Научная статья
УДК 629.015
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-90-101
EDN: ZHDKFE

Check for updates

ВЛИЯНИЕ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ НА КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ПРИВОДЕ

А.В. Климов[1,2]
[1]ООО «Инновационный центр КАМАЗ», г. Москва, Россия
[2]Московский политехнический университет, г. Москва, Россия
klimmanen@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Актуальность. *В настоящее время транспортные средства с электромеханической силовой передачей и электрохимической аккумуляторной батареей в качестве источника энергии всё чаще можно встретить на улично-дорожной сети. Это электромобили, используемые как личный транспорт, электробусы как общественный пассажирский транспорт, 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 жёсткости внешней механической характеристики электродвигателя, создаются ситуации для возбуждения колебательных явлений. Особенно 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 перекладкой, т.е. вхождением в зацепление другой стороны зубьев. При быстром изменении крутящего момента такой процесс может сопровождаться ударом с последующим возбуждением фрикционных колебаний. Поэтому важно эффективно управлять назначением крутящего момента для устранения данных негативных явлений.*
Цель исследования. *Необходимо проверить влияние S-образного закона назначения крутящего момента в управлении электромеханической силовой передачи на динамическую нагруженность механической трансмиссии и на энергоэффективность движения.*
Материалы и методы. *Исследование влияния закона назначения крутящего момента выполнено с применением методов экспериментальных исследований.*
Результаты исследования. *S-образный закон назначения крутящего момента показал возможность исключения возбуждения колебаний при изменении режима движения и направления приложения нагрузки в механической трансмиссии силовой передачи. Высокое значение рекуперативного момента при отпускании педали хода и движении в тормозном режиме снижает эффективность движения, увеличивая удельные энергозатраты на 1 км пути.*
Заключение. *Применение S-образного закона назначения крутящего момента возможно для реализации алгоритмов управления движением и реализации программного обеспечения.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *колебания в электромеханической силовой передаче, перекладка зубьев, динамическая нагруженность, S-образный закон задания момента, энергоэффективность*

Статья поступила в редакцию 23.11.2024; одобрена после рецензирования 10.01.2025; принята к публикации 24.02.2025.
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Климов А.В. Влияние закона управления на колебательные процессы в электромеханическом приводе // *Вестник СибАДИ*. 2025. Т. 22, №1. С. 90-101. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-90-101

© Климов А.В., 2025

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-90-101
EDN: ZHDKFE

INFLUENCE OF THE CONTROL LAW ON OSCILLATORY PROCESSES IN ELECTROMECHANICAL DRIVE

Alexander V. Klimov[1,2]
[1]*OOO «KAMAZ Innovation Center», Moscow, Russia 2*
[2]*Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*
klimmanen@mail.ru

ABSTRACT

Relevance. *Currently, vehicles with electromechanical power transmission and electrochemical battery as the energy source are being registered on the road network. These are electric vehicles used as personal transport, electric buses as public passenger transport, electric cargo vehicles used for various needs. The main feature of this transport is related to providing the required power reserve for 1 charge. To do this, it is necessary to use advanced power transmission components, energy sources and control methods to minimize energy consumption. Since the processes in the electromechanical power transmission run at high speeds, in the motor control circuit with frequencies up to 10 kHz or more, situations of exciting oscillatory phenomena occur where low inertia and rigidity of the external mechanical characteristics of the electric motor are observed. In particular, the modes of changing driving conditions (traction, driven, braking) are of importance, which are accompanied by a change in the direction of force in the contact zone of the wheel and the road and the direction of load application in the gears. This process is accompanied by reconnection, i.e. meshing of the other side of the teeth. With a rapid change in torque, this process can be accompanied by a shock followed by excitation of frictional vibrations. Therefore, it is important to effectively control the torque to eliminate these negative consequences.*
The purpose of the study. *It is necessary to check the influence of the S-shaped law of torque setting in the control of an electromechanical power transmission on the dynamic load of a mechanical transmission and on the energy efficiency of movement.*
Materials and methods. *The study of the influence of the law of torque setting was carried out based on experimental research methods.*
The results of the study. *The S-shaped law of torque setting has shown the possibility of eliminating vibrations excitation when changing the driving mode and the direction of load application in the mechanical transmission of the power transmission. A high value of the regenerative torque when releasing the pedal and moving in braking mode results in reduced movement efficiency, increased specific energy consumption per 1 kilometer.*
Conclusion. *The application of the S-shaped law of torque setting is suitable for the implementation of motion control algorithms and software.*

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

The article was submitted: 23.11.2024; approved after reviewing: 10.01.2025; accepted for publication: 24.02.2025.
The author have read and approved the final manuscript.
Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Klimov A.V. Influence of the control law on oscillatory processes in electromechanical drive. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 90-101. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-90-101

© Klimov A.V., 2025

Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время транспортные средства с электромеханической силовой передачей и электрохимической аккумуляторной батареей в качестве источника энергии всё чаще можно встретить на улично-дорожной сети. Это электромобили, используемые как личный транспорт, электробусы как общественный пассажирский транспорт, грузовые электромобили, используемые для различных нужд. Главным свойством для 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 жёсткости внешней механической характеристики электродвигателя, создаются ситуации для возбуждения колебательных явлений. Особенно 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 перекладкой, т.е. вхождением в зацепление другой стороны зубьев. При быстром изменении крутящего момента такой 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 в себя тяговый привод и механическую трансмиссию, позволяет реализовывать рекуперативное замедление при отпускании педали хода. При этом можно выделить 3 зоны работы привода в зависимости от положения педали: I – тормозной режим; II – режим движения по инерции; III – тяговый режим (рисунки 1, 2, 3).

