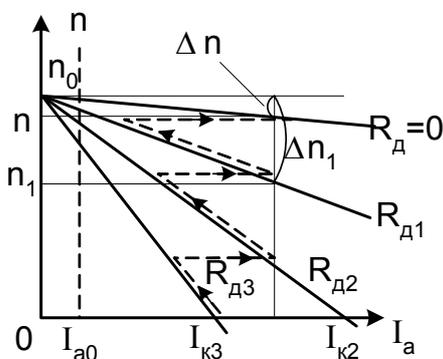


Рис. 10.6. Семейство электро-механических характеристик

В зависимости от соотношения добавочных сопротивлений $R_{d3} > R_{d2} > R_{d1} > R_d = 0$, получаем различный наклон характеристик (рис. 10.6).

При $n = 0$ $E = C_e n \Phi = 0$,

$$U = I_a (R_a + R_d) \Rightarrow$$

$$U = I_{k2} (R_a + R_d),$$

$$U = I_{k3} (R_a + R_d),$$

где I_{k2} и I_{k3} – токи короткого замыкания (токи пуска).

Электромеханические характеристики:

- естественная при $R_d = 0$;
- искусственные при $R_d > 0$.

10.3.2. Механические характеристики

Семейство механических характеристик $n = f(M)$ будет иметь вид аналогичный электромеханическим, так как при $\Phi = \text{const}$ момент M пропорционален току I_a .

10.3.3. Моментная характеристика

Моментная характеристика останется без изменений, так как на $M = f(I_a) R_d$ не влияет.

Этот способ регулирования имеет недостатки:

- можно только уменьшать частоту вращения от значения n_0 ;
- возникают дополнительные потери мощности $\Delta p = I_a^2 R_d$.

10.3.4. Переходный процесс

До t_1 $M = M_c = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

При t_1 ввели R_d ; в силу инерции n скачком измениться не может, поэтому остается прежним (рис. 10.7).

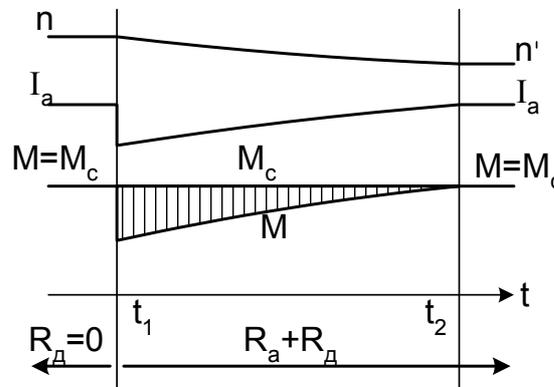


Рис. 10.7. Переходный процесс при введении в цепь якоря R_d : t_1 – начало переходного процесса; t_2 – окончание переходного процесса

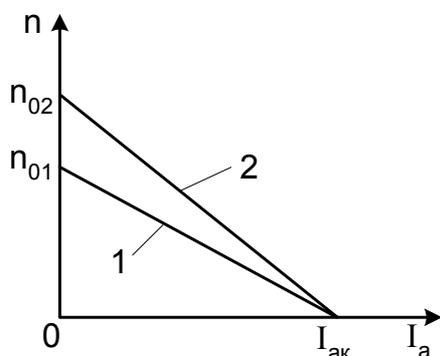
А ток I_a уменьшится резко, также уменьшится $M = C_M \Phi I_a$, так как $M < M_c$ появится отрицательный динамический момент, который вызовет постепенное уменьшение n и соответственно E . Ток якоря I_a начнет возрастать и также будет увеличиваться M до $M = M_c$.

По окончании переходного процесса $n' = \text{const}$, но $n' < n$.

10.4. Частота вращения и переходный процесс при изменении магнитного потока

10.4.1. Электромеханические характеристики (рис. 10.8)

Пусть $\Phi_1 > \Phi_2$.



$$n_1 = \frac{U - I_a R_a}{c_e \Phi_1} \quad \text{и} \quad n_2 = \frac{U - I_a R_a}{c_e \Phi_2}.$$

На холостом ходу $I_a = 0$;

$$n_{01} = \frac{U}{c_e \Phi_1} < \frac{U}{c_e \Phi_2} = n_{02}.$$

Рис. 10.8. Электромеханические характеристики двигателя: 1 – естественная; 2 – искусственная

Эти характеристики не параллельны, так как при $n = 0$ $C_e \Phi n = 0$, а ток I_a не зависит от магнитного потока

$$U = I_{ак} R_a.$$

10.4.2. Механические характеристики

На холостом ходу $I_a = 0$ и $M = 0$, при $\Phi_1 > \Phi_2$ $n_{02} > n_{01}$ (рис. 10.9).

При коротком замыкании, когда $n = 0$

$$\frac{M_{к1}}{M_{к2}} = \frac{C_M \Phi_1 I_{ак}}{C_M \Phi_2 I_{ак}} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}.$$

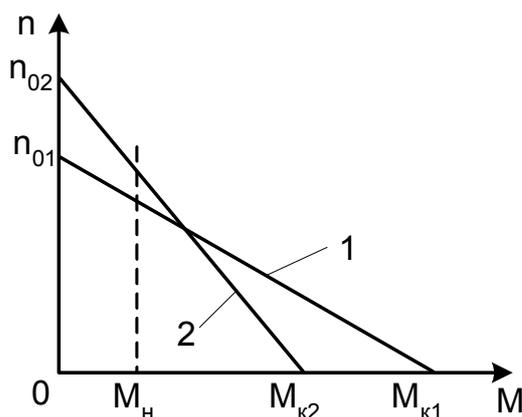


Рис. 10.9. Механические характеристики двигателя: 1 – естественная; 2 – искусственная

На практике зона изменения моментов находится в пределах $0 \div M_H$.

10.4.3. Моментная характеристика

Моментная характеристика не претерпевает изменений и семейства характеристик не имеет.

10.4.4. Переходный процесс

Если уменьшим Φ , то при неизменной в первый момент n уменьшится $E = C_e n \Phi$, но резко увеличится I_a , а вот момент неизвестно как себя «поведет» ($M = c_M \Phi I_a$), так как Φ уменьшается, а I_a увеличивается (рис. 10.10).

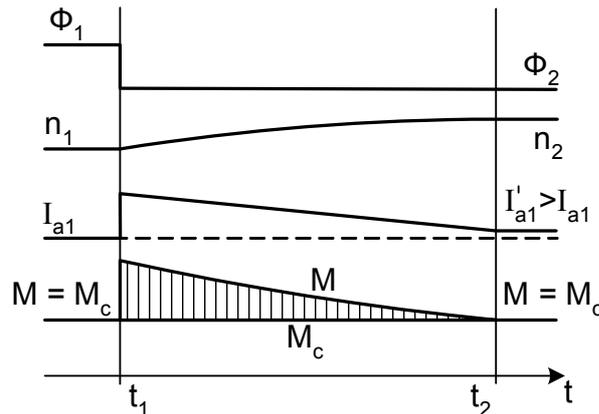


Рис. 10.10. Переходной процесс при изменении магнитного потока

Допустим, что $\Phi_2 = 0,8\Phi_1 \Rightarrow E_2 = 0,8E_1$.

Обычно $E_H = 0,95U_H$, тогда ток якоря:

$$I_{a1} = \frac{U_H - 0,95 U_H}{R_a} = 0,05 \frac{U_H}{R_a};$$

$$I_{a2} = \frac{U_H - 0,8 (0,95 U_H)}{R_a} = \frac{U_H - 0,76 U_H}{R_a} = 0,24 \frac{U_H}{R_a};$$

$$\frac{I_{a2}}{I_{a1}} = \frac{0,24}{0,05} = 4,8 \text{ раза};$$

$$M_1 = c_M I_{a1} \Phi_1;$$

$$M_2 = c_M (4,8 I_{a1}) (0,8 \Phi_1).$$

Значит $M_2 > M_1$ в $4,8 \cdot 0,8 = 3,8$ раза, т.е. момент увеличится $M > M_c$, начнется ускорение n , увеличится E , но уменьшится I_a и постепенно уменьшится M до $M = M_c$.

Этот способ регулирования экономически выгоден:

- потери мощности малы;
- ток возбуждения мал.

10.5. Частота вращения и переходный процесс при изменении питающего напряжения

10.5.1. Электромеханические характеристики

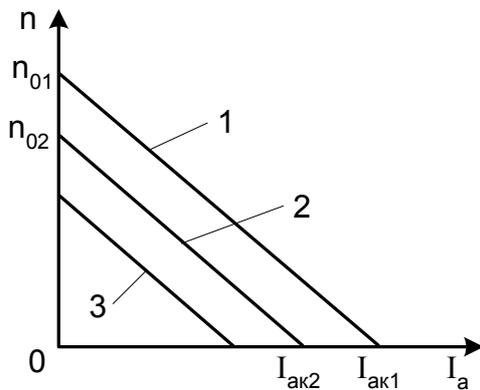


Рис. 10.11. Электромеханические характеристики двигателя: 1 – естественная; 2 и 3 – искусственные

Электромеханические характеристики зависят от подведенного напряжения:

$$U_1 > U_2 > U_3 \text{ (рис. 10.11).}$$

Если $U_1 > U_2$;

$$n_1 = \frac{U_1}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi};$$

$$n_2 = \frac{U_2}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi}.$$

При холостом ходе $I_a = 0$ $n_{01} > n_{02}$.

При коротком замыкании ($n = 0$)

$$U_1 = I_{ak1} R_a,$$

$$U_2 = I_{ak2} R_a, \quad I_{ak1} > I_{ak2}.$$

10.5.2. Механические характеристики

Механические характеристики повторяют электромеханические.

10.5.3. Моментная характеристика

Моментная характеристика при изменении напряжения не меняется.

10.5.4. Переходный процесс

Пусть уменьшится питающее напряжение от U_1 до U_2 , ток якоря уменьшится от I_{a1} до I'_{a1} (рис. 10.12).

Момент вращения также уменьшится $M < M_c$, начнется замедление вращения, т.е. n и E уменьшатся, а ток будет возрастать и M возрастает до значения $M = M_c$, когда n установится, но $n_2 < n_1$.

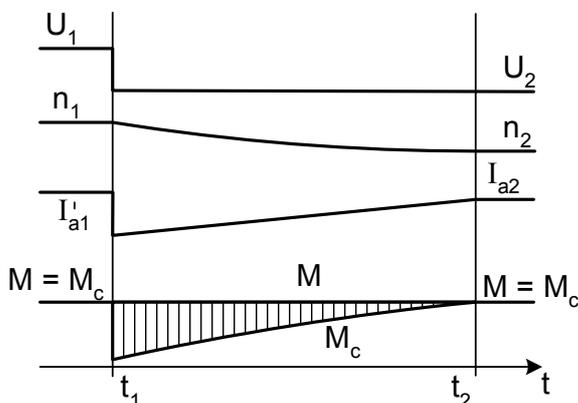


Рис. 10.12. Переходный процесс при изменении питающего напряжения

ЛЕКЦИЯ 11

ДВИГАТЕЛЬ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

План лекции

- 11.1. Характеристики двигателя с последовательным возбуждением.
- 11.2. Частота вращения и переходный процесс при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений.
- 11.3. Частота вращения и переходный процесс при изменении магнитного потока.
- 11.4. Частота вращения и переходный процесс при изменении напряжения на зажимах двигателя.

11.1. Характеристики двигателя с последовательным возбуждением

Особенностью двигателя этого типа является то, что ток в обмотке возбуждения тот же, что и в якорной обмотке. Поэтому при изменении нагрузки двигателя его магнитный поток также изменяется в широких пределах ($I_a = I_b$). Схема двигателя представлена на рис. 11.1.

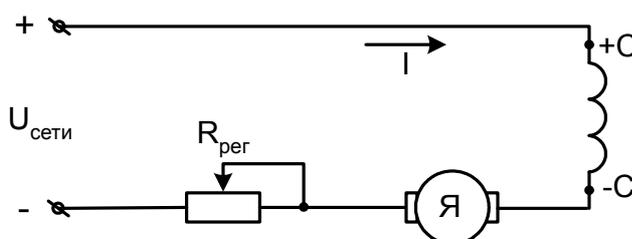


Рис. 11.1. Схема двигателя последовательного возбуждения

Электромеханическая характеристика $n = f(I_a)$ при $U = \text{const}$

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi}.$$

Предположим:

- 1) $I_a R_a \approx 0$, так как R_a очень мало;
- 2) магнитная система не насыщена, т.е. $\Phi = k I_a$ (область $(0 - a)$ на рис. 11.2).

