

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ БРОНЕВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА С КОНУСНЫМ ЯКОРЕМ

Бранспиз Ю.А., к.т.н., доц., Пшеничный А.Н.

Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля

Украина, 91000, Луганск, кв. Молодежный 20-А, ВНУ, кафедра "Электромеханика"

Приведено метод аналітичного розрахунку тягового зусилля броневого електромагніту з конусним якорем. Показано його практичну здатність для інженерних розрахунків.

Приведен метод аналітичного расчета тягового усилия броневого электромагнита с конусным якорем. Показана его практическая приемлемость для инженерных расчетов.

Электромагниты броневые типа нашли широкое распространение как электромагниты силовых электрических аппаратов. Первоначально конструкция якоря этих электромагнитов представляла собой цилиндр с плоским торцом, которому соответствовал и плоский торец цилиндрического стопа. В результате совершенствования указанных электромагнитов, была предложена конструкция якоря и стопа с конусной конфигурацией выступа на якоре и соответствующей конусной конфигурацией стопа (рис. 1) [1, 2].

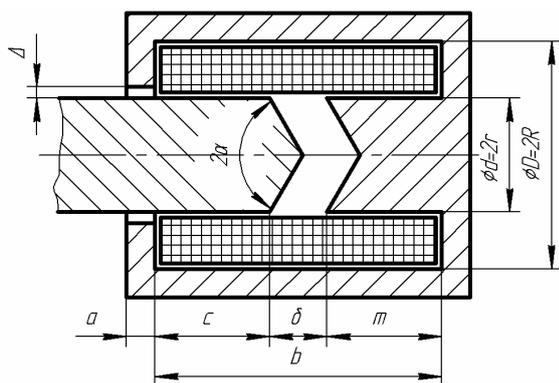


Рис. 1. Броневой электромагнит с конусным якорем

Для расчета тягового усилия в такой конусной системе якоря и стопа в настоящее время известны практические методики для инженерных расчетов (см., например, [3]), которые, однако, в последнее время подвергаются сомнению [4, 5]. Учитывая это, в данной работе решается задача определения аналитического выражения для расчета тягового усилия броневое электромагнита с конусным якорем и стопом.

Следует заметить, что поставленную задачу можно решить, используя известную формулу Максвелла, применяя для расчета магнитного поля метод конечных элементов (к примеру с помощью программы ФЕММ [6] или аналогичной, как это делается, например, в [7]). Однако, метод конечных элементов удобен для проведения поверочных расчетов (вычислительного эксперимента) электромагнитов заданной конструкции и размеров, но его применение для решения задачи синтеза той или иной электромагнитной системы встречает определенные трудности. Если же имеется аналитическое выражение для тяговой характеристики в виде функции, зависящей от габаритов магнита, размеров якоря и стопа, МДС, то, задавшись

необходимым усилием на якорь и другими начальными условиями, можно решать задачу синтеза, которая может служить и основой решения задачи определения по заданному критерию рациональных значений тех или иных геометрических размеров рассматриваемой электромагнитной системы. Поэтому при решении указанной задачи было определено получить ее решение в виде некоторого аналитического выражения для тягового усилия броневое электромагнита с конусным якорем и стопом при произвольных зазорах между ними.

С этой целью используем предложенную ранее методику расчета тягового усилия броневое электромагнита с плоским стопом [5]. Согласно ей для нахождения тягового усилия броневое электромагнита можно использовать энергетический подход с аналитическим определением потокоцепления в области обмоточного окна на основе решения уравнения Пуассона для векторного магнитного потенциала в этой области, свободная поверхность которой (по зазору) является цилиндрической поверхностью, образованной силовыми линиями с якоря на стоп. В частности, в [5] показано, что для расчета тягового усилия броневое электромагнита с плоским стопом как для относительно малых, так и для относительно больших рабочих зазоров, может быть использовано следующее выражение

$$F = -\frac{1}{2} \cdot i \cdot \left(\frac{d\Psi_{\delta}}{d\delta} + \frac{d\Psi_S}{d\delta} \right), \quad (1)$$

где i – ток в обмотке; Ψ_{δ} – потокоцепление обмотки с магнитным потоком через рабочий зазор; Ψ_S – потокоцепление обмотки с магнитным потоком рассеяния с боковой поверхности якоря.

