

УДК 629.015

EDN: LIBSTS

ВЛИЯНИЕ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ НА КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ПРИВОДЕ

А.В. Климов

ORCID: 0000-0002-5351-3622 e-mail: Aleksandr.Klimov@kamaz.ru

Инновационный центр «КАМАЗ»

Москва, Россия

Исследовано влияние S-образного закона назначения крутящего момента в управлении электромеханической силовой передачей на динамическую нагруженность механической трансмиссии и энергоэффективность движения. Показана возможность исключения возбуждения колебаний при изменении режима движения и направления приложения нагрузки в механической трансмиссии силовой передачи. Высокое значение рекуперативного момента при отпуске педали хода и движении в тормозном режиме снижает эффективность движения, увеличивая удельные энергозатраты. Применение S-образного закона назначения крутящего момента возможно для реализации алгоритмов управления движением и реализации программного обеспечения.

Ключевые слова: колебания в электромеханической силовой передаче, пересопряжение зубьев, динамическая нагруженность, S-образный закон задания момента, энергоэффективность.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Климов, А.В. Влияние закона управления на колебательные процессы в электромеханическом приводе // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 79-86. EDN: LIBSTS

THE INFLUENCE OF THE CONTROL LAW ON OSCILLATORY PROCESSES IN AN ELECTROMECHANICAL DRIVE

A.V. Klimov

ORCID: 0000-0002-5351-3622 e-mail: Aleksandr.Klimov@kamaz.ru

KAMAZ Innovation Center LLC

Moscow, Russia

Abstract. The influence of the S-shaped law of torque assignment in the control of an electromechanical power transmission on the dynamic load of a mechanical transmission and on the energy efficiency of movement is studied. The possibility of excluding the excitation of oscillations when changing the driving mode and the direction of load application in the mechanical transmission of the power transmission is shown. A high value of the regenerative torque when releasing the accelerator pedal and moving in braking mode reduces the movement efficiency, increasing the specific energy consumption. The application of the S-shaped law of torque assignment is possible for the implementation of motion control algorithms and software implementation.

Key words: oscillations in an electromechanical power transmission, overstretching of teeth, dynamic loading, S-shaped law of torque setting, energy efficiency.

FOR CITATION: A.V. Klimov. The influence of the control law on oscillatory processes in an electromechanical drive. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 1. Pp. 79-86. EDN: LIBSTS

Введение

Транспортные средства с электромеханической силовой передачей и электрохимической аккумуляторной батареей в качестве источника энергии сегодня все чаще встречаются на дорогах. Это электромобили, используемые как личный транспорт, электробусы в качестве общественного пассажирского транспорта и грузовые электромобили, используемые для различных нужд. Главным свойством данной техники является обеспечение требуемого запаса хода на одной подзарядке. Для этого необходимо применять совершенные компоненты

силовой передачи, источники энергии и методы управления, обеспечивающие минимизацию энергозатрат. Поскольку процессы в электромеханической силовой передаче протекают с высокой скоростью, в контуре управления двигателем с частотами до 10 кГц и более, при наличии низкой инерционности и жесткости внешней механической характеристики электродвигателя, создаются ситуации для возбуждения колебательных явлений. В особенности важны режимы изменения условий движения (тяговый, ведомый, тормозной), сопровождаемые изменением направления усилия в зоне контакта колеса с дорогой и направления приложения нагрузки в зубчатых зацеплениях. Данный процесс сопровождается пересопряжением, т.е. вхождением в зацепление другой стороны зубьев. При быстром изменении крутящего момента данный процесс может сопровождаться ударом с последующим возбуждением фрикционных колебаний. Поэтому важно эффективно управлять назначением крутящего момента для устранения данных негативных явлений.

Электромеханическая силовая передача, включающая тяговый привод и механическую трансмиссию, позволяет реализовывать рекуперативное замедление при отпуске педали хода. При этом можно выделить три зоны работы привода в зависимости от положения педали: I – тормозной режим; II – режим движения по инерции; III – тяговый режим (рис. 1-3).

