



Курс: «Электрические аппараты»

Лекция №5

Электромагнитные явления в электрических аппаратах

Преподаватель: Сарсенбаев Е.А., ассоц.проф. кафедры
«Энергетика»

y.sarsenbayev@satbayev.university

Алматы 2025

Содержание

1. Введение
2. Классификация электрических аппаратов
3. Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам
4. Режимы работы электротехнических устройств
5. Классификация электрических установок

По завершению урока Вы будете знать:

1. Что такое магнитная система
2. Какие требования к магнитным системам
3. Особенности магнитных систем
4. Тяговая характеристика и вибрация якоря

Введение

Магнитная система — это совокупность проводников с током и магнитомягких элементов, предназначенных для создания заданной конфигурации магнитного поля и его значения в определенном месте пространства. Магнитные элементы образуют магнитопровод, который служит для уменьшения магнитного сопротивления потоку и подведения его к тому месту пространства, где поток используется.

Магнитная цепь — это упрощенное представление о магнитной системе и ее магнитном поле, при котором электромагнитные процессы описываются уравнениями, содержащими понятиями: МДС, магнитное напряжение, магнитный поток, магнитная проводимость, магнитное сопротивление. Эти понятия формально аналогичны понятиям: ЭДС, электрическое напряжение, ток проводимости, сопротивление электрической цепи.

Магнитная система и материалы ЭА

Для расчета и анализа магнитных цепей постоянного тока используют три закона: первый и второй законы Киргофа и закон Ома для магнитных цепей.

$$\sum \Phi = 0$$

Алгебраическая сумма магнитных потоков Φ в узле магнитной цепи равна нулю

$$\sum U_M = \sum F$$

Алгебраическая сумма магнитных напряжений на магнитных сопротивлениях любого произвольно выбранного контура равна алгебраической сумме МДС действующих в этом контуре

$$\Phi = \frac{U_M}{R_M}$$

$$R_M = \frac{\rho_M l}{S} = \frac{l}{\mu_a S}$$

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость; $\rho_M = 1/\mu_a$ – удельная магнитного сопротивления магнитного материала

При расчете магнитной цепи решается обычно одна из двух задач: **прямая и обратная**. В **прямой задаче** известным является магнитный поток Φ (или магнитная индукция B) на некотором участке магнитной системы; **требуется определить** МДС обмотки F . В **обратной задаче** задана МДС обмотки, **требуется определить** поток (или индукцию). Как при прямой, так и при обратной задачах известны также все размеры магнитной системы и материал магнитопровода.

В большинстве случаев расчеты магнитных цепей постоянного тока проводится *без учета гистерезиса намагничивания*

Магнитные материалы

В зависимости от значений коэрцитивной силы ферромагнитные материалы разделяются на магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие материалы (технически чистое железо, электротехнические стали, пермаллой) используются в магнитных системах как магнитопроводы, концентраторы магнитных потоков, якоря электромагнитов. Эти материалы имеют малую коэрцитивную силу ($H_{C_{\max}} \leq 0,5 \text{ кА/м}$) высокую магнитную проницаемость и индукцию насыщения (μ , B_s).

Магнитотвердые материалы имеют большую коэрцитивную силу ($H_{C_{\max}} > 10 \text{ кА/м}$) и в предварительно намагниченном состоянии используются как постоянные магниты – первичные источники магнитного поля.

Наряду с ферромагнитными материалами применяют ферримагнетики (ферриты) – это полупроводники, в них значительно меньше потери энергии на вихревые токи в переменных полях. Ферриты бывают магнитомягкие (никелевые, марганцевые), так и магнитотвердыми (бариевые, строицевые).

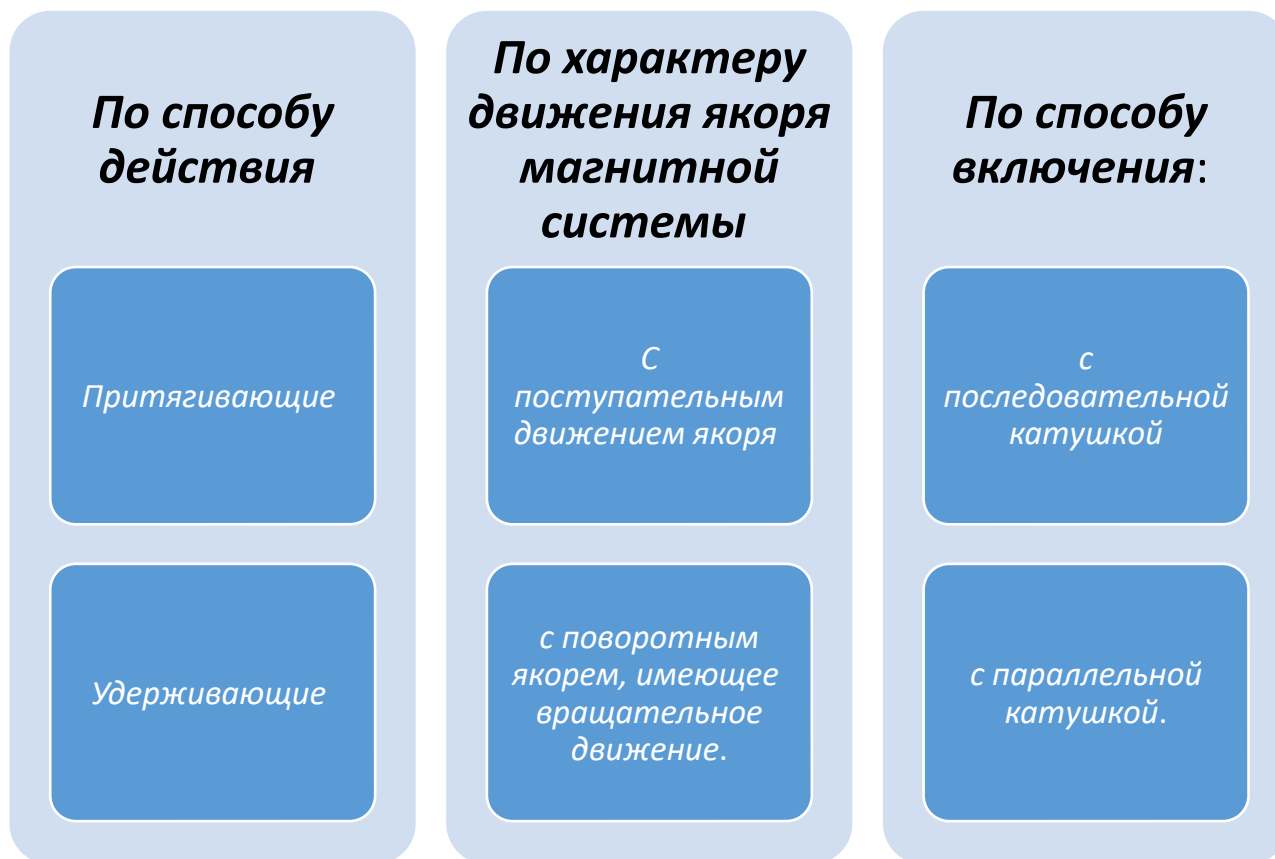
Требования к материалам для магнитных цепей электромагнитов

1. Магнитное сопротивление обратно пропорционально магнитной проницаемости μ . Чем она выше, тем при меньшей м.д.с. обмотки и мощности возможно срабатывание магнита, при этом уменьшаются размеры обмоточного окна и всего магнита.
2. Важным параметром материала магнитопровода выступает индукция насыщения B_s тяговое усилие Q_t пропорционально квадрату индукции. Поэтому, чем выше B_s , тем больше тяговое усилие электрического магнита при тех же размерах.
3. При обесточивании электрического магнита в магнитной системе существует остаточный магнитный поток Φ_0 , который определяется коэрцитивной силой H_c материала магнитопровода и проводимостью рабочего зазора.

