

УДК [UDC] 621.313.333.2 + 06
DOI 10.17816/transsyst201842167-179

© В. А. Соломин¹, А. В. Соломин¹, В. В. Коледов², Н. А. Трубицина¹

¹ Ростовский государственный университет путей сообщения
(Ростов-на-Дону, Россия)

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
(Москва, Россия)

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПРОДОЛЬНО- ПОПЕРЕЧНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ ДЛЯ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

Обоснование: Тяговые линейные асинхронные двигатели (ЛАД) на современном этапе развития человеческого общества являются наиболее перспективными для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта (МЛТ) и уже используются в ряде коммерческих проектов. Линейные асинхронные двигатели могут выполняться с продольным, поперечным и продольно-поперечным магнитным потоком и иметь большое количество вариантов конструкций.

Цель: Создать поперечные встречно направленные механические усилия, которые при симметричном расположении экипажа МЛТ относительно путевой структуры взаимно уравниваются и не оказывают никакого влияния на движение магнитолевитационного транспорта.

Методы: Математическое моделирование распределения магнитодвижущей силы ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком.

Результаты: Бегущие навстречу друг другу в поперечном направлении движения МЛТ магнитные поля пересекают электропроводящий вторичный элемент (играющий роль путевой структуры высокоскоростной транспортной системы) и индуцируют в нем электродвижущие силы, под действием которых текут токи. Рассмотрено распределение магнитодвижущих сил (МДС) линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком, магнитная система которого образована сочетанием продольно и поперечно шихтованных сердечников, на зубцах которых расположены катушки сосредоточенной трехфазной обмотки. Представлены соотношения в виде двойного ряда Фурье для расчета результирующего значения МДС в воздушном зазоре линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком.

Выводы: При боковом (поперечном) смещении высокоскоростного транспорта на магнитном подвесе относительно путевой структуры равновесие поперечных механических усилий нарушится и под действием разности усилий экипаж МЛТ будет автоматически возвращен в исходное симметричное положение.

Ключевые слова: линейный асинхронный двигатель, продольно-поперечный магнитный поток, магнитная левитация, боковая стабилизация, магнитодвижущая сила.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-РЖД № 17-20-04236 «Магнитное охлаждение перспективных транспортных и энергетических систем»

© V. Solomin¹, A. Solomin¹, V. Koledov², N. Trubitsina¹

¹Rostov State Transport University

(Rostov-on-Don, Russia)

²V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics

of the Russian Academy of Science

(Moscow, Russia)

MULTIFUNCTIONAL LINEAR INDUCTION MOTOR WITH LONGITUDINAL-TRANSVERSE MAGNETIC FLUX FOR MAGNETIC-LEVITATIONAL TRANSPORT

Background: Traction linear induction motors (LIM) at the current stage of human society development are the most promising for high-speed magnetic-levitation transport (MLT) and are already used in a number of commercial projects. Linear induction motors can be executed with longitudinal, transverse and longitudinal-transverse magnetic flux and have a large number of design options.

Aim: In addition to traction efforts, LIM develops the forces of magnetic-levitation and lateral stabilization (self-stabilization). The efforts of magnetic-levitation of linear induction motors with longitudinal and transverse magnetic flux are very significant in the zone of large slides (at low speeds) and decrease with increasing speed of the magnetic-levitation transport. To a lesser extent, the decrease in slip (at high speeds) affects the magnetic-levitation forces developed by a number of design variants of linear induction motors with a longitudinal-transverse magnetic flux, in which magnetic fields traveling in a transverse direction towards each other are additionally used. This is explained by the fact that at high and low velocities MLT, the LIM slip will be equal to unity relatively oppositely running in the transverse direction of the magnetic fields and the magnetic suspension forces will be maximum.

Materials and Methods: Running towards each other in the transverse direction of the MLT movement, magnetic fields cross the electrically conductive secondary element (playing the role of the track structure of the high-speed transport system) and induce electromotive forces in it, under the influence of which currents will flow.

Results: As a result, cross counter-directional mechanical forces are created which, in the symmetrical arrangement of the MLT crew relative to the track structure, are mutually balanced and do not have any effect on the motion of the magnetic-levitation transport. At lateral (transverse) displacement of the high-speed transport on the magnetic suspension relative to the track structure, the equilibrium of the transverse mechanical forces is disrupted and, under the effect of the effort difference, the MLT crew will be automatically returned to the original symmetrical position.

