

Н. П. РЯШЕНЦЕВ, А. В. ФРОЛОВ

РАСЧЕТ БОКОВОГО МАГНИТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МОЛОТКОВ

(Представлено кафедрой горных машин и рудничного транспорта)

Электромагнитные молотки со свободным выбегом бойка [1, 2] в конструктивном отношении подобны электромагнитам броневого типа, однако от электромагнитов они отличаются тем, что величина рабочего воздушного зазора периодически изменяется в довольно широких пределах и по абсолютной величине соизмерима с длиной намагничивающей катушки. Поэтому за время одного цикла работы в зависимости от положения бойка относительно неподвижного магнитопровода происходит перераспределение магнитного потока, так как основной магнитный поток и поток рассеяния в любом сечении магнитной цепи зависят от величины рабочего воздушного зазора.

В отличие от электромагнитов, у которых значительно большая часть потока сосредоточена между внутренними частями полюсов и полюсными наконечниками, у электромагнитных молотков со свободным выбегом бойка часть магнитного потока замыкается через внешнюю сторону полюсов. Исследования распределения магнитного потока в электромагнитных молотках со свободным выбегом бойка показали, что величина магнитного потока, замыкающаяся через внешнюю сторону полюсов, составляет значительную часть от всего магнитного потока, создаваемого катушкой (рис. 1). Сплошные линии (рис. 1) характеризуют задний полюс, а пунктирные — передний. Величина относительного потока Φ^1 определяется как

$$\Phi = \frac{\Phi_n}{\Phi_0} \cdot 100, \%$$

где Φ_n — поток, проходящий через внешнюю боковую поверхность полюса, Φ_0 — полный поток, создаваемый намагничивающей катушкой.

При отсутствии рабочего воздушного зазора боковые потоки с переднего и заднего полюсов равны между собой. При увеличении воздушного зазора поток, замыкающийся через внешнюю боковую поверхность переднего полюса, начинает резко уменьшаться и при $x = 2$ см (рис. 1 и рис. 2, а) практически равен 0. Боковой поток заднего полюса с увеличением воздушного зазора возрастает, достигает максимального значения, после которого остается практически постоянным. Экспериментально установлено, что магнитный поток, замыкающийся через внешнюю боковую поверхность заднего полюса, достигает своего максимального значения при воздушном зазоре, равном, примерно, наклон-

ной высоте полюса H (рис. 2, а). Так как боковой поток представляет собой довольно большую величину от общего магнитного потока (рис. 1), то, очевидно, при расчете магнитной системы молотка его необходимо учитывать. Необходимость определения бокового потока объяс-

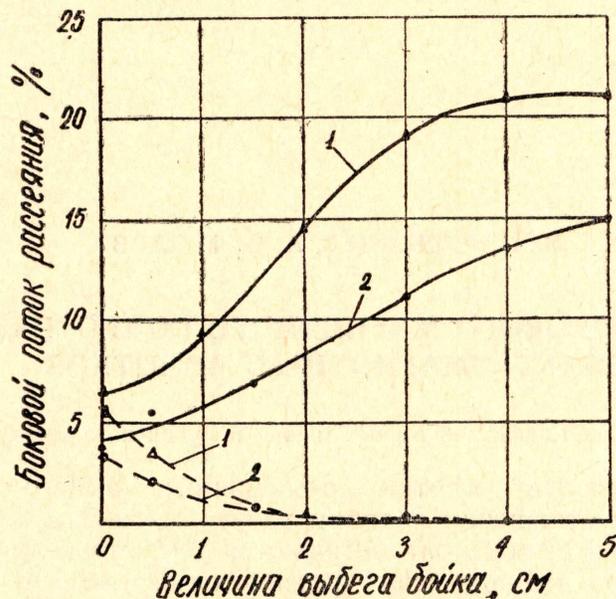


Рис. 1. Зависимость бокового потока рассеяния от величины выбега бойка для молотка МС-16 (кривая 1) и УЭ-1 (кривая 2).

