

1. Общие сведения об электрических машинах. Классификация.

Электрические машины являются одним из основных видов электрического оборудования.

Они служат для преобразования механической энергии в электрическую (генератор), или электрической в механическую (двигатели), а также для преобразования электрической энергии с одними параметрами.

Электрические машины широко используются в качестве приводной техники, из-за удобства отвода и привода электрической энергии, высокий электрических показаний, простоты обслуживания, проектирования на большой диапазон мощностей и частот организаций (ГОСТ).

Большинство машин выполняется с вращательной частью, которая называется **ротор**.

Опорами ротора являются подшипники, находящиеся в подшипных щитах которые входят в неподвижную часть машины, называются **статор**.

Существуют машины поступательной частью **линейные машины**.

Трансформаторы – вращательная часть отсутствует, однако имеются общие принципы передачи электрической энергии от одной обмотки к другой с вращательными электрическими машинами.

Электрические машины: 1. машины постоянного тока, 2. машины переменного тока.

И те и другие могут работать двигателями и генераторами.

Машины: 1. нормального исполнения, 2. специального исполнения.

Машины специального исполнения характеризуются: 1.особой методикой расчета, 2.специфическими характеристиками, 3.исполнением конструктивной и активной частей, 4.своим назначением (двигатели для погружных насосов, тяговые двигатели трансформатора, различные информационные машины).

Электрические машины делятся на: электрические машины постоянного тока (независимое возбуждение, последовательное возбуждение, параллельное возбуждение, смешанное возбуждение) и электрические машины поступательного тока (асинхронные: с фазным ротором и с короткозамкнутым ротором; синхронные: с явнополосным ротором и неявнополосным ротором).

до 0,5 кВт – микромашин

от 0,5 ... 10 кВт – малая мощность

от 10 ... 250 кВт – средняя мощность

свыше 250 кВт – большая мощность

Электрические машины обладают свойством обратимости, они могут работать как с двигателем, так и с генератором.

В трансформаторе можно изменить направление потока энергии.

2. Основы теории электрических машин и трансформаторов.

В основу работы электрических машин и трансформатора положен закон электромагнитной индукции.

Электромагнитная индукция является возникновением электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного поля, которое пронизывает этот контур.

$$e = -w \frac{d\phi}{dt}, w - \text{число витков.}$$

Знак минус означает, что магнитный поток пронизывает контур, индуцируя в нём ЭДС, направление которого определяется по правилу левого винта.

(1)

Магнитный поток определяется по правилу Буравчика (правый винт).

Закон электромагнитной индукции связан с правилом Ленца, то есть направление ЭДС всегда таково, что в замкнутом контуре она стремится создать ток, магнитное поле препятствует изменению вызвавшего его потока.

(2)

$$\Phi = BS, e = -w \frac{d\phi}{dt} = -wB \frac{dS}{dt} = -wS \frac{dB}{dt} = e_{вр} + e_{тр}, e_{вр} - \text{ЭДС вращения, } e_{тр} - \text{ЭДС трансформации.}$$

В электрических машинах при взаимодействии магнитного поля и тока в контуре происходит механическая работа.

Рассмотрим работу элементарного генератора и элементарного двигателя:

$$(3) e = Blv$$

(4) правило правой руки $e \rightarrow i$

$$(5) \text{ правило левой руки, } F_A = Bli, \bar{F} = \bar{F}_A, \text{ при } v = \text{const}$$

При движении проводника АВ в постоянном магнитном поле, меняется площадь рамки, которая это поле пронизывает. То есть по закону электромагнитной индукции $e = -wB \frac{dS}{dt}, w = 1, e \rightarrow i$.

Ток протекает по контуру, который образован проводником АВ, рельсами и сопротивлением R.

Проводник АВ по которому протекает ток, находится в зоне действия электромагнитного поля при равном движении со $v = \text{const}$, подвержен воздействию F_A , направление которого определяется по правилу левой руки.

Таким образом, F_A уравнивает действие силы приложенной из вне, то есть оказывает тормозное воздействие на АВ (на подвижную часть электрической машины).

$$F = F_A$$

$$Fv = F_A v = Bliv = ei$$

Таким образом, механическая мощность Fv преобразовалась в мощность электрическую li , получили генератор, в нём не учтены потери энергии.

Если вместо R подключить источник питания, будет иметь схему (6)

$$\frac{2\bar{F}_{тр}}{2} = \bar{F}_A (v = \text{const})$$

В результате движения АВ в заданном направлении в нём возникает ЭДС e , направление которого противоположно действию l .

$$e = -B \frac{dS}{dt} (w = 1), e - \text{противоЭДС.}$$

В данном случае мы имеем элементарный двигатель, в котором: $ei = F_{тр} v$.

В генераторном режиме возникающее F_A оказывает тормозящее действие на АВ, а в режиме двигателя – движущее действие.

Во вращающихся электрических машинах процессы имеют аналогичный характер, только линейная скорость заменяется на угловую ω (рад/с), а F переходит к моменту M (Н·м).

3. Материалы, применяемые в электромашиностроении и трансформаторостроении.

Материалы, применяемые в электрических машинах и трансформаторах, подразделяются на конструкционные, активные, электроизоляционные.

Конструкционные материалы применяются для изготовления деталей и частей машин или трансформаторов, главным назначением которых является восприятие и передача механических нагрузок, обеспечение требуемой степени защиты, охлаждения, смазки (валы, станины, подшипниковые щиты, крепежные детали, вентиляторы и др.). В качестве конструкционных материалов применяют сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы, пластмассу.

Активные материалы предназначены для изготовления токопроводящих частей, магнитных систем, активной части машин и трансформаторов, подразделяются на проводниковые и магнитные.

Проводниковые материалы (медь, алюминий) служат для изготовления обмоток машин и трансформаторов. Коллекторные пластины и контактные кольца, подвергающиеся истиранию, изготавливаются из холоднокатаной меди, а также из меди с разными присадками (кадмий и др.).

Магнитные материалы предназначены для изготовления магнитопроводов. Магнитные системы должны обладать высокой магнитной проницаемостью (требуемый магнитный поток в машине или в трансформаторе задается как можно меньшим значением магнитодвижущей

силы), повышенным электрическим сопротивлением (для снижения потерь на вихревые токи), минимальными потерями на перемагничивание (гистерезис).

Отдельную группу представляют материалы, из которых изготавливают электрические щетки (графитные, угольнографитные, металлографитные), применяемые для обеспечения скользящего контакта с коллектором и контактными кольцами электрических машин.

Электроизоляционные материалы (диэлектрики) применяются для электрической изоляции токоведущих частей от магнитных систем и корпусов, а также стальных листов магнитных сердечников друг от друга. Их свойства во многом определяют эксплуатационную надежность, габаритные размеры, массу и стоимость машины (трансформатора). Наиболее широкую номенклатуру имеют твердые электроизоляционные материалы. К ним относятся хлопчатая бумага, шелк, слюда, смолы, лаки, миканит, текстолит, электротехнический картон и др. Одним из важнейших свойств электроизоляционных материалов является нагревостойкость – способность материала сохранять свои изоляционные и механические свойства при воздействии рабочих температур в течение времени, определяемого сроком службы машины (трансформатора).

Жидкие электроизоляционные материалы находят применение, как правило, в трансформаторостроении. К ним относятся специальные сорта минерального (трансформаторного) масла. Выпускаются различные марки трансформаторных масел, отличающихся по своим диэлектрическим свойствам. Они предназначены для заливки в оборудование определенных классов напряжения.

4. Потери и КПД электрических машин и трансформаторов.

В общем случае в электрических машинах с вращающейся или подвижной частью существуют следующие виды потерь:

1. потери в магнитопроводе (70% - гистерезис, 30% - вихревые токи (токи Фуко))

2. механические потери, обуславливаются всеми видами трения

3. потери в обмотках, обуславливаются током нагрузки $\sim I^2$

4. добавочные потери, составляющие от 0,5 до 1% от потребляемой мощности машины (по ГОСТ), они обуславливаются явлением поверхностного эффекта, неравномерном воздушном зазоре, неравномерном распространении тока по сечению проводника и другим причинам.

(1) $\frac{U}{I} = R = \rho \frac{l}{S}$ - сопротивление постоянного тока

(2) $r = R \cdot k, r > R, k > 1$ – активное сопротивление (значение в справочнике)

Первые два вида относятся к потерям постоянным, то есть остаются неизменными во всем диапазоне допустимых нагрузок машин или трансформаторов.

То есть $\Delta p_{\text{магн}} + \Delta p_{\text{механ}} = \Delta p_{\text{ГОСТ}} = p_0$ - потери холостого хода

Вторые два вида относятся к потерям переменным, поскольку зависят от тока, который в процессе работы машины или трансформатора в соответствии с заданным технологическим процессом, меняет свою величину.

$$\Delta p_{\text{обм}} + \Delta p_{\text{добав}} = m I^2 r + (0,005 \dots 0,01) P_{1H} \left(\frac{1}{I_H}\right)^2$$

m – число фаз

$P_{1H} = m U \cos \varphi$ – двигатель переменного тока

$P_{1H} = UI$ – двигатель постоянного тока

Постоянные суммарные потери образуют $p_0 + \Delta p_{\text{транс}} = \Delta p_{\Sigma}$

Мощность подведена к машине или трансформатору, полная мощность (P_1), на выходе (P_2).

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \cdot 100\%$$

$$P_1 - P_2 = \Delta p_{\Sigma}$$

$$\eta = \left(\frac{P_2}{P_2 + \Delta p_{\Sigma}} \right) \cdot 100\% \text{ - трансформатор, генератор}$$

$$\eta = \left(1 - \frac{\Delta p_{\Sigma}}{P_1} \right) \cdot 100\% \text{ - двигатель (3)}$$

Определим условия, при которых $\eta = \eta_{\text{max}}$. Для этого из выражения: $\eta = \left(1 - \frac{2P_2}{P_1} \right) \cdot \frac{\Delta p_{\Sigma}}{P_1} \rightarrow \min, P_1 = UI(mU \cos \varphi), U = \text{const} (mU \cos \varphi = \text{const}), P_1 =$

$AI, A = \text{const}$

$$\Delta p_{\Sigma} = B + CI + DI^2, B = P_0, P_0 \text{ - постоянные потери}$$

CI – потери в скользящих контактах

DI^2 – потери в обмотках (переменные потери, добавлением которых пренебрегают)

$$\frac{d\left(\frac{\Delta p_{\Sigma}}{P_1}\right)}{dI} = 0$$

$$\frac{d\left(\frac{B+CI+DI^2}{AI}\right)}{dI} = 0$$

$$-\frac{B}{I^2} + D = 0$$

$$B = DI^2$$

$\eta = \eta_{\text{max}}$ если постоянные потери равны переменным. Это справедливо для электрических машин и трансформаторов.

Номинальная мощность – это выходная мощность электрических машин, которая указывается в ее паспорте или табличке, обуславливается допустимым нагревом.

К номинальным параметрам относятся: U_H (В, кВ), I_H (А, кА), n_H (об/мин), η_H (%), также технологические параметры: $\cos \varphi_H$ (напор, давление), если электрическая машина представляет собой моноблочную конструкцию с механическими (насос) или параметрами систем охлаждения трансформатора и машин, или систем смазки.

U_H двигателя и первичной обмотки трансформатора равны U_H электрических цепей.

Напряжение генератора и вторичной обмотки трансформатора, превышают номинальное напряжение сети на 5-10%, чтобы компенсировать падение напряжения.

5. Влияние геометрических размеров электрических машин и трансформаторов на их технико-экономические показатели.

Конструкция электрических машин и трансформаторов, их размеры, масса, стоимость находятся в зависимости от мощности и скорости вращения. Для ряда подобных в геометрическом отношении машин или трансформаторов геометрические размеры любой машины или трансформатора отличаются от размеров другой машины в одинаковое число раз.

Для удобства анализа следует предположить, что плотности тока, магнитные индукции в соответствующих частях, скорости вращения одинаковы. В этом случае можно рассматривать зависимость мощности, потерь и других величин от какого-либо характерного для машины или трансформатора геометрического размера l .

Внутренняя электромагнитная мощность машины или трансформатора P пропорциональна произведению тока I на эдс обмотки E . В свою очередь величина тока I пропорциональна сечению провода витка, а величина эдс E – площади контура, охватываемой витками. Таким образом, получается зависимость электромагнитной мощности P от геометрического размера l , определяемая выражением: $P = EI = l^4$

Для машин с номинальной частотой вращения n можно полагать: $l = \sqrt[4]{\frac{P}{n}} = \sqrt[4]{M}$, где M – момент, развиваемый электрической машиной и образованный в результате действия на проводники обмотки электромагнитных сил.

Если рассматривать электрические машины с одинаковой частотой вращения или трансформаторы, то их геометрические размеры будут изменяться пропорционально корню четвертой степени из их мощности: $l = \sqrt[4]{P}$.

Объем машин или трансформаторов V , их масса G , стоимость C прямо пропорциональны l^3 ; те же величины на единицу мощности обратно пропорциональны l , а, следовательно, корню четвертой степени из мощности $\sqrt[4]{P}$: $V = G = C = l^3, \frac{V}{P} = \frac{G}{P} = \frac{C}{P} = \frac{1}{l} = \frac{1}{\sqrt[4]{P}}$

Отсюда следует, что масса машины или трансформатора, их стоимость на единицу мощности уменьшаются с увеличением геометрических размеров.

При соблюдении начальных условий электрические и магнитные потери, а, следовательно, суммарные потери мощности Δp_Σ в отдельных частях машины на единицу объема постоянны они растут прямо пропорционально l^3 : $\Delta p_\Sigma = l^3, \frac{\Delta p_\Sigma}{P} = \frac{1}{l}$

Потери на единицу мощности при увеличении l и P уменьшаются, а кпд машин и трансформаторов увеличивается. В то же время площадь поверхностей охлаждения $S_{\text{охл}}$, с которых отводятся выделяющиеся в виде тепла потери Δp_Σ , растет прямо пропорционально l^2 , поэтому: $\frac{\Delta p_\Sigma}{S_{\text{охл}}} = l$

Значение потерь на единицу поверхностей охлаждения растет прямо пропорционально l . В результате условия охлаждения в крупных машинах и трансформаторах ухудшаются. Это предъявляет высокие требования к системам их охлаждения и контролю над их работой.

Приведенные зависимости показывают, что с ростом мощности электрических машин и трансформаторов относительный расход материалов и относительная стоимость у крупных машин снижаются, а кпд возрастает. Аналогичным образом нетрудно установить, что при сохранении неизменными геометрических размеров и электромагнитных нагрузок масса, стоимость и потери на единицу мощности с увеличением скорости вращения уменьшаются. Экономически целесообразно строить и применять, где это возможно, быстроходные и крупные электрические машины, а также трансформаторы большой мощности.

Зависимости для машин и трансформаторов возрастающей мощности на практике не соблюдаются точно, так как при увеличении мощности и скорости вращения всегда приходится по конструктивным и другим причинам отступать от геометрического подобия машин. Общие тенденции в изменении показателей масс, потерь и стоимости указанные зависимости отображают достаточно хорошо. Именно поэтому они могут использоваться для практических целей.

6. Нагревание и способы охлаждения электрических машин и трансформаторов.

Процессы преобразования энергии в электрических машинах и трансформаторах сопровождаются потерями, которые в свою очередь выделяются в виде тепла, частично нагревая машину или трансформатор, а частично рассеиваются в окружающую среду. Для удобства проведения тепловых расчетов принято считать, что нагрев происходит равномерно по всему объему машины, а рассеивание теплоты осуществляется равномерно со всей ее поверхности. В этих условиях уравнение теплового баланса имеет вид: $qdt = mcdt + S\lambda\tau dt$, где q - количество теплоты, выделяемое в машине (трансформаторе) в единицу времени. Оно равно $q = \frac{Q}{dt} = \Delta p_\Sigma$, где Δp_Σ - суммарные потери мощности в объекте, Вт; $mcdt$ - количество теплоты, расходуемой на нагревание объекта; m - масса нагреваемого объекта; c - удельная теплоемкость материала объекта, т.е. количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг этого материала на 1 °C; τ - превышение температуры нагрева объекта над температурой окружающей среды; $S\lambda\tau$ - количество теплоты, рассеиваемое с поверхности объекта в окружающее пространство в единицу времени; λ - коэффициент теплового рассеяния, т.е. количество теплоты, рассеиваемой с единицы поверхности двигателя в 1с при превышении температуры на 1 °C.

В начальный период работы машина (трансформатор) имеет температуру нагрева, не отличающуюся от температуры окружающей среды, т.е. $\tau = 0$. При этом вся выделяемая в машине (трансформаторе) теплота идет на его нагревание. Затем температура нагрева начинает превышать температуру окружающей среды, т.е. $\tau > 0$, часть теплоты, выделяемого в машине (трансформаторе), начинает рассеиваться в окружающую среду. Когда температура нагрева объекта достигает установившегося значения $\tau_{уст} = const$, вся выделяемая в машине теплота рассеивается в окружающую среду, т.е. наступает режим теплового равновесия: $qdt = S\lambda\tau_{уст}dt$, где $\tau_{уст}$ - установившаяся температура перегрева, °C.

Отсюда следует, что установившаяся температура перегрева определяется количеством теплоты q , выделяемым в машине (трансформаторе) в единицу времени, а также от интенсивности ее охлаждения.

Принято считать, что в реальных условиях температура перегрева машины (трансформатора) достигает установившегося значения за время

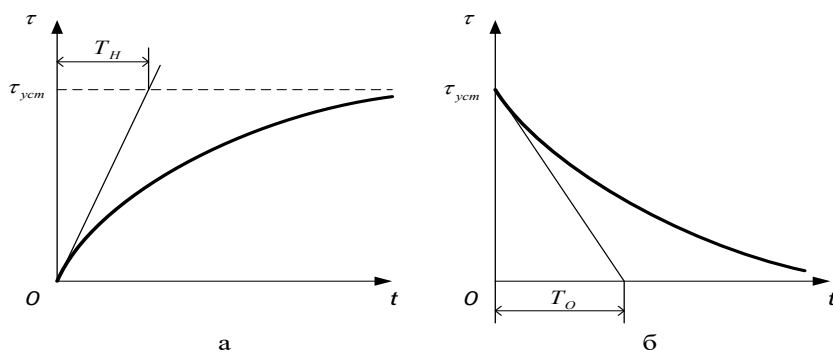


Рис. 1.3. Графики нагревания (а) и охлаждения (б) электрических машин и трансформаторов

нагревания $t = (4 - 5)T_0$. Графики нагревания и охлаждения электрических машин и трансформаторов представлены на рисунке.(1)

Для электрических машин (трансформаторов) специального назначения, работающих в условиях повышенной температуры окружающей среды, например в условиях металлургического производства, температуру θ_1 принимают равной более 40°C . Действующие стандарты устанавливают предельно допустимые температуры перегрева для частей машины (трансформатора) при разных способах измерения. (2)

Увеличение мощности электрических машин (трансформаторов), а также изменение параметров эксплуатации требует улучшения условий их охлаждения. Это достигается путем конструктивных решений, применения сложных систем с автоматическим управлением и контролем параметров охлаждающей среды, охлаждаемых частей и т.д.

На рисунке представлена классификация систем охлаждения (блоки, обведенные пунктиром, относятся только к вращающимся электрическим машинам). Электрические машины (трансформаторы) по способам охлаждения разделяют на два вида: с естественным охлаждением и с искусственным охлаждением.

Естественное охлаждение происходит без применения специальных мер путем теплопроводности и конвекции. Теплопроводность – передача теплоты внутри твердого тела от более нагретых слоев к менее нагретым слоям. Конвекция состоит в том, что частицы газа, воздуха или трансформаторного масла, соприкасающиеся с поверхностью нагретого тела, нагреваются, становятся легче и поднимаются вверх, уступая место менее нагретым частицам, и т.д. Такая конвекция называется естественной. Искусственная конвекция происходит во вращающихся машинах, которых создается принудительная циркуляция воздуха или газа.

Для **искусственного охлаждения** применяют специальные устройства, которые создают направленное движение газа или воздуха для охлаждения нагретых частей машин (трансформаторов). Искусственное охлаждение может проводиться как принудительно (по разомкнутой или замкнутой системе), так и посредством самовентиляции с учетом конструктивного исполнения машины и ее отдельных частей.

7. Электромеханические преобразователи энергии. Основные характеристики электрических машин.

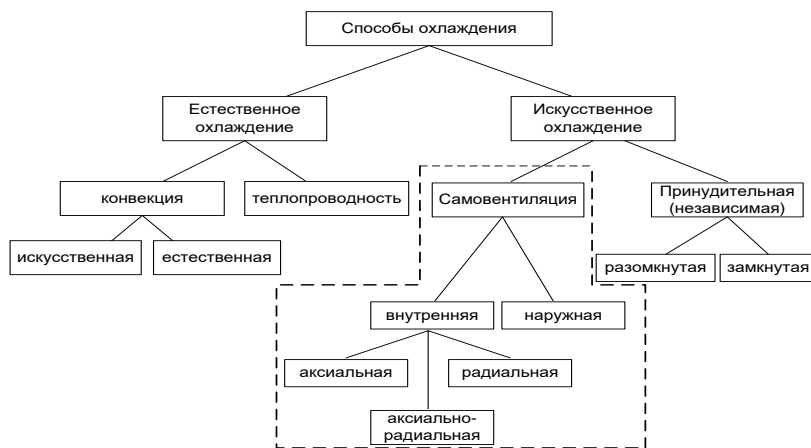


Рис. 1.4. Классификация способов охлаждения электрических машин и трансформаторов

Электрические машины применяются как двигатели или генераторы, в качестве генератора: синхронные машины большой мощности, которые составляют основу электрического оборудования на электростанциях. Маломощные энергетические установки в качестве генератора могут использовать: машины постоянного тока и асинхронные.

Последние два вида машины использует как двигатели. И составляет основу большинства электрических приводов производственных механизмов.

Свойства электрических машин описываются уравнениями, многие из которых можно представить графически.

В заданной системе координат строят графики, по которым анализируют работу электрических машин. Определяется оптимальное условие эксплуатации, определяются неисправности и т.д.

Основными характеристиками генераторов всех типов являются следующие:

1. характеристика холостого хода (1)

$$E_0 = f(I_B), n = \text{const} = n_n, I = 0$$

E_0 – ЭДС холостого хода на зажимах генератора

I_B – ток возбуждения, который создает магнитный поток машины

n – частота вращения ротора (машины нормального исполнения)

I – ток силовой цепи генератора

2. внешняя характеристика

$$U = f(I), n = \text{const} = n_n, I_B = \text{const}$$

3. регулировочная характеристика

$$I_B = f(I), n = \text{const} = n_n, U = \text{const}$$

U – напряжение, которое с зажима генератора отдается потребителю.

$$U = E - I_r$$

E – ЭДС, вырабатываемое для питания потребителя (при работе под нагрузкой)

r – внутреннее сопротивление генератора

I_r – падение напряжения на нем

Основными характеристиками двигателей всех типов являются:

1. механические характеристики

$$\omega = f(M)$$

ω – частота вращения (рад/с)

M – момент (Н·м)

$$n = f(M), n \text{ (об/мин)}, \omega = \frac{\pi}{50}, n = \frac{n}{1,55}$$

2. электромеханические характеристики

$$\omega = f(R), n = f(I)$$

3. регулировочные характеристики

$$\omega = f(I_B), \omega = f(U)$$

U – напряжение питания

4. рабочие характеристики

$$n, I, M, \eta, \cos\varphi = f(P_2)$$

η – кпд, %

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности (только для машин переменного тока)

$P_2 = M\omega$ - показатель мощности

Все обозначения характеристик снимаются при определённых условиях, если эти условия соответствуют номинальным данным электрических машин, то они называются естественными (характеристика 1 и 2 двигателей).

