

I. Электромагнитный момент и электромагнитное усилие электрических машин вращательного и поступательного движения.

1. Общее выражение для момента и силы.

Электромагнитный момент двигателя вращательного движения в общем случае определяется выражением

$$M = \frac{dW}{d\vartheta} = p \frac{dW}{d\vartheta_e} \quad (\text{Н}\cdot\text{м}) \quad (1.1)$$

W – магнитная энергия, запасенная в электрических контурах машины (Вт·с, Дж)

ϑ, ϑ_e - угол поворота вала в геометрических и электрических радианах, соответственно

p – число пар полюсов ротора.

Аналогично для электрического двигателя поступательного движения развиваемая электромагнитная сила будет

$$Q = \frac{dW}{dx} = p \frac{dW}{dx_e} \quad (1.2)$$

x – перемещение подвижной части в м

$x_e = px$ - перемещение подвижной части в «электрических» метрах (мэ)

p – число полюсных делений на подвижной части машины

Магнитная энергия n электрических контуров (обмоток, фаз) машины в обоих случаях представляется в виде

$$W = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n L_K I_K^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n ' L_{KS} I_K I_S, \quad (1.3)$$

где

L_K - собственная индуктивность k -го контура

L_{KS} - взаимная индуктивность k -го и s -го контуров, причем $L_{KS} = L_{SK}$

I_K, I_S - токи k -го и s -го контуров, соответственно.

Знак \sum' означает, что суммирование ведется по всем s , кроме $s = k$.

Пусть двигатель имеет n_1 обмоток на статоре (на неподвижной части) и n_2 обмоток на роторе (на подвижной части), так что $n_1 + n_2 = n$

Для любого произвольного момента времени система обмоток на статоре и система обмоток на роторе может быть заменена одной обмоткой на статоре и одной обмоткой на роторе, обтекаемыми некоторыми эквивалентными токами, создающими те же магнитные поля, что и исходная система.

Например обе обмотки (рис.1.3) с угловым сдвигом их осей 90° и числом витков w_1 каждая, обтекаемые токами I_a и I_b , могут быть заменены в рассматриваемый момент времени одной обмоткой с тем же числом витков w_1 , и эквивалентным током $I = \sqrt{I_a^2 + I_b^2}$. Эквивалентная магнитодвижущая сила F будет, соответственно равна $F = \sqrt{F_a^2 + F_b^2} = \sqrt{I_a^2 w_1^2 + I_b^2 w_1^2} = I w_1$

Таким образом, две обмотки, расположенные по осям двигателя (статора или ротора) a и b заменяются одной обмоткой, ориентация оси которой Z по отношению к одной из осей исходным обмоток, например a , определяется соотношением $\alpha = \arctg \frac{I_b}{I_a}$;

Сказанное может быть распространено на любое количество обмоток, угловой сдвиг между осями которых не обязательно равен 90° .

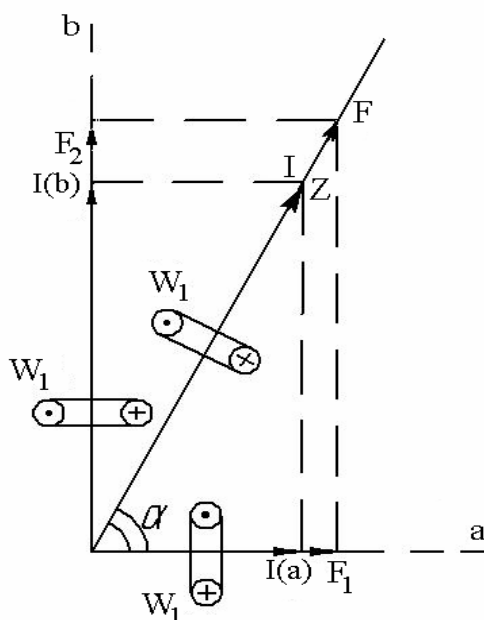


Рис. 1.3

Итак, для двух обмоток (одна – на статоре, вторая – на роторе) на основании (1.3) имеем

$$W = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + \frac{1}{2} L_{12} I_1 I_2 + \frac{1}{2} L_{21} I_1 I_2 = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + L_{12} I_1 I_2 \quad (1.4)$$

L_1, L_2 - собственные индуктивности обмоток статора и ротора, соответственно.