няется еще тем, что разность магнитных потенциалов между ярмом и бойком, определяющая величину основного потока рассеяния [3, 4, 5], является функцией бокового магнитного сопротивления. Величина боко-

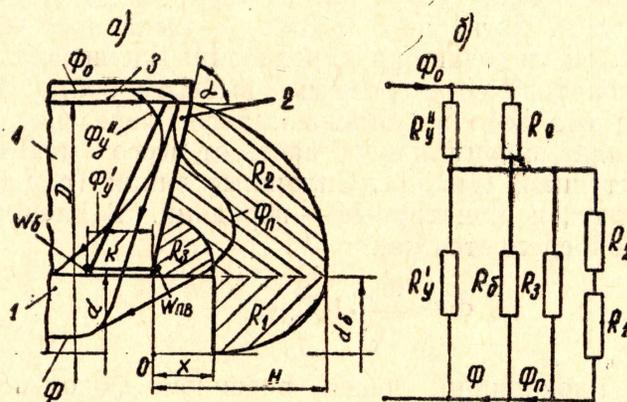


Рис. 2, а, б. Эскиз части магнитной цепи электромагнитного молотка (а) и эквивалентная схема замещения (б).

вого потока рассеяния зависит от магнитного сопротивления участка R , по которому проходит этот поток, и магнитного сопротивления R_v полюса с воздушным зазором между полюсом и бойком ($d-d_6$). На рис. 2, а представлен эскиз части магнитной цепи электромагнитного молотка типа МС-16, которая состоит из бойка 1, заднего полюса 2, намагничивающей катушки 4 и ярма 3. На этом же рисунке показан ха-

рактически распределения магнитного потока в заднем полюсе и прилегающих к нему частях магнитной цепи. Для наглядности магнитный поток показан условно сосредоточенным, хотя в действительности магнитные силовые линии охватывают все пространство, занимаемое магнитной системой молотка, а также на некотором расстоянии от нее. На рис. 2, б приведена эквивалентная электрическая схема замещения рассматриваемой части магнитной цепи, где R_y^I и R_y^{II} — магнитные сопротивления для потоков утечки Φ_y^I и Φ_y^{II} ; $R_{я}$ — сопротивление воротничка между ярмом и полюсом; $R_{в}$ — сопротивление воротничка между полюсом и бойком; R_1, R_2, R_3 — магнитные сопротивления, характеризующие величину бокового потока. Потоки рассеяния с внешней боковой поверхности полюса, как и все потоки рассеяния, имеют весьма сложную форму и образуемые ими поля трудно поддаются точному математическому описанию. В тех случаях, когда магнитные силовые линии рассеяния невозможно рассчитать даже методом графического построения картины магнитного поля [3]. Учитывая, что магнитные силовые линии бокового потока рассеяния проходят в области, не занятой намагничивающей катушкой, можно считать; что магнитное поле между внешней боковой поверхностью полюса и бойком имеет безвихревой характер [4]. Следовательно, для определения магнитного сопротивления боковому потоку рассеяния можно использовать основные положения метода ожидания вероятных путей потока и метода графического построения картины магнитного поля [3, 4, 5]. При расчете магнитного сопротивления будем считать, что магнитные силовые линии входят и выходят из ферромагнитных участков магнитной цепи под прямым углом.

Пренебрегаем магнитным полем за пределами объема, образованного вращением сектора радиусом H и углом раствора α (рис. 2, а) относительно оси симметрии молотка ox . Это допущение лежит в пределах точности расчета.

Основываясь на общих положениях метода ожидания вероятных путей потока и рекомендаций по разбивке поля на простые геометрические фигуры [3, 4, 5], объем, занимаемый боковым потоком рассеяния, делим на три простых объема, магнитные сопротивления R_1, R_2 и R_3 которых можно достаточно просто определить. Магнитные сопротивления R объемов рекомендуют определять как частное от деления средней магнитной силовой линии l на среднюю величину поперечного сечения S на пути магнитной силовой линии

$$R = \frac{l}{\mu_0 S}, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость воздуха.

