

УДК 629.017

ТОРМОЗНЫЕ УСТРОЙСТВА ДИСКОВО-КОЛОДОЧНОГО ТИПА С РЕГУЛИРУЕМЫМ ТОРМОЗНЫМ МОМЕНТОМ КАК БАЗИС АДАПТИВНЫХ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ

Антон Алексеевич Кузькин¹, аспирант,
Анатолий Вячеславович Мизюкаев², аспирант,
Павел Александрович Поляков³, д-р техн. наук, доцент
Набережночелнинский институт,
Казанский федеральный университет,
Набережные Челны, Россия

¹E-mail: antonkuzkin039@yandex.ru

²E-mail: mizyukaev2000@gmail.com

³E-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Аннотация. Проанализированные адаптивные системы торможения представляют собой встроенные программные помощники, изменяющие время контакта фрикционного узла или усилие в приводе тормозного устройства. Это позволяет реагировать на изменение внешних условий при торможении автомобиля. Данное условие недостаточно для адаптации технической системы, потому что параметром влияния является усилие в приводе, без дублирования алгоритма действия через другие параметры на течение процесса торможения. Было разработано тормозное устройство с регулированием тормозного момента, позволяющее использовать радиус взаимодействия фрикционного узла как дублирующий параметр влияния на процесс замедления диска наравне с усилием в тормозном приводе. Проведенное моделирование показало изменение нормальных сил и точек их приложения в контакте, от изменяемых прикладываемых усилий со стороны прижимающих элементов на внутреннюю тормозную колодку. Внешняя тормозная колодка контактировала с диском без изменений на протяжении всего процесса замедления, в виду отсутствия перемещения прижимающих элементов. Проведенное напряженно-деформированное состояние поверхностей накладок показало схожие результаты с графиками точек контакта фрикционного узла. Была разработана принципиальная схема адаптивной тормозной системы транспортного средства, учитывающую подсистему регулирования тормозного момента.

Ключевые слова: тормозное устройство дисково-колодочного типа, прижимающий элемент, регулирование тормозного момента, тормозная колодка, адаптивная тормозная система.

DISC BRAKES WITH ADJUSTABLE BRAKING TORQUE AS THE BASIS FOR ADAPTIVE BRAKING SYSTEMS

Anton A. Kuzkin¹, graduate student,
Anatoly V. Mizyukaev², graduate student,
Pavel A. Polyakov³, Dr. Tech. Sciences, Associate Professor

Abstract. The analyzed adaptive braking systems are built-in software assistants that vary the friction unit contact time or the brake actuator force. This allows for a response to changing external conditions during vehicle braking. This requirement is insufficient for technical sys-

tem adaptation, as the influencing parameter is the actuator force, without duplicating the algorithm's actions through other parameters on the braking process. A braking device with brake torque regulation was developed, allowing the friction unit interaction radius to be used as a duplicate parameter influencing the disc deceleration process, along with the brake actuator force. Simulations revealed changes in normal forces and their application points in contact, due to varying applied forces from the clamping elements to the inner brake pad. The outer brake pad remained in contact with the disc unchanged throughout the deceleration process, due to the lack of movement of the clamping elements. The stress-strain state of the lining surfaces revealed results similar to the friction unit contact point graphs. A schematic diagram of an adaptive vehicle braking system was developed, taking into account the braking torque control subsystem.

Keywords: disc-and-shoe brake system, clamping element, braking torque control, brake pad, adaptive braking system.

Введение

Адаптивные технические системы должны отвечать следующим критериям: минимизация неопределенности, автоматическая подстройка системы под внешнюю среду, наличие дублирующей обратной связи и более одного алгоритма действия, контроль обстановки с помощью периферийных устройств, обеспечение достаточного диапазона изменяемого параметра, минимизация временных интервалов для корректирующих действий системы. В тормозных системах адаптация реализуется рядом ассистентов управления рисунок 1. В работах [1-6] авторы приводят исследования влияния различных ассистентов на тормозную эффективность автомобиля.

