

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МАГНИТОРЕЛЬСОВЫХ СИСТЕМ ШАХТНЫХ ЛОКОМОТИВОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ МАГНИТНЫХ БЛОКОВ

*В.В. Процив, А.В.Новицкий, Государственное ВУЗ «Национальный горный университет»,  
Украина*

*А.И. Самойлов, Научно-производственная компания «Горные машины», Украина*

В работе представлены результаты математического моделирования процесса торможения шахтного поезда с применением магниторельсовых систем, оснащенных магнитными блоками различных конструкций. На основании результатов моделирования сделан вывод о целесообразности применения в выработках, имеющих значительные несовершенства рельсовой колеи и продольный уклон более 15 %, магниторельсовых систем с секционным магнитным блоком.

**Вступление.** 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]. Достоинствами магниторельсовых систем применительно к шахтным локомотивам являются 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.

**Состояние вопроса.** Опыт эксплуатации магниторельсовых систем в шахтных условиях показал, что фактические значения основных показателей эффективности работы магниторельсовых систем (сила магнитного притяжения и реализуемая тормозная сила) на 30 – 50 % ниже значений, полученных расчетным путем или в результате экспериментов в лабораторных условиях [2, 3]. Так, расчетный тормозной путь поезда в составе электровоза АРП10РВ и восьми груженых вагонеток ВГ3,3 общей массой 58 т на участке рельсового пути с продольным уклоном 35 ‰ при применении магниторельсовых тормозов составил 27 м, а в результате шахтных испытаний – 36 м, что на 25 % больше расчетного. Анализ результатов исследований процесса торможения шахтного локомотива магниторельсовыми тормозами показал, что основной причиной снижения силы магнитного притяжения является уменьшение площади контакта полюсных наконечников магнитного блока с рельсом и увеличение эквивалентного воздушного зазора между ними при прохождении локомотивом неровностей рельсового пути, наезде на препятствие. Расчеты, выполненные в работе [4], доказали, 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 продольном направлении. Перспективность такого 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.

**Цель работы** – моделирование процесса торможения шахтного поезда с использованием магниторельсовых систем, оснащенных различными типами магнитных блоков, для теоретического определения основных показателей эффективности работы.

**Материалы исследований.** Основным показателем, определяющим эффективность работы магниторельсовой системы, является сила магнитного притяжения, величина которой прямо пропорциональна площади контакта полюсных наконечников с рельсом и величине эквивалентного зазора между ними. 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  $F_{nmij}$  и реакция рельса  $Q_{in}$ , отклоненная на угол трения  $\rho$ . Горизонтальная проекция реакции рельса представляет собой тормозную силу рельсового тормоза  $F_{nmij}$ . В тяге возникает усилие  $F_{tin}$  и реакция тяги  $R_{in}$ , направленные под углом  $\alpha_{in}$ . Вертикальная проекция силы  $F_{tin}$  представляет собой силу разгрузки тормоза  $F_{pin}$ , а соответствующая ей вертикальная проекция реакции тяги  $N_{Fn11}$  через опорную балку нагружает оси экипажа. При наезде колеса на неровность рельсового пути или изменения диаметра круга катания колеса изменяются расстояния от поверхности рельса до точек крепления наклонных тяг 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). В случае применения секционного тормоза в аналогичной ситуации сила  $F_{tin}$  получает приращение  $\Delta F_{i11}$ , соответственно увеличиваются и её проекции  $F_{p11}$  и  $F_{o11}$ . При этом первая секция под действием силы  $F_{o11} + \Delta F_{o11}$  перемещается вперед, компенсируя увеличение расстояния  $l_{11}$ , вследствие чего вероятность отрыва секции от рельса уменьшается (рис. 1, а)