Если хотя бы один параметр не соответствует номинальным данным то искусственный.

Кроме упомянутых зависимостей, в процессе эксплуатации или наладки исполнительный ряд других зависимостей для поиска недостающих параметров машин, для оценки регулировочных возможностей и т.д.

8. Основы механики электропривода.

Электропривод это управляемая механическая система, которая преобразует электрическую энергию в механическую и обратно, а также управляет этим процессом.

ГОСТ 50363-92 Электроприводные термины и определения.

Современный электропривод имеет следующую структуру:

(1)

U_c и I_c – напряжение и ток сети

УП – управляемый преобразователь постоянного и переменного тока

ЭМП – электромеханический преобразователь

Ред – редуктор, который усиливает действие момента вырабатываемого ЭМП

Параметры механической части (рабочего органа РО) – момент статический, скорость в установившемся режиме, перемещение (угол поворота).

Через обратные связи, контролируемые параметрами электропривода, то есть его координаты, поступающие в систему датчиков электрических и неэлектрических величин.

Количество контролируемых координат ЭП зависит от его функции и назначения, а также от функции рабочего органа (крыльчатый вентилятор, резец станка, валок прокатного стана).

СИФУ – по совокупному воздействию сигнала задан УЗАД и сигнал образует связь, через систему регулятора контролируемых координат ЭП (ток, скорость, положение), формирует сигнал управления ($U_{упр}$) поступающий в управление преобразует (УП).

Представленная примерная структура ЭП называется замкнутой, и в настоящее время характерна для большинства ЭП в производственных механизмах.

Основой ЭП являются ЭМП (электромеханические преобразователи).

ЭМП сопряжено с системой электроснабжения, изменение в этих частях ЭП сказывается на режимах работы электрических машин и ее характеристик. Действие систем управления формирует сигнал $U_{упр}$, зависит от ее предварительных настроек параметров и заданной программы.

Если менять U , Φ , параметры электрической цепи, частоты питания U (в приводах переменного тока), то можно сформировать семейство характеристик в заданных системах координат.

Со стороны рабочего стана приходит возмущенное воздействие связи с режимом работы технологической установки.

Чтобы оценить свойства конкретного электропривода требуется описать его уравнение движения. Для этой цели рассмотрим самую простую механическую систему, представленную на рисунке.

(2) $I = I_{двиг} + I_{мех}$

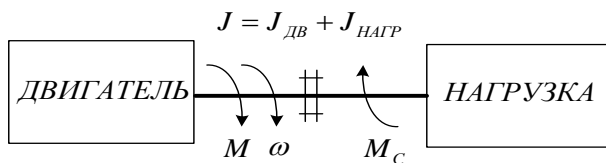


Рис. 3.1. Модель механической части

M – момент развиваемый двигателем (Н·м), ω – угловая скорость двигателя (рад/с), M_c – момент статический (момент нагрузки в двигательном режиме против его вращения), $I_{двиг}$, $I_{мех}$, I – двигатели (Н·м) механический и суммарный.

Чтобы проанализировать работу электрической машины в системе ЭП, строят механические характеристики двигателя и механизма.

$\omega = f(M)$, $\omega = f(M_c)$. При совпадении направления момента и скорости ставится знак +, при встречном направлении момента и скорости ставится знак -.

M_c бывают: активные и реактивные.

Активные M_c : не зависят от скорости привода и имеют один и тот же знак (подъемные механизмы).

(3) а и б На рисунке а M_c противодействует движению и является тормозным.

На рисунке б действие M_c совпадает с направлением движения и он является движущим.

Если $\omega = 0$, то M_c (активное) $\neq 0$.

(4)

Реактивные M_c : всегда появляются когда есть движение. Они определяются действием сил трения.

(5) (6)

Кроме того, существует M_c не зависящее от скорости:

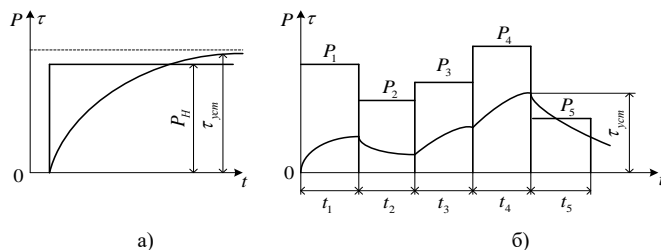
(7)

9. Режимы работы и охлаждение электрических машин.

Режим работы электрической машины – это установленный порядок чередования периодов, характеризуемых величиной и продолжительностью нагрузки, отключений, торможения, пуска и реверса во время ее работы. Режимы работы электродвигателей в электроприводах различных рабочих механизмов разнообразны. Они определяются технологическими процессами, реализуемыми рабочими механизмами. Для иллюстрации этих режимов используют нагрузочные диаграммы.

Такая диаграмма представляет графически выраженную зависимость параметра, характеризующего нагрузку приводного двигателя (мощности, момента, силы потребляемого тока) от продолжительности времени отдельных этапов, составляющих время работы электропривода.

Продолжительный режим длительностью работы двигателя, его частоты достигает продолжительный режим с рисунке (1) а (электроприводы продолжительный режим с представленный на рисунке (1) б металлорежущих станков и т.п.).



а)

б)

Рис. 3.4. Нагрузочные диаграммы продолжительного режима работы двигателя

работы S_1 характеризуется такой при которой температура перегрева всех установившихся значений $\tau_{уст}$. Различают неизменной нагрузкой, показанный на насосов, вентиляторов, транспортеров), и изменяющейся нагрузкой, (электроприводы прокатных станов,

Кратковременный режим работы S_2 характеризуется тем, что периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя. При этом периоды работы (нагрузки) двигателя t_p настолько кратковременны, что температуры нагрева всех частей двигателя не достигают установившихся значений, а периоды отключения двигателя настолько продолжительны, что все части двигателя успевают охладиться до температуры окружающей среды. По стандарту $t_p = 10; 30; 60; 90$ мин. Нагрузочная диаграмма режима S_2 отображена на рисунке (2)

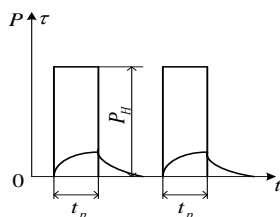


Рис. 3.5. Нагрузочная диаграмма кратковременного режима работы двигателя

Повторно-кратковременный режим S_3 характеризуется тем, что кратковременные периоды работы двигателя t_p чередуются с периодами его отключения (паузами) t_n . Причем за период работы t_p превышение температуры не успевает достигнуть установившихся значений, а за время паузы части двигателя не успевают охладиться до температуры окружающей среды. Общее время работы двигателя в режиме S_3 делится на периодически повторяющиеся циклы продолжительностью $t_{ц} = t_p + t_n$. Нагрузочная диаграмма повторно-кратковременного режима представлена на рисунке (3).

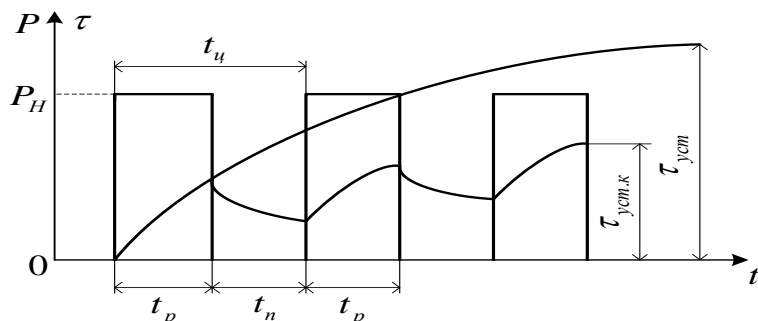


Рис. 3.6. Нагрузочная диаграмма повторно-кратковременного режима работы двигателя

Работа электрических машин в любом из упомянутых режимах, особенно при пусках и торможениях, сопровождается потерями энергии с выделением теплоты в их частях. Охлаждение, особенно машин большой мощности, является сложной и ответственной задачей. При этом используются не только конструктивные, но и специальные меры, заключающиеся в применении систем охлаждения. Как правило, в электрических машинах применимо искусственное охлаждение, включающее в себя самовентиляцию и принудительную вентиляцию.

Самовентиляция состоит в создании направленного движения воздуха от вентилятора на валу машины, которые охлаждают ее нагретые части. При наружной самовентиляции воздухом обдувается внешняя поверхность корпуса статора. Машина как правило имеет закрытое исполнение с ребристой поверхностью, которая обеспечивает увеличение поверхности охлаждения. Для внутренней самовентиляции в корпусе и подшипниковых щитах машины выполняют специальные отверстия, через которые воздух из среды, окружающей машину, проникает внутрь благодаря центробежному вентилятору на валу, охлаждает машину, «омывая» ее нагретые части, а затем нагретым выбрасывается наружу через специальные отверстия (жалюзи) в левом подшипниковом щите со стороны, противоположной вентилятору. Принцип внутренней самовентиляции электрических машин отображен на рисунке (4).

Тепловые потоки от электрических и магнитных потерь соответственно показаны светлыми и темными стрелками. Тонкие линии показывают направления воздуха с температурой окружающей среды, проникающего внутрь машины, и выбрасывающегося наружу с температурой.

10. Стандартизация основных параметров электрических машин.

Стандартизация основных параметров электрических машин относится, прежде всего, к номинальной мощности, номинальному напряжению, номинальной частоте вращения. Стандартизация электрических машин по высоте оси вращения, установочным и присоединительным размерам позволяет избежать неоправданного увеличения типоразмеров машин.

Государственными стандартами определены ряды номинальных мощностей (кВт), напряжений (В), частот вращения (об/мин), высот оси вращения (мм), а также мероприятия, которые проводятся при проектировании, испытаниях, эксплуатации электрических машин.

Конструктивные формы исполнения электрических машин определяются степенью защиты, способами охлаждения и монтажа, воздействием климатических факторов окружающей среды и категорий мест размещения электрических машин при эксплуатации, и оговорены стандартами.

Степень защиты электрических машин для обслуживающего персонала и от попадания внутрь твердых предметов и воды обозначается буквами IP (International Protection) и двумя цифрами: IPXX. Первая цифра обозначает степень защиты персонала от поражения электрическим током от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями и от попадания внутрь машины твердых тел (0 – 5); вторая цифра обозначает степень защиты от проникновения воды внутрь машины (0 – 8).

Стандартом оговорены термины и определения применительно к видам защиты электрических машин. Опыт эксплуатации определена увязка способов защиты со способами охлаждения машин. Способы охлаждения электрических машин обозначают буквами IC (International Cooling). Следующие за ними буквы и цифры характеризуют способ охлаждения машины, а также наличие разомкнутой или замкнутой системы охлаждения. Сначала указывается буква, обозначающая вид хладагента: А – воздух, Н – водород, W – вода. Если хладагентом является только воздух, то буква опускается. Первая цифра условно обозначает устройство цепи охлаждения для циркуляции хладагента (0 – 8); вторая цифра обозначает способ перемещения хладагента (0 – 8). Если машина имеет несколько цепей охлаждения (внутренняя вентиляция и наружный обдув и др.), то в обозначении может быть четыре цифры: две – для обозначения наружной цепи охлаждения и две – для внутренней.

Монтаж электрических машин определяет способ крепления электрической машины в месте ее установки и способ ее сочленения с рабочим механизмом. Монтаж машин в большинстве случаев осуществляется на лапах или посредством фланцев с возможностью горизонтального или вертикального расположения вала машины. Разновидности конструктивного исполнения электрических машин по способу монтажа определяются стандартом. Условное обозначение машины по способу монтажа отображается буквами IM (International Mounting) и четырьмя цифрами: IMXXXX. Первая цифра – это группа конструктивного исполнения (1 – 9); вторая и третья цифры обозначают способ монтажа; четвертая цифра показывает количество и форму исполнения выступающих концов вала (0 – 8).

На надежность электрических машин при их эксплуатации значительное влияние оказывают различные климатические условия внешней среды. Установлены категории мест размещения электрооборудования при эксплуатации. Оговорены стандартами допустимые отклонения в связи с реальными условиями эксплуатации, в которых может оказаться машина. Например, если машины общего назначения предназначены для работы на высоте над уровнем моря до 1000 м, то в случае работы на высоте более 1000 м их номинальная мощность должна быть снижена.

Электрические машины изготавливают сериями. Серия представляет ряд подобных машин с возрастающей по заданной шкале мощностью, имеющих однотипную конструкцию и удовлетворяющих единому комплексу требований. Каждая электрическая машина, входящая в серию, представляет типоразмер с определенными параметрами (мощность, частота вращения, масса и т.п.) и установочно-присоединительными размерами. Периодически некоторые серии подвергаются модернизации; часть серий снимаются с производства, взамен создаются новые, более совершенные. Накопление опыта по проектированию и эксплуатации машин, развитие науки и технологии, унификация типоразмеров составных частей приводят к созданию экономически более выгодных серий электрических машин.

11. Машины постоянного тока. Общие сведения. Принцип действия.

Машины постоянного тока применяют в качестве электродвигателей и генераторов. Электродвигатели постоянного тока имеют хорошие регулировочные свойства, значительную перегрузочную способность и могут быть спроектированы с любыми рабочими характеристиками. Они широко используются для приводов механизмов, требующих плавного и глубокого регулирования скорости. Машины постоянного тока дорожные машины переменного тока, имеют по сравнению с ними завышенные габариты и массу, относительно сложны в изготовлении. В крупных машинах серьезные эксплуатационные трудности создает наличие щеточно-коллекторного узла. Это ведет к образованию радиопомех и является источником пожароопасности.

Принцип действия МПТ: (1)

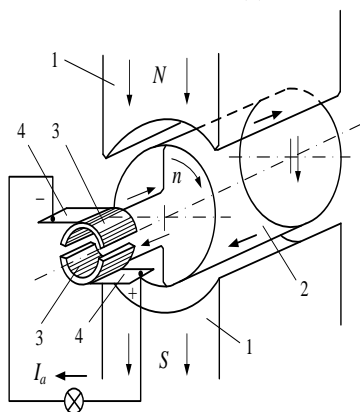


Рис. 6.1. Простейшая машина постоянного тока

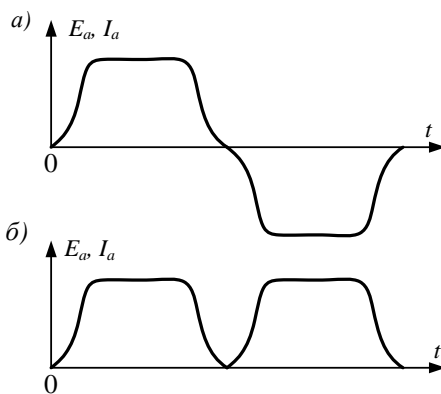


Рис. 6.3. Форма кривых эдс и тока якоря на контактных кольцах (а) и коллекторе (б) в режиме генератора

Простейшая машина постоянного тока состоит из индуктора 1, который представлен в виде постоянного магнита, и якоря 2. Индуктор предназначен для создания основного магнитного поля машины. На якоре закреплена обмотка, состоящая из одного витка. Ее выводы прикреплены к пластинам 3, которые образуют элементарный коллектор. С коллекторными пластинами соединены щётки 4, предназначенные для замыкания обмотки якоря на внешнюю цепь или для присоединения ее к источнику питания.

Обмотка представляет собой контур, те части которого находятся под главными полюсами.

В режиме генератора коллектор работает как механический выпрямитель, то есть преобразует переменный ток в обмотках якоря в постоянный ток во внешней сети. (2) а

В режиме двигателя коллектор работает как механический инвертор, то есть преобразует постоянный ток в переменный. (2) б

Принцип действия вращения генератора и двигателя постоянного тока:

При вращении якоря в его обмотке индуцируется эдс. Она является переменной, поскольку проводники обмотки якоря поочередно проходят под северными и южными полюсами. Если на концах проводников установить контактные кольца, то форма кривых эдс E_a и тока I_a обмотки якоря будет иметь вид на рисунке (3)а. Положение щеток не имеет значения. В случае применения коллектора если обмотка якоря с помощью щёток замкнута на внешнюю цепь, то при работе машины в генераторном режиме форма кривых E_a и I_a в проводниках такие же, как и на рисунке (3)а.

Для внешней цепи формы кривых эдс и тока якоря представлена на рисунке (3)б. Это объясняется тем, что при повороте якоря и коллектора изменяются направления эдс в проводниках. Также происходит смена коллекторных пластин под щётками. Из-за этого под верхней щёткой всегда будет находиться пластина, соединенная с расположенным под северным полюсом проводником, а под нижней щеткой – пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом. В результате этого полярность щёток и направление тока во внешней цепи остаются неизменными.

Следовательно, в режиме генератора коллектор является механическим выпрямителем, преобразующим переменный ток обмотки якоря в постоянный ток внешней цепи. В режиме двигателя машина потребляет от источника постоянный ток. Коллектор превращает постоянный ток в переменный ток обмоток якоря, и работает механическим инвертором.

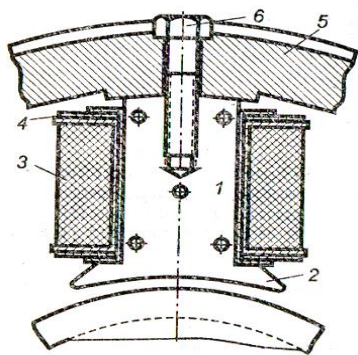


Рис. 6.5. Главный полюс с обмоткой возбуждения:

1 – сердечник; 2 – полюсный наконечник (башмак); 3 – катушка; 4 – каркас крепления катушки; 5 – станина; 6 – винт крепления полюса

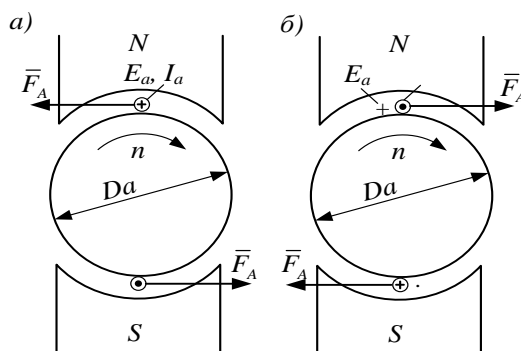


Рис. 6.2. Принцип действия машины постоянного тока в режимах генератора (а) и двигателя (б)

12. Устройство машин постоянного тока. Назначение элементов конструкции. Способы возбуждения.

МПТ нормального исполнения состоит из статора и ротора.

Статор крепится к основанию (состоит из станины, главных и добавочных полюсов с обмоткой и подшипным щитом). Станина и щиты изготавливаются из конструкционной стали.

Главные и добавочные полюсы (1) предназначены для создания магнитных полей. Главные полюсы собираются из листов электротехнической стали для упрощения технологической сборки. На них располагаются обмотки возбуждения из медного изолированного провода тонкого сечения.

Затраты возбуждения составляют от 0,5 до 3% от потребляемой мощности.

$$P_n = U_n \cdot I_n$$

Добавочные полюса создаются из листов электротехнической стали. Их обмотка более толстого сечения, изготавливается из медного изолированного провода. Она также изолирована от сердечника.

Ротор (якорь) состоит из вала, сердечника, обмотки выводы которой соединены с коллекторной пластиной. Вал изготавливается из конструкционной стали. Сердечник из электротехнической стали изолированный друг от друга, чтобы снизить влияние вихревых токов и уменьшить потери на них. Листы собираются в пакет и крепятся к валу с помощью шпонки. В крупных машинах сердечник набирается с помощью сегментов. В машинах средней и малой мощности листы штампуют или нарезают лазером – целиком.

Важной частью МПТ является коллектор. Он состоит из медных пластин с присадками (Cd) для увеличения мощности. Коллекторные пластины изолированы друг от друга миканитом, имеют соединение «ласточкин хвост». Они зажимаются с двух сторон наживными конусами для получения единичной конструкции. (2)

Коллекторный узел насаживается на вал с помощью шпонки.

Щеточный аппарат. Состоит из щеток, щеткодержателей, щеточных двигателей, траверсов. (3)

Щеточные пальцы изготавливаются из текстолита различных сплавов, в этом случае щеточные держатели должны быть изолированы от щеточных пальцев во избежание короткого замыкания. Количество пальцев равно числу главных полюсов машины.

Они расположены на траверсе: 1. щеточные пальцы, 2. труба, 3. отверстие переменного сечения, 4. щетки.

Траверсы изготавливаются из металла, закрепленного с помощью болтов. Если болты ослабить, то траверсы можно повернуть, сдвинуть щетки. Это наладочные операции.

13. Волновые и петлевые обмотки якорей машин постоянного тока.

Обмотка якоря должна удовлетворять следующим требованиям:

1. быть рассчитана на напряжение и токи нагрузки, соответствующие номинальной мощности машины;
2. иметь необходимую электрическую, механическую и термическую стойкость;
3. иметь конструкцию, обеспечивающую удовлетворительные условия токосъема с коллектора;
4. соответствовать минимальному расходу материала при заданных показателях работы машины;
5. технология изготовления обмотки должна быть по возможности простой.

Обмотки якоря изготавливаются по шаблонам, широко распространены простые петлевые и простые волновые обмотки. На их основе изготавливаются обмотки новых тел (ППО, ЛВО). (1)

Один активный проводник находится в верхней части одного паза, а другой в нижней части другого.

Основным элементом обмотки якоря является секция. Она состоит из одного или нескольких последовательно соединенных витков и присоединенных своими концами к коллекторным пластинам.

Две стороны разных секций, располагаются одна над другой и образуют элементарный паз. (2)

Число пластин коллектора K равно числу секций обмотки S и числу пазов Z . Число коллекторных пластин по возможности должно быть большим для уменьшения пульсаций тока и ЭДС. При этом уменьшается разность потенциалов между ними. Практически в низковольтных машинах постоянного тока имеет место отношение $\frac{K}{2p} = 12 \dots 35$.

Большое число пазов не желательно, так как при больших K они становятся уже, снижается механическая прочность зубьев, тоньше провод обмоток якоря, машина получается с завышенными габаритами не соответствуя расчетной мощности. В этом случае в пазах размещается некоторое количество элементарных пазов, то есть $K = S = U_a Z$.

Секция обмоток последовательно соединенных, образуют замкнутую цепь.

(3) Общими точками являются щетки. Обмотка имеет одну пару параллельных ветвей $a=1$.

