

УДК 663.915

**К РАСЧЕТУ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
МЕХАНОАКТИВАТОРОВ****Беззубцева М.М., Волков В.С.***ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет».**Санкт-Петербург, Пушкин, Россия,**e-mail: mysnegana@mail.ru*

В статье представлена методика расчета диапазонов регулирования силы тока в обмотках управления электромагнитных механоактиваторов (ЭММА) цилиндрических конструкций, при которых достигается максимизация дисперсности перерабатываемого продукта при минимальных энергозатратах на формирование диспергирующих усилий в магнитоожигенном слое размольных ферромагнитных элементов сферической формы под действием постоянного по знаку и регулируемого по величине электромагнитного поля. Даны рекомендации по конструктивному исполнению ЭММА, предназначенных для диспергирования прочных материалов. Представлены формулы для расчета параметров электромагнитного поля в рабочих объемах ЭММА исследуемых конструкций. Приведены результаты исследования зависимости электромагнитного режима работы ЭММА цилиндрических конструкций от строения и параметров электромагнитного поля в объемах обработки продукта.

Ключевые слова: механоактивация, процесс диспергирования, магнитоожигенный слой.

**TO CALCULATION OF POWER EFFECTIVE OPERATING MODES
OF MECHANOACTIVATORS****Bezzubceva M.M., Volkov V.S.***St.-Peterburg agrarian university, St.-Peterburg, Pushkin, Russia,**e-mail: mysnegana@mail.ru*

The article presents the method of calculating the adjustment ranges of the current in control windings of electromagnetic mechanoactivation (EMMA) cylindrical structures, which is achieved by maximizing the dispersion of the processed product with minimum energy consumption for the formation of dispersing efforts in magnetic liquefied layer of the grinding ferromagnetic elements of spherical shape under the action of constant sign and controllable magnitude of the electromagnetic field. Recommendations for design EMMA intended for dispersing solid materials. Presents formulas for calculating the parameters of the electromagnetic field in the working volume of EMMA studied structures. The results of investigations of the dependence of the electromagnetic mode EMMA cylindrical structures from the structure and parameters of the electromagnetic field in the volume of processing of the product.

Keywords: mechanoactivation, dispersing process, magnitoozhzhenny layer

Введение

Электромагнитный способ трансформации кинетической и потенциальной энергии в энергию разрушения материалов, реализованный в электромагнитных механоактиваторах (ЭММА) [1,2,3], позволяет решить комплекс задач, стоящих перед производителями продукции при регламентированных технологией требованиях к гранулометрическому составу получаемых частиц [4,5], температурному режиму переработки материалов [6,7], а также требований к минимальной энергоемкости готовой продукции [8] и эффекту намола [9,10]. При этом наиболее актуальной является проблема энергосбережения на стадии тонкого и сверхтонкого диспергирования прочных материалов. На образование новых поверхностей затрачивается энергия, доля которой в значительной степени определяется условиями энергоподвода и соотношениями режимов работы ЭММА (скоростных

и электромагнитных) [11], которые в свою очередь зависят от конструктивного исполнения устройства и устанавливаются в соответствии со значениями энергии начала разрушения частиц перерабатываемого материала [12]. Доля этой энергии увеличивается с ростом дисперсности твердой фазы, что предопределяет создание в рабочих объемах аппаратов более жестких силовых и энергетических условий измельчения по мере уменьшения размеров частиц. При этом сила воздействия на частицы продукта со стороны размольных элементов (элементов магнитоожигенного слоя) ЭММА возрастает с увеличением величины силы тока в обмотках управления до определенного экстремального значения. Определенные диапазоны регулирования силы тока в обмотках управления (ОУ) является одной из актуальных задач при проектировании энергоэффективных ЭММА.

Целью исследования является разработка методики расчета диапазона регули-

рования силы тока в ОУ ЭММА цилиндрических конструкций, предназначенных для диспергировании прочных материалов.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования является исследование зависимостей рациональных электромагнитных режимов работы ЭММА цилиндрических конструкций от строения электромагнитного поля в объемах обработки продукта.