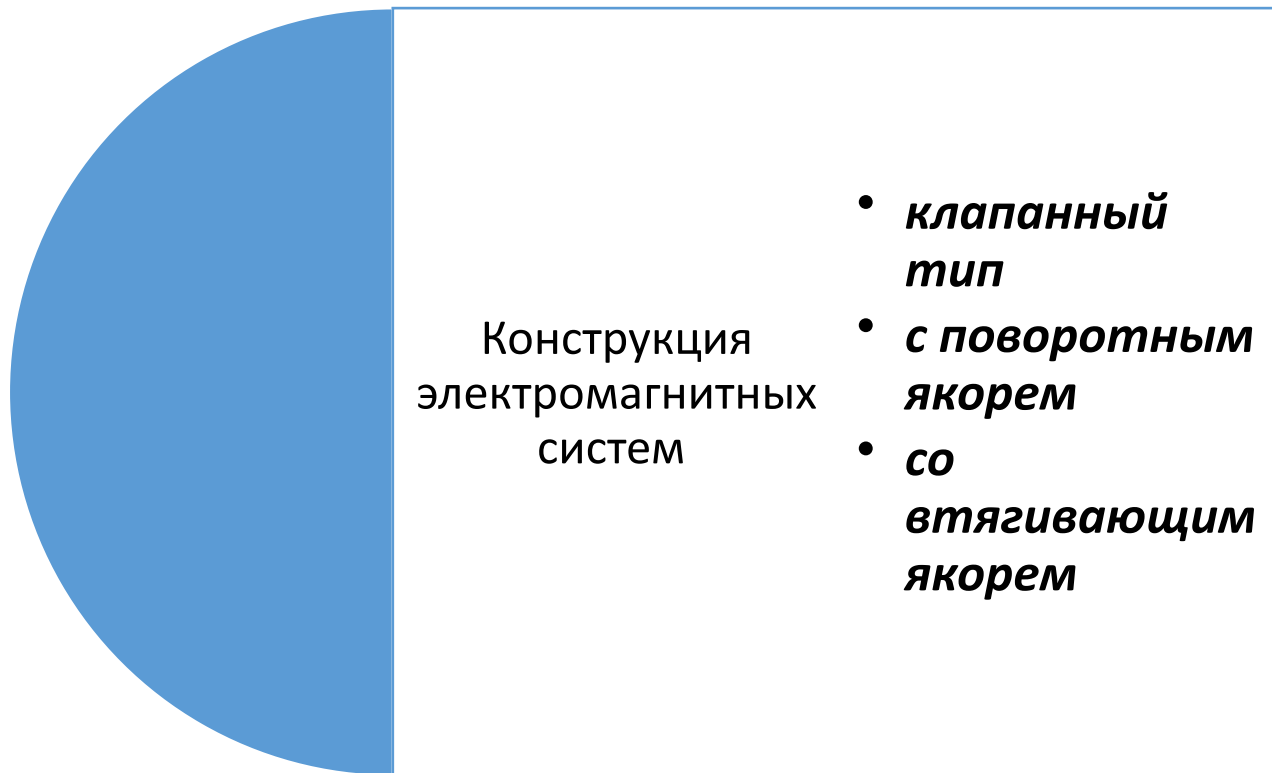
Остаточный магнитный поток может оказаться таким, что произойдет так называемое залипание сердечника. Во избежание этого явления требуется, чтобы материал обладал низкой коэрцитивной силой (узкая петля гистерезиса). Для устранения залипания в магнитной системе предусматривают конечный зазор, создаваемый специальными немагнитными прокладками.

Магнитные цепи электрических аппаратов

Магнитной цепью электрического аппарата называется совокупность его элементов, через которые замыкается магнитный поток.



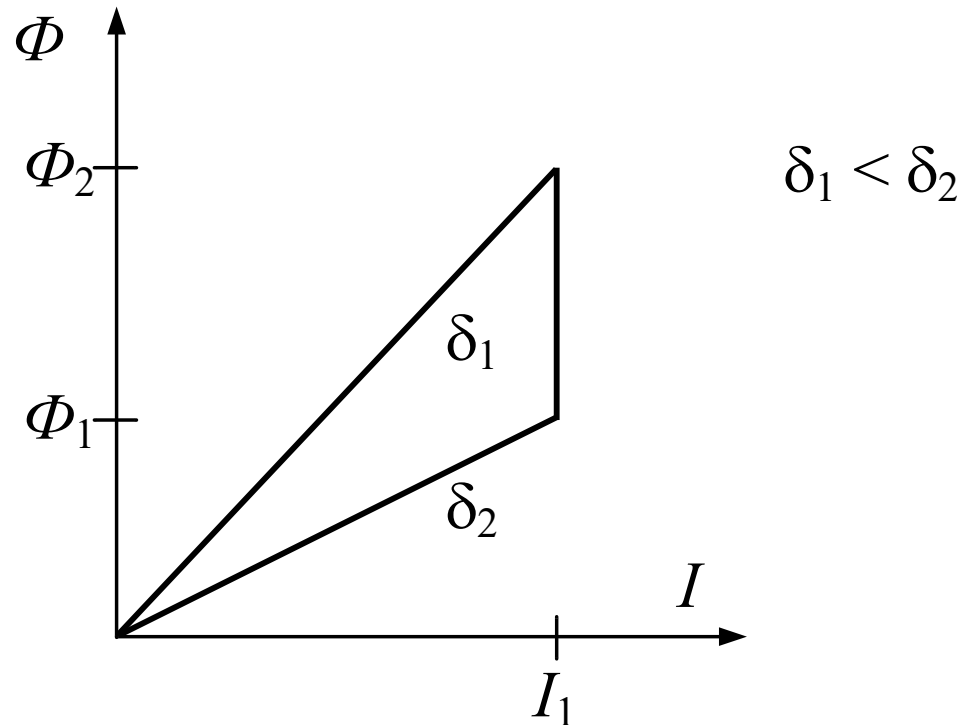
Магнитные цепи электрических аппаратов



Особенности магнитных систем постоянного и переменного тока

Ток в катушках электромагнитов постоянного тока не зависит от положения якоря, т.е. от величины воздушного зазора, а зависит лишь от напряжения питающей сети и сопротивления цепи.

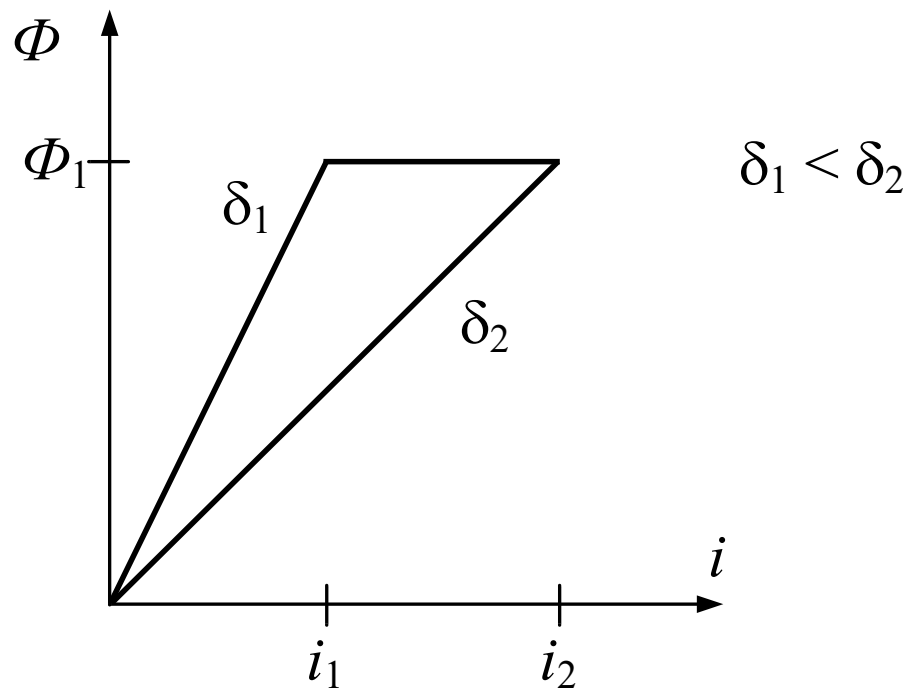
$U = \text{const}$, $R = \text{const}$, $I = \text{const}$.
Следовательно, при постоянном числе витков в катушке постоянного электромагнита н.с. $lw = \text{const}$.
При переменном токе якоря электромагнита существенно влияет на величину тока.
Питающий ток электромагнита зависит от величины не только активного, но и индуктивного сопротивления.



