

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.06

УДК 621.313.17

А.Ю. Коняев, М.Е. Зязев, К.В. Кузнецов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Российская Федерация

ОЦЕНКА ПОПЕРЕЧНОГО КРАЕВОГО ЭФФЕКТА ПРИ РАСЧЕТАХ ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ МАШИН ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрены особенности электромагнитных процессов и рабочих режимов линейных индукционных машин технологического назначения. Отличительным признаком таких машин является то, что их вторичным элементом являются обрабатываемые электропроводящие изделия и материалы (жидкий металл, перемещаемые изделия, обрабатываемые сыпучие материалы и др.), на которые оказывается непосредственное электромагнитное воздействие. Показаны основные виды линейных индукционных машин технологического назначения: магнитогидродинамические машины для транспортировки и перемешивания жидких металлов; линейные асинхронные двигатели для вспомогательного технологического оборудования в металлургической и металлообрабатывающей промышленности, осуществляющие непосредственное силовое воздействие на обрабатываемые металлические изделия; устройства индукционного нагрева в бегущем магнитном поле, совмещающие функции нагрева заготовок и силового воздействия на них; линейные индукционные машины в устройствах электродинамической сепарации, применяемых для извлечения включений цветных металлов из потока сыпучих материалов и для индукционной сортировки лома цветных металлов и сплавов. **Цель исследования:** разработка и совершенствование математических моделей и методики расчета линейных индукционных машин технологического назначения. **Методы исследования и результаты:** предложены и обоснованы математические модели и методика расчета электромагнитных сил в линейных индукционных машинах. В основе методики – совместное использование аналитической и численной (с применением метода конечных элементов) математических моделей в двумерной постановке. Особое внимание в работе уделено учету в предлагаемой методике поперечного краевого эффекта в массивном вторичном элементе. Проанализированы различные подходы к оценке такого эффекта. По результатам исследований предложены выражения для расчета поправочного коэффициента поперечного краевого эффекта, учитывающие особенности линейных индукционных машин технологического назначения. Приведены сопоставления результатов расчетов характеристик ЛИМ по предлагаемой методике с данными экспериментов на примере исследования ЛИМ электродинамического сепаратора с массивным вторичным элементом ограниченных размеров. **Практическая значимость:** предлагаемая методика расчета линейных индукционных машин технологического назначения с учетом рекомендуемого метода учета поперечного краевого эффекта позволяет существенно снизить вычислительные ресурсы, необходимые для расчетов, по сравнению с методиками на основе трехмерных моделей.

Ключевые слова: линейные индукционные машины, технологическое применение, особенности электромагнитных процессов, математические модели, поперечный краевой эффект, результаты расчетов.

A.Yu. Konyaev, M.E. Zyazev, K.V. Kuznetsov

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

ASSESSMENT OF THE TRANSVERSE EDGE EFFECT IN CALCULATIONS OF LINEAR INDUCTION MACHINES FOR TECHNOLOGICAL PURPOSE

The article discusses the features of electromagnetic processes and operating modes of linear induction machines for technological purposes. A distinctive feature of such machines is that their secondary element is the processed electrically conductive products and materials (liquid metal, moved products, processed bulk materials, etc.), which are directly affected by electromagnetic influence. The main types of linear induction machines for technological purposes are shown: magnetohydrodynamic machines for transporting and mixing liquid metals; linear asynchronous motors for auxiliary technological equipment in the metallurgical and metalworking industries, exerting direct force on the processed metal products; induction heating devices in a traveling magnetic field, combining the functions of heating workpieces and exerting force on them; linear induction machines in electrodynamic separation devices used to extract non-ferrous metal inclusions from a flow of bulk materials and for induction sorting of scrap non-ferrous metals and alloys. **The purpose of the study:** Development and improvement of mathematical models and methods for calculating linear induction machines for technological purposes. **Research methods and results:** Mathematical models and methods for calculating electromagnetic forces in linear induction machines are proposed and justified. The methodology is based on the joint use of analytical and numerical (using the finite element method) mathematical models in a two-dimensional formulation. Particular attention in the work is paid to taking into account the transverse edge effect in a massive secondary element in the proposed methodology. Various approaches to assessing this effect are analyzed. Based on the research results, expressions were proposed for calculating the correction factor for the transverse edge effect, taking into account the features of linear induction machines for technological purposes. A comparison of the results of calculations of the characteristics of linear induction machines using the proposed method with experimental data is presented using the example of studying the linear induction machines of an electrodynamic separator with a massive secondary element of limited dimensions. **Practical significance:** the proposed method for calculating linear induction machines for technological purposes, taking into account the recommended method of taking into account the transverse edge effect, can significantly reduce the computing resources required for calculations, compared to methods based on three-dimensional models.

Keywords: linear induction machines, technological application, features of electromagnetic processes, mathematical models, transverse edge effect, calculation results.

Введение

Одной из тенденций развития электромеханики является сращивание электрических машин с рабочими механизмами и технологическими устройствами. Характерным примером таких электромеханических преобразователей являются линейные индукционные машины (ЛИМ), основным достоинством которых является возможность бесконтактной передачи электромагнитных усилий вторичному элементу [1–6]. При этом обеспечивается непосредственное поступательное или возвратно-поступательное движение рабочего органа, исключаются механические

передачи. Особую группу среди линейных электрических машин составляют ЛИМ технологического назначения, отличающиеся тем, что их вторичным элементом (ВЭ) являются обрабатываемые электропроводящие изделия и материалы (жидкий металл, перемещаемые заготовки и изделия, обрабатываемые сыпучие материалы и др.), на которые оказывается непосредственное электромагнитное воздействие [6].

