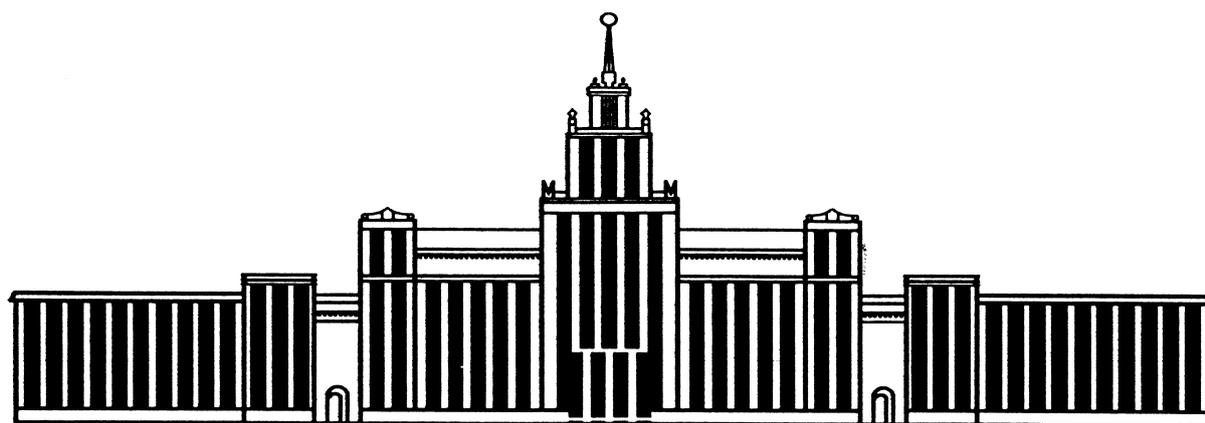

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

681.5(07)
С511

Н.И. Смоленцев

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Конспект лекций

Часть 2

Челябинск
2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Филиал ЮУрГУ в г. Миассе
Кафедра «Автоматика»

681.5(07)
С511

Н.И. Смоленцев

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Конспект лекций

Часть 2

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2013

УДК 681.51(075.8)
С511

Одобрено
учебно-методической комиссией электротехнического факультета
филиала ЮУрГУ в г. Миассе

Рецензенты:

Н.Г. Колесов, Е.М. Сычугов

Смоленцев, Н.И.

С511 Технические средства в системах автоматики и управления:
конспект лекций / Н.И. Смоленцев. – Челябинск: Издательский
центр ЮУрГУ, 2013. – Ч. 2. – 113 с.

Продолжено рассмотрение основных устройств автоматики и управления, при этом особое внимание уделено электромеханическим преобразователям, в частности электрическим двигателям и генераторам, трансформаторам. Предназначено для студентов специальности 220201 «Управление и информация в технических системах» всех форм обучения при изучении предмета «Технические средства автоматики и управления», а также студентов специальности 140211 «Электроснабжение» всех форм обучения при изучении предмета «Электромеханика». Отпечатано с авторского оригинала.

УДК 681.51(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2013

Лекция 7. Электрические машины постоянного тока

7.1. Устройство машины постоянного тока

Электрические машины постоянного тока (МПТ) обратимы, то-есть могут работать в режиме двигателя и генератора без изменения их схемы. Машины постоянного тока (двигатели) имеют хороший запуск и плавные изменения частоты вращения.

Двигатели постоянного тока используются на транспорте в качестве тяговых (электropоезда, городской электрический транспорт), используются широко в качестве исполнительных устройств автоматики.

Генераторы постоянного тока используют для питания двигателей постоянного тока, электромагнитов. Машины постоянного тока широко применяют в автоматике самолетов, судов, автомобилей и многое другое.

Диапазон мощности машин постоянного тока составляет от единиц ватт до сотен тысяч киловатт.

Основные конструктивные части МПТ это статор, ротор, воздушный зазор, который образуется, обычно цилиндрическими, поверхностями статора и ротора. Статор является индуктором, а ротор якорем. Схема машины постоянного тока приведена на рис. 26.

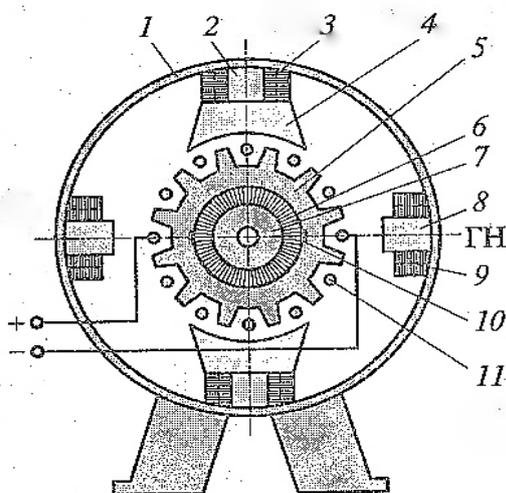


Рис. 26. Устройство машины постоянного тока

- 1 – корпус; 2 – основной полюс; 3 – полюсной наконечник;
- 4 – обмотка возбуждения; 5 – ротор; 6 – коллектор;
- 7 – вал; 8 – дополнительные полюса; 9 – обмотка;
- 10 – щетка; 11 – обмотка ротора

Статор состоит из массивного стального корпуса 1, к которому крепятся основные полюсы 2 с полюсными наконечниками 4, образуя вместе с корпусом магнитопровод. Полюсные наконечники служат для равномерного распределения магнитной индукции в зазоре между индуктором и якорем. На основных полюсах расположены соединенные параллельно обмотки возбуждения 3, предназначенные для создания магнитного поля. В некоторых

машинах магнитное поле создается с помощью постоянных магнитов. Ротор 5 представляет собой цилиндр, набранный из листов электротехнической стали с пазами на наружной стороне и насаженный на вал 7 с подшипниками. В пазы укладывается обмотка ротора 11, выводы которой присоединяют к коллектору 6, укрепленному на валу. Коллектор представляет собой цилиндр, набранный из медных пластин, изолированных друг от друга и от вала. Выводы от обмоток якоря присоединяют к соответствующим пластинам коллектора. К коллектору с помощью пружин прижимается щеткодержатель со щетками 10. Это дает возможность соединять обмотку ротора с внешней электрической цепью. Щетки устанавливают на геометрической нейтрали (ГН), линии, перпендикулярной оси машины и в которой магнитное поле основных полюсов равно нулю.

Коллектор играет роль механического выпрямителя переменного напряжения, возникающего в обмотке якоря. Помимо основных полюсов, имеются дополнительные 8 с обмоткой 9, служащие для уменьшения искрения под щетками коллектора. В зависимости от того, как включена обмотка возбуждения относительно сети и якоря, различают МПТ с независимым возбуждением (рис. 27 а) и самовозбуждением, которые делятся в свою очередь подразделяются на параллельные (рис. 27 б), последовательные (рис. 27 в) и смешанные (рис. 27 г).

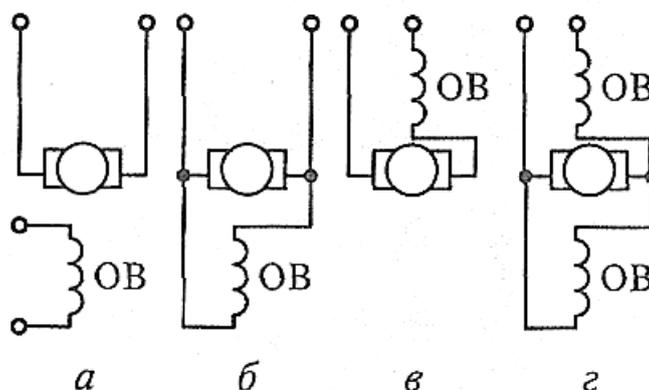


Рис. 27. Схемы возбуждения машин постоянного тока:
а – независимого; б – параллельного; в – последовательного; г – смешанного типов

В машинах независимого возбуждения обмотки возбуждения (ОВ) подключают к независимому источнику электрической энергии (аккумулятору, выпрямителю). В машинах малой мощности возбуждение создается постоянными магнитами. В машинах с самовозбуждением ОВ могут быть включены параллельно обмотки якоря, последовательно с ней и смешанно; параллельно-последовательно. При независимом и параллельном возбуждении для уменьшения потерь в ОВ и создания необходимой МДС обмоток следует уменьшить ток возбуждения, увеличив число витков. Обмотку возбуждения выполняют из провода малого сечения таким образом,

чтобы ток возбуждения составлял 2–5% от номинального тока якоря. При последовательном возбуждении обмотку делают из толстого провода, рассчитывая ее на номинальный ток якоря с небольшим количеством витков провода. На машинах смешанного возбуждения на основных полюсах размещают по две обмотки – одну включают параллельно, другую последовательно с обмоткой якоря.

7.2. Устройство обмотки якоря. Электродвижущая сила и реакция якоря

Обмотка якоря разделена на секции, каждая из которых располагается в двух пазах. Секцией называется часть обмотки якоря, состоящая из одного, двух и более витков. Расстояние между сторонами секций называется первым шагом обмотки. Оно должно быть равно полюсному делению. Полюсным делением τ называется часть окружности якоря, приходящаяся на один полюс

$$\tau = \pi D / (2p),$$

где D – диаметр якоря, p – число пар полюсов. Выводы секций присоединяют к коллекторным пластинам. Увеличение числа секций позволяет получить большее значение ЭДС между щетками уменьшить диапазон колебаний ЭДС. В результате установки щеток на геометрической нейтрали обмотка якоря делится на две параллельные ветви с одинаковым сопротивлением R . Если общее число активных проводников обмотки равно N , а число параллельных ветвей равно $2a$, то каждая ветвь состоит из $N/2a$ последовательно соединенных активных проводников различных секций. Принцип действия МПТ в режиме генератора приведен на рис. 28.

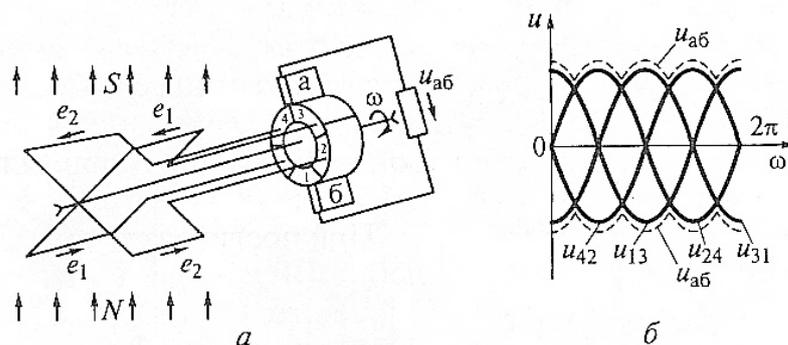


Рис. 28. Пример принципа действия МПТ в режиме генератора:
а – упрощенная схема; б – эюры напряжения между щетками; 1...4 – сектора коллектора

Ротор машины представлен одновитковыми обмотками 1,2. Виток 1 соединен с секторами 1,3 коллектора, виток 2 – с секторами 2,4. Напряжение,

генерируемое на коллекторах, определяется следующими выражениями:

$$u_{13} = e_1 = E_m \cos \omega t; \quad u_{24} = e_2 = E_m \sin \omega t.$$

При вращении ротора по часовой стрелке сектора коллектора контактируют со щеткой (а) в последовательности 3,4,1,2, а со щеткой (б) в последовательности 1,2,3,4. В результате напряжение между щетками $U_{аб}$ изменяется в той же последовательности, в которой со щетками контактируют сектора коллектора

$$u_{аб} = u_{31}, \quad u_{31} = u_{42}, \quad u_{аб} = u_{13}, \quad u_{аб} = u_{24}, \quad u_{аб} = u_{31}.$$

При изменении направления движения последовательность контактов щеток изменится на противоположную, полярность напряжения также изменится на противоположную. Сопротивление якоря $R_{я}$ определяется эквивалентным сопротивлением параллельно соединенных ветвей обмотки и составляет от долей до единиц ом.

Машина постоянного тока обычно выполняется многополюсной. При этом возрастает число щеток и параллельных ветвей якоря. ЭДС якоря равно сумме мгновенных значений ЭДС проводников одной из параллельных ветвей якоря. Чтобы получить постоянное значение ЭДС $e_{щ}$, необходимо увеличить число секций, следовательно, число пластин коллектора.

Секции поочередно переходят из одной параллельной ветви в другую при вращении якоря. При этом направление ЭДС в секциях меняется на противоположное. Секция в момент перехода проходит через геометрическую нейтраль, поскольку $B = 0$, ЭДС в ней не индуцируется. Электродвижущая сила в одном проводнике равна

$$u_{пр} = B_{ср} l_{ср} v,$$

где $B_{ср} = \Phi / \tau l_{ср}$ – среднее значение магнитной индукции на полюсном делении, Т; Φ – магнитный поток полюсов, Вб, $l_{ср}$ – длина активной зоны проводника, м; $v = D\Omega/2$ – линейная скорость перемещения проводника, м/с; $\Omega = 2\pi n/60$ – угловая скорость якоря, рад/мин; n – частота вращения якоря, об/мин. Тогда среднее значение ЭДС якоря равно:

$$E = l_{пр} N / (2a) = B_{ср} l_{пр} v N / (2a), \quad (41)$$

где $N/(2a)$ – число последовательно соединенных проводников в каждой параллельной ветви. Подстановка в формулу (41) выражения для $B_{ср}$ и v дает

$$E = \frac{pN}{60a} n \Phi = C_e n \Phi, \quad (42)$$

где $C_e = pN/60a$ – коэффициент, зависящий от конструкции машины.

Из формулы (42) следует, что ЭДС якоря пропорционально частоте его вращения и магнитному потоку полюсов машины. Эта формула справедлива как для режима генератора, так и для режима двигателя. При работе машины холостую $I_{\text{я}} = 0$. Магнитное поле при этом создается только обмоткой возбуждения. На рис. 29 (а) схематично показано распределение магнитных линий потока возбуждения $\Phi_{\text{в}}$. В этом случае ось симметрии потока совпадает с осью магнитных потоков индуктора и направлена перпендикулярно геометрической нейтрали.

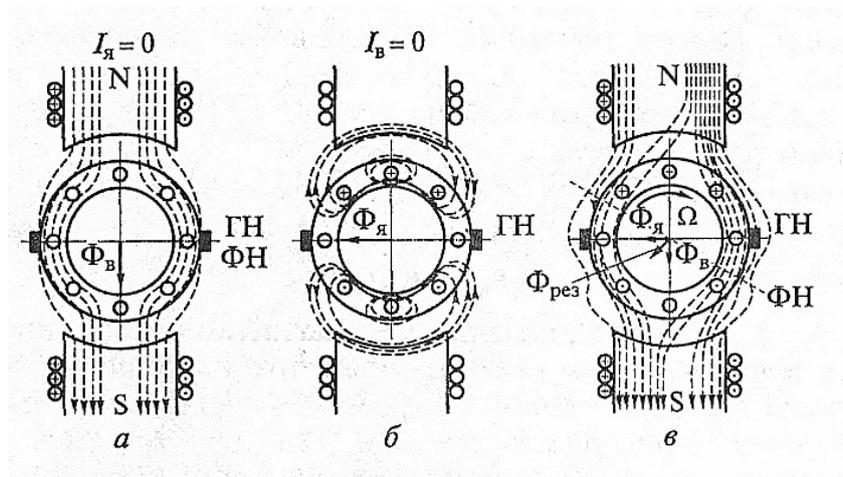


Рис. 29. Пояснение явлений реакции якоря:

а – распределение магнитного поля в ненагруженном генераторе; б – магнитное поле якоря; в – результирующее магнитное поле якоря и полюсов

При работе машины с нагрузкой в обмотке якоря возникает ток $I_{\text{я}}$, который создает в магнитопроводе якоря свое магнитное поле $\Phi_{\text{я}}$. Картина распределения магнитного поля якоря, при условии $I_{\text{я}} = 0$, показана на рис. 29 (б). В этом случае ось симметрии поля совпадает с ГН. Таким образом, при нагрузке якоря в машине существует два поля, поле ОВ и поле якоря, которые накладываются друг на друга и образуют результирующее магнитное поле (рис.29 в). Магнитное поле генератора становится несимметричным. Физическая нейтраль (ФН) – линия, перпендикулярная оси потока – смещается относительно ГН, у генератора – по направлению вращения, у двигателя – против вращения.

Влияние поля якоря на поле полюсов называется реакцией якоря. Она отрицательно сказывается на работе МПТ, приводит к необходимости смещать щетки на некоторый угол по ходу вращения якоря для генератора и в противоположную сторону для двигателя, т.к. в противном случае возникает сильное искрение щеток. Кроме того, реакция якоря приводит к усилению напряжения на зажимах якоря частоты вращения двигателя. Сдвиг щеток производят в МПТ без добавочных полюсов. Для усиления влияния якоря применяют компенсационную обмотку, уложенную в пазах полюсных наконечников основных магнитов или размещают обмотки добавочных

полюсов. Компенсационную обмотку и обмотки добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря. Магнитное поле этих обмоток направлено встречно полю якоря и реакция якоря на основные полюсы уменьшается.

7.3. Электромагнитный момент машины постоянного тока

На проводник обмотки якоря действует электромагнитная сила

$$F_{\text{пр}} = B_{\text{ср}} I_{\text{пр}} l_{\text{пр}}, \quad (43)$$

где $I_{\text{пр}} = I_{\text{я}} / (2a)$ – ток проводника, равный току параллельной ветви. Подставив в формулу в (43) выражения для $B_{\text{ср}}$ и $I_{\text{пр}}$ получим

$$F_{\text{пр}} = \frac{p\Phi I_{\text{я}}}{\pi a D}. \quad (44)$$

Сила, действующая на все проводники равна

$$F = F_{\text{пр}} N. \quad (45)$$

С учетом формул 44 и 45 найдем средний электромагнитный момент сил, действующих на якорь

$$M_{\text{ср}} = FD/2 = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_{\text{я}} = C_M \Phi I_{\text{я}}, \quad (46)$$

где $C_M = \frac{pN}{2\pi a}$ – коэффициент, зависящий от конструкции машины. Таким образом, электромагнитный момент пропорционален магнитному потоку полюсов и току якоря. По формуле (46) можно определить, как электромагнитный поток генератора, так и поток двигателя. Для генератора момент будет тормозящим, направленным против вращения якоря, а для двигателя будет положительным. Преобразование электрической энергии в механическую и механической в электрическую сопровождается потерями. Важнейшей характеристикой МПТ является коэффициент полезного действия (КПД):

$$\eta = P_2/P_1 = P_2 / (P_2 + \Delta P) = (P_1 - \Delta P) / P_1,$$

где P_2 – полезная мощность, P_1 – затраченная мощность. Величина ΔP суммарная мощность потерь энергии. Величина ΔP определяется выражением:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}},$$

где $\Delta P_{\text{Э}}$ – электрические потери, $\Delta P_{\text{СТ}}$ – потери в стали, $\Delta P_{\text{МЕХ}}$ – механические потери. Электрические потери $\Delta P_{\text{Э}}$ являются переменными и зависят от нагрузки. Значение $\Delta P_{\text{Э}}$ может быть представлено как

$$\Delta P_{\text{Э}} = \Delta P_{\text{Я}} + \Delta P_{\text{В}} + \Delta P_{\text{Щ}},$$

где $\Delta P_{\text{Я}} = R_{\text{Я}} I_{\text{Я}}^2$ – потери в обмотках якоря, $\Delta P_{\text{В}} = R_{\text{В}} I_{\text{В}}^2$ – потери в обмотках возбуждения, $\Delta P_{\text{Щ}} = I_{\text{Я}} \Delta U_{\text{Щ}}$ – потери на коллекторном механизме. Потери в стали, связанные с вихревыми токами и перемагничиванием якоря при его вращении, составляют 1–4% $P_{\text{НОМ}}$. Механические потери, связанные с трением также составляют 1–2% $P_{\text{НОМ}}$. Эти потери как и потери в стали не зависят от нагрузки, поэтому их называют потерями холостого хода. При работе МПТ вхолостую $P_2 = 0$ и КПД = 0. При увеличении полезной мощности КПД растет. Машины рассчитывают так, чтобы максимальное значение КПД соответствовало номинальной мощности $P_{\text{НОМ}}$. При нагрузке больше номинальной КПД уменьшается за счет значительного роста переменных потерь. Для машин мощностью 1–100 кВт номинальное значение КПД лежит в пределах 0,74–0,92.

Коммутация это процесс изменения тока в секции при вращении пластин коллектора. Плохая коммутация заключается в искрении щеток и как следствие отказу машины. Причиной искрения является неровность поверхности контактов. Оценку коммутации проверяют визуально или с помощью специальных приборов (индикаторов искрения). Машина постоянного тока проходит испытание на стадии сдачи.

Лекция 8. Генераторы постоянного тока

8.1. Принцип работы генератора постоянного тока

Генератор преобразует механическую энергию в электрическую. Принцип его работы основан на явлении электромагнитной индукции (рис. 30). Первичный двигатель вращает якорь с постоянной скоростью, обмотки якоря пересекают магнитное поле, созданное обмоткой возбуждения. В результате, в обмотке якоря возникает ЭДС, направление которой можно определить по правилу правой руки (магнитные силовые линии входят в ладонь, отогнутый большой палец указывает направление вращения якоря, вытянутые пальцы указывают направление индуцируемой ЭДС). Направление ЭДС в проводниках обмотки, находящихся под одноименными полюсами, будет одинаковым, а под разноименными – противоположным. Однако, благодаря коллектору, между щетками действует постоянное по направлению ЭДС (направление ЭДС в проводниках показано на рис. 30 крестиками и точками). Если к щеткам присоединить нагрузку, то ЭДС вызовет в ней постоянный ток

$I_{\text{я}}$. С появлением тока в проводниках якоря, находящимся в магнитном поле, возникают электромагнитные силы $F_{\text{ЭЛ}}$, направление которых можно определить по правилу левой руки (магнитные силовые линии входят в ладонь, вытянутые 4 пальца указывают направление тока, отогнутый большой палец – направление электромагнитной силы).

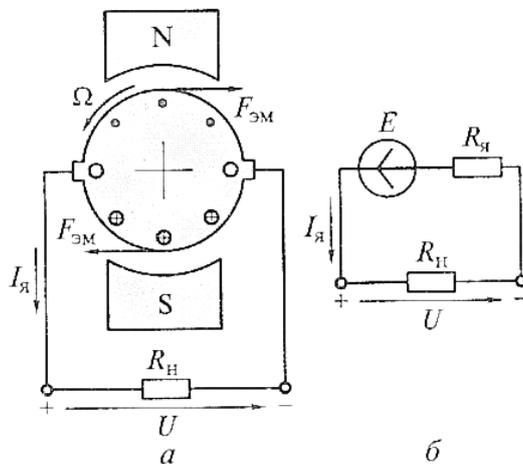


Рис. 30. Работа МПТ в режиме генератора:
а – принцип действия; б – схема замещения цепи якоря

Эти силы создают электромагнитный момент $M_{\text{ЭМ}}$, противодействующий вращающему моменту $M_{\text{ВР}}$ первичного двигателя. При постоянной угловой скорости данные моменты равны:

$$M_{\text{ВР}} - M_{\text{ЭМ}} = M.$$

Применяя к схеме замещения цепи якоря (рис. 30 б) второе правило Кирхгофа, получают уравнение электрического состояния цепи якоря

$$E = I_{\text{я}}R_{\text{я}} + U, \quad (47)$$

где E – ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, U – напряжение на зажимах генератора, $I_{\text{я}}$ – ток якоря, $R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки.

Умножив (47) на величину $I_{\text{я}}$, получаем выражение для электромагнитной мощности, развиваемой генератором

$$P_{\text{Э}} = EI_{\text{я}} = UI_{\text{я}} + R_{\text{я}}I_{\text{я}}^2 = P + \Delta P_{\text{я}}, \quad (48)$$

где P – мощность электроприемника, ΔP мощность потерь в обмотке якоря. Выражение (48) является уравнением баланса мощности в цепи якоря генератора.

Электромагнитная мощность генератора равна:

$$P_{\text{ЭМ}} = P_{\text{МЕХ}} - \Delta P_{\text{МЕХ}} = M_{\text{ЭМ}}\Omega,$$

где $\Delta P_{\text{МЕХ}}$ механические потери энергии. Генераторы как источники энергии должны иметь стабильное напряжение при изменении нагрузки и возможность плавного регулирования этого напряжения. Рабочие свойства генераторов зависят от способов возбуждения и определяются характеристиками, основными из которых являются характеристика холостого хода $E(I_B)$, внешняя $U(I)$ и регулировочная $I_B(I)$.

8.2. Генератор независимого возбуждения

Схемы генератора независимого возбуждения приведена на рис. 31:

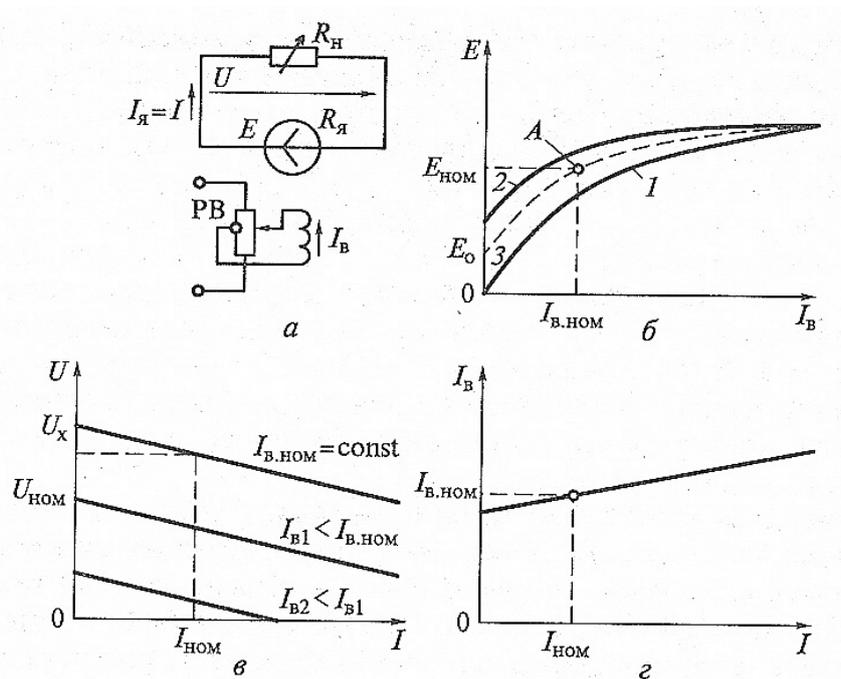


Рис. 31. Схемы генератора независимого возбуждения:

а – схема замещения, б – характеристика холостого хода, в – внешняя характеристика при различных токах возбуждения, г – регулировочная характеристика, 1 – кривая ЭДС якоря при $E_0 = 0$; 2 – при $E_0 > 0$; 3 – расчетная кривая

Характеристика холостого хода (рис. 31 б) представляет собой зависимость ЭДС якоря от тока возбуждения при разомкнутой внешней цепи ($I = 0$). Поскольку ЭДС якоря пропорционально потоку полюсов Φ , то, следовательно, то она пропорциональна току возбуждения E_0 . Так как нагрузка отсутствует, то в соответствии с формулой (47) ЭДС, индуцируемая генератором, равна напряжению на его зажимах $E = U$.

Ток возбуждения меняют с помощью реостата возбуждения (PB). Если магнитная цепь генератора размагничена (остаточный магнитный поток равен нулю), то при увеличении тока I_B ЭДС якоря E будет увеличиваться в

соответствии с кривой 1 (рис. 31 б), подобной кривой намагничивания. При уменьшении тока I_B кривая 2 пойдет выше и при $I_B = 0$ генератор имеет остаточную ЭДС $E_0 = (0,02 - 0,06)E_{НОМ}$, соответствующую магнитному потоку $\Phi_0 = (0,02 - 0,06)\Phi_{НОМ}$. За расчетную характеристику принимают кривую 3 – среднюю между кривыми 1 и 2. Кривая 3 имеет три области: линейную, область перегиба и область насыщения. В линейной области работа генератора неустойчива, так как небольшому току возбуждения соответствует большее изменение ЭДС, возможности регулирования в этой области значительны. В области насыщения работа генератора устойчива, но возможности регулирования отсутствуют. В области перегиба работа устойчива и имеются возможности регулирования. Характеристика холостого хода генератора определяет рабочую точку машины точку А, в которой соответствует напряжение $U = U_{НОМ}$. Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения (31 в) представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при условии: $I_{ВОЗ} = const$, $n = const$. С учетом того, что у генератора независимого возбуждения $I_я = I$ (ток якоря равен току нагрузки), уравнение электрического состояния имеет вид:

$$U = E - I_я R_я = C_E n \Phi - I_я R_я.$$

Напряжение на зажимах генератора будет снижаться из-за падения напряжения на обмотке якоря и реакции якоря. Уменьшение напряжения от холостого хода $U_{ХХ}$ до номинального $U_{НОМ}$ составляет 5-10% $U_{ХХ}$. Если значительно увеличить ток нагрузки R_H , то произойдет короткое замыкание генератора. Ток короткого замыкания $I_K = (10-20) I_{НОМ}$. Такой режим опасен для обмотки якоря, коллектора и щеток.

Регулировочная характеристика независимого возбуждения (рис. 31 г) представляет зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при условии $U = const, n = const$. Она показывает, как нужно изменить ток возбуждения $I_{ВОЗ}$ при изменении тока нагрузки I , чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось прежним. С увеличением нагрузки напряжение снижается. Следовательно, нужно увеличить магнитный поток возбуждения. При этом увеличивают ток возбуждения, чтобы компенсировать падение напряжения за счет работы ЭДС. Стабильность напряжения генераторов поддерживают с помощью автоматических регуляторов. Генераторы с независимым возбуждением обладают хорошими рабочими характеристиками. Недостатком является наличие постороннего источника электрической энергии для питания цепи возбуждения.

Рассмотрим генераторы параллельного возбуждения. Схема замещения и характеристики генератора представлена на рис. 32. Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения аналогична характеристике независимого возбуждения. Для самовозбуждения генератора необходимо выполнение некоторых действий. В этом состоит отличие

генератора от генератора независимого возбуждения.

Условия возбуждения следующие: 1) наличие остаточной намагниченности полюсов; 2) совпадение магнитного поля остаточной

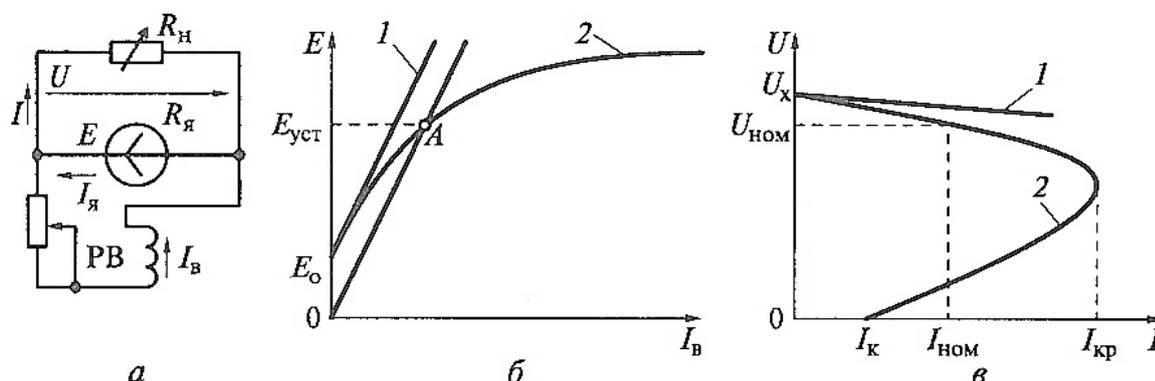


Рис. 32. Генератор параллельного возбуждения:

а – схема, б – характеристика холостого хода, в – внешняя характеристика

намагниченности и потока возбуждения; 3) сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше некоторого критического при $I_{кр}$, определяемом тангенсом угла наклона прямолинейного участка характеристики холостого хода.

Внешняя характеристика генератора $U = f(I)$, (рис.32 в), по сравнению с внешней характеристикой генератора независимого возбуждения (прямая 1) отличается более резким падением напряжения U при увеличении тока I нагрузки.

Это объясняется тем, что потеря напряжения происходит за счет падения напряжения в обмотке якоря, а также в результате уменьшения тока $I_{воз}$, вызванного уменьшением напряжения на зажимах генератора. Переход к режиму короткого замыкания вызывает искрение щеток и пробой изоляции обмотки, хотя сам ток короткого замыкания не опасен для генератора.

Регулировочная характеристика параллельного возбуждения по сравнению с регулировочной характеристикой генератора независимого возбуждения пойдет круче, так как, чтобы компенсировать большое снижение напряжения, необходимо увеличить ток возбуждения в большей степени.

Лекция 9. Двигатели постоянного тока

9.1. Принцип работы двигателя постоянного тока

Двигатель преобразует электрическую энергию в механическую. Принцип его действия состоит в следующем. К обмоткам якоря через щетки подводится

постоянное напряжение. Коллектор в данном случае выполняет функцию переключателя, обеспечивающего неизменность направления тока в проводах обмотки якоря, находящихся под соответствующими магнитными полюсами индуктора.