Когда один из элементов l и S нельзя выразить аналитически, его определяют путем измерения по чертежу с дальнейшей по необходимости аппроксимацией [5]. Однако более точные результаты при расчете сопротивления получаются при использовании объема V , занимаемого магнитным полем, так как одно из составляющих выражения (1) в этом случае определяется без погрешности

$$R = \frac{V}{\mu_0 S^2} = \frac{l^2}{\mu_0 V}. \quad (2)$$

Объем V , образованный вращением площади S' относительно оси, лежащей в плоскости фигуры и не пересекающей ее, будем определять по правилу Гюльдена [6]

$$V = 2\pi S' R_0, \quad (3)$$

где R_0 — расстояние между осью вращения и центром тяжести вращаемой фигуры. При определении магнитного сопротивления R_1 первого участка считаем, что объем его образован вращением эллиптического квадранта с полуосями $(H-x)$ и $\frac{d_6}{2}$ относительно оси ox . Причем одна из полуосей эллипса при изменении координаты x остается постоянной, что соответствует принятым ранее допущениям.

Согласно [6] объем, занимаемый магнитным полем первого участка

$$V_1 = 2\pi S'_1 R_{01},$$

где S'_1 — площадь эллиптического квадранта, пропорциональная произведению его полуосей [6],

$$S'_1 = \frac{\pi}{8} d_6 \cdot (H-x). \quad (4)$$

R_{01} — расстояние от центра тяжести до оси вращения [6],

$$R_{01} = \frac{d_6}{2} - \frac{2d_6}{3\pi}. \quad (5)$$

Принятые обозначения в выражениях (4), (5) и в дальнейшем будут соответствовать (рис. 2).

Площадь сечения, сквозь которую проходят магнитные силовые линии, будем определять как среднюю площадь входа и выхода магнитных силовых линий в первом участке

$$S_1 = \frac{\pi d_6}{2} (H-x) + \frac{\pi d_6^2}{8} = \frac{\pi d_6}{8} (4H + d_6 - 4x). \quad (6)$$

Принятые обозначения в выражениях (4), (5) и в дальнейшем будут ние первого участка

$$R_1 = \frac{4,6(H-x)}{\psi_0(4H + d_6 - 4x)^2}. \quad (7)$$

Объем второго участка определяем как произведение площади части кольца, образованного радиусами H и $(H-x)$ на ординату центра тяжести относительно оси вращения, которая равна [6]

$$R_{02} = \frac{d_6}{2} = \frac{(1 - \cos \alpha)}{3\pi k_1} \cdot \left(\frac{H^3 - x^3}{H^2 - x^2} \right). \quad (8)$$

Тогда объем второго участка

$$V_2 = 2\pi^2 k_1 [H^2 - (H-x)^2] \left[\frac{d_6}{2} + \frac{(1 - \cos \alpha)(H^3 - x^3)}{3\pi k_1 (H^2 - x^2)} \right], \quad (9)$$

где $k_1 = \frac{\alpha}{360}$.

При расчете магнитного сопротивления R_2 удобнее использовать среднюю длину магнитной силовой линии

$$l_2 = 2\pi \frac{H+x}{2} \cdot \frac{\alpha}{360} = \pi k_1 (H+x); \quad (10)$$

Подставив (9) и (10) в (2) и произведя элементарные преобразования, получим

$$R_2 = \frac{k_1 (H+x)^2}{\nu_0 \left[d_6 H^2 + \frac{2H^3}{3\pi k_1} (1 - \cos \alpha) - d_6 x^2 - \frac{2(1 - \cos \alpha)}{3\pi k_1} x^3 \right]}. \quad (11)$$

Подобным образом определяем сопротивление третьего участка, объем которого образован вращением сектора радиусом x относительно оси ox . Расстояние от центра тяжести сектора до оси вращения [6]

$$R_{03} = \frac{d_6}{2} + \frac{(1 - \cos \alpha) x}{3\pi k_1} = \frac{3\pi k_1 d_6 + 2(1 - \cos \alpha) x}{6\pi k_1}. \quad (12)$$

