

УДК 621.313.17:621.928

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.4.03

**А.Ю. Коняев, Д.О. Забалуева, М.Е. Зязев**

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ С БЕГУЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Установки электродинамической сепарации в бегущем магнитном поле находят применение в технологиях переработки твердых отходов производства и потребления. Они применяются для извлечения включений цветных металлов из потока неметаллов, а также для индукционной сортировки лома цветных металлов и сплавов. В статье рассматривается установка, которая состоит из конвейера, перемещающего обрабатываемые материалы, и линейного индуктора, располагаемого под лентой конвейера. **Цель исследования:** повышение технологической и энергетической эффективности электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов. **Результаты:** показано, что для увеличения степени извлечения металлов из потока отходов без повышения энергопотребления целесообразно использовать линейный индуктор модульной конструкции. При этом модули располагаются со смещением друг относительно друга по ходу движения конвейера и движения извлекаемых частиц. В случае применения трех модулей индуктора возможная перестановка фаз обмотки на отдельных модулях, которая обеспечивает симметрию фазных токов сепаратора. Выравнивание фазных токов позволяет полностью компенсировать реактивную энергию индукторов. При этом снижаются потери энергии в системе электроснабжения. Показана возможность выбора параметров линейных индукторов на стадии проектирования с учетом достижения минимума полной мощности, потребляемой сепаратором из сети. С учетом возможности компенсации реактивной энергии индукторов предложено перейти к выбору параметров линейных индукторов по условию достижения минимума активной мощности сепаратора. Приведенные примеры расчетов опытно-промышленного образца электродинамического сепаратора показывают, что при таком подходе возможна корректировка параметров индуктора, которая обеспечивает улучшение технологических и энергетических характеристик сепаратора.

**Ключевые слова:** электродинамическая сепарация, линейная индукционная машина, степень извлечения цветных металлов, электрическая мощность сепаратора, результаты исследований.

**A.Yu. Konyaev, D.O. Zabalueva, M.E. Zyazev**

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

## **INCREASING THE EFFICIENCY OF EDDY-CURRENT SEPARATORS WITH A TRAVELING MAGNETIC FIELD**

Installations of electrodynamic separation in a traveling magnetic field are used in technologies for processing solid waste of production and consumption. They are used for the extraction of non-ferrous metal inclusions from the non-metal stream, as well as for the induction sorting of non-ferrous scrap and alloys. The article discusses the installation, which consists of a conveyor that moves the processed materials, and a linear inductor located under the conveyor belt. **Purpose of the study:**

Increasing the technological and energy efficiency of electrodynamic separators based on linear inductors. **Results:** It was shown that to increase the degree of metal recovery from the waste stream without increasing energy consumption, it is advisable to use a linear inductor of a modular design. In this case, the modules are displaced relative to each other along the movement of the conveyor and the movement of the extracted particles. In the case of using three inductor modules, a possible rearrangement of the winding phases on separate modules, which ensures the symmetry of the phase currents of the separator. The equalization of the phase currents allows the reactive energy of the inductors to be fully compensated. At the same time, energy losses in the power supply system are reduced. The possibility of choosing the parameters of linear inductors at the design stage is shown, taking into account the achievement of a minimum consumption of the total power consumed by the separator from the network. Taking into account the possibility of compensating the reactive energy of the inductors, it is proposed to proceed to the selection of the parameters of the linear inductors according to the condition of achieving a minimum of the active power of the separator. The given examples of calculations of an experimental industrial model of an electrodynamic separator show that with this approach it is possible to adjust the parameters of the inductor, which provides an improvement in the technological and energy characteristics of the separator.

**Keywords:** eddy-current separation, linear induction machine, degree of extraction of non-ferrous metals, electric power of the separator, research results.

## Введение

Одним из эффективных примеров применения линейных индукционных машин (ЛИМ) на основе трехфазных индукторов является использование их при создании электродинамических сепараторов (по принятой в англоязычной литературе терминологии: eddy-current separators – вихретоковых сепараторов). Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем, идея которых известна с конца XIX в. (патент Т. Эдисона 1882 г.), нашли широкое применение только к концу XX в. в связи с развитием промышленности по переработке твердых отходов как за рубежом [1–7], так и в нашей стране [8–16]. Такие сепараторы применяются для решения двух типов технологических задач [14–18]:

– извлечение включений цветных металлов из потоков неметаллических сыпучих материалов (из производственных и коммунальных отходов, из различных технологических смесей);

– индукционная сортировка цветных металлов и сплавов при подготовке их к металлургическому переделу, в том числе обработка лома электротехнического и электронного оборудования, автомобильного лома и др.

Электродинамические сепараторы на основе ЛИМ легко вписываются в готовые технологические линии. При этом линейные индукторы могут устанавливаться под лентой конвейера, перемещающего обрабатываемые материалы, либо под наклонной плоскостью в местах перегрузки сыпучих отходов или лома цветных металлов. Схематично

конструкции таких сепараторов показаны на рис. 1. Сепаратор, показанный на рис. 1, а, обладает высокой производительностью и применяется для выделения цветных металлов из потоков неметаллов (например, при обработке автомобильного лома на шредерных заводах, при обработке твердых коммунальных отходов). Сепараторы с наклонной плоскостью (см. рис. 1, б), имеющие больше возможностей по формированию траектории извлекаемых частиц, целесообразны при индукционной сортировке цветных металлов и сплавов.

