

УДК 621.313.17:621.928

А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, М.Е. Зязев

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКТОРОВ СО ВСТРЕЧНО БЕГУЩИМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ В ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРАХ

Совершенствование технологий сбора и первичной обработки вторичных цветных металлов является необходимым условием для развития вторичной цветной металлургии и создания предприятий по переработке твердых отходов. Одной из таких технологий является электродинамическая сепарация в бегущем магнитном поле. Рассмотрены основные конструкции установок электродинамической сепарации. Широкое распространение получили сепараторы на основе линейных индукторов. Такие сепараторы легко вписываются в технологические линии и применяются при извлечении цветных металлов из различных видов твердых отходов (автомобильный лом, смешанные производственные и коммунальные отходы, кабельный и электронный лом и др.), а также при обработке сложного лома цветных металлов при подготовке к металлургическим переделам. Указанные задачи сепарации можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся задачи отделения цветных металлов от неметаллов, ко второй – более сложные задачи сортировки металлов по их физическим свойствам. В обоих случаях конечные результаты сепарации зависят от совместного действия на металлические частицы электромагнитных и механических сил. В настоящей статье описаны некоторые результаты исследований электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов. Показаны перспективы использования линейных индукторов, создающих встречно бегущие магнитные поля. Применение таких линейных индукторов в электродинамических сепараторах для удаления цветных металлов из твердых отходов позволяет увеличить выход металлов. Использование встречно бегущих магнитных полей при индукционной сортировке металлов и сплавов обеспечивает повышение производительности установок и улучшение качества сортировки. Показано, что распределение магнитного поля и электромагнитных усилий по длине индукторов зависит от схемы трехфазной обмотки. Основное внимание сосредоточено на выборе схемы трехфазной обмотки линейного индуктора, обеспечивающей указанные преимущества. В статье приведены результаты экспериментальных исследований опытных образцов электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов, созданных в лаборатории кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета.

Ключевые слова: твердые металлосодержащие отходы, электродинамические сепараторы, линейные индукторы, встречно бегущие магнитные поля, извлечение металлов из отходов, сортировка металлов и сплавов, технологические показатели, результаты исследований.

A.Yu. Konyaev, Zh.O. Abdullaev, D.N. Bagin, M.E. Zyazev

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

APPLICATION OF LINEAR INDUCTORS WITH OPPOSITE DIRECTION TRAVELLING MAGNETIC FIELDS IN EDDY-CURRENT SEPARATORS

The improvement of technologies for the collection and primary processing of secondary non-ferrous metals is a prerequisite for the development of secondary non-ferrous metallurgy and the establishment of solid waste processing enterprises. One such technology is eddy-current (electrodynamic) separation in a traveling magnetic field. The main structures of electrodynamic separation installations are considered. Widely distributed separators based on linear inductors. Such separators easily fit into technological lines and are used in the extraction of non-ferrous metals from various types of metal-containing solid waste (automobile scrap, mixed production and municipal waste, cable and electronic scrap, etc.), as well as in the processing of complex non-ferrous scrap in preparation it to metallurgical redistribution. Electrodynamic separation problems can be conditionally divided into two groups. The first group includes the tasks of separating non-ferrous metals from non-metals, and the second group involves more complex tasks of sorting metals according to their physical properties. In both cases, the final results of separation depend on the combined action of electromagnetic and mechanical forces on metallic particles. This article describes some of the results of studies of electrodynamic separators based on linear inductors. The prospects for the use of linear inductors that create opposite direction traveling magnetic fields are shown. The use of such linear inductors in electrodynamic separators to remove non-ferrous metals from solid waste allows for an increase in the yield of metals. The use of opposite direction traveling magnetic fields in the induction sorting of metals and alloys provides increased plant productivity and improved sorting quality. It is shown that the distribution of the magnetic field and electromagnetic forces along the inductors depend on the three-phase winding circuit. The main attention is focused on the choice of the three-phase winding of the linear inductor, which provides these advantages. The article presents the results of experimental studies of prototypes of electrodynamic separators based on linear inductors, created in the laboratory of the Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems of the Ural Federal University. The article presents the results of studies of of dual-purpose linear induction machines created in the laboratory of the Academic Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems of the Ural Federal University.

Key words: solid metal-containing waste, electrodynamic separators, linear inductors, opposite direction travelling magnetic fields, extraction of metals from wastes, sorting of metals and alloys, technological indicators, research results.

