

Электродинамические усилия (ЭДУ) в электрических аппаратах

Электродинамической стойкостью аппарата называется его способность противостоять ЭДУ (механическим воздействиям), возникающим при прохождении сквозных токов КЗ.

Она выражается либо амплитудным значением тока $i_{\text{дин}}$, либо кратностью этого тока относительно амплитуды номинального тока $I_{\text{ном}}$, т.е

$$k_{\text{дин}} = i_{\text{дин}} / \sqrt{2} I_{\text{ном}}$$

Иногда действующим значением ударного тока за период после начала КЗ ($I_{\text{уд}}$).

Электродинамические усилия (ЭДУ) в электрических аппаратах

***Электродинамические силы* в режиме трехфазного КЗ содержат четыре составляющие:**

- 1) постоянную составляющую;**
- 2) периодическую составляющую, меняющуюся с двойной промышленной частотой от взаимодействия периодических составляющих тока;**
- 3) непериодическую составляющую с частотой 50 Гц от взаимодействия периодической составляющей тока в одном проводнике и свободной составляющей в другом проводнике;**
- 4) аperiodическую составляющую от взаимодействия свободных составляющих тока.**

Электродинамические усилия (ЭДУ) в электрических аппаратах

При КЗ развиваются значительные *электродинамические силы* (механические напряжения), которые могут: деформировать или разрушить обмотки; токоведущие части и опорные конструкции ЭА; изоляторы, с помощью которых проводники укреплены к заземленным частям аппарата и др.

Электродинамические силы пропорциональны квадрату тока и могут превысить более чем в 4000 раз соответствующие нормальные значения. В силовых аппаратах *электродинамические силы* могут достигать десятков тысяч Ньютона.

Влияние *электродинамических сил* при включении на существующее короткое замыкание сказывается в большей степени, чем при отключении.

Методы расчета электродинамических усилий

1. ЭДУ определяется как результат взаимодействия проводника с током и магнитного поля (индукции) по правилу Ампера.

Применяется тогда, когда можно определить аналитически индукцию в любой точке проводника, для которого необходимо определить силу (F).

2. Основан на использовании энергетического баланса системы проводников с током, т.е. на изменении запаса магнитной энергии токоведущего контура.

Применяется тогда, когда известны аналитические зависимости (формулы), связывающие индуктивность и взаимоиндуктивность контуров с их геометрическими параметрами, т.е. в витках и катушках ЭА.

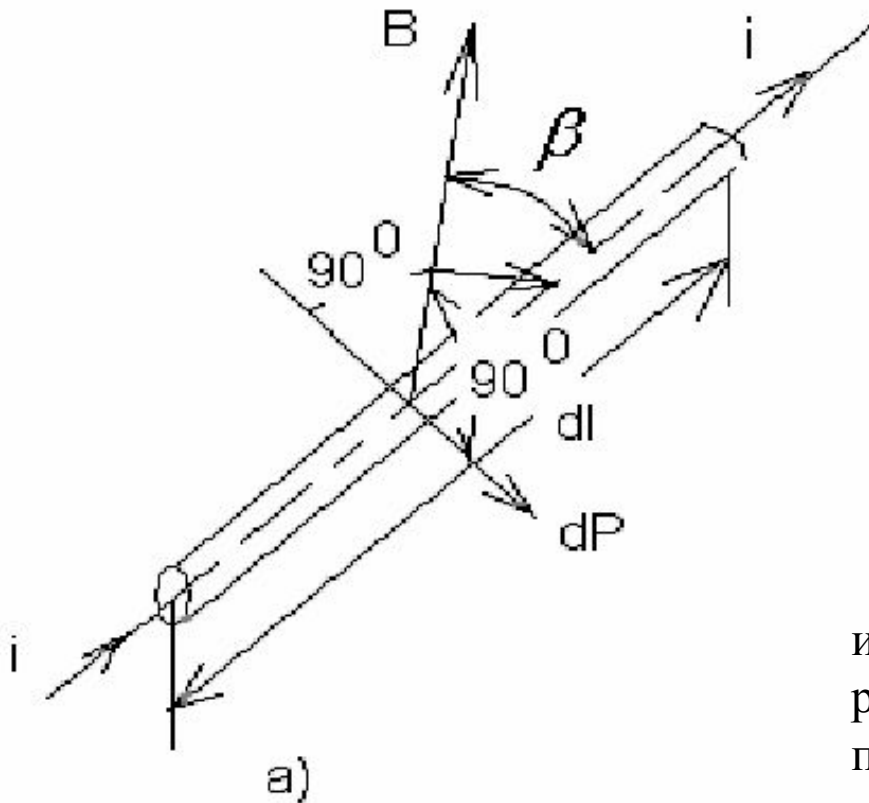
Первый метод

На элементарный проводник длиной dl , с током i , находящийся в магнитном поле с индукцией B , созданной другим проводником действует усилие

$$dF = i dl \times B = iBdl \sin \beta$$

$$F = \int_0^l dF = \int_0^l Bi \sin \beta dl$$

β – угол между **векторами** элемента dl и индукцией B , измеряемый по кратчайшему расстоянию между ними. За направление dl принимается направление тока в элементе.



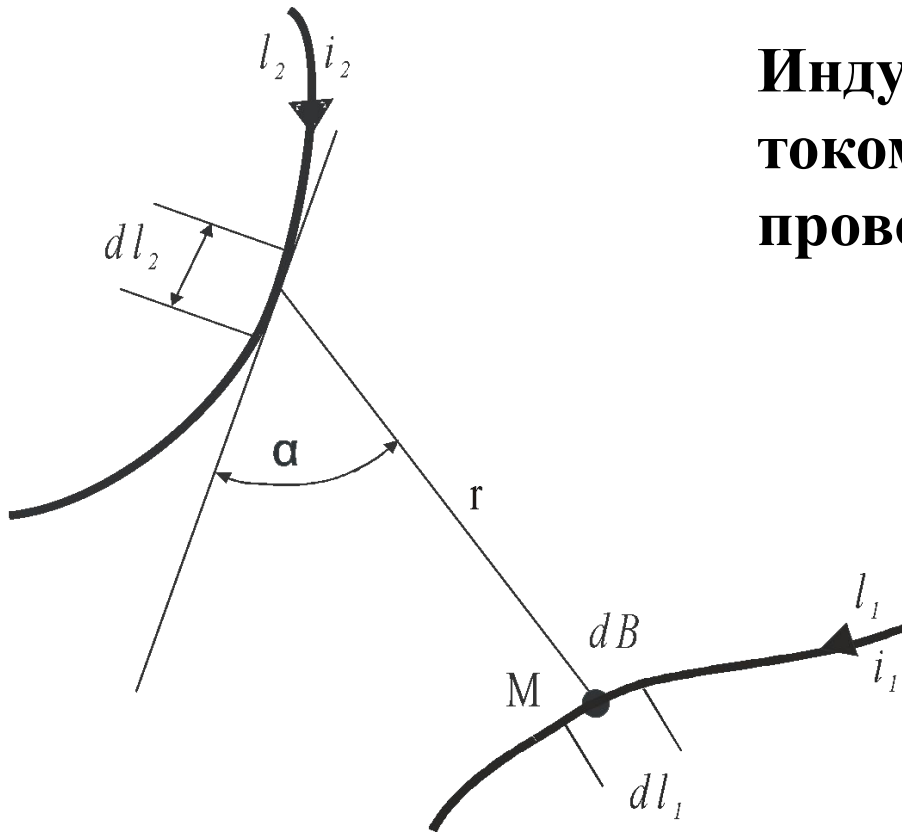
Направление ЭДУ,
действующего на элемент с
током