Для обеспечения нормальных условий работы машины надо чтобы ЭДС были одинаковы, а также с одинаковым сопротивлением. $i_a = \frac{I_k}{2\pi}$

Для простой петлевой обмотки: $2a=2p$.

Для простой волновой обмотки: $2a=2$

(4)

ОГП – ось главных полюсов

ГН – геометрическая нейтраль (ось у, поперечная)

Характеристической особенностью МПТ является то, что между ОГП, ГН=90°

14. ЭДС якоря и электромагнитный момент машин постоянного тока.

(1)

Если машине развести станину и якорь в линию и соответствующим образом размыть полюсы, то это позволит более наглядно определить ЭДС для электромагнитного момента.

τ - величина полюсного деления (вот эта буква в обратную сторону)

$\tau = \frac{\pi D a}{2p}$ (1) $D a$ - диаметр якоря

$B_{ср}$ - среднее значение индукции по длине магнитной системы статора

ЭДС в проводнике $E_{ср} = B_{ср} * l * \vartheta$ (2) где l - осевая длина якоря

(3) $\vartheta = \frac{\pi D a}{60} * n$, [Н/с] n [об/мин]

(1) и (3) \rightarrow (2): $E_{ср} = B_{ср} * l * \frac{\tau * 2 * p}{60} * n$

$B_{ср} * l * \tau = \Phi$, Вб-веберы, магнитный поток на полюсах дельты

$E_{ср} = \frac{2p}{60} * \Phi * n$ (6)

Провод якорной обмотки, который находится в зоне действия главного магнитного поля машины – называется активным проводом. Их количество N

$2a$ - число параллельных ветвей обмотки якоря, в которой параллельные ветви последовательно соединены

$\frac{N}{2a}$ - активный провод

ЭДС параллельной ветви $E_a = E_{ср} = \frac{N}{2a} = \frac{Np}{60a} * n * \Phi$ (7)

$n = \frac{30}{\pi} * \omega$ [об/мин] \leftrightarrow [рад/с] (8)

(8) \leftrightarrow (7)

$E_a = \frac{Np}{60a} = \frac{30}{\pi} \omega \Phi = \frac{Np}{2\pi a} \omega \Phi = c_e \omega \Phi$ (9)

$c_e = \frac{Np}{2\pi a}$ - Конструктивная постоянная машины (10)

Таким образом выражение МПТ якоря $E_a = c_e \Phi \omega$ (11)

Электромагнитный момент образуется в результате действия силы Ампера $F_a \Phi = B \Phi l i$ (12)

$i = \frac{I}{2a}$, I - ток внешней сети (13)

(13) \rightarrow (12)

(2)

$F_a \Phi = B_{ср} * l * \frac{I}{2a}$ (14)

$M_{ср} = F_{аср} * \frac{D a}{2}$ (15)

$\frac{D a}{2} = \frac{\tau}{\pi} * \frac{D a}{2} = \frac{2p\tau}{2\pi}$ (16)

(16) \rightarrow (15)

$M_{ср} = B_{ср} * l * \frac{I}{2a} * \frac{p\tau}{\pi} = \Phi \frac{I p}{2\pi a}$

Момент действия на N активным проводом

$M = N * M_{ср} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I$, $M = c_e \Phi I$ (17)

Иногда в выражении 11 частоту вращения выражают в [об/мин], в этом случае конструктивная постоянная в 11 и 17 будут разные, однако чаще всего при расчетах ЭМПТ и электропривода основные **се заменяют к**

Выражение 11 и 17 принимают вид $E = k\Phi\omega, M = k\Phi I$

Если исследуемая работа с магнитным потоком $\Phi = const = \Phi_n$, то $E = k\Phi_n\omega, \omega = c_n\omega, M = k\Phi_n I, I = c_n I$ в этом случае проще определить $k\Phi_n = c_n$

Полученная ЭДС и момента справедливы, как для двигательного, так и генераторного режима МПТ.

Разница в том, что в генераторе момент M тормозной и ток якоря совпадает по направлению с ЭДС. В двигательном режиме момент является движущим (вращающимся), ЭДС и ток якоря направлены встречно.

15. Реакция якоря машины постоянного тока.

1. холостой ход ($I_a = 0, I_b \neq 0$)

(1) \vec{F}_b – магнитодвижущая сила обмотки возбуждения.

В режиме холостого хода представляется магнитным полем, главные полюса которой симметричны ОГП.

2. короткое замыкание ($I_a \neq 0, I_b = 0$)

(2) \vec{F}_a – ЭДС якоря

В режиме короткого замыкания в обмотке якоря протекает ток, создавая поле, которое симметрично относительно геометрической нейтрали.

3. режим нагрузки

(3) ФН – физическая нейтраль, на которой в режиме работы под нагрузкой, результирующее магнитное поле машины.

\vec{F} – результирующее

$\beta = 0 \dots 90^\circ_{эл}$

Линия ФН сдвиг по направлению вращения генератора и против направления вращения двигателя.

Линии результирующего магнитного поля аналогичны упругим нитям, которые при их натяжении (вниз) стремятся сократить сопротивление. В результате взаимодействия магнитных полей обмотки возбуждения и якоря, возникает электромагнитный момент M , действующий против вращения режима генератора и создает вращение в режиме двигателя.

Реакция якоря (МПТ) – это влияние магнитного поля тока обмотки якоря на магнитное поле главных полюсов машины.

Она может исказить магнитное поле, а также в зависимости от тока, либо ослаблять, либо усиливать магнитное поле машины.

На рисунке 3, реакция якоря действует вдоль геометрической нейтрали, в результате чего магнитное поле машины искажается.

Если щетки повернуть на $\beta = 90^\circ_{эл}$, то они займут место на оси главных полюсов.

(4) $\vec{F}_a = \vec{F}_{ad}$ – магнитная движущая сила.

Обычно щетки сдвинуты на $\beta = 0 \dots 90^\circ_{эл}$. В случае двухполюсной машины поверхность якоря разбивается на две пары симметричных секторов.

Токи первой пары секторов создают поле поперечной реакции якоря, токи второй – продольные реакции.

(5) (6)

Из этих рисунков следует, что при повороте щеток по направлению генератора и против двигателя, возникает продольная размагничивающая ЭДС якоря. А при сдвиге щеток в обратном направлении продольная составляющая якоря будет намагничивать якорь, совпадая с потоком полюсов.

16. Причины искрения на коллекторе машины постоянного тока. Способы улучшения коммутации.

При работе машины постоянного тока щетки и коллектор образуют скользящий контакт. В результате **возникает искрение на коллекторе**. Причины искрения разделяют на механические, потенциальные и коммутационные. Механические причины обусловлены нарушением электрического контакта между щеткой и коллектором (слабое прижатие щеток к коллектору, его негладкая поверхность, загрязненность поверхности и т.д.). Потенциальные причины искрения вызваны проявлением реакции якоря. В секциях якорной обмотки индуцируются эдс, которые отличаются друг от друга. Это приводит к увеличению сверх допустимого значения напряжения между соседними коллекторными пластинами (16 – 20 В). Промежутки между коллекторными пластинами перекрываются дугами, которые постепенно сливаются в круговой огонь. Возникает перекрытие коллектора, приводящее к его износу. Коммутационные причины искрения возникают при физических процессах в машине и связаны с переходом секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую. Согласно стандартам искрение на коллекторе оценивается степенью искрения (классом коммутации) под сбегающим краем щетки. Коммутация считается хорошей, если искрение незначительно.

Для улучшения коммутации машины необходимо уменьшить величину добавочного тока коммутации. Это достигается:

- выбором щеток;
- уменьшением реактивной эдс e_p в коммутирующих секциях;
- компенсацией магнитодвижущей силы реакции якоря по геометрической нейтрали и оси полюсов;
- смещением щеток с геометрической нейтрали.

Щетки выбираются в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя. От типа щеток, их вольтамперных характеристик зависит скорость протекания коммутационных процессов. Улучшение коммутации определяется также политурой коллектора – тонкой оксидной пленкой на поверхности коллектора, обладающей повышенным электрическим сопротивлением.

Уменьшение реактивной эдс e_p в коммутирующих секциях достигается применением обмоток с укороченным шагом, сокращением числа витков в секциях обмотки якоря, использованием щеток шириной не более чем в 2 – 3 коллекторных деления.

Улучшения коммутации по геометрической нейтрали достигается установкой добавочных полюсов. Добавочные полюса устанавливаются между главными полюсами в машинах мощностью свыше 1 кВт. Их число равно числу главных полюсов или меньше в 2 раза. Магнитодвижущая сила добавочных полюсов $\vec{F}_{дп}$ направлена против магнитодвижущей силы поперечной реакции якоря \vec{F}_{aq} . При этом требуется не только компенсация \vec{F}_{aq} , но и создание коммутирующего поля B_k для компенсации реактивной эдс e_p . Обмотка добавочных полюсов включается последовательно встречно с обмоткой якоря. Компенсация величин $\vec{F}_{дп}$ и e_p , зависящих от тока нагрузки, происходит автоматически.

В мощных быстроходных машинах постоянного тока, которые работают в режиме интенсивных нагрузок, применяется компенсационная обмотка. Она предназначена для компенсации поля якоря под главными полюсами машины. Компенсационная обмотка расположена на поверхности главных полюсов в пазах, обращенных к якорю, и включена последовательно встречно с его обмоткой. Магнитное поле главных полюсов машины практически не зависит от ее нагрузки.

В машинах до 1кВт без добавочных полюсов улучшение коммутации достигается смещением щеток с геометрической нейтрали по ходу вращения у генератора и против хода вращения у двигателя. Этот способ улучшения коммутации применим в нереверсируемых электрических машинах, работающих с неизменной нагрузкой. Для снижения влияния помех на электрическую сеть из-за коммутации используют проходные конденсаторы.

Процессы коммутации в машинах постоянного тока сложны. Для их исследования применяются теоретический анализ и различные экспериментальные методы.

При замедленной коммутации длительность размагничивающей силы реакции якоря больше длительности намагничивающей реакции якоря. Результирующая коммутационная реакция якоря получается размагничивающей. При ускоренной коммутации – коммутационная реакция якоря намагничивающая. В двигательном режиме эти процессы носят обратный характер.

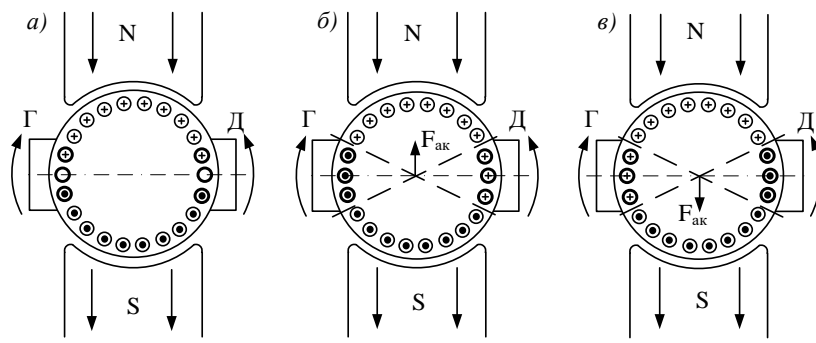


Рис. 6.27. Коммутационная реакция якоря

17. Потенциальные условия на коллекторе. Компенсационная обмотка. Обмотка дополнительных полюсов.

При отклонении коммутации от прямолинейной токи в коммутируемых секциях создают дополнительную реакцию якоря, которая называется коммутационной. В генераторном режиме при прямолинейной коммутации размагничивающее и подмагничивающее действие коммутируемой секции одинаково (рис. 6.27,а). В среднем за период коммутации эта реакция якоря не проявляется.

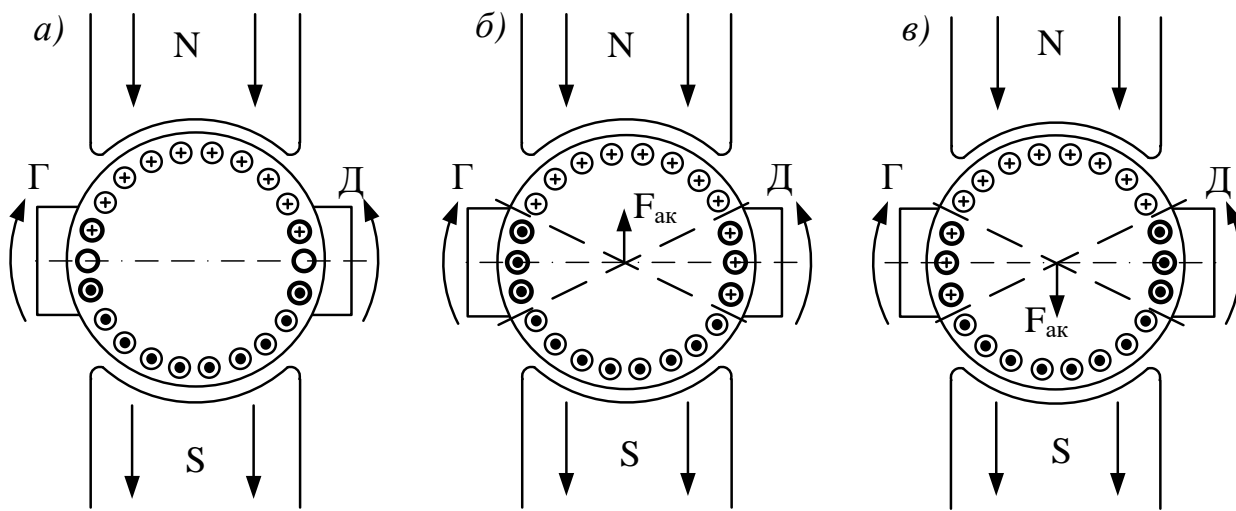


Рис. 6.27. Коммутационная реакция якоря

При замедленной коммутации (рис. 6.27,б) длительность размагничивающей силы реакции якоря больше длительности намагничивающей реакции якоря. Результирующая коммутационная реакция якоря получается размагничивающей. При ускоренной коммутации (рис. 6.27,в) — коммутационная реакция якоря намагничивающая. В

двигательном режиме эти процессы носят обратный характер [1].

18. Генераторы постоянного тока независимого возбуждения. Основная группа характеристик.

1. характеристика холостого хода $E_0 = f(I_B)$, $I = 0$, $n = \text{const} = n_{\text{номин}}$
 2. внешняя характеристика $U = f(I)$, $I_B = 0$, $n = \text{const} = n_{\text{номин}}$
 3. регулировочная характеристика $I_B = f(I)$, $U = \text{const} = U_{\text{номин}}$, $n = \text{const} = n_{\text{номин}}$
 4. характеристика короткого замыкания $I = f(I_B)$, $U = 0$, $n = \text{const} = n_{\text{номин}}$
 5. нагрузочная характеристика $U = f(I_B)$, $I = \text{const}$, $n = \text{const} = n_{\text{номин}}$
- Частный случай — характеристика холостого хода.

1. характеристика холостого хода $E_0 = f(I_B)$, $I = 0$, $n = \text{const} = n_{\text{номин}}$

(1) (2) (3)

Машину проектируют таким образом, чтобы она работала на изломе характеристик холостого хода. Этой точке соответствует ЭДС генератора, численно равное напряжению U_n . Это испытывается в токе возбуждения $I_{Bн}$.

Для того, чтобы снять характеристики генератора возбужденного до допустимого значения $E_{0 \text{ доб.}}$, величина которого определяется прочностью генератора.

При этом кривая намагничивания практически линейная, кривая цепь не намагничена.

Характеристику можно продлить до возбуждения I_B , где она отсечет отрезок на Δ .

2. внешняя характеристика $U = f(I)$, $I_B = 0$, $n = \text{const} = n_{\text{номин}}$

(4) $\Delta U\% = 5 \dots 15\%$, $I_k \rightarrow (U > 0)$

С ростом тока нагрузки I , напряжение на зажимах генератора U , будет уменьшаться из-за роста падения напряжения на внутреннем сопротивлении машин и с ростом различных действий реакции якоря.

Для того, чтобы напряжение было стабилизировано и не зависимо от тока нагрузки I , снимают регулировочные характеристики.

3. регулировочная характеристика $I_B = f(I)$, $U = \text{const} = U_{\text{номин}}$, $n = \text{const} = n_{\text{номин}}$

(5) $U = E - I_a r_a$, $E = k\Phi\omega$, $k\omega = \text{const}$, $\Phi \sim I_B$, $U = E - I_a r_a$, $\uparrow E \sim \Phi \sim I_B$

Вид регулировочной характеристики обусловлен теми же характеристиками что и внешние характеристики.

4. характеристика короткого замыкания $I = f(I_B)$, $U = 0$, $n = \text{const} = n_{\text{номин}}$

(6) в режиме испытания короткого замыкания ток якоря находится в пределах номинального значения.

Чтобы это соблюсти при замкнутой на коротко обмотке якоря приходится в обмотке возбуждения давать малый ток, в результате насыщено слабо и характеристика короткого замыкания получается практически.

При отсутствии возбуждения ($I_B = 0$) обмотка якоря вращается в остаточном магнитном потоке ($\Phi_{ост}$).

$\Phi_{ост} \rightarrow E_{ост} \rightarrow I_{ост}$

Для наладочных работ характеристику короткого замыкания лучше совместить с началом координат.

5.нагрузочная характеристика $U = f(I_B)$, $I = \text{const}$, $n = \text{const} = n_{номин}$

Эти характеристики можно оценить, ток возбуждения машины необходим для компенсации различных действующих реакций якоря.

Отрезок FB характеризует магнитодвижущую силу реакции якоря, размагничивающее действие которой компенсируется.

(7) треугольник ECD называется характеристическим, отрезок CD характеризует падение напряжения внутри машины.

Таким образом, характеристика $E = f(I_B)$, которая называется внутренней характеристикой, позволяет вместе с характеристикой треугольника оценить насколько нужно увеличить ток возбуждения, чтобы при данном токе нагрузки скомпенсировать размагничивающее действие реакции якоря.

В точке E и C в соответствии при рабочей характеристике холостого хода и нагрузки создается одна и та же ЭДС E с разными токами возбуждения.

19. Генераторы постоянного тока параллельного возбуждения. Основная группа характеристик.

1. характеристика холостого хода $E_0 = f(I_B)$, $I = 0$, $n = \text{const} = n_{номин}$

2. внешняя характеристика $U = f(I)$, $I_B = 0$, $n = \text{const} = n_{номин}$

3. регулировочная характеристика $I_B = f(I)$, $U = \text{const} = U_{номин}$, $n = \text{const} = n_{номин}$

4. характеристика короткого замыкания $I = f(I_B)$, $U = 0$, $n = \text{const} = n_{номин}$

5. нагрузочная характеристика $U = f(I_B)$, $I = \text{const}$, $n = \text{const} = n_{номин}$

Частный случай – характеристика холостого хода.

(1) Такой генератор склонен к самовозбуждению. Если вращать якорь в остаточном магнитном потоке, который $\Phi_{ост} = (0,02 \dots 0,03)\Phi_n$, то $\Phi_{ост} \rightarrow E_{ост} \rightarrow I_{ост}$.

Ток в замкнутом контуре создает свой магнитный поток, если этот поток сложится с $\Phi_{ост}$, то это приведет к увеличению ЭДС генератора, приводящий в свою очередь к увеличению тока в замкнутой контуре, этот процесс продолжается до насыщения цепи.

Он может развиваться только в одном направлении, характеристика холостого хода будет иметь вид: (2)

Внешняя характеристика при направленном возбуждении будет иметь вид: (3) $U = f(I)$, $I_B = \frac{U}{r_B}$, $n = \text{const} = n_{номин}$

Снижение напряжения на зажимах генератора обусловлено не только увеличением падения напряжения внутри машины и размагничивающим действием реакции якоря, но еще из-за снижения тока возбуждения.

После некоторого тока нагрузка $I_{пик}$ при дальнейшем росте тока под воздействием упомянутых выше факторов. $U \downarrow, \gg I_B \downarrow \gg \Phi \downarrow$

Магнитная цепь машины становится все менее насыщенной и даже незначительное уменьшение тока I_B , вызывает заметное уменьшение потока.

Характеристики $I_B = f(I)$ и $I = f(I_B)$ снимаются при подключении обмоток возбуждения при независимом источнике.

20. Генераторы постоянного тока последовательного возбуждения. Основная группа характеристик.

1. характеристика холостого хода $E_0 = f(I_B)$, $I = 0$, $n = \text{const} = n_{номин}$

2. внешняя характеристика $U = f(I)$, $I_B = 0$, $n = \text{const} = n_{номин}$

3. регулировочная характеристика $I_B = f(I)$, $U = \text{const} = U_{номин}$, $n = \text{const} = n_{номин}$

4. характеристика короткого замыкания $I = f(I_B)$, $U = 0$, $n = \text{const} = n_{номин}$

5. нагрузочная характеристика $U = f(I_B)$, $I = \text{const}$, $n = \text{const} = n_{номин}$

Частный случай – характеристика холостого хода.

В данном случае снимается только внешняя характеристика $U = f(I)$, $I_B = I$, $n = \text{const} = n_{номин}$ (1) При поступательном насыщении в магнитной цепи в точке А дальнейший рост тока, приводящий к увеличению $I_{га}$ приводит к снижению напряжения на зажимах и постоянному размагничиванию машин. Остальные характеристики такие, как при независимом возбуждении.

21. Генераторы постоянного тока смешанного возбуждения. Основная группа характеристик.

1. характеристика холостого хода $E_0 = f(I_B)$, $I = 0$, $n = \text{const} = n_{номин}$

2. внешняя характеристика $U = f(I)$, $I_B = 0$, $n = \text{const} = n_{номин}$

3. регулировочная характеристика $I_B = f(I)$, $U = \text{const} = U_{номин}$, $n = \text{const} = n_{номин}$

4. характеристика короткого замыкания $I = f(I_B)$, $U = 0$, $n = \text{const} = n_{номин}$

5. нагрузочная характеристика $U = f(I_B)$, $I = \text{const}$, $n = \text{const} = n_{номин}$

Частный случай – характеристика холостого хода.

(1) В такой машине основную роль играет параллельная обмотка возбуждения, а последовательная обмотка может включаться как согласно, так и встречно и позволяет формировать различные внешние и регулировочные характеристики.

(2)(3)

1. параллельное возбуждение, 2. последовательная обмотка включенная встречно, 3. последовательная обмотка включенная согласно

Нагружая характеристики при согласном включении последовательно соединенная обмотка будет располагаться выше характеристики холостого хода, тем самым превосходя размагничивающее действие реакции. (4)

22. Параллельная работа генераторов постоянного тока (на примере машин независимого и смешанного возбуждения).

Параллельно включенный генератор позволяет снизить их единичную мощность, повысить надежность электроснабжения потребителей. В случае вывода одного из генераторов, для параллельного подключения генератора на общую нагрузку требуется соблюдать полярность при подключении, также ЭДС генератора и напряжение сети должны быть по возможности близки, чтобы избежать значительных бросков тока, значительные усилия в которых может вывести машину из строя.

Кроме того, генератор включая параллельно, надо равномерно нагружать в соответствии с их номинальными мощностями.

