

7. Северденко В.Н., Клубович В.В., Степаненко А.В., Обработка металлов давлением и ультразвуком// Минск, Наука и техника, 1973. - 288 с.
9. Ляшенко В.П. Температурное поле бесконечного цилиндра с движущимся источником тепла // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – Харків: ХНУ, 2013. – Вип. 21 (№ 1058). – С. 97-103.
10. V. Lyashenko, T. Hryhorova Generalized Mathematical Model of Thermal Diffusion in Powder Metallurgy // AIP Conference Proceedings. – Sophia (Bulgaria), 2014. – 85(2014), P. 85 – 93.
11. V. Lyashenko, E. Kobilskaya Control of Heat Source in a Heat Conduction Problem // AIP Conference Proceedings. – Sophia (Bulgaria), 2014. – 85(2014), P. 94 – 101.
12. Victor Lyashenko, Tetiana Bryl, Elena Kobylskaya, Aleksandr Aniskov System of control of pulse processing with hyperfine wire during electroplastic deformation // XV International PhD Workshop OWD 2013. Conference archives PTEPIS, vol.33., 19-22 october. – Wisla, 2013. – P. 74 – 79.
13. Victor Lyashenko, Aleksandr Aniskov, Elena Kobilskaya. The process control of electroplastic deformation ultrafine wire // Proceeding of scientific and student's works in the field of Industrial Electrical Engineering. – Kosice, may 2013. – Volume 2, part 1. – P. 87-90.
14. Хилл Р. Математическая теория пластичности// М., Гостехтеоретиздат, 1956 г.
15. Ford H. Advanced mechanics of materials// E. Horwood ; New York : Halsted Press, 1977.
16. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести// М., Изд-во Машиностроение 1975г

Рукопис подано до редакції 08.04.16

УДК 622.625.28-83

И.О. СИНЧУК, А.Б. СЁМОЧКИН, кандидаты техн. наук, доц.,
В.А. ФЕДОТОВ, ст. преподаватель, Криворожский национальный университет

О ПРИНЦИПАХ МИНИМАЛЬНО СОУДАРЯЕМОГО И МАКСИМАЛЬНО ТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ВАГОНЕТОК РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОСОСТАВОВ

При разгрузке-погрузке шахтный электропоезд передвигается рывками, при этом в сцепных устройствах возникают удары, снижающие их срок службы, а точность позиционирования оставляет желать лучшего. В работе авторами выявлены закономерности движения поезда, и выведено выражение, позволяющее с минимальными ударами в сцепках рассчитывать перемещение вагонетки в функции тахограммы скорости электровоза, а также наличия руды в вагонетках. Точность позиционирования вагонеток при перемещении на 0,6 м составляет для 1-й вагонетки не более 4%, а для восьмой вагонетки – не более 13%.

Ключевые слова: шахтный электропоезд, сцепное устройство, упругие удары, точность

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. Железородная промышленность и ее базовая технологическая слагаемая - горнорудная, являются основным источником пополнения валютных запасов Украины [1,2]. В последние 5-8 лет акцент в выборе способа добычи железородного сырья (ЖРС) делается на подземный (шахтный) [3].

К сожалению, в силу естественного понижения глубин добычи ЖРС в отечественных железородных шахтах ниже проектных 1500-2000 м себестоимость его имеет постоянную тенденцию к росту [3]. Весомой слагаемой себестоимости является способ доставки ЖРС от места добычи до подъема его на дневную поверхность, В отечественных железородных шахтах, как впрочем и в большинстве зарубежных, доставка ЖРС осуществляется электровозосоставами (ВШТ), ведомыми специальными видами двухосных электровозов [4].

Анализ исследований и публикаций. Как следует из результатов исследований ряда авторов, показатели функционирования (ВШТ) отечественных железородных шахт оставляют желать лучшего [5-8]. Все те же исследования подтверждают существующее априорное мнение, что реальным способом повышения эффективности функционирования ВШТ является его автоматизация, что для железородных шахт в отличие других подземных предприятий подразумевает создание базовых локальных систем (подсистем) управления движением электровозосоставов по отдельным видам горных выработок [9]. Как установлено [9], режим движения электровозосоставов в подземных горных выработках определяется их видом, и это определяет режим работы тягового электропривода электровоза (ТЭП). На рис. 1 представлены осцилло-

граммы токов, потребляемых тяговыми электродвигателями двухосного рудничного электровагона при движении по подземному откаточному горизонту с дифференцированием по видам составляющих подземного горизонта: место погрузки ЖРС – движение по главному откаточному горизонту (квершлагу) – разгрузка.