При $\beta=90^\circ$ $F = \int_0^l Bi \cdot dl = B \cdot I \cdot L$

B определяется по **закону Био-Савара-Лапласа**.

$$dB = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \frac{i_2 \cdot dl_2}{r^2} \cdot \sin \alpha$$

Закон Био-Савара-Лапласа



Индукция в точке М, создаваемая током, проходящим по всему проводнику l_2

$$B = \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} \int_0^{l_2} \frac{i_2 \cdot dl_2}{r^2} \cdot \sin \alpha$$

$$F = \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} i_1 \cdot i_2 \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \frac{dl_1 \cdot dl_2 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}{r^2} = \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} i_1 \cdot i_2 \cdot k$$

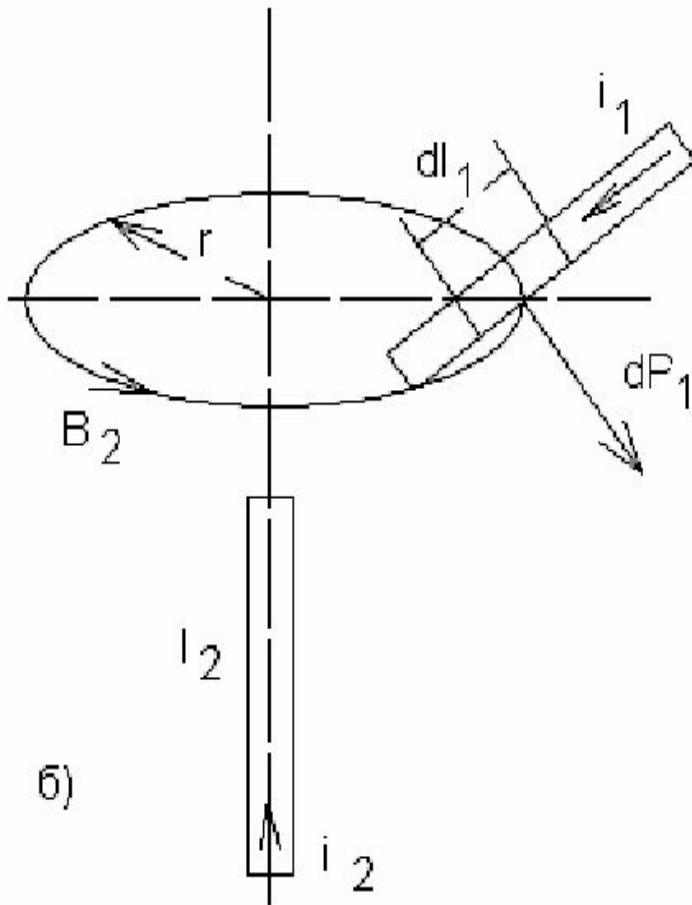
Второй метод

Сила взаимодействия двух
взаимосвязанных контуров

$$F = dW / dx$$

Энергия для двух контуров

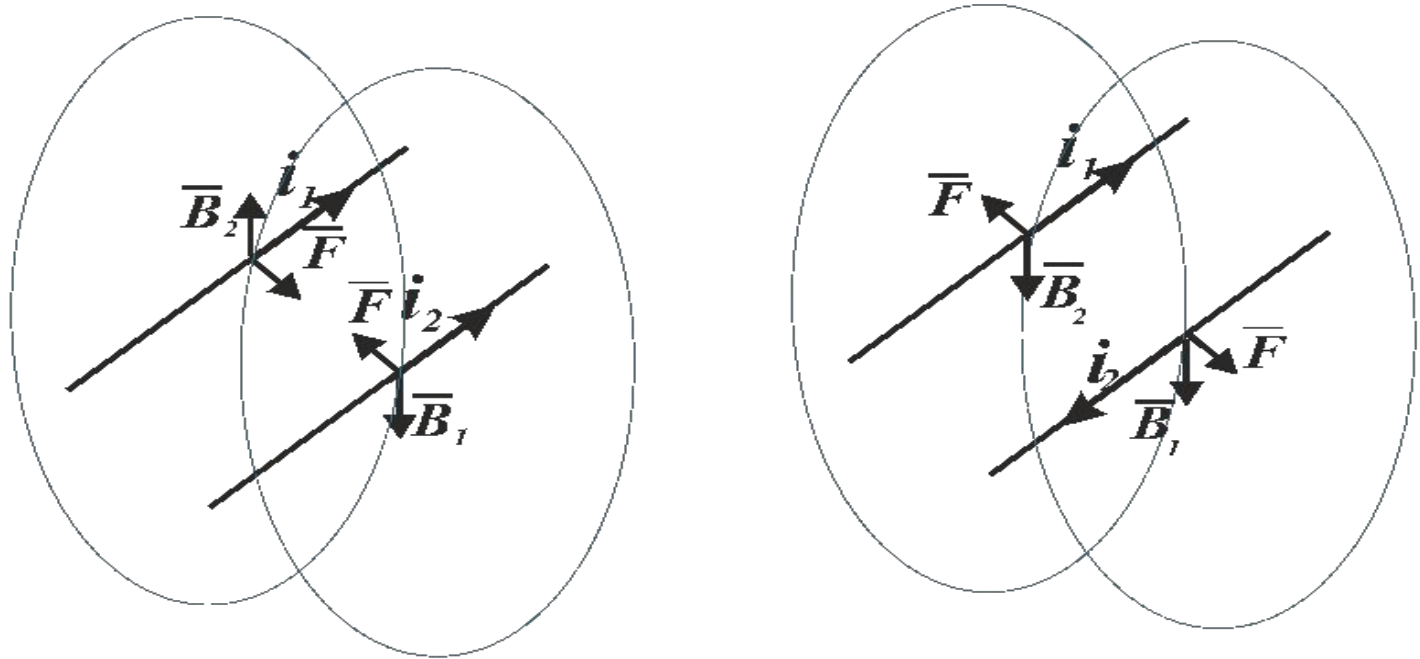
$$W = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 \pm M i_1 i_2$$



$dW / dx > 0$, т.е. сила F , действующая на токоведущие части, направлена так, чтобы электромагнитная энергия системы возрастала.