Тогда
$$n = \frac{U}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e k I_a} = \frac{\text{const}}{I_a},$$

т.е. $n I_a = \text{const}$. Таким образом, электромеханическая характеристика будет иметь вид гиперболы (рис. 11.3, кривая 1).

При нарушении пропорциональности между Φ и I_a поток возрастает медленнее, поэтому зависимость пройдет по кривой 2 (рис. 11.3).

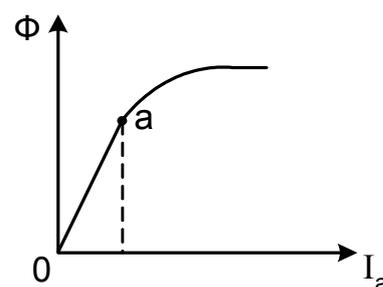


Рис. 11.2. Кривая намагничивания

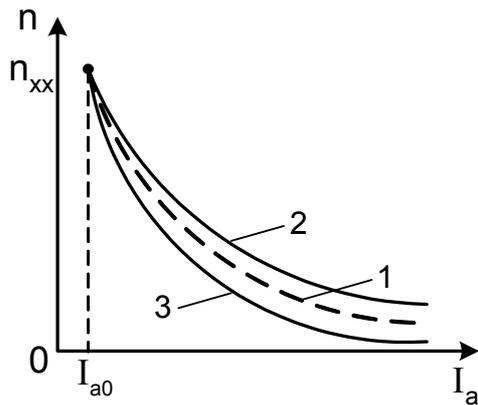


Рис. 11.3. Электромеханические характеристики двигателя

$$\text{Анализируя выражение } \frac{I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{I_a}{\Phi} \text{ const;}$$

то с ростом I_a это выражение будет увеличиваться, а зависимость пройдет по кривой 3 (рис. 11.3).

При изменении нагрузки (тока I_a) скорость вращения изменяется в широких пределах. В данном случае имеет место мягкая характеристика, поэтому нельзя допускать, чтобы двигатель последовательного возбуждения работал в режиме холостого хода. Это приводит к работе

двигателя вразнос (частота вращения $n_{xx} \rightarrow \infty$ при I_{a0}), что в свою очередь может привести к его поломке.

Моментная характеристика $M_2 = f(I_a)$ при $U = \text{const}$ (рис. 11.4)

$$M_2 = M_{\text{Э}} - M_0 = C_M I_a \Phi - M_0,$$

до насыщения $\Phi = k I_a$, так как $C_e = \frac{PN}{60a}$, то $M_{\text{Э}} = C_M k I_a^2$; так как

$C_M k = \text{const}$, то $M_{\text{Э}} \equiv I_a^2$, т.е. зависимость – квадратичная.

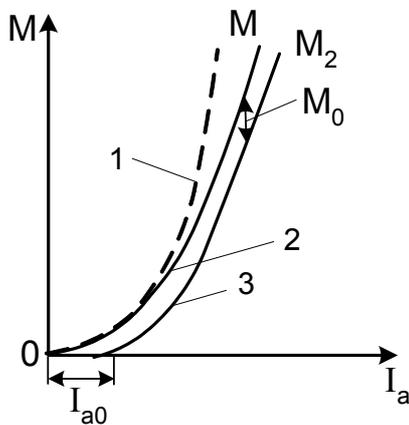


Рис. 11.4. Моментные характеристики двигателя: 1 – без учета насыщения $M_{\text{Э}} = f(I_a)$; 2 – с учетом насыщения $M_{\text{Э}} = f(I_a)$; 3 – с учетом насыщения $M_2 = f(I_a)$

Механическую характеристику (рис. 11.5) $n = f(M_2)$ при $U = \text{const}$ можно получить построением из двух предыдущих характеристик или объяснить теоретически.

Такие характеристики называются мягкими:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}.$$

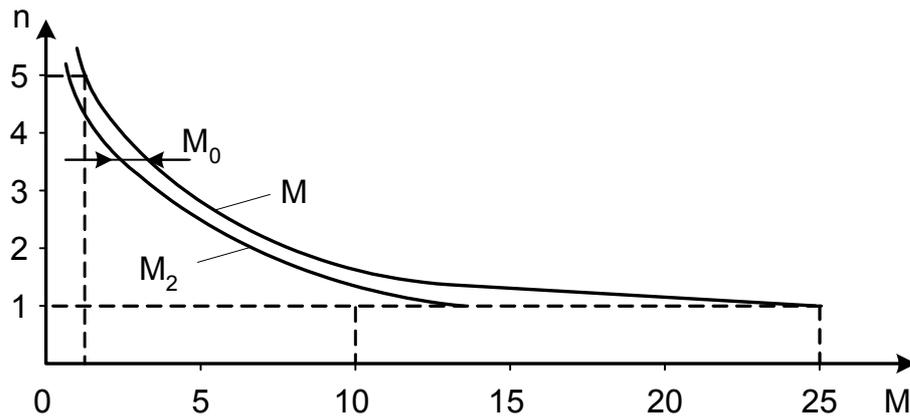


Рис. 11.5. Механические характеристики двигателя

Учитывая, что $M_{\text{Э}} = C_M I_a \Phi$, а $\Phi = k I_a$, для ненасыщенной системы $M_{\text{Э}} = c I_a^2$, тогда $I_a = \sqrt{M_{\text{Э}}/c}$ и, принимая $I_a R_a \approx 0$, получим

$$n = \frac{U}{C_e k I_a} = \frac{U}{C_e k \sqrt{\frac{M_{\text{Э}}}{c}}} = \frac{U}{\frac{C_e}{\sqrt{c}} \sqrt{M_{\text{Э}}}} = \frac{\text{const}}{\sqrt{M_{\text{Э}}}}.$$

11.2. Частота вращения и переходный процесс при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений

При введении в цепь якоря добавочных сопротивлений происходят те же процессы, что и в шунтовом двигателе.

$$\text{Без введения } R_d \quad n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi},$$

$$\text{при введении } R_d \quad n' = \frac{U - I_a (R_a + R_d)}{C_e \Phi},$$

т.е. $\frac{n}{n'} = \frac{U - I_a R_a}{U - I_a (R_a + R_d)}$, тогда электромеханические характеристики

примут вид:

$$R_{d2} > R_{d1} > 0.$$

С помощью пускового реостата подбирают такую величину R_{d2} , чтобы при $n = 0$, $I_{k2} = I_{\text{пуск}} \approx (1,5 \div 2 I_{\text{ном}})$.

Начинают разгон по кривой 3 до $I_{\text{ан}}(n''_{\text{уст}})$ (рис. 11.6), уменьшают до R_{d1} , переходят на кривую 2, разгоняют до $n'_{\text{уст}}$ и т.д. (пусковая диаграмма, рис. 11.6).

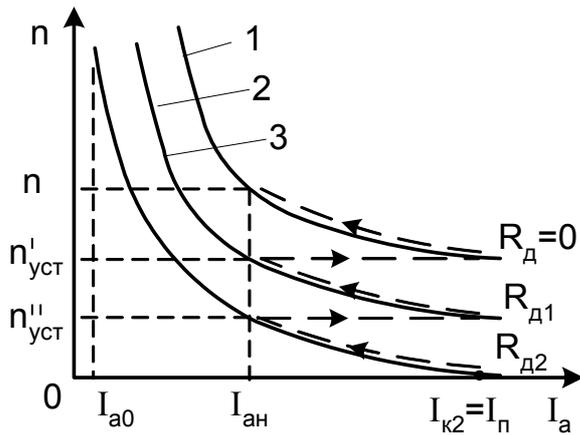


Рис. 11.6. Электромеханические характеристики двигателя: 1 – естественная; 2 и 3 – искусственные

Моментная характеристика не зависит от R_d . Механическая характеристика аналогична электромеханической. Переходной процесс такой же, как и у двигателя параллельного возбуждения.

11.3. Частота вращения и переходный процесс при изменении магнитного потока

От изменения магнитного потока изменяется частота вращения.

Пусть $\Phi' < \Phi$, $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$, $n' = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi'}$, $\frac{n}{n'} = \frac{C_e \Phi'}{C_e \Phi}$.

11.3.1. Способы изменения магнитного потока

Величина Φ зависит от намагничивающей силы обмотки возбуждения $F_B = I_B W$, следовательно, изменить магнитный поток можно двумя способами:

- изменением тока возбуждения при $W = \text{const}$ (шунтирование обмотки возбуждения, рис. 11.7, а);
- изменением числа витков при $I_B = \text{const}$ (секционирование обмотки возбуждения, рис. 11.7, б).

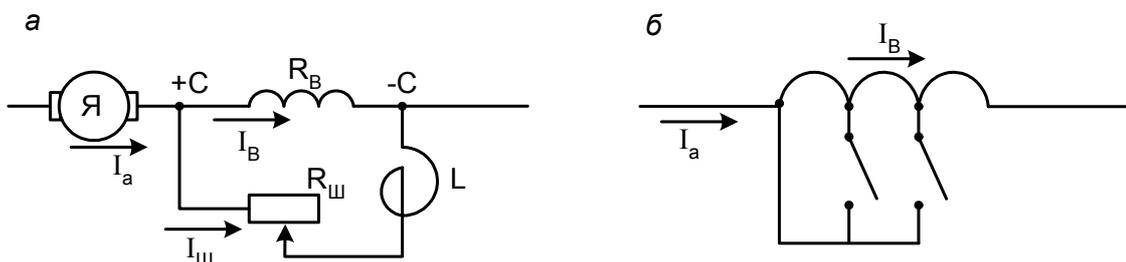


Рис. 11.7. Схемы для изменения магнитного потока

Таким образом, ток возбуждения определяется

$$I_B = I_a - I_{ш},$$

$$\frac{I_B}{I_a} = \alpha \text{ – коэффициент ослабления поля.}$$

11.3.2. Переходный процесс

Особенностью регулирования n изменением магнитного потока является то, что, например, с уменьшением I_B уменьшаются Φ и E , вследствие чего увеличивается ток якоря, а вместе с ним и I_B и $I_{\text{ш}}$, что ведет вновь к увеличению магнитного потока почти до первоначального момента (рис. 11.8).

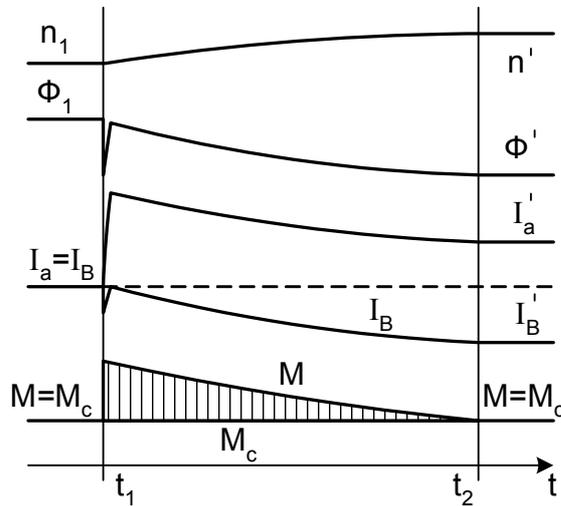


Рис. 11.8 Переходный процесс при изменении магнитного потока

С увеличением тока якоря увеличивается $M_{\text{э}}$ ($M_{\text{э}} > M_c$), начинается разгон двигателя, это ведет к увеличению n и E и уменьшению тока якоря и I_B , а, следовательно, и Φ . Все это продолжается до момента стабилизации ($M_{\text{э}} = M_c$), но при этом $I'_a > I_a$, $I'_B < I_B$, $\Phi' < \Phi$.