Площадь сектора

$$S'_3 = \pi k_1 x^2 \quad (13)$$

Совместным решением (3, 12, 13) определяем объем, который занимает магнитное поле

$$V_3 = \frac{1}{3} \pi x^2 [3\pi k_1 d_6 + 2(1 - \cos \alpha) x]. \quad (14)$$

Расчетным путем установлено, что эквивалентную площадь сечения, через которую проходят магнитные силовые линии третьего участка, можно с достаточной степенью точности определить по формуле

$$S_3 = \frac{1}{2} \pi x (d_6 + 4x \sin \alpha). \quad (15)$$

Подставляя (14) и (15) в (2), определим магнитное сопротивление третьего участка

$$R_3 = \frac{4 [3\pi k_1 d_6 + 2(1 - \cos \alpha) x]}{3\pi \nu_0 (d_6 + 4x \sin \alpha)^2}. \quad (16)$$

Общее боковое магнитное сопротивление для потоков, замыкающихся через внешнюю боковую поверхность заднего полюса, определяем согласно схеме замещения магнитной цепи (рис. 2, б)

$$R = \frac{(R_1 + R_2) \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (17)$$

При определении общего бокового сопротивления в выражениях (7), (11) и (16) числитель и знаменатель перепишем в виде степенного ряда

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{H-x}{\nu_0 (a_1 - b_1 x + 3,46 x^2)}; \\ R_2 &= \frac{H^2 + 2Hx + x^2}{\nu_0 \left(a_2 - \frac{d_6}{k_1} x^2 - b_2 x^3 \right)}; \\ R_3 &= \frac{a_3 + b_3 x}{\nu_0 (c_3 + x + 2x^2 \sin \alpha)}; \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$a_1 = 0,218 (4H + d_6)^2; \quad a_3 = \frac{k_1 d_6}{2 \sin \alpha};$$

$$b_1 = 1,74(4H + d_6); \quad b_3 = \frac{1 - \cos \alpha}{12 \pi \sin \alpha};$$

$$a_2 = \frac{H^2}{k_1} \left[d_6 + \frac{2H(1 - \cos \alpha)}{3\pi k_1} \right]; \quad c_3 = \frac{d_6^2}{8 \sin \alpha}.$$

$$b_2 = \frac{2(1 - \cos \alpha)}{3\pi k_1^2}.$$

Подставляя (18) в (17) и производя соответствующие преобразования, получим

$$R = \frac{1}{\rho_0} \frac{a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5}{A + Bx + Cx^2 + Dx^3 + Ex^4 + Fx^5 + Gx^6}. \quad (19)$$

В выражении (19) постоянные коэффициенты при переменной имеют следующие значения:

$$a = a_3 H (a_2 + H);$$

$$b = b_3 \frac{a}{a_3} - a_3 (a_2 - 2a_1 H + b_1 H^2);$$

$$c = b \frac{b_3}{a_3} - a_3 g - a \frac{b_3^2}{a_3^2};$$

$$d = a_3 \left(\frac{d_6}{k_1} - b_1 + 6,92H \right) - b_3 g;$$

$$e = a_3 (b_2 + 3,46) + b_3 \frac{d}{a_3} + g \frac{b_3^2}{a_3};$$

$$f = b_3 (b_2 + 3,46);$$

$$g = \frac{d_6}{2} H + b_2 H - a_1 + 2b_1 H - 3,46H^2;$$

$$A = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 + a \frac{c_3}{a_3};$$

$$B = \frac{a}{a_3} + \frac{c_3}{a_3} \left(b - a \frac{b_3}{c_3} \right) + a_2 (a_1 b_3 - b_1 a_3);$$

$$C = 2 \frac{a}{a_3} \sin \alpha - c_3 g - a_2 b_1 b_2 + a_3 \left(3,46 a_2 - a_1 \frac{d_6}{k_1} \right);$$

$$D = \frac{c_3}{a_3} (d + b_3 g) - g + \frac{2 \sin \alpha}{a_3} \left(b - \frac{x_3}{a_3} a \right) + a_3 \left(b_1 \frac{d_6}{k_1} - a_1 b_2 \right);$$

$$E = \frac{f}{b_3} c_3 + \frac{1}{a_3} (d + b_3 g) - 2g \sin \alpha - a_3 \left(3,46 \cdot \frac{d_6}{k_1} - b_1 b_2 \right) +$$

