

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

<https://doi.org/10.17816/transsyst636724>

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

Л.Л. Замшина, Н.А. Трубицина

Ростовский государственный университет путей сообщения

(Ростов-на-Дону, Россия)

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПУСКА В ХОД ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С РЕГУЛИРУЕМЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКОЙ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Обоснование. Линейные асинхронные двигатели в сочетании с электромагнитным подвесом перспективны для тягового привода пассажирского, грузового и городского магнитолевитационного транспорта.

Цель. Изучение особенностей пуска тягового линейного асинхронного двигателя с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента.

Материалы и методы. Аналитическим путем установлена зависимость сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента линейного асинхронного двигателя от скольжения, позволяющая выбирать и оптимизировать пусковые режимы работы двигателя.

Результаты. Полученна возможность определения сопротивления обмотки вторичного элемента линейного двигателя для выбора времени разгона магнитолевитационного транспорта в зависимости от его номинальной скорости движения и силы инерции высокоскоростного экипажа.

Заключение. Результаты исследования позволяют оптимизировать пусковые режимы линейного асинхронного двигателя путем определения способа регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки его вторичного элемента.

Ключевые слова: линейный асинхронный двигатель; магнитолевитационный транспорт; короткозамкнутая обмотка вторичного элемента; регулируемое сопротивление обмотки вторичного элемента; оптимизация пусковых режимов.

Как цитировать:

Соломин В.А., Соломин А.В., Чехова А.А., Замшина Л.Л., Трубицина Н.А. К вопросу об оптимизации пуска в ход линейного асинхронного двигателя с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т.10. № 4. С. 587–597. doi: 10.17816/transsyst636724

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Rolling stock of railways, train traction and electrification

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

L.L. Zamchin, N.A. Trubitsina

Rostov State Transport University

(Rostov-on-Don, Russia)

ON THE QUESTION OF OPTIMIZING THE START-UP OF A LINEAR INDUCTION MOTOR WITH AN ADJUSTABLE RESISTANCE OF THE SHORT-CIRCUITED WINDING OF THE SECONDARY ELEMENT

Background. Linear induction motors with electromagnetic suspension are promising for traction drives in passenger, freight, and urban magnetic-levitation transport.

Aim: To study the starting process of a traction linear induction motor with adjustable resistance in the short-circuited winding of its secondary element.

Materials and methods. The resistance of the short-circuited winding in the secondary element was analytically modeled as a function of slip, allowing the selection and optimization of the motor's starting modes.

Results. The study identified the optimal resistance of the winding in the secondary element of the linear motor, allowing for fine-tuning the acceleration time of magnetic-levitation transport vehicles based on their nominal speed and the inertia force of the high-speed vehicle.

Conclusion. The research results provide a method to optimize the starting modes of a linear induction motor. This is achieved by regulating the resistance of the short-circuited winding in its secondary element.

Keywords: linear induction motor; magnetic-levitation transport; short-circuited winding of the secondary element; adjustable resistance of the winding of the secondary element; optimization of starting modes.

To cite this article:

Solomin VA, Solomin AV, Chekhova AA, Zamshina LL, Trubitsina NA. On the question of optimizing the start-up of a linear induction motor with an adjustable resistance of the short-circuited winding of the secondary element. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):587–597. doi: 10.17816/transsyst636724

ВВЕДЕНИЕ

Транспортная система России в перспективе будет дополнена магнитолевитационным транспортом (МЛТ), предназначенным для пассажирских и грузовых перевозок. Магнитолевитационный транспорт по своей сути является инновационным и его применение предполагает появление новых технологий и технических решений на уровне изобретений. В области создания и исследования систем МЛТ работают многие научные коллективы. Значительных результатов в области разработки и изучения магнитолевитационных транспортных систем достигли российские инженеры и ученые [1–7]. Магнитолевитационный транспорт содержит ряд главных элементов (систем): устройство для магнитного подвеса преобразователь напряжения и частоты, линейный тяговый двигатель и устройства для боковой стабилизации и стабилизации воздушного зазора. Одним из наиболее перспективных вариантов представляется применение для тягового привода магнитолевитационного транспорта линейного асинхронного двигателя (ЛАД) простого по конструкции и надежного в эксплуатации. В Ростовском государственном университете путей сообщения были впервые созданы линейные асинхронные двигатели с регулируемыми сопротивлениями короткозамкнутых обмоток вторичных элементов (ВЭ) [8]. Линейные асинхронные двигатели с изменяемыми сопротивлениями короткозамкнутых обмоток вторичных элементов имеют характеристики, во многом сходные с характеристиками асинхронных машин с фазными обмотками роторов [8].