Conclusion: The distribution of magnetomotive forces (MMF) of a linear induction motor with a longitudinal-transverse magnetic flux, whose magnetic system is formed by the combination of longitudinally and transverse laminated cores, on the teeth of which the coils of a concentrated three-phase winding are located, is considered. The relations are represented in the form of a double Fourier series for calculating the resultant MMF value in the air gap of a linear induction motor with a longitudinal-transverse magnetic flux.

Keywords: Linear induction motor, Longitudinal-transverse magnetic flux, Magnetic levitation, Lateral stabilization, Magnetomotive force.

Введение

Магнитнолевитационные системы высокоскоростного транспорта, в том числе и вакуумные, способны в обозримом будущем занять достойное место в мировых транспортных коммуникациях. Исследования в области МЛТ и новых технологий, использующих явление магнитной левитации, в России активизировались в последние десятилетия. Работы по созданию и изучению МЛТ и применению магнитного подвеса в промышленных технологических установках проводятся российскими предприятиями и организациями в России. Наиболее значимых результатов в этой области исследований добились в Санкт-Петербурге [1–7], где разрабатываются и изучаются системы различного магнитного подвеса, проводятся научные конференции и семинары, на которых обсуждаются аспекты функционирования высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта, и создан инженерный кластер «Российский Маглев». Помимо систем магнитной левитации для создания новых типов МЛТ необходимо проводить работы в области тягового привода, где основным элементом является линейный двигатель. Линейные двигатели для высокоскоростного МЛТ могут быть асинхронными и синхронными. На современном этапе развития высокоскоростных транспортных систем наиболее перспективными, на наш взгляд, являются тяговые линейные асинхронные двигатели. Тяговые ЛАД уже много лет успешно эксплуатируются в Китае на магнитнолевитационном поезде, соединяющем г. Шанхай с аэропортом. Линейные асинхронные двигатели могут иметь различные конструктивные исполнения магниторывов (сплошные, дискретные) и обмоток (распределенные, сосредоточенные, трех- и двухфазные). По-нашему мнению, ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком весьма перспективны для магнитнолевитационного и вакуумного транспорта поскольку эти линейные двигатели не только создают тяговые и левитационные усилия, но и способны обеспечить боковую стабилизацию высокоскоростных экипажей.

Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным магнитным потоком

У линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком магнитные системы позволяют магнитным силовым линиям замыкаться как в продольном, так и в поперечном направлениях, что расширяет их функциональные возможности. В высокоскоростном МЛТ линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным магнитным потоком, у которых одинаковые магнитные поля «бегут» навстречу друг другу в каждом поперечном сечении ЛАД способны реализовать не только тяговые и левитационные усилия, но и боковую

стабилизацию, что повышает безопасность движения. Заметим, что усилия боковой стабилизации при смещении экипажа создаются автоматически без всяких датчиков и дополнительных устройств за счет изменения встречно бегущих в поперечном направлении магнитных полей. Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным магнитным имеют различные конструктивные исполнения, но для высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта, по нашему мнению, лучше подходят ЛАД, многофазные обмотки которых имеют схемы соединения, образующие в направлении движения транспортного средства одинаковые порядки следования фаз, а в поперечном направлении – до середины ряда один, а после середины – противоположный порядок следования фаз [8–15]. Принцип действия данных ЛАД с продольно-поперечным магнитным полем будет одинаковым. При подключении многофазной обмотки индуктора ЛАД к источнику напряжения возбуждаются бегущие магнитные поля, пересекающие электропроводящую путевую структуру, играющую роль якоря, и наводящие в ней электродвижущие силы, под действием которых в путевой структуре потекут токи. При взаимодействии магнитных потоков, бегущих в продольном направлении, с токами, ими индуцированными в электропроводящей путевой структуре МЛТ, создаются тяговое и левитационное усилия. Заметим, что при скольжении, равном единице, усилие магнитного подвеса будет максимальным. Под действием тягового усилия экипаж МЛТ начнет свое движение. При взаимодействии магнитных потоков, бегущих в поперечном направлении, с токами, ими индуцированными, создаются встречно направленные боковые механические усилия и усилия магнитного подвеса. Если транспортный экипаж симметрично расположен относительно путевой структуры, то боковые усилия одинаковы, взаимно уравниваются друг друга и не оказывают никакого влияния на движение магнитнолевитационного транспорта. Если при движении экипаж МЛТ смещается вправо или влево (например, под действием сильного бокового ветра), то равновесие боковых механических усилий нарушается и под действием разности этих усилий транспортный экипаж автоматически возвращается в прежнее, симметричное положение. Что же касается усилий магнитного подвеса, созданных при взаимодействии поперечно бегущих магнитных полей с токами в путевой структуре, то они не будут зависеть от скорости движения МЛТ. Это объясняется тем, что скольжения индуктора ЛАД относительно поперечно бегущих магнитных полей всегда будут равны единице. Конструкция линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком [16] способна развивать большие усилия боковой стабилизации магнитнолевитационного транспорта за счет повышения эффективности использования встречно бегущих магнитных полей. ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком можно использовать в сочетании с электродинамической

