

О.Н. СИНЧУК, д-р. техн. наук, проф., зав. каф. АЭПТС ГВУЗ «Криворожский национальный ун-т»
А.Б. СЁМОЧКИН, канд. техн. наук, доц. каф. АЭПТС ГВУЗ «Криворожский национальный ун-т»
В.А. ФЕДОТОВ, ст. преп. каф. АЭПТС ГВУЗ «Криворожский национальный ун-т»

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА ПРЕДЕЛЬНУЮ ВЕЛИЧИНУ УДАРНОГО УСИЛИЯ В СЦЕПНОМ УСТРОЙСТВЕ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПАРЫ «ЭЛЕКТРОВОЗ-ВАГОНЕТКА» ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗОМ

Введение. Как известно, транспортировка железорудного сырья (ЖРС), добываемого подземным способом, от мест добычи к шахтным стволам, осуществляется внутришахтным транспортом (ВШТ), представляющей собой электровозосоставы, ведомые специальными типами двухосных, так называемых рудничных, электровозов [1-4]. В определенной мере ВШТ можно считать одним из «узких» мест, сдерживающих дальнейшую интенсификацию и экономическую эффективность добычи ЖРС подземным способом [5]. Немаловажным фактором, усугубляющим высветленную проблему, является постоянно увеличивающееся число повреждений слагаемых элементов ВШТ, в том числе электровозов и вагонеток [6]. Так, в 2010-2015 г.г. общее количество повреждений только по ВШТ ПАО «Криворожский железорудный комбинат» увеличилось в 1.8 раза. Основной причиной такого явления являются: износ элементов ВШТ из-за увеличения сроков внеплановой эксплуатации, человеческого фактора, и, как и прежде, динамические удары, вызванные тем, что электровозы, ведущие электровозосоставы, более чем 60% времени цикла функционируют в неустойчивых- переходных режимах их тяговых электромеханических систем (ТЭМС), что и вызывает ударные динамические нагрузки, сопровождающиеся за пределами по условиям гарантийной эксплуатации ударами (соударениями) в элементах электровозосостава. Особенно это характерно для мест сцепки «электровоз-вагонетка» и «вагонетка- вагонетка». Если учесть, что в электровозосоставах, эксплуатируемых в железорудных шахтах, применяются не автосцепки, а примитивные сцепные устройства с ограниченным уровнем смягчения естественных ударных нагрузок, то эта проблема становится особенно очевидной, а ее решение – актуальным.

Постановка задачи: исследование и оценка причин возникновения динамических процессов в элементах ВШТ и разработка методов и средств минимизации этих воздействий средствами систем управления тяговыми электромеханическими системами рудничных электровозов.

Материалы исследований. Как уже отмечалось, на ВШТ нередки выходы из строя механической части электровозосоставов, к чему приводит довольно напряженный график пуско-тормозных режимов рудничных ТЭМС при загрузке-разгрузке руды. Сказанное можно пояснить с помощью иллюстрации (рис. 1):

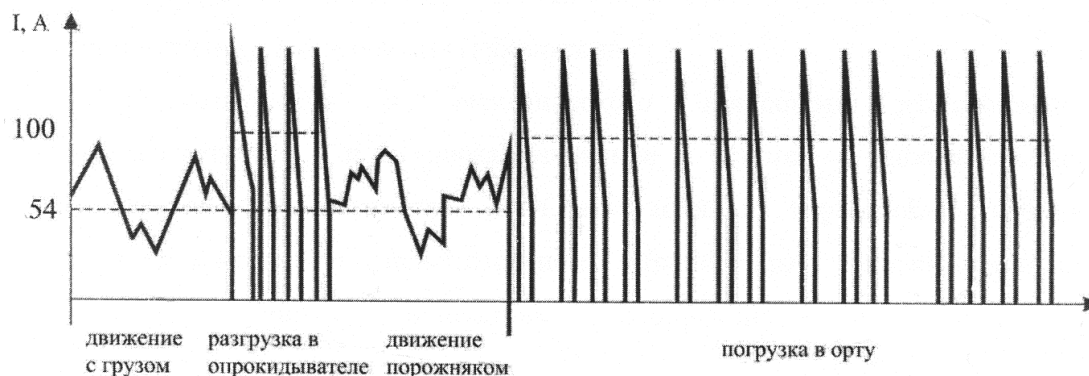


Рис. 1. Аппроксимированные нагрузочные диаграммы тяговых электроприводов контактных электровозов в цикле движения по подземным горизонтам отечественных железорудных шахт

Как видно, в цикле функционирования ВШТ доминируют переходные режимы. В исследованиях, проведенных профессорами Ренгевичем А.А., Шахтарем П.С., Клепиковым В.Б. [7,8] и рядом других ученых, задекларировано, что максимальные продольно-динамические нагрузки в буферно-сцепных устройствах ВШТ возникают при переходных режимах движения в процессе трогания и торможения поезда.

Проанализируем влияние факторов на величину ударных усилий в сцепных устройствах элементов, предполагая первоначально, что перемещение пары «электровоз-вагонетка» осуществляется на некоторое расстояние, согласно графику:

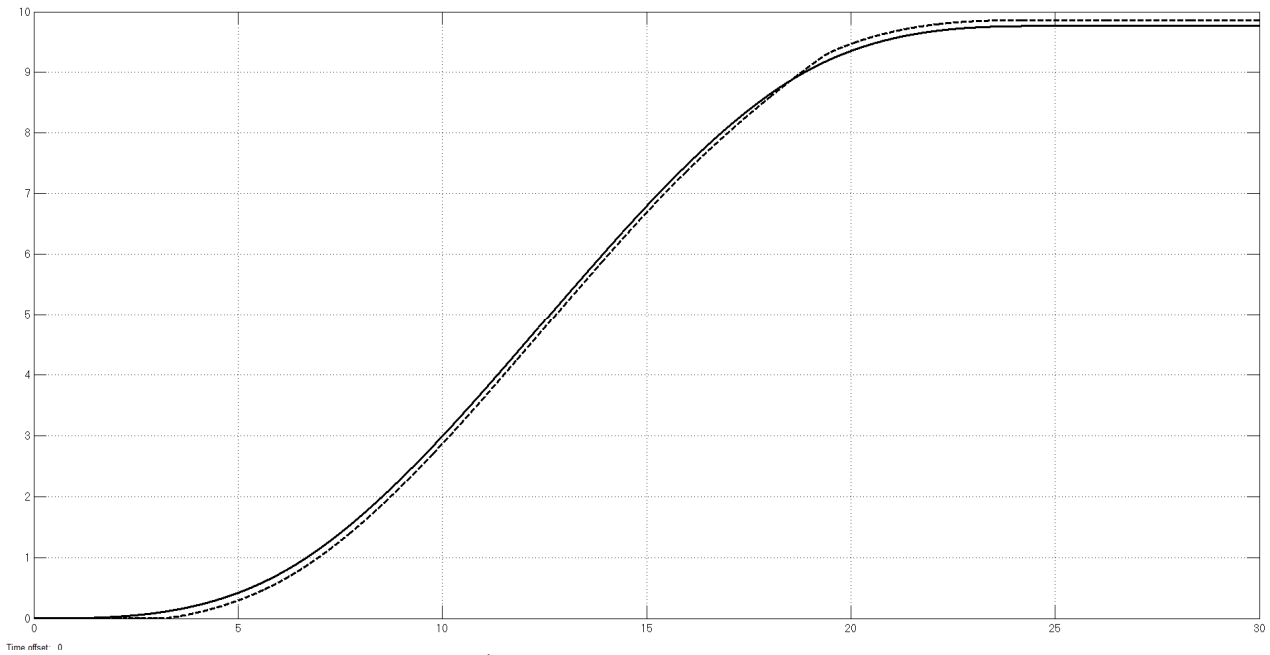


Рис. 2. Графики перемещения электровоза и вагонетки

Этот график перемещения обеспечивается с помощью формирования скорости электровоза следующей формы (рис. 3):

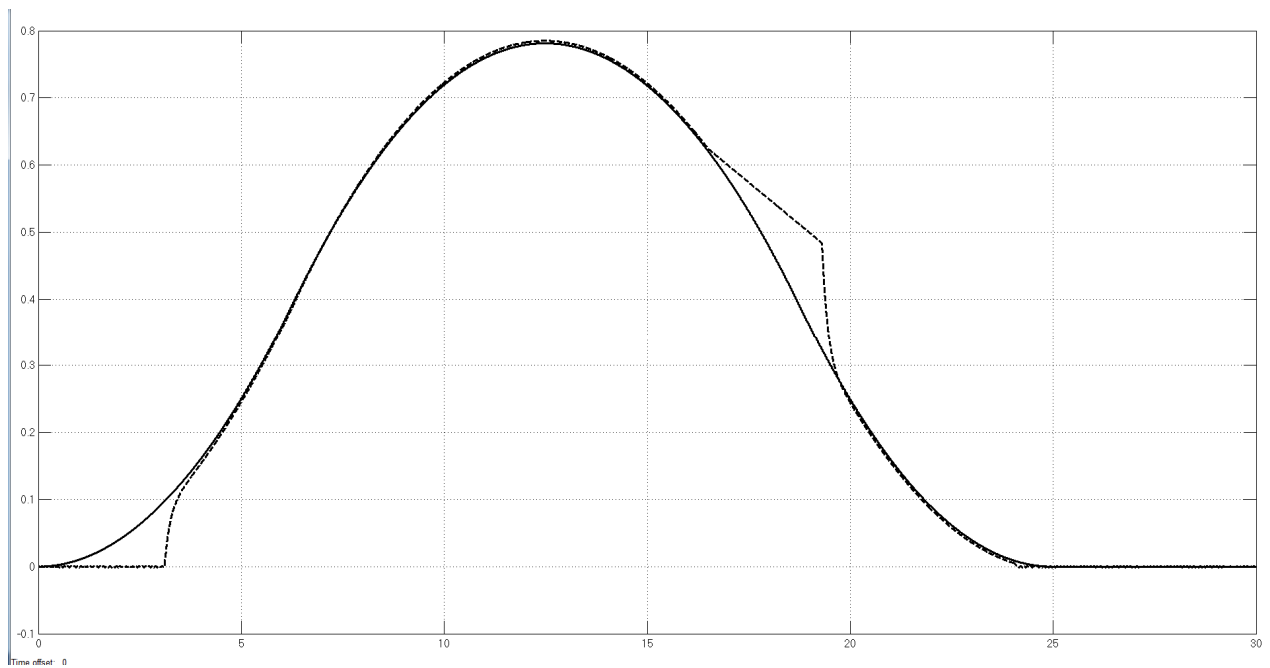


Рис. 3. Графики скорости электровоза и вагонетки

Изменение ударных усилий в сцепном устройстве приведен0 на рис. 4:

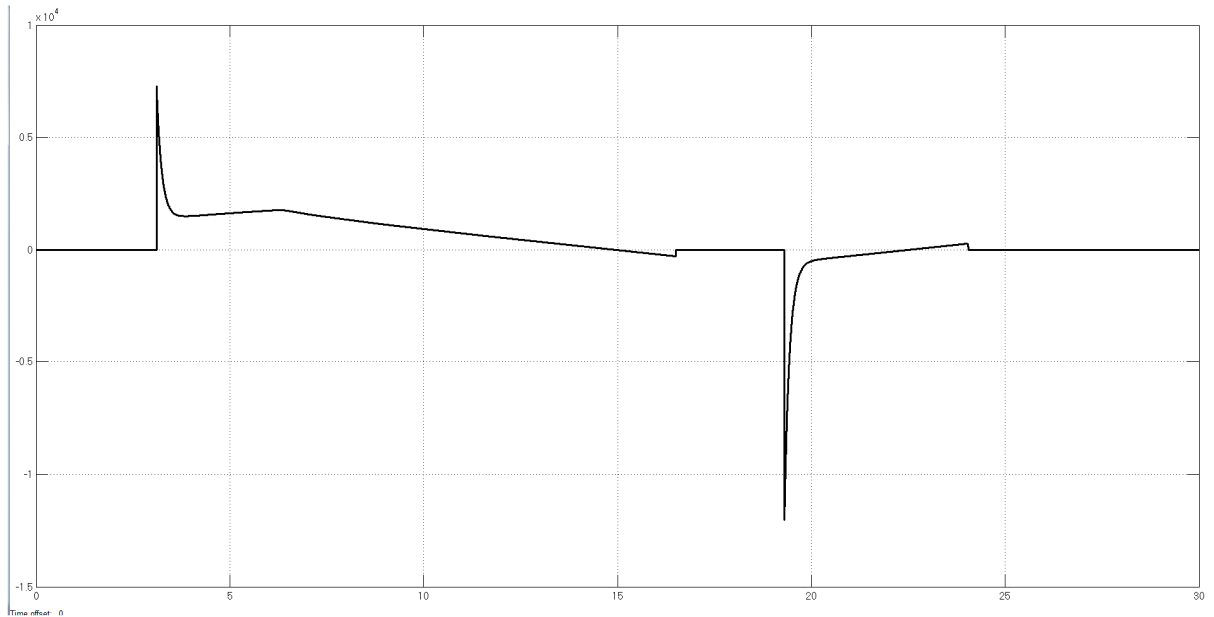


Рис. 4. Ударные усилия в сцепном устройстве при соударении в разные стороны друг от друга (положительный «выброс») и соударении навстречу друг другу (отрицательный «выброс»)

Характер ударов в сцепном устройстве становится понятен по фотоиллюстрациям рис. 5.

Изо всех графиков переходных процессов нас больше всего интересует рис. 4, так как именно на нем видны упругие удары в сцепных устройствах.

Оценим влияние на показатели переходных процессов следующих факторов:

- рывка электровоза J (принимается в диапазоне от 1 до 3);
- момента трогания вагонетки M_{tr} (принимается в диапазоне от 0 до 600Н);
- зазора в сцепном устройстве Z (принимается в диапазоне от -0.01 до 0.01 м);
- массы вагонетки $m_{вг}$ (принимается в диапазоне от 2130 до 16270 т).

Задание скорости рывком принимается в силу того, что график скорости (рис. 3) при этом получается состоящим из параболических участков, что должно смягчить колебания в упругой системе.



Рис. 5. Иллюстративное фото двух крайних положений сцепного устройства электровозосостава

В силу выбранной тактики исследований оценим влияние этих факторов на предельную величину силы упругости в сцепке. Используем для этого теорию планирования экспериментов. Для этого составляем план 4-факторного эксперимента [9], с помощью которого проводим на модели 25 вычислительных экспериментов при различных значениях параметров, указанных в таблице в кодированных единицах.

Для реализации вычислительных экспериментов (и получения графиков рис. 2, 5, 4) была построена модель в Матлабе вида рис. 6

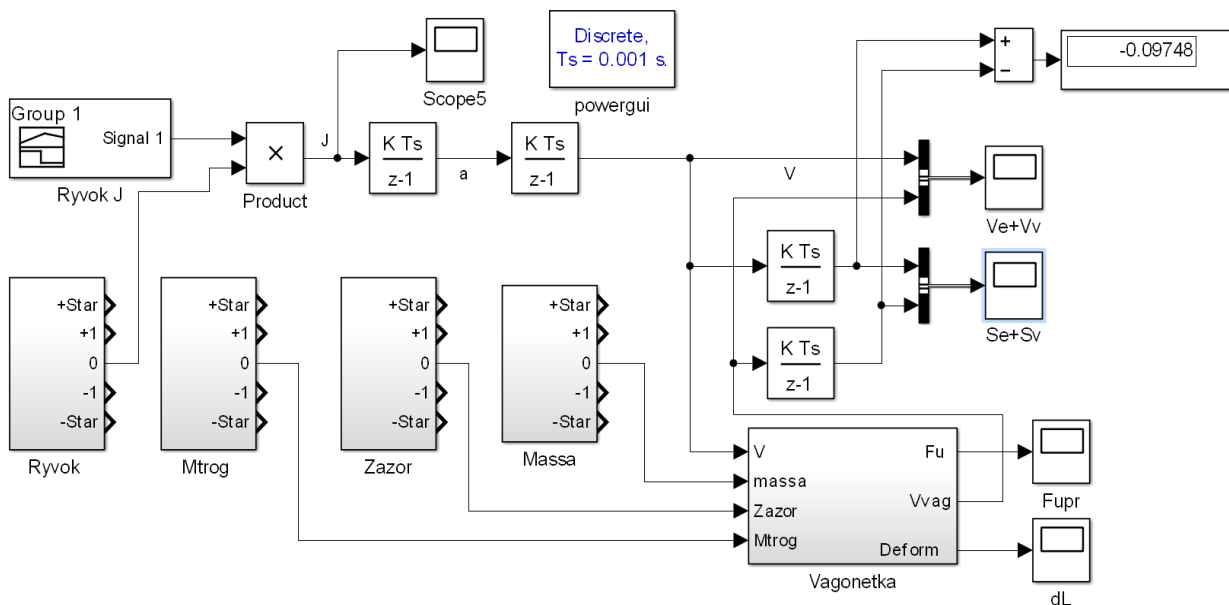


Рис. 6. Модель для проведения экспериментов в паре «электровоз-вагонетка»

Опуская подробности выполнения процедур теории планирования экспериментов, приведем готовый результат - полную функцию отклика:

$$F_{y+} = 7119,6 + 791,9 \cdot J + 0,035 \cdot M_{tr} - 3669 \cdot Z + 0,135 \cdot m_{br} - 15,7 \cdot J^2 + 110,8 \cdot M_{tr}^2 - 640,4 \cdot Z^2 + 110,8 \cdot m_{br}^2 - 0,04 \cdot J \cdot M_{tr} - 452,6 \cdot J \cdot Z + 0,08 \cdot J \cdot m_{br} + 0,08 \cdot M_{tr} \cdot Z - 0,04 \cdot M_{tr} \cdot m_{br} + 0,21 \cdot Z \cdot m_{br} \quad (1)$$

где F_{y+} - предельные величины «положительных» выбросов упругого усилия на графиках рис. 4.

После отсева незначущих коэффициентов, приводящих к разбросу выходной величины в 5 %, получим сокращенную запись выражения функции отклика:

$$F_{y+} = 7119,6 + 791,9 \cdot J + 0,035 \cdot M_{tr} - 3669 \cdot Z - 15,7 \cdot J^2 + 110,8 \cdot M_{tr}^2 - 640,4 \cdot Z^2 + 110,8 \cdot m_{br}^2 - 0,04 \cdot J \cdot M_{tr} - 452,6 \cdot J \cdot Z \quad (2)$$

Расчет значений функции отклика по полной и сокращенной формам представления показал, что при наихудших условиях (при максимальной ударной силе упругости) разница между ними составляет не более 0,00086%, то есть практически совпадают.

При сравнении расчетных значений для всех 25 экспериментов, полученных с помощью упрощенной функции отклика, с аналогичными экспериментальными значениями, можно увидеть, что максимальная ошибка достигает 5,18% при средневзвешенной ошибке 0,55 %

При анализе упрощенной записи функции отклика с помощью оператора Maximize программного пакета Mathcad было установлено, что наибольшего значения функция отклика достигает при следующем сочетании величин факторов:

$$\text{рывок } J = 1; \text{ зазор } Z = -1; \text{ момент трогания } M_{tr} = 1; \text{ масса } M = 1. \quad (3)$$

Считаем в дальнейшем эти значения самыми жесткими условиями протекания переходных процессов.

Проанализируем полученную функцию отклика отдельно по факторам:

С помощью графиков рис. 7, 8, 9, 10 и аналитически установлено, что чувствительность выходной величины функции отклика отдельно по факторам (в пределах монотонных участков графиков) составляет для:

рывка	1245 (Н/о.е.)
усилия трогания	220 (Н/о.е.)
величины зазора в сцепке	8245 (Н/о.е.)
веса вагонетки	220 (Н/о.е.)

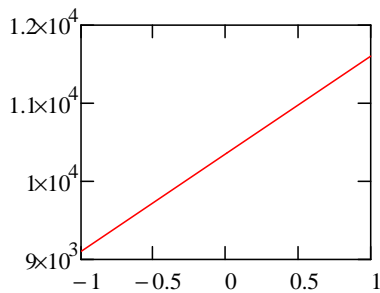


Рис. 7. Зависимость ударной силы упругости в функции рывка скорости

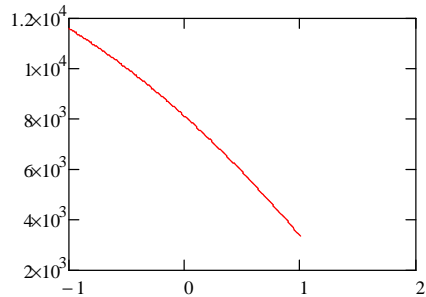


Рис. 8. Зависимость ударной силы упругости в функции величины зазора сцепки

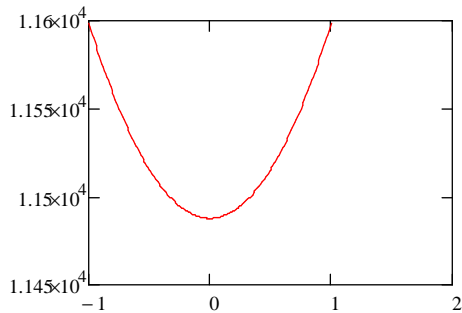


Рис. 9. Зависимость ударной силы упругости в функции усилия трогания (минимальное значение 11490 Н при 0 (то есть массе вагонетки 9200 кг))

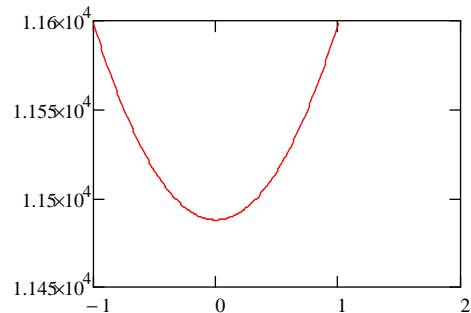


Рис. 10. Зависимость ударной силы упругости в функции веса вагонетки (минимальное значение 11490 Н при 0 (то есть массе вагонетки 9200 кг))

Особое внимание на себя обращает факт, что вес вагонетки и усилие трогания (по сути вес вагонетки также определяет сопротивление, только постоянное) одинаково мало по сравнению с другими факторами влияют на ударную силу упругости. Так, во всем пространстве факторов ударная сила упругости изменяется на $11600 - 11490 = 110$ Н. По сравнению с номинальной силой натяжения сцепного устройства эта величина мала, и ею можно пренебречь.

Несмотря на то, что усилие трогания быстро исчезает, на ударную величину упругой силы усилие трогания влияет независимо от того, каково будет в дальнейшем сопротивление движению, и потом никак не сказывается. По этой причине усилие трогания можно в дальнейшем не учитывать, и вносить его априори (при исследовании ударных сил упругости) в момент сопротивления движению вагонетки.

На ударную упругую силу в сцепке, как видим, наибольшим образом влияют в основном два фактора – рывок и начальный зазор в сцепном устройстве, на это косвенно также указывает то, что после отсева незначительных коэффициентов функции отклика остается единственный коэффициент, учитывающий взаимодействие рывка и зазора (-452,6).

И последнее. Незначительное влияние массы вагонетки и усилия трогания можно объяснить тем, что мы воздействуем на вагонетку через электровоз с помощью жесткой тахограммы скорости, при этом очевидно, что обратная связь по сопротивлению отсутствует.

Необходимо отметить, что при отработке электровозом заданной тахограммы скорости необходимо следить за предотвращением буксования колес, так как в противном случае тахограмма искажается, и использование функции отклика приводит к ошибкам.

Окончательно были проведены аналогичные исследования пары «электровоз-вагонетка» при условии формирования электровозом заданного тягового усилия. Естественно ожидать, то картина динамики должна значительно измениться, хотя бы в силу того, что скорость электровозосостава будет определяться совокупностью сил тяги электровоза, сопротивления движению, и инерцией движущихся масс.

Для проведения указанных исследований тяговое усилие электровоза по аналогии с вышеприведенным формировалось с учетом постоянства рывка. Аналогичные проведенные исследования с помощью теории планирования экспериментов по влиянию факторов тех же факторов J ; Z ; Mtr ; M на максимальную величину ударного усилия в сцепках оказались неудачными. Была получена функция отклика, для которой максимальная ошибка между расчетными и экспериментальными значениями в области определения функции отклика без «звездных» точек составляет 62% при среднезвешенной ошибке 11.26%. Полученные результаты указывают на провал текущей попытки получить адекватную функцию отклика при формировании заданного тягового усилия электровоза.

Но это отнюдь не означает, что задачу в данном направлении невозможно решить. Возможно, задача имеет адекватное решение при сужении областей определения факторов функции отклика, либо при некоторой другой форме тягового усилия. Пока что можно констатировать, что снижение упругих ударов проще осуществить при формировании заданного графика скорости электровоза.

Выводы.

1. Возможности управления переходными процессами шахтным электропоездом значительно выше при формировании заданной тахограммы движения электровоза, нежели при формировании заданного усилия электровоза.
2. Наибольшее влияние на формирование ударных усилий оказывают зазор в сцепных устройствах, и рывок скорости (в значительно меньшей степени) электровоза.
3. Данные результаты определяют дальнейшее направление исследований по построению систем автоматического управления скоростью шахтных поездов в русле заданной тахограммы движения электровоза. При этом необходимо следить, чтобы не было пробуксовок колес электровоза, в противном случае управление движением с использованием функции отклика становится невозможным.

Список литературы: 1. 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. 2. Дебелый, В. Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта [Текст] / В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С. 30–31. 3. Синчук О.Н. Перспективы развития шахтных (рудничных) электровозов с энергосберегающими видами тяговых электроприводов / О.Н. Синчук, С.В. Лебедин, И.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. 4. Синчук О.Н. Импульсные системы управления и защиты на рудничном электровозном транспорте / О.Н. Синчук, В.В. Чумак, О.В. Ершов // Под ред. д. т. н., проф. О.Н. Синчука – К.: АДЕФ – Украина. – 278 с. 5. Азарян А.А., Вілкул Ю.Г., Капленко Ю.П., Караманиц 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. 6. Синчук О.Н., Синчук І.О., Чёрная В.О. Система защиты рудничного электровоза переменного тока от аварийных режимов. Электротехника. Ежемесячный научно-технический журнал. Вып. №4(апрель) – М.: «Знак», 2012 – С.52 – 56. 7. Шахтарь П.С. Рудничные локомотивы. М.: Недра. – 1982. – 272 с. 8. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография/ В.Б.Клепиков. – Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2014. – 408 с. 9. Ивоботенко Б.А. др. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия. 1975. – С.184. 10. Жеребкин Б.В. Синтез структуры системы векторного управления тяговых электромеханических комплексов двuosных электровозов / Б.В. Жеребкин, Д.А. Шокарев, Е.И. Скапа // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. № 4/2011(16). – С.17–21. 11. Кордаков В.Н., Коржев А.А. Методика определения рациональной величины силы тяги дополнительного линейного электропривода рудничного электровоза // Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. – Вып. 29. – СПб.: СЗТУ, 2003. – С. 120 – 125.

Bibliography (translated): 1. *Sbornik tehniko-ekonomicheskikh pokazateley gornodobyvayushih predpriyatiy Ukrainy v 2009 – 2010 gg. Analiz mirovoy kon'uktury rynku GRS 2004 – 2011 gg.* / E.K. Babets, L.A. Shtan'ko, V.A. Salganik i dr. – Kryvoy Rog: Vydavnicхий dim, 2011. Print. 2. *Debelyi, V. L. Osnovnye napravleniya razvitiya shahтного locomotivного транспорта [Tekst]* / V. L. Debelyi, L. L. Debelyi, S. A. Mel'nikov // *Ugol' Ukrainy.* – 2006. – №6. – S. 30–31. Print 3. *Sinchuk O.N. Perspektivy razvitiya shahтных (rudnichnyh) elektrovozov s energosberegayuschimi vidami tyagovyh elektropryvodov* / O.N. Sinchuk, S.V. Lebedkin, I.O. Sinchuk, O.A. Udovenko, O.V. Pas'ko // *Visnyk Shidnoukrains'kogo natsional'nogo universitetu imeni Volodymyra Dalya. Lugans'k: SNU im. V. Dalya.* – 2006. – № 8 (102). – S. 83 – 92. 4. *Sinchuk O.N. Impul'sni sistemi upravleniya i zaschity na rudnichnom elektrovoznom transporte* / O.N. Sinchuk, V.V. Chumak, O.V. Erzchoff // *Pod red. d. t. n., prof. O.N. Sinchuka* – K.: ADEF – Ukraina. – 278 s. 5. *Azarjan A.A., Vilkul Ju.G., Kaplenko Ju.P., Karamanic F.I., Kolosov V.O., Morkun V.S., Pilov P.I., Sidorenko V.D., Temchenko A.G., Fedorenko P.J. Kompleks resurso- i energozberigajuchih geotehnologij vidobutku ta pererobki mineral'noї sirovini, tehnicnih zasobiv ih monitoringu iz sistemoju upravlinnja i optimizacii girnichorudnih virobniictv* – Krivij Rig: *Mineral*, 2006. – 219 s. 6. *Sinchuk O.N., Sinchuk I.O., Chjornaja V.O. Sistema zashhity rudnichного jelektrovoza peremennogo toka ot avarijnyh rezhimov. Jelektrotehnika. Ezhemesjachnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal. Vyp. №4(aprel')* – M.: «Znak», 2012 – S.52 – 56. 7. *Shahtar' P.S. Rudnichne lokomotivy. M.: Nedra.* – 1982. – 272 s. 8. *Dinamika jelektromehaniceskikh sistem s nelinejnym treniem: monografija/ V.B.Klepikov.* – H.: *Izd-vo «Pidruchnik NTU «HPI»»,* 2014. – 408 s. 9. *Ivobotenko B.A. dr. Planirovanie jeksperimenta v jelektromehanike. M.: Jenergija.* 1975. – S.184. 10. *Zherebkin B.V. Sintez struktury sistemy vektornogo upravlenija tjavovyh jelektromehaniceskikh kompleksov dvuosnyh jelektrovozov* / B.V. Zherebkin, D.A. Shokarev, E.I. Skapa // *Elektromehaniczni i energozberigajuchisistemi: shhokvar-tal'nijnaukovo-virobnichij zhurnal.* – *Kremenчук: KrNU*, 2011. – *Vip. № 4/2011(16).* – S.17–21. 11. *Kordakov V.N., Korzhev A.A. Metodika opredelenija racional'noj velichiny sily tjagi dopolnitel'nogo linejnogo jelektropryvoda rudnichного jelektrovoza* // *Problemy mashinovedenija i mashinostroenija: Mezhhvuz. sb.* – *Vyp. 29.* – *SPb.: SZTU*, 2003. – S. 120 – 125.

Получено (received) 25.08.2015