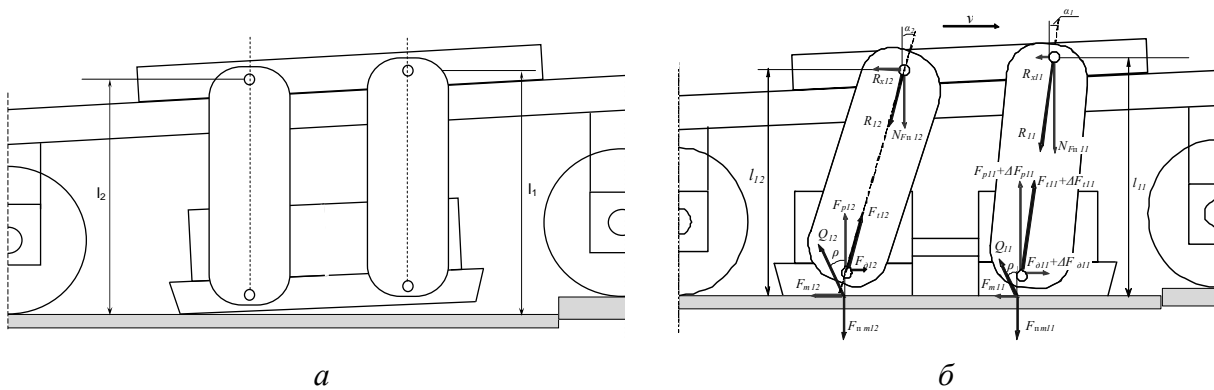


Рис. 1. Магниторельсовая система шахтного локомотива: а – с тормозным блоком традиционной конструкции; б – с секционным тормозным блоком

Для исследования процесса торможения использована математическая модель [6], которая дает возможность рассчитывать параметры движения поезда в режиме торможения колесно-колодочными и рельсовыми тормозами. Для обозначения переменных приняты следующие индексы, обозначающие принадлежность переменной к 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 по направлению 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, составленное из независимых координат  $x, x_{in}, \varphi_{in}, x_c, z_c, y_c, z, z_{in}, z_{0in}, \theta, \varphi, \psi, z, y_{0in}, x_{mij}$  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 Params.xls.

Первый этап исследований предусматривал моделирование процесса торможения шахтного поезда в составе электровоза АРП10РВ и пяти груженых вагонеток ВГ3,3 на участке идеально ровного рельсового пути с продольным уклоном 15 %. Общая длина магнитного блока

магниторельсовой системы принималась равной 0,6 м, а к каждому колесу локомотива прикладывался постоянный тормозной момент  $M_{sin}$ , равный 1 287 Н. В результате установлено, что при идентичных условиях работы тормозной путь поезда составит 10,1 м (рис. 2) 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.