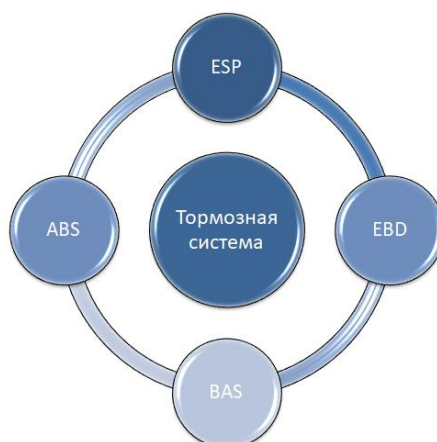


Рисунок 1. Структура электронных помощников тормозной системы автомобиля

Данные ассистенты представляют собой программные продукты, дополняющие работу антиблокировочной системы. Изменение времени взаимодействия контактирующих площадок тормозного устройства влияет на замедление автомобиля. Недостатком данной системы является ограниченность управлением тормозным моментом в процессе замедления колеса. Если рассматривать «классическую» зависимость тормозного момента [7], то анализируя каждый элемент формулы, теоретически можно предположить, что есть три управляющих параметра. Но если проанализировать, то в существующих системах используется лишь один – прижимная сила тормозного привода P_n . Коэффициент трения μ неуправляем, потому как он зависит от большого количества факторов и изменяется без четко структурированной логики. Радиус взаимодействия

(r_{63}) колодок и диска не управляется и принято считать, что он равен половине ширины колодки.

1. Гипотеза регулирования тормозным моментом

Для управления радиусом взаимодействия фрикционного узла необходимо использовать полиприжимающий механизм тормозного устройства с переменными точками приложения прижимающих сил на колодки устройства. Конструкция тормозного механизма с распределенными зонами давления подробно приводилась в исследовании [8]. В результате моделирования теоретический радиус давления системы «прижимающий механизм – тормозная колодка – тормозной диск» минимально смещался после срабатывания механизма регулировки тормозного момента (рисунок 2).

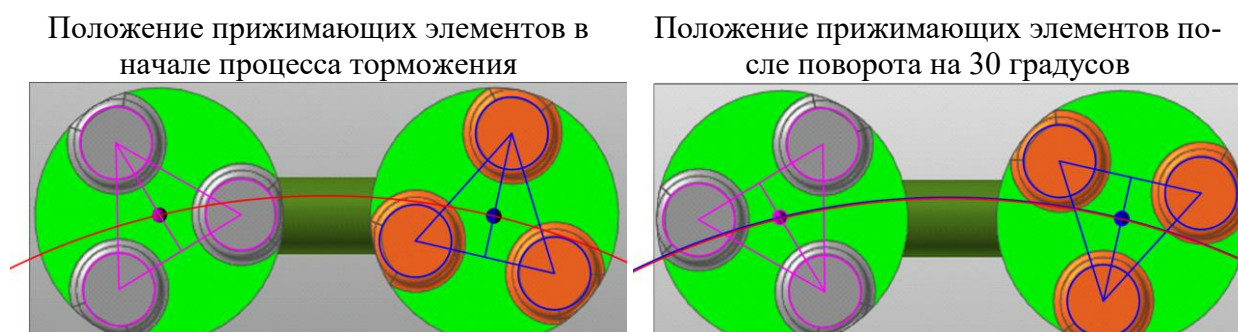


Рисунок 2. Изменение положения теоретического радиуса давления прижимающего механизма от изменения прижимающих элементов с распределенными зонами давления

Полученные результаты твердотельного моделирования подтвердили гипотезу о незначительных смещениях радиуса взаимодействия прижимающего механизма с распределенными зонами. Ввиду жизнеспособности теории изменения положения радиуса взаимодействия, были предложены прижимающие элементы с сосредоточенными зонами давления (рисунок 3). Центры давления определялись методикой, приведенной в работе [9].

