

Научная статья
УДК 629.33
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-4-608-623>
EDN: YHINZA



ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

А.В. Антонян^{1,2}, А.В. Келлер^{2,3}

¹Инновационный центр «КАМАЗ»,
г. Москва, Россия

²Московский политехнический университет,
г. Москва, Россия

³Центральный научно-исследовательский автомобильный и
автомоторный институт «НАМИ»,
г. Москва, Россия
✉ ответственный автор
antonyan.akop@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие электрических транспортных средств сопровождается переходом к электромеханическим тормозным системам, обеспечивающим отказ от традиционных гидравлических приводов. Это требует разработки структурированной архитектуры и программного обеспечения алгоритмов управления, обеспечивающих совместную, бесконфликтную работу алгоритмов электромеханической тормозной системы. Целью работы является создание функциональной структуры и алгоритмов программного обеспечения электромеханической тормозной системы транспортного средства.

Материалы и методы. Применен метод функциональной декомпозиции программного обеспечения электромеханической тормозной системы, включающей группы приема и обработки данных, формирования управляющих воздействий, диагностики и обеспечения безопасности и отправки данных.

Результаты. Предложена функциональная структура программного обеспечения электромеханической тормозной системы, включающая группы приема и обработки данных, формирования управляющих воздействий, диагностики и обеспечения безопасности и отправки данных. Разработан набор алгоритмов управления запрашиваемым тормозным моментом.

Практическое значение. Созданная функциональная структура и алгоритмы могут быть использованы при проектировании программного обеспечения электромеханических тормозных систем электрических транспортных средств, поддерживая структурированное представление всей архитектуры ПО мехатронных систем.

Оригинальность. Оригинальность заключается в формировании функциональной структуры программного обеспечения электромеханической тормозной системы и систематизации алгоритмов управления торможением с учетом динамической стабилизации и взаимодействия механического и рекуперативного торможения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мехатронная система, электромеханическая тормозная система, топология, функциональная группа, алгоритм, декомпозиция, тормозная динамика, динамическая стабилизация, синтез алгоритмов, мониторинг безопасности

БЛАГОДАРНОСТИ: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Методы оптимизационного синтеза интеллектуальных мехатронных систем управления динамикой движения электрических транспортных средств в условиях неполной информации об их фазовом состоянии при наличии неконтролируемых возмущений» (шифр: FZRR-2026-0006).

Статья поступила в редакцию 20.05.2026; одобрена после рецензирования 03.07.2026; принята к публикации 21.08.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Антонян А.В., Келлер А.В., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Антонян А.В., Келлер А.В. Функциональная структура и алгоритмы электромеханической тормозной системы транспортного средства // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 4. С. 608-623. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-4-608-623>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-4-608-623>

EDN: YHIHZA

FUNCTIONAL STRUCTURE AND ALGORITHMS OF VEHICLE ELECTROMECHANICAL BRAKING SYSTEM

Akop V. Antonyan^{1,2}, Andrey V. Keller^{2,3}

¹KAMAZ Innovation Center,
Moscow, Russia

²Moscow Polytechnic University,
Moscow, Russia

³Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute (NAMI),
Moscow, Russia

✉ corresponding author
antonyan.akop@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The development of electric vehicles is accompanied by a transition to electromechanical braking systems, which eliminate the need for traditional hydraulic drives. This requires the development of a structured architecture, software and control routines that ensure the joint, conflict-free operation of electromechanical braking system algorithms. The aim of this work is to develop a functional structure and software algorithms for a vehicle electromechanical braking system.

Materials and Methods. A method of functional software decomposition for the electromechanical braking system is applied, including groups for data reception and processing, control action generation, diagnostics and safety assurance, and data transmission.

Results. A functional software structure for the electromechanical braking system is proposed, which includes groups for data acquisition and processing, control action generation, diagnostics and safety assurance, and data transmission. A set of control algorithms for the requested braking torque has been developed.

Practical Significance. The developed functional structure and algorithms can be used in the software design of electromechanical braking systems of electric vehicles, providing a structured representation of the entire software architecture for mechatronic systems.

Originality. Originality lies in the formulation of the functional software structure for the electromechanical braking system and the systematization of braking control algorithms, taking into account dynamic stabilization and the interaction between mechanical and regenerative braking.

KEYWORDS: mechatronic system, electromechanical braking system, topology, functional group, algorithm, decomposition, braking dynamics, dynamic stabilization, algorithm synthesis, safety monitor

ACKNOWLEDGEMENTS: This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project "Methods of optimization-based synthesis for intelligent mechatronic systems controlling electric vehicle motion dynamics under incomplete information regarding their phase state in the presence of uncontrolled disturbances" (code: FZRR-2026-0006).

The article was submitted: May 20, 2026; **approved after reviewing:** July 03, 2026; **accepted for publication:** August 21, 2026.

All authors 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: Antonyan A.V., Keller A.V. Functional structure and algorithms of vehicle electromechanical braking system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (4): 608-623. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-4-608-623>

© Antonyan Akop V., Keller Andrey V., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Современные транспортные средства (ТС) характеризуются широким применением электронных систем управления, обеспечивающих повышение безопасности, управляемости и энергоэффективности^{1,2} [1, 2, 3, 4]. Одним из направлений развития является переход от традиционных гидравлических тормозных систем к электромеханическим тормозным системам, реализующим принцип управления по коммуникационной связи.

Электромеханическая тормозная система обеспечивает возможность точного формирования тормозного момента, интеграции с системами динамической стабилизации, а также контроля разгонной динамики и рекуперативного торможения. При этом возрастает роль программного обеспечения, определяющего логику взаимодействия датчиков, исполнительных устройств и алгоритмов.

Несмотря на существующие исследования в области управления торможением, недостаточно разработаны вопросы структуризации программного обеспечения и формализации алгоритмов управления электромеханическими тормозными системами.

Целью работы является создание функциональной структуры и алгоритмов программного обеспечения электромеханической тормозной системы ТС.

Научная новизна заключается в формировании функциональной структуры программного обеспечения систематизации алгоритмов управления торможением, обеспечивающих совместную работу функций и алгоритмов при формировании тормозного момента, рекуперации энергии и обеспечения безопасности движения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использован метод функциональной декомпозиции программного обеспечения электромеханической тормозной системы ТС³. Данный подход позволяет структурировать процессы обработки информации и форми-

рования управляющих воздействий в соответствии с выполняемыми функциями.

Для формирования функциональной структуры программного обеспечения было проведено выделение функциональных групп, каждая из которых выполняет свою задачу. Среди них группа приема данных, обработки данных, основной (центральной) логики, монитора безопасности и отправки данных.