L_{12} - взаимоиндуктивность между статорной и роторной обмоткой.

I_1, I_2 - ток обмотки статора и обмотки ротора, соответственно.

Для определения момента двигателя вращательного движения согласно (1.1) вычислим производную для выражения (1.4) по углу поворота ϑ , предполагая постоянными токи I_1 и I_2 в его обмотках:

$$M = \frac{1}{2} \frac{dL_1}{d\vartheta} I_1^2 + \frac{1}{2} \frac{dL_2}{d\vartheta} I_2^2 + \frac{dL_{12}}{d\vartheta} I_1 I_2 \quad (1.5)$$

Аналогично поступим для определения электромагнитной силы поступательного движения

$$Q = \frac{1}{2} \frac{dL_1}{dx} I_1^2 + \frac{1}{2} \frac{dL_2}{dx} I_2^2 + \frac{dL_{12}}{dx} I_1 I_2 \quad (1.5)$$

Индуктивности L_1 и L_2 , а также взаимоиндуктивность L_{12} являются в общем случае периодическими функциями по углу поворота ротора ϑ (для двигателей вращательного движения) или по линейному перемещению x (для двигателей поступательного движения).

2. Электромагнитный момент двигателей вращательного движения.

Собственная индуктивность обмотки статора, обмотки ротора и их взаимоиндукция имеют следующую зависимость от магнитной проводимости и числа витков

$$L_1 = G_1 w_{1e}^2 \quad (1.6)$$

$$L_2 = G_2 w_{2e}^2$$

$$L_{12} = G_{12} w_{1e} w_{2e}$$

Здесь w_{1e} , w_{2e} – эффективные числа витков обмоток двигателя. $w_{1e} = k_{01} w_1$, $w_{2e} = k_{02} w_2$

$k_{01} \leq 1, k_{02} \leq 1$ – обмоточные коэффициенты, учитывающие распределение, укорочение шага обмотки и скос пазов

G_1, G_2, G_{12} – магнитные проводимости, причем G_1 – проводимость магнитной цепи для потока, созданного обмоткой 1, расположенной на статоре (рис. 1.4 а)

G_2 – проводимость магнитной цепи для потока, созданного обмоткой 2, расположенной на роторе (рис. 1.4 б)

G_{12} – проводимость для результирующего потока сцепленного с обмоткой 1 и 2 (рис. 1.4в)

Поскольку при нашем рассмотрении мы пренебрегаем насыщением стальных участков магнитопровода статора и ротора и считаем магнитное сопротивление этих участков равным нулю, то указанные проводимости являются проводимостями воздушного зазора. Поворачивая мысленно ротор (рис. 1.4) в направлении изменения угла ϑ против часовой стрелки, мы видим, что проводимости G_1, G_2, G_{12} изменяются периодически, причем проводимости G_1, G_2 имеют период повторяемости π эл. радиан, а проводимость G_{12} , соответствующая взаимной индуктивности между обмотками $L_{12} – 2\pi$ эл. радиан.

Обычно периодические функции G_1, G_2, G_{12} заменяют их первыми гармониками, в результате чего имеем следующее представление для собственных индуктивностей и взаимоиндуктивности.

$$\begin{aligned}
 L_1 &= L_{01} - L_{m1} \cos 2p\vartheta, \\
 L_2 &= L_{02} - L_{m2} \cos Z_1\vartheta, \\
 L_{12} &= L_{m12} \sin p\vartheta.
 \end{aligned}
 \tag{1.7}$$

Здесь угол ϑ отсчитывается от оси α против часовой стрелки; p – число пар полюсов ротора, Z_1 – число зубцовых выступов статора (для рис.1.4 $p=1, Z=2$)

$$\begin{aligned}
 L_{01} &= \frac{L_{d1} + L_{q1}}{2}, \quad L_{m1} = \frac{L_{d1} - L_{q1}}{2} \\
 L_{02} &= \frac{L_{d2} + L_{q2}}{2}, \quad L_{m2} = \frac{L_{d2} - L_{q2}}{2}
 \end{aligned}$$

L_{d1} – индуктивность обмотки статора 1 по продольной оси, когда ротор (рис. 1.4. а) занимает положение, при котором его продольная ось d совпадает с осью обмотки 1 β . В этом положении собственная индуктивность обмотки статора 1 максимальна.