системой левитации для разгона транспортного экипажа до необходимой скорости движения, после чего асинхронные двигатели будут использованы в системе боковой стабилизации магнитнолевитационного транспорта.

Математическое моделирование распределения магнитодвижущей силы ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком

Для электромагнитного расчета ЛАД и определения его интегральных характеристик необходимо разработать математические модели машины, учитывающие распределение магнитодвижущей силы в воздушном зазоре и в электропроводящей части вторичного элемента (путевой структуры МЛТ). Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным замыканием магнитного потока имеют разомкнутую магнитную систему и при их работе проявляются продольный и поперечный концевые эффекты, которые оказывают большое влияние на тяговые свойства ЛАД. Поэтому при расчете необходимо учитывать влияние концевых эффектов. С целью учета влияния продольного и поперечного концевых эффектов линейный асинхронный двигатель представляется в виде двух расчетных моделей, на которых изображается распределение магнитодвижущих сил в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Такой подход к анализу свойств ЛАД позволил создать трехмерную теорию линейных электродвигателей с продольным замыканием магнитного потока. Позже была предпринята попытка распространить данную теорию на линейные асинхронные двигатели с поперечным магнитным потоком, что позволило получить хорошие результаты, совпадающие с экспериментальными данными. Используем такой подход для определения магнитодвижущей силы линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком, конструкции которых предназначены для использования на перспективном высокоскоростном магнитнолевитационном и вакуумном транспорте.

Воспользуемся для анализа рядом допущений, позволяющих получить аналитическое решение задачи.

Полагаем, что – магнитная проницаемость магнитопровода равна бесконечности, электрическая проводимость магнитопровода равна нулю; ток индуктора сосредоточен в бесконечно тонком слое на поверхности зубцов, обращенных ко вторичному элементу (электропроводящей путевой структуре МЛТ); ток индуктора создает в направлении оси “х” синусоидально бегущую волну МДС; составляющие плотности тока по оси “у” в индукторе и вторичном элементе равны нулю.

Рассмотрим линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком, предназначенный для

магнитнолевитационного транспорта, магнитная система которого образована поперечно шихтованными П-образными сердечниками, между каждой парой которых размещен продольный магнитопровод. Катушки сосредоточенной трехфазной обмотки охватывают зубцы продольно и поперечно шихтованных сердечников. Расчетная модель данного линейного асинхронного двигателя показана на рис.1. Принятая система координат содержит ось "x", ориентированную в направлении движения, ось "y", расположенную в центре сечения рельса (вторичного элемента), и ось "z", направленную поперечно перемещению индуктора. В продольном направлении МДС распределена синусоидально, а в поперечном направлении индуктор тягового ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком разбит на 23 зоны, для которых показано распределение МДС (рис. 2). Подобное представление МДС позволяет учесть влияние поперечного концевого эффекта. Магнитодвижущие силы для каждой из зон данного ЛАД в соответствии с расчетными моделями представлены в виде:

