

УДК 62-368; 625.032; 629.025; 629.4.063.8

С. А. Исупов, С. П. Круглов

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ПЕСКОПОДАЧИ ПОД КОЛЕСА ЛОКОМОТИВА

Аннотация. В данной статье рассматриваются такие термины как боксование и юз, причины их возникновения, сопутствующие этим явлениям термины. Так же рассматриваются отрицательные свойства этих явлений, ухудшающих динамику и влияющих на безопасность движения подвижного состава, а также влекущих за собой дополнительные расходы. Речь идет о борьбе с боксованием и юзом при помощи добавления в зону контакта колеса и рельса, дорогостоящего и специально подготовленного модификатора трения (кварцевый песок), который способен увеличить коэффициент сцепления до 20%. Рассматривается данный метод с параметрами локомотива ВЛ85. Так же в данной статье рассматривается построение линеаризованной математической модели процесса боксования и системы борьбы с этим явлением. Приведено два модельных испытания, на которых показаны преимущества адаптивной системы, по сравнению с системой, построенной на приблизительно вычисленных параметрах. к данному алгоритму можно применять упрощения и допущения. Пусть результат физически отличается не сильно, но при расширении математической модели и добавлении транспортных задержек и переходных процессов, ошибка в вычислениях возрастет многократно, а адаптивный алгоритм управления сможет подстроиться под новые условия. Рассмотренный в работе метод реализации адаптивной подсыпки песка может быть несложным образом интегрирован в штатную систему локомотива по защите от боксования и юза, дополняя существующие методы борьбы с этими неблагоприятными явлениями.

Ключевые слова: боксование, противобоксующие устройства, скорость скольжения, пескоподача, коэффициент трения, адаптивный закон управления, идентификация.

S. A. Isupov, S. P. Kruglov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

THE USE OF ADAPTIVE SAND FEEDING UNDER THE WHEELS OF THE LOCOMOTIVE

Abstract. This article discusses such terms as boxing and SW, the causes of their occurrence, the terms accompanying these phenomena. The negative properties of these phenomena are also considered, which worsen the dynamics and affect the safety of rolling stock movement, as well as entail additional costs. We are talking about the fight against boxing and skidding by adding an expensive and specially prepared friction modifier (quartz sand) to the contact zone of the wheel and rail, which is able to increase the coefficient of adhesion up to 20%. This method is considered with the parameters of the locomotive VL85. This article also discusses the construction of a simplified mathematical model of the boxing process and a system to combat this phenomenon. Two model tests are presented, which show the advantages of an adaptive system compared to a system built on approximately calculated parameters. simplifications and assumptions can be applied to this algorithm. Let the result not physically differ much, but with the expansion of the mathematical model and the addition of transport delays and transients, the error in calculations will increase many times, and the adaptive control algorithm will be able to adapt to new conditions. The method of implementing adaptive sand filling considered in the paper can be easily integrated into the locomotive's standard system for protection against boxing and yuz, complementing existing methods of combating these adverse phenomena.

Keywords: boxing, anti-boxing devices, sliding speed, sand delivery, coefficient of friction adaptive control law, identification.

Введение

В настоящее время на территории Российской Федерации по данным бюллетеня о текущих тенденциях российской экономики до 87% грузоперевозок осуществляется железнодорожным транспортом (без учета трубопроводного транспорта) [1]. Высокий спрос на железнодорожные услуги, приводит к немалому износу железнодорожных путей (профиля пути), рельсов и локомотивов (на сегодня износ локомотивов в среднем равен 73%) [2]. Одними из факторов, влияющих на износ составляют боксование и юз.