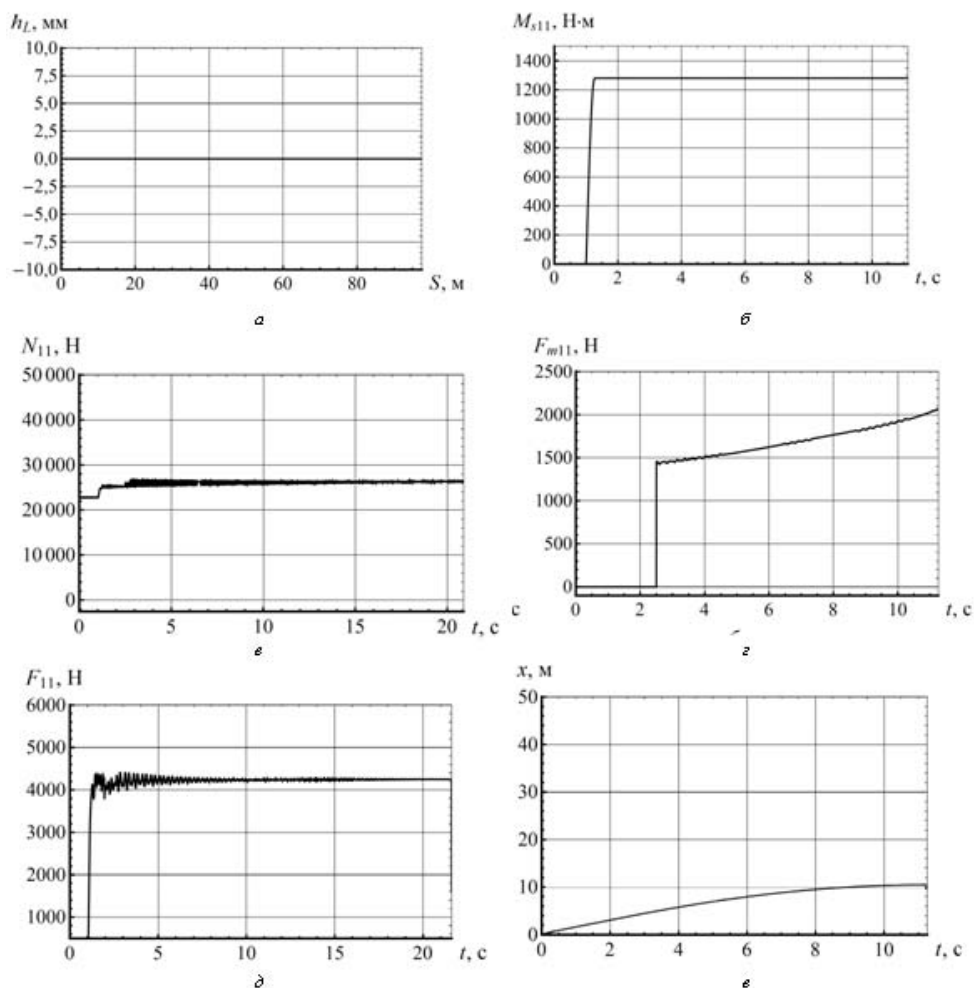


Рис. 2. Графики параметров процесса торможения шахтного поезда при совместном использовании колесно-колодочных тормозов и магниторельсовой системы (идеально ровный рельсовый путь, уклон 15 ‰): а – высота ступеньки рельсового стыка на левом рельсе; б – тормозной момент на колесе; в – реакция рельса под 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 и 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, д), причем при применении магнитного блока традиционной конструкции значение указанной силы падает до нуля, а при применении секционного магнитного блока падение составляет 45 % от начального значения (рис. 4, д).

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. 3, 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 на 14 % (с 14,1 до 12,3 м).

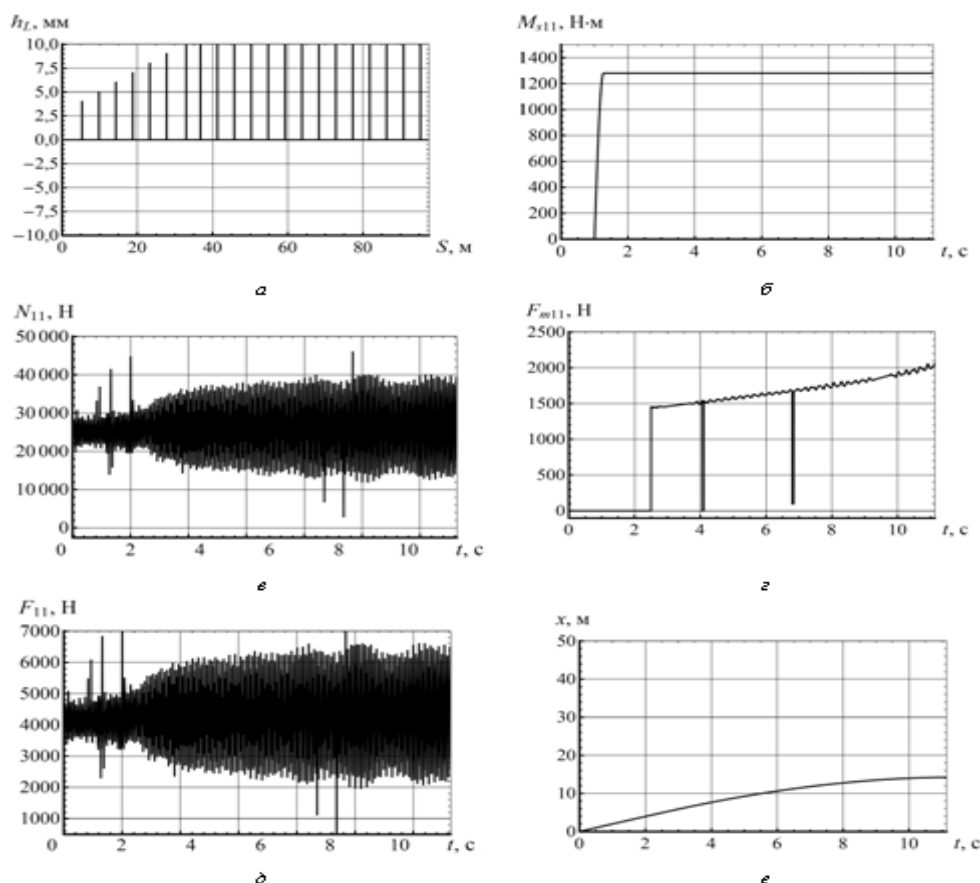


Рис. 3. Графики параметров процесса торможения шахтного поезда при совместном использовании колесо - колодочных тормозов и магниторельсовой системы с магнитным блоком традиционной конструкции на участке рельсового пути с уклоном 15 ‰ (см. обозначения на рис. 1)

