

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.46.028

Л. В. УРСУЛЯК^{1*}, А. А. ШВЕЦ^{2*}

^{1*}Кафедра «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (095) 008 70 53, эл. почта lydm.urs@gmail.com, ORCID 0000-0001-5957-6926.

^{2*}Кафедра «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, эл. почта angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ПОЕЗДА

Цель. Используя научные публикации провести анализ математических моделей, разработанных в Украине, странах СНГ и за рубежом, используемых для теоретических исследований динамики поезда, а также показать актуальность дальнейшего их совершенствования. **Анализ публикаций.** Информационной базой исследования являлись официальные полнотекстовые и реферативные базы данных, научные труды отечественных и зарубежных ученых, профессиональные периодические издания, материалы научно-практических конференций, методические материалы министерств и ведомств. Анализ публикаций о существующих математических моделях, используемых для решения широкого круга задач, связанных с исследованием динамики поезда показывает целесообразность их применения. **Результаты.** Результаты этих исследований были использованы при проектировании новых типов поглощающих аппаратов и воздухораспределителей, при разработке способов управления движением обычных и соединенных поездов, при создании соответствующих режимных карт, при разработке энергосберегающих способов ведения поездов, при пересмотре Строительных норм и правил (СНиП II-39.76), при выборе параметров, созданной в ДИИТе автономной системе автоматического управления вспомогательным локомотивом, находящимся в составе соединенного поезда, при создании на базе компьютерных технологий тренажеров для обучения машинистов, при оценке динамических показателей экипажей, характеризующих их безопасность движения. Ученые всего мира проводят численные эксперименты, связанные с оценкой динамики поезда, с помощью математических моделей, которые необходимо постоянно совершенствовать. **Научная новизна.** Научная новизна проведенного анализа заключается в изложении основных теоретических положений, на основании которых разработаны существующие математические модели для решения задач о динамике поезда. Проведенный анализ научных статей, опубликованных в Украине, странах СНГ и за рубежом, позволяет определить наиболее актуальные области применения математических моделей. **Практическая значимость.** Практическое значение полученных результатов заключается в научной обоснованности и прикладной направленности теоретических исследований с использованием математических моделей, совершенствование которых позволит расширить круг решаемых задач, повысить уровень достоверности получаемых результатов.

Ключевые слова: длинносоставные поезда; динамика поезда; математические модели продольных колебаний поезда; моделирование межвагонных соединений; научные статьи; продольные силы в поезде; тренажеры машинистов локомотивов

Вступление

С увеличением скоростей движения, масс и длин поездов, особенно грузовых, повышением мощностей локомотивов, требуется контролировать продольные силы, возникающие при стационарных и переходных режимах движения поезда, которые влияют на безопасность движения. Следует иметь в виду, что с позиции безопасности движения, опасными могут оказываться продольные силы

квазистатического характера или силы ударного характера, содержащие такие квазистатические составляющие. Такого рода силы при определенных условиях могут вызывать выдавливание (или выдергивание) вагонов из состава поезда.

Ранее экспериментальный метод исследования переходных режимов движения поездов был основным методом, используемым для получения практически важных результатов. Нынешний уровень теоретических

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

методов исследования переходных режимов движения поездов, базирующийся на использовании современных ПЭВМ и IT-технологиях, позволяет решить многие технические задачи в области динамики поезда. Кроме того, компьютерное моделирование (численный эксперимент) имеет существенные преимущества перед натурным экспериментом.

Во-первых, не нужно проводить эксперимент на реальных физических объектах, так затраты на различные компьютерные эксперименты намного меньше, чем на натурные эксперименты. Масштабы экспериментов можно выбрать по своему усмотрению, при этом есть возможность проведения многократных опытов с постепенными изменениями входных данных задачи.

Во-вторых, в процессе построения математических моделей для проведения вычислительного эксперимента и во время ее исследования можно проанализировать и понять характеристики исследуемого объекта.

Цель

Любое научное исследование должно базироваться на знании научного наследия предшественников, в связи с чем одним из ключевых этапов любого научного исследования является анализ результатов научных исследований предшественников. Необходимость такого анализа обусловлена невозможностью допустить повторов научного результата и необходимостью дальнейшего развития науки для поиска истины [30, 33].

Целью публикации является анализ результатов научных исследований, проведенных в Украине, странах СНГ и за рубежом о развитии математических моделей для решения задач о динамике поезда, а также показать актуальность дальнейшего их совершенствования.

Анализ публикаций

Для решения этих задач Николаем Егоровичем Жуковским в 1919 году были предложены две расчетные схемы поезда.

В этом случае поезд рассматривался в виде упругого стержня с грузом на конце. Масса и

длина стержня равнялась массе и длине состава, а масса груза – массе локомотива [9]. Тогда движение поезда описывалось волновым уравнением и определение продольных усилий сводилось к решению краевой задачи. Затем поезд предполагалось рассматривать как систему твердых тел, соединенных между собой упругими связями, подчиненными закону Гука, и задача сводилась к решению системы дифференциальных уравнений при заданных начальных условиях. Используя, описанные выше схемы, представляли собой консервативные системы и позволяли определить только верхние границы продольных сил при неустановившихся режимах.

В. А. Лазарян уточнил расчетные схемы, предложенные Н. Е. Жуковским. Если зазоры в межвагонных соединениях не влияют на протекание переходных процессов (при трогании с места предварительно растянутого с головы поезда, при торможении головным локомотивом предварительно сжатого с головы поезда, въезд растянутого (сжатого) поезда на выпуклый (вогнутый) перелом профиля), то поезд можно рассматривать в виде упруго-вязким стержня с грузом (локомотивом) на конце [1, 4, 12, 15-17, 19, 36].



Рис.1. Расчетная схема поезда в виде стержня.

В этом случае продольные колебания поезда описываются дифференциальными уравнениями в частных производных второго порядка.

Используя такую модель, решение задачи можно найти аналитически.

Всеволод Арутюнович Лазарян в своей докторской диссертации предложил учитывать при колебаниях рассеивание энергии и рассматривать поезд как одномерную систему твердых тел, соединенных упруго-вязкими связями.



Рис.2 Расчетная схема поезда в виде цепочки тел, соединенных упруго-вязкими связями

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Эти расчетные схемы использовались в работах В. А. Лазаряна, Е. П. Блохина, И. Г. Барбаса, Т. А. Городецкой, А. И. Стукалова, А. А. Уланова, Ф. В. Флоринского. Поставленные В. А. Лазаряном в реальных условиях многочисленные специальные опыты с поездами, подтвердили правомочность применения, в ряде случаев, упомянутых расчетных схем и позволили найти необходимые для расчетов многие характеристики грузовых и пассажирских поездов (скорость бега волны возмущений при пуске в ход и торможениях, продольную жесткость состава, жесткость междвагонных соединений при нагрузке и разгрузке, среднестатистические значения зазоров в междвагонных соединениях).

Естественно, что при этом рассматривались переходные режимы движения, на которые зазоры в упряжи поезда не влияют (пуск в ход предварительно растянутых и торможение с головы предварительно сжатых поездов, движение растянутого поезда по перелому пути типа «горб» и сжатого по перелому типа «яма»). Во всех этих случаях практически совпадали не только графики распределения вдоль состава максимальных значений продольных усилий, полученные расчетом и по итогам экспериментов, но и осциллограммы продольных усилий в сечениях поездов при различных переходных режимах. Линейная постановка задач позволяла использовать при решении аналитические методы и созданную в лаборатории динамики и прочности подвижного состава ДИИТа электрическую модель на пассивных элементах (R , L , C).

Первые исследования продольных усилий, когда зазоры влияют на переходной процесс, проводились экспериментально.

Когда зазоры в междвагонных соединениях влияют на переходной процесс, В. А. Лазарян предложил в качестве расчетной схемы систему твердых тел, которые соединены между собой элементами с упругими несовершенствами, учитывающими зазоры [3, 18, 20–23, 28].



Рис.3. Расчетная схема поезда как нелинейной системы.

Рис. 3 отличается от рис. 2 наличием еще одного элемента, условно обозначающего зазор в междвагонном соединении и нелинейностью силовых характеристик самих поглощающих аппаратов автосцепок.

Наличие в упряжи зазоров и в общем случае нелинейности силовых характеристик поглощающих аппаратов автосцепки заставляет рассматривать поезд как цепочку твердых тел, соединенных связями с нелинейными характеристиками. В этом случае математическая модель продольных колебаний поезда представляет собой систему существенно нелинейных дифференциальных уравнений, порядок которой зависит от количества экипажей в поезде. Решение такой системы аналитическим путем получить нельзя. Поэтому на первых порах исследования в ДИИТе переходных режимов движения поездов в рассматриваемой постановке выполнялись с помощью специальной электронной модели поезда, выполненной на базе трех аналоговых вычислительных машин типа МПТ-9. Известно, что одним из достоинств АВМ является получение решений в реальном масштабе времени, что очень важно в случае применения систем автоматического управления.

С появлением ЭВМ такие исследования стали проводиться путем численных экспериментов.

В этом случае задача сводилась к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений с применением методов численного интегрирования. Методике математического моделирования переходных режимов движения поездов с помощью ЭВМ посвящены работы [2, 3, 11].

Появление цифровых вычислительных машин и использование современных вычислительных методов позволили существенно расширить круг важных для отрасли задач. При этом, получаемые в результате решения системы нелинейных дифференциальных уравнений осциллограммы продольных усилий можно сравнивать с полученными экспериментально лишь качественно, но распределение вдоль состава максимальных значений продольных сил, найденных расчетом и экспериментально,

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

согласуются достаточно неплохо. Естественно, что такое согласование может быть получено лишь при условии использования в расчете достоверных механических характеристик поезда, профиля и плана пути, а также данных о распределении зазоров в упряжи к началу переходных процессов.

Для получения таких характеристик проводились специальные опыты, с однородными, по массе вагонов и типу поглощающих аппаратов, поездами в пределах станционных путей с целью определения численных значений параметров, необходимых при решении дифференциальных уравнений движения поезда.

Одним из таких параметров является предельный зазор в междувагонных соединениях.

Для грузовых поездов, сформированных из только вышедших с завода грузовых вагонов, этот зазор составляет 45 мм. В поездах, сформированных из грузовых вагонов, находящихся в эксплуатации такой зазор равен 65 мм. В пассажирских поездах зазор в междувагонном соединении равен 45 мм. Эти величины зазоров и были использованы при решении дифференциальных уравнений движения поездов [3, 29, 48].

Подвижной состав на железных дорогах колеи 1524 и 1520 мм оборудован упругофрикционными поглощающими аппаратами, не стабильными в работе, поэтому часто межвагонные связи имеют различные характеристики. Однако при экспериментальных исследованиях переходных режимов движения поездов выявлены общие, интегральные свойства для всей системы.

Интегральные значения необходимы для аналитических исследований и моделирования переходных режимов движения поездов. Они могут определяться по характеру распространения возмущений в поезде, т. е. по скорости распространения возмущений вдоль состава, по дисперсии волн возмущений различного уровня, по затуханию колебаний и т. п. [2, 3, 48].

С использованием ЦВМ были изучены переходные режимы движения грузовых и пассажирских поездов при пуске их в ход, при торможении, при движении по пути ломаного

профиля. При этом рассматривались поезда однородные и неоднородные, в том числе поезда, содержащие вагоны с подвижными грузами, оборудованные поглощающими аппаратами автосцепки и воздухораспределителя разных типов. С использованием ЦВМ решено наибольшее количество задач, связанных с продольной динамикой поезда, и решенных в разное время [7, 29, 34, 45, 48, 56-59].

Результаты этих исследований были использованы при проектировании новых типов поглощающих аппаратов и воздухораспределителей [3, 5, 6, 10, 27, 31, 32], при разработке способов управления движением обычных и соединенных поездов [2, 38, 40] и создании соответствующих режимных карт и при разработке энергосберегающих способов ведения поездов [58, 62], при пересмотре Строительных норм и правил (СНиП II-39.76) [3, 29, 48], при выборе параметров, созданной в ДИИТе автономной системе автоматического управления вспомогательным локомотивом, находящимся в составе соединенного поезда [29], при создании на базе компьютерных технологий тренажеров для обучения машинистов [24, 26, 37, 50-52, 54, 64].

В последнее время грузовые поезда массой несколько десятков тысяч тонн с рассредоточенными вдоль состава локомотивами уже давно эксплуатируются в ряде стран Америки, Азии, Африки, Канада.

С целью увеличения провозных и пропускных способностей железных дорог, сокращения эксплуатационных затрат пересматриваются весовые нормы грузовых поездов в ряде стран. Например, наиболее распространенная на пространстве колеи 1524 и 1520 мм весовая норма величиной в среднем порядка 4000 тонн заменена в России на 6000 тонн, введены в регулярную эксплуатацию на наиболее грузонапряженных направлениях железных дорог России сдвоенные грузовые поезда массой 12 тыс. тонн с распределенными вдоль состава локомотивами [13, 25, 39, 44, 46].

При этом, чтобы обеспечить допустимый уровень продольных сил при наиболее опасном режиме вождения – торможении – необходимо согласованно управлять локомотивами.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В поездах повышенной массы и особенно длины при торможении возникают продольные нагрузки, которые могут быть опасны с позиции безопасности движения.

Многочисленные специальные опыты, проведенные в разные годы на Приднепровской ж.д., ДИИТом, ЦНИИ МПС и в ряде случаев с участием МИИТа с поездами массой 6, 8 и 10 тыс. тонн показали, что при экстренных и служебных торможениях даже однородных поездов массой до 10 тыс. тонн на вагон могут действовать с малой вероятностью (порядка тысячных долей) силы, которые превосходят допускаемые при расчете на прочность.

При регулировочных торможениях наблюдаемые в опытах наибольшие значения сжимающих сил со статистической вероятностью 0,009 превосходят на 20...60% величины продольных нагрузок (± 1 МН), допускаемых для III расчётного режима. Для растягивающих сил, возникающих при «отдаче», превышение достигало 20%, но уже с большей в несколько раз вероятностью.

Исследованию продольной динамики при торможении длинносоставных поездов с помощью математических моделей посвящены многие работы [3, 11, 28, 38, 43, 44, 47-49, 53, 60, 61, 63].

При эксплуатации поездов увеличенной длины особое внимание уделяется оценке динамических показателей экипажей, среди которых наиболее важным является показатель, характеризующий безопасность движения экипажа – коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса.

Для этого используются математические модели пространственных колебаний вагона (или группы вагонов), движущегося в составе поезда [8, 14, 26, 41-42, 55]. При этом модель экипажа разбивается на отдельные объекты и связи между ними. В качестве объектов могут быть выбраны, например, все инерционные конструктивные элементы, или часть из них, которая может быть объединена в один объект; при этом остальные могут выступать в качестве отдельных объектов.

Результаты

Информационной базой исследования являлись официальные полнотекстовые и

реферативные базы данных, научные труды отечественных и зарубежных ученых, профессиональные периодические издания, материалы научно-практических конференций, методические материалы министерств и ведомств.

Анализ публикаций о развитии математических моделей для решения задач о динамике поезда показывает многочисленность исследуемых аспектов. Ученые всего мира проводят численные эксперименты, связанные с оценкой динамики поезда с помощью математических моделей, которые необходимо постоянно совершенствовать.

Результаты исследований нашли свое научное использование в ряде публикаций авторов в специальных и научных изданиях, выступлениях на научных конференциях.

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна проведенного исследования заключается в изложении основных теоретических положений и методических рекомендаций по совершенствованию математических моделей для решения задач о динамике поезда. Проведенный анализ научных публикаций, позволяет определить наиболее актуальные исследования в области безопасности движения поездов, которые невозможны без математического моделирования.

Практическое значение полученных результатов заключается в научной обоснованности и прикладной направленности теоретических исследований с использованием математических моделей, совершенствование которых позволит расширить круг решаемых задач, повысить уровень достоверности получаемых результатов.

Выводы

На основании поведенного анализа научных публикаций о математическом моделировании динамики поезда можно сделать следующие выводы:

1. Несмотря на разнообразие и большое количество вопросов, рассмотренных и решенных в области переходных режимов движения наливных поездов, проблема

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

динамики поезда, в частности его продольных колебаний, по-прежнему, остается актуальной, особенно при наиболее опасном режиме вождения – торможении.

2. В последнее время, особенно в Европе, большое внимание уделяется моделированию движения поездов увеличенной массы и длины.

3. Математические модели должны

применяться для решения задач о влиянии перспективного подвижного состава на динамику поезда.

4. Совершенствовать существующие математические модели поезда с учетом задач, возникающих при эксплуатации подвижного состава.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барбас, И. Г. Аналитическое определение усилий, возникающих в упряжных приборах при движении через перелом профиля пути / И. Г. Барбас // Сб. науч. тр. ДИИТа. – Днепропетровск, 1962. – Вып. 42. – С. 4–12.
2. Блохин, Е. П. Выбор режимов ведения поездов как стохастическая задача векторной оптимизации / Е. П. Блохин, В. В. Скалозуб // Транспорт : сб. науч. пр. / Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2002. – Вып. 7. – С. 28–31.
3. Блохин, Е. П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. – Москва : Транспорт, 1982. – 222 с.
4. Блохин, Е. П. О влиянии неоднородности поезда на динамические усилия, возникающие в упряжных приборах при трогании с места / Е. П. Блохин // Тр. ДИИТа. – Москва, 1958. – Вып. 26. – С. 4–12.
5. Болдырев, А. П. Характеристики перспективных поглощающих аппаратов в поездных условиях эксплуатации / А. П. Болдырев, А. М. Гуров, Э. А. Фатьков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вып. 15. – С. 146–153.
6. Болдырев, А. П. Эффективность применения высокоэнергоемких поглощающих аппаратов на грузовых вагонах / А. П. Болдырев, А. М. Гуров // Трансп. Рос. Федерации. – 2014. – № 3 (52). – С. 43–44.
7. Верескун, В. Д. Многомассовая модель подвижной единицы для исследования продольной динамики грузового поезда / В. Д. Верескун, Д. Е. Притыкин // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – 2014. – № 2 (54). – С. 16–27.
8. Воронова, Ю. В. Динамика грузовых вагонов на кривых малого радиуса / Ю. В. Воронова, Н. П. Рычков // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Шестой междунар. науч.-практ. конф. (30 сент.–03 окт. 2015 г.). – Иркутск, 2015. – Т. 2. – С. 445–449.
9. Жуковский, Н. Е. Работа (усилие) русского сквозного и американского несквозного тягового прибора при трогании поезда с места и в начале его движения / Н. Е. Жуковский // Бюллетень Экспериментального института путей сообщения. – 1919. – № 13. – С. 31–57.
10. Исследование продольной нагруженности грузовых вагонов, оснащенных фрикционными поглощающими аппаратами нового исполнения, при переходных режимах движения поезда / А. С. Васильев, А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин, А. М. Гуров // Вестн. Брянск. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 1 (41). – С. 12–17.
11. Карпычев, В. А. Уменьшение продольных силовых возмущений при распределенном управлении торможением поезда (РУТП) / В. А. Карпычев, С. Г. Чуев // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2017. – № 1 (37). – С. 66–72.
12. К вопросу о математическом описании процессов, происходящих при переходных режимах движения поездов с зазорами в упряжи / В. А. Лазарян, Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Л. В. Белик // Тр. ДИИТа. – Днепропетровск, 1971. – Вып. 103 : Вопросы динамики подвижного состава и применение математических машин. – С. 18–28.
13. Компаниец, Д. И. Тяжеловесное движение как фактор оптимизации перевозочного процесса / Д. И. Компаниец // Научные исследования: теория, методика и практика : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 21 мая 2017 г.). – Чебоксары, 2017. – С. 303–305.
14. Коссов, В. С. Исследования продольной динамики и воздействия на путь соединенных поездов массой 12 600 т / В. С. Коссов, А. А. Лунин // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 9. – С. 21–26.
15. Лазарян, В. А. Исследование неустановившихся режимов движения поезда / В. А. Лазарян. – Москва : Трансжелдориздат, 1949. – 135 с.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

16. Лазарян, В. А. Исследования переходных режимов движения поездов при сплошном торможении и при переходах через переломы продольного профиля пути / В. А. Лазарян // Труды ДИИТа. – Днепропетровск, 1953. – Вып. 23. – С. 5–23.
17. Лазарян, В. А. Исследования усилий, возникающих при переходных режимах движения в стержнях с различными упругими несовершенствами / В. А. Лазарян // Труды ДИИТа. – Днепропетровск, 1956. – Вып. 25. – С. 5–50.
18. Лазарян, В. А. К вопросу о выборе расчётной схемы при исследовании переходных режимов движения поездов / В. А. Лазарян // Техника железных дорог. – 1952. – № 6. – С. 17–19.
19. Лазарян, В. А. О динамических усилиях в упругих приборах поезда при немономтонном изменении силы тяги / В. А. Лазарян // Труды ДИИТа. – Днепропетровск, 1948. – Вып. 19. – С. 63–82.
20. Лазарян, В. А. О математическом моделировании движения поезда по переломам продольного профиля пути / В. А. Лазарян, Е. П. Блохин // Труды МИИТа. – Москва, 1974. – Вып. 444. – С. 83–123.
21. Лазарян, В. А. О переходных режимах движения поезда / В. А. Лазарян // Труды ДИИТа. – Днепропетровск, 1973. – Вып. 152. – С. 3–43.
22. Лазарян, В. А. Об усилиях в грузовых поездах при торможении локомотива прямым тормозом / В. А. Лазарян, Е. П. Блохин, И. Г. Барбас // Труды МИИТа. – Москва, 1974. – Вып. 444. – С. 67–73.
23. Лазарян, В. А. Электрическое моделирование движения однородных поездов через переломы продольного профиля пути / В. А. Лазарян, И. Г. Барбас, Л. А. Манашкин // Труды ДИИТа. – Днепропетровск, 1964. – Вып. 50. – С. 5–20.
24. Модульный тренажер машиниста / А. С. Акулов, К. И. Железнов, О. М. Заболотный [та ін.] // Локомотив-інформ. – 2017. – № 7/8. – С. 42–49.
25. Обеспечение экологической безопасности железнодорожной инфраструктуры при эксплуатации тяжеловесных поездов / Р. М. Куртиков, А. А. Сидраков, Е. А. Кузнецова, Е. А. Иванникова // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Москва, 2016. – С. 191–194.
26. Определение допустимых сил при оценке устойчивости грузовых вагонов от выжимания в поездах / А. А. Швеца, К. И. Железнов, А. С. Акулов, А. Н. Заболотный, Е. В. Чабанюк // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 189–192. doi: 10.15802/stp2016/61045.
27. Оценка эффективности работы фрикционных металлокерамических элементов поглощающих аппаратов при различных условиях эксплуатации / А. П. Болдырев, П. Д. Жиров, А. С. Васильев, С. В. Боровикова // Вестн. Брянск. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 2 (38). – С. 22–31.
28. Пудовиков, О. Е. Моделирование режима регулировочного торможения длинносоставного поезда / О. Е. Пудовиков, С. А. Муров // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13, № 2 (57). – С. 28–33.
29. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер, Л. Г. Маслеева, В. М. Михайличенко, Н. И. Грановская. – Москва : Транспорт, 1986. – 263 с.
30. Секерова, Ш. А. Анализ научно-исследовательских работ по продольной динамике грузового поезда / Ш. А. Секерова, Е. Г. Адильханов, Ж. С. Мусаев // Вестн. Казах. акад. трансп. и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2010. – № 6 (67). – С. 32–36.
31. Селенская, Т. В. Качество функционирования и функциональная надежность автосцепных амортизаторов, работающих в случайно сформированном грузовом поезде / Т. В. Селенская, Е. И. Селенский // Вестн. Брянск. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 2 (42). – С. 57–63.
32. Ступин, Д. А. Исследование влияния энергоемкости поглощающих аппаратов на продольные усилия в наливном поезде / Д. А. Ступин, В. И. Беляев // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – № 3. – С. 154–160.
33. Теоретические аспекты оценки безопасности систем железнодорожного транспорта / О. В. Дружинина, В. П. Сычев, Ю. М. Черкашин, В. В. Качалкин // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2014. – Т. 7, № 7. – С. 168–181.
34. Фатьков, Э. А. Программный комплекс для моделирования и расчета задач продольной динамики поезда / Э. А. Фатьков // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2009. – № 10. – С. 130–133.
35. Феоктистов, В. П. Учет ограничений по продольной динамике при регулировании пускового режима электропоездов / В. П. Феоктистов, А. В. Невинский, Д. В. Назаров // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13, № 3 (58). – С. 94–100.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

36. Экспериментальные исследования продольных усилий в грузовых поездах массой до 10 тыс. тонн при переходных режимах движения / Е. П. Блохин, О. Г. Бойчевский, П. Т. Гребенюк, И. Б. Феоктистов // Труды ЦНИИ МПС. – Москва, 1970. – Вып. 425. – С. 55–85.
37. Языков, В. Н. Численное моделирование динамики поезда в режиме реального времени / В. Н. Языков // Вестн. Брянск. гос. техн. ун-та. – 2015. – № 2 (46). – С. 123.
38. Assessment of the curving performance of heavy haul trains under braking conditions / L. Yang, Y. Kang, Sh. Luo [et al.] // Journal of Modern Transportation. – 2015. – Vol. 23, No. 3. – P. 169–175. doi:10.1007/s4053.
39. Castagnetti, F. The MARATHON 1500 m train opening up new horizons in rail freight transport in Europe / Franco Castagnetti, Armand Toubol. – Brussels : Drifosett, 2014. – 220 с.
40. Dos Santos, G. F. M. Safety analysis of a railway car under the periodic excitation from the track / G. F. M. dos Santos, R. S. Barbosa // Cogent Engineering. – 2016. – Vol. 3, No. 1. – P. 1–12. doi:10.1080/23311916.2016.1263027.
41. Experimental and numerical determination of the wheel-rail angle of attack / D. Milkovic, G. Simic, J. Tanaskovic [et al.] // Facta universitatis-series mechanical engineering. – 2015. – Vol. 13, No. 2. – P. 123–131.
42. Ivanov, V. Systematization of Integrated Motion Control of Ground Vehicles / Valentin Ivanov, Dzmityr Savitski // IEEE ACCESS. – 2015. – Vol. 3. – P. 2080–2099. doi:10.1109/ACCESS.2015.2496108.
43. Lee, D. C. A mechanical brake hardware-in-the-loop simulation of a railway vehicle that accounts for hysteresis and pneumatic cylinder dynamics / Dong-Chan Lee, Chul-Goo Kang // Advances in mechanical engineering. – 2016. – Vol. 7, No. 11. – P. 1–11. doi: 10.1177/1687814015616086.
44. Longer trains Facts & Experiences in Europe : Results of the CER working group on longer and heavier trains, May 2016. – Brussels : CER aisbl, 2016. – 81 с.
45. Mathematical Modeling of Dynamic Loading of Cassette Bearings for Freight Cars / S. Myamlin, O. Lunys, L. Neduzha, O. Kyryl'chuk // Transport Means : Proc. of 21st Intern. Scientific Conf. – Kaunas, 2017. – P. 973–976.
46. Multi-Train Energy Saving for Maximum Usage of Regenerative Energy by Dwell Time Optimization in Urban Rail Transit Using Genetic Algorithm / F. Lin, Sh. Liu, Zh. Yang [et al.] // ENERGIES. – 2016. – Vol. 9, No. 208. – P. 1–21. doi: 10.3390/en9030208.
47. Naeimi, M. Dynamics of the monorail train subjected to the braking on a straight guideway bridge / Meysam Naeimi, Meisam Tatari, Amin Esmaeilzadeh // Archive of mechanical engineering. – 2015. – Vol. 62, No. 3. – P. 363–375. doi: 10.1515/meceng-2015-0021.
48. Nestacionarieji ir kvazistatiniai geležinkelio traukinių judėjimo režimai / Eug. Blochinas, St. Dailydka, L. Lingaitis, L. Ursuliak. – Vilnius :Technika, 2016. – 168 p. doi: 10.3846/2321-M.
49. Niu, G. Failure Prognostics of Locomotive Electro-Pneumatic Brake Based on Bond Graph Modeling / Gang Niu, Xiaofan Huang // IEEE ACCESS. – 2017. – Vol. 5. – P. 15030–15039. doi:10.1109/ACCESS.2017.2734120.
50. Object oriented simulation of longitudinal train dynamics efficient tools to optimize sustainability and efficiency of railway systems / A. Frilli, M. Enrico, N. Daniele, P. Luca, R. Andrea // AEIT International Annual Conference (14–16 Oct. 2015). – Naples, Italy, 2015. doi: 10.1109/AEIT.2015.7415257.
51. Qi, Zh. Simulation of longitudinal dynamics of long freight trains in positioning operations / Zhaohui Qi, Zhihao Huang, Xianchao Kong // Journal Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. – 2012. – Vol. 50. – Iss. 9. – P. 1409–1433. doi: org/10.1080/00423114.2012.661063.
52. Regenerative braking in high speed railway applications: Analysis by different simulation tools / M. Ceraolo, G. Lutzemberger, A. Frilli, L. Pugi // Environment and Electrical Engineering (EEEIC) : IEEE 16th International Conference. – Florence, Italy, 2016. – P. 1–5. doi:10.1109/EEEIC.2016.7555474.
53. Shabana, A. A. Use of the non-inertial coordinates in the analysis of train longitudinal forces / A. A. Shabana, A. K. Aboubakr, L. Ding // Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. – 2012. – No. 7 (1). – P. 1–10. doi: 10.1115/1.4004122.
54. Simulation of Longitudinal Train Dynamics: Case Studies Using the Train Energy and Dynamics Simulator (TEDS) / M. F. Stewart, S. K. (John) Punwani, D. R. Andersen, G. F. Booth, S. P. Singh, A. Prabhakaran // Joint Rail Conference (March 23–26, 2015). – San Jose, California, USA, 2015. – P. V001T02A011. doi: 10.1115/JRC2015-5760 2015.
55. Spatial Kinetics Model of Supercavitating Vehicles Reflecting Conic-Like Oscillation / Ch. Huang, K. Luo, J. Dang [et al.] // Mathematical problems in engineering. – 2017. – Vol. 2017. – P. 1–12. doi: org/10.1155/2017/3671618.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

56. Su, Sh. Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model / Sh. Su, T. Tang, Y. Wang // *Energies*. – 2016. – Vol. 9, no. 2. – P. 2–19. doi: 10.3390/en9020105.
57. Tavan, N. An optimal integrated longitudinal and lateral dynamic controller development for vehicle path tracking / N. Tavan, M. Tavan, R. Hosseini // *Latin American journal of solids and structures*. – 2015. – Vol. 12, no. 6. – P. 1006–1023. doi:10.1590/1679-78251365.
58. The Energy-Efficient Operation Problem of a Freight Train Considering Long-Distance Steep Downhill Sections / X. Lin, Q. Wang, P. Wang [et al.] // *ENERGIES*. – 2017. – Vol. 10, no. 6. – P. 1–26. doi: 10.3390/en10060794.
59. Ursuljak, L. On the problem of dynamic response of the long trains including joint ones with the liquid cargo / L. Ursuljak, Ya. Romanjuk // *Transbaltica 2011 : Proc. of 7th Intern. Scientific Conf. (May 5–6, 2011)*. – Vilnius, 2011. – P. 269–275.
60. Varazhun, I. Determination of Longitudinal Forces in the Cars Automatic Couplers at Train Electrodynamics Braking / I. Varazhun, A. Shimanovsky, A. Zavarotny // *Engineering*. – 2016. – Vol. 134 : *Transbaltica 2015 : Proc. of the 9th Intern. Scientific Conf. (May 7–8, 2015)*. – P. 415–421. doi:10.1016/j.proeng.2016.01.032.
61. Wang, X. Optimal control of heavy haul train based on approximate dynamic programming / X. Wang, T. Tang, H. He // *Advances in mechanical engineering*. – 2017. – Vol. 9, no. 4. – P. 1–15. doi: 10.1177/1687814017698110.
62. Wang, X. Optimal operation of high-speed train based on fuzzy model predictive control / X. Wang, T. Tang // *Advances in mechanical engineering*. – 2017. – Vol. 9, No. 3. – P. 1–14. doi: 10.1177/1687814017693192.
63. Wei, W. Influence of train tail exhaust device on longitudinal force of train / W. Wei, Y. Hu // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. – 2012. – No. 12 (5). – P. 43–49.
64. Wu, Q. Longitudinal dynamics and energy analysis for heavy haul trains / Q. Wu, Sh. Luo, C. Cole // *J. Mod. Transport*. – 2014. – No. 22 (3). – P. 127–136. doi: 10.1007/s40534-014-0055-x.

Л. В. УРСУЛЯК^{1*}, А. О. ШВЕЦЬ^{2*}

^{1*} Кафедра «Теоретична та будівельна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (095) 008 70 53, ел. пошта lydm.urs@gmail.com, ORCID 0000-0001-5957-6926.

^{2*} Кафедра «Теоретична та будівельна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, ел. пошта angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902.

ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНКИ ДИНАМІКИ ПОЇЗДУ

Мета. Використовуючи наукові публікації провести аналіз математичних моделей, розроблених в Україні, країнах СНД і за кордоном, які використовуються для теоретичних досліджень динаміки поїзда, а також показати актуальність подальшого їх вдосконалення. **Аналіз публікацій.** Інформаційною базою дослідження були офіційні повнотекстові і реферативні бази даних, наукові праці вітчизняних та зарубіжних вчених, професійні періодичні видання, матеріали науково-практичних конференцій, методичні матеріали міністерств й відомств. Аналіз публікацій про існуючі математичні моделі, які використовуються для вирішення широкого кола завдань, пов'язаних з дослідженням динаміки поїзда показує доцільність їх застосування. **Результати.** Результати цих досліджень були використані при проектуванні нових типів поглинаючих апаратів і розподільників повітря, при розробці способів управління рухом звичайних і з'єднаних поїздів, при створенні відповідних режимних карт, при розробці енергозберігаючих способів ведення поїздів, при перегляді Державних будівельних норм і правил (СНіП II-39.76), при виборі параметрів, створеної в ДПТі автономній системі автоматичного керування допоміжним локомотивом, що знаходиться в складі об'єднаного поїзда, при створенні на базі комп'ютерних технологій тренажерів для навчання машиністів, при оцінюванні динамічних показників екіпажів, що характеризують їх безпеку руху. Вчені всього світу проводять чисельні експерименти, пов'язані з оцінкою динаміки поїзда, за допомогою математичних моделей, які необхідно постійно вдосконалювати. **Наукова новизна.** Наукова новизна проведеного аналізу полягає у викладі основних теоретичних положень, на підставі яких розроблені існуючі

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

математичні моделі для вирішення задач про динаміку поїзда. Проведений аналіз наукових статей, опублікованих в Україні, країнах СНД і за кордоном, дозволяє визначити найбільш актуальні сфери застосування математичних моделей. **Практична значимість.** Практичне значення отриманих результатів полягає в науковій обґрунтованості та прикладній спрямованості теоретичних досліджень з використанням математичних моделей, вдосконалення яких дозволить розширити коло вирішуваних завдань, підвищити рівень достовірності отриманих результатів.

Ключові слова: довгосоставні поїзда; динаміка поїзда; математичні моделі поздовжніх коливань поїзда; моделювання міжвагонних з'єднань; наукові статті; поздовжні сили в поїзді; тренажери машиністів локомотивів

L. V. URSULIAK^{1*}, A. O. SHVETS^{2*}

^{1*} Department «Theoretical and structural mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 008 70 53, e-mail lydm.urs@gmail.com, ORCID 0000-0001-5957-6926

^{2*} Department «Theoretical and structural mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 214 14 19, e-mail angela_shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-5537-6617

IMPROVEMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR ESTIMATION OF TRAIN DYNAMICS

Purpose. Using scientific publications to analyze mathematical models developed in Ukraine, CIS countries and abroad, used for theoretical studies of train dynamics, and also to show the urgency of their further improvement.

Analysis of publication. Information base of the research was official full-text and abstract databases, scientific works of domestic and foreign scientists, professional periodicals, materials of scientific and practical conferences, methodological materials of ministries and departments. Analysis of publications on existing mathematical models used to solve a wide range of problems associated with the study of the dynamics of the train shows the expediency of their application. **Findings.** The results of these studies were used in the design of new types of absorbing apparatus and air distributors, in the development of methods for controlling the movement of conventional and connected trains, in the creation of appropriate regime maps, in the development of energy-saving methods of conducting trains, in revising the Construction Norms and Rules (SNiP II-39.76), when selecting parameters created in the DIET by an autonomous automatic control system of an auxiliary locomotive that is part of a connected train, the basis of computer technology simulators for the training of machinists, in assessing the dynamic performance of crews characterizing their traffic safety. Scientists around the world conduct numerical experiments related to the evaluation of train dynamics using mathematical models that need to be constantly improved. **Originality.** The scientific novelty of the analysis is in the presentation of the main theoretical positions on the basis of which existing mathematical models for solving problems on the dynamics of a train have been developed. The analysis of scientific articles published in Ukraine, CIS countries and abroad allows us to determine the most relevant areas of application of mathematical models. **Practical value.** The practical significance of the results obtained lies in the scientific validity and applied orientation of theoretical studies using mathematical models, the improvement of which will expand the range of problems to be solved, and increase the level of reliability of the results obtained.

Keywords: long train; dynamics of the train; mathematical models of longitudinal train oscillations; modelling compounds between wagons; science articles; longitudinal forces in the train; trainers for locomotive drivers

REFERENCES

1. Barbas, I. G. (1962). Analiticheskoye opredeleniye usiliy, voznikayushchikh v upryazhnykh priborakh pri dvizhenii cherez perelom profilya puti. *Sbornik nauchnykh trudov DIITa*, 42, 4-12. (in Russian)
2. Blokhin, Y. P., & Skalozub, V. V. (2002). Vybory rezhimov vedeniya poyezdov kak stokhasticheskaya zadacha vektornoy optimizatsii. *Transport: Proceedings Scientific publication*, 7, 28-31. (in Russian)
3. Blokhin, Y. P., & Manashkin, L. A. (1982). *Dinamika poyezda (nestatsionarnyye prodolnyye kolebaniya)* [Monograph]. Moscow: Transport. (in Russian)
4. Blokhin, Y. P. (1958). O vliyaniy neodnorodnosti poyezda na dinamicheskiye usiliya, voznikayushchiye v upryazhnykh priborakh pri troganii s mesta. *Trudy DIITa*, 26, 4-12. (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

5. Boldyrev, A. P., Gurov, A. M., & Fatkov, E. A. (2007). The promising characteristics of shock-absorbing devices in the train operating conditions. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 15, 146-153. (in Russian)
6. Boldyrev, A. P., & Gurov, A. M. (2014). Efficiency of using high energy-consumption cushioning devices in freight wagons. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 3 (52), 43-44. (in Russian)
7. Vereskun, V.D., & Pritykin, D. E. (2014). Mnogomassovaya model podvizhnoy edinitsy dlya issledovaniya prodolnoy dinamiki gruzovogo poyezda. *Vestnik RGUPS*, 2, 16-27. (in Russian)
8. Voronova, Y. V., & Rychkov, N. P. (2015). Dinamika gruzovykh vagonov na krivyykh malogo radiusa. *Proceeding of the International Conference on Transport infrastructure of the Siberian region*, 2, 445-449. Retrieved from https://www.ircups.ru/sites/default/files/ircups/journal/tom_2_0.pdf (in Russian)
9. Zhukovskiy, N. Y. (1919). Rabota (usiliye) russkogo skvoznoho i amerikanskogo neskvoznoho tyagovogo pribora pri troganii poyezda s mesta i v nachale ego dvizheniya. *Byulleten Eksperimentalnogo instituta putey soobshcheniya*, 13, 31-57. (in Russian)
10. Vasilev, A. S., Boldyrev, A. P., Keglín, B. G., & Gurov, A. M. (2014). Research of freight car's longitudinal loading equipped new frictional absorbing devices. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 1, 12-17. (in Russian)
11. Karpychev, V. A., & Chuev, S. G. (2017). Umensheniye prodolnykh silovykh vozmushcheniy pri raspredelenom upravlenii tormozheniyem poyezda (RUTP). *Tekhnika zheleznykh dorog*, 1, 66-72. (in Russian)
12. Lazaryan, V. A., Blokhin, Y. P., Manashkin, L. A., & Belik, L. V. (1971). K voprosu o matematicheskom opisani protsessov, proiskhodyashchikh pri perekhodnykh rezhimakh dvizheniya poyezdov s zazorami v upryazhi. *Trudy DIITA*, 103, 18-28. (in Russian)
13. Kompaniets, D. I. (2017). Tyazhelovesnoye dvizheniye kak faktor optimizatsii perevozochnoho protsessa. *Proceedings of the International Scientific Conference Nauchnyye issledovaniya: teoriya, metodika i praktika*, 1, 303-305. (in Russian)
14. Kossov, V. S., & Lunin, A. A. (2016). Studies of longitudinal dynamics and impact of articulated trains weighing 12600 t on the rail track. *Tyazheloe Mashinostroenie*, 9, 21-26. (in Russian)
15. Lazaryan, V. A. (1949). Issledovaniye neustanovivshikhsya rezhimov dvizheniya poyezda. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
16. Lazaryan, V. A. (1953). Issledovaniya perekhodnykh rezhimov dvizheniya poyezdov pri sploshnom tormozhenii i pri perekhodakh cherez perelomy prodolnogo profilya puti. *Trudy DIITA*, 23, 5-23. (in Russian)
17. Lazaryan, V. A. (1956). Issledovaniya usilii, vznikayushchikh pri perekhodnykh rezhimakh dvizheniya v sterzhnyakh s razlichnymi uprugimi nesovershenstvami. *Trudy DIITA*, 25, 5-50. (in Russian)
18. Lazaryan, V. A. (1952). K voprosu o vybore raschetnoy skhemy pri issledovanii perekhodnykh rezhimov dvizheniya poyezdov. *Tekhnika zheleznykh dorog*, 6, 17-19. (in Russian)
19. Lazaryan, V. A. (1948). O dinamicheskikh usiliyakh v upryazhnykh priborakh poyezda pri nemonotonnom izmenenii sily tyagi. *Trudy DIITA*, 19, 63-82. (in Russian)
20. Lazaryan, V. A. & Blokhin, Y. P. (1974). O matematicheskom modelirovanii dvizheniya poyezda po perelomam prodolnogo profilya puti. *Trudy MIITA*, 444, 83-123. (in Russian)
21. Lazaryan, V. A. (1973). O perekhodnykh rezhimakh dvizheniya poyezda. *Trudy DIITA*, 152, 3-43. (in Russian)
22. Lazaryan, V. A., Blokhin, Y. P., & Barbas, I. G. (1974). Ob usiliyakh v gruzovykh poyezdakh pri tormozhenii lokomotiva pryamodeystvuyushchim tormozom. *Trudy MIITA*, 444, 67-73. (in Russian)
23. Lazaryan, V. A., Barbas, I. G., & Manashkin, L. A. (1964). Elektricheskoye modelirovaniye dvizheniya odnorodnykh poyezdov cherez perelomy prodolnogo profilya puti. *Trudy DIITA*, 50, 5-20. (in Russian)
24. Akulov, A. S., Zheleznov, K. I., Zabolotnyi, O. M., Ursulyak, L. V., Chabanyuk, E. V., Chernyaev, D. V., & Shvets, A. O. (2017). Modulnyi trenazher mashynista. *Lokomotyv-Inform*, 7-8, 42-49. (in Ukrainian)
25. Kurtikov, R. M., Sidrakov, A. A., Kuznetsova, Y. A., & Ivannikova, Y. A. (2016). Obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti zheleznodorozhnoy infrastruktury pri ekspluatatsii tyazhelovesnykh poyezdov. *Proceedings of the International Scientific Conference Sovremennyye problemy proektirovaniya, stroitelstva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti*, 191-194. (in Russian)
26. Shvets, A. A., Zheleznov, K. I., Akulov, A. S., Zabolotny, A. N., & Chabanyuk, E. V. (2016). Determination the permissible forces in assessing the lift resistant factor of freight cars in trains. *Science and Transport Progress*, 1 (61), 189-192. doi: 10.15802/stp2016/61045 (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

27. Boldyrev, A. P., Zhiron, P. D., Vasilyev, A. S., & Borovikova, S. V. (2013). Assessment of overall performance of the frictional ceramic-metal elements of absorbing devices under various service conditions. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2 (38), 22-31. (in Russian)
28. Pudovikov, O. E., & Murov, S. A. (2015). Modelirovaniye rezhima regulirovochnogo tormozheniya dlinnosostavnogo poyezda. *World of Transport and Transportation*, 2 (57), 28-33. (in Russian)
29. Blokhin, Y. P., Manashkin, L. A., Stambler, Y. L., Masleeva, L. G., Mikhaylichenko, V. M., & Granovskaya, N. I. (1986). Raschety i ispytaniya tyazhelovesnykh poyezdov. Moscow: Transport. (in Russian)
30. Sekerova, S. A., Adilkhanov, Y. G., & Musaev, Z. S. (2010). Analiz nauchno-issledovatel'skikh rabot po prodolnoy dinamike gruzovogo poyezda. *The Bulletin of KazAT*, 6 (67), 32-36. (in Russian)
31. Selenskaya, T. V., & Selenskiy, E. I. (2014). Quality of service and reliability of railway vehicle autocoupling shock absorbers operating in randomly grouped freight trains. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2 (42), 57-63. (in Russian)
32. Stupin, D. A., & Belyaev, V. I. (2016). Research of influence of energy consumption of draft gears on longitudinal forces in the tank car train. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 75 (3), 154-160. (in Russian)
33. Druzhinina, O. V., Sychev, V. P., Cherkashin, Y. M., & Kachalkin, V. V. (2014). Teoreticheskiye aspekty otsenki bezopasnosti sistem zheleznodorozhnogo transporta. *Vnedreniye sovremennykh konstruktivnykh i peredovykh tekhnologiy v putevoye khozyaystvo*, 7 (7), 168-181. (in Russian)
34. Fatkov, E. A. (2009). Programmnyy kompleks dlya modelirovaniya i rascheta zadach prodolnoy dinamiki poyezda. *New Materials and Technologies in Machinebuilding*, 10, 130-133. (in Russian)
35. Feoktistov, V. P., Nevinsky, A. V., & Nazarov, D. V. (2015). Uchet ogranicheniy po prodolnoy dinamike pri regulirovanii puskovogo rezhima elektropoyezdov. *World of Transport and Transportation*, 3 (58), 94-100. (in Russian)
36. Blokhin, Y. P., Boychevskiy, O. G., Grebenyuk, P. T., & Feoktistov, I. B. (1970). Eksperimentalnyye issledovaniya prodolnykh usiliy v gruzovykh poyezdakh massoy do 10 tys. tonn pri perekhodnykh rezhimakh dvizheniya. *Trudy TsNII MPS*, 425, 55-85. (in Russian)
37. Yazykov, V. N. (2015). Numerical simulation of train dynamics in real time mode. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2 (46), 123-126. (in Russian)
38. Yang, L., Kang, Y., Luo, S., & Fu, M. (2015). Assessment of the curving performance of heavy haul trains under braking conditions. *Journal of Modern Transportation*, 23 (3), 169-175. doi:10.1007/s4053
39. Castagnetti, F., & Toubol, A. (Eds.) (2014). *The MARATHON 1500 m train opening up new horizons in rail freight transport in Europe*. Brussels: Drifosett.
40. Dos Santos, G. F. M., & Barbosa, R. S. (2016). Safety analysis of a railway car under the periodic excitation from the track. *Cogent Engineering*, 3 (1), 1-12. doi:10.1080/23311916.2016.1263027
41. Milković, D., Simić, G., Tanasković, J., Jakovljević, Ž., & Lučanin, V. (2015). Experimental and numerical determination of the wheel-rail angle of attack. *Facta Universitatis, Series Mechanical Engineering*, 13 (2), 123-131.
42. Ivanov, V., & Savitski, D. (2015). Systematization of Integrated Motion Control of Ground Vehicles. *IEEE ACCESS*, 3, 2080-2099. doi:10.1109/ACCESS.2015.2496108
43. Lee, D. C., & Kang, C.-G. (2016). A mechanical brake hardware-in-the-loop simulation of a railway vehicle that accounts for hysteresis and pneumatic cylinder dynamics. *Advances in Mechanical Engineering*, 7 (11), 1-11. doi:10.1177/1687814015616086
44. CER. (2016). *Longer trains Facts & Experiences in Europe: Results of the CER working group on longer and heavier trains*. Brussels: Community of European railway and infrastructure companies.
45. Myamlin, S., Lunys, O., Neduzha, L., & Kyryl'chuk, O. (2017). Mathematical Modeling of Dynamic Loading of Cassette Bearings for Freight Cars. *Proceedings of 21st International Conference on Transport Means 2017, Lithuania*, 3, 973-976.
46. Lin, F., Liu, S., Yang, Z., Zhao, Y., Yang, Z., & Sun, H. (2016). Multi-Train Energy Saving for Maximum Usage of Regenerative Energy by Dwell Time Optimization in Urban Rail Transit Using Genetic Algorithm. *Energies*, 9 (208), 1-21. doi:10.3390/en9030208
47. Naeimi, M., Tatari, M., & Esmaeilzadeh, A. (2015). Dynamics of the monorail train subjected to the braking on a straight guideway bridge. *Archive of Mechanical Engineering*, 62 (3), 363-375. doi:10.1515/meceng-2015-0021
48. Blochinas, E., Dailydka, S., Lingaitis, L., & Ursuliak, L. (2016). *Nestacionarieji ir kvazistatiniai geležinkelio traukinių judėjimo režimai*. Vilnius: Technika.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

49. Niu, G., & Huang, X. (2017). Failure Prognostics of Locomotive Electro-Pneumatic Brake Based on Bond Graph Modeling. *IEEE Access*, 5, 15030-15039. doi:10.1109/ACCESS.2017.2734120
50. Frilli, A., Meli, E., Nocciolini, D., Pugi, L., & Rindi, A. (2015). Object oriented simulation of longitudinal train dynamics efficient tools to optimize sustainability and efficiency of railway systems. *AEIT International Annual Conference, 14-16 Oct. 2015, Naples, Italy*. doi:10.1109/AEIT.2015.7415257
51. Qi, Z., Huang, Z., & Kong, X. (2012). Simulation of longitudinal dynamics of long freight trains in positioning operations. *Vehicle System Dynamics*, 50 (9), 1409-1433. doi:10.1080/00423114.2012.661063
52. Ceraolo, M., Lutzemberger, G., Frilli, A., & Pugi, L. (2016). Regenerative braking in high speed railway applications: Analysis by different simulation tools. *16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 7-10 June 2016, Florence, Italy*, 1-5. doi:10.1109/EEEIC.2016.7555474
53. Shabana, A. A., Aboubakr, A. K., Ding, L. (2012). Use of the non-inertial coordinates in the analysis of train longitudinal forces. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 7 (1), 1-10. doi:10.1115/1.4004122
54. Stewart, M. F., Punwani, S. K., Andersen, D. R., Booth, G. F., Singh, S. P., Prabhakaran, A. (2015). Simulation of Longitudinal Train Dynamics: Case Studies Using the Train Energy and Dynamics Simulator (TEDS). *Joint Rail Conference, San Jose, California, USA, March 23-26, 2015*. doi:10.1115/JRC2015-5760
55. Huang, C., Luo, K., Dang, J., Qin, K., & Li, D. (2017). Spatial Kinetics Model of Supercavitating Vehicles Reflecting Conic-Like Oscillation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 1-12. doi:10.1155/2017/3671618
56. Su, S., Tang, T., & Wang, Y. (2016). Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model. *Energies*, 9 (2), 2-19. doi:10.3390/en9020105
57. Tavan, N., Tavan, M., & Hosseini, R. (2015). An optimal integrated longitudinal and lateral dynamic controller development for vehicle path tracking. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12 (6), 1006-1023. doi:10.1590/1679-78251365
58. Lin, X., Wang, Q., Wang, P., Sun, P., & Feng, X. (2017). The Energy-Efficient Operation Problem of a Freight Train Considering Long-Distance Steep Downhill Sections. *Energies*, 10 (6), 1-26. doi:10.3390/en10060794
59. Ursuljak, L., & Romanjuk, Y. (2011). On the problem of dynamic response of the long trains including joint ones with the liquid cargo. *Proceedings of the 7th International Scientific Conference Transbaltica 2011, May 5-6, 2011, Vilnius, Lithuania*, 269-275. Retrieved from http://leidykla.vgtu.lt/conferences/Transbaltica_2011/pdf/052.pdf
60. Varazhun, I., Shimanovsky, A., & Zavarotny, A. (2016). Determination of Longitudinal Forces in the Cars Automatic Couplers at Train Electrodynamic Braking. *Proceedings of the 9th international scientific conference Transbaltica-2016, May 7-8, 2016, Vilnius, Lithuania*, 134, 415-421. doi:10.1016/j.proeng.2016.01.032
61. Wang, X., Tang, T., & He, H. (2017). Optimal control of heavy haul train based on approximate dynamic programming. *Advances in Mechanical Engineering*, 9 (4), 1-15 doi: 10.1177/1687814017698110
62. Wang, X., & Tang, T. (2017). Optimal operation of high-speed train based on fuzzy model predictive control. *Advances in Mechanical Engineering*, 9 (3), 1-14. doi:10.1177/1687814017693192
63. Wei, W., & Hu, Y. (2012). Influence of train tail exhaust device on longitudinal force of train. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 12 (5), 43-49.
64. Wu, Q., Luo, S., & Cole, C. (2014). Longitudinal dynamics and energy analysis for heavy haul trains. *Journal of Modern Transportation*, 22 (3), 127-136. doi:10.1007/s40534-014-0055-x.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Л. Горобцем (Україна); д.т.н., проф. К. С. Заболотним (Україна)

Надійшла до редколегії: 31.07.2017

Прийнята до друку: 30.10.2017