В качестве входных данных используются данные, поступающие из бортовой информационно-управляющей сети (БИУС), по аналоговой и цифровой связи. Среди них данные от датчиков скоростей колес, положения педалей хода и тормоза, ускорений, реализованных рекуперативных моментов и других параметров ТС. На основании этих данных осуществляется работа алгоритмов мехатронной электромеханической тормозной системы.

При разработке делается также акцент на декомпозиции алгоритмов, обеспечивающих как безопасность движения, так и безопасность при эксплуатации ТС.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Архитектурные решения для программного обеспечения верхнего уровня

Современное электрическое транспортное средство содержит в себе электромеханическую тормозную систему (Brake-by-Wire)⁴ [5, 6, 7, 8, 9, 10], которая отвечает в первую очередь за тормозную динамику, а также динамическую стабилизацию.

Мехатронная система состоит из центрального блока управления, в котором заложено непосредственно программное обеспечение, отвечающее за управление исполнительными устройствами. Исполнительными устройствами в данном случае являются тормозные актуаторы, преобразующие команду запрашиваемого тормозного момента в момент затяжки тормозного привода. Вариант топологического исполнения электромеханической тормозной системы показан на рисунке 1.

¹ Staron M. Automotive Software Architectures: An Introduction. Cham: Springer, 2021. 274 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-65939-4>

² Fijalkowski B.T. Automotive Mechatronics: Operational and Practical Issues. Volume II. Berlin: Springer, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39933-9>.

³ Качала В.В. Общая теория систем и системный анализ: учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2023. 432 с.: ил. ISBN 978-5-9912-0542-9.

⁴ Decker S., Schmitt M., Weber R. Brake-by-wire braking system of a vehicle, use and vehicle having a brake-by-wire braking system // WO Patent 2022148509 A1. 2022.

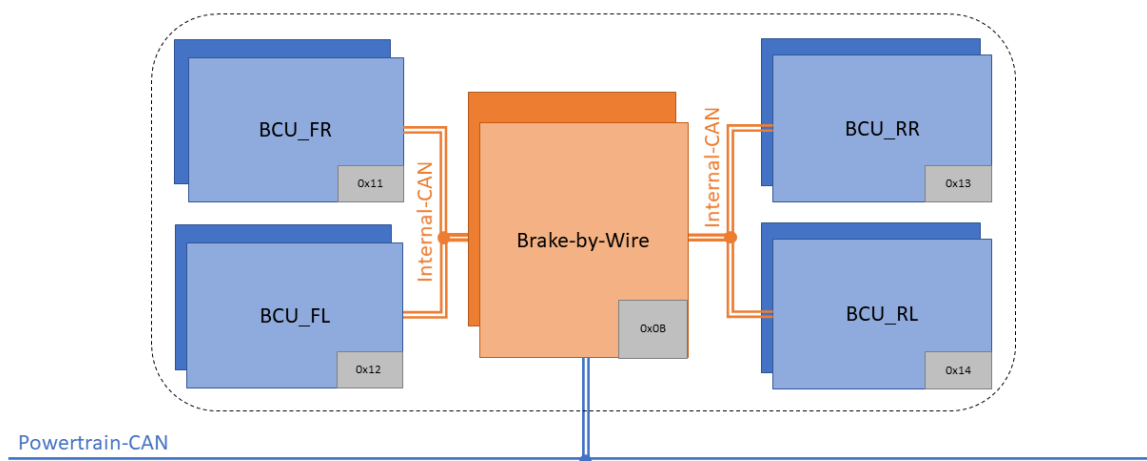


Рисунок 1 – Топология соединения элементов электромеханической тормозной системы:
 BCU_FR – Brake Control Unit Front Right – блок управления тормозным актуатором переднего правого колеса,
 BCU_FL – Brake Control Unit Front Left – блок управления тормозным актуатором переднего левого колеса,
 BCU_RR – Brake Control Unit Rear Right – блок управления тормозным актуатором заднего правого колеса,
 BCU_RL – Brake Control Unit Rear Left – блок управления тормозным актуатором заднего левого колеса,
 Powertrain-CAN – БИУС ТС, Internal-CAN – локальная сеть
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Topology of the electromechanical braking system elements.
 BCU_FR – Brake Control Unit Front Right, BCU_FL – Brake Control Unit Front Left,
 BCU_RR – Brake Control Unit Rear Right, BCU_RL – Brake Control Unit Rear Left,
 Powertrain-CAN – vehicle electronic control system, Internal-CAN – Internal Controller Area Network
 Source: compiled by the authors.

Мехатронная система электрического ТС содержит в себе ряд функций, разбитых по группам. Группа приема данных (Г1) содержит в себе следующие функции:

Г1: Функция приема данных, ее задача заключается в получении данных от сторонних систем и устройств. Данные поступают по БИУС ТС^{5,6}, аналоговому и цифровому каналу связи.

Г1: Функция обнаружения ошибок приема, ее задача заключается в обнаружении ошибок приема данных.

Группа подготовки данных (Г2) содержит в себе следующие функции:

Г2: Функция электронного перераспределения тормозного усилия, задача которой заключается в превентивном перераспределении тормозных усилий на основе перераспределения вертикальных реакций, приложенных к колесам. Для работы этой системы используются сигналы продольного ускорения

или производной от скоростей колес и угловая скорость вращения кузова ТС. В зависимости от возникновения ускорения или замедления происходит увеличение усилия на той оси, где сила инерции оказывает повышение вертикальной нагрузки на ось или колесо, и уменьшение усилия, где сила инерции оказывает понижение нагрузки на ось или колесо [11].

Г2: Функция приведения единиц измерения, заключается в перерасчете полученных данных в требуемые единицы измерения. Для работы этой функции используются все датчики и все данные, чьи измерения неприменимы в первоначальном виде.

Г2: Функция подготовки параметров ТС, ее задача заключается в формировании пула данных, содержащих информацию о параметрах ТС, среди которых: геометрия ТС, число осей и колес, в том числе ведущих, снаряженная и полная масса, число управляемых осей и колес, число и параметры тормозных

⁵ Райф К. Автомобильная электрика и электроника / под ред. Райфа К.; перевод с нем. ЧМП РИА «GMM-пресс». М.: ООО «Издательство «За рулем», 2014. 616 с.: ил. ISBN 978-5-903813-46-9.

⁶ Хернер А., Риль Х-Юр. Автомобильная электрика и электроника / перевод с нем. ЧМП РИА «GMM-пресс». М.: ООО «Издательство «За рулем», 2013. 624 с.: ил. ISBN 978-5-903813-14-8.

актуаторов, фактическое и допустимое рассогласование скоростей колес, кинематический радиус поворота и кривизна. Используются как заложенные в энергонезависимой памяти параметры, так и расчетные параметры.

