УДК 62-592

Е.В. БЫКОВСКИЙ
инженер-конструктор
E-mail: bukovskiy.e.v@gmail.com

ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Республика Беларусь

*Поступила в редакцию 22.08.2024.*

# ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЬНОЙ ПРУЖИННОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ

*В данной научно-теоретической работе представлена концепция модульной тормозной системы низкого давления для железнодорожного подвижного состава. Эта система предназначена для эффективного регулирования скорости движения и надежного удержания состава на месте в течение длительного времени. Проведен анализ существующих тормозных систем, используемых в современных грузопассажирских перевозках. Рассмотрено их историческое развитие, выявленные недостатки и современные подходы к модернизации, применяемые различными производителями. Разработанная тормозная система получила название «модульная тормозная система» (МТС). Она отличается использованием для создания тормозного нажатия мощной сжатой пружины, а ее поворотом достигается плавное изменение тормозной силы. Существенное преимущество МТС — работа при пониженном давлении. Это не только снижает интенсивность износа компрессорного оборудования, что приводит к уменьшению эксплуатационных расходов, но и способствует существенной экономии энергоресурсов, что полностью соответствует современным мировым тенденциям в области энергосбережения. Модульная конструкция системы обеспечивает возможность интеграции в существующие системы как грузового, так и пассажирского подвижного состава. При этом сохраняется важная функция автоматического срабатывания в случае несанкционированного расцепления вагонов, что гарантирует высокий уровень безопасности.*

***Ключевые слова:*** *модульная тормозная система, железнодорожный транспорт, тормозная система низкого давления, струнный транспорт, торможение, пружинный тормоз, рычажный механизм*

DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-3-72-37-45

**Введение.** В последнее время активно развиваются технологии, направленные на переход железнодорожного транспорта с ископаемого топлива на более экологичные источники энергии. Особое внимание уделяется таким аспектам, как энергоэффективность, упрощение конструкций, снижение затрат на обслуживание и уменьшение уровня шума.

Поскольку железнодорожные составы имеют большую массу, крайне важна эффективная тормозная система, которая бы гарантировала безопасность и бесперебойную работу как грузовых, так и пассажирских перевозок. В связи с этим ведущие производители разрабатывают инновационные тормозные системы. Они отличаются повышенной энергоэффективностью и простотой обслуживания по сравнению с традиционными моделями. Это позволяет не только повысить безопасность, но и снизить эксплуатационные расходы.

Эволюция тормозных систем поездов прошла через несколько значимых этапов (рисунок 1) [1].

На заре железнодорожного транспорта торможение осуществлялось вручную кондукторами — специально обученными работниками. Эта система представляла собой сложное взаимодействие между кондукторами и машинистом. Эффективность торможения напрямую зависела от силы и навыков кондукторов, а человеческий фактор существенно влиял на работу системы.

Следующим шагом в развитии стало использование пневматических тормозов, работающих на сжатом воздухе [2, 3]. Такая система оказалась более надежной и эффективной. Гидравлические тормоза не получили распространения из-за сложностей с утечками рабочей жидкости, которые невозможно было компенсировать, как в случае с воздухом. Кроме того, протяженные гидравлические линии не соответствовали требованиям по герметичности.

Пневматические тормоза доказали свою эффективность в процессе эксплуатации. Однако их развитие достигло определенного предела. Одним из значимых усовершенствований стало внедре-


**Рисунок 1 — Этапы развития тормозной системы подвижного состава**
**Figure 1 — Stages of development of the rolling stock braking system**

ние электрических клапанов в пневматическую систему [4, 5]. Появились электропневматические тормоза [6, 7], которые сократили время срабатывания тормозной системы.

Несмотря на достигнутые успехи, современные производители продолжают искать новые решения для совершенствования тормозных систем. Предлагаются различные инновационные конструкции, которые могут стать основой для следующего поколения тормозных технологий (рисунок 2).

Компания Knorr-Bremse предлагает современные электромеханические тормоза [8–10], которые могут быть оснащены собственным источником питания благодаря генератору [11] или аккумулятору [12].

Siemens представляет инновационную электрогидравлическую тормозную систему [13], за разработку которой летом 2023 года компания получила престижную награду за создание безвоздушного тормоза для поездов.

CRRC разрабатывает передовую электромеханическую тормозную систему, отличающуюся простотой и компактностью конструкции, а также высокой скоростью отклика и точностью управления [14–16].

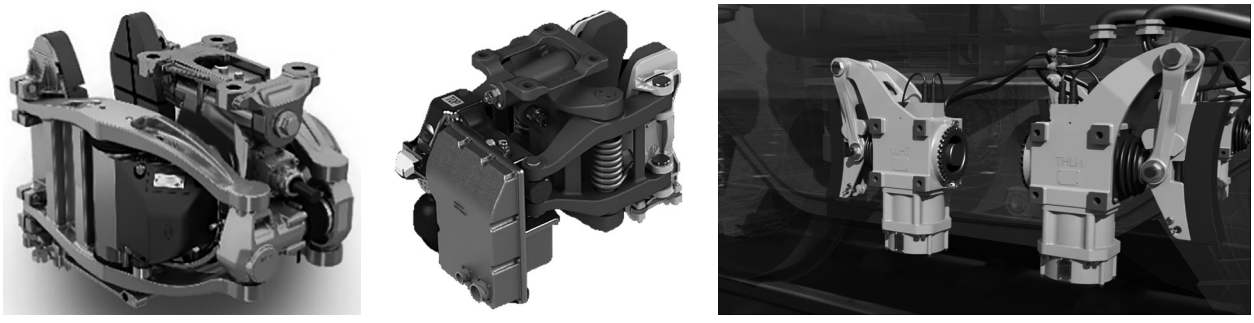
В Европе активно развивается инициатива по повышению энергоэффективности железнодорожного транспорта [17]. Это направление демонстрирует большой потенциал и становится все более актуальным в решении задач современной железнодорожной индустрии.

