

УДК 621.3.073

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ПОЛЮСАМИ И ПОЛЮСНЫМИ НАКОНЕЧНИКАМИ В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ ELCUT

Татевосян Александр Сергеевич,

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники Омского государственного технического университета, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. E-mail: karo1@mail.ru

Татевосян Андрей Александрович,

кандидат технических наук, доцент кафедры электрической техники Омского государственного технического университета, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. E-mail: karo1@mail.ru

Захарова Наталья Васильевна,

кандидат технических наук, доцент кафедры машиноведения Омского государственного технического университета, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. E-mail: nvzdm@mail.ru

Шелковников Сергей Васильевич,

магистрант кафедры теоретической и общей электротехники Омского государственного технического университета, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. serj85_85@inbox.ru

Шелковникова Юлия Васильевна,

бакалавр электромеханического факультета Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия Васильевского острова, д. 2. E-mail: shelk_07@list.ru

Актуальность исследований. Железоотделители на основе электромагнитов постоянного тока находят повсеместное применение во многих отраслях промышленности, например, на рудообогатительных фабриках, угольных теплоэлектростанциях, коксохимических заводах и т. д., для защиты оборудования от механических поломок, а также засорения конечного продукта посторонними предметами, причем сепарация основана на ферромагнитных свойствах этих предметов. Среди магнитных систем электромагнитов постоянного тока с полюсными наконечниками клапанная магнитная система является наиболее распространенной, а значит хорошо изученной, так как нашла широкое применение в приводах электромагнитных коммутационных аппаратов, устройствах автоматики и управления. Однако даже при синтезе такой магнитной системы электромагнита у разработчиков возникает проблема определения доли магнитного потока под полюсным наконечником в рабочем зазоре. Решение задачи ещё более осложняется при отсутствии в электромагните постоянного тока поворотного якоря, поскольку магнитное поле в межполюсном зазоре оказывается резко неоднородным, затухающим по мере удаления исследуемой точки от плоскости полюсов. Такое распределение магнитного поля имеет место в специальных электромагнитах постоянного тока – подвесных железоотделителях, которые используются для извлечения ферромагнитных предметов из различных сыпучих материалов, транспортируемых ленточными конвейерами.

Цель исследования. Рассмотреть комплексный подход к исследованию магнитного поля электромагнита постоянного тока с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками, характеризующийся изучением резкой неоднородности магнитного поля в межполюсном зазоре и за его пределами.

Методы исследования. Исследование проводилось с использованием разработанного лабораторного стенда электромагнита с применением программного обеспечения ELCUT 6.0. Подход основывается на сопоставлении результатов экспериментального исследования магнитного поля и магнитной силы для опытного образца электромагнитного железоотделителя с помощью цифрового миллитесламетра с датчиком Холла, численного расчета магнитного поля в комплексе программ ELCUT 6.0 и аналитического расчета напряженности магнитного поля.

Результаты исследования. Полученные результаты экспериментального исследования магнитного поля на опытном образце электромагнита с использованием цифрового миллитесламетра с датчиком Холла дополнены результатами аналитического и численного расчета магнитного поля, выполненного в комплексе программ ELCUT 6.0 (профессиональная версия). Надежность представленных результатов эксперимента и расчета подтверждается проверкой закона полного тока в замкнутом контуре. В ходе анализа затухания магнитного поля электромагнита на середине межполюсного зазора по мере удаления исследуемой точки от полюсных наконечников определено оптимальное расстояние между полюсными наконечниками, при котором удельная погонная сила магнитного поля достигает максимального значения.

Ключевые слова:

Электромагнит постоянного тока, межполюсный зазор, полюсные наконечники, расщепленные полюса, проверка закона полного тока, затухание магнитного поля, погонные силы.

Введение

Магнитная сепарация в ресурсосберегающих технологиях позволяет исключить попадание стальных примесей в машины и механизмы, выход их из рабочего состояния и снизить износ оборудования. Благодаря магнитной сепарации на предприятиях переработки растительного сырья уменьшается вероятность взрыва пылевоздушной смеси вследствие возникновения искры при попадании стальных включений в линию транспортировки [1].

На предварительной стадии проектирования железоотделителей наибольший интерес у разработчиков вызывает исследование магнитного поля для точек вертикали середины межполюсного зазора, где наиболее трудно извлечь ферромагнитные предметы вследствие максимальной толщины очищаемого слоя и минимального значения возникающей в неоднородном магнитном поле пондеромоторной силы [2]:

$$F_{\text{м.п.}} = -\text{grad}P, \quad (1)$$

где $P = \int_V \frac{\mu_0 \chi_0 H^2}{2} dV$ – потенциальная энергия на-

магниченной частицы; H – модуль напряженности магнитного поля; V – объем частицы; χ_0 – магнитная восприимчивость частицы; μ_0 – магнитная постоянная.

