

УДК 621.313.17

А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, М.Е. Зязев, И.А. КоняевУральский федеральный университет им. первого Президента
России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЦЕЛЕВЫХ ЛИНЕЙНЫХ
ИНДУКЦИОННЫХ МАШИН**

В настоящей статье описаны некоторые результаты исследований специальных электрических машин технологического назначения, в частности линейных индукционных машин. В таких индукционных машинах вторичным элементом являются обрабатываемые материалы и изделия. Показаны целесообразность применения двухцелевых линейных индукционных машин и перспективы использования линейных индукторов, создающих встречно бегущие магнитные поля. Двухцелевые (многоцелевые) линейные индукционные машины позволяют одновременно выполнять несколько рабочих функций. Например, можно перемещать металлические заготовки, осуществлять их индукционный нагрев, получать информацию о параметрах движения и положении заготовок. Рассмотрены режимы работы линейных машин со встречно бегущими магнитными полями применительно к обработке металлических заготовок: перемещение заготовок, их позиционирование в рабочей зоне и индукционный нагрев в бегущих магнитных полях. Традиционные методы индукционного нагрева изучались на протяжении многих лет. Однако индукционный нагрев в бегущем магнитном поле не полностью оценен в отношении его основных преимуществ и возможных промышленных применений. Показаны преимущества линейных индукционных машин, создающих встречно бегущие магнитные поля: повышение точности позиционирования заготовок и выравнивание температурного поля при индукционном нагреве металлических заготовок. Настоящая работа посвящена моделированию и изучению некоторых своеобразных характеристик этого типа многофазных индукционных нагревательных систем. Основное внимание сосредоточено на выборе схемы трехфазной обмотки линейного индуктора, обеспечивающей указанные преимущества. В статье приведены результаты исследований опытных образцов двухцелевых линейных индукционных машин, созданных в лаборатории кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета.

Ключевые слова: двухцелевые линейные индукционные машины, встречно бегущие магнитные поля, позиционирование, индукционный нагрев, результаты исследований.

A.Yu. Konyaev, Zh.O. Abdullaev, M.E. Zyazev, I.A. KonyaevUral Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation**INVESTIGATION OF DOUBLE-PURPOSE LINEAR
INDUCTION MACHINES**

In this paper we describe some of the results of studies of special electric machines for technological purposes, in particular, linear induction machines. In such induction machines the secondary element is the processed materials and products. The expediency of using dual-purpose linear induction machines and the prospects of using linear inductors creating opposite direction traveling magnetic

fields are shown. Two-purpose (multi-purpose) linear induction machines can simultaneously perform several operating functions. For example, it is possible to move metal blanks, perform their induction heating and obtain information on the parameters of motion and the position of the blanks. The modes of operation of linear machines with opposite direction traveling magnetic fields are considered with reference to the processing of metal blanks: movement of blanks, their positioning in the working zone, induction heating in running magnetic fields. Traditional methods of induction heating have been studied for many years. However, induction heating in a traveling magnetic field is not fully appreciated with respect to its main advantages and possible industrial applications. The advantages of linear induction machines that create opposite direction traveling magnetic fields are shown: increasing the accuracy of positioning of blanks and equalizing the temperature field during induction heating of metal blanks. The present work is devoted to modeling and studying some peculiar characteristics of this type of multi-phase induction heating systems. 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 studies of prototypes of dual-purpose linear induction machines created in the laboratory of the Department of Electrical Engineering and Electrotechnological Systems of the Ural Federal University.

Keywords: double-purpose linear induction machines, opposite direction travelling magnetic fields, positioning, induction heating, research results.

Введение. Перспективным направлением развития специальных электрических машин является разработка и применение линейных индукционных машин (ЛИМ) технологического назначения, в которых технологическое воздействие на обрабатываемые материалы, заготовки или изделия осуществляется бегущим магнитным полем. Известны случаи применения подобных ЛИМ для электромагнитного воздействия на жидкие металлы в МГД-технологиях [1], для электродинамической сепарации металлосодержащих отходов и индукционной сортировки лома цветных металлов [2–4], для осуществления вспомогательных технологических операций при металлообработке (захват, подача, ориентация, стапелирование заготовок) [5–6] и др.