Если и для конусного якоря принять что свободная поверхность обмоточного окна (по зазору) является цилиндрической поверхностью, образованной силовыми линиями с якоря (с окружности основания конуса наконечника якоря) на стоп (окружность основания конусного углубления в стопе), то выражение (1) может быть применено и для рассматриваемого броневое электромагнита (рис. 1). При этом потокоцепление Ψ_S в (1) может быть посчитано также как и в [5], а именно, по формуле (здесь w – число витков обмотки, а обозначения геометрических размеров соответствует их обозначению на рис. 1)

$$\Psi_s = r \cdot 4/\delta \cdot b \cdot \mu_0 \cdot i \cdot w^2 / \pi^2 \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \cdot (\sin(k_n \cdot c) - k_n \cdot c \cdot \cos(k_n \cdot c)) \times (\sin(k_n \cdot (c + \delta)) - \sin(k_n \cdot c)) \times F_{IK}, \quad (2)$$

где $k_n = \frac{n \cdot \pi}{b}$; $F_{IK} = \frac{[K_0(k_n \cdot R) \cdot I_1(k_n \cdot r) + I_0(k_n \cdot R) \cdot K_1(k_n \cdot r)]}{[K_0(k_n \cdot r) \cdot I_0(k_n \cdot R) - I_0(k_n \cdot r) \cdot K_0(k_n \cdot R)]}$, I_0, K_0, I_1, K_1 – модифицированные функции Бесселя первого (I_0, I_1) и второго (K_0, K_1) рода, соответственно, нулевого и первого порядка.

Что же касается потокоцепления Ψ_δ , которое в общем случае определяется проводимостью магнитного потока в зазоре Λ_δ (а именно, $\Psi_\delta = i \cdot w^2 \cdot \Lambda_\delta$ [3]), то для конусного якоря и стопа это потокоцепление можно определить как

$$\Psi_\delta = i \cdot w^2 \cdot \mu_0 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot \delta \cdot \sin^2(\alpha)} - \frac{0,157 \cdot d}{\sin^2(\alpha)} + 0,75 \cdot d \right), \quad (3)$$

если использовать соответствующее выражение для проводимости магнитного потока между системой полюсов «конус-воронка» из [8].

Таким образом, по (1), тяговое усилие в рассматриваемом случае представляет собой сумму

$$F = F_\delta + F_S, \quad (4)$$

где $F_\delta = -0,5 \cdot i \cdot \frac{d\Psi_\delta}{d\delta}$, или, с учетом (3)

$$F_\delta = (i \cdot w)^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot \delta^2 \cdot \sin^2(\alpha)}; \quad (5)$$

а $F_S = -0,5 \cdot i \cdot d\Psi_S / d\delta$, или, согласно [5],

$$F_S = 2/\pi^2 \cdot \mu_0 \cdot (i \cdot w)^2 \cdot r \cdot b \times \sum_{n=1}^{\infty} F_{IK} \cdot \left\{ \frac{1}{n^3} \cdot \frac{1}{\delta^2} \cdot [\sin(k_n \cdot c) - k_n \cdot c \cdot \cos(k_n \cdot c)] \times [\sin(k_n \cdot (b - m)) - \sin(k_n \cdot c)] + \frac{1}{n^3} \cdot k_n / \delta \cdot [k_n \cdot c \cdot \sin(k_n \cdot c) \cdot \sin(k_n \cdot (b - m)) + k_n \cdot c \cdot \cos(2 \cdot k_n \cdot c) - 0,5 \cdot \sin(2 \cdot k_n \cdot c)] \right\}. \quad (6)$$

Далее учтем, что для практического использования формул (5) и (6) необходимо, как указано в [3], понимать в этих формулах под произведением $i \cdot w$ не всю МДС обмотки, а ту ее часть, которая приходится на зазор, то есть $(i \cdot w)_\delta$ – падение магнитного потенциала в рабочем зазоре.

Для определения $(i \cdot w)_\delta$ воспользуемся тем, что разница между полной МДС обмотки и МДС обмотки, приходящаяся на рабочий зазор, обусловлена падением магнитного потенциала в паразитных зазорах и в железе магнитопровода. При этом, если принять магнитное состояние железа магнитопровода ненасыщенным, то есть, если пренебречь падением магнитного потенциала в железе магнитопровода, то падение $(i \cdot w)_\delta$ можно определить как разность

$$(i \cdot w)_\delta = i \cdot w - \Delta U, \quad (7)$$

где ΔU – падение магнитного потенциала в паразитных зазорах.

Тогда, учитывая, что в рассматриваемой системе имеется один конструктивный паразитный зазор Δ в области воротничка (рис. 1), падение магнитного потенциала на этом зазоре может быть определено исходя из упрощенной схемы замещения рассматриваемого электромагнита, изображенной на рис. 2, на котором обозначено: Λ_δ – проводимость рабочего зазора; Λ_c – проводимость рассеяния с боковой поверхности якоря; Λ_Δ – проводимость паразитного зазора; Φ_0 – магнитный поток через паразитный зазор.

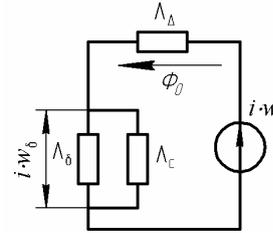


Рис. 2. Принятая схема замещения магнитной цепи электромагнита

Согласно этой схеме замещения падение магнитного потенциала на паразитном зазоре определится как отношение Φ_0 / Λ_Δ , что позволяет записать вместо (7) следующее выражение

$$(i \cdot w)_\delta = i \cdot w - \Phi_0 / \Lambda_\Delta. \quad (8)$$

Таким образом, для определения падения магнитного потенциала на паразитном зазоре необходимо определить магнитный поток Φ_0 , равный, согласно принятой схеме замещения (рис. 2)

$$\Phi_0 = (i \cdot w) \cdot \frac{\Lambda_\delta + \Lambda_c}{\Lambda_\delta + \Lambda_c + \Lambda_\Delta},$$

что при подстановке в (8) дает

$$(i \cdot w)_\delta = (i \cdot w) \cdot \frac{\Lambda_\Delta}{\Lambda_\delta + \Lambda_c + \Lambda_\Delta}. \quad (9)$$

При этом проводимости $\Lambda_\delta, \Lambda_c$ могут быть определены как [магниты]

$$\Lambda_\delta = \mu_0 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot \delta \cdot \sin^2(\alpha)} - \frac{0,157 \cdot d}{\sin^2(\alpha)} + 0,75 \cdot d \right), \quad (10)$$

$$\Lambda_c = \mu_0 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\ln(D/d)}. \quad (11)$$

А для определения проводимости паразитного зазора воспользуемся методом Ротерса [3, 8], согласно которому вероятные пути магнитного потока в области паразитного зазора Δ представляют собой систему потоков, изображенную на рис.3, на котором обозначено: Λ_1 – проводимость с цилиндрической поверхности якоря на цилиндрическую поверхность фланца; Λ_2 – проводимость с цилиндрической поверхности якоря на ребро фланца; Λ_3 – проводимость с цилиндрической поверхности якоря на нижнюю торцевую поверхность фланца; Λ_4 – проводимость с цилиндрической поверхности якоря на верхнюю торцевую поверхность фланца.

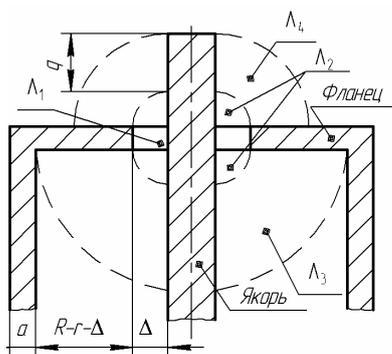


Рис. К определению магнитной проводимости паразитного зазора

При этом проводимость Λ_{Δ} , как общая проводимость паразитного зазора, определяется суммой

$$\Lambda_{\Delta} = \Lambda_1 + 2 \cdot \Lambda_2 + \Lambda_3 + \Lambda_4, \quad (12)$$

где [8]:

$$\Lambda_1 = \mu_0 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\ln(r + \Delta/r)}; \quad \Lambda_2 = 1,65 \cdot \mu_0 \cdot (d + 0,85 \cdot \Delta);$$

$$\Lambda_3 = 4 \cdot \mu_0 \cdot (r + \sqrt{\Delta \cdot (R-r)}) \cdot \ln((R-r)/\Delta);$$

$$\Lambda_4 = 4 \cdot \mu_0 \cdot (r + \sqrt{\Delta \cdot (q+\Delta)}) \cdot \ln((q+\Delta)/\Delta).$$

Заметим, что схема распределения магнитных потоков в области паразитного зазора (воротничка) броневое электромагнита, принятая в данной работе, отличается от традиционной схемы такого распределения, которая включает в себя лишь магнитный поток, соответствующий проводимости Λ_1 , что дает в этом случае $\Lambda_{\Delta} = \Lambda_1$. Однако, как показал непосредственный расчет, такой способ учета магнитной проводимости паразитного зазора дает неудовлетворительный результат.

Таким образом, подставляя (10-12) в (9) можно получить выражение для $(i \cdot w)_{\delta}$, подстановка которого в (5) и (6) позволяет осуществить расчет тягового усилия рассматриваемого электромагнита по (4).

Для проверки практической приемлемости предложенного способа определения тягового усилия рассматриваемого электромагнита с конусным якорем было осуществлено сравнение расчета по формулам (4 - 6) и (9 - 12) с данными расчета тягового усилия с применением пакета программ FEMM [6]. При этом расчет по FEMM рассматривался как вычислительный эксперимент и его данные принимались за 100%. В этой связи следует отметить практические преимущества, которые дает непосредственный расчет тягового усилия, без обращения к расчету магнитного поля в электромагните, результаты которого (при гарантированной точности) могут использоваться как экспериментальные данные для оценки расчетной методики.

В таблице приведена тяговая характеристика электромагнита с геометрией тягового реле стартера типа 5702.3708 [4]: $r=10,0$ мм; $R=20,0$ мм; $b=50,0$ мм; $t=20$ мм, $a=5$ мм, $\Delta=0,5$ мм. $(i \cdot w)=4750$ А, рассчитанная с применением программы FEMM, по предложенной методике, по традиционной методике из [3], при этом падение магнитного потенциала в области воротничка определялось по (9 - 12).

Расчетное тяговое усилие

δ , мм	Метод расчета				
	FEMM F , Н	Предлагаемый F , Н	прогр, %	Традиционный F , Н	прогр, %
$\alpha = 60^{\circ}$					
15	37,64	37,45	-0,50	33,98	-9,72
13	48,67	48,40	-0,55	43,90	-9,80
11	64,55	64,04	-0,79	57,99	-10,16
9	89,16	88,31	-0,96	79,86	-10,44
7	133,03	131,04	-1,50	118,53	-10,90
5	225,62	222,81	-1,25	202,55	-10,23
3	512	504,58	-1,45	465,06	-9,17
1	2750,8	2686,0	-2,36	2525,0	-8,21
$\alpha = 30^{\circ}$					
15	80,90	78,38	-3,11	74,65	-7,72
13	104,65	100,51	-3,96	95,62	-8,63
11	138,78	132,81	-4,30	126,18	-9,08
9	191,28	183,61	-4,01	174,19	-8,93
7	283,22	272,40	-3,82	258,13	-8,86
5	472,45	454,33	-3,83	430,20	-8,94
3	986,85	941,50	-4,60	890,10	-9,80
1	3578	3258,0	-8,94	3042,0	-14,98

Приведенные результаты подтверждают практическую приемлемость предложенного способа аналитического расчета тягового усилия броневое электромагнита с конусным якорем в ненасыщенном режиме стали магнитопровода, когда можно пренебречь падением магнитного потенциала в стали, учет которого составляет предмет отдельного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аранович Б.И., Шамрай Б.В. Электромагнитные устройства автоматики. – М-Л: Энергия, 1965. – 484 с.
- [2] Основы теории электрических аппаратов / И.С. Таев, Б.К. Буль и др.; Под ред. И.С. Таева. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.
- [3] Чунихин А.А. Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
- [4] Гаранин А.Ю., Силаева Е.В., Шлегель О.А., Попенко В.Н. Расчет тягового усилия электромагнита постоянного тока. //Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 55-58.
- [5] Бранспиз Ю.А., Пшеничный А.Н. Расчет тягового усилия броневое электромагнита с ненасыщенной магнитной системой// Технічна електродинаміка. – 2004. – Тем. выпуск: Проблеми сучасної електротехніки. Ч.2. – С. 71-74.
- [6] Meeker D. FEMM Version 3.3: User's manual. – 2002. – (<http://femm.berlios.de>)
- [7] Клименко Б.В., Байда Е.И. О проектировании броневых электромагнитов постоянного тока на базе – расчета магнитного поля методом конечных элементов//Электротехніка і Електромеханіка. – 2003. – № 1. – С. 38-40.
- [8] Постоянные магниты: Справочник/ Альтман А. Б., Герберг А.Н., Гладышев П. А. И др.; Под ред. Ю. М. Пятина. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергия, 1980. – 488с.

Поступила 30.08.2004