Результаты исследования и их обсуждение

При переработке прочных материалов в конструкциях ЭММА предусмотрена установка нескольких ОУ, расположенных как в корпусе устройства, так и на его внутреннем роторе (или на обеих частях магнитопровода одновременно) [13, 14]. За счет применения дополнительных обмоток управления повышается качество промагничивания ферромагнитной загрузки, что способствует усилению диспергирующих нагрузок по частицам перерабатываемого продукта. При цилиндрическом исполнении рабочего объема с расположением обмотки управления в корпусе устройства, магнитный по-

ток Φ , создаваемый электрическим током, протекающим по обмотке ОУ, замыкается по участкам магнитопровода – корпусу I, рабочему объему II и внутреннему цилиндру (ротору III) (рис. 1). Площадь сечения корпуса значительно меньше площади сечения внутреннего цилиндра [15]. В корпусе магнитная индукция ВК имеет большее значение, чем в цилиндре. А так как толщина корпуса незначительна по сравнению с его внешним радиусом, то можно считать, что магнитный поток Φ распределен равномерно по его толщине.

На рис. 2 представлен график распределения напряженности магнитного поля H_0 внутри рабочего объема. Максимально допустимое значение индукции магнитного потока в корпусе $B_{к доп}$ определяется путем интегрирования значений индукции в рабочем объеме у внутренней поверхности корпуса (при $\rho = R_1$, где ρ – радиус точки объема обработки, R_1 – внутренний радиус корпуса) по половине этой поверхности с последующим делением результата на минимально площадь сечения корпуса S_k .

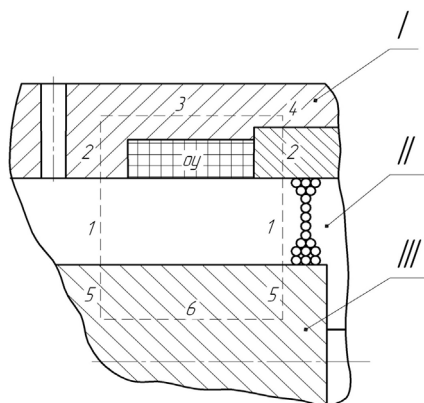


Рис. 1. Конструктивная схема магнитопровода ЭММА цилиндрического исполнения:
I – корпус II – рабочий объем с феррошарами; III – внутренний цилиндр;
1, 2, ..., 6 – участки магнитопровода; ОУ – обмотка управления

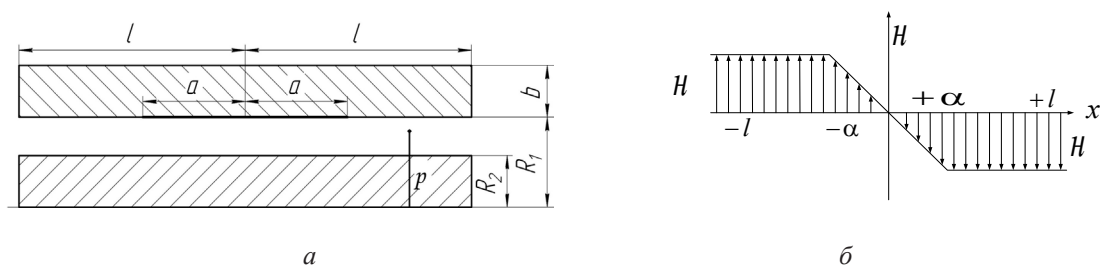


Рис. 2. Расчетные участки элементов ЭММА:
a – геометрические параметры участков; б – схема распределения силовых линий магнитного поля в рабочем объеме ЭММА; $2l$ – высота рабочего объема; $2a$ – высота паза для размещения обмотки управления; b – толщина корпуса; R_1 и R_2 – соответственно радиусы цилиндрических поверхностей корпуса и ротора; r – радиус произвольной точки рабочего объема.

На участке "I-α" поле в рабочем объеме ЭММА цилиндрических конструкций является равномерно-радиальным, причем его параметры (напряженность и индукция) увеличиваются по радиусу устройств к внутренней цилиндрической поверхности, составляющей рабочий объем, по линейному закону. Среднее значение напряженности определяется выражением: $H_{cp} = \frac{\omega i}{2(R_1 - R_2)}$. Параметры магнитного поля в объеме обработки ЭММА цилиндрических конструкций увеличиваются по радиусу к внутренней по-

верхности, образующей рабочий объем, по линейному закону [16]: $\frac{B_2}{B_1} = \frac{R_1}{R_2}$ и $\frac{H_2}{H_1} = \frac{R_1}{R_2}$.

Выражения для определения напряженности H₀ и индукции B₀ магнитного поля в любой точке рабочего объема ЭММА цилиндрических конструкций имеют вид:

$$H_0 = \frac{\omega i (R_1 + R_2 - \rho)}{R_1^2 - R_2^2}; \quad B_0 = \frac{\mu_0 \omega i (R_1 + R_2 - \rho)}{R_1^2 - R_2^2}, \quad (1)$$

где ρ - радиус точки объема обработки при $R_2 \leq \rho \leq R_1$.

