

поступает на второй электрод и на узел контроля амплитуды тока. Величина амплитуды электрического тока, протекающего между вторым электродом и лечебной головкой с выхода узла контроля амплитуды тока поступает на устройство управления.

Отличительная особенность разработанной лечебной головки заключается в том, что конструкция головки позволяет подавать одновременно через одну и ту же контактную площадку два вида физических воздействий: ультразвуковое излучение и электрический ток. Это обеспе-

чивается гальванической развязкой контактирующей с пациентом поверхности от цепей питания аппарата. Конструкция лечебной головки представлена на рисунке 2.

1. Улащик В.С. Очерки общей физиотерапии. – Минск. – 1994.
2. Улащик В.С. Фоноэлектротерапия: обоснование метода и аппарат / В. С. Улащик, А. Ф. Романов, И. Л. Морозова, Н. Н. Дедович // Новости медико-биологических наук. – 2015. – Т.11, №2.- С.168-173.

УДК 681.2.082:531.45

### ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ НА ШАРИКАХ С РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ

Джилавдари И.З.<sup>1</sup>, Мекид С.<sup>2</sup>, Ризноокая Н.Н.<sup>1</sup>, Карпович С.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Университет нефти и минералов короля Фадха

Дхахран, Саудовская Аравия

Одним из методов исследования физико-механических свойств поверхности материалов является измерение трения качения. Кроме того, трение качения является основным источником погрешности систем точного позиционирования, в которых трение проявляет себя на самых начальных этапах их движения и где смещение тел качения имеет размеры порядка размеров пятна контакта. В условиях малых нагрузок, смещений и скоростей сопротивление качению в весьма мало. Кроме того, при малых смещениях сопротивление качению имеет нелинейный и гистерезисный характер. Поэтому измерение момента сопротивления является важной и сложной задачей.

Ранее авторами были разработаны оригинальные средства и методики измерения моментов трения качения шариков на плоской поверхности в условиях, когда смещение шариков существенно меньше диаметра пятна контакта [1]. Принцип действия устройства основан на измерениях амплитуд свободных затухающих колебаний маятника, опирающегося двумя шариками на плоскую поверхность. Разработанные методы и методики позволяют измерять каждую амплитуду колебаний, а также время колебаний. Высокие чувствительность и точность измерений позволили установить новый физический эффект, а именно резкое уменьшение периода колебаний при уменьшении амплитуды на самых последних этапах качаний маятника. По мнению авторов этот эффект объясняется влиянием сил адгезии между поверхностями шариков и опорных поверхностей, что позволяет реализовать неразрушающий метод оценки этих сил. Эти измерения имеют абсолютный характер, т.е. сво-

дятся к измерениям амплитуд колебаний и времени – основных единиц в системе СИ.

Как недостаток разработанных средств измерений можно указать необходимость тщательной подготовки поверхностей в паре трения, в первую очередь, обеспечения их высокой чистоты поверхностей на уровне  $Ra \approx 0,06$  мкм и менее.

В связи с этим авторами были проведены сравнительные измерения трения качения как с использованием гладких шариков и плоских опорных поверхностей высокой чистоты, так и с использованием заведомо шероховатых шариков с  $Ra$  10 мкм и плоских поверхностей, имеющие гладкие полированные поверхности с  $Ra$  0,02 мкм с заметными поверхностными локальными дефектами в виде царапин и точечных вмятин, а также «завалы», особенно заметные на краях. Измерения проводились в двух различных точках поверхности каждого образца, при этом измерения проводились трижды в каждой точке поверхности. Результаты этих трех измерений усреднялись.

На первой стадии измерений были использованы гладкие шарики  $Ra$  0,02 мкм диаметром 10 мм, выполненные из плавленого корунда, и плоские поверхности плиток Иогансона, выполненных из стального сплава с  $Ra$  0,0126 мкм, имеющих твердость не менее 800 единиц HV (около 62 единиц HRC). На этих же плитках измерялось трение качения корундовых шероховатых шариков с  $Ra$  10 мкм. Результаты зависимости амплитуд колебаний маятника в обоих случаях представлены на рисунке 1.

