

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ  
Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК [UDC] 621.313.333  
<https://doi.org/10.17816/transsyst625012>

© В.А. Соломин, А.В. Соломин, А.А. Чехова, М.Ю. Дунаев  
Ростовский государственный университет путей сообщения  
(Ростов-на-Дону, Россия)

## К ВОПРОСУ РЕГУЛИРОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Обоснование.** Разработка и исследование линейных асинхронных тяговых приводов для магнитолевитационного транспорта является достаточно актуальной задачей. Линейные асинхронные двигатели могут найти применение в качестве основных тяговых машин для перспективного транспорта и дополнительных для традиционного подвижного состава.

**Цель.** Исследование особенностей регулирования тягового линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента.

**Материалы и методы.** Аналитическим путем установлены соотношения для расчета сопротивлений короткозамкнутой обмотки вторичного элемента и пусковых тяговых усилий регулируемого линейного асинхронного двигателя.

**Результаты.** Полученные соотношения позволили произвести расчеты пусковых сопротивлений короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента и тяговых усилий двигателя.

**Заключение.** Результаты исследования регулирования сопротивления короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента и пусковых тяговых усилий линейного асинхронного двигателя позволяют обоснованно выбрать рациональные режимы включения двигателя.

**Ключевые слова:** магнитолевитационный транспорт; регулируемый линейный асинхронный двигатель; короткозамкнутая обмотка вторичного элемента; пусковые режимы.

### Как цитировать:

Соломин В.А., Соломин А.В., Чехова А.А., Дунаев М.Ю. К вопросу регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента линейного асинхронного двигателя // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 93–109. <https://doi.org/10.17816/transsyst625012>

## Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

© V.A. Solomin, A.V. Solomin, A.A. Chekhov, M.Yu. Dunaev

Rostov State Transport University

(Rostov-on-Don, Russia)

**ISSUE OF REGULATING THE RESISTANCE OF THE SHORT-CIRCUITED WINDING OF THE SECONDARY ELEMENT OF A LINEAR INDUCTION MOTOR**

**Background.** The development and research of linear induction traction drives for magnetic-levitation transport is an urgent task. Linear induction motors can be used as the main traction machines for advanced transport and as additional traction machines for traditional rolling stock.

**Aim.** This study aims to research on the features of regulation of a traction linear induction motor with variable resistance by short-circuited winding of the secondary element.

**Materials and methods.** The ratios for calculating the resistances of the short-circuited winding of the secondary and starting traction forces of an adjustable linear induction motor are analytically established.

**Results.** The obtained ratios made it possible to calculate the starting resistances of the short-circuited winding of the secondary element and the traction forces of the engine.

**Conclusion.** This study of the regulation of the resistance of the short-circuited winding of the secondary element and the starting traction forces of a linear induction motor provides guidance on choosing rational modes of switching on the motor.

**Keywords:** magnetic-levitation transport, adjustable linear asynchronous motor, short-circuited winding of the secondary element, starting modes.

**To cite this article:**

Solomin VA, Solomin AV, Chekhova AA, Dunaev MYu. Issue of regulating the resistance of the short-circuited winding of the secondary element of a linear induction motor. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(1):93–109. <https://doi.org/10.17816/transsyst625012>

## ВВЕДЕНИЕ

Высокоскоростной магнитнолевитационный транспорт (МЛТ) является новым и важным этапом эволюции транспортной системы во всем мире. Достижения науки, современные материалы и технологии сделали возможным создание принципиально новых высокоскоростных и комфортабельных видов транспорта, сочетающих высокие скорости перевозки пассажиров и грузов с высокой степенью безопасности движения. Магнитнолевитационный транспорт решает и ряд важных для общества экологических проблем. Значительных успехов в разработке МЛТ достигли российские инженеры и ученые [1–7]. Важным элементом магнитнолевитационного транспорта является линейный тяговый электрический привод. Одним из самых простых и экономичных вариантов является использование для тяги МЛТ привода на основе линейного асинхронного двигателя (ЛАД). Использование линейных асинхронных двигателей в качестве основного элемента тяговой системы МЛТ обеспечивает возможность эффективного электрического торможения транспортного средства. В настоящее время созданы конструкции ЛАД с изменяемым сопротивлением короткозамкнутых обмоток их вторичных элементов (ВЭ), обладающие характеристиками, сходными с асинхронными машинами с фазными обмотками роторов [8].

Представленная статья посвящена рассмотрению особенностей регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ и пуска в ход тягового линейного асинхронного двигателя новой конструкции.

### О РЕГУЛИРОВАНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Регулируемые линейные асинхронные двигатели, у которых можно изменять сопротивление короткозамкнутой обмотки вторичного элемента, имеют хорошие перспективы для применения на высокоскоростном подвижном составе. Разработанные впервые в РГУПС, регулируемые ЛАД обладают всеми положительными свойствами асинхронных машин с фазными обмотками ВЭ, обладая при этом более простой конструкцией [8]. Короткозамкнутые обмотки регулируемых ЛАД образованы стержнями, состоящими из отдельных проводников, расположенных один над другим по высоте в каждом пазу. Стержни обмотки ВЭ закорочены с одной стороны общей электропроводящей шиной, а с другой – подвижным замыкающим

элементом. Подвижный элемент способен замыкать одинаковое количество проводников, образующих стержни вторичного элемента ЛАД. Сопротивление короткозамкнутой обмотки ВЭ может плавно изменяться от бесконечности (когда все стержни обмотки разомкнуты) до его номинального (минимального) значения при замыкании всех проводников во всех пазах сердечника ВЭ.

Основы теории, описывающей процессы, происходящие при таком регулировании тягового линейного асинхронного двигателя, изложены в [8]. Диапазон регулирования тягового линейного асинхронного двигателя может быть расширен за счет изменения конструкции подвижного замыкающего элемента, который способен закорачивать неодинаковое количество проводников в разных пазах ВЭ или замыкать одновременно не все стержни короткозамкнутой обмотки. При таком изменении положения замыкающего элемента на разных стадиях регулирования ЛАД обмотка его ВЭ содержит разное количество стержней, причем эти стержни могут иметь разное сопротивление.

Возникает задача определения закономерностей регулирования, при котором для любого варианта выполнения короткозамкнутой обмотки ВЭ будет достигаться максимум тягового усилия при минимальных значениях токов в обеих обмотках линейного асинхронного двигателя. Основной задачей при проектировании ЛАД является определение оптимальных значений чисел пазов ( $z_2$ ) ВЭ и количества, равномерно размещенных по длине вторичного элемента, пазов ( $n$ ), сопротивления стержней которых регулируются, при заданном числе пар полюсов ( $p$ ) тягового линейного асинхронного двигателя.

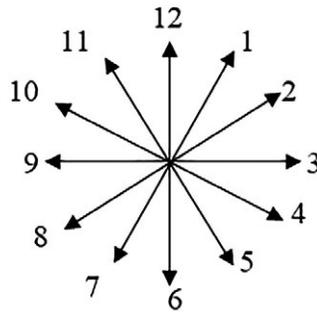
Механическое тяговое усилие, развиваемое ЛАД с короткозамкнутой обмоткой ВЭ, представляет собой сумму векторных произведений токов в стержнях и магнитной индукции в воздушном зазоре. При симметричном (равномерном) размещении стержней короткозамкнутой обмотки ВЭ векторная диаграмма электродвижущих сил (ЭДС) и токов будет представлять собой правильную звезду как на рис.1 [9].

Продемонстрируем наглядно, как будут распределяться токи в стержнях короткозамкнутой обмотки вторичного элемента представленного линейного асинхронного двигателя при  $z_2 = 12$ . Для этого используем векторную диаграмму (рис. 2).

