

Предлагаемая методика расчета соотношений между относительными скоростями и направлениями их векторов в различных точках поверхности зуба позволяет обеспечить постоянство угла между направлением вектора скорости в зацеплении «колесо-инструмент» и направлением режущей кромки, что в свою очередь позволяет выбрать:

- форму контакта зубьев инструмента и заготовки;
- схему расположения стружечных канавок инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашников, А.С. Передовые технологии изготовления зубчатых колес // Справочник. Инженерный журнал. – 2012. – № 11. – С. 44 – 51.
2. Клепиков, В.В., Солоницын, Б.М. Повышение технологических возможностей процесса чистовой обработки зубчатых колес // Вестник машиностроения. – 2005. – № 11. – С. 47 – 49.
3. Параметрическая оптимизация обработки зубчатых колес. Монография: Виноградов В.М., Черепакхин А.А., Клепиков В.В./ Deutschland, Saarbrücken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co., 2012 г. – 230 с.
4. Клепиков, В.В., Черепакхин, А.А. Влияние метода формообразования зубьев на форму припуска под зубоотделочные операции и их точность // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 3(57). С. 35 – 39.
5. Солоницын, Б.М., Клепиков, В.В. Совершенствование способа зубошевингования цилиндрических колес

облегающими шеверами // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 3. – С. 59 – 53.

6. Солоницын, Б.М., Клепиков, В.В. Повышение качества и производительности процесса шевингования зубчатых колес // Вестник машиностроения. – 2008. – № 10. – С. 54 – 55 с.

REFERENCES

1. Kalashnikov, A.S. Efficient technologies in manufacturing cog-wheels // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2012. – № 11. – pp. 44 – 51.
2. Klepikov, V.V., Solonitsyn, B.M. Technological potentialities increase in cog-wheel finishing // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2005. – № 11. – pp. 47 – 49.
3. *Parametric Optimization in Cog-Wheel Machining*. Monograph: Vinogradov V.M., Cherepakhin A.A., Klepikov V.V./ Deutschland, Saarbrücken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co., 2012 г. – pp. 230.
4. Klepikov, V.V., Cherepakhin, A.A. Impact of teeth shaping method upon allowance form for teeth finishing operations and their accuracy // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – № 3(57). pp. 35 – 39.
5. Solonitsyn, B.M., Klyopikov, V.V. Up-dating of method for teeth shaving of spur cog-wheels with female shavers // *Tractors and Agricultural Machinery*. – 2010. – № 3. – pp. 59 – 53.
6. Solonitsyn, B.M., Klepikov, V.V. Quality and efficiency increase in cog-wheel shaving // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2008. – № 10. – pp. 54 – 55.

Рецензент д.т.н. Г.А. Харламов

УДК 621.941

DOI: 10.12737/article_592d151f08adf1.59398484

Е.В. Пашков, д.т.н.,
 А.А. Вожжов, старший преподаватель
 (ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет,
 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33)
 E-mail: 0506773532@mail.ru

Моделирование процесса двурезцового точения фасонных поверхностей

Приведен анализ технологической схемы двурезцового фасонного точения. Рассмотрена неустойчивая форма колебаний системы «резец–заготовка» в процессе фасонного точения. Представлены зависимости позволяющие оценить величины колебаний при обработке. Приведен ряд экспериментальных исследований, подтверждающих теоретические предположения.

Ключевые слова: двурезцовое точение; фасонная поверхность; колебания; качество поверхности; эффективность процесса.

Process simulation of profiled surface two-cutter turning

The analysis of a technological system for two-cutter profile turning is shown. An unstable form of oscillations in the “cutter-blank” system in the course of profile turning is considered. The dependencies allowing the estimation of an oscillation value at machining are shown. Some experimental investigations confirming theoretical assumptions are shown.

Keywords: two-cutter turning; profile surface; oscillations; surface quality; process efficiency.

Контактные устройства, так называемые электрические контакты, бывают скользящие, разрывные (разъемные) и постоянные. Они применяются для передачи токов различной силы и, в зависимости от этого, получили название слаботочные и сильноточные. Особенно в тяжелых условиях работают скользящие контакты, так как на их рабочих поверхностях помимо эрозионного изнашивания, возникающего при прохождении электрического тока, происходит износ под действием сил трения. Наложение этих двух видов изнашивания приводит к резкому снижению долговечности и надежности контактов.