Боксование – термин, применяемый на железнодорожном транспорте для обозначения явления проскальзывания колёсных пар локомотива или мотор-вагонного подвижного состава по отношению к поверхности рельса на режимах тяги, при котором поверхность качения колёсной пары имеет линейную скорость относительно корпуса локомотива выше, чем

поверхность рельса, по которой колёсная пара катится. После срыва в боксование коэффициент трения между колесом и рельсом резко уменьшается и самопроизвольно боксование прекратиться уже не может. Длительное не прекращающееся боксование называется разнóсным боксованием. Противоположным боксованию является юз, соответствующий режиму торможения, здесь поверхность качения колёсной пары имеет линейную скорость относительно корпуса локомотива меньше (включая нулевую – заклинивание колес), чем поверхность рельса [3].

Боксование и юз отрицательно влияют на динамику движения поезда, так как нарушаются режимы разгона и торможения поезда. Из-за этого возникает проблема, связанная с безопасностью движения железнодорожного состава. Данной проблеме так же сопутствуют ряд неблагоприятных явлений, таких как разрушение рельсов и колесных пар, выход из строя оборудования локомотива и др., что тоже может повлиять на безопасность движения поезда.

Одним из эффективных способов решения данной проблемы является подача специального подготовленного песка в зону сцепления колеса с рельсом [4]. Это повышает коэффициент сцепления. Однако у данного способа есть ряд неблагоприятных факторов, таких как работа в релейном режиме (не регулируется количества подаваемого песка), отсутствие учета внешних воздействий (погодные условия, скорость движения) и другие, описанные в [5], где проанализированы положительные и отрицательные свойства существующих систем защиты от боксования и юза путем подачи песка под колеса локомотива, сделан вывод, что увеличение коэффициента трения можно обеспечить, учитывая:

- параметры, относящиеся к виду обратной связи (дискретная, непрерывная), такие как скорость боксования или текущая скорость локомотива;
- параметры относящиеся к типу регулирования, такие как ширины импульса пескоподающей форсунки или потока песковоздушной смеси;
- параметры, относящиеся к внешним воздействиям, таким как погодные условия, уклон пути, кривизна пути и пр.

Цель работы. В связи с вышеперечисленным стоит задача в создании системы, которая сможет учитывать не только факт боксования и юза, но и скорость скольжения, а также подстраиваться под внешние априорно неизвестные воздействия. Такой метод был описан в работе [6].

Предлагается реализовать адаптивную систему подачи песка под колеса локомотива и испытать ее на линеаризованной математической модели боксования. В отличии от предыдущих работ, в данном исследовании ставится цель:

- доказать работоспособность алгоритма управления адаптивной подсыпки песка, внедренной в пескоподающую систему на линеаризованной модели.
- доказать превосходство идентификации оценок параметров объекта управления по сравнению с их приближительным вычислением.

Описание объекта управления. Для составления упрощенной математической модели возьмем одну колесную пару локомотива, суммируем массу всех вагонов в один, как это представлено на рис.1.

На рисунке обозначено:

m_k, J_k, R_k – масса и осевой момент инерции колесной пары, а также радиус колеса соответственно;

m_l, m_v – масса локомотива и вагонов, отнесенная к одной колесной паре, определяются по полной массе локомотива и вагонов соответственно, делением на количество колесных пар локомотива;

γ – угол наклона пути;

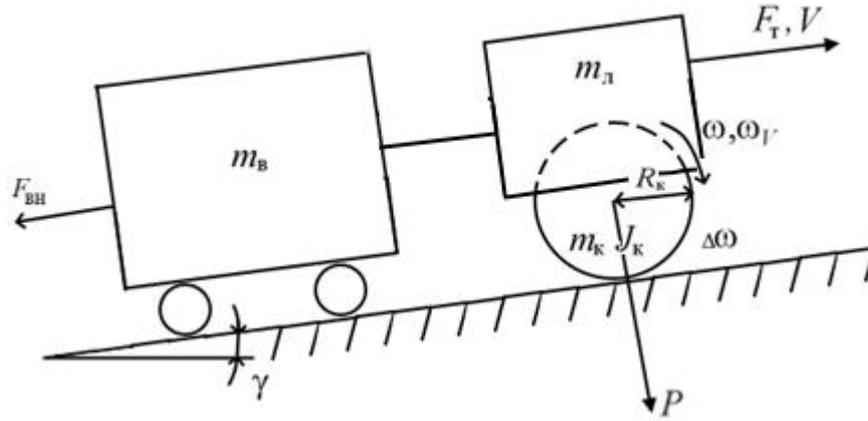


Рис. 1. Математическая модель грузового поезда, сведенная к одной колесной паре локомотива