В режиме движения по инерции для снижения динамической нагруженности механической трансмиссии электродвигатель может реализовывать небольшой рекуперативный момент.

Также 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.

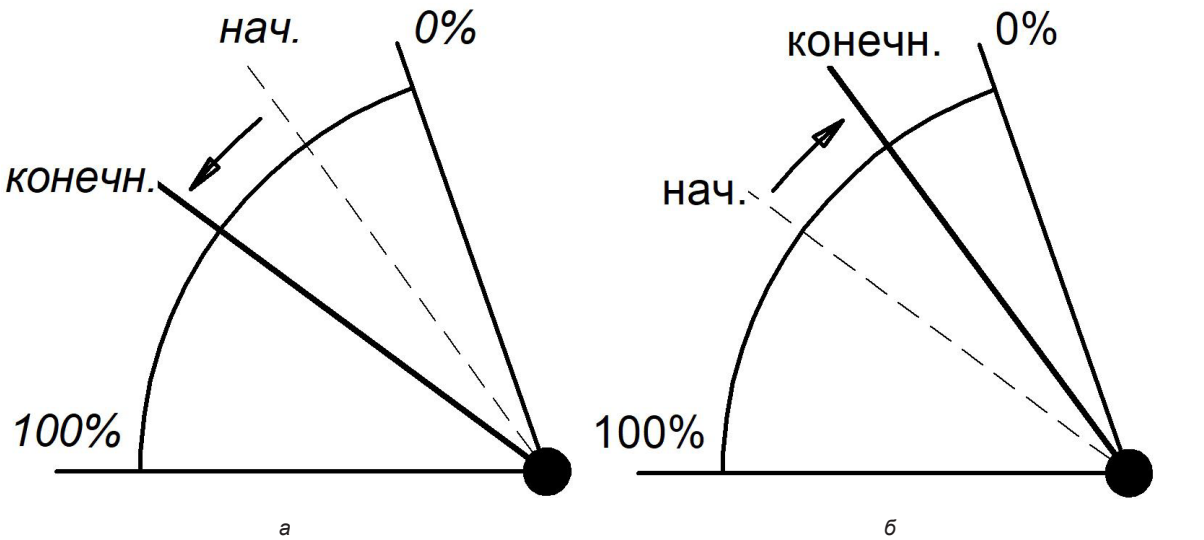

Рисунок 1 – Основные принципы управления ускорения и замедления: а – при разгоне (ускорении); б – при замедлении (торможении)
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Basic principles of acceleration and deceleration control: a – during acceleration (acceleration); b – during deceleration (deceleration)
Source: compiled by the authors.

© 2004–2025 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

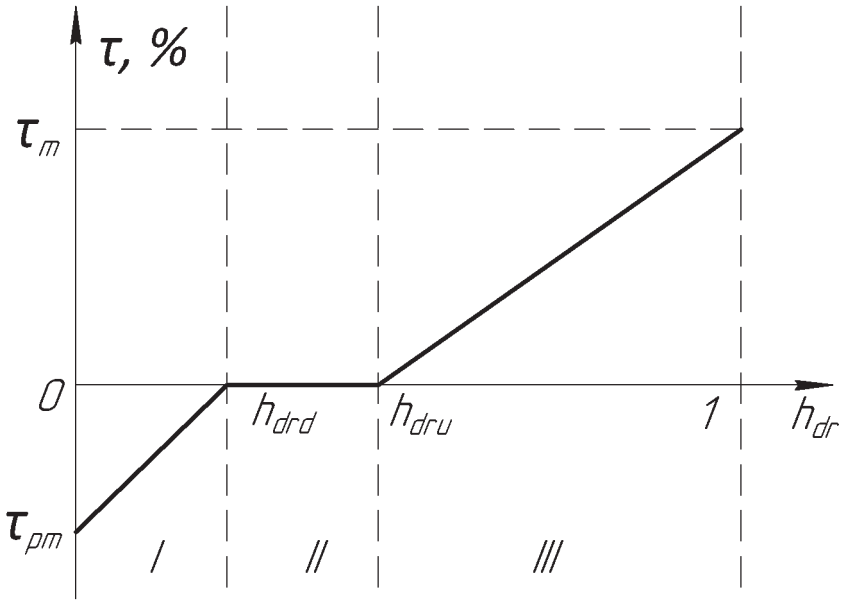

Рисунок 2 – Монотонный характер зависимости уставок крутящего момента τ от положения педали
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Monotonous character of dependence between torque settings and pedal position
Source: compiled by the authors.

Такое явления может возникать из-за изменения нагрузки как на выходном звене (колесе), так и на входном (вал электродвигателя). Последнее происходит из-за высокой жёсткости внешней характеристики привода и колебаний (пульсаций) крутящего момента из-за не идеальности электромагнитной системы и методов управления.

Очень важно реализовывать методы управления крутящих моментов, позволяющие исключить или минимизировать дополнительные динамические нагрузки. Поэтому целью исследования является проверка влияния на динамическую нагруженность различных законов задания момента.