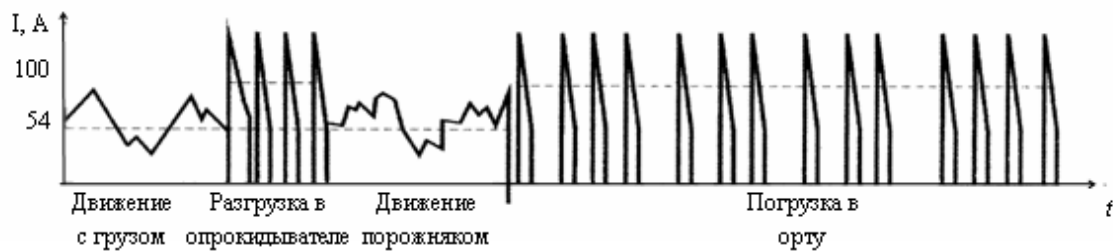


Рис. 1. Аппроксимированные нагрузочные диаграммы тяговых электроприводов контактных электровазосоставов в цикле движения по подземным горизонтам отечественных железорудных шахт

Постановка задачи. Как следует из рис. 1, режимы движения электровазосоставов в подземных горных выработках железорудных шахт различаются, прежде всего по своей динамике в функции соответствующего вида горной выработки. Более того, установлено, что более 60% своего времени ТЭП и его двигатели работают в переходных режимах, то есть в режимах «сплошной динамики» [6-8].



Рис. 2. Иллюстративное фото крайних положений сцепного устройства электровазосостава с вагонетками

Последнее во многом определяет долговечность слагаемых электросостава, а также не позволяет достаточно точно устанавливать вагонетки под пунктами погрузки-разгрузки, что неизбежно влияет на производительность электровазосоставов [6,8]. Более того, и, что главное, именно решение этой части проблемы необходимое условие построения системы автоматического управления. Исторически сложилось так, что конструкторами электровазосоставов конструктивно закладывалось в проекте, что основными элементами, демпфирующими упругие удары в электровазосоставе, должны быть сцепные устройства, которые, кстати, в рудничных электровазосоставах, используемых в железорудных шахтах по ряду технологических причин, отличаются по конструкции от автосцепок, широко применяемых в МПС и электровазосоставах угольных шахт, в худшую сторону по уровню жесткости и гашению сил динамических ударов (рис. 2а,б).

Именно исследование их поведения и определение границ возможного уровня демпфирования являются целью данных исследований, что позволяет строить структуру алгоритма автоматического адаптивного к данным условиям управления ТЭП [8].

Изложение материала и результаты. В ходе предварительных вычислительных экспериментов авторами установлено, что максимальное воздействие на ударные упругие моменты в сцепных устройствах шахтных электровазосоставов оказывает начальная величина зазора в сцепных устройствах. Между тем, меньшие удары (или же их отсутствие), как и ожидалось, происходят при полностью выбранных зазорах в начальный момент времени в данных видах сцепок. Далее по ниспадающей по интенсивности влияния вслед за зазорами следует величина рывка ускорения, скорости движения, развиваемой электровазосоставом. Фактор «рывка» выбран не случайно – как известно, для гашения подобных колебаний подъемных скипов в шахтах при их движении как раз используют тахограмму скорости скипов с поддержанием постоянства рывка

скорости [10]. Если рывок поддерживать постоянным, и переключать его знак в определенные моменты времени, как это показано на рис. 3, то получим графики, представленные на рис. 4 и 5.

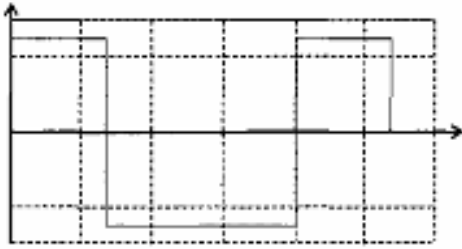


Рис. 3. График рывка скорости шахтного электровоза

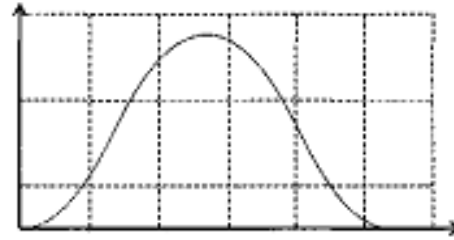


Рис. 4. График скорости шахтного электровоза

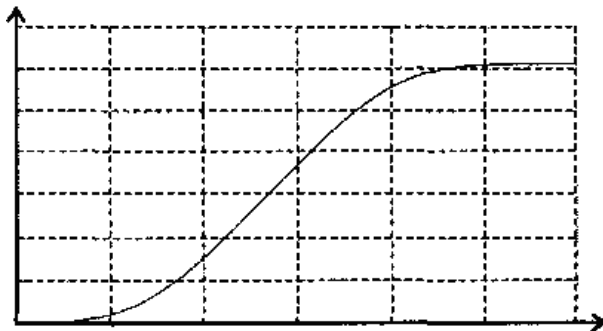


Рис. 5.- График перемещения шахтного электровоза

Если известна величина рывка J , то из выражения определения понятия рывка следует первое дифференциальное уравнение

$$J = \frac{d^2V}{dt^2} \Rightarrow \int_0^{t_1} J dt = \frac{dV}{dt} \Rightarrow J \cdot t_1 = \frac{dV}{dt}.$$

С другой стороны, на первом участке действия рывка (от 0 до t_1 - когда рывок положителен) имеет силу выражение

$$S = \int_0^{t_1} V dt.$$

Для указанного первого участка действия рывка известно, что перемещение всегда составляет устойчивую долю 0,0833 полного требуемого перемещения S . То есть для графика перемещения (см. рис. 3) первый участок действия положительного рывка заканчивается в момент, когда текущее перемещение равно $0,0833 S = 0,0833 \cdot 3,1 = 0,26$ м.

Таким образом, зная предельно допустимое значение рывка, например $J = 0,005$, мы имеем систему уравнений, решив которую, можно определить точки переключения полярности рывка (как видно на рис. 1, переключение происходит в моменты времени, кратные t_1 , т.е. $t_1, 3 \cdot t_1, 4 \cdot t_1$).

$$\begin{cases} 0,005 \cdot t_1 = \frac{dV}{dt}; & 0,26 = \int_0^{t_1} V dt. \end{cases}$$

В общем, задача формирования заданной тахограммы скорости, легко формализуется и полностью определяется требуемой величиной перемещения электровоза.

В данном случае требуется обеспечить максимально точное и безударное управление перемещением вагонеток. Задача осложняется тем, что шахтный поезд соединен друг с другом специфичными сцепными устройствами. Во-первых, указанные сцепные устройства имеют значительный люфт (свободный порядка 20 см), во-вторых, сцепные устройства содержат в своем составе пружины с демфирующими амортизаторами. Поэтому в общем случае, если все сцепные устройства шахтного поезда имеют люфт, то вагонетки относительно электровоза располагаются случайным образом, и вся система может иметь столько степеней свободы, сколько единиц в шахтном поезде. Задача точного безударного управления становится такой, что не поддается точному аналитическому решению.

Одним из путей упрощения задачи управления является приведение шахтного поезда к системе с одной степенью свободы. Естественно, простое пренебрежение зазорами в данном случае недопустимо, так как нами ранее была установлена их ведущая роль в формировании упругих ударов в сцепных устройствах. Что касается точности позиционирования, то при таком упрощении при люфте 0,2 м 5-я по счету от головы поезда вагонетка может остановиться (при свободных пружинах в сцепных устройствах) с точностью в диапазоне минимум от 0 до 1 м (с натянутыми или сжатыми пружинами эта цифра может быть больше). Поэтому приведение к

системе с одной степенью свободы проведем таким образом, что каким-либо образом в начальный момент времени выберем все зазоры в шахтном поезде, и с этого момента начинаем управление всем шахтным поездом как полностью связанною системою.

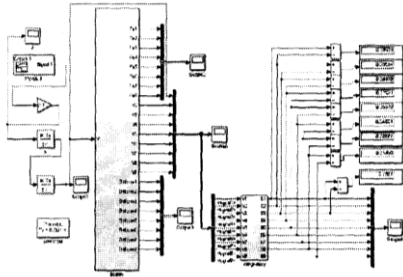


Рис. 6. Модель для исследования процессов перемещения шахтного электропоезда

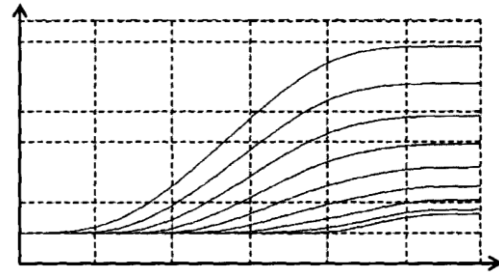


Рис. 7. Графики перемещения шахтного электропоезда

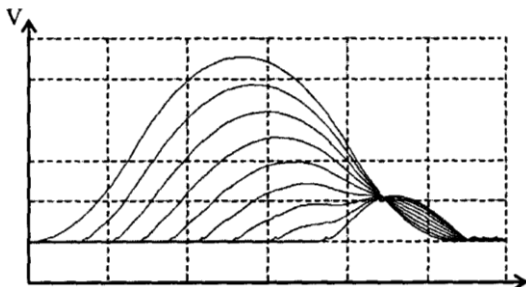


Рис. 8. Графики скоростей шахтного электропоезда

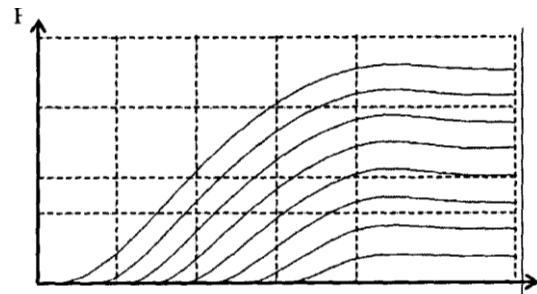


Рис. 9. Графики продольных относительных деформаций пружин сцепных устройств

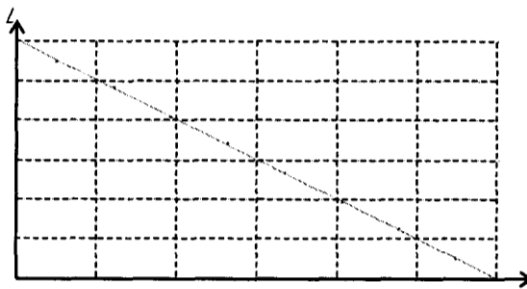


Рис. 10. График зависимости деформации сцепного устройства в функции номера сцепки (для груженого шахтного поезда)

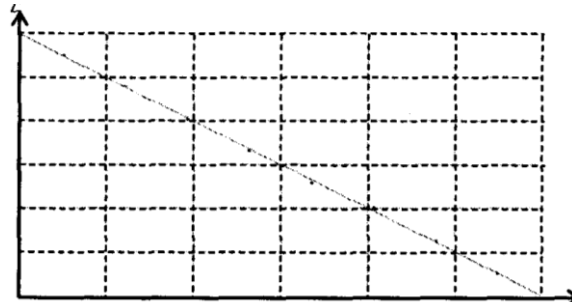


Рис. 11. График зависимости деформации сцепного устройства в функции номера сцепки (для пустого шахтного поезда)

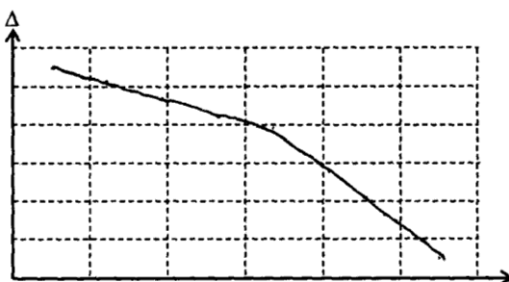


Рис. 12. График зависимости деформации сцепного устройства в функции номера сцепки (4 пустых и 4 полных вагонетки)

Основным требованием, которое предъявляются к полученной системе при управлении ею – предотвращение размыкания любого по поезду зазора в сцепных устройствах. В таком случае на первый взгляд представляется, что предотвратить размыкание зазоров возможно за счет ограничения величины рывка.

Смоделируем с помощью модели рис. 6 переходные процессы перемещения электровоза на 0,6 м, и получим следующие переходные процессы (рис. 7,8,9).

Рассматривая графики рис. 7,9 можно отметить монотонность уменьшения перемещения каждой единицы шахтного поезда (рис. 7), а также монотонность уменьшения относительной деформации пружин сцепных устройств (рис. 9). На последнем рисунке особо следует отметить, что нигде не происходит размыкания зазоров сцепных устройств (о чем можно судить по тому, что в ходе переходного процесса ни одна из линий графика не пересекает оси абсцисс), т.е., систему сохраняем связанною, с одной степенью свободы.

Проаналізуємо кількісно монотонність убывания перемещения на моделі рис. 6. Для цього з допомогою цифрових измерителей выясним різницю перемещень між кожними сусідніми вагонетками, після закінчення перемещень. Кожній сцепці присваивався номер, починаючи від голови поїзда, і для кожної сцепки визначалась різниця між перемещеннями сусідніх вагонеток. Була отримана таблиця, з допомогою якої був побудований графік рис. 10 і отримана апроксимація цього графіка формулою виду $y = -0,0152x + 0,137$.

Остання апроксимація була отримана для повного навантаженого шахтного поїзда. Для порожнього шахтного поїзда були отримані аналогічні результати: $y = -0,00528x + 0,0486$ для графіка рис. 11. Аналогічні результати були отримані для шахтного поїзда з 4 первими порожніми і 4 останніми повними вагонетками (рис. 12).

Виходячи з останнього графіка, цікаво відзначити, що для першого, більш пологого ділянки графіка коефіцієнт нахилу становить: $(0,0612 - 0,0766)/3 = 0,00513$, що не більш ніж на 2,8% відрізняється від коефіцієнта нахилу графіка порожнього поїзда рис. 9.

Відповідно, для більш крутого ділянки коефіцієнт нахилу становить: $(0,001421 - 0,05686)/3 = -0,0142$, що не більш ніж на 6,5% відрізняється від коефіцієнта нахилу графіка навантаженого поїзда рис. 8.

Це дозволяє нам, знаючи вище наведені вирази, збільшити точність автоматичного управління перемещенням будь-якої вагонетки в шахтному поїзді.

Допустимо, що потрібно переместити на певну відстань (наприклад, 0,6 метра) третю від електровоза повністю навантажену вагонетку. Перші дві вже розвантажені. Тоді, згідно з виразами 1 і 2 для порожніх і повних вагонеток збільшення відстані між вагонетками для перших двох стиків шахтного поїзда становить

$$\Delta S = -0,00528 \cdot 1 + 0,0468 - 0,0528 \cdot 2 + 0,0468 - 0,0152 \cdot 3 + 0,137 = 0,217 \text{ м.}$$

Помилка позиціонування третьою вагонеткою порівняно з модельним експериментом становить 2,2 см, що становить 3,65 % від повного перемещень вагонетки.

Це означає, що якщо потрібно переместити третю вагонетку, наприклад, на 0,6 метра з помилкою 2,2 см, слід електровоз з обмеженням ривка передвинути на відстань $0,06 + 0,217 = 0,817 \text{ м.}$

Оцінимо помилку позиціонування останньої вагонетки, при перших двох порожніх вагонетках

$$\Delta S = -0,00528 \cdot (1+2) + 2,0468 - 0,0528 \cdot (3+4+5+6+7+8) + 6 \cdot 0,137 = 0,4298 \text{ м.}$$

Помилка позиціонування останньої вагонетки порівняно з модельним експериментом становить 8 см, або 13 % від повного перемещень вагонетки. Іншими словами, щоб передвинути останню вагонетку на 0,6 метра з помилкою позиціонування 8 см, необхідно електровоз передвинути за тахограмою швидкості на відстань $0,6 + 0,42984 = 1,02984 \text{ м.}$

Висновки і напрямки подальших досліджень. Розроблений і запропонований для практичної реалізації алгоритм управління ТЭП електродвигуна дозволяє здійснювати перебудову вагонеток під навантаженням з достатнім рівнем точності. Точність позиціонування вагонеток досить висока в голові поїзда, і спадає в кінці, досягаючи в розглянутому частному випадку 13% від повного перемещень вагонетки. Між тим, результат має силу для довільного частного випадку, а для подальшого рішення питання точного управління слід було б отримати функцію управління для максимального діапазону всіх можливих умов експлуатації шахтного електropoїзда.

Список літератури

1. Шидловський А.К. Геоэкономика та геополітика України / Шидловський А.К., Півняк Г.Г., Рогоза М.В., Випанасенко С.І. Навчальний посібник. – Д.: Національний гірничий університет. 2002. – 282 с.
2. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009 – 2010 гг. Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004 – 2011 гг. / Е.К. Бабец, Л.А. Штанько, В.А. Салганик и др. – Кривой Рог: Видавничий дім, 2011.
3. Азарян А.А., Вілкул Ю.Г., Капленко Ю.П., Караманич Ф.І., Колосов В.О., Моркун В.С., Пілов П.І., Сидоренко В.Д., Темченко А.Г., Федоренко П.Й. Комплекс ресурсо- і енергозберігаючих геотехнологій видобутку та переробки мінеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління і оптимізації гірничорудних виробництв – Кривий Ріг: Мінерал, 2006. – 219 с.
4. Волотковський С.А. Рудничная электровозная тяга / С.А. Волотковський. – М.: Недр, 1986. – 189 с.
5. Синчук О.Н. Перспективи розвитку шахтних (рудничних) електровозів з енергосберегаючими видами тягових електродвигуна / О.Н. Синчук, С.В. Лебедкин, І.О. Синчук, О.О. Удовенко, О.В. Пасько // Вісник

Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2006. – № 8 (102). – С. 83 – 92.

6. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография / В.Б. Клепиков. – Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2014. – 408 с.

7. Шахтарь П.С. Рудничные локомотивы. М.: Недра. – 1982. – 272 с.

8. Синчук О.М. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый; под ред. докт. техн. наук, проф. О.Н. Синчука. – Кривой Рог - Донецк: ЧП Щербатых А. В., 2015. – 296 с.

9. Синчук О.Н., Беридзе Т.М., Гузов Э.С. Системы управления рудничным электровозным транспортом, – М.: Недра, 1993. – 255 с.

10. Чермалых В.М. Исследование оптимальных по динамичности систем подъема глубоких шахт: дис.. д-ра техн. наук / В.М. Чермалых. - Днепропетровск, 1970. – 420 с.

Рукопись поступила в редакцию 16.04.16

УДК 622.625.28-83

А.Б. СЕМОЧКИН, канд. техн. наук, доцент, В.А. ФЕДОТОВ, ст. преподаватель

Криворожский национальный университет

Л.В. СМЕНОВА, ст. преподаватель

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВАГОНЕТОК РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОСОСТАВОВ ПРИ ПОГРУЗОЧНО РАЗГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

В статье рассмотрены вопросы уменьшения времени погрузки-разгрузки электровозосоставов в специфических условиях железорудных предприятий с подземными способами ведения горных работ.

Установлено, что при погрузочно-разгрузочных операциях, на которые приходится большая часть цикла движения электровозосоставов в подземных горных выработках, электропоезд передвигается рывками, при этом зазоры в сцепных устройствах ухудшают точность позиционирования вагонеток под погрузочными люками, а, следовательно, увеличивают время выполнения этой технологической операции и, кроме того, вызывают удары, снижающие срок службы слагаемых составов.

Проведен сравнительный анализ различных математических подходов для решения задачи минимизации этого вида ударов путем создания соответствующего алгоритма управления тяговой электромеханической системой электровоза. В числе анализируемых методы: длинноволнового приближения цепочки связанных осцилляторов, идентификации объекта управления, теории планирования экспериментов, нечеткого и нейросетевого регулирования.

Установлено, что из исследуемого перечня методов следует исключить метод нечеткого управления, а остальные подходы подлежат более глубокой проработке для достижения поставленной цели.

Ключевые слова: шахтный электропоезд, управление перемещением, математические подходы

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. Электрический транспорт, как и прежде, - основной вид внутришахтного транспорта (ВШТ) горных предприятий с подземными способами ведения работ [1, 2]. В отличие от угольных, 100 % грузоперевозок железорудных предприятий (шахт, рудников) осуществляется электровозами с адресным закреплением составов, т. е. электровоз-вагонетка составляют единый модуль [3]. К сожалению, производительность электровозосоставов отечественных железорудных шахт в последнее десятилетие имеет тенденцию к снижению, что сказывается на себестоимости добываемого железорудного сырья, основного отечественного продукта для пополнения валютных запасов Украины [4]. Корни такого положения кроются, прежде всего, в увеличении длин подземных транспортных магистралей в связи с понижением уровня ведения работ. В силу этого изменяются и временные показатели цикла движения электровозосоставов: погрузка – движение с грузом – разгрузка – движение порожняком [5]. В табл. 1 представлены временные характеристики работы электровозосоставов по слагаемым цикла движения. Как следует из табл. 1, значительная часть времени – 35 – 50% цикла движения относится к процессу погрузки-разгрузки составов. Учитывая, что скорость движения электровозосоставов в магистральных подземных горных выработках - квершлагах строго ограничена соответствующими правилами [6] по величине тормозного пути состава и в переводе на скорость движения составляет 12-15 км/ч, т. е. не может быть увеличена для уменьшения времени цикла движения, то единственный реальный путь умень-