$P = (m_{\text{Л}} + m_{\text{к}})g \cos \gamma$ – сила давления колесной пары на рельсы; g – ускорение свободного падения;

V – линейная скорость центра колесной пары (линейная скорость поезда);

ω – угловая скорость колесной пары;

$\omega_V = V/R_{\text{к}}$ – угловая скорость колесной пары, соответствующая линейной скорости;

$\Delta\omega = \omega - \omega_V$ – угловая скорость боксования колесной пары;

$F_T, F_{\text{ВН}}$ – сила тяги, создаваемая колесной парой, и внешняя сила, обусловленная трением и наклоном пути (также отнесенные к одной колесной паре подобным указанным выше образом);

В статье [7] описана, динамика боксования объекта управления в виде:

$$\Delta\dot{\omega} \approx a_1\Delta\omega + a_2 - bu, \quad (1)$$

где $a_1 \triangleq -k_M J_{\text{к}}^{-1} + c PR_{\text{к}}^2 / (J_{\text{к}} V)$,

$a_2 = M_{\text{зад}} / J_{\text{к}} - (\psi_{\text{max}} + \Delta\psi_{\text{ВН}}) PR_{\text{к}} / J_{\text{к}}$,

$b \triangleq k_{\text{П}} PR_{\text{к}} / J_{\text{к}}$ – неизвестные параметры объекта управления (1), в которых в соответствии с [8-14] $k_M = 36 \text{кНмс}$ – коэффициент, учитывающий известное снижение приводного момента за счет развивающейся угловой скорости, в частности, боксования, принят в соответствии с [8-14], $M_{\text{зад}}$ – момент заданный машинистом, ψ_{max} – максимальное значение коэффициента сцепления зависящее от текущего состояния рельс и погоды, $\Delta\psi_{\text{ВН}}$ – изменение коэффициента трения из-за внешних воздействий;

$u = 0 \dots 1$ – управляющее воздействие на пескоподающую форсунку.

Для формализации требования к свойствам боксования назначена неявная устойчивая эталонная модель

$$\Delta\dot{\omega}_{\text{м}} = a_{\text{м}} (\Delta\omega_{\text{м}} - \Delta\omega_{\text{зад}}), \quad \Delta\omega_{\text{м}}(t_0) = \Delta\omega(t_0), \quad (2)$$

где $\Delta\omega_{\text{м}}, \Delta\omega_{\text{зад}}$ – модельное и заданное поведение угловой скорости боксования соответственно. Для обеспечения максимального коэффициента сцепления $\Delta\omega_{\text{зад}}$ определяется как:

$$\Delta\omega_{\text{зад}} = \varepsilon_{\text{кр}} V / R_{\text{к}} \approx \varepsilon_{\text{кр}} \omega, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{кр}$ – критическое значение относительной скорости скольжения, примем ее $\varepsilon_{кр} = 0.02$ в соответствии с [2];

$a_M < 0$ – параметр модели, определяемый требуемую скорость подавления боксования.

Для определения закона управления пескоподающей форсункой, так что бы она смогла обеспечить приблизительное совпадение скорости боксования с эталонной моделью, можно из (1) выразить u

$$u = -b^{-1} \left[(a_M - a_1) \Delta\omega - a_M \Delta\omega_{зад} - a_2 \right], \quad (4)$$

Так как параметры объекта (1) неизвестны, то вместо (4) сформируем закон управления, построенный на оценках неизвестных параметров

$$u = -\hat{b}^{-1} \left[(a_M - \hat{a}_1) \Delta\omega - a_M \Delta\omega_{зад} - \hat{a}_2 \right], \quad (5)$$

где символом « $\hat{}$ » обозначены оценки соответствующих параметров.