В шунтирующей цепи должна иметься индуктивность L . В случае отрыва и нового контакта пантографа, все замкнется через якорь и $R_{\text{ш}}$ (см. рис. 11.7, а), если в его цепи не будет L , то $I = \frac{U}{R_a + R_{\text{ш}}}$ очень вели-

ко, так как не будет противоэдс, что приведет к “круговому огню”.

Анализ характеристик при изменении Φ дан на рис. 11.9.

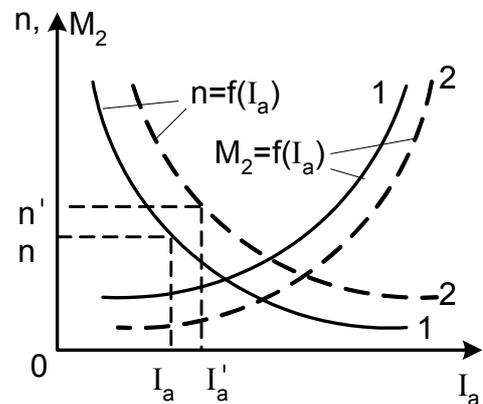


Рис. 11.9. Электромеханические и моментные характеристики двигателя: 1 – естественная; 2 – искусственная

11.3.3. Моментные характеристики $M = f(I_a)$

При тех же токах I_a зависимость определяется только потоком Φ , следовательно,

$$M_2 = M_{\text{Э}} - M_0 = c_M I_a \Phi - M_0.$$

Механическая характеристика будет аналогична электромеханической.

11.4. Частота вращения и переходный процесс при изменении напряжения на зажимах двигателя

Переходный процесс аналогичен процессу двигателя с параллельным возбуждением.

Изменить напряжение на двигателях можно:

- по системе Г–Д (применяется редко);
- перегруппировкой двигателей, т.е. переключением с последовательного соединения на параллельное (рис. 11.10).

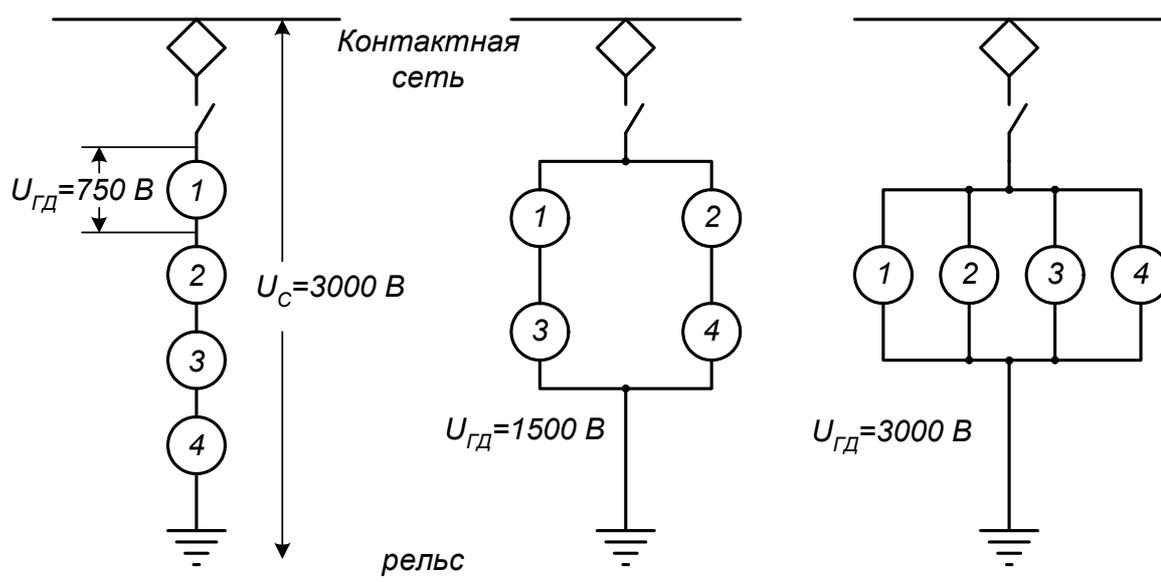


Рис. 11.10. Схемы включения тяговых двигателей

При первоначальном напряжении U $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$;

уменьшим напряжение $n' = \frac{\beta U - I_a R_a}{C_e \Phi}$, тогда $\frac{n}{n'} = \frac{U - I_a R_a}{\beta U - I_a R_a}$, так как

$I_a R_a \rightarrow 0$, то $n' = \beta \frac{U}{U} n = \beta n$.

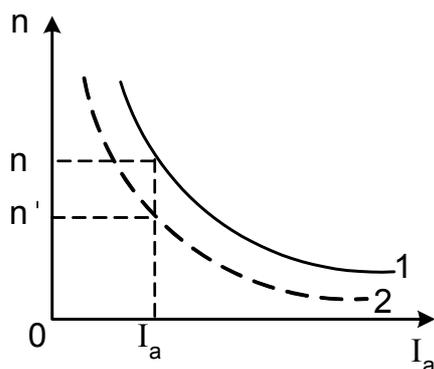


Рис. 11.11. Электромеханические характеристики двигателя: 1 – при $U_{\text{ном}}$; 2 – при $U < U_{\text{ном}}$

Если уменьшится напряжение, то уменьшится и частота вращения почти во столько же раз при том же токе якоря I_a (рис. 11.11).

Механическая характеристика аналогична электромеханической.

Моментная характеристика не зависит от напряжения.

Характеристики двигателя смешанного возбуждения рассмотреть самостоятельно. Его характеристики находятся между характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения.

ЛЕКЦИЯ 12 ТРАНСФОРМАТОРЫ

План лекции

12.1. Устройство и принцип действия однофазного трансформатора.

12.2. Уравнения напряжений и эдс однофазного трансформатора под нагрузкой.

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Чаще всего применяются *однофазные* и *трехфазные* трансформаторы. Трансформаторы с другим числом фаз используются в специальных устройствах.

В зависимости от назначения трансформаторы имеют некоторые особенности в конструкции и режимах работы.

12.1. Устройство и принцип действия однофазного трансформатора

Простейший трансформатор (рис. 12.1) состоит из магнитомягкого замкнутого магнитопровода (сердечника) и двух обмоток.

Магнитопровод служит для концентрации и прохождения магнитного потока. Он должен обладать минимальным сопротивлением магнитному потоку и выполняться из магнитомягкого ферромагнитного материала.

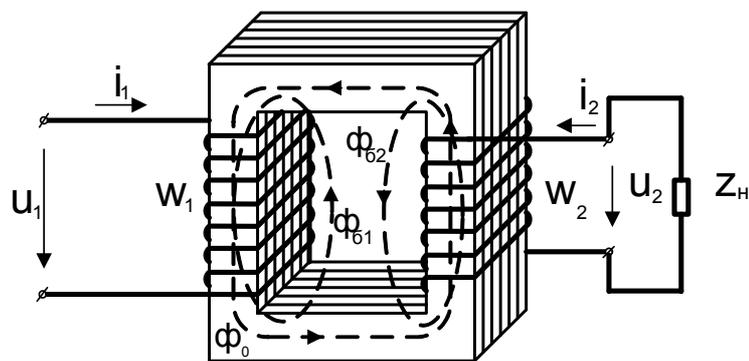


Рис. 12.1 Простейший однофазный трансформатор (магнитопровод стержневого типа)

Ферромагнетики, попадая во внешнее магнитное поле, создают свое магнитное поле, поток которого намного больше потока катушки.

По конструкции магнитопроводы бывают *стержневого* (рис. 12.1) и *броневое* (рис. 12.2) типов.

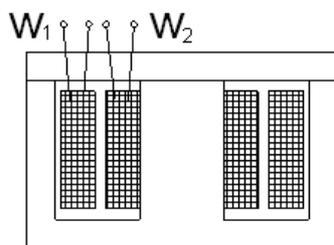


Рис. 12.2. Магнитопровод броневое типа

Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы набираются из листов электротехнической стали толщиной 0,5 и 0,35 мм *горячекатаной прокатки* (1411, 1511) или *холоднокатаной прокатки* (3411, 3412, 3413 и др.).

У листов холоднокатаной стали сопротивление R_{μ} по направлению проката меньше.

Сердечники, набранные из листов стали, называются *шихтованными*.

Шихтованные сердечники изготовляют *встык* (рис. 12.3, а) и *впереплет* (рис. 12.3, б). На сердечники, изготовленные встык, упрощается посадка обмотки, их применяют в трансформаторах малой мощности.

Для уменьшения воздушных зазоров используют *ленточные* сердечники (рис. 12.3, в).

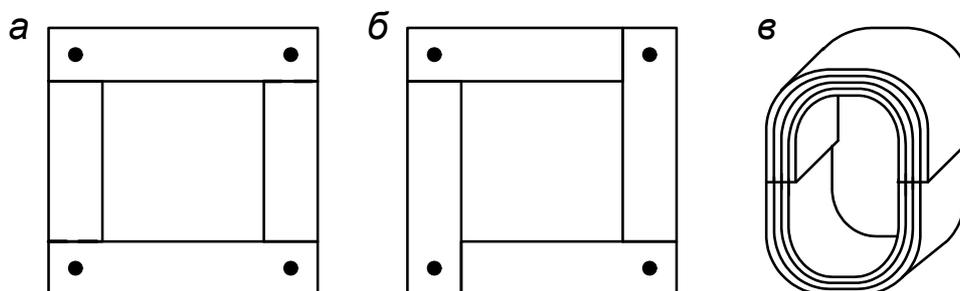


Рис. 12.3. Магнитопроводы уложенные встык (а); впереплет (б); ленточный (в)

Принцип действия трансформатора основан на *законе электромагнитной индукции*.

К первичной обмотке трансформатора подключается переменное напряжение u_1 , по ней потечет переменный ток i_1 , который создаст магнитодвижущую силу (мдс) $i_1 W_1$. Мдс в свою очередь создаст переменный магнитный поток, который, замыкаясь по магнитопроводу, будет наводить в обеих обмотках электродвижущую силу. В первичной обмотке возникает эдс самоиндукции, а во вторичной – эдс взаимной индукции

$$u_1 \rightarrow i_1 \rightarrow F_1 = W_1 i_1 \rightarrow (\Phi_0 + \Phi_6),$$

где Φ_0 – основной магнитный поток, пересекающий обе обмотки; Φ_6 – поток рассеяния, пересекающий только одну обмотку (см. рис. 12.1);

$$\begin{array}{l} \Phi \nearrow e_2 = -W_2 \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ 0 \searrow e_1 = -W_1 \frac{d\Phi_0}{dt}. \end{array}$$

12.2. Уравнения напряжений и эдс однофазного трансформатора под нагрузкой

Если к вторичной обмотке подключить нагрузку Z_H , то по ней потечет ток i_2 . Этот ток создает свой магнитный поток Φ_2 , который направлен навстречу основному потоку от тока i_1 .

Таким образом, получается два взаимно-индуктивных контура со встречным включением обмоток (рис. 12.4).

На рис. 12.4 представлена схема замещения трансформатора.

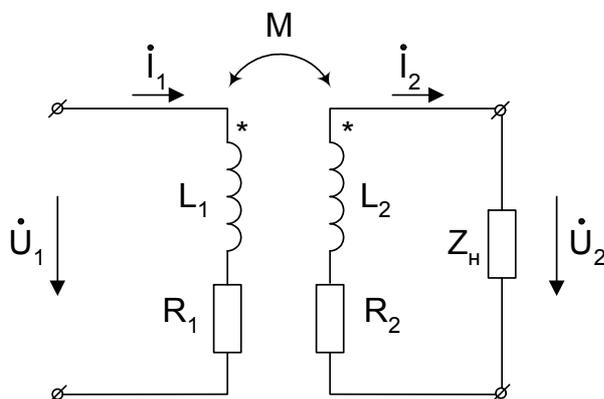


Рис. 12.4 Схема встречного включения обмоток трансформатора: * – одноименные зажимы

Два зажима 2-х разных элементов являются одноименными и обозначаются одинаково. Если токи относительно их протекают в одном направлении, а магнитные потоки направлены согласно – это согласное включение обмоток.

На рис. 12.4 показано встречное включение обмоток.