При малых размерах намагниченной частицы в объеме V модуль напряженности магнитного поля H можно считать одинаковым и выражение для пондеромоторной силы упрощается:

$$F_{\text{м.п.}} = -\mu_0 \chi_0 V H \text{grad}H. \quad (2)$$

Поскольку напряженность магнитного поля с увеличением расстояния от поверхности магнитной системы электромагнита уменьшается ($\text{grad}H < 0$), то положительное значение пондеромоторной силы означает, что под её действием ферромагнитные частицы будут перемещаться к полюсам. В выражении (2) величину

$$F_{\text{м}} = H \text{grad}H \quad (3)$$

принято называть магнитной силой, она не зависит от формы, размеров и природы извлекаемого тела, а характеризует только свойства магнитного поля и критерий качества разрабатываемой конструкции электромагнитного железоотделителя.

Аналитическое решение для расчета магнитного поля

Расчет магнитного поля на середине межполюсного зазора для подвешенного электромагнитного железоотделителя на предварительной стадии проектирования можно свести к аналитическому расчету плоскопараллельного магнитного поля двух бесконечных пластин шириной L , отстоящих друг от друга на расстоянии 2δ , имеющих разность магнитных потенциалов U_0 (рис. 1). На оси симметрии магнитной системы напряженность магнитного

поля имеет только горизонтальную составляющую [3], а именно:

$$H = H_x(y) = \frac{U_0}{2K(k)} \frac{(L + \delta)}{\sqrt{\delta^2 + y^2} \sqrt{(L + \delta)^2 + y^2}}, \quad (4)$$

где y – расстояние по вертикали от плоскости полюсов до расчетной точки А, в которой определяется напряженность магнитного поля; $K(k)$ – полный эллиптический интеграл первого рода с модулем k , аппроксимируемый выражением (с точностью до четвертого знака после запятой)

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

$$\text{модуль } k = \frac{L}{L + \delta},$$

$$a_0 = 1,3862944, \quad a_1 = 0,119723, \quad a_2 = 0,0725296;$$

$$b_0 = 0,5, \quad b_1 = 0,1213478, \quad b_2 = 0,0288729.$$

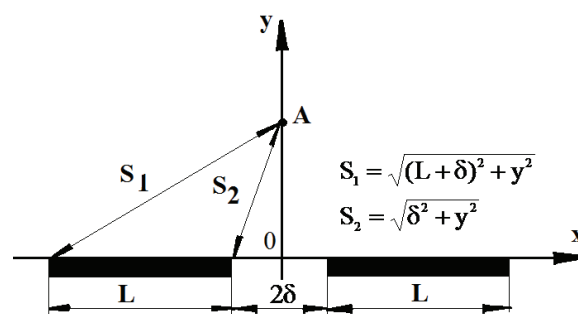


Рис. 1. Расчетная схема магнитной системы

Fig. 1. Structural diagram of magnetic system

Представленное аналитическое решение (3) для модуля напряженности магнитного поля на середине межполюсного зазора используется на стадии предварительных проектных расчетов электромагнитных железоотделителей. На этой стадии расчет распределения напряженности магнитного поля по всему межполюсному пространству и под полюсными наконечниками, как правило, не проводится, поскольку именно на середине межполюсного зазора труднее всего обеспечить извлечение ферромагнитных предметов вследствие максимальной толщины слоя очищаемого материала [3, 4].

Целью данной статьи является комплексный подход к исследованию магнитного поля подвешенного электромагнитного железоотделителя постоянного тока с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками. Подход основывается на сопоставлении результатов экспериментального исследования магнитного поля и магнитной силы $F_{\text{м}} = H \text{grad}H$ для опытного образца электромагнитного железоотделителя с помощью цифрового миллитесламетр-датчиком Холла [5], численного расчета магнитного поля (магнитостатическая задача) в комплексе программ Elcut 6.0 (профессиональная версия) и аналитического расчета напряженности магнитного поля с использованием выражения (3).

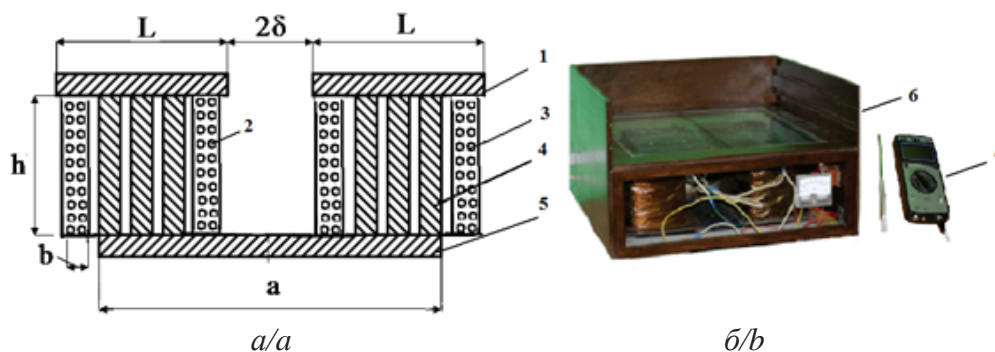


Рис. 2. Эскиз (а) и внешний вид (б) магнитной системы электромагнита постоянного тока: 1 – полюсные наконечники; 2, 3 – обмотка, состоящая из двух идентичных катушек; 4 – расщепленные полюса; 5 – ярмо; 6 – лабораторный стенд; 7 – цифровой миллитесламетр ТПУ-03, снабженный датчиком Холла