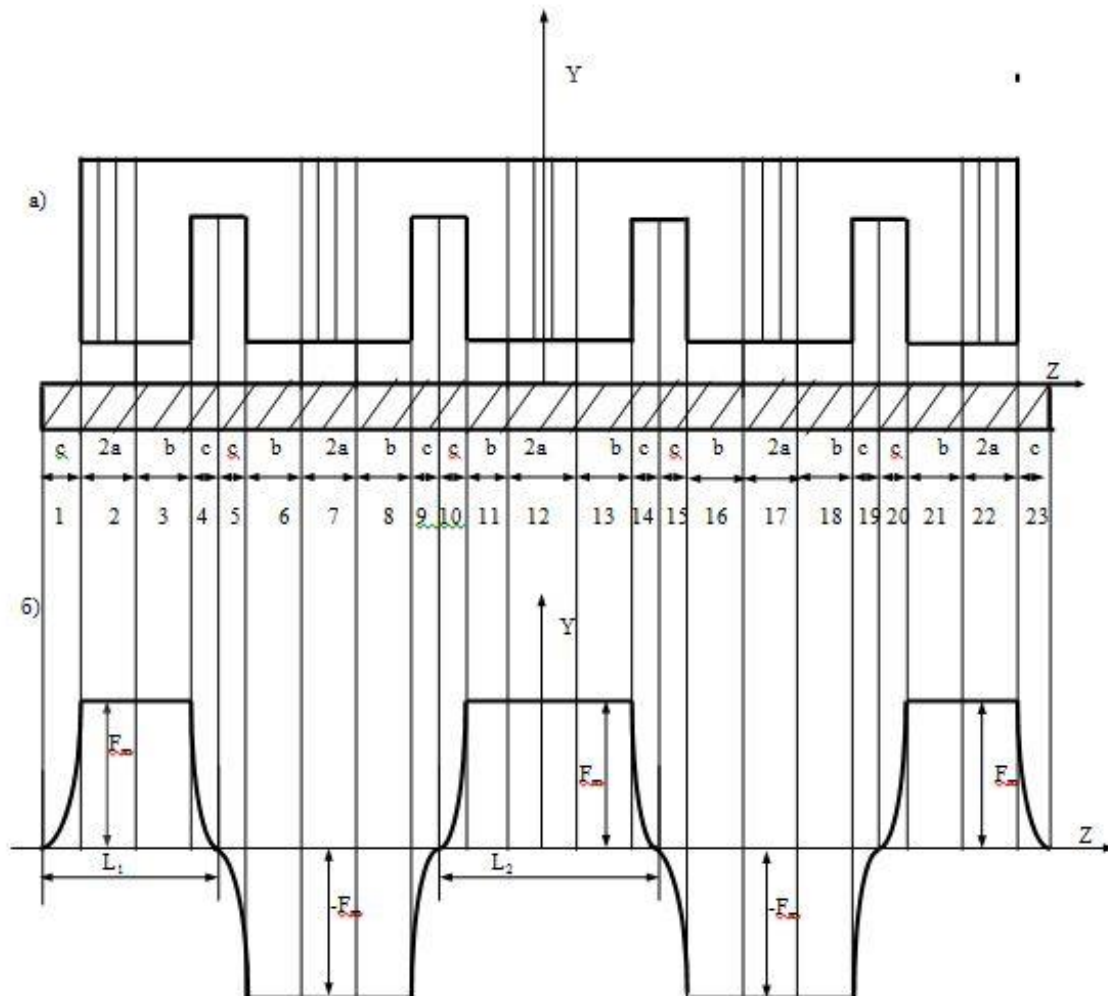


Рис 1. Расчетная модель ЛАД в поперечном направлении: а) поперечное сечение ЛАД; б) распределение МДС в поперечном направлении

$$F_1 = F_m \left[1 + \sin \frac{\pi(z + 5a + 4b + 4c)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (1)$$

$$F_2 = F_3 = F_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (2)$$

$$F_4 = F_m \left[1 - \sin \frac{\pi(z - 3a - 3b - 3c)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (3)$$

$$F_5 = -F_m \left[1 + \sin \frac{\pi(z + 3a + 3b + 2c)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (4)$$

$$F_6 = F_7 = F_8 = -F_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (5)$$

$$F_9 = -F_m \left[1 - \sin \frac{\pi(z - a - b - c)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (6)$$

$$F_{10} = F_m \left[1 + \sin \frac{\pi(z + a + b)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (7)$$

$$F_{11} = F_{12} = F_{13} = F_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (8)$$

$$F_{14} = F_m \left[1 - \sin \frac{\pi(z - a - b)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (9)$$

$$F_{15} = -F_m \left[1 + \sin \frac{\pi(z + a + b + c)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (10)$$

$$F_{16} = F_{17} = F_{18} = -F_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (11)$$

$$F_{19} = -F_m \left[1 - \sin \frac{\pi(z - 3a - 3b - 2c)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (12)$$

$$F_{20} = F_m \left[1 + \sin \frac{\pi(z + 3a + 3b + 3c)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (13)$$

$$F_{21} = F_{22} = F_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \quad (14)$$

$$F_{23} = F_m \left[1 - \sin \frac{\pi(z - 5a - 4b - 4c)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}. \quad (15)$$

$$\text{где } F_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} qm\omega_c I_K k_{o\delta 1}; \quad (16)$$

ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, поперечное сечение которого показано на рис.1, можно представить в виде суммы пяти линейных двигателей, работающих согласно: трех срединных, МДС

которых изменяется в поперечном направлении с периодом $T_2 = 2L_2$, и двух крайних, магнитодвижущая сила которых имеет период $T_1 = 2L_1$ по оси “z”.

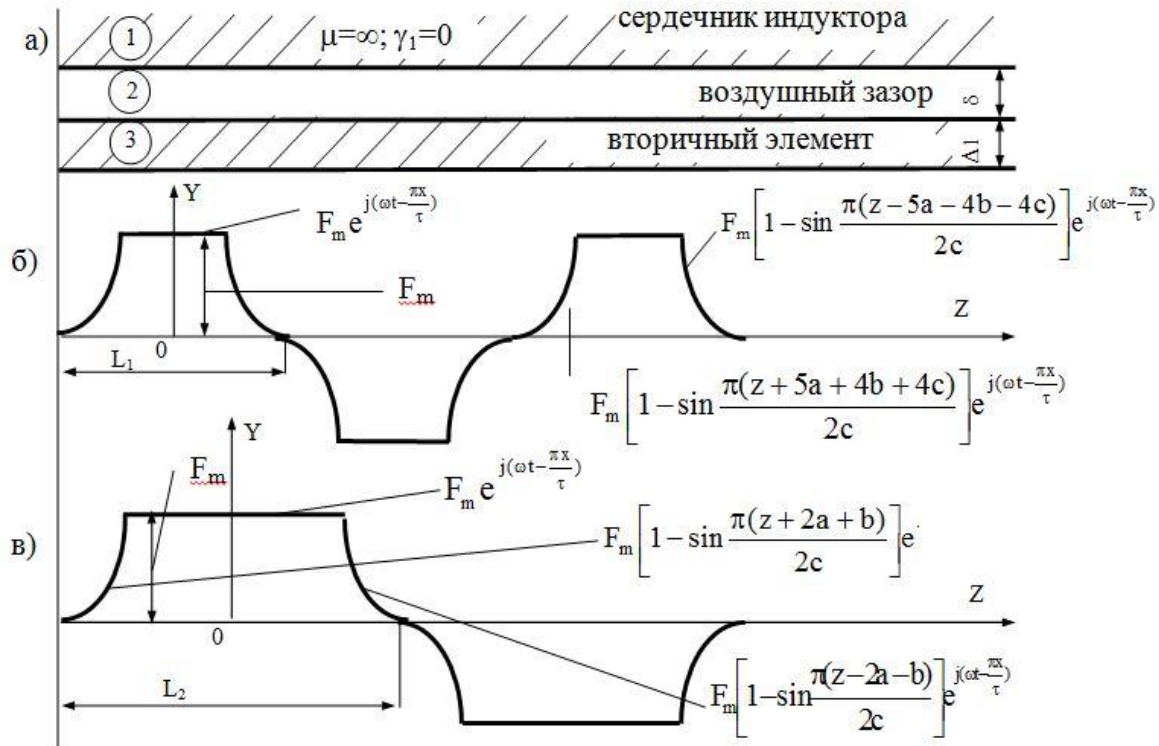


Рис 2. Расчетная модель и МДС линейного двигателя в поперечном направлении:
а) расчетная модель; б) распределение МДС срединных ЛАД;
в) распределение МДС крайних ЛАД

В этом случае расчет может быть выполнен отдельно для ЛАД 1, а результаты расчета удвоены, и для ЛАД 2 (результаты расчета утроены). Просуммировав результаты расчета ЛАД 1 и ЛАД 2, получаем интегральные значения параметров и характеристик ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком.