В работе приведены результаты исследования особенностей пускового режима тягового линейного асинхронного двигателя и определения способа регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ для получения оптимальной и оптимизированной пусковых характеристик магнитолевитационного транспорта.

ОСОБЕННОСТИ ПУСКА В ХОД РЕГУЛИРУЕМОГО ЛАД

Регулируемый линейный асинхронный двигатель содержит короткозамкнутую обмотку, размещенную в пазах сердечника вторичного элемента и состоящую из электропроводящих стержней. По бокам стержни обмотки вторичного элемента закорочены общей электропроводящей шиной, а с противоположной стороны – замыкающим элементом. Замыкающий элемент в наиболее простом варианте выполнения состоит из двух частей: электропроводящей и изоляционной. Замыкающий

элемент может иметь различные модификации исполнения и обеспечивать возможность, например, вращения вокруг своей горизонтальной оси или же реализовывать вращательно поступательное перемещение с целью регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента. Кроме того, Разработаны конструкции линейных асинхронных двигателей, у которых замыкающий элемент способен перемещаться в вертикальном направлении или совершать вертикально поступательное движение для изменения сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ ЛАД. Конструкции стержней короткозамкнутой обмотки вторичного элемента могут быть различными, например, состоять из нескольких изолированных проводников, размещенных в пазе сердечника ВЭ параллельно друг другу в вертикальном или горизонтальном направлениях. Как вариант, каждый стержень обмотки ВЭ может быть выполнен в виде одного проводника, полностью занимающего весь паз [8]. Перемещение замыкающего элемента приводит к изменению сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ, что используется для регулирования скорости движения ЛАД и улучшения его пусковых характеристик.

Вопросы исследования пусковых режимов линейных асинхронных двигателей с регулируемым сопротивлением короткозамкнутых обмоток вторичных элементов являются важными, результаты их изучения представлены в [9, 10].

Вариационная задача минимизации времени пуска и уменьшения потерь мощности регулируемого ЛАД при изменении активного сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента сводится к определению функции $r'_2(s)$, доставляющей минимум функционалу, определенному путем преобразований соотношения, полученного в [11]

$$t_n = T_{эм} \int_{s_n}^1 \frac{s \left[\left(r_1 + r'_2(s) \right)^2 + x_k^2(s) \right] ds}{c_m \cdot r'_2(s) - F(s) \cdot s \left[\left(r_1 + r'_2(s) \right)^2 + x_k^2(s) \right]}, \quad (1)$$

где t_n – время пуска; c ; $T_{эм}$ – электромеханическая постоянная времени, зависящая от силы инерции электропривода (экипажа МЛТ); c ; r_1 – активное сопротивление фазы обмотки индуктора, Ом; s_n – номинальное скольжение ЛАД; о.е.; s – скольжение; о.е.; $r'_2(s)$ – приведенное к индуктору активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ВЭ; Ом; $x_k(s)$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания ЛАД; Ом.; $F_c(s)$ – механическое усилие инерции электропривода; Н;

c_m — коэффициент, зависящий от фазного напряжения индуктора и параметров короткозамкнутой обмотки ВЭ.

Согласно условию Эйлера [12], функция $r'_2(s)$, доставляющая минимум функционалу (1), должна удовлетворять уравнению

$$\frac{\partial}{\partial r'_2(s)} \left(\frac{s \left[\left(r_1 + \frac{r'_2(s)}{s} \right)^2 + x_k^2(s) \right]}{c_m \cdot r'_2(s) - F_c(s) \cdot s \left[\left(r_1 + \frac{r'_2(s)}{s} \right)^2 + x_k^2(s) \right]} \right) = 0 \quad (2)$$

или, в соответствии с [13],

$$\frac{c_m (r'_2(s))^2}{s} - c_m \cdot s \cdot r_1^2 - c_m \cdot s \cdot x_k^2(s) = 0. \quad (3)$$

Решая (3) относительно $r'_2(s)$, получим

$$r'_2(s) = s \sqrt{r_1^2 + x_k^2(s)}. \quad (4)$$

Зависимость (4) обеспечивает абсолютную минимизацию времени разгона машины при включении тягового линейного асинхронного двигателя в случае плавного регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки его вторичного элемента.

В качестве примера график этой функции для регулируемого ЛАД с номинальной мощностью 60 кВт, с числом полюсов $2p=4$, и номинальной скоростью движения $v_n=36$ м/с при силе инерции в 10 раз, превышающей силу инерции экипажа магнитолевитационного транспорта, представлен на Рис. 1. Время пуска данного регулируемого линейного асинхронного двигателя, определенное расчетным путем, при плавном изменении сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ составило 2,74 с.

Плавное регулирование сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД возможно обеспечить только при использовании сплошных электропроводящих стержней, полностью занимающих пазы сердечника вторичного элемента.

Конструктивное выполнение стержней короткозамкнутой обмотки ВЭ регулируемого линейного асинхронного двигателя обеспечивает

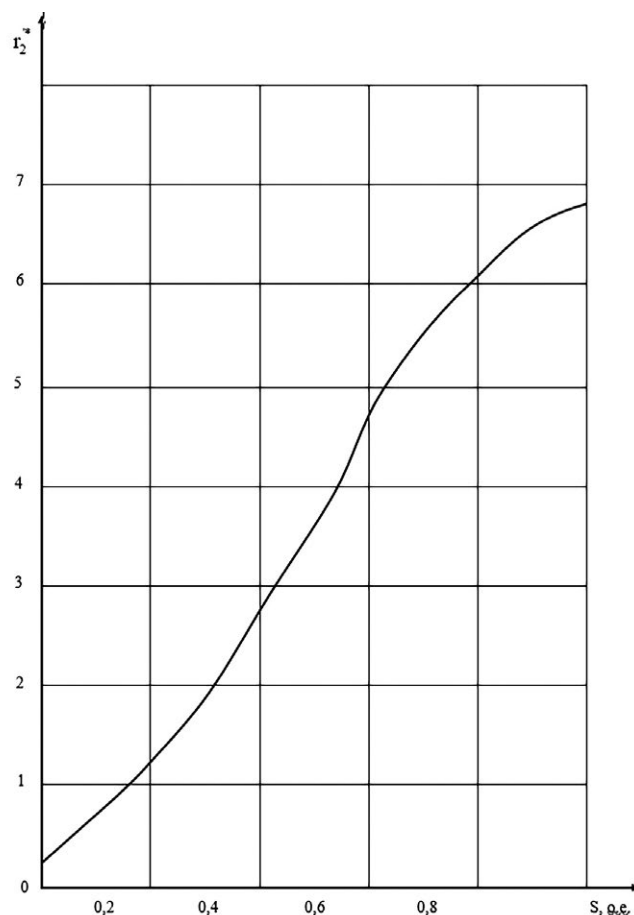


Рис. 1. Оптимальная (гладкая) зависимость сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД от скольжения

Fig. 1. Optimal (smooth) dependence of the resistance of the short-circuited winding of the secondary element of the LIM on slip

и ступенчатое изменение величины сопротивления обмотки вторичного элемента при пуске двигателя в ход. Ступенчатое изменение сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ ЛАД достигается как замыканием отдельных проводников стержней подвижным замыкающим контактным элементом, так и при использовании электронного коммутатора. При дискретном регулировании возникает задача определения значений скольжений, при которых должны поочередно переключаться ступени сопротивлений стержней обмотки вторичного элемента ЛАД.

Определим в общем виде для заданной оптимальной зависимости $r_2'(s)$, представленной кривой на Рис. 1, и заданных « n » ступеней переключения активного сопротивления обмотки вторичного элемента ЛАД. Определим значения r_{2i}' , соответствующие « n » ступеням регулирования, и величины скольжений s_{nki} , при которых должно

происходить переключение ступеней сопротивлений (линия 2, Рис. 2). Для этого запишем соотношение для каждой из ступеней регулирования

$$(s_{i-1}, s_i) = \left[\left(r_2' \right)^{-1} \left(r_{nki-1} \right), r_2' \left(r_{2nki} \right) \right],$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n-1, n$ и где положено $s_0 = r_2' \left(r_{2i} \right)$ и получим систему равенств

