

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2023.1.02

УДК 621.313.17:621.928

А.Ю. Коняев, М.Е. Зязев, А.О. Ильинская

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ ПРИ РАСЧЕТЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ПРОВОДЯЩИХ ЧАСТИЦ В БЕГУЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА

Рассмотрены электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем на основе линейных индукторов. Такие сепараторы обладают высокой производительностью и легко вписываются в готовые технологические линии. Они эффективны при извлечении цветных металлов из различных видов сыпучих материалов (автомобильный лом, смешанные производственные и коммунальные отходы, кабельный и электронный лом и др.). Сепараторы применяются также при сортировке лома цветных металлов при подготовке к металлургическим процессам. В данной статье основное внимание уделяется электродинамическому сепаратору, основу которого составляют конвейер, перемещающий обрабатываемые материалы, и трехфазный линейный индуктор, располагаемый под лентой конвейера. **Цель исследования:** совершенствование математических моделей и методики расчета электродинамических сепараторов на основе линейных индукционных машин. **Результаты:** предлагаемая методика расчета физических процессов в сепараторе включает два этапа. На первом этапе производится расчет электромагнитных усилий, действующих на частицы цветных металлов, по методике, разработанной в Уральском федеральном университете. На втором этапе выполняется расчет траекторий движения сепарируемых частиц в рабочей зоне сепаратора с учетом совместного действия электромагнитных и механических сил. При этом предлагается разделение рабочей зоны сепарации на участки малых размеров. В пределах таких участков силы принимаются неизменными. В статье приведены полиномиальные зависимости электромагнитных сил от скорости движения частиц и их расположения над индуктором. Такие зависимости позволяют в ходе расчетов корректировать усилия при переходе с участка на участок по расчетным значениям скорости и координаты частицы. Представлены примеры расчета траекторий движения проводящих частиц в рабочей зоне электродинамического сепаратора. Результаты расчета траекторий позволяют оценивать результаты сепарации на стадии проектирования установок.

Ключевые слова: электродинамическая сепарация, линейные индукторы, электромагнитные силы, механические силы, траектории движения частиц, математическая модель, результаты расчетов.

A.Yu. Konyaev, M.E. Zyazev, A.O. Ilinskaya

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

ACCOUNTING FOR CHANGES IN ELECTROMAGNETIC FORCES WHEN CALCULATING THE TRAJECTORIES OF CONDUCTIVE PARTICLES IN A TRAVELING MAGNETIC FIELD OF AN EDDY-CURRENT SEPARATOR

The article deals with eddy-current (electrodynamic) separators with a traveling magnetic field based on linear inductors. Such separators have high performance and easily fit into finished production lines. They are effective in extracting non-ferrous metals from various types of bulk materials (automobile scrap, mixed industrial and municipal waste, cable and electronic scrap, etc.). Separators are also used for sorting non-ferrous metal scrap in preparation for metallurgical processes. This article focuses on the eddy-current separator, which is based on a conveyor that moves the processed materials, and a three-phase linear inductor located under the conveyor belt. **The purpose of the study:** improvement of mathematical models and methods for calculating eddy-current separators based on linear induction machines. **Results:** the proposed method for calculating the physical processes in the separator includes two stages. At the first stage, the calculation of the electromagnetic forces acting on the particles of non-ferrous metals is carried out, according to the methodology developed in Ural Federal University. At the second stage, the trajectories of movement of the separated particles in the working area of the separator are calculated taking into account the combined action of electromagnetic and mechanical forces. At the same time, it is proposed to divide the working separation zone into sections of small sizes. Within such sections, the forces are assumed to be unchanged. The article presents polynomial dependences of electromagnetic forces on the speed of particles and their location above the inductor. Such dependencies allow, in the course of calculations, to correct the forces during the transition from section to section according to the calculated values of the speed and coordinates of the particle. Examples of calculating the trajectories of conductive particles in the working area of an eddy-current separator are presented. The results of the trajectory calculation make it possible to evaluate the results of separation at the stage of plant design.

Keywords: eddy-current separation, linear inductors, electromagnetic forces, mechanical forces, particle trajectories, mathematical model, calculation results.