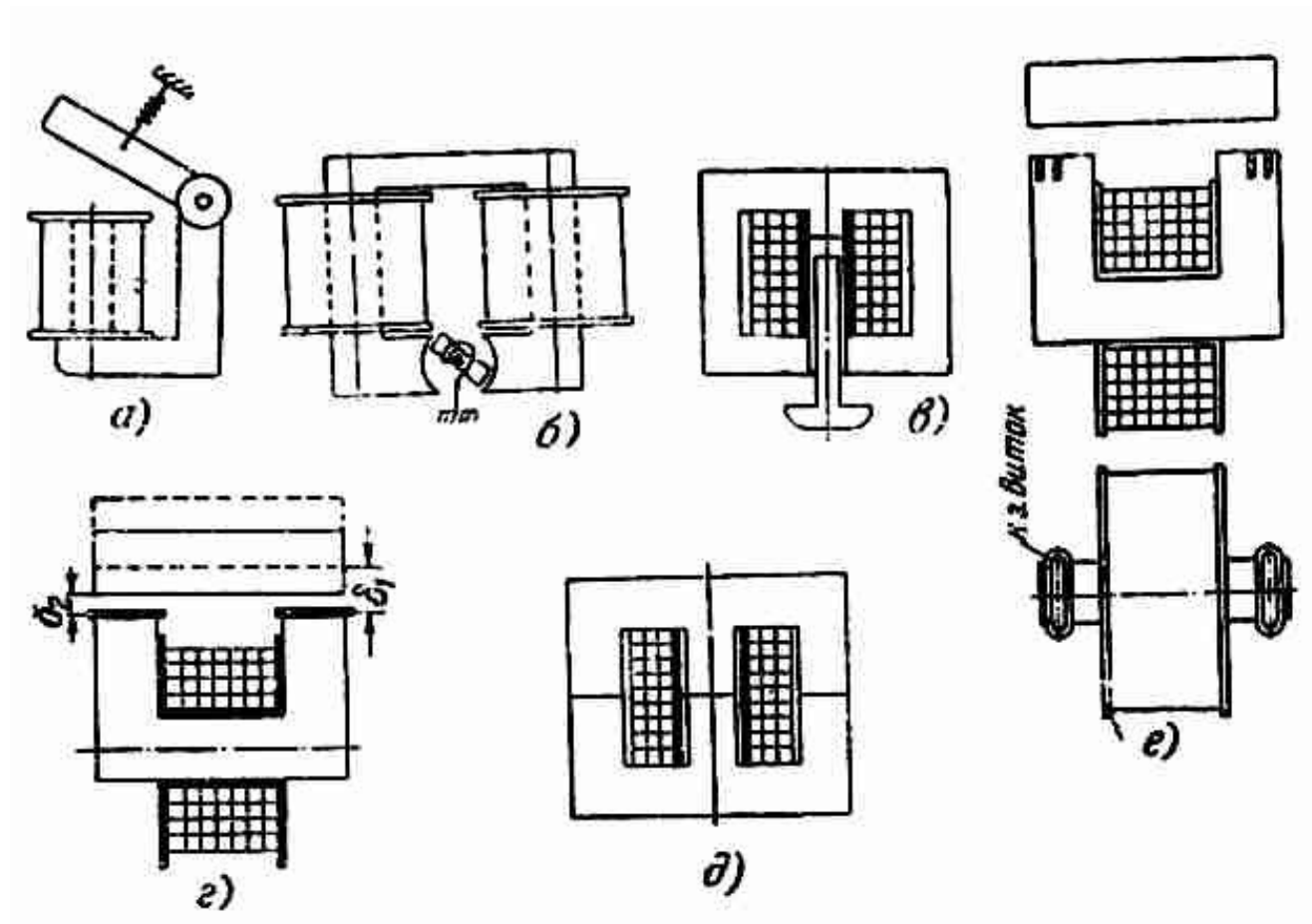
Особенности магнитных систем постоянного и переменного тока

При большом зазоре индуктивное сопротивление мало и ток значительно превосходит по величине ток при втянутом якоре. Таким образом, ток в катушке зависит от магнитного сопротивления магнитопровода, которое изменяется при изменении величины воздушного зазора, а поскольку $I \neq \text{const}$, н.с. $I/w \neq \text{const}$, магнитный поток

$$\Phi = \frac{U \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot w} = \text{const}$$

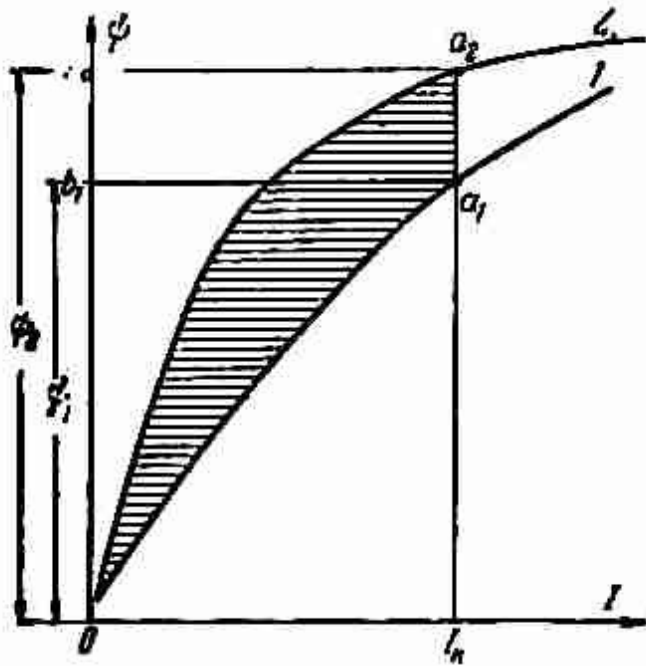


Формы магнитных систем электромагнитных аппаратов

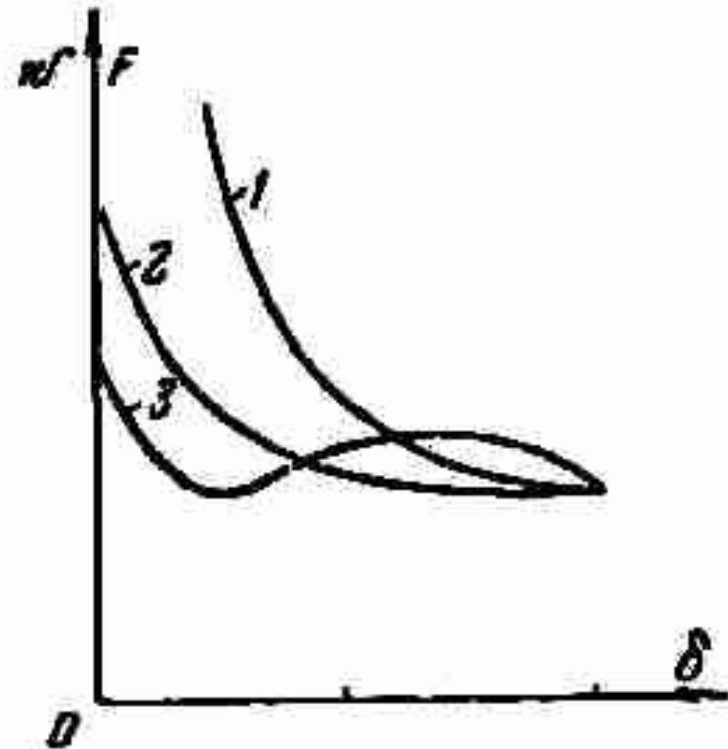


Тяговые характеристики электромагнитных аппаратов

2



Кривые намагничивания и работа электромагнита



1 – короткоходовой магнит переменного тока; 2 – длинноходовой магнит переменного тока; 3 – то же постоянного тока

Электромагниты

Магнит – это источник магнитного поля чаще всего в виде намагниченного ферромагнетика.