Коэффициент магнитной связи K :

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}};$$

$$M = K\sqrt{L_1 L_2},$$

где L_1 – собственная индуктивность первичной обмотки, Гн; L_2 – собственная индуктивность вторичной обмотки, Гн; M – взаимная индуктивность обмоток, Гн.

Составим уравнения по 2-му закону Кирхгофа для мгновенных значений токов:

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 - M \frac{di_2}{dt}, \quad (12.1,а)$$

$$0 = L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R_2 - M \frac{di_1}{dt} + u_2, \quad (12.2,а)$$

или в комплексной форме записи:

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 + R_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2, \quad (12.1,б)$$

$$0 = j\omega L_2 \dot{I}_2 + R_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 + \dot{U}_2. \quad (12.2,б)$$

Обозначим $j\omega M \dot{I}_2 = \dot{E}_{1M}, \quad j\omega M \dot{I}_1 = \dot{E}_{2M},$

$$j\omega L_1 \dot{I}_1 = \dot{E}_{1S}, \quad j\omega L_2 \dot{I}_2 = \dot{E}_{2S},$$

где \dot{E}_{1M} и \dot{E}_{2M} – эдс взаимной индукции; \dot{E}_{1S} и \dot{E}_{2S} – эдс самоиндукции.

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{1S} + R_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_{1M} = -(\dot{E}_{1M} - \dot{E}_{1S}) + R_1 \dot{I}_1, \quad (12.1,в)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_{2S} - \dot{E}_{2M} - R_2 \dot{I}_2 = (\dot{E}_{2M} - \dot{E}_{2S}) - R_2 \dot{I}_2, \quad (12.2,в)$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1, \quad (12.1,г)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2 \dot{I}_2. \quad (12.2,г)$$

Основные уравнения трансформатора (12.1,г) и (12.2,г) составлены без учета потоков рассеяния.

От потоков рассеяния Φ_6 в обмотках трансформатора наводятся эдс [формулы (12.1,д) и (12.2,д)].

$$e_{61} = L_{61} \frac{di_1}{dt} \Rightarrow \dot{E}_{61} = jX_1 \dot{I}_1, \quad (12.1,д)$$

$$e_{62} = L_{62} \frac{di_1}{dt} \Rightarrow \dot{E}_{62} = jX_2 \dot{I}_2. \quad (12.2,д)$$

Тогда уравнения (12.1,г) и (12.2,г) примут вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1,$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2 \dot{I}_2 - jX_2 \dot{I}_2.$$

Работа первичной обмотки трансформатора аналогична работе электродвигателя, а вторичной – генератора.

ЛЕКЦИЯ 13 ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ИДЕАЛЬНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ. УРАВНЕНИЕ МДС, ПРИВЕДЕНИЕ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

План лекции

13.1. Основные соотношения в идеальном трансформаторе.

13.2. Уравнение мдс трансформатора.

13.3. Приведенный трансформатор.

13.4. Схемы замещения трансформатора.

13.1. Основные соотношения параметров в идеальном трансформаторе

Идеальным называется трансформатор, у которого:

– коэффициент магнитной связи $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = 1$, т.е. отсутствуют по-

токи рассеяния;

– коэффициент полезного действия (кпд) $\eta = 1$, т.е. отсутствуют потери мощности электрические (в обмотках) $p_{эл1} = 0$, так как $r_2 = 0$ и $p_{эл2} = 0$, потому что $r_1 = 0$; магнитные (в сердечнике) $p_{вихр} = 0$ и $p_{гист} = 0$, $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$, $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$;

– напряжение изменяется по синусоидальному закону, так как $\phi = \Phi_m \sin \omega t$, т.е. трансформатор работает на прямолинейном участке кривой намагничивания (без насыщения). Наводимые в обмотках эдс:

$$\begin{aligned} e_1 &= -\frac{d\psi_1}{dt} = -W_1 \frac{d\phi}{dt} = -W_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = \\ &= -\omega W_1 \Phi_m \cos \omega t = \omega W_1 \Phi_m (-\cos \omega t), \end{aligned}$$

где $\omega W_1 \Phi_m = E_{1m}$;

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ), \quad (13.1)$$

$$e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -W_2 \frac{d\phi}{dt} = -W_2 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} =$$

$$= -\omega W_2 \Phi_m \cos \omega t = \omega W_2 \Phi_m (-\cos \omega t),$$

где $\omega W_2 \Phi_m = E_{2m}$;

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ). \quad (13.2)$$

Эдс, наводимые магнитным потоком, отстают от него на угол 90° (рис. 13.1)

Действующие значения эдс:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega W_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2 \pi f_1}{\sqrt{2}} W_1 \Phi_m;$$

$$E_1 = 4,44 f_1 W_1 \Phi_m, \quad (13.3)$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega W_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2 \pi f_1}{\sqrt{2}} W_2 \Phi_m,$$

$$E_2 = 4,44 f_1 W_2 \Phi_m. \quad (13.4)$$

Рис. 13.1. Векторная диаграмма идеального трансформатора

Если $W_1 > W_2$ – то трансформатор понижающий и наоборот $W_1 < W_2$ – повышающий.

Отношение эдс:
$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f_1 W_1 \Phi_m}{4,44 f_1 W_2 \Phi_m} = \frac{W_1}{W_2}, \quad (13.5)$$

где K – коэффициент трансформации.

В идеальном трансформаторе $U_1 = E_1$, $U_2 = E_2$, тогда

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} = K.$$

Мощности обмоток $S_1 = S_2$, $U_1 I_1 = U_2 I_2$, откуда $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = K$.

Таким образом, токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны количеству витков.

В реальном трансформаторе полученные соотношения несколько нарушаются. Но силовые трансформаторы имеют очень высокий КПД ($\eta = 98 \div 99 \%$), у них r_1 и r_2 малы, $x_{\sigma 1}$ и $x_{\sigma 2}$ также малы.

13.2. Уравнение мдс трансформатора

В режиме холостого хода (хх) первичная обмотка трансформатора забирает из сети такой ток $\dot{I}_{1\text{хх}} = \dot{I}_0$, который создает мдс $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 W_1$, а мдс в свою очередь создает магнитный поток Φ_0 .

Когда во вторичной обмотке потечет ток \dot{I}_2 , он создаст свою мдс $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 W_2$ и соответственно свой поток Φ_2 , направление которого встречное к основному потоку Φ_0 . Следовательно, поток Φ_0 уменьшается. Если поток Φ_0 уменьшается, то уменьшается и индуктивное сопротивление x_{L1} в первичной обмотке, а так как \dot{U}_1 неизменно, то увеличится ток в первичной обмотке на величину $\Delta \dot{I}_1$. Кроме тока холостого хода \dot{I}_0 теперь будет потребляться из сети еще дополнительный ток $\Delta \dot{I}_1$ такой величины, которая создает свою мдс $\Delta \dot{F}_1 = \Delta \dot{I}_1 W_1$, компенсирующую мдс \dot{F}_2 , т.е. $\Delta \dot{I}_1 W_1 = \dot{I}_2 W_2$ и основной магнитный поток Φ_0 останется таким же, каким он был в режиме холостого хода.

Таким образом, полную мдс первичной обмотки при работе трансформатора под нагрузкой выразим формулой

$$W_1 \dot{I}_1 = W_1 \dot{I}_0 + W_1 \Delta \dot{I}_1$$

или, заменив $W_1 \Delta \dot{I}_1$ на $(-W_2 \dot{I}_2)$, получим

$$W_1 \dot{I}_1 = W_1 \dot{I}_0 - W_2 \dot{I}_2, \text{ или}$$

$$W_1 \dot{I}_1 + W_2 \dot{I}_2 = W_1 \dot{I}_0. \quad (13.6)$$

Разделив (13.6) на W_1 , получим:

$$\dot{I}_1 + \frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2 = \dot{I}_0, \text{ так как } \frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{K}, \text{ то}$$

$$\dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{K} = \dot{I}_0, \quad (13.7)$$

где $\frac{\dot{I}_2}{K} = \dot{I}'_2$ – ток вторичной обмотки, приведенный к первичной (подразд. 13.3).

13.3. Приведенный трансформатор

Так как в общем случае $\omega_2 \neq \omega_1$, то $E_2 \neq E_1$ и $I_2 \neq I_1$. В соответствии с разными эдс и токами различны и параметры обмоток, т.е. их активные и индуктивные сопротивления. Это затрудняет количественный учет

процессов, происходящих в трансформаторе, и построение векторных диаграмм, особенно при больших коэффициентах трансформации.

Чтобы избежать этих затруднений, пользуются способом, при котором *обе обмотки трансформатора приводятся к одному числу витков*.

Обычно приводят вторичную обмотку к первичной, т.е. новое число витков вторичной обмотки приравнивают к первичной $W'_2 = W_1$, (в дальнейшем приведенные параметры обозначаем со штрихом), но чтобы не изменилось энергетическое состояние трансформатора поступают следующим образом: имеют в виду, что при новом числе витков изменится и эдс, т.е. $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$, так как $W'_2 = W_1$, т.е.

$$\dot{E}'_2 = \dot{E}_2 K. \quad (13.8)$$

Мощность трансформатора не должна измениться, при этом:

– полная мощность $\dot{E}'_2 \dot{I}'_2 = \dot{E}_2 \dot{I}_2$, откуда

$$\dot{i}'_2 = \frac{\dot{E}_2 \dot{I}_2}{\dot{E}'_2} = \frac{\dot{E}_2 \dot{I}_2}{\dot{E}_2 K} = \frac{\dot{I}_2}{K},$$

т.е. приведенное значение тока

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{K}; \quad (13.9)$$

– активная мощность $(\dot{I}'_2)^2 R'_2 = (\dot{I}_2)^2 R_2$, откуда

$$R'_2 = \frac{(\dot{I}_2)^2 R_2}{(\dot{I}'_2)^2} = \frac{(\dot{I}_2)^2 R_2}{(\dot{I}_2)^2 / K^2} = K^2 R_2,$$

$$R'_2 = K^2 R_2; \quad (13.10)$$

– реактивная мощность $(\dot{I}'_2)^2 X'_2 = (\dot{I}_2)^2 X_2$, откуда

$$X'_2 = \frac{(\dot{I}_2)^2 X_2}{(\dot{I}'_2)^2} = \frac{(\dot{I}_2)^2 X_2}{(\dot{I}_2)^2 / K^2} = K^2 X_2,$$

$$X'_2 = K^2 X_2; \quad (13.11)$$

и соответственно

$$Z'_2 = K^2 Z_2. \quad (13.12)$$

Уравнение мдс трансформатора (см. подразд. 13.2):

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0, \quad (13.13)$$

уравнения эдс трансформатора:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1, \quad (13.14)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}'_2 + \dot{I}'_2 \underline{Z}'_2. \quad (13.15)$$

Еще одним средством, облегчающим исследование и расчет трансформаторов, является применение электрической схемы замещения приведенного трансформатора.

13.4. Схемы замещения трансформатора

Действительный приведенный трансформатор имеет схему замещения с магнитной связью, которая показана на рис. 13.2.

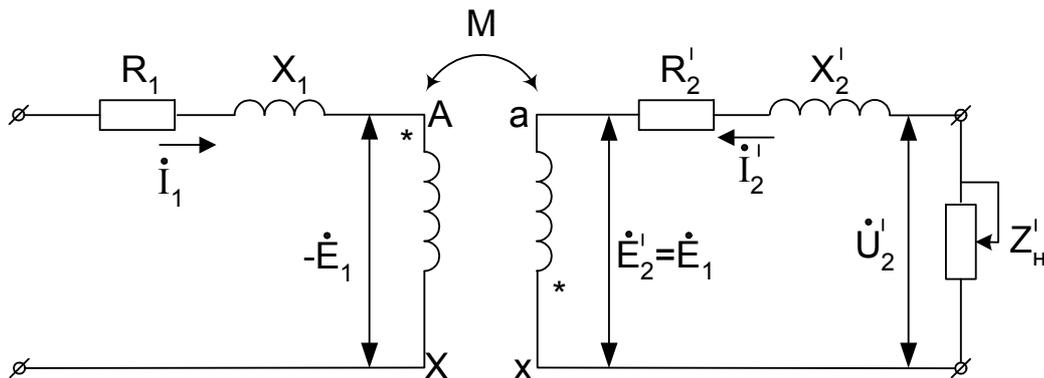


Рис. 13.2. Схема замещения приведенного трансформатора с магнитной связью

Согласно этой схеме магнитную связь можно заменить на электрическую.

