

## Повышение энергоэффективности электродинамических сепараторов на стадии проектирования

Коняев А. Ю., доктор техн. наук,  
 Коняев И. А., Назаров С. Л., кандидаты техн. наук  
 Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Дана оценка энергоэффективности электродинамических сепараторов для обработки лома и отходов цветных металлов. Представлены результаты исследований ряда опытно-промышленных образцов. Рассмотрены проблемы конструктивных решений и компенсации реактивной мощности.

**Ключевые слова:** электродинамические сепараторы, энергоэффективность, конструктивные решения, компенсация реактивной мощности.

Устройства электродинамической сепарации в бегущем магнитном поле широко применяются при извлечении лома и отходов ферромагнитных металлов из твердых отходов производства и потребления, а также при сортировке лома цветных металлов на стадии подготовки его к металлургическому переделу [1 – 3]. Интерес к таким сепараторам возрастает в связи с необходимостью решения задач энерго- и ресурсосбережения (извлечения и переработки вторичных металлов) и охраны окружающей среды (утилизации твердых отходов).

Среди электродинамических сепараторов, используемых в мировой и отечественной практике, наибольшей производительностью и универсальностью характеризуются те, в которых бегущее магнитное поле создается линейными индукторами с трехфазной обмоткой. Принцип работы этих сепараторов такой же, как и линейных асинхронных двигателей. При этом роль вторичного элемента (ВЭ) линейных индукционных машин (ЛИМ) выполняют извлекаемые из сепарируемых смесей проводящие предметы. Особенностью ЛИМ электродинамических сепараторов является наличие открытой магнитной системы (при одностороннем исполнении индукторов, когда обрабатываемая смесь находится над поверхностью индуктора) либо повышенного немагнитного зазора (при двухстороннем исполнении, когда зона сепарации находится между двумя индукторами). Поэтому рассматриваемые ЛИМ характеризуются высоким энергопотреблением и низким коэффициентом мощности ( $\cos \varphi$ ). Как правило, установки электродинамической сепарации считаются непрерывно работающим оборудованием и относятся к числу наиболее энергоемких в технологических линиях по переработке металлосодержащих отходов, поэтому

при их разработке необходимо стремиться к повышению энергетических показателей.

Исследование электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем — одно из научных направлений кафедры электротехники и электротехнологических систем Уральского федерального университета (ранее УГТУ – УПИ). Здесь разработаны математические модели электродинамических сепараторов и накоплен опыт проектирования указанных установок, часть из которых доведена до промышленной реализации [3 – 6]. В данной статье рассматриваются возможности улучшения энергетических показателей сепараторов на стадии проектирования и основные пути создания энергоэффективных установок.

**Выбор главных размеров линейных индукторов.** В [4, 6] получены выражения, связывающие электромагнитное усилие, воздействующее на извлекаемую проводящую пластину, с электромагнитными нагрузками и размерами индуктора и вторичного элемента. Например, аналитическое выражение для расчета электромагнитного усилия имеет вид

$$F = \frac{\mu_0 a \tau^2}{\pi \delta_{\text{ЭК}}} J_{1m}^2 \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon^2} k_F, \quad (1)$$

где  $J_{1m}$  — амплитуда линейной плотности тока индуктора;  $\tau$  — полюсное деление;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\delta_{\text{ЭК}}$  — эквивалентный воздушный зазор.

Коэффициент  $k_F$  (полная формула для его определения получена в виде рядов и не приводится из-за громоздкости) зависит от размеров проводящей пластины ( $a, b$ ) и электромагнитной добротности ЛИМ, вычисляемой по формуле

$$\varepsilon = \frac{2\mu_0\gamma f\tau^2 d}{\pi\delta_{\text{ЭК}}}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  и  $d$  — удельная электропроводность и толщина ВЭ;  $f$  — частота тока и поля.