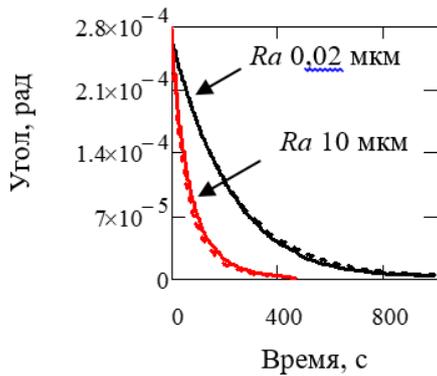


Рисунок 1 – Сплошные линии – измерения в первой точке; пунктирные – измерения во второй точке

Из рисунка виден ожидаемый результат: затухание амплитуды колебаний (т.е. трение качения) для шероховатых шариков больше, чем для гладких. Количественный результат здесь вычисляется легко по известным формулам [1]. Однако, обращает на себя внимание близость результатов для разных точек одного объекта (штриховые и сплошные линии).

Также были проведены аналогичные измерения для поверхностей, выполненных из стали 45, имевших три вида термообработки. Первый вид (сталь 1) – закаленная сталь (HRC=52), второй вид (сталь 2) – сталь закаленная и отпущенная (HRC=48), третий вид (сталь 3) – сталь без термообработки (HRC=16). Результаты измерений с гладкими шариками представлены на рисунке 2.

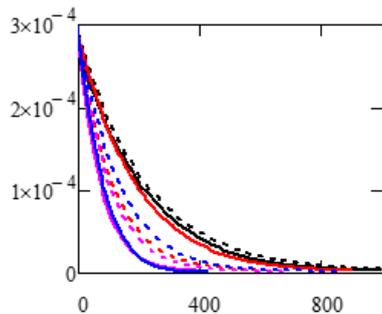


Рисунок 2

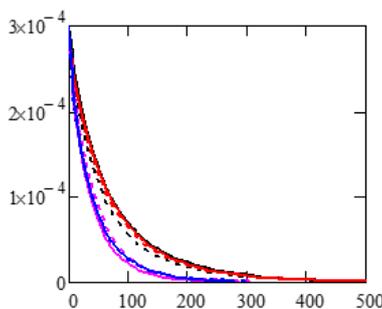


Рисунок 3

Результаты измерений с шероховатыми шариками представлены на рисунке 3.

Из рисунков 2 и 3 видно, что опыты с шероховатыми шариками дают меньший разброс результатов, полученных для двух отдельных точек каждого образца.

Большой разброс значений для гладких шариков, по-видимому, обусловлен большим влиянием состояния поверхности опорных поверхностей на результаты измерений. Из рисунка 3 видно также ожидаемое меньшее затухание колебаний маятника для образцов, твердость которых находится в интервале 64-52 единиц HRC. В тоже время в интервале 48-16 единиц HRC, где затухание колебаний больше, затухание колебаний практически не отличаются между собой.

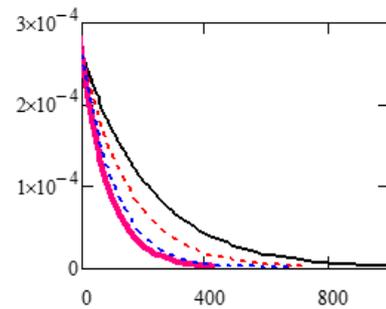


Рисунок 4

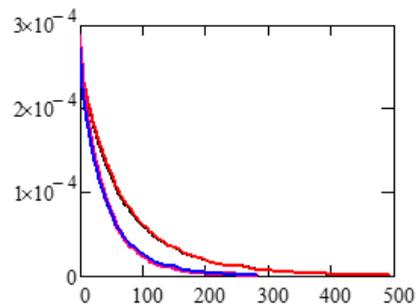


Рисунок 5

Сделанное заключение особенно четко видно из графиков затухания амплитуды колебаний маятника, усредненных для обеих точек на каждом образце. Эти графики показаны на рисунках 4 и 5.