**Предлагаемый тормозной механизм.** Данная разработка продолжает исследования в области модульных тормозных систем [18], углубляя понимание принципов работы данного механизма.

Отличительной чертой предлагаемой системы является применение мощной сжатой пружины для создания силы торможения. Уникальность конструкции заключается в возможности плавного регулирования силы нажатия посредством изменения угла наклона специального рычага, что обеспечивает более точное управление торможением по сравнению с ранее разработанными решениями.

На рисунке 3 представлена схема предлагаемого тормозного механизма, а на рисунке 4 — его 3D-модель. Для улучшения читаемости на некоторых участках механизма выполнены разрезы.

Тормозной механизм состоит из поворотного рычага 1, на котором установлена мощная сжатая пружина 2, создающая силу торможения. Пружи-



*a* *b* *c*

**Рисунок 2 — Общий вид безвоздушных тормозных механизмов:** *a* — электромеханический тормоз Knorr-Bremse; *b* — электрогидравлический тормоз Siemens; *c* — электромеханический тормоз CRRC
**Figure 2 — General view of airless braking mechanisms:** *a* — Knorr-Bremse electromechanical brake; *b* — Siemens electrohydraulic brake; *c* — CRRC electromechanical brake

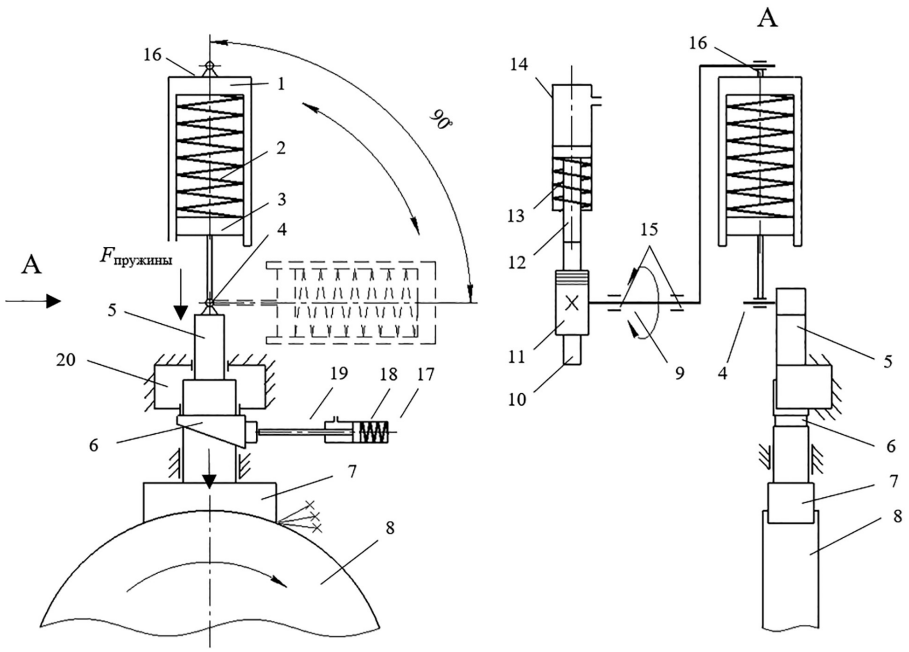
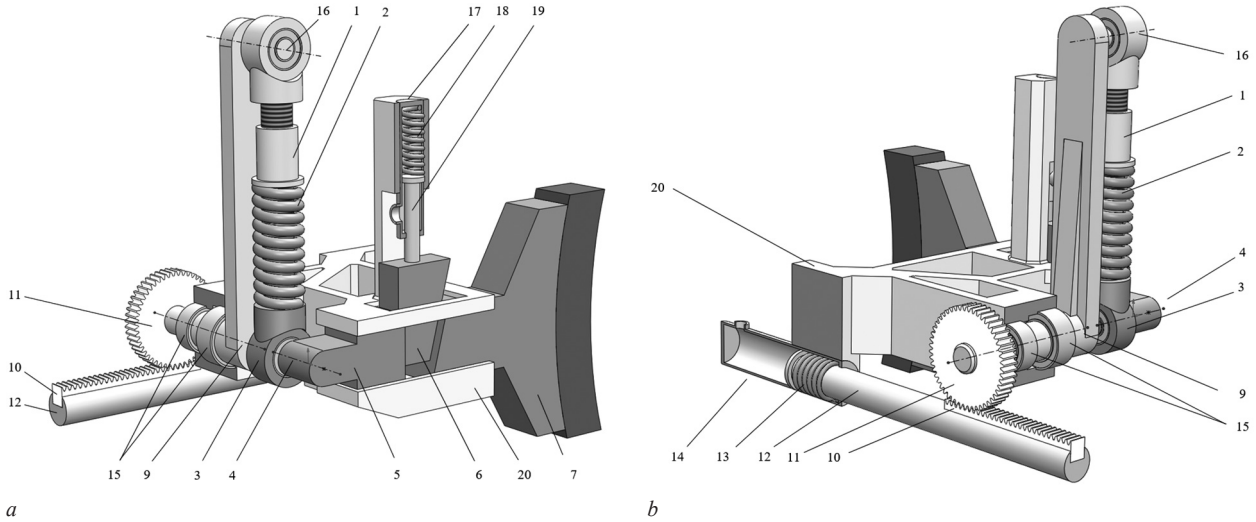



