

СПОСОБ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДУКТОРОВ С ПЕРЕМЕННЫМ ЧИСЛОМ ПАР ПОЛЮСОВ

Ю.В. Афанасьев, yvafanasev@mail.ru
А.Ю. Демин, deminal77@yandex.ru
Д.Ю. Пашали, dipashali@mail.ru
О.А. Юшкова, yushkova-usatu@bk.ru
А.И. Шайхлисламов, aidar.sh0411@gmail.com
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Аннотация. Проведен анализ современных конструкций систем автоматической сортировки твердых бытовых отходов, выявлены недостатки. Предложен оригинальный способ электродинамической сепарации электропроводящих материалов с использованием одного или нескольких индукторов с переменным числом пар полюсов, создающих бегущее электромагнитное поле, которым воздействуют на электропроводящие фрагменты твердых бытовых отходов. Обмотки индукторов при сепарации переключаются так, что полюсное деление изменяется дискретно от максимального до минимального или наоборот, с определенным интервалом времени переключения, определяемым максимальным значением инерции электропроводящих фрагментов с размером, близким к значению полюсного деления. Приводится описание способа электродинамической сепарации, а также блока управления системой электродинамической сепарации. Предлагаемый способ позволит расширить функциональные возможности автоматизированных систем сортировки и переработки электропроводящих твердых бытовых отходов и повысить производительность сепарации.

Ключевые слова: электродинамическая сепарация, электропроводящий фрагмент, твердые бытовые отходы, переключение пар полюсов, полюсное деление

Для цитирования: Способ электродинамической сепарации электропроводящих материалов с использованием индукторов с переменным числом пар полюсов / Ю.В. Афанасьев, А.Ю. Демин, Д.Ю. Пашали и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 82–88. DOI: 10.14529/power230108

Original article
DOI: 10.14529/power230108

THE ELECTRODYNAMIC SEPARATION OF CONDUCTING MATERIALS USING INDUCTORS WITH A VARIABLE POLE PAIR NUMBER

Yu.V. Afanasiev, yvafanasev@mail.ru
A.Yu. Demin, deminal77@yandex.ru
D.Yu. Pashali, dipashali@mail.ru
O.A. Yushkova, yushkova-usatu@bk.ru
A.I. Shaikhislamov, aidar.sh0411@gmail.com
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Abstract. This paper analyses systems for the automatic sorting of municipal solid waste and identifies shortcomings. It proposes an original method for the electrodynamic separation of electrically conductive materials using one or more inductors with a variable number of pole pairs, which create a traveling electromagnetic field and act on electrically conductive fragments of municipal solid waste. During separation, the inductor windings are switched so that the pole division changes discretely from the maximum to the minimum or vice versa, with a switching time interval determined by the maximum value of the inertia of the electrically conductive fragments with a size close to the value of the pole

division. The method of electrodynamic separation and the control unit of the electrodynamic separation system are described. The method expands the functionality of automated systems for sorting and processing electrically conductive municipal solid waste and increases separation performance.

Keywords: electrodynamic separation, electrically conductive fragment, municipal solid waste, pole pair switching, pole division

For citation: Afanasiev Yu.V., Demin A.Yu., Pashali D.Yu., Yushkova O.A., Shaikhislamov A.I. The electrodynamic separation of conducting materials using inductors with a variable pole pair number. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(1):82–88. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230108

Введение

В РФ очень остро стоит вопрос организации сортировки твердых бытовых отходов (ТБО) – в 2021 году на полигоны отправлялось до 94 % отходов, по России количество незаконных свалок составило более 15 тысяч, из них в только в республике Башкортостан – 1822 [1]. В 2020 году Президент РФ В.В. Путин подписал Указ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года», который обозначил цели национального проекта «Экология» к 2030 году, важнейшей из которых, с точки зрения авторов, является сокращение вдвое объемов полигонных захоронений [2]. В настоящее время актуальной научно-технической задачей является разработка систем автоматической сортировки неселективно собранных ТБО, повышающих в десятки раз, по сравнению с ручной, эффективность и производительность процесса переработки.