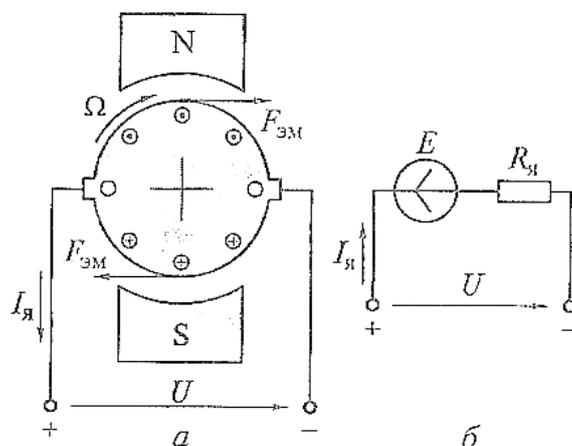


Рис. 33. Работа МПТ в режиме двигателя:
а – принцип действия двигателя, б – схема замещения цепи якоря

Предположим, что под северным полюсом ток направлен к нам, а под южным – от нас (33 а). В этом случае на проводнике обмотки якоря, находящемся в магнитном поле, действует электромагнитная сила $F_{эм}$. Совокупность этих сил создает вращающий момент $M_{эм}$ и якорь начинает вращаться со скоростью Ω . При этом в обмотке якоря индуцируется ЭДС, направление которой противоположно питающему напряжению, поэтому ее называют противо – ЭДС.

Применяя к схеме замещения цепи якоря (рис. 33 б) второе правило Кирхгофа, получаем уравнение электрического состояния двигателя:

$$U = E + R_я I_я. \quad (49)$$

Умножив почленно уравнение (49) на величину $I_я$, получаем выражение для мощности, подводимой к двигателю от внешнего генератора

$$P_э = UI_я = EI_я + R_я I_я^2 = P_{эм} + P_{пот}. \quad (50)$$

Выражение (50) является уравнением баланса мощности цепи якоря двигателя. Она показывает, что электрическая мощность преобразуется в электромагнитную мощность $P_{эм}$ и мощность электрических потерь в обмотке якоря $P_{пот}$. Двигатель постоянного тока также классифицируют по способам возбуждения. Общим свойствам и характеристикам. Свойства двигателя постоянного тока зависят от того, как меняется его магнитный поток при изменении механической нагрузки (момента сопротивления) на

валу, т.е. фактически от способа возбуждения. Различают двигатели последовательного, параллельного и смешанного возбуждения. Хотя указанные типы двигателей имеют разные эксплуатационные свойства, им присущи также общие свойства и процессы (свойства саморегулирования, процессы пуска и реверса).

Пуском двигателя называют процесс разгона ротора от неподвижного состояния до установившегося значения частоты вращения. Пуск может продолжаться от долей секунды до нескольких десятков секунд.

Пусковые качества двигателя оцениваются кратностью пускового момента и пускового тока к номинальному значению. Двигатели постоянного тока обладают хорошими пусковыми качествами. Они могут создавать большой пусковой момент при небольшом пусковом токе.

Используя уравнение (49), определяют ток

$$I_{\text{я}} = (U - E) / R_{\text{я}}. \quad (51)$$

В момент пуска угловая скорость равна нулю и противо-ЭДС = 0. Тогда пусковой ток двигателя $I_{\text{я.н}} = \frac{U}{R_{\text{я}}} \cong (10 - 30) I_{\text{я.ном}}$. Такой пусковой ток может создать слишком большой пусковой момент $M_{\text{ПУСК}} = C_{\text{М}} \Phi I_{\text{я.н}}$, вызывающий рывок на валу двигателя и искрение щеток коллектора. Для ограничения пускового тока последовательно с обмоткой якоря включают пусковой реостат, сопротивление $R_{\text{п}}$ которого, рассчитывают исходя из кратковременно допустимого значения тока якоря и получения необходимого пускового момента:

$$I_{\text{п.доп.}} = U(R_{\text{я}} + R_{\text{п}}) \leq (2 - 2,5) I_{\text{я.ном}}.$$

После разгона ротора в его обмотках возникает противо-ЭДС и значение тока уменьшается. Затем пусковой реостат постепенно выводят вручную или автоматически. Пуск ДПТ можно производить при пониженном напряжении питания.

Все электродвигатели обладают свойством саморегулирования, то-есть, автоматически увеличивают вращающий момент $M_{\text{вр}}$ при увеличении сопротивления $M_{\text{сопр}}$. При уменьшении угловой скорости двигателя за счет момента сопротивления $M_{\text{сопр}}$ противо-ЭДС уменьшается и ток якоря возрастает, увеличивая вращающий момент. Следовательно, ток якоря зависит от механической нагрузки. Изменение направления вращения двигателя – реверсирование, можно изменить, изменив знак напряжения на якоре или напряжение на обмотке возбуждения. Для реверса двигателей постоянного тока достаточно изменить напряжение обмотки.

9.2. Основные характеристики двигателя

1. Электромеханическая характеристика – зависимость частоты вращения якоря от его тока:

$$n = f(I_{\text{я}}) = \frac{U - R_{\text{я}}}{C_{\text{E}}\Phi}.$$

2. Механическая характеристика – зависимость частоты вращения якоря от момента M на валу двигателя:

$$n = f(M) = \frac{U}{C_{\text{E}}} - \frac{MR_{\text{я}}}{C_{\text{E}}C_{\text{M}}\Phi^2}.$$

3. Моментная характеристика – зависимость момента M на валу двигателя от тока якоря:

$$M = C_{\text{M}}I_{\text{я}}\Phi.$$

4. Характеристика холостого хода – зависимость частоты вращения якоря от тока в обмотке возбуждения в режиме холостого хода при условии постоянства приложенного к зажимам двигателя напряжения U .

Характеристика $n = f(I_{\text{я}})$ при $U = \text{const}$ определяется выражением:

$$n = \frac{U - R_{\text{я}}I_{\text{я}}}{C_{\text{E}}\Phi}.$$

5. Регулировочная характеристика – зависимость тока в обмотке возбуждения от тока якоря или от полезной мощности P_2 на валу двигателя при условии $U = \text{const}$. Характеристики $n = f(I_{\text{B}})$ служат для регулирования частоты двигателя вращения. Она показывает, как нужно менять ток возбуждения, чтобы с изменением нагрузки на валу двигателя частота вращения n оставалась постоянной. Схемы двигателя и его характеристики приведены на рис. 34. В цепь якоря включен пусковой реостат (РП), который перед пуском полностью вводят для уменьшения пускового тока. В цепь возбуждения включен реостат регулирования тока возбуждения, а, следовательно, и магнитного потока, что необходимо для регулирования частоты вращения якоря. Для увеличения пускового момента регулирования реостат перед пуском полностью выводят. По мере разгона двигателя РВ вводят, РП выводят.

Обмотка возбуждения может быть включена на напряжение другого источника (независимое возбуждение). При этом расширяются возможности регулирования частоты вращения двигателя, так как одновременно с изменением поля возбуждения можно регулировать напряжение питания. В зависимости от способа возбуждения двигателей их характеристики будут различны (рис. 34 б, в, г, д, е).

Рассмотрим двигатель последовательного возбуждения. Схема двигателя приведена на рис. 35. Как видно на схеме, через обмотку якоря и обмотку возбуждения проходит один и тот же ток. Поэтому с изменением нагрузки на валу меняется ток якоря, следовательно, и магнитный поток, что вызывает изменение частоты вращения. С увеличением нагрузки возрастает ток якоря, увеличивается падение напряжения в сопротивлениях обмоток якоря и

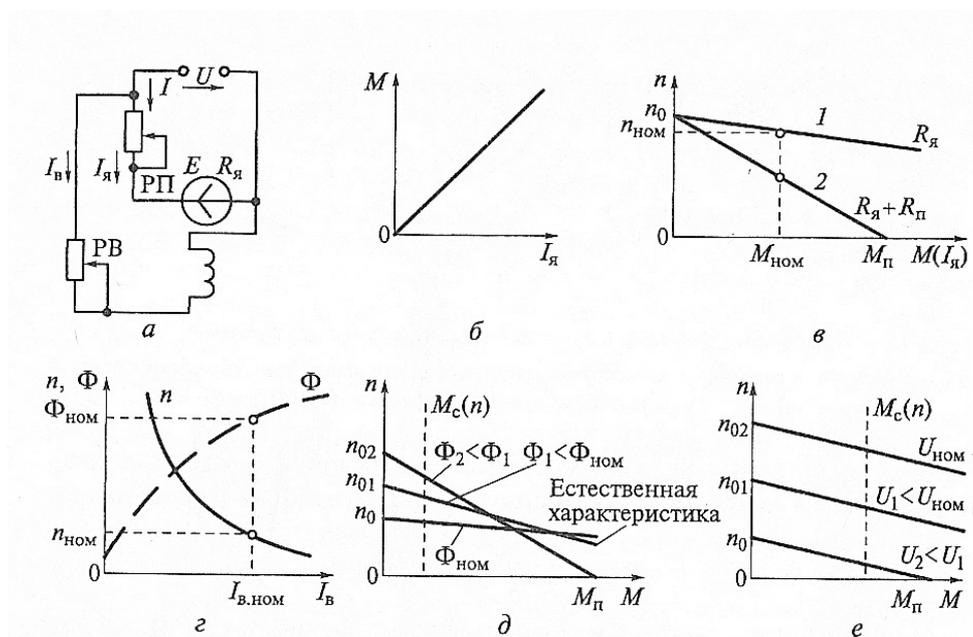


Рис. 34. Двигатель параллельного возбуждения:

а – схема, б – моментная характеристика, в – механические характеристики, г – характеристика холостого хода, д - механическая характеристика при полюсном регулировании, е – механическая характеристика при якорном регулировании, 1 – при выведенном РП, 2 – при введенном РП.

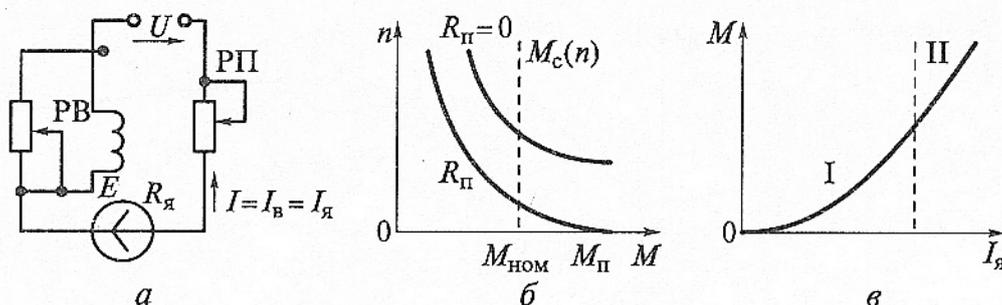


Рис. 35. Двигатель последовательного возбуждения:

а – схема, б – механическая характеристика, в – моментная характеристика, I, II – участки изменения пускового момента

возбуждения, но одновременно увеличивается и магнитный поток Φ . Поэтому

частота вращения n будет снижаться с ростом потока Φ в большей степени по сравнению с двигателем параллельного возбуждения, т.е. для двигателя последовательного возбуждения механическая и электромеханическая характеристики более “мягкие”:

$$n = \frac{U - (R_{\text{я}} + R_{\text{в}})I_{\text{в}}}{C_{\text{Е}}\Phi}.$$

Моментная характеристика двигателя последовательного возбуждения (рис. 35 в) имеет два участка: при небольших токах якоря поток Φ полюса пропорционален току $I_{\text{я}}$, а момент M – квадрату тока $I_{\text{я}}$, т.е., момент изменяется по параболе, что создает большой пусковой момент – участок I; с увеличением тока $I_{\text{я}}$ магнитная система насыщается, поток $\Phi \cong \text{const}$ и парабола переходят в прямую – участок II. Отличительной особенностью двигателя с последовательным возбуждением является то, что его нельзя запускать без нагрузки – двигатель идет “вразнос”.

Существуют следующие способы регулирования частоты вращения двигателя последовательного возбуждения.

Реостатное регулирование – осуществляется за счет сопротивления, включенного последовательно с обмоткой якоря. Увеличение сопротивления приводит к увеличению частоты вращения, но также к увеличению потерь. Способ не экономичен и применяется редко.

Полюсное регулирование – осуществляется шунтированием (замыканием) обмотки возбуждения реостатом возбуждения, что приводит к изменению тока возбуждения, следовательно, магнитного потока. Уменьшение тока возбуждения вызывает увеличение частоты вращения при небольших нагрузках. Этот способ применяется в двигателях малой мощности, когда требуется плавное регулирование.

В двигателях большей мощности полюсное регулирование производят замыканием накоротко частей витков обмотки возбуждения, что приводит к уменьшению числа витков, следовательно, МДС и магнитного потока.

Получается ступенчатое регулирование, которое применяется на тяговом транспорте. Безреостатное регулирование (ступенчатое изменение питающего напряжения на тяговых двигателях электротранспорта) осуществляют групповым параллельным или последовательным подключением двигателей к сети. Двигатели последовательного возбуждения применяют в крановых установках и летательных аппаратах для обеспечения больших пусковых моментов.

Лекция 10. Электрические машины переменного тока

10.1. Типы электрических машин переменного тока

Электрическая машина переменного тока состоит из неподвижной части статора и вращающейся – ротора. В основе работы машин переменного тока

лежит принцип вращающегося магнитного поля, частота вращения которого определяется частотой питающей сети f и числом пар полюсов машины p : $n_1 = 60f/p$. Размерность числа оборотов машины $[n_1] \frac{1}{\text{мин}}$.

Электрические машины переменного тока подразделяют на асинхронные (АД) и синхронные (СД). Асинхронной называют электрическую машину, у которой частота вращения ротора n отличается от частоты вращения магнитного поля n_1 и изменяется в зависимости от нагрузочного момента. Асинхронные двигатели общего назначения применяют, главным образом, как двигатели в двух исполнениях:

- короткозамкнутые (беличье колесо);
- с фазным ротором (с контактными кольцами).

Широко распространены во всех отраслях промышленности асинхронные микромашины мощностью от долей Вт до 500 Вт с различной частотой вращения. По конструкции и принципу действия их делят:

- трехфазные двигатели с короткозамкнутым и фазным ротором;
- однофазные двигатели с конденсаторным пуском и с расщепленными или экранированными полюсами;
- двухфазные исполнительные двигатели с короткозамкнутым и полым немагнитным ротором.

В различных схемах автоматики используют асинхронные тахогенераторы, которые являются надежными измерителями частоты вращения.

Синхронной называют такую машину, частота вращения ротора которой при любом режиме работы равна частоте вращения поля магнитного поля $n = n_1$. Синхронная машина может возбуждаться постоянным током (электромагнитным путем) или с помощью постоянных магнитов. Такие машины применяются в качестве двигателя и генератора.

Среди специальных синхронных машин часто используют синхронные реактивные двигатели с сосредоточенными и распределенными обмотками на статоре, а также редукторные, гистерезисные и шаговые двигатели.

Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: неподвижной – статора и вращающейся – ротора, которые отделены друг от друга воздушным зазором (рис. 36).

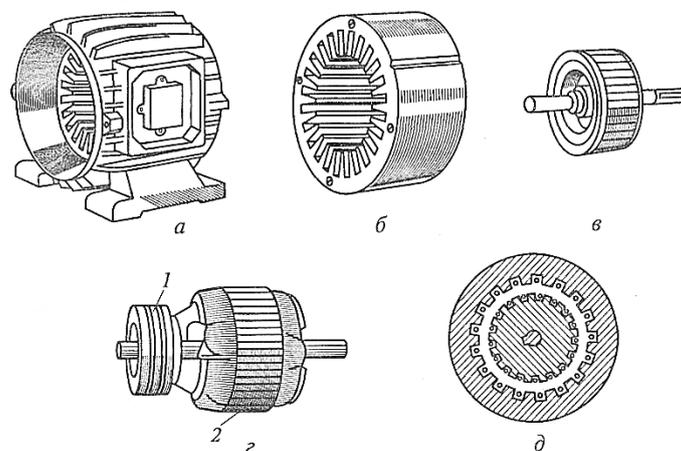


Рис. 36. Асинхронный двигатель:

а – корпус асинхронной машины с сердечником статора, б – сердечник статора, в – короткозамкнутый ротор, г – фазный ротор с контактными кольцами, д – магнитная система, 1 – контактное кольцо, 2 – обмотка

Статор представляет собой полый цилиндр, набираемый из электротехнической стали толщиной 0,5 мм. На внутренней поверхности имеются пазы, в которые закладывается трехфазная обмотка. Ротор – это цилиндр, набираемый из электротехнической стали толщиной 0,5мм, на внешней поверхности которой имеются пазы для трехфазной обмотки ротора.

По типу обмотки ротора асинхронные двигатели делятся на АД с короткозамкнутой обмоткой ротора и АД с фазной обмоткой ротора.

Короткозамкнутая обмотка ротора выполняется в виде беличьего колеса, т.е. в пазы ротора вставляются стержни из меди или алюминия, которые с торцов зажимаются кольцами из того же материала.

Принцип действия АД основан на создании вращающегося магнитного поля с помощью трехфазной обмотки, токи которого в каждой фазе сдвинуты на 120 градусов (рис. 37 а) относительно друг друга.

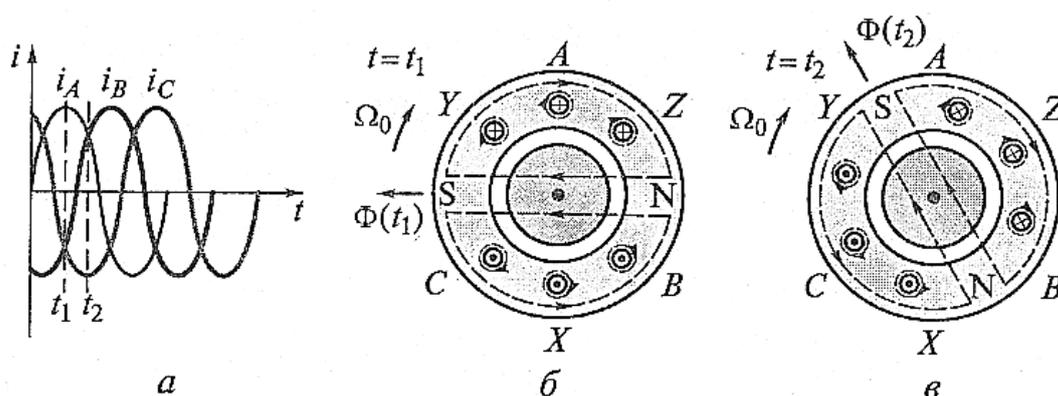


Рис. 37. Создание вращающегося поля трехфазной обмоткой статора: а – эюры токов напряжения в обмотках статора, б – направление токов в обмотках статора в момент времени t_1 , в – в момент времени t_2

Магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них (на основании закона электромагнитной индукции) переменную ЭДС, направление которой определяется по правилу правой руки (рис. 37 б). Так как обмотка ротора замкнута, переменная ЭДС вызывает в ней ток того же направления, что и сама ЭДС (рис. 37 в).

В результате взаимодействия тока ротора с вращающимся магнитным полем возникает сила, действующая на проводники ротора, направление которой определяется по правилу левой руки (сила определяется на основании закона Ампера $F = BI$).

Сила создает момент, направленный в ту же сторону, что и сила, под действием которой ротор приходит в движение (рис. 38). Вращающееся магнитное поле перемещается в воздушном зазоре с частотой вращения,

об/мин $n_1 = \frac{60f_1}{p}$, где f_1 – частота питающей сети, p – число пар полюсов. Частота вращения ротора n всегда меньше частоты вращения магнитного поля статора n_1 , т.к. создание механического момента вращения возможно

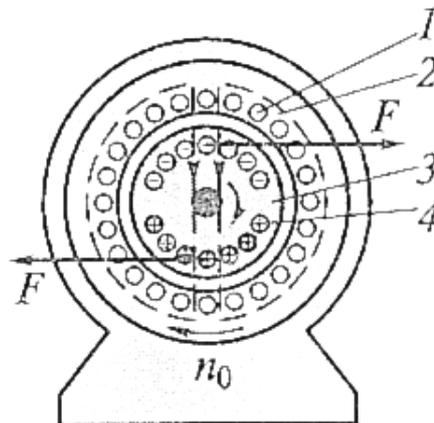


Рис.38. Принцип действия асинхронного двигателя
1 – обмотка статора, 2 – статор, 3 – ротор, 4 – обмотка ротора

лишь тогда, когда имеет место движение проводников ротора относительно вращающегося проводники магнитного поля.

Величина $S = \frac{n_1 - n}{n_1} \%$, называется скольжением. При номинальной нагрузке скольжение асинхронного двигателя составляет 1-6%.

10.2. Электродвижущие силы обмоток статора и ротора

Вращающееся магнитное поле, распределенное вдоль воздушного зазора по закону синуса, пересекает проводники обмотки статора и наводит в них переменную синусоидальную ЭДС, действительное значение которой по аналогии с трансформатором равно:

$$E_1 = 4,44f_1w_1\Phi_m K_{01},$$

где f_1 – частота тока в статоре, w_1 – число витков фазы, Φ_m – амплитуда магнитного потока, K_{01} – обмоточный коэффициент, учитывающий, что каждая фаза статора состоит из секций, сдвинутых в пространстве относительно друг друга. Поэтому, результирующая ЭДС одной фазы обмотки статора будет определяться не арифметической, а геометрической суммой ЭДС секций, т.е.

$$K_0 = \frac{E}{NE_c},$$

где E – геометрическая сумма ЭДС секций, NE_c – алгебраическая сумма ЭДС секций.

Для ЭДС фазы неподвижного ротора имеем:

$$E_2 = 4,44f_1w_2\Phi_mK_{02}.$$

Так как частота вращения магнитного поля статора относительно вращающегося ротора с учетом выражения для скольжения равна

$$n_s = n_0 - n = (n_0 - n) \frac{n_0}{n_0} = n_0 S,$$

то частота ЭДС фазы вращающегося ротора будет

$$f_2 = S f_1.$$

Откуда выражение для действующего значения ЭДС вращающегося ротора имеет вид

$$E_{2s} = 4,44f_1 S w_2 \Phi_m K_{02} = E_2 S.$$

10.3. Сопротивление обмотки ротора. Эквивалентная схема фазы обмотки ротора

Для вращающегося ротора активное сопротивление равно R_2 , а индуктивное обусловлено потоком рассеяния

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 S L_2,$$

где L_2 – индуктивность обмотки ротора, x_2 – индуктивное сопротивление, обусловленное потоком рассеяния. Ток обмотки ротора равен

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + x_{2s}^2}}. \quad (51)$$

10.4. Вращающий момент асинхронного двигателя

Вращающий момент АД является электромагнитным моментом как результат взаимодействия вращающегося магнитного поля АД с токами роторной обмотки. Электромагнитная мощность может быть представлена выражением:

$$P_{ЭМ} = M\omega_0,$$

где ω_0 – угловая скорость вращения магнитного поля двигателя. Отсюда вращающий момент равен

$$M = \frac{P_{ЭМ}}{\omega_0}.$$

Для нахождения $P_{ЭМ}$ рассмотрим упрощенную схему (рис. 39) замещения АД, откуда

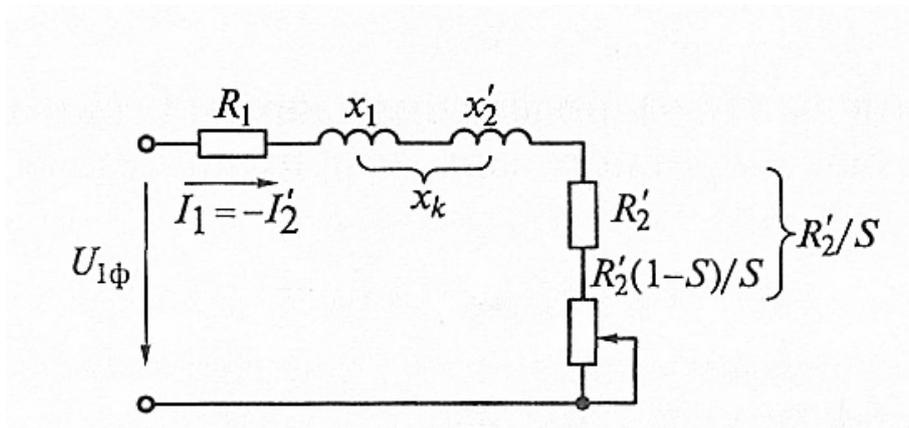


Рис. 39. Упрощенная схема замещения АД

R_1 – фазное напряжение; X_1 – сопротивление статора; X_2' – индуктивность потока рассеяния ротора; R_2' – сопротивление ротора

магнитный момент асинхронного двигателя равен

$$M = C_M \frac{U_{1\phi}^2 R_2' / S}{[(R_1 + R_2')^2 + X_2'^2]} \quad (52)$$

Из формулы (52) следует, что момент является функцией скольжения. Задаваясь различными значениями скольжения от нуля до 1, и, пользуясь формулой (52), можно построить зависимость $M = f(S)$. Эта зависимость приведена на рис.40.

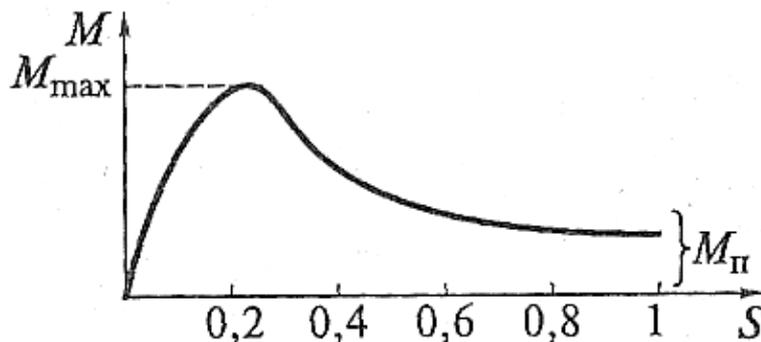


Рис. 40. Зависимость вращающего момента от скольжения

При скольжении $S = 1$ двигатель развивает пусковой момент M_{Π} . При скольжении $S = 0,12-0,2$ максимальный момент M_{max} и при $S = 0,01-0,06$ номинальный момент S_m . Для нахождения $S = S_m$ необходимо приравнять производную от выражения (52) нулю:

$$\frac{dM}{dS} = 0 \rightarrow S_m = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (53)$$

Так как R_1 составляет 10-15% от X_k , то $R_1^2 \ll X_k^2$ и формула (53) имеет вид $S_m = \frac{R_2'}{X_k}$, тогда максимальные значения момента вращения

$$M_{max} = C_M \frac{U_1^2}{2(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}. \quad (54)$$

Максимальный момент определяет перегрузочную способность АД. Выражение (54) показывает, что M_{max} не зависит от сопротивления ротора. Критическое скольжение зависит от сопротивления ротора. Следовательно, изменяя сопротивление ротора, можно увеличить критическое скольжение, не изменяя M_{max} . Это используют для пуска АД. Участок характеристики $M = f(S)$ от $S = 0$ до $S = S_m$ называется устойчивым, а от S_m до $S = 1$ неустойчивым.

В каталогах и справочниках по АД значения пускового и максимального моментов задаются в виде отношений этих величин к номинальному моменту двигателя:

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_{ном}}, \quad K_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{ном}},$$

где λ – коэффициент перегрузочной способности;

K_{Π} – кратность пускового момента.

Для нахождения M_{max} и M_{Π} предварительно вычисляют номинальный момент двигателя:

$$M_{ном} = 9550 \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}},$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность, кВт;

$\eta_{ном}$ – номинальный КПД.

Если взять отношение формул (52) и (54) и принять $R_1 = 0$, то получим

$$\frac{M}{M_{max}} = \frac{2}{S_m/S + S/S_m}, \quad (55)$$

откуда

$$M = \frac{2M_{max}}{S_m/S + S/S_m}. \quad (56)$$

Формула (56) используется для построения зависимости $M = f(S)$, но предварительно находят максимальное скольжение S_{max} , применяя выражение (56) для номинального режима двигателя

$$\frac{M_{ном}}{M_{max}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{2}{S_m/S + S/S_m}.$$

Тогда максимальное скольжение

$$S_{max} = S_{ном} (\lambda + \sqrt{(\lambda^2 - 1)}),$$

где, $S_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_{ном}}.$

Механической характеристикой называется зависимость скорости вращения ротора двигателя от момента, развиваемого двигателем (рис. 41) $n = f(M)$. По своей форме она отличается от кривой $M = f(S)$ только положением к координатным осям. Для получения механической характеристики используют формулу $n = n_0(1 - S)$, учитывая связь $M = \frac{2M_{max}}{S_m/S + S/S_m}$.

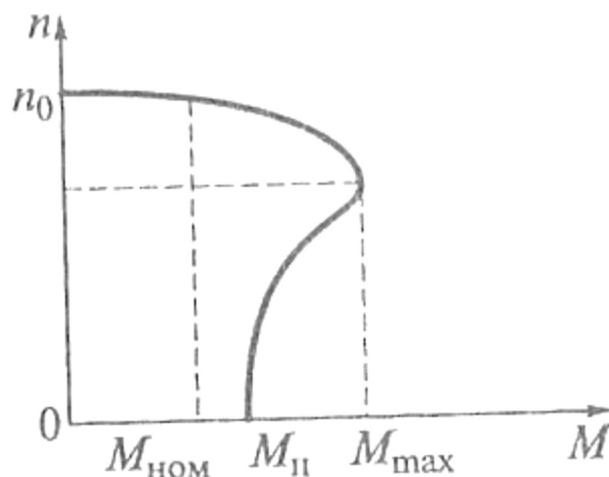


Рис. 41. Механическая характеристика двигателя

10.5. Рабочие характеристики АД

Рабочими характеристиками АД называют зависимость скорости вращения n , вращающего момента M , коэффициента мощности $\cos\varphi$ и КПД ($\eta = \frac{P_2}{P_1}$) от мощности P_2 двигателя на валу при номинальной частоте питающей сети $f_1 = \text{const}$ и напряжении на зажимах статора $U_1 = \text{const}$ (рис. 42).

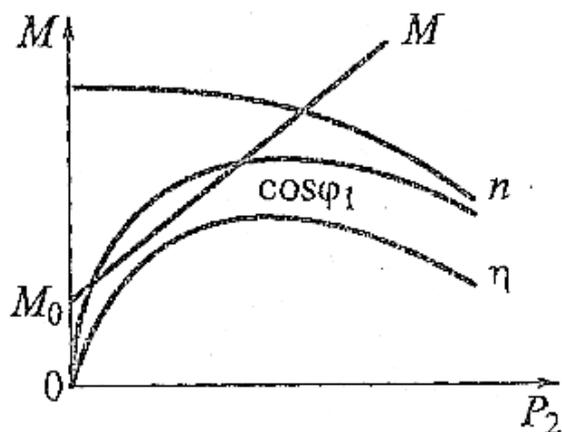


Рис.42. Рабочие характеристики АД

Так как $P_2 \approx P_{эм} = M\omega$, то зависимость $n = f(M)$ мало отличается по форме от механической характеристики $n = f(M)$.

Вращающий момент M , развиваемый АД, складывается из полезного момента M_2 , отдаваемого на валу, и момента холостого хода M_0 : $M = M_2 + M_0$. Полезный момент $M_2 = \frac{P_2}{\omega_0}$ практически линейно зависит от P_2 .

Момент холостого хода затрачивается на покрытие механических потерь двигателя и практически не зависит от перегрузки двигателя

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}.$$

При холостом ходе АД $\cos \varphi_1$ обычно не превышает величины 0,2. При росте нагрузки увеличивается ток статора, в основном его активная составляющая и увеличивается $\cos \varphi_1$.

При нагрузках, близких к номинальной, рост $\cos \varphi_1$ замедляется из-за увеличения реактивной мощности полей рассеяния. При номинальной нагрузке $\cos \varphi_1 = 0,7 - 0,85$. При отсутствии нагрузки КПД равен нулю, а по мере увеличения мощности P_2 он повышается. При больших нагрузках рост КПД замедляется.

Лекция 11. Однофазные асинхронные двигатели

11.1. Пуск АД с фазным двигателем

Пуск асинхронного двигателя сопровождается появлением в цепях статора и ротора токов значительной величины. Пусковой ток может в 4-8 раз превышать номинальный ток двигателя. Включение в цепь ротора добавочного сопротивления (пускового реостата R) позволяет уменьшить пусковой ток и увеличить пусковой момент (рис. 43 а). Выражение для вращающего момента при добавочном сопротивлении имеет вид:

$$M = C_M \frac{U_{1\phi}^2 \frac{R_2' + R'}{s}}{\left[\left(R_1 + \frac{R_2' + R'}{s} \right)^2 + X_2^2 \right]}.$$

При введении в цепь ротора добавочного сопротивления зависимость $M = f(S)$ смещается вправо и всегда можно подобрать значение R , при котором пусковой момент равен максимальному (43 б). По мере разгона двигателя сопротивление реостата выводится для поддержания максимального момента и осуществляется постепенный переход на естественную характеристику 1 с искусственных характеристик 2,3,4

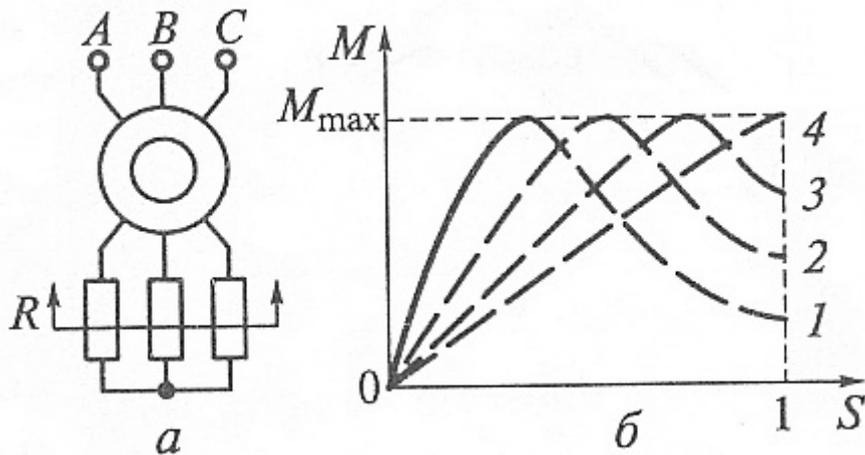


Рис. 43. Пуск АД с фазным ротором:

а – схема двигателя, б – пусковые характеристики, 1 – естественная характеристика, 2...4 – искусственные характеристики

Однофазным называется асинхронный двигатель, у которого на статоре располагается однофазная обмотка, занимающая примерно $1/3$ пазов статора, а ротор может быть короткозамкнутым или фазным. Однофазный ток, протекая по обмотке статора, создает пульсирующий магнитный поток, который можно разложить на два вращающихся в противоположные стороны с одинаковой частотой вращения и одинаковыми амплитудами, равными нулевым амплитудам пульсирующего потока. При неподвижном роторе оба вращающихся поля, взаимодействуя с током ротора, создают два равных, но противоположно направленных вращающих момента, которые уравнивают друг друга. Поэтому пусковой момент однофазного двигателя равен нулю. Однако, если двигатель привести во вращение от постоянного привода, то равновесие моментов нарушится и после отключения постороннего привода двигатель будет вращаться в ту же сторону.