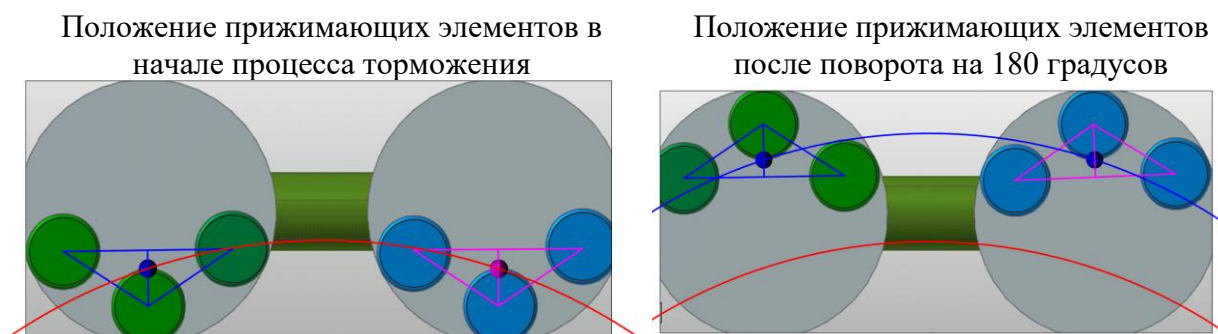


Рисунок 3. Изменение положения теоретического радиуса давления прижимающего механизма от изменения прижимающих элементов с сосредоточенными зонами давления

Разработанная твердотельная модель тормозного устройства дисково-колодочного типа с возможностью регулирования тормозного момента представлена на рисунок 4.

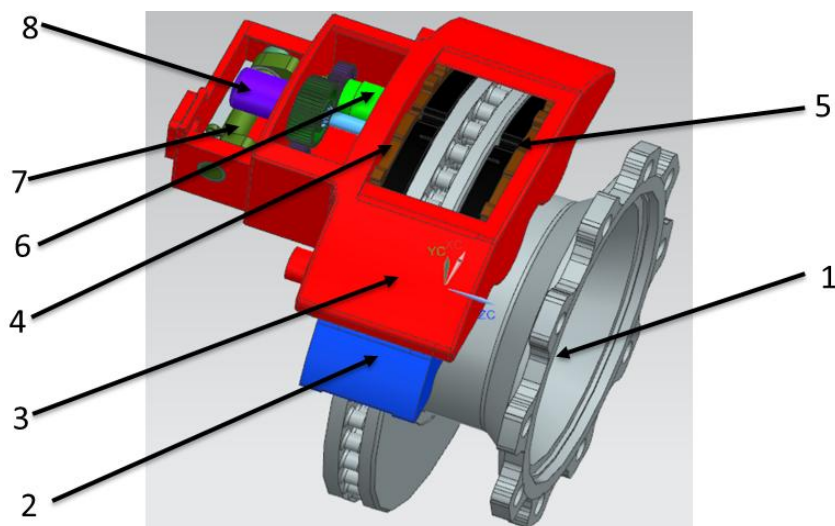


Рисунок 4. Дисково-колодочное тормозное устройство с электромеханическим регулятором тормозного момента: 1 – диск; 2 – скоба; 3 – суппорт; 4 – внутренняя колодка; 5 – внешняя колодка; 6 – прижимающий элемент; 7 – кулачок пневматического привода; 8 – электродвигатель регулирования тормозного момента

Внутренняя колодка 4 воздействовала на рабочую поверхность диска 1 с помощью прижимающих элементов 6, которые имели сосредоточенные зоны давления. Внешняя колодка 5 воздействовала с поверхностью диска посредством прижатия стенкой суппорта 3. Перемещение колодок ограничивалось конструкцией скобы 2 и суппорта 3. Поступательное перемещение прижимающих элементов 6, обеспечивающих прижатие колодок к поверхностям диска осуществлялось при помощи кулачка 7, а вращение этих элементов 6 достигалось с помощью электродвигателя 8 и зубчатой передачи.

2. Моделирование процесса торможения предложенным прототипом

Было проведено твердотельное моделирование тормозного устройства с механизмом регулирования тормозного момента в процессе торможения. Исходные данные для моделирования были идентичны, как и в предыдущей модели. Результаты моделирования показали следующие результаты (рисунок 5 и 6).

Механизм регулирования тормозного момента с начала торможения до 1,25 с. удерживал прижимающие элементы в положении, когда зоны сосредоточенного давления воздействовали на нижние части колодок. В период с 1,25 с. до 1,35 с. прижимающие элементы поворачивались вокруг своей оси на 180 град., в результате зоны сосредоточенного давления контактировали с верхней половиной внутренней тормозной колодки. С 1,65 с. до 1,75 с. прижимающие элементы возвращались в исходное положение. Согласно полученным диаграммам на внутренней колодке наблюдался скачок, как контактирующих сил, так и смещение этих сил по ширине колодки в сторону периферии. Тогда как для внешней колодки радиус взаимодействия и силы в контактирующих площадках не изменялись по величине, что свидетельствовало об отсутствии смещаемых зон приложения прижимающих сил.

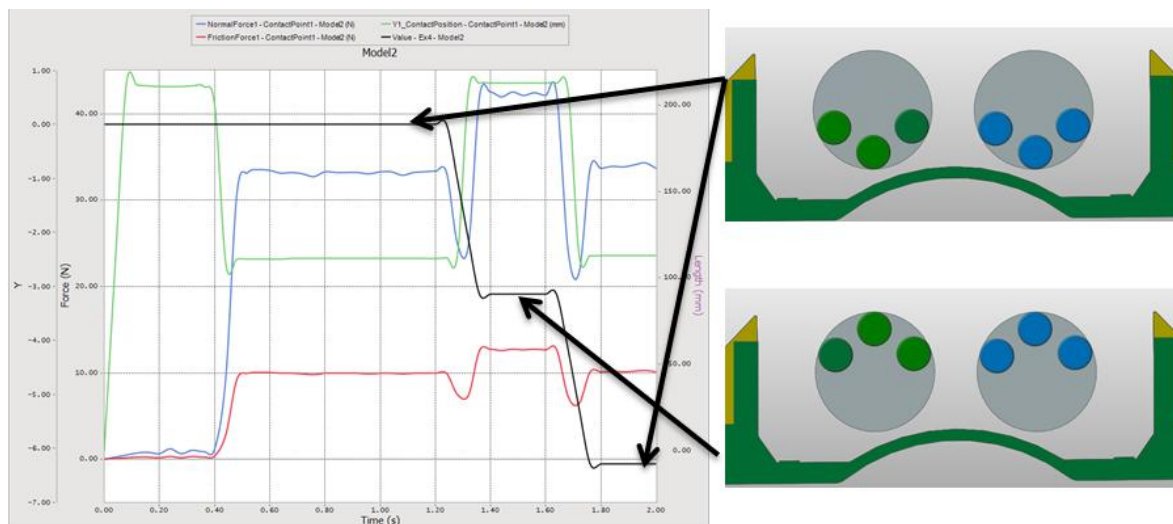


Рисунок 5. Изменение сил в контакте внутренней тормозной колодки и диска, радиусов взаимодействия пар фрикционного узла от положения прижимающих элементов тормозного устройства

