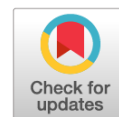


DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-633692>

Оригинальное исследование



Испытания эффективности алгоритма подавления автоколебаний при интенсивном торможении транспортного средства

А.В. Климов^{1, 2}

¹ Инновационный центр «КАМАЗ», Москва, Россия;

² Московский политехнический университет, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. При замедлении транспортного средства, в особенности на скользком покрытии, возможна потеря устойчивости движения системы электромеханического привода, сопровождающаяся возбуждением автоколебаний с высокими амплитудами. Зарождение автоколебаний возникает при росте скорости скольжения и снижении силы трения. При этом резко повышается динамическая нагруженность системы привода, что может привести к выходу её из строя. Вследствие этого разработка методов подавления автоколебательных явлений оказывается актуальной задачей.

Цель исследования — методами натурных экспериментов проверить работоспособность и эффективность метода подавления автоколебаний в электромеханической системе привода колеса при торможении.

Материалы и методы. Исследование работоспособности и эффективности алгоритма выполнено с применением методов натурных экспериментов.

Результаты исследования. С помощью метода натурных экспериментов установлена работоспособность и эффективность алгоритма подавления автоколебаний при выполнении замедления, который позволяет снизить величины максимальных амплитуд в 6 раз, усреднённых амплитуд в 3–3,5 раза, исключая при этом изменения знака момента при интенсивных замедлениях транспортного средства.

Заключение. Алгоритм подавления автоколебаний можно рекомендовать для практической разработки систем управления замедлением транспортных средств.

Ключевые слова: автоколебания; демпфирование; интенсивное торможение; импульсное подавление колебаний; скольжение; испытания.

Как цитировать:

Климов А.В. Испытания эффективности алгоритма подавления автоколебаний при интенсивном торможении транспортного средства // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 4. С. 312–323. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-633692>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-633692>

Original Study Article

Testing the effectiveness of the algorithm for suppressing self-oscillations during intensive braking of a vehicle

Alexander V. Klimov^{1, 2}¹ KAMAZ Innovation Center, Moscow, Russia;² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: When the vehicle slows down, especially on slippery surfaces, it is possible to lose the motion stability of the electromechanical drive system, accompanied by the excitation of self-oscillations with high amplitudes. The origin of self-oscillations occurs when the sliding speed increases and the friction force decreases. At the same time, the dynamic load of the drive system increases sharply, which can lead to its failure. As a result, the development of methods for suppressing self-oscillatory phenomena is a relevant task.

OBJECTIVE: Using the methods of field experiments, to test the operability and effectiveness of the method of suppressing self-oscillations in the electromechanical wheel drive system during braking.

METHODS: The study of the efficiency and effectiveness of the algorithm was carried out using the methods of field experiments.

RESULTS: Using the method of field experiments, the operability and effectiveness of the algorithm for suppressing self-oscillations during deceleration has been found, as it is capable of reducing the values of maximum amplitudes by 6 times, averaged amplitudes by 3–3.5 times, while excluding changes in the sign of the torque during intense vehicle decelerations.

CONCLUSIONS: The algorithm for suppressing self-oscillations can be recommended for the practical development of vehicle deceleration control systems.

Keywords: self-oscillation; damping; intensive braking; impulse suppression of vibrations; sliding; testing.

To cite this article:

Klimov AV. Testing the effectiveness of the algorithm for suppressing self-oscillations during intensive braking of a vehicle. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2024;18(4):312–323. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-633692>

Received: 23.06.2024

Accepted: 18.02.2025

Published online: 18.02.2025

ВВЕДЕНИЕ

Как показывает анализ, проведённый [1–6], автоколебания в зоне взаимодействия эластичного колеса с опорным основанием при торможении возбуждаются в конечной фазе процесса замедления и могут иметь значительную интенсивность, что негативно сказывается на качестве процесса замедления и управляемости машины. Автоколебания сопровождаются увеличением в несколько раз амплитуд колебаний кинематических и силовых параметров процессов, протекающих в нелинейных системах, увеличивают их динамическую нагруженность, приводя к входу из строя. В [7–10] показано, что автоколебательные процессы при их возбуждении можно эффективно подавлять, выводя из системы провоцирующую их энергию. Для индивидуального электро-механического привода колёс предложено использовать демпфирующий крутящий момент прямо пропорциональный угловой скорости колёс $M_d = -K_w \omega_k f_{relay}$, (здесь K_w — коэффициент вязкого трения или коэффициент демпфирования).

Для активного подавления автоколебаний коэффициент демпфирования должен быть $K_w \geq 2\sqrt{J_k C_m}$ [7–10], где J_k — момент инерции колеса и механического привода, а угловую жёсткость C_{mi} для колеса можно оценить в процессе управления как отношение приращения реализуемого приводом момента и ускорения/замедления

колеса $C_{mi} = \frac{\Delta M_{ti}}{\Delta \omega_{ki}}$.

Испытаниям подвергалось транспортное средство, оснащённое индивидуальным тяговым электроприводом с функцией подавления автоколебаний и без неё. Основные характеристики электробуса и индивидуального тягового электрического привода приведены в [11].

Целью испытаний является проверка методами экспериментальных исследований эффективности работы алгоритма подавления автоколебаний в индивидуальном тяговом электроприводе электробуса большого класса.

ПРОГРАММА ИСПЫТАНИЙ ПО ПРОВЕРКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ АУТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

Транспортное средство для испытаний должно быть в 2 весовых состояниях: загружено на 100% до полной массы 18 000 кг и не загружено — иметь снаряжённую массу 12 200 кг.

Дорожные условия выбраны исходя из реализации повышенного проскальзывания ведущих колёс. Не должно наблюдаться сильного встречного ветра для исключения его влияния на динамику движения. Шины накачаны до давления, соответствующего технической документации, предварительно прогреты пробегом протяжённостью не менее 1 км скоростью не менее 25 км/ч.

Степень заряженности тяговой аккумуляторной батареи должна быть достаточной для обеспечения необходимой динамики движения и не оказывать влияния на тягово-скоростные характеристики привода.

В табл. 1 приведён перечень испытаний при исследовании эффективности алгоритма подавления автоколебаний при выполнении интенсивного замедления.

В качестве опорного основания выбран мокрый базальт.

ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ

Системы транспортного средства оснащены датчиками для фиксации параметров процессов их работы. Тяговый электрический привод оснащён датчиками частоты вращения ротора и фазных токов, позволяющими автономному инвертору напряжения рассчитывать развиваемый электромагнитный момент двигателя с помощью наблюдателя электромагнитного момента [12], нагрузка на колесе определяется с помощью наблюдателя момента сопротивления в процессе управления [13]. Регистрируется

Таблица 1. Программа испытаний при выполнении интенсивного замедления

Table 1. Testing procedure at performing intensive deceleration

Вид испытаний	Описание
Интенсивное торможение на горизонтальном скользком опорном основании (с 20 км/ч до остановки) с активированным и деактивированным рекуперативным торможением	Интенсивное замедление до полной остановки при полностью нажатой педали тормоза. Оба колеса на скользком опорном основании. Интенсивное замедление до полной остановки при полностью нажатой педали тормоза. Правое колесо на скользком опорном основании, левое — на сухом. Интенсивное замедление до полной остановки при полностью нажатой педали тормоза. Левое колесо на скользком опорном основании, правое — на сухом.
Интенсивное торможение на горизонтальном меняющемся опорном основании (с 20 км/ч до остановки)	Левое колесо стартует со скользкого покрытия и переходит на сухой асфальт. Правое колесо стартует со скользкого покрытия и переходит на сухой асфальт. Оба колеса стартуют со скользкого покрытия и переходят на сухой асфальт.