Введение

Среди специальных электрических машин, получивших развитие в последние годы, можно выделить линейные электрические машины (ЛИМ) технологического назначения. Отличительным признаком таких машин является то, что их вторичным элементом являются непосредственно электропроводящие изделия и материалы (жидкий металл, перемещаемые заготовки и изделия, обрабатываемые сыпучие материалы и др.), на которые воздействует бегущее магнитное поле, создаваемое трехфазными линейными индукторами. Такая специфика вторичного элемента наряду с эффектами, обусловленными разомкнутостью магнитопровода линейного индуктора, существенно усложняет

анализ электромагнитных процессов в ЛИМ и устройствах на их основе. Характерным примером ЛИМ технологического назначения служит их применение в электродинамических (вихретоковых) сепараторах. Такие сепараторы нашли применение в технологиях сбора и обработки лома цветных металлов, в частности, для извлечения металлических включений из твердых отходов производства и потребления. Подобные технологии в последние десятилетия разрабатываются как за рубежом [1–7], так и в нашей стране [6–11] и становятся неотъемлемой частью производств по промышленной переработке твердых коммунальных отходов, отслуживших свой срок транспортных средств, лома электротехнического и электронного оборудования и т.п. Стратегия развития производств по промышленной переработке твердых отходов в нашей стране, принятая в 2018 г., предполагает максимальную степень извлечения из отходов отдельных компонентов, пригодных для использования в качестве вторичного сырья, а также развитие отечественной технологической и машиностроительной базы, обеспечивающей отрасль переработки отходов необходимым оборудованием, обладающим также высоким экспортным потенциалом [12]. Все это делает актуальными разработки и совершенствование устройств электродинамической сепарации с целью улучшения их энергетических и функциональных характеристик.

В Уральском федеральном университете (УрФУ) исследования электродинамических сепараторов на протяжении ряда лет проводятся на кафедре электротехники [13–18]. В научной лаборатории кафедры созданы опытные установки, отличающиеся по мощности, габаритам и конструкции. Это позволяет проводить экспериментальные исследования сепараторов и апробацию реальных технологий в интересах заинтересованных предприятий. Вместе с тем выполняются теоретические исследования на основе математического моделирования физических процессов в ЛИМ и в сепараторах на их основе. В данной работе обобщаются некоторые результаты таких исследований, выполненных в УрФУ в последние годы.

Методика и результаты исследований

Электродинамические сепараторы, в основе которых лежит принцип взаимодействия проводящих частиц с переменным магнитным полем, отличаются по виду магнитных полей (импульсные, пульсирую-

щие, вращающиеся, бегущие) и способам их возбуждения, а также по способам подачи сепарируемых материалов в рабочую зону. Наибольшей производительностью обладают сепараторы на основе трехфазных линейных индукторов, устанавливаемых под (над) лентой конвейера, подающего отходы. Варианты таких сепараторов показаны на рис. 1. Обработываемый материал подается по ленте конвейера 1 в активную зону индуктора 4. Проводящие частицы 3, взаимодействуя с бегущим магнитным полем, выносятся за пределы конвейера в поперечном направлении и собираются в приемнике 5. Непроводящие частицы 2 движутся над индуктором без отклонения и попадают в приемник 6.

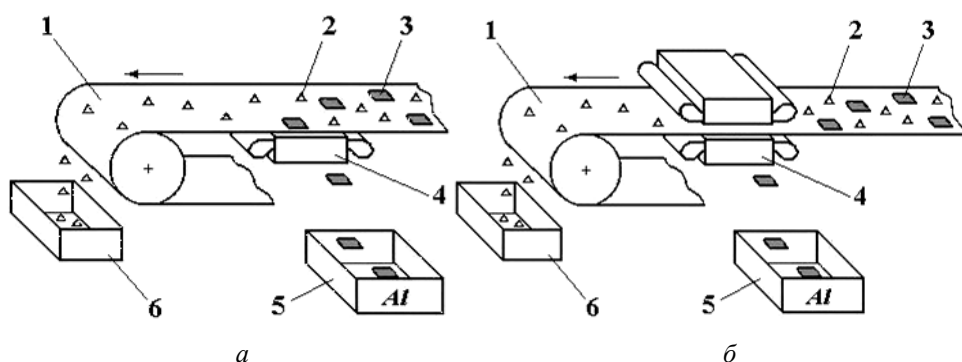


Рис. 1. Схемы сепараторов на основе ЛИМ с односторонним (а) и двухсторонним (б) индукторами: 1 – конвейер; 2 – неметаллические частицы; 3 – частицы цветных металлов; 4 – индукторы; 5 и 6 – приемники продуктов разделения

