

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 681.2.082:531.45

РИЗНООКАЯ
Наталия Николаевна

**УСТРОЙСТВО И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ МАЛЫХ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ ПРИ УПРУГОМ
КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.11.01 – Приборы и методы измерения
(по видам измерений)

Минск, 2011

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **Джилавдари Игорь Захарович**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Информационно-
измерительная техника и технологий»
Белорусского национального технического
университета

Официальные оппоненты: **Рудницкий Валерий Аркадьевич**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией контактно-
динамических методов контроля
Государственного научного учреждения
«Институт прикладной физики
Национальной академии наук Беларуси»;
Григорьев Андрей Яковлевич,
доктор технических наук,
заведующий лабораторией «Трибоанализ»
Государственного научного учреждения
«Институт механики металлополимерных
систем им. В. А. Белого Национальной
академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация Государственное научное учреждение
«Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 18 ноября 2011 г. в 14¹⁵ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.17 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, ауд. 202, e-mail: aantoshyn@mail.ru, тел. +375 (17) 293 95 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «17» октября 2011 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций

А.А. Антошин

© Ризноокая Н.Н., 2011

© БНТУ, 2011

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений развития современной техники и приборостроения является разработка методов измерения и контроля параметров трения и износа материалов и покрытий на начальном этапе движения контактирующих тел. Этот этап получил название «предварительное смещение». С подобного рода задачами сталкиваются разработчики микромеханических приборов и систем точного позиционирования, в таких областях как управление телескопами, управление оружием, робототехника, технология производства интегральных схем и т.п.

С целью уменьшения трения и износа, в технических устройствах и приборах часто используют элементы качения, работающие в условиях малых нагрузок, смещений и скоростей. Однако нелинейный и гистерезисный характер, а также малая величина трения качения в процессах предварительных смещений не позволяют измерять его параметры с высокой точностью и чувствительностью с помощью существующих устройств и методов. Поэтому механизмы и законы изменения моментов трения качения в процессах предварительных смещений до сих пор не вполне изучены. Это ограничивает точность существующих приборов и возможность управления этим трением.

Таким образом, в настоящее время в области исследования трения качения в режиме малых предварительных смещений и нагрузок существует проблема, поставленная потребностями науки и практики, а именно, проблема измерения параметров трения качения в самом начале движения и установление закономерностей их изменения в процессе смещения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь с крупными научными программами (проектами), темами. Диссертационная работа выполнялась в соответствии со следующими заданиями и программами:

– проект «Универсальный метод и устройство для исследования трения качения и адгезии на микроучастках поверхности материалов и покрытий» по заданию Т09-012 БРФФИ на период 2008–2011 гг. (гос. рег. № 20091221);

- проект «Метод и устройство для исследования физико-механических свойств поверхностей материалов и покрытий» в рамках гранта Министерства образования для студентов на 2008 г. (гос. рег. № 2008477);
- проект «Разработка нового метода и устройства для исследования упругости и диссипации энергии поверхности твердых тел и тонкопленочных покрытий» по заданию «Приборостроение 4.07.3» на 2004–2005 (гос. рег. № 20041176);
- проект «Исследование динамики маятника с опорой качения с целью создания чувствительного элемента нового маятникового гравиметра» по заданию «Механика 38» ГПОФИ «Исследование динамики и процессов управления в механических, гидравлических и газовых системах», на 2004–2005 г. (гос. рег. № 20041179);
- проект «Разработка и исследование макета принципиально нового маятникового гравиметра» по ГКП «Электроника» на 2006–2008 гг. (гос. рег. № 20062000).

Тема диссертационной работы соответствует пункту 2.1. «Машиноведение; механика, надежность и безопасность машин и технических систем; трение и износ в машинах; теория проектирования, мехатронные системы машин и механизмов», пункту 2.2. «Физика, химия и механика поверхности; механика адаптивных материалов и конструкций, управление структурой и свойствами поверхности, в том числе на наноструктурном уровне» и пункту 7.8. «Методы и средства контроля технологии производства и электропараметров создаваемых полупроводниковых приборов и интегральных схем» из перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2005–2010 годы, утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17.05.2005 г. № 512.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка устройства и методов для измерения параметров трения качения в режиме предварительных смещений, значительно меньших радиуса пятна упругого контакта, на основе свободных качаний физического маятника, опирающегося двумя шариками на плоскую исследуемую поверхность, и установление механизмов и реальной зависимости момента трения качения от перемещения.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- разработать устройство и метод измерения амплитуд свободных качаний физического маятника, опирающегося двумя шариками на плоское основание, и соответствующих им моментов времени при амплитудах,

существенно меньших угла упругого контакта шариков и опорной поверхности;

– провести анализ факторов, вызывающих проскальзывание сферических опор маятника, в том числе и вибраций основания, на измерение параметров трения качения и разработать средства и методы устранения этого влияния;

– разработать метод измерения коэффициента сопротивления качению, обладающий существенно большей чувствительностью и точностью по сравнению со стандартизированным методом измерений этого параметра;

– установить аналитическую зависимость момента трения качения от амплитуды колебаний маятника и разработать методы измерения основных параметров трения качения на основе новой феноменологической модели момента трения качения, учитывающей основные механизмы диссипации энергии маятника;

– провести на опыте измерения основных параметров трения качения, подтвердить возможность расширения функциональных возможностей маятникового устройства, установить реальный вид зависимости момента трения качения от смещения, в том числе, вид кривых гистерезиса момента трения качения в режиме малых предварительных смещений и оценить погрешности измерений.

Объектом исследования является трение качения при упругом контакте твердых тел в процессе циклических перемещений.

Предметом исследования являются параметры и закономерности трения качения в процессе малого предварительного смещения.

Выбор объекта и предмета исследований обусловлен практическими потребностями современной промышленности в разработке высокочувствительных и высокоточных приборов и методов контроля физико-механических параметров поверхностей материалов и покрытий на микроучастках поверхности, а также для повышения точности современных систем точного позиционирования.

Положения, выносимые на защиту:

– измерительное устройство на принципе свободных качаний физического маятника с опорой в виде двух шариков, центр масс которого находится на мгновенной оси вращения, что устраняет проскальзывания шариков и влияние вибраций основания; в совокупности данное устройство позволяет проводить измерения амплитуд качаний маятника в угловом интервале от 2 до 600 угловых секунд с относительной погрешностью от 10 % до 0,6 %, соответственно, которые не доступны стандартизированному маятниковому средству измерений;

– метод измерения коэффициента сопротивления качению, в котором измеряют все амплитуды колебаний маятника и рассчитывают полное угловое перемещение маятника за все время колебаний, тем самым, исключают методическую погрешность, которая присуща стандартизированному методу по ГОСТ 27640–88 и связана с законом затухания амплитуды, что в совокупности с разработанным измерительным устройством позволяет достигнуть чувствительности и абсолютной погрешности измерений на уровне 10^{-8} , не доступных другим маятниковым методам измерений;

– теоретически установленные и экспериментально подтвержденные аналитическая зависимость момента трения качения от смещения шариков в режиме малых предварительных смещений и аналитический вид зависимости амплитуды колебаний маятника от времени на основе предложенной новой модели зависимости момента трения качения от угла отклонения маятника, учитывающей связь потерь энергии маятника с частотно-независимыми потерями на внутреннее трение и работу сил адгезии на отрыв;

– метод измерения момента трения качения, основанный на аппроксимации экспериментально полученной зависимости амплитуды от времени, аналитической зависимостью, обеспечивающий чувствительность измерений порядка 10^{-10} Н·м и погрешность не более 10 %, существенно расширяющий функциональные возможности маятникового метода измерений, что позволяет прецизионно определять различные параметры трения качения, а также поверхностную плотность работы адгезии на отрыв на уровне 10^{-3} Дж/м².

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертационного исследования получены автором диссертации самостоятельно. Совместно с научным руководителем автор диссертации определил предмет исследований, разработал эскизный проект измерительного устройства и участвовал в его изготовлении, а также сформулировал основные задачи исследования, положения, выводы и рекомендации диссертации.

Непосредственно автор разработал оптико-электронные системы калибровки и формирования измерительного сигнала, а также алгоритм выделения измерительного сигнала на фоне шумов измерительной цепи. Кроме того, автор провел комплекс теоретических и экспериментальных исследований по разработке методов измерения параметров трения качения в области малых предварительных смещений.

Пилипенко В.А. принимал участие в обсуждении механизмов влияния адгезии на свободные качания физического маятника с опорой на два

шарика [6, 17]. Чижик С.А. давал практические рекомендации при разработке способа измерения коэффициента трения качения [27].

Апробация результатов диссертации. Основные результаты исследований были доложены и обсуждены на следующих международных научно-технических конференциях: «Приборостроение» (Минск, 2008, 2009, 2010 г.), «Полимерные композиты и трибология «ПОЛИКОМТРИБ» (Гомель, 2007, 2009, 2011 г.), «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2007, 2008, 2009, 2010 г.), «Метрология-2009» (Минск, 2009 г.), «Техника и технологии: инновации и качество» (Барановичи, 2008 г.); международных конференциях молодых ученых «Новые направления развития приборостроения» (Минск, 2008 г.), «Исследование и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (Гомель, 2008 г.)

Опубликованность результатов. Основные результаты работы опубликованы в 30 печатных работах (7 а. л.), включая: 3 статьи в научных журналах согласно перечню научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по научному направлению «Приборостроение» (1,2 а. л.), 7 статей в научных рецензируемых журналах, 13 докладов в трудах конференций, 3 тезиса докладов, 3 патента на изобретение Республики Беларусь (0,9 а. л.) и 1 заявку на изобретение с положительным решением на выдачу патента.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем диссертации – 171 страниц, включая 59 рис. и 8 табл. на 45 страницах, список использованных источников из 94 наименований на 7 страницах, список опубликованных работ автора из 30 наименований на 4 страницах, 10 приложений на 27 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении отражена актуальность темы диссертации, дан краткий анализ состояния проблемы измерения параметров трения качения в процессах предварительных смещений (ПС), обоснована необходимость и определены основные направления диссертационного исследования.

В первой главе «Измерение параметров трения качения в процессе предварительного смещения» излагаются краткая история развития теории трения качения и современное представление о его механизмах. Рассматриваются исследования трения качения в режиме предварительного

смещения. Описываются основные теоретические модели зависимости трения качения от смещения и выделяются нерешенные проблемы. К ним относятся: отсутствие ясного представления о механизмах трения качения при малых нагрузках и предельно малых смещениях, отсутствие точных методов и средств измерения параметров этого трения, а также отсутствие методов и средств определения с высокой точностью реальных зависимостей моментов трения от перемещения.

Описывается стандартизированное маятниковое устройство по ГОСТ 27640–88, представляющее интерес с точки зрения его принципа действия. Рассматриваются работы, в которых приводятся результаты исследований трения качения с помощью данного устройства, выделяются его недостатки и недостатки применяемой методики, которые не позволяют их применять непосредственно для исследований трения качения в процессах малых ПС.

На основании выявленных проблем, определены объект и предмет диссертационного исследования, а также сформулированы его цель и задачи.

Во второй главе «Устройство для измерения параметров трения качения в режиме малых смещений на пятне упругого контакта» описывается разработанное в диссертации устройство, которое предназначено для измерения параметров трения качения в области малых ПС, т.е. в области, в которой перемещения тела качения существенно меньше радиуса пятна упругого контакта.

Разработанное устройство показано на рисунке 1 (на рисунке не показан каркас установки 1, на который крепятся все элементы).

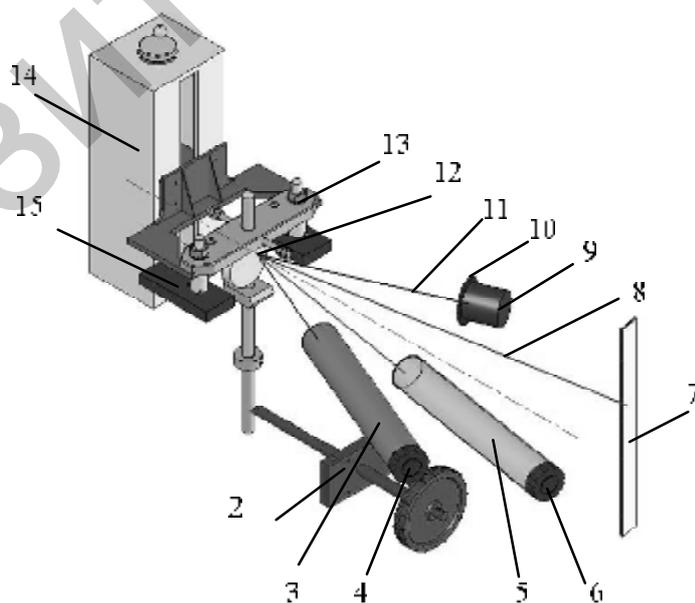


Рисунок 1 – Устройство для измерения параметров трения качения в режиме малых предварительных смещений

Данное устройство работает следующим образом. Объект исследования в виде двух плоских пластин крепят на площадках 15. На эти пластины опускают маятник 13, пользуясь механизмом установки и регулировки положения маятника 14. Ожидают состояния покоя маятника 13. Фокусируют с помощью устройства 5 луч 8 лазера 6, отраженный от зеркала 12, закрепленного на маятнике 13, на линейку 7, фиксируют это положение, и принимают его за положение покоя. Затем маятник 13 отклоняют до регулируемого упора 2 на заданный угол, фиксируя этот угол по положению лазерного луча 8 на линейке 7. Затем маятник 13 освобождают, и он начинает совершать свободные затухающие колебания.

