

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Гутаревич Виктор Олегович



**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ ШАХТНЫХ
ПОДВЕСНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ДОРОГ С ОПТИМАЛЬНЫМИ
ДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание научной степени
доктора технических наук

Донецк - 2017

Работа выполнена в ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

Научный

консультант: доктор технических наук, профессор
Кондрахин Виталий Петрович

Официальные
оппоненты:

Хазанович Григорий Шнеерович,
доктор технических наук, профессор,
Шахтинский институт (филиал) ФГБОУПО «Южно-
Российский государственный политехнический
университет (НПИ) имени М.И. Платова», профессор
кафедры «Технология и комплексы горных, строительных и
металлургических производств»;

Корнеев Сергей Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
ГОУ ВПО «Донбасский государственный технический
университет» (г. Алчевск), заведующий кафедрой «Горная
энергомеханика и оборудование»;

Паламарчук Николай Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
ГОО ВПО «Донецкий институт железнодорожного
транспорта» (г. Донецк), заведующий кафедрой
«Подвижной состав железных дорог»

Ведущая

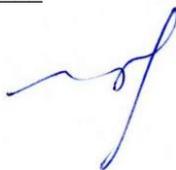
организация: Юргинский технологический институт (филиал) ФГБОУВО
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» (г. Юрга)

Защита состоится 12 октября 2017 года в 12-00 часов на заседании
диссертационного совета Д 01.008.01 при ГОУВПО «Донецкий
национальный технический университет» по адресу: ул. Артема, 58,
г. Донецк, 283001, I-й учебный корпус, ауд. 1203. Тел. / факс: +38 (062) 304-
30-55, e-mail: uchensovet@donntu.org

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Донецкий
национальный технический университет» по адресу: ул. Артема, 58,
г. Донецк, 283001, II-й учебный корпус, адрес сайта университета
<http://donntu.org>.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01,
доктор технических наук, доцент



И.А. Бершадский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На угольных шахтах Донбасса основным видом транспорта вспомогательных грузов и людей по горизонтальным выработкам является локомотивная доставка, а по наклонным – канатная, что неизбежно связано с перецепками, перегрузками составов и применением многоступенчатой технологии перемещения. Особенно усложняется работа на шахтах, имеющих разветвленные и искривленные выработки со знакопеременным профилем. В то же время опыт эксплуатации шахтных подвесных монорельсовых дорог подтверждает возможность создания бесперегрузочной технологии транспортирования, что позволяет снизить затраты и улучшить работу горного предприятия.

При движении подвижного состава по монорельсу эксплуатация шахтной подвесной монорельсовой дороги связана с силовыми воздействиями, обусловленными переходными режимами работы и кривизной пути. В результате чего наблюдаются динамические колебания, приводящие к деформации самого пути и его элементов подвешивания, включая крепь горной выработки. Вследствие этого ухудшается эффективность, снижается надежность и повышается аварийность работы. С ростом скорости движения и массовой нагрузки на монорельс негативные последствия многократно усиливаются, что значительно ограничивает возможность эксплуатации подвесных монорельсовых дорог на шахтах.

Таким образом, **актуальная научная проблема**, имеющая важное хозяйственное значение, состоит в развитии научных основ создания шахтных подвесных монорельсовых дорог с оптимальными динамическими параметрами, установлении закономерностей формирования динамических нагрузок на крепь горной выработки в зависимости от свойств подвески монорельса и подвижного состава, что позволяет снизить динамические нагрузки на крепь горной выработки от воздействия перевозимых грузов, расширить область применения, а также повысить технический уровень и эффективность работы монорельсового транспорта.

Степень разработанности темы. Проблемы создания подвесных монорельсовых дорог нашли широкое отражение в работах ученых: Л.И. Айзенштока, В.С. Берсенева, В.Г. Вербицкого, А.С. Веткина, В.Н. Григорьева, А.В. Денищенко, А.И. Дукельского, В.А. Дьякова, В.А. Еременко, Л.Г. Желтухина, И.И. Иванченко, И.П. Киселева, М.А. Котова, А.И.Кравцова, Е.В. Кузнецова, Л.Г. Лобаса, Р.В. Малова, В.М. Мерецкого, П.Е. Мерзлякова, Р.В. Мерцалова, В.Р. Ногих, В.С. Носова, О.С. Петренко, В.А. Расцветаева, Н.Н. Следя, А.Г. Степанова, В.М. Тарасова, А.А. Ткаченко, А.Е. Хлусова, М.В. Чашко, Л.Н. Ширина, Я.В. Щукина, В. Besa, Е.К. Chanda, М. Grujić, С.Н. Lee, М. Kawatani, С.В. Kim, Y. Kobayashi, М. Naeimi, N. Nishimura, I. Ristović, J. Tokarczyk, N.S. Trahair.

Несмотря на большой объем исследований в области создания и повышения эффективности работы шахтных подвесных дорог, их преимущества не реализованы в полной мере и широкое применение в шахтах Донбасса пока не представляется возможным. Положения расчета основных параметров шахтных подвесных монорельсовых дорог, приведенные в литературе, не содержат полных сведений об условиях эксплуатации, возникающих во время движения динамических нагрузках и вибрациях, которые передаются на крепь и на пассажиров. Обобщить эти сведения и дать универсальные рекомендации по расчету весьма затруднительно. Также не представляется возможным дать рекомендации по выбору параметров грузовых единиц, ходовых тележек и подвесок монорельсового пути, по целесообразности применения средств для снижения влияния динамических нагрузок на элементы подвесных монорельсовых дорог и на крепь горной выработки. Необходима разработка новых подходов и технических решений, удовлетворяющих современным требованиям к монорельсовому транспорту для горных предприятий.

Цель и задачи исследований. Цель работы – развитие научных основ создания шахтных подвесных монорельсовых дорог с оптимальными динамическими параметрами, установление закономерностей формирования динамических нагрузок на крепь горной выработки в зависимости от свойств подвески монорельса и подвижного состава, что позволяет снизить динамическое воздействие от нагрузок на элементы дороги и на крепь горных выработок, а также расширяет область применения, повышает технический уровень и эффективность работы монорельсового транспорта.

Указанная цель достигается за счет решения следующих задач:

- провести моделирование процесса функционирования монорельсового транспорта как элемента логистической системы шахты;
- выполнить анализ динамических характеристик подвесного пути шахтных монорельсовых дорог и разработать математические модели, позволяющие производить количественную оценку параметров колебаний подвижного состава и подвесного монорельсового пути;
- установить закономерности влияния кинематических и параметрических возмущений подвесного монорельсового пути на колебания шахтной подвесной монорельсовой дороги;
- исследовать вертикальные, боковые и продольные колебания подвижного состава и обосновать целесообразные параметры элементов шахтной подвесной монорельсовой дороги для улучшения ее динамических свойств;
- выполнить синтез подвески шахтной подвесной монорельсовой дороги, определить ее передаточную функцию, а также установить оптимальное сочетание параметров подвижного состава и монорельсового пути;
- провести экспериментальные исследования шахтных подвесных монорельсовых дорог;

- разработать рекомендации для снижения динамических нагрузок на крепь горной выработки, адаптированные к современным монорельсовым дорогам;

- выполнить конструкторско-техническую реализацию рекомендаций для их внедрения и повышения технического уровня шахтной подвесной монорельсовой дороги.

Идея работы заключается в снижении динамических нагрузок в виде колебаний и ударов, возникающих во время движения подвижного состава по монорельсу и передающихся на крепь горных выработок, путем оптимизации структуры и параметров шахтной подвесной монорельсовой дороги.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются процессы взаимодействия подвижного состава с монорельсом, возникающие во время движения подвесной монорельсовой дороги, а предметом – функциональная связь между конструктивными особенностями подвесной монорельсовой дороги и динамическими нагрузками, которые воздействуют на подвижной состав, монорельс и на крепь горной выработки.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- впервые разработана математическая модель функционирования шахтной подвесной монорельсовой дороги как элемента логистической системы горного предприятия, учитывающая фактор неопределенности при взаимодействии встречных потоков двух видов, когда погрузочно-разгрузочные работы проводятся без промежуточного хранения и с его использованием, что позволяет оценивать показатели эффективности работы и целесообразную область применения монорельсового транспорта;

- установлено, что во время движения подвижного состава по монорельсовому пути возникают колебательные процессы, обусловленные действием кинематических, силовых и параметрических возмущений. С учетом этого впервые разработана математическая модель, представленная системой дифференциальных уравнений, описывающих вертикальные и боковые колебания монорельса и подвижного состава, что позволяет исследовать вертикальные и боковые колебания как совместно, так и раздельно. В результате определены рациональные соотношения между значениями коэффициентов жесткости подвески монорельса и подвижного состава, а также между их массами, что позволило снизить амплитуды вертикальных колебаний тележек и монорельсового пути в 1,7 раза;

- впервые доказана целесообразность введения упруго-демпфирующих элементов в конструкцию подвески монорельсового пути. Выполнен синтез подвески монорельсового пути с оптимальными передаточными функциями и установлена оптимальная передаточная функция, учитывающая одновременное действие гармонических возмущений и относительных перемещений, вызванных динамическими ударами, возникающими во время движения подвижного состава по подвесному монорельсу со стыками. Найдено оптимальное сочетание параметров для шахтных подвесных монорельсовых дорог: коэффициенты жесткости подвески для монорельсового пути 5060 кН/м

и ходовой тележки 4070 кН/м; их коэффициенты вязкого сопротивления – 50 кН·с/м. По сравнению с существующими монорельсовыми дорогами реализация указанных значений в подвесе позволяет снизить максимальные динамические нагрузки на крепь горной выработки в 1,5 раза;

- впервые установлены закономерности извилистого движения ходовых тележек по монорельсовому пути, когда наряду с прямолинейным движением вдоль монорельса они смещаются поперек продольной оси и поворачиваются вокруг вертикальной оси. При этом возникают силы инерции и моменты сил инерции, вызывающие боковое раскачивание подвижного состава монорельсовой дороги;

- дальнейшее развитие получила математическая модель бокового раскачивания подвесной монорельсовой дороги, которая позволяет исследовать взаимосвязь между параметрами подвески монорельса и подвижного состава для снижения амплитуды бокового раскачивания шахтной подвесной монорельсовой дороги. Выявлено, что использование дополнительных упругих связей в поперечной плоскости относительно монорельсового пути позволяет более, чем в 3 раза уменьшить амплитуду бокового раскачивания монорельса и снизить время затухания не менее, чем в 2 раза;

- впервые предложен механизм снижения боковых колебаний подвижного состава и разработана тележка, в которой по обе стороны монорельса устанавливаются на поворотных рычагах по два подпружиненных боковых ролика. При коэффициенте жесткости пружин боковых роликов равном 200 кН/м линейные смещения тележки составляют менее 1 мм, а отклонение оси кузова от вертикали не превышает 0,1 рад, что позволяет уменьшить амплитуды боковых колебаний подвижного состава современных шахтных подвесных монорельсовых дорог в 4 раза;

- дальнейшее развитие получили математические модели продольных колебаний шахтной подвесной монорельсовой дороги как системы твердых тел, связанных между собой упругими связями. В результате установлено, что продольные динамические силы более, чем в 1,6 раза могут превышать значения прикладываемых тормозных усилий. Для уменьшения продольных колебаний составных частей подвесной монорельсовой дороги во время торможения целесообразно выполнять сцепки с коэффициентом вязкости более 50 кН·с/м. Причем для подвижного состава массой до 32 т достаточно увеличивать значение указанного коэффициента только для сцепок тормозных тележек.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в установлении закономерностей формирования динамических процессов, возникающих во время движения подвижного состава по подвесному монорельсу с учетом его деформаций и колебаний, а также их влияние на крепь горной выработки, что позволяет создать научные основы синтеза подвески шахтной подвесной монорельсовой дороги.

Практическая значимость выводов и рекомендаций, полученных в диссертации, заключается в том, что обоснована возможность применения логи-

стического подхода к структурообразованию шахтных подвесных монорельсовых дорог, что в итоге приводит к повышению эффективности их работы. Разработана методика, позволяющая определять упругие характеристики монорельсового пути. В результате синтеза шахтных подвесных монорельсовых дорог выявлено, что за счет установления оптимального сочетания параметров подвески и применения демпфирующих устройств, возможно снизить вибрации и динамические нагрузки на крепь горной выработки. Полученные результаты позволяют обеспечить расширение области применения подвесных монорельсовых дорог в сложных горно-технических условиях шахт Донбасса и повышение устойчивости крепи горной выработки.

Кроме того, новизна и практическая значимость работы подтверждается полученными патентами на изобретения UA109446C2 от 25.08.2015г. «Способ амортизации стыков рельса и устройство для его реализации», UA110136C2 от 25.11.2015г. «Способ подвешивания монорельса в горной выработке», RU2611660C1 от 28.02.2017 г. «Шахтная монорельсовая дорога», а также полезные модели UA72688U от 27.08.2012г. «Шахтная монорельсовая дорога», UA79713U от 25.04.2013г. «Рельсовая нить из профильных рельсов» и UA94675U от 25.11.2014г. «Шарнирное соединение».

Методология и методы исследования. Методологической основой работы являются общеполитические и общенаучные методы познания явлений и процессов, используемых в технических и прикладных науках. Методология исследования базируется на системном подходе с применением анализа и синтеза сложных динамических моделей. В ходе выполнения исследований использовались: математическое моделирование динамических процессов на основе дифференциальных уравнений, методы анализа и синтеза случайных величин и случайных процессов, методы численного эксперимента, методы экспериментальных исследований и обработки экспериментальных данных. Трехмерное моделирование подвижного состава и монорельсового пути осуществлялось с помощью систем автоматизированного проектирования.

Теоретической базой исследования шахтных подвесных монорельсовых дорог являлись научные труды отечественных и зарубежных авторов, материалы периодических изданий, научные монографии, которые посвящены проблемам создания различных видов горно-добывающих и транспортных машин, а также логистики горных предприятий.

Положения, выносимые на защиту:

- закономерности функционирования шахтных подвесных монорельсовых дорог как элемента логистической системы горного предприятия и последовательность построения оптимального плана перевозок, позволяющие учитывать взаимодействие встречных потоков, а также минимизировать стоимость и время доставки грузов в условиях неопределенности и рисков;

- теоретические зависимости, подтвержденные экспериментальными исследованиями колебаний монорельсового пути и подвижного состава, для определения динамических нагрузок, возникающих во время движения по-

движного состава, передающихся на крепь горной выработки и снижающих ее устойчивость;

- результаты синтеза шахтной подвесной монорельсовой дороги, который основан на ограничении действия динамических нагрузок, обусловленных возникающими во время движения подвижного состава по подвесному монорельсу колебательными процессами, что позволило определить оптимальные параметры подвесок монорельсового пути для снижения динамических нагрузок на крепь горных выработок;

- механизм уменьшения амплитуд колебаний элементов подвесной монорельсовой дороги за счет снижения влияния кинематических и параметрических возмущений на колебательные процессы, возникающие во время движения подвижного состава.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью поставленных задач и принятых допущений, достаточным объемом и результатами аналитических исследований, обоснованным применением методов математической статистики и вычислительной техники, согласованностью полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований, их корреляцией с результатами других авторов. Расхождение результатов вычислений динамических нагрузок и натурных экспериментальных данных не превышает 9%. При этом частоты колебаний отличаются не более, чем на 12%.

Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, постановке научной проблемы, цели и задач работы, выборе методов и направлений исследований, выполнении теоретических, аналитических и экспериментальных исследований, разработке положений и методических рекомендаций по использованию результатов работы, а также их внедрению.

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и получили позитивную оценку на международных научно-практических конференциях: «Технологии, материалы, транспорт и логистика. Перспективы развития» (Луганск, 2010, 2011 гг.); «Логистика промышленных регионов» (Донецк, 2010 г.); «Проблемы развития транспортной логистики» (Болгария, Несебыр, 2011, 2012 г., Румыния, Галац, 2013 г.); «Проблемы развития транспортных систем и логистики» (Луганск, 2011-2013 гг.); «Transport Problems» (Польша, Катовице, 2011-2013 гг.); «Research and Development in Mechanical Industry» (Сербия, Топола, 2014 г.); «Неделя горняка» (Москва, 2014, 2016 гг.); «Форум горняков-2014» (Днепропетровск, 2014 г.); «Инновационные перспективы Донбасса» (Донецк, 2015, 2016 гг.).

Основные положения и результаты диссертации, полученные автором, доведены до уровня методических и практических разработок, направленных на улучшение эксплуатационных свойств и надежности подвижного состава шахтной подвесной монорельсовой дороги. Подтверждением практического

значения полученных результатов является использование институтом МакНИИ методики для определения динамических характеристик монорельсовых дорог.

Основные результаты работы переданы в ГП «Донецкий энергозавод», ГП «Донецгормаш», ГП «Шахтерскантрацит», ООО «Шахта «Свято-Покровская №3», ООО «Завод «Амплитуда», АО «EVAS B&P» в виде технических предложений по разработке принципиально новых конструкций устройств для снижения динамических нагрузок на элементы шахтных подвесных монорельсовых дорог. Подвесное устройство для монорельсового пути КМ-17 представлялось на выставке научно-технических разработок «Инновационные перспективы Донбасса» (Донецк, 2015, 2016 гг.). Годовой экономический эффект от внедрения подвеса составляет 325,4 тыс.р на 1 км монорельсовой дороги.

Полученные в ходе выполнения диссертационных исследований результаты использованы ДонНТУ в учебном процессе для студентов по специальности «Горное дело» специализаций «Транспортные системы горного производства» и «Горные машины и оборудование».

Основные положения диссертации опубликованы в 43 работах, в том числе: 1 монография, 26 статей в специализированных изданиях, из которых 4 статьи в журналах, включенных в базу научного цитирования Scopus, 7 публикаций материалов и тезисов на международных конференциях, 3 учебных пособия с грифом МОНУ, 6 патентов на изобретения и полезные модели.

Диссертационная работа содержит 328 страниц машинописного текста и состоит из введения, восьми разделов, выводов, списка литературы из 301 источника на 34 страницах и 4 приложений на 15 страницах. Основной текст, изложенный на 279 страницах, иллюстрируется 80 рисунками и содержит 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, поставлена цель, сформулированы идея работы и задачи исследований, методология и методы их достижения. Указана научная новизна и практическая ценность результатов работы. Приведены научные положения, их новизна, практическое значение полученных результатов и их реализация. Рассмотрены вопросы обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, личного вклада соискателя. Дана информация о публикациях по теме исследований, указана структура и объем работы.

В первом разделе проведен анализ исследований, посвященных созданию и опыту применения шахтных подвесных монорельсовых дорог (ПМД). Выполнен логистический анализ целесообразности применения монорельсового транспорта на горных предприятиях.

В шахтных условиях монорельсовый путь и колеса подвижного состава на своих поверхностях качения имеют неровности. При этом характерны та-

кие технические особенности, как конусность колес, наличие стыков и кривизна монорельса. Вследствие этих факторов в элементах подвесной монорельсовой дороги возникают различные деформации и колебания, а при их взаимодействии – динамические силы. В результате затрачивается энергия не только на полезное движение, но и на вредное, связанное с возбуждением колебаний, вызывающих дополнительную нагрузку на крепь горной выработки, снижая ее несущую способность. Кроме того, возникающие динамические колебания увеличивают износ подвижного состава, монорельса и его соединений.

Исследованиями динамических процессов, происходящих во время движения подвижного состава по рельсу, занимались ученые Е.П. Блохин, М.Ф. Вериго, С.В. Вершинский, И.В. Данович, А.Л. Голубенко, Л.А. Губачева, В.Н. Кашников, А.Я. Коган, М.Л. Коротенко, И.В. Крагельский, С.М. Куценко, В.А. Лазарян, В.Б. Медель, Д.К. Минов, С.В. Мямлин, Н.А. Радченко, В.М. Старченко, Т.А. Тибилов, Г.И. Тумановили, Х.Т. Туранов, Ю.С. Ромен, В.Ф. Ушкалов, Л.А. Шадур, V. Dukkipati, K. Garg, W. Kik, D. Moelle, W. Murray, K. Popp, W. Schiehlen, H. Scheffel, S. Steisunas.

Большой вклад в создание и совершенствование горно-добывающих и транспортных машин внесли ученые С.Е. Блохин, Л.Я. Будиков, Г.Д. Буялич, В.И. Галкин, С.С. Гребенкин, В.Г. Гуляев, А.Б. Ефименков, Л.И. Кантович, В.П. Кондрахин, А.Н. Коптовец, С.В. Корнеев, Б.А. Кузнецов, В.В. Мишин, В.Г. Нечепав, Е.Е. Новиков, Н.В. Паламарчук, В.А. Пенчук, Н.С. Поляков, В.В. Процив, С.В. Ракша, А.В. Ремезов, А.А. Ренгевич, В.И. Самуся, В.А. Салов, Н.И. Сысоев, А.А. Сердюк, А.О. Спиваковский, И.А. Таран, В.П. Франчук, Г.Ш. Хазанович, П.С. Шахтарь, Э.М. Шляхов, О.Е. Шабаев, В.Г. Шорин, И.Г. Штокман, T. Buniok, H. Cichos, J. Rusinek, A. Sladkowzki.

Из проведенного обзора литературных источников в областях отечественного и зарубежного машиностроения, опыта применения в горной промышленности, работ по созданию и исследованию монорельсового транспорта следует, что шахтные подвесные монорельсовые дороги выпускаются и эксплуатируются на предприятиях многих стран мира. Они имеют различную конструкцию и эксплуатационные параметры, от которых во многом зависит эффективность работы.

Приведенные в литературе результаты исследований и методики расчета параметров ПМД не содержат подробных сведений о динамических нагрузках, возникающих во время движения и воздействующих на подвижной состав, монорельсовый путь, а также крепь горной выработки. Обобщить эти сведения и дать рекомендации по расчету динамических параметров ПМД представляется, как правило, затруднительным. Увеличение нагрузки на крепь, вызванное динамическими нагрузками, приводит к снижению устойчивости горной выработки, что исключает возможность работы ПМД или требует дополнительных затрат на горные работы.

На основании проведенного анализа установлены решенные и нерешенные проблемы, а также сформулированы задачи исследований, необходимые для достижения поставленной цели.

Во втором разделе установлены методы научных исследований для анализа и синтеза ПМД. Обоснована общая методика исследования динамических процессов, которые протекают во время движения подвижного состава по подвесному монорельсовому пути, выбраны методы решения теоретических задач, экспериментальных исследований и составлена обобщенная структурная схема исследуемой модели.

Экспериментальные исследования проводились согласно разработанной программе в представительных шахтных условиях и на полномасштабном стенде в лабораторных условиях. Для выполнения программы экспериментальных исследований применялись стандартные и типовые методики, представляющие собой совокупность способов и приемов, необходимых для определения характеристик и параметров, а также обработки полученных результатов. Указанная реализация программы испытаний не потребовала создания специальных метрологических приборов и мероприятий.

Третий раздел посвящен разработке теоретико-методологических основ моделирования процесса функционирования ПМД в логистической системе шахты. Установлены общие логистические подходы к выбору параметров монорельсового транспорта с учетом специфики горнотехнических условий эксплуатации и разработаны математические модели движения подвижного состава (ПС) между пунктами погрузки и разгрузки, а также вариантов доставки грузов с промежуточными перегрузками.

Исследовано взаимодействие встречных потоков горных предприятий, которое связано с фактором неопределенности, неизбежно сопутствующим работе ПМД. Рассмотрено два вида взаимодействия встречных потоков в перегрузочном пункте, первый – когда погрузочно-разгрузочные работы проводятся без промежуточного (временного) хранения и, второй – с использованием промежуточного хранения (рис. 1).

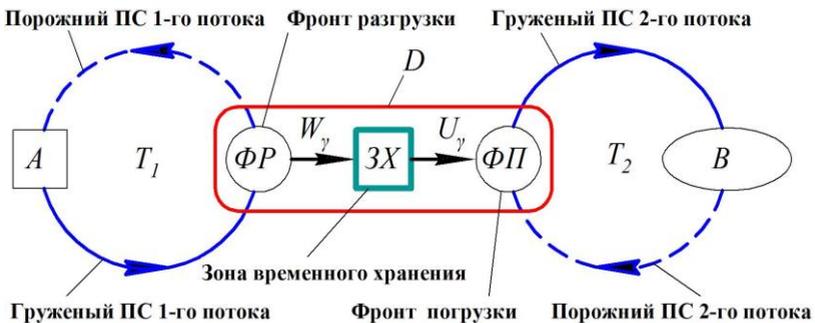


Рис. 1. Транспортно-технологическая система перевозки двумя ПМД

Для перевозки из пункта погрузки A в перегрузочный пункт D применяется одна ПМД, имеющая грузоподъемность $m_{\gamma 1}$. Далее из пункта D до пункта разгрузки B используется другая ПМД с грузоподъемностью $m_{\gamma 2}$. В перегрузочном пункте D происходит перегрузка с одной ПМД непосредственно на другую ПМД с интенсивностью V_{γ} . При этом время рейса первой ПМД равно T_1 , а второй – T_2 . Время рейса включает время движения от одного пункта к другому, а также время, необходимое для нахождения в соответствующем пункте.

В реальных условиях параметры $m_{\gamma 1}$, $m_{\gamma 2}$, T_1 и T_2 являются случайными, поскольку практически невозможно предсказать их мгновенные значения, а поэтому для рассматриваемых условий процесс перемещения ПС ПМД и груза является случайным. В качестве допущения принято, что указанные параметры распределяются по показательному закону

$$\begin{aligned} \mathbf{P}\{m_{\gamma i} \leq x\} &= 1 - e^{-x/g_i}, \quad x \geq 0; \\ \mathbf{P}\{T_i \leq t\} &= 1 - e^{-\lambda_i t}, \quad t \geq 0, \quad i = 1; 2, \end{aligned} \quad (1)$$

где g_i – средняя грузоподъемность ПМД для i -го потока; λ_i^{-1} – среднее время рейса ПМД для i -го потока.

На основании (1) процесс изменения состояний транспортно-технологической системы рассматривали как однородный марковский, когда будущее его поведение определяется только текущим состоянием в данный момент и не зависит от того, как процесс перешел в данное состояние.

При этом возможны следующие состояния: первое – когда ПС 1-го потока поступил в перегрузочный пункт, а ПС 2-го потока находится в рейсе; второе – когда ПС 2-го потока поступил в перегрузочный пункт, ПС 1-го потока находится в рейсе; третье – когда оба состава поступили в перегрузочный пункт. Первому состоянию соответствует символическая запись $(1,0)$, второму – $(0,1)$, а третьему – $(1,1)$. В первом и втором состояниях один из ПС ожидает другой, а перегрузка происходит только в третьем состоянии.

За бесконечно малое время Δt вероятность перехода системы из одного состояния в другое будет

$$\begin{aligned} \mathbf{P}\left\{(0,1) \xrightarrow{\Delta t} (1,1)\right\} &= \lambda_1 \Delta t + o(\Delta t), \\ \mathbf{P}\left\{(1,1) \xrightarrow{\Delta t} (0,1)\right\} &= \mu_1 \Delta t + o(\Delta t), \\ \mathbf{P}\left\{(1,1) \xrightarrow{\Delta t} (1,0)\right\} &= \mu_2 \Delta t + o(\Delta t), \\ \mathbf{P}\left\{(1,0) \xrightarrow{\Delta t} (1,1)\right\} &= \lambda_2 \Delta t + o(\Delta t), \end{aligned}$$

где $o(\Delta t)$ – бесконечно малая величина высшего порядка малости в сравнении с Δt ; $\mu_i = V_\gamma / g_i$, $i = 1, 2$.

В результате установлено

$$P(0,1) = \frac{\mu_1}{\lambda_1} P(1,1); \quad P(1,0) = \frac{\mu_2}{\lambda_2} P(1,1); \quad P(1,1) = \left(1 + \frac{\mu_1}{\lambda_1} + \frac{\mu_2}{\lambda_2}\right)^{-1}.$$

Количество единиц ПС, находящегося в перегрузочном пункте, будет равно $\bar{q}_1 = P(1,0) + P(1,1)$; $\bar{q}_2 = P(0,1) + P(1,1)$, а среднее количество единиц ПС, перевозящего грузы, –

$$\bar{r}_1 = P(0,1) = 1 - \bar{q}_1; \quad \bar{r}_2 = P(1,0) = 1 - \bar{q}_2.$$

Рассмотрен второй вид взаимодействия встречных потоков – с использованием промежуточного хранения, для которого исключается время ожидания ПМД. Это обеспечивается тем, что ПС 1-го потока разгружается с интенсивностью W_γ сразу после прибытия в перегрузочный пункт D и без ожидания ПС 2-го потока. В свою очередь ПС 2-го потока может загружаться с интенсивностью U_γ сразу после прибытия. При этом для промежуточного хранения выделяется зона (участок) горной выработки, имеющая фронты разгрузки ΦP и погрузки $\Phi П$. В этой транспортно-технологической системе состояние $(0,0)$ всегда существенно, а поэтому именно это состояние рассмотрено для построения графа переходов.

Текущее состояние подобной системы зависит не только от времени прибытия и убытия ПС, но и от наличия груза в зоне хранения, что может быть отражено как

$$(k_1, k_2; x), \quad k_1, k_2 = 0,1; \quad x \geq 0.$$

Распределение вероятностей состояний определяется

$$q(k_1, k_2; x), \quad k_1, k_2 = 0,1; \quad x \geq 0, \quad P^-(0,1),$$

где $q(k_1, k_2; x)$ – плотность распределения груза в зоне хранения с вероятностью состояния (k_1, k_2) ; $P^-(0,1)$ – вероятность состояния $(0,0;0)$, когда ПС 2-го потока находится в ожидании погрузки, а груза в зоне хранения нет.

Граф состояний и переходов для рассматриваемой системы приведен на рис. 2, где $v_i = V_\gamma / g_i$, $i=1, 2$.

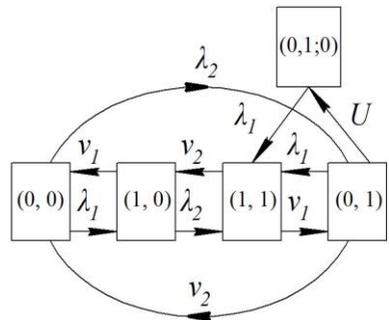


Рис. 2. Граф состояний и переходов системы перевозки двумя ПМД с использованием промежуточного хранения

Плотности распределения $q(k_1, k_2; x)$, вероятности $P^-(0,1)$, система уравнений и граничных условий будут

$$\begin{aligned} & -(\lambda_1 + \lambda_2)q(0,0;x) + v_1q(1,0;x) + v_2q(0,1;x) = 0' \\ & W_\gamma q'(1,0;x) = -(\lambda_2 + v_1)q(1,0;x) + v_2q(1,1;x) + \lambda_1q(0,0;x); \\ & V_{\gamma 1} q'(1,1;x) = -(v_1 + v_2)q(1,1;x) + \lambda_1q(0,1;x) + \lambda_2q(1,0;x); \\ & -U_\gamma q'(0,1;x) = -(\lambda_1 + v_2)q(0,1;x) + v_1q(1,1;x) + \lambda_2q(0,0;x); \end{aligned} \quad (2)$$

$$x > 0; U_\gamma q(0,1;0) = \lambda_1 P^-(0,1), V_{\gamma 1} q(1,1;0) = \lambda_1 P^-(0,1), q(0,0;0) = q(1,0;0) = 0,$$

где $V_{\gamma 1}$ – скорость изменения количества груза в зоне хранения, находящегося в состоянии (1,1), равная $V_{\gamma 1} = W_\gamma - U_\gamma$.

Поскольку $W_\gamma > U_\gamma$, то $V_{\gamma 1} > 0$.

Для рассматриваемой системы условие нормировки вероятностей

$$\int_0^\infty (q(0,0;x) + q(1,0;x) + q(0,1;x) + q(1,1;x)) dx + P^-(0,1) = 1. \quad (3)$$

Вероятности состояний имеют вид

$$P(k_1, k_2) = \int_0^\infty q(k_1, k_2; x) dx; (k_1, k_2) \neq (0,1),$$

$$k_1, k_2 = 0,1; P(0,1) = P^-(0,1) + \int_0^\infty q(0,1;x) dx.$$

Плотность распределения груза в зоне хранения для любого момента времени

$$q(x) = \sum_{k_1, k_2} q(k_1, k_2; x).$$

С учетом (2) и (3) вероятность $P(k_1, k_2)$

$$\begin{aligned} P(1,0) &= \frac{1}{\Delta} \lambda_1 v_2 (\lambda_2 U_\gamma + \lambda_1 W_\gamma) P^-(0,1), \\ P(1,1) &= \frac{1}{\Delta} \lambda_1 [\lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2 + v_1) U_\gamma - \lambda_1 v_2 W_\gamma] P^-(0,1), \\ P(0,1) &= \frac{V_{\gamma 1}}{U_\gamma} P(1,1) + \frac{W_\gamma}{U_\gamma} P(1,0) + P^-(0,1), \\ P(0,0) &= \frac{v_1}{\lambda_1 + \lambda_2} P(1,0) + \frac{v_2}{\lambda_1 + \lambda_2} [P(0,1) - P^-(0,1)] \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Delta = (\lambda_1 + \lambda_2 + v_1 + v_2)[(\lambda_1 + v_1)\lambda_2 U_\gamma - (\lambda_2 + v_2)\lambda_1 W_\gamma]$.

Вероятность состояния, которое соответствует отсутствию груза в перегрузочном пункте

$$P^-(0,1) = 1 - \frac{\lambda_1(\lambda_2 + v_2)W_\gamma}{\lambda_2(\lambda_1 + v_1)U_\gamma}.$$

Среднее количество ПС i -го потока, прибывшего на перегрузочный пункт будет $\bar{q}_1 = P(1,0) + P(1,1)$, $\bar{q}_2 = P(0,1) + P(1,1)$, а среднее количество ПС i -го потока, находящегося в рейсе $\bar{r}_1 = 1 - \bar{q}_1$; $\bar{r}_2 = 1 - \bar{q}_2$.

В четвертом разделе работы установлена взаимосвязь между параметрами монорельсового пути и колебаниями, которые вызваны различными нагрузками. Используя принцип суперпозиции, с учетом закрепления в горной выработке, рассмотрены продольные и поперечные колебания монорельса. При этом исследованы колебательные процессы, возникающие во время действия на монорельс продольных и поперечных подвижных сил.

Рассмотрено движение одиночной тележки массы m_t по подвесному монорельсовому пути, секции которого шарнирно соединены между собой (рис. 3). Под действием силы тяжести от этой массы продольная ось монорельсового пути изгибается, и поступательное ее движение сопровождается вертикальными смещениями, которые зависят не только от статической нагрузки, но и от вертикальной силы инерции.

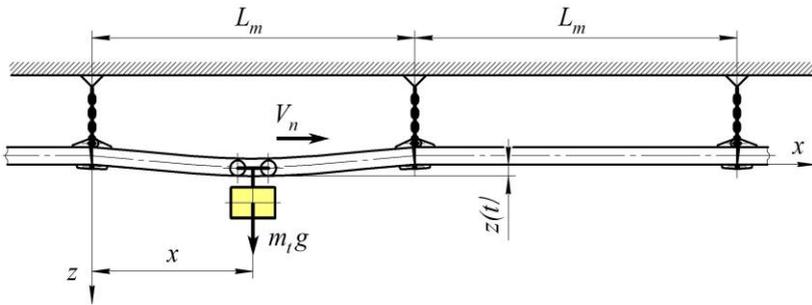


Рис. 3. Схема деформации подвесного монорельсового пути под движущейся тележкой

При движении тележки с постоянной скоростью V_n возникает возмущающая нагрузка, вызванная действием массы. Если масса секции монорельсового пути достаточно велика по сравнению с массой тележки, то следует учитывать инерцию монорельса, а инерцию последней можно не учитывать

На основании теории Бернулли-Эйлера для малых деформаций уравнение изогнутой оси монорельса имеет вид

$$\frac{\partial^4 z}{dx^4} EJ + \frac{\partial^2 z}{dt^2} m_t = -\frac{2m_t g}{L_m} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \alpha_n t \sin \frac{n\pi x}{L_m}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости материала монорельса; J – момент инерции поперечного сечения монорельса относительно его продольной оси; L_m – длина секции монорельса; $\omega_V = n\pi V_n / L_m$.

Решение уравнения (5) получено с использованием метода Фурье

$$z(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-2g}{L_m \omega_f^2 (1 - \omega_V^2 / \omega_f^2)} \left(\sin \omega_V t - \frac{\omega_V}{\omega_f} \sin \omega_f t \right) \sin \frac{n\pi x}{L_m},$$

где
$$\omega_f = n^2 \pi^2 / L_m^2 \sqrt{EJ / m_t}.$$

Рассмотрен случай, когда перемещаемая тележка имеет массу значительно больше, чем масса секции монорельса. При этом динамическое воздействие, учитывающее силу инерции тележки, будет

$$F_d = m_t g \left(1 - \frac{V_n^2 m_u}{EJ} \frac{2L_m^2 - 12L_m x + 12x^2}{3L_m} \right).$$

В результате установлено, что наибольшая нагрузка на секцию монорельса будет при $x = L_m / 2$ достигать $F_{\max} = m_t g \left(1 + V_n^2 m_t L_m / (3EJ) \right)$, а коэффициент динамичности: $k_d = 1 + V_n^2 m_t L_m / (3EJ)$.

В соответствии с этим изгиб секции монорельса под действием динамической нагрузки составляет $z_{\max} = m_t g L_m^3 / (48EJ) \left(1 + V_n^2 m_t L_m / (3EJ) \right)$.

Зависимости динамических нагрузок F_d при перемещении по координате $x = V_n t$ показаны на рис. 4,а. Указанные зависимости получены для монорельса, который имеет $L_m = 3$ м; $E = 20,6 \cdot 10^7$ кН/м² и $J = 8,73 \cdot 10^{-6}$ м⁴. Из этого рисунка видно, что F_d увеличивается с повышением массы тележки m_t и наибольшего значения достигает при $x = L_m / 2$.

Из рис. 4,б следует, что коэффициент динамичности k_d увеличивается с повышением скорости движения V_n и массы тележки m_t . При скорости движения V_n менее 0,5 м/с коэффициент динамичности $k_d = 1$, а следовательно, динамические нагрузки F_d практически равны статическим. При дальнейшем росте скорости коэффициент динамичности увеличивается. Для тележек массой 32 т при V_n до 5 м/с этот коэффициент равен 1,45.

Указанные динамические нагрузки дополнительно деформируют монорельсовый путь. График зависимости изгиба секции монорельса под действием динамической нагрузки, перемещаемой по координате $x = V_n t$, приведен на рис. 4,в. Из этого рисунка видно, что наибольшего значения 15 мм изгиб монорельса достигает, когда масса $m_t = 4,5$ т. Для $m_t = 2,0$ т изгиб составляет не более 7 мм.

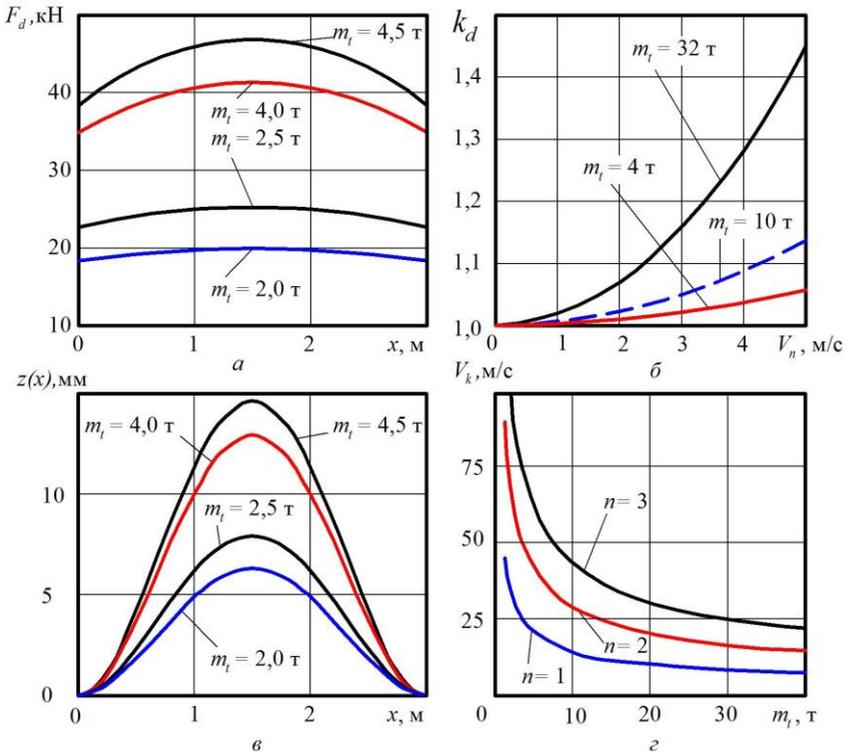


Рис. 4. Графики зависимостей: *a* – динамических нагрузок при перемещении по координате $x = V_n t$; *б* – коэффициента динамичности k_d от скорости движения монорельсовой тележки (при $x = L_m/2$); *в* – изгиба продольной оси монорельсового пути при перемещении динамической нагрузки по координате x ; *г* – критической скорости движения V_k от массы тележки m_t

Установленные значения изгиба монорельса служат источником кинематических возмущений, приводящих к вынужденным колебаниям подвижного состава монорельсовой дороги во время движения с постоянной скоростью. На основании этого критическая скорость движения тележки по монорельсу будет равна $V_k = n\pi / L_m \sqrt{EJ / m_t}$.

График зависимости критической скорости от массы тележки приведен на рис. 4,г. Указанные кривые построены для первого, второго и третьего тонов колебаний, когда $n = 1$; 2 и 3. Для тележек массой $m_t = 4,5$ т первая критическая скорость равна 20,9 м/с. При дальнейшем увеличении m_t до 32 т критическая скорость снижается и составляет 15,7 м/с. Поскольку на практи-

ке скорость движения тележек не превышает 5 м/с, то современные ПМД для шахт работают в дорезонансном режиме.

Пятый раздел посвящен исследованиям колебаний подвижного состава с учетом упругости монорельсового пути. При этом рассмотрены возникающие во время движения колебания в вертикальной, поперечной и продольной плоскостях.

Расчетная схема подвесной вагонетки, состоящей из кузова и двух тележек, показана на рис 5. На схеме приняты следующие обозначения; c_t , b_t – коэффициенты жесткости и вязкого трения верхней подвески монорельса, соответственно; c_k , b_k – коэффициенты жесткости и вязкого трения подвески кузова. Расстояния между осями крепления тележек к кузову обозначены как $2l_k$, между точками контакта ходовых колес тележек с монорельсом – $2l_t$, а высоту подвеса кузова – h . Первая по ходу движения тележка, совершая колебания совместно с частью монорельса, имеет две степени свободы и две обобщенные координаты z_{t1} , φ_{t1} , а вторая – обобщенные координаты z_{t2} , φ_{t2} .

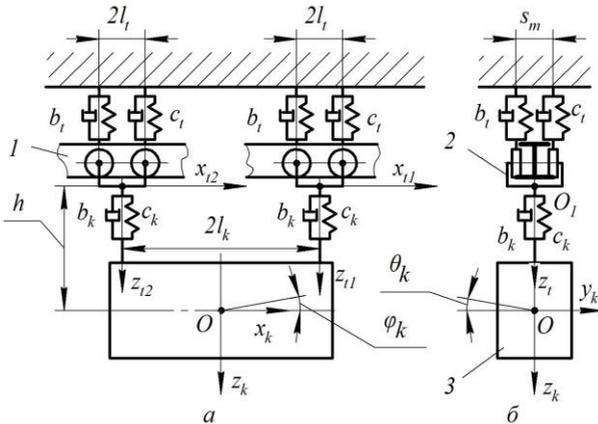


Рис. 5. Расчетная схема колебаний подвесной вагонетки: а – вид сбоку монорельса; б – поперечный вид, где 1 – подвесной монорельс; 2 – тележка; 3 – кузов

Кузов и тележки связаны между собой упругими и диссипативными связями, характеризующимися коэффициентами жесткости и вязкого сопротивления. Считаем, что колеса тележек перемещаются по монорельсу без отрыва от поверхностей качения на нижних полках. Неровности монорельса в местах контакта колес с левой и правой стороны примем равными. Эти неровности, являющиеся внешними возмущениями системы со стороны монорельса, определяются отклонениями его размеров от номинальных, а также прогибами, возникающими во время поступательного движения кузова с тележками.

Неровности монорельсового пути для горных предприятий, который подвешивается в местах стыков, предложено аппроксимировать:

$$\eta(t) = \frac{1}{2} \eta_0 \left(\left| \sin \omega_\tau t + k_{om} \frac{\delta_m}{L_m} \right| + \left| \sin \omega_\tau t - k_{om} \frac{\delta_m}{L_m} \right| - 2k_{om} \frac{\delta_m}{L_m} \right) + \eta_m |\sin \omega_\tau t|,$$

где η_0 – наибольший прогиб секции монорельса; δ_m – длина проушин для соединения секций монорельса; k_{om} – коэффициент, учитывающий расположение проушин на секции монорельса; $k_{om} = 3$ – при длине секции монорельса $L_m = 3,0$ м; $k_{om} = 2,4$ – при $L_m = 2,4$ м; $k_{om} = 2$ – при $L_m = 2,0$ м.

ω_τ – частота возмущения от неровностей монорельса с длиной волны L_τ , равная $\omega_\tau = 2\pi V_n / L_\tau$; η_m – высота неровности стыка соседних секций монорельсового пути. Для монорельсового пути длина волны L_τ соответствует длине секции монорельса L_m .

Если неровности монорельсового пути в месте контакта первой по ходу движения колесной пары $\eta_1(t) = \eta(t)$, то в месте контакта второй по ходу движения колесной пары этой тележки, установленной на расстоянии $2l_t$, перемещение с учетом запаздывания будет $\eta_2(t) = \eta_1 \sin \omega_\tau (t - 2l_t / V_n)$.

Аналогично для второй по ходу движения тележки, расположенной на расстоянии $2l_k$: $\eta_3(t) = \eta_1 \sin \omega_\tau (t - 2l_k / V_n)$; $\eta_4(t) = \eta_1 \sin \omega_\tau (t - 2(l_t + l_k) / V_n)$.

Кроме того, во время движения тележек вдоль пролета монорельса, его жесткость периодически изменяется. На стыках жесткость монорельса определяется главным образом жесткостью подвески, а между подвесками – изгибной жесткостью балки, из которой изготовлен монорельс. Жесткость подвески зависит от параметров применяемой круглозвенной цепи и ее способа крепления в горной выработке. С учетом этого изменение коэффициента жесткости c_{m1} по длине пролета подвесного монорельса представлено в виде периодической функции, период повторения которой соответствует длине балок секции

$$c_{m1} = c_m \left(1 - \frac{1}{2} k_{m1} \left(\left| \sin \omega_\tau t + k_{om} \frac{\delta_m}{L_m} \right| + \left| \sin \omega_\tau t - k_{om} \frac{\delta_m}{L_m} \right| - 2k_{om} \frac{\delta_m}{L_m} \right) - k_{m2} |\sin \omega_\tau t| \right),$$

где c_m – коэффициент жесткости подвески монорельсового пути; k_{m1} – коэффициент изменения жесткости монорельса в середине пролета секции; k_{m2} – коэффициент изменения жесткости монорельса в зоне стыка. Значение коэффициента k_{m1} определяется отношением жесткости балки в середине пролета к жесткости подвески, а k_{m2} – отношением жесткости стыка к жесткости подвески.

Система дифференциальных уравнений, описывающая колебания подвесной вагонетки, представлена как

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}\ddot{z}_k + b_{11}\dot{z}_k + b_{16}\dot{z}_{t1} + b_{18}\dot{z}_{t2} + c_{11}z_k + c_{16}z_{t1} + c_{18}z_{t2} = 0; \\ a_{22}\ddot{y}_k + b_{22}\dot{y}_k + b_{23}\dot{\theta}_k + c_{22}y_k + c_{23}\theta_k = 0; \\ a_{33}\ddot{\theta}_k + b_{32}\dot{y}_k + b_{33}\dot{\theta}_k + c_{32}y_k + c_{33}\theta_k = 0; \\ a_{44}\ddot{\varphi}_k + b_{44}\dot{\varphi}_k + b_{46}\dot{z}_{t1} + b_{48}\dot{z}_{t2} + c_{44}\varphi_k + c_{46}z_{t1} + c_{48}z_{t2} = 0; \\ a_{55}\ddot{\psi}_k + b_{55}\dot{\psi}_k + c_{55}\psi_k = 0; \\ a_{66}\ddot{z}_{t1} + b_{61}\dot{z}_k + b_{64}\dot{\varphi}_k + b_{66}\dot{z}_{t1} + c_{61}z_k + c_{64}\varphi_k + c_{66}z_{t1} = \bar{b}_{61}\dot{\eta}_1 + \\ + \bar{b}_{62}\dot{\eta}_2 + \bar{c}_{61}\eta_1 + \bar{c}_{62}\eta_2; \\ a_{77}\ddot{\varphi}_{t1} + b_{77}\dot{\varphi}_{t1} + c_{77}\varphi_{t1} = -\bar{b}_{71}\dot{\eta}_1 + \bar{b}_{72}\dot{\eta}_2 - \bar{c}_{71}\eta_1 + \bar{c}_{72}\eta_2; \\ a_{88}\ddot{z}_{t2} + b_{81}\dot{z}_k + b_{84}\dot{\varphi}_k + b_{88}\dot{z}_{t2} + c_{81}z_k + c_{84}\varphi_k + c_{88}z_{t2} = \bar{b}_{83}\dot{\eta}_3 + \\ + \bar{b}_{83}\dot{\eta}_3 + \bar{c}_{83}\eta_3 + \bar{c}_{84}\eta_4; \\ a_{99}\ddot{\varphi}_{t2} + b_{99}\dot{\varphi}_{t1} + c_{99}\varphi_{t2} = -\bar{b}_{93}\dot{\eta}_3 + \bar{b}_{94}\dot{\eta}_4 - \bar{c}_{93}\eta_3 + \bar{c}_{94}\eta_4, \end{array} \right. \quad (6)$$

где a_{ij} — коэффициенты, соответствующие действующим в системе приведенным массам и моментам инерции: $a_{11} = a_{22} = m_k$; $a_{33} = J_{kx}$; $a_{44} = J_{ky}$; $a_{55} = J_{kz}$; $a_{66} = m_{t1}$; $a_{77} = J_{t1y}$; $a_{88} = m_{t2}$; $a_{99} = J_{t2y}$; b_{ij} — коэффициенты, характеризующие вязкое сопротивление элементов подвески, равные: $b_{11} = 4b_{kz}$; $b_{16} = -2b_{kz}$; $b_{18} = -2b_{kz}$; $b_{22} = 4b_{ky}$; $b_{23} = -4b_{ky}h$; $b_{32} = -4b_{ky}h$; $b_{33} = 4(b_{kz}b^2 + b_{ky}h^2)$; $b_{44} = 4b_{kz}l_k^2$; $b_{46} = -2b_{kz}l_k$; $b_{48} = -2b_{kz}l_k$; $b_{55} = 4b_{ky}l_k^2$; $b_{61} = -2b_{kz}$; $b_{64} = 2b_{kz}l_k$; $b_{66} = 2(2b_{tz} + b_{kz})$; $b_{77} = 4b_{tz}l_t^2$; $b_{81} = -2b_{kz}$; $b_{84} = -2b_{kz}l_k$; $b_{88} = 2(2b_{tz} + b_{kz})$; $b_{99} = 4b_{tz}l_t^2$; $\bar{b}_{61} = \bar{b}_{62} = \bar{b}_{83} = \bar{b}_{84} = 2b_{mz}$; $\bar{b}_{71} = \bar{b}_{72} = \bar{b}_{93} = \bar{b}_{94} = 2b_{mz}l_m$; c_{ij} — коэффициенты, характеризующие жесткость элементов подвески (имеют вид аналогичный b_{ij}).

Зависимости линейных колебаний кузова z_k , первой z_{t1} и второй z_{t2} по ходу движения тележек в вертикальной плоскости приведены на рис. 6. Здесь также показаны углы поворота кузова φ_k , первой φ_{t1} и второй φ_{t2} тележек.

Отсюда видны признаки наложения на колебания низкой частоты с большой амплитудой колебаний высокой частоты с малыми амплитудами. Анализ показывает, что высокочастотные гармоники колебаний являются следствием наложения колебаний тележек на монорельсе на колебания кузова. В результате установлено, что подбирая жесткость подвески и коэффициент вязкого сопротивления, можно снизить действующие вертикальные динамические нагрузки на ходовую тележку и монорельс более чем в 1,7 раза.

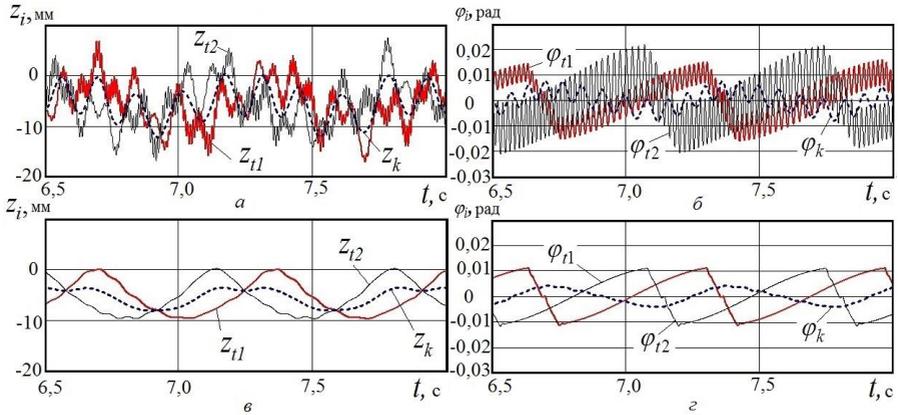


Рис. 6. Зависимости линейных колебаний кузова и тележек во времени при:
 $a, б - b_m = 0$; $в, г - b_m = 5 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$

Рассмотрен процесс бокового раскачивания ПС. Для этого использована двухмассовая модель ПМД, представленная на рис. 7, где приняты следующие обозначения: m_1 – приведенная масса монорельса; m_2 – приведенная масса подвижного состава; l_1 – длина подвески монорельса; l_2 – расстояние от оси подвески монорельса до центра тяжести подвижного состава; θ_1, θ_2 – углы отклонения монорельса и кузова подвижного состава от вертикали. Указанные углы отклонений выбраны в качестве обобщенных координат.

Для снижения амплитуды бокового раскачивания подвижного состава к монорельсу на расстоянии от точек подвеса h_p прикреплены дополнительные упругие связи, имеющие коэффициент жесткости c_p и коэффициент сил вязкого сопротивления b_δ .

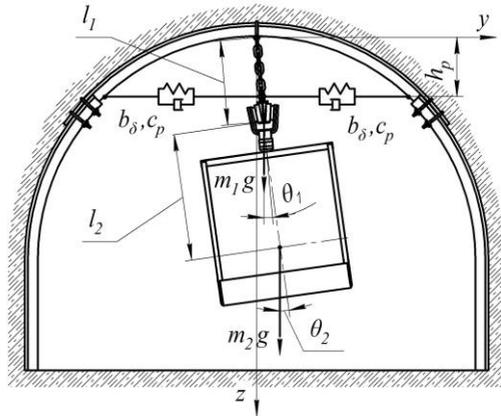


Рис. 7. Схема бокового раскачивания монорельса и подвижного состава в горной выработке

Используя уравнения Лагранжа, получены нелинейные уравнения колебаний механической системы, показанной на рис. 7:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)l_1^2\ddot{\theta}_1 + m_2l_1l_2\ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + m_2l_1l_2\dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + (m_1 + m_2)l_1g \sin \theta_1 - \\ - 2c_p h_p^2 \cos \theta_1 = -b_{\theta_1}\dot{\theta}_1 - b_{\delta}h_p\dot{\theta}_1; \\ m_1l_1l_2\ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + m_2l_2^2\ddot{\theta}_2 - m_2l_1l_2\dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_2l_2g \sin \theta_2 = -b_{\theta_2}\dot{\theta}_2, \end{cases}$$

где $b_{\theta_1}, b_{\theta_2}$ – коэффициенты, определяющие моменты сил сопротивления в опорах подвески монорельса и кузова вагонетки.

Численное решение рассматриваемой системы приведено на рис. 8.

На рис. 8, а, в показаны графики колебаний подвешенного монорельсового пути и экипажа при $m_1 = 1,0$ т; $m_2 = 1$ т; $l_1 = 0,4$ м; $l_2 = 0,8$ м; $h_p = 0,35$ м $b_{\theta_1} = b_{\theta_2} = 0,025$ Н·м·с и для начальных условий $\theta_1(t=0) = 0$; $\theta_2(t=0) = 0,1$ рад; $\dot{\theta}_1(t=0) = 0$; $\dot{\theta}_2(t=0) = 0$. Из этих рисунков видно, что использование дополнительных упругих связей в поперечной плоскости относительно монорельсового пути позволяет в несколько раз уменьшить амплитуду бокового раскачивания монорельса и снизить период затухания.

Зависимости, указанные на рис. 8, б, з, получены при тех же входящих параметрах, но масса экипажа m_2 принималась равной 4,0 т. В этом случае колебания затухают более интенсивно, но в начальный период амплитуды колебаний θ_2 принимают значения в 1,5 раза выше, чем при $m_2 = 1$ т.

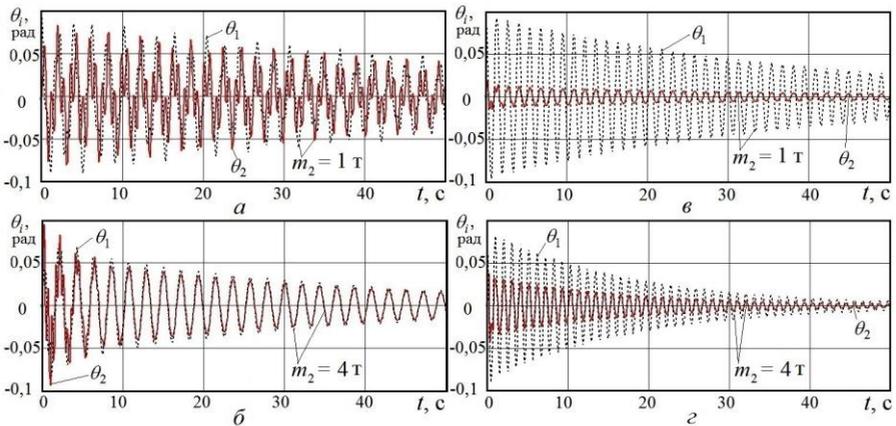


Рис. 8. Амплитуды бокового раскачивания монорельса и экипажа: а, б – без упругих связей; в, з – для упругих связей, имеющих $c_p = 500$ кН/м

Во время движения ПС в режиме тяги и торможения возникают как растягивающие, так и сжимающие силы, направленные вдоль монорельса и приводящие к продольным колебаниям ПМД. Возникающие при этом динамические нагрузки передаются на монорельсовый путь через тележки и сцепки, позволяющие удерживать единицы ПС на определенном расстоянии друг от друга. Кроме этого продольные нагрузки воспринимает и перевозимый груз.

Расчеты, проведенные для разного количества единиц ПС, показывают, что для групп, имеющих близкие приведенные массы, а также коэффициенты c_c и b_c , характер колебаний определяется, главным образом, тяговыми и тормозными усилиями, а также жесткостью сцепок устройств, реализующих эти усилия. Поэтому для ПМД, имеющих однородные единицы ПС и сцепки, расчетная схема продольных колебаний может быть представлена в упрощенном виде (рис. 9).

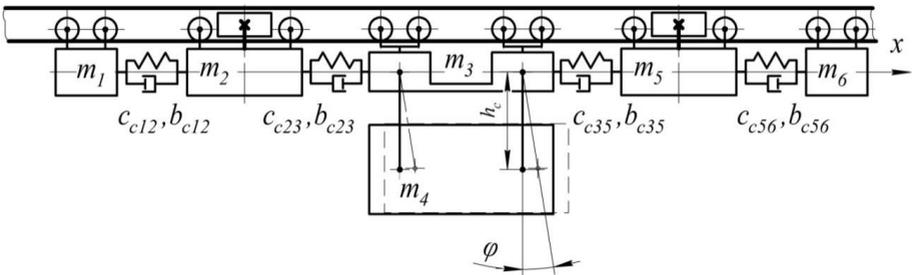


Рис. 9. Расчетная схема продольных колебаний крупногабаритного груза, перевозимого ПМД

На этой схеме обозначено: m_1, m_6 – приведенные массы тормозных тележек; m_2, m_5 – приведенные массы тяговых устройств; m_3 – приведенная масса ходовых тележек (грузоподъемной балки); m_4 – приведенная масса груза, подвешенного под грузоподъемной балкой; h_c – расстояние между центрами масс тележек и подвесных элементов экипажа; c_{c12}, b_{c12} – коэффициент жесткости и коэффициент сил вязкого сопротивления сцепки между массами m_1 и m_2 ; c_{c23}, b_{c23} – коэффициент жесткости и коэффициент сил вязкого сопротивления сцепки между массами m_2 и m_3 ; c_{c35}, b_{c35} – коэффициент жесткости и коэффициент сил вязкого сопротивления сцепки между массами m_3 и m_5 ; c_{c56}, b_{c56} – коэффициент жесткости сцепки и коэффициент сил вязкого сопротивления между массами m_5 и m_6 , соответственно.

Тогда уравнения продольных колебаний крупногабаритного груза, перевозимого ПМД, будут

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{x}_1 + T_{q1}(t) + c_{c12}(x_1 - x_2) + b_{c12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0; \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_{c12}(x_1 - x_2) - b_{c12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_{c23}(x_2 - x_3) + b_{c23}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + F_q(t) = 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 - c_{c23}(x_2 - x_3) - b_{c23}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + c_{c35}(x_3 - x_5) + b_{c35}(\dot{x}_3 - \dot{x}_5) + \\ + \frac{m_4 g}{h_c}(x_3 - x_4) = 0; \\ \ddot{x}_4 - \frac{g}{h_c}(x_3 - x_4) = 0; \\ m_5 \ddot{x}_5 - c_{c35}(x_3 - x_5) - b_{c35}(\dot{x}_3 - \dot{x}_5) + c_{c56}(x_5 - x_6) + b_{c56}(\dot{x}_5 - \dot{x}_6) + F_q(t) = 0; \\ m_6 \ddot{x}_6 - c_{c56}(x_5 - x_6) - b_{c56}(\dot{x}_5 - \dot{x}_6) + T_{q6}(t) = 0, \end{array} \right. \quad (7)$$

где $T_{q1}(t)$, $T_{q2}(t)$ – тормозные усилия, воздействующие на соответствующие массы; $F_q(t)$ – тормозное усилие, создаваемое на тяговом устройстве.

Численное решение уравнений (7) приведено на рис. 10. Здесь приняты следующие значения входящих параметров: $m_1 = m_6 = 0,2$ т; $m_2 = m_5 = 2,0$ т; $m_3 = 3,0$ т; $F_q(t) = 10$ кН; $T_q(t) = 30$ кН; $h_c = 1$ м; $c_c = 300$ кН/м; $b_c = 0,3$ кН·с/м и $V = 4$ м/с.

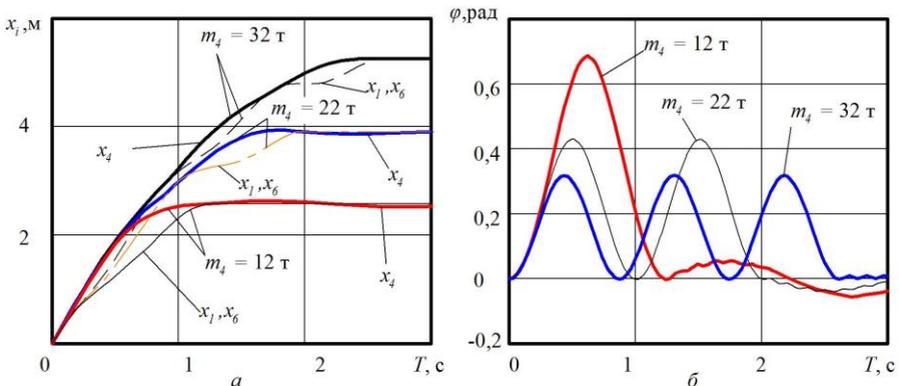


Рис. 10. Зависимости изменения координат составных частей подвесной монорельсовой дороги во время торможения: $a - x_i = f(t)$; $b - \varphi = f(t)$

Приведенные на этом рисунке графики указывают на неравномерный характер перемещения составных частей подвижного состава вдоль продольной оси монорельса во время торможения. Если массы m_1, m_2, m_3, m_5, m_6 , относящиеся к тележкам, имеют одинаковые соответствующие мгновенные

значения x_1, x_2, x_3, x_5, x_6 , то мгновенные значения x_4 подвешенной массы m_4 отличаются от них. После остановки состава масса m_4 может совершать затухающие колебания, раскачиваясь вокруг точек подвеса относительно вертикали на угол φ от 0,05 до 0,65 рад.

Как видно из рис. 10,б, с увеличением массы m_4 амплитуда этих колебаний снижается. Так при $m_4 = 22$ т наибольший угол φ составляет 0,42 рад, а при $m_4 = 12$ т – не более 0,32 рад.

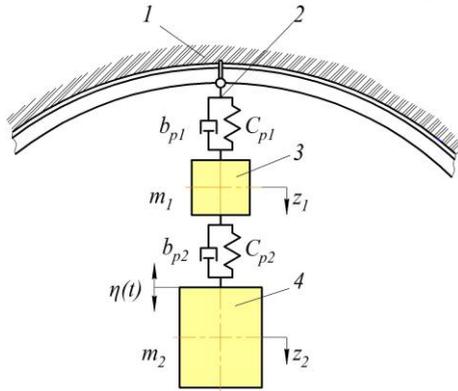
В шестом разделе выполнен синтез ПМД, обеспечивающий минимизацию динамических нагрузок на крепь горных выработок. Для этого произведен выбор критериев, выполнен анализ возможных ограничений, обусловленных действием динамических процессов, установлены оптимальные значения параметров подвески монорельсового пути.

Синтез подвески монорельсового пути сводился к установлению оптимальной передаточной функции, обеспечивающей наилучшее качество относительно квадратичного критерия. Для силовых возмущений в виде «белого шума» установлена оптимальная передаточная функция

$$W(p) = \frac{\sqrt{2}\omega_q p + \omega_q^2}{p^2 + \sqrt{2}\omega_q p + \omega_q^2},$$

где ω_q – частота, соответствующая множителям Лагранжа.

Полученная оптимальная передаточная функция относится к линейной механической системе, имеющей упругую подвеску с параллельно расположенным демпфером.



С учетом этого составлена расчетная схема ПМД, показанная на рис. 12. На этой схеме обозначено: m_1, m_2 – соответственно массы монорельса и подвижной единицы состава, приходящиеся на одну подвеску монорельсового пути; z_1, z_2 – координаты центров тяжести монорельса и подвижной единицы состава, соответственно; $\eta(t)$ – возмущения от монорельсового пути, действующие на ходовую тележку ПС; C_{p1}, b_{p1} – коэффициенты жесткости и вязкого трения в подвеске монорельсового пути, соот-

Рис. 12. Расчетная схема динамического воздействия на подвес монорельсового пути: 1 – кровля; 2 – подвес; 3 – монорельс; 4 – подвижной состав

ответственно; C_{p2}, b_{p2} – аналогично коэффициенты жесткости и вязкого трения ходовой тележки.

Возмущения $\eta(t)$, действующие на рассматриваемую массу m_2 во время движения ПС по монорельсовому пути со стыками, представлены в виде одиночной неровности $\eta(t) = \eta_{0S}(1 - \cos 2\pi x / l_{oS})/2$, где η_{0S}, l_{oS} – соответственно высота и длина неровности, образуемой при движении ходовой тележки по стыку монорельсового пути.

При действии на массу m_2 возмущений $\eta(t)$ за счет деформации подвески возникают колебания, передающиеся на ПС, а также крепь горной выработки:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + b_{p1} \dot{z}_1 + b_{p2} (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + C_{p1} z_1 + C_{p2} (z_1 - z_2) = 0; \\ m_2 \ddot{z}_2 + b_{p2} (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + C_{p2} (z_2 - z_1) = b_{p2} \dot{\eta}(t) + C_{p2} \eta(t) \end{cases} \quad (8)$$

Графические зависимости изменения координат z_1 и z_2 во времени, полученные на основании решения уравнений (8), представлены на рис. 13,а. При этом принимали следующие значения входящих параметров: $m_1 = 0,2$ т; $m_2 = 4$ т; $\eta_{0S} = 0,005$ м, $l_{oS} = 0,3$ м и $V_n = 3$ м/с. Возникающие в результате изменения z_1 и z_2 усилия в подвесе монорельсового пути F_{kr1} и в подвесе ходовой тележки – F_{kr2} приведены на рис. 13,б.

Из этих рисунков видно, что для разных значений параметров подвеса колебания происходят с различными амплитудами, частотами и темпами затухания. Причем, если $C_{p1} = C_{p2} = 7000$ кН/м и $b_{p1} = b_{p2} = 15$ кН·с/м, то по абсолютной величине z_1 достигает до 6,1 мм, а z_2 – до 12,0 мм, наибольшее усилие в подвесе $F_{kr1} = 80,2$ кН, а между ходовой тележкой и монорельсом – $F_{kr2} = 77,3$ кН. При $C_{p1} = 2600$ кН/м; и $b_{p1} = 50$ кН·с/м имеем $z_1 = 11$ мм, $z_2 = 15$ мм, $F_{kr1} = 59,6$ кН и $F_{kr2} = 57,0$ кН. Отсюда следует, что изменяя значения C_{p1}, C_{p2} и b_{p1}, b_{p2} возможно снижать воздействующие на подвес монорельсового пути динамические нагрузки.

Математическая модель оптимизации параметров подвеса монорельсового пути представлена в виде:

$$\begin{cases} \bar{X}_{onm} \{C_{p1}, C_{p2}, b_{p1}, b_{p2}\} \\ \bar{C} \{m_1, m_2, V_n, \eta_{0S}, l_{oS}\} \\ \Phi_p = F(X, C) \rightarrow \min \\ \Phi_\delta \leq f_{dop} \end{cases} ,$$

где \bar{X}_{opt} – вектор параметров подвеса монорельсового пути, соответствующий оптимальному значению целевой функции $\Phi_p = F(X, C)$; \bar{X} – вектор параметров подвеса; \bar{C} – вектор констант, не зависящих от параметров подвеса; Φ_δ – целевая функция, относящаяся к вертикальным перемещениям, возникающим в подвеске; f_{dop} – допустимая деформация подвеса монорельса под воздействием статических и динамических сил, которые возникают во время движения ПС.

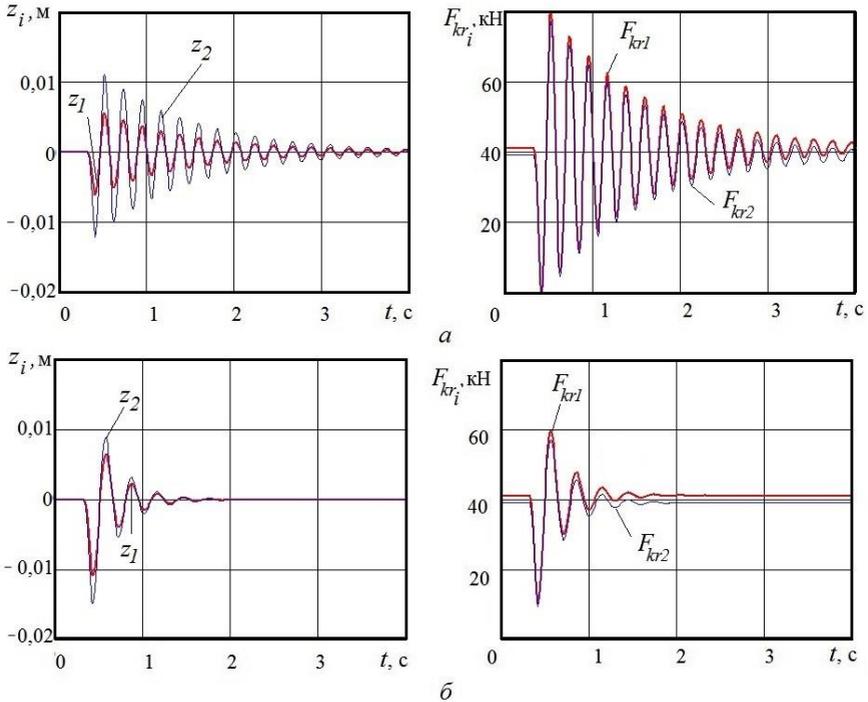


Рис. 13. Графические зависимости изменения координат z_1 , z_2 и усилий F_{kr1} , F_{kr2} во времени при: а – $C_{p1} = C_{p2} = 7000$ кН/м, $b_{p1} = b_{p2} = 15$ кН·с/м; б – $C_{p1} = 2600$ кН/м, $C_{p2} = 7000$ кН/м, $b_{p1} = 50$ кН·с/м, $b_{p2} = 15$ кН·с/м

В качестве критериев (функций цели) оптимальности принимались динамические нагрузки в подвеске монорельсового пути, а также вертикальные перемещения, которые возникают во время движения ПС. Для подвесных

монорельсовых дорог деформация пути не должна превышать $L_m / 200$, что для секции монорельса длиной $L_m = 3$ м составляет 15 мм. Поэтому указанное значение принято для $f_{доп}$.

В результате найдены следующие значения оптимизируемых параметров: $C_{p1} = 5060$ кН/м; $C_{p2} = 4070$ кН/м; $b_{p1} = b_{p2} = 50$ кН·с/м. Для этого сочетания параметров наибольшая нагрузка на подвес достигает $F_{кр1} = 54,2$ кН. Таким образом, применение подвеса с демпфирующим устройством с оптимальными параметрами позволяет снизить динамические нагрузки более чем в 1,5 раза.

В седьмом разделе предложены способы и средства для уменьшения колебаний подвижного состава и подвесного монорельсового пути, что дает возможность снизить динамические нагрузки на подвеску монорельса и крепь горной выработки.

Проведенные исследования позволили разработать:

- монорельсовый путь (пат. UA72688U), который в местах соединений имеет упругие элементы, позволяющие за счет своих деформаций под нагрузкой смещаться стыкуемым отрезкам относительно друг друга. Указанные смещения снижают превышения в стыках, что уменьшает силу удара на ходовую тележку и подвеску пути;

- монорельсовый путь (пат. UA79713U), каждый стык которого оснащается упругим отбойником, закрепленным под нижней полкой стыкуемого отрезка монорельса. Упругий отбойник воспринимает нагрузку и уменьшает превышения в стыках и за счет этого позволяет снизить силу удара.

- устройство для соединения секций монорельсового пути (пат. UA94675U), которое дает возможность уменьшить углы перекоса между стыкуемыми отрезками монорельса в 2 раза, как в вертикальной, так и горизонтальной плоскостях, что улучшает геометрию пути, ограничивая кинематические воздействия на подвижной состав.

- способ амортизации стыков рельса и устройство для его реализации (пат. UA109446C2), позволяющее изменять жесткость в местах соединений и поглощать удары;

- способ подвешивания монорельса в горной выработке (пат. UA110136C2) и подвес монорельсового пути (пат. RU2611660C1), которые обеспечивают снижение динамических нагрузок, возникающих во время движения подвижного состава по подвесному монорельсу, что приводит к повышению устойчивости кровли горной выработки.

Указанные способы использованы в конструкциях подвесов монорельсового пути КМ-17 и КП-17.

Для подвижного состава разработаны тележки с подпружиненными боковыми роликами, позволяющие ограничивать боковые отклонения вагонеток, которые возникают во время движения по криволинейным трассам.

Кроме того, для ограничения динамических нагрузок на крепь горной выработки предложено устройство для контроля усилий на монорельс, которое имеет рудничное взрывозащищенное исполнение, что дает возможность использовать его в опасных по пыли и газу шахтах. Указанный контроль осуществляется путем измерения усилия, возникающего во время движения подвижного состава по монорельсовому пути, и в случае перегруза – немедленной подачи светового и звукового сигнала.

Схемы разработанных устройств и место их расположения, показаны на рис. 14.

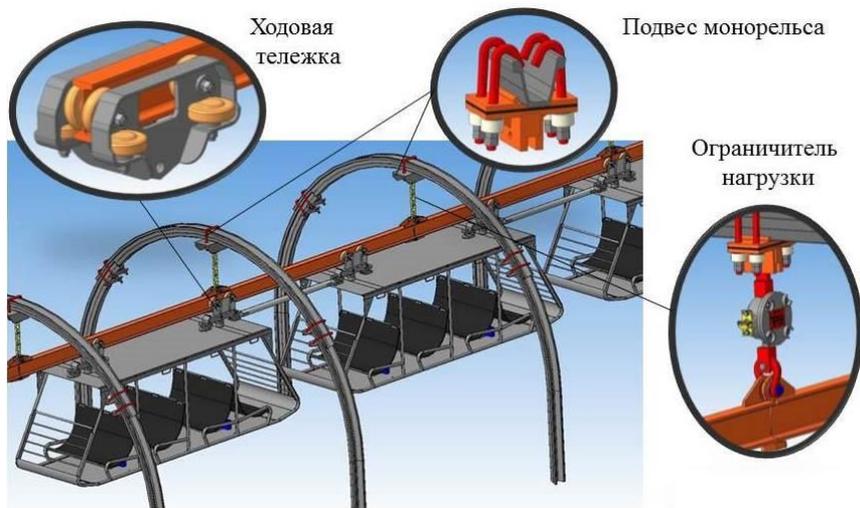


Рис. 14. Схема подвесной монорельсовой дороги нового технического уровня

Применение предлагаемых устройств позволит повысить технический уровень существующих и вновь проектируемых шахтных подвесных монорельсовых дорог.

В восьмом разделе приведены результаты экспериментальных исследований подвесной монорельсовой дороги в условиях шахты «Горняк» ПО «Селидовуголь» и представлены результаты испытаний подвеса КП-17 на шахте «Свято-Покровская №3».

Исследования подвесной монорельсовой дороги проводились на откаточном квершлага $l_8^1 - m_2$ горизонта 1550 м и ходке №1 пласта m_2 . Квершлаг имел длину 280 м с одним поворотом в плане на угол 70° радиусом 8 м. Длина ходка составляла 820 м, а средний угол наклона – 14° . Крепление выработок было выполнено арочной крепью АП-3 шагом 0,8 м. Для квершлага сечение в свету не превышало $12,6 \text{ м}^2$, а ходка – $10,6 \text{ м}^2$.

В этих выработках подвешивался монорельсовый путь 6ДМКУ длиной секций по 3 м на прямолинейных участках и по 1 м – на закруглениях. При этом стыки секций выполнялись с превышением поверхностей качения высотой до 2 мм и углом перекоса между продольными осями соседних секций не более 2° . Радиусы закруглений монорельсового пути в вертикальной плоскости составляли не менее 10 м, а в горизонтальной – 4,5 м.



Рис. 15. Общий вид шахтной подвесной монорельсовой дороги с локомотивом на откаточном квершлагге $l_8^1 - m_2$ горизонта 1550 м и ходке №1 пласта m_2 шахты «Горняк»

Методикой проведения экспериментальных исследований предусматривалось измерение и регистрация силовых и кинематических параметров движения подвижного состава ПМД. Для этого использовался комплекс измерительной аппаратуры, в состав которого входили тензодинамометры, датчики скорости, отметчик пройденного пути, усилитель 8АНЧ-7М и светолучевой осциллограф Н-115 с отметчиком времени. Дополнительно для измерения скорости, ускорения, амплитуды и частоты колебаний узлов подвесного монорельсового пути и узлов подвесной вагонетки использовался портативный виброметр ВМ-8, который имел пьезоэлектрический датчик и преобразователь, позволяющий представлять измеряемый параметр в виде цифр или графиков.

Во время испытаний измерялись вертикальные и боковые смещения монорельсового пути, вызванные действием динамических нагрузок. При этом производилась оценка интенсивности затухания колебаний. Зависимости из-

менения амплитуд вертикальных смещений подвесного монорельсового пути во времени после действия ударов на стыках приведены на рис. 16. Обработка результатов производилась с использованием пакета прикладных программ для статистического анализа данных.

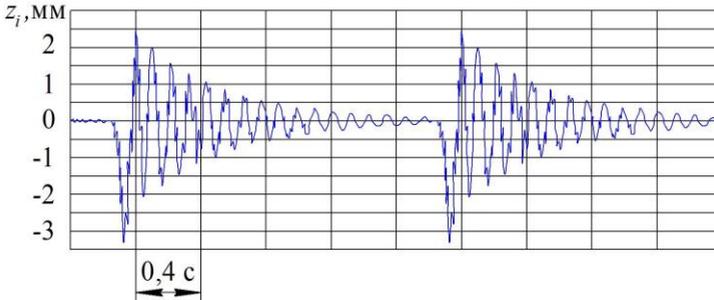


Рис. 16. Вертикальные смещения монорельсового пути
(при $V_n = 1,5$ м/с; $m_2 = 3,0$ т)

Установлено, что максимальное расхождение результатов вычислений динамических нагрузок и натурных экспериментальных данных не превышает 9%. При этом частоты колебаний отличаются не более, чем на 12%.

Испытания подвеса КП-17 на шахте «Свято-Покровская №3» подтвердили его работоспособность и эффективность применения в составе подвесной монорельсовой дороги. Годовой экономический эффект от применения подвеса КП-17 составляет 325,4 тыс.р. на 1 км дороги.

ВЫВОДЫ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой на основании проведенных автором исследований, получено новое решение **актуальной научной проблемы**, имеющей важное хозяйственное значение, заключающейся в развитии научных основ создания шахтных подвесных монорельсовых дорог с оптимальными динамическими параметрами и установлении закономерностей формирования динамических нагрузок на крепь горной выработки в зависимости от свойств подвески монорельса и подвижного состава, что позволяет снизить динамическое воздействие от нагрузок на элементы дороги и крепь горных выработок в 1,5 раза, а также расширяет область применения, повышает технический уровень и эффективность работы монорельсового транспорта.

Основные научные результаты заключаются в следующем.

1. Впервые разработана математическая модель функционирования шахтных подвесных монорельсовых дорог как элемента логистической системы горного предприятия, позволяющая с учетом неопределенности и рисков моделировать два вида взаимодействия встречных потоков в перегрузоч-

ном пункте: первый, когда погрузочно-разгрузочные работы проводятся без промежуточного хранения, и второй – с использованием промежуточного хранения. С помощью найденных решений, возможно минимизировать стоимость и время доставки грузов, а также корректно в научном отношении устанавливать массу груза и целесообразную область применения шахтных подвесных монорельсовых дорог.

2. Выполнен анализ динамических характеристик подвесного пути шахтных монорельсовых дорог и получено математическое описание, позволяющее производить количественную оценку параметров колебаний подвижного состава и подвесного монорельсового пути. Впервые разработана математическая модель, которая представлена системой дифференциальных уравнений, описывающих вертикальные и боковые колебания подвижного состава, что позволяет исследовать вертикальные и боковые колебания как совместно, так и раздельно.

3. Установлены закономерности влияния кинематических и параметрических возмущений подвесного монорельсового пути на колебания элементов подвесной дороги, позволяющие обоснованно определять параметры динамических процессов, возникающих во время эксплуатации. Для математического моделирования протекающих процессов в качестве кинематических возмущений необходимо учитывать неровности поверхностей качения монорельса, взаимное смещение его соединяемых отрезков и в качестве параметрических возмущений – изменение жесткости по длине, поскольку по мере приближения к подвеске коэффициент жесткости монорельсового пути в вертикальном направлении увеличивается, а по мере удаления – снижается.

4. Усовершенствована математическая модель вертикальных колебаний шахтной подвесной монорельсовой дороги, являющихся следствием взаимодействия подвижного состава с монорельсом переменной жесткости по длине и неровностями по высоте, которая позволяет установить влияние скорости движения подвесной вагонетки, ее массы и коэффициента вязкого сопротивления подвески монорельса на значения амплитуды колебаний тележек и кузова. В результате выявлено, что за счет рационального выбора коэффициентов жесткости подвески монорельса и подвижного состава, а также их масс, возможно снизить амплитуды вертикальных колебаний тележек и монорельса в 1,7 раза.

5. Впервые определены закономерности извилистого движения ходовых тележек подвижного состава, учитывающие сложную волнообразную траекторию движения по монорельсу, что позволило определить возникающие силы и моменты сил инерции, влияющие на боковое раскачивание подвижного состава.

6. Получила дальнейшее развитие модель бокового раскачивания подвесной монорельсовой дороги, которая позволяет исследовать взаимосвязь между параметрами подвески монорельса и подвижного состава. Предложены устройства для снижения амплитуды бокового раскачивания шахтной

подвесной монорельсовой дороги. Для снижения амплитуд боковых колебаний кузова относительно вертикали следует устанавливать тележку с боковыми роликами, имеющими коэффициент жесткости пружин 200 кН/м, что позволяет уменьшать возникающие во время движения по подвесному монорельсовому пути амплитуды боковых колебаний более, чем в 4 раза.

7. Получены аналитические выражения для установления продольных колебаний подвижного состава во время движения по монорельсу как системы твердых тел, связанных между собой упругими связями. При жесткости сцепок более 8000 кН/м расчетная схема продольных колебаний может быть представлена в виде системы, где массы тележек заменены одной приведенной массой, совершающей движение вдоль монорельса, и приведенными массами подвешенной части подвижного состава, раскачивающихся вокруг точек подвеса относительно вертикали. В результате вычислений получено, что продольные динамические силы более, чем в 1,6 раза могут превышать значения прикладываемых тормозных усилий. Возникающие во время торможения перевозимого груза отклонения относительно вертикали периодически изменяются в пределах от 0,05 до 0,67 рад. Для уменьшения продольных колебаний составных частей подвесной монорельсовой дороги во время торможения достаточно увеличивать значение коэффициента вязкого сопротивления только сцепок тормозных тележек, что позволяет существенно не усложнять конструкцию подвижного состава.

8. Выполнен синтез подвески монорельсового пути с оптимальными динамическими характеристиками и установлена оптимальная передаточная функция, учитывающая одновременное действие гармонических возмущений и относительных перемещений, вызванных динамическими ударами, возникающими во время движения подвижного состава по подвесному монорельсу со стыками. Полученная оптимальная передаточная функция относится к линейной механической системе, имеющей упругую подвеску с параллельно расположенным демпфером. Установлено оптимальное сочетание параметров: коэффициенты жесткости подвески для монорельсового пути 5060 кН/м и ходовой тележки 4070 кН/м; их коэффициенты вязкого сопротивления – 50 кН·с/м. Реализация указанных значений в подвесе позволяет снизить динамические нагрузки на крепь горной выработки до 1,5 раз.

9. Проведены экспериментальные исследования опытного образца монорельсового локомотива в условиях шахты «Горняк» ПО «Селидовуголь», подтверждающие достоверность теоретических выводов. Расхождение результатов вычислений динамических нагрузок и натуральных экспериментальных данных не превышает 9%. При этом частоты колебаний отличаются не более, чем на 12%.

10. Предложены научно-обоснованные технические решения для подвешивания и соединения отрезков монорельса в горных выработках, которые позволяют снизить динамические нагрузки, возникающие во время движения подвесной монорельсовой дороги. Новизна технических решений подтвер-

ждена патентами на изобретения. Годовой экономический эффект от применения разработанных устройств составляет 325,4 тыс.р. на 1 км дороги.

11. Полученные в диссертации результаты, разработанные методики и устройства приняты к использованию в МакНИИ и внедрены на предприятиях: ГП «Донецкий энергозавод», ГП «Донецкгормаш», ГП «Шахтерскантрацит», ООО «Завод «Амплитуда», ООО «Шахта «Свято-Покровская №3» и АО «EVAS B&P». Предложенные устройства позволяют повысить технический уровень шахтной подвесной монорельсовой дороги. Внедрение результатов работы подтверждает практическую ценность работы и имеет социальный эффект за счет повышения безопасности работы монорельсового транспорта.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Шахтные испытания монорельсовой дороги с бесконтактным электропитанием на промышленной частоте / М.В. Чашко, Н.Н. Следь, В.О. Гутаревич [и др.] // Шахтный и карьерный транспорт / под ред. А.О. Спиваковского. – Москва, 1986. – Вып. 10. – С. 168-171.

2. Гутаревич, В.О. Исследование закономерностей движения шахтной подвесной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич // Способы и средства безопасной эксплуатации электромеханического оборудования в шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка, 2011. – Вып. 2(28). – С. 150-158.

3. Гутаревич, В.О. Динамическая модель движения шахтной подвесной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2012. – № 4(175). – С. 107-111.

4. Гутаревич, В.О. Математическая модель подвешенного пути шахтной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич // Наукові праці ДонНТУ. – 2012. – № 2(24). – С. 61-69. – (Серія «Гірничо-електромеханічна»), (включен в РИНЦ).

5. Гутаревич, В.О. Исследование процесса взаимодействия экипажа с подвесным монорельсом / В.О. Гутаревич // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2012. – №6 (177), Ч.1. – С. 366-370.

6. Гутаревич, В.О. Исследование процесса взаимодействия ходового колеса с подвесным монорельсом / В.О. Гутаревич // Способы и средства безопасной эксплуатации электромеханического оборудования в шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка, 2012. – Вып.2(30). – С. 82-87.

7. Гутаревич, В.О. Вертикальные колебания подвижного состава шахтной подвесной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич // Наукові праці ДонНТУ. – 2013. – № 2(26). – С. 97-107. – (Серія «Гірничо-електромеханічна»), (включен в РИНЦ).

8. Гутаревич, В.О. Поперечные колебания подвешенного монорельса при действии на него продольных сил / В.О. Гутаревич // Підійомно-транспортна техніка. – 2013. – № 3(39). – С. 74-82.

9. Гутаревич, В.О. Исследование продольных колебаний подвешенного монорельсового пути / В.О. Гутаревич // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2013. – № 5(194), Ч. 1. – С. 100-105.

10. Гутаревич, В.О. Исследование упругих колебаний экипажа и подвешенного пути шахтной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич // Наукові праці ДонНТУ. – 2013. – №1(25). – С. 72-78. – (Серія «Гірничо-електромеханічна»), (включен в РИНЦ).

11. Гутаревич В.О. Исследования поперечных колебаний монорельсового пути шахтной подвешенной дороги / В.О. Гутаревич // Вісник Донбаської державної машинобуд. акад.: зб. наук. пр. – 2013. – № 1(30). – С. 42-47.

12. Гутаревич, В.О. Дослідження руху підвісного екіпажу при проходженні стиків монорейки / В.О. Гутаревич, А.С. Тімонін // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2013. – № 2(33). – С. 187-191.

13. Гутаревич, В.О. Исследование извилистого движения тележек подвешенной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2013. – № 9(198), Ч. 1. – С. 45-48.

14. Гутаревич, В.О. Исследование движения экипажа подвешенной монорельсовой дороги с учетом деформации монорельса / В.О. Гутаревич // Підійомно-транспортна техніка. – 2013. – № 4(40). – С. 45-53.

15. Гутаревич, В.О. Боковые колебания подвижного состава шахтной подвешенной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – Москва, 2014. – № 6. – С. 264-270, (включен в РИНЦ).

16. Гутаревич, В.О. Критерии оптимального синтеза шахтной подвешенной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич // Наукові праці ДонНТУ. – 2014. – № 1(27). – С. 90-99. – (Серія «Гірничо-електромеханічна»), (включен в РИНЦ).

17. Гутаревич, В.О. Математические модели процесса перевозки шахтными подвесными монорельсовыми дорогами / В.О. Гутаревич // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2014. – № 4(211), Ч. 1. – С. 158-164.

18. Гутаревич, В.О. Продольные колебания шахтной монорельсовой дороги при торможении / В.О. Гутаревич // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2014. – № 4(50). – С. 96-101, (включен в РИНЦ).

19. Гутаревич, В.О. Продольная динамика шахтной подвешенной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич // Науковий вісник НГУ. – 2015. – № 1. – С. 83-88, (включен в SCOPUS).

20. Гутаревич, В.О. Динамическая нагруженность монорельсовых тележек и подвешенного пути / В.О. Гутаревич // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2015. – № 4. – С. 85-88, (включен в РИНЦ).

21. Гутаревич, В.О. Обоснование оптимального режима пуска и торможения шахтной подвесной монорельсовой дороги / В.О. Гутаревич, Е.Л. Игнаткина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – Москва, 2016. – № 9. – С. 29-36, (включен в РИНЦ).

22. Gutarevych, V. A Mathematical Model Study of Suspended Monorail / V. Gutarevych // Transport Problems. – 2012. – Vol. 7, Iss. 3. – P. 61-66, (включен в SCOPUS, РИНЦ).

23. Gutarevych, V.O. Mathematical modeling of end carriage motion on the overhead monorail / V.O. Gutarevych // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – No. 5. – P. 52-56, (включен в SCOPUS).

24. Gutarevych, V. Dynamic model of movement of mine suspended monorail / V. Gutarevych // Transport Problems. – 2014. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 13-18, (включен в SCOPUS, РИНЦ).

25. Gutarevych, V. Research of regularities of suspended mine monorail motion / V. Gutarevych // Mechanical Testing and Diagnosis. – 2014. Vol. 1(IV). – P. 12-17.

26. Gutarevych, V. Research on the Influence of Dynamic Load on Suspended Monorail / V. Gutarevych [et al.] // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 806. – P. 23-29, (включен в РИНЦ).

Научные работы в виде монографии

27. Гутаревич, В.О. Динамика шахтных подвесных монорельсовых дорог: монография / В.О. Гутаревич. – Донецк: ЛАНДОН-XXI, 2014. – 205 с.

Научные работы и тезисы докладов в материалах конференций

28. Гутаревич, В.О. Математичні моделі просування вантажопотоків декількома видами транспорту / В.О. Гутаревич // Проблемы развития транспортной логистики: Тезисы докладов III междунар. науч.-практ. конф. Интер-ТРАНСЛОГ-2011, Одесса – Несебыр, 25-30 сент. 2011 г. – Одесса: ОНМУ, 2011. – С. 182-184.

29. Гутаревич, В.О. Исследование продольных колебаний подвесного монорельсового пути / В.О. Гутаревич // Проблеми розвитку транспортних систем і логістики: матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. – Луганськ, 2013. – С. 4-6.

30. Гутаревич, В.О. Логистические подходы к формированию процесса перевозки вспомогательных грузов шахтными подвесными монорельсовыми дорогами / В.О. Гутаревич // Проблеми розвитку транспортних систем і логістики : матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2014. – С. 50-52.

31. Гутаревич, В.О. Проблемы и перспективы совершенствования шахтных подвесных монорельсовых дорог / В.О. Гутаревич // Форум гірників-2014: матеріали міжнар. конф., 01-04 жовт. 2014 р., м. Дніпропетровськ. – Дніпропетровськ: «ЛізуновПрес», 2014. – Т.3. – С. 137-145.

32. Гутаревич, В.О. Снижение динамических нагрузок на подвеску шахтных подвесных монорельсовых дорог / В.О. Гутаревич, В.П. Кондрахин // Инновационные перспективы Донбасса [Электронный ресурс]: материалы международной научно-практической конференции, г. Донецк, 20-22 мая 2015 г. Т.3: Инновационные технологии изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов / М-во образования и науки ДНР и др.; редкол.: Л.П. Полякова и др. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2015. – С.64-71. – Режим доступа: http://ea.donntu.org:8080/jspui/bitstream/123456789/28912/1/s3_14_gutarevych.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

33. Gutarevych, V. Research of process of running wheel with suspended monorail / V. Gutarevych // V International Scientific Conference “Transport Problems”, (Katowice, 26-28 June 2013). – Katowice, 2013. – P. 163-168.

34. Gutarevych, V. Influence of the moving load on suspended monorail oscillations / V. Gutarevych, N. Vodolaskaya // 14th International Conference “Research and Development in Mechanical Industry”, RaDMI-2014, 18-21 September 2014. – Topola, 2014. – P. 228-234.

Патенты на изобретения

35. Пат. UA72688U Україна, МПК В61В03/00, Е21F13/02. Шахтна монорейкова дорога / Гутаревич В.О.; заявник і власник Донец. нац. техн. ун-т. – № u201201785; заявл. 17.02.2012; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 16.

35. Пат. UA79713U Україна, МПК E01B 25/00, B61B03/00. Рейкова нитка з профільних ходових рейок / Гутаревич В.О.; заявник і власник Донец. нац. техн. ун-т. – № u201213471; заявл. 26.11.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.

37. Пат. UA94675U Україна, МПК В61В3/00, E01B 25/00. Шарнірне з'єднання / В.О. Гутаревич, С.М. Зеленчук; заявник і власник Донец. нац. техн. ун-т. – № u201406164; заявл. 04.06.2014; опубл. 25.11.2014, Бюл. № 22.

38. Пат. UA109446C2 Україна, МПК E01B 25/24, B61B13/04, B61B3/00. Спосіб амортизації стиків рейок та пристрій для його реалізації / Гутаревич В.О.; заявник і власник Донец. нац. техн. ун-т. – № a201302196; заявл. 21.02.2013; опубл. 25.08.2015, Бюл. № 16.

39. Пат. UA110136C2 Україна, МПК E21F13/08, B61B13/04, E01B25/24. Спосіб підвищування монорейки в гірничий виробці / Гутаревич В.О.; заявник і власник патенту Донец. нац. техн. ун-т. – № a201400760; заявл. 27.01.2014; опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22.

40. Пат. RU2611660C1 Российская Федерация, МПК В 61 В 13/04, Е 21 F 13/02, В 61 В 3/00, Е 01 В 25/24. Шахтная монорельсовая дорога / Гутаревич В.О.; заявитель и патентообладатель Гутаревич В.О. – № 2015145934; заявл. 26.10.2015; опубл. 28.02.2017, Бюл. № 7.

Учебники и учебные пособия с грифом МОНУ

41. Транспортно-технологічна логістика енергоємних виробництв / В.О. Будішевський, В.О. Гутаревич, В.О. Кислун та ін.; ред. В.О. Будішевський, А.О. Суліма. – Донецьк: РВА ДонНТУ, 2003. – 302с.

42. Проектування транспортних систем енергоємних виробництв / В.О. Будішевський, В.О. Гутаревич, О.О. Пуханов та ін.; ред. В.О. Будішевський, А.О. Суліма. – Донецьк: Друк-Інфо, 2008. – 454 с.

43. Транспортно-складська логістика гірничих підприємств / В.О. Будішевський, В.О. Гутаревич, Л.Н. Ширін та ін.; ред. В.О. Будішевський, Л.Н. Ширін. – Дніпропетровськ: Нац. гірничий ун-т, 2010. – 430с.

Личный вклад автора в работы, опубликованные с соавторами: [1] – разработка методики, проведение измерений, обработка и анализ результатов ходовых испытаний шахтной подвесной монорельсовой дороги; [12, 22, 26, 32, 34] – разработка математической модели, проведение вычислений и анализ; [37] – обоснование структурной схемы устройства и адаптация шарнирного соединения для подвешенного монорельса; [41, 43] – разделы по созданию транспортно-складских систем как элемента логистической системы горного предприятия; [42] – глава по подвесным монорельсовым дорогам.

АННОТАЦИЯ

Гутаревич В.О. Развитие научных основ создания шахтных подвесных монорельсовых дорог с оптимальными динамическими параметрами. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.06 – «Горные машины». – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет» Министерства образования и науки ДНР, Донецк, 2017.

В диссертации решена актуальная научная проблема, заключающаяся в развитии научных основ создания шахтных подвесных монорельсовых дорог с оптимальными динамическими параметрами, установлении закономерностей формирования динамических нагрузок на крепь горной выработки в зависимости от свойств подвески монорельса и подвижного состава, что позволяет снизить динамическое воздействие от нагрузок на элементы дороги и крепь горных выработок в 1,5 раза, а также расширяет область применения, повышает технический уровень и эффективность работы монорельсового транспорта.

Выполнен анализ динамических характеристик шахтных подвесных монорельсовых дорог и получено математическое описание, позволяющее производить количественную оценку амплитуд колебаний подвижного состава и подвешенного монорельсового пути. Выявлены закономерности влияния кинематических и параметрических возмущений монорельсового пути на колебания элементов подвесной дороги, позволяющие обоснованно определять параметры динамических процессов, возникающих во время ее эксплуатации. Проведен синтез подвесной монорельсовой дороги, установлены критерии и определены оптимальные параметры подвески монорельсового пути. Предложены новые научно-обоснованные технические решения для подвешива-

ния монорельсового пути в горных выработках, которые позволяют снизить динамические нагрузки, возникающие во время движения подвесной монорельсовой дороги.

Ключевые слова: монорельсовый путь, подвижной состав, подвесная дорога, скорость, инерция, перемещение, динамическая нагрузка, деформация, колебания

ABSTRACT

Gutarevych V.O. Development of Scientific Basis for Creation of Mine Suspended Monorails with Optimal Dynamic Parameters. – Manuscript.

Thesis for the Degree of the Doctor of technical sciences on the specialty 05.05.06 – "Mining Machines". – State Educational Institution of Higher Professional Education "Donetsk National Technical University" of the Ministry of Education and Science of DPR, Donetsk, 2017.

Dissertation is solved the actual scientific problem, consisting in development of scientific foundations for creation of mine suspended monorail roads with optimal dynamic parameters, is established regularities in the formation of dynamic loads on the support of the mine top, depending on properties of the monorail suspension and rolling track, which allows reducing the dynamic effect of loads on elements of track and supports of mine top more in 1.5 times. Results give opportunity to expand the field of application monorail transport, raise their technical level and efficiency of work.

Were conducted the analysis dynamic characteristics of the mine suspended monorails and obtained mathematical description, which perfect for quantitative estimation amplitudes of the oscillations rolling stock and suspended monorail track. Established the regularities of the influence kinematic and parametric disturbances monorail track to the periodic fluctuations of elements monorail allow reasonably determine the parameters of the dynamic processes that occur during its operation. Moreover were carried out the criteria, synthesis of suspended monorail under dynamic loads an equation that describes structure of system optimal suspension monorail track. Proposed new science-based solutions for hanging and connecting monorail sections in mines, which can reduce the dynamic loads that occur during movement suspended monorail.

Keywords: monorail track, rolling stock, suspended monorail, speed, inertia, motion, dynamic load, deformation, vibrations.

Подписано к печати 48.06.2017 г. Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 4,22. Печать лазерная. Заказ № 366. Тираж 320 экз.

Отпечатано в «Цифровой типографии» (ФЛП Артамонов Д.А)
г. Донецк. Тел.: (050) 886-53-63

Свидетельство о регистрации серия АА02 № 51150 от 9 февраля 2015 г.