

*И.А. НЕСТЕРЕНКО*, аспирант, ВНУ им. В. Даля, Луганск

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ БАРАБАННЫХ СЕПАРАТОРОВ**

Досліджено можливість цільового синтезу відкритих багатополосних електромагнітних систем барабаних сепараторів за критеріями оптимальності: мінімальна вага та мінімальна споживаєма потужність в усталеному тепловому режимі. Отримано рівняння що пов'язують функцію цілі і параметри електромагнітної системи.

Исследована возможность целевого синтеза открытых многополосных электромагнитных систем барабанных сепараторов по критериям оптимальности: минимальный вес активных материалов, минимальная потребляемая мощность в установленном тепловом режиме. Получены уравнения оптимальных связей функции цели и параметров электромагнитной системы.

**Введение.** Барабанные сепараторы предназначены для разделения зернистых и порошковых сильномагнитных материалов по магнитным свойствам. На рис. 1 изображена электромагнитная система барабанного сепаратора для мокрой сепарации. Электромагнитная система создает интенсивное магнитное поле в рабочей зоне сепаратора. Исходный материал содержит магнитную и не магнитную фракции, который транспортируется в рабочую зону сепаратора, и ней происходит разделение магнитной и немагнитной фракции. Магнитная фракция попадает в бункер для магнитной фракции, а немагнитная попадает в хвосты, которые уходят в отвал. Электромагнитная система барабанного сепаратора металлоемкая и состоит из магнитопровода и намагничивающих катушек. Магнитопровод изготавливают из ферромагнитной стали, катушки наматывают из медного или алюминиевого обмоточного провода. Эти материалы составляют основные затраты производителя при изготовлении барабанного сепаратора.

**Цель исследования.** Исследовать возможность на стадии проектирования электромагнитной системы барабанного сепаратора получение заданных технических характеристик при минимальном весе магнитопровода и катушек.

**Описание электромагнитной системы.** Электромагнитные системы с большим объемом рабочего магнитного поля получили назва-

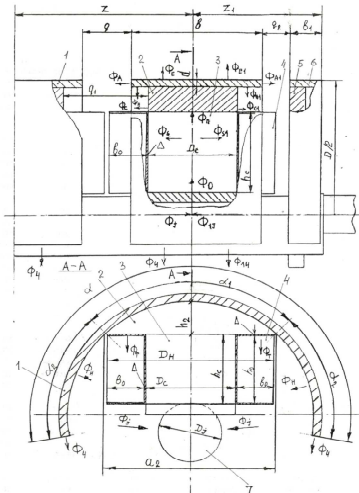


Рис. 1.

электромгнитной системы  $Z$ , которая расположена между двумя половинами полюсных наконечников и область крайнего полюса  $Z_1$ , которая расположена между половиной полюсного наконечника и наконечником крайнего полюса. На рис. 1 обозначены: 1 – полюсный наконечник блока; 2 – сектор сердечника; 3 – сердечник катушки; 4 – катушка; 5 – боковина крайнего полюса; 6 – полюсный наконечник крайнего полюса; 7 – ярмо.

Для реальной электромагнитной системы барабанного сепаратора можно составить систему независимых уравнений связи для намагничивающих сил (н. с.) [1], которая имеет вид

$$F = F_U + F_\theta + F_H + F_\Phi, \quad (1)$$

где  $F$  – н.с. одной катушки.

**Расчет электромагнитной системы.** Расчет удобно вести на один полюс из-за симметрии магнитной системы. Каждая н.с.  $F_U, F_\theta, F_H$  и  $F_\Phi$  определяется на основе анализа отдельных физических процессов, протекающих в электромагнитной системе. Найдем значения н.с.  $F_U, F_\theta, F_H$  и  $F_\Phi$  в расчете на один полюс, выраженные через ряд параметров магнитной системы.