Основные достоинства ЛИМ связаны с бесконтактной передачей усилия обрабатываемым средам и изделиям, которые выполняют функции вторичного элемента индукционной машины. Это особенно важно при электромагнитном воздействии на жидкие металлы и сыпучие среды. При использовании ЛИМ в электроприводах вспомогательного технологического оборудования появляется возможность устранения механических передач, снимаются ограничения, присущие передаче механического усилия перемещаемым металлическим заготовкам или изделиям от роликов за счет сил сцепления. Можно отметить также хорошую встраиваемость ЛИМ в технологические линии и агрегаты.

Одним из достоинств ЛИМ технологического назначения является возможность совмещения в одной машине нескольких функций (перемещение, нагрев, получение информации о параметрах движения). Наиболее часто двухцелевые ЛИМ используют для совместного

механического и теплового воздействия на обрабатываемые материалы и изделия. Можно привести ряд примеров реализации таких технологических операций: натяжение и нагрев с целью термообработки металлических лент, перемещение и нагрев металлических полос и листов в непрерывных линиях индукционного нагрева, перемещение и подогрев литейных форм и изложниц в литейной карусельной машине, перемещение жидкого металла с одновременным подогревом металлического трубопровода и др. [7–14]. Важно подчеркнуть, что достоинства индукционного нагрева металлических заготовок в бегущих магнитных полях отмечаются многими специалистами в области электротермии [15–20]. Такие достоинства заключающиеся в следующем:

1. Электромагнитная мощность в нагреваемом металле в случае бегущего магнитного поля распределяется более равномерно, чем в случае пульсирующего поля, что обуславливает выравнивание температур.

2. Появляется возможность целенаправленного использования электромагнитных сил для создания поточных технологических линий.

3. Имеется дополнительная возможность регулирования параметров нагрева за счет изменения характера и скорости перемещения нагреваемых изделий.

4. При использовании трехфазных индукторов улучшается работа системы электроснабжения за счет симметрирования фаз и повышения коэффициента мощности установок.

5. Снижаются уровни акустического шума и вибраций.

Важно отметить, что при создании технологических установок на основе ЛИМ могут применяться решения, не характерные для традиционных электрических машин. Например, новые возможности в разработке установок индукционного нагрева появляются при использовании ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями. Исследования таких электрических машин и установок на их основе проводятся на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета [21]. В данной статье излагаются некоторые результаты таких исследований.

Содержание и результаты исследований. Один из возможных вариантов ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями схематично представлен на рис. 1. Трехфазная обмотка машины разделена на две секции, располагаемые в пазах левой и правой частей индуктора. При этом порядок чередования фаз в каждой из секций обмотки выби-

рается таким, что создаваемые ими бегущие магнитные поля движутся к центру индуктора. Электромагнитные усилия $F_{эм}$, действующие на левую и правую части вторичного элемента (например, обрабатываемой металлической заготовки), также направлены навстречу друг другу. Рассматриваемая ЛИМ позволяет легко управлять движением заготовок. Включение одной из секций обмотки обеспечивает перемещение заготовки в нужном направлении. Включение обеих секций при условии неравенства сил $F_{эм,л}$ и $F_{эм,п}$ приводит к движению заготовки на пониженной скорости, а в случае равенства $F_{эм,л} = F_{эм,п}$ реализуется режим позиционирования заготовок (при условии, что длина заготовки меньше длины индуктора).

Указанные возможности ЛИМ со встречно бегущими полями позволяют создавать на их основе загрузочно-подающие устройства для подачи заготовок в рабочую зону в металлообрабатывающем производстве, для подачи деталей под схват робота на сборочных операциях в машиностроении и приборостроении и др. Отметим, что для таких вспомогательных технологических операций режим позиционирования заготовок при использовании рассматриваемых ЛИМ может оказаться наиболее востребованным, поскольку за счет эффекта самоцентрирования можно добиться высокой точности позиционирования.