Направление ЭДУ,
действующего на элемент с
током

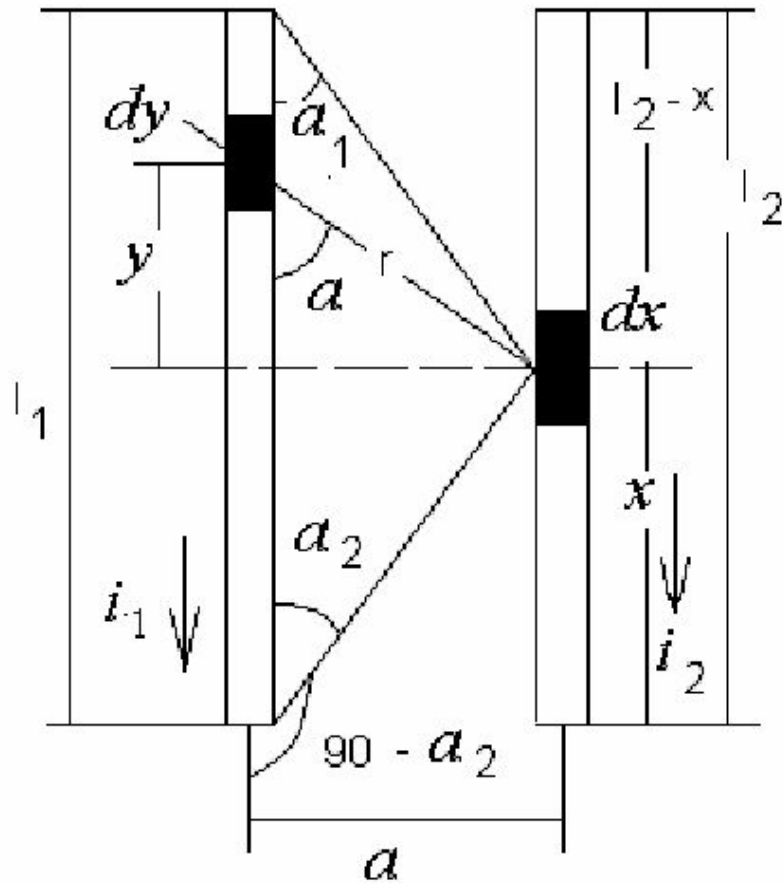
Электродинамические силы между параллельными проводниками **бесконечной** длины



$$F = \frac{\mu_o}{2 \cdot \pi} i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{l}{a}$$

l – длина участка; a – расстояние между проводниками с токами i_1 и i_2

ЭДУ между параллельными проводниками



Если $l_1 = l_2 = l$

$$F_x = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right]$$

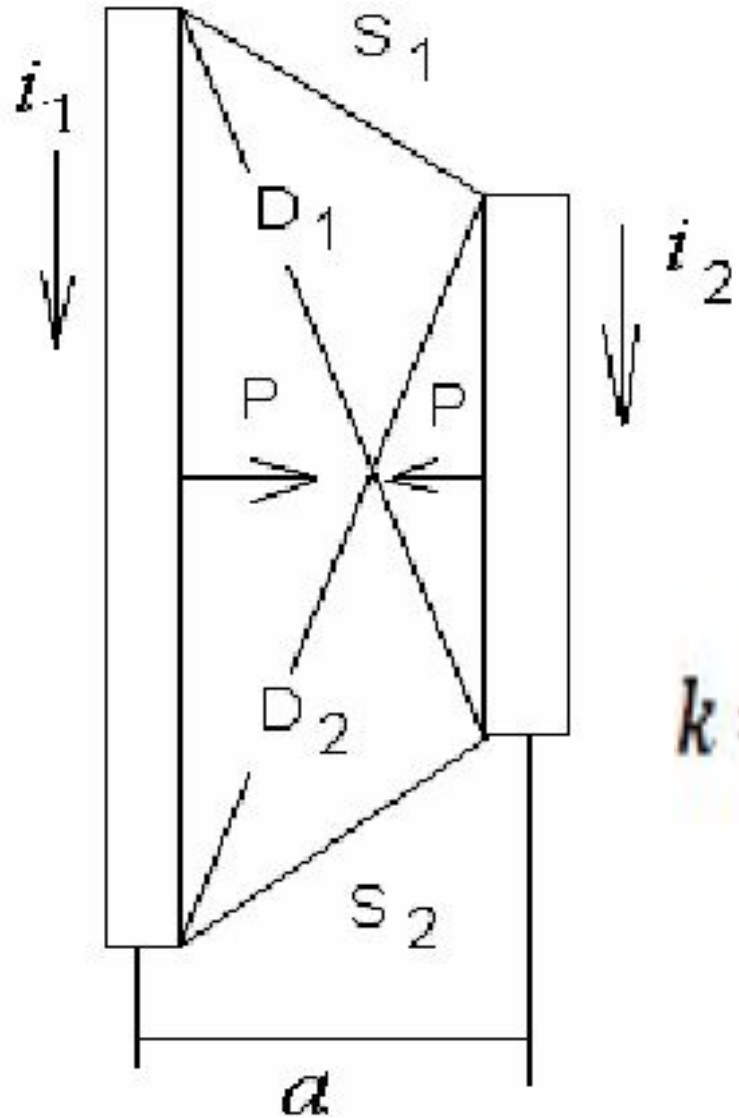
$$k = \frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right]$$

$$F_x = 10^{-7} k i_1 i_2.$$

Если $\frac{a}{l} \ll 1$, то $k = \frac{2l}{a}$

тогда $F_x = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a}$

ЭДУ между параллельными проводниками



Для 2-х проводников разной длины $l_1 \neq l_2$ с любым СДВИГОМ

$$F_x = 10^{-7} k i_1 i_2.$$

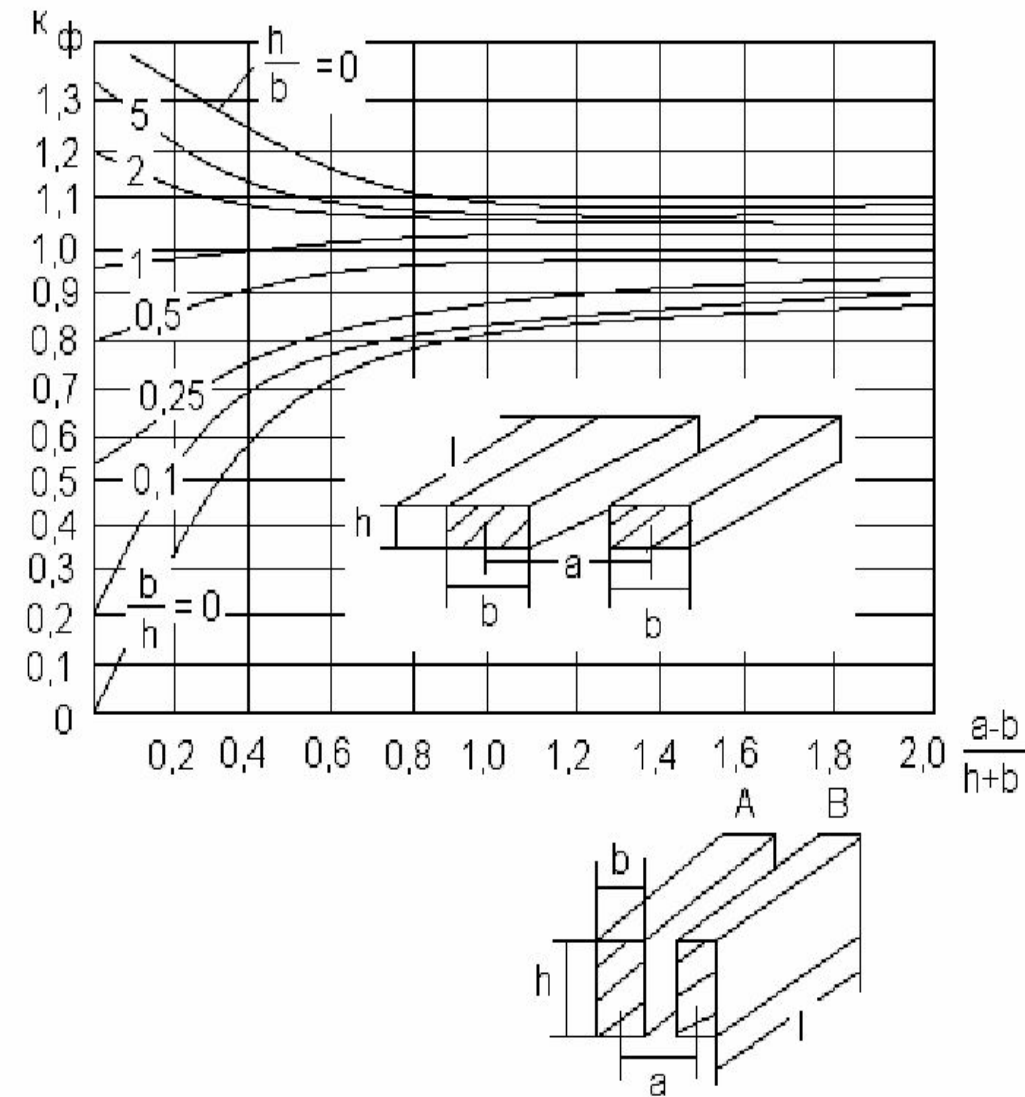
$$k = \frac{\sum D - \sum S}{a} = \frac{(D_1 + D_2) - (S_1 + S_2)}{a}$$