Fig. 2. Sketch (a) and appearance (b) of magnetic system of DC electromagnet: 1 is the pole pieces; 2, 3 is the winding consisting of two identical coils; 4 are the split poles; 5 is the yoke; 6 is the laboratory stand; 7 is the digital milliteslametr TPU-3 equipped with the Hall sensor

Описание лабораторного стенда

Экспериментальная часть исследования магнитного поля выполнена на опытном образце электромагнита. Эскиз электромагнита и внешний вид лабораторного стенда показаны на рис. 2.

Электрическая схема лабораторного стенда показана на рис. 3. Опытный образец электромагнита имеет полное число витков обмотки $w=1100$. Ток обмотки $I=2,1$ А. Магнитопровод выполнен из листовой горячекатаной стали марки Ст. 20: ярмо сердечника размером $376 \times 140 \times 20$ мм, шесть наборных полюсов размерами $20 \times 140 \times 140$ мм, два полюсных наконечника размерами $160 \times 140 \times 20$ мм. Толщина катушки – 20 мм, высота катушки – 140 мм, зазор между наборными полюсами – 20 мм, толщина стенок каркаса катушек – 5 мм.

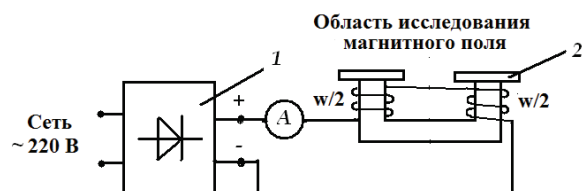


Рис. 3. Электрическая схема лабораторной установки: 1 – выпрямитель; 2 – электромагнит постоянного тока с двумя полюсными наконечниками

Fig. 3. Electrical circuit of the laboratory device: 1 is the rectifier; 2 is the DC electromagnet with two pole pieces

Исследование магнитного поля в программном обеспечении Elcut 6.0

Расчетная часть исследования магнитного поля численным методом построена на решении задачи линейной магнитостатики в комплексе программ Elcut 6.0 (профессиональная версия) [6–8]. В задаче магнитное поле принимается плоскопараллельным (векторы \vec{B} и \vec{H} лежат в плоскости xy , зависят от координат x и y и не зависят от координаты z). Вектор плотности тока $\vec{J}=J_z$ имеет одну составляющую, направленную вдоль оси z . В декартовой системе координат магнитное поле электро-

магнита в кусочно-однородных средах описывается с помощью уравнения Лапласа–Пуассона относительно векторного магнитного потенциала $\vec{A}=A_z$ [9–12]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu'} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu'} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\mu_0 J_z. \quad (5)$$

Площадь области моделирования с учетом кусочно-однородных сред с различными магнитными проницаемостями (сталь, обмотка с током, воздух) составляет 50×300 мм².

На внешней границе области принимается условие, что векторный магнитный потенциал $A_z=0$, относительная магнитная проницаемость стали $\mu'=2000$, относительная магнитная проницаемость воздуха и обмоточного медного провода $\mu'=1$. Геометрия модели электромагнита задана размерами: $a=376$ мм, $h=140$ мм, $L=170$ мм, $2\delta=36$ мм, $b=20$ мм (рис. 2). Область модели покрывается сеткой конечных элементов (из более 124 тысяч узлов, с шагом дискретизации 1 мм).

Проверка численного расчета картины магнитного поля электромагнита в пакете Elcut 6.0 по закону полного тока для произвольного контура показала, что при заданном шаге дискретизации ошибка расчета не превышает одного процента [13–16].

По рассчитанной картине магнитного поля электромагнита можно определить изменение вектора напряженности магнитного поля и его составляющих в любом заданном направлении, например по стрелке l (рис. 4). Из графика видно, что интенсивность магнитного поля на середине межполюсного зазора, то есть способность его производить работу, оказывается значительно больше, чем под полюсными наконечниками.

Результаты исследования

Сопоставление результатов эксперимента и расчета распределения напряженности магнитного поля на середине межполюсного зазора по оси y показано на рис. 5 [17–20].

