

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИОННОГО РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ПОДВЕСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ

В статье предложена методика оптимизации конструкций подвесных электромагнитных сепараторов по минимуму массы активных материалов, используемых для их изготовления. Методика оптимизации основывается на выводе уравнений взаимосвязи конструктивных параметров электромагнитных сепараторов на заданные технические условия. При разработке методики оптимизации использовано допущение о плоскопараллельном характере магнитного поля под полюсными наконечниками электромагнитного сепаратора, благодаря которому произведен вывод формулы для магнитной силы на середине межполюсного зазора. Исследовано влияние на максимум магнитной силы длины полюсных наконечников, межполюсного зазора и высоты подвеса электромагнитного сепаратора. На основе разработанной методики оптимизации построен алгоритм расчета оптимальных конструкций подвесных электромагнитных сепараторов.

Ключевые слова: магнитная сила, межполюсный зазор, полюсные наконечники, оптимизационные соотношения, минимум массы активных материалов.

Введение. Среди задач промышленного производства обеспечения отраслей народного хозяйства энергоэффективными и надежными машинами и оборудованием является разработка оптимальных конструкций подвесных электромагнитных сепараторов, предназначенных для извлечения ферромагнитных частиц из сыпучих материалов, транспортируемых ленточными конвейерами. Простота и удобство обслуживания электромагнитных сепараторов традиционных конструкций с П- и Ш-образным магнитопроводом, на стержнях которых расположены обмотки, питаемые постоянным током, обусловили их широкое применение на практике.

Однако вопросы снижения массогабаритных показателей электромагнитных сепараторов и электропотребления до сих пор остаются недостаточно изученными, о чем косвенно свидетельствует большое количество, опубликованных научных работ и патентов на изобретение за прошедшее время [1–8].

Постановка задачи. На стадии предварительного проектирования подвесных электромагнитных сепараторов с полюсными наконечниками (рис. 1) расчет трехмерного магнитного поля целесообразно заменить аналитическим расчетом плоскопараллельного магнитного поля двух бесконечных пластин шириной L , отстоящих друг от друга на расстоянии 2δ , имеющих разность магнитных потенциалов U_0 . На середине межполюсного зазора (рис. 2), вследствие симметрии магнитной системы электромагнитного сепаратора, напряженность маг-

нитного поля имеет одну горизонтальную составляющую [9, 10].

$$H = H_x(y) = \frac{U_0}{2K(k)} \cdot \frac{(L + \delta)}{\sqrt{\delta^2 + y^2} \cdot \sqrt{(L + \delta)^2 + y^2}}, \quad (1)$$

где y — расстояние по вертикали от плоскости полюсных наконечников до расчетной точки А, $K(k)$ — полный эллиптический интеграл первого рода с модулем $k = \frac{L}{L + \delta}$, аппроксимируемый выражением

$$K(k) = \sum_{n=0}^2 (1 - k^2)^n \left[a_n + b_n \ln \frac{1}{(1 - k^2)} \right]$$

$$\begin{aligned} a_0 &= 1,3862944 & a_1 &= 0,119723 & a_2 &= 0,0725296 \\ b_0 &= 0,5 & b_1 &= 0,1213478 & b_2 &= 0,0288729 \end{aligned}$$

$$S_1 = \sqrt{(L + \delta)^2 + y^2}$$

$$S_2 = \sqrt{\delta^2 + y^2}.$$

Пондеромоторная сила F_M , действующая на ферромагнитную частицу в неоднородном магнитном поле:

$$F_M = -gradP, \quad (2)$$

где $P = \int_V \frac{\mu_0 \chi_0 H^2}{2} dV$ — потенциальная энергия частицы, V — объем частицы, H — модуль напряжен-

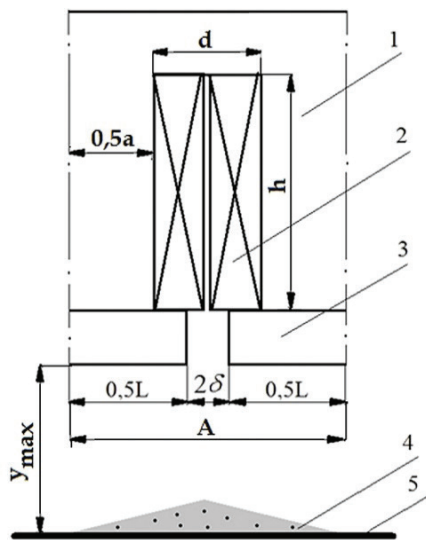


Рис. 1. Фрагмент конструкции подвешенного электромагнитного сепаратора: 1 — магнитопровод, 2 — обмотка намагничивания, 3 — полюсный наконечник, 4 — сыпучий материал с ферромагнитными частицами, 5 — лента конвейера

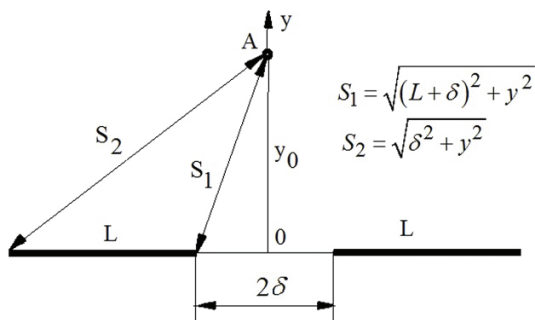


Рис. 2. Расчетная схема для определения напряженности магнитного поля в точке А на середине межполюсного зазора

ности магнитного поля, χ_0 — магнитная восприимчивость частицы, μ_0 — магнитная постоянная.

При малых размерах частицы в объеме V модуль напряженности магнитного поля H можно считать одинаковым. Тогда:

$$F'_M = -\mu_0 \chi_0 V H \text{grad} H. \quad (3)$$

Величина в выражении (3):

$$F'_M = H \text{grad} H \quad (4)$$

представляет собой магнитную силу, которая не зависит от формы, размеров и магнитной восприимчивости ферромагнитных частиц. Это обстоятельство позволяет на предварительной стадии проектирования электромагнитных сепараторов использовать магнитную силу для оценки качества их конструкций [11–13].

Вывод расчетных соотношений. Так как напряженность магнитного поля на середине межполюсного зазора электромагнитного сепаратора имеет одну составляющую, совпадающую с осью x , то

$$\text{grad} H = \frac{dH_x(y)}{dy} = \frac{dH(y)}{dy}. \quad (5)$$

Тогда с учетом выражения (1):

$$\frac{dH(y)}{dy} = \frac{U_0}{2K(k)} (L + \delta) \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{\sqrt{\delta^2 + y^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(L + \delta)^2 + y^2}} \right). \quad (6)$$

Вычислив производную в скобках по переменной y , получим:

$$\frac{dH(y)}{dy} = \frac{U_0}{2K(k)} (L + \delta) \times \left\{ \frac{1}{\sqrt{(L + \delta)^2 + y^2}} \left[-\frac{1}{2} (\delta^2 + y^2)^{-3/2} \cdot 2y \right] + \right. \\ \left. \times \left[\frac{1}{\sqrt{\delta^2 + y^2}} \left[-\frac{1}{2} [(L + \delta)^2 + y^2]^{-3/2} \cdot 2y \right] \right] \right\}. \quad (7)$$

Сгруппируем слагаемые и объединим скобки в выражении (7), тогда запишем:

$$\frac{dH(y)}{dy} = \frac{U_0}{2K(k)} (L + \delta) y \times \left\{ \frac{1}{\sqrt{(L + \delta)^2 + y^2} \cdot (\delta^2 + y^2)^{3/2}} + \frac{1}{\sqrt{\delta^2 + y^2} [(L + \delta)^2 + y^2]^{3/2}} \right\}. \quad (8)$$

Подставим выражение производной (8) в уравнение (4), после преобразований окончательно получим формулу для расчета магнитной силы:

$$F'_M = - \left[\frac{U_0}{2K(k)} \right]^2 (L + \delta)^2 y \frac{(L + \delta)^2 + 2y^2 + \delta^2}{(\delta^2 + y^2)^2 [(L + \delta)^2 + y^2]^2}. \quad (9)$$

Зависимость магнитной силы от квадрата магнитного напряжения между полюсными наконечниками U_0 является общим недостатком конструкций подвешенных электромагнитных сепараторов, поскольку снижение магнитного напряжения U_0 между полюсными наконечниками на 30 % ведет к уменьшению магнитной силы в 2 раза.

Для анализа зависимости магнитной силы F'_M от конструктивных параметров электромагнитных сепараторов используем две независимые переменные:

$$x_1 = \left(\frac{L + \delta}{y} \right)^2, \quad x_2 = \left(\frac{\delta}{y} \right)^2. \quad (10)$$

С учетом (10) выражение (9) принимает вид:

$$F'_M = - \left[\frac{U_0}{2K(k)} \right]^2 \cdot \frac{x_1}{y^3} \cdot \frac{x_1 + x_2 + 2}{(1 + x_1)^2 (1 + x_2)^2}. \quad (11)$$

Исследование зависимости магнитной силы $F'_M = F'_M(x_1, x_2)$ на экстремум при фиксированном значении расстояния y , отсчитываемого от плоскости полюсных наконечников до расчетной точки А, а также значения коэффициента $k = \frac{L}{L + \delta} = \text{const}$ позволяет определить критические точки решения системы уравнений:

$$\begin{cases} x_2 + 2 - x_1 x_2 = 0 \\ 3 + x_2 + 2x_1 = 0, \end{cases} \quad (12)$$

где E — модуль упругости стали, равный $2 \cdot 10^5$ МПа [13].

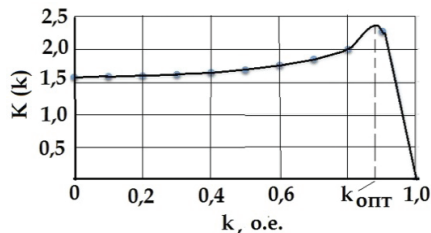


Рис. 3. Нахождение максимума зависимости $K(k)$

Площадь поперечного сечения из данного условия:

$$x'_1 = \left(\frac{L + \delta}{y}\right)^2 = \frac{1}{2}, \quad x'_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\delta}{L + \delta}\right)^2. \quad (13)$$

Для расчета значений критических точек по формулам (13) необходимо знание высоты подвеса электромагнитного сепаратора над лентой транспортера $y = y_{\max}$, которое обычно указывается техническими условиями на его проектирование. Однако также требуется знать оптимальное значение $k = k_{\text{опт}}$, при котором функция $K(k)$ достигает максимального значения. Из графика зависимости $K(k)$, показанной на рис. 3, значения $k_{\text{опт}} \approx 0,85$. С учетом $k_{\text{опт}} \approx 0,85$ расчет межполюсного зазора и длины полюсных наконечников не представляет затруднений. Например, при заданном значении $y_{\max} = 100$ мм,

$$L + \delta = y_{\max} / \sqrt{2} = 100 / \sqrt{2} = 71 \text{ мм},$$

$$L = k_{\text{опт}}(L + \delta) = 0,85 \cdot 71 \approx 60 \text{ мм}.$$

Примем во внимание, что

$$k_{\text{опт}} = 1 - \sqrt{\frac{x'_2}{x'_1}},$$

тогда найдем

$$x'_2 = x'_1(1 - k_{\text{опт}})^2 = \frac{(1 - 0,85)^2}{2} = 0,01125,$$

$$\delta = (L + \delta) \cdot \sqrt{2 \cdot x'_2} = 71\sqrt{2 \cdot 0,01125} \approx 11 \text{ мм}.$$

Из примера видно, что длина полюсных наконечников в конструкции электромагнитного сепаратора составляет 60 мм, межполюсный зазор — $2\delta = 22$ мм. При этом ширина активной зоны сепарации составляет $A = L + 2\delta = 82$ мм.

Для оптимизации по массе активных материалов, используемых для изготовления электромагнитного сепаратора, выделим в конструкции один из сегментов его магнитной системы (рис. 1). Масса активных материалов электромагнитного сепаратора: $m_{\text{ЭМ}} = N(m_m + m_{\text{см}})$, где N — число П-образных сегментов магнитопровода электромагнитного сепаратора; $m_m = 2S_{\text{кам}}(l + a + d)k_3\gamma_m$ — масса обмоточного провода, $m_{\text{см}} = S_c k_c \gamma_{\text{см}} \left(h + \frac{a + d}{2}\right)$ — масса стального магнитопровода, $S_{\text{кам}} = 0,5dh$ — площадь поперечного сечения катушки, $S_c = al$ — площадь поперечного сечения магнитопровода, l — толщина магнитопровода, k_3 — коэффициент заполнения по меди, k_c — коэффициент заполнения сечения сердечника

сталью, $\gamma_m = 8900 \text{ кг/м}^3$ — плотность меди, $\gamma_c = 7800 \text{ кг/м}^3$ — плотность стали.

Принимая в расчете $S_{\text{кам}} = \text{const}$ и $S_c = \text{const}$, выразим массу активных материалов электромагнитного сепаратора через две независимые переменные $n = \frac{d}{h}$ и $r = \frac{a}{l}$. Определение условий отыскания минимума массы активных материалов электромагнитного сепаратора предусматривает отыскание частных производных от функции $m_{\text{ЭМ}} = m_{\text{ЭМ}}(n, r)$ и составления системы уравнений относительно двух независимых переменных для определения критических точек:

$$n' = \frac{d}{h} = \frac{2}{1 + K} \quad \text{и} \quad r' = \frac{a}{l} = \frac{K}{1 + K}, \quad (14)$$

$$\text{где } K = \frac{4S_{\text{кам}} \cdot k_3 \cdot \gamma_m}{S_c \cdot k_c \cdot \gamma_c}.$$

Для расчета поперечных сечений $S_{\text{кам}}$ и S_c используются исходные данные для проектирования оптимальной конструкции электромагнитного сепаратора, к числу которых относятся допустимая плотность тока в сечении обмоточного провода и необходимое максимальное значение пондеромоторной частицы, действующей на ферромагнитную частицу на середине межполюсного зазора, удаленной от плоскости полюсных наконечников на расстоянии y_{\max} .

Выводы.

1. Разработана методика оптимизации магнитных систем подвесных электромагнитных сепараторов, базирующаяся на выведенных в работе критерийных соотношениях.

2. Областью применения разработанной методики является предварительная стадия проектирования оптимальных конструкций электромагнитных сепараторов, требующая проведения поверочных расчетов для уточнения их параметров на основе численного расчета трехмерного магнитного поля методом конечных элементов на ПК.

Библиографический список

1. Чарыков В. И., Копытин И. И. Электромагнитные деферризаторы: теория, расчет, конструкция: моногр. Курган: Изд-во КГУ, 2018. 150 с.
2. Чарыков В. И., Евдокимов А. А., Копытин И. И. Инновационные решения при конструировании электромагнитных сепараторов: моногр. Курган: Изд-во КГУ, 2015. 182 с. ISBN 978-5-4217-0319-8.
3. Мищенко А. С., Тишин А. М. Магнитные сепараторы — многообразие конструкций. URL: <http://www.amtc.ru/publications/articles/7752/> (дата обращения: 10.01.2020).
4. Пат. 2183997 Российская Федерация, МПК В 03 С 1/24. Электромагнитный сепаратор / Звегинцев А. Г. № 2000118502/03; заявл. 11.07.00; опубл. 27.06.02.
5. Пат. 2513946 Российская Федерация, МПК В 03 С 1/26. Электромагнитный сепаратор гравитационного действия / Зуев В. С., Чарыков В. И., Митюнин А. А., Евдокимов А. А., Копытин И. И. № 2012147154/03; заявл. 06.11.12; опубл. 20.04.14, Бюл. № 11.
6. Пат. 2516608 Российская Федерация, МПК В 03 С 1/04. Электромагнитный сепаратор / Зуев В. С., Чарыков В. И., Евдокимов А. А., Митюнин А. А., Копытин И. И. № 2012147153/03; заявл. 06.11.12; опубл. 20.05.14, Бюл. № 14.
7. Пат. 2203144 Российская Федерация, МПК В 03 С 1/14, В 03 С 1/16. Электромагнитный сепаратор / Якубайлик Э. К., Гришаев Д. В., Столбунов А. Е., Ганженко И. М. № 2001118699/03; заявл. 05.17.01; опубл. 27.04.03.

8. Пат. 2116838 Российская Федерация, МПК В 03 С 1/025, В 03 С 1/22. Магнитный сепаратор / Гугис А. Н. № 97101156/03; заявл. 28.01.97; опубл. 10.08.98.

9. Загирняк М. Ф., Бранспиз Ю. А. Приближенная формула напряженности магнитного поля над серединой зазора двухполюсного магнитного железотделителя // Известия вузов. Электромеханика. 1992. № 3. С. 62–65.

10. Татевосян А. С., Татевосян А. А., Захарова Т. В. [и др.]. Экспериментальное исследование и расчет магнитного поля электромагнита постоянного тока с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками в комплексе программ ELCUT // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 2. С. 133–140.

11. Сумцов В. Ф. Электромагнитные железотделители. М.: Машиностроение, 1978. 174 с.

12. Радченко А. В., Татевосян А. С. Расчет нестационарного магнитного поля подвешенного электромагнитного железотделителя с наборными полюсами и полюсными наконечниками при регулировании величины межполюсного зазора // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 3. С. 92–96. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-92-96.

13. Татевосян А. С. [и др.]. Исследование влияния конструктивных параметров исполнительных элементов на работу электроимпульсных устройств очистки // Актуальные вопросы энергетики: сб. тр. конф. Омск, 2018. С. 294–298.

КОЩУК Галина Андреевна, старший преподаватель кафедры «Теоретическая и общая электротехника». Адрес для переписки: galina_koshuk@mail.ru

НИКИТИН Константин Иванович, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

Адрес для переписки: nki@ngs.ru

ТАТЕВОСЯН Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 5995-1778

AuthorID (РИНЦ): 166166

Адрес для переписки: ast_51@mail.ru

ТЕРЕЩЕНКО Надежда Андреевна, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 4017-2286

AuthorID (РИНЦ): 947723.

Адрес для переписки: nadezhda.tereshchenko@mail.ru

Для цитирования

Кошук Г. А., Никитин К. И., Татевосян А. С., Терещенко Н. А. Методика оптимизационного расчета конструкций подвешенных электромагнитных сепараторов // Омский научный вестник. 2020. № 3 (171). С. 47–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-47-50.

Статья поступила в редакцию 16.04.2020 г.

© Г. А. Кошук, К. И. Никитин, А. С. Татевосян,
Н. А. Терещенко