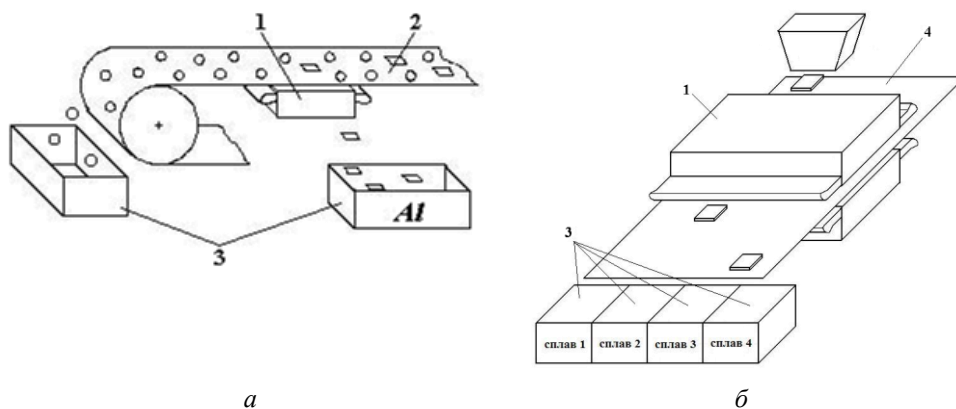


Рис. 1. Схемы электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов: 1 – индукторы; 2 – лента конвейера; 3 – приемники продуктов разделения; 4 – наклонная плоскость

В последние годы в связи с появлением высокоэффективных постоянных магнитов все большее распространение получают электродинамические сепараторы с вращающимся индуктором, чаще всего встраиваемым в шкив конвейера, как показано на рис. 2. Такие сепараторы могут применяться и для сбора, и для сортировки цветных металлов [16–22]. Однако при этом требуется подача материалов монослоем в виде разреженного потока, что ограничивает производительность установок.

Основным достоинством сепараторов на основе постоянных магнитов по сравнению с сепараторами на основе ЛИМ считается отсутствие энергопотребления для возбуждения вращающегося магнитного поля. Однако при такой оценке не учитывается потребление энергии электродвигателем, приводящим в движение индуктор. Кроме того, такой сепаратор не может встраиваться в готовые технологические линии, поэтому комплектуется собственным конвейером, электропривод которого также следует учитывать при оценке энергопотребления ус-

тановки. В зависимости от производительности сепараторов суммарная установленная мощность указанных электродвигателей составляет от 3 до 15 кВт [16].

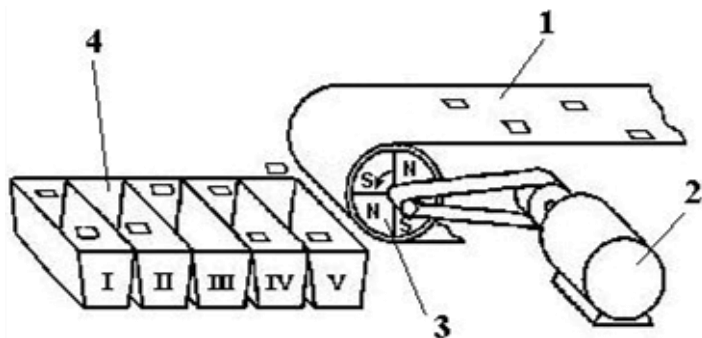


Рис. 2. Схема сепаратора на основе вращающихся индукторов с постоянными магнитами: 1 – лента конвейера; 2 – приводной электродвигатель; 3 – вращающийся индуктор; 4 – приемники продуктов разделения

Электродинамические сепараторы на основе ЛИМ характеризуются существенно большей электрической мощностью, потребляемой из сети. Например, в сепараторах КМ-203М, разработанных для извлечения металлов из твердых коммунальных отходов, при ширине ленты конвейера 1,0–1,2 м мощность трехфазного линейного индуктора превышает 100 кВА [13, 14]. В то же время при наличии открытой магнитной системы такие ЛИМ характеризуются низким коэффициентом мощности ( $\cos\varphi < 0,1$ ). Из этого следует, что при решении вопроса компенсации реактивной энергии линейных индукторов энергопотребление электродинамических сепараторов на основе ЛИМ будет сопоставимо с энергопотреблением сепараторов на основе вращающихся индукторов с постоянными магнитами.

Исследованием разных вариантов электродинамических сепараторов совместно с заинтересованными предприятиями занимается кафедра электротехники Уральского федерального университета [12–15, 22]. Одной из целей исследований таких сепараторов является повышения эффективности их работы: увеличение степени извлечения сепарируемых металлов и снижение энергопотребления. Возможности повышения эффективности сепараторов на основе ЛИМ обсуждаются в данной статье.