На более подробной расчетной модели ЛАД (рис. 2) обозначены три зоны:

- 1-магнитная система индуктора;
- 2-воздушный зазор;
- 3-электропроводящий вторичный элемент (путевая структура МЛТ).

При анализе расчетных моделей используем допущения, принятые ранее.

Расчетные модели и принятые ранее допущения (рис. 1 и рис. 2) позволяют представить МДС крайнего ЛАД 1 в виде периодической функции с периодом $T_x = 1$ по оси “x” и с периодом $T_z = 2L_1$ по оси “z” в виде:

$$F_1(x, z, t) = \begin{cases} F_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} ; \\ \text{при } -p\tau \leq x \leq p\tau; \quad -(5a + 4b + 4c) \leq z \leq -(3a + 3b + 3c); \\ F_m \left[1 - \sin \frac{\pi(z - 5a - 4b - 4c)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} ; \\ \text{при } -p\tau \leq x \leq p\tau; \quad -(3a + 3b + 3c) \leq z \leq -(3a + 3b + 2c); \\ F_m \left[1 + \sin \frac{\pi(z + 5a + 4b + 4c)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} ; \\ \text{при } -p\tau \leq x \leq p\tau; \quad -(5a + 4b + 4c) \leq z \leq -(5a + 4b + 3c); \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{где } F_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} qm\omega_c I_{cK_{обл}}; \quad (18)$$

Магнитодвижущую силу срединного ЛАД-2 можно представить как периодические функции с периодом $T_x=1$ по оси “x” и с периодом $T_z=2L_2$ по оси “z”, заданные следующим образом:

$$F_2(x, z, t) = \begin{cases} F_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} ; \\ \text{при } -p\tau \leq x \leq p\tau; \quad -(2a + b + c) \leq z \leq (2a + b + c); \\ F_m \left[1 - \sin \frac{\pi(z - 2a - b)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} ; \\ \text{при } -p\tau \leq x \leq p\tau; \quad -(2a + b) \leq z \leq (2a + b + c); \\ F_m \left[1 + \sin \frac{\pi(z + 2a + b)}{2c} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} ; \\ \text{при } -p\tau \leq x \leq p\tau; \quad -(2a + b + c) \leq z \leq (2a + b); \end{cases} \quad (19)$$

Выполнив ряд преобразований, представим МДС “крайних” и срединных ЛАД в виде двойных рядов Фурье.

Для крайнего ЛАД магнитодвижущая сила получена в виде:

$$F_1(x, z, t) = \frac{8\tau F_m}{\pi^2 l} \sum_n \sum_v n_1 \left(\pi n \frac{z}{L_1} \right) v_k e^{j(\omega t + 2\pi v \frac{x}{l})}, \quad (20)$$

$$n_{n1} = \frac{1}{n[1 - (2n \frac{c}{l_1})^2]} \left[\sin \frac{\pi n(a + \frac{b}{2} + c)}{L_1} - 2n \frac{c}{L_1} \cos \left(\pi n \frac{a + \frac{b}{2}}{L_1} \right) \right] \quad (21)$$

где n - целое, положительное, нечетное число - порядок гармонической составляющей МДС в направлении оси “z”, причем период первой гармоники составляет $2L_1=2(2a+b+c)$;

v - порядок гармоники МДС по оси “x”;

n_{n1} - коэффициент, учитывающий распределение МДС в зоне лобовых частей обмотки ЛАД 1;

v_k - коэффициент, учитывающий число полюсов.

Магнитодвижущая сила срединного ЛАД 2 определена следующим образом:

$$F_2(x, z, t) = \frac{8\tau F_m}{\pi^2 l} \sum_n \sum_v n_{n2} \left(\pi n \frac{z}{L_2} \right) v_k e^{j(\omega t + 2\pi v \frac{x}{l})}, \quad (22)$$

$$n_{n2} = \frac{1}{n[1 - (2n \frac{c}{l_1})^2]} \left[\sin \frac{\pi n(a + b + c)}{L_2} - 2n \frac{c}{L_2} \cos \left(\pi n \frac{a + b}{L_2} \right) \right], \quad (23)$$

где $L_2=2(2a+2b+2c)$.