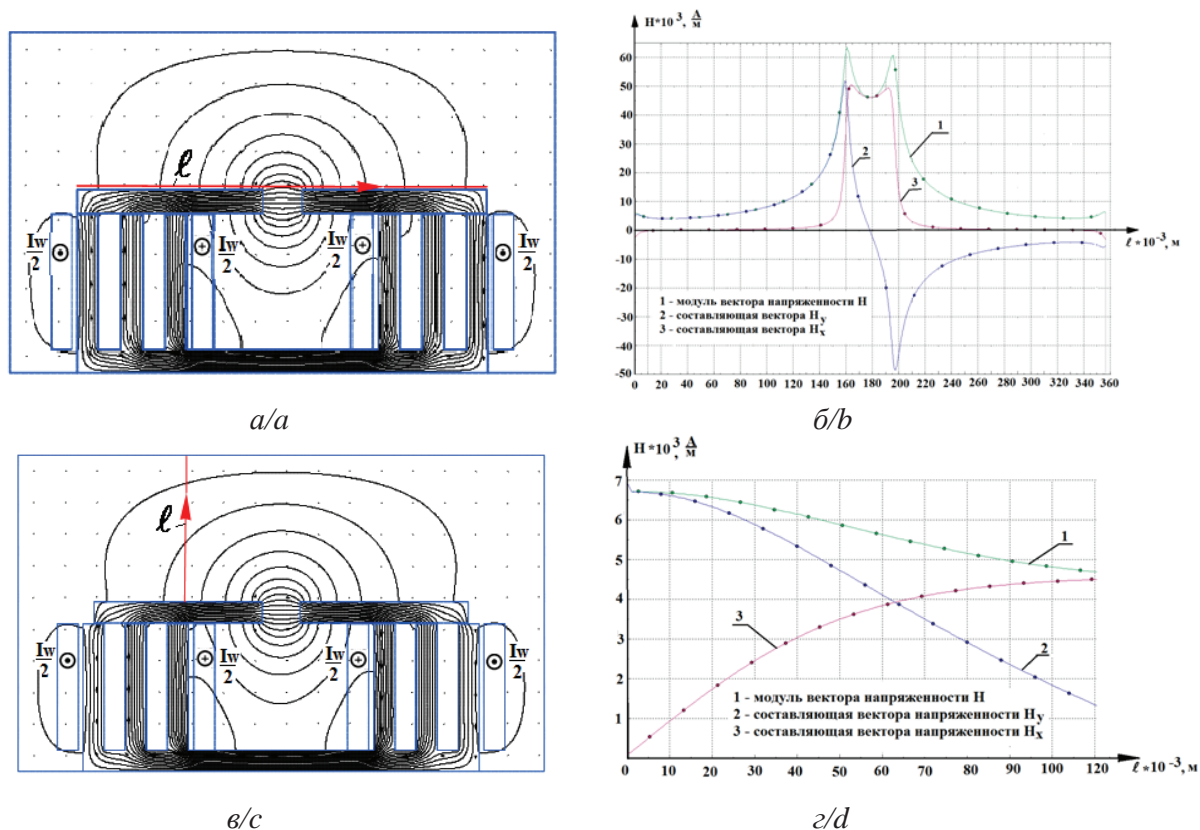


Рис. 4. Картина магнитного поля (а, в) и распределение модуля и составляющих вектора напряженности поля (б, г) вдоль прямой l

Fig. 4. Pattern of magnetic field (a, c) and distribution of module and components of the field vector (b, d) along a straight line

Экспериментальные значения напряженности магнитного поля в расчетных точках определялись по значениям магнитной индукции, измерен-

ным миллитесламетром по формуле $H=B/\mu_0$ [21–23]. На графике (рис. 5) наблюдается хорошее сближение экспериментальной кривой 1 с расчет-

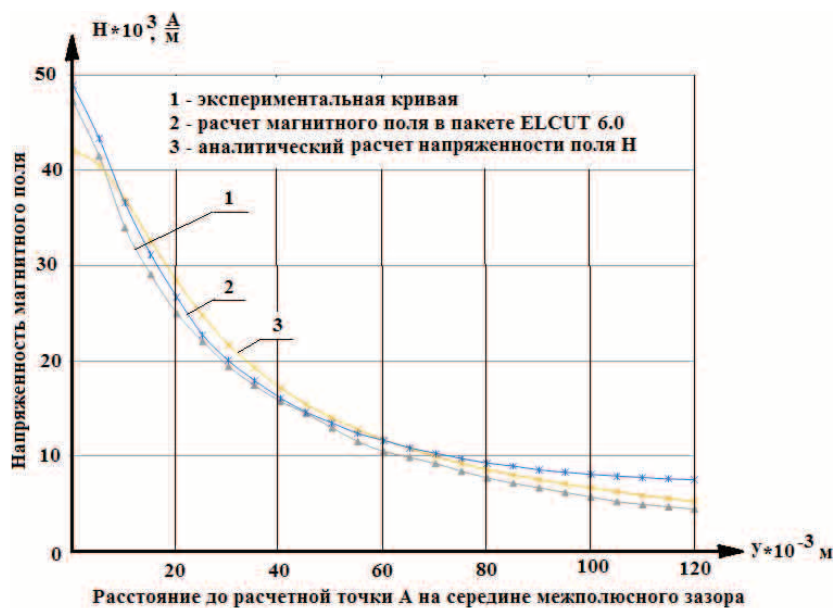


Рис. 5. Комплексный подход к исследованию магнитного поля на середине межполюсного зазора вдоль оси y

Fig. 5. Integrated approach to the research of the magnetic field in the middle of the pole gap along the axis y

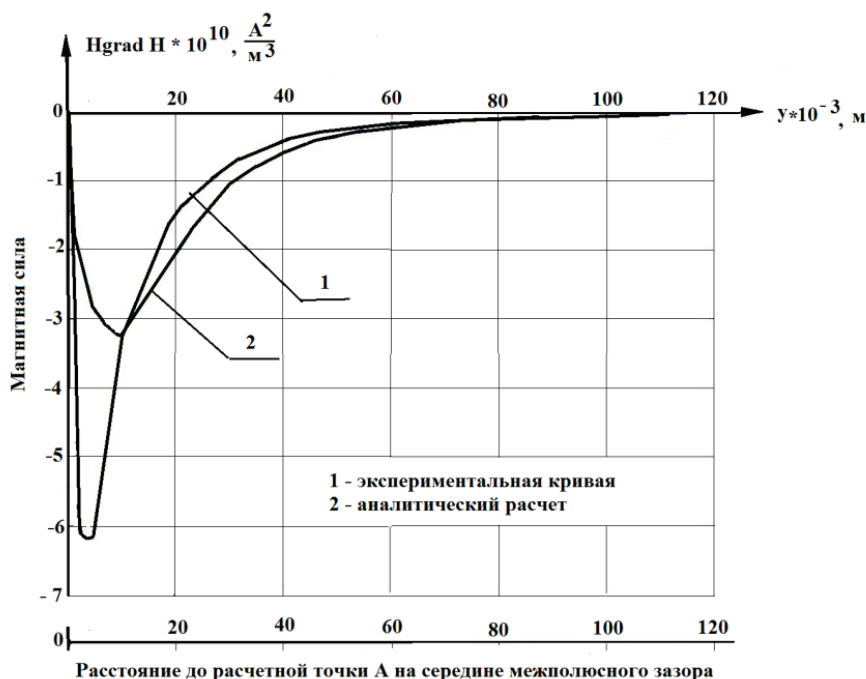


Рис. 6. Магнитная сила электромагнита в области резкой неоднородности магнитного поля

Fig. 6. Magnetic force of the electromagnet in the magnetic field sharp inhomogeneity range

ной кривой 2, построенной с использованием пакета Elcut 6.0, особенно в области, где магнитное поле имеет резкую неоднородность. Аналитический метод расчета напряженности магнитного поля (кривая 3) в этой области имеет большее расхождение с экспериментом.

Для выяснения влияния этого расхождения на магнитную силу электромагнита аппроксимируем кривые 1 и 3, заданные таблично, кубическим сплайном в пакете Matlab [24, 25]. Для кубического сплайна функций используем процедуру вычисления магнитной силы по формуле (3). Результаты расчета магнитной силы электромагнита на середине межполюсного зазора по оси у показаны на рис. 6.

Анализ построенных кривых на рисунке показывает, что в области резкой неоднородности магнитного поля магнитная сила электромагнита достигает максимума. Причем экспериментальная и расчетная кривые в этой области существенно расходятся между собой, что свидетельствует о возможности использования аналитического метода на предварительной стадии проектирования электромагнита. При выполнении оптимизационных расчетов его конструкции необходимо основываться на результатах численного расчета магнитного поля, выполненного с помощью пакета Elcut 6.0 (профессиональная версия).

С увеличением расстояния от поверхности магнитной системы электромагнита напряженность магнитного поля (также магнитная индукция) затухает по экспоненте, однако этот закон в области резкой неоднородности магнитного поля на середине межполюсного зазора, где магнитная сила до-

стигает максимального значения, не выполняется. Экспериментальная кривая магнитной индукции вдоль оси у и экспоненциальный тренд функции, построенный в пакете Excel [24], в этой области существенно отличаются.