В первом приближении для сепараторов на основе трехфазных линейных индукторов через параметры схемы замещения  $X_1$  и  $X_m$  с учетом  $R_1 \ll X_1$  и  $X_m$  (мощностью, вносимой ВЭ малых размеров, также можно пренебречь) получено выражение для определения потребляемой линейным индуктором мощности [6]:

$$S = 0,4 \cdot 10^{-6} \frac{f l L}{k_w^2 N_d} J_{1m}^2 \times \left( 10t_z \frac{h_{\text{п}}}{3b_{\text{п}}} + 3,4 \frac{\tau^2}{mL} + \frac{k_w^2 \tau^2 N_d}{k_{\mu} \delta_{\text{ЭК}}} \right), \quad (3)$$

где  $l$  и  $L$  — длина и ширина активной зоны индуктора;  $b_{\text{п}}$  и  $h_{\text{п}}$  — ширина и глубина паза;  $t_z$  — зубцовое деление;  $k_w$  — обмоточный коэффициент;  $m$  — масса извлекаемой частицы;  $k_{\mu}$  — коэффициент, учитывающий насыщение магнитопровода;  $N_d = 1$  или  $2$  соответственно для одностороннего или двухстороннего индуктора; коэффициент  $3,4$  соответствует двухслойной обмотке (при однослойной он составляет  $6,7$ ).

При предпроектных исследованиях в качестве критериев оптимальности используют показатели  $F_m = F/m$ , Н/кг или м/с<sup>2</sup>, и  $F_S = F/S$ , Н/(кВ·А). Первый критерий свидетельствует о возможности достижения максимальных ускорений при извлечении металла, второй — о возможности минимизации энергопотребления. При заданных свойствах вторичного элемента (извлекаемой проводящей частицы) зависимости показателей  $F_m$  и  $F_S$  от частоты и полюсного деления являются экстремальными, но местоположения их экстремумов могут существенно различаться. Поэтому целесообразно ввести обобщенный критерий оптимальности  $F_{mS}^*$ , определяемый из выражения

$$F_{mS}^* = a_m F_m^* + a_S F_S^*, \quad (4)$$

где  $a_m$  и  $a_S$  — весовые коэффициенты ( $a_m + a_S = 1,0$ );  $F_m^*$  и  $F_S^*$  — показатели, нормированные к максимальным значениям  $F_m$  и  $F_S$ .

В качестве примера на рис. 1 показан выбор  $\tau$  по результатам расчета показателей  $F_m^*$ ,  $F_S^*$ ,  $F_{mS}^*$  линейных индукторов сепараторов,

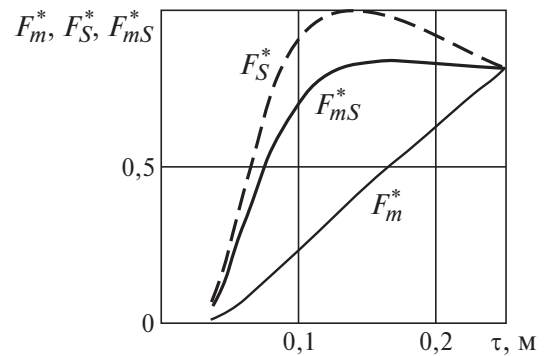


Рис. 1. Пример выбора полюсного деления  $\tau$

предназначенных для электродинамической сепарации мелкой фракции отходов. Приведенные кривые соответствуют двухстороннему индуктору (размеры магнитопровода —  $1200 \times 300 \times 65$  мм) и пробной алюминиевой пластине размерами  $40 \times 40 \times 2$  мм с удельной электропроводностью  $\gamma = 25 \cdot 10^6$  См/м. Частота магнитного поля  $f = 400$  Гц. При расчетах обобщенного критерия  $F_{mS}^*$  по выражению (4) весовые коэффициенты  $a_m$  и  $a_S$  принимали значения соответственно  $0,3$  и  $0,7$ . Возможность увеличения весового коэффициента  $a_S$  обусловлена тем, что уже при  $\tau \geq 0,1$  м показатель  $F_m$  значительно превышает требуемое ускорение, сообщаемое извлекаемым предметам ( $6 - 8$  м/с<sup>2</sup>), в связи с чем более значимой становится задача минимизации энергопотребления. Для дальнейшего проектирования сепаратора принято полюсное деление  $\tau = 0,186$  м (одно из значений, соответствующих имеющейся у завода-изготовителя технологической оснастке) [5].

**Выбор рациональной конструкции сепаратора в целом и размеров его механической части.** Рассматриваемые сепараторы представляют собой электромеханические системы, у которых конечный результат (извлечение проводящих частиц) зависит от совместного воздействия электромагнитных и конкурирующих с ними механических сил (гравитации, центробежных, трения, динамического сопротивления среды и др.), значения и направления которых зависят от конструкции электродинамического сепаратора и способа подачи материала. При использовании линейных индукторов сепарируемые материалы могут подаваться в зону сепарации по ленте конвейера, по наклонной плоскости либо в свободном падении при вертикальном расположении индукторов и активного зазора. В этих случаях траектории движения извлекае-

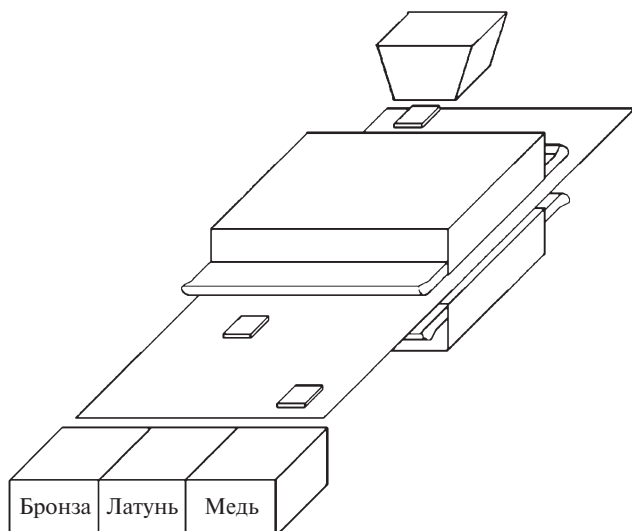


Рис. 2. Схема электродинамического сепаратора с двухсторонним линейным индуктором

мых проводящих частиц будут существенно различаться.

На рис. 2 схематично показана установка электродинамической сепарации на основе двухстороннего линейного индуктора при подаче материала по наклонной плоскости. При расчетах такой конструкции варьируются угол наклона плоскости подачи  $\alpha$ , расстояние  $L_0$ , проходимое пластиной до индуктора, ширина индуктора  $L_{и}$ , расстояние от индуктора до приемников продуктов разделения  $L_{п}$  и учитывается скорость  $V_k$  подачи материала на наклонную плоскость с конвейера. Одним из важных параметров, определяющих характеристики установки, является коэффициент трения  $k_{тр}$ , изменяя значение которого можно учесть не только свойства самой плоскости подачи, но и противодействие других механических сил. Значения сил сопротивления и коэффициента трения можно определять экспериментально и задавать в техническом задании на проектирование.

В [6] получены выражения, связывающие требуемые для сепарации удельные электромагнитные усилия  $F_m$  с указанными механическими параметрами системы. При разработке энергоэффективных установок на стадии проектирования необходимо определять параметры механической части сепаратора, при которых обеспечивается минимум требуемых удельных электромагнитных усилий  $F_m$  и соответственно минимум установленной мощности и энергопотребления. Пример расчета требуемых для сепарации удельных электромагнитных усилий показан на рис. 3. Опытная установка для сортировки медных сплавов, подобная приведенной на

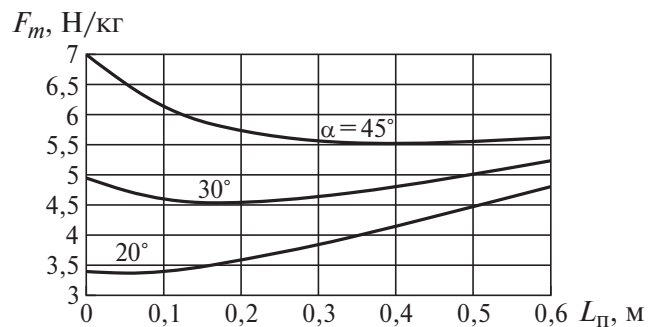


Рис. 3. Кривые зависимости требуемого удельного электромагнитного усилия от размера наклонной плоскости  $L_{п}$  и угла ее наклона  $\alpha$

рис. 2, имела следующие заданные параметры:  $V_k = 0,1$  м/с;  $L_0 = 0,1$  м;  $L_{и} = 0,3$  м;  $k_{тр} = 0,3$ ; требуемое отклонение медных пластин от линии подачи у приемников  $R = 0,1$  м.

Характер зависимостей подтверждает необходимость оптимизационных расчетов для достижения минимума требуемого электромагнитного усилия и энергопотребления сепаратора.

**Повышение коэффициента мощности.** Как уже отмечалось, рассматриваемые сепараторы характеризуются большими немагнитными зазорами в основной магнитной цепи и, как следствие, низким  $\cos \varphi$ . При использовании трехфазных линейных индукторов следует учитывать также несимметрию фазных токов, обусловленную различным расположением катушек обмотки на разомкнутом магнитопроводе. Такое сочетание свойств ЛИМ сепараторов накладывает ограничения на выбор средств компенсации реактивной мощности. Подключение к линейным индукторам компенсирующих конденсаторов с симметричным распределением емкостей по фазам приводит, с одной стороны, к снижению потребления реактивной мощности, с другой — к увеличению несимметрии фазных токов. Например, при испытаниях электродинамического сепаратора КМ-203М, разработанного УрФУ совместно с АО «Уралэнергоцветмет» [5], были получены усредненные данные по четырем испытанным ЛИМ (в числителе и знаменателе указаны соответственно значения, полученные при отсутствии конденсаторов и после их подключения):

полная потребляемая мощность сепаратора, кВт · А . . . . . 112/40  
 средний ток фазы установки, А . . . . . 168/60  
 отклонение фазных токов от среднего, % . . . . . 10 – 12/30 – 35  
 коэффициент мощности установки . . . . . 0,05/0,14

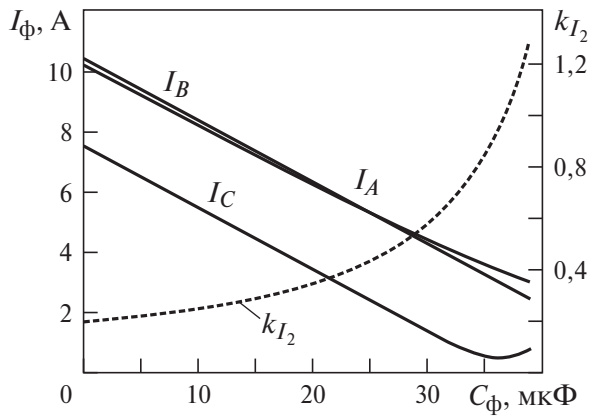


Рис. 4. Характеристики установки электродинамической сепарации при симметричной компенсации реактивной мощности

Отмеченные особенности установок электродинамической сепарации (низкий  $\cos \varphi$  и несимметрия фазных токов) могут оказывать существенное влияние на качество электрической энергии в сетях предприятий. Оно особенно значительно в электрических сетях заводов по переработке отходов, имеющих относительно небольшую мощность (как правило, установленная мощность трансформаторов в системе электроснабжения таких предприятий не превышает  $1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ). Указанные недостатки обуславливают необходимость проведения исследований, направленных на оптимизацию работы установок электродинамической сепарации с учетом компенсации реактивной мощности.

Ввиду того, что влияние разомкнутости магнитопровода ЛИМ на несимметрию фазных токов индуктора увеличивается с понижением числа полюсов, исследования выполнены на двухполюсной ЛИМ опытно-промышленного сепаратора, предназначенного для обработки измельченного лома цветных металлов. При питании от стандартной промышленной сети линейный индуктор потребляет активную мощность  $0,75 \text{ кВт}$  при коэффициенте мощности  $\cos \varphi = 0,12$ . Значения токов в фазах обмотки:  $10,5$ ;  $10,6$ ;  $7,2 \text{ А}$ . Отклонения фазных токов от среднего значения ( $9,5 \text{ А}$ ) составляют  $12 - 24 \%$ . Следует отметить, что разработанные в УрФУ математические модели ЛИМ сепараторов позволяют получать указанные значения токов расчетным путем, а значит, рассматривать варианты компенсации реактивной мощности на стадии проектирования.

На рис. 4 показаны кривые изменения токов, потребляемых исследуемой установкой, после подключения компенсирующих конденсаторов, одинаковых для всех фаз. Как

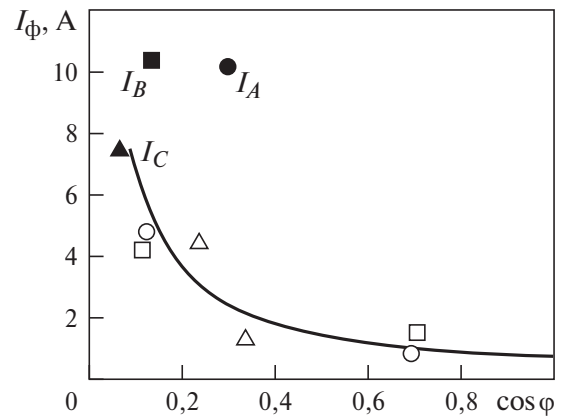


Рис. 5. Значения коэффициента мощности и токов в фазах установки при точной (сплошная линия) и приближенной пофазной компенсации

видно, увеличение емкости конденсаторов ведет к росту несимметрии токов. Для количественной ее оценки приведена кривая коэффициента несимметрии по току  $k_{I_2}$  (отношение амплитуд токов обратной и прямой последовательностей). При емкости конденсаторов  $C_\phi = 30 \mu\text{F}$  коэффициент  $k_{I_2}$  достигает значения  $1,0$ , а отклонение фазных токов от среднего —  $40 - 50 \%$ . В то же время коэффициент мощности установки  $\cos \varphi$  в целом не превышает значения  $0,4$ . Дальнейшее повышение емкости конденсаторов и  $\cos \varphi$  приводит к перекомпенсации в одной из фаз установки (фазе  $C$ ).

С целью устранения указанного противоречия рассмотрены варианты пофазной симметрирующей компенсации. Результаты расчетов приведены в таблице, где сопоставляются данные точной и приближенной пофазной симметрирующей компенсации, и на рис. 5. Как видно из таблицы, выбор оптимальных емкостей конденсаторов для каждой фазы позволяет не только увеличить коэффициент мощности, но и симметризовать токи, потребляемые установкой из сети (соответствующие значения указаны в числителе). Достигаемые при этом значения токов и  $\cos \varphi$  показаны на рис. 5 сплошной линией. На практике точный подбор емкостей компенсирующих конденсаторов затруднителен. Поэтому в качестве примера в таблице (в знаменателе) и на рис. 5 (точками) приведены варианты решения задачи при использовании стандартных значений емкости компенсирующих конденсаторов. Полученные результаты незначительно уступают идеализированному варианту компенсации с оптимальным значением емкостей, но позволяют достичь больших значений  $\cos \varphi$ , чем в варианте симмет-



Вариант	Фаза	$C_{\phi}$ , мкФ	$I_{\phi}$ , А	$\cos \varphi$	$k_{I_2}$
1	<i>A</i>	40,6 / 4 × 10,0	4,46 / 4,79	0,16 / 0,12	0,077
	<i>B</i>	17,0 / 2 × 10,0	4,46 / 4,20	0,16 / 0,11	
	<i>C</i>	12,7 / 1 × 10,0	4,46 / 4,50	0,16 / 0,23	
2	<i>A</i>	60,1 / 2 × 30,0	0,83 / 0,85	0,87 / 0,69	0,315
	<i>B</i>	36,5 / 1 × 30,0	0,83 / 1,51	0,87 / 0,71	
	<i>C</i>	32,2 / 1 × 30,0	0,83 / 1,36	0,87 / 0,34	

ричной компенсации, при приемлемом уровне несимметрии потребляемых токов.

Таким образом, электродинамические сепараторы можно рассматривать как основу новых энерго- и ресурсосберегающих технологий в области цветной металлургии и охраны окружающей среды. Вместе с тем приведенные в статье примеры свидетельствуют о том, что при использовании созданных в УрФУ методик расчета электродинамических сепараторов можно решать вопросы повышения энергоэффективности процессов и установок электродинамической сепарации на стадии проектирования и предпроектных исследований.

#### Список литературы

1. Колобов Г. А., Бредихин В. Н., Чернобаев В. М. Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов. — М.: Металлургия, 1993.
2. Шубов Л. Я., Ставровский М. Е., Олейник А. В. Технология отходов. — М.: Альфа-М, Инфра-М, 2011.
3. Коняев А. Ю., Коняев И. А., Назаров С. Л. О применении электродинамических сепараторов в технологиях вторичной цветной металлургии. — Цветные металлы, 2012, № 11.
4. Коняев А. Ю., Назаров С. Л. Исследование характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели. — Электротехника, 1998, № 5.
5. Устройства для электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов / А. А. Патрик, Н. Н. Мурахин, А. Ю. Коняев и др. — Промышленная энергетика, 2001, № 6.
6. 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.

konyaev@ustu.ru