**Рисунок 3 — Кинематическая схема предлагаемого тормозного механизма**
**Figure 3 — Kinematic scheme of the proposed braking mechanism**




*a* *b*

**Рисунок 4 — 3D-модель предлагаемого тормозного механизма:** *a* — вид 1; *b* — вид 2
**Figure 4 — 3D model of the proposed braking mechanism:** *a* — view 1; *b* — view 2

на упирается одной стороной в упор, а другой — в шток 3, который может свободно перемещаться вдоль оси пружины. Упор связан с рычагом посредством шарнирного соединения с осью 16.

Шток пружины связан с вертикальным штоком 5 через шарнирное соединение с осью 4. Рычаг вращается на подшипниках 15 вокруг оси 9. Максимальный угол поворота рычага составляет 90° и осуществляется с помощью реечной передачи, в которой задействованы шестерня 11 и рейка 10. Реечная передача приводится в действие штоком 12 пневмоцилиндра 14, подключенного к тормозной магистрали. В пневмоцилиндре 14 установлена пружина 13, втягивающая шток при снижении давления в системе.

Для компенсации уменьшения высоты колодок из-за износа между колодкой 7 и вертикальным штоком 5 используется клин 6. Клин выдвигается штоком 19 пневмоцилиндра 17, подключенного к тормозной магистрали. В пневмоцилиндре 17 установлена пружина 18, которая выдвигает шток с клином при снижении давления. Жесткость пружины в пневмоцилиндре клина больше, чем у пневмоцилиндра рычага.

В процессе эксплуатации системы клин 6 при торможении постепенно выдвигается, прижимая изношенную колодку 7 к колесу 8. Вертикальный шток, на котором закреплен рычаг, поддерживается в верхнем положении до упора корпуса 20, обеспечивая соосность оси вращения рычага 9 и оси шарнирного соединения пружинного штока 4.

Конструкция разработана таким образом, чтобы передавать усилие не только непосредственно

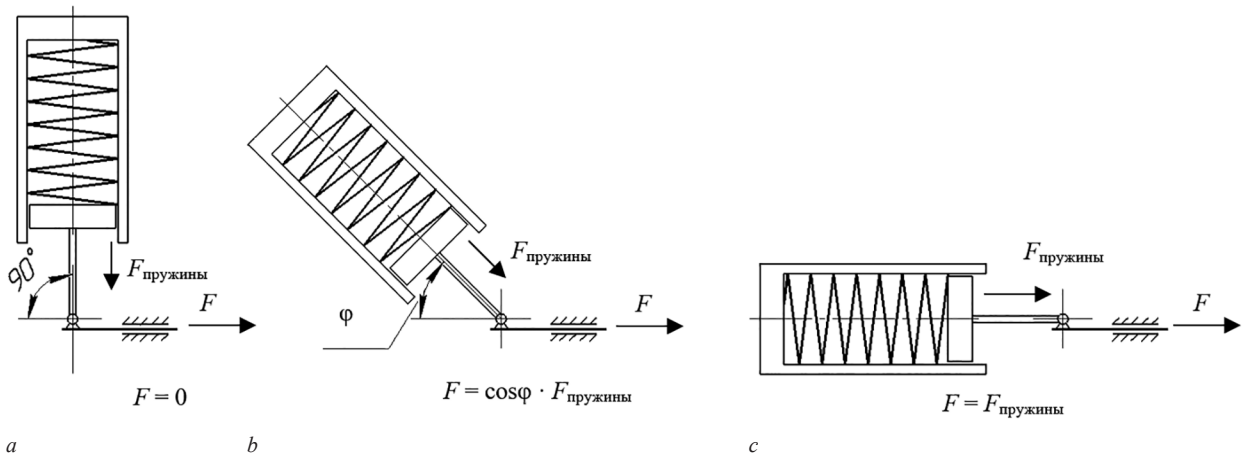



**Рисунок 5 — Работа рычажного механизма:** *a* — усилие на колодку равно 0; *b* — усилие на колодку равно cosφ от усилия пружины; *c* — усилие на колодку равно усилию пружины

**Figure 5 — Operation of the lever mechanism:** *a* — the force on the pad is 0; *b* — the force on the pad is cosφ from the force of the spring; *c* — the force on the pad is equal to the force of the spring

на колодку и колесо, но и через рычажную передачу, что будет подробно рассмотрено далее.

Усилие, создаваемое пружиной, регулируется изменением угла наклона рычага. В состоянии растормаживания рычаг с пружиной располагается перпендикулярно штоку и колодке, что приводит к нулевому усилию на колодку (рисунок 5 *a*).

По мере поворота рычага угол между ним и штоком уменьшается, увеличивая тем самым усилие от пружины на колодку (см. рисунок 5 *b*). При максимальном повороте рычага усилие от пружины становится сонаправленным с движением штока, достигая максимального значения (см. рисунок 5 *c*).

Сила торможения на колодки в таком случае будет определятся следующей формулой:

$$F = F_{пруж} \cdot \cos\varphi,$$

где $F_{пруж}$ — усилие пружины, Н; φ — угол наклона рычага, град.