Современный уровень систем автоматической сортировки ТБО

Авторами проведен анализ современных конструкций систем автоматической сортировки ТБО [3–13]. Например, в [5] рекомендуется использовать сепараторы на основе линейных асинхронных машин, поскольку такие установки могут быть интегрированы в ранее созданные технологические линии и не имеют движущихся частей, при этом для улучшения технических параметров необходимо использовать конденсаторные батареи, а также модульную конструкцию катушек индуктивности. Результатом таких опций является снижение количества потребляемой электроэнергии от линий электропередачи и компенсация реактивной мощности. В [6] приводятся способы повышения эффективности извлечения металлических частиц из потока ТБО: тонкослойным распределением транспортируемых масс на конвейерной ленте, увеличением ширины линейного индуктора, использованием модульной конструкции линейного индуктора. В таком вихретоковом сепараторе можно улучшить как технологические, так и энергетические показатели. В [7–9] предлагается вихретоковая сепарация частиц цветных металлов. Приводятся ограничения конструкции вращающегося барабана с ременным приводом, а также потенциальные новые конструкции и новые области применения вихретоковых сепараторов. В этом же

источнике приведены математические модели, позволяющие исследовать магнитное поле вихретокового сепаратора. В [12] предложен метод электростатической сепарации на примере электростатического отделения алюминия от остатков процесса переработки электрических кабелей. В [13] предлагается электродинамическая сортировка по вихретоковому принципу сепарации, однако вместо того, чтобы вращать механический массив постоянных магнитов, система возбуждает неподвижный электромагнит переменным электрическим током, что позволяет частоте возбуждения выходить далеко за пределы механической системы, и она способна разделять материалы как по электропроводности, так и по массовой плотности.

Проведенный авторами анализ известных конструкций [3–14] выявил следующие недостатки:

- недостаточно высокая эффективность сепарации, так как создаваемое индукторами бегущее электромагнитное поле (БЭМП) практически не оказывает силового воздействия на электропроводящие фрагменты ТБО, размеры которых меньше полюсного деления индукторов, т. е. эффективность силового воздействия БЭМП индуктора снижается и прекращается при уменьшении размеров этих фрагментов;

- при пространственном совмещении индукторов с разнонаправленными БЭМП в рабочей зоне происходит гашение одного поля другим и на конвейерной ленте (КЛ) в этом месте образуется пространство, в котором БЭМП отсутствует и электропроводящие фрагменты (ЭФ) не извлекаются;

- при пространственно удаленном расположении одного индуктора от другого гашение не происходит, но на конвейерной ленте в промежутке между ними также образуется пространство, в котором БЭМП отсутствует и ЭФ не сепарируются;

- для расширения класса крупности извлекаемых ЭФ применяется импульсное усиление мощности индукторов (в несколько раз), это снижает энергоэффективность не пропорционально повышению качества селекции, так как на повышение эффективности электродинамической сепарации и расширение «классов крупности» радикально влияет только «подбор» полюсного деления индуктора.

Описание способа электродинамической сепарации

Авторами разработан оригинальный способ электродинамической сепарации [15], при котором используется один или несколько индукторов, создающих БЭМП, посредством которого воздействуют на ЭФ ТБО. Индукторы имеют переменное число пар полюсов и соответственно полюсное деление, определяемое соотношением

$$\tau_i = \frac{v}{2f_i},$$

где τ_i – полюсное деление; v – скорость БЭМП; i – индекс, указывающий на число пар полюсов, которые непрерывно воздействуют на электропроводящие фрагменты БЭМП, f_i – частота тока в обмотке индуктора.

Обмотки индукторов при сепарации переключаются так, что τ_i изменяется дискретно от максимального до минимального или наоборот, с интервалом времени переключения t , определяемым максимальным значением инерции ЭФ с размером, близким к τ_i .

