

УДК 629.2

В.Ф. УШКАЛОВ, Т.Ф. МОКРИЙ

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Приведены основные результаты исследований, выполненных отделом "Статистическая динамика механических систем" ИТМ НАН Украины и НКА Украины в период 1998-2008 гг.

The basic results of research carried out by the Statistical Dynamics of Mechanical Systems Department of ITM, NASU&NSAU in the period of 1998 – 2008 are presented.

Отдел "Статистическая динамика механических систем" образован в 1975 году. Область исследований – случайные колебания механических систем, идентификация и оптимизация их параметров; прогнозирование вибронагруженности и динамической прочности движущихся объектов, в том числе транспортных средств и изделий ракетно-космической техники.

В период 1998-2008 гг. в отделе выполнен ряд теоретических и вытекающих из них прикладных исследований. Так, развиты методы углубленных исследований случайных колебаний и динамического взаимодействия элементов сложных механических систем и их контактного взаимодействия с рельсовым деформируемым основанием. С использованием этих методов усовершенствована пара "колесо – рельс" за счет изменения формы диска колеса и профиля головки рельса, что позволяет улучшить условия вписывания железнодорожных экипажей в криволинейные участки пути, снизить напряжения в зонах контакта колес и рельсов, уменьшить износ контактирующих тел, повысить их ресурс. Проведены исследования по усовершенствованию ходовых частей железнодорожных вагонов для повышения их динамических качеств и улучшения взаимодействия с путем, и в итоге разработаны и внедрены много лет ожидаемые на железнодорожном транспорте стран СНГ и Балтии изменения в ходовых частях подвижного состава.

Продолжены исследования проблемы транспортировки ракет-носителей, на этот раз по морским путям, с учетом долговременных статистических данных о волновых режимах на маршруте транспортировки ракет-носителей.

Выполнены качественный анализ и моделирование особых режимов движения механических систем с фрикционным взаимодействием, в частности явлений "wedging" (заклинивание) и "jamming" (заедание); доказана возможность использования в движущихся механических системах обратной связи по ускорению; исследованы особенности описания сингулярно возмущенных механических систем и свойства уравнений их движения. Эти теоретические разработки нашли применение при решении ряда практических задач в области совершенствования или создания новых транспортных средств и изделий ракетно-космической техники.

Наиболее важные результаты теоретических и прикладных исследований кратко изложены ниже.

**Основные результаты в области совершенствования и создания средств железнодорожной техники**

**Уточнение модели взаимодействия пары «колесо-рельс».** Одним из наиболее сложных вопросов, возникающих при прогнозировании показателей динамических качеств вагонов и, в частности, устойчивости их движения, является определение сил крипа, которые обусловлены явлением псевдоскольжения контактных поверхностей пары «колесо-рельс» из-за жесткой

© В.Ф. Ушкалов, Т.Ф. Мокрий, 2008

насадки колес на общей оси и конической формы поверхностей их катания. Величина псевдоскольжения каждого закрепленного на оси колеса зависит от соотношения длин кругов катания и расстояний, проходимых колесами по рельсам, от вертикальных нагрузок в каждый момент времени на каждое колесо, режима работы колесной пары (свободное качение, тяговый или тормозной режим), состояния контактных поверхностей колес и рельсов и т.п. Традиционная расчетная модель для определения показателей кривизны имеет ограниченную область использования: линейный профиль поверхности катания колеса, одинаковый диаметр колес, постоянная ширина колеи, неизношенные рельсы и колеса, одинаковые горизонтальные неровности на обоих рельсах, равномерная нагрузка на колеса и др. Прогнозные оценки динамических качеств вагонов при этом могут существенно отличаться от реальных значений. В результате проведенных исследований предложена уточненная модель для определения показателей кривизны, которая позволяет более точно описать динамические процессы взаимодействия в системе «экипаж-путь». Оценено влияние уточнений на величину критической скорости и вынужденные колебания вагонов, выполнено сравнение с экспериментальными данными. В дальнейшем эта модель использовалась для проведения расчетов с целью усовершенствования ходовых частей грузовых и пассажирских вагонов и улучшения контактного взаимодействия пары «колесо-рельс». Решена также задача об идентификации сил кривизны в точке контакта колеса и рельса [1].

**Разработка профилей обода колеса.** Теоретические разработки по созданию новых профилей колес ведутся в отделе с 1997 г. [2 – 14]. Проводятся они поэтапно с чередованием теоретических и экспериментальных исследований, поскольку окончательные выводы об эффективности использования того или иного профиля могут быть сделаны лишь на основании результатов динамических ходовых и эксплуатационных испытаний вагонов.

На первом этапе из большой серии созданных профилей ободьев колес были предложены для испытаний два новых профиля, использование которых, по прогнозным оценкам, позволило бы существенно (в 1,5 – 2 раза) снизить износ контактирующих тел. Проведенные ходовые испытания вагонов, оборудованных колесами с новыми профилями, подтвердили эффективность их применения с точки зрения износа гребней. Однако динамические качества грузовых вагонов несколько ухудшились. Поэтому к разработке новых профилей обода колес в теоретических исследованиях пришлось применить комплексный подход, заключающийся в поиске компромиссного решения при противоречивых критериях, которыми являются снижение износа колес и улучшение динамических качеств вагонов. В результате такого подхода удалось создать более совершенный профиль ИТМ-73 [10 – 14], при использовании которого, как показали расчеты и экспериментальные данные, интенсивность износа гребней колес не выше, чем у колес с ранее разработанными профилями, и показатели динамических качеств грузовых вагонов не выходят за пределы допустимых значений в диапазоне эксплуатационных скоростей [8]. Дальнейшее улучшение динамических качеств вагона (в частности, повышение его критической скорости), как показали исследования, целесообразно проводить не за счет продолжения изменения формы профиля колеса, а за счет других конструктивных изменений в базовой тележке, например, использования упругих скользунов постоянного контакта.

В последнее время отдел работает над созданием конформного профиля обода колеса. Если профиль колеса в области гребня конформен профилю рельса, имеют место самая большая площадка контакта и наименьшие контактные напряжения по сравнению с неконформными профилями.

Разработана уточненная математическая модель взаимодействия железнодорожного колеса и рельса, позволяющая учесть ряд важных факторов, таких как конформность контакта, три фазы взаимодействия (в том числе двухточечный контакт), нелинейность сил крипа и т.п.

Проведены исследования по оценке влияния формы контактных поверхностей колес и рельсов (в том числе с конформным контактом) на динамические качества грузового вагона, показатели взаимодействия и износа контактной пары «колесо – рельс» при движении вагона с различными скоростями по прямым и криволинейным участкам пути. По результатам этих расчетов выбран конформный профиль колеса, который рекомендуется для использования на отечественных железных дорогах. Показано, что грузовые вагоны с выбранным конформным профилем обода колес обладают достаточно высокими динамическими качествами, и, по сравнению со случаем применения стандартных колес, имеют значительно меньшие показатели износа гребней и в два раза выше срок службы колес.

**Разработка износостойких профилей рельсов.** При движении вагонов в кривых имеет место усиленный износ боковой грани головки наружного рельса и развитие дефектов контактно-усталостного происхождения. В результате менять рельсы в кривых приходится значительно чаще, чем на прямых участках пути. В мире ведутся интенсивные исследования по разработке новых форм головок рельсов, в частности асимметричных, для наружных нитей кривых.

В Австрии с 1995 г. применение асимметричного шлифования с целью создания специальных профилей головок наружных рельсов было возведено в разряд обязательных мероприятий, проводимых в рамках текущего содержания пути. В результате этого срок службы рельсов увеличился почти на 50%.

На железных дорогах СНГ массово применяются рельсы Р65. Эти рельсы хорошо работают на прямых участках пути. В кривых малого радиуса при существующих осевых нагрузках и скоростях движения поездов рельсы Р65 изнашиваются более интенсивно.

В последнее время в отделе ведутся исследования по оптимизации профиля головки рельса. Разработана серия новых форм головок рельсов для наружных нитей кривых, позволяющих снизить боковой износ. При этом учитывалось, что доля новых колес в эксплуатации очень мала, поэтому основное внимание уделялось взаимодействию рельсов с изношенными колесами.

Одним из разработанных профилей является асимметричный профиль И23 [15]. Головка рельса с профилем И23 имеет более выпуклую верхнюю часть рабочей поверхности по сравнению со стандартным рельсом Р65, что позволяет уменьшить контактное взаимодействие колес подвижного состава с зоной ее бокового закругления вследствие рассредоточения (со смещением к центру головки) мест приложения вертикальных нагрузок. Радиус бокового закругления головки рельса выбирался из условия снижения бокового износа рельсов и обеспечения двухточечного контакта как с неизношенными, так и с изношенными стандартными колесами.

С помощью метода конечных элементов проведены расчеты контактного взаимодействия колес с предлагаемым рельсом И23, а также – для сравнения

– со стандартным рельсом Р65. Согласно результатам этих расчетов, при взаимодействии рельса И23 со стандартным колесом в кривых малого радиуса наибольшие эквивалентные напряжения возникают (в отличие от рельса Р65) в центральной части головки рельса, что некритично. В районе касания гребня колеса напряжения в 1,5 – 2 раза меньше, чем в случае использования рельса Р65, что снижает вероятность возникновения контактно-усталостных повреждений выкружки рельса.

Отметим также, что работа сил трения в зоне контакта гребня колеса с рельсом, имеющим профиль И23, существенно ниже, чем со стандартным рельсом Р65, а следовательно, меньше и боковой износ головки рельса.

Таким образом, применение в наружных нитях кривых малого радиуса рельсов с профилем головки И23 является эффективным как с точки зрения уменьшения бокового износа головки рельса, так и с точки зрения предупреждения образования и развития контактно-усталостных повреждений.

**Уточнение математической модели для исследования динамики вагонов с упругими дисками колес и их взаимодействия с путем.** Взаимодействие колеса и рельса является одним из основных факторов, определяющих безопасность движения, допустимую скорость поездов, нагруженность рельсов и т.п. При этом определенное улучшение взаимодействия колеса с рельсами можно получить путем совершенствования формы диска колеса.

С помощью конечно-элементной модели железнодорожного колеса исследовано влияние геометрии диска на упругие свойства колеса. На основании зависимостей перемещений (относительно неподвижно закрепленной ступицы) точек обода колеса от величины приложенных в этих точках сил для разных вариантов формы и толщины дисков, а также различной толщины ободьев колес определены жесткости колеса в радиальном и осевом направлениях. Показано, что при действии реальных нагрузок в результате изгиба дисков происходит поворот профиля обода колеса относительно профиля головки рельса, что может оказывать заметное влияние на процессы контактного взаимодействия пары «колесо – рельс». Поскольку нагрузка на колесо изменяется в процессе движения вагона, будет изменяться и угол поворота обода колеса относительно головки рельса. Для учета таких смещений контактных поверхностей колес при расчетах пространственных колебаний единиц подвижного состава выполнено усовершенствование математической модели, позволяющее учитывать изменение поворота обода колеса относительно рельса в зависимости от формы диска колеса, положения точек контакта на ободу и динамических усилий, действующих в этих точках. В расчетной схеме учтены также упругие свойства дисков колес в радиальном и осевом направлениях.

**Устойчивость движения вагонов.** Одним из принципиальных вопросов, который в первую очередь необходимо решить в процессе модернизации существующих и создания перспективных тележек, является обеспечение устойчивости движения экипажей. Потеря устойчивости приводит к повышенному износу элементов ходовых частей и верхнего строения пути. При этом возможно также нарушение условий безопасности движения. Минимальную скорость, при которой устанавливаются незатухающие автоколебания экипажа, принято называть критической.

В отделе проводились исследования устойчивости движения различных грузовых и пассажирских вагонов. Далее для примера приведены результаты исследований устойчивости движения порожних и груженых вагонов с тележками модели 18-100 до и после их модернизации путем установки элементов компании A. Stucki [16], включающих упруго-фрикционные скользящие постоянного контакта.

Оценено влияние такой модернизации тележки на значение критической скорости вагона со стандартными колесами, имеющими различную степень износа гребней: неизношенные (толщина гребня 33 мм), малоизношенные (толщина гребня 29 – 30 мм) и среднеизношенные (толщина гребня 27 – 27,5 мм). Устойчивость движения вагонов рассматривалась как по отношению к возмущению начальных условий (устойчивость по А.М. Ляпунову), так и при постоянно действующих малых возмущениях (устойчивость по И.Г. Малкину).

Результаты теоретических исследований показали, что критическая скорость вагона на типовых тележках существенным образом снижается с износом колес. Так, по сравнению с новыми колесами, как для порожнего, так и для груженого вагонов при малом износе колес она меньше на 20 км/ч, а при среднем износе – на 40 км/ч.

Снижение значения критической скорости, связанное с износом колес, у вагона на модернизированных тележках с элементами A.Stucki происходит менее интенсивно. При малом износе колес это значение уменьшается на 10 и 20 км/ч, а при среднем износе – еще на 10 и 5 км/ч для порожнего и груженого вагонов соответственно.

В случае неизношенных колес критическая скорость вагона на модернизированных тележках примерно на 40 – 50 км/ч выше, чем у вагона на типовых тележках. В процессе износа колес это различие увеличивается и достигает 55 – 60 км/ч для вагонов со среднеизношенными колесами.

Следует отметить, что оценки, полученные при проведенных теоретических исследованиях, представляют собой верхнюю границу значений критической скорости для экипажа данной конструкции. Это связано с тем, что в расчетах моделируется движение по идеально гладкому пути без неровностей или при возмущениях со стороны пути, составляющих 2 – 10% от уровня горизонтальных неровностей, характерных для хорошего состояния пути. При движении экипажа по пути с реально действующими возмущениями критическая скорость может снижаться.

Для экспериментальной оценки динамических качеств грузовых вагонов на типовых и модернизированных тележках были проведены ходовые испытания со скоростями движения до 120 км/ч. Найденные в результате такого эксперимента значения критических скоростей несколько ниже полученных теоретических оценок, однако качественная картина устойчивости движения грузовых вагонов с различными типами тележек остается такой же.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования устойчивости грузовых вагонов показали, что модернизация тележек с использованием элементов A. Stucki позволяет повысить критическую скорость грузовых вагонов (как с новыми, так и с изношенными колесами).

**Явления заедания и заклинивания в системах с сухим трением.** Начиная с 2000 г. в отделе проводятся работы по исследованию специальных режимов функционирования фрикционных систем [17 – 27]. В тележках 18-

100, как и в других трехэлементных тележках грузовых вагонов, рассеяние энергии колебаний осуществляется при помощи сухого трения. С трением, в частности, происходит скольжение клиньев относительно боковин и наддрессорных балок. При определенных условиях даже сравнительно малые возмущения могут приводить к большим изменениям характеристик движения, например, к резкому и значительному возрастанию нормальных реакций и, как следствие, других сил, в частности сил взаимодействия колеса и рельса. В отдельных же случаях, когда система приближается к некоторым особым состояниям, силы теоретически могут стремиться к бесконечности. Такое явление в системах с кулоновым трением называют “jamming” (заедание) или “wedging” (заклинивание) в зависимости от некоторых дополнительных условий [17, 20 – 27, <http://mzhecheve.web.optima.com.ua>].

В результате исследований определены условия, при которых в процессе движения грузовых вагонов с трехэлементными тележками, в частности с тележками Barber S-2-D, Barber S-2-PD (США) и 18-100 (страны СНГ), может возникать явление “jamming”, сопровождающееся резким и значительным ростом сил взаимодействия клиньев с наддрессорными балками и колес с рельсами [17, 20, 27]. Показано, что наиболее перспективный путь уменьшения контактных сил связан с понижением контактной жесткости, в частности за счет использования полиуретановых накладок, что позволяет практически устранить “jamming”.

Суть “wedging” заключается в том, что в некоторых конфигурациях систему заклинивает, а значения возникающих при этом сил реакций могут быть очень большими, что может привести к появлению необратимых деформаций в телах и даже к разрушению системы. В результате выполненных исследований установлены геометрические и аналитические условия возникновения “wedging” в системах с двумя, тремя и произвольным числом фрикционных контактов [17, 20 – 27]. Применение полученных теоретических результатов к исследованию различных фрикционных систем (Пэнлеве-Клейна, фрикционной системы демпфирования и др.) показало, что они могут быть эффективно использованы на практике при анализе возможности возникновения “wedging” в реальных системах с фрикционными контактами.

**Силы, зависящие от ускорения.** Как известно, в 1964 году Л. Парс опубликовал монографию “A Treatise on Analytical Dynamics”, в которой доказывает, что силы, зависящие от ускорения, неприемлемы в механике, поскольку противоречат одному из ее основополагающих принципов – принципу независимости действия сил. Несмотря на эту публикацию, в отделе в течение 10 лет проводились исследования, в результате которых было показано, что приведенное Л. Парсом доказательство ошибочно, а силы, зависящие от ускорения, в такой же степени приемлемы в механике, как и традиционные силы, зависящие только от положения, скорости и времени [28 – 30, <http://mzhecheve.web.optima.com.ua>]. Работы [28, 29] устранили принципиальное препятствие на пути применения сил, зависящих от ускорения. Дальнейшие исследования [30] показали, что существует целый ряд прикладных задач, которые могут быть решены с помощью сил, зависящих от ускорения. В одних случаях эти силы могут использоваться для объяснения различных физических явлений, в других – как средство получения наиболее эффективного решения, в третьих – как единственный способ решения. Вместе с тем, эти силы имеют принципиальные особенности, приводящие иногда к нежиз-

данным эффектам. Так, при алгебраической зависимости сил от ускорения пренебрежение даже сколь угодно малым ненулевым запаздыванием может приводить к качественным изменениям в поведении системы. Вследствие этого движение системы может оказаться неустойчивым даже в том случае, когда действительные части корней соответствующего характеристического уравнения отрицательны. В результате проведенных исследований было показано, что формирование стабилизирующего управления должно осуществляться в соответствии с дифференциальной зависимостью управления от ускорения. При соответствующем выборе параметров такое управление не только обеспечивает асимптотическую устойчивость тривиального решения, но и позволяет существенно снизить влияние постоянно действующих возмущений.

Разработанные подходы и методы были применены к исследованию конкретных механических систем. В частности, исследована задача стабилизации железнодорожного вагона с наклоняемым кузовом, где использование управляющего момента, зависящего от углового ускорения, позволило решить данную задачу без использования информации о неизвестном угле поворота кузова [30]. Рассмотрена задача о стабилизации такими силами сингулярно возмущенных систем для уменьшения влияния постоянно действующих возмущений. Традиционный подход к стабилизации таких систем, когда управление зависит только от положения и скорости, еще более повышает жесткость системы, в связи с чем этот подход не всегда позволяет снизить влияние постоянно действующих возмущений. Использование сил, зависящих от ускорения, позволило в несколько раз уменьшить влияние постоянно действующих возмущений при стабилизации конкретного многосвязного механизма.

**Теоретические исследования по совершенствованию конструкции тележек железнодорожных вагонов для скоростного движения.** При внедрении скоростного движения на существующих железных дорогах Украины одной из важных задач является разработка рекомендаций относительно совершенствования конструкций существующего подвижного состава и пути для эксплуатации с повышенными скоростями. Для проведения таких исследований в отделе разработаны модификации расчетных схем и математических моделей колебаний единиц подвижного состава с учетом изменений их конструкций для эксплуатации в условиях скоростного движения в Украине.

Рассмотрен ряд вариантов изменения конструкции трехэлементных тележек грузовых вагонов, в том числе [31 – 39]: применение боковых упруго-диссипативных скользунов; установка дополнительного амортизатора в центральном подвешивании вагона; усовершенствование клиновой системы фрикционного демпфирования тележки; применение упругих элементов и адаптеров в узлах сочленения корпуса буксы с боковой рамой; введение дополнительных связей между колесными парами; использование нового износоустойчивого профиля ободьев колес. Выполнено исследование по выбору рациональных параметров узлов модернизации с точки зрения повышения критической скорости вагона, улучшения его динамических качеств для скоростей движения до 120 км/ч, снижения интенсивности износа колес и рельсов.

Проведен также выбор параметров пассажирских вагонов, при которых показатели динамических качеств экипажей и износа их колес удовлетворяют нормативным требованиям для скоростей движения до 160 км/ч, в том

числе определены рациональные значения параметров жесткости и демпфирования двухступенчатого рессорного подвешивания, оценено влияние базы вагона на показатели плавности хода и износа колес пассажирского вагона, проведено сравнение динамических качеств типового пассажирского вагона на тележках КВЗ-ЦНИИ и вагона с выбранными рациональными параметрами подвешивания. За счет замены значений указанных параметров типового пассажирского вагона выбранными рациональными можно улучшить его динамические качества и удовлетворить нормативным требованиям для “хорошего” хода вагона как при существующих скоростях движения, так и при их повышении до 160 км/ч.

Проведены также исследования по оценке динамических качеств пассажирских вагонов нового поколения с увеличенной до 19 м базой на тележках новых конструкций моделей 68-7007 (68-7012), предназначенных для эксплуатации с повышенными до 140 км/ч скоростями движения на железных дорогах Украины. Выполнены расчеты движения экипажей в широком диапазоне скоростей по прямым и криволинейным участкам пути с различным уровнем входных возмущений, учитывающим состояние пути на отечественных железных дорогах. Предложены варианты сочетания жесткостных параметров рессорного подвешивания и торсионных устройств, реализация которых позволит снизить уровень колебаний боковой качки кузова. Полученные результаты использованы при совершенствовании конструкции тележек для пассажирских вагонов нового поколения на Крюковском вагоностроительном заводе.

**Внедрение результатов теоретических и экспериментальных исследований отдела по модернизации существующих и созданию новых тележек грузовых вагонов.** На протяжении многих десятилетий в парке грузовых вагонов Украины и стран бывшего СССР широко используются трехэлементные тележки модели 18-100. Эти тележки наряду с положительными чертами (простота конструкции, невысокая стоимость изготовления, технологичность в ремонте и др.) имеют существенные недостатки. Главные из них – неудовлетворительные характеристики при вписывании в кривые, значительный износ колес и рельсов, склонность к самовозбуждению колебаний виляния во время движения на прямых участках пути. По мере износа конструктивных элементов влияние этих недостатков возрастает: увеличивается износ пятниковых узлов и других элементов тележек, уменьшается критическая скорость вагонов. Во время движения вагонов со скоростями выше критической интенсивные колебания виляния кузова относительно тележек негативно влияют на безопасность движения, а в некоторых случаях приводят к сходу вагонов с рельсов. В связи с этим возникла необходимость замены тележек модели 18-100.

В Украине работы проводятся в двух направлениях: первое направление – замена тележек 18-100 модернизированными трехэлементными тележками с сохранением основных наиболее металлоемких элементов модели 18-100 и введением нескольких узлов модернизации (это направление требует меньше времени и меньших финансовых затрат); второе направление – замена тележек модели 18-100 существенно лучшими новыми тележками (этот путь является более эффективным, но для этого нужно больше времени и значительные финансовые затраты).



**Проведенные работы по первому направлению.** На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований ИТМ предложена комплексная модернизация типовых тележек (модели 18-100) грузовых вагонов [40-43], которая включает использование трех устройств компании A. Stucki (США): упругодиссипативных боковых скользунов постоянного контакта в узлах опирания кузова на ходовые части, износостойких фрикционных планок и фрикционных клиньев с упругими полиуретановыми накладками на наклонных поверхностях в рессорном подвешивании, эластомерных прокладок между пятником и подпятником, а также одновременное применение колес с износостойким нелинейным профилем ИТМ-73, разработанным в ИТМ НАНУ и НККАУ.

*Использование комплексной модернизации тележек дает:*

- значительное уменьшение сил взаимодействия колес и рельсов и, как результат, уменьшение износа их контактирующих поверхностей;
- возможность увеличения диапазона эксплуатационных скоростей движения порожних грузовых вагонов на 30...40 км/ч;
- увеличение запаса устойчивости вагонов против схода с рельсов, т. е. повышение безопасности движения при сохранении ограничений на скорость движения;
- увеличение ресурса элементов системы рессорного подвешивания примерно в 7...10 раз;
- эффективное гашение колебаний виляния и боковой качки;
- полное исключение явления «заедания» во фрикционной системе демпфирования;
- увеличение ресурса колесных пар по износу гребней колес более чем в 2 раза;
- заметное уменьшение износа элементов пятникового узла;
- уменьшение износа поверхностей трения в буксовом проеме;
- возможность эффективного использования тележек рабочего парка вагонов со значительным уменьшением эксплуатационных затрат на их содержание;
- уменьшение затрат энергии на тягу благодаря уменьшению сил взаимодействия колес и рельсов.

Более подробная информация об элементах комплексной модернизации тележек приведена на сайте <http://www.astucki.com.ua>.

Эффективность комплексной модернизации тележек подтверждена результатами ходовых динамических и эксплуатационных испытаний опытных вагонов с типовыми и комплексно модернизированными тележками, проведенных в 2000-2007 гг. на железных дорогах Украины и России.

Указанная модернизация тележек предложена для внедрения на железных дорогах Украины, стран СНГ и Балтии, где ширина колеи 1520 мм. Разработана инструкция по технологии установки узлов модернизации, начато обучение специалистов для обслуживания модернизированных тележек в процессе их эксплуатации.

С 2004 г. проводится широкомасштабное внедрение комплексной модернизации тележек грузовых вагонов на железных дорогах Украины. Сейчас модернизацию тележек выполняют на Крюковском вагоностроительном заводе при строительстве новых вагонов и на всех вагоноремонтных заводах

Украины в период капитальных ремонтов вагонов. На сегодняшний день модернизировано более 13000 тележек. Имеется положительное решение Комиссии Совета по железнодорожному транспорту полномочных представителей стран СНГ и Балтии о возможности эксплуатации полувагонов с комплексно модернизированными тележками на железных дорогах этих стран, а также рекомендации Комиссии Совета железнодорожным администрациям этих стран выполнять с 1 января 2008 г. предложенную комплексную модернизацию тележек модели 18-100 при плановых ремонтах грузовых вагонов инвентарного парка. В настоящее время начата модернизация опытных групп вагонов на железных дорогах России, Литвы, Казахстана.

**Проведенные работы по второму направлению.** В ИТМ выполнены теоретические исследования по выбору параметров ряда тележек новых конструкций. Это, в частности, тележки модели 18-4129 (разработка Украины) и ICG Motion Control (разработка США), предназначенные для эксплуатации на железных дорогах колеи 1520 мм в грузовых вагонах с увеличенной до 245 кН нагрузкой от оси на рельсы.

Конструкция тележки модели 18-4129 отличается от серийной тележки модели 18-100 наличием билинейного рессорного подвешивания, скользунов постоянного контакта, адаптеров в узлах опирания боковых рам на буксы, диагональных связей между боковыми рамами. В тележке модели ICG Motion Control также имеются скользуны постоянного контакта и адаптеры в буксовых узлах, однако их конструкция иная, чем в тележке модели 18-4129.

Проведены исследования динамических качеств и износа колес порожних и груженых полувагонов нового поколения с новыми тележками, оборудованными колесами с неизношенными и среднеизношенными профилями ободьев, при движении с разными скоростями по прямым и криволинейным участкам рельсового пути.

Сделано сравнение полученных расчетных показателей динамических качеств полувагона нового поколения с тележками модели 18-4129 и ICG Motion Control с аналогичными данными для типового полувагона модели 12-783 с тележками 18-100, а также с экспериментальными данными для полувагона нового поколения УВЗ с российскими тележками модели 18-579 (18-194-1) в двух вариантах исполнения (УВЗ 1 и УВЗ 2).

Для расчетов использовалось входное возмущение, которое построено в ИТМ в виде преобразованных данных путеизмерителя (с учетом его амплитудно-частотной характеристики) на отдельных участках железнодорожных путей. Анализ этих данных показал, что частотный состав неровностей на разных участках пути примерно одинаков, а уровень может существенно отличаться. Для оценки динамических качеств вагонов нового поколения с перспективными украинскими и российскими тележками частотный состав возмущения принимался таким, как на участке, где проводятся испытания украинских вагонов, а расчетные уровни возмущений, действующих на вагоны со стороны пути, подбирались с учетом экспериментальных данных о динамических показателях типового полувагона, полученных на скоростном полигоне, где проводятся испытания российских вагонов.

По результатам компьютерного моделирования сделаны следующие выводы. Тележки моделей 18-4129 и ICG Motion Control со стандартным профилем колес могут использоваться в полувагоне нового поколения для эксплуатации в порожнем и груженом состояниях на прямых участках пути со

скоростями до 120 км/ч включительно, на круговых кривых радиусов 300 м и 650 м – со скоростями до 80 км/ч и 100 км/ч соответственно. При этом движение полувагона будет устойчивым, значения показателей его динамических качеств по вертикали и по горизонтали, в основном, не превысят допустимых значений для «хорошего» хода вагона. Однако необходимо принять меры по снижению износа стандартных колес у полувагонов нового поколения с тележками ICG Motion Control, поскольку при движении в кривых, особенно малого радиуса, он выше, чем у типового полувагона.

Полученные результаты использованы при выборе параметров модели тележек для эксплуатации в полувагонах нового поколения.

**Создание датчиков и усилительных блоков с фильтрами для измерения виброускорений.** Для измерения виброускорений при экспериментальных исследованиях динамической нагруженности элементов различных объектов разработаны конструкция и принципиальная электрическая схема, проведен монтаж, наладка, лабораторные и полевые испытания высокоточных одно- (ПДУ-5, ПДУ-50), двух- (ПДУ-205) и трехосных (ПДУ-305) датчиков с аналоговыми выходами и усилительных блоков с фильтрами к ним. Датчики ПДУ-5, ПДУ-205 и ПДУ-305 предназначены для измерения виброускорений в диапазоне  $\pm 5$  g, датчик ПДУ-50 – в диапазоне  $\pm 50$  g. Основные характеристики датчиков приведены в таблице.

Датчик, тип	Диапазон измерений, g	Чувствительность, мВ/g	Ширина полосы частот, кГц	Питание, В	Рабочий диапазон температур, °С
ПДУ-5	$\pm 5$	250, 500 750, 1000	0÷10	5	от -40 до +85
ПДУ-205	$\pm 5$	174	0÷0,5	5	от -20 до +70
ПДУ-305	$\pm 5$	174	0÷0,5	5	от -20 до +70
ПДУ-50	$\pm 50$	38	0÷1	5	от -40 до +70

Усилительные блоки с фильтрами конструктивно выполнены в виде блоков-приставок УБ-1К, УБ-2К, УБ-3К, соответственно, для одно-, двух- и трехосных датчиков, которые позволяют проводить обработку сигнала, поступающего с датчика (по каждой координате), в диапазоне частот 0÷30, 0÷100 Гц с необходимыми коэффициентами усиления измерительного канала (4, 8, 12, 16) и передачу его на регистратор. Усилительные блоки могут располагаться как в непосредственной близости к датчикам, так и возле регистратора.

#### **Основные результаты в области создания изделий ракетно-космической техники**

**Определение параметров орбит космических аппаратов.** Несмотря на интенсивное развитие космической науки, точность определения состояния (положения и скорости) как наземных, так и космических объектов, обеспечиваемая существующими технологиями, для ряда практически важных задач (навигации, дистанционного зондирования Земли, картографии, океанографии и др.) является неудовлетворительной. Традиционные методы не всегда эффективны при высоких требованиях к точности оценивания, что постоянно стимулирует разработку новых эффективных методов и технических

решений для определения движения космических аппаратов на основе статистической обработки измерительной информации.

В институте разработан новый метод оценивания параметров орбит космических аппаратов – метод согласованных измерений [44, 45], представляющий собой развитие известного метода гарантированных оценок. Этот метод предъявляет сравнительно слабые и легко проверяемые требования к ошибкам измерений, благодаря чему в ряде практически важных случаев он обеспечивает более высокую (иногда значительно) точность определения состояния как наземных, так и космических объектов.

Простота и наглядность метода позволяет эффективно использовать его на этапах планирования и предварительной обработки измерений. Разработанный метод согласованных измерений был использован при экспертизе качества измерений наземной станции совмещенной командно-телеметрической радиолинии для космических аппаратов «Микроспутник» и «EgyptSat». В результате был выявлен ряд ошибок в программном обеспечении наземной станции и выполнен анализ эффективности мер, принятых разработчиком по устранению указанных ошибок.

**Сингулярно возмущенные механические системы.** При исследовании динамики многоэлементных механических систем часто пренебрегают массо-инерционными характеристиками отдельных элементов, полагая их равными нулю. Классическая механика имеет дело только с частицами (материальными точками) ненулевой (положительной) массы, однако нередко использование нулевых масс вполне допустимо. Это, в частности, касается случаев, когда уравнения движения регулярные и удовлетворяют известным теоремам о существовании, единственности и непрерывной зависимости решения задачи Коши от параметров. Вместе с тем, существуют механические системы, уравнения движения которых после обнуления малых масс становятся вырожденными и поэтому не подпадают под действие данных теорем. Вопрос о корректности обнуления малых масс для таких систем становится нетривиальным. Кроме того, вырожденность уравнений движения приводит к серьезным проблемам как при отыскании решений уравнений движения, так и при их численном и качественном анализе.

В институте длительное время изучаются системы массовых и безмассовых частиц. Исследованы особенности описания этих систем и свойства соответствующих уравнений движения. Также рассмотрен вопрос о корректности процедуры обнуления малых масс как вопрос о непрерывной зависимости решения сингулярно возмущенных уравнений движения от малого параметра [46 – 48, <http://mzhecheve.web.optima.com.ua>].

**Поочередное управление.** Еще одно направление фундаментальных исследований связано с поочередным управлением [49]. Поочередное воздействие характеризуется тем, что в каждый момент времени оно приложено к одному и только одному входу. Если в данный момент времени подвижное управление приложено к данному входу, то все оставшиеся входы считаются свободными от этого воздействия, то есть входные воздействия на все оставшиеся входы равны нулю. В другой момент времени поочередное входное воздействие может переключиться на следующий вход или вернуться к прежнему входу и т.д. Получен ряд результатов по управляемости, устойчивости и оптимальному управлению механическими системами с поочередным управлением [28].

**Исследования нагруженности ракет-носителей при морской транспортировке.** Выполнены исследования по оценке нагруженности ступеней ракет-носителей (РН) «Циклон-4» при морской транспортировке в грузовом отсеке судна с территории Украины в Бразилию (космодром Алькантара) с учетом разной степени балльности морского волнения [50 – 52]. Условия морской транспортировки имеют ряд специфических особенностей по сравнению с другими видами транспортировки, например, железнодорожной или автомобильной [53]. Это в первую очередь связано с невозможностью гарантирования благоприятных условий плавания по всему маршруту. С этой точки зрения перевозка морем особо ответственных, дорогостоящих и чувствительных к перегрузкам объектов, какими являются РН, требует повышенного внимания к оценке риска для судна и перевозимого груза на всем маршруте транспортировки. Рассмотренный в работе маршрут морской транспортировки начинается в сравнительно спокойном Черноморском регионе (от порта Октябрьский) и далее пролегает по Атлантическому океану к берегам Южной Америки. Если начальные участки маршрута имеют, как правило, благоприятные условия для плавания, то Атлантический океан значительно чаще подвержен действию штормовых ветров. К сожалению, в достаточно сильных штормах при стечении неблагоприятных обстоятельств гибнут не только малые суда, но и крупные современные суда с длинами в 200 – 250 м и более.

Проведен анализ и обобщены долговременные статистические данные о волновых режимах на маршруте транспортирования РН, что позволило построить обобщенную спектральную модель нерегулярного морского волнения на этом маршруте с детальным учетом особенностей спектров реальных режимов волнения в морях и океанах. На основе разработанной спектральной модели построены типичные спектры нерегулярного волнения различной интенсивности – от слабого до сильного. По этим спектрам для выбранных режимов волнения на интервалах квазистационарности, достаточных для получения надежных оценок краткосрочных статистических характеристик волнения и качки, рассчитаны временные реализации волновых ординат, хорошо согласующиеся с имеющимися данными из литературных источников.

В рамках линейной модели разработана методика расчета обобщенной качки судна при движении произвольными курсовыми углами к регулярным волнам малой амплитуды. По результатам анализа найденных временных реализаций нерегулярного волнения для расчетов качки транспортировочного судна выбраны такие реализации волнения, которые включают характерные последовательности волн различных типов. При расчетах продольной качки варьировалась скорость поступательного движения судна с учетом уровня интенсивности волнения. Получены временные процессы перемещений и ускорений в заданных точках корпуса судна для наиболее важных случаев движения судна – встречным курсом и лагом к нерегулярным волнам, характерных для нештатной ситуации.

Результаты исследования продольной качки расчетного транспортировочного судна показали, что при увеличении интенсивности волнения максимальные вертикальные ускорения (в точках у носовой переборки) составляют (0,4 - 0,5)g.

Разработаны математические модели для оценки нагруженности элементов РН при морской транспортировке. С использованием этих моделей оценены наибольшие значения горизонтальных ускорений и динамические со-

ставляющие вертикальных ускорений на корпусе РН при движении расчетного транспортировочного судна встречным курсом и лагом к волне при штормовых погодных условиях.

Расчеты показали, что при движении судна встречным курсом к волнам для разного уровня морского волнения наибольшие вертикальные ускорения на корпусах частей РН наблюдаются в местах, наиболее удаленных от центра продольных колебаний судна. Однако, даже при морском волнении высокой балльности (высота волны 11 м) для рассматриваемого вида колебаний максимальные динамические ускорения на корпусах ступеней РН составляют не более  $3,3 \text{ м/с}^2$ , т.е. не превышают допустимый для изделия уровень 0,6 g. При этом вклад от килевой качки в величины ускорений может составлять до 65 %, в зависимости от расположения изделия в трюме. В условиях возможного выбора схемы загрузки трюма более предпочтительным с точки зрения уменьшения уровня вертикальных ускорений является вариант размещения грунтовых транспортных агрегатов с РН в трюме судна с максимальным смещением к кормовой переборке судна.

При движении судна лагом к волне уровень максимальных вертикальных ускорений на РН растет почти линейно с увеличением высоты волны. Однако он составляет примерно 20 % от ускорений, вызванных вертикальной качкой, и около 5 % – от допустимого значения (0,6 g). Несколько выше при этом виде колебаний судна максимальные горизонтальные ускорения на корпусе РН – около 10 % от допустимого значения. В целом, возмущение типа бортовой качки расчетного транспортировочного судна при рассмотренных высотах морской волны не приводит к недопустимым перегрузкам на РН.

Проведенные исследования позволили дать предварительные оценки нагруженности РН при транспортировании морем в штормовых условиях.

1. *Ushkalov V. F. Creep forces identification in a car wheel-rail contact point / V. F. Ushkalov, S. F. Red'ko, I. A. Serebriany // Ingegneria Ferroviaria. – 1998. – 11. – P. 769 – 778.*
2. *Ushkalov V. F. On Effect of Bogie Construction on Dynamic Performance of Railway Vehicles and Their Wheel-Wear / V. F. Ushkalov, T. F. Mokriy, I. Y. Shevtsov // Proceedings of the 4 th International Conference on Railway Bogies and Running Gears. – Budapest, Hungary, 1998. – P. 223 – 232.*
3. *Ushkalov V. F. Effect of the Wheel Profile on Dynamics of rail vehicle and Wear of the Wheel/Rail Contact Pair / V. F. Ushkalov // Proc. of International Heavy Haul Association STS-conference "Wheel/Rail Interface". –1999. – Vol. 1. – P. 87 – 94.*
4. *Ушкалов В. Ф. О возможном улучшении динамических качеств грузового вагона и снижении износа пары "колесо-рельс" / В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрий, И. Ю. Мальшева, Л. А. Гальченко // Техническая механика. – 2000. – № 1. – С. 83 – 89.*
5. *Ушкалов В. Ф. Влияние условий контакта колес с рельсами на динамические качества грузовых вагонов / В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрий, И. А. Мащенко, И. Е. Шевцов // Техническая механика. – 2002. – № 1. – С. 146 – 152.*
6. *Ушкалов В. Ф. Об оценке эффективности использования колес с разными профилями ободьев в железнодорожных вагонах / В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрий, И. А. Мащенко, И. Ю. Мальшева // Техническая механика. – 2002. – № 2. – С. 121 – 127.*
7. *Ушкалов В. Ф. Создание новых профилей обода железнодорожных колес для снижения их износа при использовании в типовых тележках ЦНИИ-ХЗ / В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрий, И. А. Мащенко, И. Е. Шевцов // Техническая механика. – 2002. – №2. – С. 132 – 138.*
8. *Ушкалов В. Ф. Влияние на динамические качества полувагонов с тележками модели 18-100 замены стандартного профиля колес профилем ИТМ-73 / В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрий, И. Ю. Мальшева, И. А. Мащенко, Д. И. Гриценко // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна. – 2006. – Вып. 11. – С. 167 – 170.*
9. *Патент на винахід 42054 Україна, МПК В 60В 21/02. Обід залізничного колеса (Варіанти) : Патент на винахід 42054 Україна, МПК В 60В 21/02 В. Ф. Ушкалов (Україна), Т. Ф. Мокрій (Україна), І. Ю. Малишева (Україна), І. О. Мащенко (Україна), І. С. Шевцов (Україна) – 97084406 ; Заявл. 29.08.1997 ; Опубл. 15.10.2001, Бюл. № 9.*
10. *Деклараційний патент на корисну модель 1181 Україна, МПК В 60В 21/02. Викружка обода залізничного колеса : Деклараційний патент на корисну модель 1181 Україна, МПК В 60В 21/02*

- В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрий, І. О. Мащенко* – № 2001064277 ; Заявл. 20.06.2001 ; Опубл. 15.03.2002, Бюл. № 3.
11. Декларацийний патент на корисну модель 1182 України, МПК В 60В 21/02. Профіль обода залізничного колеса : Декларацийний патент на корисну модель 1182 України, МПК В 60В 21/02 *В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрий, І. О. Мащенко* . – № 2001064278 ; Заявл. 20.06.2001 ; Опубл. 15.03.2002, Бюл. № 3.
  12. Свидетельство на полезную модель 22099 Российской Федерации, МПК В 60В 21/02. Профиль обода железнодорожного колеса : Свидетельство на полезную модель 22099 Российской Федерации, МПК В 60В 21/02 *В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрий, И. А. Мащенко* . – № 2001125557/20 ; Заявл. 26.09.2001 ; Опубл. – 10.03.2002, Бюл. № 7.
  13. Свидетельство на полезную модель 22100 Российской Федерации, МПК В 60В 21/02. Выкружка обода железнодорожного колеса : Свидетельство на полезную модель 22100 Российской Федерации, МПК В 60В 21/02 *В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрий, И. А. Мащенко* – № 2001125579/20 ; Заявл. 26.09.2001 ; Опубл. – 10.03.2002. Бюл. № 7.
  14. Свидетельство на полезную модель 26208 Российской Федерации, МПК В60В 21/00. Профиль поверхности обода железнодорожного колеса : Свидетельство на полезную модель 26208 Российской Федерации, МПК В60В 21/00 *В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрий, И. А. Мащенко* . – № 2002109686/20 ; Заявл. 15.04.2002 ; Опубл. 20.11.2002, Бюл. №32.
  15. *Ушкалов В. Ф.* Разработка рационального профиля головки рельса с несимметричной поверхностью катания / *В. Ф. Ушкалов, И. А. Серебряный, И. В. Подъельников* // *Техническая механика*. – 2008. – №1. – С.31 – 37.
  16. *Ushkalov V.* Study on the loss of the motion stability of freight wagons running on standard and upgraded trucks at different level of their wheel wear / *V. Ushkalov, I. Serebryanyi, L. Lapina* // *Proceedings of the 5th International conference on "Railway bogies and running gears"*, 24–26 September, 2001, Budapest, Hungary.– Budapest, 2001. – P. 253 – 261.
  17. *Ushkalov V. F.* Investigation of Dynamics in a Subsystem "Bogie Beam – Wedges – Bogie Side" of the Bogie / *V. F. Ushkalov, M. M. Zhechev* // *International Applied Mechanics*. – 2002. – Vol. 38, № 11. – P. 137 – 144.
  18. *Жечев М. М.* Численное моделирование динамики систем с кулоновым трением / *М. М. Жечев* // *Техническая механика*. – 2003. – № 1. – С. 101 – 106.
  19. *Ушкалов В. Ф.* Зависимость сил трения в фрикционном демпфере от вертикального перемещения над-рессорной балки / *В. Ф. Ушкалов, М. М. Жечев, И. А. Серебряный, М. В. Скатенок* // *Техническая механика*. – 2003. – № 2. – С. 109 – 120.
  20. *Ушкалов В. Ф.* Явление "jamming" в динамике вагона с тележками 18–100 / *В. Ф. Ушкалов, М. М. Жечев, А. Д. МакКисик* // *Вестник ВНИИЖТ*. – 2004. – № 2. – С. 9 – 13.
  21. *Жечев М. М.* Необходимые условия "wedging" ("заклинивания") в системах с кулоновым трением / *М. М. Жечев, М. В. Скатенок* // *Техническая механика*. – 2004. – № 1. – С. 31 – 39.
  22. *Ушкалов В. Ф.* О возможности возникновения "jamming" при движении колёсной пары в поперечной плоскости / *В. Ф. Ушкалов, М. М. Жечев, М. В. Скатенок* // *Техническая механика*. – 2004. – № 2. – С. 45 – 49.
  23. *Жечев М. М.* Явление "wedging" в системах с сухим трением / *М. М. Жечев, М. В. Скатенок* // *Механика твёрдого тела*. – 2004. – № 34. – С. 194 – 198.
  24. *Скатенок М. В.* Аналитические условия заклинивания в системах с фрикционными контактами / *М. В. Скатенок* // *Механика твёрдого тела*. – 2005. – № 35. – С. 145 – 153.
  25. *Жечев М. М.* Механические системы с кулоновым трением, допускающие заклинивание / *М. М. Жечев, М. В. Скатенок* // *Техническая механика*. – 2005. – № 1. – С. 22 – 35.
  26. *Скатенок М. В.* Аналитические условия заклинивания в движении для систем с кулоновым трением / *М. В. Скатенок* // *Техническая механика*. – 2006. – № 2. – С. 32 – 47.
  27. *Ushkalov V. F.* Possibility of jamming and wedging in the three-piece trucks of a moving freight car / *V. F. Ushkalov, M. M. Zhechev, A. D. McKisic* // *Vehicle System Dynamics*. – 2007. – Vol. 45, № 1. – P. 61 – 76.
  28. *Жечев М. М.* Поочередное управление / *М. М. Жечев*. – Киев: Наукова думка, 2003. – 188 с.
  29. *Zhechev M. M.* On the admissibility of given acceleration-dependent forces in mechanics / *M. M. Zhechev* // *Journal of Applied Mechanics*. – Transactions of the ASME. – 2007. – Vol. 74, № 1. – P. 107 – 110.
  30. *Zhechev M. M.* Peculiarities of the use of acceleration-dependent forces in mechanical problems / *M. M. Zhechev* // *Journal of Multi-body Dynamics*. – 2007. – Vol. 221, № K4. – P. 497 – 503.
  31. *Ушкалов В. Ф.* Влияние конструкции и состояния ходовых частей пассажирского вагона на износ пары "колесо-рельс" / *В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрий, И. А. Мащенко, Л. А. Гальченко* // *Техническая механика*. – 2000. – № 2. – С. 57 – 63.
  32. Декларацийний патент на корисну модель № 1802 України, МКИ В 61F 5/14. Пружно-котковий ковзун для візків вантажних залізничних вагонів : Декларацийний патент на корисну модель № 1802 України, МКИ В 61F 5/14 *В. Ф. Ушкалов (UA), Брюс Г. Гатнарек (US), Деніс Л. Рен (US)* . – № 2002097474 ; Заявл. 16.09.2002 ; Опубл. – 15.05.2003, Бюл. № 5.
  33. Декларацийний патент на корисну модель № 1803 України, МКИ В 61F 5/12. Фрикційний клин : Декларацийний патент на корисну модель № 1803 України, МКИ В 61F 5/12 *В. Ф. Ушкалов (UA), Брюс Г. Гатнарек (US), Джеймс Ф. Райт (US)* . – № 2002097475 ; Заявл. 16.09.2002 ; Опубл. – 15.05.2003, Бюл. № 5.

34. Деклараци́нный патент на корисну модель № 1804 України, МКИ В 61F 5/14. Пружно-котковий ковзун : Деклараци́нный патент на корисну модель № 1804 України, МКИ В 61F 5/14 *В. Ф. Ушкалов (UA), Брюс Г. Гатнарк (US), Деніс Л. Рен (US)* – № 2002097476 ; Заявл. 16.09.2002 ; Опубл. – 15.05.2003, Бюл. №5.
35. Свидетельство на полезную модель № 29019 Российской Федерации, МКИ В 61F 5/14. Упруго-катковий скользящий для тележек грузовых железнодорожных вагонов : Свидетельство на полезную модель № 29019 Российской Федерации, МКИ В 61F 5/14 *В. Ф. Ушкалов (UA), Брюс Г. Гатнарк (US), Деніс Л. Рен (US)*. – № 2002124395/20 ; Заявл. 19.09.2002 ; Опубл. 27.04.2003, Бюл. № 12.
36. Свидетельство на полезную модель № 29020 Российской Федерации, МКИ В 61F 5/14. Упруго-катковий скользящий : *В. Ф. Ушкалов (UA), Брюс Г. Гатнарк (US), Деніс Л. Рен (US)*. – № 2002124396/20 ; Заявл. 19.09.2002 ; Опубл. 27.04.2003, Бюл. № 12.
37. Свидетельство на полезную модель № 29276 Российской Федерации, МКИ В 61F 5/12. Фрикционный клин : Свидетельство на полезную модель № 29276 Российской Федерации, МКИ В 61F 5/12 *В. Ф. Ушкалов (UA), Брюс Г. Гатнарк (US), Джеймс Ф. Райт (US)*. – № 2002124394/20 ; Заявл. 19.09.2002 ; Опубл. 10.05.2003, Бюл. № 13.
38. *Ушкалов В. Ф.* Выбор рациональных значений жесткости дополнительных упругих элементов в узлах сочленения корпуса буксы с боковой рамой / *В. Ф. Ушкалов, И. А. Серебряный, Л. Г. Лапина* // *Техническая механика*. – 2004. – № 2. – С. 111 – 115.
39. *Ушкалов В. Ф.* Исследование динамики грузового вагона с дополнительными связями между элементами ходовых частей / *В. Ф. Ушкалов, И. А. Серебряный, Л. Г. Лапина* // *Техническая механика*. – 2006. – № 1. – С. 26 – 31.
40. *Ушкалов В. Ф.* Модернізація ходових частин вантажних вагонів / *В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрій, М. М. Жечев, І. О. Серебряний, І. Ю. Малышева* // *Залізничний транспорт України*. – 2003. – № 5. – С. 33 – 36.
41. *Ушкалов В. Ф.* Комплексная модернизация тележек грузовых вагонов – путь к улучшению взаимодействия колес и рельсов / *В. Ф. Ушкалов* // *Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути : научно-практическая конференция, 2003, Щербинка, Россия*. – 2003. – С. 43 – 46.
42. *Gregg Hansen W. M.* Комплексная модернизация тележек 18-100 для снижения износа колес и повышения ходовых качеств грузовых вагонов / *W. M. Gregg Hansen, А. Д. Лашко, В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрій, І. Ю. Малышева, І. А. Мащенко* // *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна*. – 2004. – Вып. 5 – С. 215 – 219.
43. *Ушкалов В. Ф.* Комплексная модернизация ходовых частей грузовых вагонов / *В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрій, І. Ю. Малышева, І. А. Мащенко, С. С. Пасичник* // *Вагонный парк*. – 2007. – № 2. – С. 18 – 22.
44. *Жечев М. М.* Метод согласованных измерений определения движения КА / *М. М. Жечев, А. Д. Шептун* // *Техническая механика*. – 2002. – № 2. – С. 36 – 44.
45. *Zhechev M. M.* Consistent Measurements Method for Spacecraft Orbit Determination / *M. M. Zhechev, A. D. Sheptun, O. M. Ventskovsky, N. B. Gorev, I. V. Mashtak* // *European Journal of Navigation*. – 2006. – Vol. 4, № 3. – P. 55 – 60.
46. *Жечев М. М.* Сингулярно возмущенные механические системы / *М. М. Жечев*. – Днепропетровск : ИТМ НАНУ и НКАУ, 1998. – 131 с.
47. *Zhechev M. M.* Asymptotic stability of the equilibrium of singular mechanical systems / *M. M. Zhechev* // *Automation and Remote Control*. – 2001. – Vol. 62, № 3. – P. 383 – 390.
48. *Zhechev M. M.* Equations of motion for singular systems of massed and massless bodies / *M. M. Zhechev* // *Journal of Multi-body Dynamics*. – 2007. – Vol. 221, № K4. – P. 591 – 597.
49. *Zhechev M. M.* The equilibrium position of autonomous systems: Stabilization by a sequential control / *M. M. Zhechev* // *Automation and Remote Control*. – 1998. – Vol. 59, № 3, Part 1. – P. 305 – 309.
50. *Ушкалов В. Ф.* Проблемы и задачи обеспечения безопасной транспортировки ракет-носителей морским путем / *В. Ф. Ушкалов, А. Н. Сердюченко* // *Техническая механика*. – 2005. – № 2. – С. 75 – 89.
51. *Ушкалов В. Ф.* Ускорения, возникающие при морской транспортировке ракет-носителей в условиях волнения и качки судна / *В. Ф. Ушкалов, А. Н. Сердюченко, А. К. Шерсток* // *Техническая механика*. – 2006. – №2. – С. 20 – 31.
52. *Ушкалов В. Ф.* Характеристика ветро-волновых режимов на маршруте морской транспортировки ракет-носителей из порта Украины к экватору / *В. Ф. Ушкалов, А. Н. Сердюченко* // *Техническая механика*. – 2007. – № 2. – С. 109 – 124.
53. *Ушкалов В. Ф.* Прогнозирование динамических качеств и оценка вибронгруженности изделий ракетно-космической техники при транспортировке по железной дороге / *В. Ф. Ушкалов, Г. И. Богомаз* // *Техническая механика*. – 2001. – № 2. – С. 99 – 109.

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 10.09.08,  
в окончательном варианте 19.09.08