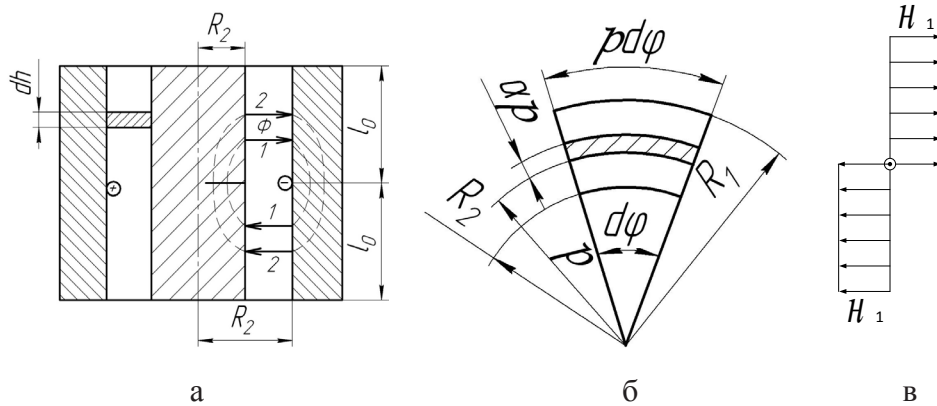


Рис. 3. Схема к расчету параметров электромагнитного поля на участках рабочего объема: а – продольный разрез устройства; б – элемент рабочего объема; в – схема распределения силовых линий магнитного поля на участках „I-α“

С учетом зависимостей (1) и параметров расчетной схемы, представленной на рисун-

ке 3, выражение для определения магнитной энергии имеет вид:

$$W_{\dot{y}} = \frac{1}{2} \mu_0 \int_{V_0} H_0^2 dV_0; \quad W_{\dot{y}}^{I-\alpha} = \frac{1}{2} \mu_0 \int_{R_2}^{R_1} \int_0^{2\pi} \int_0^{2l} \frac{\omega^2 i^2 (R_1 + R_2 - \rho)^2}{(R_1^2 - R_2^2)} dp d\phi dh,$$

где V₀ – объем обработки продукта.

После интегрирования и ряда несложных математических преобразований получим формулу для вычисления энергии в рабочем объеме ЭММА на участке „I-α“:

$$W_{\dot{y}}^{I-\alpha} = \frac{\mu_0 \pi \omega^2 i^2 (l - \alpha)}{6} \frac{1 + 4 \frac{R_2}{R_1} + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2}{1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2} \quad (2)$$

Так как магнитная энергия определяется выражением $W_{\dot{y}} = \frac{1}{2} L_{\dot{y}} i^2$ (здесь L_ḡ – индуктивность ОУ), то можно записать равенство:

$$\frac{\mu_0 \pi \omega^2 i^2 (l - \alpha)}{6} \frac{1 + 4 \frac{R_2}{R_1} + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2}{1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2} = \frac{1}{2} L_{\dot{y}} i^2.$$

Отсюда получаем формулу для определения индуктивности обмотки управления на участке „I-α“:

$$L_{\dot{y}}^{I-\alpha} = \frac{1}{3} \mu_0 \pi \omega^2 (l - \alpha) \frac{1 + 4 \frac{R_2}{R_1} + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2}{1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2} \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) получены для идеализированного случая, когда обмотка управления с током, создающим магнитное поле в рабочем объеме аппарата, представлена в виде одного витка с нулевым диаметром провода. Между тем, при конструктивном исполнении обмотка управления занимает существенную часть длины ЭММА. Поэтому более точно ее можно представить в виде токового слоя, расположенного симметрично относительно середины рабочего объема на внутренней поверхности ци-

линдрического корпуса. При этом линейная плотность тока в слое σ_i определена выражением $\sigma_i = W_y I_y / 2\alpha$, (здесь W_y - число витков в ОУ; I_y - сила тока в ОУ).