также угловая скорость всех колёс. Динамика кузова транспортного средства регистрируется с помощью датчиков линейных и угловых ускорений по всем координатам.

Для фиксации данных использовался адаптер Vector VN1630A (рис. 1) для подключения сети CAN к ЭВМ. Для анализа данных использовалось программное обеспечение Vector CANoe.

Рабочее окно программы Vector CANoe показано на рис. 2, *a*, MatLab Simulink — на рис. 2, *b*.

Помимо регистрации данных с CAN шины производилась фиксация значений крутящего момента и угловых скоростей на ведущих колёсах с помощью тензометрических колёс Kistler RoaDyn. Измерительные колёса, установленные на ступицу ведущих колёс, показаны на рис. 3.

С помощью регистрирующей аппаратуры IMC-CRFX-400 (рис. 4) осуществлялась фиксация значений крутящего момента, частоты вращения ведущих колёс.

Дополнительно измеряются значения постоянного тока, потребляемого тяговыми электромеханическими приводами (рис. 5), для определения характера воздействия возбуждающихся колебательных явлений.



Рис. 1. Адаптер Vector VN1630A.

Fig. 1. The Vector VN1630A adapter.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ТОРМОЖЕНИИ С ДЕАКТИВИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ПОДАВЛЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Транспортное средство перед началом испытаний осуществляет разгон до требуемой скорости и при въезде на опорное основание с низким коэффициентом сцепления — мокрый базальт, осуществляется интенсивное торможение, во время которого водитель нажимает на педаль тормоза с максимальной скоростью до упора.

На рис. 6–11 показаны результаты выполненных заездов. На приведённых регистрируемых зависимостях отчётливо видны участки работы антиблокировочной системы, сопровождаемые при этом возбуждением автоколебательных явлений для крутящих моментов на колёсах. Обнаруживается изменение знака крутящего момента, приложенного к колесу, что свидетельствует о наличии перекадки зубьев в зацеплении при активации антиблокировочной системы. Для реализации частот вращения колёс в данном случае существенные возбуждения автоколебательных явлений не обнаружены.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ТОРМОЖЕНИИ С АКТИВИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ПОДАВЛЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ

На рис. 12–17 показаны результаты выполненных заездов при исследовании режима экстренного замедления на опорном основании с низкими сцепными

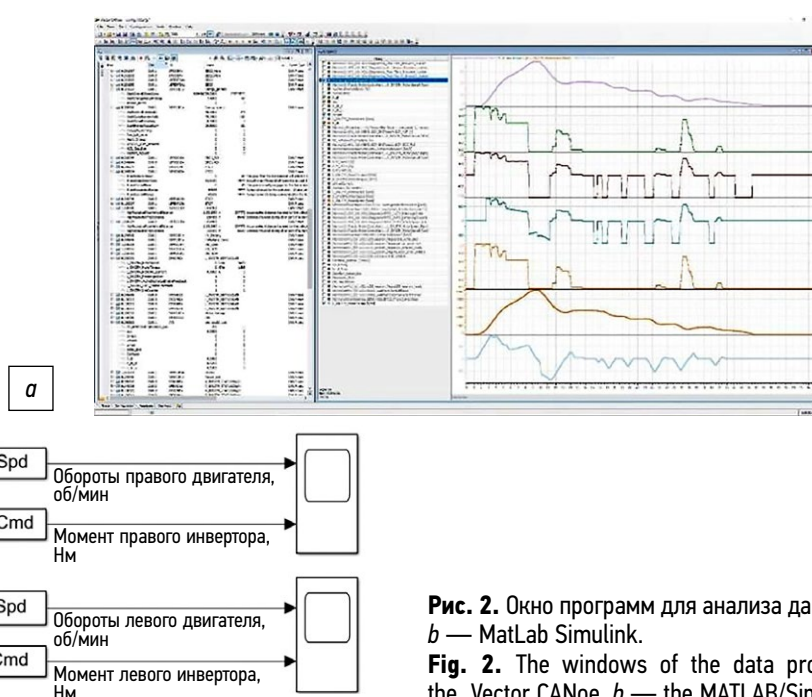


Рис. 2. Окно программ для анализа данных: *a* — Vector CANoe; *b* — MatLab Simulink.

Fig. 2. The windows of the data processing software: *a* — the Vector CANoe, *b* — the MATLAB/Simulink.



Рис. 3. Тензометрические измерительные колёса Kistler RoaDyn.
Fig. 3. The Kistler RoaDyn wheel force transducers.

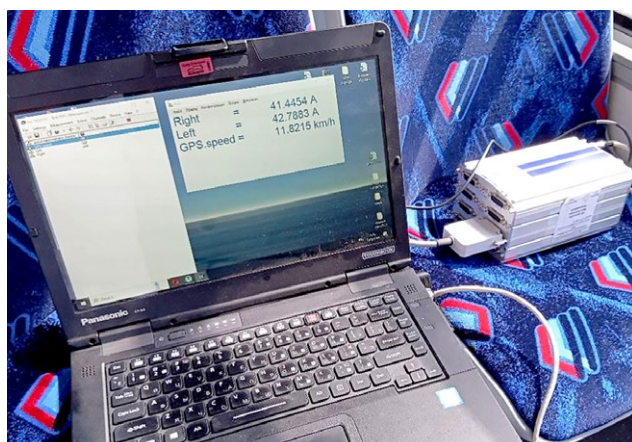


Рис. 4. Оборудование для сбора данных IMC-CRFX-400.
Fig. 4. The IMC-CRFX-400 data acquisition equipment.

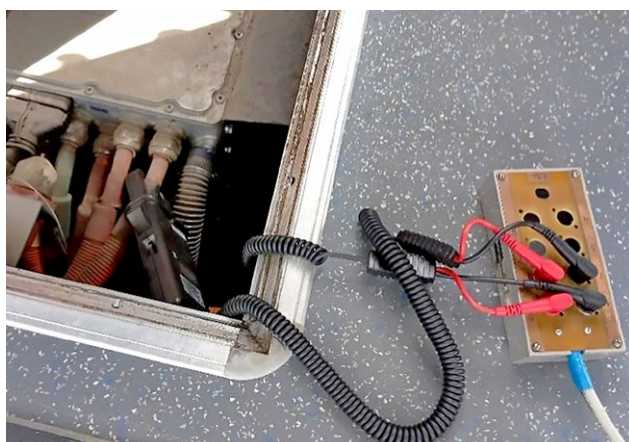


Рис. 5. Измерение потребляемого тока.
Fig. 5. The current consumption measuring.

свойствами для транспортного средства, оснащённого системой подавления автоколебаний.

На приведённых регистрируемых зависимостях отчётливо видны участки работы антиблокировочной системы при повышенном скольжении колёс. Возбуждаемые при этом колебательные явления менее интенсивны, чем в предыдущем случае, и характеризуются меньшим значением амплитуд, что свидетельствует об эффективности алгоритма подавления автоколебательных явлений. Для реализации частот вращения колёс в данном случае возбуждение автоколебательных явлений не обнаружено.