На рисунке 6 представлена схема работы всего тормозного механизма. В расторможенном состоянии клин отодвигается, а рычаг располагается перпендикулярно направлению движения колодки (см. рисунок 6 *a*).

При торможении воздух выходит из системы. Пружина пневмоцилиндра клина, обладающая большей жесткостью, первой приходит в движение, выдвигая клин (рисунок 7) и прижимая колодку к колесу (см. рисунок 6 *b*).

По мере снижения давления вступает в работу пружина пневмоцилиндра рычага с меньшей жесткостью (см. рисунок 7), втягивая шток и через реечную передачу поворачивая рычаг (см. рисунок 6 *c*). Угол поворота рычага, а следовательно, и сила торможения регулируются давлением в тормозной магистрали посредством ручки крана машиниста. Возвращению клина в исходное положение препятствует сила трения, возникающая из-за сжатия пружины рычага.

Для растормаживания в систему подается воздух. При возрастании давления преодолевается сила возвратной пружины и поршень пневмоцилиндра рычага выдвигает шток, поворачивая рычаг в положение, перпендикулярное движению колодки (см. рисунок 6 *d*). В этот момент происходит сжатие пружины на величину износа колодки за одно срабатывание механизма, составляющую доли миллиметра [19, 20]. Одновременно с этим втягивается шток пневмоцилиндра клина.

После этого тормозной механизм возвращается в расторможенное состояние (см. рисунок 6 *e*).

Благодаря тому, что работа системы основана на использовании давления воздуха для поворота рычага, а не прямого воздействия на колодку, как в традиционных схемах, данный тормоз может эффективно функционировать при пониженных давлениях.

**Применение предлагаемой тормозной системы в грузовых железнодорожных вагонах.** В качестве примера применения тормозной системы используется 4-осный грузовой вагон-хоппер (рисунок 8).

Модульная конструкция дает возможность заменить традиционный тормозной цилиндр на предлагаемый тормозной механизм.

На рисунке 9 показан пример установки, где 1 — предлагаемый тормозной механизм, 2 — рычажная передача, а 3 — тормозная магистраль из стандартной схемы системы.

Такой подход обеспечивает беспроблемную интеграцию в существующую систему, при этом сохраняется важнейшая особенность традиционной схемы — автоматическое срабатывание тормозов в случае несанкционированного расцепления вагонов.

**Применение предлагаемой тормозной системы в пассажирских поездах.** Помимо грузовых вагонов, тормозной механизм может применяться и на межрегиональных пассажирских поездах (рисунок 10).

