

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.313.333

DOI 10.17816/transsyst20217287-96

© В. А. Соломин, А. В. Соломин, А. А. Чехова

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

ПУСКОВЫЕ УСИЛИЯ ТЯГОВОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С РЕГУЛИРУЕМЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Обоснование: Разработка и исследование линейных тяговых приводов для магнитолевитационного транспорта является актуальной задачей. Линейные асинхронные двигатели могут использоваться в качестве тяговых машин для перспективного подвижного состава.

Цель: Исследование пусковых характеристик регулируемого тягового линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента.

Методы: Теоретическим путем получены соотношения для расчета тяговых пусковых усилий регулируемого линейного асинхронного двигателя с различными конструкциями короткозамкнутой обмотки вторичного элемента.

Результаты: На основании полученных соотношений выполнены расчеты пусковых тяговых усилий линейных асинхронных двигателей, предназначенных для использования на перспективных видах транспорта.

Заключение: Результаты расчета пусковых тяговых усилий регулируемых линейных асинхронных двигателей позволяют обоснованно выбирать режимы включения двигателя в зависимости от конструкции обмотки вторичного элемента.

Ключевые слова: магнитолевитационный транспорт, регулируемый линейный асинхронный двигатель, пусковые тяговые усилия, вытеснение тока в пазу.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© V. A. Solomin, A. V. Solomin, A. A. Chekhov

Rostov State Transport University
(Rostov-on-Don, Russia)

STARTING FORCES OF THE TRACTION LINEAR INDUCTION MOTOR WITH ADJUSTABLE RESISTANCE OF THE SHORT- CIRCUITED WINDING OF THE SECONDARY ELEMENT

Background: Development and research of linear traction drives for Maglev transport is an urgent task. Linear induction motors can be used as traction machines for advanced rolling stock.

Aim: Study of the starting characteristics of an adjustable traction linear induction motor with variable resistance by a short-circuited winding of the secondary element.

Methods: Theoretically, relations were obtained for calculating the traction starting forces of an adjustable linear induction motor with various designs of a short-circuited winding of the secondary element.

Results: Based on the obtained ratios, the calculations of the starting traction forces of linear induction motors intended for use in promising modes of transport were performed.

Conclusion: The results of calculating the starting traction forces of adjustable linear induction motors make it possible to reasonably select the modes of starting the motor depending on the design of the secondary winding.

Keywords: magneyc-levitation transport, adjustable linear induction motor, starting tractive forces, current extraction in the slot.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование транспортных коммуникаций имеет большое значение для развития современного общества. Свою заметную роль в этой области играют принципиально новые виды транспорта, способные перемещать на большие расстояния с высокими скоростями людей и различные грузы. Магнитолевитационный транспорт (МЛТ) развивает скорости бесконтактного с путевой структурой движения экипажей в диапазоне 350-500 км/ч. Скорости движения свыше 1000 км/ч могут быть достигнуты при использовании вакуумного магнитолевитационного транспорта (ВМЛТ). В качестве приводных электрических машин систем МЛТ и ВМЛТ используются линейные тяговые двигатели, преобразующие электроэнергию непосредственно в поступательное перемещение. Линейные тяговые двигатели для магнитолевитационного транспорта и ВМЛТ бывают синхронными и асинхронными. На нынешнем этапе развития техники и технологий многие инженеры и ученые полагают, что линейные асинхронные двигатели (ЛАД) имеют хорошие перспективы для МЛТ и ВМЛТ, так как системы торможения высокоскоростных поездов оказываются более эффективными. Одним из достоинств тяговых ЛАД является простота их включения (пуска в ход) по сравнению с линейными синхронными двигателями. Новый вид линейных асинхронных двигателей с регулируемыми сопротивлениями короткозамкнутых обмоток их вторичных элементов (ВЭ) обеспечивает повышение пусковых и регулировочных свойств, при применении их на высокоскоростных видах транспорта. Представленная работа посвящена рассмотрению особенностей пуска в ход тягового ЛАД с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента.

