

## КОРРЕКТИРУЮЩАЯ ФУНКЦИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ГРАДИЕНТА НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БАРАБАННОГО СЕПАРАТОРА

*Нестеренко И.А., асп.*

*Восточноукраинський національний університет ім. Володимира Даля, г. Луганск*

*кв. Молодежний, 20 А, 91034 г. Луганск, Украина*

*E-mail: nester@poisk.lg.ua*

На основании экспериментальных исследований, полученных на физической модели, уточнена формула для расчета градиента напряженности магнитного поля, которая имеет в своем составе аппроксимирующее выражение.

**Ключевые слова:** магнитная сепарация, напряженность, градиент напряженности магнитного поля.

**Введение.** При синтезе электромагнитных систем барабанных сепараторов исходной величиной служат произведение напряженности и градиента напряженности магнитного поля  $f_0 = H_0 \text{grad} H_0$  на заданном расстоянии от поверхности полюсов. Эта величина характеризует интенсивность магнитного поля.

**Анализ предыдущих исследований.** В работе [1, 2] изложен метод, позволяющий определить напряженность магнитного поля как функцию геометрических размеров электромагнитной системы, методом конформных отображений. Этот метод дает качественное распределение напряженности и градиента напряженности магнитного поля в рабочей зоне сепаратора.

$$H = \frac{H_\infty U_M}{Z} \quad (1)$$

$$H_\infty = \frac{X_2}{K(k) \sqrt{(M_1 + M_2)(M_3 + M_2)M_4}},$$

где  $K(k)$  - эллиптический интеграл с модулем  $\frac{1}{X_2}$ ;

$$M_1 = (4X_2(X_5 - X_4)^2 - X_2^2)^2;$$

$$M_2 = 64X_2^2 X_5^2 X_4^2;$$

$$M_3 = (4X_2^2(X_5^2 - X_4^2) - 1)^2;$$

$$M_4 = (2X_2 X_5 - 1)^2 + X_2^2 X_4^2.$$

Перечень геометрических размеров, влияющих на величину напряженности и градиента напряженности магнитного поля в рабочей области сепаратора, вычислим согласно уравнениям в критериальной форме:

$$X_1 = \frac{l}{q}; X_2 = \frac{z}{q}; X_8 = \frac{y}{z}; X_5 = \frac{x}{z}; X_6 = \frac{d}{q}.$$

где  $q_1 = Z - D_c$ .

Для уточнения этой закономерности применен метод физического моделирования. На физической модели, выполненной в масштабе 1:1 были получены экспериментальные данные напряженности магнитного поля в 125 точках модели. На основании обработки экспериментальных данных, аналитически полученная формула распределения напряженности магнитного поля, уточнена корректирующей

функцией. Корректирующая функция, полученная аппроксимацией экспериментальных данных физической модели, имеет вид:

$$k_0 = 1,8145 + 1,62938X_1 + 1,25258X_1^2 - 7,42276X_1X_8 - 1,575236X_8^2 + 8,20313X_1X_8^2 / ((1 + X_1)^2(0,948 + 0,0513X_2)) \quad (2)$$

Таким образом, для расчета напряженности магнитного поля, предложена формула, состоящая из двух сомножителей. Первый сомножитель есть аналитическое решение упрощенной задачи на основе метода конформных отображений (1), второй сомножитель есть корректирующая функция, которая уточняет аналитическое решение применительно к фактическим границам магнитного поля (2). Тогда приведенная напряженность магнитного поля определится из уравнения

$$H_0 = \frac{HZ}{U_M} = k_0 H_\infty. \quad (3)$$

При неточно заданной функции  $k_0$ , производная от напряженности магнитного поля дает значительные погрешности.