Круглая и кольцевая формы сечения проводников не влияют на ЭДУ, т.к. магнитные силовые линии вокруг проводников представляют собой окружности и можно считать, что ток сосредоточен в геометрической оси проводника.

Поверхностный эффект в проводниках круглого сечения не сказывается на ЭДУ, а **эффект близости**, смещающий токи в проводниках, вызывает увеличение ЭДУ при встречных токах и уменьшение – при согласованных.

При прямоугольной форме сечения размеры влияют на ЭДУ, т.к. магнитные силовые линии около проводников являются не окружностями, а овалами. Это влияние учитывается с помощью кривых Двайта, по которым находится коэффициент формы k_{ϕ} , после чего ЭДУ находится по формуле

$$F_x = 10^{-7} i_1 i_2 k k_{\phi}$$



ЭДУ, действующие на перемычку (90°)

Сила, действующая на dx

$$dF_x = iB_x dx$$

Индукция от проводника $h \rightarrow \infty$ в точке на расстоянии x от его оси

$$B_x = \mu_0 i / 4\pi x$$

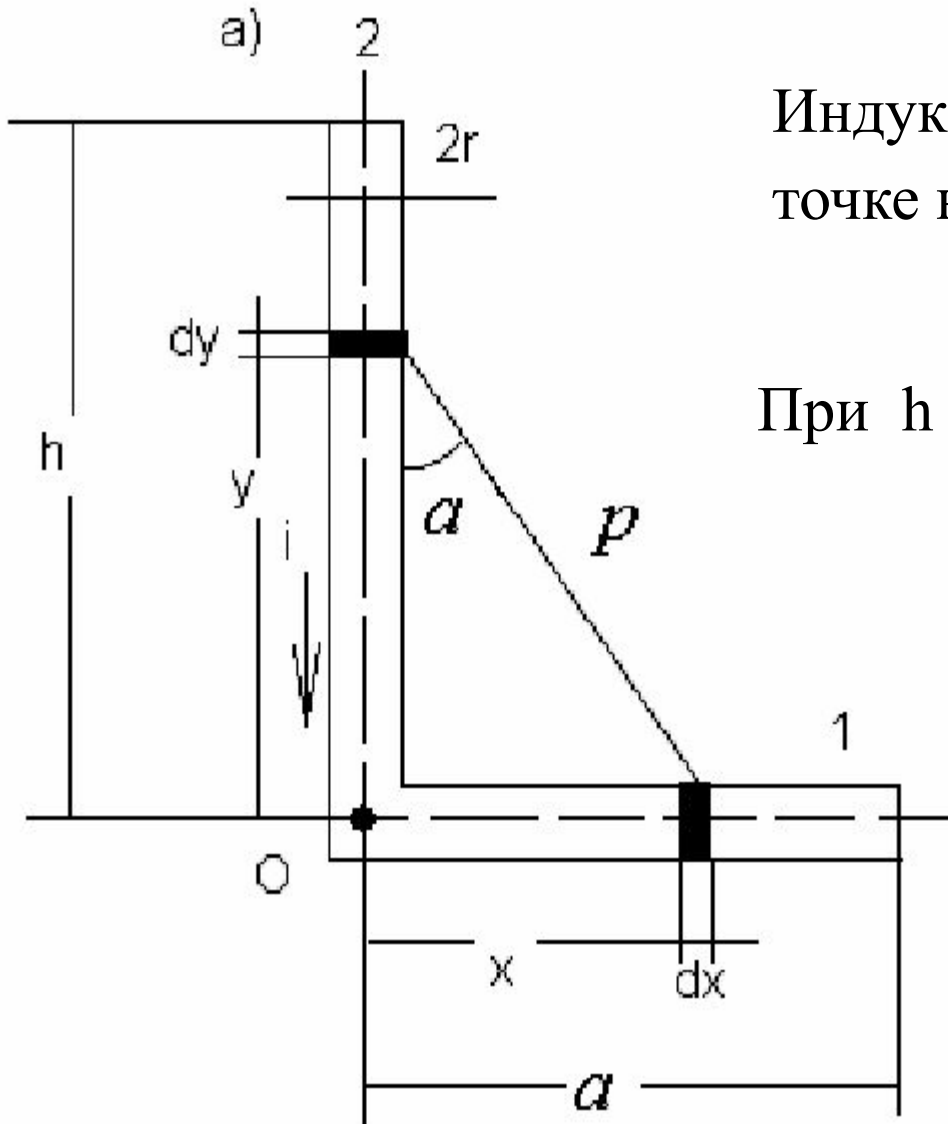
При $h \rightarrow \infty$ $F_x = 10^{-7} i^2 \ln a/r$