При интенсивных торможениях на опорном основании с низкими сцепными свойствами (лёд, лёд со снегом, мокрый асфальт и др.) для транспортного средства,

не оснащённого алгоритмом подавления автоколебаний, усреднённые амплитуды колебаний крутящих моментов находятся в диапазоне 1850...2500 Нм, с максимальными значениями амплитуды — в диапазоне 6000...8500 Нм.

При оснащении системы управления транспортного средства алгоритмом подавления автоколебаний при интенсивном торможении усреднённые амплитуды колебаний крутящих моментов находятся в диапазоне 500...750 Нм, с максимальными значениями амплитуды — в диапазоне 1000...1500 Нм.

Применение алгоритма подавления автоколебаний в системе управления позволяет снизить величины максимальных амплитуд в 6 раз, усреднённых амплитуд — в 3–3,5 раза, исключая при этом изменения знака момента.

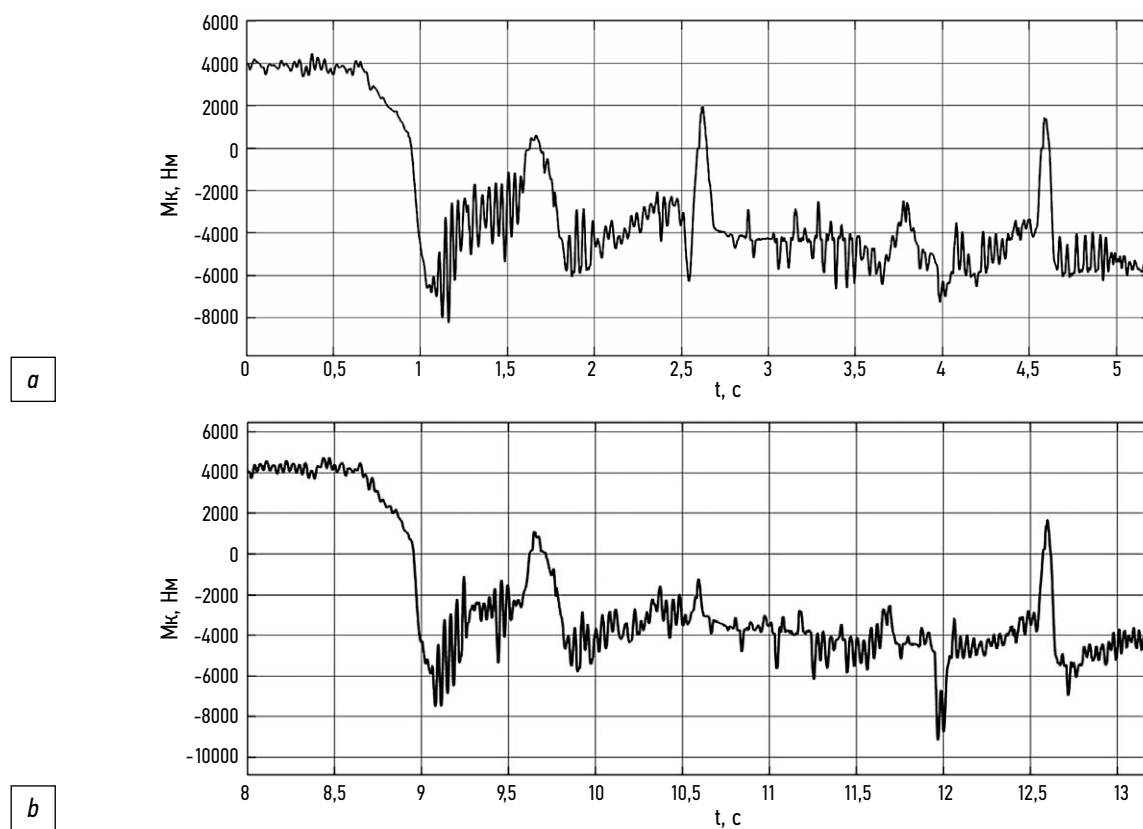


Рис. 6. Крутящий момент на колесе с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 1: *a* — левом; *b* — правом.
Fig. 6. Torque at the left (*a*) and right (*b*) wheels with the deactivated system of suppressing self-oscillations, ride № 1.

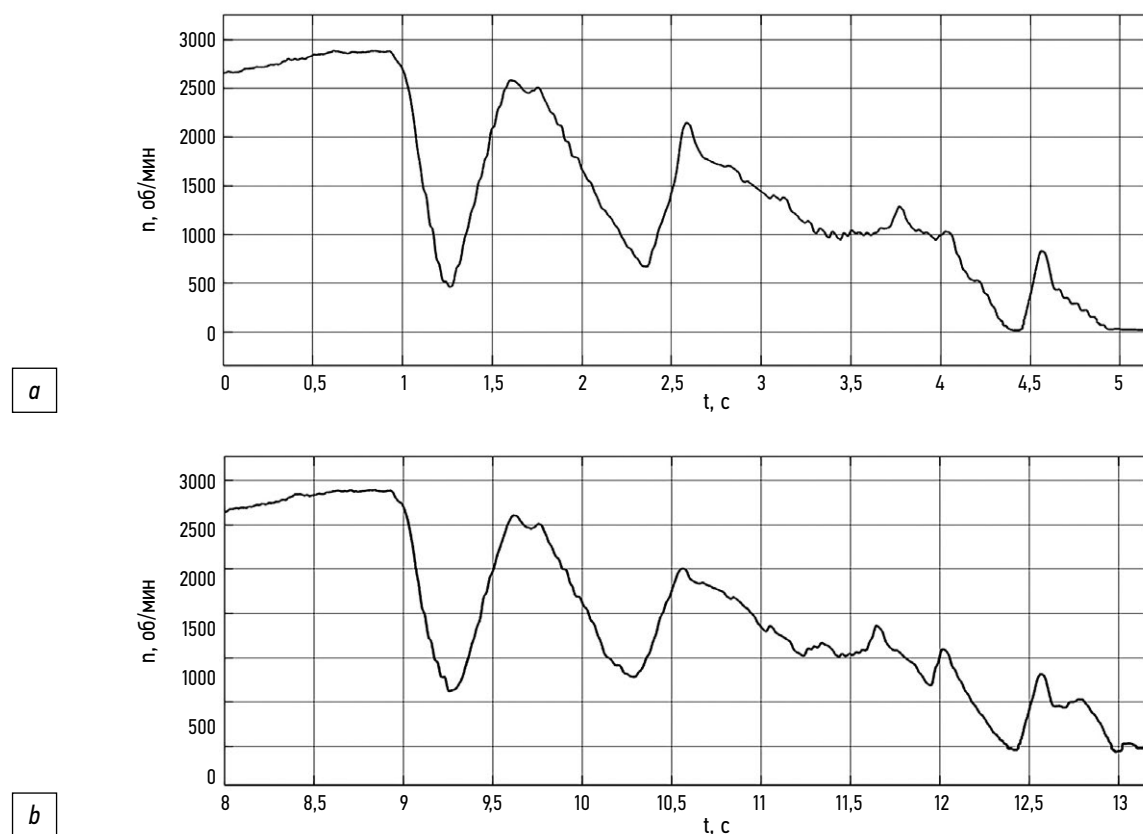


Рис. 7. Частота вращения колеса с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 1: *a* — левого; *b* — правого.
Fig. 7. Rotation velocity of the left (*a*) and right (*b*) wheels with the deactivated system of suppressing self-oscillations, ride № 1.