В соответствии с [7] примем

$$0.5b \leq \hat{b} \leq 2b, \quad (6)$$

которую легко определить приблизительно как $b = k_{\Pi} PR_K / J_K$. Оценки \hat{a}_1 и \hat{a}_2 предлагается определять алгоритмом Качмажа [9]:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + \eta_i y_i \mu_i; \mu_i = z_i - y_i^T \hat{\theta}_{i-1}; \\ \eta_i = \lambda / (y_i^T y_i + \vartheta), \end{cases} \quad (7)$$

где индекс $i = 1, 2, 3, \dots$ – указывает на дискретные моменты времени с шагом Δt ;

$\hat{\theta}_i = [\hat{a}_{1i}, \hat{a}_{2i}]^T$ – вектор искомым оценок; верхний индекс «Т» означает транспонирование;

$y_i = [\Delta\omega_i, 1]^T$ – вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам;

μ_i – невязка идентификации;

$z_i = \Delta\dot{\omega}_i + \hat{b} u_i$ – отклик объекта, где оценка \hat{b} определяется отдельно;

$0 < \lambda \leq 1$ – назначаемый коэффициент усиления алгоритма;

ϑ – малое положительное число, исключающее деления на нуль.

Данное исследование предлагается реализовать следующим образом.

Заранее определяются параметры эталонной модели (2): a_M , $\Delta\varepsilon$, $\varepsilon_{кр}$, где $\varepsilon_{кр}$ может вычисляться отношением текущей скорости боксования и скорости вращения колесной пары соответствующей скорости движения $\frac{\Delta\omega}{\omega_V}$. Так же заранее определяется \hat{b} с точностью до

выполнения условия (6). По полученным сигналам $\Delta\dot{\omega}$, $\Delta\omega$ и сигнала u с предыдущего момента времени запускается алгоритм идентификации (7) с вектором искомым оценок $\hat{\theta}_i$. Полученные оценки сразу же используются для формирования закона управления (5). Полученный управляющий сигнал подается на математическую модель (1). Далее процедура повторяется.

Для доказательства эффективности данного метода проведем два исследования на модельном примере, включающем в себя погашение факта боксования грузового поезда, с 2 секционными локомотивом ВЛ85 с параметрами, сведенными к одной колесной паре:

$$P = 230 \text{ кН}, M_{зад} = 48.5 \text{ кНм}, \psi_{max} = 0.28, R_K = 0.625 \text{ М}, J_K = 2420 \text{ кг м}^2, k_M = 36 \text{ кНмс}$$

$a_M = -100 \text{ с}^{-1}$, $\Delta t = 0.01 \text{ с}$, $\Delta\omega_0 = 60 \text{ град/с}$ – начальная скорость боксования.

Исследование проведем без транспортных ограничений, так как нам важно только увидеть разницу между фактической скоростью боксования и эталонной моделью.

Для первого эксперимента будем использовать закон управления (4), параметры которого рассчитаем сами и намеренно допустим ошибку в 20% от точных значений, так как некоторые из параметров нам либо неизвестны, либо неточные.

На рис.2 представлены результаты испытаний первого эксперимента.