Введены некоторые обозначения. Так, сопротивление обмотки ВЭ, где установлены стержни, параллельно друг другу, примем  $z_c$ , а сопротивление между этими стержнями, попарно соединенных между

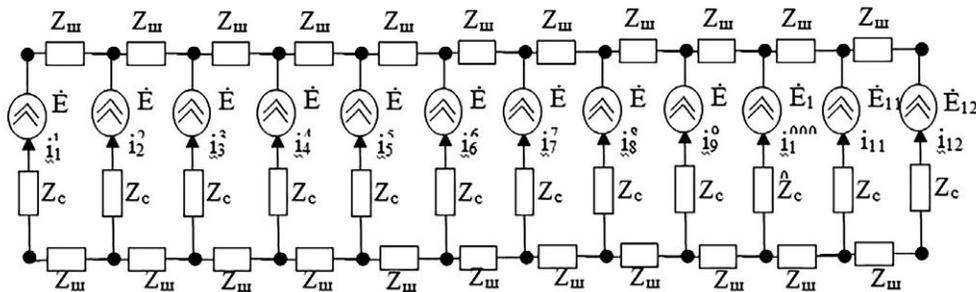
собой шиной –  $z_{\text{ш}}$ . Угол сдвига  $\alpha$  между векторами ЭДС и токов соседних

стержней обмотки составит  $\alpha = \frac{2\pi p}{z_2}$ .



**Рис. 1.** Векторная диаграмма ЭДС и токов стержней короткозамкнутой обмотки ВЭ

**Fig. 1.** Vector diagram of the EMF and currents of the short-circuited winding of the SE rods



**Рис. 2.** Электрическая схема замещения короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого ЛАД ( $z_2=12$ )

**Fig. 2.** Electrical equivalent circuit of a short-circuited winding of the secondary element of the adjustable LIM ( $z_2=12$ )

Для решения данной задачи будет необходимо спроецировать векторы токов стержней вторичного элемента ЛАД на вещественные и мнимые полуоси декартовой системы координат. Подставив значения активных сопротивлений, получим правильную токовую звезду, применяя метод контурных токов. Данное обстоятельство свидетельствует о максимальном пусковом усилии в начальный момент движения, что, несомненно, является преимуществом для высокоскоростного МЛТ. Спроецируем векторы токов полученной правильной звезды на оси декартовой системы координат. Достаточным будет определить проекции векторов токов только на одну вещественную ось и одну мнимую полуось.



будут сдвинуты на одинаковый угол  $\left(\frac{2\pi}{n}\right)$  относительно друг друга.

На этот же угол будут сдвинуты и соответствующие токи.

Рассмотрим проекцию каждого вектора звезды токов на полуось системы координат рис. 1. Предположим, что в самом общем случае сопротивления соседних стержней изменяются неодинаково. Возможен и такой способ управления ЛАД. В этом случае суммы проекций векторов токов могут отличаться от сумм проекций при симметричном регулировании. Если суммы проекций на оси координат при равномерном регулировании сопротивления стержней будут меньше, чем при неравномерном изменении активного сопротивления в соседних стержнях, то изменения количества стержней ВЭ ЛАД и корректировка значений их сопротивления не окажут влияния на корректную работу машины. При уменьшении количества стержней в обмотке вторичной части или же уменьшения значений сопротивления стержней короткозамкнутой обмотки могут возникать пульсации тягового механического усилия в линейном асинхронном двигателе. Чтобы избежать этого негативного эффекта при неравномерном регулировании сопротивления вторичной части, необходимо добиться плавной звезды, т.е. векторы, образующие звезду токов, должны распределялись по окружности, как можно плавнее и не налегать друг на друга. Кроме того, векторы ЭДС (рис. 2) также не должны накладываться друг на друга и быть попарно различными.

Установим условия, при которых выполняется отмеченное ограничение. Исследуем в каком случае  $\exp(j0) - \exp(j\alpha)$ ;  $\exp j\left(\frac{z_2}{n}\alpha\right) - \exp\left[j\left(\frac{z_2}{n} + 1\right)\alpha\right]$ ;  $\exp\left[j\frac{(n-1)z_2}{n}\alpha\right] - \exp\left[j\left(\frac{n-1}{n}z_2 + 1\right)\alpha\right]$  – суть попарно различные числа.

Из математики известно, что числа  $\left\{e^{2\pi j \frac{pm}{n}}\right\}_{m=0}^{n-1}$  попарно различны

тогда и только тогда, когда  $\exp\left(2\pi j \frac{p}{n}\right)$  является первообразным корнем

из единицы [10]. В свою очередь для выполнения этого условия необходимо и достаточно, чтобы были и взаимно просты  $((p, n) = 1)$ .