## Содержание и результаты исследований

Рассмотрим работу электродинамического сепаратора при расположении линейного индуктора под лентой конвейера (см. рис. 1, *a*). Схема движения сепарируемых металлических частиц в рабочей зоне такого сепаратора показана на рис. 3. Частицы участвуют в двух движениях: со скоростью  $V_k$  в направлении движения конвейера и ускоренно под действием электромагнитной силы  $F_{эм}$  в поперечном направлении. В самом худшем случае частица должна преодолеть в поперечном направлении расстояние, равное ширине ленты конвейера  $B_k$ , как показано на рис. 3, *a*. Время пребывания частицы над индуктором определяется шириной индуктора  $L_{и}$  и скоростью конвейера  $V_k$ . Например, электродинамический сепаратор КМ-203М, разработанный при участии УрФУ и описанный в [12–13], характеризуется следующими параметрами: ширина ленты конвейера  $B_k = 1200$  мм, скорость конвейера  $V_k = 1$  м/с, размеры активной зоны линейного индуктора  $1488 \times 350$  мм, полная мощность, потребляемая ЛИМ из сети,  $S = 112$  кВА. Как показали результаты испытаний сепаратора, из потока твердых коммунальных отходов надежно извлекаются алюминиевые частицы крупностью более 40 мм (частица 1, см. рис. 3, *a*). Алюминиевые частицы меньшей крупности, а также частицы металлов с меньшей электропроводностью могут не извлекаться из потока отходов (частицы 2 и 3, см. на рис. 3, *a*). При испытаниях сепаратора КМ-203М в технологической линии обработки твердых коммунальных отходов указанные потери цветных металлов составляли 20–30 %.

Наиболее просто повышения степени извлечения сепарируемых металлических частиц можно добиться за счет увеличения ширины линейного индуктора  $L_{и}$ , как показано на рис. 3, *б*, либо установкой дополнительного индуктора (как было сделано в случае сепаратора КМ-203М). Однако при этом практически пропорционально увеличению  $L_{и}$  растет потребляемая сепаратором мощность  $S$ . Повышение степени извлечения металла без роста энергопотребления возможно за счет использования модульной конструкции линейного индуктора, как показано на рис. 3, *в*. При этом каждый модуль индуктора имеет габариты и мощность в три раза меньшие, чем в исходном варианте (см. рис. 3, *a*), а ступенчатое расположение модулей позволяет сформировать траектории движения частиц, обеспечивающие их удаление с ленты конвейера. Указанный технологический эффект подтверждается результатами экспериментов, выполненных авторами.

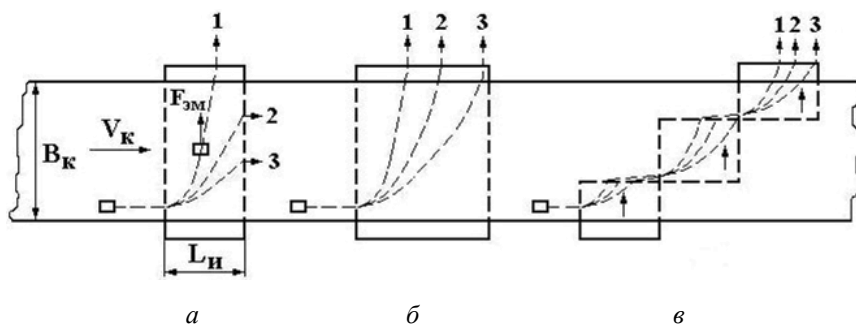


Рис. 3. Схема движения извлекаемых металлических частиц в зоне сепарации

Важно отметить, что модульная конструкция ЛИМ позволяет также улучшить электрические характеристики сепаратора. Ранее отмечалось, что для электродинамических сепараторов характерна большая реактивная мощность. Например, ЛИМ сепаратора КМ-203М потребляет полную мощность  $S = 112$  кВА при  $\cos\varphi = 0,05$  [12]. Компенсация реактивной мощности осложняется присущей линейным индукторам несимметрией фазных токов. В сепараторе КМ-203М отклонение фазных токов от среднего значения составляло 10–12 %. При установке компенсирующих конденсаторов удалось снизить потребляемую мощность линейного индуктора до значения  $S = 40$  кВА, при этом несимметрия токов увеличилась (отклонение фазных токов от среднего значения возросло до 30–35 %).

При использовании в сепараторе индуктора из трех модулей (как на рис. 3, в) возможна транспозиция фаз обмоток отдельных модулей, благодаря которой можно обеспечить симметрию фазных токов сепаратора. В этом случае устраняются проблемы компенсации реактивной энергии ЛИМ. С учетом спокойного характера нагрузки ЛИМ сепаратора можно достичь значения  $\cos\varphi$ , близкого к 1,0. При этом мощность, потребляемая сепаратором из сети, приближается к активной мощности линейного индуктора (в случае сепаратора КМ-203М активная мощность индуктора  $P_1 = 5,6$  кВт). Таким образом достигаются существенное снижение энергопотребления сепаратора и уменьшение потерь в системе электроснабжения.