L_{q1} – индуктивность обмотки статора 1 по поперечной оси, когда продольная ось ротора d перпендикулярна оси обмотки β , а поперечная ось ротора q совпадает с осью обмотки статора β . В этом положении собственная индуктивность обмотки статора минимальна.

Аналогично для обмотки ротора 2 (рис. 1.4 б)

L_{d2} – индуктивность обмотки ротора 2 по продольной оси, когда ось d совпадает с осью β .

L_{q2} – индуктивность обмотки ротора 2 по поперечной оси, когда d перпендикулярна оси обмотки β , а ось ротора q совпадает с осью обмотки статора β .

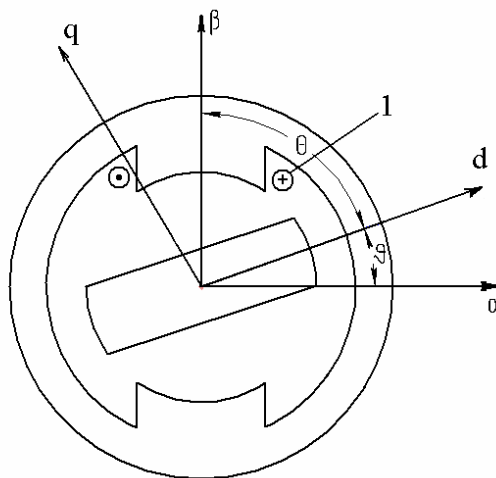


Рис. 1.4 а)

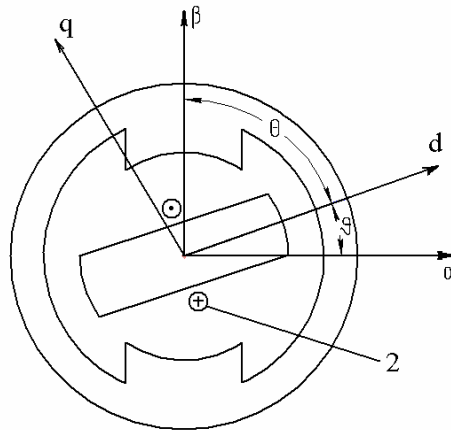


Рис. 1.4 б)

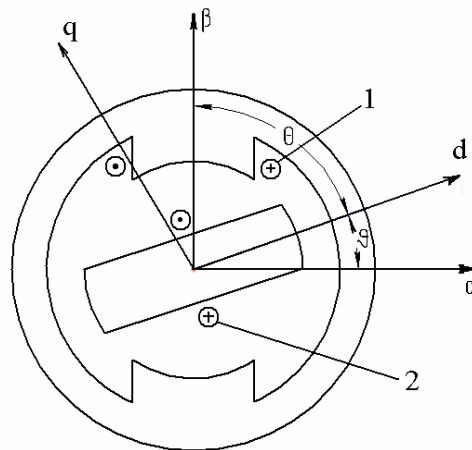


Рис. 1.4 в)

Надо отметить, что индуктивности $L_{dl,2}$, $L_{ql,2}$, определяются не только потоком, созданным соответствующими обмотками, и проходящим через воздушный зазор и стальные участки магнитопровода, но и потоками рассеяния, замыкающимися по некоторым воздушным промежуткам.

Можно считать проводимости для потоков рассеяния $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$ не зависящими от угла поворота ϑ и записать

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{1a}, \quad L_2 = L_{\sigma 2} + L_{2a}$$

В этом случае проводимость G_M , определяющую амплитуду взаимной индуктивности $(L_{12})_m$ в выражении (1.7) можно считать равной проводимости G_{ad1} , по продольной оси для обмотки 1.

