

УДК 621.313.17:621.928

Д.О. Забалуева, Э.В. Гиззатуллин, А.Ю. Коняев  
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ МАШИН

Одной из актуальных экономических задач является развитие промышленной переработки твердых отходов производства и потребления. В статье приводятся результаты исследования электродинамических сепараторов, применяемых для извлечения цветных металлов из твердых отходов. Рассматриваются сепараторы с бегущим магнитным полем на основе линейных индукционных машин. Приведены показатели оценки энергоэффективности сепараторов и примеры расчета таких показателей. Показана возможность снижения электрической энергии, потребляемой сепаратором за счет рационального выбора размеров линейного индуктора.

**Ключевые слова:** электродинамический сепаратор; линейная индукционная машина; снижение потребления энергии.

D.O. Zabalueva, E.V. Gizzatullin, A.Yu. Konyaev  
Ural Federal University, Yekaterinburg

## INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF EDDY-CURRENT SEPARATORS BASED ON LINEAR INDUCTION MACHINES

One of the urgent economic tasks is the development of industrial processing of solid production and consumption waste. The article presents the results of a study of eddy-current separators used to extract non-ferrous metals from solid waste. Separators with a traveling magnetic field based on linear induction machines are considered. Indicators for assessing the energy efficiency of separators and examples of calculating such indicators are given. The possibility of reducing the electrical energy consumed by the separator due to the rational choice of the dimensions of the linear inductor is shown.

**Key words:** eddy-current separator; linear induction machine; energy consumption reduction.

**Введение.** В последние годы в нашей стране большое внимание уделяется становлению отрасли переработки отходов производства и потребления. При этом решаются две взаимосвязанные задачи: охрана окружающей среды, а также извлечение ресурсоценных компонентов и последующее использование их в качестве вторичного сырья. В различных видах многокомпонентных отходов наибольшую ценность представляют вторичные металлы. Для извлечения черных металлов применяются серийно выпускаемые магнитные сепараторы. При извлечении лома и отходов цветных металлов находят применение технологии и устройства электродинамической (вихретоковой) сепарации в бегущем магнитном поле, менее отработанные на практике [1-4]. Наибольшее распространение получили электродинамические сепараторы с вращающимися индукторами на основе постоянных магнитов, основным достоинством которых считается малое энергопотребление [1, 3]. В то же время наибольшей

производительностью и универсальностью обладают сепараторы, в которых бегущее магнитное поле создается линейными индукторами с трехфазной обмоткой. Принцип работы таких сепараторов подобен принципу работы асинхронных электродвигателей. При этом роль вторичного элемента таких линейных индукционных машин (ЛИМ) выполняют извлекаемые из сепарируемых отходов частицы цветных металлов. Линейные индукторы сепараторов могут встраиваться в готовые технологические линии и выполняться с открытой магнитной системой (при одностороннем исполнении индукторы устанавливаются под лентой, перемещающей обрабатываемые отходы), либо в двухстороннем исполнении (зона сепарации находится в технологическом зазоре между двумя индукторами). Большой немагнитный зазор обуславливает высокое энергопотребление и низкий коэффициент мощности ( $\cos\phi$ ) ЛИМ. С учетом этого при разработке электродинамических сепараторов возникает задача повышения их энергоэффективности (обеспечение минимума энергопотребления при заданных технологических характеристиках).

**Методы и результаты исследований.** При разработке электродинамических сепараторов в качестве критериев оптимальности целесообразно использовать такие показатели, как: удельное электромагнитное усилие  $F_m = F_{эм}/m$  [Н/кг или м/с<sup>2</sup>] (отношение пускового электромагнитного усилия к массе извлекаемой частицы) и энергетический показатель  $F_{mS} = F_m/S$  [Н/(кг·кВА)] (отношение удельного усилия к потребляемой ЛИМ мощности). Первый показатель определяет работоспособность сепаратора (возможность достижения требуемых для извлечения металла ускорений), второй – позволяет оценить энергопотребление.

Для предварительного расчета удельных электромагнитных усилий  $F_m$  можно использовать методику расчета усилий, действующих в бегущем магнитном поле на проводящие частицы, размеры которых меньше размеров полюсного деления индуктора. Такая методика разработана в Уральском федеральном университете [3, 5].

Полную мощность, потребляемую ЛИМ сепаратора из сети, на стадии предпроектных исследований можно определить из расчета схемы замещения машины с учетом ряда упрощающих допущений. Поскольку определяющим для процесса сепарации проводящих частиц является режим трогания (пуска), то за основу взята Т-образная схема замещения асинхронного двигателя при скольжении  $s = 1$  (рис. 1, а).