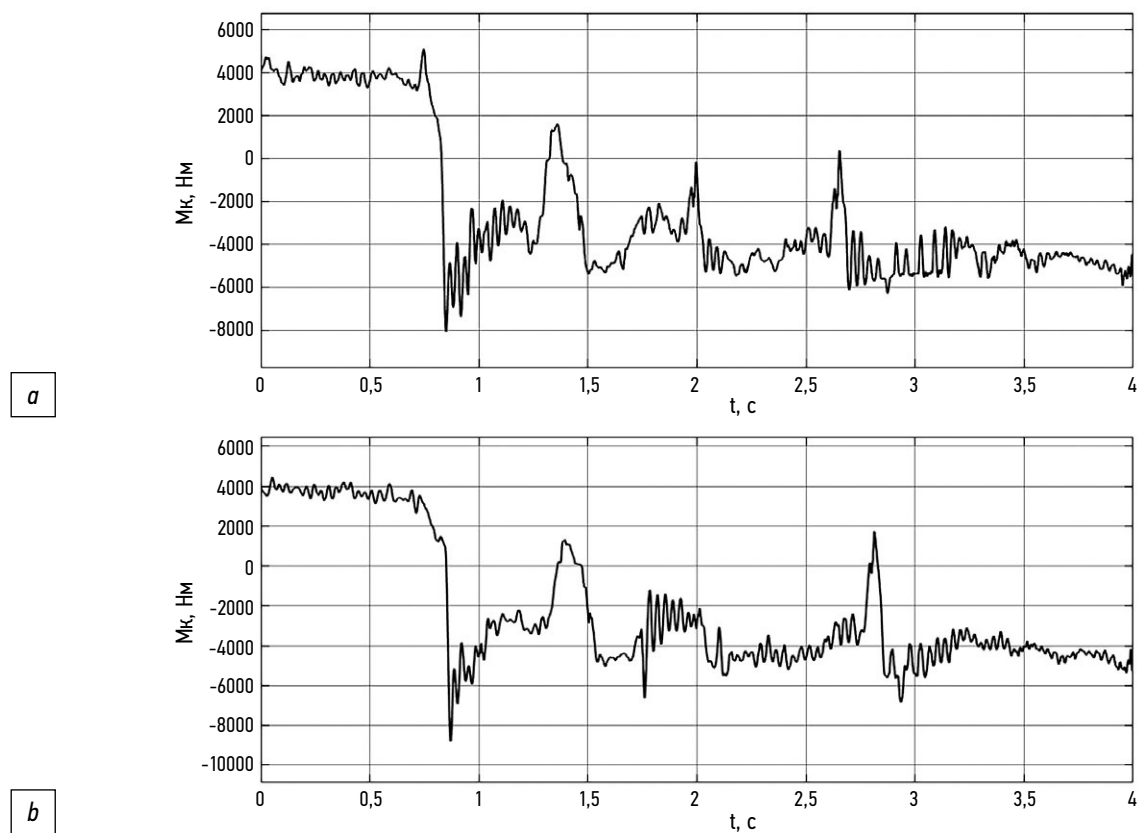


Рис. 8. Крутящий момент на колесе с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 2: *a* — левом; *b* — правом.
Fig. 8. Torque at the left (*a*) and right (*b*) wheels with the deactivated system of suppressing self-oscillations, ride № 2.

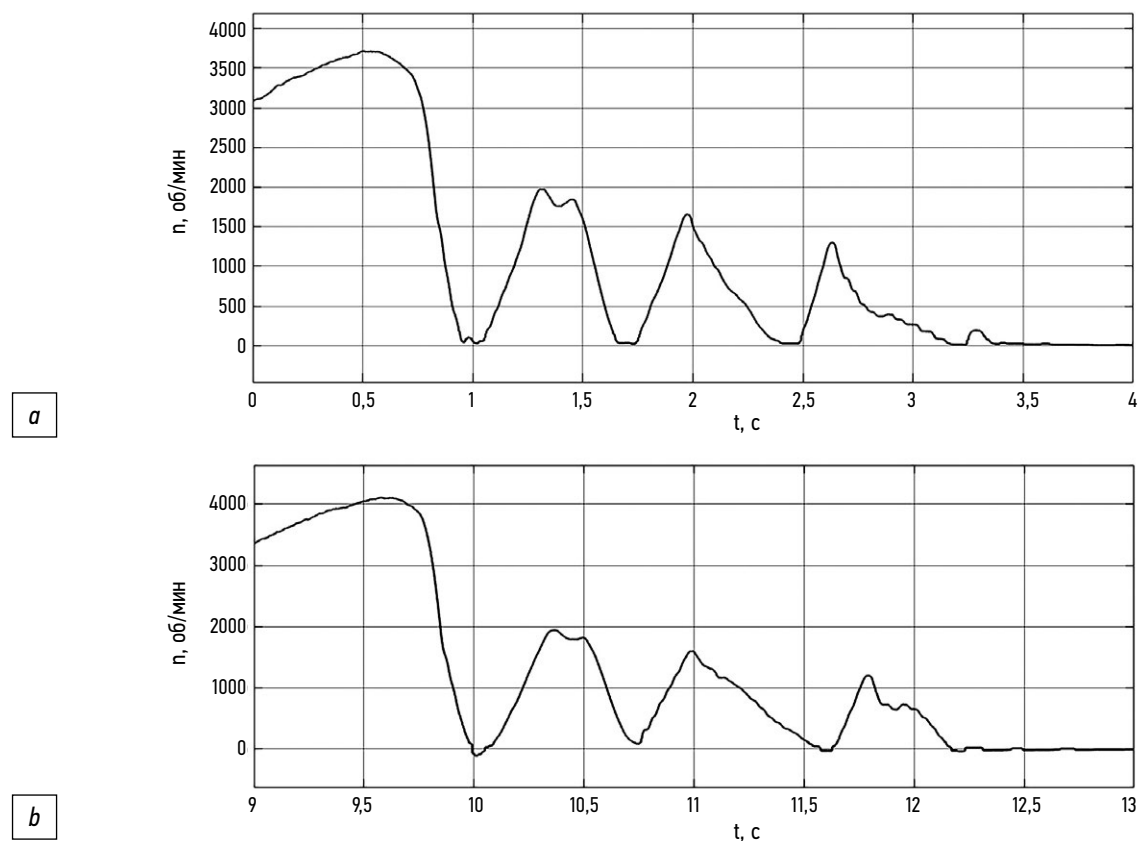
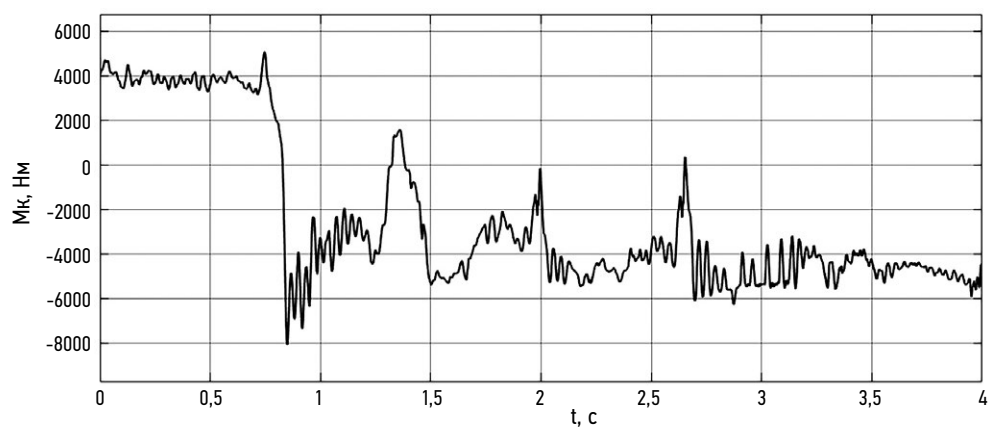
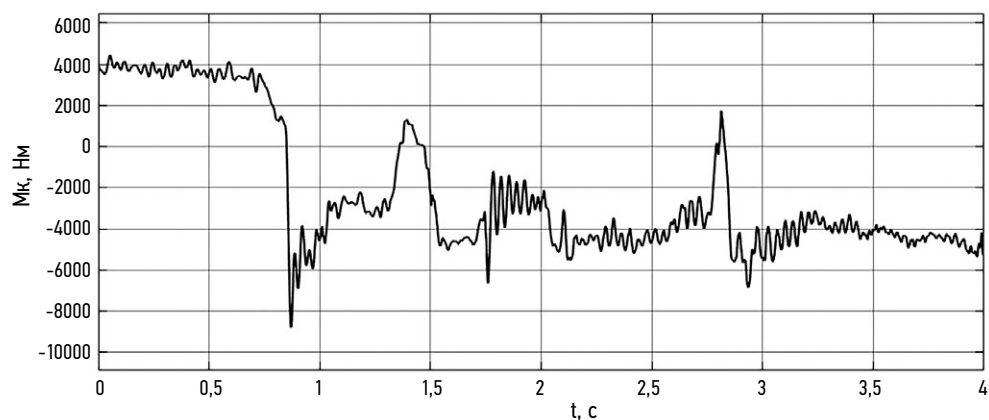


