

УДК 621.313.333+06

А. В. Соломин

**КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЯГИ И БОКОВОЙ
СТАБИЛИЗАЦИИ ДЛЯ МАГНИТНОЛЕВИТАЦИОННОГО
ТРАНСПОРТА**

Дата поступления 09.09.2017

Решение о публикации 26.10.2017

Вопросы совершенствования имеющихся и создания новых видов транспорта важны и актуальны для развития человеческого общества. Одним из наиболее перспективных и экологически чистых новых видов транспортных средств является высокоскоростной магнитнолевитационный транспорт, перемещающийся со скоростями до 500 км/ч.

Цель. Обосновать целесообразности использования линейного асинхронного двигателя; разработать и исследовать варианты конструкции двигателей данного типа.

Методы. Описана конструкция линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком для комбинированной системы тяги и боковой стабилизации магнитнолевитационного транспорта, развивающая повышенные усилия боковой стабилизации. Выполнено математическое моделирование магнитодвижущих сил (МДС) в зазоре тягового линейного двигателя данного типа. Для анализа были приняты допущения о равномерности распределения магнитной индукции в воздушном зазоре в поперечном направлении и о ее синусоидальности в продольном направлении, позволившие разработать новую математическую модель распределения МДС в воздушном зазоре линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком.

Результаты. Разработанная математическая модель для расчета МДС тяговой линейной машины позволит повысить точность расчета тяговых и стабилизирующих боковых усилий комбинированной системы для магнитнолевитационного транспорта, в том числе при разных вариантах взаимного расположения индуктора относительно вторичного элемента. Это подтверждает успешный десятилетний опыт коммерческой эксплуатации высокоскоростного поезда на магнитном подвесе, перевозящего пассажиров из аэропорта в город Шанхай в Китайской народной республике.

На величину тягового и бокового усилий линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком для высокоскоростного транспорта влияет характер распределения тока во вторичном элементе, который существенным образом зависит от распределения магнитодвижущих сил в воздушном зазоре машины.

Комбинированная система тяги, боковая стабилизация, линейный асинхронный двигатель, продольно-поперечный магнитный поток, магнитодвижущая сила.

Введение

Развитие транспорта в Российской Федерации, обладающей огромной территорией и выгодным географическим положением, является важной стратегической задачей. Реализация новых транспортных направлений, соединяющих запад с востоком и север с югом нашей страны, а также создание транспортных коридоров на территории России, соединяющих страны Европы с азиатскими государствами, для перемещения грузов и пассажиров позволит решить многие геополитические и экономические задачи. Для достижения этих целей необходимо не только совершенствовать имеющиеся, но и создавать принципиально новые виды высокоскоростного транспорта. Современные высокоскоростные виды транспорта уже не в состоянии решить поставленные задачи на новом уровне.

Свою нишу в создании современной и перспективной транспортной инфраструктуры России и других стран сможет занять высокоскоростной магнитнолевитационный транспорт. Проблемами создания и исследования магнитнолевитационного транспорта в последние 10 лет активно занимаются российские научные работники и инженеры в транспортных вузах, в академических и отраслевых научно-исследовательских организациях. Вопросы развития высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта уделяют значительное внимание в ОАО «РЖД», поддерживают исследования в данной области в том числе экономически – путем выделения грантов на поисковые и опытные работы. Результатам выполненных исследований и перспективам проведения дальнейших работ в данной области посвящено множество серьезных публикаций [1–8]. Наибольших результатов в разработке и исследованиях магнитнолевитационного транспорта в России достигла научная школа Петербургского государственного университета путей сообщения [1–7].

Для практической реализации высокоскоростных магнитнолевитационных транспортных систем необходимо решить ряд научных и технических проблем, одна из которых – безопасность движения. Безопасность движения высокоскоростных поездов на магнитном подвесе – важная проблема, включающая в себя много аспектов. Один из них – улучшение динамических качеств магнитнолевитационного транспорта путем обеспечения его поперечной стабилизации относительно путевой структуры. В Ростовском государственном университете путей сообщения (РГУПС) разработан новый тип тяговой машины для магнитнолевитационного транспорта – линейный асинхронный двигатель (ЛАД) с продольно-поперечным магнитным потоком. Такой ЛАД способен развивать помимо тяговых усилия поперечной стабилизации [9]. Усилия поперечной стабилизации автоматически возникают сами при боковом смещении транспортного экипажа, подвешенного в магнитном поле, без дополнительных устройств и датчиков положения. ЛАД с продоль-

но-поперечным магнитным потоком работает на принципе встречно бегущих магнитных полей. Ряд научных результатов по исследованию линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком в РГУПС опубликован в [10–11]. Вопросы движения и поперечной динамики магнитнолевитационного транспорта весьма актуальны, о чем свидетельствуют научные исследования в Московском государственном университете путей сообщения [12].

Конструктивные схемы и особенности работы комбинированных систем тяги и боковой стабилизации

Одна из конструкций, обеспечивающих создание тягового и бокового стабилизирующего усилий и предназначенных для магнитнолевитационного транспорта, описана в [13]. Увеличение тягового усилия комбинированной системы тяги и боковой стабилизации обеспечивает ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком [14].

ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком [14] имеет в направлении движения беззубцовые (гладкие) активные зоны, что повышает синусоидальность распределения магнитного потока в воздушном зазоре и значение тягового усилия данного двигателя.

Для улучшения распределения магнитного поля в поперечном направлении разработан линейный асинхронный двигатель [15], содержащий индуктор (рис. 1), магнитная система которого образована поперечно расположенными сердечниками 1, несущими катушки обмотки 2. Поперечно шихтованные сердечники соединены продольно шихтованными сердечниками 3. Сердечники, шихтованные в продольном направлении, образованы двумя наклонными стержнями, концы которых входят в пазы поперечных сердечников. На продольных сердечниках расположены катушки обмотки 4. Многофазная обмотка разделена на две части, одна из которых расположена на поперечных, а другая – на продольных сердечниках. Вторичный элемент выполняется композиционным. Электропроводящая часть 5 вторичного элемента уложена поверх обратного магнитопровода 6. Беззубцовое строение индуктора данного ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком обеспечивает синусоидальность распределения магнитного потока в воздушном зазоре в поперечном направлении, что позволяет увеличить боковые стабилизирующие усилия при использовании машины на магнитнолевитационном транспорте.

Принцип действия линейных асинхронных двигателей, принципиальные конструктивные схемы которых представлены на рис. 1, 2, одинаковы, и в них использовано явление встречно бегущих магнитных полей.

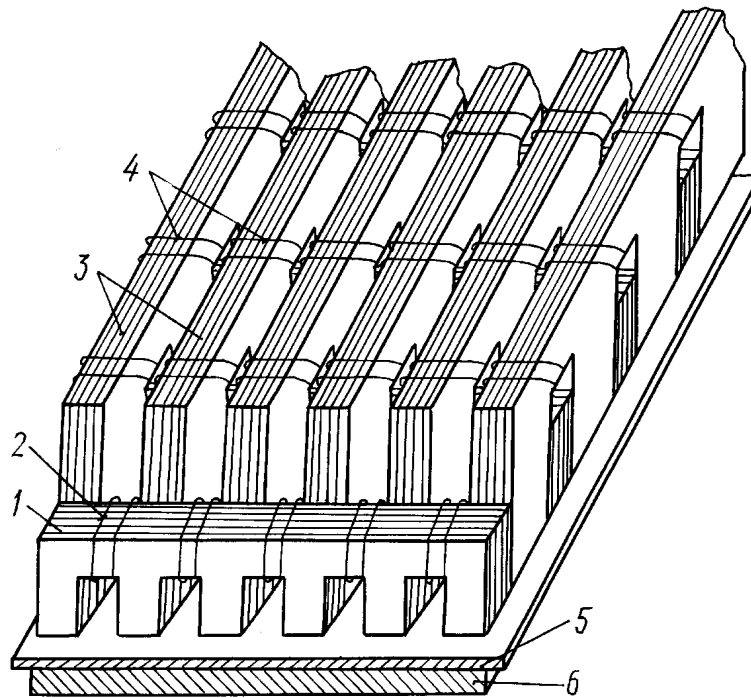


Рис. 1. Линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком: 1 – поперечно шихтованный сердечник; 2, 4 – обмотка; 3 – продольно шихтованный сердечник; 5 – электропроводящая шина; 6 – ферромагнитное основание

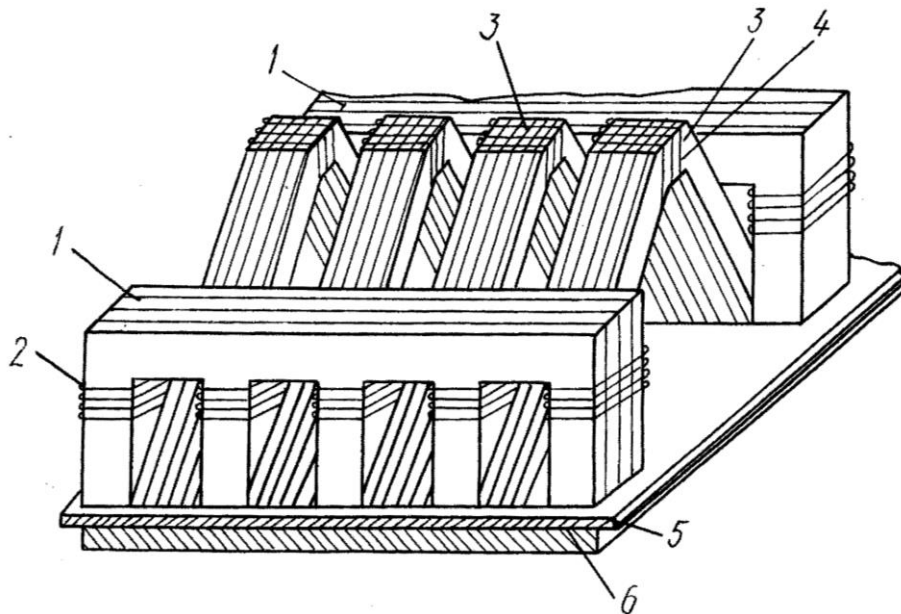


Рис. 2. Линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком: 1 – поперечно шихтованный сердечник; 2, 4 – обмотка; 3 – продольно шихтованный сердечник; 5 – электропроводящая полоса; 6 – ферромагнитное основание

Новая конструкция ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком [16] для комбинированных систем тяги и боковой стабилизации позволяет увеличить усилия боковой стабилизации за счет того, что при поперечном смещении магнитнолевитационного транспортного экипажа часть индуктора располагается над короткозамкнутой обмоткой, размещенной по обе части основной путевой структуры. В этом случае поперечно бегущие магнитные поля взаимодействуют с токами стержней, а не с вихревыми токами в электропроводящей шине. В итоге усилия поперечной стабилизации возрастают, улучшается поперечная динамика магнитнолевитационного транспорта.

Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным магнитным потоком позволяют реализовать высокие линейные скорости даже при промышленной частоте электропитания, поэтому одной из наиболее перспективных областей применения этих двигателей является высокоскоростной магнитнолевитационный транспорт, который перемещается со скоростью 350–500 км/ч. Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным магнитным потоком просты по конструкции, технологичны в изготовлении и обладают высокой надежностью. В связи с этим разработка основ их теории и методики расчета является актуальной задачей.

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 (МДС) в воздушном зазоре и в электропроводящей части вторичного элемента. Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным замыканием магнитного потока имеют разомкнутую магнитную систему, 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. Для учета влияния продольного и поперечного концевых эффектов линейный асинхронный двигатель представляется в виде двух расчетных моделей, на которых изображается распределение магнитодвижущих сил в двух взаимноперпендикулярных направлениях. Такой метод анализа МДС для ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком был использован в РГУПС. Используем такой подход для определения магнитодвижущей силы в ЛАД, конструкции которых предназначены для использования на перспективном высокоскоростном магнитнолевитационном транспорте.

Расчетная модель ЛАД в продольном направлении представлена на рис. 3 в виде чередующихся через определенные промежутки индукторов линейных электродвигателей. Промежутки между индукторами являются зонами продольного краевого эффекта, которая может быть принята $L_{к\max} \cong 2\tau$. Из рис. 3 видно, что в продольном направлении МДС изменяется синусоидально с периодом l . Полагаем, что в зонах продольного краевого эффекта магнитодвижущая сила равна нулю.

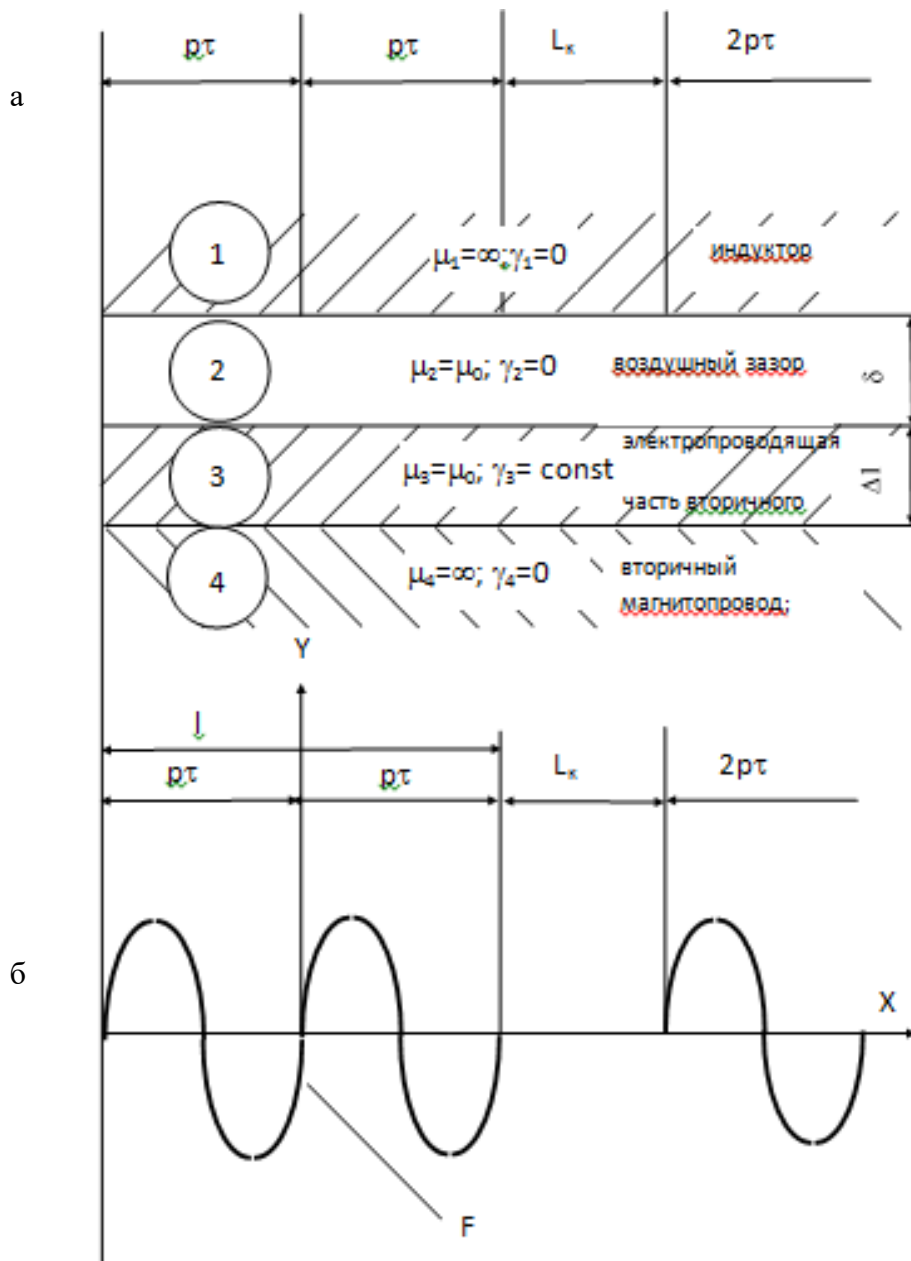


Рис. 3. Расчетная модель и распределение МДС линейного двигателя в продольном направлении: а) основные зоны машины: 1 – индуктор; 2 – воздушный зазор; 3 – электропроводящая часть вторичного элемента; 4 – обратный магнитопровод; б) распределение МДС в направлении движения

Рассмотрим расчетную модель линейного асинхронного двигателя в поперечном направлении (рис. 4). Картина распределения магнитодвижущей силы линейного асинхронного двигателя в поперечном направлении показывает, что машина образована шестью одинаковыми линейными двигателями, действующими согласно, поэтому достаточно рассчитать один линейный асинхронный двигатель, а результаты умножить на шесть.

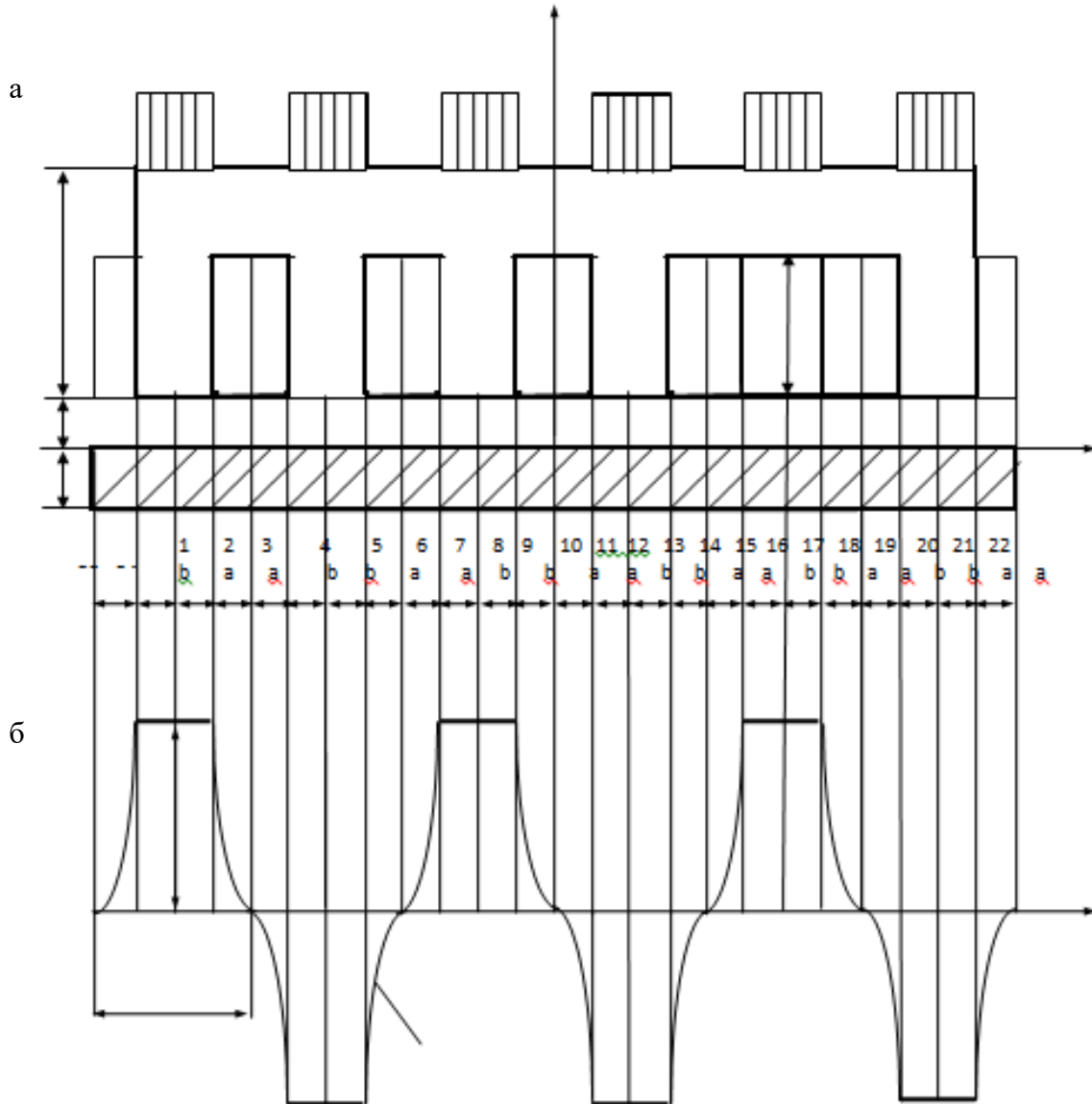


Рис. 4. Расчетная модель и распределение МДС линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком в поперечном направлении:
а) поперечное сечение ЛАД; б) распределение МДС

Рассмотрим линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком, имеющий конструкцию, представленную на рис. 1.

ЛАД разбит для анализа распределения МДС на зоны 1–24. Воспользуемся 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;
- ток индуктора создает в направлении оси x синусоидально бегущую волну МДС;
- составляющие плотности тока по оси y в индукторе и вторичном элементе равны нулю.

В выбранном варианте конструкции ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком в соответствии с расчетными моделями (рис. 3, 4) и с учетом принятых допущений значения магнитодвижущих сил получены для всех рассматриваемых зон в поперечном направлении.

В соответствии с принятыми допущениями и расчетными моделями (рис. 3, 4) и с преобразованиями для ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком установлено, что МДС данного линейного двигателя представляет собой периодическую функцию с периодом $T_x = l$ по оси x и с периодом $T_z = 2L$ по оси z , которая задана следующим образом

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

где $F_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} q \cdot m \cdot w_c \cdot I_{1\phi} \cdot k_{од1}$;

q – число пазов на полюс и фазу;

w_c – число витков в катушке обмотки;

m – число фаз;

$I_{1\phi}$ – ток фазы индуктора;

$k_{\delta 1}$ – обмоточный коэффициент для первой гармоники тока;

τ – полюсное деление индуктора;

a, b – поперечные размеры сердечника.

С учетом конструкции индуктора ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком его магнитодвижущую силу после ряда преобразований представим в виде двойного ряда Фурье:

$$F(x, z, t) = \frac{8\tau F_m}{\pi^2 l} \sum_n \sum_v n_{\pi} \cos\left(\pi n \frac{z}{L}\right) v_{\kappa} e^{j(\omega t + 2\pi v \frac{x}{l})},$$

где n – целое положительное, нечетное число – порядок гармонической составляющей МДС по оси z , где период первой гармоники составляет $2L = 4(a + b)$;

v – любое целое число – порядок гармоники в направлении оси x ;

n_{π} – коэффициент, учитывающий распределение МДС в зоне лобовых частей обмотки.

Коэффициент, учитывающий распределение МДС в зоне лобовых частей тягового ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, определяется соотношением

$$n_{\pi} = \frac{1}{n \left[1 - \left(2n \frac{b}{l} \right)^2 \right]} \left[\sin \frac{\pi n (a + b)}{L} - 2n \frac{b}{L} \cos \left(\pi n \frac{a}{L} \right) \right];$$

$$v_{\kappa} = \frac{\sin \pi n \left(1 + v \frac{2\tau}{l} \right)}{1 + v \frac{2\tau}{l}},$$

где v_{κ} – коэффициент, учитывающий число полюсов ЛАД.

Полученное представление магнитодвижущих сил ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком в виде двойных рядов Фурье справедливо для машин с любым числом полюсов. Предложенный подход к определению распределения магнитодвижущей силы позволяет свести реальные модели ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком со сложным строением магнитных систем индукторов к расчетным математическим, позволяющих рассчитывать магнитное поле ЛАД.

Заключение

Рассмотрен ряд конструкций линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком с точки зрения целесообразности их применения для перспективного высокоскоростного магнитнолевитаци-

онного транспорта в качестве комбинированных систем тяги и боковой стабилизации.

Предложена методика аналитического определения магнитодвижущей силы, позволяющая исследовать ее распределение в воздушном зазоре при любой конструкции индуктора тягового ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком для высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта.

Разработаны математические модели для новых конструкций индукторов тяговых линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком, позволяющие находить распределение магнитодвижущей силы ЛАД в воздушном зазоре между индуктором и вторичным элементом и устанавливать взаимосвязи между параметрами и размерами линейной машины и величиной МДС, что повысит точность расчетов при проектировании данных двигателей для высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта.

Библиографический список

1. Антонов Ю.Ф. Магнитнолевитационная транспортная технология: монография / Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев и др.; под ред. В.А. Гапановича – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.
2. Зайцев А.А. Транспорт на магнитном подвесе: моногр. / А.А. Зайцев, Г.Н. Талашкин, Я.В. Соколова. – СПб.: ПГУПС, 2010. – 160 с.
3. Антонов Ю.Ф. Магнитнолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с.
4. Зайцев А.А. Магнитнолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны: моногр. / А.А. Зайцев, Е.И. Морозова, Г.Н. Талашкин, Я.В. Соколова. – СПб.: НП-Принт, 2015. – 140 с.
5. Зайцев А.А. О современной стадии развития магнитнолевитационного транспорта / А.А. Зайцев // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 12. – С. 62–65.
6. Зайцев А.А. Магнитнолевитационные транспортные системы и технологии / А.А. Зайцев // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С. 69–73.
7. Антонов Ю.Ф. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы / Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев, Е.И. Морозова // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 4 (41). – С. 5–15.
8. Лapidус Б.М. Железнодорожный транспорт: философия будущего / Б.М. Лapidус, Л.В. Лapidус. – М.: Прометей, 2015. – 232 с.

9. Соломин А.В. Линейный асинхронный двигатель для высокоскоростной транспортной системы на магнитной подвеске / А.В. Соломин // Вест. РГУПС. – 2004. – № 4. – С. 41–44.

10. Соломин В.А. О рациональном взаимном расположении индуктора и вторичного элемента тягового линейного асинхронного двигателя для высокоскоростного транспорта / В.А. Соломин, А.В. Соломин, Л.Л. Замшина // Вест. РГУПС. – 2009. – № 2. – С. 120–123.

11. Соломин В.А. Усилия поперечной самостабилизации тягового линейного асинхронного двигателя / В.А. Соломин, А.В. Соломин, Л.Л. Замшина, А.Л. Быкадоров // Вестн. РГУПС. – 2012. – № 1. – С. 71–74.

12. Пашков Н.Н. Уравнения движения магнитнолевитационного подвижного состава / Н.Н. Пашков // Транспортные системы и технологии. – Вып. 1 (1), 2015. – С. 59–69. – URL: <http://www.transstyst.ru/razdel-2-3-pashkov.html> (дата обращения 27.05.2017).

13. Соломин В.А. Система боковой самостабилизации высокоскоростного экипажа с магнитной левитацией / В.А. Соломин, В.Н. Носков, М.Ю. Пустоветов, Н.С. Флегонтов // Магнитнолевитационные транспортные системы и технологии. МТСТ`13. Труды 1-й Междунар. науч. конф. Санкт-Петербург, 29–31 окт. 2013 г. – под ред. Ю.Ф. Антонова. – СПб.: PUDRA, 2013. – С. 66–67.

14. А.с. СССР № 868942, МПК 41/04. 1981.

15. А.с. СССР № 801198, МПК 41/04. 1981.

16. Пат. Россия № 2518915, МПК Н 02 К 41/025. 2014.

Сведения об авторе:

СОЛОМИН Андрей Владимирович, к. т. н., доцент.

E-mail: vag@kaf.rgups.ru.

Ростовский государственный университет путей сообщения

A. V. Solomin

COMBINATION TRACTION AND LATERAL STABILISATION SYSTEM FOR MAGNETIC LEVITATION TRANSPORT

Date of receipt 09.09.2017

Decision on publication 26.10.2017

The problems of improvement of modern types of transport and creation of new ones are important and topical for the human society development. One of the most promising and environmentally-friendly modes of transport is the high-speed maglev transport, moving at speeds of approximately 500 km/h.

Objective. Justification of linear induction motor, development and research of various constructions of this type of motors.

Methods. Description of linear induction motor with longitudinal and transverse magnetic flux for combined traction and lateral stabilisation system of maglev transport, having increased lateral stabilisation forces. The mathematical modelling of magnetomotive force (MF) in the air gap of traction linear motor of this type has been conducted. To analyse the MF the assumption has been made about even distribution of magnetic induction in the air gap in transverse direction and its sinusoidal longitudinal direction, making it possible to develop new mathematical model of MF distribution in the air gap of linear induction motor with longitudinal and transverse magnetic flux

Results. The developed mathematical model for calculation of MF on traction linear machine will enable increasing accuracy of traction and lateral stabilisation combined system forces for maglev transport. The same relates to mutual location of inductor to the secondary element. All this proves the successful ten-year commercial operation experience of magnetically suspended train carrying passengers from an airport to Shanghai, P.R. China.

The values of traction and lateral stabilisation forces of linear induction motor with longitudinal and transverse magnetic flux is greatly influenced by the character of current distribution in the secondary element. The character itself is influenced by MF distribution in the air gap.

Combined traction and lateral stabilisation system, lateral stabilisation, linear induction motor (LIM), longitudinal-transverse magnetic flux, magnetomotive force (MF), secondary element (SE).

Introduction

Development of transport in the Russian Federation, which has a vast territory and a good geographic location, is of great strategic importance. Realisation of new transport routes, connecting West with East and North with South of this country, and creation of transport corridors in its territory, connecting European and Asian countries for transportation of goods and passengers, will enable solving many geopolitical and economic issues. To achieve this goal, it is necessary

not only to improve the existing transport modes, but also to create conceptually new, high-speed ones. Today's high-speed transport modes cannot respond to new challenges.

Magnetic levitation transport can have its own niche in creation of transport infrastructure of the number of countries, including Russia. The problems related to creation of maglev transport have been tackled by Russian scientists and engineers for over 10 years already. These scientists work at transport universities, in scientific and research organisations. The development of this mode of transport is paid much attention to in JSC "RZD", which supports researches aimed at studying various aspects of this problem, including by means of financial help. And the results of these studies are described in detail in various serious publications [1–8]. The best-known research results are those obtained by Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University scientists [1–7].

To practically implement high-speed maglev transport systems, it is necessary to solve a number of scientific and technical problems, with the traffic safety being one of them. Magnetically suspended trains traffic safety is a crucial problem comprising a large number of aspects. One of them is improvement of dynamic properties of maglev transport by means of ensuring its transverse stabilisation relatively to the guideway. Rostov State Transport University (RGUPS) has developed a linear induction motor (LIM) with longitudinal and transverse magnetic flux. Apart from traction forces, LIM with longitudinal and transverse magnetic flux (LTMF) is capable of achieving lateral stabilisation forces [9]. Transverse stabilisation forces automatically emerge themselves when lateral displacement of the vehicle takes place, suspended in the magnetic field, without any extra devices and location sensors. LIM with LTMF functions on the basis of magnetic fields flowing towards each other. A number of results of researches of LIM with LTMF at RGUPS has been published in [10, 11]. The motion and transverse dynamics of maglev transport is very topical which is indicated by researches being carried out at the Russian University of Transport (MIIT) [12].

Construction schemes and peculiarities of combined traction and lateral stabilisation system performance

One of the constructions making it possible to create traction and lateral stabilisation forces for maglev transport, is described in the [13]. The increase of traction force in combined traction and lateral stabilisation system is ensured by LIM with LTMF [14].

LIM with LTMF [14] has toothless (smooth) active zones in its motion direction that helps increase sinusoidal distribution of magnetic flux in the air gap and the traction force value of LIM.

To improve magnetic field distribution transversely to the motion direction, the LIM with inductor has been developed (fig. 1), the magnetic system of

which is arranged by transversely placed cores 1, bearing winding coils 2. Transversely laminated cores are connected by longitudinally laminated cores 3. The longitudinally laminated cores are made up by two slant cores, the limbs of which are inserted into grooves of transverse cores. On the longitudinal cores, the winding coils are placed 4. Polyphase winding is divided into two parts, with one of them placed on the transverse cores and the other on the longitudinal ones. The secondary element is composite.

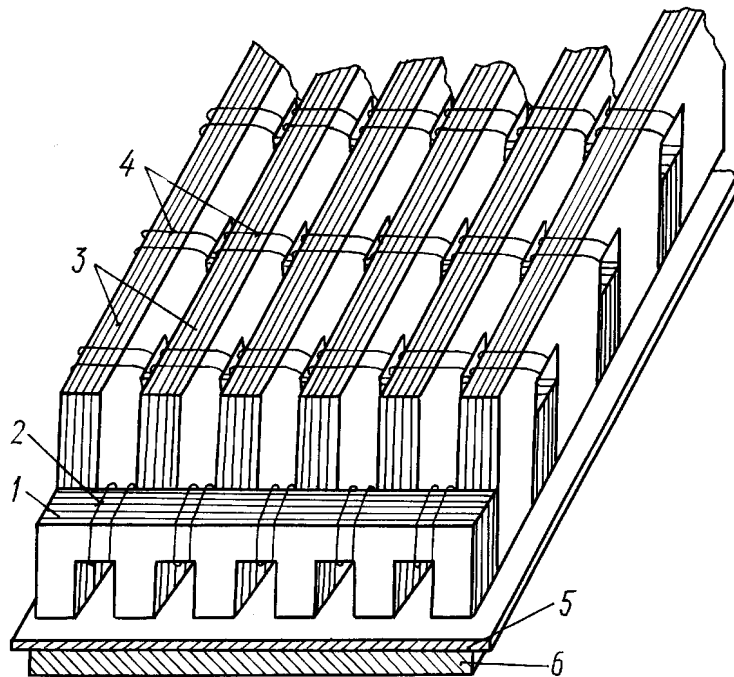


Fig. 1. Linear induction motor with longitudinal and transverse magnetic flux:
 1 – transversely laminated core; 2, 4 – winding; 3 – longitudinally laminated core;
 5 – electroconductive bus; 6 – ferromagnetic base

The electroconductive part 5 of the secondary element is laid over the reverse magnetic conductor 6. Toothless inductor structure of this LIM with LTMF ensures equal transverse distribution of magnetic flux in the air gap, thus making it possible to enhance lateral stabilisation forces.

The working principle of LIM, the schemes of which can be seen in the fig. 1, 2, are the same with the magnetic fields flowing towards each other.

New construction of LIM with LTMF [16] for combined traction and lateral stabilisation systems enables increasing lateral stabilisation forces owing to the fact that during vehicle lateral displacement, a part of the inductor is placed above the short-circuited winding which is placed on both sides of the guideway. In this case, transverse magnetic fluxes interact with core currents and not with whirling fluxes in the bus. As a result, transverse stabilisation forces grow, and the lateral dynamics of maglev transport improves too.

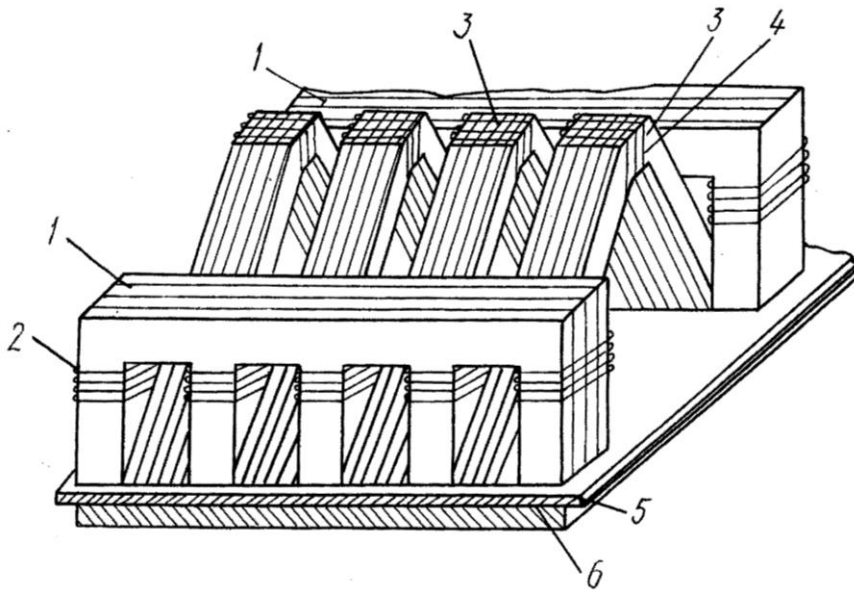


Fig. 2. Linear induction motor with longitudinal and transverse magnetic flux:
 1 – transversely laminated core; 2, 4 – winding; 3 – longitudinally laminated core;
 5 – electroconductive strip; 6 – ferromagnetic base

LIMs with LTMF enable realising high speeds even at industrial electric power supply. Therefore, one of the most promising fields of these motors' application is high-speed maglev transport running at speeds 350–500 km/h. LIM with LTMF are not sophisticated, but are highly reliable. In this respect, the topical task is to develop their theoretical base and calculation methods.

Mathematical modelling of magnetomotive force distribution of LIM with LTFM

For electromagnetic calculation of LIM and determination of its integral properties, it is obligatory to develop machine mathematical models, considering machine magnetomotive force (MF) distribution in the air gap and in the conductive part of the secondary element. Linear induction motors with longitudinal and transverse short-circuited magnetic flux have open magnetic system, and there are longitudinal and transverse end effects occurring during their performance, which strongly influence LIM traction properties. Therefore, it is important to consider end effects during operation. In order to take into account the influence of longitudinal and transverse end effects, a linear induction motor is represented in the form of two calculation models, which display magnetomotive forces distribution in two mutually perpendicular directions. This method of analysis of the MF for the linear induction motor with a longitudinal and transverse magnetic flux has been used at RGUPS. We use this approach to determine the magnetomotive force in the LIM, the designs of which are intended for use on a promising high-speed magnetic levitation transport.

The calculation model of LIM in the longitudinal direction is shown in the fig. 3 in the form of linear motors' inductors alternating with each other. The intervals between the inductors are the longitudinal end effect zones. The zone can be taken as $L_{\kappa \max} \cong 2\tau$. It is seen from the fig. 3 that in the longitudinal direction the MF changes evenly (sinusoidally) with the period l . We suppose that in the longitudinal end effect zones equals zero.

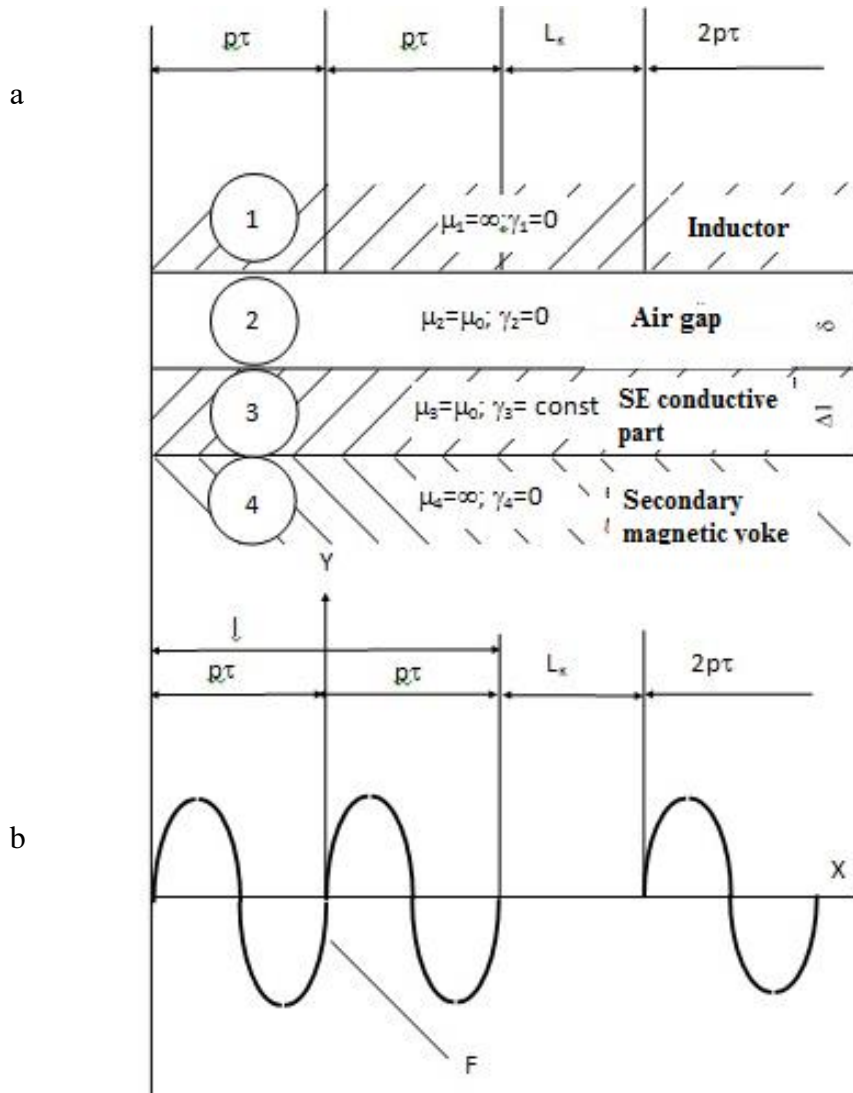


Fig. 3. Calculation model and MF longitudinal distribution of LIM:

- a) machine basic zones: 1 – inductor; 2 – air gap; 3 – electromotive part of the SE;
4 – reverse magnetic yoke; b) longitudinal distribution of MF

Let us analyse the model of linear induction motor in the transverse direction (fig. 4). The scheme of MF transverse distribution indicates that the machine is formed by 6 similar linear motors, which function in unison. Therefore, it is sufficient to calculate only one LIM and the results obtained can be multiplied by 6.

Let us analyse LIM with LTMF, having the structure shown in the fig. 1.

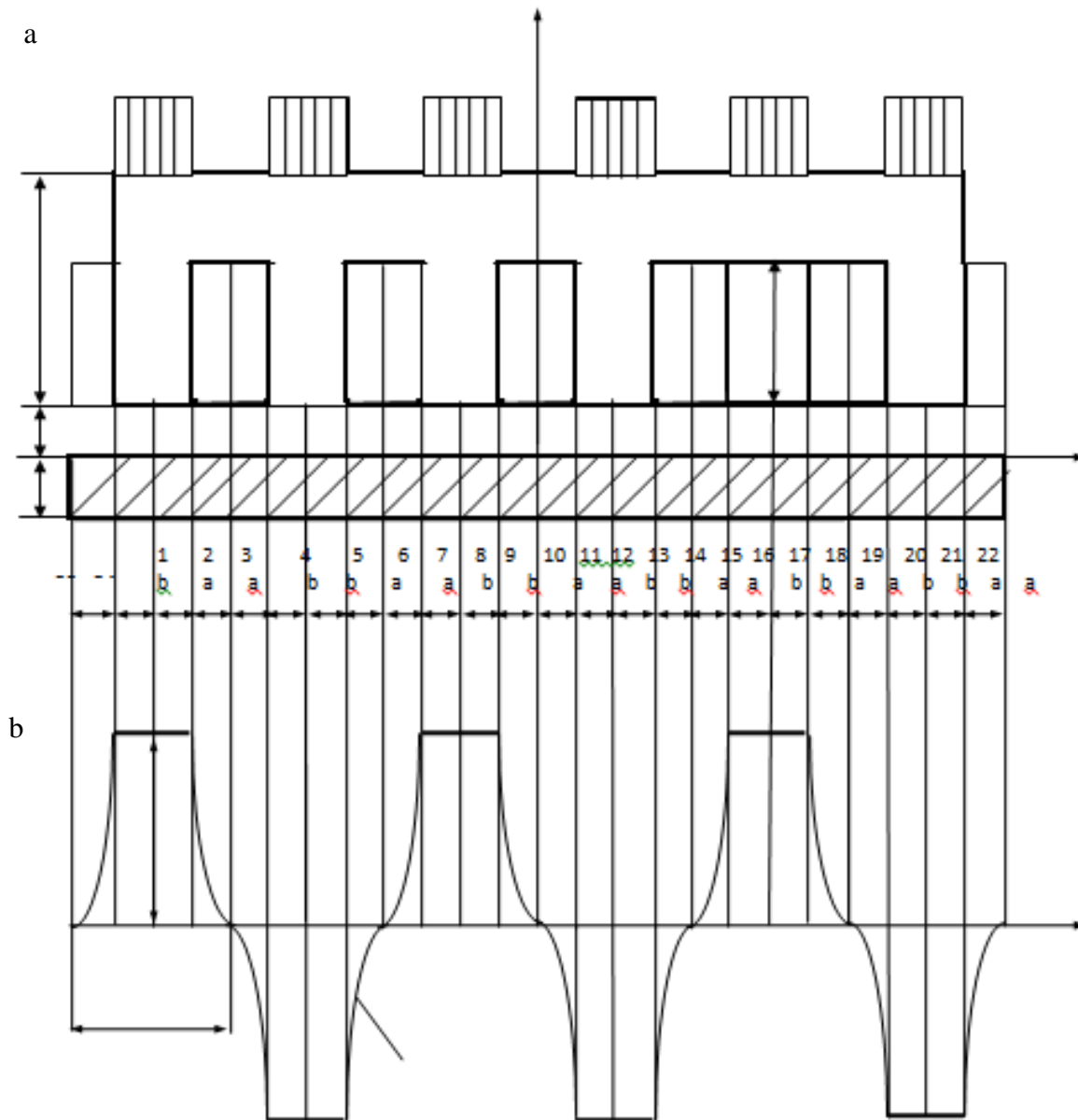


Fig. 4. Calculation model and transverse distribution of MF of linear induction motor with transverse and longitudinal flux: a) cross section of LIM; b) MF distribution

For analysis of MF distribution, LIM is divided into zones 1–24. Let us make use of the number of assumptions allowing us to obtain analytical solution of the task. We suppose that:

- magnetic permeability of the yoke is infinite;
- yoke electric conductivity is equals zero;
- inductor current is focused on infinitely thin layer on the surface of teeth facing the SE;

- inductor current generates sinusoidal running wave of MF in the direction of the x axis;
- current density constituents on the y axis in the SE equal zero.

For this construction of LIM with LTMF in accordance with calculation models (fig. 3, 4), taking into account the taken assumptions, MF values have been obtained for all transverse zones analysed.

In accordance with the assumptions taken and the calculation models (fig. 3, 4), and a number of transformations for LIM with LTMF, it has been stated that MF of this motor is a periodic function with the period $T_x = l$ on the x axis and with the period $T_z = 2L$ on the z axis which is set as follows:

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

where $F_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} q \cdot m \cdot w_c \cdot I_{\phi} \cdot k_{o\delta 1}$;

q – number of grooves per pole and phase;

w_c – number of windings in the coil;

m – number of phases;

I_{ϕ} – inductor phase current;

$k_{o\delta 1}$ – winding coefficient for current fundamental harmonic;

τ – pole division of in the inductor;

a, b – transverse sizes of the core.

Considering the construction of the inductor of LIM with LTMF, after a number of transformations, we will represent as double Fourier series

$$F(x, z, t) = \frac{8\tau F_m}{\pi^2 l} \sum_n \sum_v n_{\pi} \cos(\pi n \frac{z}{L}) v_{\kappa} e^{j(\omega t + 2\pi v \frac{x}{l})},$$

where n – integer, positive, odd number – order of the harmonic constituent of MF on the z axis, where the period of fundamental harmonic is

$$2L = 4(a + b);$$

v – any integer number – order of the harmonic in the x axis;

n_{π} – coefficient considering MF distribution in the zone of coil end.

Coefficient considering MF distribution in the zone of coil end of traction LIM with LTMF is determined as follows

$$n_{\pi} = \frac{1}{n \left[1 - \left(2n \frac{b}{l} \right)^2 \right]} \left[\sin \frac{\pi n (a + b)}{L} - 2n \frac{b}{L} \cos \left(\pi n \frac{a}{L} \right) \right];$$

$$v_{\kappa} = \frac{\sin pn \left(1 + v \frac{2\tau}{l} \right)}{1 + v \frac{2\tau}{l}},$$

where v_{κ} – coefficient considering the number of poles of LIM.

The received idea of magnetomotive forces of LIM with a longitudinal and transverse magnetic flux in the form of double Fourier series is valid for machines with any number of poles. The proposed approach to determine the distribution of the magnetomotive force makes it possible to combine the real models of linear induction motors with a longitudinal and transverse magnetic flux with the complex structure of the magnetic inductor systems to the calculated mathematical ones that make it possible to calculate the magnetic field of the LIM.

Conclusion

A range of constructions of linear induction motors with longitudinal and transverse magnetic flux has been analysed, in terms of their relevance for application for future maglev transport as a combined traction and lateral stabilisation system.

The method has been suggested to analytically determine magnetomotive force, making it possible to analyse its distribution in the air gap at any construction of LIM inductor with longitudinal and transverse magnetic flux for maglev transport.

The mathematical models for new constructions of inductors of LIM with LTMF, which enables finding MF distribution in the air gap between inductor and the secondary element, and determine interconnections between parameters and sizes of linear machines and MF value, which will increase the accuracy of calculations during the design of motors for maglev transport.

References

1. Antonov Yu.F., Zaitsev A.A. et al. Magnetic Levitation Transport Technology [Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya]. Monogr. Ed. V.A. Gapanovich. Moscow, 2014. 476 p.
2. Zaitsev A.A., Talashkin G.N., Sokolova Ya.V. Magnetically Suspended Transport [Transport na magnitnom podvese]. Monogr. St. Petersburg, 2010. 160 p.
3. Antonov Yu.F., Zaitsev A.A. Magnetic Levitation Transport: Scientific Problems and Technical Solutions [Magnitolevitatsionnyi transport: nauchnyye problem i tekhnicheskiye resheniya]. Moscow, 2015. 612 p.
4. Zaitsev A.A., Morozova E.I., Talashkin G.N., Sokolova Ya.V. Magnetic Levitation Transport in the Whole Transport System of the Country [Magnitolevitatsionnyi transport v edinoi transportnoi sisteme strany]. St. Petersburg, 2015. 140 p.
5. Zaitsev A.A. *Railway Transport*, 2016, no. 12, pp. 62–65.
6. Zaitsev A.A. *Railway Transport*, 2014, no. 5, pp. 69–73.
7. Antonov Yu.F., Zaitsev A.A., Morozova E.I., *Proc. Petersburg State Transp. Univ.* 2014, is. 4 (41), pp. 5–15.
8. Lapidus B.M., Lapidus L.V. Railway Transport: the Philosophy of Tomorrow [Zheleznodorozhnyi transport: filosofiya budushchego]. Moscow, 2015. 232 p.
9. Solomin A.V. *Proc. Rostov State Transp. Univ.*, 2004, no. 4, pp. 41–44.
10. Solomin V.A. Solomin A.V., Zamshina L.L. *Proc. Rostov State Transp. Univ.*, 2009, no. 2, pp. 120–123.
11. Solomin V.A. Solomin A.V., Zamshina L.L., Bykadorov A.L. *Proc. Rostov State Transp. Univ.*, 2012, no. 1, pp. 71–74.
12. Pashkov N.N. *Transp. Syst. Technol.*, 2015, vol. 1 (1), pp. 59–69. Available at: <http://www.transssyst.ru/razdel-2-3-pashkov.html> (accessed 27.05.2017).
13. Solomin V.A., Noskov V.N., Pustovetov M.Yu., Flegontov N.S. Lateral Self-Stabilisation System of High-Speed Maglev Transport [Sistema bokovoi samostabilizatsyi vysokoskorostnogo ekipazha s magnitnoi levitatsyiei]. *Magnetic Levitation Transp. Syst. and Technol. MTST`13. Proc. 1st Int. Sci. Conf.*, St. Petersburg, 29–31 Oct. 2013. Ed. Yu.F. Antonova. St. Petersburg, 2013, pp. 66–67.
14. A.c. USSR № 868942, IPC 41/04. 1981.
15. A.c. USSR № 801198, IPC 41/04. 1981.
16. Patent RU № 2518915, IPC H 02 K 41/025. 2014.

Information about the author:

Andrey V. SOLOMIN, Ph. D., Cand. Sci. (Eng.) Associate Prof.
 E-mail: vag@kaf.rgups.ru
 Rostov State University of Railway Transport