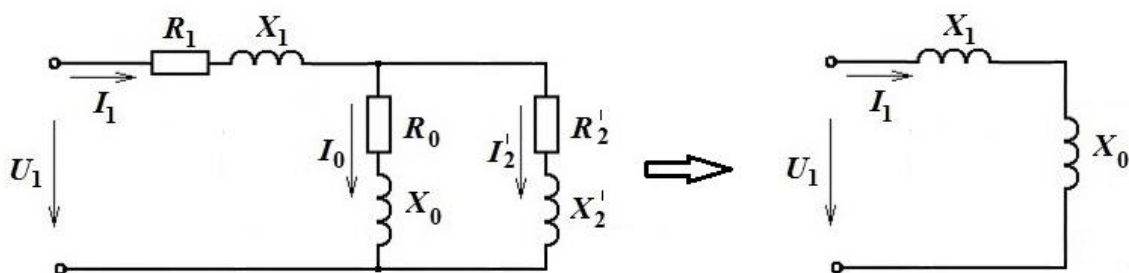


Рисунок 1 – Полная (а) и упрощенная (б) схемы замещения ЛИМ сепаратора

Оценим возможности дальнейшего упрощения схемы замещения. Сопротивления  $R_2$  и  $X_2$  соответствуют мощности, вносимой проводящей частицей при появлении ее в активной зоне индуктора. Расчеты и эксперименты показывают, что при размерах немагнитных проводящих частиц, меньших полюсного деления  $\tau$ , появление их над индуктором практически не изменяет ток индуктора  $I_1$ . С учетом этого при расчете мощности  $S$  вторичный контур в схеме замещения можно не учитывать. Активные сопротивления  $R_1$  и  $R_0$ , которые соответствуют потерям мощности в обмотке индуктора и в стали магнитопровода, также мало влияют на ток индуктора. С учетом того, что ЛИМ сепаратора характеризуется относительно большими значениями отношения  $\delta/\tau$  (немагнитный рабочий зазор к полюсному делению), они имеют низкий коэффициент мощности ( $\cos\varphi = 0,1-0,2$  для одностороннего исполнения и  $\cos\varphi = 0,2-0,3$  для двухстороннего варианта). При таких значениях  $\cos\varphi$  полное сопротивление схемы замещения практически совпадает с реактивной составляющей ( $X_1 + X_0 = (0,995-0,954) \cdot Z$ ). При этом схема замещения ЛИМ максимально упрощается (рис. 1, б). Это позволяет выразить ток индуктора и полную мощность ЛИМ только через реактивные сопротивления: индуктивное сопротивление рассеяния обмотки индуктора  $X_1$  и сопротивление взаимоиндукции  $X_0$ :

$$I_1 \approx \frac{U_1}{(X_1 + X_0)}, \quad (1)$$

$$S = 3I_1^2(X_1 + X_0). \quad (2)$$

Входящие в (1) - (2) сопротивления можно определять по известным из практики проектирования асинхронных электродвигателей выражениям [6]:

$$X_1 = 4\pi\mu_0 f w_1^2 \frac{L_n}{pq} \Sigma\lambda, \quad (3)$$

$$X_0 = \frac{4\mu_0 L_n t m f (w_1 k_w)^2}{k_\mu \delta_\delta p}, \quad (4)$$

где  $f$  – частота сети;  $w_1$  – количество последовательно соединенных витков фазы обмотки;  $L_n$  – ширина активной зоны индуктора;  $p$  – число пар полюсов;  $q$  – число пазов на полюс и фазу;  $\tau$  – полюсное деление;  $m$  – число фаз обмотки;  $k_w$  – обмоточный коэффициент;  $\delta_\delta = k_\delta \delta$  – эквивалентный немагнитный зазор;  $k_\mu$  – коэффициент, учитывающий насыщение магнитопровода;  $\Sigma\lambda = \lambda_\pi + \lambda_\lambda + \lambda_\delta$  – коэффициенты проводимости рассеяния: пазового, лобового, дифференциального (при больших технологических зазорах дифференциальным рассеянием можно пренебречь).