Особое место среди электрических контактов занимают слаботочные скользящие контакты, которые получили широкое применение в системах управления авиационной, космической, судовой техникой, средствами автоматизации промышленного производства. Сложность решения триботехнических задач при работе скользящих электрических контактов обусловлена действием электрического тока, приводящего к ужесточению условий внешнего трения и износа.

Основным элементом, определяющим надежность работы щеточно-коллекторного узла, являются слаботочные скользящие контакты, назначение которых заключается в передаче без искажения электрического сигнала от подвижных элементов к неподвижным. Слаботочные скользящие контакты состоят из цилиндрического коллектора и щеток. Большую группу коллекторных токосъемных колец можно отнести к группе колец с фасонными канавками (рис.1).

Миниатюризация размеров конструкций слаботочных скользящих контактов связана, в первую очередь, с экономией благородных металлов, уменьшением массы и размеров контактных узлов микромашин и приборов. Другой причиной миниатюризации конструкции явля-

ется поиск оптимальных условий контактирования и эксплуатационных параметров, повышающих надежность и долговечность слаботочных скользящих контактов.

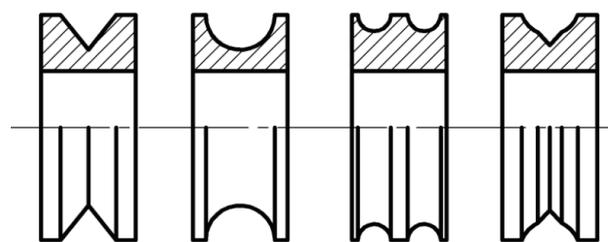


Рис. 1. Форма колец слаботочных скользящих контактов

При уменьшении их размеров удорожается и их изготовление, увеличивается количество брака, а из-за отсутствия приборов и методов контроля характеристик качества поверхности, значительно снижается объективность оценки надежности и долговечности работы контактов.

На основе анализа зависимостей, определяющих характеристики шероховатости при фасонном точении профильных канавок, можно сделать вывод, что параметры шероховатости в процессе обработки с использованием рекомендованных режимов резания формируются в зависимости от шероховатости задней поверхности резца и параметров (колебаний) режущего инструмента и заготовки в процессе обработки.

Операция фасонного точения профильных канавок выполняется на специальных токарных станках повышенной точности, налаженных на отдельные операции. Число возможных конструкторских наладок специальных токарных станков бесконечно, т.к. зависит, в первую очередь, от большого многообразия обрабатываемых деталей, от множества вариантов форм и размеров деталей.

В результате обработки канавки двумя резцами одновременно можно свести к минимуму негативное влияние деформаций. Это способствует повышению точности и уменьшению вы-

соты микронеровностей обработанной поверхности.

Одним из решений является вариант обработки, основанный на противоположном размещении двух резцов. В этом случае процесс деления подачи между резцами будет выполняться автоматически при любых численных значениях величины подачи, т.к. один резец всегда будет отставать от другого в направлении вращения на половину оборота. При этом обеспечивается высокая производительность обработки и значительно упрощается заточка и настройка резцов.

На практике данный метод может быть реализован двумя принципиально различными вариантами. Реализация метода предполагает последовательное расположение двух резцов друг за другом. При этом второй резец может работать параллельно с первым либо вступать в работу на завершающем этапе обработки первого резца. В связи с изложенным, первый вариант обработки, даже при одинаковой подаче по производительности, практически не будет отличаться от обычного однорезцового точения.

Если при этом настроить в статике оба резца на один и тот же размер обработки, то в результате увеличенных упругих отжатий в сечении первого резца, второй резец будет снимать не только неровности обработанной первым резцом поверхности, но будет также срезать и часть оставленного (в связи с отжатиями первого резца) припуска на обработку. В этом случае обработка будет происходить как при обычном последовательном двурезцовом точении только с уменьшенной площадью резания на первом резце.