Индукторы, управляемые автономно (каждый своим каналом, рис. 3) и создающие разнонаправленные БЭМП, устанавливаются в рабочей зоне в положениях, исключающих взаимное гашение полей и образование областей, свободных от БЭМП, в направлении движения КЛ, на расстоянии друг от друга не менее чем на величину половины амплитуды внешнего магнитного поля (ВМП) индуктора [16] или с перекрытием ширины в направлении, перпендикулярном движению КЛ.

При стабилизации размеров ЭФ «сканирование» чисел пар полюсов прекращается и фиксиру-

ется на оптимальном полюсном делении до тех пор, пока датчик не покажет изменения размеров ЭФ ТБО. Когда такой сигнал получен, соответствующий (или оба) индуктор возвращается коммутирующими устройствами управляющего блока в режим изменения числа пар полюсов (или τ_i). Число пар полюсов (или τ_i) устанавливают постоянной величиной для обеспечения наиболее эффективной селекции ЭФ ТБО этого размера.

Исходный материал, подлежащий сепарации, подается по КЛ в рабочую зону. Первый и второй индукторы с периодически изменяющимся τ_i постоянно работают в двух режимах: циклического изменения пар полюсов или с постоянным числом пар полюсов. Эффективность сортировки увеличивается за счет того, что:

- ЭФ ТБО меньшего размера, находящиеся в зоне действия БЭМП, получают более мощный импульс силы при меньшем τ_i (большем числе пар полюсов);
- ЭФ ТБО большего размера получают менее сильный импульс силы при большем τ_i (меньшем числе пар полюсов).

При этом силовое воздействие БЭМП имеет место только при превышении размеров фрагментов больше τ_i .

На рис. 1 представлено воздействие БЭМП при размере ЭФ ТБО меньше полюсного деления, на рис. 2 представлено воздействие БЭМП при размере ЭФ ТБО больше полюсного деления.

БЭМП представлено в виде мгновенной картины «застывших волн» в рабочей зоне, а ЭФ ТБО – в виде отдельных проводящих тел, размеры которых в направлении, перпендикулярном движению

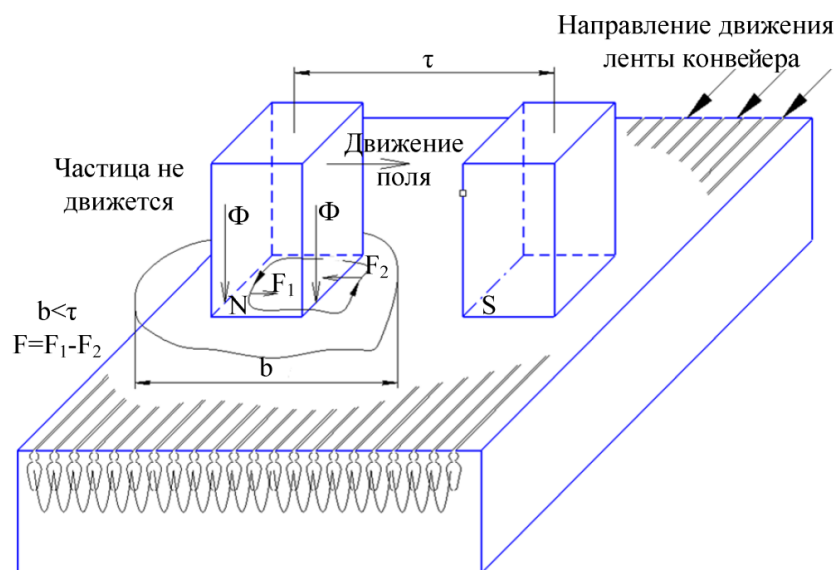


Рис. 1. Воздействие бегущих электромагнитных полей при размере электропроводящего фрагмента меньше полюсного деления
Fig. 1. The impact of traveling electromagnetic fields when the size of the electrically conductive fragment is less than the pole division

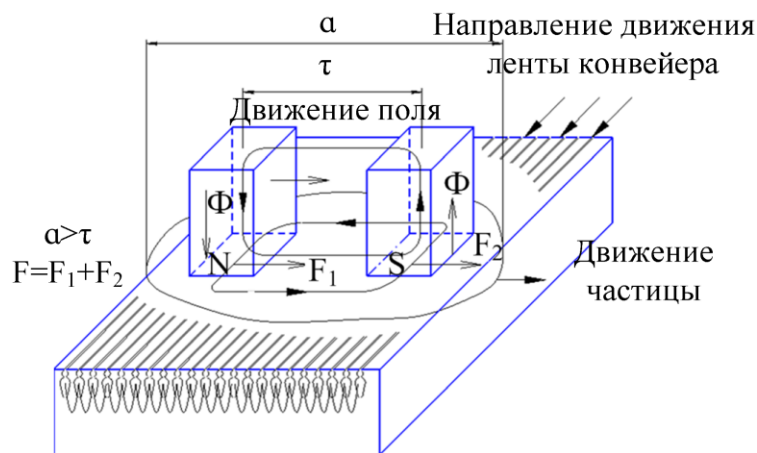


Рис. 2. Воздействие бегущих электромагнитных полей при размере электропроводящего фрагмента больше полюсного деления
Fig. 2. The impact of traveling electromagnetic fields when the size of the electrically conductive fragment is greater than the pole division

КЛ, превышают τ_i . Если размер ЭФ b больше полюсного деления $b > \tau_i$ (см. рис. 2), то сумма сил, создаваемых поперечными к направлению движения КЛ составляющими тока I , будут определять силу $\vec{F}$:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

Под действием силы $\vec{F}$ ЭФ ТБО движется в сторону края КЛ. Направление силы, действующей на фрагменты, определяется правилом левой руки, а направление наведенного тока в ней – правилом правой руки. Ввиду относительно малой скорости движения КЛ при данных рассуждениях она не учитывается.

Картина полей и токов при размере ЭФ ТБО меньше полюсного деления $b < \tau_i$, поясняется на рис. 1. На поперечные составляющие контуров тока, образованных переменным магнитным полем, в пределах, ограниченных размерами ЭФ ТБО, действуют силы, которые направлены противоположно и поэтому компенсируют друг друга:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2 = 0.$$

Так как $\vec{F}_1 = \vec{F}_2$, результирующая сила $\vec{F}$ равна нулю и ЭФ не движется. То же самое следует из [9]: результирующая сила, которая действует на контур с током в магнитном поле, определяется в соответствии с уравнением

$$\vec{F} = I \left[d\vec{l}, \vec{B} \right],$$

где $d\vec{l}$ – вектор, совпадающий по направлению с током; $\vec{B}$ – вектор, характеризующий силовое действие БЭМП на движущийся заряд, как (см. рис. 1 и 2).

$$\vec{F} = I \oint [d\vec{l}, \vec{B}], \quad (1)$$

где интегрирование проводится по данному контуру с током I . Если поле в пределах размеров фрагментов образуется двумя разноименными по-

люсами (см. рис. 2), то поле неоднородно. Если в пределах размеров ЭФ ТБО находится только один полюс, то магнитное поле можно считать однородным, тогда вектор $\vec{B}$ можно вынести из-под интеграла (1), и задача сводится к вычислению векторного интеграла:

$$\vec{F} = I \vec{B} \oint d\vec{l}.$$

Этот интеграл представляет собой сумму замкнутых в цепочку элементарных векторов $d\vec{l}$ (продольные и поперечные составляющие тока I (см. рис. 2), поэтому он равен нулю. Значит, и $\vec{F} = 0$, т. е. результирующая сила Ампера равна нулю.

При установке с перекрытием индукторы располагаются на расстоянии друг от друга на величину Δ . Это расстояние, как правило, задает удвоенный размер вылета лобовых частей индукторов и должно быть менее величины выпучивания электромагнитного поля при действующей частоте питающего напряжения и среднем значении магнитной проницаемости сортируемого электропроводящего материала в направлении движения КЛ.

Работа блока управления системой электродинамической сепарации

Для реализации предлагаемого метода электродинамической сепарации авторами разработан блок управления. Работа системы электродинамической сепарации поясняется структурой, приведенной на рис. 3.

Основным центром, управляющим работой системы электродинамической сепарации электропроводящих материалов, является микроконтроллерный блок анализа и управления (МБАиУ) 5, который может быть реализован на базе программируемого логического контроллера. С помощью сигналов МБАиУ задается направление и скорость

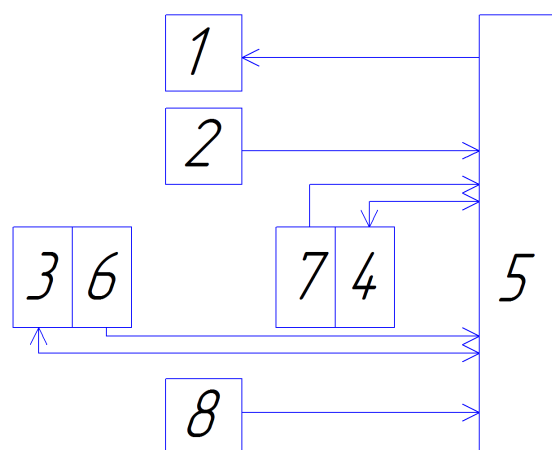


Рис. 3. Структура блока управления системой электродинамической сепарации: 1 – блок управления конвейерной лентой; 2 – блок детектирования электропроводящих фрагментов; 3 и 4 – левосторонний и правосторонний индукторы соответственно; 5 – блок анализа и управления; 6 и 7 – блоки детектирования электропроводящих фрагментов; 8 – блок контроля качества сортировки

Fig. 3. The structure of the control unit of the electrodynamic separation system: 1 – conveyor belt control unit; 2 – block for detecting electrically conductive fragments; 3 and 4 – left-handed and right-handed inductors, respectively; 5 – block of analysis and control; 6 and 7 – blocks for detecting electrically conductive fragments; 8 – sorting quality control unit

движения КЛ через блок управления конвейерной лентой 1.

Управление происходит следующим образом: при поступлении данных с первичного блока детектирования количества поступающих ЭФ 2 происходит включение соответственно левостороннего и правостороннего индукторов 3 и 4 для извлечения металла с начальным значением полюсного деления τ_i .

После этого происходит анализ сигналов с блоков детектирования количества ЭФ 6 и 7, а также блока контроля качества сортировки 8. Если блок 8 показывает наличие ЭФ на КЛ, то изменяется режим работы индукторов 3 и 4 (устанавливается следующее по порядку значение полюсного деления $\tau_i + 1$) и включается реверс КЛ с помощью блока управления 1. Блоки контроля качества сортировки 8 и детектирования поступающих ЭФ 2 могут быть реализованы на основе интегральных схем. Блоки детектирования количества ЭФ 6 и 7 могут быть реализованы различными способами – как электромагнитными, так и оптическими. Затем

анализируется сигнал с блока детектирования 2 и возможны два варианта:

- при отсутствии частиц металла КЛ переключается на ход в прямом направлении без изменения режима работы индукторов;
- если датчик блока 2 показывает наличие частиц металла, то КЛ переключается на ход в прямом направлении с изменением режима работы индукторов.

Процесс сортировки продолжается циклически с учетом текущей информации с датчиков блоков детектирования 2 и контроля 8 (блоки 2, 8 и 6, 7 различаются по месту установки относительно поступающего на ленте материала и по возможному способу реализации).

Таким образом, разработанный авторами оригинальный способ электродинамической сепарации с использованием одного или нескольких индукторов, имеющих переключаемое число пар полюсов, активизирующих движение электропроводящих фрагментов ТБО широкого спектра размеров, позволит повысить эффективность их сортировки.

Список литературы

1. Число незаконных свалок в России за два года выросло на 30 % URL: <https://www.rbc.ru/business/11/04/2022/624ffdf9a794728ec7c467d?from=newsfeed> (дата обращения: 11.04.2022).
2. Указ Президента Российской Федерации от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года». URL: <http://ips.pravo.gov.ru:8080/default.aspx?pn=0001202007210012> (дата обращения: 01.02.2022).
3. 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. 2, № 6. С. 4–9. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-6-4-9
4. Коняев А.Ю. Сепараторы для извлечения цветных металлов из ТКО // Твердые бытовые отходы. 2017. № 3 (129). С. 36–39.
5. Zyazev M.E., Zyazeva E.S., Konyaev A.Y. Comparison of Electrodynamical Separators with a Traveling Magnetic Field with Different Designs of Inductors // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2021. P. 1580–1582. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396237
6. Increasing the Efficiency of Installations Based on Linear Induction Machines Through the Modular Design of Inductors / M.E. Zyazev, E.S. Lyampasova, Z.O. Abdullaev, A.Yu. Konyaev // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2020. P. 1347–1349. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039151

7. Nagel J.R. An analytic model for eddy current separation // *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 127 (1). P. 277–285. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.08.025
8. 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 (2). P. 149–159. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.025
9. Numerical Simulation and Experimental Observation of Charged Particles Trajectories in Roll-Type Electrostatic Separators / M. Maammar, I.-E. Achouri, T. Zeghloul et al. // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021. Vol. 57, no. 6. P. 6504–6511. DOI: 10.1109/TIA.2021.3103485
10. Gundupalli S.P., Hait S., Thakur A. A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling // *Waste Management*. 2017. Vol. 60. P. 56–74. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.09.015
11. A multi-label waste detection model based on transfer learning / Qiang Zhang, Qifan Yang, Xujuan Zhang et al. // *Resources, Conservation and Recycling*. 2022. Vol. 181 (1). P. 106235. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106235
12. Bedeković G., Trbović R. Electrostatic separation of aluminium from residue of electric cables recycling process // *Waste Management*. 2020. Vol. 108 (3). P. 21–27. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.04.033
13. Electrodynamics Sorting of Industrial Scrap Metal / J.R. Nagel, D. Cohrs, J. Salgado, R.K. Rajamani // *KONA Powder and Particle Journal*. 2020. Vol. 37. P. 258–264. DOI: 10.14356/kona.2020015
14. Sereda T.G., Kostarev S.N. Development of automated control system for waste sorting // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 537 (6). P. 062012. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062012
15. Пат. RU 2767485 С1. Способ электродинамической сепарации и устройство для его осуществления / А.И. Шайхлисламов, Ф.Р. Исмагилов, Ю.В. Афанасьев и др. № 2021124188; заявл. 16.08.2021; опубл. 17.03.2022.
16. The external magnetic field of electrotechnical complexes elements with a shell having a finite magnetic permeability / Y.V. Afanasyev, A.Y. Demin, O.A. Yushkova, D.Y. Pashali // 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). Ufa, Russia, 2020. P. 148–152. DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278434

References

1. *Chislo nezakonnykh svalok v Rossii za dva goda vyroslo na 30 %* [The number of illegal landfills in Russia has increased by 30 % in two years]. (In Russ.) Available at: <https://www.rbc.ru/business/11/04/2022/624ffdf9a794728ec7c467d?from=newsfeed> (accessed 11.04.2022 г.).
2. *Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 21.07.2020 № 474 “O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda”* [Decree of the President of the Russian Federation of July 21, 2020 No. 474 “On the National Development Goals of the Russian Federation for the period up to 2030”]. (In Russ.) Available at: <http://ips.pravo.gov.ru:8080/default.aspx?pn=0001202007210012> (accessed 01.02.2022).
3. Konyaev A.Yu., Abdullaev Zh.O., Bagin D.N., Konyaev I.A. Features of Electrodynamics Separation the Fine Fraction of Municipal Solid Waste. (In Russ.) *Ecology & Industry of Russia*. 2017;2(6):4–9. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-6-4-9
4. Konyaev A.Yu. [Separators for the extraction of non-ferrous metals from MSW]. *Tverdye bytovye otkhody*. 2017;3(129):36–39. (In Russ.)
5. Zyazev M.E., Zyazeva E.S., Konyaev A.Y. Comparison of Electrodynamics Separators with a Traveling Magnetic Field with Different Designs of Inductors. In: *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*; 2021. P. 1580–1582. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396237
6. Zyazev M.E., Lyampasova E.S., Abdullaev Z.O., Konyaev A.Yu. Increasing the Efficiency of Installations Based on Linear Induction Machines Through the Modular Design of Inductors. In: *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*; 2020. P. 1347–1349. DOI: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039151
7. Nagel J.R. An analytic model for eddy current separation. *Minerals Engineering*. 2018;127(1):277–285. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.08.025
8. 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(2):149–159. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.025
9. Maammar M., Achouri I.-E., Zeghloul T., Medles K., Aksa W., Dascalescu L. Numerical Simulation and Experimental Observation of Charged Particles Trajectories in Roll-Type Electrostatic Separators. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021;57(6):6504–6511. DOI: 10.1109/TIA.2021.3103485
10. Gundupalli S.P., Hait S., Thakur A. A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. *Waste Management*. 2017;60:56–74. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.09.015
11. Qiang Zhang, Qifan Yang, Xujuan Zhang et al. A multi-label waste detection model based on transfer learning. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022;181(1):106235. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106235

12. Bedeković G., Trbović R. Electrostatic separation of aluminium from residue of electric cables recycling process. *Waste Management*. 2020;108(3):21–27. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.04.033
13. Nagel J.R., Cohrs D., Salgado J., Rajamani R.K. Electrodynamic Sorting of Industrial Scrap Metal. *KONA Powder and Particle Journal*. 2020;37:258–264. DOI: 10.14356/kona.2020015
14. Sereda T.G., Kostarev S.N. Development of automated control system for waste sorting. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;537(6):062012. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062012
15. Shaikhislamov A.I., Ismagilov F.R., Afanasiev Yu.V., Pashali D.Yu., Pashali A.M. *Method for electrodynamic separation and device for its implementation*. Patent RU 2767485 C1, 2022. (In Russ.)
16. Afanasyev Y.V., Demin A.Y., Yushkova O.A., Pashali D.Y. The external magnetic field of electrotechnical complexes elements with a shell having a finite magnetic permeability. *2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. Ufa, Russia; 2020. P. 148–152. DOI: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278434

Информация об авторах

Афанасьев Юрий Викторович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; yvafanasev@mail.ru.

Демин Алексей Юрьевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры электронной инженерии, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; deminal77@yandex.ru.

Пашали Диана Юрьевна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; dipashali@mail.ru.

Юшкова Оксана Алексеевна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; yushkova-usatu@bk.ru.

Шайхлисламов Айдар Ильдарович, инженер кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия; aidar.sh0411@gmail.com.

Information about the authors

Yury V. Afanasiev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electromechanics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; yvafanasev@mail.ru.

Aleksey Yu. Demin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Electronic Engineering, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; deminal77@yandex.ru.

Diana Yu. Pashali, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electromechanics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; dipashali@mail.ru.

Oksana A. Yushkova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electromechanics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; yushkova-usatu@bk.ru.

Aidar I. Shaikhislamov, Engineer of the Department of Electromechanics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia; aidar.sh0411@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 11.11.2022; одобрена после рецензирования 28.11.2022; принята к публикации 28.11.2022.

The article was submitted 11.11.2022; approved after review 28.11.2022; accepted for publication 28.11.2022.