Электромагнит – это ферромагнитный сердечник из магнитомягкого материала с обмоткой, обтекаемой током.

Электромагниты широко применяются в различных электромагнитных механизмах, действия которых происходит вследствие притяжения подвижной части устройства (якоря) к неподвижной части (сердечнику) магнитопровода.

В системах автоматики электромагниты применяются в качестве чувствительных, промежуточных и исполнительных элементов.

По роду тока в обмотке различают электромагниты постоянного и переменного тока.

Электромагниты постоянного тока, в свою очередь, подразделяются на **нейтральные**, которые не реагируют на полярность входного сигнала, и **поляризованные**, у которых направление перемещения якоря определяется полярностью управляющего сигнала.

Нейтральные электромагниты (ЭМ)

по
конструктивному
исполнению

- ЭМ клапанного типа;
- ЭМ с втягивающимся якорем (ЭМ соленоидного типа, прямоходовой ЭМ, втяжной ЭМ);
- ЭМ с поперечно движущимся якорем;
- электромагнитные пропорциональные управляющие элементы
- ЭМ с поворотным якорем

длины
хода
якоря
различают

- **короткоходовые** (до 8 мм)
- **длинноходовые** (до 150 мм) ЭМ.

По
быстродействию ЭМ

- быстродействующие ($t_{\text{срб}}, t_{\text{отн}} \leq 50 \text{ мс}$);
- - нормальные ($t_{\text{срб}}, t_{\text{отн}} = 50-150 \text{ мс}$);
- - замедленного действия ($t_{\text{срб}}, t_{\text{отн}} > 150 \text{ мс}$).
- По назначению ЭМ делятся на:
 - - приводные;
 - - перемещающие;
 - - фиксирующие;
 - - специальные.

Тяговая и механическая характеристики

В соответствии со 2-м законом Киргофа в любое мгновение переходного процесса при включении ЭМ

$$U = iR + \omega d\Phi/dt$$

где U – напряжение на зажимах катушки, ω – число витков и активным сопротивлением R .

Умножив обе части этой формулы на idt , получим уравнение энергетического баланса

$$Uidt = i^2 Rdt + \omega id\Phi$$

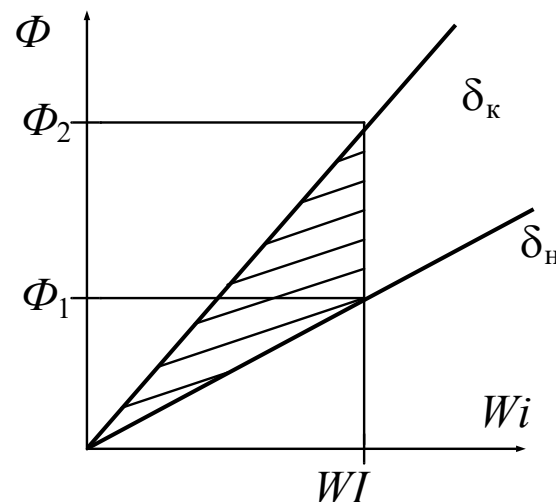
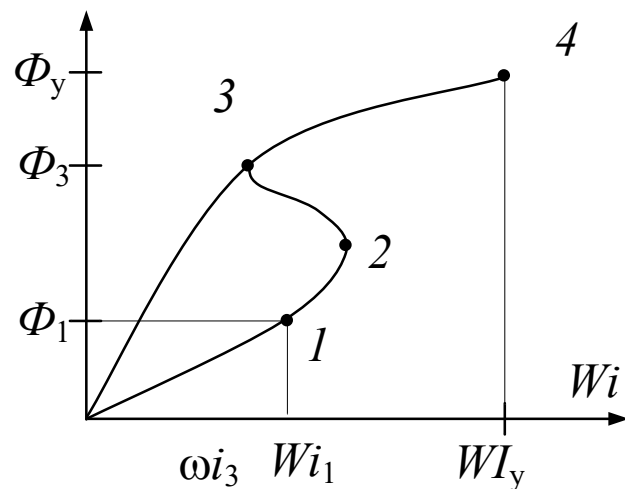
где $Uidt$ – электрическая энергия, поступающая в обмотку за время dt ;

– тепловые потери в ее активном сопротивлении; $\omega id\Phi$ – энергия, затраченная на создание магнитного поля ЭМ в механическую работу движения якоря.

$i^2 Rdt$

$$\int_0^t Uidt = \int_0^t i^2 Rdt + \int_0^{\Phi} \omega id\Phi$$

Классификация электрических аппаратов

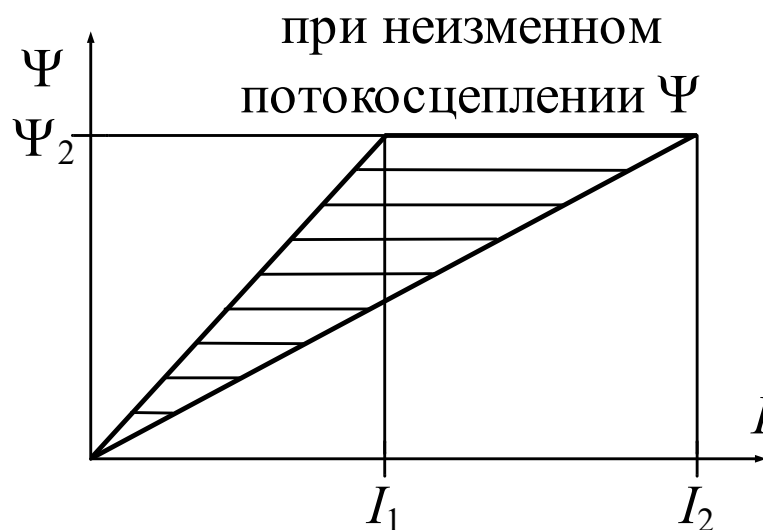
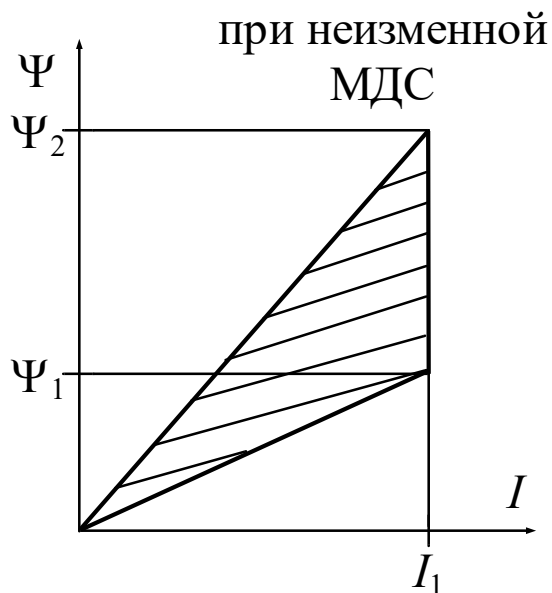


$$\Psi = w\Phi = f(i) \quad \Psi = L \cdot i \quad L = \frac{\Psi}{I}$$

на постоянный ток.

При условии, что магнитопровод ненасыщен, т.е. весь поток проходит через рабочий зазор, и во время движения якоря ток в обмотке ЭМ не изменяется (линейная зависимость).