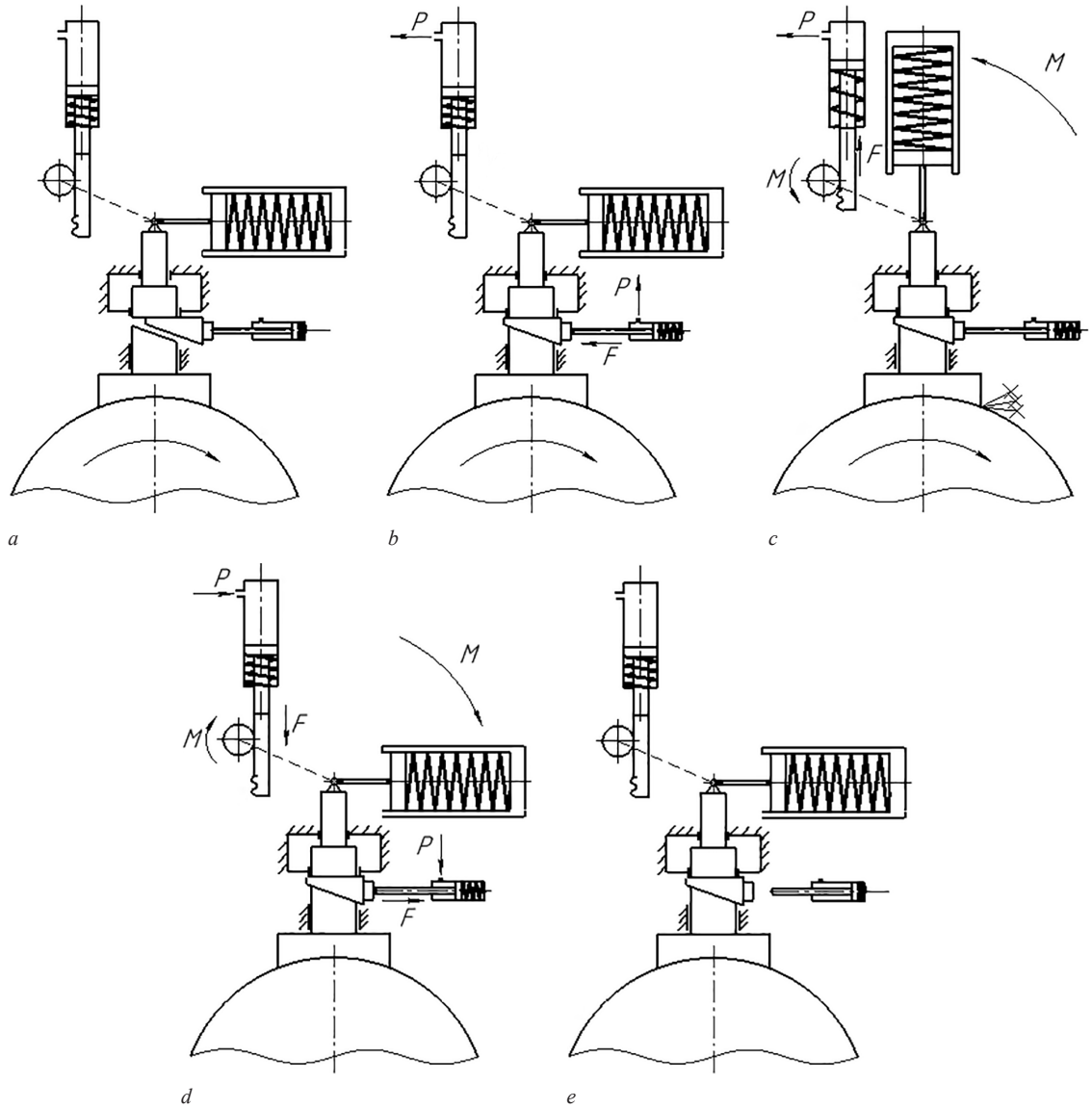



**Рисунок 6 — Работа тормозного механизма:** *a* — расторможенное состояние; *b* — прижатие колодки; *c* — торможение; *d* — растормаживание; *e* — расторможенное состояние после остановки
**Figure 6 — Operation of the brake mechanism:** *a* — disengaged state; *b* — pressing pads; *c* — braking; *d* — disengagement; *e* — disengaged state after stopping

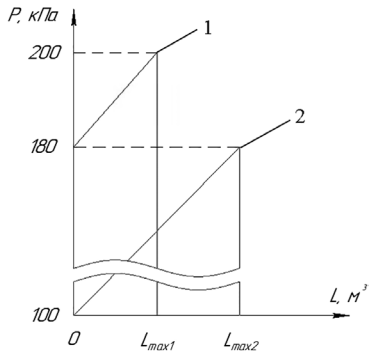



**Рисунок 7 — Перемещение пневмоцилиндра рычага и штока в зависимости от давления:** 1 — перемещение пневмоцилиндра клина; 2 — перемещение пневмоцилиндра рычага; $L_{max1}$ — максимальное перемещение штока пнемоцилиндра клина; $L_{max2}$ — максимальное перемещение штока пневмоцилиндра рычага
**Figure 7 — Movement of the pneumatic cylinder of the lever and the rod depending on the pressure:** 1 — movement of the wedge pneumatic cylinder; 2 — movement of the lever pneumatic cylinder; $L_{max1}$ — maximum movement of the wedge pneumatic cylinder rod; $L_{max2}$ — maximum movement of the lever pneumatic cylinder rod

Вариант расположения тормозных механизмов представлен на рисунке 11. Каждый тормозной механизм (модуль) 1 закрепляется на вагонной тележке 2 и воздействует на свой тормозной диск 3. Эти тормоза интегрируются в существующую воздушную систему поезда и активируются при падении давления в магистрали.

Особенность предлагаемой системы (тормозного контура) заключается в ее способности работать при пониженном давлении. Это решение обеспечивает значительную энергоэффективность, снижая нагрузку на компрессорное оборудование и уменьшая износ его компонентов. Такая оптимизация способствует повышению общей надежности тормозной системы и экономии энергоресурсов.

**Применение предлагаемой тормозной системы в технологиях UST Inc.** Данная тормозная система может использоваться не только на наземном железнодорожном транспорте, но и на грузо-

**Рисунок 8 — Вагон-хоппер**
**Figure 8 — Railway hopper car**

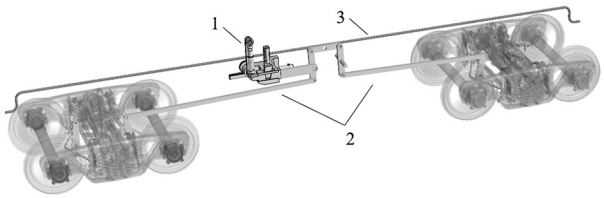



**Рисунок 9 — Вариант установки тормозного механизма в грузовых вагонах:** 1 — предлагаемый тормозной механизм; 2 — рычажная передача; 3 — тормозная магистраль
**Figure 9 — Option of installing the brake mechanism in freight wagons:** 1 — proposed brake mechanism; 2 — lever transmission; 3 — brake line

**Рисунок 10 — Межрегиональный пассажирский поезд ЭС2ГП-001**
**Figure 10 — Interregional passenger train ES2GP-001**

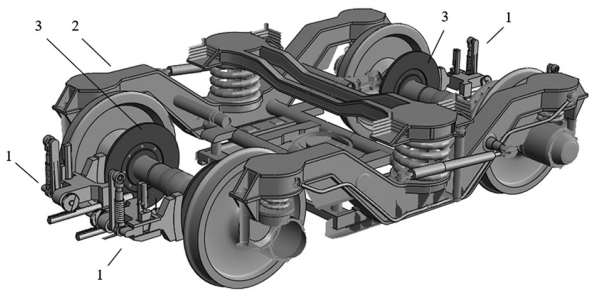



**Рисунок 11 — Вариант расположения тормозных механизмов в пассажирских вагонах**
**Figure 11 — Arrangement option of braking mechanisms in passenger cars**

вых подвесных транспортных средствах второго уровня.

В качестве наглядного примера можно привести грузовой транспорт под названием «подвесной

**Рисунок 12 — Подвесной Юниконт производства UST Inc**
**Figure 12 — Suspended Unicont manufactured by UST Inc**

Юниконт» (рисунок 12), разработанный компанией UST Inc. Это транспортное средство предназначено для перевозки контейнеров между логистическими центрами на промышленных объектах и в портах.