Можно отметить, что линейные индукторы характеризуются простотой конструкции и высокой надежностью, легко вписываются в действующие технологические линии. В то же время такие сепараторы отличаются повышенным энергопотреблением, поскольку имеют открытую магнитную систему (при использовании односторонних линейных индукторов) или большой рабочий зазор (в случае двухстороннего индуктора). Например, односторонний линейный индуктор опытно-промышленного сепаратора КМ-203М, разработанного в УрФУ совместно с ОАО «Уралэнергоцветмет» (г. Екатеринбург) [13], имеет потребляемую из сети мощность $S = 110$ кВА. Другой проблемой, которую нужно решать при разработке сепараторов, является существенная зависимость результатов сепарации от крупности извлекаемых частиц металла. С уменьшением размеров удельное электромагнитное усилие F_m , соответствующее ускорению частицы под действием этой силы,

снижается (F_m – отношение электромагнитного усилия, действующего на частицу, к ее массе, Н/кг или м/с²). Например, испытания сепаратора КМ-203М в действующей технологической линии по обработке твердых коммунальных отходов показали, что основные потери цветных металлов приходятся на мелкую фракцию (с крупностью менее 40 мм). Поэтому целями проводимых исследований электродинамических сепараторов являются снижение энергопотребления установок и расширение диапазона крупности сепарируемых частиц металлов. Для решения этих задач необходимо развитие теории электродинамических сепараторов.

В рамках научно-исследовательских работ, выполняемых в УрФУ совместно с заинтересованными предприятиями, были разработаны математические модели и методики расчета ЛИМ со вторичным элементом ограниченных размеров и сепараторов на основе таких ЛИМ [19–24]. Это позволяет оценивать энергетические и функциональные характеристики сепараторов уже на стадии проектирования.

С учетом особенностей работы электродинамических сепараторов расчеты физических процессов и характеристики установок целесообразно разделить на два этапа. На первом этапе выполняется расчет электромагнитных сил, действующих на сепарируемые частицы в активной зоне ЛИМ. При расчетах используется реализованный в пакете Mathcad алгоритм, основанный на аналитической модели ЛИМ, описанной ранее в [19–20]. Аналитическая модель, в которой корректно определяется распределение токов, наведенных в частицах ограниченных размеров, но учитывается только бегущая составляющая магнитного поля, удобна при многовариантных поисковых расчетах. Уточненные расчеты магнитных полей и электромагнитных сил для выбранных вариантов машин проводятся численными методами (метод конечных элементов), использующими моделирование ЛИМ в двухмерной постановке. При этом для учета поперечного краевого эффекта при определении параметров вторичных элементов вводится поправочный коэффициент, определяемый по аналитической модели. Такой подход позволяет избежать использования при численных расчетах трехмерных моделей, требующих больших вычислительных ресурсов.

На втором этапе с использованием найденных электромагнитных сил и механических сил, препятствующих движению, определяются траектории движения частиц в зоне сепарации. При этом необходимо

решить уравнение движения, которое в общем случае записывается в виде:

$$F_{эм}(V, Y) - F_{сопр}(V) = m \frac{dV}{dx}. \quad (1)$$

Решение уравнения (1) осложняется тем, что электромагнитная сила $F_{эм}$ меняется с изменением скорости движения V и местоположения частицы над индуктором (по координате Y). Сила сопротивления движению $F_{сопр}$ (в рассматриваемом случае это совокупность сил трения и сопротивления среды) также может зависеть от скорости. В разработанной в УрФУ методике решение нелинейного уравнения (1) заменяется последовательным решением линейных уравнений движения для участков малых размеров, в пределах которых силы могут считаться неизменными по величине [22–23]. Расчетная модель сепаратора, соответствующая такому подходу, представлена на рис. 2. Активная зона линейного индуктора разбивается в направлении оси X на участки шириной $\Delta L = L_n/n$, как показано на рис. 2. Для повышения точности расчетов рекомендуется выбирать число участков разбиения зоны над индуктором не менее 10. Шаг разбиения зоны сепарации за индуктором (по ходу движения конвейера) может быть произвольным, а количество участков в этой зоне определяется автоматически в ходе решения. Расчет траектории прекращается, когда частица выйдет за пределы ленты конвейера (частица 1 на рис. 2), или когда скорость движения частицы в направлении оси Y станет равной нулю (частица 2 на рис. 2).

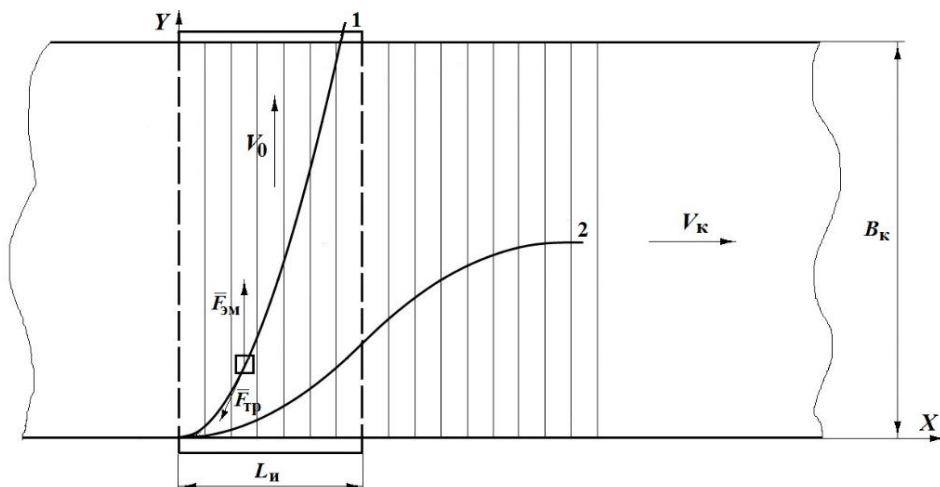


Рис. 2. Модель электродинамического сепаратора для расчета траекторий движения извлекаемых проводящих частиц

При решении уравнения движения вычисляются скорость движения частицы V (в частности, ее составляющая V_Y) и ее смещение в направлении оси Y . Это позволяет корректировать усилия при переходе с участка на участок в соответствии с полученными значениям V_Y и Y . В опубликованных ранее работах [22–24] рассматривались упрощенные варианты расчета траекторий движения частиц для двух частных случаев ЛИМ сепараторов, в которых изменение электромагнитного усилия по координате несущественно. Изменением усилия от скорости движения частиц в одном случае пренебрегалось (в предположении, что ЛИМ сепаратора работает при скольжениях, близких к $s = 1,0$), в другом случае предполагалось, что такое изменение усилия можно представить линейной зависимостью вида:

$$F_{\text{эм}}(V) = F_{\text{эм}0} \cdot \left(1 - \frac{V_Y}{V_0}\right), \quad (2)$$

где $F_{\text{эм}0}$ – пусковое электромагнитное усилие, $V_0 = 2\tau f$ – скорость бегущего магнитного поля, τ – полюсное деление индуктора, V_Y – текущая скорость частицы в направлении движения поля.

Очевидно, что рассмотренные случаи не охватывают всех возможных вариантов ЛИМ, которые могут встречаться при проектировании сепараторов. Например, на рис. 3 представлены экспериментально полученные кривые распределения электромагнитного усилия по длине двухполюсного линейного индуктора одной из лабораторных установок.

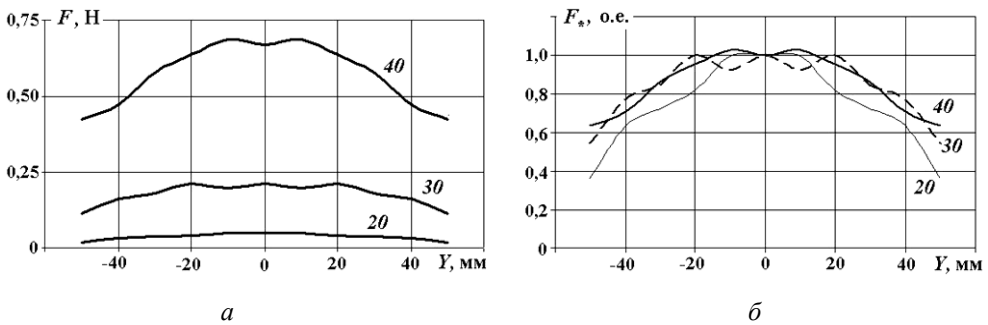


Рис. 3. Распределение электромагнитного усилия по длине ЛИМ при разном размере пластин (цифры на графиках) в натуральных (а) и относительных значениях (б)

Нетрудно видеть, что изменение усилия от координаты Y может быть весьма существенным. Основные параметры ЛИМ установки: полюсное деление индуктора $\tau = 75$ мм, рабочий зазор $\delta = 12$ мм, потреб-

ляемая мощность $S = 2$ кВА. В ходе экспериментов измерялись усилия, действующие на медные частицы разных размеров: $40 \times 40 \times 3$, $30 \times 30 \times 3$ и $20 \times 20 \times 3$ мм. Нетрудно видеть, что электромагнитное усилие изменяет свое значение по продольной оси индуктора. При этом с уменьшением размера частиц неравномерность распределения усилия по длине индуктора увеличивается, что делает этот фактор значимым для расчетов электродинамических сепараторов. На рис. 4 для той же ЛИМ приведены варианты расчетных зависимостей электромагнитных усилий от относительной скорости движения сепарируемых частиц (V_Y/V_0). Для удобства сравнения характеристика усилия также приведено в относительных единицах. В качестве вторичных элементов при расчетах рассматривались медные частицы толщиной $d = 3$ мм. Цифры на графиках рис. 4 соответствуют вариантам размеров квадратных частиц ($a = b$): 1 – 2τ , 2 – τ , 3 – $0,5\tau$, 4 – $0,4\tau$, 5 – $0,2\tau$. Можно отметить, что зависимости электромагнитного усилия от скорости близки к линейным только при малых размерах вторичных элементов (для $b < 0,2\tau$).

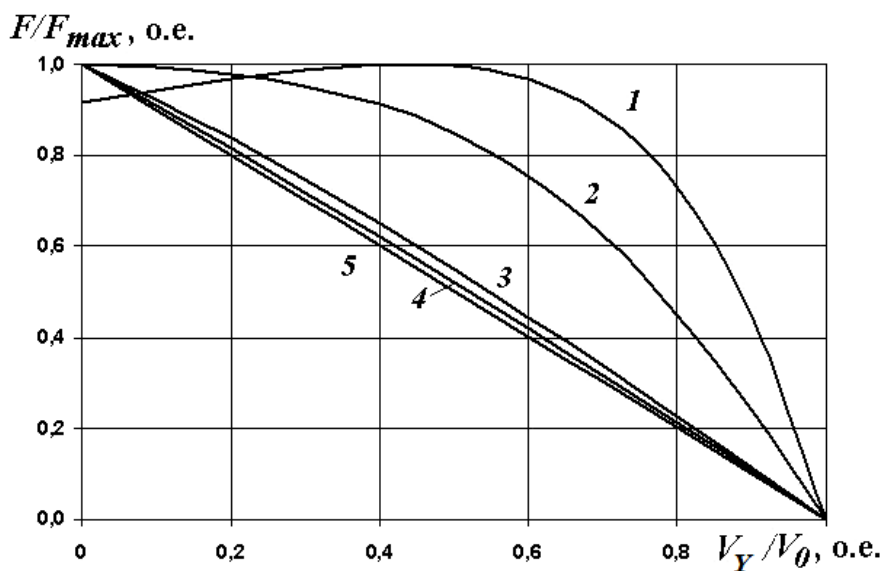


Рис. 4. Механические характеристики ЛИМ при разных размерах сепарируемых частиц металла

Для корректировки усилий в разработанной программе расчета траекторий, реализованной в пакете Mathcad, предлагается использовать аппроксимации механической характеристики ЛИМ и распреде-

ления электромагнитного усилия по длине индуктора полиномиальными зависимостями от относительной скорости частицы (V_Y/V_0) и положения частицы над индуктором (координаты Y). Например, зависимость электромагнитного усилия от координаты Y может быть аппроксимирована полиномиальной зависимостью вида:

$$F_{mY} = F_{m0}(1 + k_{Y1} \cdot Y + k_{Y2} \cdot Y^2). \quad (3)$$

Коэффициенты полинома определяются методом наименьших квадратов. Например, для зависимостей, аппроксимирующих кривые, показанные на рис. 3, получены такие значения коэффициентов: $k_{Y1} = -1,57$ и $k_{Y2} = -101,20$ (для крупности частиц 40 мм), $k_{Y1} = -0,167$ и $k_{Y2} = -152,10$ (для крупности 30 мм), $k_{Y1} = -3,997$ и $k_{Y2} = -135,20$ (для крупности 20 мм). При подстановке значений координаты Y в метрах коэффициенты имеют размерность $1/m$ (для k_{Y1}) и $1/m^2$ (для k_{Y2}).

Механические характеристики ЛИМ, показанные на рис. 4, предлагается аппроксимировать полиномиальными зависимостями третьей степени вида:

$$F_{mV} = F_{mV0} \left(1 + k_{V1} \cdot \frac{V}{V_0} + k_{V2} \cdot \frac{V^2}{V_0^2} + k_{V3} \cdot \frac{V^3}{V_0^3} \right). \quad (4)$$

Безразмерные коэффициенты полиномиальной зависимости (4) также определяются методом наименьших квадратов. Например, для вторичных элементов с размером $b = \tau$ (кривая 2 на рис. 4) получено: $k_{v1} = 0,112$; $k_{v2} = -0,708$ и $k_{v3} = -0,351$, с размером $b = 0,5\tau$ (кривая 3 на рис. 4) – $k_{v1} = -0,845$; $k_{v2} = -0,068$ и $k_{v3} = -0,099$ и т.д.

На основании описанной расчетной модели сепаратора (см. рис. 2) с учетом выражений (3)–(4) выполнены расчеты траекторий движения проводящих частиц в рабочей зоне лабораторной установки электродинамической сепарации. В основе установки – двухсторонний линейный индуктор с полюсным делением $\tau = 75$ мм, шириной пакета магнитопровода $L_{и} = 100$ мм и рабочим зазором $\delta = 12$ мм. При питании от трехфазного источника напряжения с частотой $f = 50$ Гц скорость бегущего магнитного поля $V_0 = 7,5$ м/с. Частицы подаются в рабочую зону по ленте конвейера шириной $B_k = 150$ мм со скоростью $V_k = 1,5$ м/с. Коэффициент сопротивления движению при расчетах принимался таким: $k_{сопр} = 0,6$.

На первом этапе оценивались удельные пусковые электромагнитные усилия F_m (отношение усилия к массе частицы), действующие на квадратные медные пластины толщиной $d = 3$ мм при изменении стороны квадрата b от 5 до 60 мм. Полученные значения удельных усилий (F_m принимали значения от 0,63 до 45,50 Н/кг) использовались для расчета траекторий движения частиц в рабочей зоне сепаратора. Примеры расчетных траекторий, соответствующих удельному электромагнитному усилию $F_m = 40$ Н/кг (размер частицы 30×30 мм), представлены на рис. 5. Расчеты выполнены для трех вариантов, отличающихся способом корректировки электромагнитных усилий, (соответствуют цифрам на графиках рис. 5): 1 – удельное электромагнитное усилие не зависит от положения частицы в активной зоне индуктора и остается постоянным при изменении скорости частицы V_Y ; 2 – удельное электромагнитное усилие не зависит от положения частицы в активной зоне индуктора, но корректируется при переходе с участка на участок с изменением скорости движения V_Y по выражению (2); 3 – удельное электромагнитное усилие корректируется при изменении координаты Y по выражению (3), а при изменении скорости V_Y – по выражению (4).

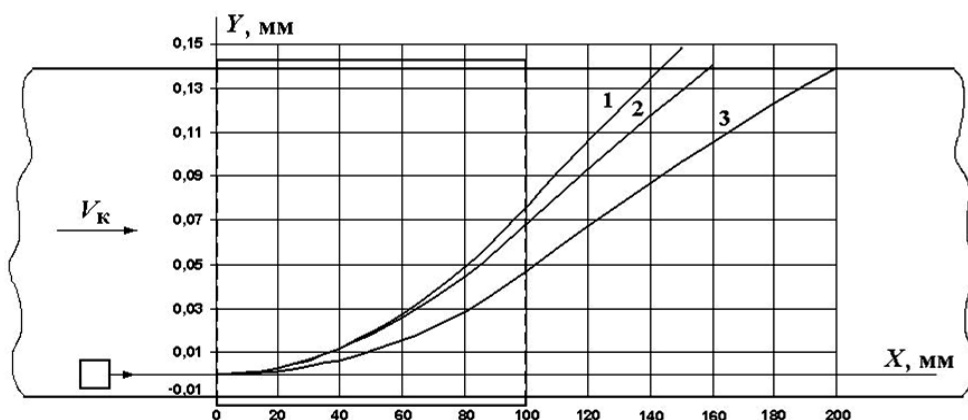


Рис. 5. Расчетные траектории движения частицы металла в зоне сепарации

Как видно на рис. 5, траектории движения частиц в рабочей зоне сепаратора при различных допущениях, принимаемых в расчетах, существенно отличаются. Например, выход частицы с конвейера происходит на отметках $X = 144,0$ мм (вариант 1), $X = 159,5$ мм (вариант 2) и $X = 201,5$ мм (вариант 3). Ошибка в расчете траектории по варианту 1 достигает 30 %. Расчеты показывают, что расхождение

траекторий при разных допущениях уменьшается с уменьшением размеров частиц и с увеличением скорости движения бегущего магнитного поля (с ростом полюсного деления τ , либо частоты f).

Заключение

Таким образом, в работе обоснована необходимость расчета траекторий движения металлических частиц в рабочей зоне электродинамического сепаратора на основе ЛИМ с подачей сепарируемых материалов по ленте конвейера и предложена методика расчета таких траекторий с учетом изменения электромагнитных усилий в процессе движения частиц в активной зоне индуктора. В отличие от ранее опубликованных работ в данной статье предложена методика учета зависимостей электромагнитных сил, действующих на проводящую частицу, от изменения положения частицы над индуктором и приобретенной ею скорости. Предлагаемые аппроксимации таких зависимостей полиномиальными функциями позволили автоматизировать расчеты характеристик электродинамических сепараторов.

Библиографический список

1. 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
2. Aluminium recovery from electronic scrap by High-Force eddy-current separators / S. Zhang, E. Forsberg, B. Arvidson, W. Moss // Resources, Conservation and Recycling. – 1998. – № 23. – P. 225–241.
3. Gesing A., Wolanski R. Recycling light metals from end-of-life vehicles // Journal of Metals. – 2001. – Vol. 53, № 11. – P. 21–23. DOI: 10.1007/s11837-001-0188-3
4. 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
5. 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. – Vol. 133. – P. 149–159. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.025

6. Колобов Г.А., Бредихин В.Н., Чернобаев В.М. Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов. – М.: Metallurgy, 1993. – 288 с.
7. Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Олейник А.В. Технология отходов. – М.: Альфа-М, Инфра-М, 2011. – 352 с.
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., Шаимова 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. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г. (утв. Распор. Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р) [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/
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. 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
16. 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.

17. Obvintseva E.Yu., Konyaev A.Yu. Linear induction machines for electrodynamic separation of non-ferrous metals // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (February 1–3, 2017 EIConRus). – St. Petersburg, Russia, 2017. – P. 1567–1570. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910871

18. Issues of induction sorting of scrap and waste of non-ferrous metals / M.E. Zyazev, E.S. Lyampasova, Z.O. Abdullaev, A.Yu. Konyaev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Iss. 950. IOP Publishing. – 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/950/1/012017

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

20. 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.

21. Оценка характеристик линейных индукционных машин при ограничении размеров вторичного элемента / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров // Электричество. – 2010. – № 4. – С. 32–36.

22. Konyaev A.Y., Bagin D.N. Modeling an electrodynamic separator based on a linear inductor // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 89, № 3. – P. 168–173. DOI: 10.3103/S1068371218030100

23. Коняев А.Ю., Багин Д.Н., Лаптева Е.О. Моделирование движения проводящих частиц в активной зоне линейного индуктора электродинамического сепаратора // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 36. – С. 63–79. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.4.04

24. Зязев М.Е., Гиззатуллин Э.В., Коняев А.Ю. Моделирование и исследование движения проводящих частиц при сепарации в бегущем магнитном поле // Вопросы электротехнологии. – 2021. – № 3 (32). – С. 5–14.

