

УДК 663.915

ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТОВ С МАГНИТООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ**Беззубцева М.М., Волков В.С., Зубков В.В.***Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург,
e-mail: mysnegana@mail.ru*

Обобщены результаты исследований электромагнитных измельчителей постоянного тока, электромагнитных механоактиваторов, электромагнитных мешалок, а также электромагнитных плотномеров для контроля загрязненности технологических сред ферропримесями. Принцип действия устройств основан на нетрадиционном способе передачи механической энергии слою размольных элементов с использованием квазистационарного магнитного поля постоянного тока. Метод расчета магнитных полей исследуемых аппаратов основан на введении вторичных источников и состоит из сведения задачи к интегральным уравнениям с их числовым решением. Метод интегральных уравнений позволяет строить магнитные поля в рабочих объемах (зазорах) аппаратов цилиндрических конструкций с электромагнитным способом формирования сцепляющего (или диспергирующего) усилия и определять параметры поля (индукцию и напряженность) в любой заданной точке рабочего объема (рабочего зазора), в которой осуществляется силовое контактное взаимодействие между феррочастицами (размольными органами аппарата или ферропримесями) в их магнитноожигенном слое.

Ключевые слова: электромагнитный механоактиватор, расчет магнитных полей, феррочастицы, интегральные уравнения

RESEARCHING DEVICES WITH MAGNETTICALLY FLUIDIZED LAYERS**Bezzubceva M.M., Volkov V.S., Zubkov V.V.***St.-Peterburg agrarian university, St.-Peterburg, e-mail: mysnegana@mail.ru*

The researching results of direct current (DC) electromagnetic choppers, electromagnetic mechanical actuators, electromagnetic stirrers and electromagnetic densitometers for control of technological environment pollution with ferroimpurities are generalized. Function of these devices is based on nontraditional method of transmitting mechanical energy to grinding elements layer using quasi-stationary DC magnetic field. Method of calculating the magnetic fields studied devices is based on induction of secondary sources and consists of reducing the problem to integral equations with their numerical solution. The method of integral equations allows us to construct the magnetic field in working volume (gaps) of cylindrical structure apparatus with an electromagnetic method of forming the bonding efforts and determine the parameters of the field (induction and tension) at any given point of working volume in which the contact force between the ferromagnetic particles efforts (the grinding bodies or ferroimpurities) in their magnetically fluidized layer is implemented.

Keywords: electromagnetic mehanoaktivator, the calculation of magnetic fields ferroparticles, integral equations

Способ формирования силового (сцепляющего) усилия в магнитноожигенном слое ферромагнитных частиц [1, 2] положен в основу принципа действия аппаратов и приборов различного целевого назначения: электромагнитных порошковых муфт [13], электромагнитных измельчителей постоянного тока (ЭМИПТ) [1], электромагнитных механоактиваторов (ЭММА) [3], электромагнитных мешалок (ЭММ) [4], а также электромагнитных плотномеров (ЭПЛ) для контроля загрязненности технологических сред ферропримесями [5, 6, 7, 11].

Принцип действия устройств основан на нетрадиционном способе передачи механической энергии слою размольных элементов с использованием квазистационарного магнитного поля постоянного тока. В основе механизма создания диспергирующего усилия в ЭМИПТ и ЭММА лежит действие магнитных сил, притягивающих размольные ферроэлементы к поверхностям рабочих органов устройства и друг к другу с организацией их в различные структурные построения. Кинетическая энергия движения сообщается мелющим

телам в процессе непрерывного объемного передеформирования и разрушения их структурных построений при относительном смещении поверхностей рабочего объема устройства. Целенаправленная переориентация размольных элементов с разностью скоростей в структурных группах сопровождается созданием многочисленных контактных взаимодействий между ними через прослойку обрабатываемого продукта. При силовом взаимодействии мелющие тела преобразуют кинетическую энергию своего движения в энергию разрушения материала и измельчают его статическим сжатием и ударно-истирающими нагрузками. В ЭМИПТ и ЭММА обеспечивается энергонапряженный характер диспергирующих сил, который легко подлжит автоматизации и требует малых затрат мощности, что соответствует требованиям механоактивации продуктов различного целевого назначения.