Наиболее известными из относящихся к данному классу ЛИМ являются МГД-машины, в которых бегущее магнитное поле воздействует непосредственно на обрабатываемый жидкий металл, выполняющий роль вторичного элемента [7–10]. Следует отметить, что специфика физических процессов в МГД-машинах обусловила выделение магнитной гидродинамики в самостоятельную область электромеханики. В то же время анализ литературных источников показывает, что за последние годы разработано много устройств, которые соответствуют классификационным признакам ЛИМ технологического назначения. Помимо МГД-машин можно выделить следующие основные группы:

– ЛИМ для вспомогательного технологического оборудования в металлургической и металлообрабатывающей промышленности, обеспечивающие непосредственное силовое воздействие на обрабатываемые металлические изделия для реализации технологических операций (перемещение и торможение проката, натяжение лент и полос, манипулирование прокатными изделиями и др.) [3, 4, 11–14];

– устройства индукционного нагрева в бегущем магнитном поле, в которых совмещаются функции нагрева заготовок и силового воздействия на них с целью поступательного перемещения, загрузки, выгрузки, позиционирования [15–20];

– ЛИМ электродинамических сепараторов, применяемых для извлечения включений цветных металлов из потока сыпучих материалов (технологических смесей, различных видов твердых отходов), а также для индукционной сортировки лома цветных металлов и сплавов (например, сепарация электротехнического и электронного лома, дробленого лома выведенных из эксплуатации транспортных средств и др.) [21–25].

Разработки ЛИМ технологического назначения и устройств на их основе в разные годы выполнялись в Уральском федеральном университете (ранее УГТУ-УПИ) [3, 6, 17, 23–27]. Как правило, разработки заканчивались созданием опытных и опытно-промышленных образцов установок. Накопленный опыт исследований и эксплуатации машин

позволил выявить ряд их особенностей, основные из которых заключаются в следующем:

- размеры и физические свойства вторичных элементов (обрабатываемых изделий и сред) заданы технологической задачей и не являются предметом выбора, как в случае линейного электропривода;

- массивные проводящие ВЭ рассматриваемых машин могут иметь ограниченные размеры, что приводит к появлению поперечного и продольного краевых эффектов, обуславливающих перераспределение вторичных токов и соответствующее снижение электромагнитных усилий;

- ЛИМ технологического назначения в отличие от линейных двигателей для транспортных систем характеризуются повышенными рабочими зазорами и, как следствие, низким коэффициентом мощности;

- скорость движения вторичных элементов, как правило, значительно меньше, чем скорость бегущего магнитного поля, поэтому ЛИМ работают при скольжениях, близких к $s = 1$;

- реакция вторичных токов в большинстве случаев незначительна: вносимая вторичным элементом мощность мала по сравнению с мощностью индуктора (особенно это касается вносимой реактивной мощности) и электромагнитная добротность ЛИМ ϵ_0 меньше единицы.

Указанные особенности следует учитывать при проектировании и разработке ЛИМ под конкретные технологические задачи. Некоторые из указанных факторов облегчают проектирование. Например, работоспособность ЛИМ можно оценивать только по величине пускового усилия, а полученные из оценки вариантов основные параметры бегущего магнитного поля (уровень требуемой магнитной индукции, полюсное деление и частота поля) могут использоваться для проектирования линейного индуктора без учета реакции вторичных токов. В то же время параметры массивных ВЭ (размеры и удельная электропроводность материала) могут быть далеки от оптимальных, поэтому при оценке вариантов ЛИМ приходится выбирать лучшую из «плохих» машин. Наибольшее влияние на характеристики рассматриваемых ЛИМ оказывает поперечный краевой эффект в массивных ВЭ, поэтому оценке этого эффекта в данной работе уделяется особое внимание.

Содержание и результаты исследований

Моделирование ЛИМ технологического назначения осложняется тем, что линейный индуктор и вторичный элемент имеют ограниченные размеры, что обуславливает различного рода краевые эффекты.

Наиболее полный учет всех особенностей такой ЛИМ возможен только при решении задачи в трехмерной постановке. С учетом разомкнутости магнитопровода линейного индуктора и в общем случае произвольного расположения ВЭ в активной зоне (полное, либо частичное перекрытие индуктора) при моделировании отсутствует возможность сокращения расчетной области. Например, невозможен расчет на пару полюсов, применяемый для вращающихся электрических машин. С учетом изложенного численный расчет ЛИМ в трехмерной постановке, например, с помощью метода конечных элементов, реализованного в математических пакетах Comsol Multiphysics, ANSYS, Elcut и др., требует больших вычислительных ресурсов. В то же время моделирование ЛИМ в двухмерной постановке возможно лишь при весьма грубых допущениях. Например, для расчетов ЛИМ электродинамических сепараторов в УрФУ была разработана двухмерная аналитическая модель [26]. ЛИМ сепараторов отличаются тем, что сепарируемые металлические частицы, исполняющие роль ВЭ, имеют размеры, меньшие полюсного деления индуктора, и распределение вторичных токов становится наиболее значимым фактором при определении электромагнитных усилий. Расчетная модель такой ЛИМ показана на рис. 1.

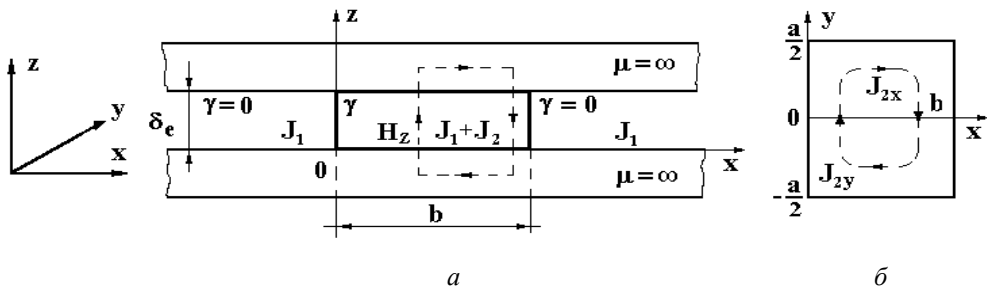


Рис. 1. Двухмерная модель ЛИМ: *a* – к расчету магнитного поля; *б* – к расчету вторичных токов

Представленная на рис. 1 модель ЛИМ позволяет определить распределение магнитного поля в активной зоне индуктора в плоскости x - z (рис. 1, *a*) и распределение вторичных токов в плоскости x - y (рис. 1, *б*). При этом получено аналитическое выражение для электромагнитного усилия, действующего на проводящую частицу ограниченных размеров:

$$F_x = \frac{4}{\pi^2} \mu_o ab \delta \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cdot \frac{\varepsilon_o s J_{1m}^2}{\alpha(1 + \lambda_n^2 / \alpha^2 + j\varepsilon_o s)} \times \left[1 - k_{1n} \frac{1 - e^{(\chi_{1n} + j\alpha)b}}{(\chi_{1n} + j\alpha)b} + k_{2n} \frac{1 - e^{(\chi_{2n} + j\alpha)b}}{(\chi_{2n} + j\alpha)b} \right] \right\}, \quad (1)$$

где J_{1m} – амплитуда объемной плотности первичного тока, вынесенного в зазор (A/m^2), a и b – размеры ВЭ по осям y и x (соответственно) (м), δ – рабочий зазор (м), $\alpha = \pi/\tau$ (τ – полюсное деление). Коэффициенты в (1) определяются выражениями:

$$k_{1n} = \frac{e^{\chi_{2n}b} - e^{-j\alpha b}}{e^{\chi_{1n}b} - e^{\chi_{2n}b}}, \quad k_{2n} = \frac{e^{\chi_{1n}b} - e^{-j\alpha b}}{e^{\chi_{1n}b} - e^{\chi_{2n}b}},$$

$$\chi_{1n} = \alpha \left[\frac{\varepsilon_o(1-s)}{2} + \sqrt{\frac{\varepsilon_o^2(1-s)^2}{4} + \left(\frac{\lambda_n}{\alpha}\right)^2 + j\varepsilon_o} \right],$$

$$\chi_{2n} = \alpha \left[\frac{\varepsilon_o(1-s)}{2} - \sqrt{\frac{\varepsilon_o^2(1-s)^2}{4} + \left(\frac{\lambda_n}{\alpha}\right)^2 + j\varepsilon_o} \right], \quad (2)$$

$$\lambda_n = 2(n-1) \frac{\pi}{a}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

$$\varepsilon_o = \frac{2\mu_o \cdot \gamma \cdot f \cdot \tau^2 \cdot d}{\pi \cdot \delta_s}, \quad (3)$$

где ε_o – электромагнитная добротность ЛИМ; μ_o – магнитная постоянная; γ и d – удельная электропроводность и толщина частицы, м; τ – полюсное деление индуктора, м; δ_s – эквивалентный воздушный зазор, учитывающий зубчатость магнитопровода, м; s – скольжение.

Описанная методика расчета электромагнитных усилий в ЛИМ с ВЭ малых размеров реализована в пакете Mathcad и используется при предварительной оценке характеристик сепараторов. Наиболее грубым допущением данной расчетной модели является использование бесконечно протяженного индуктора в плоскости x - y , что предполагает существование в рабочем зазоре только бегущей составляющей первичного магнитного поля без учета искажений, определяемых краевыми эффектами. Достоинством модели является возможность расчета распределения вторичных токов в проводящей пластине с учетом ограничения ее размеров.

Корректное решение задачи о распределении магнитного поля ЛИМ в плоскости x - z с учетом ограниченности размеров индуктора

и зубчатости магнитопровода может быть получено методом конечных элементов в двухмерной постановке. В то же время в двухмерной постановке такие расчеты не позволяют учесть поперечный краевой эффект, связанный с появлением в лобовых частях массивных ВЭ продольных составляющих вторичных токов, поскольку двухмерная постановка предполагает наличие только одной составляющей вторичных токов по оси y . С учетом этого расчеты электромагнитных усилий приводят к существенным ошибкам [27].

Для расчета ЛИМ технологического назначения в УрФУ предложено использовать сочетание аналитической и численной моделей в двухмерной постановке. С помощью аналитической модели, схема которой показана на рис. 1, оценивается влияние на характеристики ЛИМ поперечного краевого эффекта. При этом коэффициент поперечного краевого эффекта определяется из сравнения результатов расчета электромагнитного усилия для идеализированной ЛИМ $F_{\text{эм. ид}}$ с бесконечно широким в направлении оси y вторичным элементом и расчета усилия при реальных размерах ВЭ $F_{\text{эм}}$. При расчетах идеализированной машины ширина ВЭ задается в 5–10 раз большая ширины a , после чего расчетное усилие приводится к реальной ширине ВЭ:

$$k_q = \frac{F_{\text{эм}}}{F_{\text{эм. ид}}}. \quad (4)$$

Применение подобных коэффициентов k_q позволяет скорректировать параметры ВЭ, задаваемые при расчетах ЛИМ с использованием метода конечных элементов в двухмерной постановке.

В частности, в пакете Elcut (версия 5.5 и выше) имеется возможность моделирования массивного ВЭ с помощью цепной электрической схемы замещения, количество элементов которой соответствует количеству участков, на которые в направлении движения магнитного поля разбивается ВЭ. Сопротивление таких участков определяется по выражению:

$$R_3 = \frac{a}{\gamma \cdot \Delta b \cdot d \cdot k_q}, \quad (5)$$

где a и d – ширина и толщина ВЭ, м); γ – удельная электропроводность ВЭ, См/м; $\Delta b = b/n$ – ширина участка разбиения ВЭ, м; n – их количество (четное число).

Можно отметить, что подобным же образом корректируется сопротивление вторичных электрических цепей при проектировании асинхронных двигателей с массивными роторами [28–31]. В случае линейных индукционных машин такой подход возможен только в частных случаях и требует обоснования, поэтому в УрФУ были выполнены дополнительные исследования.

Наиболее полно задача учета влияния поперечного краевого эффекта на характеристики ЛИМ решена в [7, 32]. В этих работах рассмотрена двухсторонняя ЛИМ с массивным немагнитным вторичным элементом, схематично показанная на рис. 2.

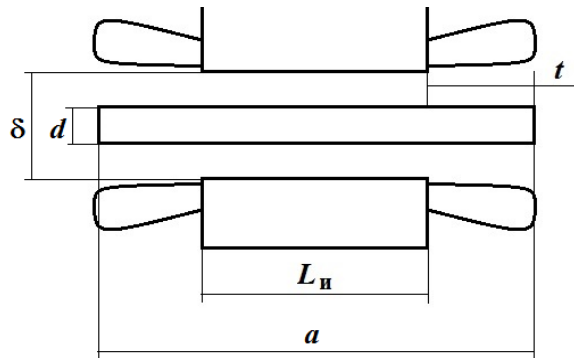


Рис. 2. К оценке поперечного краевого эффекта

В общем случае ширина вторичного элемента a превышает ширину линейного индуктора $L_{\text{н}}$ (t – односторонний вылет ВЭ за пределы индуктора). В расчетной модели ВЭ заполняет весь воздушный зазор. С учетом этого вводится расчетное значение удельной электропроводности ВЭ ($\gamma_{\text{р}}$):

$$\gamma_{\text{р}} = \gamma \cdot \frac{d}{\delta}. \quad (6)$$

Выражение для полной электромагнитной мощности вторичной цепи S_2 ЛИМ получено в виде:

$$S_2 = S_{20} \cdot k_S, \quad (7)$$

где S_{20} – комплексная величина полной электромагнитной мощности без учета размагничивающего влияния вторичных токов и поперечного краевого эффекта; k_S – комплексный поправочный коэффициент:

$$k_S = k_a + jk_p = \frac{\alpha^2}{\lambda^2} \cdot \left\{ 1 - \frac{\alpha \cdot \gamma_{\text{р}} \cdot \sinh\left(\lambda \cdot \frac{L_{\text{н}}}{2}\right)}{\lambda \cdot \frac{L_{\text{н}}}{2} \left[\alpha \cdot \gamma_{\text{р}} \cdot \cosh\left(\lambda \cdot \frac{L_{\text{н}}}{2}\right) + \lambda \cdot \gamma_{\text{р}} \cdot \tanh(\alpha \cdot t) \cdot \sinh\left(\lambda \cdot \frac{L_{\text{н}}}{2}\right) \right]} \right\}, \quad (8)$$

где $\lambda = \sqrt{1 + j\varepsilon}$.

При расчетах линейных асинхронных двигателей рядом авторов (например, [2–3]) рекомендуется использовать для учета поперечного краевого эффекта методику, разработанную в [33]. В этой работе предлагается корректировать электромагнитное усилие двигателя (через корректировку удельной электропроводности ВЭ подобно (5)) с помощью следующего коэффициента:

$$k_q = \frac{1-u-\varepsilon v}{1-\varepsilon v+\varepsilon^2 \cdot u}, \quad (9)$$

где

$$u = \operatorname{Re}(\underline{T}) \text{ и } v = \operatorname{Im}(\underline{T}); \quad T = \frac{\tanh\left(\frac{\lambda a}{2}\right)}{\frac{\lambda a}{2} \left[1 + \frac{\lambda}{\alpha} \tanh\left(\frac{\lambda a}{2}\right) \cdot \tanh(\alpha t)\right]}$$

Решения, приведенные в [7, 32] и [33], идентичны, и расчеты по выражениям (8) и (9) дают одинаковые результаты. Следует отметить, что учет поперечного краевого эффекта при расчетах ЛИМ методом конечных элементов (в пакетах Comsol Multiphysics, ANSYS, Elcut и др.) в двухмерной постановке с помощью комплексных коэффициентов, полученных в [7, 32–33], не корректен, так как при моделировании ЛИМ в этих пакетах размагничивающее действие вторичных токов и изменение поля по толщине ВЭ учитываются автоматически. В то же время в работах [7, 32] показаны частные случаи выражения (8). Например, в случае малой электромагнитной добротности ЛИМ ($\varepsilon \ll 1$) в решении, приведенном в [7, 32], можно не учитывать размагничивающее влияние вторичных токов. При этом выражение (8) упрощается и будет содержать только вещественную составляющую:

$$k_s = k_q = 1 - \frac{2}{\alpha \cdot L_n \cdot (\tanh(\alpha t) + \coth\left(\alpha \frac{L_n}{2}\right))}. \quad (10)$$

Получение коэффициентов, имеющих только вещественную часть, означает, что при учете поперечного краевого эффекта возможна корректировка сопротивлений участков ВЭ за счет изменения удельной электропроводности по (5).

Упрощенные формулы для вычисления коэффициента поперечного краевого эффекта, полученные на основании моделирования ЛИМ при различных упрощающих допущениях или по результатам экспериментальных исследований, предлагались различными авторами. В таблице приведены некоторые из таких формул. Отметим, что выражения для коэффициента поперечного краевого эффекта, приве-

денные в [27], [28–29] и [35], не учитывают вылет ВЭ за пределы индуктора, поэтому могут использоваться только при ширине ВЭ, не превышающей ширину активной зоны ЛИМ $L_{и}$. В то же время выражение, представленное в [34], пригодно только для вариантов ЛИМ с вылетом ВЭ за пределы индуктора ($t > 0$).

Выражения для расчета коэффициента поперечного краевого эффекта k_q

№ п/п	Источник информации	Выражение для k_q
1	А.И. Вольдек, Х.И. Янес [7, 32]	Формула (10)
2	Н. Bolton [33]	Формула (9)
3	W.J. Gibbs, В.М. Куцевалов [28–29]	$k_q = \frac{1}{1 + \frac{2\tau}{\pi L_{и}}}$
4	В.Е. Скобелев [34]	$k_q = \frac{1}{1 + \frac{0,63\tau^2}{4t \cdot L_{и}}}$
5	Л.Я. Улманис [35]	$k_q = \frac{1}{1 + \frac{\tau^2}{L_{и}^2}}$
6	А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров [27]	Формула (4)

По выражениям, приведенным в табл. 1, выполнены сопоставительные расчеты. Результаты таких расчетов представлены на рис. 3 и 4 (номера кривых на рис. 3 соответствуют номерам строк в таблице, на рис. 4 сплошные линии соответствуют вариантам 1 и 2 таблицы, а пунктирные – варианту 4).

При отсутствии вылета ВЭ за пределы индуктора коэффициент поперечного краевого эффекта k_q в вариантах 1, 3 и 5 зависит только от относительной ширины ВЭ ($L_{и}/\tau$). На рис. 3 видно, что расчеты по варианту 1 дают заниженные значения коэффициента. Расчет по варианту 3 дает существенное завышение значений k_q при малой относительной ширине ВЭ ($L_{и}/\tau < 1,0$). Значения коэффициентов, рассчитанные по выражению, полученному Л.Я. Улманисом [35] при обработке экспериментальных данных (вариант 5), и по методике, предложенной в УрФУ [27] (варианты 6, а и 6, б), хорошо согласуются друг с другом. Достоинством методики, предложенной в УрФУ, является учет большего количества конструктивных факторов (например, на рис. 3 приведены значения k_q для разных полюсных делений индуктора τ).

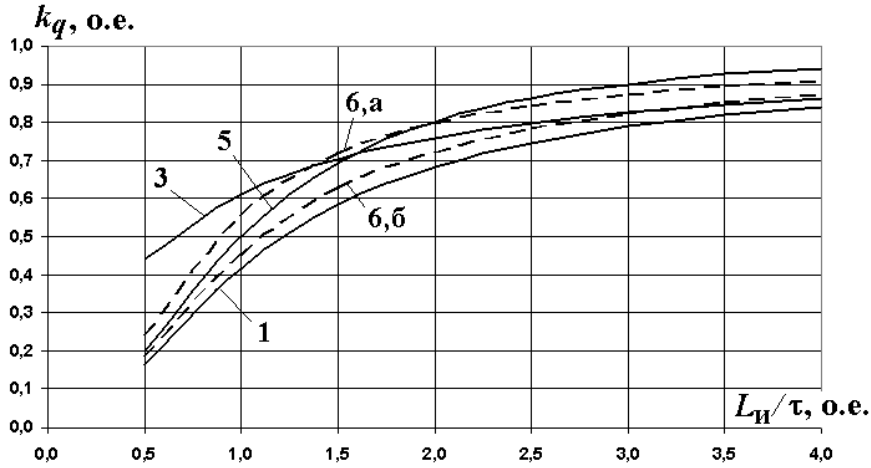


Рис. 3. Оценка коэффициентов поперечного краевого эффекта для вариантов ЛИМ с узким ВЭ ($a \leq L_w$): 6, а – $\tau = 0,2$ м; 6, б – $\tau = 0,1$ м

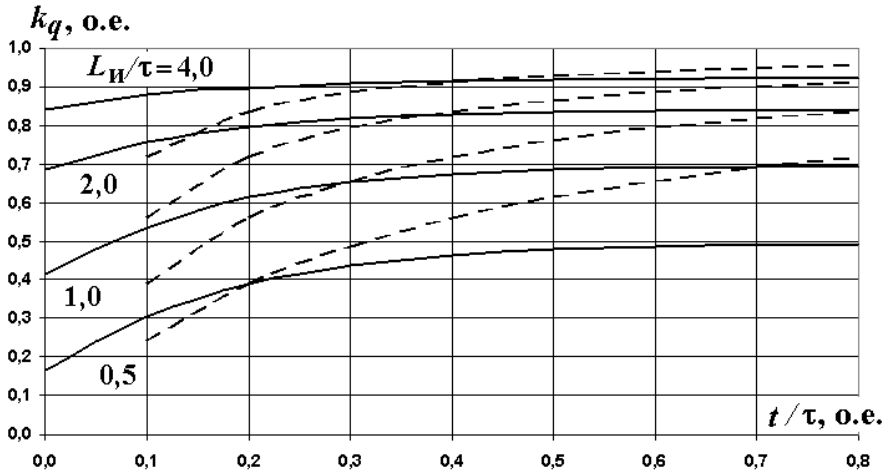


Рис. 4. Оценка коэффициентов поперечного краевого эффекта для ЛИМ, имеющих вылеты вторичного элемента за пределы индуктора

Как видно на рис. 4, коэффициенты поперечного краевого эффекта для ЛИМ, имеющих вылеты ВЭ за пределы активной зоны индуктора ($t > 0$), зависят как от относительной ширины индуктора (L_w/τ), так и от относительного значения вылета ВЭ (t/τ). Для практического использования можно рекомендовать методику расчета коэффициента по варианту 1, предложенную в [7, 32], либо по варианту 2 [33]. При условии малой электромагнитной добротности ($\varepsilon \ll 1$) расчеты по этим вариантам дают одинаковый результат. Выражение для k_q по ва-

рианту 4, предложенное в [34], дает принципиально неверные результаты при малых значениях вылета ВЭ t .

Как уже отмечалось ранее, для ЛИМ технологического назначения характерны электромагнитные добротности $\epsilon < 1$, и вносимой вторичными элементами реактивной мощностью можно пренебречь. Это соответствует допущениям, при которых получены относительно простые выражения для коэффициента поперечного краевого эффекта k_q , рассмотренные при исследовании.

Методика расчета электромагнитных усилий ЛИМ технологического назначения, основанная на сочетании аналитической и численной моделей ЛИМ в двухмерной постановке с учетом предлагаемых методов учета поперечного краевого эффекта, неоднократно тестировалась в УрФУ при расчетах опытных установок. В частности, на рис. 5 и 6 представлены расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (пунктир) кривые распределения электромагнитных усилий по длине индуктора, действующих на алюминиевую пластину с размерами $40 \times 40 \times 3$ мм в односторонней четырехполюсной ЛИМ. Основные размеры ЛИМ: полюсное деление $\tau = 0,102$ м; ширина индуктора $L_{\text{и}} = 0,105$ м, немагнитный рабочий зазор $\delta = 0,003$ м. Такая ЛИМ с обмотками индуктора, создающими встречно бегущие магнитные поля, предназначена для установки электродинамической сепарации, используемой для сортировки цветных металлов [17, 36].

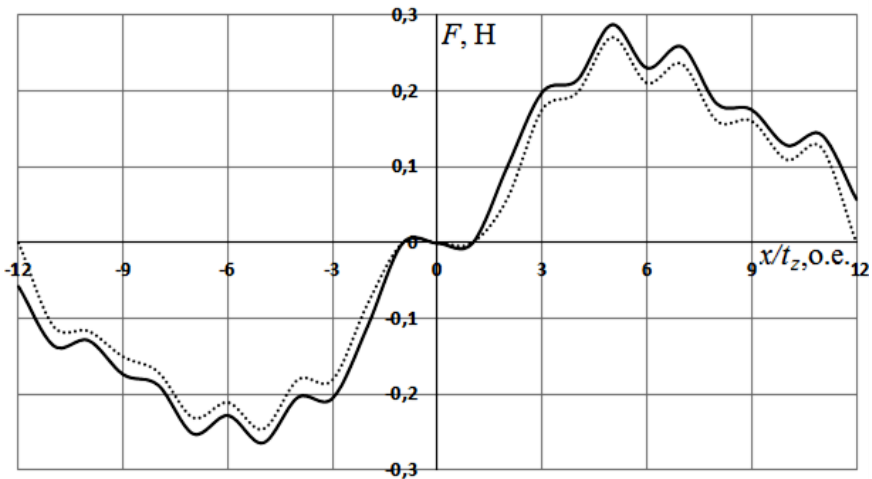


Рис. 5. Сопоставление расчетных и экспериментальных кривых распределения усилий для ЛИМ при схеме укладки обмотки YYCCXXVVBZZAAAAZZVVBXXCCYY

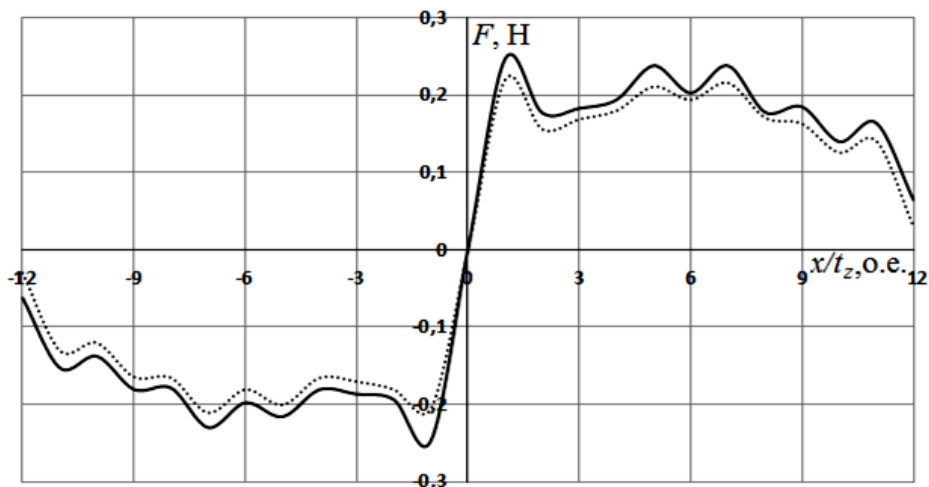


Рис. 6. Сопоставление расчетных и экспериментальных кривых распределения усилий для ЛИМ при схеме укладки обмотки BVZZAAYCCXXAAZZBVXXCCYY

Сравнение кривых распределения электромагнитных усилий, представленных на рис. 5 и 6, показывает хорошее совпадение результатов расчетов и экспериментов: отличие не превышает 10–15 %.

Заключение

Таким образом, в статье приведены примеры эффективного применения ЛИМ технологического назначения, разработки которых ведутся в Уральском федеральном университете. В ходе исследования таких машин сформирована методика расчета электромагнитных усилий, основанная на сочетании аналитической и численной моделей ЛИМ в двухмерной постановке. Одним из условий реализации численной модели ЛИМ при расчете методом конечных элементов в двухмерной постановке является учет поперечного краевого эффекта в массивных вторичных элементах с помощью поправочного коэффициента. Дополнительные исследования позволили получить рекомендации по выбору методов расчета такого коэффициента. Предлагаемая методика расчета ЛИМ технологического назначения позволяет существенно снизить вычислительные ресурсы, необходимые для расчетов, по сравнению с методиками на основе трехмерных моделей, что позволяет рекомендовать ее для использования при разработке таких электрических машин.

Библиографический список

1. Laithwaite, E.R. Induction machines for special purposes / E.R. Laithwaite. – London, 1966. – 337 p.
2. Yamamura, S. Theory of Linear Induction Motors / S. Yamamura. – New York: Halsted, 1979. – 180 p.
3. Веселовский, О.Н. Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
4. Gieras, J.F. Linear Induction Drives / J.F. Gieras. – London: Oxford Univ. Press, 1994. – 320 p.
5. Линейные электрические машины возвратно-поступательного действия – типы и конструкции электрических машин / В.Б. Баль, В.Я. Геча, В.И. Гончаров, Е.В. Ежов, В.Г. Чиркин, С.В. Ширинский, Д.А. Петриченко // Вопросы электромеханики: тр. ВНИИЭМ. – 2015. – Т. 148, № 5. – С. 3–13.
6. Коняев, А.Ю. Линейные индукционные машины для технологического электромагнитного воздействия на обрабатываемые электропроводящие изделия и материалы: дис. ... д-ра техн. наук / А.Ю. Коняев. – Екатеринбург: Изд-во Уральск. гос. техн. ун-та – УПИ, 1996. – 440 с.
7. Вольдек, А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1970. – 272 с.
8. Гельфгат, Ю.М. Металлургические применения магнитной гидродинамики / Ю.М. Гельфгат // Магнитная гидродинамика. – 1987. – № 3. – С. 120–137.
9. Тимофеев, В.Н. Анализ электромагнитных процессов магнитогидродинамического перемешивания жидких металлов / В.Н. Тимофеев, М.Ю. Хацаюк // Электричество. – 2017. – № 1. – С. 35–44.
10. Garnier, M. Electromagnetic Processing of Liquid Materials in Europe / M. Garnier // Iron and Steel Institute Journal International. – 1990. – Vol. 30 (1). – P. 1–7. DOI: 10.2355/isijinternational.30.1
11. Laitwait, E.R. Applications of linear motors in the steel metal industry / E.R. Laitwait // Sheet Metal Industry. – 1982. – Vol. 59, iss. 8. – P. 615–617.
12. Blease, J. Applying linear motors in material handling / J. Blease, R. Bhatia, R.M. Pal // Machine Design. – 1989. – Vol. 26. – P. 91–96.

13. Кузьменко, А.Г. Электромагнитные механизмы металлургических машин / А.Г. Кузьменко, В.Г. Грачев, Ф.С. Солодовник. – М.: Металлургия, 1996. – 508 с.

14. Васильев, Л.А. Особенности расчета линейных асинхронных двигателей для двухкоординатного манипулирования массивными стальными листами / Л.А. Васильев, М.З. Дудник // *Электричество*. – 1986. – № 8. – С. 60–62.

15. Ращепкин, А.П. Индукционный метод нагрева проката из цветных металлов и сплавов / А.П. Ращепкин, В.А. Крутилин, П.А. Виштак // *Цветные металлы*. – 1989. – № 1. – С. 104–107.

16. Васильев, Л.А. Линейные асинхронные двигатели в устройствах индукционного нагрева / Л.А. Васильев, Е.В. Самарец, А.Н. Шпак // *Бесконтактные регулируемые электрические машины: сб. науч. тр. ВНИИЭлектромаша*. – Л.: ВНИИЭлектромаш, 1991. – С. 93–102.

17. Abdullaev, Zh.O. Linear Induction Machines with the Opposite Direction Travelling Magnetic Fields for Induction Heating / Zh.O. Abdullaev, A.Yu. Konyaev // *Proceedings of the 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference*. – St. Petersburg, Russia, 2018. – P. 555–557. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317158

18. Comparison of edge-effects of transverse flux and travelling wave induction heating inductors / S. Lupi, M. Forzan, F. Dughiero, A. Zenkov // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1999. – Vol. 35, iss. 5. – Part 2. – P. 3556–3558. DOI: 10.1109/20.800588

19. Pang, L. New development of traveling wave induction heating / L. Pang, Y. Wang, T. Chen // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – June 2010. – Vol. 20, no. 3. – P. 1013–1016. DOI: 10.1109/TASC.2010.2040378

20. Frogner, K. Induction heating using a two-phase travelling wave setup / K. Frogner, T. Cedell, M. Andersson // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2014. – Vol. 44. – P. 217–226. DOI: 10.3233/JAE-141762

21. Settimo, F. Eddy current separation of fine non-ferrous particles from bulk streams / F. Settimo, P. Belivacqua, P. Rem // *Physical Separation in Science and Engineering*. – 2004. – Vol. 13, no. 1. – P. 15–23. DOI: 10.1080/00207390410001710726

22. Smith, Y.R. Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review / Y.R. Smith, J.R. Nagel, R.K. Rajamani // *Minerals Engineering*. – 2019. – Vol. 133. – P. 149–159. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.025

23. 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.

24. 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, no. 6. – P. 4–9. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-6-4-9

25. 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*. Issue 950. – IOP Publishing, 2020. – 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/950/1/012017

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

27. 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.

28. Gibbs, W.J. Induction and synchronous motors with unlaminated rotors / W.J. Gibbs // *IEE Journal*. – 1948. – Vol. 95. – Pt. II. – P. 411–420.

29. Куцевалов, В.М. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами / В.М. Куцевалов. – М., Л.: Энергия, 1966. – 304 с.

30. Могильников, В.С. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором и их применение / В.С. Могильников, А.М. Олейников, А.Н. Стрельников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 120 с.

31. Лопухина, Е.М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики / Е.М. Лопухина. – М.: Высшая школа, 1988. – 328 с.

32. Вольдек, А.И. Поперечный краевой эффект в плоском индукционном насосе с электропроводящим каналом / А.И. Вольдек, Х.И. Янес // *Тр. Таллин. политехн. ин-та. Сер. А*. – 1962. – № 197. – С. 23–35.

33. Bolton, H. Transverse edge effect in short-rotor induction motors / H. Bolton // Proc. IEE. – May. 1968. – Vol. 116. – P. 725–733.

34. Скобелев, В.Е. К вопросу применения асинхронного линейного двигателя на высокоскоростном наземном транспорте / В.Е. Скобелев // Железные дороги мира. – 1976. – № 12. – С. 3–13.

35. Улманис, Л.Я. К вопросу о поперечном краевом эффекте в индукционных насосах. Вопросы магнитной гидродинамики и динамики плазмы / Л.Я. Улманис. Ч. 2. – Рига: Изд-во АН Латв. ССР. – 1962. – С. 561–567.

36. Konyaev, A.Yu. Electrodynamics separators based on linear inductors with diverging magnetic fields / A.Yu. Konyaev // Russian Electrical Engineering. – 2013. – 84 (3). – P. 171–175. DOI: 10.3103/s1068371213030061

References

1. Laithwaite E.R. Induction machines for special purposes. London, 1966, 337 p.

2. Yamamura S. Theory of Linear Induction Motors. New York: Halsted, 1979, 180 p.

3. Veselovskii O.N., Koniaev A.Iu., Sarapulov F.N. Lineinye asinkhronnye dvigateli [Linear asynchronous motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 256 p.

4. Gieras J.F. Linear Induction Drives. London: Oxford Univ. Press, 1994, 320 p.

5. Bal' V.B., Gecha V.Ia., Goncharov V.I., Ezhov E.V., Chirkin V.G., Shirinskii S.V., Petrichenko D.A. Lineinye elektricheskie mashiny vozvratno-postupatel'nogo deistviia - tipy i konstruktsii elektricheskikh mashin [Linear electric machines of reciprocating action - types and designs of electric machines]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEМ*, 2015, vol. 148, no. 5, pp. 3-13.

6. Koniaev A.Iu. Lineinye induktsionnye mashiny dlia tekhnologicheskogo elektromagnitnogo vozdeistviia na obrabatyvaemye elektroprovodiashchie izdeliia i materialy [Linear induction machines for technological electromagnetic influence on processed electrically conductive products and materials]. Ph. D. thesis. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet - UPI, 1996, 440 p.

7. Vol'dek A.I. Induktsionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom [Induction magnetohydrodynamic machines with liquid metal working fluid]. Leningrad: Energiia, 1970, 272 p.

8. Gel'fgat Iu.M. Metallurgicheskie primeneniia magnitnoi gidrodinamiki [Metallurgical applications of magnetic hydrodynamics]. *Magnitnaia gidrodinamika*, 1987, no. 3, pp. 120-137.

9. Timofeev V.N., Khatsaiuk M.Iu. Analiz elektromagnitnykh protsessov magnitogidrodinamicheskogo peremeshivaniia zhidkikh metallov [Analysis of electromagnetic processes of magnetohydrodynamic mixing of liquid metals]. *Elektrichestvo*, 2017, no. 1, pp. 35-44.

10. Garnier M. Electromagnetic Processing of Liquid Materials in Europe. *Iron and Steel Institute Journal International*, 1990, vol. 30 (1), pp. 1-7. DOI: 10.2355/isijinternational.30.1

11. Laitwait E.R. Applications of linear motors in the steel metal industry. *Sheet Metal Industry*, 1982, vol. 59, iss. 8, pp. 615-617.

12. Blease J., Bhatia R., Pal R.M. Applying linear motors in material handling. *Machine Design*, 1989, vol. 26, pp. 91-96.

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

14. Vasil'ev L.A., Dudnik M.Z. Osobennosti rascheta lineinykh asinkhronnykh dvigatelei dlia dvukhkoordinatnogo manipulirovaniia massivnymi stal'nymi listami [Features of the calculation of linear asynchronous motors for two-axis manipulation of massive steel sheets]. *Elektrichestvo*, 1986, no. 8, pp. 60-62.

15. Rashchepkin A.P., Krutilin V.A., Vishtak P.A. Induktsionnyi metod nagreva prokata iz tsvetnykh metallov i splavov [Induction method of heating rolled products from non-ferrous metals and alloys]. *Tsvetnye metally*, 1989, no. 1, pp. 104-107.

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

17. Abdullaev Zh.O., Konyaev A.Yu. Linear Induction Machines with the Opposite Direction Travelling Magnetic Fields for Induction Heating. *Proceedings of the 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in*

Electrical and Electronic Engineering Conference. St. Petersburg. Russia, 2018, pp. 555-557. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317158

18. Lupi S., Forzan M., Dughiero F., Zenkov A. Comparison of edge-effects of transverse flux and travelling wave induction heating inductors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, vol. 35, iss. 5, part 2, pp. 3556-3558. DOI:10.1109/20.800588

19. Pang L., Wang L., Chen T. New development of traveling wave induction heating. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, June 2010, vol. 20, no. 3, pp. 1013-1016. DOI: 10.1109/TASC.2010.2040378

20. 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. DOI: 10.3233/JAE-141762

21. 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

22. 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

23. 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 electrodynamic separation of scrap and waste of non-ferrous metals]. *Promyshlennaiia energetika*, 2001, no. 6, pp. 16-19.

24. 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

25. 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. Issue 950*. IOP Publishing, 2020, 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/950/1/012017

26. Koniaev A.Iu., Nazarov S.L. Issledovaniia kharakteristik elektrodinamicheskikh separatorov na osnove dvukhmernoi modeli [Studies of the characteristics of electrodynamic separators based on a two-dimensional model]. *Elektrotekhnik*, 1998, no. 5, pp. 52-57.

27. 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 when limiting the size of the secondary element]. *Elektrichestvo*, 2010, no. 4, pp. 32-36.

28. Gibbs W.J. Induction and synchronous motors with unlaminated rotors. *IEE Journal*, 1948, vol. 95, pt. II, pp. 411-420.

29. Kutsevalov V.M. Voprosy teorii i rascheta asinkhronnykh mashin s massivnymi rotorami [Questions of theory and calculation of asynchronous machines with massive rotors]. Moscow, Leningrad: Energiia, 1966, 304 p.

30. Mogil'nikov V.S., Oleinikov A.M., Strel'nikov A.N. Asinkhronnye dvigateli s dvukhsloinym rotorom i ikh primenenie [Asynchronous motors with a two-layer rotor and their application]. Moscow: Energoatomizdat, 1983, 120 p.

31. Lopukhina E.M. Asinkhronnye ispolnitel'nye mikrosvigateli dlia sistem avtomatiki [Asynchronous executive micromotors for automation systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 328 p.

32. Vol'dek A.I., Ianes Kh.I. Poperechnyi kraevoi effekt v ploskom induktsionnom nasose s elektroprovodiashchim kanalom [Transverse edge effect in a flat induction pump with an electrically conductive channel]. *Trudy Tallinskogo politekhnicheskogo instituta, seriia A*, 1962, no. 197, pp. 23-35.

33. Bolton H. Transverse edge effect in short-rotor induction motors. *Proc. IEE*, May. 1968, vol. 116, pp. 725-733.

34. Skobelev V.E. K voprosu primeneniia asinkhronnogo lineinogo dvigatel'ia na vysokoskorostnom nazemnom transporte [On the issue of using an asynchronous linear motor in high-speed ground transport]. *Zheleznye dorogi mira*, 1976, no. 12, pp. 3-13.

35. Ulmanis L.Ia. K voprosu o poperechnom kraevom effekte v induktsionnykh nasosakh. Voprosy magnitnoi gidrodinamiki i dinamiki plazmy. Chast' 2 [On the issue of transverse edge effect in induction pumps. Part 2]. Riga: Akademiia nauk Latviiskoi SSR, 1962, pp. 561-567.

36. Konyaev A.Yu. Electrodynamic separators based on linear inductors with diverging magnetic fields. *Russian Electrical Engineering*, 2013, 84 (3), pp. 171-175. DOI: 10.3103/s1068371213030061

Сведения об авторах

Коняев Андрей Юрьевич (Екатеринбург, Российская Федерация) – 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, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: zyacho72@gmail.com).

Кузнецов Константин Вадимович (Екатеринбург, Российская Федерация) – старший преподаватель кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: kvsmith@yandex.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).

Konstantin V. Kuznetsov (Ekaterinburg, Russian Federation) – Senior Lecturer at 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: kvsmith@yandex.ru).

Поступила: 21.05.2024. Одобрена: 24.05.2024. Принята к публикации: 08.07.2024.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

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

Вклад авторов. Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Коняев, А.Ю. Оценка поперечного краевого эффекта при расчетах линейных индукционных машин технологического назначения / А.Ю. Коняев, М.Е. Зязев, К.В. Кузнецов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 50. – С. 104–125. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.06

Please cite this article in English as:

Konyaev A.Yu., Zyazev M.E., Kuznetsov K.V. Assessment of the transverse edge effect in calculations of linear induction machines for technological purpose. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 50, pp. 104-125. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.06