Величина н.с.  $F_U$  определяется из анализа баланса напряжений на входе электромагнитной системы

ние открытых электромагнитных систем. При синтезе открытых электромагнитных систем исходными величинами служат: произведение напряженности и градиента напряженности магнитного поля  $f_0$  на заданном расстоянии от поверхности полюсов, минимально допустимая ширина  $Z$  и угол  $\alpha$  охвата рабочей зоны на одну пару полюсов, габаритный размер электромагнитной системы по диаметру  $D$  и длине  $L$ , напряжение питающей сети  $U$ . На рис. 1 изображен эскиз электромагнитной системы барабанного сепаратора и потокораспределение в локальных областях поля: область блока

$$F_U = \frac{US_{\Pi}}{\pi\rho_0(1+\alpha_T\theta)(D+b_0+\Delta)}, \quad (2)$$

где  $U$  – напряжение сети;  $S_{\Pi}$  – сечение голого провода;  $\rho_0$  – удельное сопротивление материала провода при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_T$  – температурный коэффициент сопротивления материала провода;  $\theta$  – температура перегрева обмотки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $D$  – диаметр сердечника;  $b_0$  – толщина обмотки;  $\Delta$  – суммарная толщина изоляции и каркаса катушки (рис. 1).

Величина н.с.  $F_{\theta}$  находится из анализа теплового баланса электромагнитной системы в установившемся тепловом режиме

$$F_{\theta} = \sqrt{\frac{2P_{\text{уд}}WS_{\Pi}(WS_{\Pi}+b_0^2k_3)}{\rho_0b_0k_3(1+\alpha_T\theta)}}, \quad (3)$$

где  $W$  – число витков катушки;  $k_3$  – коэффициент заполнения материалом провода окна намотки;  $P_{\text{уд}}$  – удельная мощность рассеяния с поверхности катушки в установившемся тепловом режиме, при температуре перегрева  $\theta$ .

Величина н.с.  $F_H$  определяется из анализа распределения произведения напряженности и градиента напряженности магнитного поля в рабочем воздушном пространстве между полюсами

$$F_H = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{f_0 Z^3}{f_0^*}} + \sum_{i=1}^m U_{\text{м.ци}} \right), \quad (4)$$

где  $Z$  – суммарная ширина полюсов и воздушного зазора (рис. 1);  $U_{\text{м.ци}}$  – падение магнитного напряжения на участке стали магнитной цепи. Здесь  $f_0$  и  $f_0^*$  находится из уравнений

$$f_0 = H\nabla H; \quad f_0^* = H \bullet \nabla H \bullet; \quad H \bullet = HZ/U_{\text{МБ}}; \quad f_0 = \frac{U^2}{Z^3} H \nabla H,$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля [8];  $\nabla$  – оператор Гамильтона;  $U_{\text{МБ}}$  – магнитное напряжение между полюсами.

Намагничивающая сила  $F_{\Phi}$  находится из анализа магнитной цепи рис. 1 и должна быть равна сумме падений магнитного напряжения в воздушном зазоре и стали

$$F_{\Phi} = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi D_C^2 B_{\text{ср}}}{4G_B} + \sum_{i=1}^m U_{\text{м.ци}} \right), \quad (5)$$

где  $B_{\text{ср}}$  – среднее значение магнитной индукции в сердечнике;  $G_{\text{в}}$  – магнитная проводимость воздушного промежутка блока электромагнитной системы в расчете на один полюс[7].

Полный расчет симметричной половины предполагает расчет области блока и расчет области крайнего полюса

На примере симметричной половины области блока электромагнитной системы (рис. 1) составим схему замещения (рис. 2), которая учитывает магнитное сопротивление стали магнитопровода и потоки рассеяния. На рис. 2 изображена схема замещения симметричной половины блока магнитной системы.

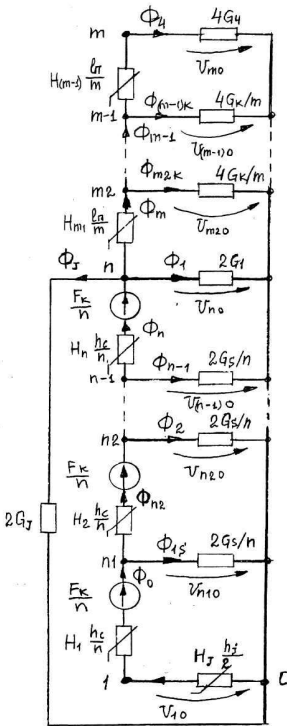


Рис. 2.

Сумма падений магнитного напряжения вдоль направления средней силовой линии магнитного потока (рис.2) определится из выражения

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m U_{\text{м.с}i} = \Phi_0 (R_J + R_{c1}) + 2 \sum_{i=2}^n \Phi_i R_{ci}, \quad (6)$$

где  $R_{c1}$ ,  $R_{ci}$ ,  $R_J$  – соответственно магнитные сопротивления сектора, участка сердечника и ярма, обтекаемого потоком  $\Phi_0$ . Для расчета магнитных сопротивлений используется усредненная кривая намагничивания, для ст. 3 [2] в диапазоне  $B = 0,5 - 2T$  :

$$H = A_1 \cdot B \cdot (A_2 + B^{A_3}), \quad (7)$$

где  $H$  и  $B$  – напряженность и индукция в стали, соответственно А/м и Тл;  $A_1 = 102, A_2 = 9,95, A_3 = 8$ . С учетом исходных данных и уравнения (7) решение системы уравнений (1) позволяет определить основные параметры магнитопровода и катушки  $D_C, D_J, h_0, b_0, W$ .

При оптимальном проектировании дополнительно вводится ряд экономических показателей (целевых функций)

$\mathcal{E}_*(p_i)$  и ограничений  $D_*(p_i)$  [1, 3], где  $p_i (i - \text{мерный вектор})$  – неоднородная совокупность, включающая геометрические параметры системы, обмоточные данные катушек, характеристики используемых материалов и др.

**Экономические показатели.** Наиболее важными экономическими показателями открытых электромагнитных систем являются объем, масса, стоимость активных материалов и потребляемая мощность в установившемся тепловом режиме.

В безразмерной форме экономические показатели запишутся в следующем виде [6]:

$$V_* = V/Z^3 = (V_0 + V_C)/Z^3; \quad (8)$$

$$m_* = m/\gamma Z^3 = (\gamma_0 V_0 / \gamma_C + V_C)/Z^3; \quad (9)$$

$$CT_* = CT / (\gamma_C \Pi_C Z^3) = (\gamma_0 V_0 \Pi_0 / (\gamma_C \Pi_C) + V_C)/Z^3; \quad (10)$$

$$P_* = P / (R_T \theta Z^2), \quad (11)$$

где  $V, m, CT, P$  – соответственно объем, масса, стоимость активных материалов и потребляемая мощность электромагнитной системой в установившемся тепловом режиме;  $\gamma_C, \gamma_0$  – плотность стали и материала провода;  $\Pi_C, \Pi_0$  – цена единицы массы стали и провода;  $R_T$  – коэффициент теплоотдачи;  $\theta$  – температура перегрева катушки в установившемся тепловом режиме;  $V_0, V_C$  – объемы материалов провода и стали.

В процессе расчетов могут возникнуть варианты электромагнитной системы, не представляющие практического интереса. Система количественных ограничений  $D_*(p_i)$  должна исключить из рассмотрения эти варианты расчетов.

Для проведения экстремальных исследований составляют исходную систему уравнений

$$\frac{d \mathcal{E}}{d p_i} = 0; \quad D_*(p_i) \in \langle \rangle p_i,$$

где  $\langle \rangle, =, \langle \rangle$  – система количественных ограничений в виде равенств и неравенств. Система количественных ограничений имеет вид:

$$\begin{aligned} B_{\text{ср}} \leq B_d; \quad (D_C - b) \leq q \leq (Z - D_C); \quad 3,2 < Z/q < 7; \\ h_C \leq h_{\text{ДОП}}; \quad 6 < l/q < 10; \\ 120^0 \leq \alpha \leq 206^0; \quad D/2 \leq h_C \leq \frac{D}{2} - h_2; \end{aligned} \quad (12)$$

$$(D - 2d)/2 > (2h_2 + 2d + h_C); \quad (2Z_1 + 2Z) \leq L,$$

где  $B_d$  – допустимая индукция в наиболее насыщенной части магнитопровода;  $q$  – воздушный зазор между полюсами;  $Z$  – межцентровое

расстояние между сердечниками;  $Z_1$  – ширина участка электромагнитной системы между сердечником и крайним полюсом;  $L$  – расчетный габаритный размер электромагнитной системы по длине.

Точное аналитическое решение задачи определения глобального экстремума целевой функции по уравнениям (8), (11) не представляется возможным, поэтому для поиска экстремума целесообразно применять

численные методы, например, метод деформируемого многогранника [3]. В отличие от [3] этот метод использовался с ограничениями в виде равенств и неравенств, что достигается дополнением программы блоком проверки переменного параметра на соответствие заданному диапазону и блоком присвоения конца или начала диапазона соответствующей переменной, если величина ее выходит за пределы диапазона после операций растяжения, сжатия, отражения и редукции.

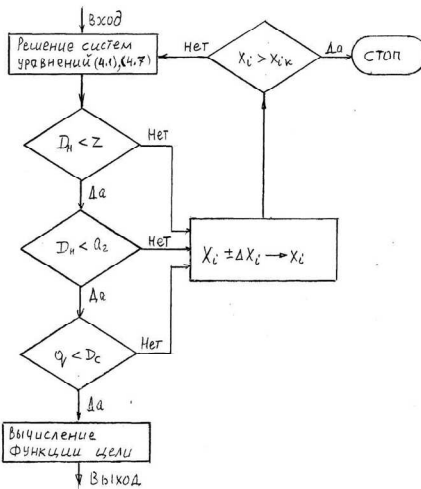


Рис. 3.

Переменные параметры варьируются в диапазонах:  $X_1 = l/q = 6 \div 10,21$ ;  $X_2 = Z/q = 3,2 \div 7$ ;  $X_4 = y/Z = 0,25$ .

Первоначально задавались значения начального симплекса  $X_{1(0)}$  [6;7,4;0;10,21];  $X_{2(0)}$  [3,2; 4,5;5;6];  $X_{4(0)}$  [0,25]. На рис.3 изображена блок-схема вычисления функции цели. Для каждой вершины начального симплекса вычисляется функция цели по блок-схеме рис. 3. Останов ЦВМ по команде "СТОП" при вычислении функции цели означает, что при заданных диапазонах переменных и исходных данных не существует варианта электромагнитной системы, имеющего практический интерес.

Исходные данные для электромагнитного барабанного сепаратора ЭБМ-80/170А:  $L_{\max} = 1,7$  м,  $f_0 = 10^3$  кА<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> [5],  $B_{cp} = 1,57$  Т,  $Z = 0,432$  м,  $d = 0,03$  м,  $D = 0,8$  м  $D_j = 0,18$  м. Для получения заданной загрузки магнитопровода, диаметр сердечника катушки варьировался в диапазоне  $D_C = 0,26 - 0,3$  м.

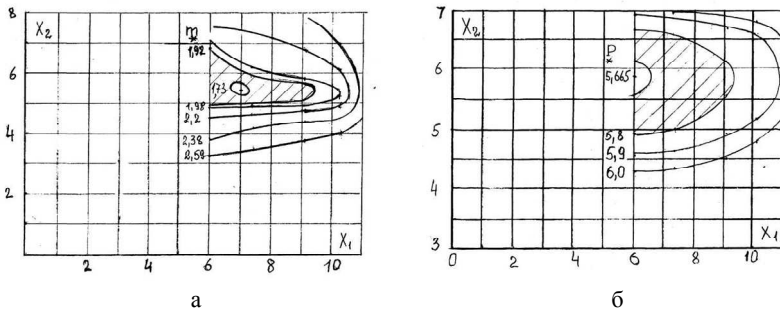


Рис.4.

Результаты расчетов на ЦВМ представлены на рис. 4,а,б в виде семейства изолиний целевых функций а –  $m = \text{const}$ , б –  $P = \text{const}$ . Квазиоптимальная область на рис. 4,а,б заштрихована.

Анализ результатов расчета показывает, что минимальные значения целевых функций  $P_{\min}^*$ ,  $m_{\min}^*$  существенно зависят от величин

$X_1 = l/q$ ,  $X_2 = Z/q$ . Наблюдаются частные экстремумы (минимумы) целевых функций по переменной  $X_2$ . Рост переменной  $X_1$  приводит к монотонному увеличению минимальных значений целевых функций. Экстремум по переменной  $X_2$  обусловлен тем, что при малых значениях  $X_2$  увеличивается воздушный зазор между полюсами, следовательно, увеличивается магнитное сопротивление воздушного зазора. Для поддержания заданного  $f_0 = H \text{ grad} H$  необходимо увеличить м.д.с. катушки,

а это приводит к увеличению массы и мощности катушки. При больших значениях  $X_2$  чрезмерно уменьшается воздушный зазор между полюсами, следовательно, потоки выпучивания чрезмерно уменьшаются и соответственно уменьшается величина  $f_0 = H \text{ grad} H$ . Для поддержания заданного  $f_0 = H \text{ grad} H$  необходимо увеличить м.д.с. катушки,