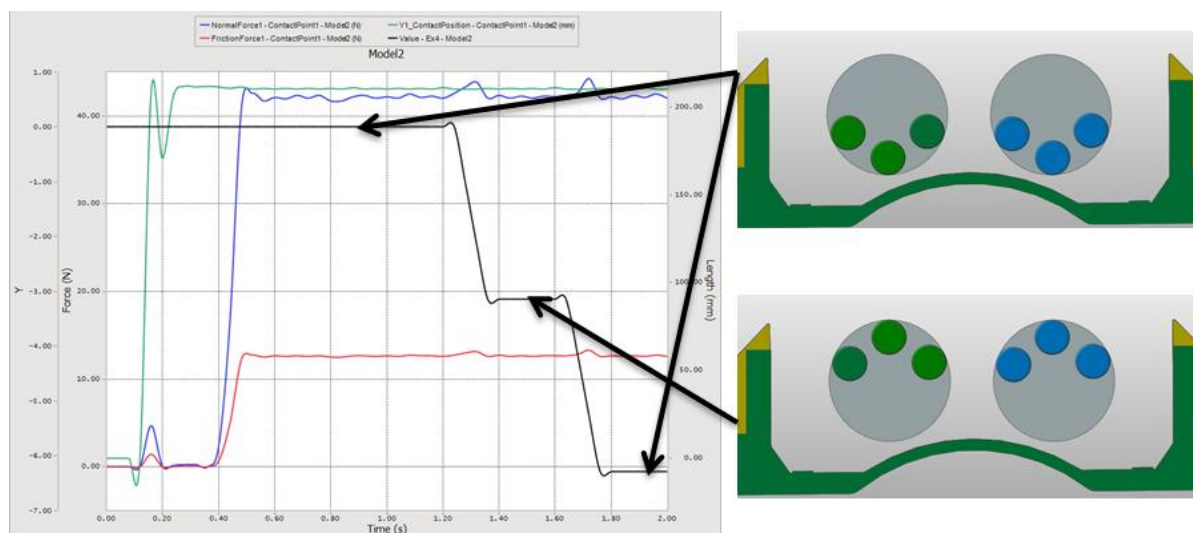


Рисунок 6. Изменение сил в контакте внешней тормозной колодки и диска, радиусов взаимодействия пар фрикционного узла от положения прижимающих элементов тормозного устройства

После поворота на 180 град. прижимные силы в контакте увеличились на 28,3% для внутренней колодки тормоза. После возврата в исходное положение прижимающих элементов контактирующие силы снизились на 26,4% для внутренней колодки тормоза.

Для более точного отслеживания смещения радиусов взаимодействия пар фрикционного узла было проведено напряженно-деформированное состояние поверхностей колодок (рисунок 7 и 8).

Для анализа напряженно-деформированного состояния поверхностей тормозных колодок были выбраны по два узла полигональных сеток, расположенных в нижнем и верхнем поясах тормозной колодки. Как видно из графиков напряжение на поверхности внутренней колодки в верхнем поясе поле поворота прижимающих элементов (интервал торможения 1,35 – 1,65 с.) увеличилось в 3,13 раза, а в нижнем поясе колодки снизилось в 6,29 раза.