С учетом возможности полной компенсации реактивной мощности электродинамического сепаратора целесообразно изменить подход к оценке энергоэффективности установок на стадии проектирования. Ранее в [14, 23] для выбора главных размеров ЛИМ сепаратора предла-

галось использовать два критерия оптимальности: удельное электромагнитное усилие  $F_m = F/m$  [Н/кг или м/с<sup>2</sup>] (отношение пускового электромагнитного усилия к массе извлекаемой частицы) и  $F_{mS} = F_m/S$  [Н/(кг·кВА)] (отношение удельного электромагнитного усилия к полной потребляемой ЛИМ мощности). Показатель  $F_m$  позволяет оценить работоспособность сепаратора, определяемую достижением требуемых ускорений при извлечении металла. По второму показателю  $F_{mS}$  оценивается возможность достижения минимума энергопотребления при заданных требуемых усилиях. Указанный подход использовался при проектировании сепаратора КМ-203М. При этом электромагнитное усилие, действующее в бегущем магнитном поле на частицу ограниченных размеров, и удельное электромагнитное усилие рассчитывались по методике, изложенной в [14, 24], а полная мощность, потребляемая ЛИМ из сети, определялась по выражению:

$$S = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{f \cdot l_u \cdot L_u}{k_w^2} \cdot J_{1m}^2 \left( 10t_z \cdot \frac{h_n}{3b_n} + 3,4 \frac{\tau^2}{m \cdot L_u} + \frac{k_w^2 \cdot \tau^2}{k_\mu \cdot \delta_3} \right) N, \quad (1)$$

где  $f$  – частота сети;  $l_u$  – длина индуктора,  $l_u = 2p\tau$ ;  $L_u$  – ширина активной зоны индуктора;  $b_n$  и  $h_n$  – ширина и глубина паза;  $t_z$  – зубцовое деление;  $J_{1m}$  – амплитуда линейной плотности тока одного индуктора;  $\tau$  – полюсное деление;  $m$  – число фаз обмотки;  $k_w$  – обмоточный коэффициент;  $\delta_3$  – эквивалентный немагнитный зазор,  $\delta_3 = k_\delta \delta$ ;  $k_\mu$  – коэффициент, учитывающий насыщение магнитопровода; 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.

Выражение (1) получено при допущении, что токи линейного индуктора ограничены только реактивными сопротивлениями  $X_1$  (сопротивление рассеяния обмотки индуктора) и  $X_0$  (сопротивление взаимоиндукции), что при указанных низких значениях коэффициентов мощности ЛИМ вполне допустимо (например, при  $\cos\varphi = 0,1$  значение реактивного сопротивления составляет 0,995 от полного сопротивления ЛИМ).

Результаты расчета показателей  $F_m$  и  $F_{mS}$ , полученные при выборе полюсного деления  $\tau$  одностороннего линейного индуктора, представлены на рис. 4. Расчеты мощности  $S$  выполнены при следующих основных исходных данных: длина индуктора  $l_u = 1116$  мм при ширине ленты конвейера  $B_k = 1000$  мм; ширина активной зоны индуктора

$L_{\text{н}} = 300$  мм; амплитуда линейной плотности тока  $J_{1m} = 110$  кА/м; геометрия зубцовой зоны индуктора ( $t_z = 15,5$  мм;  $b_{\text{п}} = 9$  мм и  $h_{\text{п}} = 60$  мм) и варианты полюсных делений ( $\tau = 3qt_z$ ) определялись размерами штампа, имеющегося у предприятия-изготовителя. Удельные электромагнитные усилия  $F_m$  для каждого из вариантов  $\tau$  рассчитывались при постоянной линейной плотности тока  $J_{1m} = 110$  кА/м для алюминиевой пластины с размерами  $40 \times 40 \times 3$  мм, расположенной на удалении 50 мм от поверхности индуктора (металлическая частица лежит на поверхности слоя отходов и наиболее удалена от индуктора).

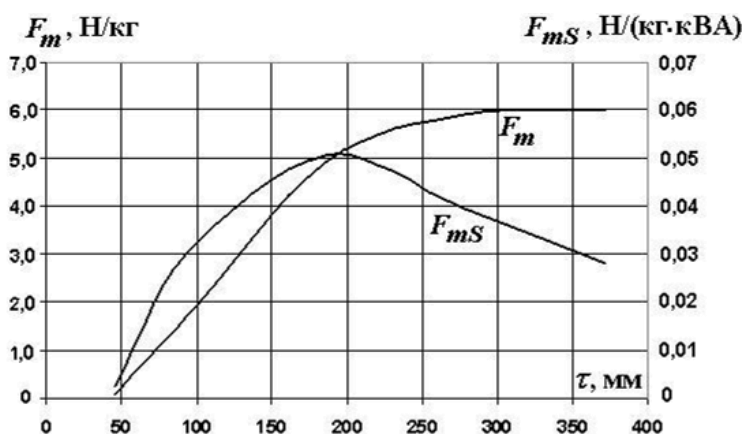


Рис. 4. К выбору полюсного деления ЛИМ сепаратора КМ-203М с учетом оценки полной потребляемой мощности

На графиках (рис. 4) нетрудно видеть, что удельное электромагнитное усилие  $F_m$  в рассматриваемом диапазоне полюсных делений монотонно растет, достигая максимального значения на границе диапазона (при  $\tau = 372$  мм). В то же время зависимость комплексного показателя  $F_{mS}$  от полюсного деления имеет явно выраженный экстремум при  $\tau = 186$  мм. Такое полюсное деление было рекомендовано при проектировании и использовано при создании опытно-промышленного сепаратора КМ-203М.

Возможности устранения несимметрии фазных токов и компенсации реактивной мощности ЛИМ при использовании модульной конструкции индуктора позволяют перейти при проектировании сепараторов к комплексному показателю  $F_{mP} = F_m/P_1$  [Н/(кг·кВт)] (отношение удельного электромагнитного усилия к активной мощности, потребляемой ЛИМ). Такой показатель позволяет оценивать работоспособность



сепаратора и затраты потребляемой им активной мощности  $P_1$ . При этом активная мощность ЛИМ может быть рассчитана по выражению:

$$P_1 = 0,5k_\theta \cdot \rho \cdot J_{1m}^2 \cdot \frac{l_u \cdot t_z \cdot (L_u + k_{\text{лоб}} \cdot \tau)}{k_3 \cdot k_w^2 \cdot h_n \cdot b_n}, \quad (2)$$

где к параметрам, использованным ранее в выражении (1), добавились:  $\rho$  и  $k_\theta$  – удельное электрическое сопротивление и температурный коэффициент меди;  $k_3$  – коэффициент заполнения паза медью;  $k_{\text{лоб}}$  – коэффициент, учитывающий длину лобовой части катушек обмотки.

Все величины, входящие в выражения (1) и (2), могут быть заданы на стадии проектирования, что позволяет оценивать мощности ЛИМ при поисковых расчетах электродинамических сепараторов. Зависимости показателей  $F_m$  и  $F_{mP}$  от полюсного деления одностороннего линейного индуктора, рассчитанные для тех же исходных данных, представлены на рис. 5.

Как видно на рис. 5, экстремум показателя  $F_{mP}$  смещается в сторону больших значений полюсных делений по сравнению с зависимостью  $F_{mS}(\tau)$ . С учетом этого можно рекомендовать для создания индуктора полюсное деление  $\tau = 232,5$  мм, соответствующее экстремуму. При этом удельное электромагнитное усилие  $F_m$  увеличивается на 13,8 % по сравнению со случаем полюсного деления  $\tau = 186$  мм.

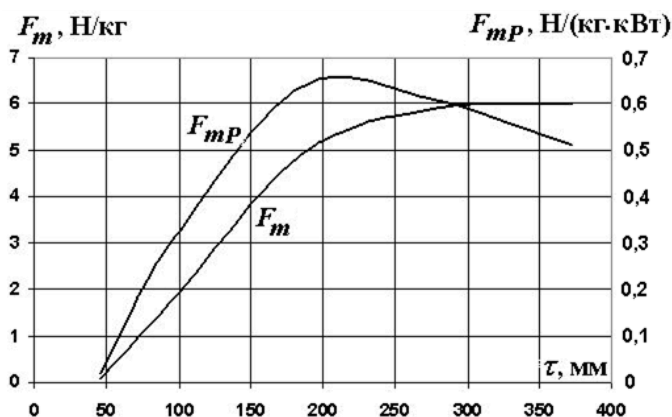


Рис. 5. К выбору полюсного деления ЛИМ сепаратора КМ-203М с учетом оценки потребляемой активной мощности

Таким образом, использование модульной конструкции линейных индукторов, обеспечивающее симметрирование фазных токов и компенсацию реактивной мощности ЛИМ, позволяет дополнительно

скорректировать проектное решение и добиться улучшения энергетических показателей сепараторов на стадии проектирования.

Еще больший эффект может быть получен при использовании в электродинамическом сепараторе двухстороннего линейного индуктора. В этом случае лента конвейера перемещает обрабатываемые материалы в зазоре между двумя активными сторонами индуктора. Такой вариант конструкции становится возможным при предварительной сортировке отходов по крупности и рекомендуется для обработки фракций отходов крупностью менее 50 мм [13]. При такой крупности зазор между сторонами индукторов может составлять 60 мм. Ограничение немагнитного зазора наряду с двухсторонним возбуждением магнитного поля позволяет существенно увеличить удельные электромагнитные усилия, действующие на сепарируемые частицы, и повысить энергетические характеристики сепараторов. Зависимости показателей  $F_m$ ,  $F_{mS}$  и  $F_{mP}$  от полюсного деления  $\tau$  для варианта ЛИМ с двухсторонним индуктором были рассчитаны при тех же исходных данных, что и для случая сепаратора КМ-203М. Результаты расчетов показаны на рис. 6 и 7.

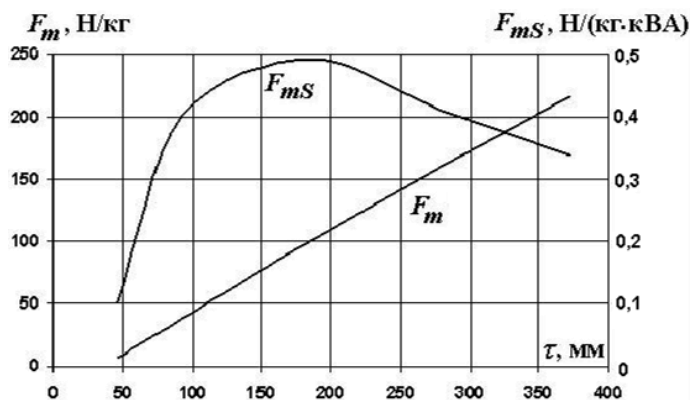


Рис. 6. Показатели сепаратора на основе двухсторонней ЛИМ с учетом оценки полной потребляемой мощности

Как видно на рис. 6, при оценке эффективности сепаратора по показателю  $F_{mS}$ , учитывающему расход полной мощности, потребляемой из сети, можно рекомендовать для создания индукторов полюсное деление  $\tau = 186$  мм, которому соответствует экстремум зависимости  $F_{mS}(\tau)$  и при котором достигается удельное электромагнитное усилие  $F_m = 100$  Н/кг (для алюминиевой частицы с размерами  $40 \times 40$  мм, находящейся в центре зазора на наибольшем удалении от поверхности индукторов).

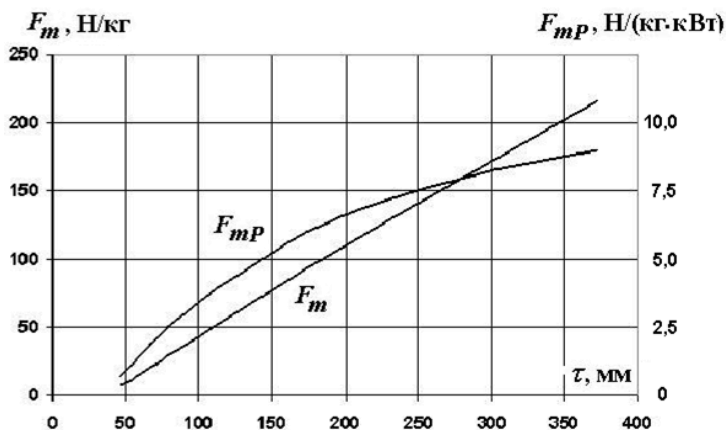


Рис. 7. Показатели сепаратора на основе двухсторонней ЛИМ с учетом оценки потребляемой активной мощности

На рис. 7 видно, что при использовании комплексного показателя  $F_{mP}$  экстремумы зависимости  $F_{mP}(\tau)$  смещаются в сторону больших значений полюсного деления  $\tau$ . Поэтому при необходимости увеличения удельного электромагнитного усилия (например, для повышения степени извлечения мелких частиц металла или частиц с меньшей электропроводностью) появляется возможность выбора полюсных делений линейного индуктора сепаратора, больших, чем  $\tau = 186$  мм, рекомендованные ранее.

### Заключение

Таким образом, выполненные исследования показали, что для повышения эффективности электродинамических сепараторов на основе ЛИМ с подачей обрабатываемых материалов по ленте конвейера целесообразно применять линейные индукторы модульного исполнения. При каскадном расположении модулей индуктора по направлению движения конвейера и движения сепарируемых частиц без увеличения мощности ЛИМ достигается извлечение металлических частиц меньшей крупности и меньшей электропроводности, чем в случае монолитных индукторов, располагаемых поперек ленты конвейера. Наличие трех модулей линейного индуктора позволяет использовать транспозицию фаз обмоток индуктора, что обеспечивает симметрирование фазных токов ЛИМ и способствует компенсации реактивной энергии. С учетом возможности практически полной компенсации реактивной мощности целесообразно при проектировании сепараторов

перейти от оценки энергоэффективности по показателю  $F_{mS}$ , учитывающему расход полной мощности, потребляемой сепаратором из сети, к показателю  $F_{mP}$ , который учитывает только активную мощность ЛИМ. Такой подход позволяет скорректировать выбор параметров сепаратора на стадии проектирования с соответствующим улучшением его характеристик.

### **Библиографический список**

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. – P. 975–984. DOI: 10.1016/0892-6875(94)90027-2/
2. Schloemann E. Eddy current techniques for segregating nonferrous metals from waste // Resources, Conservation and Recycling. – 1982. – № 5. – P. 149–162. DOI: 10.1016/0361-3658(82)90024-8
3. Samuel R. A new method of scrap recycling // Journal of Metals. – 1980. – Vol. 30. – P. 21–23.
4. “Coreco” introduces new induction powered separator for non-ferrous scrap // Recycling Today, Toronto. – 1979. – Vol. 17, № 8. – P. 90.
5. Patent US № 5133505. Separation of aluminium alloys / G. Bourcier, J. Lowdon; appl. date: 31.01.1990, № 606634; date of publ.: 28.07.1992. IPC class: B02C23/00.
6. Patent JP № 55094658. Non-magnetic metal sorter with linear motor / O. Akishi; appl. date: 08.01.1979; date of publ.: 18.07.1980. IPC class: B03C 1/ 24.
7. Patent JP № 60143846. Linear motor – type sorting device of non-magnetic metal / O. Akishi, T. Makoti, T. Katsuhi; appl. date: 10.12.1984; date of publ.: 30.07.1985. IPC class: B03C 1/ 24.
8. Коняев А.Ю., Жуков А.А., Ширшов Б.П. Линейные асинхронные двигатели в электромагнитных сепараторах для извлечения алюминия из бытовых отходов // Электротехническая промышленность. Электрические машины. – 1981. – № 9. – С. 16–18.
9. Черепнин О.М., Шевелев А.И., Шалимова И.Г. Сепарация немагнитных цветных металлов в бегущем магнитном поле // Цветные металлы. – 1985. – № 11. – С. 85–87.
10. Технология извлечения металлов из твердых бытовых отходов / С.В. Дуденков, Л.Я. Шубов, С.И. Хворостяной [и др.] // Цветные металлы. – 1984. – № 9. – С. 91–96.

11. Володин Г.И. Металлоуловитель цветных металлов на основе двухстороннего линейного асинхронного электродвигателя // Известия вузов. Электромеханика. – 1999. – № 4. – С. 16–18.

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

13. Features of electrodynamic separation the fine fraction of municipal solid waste / A.Yu. Konyaev, Zh.O. Abdullaev, D.N. Bagin, I.A. Konyaev // Ecology and Industry of Russia. – 2017. – Vol. 21, № 6. – P. 4–9. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-6-4-9

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

15. Коняев А.Ю., Коняев И.А., Назаров С.Л. Применение электродинамических сепараторов в технологиях вторичной цветной металлургии // Цветные металлы. – 2012. – № 11. – С. 22–26.

16. Сепараторы магнитные вихретоковые SMVT [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.erga.ru/catalog/vikhretokovye-separatory>

17. Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Олейник А.В. Технология отходов. – М.: Альфа-М, Инфра-М, 2011. – 352 с.

18. Колобов Г.А., Бредихин В.Н., Чернобаев В.М. Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов. – М.: Металлургия, 1993. – 288 с.

19. Lungu M., Rem P. Eddy-current separation of small nonferrous particles by a single-disk separator with permanent magnets // IEEE Transactions on Magnetics. – 2003. – 39(4). – P. 2062–2067. DOI: 10.1109/tmag.2003.812724

20. Settimo F., Belivacqua P., Rem P. Eddy current separation of fine non-ferrous particles from bulk streams // Physical Separation in Science and Engineering. – 2004. – Vol. 13, № 1. – P. 15–23. DOI: 10.1080/00207390410001710726

21. Smith Y.R., Nagel J.R., Rajamani R.K. Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review // Minerals Engineering. – 2019. – 133. – P. 149–159. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.025

22. Электродинамические сепараторы с вращающимся магнитным полем для обработки измельченного электронного лома / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, С.Л. Назаров, Н.С. Якушев // Промышленная энергетика. – 2015. – № 7. – С. 44–47.

23. Коняев А.Ю., Коняев И.А., Назаров С.Л. Повышение энергоэффективности электродинамических сепараторов на стадии проектирования // Промышленная энергетика. – 2014. – № 4. – С. 22–26.

24. Коняев А.Ю., Назаров С.Л. Исследования характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели // Электротехника. – 1998. – № 5. – С. 52–57.

### References

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, no. 7, pp. 975-984. DOI: 10.1016/0892-6875(94)90027-2/

2. Schloemann E. Eddy current techniques for segregating nonferrous metals from waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 1982, no. 5, pp. 149-162. DOI: 10.1016/0361-3658(82)90024-8

3. Samuel R. A new method of scrap recycling. *Journal of Metals*, 1980, vol. 30, pp. 21-23.

4. “Coreco” introduces new induction powered separator for non-ferrous scrap. *Recycling Today, Toronto*, 1979, vol. 17, no. 8, 90 p.

5. Bourcier G., Lowdon J. Separation of aluminium alloys. Patent US no. 5133505 (1992).

6. Akishi O. Non-magnetic metal sorter with linear motor. Patent JP no. 55094658 (1980).

7. Akishi O., Makoti T., Katsuhi T. Linear motor - type sorting device of non-magnetic metal. Patent JP no. 60143846 (1985).

8. Koniaev A.Iu., Zhukov A.A., Shirshov B.P. Lineinye asinkhronnye dvigateli v elektromagnitnykh separatorakh dlia izvlecheniia aliuminiia iz bytovykh otkhodov [Linear induction motors in electromagnetic separators for extracting aluminum from household waste]. *Elektrotekhnicheskaiia promyshlennost'. Elektricheskie mashiny*, 1981, no. 9, pp. 16-18.

9. Cherepnin O.M., Shevelev A.I., Shalimova I.G. Separatsiia nemagnitnykh tsvetnykh metallov v begushchem magnitnom pole [Separation of non-magnetic non-ferrous metals in a running magnetic field]. *Tsvetnye metally*, 1985, no. 11, pp. 85-87.

10. Dudenkov S.V., Shubov L.Ia., Khvorostianoi S.I. et al. Tekhnologiia izvlecheniia metallov iz tverdykh bytovykh otkhodov [Technology of metal extraction from solid household waste]. *Tsvetnye metally*, 1984, no. 9, pp. 91-96.

11. Volodin G.I. Metalloulovitel' tsvetnykh metallov na osnove dvukhstoronnogo lineinogo asinkhronnogo elektrodvigatel'ia [Metal catcher of non-ferrous metals on the basis of a double-sided linear asynchronous electric motor]. *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika*, 1999, no. 4, pp. 16-18.

12. Patrik A.A., Murakhin N.N., Derendiaeva T.N., Koniaev A.Iu., Nazarov S.L. Ustroistva dlia elektrodinamicheskoi separatsii loma i otkhodov tsvetnykh metallov [Devices for electrodynamic separation of non-ferrous metal scrap and waste]. *Promyshlennaia energetika*, 2001, no. 6, pp. 16-19.

13. Konyaev A.Yu., Abdullaev Zh.O., Bagin D.N., Konyaev I.A. Features of electrodynamic separation the fine fraction of municipal solid waste. *Ecology and Industry of Russia*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 4-9. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-6-4-9

14. Koniaev A.Iu., Koniaev I.A., Markin N.E., Nazarov S.L. Elektrodinamicheskie separatory s begushchim magnitnym polem: osnovy teorii i rascheta [Electrodynamic separators with a traveling magnetic field: fundamentals of theory and calculation]. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2012, 104 p.

15. Koniaev A.Iu., Koniaev I.A., Nazarov S.L. Primenenie elektrodinamicheskikh separatorov v tekhnologiiakh vtorichnoi tsvetnoi metallurgii [Electrodynamic separators application in secondary non-ferrous metallurgy]. *Tsvetnye metally*, 2012, no. 11, pp. 22-26.

16. Separatory magnitnye vikhretokovye SMVT [Separators magnetic eddy current SMVT], available at: <http://www.erga.ru/catalog/vikhretokovye-separatory>

17. Shubov L.Ia., Stavrovskii M.E., Oleinik A.V. Tekhnologiia otkhodov [Waste technology]. Moscow: Al'fa-M, Infra-M, 2011, 352 p.

18. Kolobov G.A., Bredikhin V.N., Chernobaev V.M. Sbor i obrabotka vtorichnogo syr'ia tsvetnykh metallov [Collection and processing of secondary raw materials of non-ferrous metals]. Moscow: Metallurgiya, 1993, 288 p.

19. Lungu M., Rem P. Eddy-current separation of small nonferrous particles by a single-disk separator with permanent magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, 39(4), pp. 2062-2067. DOI: 10.1109/tmag.2003.812724

20. Settimo F., Belivacqua P., Rem P. Eddy current separation of fine non-ferrous particles from bulk streams. *Physical Separation in Science and Engineering*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 15-23. DOI: 10.1080/00207390410001710726

21. Smith Y.R., Nagel J.R., Rajamani R.K. Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review. *Minerals Engineering*, 2019, 133, pp. 149-159. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.025

22. Koniaev A.Iu., Koniaev I.A., Nazarov S.L., Iakushev N.S. Elektrodinamicheskie separatory s vrashchaiushchimsia magnitnym polem dlia obrabotki izmel'chennogo elektronnoho loma [Electrodynamic separators with rotating magnetic field for the processing of crushed electronic scrap]. *Promyshlennaia energetika*, 2015, no. 7, pp. 44-47.

23. Koniaev A.Iu., Koniaev I.A., Nazarov S.L. Povyslenie energoeffektivnosti elektrodinamicheskikh separatorov na stadii proektirovaniia [Improving the energy efficiency of electrodynamic separators at the design stage]. *Promyshlennaia energetika*, 2014, no. 4, pp. 22-26.

24. Koniaev A.Iu., Nazarov S.L. Issledovaniia kharakteristik elektrodinamicheskikh separatorov na osnove dvumernoi modeli [Investigations of the characteristics of electrodynamic separators based on a two-dimensional model]. *Elektrotehnika*, 1998, no. 5, pp. 52-57.

### **Сведения об авторах**

**Коняев Андрей Юрьевич** (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета (УрФУ) имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: a.u.konyaev@urfu.ru).



**Забалуева Дарья Олеговна** (Екатеринбург, Россия) – магистрант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета (УрФУ) имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: dashenka.1998zabalueva@mail.ru).

**Зязев Михаил Евгеньевич** (Екатеринбург, Россия) – аспирант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета (УрФУ) имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: zyacho72@gmail.com).

### **About the authors**

**Andrey Yu. Konyaev** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering of the Urals Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: a.u.konyaev@urfu.ru).

**Darya O. Zabalueva** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Master Student Department of Electrical engineering of Urals Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: dashenka.1998zabalueva@mail.ru).

**Mihail E. Zyazev** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Graduate Student of the Department of Electrical Engineering and Electrotechnological systems of the Urals Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: zyacho72@gmail.com).

Получено 08.10.2021