В результате теоретических исследований на основании развития дипольной модели Максвелла [12] получены функциональные зависимости силового (сцепляющего) усилия между феррочастицами от

параметров электромагнитного поля в рабочих зазорах (или объемах обработки) аппаратов [3, 8]. Адекватность математических моделей реальным процессам подтверждена результатами экспериментальных исследований на моделях, макетах, опытных образцах проектируемых устройств для диспергирования и механоактивации перерабатываемых материалов и стендах для контроля загрязненности технологических сред ферропримесями [1, 3, 8, 9].

Целью данной работы является разработка методики построения электромагнитных полей в аппаратах с электромагнитным способом формирования диспергирующего (сцепляющего) усилия.

Материал и методы исследований

Предметом исследований является магнитооживленный слой, образующийся из ферромагнитных элементов (диспергирующих размольных тел или ферропримесей) в рабочих объемах ЭММА, ЭМИПТ, ЭПЛ.

Для построения магнитных полей использован метод интегральных уравнений.

Результаты исследования и их обсуждение

Силовое взаимодействие между ферроэлементами (размольными элементами, ферропримесями) определяется параметрами магнитного поля в объемах обработки продукта. Для расчета необходимо располагать методом построения электромагнитных полей в рабочих объемах с учетом их конструкции. Задача построения магнитного поля сводится к задаче построения осесимметричных магнитных полей цилиндрических обмоток с током при наличии металлических вставок, имеющих магнитную проницаемость $\mu > 1$.

При решении поставленной задачи исходили из следующих основных положений: магнитное поле создается обмоткой с постоянным током; конфигурация поля в рабочем объеме формируется с помощью цилиндрических ферромагнитных рабочих органов аппарата (магнитных вставок); влияние магнитных вставок на конфигурацию поля учитываем с помощью цилиндрических слоев с неизвестными плотностями тока; неизвестные плотности токовых слоев определяем в результате решения системы интегральных уравнений.

Для построения магнитного поля в рабочих зазорах (объемах) проектируемых устройств цилиндрических конструкций с ротором и внутренним расположением обмотки управления на статоре использован метод интегральных уравнений [1, 3]. Метод основан на введении вторичных источников и состоит из сведения задачи к интегральным уравнениям с их числовым решением. Ферромагнитный ротор в устройствах цилиндрических конструкций [1, 3, 8, 10] (рис. 1) заменен токовым слоем $\sigma(z)$. Для суммарного векторного потенциала $A_\phi(r, z)$ магнитного поля справедливо равенство

$$A_\phi(r, z) = A_\phi^*(r, z) + A_\phi^{**}(r, z), \quad (1)$$

где A_ϕ^{**} – потенциал поля, создаваемого обмоткой; A_ϕ^* – потенциал поля, создаваемого токовым слоем.

$$A_\phi^*(r, z) = r_0 \int_{-c}^c \int_0^{2\pi} \frac{\sigma(z_0) \cos \varphi d\varphi dz_0}{\sqrt{r^2 - 2r r_0 \cos \varphi + r_0^2 + (z_0 - z)^2}}. \quad (2)$$

При переходе силовых линий магнитного поля через боковую поверхность ротора (рис. 1) касательная составляющая напряженности поля остается непрерывной. Для проекции вектора магнитной индукции B_z^* токового слоя имеем:

женности поля остается непрерывной. Для проекции вектора магнитной индукции B_z^* токового слоя имеем:

$$B_z^*(r, z) = \frac{r_0}{r} \int_{-c}^c \int_0^{2\pi} \frac{\sigma(z_0) \cos \varphi d\varphi dz_0}{\sqrt{r^2 - 2r r_0 \cos \varphi + r_0^2 + (z_0 - z)^2}} - r_0 \int_{-c}^c \int_0^{2\pi} \frac{\sigma(z_0) \cos \varphi (r - r_0 \cos \varphi) d\varphi dz_0}{[r^2 - 2r r_0 \cos \varphi + r_0^2 + (z_0 - z)^2]^{3/2}}. \quad (3)$$