References

1. 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

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

3. Gesing A., Wolanski R. Recycling light metals from end-of-life vehicles. *Journal of Metals*, 2001, vol. 53, no. 11, pp. 21-23. DOI: 10.1007/s11837-001-0188-3

4. 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

5. 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, vol. 133, pp. 149-159. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.025

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: Metallurgiiia. 1993, 288 p.

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

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., Shaimova I.G. Separatsiia nemagnitnykh tsvetnykh metallov v begushchem magnitnom pole [Separation of non-magnetic non-ferrous metals in a traveling 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 elektrodvigatora [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. Strategiiia razvitiia promyshlennosti po obrabotke, utilizatsii i obezvrezhivaniuu otkhodov proizvodstva i potrebleniia na period do 2030 g. (utv. Raspor. 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/

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 [Devices for eddy-current separation of non-ferrous metal scrap and waste]. *Promyshlennaia energetika*, 2001, no. 6, pp. 16-19.

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

15. 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

16. 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, № 3, pp. 36-39.

17. Obvintseva E.Yu., Konyaev A.Yu. Linear induction machines for electrodynamic separation of non-ferrous metals. *Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (February 1–3, 2017 ElConRus)*. St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 1567-1570. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910871

18. Zyazev M.E., Lyampasova E.S., Abdullaev Z.O., Konyaev A.Yu. Issues of induction sorting of scrap and waste of non-ferrous metals. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, iss. 950, IOP Publishing, 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/950/1/012017

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

20. Koniaev A.Iu., Koniaev I.A., Markin N.E., Nazarov S.L. Elektrodinamicheskie separatory s begushchim magnitnym polem: osnovy teorii i rascheta [Eddy-current separators with a traveling magnetic field: fundamentals of theory and calculation]. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet, 2012, 104 p.

21. Koniaev A.Iu., Koniaev I.A., Markin N.E., Nazarov S.L. Otsenka kharakteristik lineinykh induktsionnykh mashin pri ogranichenii razmerov vtorichnogo elementa [Evaluation of the characteristics of linear induction machines with the limitation of the size of the secondary]. *Elektrichestvo*, 2010, no. 4, pp. 32-36.

22. Konyaev A.Y., Bagin D.N. Modeling an Electrodynamical Separator Based on a Linear Inductor. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, no. 3, pp. 168-173. DOI: 10.3103/S1068371218030100

23. Koniaev A.Iu., Bagin D.N., Lapteva E.O. Modelirovanie dvizheniia provodiashchikh chastits v aktivnoi zone lineinogo induktora elektrodinamicheskogo separatora [Modeling the movement of conductive particles in the active zone of a linear inductor of an eddy-current separator]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2020, no. 36, pp. 63-79. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.4.04

24. Ziazev M.E., Gizzatullin E.V., Koniaev A.Iu. Modelirovanie i issledovanie dvizheniia provodiashchikh chastits pri separatsii v begushchem magnitnom pole [Modeling and study of the movement of conductive particles during separation in a traveling magnetic field]. *Voprosy elektrotekhnologii*, 2021, no. 3 (32), pp. 5-14.

Сведения об авторах

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

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

Ильинская Анастасия Олеговна (Екатеринбург, Россия) – магистрант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: nastya.ilnskaya@mail.ru).

About the authors

Andrey Yu. Konyaev (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, 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).

Mikhail E. Zyazev (Ekaterinburg, Russian Federation) – Graduate Student 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: zyacho72@gmail.com).

Anastasia O. Ilinskaya (Ekaterinburg, Russian Federation) – Master Student 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: nastya.ilnskaya@mail.ru).

Поступила: 08.12.2022. Одобрена: 30.12.2022. Принята к публикации: 01.04.2023.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Коняев, А.Ю. Учет изменения электромагнитных сил при расчете траекторий движения проводящих частиц в бегущем магнитном поле электродинамического сепаратора / А.Ю. Коняев, М.Е. Зязев, А.О. Ильинская // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 45. – С. 31–47. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.1.02

Please cite this article in English as:

Konyaev A.Yu., Zyazev M.E., Ilinskaya A.O. Accounting for changes in electromagnetic forces when calculating the trajectories of conductive particles in a traveling magnetic field of an eddy-current separator. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2023, no. 45, pp. 31-47. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.1.02