Известно, что износ резцов, точность обработки и шероховатость поверхности в значительной степени зависят от виброустойчивости технологической системы [1, 2], увеличение которой способствует повышению производительности обработки.

В процессе фасонного точения неустойчивая форма колебаний чаще всего представляет собой колебания системы «резец–заготовка». Предшествующими исследованиями показано [3], что для описания подобных колебаний системы достаточно ограничиться одной степенью свободы в направлении действия вектора равнодействующей силы $P_{zy} = P_z + P_y$. Поэтому, в работе принята расчетная схема с одной сосре-

доточенной приведенной массой и одной степенью свободы.

В процессе колебательного движения на систему будут действовать следующие силы: сила инерции; восстанавливающая сила, равная силе упругости; сила вязкого сопротивления; а также внешняя сила $P(\tau)$, которая представляет собой некоторую функцию от времени τ .

Дифференциальное уравнение движения системы может быть записано в виде [4]:

$$M \frac{d^2 y}{d\tau^2} + H \frac{dy}{d\tau} + Cy = P(\tau), \quad (1)$$

где M – приведенная масса системы; H – приведенное вязкое сопротивление; C – приведенная жесткость системы.

Решение дифференциального уравнения (1) движения системы при начальных условиях $y(0) = 0$ и $y'(0) = 0$ имеет вид:

$$y = \frac{1}{M \cdot f} \cdot \int_0^{\tau} P(u) \cdot e^{\lambda(\tau-u)} \cdot \sin f(\tau-u) du, \quad (2)$$

где $f = \sqrt{\frac{C}{M} - \frac{H^2}{4 \cdot M^2}}$ – собственная частота

колебаний системы; $\lambda = -\frac{H}{2M}$ – декремент за-

тухания колебаний; u – время, которое изменяется в пределах от $u = 0$ до $u = \tau$.

Примем, что внешняя сила $P_1(\tau)$ для одного резца изменяется во времени τ по следующему закону:

$$P_1(\tau) = K \cdot t_{\min} + K \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot (1 + \sin \omega t), \quad (3)$$

где ω – частота вращения шпинделя; K – коэффициент пропорциональности между силой резания и глубиной резания; t_{\min} – минимальная глубина резания; Δt – смещение припуска на обработку, определяемое как разность t_{\max} и t_{\min} .

Такой закон изменения внешней силы характерен для наиболее часто встречаемого в практике случая смещения оси предварительно обработанной заготовки в процессе последующей финишной обработки. В этом случае величина динамического смещения инструмента в любой момент обработки может быть определена по выражению

$$y_1 = \frac{1}{M \cdot f} \cdot \int_0^{\tau} \left(K \cdot t_{\min} + K \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot (1 + \sin \omega u) \right) \cdot e^{\lambda(\tau-u)} \cdot \sin f(\tau-u) du \quad (4)$$

или

$$y_1 = \frac{1}{M \cdot f} \cdot \left(K \cdot t_{\min} + K \cdot \frac{\Delta t}{2} \right) \cdot \frac{1}{\lambda^2 + f^2} \cdot \left(f + \lambda \cdot e^{\lambda \cdot \tau} \cdot \sin(f \cdot \tau) - f \cdot e^{\lambda \cdot \tau} \cdot \cos(f \cdot \tau) \right) + \frac{1}{M \cdot f} \cdot K \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{1}{\lambda^4 + 2 \cdot \lambda^2 \cdot (\omega^2 + f^2) + (\omega^2 + f^2)^2} \times \left(2 \cdot \omega \cdot f \cdot \lambda \cdot \cos(\omega \cdot \tau) - f \cdot (\omega^2 - \lambda^2 - f^2) \cdot \sin(\omega \cdot \tau) + \omega \cdot (\omega^2 + \lambda^2 - f^2) \cdot \sin(f \cdot \tau) + \lambda \cdot (\omega^2 + \lambda^2 + f^2) \cdot e^{\lambda \cdot \tau} \cdot \cos(f \cdot \tau) \right) \quad (5)$$

В случае двурезцовой обработки внешняя сила для первого резца будет изменяться во времени аналогично, как и в случае однорезцовой обработки

$$P_1(\tau) = K \cdot t_{\min} + K \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot (1 + \sin(\omega \cdot \tau)) \quad (6)$$

Для второго резца, расположенного под углом 180° по отношению к первому, внешняя сила будет равна

$$P_2(\tau) = K \cdot t_{\min} + K \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot (1 + \sin(\omega \cdot \tau + 180^\circ)) \quad (7)$$

или

$$P_2(\tau) = K \cdot t_{\min} + K \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot (1 - \sin(\omega \cdot \tau)) \quad (8)$$

Так как векторы сил от обоих резцов направ-

лены противоположно друг другу, то суммарная внешняя сила, действующая на систему «резец – заготовка», в этом случае будет определяться разностью сил $P_1(\tau)$ и $P_2(\tau)$:

$$P_{1-2}(\tau) = P_1(\tau) - P_2(\tau), \quad (9)$$

или

$$P_{1-2}(\tau) = K \cdot \Delta t \cdot \sin(\omega \cdot \tau) \quad (10)$$

Тогда для двурезцового точения

$$y_{1-2} = \frac{1}{M \cdot f} \times \int_0^\tau K \cdot \Delta t \cdot \sin(\omega \cdot u) \cdot e^{\lambda \cdot (\tau - u)} \cdot \sin f(\tau - u) du \quad (11)$$

$$\times \int_0^\tau K \cdot \Delta t \cdot \sin(\omega \cdot u) \cdot e^{\lambda \cdot (\tau - u)} \cdot \sin f(\tau - u) du$$

или

$$y_{1-2} = \frac{1}{M \cdot f} \cdot K \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{\lambda^4 + 2 \cdot \lambda^2 \cdot (\omega^2 + f^2) + (\omega^2 + f^2)^2} \times \left(2 \cdot \omega \cdot f \cdot \lambda \cdot \cos(\omega \cdot \tau) - f \cdot (\omega^2 - \lambda^2 - f^2) \cdot \sin(\omega \cdot \tau) + \omega \cdot (\omega^2 + \lambda^2 - f^2) \cdot \sin(f \cdot \tau) + \lambda \cdot (\omega^2 + \lambda^2 + f^2) \cdot e^{\lambda \cdot \tau} \cdot \cos(f \cdot \tau) \right) \quad (12)$$

Из анализа приведенных формул (5) и (11) для y_1 и y_{1-2} , в случае двурезцовой обработки величина колебаний инструмента определяется не полным припуском на обработку, как это было при однорезцовом точении, а лишь величиной смещения припуска Δt , при этом колебания уменьшаются.

Выполненные исследования процесса фасонного точения канавок коллектора использованы при решении практических задач финишной обработки деталей на автоматизированном оборудовании рис. 2.

Сопоставление экспериментальных данных показывает, что шероховатость обработанной поверхности по сравнению с однорезцовой обработкой уменьшается в 1,5...2 раза. Несколько меньший эффект по сравнению с теоретически ожидаемым связан с тем, что шероховатость поверхности формируется не только в результате копирования геометрической формы и тра-

ектории движения инструмента, но в значительной мере зависит и от степени пластической деформации поверхностного слоя детали, которая при переходе к двурезцовой обработке практически не изменяется. Кроме того, на шероховатость поверхности оказывают влияние погрешности заточки и установки резцов.

Для контроля шероховатости использовался 3D сканирующий Лазерный Рамановский спектрометр Confotec NR500, оснащенный объективом CF Plan APO 100x, NA = 0,95, цветной CCD камерой для микроскопа с высоким разрешением. Фрагмент исследования представлен на рис. 3.

Шероховатость обработанной поверхности зависит и от уровня изгибных колебаний инструмента. Снижение амплитуды изгибных колебаний способствует уменьшению величины относительного износа резцов и повышению их стойкости, а также оказывает положительное

влияние на шероховатость обработанной поверхности. Измерение амплитуды изгибных колебаний инструмента выполнялось при скорости резания 60 м/мин, подача изменялась от 0,002 до 0,012 мм/об.