Так как $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$, то точки А и а, а также X и x на приведенном трансформаторе имеют одинаковые потенциалы, что позволяет электрически соединить указанные точки, получив Т-образную схему замещения и перейти от магнитной связи обмоток к электрической (рис. 13.3).

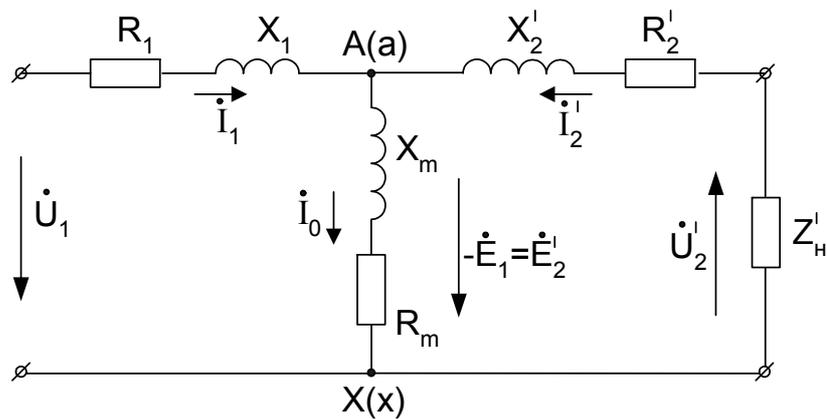


Рис. 13.3. Схема замещения приведенного трансформатора с электрической связью

Эта схема удовлетворяет уравнениям эдс и токов приведенного трансформатора [формулы (13.13)–(13.15)].

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0, \quad (13.13,a)$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}'_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}'_1 = -\dot{E}'_1 + \dot{I}_1 j X_1 + \dot{I}_1 R_1, \quad (13.14,a)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}'_2 + \dot{I}'_2 \underline{Z}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 j X'_2 - \dot{I}'_2 R'_2. \quad (13.15,a)$$

По схеме замещения и уравнениям приведенного трансформатора можно построить векторную диаграмму (см. подразд. 15.1).

ЛЕКЦИЯ 14 РЕЖИМЫ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

План лекции

- 14.1. Параметры холостого хода трансформатора.
- 14.2. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора.
- 14.3. Параметры режима короткого замыкания.
- 14.4. Векторная диаграмма короткого замыкания трансформатора.

14.1. Параметры холостого хода трансформатора

Режимом холостого хода трансформатора называют режим, когда вторичная обмотка трансформатора разомкнута ($Z_H \rightarrow \infty$, $I_2 = 0$), а на первичную обмотку подается номинальное напряжение U_{1H} .

Режим холостого хода осуществляют по схеме, приведенной на рис. 14.1.

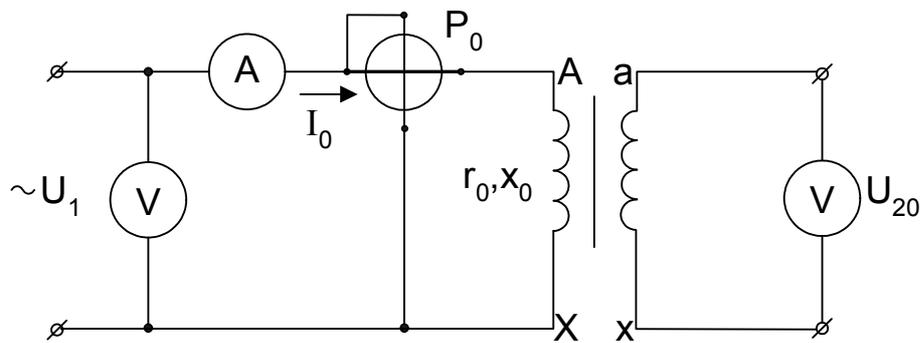


Рис. 14.1. Схема опыта холостого хода

По результатам опыта имеем параметры холостого хода:

- приложенное первичное напряжение U_1 ;
- вторичное напряжение $U_2 = E_2$;
- ток холостого хода I_0 ;
- мощность, потребляемая на холостом ходу P_0 .

Полезная мощность трансформатора $P_2 = 0$, но потребляемая мощность P_0 расходуется на магнитные потери (потери в стали $P_{ст}$ от перемагничивания сердечника) и электрические потери в первичной обмотке $P_{Э1} = I_0^2 r_1$; но так как $I_0 = (2 \div 10) \%$ от $I_{1н}$, то этими потерями в обмотке можно пренебречь.

Потери мощности в стали $P_{ст}$ с изменением нагрузки остаются неизменными.

Потери холостого хода затрачиваются на потери мощности от вихревых токов, наводимых в магнитопроводе, и от перемагничивания петли гистерезиса.

По полученным данным из опыта холостого хода можно рассчитать следующие величины:

- коэффициент трансформации $K = U_1/U_2$;
- коэффициент мощности холостого хода $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{S_0} = \frac{P_0}{U_{1н} I_0}$;
- ток холостого хода в процентах $i_0 \% = \frac{I_0}{I_{1н}} 100$;
- полное сопротивление $z_0 = U_{1н}/I_0$.

Согласно схемы замещения трансформатора на холостом ходу (рис. 14.2)

$$r_0 = r_1 + r_M; \quad x_0 = x_1 + x_M; \quad z_0 = z_1 + z_M, \quad (14.1)$$

где r_M и x_M – активная и реактивная составляющие сопротивления контура намагничивания.

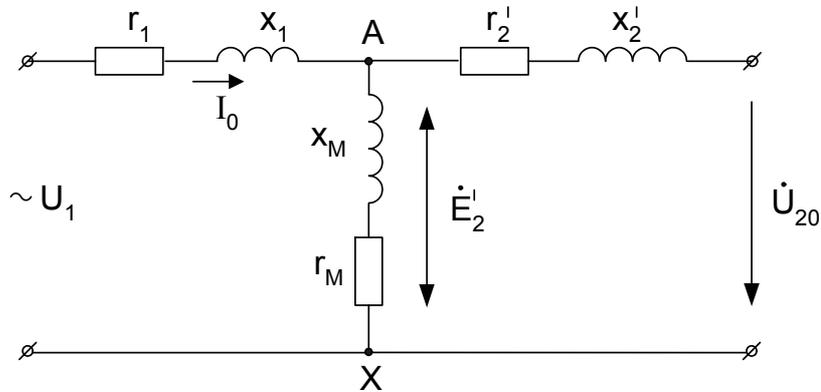


Рис. 14.2. Схема замещения приведенного трансформатора в режиме холостого хода

Величины этих составляющих определяются по следующим формулам:

$$r_0 = P_0 / I_0^2; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} \quad \text{или} \quad (14.2)$$

$$r_0 = z_0 \cos \varphi_0; \quad x_0 = z_0 \sin \varphi_0. \quad (14.3)$$

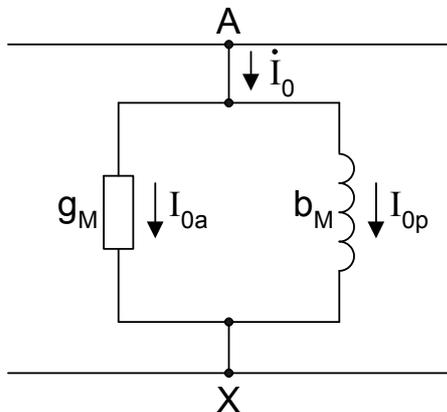


Рис. 14.3. Параллельная схема замещения контура на магнитивания трансформатора

Иногда последовательная схема замещения контура намагничивания заменяется на параллельную, как это показано на рис. 14.3.

Переход от одной схемы к другой эквивалентной рассматривается в курсе ТОЭ.

Активная составляющая тока холостого хода идет на покрытие потерь мощности

$$I_{0a} = P_0 / U_{1н}. \quad (14.4)$$

Реактивная составляющая тока холостого хода создает основной магнитный поток

$$I_{0p} = \sqrt{I_0^2 - I_{0a}^2}; \quad (14.5)$$

$$\text{или} \quad I_{0p} = I_0 \cos \varphi_0; \quad I_{0p} = I_0 \sin \varphi_0. \quad (14.6)$$

14.2. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

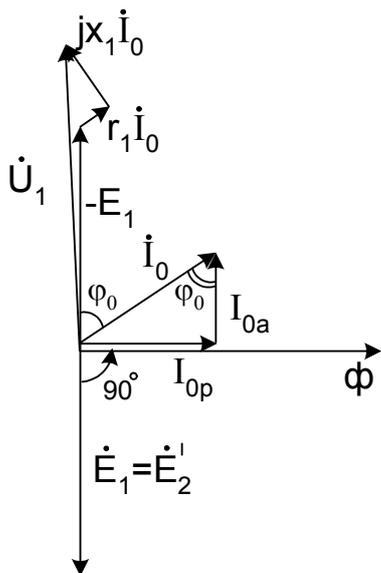


Рис. 14.4. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

Векторная диаграмма холостого хода трансформатора приведена на рис. 14.4.

Порядок построения диаграммы:

- проводится произвольно вектор магнитного потока Φ ;
- с ним по фазе совпадает реактивная составляющая тока \bar{I}_{0p} , создающая этот поток;
- под углом 90° из вершины тока \bar{I}_{0p} проводится вектор \bar{I}_{0a} , в результате получаем $\bar{I}_0 = \bar{I}_{0p} + \bar{I}_{0a}$.

От магнитного потока Φ эдс $\bar{E}_1 = \bar{E}'_2$ отстают на 90° , а вектор $(-\bar{E}_1)$ повернут на 180° относительно вектора \bar{E}_1 .

Чтобы выполнялось условие уравнения напряжений для первичной обмотки $\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_0 r_1 + jx_1 \bar{I}_0$, надо к вектору $(-\bar{E}_1)$ прибавить вектор падения напряжения $\bar{I}_0 r_1$, проведя его параллельно току \bar{I}_0 , и вектор $jx_1 \bar{I}_0$ под углом 90° к вектору тока \bar{I}_0 .

14.3. Параметры режима короткого замыкания

Режимом короткого замыкания трансформатора называют режим, когда вторичная обмотка замыкается накоротко ($z_H = 0$), а к первичной подводят такое пониженное напряжение U_K , при котором токи в обмотках должны быть равными номинальным $I_{1k} = I_{1H}$; $I_{2k} = I_{2H}$. Напряжение U_K составляет всего $(5 \div 12)\%$ от номинального первичного напряжения

$$u_k \% = \frac{U_k}{U_{1H}} 100 = (5 \div 12)\%. \quad (14.7)$$

Режим короткого замыкания осуществляется по схеме, приведенной на рис. 14.5.

Из опыта короткого замыкания имеем:

- приложенное напряжение U_{1k} ($U_{2k} = 0$);
- токи в обмотках I_{1k} и I_{2k} ;
- мощность потребления в режиме короткого замыкания P_k .

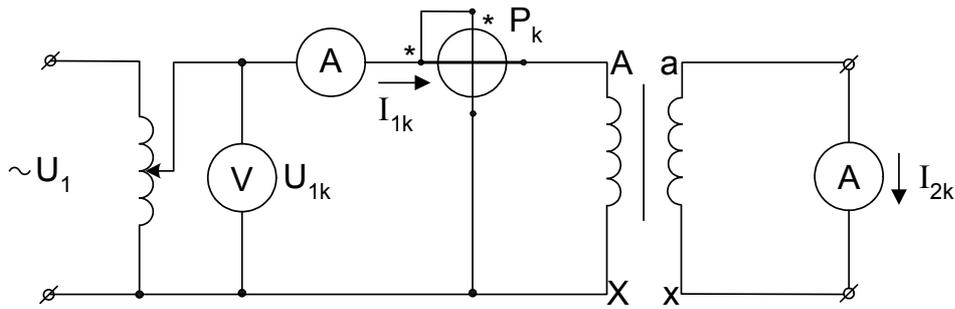


Рис. 14.5. Схема опыта короткого замыкания

Магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, находится в прямой зависимости от приложенного напряжения. Но как было отмечено выше, напряжение U_{1k} весьма незначительно, поэтому магнитный поток очень мал, что позволяет допустить:

– ток намагничивания I_0 близок к нулю и им можно пренебречь, поэтому в схеме замещения для режима короткого замыкания (рис. 14.6) контур намагничивания отсутствует, а $I_{1k} = -I_{2k}$;

– вся мощность, потребляемая из сети, расходуется на покрытие электрических потерь (потери в меди обмоток P_M).

$$P_M = \beta^2 P_k, \quad (14.7, a)$$

где $\beta = \frac{I_1}{I_{1H}} = \frac{I_2}{I_{2H}}$ – коэффициент загрузки трансформатора;

при $\beta = 1$, $P_M = P_k$.