Таким образом, (1.7) можно переписать так

$$L_1 = L_{\sigma 1} + \frac{L_{ad1} + L_{aq1}}{2} - \frac{L_{ad1} + L_{aq1}}{2} \cos 2p\vartheta, \quad (1.8)$$

$$L_2 = L_{\sigma 2} + \frac{L_{ad2} + L_{aq2}}{2} - \frac{L_{ad2} + L_{aq2}}{2} \cos Z_1\vartheta,$$

$$L_{12} = L_{ad12} \sin p\vartheta$$

Для числа пар полюсов двигателя $p \neq 1$ обмотка состоит из p последовательно соединенных катушечных групп с числом витков в

каждой: $\frac{W_1}{p}$ - для статора и $\frac{W_2}{p}$ - для ротора. В результате соответствующие индуктивности получают выражение

$$L_{ad1} = pG'_{ad1}\left(\frac{W_1}{p}\right)^2; L_{ad2} = pG'_{ad2}\left(\frac{W_2}{p}\right)^2, \quad (1.9)$$

$$L_{aq1} = pG'_{aq1}\left(\frac{W_1}{p}\right)^2; L_{aq2} = pG'_{aq2}\left(\frac{W_2}{p}\right)^2$$

$$L_{a12} = pG'_{12}\left(\frac{W_1}{p}\right)\left(\frac{W_2}{p}\right)$$

Здесь $G'_{ad1}, G'_{ad2}, G'_{aq1}, G'_{aq2}, G'_{12}$ - проводимости на одну пару полюсов по соответствующим осям электрической машины. В большинстве случаев, можно принять, что $G'_{ad1} = G'_{ad2} = G'_{a12} = G'_a$

Где магнитная проводимость двух воздушных зазоров на одну пару полюсов будет

$$G'_a = \mu_0 \frac{k_f \cdot \alpha_n \cdot \tau \cdot l_a}{k_\mu \cdot k_\delta \cdot 2 \cdot \delta} \quad (1.10)$$

$\tau = \frac{\pi D}{2p}$ - полюсное деление, D - средний диаметр по зазорам

$\alpha_n = \frac{b_n}{\tau}$ - коэффициент полюсной дуги, b_n - длина дуги полюса

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/М}$ - магнитная проницаемость вакуума

l_a - длина полюса вдоль оси машины (м)

δ - односторонний воздушный зазор под полюсом (м)

k_μ - коэффициент насыщения магнитной цепи, учитывающий уменьшение проводимости за счет магнитного сопротивления стальных участков ($K_\mu \approx 1,05 \dots 1,3$)

k_δ - коэффициент зубчатости, учитывающий уменьшение проводимости гладких воздушных зазоров за счет зубчатости статора и (или) ротора, $K_\delta \approx 1,1 \dots 1,4$

k_f - коэффициент краевого эффекта, учитывающий увеличение магнитной проводимости под полюсом за счет дополнительной проводимости по бокам междуполюсных впадин и торцевых областей полюсов, $k_f \approx 1,1 \dots 1,3$

Для определения момента двигателя вычислим производные от индуктивностей из (1.8), и в результате чего получим следующее выражение:

$$M = \frac{1}{2} p(L_{ad} - L_{aq})I_1^2 \sin 2\theta + \frac{1}{2} (L_{ad} - L_{aq})Z_1 I_2^2 \sin Z_1 \theta + pL_{ad} I_1 I_2 \sin 2\theta \quad (1.11)$$

Здесь в соответствии с рис.4 мы выразили угол ϑ через угол θ между осями обмоток 1 и 2:

$$\vartheta = \frac{\pi}{2} - \theta$$

Мы получили универсальное выражение для момента любого типа электрического двигателя, которое в общем случае содержит три составляющие. Составляющая M_I представляет реактивный момент, возникающий при взаимодействии поля, созданного эквивалентным током обмотки статора со стальным магнитопроводом ротора, имеющим разные геометрические размеры по продольной оси d и поперечной оси q (явнополюсность ротора). Этот момент при $L_{ad} \neq L_{aq}$ является основным для синхронных и вентильных двигателей с реактивным ротором, у которых отсутствует обмотка возбуждения 2 и, соответственно, ток I_2 . Реактивный момент M_I присутствует также как составляющая в синхронных двигателях с электромагнитным возбуждением в случае явнополюсности (несимметрии) ротора.

Составляющая M_{II} также представляет собой реактивный момент от взаимодействия потока, созданного обмоткой ротора 2 (рис. 1.4 б) с выступами или зубцами статора. Обычно этот момент имеет вредный характер, вызывая зубцовые пульсации, приводящие к неравномерности вращения на низких скоростях в режим регулирования. Зубцовые пульсации потока, кроме того, приводят к появлению дополнительных потерь в стали и снижению КПД двигателя. Существует ряд мер, обеспечивающих снижение зубцовых пульсаций, которые позволяют пренебречь моментом M_{II} , так что далее мы не будем его учитывать, считается расточку статора «гладкой».