**Цель работы.** Введение корректирующей функции для расчета напряженности магнитного поля барабанного сепаратора.

**Материал и результаты исследования.** Корректирующая функция учитывает несоответствие при взятии производной от аппроксимирующей функции напряженности магнитного поля (3) и градиента напряженности, определенного по экспериментальным данным напряженности магнитного поля:

$$k_f = \text{grad}(H_3) / \text{grad}(H_0), \quad (4)$$

где  $\text{grad}H_3$  - градиент напряженности магнитного поля, полученный по экспериментальным данным;  $\text{grad}H_0$  - градиент напряженности магнитного поля, полученный дифференцированием формулы (3) напряженности магнитного поля, которая содержит неточно заданную функцию  $k_0$ .

$$H_0 = k_0 H_\infty, \quad (5)$$

где  $H_\infty$  - вычисляется по формулам (1).

Величина  $H_0 \text{grad}(H_0)$  определяется из следующих математических преобразований.

Из (1) при взятии производной по  $X_8$ , получим

$$\frac{dH_{\infty}}{dX_8} = -\frac{X_2}{4K(k)} \left( (R_1 + R_2)(R_3 + R_2) \right)^{-5/4} \times \left( \frac{d(R_1 + R_2)}{dX_8} (R_3 + R_2) + (R_1 + R_2) \frac{d(R_3 + R_2)}{dX_8} \right) \quad (6)$$

Из (5) при взятии производной по  $X_8$ , получим

$$\frac{dH_0}{dX_8} = k_0 \frac{dH_{\infty}}{dX_8} + H_{\infty} \frac{dk_0}{dX_8} \quad (7)$$

$$\frac{dk_0}{dX_8} = \frac{-7,42276X_1 - 3,15047X_8 + 16,40626X_1X_8}{(1 + X_1)^2(0,948 + 0,0513X_2)} \quad (8)$$

$$\frac{d(R_1 + R_2)}{dX_8} = -16X_2^2X_8(4X_2^2(X_5^2 - X_8^2) - X_2^2) + 128X_4^2X_5^2X_8 \quad (9)$$

$$\frac{d(R_3 + R_2)}{dX_8} = -16X_2^2X_8(4X_2^2(X_5^2 - X_8^2) - 1) + 128X_4^2X_5^2X_8 \quad (10)$$

Из уравнений(5 , 10), получим

$$H_0 \text{grad}(H_0) = H_0 k_f \frac{dH_0}{dX_8} \quad (11)$$

Таким образом, вычислив  $H_0 \text{grad}H_0$  по формуле (11), затем с использованием выражения

$$f = H \text{grad}(H) = \frac{(H_0 \text{grad}(H_0))U_1^2}{Z^3} \quad (12)$$

можно перейти к приведенной электромагнитной силе, которая задается в техническом задании на проектирование сепаратора.

В табл. 1 приведены результаты вычислений по формуле (4).

**Таблица 1 – Результаты вычислений**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X8	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
k <sub>f</sub>	2,998	4,005	5,1198	6,12	6,82	7,029	6,714	5,9997	5,1	4,213

**Таблица 2 – Расчетные данные**

X4	у, м	H <sub>p</sub> , кА/м	H <sub>э</sub> , кА/м	V <sub>p</sub> *E-4, Тл	V <sub>э</sub> *E-4, Тл	f <sub>p</sub> *E6, A <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	f <sub>э</sub> *E6, A <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>
0,05	0,0216	149,35352	146,75904	1875,88022	1843,2935	-222737,3147	239929,6143
0,1	0,0432	125,15179	123,80478	1571,90648	1554,98801	-179317,3925	169414,2733
0,15	0,0648	101,04089	100,41262	1269,07353	1261,18253	-113497,9422	108219,2347
0,2	0,0864	81,100831	80,904943	1018,62644	1016,16609	-66780,76105	66241,22713
0,25	0,108	65,614367	65,671399	824,116449	824,832768	-39754,87452	40758,64279
0,3	0,1296	53,766143	53,963371	675,30276	677,779936	-24902,10233	25744,55167
0,35	0,1512	44,678589	44,945096	561,163082	564,510411	-16573,48152	16803,57404
0,4	0,1728	37,649437	37,940516	472,876926	476,532883	-11560,95406	11343,10654
0,45	0,1944	32,157664	32,445219	403,90026	407,511954	-8182,238471	7909,412778
0,5	0,216	27,823641	28,090237	349,46493	352,813373	-5566,546013	5686,248312