Второй интеграл в выражении (3) является нормальной производной (т.е. производной в направлении нормали к боковой поверхности ротора) от потенциала простого слоя. Производная совершает скачок

при пересечении простого слоя. Это обстоятельство позволяет составить интегральное уравнение для определения неизвестной плотности простого слоя:

$$B_z(r, z) = B_z^*(r, z) + B_z^{**}(r, z). \quad (4)$$

Устремляя r к r_0 изнутри и снаружи токового слоя (рис. 1), получим:

$$B_z^e(r_0, z) = \frac{1}{\mu} B_z^i(r_0, z), \quad (5)$$

где

$$B_z^e = -2\pi\sigma(z) + B_z^*(r_0, z) + B_z^{**}(r_0, z); \quad (6) \quad \sigma(z) = \frac{1}{\pi} \frac{\mu - 1}{\mu + 1} [B_z^*(r_0, z) + B_z^{**}(r_0, z)], \quad (8)$$

$$\text{где } B_z^*(r_0, z) = \int_{-c}^c \int_0^{2\pi} \frac{\sigma(z_0) \cos \varphi d\varphi dz_0}{\sqrt{2r_0^2(1 - \cos \varphi) + (z_0 - z)^2}} - r_0^2 \int_{-c}^c \int_0^{2\pi} \frac{\sigma(z_0) \cos \varphi (1 - \cos \varphi) d\varphi dz_0}{[2r_0^2(1 - \cos \varphi) + (z_0 - z)^2]^{3/2}}. \quad (9)$$