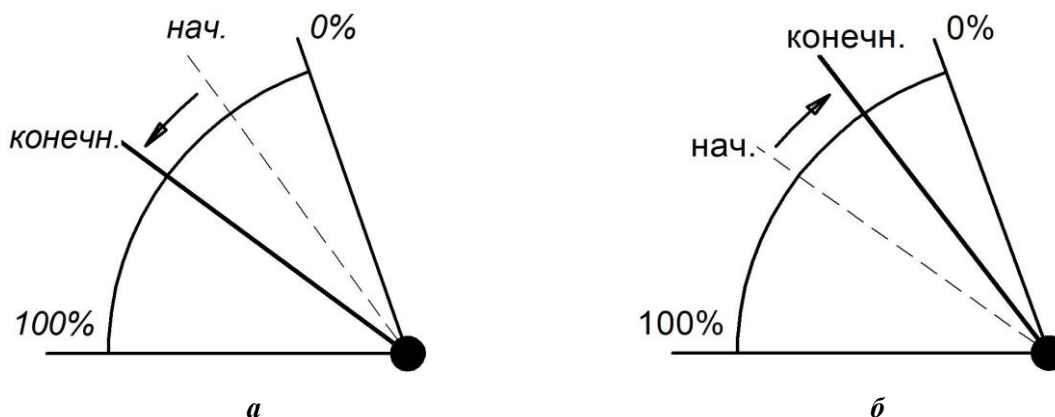


Рис. 1. Основные принципы управления ускорением и замедлением:
а – при разгоне (ускорении); б – при замедлении (торможении)

Fig. 1. Basic principles of acceleration and deceleration control:
a – during acceleration; b – during deceleration (braking)

В режиме движения по инерции для снижения динамической нагруженности механической трансмиссии электродвигатель может реализовывать небольшой рекуперативный момент. С этой точки зрения особенно важен переход между тяговым и тормозным режимами, так как в этих случаях происходит изменение направления приложения нагрузки в зубчатых передачах. Поскольку инерция электропривода мала, в данном случае могут наблюдаться ударные нагрузки в зацеплениях механической передачи, проявляющиеся в колебаниях частоты вращения валов. Данное явление может возникать из-за изменения нагрузки как на выходном звене (колесе), так и на входном (вал электродвигателя). Последнее происходит в силу высокой жесткости внешней характеристики привода и колебаний (пульсаций) крутящего момента из-за несовершенной электромагнитной системы и методов управления.

Очень важно реализовывать методы управления крутящим моментом, позволяющие исключить или минимизировать дополнительные динамические нагрузки. Данной проблемой определяется цель работы: проверка влияния законов задания момента на динамическую нагруженность различных.

Исследование характера различных зависимостей задания крутящего момента на динамическую нагруженность механических передач электропривода можно выполнять методами натурных экспериментальных исследований.

Исследование характера зависимости крутящего момента от положения педали хода

Существует как монотонный характер зависимости уставок крутящего момента от положения педали (рис. 2), так и S-образный (рис. 3) [1-13].

Значение рекуперативного крутящего момента в режиме движения по инерции h_{dru} – h_{drd} обеспечивает как имитацию сопротивления в трансмиссии, так и исключение указанных выше пересопряжений при колебаниях сопротивления движения и нормальной нагрузки на колесах, а также влияет на энергоэффективность движения.

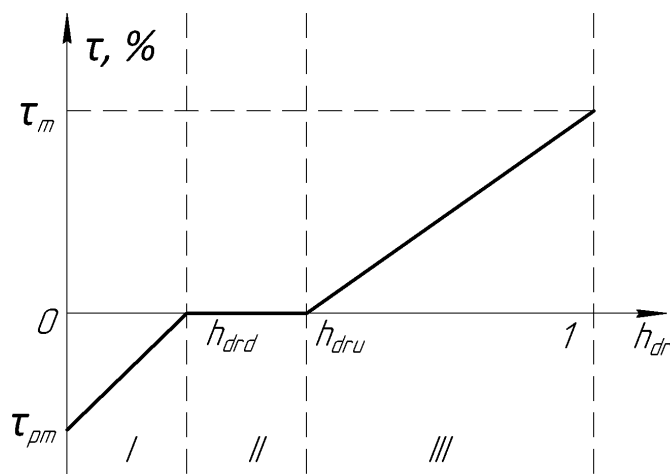


Рис. 2. Монотонный характер зависимости уставок крутящего момента от положения педали