Схема параллельной работы генератора независимого возбуждения:

(1) $I_n = I_1 + I_2$

Стараемся, чтобы вольтамперная характеристика генератора была одинакова. При подключении важно соблюдать полярность, поскольку при несоблюдении полярности при холостом ходу между генератором протекают большие токи.

Напряжение, которое прикладывается к нагрузке М, должно быть обеспечено 2 генерат.

$U = E_1 - I_1 r_a = E_2 - I_2 r_a$

$E_1 = k_1 \Phi_1 \omega_1$, $E_2 = k_2 \Phi_2 \omega_2$

Чаше всего величину ЭДС регулирует изменение тока возбуждения.

Если требуется нагрузить генератор 1 и передать его нагрузку генератору 2, то одновременно $I_{B1} \downarrow$, $I_{B2} \uparrow$, до тех пор пока $I = 0$.

После этого генератор 1 отключают от сети. Снижение тока возбуждения нужно проводить плавно, поскольку при резком его снижении из-за пропорциональной механической части агрегата может получиться, что E меньше U , то есть машина переводится в двигательный режим. Это может привести к выводу из строя привод двигателя, поскольку момент МПТ будет уже не уравновешивать момент привод.двигателя, а совпадать с ним, что приведет к разному.

23. Двигатели постоянного тока. Основная группа характеристик. Условия получения. Графическое представление.

ДПТ в зависимости от способа возбуждения позволяет формировать различные характеристики.

Характеристики ДПТ

1) Пусковая характеристика $\frac{I_n M_n}{I_n I_n} t_n$

2) Рабочая характеристика $M, I, n, \eta = f(P_2)$ P_2 -мощность на валу (полезная) РИСУНКИ

Рабочая характеристика снимаются при условиях

$U = const = U_H, I_B = const = I_H; R_a = r_{a2}$ (убывающее сопротивление в цепи якоря)

3) Регулировочная характеристика $D = \frac{n_{max}}{n_{min}}$ – диапазон регулирования РИСУНКИ

4) Электромеханическая характеристика

$\omega = f(I), I$ – ток в цепи якоря

5) Механическая характеристика

$i = f(M), M = K\Phi I$ – электромагнитный момент, $K = \frac{pN}{2\pi\omega}$

Характеристики 4 и 5 бывают естественными и искусственными. Естественные характеристики для ДПТ НВ получают при условии $U = const = U_H, \Phi = const = \Phi_H, R_a = r_{a2} (r_{уб} = 0)$

$$r_{a2} = r_a + r_{д.п} + r_{с.о}$$

В каталоге даны R обмотки при определении t. В расчетах используется значение R обмоток приведенные к их рабочей t.

Рабочая t обмотки связаны с классом изоляции. Для В: $t_{раб} = 75$ (градусов). Поэтому вводят коэффициент $k_t = \frac{235 + t_{раб}}{235 + t_{окр.ср}}$ – для меди.

24. Способы регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения. Электромеханические и механические характеристики.

Двигателей постоянного тока можно регулировать тремя способами:

- изменением напряжения, подводимого к обмотке якоря U_a ;
- изменением сопротивления цепи якоря R_a ;
- изменением магнитного потока возбуждения Φ .

$$U = E + I R_a, R_a = r_{аз} + r_{доб}, E = k\Phi\omega, U = k\Phi\omega + I R_a$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I R_a}{k\Phi} = \omega_0 - \Delta\omega, M = k\Phi I, \omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M R_a}{(k\Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega'$$

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi} \text{ – скорость Х.Х (M=0, I=0)}$$

$$\Delta\omega = \frac{I R_a}{k\Phi} \text{ – изменение скорости на характеристики } \omega = f(I) \text{ при каком-либо токе I}$$

$$\Delta\omega' = \frac{M R_a}{(k\Phi)^2} \text{ – изменение момента на характеристики } \omega = f(M) \text{ при каком-либо моменте M}$$

Рассмотрим способ регулирования скорости, который позволяет формировать искусственную характеристики. $\omega = f(I), \omega = f(M)$

Характеристики называется искусственной, если хотя бы один из параметров при которых снимается характеристик естественная отклоняется от нормы. ($U = const = U_H, \Phi = const = \Phi_H, R_a = r_{аз}$)

1. $U = var, \Phi = const = \Phi_H, R_a = r_{аз}$

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_H} = var, \Delta\omega = \frac{I r_{аз}}{k\Phi_H} = const, \Delta\omega' = \frac{M r_{аз}}{k\Phi_H} = const$$

Двигатели независимого и параллельного возбуждения обладают практически равными регулировочными возможностями по скорости (в отношении изменения величин R_a и Φ). Регулирование скорости изменением напряжения U_a применяется только для двигателей независимого возбуждения. При этом у двигателей параллельного возбуждения изменяется поток возбуждения Φ и их скорость меняется незначительно.

Регулирование скорости двигателя независимого возбуждения вниз от номинальной осуществляется уменьшением величины U_a . Для этой цели используются полупроводниковые преобразователи. При этом чаще всего $R_a = r_{а\sum}$ и $\Phi = const$. Изменение скорости $\Delta\omega$ от напряжения не зависит. Электромеханические и механические характеристики двигателя качественно не отличаются друг от друга.

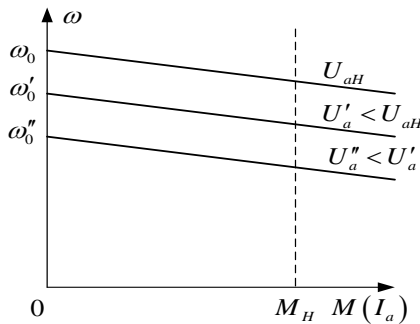
Рисунок

При $U > U_H$ магнитная цепь машины КПД.

2. $R_a = var, U = const = U_H, \Phi =$

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_H} = const, \Delta\omega = \frac{I(r_{аз} + r_{доб})}{k\Phi_H} = var,$$

Рисунок



насыщается, растут потери, нагрев, ухудшается

Рис. 6.40. Механические (электромеханические) характеристики двигателя независимого возбуждения при изменении напряжения U_a

$const = \Phi_H$

$$\Delta\omega' = \frac{M(r_{аз} + r_{доб})}{k\Phi_H} = var$$

$$\Delta\omega_e < \Delta\omega_1 < \Delta\omega_2, M_{п1} = k\Phi_H I_{п2}, I_{п2} = \frac{U_H}{(r_1 + r_2 + r_{аз})} = \frac{U_H}{I_{п2}}, (r_1 + r_2) = \frac{U_H}{(2 \dots 2,5) I_H r_{аз}}$$

Реостатный пуск прост в организации,

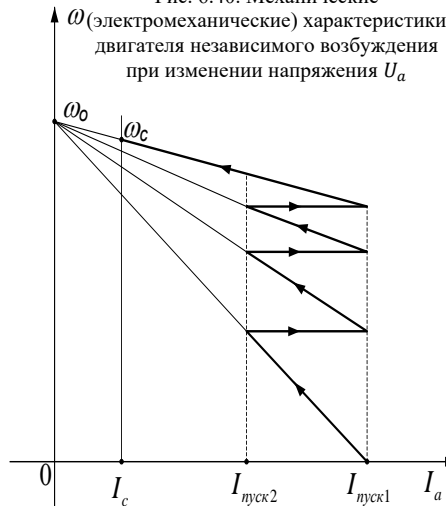


Рис. 6.42. Электромеханические характеристики реостатного пуска

(2 ... 2,5) I_H по условиям коммутации МПТ.

однако при этом большие потери на резисторах.

В момент пуска двигателя $\omega = 0 \Rightarrow E = 0$

$I = \frac{U}{r_{az}} = (10 \dots 20)I_H.$

В данном случае в момент пуска поступает пусковой резистор. Реостатный пуск ступенчатый, резисторы выводят из работы постепенно.

3. $\Phi = var, U = const = U_H, R_a = r_{az}$
 $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_H} = \frac{1}{\Phi}, \Delta\omega = \frac{I r_{az}}{k\Phi_H} = \frac{1}{\Phi}, \Delta\omega' = \frac{M r_{az}}{k\Phi_H} = \frac{1}{\Phi^2}$

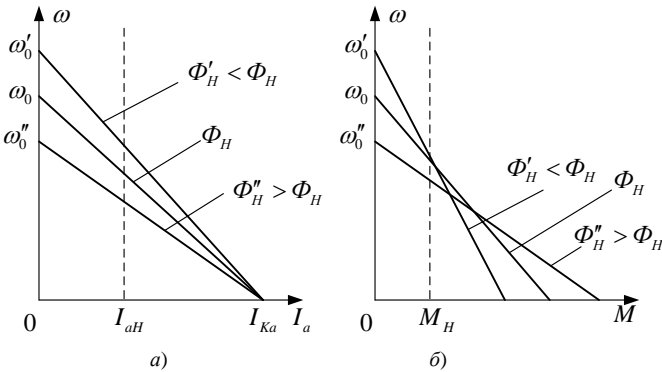


Рис. 6.43. Электромеханические (а) и механические (б) характеристики двигателя при изменении потока Φ

25.Способы регулирования скорости параллельного возбуждения. механические характеристики.

Двигателей постоянного тока можно

- изменением напряжения,
- изменением сопротивления цепи якоря R_a ;
- изменением магнитного потока возбуждения Φ .

$U = E + I R_a, R_a = r_{az} + r_{доб}, E = k\Phi\omega, U = k\Phi\omega + I R_a$
 $\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I R_a}{k\Phi} = \omega_0 - \Delta\omega, M = k\Phi I, \omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M R_a}{(k\Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega'$
 $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$ - скорость Х.Х ($M=0, I=0$)
 $\Delta\omega = \frac{I R_a}{k\Phi}$ - изменение скорости на характеристики $\omega = f(I)$ при каком-либо токе I
 $\Delta\omega' = \frac{M R_a}{(k\Phi)^2}$ - изменение момента на характеристики $\omega = f(M)$ при каком-либо моменте M

Рассмотрим способ регулирования скорости, который позволяет формировать искусственную характеристики. $\omega = f(I), \omega = f(M)$
Характеристики называется искусственной, если хотя бы один из параметров при которых снимается характеристик естественная отклоняется от нормы. ($U = const = U_H, \Phi = const = \Phi_H, R_a = r_{az}$)

1. $U - var, \Phi = const = \Phi_H, R_a = r_{az}$
 $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_H} = var, \Delta\omega = \frac{I r_{az}}{k\Phi_H} = const, \Delta\omega' = \frac{M r_{az}}{k\Phi_H} = const$

Двигатели независимого и параллельного возбуждения обладают практически равными регулировочными возможностями по скорости (в отношении изменения величин R_a и Φ). Регулирование скорости изменением напряжения U_a применяется только для двигателей независимого возбуждения. При этом у двигателей параллельного возбуждения изменяется поток возбуждения Φ и их скорость меняется незначительно. Регулирование скорости двигателя независимого возбуждения вниз от номинальной осуществляется уменьшением величины U_a . Для этой цели используются полупроводниковые преобразователи. При этом чаще всего $R_a = r_{a\Sigma}$ и $\Phi = const$. Изменение скорости $\Delta\omega$ от напряжения не зависит. Электромеханические и механические характеристики двигателя качественно не отличаются друг от друга.

двигателей постоянного тока
Электромеханические и механические
регулировать тремя способами:
подводимого к обмотке якоря U_a ;

Рисунок

При $U > U_H$ магнитная цепь машины КПД.
2. $R_a - var, U = const = U_H, \Phi =$
 $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_H} = const, \Delta\omega = \frac{I (r_{az} + r_{доб})}{k\Phi_H} = var,$

Рисунок

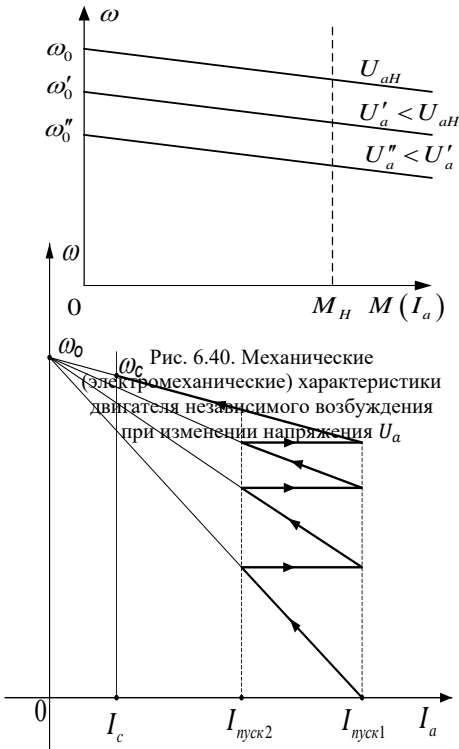


Рис. 6.42. Электромеханические характеристики реостатного пуска

насыщается, растут потери, нагрев, ухудшается
 $const = \Phi_H$
 $\Delta\omega' = \frac{M (r_{az} + r_{доб})}{k\Phi_H} = var$

$\Delta\omega_e < \Delta\omega_1 < \Delta\omega_2, M_{п1} = k\Phi_H I_{п2}, I_{п2} = (2 \dots 2,5)I_H$ по условиям коммутации МПТ.

$$(r_1 + r_2 + r_{az}) = \frac{U_H}{I_{п2}}, (r_1 + r_2) = \frac{U_H}{(2 \dots 2,5)I_H r_{az}}$$

Реостатный пуск прост в организации, однако при этом большие потери на резисторах.

В момент пуска двигателя $\omega = 0 \Rightarrow E = 0$

$$I = \frac{U}{r_{az}} = (10 \dots 20)I_H.$$

В данном случае в момент пуска поступает пусковой резистор. Реостатный пуск ступенчатый, резисторы выводят из работы постепенно.

3. $\Phi = \text{var}, U = \text{const} = U_H, R_a = r_{az}$

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_H} = \frac{1}{\Phi}, \Delta\omega = \frac{I r_{az}}{k\Phi_H} = \frac{1}{\Phi}, \Delta\omega' = \frac{M r_{az}}{k\Phi_H} = \frac{1}{\Phi^2}$$

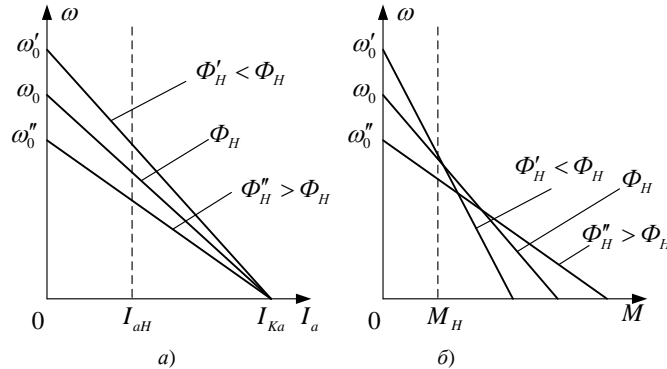


Рис. 6.43. Электромеханические (а) и механические (б) характеристики двигателя при изменении потока Φ

26. Способы регулирования скорости двигателей постоянного тока последовательного возбуждения. Электромеханические и механические характеристики.

Для данного двигателя справедливо $\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I R_a}{k\Phi}$ (1) $\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M R_a}{(k\Phi)^2}$ (2) $R_a = r_{\Sigma} + r_{доб}$

Характеристика намагничивания простого аналитического выражения не имеет, и представляется в примерном виде. Можно считать, что скорость двигателя и развиваемый им момент, в установленном режиме работы, связаны между собой, если предположить, что поток возбужден и ток в якоре связаны коэффициентом пропорциональности α . $\Phi = \alpha I$ (пунктирная линия на графике). Тогда выражение 1 примет вид $\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R_a}{k\alpha}$ (3) $k = \frac{P V}{2\pi a}$ - конструктивный коэффициент машины.

Электромагнитный момент: $M = k\Phi I = k\alpha I^2$ $M \sim I^2$

В этом случае 3 принимает вид: $\omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R_a}{k\alpha}$ (4)

Таким образом соответствующая характеристика ДПТ последовательного возбуждения представляет собой гиперболу.

ДПТ имеющие одинаковую мощность с ДНВ имеет меньшие габариты. При последовательном возбуждении создается больший момент при одном и том же токе с ДНВ.

В то же время у серийного двигателя скорость идеального холостого хода стремиться к бесконечности, то есть такой двигатель нельзя запускать в холостую или при малых нагрузках. $I \rightarrow 0 \Rightarrow I_b \rightarrow 0 \Rightarrow \Phi \rightarrow 0 \Rightarrow \omega_0 \rightarrow \infty$ (разнос!)

β -жесткость характеристики; $\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = tg \alpha, \beta > \beta_1$

Жесткость характеристики серийного двигателя различна. При токе номинала (А), жесткость характеристики соответствует ДПТ НВ. Полученные уравнения 1-4 дают лишь общее представление о характеристике серийного двигателя. Они построены исходя из предположения, что характеристика намагничивания двигателя линейна, то есть магнитная цепь не насыщена.

Построение естественной характеристики серийного двигателя $\omega = f(I)$ и $\omega = f(M)$

Проводят из универсальных характеристик построенных в относительных единицах для серий машин, в зависимости от их мощностей.

Естественные характеристики получают при следующих условиях:

Серийный двигатель может работать в тех же режимах, что и ДПТ НВ за исключением идеального холостого хода и рекуперативного торможения (отдачи энергии в сеть)

1. $U = \text{var}, I = I_b, r_{доб} = 0, I > I_n$ - магнитная цепь насыщена $\Phi = \text{const}$

2. $R_a = \text{var}, U = \text{const} = U_n, I = I_b$

В схеме предусмотрено индуктирование обмотки якоря и обмотки возбуждения. Если зашунтировать обмотки якоря и замкнуть k_1 , то $I < I_b, I = I - I_{ш}$

В этом случае магнитное поле усиливается, характер кажется ниже естественной. Можно добиться с помощью реостата $r_{доб}$, получение скорости ω_0 при $\Phi_n \neq 0, I_b = I_{ш} \neq 0, I = 0$

Если k_1 разомкнут и замкнут k_2 , то магнитный поток обмотки возбуждения ОВ ослабляется, $I_b < I, I_b = I - I_{ш}$

Характеристика может быть выше естественной

Опасность разноса двигателя усугубляется.

29. Трансформаторы. Общие сведения. Классификация. Устройство и принцип действия.

Трансформатор - статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования (трансформации) электроэнергии переменного тока с одним напряжением в электроэнергию переменного тока с другим напряжением при неизменной частоте. Трансформаторы бывают общего и специального назначения. Первые широко используются, как силовые в системах электроснабжения. Силовые трансформаторы бывают: масляные, сухие. Трансформаторы специального назначения имеют узкие области применения (сварочные, выпрямительные, измерительные)

Трансформаторы классифицируют по следующим параметрам:

- способ охлаждения (масляные с естественным и принудительным охлаждением, сухие с естественным и принудительным охлаждением, трансформаторы с водомасляными и дутьевым охлаждением, совтоловые и с применением других синтетических жидкостей);

- исполнение (внутренняя или наружная установка, герметичные, уплотненные);

- число фаз (однофазные и многофазные);

- число обмоток (двухобмоточные и многообмоточные);

- конструкция обмоток (концентрические, чередующиеся);
- конструкция магнитопровода (стержневые, броневые, бронестержневые, тороидальные);
- способ регулирования напряжения (под нагрузкой и при отключении напряжения).

(1) Преобразование энергии переменного тока в трансформаторе происходит в соответствии с законом электромагнитной индукции.

Однофазный трансформатор в упрощенном виде состоит из замкнутого магнитопровода и обмоток.

Магнитопровод собирается из листов электротехнической стали толщиной (0,35...0,5 мм). Трансформаторная сталь характеризуется узкой петлей гистерезиса, что позволяет снизить потери перемагничивания. Магнитные свойства стали зависят от проката.

(2) Магнитопровод и сердечник условно состоит из стержней и ярма.

Магнитопровод (сердечник) в собранном виде представляет собой единую конструкцию. Листы трансформаторной стали изолированы друг от друга. Обмотки изготовлены из медного изолированного провода (круглого, прямоугольного или квадратного сечения). Обмотка, которая подключается к сети с напряжением U_1 называется первичной обмоткой с числом витков W_1 . Обмотка, к которой подключается нагрузка с сопротивлением $Z_{н\Gamma}$, называется вторичной обмоткой с числом витков W_2 .

$k = W_1/W_2$, коэффициент трансформации ($k > 1$, трансформатор понижающий; $k < 1$, трансформатор повышающий)

Первичная обмотка понижающего трансформатора, называется обмоткой высшего напряжения (ОВН). Она мотается проводом малого сечения и имеет большую длину, чем обмотка вторичная, сечение которой больше, а длина короче, это обмотка низшего напряжения (ОНН).

$$R_{\text{ОВН}} > R_{\text{ОНН}}, R = \rho \cdot l / S$$

Принцип работы трансформатора можно представить следующей цепочкой:

(3)

Передача электрической энергии в трансформаторах различного назначения от одной обмотки к другой осуществляется в соответствии с законом электромагнитной индукции. ЭДС, наводимая в обмотке с числом витков, численно равна изменению магнитного потока во времени, проходящего через нее.

Устройство и принцип действия однофазного трансформатора могут быть рассмотрены согласно рисунку (4). В простейшем случае однофазный трансформатор состоит из двух обмоток 1 и 2, закрепленных на замкнутом магнитопроводе 3 для усиления электромагнитного взаимодействия между ними. Магнитопровод состоит из верхнего и нижнего ярма, а так же из стержней, на которых закреплены обмотки. Магнитная система трансформатора состоит из изолированных друг от друга листов анизотропной электротехнической (трансформаторной) стали с присадками кремния для снижения уровня вихревых токов толщиной 0,35...0,55 мм. Обмотка 1, к которой подводится энергия от генератора Г, называется первичной; обмотка 2, к которой подключена нагрузка $Z_{н\Gamma}$, называется вторичной.

При прохождении тока, по первичной обмотке возникает магнитный поток, образующий две свои составляющие: полезный поток, проходящий по стали магнитопровода, и поток рассеивания, замыкающийся по воздуху. Полезный поток индуцирует в обеих обмотках ЭДС. При замыкании вторичной обмотки на нагрузку $Z_{н\Gamma}$ под действием наведенной в ней ЭДС протекает ток, создающий свой магнитный поток. Поток в соответствии с правилом Ленца в каждый момент времени направлен навстречу потоку. Он так же образует две составляющие – полезную и рассеивания. Потоки обеих обмоток и образуют результирующий полезный магнитный поток, определяющий величины ЭДС обмоток в режиме нагрузки трансформатора.

Обмотка трансформатора, подключаемая к сети с более высоким напряжением, называется обмоткой высшего напряжения (ОВН). Обмотка трансформатора, к которой подключается сеть с более низким напряжением, называется обмоткой низшего напряжения (ОНН). Силовые трансформаторы и автотрансформаторы бывают повышающими и понижающими. Такое разделение обусловлено различными значениями напряжений в электрических сетях. Повышающие трансформаторы и автотрансформаторы установлены на электростанциях с целью повышения напряжения, вырабатываемого синхронными генераторами, для дальнейшей передачи энергии по электрическим сетям на большие расстояния. Понижающие трансформаторы установлены на понизительных, распределительных электрических подстанциях с целью понижения напряжения электрических сетей и для передачи энергии пониженного напряжения в определенные районы или конкретным потребителям. Первичные обмотки трансформаторов подключены к источникам питания (для повышающих трансформаторов – к генераторам электростанций; для понижающих трансформаторов – к сетям, питающим подстанции) и являются потребителями электроэнергии. Вторичные обмотки трансформаторов подключены к нагрузке (для повышающих трансформаторов – к сетям, питающим подстанции; для понижающих трансформаторов – к сетям, питающим подстанции более низкого напряжения и потребителей), являясь генераторами электроэнергии.

Для всех трансформаторов существуют два предельных режима работы: режим холостого хода и режим короткого замыкания. При наложении одного режима на другой можно моделировать любой нагрузочный режим трансформатора. Изучение предельных режимов трансформаторов необходимо для проведения их испытаний с целью поиска неисправностей, определения эксплуатационных параметров, построения схем замещения, служащими по существу расчетными моделями трансформаторов. (еще есть режим: работа под нагрузкой)

30. Холостой ход однофазного трансформатора. Схема замещения и векторная диаграмма.

Рассмотрим идеальный трансформатор на холостом ходу у которого отсутствует активное сопротивление и потери в обмотках, а так же потоки рассеивания и потери в стали.

Рисунок

Сердечник трансформатора насыщается в результате при синусоидальных напряжениях, ЭДС и магнитном потоке, ток холостого хода получается не синусоидальным.

Снимают характеристику холостого хода (потери, ток $\cos \varphi_0$) в зависимости от напряжения, которое подводит к трансформатору.

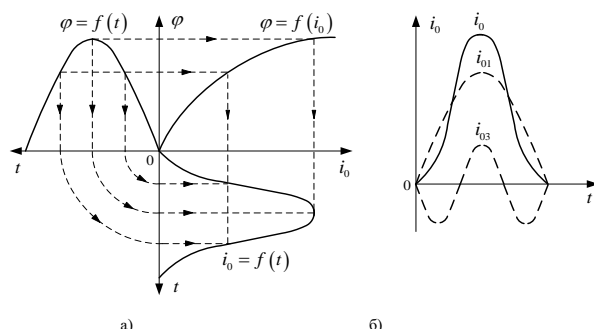


Рис. 2.3. Зависимости, поясняющие графическое определение формы кривой тока холостого хода (а) и отображающие влияние третьей гармоники на форму тока холостого хода трансформатора (б)

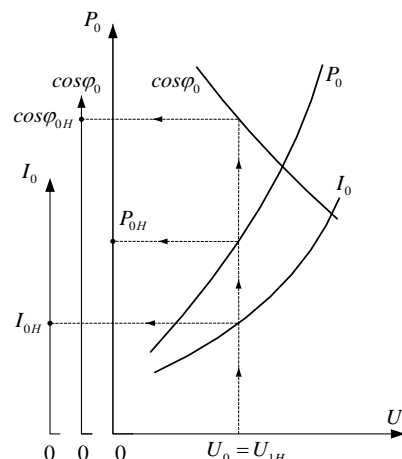


Рис. 2.4. Характеристики трансформатора в режиме холостого хода

$$I_{OH} \leq 0,1 I_{1H}, \cos \varphi_{OH} = \frac{P_{0+1}}{m U_{1PH} I_{1PH}}, \text{ м- число фаз}$$

Рисунок

$$\Phi_{m2} = 2\Phi_{m1} = 2\Phi_{m3},$$

Рисунок

$$\Phi_{m1} > \Phi_{m2} > \Phi_{m3},$$

$$U_1 = -E_1 + I_0(r_1 + jx_1), E_2 = U_{20}$$

Рисунок

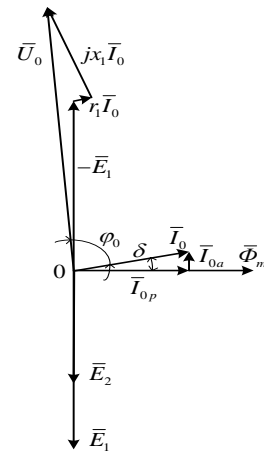
$$r_\mu, x_\mu\text{-параметры контура намагничивания. } r_\mu, x_\mu = \sqrt{r_\mu^2 + x_\mu^2} = z_m$$
$$r_\mu + r_1 = r_0; r_\mu \gg r_1 \gg r_\mu \approx r_0, x_\mu + x_1 = x_0$$
$$r_0, x_0, z_0\text{-параметры холостого хода. } z_0 = \sqrt{r_0^2 + x_0^2}$$
 δ -угол диэлектрических потерь($3 \dots i_1$) , $|E_2| < |E_1|$ 

Рис. 2.5. Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода

Исследуем испытание короткого замыкания, а не эксплуатационное. Для этого закоротив вторичную обмотку, обмотки первичной проводят напряжения от ЛАТР. При испытательном КЗ токи в обмотки находится в пределах минимального значения.

Рисунок

$W_2 \rightarrow W'_2 \rightarrow W_1$, число витков меняется в k раз.

$$k = \frac{W_1}{W_2}, (\text{коэффициент трансформации})$$

$$E'_2 = E_2 k = E_1, I'_2 = \frac{I_2}{k} = I_1, r'_2 = r_2 \cdot k^2, x'_2 = x_2 k^2$$

Если пренебречь током Х.Х. то согласно правилу Ленца ($I_0 \approx 0$)

$$I_1 w_1 = -I_2 W_2; I_1 w_1 = -I_2 w_1' \Rightarrow I_1 = -I_2'$$

Рисунок

$$z_k = (r_1 + r'_2) + j(x_1 + x'_2), z_k\text{- полное сопротивление КЗ}$$

В данной схеме замещения в реальной электромагнитной связи между обмотками заменены гальвоническими (непосредственными) связями.

В опыте Кз находят P_{KH} и $U_K(\%)$

Значение напряжения короткого обмотках. Оно входит в паспортные $U_{KH} \% = \frac{U_{KH}}{U_{1H}} \cdot 100\%$, где U_{1H} – напряжение, подводимое к первичной обмотке, обеспечивающее протекание в них

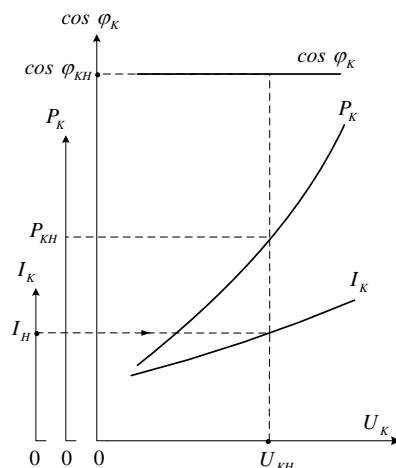


Рис. 2.7. Характеристики трансформатора в режиме короткого замыкания

замыкания определяется для номинальных токов в данные трансформаторов и указывается в процентах: номинальное напряжение первичной обмотки; U_{KH} – обмотке при замкнутой накоротко вторичной обмотке, номинальных токов.

35. Особенности конструктивного исполнения трансформаторов. Основные варианты конструкций магнитопроводов и обмоток. Способы соединения обмоток.

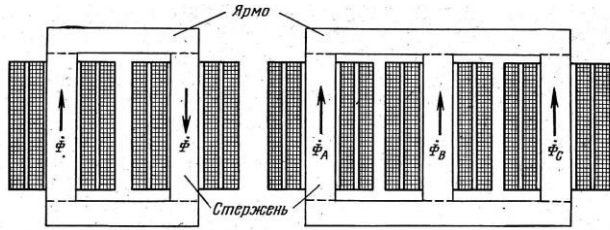


Рис. 2.15. Схемы стержневых трансформаторов

Основными элементами конструкции трансформаторов являются магнитопровод, обмотки с отводами и элементами изоляции, а для масляных, кроме того, бак с расширителем. Трансформаторы снабжаются также устройствами охлаждения, переключения ответвлений обмоток, защиты масла от воздействий внешней среды, контроля и сигнализации, а также вводами. В конструкции магнитопровода различают активную часть, непосредственно проводящую магнитный поток, и неактивную часть, придающую магнитопроводу необходимую жесткость. Различают два основных типа магнитных систем трансформатора: стержневую и броневую. В таких типах магнитных систем стержни и ярма расположены в одной плоскости.

В однофазных стержневых трансформаторах каждая обмотка состоит из двух частей, которые расположены на двух стержнях и соединяются последовательно или параллельно. Такое расположение обмоток позволяет усилить электромагнитную связь между ними.

Однофазный трансформатор броневой конструкции имеет один стержень с обмотками и развитое ярмо, которое частично закрывает обмотки подобно броне. В трансформаторах такого типа электромагнитная связь между обмотками несколько лучше, чем в стержневых. В трехфазных сетях, рассчитанных на большую мощность ($S_n > 300$ МВА) применяются трехфазные трансформаторные группы. Такие трансформаторы называют также групповыми. Чаще применяются трехфазные трансформаторы с магнитопроводом, который является общим для всех фаз. Идея образования такого трансформатора заключалась в том, что, для синусоидальных токов и синусоидальных потоков справедливо:

$$i_A + i_B + i_C = 0, \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$$

У современных трехфазных трансформаторов магнитопроводы всех фаз находятся в одной плоскости. Для такой конструкции характерна некоторая несимметрия магнитной цепи, т.е. длина магнитных линий средней фазы несколько короче, чем для крайних.

По способу сочленения ярм и стержней магнитопроводы бывают стыковые и шихтованные. В стыковых магнитопроводах магнитная цепь состоит из вертикальных стержней и перекрывающих их сверху и снизу ярм. Ярма и стержни собираются отдельно и крепятся с помощью стяжных шпилек. Во избежание замыкания листов и возникновения значительных вихревых токов, между ними помещают изоляционные прокладки из нагревостойкого материала. Однако это вызывает увеличение сопротивления магнитной цепи и ведет к росту тока намагничивания.

В шихтованных магнитопроводах стержни и ярма собираются как единая конструкция. Вместо прямоугольных листов применяют листы, одна из сторон которых срезана под углом. Такая шихтовка называется в «косой стык» и приводит к снижению потерь в углах магнитопровода из-за уменьшения длины пути магнитного потока S , не совпадающего с направлением прокатки листа 1.

Стержни магнитопровода имеют в сечении вид многоугольника, вписанного в окружность. Число ступеней растет с увеличением мощности трансформатора. При работе трансформатора на металлических частях его магнитопровода наводятся электрические заряды. Чтобы избежать разрядов внутри бака, активная сталь и ярмовые балки заземляются при помощи медной ленты, соединяющей крайний пакет активной стали с ярмовой балкой и проходящей далее к заземленному баку.

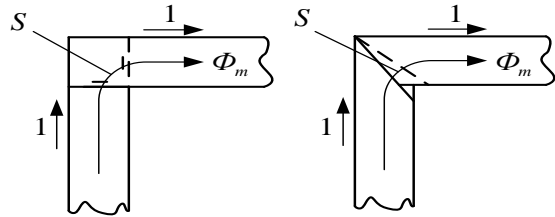


Рис. 2.19. Сравнение длины пути магнитного потока S : а) при шихтовке магнитопровода из прямоугольных пластин; б) при шихтовке магнитопровода из пластин со срезанными углами

По взаимному положению обмотки подразделяются на дисковые чередующиеся и концентрические. Первые обеспечивают хорошую электромагнитную связь друг с другом, однако сложны в изготовлении и применяются редко. Вторые в современных трансформаторах используются достаточно широко.

Концентрические обмотки: 1) **Цилиндрическая многослойная** - Провод круглого сечения для ОВН до 35 кВ; при большом количестве слоев, разделенных кабельной бумагой, обмотка выполнена из двух катушек с охлаждающим каналом; проста в изготовлении, но имеет недостаточную механическую прочность.

2) **Катушечные цилиндрические многослойные** - Несколько последовательно соединенных катушек из провода круглого сечения для ОВН до 35 кВ., 3) **Цилиндрические одно- и двухслойные** - Провод круглого сечения для ОНН до 6 кВ на токи до 800 А; проста в изготовлении, однако имеет недостаточную механическую прочность при коротких замыканиях. 4) **Винтовые одно- и многоходовые** - Провод прямоугольного или квадратного сечения для ОНН на токи до 300 А; обладает достаточной механической прочностью. 5) **Непрерывные спиральные катушечные** - Провод прямоугольного или квадратного сечения для ОНН и ОВН; сложна в изготовлении, но обладает высокой механической прочностью.

36 Схемы и группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов.

Обмотки трёхфазных трансформаторов соединенных в схема треугольник, звезда, зигзаг

Соединение в звезду используется в распределительных сетях систем обслуживания. Нейтральную точку заземляют $U_f = U_1/\sqrt{3}$ снижая затраты на изоляцию?

Включение обмоток в треугольник позволяет снизить влияние высшей гармоничных напряжений, особенно кратных 3/

Соединение в зигзаг применяется в трансформаторе, работающие на несимметричной нагрузке.

Разные обмотки	высшего	U	(ОВН)	(ABC-начало	XYZ-конец)
----------------	---------	---	-------	-------------	------------

Оботки среднего напряжения (ОСН) (Am,Bm,Cm-начало , Xm,Ym,Zm-конец)

Нулевой провод в звезде,зигзаге обозначается Om

Знания начала о концов обмоток позволяет при соответствии схеме обмотки определить к какой группе относится трансформатор. Это важно для подключения трансформатора на параллельную работу.

Для того, чтобы определить к какой группе относится трансформатор – надо знать угол между линейным напряжением(ЭДС) первичной и вторичной обмоток.

Этот угол кратен 30 градусам. У трёхфазного трансформатора существует 12 групп от 0 до 11. Для определения групп используется “часовой метод”

(1)

Если направление намотки обеих обмоток одинаково, то их ЭДС направлено согласно.

В однофазно варианте получается группа 0(группа 12)

Усли поменять направление намотки одной из обмоток, то ЭДС обмоток направлен встречно и образует группа 6(и в однофазном)

(2)

При определении группы трансформатора вектор линии ЭДС обмотки высшего напряжения принимают в качестве минутной стрелки(большой), которая жестко связана с цифрой 0. Одноименный вектор линии ЭДС ОНН принимают за часовую(малую). Эти векторы связаны между собой и показание условных часов определяет группу трансформаторов.

37.Правила включения трансформаторов на параллельную работу. Причины возникновения уравнильных токов. Фазировка трансформаторов.

Такая работа применяется над подстанциях для обеспечения резервирования электроснабжения потребителя, при ремонте, а также для уменьшения потерь энергии в каждом трансформаторе при изменении нагрузки.

Единичная мощность каждого трансформатора уменьшается, можно организовать экономный режим рабочего трансформатора.

Для достижения наилучшего режима работы желательно, чтобы нагрузка распределялась между трансформаторами пропорционально их номинальной мощности.

Это достигается путем выполнения следующих условий:

1)группы трансформаторов должны быть одинаковыми

2)коэффициенты трансформаторов должны быть одинаковыми(из опыта эксплуатации следует ,что коэффициент трансформации К каждого трансформатора не должны отличаться более чем $\pm 0,5\%$ от среднего геометрического значения) $\Delta k = \frac{k_1 - k_2}{\sqrt{k_1 k_2}} * 100 \leq \pm 0,5\%$

3)напряжение короткого замыкания у трансформатора должны быть одинаковы(из опыта эксплуатации трансформатора следует, что допускаемая параллельная работа трансформатора при отличии напряжения короткого замыкания каждого трансформатора не больше $\pm 10\%$ от среднего арифметического значения) $\Delta U_{k\%} = \frac{U_{k\%1} - U_{k\%2}}{0,5(U_{k\%1} + U_{k\%2})} * 100\% \leq \pm 10\%$

Во всех 3 случаях между параллельными работами трансформатора возникают уравнильные токи.

Рисунок

У силовых трансформаторов , стоящих в электроснабжении имеется возможное переключение внешней первичной обмотки, меняя таким образом коэффициент трансформации.

Переключение проводится или без возбуждения(ПБВ) то есть когда потребитель отключается. При этом напряжение меняется в диапазон - 2,5...2,5% относительно номинального значения.

Также переключение осуществляется под нагрузкой, напряжение меняется в диапазон $-(6-10\%) \dots +(6-10\%)$

Потребитель не отключается

Переключение проводится при изменении нагрузки потребителя, а также в разные сезоны года. Их целью является поддержка потребителю номинального напряжения.

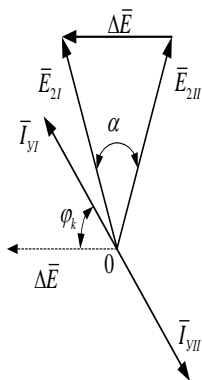
38.Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых группах соединения обмоток.

На повышающих и понижающих трансформаторных подстанциях обычно устанавливаются в зависимости от мощности несколько параллельно работающих трансформаторов. Параллельная работа необходима для обеспечения резервирования в электроснабжении потребителей при аварии или ремонте, а также для уменьшения потерь энергии в периоды малых нагрузок подстанции путем отключения отдельных параллельно работающих трансформаторов.

Пусть включены на параллельную работу трансформаторы с соединением обмоток Y/Y-0 и Y/ Δ -11, имеющие одинаковые первичные и вторичные напряжения (1). Тогда вторичные эдс E_{2I} и E_{2II} соответствующих фаз трансформаторов будут равны по значению, но сдвинуты по фазе на угол α , равный 30° . В замкнутом контуре вторичных обмоток возникает разность эдс: $\Delta E = 2E_2 \sin \frac{\alpha}{2} \approx 0,5E_2$

Значение уравнильного тока \bar{I}_y , протекающего по первичной и вторичной обмоткам трансформаторов, ограничено сопротивлениями обмоток. Оно равно сумме сопротивлений короткого замыкания трансформаторов. Тогда $I_y = \frac{\Delta E}{z_{KI} + z_{KII}}$

В качестве иллюстрации рассмотрена параллельная работа двух трансформаторов в режиме холостого хода с одинаковыми мощностями, коэффициентами трансформации k и сопротивлениями короткого замыкания $z_{K\%I} = z_{K\%II} = u_{KH\%} = 0,05$. Величина уравнильного тока в процентах от номинального значения тока обмоток составит. $I_{y\%} = \frac{0,5}{2 * 0,05} * 100\% = 500\%$ Наличие такого тока будет равносильно короткому замыканию. Параллельная работа трансформаторов с различными группами соединения обмоток недопустима даже в режиме холостого хода.



(1). Параллельная работа трансформаторов с соединением обмоток Y/Y-0 и Y/ Δ -11

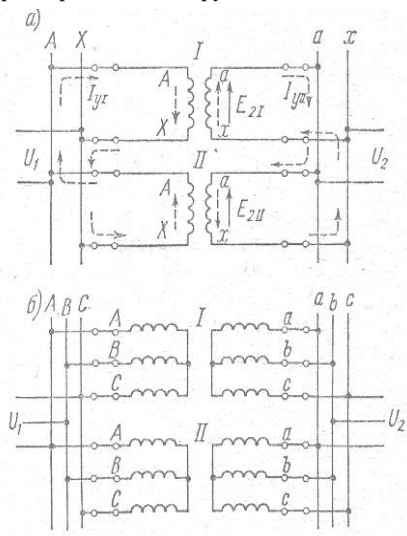


Рис. 2.32. Схемы параллельной работы однофазных (а) и трехфазных (б) трансформаторов

39. Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации.

На повышающих и понижающих трансформаторных подстанциях обычно устанавливаются в зависимости от мощности несколько параллельно работающих трансформаторов. Параллельная работа необходима для обеспечения резервирования в электроснабжении потребителей при аварии или ремонте, а также для уменьшения потерь энергии в периоды малых нагрузок подстанции путем отключения отдельных параллельно работающих трансформаторов.

Пусть у двух однородных трансформаторов первичные и вторичные напряжения не равны, причем $\bar{E}_{2I} > \bar{E}_{2II}$. Следовательно, в замкнутом контуре вторичных обмоток будет действовать разность эдс

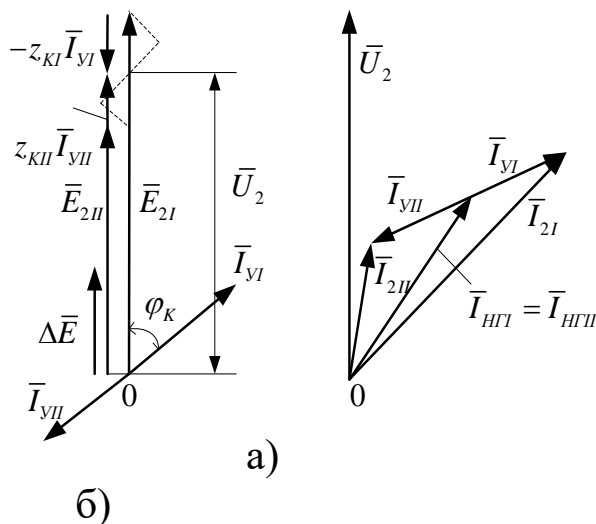
$\Delta \bar{E} = \bar{E}_{2I} - \bar{E}_{2II}$ (1 а). Возникающий уравнивающий ток \bar{I}_y во вторичных обмотках трансформаторов имеет различные направления относительно действующих в них эдс. Трансформатор I (рис. 2.32), т.к. $\bar{E}_{2I} > \bar{E}_{2II}$ является источником тока, а трансформатор II потребляет этот ток. Падения напряжения $z_{KI}\bar{I}_{yI}$ и $z_{KII}\bar{I}_{yII}$, вызываемые уравнительными токами в обмотках трансформаторов, выравнивают вторичные напряжения обмоток \bar{U}_2 . При включении нагрузки в трансформаторах возникают токи нагрузки \bar{I}_{HGI} и \bar{I}_{HGI} (1 б). Уравнительные токи \bar{I}_{yI} и \bar{I}_{yII} складываются с ними и вызывают неравномерную нагрузку трансформаторов. Трансформатор I оказывается перегруженным, а трансформатор II – недогруженным.

Пусть параллельно работают два трансформатора одинаковых мощностей, с одинаковыми группами соединения обмоток и сопротивлениями короткого замыкания $z_{K\%I} = z_{K\%II} = u_{KH\%} = 0,055$. Коэффициенты их трансформации k различаются на 1%. Тогда разность эдс ΔE будет равна $0,01 \cdot U_H$. Согласно выражению (2.61) уравнивающий ток I_y составляет довольно значительную величину. Он будет $I_{y\%} = \frac{0,01}{2 \cdot 0,055} \cdot 100\% = 9\%$. Также и в этом случае трансформаторы загружены неравномерно.

Как показывает опыт эксплуатации при параллельной работе трансформаторов их коэффициенты трансформации не должны различаться более чем на $\pm 0,5\%$ от их среднего значения. Например, для двух трансформаторов с коэффициентами k_I и k_{II} такое отличие определяется выражением:

$$\Delta k = \frac{(k_I - k_{II})}{\sqrt{k_I k_{II}}} \cdot 100\% \leq \pm 0,5\%$$

Трансформатор с меньшим значением k , несет большую нагрузку, чем трансформатор с большим k .



(1 а). Параллельная работа

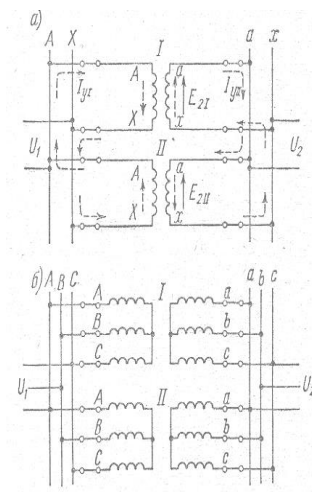


Рис. 2.32.
Схемы
параллельной

40. Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых напряжениях короткого замыкания.

На повышающих и понижающих трансформаторных подстанциях обычно устанавливаются в зависимости от мощности несколько параллельно работающих трансформаторов. Параллельная работа необходима для обеспечения резервирования в электроснабжении потребителей при аварии или ремонте, а также для уменьшения потерь энергии в периоды малых нагрузок подстанции путем отключения отдельных параллельно работающих трансформаторов.

Три трансформатора работают параллельно, имеют одинаковые группы соединения обмоток и коэффициенты трансформации k . Для упрощения анализа их работы пренебрежем током намагничивания. В результате может быть использована упрощенная схема замещения, которая представлена на рис. 2.35. Определим распределение нагрузки между трансформаторами. Падение напряжения в трансформаторной группе:

$$\Delta U = I \cdot z = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{z_{Ki}}}, \text{ где } z - \text{сопротивление } n \text{ трансформаторов в группе; } z_{Ki} - \text{сопротивление короткого замыкания } i\text{-ого трансформатора.}$$

Напряжение $u_{KH\%}$ и сопротивление z_{Ki} короткого замыкания каждого i -ого трансформатора рассчитываются в соответствии с формулами; .

$$u_{KH\%} = \frac{z_{Ki} I_{HI}}{U_{1H}} \cdot 100\%; \quad z_{Ki} = \frac{u_{KH\%} U_{1H}}{100 I_{HI}}$$

$$\text{Ток каждого } i\text{-ого трансформатора определяется выражением: } I_i = \frac{\Delta U}{z_{Ki}} = \frac{I}{z_{Ki} \sum_{i=1}^n \frac{1}{z_{Ki}}} = \frac{I}{\frac{u_{KH\%} U_{1H}}{100 I_{HI}} \sum_{i=1}^n \frac{100 I_{HI}}{u_{KH\%} U_{1H}}}$$

$$\text{Умножаем обе части выражения (2.66) на коэффициент: } m U_{1H} : m U_{1H} I_i = \frac{m}{m} \cdot \frac{u_{KH\%} U_{1H}}{100 I_{HI}} \sum_{i=1}^n \frac{100 I_{HI}}{u_{KH\%} U_{1H}}$$

Тогда нагрузка каждого i -ого трансформатора:

$$S_i = \frac{u_{KH\%} \sum_{i=1}^n S_{Hi}}{S_{Hi}}$$

где S - суммарная мощность нагрузки, S_{Hi} - паспортная мощность i -ого трансформатора.

Если пренебречь незначительным сдвигом токов по фазе в ветвях схемы замещения, то можно полагать, что;

$$I = I_I + I_{II} + I_{III}, \quad S = S_I + S_{II} + S_{III}$$

Таким образом, первый трансформатор *I* с меньшим значением $u_{KH}\%$ перегружен, трансформатор *II* работает с нагрузкой близкой к номинальной, а трансформатор *III* с большим значением $u_{KH}\%$ недогружен. Трансформатор, имеющий меньшее значение напряжения короткого замыкания $u_{KH}\%$, несет большую нагрузку. Суммарная нагрузка должна быть снижена, чтобы первый трансформатор работал в номинальном режиме, но тогда третий трансформатор будет еще более недогружен. Следовательно, такая работа нецелесообразна.

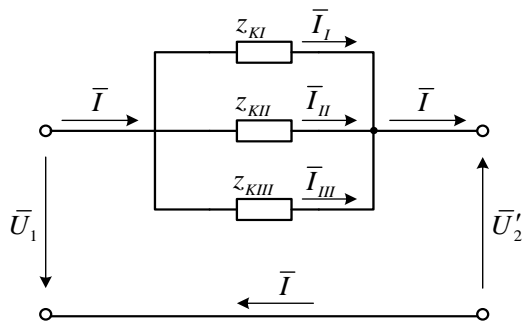


Рис. 2.35. Параллельная работа

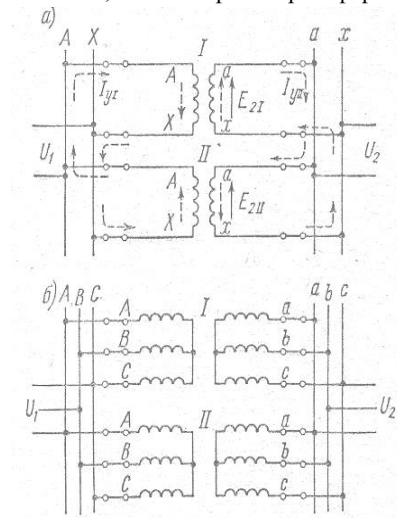


Рис. 2.32. Схемы параллельной работы

41. Мощность потерь трансформаторов при параллельной работе.

Определение суммарной мощности потерь параллельно работающих трансформаторов позволяет найти пределы нагрузок подстанции, при которых целесообразно переходить от работы одного трансформатора к параллельной работе двух, трех и т. д., что дает заметный экономический эффект. Например, на подстанции установлены три одинаковых трансформатора с потерями холостого хода P_{0H} и короткого замыкания P_{KH} . Если всю нагрузку подстанции несет один трансформатор, то мощность потерь составляет $P_{0H} + \beta^2 P_{KH}$. Если при той же нагрузке подстанции параллельно работают два трансформатора, то мощность потерь составляет $2P_{0H} + 2(\frac{\beta}{2})^2 P_{KH}$. Приравнявая потери одного трансформатора и потери двух трансформаторов, определим значение β_2 , при котором потери в двух трансформаторах будут меньше, чем в одном: $P_{0H} + \beta^2 P_{KH} = 2P_{0H} + 2(\frac{\beta}{2})^2 P_{KH}$.

$$\beta = \beta_2 = \sqrt{\frac{2P_{0H}}{P_{KH}}}.$$

Параллельное включение трех трансформаторов позволяет найти β_3 , при котором потери в них будут меньше, чем в двух: $2P_{0H} + 2(\frac{\beta}{2})^2 P_{KH} = 3P_{0H} + 3(\frac{\beta}{3})^2 P_{KH}$. $\beta = \beta_3 = \sqrt{\frac{6P_{0H}}{P_{KH}}}$.

Данный подход служит для определения рационального режима работы трансформаторов подстанции при ее проектировании и эксплуатации. Он используется также при неодинаковых потерях в трансформаторах. Экономический эффект достигается за счет снижения потерь холостого хода трансформаторов в случае отключения их части из сети питания в часы минимума нагрузок (ночные смены, выходные дни).

42. Особенности холостого хода трехфазных трансформаторов в зависимости от конструкции магнитопровода и способа соединения обмоток.

Для анализа режима холостого хода рассмотрим трехфазный трансформатор с соединением обмоток Δ/Y (рис. 2.29 а). Пусть каждая фаза его первичной обмотки подключена к синусоидальному напряжению сети. Тогда потоки будут синусоидальными, а фазные токи содержать высшие гармоники, из которых более других выделяется третья гармоника. Кратные трем гармоники тока холостого хода по фазе совпадают. По этой причине в линейных токах, которые представляют разность токов соответствующих фаз, гармоники, кратные трем, будут отсутствовать. Токи гармоник, кратных трем, будут циркулировать внутри замкнутого треугольника.

Если обмотки соединить по схеме Y/Δ , то гармоники, кратные трем, в фазных токах не могут существовать. Из нулевой точки нет выхода и гармоники, кратные трем, будут друг друга компенсировать (рис. 2.29 б). В результате, фазные токи холостого хода принимают синусоидальную форму. При этом потоки во всех трех магнитопроводах перестают быть синусоидальными. Они принимают уплощенную форму вследствие насыщения магнитопровода. Каждая гармоника потока индуцирует в обмотке свою эдс, отстающую по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$. Все фазные эдс принимают пикообразную форму. В ряде случаев амплитуда третьей гармоники E_{3m} равна примерно половине амплитуды первой гармоники E_{1m} , т.е. $\Phi_{1Y} \approx 0,5E_{1m}$. Результирующая эдс фазы возрастает возникает опасность пробоя изоляции обмоток. Вместе с тем, линейные эдс синусоидальны.

Уплощенная кривая потока наряду с основной гармоникой Φ_{1Y} будет иметь относительно сильную третью гармонику Φ_{3Y} (рис. 2.30, а). Третьи гармоники потока, совпадающие по фазе, индуцируют во вторичной обмотке, соединенной треугольником, три равные по значению и совпадающие по фазе эдс $E_{\Delta 3}$. Они складываются в контуре треугольника и создают ток $I_{\Delta 3}$. Если пренебречь активным сопротивлением обмоток, то ток имеет индуктивный характер. Создаваемый им поток $\Phi_{\Delta 3}$ почти полностью компенсирует поток Φ_{3Y} . Поэтому результирующие потоки фаз будут практически синусоидальными (рис. 2.30, б). Следовательно, при соединении одной из обмоток трансформатора в треугольник магнитные потоки, эдс и напряжения фаз остаются практически синусоидальными.

Целесообразно также рассмотреть работу трансформатора при включении его по схеме Y/Y . В случае соединения обмоток по схеме Δ/Y было установлено, что фазные токи имеют синусоидальную форму, а потоки – уплощенную, т.е., представлены совокупностью первой гармоники и гармоник, кратных трем.

В трехфазной группе однофазных трансформаторов (рис. 2.31, а) и в трансформаторах броневых типа (рис. 2.31, б) третьи гармоники замыкаются по магнитопроводу. В результате фазные эдс не синусоидальны, линейные же эдс не содержат гармоник кратных трем. В трехстержневых трансформаторах (рис. 2.31, в) третьи гармоники потока не могут замыкаться по магнитопроводу. Они вытесняют друг друга за его пределы и замыкаются от одного ярма к другому через трансформаторное масло или воздух, через стенки бака, крепежные детали, что вызывает добавочные потери от вихревых токов. Сопротивление магнитной цепи для третьих гармоник резко возрастает. Их амплитуда снижается до приемлемого малого уровня. Потоки во всех стержнях принимают практически синусоидальную форму, синусоидальными будут также фазные и линейные эдс.

При соединении обмоток по схеме Y/Y возникают искажения кривых фазных напряжений, а в трехстержневых трансформаторах — добавочные потери от вихревых токов.

В случае наличия нулевого провода образуется замкнутый контур для третьих гармоник тока. Причем в нулевом проводе ток имеет утроенное значение тока третьей гармоники фазы трансформатора. Если этот контур создается через сопротивление нагрузки или другие сопротивления, то величина и влияние токов третьей гармоники уменьшится. Трансформаторы большой мощности с соединением обмоток по схеме Y/Y, заводами-изготовителями, как правило, не производятся. В случае потребности в таких трансформаторах используют дополнительную, третичную, обмотку, соединенную в треугольник. Сечение обмотки рассчитано только на токи третьей гармоники фазы трансформатора.

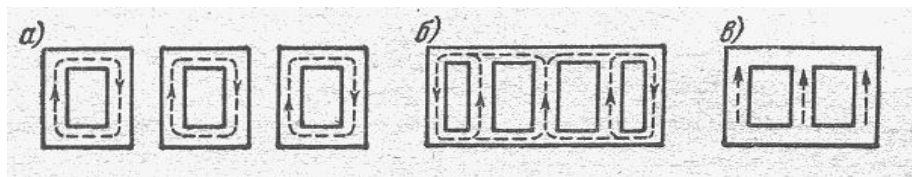


Рис. 2.31. Третьи гармоники потока в трехфазных трансформаторах

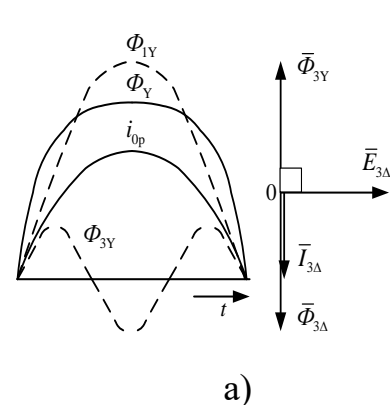


Рис. 2.30. Форма кривой потока при синусоидальном токе намагничивания (а) и векторная диаграмма потоков и токов третьей

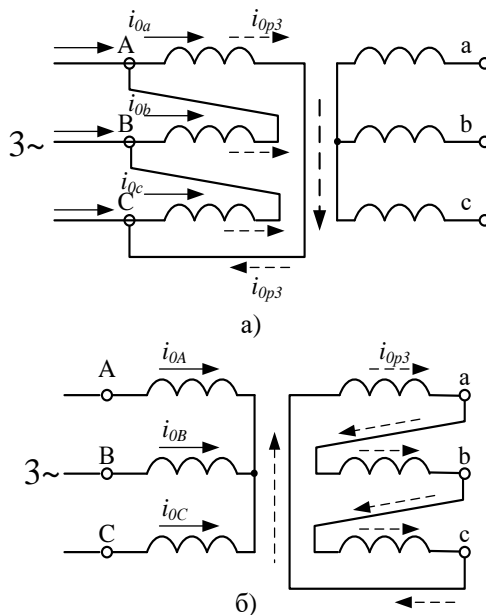


Рис. 2.29. Питание трехфазного трансформатора на холостом ходу

43.Способы охлаждения трансформаторов. Особенности конструктивного исполнения систем охлаждения.

Повышение номинальной мощности трансформатора приводит к увеличению потерь Δp_{Σ} в нем, которые растут пропорционально кубу линейных размеров l^3 , а поверхности охлаждения $S_{охл}$ — пропорционально их квадрату l^2 . Это приводит к необходимости по мере роста номинальной мощности отступать от конструктивного подобия трансформаторов и увеличивать относительные размеры охлаждающих поверхностей обмоток, магнитной системы и бака.

Конструкция масляного бака зависит от мощности трансформатора. В маломощных трансформаторах ($S_H \leq 20 \text{ кВА}$) баки имеют гладкую поверхность. Внутри бака происходит естественная конвекция масла (способ охлаждения М). Стенка бака отдает тепло в окружающую среду путем конвекции и лучеиспускания воздуха. Наибольшая допустимая температура масла в верхних слоях 95°С . При мощности трансформаторов от 20 кВА до 1800 кВА и выше к стенкам бака привариваются трубы (рис. 2.38,а) или используются радиаторы (рис.2.38,б). В трансформаторах большей мощности применяется также обдувание каждого радиатора вентиляторами (способ охлаждения Д), в результате чего теплоотдача увеличивается на 50–60% (рис. 2.39).

Более интенсивным является водомасляное охлаждение (способ Ц), схема которого изображена на рис. 2.40. Нагретое масло откачивается из верхней части бака насосом, пропускается по специальным каналам через водяной маслоохладитель (теплообменник), представленный на рис. 2.41, и поступает в нижнюю часть бака. Иногда теплообменники помещают внутри бака трансформатора. Искусственное воздушно-масляное охлаждение (способ ДЦ) применяется для трансформаторов весьма большой мощности, при котором нагретое масло при помощи насоса пропускается через вынесенный охладитель, обдуваемый воздухом. Схема для способа охлаждения ДЦ показана на рис. 2.42.

Обычно искусственное дутье рассчитывается таким образом, что мощность трансформатора увеличивается примерно на 30%. Обслуживание устройств охлаждения проводится в определенные сроки, условия эксплуатации требуют учета климатических и производственных условий, состояния частей трансформатора, других факторов.

На крышке трансформаторного бака устанавливаются маслonaполненные вводы, внутри которых проходит медный стержень, служащий для соединения трансформатора с внешней сетью. Трансформаторы мощностью свыше 75 кВА для заполнения маслом над крышкой бака имеют расширитель с соединенной с ним выхлопной трубой (рис.2.43). Объем расширителя составляет 8–10% от объема масла в баке. Он выбирается таким, чтобы при любых колебаниях температуры и объема масла верхний уровень масла оставался в пределах расширителя. При этом также уменьшается открытая поверхность масла. В расширителе устанавливается силикагелевый воздухоосушитель, поглощающий из воздуха влагу. Однако полностью воздух не осушается и влажность его в расширителе повышается. Для предотвращения этого применяют герметичные баки с газовой подушкой из азота или свободное пространство заполняют азотом, который поступает из специальных емкостей. Между расширителем и баком устанавливается газовое реле. Оно служит для сигнализации и отключения трансформатора от сети при разложении масла и выделении газа при аварии. Кроме того, на крышке бака устанавливается выхлопная труба, закрытая тонкой мембраной из тонкого стекла или медной фольги. Мембрана лопается при повышении давления внутри бака, что защищает его от разрыва. Верхняя полость выхлопной трубы и воздушное

пространство над поверхностью масла в расширителе соединены трубкой для выравнивания давлений с обеих сторон диафрагмы при изменении объема масла. Аварийный сброс масла, а также его слив для замены новым маслом происходит в специально приготовленные заранее на месте монтажа маслосборные ямы. В процессе эксплуатации осуществляется окисление, увлажнение и загрязнение масла, что ухудшает его изоляционные свойства. Отборы проб масла выполняется регулярно, а также периодически проводится его очистка, сушка или замена. Сушке подвергаются также магнитопроводы и обмотки [5].

Маслоуказатель, устанавливаемый в торцевой части расширителя, служит для контроля уровня масла в трансформаторе. Применяются плоские и трубчатые стеклянные маслоуказатели, работающие по принципу сообщающихся сосудов. На шкале маслоуказателя нанесены три контрольные риски, соответствующие уровням масла в неработающем трансформаторе при температурах $-45, +15, +40$ °С. В корпус маслоуказателя встроен специальный герметичный контакт (геркон), подающий сигнал в случае недопустимого понижения уровня масла в трансформаторе [12].

В сухих трансформаторах бак заменен легким кожухом. Отсутствие масла и применение в качестве твердой изоляции обмоток стекловолокна и других материалов существенно повышает пожарную безопасность установки. Однако воздух является менее совершенной изолирующей и охлаждающей средой, чем масло. Поэтому требуется увеличивать изоляционные промежутки и охлаждающие каналы, допускать меньшие нагрузки, что ведет к снижению потерь по сравнению с масляными трансформаторами. Для уменьшения потерь от потоков рассеяния стальные баки экранируются с внутренней стороны пакетами электротехнической стали или пластинами из немагнитных материалов (меди, алюминия) [5].

Трансформаторы мощностью до 1800 кВА перевозят в собранном виде, масляные заполнены маслом. Трансформаторы большей мощности транспортируют с демонтированными радиаторами, расширителями и т.д. [13]

44. Регулирование напряжения трансформаторов.

Колебания нагрузок потребителей вызывает колебания вторичного напряжения трансформатора, поэтому возникает необходимость регулирования напряжения трансформаторов путем изменения коэффициента трансформации $k = \frac{w_1}{w_2}$, т. е. числа включенных в работу витков первичной или вторичной обмотки.

Для этого обмотка выполняется с рядом ответвлений и снабжается специальным переключающим устройством.

У понижающих трансформаторов при необходимости повысить или понизить напряжение на вторичной стороне НН следует на первичной стороне ВН переходить соответственно на меньшее или большее число витков.

Для повышающих трансформаторов переход осуществляется на большее или меньшее число витков обмотки ВН в соответствии с необходимостью повысить или понизить напряжение на вторичной стороне НН.

Ответвления расположены на той стороне, где в процессе эксплуатации напряжение подвергается изменениям. Чаще всего это сторона высшего напряжения ВН или среднего напряжения СН. Переключаемые участки целесообразно располагать в средней части обмотки. Это необходимо, чтобы части обмоток были равномерно загружены и не вызвали существенного искажения магнитного поля рассеивания, которое, в свою очередь, способствует созданию усилий, возникающих при коротких замыканиях, стремящихся сдвинуть обмотки друг относительно друга в осевом направлении. Опасность разрушения обмоток при этом тем меньше, чем равномернее распределены отключаемые витки по высоте обмотки.

47. Трехобмоточные трансформаторы. Автотрансформаторы.

Автотрансформаторы. В сетях высокого и низкого напряжений нередко возникает необходимость сравнительно небольшого изменения напряжения. Использование обычных двухобмоточных трансформаторов при этом бывает неэкономичным. Поэтому применяют трансформаторы, у которых первичная и вторичная обмотки имеют и электромагнитную, и электрическую связь. В автотрансформаторе первичная обмотка w_1 включается в сеть параллельно, а вторичная w_2 – последовательно. Устройство обмоток и их расположение на стержнях такие же, как и в обычном трансформаторе. Однако из-за наличия электрической связи между обмотками изоляция каждой из них относительно корпуса должна быть рассчитана на напряжение сети высшего напряжения $U_{ВН}$. Способы включения обмоток автотрансформатора представлены на рис. 2.55.

Автотрансформаторы бывают повышающими и понижающими. Во всех случаях справедливо выражение: $U_{ВН} = U_{НН} + U_2$.

Коэффициент трансформации автотрансформатора k_a определяется, если пренебречь потерями, падениями напряжения в обмотках и током намагничивания, отношением:

$$k_a = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Расчетная (внутренняя, типовая) мощность S_p , передаваемая электромагнитным путем из первичной обмотки во вторичную, как и в обычном трансформаторе: $S_p = U_1 I_1 = U_2 I_2$

Проходная (внешняя, номинальная) мощность $S_{пр}$, передаваемая из одной сети в другую, равна: $S_{пр} = U_{НН} I_{НН} = U_{ВН} I_{ВН}$

Часть мощности передается из одной сети в другую непосредственно электрическим путем, поэтому $S_{пр} > S_p$. Расход материалов, габариты

автотрансформаторов определяются расчетной мощностью S_p . Проходная мощность $S_{пр}$ больше расчетной S_p . Поэтому применение

автотрансформаторов выгоднее, чем обычных трансформаторов, у которых проходная и расчетная мощности равны. Для схемы рис. 2.55,а справедливо выражение:

$$\frac{S_{прН}}{S_{прВН}} = \frac{E_2 I_2}{U_{ВН} I_{ВН}} = \frac{(U_{ВН} - U_{НН}) I_{ВН}}{U_{ВН} I_{ВН}} = \frac{k-1}{k}.$$

На практике чаще применяют схему, представленную на рис. 2.55,а, поскольку в схеме рис. 2.55,б ток вторичной обмотки в k раз больше. Желательно, чтобы коэффициент трансформации k был близок к единице. Обычно используются автотрансформаторы с $k \leq 2,5$. Потери и напряжения короткого замыкания, если их отнести к проходной мощности и к номинальному напряжению сети, обычно в $\frac{S_p}{S_{пр}}$ раз меньше, чем в обычных

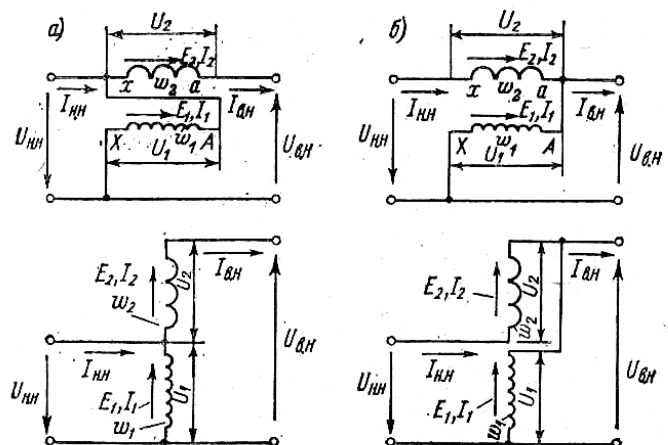


Рис. 2.55. Схемы однофазных

трансформаторах. При этом увеличивается КПД передачи энергии но, вместе с тем, увеличиваются токи короткого замыкания. Величина $\alpha = \frac{S_p}{S_{np}}$ называется коэффициентом выгоды автотрансформатора.

48. Трансформаторы специального назначения (печные, сварочные, выпрямительные, измерительные). Реакторы.

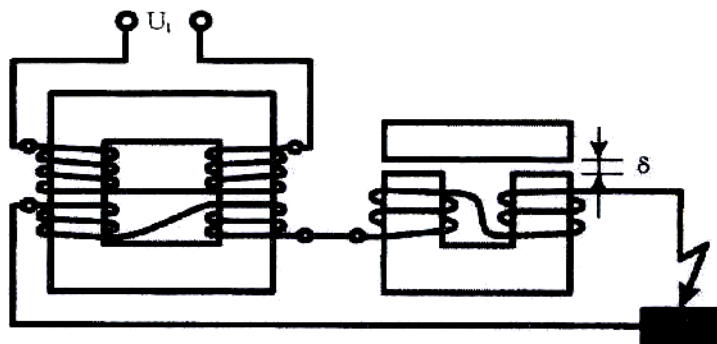


Рис. 2.57. Сварочный трансформатор с реактивной

регулируемую реактивную катушку. Увеличение индуктивного сопротивления достигается у трансформаторов, в которых первичная и вторичная обмотки располагаются на различных стержнях. При этом магнитная связь между обмотками уменьшается, ток нагрузки оказывает значительное влияние на режим работы сварочного трансформатора в отличие от обычного. Используются магнитные шунты, в которых при насыщении магнитный поток вытесняется в стержень. В результате напряжение на вторичной обмотке увеличивается [8].

Печные трансформаторы. Дуговые электропечи являются основными приемниками электроэнергии для процессов электротермии и электролиза. Они работают на однофазном и трехфазном токе низкого напряжения от 110 до 420 В. Вторичный ток их понижающих трансформаторов, подключенных к высоковольтным сетям, составляет десятки и сотни кА. Мощность печных трансформаторов достигает 25 МВ·А. Вторичная их обмотка выполняется с большим числом параллельных цепей с одним или двумя витками. В трансформаторах дуговых электропечей требуется регулировка вторичных напряжений в широких пределах до $\pm 50\%$ номинального значения. Регулировка идет как с первичной, так и со вторичной стороны путем переключения отдельных групп витков с параллельного на последовательное соединение. Печные трансформаторы работают в тяжелых условиях с резко меняющимися нагрузками (от холостого хода до короткого замыкания). Для ограничения тока короткого замыкания в первичную цепь включают дополнительную реактивную катушку. При концентрических обмотках первичная обмотка, высоковольтная, размещена внутри, а вторичная, низковольтная, снаружи. Первичная обмотка содержит ответвления в сочетании с переключением У наΔ. Во вторичной цепи возможны переключения отдельных групп витков с параллельного соединения на последовательное. Механическое крепление обмоток должно быть достаточно надежным, чтобы противостоять значительным усилиям, возникающим при работе таких трансформаторов.

Измерительные трансформаторы тока и напряжения. Измерительные трансформаторы применяются при напряжениях более 250 В для установок переменного тока, где требуется отделение цепей измерительных приборов и защитных реле от сети высокого напряжения; для безопасного пользования приборами и упрощения изоляции их токоведущих частей; для преобразования тока или напряжения в значения более удобные для измерения их стандартными приборами (амперметры – до 5 А, вольтметры – до 150 В). Различают измерительные трансформаторы тока и напряжения.

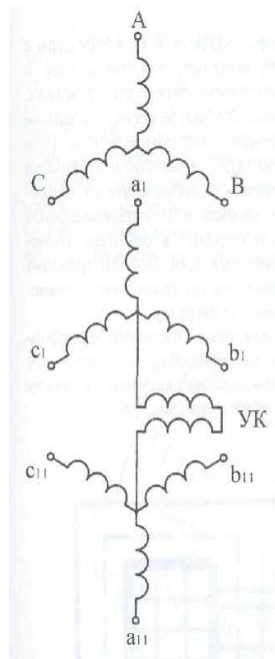


Рис. 2.58. Схема трансформатора с уравнивающей катушкой между нейтральными

Первичную обмотку трансформаторов тока включают последовательно в измерительную цепь, а вторичную их обмотку замыкают на измерительные или релейные устройства с малым сопротивлением. В рабочем режиме магнитный поток трансформатора тока весьма мал. Состояние его магнитопровода далеко от насыщения. Если разомкнуть вторичную цепь, то размагничивающее действие вторичного тока исчезает. Поток существенно возрастает. На зажимах вторичной обмотки возникает опасное для жизни напряжение. Сам трансформатор может выйти из строя из-за пробоя изоляции. В цепях на значительные токи (десятки, сотни ампер и выше) первичной обмоткой трансформатора ток являются токоведущие шины, на которые трансформатор надевается. При повышенных напряжениях и больших токах трансформаторы тока приобретают значительные размеры, которые, однако, удастся уменьшить по мере усовершенствования конструкции. Нормальным режимом работы трансформатора тока является режим близкий к короткому замыканию.

Трансформаторы напряжения необходимы для измерения напряжения в высоковольтных сетях, питания цепей напряжения релейной аппаратуры, проведения наладочных операций. Измерительные приборы и обмотки реле подключаются к вторичным обмоткам трансформатора параллельно. Сопротивление нагрузки, как правило, велико и трансформатор напряжения работает в режиме, близком к режиму холостого хода [4].

Выпрямительные трансформаторы. В таких трансформаторах, включенных на вентильные преобразователи (выпрямителей, инверторов) протекают высокочастотные переходные процессы, что необходимо учитывать при их проектировании. Из-за поочередной работы полупроводниковых приборов трансформатор загружен несимметрично. В результате требуется выбрать такую схему соединения обмоток, которая обеспечивала бы нормальные условия намагничивания магнитопровода трансформатора. Токи вторичных обмоток из-за попеременной работы вентилей содержат высшие гармоники. Они не уравниваются токами первичных обмоток. Выпрямленное напряжение и ток получаются пульсирующими. Для снижения амплитуды пульсаций увеличивают число фаз вторичной обмотки трансформатора. В шестифазных выпрямительных схемах включают уравнивающую катушку (УК) между нейтральными двух трехфазных групп обмоток (рис 2.58)

Реакторы. Реакторы по своему устройству аналогичны трансформаторам. Их применяют в качестве токоограничивающих реактивных сопротивлений, регулируемых приемников реактивной мощности, фильтров токов высших гармоник. Реакторы имеют только одну обмотку, мощность которой сильно

зависит от магнитной проницаемости железа $\mu_{Fe} \sim \frac{1}{I}$. Работа реакторов аналогична работе трансформаторов на холостом ходу. Практическое

применение получили реакторы, имеющие в цепи немагнитные зазоры δ (рис. 2.59), заполненные изоляционным материалом (прессованный картон, гетинакс и т.п.). Зазоров выполняется несколько для увеличения устойчивости реактора к действию токов короткого замыкания. Характеристики реактора становятся линейными, так как магнитное сопротивление магнитопровода в основном определяется материалом зазоров. Реакторы выполняются однофазными и трехфазными, изготавливаются с переменным реактивным сопротивлением (изменение числа витков, размеров воздушных зазоров, применение подмагничивания магнитопровода), имеют естественное масляное или воздушное охлаждение. Для ограничения токов короткого замыкания в сетях до 10 кВ применяются бетонные реакторы, изготовленные из концентрически расположенных витков круглого многожильного провода, который заливается в бетонные колонны. Обмотки рассчитаны на токи в тысячи ампер и значительные механические усилия. Металлические детали реакторов выполняются из немагнитной стали. Обслуживание реакторов аналогично обслуживанию трансформаторов [12].

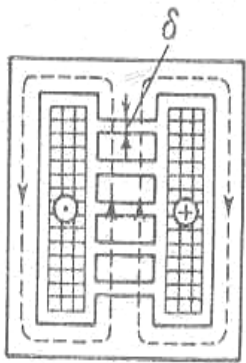


Рис. 2.59. Устройство однофазного реактора со стальным магнитопроводом и воздушными зазорами

50. Общие сведения о машинах переменного тока. Конструктивные особенности, классификация, области применения.

Машины переменного тока являются большим классом машин применяемые в производстве. Делятся на: синхронные и асинхронные. Наибольшее распространения получили трёхфазные машины. Машины асинхронные, как двигатель, синхронные, как генератор. Асинхронные машины установлены в 70 % электропривод. общепромышленных механизмов. Они различаются конструкцией ротора и подразделяются на: АМФ – асинхронные машины с фазным ротором, АМКЗР – асинхронные машины с коротко замкнутым ротором.

Коротко замкнутые машины просты по конструкции, надёжны, и используются в большинстве электроприводов общепромышленных механизмов.

Асинхронный двигатель был изобретён в 1889 г. М.О. Доливо-Добровольским.

В трёхфазном варианте нормальная работа асинхронной машины возможно при наличии вращающегося магнитного поля. Машины нормального исполнения имеют неподвижный статор с трёхфазной обмоткой, которая соединяется в звезду или треугольник. Вращающийся ротор фазных машин тоже имеет трёхфазную обмотку соединённую в звезду. У машин КЗ обмотка состоит из стержня и 2 колец, образующих «беличью клетку».

51. Принцип действия асинхронного двигателя.

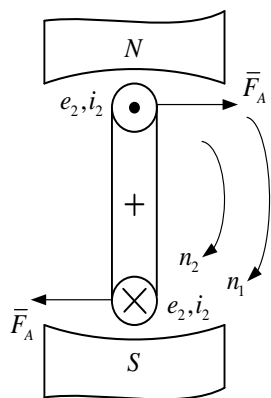


Рис.4.3. Принцип действия асинхронного двигателя

При неподвижном роторе магнитное поле, представленное в виде постоянного магнита, вращается в зазоре с частотой n_1 . Оно пересекает проводники короткозамкнутого витка на роторе и индуцирует в них эдс e_2 . Направление действия эдс в данный момент времени определяется по правилу правой руки. Под действием e_2 возникает ток i_2 , имеющий такое же направление, что и вызвавшая его эдс. Взаимодействие тока i_2 с магнитным полем статора приводит к образованию силы $\overline{F_A}$. Направление действия $\overline{F_A}$ определяется по правилу левой руки. Сила $\overline{F_A}$ образует электромагнитный момент M , под действием которого ротор начинает вращаться с частотой n_2 . Направления вращения магнитного поля статора и ротора совпадают. Эдс и ток ротора, электромагнитный момент при неподвижном роторе имеют максимальное значение. При увеличении n_2 эти параметры уменьшаются, т.к. магнитное поле пересекает проводники ротора с уменьшающейся частотой. При условии $n_2 = n_1$ асинхронный двигатель устойчиво работать не может, поскольку эдс в обмотке ротора перестает индуцироваться, исчезает ток и момент, снижается частота вращения ротора. При условии $n_2 < n_1$ в роторе появляются эдс и ток, возникает момент. Он направлен на преодоление сил трения или иных воздействий, приложенных к валу. Следовательно, асинхронный двигатель работает с частотой вращения, которая определяется нагрузкой на его валу. Условие $n_2 < n_1$ представляет собой основное отличие асинхронных машин от синхронных машин, для которых $n_2 = n_1$.

Величина, отражающая условие $n_2 \neq n_1$, называется скольжением $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$.

Частота вращения ротора n_2 определяется как: $n_2 = n_1(1 - s)$

Номинальное скольжение s_H соответствует номинальной частоте вращения двигателя n_{2H} . Частота эдс и тока в обмотке ротора при его вращении пропорциональна частоте вращения магнитного поля статора относительно ротора $n_s = n_1 - n_2$; $f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = f_1 s$

Частота вращения магнитодвижущей силы статора относительно ротора равна $n_2 = \frac{60f_2}{p} = n_1 s$

52. Конструкция асинхронной машины.

Асинхронные машины делятся на два типа, которые отличаются машины с короткозамкнутым ротором и машины с фазным ротором.

Статор асинхронной машины состоит из корпуса, сердечника и обмотки. Корпус изготавливают стальным, чугуном, алюминиевым, пластмассовым. Снаружи располагают коробку, в которую помещают концы обмоток статора для соединения между собой и подключения к сети. Сердечник набирают из покрытых лаком листов электротехнической стали толщиной 0,35-0,5 мм. На внутренней поверхности сердечника выполнены пазы, в которые уложена трехфазная обмотка. Обмотка выполняется по шаблонам изолированным медным или алюминиевым проводом. Она укладывается в пазы таким образом, чтобы пространственный сдвиг между каждой фазой составлял $120^\circ_{эл}$ для создания кругового поля асинхронной машины. Обмотка каждой фазы содержит несколько катушек, которые могут соединяться последовательно или параллельно. В зависимости от числа катушек на одну фазу, способа их соединения получают обмотки с различным числом пар полюсов p . Фазы могут быть соединены по схемам «звезда» или «треугольник». Фазное напряжение обмотки статора должно оставаться постоянным. Части витков, расположенные в пазах, называют активными сторонами, поскольку в них индуцируются эдс. Части витков, соединяющие активные стороны и расположенные на торцевых частях статора или ротора, называют лобовыми соединениями.

Ротор асинхронной машины состоит из вала, сердечника и обмотки. Вал изготовлен из стали и закреплен в подшипниковых щитах. На валу закреплен сердечник, на внешней стороне которого выполнены скошенные пазы для обмотки. Сердечники статора и ротора образуют магнитную систему машины. У короткозамкнутых машин обмотка ротора выполнена из алюминия в виде «беличьей клетки». Обмотка ротора в этом случае выполняется путем заливки пазов расплавленным алюминием. Одновременно отливают замыкающие кольца вместе с лопатками для вентиляции. Обмотка фазного ротора имеет конструкцию по аналогии с обмоткой статора. Она содержит то же число пар полюсов p . Применение скошенных пазов ведет к более равномерному распределению магнитного поля в зазоре вдоль активных проводников и снижению шума машины. Концы обмоток фазного ротора соединены в общую точку. Начала обмоток выведены на контактные кольца, расположенные на валу. Контактные кольца выполняются преимущественно из латуни. Они изолированы друг от друга и от вала. К кольцам прижаты щетки, которые посредством отводов от них, можно замыкать накоротко. В цепь ротора можно включать активные, индуктивные, емкостные сопротивления, а также источники эдс. Такие меры позволяют увеличить пусковой момент, понизить пусковые токи, обеспечить плавность пуска двигателя.

53. Вращающееся поле асинхронной машины (двигательный режим).

Пусть обмотка статора соединена в звезду, сопротивление фаз одинаково, система симметрична. Обмотки трехфазного статора равномерно распределены по его сердечнику. В обмотке статора протекает ток:

$$\begin{aligned} i_A &= I_{Am} \sin \omega t, \\ i_B &= I_{Bm} \sin(\omega t - 120^\circ_{эл}); \\ i_C &= I_{Cm} \sin(\omega t + 120^\circ_{эл}). \end{aligned}$$

Электрические градусы связаны с геометрическими градусами: $\alpha_{эл} = p \alpha_{геом}$, где p – число пар полюсов, количество которых зависит от способа включения обмоток каждой фазы.

Токи каждой фазы создают пульсирующие магнитодвижущие силы, совокупное действие которых приводит к созданию результирующей магнитодвижущей силы, создающей магнитный поток машины. Ее вектор вращается относительно статора.

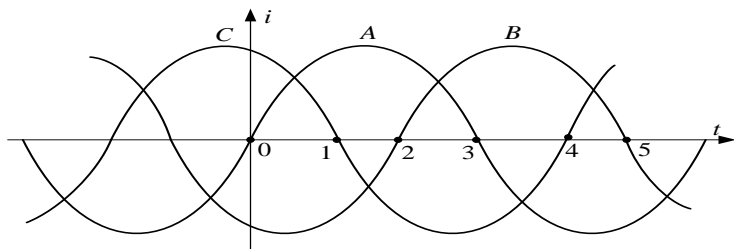


Рис. 4.1. Система трехфазных токов в обмотке статора асинхронного двигателя

Следует определить направление токов всех фазных обмоток в обозначенных точках. При условии $i > 0$ ток протекает от начала обмотки к ее концу. Если $i < 0$, то ток протекает в обмотке от ее конца к началу. Вектор магнитодвижущей силы обмотки статора при переходе от одного указанного момента времени к другому поворачивается на $60^\circ_{эл}$ и совершает полный оборот за период. Частота его вращения (об/мин) равна $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ где f_1 – частота тока в обмотке статора, Гц.

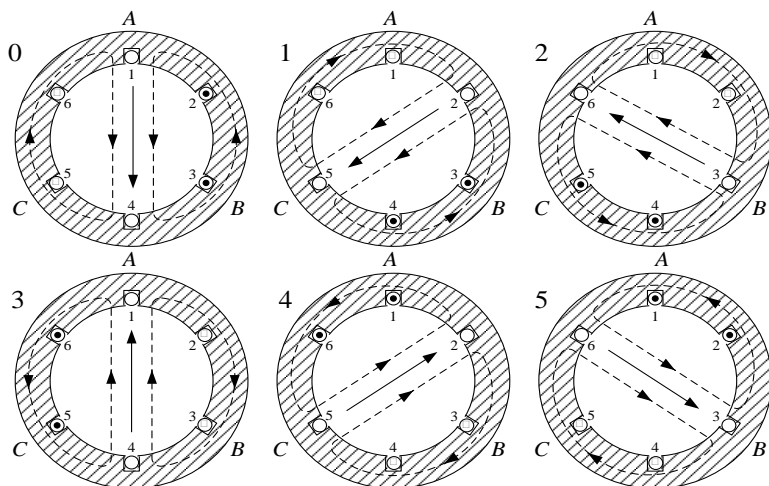


Рис. 4.2. Принцип получения магнитодвижущей силы вращающегося магнитного поля

При повреждениях фазных обмоток (обрыв, ненадежный контакт) поле в зазоре перестает быть круговым. В этих случаях оно имеет эллиптический или пульсирующий характер. Нормальные условия работы асинхронного двигателя нарушаются. Это ведет к ухудшению качества работы приводимых агрегатов и сокращает срок службы самого двигателя.

56. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя. Способы улучшения энергетических показателей асинхронного двигателя.

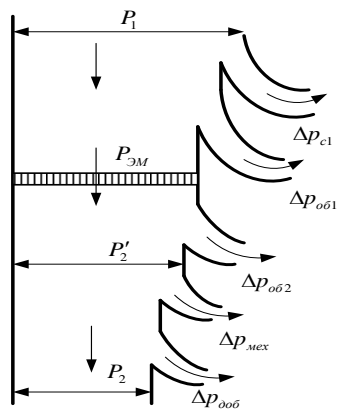


Рис. 4.9. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Преобразование энергии в асинхронном двигателе, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии. Потери делятся на механические, магнитные, электрические и добавочные. Первые два вида потерь относятся к постоянным потерям, вторые два вида потерь – к переменным. Преобразование активной мощности асинхронного двигателя представлено на энергетической диаграмме (рис. 4.9). Мощность P_1 подводится из сети, за вычетом потерь в магнитопроводе $\Delta P_{с1}$ и обмотке статора $\Delta P_{об1}$ преобразуется в электромагнитную мощность $P_{эм}$, которая передается через воздушный зазор машины в ротор. В нормальном режиме работы асинхронного двигателя потери в магнитопроводе ротора пропорциональны частоте f_2 . Электромагнитная мощность $P_{эм}$, благодаря которой возникает электромагнитный момент двигателя M , за вычетом потерь в обмотке ротора $\Delta P_{об2}$, преобразуется в полную механическую мощность P_2 . На преодоление сил трения, которые составляют механические потери $\Delta P_{мех}$, затрачивается часть электромагнитного момента, развиваемого на роторе двигателя. Этот момент называется моментом холостого хода M_0 . Добавочные потери $\Delta P_{доб}$, составляющие от 0,5 до 1 % подводимой к двигателю мощности P_1 в номинальном режиме работы, включают потери от пульсаций магнитного поля, высших гармонических составляющих, насыщения/ Потери $\Delta P_{доб}$, зависят от нагрузки двигателя β : $\Delta P_{доб} = \beta^2 \Delta P_{добн}$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя: $\eta = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_1}$

Кпд асинхронных двигателей средней и большой мощности составляет 0,85-0,92.

Для оптимизации работы двигателей в течение технологического процесса и улучшения их энергетических

показателей принимаются следующие меры:

- мощность двигателя выбирают в соответствии с нагрузкой на его валу, т.к. недогруженный двигатель работает с низким кпд;
- включение параллельно двигателю батарей конденсаторов, которые своей емкостью компенсируют сдвиг фаз, обусловленный индуктивностью двигателя (поперечная компенсация);
- переключение обмотки статора с треугольника на звезду;
- ограничение работы двигателей на холостом ходу;
- применение вентильных преобразователей напряжения и частоты для питания недогруженных двигателей.

57. Уравнение электромагнитного момента асинхронной машины и его анализ. Механическая характеристика асинхронной машины. Условия получения естественной механической характеристики. Рабочий участок механической характеристики.

Электромагнитный момент M создаётся в результате взаимодействия тока ротора с вращающимся в зазоре машины магнитным полем. $M = \frac{P_{эм}}{\omega_1} =$

$$\frac{m_1 I_2 E_2 \cos \psi_2}{\omega_1} = \frac{m_1 I_2^2 \frac{R_2}{s}}{\omega_1}, \text{ где } \omega_1 - \text{синхронная угловая скорость вращения поля статора, рад/с. } \omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}.$$

$$M = \frac{m_1 U_1^2 p \frac{R_2}{s}}{2\pi f_1 \left(\left(r_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + x_k^2 \right)}, \text{ где } x_k = x_1 + x_2' - \text{индуктивное сопротивление короткого замыкания.}$$

Задавая ряд значений скольжения s от $-\infty$ до $+\infty$ и принимая остальные параметры выражения неизменными, в результате можно получить зависимость $s = f(M)$, которая называется статической механической характеристикой асинхронной машины. Данная характеристика отображает три возможных режима работы асинхронной машины подключенной к сети;

- режим двигателя ($0 < s \leq 1$);
- режим генератора ($0 \geq s > -\infty$);
- режим электромагнитного тормоза ($1 \leq s < +\infty$).