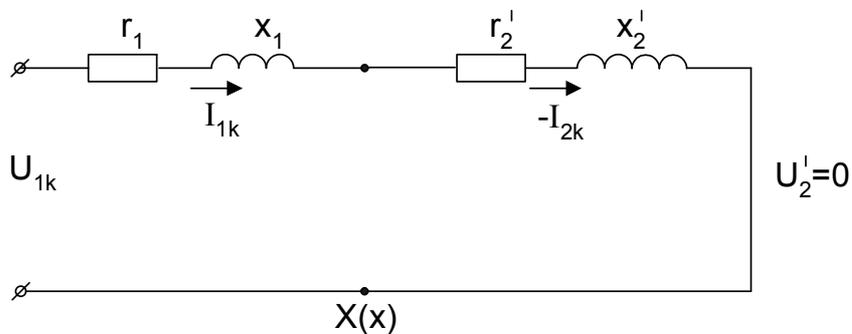


Рис. 14.6. Схема замещения приведенного трансформатора в режиме короткого замыкания

По полученным данным из опыта короткого замыкания можно рассчитать следующие величины:

– коэффициент трансформации $K = I_{2k}/I_{1k}$;

– коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_K = \frac{P_k}{S_k} = \frac{P_k}{U_{1k} I_{1k}}; \quad (14.8)$$

– напряжение короткого замыкания по формуле (14.7) в процентах;

– полное сопротивление $z_k = U_{1k}/I_{1k}$.

Согласно схеме замещения трансформатора в режиме короткого замыкания (см. рис. 14.6)

$$\dot{U}_{1k} = \dot{I}_{1k}(r_k + jx_k) = \dot{I}_{1k}(r_1 + r'_2) + j\dot{I}_{1k}(x_1 + x'_2); \quad (14.9)$$

$$r_k = r_1 + r'_2; \quad x_k = x_1 + x'_2; \quad z_k = z_1 + z'_2. \quad (14.10)$$

Активная и реактивная составляющие полного сопротивления короткого замыкания

$$r_k = P_k / I_{1k}^2; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad \text{или} \quad (14.11)$$

$$r_k = z_k \cos \varphi_k; \quad x_k = z_k \sin \varphi_k. \quad (14.12)$$

Напряжение короткого замыкания в процентах можно также определить по следующему выражению

$$u_k \% = \frac{z_k I_{1k}}{U_{1H}} 100 = \frac{z_k S_H}{U_{1H}^2} 100. \quad (14.13)$$

Тогда активная и реактивная составляющие

$$u_{ak} \% = u_k \% \cos \varphi_k = \frac{r_k I_{1k}}{U_{1H}} 100, \quad (14.14)$$

$$u_{pk} \% = u_k \% \sin \varphi_k = \frac{x_k I_{1k}}{U_{1H}} 100, \quad (14.15)$$

при этом, не забывая, что $I_{1k} = I_{1H}$.

14.4. Векторная диаграмма короткого замыкания трансформатора

Векторная диаграмма короткого замыкания трансформатора приведена на рис. 14.7.

При построении векторной диаграммы должно выполняться условие (14.9).

Согласно теории приведенного трансформатора и выражениям (14.10)

$$r_1 = r'_2 = r_k / 2; \quad x_1 = x'_2 = x_k / 2.$$

$$\text{Тогда} \quad r_2 = r'_2 / K^2; \quad x_2 = x'_2 / K^2.$$

Таким образом, по опытам холостого хода и короткого замыкания можно определить основные параметры трансформатора, что позволяет анализировать работу трансформатора под нагрузкой при помощи векторной диаграммы.

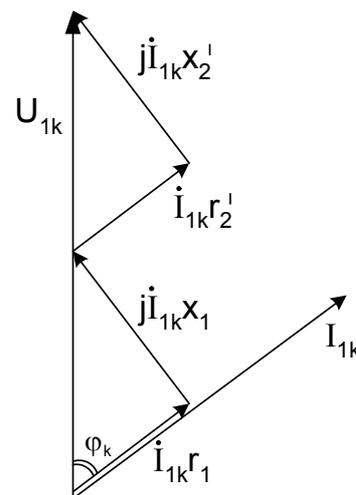


Рис. 14.7. Векторная диаграмма короткого замыкания трансформатора

ЛЕКЦИЯ 15 РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

План лекции

- 15.1. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке.
- 15.2. Внешняя характеристика трансформатора.
- 15.3. Коэффициент полезного действия трансформатора.

15.1. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

Все параметры схемы замещения работающего трансформатора, за исключением $z'_н$, являются постоянными величинами и могут быть определены из опытов холостого хода и короткого замыкания.

По основным уравнениям эдс и токов можно построить векторную диаграмму, которая наглядно показывает соотношения между токами, эдс и напряжениями.

Она является графическим выражением основных уравнений приведенного трансформатора.

Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке приведена на рис. 15.1.

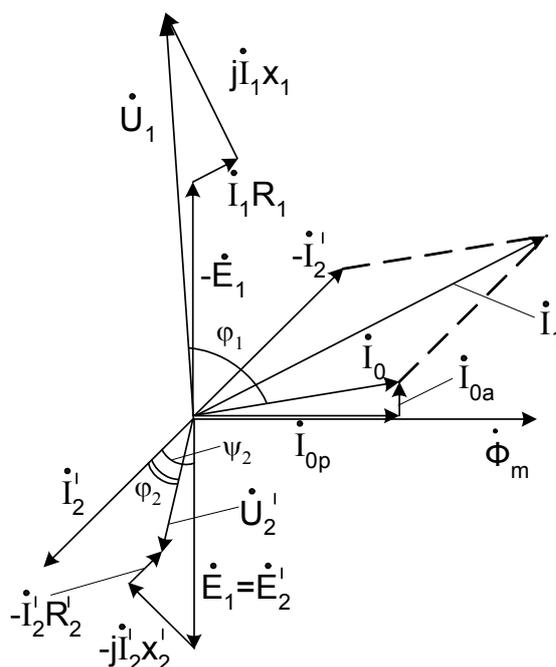


Рис. 15.1. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

Порядок построения векторной диаграммы:

- проводится произвольно вектор магнитного потока $\dot{\Phi}$;
- построение векторов \bar{I}_{0p} , \bar{I}_{0a} и \bar{I}_0 аналогично диаграмме холостого хода;

– эдс $\bar{E}_1 = \bar{E}'_2$ отстают на 90° от магнитного потока Φ_m ;

– определив величину тока $I'_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{(R'_H + R'_2)^2 + (X'_H + X'_2)^2}}$, откладываем

вектор \dot{I}'_2 под углом ψ_2 , который находим по формуле $\psi_2 = \arctg \frac{X'_2 + X'_H}{R'_2 + R'_H}$;

– согласно уравнению (13.13) $\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + (-\bar{I}'_2)$ строим вектор \bar{I}_1 ;

– по формуле (13.14) $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_1 + \dot{I}_1 R_1$ находим вектор \dot{U}_1 ;

– по формуле (13.15) $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 X'_2 - \dot{I}'_2 R'_2$ получаем вектор \dot{U}'_2 .

По полученным данным можно построить внешнюю характеристику $U_2 = f(I_2)$ и зависимость $\cos \varphi_1 = f(I_2)$.

В случае активно-емкостной нагрузки вид диаграммы изменится при прежнем порядке построений. Ток \dot{I}'_2 опережает эдс по фазе на

угол $\psi_2 = \arctg \frac{X'_2 + X'_H}{R'_2 + R'_H}$.

15.2. Внешняя характеристика трансформатора

Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$, $\cos \varphi_2 = \text{const}$ (рис. 15.2).

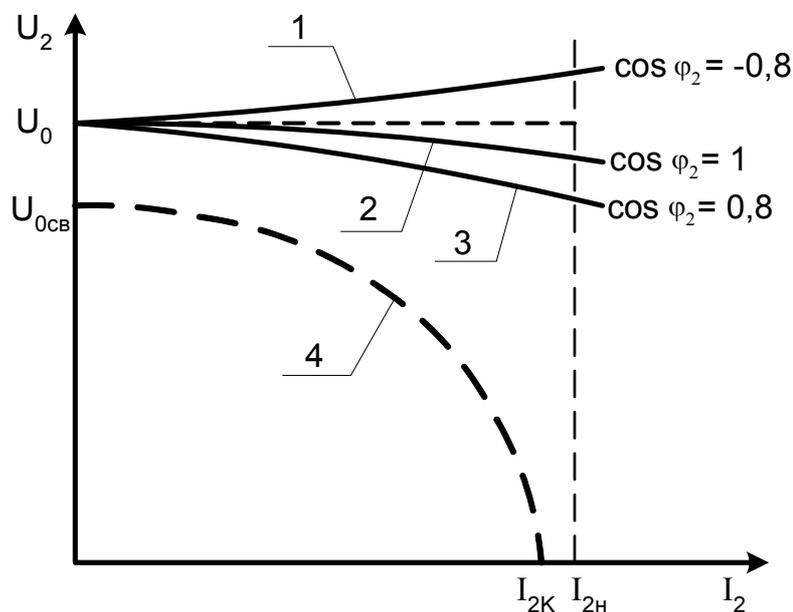


Рис. 15.2. Внешние характеристики трансформатора: 1 – нагрузка активно-емкостная; 2 – чисто активная; 3 – активно-индуктивная; 4 – внешняя характеристика сварочного трансформатора

У сварочного трансформатора $U_{0CB} \approx 70$ В достаточное для зажигания дуги. При сварке $U_{CB} = 0$, а $I_{2K} = I_{CB} \approx 300$ А. Такая крутопадающая характеристика образуется за счет включения последовательно с вторичной обмоткой реактора (катушки с большой индуктивностью).

15.3. Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется по формуле

$$\eta = P_2/P_1, \quad (15.1)$$

где P_2 – мощность, отдаваемая (полезная) вторичной обмоткой; P_1 – мощность подведенная (затраченная) к первичной обмотке.

Разность между подведенной и отдаваемой мощностями является потерями мощности:

$$P_1 - P_2 = \Sigma P. \quad (15.2)$$

Потери мощности в трансформаторе делятся на магнитные и электрические.

Магнитные потери – это потери мощности в магнитопроводе на гистерезис и на вихревые токи.

$P_{\text{маг}} = P_{\text{ст}} = P_{\text{г}} + P_{\text{вх}} = P_0$ – потери холостого хода (постоянные, см. подразд. 14.1).

Электрические потери – это потери, связанные с нагревом обмоток трансформатора:

$P_{\text{эл}} = P_{\text{ма}} = \beta^2 P_{\text{кн}}$ – переменные потери, так как зависят от силы тока $P_{\text{ма}}$ (см. 14.7,а),

$$\beta = I_1/I_{1н} = I_2/I_{2н},$$

где β – коэффициент нагрузки.

Полезную мощность можно определить по формуле

$$P_2 = mU_2I_2 \cos \varphi_2, \quad (15.3)$$

где m – число фаз,

при $m = 1$

$$P_2 = \beta S_H \cos \varphi_2.$$

Если $P_1 = P_2 + \Sigma P$, то

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P},$$

подставим значения потерь мощности

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{KH}}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{KH}}. \quad (15.4)$$

Максимальное значение кпд соответствует такой нагрузке, когда магнитные потери равны электрическим потерям $P_0 = \beta^2 P_{KH}$,

откуда
$$\beta = \sqrt{P_0 / P_{KH}}. \quad (15.5)$$

Зависимость коэффициента полезного действия от коэффициента нагрузки $\eta = f(\beta)$ представлена на рис. 15.3.