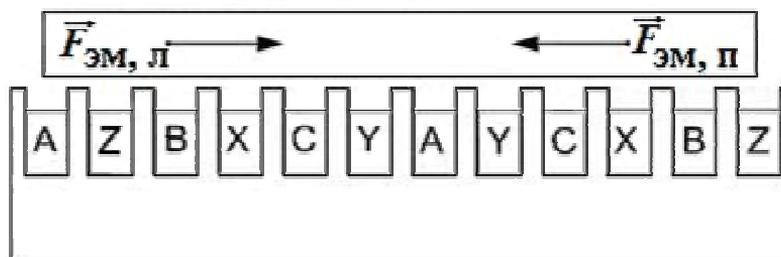


Рис. 1. Схема ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями

Например, в установках индукционного нагрева важно располагать нагреваемую заготовку в зоне нагрева симметрично относительно центра индуктора. Смещение ее от симметричного положения приводит к нежелательному увеличению неравномерности распределения температур по длине заготовки. Для оценки такого явления авторами выполнены исследования ряда опытных установок на основе ЛИМ, созданных в лаборатории УрФУ. Например, на рис. 2 приведены зависимости относительного размаха колебаний температуры по длине

алюминиевой заготовки $\delta\Theta$, нагреваемой в двухстороннем линейном индукторе, от ошибки позиционирования Δx (отклонения оси заготовки от оси индуктора). Исследованный четырехполюсный линейный индуктор имеет полюсное деление $\tau = 102$ мм и ширину активной зоны (по железу) $B_{и} = 105$ мм. При питании от стандартной трехфазной сети (380 В, 50 Гц) достигалась линейная токовая нагрузка $A_1 = 750$ А/см (на одну сторону), обеспечивающая за 3 мин нагрев заготовки до температуры 250–300 °С.

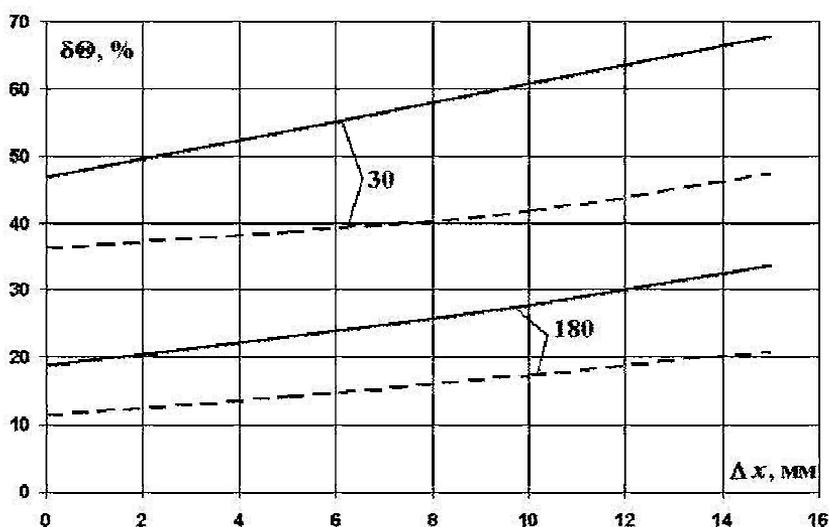


Рис. 2. Относительный размах колебаний температуры по длине заготовки при ее несимметричном расположении в индукторе

Результаты, приведенные на рис. 2, соответствуют размерам алюминиевой заготовки 380×100×10 мм. Удельная электрическая проводимость материала заготовки $\gamma = 32$ МСм/м. Относительный размах колебаний температуры $\delta\Theta$ определялся по выражению:

$$\delta\Theta = 100 \times (\Theta_{\max} - \Theta_{\min}) / \Theta_{\text{ср}},$$

где Θ_{\max} , Θ_{\min} и $\Theta_{\text{ср}}$ — соответственно максимальное минимальное и среднее значения температуры по длине заготовки.

Зависимости, приведенные на рис. 2, получены для разных значений времени нагрева: 30 и 180 с (цифры на графиках). Сплошные линии соответствуют режиму нагрева в бегущем магнитном поле одного направления. Нетрудно видеть, что неравномерность нагрева заготовок существенно возрастает при смещении ее относительно центра

индуктора (Δx), что подтверждает необходимость позиционирования заготовок по оси индуктора. В существующих установках индукционного нагрева подача заготовок в индуктор осуществляется чаще всего с помощью механических толкателей, а позиционирование в зоне нагрева – с помощью упоров, которые предотвращают также эффект саморазгрузки заготовок под действием электромагнитных сил. Применение для загрузки заготовок и удержания в зоне нагрева ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями может существенно упростить конструкцию установок индукционного нагрева.