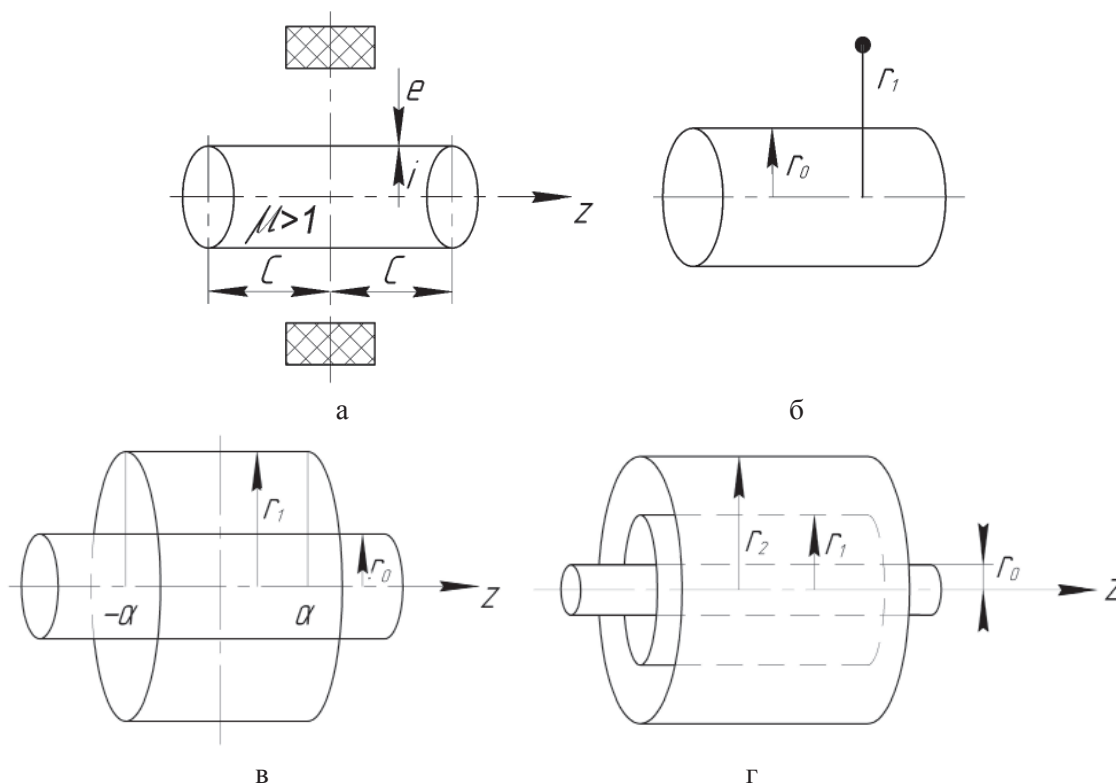


Рис. 1. К расчету магнитных полей в рабочих объемах (зазорах) устройств с магнитооживленным слоем феррочастиц:

а – к построению поля обмотки с током при наличии цилиндрического ротора; б – одиночный виток с током; в – токовый слой с постоянной плотностью; г – многослойная катушка с током

Для элементов источника магнитного поля проекции вектора магнитной индук-

ции B_z^{**} , входящие в формулу (8), определяются следующими равенствами:

– одиночный виток с током I (рис. 1, б)

$$B_z^{**}(r_0, z) = \frac{1}{2\pi r_0} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi d\varphi}{\sqrt{r_0^2 - 2r_0 r_1 \cos \varphi + r_1^2 + z^2}} - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(r_0 - r_1 \cos \varphi) \cos \varphi d\varphi}{(r_0^2 - 2r_0 r_1 \cos \varphi + r_1^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (10)$$

– токовый слой с постоянной плотностью $\sigma = \frac{I}{4\pi\alpha r_1}$ (рис. 1, в)

$$B_z^{**}(r_0, z) = \frac{1}{2\pi\alpha r_0} \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\varphi d\varphi dz_Q}{\sqrt{r_0^2 - 2r_0r_1 \cos\varphi + r_1^2 + (z - z_Q)^2}} - \frac{I}{4\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_0^{2\pi} \frac{(r_0 - r_1 \cos\varphi) \cos\varphi d\varphi dz_Q}{[r_0^2 - 2r_0r_1 \cos\varphi + r_1^2 + (z - z_Q)^2]^{\frac{3}{2}}}; \quad (11)$$

– многослойная катушка с током (рис. 1, г)

$$B_z^{**}(r_0, z) = \frac{I}{2\pi(r_2^2 - r_1^2)} \int_{r_1}^{r_2} \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_0^{2\pi} \frac{r_Q \cos\varphi d\varphi dz_Q dr_Q}{\sqrt{r_Q^2 - 2r_Qr_0 \cos\varphi + r_0^2 + (z - z_Q)^2}} - \frac{I}{2\pi\alpha(r_2^2 - r_1^2)} \int_{r_1}^{r_2} \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_0^{2\pi} \frac{r_Q (r_0 - r_Q \cos\varphi) \cos\varphi d\varphi dz_Q dr_Q}{[r_Q^2 - 2r_Qr_0 \cos\varphi + r_0^2 + (z - z_Q)^2]^{\frac{3}{2}}}. \quad (12)$$

Для цилиндрических роторных ЭММА, ЭМИПТ и ЭПЛ с обмоткой управления, расположенной на внутренней поверхности статора (рис. 2), составлена следующая система интегральных уравнений относительно трех неизвестных плотностей поверхностных токов $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_3$:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0(z) &= \frac{1}{2\pi} \frac{\mu - \mu_0}{\mu + \mu_0} \{B_{0z}(r_0, z) + B_{1z}(r_0, z) + B_{3z}(r_0, z) + B_z(r_0, z)\} \\ \sigma_1(z) &= \frac{1}{2\pi} \frac{\mu - \mu_0}{\mu + \mu_0} \{B_{0z}(r_0, z) + B_{1z}(r_0, z) + B_{3z}(r_0, z) + B_z(r_0, z)\} \\ \sigma_3(z) &= \frac{1}{2\pi} \frac{\mu - \mu_0}{\mu + \mu_0} \{B_{0z}(r_0, z) + B_{1z}(r_0, z) + B_{3z}(r_0, z) + B_z(r_0, z)\} \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Система (13) решается итерационным методом.

Коэффициент объемного заполнения рабочего объема (K_p) учтен отношением магнитной проницаемости рабочего объема (μ_0) к магнитной проницаемости ферромагнитных элементов (μ) в магнитоожигенном слое.

Заклучение

Метод интегральных уравнений позволяет строить магнитные поля в рабочих объемах (зазорах) аппаратов цилиндрических конструкций с электромагнитным способом формирования сцепляющего (или диспергирующего) усилия и определять параметры поля (индукцию и напряженность) в любой заданной точке рабочего объема (рабочего зазора), в которой осуществляется силовое контактное взаимодействие между феррочастицами (размольными органами аппарата или ферропримесями) в их магнитоожигенном слое.

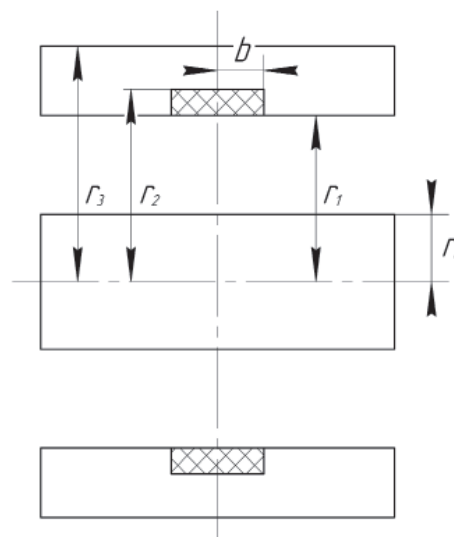


Рис. 2. К построению магнитных полей в рабочих объемах цилиндрических роторных ЭММА, ЭМИПТ и ЭПЛ с обмоткой управления, расположенной на внутренней поверхности статора

Список литературы

1. Беззубцева М.М. Теоретические основы электромагнитного измельчения. – СПб.: СПбГАУ, 2005. – 160 с.
2. Беззубцева М.М., Волков В.С. Прикладная теория способа электромагнитной механоактивации // Известия Международной академии аграрного образования. – 2013. – Т. 3, № 16. – С. 93–96.
3. Беззубцева М.М., Волков В.С. Теоретические основы электромагнитной механоактивации. – СПб.: СПбГАУ, 2011. – 145 с.
4. Беззубцева М.М., Волков В.С. Электромагнитные мешалки. Теория и технологические возможности. – Saarbrücken GmbH.: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 141 с.
5. Беззубцева М.М. Электромагнитный способ диагностики загрязненности технологических сред: монография. – СПб.: СПбГАУ, 2009. – 130 с.
6. Беззубцева М.М., Соколов А.В. Устройство для оценки степени загрязнения жидкостей примесями. Свидетельство № 11343 Рос. Федерация. 99101581/20; Заявл. 25.01.1999; Опубл. 16.09.1999, Бюл. № 13. 3 с.
7. Беззубцева М.М., Зубков В.В. Экспресс диагностика эффекта намолса с использованием методов электротехнологий // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования. – СПб.: СПбГАУ, 2011. – С. 332–337.
8. Беззубцева М.М., Волков В.С. Активатор для тонкого измельчения материалов // Инновационные технологии механизации, автоматизации и технического обслуживания в АПК // Сборник материалов Международной научно-практической интернет – конференции. – Орел ГАУ, 2008. – С. 122–126.
9. Беззубцева М.М., Волков В.С. Повышение энергоэффективности безотходной технологии производства корма // Материалы Международной научно – практической конференции / под ред. А.В. Павлова. – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2010. – С. 133–134.
10. Беззубцева М.М. Энергоэффективный способ электромагнитной активации // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 5. – С. 92–93.
11. Зубков В.В. Экспресс анализ загрязненности смазочно-охлаждающих технологических сред в ремонтных производствах АПК // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы II Международной научно-практической конференции / под ред. А.В. Павлова. – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2011. – С. 129–132.
12. Максвелл Д.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1952. – 685 с.
13. Пуговкин П.Р., Беззубцева М.М. Модель образования сцепляющего усилия в ЭПМ // Известия вузов. Электромеханика. – 1987. – № 10. – С. 91–95.
2. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Prikladnaja teorija sposoba jelektromagnitnoj mehanoaktivacii // Izvestija Mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovanija, 2013. T. 3, no. 16. pp. 93–96.
3. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Teoreticheskie osnovy jelektromagnitnoj mehanoaktivacii. SPb.: SPbGAU, 2011. 145 p.
4. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Jelektromagnitnye meshalki. Teorija i tehnologicheskie vozmozhnosti. Saarbrucken GmbH.: Palmarium Academic Publishing, 2013. 141 p.
5. Bezzubceva M.M. Jelektromagnitnyj sposob diagnostiki zagrjaznennosti tehnologicheskix sred. Monografija. SPb.: SPbGAU, 2009. 130 p.
6. Bezzubceva M.M., Sokolov A.V. Ustrojstvo dlja ocenki stepeni zagrjaznenija zhidkostej primesjami. Svidetel'stvo № 11343 Ros. Federacija. 99101581/20; Zajavl. 25.01.1999; Opubl. 16.09.1999, Bjul. no. 13. 3 p.
7. Bezzubceva M.M., Zubkov V.V. Jekspress diagnostika jeffekta namola s ispol'zovanijem metodov jelektrotehnologij // Nauchnoe obespechenie razvitija APK v uslovijah reformirovanija. SPbGAU, 2011. pp. 332–337.
8. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Aktivator dlja tonkogo izmel'čeniya materialov // Innovacionnye tehnologii mehanizacii, avtomatizacii i tehničeskogo obsluživaniya v APK. Sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoij internet – konferencii. Orel GAU, 2008. pp. 122–126.
9. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Povyšenie jenergojeffektivnosti bezothodnoj tehnologii proizvodstva korma // Materialy Mezhdunarodnoj nauchno – praktičeskoij konferencii / Pod red. A.V. Pavlova.- Saratov: Izd-vo «KUBiK», 2010. pp. 133–134.
10. Bezzubceva M.M. Jenergojeffektivnyj sposob jelektromagnitnoj aktivacii // Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovanija, 2012. no. 5. pp. 92–93.
11. Zubkov V.V. Jekspress analiz zagrjaznennosti smazочно-ohlazhdajushhih tehnologičeskix sred v remonnyx proizvodstvax APK // Aktual'nye problemy jenergetiki APK: Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoij konferencii / Pod red. A.V. Pavlova. – Saratov: Izdatel'stvo «KUBiK», 2011. pp. 129–132.
12. Maksvell D.K. Izbrannye sočinenija po teorii jelektromagnitnogo polja. M.: Izd-vo tehniko – teoretičeskoij literatury, 1952. 685 p.
13. Pugovkin P.R., Bezzubceva M.M. Model' obrazovanija scepļajushhego usilija v JePM // Izvestija vuzov. Jelektromehanika, 1987. no. 10. pp. 91–95.

References

1. Bezzubceva M.M. Teoreticheskie osnovy jelektromagnitnogo izmel'čeniya. SPb.: SPbGAU, 2005. 160 p.

Рецензенты:

Ракутько С.А., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией энергоэффективных электротехнологий ГНУ СЗ НИИМЭСХ Россельхозакадемии, г. Санкт-Петербург;

Салова Т.Ю., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «ТиТ» СПбГАУ, г. Санкт-Петербург.
Работа поступила в редакцию 11.04.2013.