Fig. 2. Monotonous nature of the dependence of torque settings on pedal position

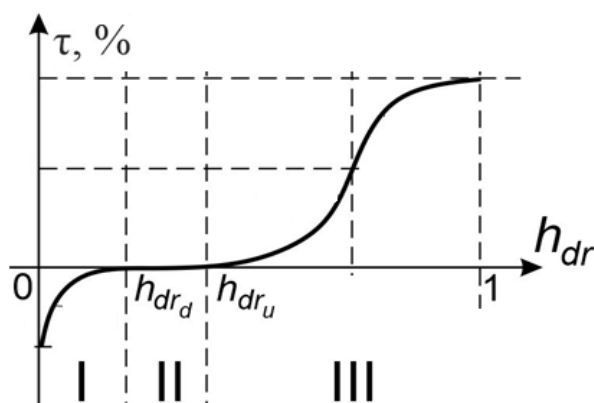


Рис. 3. S-образный характер зависимости уставок крутящего момента от положения педали [14]

Fig. 3. S-shaped dependence of torque settings on pedal position [14]

Были проведены испытательные заезды транспортного средства [15], имеющего как монотонный, так и S-образный характер зависимостей крутящих моментов, при которых осуществлялись разгоны после трогания с места по прямой при нажатии педали хода и замедления при ее отпускании на ровной асфальтовой дороге. На ведущие колеса были установлены тензометрические колеса *KistlerRim* для фиксации силовых и кинематических параметров. Дополнительно параметры фиксировались с помощью штатных датчиков с CAN шины. При этом фиксировались значения угловых скоростей вала электродвигателя и положение педали хода. Для монотонного характера зависимости реализации процесса изменения положения педали хода и значений частоты вращения вала ротора приведены на рис. 4.

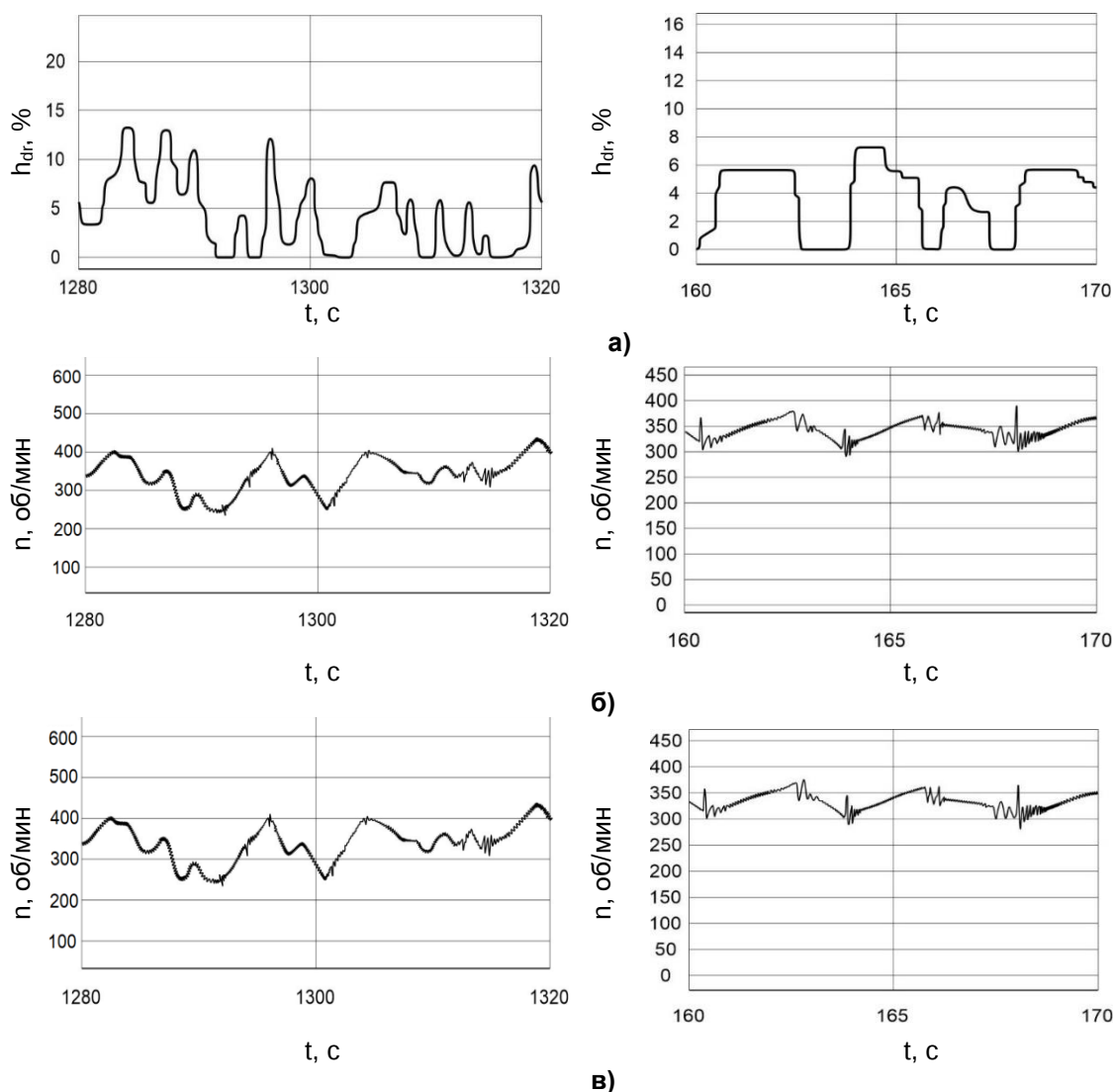


Рис. 4. Реализации частот вращения роторов тяговых электродвигателей при монотонном характере зависимости уставок крутящего момента (слева – фрагмент 1; справа – фрагмент 2):
 а) положение педали хода, %; б) частота вращения ротора левого электродвигателя, об/мин;
 в) частота вращения ротора правого электродвигателя, об/мин

Fig. 4. Realizations of rotation frequencies of traction electric motor rotors with a monotonic nature of the dependence of torque settings (left – fragment 1; right – fragment 2):
 а) position of the accelerator pedal, %; б) rotation frequency of the rotor of the left electric motor, rpm;
 в) rotation frequency of the rotor of the right electric motor, rpm

На рис. 4 отчетливо видны всплески на графиках угловых скоростей вращения роторов тяговых электродвигателей, свидетельствующие об ударной переключке зубьев в механической передаче. Данные всплески реализаций могут в дальнейшем провоцировать автоколебания в механической трансмиссии, которым могут способствовать процессы в зоне контакта шины с дорогой [16-36], а также в электрической машине [37, 38] подавляемые в последствие с помощью управления электромеханическим приводом [39].

S-образный характер зависимости уставки крутящего момента тягового электродвигателя положительно сказывается на режимах работы механического привода, позволяя избежать ударной переключки (пересопряжения зубьев). Реализации значений положения педали и частоты вращения вала двигателя приведены на рис. 5.

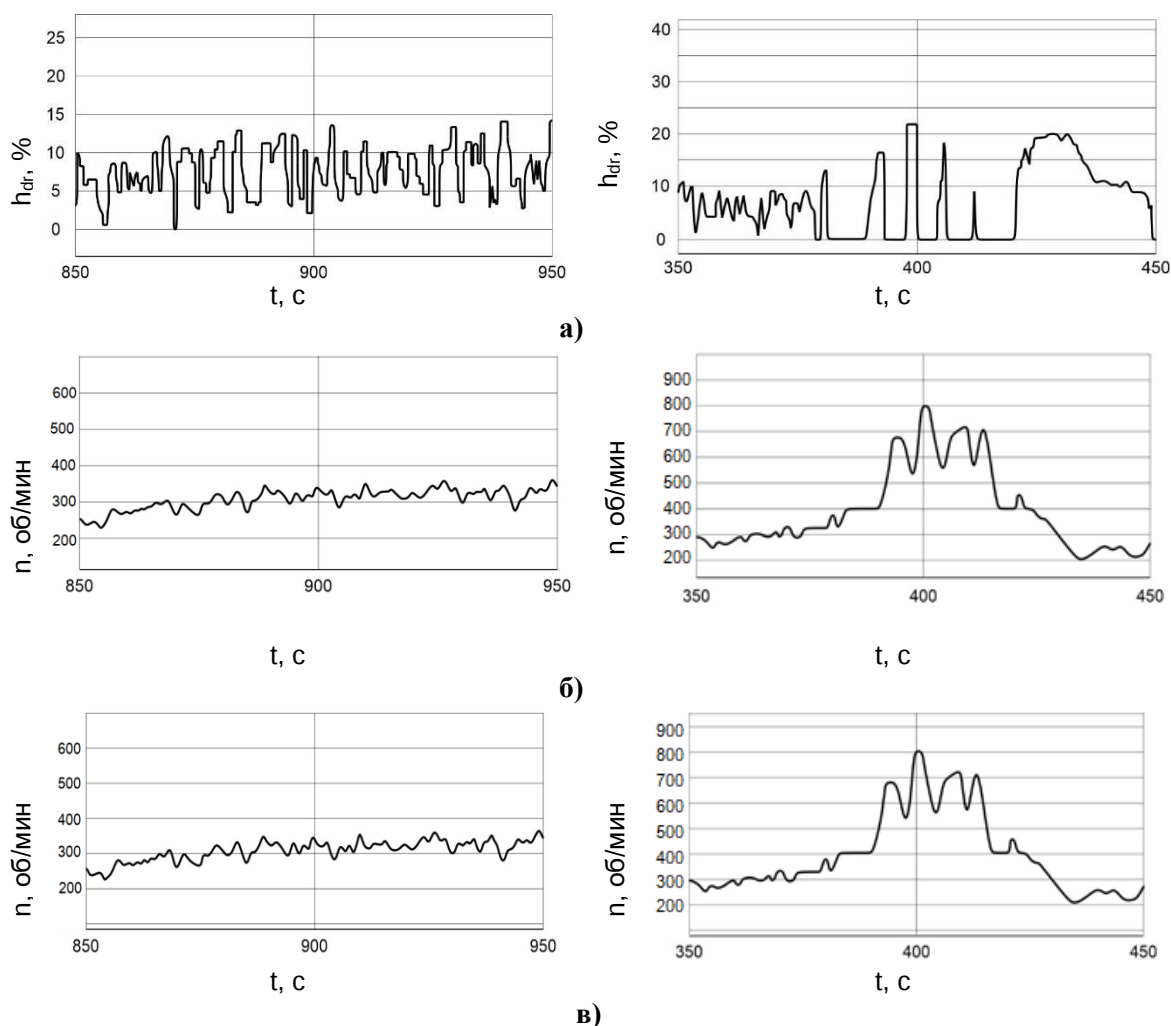


Рис. 5. Реализации положения педали хода и частот вращения роторов тяговых электродвигателей при S-образном характере зависимости уставок крутящего момента (слева – фрагмент 1; справа – фрагмент 2):

а) положение педали хода, %; б) частота вращения ротора левого электродвигателя, об/мин; в) частота вращения ротора правого электродвигателя, об/мин

Fig. 5. Realizations of the position of the accelerator pedal and the rotation frequencies of traction electric motor rotors with an S-shaped dependence of torque settings (left – fragment 1; right – fragment 2):

a) the position of the accelerator pedal, %; b) rotation frequency of the rotor of the left electric motor, rpm; c) rotation frequency of the rotor of the right electric motor, rpm

Исследование величины рекуперативного момента на энергоэффективность

Наличие режима замедления при отпускании педали хода (зоны I и II – рис. 2, 3) позволяет не только снизить динамическую нагруженность механических передач при переходных режимах движения, но и повысить энергоэффективность. Влияние на энергоэффективность проанализировано в процессе испытательных заездов исследуемого транспортного средства при осуществлении движения по циклу соответствующему городскому движению. Влияние величины рекуперативного момента при движении по инерции приведены в табл. 1.

