

УДК 621.318

РАСЧЕТ МАГНТНОЙ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗОТДЕЛИТЕЛЯ

Букреев В.В., к.т.н., доц., Яковенко В.В., д.т.н., проф., Якименко А.Е., асп. Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля 91034, г. Луганск, пр-т Молодежный, 20а E-mail: uni@snu.edu.ua

Розглянута методика розрахунку магнітної системи залізвіддільника на постійних магнітах, що базується на принципі взаємності К.М. Поливанова. Запропонована методика дозволяє визначити необхідні геометричні параметри полюсів для забезпечення заданої індукції магнітного поля в об'ємі контрольованого матеріалу, тобто здійснити синтез магнітної системи залізвіддільника.

Ключові слова: магнітна система, залізвіддільник.

Design procedure of permanent magnet iron separator magnetic system is examined, which is based upon reciprocity principle of K.M. Polivanov. The introduced procedure makes it possible to define required poles geometrical parameters to provide given magnetic field induction within tested material, that is to carry out iron separator magnetic system synthesis.

Key words: magnetic system, iron separator.

Введение. При извлечении магнитных частиц из потока пищевых продуктов и других подобных немагнитных веществ целесообразным является применение железоотделителей на постоянных магнитах. Поскольку ферромагнитные частицы в пищевых продуктах встречаются редко, то их удаление с полюсов железоотделителя можно производить вручную. Важным является определение необходимого объема постоянных магнитов и их геометрические параметров, при которых гарантируется извлечение ферромагнитных частиц из любой точки объема продуктов, находящихся под полюсами железоотделителя. Для этого необходима не только заданная интенсивность поля, но и определенная его топография.

Метод расчета среднего значения модуля вектора напряженности основан на использовании принципа взаимности К.М. Поливанова [1], адаптированного для рассматриваемой задачи. Адаптация принципа взаимности является дальнейшим развитием метода синтеза поля, изложенного в [2, 3]. Расчет предназначен для магнитных систем железоотделителей, состоящих только из постоянных магнитов критической группы.

Анализ предыдущих исследований. Определение необходимой величины напряженности поля в рабочей области железоотделителя. Пондеромоторная сила, действующая на извлекаемую частицу, может быть рассчитана по следующей формуле [4]:

$$F = \mu_0 \chi V H \text{grad} H,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; χ - магнитная восприимчивость частицы; H - модуль напряженности магнитного поля.

Согласно требованиям стандартов (ГОСТ 13602-79 "Железоотделители электромагнитные") критерием извлекающей способности железоотделителей

считается модуль напряженности магнитного поля на расстоянии 10 мм от рабочей поверхности полюса постоянного магнита, который должен составлять не менее 10^5 А/м, что вполне реально для феррит-бариевых магнитов, которые имеют постоянную по объему намагниченность равную $2,2 \cdot 10^5$ А/м. На расстоянии 0,1–0,2 м от полюса напряженность магнитного поля, индуцированного постоянным магнитом, уменьшается в 5–15 раз. Можно сказать, что средняя по глубине слоя немагнитного вещества напряженность магнитного поля должна составлять 25–35 кА/м.

Поскольку нормальная составляющая напряженности магнитного поля по мере удаления от плоскости постоянного магнита уменьшается как полином второй степени, можно считать градиент модуля напряженности поля мало зависящим от геометрии полюса и обеспечивать в рабочем объеме только величину среднего значения модуля вектора напряженности магнитного поля.

Математическая модель синтеза магнитной системы железоотделителя. Принцип взаимности К.М. Поливанова выражается соотношением [1]:

$$\Phi = \frac{\mu_0}{Iw} \int_{V_M} \vec{H} \cdot \vec{M} dV_M, \tag{1}$$

где Φ - магнитный поток, индуцированный постоянным магнитом в некоторой области пространства V ; I, w - ток и число витков катушки, которая создает в объеме постоянного магнита V_M напряженность магнитного поля \vec{H} .