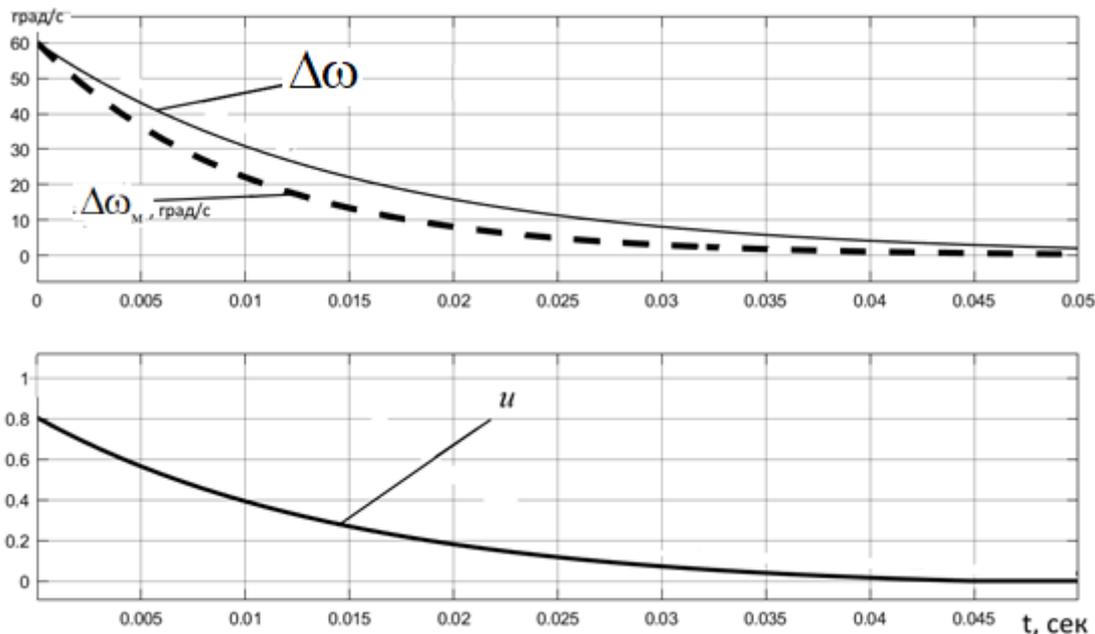


Рис. 2. Результаты первого эксперимента

На рис.2 представлены текущая скорость боксования – $\Delta\omega$, скорость боксования определяемая моделью – $\Delta\omega_m$ и управляющий сигнал u . На данном рисунке видно, что текущая скорость боксования снижается, но при этом не совпадает со скоростью боксования модели. Это говорит о том, что сигнал поступает в недостаточной мере и система не справляется.

На рис.3 представлены результаты испытаний второго эксперимента.