Рис. 9. Частота вращения колеса с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 1: *a* — левого; *b* — правого.
Fig. 9. Rotation velocity of the left (*a*) and right (*b*) wheels with the deactivated system of suppressing self-oscillations, ride № 2.

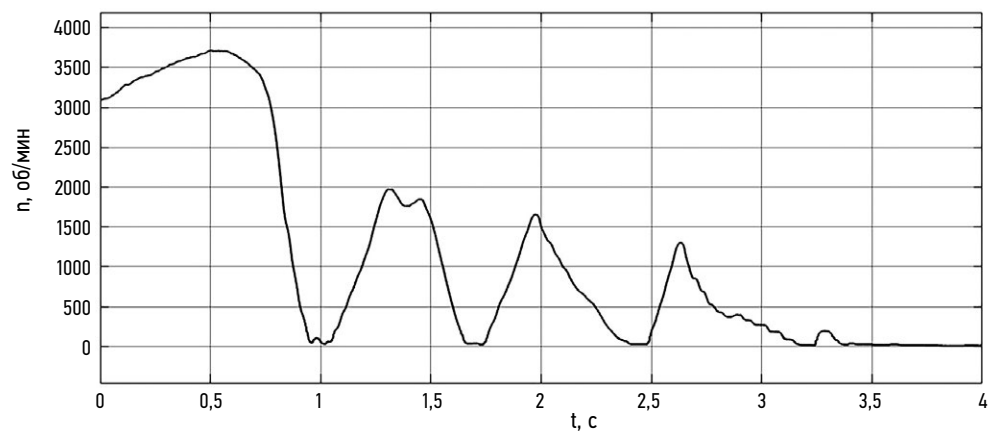


a

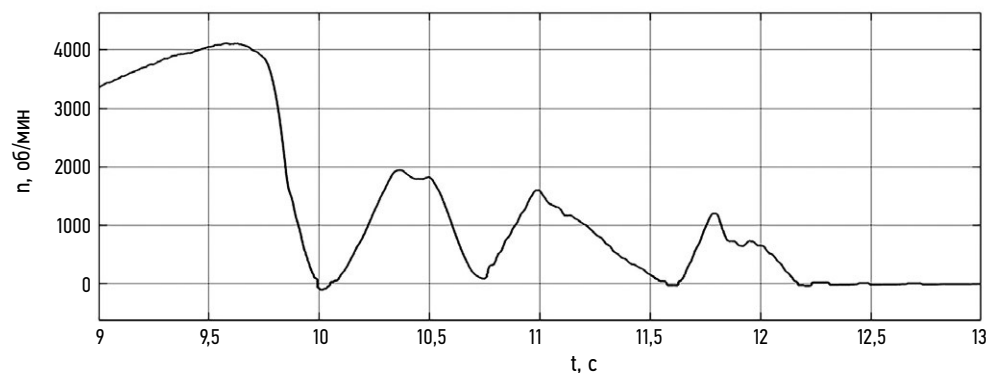


b

Рис. 10. Крутящий момент на колесе с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 3: *a* — левом; *b* — правом.
Fig. 10. Torque at the left (*a*) and right (*b*) wheels with the deactivated system of suppressing self-oscillations, ride № 3.