Г2: Функция идентификации параметров и условий движения, роль которой заключается в получении информации об объекте и внешней среде непрямым способом определения [12, 13]. Для работы этой функции используются всевозможные датчики, которые устанавливаются штатно в автомобиле.

Группа диагностики (Г3) содержит в себе следующие функции:

Г3: Функция пре-диагностики, задача которой заключается в приеме и сборе ошибок от сторонних компонентов и обнаружении проблем, связанных с приемом данных. Функция транслирует или расшифровывает коды ошибок от сторонних компонентов, обнаруживает запаздывание приема данных и целостность принимаемых пакетов данных.

Г3: Функция пост-диагностики, задача которой заключается в проверке корректности принятых величин, переданных или наблюдаемых сигналов. Проверяется соответствие принимаемых данных на предмет физической или технической реализуемости и правдоподобие калиброванных данных. Также проводится группирование ошибок по деградации и деактивации алгоритмов и функций.

Группа основной (центральной) логики (Г4) содержит в себе следующие функции:

Г4: Функция определения состояния движения, задача этой функции заключается в детерминировании глобального состояния работы мехатронной системы на основе внешних управляющих воздействий и условий движения [14, 15]. Для работы этой функции необходимы сигналы положения педали хода и тормоза, состояния работы исполнительных устройств, наличия или отсутствия ошибок. Управляющие воздействия и внешние факторы переводят систему управления в требуемое состояние режима движения.

Г4: Функция контроля разгонной динамики, ее задача заключается в корректировке действий водителя при нажатии на педаль хода. Для ее работы используются датчики частот вращения колес и инерционный датчик. Водитель при нажатии на педаль хода задает общий тренд движения, в котором не учиты-

ваются факторы, требующие корректировки. Функция контроля разгонной динамики имеет возможность самостоятельно вмешиваться в действия водителя, корректируя процесс трогания с места.

Г4: Функция динамической стабилизации, ее задача заключается в сохранении устойчивости и управляемости ТС в физических пределах в критических ситуациях движения. Для ее работы используются датчики частот вращения колес, датчик поворота рулевого колеса, инерционный датчик. При возникновении отклонения параметров движения, заданных водителем или другой интеллектуальной системой, осуществляется вмешательство системы динамической стабилизации (СДС) путем подтормаживания колес оси или борта, или перераспределения крутящих моментов ⁷ [16, 17, 18, 19].

Г4: Функция окончательного формирования управляющих воздействий, данная функция является финальным этапом формирования запрашиваемых величин в требуемом виде для работы исполнительных устройств. На вход этой функции поступают данные от функции определения состояния движения, контроля тормозной динамики и динамической стабилизации. Частично данные поступают из функций группы подготовки данных.

Группа монитора безопасности (Г5) содержит в себе следующие функции:

Г5: Функция проверки ответа от исполнительных устройств, данная функция необходима для проверки соответствия полученных сигналов от исполнительных устройств. Для работы этой функции используются запрашиваемые сигналы состояний исполнительных устройств, запрашиваемые параметры и ответные им сигналы. При обнаружении несоответствия выводится соответствующая команда на принятие мер.

Г5: Функция обнаружения несанкционированной работы исполнительных устройств, данная функция необходима для выявления несанкционированной работы исполнительных устройств путем сопоставления актуального состояния работы устройства и команд от мехатронной системы.

Г5: Функция проверки работы системы динамической стабилизации, данная функция нужна для проверки адекватности работы СДС в мехатронной системе. Используются

⁷ Автомобильный справочник. Пер с англ. ООО «СтарСПБ». 3-е изд., перераб. и доп. М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2012. 1280 с.: ил. ISBN 978-5-9698-0406-7.

сигналы, описывающие динамику ТС, запросы водителя и управляющие команды на исполнительные устройства. Обнаружение несоответствия в работе СДС вызывает аварийное отключение функций, связанных со стабилизацией.

Г5: Функция обнаружения несанкционированного управления, ее задача заключается в обнаружении несанкционированного или несогласованного поведения управляющего сигнала со стороны мехатронной системы. Эта функция проводит грубую проверку на предмет правдоподобия между сигналами от органов управления, измеренных и оцененных параметров и запрашиваемыми командами.

Группа отправки данных (Г6) содержит в себе следующие функции:

Г6: Функция отправки данных, ее задача заключается в отправке данных на сторонние системы и устройства. Данные посылаются по БИУС ТС, аналоговому и цифровому каналу связи.

Методы разработки функциональной схемы и реестр алгоритмов работы мехатронной системы

Функциональная схема определяет то, как будет осуществлена компоновка групп и функций, а также формат их взаимодействия, подчиненность и зависимость друг от друга. Напомним, что мехатронная система содержит группы приема и отправки данных, подготовки данных и основной (центральной) логики, диагностики и монитора безопасности.

Группа приема данных содержит в себе функцию приема данных и функцию обнаружения ошибок приема. Это начальный этап, на котором начинается вычислительная работа мехатронной системы. Полученные сигналы от разных каналов приема объединяются в единую структуру, для дальнейшей трансляции в подсистемы, отвечающие за выполнение основного функционала. Внешний вид функциональной схемы группы приема данных показан на рисунке 2.



Рисунок 2 – Функциональная схема группы приема данных (Г1)
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Functional diagram of the data reception group (G1)
Source: compiled by the authors.

Реестр алгоритмов группы приема данных представлен в таблице 1.

Таблица 1
Алгоритмы группы приема данных
Источник: составлено авторами.

Table 1
Algorithms of the data reception group
Source: compiled by the authors.

Наименование алгоритма	Описание и назначение алгоритма
Функция приема данных	
1. Алгоритм приема сообщений и сигналов по БИУС	Алгоритм расшифровывает полученные сообщения с последующей расшифровкой сигналов. В дополнение к приему сообщений выводится также сигнал с кодом типа ошибки при приеме сообщения
2. Алгоритм приема измеренных аналоговых сигналов	Алгоритм принимает аналоговые сигналы в первоначальном виде без предварительной обработки и выводит при обнаружении сигнал с кодом ошибки
3. Алгоритм приема измеренных цифровых сигналов	Алгоритм принимает цифровые сигналы в первоначальном виде без предварительной обработки и выводит при обнаружении сигнал с кодом ошибки
4. Алгоритм приема данных из энергонезависимой памяти	Алгоритм выводит сохранённые данные из энергонезависимой памяти и выводит при обнаружении сигнал с кодом ошибки

Группа подготовки данных содержит в себе функцию электронного перераспределения тягового и тормозного усилия, функцию принятия направления движения, функцию приведения единиц измерения, функцию подготовки параметров ТС, функцию идентификации параметров и условий движения. Полу-

ченный набор сигналов от функций поступает в группы диагностики, основной (центральной) логики, монитора безопасности и группы отправки данных. Внешний вид функциональной схемы группы приема данных показан на рисунке 3.