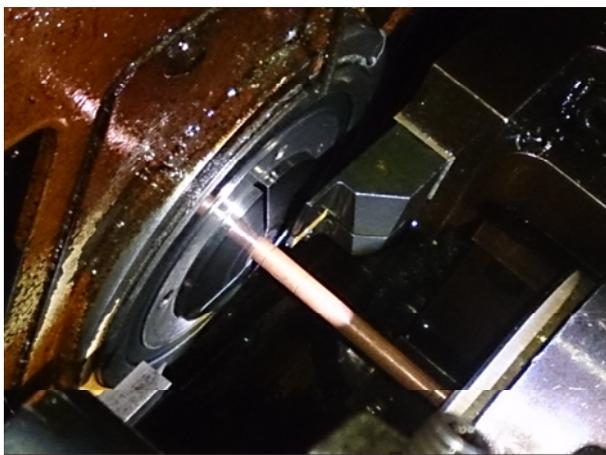
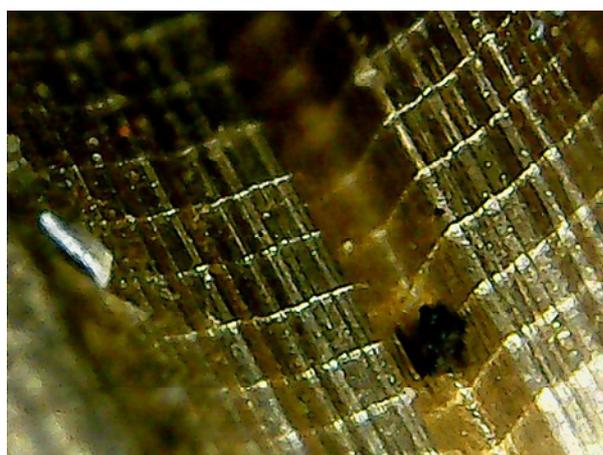
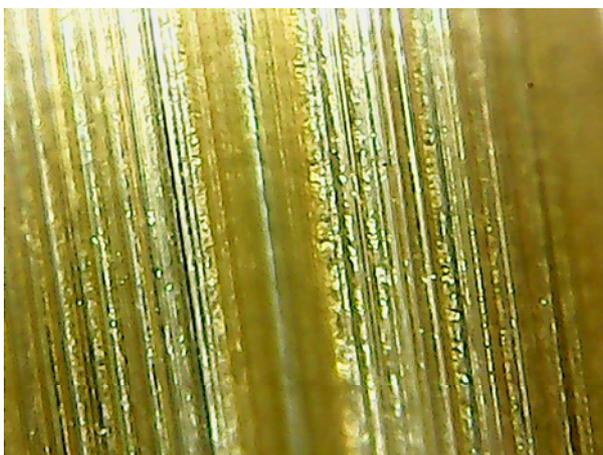


Рис. 2. Экспериментальное исследование двурезцового точения фасонных поверхностей



а)



б)

Рис. 3. Поверхность канавки (×500):

а – точение фасонным резцом сложной формы; б – двурезцовое точение

Результаты измерений амплитуд колебаний в сопоставлении с величинами относительного износа резцов по задней поверхности на соответствующих режимах резания приведены в табл. 1.

1. Результаты экспериментальных исследований

Подача, мм/об	Однорезцовое фасонное точение		Двурезцовое фасонное точение	
	Относительный износ, мкм/км	Амплитуда колебаний, мкм	Относительный износ, мкм/км	Амплитуда колебаний, мкм
0,002	10	1,5	6,5	1,0
0,004	10	2,0	7,0	1,0
0,006	11	2,0	8,0	1,5
0,008	12	2,5	8,0	2,0
0,01	12	3,0	8,5	2,0
0,012	12	3,5	8,5	2,5

На основании результатов экспериментальных исследований, представленных в табл. 1, амплитуда изгибных колебаний резца в процессе резания увеличивается с повышением подачи. При любых значениях подачи амплитуда колебаний инструмента ниже в случае двурезцовой обработки. Это подтверждает приведенные выше теоретические выводы.

С результатами измерения амплитуд колебаний инструмента хорошо согласуются данные по величине относительного износа резцов на соответствующих режимах обработки. В случае двурезцового фасонного точения относительный износ резцов примерно в 1,5 раза ниже, чем при таких же режимах в случае однорезцовой обработки.

С увеличением подачи незначительно увеличивается относительный износ резцов как в случае однорезцового точения, так и в случае двурезцовой обработки.