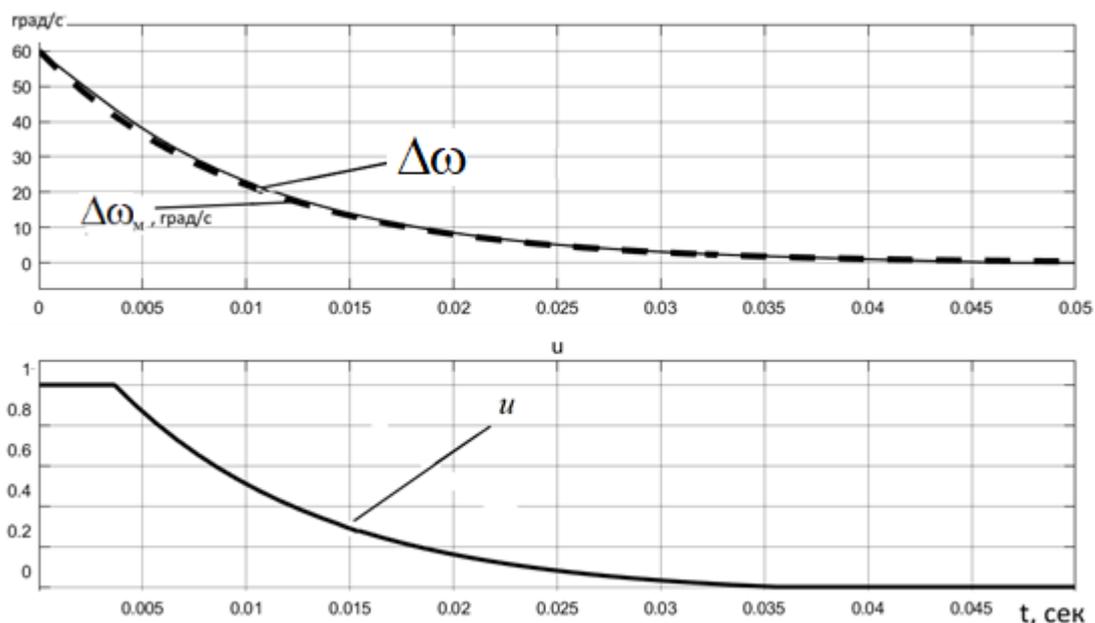


Рис. 3. Результаты второго эксперимента

На рис.3 представлены текущая скорость боксования – $\Delta\omega$, скорость боксования определяемая моделью – $\Delta\omega_m$ и управляющий сигнал u . На данном рисунке видно, что текущая скорость боксования снижается, при этом совпадает со скоростью боксования модели. Это говорит о том, что сигнал поступает в достаточной мере и система правильно оценивает параметры объекта. При этом изменения параметра \hat{b} в пределах $0.5b \leq \hat{b} \leq 2b$, не повлияли на работу системы и график выглядел практически так же.

Заключение

Модельные испытания упрощенной математической модели показали ее работоспособность и возможность адаптироваться к неточностям вычисления параметров объекта управления. Из этого следует, что к данному алгоритму можно применять упрощения и допущения. Пусть результат физически отличается не сильно (менее 0.1 с), но при расширении математической модели и добавлении транспортных задержек и переходных процессов, ошибка в вычислениях возрастет многократно, а адаптивный алгоритм управления сможет подстроиться под новые условия. Рассмотренный в работе метод реализации адаптивной подсыпки песка может быть несложным образом интегрирован в штатную систему локомотива по защите от боксования и юза, дополняя существующие методы борьбы с этими неблагоприятными явлениями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики. Выпуск № 53, сентябрь 2019 – 14с.
2. Г.В. Самме: Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами. Монография, Москва 2005г – 79с.
3. Тарасов А. Н. Управление асинхронными тяговыми электродвигателями тележки локомотива в предельных по сцеплению режимах движения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Брянский государственный технический университет 2017 - 144с.
4. Кузнецов В.Д. Избранные труды. Физика резания и трения металлов и кристаллов. —М.: Наука, 1977
5. Исупов, С. А., Круглов, С. П. Системы пескоподачи под колеса современных локомотивов. Электронный научный журнал "Молодая наука Сибири", (1(15) извлечено от <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/496>
6. Kруглов, S.P., Kовыршин, S.V., Isupov, S.A. Suppression of the Locomotive Wheelset Jamming by Means of Adaptive Sand Supply. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2022, vol 272, pp. 689-700. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8759-4_72 (Scopus).
7. Круглов С.П. Адаптивная подсыпка песка на локомотиве / С. П. Круглов, С. В. Ковыршин, П. Ю. Иванов, С. А. Исупов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 104–112. – DOI: 10.26731/1813- 9108.2021.2(70).104-112
8. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р в редакции Распоряжения ОАО «РЖД» от 09.02.2018 № 182/р. – 516 с.
9. Гогричиани Г.В., Казаринов А.В., Михеев В.В., Курцев С.Б. Основные принципы управления системой противоюзовой защиты современного подвижного состава // Вестник ВНИИЖТ, 2003, №3. С.14-21.
10. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги: учебник для вузов ж.-д. транспорта/ Под ред. В.Д. Кузьмича. – М.: Издательство «Маршрут», 2005. – 448 с.

11. Ляпушкин Н.Н. Прогнозирование сцепных свойств локомотивов с различными типами тяговых электродвигателей. Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. – М.: МИИТ, 2014. – 46 с.
12. Савоськин А.Н., Чучин А.А. Исследование процессов срыва сцепления и буксования в тяговом приводе I класса // Моделирование транспортных процессов. – 2009. – №2. С.47-55.
13. Савоськин А.Н., Чучин А.А. Исследование процессов срыва сцепления и буксования в тяговом приводе I класса // Моделирование транспортных процессов. – 2009. – №2. С.47-55.
14. В.А. Сидяков, Л.А. Андреева, А.Г. Колчанов, И.П. Потапов, Н.И. Карганова, А.В. Багинов, В.Е. Сидяков, И.Т. Демченко, В.П. Глухман. Актуализация правил тяговых расчетов на промышленном железнодорожном транспорте. Методическое пособие. Москва 2016г – 95с.
15. Astrom K.J., Wittenmark B. Adaptive control. Second edition. Dover Publications, Inc., Mineola, New York, 2008.