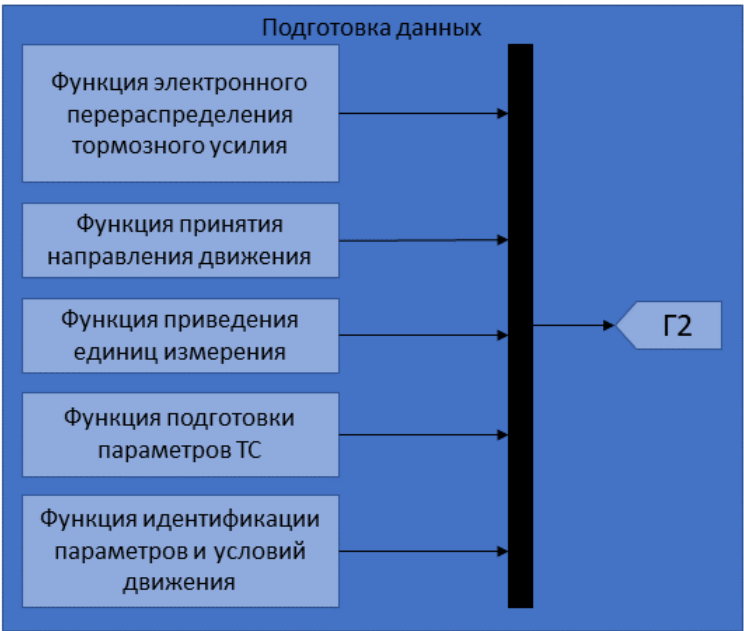


Рисунок 3 – Функциональная схема группы подготовки данных (Г2)
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Functional diagram of the data preparation group (G2)
Source: compiled by the authors.

Реестр алгоритмов группы подготовки данных представлен в таблице 2.

Таблица 2
Алгоритмы группы подготовки данных
Источник: составлено авторами.

Table 2
Data preparation group algorithms
Source: compiled by the authors.

Наименование алгоритма	Описание и назначение алгоритма
Функция электронного перераспределения тормозного усилия	
1. Алгоритм оценки вертикальных нагрузок	Алгоритм необходим для оценки динамических нагрузок, приложенных к осям и колесам ТС, ориентируясь на продольное ускорение, линейную скорость и угловую скорость [11]. Алгоритм вычисляет, какая ось или какое колесо наиболее нагружены и в какой степени. Это необходимо для рационального распределения тормозного усилия
Функция приведения единиц измерения	
2. Алгоритм расчета скоростей и ускорений колес	Данный алгоритм вычисляет окружные скорости колес путем перевода полученных данных в требуемые единицы измерения. Вычисление окружных ускорений проводится путём дифференцирования
3. Алгоритм формирования запроса торможения	Данный алгоритм проводит перерасчет цифрового сигнала от электронной педали тормоза в процент нажатия на педаль с последующим формированием сигнала запрашиваемого замедления. Также проводится перерасчет аналогового сигнала в сигнал кода нажатия на педаль тормоза
Функция подготовки параметров ТС	
4. Алгоритм формирования геометрических параметров	Данный алгоритм необходим для получения информации о геометрических параметрах ТС
5. Алгоритм формирования кинематических параметров	Данный алгоритм определяет кинематические параметры ТС, описывающие главным образом криволинейное движение, среди которых кинематический радиус и кривизна траектории, желаемый и фактический параметры поворота, желаемая угловая скорость вращения кузова ТС
6. Алгоритм определения неподвижного состояния	Данный алгоритм определяет факт неподвижности ТС по входным данным с датчиков, измеряющих скорости или ускорения. Определение неподвижности осуществляется по двум критериям: по динамике кузова и скоростям колес
7. Алгоритм формирования параметров тормозных актуаторов	Задача алгоритма заключается в формировании пула данных, содержащих информацию о параметрах электромеханических тормозных механизмов, среди которых конструктивный фрикционный тормозной момент и момент затяжки
Функция идентификации параметров и условий движения	
8. Алгоритм динамической оценки массы	В этом алгоритме проводится оценка массы ТС, дорожного уклона и сопротивления движению
9. Алгоритм оценки коэффициента сцепления с опорным основанием	Данный алгоритм необходим для оценки коэффициента сцепления колеса на опорном основании [13]
10. Алгоритм оценки характера взаимодействия колеса с опорным основанием	Данный алгоритм главным образом необходим для корректной работы функции защиты колес от блокировки при торможении. Он оценивает характер дисперсии сигнала частоты вращения колеса при релейно-импульсном управлении тормозным моментом. Результатом оценки является набор сигналов допустимого замедления каждого из колес
11. Алгоритм оценки скорости движения	Данный алгоритм проводит оценку скорости, ориентируясь на скорости колес и условия движения ТС [12]. Учитывается, в каких режимах качения пребывают колеса. Исходя из этого, определяется опорная скорость и степень отклонения скоростей колес от нее

Группа диагностики содержит в себе функцию пре-диагностики и функцию пост-диагностики. Сигналы группы диагностики объединяются в единую структуру и транслируются в подсистемы подготовки данных, основной (центральной) логики, монитора безопасности и отправки данных. В группе монитора безо-

пасности эти данные используются для деактивации или ограничения возможностей функций и алгоритмов. Данные, адресованные в группу отправки данных, используются для формирования диагностических сообщений. Внешний вид функциональной схемы группы диагностики показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Функциональная схема группы диагностики (ГЗ)
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Functional diagram of the diagnostics group (G3)
Source: compiled by the authors.

Реестр алгоритмов группы диагностики представлен в таблице 3.

Таблица 3
Алгоритмы группы диагностики
Источник: составлено авторами.

Table 3
Diagnostics Group Algorithms
Source: compiled by the authors.