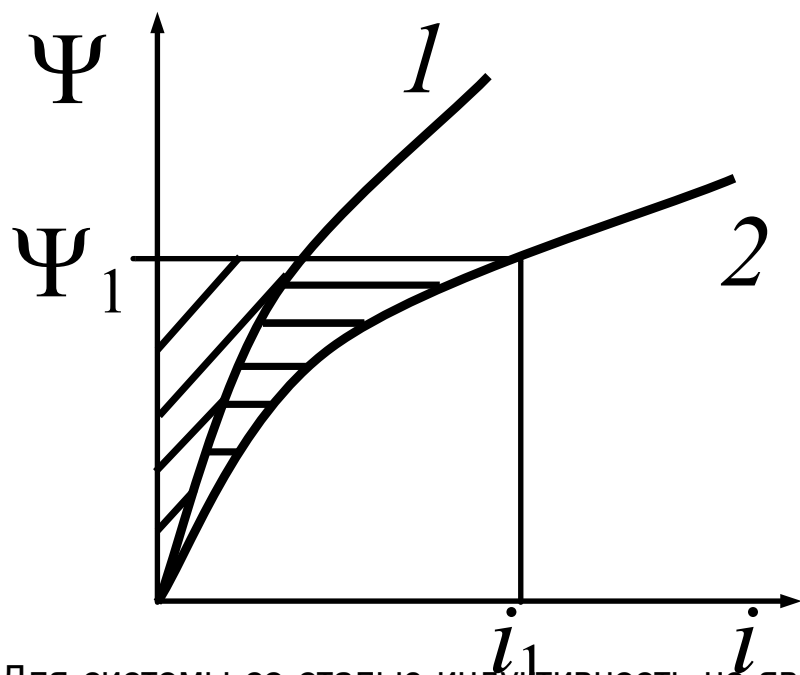
Классификация электрических аппаратов



Таким образом, энергия, сообщенная электрическому магниту, равна энергии, поступившей из сети, за вычетом потерь в катушке. При установившемся режиме вся энергия, поступающая из сети, расходуется на потери в катушке.

Классификация электрических аппаратов

Величина запасенная в электромагните энергии на графике пропорциональна площади, ограниченной кривой $\Psi(i)$ и осью ординат (заштрихованная площадь).



1 – в цепи без стали;
2 – в цепи со сталью

Для системы со сталью индуктивность не является постоянной величиной, а зависит от степени насыщения системы тогда

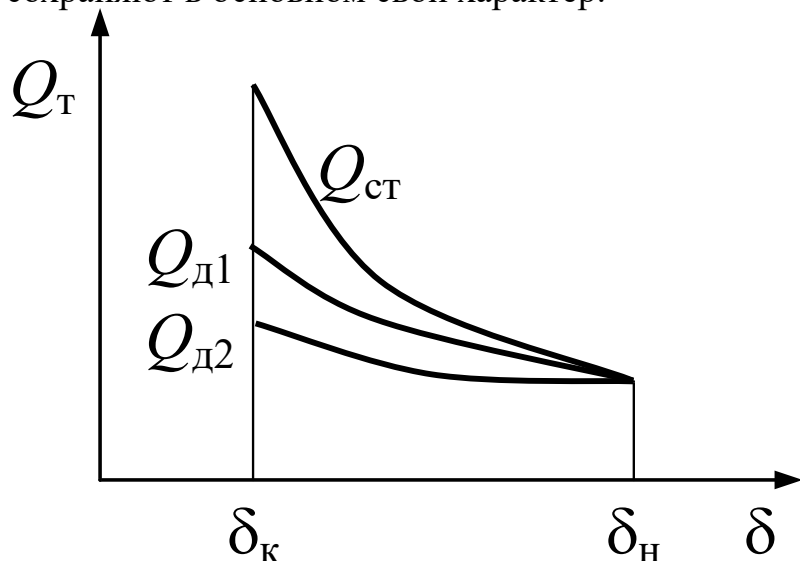
$$L = \frac{2W_M}{I^2}$$

- на переменном токе.

Классификация электрических аппаратов

Тяговой или **электромеханической** характеристикой ЭМ называют зависимость $Q_T(\delta)$ тягового усилия от длины воздушного зазора δ при оговоренном характере изменений тока обмотки и противодействующих усилий во время срабатывания.

Различают **статические** и **динамические тяговые характеристики**. Статическая характеристика характеризует тяговое усилие ЭМ при фиксированном якоре. При движении якоря изменяется индуктивность системы и динамические характеристики, которые сохраняют в основном свой характер.



Динамические тяговые характеристики, их множество, определяются механическими характеристиками ЭМ. Это характеристики противодействующих сил.

Динамика электромагнита

Под инерционностью ЭМ понимают запаздывание перемещения якоря по сравнению с изменениями выходного напряжения. Она определяется отставанием изменения тока в обмотке от изменения приложенного к ней напряжения и механической инерции якоря и связанных с ним подвижных частей.

Время от подачи входного напряжения на зажимы обмотки ЭМ до полного притяжения якоря ($\delta = \delta_k$) называют **временем срабатывания** - $t_{\text{ср}}$, а от снятия входного напряжения до возвращения якоря в начальное положение ($\delta = \delta_n$) – **временем отпускания** - $t_{\text{отп}}$.

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{тр}} + t_{\text{дв}}$$

$$t_{\text{отп}} = t'_{\text{тр}} + t'_{\text{дв}}$$

где $t_{\text{дв}}$, - время движения якоря соответственно от δ_n до δ_k и наоборот.

Для включения обмотки ЭМ на постоянное напряжение источника справедливо уравнение

$$U = iR + d\Psi/dt$$

$$\Psi = \omega\Phi = Li$$

Динамика электромагнита

Тогда $U = iR + L_H di/dt$, решением которого при скачкообразном ступенчатом увеличении входного напряжения от 0 до U служит выражение

$$i = I_{уст} (1 - e^{-t/T_э}),$$

где $I_{уст} = \frac{U}{R}$ - установившееся значение тока в обмотке; $T_э = \frac{L_H}{R}$ - электромагнитная постоянная времени обмотки при $\delta = \delta_H$.

Ток i в обмотке увеличивается по экспоненте, пока якорь остается неподвижным.

По достижении $i = I_{тр}$ тяговое усилие становится больше противодействующего и якорь начинает перемещаться

$$t_{тр} = T_э \ln \frac{I_{уст}}{I_{уст} - I_{тр}} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - I_{тр}/I_{уст}},$$

где $I_{тр}$ - минимальный ток, обеспечивающий срабатывание.

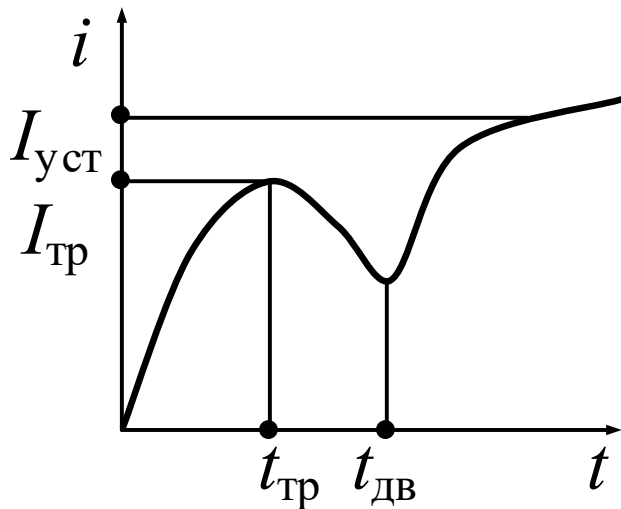
С начала движения якоря ток перестает нарастать по экспоненте и начинает падать, так как индуктивность обмотки увеличивается

$$L = \omega^2 / R_\mu,$$

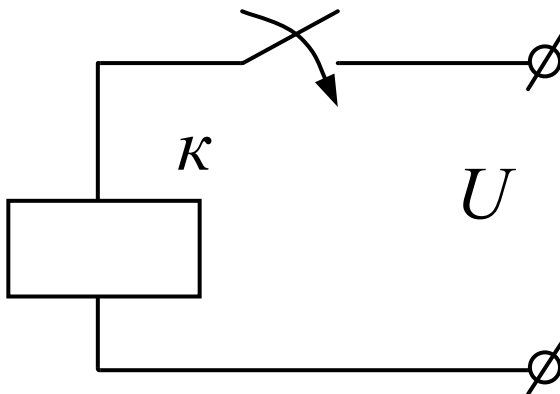
где ω - число витков; R_μ - магнитное сопротивление.