На ранней стадии проектирования ток индуктора  $I_1$ , входящий в (2), не известен, поэтому его целесообразно заменить на величину, характеризующую удельные электромагнитные нагрузки ЛИМ. При расчетах электромагнитного усилия, действующего на сепарируемую частицу, используется модель ЛИМ, в

которой зубчатый магнитопровод заменяется гладким, а токи в пазах представлены током, распределенным по поверхности индуктора [3, 5]. Амплитуда линейной плотности такого тока  $J_{1m}$  определяется выражением:

$$J_{1m} = \sqrt{2}k_w A_1 = \sqrt{2}k_w \frac{I_1 w_1}{p q t_z}. \quad (5)$$

С учетом (2) - (5) полную мощность, потребляемую ЛИМ из сети, можно представить в виде:

$$S = 0,4 \cdot 10^{-6} \frac{f \cdot l_{\text{и}} \cdot L_{\text{и}}}{k_w^2} J_{1m}^2 \left( 10 t_z \frac{h_{\text{п}}}{3 b_{\text{п}}} + 3,4 \frac{\tau^2}{m \cdot L_{\text{и}}} + \frac{k_w^2 \tau^2}{k_{\mu} \cdot \delta_3} \right) \cdot N, \quad (6)$$

где  $l_{\text{и}} = 2p\tau$  – длина активной зоны индуктора;  $b_{\text{п}}$  и  $h_{\text{п}}$  – ширина и глубина паза;  $t_z$  – зубцовое деление;  $J_{1m}$  – амплитуда линейной плотности тока одного индуктора; коэффициент  $N$  принимает значение 1 или 2 соответственно при одностороннем или двухстороннем возбуждении индуктора; коэффициент 3,4 перед вторым слагаемым в скобках соответствует двухслойной обмотке, при однослойной – следует подставлять 6,7.

Как видно, в выражение (6) помимо амплитуды линейной плотности тока входят только главные размеры индуктора и размеры зубцовой зоны магнитопровода, которые могут быть заданы в самом начале проектирования ЛИМ сепаратора. Возможность использования выражения для полной мощности (6) проверялось при расчетах электродинамического сепаратора КМ-203М, разработанного и созданного в Уральском федеральном университете в содружестве с ОАО «Уралэнергоцветмет» [2]. Сепаратор предназначался для извлечения цветных металлов из потока твердых коммунальных отходов, перемещаемых по ленте конвейера шириной 1,2 м. При заводских испытаниях сепаратора были определены полная потребляемая из сети мощность ( $S = 111$  кВА) и токи в фазах индуктора (180 А, 175 А, 150 А). Среднее значение тока в фазе  $I_1 = 168$  А. Такому току соответствует амплитуда линейной плотности тока по (5)  $J_{1m} = 110$  кА/м. Для этого значения  $J_{1m}$  при заданных размерах индуктора расчетное значение полной мощности по (6) составило  $S = 108,1$  кВА, что менее чем на 3% отличается от значения, полученного при испытаниях.

Для условий, соответствующих техническому заданию на электродинамический сепаратор КМ-203М, выполнены расчеты показателей  $F_m$  и  $F_{mS}$  в зависимости от величины полюсного деления  $\tau$ . Значения расчетных полюсных делений соответствуют штампу, имеющемуся в ОАО «Уралэнергоцветмет». Для расчета удельных электромагнитных усилий выбраны алюминиевые частицы размером  $40 \times 40 \times 3$  мм с удельной электропроводностью 27 МСм/м. При этом рассмотрено два варианта расположения проводящих частиц: на ленте конвейера (удаление от поверхности индуктора  $h = 10$  мм) и на поверхности слоя отходов ( $h = 50$  мм). Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3:  $F_m$  - пунктирные линии,  $F_{mS}$  - сплошные линии.