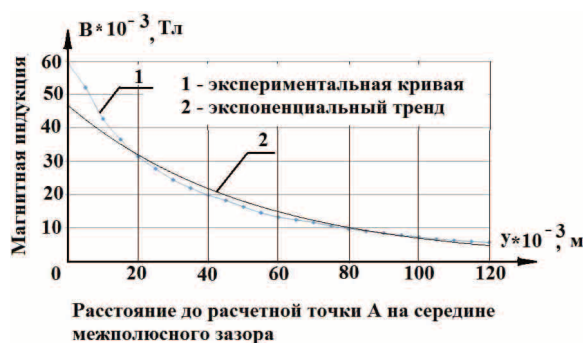


Рис. 7. Затухание магнитной индукции с увеличением расстояния от поверхности магнитной системы

Fig. 7. Attenuation of magnetic induction with increase of distance from magnetic system surface

Выводы

1. Экспериментальным и расчетным путем на основе исследования магнитного поля электромагнита с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками показано, что в области межполюсного зазора с резкой неоднородностью магнитного поля наблюдается максимум магнитной силы.
2. Численная модель магнитного поля электромагнита, построенная в пакете Elcut 6.0 (профессиональная версия), наиболее точно описы-

вает распределение магнитного поля в межполюсном зазоре и под полюсными наконечниками. В области с резкой неоднородностью затухание магнитного поля происходит не по экспоненциальному закону.

3. Задача оптимального проектирования электромагнита с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками может быть решена на

основе численного расчета магнитного поля с помощью пакета Elcut 6.0 (профессиональная версия). Критерием оптимальности конструкции магнитной системы может служить максимум магнитной силы на середине межполюсного зазора путем варьирования параметра $k=L/\delta$ при прочих неизменных условиях, включая постоянство ампер-витков обмотки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мищенко А.С., Тишин А.М. Магнитные сепараторы – многообразие конструкций. URL: <http://www.amtc.ru/publications/articles/2053> (дата обращения: 05.01.2016).
2. Сумцов В.Ф. Электромагнитные железоотделители. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
3. Загирняк М.Ф., Бранспиз Ю.А. Приближенная формула напряженности магнитного поля над серединой зазора двухполюсного магнитного железоотделителя // Изв. вузов. Электромеханика. – 1992. – № 3. – С. 62–65.
4. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов: руководство пользователя. Версия 6.0. – ПК TOP; СПб., 1989–2013. URL: <http://www.exponenta.ru/soft/others/elcut/Manual.pdf> (дата обращения: 05.01.2016).
5. Сытник А.А., Ключка К.Н., Протасов С.Ю. Применение интегральных динамических моделей при решении задачи идентификации параметров электрических цепей // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 103–106.
6. Дьяконов В.П., Пеньков А.А. MATLAB и SIMULINK в электроэнергетике. – М.: Изд-во «Горячая линия – телеком», 2009. – 816 с.
7. Злыгостева Г.В., Муравьев С.В. Обобщенная модель процедуры испытаний измерительного программного обеспечения // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 62–67.
8. Ran Wang, Shuaihua Nie, Jianhua Zhao, Yang Ji. Measuring magnetic anisotropy with a rotatable AC electromagnet // Measurement. – 2016, February. – V. 79. – P. 15–19.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Гардарики, 2001. – 317 с.
10. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Calculation of magnetic system of the magnetoelectric machines // Proc. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics. – Omsk, 11–13 November 2014. – P. 299–302.
11. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. The study of magnetic characteristics of amorphous alloys at various frequencies and ranges of magnetic flux // Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015. – Omsk, 21–23 May 2015. – P. 1250–1254.
12. Tatevosyan A.A., Fokina V.V. The study of the electromagnetic field of the synchronous magnetoelectric generator // Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Omsk, 21–23 May 2015. – P. 1336–1340.
13. Ишков А.С., Литвинов Л.Н. Измерительно-вычислительный комплекс для исследования магнитных характеристик электротехнической стали // Датчики и системы. – 2006. – № 4. – С. 14–17.
14. Татевосян А.А., Татевосян А.С. Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения. // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 121–132.
15. Pironneau M.O. Optimum design with Lagrangian finite elements: Design of an electromagnet // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1978, September. – V. 15. – Iss. 3. – P. 277–308.
16. Anderson Ph. A universal DC characterisation system for hard and soft magnetic materials // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2008, October. – V. 320. – Iss. 20. – P. e589–e593.
17. Zaharova N.V. Improvement of magnetic system of the speed sensor in the devices of the impact parameters control // Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015. – Omsk, 21–23 May 2015. – P. 482–486.
18. Anisotropy field distribution in soft magnetic Hitperm alloys submitted to different field annealing processes / J.S. Blázquez, J. Marcin, F. Andrejka, V. Franco, A. Conde, I. Skorvanek // Journal of Alloys and Compounds. – 2016, 15 February. – V. 658. – P. 367–371.
19. Fernanda A. Sampaio da Silva, Castro N.A., de Campos M.F. Modeling hysteresis curves of anisotropic SmCoFeCuZr magnets // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2013, February. – V. 328. – P. 53–57.
20. Макенова Н.А., Канев Ф.Ю., Носов Г.В. Построение компьютерных моделей по курсу ТОЭ в различных системах программирования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 312. – № 4. – С. 103–108.
21. Research on anisotropic bonded Nd–Fe–B magnets by 2-step compaction process / Bin Ma, Aizhi Sun, Zhenwen Lu, Chuan Cheng, Chen Xu // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016, 1 March. – V. 401. – P. 802–805.
22. Бахвалов Ю.А., Горбатенко Н.И., Гречихин В.В. Метод решения обратных задач магнитных измерений // Измерительная техника. – 2015. – № 3 – С. 58–60.
23. Создание однородного магнитного поля с помощью системы аксиальных катушек для калибровки магнитометров / В.Е. Баранова (Огай), П.Ф. Баранов, С.В. Муравьев, С.В. Учайкин // Измерительная техника. – 2015. – № 5. – С. 52–56.
24. Спиридонов О.В. Расширенные возможности Microsoft Excel 2003. – М.: МИЭМП, 2010. – 458 с.
25. McDougall I. Ferrous Alloys Processing Equipment // Handbook of Ferrous Alloys. – Oxford, Elsevier Science, 2013. – P. 83–138.

Поступила 11.01.2016.

UDC 621.3.073

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND CALCULATION OF MAGNETIC FIELD OF DC ELECTROMAGNET WITH SPLIT POLES AND POLE PIECES IN THE SOFTWARE COMPLEX ELCUT

Aleksandr S. Tatevosyan,

Omsk State Technical University, 11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia. E-mail: ast_51@mail.ru

Andrey A. Tatevosyan,

Omsk State Technical University, 11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia. E-mail: karo1@mail.ru

Natalya V. Zakharova,

Omsk State Technical University, 11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia. E-mail: nvzdm@mail.ru

Sergey V. Shelkovnikov,

Omsk State Technical University, 11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia. E-mail: serj85_85@inbox.ru

Yulia V. Shelkovnikova,

National Mineral Resources University (Mining University) 2, 21 line of Vasilyevsky Island, Saint-Petersburg, 199106, Russia. E-mail: shelk_07@list.ru

The relevance of research. Iron separator devices based on the DC electromagnets are widely spread in many industries: ore-treatment plants, coal thermal power plants, coking plants, for equipment protection from mechanical damage, as well as from final product clogged with outsider objects; separation is based on ferromagnetic properties of these objects. Among the magnetic systems of permanent magnets with magnetic pole pieces the valve system is the most common and therefore the well-studied, as it is widely used in the drives of electromagnetic switching devices, automation and control devices. However, even in the synthesis of a solenoid magnet system the developers have the problem of determining the proportion of the magnetic flux by the pole piece in the working gap. Solution of the problem is even more complicated in the absence of a rotary anchor in DC electromagnet, since the magnetic field in the pole gap is dramatically uneven, fading with the distance of the point from the plane of the poles. Such distribution of the magnetic field takes place in special DC electromagnets – suspended iron separators, which are used to extract the ferromagnetic items from various bulk materials transported by belt conveyors.

The aim of research. The paper considers an integrated approach to the study of magnetic field of DC electromagnet with split poles and pole pieces, characterized by the study of the sharp inhomogeneity of the magnetic field in the pole gap and beyond.

Methods of research. The study was carried out using a laboratory designed electromagnet using software Elcut 6.0. The approach is based on comparing the results of an experimental study of magnetic field and magnetic force for the prototype electromagnetic iron separator with a digital milliteslametra with the Hall sensor, a numerical calculation of the magnetic field in the complex programs Elcut 6.0 and analytical calculation of the magnetic field.

The results of experimental research of the magnetic field in a prototype electromagnet using digital milliteslameter with the Hall sensor were supplemented by the results of analytical and numerical calculation of magnetic fields made in the software complex Elcut 6.0 (professional version). The reliability of the presented results of the experiment and the calculation is confirmed by checking the Ampere law in a closed circuit. Analyzing the attenuation of the magnetic field of the electromagnet in the middle of the pole gap as the distance of the investigated point from the pole pieces the authors determined the optimal distance between the pole pieces at which the specific ponderomotive force of the magnetic field reaches the maximum value.

Key words:

DC electromagnet, pole gap, pole pieces, split poles, verification of Ampere law, magnetic field attenuation, ponderomotive force.