На участках „ α “ напряженность магнитного поля в рабочих объемах ЭММА меняется линейно (при фиксированном значении ρ) по закону:

$$H_0 = \frac{W_y I_y (R_1 + R_2 - \rho) x}{R_1^2 - R_2^2 \alpha} \quad (4)$$

Магнитная энергия на этом участке равна:

$$W_{\Sigma}^{\alpha} = \frac{1}{2} \mu_0 \int_{R_2}^{R_1} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\alpha} \frac{x^2 W_y^2 I_y^2 (R_1 + R_2 - \rho)^2}{\alpha^2 (R_1^2 - R_2^2)^2} d\rho d\varphi dx.$$

Или после интегрирования и математических преобразований может быть представлена в виде:

$$\mu_0 \frac{\pi W_y^2 I_y^2 \left(l - \frac{2}{3} \alpha \right) 1 + 4 \frac{R_2}{R_1} + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2}{6 \left(1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right)} = \frac{1}{2} L_{\Sigma}^{\alpha} I_y^2 \quad \text{или} \quad L_{\Sigma}^{\alpha} = \mu_0 \frac{\pi W_y^2 \left(l - \frac{2}{3} \alpha \right) 1 + 4 \frac{R_2}{R_1} + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2}{3 \left(1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right)} \quad (7)$$

На основании полученных данных магнитный поток Φ , проходящий по корпусу устройства, можно представить в виде:

$$\Phi = 2\pi \mu_0 R_1 \left[\int_0^{\alpha} \frac{W_y I_y R_2 x}{R_1^2 - R_2^2 \alpha} dx + \frac{W_y I_y R_2}{R_1^2 - R_2^2} (l - \alpha) \right]$$

Интегрирование этого выражения как интеграла, содержащего линейные множители, , дает окончательное искомое уравнение:

$$\Phi = 2\pi \mu_0 \frac{W_y I_y R_1 R_2}{R_1^2 - R_2^2} \left[\frac{1}{\alpha} \frac{1}{2} x^2 \Big|_0^{\alpha} + (l - \alpha) \right]$$

$$\Phi = 2\pi \mu_0 \frac{W_y I_y R_1 R_2}{R_1^2 - R_2^2} \left(l - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (8)$$

Принимая во внимание, что корпус устройства является наиболее насыщенным в магнитном отношении участком магнитопровода, и, исходя из цилиндрического конструктивного исполнения этого участка, можно записать:

$$\Phi = B_{K_{доп}} 2\pi R_1 \epsilon \quad (9)$$

При совместном решении уравнений (8) и (9) $2\pi \mu_0 \frac{W_y I_y R_1 R_2}{R_1^2 - R_2^2} \left(l - \frac{\alpha}{2} \right) = B_{K_{доп}} 2\pi R_1 \epsilon$

получаем выражение для определения величины индукции в корпусе устройства:

$$W_{\Sigma}^{\alpha} = \mu_0 \frac{\pi W_y^2 I_y^2 \alpha}{18} \frac{1 + 4 \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2}{1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2} \quad (5)$$

Суммарная магнитная энергия в рабочем объеме на участках „ $l - \alpha$ “ и „ α “ определена по формуле:

$$W_{\Sigma}^{\Sigma} = W_{\Sigma}^{l-\alpha} + W_{\Sigma}^{\alpha},$$

$$W_{\Sigma}^{\Sigma} = \mu_0 \frac{\pi W_y^2 I_y^2 \left(l - \frac{2}{3} \alpha \right) 1 + 4 \frac{R_2}{R_1} + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2}{6 \left(1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right)} \quad (6)$$

Индуктивность I_{Σ}^{Σ} обмотки управления ЭММА можно определить из равенства

$$B_{K_{доп}} = \mu_0 \frac{W_y I_y R_2}{R_1^2 - R_2^2} \frac{\left(l - \frac{\alpha}{2} \right)}{\epsilon} \quad (10)$$

Анализ полученной зависимости показывает, что при проектировании ЭММА цилиндрических конструкций величину ϵ следует выбирать наименьшей в корпусе, т.е. в месте расположения обмотки управления (участок III на рис. 1). Для обеспечения высоких регулировочных способностей аппарата корпус необходимо изготавливать из магнитного материала с высоким значением магнитной проницаемости и индуктивности насыщения. Определив по кривым намагничивания для выбранных материалов самого напряженного в магнитном отношении участка магнитопровода $B_{K_{доп}}$ можно установить максимальное значение и диапазоны регулирования силы тока I_y в ОУ, обеспечивающие энергоэффективное проведение процесса механоактивации [17]:

$$I_{y_{\max}} = \frac{B_{K_{доп}} (R_1^2 - R_2^2) \epsilon}{\mu_0 W_y R_2 \left(l - \frac{\alpha}{2} \right)},$$

$$I_{y_{\min}} \leq I_y \leq \frac{B_{K_{доп}} R_1^2 - R_2^2 \epsilon}{\mu_0 W_y R_2 \left(l - \frac{\alpha}{2} \right)},$$

где $I_{y_{\min}}$ - минимальное значение силы тока, при котором обеспечивается формирование структурных групп из ферромагнитных элементов в рабочем объеме ЭММА [1].