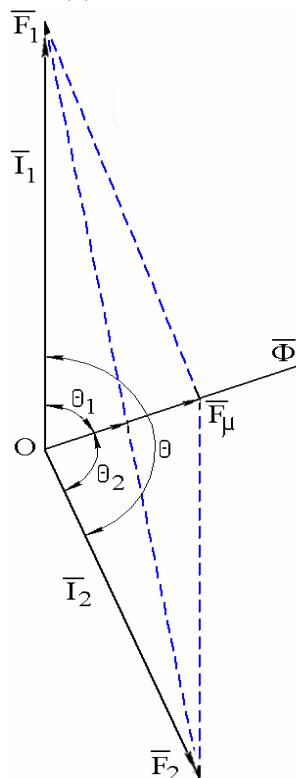


Рис. 1.5

Наконец, составляющая M_{III} имеет в большинстве случаев главное значение и представляет собой момент от взаимодействия потока,

созданного одной из обмоток, с токами в проводниках другой. Мы увидим далее, что составляющая M_{III} может также рассматриваться как результат взаимодействия результирующего потока в зазоре, полученного векторным (геометрическим) сложением потоков, созданных токами I_1 и I_2 , с проводниками с током одной из обмоток (I_1 или I_2). Использование составляющей M_{III} характерно для двигателей постоянного тока, асинхронных и синхронных двигателей.

3. Общие выражения для электромагнитного момента двигателей постоянного и переменного тока.

Приведем ряд равноценных выражений для определения составляющей момента M_{III} в (1.10), используя выражение (1.9). Индекс «III» далее будем опускать

$$M = pL_{12ad}I_1I_2 \sin \theta = p^2 G'_a \left(\frac{w_{1e}}{p}\right) \left(\frac{w_{2e}}{p}\right) I_1 I_2 \sin \theta \quad (1.12)$$

Величины $I_1 \frac{w_{1e}}{p} = F_1$ и $I_2 \frac{w_{2e}}{p} = F_2$ - магнитодвижущие силы, создаваемые обмотками на одну пару полюсов. Таким образом момент двигателя для неявнополюсного ротора представляется в виде

$$M = p^2 G'_a F_1 F_2 \sin \theta \quad (1.13)$$

Если обмотка возбуждения расположена на статоре (машина постоянного тока), то $G'_a F_1 = \Phi$ - поток возбуждения на пару полюсов. В этом случае $pF_2 = I_2 w_{2e}$ и формула (1.13) принимает вид

$$M = p\Phi w_{2e} I_2 \sin \theta \quad (1.14)$$

Если обмотка возбуждения расположена на роторе (синхронные электрические машины), то поток возбуждения на пару полюсов будет $\Phi = G'_{ad} F_2$ и (1.13) принимает вид

$$M = p\Phi w_{1e} I_1 \sin \theta \quad (1.15)$$

При использовании формулы момента (1.12) или (1.13) для асинхронного двигателя могут оказаться более удобными другие структуры этих формул. Поясним сказанное, рассмотрев векторную диаграмму намагничивающих сил F_1, F_2 статора и ротора (рис.1.5)

Результирующая МДС F_μ , полученная векторным сложением МДС F_1 и F_2 создает результирующий поток в зазоре машины $\Phi = G'_a F_\mu$

В асинхронном двигателе результирующий поток создается совместным сложением потоков, созданных обмоткой статора и обмоткой ротора.