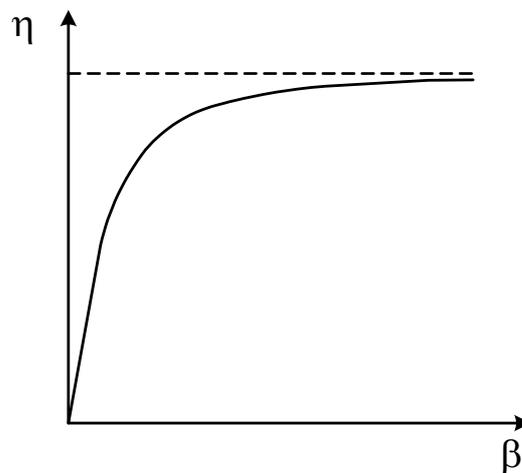


Рис. 15.3. Зависимость коэффициента полезного действия трансформатора от коэффициента нагрузки

Как правило у трансформаторов кпд очень высокий.

ЛЕКЦИЯ 16 ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

План лекции

- 16.1. Устройство трехфазных трансформаторов.
- 16.2. Группы соединения обмоток.
- 16.3. Параллельная работа трансформаторов.
- 16.4. Регулирование напряжения трансформаторов.

16.1. Устройство трехфазных трансформаторов

Преобразование (трансформирование) трехфазного напряжения можно осуществить:

– тремя однофазными трансформаторами, соединенными в одну трансформаторную группу (рис. 16.1), но она имеет *недостатки*: боль-

шую массу, высокую стоимость, но при больших мощностях $S > 60000$ кВА идут на использование группы, так как облегчается транспортировка по частям;

– трехфазными трансформаторами – обмотки на трех стержнях, их объединяют два ярма (рис. 16.2).

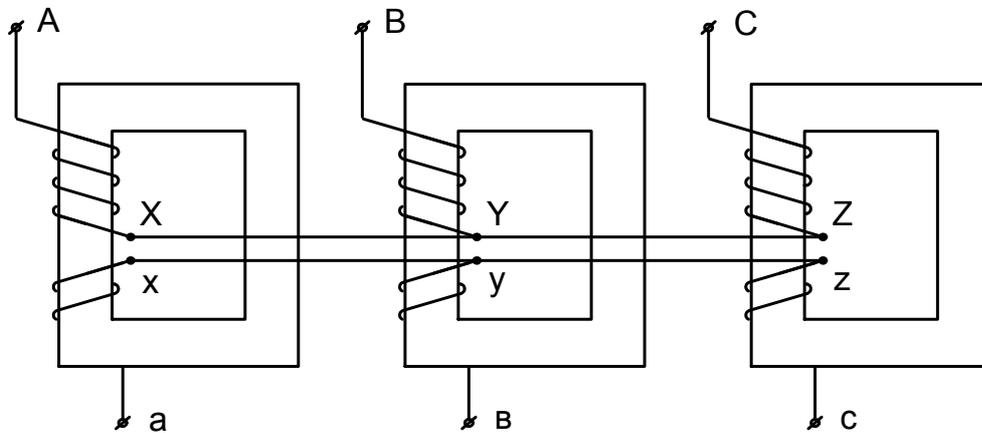


Рис. 16.1. Трехфазная трансформаторная группа

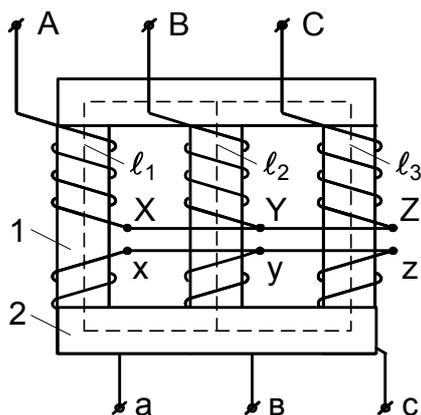


Рис. 16.2. Трехфазный трансформатор: 1 – стержень; 2 – ярмо; $l_1 = l_3 \neq l_2$ – средние длины участков

Магнитное сопротивление у трехфазного трансформатора:

$$R_M = \frac{l}{\mu S} \text{ при } S_1 = S_2 = S_3, \quad R_{M1} = R_{M3} > R_{M2}.$$

Такой магнитопровод является несимметричным.

При симметричной схеме трехфазного напряжения, подведенного к трансформатору, токи холостого хода образуют несимметричную систему.

Сечение ярма делают на 10÷15 % больше чем сечение стержня, что уменьшает его магнитное сопротивление.

Уравнения эдс и мдс, диаграммы, схемы замещения однофазных трансформаторов могут быть использованы для исследования работы каждой фазы трехфазного трансформатора.

16.2. Группы соединения обмоток

Ранее принималось, что E_1 и E_2' совпадают по фазе (в схемах замещения, на векторных диаграммах). Но это не всегда выполняется, так как на угол сдвига влияют:

- направление намотки катушек;
- маркировка выводов.

Пример.

В однофазном трансформаторе угол сдвига между первичной E_1 и вторичной E_2 эдс может принимать всего 2 значения: $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 180^\circ$.

В трехфазном трансформаторе угол сдвига между эдс или напряжениями высокой и низкой сторонами может принимать значения от 0° до 360° через 30° . Поэтому сдвиг фаз между одноименными линейными эдс принято выражать группой соединений, для чего принимается ряд чисел от 0 до 11 (рис. 16.3).

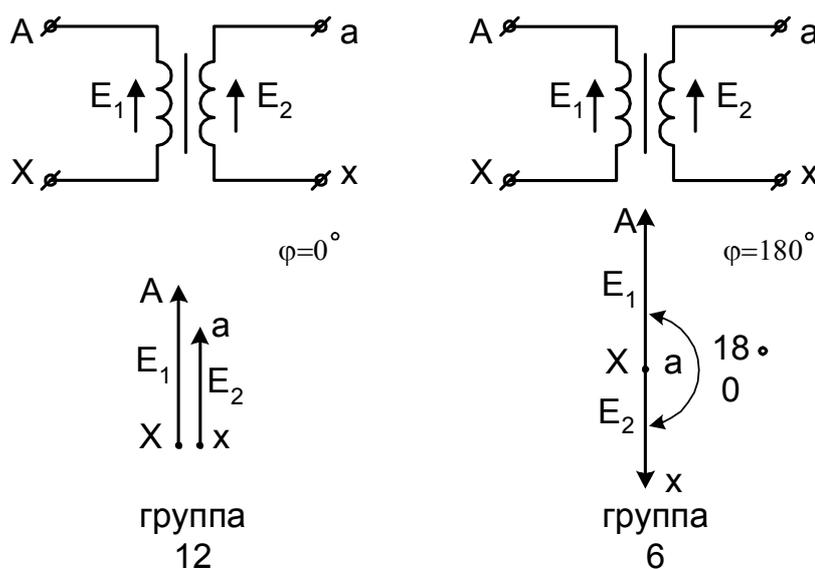


Рис. 16.3. К понятию о группах трансформаторов

Из 12 групп соединений обмоток трехфазных трансформаторов в России стандартизированы только две:

- группа 11 со сдвигом фаз 330° $Y/\Delta - 11$, $Y_0/\Delta - 11$; $Y_0/Z - 11$;
- группа 0 со сдвигом фаз 0° (360°) $Y/Y_0 - 0$.

В качестве примера определения группы соединения на рис. 16.4 приведено соединение “звезда – звезда”, а на рис. 16.5 соединение “звезда – треугольник”.

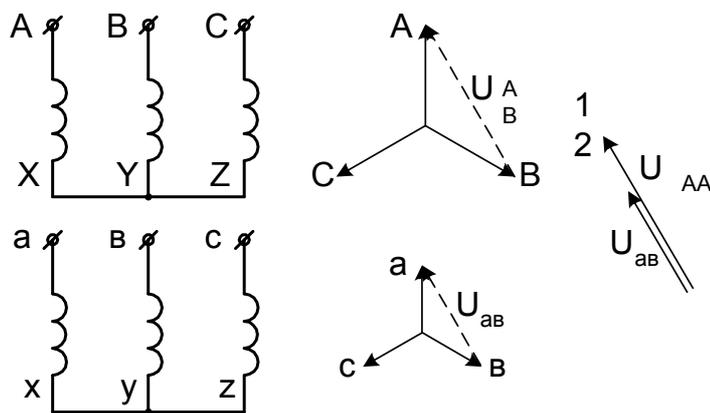


Рис. 16.4. Группа соединения обмоток – 0

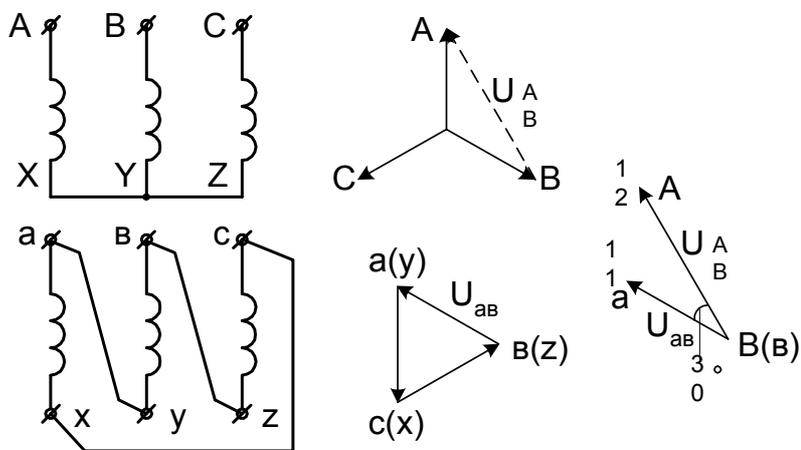


Рис. 16.5. Группа соединения обмоток – 11

16.3. Параллельная работа трансформаторов

Параллельная работа трансформаторов осуществляется при включении первичных обмоток на общую первичную сеть, а вторичных – на общую вторичную сеть.

Параллельная работа трансформаторов необходима для того, чтобы при увеличении нагрузки включать добавочные трансформаторы, при снижении нагрузки – выключать, менять при ремонте и т.д.

Трансформаторы могут быть включены на параллельную работу только при соблюдении следующих условий.

1. Трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации $K_I = K_{II} = K_{III} = \dots$, что дает одинаковые вторичные напряжения.

Если не выполнять это условие, то даже в режиме холостого хода потечет уравнительный ток

$$I_{yp} = \frac{\Delta U}{z_I + z_{II}}, \quad (16.1)$$

где z_I и z_{II} – внутренние сопротивления трансформаторов.

Под нагрузкой, если S_{HI} и S_{HII} равны, то трансформатор с меньшим коэффициентом трансформации $K_I < K_{II}$ оказывается перегруженным ($I_{нагр} + I_{yp}$), а другой – недогруженным ($I_{нагр} - I_{yp}$).

Так как перегрузка трансформаторов недопустима, то придется снижать общую нагрузку.

Государственные стандарты допускают разницу коэффициентов трансформации, не превышающую 0,5%, т.е.

$$\Delta K = \frac{K_I - K_{II}}{K} \leq \pm 0,5\%, \quad (16.2)$$

где $K = \sqrt{K_I K_{II}}$ – среднее геометрическое значение коэффициента трансформации.

2. Трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединений.

Несоблюдение этого условия ведет к тому, что вторичные эдс окажутся сдвинутыми по фазе, появится разностная эдс и также потечет уравнительный ток.

3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания $u_{KI} = u_{KII} = u_{KIII} = \dots$

Если при выполнении прочих условий два (или более) трансформатора с разными u_K включены на параллельную работу, то нагрузки S_1 и S_2 распределятся между ними обратно пропорционально u_K

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{u_{KII} S_{HI}}{u_{KI} S_{HII}}, \quad (16.3)$$

где S_{HI} и S_{HII} – мощности, на которые рассчитаны трансформаторы.

Трансформатор с меньшим u_K перегружается, значит надо снижать общую нагрузку, следовательно, один трансформатор также будет недогружен.