Такая система позволяет эффективно использовать тормозные механизмы в условиях подвесного движения, обеспечивая безопасность и надежность при транспортировке грузов.

Данный транспорт имеет 2-контурную гидравлическую тормозную систему, схема которой представлена на рисунке 13 из патента [21]. Система имеет каналы высокого 1 и низкого 2 давления, заполненные рабочей жидкостью 3, электрическую насосную станцию 4, гидроаккумуляторы 5, тормозные цилиндры 6 и 7, датчики обратной связи 8 и редукционные клапаны 9, объединенные электрической схемой с электронной системой управления (ЭСУ) (10).

Применение модульной тормозной системы позволяет заменить гидравлический привод на электропривод и упростить компоновку транспорта (рисунок 14).

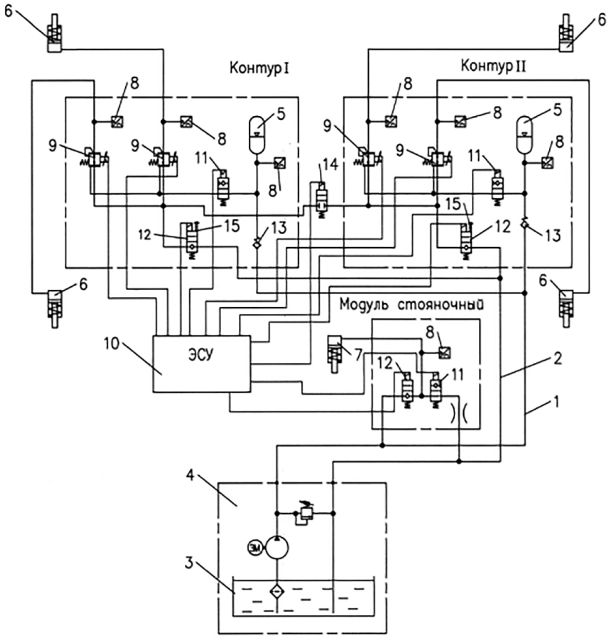



**Рисунок 13 — Схема гидравлической тормозной системы**
**Figure 13 — Diagram of the hydraulic braking system**

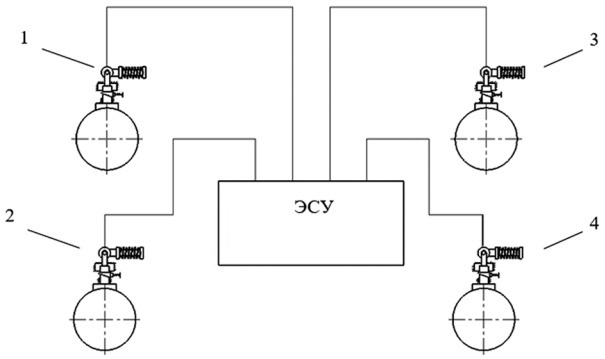



**Рисунок 14 — Схема модульной тормозной системы**
**Figure 14 — Diagram of the modular braking system**

Эта система включает в себя тормозные механизмы 1–4, установленные на каждое колесо и соединенные посредством электрической схемы с ЭСУ. Такое решение позволяет оптимизировать пространство и повысить эффективность торможения.

**Выводы.** Исследование было посвящено разработке новой концепции тормозной системы. Проведенный анализ показал, что система способна функционировать при пониженном давлении, что позволяет существенно сократить расходы на обслуживание пневмооборудования. Это особенно важно для операторов поездов, так как снижает эксплуатационные затраты.

Конструктивное исполнение системы допускает использование различных типов привода управления. Помимо традиционного пневматического, возможно применение электрического привода. Благодаря модульной конструкции система может найти применение не только в железнодорожном транспорте, но и в других сферах.

Инновационная концепция работы системы основана на использовании мощной пружины. Однако для окончательного определения ее эффективности требуется проведение дополнительных испытаний и более детальной проработки.