Угловые отклонения маятника 13 в процессе колебаний фиксируют по положению луча 11 лазера 4, отраженного от зеркала 12, закрепленного на маятнике 13. Луч 11 лазера 4 фокусируется с помощью устройства 3 на оптико-электронный приемник 9, защищенный светофильтром 10, где формируется электрический сигнал, поступающий на персональный компьютер. Измерения проводят до тех пор, пока маятник не вернется в состояние равновесия.

Сигнал с оптико-электронного приемника 9, записывают и обрабатывают на персональном компьютере, используя разработанное в диссертации специализированное программное обеспечение, с помощью которого получают значения амплитуд, соответствующие им моменты времени и значения длительностей циклов (периодов) колебаний.

Данное устройство позволяет проводить измерения амплитуд колебаний маятника в интервале значений от 2 до 600 угловых секунд с погрешностью, обусловленной аддитивными шумами измерительной цепи и дискретностью аналого-цифрового преобразования, от 10 % до 0,6 %, соответственно, а также измерять длительности циклов колебаний с относительной погрешностью не превышающей 10^{-4} , которая обусловлена нестабильностью частоты тактового генератора компьютера.

В третьей главе «Анализ эффектов, вызывающих проскальзывания сферических опор в маятниковом устройстве, и минимизация их влияния» проведен анализ двух классических механизмов проскальзывания («по Рейнольдсу» и «по Хизкоуту») для случая свободных качаний маятника, опирающегося двумя шариками на плоское основание в условиях упругих деформаций контактирующих тел, и получены оценки соответствующих моментов трения качения. При максимальной амплитуде колебаний маятника, равной сто угловых секунд, и при нагрузке, равной 6 Н, эти проскальзывания приводят к появлению моментов трения, которые по порядку величины не превосходят 10^{-10} Н·м. При уменьшении амплитуды эти моменты уменьшаются до нуля.

В данной главе показано, что, вследствие самой динамики свободных качаний маятника, ускорение центра масс маятника всегда имеет горизонтальную составляющую, и это ускорение может приводить к проскальзыванию шариков. При этом момент трения качения может быть на три и более порядка больше моментов трения от проскальзывания по Рейнольдсу и по Хизкоуту. Поэтому этим проскальзыванием нельзя пренебрегать. В существующей литературе, посвященной маятниковому методу измерения трения качения, этот механизм не рассматривался.

Здесь также показано, что в случае, когда в состоянии покоя центр масс маятника находится на мгновенной оси вращения, при малых амплитудах качаний проскальзывания, возникающие как под действием ускоренного движения центра масс маятника, так и под влиянием горизонтальных и вертикальных вибраций основания, практически будут отсутствовать, т.е. такой маятник является «невозмущаемым».

Невозмущаемый маятник может быть реализован путем специальной балансировки. В данной главе описаны два способа балансировки, на которые получены патент на изобретение и положительное решение.

В четвертой главе «Методы измерения параметров трения качения в режиме предварительных смещений» предложена новая феноменологическая модель зависимости момента силы трения качения от перемещения тела качения (в данном случае, от угла отклонения маятника от положения равновесия или такого же угла поворота шариков при качении).

В диссертации на основе известных свойств момента трения качения в процессе ПС, приведенных в литературе, сделано предположение, что основные потери энергии маятника могут быть связаны с «частотно независимыми потерями энергии на внутреннее трение» в материале опорной поверхности. Кроме того, здесь сделано предположение о наличии стартового момента трения качения (момента трогания), который обусловлен работой сил адгезии при отрыве части поверхности шарика при его повороте на опорной поверхности. В этом случае момент трения качения, действующий на шарики (или через шарики на маятник), имеет вид

$$M_{\text{СК}}(\varphi, \varphi) = -mgR(c + b\varphi^p)\text{sign}(\varphi), \quad (1)$$

где φ – угол отклонения маятника от положения равновесия;

m – масса маятника;

g – ускорение свободного падения;

R – радиус шарика;

b , p и c – постоянные, которые должны определяться из опыта.

Тогда уравнение малых колебаний маятника имеет вид

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega_0^2\varphi = -\omega_0^2(c + b\varphi^p)\text{sign}\left(\frac{d\varphi}{dt}\right), \quad (2)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{mgR}{I_c}} = \frac{2\pi}{T}$;

I_c – момент инерции маятника относительно центра масс.

Решение уравнения (2), которое находится в первом приближении асимптотической теории нелинейных колебаний, можно представить в виде зависимости времени t колебаний от амплитуды α :

$$t(\alpha) = -\frac{T}{4} \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\varphi}{\frac{1}{p+1} b\varphi^p + c}. \quad (3)$$

где α_0 – начальная амплитуда в радианах.

В этом приближении период T не зависит от амплитуды. На основе модели (1) и уравнения (3) в данной главе разработаны новые методы измерения параметров трения качения в режиме малых ПС, которые существенно расширяют функциональные возможности маятникового метода. Реализация этих методов сводится к следующим операциям: измеряют на опыте амплитуды колебаний маятника и соответствующие им моменты времени и затем аппроксимируют полученную экспериментальную зависимость аналитической зависимостью, определяемую формулой (3), и вычисляют коэффициенты b , p и c как параметры аппроксимации.

В свою очередь, это позволяет получить зависимость момента $M_{ск}$ как функцию угла φ по формуле (1). Далее, для любого значения φ , коэффициент трения качения можно определить по известной формуле:

$$f_k = \frac{|M_{ск}|}{mg}. \quad (4)$$

Из (1) можно видеть, что момент $M_0 = mgRc$ имеет смысл момента трогания (стартовый момент). При малых нагрузках возможность существования этого момента в литературе не рассматривалась и задача его измерения до сих пор не ставилась, по-видимому, вследствие недостаточной точности и чувствительности существующих средств измерений.

Кроме того, поскольку момент M_0 обусловлен силами адгезии, можно найти поверхностную плотность σ работы, необходимую для отрыва части поверхности шарика при его повороте на опорной поверхности:

$$\sigma = \frac{A_0(\varphi)}{2S(\varphi)} = \frac{mgc}{4a}, \quad (5)$$

где $A_0(\varphi)$ – работа момента трения M_0 , совершаемая при повороте маятника на угол $\varphi \ll 1$;

$S(\varphi)$ – площадь, на которой происходит отрыв поверхности шарика при повороте его на угол φ ;

a – радиус пятна контакта.

На этот метод измерения параметра σ получен патент на изобретение.

Предложена методика оценки интегральной погрешности методов измерений параметров трения, построенных на основе предложенной модели момента трения качения. Эта оценка основана на законе сохранения энергии и дается очевидной формулой

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{A_{\text{ск}}(c, b, p)}{\Delta W_{\text{пот}}} \right|, \quad (6)$$

где $A_{\text{ск}}(c, b, p)$ – работа, совершаемая силами трения качения за все время наблюдения колебаний, определяемая на основании предложенной модели;

$\Delta W_{\text{пот}}$ – изменение потенциальной энергии маятника, определяемое на основании измерений начальной и конечной амплитуд колебаний.

Также в данной главе предложен новый метод измерения коэффициента сопротивления качению $f_{\text{ск}}$, который можно применять при любых законах затухания амплитуды. Здесь проводят измерения всех амплитуд α_j колебаний маятника и определяют коэффициент $f_{\text{ск}}$ по следующей формуле

$$f_{\text{ск}} = \frac{\cos \alpha_n - \cos \alpha_0}{2(\alpha_0 + \alpha_n) + 4 \sum_{j=1}^{N-1} \alpha_j}. \quad (7)$$

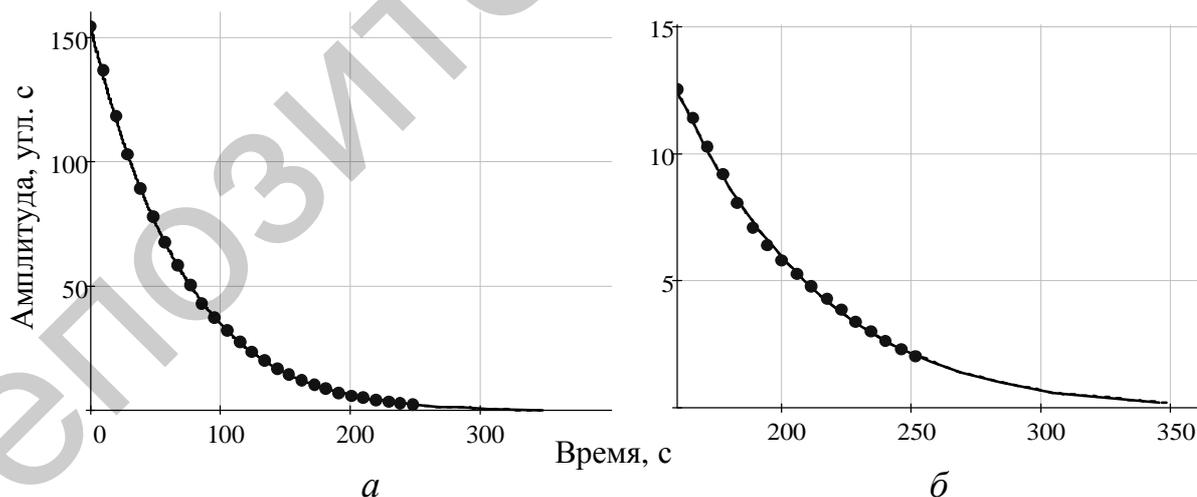
В отличие от стандартизированного метода (ГОСТ 27640–88), в данном методе отсутствует методическая погрешность, обусловленная отклонением закона затухания амплитуды во времени от линейного закона.

На этот метод определения коэффициента сопротивления качению получен патент на изобретение.

В пятой главе «Измерение параметров трения качения и анализ их результатов» описываются результаты исследований и измерений параметров трения качения в режиме малых ПС, полученные с помощью разработанных в диссертации методов и устройства. Этот режим является наиболее проблематичным для исследований, вследствие недостаточной чувствительности и точности использовавшихся ранее методов и средств измерений. Здесь представлены результаты измерений коэффициента $f_{ск}$, момента трения $M_{ск}$, коэффициента трения f_k и поверхностной плотности работы адгезии на отрыв, а также оценки погрешностей измерений.

В измерительном устройстве использовался маятник массой 1,256 кг, в опоре которого находились два шарика радиусом 5 мм, выполненные из прессованного корундового порошка (конструкция предполагает возможность использования шариков из любых твердых материалов). Эксперименты проводились на плоских полированных поверхностях материалов, которые широко используются в современном приборостроении: сталь ШХ15, оптическое стекло К8 и электротехнический кремний. Во всех опытах диапазон смещений шариков не превышал 8 мкм, в то время как радиус пятна упругого контакта находился в интервале от 55 мкм до 70 мкм. При этом нагрузка на шарики не превышала предела упругости материалов.

Во всех экспериментах наблюдалась существенно нелинейная зависимость амплитуды колебаний маятника от времени (рисунок 2).



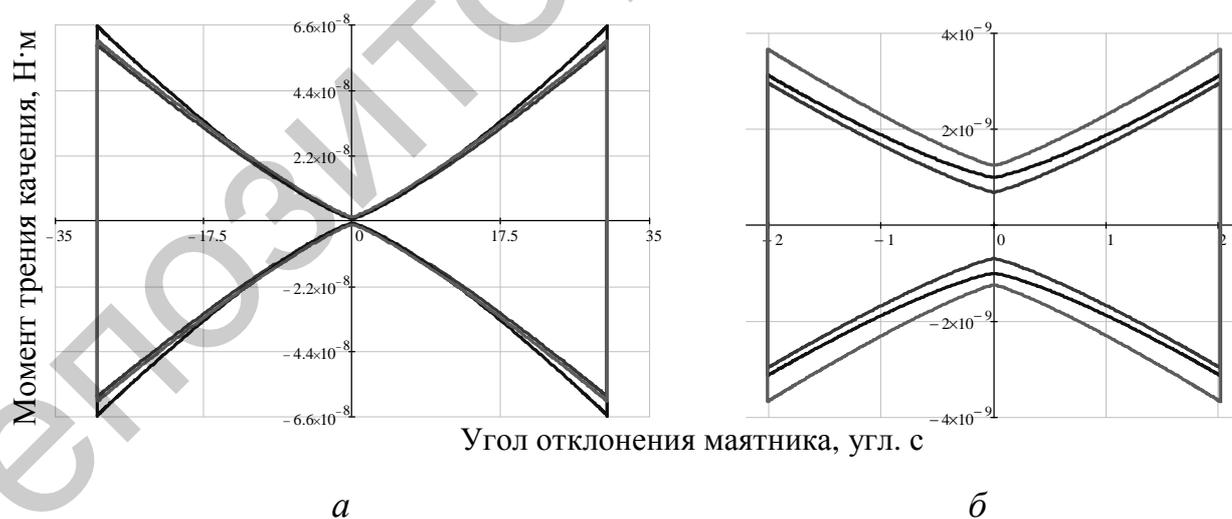
● – результат измерения; — – кривая аппроксимации; *a* – полная реализация (показана каждая пятая амплитуда); *б* – заключительная часть реализации (показана каждая третья амплитуда)

Рисунок 2 – Зависимость амплитуды от времени для пары корунд – стекло К8 при начальной амплитуде 153 угл. с

Применение процедуры нелинейной аппроксимации и формулы (3) позволили установить аналитическую зависимость амплитуды свободных колебаний физического маятника от времени с относительным СКО порядка 0,1 % (адекватность реальной и теоретической зависимостей видна из рисунка 2). До сих пор такая задача не могла быть решена.

При измерениях коэффициента $f_{ск}$ были получены значения порядка от 10^{-6} до 10^{-8} при абсолютной погрешности на уровне 10^{-8} в интервале амплитуд колебаний от 300 до 2 угловых секунд, соответственно. Отметим, что стандартный метод измерений может обеспечить измерения этого параметра с минимальным значением порядка 10^{-5} при амплитудах, больших 70 угл. мин при условии, что закон затухания амплитуды является линейным.

Был установлен вид реальных гистерезисных кривых для зависимости момента трения качения от перемещения, в том числе, в самом начале качения, что решает одну из основных проблем, возникающих при разработке систем точного позиционирования. Чувствительность измерения моментов $M_{ск}$ была порядка 10^{-10} Н·м. Погрешность этих измерений при всех проведенных измерениях не превышала 10 %. На рисунке 3 приведены соответствующие кривые, полученные в трех различных точках одной поверхности образца из стекла К8. Их разброс характеризует однородность физико-механических свойств этой поверхности.



а – первый цикл колебаний ($\alpha = 30$ угл. с); *б* – последний цикл колебаний ($\alpha = 2$ угл. с)

Рисунок 3 – Зависимость момента трения от угла отклонения маятника при $\alpha_0=30$ угл. с в трех точках одной поверхности стекла К8

Во всех опытах были измерены значения стартовых моментов M_0 , которые оказались в интервале от 10^{-9} Н·м до 10^{-10} Н·м при погрешности измерений от $1,6 \cdot 10^{-10}$ Н·м до $1,2 \cdot 10^{-13}$ Н·м, соответственно, (рисунок 3, б).

Разработанная теория позволила проводить измерение поверхностной плотности работы адгезии на уровне 10^{-3} Дж/м². Среднее по всем измерениям значение погрешности измерений составило 9 %. Полученные значения по порядку величины согласуются с аналогичными значениями, приведенными в литературе и полученными с помощью сложных по конструкции контактных адгезиометров и силовых зондовых микроскопов.

В опытах с образцами кремния с шероховатостью 0,4 нм и 0,1 нм установлено, что уменьшение шероховатости приводит к увеличению момента трения качения и к существенному изменению зависимости периода колебаний маятника от амплитуды (рисунок 4).

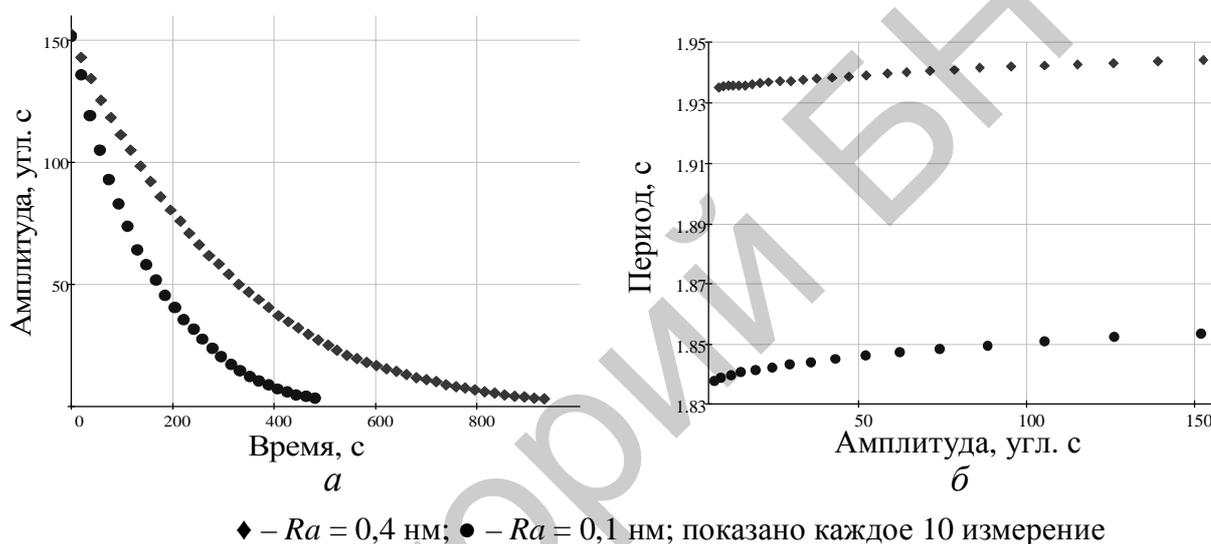
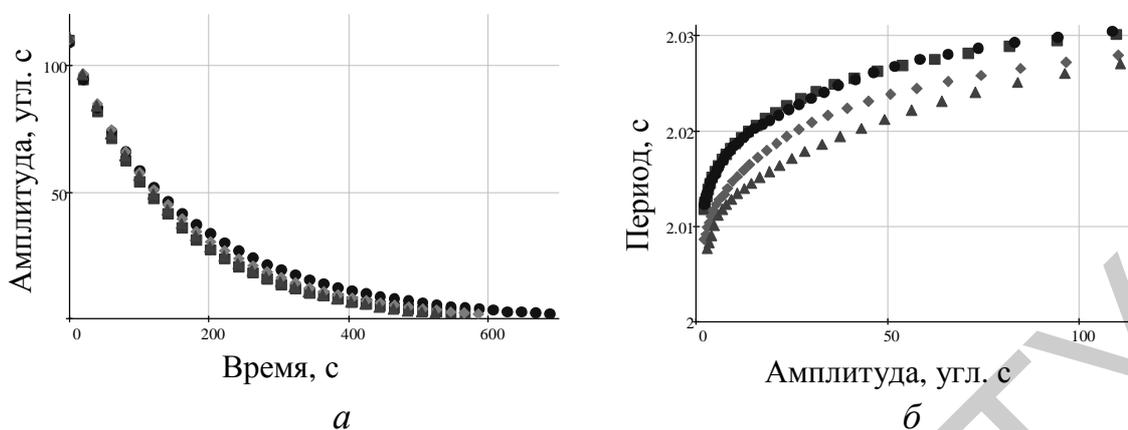


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды колебаний маятника от времени (а) и периода колебаний маятника от амплитуды (б) на поверхности кремния с различной шероховатостью

Эту зависимость можно объяснить тем, что в материалах с более высокой степенью полировки при качении в режиме предварительных смещений роль адгезионного взаимодействия, возрастает. Оказалось, что адгезия, с одной стороны, увеличивает потери энергии и, с другой стороны, уменьшает период колебаний. Подобная связь демпфирования и периода колебаний противоречит существующим представлениям. Обычно считается, что увеличение трения приводит к увеличению периода.

Исследовано влияние на результаты измерений параметров трения качения предварительной протирки исследуемых поверхностей различными растворителями (вода, керосин, эфир и изопропиловый спирт), которые должны были изменять силы адгезии. Установлено, что эта процедура мало влияет на величину затухания колебаний маятника, однако, она заметно влияет на зависимость периода качений от амплитуды (рисунок 5).



■ – пары воды; ● – диэтиловый эфир; ◆ – изопропиловый спирт; ▲ – керосин;
показано каждое 10 измерение

Рисунок 5 – Зависимость амплитуды колебаний маятника от времени (а) и периода колебаний маятника от амплитуды (б) на поверхности стекла К8 при начальной амплитуде 110 угл. с

Из этих опытов следует, что основным механизмом потери энергии являются потери на внутреннее трение при деформации поверхности образцов. Влияние сил адгезии становится заметным при стремлении амплитуды колебаний к нулю, где эти силы определяют стартовое значение момента трения качения. Они же придают зависимости периода от амплитуды характерный вид, а именно, резкое уменьшение периода при уменьшении амплитуды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В ходе выполнения данного диссертационного исследования были получены следующие новые научные результаты:

1. Разработано новое измерительное устройство на принципе свободных качаний физического маятника с опорой в виде двух шариков [1–5, 7, 13, 16], отличающееся тем, что оно содержит оптико-электронные средства калибровки и формирования измерительного сигнала в цифровом формате, который позволяет осуществлять его статистическую обработку, отделяя полезный сигнал от аддитивного шума [1, 12, 13]. В этом устройстве маятник имеет специальную балансировку, при которой центр масс маятника располагают на мгновенной оси вращения, что обеспечивает устранение поскользывания шариков [3, 11]. Разработаны два способа балансировки маятника, на которые получен патент на изобретение и положительное решение на выдачу патента [29, 30]. В совокупности

указанные отличительные признаки позволяют проводить измерения амплитуд качаний маятника в угловом интервале от 2 до 600 угловых секунд с относительной погрешностью от 10 % до 0,6 %, соответственно [1]. Существующее стандартизированное маятниковое устройство (ГОСТ 27640–88) может проводить измерение амплитуд, больших 70 угловых минут с погрешностью на уровне 5 %, т.е. уступает по чувствительности в 2000 раз и по точности в 1000 раз.

2. Разработан новый метод измерения коэффициента сопротивления качению, отличающийся тем, что в нем измеряют все амплитуды колебаний маятника и рассчитывают полный угловой путь, проходимый маятником. Этот метод можно применять при любом законе затухания амплитуды колебаний маятника [3, 4, 7, 14–16, 18, 21, 24]. Данный метод свободен от методической погрешности, присущей существующему стандартизированному маятниковому методу, которая обусловлена отклонением закона затухания амплитуды колебаний маятника от линейного закона и может достигать нескольких сотен процентов. В совокупности с разработанным измерительным устройством данный метод позволяет достигнуть чувствительности и абсолютной погрешности измерений на уровне 10^{-8} . Существующее стандартизированное устройство (ГОСТ 27640–88) для измерения этого параметра позволяет измерять значения этого коэффициента, большие 10^{-5} , с погрешностью на уровне 10%, т.е. уступает по чувствительности в 1000 раз и по точности не менее, чем в 100 раз. На разработанный метод получен патент на изобретение [27].

3. Теоретически установлены и экспериментально подтверждены закономерности в зависимости момента трения качения от смещения шариков в режиме малых предварительных смещений, а также закономерности в зависимости амплитуды колебаний маятника от времени. При этом аналитическая зависимость амплитуды соответствует реальной зависимости со средним квадратическим отклонением, меньшим 0,1 %. Данные теоретические результаты получены на основе предложенной новой феноменологической модели зависимости момента трения качения от угла отклонения маятника [2, 4, 7, 20, 24], учитывающей связь потерь энергии маятника с частотно-независимыми потерями на внутреннее трение в материале, на поверхность которого опираются сферические опоры маятника, и работу сил адгезии на отрыв. Эта работа совершается при отрыве поверхности шарика от опорной поверхности в процессе их малых поворотов вместе с маятником.

4. Разработан метод измерения момента трения качения [2, 4, 7] путем аппроксимации зависимости значений амплитуд от времени, полученной на опыте, аналитической зависимостью, который позволяет измерять этот

момент с чувствительностью порядка 10^{-10} Н·м и с погрешностью не более 10 %. Кроме того, данный метод позволяет измерять значение стартового момента с такой же чувствительностью. В свою очередь, это позволяет измерять поверхностную плотность работы адгезии на отрыв на уровне 10^{-3} Дж/м² [4, 7, 19, 20, 24, 25]. На способ измерения этого параметра получен патент на изобретение [28]. Данный метод позволяет существенно расширить функциональные возможности маятникового метода измерений, что придает ему новое качество, обеспечивая измерения с его помощью различных параметров трения качения с недостижимыми ранее точностью и чувствительностью.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные измерительное устройство и методы измерений в режиме малых предварительных смещений при качении и достигнутые высокая точность измерений позволяют их использовать для оценки однородности физико-механических свойств поверхности материалов и покрытий.

Результаты данной работы могут быть использованы также при проектировании систем точного позиционирования, которые используются при производстве интегральных схем, оптико-механических систем и в управлении рабочими элементами роботов и телескопов.

Эти результаты могут быть рекомендованы к применению в организациях, занимающихся разработкой новых материалов и покрытий, систем точного позиционирования, контролем качества поверхности, таких как учреждения Национальной академии наук Беларуси (ИТМО, ИММС, ФТИ) и НПО порошковой металлургии, а также ОАО «Интеграл», ГНПО «Планар».

Результаты, полученные в диссертации, были использованы при исследовании однородности поверхностей монокристаллов кремния на ОАО «Интеграл», а также внедрены в учебно-методический процесс при изучении дисциплины «Физические основы измерений» на приборостроительном факультете БНТУ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1. Ризноокая, Н. Н. Об измерении амплитуд и периода микрокачаний физического маятника с опорой качения / Н. Н. Ризноокая // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2011. – № 2. – С. 32–37.
2. Джилавдари, И. З. Об измерении малых моментов трения качения маятниковым методом / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Метрология и приборостроение. – 2011. – № 1. – С. 29–32.
3. Джилавдари, И. З. Методика и средство измерения малых коэффициентов сопротивления качению маятниковым методом / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Метрология и приборостроение. – 2010. – № 4. – С. 13–17.
4. Джилавдари, И. З. Феноменологическая теория микрокачаний шарика на пятне контакта / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – Т. 5, № 1. – С. 3–12.
5. Джилавдари, И. З. Исследование контактной адгезии методом свободных микрокачаний маятника / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Трение и износ. – 2009. – Т. 30, № 6. – С. 533–539.
6. Джилавдари, И. З. Влияние адгезии на период свободных микрокачаний маятника / И. З. Джилавдари, В. А. Пилипенко, Н. Н. Ризноокая // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2008. – № 4. – С. 77–83.
7. Джилавдари, И. З. Экспериментальная оценка составляющих трения качения шариков при малых циклических смещениях / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 5. – С. 453–458.
8. Джилавдари, И. З. Исследование динамики свободных микрокачаний маятника с опорой на два шарика / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 1. – С. 5–11.
9. Джилавдари, И. З. Измерение характеристик трения на поверхности материалов методом микрокачаний маятника / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Трение и износ. – 2007. – Т. 28, № 5. – С. 485–492.
10. Джилавдари, И. З. Особенности динамики малых качаний маятника на упругой поверхности при наличии гистерезисного трения / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Трение и износ. – 2007. – Т. 28, № 2. – С. 143–150.

Материалы научных конференций

11. Джилавдари, И. З. О динамике физического маятника с опорой качения / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Приборостроение – 2010 : материалы 3-й Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 10-12 ноября 2010 г. / БНТУ ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2010. – С. 259–260.

12. Ризноокая, Н. Н. Выделение регулярного сигнала на фоне сильных помех методом математической фильтрации / Н. Н. Ризноокая // Наука – образованию, производству, экономике : материалы восьмой международной научно-технической конференции, Минск, 2010 г. : в 4 т. / Бел. нац. техн. университет ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2010. – Т. 2. – С. 161.

13. Ризноокая, Н. Н. Система измерения периодов и малых амплитуд колебаний маятника / Н. Н. Ризноокая // Приборостроение – 2009 : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 11-13 ноября 2009 г. / БНТУ ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2009. – С. 98–99.

14. Джилавдари, И. З. Об измерении коэффициента потерь и коэффициента трения качения при малых качаниях физического маятника / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Приборостроение – 2009 : материалы 2-й Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 11-13 ноября 2009 г. / БНТУ ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2009. – С. 171–172.

15. Джилавдари, И. З. Об измерении малых коэффициентов трения качения / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Наука – образованию, производству, экономике : материалы седьмой международной научно-технической конференции, Минск, 2009 г. : в 3 т. / БНТУ ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2009. – Т. 1. – С. 410.

16. Джилавдари, И. З. Метод и устройство для высокоточного измерения супермалых коэффициентов трения качения / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Метрология-2009 : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 14-15 апреля 2009 г. / БелГИМ ; редкол.: Н. А. Жагора [и др.]. – Минск, 2009. – С. 108–112.

17. Джилавдари, И. З. Измерение давления контактной адгезии методом свободных микрокачаний маятника / И. З. Джилавдари, А. В. Пилипенко, Н. Н. Ризноокая // Приборостроение – 2008 : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 12-14 ноября 2008 г. / БНТУ ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2008. – С. 153–155.

18. Артамонова, М. С. Новый метод измерения трения качения / М. С. Артамонова, Н. Н. Ризноокая, И. З. Джилавдари // Новые направления развития приборостроения : материалы Республ. студент. науч.-технич.

конф., Минск, май 2008 г. / БНТУ ; редкол.: В. Л. Соломахо [и др.]. – Минск, 2008. – С. 122–123.

19. Киреева, Е. В. Контроль адгезии маятниковым методом / Е. В. Киреева, Н. Н. Ризноокая, И. З. Джилавдари // Новые направления развития приборостроения : материалы Республ. студент. науч.-технич. конф., Минск, май 2008 г. / БНТУ ; редкол.: В. Л. Соломахо [и др.]. – Минск, 2008. – С. 124–125.

20. Артамонова, М. С. Измерение работы адгезии на отрыв / М. С. Артамонова, Н. Н. Ризноокая // Исследование и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы VIII Международной межвузовской научн.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 28-29 апр. 2008 г. / ГГТУ им. П. О. Сухого. – Гомель, 2008. – С. 97–100.

21. Ризноокая, Н. Н. Измерения коэффициента трения качения на микроучастках поверхности / Н. Н. Ризноокая // Исследование и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы VIII Международной межвузовской научн.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 28-29 апр. 2008 г. / ГГТУ им. П. О. Сухого. – Гомель, 2008. – С. 100–103.

22. Ризноокая, Н. Н. Высокоточный метод измерения трения качения / Н. Н. Ризноокая // Техника и технологии: инновации и качество : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 23-24 ноября 2007 г. / БарГУ ; редкол.: В. В. Таруц (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : РИО БагГУ, 2007. – С. 123–126.

23. Джилавдари, И. З. Метод измерения адгезионной и гистерезисной составляющих момента трения качения / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Пятой Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 2007 г. : в 2 т. / БНТУ ; редкол.: Б. М. Хрусталева, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2007. – Т.1. – С. 381–384.

Тезисы докладов конференций

24. Джилавдари, И. З. Метод и устройство измерения сверхмалого трения в процессах предварительного качения / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ–2011) [Электронный ресурс] : тезисы докладов Междунар. конф. – Электрон. дан. и прогр. (99,9 Мб). – Гомель, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) : зв., цв.

25. Джилавдари, И. З. О механизме взаимодействия твёрдых тел на пятне контакта при малых циклических качаниях / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ–2009) : тезисы докладов Междунар. науч.-технич. конф., Гомель, 22-25 июня 2009 г. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель, 2009. – С. 71.

26. Джилавдари, И. З. Исследование динамики свободных микрокачаний маятника с опорой на два шарика / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ–2007) : тезисы докладов Междунар. науч.-технич. конф., Гомель, 16-19 июля 2007 г. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель, 2007. – С. 30–31.

Патенты и заявки на изобретения

27. Способ определения коэффициента трения качения : пат. 14144 Респ. Беларусь, МПК7 G 01 N 19/02 / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая, С. А. Чижик ; заявитель БНТУ. – № а 20081459; заявл. 18.11.08; опубл. 30.04.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 127–128.

28. Способ определения работы адгезионного отрыва : пат 13618 Респ. Беларусь, МПК7 G 01 N 13/00, G 01 N 19/02 / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая; заявитель БНТУ. – № а 20080550 ; заявл. 25.04.08 ; опубл. 30.10.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 5. – С. 125.

29. Способ определения коэффициента трения качения : пат. 11588 Респ. Беларусь, МПК7 G 01 N 13/00, G 01 N 19/02 / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая ; заявитель БНТУ. – № а 20070484 ; заявл. 27.04.07 ; опубл. 28.02.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1. – С. 115.

30. Способ балансировки физического маятника, опирающегося двумя шариками на внешнее основание : МПК7 G 01 M 1/12 / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая; заявитель БНТУ. – заявка № а 20090535 ; заявл. 15.04.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 6. – С. 31–32.

РЭЗІЮМЭ

Рызнаокая Наталля Мікалаеўна

ПРЫЛАДА І МЕТАДЫ ВЫМЯРЭННЯ ПАРАМЕТРАЎ ТРЭННЯ КАЧЭННЯ Ў РЭЖЫМЕ МАЛЫХ ПАПЯРЭДНІХ ПЕРАМЯШЧЭННЯЎ ПРЫ ПРУГКІМ КАНТАКЦЕ ЦВЁРДЫХ ЦЕЛАЎ

Ключавыя словы: трэнне качэння, маятнікавы метад, папярэдняе перамяшчэнне, момант трэння качэння, каэфіцыент супраціву качэнню, каэфіцыент трэння качэння, праца адгезіі на адрыў, перыяд хістанняў.

Мэта працы: распрацоўка прылады і метадаў для вымярэння параметраў трэння качэння ў рэжыме папярэдніх перамяшчэнняў, значна меншых радыусу пятна прускага кантакту, на аснове вольных хістанняў фізічнага маятніка, які абাপіраецца двума шарыкамі на плоскую доследную паверхню, і ўсталяванне механізмаў і рэальнай залежнасці моманту трэння качэння ад перамяшчэння.

Метады даследавання і апаратура: падчас працы праводзіліся эксперыментальныя даследаванні з выкарыстаннем лазернай тэхнікі, оптыкі і оптыка-электронных прыбораў з зарадавай сувяззю. Ужываліся камп'ютарная статыстычная апрацоўка і лікавыя метады нелінейнай апраксімацыі вопытных дадзеных.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацавана і выраблена вымяральная прылада на аснове вольных ваганняў фізічнага маятніка з прынцыпова новымі функцыянальнымі магчымасцямі.

Распрацаваны новы метад вымярэння моманту трэння качэння з адчувальнасцю парадку 10^{-10} Н·м. Упершыню тэарэтычна і эксперыментальна атрыманы рэальныя гістэрэзісныя залежнасці моманту трэння качэння ад перамяшчэння падчас малых цыклічных перамяшчэнняў.

Распрацаваны новы метад вымярэння ўдзельнай энергіі адгезійнага адрыву з адчувальнасцю на ўзроўні 10^{-3} Дж/м² з хібнасцю 9 %.

Распрацаваны новы метад вызначэння каэфіцыента супраціву качэнню з адчувальнасцю і абсалютнай хібнасцю парадку 10^{-8} .

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць ужывання: вынікі дадзенай працы могуць быць скарыстаны пры праектаванні сістэм дакладнага пазіцыянавання, а таксама пры даследаванні фізіка-механічных уласцівасцяў і аднастайнасці паверхняў матэрыялаў і пакрыццяў.

РЕЗЮМЕ

Ризноокая Наталия Николаевна

УСТРОЙСТВО И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ МАЛЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ ПРИ УПРУГОМ КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Ключевые слова: трение качения, маятниковый метод, предварительное смещение, момент трения качения, коэффициент сопротивления качению, коэффициент трения качения, работа адгезии на отрыв, период колебаний.

Цель работы: разработка устройства и методов для измерения параметров трения качения в режиме предварительных смещений, значительно меньших радиуса пятна упругого контакта, на основе свободных качаний физического маятника, опирающегося двумя шариками на плоскую исследуемую поверхность, и установление механизмов и реальной зависимости момента трения качения от перемещения.

Методы исследования и аппаратура: в ходе работы проводились экспериментальные исследования с использованием лазерной техники, оптических приборов и оптико-электронных приборов с зарядовой связью. Применялись компьютерная статистическая обработка и численные методы нелинейной аппроксимации опытных данных.

Полученные результаты и их новизна: разработано и изготовлено измерительное устройство на основе свободных колебаний физического маятника с принципиально новыми функциональными возможностями.

Разработан новый метод измерения момента трения качения с чувствительностью порядка 10^{-10} Н·м и погрешностью 10^{-11} Н·м. Впервые теоретически и экспериментально получены реальные гистерезисные зависимости момента трения качения от перемещения в процессе малых циклических перемещений.

Разработан новый метод измерения удельной энергии адгезионного отрыва с чувствительностью на уровне 10^{-3} Дж/м² с погрешностью 9 %.

Разработан новый метод определения коэффициента сопротивления качению с чувствительностью и абсолютной погрешностью порядка 10^{-8} .

Рекомендации по использованию и область применения: результаты данной работы могут быть использованы при проектировании систем позиционирования, а также при исследовании физико-механических свойств и однородности поверхностей материалов и покрытий.

SUMMARY

Riznookaya Natalia Nikolaevna

DEVICE AND METHODS FOR PRE-ROLLING FRICTION PARAMETERS MEASUREMENT AT ELASTIC CONTACT OF SOLIDS

Key words: rolling friction, pendulum method, pre-rolling displacement, rolling friction torque, rolling resistance coefficient, rolling friction coefficient, specific adhesion, period of oscillations.

Aim of the study: to develop the device and methods for pre-rolling friction parameters measurement, when displacement is considerably smaller than the radius of elastic contact spot, said method based on compound pendulum free oscillations, pendulum leaning against the flat surface under study with two balls, and to determine mechanisms and real dependence of a rolling friction torque on displacement.

Research techniques and equipment: during experimental researches used laser technology, optics and charge-couples devices were used. Computer statistical machining and numerical methods of nonlinear approximation of experimental data were applied.

Results and novelty: the measuring device based on compound pendulum free oscillations and having essentially new functional capabilities is developed and manufactured.

The new rolling friction torque measurement method with sensitivity of the order 10^{-10} N·m is developed. For the first time theoretically and experimentally real hysteresis dependences of a rolling friction torque on displacement in the course of small cyclical displacement are gained.

The new specific adhesion measurement method with sensitivity at level of 10^{-3} J/m² with a margin error 9 % is developed.

The new rolling resistance coefficient determination method with both sensitivity and absolute error of the order 10^{-8} is developed.

Recommendations for usage and an area of application. This thesis results can be used in positioning system design, and also in materials surfaces and coats physical and mechanical properties and homogeneity analysis.

Научное издание

РИЗНООКАЯ Наталия Николаевна

УСТРОЙСТВО И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕНИЯ
КАЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ МАЛЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ
ПРИ УПРУГОМ КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.11.01 – Приборы и методы измерения
(по видам измерений)

Подписано в печать 12.10.2011.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 60. Заказ 1127.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет

ЛИ №02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.