$$M_0 = 10^{-7} i^2 (a - r)$$

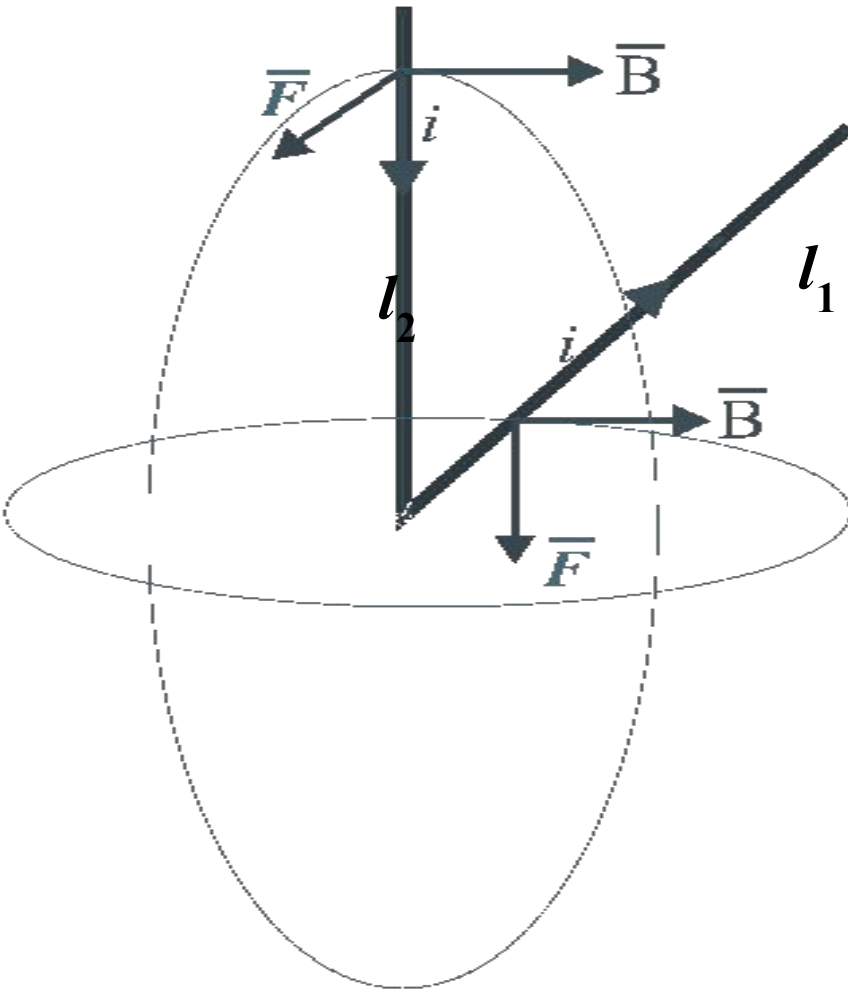
при h конечном

$$F = 10^{-7} i^2 \ln \frac{a/r}{1 + \sqrt{1 + (a/h)^2}}$$

$$M_0 = 10^{-7} i^2 a \left(\ln \frac{a-r}{r} + r \right)$$



ЭДУ, действующие на перемычку (90°)



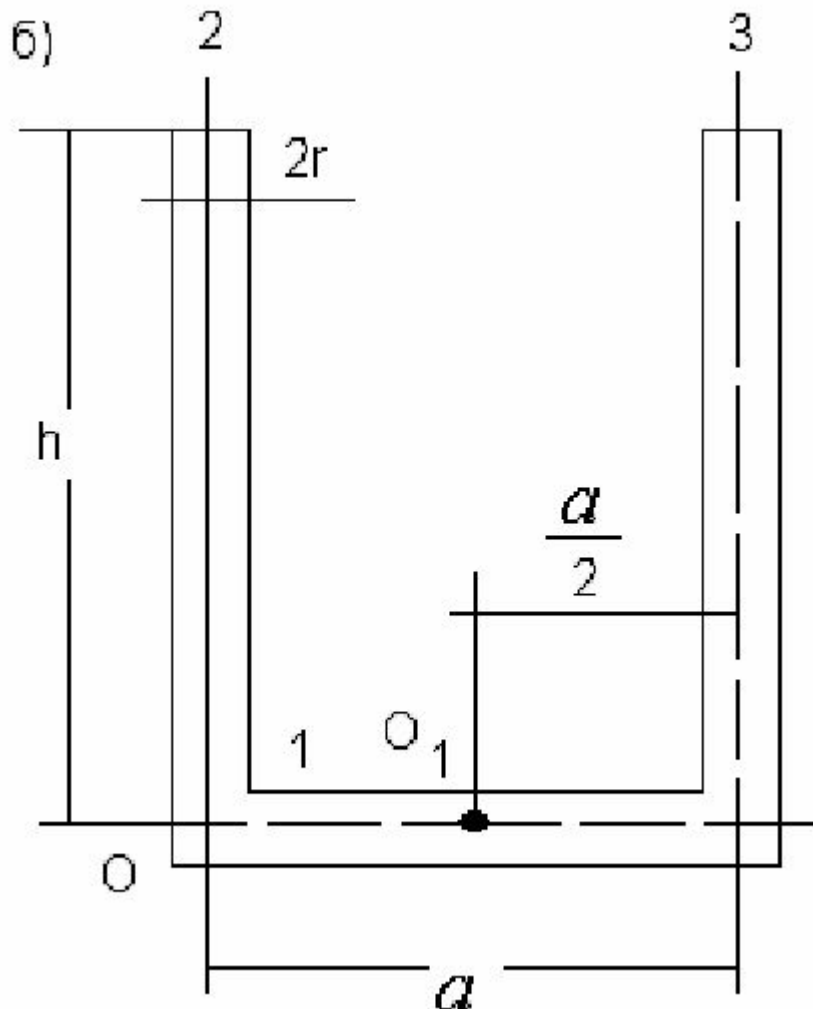
Если $l_2 \rightarrow \infty$, то полная сила, действующая на проводник конечной длины l_1

$$F = \frac{\mu_o}{2 \cdot \pi} i^2 \cdot \ln \frac{l_1}{r}$$

Если l_2 конечной длины, то полная сила, действующая на проводник конечной длины l_1

$$F = \frac{\mu_o}{2 \cdot \pi} i^2 \cdot \ln \frac{l_1}{r} \frac{\left(l_2 + \sqrt{l_2^2 + r^2} \right)}{\left(l_2 + \sqrt{l_2^2 + l_1^2} \right)}$$

ЭДУ, действующие на перемычку (петля)



При $h \rightarrow \infty$

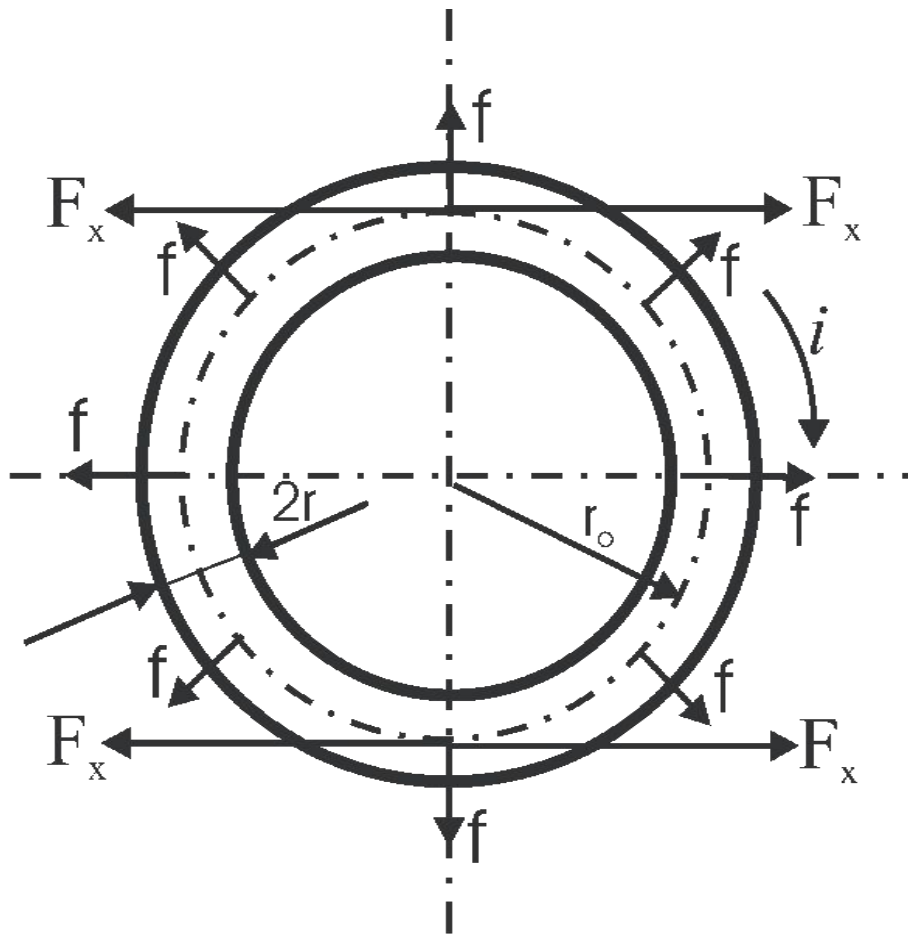
$$F = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \ln \frac{a}{r}$$

при h конечном

$$F = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \ln \frac{a/r}{1 + \sqrt{1 + (a/h)^2}}$$

$$M_{O_1} = 10^{-7} i^2 \frac{a}{2} \left(\ln \frac{a}{4r} + \frac{2r}{a} \right)$$

Электродинамические силы в кольцевом витке и между кольцевыми витками



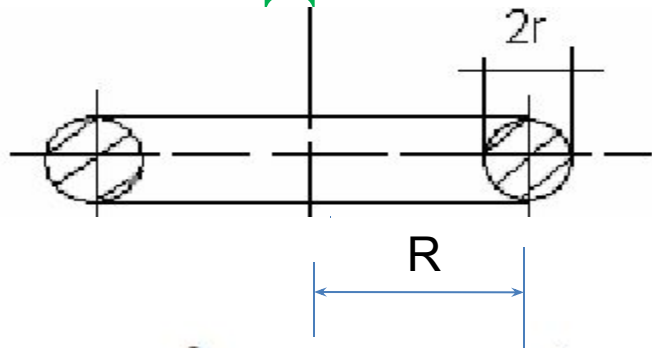
**Общая радиальная сила,
действующая на виток**

$$F = \frac{\mu_o i^2}{2} \cdot \left(\ln \left(\frac{8r_o}{r} \right) - 0,75 \right)$$

**Электродинамическая сила F_x ,
стремящаяся разорвать виток**

$$F_x = \frac{\mu_o i^2}{4\pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{8r_o}{r} \right) - 0,75 \right)$$

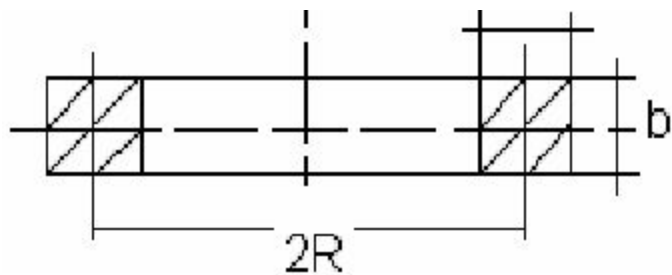
Для витка круглого сечения, при $R \gg r$



$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right)$$

$$F_R = \frac{i^2}{2 \cdot 2\pi} 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right) = 10^{-7} i^2 \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right)$$

Для витка прямоугольного сечения



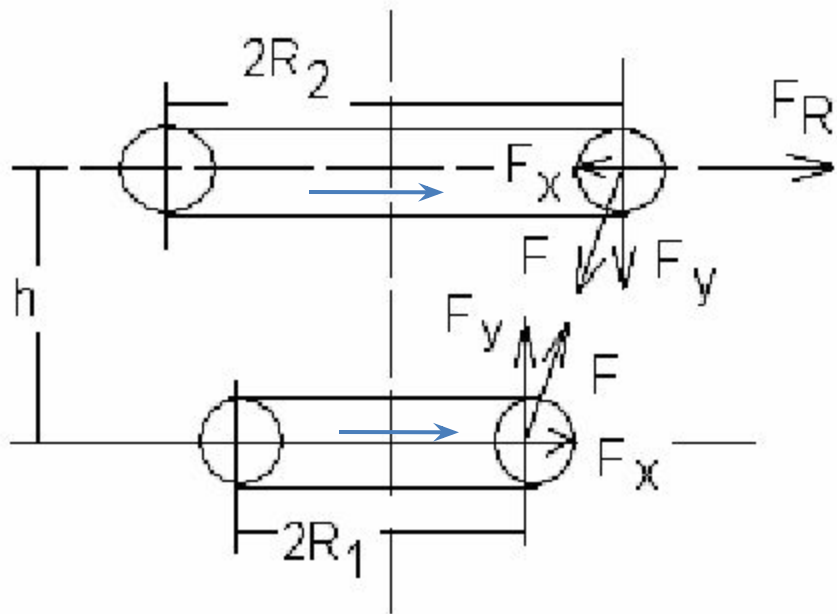
$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,5 \right)$$

$$F_R = 10^{-7} i^2 \left(\ln \frac{8R}{r} + 0,5 \right)$$

$$i = ni_0$$

Силы взаимодействия между двумя витками

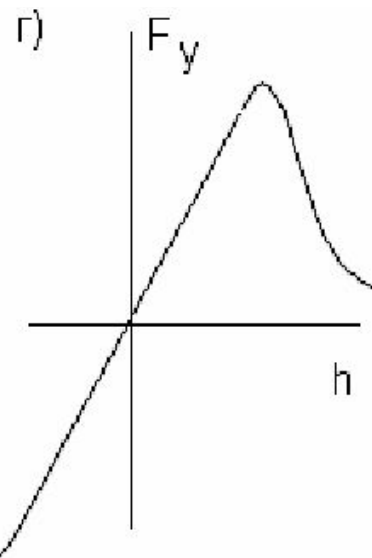
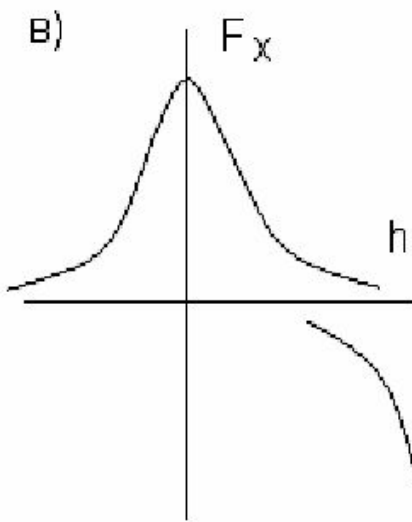
б)



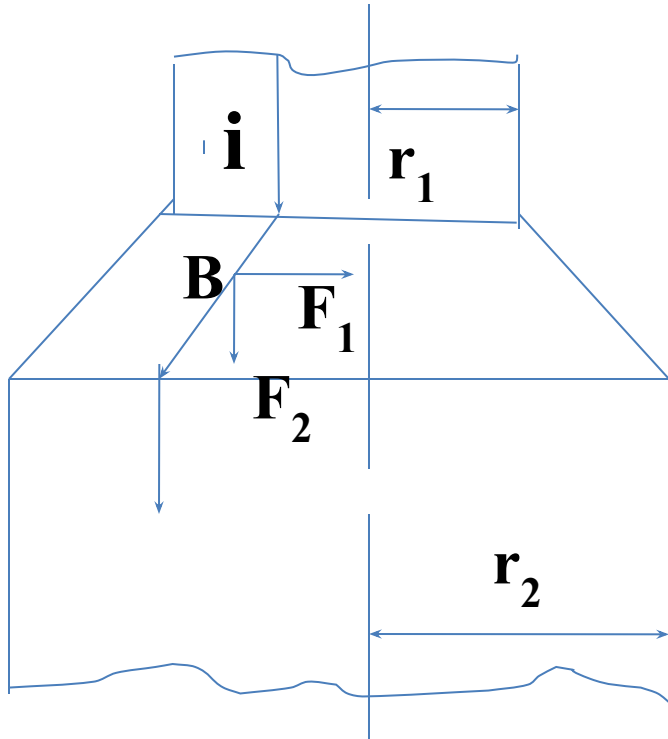
$$F_x \approx 10^{-7} 4\pi i_1 i_2 \frac{R_1 c}{h^2 + c^2}$$

$$F_y \approx 10^{-7} 4\pi i_1 i_2 \frac{R_1 h}{h^2 + c^2}$$

$$c = R_2 - R_1; \quad R_2 > R_1$$



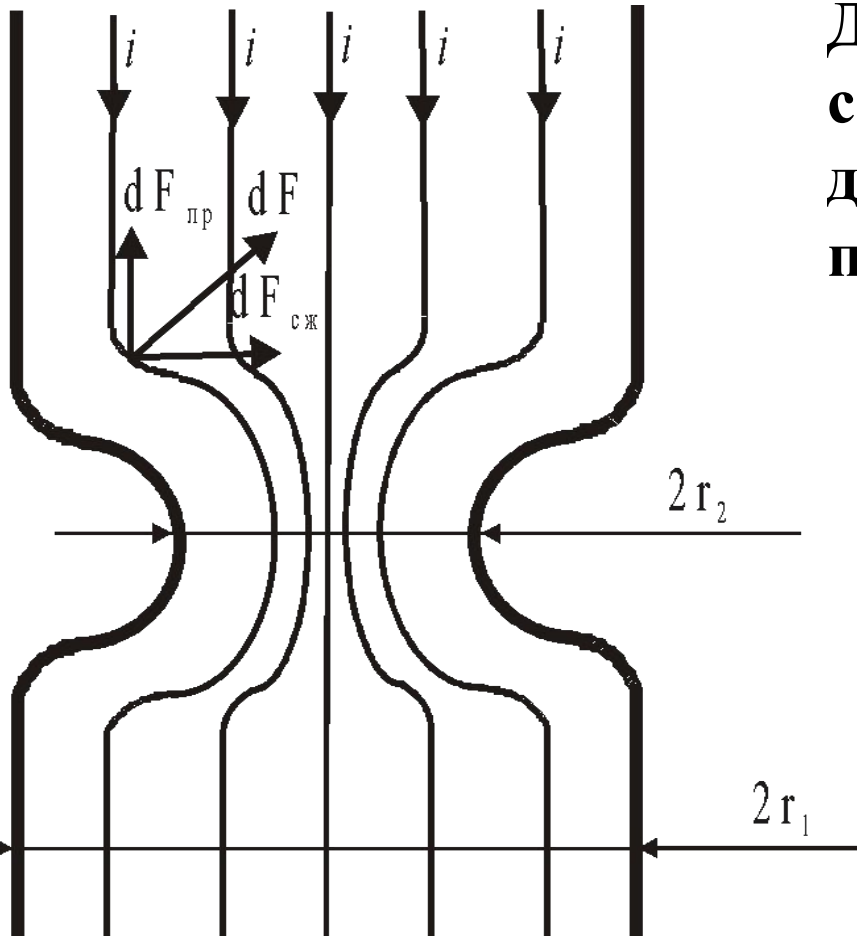
Электродинамические усилия в месте изменения сечения



$$F_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln r_2/r_1 = 10^{-7} i^2 \ln r_2/r_1$$

Электродинамическая сила F , возникающая при изменении сечения, зависит только от отношения радиусов (сечений) и не зависит от длины и формы перехода, направления токов.

Электродинамические усилия в месте изменения сечения



Для проводника круглого сечения полная сила, действующая по оси проводника

$$F_{пр} = \frac{\mu_o i^2}{4\pi} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$$

Для некруглого сечения

$$F_{пр} = \frac{\mu_o i^2}{4\pi} \ln\left(\frac{S_1}{S_2}\right)$$

Электродинамические силы при переменном токе

$$F = \left(\mu_o / 4 \cdot \pi \right) \cdot i^2 \cdot k_k$$

Однофазная система переменного тока. Ток изменяется по закону

$$i = I_m \sin \omega t$$

I_m – амплитудное значение.

Учитывая, что $\sin^2 \omega t = (1 - \cos 2\omega t)/2$, мгновенное значение электродинамической силы между отдельными частями проводника

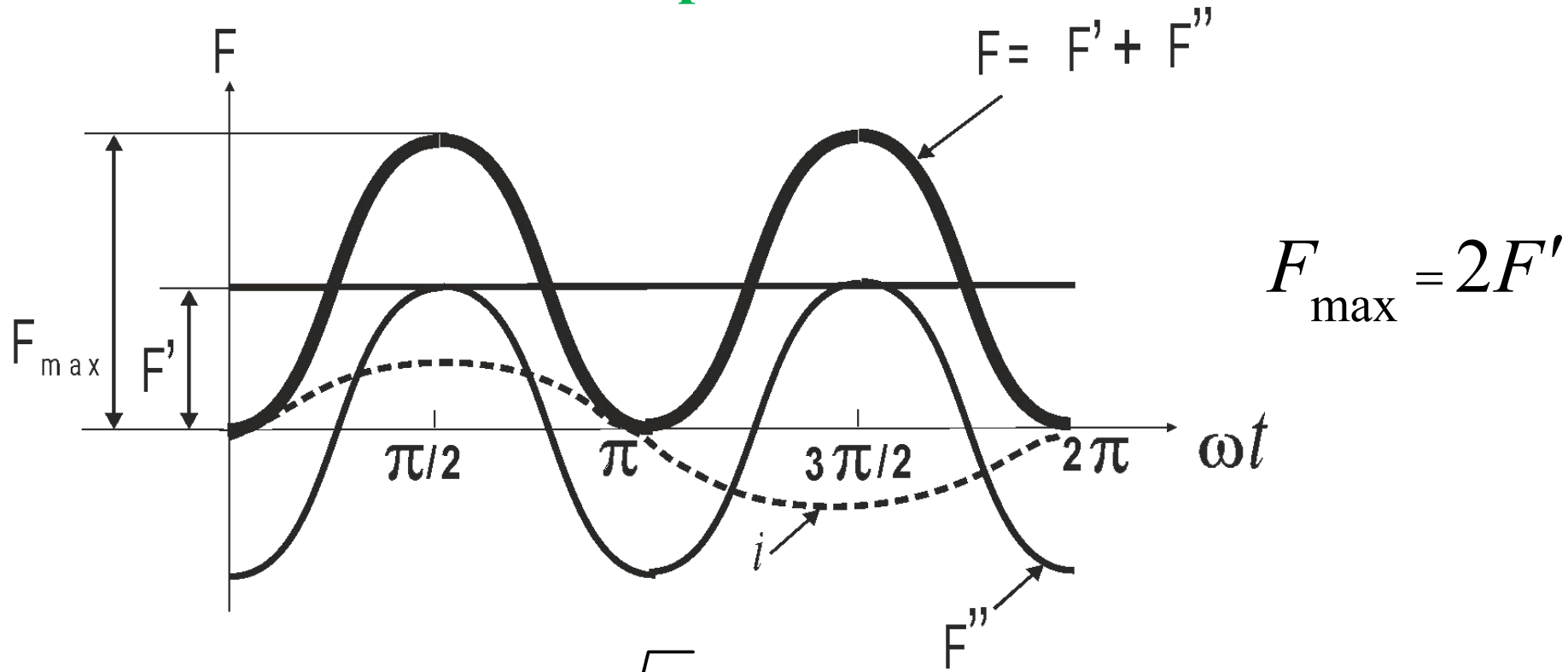
$$F = \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} k_k \cdot \frac{I_m^2}{2} + \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} k_k \cdot \frac{I_m^2}{2} \cdot \cos 2\omega t = F' + F' \cos 2\omega t$$

$$F' = \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} k_k \cdot \frac{I_m^2}{2} = \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} k_k \cdot \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} k_k \cdot I_\Delta$$

$$F'' = F' \cos 2\omega t$$

$$F = F' + F''$$

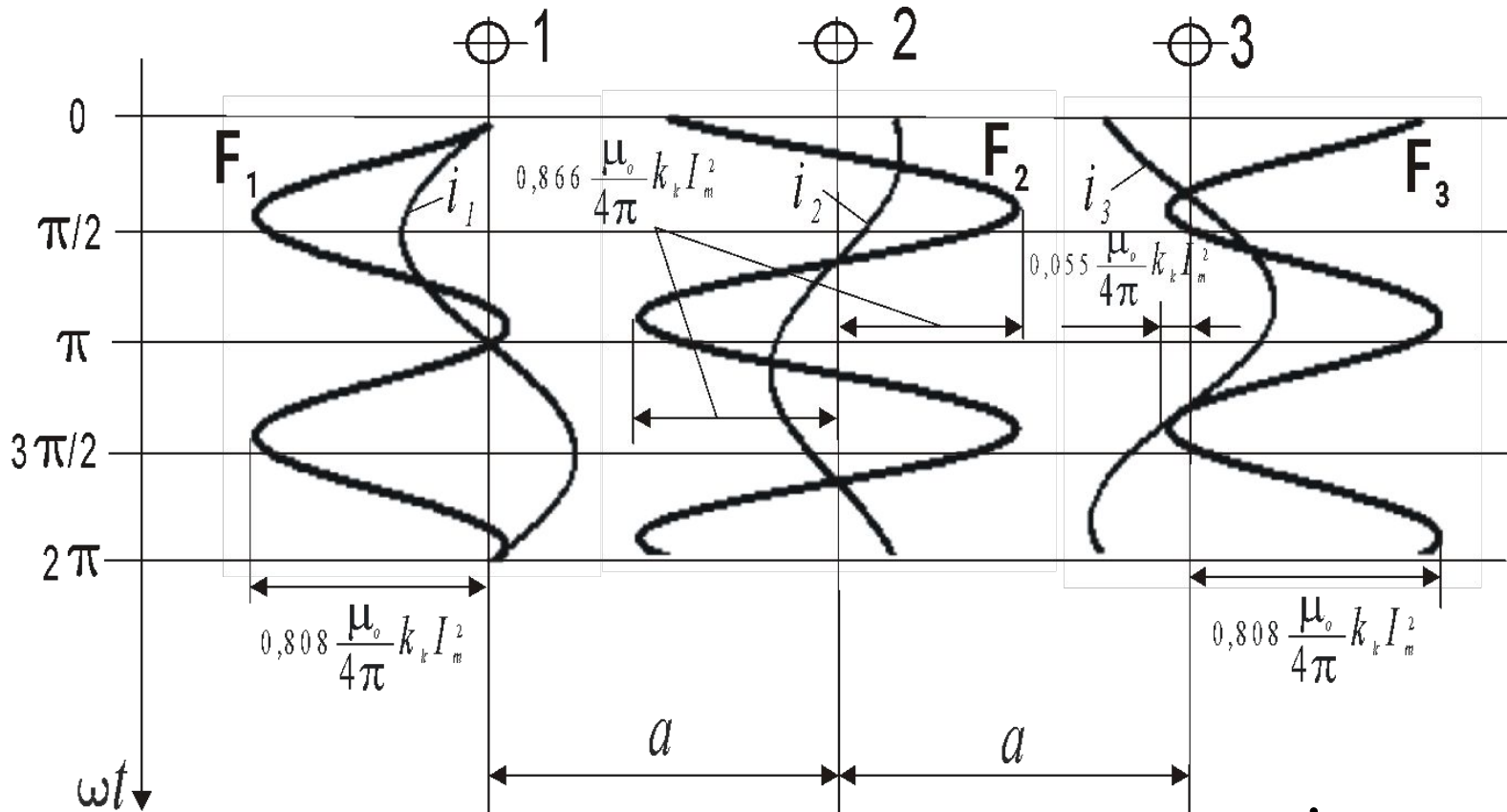
Электродинамические силы в однофазной системе переменного тока



$$i_{y\partial \max} = k_{y\partial} I_m = k_{y\partial} \sqrt{2} I$$

$$F_{\max \text{ расч. (1)}} = 2F'(i_{y\partial \max}) = \frac{2\mu_o}{4 \cdot \pi} k_k \cdot \frac{(1,8\sqrt{2} I)^2}{2} = 6,48 \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} k_k I^2$$

Электродинамические силы в трехфазной системе переменного тока



$$i_{y\partial \max} = k_{y\partial} I_{m3}$$

$$F_{\max \text{ расч. (3)}} = \frac{0,866 \mu_0}{4 \cdot \pi} k_k \cdot k_{y\partial} \cdot I_{m3}^2 = \frac{0,866 \mu_0}{4 \cdot \pi} k_k \cdot (1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_3)^2 = 5,6 \cdot \frac{k_k}{4 \cdot \pi} \cdot I_3^2$$