## Список литературы


1. Галай, Э.И. Тормозные системы железнодорожного транспорта. Конструкция тормозного оборудования: учеб. пособие / Э.И. Галай, Е.Э. Галай; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. — Гомель: БелГУТ, 2010. — 315 с.
2. Patent US656516A. Air-brake: publ. date 21.08.1900 / Clark F.L.; applicant WESTINGHOUSE AIR BRAKE CO. — URL: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/002725085/publication/US656516A?q=pn%3DUS656516A (date of access: 01.08.2024).
3. Patent US687773A. Air-brake: publ. date 03.12.1901 / Noyes H.F.; applicant WESTINGHOUSE AIR BRAKE CO. — URL: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/002756315/publication/US687773A?q=pn%3DUS687773A (date of access: 01.08.2024).
4. Patent CA3116439A. Pneumatic brake for a rail vehicle: publ. date 23.04.2020 / Hormann C., Schneider H.; applicant Siemens Mobility Austria GmbH. — URL: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/068072325/publication/CA3116439A1?q=CA3116439A (date of access: 01.08.2024).
5. Patent CN201680070814A. Compressed air brake device for a rail vehicle with a direct, electropneumatic brake: publ. date: 17.07.2018 / Reinicke S., Mauder M., Wiesand M.; applicant SIEMENS AG. — URL: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/057460492/publication/CN108290560A?q=CN201680070814A (date of access: 01.08.2024).
6. Патент RU 2661175 C1. Электропневматический тормоз вагонотолкателя (варианты): заявлено 29.03.2017: опубл. 12.07.2018 / Смирнов В.П., Одиноков О.И., Рошинец О.И; заявитель ПромТехТранс. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37377134 (дата доступа: 01.08.2024).
7. Patent EP2017056482W. Brake system, rail vehicle having a brake system, and method for operating a brake system: publ. date: 05.10.2017 / Lichterfeld J.P., Wernert H.; applicant SIEMENS MOBILITY GMBH. — URL: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/058461271/publication/WO2017167592A1?q=EP2017056482W (date of access: 01.08.2024).
8. Smart and electrified: brakes for the train of the future // Knorr-Bremse. — URL: https://www.knorr-bremse.com/en/magazine/smart-and-electrified-brakes-for-the-train-of-the-future.json (date of access: 01.08.2024).
9. Die Elektro-Mechanische Bremse: Elektrisch bremsen per Brake-by-wire // Rail Vehicle Systems. — URL: https://rail.knorr-bremse.com/media/test_e/6400_publications/6420_fachliteratur/em_bremse_tagung_graz/zevrail_em_brake_2023_de.pdf (date of access: 01.08.2024).
10. Patent EP 21212588. Electromechanical brake actuator, brake system having the electromechanical brake actuator and method for operating the electromechanical brake actuator: publ. date: 07.06.2023 / Barath G.; applicant KNORR BREMSE SYSTEME. — URL: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/078822479/publication/EP4190648A1?q=EP21212588A (date of access: 01.08.2024).
11. Patent EP 22173501A. Brake system of a railway vehicle, railway vehicle, and method for operating the brake system: publ. date: 22.11.2023 / Kremer M.; applicant KNORR BREMSE SYSTEME. — URL: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/081748691/publication/EP4279344A1?q=EP22173501A (date of access: 01.08.2024).
12. Patent CN 201880056138A. Electro-mechanical brake actuator with internal power electronics unit and energy store: publ. date: 21.04.2020 / Mosbach C., Elstorpff M.-G., Muller C., Sussmann A.; applicant KNORR BREMSE SYSTEME. — URL: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/063490418/publication/CN111051166A?q=CN201880056138A (date of access: 01.08.2024).
13. Das neue druckluftfreie Bremssystem der Siemens Bremse // SIEMENS. — URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1ebea61e-1fa7-4d30-ae52-562318c7e516/Beleg-pdf-Beitrag-EI-9-21-61-63-Lichterfeld-Steinfelder.pdf (date of access: 01.08.2024).
14. Patent CN 202020009019U. Railway vehicle electromechanical brake system: publ. date: 04.09.2020 / Miao F., Hu B., Lyu Y., Yang L., Luo K.; applicant CRRC QINGDAO SIFANG ROLLING STOCK RES INST CO LTD. — URL: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/072276039/publication/CN211417237U?q=CN202020009019U (date of access: 01.08.2024).
15. Patent CN 202010843018A. Rail vehicle electromechanical brake system: publ. date: 20.11.2020 / Sun H., Wang Y., Lu J., Wang Q.; applicant CRRC NANJING PUZHEN HAITAI BRAKE EQUIPMENT CO LTD. — URL: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/073388721/publication/CN111959466A?q=CN202010843018A (date of access: 01.08.2024).
16. Patent CN 202020584234U. Electromechanical brake and brake system: publ. date: 17.11.2020 / Ma F., Lin H., Miao F., Li J., Hao B., Wang S.; applicant CRRC QINGDAO SIFANG ROLLING STOCK RES INST CO LTD. — URL: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/073164671/publication/CN211951276U?q=CN202020584234U (date of access: 01.08.2024).
17. Report on the budgetary and financial management 2022. Europe's Rail Joint Undertaking // European Parliament. — European Parliament: https://www.europarl.europa.eu/cmsdata/269930/Europe's%20Rail%20JU_%20RBFM%202022.pdf (date of access: 31.01.2024).
18. Быковский, Е.В. Обоснование применения модульной тормозной системы / Е.В. Быковский / Инновационное разви-

тие транспортного и строительного комплексов: материалы междунар. науч.-практич. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа, Гомель, 16–17 ноября 2023 г.: в 2 ч. / М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, БелЖД, БелГУТ. — Гомель, 2023. — Ч. 1. — С. 17–18.
19. Simulation study on friction and wear law of brake pad in high-power disc brake / S. Zhang, Q. Hao, Y. Liu [et al.] // Mathematical Problems in Engineering. — 2019. — Vol. 2019, iss. 1. — DOI: https://doi.org/10.1155/2019/6250694.
20. Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes / M. Kindrachuk, D. Volchenko, N. Fidrovska [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — Vol. 4, no. 12(124). — P. 56–61. — DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285699.
21. Полезная модель BY 12735. Гидравлическая тормозная система транспортного средства: заявлено 05.10.2020:01.10. опубл. 01.10.2021 / Юницкий А.Э., Зайцев А.Д., Сосинович С.В., Немаровский Ю.В.; заявитель ЗАО «Струнные технологии». — URL: https://ust.inc/img/12735.pdf.

BYKOVSKIY Evgeniy V.
Design Engineer
E-mail: bukovskiy.e.v@gmail.com

Unitsky String Technologies, Inc., Minsk, Republic of Belarus

*Received August 22, 2024.*

# JUSTIFICATION FOR THE USE OF A MODULAR SPRING BRAKING SYSTEM

*This scientific and theoretical paper presents the concept of a modular low-pressure braking system for railway rolling stock. This system is designed to effectively regulate the speed of movement and reliably hold the train in place for a long time. The analysis of the existing braking systems used in modern cargo and passenger transportation is carried out. Their historical development, identified shortcomings and modern approaches to modernization used by various manufacturers are considered. The developed braking system was named the "Modular Braking System" (MTS). It is characterized by the use of a powerful compressed spring to create braking pressure, and by turning it, a smooth change in braking force is achieved. A significant MTS advantage is its low-pressure operation. It not only reduces the wear rate of compressor equipment, which reduces operating costs, but also contributes to significant energy savings. This is fully consistent with current global trends in energy conservation. The modular design of the system makes it possible to integrate both freight and passenger rolling stock into existing systems. At the same time, the important function of automatic operation remains in case of unauthorized uncoupling, which guarantees a high level of safety.*

***Keywords:*** *modular braking system, railway transport, low-pressure braking system, string transport, braking, spring brake, lever mechanism*

DOI: https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-3-72-37-45

## References

1. Galay E.I., Galay E.E. *Tormoznye sistemy zheleznodorozhnogo transporta. Konstruktsiya tormoznogo oborudovaniya* [Braking systems of railway transport. Brake equipment design]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2010. 315 p. (in Russ.).
2. Clark F.L. *Air-brake*. Patent US, no. US656516A, 1900.
3. Noyes H.F. *Air-brake*. Patent US, no. US687773A, 1901.
4. Hormann C., Schneider H. *Pneumatic brake for a rail vehicle*. Patent CA, no. CA3116439A, 2020.
5. Reinicke S., Mauder M., Wiesand M. *Compressed air brake device for a rail vehicle with a direct, electropneumatic brake*. Patent CN, no. CN201680070814A, 2018.
6. Smirnov V.P., Odinokov O.I., Roshinets O.I. *Elektropnevmaticheskiy tormoz vagonotolkatelya (varianty)* [Electropneumatic pusher brake (variants)]. Patent RU, no. RU 2661175 C1, 2018.
7. Lichterfeld J.P., Wernert H. *Brake system, rail vehicle having a brake system, and method for operating a brake system*. Patent EPO, no. EP2017056482W, 2017.
8. *Smart and electrified: brakes for the train of the future*. 2023. Available at: https://www.knorr-bremse.com/en/magazine/smart-and-electrified-brakes-for-the-train-of-the-future.json (accessed August 1, 2024).
9. Baier J. *Die Elektro-Mechanische Bremse: Elektrisch bremsen per Brake-by-wire.* Available at: https://rail.knorr-bremse.com/media/test_e/6400_publications/6420_fachliteratur/em_bremse_tagung_graz/zevrail_em_brake_2023_de.pdf (accessed August 1, 2024).
10. Barath G. *Electromechanical brake actuator, brake system having the electromechanical brake actuator and method for operating the electromechanical brake actuator*. Patent EPO, no. EP21212588, 2023.
11. Kremer M. *Brake system of a railway vehicle, railway vehicle, and method for operating the brake system*. Patent EPO, EP22173501A, 2023.
12. Mosbach C., Elstorpff M.-G., Muller C., Sussmann A. *Electro-mechanical brake actuator with internal power electronics*

*unit and energy store*. Patent CN, no. CN201880056138A, 2020.
13. Lichterfeld J., Steinfelder R. *Das neue druckluftfreie Bremssystem der Siemens Bremse*. 2021. Available at: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1ebea61e-1fa7-4d30-ae52-562318c7e516/Beleg-pdf-Beitrag-EI-9-21-61-63-Lichterfeld-Steinfelder.pdf (accessed August 1, 2024).
14. Miao F., Hu B., Lyu Y., Yang L., Luo K. *Railway vehicle electromechanical brake system*. Patent CN, no. CN202020009019U, 2020.
15. Sun H., Wang Y., Lu J., Wang Q. *Rail vehicle electromechanical brake system*. Patent CN, no. CN202010843018A, 2020.
16. Ma F., et al. *Electromechanical brake and brake system*. Patent CN, no. CN202020584234U, 2020.
17. *Report on the budgetary and financial management 2022. Europe's Rail Joint Undertaking*. 2023. Available at: https://www.europarl.europa.eu/cmsdata/269930/Europe's%20Rail%20JU_%20RBFM%202022.pdf (accessed January 31, 2024).
18. Bykovskiy E.V. Obosnovanie primeneniya modulnoy tormoznoy sistemy [Justification of the use of a modular braking system]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu BelIIZHTa – BelGUTa "Innovatsionnoe razvitie transportnogo i stroitelnogo kompleksov"* [Proc. International scientific and practical conference, dedicated to the 70th anniversary of Belarusian Institute of Railway Engineers – Belarusian State University of Transport "Innovative development of transport and construction complexes"]. Gomel, 2023, part 1, pp. 17–18 (in Russ.).
19. Zhang S., et al. Simulation study on friction and wear law of brake pad in high-power disc brake. *Mathematical problems in engineering*, 2019, vol. 2019, iss. 1. DOI: https://doi.org/10.1155/2019/6250694.
20. Kindrachuk M., et al. Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2023, vol. 4, no. 12(124), pp. 56–61. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285699.
21. Yunitskiy A.E., Zaytsev A.D., Sosinovich S.V., Nemarovskiy Yu.V. *Gidravlicheskaya tormoznaya sistema transportnogo sredstva* [Hydraulic braking system of a vehicle]. Utility model BY, no. 12735, 2021 (in Russ.).