Введение. Одной из актуальных задач в развитии экономики нашей страны является создание отрасли переработки отходов, прежде всего твердых коммунальных отходов и близких к ним по компонентному составу смешанных промышленных отходов [1–3]. Стратегия развития отрасли предполагает уменьшение доли полигонного захоронения таких отходов и максимальную степень извлечения из них компонентов, пригодных для использования в качестве вторичного сырья: металлов, пластмасс, макулатуры и т.п. Аналогичные задачи возникают при переработке лома выведенных из эксплуатации транспортных

средств, лома электротехнического и электронного оборудования и других видов металлосодержащих отходов [4–6]. Становление отрасли переработки твердых отходов предполагает развитие российской технологической и машиностроительной базы, обеспечивающей создание высокотехнологичного оборудования, в том числе обладающего экспортным потенциалом [2].

Наиболее ценными материалами, использование которых в качестве вторичного сырья позволяет улучшить экономические показатели переработки твердых отходов, являются черные и цветные металлы. При этом для извлечения черных металлов используются магнитные сепараторы – железоотделители шкивного или подвесного типов, которые выпускаются серийно [7–8]. При установке в технологическую линию необходимого числа железоотделителей (от 1 до 4) достигается уровень извлечения металла до 100 % независимо от размера частиц.

Более сложной и менее изученной является задача извлечения из потока твердых отходов цветных металлов. Для решения такой задачи в зарубежной практике используются электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем (по принятой за рубежом терминологии: *eddy-current separators* – вихретоковые сепараторы) [9–12]. Создание и совершенствование таких сепараторов являются актуальными задачами.

В течение многих лет разработка электродинамических сепараторов проводится на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета. Накоплен опыт создания и эксплуатации установок для различного применения [12–17]. В данной статье излагаются некоторые результаты исследований электродинамических сепараторов, выполненных в последние годы.

Содержание и результаты исследований. В различных технологических схемах обработки металлосодержащих отходов и амортизационного лома магнитная сепарация предшествует электродинамической, поэтому на вход электродинамических сепараторов поступает материал без ферромагнитных включений. После этого с помощью электродинамической сепарации могут решаться два типа технологических задач:

- извлечение цветных металлов из потока твердых отходов;
- сортировка цветных металлов по видам и маркам сплавов.

При решении первой технологической задачи, как правило, требуется высокая производительность установок. В этом случае целесообразна подача материала по ленте конвейера, как показано на рис. 1. В таких электродинамических сепараторах бегущее (вращающееся) магнитное поле создается с помощью линейных индукторов (рис. 1, а, б), а также с помощью индукторов с вращающимися магнитами либо электромагнитами (рис. 1, в). Рассмотрим работу сепаратора на примере установки с односторонним линейным индуктором. Подаваемый по ленте конвейера 1 поток сыпучих материалов, включающий частицы неметаллов 2 и металлов 3, проходит через активную зону линейного индуктора 4. Под действием электромагнитных сил частицы металлов выносятся в поперечном от конвейера направлении и собираются в приемник 5, неметаллические частицы перемещаются в приемник 6. В результате сепарации на установках, показанных на рис. 1, в качестве полезного продукта получается коллективный концентрат цветных металлов. Такие сепараторы применяются для удаления цветных металлов из твердых коммунальных отходов и близким к ним по составу смешанных промышленных отходов [9, 11–13, 16–17].