Статическая механическая характеристика называется естественной, если она получена при условиях $U_1 = \text{const} = U_{1H}$, $f_1 = \text{const} = f_{1H}$ $R_2' = r_2'$ ($r_{доб} = 0$). При отклонении хотя бы одного из этих параметров от указанных значений характеристика является искусственной.

В случае неподвижного ротора ($s=1$) пусковой момент $M_{п}$:

$$M_{п} = \frac{m_1 U_1^2 p R_2}{2\pi f_1 ((r_1 + R_2')^2 + x_k^2)},$$

s_m , при котором момент асинхронной машины максимален M_m . Такое значение скольжения и момента называют критическими. $s_m = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$

Статическая механическая характеристика может быть представлена в виде $\omega = f(M)$. Чтобы перейти от об/мин в рад/с $\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{n}{9,55}$

Статическая механическая характеристика асинхронной машины представлена на рис 4.10. При идеальном холостом ходе ($s = 0$) асинхронная машина не развивает момент, т.к. эдс и ток в роторной обмотке не индуцируются. С увеличением нагрузки на валу частота вращения ротора

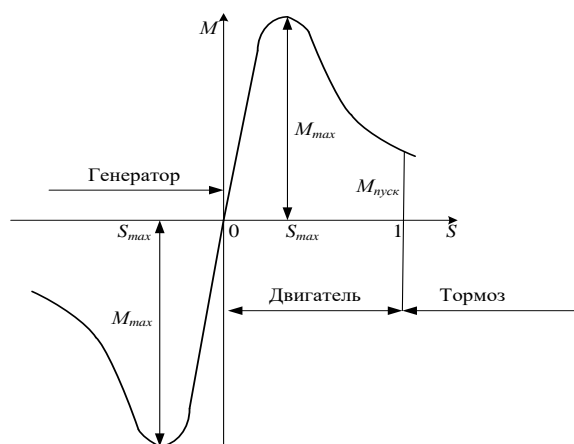


Рис 4.10. Статическая механическая характеристика асинхронной машины

снижается, возрастают скольжение, эдс и ток в роторе, а так же момент. Увеличение скольжения s вызывает рост частоты тока в роторе f_2 и индуктивного сопротивления ротора x_2' . В связи с этим, начиная с некоторого значения скольжения s_m , момент, развиваемый двигателем, перестает нарастать, несмотря на нарастание тока в роторе. Активная составляющая тока в роторе уменьшается из-за роста доли реактивного сопротивления. Момент зависит от активной составляющей тока ротора, он будет также снижаться. При генераторном режиме работы асинхронной машины ее максимальный момент больше, чем при двигательном режиме. Это объясняется тем, что в генераторном режиме часть потерь компенсируется за счет приводного двигателя, расположенного на одном валу с асинхронной машиной. Отдаваемая в сеть активная мощность должна быть равна по величине активной мощности, которая потребляется асинхронной машиной в режиме двигателя.

Перегрузочная способность: $k_m = \frac{M_m}{M_H}$, где M_H – номинальный момент, который можно определить как: $M_H = 9550 \frac{P_H}{n_H}$, где P_H – номинальная мощность двигателя, кВт.

Участок статической механической характеристики с пределами изменения скольжения от $-s_m$ до s_m называется рабочим участком механической характеристики или устойчивым участком работы асинхронной машины. Рабочий участок может быть рассчитан по формуле Клосса: $\frac{M}{M_m} = \frac{2(s_m+1)}{\frac{s}{s_m} + 2s_m + \frac{s_m}{s}}$

Асинхронный двигатель наиболее экономично работает на участке статической механической характеристики с пределами изменения скольжения от 0 до s_m , потому что электрические потери в обмотках ротора $\Delta p_{об2}$ пропорциональны скольжению: $\Delta p_{об2} = P_{эм}s$.

58. Регулирование скорости асинхронного двигателя путем введения добавочного сопротивления в цепь ротора. Механические характеристики.

Способ нашел широкое распространение из-за простоты реализации. Однако он требует большого количества контактной аппаратуры, а применение активных сопротивлений увеличивает потери в роторе. Критическое скольжение s_m и пусковой момент $M_{п}$ прямо пропорциональны величине активного сопротивления цепи ротора R'_2 , а скорость вращения поля статора ω_1 и критический момент M_m не зависят от него, поэтому остаются неизменными в любом диапазоне изменения скорости ротора.

Можно подобрать добавочное сопротивление так, что пусковой момент $M_{п}$ двигателя будет равен максимальному моменту M_m . Величину $r_{доб}$ рассчитывают из выражения для скольжения $s_m = 1$:

$$s_m = 1 = \frac{R'_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = \frac{r'_2 + r'_{доб}}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}, \quad r_{доб} = \frac{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} - r'_2}{k_e^2}$$

Рост величины R'_2 приводит к снижению тока ротора I_2 . Однако возрастает его активная составляющая, что вызывает увеличение электромагнитного момента M . Этим объясняется рост пускового момента $M_{п}$ до определенного значения, после чего $M_{п}$ уменьшается, т.к. ток ротора убывает быстрее, чем растет его активная составляющая. Реостат в цепи ротора является и регулировочным, и пусковым. Пусковой ток ротора из-за наличия контактных колец и щеток ограничивают величиной $I_{2п} = (2 - 2,5)I_{2н}$. Регулирование скорости ротора при данном моменте нагрузки на валу $M_c = M_H$ (рис. 4.11) происходит вниз от ее номинала.

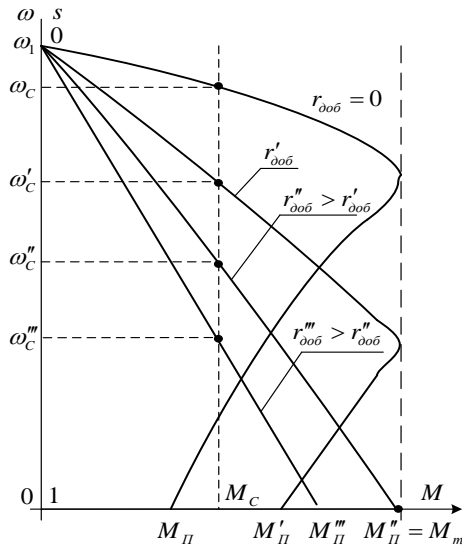


Рис. 4.11. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении в

роторе добавочного сопротивления $r_{доб}$

59. Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения подводимого к статору напряжения. Механические характеристики.

Способ применим в равной мере для всех асинхронных двигателей. Момент двигателя M , а также моменты пусковой $M_{п}$ и критический M_m , пропорциональны квадрату напряжения, подведенного к цепи статора, U_1^2 . Скорость идеального холостого хода ω_1 и критическое скольжение s_m от уровня напряжения не зависят. Влияние напряжения U_1 на вид механических характеристик представлено на рис. 4.14.

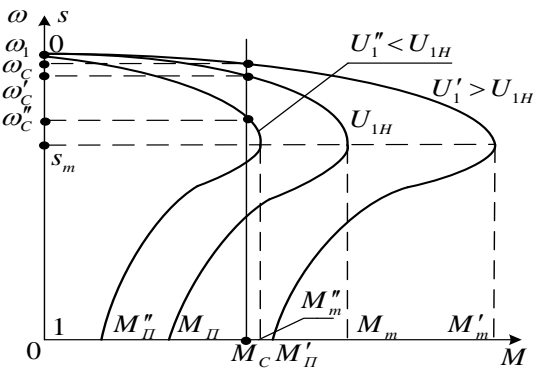


Рис. 4.14. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения, подводимого к статору

При условии $U_1' > U_{1H}$ характеристика проходит выше естественной. Хотя в данном случае возрастает пусковой момент двигателя, но увеличивается ток статора, насыщаются магнитопроводы и увеличиваются потери. Поэтому согласно стандартам для эксплуатации асинхронных двигателей допускается повышение питающего напряжения не более чем на 5% от номинального значения. Когда выполняется условие $U_1' > U_{1H}$, то характеристика проходит ниже естественной. Уменьшается пусковой момент и падает перегрузочная способность двигателя. Снижение питающего напряжения допускается не более чем на 10% от номинального значения. Изменение напряжения достигается в частности регуляторами напряжения на полупроводниковых элементах. При таком способе диапазон регулирования скорости невелик, а регулирование возможно только вниз от номинальной скорости.

60. Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения числа пар полюсов. Механические характеристики.

Способ на практике реализуется для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. У двигателей с фазным ротором приходится менять число пар полюсов не только на статоре, но и на роторе, что усложняет схему управления. Изменение числа пар полюсов в обмотке статора достигается переключением ее частей с последовательного на параллельное соединение. На рис. 4.15 представлены направления токов в обмотках и потоков полюсов. В данном случае необходимо так же поменять местами фазы обмотки двигателя, чтобы сохранить прежним направление вращения поля статора.

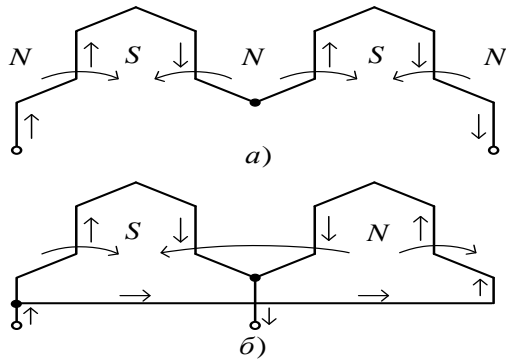


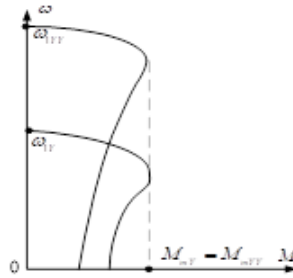
Рис. 4.15. Переход от числа полюсов $2p=4$ (а) к $2p=2$ (б)

Скорость асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов можно регулировать двумя способами: при постоянном моменте ($M=const$) и при постоянной мощности ($P=const$). При условии $M=const$ уменьшение числа пар полюсов достигается переключением обмоток статора с соединения Y на YY (двойная звезда). Выражения потребляемых из сети активных мощностей при этом имеют вид:

$$P_{1Y} = 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} I_1 \cos \varphi_{1Y};$$

$$P_{1YY} = 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} 2I_1 \cos \varphi_{1Y} = 2P_{1Y}.$$

Коэффициенты мощности обеих схем примерно равны. Скорость идеального холостого хода $\omega_{1YY} = 2\omega_{1Y}$. Момент, развиваемый двигателем $M \approx \frac{P_1}{\omega_1}$, при этом $M_Y \approx M_{YY}$. Для рассматриваемого способа схемы переключения и механические характеристики двигателя представлены на рис. 4.16. Способ регулирования скорости при условии $M=const$ целесообразно применять в электроприводах с постоянно действующим моментом нагрузки при любой частоте вращения, например, в подъемно-транспортных механизмах.



При условии $P=const$ уменьшение числа пар полюсов достигается переключением обмоток статора с соединения Δ на YY. Выражения, отображающие потребляемые из сети активные мощности, при этом имеют вид: $P_{1Y} = 3U_1 I_1 \cos \varphi_{1\Delta}$;

$$P_{1YY} = 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} 2I_1 \cos \varphi_{1YY} = 2P_{1Y}.$$

Коэффициенты мощности обеих схем примерно равны. Потребляемая мощность $P_{1YY} = 1,15P_{1\Delta}$. Если разницей в 15% пренебречь, что упрощает анализ, то $P_{1YY} = P_{1\Delta}$, а скорость идеального холостого хода $\omega_{1YY} \approx 2\omega_{1\Delta}$. Момент двигателя при этом $M_{YY} \approx \frac{M_{\Delta}}{2}$. Схемы переключения и механические характеристики двигателя изображены на рис. 4.17. Способ регулирования скорости при условии $P=const$ целесообразно применять когда момент нагрузки меняется обратно пропорционально частоте вращения, например, в станочных электроприводах. В обоих вариантах регулирования сохраняется жесткость рабочих участков механических характеристик. При регулировании на разных скоростях остаются практически неизменными энергетические показатели двигателей.

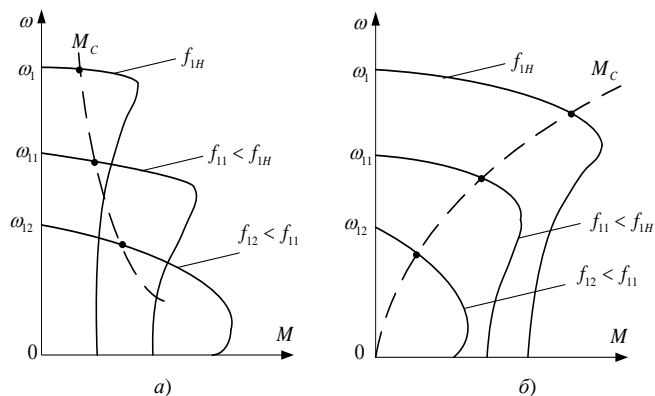
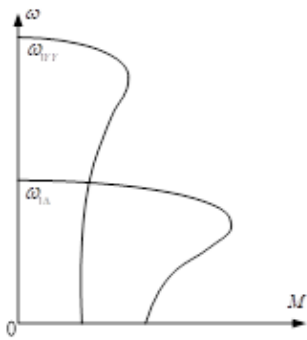


Рис. 4.19. Механические характеристики асинхронного двигателя при условии постоянства мощности (а) и вентиляторной нагрузки (б)

61 Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения величины напряжения статора и его частоты. Законы управления $\frac{U_1}{f_1} = const$,

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const, \frac{U_1}{f_1^2} = const. \text{ Механические характеристики для всех случаев.}$$

Регулирование скорости изменением частоты f_1 подведенного напряжения U_1 (частотное регулирование). Способ является наиболее перспективным в связи с широким применением преобразователей частоты, выполненных на полупроводниковых элементах. Он реализуется преимущественно на короткозамкнутых асинхронных двигателях ($R'_2 = r'_2$). Регулирование скорости двигателя происходит плавно в широком диапазоне как вверх, так и вниз от ее номинального значения. Способ является достаточно экономичным в плане энергопотребления, однако стоимость преобразователей частоты по сравнению со

стоимостью двигателя относительно велика. Наиболее рациональное регулирование скорости достигается при условии поддержания неизменным магнитного потока двигателя Φ_m . При условии $U_1 \approx const$ и $r_1 \approx 0$ имеем:

$$U_1 \approx E_1 = c \cdot f_1 \cdot \Phi_m = const, \quad (4.66)$$

где c – постоянная, зависящая от параметров двигателя.

Из выражения (4.66) следует, что с увеличением частоты f_1 снижается магнитный поток Φ_m и развиваемый двигателем момент, а также его перегрузочная способность. Если же частота f_1 снижается, то происходит рост магнитного потока. Это приводит к насыщению магнитной цепи двигателя и повышению потерь. Для обеспечения условия постоянства магнитного потока ($\Phi_m = const$) требуется регулировать напряжение U_1 и частоту f_1 пропорционально друг другу, т. е. по закону

$$\frac{U_1}{f_1} = k = const. \quad (4.67)$$

Целесообразно проанализировать, как будут располагаться механические характеристики при регулировании скорости по (4.67). Скорость идеального холостого хода ω_1 пропорционально зависит от частоты питающего напряжения f_1 . Индуктивное сопротивление короткого замыкания $x_K = 2\pi f_1 L_K$.

Принимая, что $U_1 = k f_1$, выражения моментов трехфазного асинхронного двигателя (4.54) – (4.56) и критического скольжения s_m (4.52) при этом примут вид:

$$M = \frac{3k^2 f_1^2 \frac{r_2'}{s} p}{2\pi f_1 \left(\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (2\pi f_1 L_K)^2 \right)}; \quad M \sim \frac{f_1^2}{f_1^3}; \quad (4.68)$$

$$M_{\Pi} = \frac{3k^2 f_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 \left((r_1 + r_2')^2 + (2\pi f_1 L_K)^2 \right)}; \quad M_{\Pi} \sim \frac{f_1^2}{f_1^3}; \quad (4.69)$$

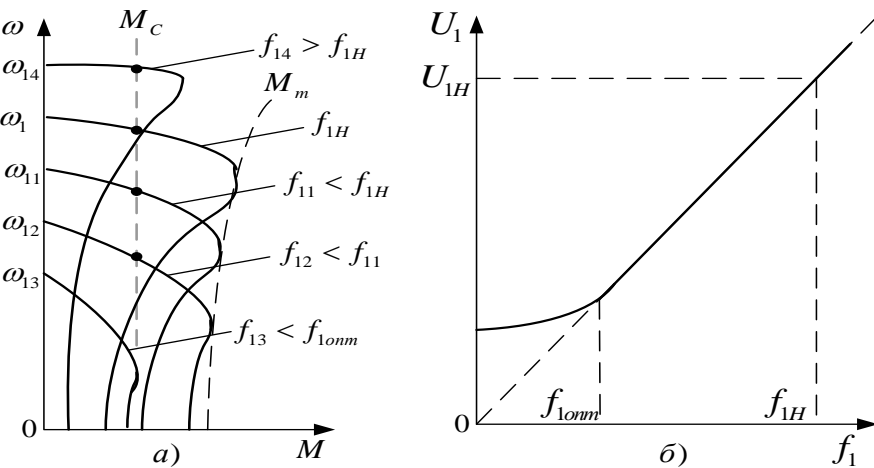
$$M_m = \frac{3k^2 f_1^2 p}{4\pi \cdot f_1 \cdot (r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + (2\pi f_1 L_K)^2})}; \quad M_m \sim \frac{f_1^2}{f_1^2}; \quad (4.70)$$

$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (2\pi f_1 L_K)^2}}; \quad s_m \sim \frac{1}{f_1}. \quad (4.71)$$

Согласно полученных выражений момент, развиваемый двигателем при пуске и работе, изменяется обратно пропорционально частоте f_1 . Скольжение s_m

меняется аналогичным образом, а жесткость механической характеристики возрастает. Максимальный момент M_m стабилизируется. Механические

характеристики для рассмотренного случая представлены на рис. 4.18,а. При частотах $f_1 > f_{1H}$ напряжение U_1 не повышают, поскольку это недопустимо по условиям эксплуатации двигателей, а оставляют равным номинальному. В результате снижается перегрузочная способность двигателя, что необходимо учитывать при выборе его нагрузки. Установлено, что для реальных условий в процессе регулирования скорости при соблюдении закона



$\frac{U_1}{f_1} = const$ с уменьшением частоты f_1 момент M_m несколько снижается. Это

объясняется нарастающим влиянием падения напряжения в статорной обмотке двигателя, что наиболее заметно у двигателей небольшой

мощности. Пусковой момент двигателя M_{Π} в то же время увеличивается с уменьшением частоты f_1 . Оптимальное значение $M_{\Pi onm}$

наступает при частоте f_{1onm} питающего напряжения равной 15 – 20 Гц, определяемой по

формуле, если $\frac{dM_{\Pi}}{df_1} = 0$:

Рис. 4.18. Механические характеристики асинхронного двигателя при $M = const$ (а) и зависимость

$$U_1 = F(f_1) \quad (б)$$

$$f_{1onm} = \frac{r_1 + r_2'}{2\pi \cdot L_K}. \quad (4.72)$$

При частотах $f_1 < f_{1onm}$ следует менять напряжение U_1 в меньшей мере, чем частоту f_1 (рис. 4.18,б), поскольку регулирование по закону

$$\frac{U_1}{f_1} = const \text{ приводит к существенному снижению } M_m. \text{ Регулирование скорости асинхронного двигателя по данному закону целесообразно,}$$

когда выполняется условие $M_C = const$. Для некоторых производственных механизмов, например, насосных установок, чрезмерное снижение скорости вращения двигателя может привести к выходу из строя их рабочего органа и другим неисправностям. Поэтому в преобразователях частоты не всегда целесообразно выставлять задание на минимальные скорости вращения двигателей, добиваясь глубокого ее регулирования. Работа с минимальной частотой вращения ограничивается ухудшением условий охлаждения двигателя с его самовентиляцией. В этом случае более эффективна независимая вентиляция.

Наряду с регулированием, при котором выполняется отношение $\frac{U_1}{f_1} = const$, используются в современных электроприводах и другие зависимости,

например $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const$ (условие постоянства мощности) или $\frac{U_1}{f_1^2} = const$ (при вентиляторной нагрузке). Вид такой зависимости

определяется требованиями технологического процесса промышленных установок. Механические характеристики двигателей при использовании указанных зависимостей приведены на рис. 4.19. Применение вентильных преобразователей частоты улучшает технико-экономические показатели регулируемых электроприводов. Основным их недостатком является генерация высших гармоник, что приводит к возникновению дополнительных потерь, паразитных моментов, ухудшающих эксплуатационные свойства двигателя, ведущих к его перегреву, а также влиянию на качество электроэнергии у потребителей. Для снижения негативного воздействия высших гармоник используются сглаживающие фильтры, вентильные элементы с большой частотой коммутации, что позволяет приблизить кривую выходного напряжения к синусоиде [25].

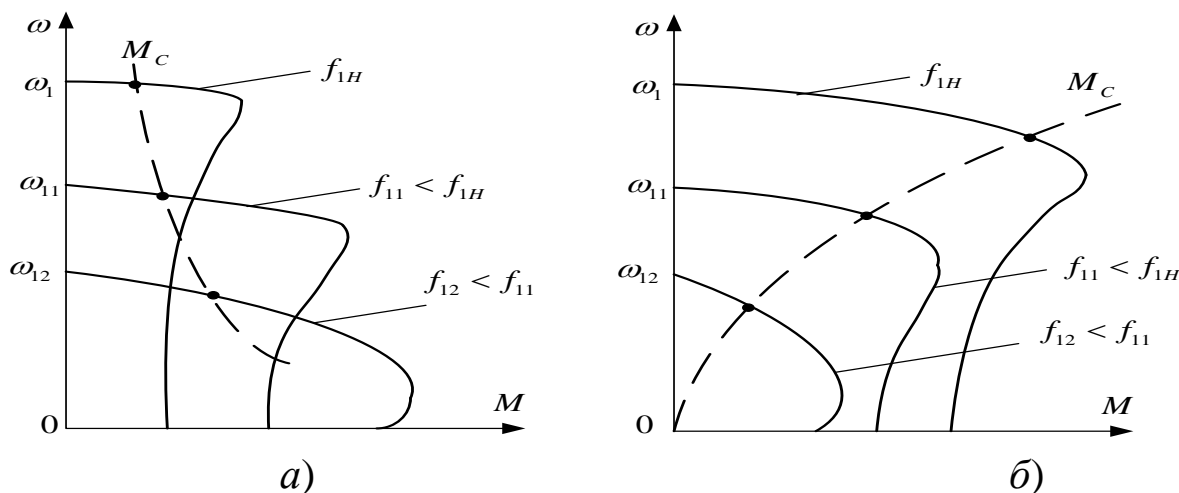


Рис. 4.19. Механические характеристики асинхронного двигателя при условии постоянства мощности (а) и вентиляторной нагрузки б)