$$t'_{\text{тр}} \ll t'_{\text{дв}}$$

Динамика электромагнита



ВКЛЮЧЕНИЕ

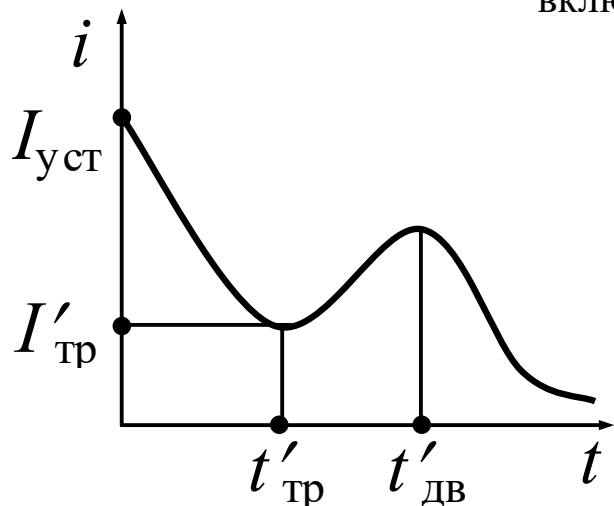


Возможны **два** способа отключения реле:

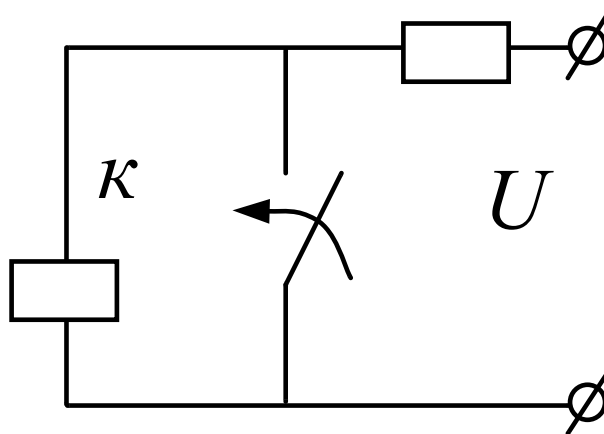
- разрывом цепи обмотки;
- шунтированием обмотки.

В первом случае ток практически мгновенно падает до нуля, тогда $t_{\text{отп}} \approx t_{\text{дв}}$, так как

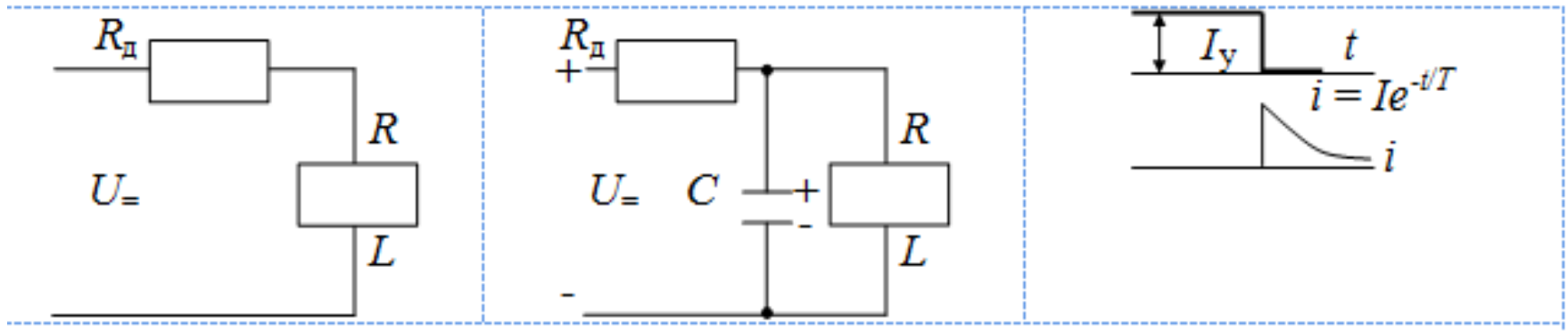
Во втором случае переходной процесс при отпуске протекает по экспоненте.



ОТКЛЮЧЕНИЕ



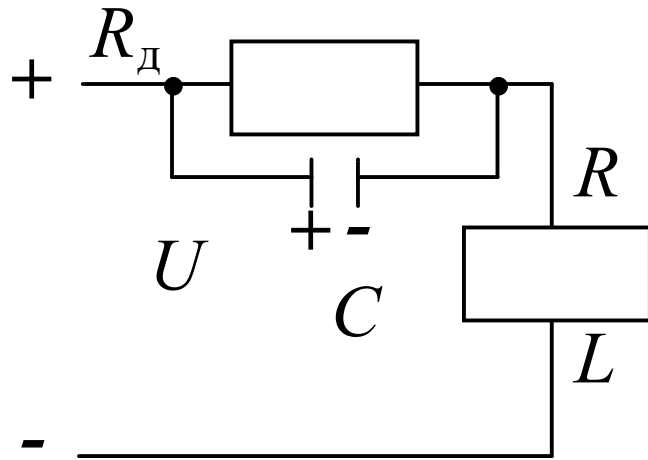
Схемы увеличения t_{cp}



Увеличение активного сопротивления ведет к росту времени трогания, чем оно меньше, тем быстрее срабатывает ЭМ.

Ускорить срабатывание ЭМ при неизменных его габаритах можно с помощью схем форсировки.

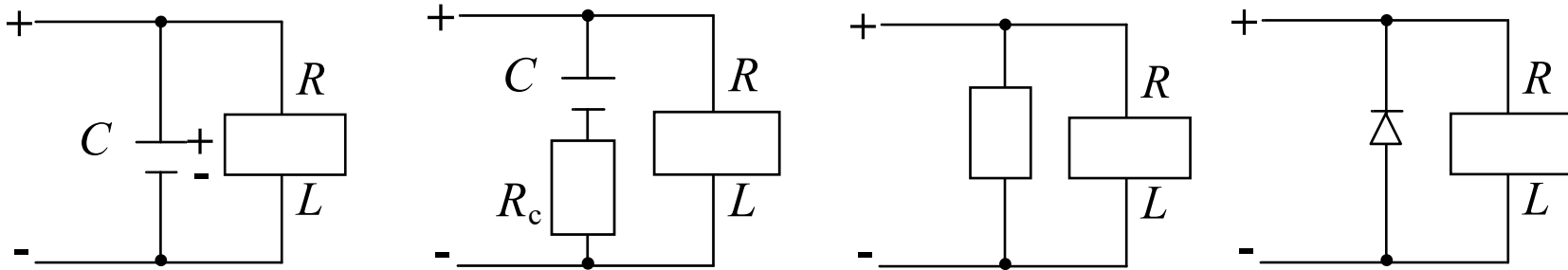
Схема уменьшения $t_{ср}$



В первый момент времени незаряженный конденсатор C уменьшает падение напряжения в резисторе $R_{д}$, благодаря чему обеспечивается форсировка ЭМ. В установившемся режиме ток в цепи ограничивается резистором $R_{д}$. Емкость выбирается из условия

$$C = L \cdot 10^6 / R \cdot R_{д} \quad (\text{Гн} / \text{Ом}).$$

Схемы увеличения t_{cp} за счет большего t'_{mp}



Приведение схемы обеспечивают стабильное снижение t_{cp} нормальных по быстрдействию ЭМ до нескольких миллисекунд или увеличения их $t_{отп}$ до нескольких секунд.