Наименование алгоритма	Описание и назначение алгоритма
Функция пре-диагностики	
1. Алгоритм приема ошибок от электромеханических тормозных актуаторов	Назначение алгоритма заключается в сборе флагов ошибок от электромеханических тормозных актуаторов по БИУС ТС
2. Алгоритм распознавания нарушения периодичности принимаемого сообщения	Алгоритм необходим для обнаружения нарушения процесса приема данных, характеризующийся как полным отсутствием, так и превышением допустимого времени поступления
3. Алгоритм проверки целостности принимаемых данных	Алгоритм предназначен для контроля целостности принимаемых данных путем проверки зашифрованной информации, передаваемой в составе данных
Функция пост-диагностики	
4. Алгоритм распознавания недостоверности принимаемых данных	Алгоритм необходим для проверки принятых данных на предмет правдоподобия с физической или технической точки зрения. В алгоритме проводится сравнение поступившего сигнала с физическими и техническими ограничениями
5. Алгоритм группирования сигналов ошибок по рабочим группам	Данный алгоритм необходим для сбора данных об ошибках по тому, к какой функции или устройству они относятся. Формируются группированные флаги ошибок, которые либо деактивируют, либо ограничивают функционал, также деактивируют исполнительные устройства
6. Алгоритм проверки достоверности калибруемых параметров	Данный алгоритм необходим для проверки правильности калибровки параметров. На вход поступают данные, полученные как в процессе калибровки, так и хранящиеся в энергонезависимой памяти. Эти данные проверяются на предмет правдоподобия величин, нормального распределения калиброванных значений

Группа основной (центральной) логики содержит в себе функцию определения состояния движения, функцию определения состояния поворота, функцию контроля разгонной динамики, функцию динамической стабилизации, функцию управления поворотом ТС, функцию окончательного формирования управляющих воздействий. Сигналы

из функций группы основной (центральной) логики поступают в группу отправки данных для последующей передачи запросов на исполнительные устройства и в группу монитора безопасности для сопоставления запросов с принятыми данными. Внешний вид функциональной схемы группы основной (центральной) логики показан на рисунке 5.

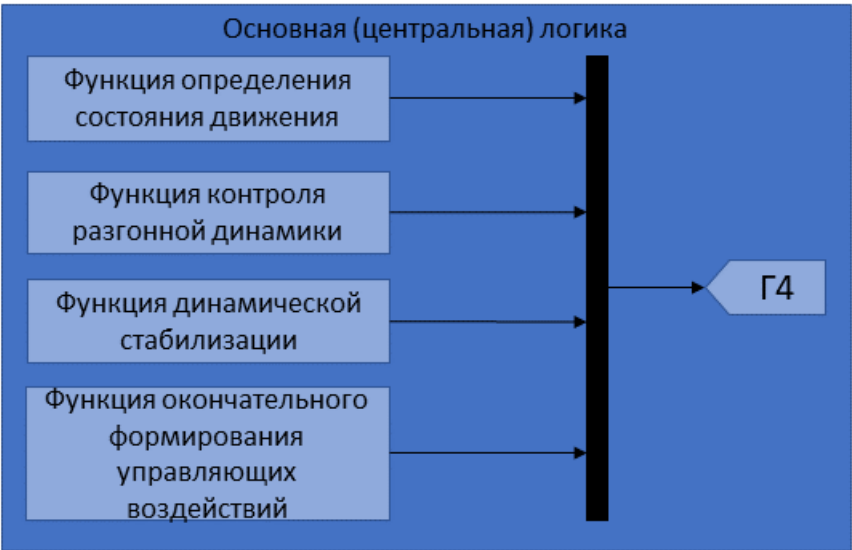


Рисунок 5 – Функциональная схема группы основной (центральной) логики (Г4)
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Functional diagram of the core logic group (G4)
Source: compiled by the authors.

Реестр алгоритмов группы основной (центральной) логики представлен в таблице 4.

Таблица 4
Алгоритмы группы основной (центральной) логики
Источник: составлено авторами.

Table 4
Algorithms of the core logic group
Source: compiled by the authors.

Наименование алгоритма	Описание и назначение алгоритма
Функция определения состояния движения	
1. Алгоритм определения состояния режима движения	Данный алгоритм выполняет ключевую функцию, определяющую характер работы всей мехатронной системы [14]. В этом же алгоритме учитываются запросы со стороны тормозной системы. Кроме определения режимов работы, данный алгоритм выполняет задачу по формированию величины и знака относительных крутящего и рекуперативного моментов
2. Алгоритм управления стояночным тормозом	Задача алгоритма заключается в удержании ТС в фиксированном, неподвижном состоянии. Для работы алгоритма используется сигнал измеренного крутящего момента на электродвигателе и сигнал датчика уклона. Электронный стояночный тормоз активируется водителем при нажатии клавиши или вызова функции в интерфейсе. Функция также совмещает возможность удержания на уклоне, деактивация которого происходит автоматически по мере обнаружения достаточного крутящего момента для начала движения на уклоне

Наименование алгоритма	Описание и назначение алгоритма
3. Алгоритм совместного рекуперативного торможения	Задача алгоритма заключается в формировании команд управления рекуперативным моментом при соучастии фрикционных тормозов во время торможения ⁸ [15]. Для работы этого алгоритма используются сигналы доступного и актуального рекуперативного момента от системы управления тяговым электроприводом. При наличии запроса на торможение электромеханическая тормозная система, учитывая доступный рекуперативный момент, вычисляет баланс тормозных усилий между фрикционными тормозами и рекуператором. При необходимости обеспечения энергоэффективности перераспределение тормозных усилий осуществляется в пользу рекуперации, а при экстренном торможении, динамической стабилизации и при опасности блокировки колес – в пользу фрикционных тормозных механизмов
4. Алгоритм управления адаптивным круиз-контролем	Задача алгоритма заключается в поддержании желаемой скорости, заданной водителем или поддержания скорости впереди идущего ТС для сохранения безопасной дистанции между ними. Фактическая скорость автомобиля поступает в БУ АКК от сторонних систем слежения за динамикой ТС
Функция контроля разгонной динамики	
5. Алгоритм предотвращения буксования	Данный алгоритм позволяет ограничивать буксование ведущих колес путем подтормаживания буксующего колеса и регулирования крутящего момента на ведущей оси. Алгоритм актуален для дифференциальных схем трансмиссий, где индивидуальное управление крутящим моментом на колесе невозможно
Функция динамической стабилизации	
6. Алгоритм защиты от опрокидывания	Алгоритм необходим для недопущения увеличения крена при совершении поворота при наличии крутящего момента. При достижении порогового значения происходит постепенное снижение крутящего момента, достаточного для недопущения приближения измеряемой угловой скорости кузова к допустимой угловой скорости
7. Алгоритм защиты от заноса	Данный алгоритм путем снижения или перераспределения крутящих моментов уравнивает переносные скорости передней и задней осей, преимущественно на высоких скоростях
8. Алгоритм управления рысканием	Данный алгоритм актуален в случае применения на электрическом ТС с индивидуальным приводом к колесам. При совершении маневра при запросе крутящего момента, при использовании кинематической схемы мотор-ступица существует возможность перераспределения крутящих моментов таким образом, чтобы обеспечить повышение управляемости ТС [16]
9. Алгоритм защиты от блокировки колес при торможении	Данный алгоритм обеспечивает выдерживание скольжения колеса относительно скорости ТС, в диапазоне от 0,1 до 0,3, ориентируясь на сигналы частоты вращения колеса и ее производной [17, 18, 19]
Функция окончательного формирования управляющих воздействий	
10. Алгоритм формирования запрашиваемого тормозного момента	Задача алгоритма заключается в сглаживании сигналов запрашиваемых тормозных моментов, которые имеют высокочастотные всплески от действий водителя и работы регуляторов. Данный алгоритм является финальным этапом, где проводятся вычисления, связанные с запрашиваемыми величинами [20]