При уменьшении рекуперативного крутящего момента удельный расход энергии на движение снижается, ввиду увеличения общего пути, пройденного транспортным средством. Однако величина уставки максимального рекуперативного момента при электродинамическом торможении и при движении по инерции должна иметь возможность настройки водителем или изменяться адаптивно в зависимости от условий движения.

Таблица 1.

Влияние уставки рекуперативного момента в диапазоне положения педали $h_{dru} - h_{drd}$

Table 1.

Effect of regenerative torque setting in the pedal position range $h_{dru} - h_{drd}$

Рекуперативный крутящий момент в диапазоне $h_{dru} - h_{drd}$, Нм	25	40	60	80
Удельный расход энергии на движение, кВт·ч/км	0,80	0,80	0,83	0,82
	0,55	0,57	0,56	0,57
	0,74	0,75	0,78	0,79

Высокое значение момента способствует излишней динамике замедления и уменьшает путь выбега, что мало энергоэффективно. Низкий рекуперативный момент не обеспечивает требуемого замедления при движении накатом.

Выводы

При введении в управление электромеханической силовой передачей S-образного закона управления устраняются колебательные явления в механических передачах при изменении режима движения с тягового на тормозной или движения по инерции, что выражается в отсутствие всплесков угловых скоростей вращения деталей. При этом снижается их динамическая нагруженность при изменении направления нагрузки в зубчатых зацеплениях – пересопряжении зубьев, за счет достижения изменения режима при нулевых производных изменения крутящего момента электродвигателя.

Величина рекуперативного момента, развиваемого электродвигателем при отпускании педали хода, влияет на энергоэффективность движения. Высокие значения рекуперативного момента увеличивают удельные затраты энергии за счет уменьшения тормозного пути на выбеге, что заставляет водителя воздействовать на педаль хода, переводя силовую передачу в тяговый режим.

Библиографический список

1. Бутарович, Д.О. Алгоритм управления рекуперативным торможением с помощью педали акселератора / Д.О. Бутарович, Г.И. Скотников, А.В. Эраносян // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 4. С. 275-281.
2. Wen, He. A single-pedal regenerative braking control strategy of accelerator pedal for electric vehicles based on adaptive fuzzy control algorithm / He Wen, Ch. Wang, Hui, Jia // Energy Procedia. 2018. Vol. 152. Pp. 624-629. – doi:10.1016/j.egypro.2018.09.221
3. Yongqiang, Zhao. A research on evaluation and development of single-pedal function for electric vehicle based on PID / Zhao Yongqiang, Xin Zhang, Jiashi Li et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1605.
4. Hongwen, He. An intelligent braking system composed single-pedal and multi-objective optimization neural network braking control strategies for electric vehicle / He Hongwen, Chen Wang; Hui Jia, Xing Cui // Applied Energy. 2020. No 259. (C). – doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114172.
5. Zhang, J. Cooperative control of regenerative braking and hydraulic braking of an electrified passenger car / J. Zhang, C. Lv, J. Gou et al. // Proc Inst Mech Eng, Part D: J Automob Eng 2012;226(10). Pp. 1289-302.
6. Guo, J. Regenerative braking strategy for electric vehicles[C] / J. Guo, J. Wang, B. Cao // Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2009. Pp. 864-868.
7. Guoqing. Xu. An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles[J] / Xu Guoqing, Li Weimin, Xu Kun et al. // Energies. 2011. No 4 (9). Pp. 1461-1477.
8. Zhang, J. Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus[J] / J. Zhang, C. Lv, M. Qiu et al. // Energy Conversion & Management, 2013, 76(76):1117-1124.

9. **Wang, J.W.** Spatially Piecewise Fuzzy Control Design for Sampled-Data Exponential Stabilization of Semi-linear Parabolic PDE Systems [J] / J.W. Wang, S.H. Tsai, H.X. Li et al. // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2018.
10. **Zhang, K.** A Comparative Study on Regenerative Braking System and Its Strategies for Rear-wheel Drive Battery Electric Vehicles [J] / K. Zhang, Xu Liangfei et al. // Automotive Engineering. 2015. No 02. Pp. 125-131.
11. **Lv, C.** Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles [J] / C. Lv, J. Zhang, Y. Li et al. // Energy Conversion and Management. 2015. Vol. 92. Pp. 469-482.
12. **Kulas, R.A.** A System Safety Perspective into Chevy Bolt's One Pedal Driving / Kulas, R.A., Rieland, H., and Pechauer, J., // SAE Technical Paper 2019-01-0133, 2019, doi:10.4271/2019-01-0133.
13. **Wang, J.** Evaluating the energy efficiency of a one pedal driving algorithm. 1-10. / J. Wang, I. Besselink, J. M., J. J. van Boekel, H. Nijmeijer // Paper presented at 2015 European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress (EEVC 2015), Brussels, Belgium.
14. Способ управления ускорением и замедлением транспортного средства тяговым электрическим приводом с помощью одной педали хода. Климов А.В., Жилейкин М.М., Оспанбеков Б.К., Анто-
нян А.В., Давоян Г.Ю. Патент на изобретение 2799275 С1, 04.07.2023. Заявка № 2023110482 от 24.04.2023.
15. Электробус КАМАЗ-6282. Официальный сайт [Электронный ресурс]: https://kamaz.ru/production/buses/pdf_062023/Электробус%20КАМАЗ-6282.pdf (дата обращения 04.03.2024).
16. Вильке, В.Г., Шаповалов И.Л. Автоколебания в процессе торможения автомобиля / Вильке В.Г., Шаповалов И.Л. // Вестник МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 2015. № 4. С. 33-39.
17. **Кручинин, П.А.** Математическая модель автомобильного колеса на антиблокировочных режимах движения / П.А. Кручинин, М.Х. Магомедов, И.В. Новожилов // Известия РАН, серия МТТ. 2001, № 6, С. 63-69.
18. **Awrejcewicz, J.** Estimation of chaotic and regular (stick-slip and ship-slip) oscillations exhibited by coupled oscillations with dry friction / J. Awrejcewicz, L. Dzyubak, C. Gheorghi // Nonlinear Dynamics. 2005. V. 42. № 2. P. 383-394.
19. **Pascal, M.** Dynamics and stability of a two degrees of freedom oscillator with an elastic stop // Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. 2006. Vol. 1. №1. P. 94-102.
20. **Shin, K.** Analysis of disk brake noise using a two-degrees-of-freedom model / K. Shin, M.J. Brennan, J.-E. Oh, C.J. Harris // Journal of Sound and Vibration. 2002. Vol. 254. № 5. P. 837-848.
21. **Ергин, А.А.** Антиблокировочная система управления тормозным приводом колеса автомобиля / А.А. Ергин, М.Б. Коломейцева, Г.О. Котиев Г.О. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 9. С. 11-13.
22. **Soliman, A.** An investigation of anti-lock braking system for automobiles / A. Soliman, M. Kaldas //SAE Tech. Paper. 2012. No 2012-01-0209. – doi: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0209>
23. Sun, C. Development of ABS ECU with hard ware-in-the-loop simulation based on labcar system / C. Sun, Pei //SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst. 2015. Vol. 8, No 1. Pp. 14-21. – doi: <https://doi.org/10.4271/2014-01-2524>.
24. **Sabbioni, E.** Analysis of ABS/ESP control logics using a HIL test bench / E. Sabbioni, F. Cheli, V. d'Alessandro // SAE Tech. Paper. 2011. No. 2011-01-0032, – doi: <https://doi.org/10.4271/2011-01-0032>
25. **Жилейкин, М.М.** Исследование автоколебательных процессов в зоне взаимодействия эластичной шины с твердым опорным основанием // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 10. С. 3-15. – doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-3-15.
26. **Жилейкин, М.М.** Метод выявления потери устойчивости движения тракторов при реализации тягового усилия на прицеп или сцепной агрегат / М.М. Жилейкин, П.В. Сиротин, С.С. Носиков, Н.Н. Пуляев // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 1. С. 39-48. – DOI 10.17816/0321-4443-321266. – EDN ZCQJYM.
27. **Грабар, И.Г.** Определение условий начала автоколебательных процессов в контакте модели пневматической шины с сыпучим грунтом / И.Г. Грабар, Е.Г. Опанасюк, Д.Б. Бегерский, О.Е. Опанасюк // Вісник СевНТУ. 2011. № 121. С. 139-142. – EDN UMXAMR.
28. **Клепиков, В.Б.** Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография / В.Б. Клепиков. – Харьков: Підручник НТУ «ХП», 2014. – 408 с. – ISBN 978-617-687-029-6.