ПУСКОВЫЕ УСИЛИЯ ТЯГОВОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Пусковые характеристики асинхронных двигателей с короткозамкнутыми обмотками роторов достаточно подробно описаны в [1–3]. Тяговые и промышленные приводы с линейными асинхронными двигателями исследованы в [4–14], в которых изложены вопросы теории и расчета ЛАД, в том числе рассмотрены вопросы пуска в ход и регулирования скорости. Линейные асинхронные двигатели с изменяемыми сопротивлениями короткозамкнутых обмоток [10] позволяют регулировать пусковые тяговые усилия в широком диапазоне. Последнее обстоятельство делает данные электродвигатели предпочтительными для высокоскоростного транспорта.

Соотношения для расчета механических усилий, в том числе и пусковых асинхронных двигателей с короткозамкнутыми обмотками роторов приведены в [1–3]. На их основе после ряда преобразований получено выражение для расчета тягового усилия регулируемого ЛАД с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента

$$F_T = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{2\tau f [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2]}, \quad (1)$$

где m_1 – число фаз индуктора;

τ – полюсное деление ЛАД;

U_1 – фазное напряжение индуктора;

f – частота тока;

r_1 – активное сопротивление фазы обмотки индуктора;

x_1 – индуктивное сопротивление фазы обмотки индуктора;

r_2' – приведенное активное сопротивление вторичного элемента;

x_2' – приведенное индуктивное сопротивление обмотки вторичного элемента;

s – скольжение

Следует заметить, что (1) не учитывает влияние продольного краевого эффекта. Влияние продольного краевого эффекта при расчете рабочих и электромеханических характеристик регулируемого линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента может быть учтено отдельно.

В пусковом режиме (в первый момент) скорость движения равна нулю и скольжение $s=1$.

В момент пуска выражение (1) принимает вид

$$F_{\text{Тыск}} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2'}{2\tau f[(r_1' + r_2')^2 + (x_1' + x_2')^2]} \quad (2)$$

Сопротивление короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД изменяется при перемещении подвижного электропроводящего замыкающего элемента.

Рассмотрим два варианта конструкции стержня короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого линейного асинхронного двигателя (Рис. 1). Первый вариант – стержень обмотки ВЭ образован рядом изолированных проводников, расположенных один над другим по высоте паза (Рис. 1, а); второй – стержень выполнен сплошным (Рис. 1, б).

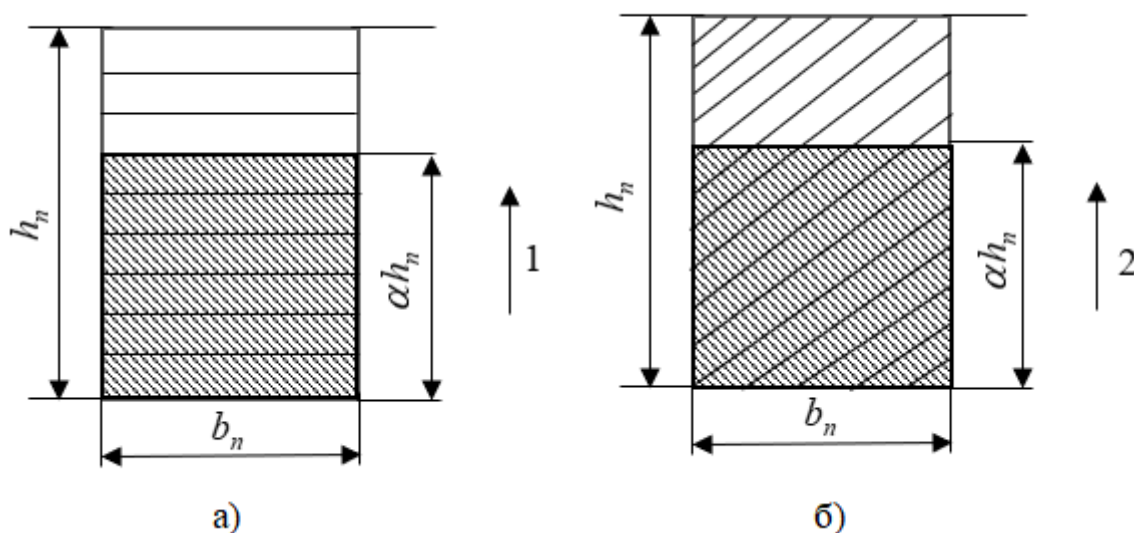


Рис. 1. Паз вторичного элемента регулируемого ЛАД. 1,2 – направление перемещения замыкающего элемента; h_n – высота паза; b_n – ширина паза; αh_n – площадь замкнутой части стержня обмотки вторичного элемента (заштрихована)

При определении пускового тягового усилия регулируемого ЛАД, у которого стержни короткозамкнутой обмотки вторичного элемента выполнены из отдельных изолированных проводников (Рис. 1, а) учет влияния вытеснения тока в пазу необязателен и расчет производится по формуле (2). В том случае, если стержни обмотки ВЭ выполнены сплошными (Рис. 1, б), то влияние вытеснения тока на величины параметров обмотки вторичного элемента учитывать необходимо. При учете влияния вытеснения тока в пазу обмотки ВЭ пусковое усилие определяется соотношением

$$F_{\text{Тыск}} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot \varphi(\xi) \cdot r_2'}{2\tau f[(r_1' + \varphi(\xi)r_2')^2 + (x_1' + \lambda(\xi)x_2')^2]} \quad (3)$$

где $\varphi(\xi)$ – коэффициент увеличения активного сопротивления обмотки вторичного элемента;

$\lambda(\xi)$ – коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления обмотки вторичного элемента.

РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ УСИЛИЙ ЛАД

Полагаем, что при пуске регулируемого линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента $U_1 = \text{const}$ и $f = \text{const}$. Введем обозначение

$$C = \frac{m_1 U_1}{2\tau f} = \text{const}. \quad (4)$$

Вводя коэффициент «C» в формулу (2), получим пусковое усилие для варианта (рис. 1, а)

$$F_{\text{пуск}} = \frac{C_1 \cdot r_2'}{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}. \quad (5)$$

Соотношение для расчета пускового тягового усилия регулируемого ЛАД при учете влияния вытеснения тока в пазу обмотки ВЭ для варианта (Рис. 1, б)

$$F_{\text{пуск}} = \frac{C \cdot \varphi(\xi) \cdot r_2'}{(r_1 + \varphi(\xi) \cdot r_2')^2 + (x_1 + \lambda(\xi) \cdot x_2')^2}. \quad (6)$$

Рассмотрим примеры расчета пускового тягового усилия регулируемого линейного асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента, имеющего следующие данные:

$$P_H = 13 \text{ кВт};$$

$$2p = 4;$$

$$f = 50 \text{ Гц};$$

$$U_1 = 220 \text{ В},$$

$$\tau = 0,1445 \text{ м};$$

$$l_\delta = 0,123 \text{ м};$$

$$r_1 = 0,36 \text{ Ом};$$

$$r_2 = 5,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}, \quad r_2' = 0,245 \text{ Ом};$$

$$x_1 = 0,955 \text{ Ом};$$

$$x_2 = 0,308 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \quad x_2' = 0,94 \text{ Ом}.$$

Определим коэффициент C (4)

$$C = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 50 \cdot 0,1445} = 10048,4.$$

Выполним расчет пусковых тяговых усилий регулируемого ЛАД без учета влияния вытеснения тока в пазу обмотки вторичного элемента (рис. 1, а) при варьировании значения « α » по (5). Для $\alpha = 1$

$$F_{\text{пуск1}} = \frac{10048,4 \cdot 0,245}{(0,36 + 0,245)^2 + (0,955 + 0,94)^2} = 622 \text{ Н.}$$

Результаты расчета для других значений « α » представлены в Табл. 1.

Таблица 1. Пусковые тяговые усилия ЛАД

α	1	0,8	0,6	0,4
$F_{\text{пуск}}, \text{ Н}$	622,0	914, 11	1414,9	2268,6

Определим значения пусковых тяговых усилий регулируемого линейного асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ВЭ с учетом вытеснения тока в пазу обмотки вторичного элемента (Рис. 1, б) при варьировании значения « α ». Значения коэффициентов увеличения активного $\varphi(\xi)$ и уменьшения индуктивного $\lambda(\xi)$ сопротивлений приняты на основании результатов, представленных в [15].

Расчеты выполнены по формуле (6). Пусковое тяговое усилие для регулируемого ЛАД при $\alpha = 1$

$$F_{\text{пуск1}} = \frac{10048,4 \cdot 4,7 \cdot 0,245}{(0,36 + 4,7 \cdot 0,245)^2 + (0,955 + 0,3 \cdot 0,94)^2} = 2954,7 \text{ Н.}$$

Таблица 2. Пусковые тяговые усилия ЛАД

α	1	0,8	0,6	0,4
$F_{\text{пуск}}, \text{ Н}$	2954,7	2971,2	2940,6	2898,3

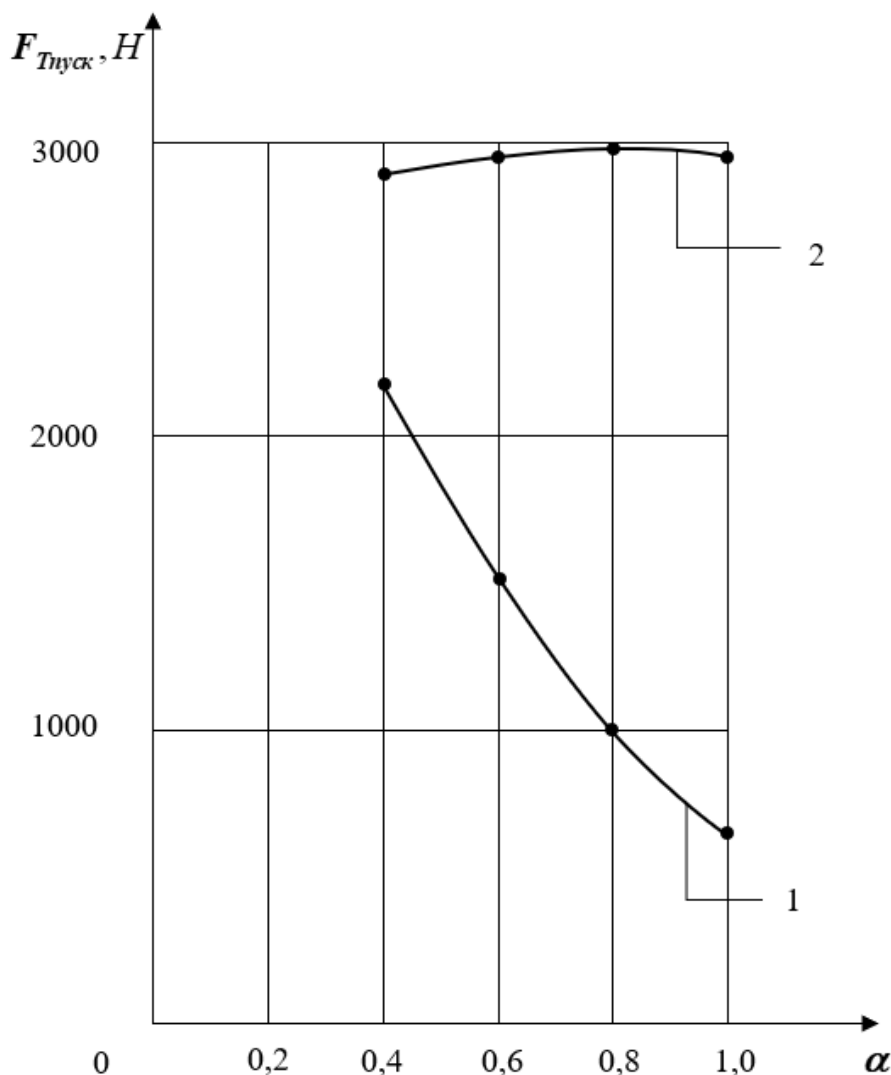


Рис. 2. Пусковые тяговые усилия регулируемого ЛАД без учета вытеснения тока (1) и с учетом вытеснения тока (2)

Результаты расчета (Табл. 1, 2) представлены графически на Рис. 2. Анализ результатов расчета пусковых тяговых усилий регулируемого линейного асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента показывает, что если стержни обмотки ВЭ образованы отдельными изолированными проводниками, расположенными один за другим по высоте паза (Рис. 1 а), то ЛАД во многом идентичен асинхронной машине с фазной обмоткой ротора. Для роста $F_{Тпуск}$ следует увеличивать значение сопротивления обмотки вторичного элемента, что подтверждается данными Табл. 1, кривой 1, показанной на Рис. 2. Плоское расположение изолированных проводников в пазу короткозамкнутой обмотки вторичного элемента (Рис. 1 а) практически не позволяет проявляться поверхностному эффекту и делает необязательным учет влияния вытеснения тока на параметры обмотки ВЭ.

Если стержни обмотки вторичного элемента регулируемого ЛАД выполнены сплошными (Рис. 1 б), то учет вытеснения тока в пазу ВЭ на параметры обмотки обязателен, что подтверждают данные расчета $F_{\text{пуск}}$, приведенные в Табл. 2. Анализ результатов расчета показал, что при такой конструкции обмотки вторичного элемента линейного асинхронного двигателя регулировка сопротивления в сторону увеличения, что происходит с ростом коэффициента « α » не дает значимого эффекта (Табл. 2, Рис. 2). Это означает, что в процессе пуска не нужно увеличивать сопротивление короткозамкнутой обмотки регулируемого ЛАД.

ВЫВОДЫ

1. Выполненные расчеты показали, что для увеличения пускового тягового усилия регулируемого линейного асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента стержни обмотки следует выполнять сплошными.
2. Степень замыкания (закорачивания) подвижным элементом стержня обмотки вторичного элемента регулируемого ЛАД практически не влияет на величину тягового пускового усилия.
3. Регулируемый ЛАД, стержни обмотки вторичного элемента которого образованы изолированными проводниками, по своим пусковым свойствам аналогичен асинхронному двигателю с фазным ротором.

Авторы заявляют что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ленинград: Энергия, ч. 2, 1973. [Kostenko MP, Piotrovskiy LM. *Elektricheskiye mashiny*. Leningrad: Energiya; 1973. (In Russ)]. Доступно по: <https://bookree.org/reader?file=652790>. Ссылка активна на: 27.01.2021.
2. Вольдек А.И. Электрические машины (монография). Ленинград: Энергия, 1978. [Vol'dek AI. *Elektricheskiye mashiny* (monografiya). Leningrad: Energiya; 1978. (In Russ)]. Доступно по: https://www.studmed.ru/view/voldek-ai-elektricheskiye-mashiny_2c65ef977a1.html. Ссылка активна на: 27.01.2021.
3. Винокуров В.А., Попов Д.А. Электрические машины железнодорожного транспорта. М.: Транспорт, 1986. [Vinokurov VA, Popov DA. *Elektricheskiye mashiny zheleznodorozhnogo transporta*. M.: Transport; 1986. (In Russ)]. Доступно по: https://www.studmed.ru/vinokurov-va-popov-da-elektricheskiye-mashiny-zheleznodorozhnogo-transporta_7d63ea3eaf8.html. Ссылка активна на: 27.01.2021.
4. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. М.: Энергоатомиздат, 1991. [Veselovskiy ON, Konyayev AYU,

- Sarapulov FN. *Lineynyye asinkhronnyye dvigateli*. M.: Energoatomizdat; 1991. (In Russ)]. Ссылка активна на: 28.01.2021. Доступно по: <http://nauchkniga.com/nk/index.php?action=bookInfo&id=69266>.
5. Сарапулов Ф.Н., Бегалов В.А., Иваницкий С.В. Исследование короткозамкнутого линейного асинхронного двигателя с разомкнутым магнитопроводом // *Электричество*. – 1982. – № 5. – С. 30–34. [Sarapulov FN, Begalov VA, Ivanitskiy SV. Issledovaniye korotkozamknutogo lineynogo asinkhronnogo dvigatelya s razomknutym magnitoprovozom. *Elektrichestvo*. 1982;(5):30-34. (In Russ.)].
 6. Сарапулов Ф.Н. Расчет режима короткого замыкания индукционного двигателя на основе магнитной схемы замещения // *Электричество*. – 1976. – № 6. – С. 56–58. [Sarapulov FN. Raschet rezhima korotkogo zamykaniya induktsionnogo dvigatelya na osnove magnitnoy skhemy zameshcheniya. *Elektrichestvo*. 1976;(6):56-58. (In Russ.)].
 7. Епифанов А.П., Лебедев А.М., Талья И.И. Повышение эффективности тягового линейного асинхронного привода // *Известия вузов. Электромеханика*. – 1990. – № 7. – С. 60–67. [Epifanov AP, Lebedev AM, Tal'ya II. Povysheniye effektivnosti tyagovogo lineynogo asinkhronnogo privoda. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 1990;(7):60-67. (In Russ.)].
 8. Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Шымчак П. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТИ – УПИ, 2001. [Sarapulov FN, Sarapulov SF, Shimchak P. *Matematicheskiye modeli lineynykh induktsionnykh mashin na osnove skhem zameshcheniya*. Yekaterinburg: GOU VPO UGTI – UPI; 2001. (In Russ)]. Доступно по: <https://bookree.org/reader?file=813029&pg=2>. Ссылка активна на: 28.01.2021.
 9. Hellinger R, Mnich P. Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status and Future Outlook. *Proceedings of the IEEE*. 2009;97(11):1892-1900.
 10. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 271 с. [Voldek AI. *Induktsionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom*. Leningrad: Energia; 1970. 271 p. (In Russ.)].
 11. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 180 с. [Yamamura S. *Teoria lineynykh asinkhronnykh dvigatelei*. Leningrad: Energoatomizdat; 1983. 180 p. (In Russ.)].
 12. Черных И.В., Сарапулов Ф.Н. Основы теории и моделирование линейного асинхронного двигателя как объекта управления. – Екатеринбург, УГТУ, 1999. – 229 с. [Chernykh IV, Sarapulov FN. *Osnovy teorii i modelirovanie lineynogo asinkhronnogo dvigatelya kak ob'ekta upravleniya*. Ekaterinburg. UGTU. 1999. 229 p. (In Russ.)].
 13. Li M, Yang Z, Lin F, Sun H. Characteristics of Linear Induction Motor Considering Material of Reaction Plate Change. *Journal of Computers*. 2013;8(1):102-107. doi: 10.4304/jcp.8.1.102-107
 14. Lee H-W, Lee SG, Park C, et al. Characteristic Analysis of a Linear Induction Motor for a Lightweight Train According to Various Secondary Schemes. *IJR International Journal of Railway*. 2008;1(1):6-11.
 15. Соломин А.В. Регулируемый линейный асинхронный двигатель // *Электротехника*. – 2004. – № 12. – С. 31–34. [Solomin AV. Reguliruyemyy lineynyy asinkhronnyy dvigatel'. *Elektrotehnika*. 2004;(12):31-34. (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, кандидат 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

Solomin Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor;

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

E-mail: ema@rgups.ru

Andrei V. Solomin, Candidate of Technological sciences, Associate Professor; phone:

+7(863)2726212;

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

E-mail: vag@kaf.rgups.ru

Anastasia A. Chekhova, Graduate; phone: +7(863)2726212;

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

E-mail: ema@rgups.ru

Цитировать:

Соломин В.А., Соломин А.В., Чехова А.А. Пусковые усилия тягового линейного асинхронного двигателя с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 2. – С. 87–96. doi: 10.17816/transsyst20217287-96

To cite this article:

Solomin VA, Solomin AV, Chekhova AA. Starting forces of the traction linear induction motor with adjustable resistance of the short-circuited winding of the secondary element. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(2):87-96. doi: 10.17816/transsyst20217287-96