Поскольку в магнитах критической группы вектор намагниченности постоянен по объему магнита, то можно считать, что поле постоянного магнита создается простым слоем магнитных зарядов, расположенных на поверхности постоянного магни-

та, и плотность этого слоя равна $\sigma = \mu_0 M_n$, где M_n - нормальная составляющая вектора намагниченности на активной плоскости постоянного магнита. Поэтому формулу (1) преобразуем следующим образом. Из соотношения

$$\operatorname{div}(\varphi \bar{M}) = \bar{M} \operatorname{grad} \varphi + \varphi \operatorname{div} \bar{M},$$

где φ - скалярная функция магнитного потенциала, так как в объеме постоянного магнита $\operatorname{div} \bar{M} = 0$, а $\bar{H} = -\operatorname{grad} \varphi$, получаем

$$\bar{H} \cdot \bar{M} = -\operatorname{div}(\varphi \bar{M}). \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) и используя формулу Остроградского-Гаусса, имеем:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{\mu_0}{I_w} \int_{V_M} \operatorname{div}(\varphi \bar{M}) dV = \frac{\mu_0}{I_w} \oint_{S_M} \varphi \cdot M_n dS = \\ &= \frac{\mu_0}{I_w} \oint_{S_M} \sigma \cdot M_n dS. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь S_M - площадь поверхности постоянного магнита; φ - функция скалярного магнитного потенциала на поверхности магнита; M_n - нормальная составляющая намагниченности на поверхности постоянного магнита.

Цель работы - разработка методики расчета магнитной системы железоотделителя на постоянных магнитах, позволяющей определять геометрические параметры полюсов при заданном значении модуля вектора напряженности в объеме контролируемого материала, то есть позволяющая производить синтез магнитной системы железоотделителя.

Материал и результаты исследования. Задача синтеза магнитной системы, создающей максимальное среднее значение напряженности поля, формулируется так, как это изложено в [2]. Требуется определить расположение в пространстве плоскости постоянного магнита, при котором среднее значение магнитной индукции в заданном объеме принимает максимальное значение. Постоянный магнит имеет две плоскости, на которых плотность зарядов имеет противоположные полярности (рис. 1, а). В объеме рассчитываемого поля выделяется виток с током i , радиусом a , который на расстоянии r от витка создает магнитный потенциал

$$\varphi = \frac{ia^2 \cos \Theta}{4\pi \cdot r_{PQ}^2}, \quad (4)$$

где Θ - угол между нормалью к плоскости витка и вектором \vec{r}_{PQ} .

Для применения формулы (4) на малых расстояниях от витка следует заменить поле витка полем диполей [5]. Применяя теорему Стокса:

$$\int_S \operatorname{rot} \vec{S} = \oint_i \vec{i} d\vec{l},$$

разобьем всю площадь витка (рис. 1, б)) на элементы, по контуру каждого из которых течет ток, равный току i и имеющий такое же направление. Таким образом поле витка можно получить суперпозицией

полей элементарных витков на любых малых расстояниях от него.

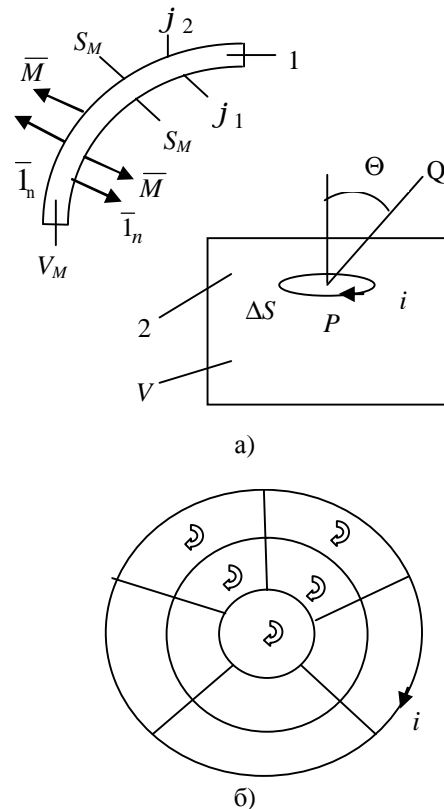


Рисунок 1 - К определению потенциала витка: 1 - постоянный магнит; 2 - объем, в котором создается магнитное поле заданной интенсивности

Представим область под постоянным магнитом, занятую немагнитным материалом, из которого извлекается ферромагнитная частица, катушкой прямоугольного сечения (рис. 2).