Более высокие показатели эффективности секционного магнитного блока обеспечиваются за счет возможности относительного перемещения секций. При прохождении колесом ступенек рельсовых стыков секции перемещаются относительно кузова локомотива (рис. 5, а), при этом углы наклона тяг секций  $\alpha_{m11}$  и  $\alpha_{m12}$  уменьшаются, а силы догружения осей, создаваемые секциями, увеличиваются (рис. 5, б), что в итоге позволяет реализовать большие силы торможения в точке контакта колеса с рельсом. Отклонения угла наклона тяг обусловлено изменением расстояний  $l_1$  и  $l_2$  (рис. 1), величина которых пропорциональна высоте неровностей рельсового пути.

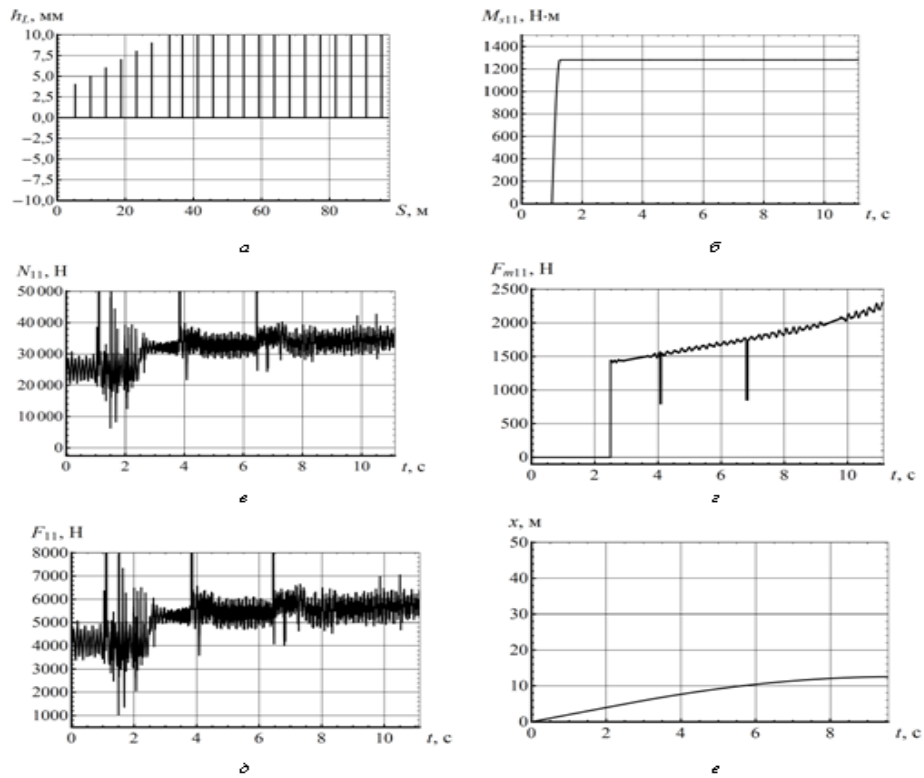


Рис. 4. Графики параметров процесса торможения шахтного поезда при совместном использовании колесно-колодочных тормозов и магниторельсовой системы с секционным магнитным блоком на участке рельсового пути с уклоном 15 ‰ (см. обозначения на рис. 1).