REFERENCES

- Mishchenko A.C., Tishin A.M. *Magnitnye separatory – mnogoobrazie konstruktsiy* [Magnetic separators – the variety of constructions]. Available at: <http://www.amtc.ru/publications/articles/2053> (accessed: 05 January 2016).
- Sumtsov V.F. *Elektromagnitnye zhelezootdeliteli* [Iron separators]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 174 p.
- Zagirnyak M.F., Branspiz Yu.A. Priblizhennaya formula napyazhennosti magnitnogo polya nad seredinoy zazora dvukhpolyusnogo magnitnogo zhelezootdelitelya [Approximated formula of magnetic field stress over the middle of the gap of two-pole iron separator]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 1992, no. 3, pp. 62–65.
- ELCUT. *Modelirovanie dvumernykh poley metodom konechnykh ehlementov: rukovodstvo polzovatelya. Versiya 6.0*. [ELCUT. Modeling two-dimensional fields by the finite element method: user manual. Version 6.0.]. Moscow, PK TOP; St.-Petersburg, 1989–2013. Available at: <http://www.exponenta.ru/soft/others/elcut/Manual.pdf> (accessed: 05 January 2016).
- Sytnik A.A., Klyuchka K.N., Protasov S.Yu. Application of integral dynamic models when solving the problems of identification of electric circuit parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 103–106. In Rus.

6. Dyakonov V.P., Penkov A.A. *MATLAB i SIMULINK v ehlektronergetike* [MATLAB and SIMULINK in power engineering]. Moscow, Goryachaya liniya – telekom Publ., 2009. 816 p.
7. Zlygosteva G.V., Muravyev S.V. Generalized model of testing measuring software. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 4, pp. 62–67. In Rus.
8. Ran Wang, ShuaihuaNie, Jianhua Zhao, Yang Ji. Measuring magnetic anisotropy with a rotatable AC electromagnet. *Measurement*, 2016, February, vol. 79, pp. 15–19.
9. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektromagnitnoe pole* [Theoretical bases of electrical engineering. Electromagnetic field]. Moscow, Gardariki Publ., 2001. 317 p.
10. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Calculation of magnetic system of the magnetoelectric machines. *Proc. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics*. Omsk, 11–13 November 2014. pp. 299–302.
11. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. The study of magnetic characteristics of amorphous alloys at various frequencies and ranges of magnetic flux. *Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. Omsk, 21–23 May 2015. pp. 1250–1254.
12. Tatevosyan A.A., Fokina V.V. The study of the electromagnetic field of the synchronous magnetoelectric generator. *Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. Omsk, 21–23 May 2015. pp. 1336–1340.
13. Ishkov A.S., Litvinov L.N. Izmeritelno-vychislitelny kompleks dlya issledovaniya magnitnykh kharakteristik elektrotekhnicheskoy stali [Measuring and computing complex for studying magnetic characteristics of electrotechnical steel]. *Datchiki i sistemy*, 2006, no. 4, pp. 14–17.
14. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Calculation of optimal parameters of electromagnetic drive of oscillation mode. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 121–132. In Rus.
15. Pironneau M.O. Optimum design with Lagrangian finite elements: Design of an electromagnet. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1978, September, vol. 15, Iss. 3, pp. 277–308.
16. Anderson Ph. A universal DC characterisation system for hard and soft magnetic materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, October, vol. 320, Iss. 20, pp. e589–e593.
17. Zaharova N.V. Improvement of magnetic system of the speed sensor in the devices of the impact parameters control. *Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. Omsk, 21–23 May 2015. pp. 482–486.
18. Blázquez J.S., Marcin J., Andrejka F., Franco V., Conde A., Skorkvanek I. Anisotropy field distribution in soft magnetic Hitperm alloys submitted to different field annealing processes. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 15 February, vol. 658, pp. 367–371.
19. Fernanda A. Sampaio da Silva, Castro N.A., de Campos M.F. Modeling hysteresis curves of anisotropic SmCoFeCuZr magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, February, vol. 328, pp. 53–57.
20. Makenova N.A., Kanev F.Yu., Nosov G.V. Computer modeling in the course Theoretical bases of electrical engineering in different programming systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 312, no. 4, pp. 103–108. In Rus.
21. Bin Ma, Aizhi Sun, Zhenwen Lu, Chuan Cheng, Chen Xu. Research on anisotropic bonded Nd–Fe–B magnets by 2-step compaction process. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, 1 March, vol. 401, pp. 802–805.
22. Bakhvalov Yu.A., Gorbatenko N.I., Grechikhin V.V. Method of solving reverse problems of magnetic measurements. *Measurement technique*, 2015, no. 3, pp. 58–60. In Rus.
23. Baranova V.E. (Ogaj), Baranov P.F., Muravyev S.V., Uchaykin S.V. Development of uniform magnetic field by the system of axial coils for calibrating magnetic tester. *Measurement technique*, 2015, no. 5, pp. 52–56. In Rus.
24. Spiridonov O.V. *Rasshirennye vozmozhnosti MicrosoftExcel 2003* [Exceeding the possibilities of MicrosoftExcel 2003]. Moscow, MIEHMP Publ., 2010. 458 p.
25. McDougall I. *Ferroalloys Processing Equipment. Handbook of Ferroalloys*. Oxford, Elsevier Science, 2013. pp. 83–138.

Received: 11 January 2016.