Здесь использованы обозначения:

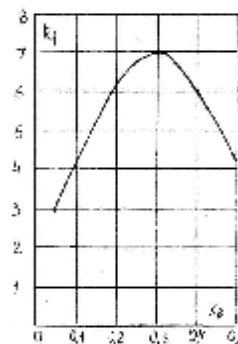


Рисунок 1 - Зависимость k<sub>f</sub> от X<sub>8</sub>

Аппроксимацию экспериментальных исследований проведем по известной своей эффективностью программе «Polinom» [3]. Эта программа позволяет определять коэффициенты многочлена вида

$$YP = a_{00} + \sum_{i=1}^N a_{0i} \cdot X_i + \sum_{i,j=1}^N a_{ij} \cdot X_i X_j, \quad (i < j) \quad (13)$$

методом наименьших квадратов с последующим вычислением среднеквадратичного отклонения

$$s = \sqrt{\frac{\sum (Y_i + YP)^2}{N - NK}} \quad (14)$$

Для того, чтобы после каждой проверки адекватности выбранной модели многочлена не вычислять критерий Фишера, программа предусматривает проверку адекватности вычислением вариационной ошибки по формуле:

$$v = \frac{s}{Y_{cp}}, \quad \text{где } Y_{cp} = \frac{\sum Y_i}{N} \quad (15)$$

$a$  – коэффициенты многочлена;  $NФ$  – количество факторов (критериев подобия);  $N$  – число опытов;  $NК$  – число коэффициентов многочлена;

$Y_i$  – экспериментальная величина искомой функции;  $YР$  – расчетная величина искомой функции, полученная вычислением по формуле (13);  $X_i, X_j$  – факторы (критерии геометрического подобия). Если вариационную ошибку выразить в процентах, то критерий Фишера будет выполняться, если вариационная ошибка будет меньше или равна ошибке эксперимента.

Учитывая частную зависимость  $k_f=f(X_8)$  (рис. 1) аппроксимирующее выражение для  $k_f=f(X_8)$ , будем искать в виде:

$$k_f = 1 + a_{01}X_8 + a_{11}X_8^2. \quad (16)$$

В результате расчетов найдены коэффициенты регрессии и, соответственно, найдено аппроксимирующее аналитическое выражения для точек над серединой зазора магнитной системы

$$k_f = 1 + 38,937X_8 - 65,374X_8^2. \quad (17)$$

Среднеквадратичное отклонение между экспериментальными и расчетными значениями составило  $s=0,1978$ , а вариационная ошибка по параметру составила  $var=0,00448$ , что следует считать удовлетворительным.

Проверка аппроксимирующего выражения на адекватность данным физического моделирования на исследованном диапазоне изменения переменных  $X_8$ , в итоге проводилась по известному критерию Фишера [3].

По разработанной математической модели была просчитана конструкция электромагнитного барабанного сепаратора ЭБМ 90/250А с масляным охлаждением обмоток и следующими техническими характеристиками: наружный диаметр барабана  $D=900\text{mm}$ , полюсное деление  $Z=432\text{mm}$ , воздушный зазор между соседними полюсными наконечниками  $q=130\text{mm}$ , диаметр сердечников катушек  $D_c=300\text{mm}$ , толщина наружной пластины полюсного наконечника  $d_1=32\text{mm}$ , толщина внутренней пластины полюсного наконечника  $d_2=16\text{mm}$ , диаметр ярма  $D_J=220\text{mm}$ , центральный угол полюсного наконечника  $\alpha=124^\circ$ , высота сердечника катушек  $h_c=370\text{mm}$ .

На рис. 2 обозначены: 1–полюсный наконечник блока, 2–сегмент, 3–сердечник, 4–намагничивающие катушки, 5–крайний полюс, 6–ярмо, 7–призма, 8–наконечник.

В табл. 2 приведены расчетные данные – расстояние от поверхности полюсных наконечников по середине воздушного зазора,  $H$  – напряженность магнитного поля,  $B$  – магнитная индукция,  $f = Hgrad(H)$  – приведенная электромагнитная сила, векторная величина, направленная в сторону возрастания градиента, о чем свидетельствует знак минус.

В табл. 2 также помещены экспериментальные данные, полученные на экспериментальном образце электромагнитного барабанного сепаратора ЭБМ 90/250А в тех же точках, что и расчетные. Экспери-

ментальные данные обрабатывались по специальной программе на компьютере с применением сглаживания экспериментальных данных и численного дифференцирования.

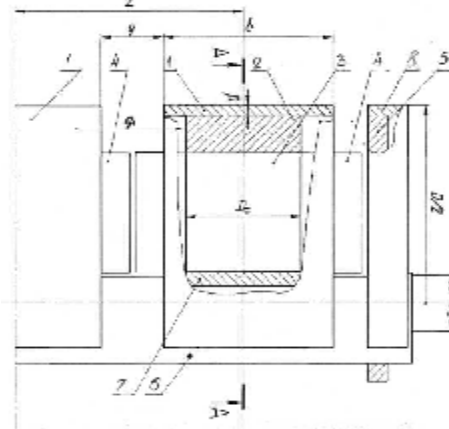


Рисунок 2 – Многополюсная П-образная электромагнитная система сепаратора ЭБМ 90/250А

Из сравнения расчетных  $H_p, f_p$  и экспериментальных  $H_э, f_э$  данных видно, что они достаточно хорошо совпадают, наибольшая погрешность по приведенной силе составляет 7,1%, по магнитной индукции составляет 1,76%, по напряженности магнитного поля 1,72%, что можно считать удовлетворительным для инженерных расчетов.

**Выводы.** Получены формулы для вычисления приведенной электромагнитной силы  $H_0grad(H_0)$  и корректирующая функция, учитывающая несоответствие производной от напряженности магнитного поля по аппроксимирующей формуле с градиентом от напряженности магнитного поля, полученного табличным дифференцированием экспериментальных данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нестеренко И.А., Нестеренко А.П., Серда Е.А. Аналитический расчёт напряжённости магнитного поля блока магнитной системы барабанного сепаратора// Вісник СНУ. –2008.–8.
2. Нестеренко И.А., Нестеренко А.П., Серда Е.А. Аналитический расчёт распределения напряжённости магнитного поля между крайним полюсом и половиной полюса блока магнитной системы барабанного сепаратора// Вісник СНУ.– 2008.– 8(126), ч.3.
3. Рафалес-Ламарка Э.Э., Солодовник П.С. Алгоритм для получения многофакторной корреляционной зависимости с проверкой значимости коэффициентов. Респ. межвед. сб. «Локомотивостроение».– М.: Высшая школа, 1975.– Вып. 7.– С.71-75.

Статья надійшла 14.03.2011 р.  
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.  
Некрасовим А.В.

## КОРИГУВАЛЬНА ФУНКЦІЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ГРАДІЄНТ НАПРУГИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ БАРАБАННОГО СЕПАРАТОРА

*Нестеренко І.А., асп.*

*Східноукраїнській національній університет ім. Володимира Даля, г. Луганск*

*квт. Молодіжний, 20 А, 91034, м. Луганськ*

*E-mail: [nester@poisk.lg.ua](mailto:nester@poisk.lg.ua)*

На підставі експериментальних досліджень, отриманих на фізичній моделі, уточнена формула для розрахунку градієнта напруженості магнітного поля, яка має у своєму складі апроксимуючий вираз.

**Ключові слова:** магнітна сепарація, напруженість, градієнт напруженості магнітного поля.

## CORRECTION FUNCTION FOR CALCULATION OF THE GRADIENT OF MAGNETIC FIELD DRUM SEPARATOR

*Nesterenko I., post-grad.*

*Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Lugansk*

*kvt.Molodezhny, 20 A, 91034, Lugansk*

*E-mail: [nester@poisk.lg.ua](mailto:nester@poisk.lg.ua)*

On the basis of experimental studies obtained on the physical model, the formula for calculating the gradient of the magnetic field, which has in its composition approximating expression, has been refined.

**Key words:** magnetic separation, tension gradient of magnetic field.