Выводы

1. Предложенный способ моделирования распределения магнитодвижущей силы ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком позволяет свести реальные модели линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком со сложным строением магнитных систем индукторов к расчетным математическим. Это может послужить в качестве основы для создания методики расчета параметров и характеристик тяговых ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, предназначенных для использования на высокоскоростном магнитнолевитационном и вакуумном транспорте.

2. Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным магнитным потоком в системах высокоскоростного МЛТ способны наряду с тяговым и левитационным усилиями реализовать автоматическую поперечную (боковую) самостабилизацию транспортного экипажа относительно путевой структуры и являются многофункциональными устройствами.

3. Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным магнитным потоком в комбинации с электродинамической системой магнитной левитации перспективны для магнитнолевитационного транспорта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология. – Москва: Издательство физико-математической литературы, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA. Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya. Moscow: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury; 2014. 476 p. (In Russ.)].
2. Зайцев А.А., Талашкин Г.Н., Соколова Я.В. Транспорт на магнитном подвесе. – СПб: Издательство Петербургского государственного университета путей сообщения, 2010. – 160 с. [Zaitsev AA, Talashin GN, Sokolova YaV. Transport na magnitnom podvесе. St. Petersburg: Izdatel'stvo Peterburgskogo universiteta pytei soobkheniya; 2010. 160 p. (In Russ.)].
3. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения. – Москва: Издательство физико-математической литературы, 2015. – 612 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA. Magnitolevitatsionnyy transport: nauchnyye problem i tekhnicheskiye resheniya. Moscow: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury; 2015. 612 p. (In Russ.)].
4. Зайцев А.А., Морозова Е.Н., Талашкин Г.Н. и др. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны. – Санкт-Петербург: ООО «Типография «НП-ПРИНТ», 2015. – 140 с. [Zaitsev AA, Morozova EN, Talashin GN, et al. Magnitolevitatsionnyy transport v edinoi transportnoi sisteme strany. St. Petersburg: ООО 'Tipografiya 'NP-PRINT'; 2015. 140 p. (In Russ.)].
5. Зайцев А.А. О современной стадии развития магнитолевитационного транспорта // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 12. – С. 62-65. [Zaitsev AA. O sovremennoy stadii razvitiya magnitolevitatsionnogo transporta. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2016;(12):62-65. (In Russ.)].
6. Зайцев А.А. Магнитолевитационные системы и технологии // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С. 69-73. [Zaitsev AA. Magnitolevitatsionnyye sistemy i technologii. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2014;(5):69-73. (In Russ.)].
7. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А., Морозова Е.И. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы // Известия ПГУПС. – 2014. – Т. 4. – № 41. – С. 5–15. [Antonov YuF, Zaitsev AA, Morozova EI. Issledovanie magnitodinamicheskoi levitatsii i elektrodinamicheskogo tormozeniya gruzovoi transportnoi platformy. *Izvestia PGUPS*. 2014;4(41):5-15. (In Russ.)].
8. Авторское свидетельство СССР на изобретение № 696579/05.11.79. Бюл. № 41. Попов А.Д., Соломин В.А., Хантимиров С.С. и др. Линейный асинхронный двигатель. Режим доступа: <http://patents.su/2-696579-linejnyjj-asinkhronnyjj-dvigatel.html>. [Author's certificate the USSR № 696579/05.11.79. Byul. № 41. Popov AD, Solomin VA, Chantimirov SS et al. *Lineinyi asinhronnyi dvigatel*. Available from: <http://patents.su/2-696579-linejnyjj-asinkhronnyjj-dvigatel.html>. (In Russ.)].
9. Popov AD, Solomin VA, Khantimirov SS, et al, inventor. *Linear inducton motor*. United States patent US 4216397. 1980 Aug 5. Available from: <https://patents.google.com/patent/US4216397A/en>.
10. Popov AD, Solomin VA, Chantimirov SS und. and, inventor. *Linearer Asynchron motor*. Bundesrepublik Deutschland patent 2851038. 1983 Aug 11. Available from: <https://patents.google.com/patent/DE2851038A1/en?q=Pat.+2851038+Bundesrepublik+Deutschland>.