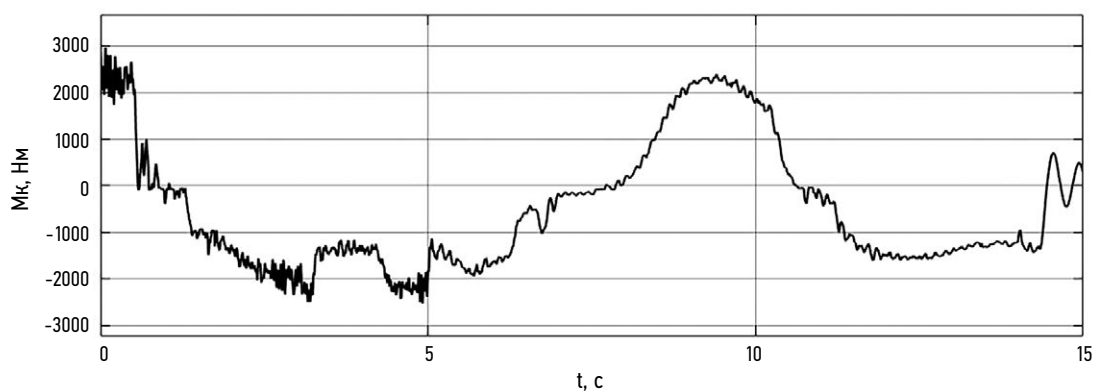


a

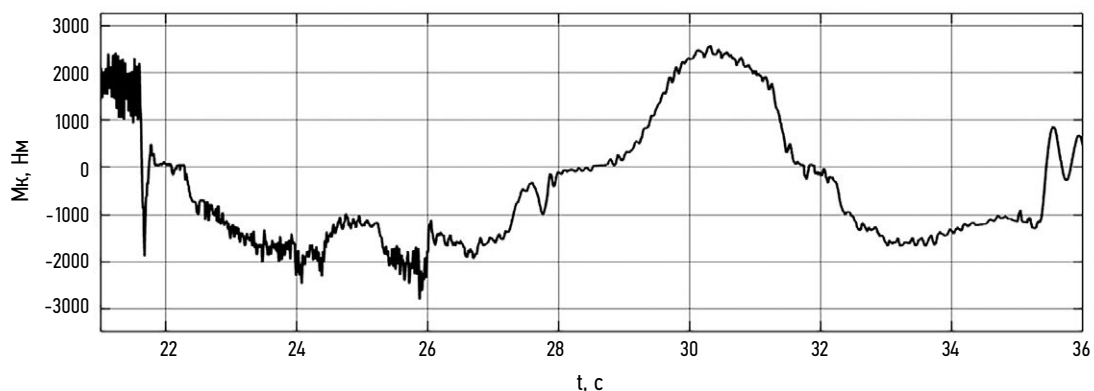


b

Рис. 11. Частота вращения колеса с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 3: *a* — левого; *b* — правого.
Fig. 11. Rotation velocity of the left (*a*) and right (*b*) wheels with the deactivated system of suppressing self-oscillations, ride № 3.

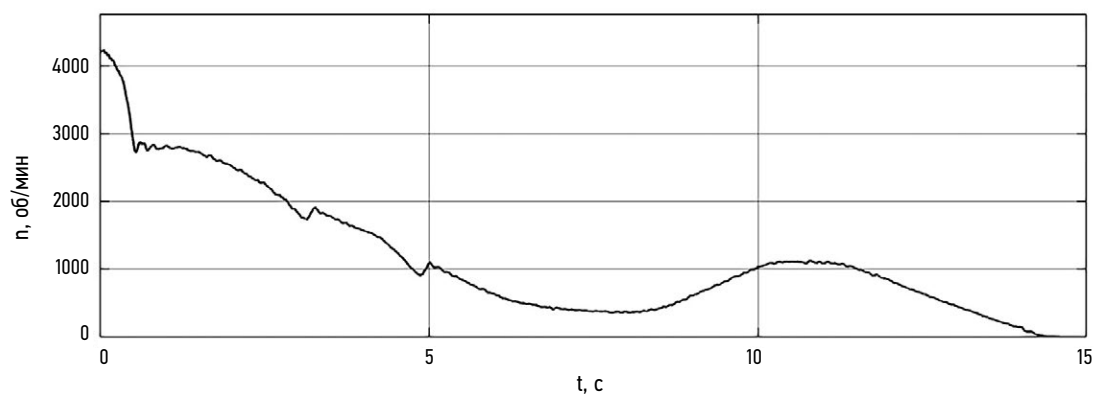


a

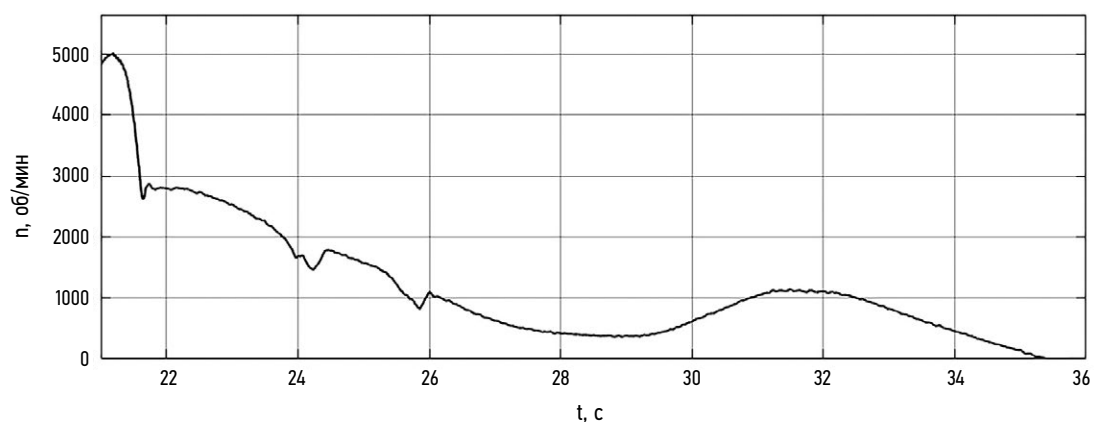


b

Рис. 12. Крутящий момент на колесе с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 1: *a* — левом; *b* — правом.
Fig. 12. Torque at the left (*a*) and right (*b*) wheels with the activated.

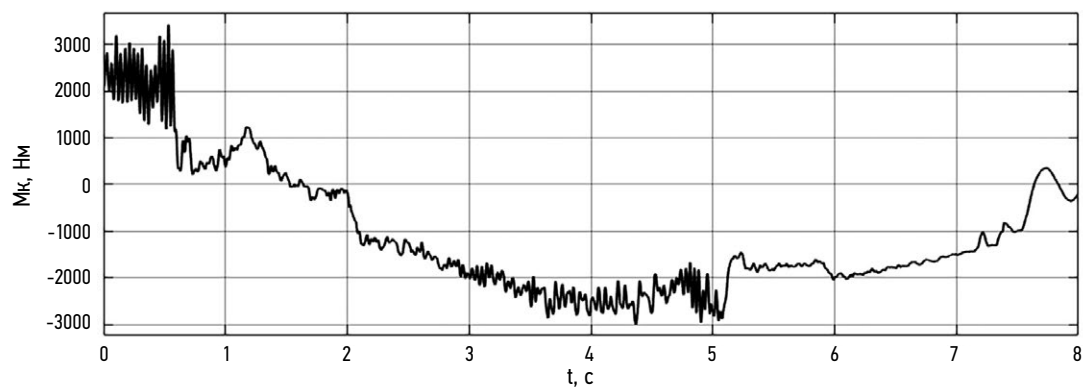


a

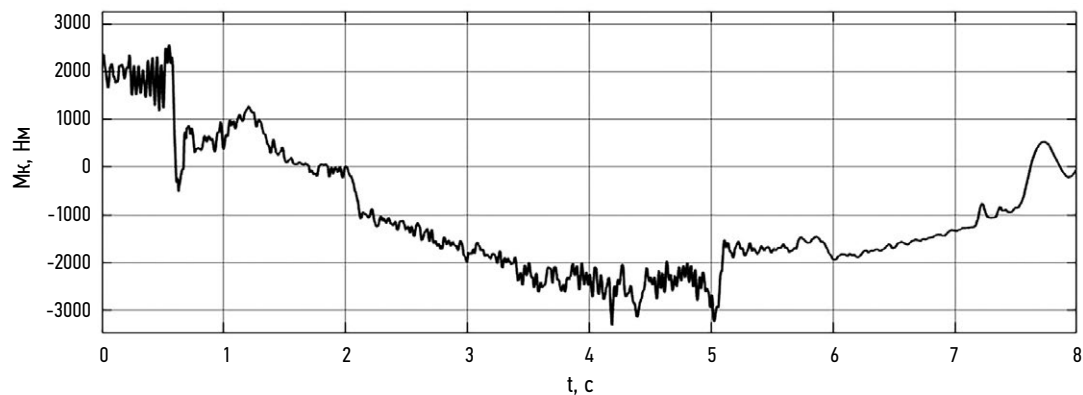


b

Рис. 13. Частота вращения колеса с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 1: *a* — левого; *b* — правого.
Fig. 13. Rotation velocity of the left (*a*) and right (*b*) wheels with the activated system of suppressing self-oscillations, ride № 1.

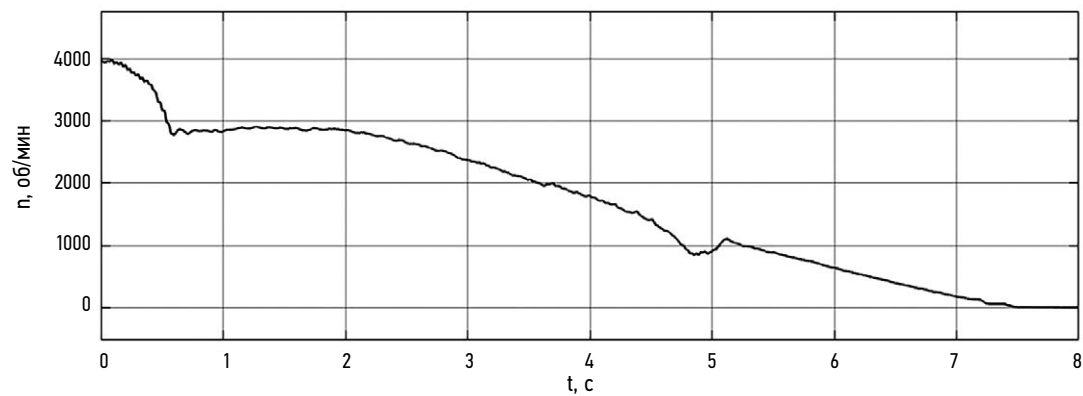


a

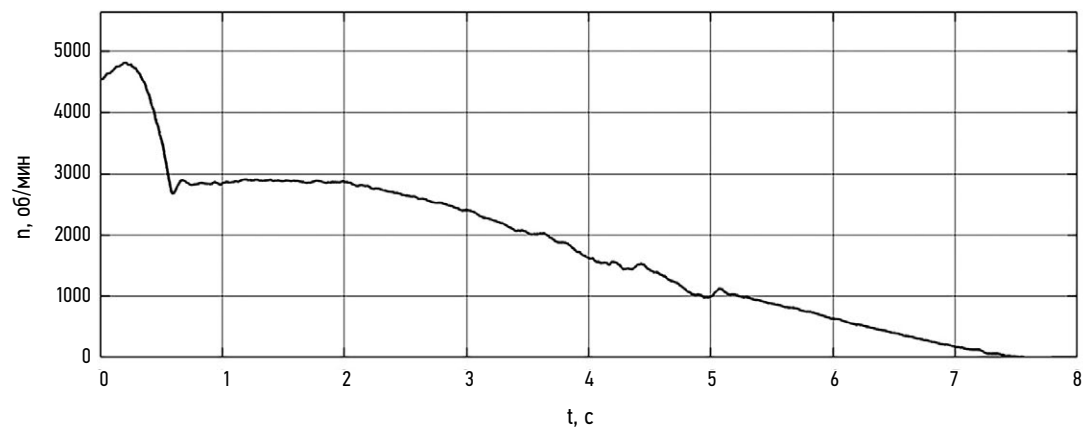


b

Рис. 14. Крутящий момент на колесе с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 2: а — левом; б — правом.
Fig. 14. Torque at the left (a) and right (b) wheels with the activated system of suppressing self-oscillations, ride № 2.



a



b

Рис. 15. Частота вращения колеса с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 2: а — левого; б — правого.
Fig. 15. Rotation velocity of the left (a) and right (b) wheels with the activated system of suppressing self-oscillations, ride № 2.

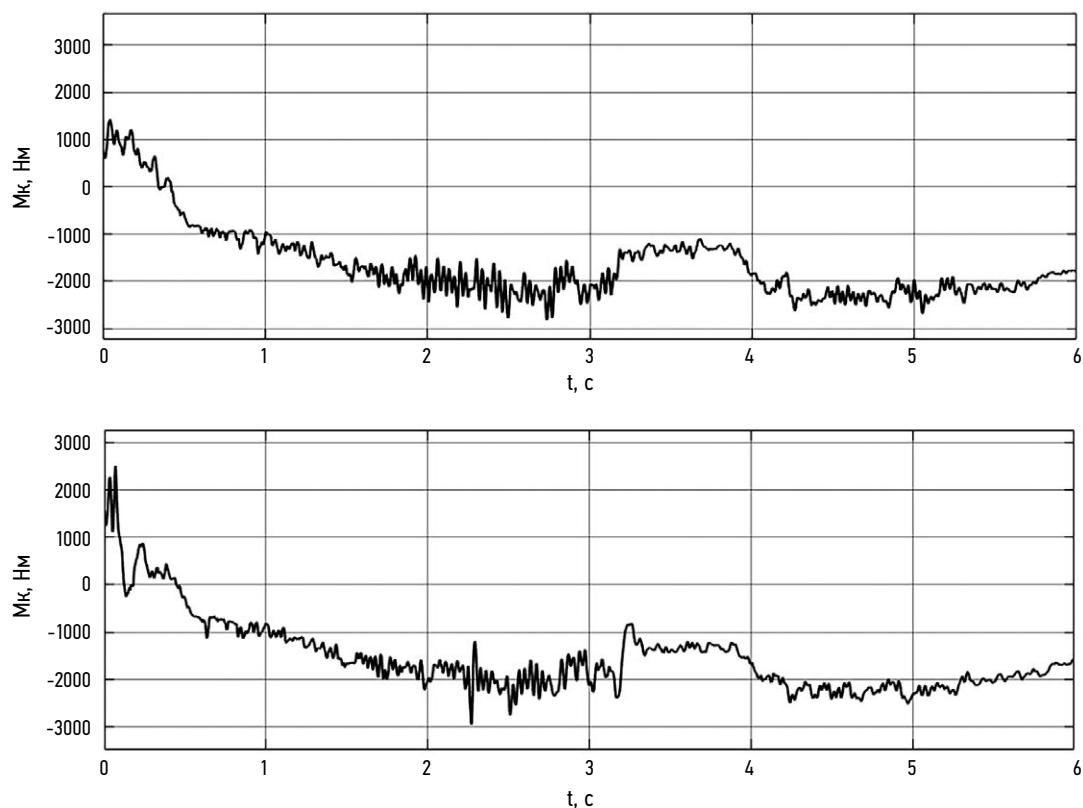


Рис. 16. Крутящий момент на колесе с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 3: *a* — левом; *b* — правом.
Fig. 16. Torque at the left (*a*) and right (*b*) wheels with the activated system of suppressing self-oscillations, ride № 3.