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 монотонный характер зависимости уставок крутящего момента от положения педали (см. рисунок 2) и S-образный характер (см. рисунок 3) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Значение рекуперативного крутящего момента в режиме движения по инерции обеспечивает как имитацию сопротивления в трансмиссии, так и исключение указанных выше перекладок при колебаниях сопротивления движения и нормальной нагрузки на колёсах, а также влияет на энергоэффективность движения.

© 2004–2025 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

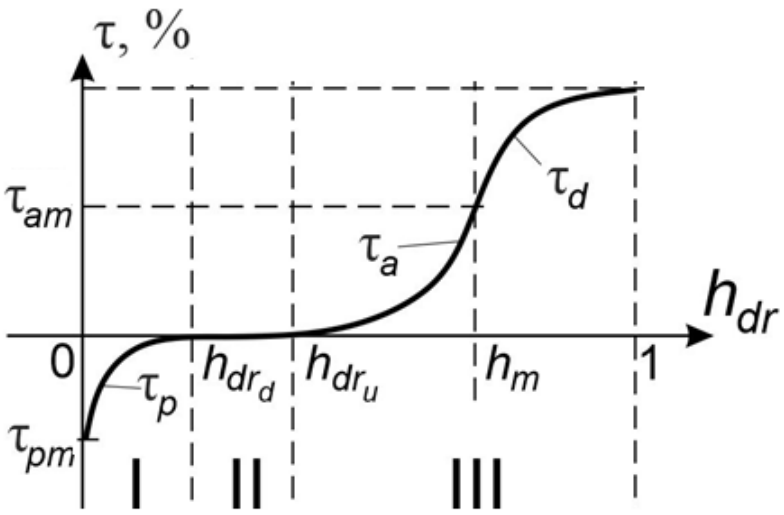

Рисунок 3 – S-образный характер зависимости уставок крутящего момента τ от положения педали h_{dr}[1]
Источник: составлено автором.

Figure 3 – S-shaped character of dependence between torque settings τ and pedal position[1] h_{dr}
Source: compiled by the authors.

При установке водителем педали в положение, соответствующее диапазону $h_{dru} – h_{drd}$ машина осуществляет движение по инерции (режим II). При этом значение рекуперативного крутящего момента в режиме движения по инерции $h_{dru} – h_{drd}$ обеспечивает как имитацию сопротивления в трансмиссии, так и исключение указанных выше перекладок при колебаниях сопротивления движения и нормальной нагрузки на колёсах, а также влияет на энергоэффективность движения. При установке педали в положение более чем h_{dru}, но менее чем h_m тяговый электрический привод переходит в тяговый режим (III), причём при S-образном законе управления уставка крутящего момента τ_m рассчитывается по полиноминальной зависимости $\tau_a = d\left(\frac{h_{dr}}{h_{dr_u}}\right)^n + e\left(\frac{h_{dr}}{h_{dr_u}}\right) + f$, где *d, e, f* – коэффициенты, определяемые из граничных условий.

В случае дальнейшего нажатия на педаль хода более чем h_m становится доступным использование максимального крутящего момента, и его уставка рассчитывается по полиноминальной зависимости $\tau_d = k{h_{dr}}^2 + lh_{dr} + m$, где *k, l u m* – коэффициенты, определяемые из граничных условий. Если водитель отпускает педаль и её положение находится в диапазоне от 0 до h_{drd}, тяговый привод переходит в режим рекуперативного торможения (режим I) с максимально возможной уставкой τ_{pm}. Закон назначения уставки при S-образном законе определяется полиномом $\tau_p = a\left(\frac{h_{dr}}{h_{dr_d}}\right)^2 + b\left(\frac{h_{dr}}{h_{dr_d}}\right) + c$, где a, b и c – коэффициенты, рассчитанные исходя из граничных условий. Коэффициенты полиномов при S-образном законе управления устанавливаются исходя из обеспечения перехода между режимами движения с нулевой скоростью изменения крутящего момента и асимптотического их приближения.

Были проведены испытательные заезды транспортного средства[2] 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 её отпускании на ровной асфальтовой дороге. На ведущие колёса устанавливались тензометрические колёса Kistler Rim для фиксации силовых и кинематических параметров. Дополнительно параметры фиксировались с помощью штатных датчиков с CAN шины.

[1] Патент РФ № 2799275 C1, 04.07.2023. Способ управления ускорением и замедлением транспортного средства тяговым электрическим приводом с помощью одной педали хода // Патент на изобретение № 2023110482 от 24.04.2023 / Климов А.В., Жилейкин М.М., Оспанбеков Б.К., Антонян А.В., Давоян Г.Ю.