Основной недостаток электромагнитного демпфера – зависимость выдержки времени от температуры окружающей среды. Изменение температуры окружающей среды на каждые 10°C ведет к изменению выдержки времени на 4 %.

Расчет электромагнитной системы при переменном токе отличается от расчета магнитной системы постоянного тока **в следующем**.

При переменном токе и потоке в магнитопроводе за счет явлений гистерезиса и вихревых токов появляются потери энергии. Поэтому не весь ток, текущий по катушке является намагничивающим. Часть тока идет на покрытие указанных потерь.

Величина тока в катушке на переменном токе не равна подведенному напряжению, деленному на омическое сопротивление катушки, как это имеет место при постоянном токе.

Величина тока здесь должна быть такой, чтобы число потокосцепленной катушки соответствовало подведенному напряжению. Если пренебречь омическим падением напряжения в катушке (для обмотки напряжения $R \ll \omega L$), то индуцированная Э.Д.С. e должна быть равна

$$e = \omega \cdot W \cdot \Phi = U$$

Таким образом, если задано приложенное к катушке напряжение, то тем самым задан поток. По катушке течет ток i такой величины, чтобы создать необходимый поток.

Допустим, что поток в воздушном зазоре δ равен Φ_δ , и поток рассеяния отсутствует. Пренебрегая потерями м.д.с. в стали можно записать

$$I_\delta = \frac{U_\delta \cdot \delta}{\omega W^2 \cdot S}$$

- часть тока, которая уходит на создание м.д.с.
где W - число витков, S – площадь.

Электромагниты переменного тока

Согласно приведенному выражению при принятых допущениях ток в катушке **пропорционален величине воздушного зазора**. В действительности из-за наличия потоков рассеяния изменение намагничивающего тока происходит медленнее, чем изменяется воздушный зазор.

С ростом зазора δ уменьшается индуктивные сопротивления, при этом **ток будет расти, а поток - уменьшаться**

$$X = \omega W^2 \mu_0 S / 2\delta$$

В реальных электромагнитных системах аппаратов ток катушки при разомкнутом якоре (пусковой ток) превосходит ток в катушке при замкнутом якоре (рабочий ток) в 6-10 раз.

Потери на гистерезис и вихревые токи являются активными потерями. Составляющая тока, идущая на покрытие этих потерь будет активной составляющей. Составляющая тока, идущая на создание м.д.с. является реактивной составляющей. Таким образом для цепи катушки имеем

$$U_m^2 = (RI_m)^2 + (\omega WSB_m)^2$$

И так, с ростом рабочего зазора в электрическом аппарате как в катушках постоянного, так и переменного тока магнитный поток падает.

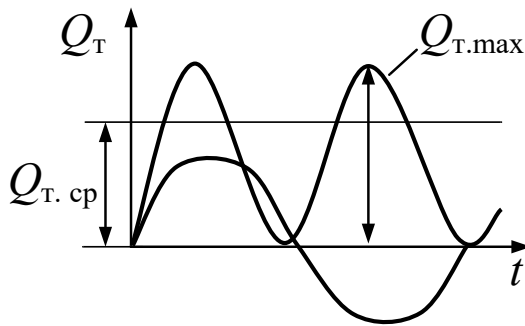
Однако, в магнитных цепях переменного тока это является следствием роста падения напряжения на активном сопротивлении обмотки, а в цепях постоянного тока – ростом магнитного сопротивления воздушного зазора.

Тяговая характеристика

Якорь ЭМ притягивается к сердечнику и при подаче в обмотку переменного тока. Предполагая поток в магнитопроводе синусоидальным по формуле Максвелла найдено выражение

$$Q_T = \frac{\Phi_{\delta}^2}{2\mu_0 S} = Q_{T_{\max}} \sin 2\omega t$$

где $Q_{T_{\max}}$ - амплитуде тягового усилия, неизменного по знаку и пульсирующего с удвоенной частотой.



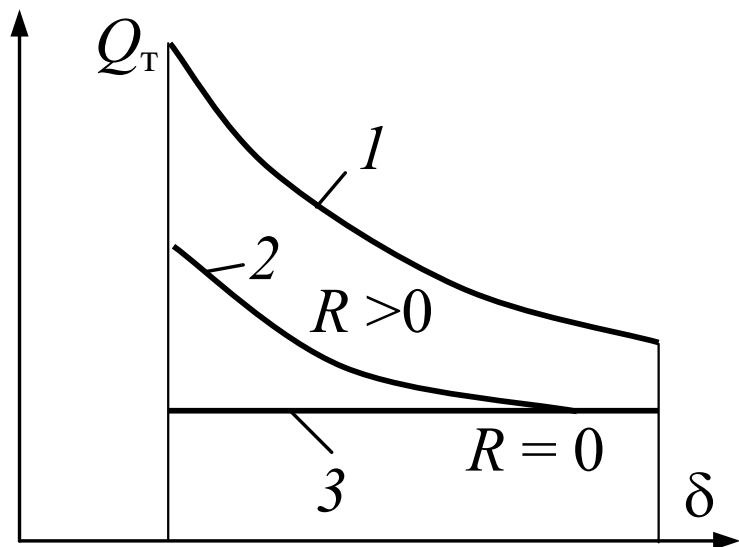
Притяжение якоря определяется средним значением тягового усилия $Q_{T_{\text{cp}}}$, т.е. его постоянной составляющей. Следует иметь ввиду, что постоянная составляющая тягового усилия ЭМ переменного тока в два раза меньше тягового усилия ЭМ постоянного тока и при прочих равных условиях ЭМ постоянного тока развивает большую силу притяжения, чем ЭМ переменного тока.

Если на постоянном напряжении

$$I_{\text{уст}} = F/W = U/R = \text{const} \neq f(\delta)$$

Тяговая характеристика

При $\Phi_m = \text{const} \neq f(\delta)$, и следовательно,

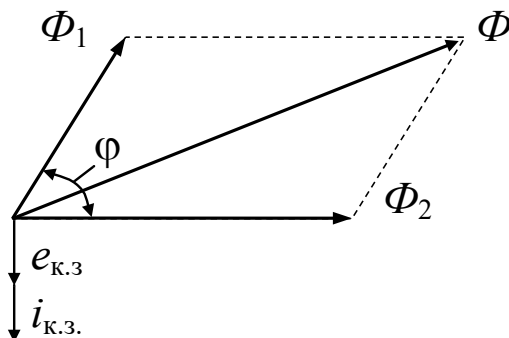
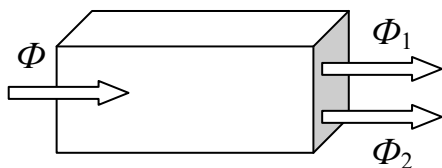
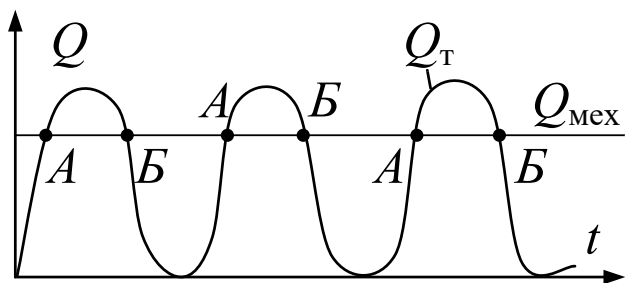


гори

ЭМ п
акт
его с

Способы устранения вибрации якоря

Одно из эффективных средств против вибрации якоря – уменьшение пульсаций тягового усилия с помощью магнитных экранов (к.з. витков), охватывающих часть сечения сердечника, и многофазных ЭМ. К.з. виток из проводниковых материалов (медь, латунь) охватывает 70-80 % полюса ЭМ.