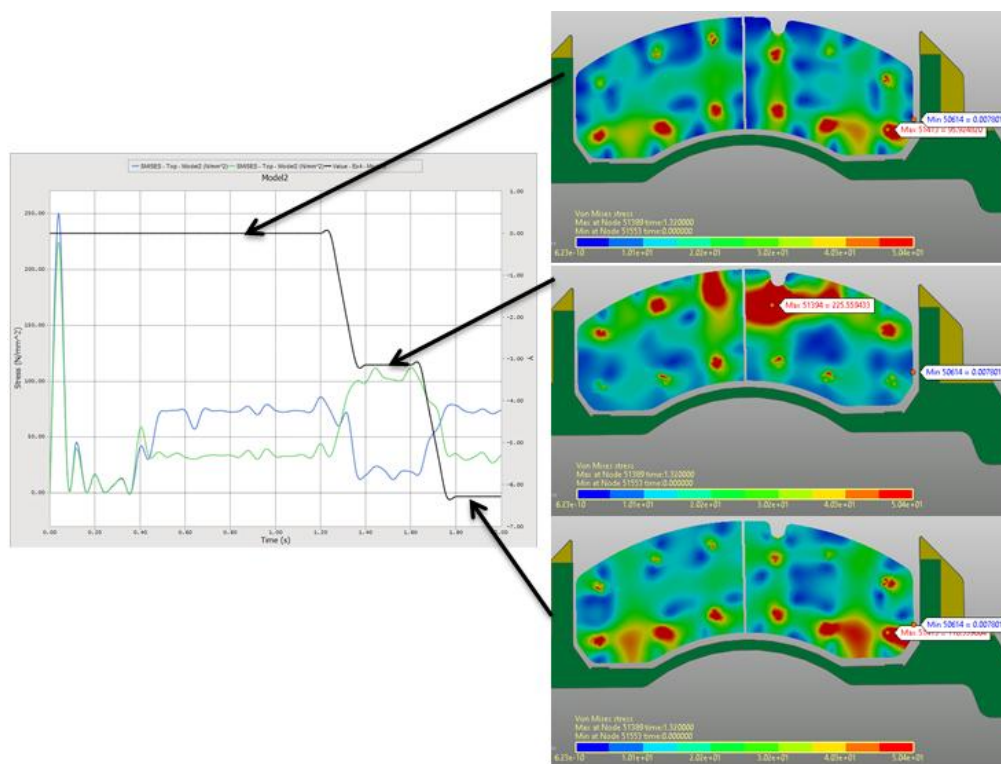


Рисунок 7. Изменение напряжений на поверхности внутренней тормозной колодки от положения прижимающих элементов тормозного устройства

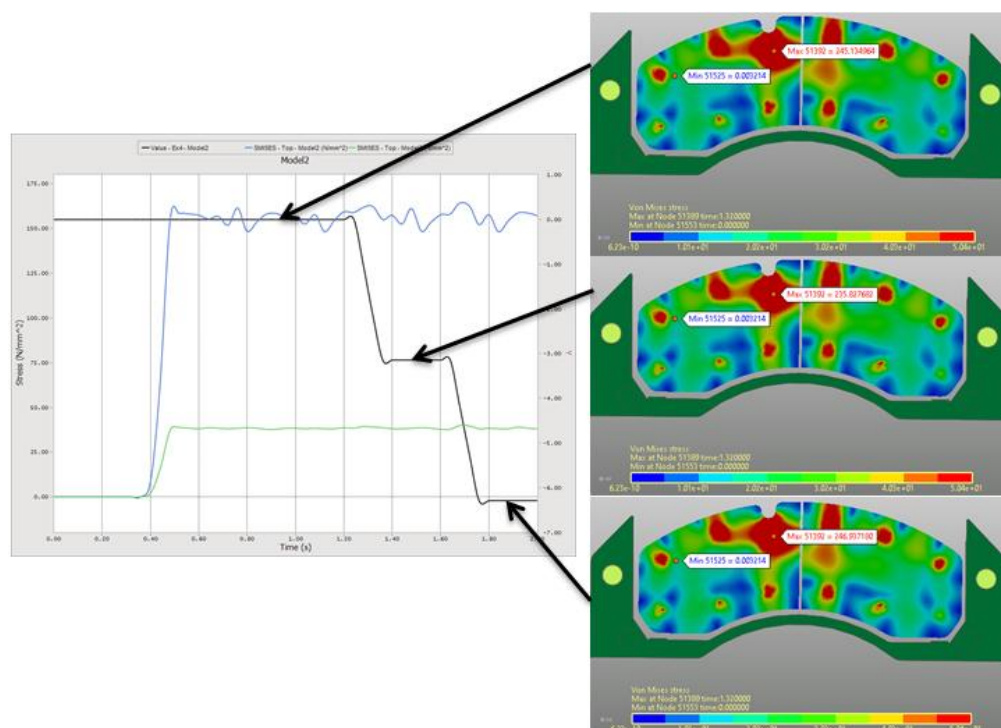


Рисунок 8. Изменение напряжений на поверхности внешней тормозной колодки от положения прижимающих элементов тормозного устройства

После достижения прижимающими элементами исходного положения напряжения на поверхности внутренней колодки вернулись к прежним значениям. Для внешней колодки напряжения на поверхностях не изменялись в виду постоянства зон давления.

Используя принцип изменение положения зон прижимающих элементов, возможно, изменять замедление тормозного диска с колесом автомобиля в зависимости от нагрузки, приходящейся на это колесо (рисунок 9). Для реализации адаптивной тормозной системы необходимы следующие периферийные устройства: датчики нагрузки на колесо и инклинометр-акселерометр.

Собранная информация, получаемая от периферийных устройств, обрабатывается электронным блоком управления, который управляет подачей давления тормозной жидкости к рабочим прижимающим элементам колесных тормозных устройств. Т.е. создаваемая адаптивная тормозная система не только управляет усилиями на прижимающих элементах тормозных устройств, но и какие из этих прижимающих элементов необходимо включать для создания зон давления на колодках каждого из колес.

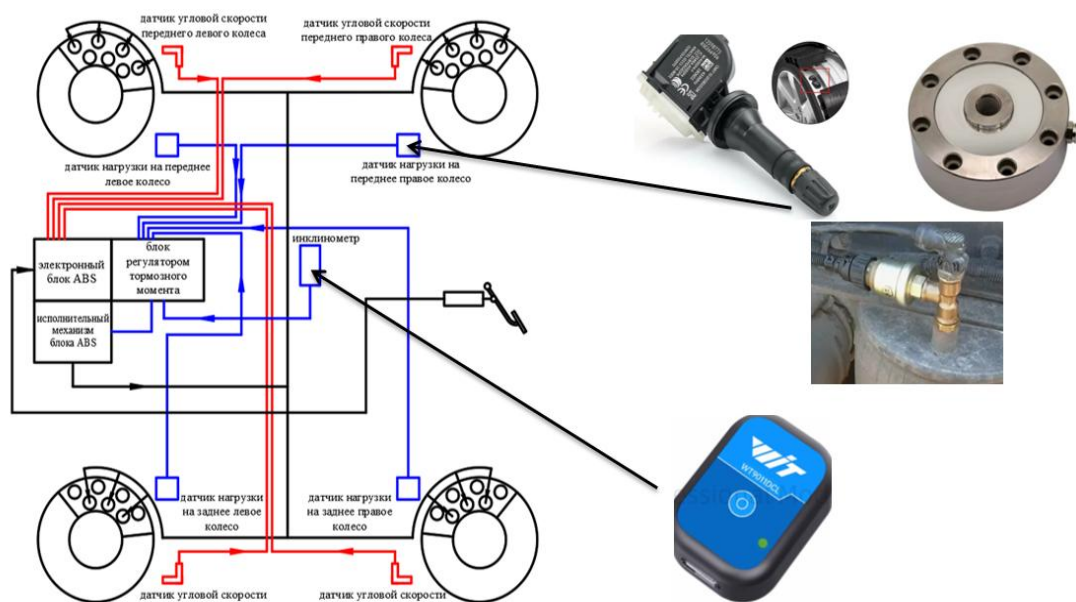


Рисунок 9. Принципиальная схема адаптивного управления тормозной системой автомобиля, оснащенного тормозными устройствами с регулируемым тормозным моментом

Заключение

Выполненное моделирование показало, что изменение точек прикладываемых сил со стороны привода на тормозную колодку позволяет изменять радиус взаимодействия во фрикционном узле. Данный параметр может выступать в качестве параметра влияния на процесс торможения наравне с усилием на рабочем органе тормозного привода. Таким образом, у адаптивной тормозной системы появляется дублирующий элемент регулирования тормозного момента на диске тормозного устройства. Комбинируя два этих параметра влияния, можно управлять тормозным моментом на каждом из колес транспортного средства, улучшая эффективность торможения и повышая предсказуемость поведения транспортного средства при замедлении в сложных условиях. Предложенная система управления тормозными устройствами дополнит антиблокировочную систему автомобиля и позволит подключаться при торможении колес с различным коэффициентом сцепления с дорогой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gunjate S. S. A systematic review of emergency braking assistant system to avoid accidents using pulse width modulation and fuzzy logic control integrated with antilock braking / S. S. Gunjate, S. A. Khot // International journal of automotive and mechanical engineering. 2023. Vol. 20. I. 2. PP. 10457–10479. DOI: <https://doi.org/10.15282/ijame.20.2.2023.10.0808>
2. A fuzzy logic-based anti-lock braking systems / I. Shinko, S. Enxhisa, K. Bexhet, [et al.] // Machines Technologies Materials. 2020. Vol. 14. № 2. PP. 58-60.
3. The new paradigm of an anti-lock braking system for a full electric vehicle: experimental investigation and benchmarking / S. Dzmitry, V. Ivanov, K. Augsburg, [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2016. Vol. 230, № 10. PP. 1364-1377. DOI:10.1177/0954407015608548.
4. A fuzzy anti-lock braking system (ABS) controller using CMOS circuits / M. Majid, A. Khoei, K. Hadidi // Microprocessors and Microsystems. 2019. Vol. 70. PP. 47-52. DOI: 10.1016/j.micpro.2019.05.001.
5. Design of regenerative anti-lock braking system controller for 4 in-wheel-motor drive electric vehicle with road surface estimation / A. Andrei, V. Vodovozov, K. Augsburg, [et al.] // International Journal of Automotive Technology. 2018. Vol. 19. № 4. PP. 727-742. DOI:10.1007/s12239-018-0070-8.
6. Implementation a fractional-order adaptive model-based PID-type sliding mode speed control for wheeled mobile robot / A. K. Koray, M. H. Çiplak, A. Dumlu // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2019. Vol. 233, № 8. PP. 1067-1084. DOI:10.1177/0959651819847395
7. Автомобиль: Анализ конструкций, элементы расчета / В. В. Осеичугов, А. К. Фрумкин. - Москва: Машиностроение, 1989. - 302с
8. Изменение характеристик тормозного устройства дисково-колодочного типа путем совершенствования механизма прижатия тормозной колодки / П. А. Поляков, И. А. Яицков, А. А. Кузькин [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4(100). – С. 188-198. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_188
9. Поляков, П. А. Определение положения центра давления в системе "прижимающий элемент - тормозная колодка - тормозной диск" / П. А. Поляков // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 16. – С. 62-69. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-16-62-69.