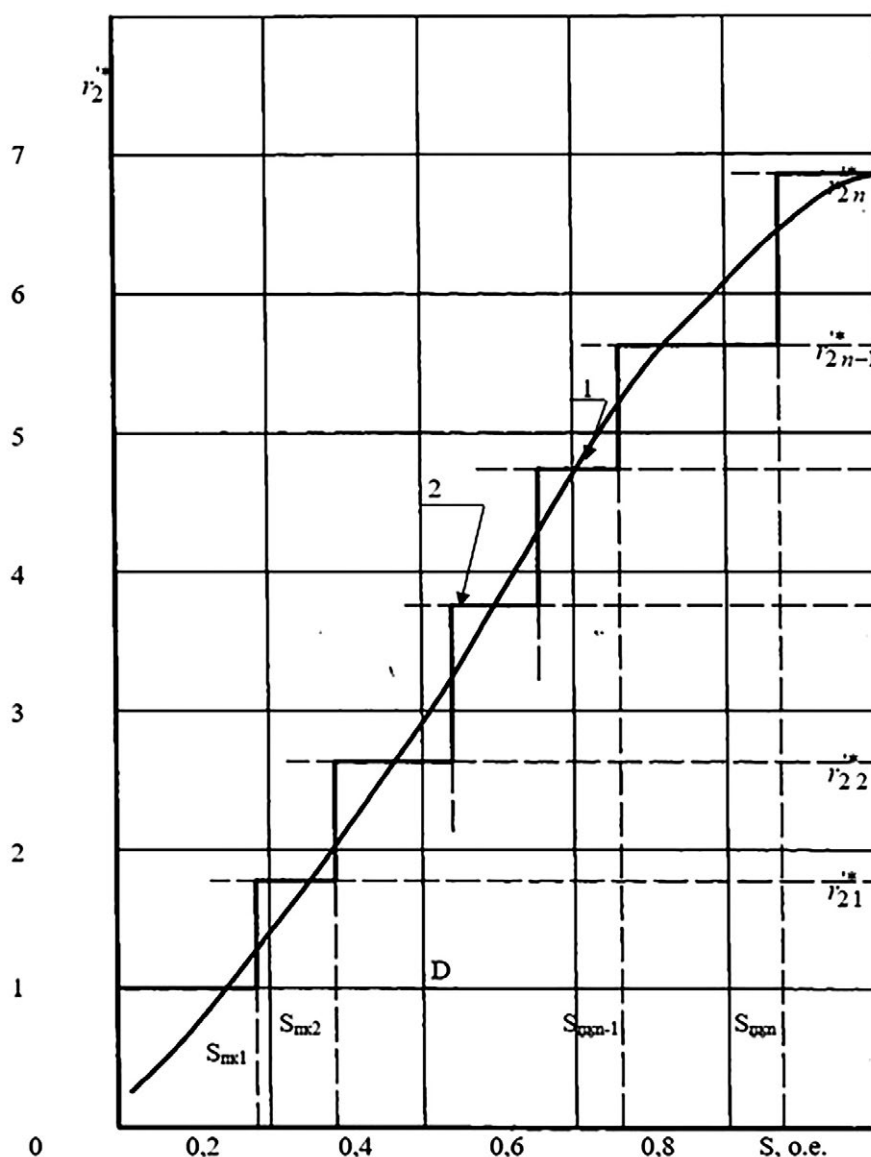


Рис. 2. Оптимальная гладкая – 1 и оптимизированная (многоступенчатая) – 2 зависимости сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД от скольжения

Fig. 2. Optimal smooth – 1 and optimized (multi-stage) – 2 dependences of the resistance of the short-circuited winding of the secondary element of the LIM on slip

$$\left\{ \begin{array}{l} s_{n\kappa 1} = (r_2')^{-1} \left(\frac{1}{2} (1 + r_{n\kappa 1}') \right); \\ s_{n\kappa 2} = (r_2')^{-1} \left(\frac{1}{2} (r_{n\kappa 1}' + r_{n\kappa 2}') \right); \\ \dots\dots\dots \\ s_{n\kappa n} = (r_2')^{-1} \left(\frac{1}{2} (r_{n\kappa n-1}' + r_{n\kappa n}') \right). \end{array} \right. \quad (5)$$

Система равенств (5) определяет ступенчатую оптимизированную зависимость функции $r_2'(s)$. Например, при $n = 7$ рассчитанное на ЭВМ время пуска (разгона) регулируемого ЛАД, мощностью 60 кВт, составило $t_n = 2,92$ с, что превышает на 6,6% время при оптимальном (Рис. 1), плавном изменении $r_2'(s)$. Для обеспечения комфорта пассажиров магнитолевитационного транспорта нужен плавный разгон транспортного экипажа при пониженном значении пускового усилия. Для достижения этой цели по полученным соотношениям можно рассчитать необходимые значения сопротивлений каждой ступени при регулировании параметров обмотки вторичного элемента в процессе пуска тягового ЛАД в ход.

В заключении можно сделать вывод о том, что для определения параметров ступенчатой зависимости $r_2'(s)$, при которой имеет место пуск с заданным временем разгона магнитолевитационного транспорта с тяговым линейным асинхронным двигателем с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента, можно использовать полученные теоретическим путем соотношения.

ВЫВОДЫ

Определена оптимальная (гладкая) зависимость активного сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента, регулируемого ЛАД от скольжения, при которой время пуска будет минимальным.

Конструкция короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого линейного асинхронного двигателя позволяет получить ступенчатую зависимость $r_2'(s)$, близкую к оптимальной.

Расчетные исследования показали, что для увеличения пускового тягового усилия и его плавного изменения в широких пределах у регулируемого линейного асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента стержни обмотки следует выполнять

сплошными и перемещать замыкающий элемент в продольном направлении (по ширине паза).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Ростовского государственного университета путей сообщения.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the support of the Rostov State University of Transport.

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. Куценко В.В. Тягово-тормозные устройства на основе регулируемых линейных асинхронных двигателей для высокоскоростного транспорта : дисс. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2011. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005405721>

10. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины. Теория, расчет, элементы проектирования. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
11. Лаврентьев М.А., Люстерник Л.А. Курс вариационного исчисления. 2-е изд. М.: ГИТТЛ, 1950.
12. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. М.: Высш.школа, 1965.

REFERENCES

1. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnetic Levitation Transport Technology*. Moscow: FIZMATLIT; 2014. (In Russ.)
2. Zaitsev AA, Sokolova IaV, Talashkin GN. *Magnetic levitation transport*. 2nd ed. St. Petersburg: PGUPS; 2011. (In Russ.)
3. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnetic Levitation Transport: Scientific Problems and Technical Solutions*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. (In Russ.)
4. Zaitsev AA, Morozova EI, Talashkin GN, Sokolova YaV. *Magnetic levitation transport in the unified transport system of the country*. St. Petersburg: NP-Print; 2015. (In Russ.)
5. Zaitsev AA, Sokolova YaV. On the current stage of development of magnetic levitation transport. *Railway transport*. 2016;12:62–65. (In Russ.) EDN: BYVZPT
6. Zaitsev AA. Magnetic levitation transport systems and technologies. *Railway transport*. 2014;5:69–73. (In Russ.) EDN TDGFZB
7. Antonov JF, Zaitsev AA, Morozova EI. Study of magnetodynamic levitation and electrodynamic braking of a cargo transport platform. *Proceedings of Petersburg state transport University*. 2014;4(41):5–15. (In Russ.) EDN: TDWZWN
8. Solomin AV. Adjustable linear asynchronous motor. *Electrical engineering*. 2004;12:31–34. (In Russ.)
9. Kutsenko VV. Traction and braking devices based on controlled linear asynchronous motors for high-speed transport [dissertation]. Rostov-on-Don; 2011. Available from: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005405721>. (In Russ.)
10. Dombrovsky VV, Zaichik VM. *Asynchronous machines. Theory, calculation, design elements*. Leningrad: Energoatomizdat; 1990. (In Russ.)
11. Lavrentiev M.A., Lyusternik L.A. *Course of calculus of variations*. 2nd ed. Moscow: GITTL; 1950. (In Russ.)
12. Kurosh A.G. *Course of Higher Algebra*. Moscow: Vyssh.shkola; 1965. (In Russ.)
- 13.

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, профессор;

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: bichilovaa@mail.ru

Замшина Лариса Леонидовна, кандидат технических наук; доцент;

eLibrary SPIN: 8703-1347; ORCID: 0000-0001-5374-9443;

E-mail: ema@rgups.ru

Трубицина Надежда Анатольевна, кандидат технических наук; доцент;

eLibrary SPIN: 4192-0487; ORCID: 0000-0001-6640-8306;

E-mail: ema@rgups.ru

Information about the authors:

Vladimir A. Solomin, Doctor of Technical Sciences, Professor;

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

E-mail: ema@rgups.ru

Andrei V. Solomin, Doctor of Technical Sciences, Professor;

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

E-mail: vag@kaf.rgups.ru

Anastasia A. Chekhova, Postgraduate student;

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

E-mail: bichilovaa@mail.ru

Larisa L. Zamshina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 8703-1347; ORCID: 0000-0001-5374-9443;

E-mail: ema@rgups.ru

Nadezhda A. Trubitsina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 4192-0487; ORCID: 0000-0001-6640-8306;

E-mail: ema@rgups.ru