

## УЧЕТ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА МАГНИТОПРОВОДА БРОНЕВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПРИ РАСЧЕТЕ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Бранспиз Ю.А., д.т.н., проф.

Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля

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

E-mail: branspiz@snu.edu.ua

Загирняк М.В., д.т.н.,

Кременчугский государственный политехнический университет

Украина, 39614, Полтавская обл., Кременчуг, Першетравнева, 20

E-mail: mzagim@polytech.poltava.ua

Пшеничный А.Н.

Первомайский электромеханический завод им. К.Маркса

Украина, 93202, Луганская обл., Первомайск., Заводской переулок, 1, ОГК

E-mail: const@pemz.com.ua

*Показано, що використання одноконтурної схеми заміщення магнітного ланцюга броньового електромагніту дозволяє врахувати магнітні властивості матеріалу магнітопровода електромагніту при розрахунку тягового зусилля по запропонованій методиці*

*Показано, что использование одноконтурной схемы замещения магнитной цепи броньового электромагнита позволяет учесть магнитные свойства материала магнітопровода електромагніта при расчете тягового усилия по предлагаемой методике.*

### ВВЕДЕНИЕ

Расширение области применения броневых электромагнитов и повышение их конкурентоспособности можно достигнуть, кроме прочего, созданием таких броневых электромагнитов, геометрические размеры и электрические параметры которых будут соответствовать минимально возможному расходу активных материалов и потребляемой мощности при условии создания определенного тягового усилия. Это повышает требования к практическим методам электромагнитного расчета указанных электромагнитов, которые при достаточной простоте (для снижения времени на поиск приемлемого варианта) должны обеспечивать достаточную точность расчета тягового усилия с учетом магнитного состояния материала магнітопровода.

В настоящее время для расчета магнитного поля броневых электромагнитов традиционной конструкции (рис.1) широкое распространение получили компьютерные программные продукты, которые основаны на численных методах расчета электромагнитных полей (например, методе конечных элементов – FEMM, QuickField, Ansoft Maxwell). Однако, решение задач по определению оптимальных параметров электромагнитных систем (например, по критериям минимума потребляемой мощности или минимума массы) с применением программ, основанных на численных методах расчета магнитных полей, представляет определенные практические трудности. Поэтому представляется целесообразным разработать методику аналитического расчета тягового усилия броньового электромагнита, на основе которого можно решать указанные оптимизационные задачи.

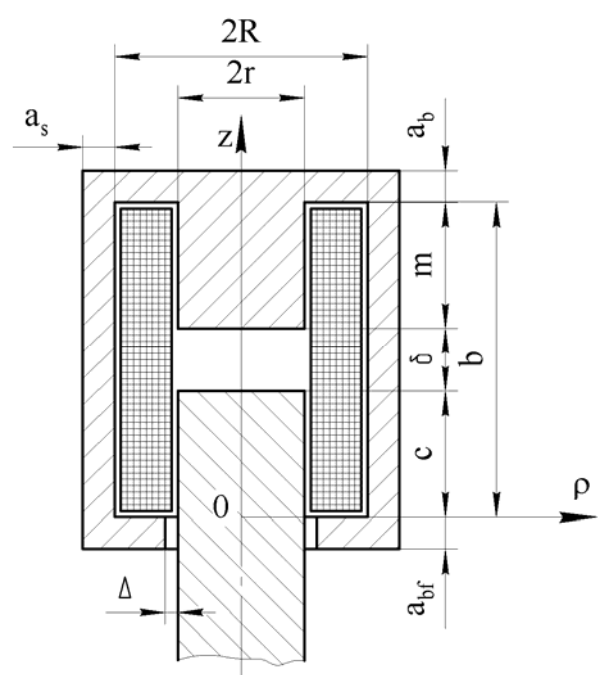


Рис. 1. Электромагнитная система броньового электромагнита

С этой целью в данной работе предложена методика расчета магнитной цепи рассматриваемого электромагнита, основанная на аналитическом расчете магнитного поля в его обмоточном окне, которая может быть легко применена для решения задач по определению геометрических размеров и электрических параметров, соответствующих некоторому критерию оптимальности при условии создания определенного тягового усилия.

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ В ОБМОТОЧНОМ ОКНЕ

В основу расчета положена методика, описанная в [1], согласно которой расчет магнитного поля в обмоточном окне осуществлен путем решения соответствующего уравнения Пуассона для векторного магнитного потенциала  $A(\rho, z)$  с традиционными для данной задачи допущениями (см., например, [2]).

Соответствующий результат для указанного векторного потенциала получается в виде бесконечного ряда, который, однако, быстро сходится

$$A(\rho, z) = \frac{\mu_0 \cdot F_0}{(R-r) \cdot b} \left( -\frac{1}{3} \cdot \rho^2 + \frac{1}{2} \cdot R \cdot \rho + \frac{a_2}{\rho} - \frac{2 \cdot b^2 \cdot (R-r)}{\pi^2 \cdot \delta} \right) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_n(\rho)}{n^2} \cdot \cos(k_n \cdot z) \cdot (\sin(k_n \cdot (c + \delta)) - \sin(k_n \cdot c)) \quad (1)$$

здесь

$$P_n(\rho) = \frac{[K_0(k_n \cdot R) \cdot I_1(k_n \cdot \rho) + I_0(k_n \cdot R) \cdot K_1(k_n \cdot \rho)]}{[K_0(k_n \cdot r) \cdot I_0(k_n \cdot R) - I_0(k_n \cdot r) \cdot K_0(k_n \cdot R)]},$$

где  $I_1, K_1, I_0, K_0$  – модифицированные функции

Бесселя;  $F_0$  – МДС обмотки и  $k_n = \frac{n \cdot \pi}{b}$ .

Выражение (1) было использовано для расчета магнитных потоков в обмоточном окне (рис. 1). С этой целью, исходя из определения векторного потенциала ( $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$ ) в нашем осесимметричном случае (плоско-меридианное магнитное поле) магнитный поток  $\Phi_{1,2}$  через любую поверхность между двумя круговыми контурами с радиусами  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , которые отстоят от начала координат на расстоянии, соответственно,  $z_1$  и  $z_2$ , было определено следующим образом

$$\Phi_{1,2} = 2 \cdot \pi \cdot [\rho_1 \cdot A(\rho_1, z_1) - \rho_2 \cdot A(\rho_2, z_2)]. \quad (2)$$

При этом, подставляя в (2) значения координат круговых контуров, соответствующих элементов поверхности обмоточного окна, были получены следующие выражения для потоков с этих элементов (рис. 1):

с боковой поверхности якоря

$$\Phi_c = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot [A(r, 0) - A(r, c)]; \quad (3)$$

на боковую поверхность стопа

$$\Phi_m = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot [A(r, b) - A(r, c + \delta)]; \quad (4)$$

с проходного фланца

$$\Phi_{b,f} = 2 \cdot \pi \cdot [R \cdot A(R, 0) - (r + \Delta) \cdot A(r + \Delta, 0)]; \quad (5)$$

на фланец

$$\Phi_f = 2 \cdot \pi \cdot [R \cdot A(R, b) - r \cdot A(r, b)]; \quad (6)$$

на внутреннюю поверхность магнитопровода (этот поток может быть представлен двумя составляющими  $\Phi_{s+}$  и  $\Phi_{s-}$  противоположных знаков, граница между которыми определяется точкой на внутренней поверхности магнитопровода с координатой  $z=M$ , где потенциал  $A(R, z)$  имеет минимум)

$$\Phi_{s+} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot [A(R, 0) - A(R, M)], \quad (7)$$

$$\Phi_{s-} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot [A(R, b) - A(R, M)]. \quad (8)$$

## ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ БРОНЕВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Приведенное определение магнитных потоков позволяет осуществить расчет магнитной цепи броневое электромагнита с учетом рабочего потока и потоков в обмоточном окне на основе использования одноконтурной схемы замещения с выделенными узловыми точками, в которых осуществляется подвод или отвод соответствующих потоков обмоточного окна (рис. 2).

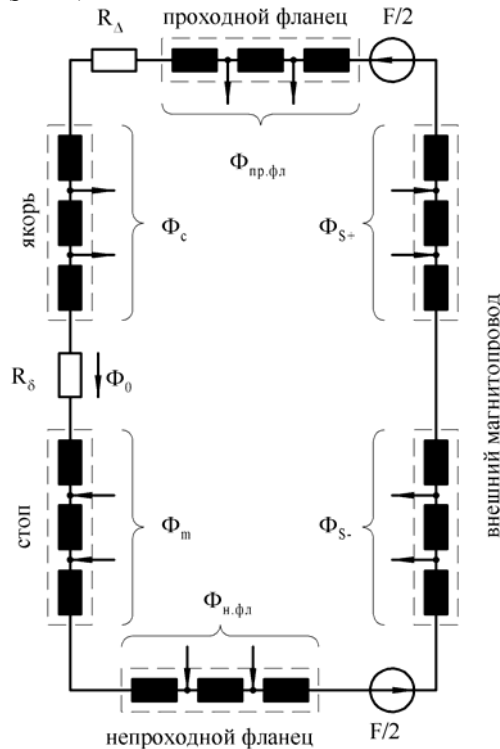


Рис. 2. Расчетная эквивалентная схема замещения броневое электромагнита

Каждый стальной конструктивный элемент броневое электромагнита разбивается на отдельные участки, в которых определяется магнитный поток индукция и напряженность магнитного поля. При этом задаются геометрические размеры элемента (длина и среднее поперечное сечение) и кривая намагниченности стали (представляется интерполяцией кубическими сплайнами). Катушка разбивается на две части и МДС каждой этой части (равная половине от полной МДС катушки намагничивания), представленная как эквивалентный источник, размещается между элементами схемы замещения как показано на рис. 2.

Кроме стальных участков в схеме замещения учтено наличие в рассматриваемой системе как рабочего зазора так и паразитного зазора между проходным фланцем и якорем. Для них магнитное сопротивление  $R_\delta$  и  $R_\Delta$  определялось с учетом того, что эти зазоры представляют собой простые геометрические фигуры, магнитная проводимость которых может быть легко определена методом Ротерса.

Для принятой одноконтурной схемы замещения математическая модель магнитной системы броневое электромагнита представляет собой систему уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа для

магнитных потоков в узловых точках, и одного уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа, для принятого контура (исккомым является магнитный поток через рабочий зазор  $\Phi_0$ , рис. 2). При составлении этих уравнений было учтено, что магнитные потоки через элементы схемы замещения представляют собой сумму потока  $\Phi_0$  и магнитного потока рассеивания, который для каждого элемента принимался с учетом подтекания или стекания магнитного потока, соответственно предложенной схеме замещения;

Расчет падения магнитодвижущей силы (МДС) на стальных участках осуществлен с учетом кривой намагничивания для материала магнитопровода. Для этого, на каждом шаге расчета, по известным магнитным потокам в каждом конструктивном элементе, разделенном на три участка, определялась напряженность магнитного поля в трех средних сечениях этих участков (по известной кривой намагничивания) и средняя по участкам напряженность поля (по формуле Симпсона), которая и принималась равной средней напряженности магнитного поля в выделенном конструктивном элементе. При этом падение МДС на элементах схемы замещения определялось как произведение указанной средней напряженности поля на длину элемента.

Решение системы уравнений математической модели броневое электромагнита, составленных по приведенной схеме замещения, осуществлялось методом половинного деления. Соответствующий алгоритм приведен на рис. 3. Целью расчета является определение падения МДС обмотки во всех элементах конструкции электромагнита, в том числе, и в рабочем зазоре при найденном значении потока  $\Phi_0$ .

Началом интервала отсечения корня для потока  $\Phi_0$  принято нулевое значение, а концом интервала – значение магнитного потока через рабочий зазор в случае отсутствия потоков рассеивания и отсутствия падения магнитного потенциала в железе магнитопровода

$$\Phi_0 = F_0 / (R_\delta + R_\Delta), \quad (9)$$

где  $F_0$  – МДС обмотки намагничивания,  $R_\delta$  и  $R_\Delta$  – магнитные сопротивления, соответственно, рабочего зазора и паразитного зазора (рис. 1, 2).

Каждый шаг алгоритма расчета схемы замещения (рис. 3) был составлен как последовательность операций:

- определения части МДС обмотки, приходящейся на рабочий зазор (обозначим ее как  $F_\delta$ );
- расчета потоков в обмоточном окне по (3)-(8);
- сравнения суммы падений МДС на всех участках схемы замещения (обозначим эту сумму как  $F_\Sigma$ ) с МДС обмотки возбуждения  $F_0$ .

Если при таком сравнении заданная точность совпадения суммы МДС  $F_\Sigma$  с МДС обмотки возбуждения  $F_0$  не достигалась, то осуществлялась корректировка значения потока  $\Phi_0$  по методу половинного деления. А именно (рис. 3): если  $F_\Sigma$  оказывается больше  $F_0$ , то значение потока  $\Phi_0$  на следующем

шаге вычислений уменьшается по методу половинного деления; если же  $F_\Sigma$  оказывается меньше  $F_0$ , то значение потока  $\Phi_0$  на следующем шаге вычислений увеличивается по методу половинного деления. При достижении заданной точности в указанном сравнении расчет магнитной цепи прекращается.



Рис. 3. Алгоритм расчета  $F_\delta$  по схеме замещения

Отметим, что на каждом шаге расчета схемы замещения по приведенному алгоритму магнитные потоки в обмоточном окне определяются по формулам (3)-(8) при значении МДС, равном значению падения магнитного потенциала на зазоре (обозначим это значение МДС как  $F_\delta$ ). То есть, в этом случае в формуле (1) вместо  $F_0$  следует подставлять  $F_\delta$ , что и было учтено при реализации рассматриваемого алгоритма.

Отметим также, что в общем случае любой участок магнитопровода может быть разбит на произвольное число элементов. Это не изменяет принципиально описанный алгоритм расчета предложенной одноконтурной схемы замещения рассматриваемого броневое электромагнита, но позволяет повысить точность соответствующих расчетов.

#### РАСЧЕТНОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ

В работе [3] авторами показано, что для ненасыщенной магнитной системы броневое электромагнита тяговое усилие на якорь может быть рассчитано по формуле

$$P = \frac{\pi}{2} \cdot F_0^2 \cdot \mu_0 \cdot \left(\frac{r}{\delta}\right)^2 + \frac{2}{\pi^2} \cdot \mu_0 \cdot F_0^2 \cdot r \cdot b \times \sum_{n=1}^{\infty} P_n(r) \cdot \left\{ \frac{1}{n^3} \cdot \frac{1}{\delta^2} \cdot [\sin(k_n \cdot c) - k_n \cdot c \cdot \cos(k_n \cdot c)] \times [\sin(k_n \cdot (b-m)) - \sin(k_n \cdot c)] + \frac{1}{n^3} \cdot \frac{k_n}{\delta} \cdot [k_n \cdot c \cdot \sin(k_n \cdot c) \cdot \sin(k_n \cdot (b-m)) + k_n \cdot c \cdot \cos(2 \cdot k_n \cdot c) - \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot k_n \cdot c)] \right\}, \quad (10)$$

где  $P_n(r)$  – функция  $P_n(\rho)$  при  $\rho = r$ .

Для расчета тягового усилия с учетом магнитного состояния стали магнитопровода предлагается использовать в формуле(10) вместо МДС обмотки ту часть МДС, которая приходится на рабочий зазор. То есть, для тягового усилия в рассматриваемом случае можно записать, на основе (10), выражение

$$P = F_{\delta}^2 \cdot \mu_0 \cdot \left[ \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{r}{\delta}\right)^2 + \frac{2 \cdot r \cdot b}{\pi^2} \times Q \right], \quad (11)$$

где через  $Q$  обозначена сумма в (10), а  $F_{\delta}$  – МДС обмотки, приходящаяся на зазор, численное значение которой следует находить по описанной выше методике, позволяющей учесть влияние на  $F_{\delta}$  не только паразитного зазора, как это сделано в [3], но и влияние магнитного состояния материала магнитопровода.

#### ПРОВЕРКА ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ

Для проверки приведенной математической модели был использован вычислительный эксперимент – компьютерный анализ магнитного поля на основе программы FEMM [4]. Вычислительный эксперимент осуществлялся для электромагнита системы зажигания автомобиля с параметрами (обозначения по рис.1):  $\delta = 2-10$  мм;  $r = 10$  мм;  $R = 20$  мм;  $b = 50$  мм;  $m = 20$  мм,  $\Delta = 0,3$  мм,  $a_{bf} = a_f = 4$  мм,  $a_s = 2$  мм,  $F_0 = 1500$  А (такое значение МДС обмотки обеспечивает насыщенное состояние материала магнитопровода со средней индукцией на малых зазорах  $\sim 1,5$  Тл); материал магнитопровода – сталь 3 (Кривая намагничивания бралась из [5]). При этом в ходе вычислительного эксперимента размер конечного элемента для расчета магнитного поля был выбран таким, что

при уменьшении его вдвое различие между результатами расчета составило менее 0.2 %.

Согласно данным проверки (таблица) можно утверждать, что погрешность определения тягового усилия по предлагаемой методике является удовлетворительной для инженерной практики.

Таблица

Падение МДС на рабочем зазоре и тяговое усилие электромагнита при МДС обмотки  $F_0 = 1500$  А

$\delta$	$F_{\delta}$ , А			$F$ , Н		
	FEMM	*	%	FEMM	По(11)	%
2	1170	1179	0,73	75,79	75,68	-0,15
4	1291	1303	0,92	26,16	25,93	-0,87
6	1338	1352	1,02	14,02	13,85	-1,21
8	1367	1382	1,09	9,07	8,94	-1,40
10	1388	1403	1,11	6,43	6,35	-1,34
12	1404	1419	1,09	4,81	4,74	-1,48
14	1417	1432	1,07	3,70	3,64	-1,60

\* расчет по предлагаемой методике

Отметим, что предлагаемая методика расчета тяговой усилия может служить основой для решения не только задач анализа, но и для решения задач синтеза броневых электромагнитов (разработка соответствующих методик может рассматриваться как перспектива дальнейшего развития предлагаемой методики).

#### ВЫВОД

Разработанный алгоритм расчета тягового усилия броневое электромагнита обладает простотой и достаточной точностью, которая позволяет применить его в инженерной практике для определения тяговой характеристики электромагнита по известной МДС обмотки с учетом магнитного состояния материала магнитопровода.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бранспиз Ю.А., Пшеничный А.Н. Расчет векторного потенциала в обмоточном окне осесимметричного электромагнита с несимметричным зазором // Вестник Восточноукраинского национального университета им. В. Даля.– 2002.– №8.– С. 34-41.
- [2] Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А. Расчет магнитного поля в обмоточном окне осесимметричного электромагнита // Изв. вузов. Электромеханика.– 1986.– № 7.– С. 19-28.
- [3] Бранспиз Ю.А., Пшеничный А.Н. Расчет тягового усилия броневое электромагнита с ненасыщенной магнитной системой // Технічна електродинаміка.– 2004.– Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки. Ч.2.– С. 71-74.
- [4] Meeker D. FEMM Version 3.31: User's manual.– 2005.– (<http://femm.berlios.de>)
- [5] Проектирование электрических машин.– В 2-х кн.: Кн.2 / И.П. Копылов, Б.В. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова.– М.: Энергоатомиздат, 1993.– 384 с.

Поступила 30.08.2005