REFERENCES

1. Gunjate S. S. A systematic review of emergency braking assistant system to avoid accidents using pulse width modulation and fuzzy logic control integrated with antilock braking / S. S. Gunjate, S. A. Khot // International journal of automotive and mechanical engineering. 2023. Vol. 20. I. 2. PP. 10457–10479. DOI: <https://doi.org/10.15282/ijame.20.2.2023.10.0808>
2. A fuzzy logic-based anti-lock braking systems / I. Shinko, S. Enxhisa, K. Bexhet, [et al.] // Machines Technologies Materials. 2020. Vol. 14. № 2. PP. 58-60.
3. The new paradigm of an anti-lock braking system for a full electric vehicle: experimental investigation and benchmarking / S. Dzmitry, V. Ivanov, K. Augsburg, [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2016. Vol. 230, № 10. PP. 1364-1377. DOI:10.1177/0954407015608548.

4. A fuzzy anti-lock braking system (ABS) controller using CMOS circuits / M. Majid, A. Khoei, K. Hadidi // Microprocessors and Microsystems. 2019. Vol. 70. PP. 47-52. DOI: 10.1016/j.micpro.2019.05.001.
5. Design of regenerative anti-lock braking system controller for 4 in-wheel-motor drive electric vehicle with road surface estimation / A. Andrei, V. Vodovozov, K. Augsburg, [et al.] // International Journal of Automotive Technology. 2018. Vol. 19. № 4. PP. 727-742. DOI:10.1007/s12239-018-0070-8.
6. Implementation a fractional-order adaptive model-based PID-type sliding mode speed control for wheeled mobile robot / A. K. Koray, M. H. Çiplak, A. Dumlu // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2019. Vol. 233, № 8. PP. 1067-1084. DOI:10.1177/0959651819847395
7. Automobile: Analysis of Designs, Calculation Elements / V. V. Osepchugov, A. K. Frumkin. - Moscow: Mashinostroenie, 1989. - 302 p.
8. Changing the characteristics of a disc-and-shoe brake device by improving the brake shoe pressing mechanism / P. A. Polyakov, I. A. Yaitsov, A. A. Kuzkin [et al.] // Bulletin of the Rostov State Transport University. - 2025. – No. 4 (100). - P. 188-198. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_188
9. Polyakov, P. A. Determination of the position of the pressure center in the "pressing element - brake pad - brake disc" system / P. A. Polyakov // Transport, mining and construction engineering: science and production. - 2022. - No. 16. - P. 62-69. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-16-62-69.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.03.2026; одобрена после рецензирования 16.03.2026; принята к публикации 26.03.2026.

The article was submitted March 4, 2026; approved after reviewing March 16, 2026; accepted for publication March 26, 2026.