11. Popov AD, Solomin VA, Khantimirov SS, inventor. *Moteur electrique asynchrone a movement lineaire*. France patent 7836932. 1981 Oct. 23. Available from: <https://patents.google.com/patent/US7836932B2/en?q=Pat.+7836932+France>.
12. Авторское свидетельство СССР на изобретение № 868942/30.09.81. Бюл. №. 36. Попов А.Д., Соломин В.А., Хантимиров С.С., Шириков А.А. Линейный асинхронный двигатель. Режим доступа: <http://patents.su/3-868942-linejjnyjj-asinkhronnyjj-dvigatel.html>. [Author's certificate the USSR № 868942/30.09.81. Byul. № 36. Popov AD, Solomin VA, Chantimirov SS, Shirikov AA. *Lineinyi asinhronnyi dvigatel*. Available from: <http://patents.su/3-868942-linejjnyjj-asinkhronnyjj-dvigatel.html>. (In Russ)].
13. Popov AD, Solomin VA, Khantimirov SS, et al, inventor. *Linear inducton motor*. United States patent US 4271367. 1981 Jun. 2. Available from: <https://patents.google.com/patent/US4271367A/en?q=Pat.+4271367+United+States>.
14. Popov AD, Solomin VA, Chantimirov SS, et al, inventor. *Linearer Asynchrone motor*. Bundesrepublik Deutschland patent 3012917. 1984 March 8. Available from: <https://patents.google.com/patent/DE3012917A1/en?q=Pat.+3012917+Bundesrepublik+Deutschland>.
15. Popov AD, Solomin VA, Khantimirov SS, et al, inventor. *Moteur electrique asynchrone a movement lineaire*. France patent 8008928. 1983 Feb. 25. Available from: <https://patents.google.com/patent/US8008928B2/en?q=Pat.+8008928+France>.
16. Патент РФ на изобретение № 2268543/20.01.06. Бюл. № 2. Соломин А.В. Линейный асинхронный двигатель. Режим доступа: <http://bd.patent.su/2268000-2268999/pat/servlet/servletb65f.html>. [Pat. RUS № 2268543/20.01.06. Byul. №.2. Solomin AV. *Lineinyi asinhronnyi dvigatel*. Available from: <http://bd.patent.su/2268000-2268999/pat/servlet/servletb65f.html>. (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Соломин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор; телефон: +7(863)2726212; адрес: 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2;
eLibrary SPIN:6785-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;
E-mail: ema@rgups.ru

Соломин Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN:7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;
E-mail: vag@kaf.rgups.ru

Коледов Виктор Викторович, доктор физико-математических наук, профессор РАН;
eLibrary SPIN: 9291-1989; ORCID: 0000-0002-2439-6391;
E-mail: victor_koledov@mail.ru

Трубицина Надежда Анатольевна, кандидат технических наук, доцент; телефон: +7(863)2726212;
eLibrary SPIN: 4192-0487; ORCID: 0000-0001-6640-8306;
E-mail: ema@rgups.ru

Information about the authors:

Vladimir A. Solomin, Doctor of Technological sciences, Professor; phone: +7(863)2726212; address: 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia;
eLibrary SPIN: 6785-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;
E-mail: ema@rgups.ru

Andrei V. Solomin, Candidate of Technological sciences, Associate Professor;
eLibrary SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;
E-mail: vag@kaf.rgups.ru

Victor V. Koledov, Doctor of physico-mathematical Sciences, Professor Russian Academy of Sciences;
eLibrary SPIN: 9291-1989; ORCID: 0000-0002-2439-6391;
E-mail: victor_koledov@mail.ru

Nadezda A. Trubitsina, Candidate of Technological sciences, Associate Professor;
eLibrary SPIN: 4192-0487; ORCID: 0000-0001-6640-8306;
E-mail: ema@rgups.ru

Цитировать:

Соломин В.А., Соломин А.В., Коледов В.В., Трубицина Н.А. Многофункциональный линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком для магнитолевитационного транспорта // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 2. – С.167–179. doi: 10.17816/transsyst201842167-179

To cite this article:

Solomin VA, Solomin AV, Koledov VV, Trubitsina NA. Multifunctional Linear Induction Motor with Longitudinal-Transverse Magnetic Flux for Magnetic-Levitational Transport. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):167-179. doi: 10.17816/transsyst201842167-179