© 2004–2025 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

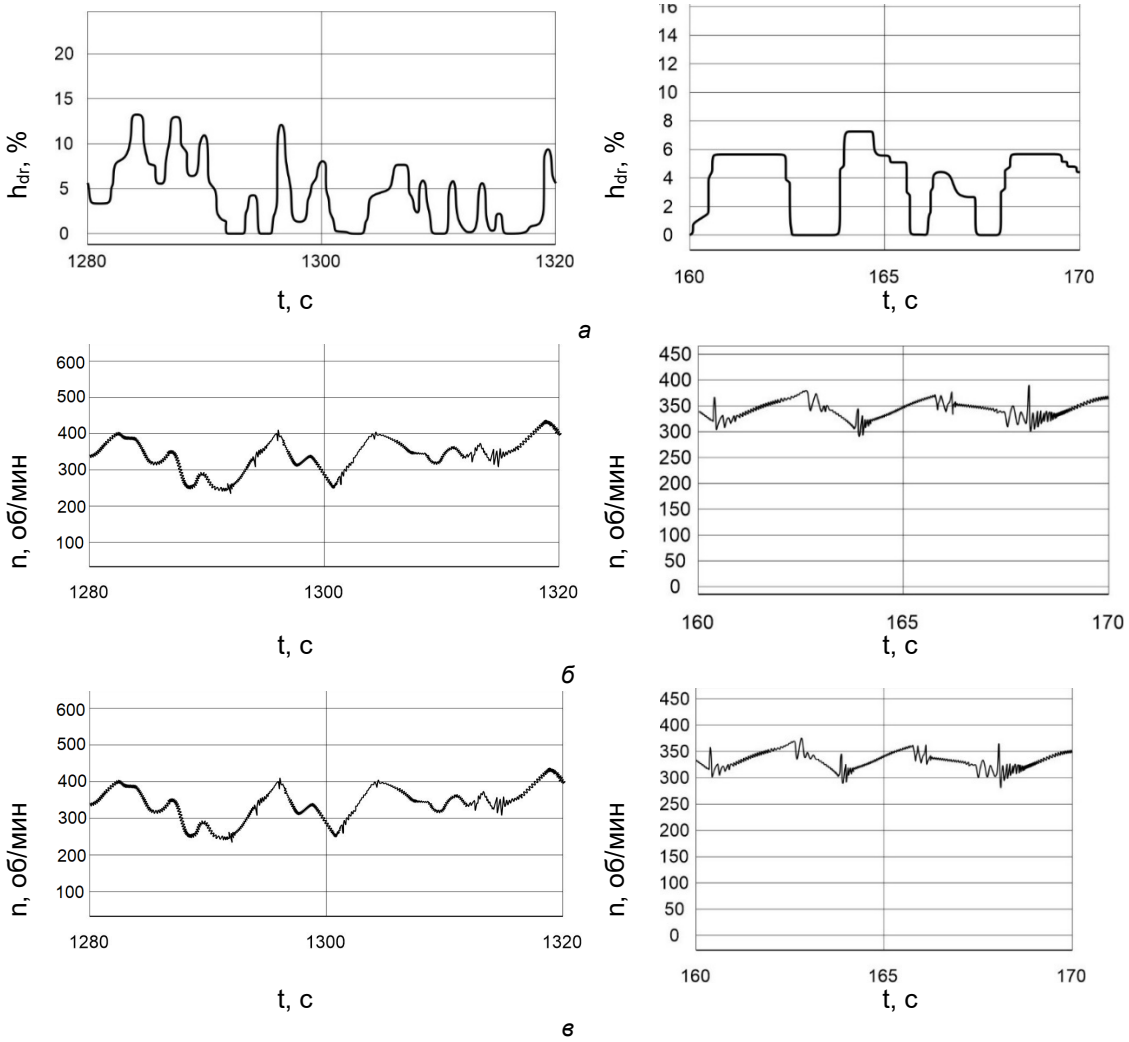

Рисунок 4 – Реализации частот вращения роторов тяговых электродвигателей при монотонном характере зависимости уставок крутящего момента (слева – фрагмент 1; справа – фрагмент 2):
а – положение педали хода, %;
б – частота вращения ротора левого электродвигателя, об/мин;
в – частота вращения ротора правого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

Figure 4 – Rotor speeds of traction motor with monotonous character of torque settings dependence (on the left – fragment 1; on the right – fragment 2):
a – position of the travel pedal, %;
b – rotor speed of the left electric motor, r/min;
c – rotor speed of the right electric motor, rpm[2]
Source: compiled by the authors.

[2] Электробус КАМАЗ-6282 [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. https://kamaz.ru/production/buses/pdf_062023/Электробус%20KAMAZ-6282.pdf (дата обращения: 04.03.2024).

© 2004–2025 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

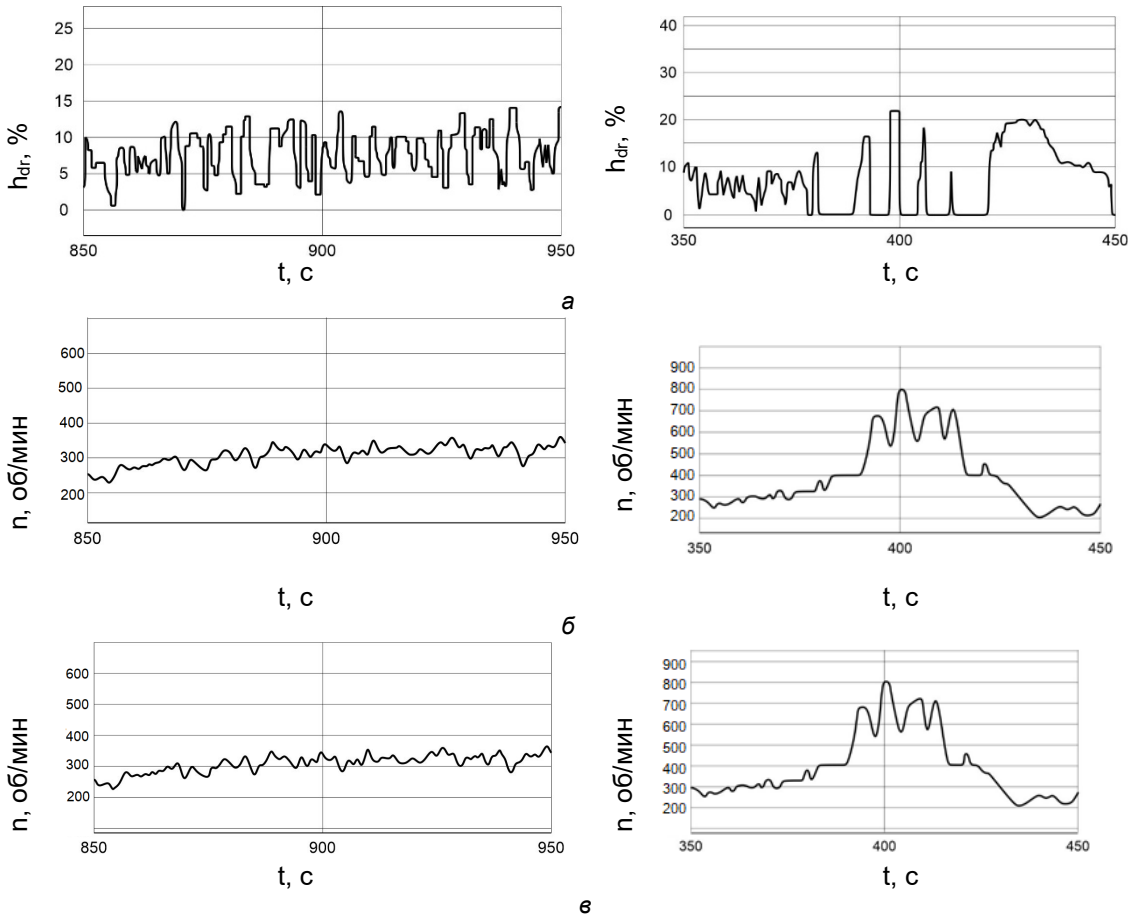

Рисунок 5 – Реализации положения педали хода и частот вращения роторов тяговых электродвигателей при S-образном характере зависимости уставок крутящего момента (слева – фрагмент 1; справа – фрагмент 2):
а – положение педали хода, %;
б – частота вращения ротора левого электродвигателя, об/мин;
в – частота вращения ротора правого электродвигателя, об/мин
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Travel pedal position and rotor speeds of traction motors with S-shaped character of torque settings dependence (on the left – fragment 1; on the right – fragment 2):
a – position of the travel pedal, %;
b – rotor speed of the left electric motor, r/min;
c – rotor speed of the right electric motor, r/min.
Source: compiled by the authors.

© 2004–2025 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

Таблица

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

Источник: составлено автором.

Table

Effect of regenerative torque setpoint in the pedal position range $h_{dru} – h_{drd}$

Source: compiled by the authors.

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

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 рисунке 4.

На рисунке 4 отчётливо видны всплески на графиках угловых скоростей вращения роторов тяговых электродвигателей, свидетельствующие об ударной перекладке 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 [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34], а также в электрической машине[3,4] подавляемые в последствии с помощью управления электромеханическим приводом[5].

S-образный характер зависимости уставки крутящего момента тягового электродвигателя положительным образом сказывается на режимах работы механического привода, позволяя избежать ударной перекладки (перекладок зубьев). Реализации значений положения педали и частоты вращения вала двигателя приведены на рисунке 5.

Исследование величины рекуперативного момента на энергоэффективность

Наличие режима замедления при отпускании педали хода (зоны I и II – см. рисунки 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[6] при осуществлении движения по циклу[7], соответствующему городскому движению[8]. Влияние величины рекуперативного момента при движении по инерции приведены в таблице.

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 электроди-

[3] 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.: ил.

[4] Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 3-е, перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с., ил.

[5] Патент РФ № 2797069 C1, МПК B60K 17/12, B60L 15/20, B60L 3/10. Способ управления индивидуальным тяговым электроприводом ведущих колёс многоколёсного транспортного средства: № 2023103483: заявл. 16.02.2023; опубл. 31.05.2023 / А.В. Климов, Б.К. Оспанбеков, М. М. Жилейкин [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество «КАМАЗ». EDN QAUBVR.

[6] Электробус КАМАЗ-6282 [Электронный ресурс]: [офиц. сайт]. https://kamaz.ru/production/buses/pdf_062023/Электробус%20KAMAZ-6282.pdf (дата обращения: 04.03.2024).

[7] ГОСТ Р 54810–2011 Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. Введ. 2012.09.01. М.: СТАНДАРТИНФОРМ. 2012. 23 с.

[8] Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 3-е , перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с., ил.

© 2004–2025 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

намическом торможении и при движении по инерции должна иметь возможность настройки водителем или изменяться адаптивно в зависимости от условий движения. 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 управление устраняет колебательные явления в механических передачах при изменении режима движения с тягового на тормозной или движения по инерции, что выражается в отсутствии всплесков угловых скоростей вращения деталей. При этом снижается их динамическая нагруженность при изменении направления нагрузки в зубчатых зацеплениях – перекладок зубьев, за счёт достижения изменения режима при нулевых производных изменениях 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 счёт уменьшения тормозного пути на выбеге, что заставляет водителя воздействовать на педаль хода переводя силовую передачу в тяговый режим.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бутарович Д.О., Скотников Г.И., Эраносян А.В. Алгоритм управления рекуперативным торможением с помощью педали акселератора // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 4. С. 275–281. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-04-275-281.

2. Wen, He & Chen, Wang & Hui, Jia. A single-pedal regenerative braking control strategy of accelerator pedal for electric vehicles based on adaptive fuzzy control algorithm. Energy Procedia. 2018. 152. pp. 624–629. doi: 10.1016/j.egypro.2018.09.221

3. Yongqiang, Zhao & Xin, Zhang & Jiashi, Li & Haitao, Huo & Teng, Ma & Chunyu, Zhou. A research on evaluation and development of single-pedal function for electric vehicle based on PID. Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1605.

4. Hongwen He; Chen Wang; Hui Jia and Xing Cui An intelligent braking system composed single-pedal and multi-objective optimization neural network braking control strategies for electric vehicle, Applied Energy. 2020. 259, (C) doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114172.

5. Zhang J, Lv C, Gou J, et al. Cooperative control of regenerative braking and hydraulic braking of an electrified passenger car. Proc Inst Mech Eng, Part D: J Automob Eng 2012; 226(10). pp. 1289–302.

6. Guo J, Wang J, Cao B. Regenerative braking strategy for electric vehicles[C] // Intelligent Vehicles Symposium. IEEE. 2009. pp. 864–868.

7. Xu Guoqing, Li Weimin, Xu Kun, et al. An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles[J]. Energies. 2011. 4(9). pp. 1461–1477.

8. Zhang J, Lv C, Qiu M, et al. Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus[J]. Energy Conversion & Management. 2013. 76(76). 1117–1124.

9. Wang J.W, Tsai S.H, Li H.X, et al. Spatially Piecewise Fuzzy Control Design for Sampled-Data Exponential Stabilization of Semi-linear Parabolic PDE Systems [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2018.

10. Zhang Kangkang, Xu Liangfei et al. A Comparative Study on Regenerative Braking System and Its Strategies for Rear-wheel Drive Battery Electric Vehicles [J]. Automotive Engineering. 2015,(02). pp. 125–131.

11. Lv C., Zhang J., Li Y., et al. Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles [J]. Energy Conversion and Management, 2015. 92. pp. 469–482.

12. Kulas R.A., Rieland H., and Pechauer J., “A System Safety Perspective into Chevy Bolt’s One Pedal Driving, ”SAE Technical Paper 2019-01-0133, 2019. DOI: 10.4271/2019-01-0133.

13. Wang J., Besselink I.J. M., van Boekel, J.J. P., & Nijmeijer, H. Evaluating the energy efficiency of a one pedal driving algorithm. 1-10. Paper presented at 2015 European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress (EEVC 2015), Brussels, Belgium. 2015.

14. Вильке В.Г., Шаповалов И.Л. Автоколебания в процессе торможения автомобиля // Вестник МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 2015. № 4. С. 33–39.

15. Кручинин П.А., Магомедов М.Х., Новожилов И.В. Математическая модель автомобильного колеса на антиблокировочных режимах движения. Известия РАН, серия МТТ. 2001. № 6. С. 63–69.

16. Awrejcewiez J., Dzyubak L., Grehori C. Estimation of chaotic and regular (stick-slip and ship-slip) oscillations exhibited by coupled oscillations with dry friction // Nonlinear Dynamics. 2005. V. 42. No.2. P. 383–394.

17. Pascal M. Dynamics and stability of a two degrees of freedom oscillator with an elastic stop // Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. 2006. V.1. No 1. P. 94–102.

18. Shin K., Brennan M.J., Oh J.-E., Harris C.J. Analysis of disk brake noise using a two-degrees-of-freedom model. Journal of Sound and Vibration. 2002. V. 254. No 5. P. 837–848.

© 2004–2025 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

19. Вильке В.Г., Шаповалов И.Л. Автоколебания в процессе торможения автомобиля // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2015. № 4. С 33–39.

20. Ергин А.А., Коломейцева М.Б., Котиев Г.О. Антиблокировочная система управления тормозным приводом колеса автомобиля. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 9. С. 11–13.

21. Soliman A., Kaldas M. An investigation of anti-lock braking system for automobiles. SAE Tech. Paper. 2012. no. 2012-01-0209. DOI: https://doi.org/10.4271/2012-01-0209

22. Sun C., Pei X. Development of ABS ECU with hard ware-inthe-loop simulation based on labcar system. 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.

23. Sabbioni E., Cheli F., d'Alessandro V. Analysis of ABS/ESP control logics using a HIL test bench. SAE Tech. Paper. 2011. no. 2011-01-0032. DOI: https://doi.org/10.4271/2011-01-0032

24. 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.

25. Жилейкин М.М., Сиротин П.В., Носиков С.С., Пуляев Н.Н. Метод выявления потери устойчивости движения тракторов при реализации тягового усилия на прицеп или сцепной агрегат // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 1. С. 39–48. DOI: 10.17816/0321-4443-321266. EDN ZCQJYM.

26. Грабар И.Г., Опанасюк Е.Г., Бегерский Д.Б., Опанасюк О.Е. Определение условий начала автоколебательных процессов в контакте модели пневматической шины с сыпучим грунтом // Вісник СевНТУ. 2011. № 121. С. 139–142. EDN UMXAMR.

27. Клепиков В.Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. Х.: Изд-во «Підручник НТУ "ХПІ"», 2014. 408 с. На рус. яз. ISBN 978-617-687-029-6.

28. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Keller A.V., Shadrin S.S., Makarova D.A., Furletov Y.M. Research into the Peculiarities of the Individual Traction Drive Nonlinear System Oscillatory Processes. World Electr. Veh. J. 2023. 14, 316. DOI: https://doi.org/10.3390/wevj14110316

29. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Antonyan A.V. [et al.] Detecting Wheel Slip to Suppress Self-Excited Oscillations in Braking Mode // World Electric Vehicle Journal. 2024. Vol. 15, No. 8. P. 340. DOI: 10.3390/wevj15080340. EDN FHAZAU.

30. 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.

31. Климов А.В., Антонян А.В. Исследование особенностей протекания колебательных процессов в нелинейной системе индивидуального тягового привода электробуса // Известия МГТУ МАМИ. 2023. Т. 17, № 1. С. 87–96. DOI: 10.17816/2074-0530-115233. EDN DVWXHE.

32. Климов А.В. Противобуксовочная система с функцией подавления автоколебаний колёс в тяговом режиме работы // Труды НАМИ. 2023. № 3(294). С. 44–56. DOI: 10.51187/0135-3152-2023-3-44-56. EDN XJXUWX.

33. 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.

34. 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.

REFERENCES

1. Butarovich D.O., Skotnikov G.I., Eranosyan A.V. Regenerative braking control algorithm using the accelerator pedal. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta,* 2022; 4: 275–281. (in Russ.) DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-04-275-281

2. Wen He & Chen Wang & Hui Jia. A single-pedal regenerative braking control strategy of accelerator pedal for electric vehicles based on adaptive fuzzy control algorithm. *Energy Procedia*. 2018; 152: 624–629. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.09.221

3. Yongqiang, Zhao & Xin, Zhang & Jiashi, Li & Haitao, Huo & Teng, Ma & Chunyu, Zhou. A research on evaluation and development of single-pedal function for electric vehicle based on PID. *Journal of Physics: Conference Series.* 2020.1605.

4. Hongwen He; Chen Wang; Hui Jia and Xing Cui An intelligent braking system composed single-pedal and multi-objective optimization neural network braking control strategies for electric vehicle, *Applied Energy*. 2020. 259, (C) DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114172.

5. Zhang J., Lv C., Gou J., et al. Cooperative control of regenerative braking and hydraulic braking of an electrified passenger car. Proc Inst Mech Eng, Part D: J *Automob Eng*. 2012; 226(10): 1289–302.

6. Guo J., Wang J., Cao B. Regenerative braking strategy for electric vehicles[C]. *Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, 2009: 864–868.

7. Xu Guoqing, Li Weimin, Xu Kun, et al. An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles[J]. *Energies*. 2011; 4(9): 1461–1477.

8. Zhang J., Lv C., Qiu M., et al. Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus[J]. *Energy Conversion & Management*. 2013; 76(76): 1117–1124.

9. Wang J.W, Tsai S.H, Li H.X., et al. Spatially Piecewise Fuzzy Control Design for Sampled-Data Exponential Stabilization of Semi-linear Parabolic PDE Systems [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018.

© 2004–2025 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

10. Zhang Kangkang, Xu Liangfei et al. A Comparative Study on Regenerative Braking System and Its Strategies for Rear-wheel Drive Battery Electric Vehicles [J]. *Automotive Engineering*. 2015; (02): 125–131.

11. Lv C., Zhang J., Li Y., et al. Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015; 92: 469–482.

12. Kulas R.A., Rieland H., and Pechauer J., "A System Safety Perspective into Chevy Bolt's One Pedal Driving, "SAE Technical Paper 2019-01-0133, 2019. DOI: 10.4271/2019-01-0133.

13. Wang J., Besselink I.J. M., van Boekel J. J. P., & Nijmeijer H. Evaluating the energy efficiency of a one pedal driving algorithm. 1-10. Paper presented at 2015 European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress (EEVC 2015), Brussels, Belgium. 2015.

14. Wilke V.G., Shapovalov I.L. Self-oscillations in the process of braking a car. *Bulletin of Moscow State University. Ser. 1. Mathematics, mechanics*. 2015; 4: 33–39.

15. Kruchinin P.A., Magomedov M.H., Novozhilov I.V. Mathematical model of an automobile wheel in anti-lock driving modes. *Mechanics of Solids.* 2001; 6: 63–69. (in Russ,)

16. Awrejcewiez J., Dzyubak L., Grehori C. Estimation of chaotic and regular (stick-slip and ship-slip) oscillations exhibited by coupled oscillations with dry friction. *Nonlinear Dynamics*. 2005; V. 42. No.2: 383–394.

17. Pascal M. Dynamics and stability of a two degrees of freedom oscillator with an elastic stop. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2006; V.1. No.1. P. 94–102.

18. Shin K., Brennan M.J., Oh J.-E., Harris C.J. Analysis of disk brake noise using a two-degrees-of-freedom model. *Journal of Sound and Vibration*. 2002; V. 254. No.5: 837–848.

19. Vil'ke V.G., Shapovalov I.L. Self-oscillations during car braking. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya* 1. *Matematika. Mekhanika.* 2015; 4: 33–39. (in Russ.)

20. Ergin A.A., Kolomejtseva M.B., Kotiev G.O. Antiblocking control system of the brake drive of automobile wheel. *Pribory i Sistemy Upravleniya*. 2004; (9): 11–13.

21. Soliman A., Kaldas M. An investigation of anti-lock braking system for automobiles. *SAE Tech. Paper.* 2012; 2012-01-0209. DOI: https://doi.org/10.4271/2012-01-0209

22. Sun C., Pei X. Development of ABS ECU with hard ware-inthe-loop simulation based on labcar system. SAE Int. J. Passeng. *Cars – Electron. Electr. Syst.* 2015; vol. 8, no. 1: 14–21. DOI: https://doi.org/10.4271/2014-01-2524.

23. Sabbioni E., Cheli F., d'Alessandro V. Analysis of ABS/ESP control logics using a HIL test bench. *SAE Tech. Paper*. 2011; 2011-01-0032. DOI: https://doi.org/10.4271/2011-01-0032

24. Zhileykin M.M. Research of Self-Oscillating Processes in the Zone of Interaction of an Elastic Tire with a Solid Support Base. BMSTU *Journal of Mechanical Engineering*. 2021; 10: 3–15, DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-3-15. (in Russ.)

25. Zhileykin M.M., Sirotin P.V., Nosikov S.S., Pulyaev N.N. Method for detecting the loss of stability of the movement of tractors when towing a trailer or a coupled unit. *Tractors and agricultural machinery*. 2023; Vol. 90, No. 1: 39–48. (in Russ) DOI: 10.17816/0321-4443-321266. EDN ZCQJYM.

26. Grabar I.G., Opanasyuk E.G., Begersky D.B., Opanasyuk O.E. Features of kinematics and dynamics of the multiwheel mover with dry soil interaction. *Visnik SevNTU*. 2011; 121: 139–142. (in Russ.) EDN UMXAMR.

27. Klepikov V.B. *Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: monograph.* Publishing house: "The assistant of NTU "KHPI"", 2014; 408. (In Rus.)

28. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Keller A.V., Shadrin S.S., Makarova D.A., Furletov Y.M. Research into the Peculiarities of the Individual Traction Drive Nonlinear System Oscillatory Processes. World Electr. Veh. J. 2023. 14, 316. DOI: https://doi.org/10.3390/wevj14110316

29. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Antonyan A.V. [et al.] Detecting Wheel Slip to Suppress Self-Excited Oscillations in Braking Mode. *World Electric Vehicle Journal*. 2024. Vol. 15, No. 8. P. 340. DOI: 10.3390/wevj15080340. EDN FHAZAU.

30. Klimov A.V. Oscillatory processes in a nonlinear system of an individual traction electric drive. *Truck.* 2023; 7: 19–24. DOI 10.36652/1684-1298-2023-7-19-24. EDN RXPWMI. (in Russ.)

31. Klimov A.V., Antonyan A.V. Research of features of oscillating process' behavior in the nonlinear system of individual traction drive of an electrobus. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2023; Vol. 17. No. 1: 87–96. DOI: 10.17816/2074-0530-115233

32. Klimov A.V. Traction control system with function of suppression of wheels self-oscillation in traction mode. *Trudy NAMI*. 2023; (3): 44–56. (In Russ.) https://doi.org/10.51187/0135-3152-2023-3-44-56

33. 33. Klimov A.V. The observer of the slipping of the driving wheels with the function of suppressing self-oscillations in traction mode. *Transport systems.* 2023; 2(28): 17–29. (in Russ.) DOI: 10.46960/2782-5477_2023_2_17. EDN HRSZDR.

34. Klimov A.V. Suppression of self-osculations of the drive wheels in braking mode. Truck. 2023; 9: 6–14. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-9-6-14. EDN PUCDXP. (in Russ.)

© 2004–2025 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Климов Александр Владимирович – канд. техн. наук, руководитель службы электрифицированных автомобилей ООО «Инновационный центр КАМАЗ» (121205, г. Москва, Инновационный центр Сколково, Большой бульвар, 62, оф. С-203); доц. Перспективной инженерной школы электротранспорта Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38).

ORCID: *https://orcid.org/0000-0002- 5351-3622,*
SPIN-код: *7637-3104,*
e-mail: *klimmanen@ mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Klimov Alexander V. – Cand. of Sci. (Eng.), Head of the Electric Vehicles Service, KAMAZ Innovation Center (121205, Moscow, Skolkovo Innovation Center, 62 Bolshoi Boulevard St., office C-203); Associate Professor at the Prospective Engineering School of Electric Transport, Moscow Polytechnic University (107023, Moscow, 38 Bolshaya Semyonovskaya St.).

ORCID: *https://orcid.org/0000-0002-5351-3622,*
SPIN-code: *7637-3104,*
e-mail: *klimmanen@mail.ru*

© 2004–2025 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal