

## РАСЧЕТ СИЛЫ ТЯГИ Ш-ОБРАЗНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОПЕРЕЧНО ДВИЖУЩИМСЯ ЯКОРЕМ

В. Н. ГУРНИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром электромеханического факультета)

Особенностью расчета силы тяги Ш-образного электромагнита постоянного тока с поперечно движущимся якорем является наличие двух электромагнитных сил, изменяющихся по величине при перемещении якоря. Данный электромагнит является элементом 4-обмоточного линейного электромагнитного двигателя. Расчет и построение статической тяговой характеристики электромагнита позволяет определить зависимость предельно развиваемой силы от полного перемещения якоря, а также выбрать рациональный участок хода якоря электромагнита.

Силы, действующие на якорь, будут направлены так, как показано на рис. 1, где обозначены:

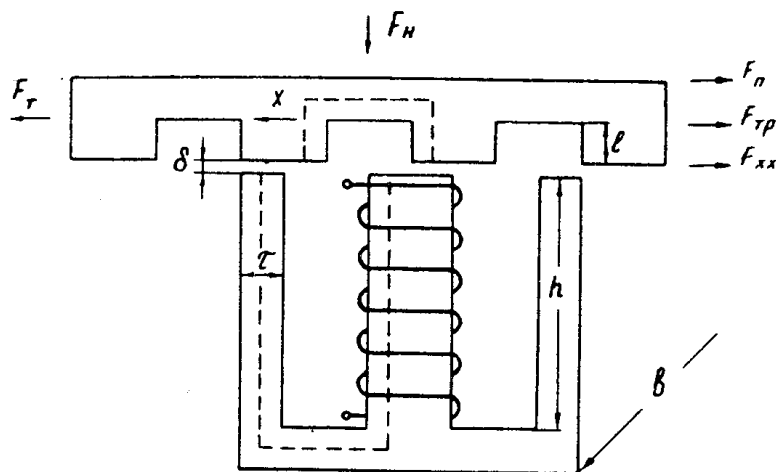


Рис. 1. Схема действия статических сил на якорь электромагнита.

- $F_T$  — сила тяги, развиваемая электромагнитом;
- $F_N$  — нормальная сила, притягивающая якорь к ярму;
- $F_{тр}$  — сила трения, возникающая как результат действия нормальной силы и равная произведению нормальной силы на коэффициент трения  $f_{тр}$ :

$$F_{тр} = F_N \cdot f_{тр}, \quad (1)$$

$F_{xx}$  — сила холостого хода;

$F_{п}$  — заданная функция полезной силы.

Учитывая направления действия рассмотренных сил, уравнение движения якоря электромагнита можно написать следующим образом:

$$F_{т} - F_{п} - F_{тр} - F_{xx} = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где  $m$  — масса всех движущихся частей;

$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$  — ускорение, с которым происходит движение в направлении  $x$ .

Решение уравнения (2) в статике, то есть, когда ток в обмотке электромагнита во все время движения  $I = \text{const}$  и движение происходит с бесконечно малой скоростью, а правая часть уравнения (2) обращается в нуль, сводится к определению сил  $F_{т}$  и  $F_{п}$  (величины  $F_{xx}$  и  $f_{тр}$  определяются конструкцией электромагнита).

Сила тяги  $F_{т}$ , являющаяся функцией положения якоря  $x$  (при постоянных значениях  $\delta$ ,  $\tau$ ,  $b$ ,  $l$ ,  $h$ ), равна [1]:

$$F_{т} = - \frac{(I\omega)^2}{2} \cdot \frac{\partial G_{м}}{\partial x}, \quad (3)$$

где  $\omega$  — число витков обмотки электромагнита;

$G_{м}$  — эквивалентная проводимость магнитопровода, путей, по которым проходит поток выпучивания и воздушного зазора.

Для определения этой проводимости рассмотрим эквивалентную схему замещения магнитной цепи электромагнита (рис. 2), где

$G_{ж}$  — эквивалентная проводимость магнитопровода;

$G_{\delta}$  — эквивалентная проводимость воздушного зазора;

$G_{в}$  — эквивалентная проводимость путей, по которым проходит поток выпучивания;

$G_{\tau}$  — эквивалентная проводимость рассеяния.

(Стрелками указаны проводимости, изменяющиеся при перемещении якоря и неизменном значении тока в обмотке электромагнита).

Обозначим переменную проводимость

$$G_{\delta} + G_{в} = G_{\nu}, \quad (4)$$

тогда эквивалентная проводимость воздушных промежутков

$$G = G_{\delta} + G_{в} + G_{\tau} = G_{\nu} + G_{\tau}, \quad (5)$$

а суммарная эквивалентная проводимость всей магнитной цепи электромагнита

$$G_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{G_{ж}} + \frac{1}{G}}. \quad (6)$$

Проводимость  $G_{\tau}$  при неизменном значении тока  $I$  не зависит от положения якоря электромагнита и может быть найдена для нашего

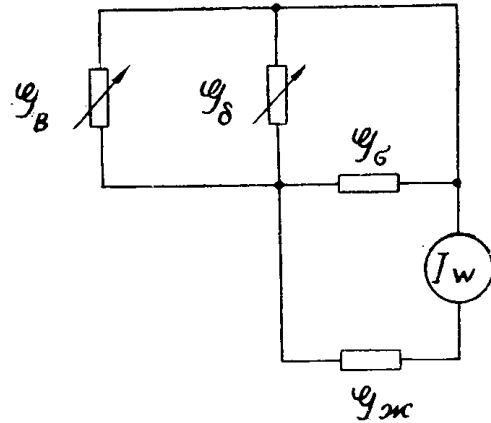


Рис. 2. Схема замещения эквивалентных проводимостей магнитной цепи электромагнита.

случая аналитически [2]; после простых преобразований получаем

$$G_{\tau} = \mu_0 h \left( \frac{b}{3\tau} + 0,396 \right) \approx \mu_0 h \left( \frac{b}{3\tau} + 0,4 \right). \quad (7)$$

Эта проводимость не входит под знак производной в выражении силы тяги как величина постоянная (3).

Проводимость  $G_m$  равна

$$G_m = \frac{1}{\frac{1}{G_v} + \frac{1}{G_{ж}}}, \quad (8)$$

откуда

$$\frac{\partial G_m}{\partial x} = \frac{G_m^2}{G_v^2} \cdot \frac{\partial G_v}{\partial x} \quad (9)$$

и

$$\frac{\partial G_m}{\partial \delta} = \frac{G_m^2}{G_v^2} \cdot \frac{\partial G_v}{\partial \delta}. \quad (9a)$$

Производную  $\frac{\partial G_v}{\partial x}$  находим из кривых  $G = f(x)$ , приведенных в [3] следующим образом.

Вычислим по формуле (7) значение  $G_{\tau}$  для заданных  $\tau, b, h$  и, вычитая его из ординат кривых  $G = f(x)$  для тех же  $\tau, b, h$ , построим кривые  $G_v = f_1(x)$ . Производную

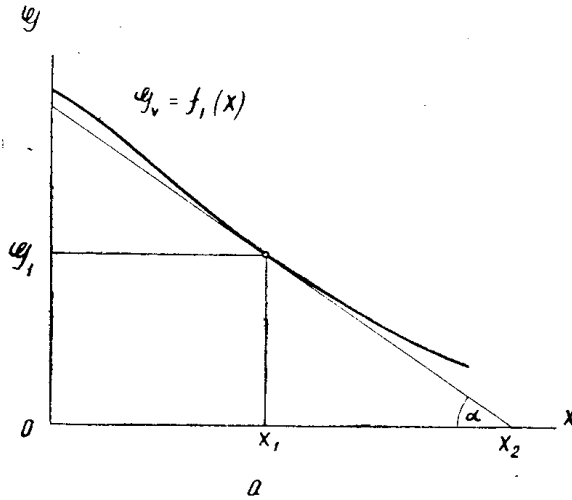


Рис. 3а. Графический способ нахождения производной

$$\left( \frac{\partial G_v}{\partial x} \right)_{x=x_1} = \text{const}$$

$\frac{\partial G_v}{\partial x}$  из построенных кривых получим графическим путем, проводя касательную к кривой  $G_v = f_1(x)$  (рис. 3,а) и находя

$$\left( \frac{\partial G_v}{\partial x} \right)_{x=x_1} = \text{tg } \alpha = \frac{G_1}{x_2 - x_1}. \quad (10)$$

Сила нормального притяжения якоря к ярму электромагнита (в направлении другого возможного перемещения  $\delta$ , фиксируемого, однако, элементами конструкции электромагнита) определяется

$$F_H = - \frac{(I\omega)^2}{2} \cdot \frac{\partial G_m}{\partial \delta}. \quad (11)$$

Для нахождения  $\frac{\partial G_m}{\partial \delta}$  и прежде всего  $G_m = \varphi(\delta)$  произведем следующие операции.

Перестроим кривые  $G = f(x)$ , построенные при фиксированных значениях  $\delta$  и постоянных  $\tau, b, l, h$  в кривые  $G = \varphi(\delta)$  при некоторых фиксированных значениях  $x$  и тех же  $\tau, b, l, h$ .

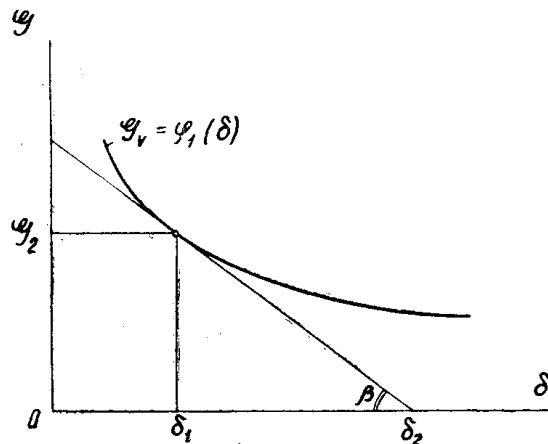


Рис. 3б. Графический способ нахождения производной

$$\left( \frac{\partial G_v}{\partial \delta} \right)_{x=\text{const}}$$

Далее в соответствии с уравнениями (4), (5) и (7) строим кривую  $G_v = \varphi_1(\delta)$  аналогично предыдущему. Производную  $\frac{\partial G_v}{\partial \delta}$  находим графически, проводя касательную к кривой  $G_v = \varphi_1(\delta)$  рис. 3, б) и находя

$$\left(\frac{\partial G_v}{\partial \delta}\right)_{\delta=\delta_1} = \operatorname{tg} \beta = \frac{G_2}{\delta_2 - \delta_1}. \quad (12)$$

Проводимость магнитопровода  $G_{ж}$  для постоянного тока  $I$  и известного сорта стали находим по формуле

$$G_{ж} = 2\mu_{ж} \frac{b \cdot \tau}{l_{cp}}, \quad (13)$$

где  $l_{cp}$  — длина средней силовой линии магнитопровода (на рис. 1 обозначена пунктиром), равная

$$l_{cp} = 2h + 2l + 8\tau, \quad (14)$$

$\mu_{ж}$  — находим по кривым  $\mu_{ж}(B)$ , а  $B$  — по кривым  $B(H)$ .

Точность вычислений статических сил  $F_T$  и  $F_H$  зависит от точности графических построений  $\frac{\partial G_v}{\partial x}$  и  $\frac{\partial G_v}{\partial \delta}$  и лежит в пределах 5—10% и погрешностей, которые дают кривые  $G_v = f(b_v, l_v, x_v, \delta_v)$  [3].

Теоретически построенные примерные кривые статических сил  $F_T$  и  $F_H$  при  $\delta = \text{const}$  (рис. 4) были сравнены с их экспериментальными значениями, измеренными с помощью тензодатчиков, что дало хорошо совпадающие результаты (погрешность не превышала 10—15%).

#### ПРИМЕЧАНИЯ

Кривые  $G_v = f(b_v, l_v, x_v, \delta_v)$  сняты для  $h_v = 6$ ; для других значений  $h_v$  указанные кривые могут быть скорректированы с помощью формулы (7), которая может учесть проводимость рассеяния  $G_s$  для различных  $h$ .

Кривые  $G_v = f(b_v, l_v, x_v, \delta_v)$  построены при питании обмотки электромагнита  $U_{\sim} = \text{const}$ , хотя с точки зрения применения формулы (7) при расчетах такие построения нужно было бы производить при  $I_{\sim} = \text{const}$ . Практически совпадающие кривые  $G_v = f(b_v, l_v, x_v, \delta_v)$  при питании обмотки электромагнита  $U_{\sim} = \text{const}$  и питания  $I_{\sim} = \text{const}$  [4] и затруднительная техника эксперимента во втором случае (диапазон прикладываемых напряжений достигает 100) привели к выбору первого варианта.

#### Выводы

1. Предлагаемая методика позволяет простым способом построить статические характеристики сил  $F_T$  и  $F_H$ .

2. При ходе якоря электромагнита, равном  $\tau$  и общем изменении сил  $F_T$  и  $F_H$  в пределах  $2\tau$ , кривые  $F_T$  и  $F_H$  дают возможность выбрать рациональный участок хода электромагнита.

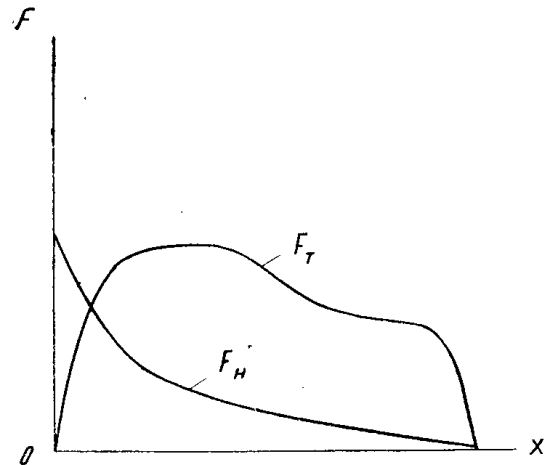


Рис. 4. Характеристики статических сил  $F_T$  и  $F_H$  электромагнита.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Могилевский. К расчету тяговых сил в электромагнитах, «Вестник электропромышленности», № 4, 1960.
  2. М. И. Витенберг. Расчет электромагнитных реле, ГЭИ, 1961.
  3. В. Н. Гурницкий. Определение магнитных проводимостей воздушных промежутков Ш-образного электромагнита с поперечно движущимся якорем, Известия ТПИ, т. 139, Томск, 1965.
  4. А. Я. Буйлов. Основы электроаппаратостроения, ГЭИ, 1946.
-