а это приводит к увеличению массы и мощности катушки. Таким образом, по  $X_2$  существует минимум по критериям оптимальности  $P_{\min}^*$ ,  $m_{\min}^*$  для всех исследованных  $X_1$  при значениях  $X_2 = 5,5-6,0$ . При минимизации массы активных материалов полученную зависимость

оптимальных значений  $m_*(X_2)$ , можно представить аппроксимирующей формулой

$$m_* = \sqrt[4]{X_1} (1,45X_2 - 0,3925X_2^2 + 0,030348X_2^3). \quad (13)$$

Из уравнения (13) найдем минимум целевой функции  $m_{* \min}$ . Для этого продифференцируем (13) по  $X_2$  и приравняем производную нулю, получим

$$\frac{m_*}{dX_2} = \sqrt[4]{X_1} (1,45 - 0,785X_2 + 0,091X_2^2) = 0. \quad (14)$$

Оптимальная величина  $X_2$  при минимизации целевой функции  $m_{* \min}$  для данного электромагнитного сепаратора ЭБМ-80/170А определится решением квадратного уравнения (14)  $X_2=5,94$ .

При минимизации мощности полученную зависимость оптимальных значений  $P_*(X_2)$ , можно представить аппроксимирующей формулой

$$P_* = 1 + 0,3593X_1 - 1,93382X_2 + 0,16815X_2^2. \quad (15)$$

Из уравнения (15) найдем минимум целевой функции  $P_{* \min}$ . Для этого продифференцируем (15) по  $X_2$  и приравняем производную нулю, получим

$$\frac{P_*}{dX_2} = -1,93382X_2 + 0,16815X_2 = 0. \quad (16)$$

Оптимальная величина  $X_2$  при минимизации целевой функции  $P_{* \min}$  для данного электромагнитного сепаратора ЭБМ-80/170А определится решением уравнения (16)  $X_2=5,75$ .

### **Выводы:**

1. Анализ результатов расчета показывает, что минимальные значения целевых функций  $P_{* \min}$ ,  $m_{* \min}$  существенно зависят от величин  $X_1=l/q$ ,  $X_2=Z/q$ . Наблюдаются частные экстремумы (минимумы) целевых функций по переменной  $X_2$ . Рост переменной  $X_1$  приводит к монотонному увеличению минимальных значений целевых функций.

2. Полученные оптимальные значения  $X_2$  при минимизации целе-



вых функций  $P_{* \min}$ ,  $m_{* \min}$  не противоречивы и находятся в диапазоне 5,5-6,0.

3. Учитывая, что затраты на активные материалы разовые, а затраты на электроэнергию эксплуатационные, то предпочтение следует отдавать функции цели  $P_{* \min}$ .

**Список литературы:** 1. *Любчик М.А.* Расчет и проектирование электромагнитов постоянного и переменного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 224 с. 2. *Панасенков М.А.* Электромагнитные расчеты устройств с нелинейными распределенными параметрами. – М.: Энергия, 1971. – 216 с. 3. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование. Пер. с англ. И.М. Быховской, Б.Т. Вавилова. Под редакцией М.Л. Быховского. – М.: Мир, 1975. – 535 с. 4. *Frey K.* Anwendungen der Konformen Abbildung auf praktische Probleme des Elektromaschinenbaues, 1925. 5. *Деркач В.Г., Колычев П.А.* Специальные методы обогащения полезных ископаемых. М.: Metallurgizdat, 1956. – 344 с. 6. *Буль Б.К., Карташян В.О., Нестеренко А.П.* Проектирование оптимальных электромагнитных систем подвесных железотделителей // Электротехника. – 1981. – №4. – С. 54-57. 7. *Нестеренко И.А., Нестеренко А.П.* Усовершенствование математической модели для расчета магнитной проводимости блока магнитной системы барабанного сепаратора // Вісник СНУ. – Луганск: СНУ. – 2008. – №7. – Ч. 1. 8. *Нестеренко И.А., Нестеренко А.П., Середа Е.А.* Аналитический расчет напряженности магнитного поля блока магнитной системы барабанного сепаратора // Вісник СНУ. – Луганск: СНУ. – 2008. – №8.



**Нестеренко Игорь Александрович**, 1963 года рождения, г Луганск.

В 1985 году закончил Луганский машиностроительный институт по специальности "Электрические машины и аппараты". Аспирант кафедры "Электромеханика" Восточнoукраинского национального университета

*Поступила в редколлегию 1.11.2010*