Использование технологической схемы двурезцового фасонного точения может обеспечить существенное уменьшение шероховатости поверхности по сравнению с однорезцовым. Возможно повышение показателей точности формы продольного и поперечного сечений канавок, что подтверждает эффективность применения метода в условиях фасонного точения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маталин, А.А. Влияние вибраций системы СПИД и неравномерности припуска заготовки на качество поверхности при тонком растачивании / А.А. Маталин, К.В. Ломакин. – В кн.: Передовая технология и автоматизация управления

процессами обработки деталей машин. – Л.: Машиностроение, 1970. – С. 219 – 225.

2. **Вожжов, А.А.** Анализ особенностей расчета сил резания при точении с пилообразными колебаниями резца в радиальном направлении // *Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 139/2013. Серія: Машиноприладобудування та транспорт.* – Севастополь, 2013. С. 45 – 52.

3. **Вожжов, А.А., Худаймуратов, М.А.** Анализ относительных вынужденных колебаний инструмента и детали при фасонном точении // *Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастоп. гос. ун-т.* – Севастополь: СевГУ, 2016. Вып. 4. – С.10 – 20.

4. **Пашков, Е.В.** Технологические основы обработки точением тонкостенных цилиндрических деталей: учеб. пособие. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. – 425 с.

REFERENCES

1. Matalin, A.A. Impact of SPID system oscillations and allowance unevenness upon surface quality at fine boring / A.A. Matalin, K.V. Lomakin. – In the book: *Efficient Technology and Automation for Control of Machine Parts Machining.* – L.: Mechanical Engineering, 1970. – pp. 219 – 225.

2. Vozhzhov, A.A. Peculiarity analysis in computation of cutting forces at turning with cutter sawtooth oscillations in radial direction // *Bulletin of SevNTU: Proceedings, Edition 139/2013. Set: Mechanical Engineering and Transport.* – Sevastopol, 2013. pp. 45 – 52.

3. Vozhzhov, A.A., Khudaimuratov, M.A. Analysis of relative forced oscillations of a tool and a blank at profile turning // *Bulletin of Modern Technologies: Proceedings of Sevastopol State Uni. - Sevastopol: SevSU, 2016. Edition 4.* – pp.10 – 20.

4. Pashkov, E.V. *Technological Fundamentals in Thin-walled Cylindrical Parts Turning: Reference Book.* – Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2000. – pp. 425

Рецензент д.т.н. У.А. Абдулгазис

УДК 62-791.2

DOI: 10.12737/article_592d158d571ed7.95843767

В.В. Мелентьев, ведущий инженер

(ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33)

Е.И. Масленников, к.т.н., **К.Г. Порошин**, старший инженер, **О.В. Шибанов**, инженер (ОАО «ДжиЭс-Нанотех», 238051, Россия, Калининградская область, г. Гусев, ул. Индустриальная, 11)
E-mail: melentev.petrus@gmail.com; maslennikov@gsnanotech.com

Научное датчик для вибродиагностики на базе технологии МЭМС и RFID

Представлен датчик для проведения вибродиагностики с МЭМС-акселерометром в качестве сенсора вибрации, а также рассматривается метод реализации датчика вибрации с беспроводной передачей данных и активацией с помощью RFID.

Ключевые слова: МЭМС; RFID; вибродиагностика; датчик вибрации.

V.V. Melentiev, Principal engineer,

(FSBEI HE "Petrozavodsk State University" (PetrSU), 33, Lenin Avenue, Petrozavodsk, Republik of Karelia 185910)

E.I. Maslennikov, Can. Eng., **K.G. Poroshin**, Senior engineer, **O.V. Shibanov**, Engineer (PC "JS-Nano-Tech", 11, Industrialnaya Str., Gusev, Kaliningrad Region, Russia 238051)

Science intensive detector for vibration diagnostics based on MEMS and RFID technology

A detector for carrying out vibration diagnostics with MEMS – accelerometer as a vibration detector is presented, and a method for the realization of a vibration detector with a wireless data transfer and activation with the aid of RFID is also under consideration.

Keywords: MEMS; RFID; vibration diagnostics; vibration detector.