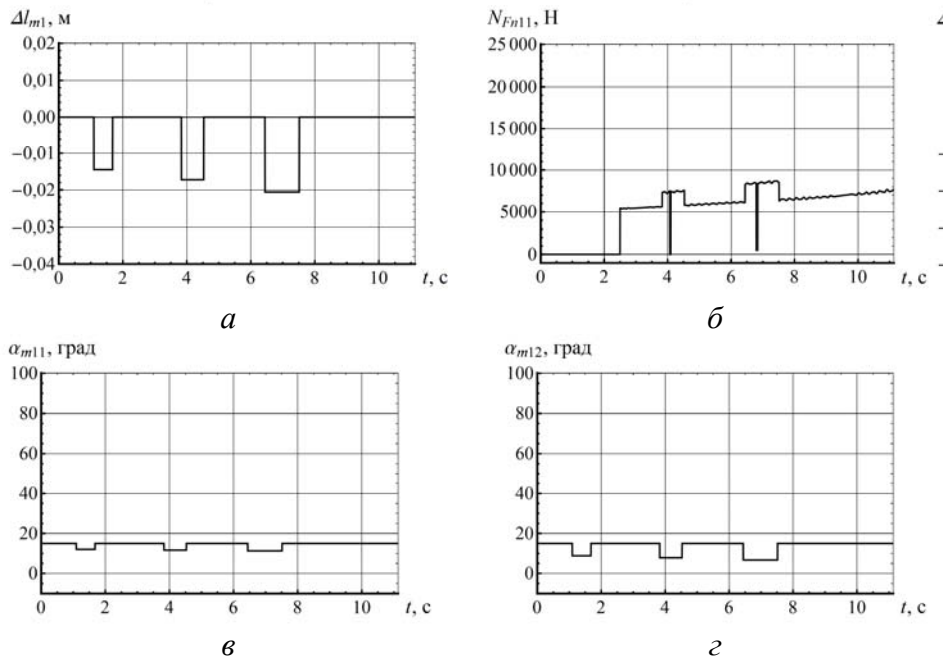


Рис. 5. Графики параметров работы магниторельсовой системы при прохождении неровностей рельсового пути: *a* – относительное перемещение секций; *б* – сила догружения колеса; *в*, *г* – углы наклона тяг первой и второй по ходу движения поезда секции

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 тор-

можения принимались те же, что и на предыдущих этапах. Поскольку на всех этапах исследований 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. 6 и 7). 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.

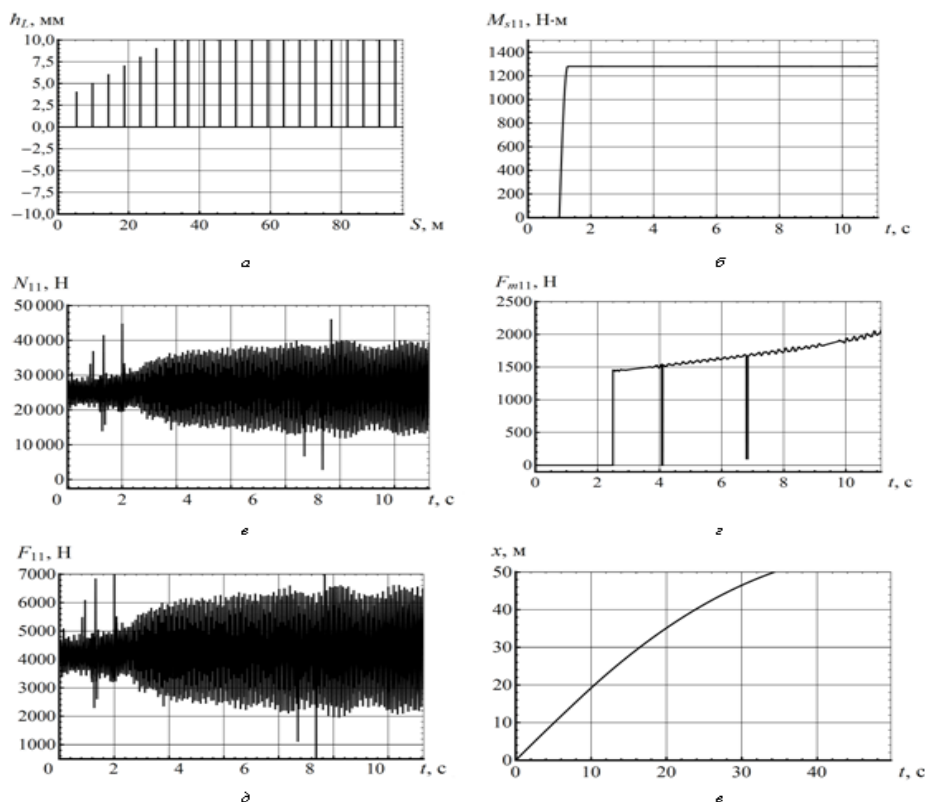


Рис. 6. Графики параметров процесса торможения шахтного поезда при совместном использовании колесно-колодочных тормозов и магниторельсовой системы с магнитным блоком традиционной конструкции на участке рельсового пути с уклоном 50 % (см. обозначения на рис. 1)

**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 догрузки 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 ось 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 его применения при увеличении уклона возрастает.