Принцип работы к.з. витка заключается в следующем. Общий поток ЭМ Φ разветвляется на поток Φ_1 , который происходит по неохваченной витком части полюса, и на поток Φ_2 , который проходит через часть, охватываемую к.з. витком.

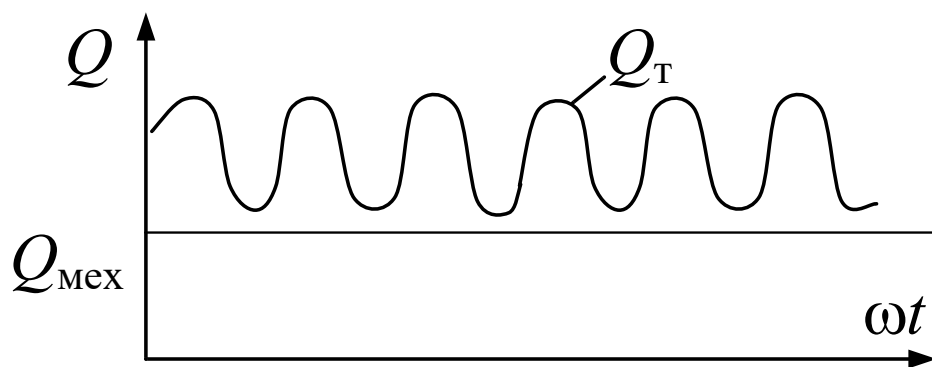
При этом в витке индуцируется э.д.с. $e_{к.з.}$ и возникает $i_{к.з.}$, сдвинутых по отношению к $i_{к.з.}$ на угол γ_0 и определяющих весьма незначительной индуктивностью витка. Для упрощения принимаем $\gamma_0 = 0$.

Это ток возбуждает магнитный поток $\Phi_{к.з.}$, который охватывает к.з. виток и вместе с частью основного потока образует поток Φ_2 , проходящий через часть полюса, охваченную витком, и сдвинутый во времени по отношению к потоку Φ_1 на угол φ .

Способы устранения вибрации якоря

Сила притяжения ЭМ складывается из двух пульсирующих составляющих, но сдвинутых во времени.

Благодаря сдвигу по времени общая сила притяжения пульсирует много меньше и минимальное значение ее остается выше силы отталкивая, чем и исключается вибрация якоря.



Пульсации Q_T зависят от угла φ , они будут отсутствовать при двух условиях:

1) $\Phi_1 = \Phi_2$; 2) $2\varphi = \pi$, т.е. угол $= 90^\circ$.

Под пульсациями усилия понимают отношения значений переменной составляющей к постоянной.

В системах с к.з. витком сдвиг потоков на 90° практически невозможен. На практике $\varphi = 50-80^\circ$.

Магнитные цепи с постоянными магнитами

Для создания постоянного магнитного поля используют постоянные магниты, изготавливаемые из магнитотвердых материалов с широкой петлей гистерезиса. В процессе работы магнита наблюдается уменьшения потока в рабочем зазоре – **старение магнита**.

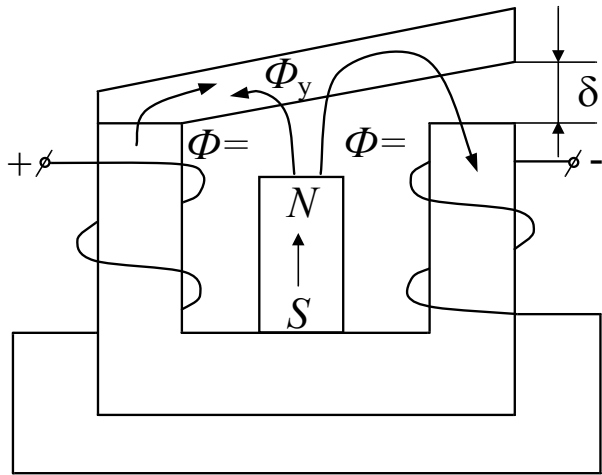
Различают: *структурное, механическое, магнитное* старение.

При структурном - материал магнита после закалки или отливки имеет неравномерную структуру, но со временем это неравномерность переходит в более равновесное - стабильное состояние. При этом в металле исчезают внутренние напряжения. Одновременно уменьшаются значения B_r и H_c .

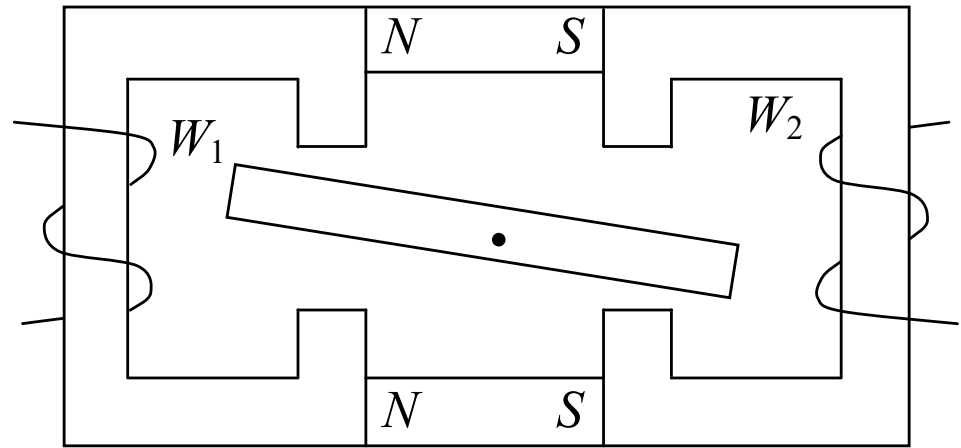
Механическое старение наступает при ударах и вибрациях магнита и влияние высоких температур, которые ослабляют поток магнита.

Магнитное старение состоит в изменении свойств материала под действием высших магнитных колебаний для стабилизации характеристик постоянного магнита его подвергают термообработке (отпуску), механическим воздействием (ударом, вибрации) и предварительному размагничиванию током небольшой напряженности.

Магнитные цепи с постоянными магнитами

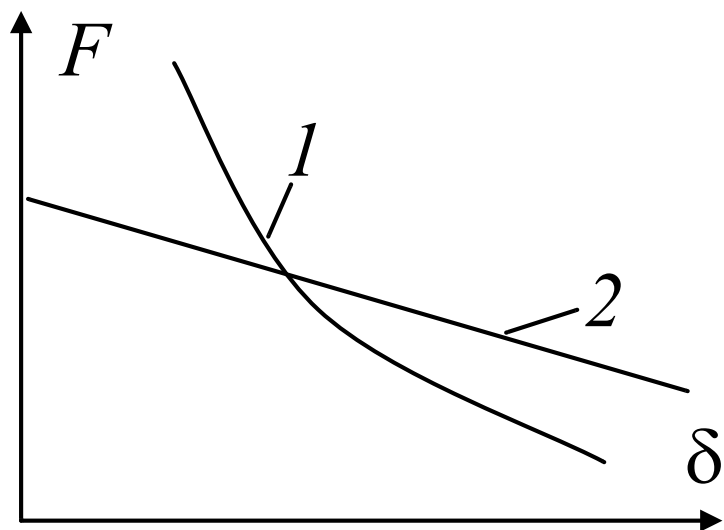


дифференциальная схема



мостовая схема

Сравнительная оценка электромагнитов



- Как видно из графика сила тяги у магнита переменного тока снижается в меньшей степени, чем у электромагнита постоянного тока.

- При включении в сеть электромагниты переменного тока потребляют ток в 20-30 раз больше, чем в рабочем состоянии.

- Коэффициент мощности их при включении составляет 0,1-0,35.

Тяговые характеристики электромагнитов:

1 – постоянного тока;

2 – переменного тока