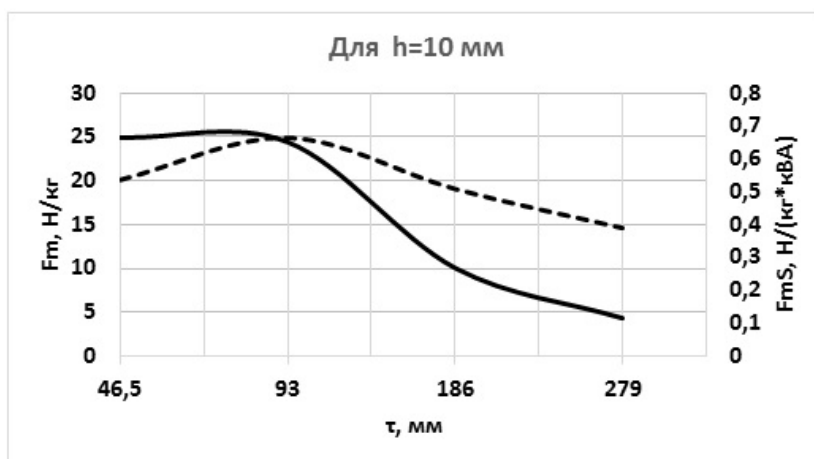


Рисунок 2 – Удельные показатели сепаратора при расположении частиц на ленте

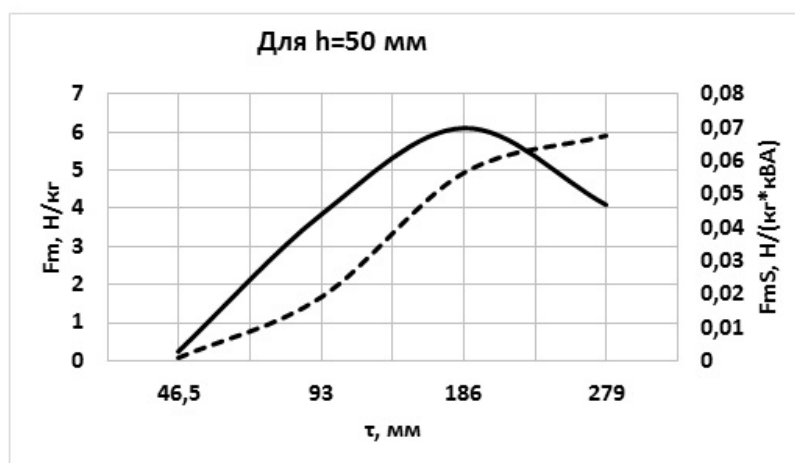


Рисунок 3 – Показатели сепаратора при расположении частиц на поверхности слоя отходов

Как видно из рис. 2 и 3, зависимости  $F_{mS}(\tau)$  имеют экстремумы, что позволяет выбирать необходимое полюсное деление. Например, в случае подачи сепарируемых материалов монослоем ( $h = 10$  мм) целесообразно принять полюсное деление  $\tau = 93$  мм, соответствующее максимуму показателя  $F_m$  и близкое к максимальному значению  $F_{mS}$ . Для высокопроизводительной технологической линии с толщиной слоя отходов 50 мм предпочтительно полюсное деление  $\tau = 186$  мм, которое было выбрано при проектировании сепаратора КМ-203М. Выполненные расчеты подтвердили правильность этого выбора. Нужно отметить, что в качестве прототипа заказчиком был представлен сепаратор КМ-203, который описан, например, в [4]. Его разработчики использовали индуктор с полюсным делением 126 мм, далеким от оптимального значения. В результате ЛИМ сепаратора-прототипа имела завышенные габариты и потребляемую мощность (более 400 кВА).

**Заключение.** Таким образом, выполненные исследования подтвердили возможность использования предложенной методики для оценки

энергоэффективности электродинамических сепараторов на основе линейных индукционных машин и выбора рациональных вариантов линейного индуктора на стадии проектирования.

### Список литературы

1. Wilson R.J., Veasey T.J., Squires D.M. Application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes / Minerals Engineering, 1994, № 7, pp. 975-984.

2. Устройства для электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов / А.А. Патрик, Н.Н. Мурахин, А.Ю. Коняев, Т.Н. Дерендяева, С.Л. Назаров // Промышленная энергетика, 2001, № 6, с. 16-19.

3. Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем: основы теории и расчета / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров. – Екатеринбург: УрФУ. – 2012. 104 с.

4. Кузнецов В.Л., Крапильская Н.М., Юдина Л.Ф. Экологические проблемы твердых бытовых отходов (сбор, ликвидация, утилизация). – М.: ИПЦ МИКХиС, 2005. – 53 с.

5. Коняев А.Ю., Назаров С.Л. Исследование характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели // Электротехника, 1998, № 5, с. 52-57.

6. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.

### Сведения об авторах

**Забалуева Дарья Олеговна** – магистрант кафедры «Электротехника», Уральский федеральный университет, Екатеринбург, e-mail: dashenka.1998zabalueva@mail.ru

**Гиззатуллин Эльмир Вилевич** – магистрант кафедры «Электротехника», Уральский федеральный университет, Екатеринбург, e-mail: gizzatullin.elmir@mail.ru

**Коняев Андрей Юрьевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника», Уральский федеральный университет, Екатеринбург, e-mail: a.u.konyaev@urfu.ru

### About the authors

**Zabalueva Daria Olegovna** – Master's student of the Department of Electrical Engineering, Ural Federal University, Yekaterinburg, e-mail: dashenka.1998zabalueva@mail.ru

**Gizzatullin Elmir Vilevich** – Master's student of the Department of Electrical Engineering, Ural Federal University, Yekaterinburg, e-mail: gizzatullin.elmir@mail.ru

**Konyaev Andrey Yurievich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering, Ural Federal University, Yekaterinburg, e-mail: a.u.konyaev@urfu.ru