Группа монитора безопасности содержит в себе функцию проверки ответа от исполнительных устройств, функцию обнаружения несанкционированной работы исполнительных устройств, функцию проверки работы системы динамической стабилизации, функцию обнаружения несанкционированного управления. Данные, сформированные в группе монитора безопасности, транслируются в группу основ-

ной (центральной) логики для полной деактивации функций и алгоритмов, отвечающих за динамику ТС, а также в группу отправки данных для деактивации исполнительных устройств, отвечающих за динамику ТС по альтернативным каналам связи. Внешний вид функциональной схемы группы монитора безопасности показан на рисунке 6.

⁸ Kim J., Lee S., Park J. Regenerative braking control device of electric vehicle // US Patent 10 300 795 B2. 2019.

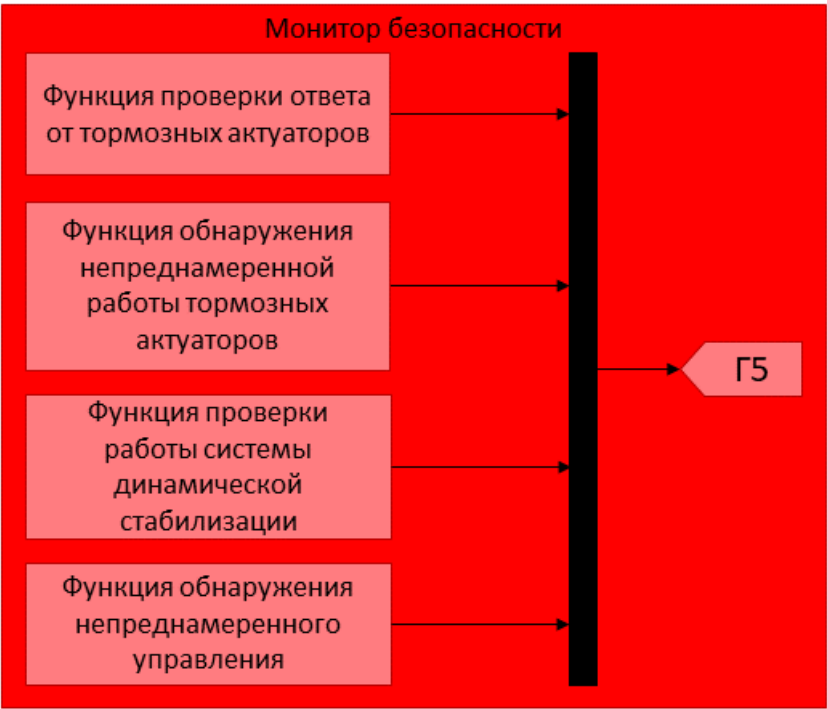


Рисунок 6 – Функциональная схема группы монитора безопасности (Г5)
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Functional diagram of the security monitor group (G5)
Source: compiled by the authors.

Реестр алгоритмов группы монитора безопасности представлен в таблице 5.

Таблица 5
Алгоритмы группы монитора безопасности
Источник: составлено авторами.

Table 5
Security Monitor Group Algorithms
Source: compiled by the authors.

Наименование алгоритма	Описание и назначение алгоритма
Функция проверки ответа от исполнительных устройств	
1. Алгоритм распознавания различия между запрошенным и реализованным тормозными моментами	Алгоритм необходим для проверки выполнения запрашиваемого тормозного момента тормозным актуатором. Реализованный момент не должен отличаться на допустимую величину отклонения от запроса
Функция обнаружения несанкционированной работы исполнительных устройств	
2. Алгоритм распознавания несанкционированного изменения состояния работы исполнительного устройства	Алгоритм необходим для контроля за состоянием и режимом работы исполнительного устройства на предмет соответствия условиям работы
Функция обнаружения несанкционированного управления	
3. Алгоритм распознавания неверного распределения тормозных моментов	Алгоритм необходим для распознавания неверного распределения тормозных моментов в условиях работы СДС. Проверяется перераспределение вектора торможения в зависимости от условий движения
4. Алгоритм распознавания несанкционированного замедления	Алгоритм необходим для распознавания несанкционированного запроса рекуперативного или тормозного моментов, без команды от водителя или интеллектуальной системы

Группа отправки данных содержит в себе функцию отправки данных. Это завершающий этап вычислительной работы мехатронной системы. Процесс отправки сообщений подразу-

мекает процесс шифровки битов информации и ранжирование по сигналам. Внешний вид функциональной схемы группы отправки данных показан на рисунке 7.



Рисунок 7 – Функциональная схема группы отправки данных (Г6)
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Functional diagram of the data transmission group (G6)
Source: compiled by the authors.

Реестр алгоритмов группы отправки данных представлен в таблице 6.

Таблица 6
Алгоритмы группы отправки данных
Источник: составлено авторами.

Table 6
Algorithms of the data transmission group
Source: compiled by the authors.

Наименование алгоритма	Описание и назначение алгоритма
Функция отправки данных	
1. Алгоритм отправки сообщений и сигналов на БИУС	Алгоритм формирует сообщения с последующей отправкой сигналов
2. Алгоритм отправки сформированных аналоговых сигналов	Алгоритм формирует аналоговые сигналы с последующей отправкой
3. Алгоритм отправки сформированных цифровых сигналов	Алгоритм формирует цифровые сигналы с последующей отправкой
4. Алгоритм отправки данных в энергонезависимую память	Алгоритм формирует данные с последующей отправкой в энергонезависимую память

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты разработанной архитектуры позволяют сформулировать архитектуру программного обеспечения электромеханической тормозной системы ТС. Предложенная архитектура обеспечивает разделение процессов приема, вычисления и отправки данных.

Данная архитектура позволяет обеспечить гибкость и масштабируемость разрабатываемого ПО на предмет активации и деактивации алгоритмов или их расширения.

Таким образом, предложенная компоновка и структура алгоритмов позволяет обеспечить эффективность и безопасность функционирования мехатронной системы.

