

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:

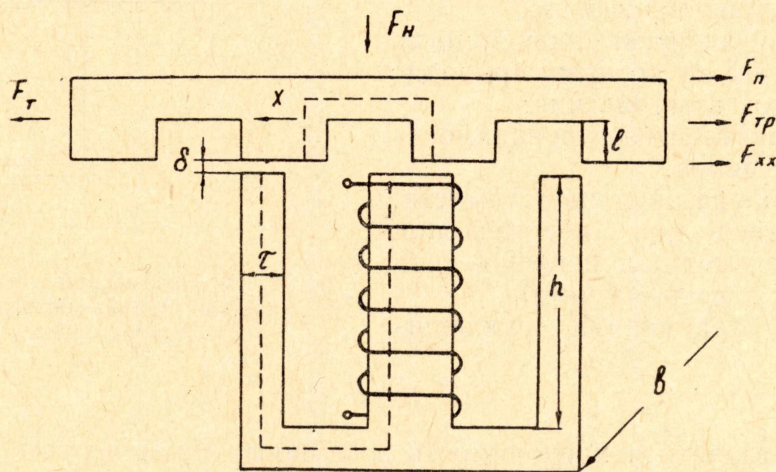


Рис. 1. Схема действия статических сил на якорь электромагнита.

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

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

F_{xx} — сила холостого хода;

F_{Π} — заданная функция полезной силы.

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

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

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_T и F_{Π} (величины F_{xx} и $f_{\text{тр}}$ определяются конструкцией электромагнита).

Сила тяги F_T , являющаяся функцией положения якоря x (при постоянных значениях δ , τ , b , l , h), равна [1]:

$$F_T = - \frac{(I\omega)^2}{2} \cdot \frac{\partial G_M}{\partial x}, \quad (3)$$

где ω — число витков обмотки электромагнита;

G_M — 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

$G_{\text{ж}}$ — эквивалентная проводимость магнитопровода;

G_{δ} — эквивалентная проводимость воздушного зазора;

G_B — эквивалентная проводимость путей, по которым проходит поток выпучивания;

G_{σ} — эквивалентная проводимость рассеяния.

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

Обозначим переменную проводимость

$$G_{\delta} + G_B = G_v, \quad (4)$$

тогда эквивалентная проводимость воздушных промежутков

$$G = G_{\delta} + G_B + G_{\sigma} = G_v + G_{\sigma}, \quad (5)$$

а суммарная эквивалентная проводимость всей магнитной цепи электромагнита

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

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

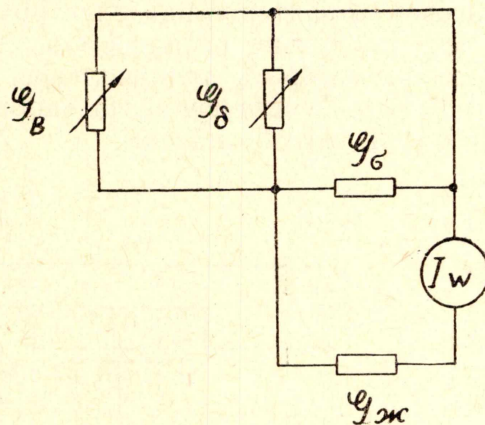


Рис. 2. Схема замещения эквивалентных проводимостей магнитной цепи электромагнита.

случая аналитически [2]; после простых преобразований получаем

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

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_{σ} для заданных τ, b, h и, вычитая его из ординат кривых $G = f(x)$ для тех же τ, b, h , построим кривые $G_v = f_1(x)$. Производную

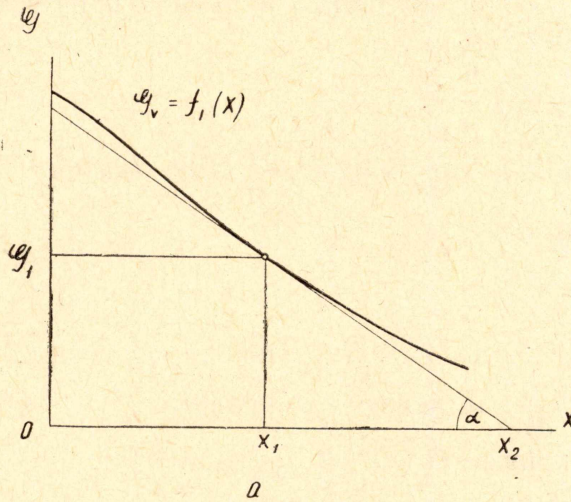


Рис. 3а. Графический способ нахождения производной

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

$\frac{\partial G_v}{\partial x}$ 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 δ , 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 δ и постоянных τ, b, l, h в кривые $G = \varphi(\delta)$ при некоторых фиксированных значениях x и тех же τ, b, l, h .

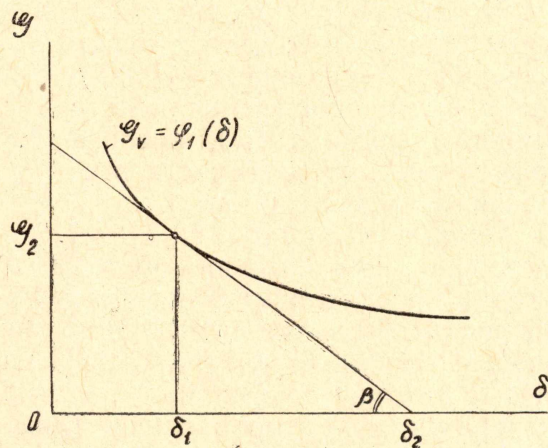


Рис. 3б. Графический способ нахождения производной

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

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

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

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

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

$\mu_{ж}$ — 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 $G_\tau = f(b_\tau, l_\tau, x_\tau, \delta_\tau)$ [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 $G_\tau = f(b_\tau, l_\tau, x_\tau, \delta_\tau)$ сняты для $h_\tau = 6$; для других значений h_τ указанные кривые могут быть скорректированы с помощью формулы (7), которая может учесть проводимость рассеяния G_σ для различных h .

Кривые $G_\tau = f(b_\tau, l_\tau, x_\tau, \delta_\tau)$ 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 $G_\tau = f(b_\tau, l_\tau, x_\tau, \delta_\tau)$ 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 τ и общем изменении сил F_T и F_H в пределах 2τ , кривые F_T и F_H дают возможность выбрать рациональный участок хода электромагнита.

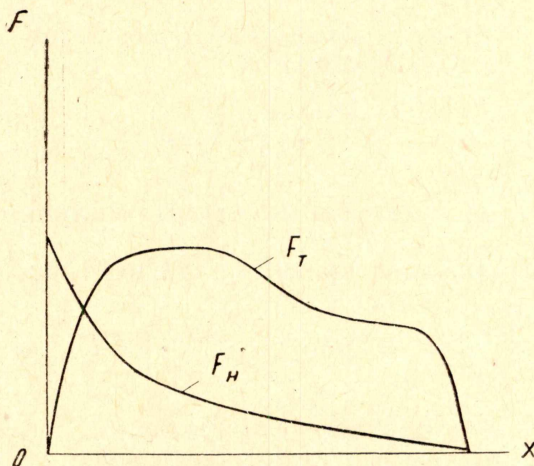


Рис. 4. Характеристики статических сил F_T и F_H электромагнита.

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.
-