**Выводы.** Отсутствие четкой зависимости в интенсивности затухания амплитуд свободных колебаний маятника, опирающегося двумя шариками на плоскую стальную полированную поверхность, для образцов с различной твердостью в случае полированных шариков, по-видимому, свидетельствует о том, что основной составляющей трения в этом случае является адгезионная составляющая. С другой стороны, увеличение затухания амплитуд для каждого из образцов в случае шероховатых шариков свидетельствует о том, что основной составляющей трения в этом случае является деформационная составляющая.

Использование шероховатых шариков в качестве опоры маятника позволяет уменьшить требования к шероховатости поверхности при относительной оценке твердости материала опор маятника.

1. Gilavdary, I. Mekid, Samir; Riznookaya, Natalia  
A new theory on pure pre-rolling resistance

УДК 681.5: 0049

## МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ С ПОМОЩЬЮ МИКРОПРОЦЕССОРА RASPBERRY PI

Достанко А.П., Ланин В.Л., Лаппо А.И.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

Современное производство изделий электроники является сложным и многокомпонентным процессом, включающим большое число различных технологических операций. Для обеспечения высокого выхода годных изделий необходим постоянный контроль режимов технологических процессов и параметров изготавливаемых изделий. Трудоемкость контрольно-измерительных операций в настоящее время достигает до 50% от общей трудоемкости изготовления изделий. Поэтому проблема снижения трудоемкости контроля и одновременного повышения качества изделий не может быть решена без широкого применения компьютерной техники.

Микроконтроллерное управление технологическими процессами является бурно развивающейся областью науки и техники, которая активно поддерживается государством и множеством частных компаний. В связи с этим, становится актуальной задача подготовки молодых специалистов в этой области, которые могли бы заниматься решением проблем машинного зрения, искусственного интеллекта и автоматического управления.

В отличие от существующих аналогов в качестве основы для управления технологическими процессами используется одноплатный компьютер Raspberry PI. Это устройство включает в себя микропроцессор с архитектурой ARM11, 512Мб оперативной памяти и встроенный графический процессор (рисунок 1).. Благодаря такой комбинации, на Raspberry PI можно решать ресурсоемкие задачи машинного зрения и искусственного ин-теллекта, а также управления технологическими процессами.

Компьютер Raspberry PI снабжен двумя портами USB2.0, HDMI и композитным видеовыходом, что позволяет выполнять лабораторные работы без использования отдельного персонального компьютера. Управляющая программа со-

through pendulum oscillations / I. Gilavdary, S. Mekid, N. Riznookaya // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology – 2013. –Vol. 227, Issue J6 – P. 618-628.

ставляется и тестируется на стороне Raspberry PI в графической среде операционной системы Debian. Отдельно следует отметить наличие входов/выходов общего назначения и распространенных шин передачи данных: SPI, I2C и UART. Эти электронные интерфейсы значительно упрощают соединение с различными датчиками (термопарой), индикаторами и исполнительными устройствами.



Рисунок 1 – Внешний вид миникомпьютера Raspberry PI

К Raspberry PI подключается внешнее измерительное устройство ОВЕН ТРМ210 – ПИД-регулятор температуры, давления или других физических величин, предназначен для измерения и точного поддержания заданных параметров в различных технологических процессах (рисунок 2).. Используется в составе сложного технологического оборудования: экструдеров, термопласт-автоматов, печей, полиграфического, вакуум-формовочного оборудования и т.п.

Технические характеристики и интерфейсы Raspberry PI:

- CPU&GPU - центральный процессор с ин-