Теперь заметим из рис. 1.5, что площадь параллелограмма $OF_1 F_\mu F_2$

построенного на векторах МДС \bar{F}_1 и \bar{F}_2 можно представить как суммы площадей двух треугольников:

$S_{OF_1F_\mu F_2} = 2S_{\Delta OF_1F_2}$, или двух других треугольников: $S_{OF_1F_\mu F_2} = 2S_{\Delta OF_1F_\mu} = 2S_{\Delta OF_\mu F_2}$

С другой стороны, известно, что площадь треугольника $S_{\Delta} = \frac{1}{2} a \cdot b \cdot \sin(\hat{ab})$ где a, b – любые стороны треугольника, (\hat{ab}) – угол между

этими сторонами

Последнее означает, что

$$\begin{aligned} S_{OF_1F_\mu F_2} &= F_1 F_2 \sin \theta, \\ S_{OF_1F_\mu F_2} &= F_1 F_\mu \sin \theta_1, \\ S_{OF_1F_\mu F_2} &= F_2 F_\mu \sin \theta_2 \\ \theta_1 + \theta_2 &= \theta \end{aligned} \quad (1.16)$$

Отсюда следует, что формула момента (1.12) или (1.13) для асинхронного двигателя, имеющего равно равномерный воздушный зазор по всей расточке статора, может иметь три равноценных выражения:

на основании (1.13) и (1.16)

$$\begin{aligned} M &= C_m' F_1 F_2 \sin \theta; \\ M &= C_m' F_1 F_\mu \sin \theta_1; \\ M &= C_m' F_2 F_\mu \sin \theta_2 \\ C_m' &= p^2 G_a' \end{aligned} \quad (1.17)$$

учитывая, что $G_a' F_\mu = \Phi$, получим также

$$\begin{aligned} M &= p^2 \Phi F_1 \sin \theta_1 = p \Phi w_{1e} I_1 \sin \theta_1, \\ M &= p^2 \Phi F_2 \sin \theta_2 = p \Phi w_{2e} I_2 \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (1.18)$$

Здесь θ_1 - угол между вектором результирующего тока статора \bar{I}_1 (или созданной им МДС F_1) и вектором результирующего потока в зазоре $\bar{\Phi}$.

θ_2 - угол между вектором результирующего тока ротора \bar{I}_2 и вектором результирующего потока в зазоре $\bar{\Phi}$.

Для всех рассмотренных случаев в установившемся режиме углы $\theta, \theta_1, \theta_2$ неизменные величины для данной нагрузки M

Соотношения (1.17) и (1.18) применимы так же к синхронным машинам неявнополюсного типа.

Предпочтительность использования той или иной формулы при построении некоторых систем управления зачастую зависит от возможности непосредственного замера входящих в них величин. Например, в (1.18) можно предпочесть первую формулу, поскольку ток статора I_1 может быть замерен датчиком тока, результирующий поток в зазоре Φ может быть замерен датчиком Холла или сигнальной обмоткой, угол θ_1 может быть рассчитан или косвенно замерен с последующим пересчетом микропроцессором.

Дальнейшее практическое использование формул момента (1.14), (1.15), (1.18) для разных типов машин, полученных на основе универсального

выражения момента (1.11), зависит от определения изображающих токов статора и ротора I_1 и I_2 , которые зависят от вида обмоток, способа соединения и количества их элементов (фаз, секций), а также от углового сдвига магнитных осей этих элементов.

При рассмотрении конкретных типов двигателей мы приведем относящиеся к этому вопросу аналитические зависимости.

4. Общие выражения для электромагнитных сил линейных двигателей постоянного и переменного тока.

Теперь приведем выражения для электромагнитных сил, возникающих в линейных двигателях. В выражении для силы (1.15) будем принимать во внимание основную составляющую

$$Q = \frac{dL_{12}}{dx} I_1 I_2, \quad (1.19)$$

пренебрегая другими составляющими, которые учитывают влияние зубцов и явных полюсных выступов. Таким образом, будем считать подвижную и неподвижную части, разделенными гладкими поверхностями и некоторым эквивалентным зазором $\Delta\vartheta$, который учитывает не только непосредственно воздушные промежутки между частями, но и возможные немагнитные элементы, расположенные между подвижной и неподвижной частью (проводники обмотки, расположенные вне магнитопроводов, диэлектрический каркас обмоток и т.д.)

С учетом этих замечаний представим модель линейного двигателя в виде, изображенном на рис. 1.6. Как и для двигателя вращательного движения, модель для произвольного момента времени содержит по одной обмотке на неподвижной и подвижной частях с токами I_1 и I_2 , соответственно. Обмотки имеют полный шаг τ , равный полюсному делению τ . Начало отсчета по координате x ведется от точки O , отстоящей от оси I_1 неподвижной обмотки на величину τ .

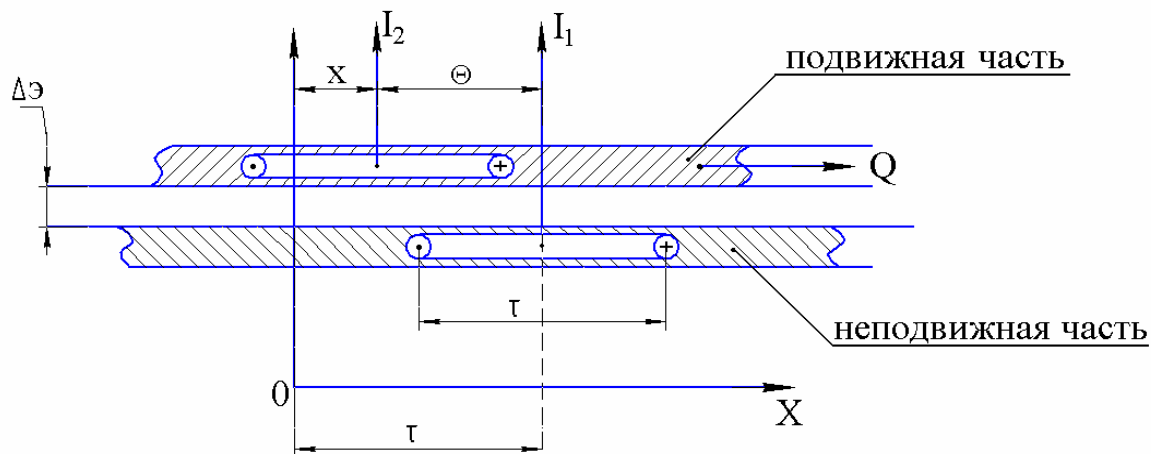


Рис. 1.6

Для произвольной координаты x взаимоиндуктивность обмоток будет иметь выражение :

$$L_{12} = -L_{m12} \cos \frac{\pi}{\tau} x = -pL'_{m12} \cos \frac{\pi}{\tau} x ,$$

где в общем случае предполагается, что каждая обмотка содержит p последовательно соединенных катушек. Далее получим

$$\frac{dL_{12}}{dx} = p \frac{\pi}{\tau} L'_{m12} \sin \frac{\pi}{\tau} x ,$$

причем амплитуда взаимоиндуктивности двух катушек содержащих, соответственно $\frac{w_{1e}}{p}$ и $\frac{w_{2e}}{p}$ витков будет равна

$$L'_{m12} = \mu_0 \frac{k_f \tau l_a}{k_\delta k_\mu 2\Delta_\varnothing} \left(\frac{w_{1e}}{p}\right) \left(\frac{w_{2e}}{p}\right)$$

Подставив производную $\frac{dL_{12}}{dx}$ с учетом выражения для амплитуды индуктивности на пару полюсов L'_{m12} в формулу силы (1.19), получим

$$Q = p^2 \mu_0 \frac{\pi k_f l_a}{k_\delta k_\mu 2\Delta_\varnothing} \left(\frac{w_{1e}}{p}\right) \left(\frac{w_{2e}}{p}\right) I_1 I_2 \sin \frac{\pi}{\tau} x$$

Обозначив расстояние между магнитными осями обмоток с токами I_1 и I_2 по аналогии с двигателями вращательного движения как

$x_\theta = \tau - x$, получим

$$Q = p^2 \mu_0 \frac{\pi k_f l_a}{k_\delta k_\mu 2\Delta_\varnothing} \left(\frac{w_{1e}}{p}\right) \left(\frac{w_{2e}}{p}\right) I_1 I_2 \sin \frac{\pi}{\tau} x_\theta , \quad (\text{Н}) \quad (1.20)$$

В этой формуле l_a (м) – длина (ширина) линейного двигателя в направлении, перпендикулярном рисунку (рис. 1.6)

Важную роль при расчете силы Q для многих конструкций играет коэффициент краевого эффекта k_f , который учитывает потоки, сцепляющиеся с обеими обмотками по краям конструкции, но не проходящие через площадь рабочего зазора τl_a

Теперь модифицируем формулу силы (1.20) применительно к различным типам электрических машин линейного (поступательного) движения.