По работе было получено следующее заключение:

- Разработана функциональная структура ПО мехатронной системы, которая главным образом отвечает за управление динамикой торможения и динамической стабилизации движения ТС.
- Сформированы функциональные группы, функции и алгоритмы, отвечающие за работу электромеханической тормозной системы, включающие формирование рекуперативного и тормозного моментов.
- Реализовано обеспечение гибкости и масштабируемости разрабатываемого ПО.
- Реализованные алгоритмы позволяют повысить эффективность управления тормозной динамикой и безопасностью при движении и эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Келлер А.В., Климов А.В., Шадрин С.С., Попов А.В. Методы оптимизационного синтеза интеллектуальных систем управления динамикой движения наземных транспортных средств // XVIII Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2025): материалы мультikonференции. Тула, 15–20 сентября 2025, г. Тула: Тульский государственный университет, 2025. С. 96–99. <https://doi.org/10.12731/2618-795X-2025-12-13-24>. EDN: EHCEIX.
2. Seidenberg T., Disselkamp J.-Ph, Jürgehake C., Grobbel D., Dumitrescu R., Papanikolaou Ap., Development of a modular architecture for complex mechatronic systems. *Procedia CIRP*. Volume 119, Pages 1158-1163 <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.186>. EDN: XNEFXM.
3. Chen Z., Wang R., Ding R., Liu B., Liu W., Sun D., Guo Z. Research Progress and Future Prospects of Brake-by-Wire Technology for New Energy Vehicles. *Energies* 2025, 18, 2702. <https://doi.org/10.3390/en18112702>. EDN: BNHFSU.
4. Асанов А.З. Архитектура бортовых информационно-управляющих систем, роботизирован-

ных большегрузных магистральных автомобилей // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5, № 3(17). С. 106–113.

5. Ji Q., Zheng L., Bi Y., Pang H. Review of Brake-by-Wire Technology for Low-Speed and Autonomous Vehicles. *World Electr. Veh. J.* 2024, 15, 581. <https://doi.org/10.3390/wevj15120581>. EDN: MVMOYJ.
6. Li C., Zhuo G., Tang C., Xiong L., Tian W., Qiao L., Cheng Y., Duan Y. A Review of Electro-Mechanical Brake (EMB) System: Structure, Control and Application. *Sustainability* 2023, 15, 4514. <https://doi.org/10.3390/su15054514>. EDN: EKYWLQ.
7. Hua X., Zeng J., Li H., Huang J., Luo M., Feng X., Xiong H., Wu W. A Review of Automobile Brake-by-Wire Control Technology. *Processes* 2023, 11, 994. <https://doi.org/10.3390/pr11040994>. EDN: DUYZAT.
8. Gumiel J.Á., Mabe J., Burguera F., Jiménez J., Barrueta Peña J. Next-Generation Pedal: Integration of Sensors in a Braking Pedal for a Full Brake-by-Wire System. *Sensors* 2023, 23, 6345. <https://doi.org/10.3390/s23146345>. EDN: LVTRVC.
9. Hu Chenhua, Pan Guangyong, Kong Linzhan, Yu Junhua. Research of Brake by Wire System. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. 2479. 012051. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2479/1/012051>
10. Li D., Tan C., Ge W., Cui J., Gu C., Chi X. Review of Brake-by-Wire System and Control Technology. *Actuators* 2022, 11, 80. <https://doi.org/10.3390/act11030080>. EDN: EABQFQ.
11. Жилейкин М.М., Климов А.В., Антонян А.В. Метод динамической оценки вертикальных нагрузок на оси и колеса электробуса большого класса // Автомобильная промышленность. 2022. № 11. С. 18–21. EDN: HVUZN.
12. Антонян А.В. Метод оценки скорости движения электробуса большого класса // Актуальные вопросы машиноведения. 2023. Т. 12. С. 21–24. EDN: EOXM.
13. Ахметшин А.А. Скользящий корреляционный анализ для выявления пробуксовки ведущих колес электробуса с использованием коэффициента Пирсона и доверительных интервалов // Грузовик. 2025. № 11. С. 3–8. <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-11-3-8>. EDN: DLUCJW.
14. Антонян А.В. Метод определения состояния работы системы управления тяговым электроприводом // Грузовик. 2025. № 12. С. 8–14. <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-12-8-14>. EDN: HJVPUL.
15. Szumska E.M. Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies and Efficiency Challenges. *Energies* 2025, 18, 2422. <https://doi.org/10.3390/en18102422>. EDN: CWBBJS.
16. Deng H., Hu J., Cheng B., Yan F., Chen D., Xu T., Zhang P. Research on Stability Control of Vehicles with Brake-by-Wire System During Braking-in-Turn Maneuver. *Mathematics* 2026, 14, 1684. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/math14101684>
17. Qasem G.A.A., Abdullah M.F., Farid M., Bakhuraisha Y.A. Enhancing Anti-Lock Braking System Performance Using Fuzzy Logic Control Under Vari-

able Friction Conditions. *Symmetry* 2025, 17, 1692. <https://doi.org/10.3390/sym17101692>. EDN: QSKING.

18. Abdullah M.F., Qasem G.A., Farid M. An Enhanced ABS Braking Control System with Autonomous Vehicle Stopping. *World Electr. Veh. J.* 2025, 16, 400. <https://doi.org/10.3390/wevj16070400>. EDN: YJYLJV.

19. Lai F., Wang X. Enhancing Autonomous Vehicle Stability through Pre-Emptive Braking Control for Emergency Collision Avoidance. *Appl. Sci.* 2023, 13, 13219. <https://doi.org/10.3390/app132413219>. EDN: COEIUN.

20. Xiao F., Gong X., Lu Z., Qian L., Zhang Y., Wang L. Design and Control of New Brake-by-Wire Actuator for Vehicle Based on Linear Motor and Lever Mechanism, in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 95832-95842, 2021, <https://doi.org/10.1109/access.2021.3094030>. EDN: CREXRW.

REFERENCES

1. Keller A.V., Klimov A.V., Shadrin S.S., Popov A.V. Methods of optimization synthesis of intelligent motion control systems for ground vehicles // XVIII All-Russian Multi-conference on Management Problems (MCPU-2025): materials of the multi-conference. Tula, September 15-20, 2025. Tula: Tula State University, 2025. pp. 96-99. (In Russ.) <https://doi.org/10.12731/2618-795X-2025-12-13-24>. EDN: EHCEIX.

2. Seidenberg T., Disselkamp J.-Ph., Jürgenhake C., Grobbel D., Dumitrescu R., Papanikolaou Ap., Development of a modular architecture for complex mechatronic systems. *Procedia CIRP*. Volume 119, Pages 1158-1163 <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.186>. EDN: XNEFXM.