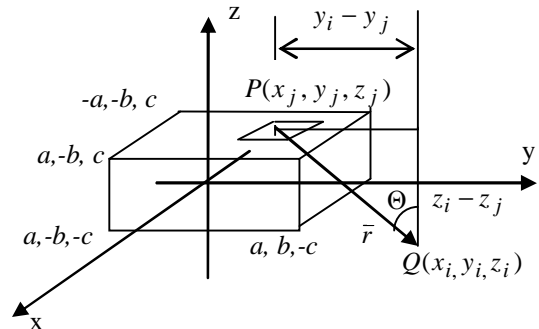


Рисунок 2 - Геометрическая модель рабочей области железоотделителя

Выделим внутри катушки фиктивный виток с размерами dx, dy, dz , площадью dS и током idz (здесь i - поверхностная плотность тока). На основании (4) потенциал в точке Q от элементарного витка с координатами x_j, y_j, z_j внутри объема катушки будет равен:

$$d\varphi = \frac{idz dS \cos \Theta}{4\pi r_{PQ}^3} = \frac{i(z_i - z_j) dx_j dy_j dz_j}{4\pi [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]^{3/2}} \quad (5)$$

Потенциал, созданный всей катушкой, равен:

$$\varphi = \frac{i}{4\pi} \int_{-c}^c \int_{-b}^b \int_{-a}^a \frac{(z_i - z_j) dx_j dy_j dz_j}{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]^{3/2}} = \frac{i}{4\pi} \left[\int_{-b}^b \frac{\ln(x_i + a) + \sqrt{(x_i + a)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i + c)^2}}{-b \ln(x_i - a) + \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i + c)^2}} dy_j - \int_{-b}^b \frac{\ln(x_i + a) + \sqrt{(x_i + a)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - c)^2}}{-b \ln(x_i - a) + \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - c)^2}} dy_j \right] \quad (6)$$

С учетом (3) и рис. 2 среднее значение напряженности в рабочей области железоотделителя определяется по следующей формуле:

$$H_{cp} = \frac{1}{Iw4ab} \oint_{S_M} \varphi \cdot M_n dS \quad (7)$$

Согласно (7) на заданном расстоянии от немагнитного вещества максимальное значение модуля напряженности будет тогда, когда активная поверхность постоянного магнита совпадает с эквипотенциальной поверхностью катушки. В этом случае значение напряженности магнитного поля может быть рассчитано по формуле:

$$H_{cp} = \frac{1}{Iw4ab} (\varphi_1 - \varphi_2) M_n \cdot S_M \quad (8)$$

Здесь S_M - площадь поверхности постоянного магнита; φ_1, φ_2 - значения потенциала на двух

противоположных поверхностях постоянного магнита.

Выводы.

1. Впервые разработана методика определения магнитной индукции в заданном объеме, основанная на применении принципа взаимности, который использует функцию магнитного скалярного потенциала и поверхностную плотность магнитных зарядов, что упрощает расчет магнитной системы.

2. Максимальная величина среднего значения магнитной индукции в рабочем объеме железоотделителя будет при совпадении активной плоскости постоянных магнитов с эквипотенциальной поверхностью катушки, занимающей объем рабочей области железоотделителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч. 3. – М.: Энергия, 1975. – 120 с.
2. Горская И.Ю. Синтез магнитной системы с постоянными магнитами, создающей максимальное среднее значение поля в заданном объеме // Электромеханика. – 2001. – №1. – С.21-24.
3. Стадник И.П., Горская И.Ю. Синтез магнитной системы с постоянными магнитами, создающей максимальное среднее значение поля на отрезке оси // Электромеханика. – 1994. – №4-5. – С.16-21.
4. Бранспиз Ю.А. Теория расчетов силового воздействия магнитного поля на магнетики. - Луганск: Изд-во ВУГУ, 1997. – 128 с.
5. Загороднюк В.Г., Востроилов Р.С. Расчет магнитных полей с большим воздушным зазором методом эквивалентных соленоидов // Электромеханика. – 1987. – №8. – С. 825-829.