REFERENCES

1. Bulletin on the current trends of the Russian economy. Issue No. 53, September 2019 - 14с.
2. G.V. Samme: Frictional interaction of locomotive wheel pairs with rails. Monograph, Moscow 2005 – 79с.
3. Tarasov A. N. Control of asynchronous traction motors of locomotive bogies in traction-limiting driving modes. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Bryansk State Technical University 2017 - 144s.
4. Kuznetsov V.D. Selected works. Physics of cutting and friction of metals and crystals. —М.: Nauka, 1977
5. Isupov, S. A., Kruglov, S. P. Sand feeding systems under the wheels of modern locomotives. Electronic scientific journal "Young Science of Siberia", (1(15) retrieved from <https://ojs.ircgups.ru/index.php/mns/article/view/496>
6. Kruglov S.P., Kovyrshin S.V., Isupov S.A. Suppression of jamming of a locomotive wheelset using adaptive sand supply. Intellectual Innovations, Systems and Technologies, 2022, volume 272, pp. 689-700. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8759-4_72 (Scopus).
7. Kruglov S.P. Adaptive sand filling on a locomotive / S. P. Kruglov, S. V. Kovyrshin, P. Yu. Ivanov, S. A. Isupov // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2021. – № 2 (70). – Pp. 104-112. – DOI: 10.26731/1813- 9108.2021.2 (70).104-112
8. Rules of traction calculations for train work. Approved by the Order of JSC "Russian Railways" dated 12.05.2016 No. 867r as amended by the Order of JSC "Russian Railways" dated 09.02.2018 No. 182/p. -516 p.
9. Gogrichiani G.V., Kazarinov A.V., Mikheev V.V., Kurtsev S.B. Basic principles of management of the anti-skid protection system of modern rolling stock // Bulletin of VNIIZhT, 2003, No. 3. pp.14-21.
10. Kuzmich V.D., Rudnev V.S., Frenkel S.Ya. Theory of locomotive traction: textbook for universities of railway transport/ Edited by V.D. Kuzmich. – М.: Publishing house "Route", 2005. – 448 p.
11. Lyapushkin N.N. Prediction of coupling properties of locomotives with various types of traction motors. Abstract of the diss. for the candidate of Academic Studies, Doctor of Technical Sciences – Moscow: МИИТ, 2014. – 46 p.
12. Savoskin A.N., Chuchin A.A. Investigation of the processes of clutch failure and slipping in a traction drive of the I class // Modeling of transport processes. – 2009.– No.2. pp.47-55.
13. Savoskin A.N., Chuchin A.A. Investigation of clutch failure and slipping processes in a traction drive of the I class // Modeling of transport processes. - 2009. – No. 2. pp.47-55.

14. V.A. Sidyakov, L.A. Andreeva, A.G. Kolchanov, I.P. Potapov, N.I. Karganova, A.V. Baginov, V.E. Sidyakov, I.T. Demchenko, V.P. Glukhman. Updating the rules of traction calculations in industrial railway transport. Methodical manual. Moscow 2016 – 95с.

15. Astrom K.J., Wittenmark B. Adaptive management. Second edition. Dover Publications, Inc., Mineola, New York, 2008.

Информация об авторах

Исупов Станислав Андреевич – Аспирант гр. ИВТ.6-20-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: vclvloo@gmail.com

Круглов Сергей Петрович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Information about the authors

Isupov Stanislav Andreevich – Aspirant of gr.IVT.6-20-1, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: vclvloo@gmail.com

Kruglov Sergey Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru