

Новицкий А.В., Литвин В.В.  
*Национальный горный университет*

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТОРЕЛЬСОВЫХ СИСТЕМ ШАХТНЫХ ЛОКОМОТИВОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МАГНИТНЫХ БЛОКОВ

Проанализированы причины низкой эффективности тормозных устройств, которые в настоящее время используются на шахтных локомотивах. Рассмотрены и проанализированы некоторые известные технические решения по повышению тормозных характеристик шахтных локомотивов, указаны их недостатки. Представлены результаты математического моделирования процесса торможения шахтного поезда с использованием магниторельсовых систем при работе в выработках с уклоном пути 15 и 50 ‰ и различных эксплуатационных условиях. Проведен сравнительный анализ основных параметров торможения при применении магнитных блоков традиционной и секционной компоновки. Установлено, что использование секционного тормозного блока на участках с несовершенствами рельсового пути обеспечивает более стабильные значения сил прижатия и торможения, что позволяет существенно уменьшить тормозной путь поезда. В результате сделан вывод о целесообразности применения в выработках с уклоном пути более 15 ‰, имеющих значительные несовершенства рельсовой колеи, магниторельсовых систем с секционным магнитным блоком.

**Ключевые слова:** шахтный локомотив, магниторельсовая система, торможение, тормозной путь, рельсовая колея.

**Постановка проблемы.** В настоящее время основным средством транспортирования грузов и людей по горизонтальным выработкам угольных шахт является рельсовый локомотивный транспорт. Повышение его производительности возможно за счет увеличения скорости движения и весовой нормы поезда, что ограничивается возможностями традиционно применяемых тормозных средств локомотива, который в настоящее время является единственной тормозной единицей шахтного поезда.

Согласно действующим нормативным документам, основным показателем безопасности движения является тормозной путь поезда – 40 м для грузовых и 20 м для людских составов, причем указанные значения должны быть обеспечены в любых условиях эксплуатации. Используемые на эксплуатируемых в настоящее время локомотивах колодочно-колесные тормозные системы реализуют ограниченную по условиям сцепления тормозную силу в точках контакта колеса с рельсом и не гарантируют безопасную остановку поезда на регламентируемом тормозном пути. Это объясняется тем, что при наложении на тормозную колодку тормозного нажатия, величина которого больше некоторого предельного для данных условий значения, происходит срыв сцепления и блокирование колеса [1]. Величина предельного для данных условий тормозного нажатия определяется рядом факторов, среди которых наиболее значимыми являются вертикальная нагрузка на колесо и состояние рельсового пути (характер и степень загрязненности, износа дорожек катания и т.д.). Способы управления параметрами сцепления колеса с рельсом, например, подсыпка песка, на практике оказываются недостаточно эффективными, поэтому задача повышения безопасности локомотивной откатки за счет обеспечения безюзового режима движения сводится к разработке способа увеличения вертикальной нагрузки на колесо, что позволит прилагать к колесу максимально возможный тормозной момент без риска срыва сцепления колеса с рельсом.

Одним из перспективных способов повышения тормозных характеристик шахтных локомотивов является применение магниторельсовых систем, реализующих тормозное усилие за счет сил фрикционного взаимодействия между магнитным блоком и рельсом [1, 2]. Достоинствами магниторельсовых систем применительно к шахтным локомотивам является высокая эффективность, независимость от внешних источников питания (при применении в качестве источника магнитного потока постоянных магнитов), возможность передачи части силы магнитного притяжения на оси локомотива для увеличения эффективности работы колесно-колодочного тормоза и повышения устойчивости движения локомотива.

Опыт эксплуатации магниторельсовых систем в шахтных условиях показал, что фактические значения основных показателей эффективности работы магниторельсовых систем (сила магнитного притяжения, реализуемая тормозная сила) на 30 – 50% ниже значений полученных расчетным путем или в результате экспериментов в лабораторных условиях [3]. Анализ результатов исследований

процесса торможения штатного локомотива магниторельсовыми тормозами показал, что основной причиной снижения силы магнитного притяжения является уменьшение площади контакта полюсных наконечников магнитного блока с рельсом при прохождении локомотивом неровностей рельсового пути, наезде на препятствие, изменении диаметра круга катания колеса. Расчеты, выполненные в работе [4], показали, что при величине эквивалентного зазора 0,1 мм (полное прилегание приработанных полюсных наконечников к рельсу) реализуемая сила магнитного притяжения составляет 97 % от теоретически возможной, а при зазоре 0,5 мм – только 72 %.

Решение данной проблемы может быть использование секционного магнитного блока, в котором секции имеют возможность относительного перемещения в продольной плоскости. Перспективность данного технического решения подтверждена испытаниями в полигонных условиях [5], однако теоретическое обоснование эффективности его применения, как и методики проектирования магниторельсовых систем с секционным магнитным блоком, в научной литературе отсутствуют. Поэтому целью работы является сравнительная оценка основных показателей эффективности работы магниторельсовых систем с различными типами магнитных блоков на основе результатов математического моделирования процесса торможения шахтного поезда.

#### Результаты исследований.

Основным показателем, определяющим эффективность работы магниторельсовой системы, является сила магнитного притяжения, величина которой прямо пропорциональна площади контакта полюсных наконечников с рельсом. При движении по идеально ровным рельсам площадь контакта остается постоянной как для магнитного блока традиционной конструкции, так и для секционного блока. При контакте тормозного блока с рельсом на каждую секцию действует сила магнитного притяжения  $F_{pm\,in}$  и реакция рельса  $Q_{in}$ , отклоненная на угол трения  $\rho$ . Горизонтальная проекция реакции рельса представляет собой тормозную силу рельсового тормоза  $F_{pm\,ij}$ . В тяге возникает усилие  $F_{t\,in}$  и реакция тяги  $R_{in}$ , направленные под углом  $\alpha_{in}$ . Вертикальная проекция силы  $F_{t\,in}$  представляет собой силу разгрузки тормоза  $F_{p\,in}$ , а соответствующая ей вертикальная проекция реакции тяги  $N_{Ft\,11}$  через опорную балку нагружает оси экипажа. При наезде колеса на неровность рельсового пути или изменения диаметра круга катания колеса изменяется расстояние от поверхности рельса до точки крепления наклонной тяги на опорной балке  $l_{in}$ , что при использовании тормозного блока традиционной конструкции приводит к возникновению воздушного зазора и исчезновению силового взаимодействия между тормозом и рельсом (рис.1, а). При использовании секционного тормоза в аналогичной ситуации сила  $F_{t11}$  получает приращение  $\Delta F_{t11}$ , соответственно увеличиваются и её проекции  $F_{p11}$  и  $F_{d11}$ . При этом первая секция под действием силы  $F_{d11} + \Delta F_{d11}$  перемещается вперед, компенсируя увеличение расстояния  $l_{11}$ , вследствие чего вероятность отрыва секции от рельса уменьшается (рис.1, б).

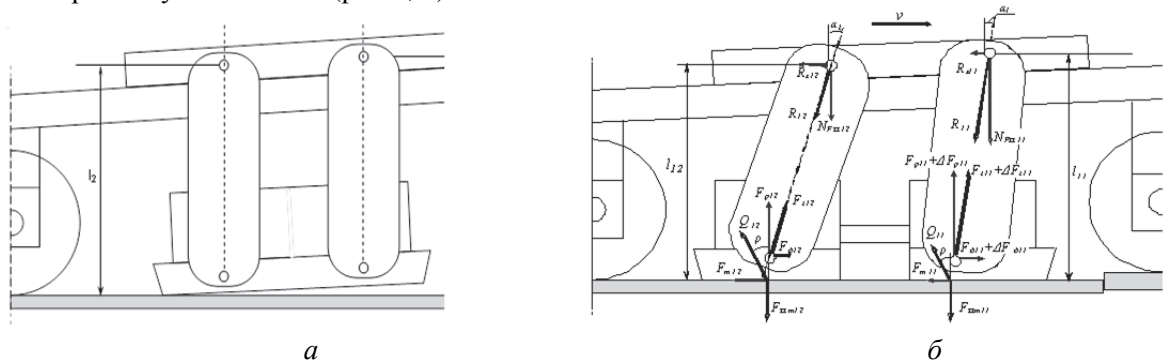


Рисунок 1 – Магниторельсовая система шахтного локомотива с тормозным блоком традиционной конструкции (а) и с секционным тормозным блоком (б)

Для исследования процесса торможения использована математическая модель, которая дает возможность рассчитывать параметры движения поезда в режиме торможения колесно-колодочными и рельсовыми тормозами. Для обозначения переменных приняты следующие индексы, обозначающие принадлежность переменной объекту математической модели:  $n$  – к колёсным парам, упругим и диссипативным элементам подвески, причем 1 обозначена ближняя к голове поезда колесная пара;  $s$  – к колесно-колодочному тормозу, установленному на колесе ( $s = 1, 2$ ), при этом 1 обозначены левые в направлении к голове поезда колодки;  $o$  – к рельсовой колее:  $L$  – к левому рельсу;  $R$  – к правому рельсу. Численное решение системы из 33 дифференциальных уравнений второго порядка

выполнено в программе Wolfram Mathematica 8. Для определения тормозного пути поезда и времени торможения использовался программный продукт *5DKP.nb* [6], выполненный в программном комплексе Wolfram Mathematica 8, геометрические характеристики неровностей пути задавались в дополнительном файле *Path Parametrs.xls*.

Первый этап исследований предусматривал моделирование процесса торможения шахтного поезда в составе электровоза АРП10РВ и 5 груженых вагонеток на участке идеально ровного рельсового пути с продольным уклоном 15‰. Общая длина магнитного блока магниторельсовой системы принималась равной 0,6 м, к каждому колесу локомотива прикладывался постоянный тормозной момент  $M_{s11}$ , равный 1287 Н (рис.2).. В результате установлено, что при идентичных условиях работы тормозной путь поезда составит 10,1 м как при использовании секционного магнитного блока, так и при применении магнитного блока традиционной конструкции. Результаты моделирования подтвердили предположение о том, что при отсутствии неровностей рельсового пути тормозной путь поезда не зависит от типа магнитного блока, а определяется в первую очередь его длиной.

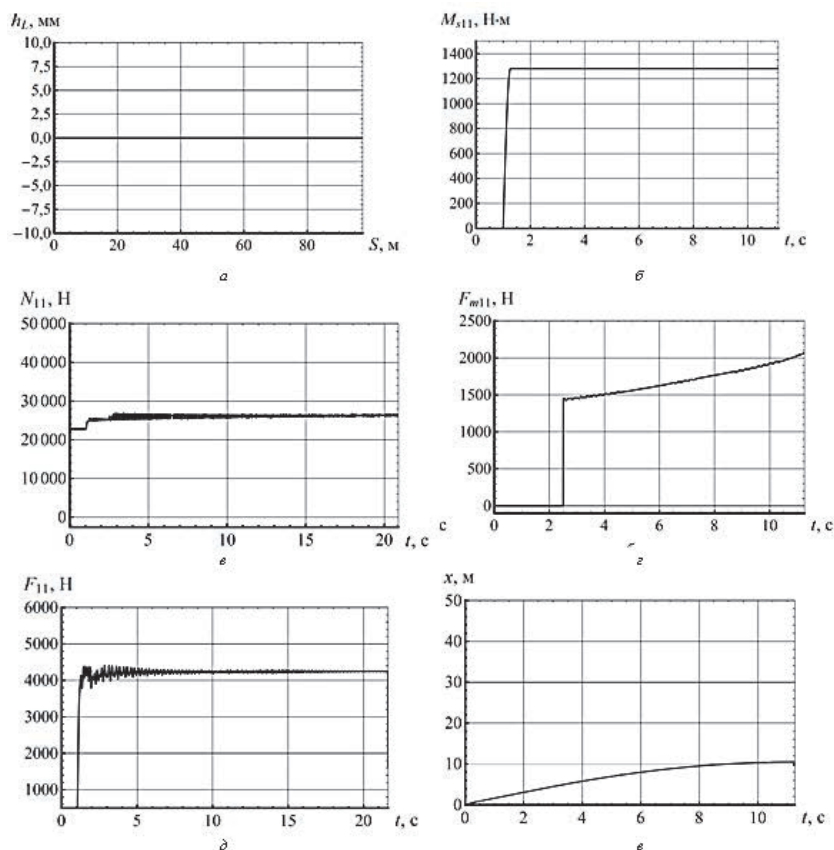


Рисунок 2 – Графики параметров процесса торможения шахтного поезда при совместном использовании колесо - колодных тормозов и магниторельсовой системы (идеально ровный рельсовый путь): а – высота ступеньки рельсового стыка на левом рельсе; б – тормозной момент на колесе; в – реакция рельса под колесом; г – тормозная сила, реализуемая магнитным блоком; д – тормозная сила на колесе; е – тормозной путь

Второй этап исследований предусматривал моделирование процесса торможения шахтного поезда на участке рельсового пути с одиночными короткими локальными неровностями в виде ступенек в местах стыков рельсов. Масса поезда, продольный уклон и прочие условия торможения принимались те же, что и на первом этапе. В результате получены графики, отображающие изменение основных параметров процесса торможения (рис. 3, 4).

Как видно из графиков, при прохождении неровностей рельсового пути вследствие отрыва магнитного блока от рельса значение тормозной силы  $F_{m11}$  скачкообразно снижается (рис. 3, г), причем при применении магнитного блока традиционной конструкции значение силы  $F_{m11}$  падает до нуля, а при секционного применения магнитного блока падение составляет 45 % от начального значения.

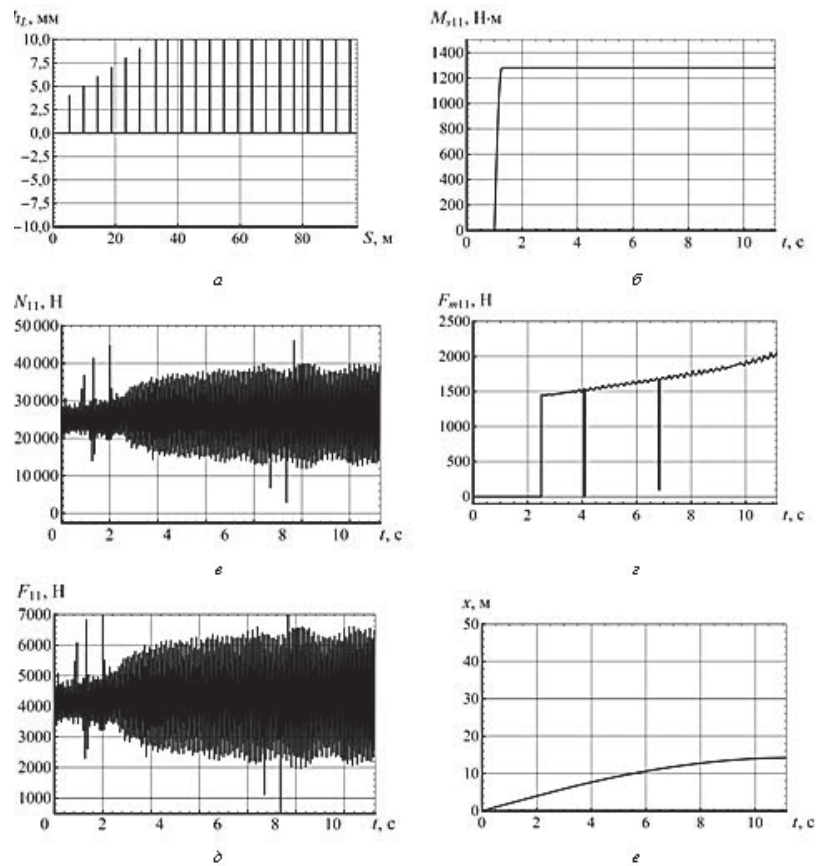


Рисунок 3 – Графики параметров процесса торможения шахтного поезда при совместном использовании колесо - колодных тормозов и магниторельсовой системы с магнитным блоком традиционной конструкции на участке рельсового пути с уклоном 15% (см. обозначения на рис.1)

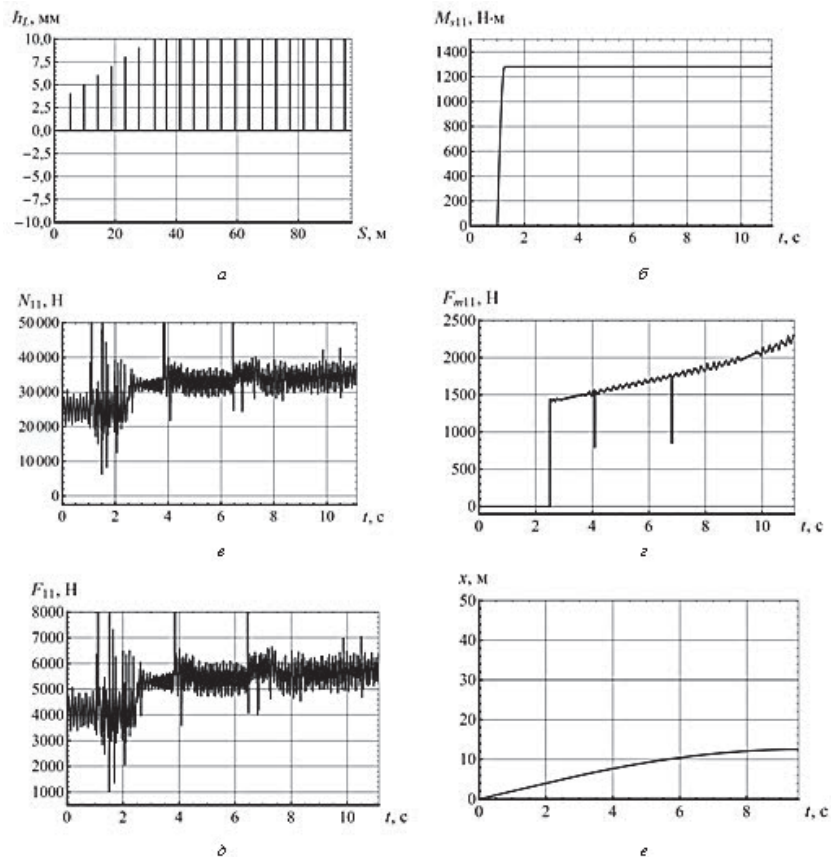


Рисунок 4 – Графики параметров процесса торможения шахтного поезда при совместном использовании колесо - колодных тормозов и магниторельсовой системы с секционным магнитным блоком на участке рельсового пути с уклоном 15% (см. обозначения на рис.1)



Передача части силы магнитного притяжения на оси локомотива позволяет уменьшить негативное влияние неровностей рельсового пути, выражаемое в разгрузке колесных пар, что приводит к снижению тормозной силы, реализуемой в точке контакта колеса с рельсом. При обеспечении стабильного значения силы догружения колесных пар заметно уменьшается амплитуда колебания значений реакции рельса под колесом  $N_{11}$ , что позволяет получить большие значения тормозной силы на колеса локомотива (рис. 4). Так, при применении магнитного блока традиционной конструкции отклонения мгновенного значения тормозной силы  $F_{11}$  достигают 76 %, в то время как при применении секционного блока этот показатель составил 22 %. Вследствие этого средняя за период торможения тормозная сила, реализуемая локомотивом, увеличивается на 12 %, а тормозной путь уменьшается 14 % (с 14,1 м до 12,3 м).

Третий этап исследований предусматривал моделирование процесса торможения в наиболее тяжелых условиях эксплуатации локомотивного транспорта – при максимальном уклоне рельсового пути 50 ‰. Характеристики неровностей рельсового пути и прочие условия торможения принимались те же, что и на предыдущих этапах. Поскольку на всех этапах исследования использовались одни и те же тормозные механизмы, результаты расчетов тормозных сил  $F_{m11}$  и  $F_{11}$  равны, однако эффект от использования секционного магнитного блока более заметен (рис.5, 6). Так, если при торможении блоком традиционной конструкции тормозной путь поезда составил 55,4 м, то при использовании секционного блока тормозной путь поезда составил 33,6 м. Следовательно, можно сделать вывод о том, что применение секционного тормозного блока более целесообразно при больших значениях уклона рельсового пути.

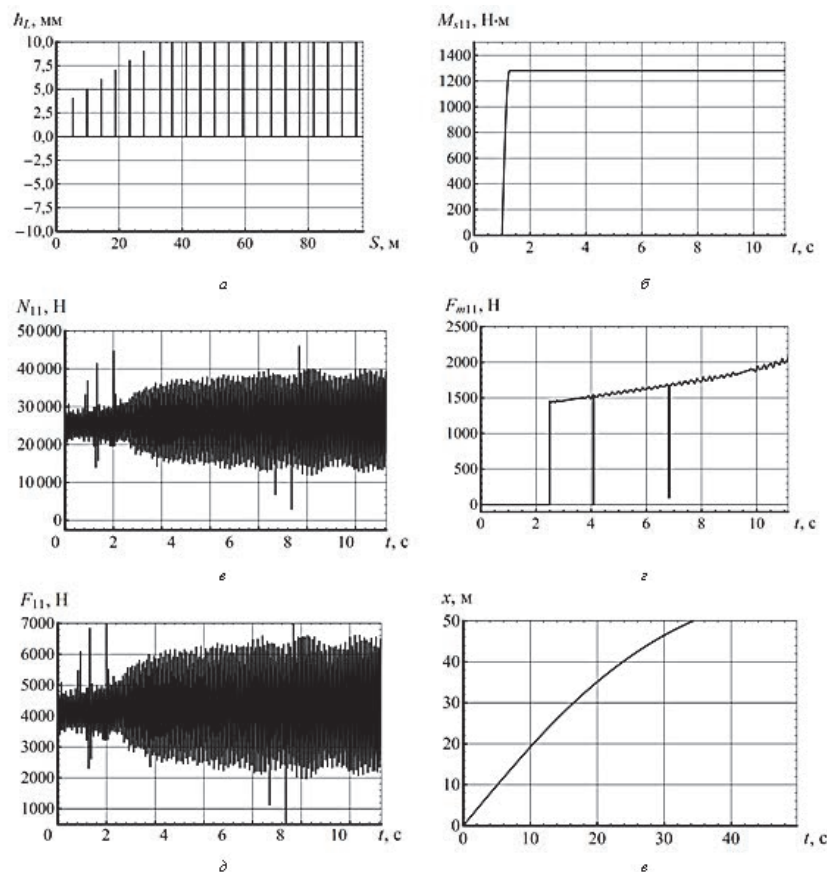


Рисунок 5 – Графики параметров процесса торможения шахтного поезда при совместном использовании колесо - колодочных тормозов и магниторельсовой системы с магнитным блоком традиционной конструкции на участке рельсового пути с уклоном 50‰ (см. обозначения на рис.1).

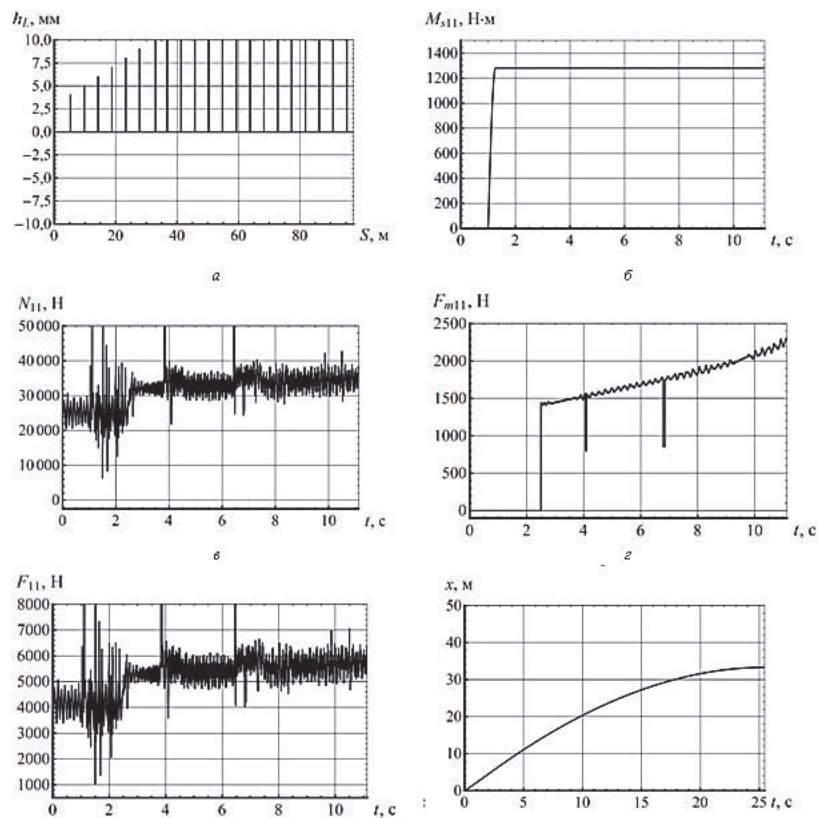


Рисунок 6 – Графики параметров процесса торможения шахтного поезда при совместном использовании колесо - колодочных тормозов и магниторельсовой системы с секционным магнитным блоком на участке рельсового пути с уклоном 50‰ (см. обозначения на рис.1).

**Выводы.** На основании результатов моделирования процесса торможения шахтного поезда магниторельсовыми тормозными системами с различными типами магнитного блока установлено, что при эксплуатации на участках рельсового пути, имеющих геометрические несовершенства, секционный блок имеет существенные преимущества перед магнитным блоком традиционной конструкции, поскольку за счет возможности относительного перемещения секций обеспечиваются более стабильные значения силы магнитного притяжения, торможения и догружения осей, что в свою очередь позволяет улучшить тормозные характеристики шахтного локомотива, уменьшить тормозной путь, повысить безопасность работы локомотивного транспорта. Передача части силы магнитного притяжения на оси локомотива позволяет уменьшить амплитуду колебания вертикальной нагрузки на колесо, что положительно сказывается на эффективности работы колодочно-колесного тормоза. Применение секционных блоков целесообразно при работе в откаточных горных выработках с продольным уклоном рельсового пути от 15‰ до 50 ‰ и значительными несовершенствами рельсовой колеи, причем эффективность применения при увеличении уклона возрастает.

1. Салов В. А. Повышение тяговой и тормозной способности шахтного подвижного состава с помощью магнитных устройств / В. А. Салов // Известия вузов: Горный журнал. – 1990. – № 2. – С. 77 – 80.
2. Абрамов А. П. К вопросу увеличения производительности локомотивной откатки / А. П. Абрамов, В. Д. Елманов // Механизация очистных и проходческих работ : сб. науч. тр. Кузбас. политехн. ин-та. – Кемерово, 1985. – С. 97 – 99.
3. Новицкий А.В. Исследование характеристик колебательного процесса рельсового тормоза при воздействии импульса мгновенной силы / А.В. Новицкий // Вісник Кременчуц. держ. політех. ун-ту. – 2006. – № 2 (37), ч.1 - С. 51 - 56.
4. Процев В.В. Научное обоснование новых технических решений по совершенствованию тормозной системы шахтного шарнирно-сочлененного локомотива. – Дис. .. соиск. уч. степ. д.т.н. – Дн-ск, 2012. – 415 с.
5. Салов В.А. Определение характеристик магниторельсового тормоза шахтного локомотива при движении по рельсовому стыку / В. А. Салов, В. А. Сердюк // Вибрации в технике и технологиях. – 2000. – № 4 (16). – С. 56 – 58.
6. Новицкий А. В. Влияние несовершенств рельсового пути на характеристики колебательного режима шахтного локомотива / А. В. Новицкий // Сборник научных трудов НГУ. – 2004. – № 19 – С. 171 – 176.

## REFERENCES

1. Salov, V. (1990). Increased traction and braking ability of mine rolling stock using magnetic devices. [Povyshenie tzhagovoy i tormoznoj sposobnosti shahtnogo podvignogo sostava s pomosh'ju magnitnyh ustrojstv]. *Gornyj Journal*. Vol 2. Moskou, pp. 77 – 80.
2. Abramov, A. & Elmanov, V. (1985). On the question of increasing the productivity of locomotive haulage. [K voprosu uvelicheniya proizvoditel'nosti lokomotivnoj otkatki] *Mehanizacija ochistnyh i prohodcheskih rabot*. Vol. 2(14). Kemerovo, Kuzbasskii politehnicheskii universitet, pp. 97 – 99.
3. Novytski, A. (2006). Investigation of the characteristics of the oscillatory process under the influence of a rail brake pulse instant power [Issledovanie harakteristik kolebatel'nogo processa rel'sovogo tormoza pri vozdeystvii impul'sa mgnovennoj sily]. *Vestnik Kremenchutskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. Vol 2(37). Kremenchug, pp. 51 – 56.
4. Protsiv, V. (2015). *Nauchnoe obosnovanie novyh tehnikeskikh reshenij po sovershenstvovaniju tormoznoj systemy shahtnogo sharnirno-sochlenennogo locomotive*. Dokt. Diss. [Scientific ground of technical decisions on perfection of the brake system of the mine joint-jointed locomotive. Dokt. Diss.]. Dnepropetrovsk, 415 p.
5. Salov, V. & Serdyuk, V. (2000). Characterization of magnetic rail brakes of mine locomotive when driving on the rail joints. [Opredelenie harakteristik magnitorel'sovogo tormoza shahtnogo lokomotiva pri dvizhenii po rel'sovomu styku]. *Vibracii v tehnike i tehnologijah*. Vol. 4(16). Dnepropetrovsk, NMU Publ., pp. 56 – 58.
6. Novytski, A. (2010). The impact of imperfections on the track characteristics of the vibrational mode of mine locomotive. [Vliyanie nesovershenstv rel'sovogo puti na kharakteristiki kolebatel'nogo rezhima shakhtnogo lokomotiva]. *Sbornik nauchnykh trudov NGU*. Vol. 37. Dnepropetrovsk, NMU Publ., pp. 171 – 176.

**Новицкий О.В., Литвин В.В. Оцінка ефективності магніторейкових систем шахтних локомотивів при використанні різних типів магнітних блоків.**

Проаналізовано причини низької ефективності гальмівних пристроїв, які в даний час використовуються на шахтних локомотивах. Розглянуто та проаналізовано деякі відомі технічні рішення щодо підвищення гальмівних характеристик шахтних локомотивів, вказані їх недоліки. Представлені результати математичного моделювання процесу гальмування шахтного поїзда з використанням магніторейкових систем при роботі у виробках з ухилом колії 15 і 50 ‰ та різних експлуатаційних умовах. Проведено порівняльний аналіз основних параметрів гальмування при застосуванні магнітних блоків традиційної та секційної компоновки. Встановлено, що використання секційного гальмівного блоку на ділянках з недосконалістю рейкового шляху забезпечує більш стабільні значення сил притиснення і гальмування, що дозволяє істотно зменшити гальмівний шлях поїзда. У результаті зроблено висновок про доцільність застосування у виробках з ухилом шляху більш 15 ‰, що мають значні недосконалості рейкової колії, магніторейкових систем з секційним магнітним блоком.

**Ключові слова:** шахтний локомотив, магніторейкова система, гальмування, гальмівний шлях, рейкова колія.

**A. Novytski, V. Litvin. Evaluating the effectiveness of magnetic rail systems for mine locomotives using different types of magnetic blocks.**

The reasons for the low efficiency of braking devices that are currently used in the mine locomotive. We considered and analyzed some of the known technical solutions to improve the braking performance of mine locomotives, given their limitations. The results of mathematical modeling of the mine train braking using magnitorelovnyh systems at work in the mines sloping path 15 and 50 ‰ and a variety of operating conditions. A comparative analysis of the basic parameters of braking when using the traditional magnetic blocks and sectional layout. It was found that the use of the brake unit in the sectional areas of the imperfections of the track provides a more stable value of the pressing force and braking, which can significantly reduce the braking distance of the train. As a result of the conclusion of the feasibility of the use of mines in the path with a slope of more than 15 ‰, with significant imperfections rail track, magnetic rail systems with the section of the magnetic unit.

**Keywords:** mine locomotive, the magnetic rail system, braking, stopping distance, rail track.

**АВТОРИ:**

**НОВИЦЬКИЙ Олексій Володимирович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління на транспорті, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», e-mail: novitsk\_a@mail.ru;

**ЛИТВИН Вадим Вікторович**, старший викладач кафедри управління на транспорті, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет».

**AUTHORS:**

**Alexey NOVYTSKI**, Ph.D. in Engineering, Assoc. Professor of Transport Management Department, National Mining University, e-mail: novitsk\_a@mail.ru;

**Vadim LITVIN**, Senior Lecturer of Transport Management Department, National Mining University.