Однофазные двигатели по своим весовым, энергетическим показателям уступают трехфазным. Величина максимального момента однофазного двигателя, в отличие от трехфазного зависит от активного сопротивления ротора (рис. 44 а).

Для развития пускового момента необходимо наличие в воздушном зазоре вращающегося магнитного поля, что может иметь место при сдвиге двух МДС во времени и пространстве. Это достигается при помощи специальной пусковой обмотки, которая размещена на статоре и смещена относительно рабочей обмотки на 90° . Последовательно с обмоткой (пусковой) включают конденсатор (рис. 44 б). Пространственный сдвиг обмоток на 90° и фазовый сдвиг во времени для токов пусковой и рабочей обмотки с числом обмоток w_n и w_p позволяют получить вращающееся магнитное поле и пусковой момент.

Пусковая обмотка АД включается только во время пуска. Однофазный

двигатель, у которого пусковая обмотка с конденсатором включена постоянно, а не только во время пуска, называется конденсаторным двигателем.

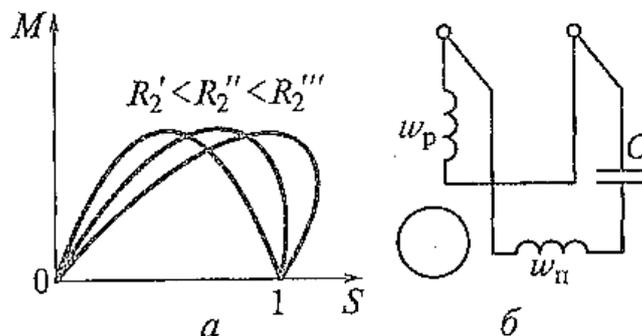


Рис. 44. Однофазный асинхронный двигатель:

а – зависимость момента от активного сопротивления ротора, б – схема однофазного АД

11.2. Пуск АД с короткозамкнутым ротором

В связи с ростом мощностей питающих сетей широко применяется прямое включение АД в сеть. Однако, пусковой ток мощных АД может вызвать большое падение напряжения в питающей сети и трансформаторе, и неблагоприятно сказаться на других электроприемниках. Поэтому применяется пуск АД при пониженном напряжении, что достигается двумя способами:

- применением автотрансформаторов;
- переключением обмотки статора с “треугольника” на “звезду”, если обмотка соединена по схеме треугольника

$$I_{л \lambda} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3} Z}; \quad I_{л \Delta} = \frac{\sqrt{3} U_{л}}{Z},$$

где $I_{л \lambda}$ и $I_{л \Delta}$ – пусковой линейный ток при схеме соединения “звездой” и “треугольником”, $U_{л}$ – линейное напряжение, Z – полное сопротивление фазы. Таким образом, переключение с Δ на λ уменьшает пусковой ток в три раза, а фазное напряжения в $\sqrt{3}$ раз.

11.3. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

Частоту вращения АД можно регулировать двумя путями:

- изменяя скольжение;
- изменяя частоту вращения магнитного поля АД

$$n = n_0(1-S) = \frac{60f_1}{p_1}(1-S).$$

В двигателях с фазным ротором изменение скольжения и частоты вращения достигается путем введения в цепь ротора добавочного сопротивления. Недостаток этого метода – его неэффективность, т.к. добавочное сопротивление расходует энергию. Изменение частоты вращения магнитного поля также можно осуществить двумя другими путями:

- изменением числа пар полюсов обмотки статора;
- изменением частоты f_1 питающей сети.

Изменение числа полюсов достигается закладкой двух статорных обмоток на разное число пар полюсов. Переключение обмоток позволяет получить двухскоростные АД. Изменение частоты f_1 питающей сети позволяет регулировать частоту вращения АД плавно и в широких пределах, но требует специального источника или преобразователя энергии с регулируемой частотой и обладает низким КПД.

Лекция 12. Синхронные электрические машины

12.1. Устройство синхронных электрических машин

Синхронными машинами являются машины переменного тока, они легко обратимы и используются в двух режимах: генераторном и двигательном. Синхронными машинами называются потому, что частота вращения ротора машины равна частоте вращения магнитного поля. Синхронная машина состоит из двух основных частей: статора (якоря) и ротора (индуктора). На рис. 45 приведены примеры исполнения роторов синхронных машин.

Статор синхронной машины устроен аналогично статору асинхронного двигателя. Ротор представляет собой электромагниты, обмотка которых питается постоянным током и называется обмоткой возбуждения.

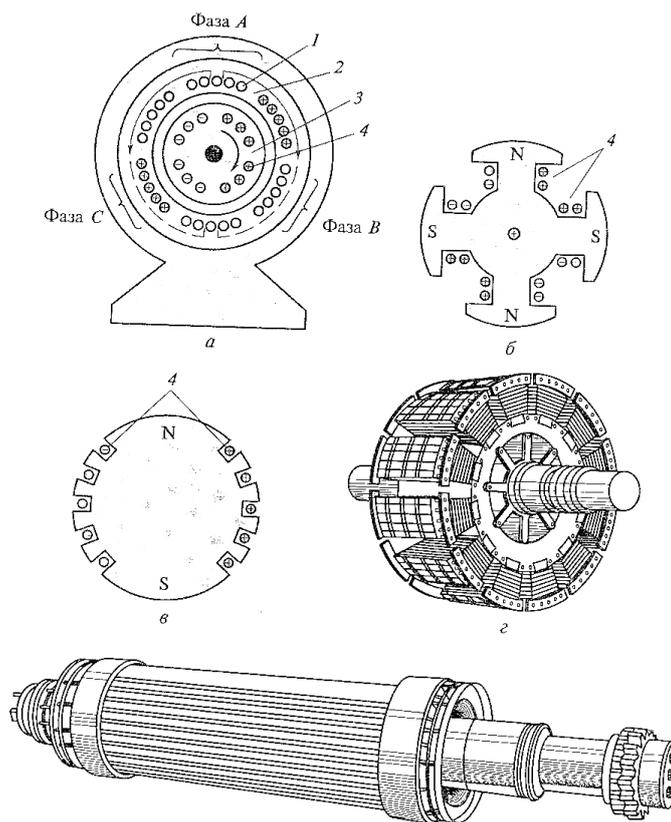


Рис. 45. Синхронная машина

а – схема устройства, б – схема поперечного сечения явнополюсного ротора, в – неявнополюсного ротора, г – конструктивное исполнение явнополюсного ротора, д – неявнополюсного ротора, 1 – обмотка якоря, 2 – статор, 3 – ротор, 4 – обмотка возбуждения

По конструктивному исполнению роторы бывают двух типов: явнополюсные и неявнополюсные. Неявнополюсные роторы применяют в машинах с большой частотой вращения магнитного поля ($n = 1000, 1500, 3000$ об/мин), а явнополюсные – в машинах большой мощности и с меньшей частотой вращения. Для питания обмоток возбуждения необходимо иметь источник постоянной ЭДС.

В качестве такого источника используют полупроводниковые выпрямители или генераторы постоянного тока, размещаемые на общем валу синхронной машины и называемыми возбудителями.

Рассмотрим ЭДС синхронной машины. Конструкция машины обеспечивает синусоидальное распределение индукции B в воздушном зазоре, что, в свою очередь, создает синусоидально изменяющуюся ЭДС в обмотках статора. Электродвижущая сила в одном проводнике (одной активной стороне витка) равна

$$e_i = B_i l v,$$

где B_i – магнитная индукция в месте расположения проводника, l – длина

якоря машины, v – линейная скорость вращения индуктора. Амплитудные значения ЭДС фазы обмотки якоря

$$E_m = 2w_\phi B_m lv, \quad (57)$$

где, коэффициент 2 учитывает обе основные стороны витка, w_ϕ – число витков одной фазы якоря, B_m – амплитудное значение индукции под полюсом. Синусоидальное распределение магнитной индукции заменяют средней величиной

$$B_{cp} = \frac{2}{\pi} B_m, \quad \text{откуда } B_m = \frac{\pi}{2} B_{cp}.$$

Скорость вращения v представляют в следующем виде:

$$v = \frac{\pi D n}{60} \times \frac{2p}{2p} = 2\tau \frac{pn}{60},$$

где D – диаметр статора, $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ – полюсное деление.

После преобразований выражение (57) принимает вид:

$$E_m = 2\pi w_\phi \frac{pn}{60} l\tau B_{cp}. \quad (58)$$

Произведение $l\tau = S$ – сечение поверхности, пронизываемой магнитным потоком полюса индуктора. Тогда произведение $S B_{cp} = \Phi_n$ – магнитный поток одного полюса. Окончательно выражение (58) можно записать в следующем виде:

$$E_m = 2\pi w_\phi \frac{pn}{60} \Phi_n = \frac{2\pi w_\phi}{60} P_n \Phi_n.$$

Кроме того, для учета распределения обмотки на статоре вводят обмоточный коэффициент K_0 . Тогда

$$E_m = 2\pi \frac{w_\phi}{60} K_0 n \Phi_n.$$

Окончательно, действующее значение ЭДС будет равно:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2} \cdot 60} w_\phi p K_0.$$

Обозначив $C_e = \frac{2\pi}{\sqrt{2} \cdot 60} w_\phi p K_0$ – постоянной величиной для синхронной машины, получим

$$E = C_e n \Phi_n. \quad (59)$$

Электродвижущая сила синхронного генератора должна обладать неизменной частотой f_1 , что обеспечивается условием $n = const$. Таким образом, регулирование напряжения (ЭДС) осуществляют только изменением магнитного потока Φ_n , т.е. изменением тока в обмотке возбуждения. Частота индуцируемой ЭДС равна $f = pn/60$. Следовательно, выражение (58) можно представить в виде:

$$E = 4,44 w_\phi f \Phi_n K_0. \quad (60)$$

12.2. Работа синхронной машины в режиме автономного генератора

При подключении нагрузки Z_H к синхронному генератору (рис. 46) в фазах обмотки статора (якоря) возникает ток, который обуславливает появление МДС, вызывающий магнитный поток статора (якоря).

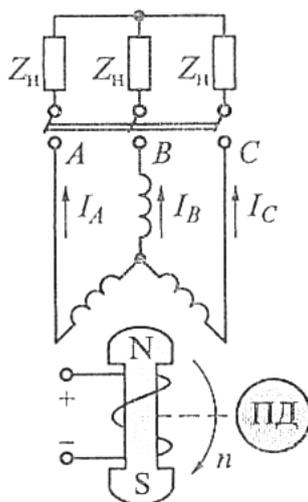


Рис. 46. Схема синхронной машины при работе в режиме автономного генератора

Этот поток, созданный трехфазной системой токов, представляет собой вращающееся магнитное поле. Его северные полюса захватывают южные полюса ротора, а южные – северные. Таким образом, ротор вращается с

магнитным полем синхронно. Если изменяется скорость вращения ротора, то изменяется частота индуцируемой ЭДС, следовательно, и частота вращения магнитного поля. Однако, синхронность вращения ротора и магнитного поля сохранится. Взаимодействие магнитного поля ротора и индуктора называется реакцией якоря. Реакция якоря зависит от характера нагрузки: активная, индуктивная или емкостная. При активной нагрузке R сдвиг фаз (угол φ) между током нагрузки и питающим напряжением равен нулю. При индуктивной нагрузке $-L$, сдвиг фаз между током и напряжением равен 90° . Напряжение опережает ток по фазе на 90° . При емкостной нагрузке $-C$, сдвиг фаз между током и напряжением равен -90° . К основным характеристикам синхронного генератора относятся характеристики холостого хода, внешняя и регулировочная (рис.47). Зависимость ЭДС синхронного генератора от тока возбуждения $E = f(I_B)$ снимается при отсутствии нагрузки ($I_H = 0$) и постоянной частоты вращения индуктора ($n_{ном} = const$). По этой характеристике (рис. 47 а) можно определить порядок напряжения, на который рассчитан данный генератор.

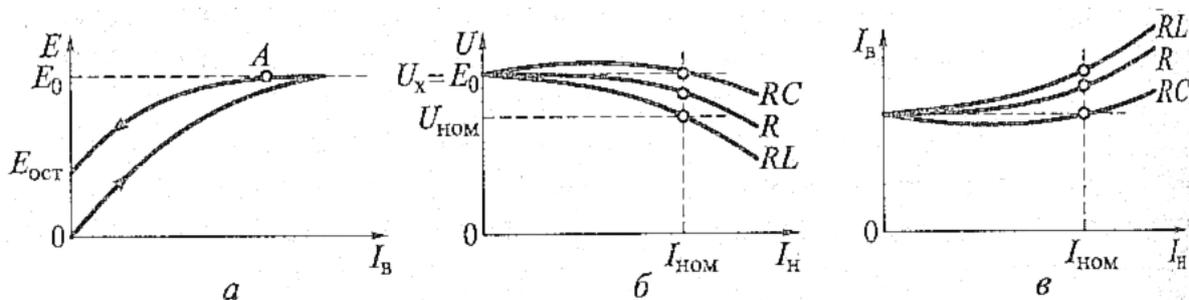


Рис. 47. Характеристики синхронного генератора:

а – холостого хода, б – внешняя, в – регулировочная

12.3. Характеристика холостого хода

Для этого на колене насыщения выбирают точку A и для нее определяют ЭДС E_0 . На рис. 47 а показаны две ветви характеристики: одна получена при увеличении тока возбуждения (намагничивание индуктора) при условии, что магнитопровод машины не был намагничен, а вторая – при уменьшении тока возбуждения (размагничивание индуктора). Остаточная ЭДС $E_{ост}$ создается остаточным магнитным потоком при $I_B = 0$ за счет гистерезиса ферромагнитных материалов. Внешняя характеристика или зависимость напряжения генератора от тока нагрузки $U = f(I_H)$ снимается при постоянной частоте вращения и неизменном токе возбуждения (рис. 48 б). Эта характеристика показывает степень стабильности напряжения при изменении нагрузки. Различие характеристик на рис. 48 б объясняется характером нагрузки. R – активно-индуктивная, LR – активно-емкостная. Кривой R соответствует $\cos\varphi = 1$, кривой RC и RL – $\cos\varphi < 1$. Для генератора

стабильность напряжения определяют потерей напряжения при номинальной нагрузке, %

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \frac{U_x - U_{\text{НОМ}}}{U_x} \times 100 . \quad (61)$$

Регулировочная характеристика генератора – это зависимость тока возбуждения от тока нагрузки $I_B = f(I_H)$ и она снимается при постоянной частоте вращения и неизменном напряжении якоря (рис. 47 в). Эта характеристика показывает, как нужно изменить ток возбуждения I_B для обеспечения постоянства напряжения $U = \text{const}$. При снятии характеристики необходимо соблюдать условие $\cos\varphi = \text{const}$.

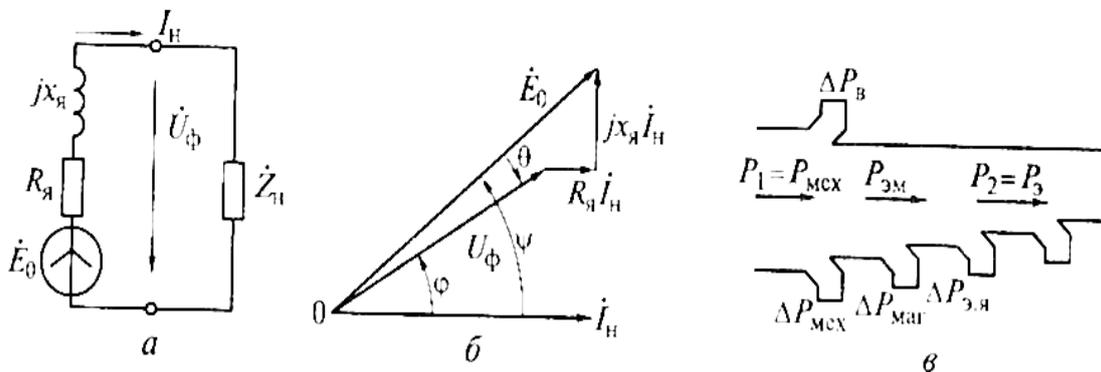
12.4. Схема замещения обмотки якоря синхронного генератора. Мощность и электромагнитный момент

Обмотка одной фазы якоря может быть представлена активным двухполюсником (рис. 48 а). ЭДС E_0 которого – ЭДС холостого хода, а сопротивление содержит активную и индуктивную составляющие. К этому двухполюснику подключена нагрузка Z_H . Согласно второму правилу Кирхгофа

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_\phi + R_{\text{я}} I_H + jx_{\text{я}} \dot{I}_H,$$

где \dot{U}_ϕ – напряжение фазы обмотки якоря;

$R_{\text{я}}$ и $x_{\text{я}}$ – активное и индуктивное сопротивление фазы обмотки якоря соответственно.



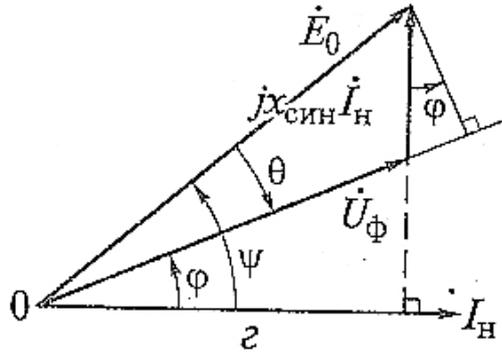


Рис. 48. Схема замещения якоря синхронного генератора:

а – схема замещения; б, г – векторные диаграммы фазы; в – энергетическая диаграмма

Электрическая мощность генератора, передаваемая в нагрузку равна

$$P = mU_{\phi}I_N \cos\varphi, \quad (62)$$

где m – число фаз якоря. Мощность электрических потерь энергии в обмотках составит

$$P_{\text{э.я}} = mR_{\text{я}}I_N^2. \quad (63)$$

Электромагнитная мощность, передаваемая в якорь синхронного генератора равна

$$P_{\text{эм}} = P + P_{\text{э.я}} = mI_N(U_{\phi} \cos\varphi + R_{\text{я}}I_N). \quad (64)$$

Из векторной диаграммы (рис. 48 б) следует, что

$$U_{\phi} \cos\varphi + R_{\text{я}}I_N = E_0 \cos\psi.$$

Рассмотрим преобразование механической энергии в электрическую. При работе синхронной машины в режиме генератора первичный двигатель развивает мощность $P_1 = P_{\text{мех}}$, которая преобразуется в электрическую мощность $P_2 = P_3$. Часть энергии тратится на питание обмотки возбуждения. Эту энергию вырабатывает генератор постоянного напряжения, размещенный на валу синхронной машины. В процессе преобразования механической энергии в электрическую возникают следующие потери:

– электрические в обмотках якоря и обмотке возбуждения, мощность которой составляет соответственно $\Delta P_{\text{э.я}} = R_{\text{я}} I_{\text{н}}^2$, $\Delta P_{\text{э.в}} R_{\text{н}} R_{\text{в}}^2$;

– магнитные (в якоре), обусловленные гистерезисом и вихревыми токами, мощность которых $\Delta P_{\text{маг}}$;

– механические – на трение и вентиляцию, мощность $\Delta P_{\text{мех}}$. На рис. (48 в) приведена энергетическая диаграмма синхронного генератора.

При взаимодействии магнитных полей якоря и индуктора возникает электромагнитный момент

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega_0} = \frac{m}{\Omega_0} E_0 I_{\text{н}} \cos \psi, \quad (65)$$

где $\Omega_0 = 2\pi n_0 / 60$.

У синхронных машин активное сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$ во много раз меньше ее индуктивного сопротивления $X_{\text{я}}$. Пренебрегая $R_{\text{я}}$ и обозначив индуктивное сопротивление синхронной машины через $X_{\text{син}}$, строят упрощенную векторную диаграмму (48 г). Спроецировав ЭДС E_0 на направление вектора, можно записать равенство:

$$\begin{aligned} E_0 \cos \psi &= U_{\phi} \cos \varphi, \\ X_{\text{син}} I_{\text{н}} \cos \varphi &= E_0 \sin \theta, \end{aligned}$$

отсюда

$$\cos \psi = \frac{U_{\phi} \cos \varphi}{E_0}; \quad \cos \varphi = \frac{E_0 \sin \theta}{X_{\text{син}} I_{\text{н}}}. \quad (66)$$

Совместное решение соотношений (65) и (66) дает:

$$M_{\text{эм}} = \frac{m}{\Omega_0} \frac{E_0 U_{\phi}}{X_{\text{син}}} \sin \theta. \quad (67)$$

Как следует из выражения (67) электрический момент $M_{\text{эм}}$ синхронной машины прямо пропорционален синусу угла между осями магнитного потока индуктора и вращающегося магнитного потока якоря. В генераторном режиме синхронной машины электромагнитный момент является тормозящим, а в двигательном режиме – вращающим. На рис. 49 показана зависимость $M = f(\theta)$ для генераторного и двигательного режимов работы генератора. Максимальный момент $M_{\text{мах}}$ определяет перегрузочную способность синхронной машины. При увеличении нагрузочного момента больше $M_{\text{мах}}$ синхронная машина выпадает из синхронизма. Рабочий

диапазон изменения угла θ составляет $0-30^\circ$, а превышение нагрузки генератора больше номинальной может происходить только кратковременно.

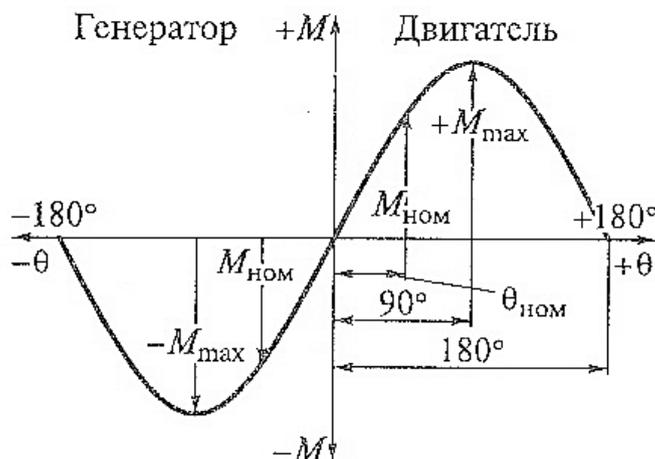


Рис. 49. Характеристика электромагнитного момента синхронной машины

12.5. Подключение трехфазной синхронной машины к электрической сети

Подключение синхронной машины к электрической сети осуществляется как для параллельной работы генераторов, так и для работы синхронной машины в качестве двигателя. Рассмотрим условие подключения синхронной машины к сети независимо от режима ее работы (рис. 50 а) Исходными данными для сети являются напряжение сети U_c и частота сети f_c , а для синхронной машины – ЭДС смещения $E_{см}$ и ее частота $f_{см}$. Условием подключения синхронной машины является отсутствие тока в фазах обмотки в момент замыкания рубильника. Это возможно только в случаях, когда $\dot{U}_c = \dot{E}_{см}$. Разогнав первичный двигатель (ГД) на номинальной частоте вращения и изменяя ток возбуждения, устанавливают величину ЭДС $E_{см}$ равной напряжению $\dot{U}_{см}$. Электродвижущая сила в момент замыкания рубильника должна находиться в фазе с напряжением U_c (рис. 50 б). Тогда в фазах обмотки якоря ЭДС синхронной машины и напряжение сети будут направлены навстречу, а уравнивающий ток включения в обмотке якоря будет равен:

$$I_{ур} = (\dot{U}_c - \dot{E}_{см}) / \dot{Z}_я = 0, \quad (68)$$

где $\dot{Z}_я$ – сопротивление фазы обмотки якоря синхронной машины. На практике этот момент уловить трудно, поскольку частота ЭДС синхронной машины нестабильна. Для подключения синхронной машины к сети необходимо произвести синхронизацию ЭДС и напряжения сети. Для этого существует устройство – синхроскопы.

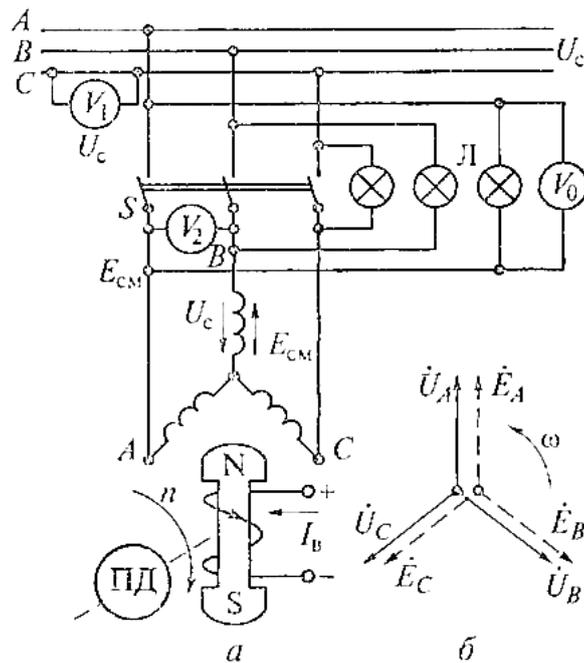


Рис. 50. Схема подключения синхронной машины к электрической сети:
 а – схема, б – векторная диаграмма ЭДС и напряжений в момент включения

В простейшем синхроскопе используются лампы накаливания, которые могут включаться по двум схемам: на одновременное загорание (рис. 50 а) и поочередное погасание.

Лампы включения в разомкнутой цепи рубильника S находятся под тем же напряжением, что и вольтметр V_0 . Следовательно, они периодически загораются и гаснут. Чем ближе частота ЭДС синхронной машины к частоте сети, тем медленнее загораются и гаснут лампы. Стрелка вольтметра магнитоэлектрической системы отклоняется влево и вправо относительно нуля, расположенного в центре шкалы. По скорости загорания затухания ламп регулируют частоту вращения индуктора ГД, добиваясь совпадения частот сети и синхронной машины. Включение рубильника S производится в тот момент, когда вольтметр V_0 показывает нуль, а лампочки полностью погасли. При этом в момент замыкания рубильника ток в обмотках якоря будет равен нулю.

Появление тока в фазах А,В,С якорной обмотки создает вращающееся магнитное поле, которое захватывает полюса индуктора, и индуктор начинает вращаться синхронно с вращающимся магнитным полем якоря с частотой $n_0 = 60f_c/p$. Для создания активной мощности в электрической машине необходимы дополнительные условия, а именно: увеличение вращающего момента $M_{вр}$ первичного двигателя или появление механической нагрузки M_H на валу ротора синхронной машины. При увеличении вращающего момента $M_{вр}$ первичного двигателя ротор (индуктор) синхронной машины

стремится увеличить частоту вращения n_0 , но его удерживает вращающееся магнитное поле якоря, частота вращения n_0 которого измениться не может, т.к. частота сети $f_c = const$. Поэтому происходит угловое смещение между осями магнитных полей индуктора и якоря. Ось магнитного поля индуктора сместится относительно оси вращающегося поля якоря на угол θ в направлении вращающегося индуктора (рис. 51 а).

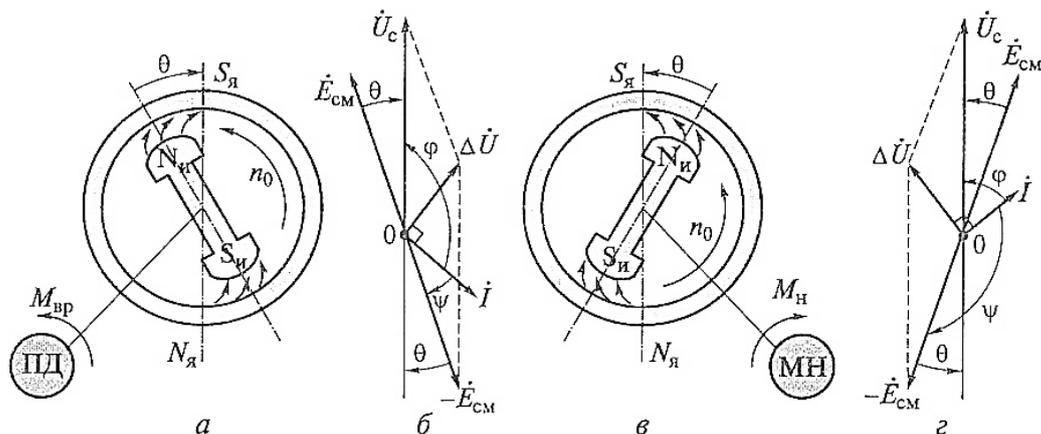


Рис. 51. Режимы работы синхронной машины:

а, б – генераторный, в, г – двигательный

Векторная диаграмма синхронной машины для этого случая приведена на рис. (51 б). Мощность синхронной машины относительно оси равна

$$p = mU_c I \cos \varphi. \quad (69)$$

Поскольку угол $\varphi > 90^\circ$, мощность имеет отрицательные значения. Это означает, что синхронная машина не потребляет энергии из сети, а отдает ее в сеть, т.е. работает в режиме генератора. Из сказанного следует, что синхронная машина начинает работать в качестве генератора только при увеличении (начиная от холостого хода) вращающего момента первичного двигателя (увеличение подачи пара, воды, топлива). При отключении первичного двигателя от энергопитания двигатель переходит в механическую нагрузку и создает нагрузочный тормозной момент, который начинает тормозить вращение ротора. Однако, вращающееся магнитное поле якоря удерживает магнитные поля индуктора и ротор продолжает вращаться с синхронной частотой n_0 . Под действием нагрузочного момента ось магнитного поля индуктора сместится в сторону, противоположную вращению ротора, на угол θ (рис. 51 в). Векторная диаграмма синхронной машины для данного режима приведена на рис. 51 г. В этом случае мощность синхронной машины относительно сети определяется выражением (69), с учетом того, что угол $\varphi < 90^\circ$ имеет положительное значение.

Следовательно, синхронная машина потребляет энергию из сети, т.е. работает в режиме двигателя.

12.6. Синхронный электрический двигатель

На рис. 52 а показана схема замещения одной фазы синхронного двигателя, а на рис. 52 б – его векторная диаграмма.

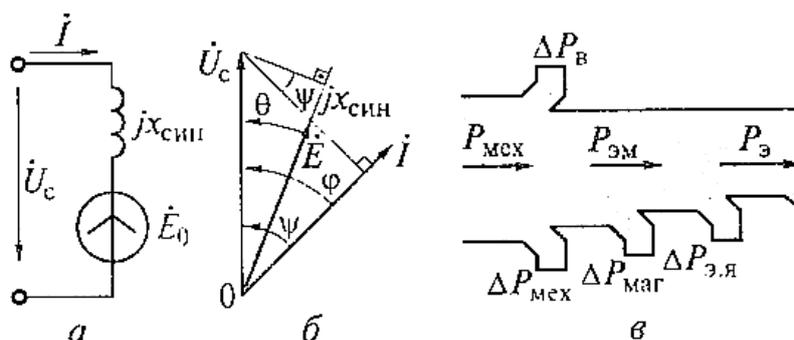


Рис. 52. Якорь синхронного двигателя:

а – схема замещения, б – векторная диаграмма фазы, в – энергетическая диаграмма

Из векторной диаграммы следует

$$\dot{U}_c = \dot{E}_0 + jX_{\text{син}}I. \quad (70)$$

Электромагнитная мощность двигателя находится по формуле:

$$P = mU_c I \cos \varphi = mE_0 I \cos \psi. \quad (71)$$

Тогда электромагнитный момент синхронного электрического двигателя составит:

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega_0} = \frac{m}{\Omega_0} U_c I \cos \varphi = \frac{m}{\Omega_0} E_0 I \cos \psi. \quad (72)$$

Тогда из векторной диаграммы можно получить:

$$X_{\text{син}} I \cos \psi = U_c \sin \theta. \quad (73)$$

Из формулы (73) следует

$$\cos\psi = \frac{U_c}{X_{\text{син}} I} \sin\theta.$$

При $m = 3$ (для трехфазного двигателя) из формул (71) и (72) получают выражение для электромагнитного момента

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{\Omega_0} \frac{E_0 U_c}{X_{\text{син}}} \sin\theta. \quad (74)$$

Зависимость момента $M_{\text{эм}}$ от угла θ показана на рис. 49. Синхронный двигатель обладает свойством саморегулирования, т.е. при изменении нагрузки на валу он изменяет электромагнитный момент. При уменьшении нагрузки уменьшается угол θ и, как показывает выражение (74), уменьшается электромагнитный момент, развиваемый двигателем. Следовательно, уменьшается мощность $P_{\text{эм}}$, и двигатель начинает потреблять из сети меньше электроэнергии.

При увеличении нагрузки на валу двигателя угол θ возрастает и увеличивается электромагнитный момент, развиваемый двигателем. При этом увеличивается мощность $P_{\text{эм}}$ и двигатель начинает потреблять из сети больше энергии. Энергетическая диаграмма двигателя представлена на рис. 52 в.

Для подключения синхронного двигателя к сети способом, указанным в подразделе 11.4, необходимы двигатель разгона и синхронизирующее устройство.

Если же обмотку статора подключить в тот момент, когда ротор неподвижен, а в обмотке возбуждения ток $I_{\text{в}}$, ротор не придет во вращение, т.к. мгновенно возникающее вращающееся магнитное поле не будет успевать сцепляться с его неподвижными магнитными полюсами. Возникает аварийный режим – в обмотках статора появляется ток короткого замыкания.

Для разгона синхронного двигателя применяется так называемый асинхронный пуск. Для этого на роторе синхронного двигателя размещается короткозамкнутая обмотка (как в синхронных двигателях). В полюс индуктора синхронного двигателя помещены стержни короткозамкнутой обмотки (рис. 53). Пуск двигателя осуществляют в следующей последовательности. Обмотка возбуждения отключается от источника питания и замыкается на пусковой реостат, сопротивление которого значительно больше сопротивления обмотки возбуждения $R_{\text{пр}} = (8-10)R_{\text{ов}}$. Оставлять разомкнутой обмотку возбуждения нельзя, т.к. в момент пуска в ней индуцируется большая ЭДС, опасная для обмотки и обслуживающего персонала.

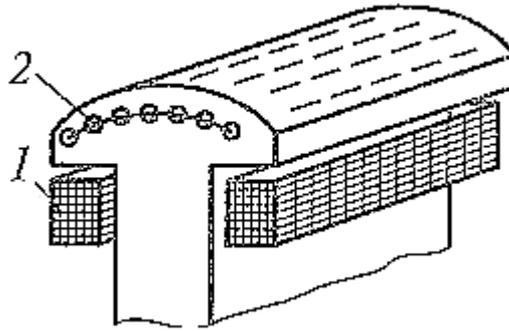


Рис. 53. Размещение пусковой короткозамкнутой обмотки в полюсе индуктора синхронного двигателя:

1 – обмотка возбуждения, 2 – короткозамкнутая обмотка

Статорная обмотка (обмотка якоря) подключается к источнику питания сети. Возникающее вращающееся магнитное поле начинает разгонять двигатель, который работает как синхронный. Когда двигатель разгоняется до частоты близкой к синхронной обмотку якоря, отключают от пускового реостата и подключают к источнику питания обмотки возбуждения. Появляющийся ток создает магнитный поток индуктора, который захватывается магнитным полем статора и двигатель втягивается в синхронизм.

12.7. Регулирование реактивной мощности синхронного двигателя

Реактивная мощность синхронной машины, как по характеру, так и по величине зависит от тока возбуждения. Изменение тока возбуждения не оказывает влияния на активную мощность, которая зависит только от механической нагрузки на валу двигателя, следовательно, одно из важнейших свойств синхронного двигателя – возможность работы одновременно в двух режимах: двигателя и генератора реактивной мощности, что широко используется для улучшения коэффициента мощности $\cos\varphi$ в энергосистемах. В некоторых случаях синхронные машины используют только в качестве синхронных компенсаторов (генераторов реактивной мощности). Зависимости тока двигателя от тока возбуждения $I = f(I_B)$ называют U -образными характеристиками (рис. 54).

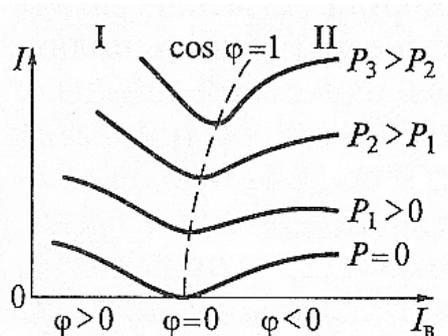


Рис. 54. U – образные характеристики синхронного двигателя при изменении тока возбуждения:

I, II – соответственно области недовозбужденного и перевозбужденного двигателя

Лекция 13. Синхронные электрические микромашины

13.1. Синхронный микродвигатель

Двигатель с постоянными магнитами отличается от обычного синхронного двигателя отсутствием обмотки возбуждения на полюсах индуктора и наличием полюсов в виде постоянных магнитов. В пазах полюсных наконечников индуктора размещаются стержни короткозамкнутой пусковой обмотки, предназначенной для асинхронного разгона двигателя. При достижении ротором частоты вращения n , близкой к частоте вращения n_0 вращающегося магнитного поля, двигатель втягивается в синхронизм. На рис. 55 а приведена схема устройства ротора такого двигателя.

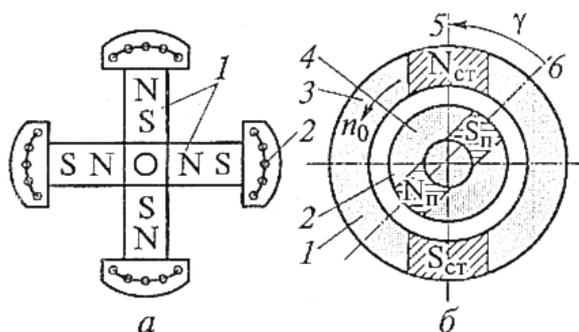


Рис. 55. Ротор двигателя с постоянными магнитами:

а – схема устройства ротора, б – схема устройства гистерезисного двигателя, 1 – постоянные магниты, 2 – короткозамкнутая обмотка (пусковая), 3 – статор, 4 – ротор, 5 – ось магнитного поля статора, 6 – ось магнитного поля ротора

Гистерезисный двигатель имеет ротор, представляющий собой цилиндр из магнитотвердого материала с широкой петлей гистерезиса. В некоторых

случаях ротор набирается из нескольких колец-шайб. У гистерезисных двигателей может быть два исполнения, отличающихся расположением ротора. Например, для гироскопических систем ротором является внешняя часть двигателя, а вращающееся магнитное поле создается неподвижной внутренней частью двигателя.

Принцип действия гистерезисного двигателя заключается в следующем. Под действием магнитного поля $\Phi_{см}$ статора между ним и магнитным полем $\Phi_{п}$, образовавшимся в роторе магнитных полюсов появляется пространственный сдвиг, обусловленный запаздыванием в магнитной переориентации элементарных частиц материала ротора. Ось магнитного потока $\Phi_{п}$, отстает от оси вращающегося магнитного потока $\Phi_{см}$ на угол γ гистерезисного запаздывания (рис. 55 б). При взаимодействии магнитных потоков $\Phi_{п}$ и $\Phi_{см}$ возникают электромагнитные силы, стремящиеся совместить оси этих потоков. Гистерезисный двигатель развивает электромагнитный момент $M_{эм} = k\Phi_{см}\Phi_{п}\sin\gamma$, где k – коэффициент пропорциональности.

Под действием электромагнитных сил ротор начинает двигаться в сторону вращения магнитного поля $\Phi_{см}$, постоянно увеличивая частоту вращения n . В процессе разгона ферромагнитный материал ротора перемагничивается и его полюсы перемещаются по поверхности ротора в сторону вращения магнитного поля статора, а частота вращения ротора приближается к частоте вращения поля статора n_0 .

При выравнивании указанных частот вращения поведение магнитных полюсов ротора стабилизируется, а двигатель начинает работать как синхронный с магнитным возбуждением.

13.2. Реактивный двигатель

Реактивный двигатель имеет ротор, выполненный в виде секционированного магнитопровода, обладающий различным магнитным сопротивлением в радиальном направлении (вдоль поперечной и продольной осей).

Синхронный вращающий момент реактивного двигателя создается без собственного магнитного поля ротора. Для этого ротор выполняют из пакетов электротехнической стали, залитых неферромагнитным материалом из алюминием (рис. 56). Такой ротор обладает наименьшим магнитным сопротивлением вдоль оси 1, совпадающей с направлением пакетов листовой электротехнической стали 2.

При подключении напряжения к статорной обмотке возникает вращающееся магнитное поле с синхронной частотой n_0 и начинается асинхронный разгон ротора, частота которого приближается к частоте n_0 .

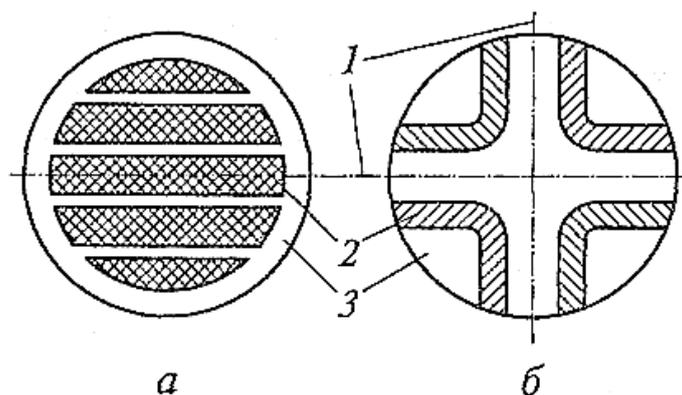


Рис. 56. Принципиальные схемы роторов реактивного двигателя:

а – двухполюсного, б – четырехполюсного, 1 – ось наименьшего магнитного сопротивления, 2 – пакеты листовой электротехнической стали, 3 – неферромагнитный материал

При отсутствии нагрузки на валу двигателя вращающийся магнитный поток, пронизывая пакеты листовой стали 2 в продольном направлении (вдоль оси 1), захватывают ротор. Последний под воздействием сил вращающегося магнитного поля займет такое положение, при котором продольные оси 1 совпадут с осями вращающегося поля и ротор начнет вращаться с синхронной скоростью.

При подключении нагрузки ротор двигателя сместится относительно вращающегося поля на угол θ . На рис. 56 а – показан ротор двухполюсного двигателя, а на рис. 56 б – четырехполюсного двигателя.

13.3. Шаговый импульсный двигатель

Шаговый импульсный двигатель имеет ротор, выполненный в виде постоянного магнита, и статор с явно выраженными полюсами, на которых в полуоткрытых пазах размещаются обмотки возбуждения 1,2, питаемые путем подачи импульсов напряжения. На рис. 57 показаны положения ротора двигателя при изменении питания обмоток возбуждения (крестиками и точками указаны направления тока). Рис. 57 а – соответствует импульсу 1 тока $I_{в1}$; рис. 57 б – импульсу 2 тока $I_{в2}$, рис. 57 в – импульсу 3 тока $I_{в1}$ и т.д. Каждый импульс тока возбуждения (см. рис. 57 г) поворачивает ротор на угол 90° . Поворот осуществляется за счет момента, который возникает в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора. Увеличивая число полюсов, можно изменить величину угла поворота. Число полюсов ротора должно быть равно числу полюсов статора.

13.4. Машины с постоянными магнитами

Машины с постоянными магнитами обладают преимуществом по сравнению с машинами с обмотками возбуждения, тем, что потери равны нулю. Наибольшее распространение получили микродвигатели с постоянными магнитами.

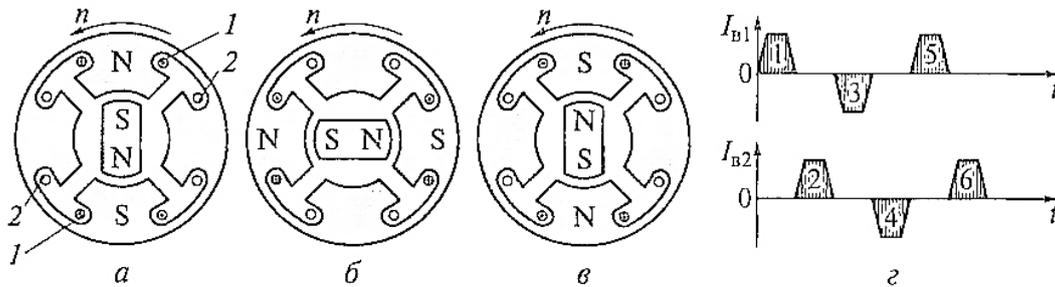


Рис. 57. Пояснение работы шагового (импульсного) двигателя:

а...в – положение ротора при подаче импульсов тока возбуждения, г – временная диаграмма изменения импульсов тока возбуждения, 1 – первая обмотка возбуждения, 2 – вторая обмотка возбуждения

Машины с постоянными магнитами получили еще название магнитоэлектрические машины. В самолетах, автомобилях, тракторах и системах автоматики применяют машины с постоянными магнитами. Статор этих машин ничем не отличается от статора машин с обмоткой возбуждения. Статор имеет источник вращающегося поля. Ротор машины имеет вместо обмотки возбуждения постоянные магниты и обычно короткозамкнутую пусковую обмотку. На рис. 58 изображен двигатель с постоянными магнитами.

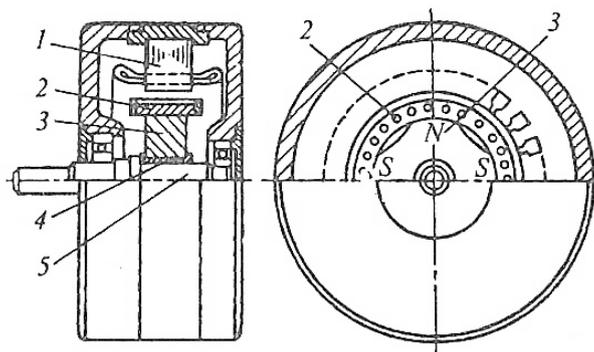


Рис. 58. Двигатель с постоянными магнитами

Статор 1 имеет источник вращающегося магнитного поля. На роторе 3 расположены постоянные магниты 2. Постоянные магниты направлены на втулку 4 вала 5. Ротор с постоянными магнитами может быть весьма разнообразным – в виде звездочки, цилиндра. В последнее время стала

применяться ферромагнитная резина, в которую вкрапляются постоянные магниты. Магнитоэлектрические машины обладают целым рядом преимуществ:

- высокая надежность из-за отсутствия вращающихся обмоток;
- высокий КПД, меньше нагрева;
- отсутствие помех радиоприемника.

Недостатки этих машин:

- генераторы не допускают обычного регулирования напряжения;
- повышение стоимости уже при мощности 300-400 Вт;
- плохие пусковые качества.

13.5. Сверхпроводящие синхронные машины

Предельная мощность турбогенераторов с внутренним водяным охлаждением составляет 2 млн. кВт. Дальнейший рост мощности возможен только при применении сверхпроводящих обмоток возбуждения синхронной машины. Это позволяет преодолеть технологический предел 2 млн кВт и создавать генераторы с практически неограниченной мощностью, значительно повысить КПД и снизить массово-габаритные характеристики генератора. На рис. 59 приведен разрез турбогенератора КТГ – 1,5 мощностью 1500 кВА, 3000 об/мин.

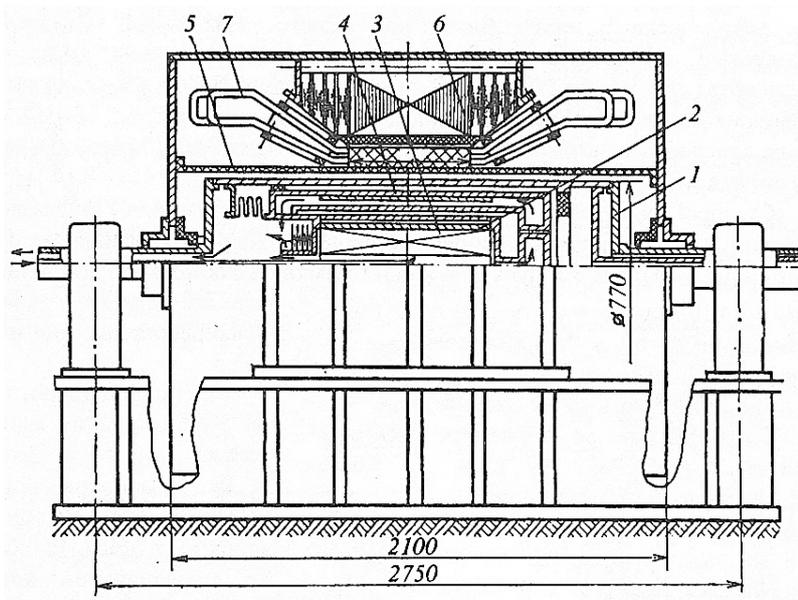


Рис. 59. Криогенный турбогенератор 1200 кВт, 3000 об/мин

Ротор 1 машины представляет собой вращающийся криостат с вакуумной изоляцией. Жидкий гелий через узел подачи поступает на периферию

бандажа ротора 2, удерживающего катушки возбуждения 3, и проходит через каналы в элементах крепления обмотки ротора. Пары гелия в центральной части делятся на два потока, охлаждающие концевки зоны ротора, экран 4 и токовводы. Газообразный гелий выходит из ротора при температуре близкой к окружающей среде. Ротор вращается в вакуумированном пространстве внутри оболочки из стеклопластика 5. Вакуум обеспечивается путем специальных уплотнений.

Сверхпроводящая обмотка ротора выполнена из ниобиевой проволоки. Плотность тока в обмотке возбуждения достигает 100 А/м^2 . Статор в машине шихтован электротехнической сталью. Обмотка ротора 7 выполнена из медных проводников, охлаждаемых водой.

Величина магнитного поля в обмотках возбуждения достигает 1,3–1,5 Тл, поэтому сердечник статора делают беззубцовым с ферромагнитным экраном, который концентрирует магнитное поле внутри машины. Синхронная сверхпроводящая машина может работать в генераторном и двигательном режимах. Однако, стоимость криогенной установки на жидком гелии снижает экономическую целесообразность массового применения таких генераторов.

К новым направлением развития синхронных двигателей относятся двигатели с охлаждением в жидком азоте, т.е. при температуре 70 К. По предварительным оценкам массово-энергетические показатели таких машин значительно выше аналогичных показателей традиционных синхронных машин.

Массивные ВТСП – элементы в таких двигателях могут быть изготовлены из керамики или пленок. Можно выделить три перспективные конструкции магнитоэлектрических двигателей на основе массивных ВТСП – элементов :

- с радиальной намагниченностью;
- с радиально – тангенциальной намагниченностью;
- с тангенциальной намагниченностью.

Каждая из этих схем имеет свои достоинства и недостатки. Поэтому выбор конкретной машины при конструировании – это очень взвешенный применительно к конкретной задаче шаг. На основе решения двумерных электродинамических задач проведен сравнительный анализ данных типов машин и получены следующие рекомендации:

- двигатели с радиальными постоянными магнитами более эффективны в широком диапазоне полюсности при тонких постоянных магнитах (ПМ);
- радиально-тангенциальные двигатели предпочтительнее при среднем числе полюсов $p = 2 - 4$ и при относительно толстом ПМ;
- двигатели с тангенциальными магнитами имеют преимущество при большом числе пар полюсов $p = 5$ и более.

В настоящее время данное направление находится в стадии разработки.

Лекция 14. Трансформаторы

14.1. Назначение и общие свойства трансформаторов

Трансформаторы – это электромагнитные статические преобразователи электрической энергии. Основное назначение трансформатора – изменение напряжения переменного тока. Наибольшее распространение имеют силовые трансформаторы, которые выпускаются промышленностью на мощности свыше миллиона киловольтампер и напряжением до 1150–1500 кВ.

Для передачи энергии необходимо повысить напряжение генераторов, установленных на электростанциях с 16–24 кВ до напряжений 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ, используемых в линиях электропередач, а затем снова понизить до 35, 10, 6, 0,66, 0,38, 0,22 кВ, чтобы использовать электроэнергию в промышленности, быту, сельском хозяйстве. Так как в электрических системах имеет место многократная трансформация, мощность трансформаторов в 7-10 раз превышает мощность генераторов на электростанциях.

Силовые трансформаторы в нашей стране выпускаются промышленностью в основном на частоту 50 Гц. Трансформаторы малой мощности широко используют в различных электротехнических машинах, системах переработки и передачи информации, навигации, автомобилестроение и других устройствах. Диапазон частот данных трансформаторов от нескольких Гц до 10^{15} Гц.

По числу фаз трансформаторы делятся на однофазные, двухфазные, трехфазные, многофазные.

Трансформаторы имеют две или несколько обмоток, индуктивно связанных друг с другом. Обмотки, потребляющие энергию из сети, называются первичными. Обмотки, отдающие электрическую энергию потребителю, называются вторичными. Трехфазные трансформаторы имеют соединение обмоток в трехлучевую звезду или треугольник, а также многоугольник. В зависимости от соотношения напряжений на первичной и вторичной обмотках, трансформаторы делятся на повышающие и понижающие. В повышающем трансформаторе первичная обмотка имеет низкое напряжение, а вторичная – высокое. В понижающем трансформаторе, наоборот, вторичная обмотка имеет низкое напряжение, а первичная – высокое.

Трансформаторы, имеющие одну первичную обмотку и одну вторичную обмотку, называются двухобмоточные. Достаточно широко распространены трехобмоточные трансформаторы, имеющие на каждую фазу три обмотки, например, на стороне низкого напряжения две обмотки, а на стороне высокого напряжения одна обмотка и наоборот. Многофазные трансформаторы могут иметь несколько обмоток низкого и высокого напряжения.

По конструкции силовые трансформаторы делят на два основных типа – масляные и сухие. В масляных трансформаторах магнитопровод с обмотками находится в баке, заполненном трансформаторным маслом, которое является

одновременно изолятором и охлаждающим агентом. Сухие трансформаторы охлаждаются воздухом. Они применяются в помещениях (жилых и производственных), где эксплуатация масляных трансформаторов взрывоопасна. Трансформаторное масло является горючим и при нарушении герметичности трансформатора может повредить другое оборудование.

Наряду с трансформаторами широко применяются автотрансформаторы, в которых в отличие от трансформаторов, имеется электрическая связь между первичной и вторичной обмоткой. При этом мощность из одной обмотки во вторую передается как магнитным полем, так и за счет электрической связи. Автотрансформаторы строятся на большие мощности и высокое напряжение, применяются в электросистемах, а также используются для регулирования напряжения в установках большой мощности.

Номинальные данные трансформатора, на которые он рассчитан с заводской гарантией 25 лет, указываются в паспортной табличке трансформатора:

- $S_{\text{ном}}$, кВА, номинальная полная мощность;
- $U_{\text{л.ном}}$, В или кВ, номинальное линейное напряжение;
- $I_{\text{л.ном}}$, А или кА, номинальный линейный ток;
- $f_{\text{ном}}$, Гц, номинальная частота;
- m , число фаз;
- $U_{\text{к}}$, %, напряжение короткого замыкания.

Также приводится схема и группа соединения, режим работы и способ охлаждения. В табличке приводятся также данные, необходимые для монтажа трансформатора: полная масса, масса масла, масса выемной (активной) части трансформатора. Указывается также тип трансформатора в соответствии с ГОСТом, завод-изготовитель и год выпуска.

Номинальная мощность однофазного трансформатора $S_{\text{ном}} = U_{1\text{л.ном}} I_{1\text{л.ном}}$, трехфазного $S_{\text{ном}} = \sqrt{3} U_{1\text{л.ном}} I_{1\text{л.ном}} = 3 U_{1\text{ф.ном}} I_{1\text{ф.ном}}$, где $U_{1\text{л.ном}}$, $U_{1\text{ф.ном}}$, $I_{1\text{л.ном}}$, $I_{1\text{ф.ном}}$ – соответственно номинальные линейные и фазные значения напряжений и токов

Номинальными напряжениями трансформатора являются линейные напряжения при холостом ходу по первичной и вторичной обмоткам трансформатора. За номинальные токи первичной и вторичной обмоток принимаются токи, рассчитанные по номинальной мощности при номинальных первичных и вторичных напряжениях. В виду общности конструкции и методов расчета к трансформаторам могут быть отнесены реакторы, дроссели насыщения и сверхпроводящие индуктивные накопители. Существует большая группа электромагнитных устройств; магнитные усилители, различные индуктивные датчики, измерительные трансформаторы, накопители энергии, которые имеют схожую с трансформаторами конструкцию.

14.2. Принцип работы трансформатора

Рассмотрим работу однофазного двухобмоточного трансформатора. Схема трансформатора приведена на рис. 60. Однофазный двухобмоточный трансформатор состоит из двух обмоток, размещенных на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала. Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток машины. Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока с напряжением U_1 . Ко вторичной обмотке 2 присоединяют сопротивление нагрузки Z_H .

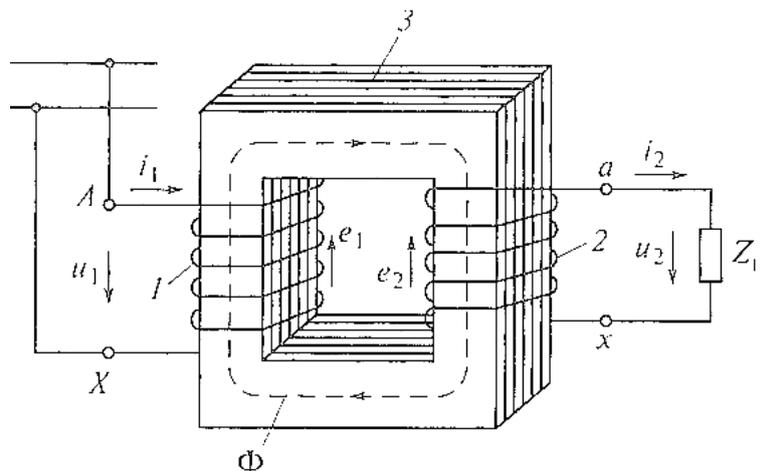


Рис. 60. Однофазный двухобмоточный трансформатор

1– первичная обмотка; 2– вторичная обмотка; 3– магнитопровод

Начала и концы обмоток ВН обозначают буквами A и X ; обмотки НН – буквами a и x . При подключении в сеть в первичной обмотке возникает переменный ток i_1 , который создает переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу. Пусть Φ индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС – e_1 и e_2 , пропорциональные, согласно закону Максвелла числу витков w_1 и w_2 соответствующих обмоток и скорости изменения потока $\frac{d\Phi}{dt}$. Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке равны:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (75)$$

Отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяется следующим выражением:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (76)$$

Если пренебречь падением напряжения в обмотках трансформатора, которое обычно не превышает 3–5% номинальных значений U_1 и U_2 , считать, что $E_1 \cong U_1$ и $E_2 \cong U_2$, то получим

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (77)$$

В случае, когда необходимо повысить вторичное напряжение U_2 , число витков w_2 берут больше w_1 . Такой трансформатор называют повышающим. Когда требуется уменьшить напряжение U_2 , то число витков w_2 берут меньше w_1 , такой трансформатор называют понижающим. Отношение ЭДС $E_{\text{ВН}}$ обмотки высшего напряжения к ЭДС $E_{\text{НН}}$ обмотки низшего напряжения (или соотношение их числа витков) называют коэффициентом трансформации:

$$k = \frac{E_{\text{ВН}}}{E_{\text{НН}}} = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}}. \quad (78)$$

В системах передачи и распределения электрической энергии в ряде случаев применяют трехобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиоэлектроники и автоматики – многообмоточные трансформаторы. В таких трансформаторах на магнитопроводе размещено три или большее количество изолированных друг от друга обмоток, что позволяет при питании одной из обмоток получить два или большее число напряжения (U_2, U_3, U_4 и т. д.) для электроснабжения двух или большего числа групп потребителей. В трехобмоточных силовых трансформаторах различают обмотки высшего, низшего, среднего (СН) напряжений.

В трансформаторах преобразуется только напряжения и токи. Мощность остается приблизительно постоянно (она несколько уменьшается вследствие внутренних потерь электроэнергии в трансформаторе), следовательно

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{w_2}{w_1}.$$

При увеличении вторичного напряжения в k раз по сравнению с первичным, ток I_2 во вторичной обмотке уменьшится в k раз. Трансформатор может работать только в цепях переменного тока. Важным свойством трансформатора, используемым в устройствах автоматики и радиоэлектроники, является его способность преобразовывать нагрузочное

сопротивление. Если к источнику переменного тока подключить сопротивление R через трансформатор с коэффициентом трансформации k , то в цепи источника

$$R' = \frac{P_1}{I_1^2} \cong \frac{P_2}{I_1^2} \cong \frac{I_2^2 R}{I_1^2} \cong k^2 R, \quad (79)$$

где P_1 – мощность, потребляемая трансформатором от источника переменного тока, Вт; P_2 – мощность, потребляемая сопротивлением R от трансформатора, Вт; $P_2 = I_2^2 R \cong P_1$.

Таким образом, трансформатор изменяет значение нагрузочного сопротивления R в k раз.

Лекция 15. Конструкции трансформаторов

15.1. Основные типы трансформаторов

Основным элементом конструкции трансформатора является сердечник трансформатора. Сердечником трансформатора называется конструкция, образующая магнитную цепь трансформатора. В зависимости от расположения сердечника относительно обмоток различают (рис.61):

- трансформаторы стержневые, в которых обмотка охватывает стержни сердечника;
- трансформаторы броневые, в которых обмотка частично охватывается сердечником;
- трансформаторы тороидальные.

Часть магнитопровода, на котором размещены обмотки, называется стержнем, а на которой обмотки отсутствуют – ярмом.

Трансформаторы большой мощности, средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшее охлаждение и меньшую массу, чем броневые. Силовые трансформаторы большой мощности броневые типа отечественная промышленность не выпускает, но при значительных мощностях (более 80-100 мВА на фазу) часто применяют бронестержневые трансформаторы, у которых крайние стержни имеют боковые ярма (рис.61).

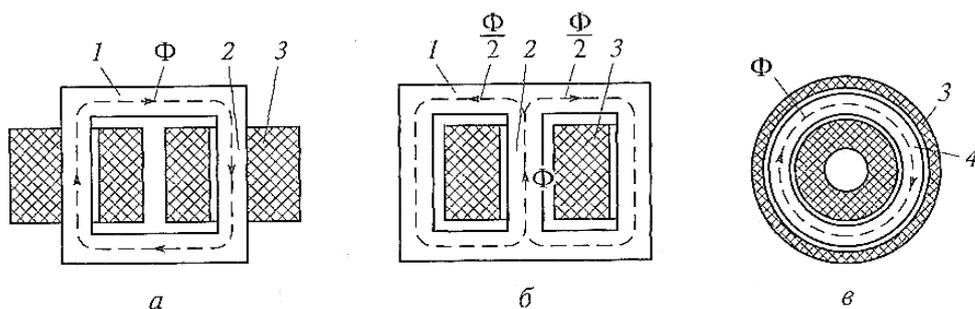


Рис.61. Типы однофазных трансформаторов

а – стержневой; б – броневой; в – тороидальный; 1 – ярмо; 2 – стержень; 3 – обмотки; 4 – магнитопровод

Такая конструкция позволяет уменьшить поперечное сечение верхнего и нижнего ярм по сравнению со стержневым трансформатором, в результате чего уменьшается высота трансформатора и упрощается его конструкция, упрощается транспортировка к месту эксплуатации многостержневой конструкции. В этом случае мощность каждой фазы распределяют между двумя или тремя отдельными стержнями.

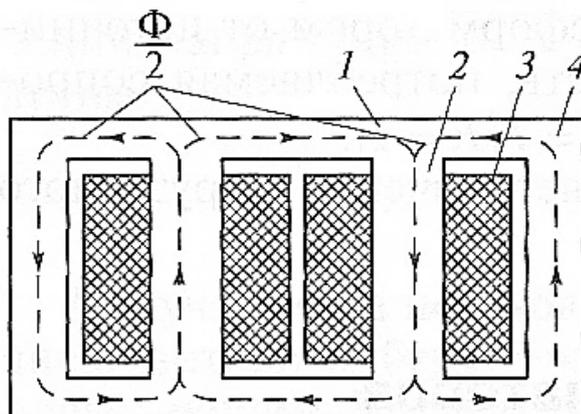


Рис. 62. Бронестержневой однофазный трансформатор большой мощности

1 – верхнее ярмо; 2 – стержень; 3 – обмотки; 4 – боковое ярмо

Для снижения затрат от вихревых токов магнитопроводы сердечника собирают из армированных листов электротехнической стали толщиной 0,25-0,5 мм при частоте 50 Гц. Обычно применяют анизотропную холоднокатанную сталь с ребристой структурой (марки 3412, 3416), с добавлением кремния 2,8-3,8%. Магнитные свойства этой стали резко улучшаются при совпадении направлений магнитного потока и прокатки: потери в стали на перемагничивание уменьшаются в 2-3 раза, а магнитная проницаемость и индукция возрастают.

Однако использование холоднокатаной стали усложняет конструкцию и технологию изготовления магнитопроводов, так как при этом требуется

исключить прохождение прокатки поперек направления магнитного потока или, по крайней мере, уменьшить длину участков, на которых это явление возникает.

Существует два способа сборки сердечников – впритык и внахлест. По первому способу стержни и ярма собираются отдельно, а затем прессуются и крепятся специальными стяжными болтами. Между стержнями и ярмом прокладываются изолирующие теплостойкие прокладки, с тем, чтобы предупредить замыкание вихревых токов, образующихся в стержне, через ярмо. Этот способ имеет преимущество простоты сборки сердечника и последующей разборке при осмотре трансформатора и его ремонта.

Второй способ требует несколько больше времени, однако он имеет ряд достоинств: зазоры в стыках получаются меньшими, вследствие чего уменьшается ток холостого хода; существует возможность обойтись без шпилек, проходящих через сердечник, либо свести их число к минимуму, вследствие чего конструкция сердечника облегчается, упрощаются приспособления и оборудование для сборки. Благодаря этому второй способ сборки сердечников трансформаторов получил широкое распространение.

В поперечном сечении стержням дают форму вписанного круг ступенчатого многоугольника или квадрата (рис.63).

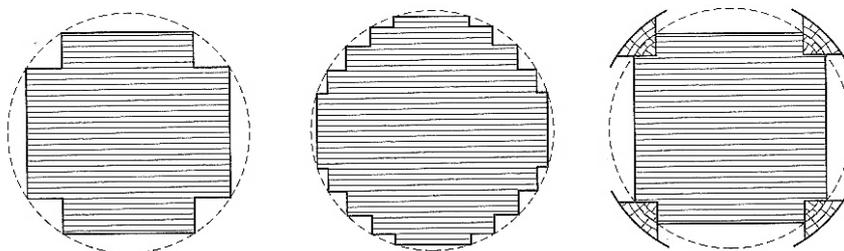


Рис. 63. Формы сечений стержней трансформатора

Квадратная форма сердечника применяется лишь в трансформаторах очень малой мощности, так как при этой форме сердечника плохо используется место внутри круга. Как правило, число ступеней тем больше, чем больше мощность трансформатора и, следовательно, диаметр круга, описанного вокруг стержня. В трансформаторах большой мощности между отдельными пакетами стали оставляют вентиляционные каналы в направлении, параллельном плоскости листа и перпендикулярном ей (рис. 64).

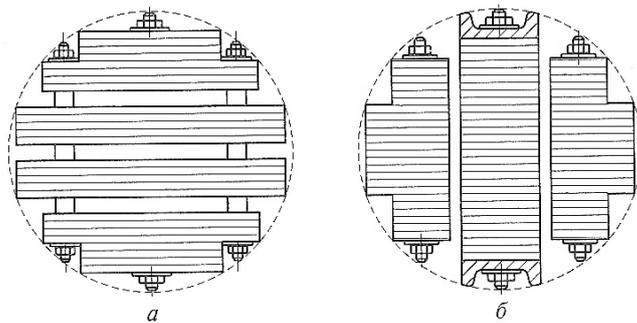


Рис. 64. Сечение стержней трансформаторов, имеющих продольные и поперечные каналы

15.2. Ярмо стержневого трансформатора

Ярмо стержневого трансформатора имеет в сечении прямоугольную или чаще ступенчатую форму (рис. 65). При ступенчатом сечении ярма магнитный поток равномерней распределяется по сечению ярма, так как в этом случае сечения пакетов ярма больше соответствуют сечениям пакетов стержней.

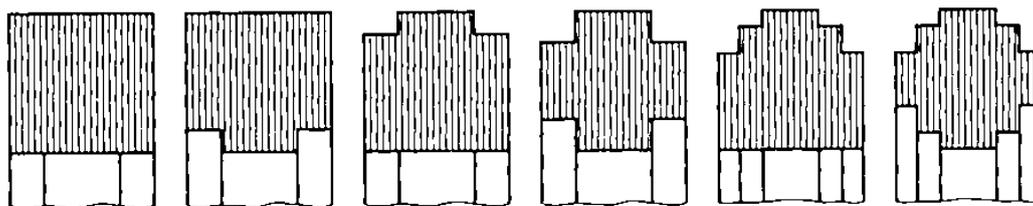


Рис. 65. Формы сечений ярма трансформатора

Чтобы уменьшить ток холостого хода и потери в стали трансформатора, сечения ярма делают на 5-15% больше сечения стержня.

В трансформаторах малой мощности магнитопровод собирают из шихтованных пластин (рис. 66).

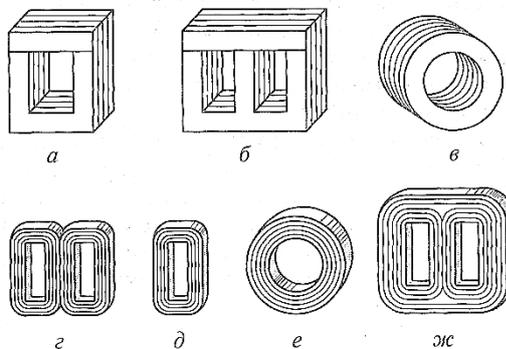


Рис. 66. Магнитопроводы трансформаторов малой мощности
а, д – стержневой; б, г – броневой; в, е – тороидальный; ж – трехфазный

Большое распространение получили магнитопроводы, навитые из узкой ленты электротехнической стали (обычно из анизотропной холоднокатаной стали или из специальных железоникелевых сплавов типа пермаллой). Их можно использовать для стержневых, броневых, тороидальных и трехфазных трансформаторов. Основными преимуществами таких магнитопроводов перед шихтованными является лучшее использование ферромагнитного материала благодаря ориентации магнитного потока в направлении проката стали или пермаллоя и более высокое сопротивление вихревым токам, что обуславливает снижение потерь мощности в магнитопроводе, особенно при повышении частот.

Ленточные магнитопроводы бывают разъемными и неразъемными. Для трансформаторов, работающих на частотах 400 и 500 Гц, магнитопроводы выполняют из специальных сортов электротехнической стали с малыми удельными потерями при повышенной частоте, а также из железоникелевых сплавов типа пермаллой, которые имеют большую начальную проницаемость и позволяют получить магнитные поля с большой индукцией при сравнительно слабой напряженности. Толщина листов стали составляет 0,2; 0,15; 0,1; 0,08 мм.

При частотах более 10-20 кГц магнитопровод прессуют из порошковых материалов (магнетодиэлектриков и ферритов).

15.3. Обмотки и изоляция

В современных трансформаторах для лучшей магнитной связи первичную и вторичную обмотки стремятся расположить как можно ближе одна к другой. При этом на каждом стержне магнитопровода размещают обе обмотки либо концентрически, либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующихся по высоте стержня. В первом случае обмотки называют концентрическими, во втором – чередующимся. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем ближе к стержням располагают обмотку НН, требующую меньше изоляции относительно сердечника трансформатора, а снаружи – обмотку ВН (рис. 67).

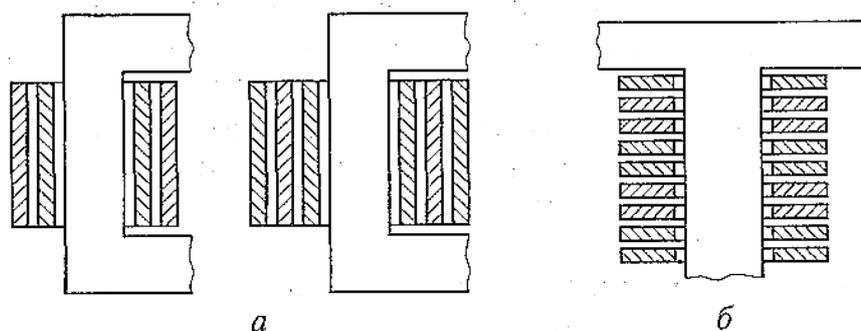


Рис. 67. Простая и двойная концентрические (а) и чередующиеся (б) обмотки трансформатора

В некоторых случаях для уменьшения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток применяют двойные concentрические обмотки (рис.2.8. а), в которых обмотку НН делят на две части с одинаковым числом витков. Аналогично можно выполнить и обмотку ВН. При чередующихся обмотках всю обмотку делят на симметричные группы, состоящие из одной или нескольких катушек ВН и расположенных по обе стороны от них двух или нескольких катушек НН.

Обмотки трансформаторов изготавливают из медных или алюминиевых проводов. При использовании алюминия поперечное сечение провода берется примерно на 70% больше, чем при использовании меди вследствие большего удельного электрического сопротивления алюминия. В связи с этим габаритные размеры и масса трансформаторов с алюминием больше, чем у трансформаторов с медными обмотками.

При сравнительно небольших мощностях и токах обмотки выполняют из изолированного провода круглого сечения, при больших мощностях и токах применяют провода прямоугольного сечения. В ряде случаев обмотки наматывают из нескольких параллельных проводов. По конструкции concentрические обмотки бывают цилиндрические непрерывные и винтовые. Цилиндрические обмотки, выполненные из прямоугольного провода, обычно применяют в качестве обмоток низшего напряжения при мощностях 250 кВА на один стержень (до 630 кВА для трехфазного трансформатора) и напряжением до 6 кВ. При мощностях 10-16 кВА, обмотку наматывают в один или два слоя, а при больших мощностях – в два слоя, соединенных, последовательно. Провод наматывают по винтовой линии на бумажно-бакелитовые цилиндры и одновременно изолируют его от стержня магнитопровода и соседних катушек. Если обмотка имеет несколько слоев, то между ними прокладывают изоляционные пленки, образующие каналы.

В трансформаторах мощностью 160-63000 кВА на стержень и выше при напряжениях 3-220 кВА в качестве обмоток высшего напряжения часто применяют непрерывные спиральные катушечные обмотки. Обмотку называют непрерывной, потому что ее наматывают без разрывов. Винтовые одно – и многоходовые обмотки используют обычно в качестве обмоток низшего напряжения в трансформаторах мощностью свыше 240 кВА на стержень при напряжении до 15 кВ и токах свыше 300 А. – для медных проводов и 150–200 А – алюминиевых проводов.

Винтовую обмотку наматывают по винтовой линии из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения, прилегающих друг к другу в радиальном направлении. Подобно резьбе винта она может быть одно-, – двух- и иногда многоходовой. Между отдельными витками расположены охлаждающие каналы. При использовании винтовых и непрерывных катушечных обмоток, выполненных из нескольких параллельных проводников, необходимо предусмотреть равномерное распределение тока, так как более удаленные от оси витки, имеют большую длину. Кроме того, в

них индуцируются различные ЭДС. Чтобы уравнивать длины проводников и создать одинаковые условия для ЭДС, производят транспозицию проводов, т.е. периодически меняют их местами. В настоящее время широко распространены винтовые обмотки из транспонированных проводов, в котором при изготовлении отдельные проводники с лаковой изоляцией меняются местами. Поверх провода накладывают общую изоляцию из кабельной бумаги. Используются также подразделенные провода, состоящие из двух, трех изолированных проводников, охватываемых общей изоляцией. Такое разделение проводника приводит к значительному, (на 20-30%), снижению добавочных потерь от индуцируемых в проводниках вихревых токов. В трансформаторах малой мощности и микротрансформаторах используют однослойные и многослойные обмотки из круглого провода с эмалевой или хлопчато-бумажной изоляцией, которые наматывают на гильзу или каркас, изготовленный из электрокартона. Между слоями проводов прокладывают изоляцию из кабельной бумаги или ткани. В микротрансформаторах обмотки часто выполняют из алюминиевой фольги толщиной 30-20 мкм. Изоляцией здесь служит окисная пленка фольги, которая обладает достаточной теплостойкостью, теплопроводностью и может выдерживать рабочие напряжения до 100 В. В обмотках высокочастотных трансформаторов применяют расщепленные многожильные провода.

В трансформаторах, работающих в условиях высокой температуры и радиоактивного облучения, нашли применение провода с изоляцией из анодированного алюминия и с изоляцией из кварцевых нитей. В этих трансформаторах применяют галетные обмотки. Такая обмотка состоит из отдельных унифицированных элементов-галет, каждая из которых представляет собой законченный конструктивный элемент.

Галеты собирают на стержень магнитопровода и соединяют между собой в соответствии с электрической схемой трансформатора.

Путем последовательного и параллельного соединения галет можно получить различные значения токов и напряжений трансформатора.

Галеты изготавливают из обмоточного провода и алюминиевой фольги. В тороидальных трансформаторах обмотки расположены по всей окружности магнитопровода, причем на внутренней поверхности укладывают большее число слоев, чем на внешней. Изоляцию обмотки от магнитопровода осуществляют путем обматывания магнитопровода лентой из изоляционного материала.

Изоляцию обмоток трансформаторов подразделяют на главную – от магнитопровода и между обмотками (НН и ВН), и продольную – изоляцию между витками, слоями и катушками каждой обмотки. Существует также изоляция отводов от обмоток, переключателей, и вводов. Изоляция обмоток трансформатора от заземленных частей и друг от друга определяется электрической прочностью при частоте 50 Гц. Прочность изоляции обеспечивается соответствующим выбором величины изоляционных

промежутков, которые в масляных трансформаторах одновременно выполняют роль охлаждающих каналов.

В высоковольтных трансформаторах чтобы предотвратить пробой изоляции при воздействии на обмотку импульсных перенапряжений, между обмотками дополнительно ставят жесткие бумажно-бакелитовые цилиндры или мягкие цилиндры из электроизоляционного картона.

При этом высота изоляционных цилиндров должна быть больше радиуса обмоток во избежание электропробоя.

Между обмотками ВН различных фаз устанавливают межфазную изоляционную перегородку. Соблюдение изоляционного расстояния обмоток от ярма обеспечивают шайбами и прокладками из электроизоляционного картона. Между концевой изоляцией обмотки и ярмовыми балками магнитопровода в некоторых трансформаторах устанавливают металлические разрезные или неметаллические прессующие кольца.

В трансформаторах напряжением 35 кВ для защиты от атмосферных перенапряжений две начальные и две конечные катушки обмотки ВН выполняют с усиленной изоляцией. Однако такая изоляция ухудшает условия охлаждения начальных и конечных катушек, поэтому их выполняют из провода большого поперечного сечения.

В трансформаторах напряжением 110 кВ и выше для уменьшения напряжения на концевых катушках обмотки ВН и выравнивания электрического поля у концов обмотки применяют емкостную компенсацию в виде емкостных витков и колец (рис. 68).

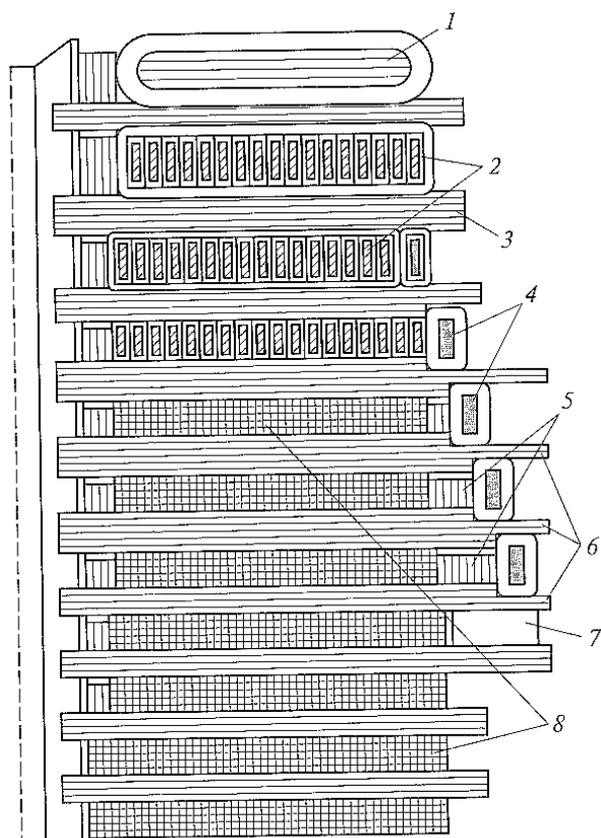


Рис. 68. Емкостные кольца и экранирующие витки на обмотке трансформатора

- 1 – емкостное кольцо;
- 2 – дисковые входные катушки с дополнительной изоляцией;
- 3 – изоляционные прокладки;
- 4 – экранирующие витки;
- 5 – изоляционные полосы;
- 6 – выступы удаленных прокладок;
- 7 – опорный изоляционный сегмент;
- 8 – непрерывная обмотка

Изоляция между катушками, слоями и витками обеспечивает как электрическую прочность обмотки при частоте 50 Гц, так и прочность обмотки при воздействии импульсных перенапряжений.

Обычно межкатушечную изоляцию осуществляют радиальными масляными каналами, простыми и двойными шайбами из электрокартона. В качестве межслойной изоляции, как правило, применяют несколько слоев кабельной бумаги, электроизоляционный картон или лакоткань. Изоляция между витками достигается изоляцией обмоточного провода.

Проходные изоляторы служат для примоединения обмоток трансформатора к линии и устанавливаются на крышке или стенке бака различают следующие типы проходных изоляторов:

- сплошные фарфоровые;
- фарфоровые с воздушным или масляным заполнением;
- фарфоровые маслозаполненные с комбинированной внутренней изоляцией;
- конденсаторные.

На рис. 69 и 70 показан проходной изолятор на 6 кВ с воздушным заполнением и на 35 кВ с масляным заполнением для наружных и внутренних установок.

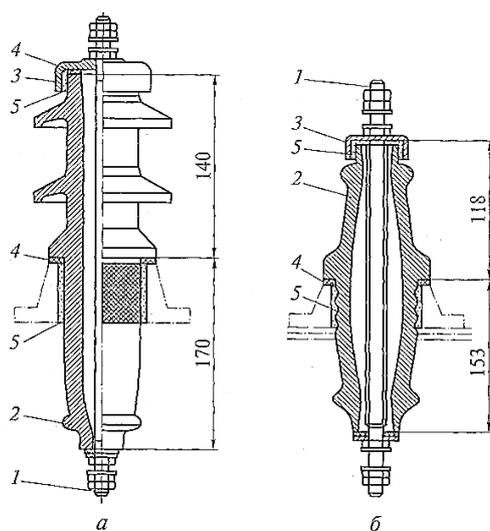


Рис. 69. Проходной изолятор на 6 кВ с воздушным заполнением
 а – для наружных установок; б – для внутренних установок; 1 –
 токоведущий стержень; 2 – изолятор; 3 – металлический колпак; 4 –
 цементирующая замазка; 5 – уплотняющая прокладка из маслупорной
 резины

Часть изоляторов, работающих в воздухе, для удлинения пути поверхностного разряда снабжают ребрами. Изоляторы для внутренних установок ребер не имеют.

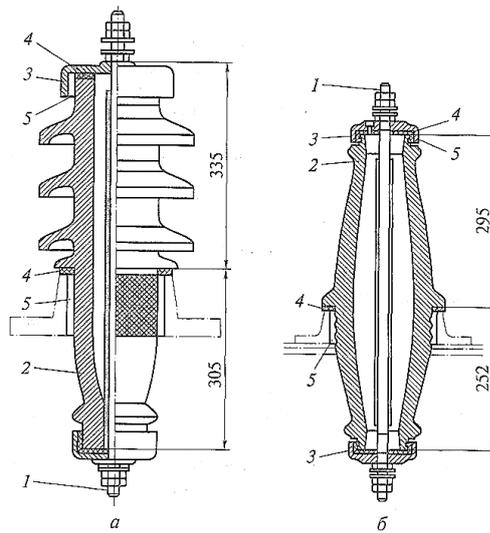


Рис. 70. Проходной изолятор на 35 кВ с масляным заполнением

а – для наружных установок; б – для внутренних установок; 1 – токоведущий стержень; 2 – изолятор; 3 – металлический колпак; 4 – цементирующая замазка; 5 – уплотняющая прокладка из масло-упорной резины

На рис. 71 изображен проходной изолятор на 110-220 кВ с масляным заполнением. Токоведущий кабель проходит внутри медной изолированной трубки, окруженной рядом ступенчатых изолирующих цилиндров. В верхней части изолятора имеется стеклянный резервуар, служащий расширителем для заполняющего изолятор масла. Размеры изолятора данного типа достаточно велики и достигают 5 м.

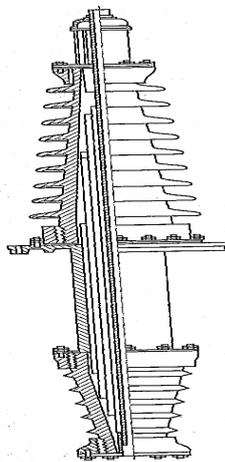


Рис. 71. Проходной изолятор на 110-220 кВ с масляным заполнением

Изолятор конденсаторного типа представляет собой ряд концентрических цилиндров из изолирующего материала, уменьшающихся по высоте по мере удаления от оси изолятора и проложенных тонкими металлическими прокладками. Таким образом, изолятор представляет собой ряд конденсаторов, последовательно соединенных друг с другом.

Конденсаторные изоляторы могут быть выполнены на самые высокие

напряжения. Их преимущество состоит в малой массе и габаритных размерах, но применяются очень редко из-за высокой стоимости.

В силовых трансформаторах для отвода тепла от обмоток применяют следующие способы охлаждения:

- воздушное;
- масляное;
- посредством негорючего диэлектрика.

Каждый вид охлаждения имеет соответствующее условное обозначение типа охлаждения.

Лекция 16. Охлаждение и изоляция трансформаторов

16.1. Сухие трансформаторы

При естественном воздушном охлаждении магнитопровод, обмотки и другие части трансформатора имеют непосредственное соприкосновение с окружающим воздухом, поэтому их охлаждение происходит путем конвекции.

Сухие трансформаторы устанавливают внутри помещений (в зданиях, производственных цехах и прочее), главное требование – пожарная безопасность. В эксплуатации они удобнее масляных, так как исключают периодическую замену масла. Поскольку воздух по сравнению с маслом более плохой изолятор все изоляционные промежутки в сухих трансформаторах больше. Вследствие меньшей теплопроводности воздуха по сравнению с маслом, перегрузки активных элементов магнитопровода в сухих трансформаторах меньше, что приводит к увеличению сечения проводов и обмотки, поэтому масса активных частей сухих трансформаторов больше масляных.

В настоящее время изготавливают сухие трансформаторы мощностью до 10 мВА и напряжением обмотки ВН до 35 кВ. Их устанавливают только в сухих закрытых помещениях с относительной влажностью воздуха до 80% во избежание чрезмерного увлажнения обмоток.

Сухие трансформаторы с естественным воздушным охлаждением могут иметь открытое (С), защищенное (СЗ) или герметичное (СГ) исполнение. Для повышения интенсивности охлаждения применяют обдув обмоток и магнитопровода потоком воздуха от вентилятора. Сухие трансформаторы с воздушным дутьем имеют обозначение СД. Трансформаторы малой мощности выполняют, как правило, охлаждением типа С.

16.2. Трансформаторы с масляным охлаждением

В трансформаторах с естественным масляным охлаждением (М) магнитопровод с обмотками погружают в бак, наполненный тщательно очищенным минеральным (трансформаторным маслом). Это масло обладает

более высокой теплопроводностью, чем воздух и хорошо отводит тепло от обмоток магнитопровода трансформатора к стенкам бака, имеющего большую площадь охлаждения, чем сам трансформатор.

Погружение обмоток в масло обеспечивает повышение изоляционной прочности и предотвращает увлажнение обмотки и потерю ее изоляционных свойств.

В трансформаторах мощностью 20-30 кВА выделяется сравнительно небольшое количество тепла, поэтому их баки имеют глухие стенки, у более мощных (20-180 кВА) поверхность охлаждения увеличивают, применяя ребристые или волнистые стенки, либо окружая бак системой труб, в которых масло циркулирует за счет конвекции. Для повышения интенсивности охлаждения в трансформаторах мощностью более 1000 кВА к баку пристраивают навесные или отдельно установленные трубчатые теплообменники (радиаторы), которые с помощью фланцев соединяются с внутренней поверхностью бака. В радиаторе происходит усиленная циркуляция масла и интенсивное охлаждение. Масляные трансформаторы типа М применяют для мощностей до 10000 кВА. Трансформаторы мощностью 10000-63000 кВА выполняют обычно с обдувом (тип Д). В этом случае теплоотдача с поверхности радиаторов форсируется путем обдува их вентиляторами. Теплоотдача при этом увеличивается в 1,5-1,6 раза.

В трансформаторах с охлаждением типа ДЦ масло откачивается и прогоняется через теплообменники, охлаждаемые воздухом. Охлаждение типа ДЦ применяется в трансформаторах мощностью 16000-250000 кВА и выше.

При использовании масло-водяного охлаждения, масло проходит через теплообменники, охлаждаемые водой. Циркуляция масла осуществляется естественным способом (типа МВ) или же с помощью насоса (охлаждение типа Ц).

16.3. Трансформаторы, охлаждаемые негорючим жидким диэлектриком

Трансформаторы с охлаждением типов Н и НД выполняют с герметизированным баком, заполненным жидким диэлектриком. Обычно применяются синтетические изоляционные материалы, которые по своим изоляционным свойствам близки к трансформаторному маслу. Трансформаторы с охлаждением типов Н и НД пожароопасны и могут устанавливаться в закрытых помещениях. Их выпускают мощностью 160-2500 кВА и напряжением 6 и 10 кВ.

При работе трансформаторное масло нагревается и расширяется. Поэтому трансформатор имеет расширительный бак, который изолирует масло от соприкосновения с воздухом. При мощности трансформатора 160 кВА и выше в масляных трансформаторах устанавливают термосифонный фильтр для непрерывного очищения масла. Иногда бак-расширитель делают с азотной защитой от соприкосновения с воздухом.

Для контроля уровня масла и температуры масляные трансформаторы

оснащены указателем уровня и температуры масла.

Трансформаторы с охлаждением дутьем типов Д, ДЦ, НД имеют два термосигнализатора. Один измеряет температуру в верхних слоях, а второй служит для управления системой автоматического управления.

Система автоматического управления включает и выключает систему охлаждения, сигнализирует об аварийной ситуации и включает систему резервного охлаждения при отказе системы основного охлаждения. Трансформаторы мощностью 10000 кВА и выше оборудуются также реле низкого уровня масла в расширителе. Реле сигнализирует и отключает трансформатор при снижении уровня масла ниже допустимого уровня.

Для защиты от возможных аварий трансформаторы мощностью более 1000 кВА имеют специальные газовые реле, которые устанавливают в трубопроводе между основным баком и расширителем. При значительном выделении взрывоопасных газов, возникающих в результате разложения масла, реле автоматически выключает трансформатор, предупреждая развитие аварийного процесса. Для защиты обмотки НН от высокого напряжения при пробое изоляции ВН, устанавливают пробивной предохранитель с напряжением пробоя 1000 В.

16.4. Условное обозначение трансформаторов различного типа

Обозначение трансформатора состоит из букв и цифр. Буквами обозначаются:

– число фаз (D–однофазный, Т – трехфазный);

– вид охлаждения (табл. 8) и число обмоток, работающие на самостоятельные сети, если оно больше двух (трехобмоточный трансформатор обозначается буквой Т).

Выполнение одной их обмоток с устройством РПН обозначают дополнительной буквой Н. При обозначении автотрансформатора добавляют букву А перед буквами обозначения трансформатора.

Исполнение трансформатора с естественным масляным охлаждением и защитой при помощи азотной подушки без расширителя, обозначают дополнительной буквой З после обозначения вида охлаждения (например, ТМЗ).

Трансформатор с расщепленной обмоткой НН – дополнительной буквой Р после обозначения числа фаз (например, ТРДН). Трансформатор для собственных нужд электростанций – дополнительной буквой С (например, ТРДНС).

Таблица 8

Условное обозначение типов охлаждения трансформаторов

Вид охлаждения	Условное обозначение
<i>Сухие трансформаторы</i>	
Естественное воздушное: при открытом исполнении при защищенном исполнении при герметичном исполнении	С СЗ СГ
<i>Масляные трансформаторы</i>	
Естественное масляное С дутьем и естественной циркуляцией масла С естественной циркуляцией воздуха и принудительной циркуляцией масла С принудительной циркуляцией масла С принудительной циркуляцией воды и естественной циркуляцией масла С принудительной циркуляцией воды и масла	М Д МЦ ДЦ МВ Ц
<i>Трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком</i>	
Естественное негорючим жидким диэлектриком Негорючим жидким диэлектриком с дутьем	Н НД

Цифрами в обозначении трансформатора указывают номинальную мощность в киловатт-амперах и через косую черту класс напряжения обмотки ВН в киловольтах. Кроме того, в обозначении указывают год выпуска рабочих чертежей трансформаторов данной конструкции (две последние цифры); климатическое исполнение и категория размещения (ГОСТ 15150 –69).

16.5. Примеры условных обозначений

1. ТМ–100/10–78У1 – трехфазный, двухобмоточный трансформатор с естественным охлаждением, номинальной мощности 100 кВА, класс напряжения 10 кВ, конструкция 1978года, для умеренного климата, категория размещения 1.

2. ТРЛНС–32000/35–80У1 – трехфазный, двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой НН, охлаждением типа Д, с устройством регулирования под нагрузкой (РПН), предназначен для собственных нужд электростанции, номинальной мощности 32 мВА, класс напряжения 35 кВ, конструкция 1980 года, для умеренного климата, категория размещения 1.

3. ТСЗ –100/10–79У3 – трехфазный сухой трансформатор защитного исполнения номинальной мощности 100 кВА, класс напряжения 10 кВ, конструкция 1979 года, для умеренного климата, категория размещения 3.

Лекция 17. Работа однофазного трансформатора в режиме холостого хода

17.1. Упрощенная схема однофазного трансформатора

Рассмотрим работу однофазного трансформатора в режиме холостого хода. Упрощенная схема однофазного трансформатора приведена на рис.71. Подведем к зажимам А–Х первичной обмотки трансформатора номинальное напряжение U_1 при номинальной частоте и синусоидальной его форме. Зажимы а–х разомкнуты и, следовательно, вторичный ток равен нулю. Под воздействием напряжения U_1 в первичной обмотке потечет ток I_0 , который создаст МДС $F_0 = w_1 I_0$, где w_1 – число витков первичной обмотки. МДС F_0 создаст магнитный поток, упрощенная картина которого наказана на рис. 72 для концентрической обмотки стержневого трансформатора. Преобладающая часть линий магнитного потока замыкается на магнитопровод, и будет сцеплена с обеими обмотками, образует основной поток Φ_m . Вторая часть магнитного потока Φ_{s1} проходит, в основном, по немагнитным материалам и, будучи, сцеплена только с первичной обмоткой образует поток рассеяния первичной обмотки при холостом ходе трансформатора. Основной магнитный поток Φ_m создает в обмотках основной ЭДС E_1 и E_2 , а поток рассеяния Φ_{s1} создает только в первичной обмотке ЭДС рассеяния E_{s1} .

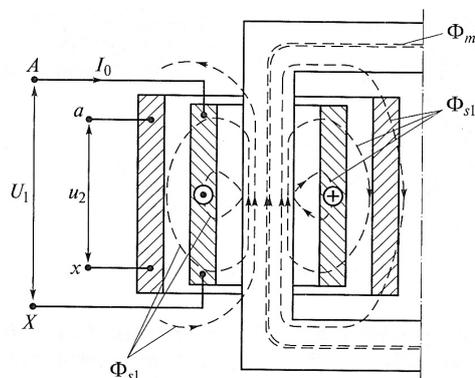


Рис. 72. Магнитные потоки однофазного трансформатора

Кроме того, активная обмотка обладает активным сопротивлением R_{s1} . При протекании тока в ней возникает сила противодействия, которую условимся называть E_{R1} .

При установлении количественных соотношений, будем считать, что в любой момент времени между ЭДС в цепи и суммой противодействующих напряжений установлено равновесие (закон равновесия), но по величине знака обратно сумме напряжений.

Поскольку речь идет о действующих значениях, то необходимо понимать геометрическую сумму

$$\dot{U}_1 = -(\dot{E}_1 + \dot{E}_{S1} + \dot{E}_{R1}). \quad (80)$$

При холостом ходу мощность, отдаваемая трансформатором равна нулю. Тем не менее, трансформатор потребляет из сети некоторую мощность, которая тратится на покрытие потерь в магнитопроводе и воздухе. Трансформатор без потерь (без активного сопротивления, рассеяния и потерь в стали) будем называть упрощенным. В этом случае уравнения равновесия будет иметь вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1, \quad (81)$$

откуда следует, что кривая \dot{E}_1 является зеркальным отражением кривой \dot{U}_1 относительно оси абсцисс. На рис. 73 напряжение \dot{U}_1 и \dot{E}_1 изображены в виде синусоид 1 и 2, сдвинутых относительно друг друга на 180° . На рис. 74 напряжения \dot{U}_1 и ЭДС \dot{E}_1 показаны двумя векторами OA и OF, причем $OA = -OF$.

Теперь можно устанавливать зависимость между ЭДС и \dot{E}_1 и основным потоком Φ_m . Если w_1 – число последовательно соединенных витков первичной обмотки, то по закону электромагнитной индукции

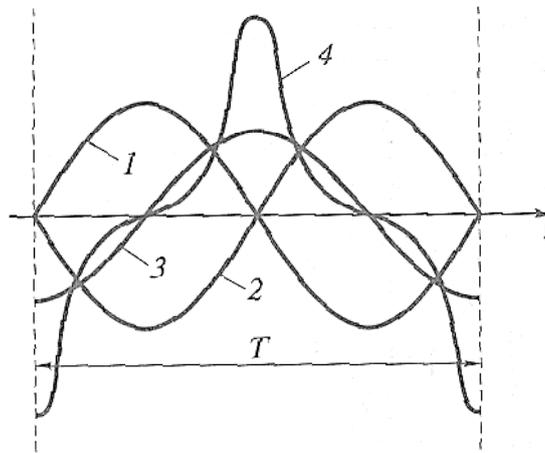


Рис. 73. ЭДС и токи упрощенного однофазного трансформатора

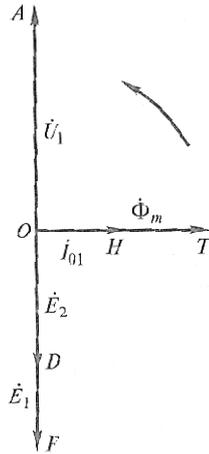


Рис. 74. Векторная диаграмма упрощенного трансформатора

$$e_1 = - w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (82)$$

где e_1 и Φ – мгновенные значения первичной ЭДС и основного потока. Если ЭДС представляет собой синусоиду, то создающий ее поток является косинусоидной функцией времени

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t, \quad (83)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота. Знак минус в формуле (82) показывает, что первичная ЭДС отстает от основного потока по фазе или основной поток опережает первичную ЭДС на угол, определяемый производной, т.е. в данном случае на 90° .

На рис. 73 изображена косинусоида Φ основного потока, а вектор $OT = \Phi_m$ основного потока приведен на рис. 74. Подставив в (82) значение потока Φ , находим

$$e_1 = - w_1 \frac{d(\Phi_m \cos \omega t)}{dt} = \omega w_1 \Phi_m \times \sin \omega t. \quad (84)$$

Наибольшее значение первичное ЭДС принимает при $\sin \omega t = 1$, тогда

$$E_{m1} = \omega w_1 \Phi_m = 2\pi f w_1 \Phi_m. \quad (85)$$

Следовательно, действующее значение первичной ЭДС будет равно

$$E_1 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m. \quad (86)$$

Аналогично, ЭДС во вторичной обмотке будет равно

$$E_2 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} w_2 \Phi_m = 4,44f w_2 \Phi_m. \quad (87)$$

По фазе \dot{E}_2 , также как \dot{E}_1 , отстает от потока Φ_m на 90° . На рис. 80 она показана вектором $OD = \dot{E}_2$.

Говоря о холостом ходе упрощенного трансформатора, необходимо определить также ток холостого хода, который в данном случае играет роль намагничивающего тока и поэтому называется намагничивающим. Амплитуда этого тока и форма кривой зависят от степени насыщения стали. Сталь можно считать не насыщенной, пока сохраняется пропорциональность между индукцией магнитного поля и величиной намагничивающего тока. Следовательно, при синусоидальном токе ЭДС, в общем случае не косинусоидальна и имеет место искажение формы кривой ЭДС при насыщении стали. Поскольку синус нечетная функция, то гармонический ряд будет содержать только нечетные гармоники (1,3,5,... и т.д.). Первая гармоника находится в фазе с магнитным потоком и, следовательно, отстает от напряжения на угол 90° . Поскольку энергия тока распределена по высшим гармоникам, то амплитуда 1 гармоники меньше действительного значения тока, причем разница будет возрастать при насыщении стали.

Из высших гармоник тока сильнее всего выражена третья гармоника. На нее следует обращать особое внимание, поскольку оказывает значительное влияние на работу трехфазных трансформаторов при некоторых способах соединения обмоток.

Поскольку ток I_0 не синусоидален, то на векторной диаграмме (рис. 74) можно показать вектор $OT = I_{01}$ только первой гармоники холостого хода. Высшие гармоники тока I_0 на диаграмме не изобразятся, и, следовательно, диаграмма в отношении тока I_0 является приближенной. В связи с отставанием тока I_0 от напряжения \dot{U}_1 на 90° , мощность холостого хода трансформатора равна нулю при упрощенном варианте его рассмотрения.

17.2. Режим холостого хода реального трансформатора

При рассмотрении реального трансформатора будем исходить из основного потока Φ_m вектор которого OT совместим с положительным направлением оси абсцисс (рис. 75). Тогда $OF = \dot{E}_1$, вектор холостого хода $OH = I_0$ строится по двум направляющим: реактивной $I_{op} = OG$, находящейся в фазе с потоком Φ_m и активной $GH = I_{oa}$, расположенной перпендикулярно первой составляющей. По величине отношения:

$$I_{oa} = \frac{P_0}{U_1},$$

где, P_0 – мощность холостого хода.

Обычно ток $I_{0a} \leq 10\%$ тока I_{op} , поэтому он оказывает незначительное влияние на величину тока холостого хода, однако он сильно влияет на форму тока холостого тока.

Рассмотрим потери на гистерезис, так как в трансформаторной стали они имеют наибольшее значение в ряду потерь холостого хода (около 85% суммы потерь).

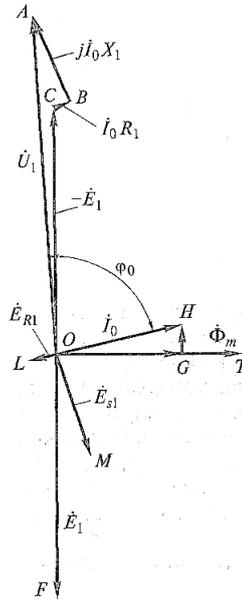


Рис. 75. Векторная диаграмма холостого хода реального трансформатора

Разложив кривую тока холостого хода I_0 , построенную с учетом петли гистерезиса в гармонический ряд, можно убедиться, что поток Φ_m отстает от первой гармоники I_{01} на угол α , который называют углом магнитного запаздывания. Зная ток I_0 можно построить векторы ЭДС активного сопротивления $\dot{E}_{R1} = OL$ и ЭДС рассеяния $\dot{E}_{S1} = OM$. ЭДС \dot{E}_{R1} находится в противофазе с током I_0 , поэтому,

$$\dot{E}_{R1} = -I_0 R_1, \quad (88)$$

где R_1 – активное сопротивление первичной обмотки. ЭДС \dot{E}_{R1} создается первичным магнитным потоком рассеяния $\dot{\Phi}_{s1}$ и отстает от нее на угол 90° .

Поскольку поток $\dot{\Phi}_{s1}$ практически не испытывает влияния гистерезиса и вихревых токов, то он совпадает по фазе с током I_0 . Следовательно,

$$\dot{E}_{S1} = -jI_0 X_1, \quad (89)$$

где X_1 – индуктивное сопротивление первичной обмотки, соответствующее потоку $\dot{\Phi}_{s1}$.

Чтобы получить вектор $OA = \dot{U}_1$ можно геометрически сложить три составляющих напряжения:

$$OC = -\dot{E}_1; CB = -\dot{E}_{R1} = I_0 R_1; BA = -\dot{E}_{S1} = j\dot{I}_0 X_1.$$

Каждая из которых равна соответствующей ЭДС по величине, но обратна по направлению

$$\dot{U}_1 = -(\dot{E}_1 + \dot{E}_{S1} + \dot{E}_{R1}) \quad (90)$$

или

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 X_1 + I_0 R_1 = -\dot{E}_1 + I_0 Z_1, \quad (91)$$

где Z_1 – полное сопротивление первичной обмотки $Z_1 = R_1 + j X_1$.

Соответствующие напряжения $I_0 R_1$ и $j\dot{I}_0 X_1$ называют активным и индуктивным падением напряжения в первичной обмотке трансформатора.

На рис. 75 векторы СВ и ВА изображены в увеличенном масштабе. В действительности падения напряжения при холостом ходе настолько малы, что им обычно пренебрегают. При холостом ходе в трансформаторе имеются следующие потери:

- в меди первичной обмотки P_{m1} ;
- основные потери в стали сердечника P_{co} ;
- добавочные потери холостого хода $P_{доб}$;

Мощность P_0 , потребляемая трансформатором при холостом ходе, тратится целиком на покрытие потерь холостого хода, т.е.

$$P_0 = P_{m1} + P_{co} + P_{доб} . \quad (92)$$

Расчеты конкретных трансформаторов показывают, что потерями $P_{m1} = I_0^2 R_1$ можно пренебречь, так как они обычно меньше 2% потерь холостого хода. Поэтому можно принять:

$$P_0 = P_{co} + P_{доб} = P_c , \quad (93)$$

т.е. – мощность холостого хода тратится только на потери в стали.

Основные потери в стали состоят из потерь на гистерезис и вихревые токи. Сердечники трансформатора собирают из специальной стали (трансформаторной стали) толщиной 0,35 мм или 0,5 мм. Трансформаторная сталь имеет добавку кремния, от которой меняются все свойства трансформаторной стали (механические, магнитные, электрические). В механическом отношении трансформаторная сталь становится хрупкой и твердой, труднее поддается обработке. В магнитном отношении она имеет

большую магнитную проницаемость, чем дипольная сталь, при индукциях меньше 1 Тл и меньшую магнитную проницаемость при более высоких индукциях. В электрическом отношении присадка кремния сильно увеличивает электрическое сопротивление и этим сильно уменьшает потери на вихревые токи, мало влияя на потери в гистерезисе.

Кроме основных потерь P_{co} при холостом ходе трансформатора всегда имеют место добавочные потери, обусловленные изменением структуры стали при механической обработке листов, неравномерном распределении магнитной индукции (в местах стыков и расположения шпилек), влиянием магнитного потока на некоторые металлические части (например, шпилька, бак, соединение обмоток ∇ / ∇), потери в изоляции трансформаторов высокого напряжения. Добавочные потери составляют 10-15% основных потерь.

Из уравнения (91) следует, что при холостом ходе трансформатор можно представить как последовательное соединение двух катушек, из которых одна не имеет сердечника и определяется сопротивлением $Z_1 = R_1 + jX_1$ первичной обмотки трансформатора, а другая имеет сердечник и определяется сопротивлением $Z_m = R_m + jX_m$ (рис. 76). Такая цепь называется схемой замещения трансформатора при холостом ходу.

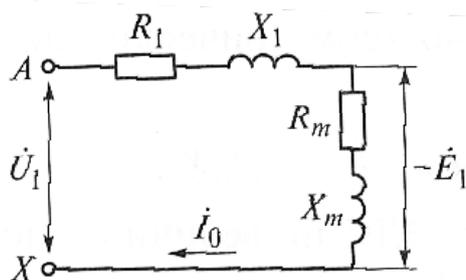


Рис. 76. Схема замещения трансформатора при холостом ходе

На схеме видно, что

$$Z_m = - \frac{E_1}{I_0}, \quad (94)$$

$$R_m = \frac{P_c}{I_0^2}, \quad (95)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (96)$$

Сопротивления Z_m, R_m, X_m называются параметрами намагничивающего контура. Параметры холостого хода определяются из опыта холостого хода. К зажимам одной из обмоток трансформатора – обычно обмотки НН – подводят номинальное напряжение, практически синусоидальное по форме напряжение

при номинальной частоте. Измерив напряжения U_1 , ток I_0 и мощность P_0 , можно определить:

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0}; \quad R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \quad (97)$$

Поскольку сопротивления R_m и X_m по сравнению с сопротивлениями R_1 и X_1 велики, то токами через них можно пренебречь и определить параметры намагничивания по формулам (97).

Лекция 18. Трехфазный трансформатор. Классификация магнитных систем

18.1. Виды магнитных систем трансформаторов

Различают два основных вида магнитных систем трансформаторов – независимые и связанные. Примером трехфазного трансформатора с независимой магнитной системой служит трехфазная трансформаторная группа, или, иначе, групповой трансформатор, представляющий собой три одинаковых однофазных трансформатора, обмотки которых соединены друг с другом определенным образом.

Трансформатор со связанной магнитной системой показан на рис. 77. Это один из самых распространенных типов трехфазных трансформаторов, так называемый трехстержневой трансформатор. Менее распространены пятистержневые трехфазные трансформаторы, состоящие из трех основных стержней, несущих обмотки, и двух добавочных стержней по бокам (не несущих обмотки), служащие для уменьшения размеров ярм.

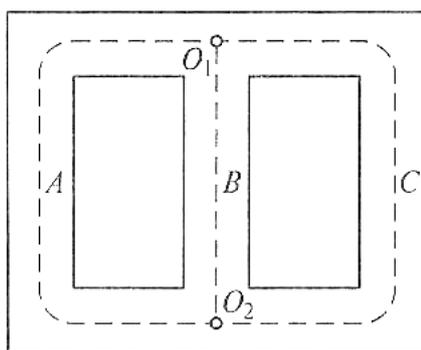


Рис. 77. Магнитная система трехстержневого трансформатора
A, B, C – стержни трансформатора; O₁, O₂ – узлы трансформатора

Если к трехфазному трансформатору подводится симметричное трехфазное напряжение, то можно считать, что магнитные потоки Φ_{mA} , Φ_{mB} , Φ_{mC} образуют симметричную трехлучевую звезду (рис. 78).

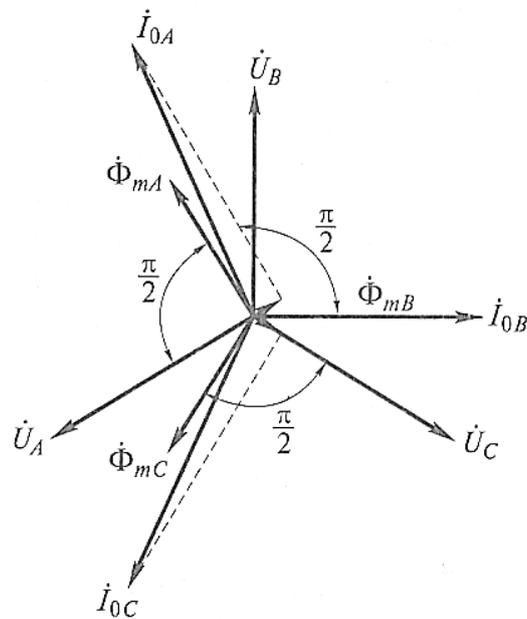


Рис. 78. Диаграмма магнитных потоков и токов трехфазного трансформатора

Поскольку путь, проходимый потоком Φ_{mB} короче, чем пути потоков Φ_{mA} и Φ_{mC} , то МДС отдельных фаз, а стало быть и токи холостого тока в фазах А, В, С не будут равны между собой по величине и, соответственно, будут несимметрично расположены. Ток I_{0B} в фазе В будет меньше, чем токи I_{0A} и I_{0C} в фазах А и С и его угол будет сдвинут относительно векторов в двух других фазах на угол, меньший 120° . Другими словами токи холостого хода трехстержневого трансформатора образуют несимметричную систему токов.

Несимметрия токов холостого хода больше сказывается в трансформаторах небольшой мощности, где ярмо играет относительно большую роль. Здесь $I_{0A} \cong I_{0C} = (1,2 - 1,5)I_{0B}$. В трансформаторах большой мощности несимметрия сглаживается. За ток холостого тока I_0 среднее значение токов I_{0A}, I_{0B}, I_{0C} . В связи с тем, что значение тока I_0 невелико (от 3 до 8% I_N), то даже в трансформаторах большой мощности несимметрия токов холостого хода перестает сказываться уже при очень небольшой нагрузке.

Диаграмма токов, построенная на рис. 78, построена для упрощенного трансформатора, т.е. такого, в котором потери холостого хода равны нулю. В этом случае мощность фазы В равна нулю, так как угол $\varphi_{0B} = 90^\circ$, мощность фазы С положительная, поскольку I_{0C} имеет положительную составляющую на направлении вектора U_{0C} , а мощность фазы А равна мощности фазы С по величине, но обратна по знаку так как I_{0A} имеет отрицательную составляющую на направлении вектора U_A .

Таким образом, при холостом ходе трехстержневого трансформатора фазы С и А обмениваются мощностями, но полная мощность холостого хода равна нулю. Неодинаковое распределение мощности при холостом ходе, также как и

не симметрия токов, не имеет значения, поскольку эта мощность обычно меньше 1% номинальной мощности трансформатора.

18.2. Трехфазный трансформатор. Схемы соединения

Каждая из обмоток трехфазного трансформатора, первичная и вторичная – может быть соединена различными способами:

- звездой;
- треугольником;
- зигзагом.

Первые два способа общеизвестны, третий представляет собой специальный способ соединения. Сущность его состоит в том, что каждую фазную обмотку делят на две, чаще равные части и помещают их на разных стержнях (рис.79). Соединение обеих частей производят так, чтобы их ЭДС геометрически вычиталась: для этого конец одной половины фазной обмотки соединяют с концом второй половины той же обмотки. Если при этом фазные обмотки разделены пополам, то результирующая ЭДС в $\sqrt{3}$ раз больше ЭДС в каждой половине фазной обмотки.

Соединения по схеме звезда, треугольник и зигзаг обозначают, соответственно, Y , Δ , Z . Способ соединения обмотки ВН сверху, а способ соединения обмоток НН – снизу, между этими обозначениями ставится наклонная черта.

Если обмотка имеет выведенную нулевую точку, то к соответствующему символу приписывается цифра «0». Таким образом, обозначение Y_0/Δ следует читать так: обмотка ВН соединена по схеме «звезда» и имеет выделенную нулевую точку, обмотка НН соединена по схеме «треугольник».

Способы соединения Z/Y , Z/Δ и Z/Z не применяются. Таким образом, практически возможным следующие шесть способов соединения обмоток трансформатора: 1) Y/Y или Y/Y_0 ; 2) Y/Δ ; 3) Y/Z или Y/Z_0 ; 4) Δ/Y ; 5) Δ/Δ ; 6) Δ/Z или Δ/Z_0 .

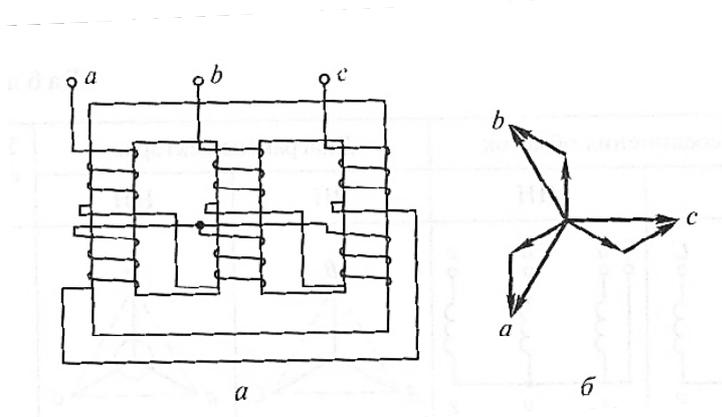


Рис. 79. Соединение обмоток трехфазного трансформатора зигзагом
а – схема соединения; б – векторная диаграмма

Поскольку одна из обмоток может быть «выведена» относительно другой, то-есть, намотана в другую сторону, то всего можно получить 12 различных способов соединения обмоток. В России применяются только три способа соединения обмоток: Y/Y_0 ; Y/Δ ; Y_0/Δ (табл. 9).

Таблица 9

Схемы соединения обмоток трансформатора

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				$Y/Y_0 - 0$
				$Y/\Delta - 11$
				$Y_0/\Delta - 11$

При пользовании этими схемами нужно иметь в виду следующее:

Начала фазных обмоток, присоединяемые к внешним зажимам трансформатора, обозначаются латинскими заглавными буквами А, В, С (в случае обмотки ВН) и а, в, с (в случае обмотки НН). Соответственно, концы фазных обмоток обозначаются буквами Х, Y, Z и х, у, z. Выведенная нулевая точка обозначается нулем.

При построении векторных диаграмм линейные напряжения обмотки ВН (штриховые линии в табл. 9) изображаются во всех случаях равносторонними треугольниками напряжений АВС, причем его вершина А, В, С находится, соответственно, в нижнем левом, в верхнем и нижнем правом углах.

При этом, если бы обмотка ВН была соединена треугольником, то стороны треугольника напряжений АВС определили бы собой в одно и тоже время фазные и линейные напряжения этой обмотки. Если же обмотка ВН была соединена звездой, как это имеет место в схемах, то между линейными и фазными напряжениями существует сдвиг по фазе на угол 30^0 . Угол 30^0 условно принят за единицу и в соответствии с этим разработан способ цифрового обозначения обмоток трансформатора.

18.3. Группы соединений обмоток трансформаторов

Обозначение группы, к которой принадлежит трансформатор, имеет важное значение. Группой определяется угол сдвига между вторичным и первичным напряжением. Этот угол зависит от направления намотки обмоток трансформатора, способа обозначения зажимов обмоток (их маркировки), способа соединения обмоток трехфазных трансформаторов.

Будем считать, что верхняя обмотка трансформатора (рис.80) является первичной обмоткой, а нижняя – вторичной. Предположим, что обе обмотки намотаны в одну сторону и что их верхние зажимы приняты за начало обмоток и обозначены буквой А и а, а нижние зажимы Х и х за концы обмоток.

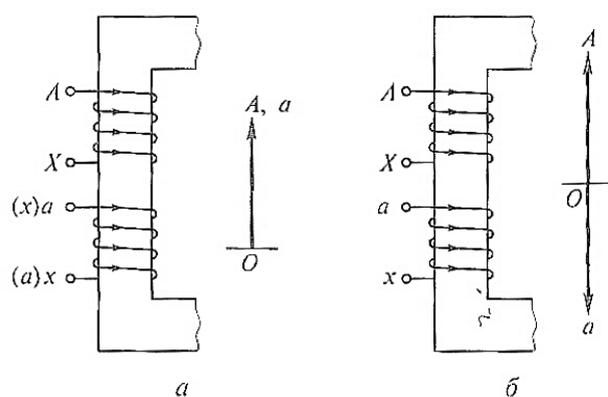


Рис. 80. Угол сдвига ЭДС в зависимости от направления намотки и обозначения зажимов обмоток

Поскольку обе обмотки трансформатора расположены на одном и том же стержне и пронизываются одним и тем же основным потоком, то индуцируемые ЭДС в обмотках имеют в любой момент времени одинаковые (относительно зажимов обмотки) направления, например, от начала А к концу Х в первичной обмотке и от начала а к концу х во вторичной обмотке. Соответственно, этому напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 на зажимах первичной и вторичной обмоток совпадают по фазе и изображаются двумя векторами ОА и Оо, равными по величине и одинаково направленными (рис. 80).

Если первичная и вторичная обмотки намотаны в разные стороны, но сохраняют те же обозначения зажимов, что и на рис. 80 а, то как это показано на рис. 79 б, напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 относительно зажимов первичной и вторичной обмоток направлены в разные стороны, например, от А к Х в первичной обмотке и от х к а во вторичной обмотке. Соответственно этому напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 должны быть изображены векторами ОА и Оа, направленными в разные стороны (рис. 80).

Тот же результат можно получить, если оставить этот же способ намотки обмоток, но изменить маркировку вторичной обмотки, присоединив ее верхний конец к зажиму х, а нижний к зажиму а. Или поменяв местами

обозначения зажимов (соответствующие буквы поставлены в скобках на рис. 80 а). В этом случае первичное напряжение было бы направлено в одну сторону, например, от зажима А к зажиму Х, а вторичное напряжение в другую – от зажима х к зажиму а. Таким образом, принимая вектора ОА первичного напряжения за исходный, можно констатировать, что вектор Оа вторичного напряжения однофазного трансформатора либо совпадает с вектором ОА по фазе, либо находится с ним в противофазе; в первом случае вектор Оа смещен относительно вектора ОА на угол $\alpha = 0$, а во втором – на угол, равный $\alpha = 180$.

Вместо того, чтобы выражать угол сдвига между напряжениями в градусах, удобнее воспользоваться часовым способом обозначения угла. Для этого вектор ОА первичного линейного напряжения принимают за большую часовую стрелку и устанавливают на цифре 12 циферблата, а вектор Оа вторичного линейного напряжения принимают за малую стрелку часов и устанавливают на циферблате соответственно положению вектора Оа относительно вектора ОА.

Если векторы ОА и Оа совпадают по фазе как на рис. 80 а, то малую стрелку часов следует установить, как и большую стрелку на той же цифре 12 (рис.81).

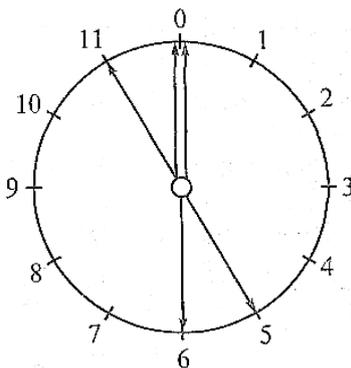


Рис. 81. Часовое обозначение групп соединений

Угол сдвига между векторами равен нулю. Цифры (0) и определяет собой группу (0), к которой в данном случае принадлежит трансформатор. Если векторы ОА и Оа находятся в противофазе, как это показано на рис. 80 б, то малую стрелку часов нужно установить на цифре 6 циферблата, что соответствует углу сдвига $30^0 \times 6 = 180^0$. В этом случае группа трансформатора определяется цифрой 6. Рассмотрим вопрос о группах соединения трехфазных трансформаторов.

Предположим, что обе обмотки трансформатора соединены по схеме звезда, намотаны в одну сторону и имеют одинаковые обозначения зажимов (рис. 80 а). Обмотку ВН будем считать первичной обмоткой, а обмотку НН вторичной. Системы фазных и линейных напряжений предполагаем симметричными. Поскольку вторичная обмотка повторяет собой первичную, то схема соединения треугольник авс вторичных фазных напряжений совпадают соответственно по фазе с треугольником АВС и звездой АХ,ВУ,СZ линейных

и фазных первичных напряжений (рис. 82). Таким образом, угол сдвига вторичного линейного напряжения относительно первичного равен нулю, следовательно, трансформатор принадлежит к группе $Y/Y_0 - 0$ ($\alpha = 0$).

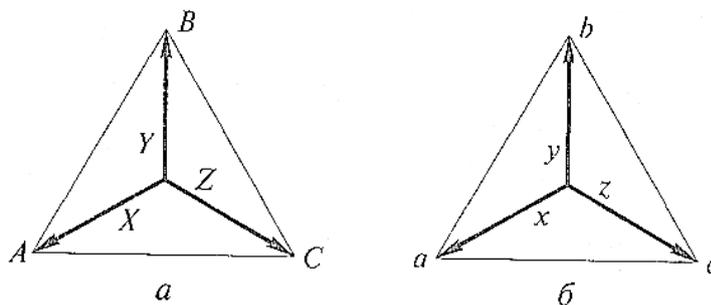


Рис. 82. Фазные (а) и линейные (б) напряжения первичных и вторичных обмоток трансформатора при соединении обмоток $Y/Y_0 - 0$

Если намотаем обмотку НН в обратном направлении относительно обмотки ВН или поменяем местами ее начало и концы, то при соединении обеих обмоток звездой треугольник напряжения авс повернется относительно треугольника ABC на угол 180° , т.е. $30^\circ \times 6$ (рис. 83).

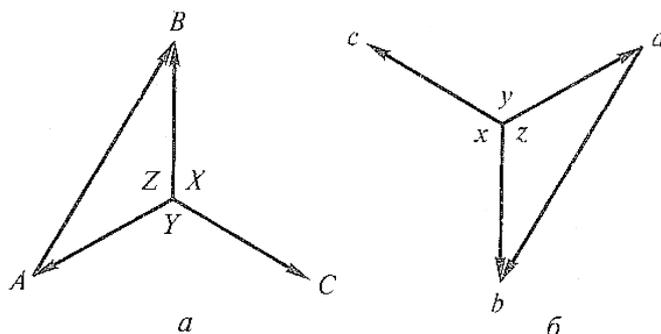


Рис. 83. Фазные (а) и линейные (б) напряжения первичных и вторичных обмоток трансформатора при соединении обмоток $Y/Y_0 - 6$

Рассмотрим схему соединения «звезда–треугольник» (табл.9). Здесь обмотка НН соединена по схеме а-х-с, z-в-у-а. Стороны АВ, ВС и СА треугольника напряжений ABC представляют собой линейные напряжения обмотки ВН, а лучи звезды того же треугольника – фазные напряжения этой обмотки. Если обмотки ВН и НН намотаны в одном направлении и имеют одинаковое количество зажимов, то векторы фазных напряжений обеих обмоток совпадают. Поэтому при построении схемы соединения треугольника авс нужно провести из точки а (рис. 84), находящейся в левом нижнем углу, вектор ах параллельно вектору AX, затем из точки с, которую нужно совместить с точкой х, следует провести вектор сz параллельно вектору CZ и, наконец, из точки в, которую нужно совместить с точкой Z, следует провести вектор ву параллельно ВУ тем самым замыкая треугольник авс.

Сопоставляя положение треугольников ABC и abc (например, сторона AB и ab) (видно, что второй треугольник повернут относительно первого по направлению вращения часовой стрелки на $330^\circ = 30 \times 11$).

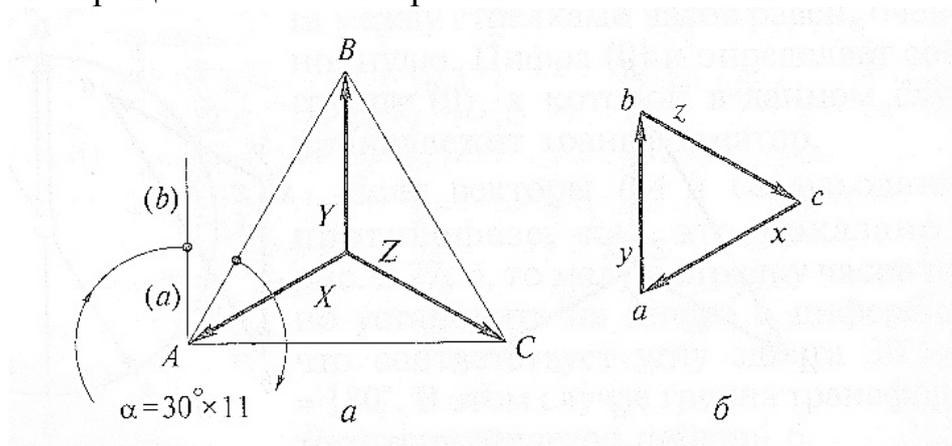


Рис. 84. Фазные (а) и линейные (б) напряжения первичных и вторичных обмоток трансформатора при соединении обмоток $Y/\Delta-11$

Следовательно, данное соединение обмоток относится к группе 2 и пишется в виде $Y/\Delta - 2$.

Если бы обмотка НН была намотана в обратном направлении относительно обмотки ВН или поменялись местами ее начало и концы, треугольник abc повернулся бы относительно треугольника ABC на $150^\circ = 30 \times 5$. Следовательно, такое соединение обмоток дает группу 5 и записывается в виде $Y/\Delta - 5$. Нетрудно показать, что если соединить обмотку НН по схеме $a-x-b-y-c-z-a$, то при одинаковом направлении намотки и одинаковом обозначении зажимов получим группу $Y/\Delta - 1$.

Группы 0,6,11,5 считаются основными. Из них можно получить ряд производных групп, например 4,8,10,2 и т.д. Для этого нужно только переместить зажимы обмоток НН относительно ВН.

Рассмотрим области применения различных групп соединения обмоток трансформаторов. Соединения $Y/Y_0 - 0$ применяются в тех случаях, когда нагрузка носит смешанный осветительно-силовой характер. Двигатели включаются на линейные напряжения 230 или 400 В, а лампы между линейным и нулевым проводом. Поскольку при заданном напряжении ток растет пропорционально мощности, то во избежание затруднений, связанных с устройством обмотки на большие токи, стандарт ограничивает мощности трансформаторов при соединении $Y/Y_0 - 0$ пределами, указанными в табл. 10. Если при этом нагрузка не равномерна, ток в нулевом проводе трансформатора не должен превышать 25% номинального тока обмотки НН.

Применение групп соединений трансформаторов

Схема соединения обмоток и группа трансформаторов	Напряжение обмоток		Мощность трансформатора, кВ·А
	ВН, кВ	НН, В	
$Y/Y_0 - 0$	До 35 включительно	230 400	До 560 включительно До 1 800 включительно
$Y/\Delta - 11$	До 35 включительно	525 Свыше 525	До 1 800 включительно До 5 600 включительно
$Y_0/\Delta - 11$	110 и выше	3 150 и выше	3 200 и выше
	6,3 и выше	3 300 и выше	7 500 и выше

В случае, когда вторичное напряжение выше 400 В, стандартом предусмотрено соединение обмоток по способу $Y/\Delta-11$. Как следует из дальнейшего, соединение одной из обмоток по схеме треугольника оказывает положительное влияние на условия работы трансформатора. Последняя группа трансформаторов, указанных в табл.10 используется главным образом в линиях электропередач. Соединение обмоток этих трансформаторов предусматривает возможность заземления на стороне высшего напряжения.

Лекция 19. Работа трехфазных трансформаторов в режиме холостого хода

Рассмотрим трансформаторную группу, состоящую из трех одинаковых однофазных трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме $Y/Y - 0$ (рис. 85). Основное, что отличает работу такой трансформаторной группы при холостом ходе от работы однофазного трансформатора при холостом ходе, состоит в том, что в ней нет третьих гармонического тока. Действительно, выражения для третьих гармонического тока трехфазной системы записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 I_{03A} &= I_{03m} \sin 3\omega t \\
 I_{03B} &= I_{03m} \sin 3 \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) = I_{03m} \sin 3\omega t \\
 I_{03C} &= I_{03m} \sin 3 \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) = I_{03m} \sin 3\omega t
 \end{aligned} \tag{98}$$

Таким образом, третьи гармонические токов всех фаз совпадают по времени. Это значит, что если, например, в фазе А-Х третья гармоническая тока направлена в данный момент времени от начала фазы А к ее концу Х, то и в фазах В-У, С-З третьи гармонического тока тоже направлены от начала фазных обмоток В и С к их концам У и Z.

При соединении обмоток по схеме звезда – соединяются в общую точку либо концы обмоток Х, У, Z, либо их начала А, В, С.

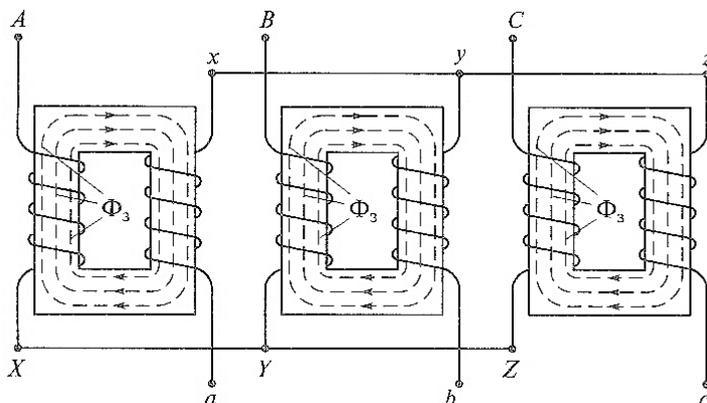


Рис. 85. Трансформаторная группа при соединении обмоток Y/Y – 0

Поэтому в каждом из трех образуемых схемой соединения звезда контуров должны были течь два равных по величине, но встречно направленных тока третьей гармонической, что физически невозможно.

Отсутствие третьей гармонической в кривой тока холостого хода имеет существенные последствия. В этом случае как бы срезается верхушка тока и его кривая приближается к синусоиде (рис. 86); но при этом соответственно срезается и верхушка магнитного потока, т.е., кривая потока превращается из синусоидальной в уплощенную (толстая кривая на рис. 86). Разложив эту кривую в гармонический ряд, можно видеть, что в кривой потока наряду с первой гармонической Φ_1 (тонкие сплошные линии на рис. 86) имеется и третья гармоническая Φ_3 .

Каждая из этих потоков создает ЭДС как в первичной так и во вторичной обмотках трансформатора, причем создаваемые потоками ЭДС отстают от них по фазе на 90° .

На рис. 86 тонкими прерывистыми линиями показаны ЭДС E_{11} и E_{13} , создаваемые потоками Φ_1 и Φ_3 в первичной обмотке. Поскольку магнитные цепи трансформаторов, образующих группу, представляют собой независимые друг от друга и замкнутые на себя контуры, то третьи гармонические потоков идут по сердечникам (штриховые линии на рис. 85). Налагаясь на потоки первой гармонической они могут резко исказить форму кривых фазных напряжений. При этом амплитуды первой и третьей гармонической ЭДС складываются.

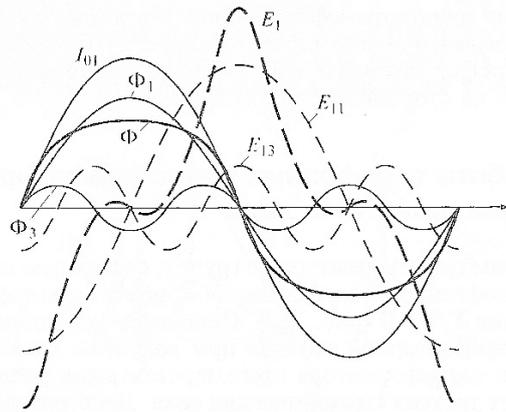


Рис. 86. Ток и поток холостого хода трехфазного группового трансформатора при соединении обмоток $Y/Y-0$

В современных трансформаторах амплитуда третьей гармонической ЭДС нередко составляет 50-50% амплитуды основной волны, что повышает на 50-60% максимальное значение фазного напряжения и на 12-17% его действующее значение.

Такое повышение напряжения нежелательно и во многих случаях опасно. Поэтому в мощных высоковольтных трансформаторах соединение Y/Y не применяют. Несмотря на резкое искажение кривых фазных напряжений линейные вторичные напряжения остаются синусоидальными, так как третьи гармонические ЭДС в линейных напряжениях исчезают по той-же причине, что и третьи гармонических токов.

Иначе обстоит дело в трехстержневом трансформаторе, в котором магнитные цепи представляют связанную систему. Действительно, потоки третьих гармонических во всех трех фазах, так же как и токи, совпадают во времени. Это значит, что потоки третьих гармонических в каждый момент времени равны друг другу по величине и в стержнях трансформатора направлены все в одну и ту же сторону, например вверх, как это показано на рис. 87.

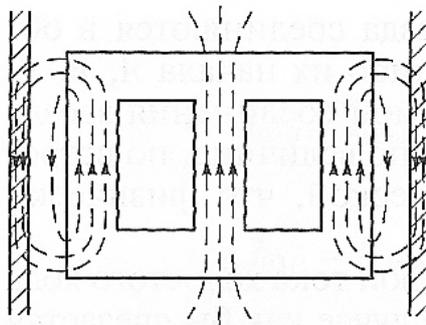


Рис. 87. Третьи гармонические потоки в трехстержневом трансформаторе

Поток третьей гармонической в каком-нибудь одном стержне, например, в первом, не может замыкаться ни через второй, ни через третий стержень, так как в каждом из них он встречает поток третьей гармонической, направленной

ему навстречу. Это приводит к тому, что линии третьей гармонической потока во всех фазах выступают из сердечника и замыкаются от ярма к ярму через воздух. Этот путь имеет большое магнитное сопротивление, поэтому потоки третьих гармонических невелики и при нормальных насыщениях стали кривые фазных напряжений, как правило, остаются синусоидальными.

Потоки третьей гармонической, замыкаясь через воздух, пульсируют с частотой $3f_1$. Они стремятся идти по пути наименьшего сопротивления, используя для этого стенки бака, стяжные болты и т.д. В результате в этих частях возникают вихревые токи, вызывающие местные нагревы и понижающие отдачу трансформатора. При индукции в стержне порядка 1,4 Тл потери в баке составляют около 10 % потерь в сердечнике, при увеличении индукции в стержне, потери в баке растут быстро, и при индукции 1,65 Тл достигают 50-60 % потерь в сердечнике.

При соединении обмоток по схеме треугольник начало каждой следующей обмотки присоединяется к концу предыдущей. В этом случае первичный треугольник трансформатора представляет собой контур, по которому все три тока третьей гармонической текут в одном направлении (рис. 88). Если в токе холостого хода присутствует третья гармоническая, то формы кривых магнитного потока и соответственно первичная и вторичная ЭДС приближаются к синусоиде, что является большим преимуществом соединения обмоток по схеме Δ/Y перед соединением по схеме Y/Y .

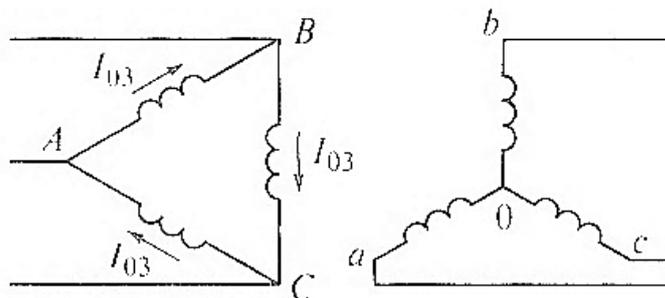


Рис. 88. Третьи гармонические тока холостого хода при соединении обмоток трансформатора по схеме Δ/Y

Рассмотрим случай холостого хода трансформатора при соединении по схеме Y/Δ . То обстоятельство, что здесь, в противоположность соединению Δ/Y , по схеме звезда соединена первичная обмотка, а по схеме треугольника вторичная (рис. 89), не имеет существенного значения.

Действительно, при соединении первичной обмотки по схеме звезда из кривой холостого хода выпадает третья гармоническая и кривая потока принимает уплощенную форму (рис. 90). Третья гармоническая потока Φ_3 индуцирует в каждой из фаз вторичной обмотки третью гармоническую ЭДС E_{23} , отстающую от потока Φ_3 по фазе на 90° .

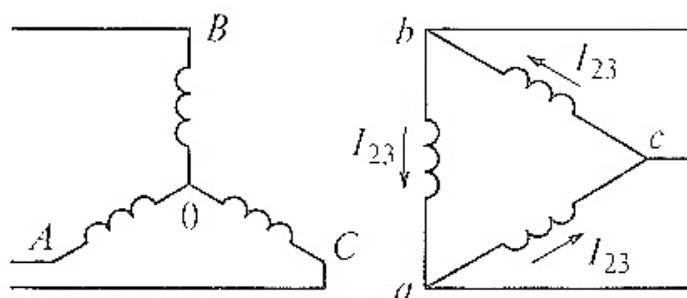


Рис. 89. Третьи гармонические тока холостого хода при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Δ

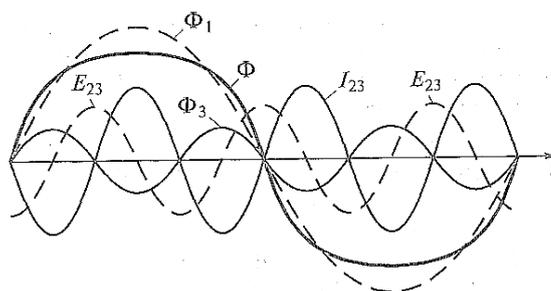


Рис. 90. Магнитный поток и ЭДС при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Δ

Эта ЭДС создает токи I_{23} , замыкающиеся по вторичному треугольнику (рис. 89) и отстающие от ЭДС E_{23} почти на 90° , так как контур вторичной обмотки имеет значительное индуктивное сопротивление. Ток I_{23} находится в противофазе с третьей гармонической потока, т.е. создает поток, компенсирующий поток Φ_3 , вследствие этого кривые результирующего потока и соответственно ЭДС приближаются к синусоиде.

Таким образом, схема соединения Y/Δ так же как и схема соединения Δ/Y , защищает трансформатор от вредных воздействий третьих гармонического потока и ЭДС.

Лекция 20. Режим короткого замыкания трансформаторов

20.1. Виды короткого замыкания

Режимы работы холостого хода и короткого замыкания являются режимами работы трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке или при замкнутой накоротко. Рассмотрев эти режимы проще перейти к изучению режимов работы под нагрузкой. Если при коротком замыкании трансформатора к зажимам его первичной обмотки подводится номинальное или близкое к нему напряжение, то токи короткого замыкания в обмотках

трансформатора достигают значений, превышающих номинальные токи в обмотках в 10-20 раз. Короткое замыкание возможно в эксплуатационных условиях, поэтому его называют эксплуатационным. Оно представляет большую опасность для трансформаторов как вследствие возникающих в нем весьма значительных механических усилий, так и вследствие чрезмерного повышения температуры. Поэтому трансформатор должен обладать повышенной механической прочностью и в его схеме должна быть предусмотрена защита, способная отключить от сети короткозамкнутый трансформатор.

Другим видом короткого замыкания является опыт короткого замыкания, который проводится при пониженном напряжении U_k . такой вид короткого замыкания называется испытательным. Предположим, что напряжение U_k понизим до такой величины $U_{k,ном}$, при котором ток в обмотках трансформатора не превышает номинальные величины. Если выразим это напряжение в процентах, то получим напряжение короткого замыкания

$$U_k = \frac{U_{k,ном}}{U_{ном}} 100. \quad (99)$$

Напряжение короткого замыкания имеет важное значение и всегда указывается на щитке трансформатора. В табл. 11 приведены значения U_k для трехфазных двухобмоточных трансформаторов. Из таблицы следует, что U_k тем больше, чем больше мощность трансформатора.

Таблица 11

Значения U_k для трехфазных двухобмоточных трансформаторов

Мощность, кВ·А	Номинальное ВН, кВ	u_k , %
5 — 5 600	6,3 и 10	5,5
50 — 2 400	35	6,5
3 200 и 4 200	35	7,0
5 600 — 10 000	35 — 38,5	7,5
15 000 — 31 500	35 — 38,5	8,0
3 200 — 31 500	110 — 121	10,5

Рассмотрим физические условия короткого замыкания при работе трансформатора. Рассмотрим испытательный режим работы трансформатора при коротком замыкании. Пусть $U_k \approx U_{k,ном}$ и ток в обмотках I_1 и I_2 не выходят за пределы номинальных токов. Упрощенно считаем, что поток I_1 и I_2 не выходят за пределы номинальных токов. Упрощенно считаем, что токи I_1 и I_2 создают магнитный поток Φ_k , сцепленный с обеими обмотками и замкнутый через магнитопровод. Кроме этого потока обмотка один создает поток рассеяния Φ_{s1} и вторичная обмотка создает поток рассеяния Φ_{s2} , как

изображено на рис. 91. Здесь приведена упрощенная картина магнитных потоков.

Поскольку подводимая к трансформатору напряжение в испытательном режиме составляет всего $5 \div 10\%$ от номинальных значений, то МДС потока $F_{ок}$ можно пренебречь и считать, что действующее по контуру сердечника МДМ F_1 и F_2 находятся во взаимном равновесии. Следовательно,

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = I_1 w_1 + I_2 w_2 = 0, \quad (100)$$

или

$$\dot{F}_1 = I_1 w_1 = -\dot{F}_2 = -I_2 w_2. \quad (101)$$

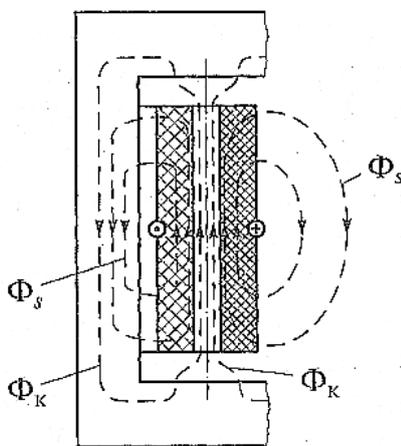


Рис. 91. Потоки рассеяния в трансформаторе с concentрической обмоткой при коротком замыкании

Уравнения (100) и (101) называются уравнениями МДС при коротком замыкании и имеют важное значение для понимания работы трансформатора в режиме короткого замыкания. Если иметь в виду абсолютные значения токов J_1 и J_2 , то

$$J_1 = J_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{J_2}{k}. \quad (102)$$

Рассмотрим ЭДС действующие в первичной и вторичной обмотках. Магнитный поток Φ_k создает ЭДС E_1 и E_2 в первичной и вторичной обмотке, отстоящие него по фазе на угол 90° . Соответственно, токи J_1 и J_2 создают потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} , которые в свою очередь индуцируют ЭДС рассеяния E_{s1} и E_{s2} :

$$\dot{E}_{s1} = -j I_1 X_1, \quad (103)$$

$$\dot{E}_{s2} = -j I_2 X_2, \quad (104)$$

где X_1 и X_2 – индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмотки трансформатора. Кроме индуктивных сопротивлений X_1 и X_2 обмотки обладают активными сопротивлениями R_1 и R_2 , которые создают падение напряжения, уменьшающее ЭДС обмоток:

$$\dot{E}_{R1} = - I_1 R_1, \quad (105)$$

$$\dot{E}_{R2} = - I_2 R_2. \quad (106)$$

Таким образом, в первичной обмотке действует 4 ЭДС: подведенное напряжение U_k и 3 ЭДС, возникающие в процессе работы трансформатора. Взаимосвязь между этими ЭДС вытекает из закона Киргофа, условия равновесия ЭДС

$$\dot{U}_k = - (\dot{E}_1 + \dot{E}_{s1} + \dot{E}_{R1}). \quad (107)$$

Этому уравнению можно придать другой вид

$$\dot{U}_k = - \dot{E}_1 + jI_1 X_1 + I_1 R_1 = - \dot{E}_1 + I_1 (X_1 + jR_1) = - \dot{E}_1 + I_1 Z_1, \quad (108)$$

где $Z_1 = R_1 + jX_1$ – полное сопротивление первичной обмотки.

Составляющие напряжения $I_1 R_1$ и $jI_1 X_1$, первая из которых совпадает по фазе с током I_1 , а вторая опережает его по фазе на 90° , принято называть активным и индуктивным падениями напряжения в первичной обмотке.

Вторичная обмотка замкнута сама на себя, поэтому три действующие в ней ЭДС должны находиться в равновесии

$$0 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{s2} + \dot{E}_{R2}.$$

Это уравнение можно записать в другой форме

$$0 = jI_2 X_2 - I_2 R_2,$$

или

$$\dot{E}_2 = I_2 (R_2 + jX_2) = I_2 Z_2, \quad (109)$$

где $Z_2 = R_2 + jX_2$ – полное сопротивление обмотки 2, $I_2 R_2$ и $jI_2 X_2$ – составляющие ЭДС \dot{E}_2 , называемые активным и индуктивным падениями напряжения во вторичной обмотке. Активное сопротивление совпадает по фазе с током I_2 , а индуктивное опережает его по фазе на угол 90° .

Уравнения (107) – (109) называются уравнениями равновесия ЭДС или

уравнениями ЭДС. Для анализа работы трансформатора используют способ приведения обмоток к одному количеству витков. Обычно вторичную обмотку приводят к первичной. Для этого вторичную обмотку, имеющую w_2 витков, пересчитывают на обмотку, имеющую w_1 витков. Все пересчитанные величины называются приведенными и обозначаются такими же символами, но со штрихом вверху, например, $\acute{E}_2, \acute{I}_2, \acute{R}_2$ и т.д.

$$\acute{E}_2 = \frac{w_1}{w_2} E_2 = k E_2 = E_1. \quad (110)$$

В таком же соотношении пересчитываются другие ЭДС E_{S2} и E_{R2} . Мощность обмотки при проведении приведения не должна измениться, т.е. $\acute{E}_2 \acute{I}_2 = E_2 I_2$, отсюда

$$\acute{I}_2 = \frac{E_1}{\acute{E}_2}, \quad I_2 = \frac{1}{k} I_2. \quad (111)$$

Поскольку мощность вторичной обмотки при приведении не меняется, то потери меди в действительной и приведенной обмотках должны быть равны. Следовательно,

$$\acute{I}_2^2 \acute{R}_2 = I_2^2 R_2,$$

Откуда

$$\acute{R}_2 = \left(\frac{I_2}{\acute{I}_2}\right)^2 R_2 = k^2 R_2. \quad (112)$$

Коэффициент самоиндукции L_2 , следовательно, индуктивное сопротивление зависят от квадрата числа витков. Значит

$$\acute{X}_2 = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 X_2 = k^2 X_2. \quad (113)$$

Трансформатор при коротком замыкании можно заменить цепью, состоящей из последовательно соединенных сопротивлений $Z_1 = R_1 + jX_1$ и $\acute{Z}_2 = \acute{R}_2 + j\acute{X}_2$ к которой приложено напряжение U_k (рис.92).

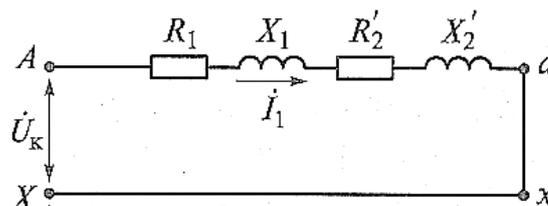


Рис.92. Схема замещения трансформатора при коротком замыкании

Схема замещения позволяет построить диаграмму, называемую треугольником короткого замыкания. Для этого вектор тока I_1 направим в положительном направлении оси ординат (рис. 93) и построим падения напряжения $I_1 Z_1$ и $I_1 Z_2$. Треугольник ОКА называется треугольником короткого замыкания. Его катеты ОВ и ВА представляют собой активную и индуктивную составляющие напряжения U_k и называются активным и индуктивным падением напряжения трансформатора.

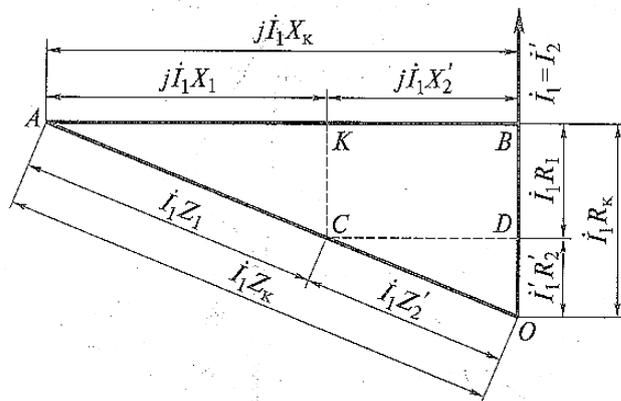


Рис.93. Треугольник короткого замыкания трансформатора

Из треугольника КЗ следует:

$$OB = I_1 R_1 + I_1 R_2 = I_1 (R_1 + R_2) = I_1 R_k,$$

$$BA = I_1 X_1 + I_1 X_2 = I_1 (X_1 + X_2) = I_1 X_k,$$

$$OA = \sqrt{OB^2 + BA^2} = I_1 \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = I_1 Z_k,$$

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{BA}{OB} = \frac{X_k}{R_k}.$$

Сопротивления $R_k = R_1 + R_2$, $X_k = X_1 + X_2$ и $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$ называются параметрами короткого замыкания.

Для практических целей треугольник КЗ строят для тока $I_1 = I_{\text{НОМ}}$ и выражают его стороны в процентном отношении номинального напряжения $U_{\text{НОМ}}$. При этом можно не придавать им характера векторов и не ставить на них стрелок векторов (рис. 94)

$$OB = U_{k.a} = \frac{I_{\text{НОМ}} R_k}{U_{\text{НОМ}}} 100, \quad (114)$$

$$BA = U_{k.p} = \frac{I_{\text{НОМ}} X_k}{U_{\text{НОМ}}} 100, \quad (115)$$

$$OA = U_k = \frac{I_{\text{НОМ}} Z_k}{U_{\text{НОМ}}} 100 = \frac{U_{k.\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} 100. \quad (116)$$

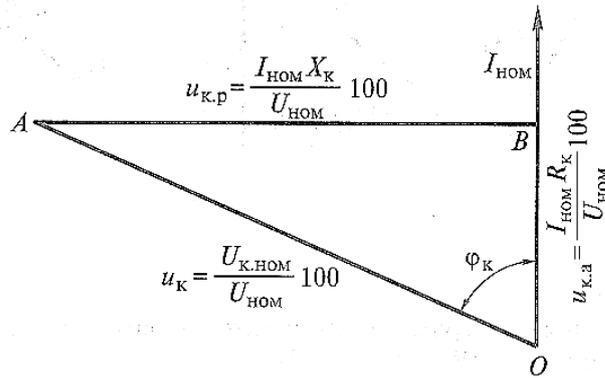


Рис.94. Основной треугольник короткого замыкания

Величины $U_{к.з}$ и $U_{к.р}$ называют составляющими короткого замыкания, а треугольник OBA – основной треугольник короткого замыкания. Поскольку при КЗ основной поток мал, то потерями в стали можно пренебречь и считать, что мощность P_k тратится в основном на покрытие потерь в меди P_{M1} и P_{M2} , т.е.,

$$P_k = P_{M1} + P_{M2} . \quad (117)$$

Потери в меди состоят из основных потерь P_{M0} , зависящих от сопротивления обмоток R_{10} и R_{20} и добавочных потерь, обусловленных неравномерным потоком рассеяния по сечению витка и его длине. Основные потери в меди обмоток составляют главную часть потерь в меди и равны

$$P_{M0} = I_1^2 R_{10} + I_2^2 R_{20} . \quad (118)$$

Обычно добавочные потери включаются в основные путем некоторого увеличения значений сопротивлений R_{10} и R_{20} . Таким образом,

$$P_k = P_{M1} + P_{M2} = I_1^2 R_{10} k_{R1} + I_2^2 R_{20} k_{R2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_1^2 R_k , \quad (119)$$

где k_{R1} и k_{R2} – коэффициенты увеличения сопротивления обмоток вследствие добавочных потерь в меди для первичной и вторичной обмоток. Они зависят от типа обмоток – концентрических или чередующихся, от формы проводника – круглый или прямоугольный, от устройства обмоток и т.д. Обычно значения коэффициентов увеличения сопротивления не превышают 1,05 – 1,15.

Мощность короткого замыкания также как мощность холостого хода имеет важное эксплуатационное значение. О величине мощности КЗ можно судить по отношению $\frac{P_{к.НОМ}}{P_{НОМ}} \times 100$, где $P_{к.НОМ}$ – мощность КЗ при $I_1 = I_{НОМ}$. Соответствующие цифры для трех- и однофазных двухобмоточных трансформаторов приведены ниже:

$P_{\text{НОМ}}, = \text{кВА}$	5–20	30–240	320–5600	7500–40500
$\frac{P_{k.\text{НОМ}}}{P_{k.\text{НОМ}}} \times 100, \%$	3,7–3,0	3–2	2–1	1,0–0,50

Для стандартных трансформаторов соотношение значений мощности холостого хода P_0 и короткого замыкания $P_{k.\text{НОМ}}$ не превышает значения 1,6. Для определения параметров КЗ производят опыт короткого замыкания однофазного трансформатора по схеме, приведенной на рис. 95.

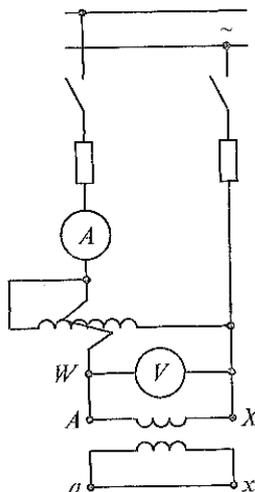


Рис. 95. Схема опыта короткого замыкания

Пусть U_k – напряжение КЗ, I_1 – первичный ток и P_k – мощность короткого замыкания, тогда

$$Z_k = \frac{U_k}{I_1}, \quad (120)$$

$$R_k = \frac{P_k}{I_1^2}, \quad (121)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \quad (122)$$

Зная параметры КЗ, можно определить напряжение U_k и его составляющие $U_{k.a}$ и $U_{k.p}$. Действительно,

$$U_k = \frac{I_{\text{НОМ}} Z_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \times 100, \quad (123)$$

$$U_{k.a} = \frac{I_{\text{НОМ}} R_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \times 100 = \frac{I_{\text{НОМ}}^2 R_k}{U_{\text{НОМ}} I_k} \times 100 = \frac{P_{k.\text{НОМ}}}{10 P_{\text{НОМ}}}, \quad (124)$$

$$U_{k.p} = \frac{I_{\text{НОМ}} X_k}{U_{\text{НОМ}}} \times 100 = \sqrt{U_k^2 - U_{k.a}^2} . \quad (125)$$

20.2. Работа трансформатора под нагрузкой

В реальных трансформаторах при нагрузке кроме основного магнитного потока существуют потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} , не участвующие в передаче энергии. Они создают ЭДС в каждой обмотке

$$E_{s1} = 4.44 f_1 w_1 \Phi_{s1m}; \quad E_{s2} = 4.44 f_2 w_2 \Phi_{s2m}.$$

С учетом ЭДС самоиндукции и падения напряжения в активных сопротивлениях обмоток, имеем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{s1} &= I_1 R_1, \\ \dot{U}_2 + \dot{E}_{s2} &= I_2 R_2 + I_2 Z_{\text{н}}, \\ I_1 &= I_0 + \left(-\frac{I_2 w_2}{w_1}\right), \end{aligned} \quad (126)$$

где $Z_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки, подключенной к трансформатору. Потоки рассеяния пропорциональны МДС обмоток или токам:

$$E_{s1} = I_1 X_1; \quad E_{s2} = I_2 X_2. \quad (127)$$

Величины X_1 и X_2 называют индуктивными сопротивлениями обмоток трансформатора, обусловленными потоками рассеяния. Поскольку векторы ЭДС \dot{E}_{s1} и \dot{E}_{s2} отстают от соответствующих потоков и токов на 90° , то

$$\dot{E}_{s1} = -j I_1 X_1; \quad \dot{E}_{s2} = -j I_2 X_2. \quad (128)$$

С учетом (128) комплексные уравнения трансформатора принимают следующий вид

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = \dot{I}_1 R_1 + j I_1 X_1 = I_1 Z_1, \quad (129)$$

$$\dot{E}_2 = I_2 R_2 + j I_2 X_2 + I_2 Z_{\text{н}} = I_2 Z_2, \quad (130)$$

$$I_1 + \frac{-I_2 w_2}{w_1} = I_0. \quad (131)$$

Рассмотрим схему замещения трансформатора под нагрузкой. Для этого решим систему уравнений (129) – (131) относительно тока I_1

$$I_1 = \frac{\dot{U}_1}{\frac{Z_1 + Z_H (k^2 Z_H + k^2 Z_2)}{Z_H + (k^2 Z_H + k^2 Z_2)}} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{\text{ЭКВ}}} \quad (132)$$

В соответствии с уравнениями (132) трансформатор можно заменить электрической схемой, по которой можно определить токи I_1 и I_2 , мощность P_1 , забираемую из сети, мощность потерь ΔP и т.п. Такую электрическую схему называют схемой замещения трансформатора под нагрузкой (рис. 96). Эквивалентное сопротивление этой схемы равно

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \frac{Z_1 + Z_H (Z'_H + Z'_2)}{Z_H + (Z'_H + Z'_2)} \quad (133)$$

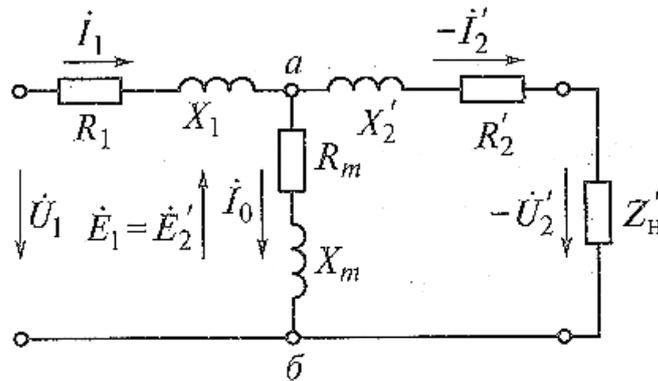


Рис. 96. Схема замещения трансформатора под нагрузкой

Схема замещения представляет собой замещение двух схем – первичной и вторичной обмоток, которые соединены между собой в точках а и б (рис. 96). В цепь первичной обмотки включены сопротивления R_1 и X_1 , в цепь вторичной обмотки – R'_2 и X'_2 . Участок схемы между точками а и б называют намагничивающим контуром, по нему протекает ток I_0 . На вход схемы подают напряжение \dot{U}_1 , к входу ее подключают переменное сопротивление Z'_H , к которому приложено напряжение $-U'_2$.

Сопротивления Z'_2 (или его составляющие $R'_2 = R_2 k^2$ и $X'_2 = X_2 k^2$), а также Z'_H называют соответственно сопротивлениями вторичной обмотки и нагрузки, приведенными к первичной обмотке. Аналогично, приведенным называют значения ЭДС и тока

$$E'_2 = kE_2 = E_1; \quad I'_2 = \frac{I_2}{k} \quad (134)$$

Полная мощность приведенного контура вторичной обмотки в схеме замещения равна мощности реального трансформатора

$$I_2' E_2' = \frac{I_2}{k} k E_2 = I_2 E_2, \quad (135)$$

а мощность электрических потерь в приведенном первичном контуре этой схемы равна мощности потерь во вторичной обмотке реального трансформатора

$$I_2'^2 R_2' = \left(\frac{I_2}{k}\right)^2 R_2 k^2 = I_2^2 R_2. \quad (136)$$

Переход от реального трансформатора к имитирующей его электрической схеме замещения можно представить состоящими из следующих этапов (рис. 97 а,б):

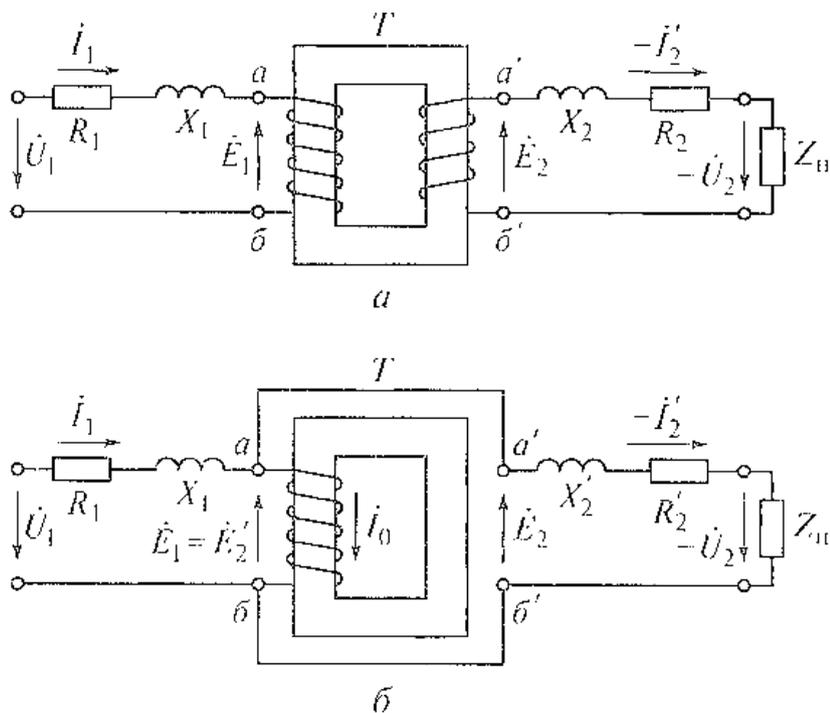


Рис. 97. Приведение вторичной обмотки к первичной

- реальный трансформатор заменяют упрощенным трансформатором Т, в цепь первичной обмотки которого включают сопротивления R_1 и X_1 , а в цепь вторичной обмотки – R_2 и X_2 (рис.97 а);
- параметры вторичной обмотки приводят к параметрам первичной, в результате чего ЭДС обмоток оказывается равными $E_1 = E_2'$;
- соединяют эквипотенциальные точки а и а', б и б' (рис. 97 б);
- включают дополнительный намагничивающий контур, по которому проходит составляющая I_0 первичного тока.

Параметры схемы замещения можно считать постоянными только при небольших изменениях первичного напряжения, т.е. в пределах 10%. Это в первую очередь относится к намагничивающему контуру с сопротивлением $Z_m = R_m + jX_m$, параметры которого определяет ток I_0 . С повышением напряжения происходит насыщение стали магнитопровода, вследствие чего уменьшается величина X_m (намагничивающий ток возрастает). Параметры схемы замещения для любого трансформатора можно определить по данным опытов холостого хода и короткого замыкания:

$$\begin{aligned} Z_1 + Z_m &= \frac{U_0}{I_0}; & R_1 + R_m &= \frac{P_0}{I_0^2}; \\ X_1 + X_m &= \sqrt{(Z_1 - Z_m)^2 - (R_1 - R_m)^2}. \end{aligned} \quad (137)$$

Поскольку ток холостого хода мал по сравнению с номинальным током трансформатора, электрическими потерями $\Delta P_{m1} = I_0^2 R_1$ пренебрегают и считают, что вся мощность, потребляемая трансформатором P_0 , расходуется на компенсацию магнитных потерь в стали магнитопровода. Тогда

$$\Delta P_{m1} = I_0^2 (R_1 + R_m) \approx I_0^2 R_m, \quad (138)$$

откуда
$$R_m = \frac{\Delta P_{m1}}{I_0^2}. \quad (139)$$

Аналогично считают, что $X_1 + X_m \cong X_m$, так как сопротивление X_m определяется основным магнитным потоком трансформатора Φ , а X_1 – потоком рассеяния Φ_{s1} , который во много раз меньше Φ . Поэтому с большой степенью точности полагают, что

$$Z_m = \frac{U_0}{I_0}; \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (140)$$

Измерив напряжение U_0 и U_{20} первичной и вторичной обмоток, определяют коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_0}{U_{20}}. \quad (141)$$

Из опыта короткого замыкания определяют:

$$Z_k = Z_1 + Z_2' = \frac{U_k}{I_{ном}}, \quad (142)$$

$$R_k = R_1 + R_2' = \frac{P_k}{I_{ном}^2}, \quad (143)$$

$$X_k = X_1 + X_2' = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \quad (144)$$

Разделить Z_k на составляющие Z_k и Z_2' довольно трудно. Обычно применяют схему замещения симметричной, полагая $Z_1 = Z_2' = 0,5 Z_k$. Это замещение близко к действительности.

20.3. Внешние характеристики трансформаторов

Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = U_{1н} = \text{const}$, $R = R_n = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$. Ток холостого хода в силовых трансформаторах большой и средней мощности сравнительно мал. Поэтому при расчетах используют упрощенную схему замещения (рис. 98) без намагничивающего контура. В этой схеме сопротивления R_1 и R_2' первичной и вторичной обмотки соединены последовательно и образуют активное сопротивление КЗ $R_k = R_1 + R_2'$. Индуктивные сопротивления $X_1 + X_2''$ образуют индуктивное сопротивление КЗ $X_k = X_1 + X_2''$.

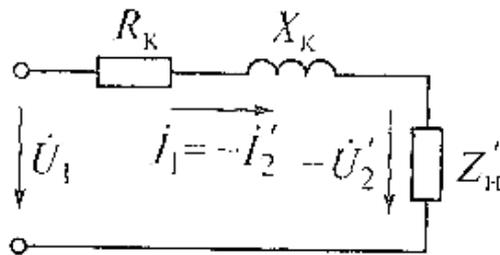


Рис. 98. Упрощенная схема замещения трансформатора

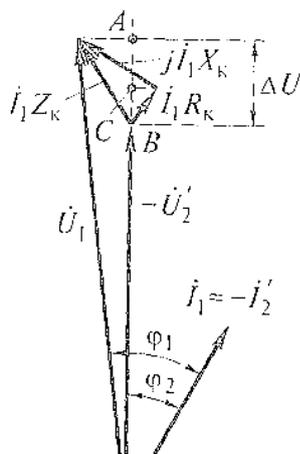


Рис. 99. Векторная диаграмма при активной нагрузке

Для упрощенной схемы замещения можно построить векторную диаграмму (рис. 99). В этой диаграмме вектор $I_1 R_k$ представляет собой результирующее

активное падение напряжения в приведенном трансформаторе, вектор $j\dot{I}_1 X_k$ – результирующее реактивное падение напряжения, а вектор $I_1 Z_k$ – результирующее полное падение напряжения. Если известно значение U_k и его составляющих $U_{k.a}$, $U_{k.p}$, то полное падение напряжения в трансформаторе и его активную и реактивную составляющие находят по формуле:

$$I_1 Z_k = \frac{\beta U_k U_{\text{НОМ}}}{100}; \quad I_1 R_k = \frac{\beta U_{k.a} U_{\text{НОМ}}}{100}; \quad I_1 X_k = \frac{\beta U_{k.p} U_{\text{НОМ}}}{100}, \quad (145)$$

где $\beta = \frac{I_2}{I_{2 \text{ НОМ}}} = \frac{I_1}{I_{1 \text{ НОМ}}}$ – коэффициент нагрузки.

Векторная диаграмма (рис. 99) позволяет определить изменения падения напряжения трансформатора в зависимости от нагрузки. Обычно ее рассчитывают как отношение алгебраической разности значений вторичного напряжения при холостом ходе U_{20} и нагрузке U_2 к напряжению U_{20} при холостом ходе и выражают в процентах:

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100 = \frac{U'_{20} - U'_2}{U'_{20}} \times 100. \quad (146)$$

Поскольку при холостом ходе отсутствует падение напряжения в обмотках трансформатора, то $U'_{20} = U_1$ при номинальном значении $U_1 = U_{1 \text{ НОМ}}$

$$\Delta U = \frac{U_{1 \text{ НОМ}} - U'_2}{U_{1 \text{ НОМ}}} \times 100. \quad (147)$$

Из диаграммы следует, что вследствие малости угла $\varphi_1 - \varphi_2$ за модуль вектора \dot{U}'_1 приближенно можно принять его проекцию на направление вектора $-\dot{U}'_2$, т.е. отрезок ОА. Тогда $\Delta U = U_1 - U'_2 = \text{ОА} - \text{ОВ} = \text{ВА}$. Спроецировав векторы $\dot{I}_1 R_k$ и $j\dot{I}_1 X_k$ на направление вектора U'_2 получим

$$\Delta U = \text{ВА} = \text{ВС} + \text{СА} = I_1 R_k \cos \varphi_2 + I_1 X_k \sin \varphi_2.$$

Относительное изменение напряжения, %

$$\Delta U = \frac{I_1 R_k \cos \varphi_2 + I_1 X_k \sin \varphi_2}{U_{\text{НОМ}}} \times 100. \quad (148)$$

При номинальной нагрузке (148) принимает вид:

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \frac{I_{\text{НОМ}} R_k \cos \varphi_2 + I_{\text{НОМ}} X_k \sin \varphi_2}{U_{\text{НОМ}}} \times 100, \quad (149)$$

или $\Delta U_{\text{НОМ}} = U_{k.a} \cos \varphi_2 + U_{k.p} \sin \varphi_2$.

Из формулы (149) следует, что изменение напряжения пропорционально току нагрузки $I'_2 \cong I_1$ и зависит от угла φ_2 . Поэтому, используя понятие коэффициента нагрузки β

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2 \text{ НОМ}}} = \frac{I_1}{I_{1 \text{ НОМ}}}, \text{ получим,}$$

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \beta \Delta U_{\text{НОМ}} = \beta (U_{k.a} \cos \varphi_2 + U_{k.p} \sin \varphi_2). \quad (150)$$

Более точная формула для силовых трансформаторов имеет вид:

$$\Delta U = \beta (U_{k.a} \cos \varphi_2 + U_{k.p} \sin \varphi_2) + \beta^2 \frac{(U_{k.p} \cos \varphi_2 - U_{k.a} \sin \varphi_2)^2}{200}. \quad (151)$$

Для построения внешних характеристик используют формулу

$$U'_2 = U_{1 \text{ НОМ}} \frac{1 - \Delta U}{100}. \quad (153)$$

В пределах изменения β от 0 до 1 внешние характеристики изменяются линейно (рис. 100 а).

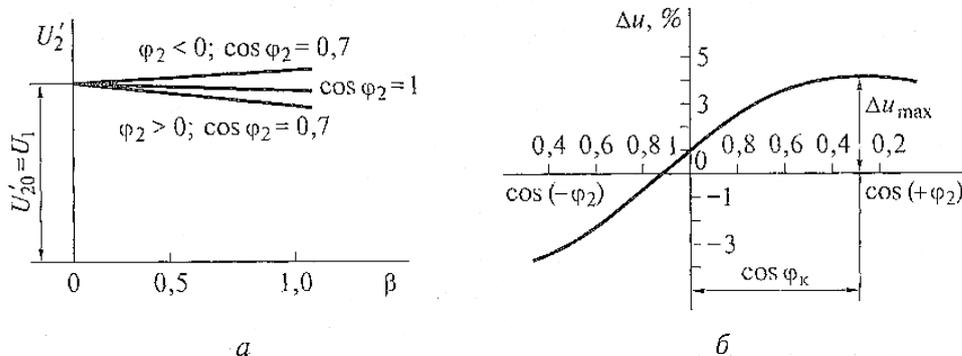


Рис. 100. Внешние характеристики трансформаторов (а) и график изменения ΔU (б)

Напряжение короткого замыкания U_k , его составляющие $U_{k.a}$ и $U_{k.p}$ зависят в определенной степени от номинальной мощности трансформатора. В трансформаторах средней и большой мощности реактивная составляющая напряжения КЗ значительно больше чем активная. Поэтому в таких трансформаторах реактивная нагрузка вызывает большее изменение напряжения U'_2 чем активная, т.е., чем меньше $\cos \varphi_2$, тем ниже проходит внешняя характеристика и сильнее изменяется напряжение U'_2 . При активно – индуктивной нагрузке и некоторых углах φ_2 оно может стать больше U_1 (в

формуле 151 при $\varphi_2 < 0$ члены, содержащие $\sin \varphi_2$ становятся отрицательными). При заданном значении β относительное изменение напряжения ΔU зависит от значения угла φ_2 .

При активной нагрузке изменение напряжения ΔU невелико; при активной – индуктивной нагрузке оно возрастает и достигает максимального значения, когда $\varphi_2 = \varphi_k$, т.е. при активно – емкостной нагрузке эта величина может стать отрицательной (рис. 100 б).

Характер изменения вторичного напряжения в трансформаторах (при $X_k > R_k$), при различных значениях угла φ_2 показан на рис. 101.

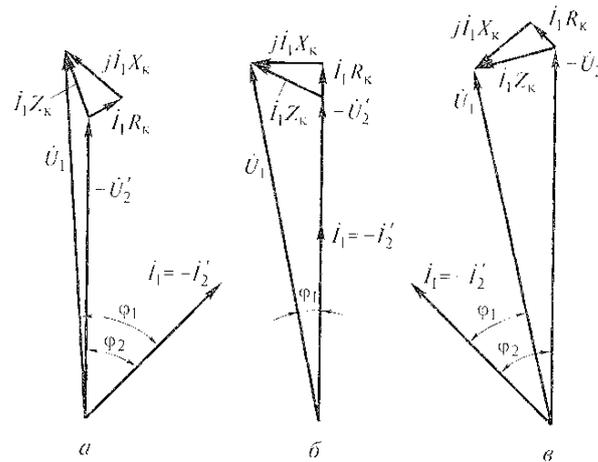


Рис. 101. Векторные диаграммы трансформатора, показывающие изменение вторичного напряжения от значений угла φ_2 : а – $\varphi_2 > 0$; б – $\varphi_2 = 0$; в – $\varphi_2 < 0$

При $\varphi_2 > 0$ (рис. 101а) увеличение нагрузки приводит к довольно быстрому возрастанию алгебраической разности $\Delta U = U_2 - U_1$. При $\varphi_2 = 0$ (рис. 101б) величина ΔU возрастает с увеличением нагрузки в значительно меньшей степени. При $\varphi_2 < 0$ (рис. 101 в), т.е. когда ток I_2' опережает напряжение U_2' (активно – емкостная нагрузка), величина ΔU может изменить свой знак.

Наличие индуктивных падений напряжений, вызываемых потоками рассеяния, ведет к нежелательному изменению напряжения трансформатора под нагрузкой. Для уменьшения потоков рассеяния первичные и вторичные обмотки выполняют на одних и тех же стержнях, приближая одну обмотку к другой. Минимальное расстояние между обмотками ограничивается электрической прочностью изоляционного промежутка.

20.4. Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициентом полезного действия трансформатора называют отношение отдаваемой мощности P_2 к мощности P_1 , поступающей в первичную обмотку

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1}$$

или,
$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}, \quad (154)$$

где ΔP – суммарные потери в трансформаторе. Высокие значения КПД не позволяют вычислить его непосредственно, поэтому вычисляют его косвенно.

При передаче энергии возникают потери в активных сопротивлениях первичной и вторичной обмотки ΔP_{M1} , ΔP_{M2} , а также потери в стали магнитопровода ΔP_C

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{M1} - \Delta P_{M2} - \Delta P. \quad (155)$$

Формулу 155 можно переписать в виде

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{M1} + \Delta P_{M2} + \Delta P_C} = 1 - \frac{\Delta P_{M1} + \Delta P_{M2} + \Delta P_C}{P_2 + \Delta P_{M1} + \Delta P_{M2} + \Delta P_C}. \quad (156)$$

Величину $P_{эм} = P_1 - \Delta P_{M1} - \Delta P_C$, поступающую во вторичную обмотку, называют внутренней электромагнитной мощностью трансформатора. Согласно стандарту потери мощности в трансформаторе определяют по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. При данных опытах трансформатор не отдает мощности. Следовательно, вся мощность, поступившая в первичную обмотку, расходуется на компенсацию потерь.

При опыте холостого хода ток I_0 невелик и электрическими потерями можно пренебречь. Магнитный поток практически равен потоку при нагрузке так как его величина определяется приложенным направлением. Магнитные потери в стали пропорциональны квадрату значения магнитного потока. Следовательно, с большой степенью точности можно считать, что магнитные потери в стали равны мощности, потребляемой трансформатором при холостом ходу и номинальном первичном напряжении

$$\Delta P_C = P_0. \quad (157)$$

Для определения суммарных электрических потерь полагают, что $I'_2 = I_2$. При этом

$$\Delta P_M = \Delta P_{M1} + \Delta P_{M2} = I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2 \approx I_2'^2 (R_1 + R_2) \approx I_2'^2 R_k,$$

или

$$\Delta P_M \approx \beta^2 I_{2\text{НОМ}}'^2 R_k \approx \beta^2 \Delta P_{M\text{НОМ}}, \quad (158)$$

где $\Delta P_{M\text{НОМ}}$ – суммарные электрические потери при номинальной нагрузке.

За расчетную температуру обмоток – условную температуру, к которой должны быть отнесены потери мощности ΔP_M принимают для масляных и сухих трансформаторов с изоляцией классов нагреваемости А, Е, В +75° С, для трансформаторов с изоляцией классов нагреваемости F, Н + 115° С. Величину $\Delta P_{M \text{ ном}} \approx I_2'^2 R_k \approx I_{1 \text{ ном}}^2 R_k$ можно принимать с достаточной степенью точности равной мощности P_k , потребляемой трансформатором при опыте КЗ при номинальной нагрузке. При этом магнитные потери в стали ΔP_c малы по сравнению с потерями ΔP_M в связи с сильным уменьшением напряжения U_1 , а следовательно, и магнитного потока трансформатора и ими можно пренебречь. Таким образом,

$$\Delta P_M = \beta^2 \Delta P_K . \quad (159)$$

Полные потери равны

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 \Delta P_K . \quad (160)$$

Подставляя значения потерь в формулу (156) и учитывая, что $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$, находим

$$\eta = 1 - \frac{1 - (\beta^2 \Delta P_K + P_0)}{\beta S_{\text{ном}} \cos \beta_2 + \beta^2 P_K + P_0} , \quad (161)$$

где $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность. Формула (161) рекомендуется стандартом для определения КПД трансформатора. Значения P_0 и P_k для силовых трансформаторов приведены в соответствующих стандартах и каталогах. По формуле (161) можно построить зависимость КПД от нагрузки. При $\beta = 0$ полезная мощность и КПД равны нулю. С увеличением полезной мощности КПД возрастет, так как потери в стали имеют постоянное значение. При некотором значении $\beta_{\text{опт}}$ кривая КПД достигает максимума, после чего начинает уменьшаться с увеличением нагрузки. Причиной этого является сильные электрические потери в обмотках, возрастающих пропорционально квадрату тока, т.е. пропорционально β^2 , в то время как полезная мощность P_2 возрастает пропорционально β .

Максимальное значение КПД в трансформаторах достигает 0,98–0,99. Оптимальный коэффициент нагрузки $\beta_{\text{опт}}$, при котором КПД = max, можно определить, взяв производную $\frac{d\eta}{d\beta}$, при этом,

$$\beta^2_{\text{опт}} P_k = P_0 \text{ или } \Delta P_M = \Delta P_c . \quad (162)$$

Следовательно, КПД имеет максимальное значение при такой нагрузке, при которой электрические потери в обмотках равны магнитным потерям. Это условие (равенство постоянных и переменных потерь) приближенно

справедливо и для других типов электрических машин. Для серийных трансформаторов

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} \approx \sqrt{0,2 - 0,25} = 0,45-0,5. \quad (163)$$

Эти значения $\beta_{\text{опт}}$ получены при проектировании трансформаторов на максимум приведенных затрат. Наиболее вероятна нагрузка трансформаторов $\beta = 0,5-0,7$. В трансформаторах малой мощности КПД значительно меньше и составляет 0,6–0,8.

20.5. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов

Согласно стандарту трехфазная система считается симметричной, если при разложении ее на вектора прямой и обратной последовательности их разность I_1 и I_2 не превышает 5%. Короткое замыкание представляет собой предельный случай несимметричной нагрузки. Различают много случаев несимметричных коротких замыканий.

Рассмотрим однофазные в системе $Y/Y - 0$, $\Delta/Y - 11$, двухфазное КЗ в системе $Y/\Delta - 11$. При анализе этих режимов будем пользоваться методом симметричных составляющих. Любую несимметричную систему токов можно разложить на три системы токов:

- прямой последовательности $\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{B1}, \dot{I}_{C1}$;
- обратной последовательности $\dot{I}_{A2}, \dot{I}_{B2}, \dot{I}_{C2}$;
- нулевой последовательности $\dot{I}_{A0}, \dot{I}_{B0}, \dot{I}_{C0}$.

Токи каждой последовательности определяются для какой-нибудь фазы, например, фазы А, по формулам:

$$I_{A1} = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \alpha \dot{I}_B + \alpha^2 \dot{I}_C), \quad (164)$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \alpha^2 \dot{I}_B + \alpha \dot{I}_C), \quad (165)$$

$$I_{A3} = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \alpha \dot{I}_B + \alpha^2 \dot{I}_C), \quad (166)$$

где α – оператор поворота на угол $\frac{2}{3} \pi$ (120°), равный $\alpha = 2e^{j\frac{2}{3}\pi}$.

$$(167)$$

Во всех случаях КЗ будем пренебрегать током холостого хода и считать, что система первичных линейных напряжений симметрична и остается симметричной независимо от режима короткого замыкания и вторичная обмотка приведена к первичной. Рассмотрим случай однофазного короткого

замыкания в системе Y/Y_0 . Пусть фаза а–х замкнута накоротко, а фаза в–у и с–z разомкнуты. Соответственно, $I_A = I_k$, $I_B = 0$, $I_C = 0$. Для упрощения анализа будем считать $R_k = 0$ и, следовательно, ток I_A отстает от \dot{E}_a на 90° . Пользуясь (2.85)–(2.87), разложим систему несимметричных вторичных токов на три составляющие: прямой последовательности $\dot{I}_{a1} - \dot{I}_{b1} - \dot{I}_{c1}$, обратной $\dot{I}_{a2} - \dot{I}_{b2} - \dot{I}_{c2}$ и нулевой $\dot{I}_{a0} - \dot{I}_{b0} - \dot{I}_{c0}$. По величине каждый из токов равен $\frac{1}{3} I_k$. Система токов прямой и обратной последовательности вторичной обмотки соответствует таким же системам токов в первичной обмотке. При этом токи первичной и вторичной обмоток находятся в противофазе, а по величине равны, так как приведены. Основная разница в том, что в первичной обмотке отсутствуют токи нулевой последовательности. Складывая геометрические токи прямой и обратной последовательности в фазах первичной обмотки, получим

$$I_a = I_{A1} + I_{A2} = -\frac{2}{3} I_k; I_B = I_{B1} + I_{B2} = \frac{1}{3} I_k; I_C = I_{C1} + I_{C2} = \frac{1}{3} I_k. \quad (168)$$

Таким образом, однофазное КЗ можно представить как результат наложения трех режимов, а именно: двух симметричных режимов трехфазного КЗ с прямым и обратным следованием фаз и третьего режима – однофазного тока только во вторичной обмотке.

Токи прямой и обратной последовательности образуют системы трехфазных токов с параметрами короткого замыкания Z_k , R_k , X_k . Токи нулевой последовательности I_{k0} и соответствующие им сопротивления Z_{k0} , R_{k0} , X_{k0} можно представить так, чтобы фазные вторичные обмотки трансформатора соединяются последовательно и подключаются к источнику однофазного тока номинальной частоты.

Протекая по обмоткам, ток I_{k0} создает поток Φ_0 , величина и действие которого зависят от устройства магнитной системы трансформатора. Анализ токов показывает, что соединение Y/Y_0-0 никогда не применяется из-за сильного искажения фазных напряжений. Наоборот, схема $Y/\Delta-11$ надежна в работе.

20.6. Параллельная работа трансформаторов

На понижающих подстанциях часто вместо одного трансформатора устанавливают несколько, имеющих ту или иную установленную мощность. Дробление всегда приводит к излишнему расходу материалов и увеличению суммарных потерь. Однако это оправдано в том случае, если установленной мощности подстанция достигает за несколько лет. При суточных колебаниях нагрузки наличие нескольких трансформаторов позволяет отключить часть трансформаторов, уменьшая тем самым потери.

Основная проблема параллельной работы заключается в равномерном распределении нагрузки между трансформаторами. Если трансформаторы

одинаковы по конструкции, эта проблема решается автоматически. На практике трансформаторы чаще бывают разные и имеющие неодинаковые номинальные мощности.

Для включения трансформаторов на параллельную работу необходимо, чтобы при холостом ходе в их обмотках не возникали уравнивающие токи и нагрузка распределялась в соответствии с их номинальной мощностью. Для этого необходимо удовлетворить ряду условий.

При неравенстве ЭДС E_{201} и E_{2011} двух параллельно работающих трансформаторов возникает уравнивающий ток. Этот ток вызывает циркуляцию мощности от трансформатора к трансформатору, а следовательно, неравномерную нагрузку трансформаторов. Уравнивающий ток можно определить по формуле

$$I_{ур} = \frac{E_{201} - E_{2011}}{Z_{k1} + Z_{k1}} \quad (169)$$

Из формулы (169) следует первое условие параллельной работы трансформаторов $E_{201} - E_{2011} = 0$. Трансформаторы должны иметь равные коэффициенты трансформации. На практике допускается различие в коэффициентах трансформации не более 0,5%, а для трансформаторов с $k > 3$ – не более 1%.

Вторым условием является совпадение по фазе ЭДС E_{201} и E_{2011} с тем чтобы их векторная разность $\Delta E = E_{201} - E_{2011} = 0$. Для этого трансформаторы должны иметь одну группу соединений. Так даже если трансформаторы принадлежат к близким группам соединений (например, 11 и 0), то сдвиг по фазе составит

$$|\Delta E| = |E_{201} - E_{2011}| = 2E_{20} \sin 15^\circ = 0,52E_{20} .$$

При этом уравнивающий ток будет в несколько раз больше номинального. Токи распределяются между трансформаторами обратно пропорционально сопротивлениям КЗ:

$$I_1/I_{11}/I_{111} = 1/Z_{k1}/1/Z_{k2}/1/Z_{k3} . \quad (170)$$

Уравнение (170) можно привести к виду:

$$I_1/I_{11}/I_{111} = (I_{ном}/I_{ном1}Z_{k1}) / (I_{ном1}/I_{ном2}Z_{k11}) / (I_{ном111}/I_{ном111}Z_{k2}) . \quad (171)$$

Умножая левую часть (171) на $U_2 \cos \varphi_2$, а правую – на $\frac{U_{ном}^2}{100}$ получим:

$$P_1/P_2/P_3 = (S_{ном1}/U_{k1}) / (S_{ном2}/U_{k2}) / (S_{ном3}/U_{k3}) . \quad (172)$$

Для равномерного распределения нагрузки между трансформаторами, они должны иметь одинаковые напряжения КЗ. Практически, нагрузка распределяется равномерно при отклонении U_k от среднего арифметического не более чем на 10%. Если U_k трансформаторов не равны, то перегружается трансформатор с меньшим значением U_k или с меньшим значением Z_k . При неравенстве активных $U_{k.a}$ и реактивных $U_{k.p}$ составляющих, между токами существует сдвиг по фазе. Суммарный ток, отдаваемый нагрузке, будет меньше их алгебраической суммы. В этом случае, мощность трансформаторов используется не полностью. У трансформаторов различной мощности значения $U_{k.a}$ и $U_{k.p}$ будут различны. Поэтому не рекомендуется включать на параллельную работу трансформаторы с отношением номинальных мощностей более трех.

Лекция 21. Автотрансформаторы

Автотрансформатор это трансформатор, в котором часть обмотки принадлежит одновременно первичной и вторичной обмотке. Принципиальная схема включения приведена на рис.102. Рассмотрим понижающий трансформатор. Первичное напряжение $\dot{U}_1 = \dot{U}_{AX}$ подводится к зажимам первичной обмотки AX, вторичной обмоткой служит часть первичной обмотки между зажимами а и X.

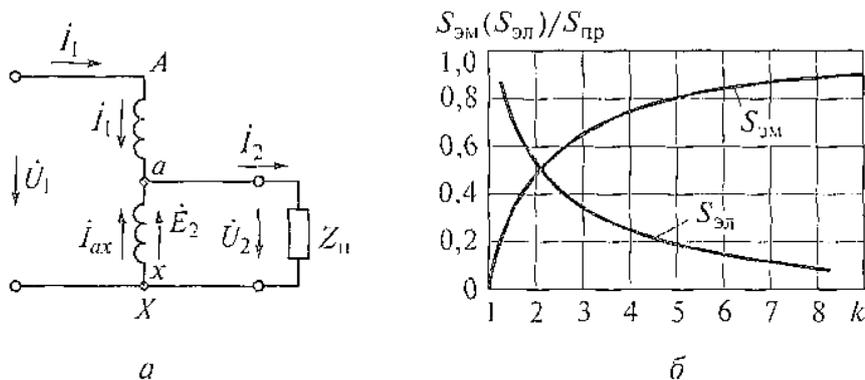


Рис. 102. Схема включения понижающего трансформатора (а) и зависимость значений мощности $S_{эм}$ и $S_{эл}$ от значения коэффициента трансформации k (б)

Режим холостого хода автотрансформатора ($I_2 = 0$) ничем не отличается от режима трансформатора. Поскольку подводимое напряжение \dot{U}_{AX} равномерно распределяется между всеми витками первичной обмотки, то во вторичной обмотке напряжение будет равно:

$$U_{AX} = \frac{U_{AX} \omega_{aX}}{\omega_{AX}} = \frac{U_{AX} \omega_{AX}}{\omega_{aX}} = \frac{U_{AX}}{k_A}, \quad (173)$$

где k_A – коэффициент трансформации автотрансформатора.

Если подвести напряжение к зажимам аХ, то получим превышающий трансформатор, в котором $\dot{U}_{AX} = k_A \dot{U}_{aX}$. При коротком замыкании автотрансформатора из первичной сети течет ток I_1 , а в проводе, замыкающем зажимы ах – ток I_2 . Если бы обмотки АХ и ах были отделены друг от друга как в обыкновенном трансформаторе, то пренебрегая намагничивающим током, имели бы

$$\dot{I}_1 \omega_{AX} + \dot{I}_2 \omega_{ax} = 0 \quad \text{или} \quad I_1 + \frac{1}{k_A} I_2 = 0. \quad (174)$$

В автотрансформаторе ток I_1 протекает только по части обмотки, тока I_2 нет, по общей части обмотки течет ток, представляющий геометрическую сумму токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 . Следовательно,

$$\dot{I}_{ax} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = -I_1(k_A - 1) = I_2 \left(1 - \frac{1}{k_A}\right). \quad (175)$$

Сравним параметры короткого замыкания автотрансформатора и трансформатора. Первое будем обозначать индексом А, а второе индексом t. При сравнении активных сопротивлений будем исходить из потерь в меди обычного автотрансформатора и трансформатора. В обычном трансформаторе потери меди $I_1^2 R_1 t + I_2^2 R_1 t$. В автотрансформаторе ток \dot{I}_1 течет только на участке с сопротивлением

$$R_{AX} = \frac{R_1 t \omega_{Aa}}{\omega_{AX}} = \frac{R_1 (\omega_{AX} - \omega_{ax})}{\omega_{AX}} = R_1 t \left(1 - \frac{1}{k_A}\right). \quad (176)$$

Следовательно,

$$P_{MAa} = I_1^2 R_{Aa} = I_1^2 R_1 t \left(1 - \frac{1}{k_A}\right). \quad (178)$$

Обмотка между зажимами играет роль вторичной обмотки. Но по ней течет ток I_{ax} , а не ток I_2 , поэтому площадь ее сечения изменяется пропорционально отношению $\frac{I_{ax}}{I_2}$, а активное сопротивление обратно пропорционально этому отношению. Следовательно,

$$P_{MAX} = I_{ax}^2 R_{ax} = I_2^2 \left(1 - \frac{1}{k_A}\right)^2 R_{2t} \left(1 - \frac{1}{k_A}\right) = R_2^2 R_{2t} \left(1 - \frac{1}{k_A}\right). \quad (179)$$

Из сопоставления формул (178) и (179) следует, что автотрансформатор можно рассматривать как обычный трансформатор с активными сопротивлениями первичной и вторичной обмоток, уменьшенным в $1 - \frac{1}{k_A}$ раз. Таким образом,

$$Rk_A = R_{kt} \left(1 - \frac{1}{k_A}\right) \quad (180)$$

и

$$Pk_A = P_{kt} \left(1 - \frac{1}{k_A}\right). \quad (181)$$

В таком же отношении уменьшается и вес меди обмоток автотрансформатора

$$G_{MA} = G_{kt} \left(1 - \frac{1}{k_A}\right). \quad (182)$$

Действительно, на участке Aa обмотка автотрансформатора имеет по сравнению с обычным трансформатором тоже сечение, но в $1 - \frac{1}{k_A}$ раз меньшую длину, а на участке ax она имеет ту же длину, что и вторичная обмотка трансформатора, но в $1 - \frac{1}{k_A}$ раз меньшее сечение.

В отношении индуктивного сопротивления автотрансформатора можно сделать тот же вывод, что в отношении его активного сопротивления

$$X_{kA} = X_{kt} \left(1 - \frac{1}{k_A}\right). \quad (183)$$

Следовательно, напряжение короткого замыкания автотрансформатора составляет

$$U_{kA} = U_{kt} \left(1 - \frac{1}{k_A}\right). \quad (184)$$

Обычно, $U_{kA} \leq 2$. Поэтому КЗ автотрансформатора протекает в гораздо сложных условиях чем КЗ трансформатора.

На рис.102 б приведена зависимость мощностей $S_{эм}$ и $S_{эл}$ от значения коэффициента трансформации k . Как следует из рисунка, при возрастании k , характеристики автотрансформатора приближаются к характеристикам трансформатора.

Библиографический список

1. Электромеханика: учебник для студ. высших учебных заведений/ О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская С.П.; под ред. О.Д. Гольдберга.– М.: Академия, 2010.
2. Копылов, И.П. Электрические машины: учебник для вузов/ И.П. Копылов. – 3–е изд., испр.– М.: Высш. шк., 2002 – 607 с.
3. Электрические машины: учебник для вузов: в 2 т./А.П. Иванов-Смоленский. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – Т.1.
4. Электрические машины: учебник для вузов: в 2 т. / А.П. Иванов-Смоленский. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.– Т.2.
5. Электрический привод: учебник для студ. высш. учебн. заведений/ Г.Б. Онищенко.– М.: Издательский центр «Академия», 2006.– 288с.
6. Электротехника и электроника: учебное пособие для студ. высш. учеб.заведений/ М.А. Жаворонков, А.В. Кузин.– М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 400 с.

Оглавление

Лекция 7. Электрические машины постоянного тока	
7.1. Устройство машины постоянного тока	3
7.2. Устройство обмотки якоря. Электродвижущая сила и реакция якоря.	5
7.3. Электромагнитный момент машины постоянного тока	8
Лекция 8. Генераторы постоянного тока	
8.1. Принцип работы генератора постоянного тока	9
8.2. Генератор независимого возбуждения	11
Лекция 9. Двигатели постоянного тока	
9.1. Принцип работы двигателя постоянного тока	13
9.2. Основные характеристики двигателя	16
Лекция 10. Электрические машины переменного тока	
10.1. Типы электрических машин переменного тока	18
10.2. Электродвижущие силы обмоток статора и ротора	21
10.3. Сопротивление обмотки ротора. Эквивалентная схема фазы обмотки ротора	22
10.4. Вращающий момент асинхронного двигателя	22
10.5. Рабочие характеристики АД	26
Лекция 11. Однофазные асинхронные двигатели	
11.1. Пуск АД с фазным двигателем	27
11.2. Пуск АД с короткозамкнутым ротором	29
11.3. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя	29
Лекция 12. Синхронные электрические двигатели	
12.1. Устройство синхронных электрических машин	30
12.2. Работа синхронной машины в режиме автономного генератора	33
12.3. Характеристика холостого хода	34
12.4. Схема замещения обмотки якоря синхронного генератора.	
Мощность и электромагнитный момент	35
12.5. Подключение трехфазной синхронной машины к электрической сети	38
12.6. Синхронный электрический двигатель	41
12.7. Регулирование реактивной мощности синхронного двигателя	43
Лекция 13. Синхронные электрические микромашины	
13.1. Синхронный микродвигатель	44
13.2. Реактивный двигатель	45
13.3. Шаговый импульсный двигатель	46
13.4. Машины с постоянными магнитами	47
13.5. Сверхпроводящие синхронные машины	48
Лекция 14. Трансформаторы	
14.1. Назначение и общие свойства трансформаторов	50
14.2. Принцип работы трансформатора	52

Лекция 15. Конструкции трансформаторов	
15.1. Основные типы трансформаторов.....	54
15.2. Ядро стержневого трансформатора.....	57
15.3. Обмотки и изоляция	58
Лекция 16. Охлаждение и изоляция трансформаторов	
16.1. Сухие трансформаторы	64
16.2. Трансформаторы с масляным охлаждением.....	64
16.3. Трансформаторы, охлаждаемые негорючим жидким диэлектриком.....	65
16.4. Условное обозначение трансформаторов различного типа	66
16.5. Примеры условных обозначений	67
Лекция 17. Работа однофазного трансформатора в режиме холостого хода	
17.1. Упрощенная схема однофазного трансформатора	68
17.2. Режим холостого хода реального трансформатора.....	71
Лекция 18. Трехфазный трансформатор. Классификация магнитных систем	
18.1. Виды магнитных систем трансформаторов	75
18.2. Трехфазный трансформатор. Схемы соединения.....	77
18.3. Группы соединений обмоток трансформаторов.....	79
Лекция 19. Работа трехфазных трансформаторов в режиме холостого хода.....	83
Лекция 20. Режим короткого замыкания трансформаторов	
20.1. Виды короткого замыкания	87
20.2. Работа трансформатора под нагрузкой.....	95
20.3. Внешние характеристики трансформаторов.....	99
20.4. Коэффициент полезного действия трансформатора	102
20.5. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов.....	105
20.6. Параллельная работа трансформаторов	106
Лекция 21. Автотрансформаторы.....	108
Библиографический список	111

Учебное издание

Смоленцев Николай Иванович

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА В СИСТЕМАХ
АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ**

Конспект лекций

Часть 2

Техн. редактор *А.В. Миних*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 17.10.2013. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 6,74. Тираж 30 экз. Заказ 469/290.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.