Рассмотрим разности экспонент при условии  $((p, n) = 1)$ .

$$\Delta_1 = \exp\left(2\pi j \frac{pm}{n}\right) - \exp\left(\left(2\pi \frac{pm}{n} + \alpha\right)j\right);$$

$$\Delta_1 = \exp\left(2\pi j \frac{pl}{n}\right) - \exp\left(\left(2\pi \frac{pl}{n} + \alpha\right)j\right); \quad (3)$$

для любых значений  $l, m \in N$ , расположены на отрезке  $[0, n-1]$ .

Докажем, что  $\Delta_1 \neq \Delta_2$ , если  $l \neq m$ . Действительно, равенство  $\Delta_1 = \Delta_2$  эквивалентно системе двух равенств

$$\begin{cases} R_e \Delta_1 = R_e \Delta_2; \\ I_m \Delta_1 = I_m \Delta_2. \end{cases} \quad (4)$$

Разложим первое равенство из выражения (4) на следующий вид

$$\cos\left(2\pi \frac{pm}{n}\right) - \cos\left(2\pi \frac{pm}{n} + \alpha\right) = \cos\left(2\pi \frac{pl}{n}\right) - \cos\left(2\pi \frac{pl}{n} + \alpha\right). \quad (5)$$

Применив тригонометрическую формулу разности косинусов,  $\cos x - \cos y = -2 \sin \frac{x-y}{2} \sin \frac{x+y}{2}$ , преобразуем равенство (5) в следующий

$$\text{вид } \sin\left(\frac{2\pi pm}{n} + \frac{\alpha}{2}\right) = \sin\left(\frac{2\pi pl}{n} + \frac{\alpha}{2}\right).$$

Используя тригонометрическую формулу разности синусов, равенство (5) будет эквивалентно

$$\sin\left(\frac{\pi p(m-1)}{n}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi p(m+1)}{n} + \frac{\alpha}{2}\right) = 0. \quad (6)$$

Так как  $m \neq l$ ,  $0 \leq m$ ,  $l \leq n-1$ ,  $(p, n)=1$ , то  $\sin \frac{\pi p(m-1)}{n} \neq 0$ .

Следовательно, выполнение данного равенства (6) возможно лишь при условии

$$\frac{\pi p(m+l)}{n} + \frac{\alpha}{2} = \pm \frac{\pi}{2} + \pi k, \quad (7)$$

где  $k = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$

Исследуем теперь равенство  $I_m \Delta_1 = I_m \Delta_2$ , представив его в виде

$$\sin \frac{2\pi p m}{n} - \sin \left( \frac{2\pi p m}{n} + \alpha \right) = \sin \frac{2\pi p l}{n} - \sin \left( \frac{2\pi p l}{n} + \alpha \right). \quad (8)$$

Используем формулу разности синусов

$$\sin x - \sin y = 2 \sin \frac{x-y}{2} \cos \frac{x+y}{2}. \text{ и получим равенство}$$

$$\cos \left( \frac{2\pi p m}{n} + \frac{\alpha}{2} \right) = \cos \left( \frac{2\pi p l}{n} + \frac{\alpha}{2} \right). \quad (9)$$

Учитывая, что  $m \neq l$ , опираясь на выражение (5), получим

$$\sin \left( \frac{\pi p (m+l)}{n} + \frac{\alpha}{2} \right) = 0. \quad (10)$$

Данное равенство возможно (8), лишь при условии

$$\frac{\pi p (m+l)}{n} + \frac{\alpha}{2} = \pi k, \quad (11)$$

где  $k = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$

При этом нарушается справедливость равенств (7) и (11), их данные противоречат друг другу.

Для выполнения данного неравенства  $\Delta_1 \neq \Delta_2$ , следует соблюсти условия  $(p, n) = 1$ . В рассмотренном общем случае возможно значительное снижение пульсаций тягового усилия при пуске в ход и в процессе регулирования скорости ЛАД. Если же имеется возможность симметричного регулирования сопротивления стержней обмотки вторичного элемента линейного асинхронного двигателя, то ее надо использовать для полного исключения пульсаций тягового усилия.

Иными словами, при симметричном регулировании сопротивлений стержней обмотки вторичного элемента ЛАД достигается возможность получения максимального пускового усилия и отсутствия его пульсаций при трогании с места высокоскоростного магнитнолевитационного поезда.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА РЕГУЛИРУЕМОГО ТЯГОВОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПУСКОВОМ РЕЖИМЕ

Одним из недостатков линейных асинхронных двигателей с короткозамкнутыми обмотками вторичных элементов является относительно низкое пусковое усилие. Низкое пусковое усилие замедляет процесс трогания высокоскоростного экипажа МЛТ с места. В РГУПС создан ряд новых конструкций линейных асинхронных двигателей с регулированием величины сопротивлений короткозамкнутых обмоток вторичных элементов [8]. Важным преимуществом тяговых линейных асинхронных двигателей с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента является регулирование скорости движения в широком диапазоне, увеличено пусковое усилие машины в момент начала движения, при этом значения силы тока снижены. Так как асинхронный двигатель, разработанный в РГУПС, по своим параметрам и положительным характеристикам схож с фазным асинхронным двигателем, то для дальнейшего его исследования рассмотрим теорию асинхронной машины с фазной обмоткой ротора.

Поставлена задача определения оптимальной величины сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД, при котором обеспечивается максимум пускового усилия при минимуме токов в обеих обмотках линейного двигателя. В этом случае будут уменьшены потери мощности при трогании высокоскоростного экипажа МЛТ с места. В теории асинхронных двигателей с фазным ротором пусковое сопротивление цепи ротора, при котором момент будет максимальным  $r_2'(M_{n\max})$ , определяется при приравнивании к единице выражения, определяющего скольжение, соответствующее максимальному моменту. В данном случае имеем почти полную аналогию с регулируемым ЛАД. Решение поставленной задачи сводится к определению сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого тягового ЛАД  $r_2'(F_{n\max})$ , соответствующего максимальному значению пускового усилия при трогании с места высокоскоростного экипажа магнитолевитационного транспорта. Используя теорию асинхронной машины с фазным ротором, дадим определение зависимости  $r_2'(F_{n\max})$  и далее продифференцируем зависимость  $F_n = f(r_2')$ .

Скольжение вторичного элемента относительно индуктора ЛАД при максимальном тяговом усилии при пуске в ход определяется соотношением

$$S_m = \frac{r_2'}{x_k}, \quad (12)$$

где  $r_2'$  – приведенное сопротивление короткозамкнутой обмотки ВЭ;  $x_k$  – сопротивление короткого замыкания ЛАД.

Полагая  $S_m = 1$ , получаем что  $r_2' = x_k$ .

Для расчета тягового усилия регулируемого ЛАД в режиме пуска определим значение тока во вторичном элементе.

Приведенный пусковой ток  $I_{2n}'$  в короткозамкнутой обмотке ВЭ определяется соотношением

$$I_{2n}' = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + (x_{no} + k_x x_{ne})^2}} + \frac{1240\delta \cdot a_1 \cdot x_{ne} (x_{no} + k_x x_{ne})}{N [r_k^2 + (x_{no} + k_x x_{ne})^2]}, \quad (13)$$

где  $\delta$  – воздушный зазор;  $U_1$  – фазное напряжение индуктора;  $a_1$  – число пар параллельных ветвей обмотки индуктора;  $N$  – число пар эффективных проводников в пазу индуктора;  $x_{no}$  – индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, не зависящее от насыщения;  $x_{ne}$  – индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения;  $k_x$  – коэффициент индуктивного сопротивления рассеяния, зависящего от насыщения (при открытых и полузакрытых пазах вторичного элемента  $k_x = 0,0825$ ).

После ряда преобразований получено алгебраическое уравнение 8-й степени, корни которого не выражаются в радикалах [10]

$$\begin{aligned} r_k^8 \cdot \frac{1}{4r_1} + r_k^7 + r_k^6 \left( r_1 - \frac{4C}{r_1} \right) + r_k^5 (7C - X^2) + r_k^4 \left( 2r_1 X^2 - \frac{X^4}{2r_1} - 2C \cdot r_1 - \frac{4C \cdot X^2}{r_1} \right) + \\ + r_k^3 (X^4 + 8C \cdot X^2) + r_k^2 (r_1 X^4 + C^2 r_1 - 2C \cdot r_1 X^2) + r_k (X^6 + C \cdot X^4) + \frac{X^3}{4r_1} = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $C = \frac{1537600\delta^2 \cdot a_1 \cdot x_{ne} \cdot X^2}{N^2 \cdot U_1^2}$ ;  $X = x_{no} + k_x x_{ne}$ .

Общий вид решения уравнения (14) в математике отсутствует, для упрощения задачи, второй член уравнения (13) приравняем к нулю.

Полученное соотношение, определяющее ток в обмотке вторичного элемента ЛАД в момент начала движения, имеет вид

$$I'_{2n} = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + (x_{no} + k_x x_{ne})^2}}. \quad (15)$$

Численным методом произведены расчеты пусковых токов во вторичных элементах ряда линейных асинхронных двигателей и сопоставлены полученные данные при учете и без учета второго слагаемого в формуле (13). Выполнена оценка полученной погрешности при обнулении второго слагаемого. Полученные результаты сведены в табл. 1. Средняя погрешность при не учете второго члена в (13) составляет 12%. Однако, пренебрежение вторым членом уравнения (13) значительно упрощает решение задачи и расчеты. Полученная погрешность вполне допустима при инженерных расчетах.

Кратность пускового тягового усилия ЛАД по отношению к номинальному по аналогии с [11] представлена в виде

$$\frac{F_{\Pi}}{F_H} = \frac{m_1 (I'_{2n})^2 r'_2 (1 - S_H)}{P_H}, \quad (16)$$

где  $S_H$  – скольжение в номинальном режиме.

Подставляя в (16) соотношение (15) и заменяя  $r'_2$  на  $r_k - r_1$ , получим

$$\frac{F_{\Pi}}{F_H} = \frac{m_1 (1 - S_H)}{P_H} \cdot \left( \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + (x_{no} + k_x x_{ne})^2}} \right)^2 \cdot (r_k - r_1). \quad (17)$$

Продифференцировав (17) по  $r_k$ , после ряда упрощений получим

$$\frac{d(F_{\Pi} / F_H)}{dr_k} = r_k - 2r_1 r_k - (x_{no} - k_x x_{ne}). \quad (18)$$

При учете, что правая часть равенства (18) будет равна нулю, единственным корнем уравнения будет

$$r_k = r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_{no} + k_x x_{ne})^2}. \quad (19)$$

Заменив  $r_k$  на  $r'_2$ , получим соотношение, позволяющее установить кратность увеличения сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого тягового ЛАД.

Сравним результаты расчетов, полученные путем вычисления из соотношений для регулируемых тяговых ЛАД, с результатами, выполненными на ЭВМ в табл. 1.

**Таблица 1.** Пусковые соотношения ЛАД с короткозамкнутым ВЭ

**Table 1.** Starting ratios of the LIM with short-circuited SE

Тип ЛАД, $P_n/V$ , кВт/(м/с)	Данные расчетов при учете второго члена в (3.13)		Данные расчетов без учета второго члена в (3.13)		Погрешность, %	
	$r'_{2п} / r'_{2н}$	$F_n / F_n$	$r'_{2п} / r'_{2н}$	$F_n / F_n$	$r'_{2п} / r'_{2н}$	$F_n / F_n$
4/50	6,41	3,12	5,49	3,11	19,9	0,31
7,5/75	13,15	3,23	11,02	3,21	16,2	0,74
40/50	7,70	4,97	6,69	4,95	13,1	0,40
45/75	23,20	3,25	19,55	3,22	11,7	0,95
250/50	27,01	2,38	25,20	2,37	6,7	0,59
440/100	29,10	3,22	27,52	3,21	5,4	0,12

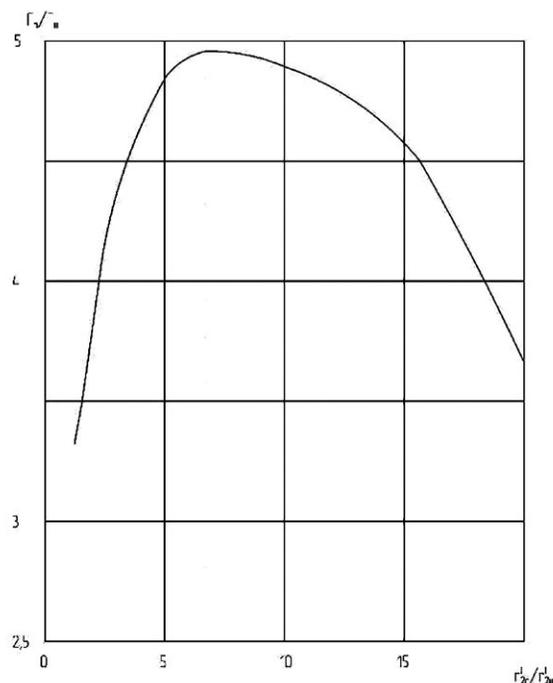
Зависимость  $F_n / F_n = f(r'_{2п} / r'_{2н})$ , рассчитанная для тягового ЛАД мощностью 45 кВт с номинальной скоростью 75 м/с, представлена графически на рис. 3.

На основании данных табл. 1 можно сделать заключение о том, что соотношение для определения пускового сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента, соответствующего максимальному значению пускового усилия ЛАД, не является точным, однако пусковое усилие при таком сопротивлении незначительно отличается от определенного точным численным методом максимального значения. Это объясняется тем, что на значительном участке функция  $F_n / F_n = f(r'_{2п} / r'_{2н})$  оказалась выпуклой (см. рис. 3) и имеет малую вариацию, т.е. при существенном изменении  $r'_2$  величина  $F_n$  меняется незначительно и происходит это как раз в окрестности точки экстремума (максимума) этой зависимости.

Изучив полученную характеристику, можно сделать вывод, что при изготовлении регулируемого линейного асинхронного двигателя, возможны некоторые технологические допущения, так, например,

при работе с подвижными замыкающими элементами для стержней короткозамкнутой обмотки вторичной части.

Предложенный в Уральском Федеральном университете (УрФУ-УПИ) метод расчета характеристик ЛАД на основе детализированных схем замещения [12], может быть применён для изучения тяговых линейных машин, созданных для транспорта на магнитном подвесе.



**Рис. 3.** Зависимость кратности пускового усилия регулируемого ЛАД от сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента

**Fig. 3.** Dependence of the multiplicity of the starting force of the adjustable LIM from the resistance of the short-circuited winding of the secondary element

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для общего случая, когда в регулируемом тяговом линейном асинхронном двигателе изменяют сопротивление не всех стержней короткозамкнутой обмотки вторичного элемента для получения максимального значения пускового механического усилия установлены критерии:

$$\begin{cases} \frac{z_2}{n} \in N; \\ (n, p) = 1. \end{cases}$$

2. Максимальное пусковое усилие регулируемого тягового ЛАД для высокоскоростных поездов достигается, если стержни короткозамкнутой обмотки вторичного элемента, сопротивление которых изменяется равномерно, расположены по длине линейного двигателя.
3. Более равномерное распределение векторов токов стержней короткозамкнутой обмотки вторичного элемента тягового ЛАД обеспечивается, если количество регулируемых стержней и число пар полюсов двигателя являются взаимно простыми числами.
4. Исследована зависимость пускового усилия регулируемого тягового линейного асинхронного двигателя от сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента. Установлено, что эта зависимость имеет максимум.
5. Соотношения, полученные для определения сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента являются достаточно точными для инженерных расчетов.
6. Доказана возможность наличия больших допусков при изготовлении вторичных элементов регулируемых тяговых ЛАД, т.к. при существенном изменении пускового сопротивления пусковое тяговое усилие (на определенном интервале) меняется незначительно (см. рис. 3).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Ростовского государственного университета путей сообщения.

### Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
2. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Талашкин Г.Н. Транспорт на магнитном подвесе. СПб.: ПГУПС, 2011.

3. Антонова Ю.Ф., Зайцева А.А. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015.
4. Зайцев А.А., Морозова Е.И., Талашкин Г.Н. и др. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны. СПб.: НП-Принт, 2015.
5. Зайцев А.А., Соколова Я.В. О современной стадии развития магнитолевитационного транспорта // Железнодорожный транспорт. 2016. № 12. С. 62–65. EDN: BYVZPT
6. Зайцев А.А. Магнитолевитационные транспортные системы и технологии // Железнодорожный транспорт. 2014. № 5. С. 69–73. EDN TDGFZB
7. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А., Морозова Е.И. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы // Известия ПГУПС. 2014. № 4 (41). С. 5–15. EDN: TDWZWN
8. Соломин А.В. Регулируемый линейный асинхронный двигатель // Электротехника. 2004. № 12. С. 31–34.
9. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.
10. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. М.: Наука, 1968.
11. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Л.: Энергия, Ч. 2, 1973.
12. Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Шымчак П. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТИ–УПИ, 2001.

## REFERENCES

1. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Moscow: FIZMATLIT; 2014. (In Russ.)
2. Zaitsev AA, Sokolova IaV, Talashkin GN. *Transport na magnitnom podvese*. 2nd ed. St. Petersburg: PGUPS; 2011. (In Russ.)
3. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnitolevitatsionnyj transport: nauchnye problemy i tekhnicheskie resheniya*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. (In Russ.)
4. Zaitsev AA, Morozova EI, Talashkin GN, Sokolova YaV. *Magnitolevitatsionnyi transport v edinoi transportnoi sisteme strany*. St. Petersburg: NP-Print; 2015. (In Russ.)
5. Zaitsev AA, Sokolova YaV. *O sovremennoi stadii razvitiya magnitolevitatsionnogo transporta*. *Railway transport*. 2016;12:62–65. (In Russ.) EDN: BYVZPT
6. Zaitsev AA. *Magnitolevitatsionnyye transportnyye sistemy i tekhnologii*. *Railway transport*. 2014;5:69–73. (In Russ.) EDN TDGFZB
7. Antonov JF, Zaitsev AA, Morozova EI. *Issledovanie magnitodinamicheskoi levitatsii i elektrodinamicheskogo tormozheniya gruzovoi transportnoi platformy*. *Proceedings of Petersburg state transport University*. 2014;4(41):5–15. (In Russ.) EDN: TDWZWN
8. Solomin AV. *Reguliruyemyy lineynyy asinkhronnyy dvigatel'*. *Electrical engineering*. 2004;12:31–34. (In Russ.)
9. Vol'dek AI. *Elektricheskiye mashiny*. Leningrad: Energiya; 1978. (In Russ.)

10. Kurosh AG. *Kurs vysshei algebry*. Moscow: Nayka; 1968. (In Russ.)
11. Kostenko MP, Piotrovskiy LM. *Elektricheskiye mashiny*. Leningrad: Energiya; 1973. (In Russ.)
12. Sarapulov FN, Sarapulov SF, Shymchak P. *Matematicheskie modeli lineinykh induktsionnykh mashin na osnove skhem zameshcheniya*. Ekaterinburg: GOU VPO UGTI–UPI; 2001. (In Russ.)

**Сведения об авторах:**

**Соломин Владимир Александрович**, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 6785-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;

E-mail: ema@rgups.ru

**Соломин Андрей Владимирович**, доктор технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;

E-mail: vag@kaf.rgups.ru

**Чехова Анастасия Алановна**, аспирант;

eLibrary SPIN: 8201-7660; ORCID: 0000-0002-3410-3687;

E-mail: ema@rgups.ru

**Дунаев Михаил Юрьевич**, аспирант;

eLibrary SPIN: 5923-9415; ORCID: 0009-0002-8747-4059;

E-mail: ema@rgups.ru

**Information about the authors:**

**Vladimir A. Solomin**, Doctor of Sciences in Engineering, Professor;

eLibrary SPIN: 6785-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;

E-mail: ema@rgups.ru

**Andrei V. Solomin**, Doctor of Sciences in Engineering, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;

E-mail: vag@kaf.rgups.ru

**Anastasia A. Chekhova**, Graduate;

eLibrary SPIN: 8201-7660; ORCID: 0000-0002-3410-3687;

E-mail: ema@rgups.ru

**Mikhail Yu. Dunaev**, Graduate;

eLibrary SPIN: 5923-9415; ORCID: 0009-0002-8747-4059;

E-mail: ema@rgups.ru