Для описанной выше ЛИМ выполнена экспериментальная оценка эффекта самоцентрирования заготовки при вводе ее в рабочую зону. Для удобства измерений в экспериментах использовался односторонний вариант индуктора. Размеры алюминиевой заготовки: длина в направлении движения магнитного поля $b = 100$ мм, в поперечном направлении – $a = 70$ мм, толщина $d = 10$ мм. Эксперименты в режиме позиционирования проводились при токах, существенно меньших, чем в режиме нагрева. Движение заготовки под действием электромагнитных сил начиналось при токе в катушках обмотки $0,7$ А (в режиме нагрева на две стороны индуктора в 10 раз больше). В исходном положении поперечная ось заготовки совпадала с краем магнитопровода индуктора. После включения ЛИМ заготовка начинала движение и, совершив несколько колебаний (от 1 до 3), останавливалась в центральной части индуктора. Для достоверности оценок опыты повторялись несколько раз для каждого из значений тока. Зависимость погрешности позиционирования Δx от тока ЛИМ приведена на рис. 3. С увеличением тока число колебаний заготовки увеличивалось, а ошибка позиционирования уменьшалась. При токе, превышающем $1,25$ А, ошибка позиционирования отсутствовала: поперечная ось пластины совпадала с осью линейного индуктора.

На практике при совмещении в двухцелевых ЛИМ функций перемещения и индукционного нагрева заготовок полученная закономерность уменьшения погрешности позиционирования с ростом тока индуктора может быть эффективно использована. Для перемещения заготовок в зоне нагрева требуются небольшие мощности и небольшие токи индуктора, которые могут обеспечить подачу заготовок и первый этап позиционирования. На втором этапе после входа заготовки в центральную зону индуктора установка (ЛИМ – индукционный нагреватель) включается на

полную мощность, соответствующую режиму нагрева. При такой мощности (при больших токах индуктора) обеспечиваются необходимая точность позиционирования и высокая скорость нагрева.

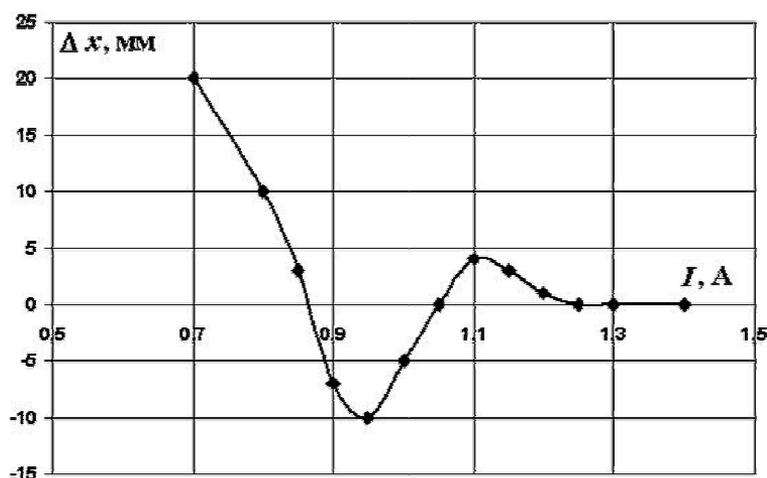


Рис. 3. Зависимость погрешности позиционирования от тока ЛИМ

Исследования режимов индукционного нагрева заготовок при использовании ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями показали, что рассматриваемые двухцелевые машины позволяют не только повысить точность позиционирования заготовок, но и улучшить характеристики самого процесса индукционного нагрева. В частности, на рис. 2 пунктирными линиями показаны зависимости относительного размаха колебаний температуры по длине алюминиевой заготовки $\delta\Theta$ от погрешности позиционирования Δx для случая индукционного нагрева заготовки в двухстороннем линейном индукторе, создающем встречно бегущие магнитные поля, перемещающиеся к центру ЛИМ. Нетрудно видеть, что индукционный нагрев во встречно бегущих магнитных полях обеспечивает значительное уменьшение неравномерности распределения температуры по длине заготовки. Отметим, что последующие исследования режима индукционного нагрева заготовок при использовании ЛИМ со встречно бегущими полями показали возможность достижения еще большего выравнивания температур. В ряде вариантов относительный размах колебаний температуры по длине заготовок не превышал 3–5 %. Такой результат обеспечивает возможность устранить промежуточный этап термостатирования заготовок и сразу направлять их к машинам для обработки давлением.