Государственные стандарты допускают разницу u_K на $\pm 10\%$ от их среднеарифметического значения.

4. Перед подключением необходимо проверить чередование фаз.

16.4. Регулирование напряжения трансформаторов

Напряжения в разных точках ЛЭП, где должны подключаться понижающие трансформаторы, отличаются, а вторичные напряжения должны быть одинаковые и равные $U_{2н}$. Поэтому обмотки высокого напряжения снабжаются регулировочными ответвлениями, с помощью которых можно получить коэффициент трансформации, несколько отличающийся от номинального.

Без нагрузки существуют два варианта выполнения регулировочных ответвлений (рис. 16.6 и 16.7).

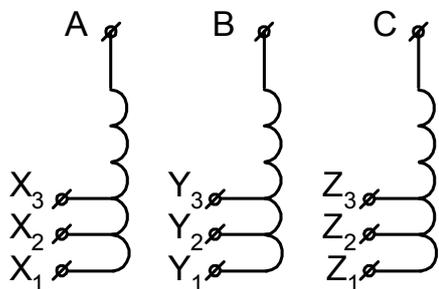


Рис. 16.6. Регулировочные ответвления вблизи нулевой точки

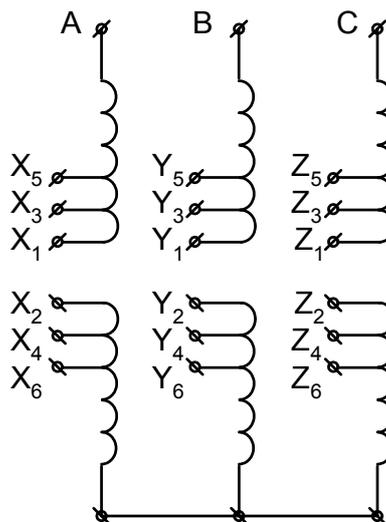


Рис. 16.7 Регулировочные ответвления посередине обмотки

Необходимая последовательность замыканий регулировочных ответвлений для схемы рис. 16.7 приведена в табл. 16.1.

Таблица 16.1

Зависимость коэффициента трансформации от схемы соединения ответвлений

Коэффициент трансформации	Соединение ответвлений		
	X	Y	Z
$K_n + 5\%$	$X_2 - X_1$	$Y_2 - Y_1$	$Z_2 - Z_1$
$K_n + 2,5\%$	$X_3 - X_2$	$Y_3 - Y_2$	$Z_3 - Z_2$
K_n (номинальный)	$X_3 - X_4$	$Y_3 - Y_4$	$Z_3 - Z_4$
$K_n - 2,5\%$	$X_4 - X_5$	$Y_4 - Y_5$	$Z_4 - Z_5$
$K_n - 5\%$	$X_5 - X_6$	$Y_5 - Y_6$	$Z_5 - Z_6$

Подключение выполняется с помощью штанги при полном отключении всех обмоток трансформатора.

С нагрузкой регулировку в цепи производят также при помощи регулировочных ответвлений, но переключения выполняются без разрыва электрической цепи (под нагрузкой). Такой способ применяется на некоторых типах электровозов.

Переключающее устройство в каждой фазе содержит реактор P , два контакта K_1 и K_2 , переключатель с двумя подвижными контактами Π_1 и Π_2 (рис. 16.8).

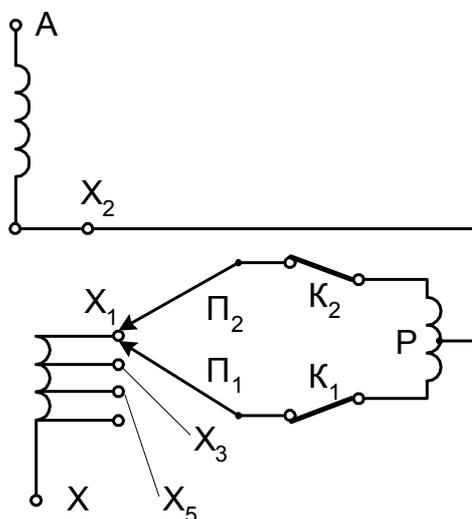


Рис. 16.8. Переключающее устройство

Порядок работы переключающего устройства приведен в табл. 16.2.

Таблица 16.2

Порядок работы переключающего устройства с реактором

Переход	Π_2	Π_1	K_2	K_1
с X_1 на X_3	X_1	X_1	Вкл	Вкл
	X_1	X_1	Вкл	Выкл
	X_1	X_3	Вкл	Вкл
	X_1	X_3	Выкл	Вкл
	X_3	X_3	Вкл	Вкл

Из приведенного выше следует, что при разных напряжениях на высокой стороне, с помощью ответвлений можно добиться одинакового напряжения на низкой стороне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В конспектах лекций "Машины постоянного тока и трансформаторы" сделана попытка изложить теорию электрических машин в сжатой, доступной пониманию студентов форме. Успешному усвоению курса должны способствовать знания таких дисциплин как "Физика", "Высшая математика", "Теоретические основы электротехники".

Знание курса электрических машин позволит успешно изучать дисциплины "Основы электропривода технологического оборудования локомотивных предприятий", "Тяговые электродвигатели" и другие специальные дисциплины.

Конспекты лекций дают базовые знания, которые студенты развивают и применяют на практике.

Ограниченное время, отведенное на чтение лекций, не позволяет охватить вопросы нетрадиционного применения электрических машин (например, использование вторичной обмотки трансформатора в качестве нагревателя жидкостной среды, сварка и плавление металлов, применение ветрогенераторов постоянного тока и др.), но творческий подход к полученным знаниям позволит студентам использовать электрические машины в соответствии с современными техническими требованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – М.: Энергия, 1978.
2. Костенко, М.П. Электрические машины. Ч. 1: Машины постоянного тока. Трансформаторы / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1972. – 543 с.
3. Кононенко, Е.В. Электрические машины (спец. курс): Учебное пособие для вузов / Е.В. Кононенко. – М.: Высшая школа, 1975. – 279 с.
4. Петров, Г.Н. Электрические машины. Ч. 1 / Г.Н. Петров. – М.: Энергия, 1974.
5. Винокуров, В.А. Электрические машины железнодорожного транспорта: Учебник для вузов / В.А. Винокуров, Д.А. Попов. – М.: Транспорт, 1986. – 511 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	1
ЛЕКЦИЯ 1	
ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ.....	5
1.1. Область применения машин постоянного тока	5
1.2. Принцип действия генератора постоянного тока, основное уравнение эдс и напряжения	5
1.3. Принцип действия двигателя постоянного тока, основное уравнение напряжения и эдс	9
ЛЕКЦИЯ 2	
ОБМОТКИ ЯКОРЕЙ	10
2.1. Обмотки кольцевого якоря и их недостатки	10
2.2. Якорные обмотки барабанного типа	10
2.3. Простая петлевая обмотка	13
2.4. Простая волновая обмотка	14
ЛЕКЦИЯ 3	
ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОСТЫХ ЯКОРНЫХ ОБМОТОК.....	15
3.1. Пример выполнения простой петлевой обмотки	15
3.2. Пример выполнения простой волновой обмотки.....	17
ЛЕКЦИЯ 4	
КОМБИНИРОВАННЫЕ И СЛОЖНЫЕ ОБМОТКИ. УСЛОВИЯ СИММЕТРИИ. УРАВНИТЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ	19
4.1. Понятие о комбинированной обмотке (лягушачья)	19
4.2. Сложные обмотки	19
4.3. Условия симметрии обмоток	20
4.4. Уравнительные соединения	21
ЛЕКЦИЯ 5	
ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА	21
5.1. Эдс реакции якоря	22
5.2. Электромагнитный момент	22
5.3. Линейная нагрузка якоря.....	23
5.4. Плотность тока	23
5.5. Реакция якоря.....	24
5.6. Влияние реакции якоря на распределение напряжения между коллекторными пластинами.....	25
5.7. Меры борьбы с влиянием поперечной реакции якоря.....	26

ЛЕКЦИЯ 6	
КОММУТАЦИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА	26
6.1. Степени искрения	26
6.2. Причины искрения.....	28
6.3. Классическая теория коммутации (теория Арнольда)	28
6.4. Реактивная эдс в коммутируемой секции.....	30
6.5. Уменьшение реактивной эдс	32
ЛЕКЦИЯ 7	
КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ.	
СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.	
ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА НЕЗАВИСИМОГО	
ВОЗБУЖДЕНИЯ	34
7.1. Потери мощности в машине постоянного тока	34
7.2. Коэффициент полезного действия.....	36
7.3. Способы возбуждения машин постоянного тока	37
7.4. Генераторы постоянного тока.....	38
7.5. Генератор независимого возбуждения и его характеристики	39
ЛЕКЦИЯ 8	
ГЕНЕРАТОРЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО	
СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
8.1. Принцип самовозбуждения в генераторе параллельного	
возбуждения	41
8.2. Характеристика генератора параллельного возбуждения	43
8.3. Генератор последовательного возбуждения	44
8.4. Генератор смешанного возбуждения.....	45
ЛЕКЦИЯ 9	
ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА	46
9.1. Основные уравнения двигателей постоянного тока.....	46
9.2. Пуск в ход двигателей постоянного тока	48
9.3. Регулирование частоты вращения.....	49
9.4. Условия устойчивой работы двигателей	49
ЛЕКЦИЯ 10	
ДВИГАТЕЛЬ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ	50
10.1. Схема управления двигателем	50
10.2. Характеристики двигателя с параллельным возбуждением	50
10.3. Частота вращения и переходный процесс при изменении	
сопротивления в цепи якоря	52
10.3.1. Электромеханические характеристики.....	52
10.3.2. Механические характеристики	53
10.3.3. Моментная характеристика	53
10.3.4. Переходный процесс.....	53

10.4. Частота вращения и переходный процесс при изменении магнитного потока	54
10.4.1. Электромеханические характеристики (рис. 10.8)	54
10.4.2. Механические характеристики	54
10.4.3. Моментная характеристика	55
10.4.4. Переходный процесс.....	55
10.5. Частота вращения и переходный процесс при изменении питающего напряжения	56
10.5.1. Электромеханические характеристики.....	56
10.5.2. Механические характеристики	56
10.5.3. Моментная характеристика	56
10.5.4. Переходный процесс.....	56
ЛЕКЦИЯ 11	
ДВИГАТЕЛЬ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ	57
11.1. Характеристики двигателя с последовательным возбуждением.....	57
11.2. Частота вращения и переходный процесс при введении в цепь якоря добавочных сопротивлений	59
11.3. Частота вращения и переходный процесс при изменении магнитного потока	60
11.3.1. Способы изменения магнитного потока	60
11.3.2. Переходный процесс	61
11.3.3. Моментные характеристики $M = f(I_a)$	62
11.4. Частота вращения и переходный процесс при изменении напряжения на зажимах двигателя	62
ЛЕКЦИЯ 12	
ТРАНСФОРМАТОРЫ.....	63
12.1. Устройство и принцип действия однофазного трансформатора	63
12.2. Уравнения напряжений и эдс однофазного трансформатора под нагрузкой.....	65
ЛЕКЦИЯ 13	
ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ИДЕАЛЬНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ. УРАВНЕНИЕ МДС, ПРИВЕДЕНИЕ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА	67
13.1. Основные соотношения параметров в идеальном трансформаторе	67
13.2. Уравнение мдс трансформатора.....	69
13.3. Приведенный трансформатор	69
13.4. Схемы замещения трансформатора	71

ЛЕКЦИЯ 14	
РЕЖИМЫ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ	
ТРАНСФОРМАТОРА	72
14.1. Параметры холостого хода трансформатора	72
14.2. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора	75
14.3. Параметры режима короткого замыкания	75
14.4. Векторная диаграмма короткого замыкания трансформатора	77
ЛЕКЦИЯ 15	
РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ	78
15.1. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке	78
15.2. Внешняя характеристика трансформатора	79
15.3. Коэффициент полезного действия трансформатора	80
ЛЕКЦИЯ 16	
ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ	81
16.1. Устройство трехфазных трансформаторов	81
16.2. Группы соединения обмоток	83
16.3. Параллельная работа трансформаторов	84
16.4. Регулирование напряжения трансформаторов	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	89