3. Chen Z., Wang R., Ding R., Liu B., Liu W., Sun D., Guo Z. Research Progress and Future Prospects of Brake-by-Wire Technology for New Energy Vehicles. *Energies* 2025, 18, 2702. <https://doi.org/10.3390/en18112702>. EDN: BNHFSU.

4. Asanov A.Z. Architecture of on-board information and control systems, robotic heavy-duty mainline vehicles. *Russian Journal of Technology*. 2017. Vol. 5, No. 3(17). pp. 106-113. (In Russ.)

5. Ji Q., Zheng L., Bi Y., Pang H. Review of Brake-by-Wire Technology for Low-Speed and Autonomous Vehicles. *World Electr. Veh. J.* 2024, 15:581. <https://doi.org/10.3390/wevj15120581>. EDN: MVMOYJ.

6. Li C., Zhuo G., Tang C., Xiong L., Tian W., Qiao L., Cheng Y., Duan Y. A Review of Electro-Mechanical Brake (EMB) System: Structure, Control and Application. *Sustainability* 2023, 15, 4514. <https://doi.org/10.3390/su15054514>. EDN: EKYWLQ.

7. Hua X., Zeng J., Li H., Huang J., Luo M., Feng X., Xiong H., Wu W. A Review of Automobile Brake-by-Wire Control Technology. *Processes* 2023, 11, 994. <https://doi.org/10.3390/pr11040994>. EDN: DUYZAT.

8. Gumiel J.Á., Mabe J., Burguera F., Jiménez J., Barruetabeña J. Next-Generation Pedal: Integration of Sensors in a Braking Pedal for a Full Brake-

by-Wire System. *Sensors* 2023, 23, 6345. <https://doi.org/10.3390/s23146345>. EDN: LVTRVC.

9. Hu Chenhua, Pan Guangyong, Kong Linzhan, Yu Junhua. Research of Brake by Wire System. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023; 2479. 012051. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2479/1/012051>

10. Li D., Tan C., Ge W., Cui J., Gu C., Chi X. Review of Brake-by-Wire System and Control Technology. *Actuators* 2022, 11, 80. <https://doi.org/10.3390/act11030080>. EDN: EABQFQ.

11. Zhileikin M.M., Klimov A.V., Antonyan A.V. Method of dynamic assessment of vertical loads on axles and wheels of a large-class electric bus. *Automotive industry*. 2022. No. 11. pp. 18-21. EDN: HVEZNF. (In Russ.)

12. Antonyan A.V. A method for estimating the speed of a large-class electric bus. *Actual issues of machine science*. 2023. Vol. 12. pp. 21-24. EDN: EOXMURK. (In Russ.)

13. Akhmetshin A.A. Sliding correlation analysis for detecting slipping of the driving wheels of an electric bus using the Pearson coefficient and confidence intervals. *Truck*. 2025. No. 11. pp. 3-8. <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-11-3-8>. EDN: DLUJCW. (In Russ.)

14. Antonyan A.V. A method for determining the operating conditions of a traction electric drive control system. *Truck*. 2025. No. 12. PP. 8-14. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-12-8-14>. EDN: HJVPUL.

15. Szumska E.M. Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies, and Efficiency Challenges. *Energies* 2025, 18, 2422. <https://doi.org/10.3390/en18102422>. EDN: CWBBJS.

16. Deng H., Hu J., Cheng B., Yan F., Chen D., Xu T., Zhang P. Research on Stability Control of Vehicles with Brake-by-Wire System During Braking-in-Turn Maneuver. *Mathematics* 2026, 14, 1684. <https://doi.org/10.3390/math14101684>

17. Qasem G.A.A., Abdullah M.F., Farid M., Bakhuraisa Y.A. Enhancing Anti-Lock Braking System Performance Using Fuzzy Logic Control Under Variable Friction Conditions. *Symmetry* 2025, 17, 1692. <https://doi.org/10.3390/sym17101692>. EDN: QSKING.

18. Abdullah M.F., Qasem G.A., Farid M. An Enhanced ABS Braking Control System with Autonomous Vehicle Stopping. *World Electr. Veh. J.* 2025, 16, 400. <https://doi.org/10.3390/wevj16070400>. EDN: YJYLJV.

19. Lai F., Wang X. Enhancing Autonomous Vehicle Stability through Pre-Emptive Braking Control for Emergency Collision Avoidance. *Appl. Sci.* 2023, 13, 13219. <https://doi.org/10.3390/app132413219>. EDN: COEIUN.

20. F. Xiao, X. Gong, Z. Lu, L. Qian, Y. Zhang and L. Wang, Design and Control of New Brake-by-Wire Actuator for Vehicle Based on Linear Motor and Lever Mechanism, in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 95832-95842, 2021, <https://doi.org/10.1109/access.2021.3094030>. EDN: CREXRW.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Антонян А.В. Разработка архитектуры мехатронной системы, пересмотр и редактирование рукописи.

Келлер А.В. Определение концепции, пересмотр и редактирование рукописи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Antonyan A.V. Development of the mechatronic system architecture, revision and editing of the manuscript;

Keller A.V. Concept design, writing and revision of the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Антонян Аноп Ваганович – канд. техн. наук, руководитель группы имитационного моделирования и оптимизации алгоритмов Инновационного центра «КАМАЗ» (121205, г. Москва, Большой бульвар, д. 62); доц. Передовой инженерной школы технологического лидерства FDR, старший научный сотрудник кафедры «Наземные транспортные средства» Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5566-6569>,

SPIN-код: 4797-9808,

e-mail: antonyan.akop@yandex.ru

Келлер Андрей Владимирович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Наземные транспортные средства» Московского политехнического

университета (107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38); ведущий эксперт Центрального научно-исследовательского автомобильного и автомоторного института «НАМИ» (125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4183-9489>,

SPIN-код: 4622-5727,

e-mail: andreikeller@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Antonyan Akop V. – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Simulation Modeling and Algorithm Optimization Group, KAMAZ Innovation Center (62 Bolshoy Bulvar st., Moscow, 121205)

Assistant professor at the FDR Advanced Engineering School of Technological Leadership, Senior researcher at the Department of Land Vehicles Moscow Polytechnic University (38 Bolshaya Semenonskaya st., Moscow, 107023).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5566-6569>,

SPIN-code: 4797-9808,

e-mail: antonyan.akop@yandex.ru

Keller Andrey V. – Dr. Sci. (Eng.), professor, Head of the Department of Land Vehicles, Moscow Polytechnic University (38 Bolshaya Semenovskaya st., Moscow, 107023).

Lead Expert at the Central Research Automobile and Automotive Engines Institute (NAMI) (2 Avtomotornaya St., Moscow, 125438).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4183-9489>,

SPIN-code: 4622-5727,

e-mail: andreikeller@rambler.ru