Выполненные исследования позволили также выявить существенную особенность рассматриваемых ЛИМ, связанную с тем, что характер распределения по длине индуктора бегущих магнитных полей, электромагнитных усилий и мощности тепловыделения в обрабатываемых металлических заготовках зависит от схемы укладки катушек разных фаз в правой и левой секциях обмотки линейного индуктора. Для создания встречно бегущих магнитных полей можно использовать различные варианты схем укладки обмоток. Например, для рассмотренной ранее четырехполюсной ЛИМ, имеющей однослойную обмотку, такие варианты приведены в таблице.

Варианты схем укладки обмоток линейного индуктора

Характер поля	Вариант	Схема укладки обмотки
Бегущее магнитное поле		AAZZBBXXCCYYAAZZBBXXCCYY
Встречно бегущие (сбегающиеся) магнитные поля	1	AAZZBBXXCCYYYCCXXBBZZAA
	2	AAZZBBXXCCYYCCXXBBZZAAYY
	3	AAZZBBXXCCYYXXBBZZAAYYCC
	4	AAZZBBXXCCYYBBZZAAYYCCXX
	5	AAZZBBXXCCYYZZAAYYCCXXBB
	6	AAZZBBXXCCYYAAYYCCXXBBZZ

Положительные результаты, показанные на рис. 2 и 3, получены для схемы обмотки ЛИМ по варианту 1, отличающейся тем, что трехфазная обмотка индуктора, состоящая из двух секций, занимающих левую и правую половины индуктора и создающих встречно направленные бегущие магнитные поля, характеризуется зеркальным расположением катушек отдельных фаз относительно поперечной оси индуктора. В ходе исследований выявлено, что при использовании в ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями других схем обмоток возможно появление ряда нежелательных эффектов: позиционирование вторичного элемента (обрабатываемой заготовки) со смещением от центра индуктора, появление в центральной части индуктора зоны, в которой отсутствует электромагнитное усилие («мертвой» зоны), увеличение неравномерности тепловыделения по длине нагреваемой заготовки и др. Указанные эффекты недостаточно изучены, что обуславливает необходимость дополнительного исследования рассматриваемых двухцелевых линейных индукционных машин.

Выводы. Таким образом, результаты выполненных исследований ЛИМ со встречно бегущими магнитными полями подтверждают перспективность использования их в качестве двухцелевых индукционных машин, предназначенных для выполнения разных технологических операций при обработке металлических заготовок и изделий. В частности, на основе таких машин могут создаваться установки индукционного нагрева в бегущих магнитных полях, отличающиеся простотой конструкции и хорошими характеристиками процессов нагрева заготовок. В то же время исследования показали, что электромагнитные процессы в рассматриваемых специальных электрических машинах имеют ряд особенностей, отличающих их от традиционных линейных электрических машин с магнитным полем, бегущим в одном направлении, что требует дополнительного исследования таких электрических машин.

Библиографический список

1. Колесниченко А.Ф. Технологические МГД-установки и процессы. – Киев: Наукова думка, 1980. – 160 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Кузьменко А.Г., Грачев В.Г., Солодовник Ф.С. Электромагнитные механизмы металлургических машин. – М.: Металлургия, 1996. – 508 с.
6. Вспомогательные устройства электромагнитного типа для линий обработки стальных листов / А.Ю. Коняев, Д.А. Звездунов, А.В. Остапенко, В.С. Проскуряков, М.В. Юрченко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – № 11. – С. 23–25.
7. Индукционный метод нагрева проката из цветных металлов и сплавов / А.П. Ращепкин, В.А. Крутилин, П.А. Виштак, И.П. Кондратенко // Цветные металлы. – 1989. – № 1. – С. 104–107.

8. Виштак П.А., Зинченко Т.Р., Ращепкин А.П. Расчет электромагнитных полей и тепловыделения в проводящих лентах при переменной величине воздушного зазора // *Техническая электродинамика*. – 1991. – № 3. – С. 23–30.

9. Певзнер М.З., Широков Н.М., Хаютин С.Г. Непрерывная индукционная обработка лент и полос. – М.: *Металлургия*, 1994. – 128 с.

10. Вопросы применения линейных асинхронных двигателей для индукционного нагрева стальных листов / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров, В.Н. Удинцев, С.Д. Исупов, Г.Г. Минин // *Электрические машины с разомкнутым магнитопроводом в технологии и приводе: межвуз. сб. науч. трудов*. – Свердловск: Изд-во УПИ, 1988. – С. 45–50.

11. Васильев Л.А., Самарец Е.В., Шпак А.Н. Линейные асинхронные двигатели в устройствах индукционного нагрева // *Бесконтактные регулируемые электрические машины*. – Л.: ВНИИэлектромаша. – 1991. – С. 93–102.

12. Influence of ferromagnetic loading characteristics on efficiency of induction heating in a running magnetic field / M.Z. Dudnik, L.A. Vasil'ev, A.N. Shpak, Yu.Ya. Esterzon // *Tyazheloe Mashinostroenie*. – 1992. – Iss. 8. – P. 6–8.

13. Карусельная машина с линейным электроприводом / Р.Б. Каск, Ю.Я. Лаугис, Х.А. Тийсмус, Р.А. Тээметс // *Литейное производство*. – 1980. – № 11. – С. 12–14.

14. Лаугис Ю.Я. Вопросы теории и практики двухцелевого линейного электропривода // *Электротехника*. – 1981. – № 6. – С. 26–28.

15. Пат. № 2534047 Рос. Федерация. МПК H05B 6/10. Способ нагрева и закалки зубчатых колес и устройство для его осуществления / А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин, С.А. Лепешкин; заяв. и патентообл. НИУ «МЭИ». № 2013125683/07; заявл. 04.06.2013; опубл. 27.11.2014. Бюл. № 33.

16. Dughiero F., Lupi S., Siega P. Calculation of forces in traveling wave induction heating system // *IEEE Transactions Magnetics*. – 1995. – Vol. 31, № 6. – P. 3560–3562.

17. Comparison of edgeeffects of transverse flux and travelling wave induction heating inductors / S. Lupi, M. Forzan, F. Dughiero, A. Zenkov // *IEEE Transactions Magnetics*. – 1999. – Vol. 35, № 5. – P. 3556–3558.

18. Pang L., Wang Y., Chen T. New development of traveling wave induction heating // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – June 2010. – Vol. 20, № 3. – P. 1013–1016.

19. Frogner K., Cedell T., Andersson M. Induction heating using a two-phase travelling wave setup // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2014. – Vol. 44. – P. 217–226.

20. An induction heating method with traveling magnetic field for long structure metal / T. Sekine, H. Tomita, S. Obata, Y. Saito // *Electr. Eng. – Japan*. – September 2009. – Vol. 168(4). – P. 32–39.

21. 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.

References

1. Kolesnichenko A.F. *Tekhnologicheskie MGD-ustanovki i protsessy* [Technological MHD devices and Processes]. Kiev: Naukova dumka, 1980. 160 p.

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, no. 23, pp. 225-241.

3. Merah 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.

4. 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: the basics of theory and calculation]. Ekaterinburg: Uralskii federalnyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. Eltsina, 2012. 104 p.

5. Kuzmenko A.G., Grachev V.G., Solodovnik F.S. *Elektromagnitnye mekhanizmy metallurgicheskikh mashin* [Electromagnetic mechanisms of metallurgical machines]. Moscow: Metallurgii, 1996. 508 p.

6. Koniaev A.Iu., Zvezdunov D.A., Ostapenko A.V., Proskuriakov V.S., Iurchenko M.V. *Vspomogatel'nye ustroistva elektromagnitnogo tipa dlia linii obrabotki stal'nykh listov* [Electromagnetic auxiliary devices for steel sheet processing lines]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 1993, no. 11, pp. 23-25.

7. Rashchepkin A.P., Krutilin V.A., Vishtak P.A., Kondratenko I.P. Induktsionnyi metod nagreva prokata iz tsvetnykh metallov i splavov [Method of induction heating rolled metal from non-ferrous metals and alloys]. *Tsvetnye metally*, 1989, no. 1, pp. 104-107.

8. Vishtak P.A., Zinchenko T.R., Rashchepkin A.P. Raschet elektromagnitnykh polei i teplovydeleniia v provodiashchikh lentakh pri peremennoi velichine vozdušnogo zazora [Calculation of electromagnetic fields and heat generation in conductive tapes with a variable air gap]. *Tekhnicheskaiia elektrodinamika*, 1991, no. 3, pp. 23-30.