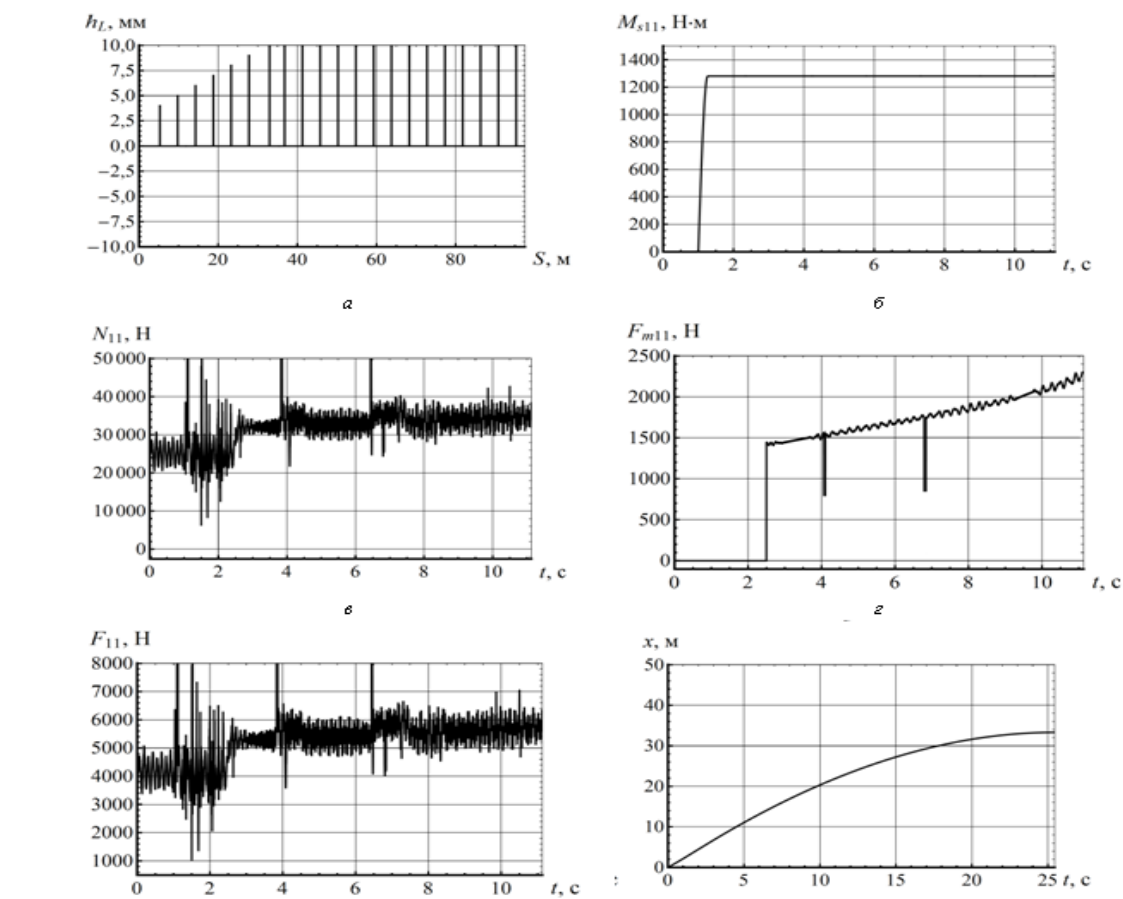


Рис. 7. Графики параметров процесса торможения шахтного поезда при совместном использовании колесно-колодочных тормозов и магниторельсовой системы с секционным магнитным блоком на участке рельсового пути с уклоном 50 ‰ (см. обозначения на рис. 1).

#### Список литературы

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. Дорожкин В. Н. Повышение надежности и эффективности магниторельсовых тормозов шахтных локомотивов : дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.05.06 «Горные машины» / В. Н. Дорожкин. – Д., 1990. – 190 с.
4. Проців В. В. Визначення гальмівної сили магніторейкового гальма на довгих нерівностях рейкової колії / В. В. Проців // Математичне моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2009. – № 2 (21). – С. 76 – 80.
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. Проців В. В. Ослаблення гальмівної сили магніторейкового гальма на одиничних нерівностях рейкової колії / В. В. Проців // Вібрація в техніці та технологіях. – Вінниця: ВДАУ. – 2010. – № 1 (57). – С. 49 – 54.