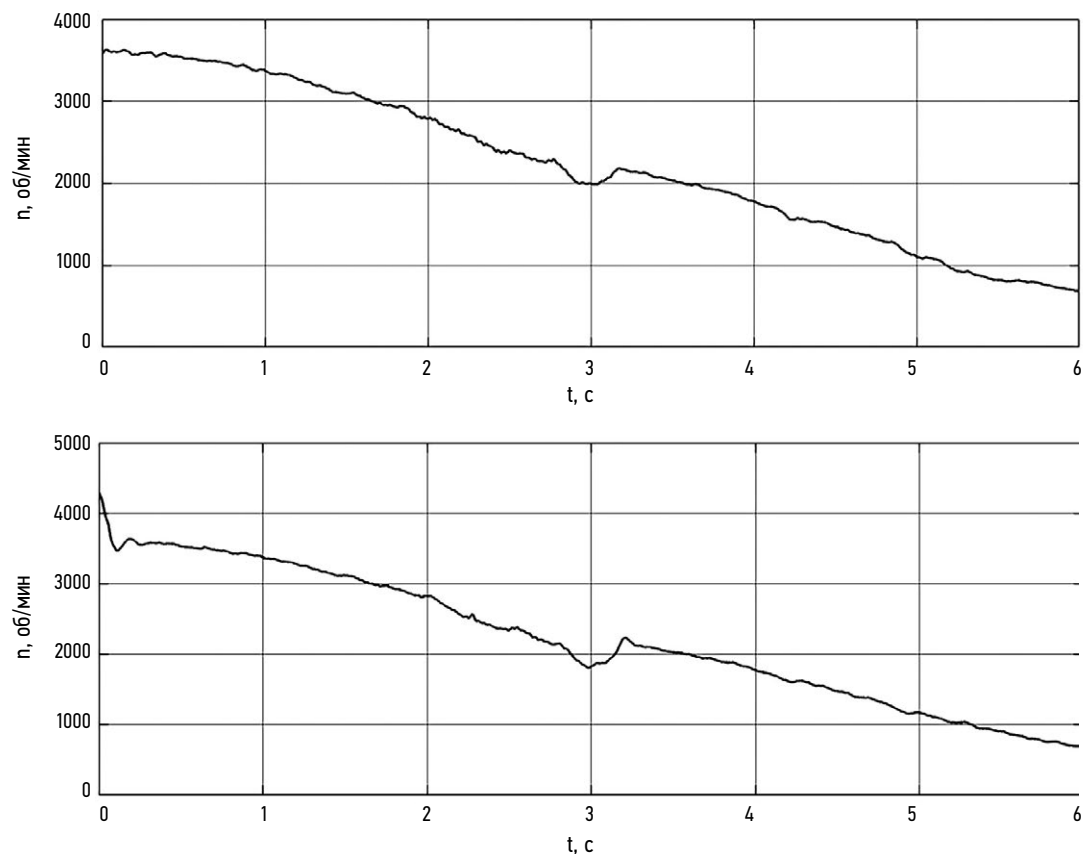


Рис. 17. Частота вращения колеса с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 3: *a* — левого; *b* — правого.
Fig. 17. Rotation velocity of the left (*a*) and right (*b*) wheels with the activated system of suppressing self-oscillations, ride № 3.

ВЫВОДЫ

Методами экспериментальных исследований установлена работоспособность и эффективность алгоритма подавления автоколебаний в системе электромеханического привода ведущих колёс транспортного средства, что позволяет рекомендовать его использование при разработке систем управления.

Методами экспериментальных исследований установлено, что применение алгоритма подавления автоколебаний в системе управления позволяет снизить величины максимальных амплитуд в 6 раз, усреднённых амплитуд — в 3–3,5 раза, исключая при этом изменения знака момента при интенсивных замедлениях транспортного средства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Klimov AV. Oscillatory processes in a nonlinear system of an individual traction electric drive. *Truck*. 2023;7:19–24. (In Russ.) doi: 10.36652/1684-1298-2023-7-19-24 EDN: RXPWMI
2. Klimov AV, Antonyan AV. Investigation of the peculiarities of the flow of oscillatory processes in a nonlinear system of an individual traction drive of an electric bus. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2023;17(1):87–96. (In Russ.) doi: 10.17816/2074-0530-115233 EDN: DVWXHE
3. Klimov AV. Investigation of the modes of motion of self-oscillations in the traction electric drive of an electric bus under operating conditions. *Truck*. 2024;3:3–8. (In Russ.) doi: 10.36652/1684-1298-2024-3-3-8 EDN: FXLUUX
4. Klimov AV. Investigation of the modes of excitation of self-oscillations in the traction electric drive of an electric bus under operating conditions. In: *Electrotechnical complexes and systems: materials of the I All-Russian Conference on electric machines within the framework of the International scientific and practical conference*. 2022;2:414–422. (In Russ.) EDN: PXJUCH
5. Klimov AV. 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
6. Klimov AV, Ospanbekov BK, Keller AV, et al. Research into the Peculiarities of the Individual Traction Drive Nonlinear System Oscillatory Processes. *World Electric Vehicle Journal*. 2023;14(11):316. doi: 10.3390/wevj14110316 EDN: BIISTI

ОБ АВТОРЕ

* **Климов Александр Владимирович**,
канд. техн. наук,
руководитель службы электрифицированных автомобилей;
доцент Перспективной инженерной школы электротранспорта;
адрес: Россия, 143026, Москва, ИЦ СКОЛКОВО,
Большой б-р, д. 62;
ORCID: 0000-0002-5351-3622;
eLibrary SPIN: 7637-3104;
e-mail: klimmanen@mail.ru

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Competing interests. The authors declares that he has no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

7. Klimov AV. 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
8. Klimov AV. Suppression of self-oscillation of the driving wheels in braking mode. *Truck*. 2023;9:6–14. (In Russ.) doi: 10.36652/1684-1298-2023-9-6-14 EDN: PUCDXP
9. Klimov AV. Traction control system with the function of suppressing self-oscillation of wheels in traction mode of operation. *Trudy NAMI*. 2023;3(294):44–56. (In Russ.) doi: 10.51187/0135-3152-2023-3-44-56 EDN: XJXUWX
10. Patent RUS 2797069 / 31.05.2023 Klimov AV, Ospanbekov BK, Zhileikin MM, et al. Method of controlling an individual traction electric drive of the driving wheels of a multi-wheeled. (In Russ.) EDN: QAUBVR
11. Electric bus KAMAZ-6282 [internet]. (In Russ.) Accessed 03.04.2024. https://kamaz.ru/production/buses/pdf_062023/Электробус%20KAMAZ-6282.pdf
12. Klimov AV. The observer of the traction electromagnetic moment on the shaft of a traction electric motor. *Tractors and agricultural machinery*. 2023;90(5):423–432. (In Russ.) doi: 10.17816/0321-4443-472138 EDN: VHDJBL
13. Klimov AV. Synthesis of an adaptive observer of the moment of resistance on the shaft of a traction electric motor. *Tractors and agricultural machinery*. 2023;90(2):99–105. (In Russ.) doi: 10.17816/0321-4443-119856 EDN: VKZKOY

AUTHOR'S INFO

* **Alexander V. Klimov**,
Cand. Sci. (Engineering),
Head of the Electrified Vehicles Service; Associate Professor
of the Advanced Engineering School of Electric Transport;
address: 62 Bolshoy blvd, IC SKOLKOVO, Moscow, Russia, 143026;
ORCID: 0000-0002-5351-3622;
eLibrary SPIN: 7637-3104;
e-mail: klimmanen@mail.ru