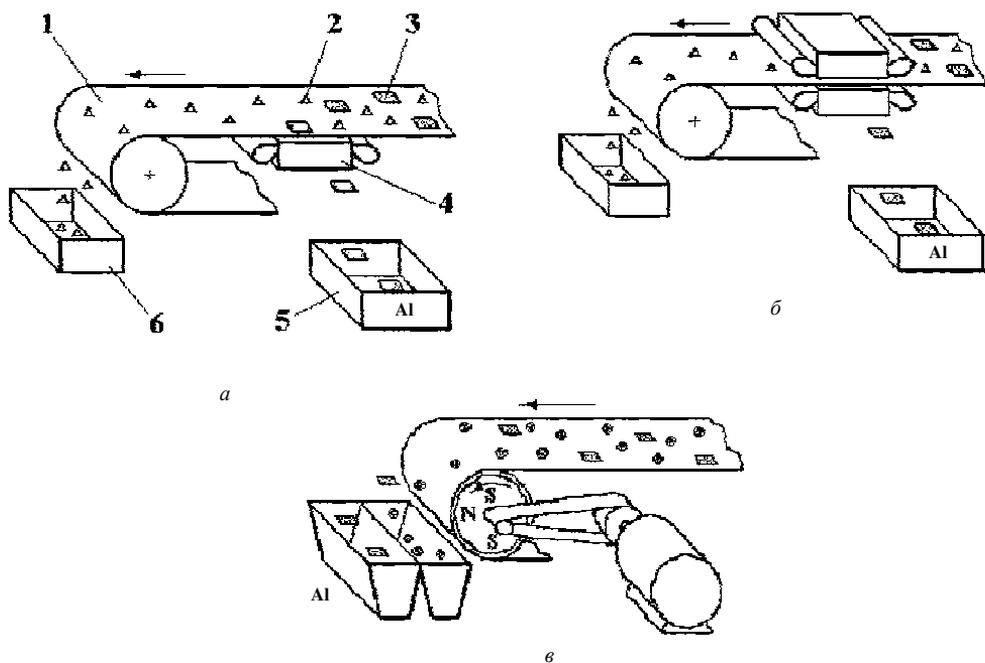


Рис. 1. Варианты электродинамических сепараторов с подачей материалы по ленте конвейера

Более сложной является задача индукционной сортировки цветных металлов и сплавов, где на первый план выходит возможность получения селективных концентратов целевых продуктов. При решении этой задачи целесообразно использовать электродинамический сепаратор на основе линейных индукторов с подачей материалов по наклонной плоскости. Такой сепаратор схематично показан на рис. 2.

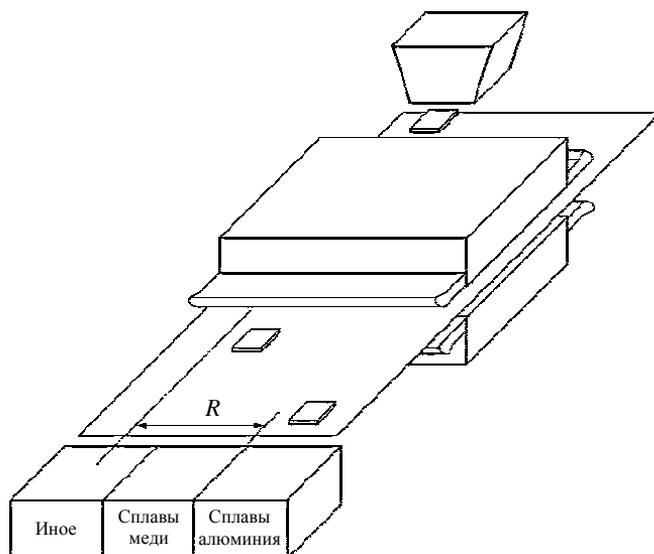


Рис. 2. Сепаратор на основе двухстороннего линейного индуктора с подачей материала по наклонной плоскости

Обрабатываемая смесь материалов подается в зону сепарации вдоль линии подачи узким потоком, ширина которого определяется крупностью частиц в исходной смеси. При этом частицы разных металлов и сплавов находятся в равных начальных условиях, что недостижимо при подаче материала в потоке по ленте конвейера. Влияние механических взаимодействий сепарируемых частиц уменьшается, и их траектории в большей степени определяются электромагнитными силами, величина которых зависит от физических свойств металлов и сплавов (прежде всего, удельной электропроводности γ и плотности ρ). Частицы металлов с разными физическими свойствами (например, сплавы меди и сплавы алюминия), приобретая разные траектории, будут собираться в разные приемники продуктов разделения. Частицы неметаллов не взаимодействуют с магнитным полем и собираются отдельно. Появляется возможность селективного сбора

металлов и сплавов. Установки такого типа могут использоваться для обработки дробленого автомобильного лома, а также электронного и кабельного лома [10, 14–15].

Опыт разработки и эксплуатации электродинамических сепараторов, накопленный в Уральском федеральном университете, позволил выявить ряд проблем, требующих решения. В установках первого типа (см. рис. 1) имеются ограничения по крупности извлекаемых из твердых отходов металлических включений. Например, из потока отходов не извлекаются алюминиевые частицы крупностью менее 40 мм [13]. Объясняется это тем, что с уменьшением размеров металлических частиц удельное электромагнитное усилие F_m (отношение электромагнитного усилия, действующего на извлекаемую металлическую частицу к ее массе) существенно снижается и может не достигать требуемого для сепарации усилия $F_{m, \text{треб}}$. На рис. 3 представлены зависимости требуемых удельных усилий от скорости и ширины конвейера, подающего отходы. Расчеты выполнены по методике, описанной в [12], основанной на решении уравнений движения металлических частиц под действием электромагнитных и конкурирующих с ними механических сил. Предполагается, что при одностороннем выходе металла частица в худшем случае должна пройти расстояние, равное ширине конвейера B_k . Полученные для таких условий кривые показаны на рис. 3 сплошными линиями. Необходимо отметить, что требуемые для сепарации усилия быстро растут с увеличением производительности установок, т.е. ширины конвейера и скорости подачи.

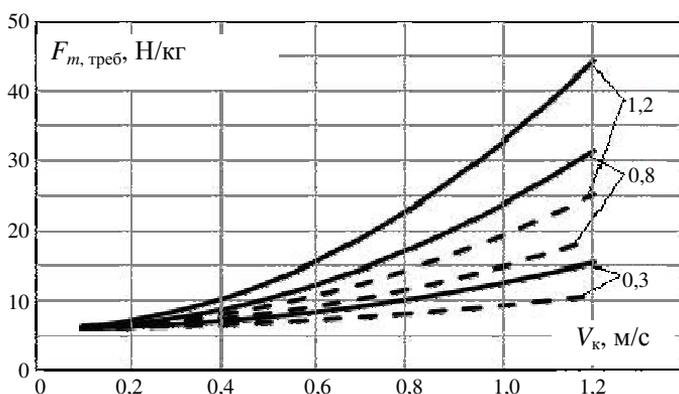


Рис. 3. Зависимости требуемых удельных усилий $F_{m, \text{треб}}$ от скорости V_k и ширины ($B_k = 1,2; 0,8; 0,3$ м) конвейера, при коэффициенте сопротивления среды $k_{\text{тр}} = 0,6$

Одним из путей увеличения доли извлекаемых из отходов металлов является использование линейных индукторов с обмотками, создающими встречно бегущие магнитные поля, движущиеся от центра индуктора [18]. Пример такой установки показан на рис. 4. Разбегающиеся магнитные поля обеспечивают выход металла из потока отходов в обе стороны от конвейера. При этом в худшем случае извлекаемая частица должна проходить расстояние, равное половине ширины конвейера $B_k/2$. Это приводит к снижению требуемых для сепарации удельных усилий, а следовательно, к увеличению выхода металла за счет извлечения мелкой фракции. На рис. 3 зависимости, соответствующие двухстороннему выходу металла, показаны пунктирными линиями. Можно видеть, что наибольший эффект предлагаемое решение дает при большой производительности установки (большие ширина ленты и скорость конвейера).

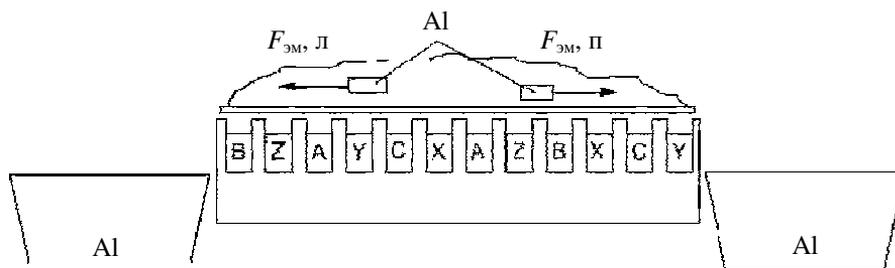


Рис. 4. Схема электродинамического сепаратора на основе линейного индуктора со встречно бегущими магнитными полями

В электродинамических сепараторах, предназначенных для индукционной сортировки металлосодержащих отходов и лома цветных металлов, необходимо обеспечивать как максимальное извлечение целевого металла, так и селективность разделения. При этом качество сепарации можно характеризовать такими технологическими показателями, как степень извлечения целевого металла в концентрат (ϵ) и содержание его в концентрате (β). Стремление повысить качество получаемых концентратов вступает в противоречие с другими характеристиками сепараторов. Например, необходимая для повышения селективности подача исходного материала потоком узкой ширины ограничивает производительность установок. При этом самое простое решение для повышения производительности, связанное с увеличением ширины подающего желоба $b_{ж}$, ведет к снижению технологических

показателей. Изложенное подтвердилось в ходе экспериментальных исследований на ряде установок, подобных показанной на рис. 2, в лаборатории УрФУ.

Для имитации сепарируемых отходов в экспериментах использовалась смесь алюминиевых частиц и частиц изоляции крупностью менее 10 мм. Смесь подавалась в рабочую зону устройства вдоль линии подачи по желобам разной ширины ($b_{ж} = 10, 20$ и 30 мм). Варьируемым в ходе опытов параметром являлось расстояние от линии подачи до разделителя потока R (как показано на рис. 2). Для трехфазной обмотки четырехполосного линейного индуктора, создающей магнитное поле, бегущее в одном направлении, использована схема укладки катушек отдельных фаз обмотки в индукторе экспериментальной установки: AAZZBVBXXCCYYAAZZBVBXXCCYY (здесь А, В, С – начала катушек соответствующих фаз; X, Y, Z – их концы). При испытаниях большая часть алюминиевых частиц под действием электромагнитных сил перемещалась за разделитель, попадая в концентрат целевого продукта, большая часть частиц изоляции не доходила до разделителя потока, попадая в хвосты обогащения. По результатам неоднократно повторенных опытов с использованием методов математической статистики определялись степень извлечения алюминия в концентрат ε и содержание алюминия в концентрате β . Пример результатов экспериментов для одной из установок приведен на рис. 5.

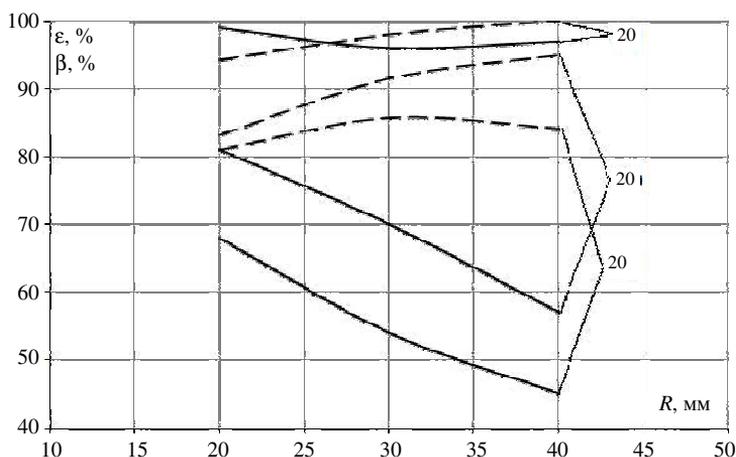


Рис. 5. Зависимость технологических показателей опытного сепаратора от положения разделителя потока при разной ширине желоба (цифры на графиках, мм)

Нетрудно видеть, что при подаче исходного материала по узкому желобу ($b_{ж} = 10$ мм) достигались высокие технологические показатели (степень извлечения металла в концентрат (сплошные линии) и содержание его в концентрате (пунктир) на уровне 95–100 %). Можно отметить, что подобные показатели были получены при заводских испытаниях опытно-промышленной установки для сепарации дробленого электронного лома, где также осуществлялась подача материала потоком шириной 10 мм [19].

При увеличении ширины желоба ($b_{ж} = 20$ или 30 мм) технологические показатели экспериментальной установки заметно ухудшались. Подобные же результаты получены на других установках, в том числе в случае сепарации реального электронного лома, представленного заинтересованным предприятием. В целом результаты экспериментов показали, что увеличение производительности сепараторов за счет увеличения объема подаваемого в рабочую зону сепарируемого материала приводит к снижению технологических показателей сепарации, ухудшению качества разделения материала. Это объясняется увеличением сил сопротивления движению металлических частиц при увеличении ширины потока и увеличением числа столкновений частиц.

Возможность повышения производительности установок без потери качества сепарации появляется при использовании в сепараторах линейных индукторов с разбегающимися магнитными полями (РБМП). Для той же установки с четырехполюсным линейным индуктором создание разбегающихся магнитных полей достигается при разбиении трехфазной обмотки на две секции (левую и правую, подобно рис. 4) и соответствующем изменении схемы укладки катушек отдельных фаз обмотки: **VBZZAAYYCCXXAAZZVBXXCCYY**. Такая схема обмотки обеспечивает движение разбегающихся магнитных полей непосредственно от оси индуктора. При этом поток входящего в сепаратор материала автоматически делится пополам и частицы металла отклоняются от линии подачи в разные стороны. Технологические показатели сепарации, достигнутые при испытаниях такого варианта установки, для ширины желоба $b_{ж} = 20$ мм показаны на рис. 6. Нетрудно видеть, что применение линейных индукторов со встречно бегущими магнитными полями и двухсторонним выходом металлических частиц позволило достичь высоких технологических показателей (на уровне 95–100 %), существенно лучших, чем в случае сепараторов с однонаправленным бегущим магнитным полем (с односторонним выходом сепарируемых частиц).

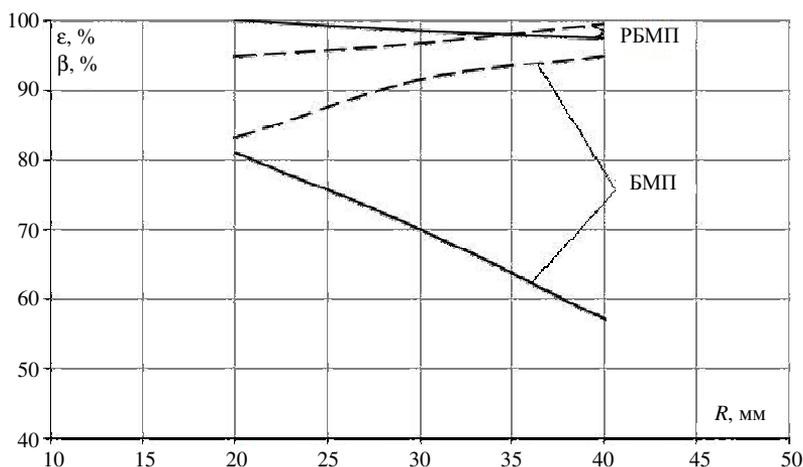


Рис. 6. Сравнение технологических показателей опытного сепаратора при ширине желоба $b_{ж} = 20$ мм для случаев однонаправленного (БМП) и разбегающихся (РБМП) магнитных полей

Необходимо отметить, что для создания встречно бегущих магнитных полей можно использовать различные варианты схем укладки трехфазных обмоток. Например, для рассмотренного четырехполюсного линейного индуктора, создающего разбегающиеся магнитные поля, такие варианты обмоток приведены в таблице. В рассмотренных вариантах фиксировалась схема укладки катушек на правой половине индуктора и изменялось чередование фаз на левой половине.

Варианты схем укладки обмоток линейного индуктора

Характер поля	Вариант	Схема укладки обмотки
Бегущее магнитное поле		
Встречно бегущие (разбегающиеся) магнитные поля	1	YYCCXXBBZZAAAIAZZBVBXXCCYY
	2	CCXXBBZZAAYYAAZZBVBXXCCYY
	3	XXBBZZAAYYCCAAZZBVBXXCCYY
	4	BBZZAAYYCCXXAAZZBVBXXCCYY
	5	ZZAAYYCCXXBBAAZZBVBXXCCYY
	6	AAAYYCCXXBBZZAAZZBVBXXCCYY

Выполненные исследования позволили выявить существенную зависимость характера распределения бегущих магнитных полей и электромагнитных усилий по длине линейного индуктора от схемы укладки катушек. Положительные результаты для рассмотренных электродинамических сепараторов, показанные на рис. 3 и 6, получены для схемы обмотки индукторов по варианту 4. Этот вариант отличается тем, что

трехфазная обмотка, состоящая из двух секций, занимающих левую и правую половины линейного индуктора и создающих встречно направленные бегущие магнитные поля, характеризуется симметричным расположением катушек отдельных фаз относительно поперечной оси индуктора и противоположным направлением токов в этих фазах. В ходе исследований выявлено, что при использовании в линейных индукторах со встречно бегущими магнитными полями других схем обмоток возможно появление в центральной зоне индуктора искажений магнитного поля и соответствующих искажений электромагнитных усилий, в том числе появление в центре индуктора зоны, в которой отсутствует электромагнитное усилие («мертвой» зоны). Применение таких схем обмоток в электродинамических сепараторах нежелательно.

Выводы. Таким образом, результаты исследований электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов со встречно бегущими (разбегающимися) магнитными полями показали перспективность их практического использования как при извлечении металлов из потока отходов, так и при индукционной сортировке металлосодержащих отходов и амортизационного лома. В то же время в ходе исследований выявлены особенности электромагнитных процессов в рассматриваемых установках, обуславливающие необходимость тщательного выбора вариантов схем трехфазных обмоток, создающих встречно бегущие магнитные поля.

Библиографический список

1. Комплексная стратегия обращения с твердыми коммунальными отходами в Российской Федерации (утв. Приказом Минприроды России от 14.08.2013 № 298) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70345114>.
2. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г. (утв. Распоряжением Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р) [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/.
3. Колычев Н.А. Оптимизация обращения с твердыми бытовыми и близкими к ним по составу промышленными отходами в крупных и средних населенных пунктах России // Биосфера: междисциплинар. науч. и приклад. журнал. – 2013. – Т. 5, № 4. – С. 393–418.

4. Тенденции и перспективы развития рециклинга металлов / А.И. Татаркин, О.А. Романова, В.Г. Дюбанов [и др.] // Экология и промышленность России. – 2013. – № 5. – С. 4–10.
5. Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Олейник А.В. Технология отходов. – М.: Альфа-М; Инфра-М, 2011. – 352 с.
6. Колобов Г.А., Бредихин В.Н., Чернобаев В.М. Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов. – М.: Металлургия, 1993. – 288 с.
7. Сумцов В.Ф. Электромагнитные железотделители. – М.: Машиностроение, 1981. – 212 с.
8. ГОСТ 10512-93. Сепараторы магнитные и электромагнитные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 27 с.
9. 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.
10. Aluminium recovery from electronic scrap by High-Force eddy-current separators / S. Zhang, E. Forssberg, B. Arvidson, W. Moss // Resources, Conservation and Recycling. – 1998. – № 23. – P. 225–241.
11. Design and development of a low cost technique for sorting household wastes using eddy current separation process / A. Merahi, K. Medles, B. Bardadi, A. Tilmatine // International Journal of Environmental Studies. – 2016. – № 2. – P. 2–11.
12. 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 Урал. федерал. ун-та им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2012. – 104 с.
13. 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.
14. Коняев А.Ю., Коняев И.А., Назаров С.Л. Применение электродинамических сепараторов в технологиях вторичной цветной металлургии // Цветные металлы. – 2012. – № 11. – С. 22–26.
15. 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.
16. Особенности электродинамической сепарации мелкой фракции твердых бытовых отходов / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев,

Д.Н. Багин, И.А. Коняев // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21, № 6. – С. 4–9.

17. Коняев А.Ю., Абдуллаев Ж.О., Коняев И.А. Сепараторы для извлечения цветных металлов из твердых коммунальных отходов // Твердые бытовые отходы. – 2017. – № 3. – С. 36–39.

18. Линейные индукционные машины со встречно бегущими магнитными полями для энергоэффективных технологий / А.Ю. Коняев, Б.А. Сокунов, Ж.О. Абдуллаев, Е.Л. Швыдкий // Промышленная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 2–7.

19. Переработка электронного лома: применение электродинамических сепараторов / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров, Р.О. Казанцев, Н.С. Якушев, В.В. Воскобойников, А.А. Дистанов // Твердые бытовые отходы. – 2014. – № 2. – С. 26–30.

References

1. Kompleksnaia strategiiia obrashcheniia s tverdymi kommunal'nymi otkhodami v Rossiiskoi Federatsii (utv. Prikazom Minprirody Rossii ot 14.08.2013 № 298) [A comprehensive strategy for the management of municipal solid waste in the Russian Federation (approved by Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated August 14, 2013 No. 298)], available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70345114>

2. Strategiiia razvitiia promyshlennosti po obrabotke, utilizatsii i obezvrezhivaniuu otkhodov proizvodstva i potrebleniia na period do 2030 g. (utv. Rasporiazheniem Pravitel'stva RF ot 25.01.2018 № 84-r) [The development strategy of the industry for the treatment, utilization and disposal of industrial and consumption waste for the period up to 2030 (Approved by Government RF Decree No. 84-p of 01/25/2018)], available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/

3. Kolychev N.A. Optimizatsiia obrashcheniia s tverdymi bytovymi i blizkimi k nim po sostavu promyshlennymi otkhodami v krupnykh i srednikh naseleennykh punktakh Rossii [Optimization of municipal solid waste and similar industrial waste handling in large and medium urban areas in Russia]. *Biosfera: mezhdistsiplinarnyi nauchnyi i prikladnoi zhurnal*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 393-418.

4. Tatarkin A.I., Romanova O.A., Diubanov V.G. [et al.] Tendentsii i perspektivy razvitiia retsiklinga metallov [Trends and prospects for the de-

velopment of metal recycling]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2013, no. 5, pp. 4-10.

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

6. 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.

7. Sumtsov V.F. *Elektromagnitnye zhelezootdeliteli* [Electromagnetic separators]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 212 p.

8. GOST 10512-93. *Separatory magnitnye i elektromagnitnye. Obshchie tekhnicheskie usloviia* [GOST 10512-93. Magnetic and electromagnetic separators. General technical conditions]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1995. 27 p.

9. 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.

10. Zhang S., Forssberg E., Arvidson B., Moss W. Aluminium recovery from electronic scrap by High-Force eddy-current separators. *Resources, Conservation and Recycling*, 1998, no. 23, pp. 225-241.

11. Merahi A., Medles K., Bardadi B., Tilmatine A. Design and development of a low cost technique for sorting household wastes using eddy current separation process. *International Journal of Environmental Studies*, 2016, no. 2, pp. 2-11.

12. 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]. Yekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2012. 104 p.

13. Patrik A.A., Murakhin N.N., Derendiaeva T.N., Koniaev A.Iu., Nazarov S.L. *Ustroistva dlia elektrodinamicheskoi separatsii loma i otkhodov tsvetnykh metallov* [Electrodynamic separator for machining of scrap non-ferrous metal]. *Promyshlennaya energetika*, 2001, no. 6, pp. 16-19.

14. 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.

15. 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 a rotating magnetic field for processing crushed electronic scrap]. *Promyshlennaia energetika*, 2015, no. 7, pp. 44-47.

16. Koniaev A.Iu., Abdullaev Zh.O., Bagin D.N., Koniaev I.A. Osobennosti elektrodinamicheskoi separatsii melkoi fraktsii tverdykh bytovykh otkhodov [Features of electrodynamic separation of the fine fraction of municipal solid waste]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 4-9.

17. Koniaev A.Iu., Abdullaev Zh.O., Koniaev I.A. Separatory dlia izvlecheniia tsvetnykh metallov iz tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Separators for the extraction of non-ferrous metals from municipal solid waste]. *Tverdye bytovye otkhody*, 2017, no. 3, pp. 36-39.

18. Koniaev A.Iu., Sokunov B.A., Abdullaev Zh.O., Shvydkii E.L. Lineinye induktsionnye mashiny so vstrechno begushchimi magnitnymi poliami dlia energoeffektivnykh tekhnologii [Linear induction machines with counter-running opposite direction travelling magnetic fields for energy-efficient technologies]. *Promyshlennaia energetika*, 2017, no. 4, pp. 2-7.

19. Koniaev A.Iu., Nazarov S.L., Kazantsev R.O., Iakushev N.S., Voskoboinikov V.V., Distanov A.A. Pererabotka elektronnoho loma: primeneniye elektrodinamicheskikh separatorov [Recycling of electronic scrap: the use of electrodynamic separators]. *Tverdye bytovye otkhody*, 2014, no. 2, pp. 26-30.

Сведения об авторах

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

Абдуллаев Жахонгир Одашжонович (Екатеринбург, Россия) – аспирант кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: zhahongir1@mail.ru).

Багин Дмитрий Николаевич (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Электротехника и электро-

технологические системы» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: bagin19@mail.ru).

Зязев Михаил Евгеньевич (Екатеринбург, Россия) – магистрант кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: zyacho72@gmail.com).

About the authors

Konyaev Andrey Yurievich (Ekaterinburg, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor 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: a.u.konyaev@urfu.ru).

Abdullaev Zahongir Odashzhonovich (Ekaterinburg, Russian Federation) is a 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: zhahongir1@mail.ru).

Bagin Dmitry Nikolaevich (Ekaterinburg, Russian Federation) is a Ph.D in Technical Sciences, Lector 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: bagin19@mail.ru).

Zyazev Mikhail Evgenyevich (Ekaterinburg, Russian Federation) is a Master Student 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 30.10.2019