1. Для линейного коллекторного двигателя постоянного тока имеем:

- поток возбуждения на пару полюсов, созданный, например обмоткой с током I_1 и числом витков w_{1e} :

$$\Phi = G'_a \left(\frac{w_{1e}}{p}\right) I_1 = \mu_0 \frac{k_f \tau l_a}{k_\delta k_\mu 2\Delta_\varnothing} \left(\frac{w_{1e}}{p}\right) I_1$$

подставив это выражение в формулу (1.20), которую следует умножить и разделить на τ , получим

$$Q = p^2 \pi \frac{\Phi}{\tau} \left(\frac{w_{2e}}{p}\right) I_2 \sin \frac{\pi}{\tau} x_\theta = p \pi \frac{\Phi}{\tau} w_{2e} I_2 \sin \left(\frac{\pi}{\tau} x_\theta\right) \quad (1.21)$$

Поток Φ можно представить как

$\Phi = \langle B(\bar{\sigma}) \rangle l_a \tau$, где $\langle B(\bar{\sigma}) \rangle$ - среднее значение индукции в зазоре

С другой стороны $\langle B\bar{\sigma} \rangle = \frac{2}{\pi} B_m$, где B_m - амплитудное значение индукции при ее синусоидальном распределении на полюсном делении. Тогда получим

$$Q = 2pB_m l_a w_{2e} I_2 \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_{\theta}\right) = pB_m l_a N I_2 \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_{\theta}\right) \quad (1.22)$$

Далее, как и для двигателей вращательного движения следует найти выражение для изображающего тока I_2 , который зависит от реального тока в обмотке, и ее типа. Мы сделаем это в соответствующем разделе.

2. Синхронный неявнополюсный линейный двигатель.

Если обмотка возбуждения находится на подвижной части, что созданный ею поток будет

$$\Phi = G'_a \left(\frac{w_{2e}}{p}\right) I_2 = \mu_0 \frac{k_f \tau l_a}{k_\delta k_\mu 2\Delta_\varnothing} \left(\frac{w_{2e}}{p}\right) I_2$$

идя далее по тому же пути, что и в предыдущем пункте, получим

$$Q = p\pi \frac{\Phi_2}{\tau} w_{1e} I_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_{\theta}\right) \quad (1.23)$$

Здесь поток Φ_2 - создан только током I_2 в обмотке на подвижной части.

Если использовать в выражении для силы Q значение результирующего потока Φ , найденного в результате векторного сложения $\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_1 + \bar{\Phi}_2$, то воспользовавшись подходом, в основе которого лежала диаграмма рис.5, примененным нами для вращающихся двигателей, мы получим:

$$Q = p\pi \frac{\Phi}{\tau} w_{1e} I_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_{\theta 1}\right), \quad (1.24)$$

$$Q = pB_m l_a w_{1e} I_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_{\theta 1}\right) \quad (1.25)$$

Здесь Φ - результирующий (суммарный) поток в зазоре, B_m - амплитудное значение индукции в зазоре на полюсном делении τ , $x_{\theta 1}$ - расстояние между магнитной осью обмотки I (вектор тока I_1) и вектором результирующего потока Φ .

3. Асинхронный линейный двигатель.

Рассуждая совершенно аналогично предыдущему, можно на основании формулы (1.20), прийти к следующим выражениям для электромагнитной силы:

$$Q = p\pi \frac{\Phi}{\tau} w_{1e} I_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_{\theta 1}\right), \quad (1.26)$$

$$Q = p\pi \frac{\Phi}{\tau} w_{2e} I_2 \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_{\theta 2}\right),$$

или

$$Q = 2pB_m l_a w_{1e} I_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_{\theta 1}\right), \quad (1.27)$$

$$Q = 2pB_m l_a w_{2e} I_2 \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_{\theta 2}\right)$$

Здесь $x_{\theta 1}$ - расстояние между магнитной осью обмотки с током I_1 и вектором результирующего потока Φ

$x_{\theta 2}$ - расстояние между магнитной осью обмотки с током I_2 и вектором результирующего потока Φ

Во всех случаях в установившемся режиме, при постоянной скорости перемещения, $x_{\theta}, x_{\theta 1}, x_{\theta 2}$ - неизменные для заданной нагрузки величины.