9. Pevzner M.Z., Shirokov N.M., Khaiutin S.G. Nepreryvnaia induktsionnaia obrabotka lent i polos [Continuous induction treatment of tapes and strips]. Moscow: Metallurgiiia, 1994. 128 p.

10. Koniaev A.Iu., Nazarov S.L., Udintsev V.N., Isupov S.D., Minin G.G. Voprosy primeneniia lineinykh asinkhronnykh dvigatelei dlia induktsionnogo nagreva stal'nykh listov [Questions of application of linear asynchronous motors for induction heating of steel sheets]. *Elektricheskie mashiny s razomknutym magnitoprovodom v tekhnologii i privode*. Sverdlovsk: Ural'skii politekhnicheskii institut, 1988, pp. 45-50.

11. Vasil'ev L.A., Samarets E.V., Shpak A.N. Lineinye asinkhronnye dvigateli v ustroistvakh induktsionnogo nagreva [Linear induction motors in induction heating devices]. *Beskontaktnye reguliruemye elektricheskie mashiny*. Leningrad: Vniielektromasha, 1991, pp. 93-102.

12. Dudnik M.Z., Vasil'ev L.A., Shpak A.N., Esterzon Yu.Ya. Influence of ferromagnetic loading characteristics on efficiency of induction heating in a running magnetic field. *Tyazheloe Mashinostroenie*, 1992, iss. 8, pp. 6-8.

13. Kask R.B., Laugis Iu.Ia., Tiismus Kh.A., Teemets R.A. Karusel'naia mashina s lineinym elektroprivodom [Rotary casting machine with linear electric drive]. *Liteinoe proizvodstvo*, 1980, no. 11, pp. 12-14.

14. Laugis Iu.Ia. Voprosy teorii i praktiki dvukhtselevogo lineinogo elektroprivoda [Questions of theory and practice of two-purpose linear electric drive]. *Elektrotekhnika*, 1981, no. 6, pp. 26-28.

15. Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R., Lepeshkin S.A. Sposob nagreva i zakalki zubchatykh koles i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia [The method of heating and hardening gears and device for its implementation]. *Patent RF No. 2534047*, 2014.

16. Dughiero F., Lupi S., Siega P. Calculation of forces in traveling wave induction heating system. *IEEE Transactions Magnetics*, 1995, vol. 31, no. 6, pp. 3560-3562.

17. Lupi S., Forzan M., Dughiero F., Zenkov A. Comparison of edgeeffects of transverse flux and travelling wave induction heating inductors. *IEEE Transactions Magnetics*, 1999, vol. 35, no. 5, pp. 3556-3558.

18. Pang L., Wang Y., Chen T. New development of traveling wave induction heating. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. June 2010, vol. 20, no. 3, pp. 1013-1016.

19. Frogner K., Cedell T., Andersson M. Induction heating using a two-phase travelling wave setup. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2014, vol. 44, pp. 217-226.

20. Sekine T., Tomita H., Obata S., Saito Y. An induction heating method with traveling magnetic field for long structure metal. *Electr. Eng. Japan*. September 2009, vol. 168(4), pp. 32-39.

21. 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 the opposite direction traveling magnetic fields for energy-efficient technologies]. *Promyshlennaiia energetika*, 2017, no. 4, pp. 2-7.

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, тел. (343) 375-47-51).

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).

Коняев Иван Андреевич (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры «Химическая технология топлива и промышленная экология» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: kia_ustu@mail.ru).

About the authors

Konyaev Andrey Yuryevich (Ekaterinburg, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrotechnological systems 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 Postgraduate of the Department of Electrical Engineering and Electrotechnological systems Urals Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, 19, Mira str., phone (343) 375-47-51).

Zyazev Mikhail Evgenyevich (Ekaterinburg, Russian Federation) is a Master Student Department of Electrical engineering and electrotechnological systems Urals Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: zyacho72@gmail.com).

Konyaev Ivan Andreevich (Ekaterinburg, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, leading engineer of the department "Chemical technology of fuel and industrial ecology" Urals Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: kia_ustu@mail.ru).

Получено 08.10.2018