29. **Klimov, A.V.** Research into the Peculiarities of the Individual Traction Drive Nonlinear System Oscillatory Processes / A.V. Klimov, B.K. Ospanbekov, A.V. Keller, S.S. Shadrin, D.A. Makarova, Y.M. Furlotov // World Electr. Veh. J. 2023, 14, 316. <https://doi.org/10.3390/wevj14110316>.
30. **Klimov, A.V.** Detecting Wheel Slip to Suppress Self-Excited Oscillations in Braking Mode / A.V. Klimov, B.K. Ospanbekov, A.V. Antonyan et al. // World Electric Vehicle Journal. 2024. Vol. 15, No. 8. P. 340. – DOI 10.3390/wevj15080340. – EDN FHAZAU.
31. **Климов, А.В.** Колебательные процессы в нелинейной системе индивидуального тягового электрического привода // Грузовик. 2023. № 7. С. 19-24. – DOI 10.36652/1684-1298-2023-7-19-24. – EDN RXPWMI.
32. **Климов, А.В.** Колебательные процессы в нелинейной системе индивидуального тягового электрического привода // Грузовик. 2023. № 7. С. 19-24. – DOI 10.36652/1684-1298-2023-7-19-24. – EDN RXPWMI.
33. **Климов, А.В.** Исследование особенностей протекания колебательных процессов в нелинейной системе индивидуального тягового привода электробуса / А.В. Климов, А.В. Антонян // Известия МГТУ МАМИ. 2023. Т. 17, № 1. С. 87-96. – DOI 10.17816/2074-0530-115233. – EDN DVWXHE.
34. **Климов, А.В.** Противобуксовочная система с функцией подавления автоколебаний колес в тяговом режиме работы // Труды НАМИ. 2023. № 3(294). С. 44-56. – DOI 10.51187/0135-3152-2023-3-44-56. – EDN XJXUWX.
35. **Климов, А.В.** Наблюдатель буксования ведущих колес с функцией подавления автоколебаний в тяговом режиме // Транспортные системы. 2023. № 2(28). С. 17-29. – DOI 10.46960/2782-5477_2023_2_17. – EDN HRSZDR.
36. **Климов, А.В.** Подавление автоколебаний ведущих колес в тормозном режиме // Грузовик. – 2023. № 9. С. 6-14. – DOI 10.36652/1684-1298-2023-9-6-14. – EDN PUCDXP.
37. Электрические машины: учебник для вузов. В двух томах. Том 2 / А.В. Иванов-Смольский – 3-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 532 с.
38. **Вольдек, А.И.** Электрические машины: учебник для студентов вузов. / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
39. ГОСТ Р 54810-2011 Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. – Введ. 2012.09.01. – М.: Стандартиформ. 2012. – 23 с.

*Дата поступления
в редакцию: 23.11.2024*

*Дата принятия
к публикации: 15.02.2025*