$$+ b_3 \left(b_1 \cdot \frac{d_6}{k_1} - a_1 b_2 \right);$$

$$F = \frac{f}{b_3} + \frac{2 \sin \alpha}{a_3} (d + b_3 g) - 3,46 a_3 b_2 - b_3 \left(3,46 \frac{d_6}{k_1} - b_1 b_2 \right);$$

$$G = 2 \frac{f}{b_3} \cdot \sin \alpha - 3,46 b_2 b_3.$$

Экспериментальная проверка выражения (19) для определения бокового магнитного сопротивления была проведена в лабораториях кафедры горных машин Томского политехнического института. Согласно рис. 2, а, б боковое магнитное сопротивление можно определить как

$$R = R_B \frac{\Phi - \Phi_n}{\Phi_n}, \quad (20)$$

где R_B — магнитное сопротивление для потока, проходящего по заднему полюсу в направлении бойка через воздушный зазор между полюсом и бойком [3, 5]

$$R_B = \frac{\ln \frac{d}{d_6}}{2\pi\mu_0 k}. \quad (21)$$

Подставляя (21) в (20), находим

$$R = \frac{\ln \frac{d}{d_6}}{2\pi\mu_0 k} \left(\frac{\Phi}{\Phi_n} - 1 \right). \quad (22)$$

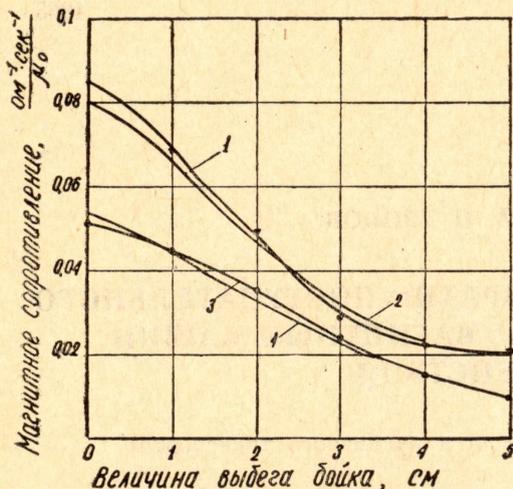


Рис. 3. Экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) зависимости бокового магнитного сопротивления от величины выбега бойка для молотка МС-16 (кривые 1, 2) и УЭ-1 (кривая 3, 4).

Магнитный поток Φ_n замыкающийся через внешнюю боковую поверхность заднего полюса и поток Φ , измеряем индукционным методом с помощью измерительных витков $W_{пв}$ и W_6 (рис. 2, а). Величину э. д. с., наведенную в измерительных витках, определяем с помощью электронного вольтметра с большим входным сопротивлением. Результаты расчета бокового магнитного сопротивления, произведенные для электромагнитных молотков типа МС-16 ($\alpha = 56^\circ$, $d_6 = 2,8$ см, $D = 9,3$ см, $k = 1,0$ и $d = 3,0$ см) и мощностью ударного узла $\alpha = 90^\circ$, $d_6 = 6,8$ см, $D = 20,0$ см, $k = 2,4$ см, $d = 7,0$ см), представлены на рис. 3. Видно, что расчетные значения бокового магнитного сопротивления (кривые 2 и 4) незначительно отличаются от этих же зависимостей, полученных экспериментально (кривые 1 и 3). Это дает основание рекомендовать полученное выражение (20) для практического использования при определении боковых магнитных сопротивлений электромагнитов подобных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Ряшенцев, Е. М. Тимошенко. Соленоидные молотки. Известия ТПИ, т. 108, Металлургиздат, 1959.
2. В. В. Иванов, Н. П. Ряшенцев. Новые электрические молотки. Ж. «Механизация строительства», № 7, 1961.
3. А. В. Гордон, А. Г. Славинская. Электромагниты постоянного тока. ГЭИ, 1960.
4. В. А. Говорков. Электрические и магнитные поля. ГЭИ, 1956.
5. Ротерс. Электромагнитные механизмы. ГЭИ, 1949.
6. Справочник машиностроителя, Т. 1, Москва, 1954.
7. А. И. Маркушевич. Теория аналитических функций. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950.