Заключение

Результаты исследований представляют методику расчета диапазонов регулирования силы тока в обмотках управления ЭММА цилиндрических конструкций, при которых достигается максимизация дисперсности перерабатываемого продукта при минимальных энергозатратах на формирование диспергирующих усилий в магнитоожигенном слое размольных ферротел.

Список литературы

1. Беззубцева М.М., Волков В.С. Классификация электромагнитных механоактиваторов по технологическому назначению. 2015. №8 -1. С. 25-27.
2. Беззубцева М.М., Ружьев В.А., Волков В.С. Теоретические исследования деформированного магнитного поля в рабочем объеме электромагнитных механоактиваторов с магнитоожигенным слоем размольных элементов цилиндрической формы // Фундаментальные исследования. 2014. №6-4. С. 689-693.
3. Беззубцева М.М., Волков В.С., Котов А.В., Обухов К.Н. Определение сил и моментов, действующих на систему ферромагнитных размольных элементов цилиндрической формы в магнитоожигенном слое рабочего объема электромагнитных механоактиваторов // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-3. С. 504-508.
4. Беззубцева М.М., Обухов К.Н. К вопросу исследования процесса электромагнитной механоактивации пищевого сельскохозяйственного сырья // Успехи современного естествознания. 2015. №1-2. С. 232-234.
5. Беззубцева М.М., Волков В.С., Обухов К.Н. Электромагнитная механоактивация полуфабрикатов шоколадного производства // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 3. С. 73-74.
6. Беззубцева М.М., Волков В.С., Платашенков И.С. Метод расчета стационарного теплового поля электромагнитного криоизмельчителя (ЭМКИ) // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. -2009. -№ 13. С. 118-122.
7. Беззубцева М.М., Криштопа В.А. Исследование тепловых процессов в электромагнитном измельчителе постоянного тока. В сборнике: Технологии и средства механизации сельского хозяйства сборник научных трудов. Редакционная коллегия: Л.В. Тишкин - главный редактор, Б.И. Вагин, Е.И. Давидсон, В. В. Калюга. Санкт-Петербург, 2006. С. 19-26.
8. Беззубцева М.М., Волков В.С., Котов А.В., Обухов К.Н. К вопросу исследования зависимости технологического эффекта измельчения рецептурных компонентов шоколадного производства от режимов работы электромагнитных механоактиваторов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. С. 358.; URL: www.science-education.ru/121-19186 (дата обращения: 11.07.2015).
9. Беззубцева М.М., Смелик В.А., Волков В.С. Исследование закономерностей износа ферроэлементов магнитоожигенного слоя электромагнитных механоактиваторов // Фундаментальные исследования. -2015. № 2-20. С. 4398-4402.
10. Беззубцева М.М. К вопросу исследования эффекта намола в аппаратах с магнитоожигенным слоем ферротел // Международный журнал экспериментального образования. -2014. - № 8-3. С. 96.
11. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование режимов работы электромагнитных механоактиваторов // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 8. – С. 109-110.
12. Беззубцева М.М., Волков В.С., Котов А.В. Анализ эффективности способов измельчения шоколадных масс // Успехи современного естествознания. – 2015. - №1 - 7. С. 1160-1163.
13. Беззубцева М.М., Волков В.С. Механоактиваторы агропромышленного комплекса. Анализ, инновации, изобретения (монография) // Успехи современного естествознания. - 2014. № 5- 1. С. 182-183.
14. Беззубцева М.М., Волков В.С., Обухов К.Н. Конструктивная модернизация аппаратов с магнитоожигенным слоем с целью повышения энергоэффективности // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 6. С. 68-69.
15. Беззубцева М.М., Волков В.С. К расчету магнитной цепи электромагнитных механоактиваторов // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 2-1. С. 66-67.
16. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование строения магнитного поля электромагнитных механоактиваторов (ЭММА) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2012. № 12. С. 90-91.
17. Беззубцева М.М., Обухов К.Н. Энергетические параметры, характеризующие работу электромагнитных механоактиваторов // Международный журнал экспериментального образования. 2015. №8-1. С. 134-135.