

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ДЕТАЛЕЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ВИБРАЦИИ**С. А. ЮДИН<sup>1\*</sup>, Р. М. ИСАЕВ<sup>2</sup><sup>1</sup> *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*  
\* *sayudin@itmo.ru*<sup>2</sup> *Техприбор, Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Рассматриваются технологические особенности изготовления пьезоэлектрические датчиков вибрации, наиболее часто используемых для измерения механических колебаний. Приведена конструкция пьезоэлектрического датчика вибрации и определены его ключевые характеристики, рассмотрены требования к шероховатости поверхности и допуску плоскостности и параллельности. Проведен анализ исследований, посвященных технологическим вопросам изготовления пьезоэлектрических датчиков вибрации. Показана необходимость разработки методики по определению рациональных технологических режимов доводочной операции.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрик, пьезоэлемент, шероховатость, вибрация, пьезоэлектрический датчик вибрации, вибропреобразователь, допуск плоскостности, допуск параллельности, относительный коэффициент поперечного преобразования, шлифование, доводка

**Ссылка для цитирования:** Юдин С. А., Исаев Р. М. Технологические особенности обработки поверхностей деталей пьезоэлектрического датчика вибрации // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 66—73. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-66-73.

**TECHNOLOGICAL FEATURES OF SURFACE TREATMENT  
OF A PIEZOELECTRIC VIBRATION SENSOR PARTS**S. A. Yudin<sup>1\*</sup>, R. M. Isaev<sup>2</sup><sup>1</sup> *ITMO University, St. Petersburg, Russia*  
*sayudin@itmo.ru*<sup>2</sup> *JSC Techpribor, St. Petersburg, Russia*

**Abstract.** Technological features of manufacturing piezoelectric vibration sensors, most often used to measure mechanical vibrations, are considered. Design of a piezoelectric vibration sensor is presented and its key characteristics are determined, the requirements for surface roughness and tolerance of flatness and parallelism are described. An analysis of studies on the technological issues of manufacturing piezoelectric vibration sensors is carried out. The necessity of development of a technique for determining rational technological modes of finishing operation is demonstrated.

**Keywords:** piezoelectric, piezoelectric element, roughness, vibration, piezoelectric vibration sensor, vibration transducer, flatness tolerance, parallelism tolerance, relative coefficient of transverse transformation, grinding, fine-tuning

**For citation:** Yudin S. A., Isaev R. M. Technological features of surface treatment of a piezoelectric vibration sensor parts. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 66—73 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-66-73.

Исследованию колебаний уделяется большое внимание при разработке, испытании и эксплуатации разнообразных технических и технологических устройств в энергетике, машиностроении, металлургии, авиационной и ракетно-космической технике, судостроении и т.д. [1—3]. С помощью измерения вибраций решаются, в том числе, вопросы, связанные с повышением надежности и безопасности техники.

На данный момент широко распространены измерительно-информационные системы вибрационного контроля, мониторинга и диагностики, которые способствуют предотвращению

аварий и поломок сложных технических устройств. Начальным звеном таких систем являются датчики параметров вибрационных и ударных колебаний, установленные непосредственно на контролируемом объекте и осуществляющие преобразования измеряемой механической величины в электрический сигнал, поступающий на регистрирующее устройство. Такие датчики, как правило, работают при высоких температурах, сильных переменных полях, интенсивных вибрационных и ударных нагрузках, высоких давлениях и т.д. В связи с этим к датчикам вибрации предъявляются особые требования по точности, надежности и стабильности метрологических характеристик.

Среди существующих типов датчиков для измерения механических колебаний следует отметить пьезоэлектрические датчики вибрации (ПДВ) [1]. При разработке и модернизации этих датчиков особое внимание уделяется изменению конструкции, что приводит к ужесточению требований к шероховатости поверхностей и геометрической точности деталей, входящих в состав датчика.

Конструкция многих ПДВ похожа [4—6]. Основание корпуса используется для установки и крепления датчика на объекте измерения, кожух корпуса предназначен для его защиты от механических повреждений, а также уменьшения воздействия внешних электромагнитных полей. Блок пьзоэлементов преобразует механические колебания в пропорциональный электрический сигнал. Съем сигнала с ПДВ и коммутация с измерительной аппаратурой осуществляются с помощью экранированного кабеля. При этом стоит отметить, что все разъемы и соединения герметизированы. В конструкции датчика отсутствуют подвижные элементы, что позволяет исключить возможность износа и гарантирует долговечность датчика. Конструкция ПДВ определяется типом деформации пьзоэлементов. Различают датчики с пьзоэлементами, работающими на растяжение-сжатие [7], изгиб [8] и сдвиг [9].

Конструкция рассматриваемого пьезоэлектрического датчика вибрации с компрессионным вибропреобразователем с упругим поджатием (рис. 1) предполагает сопряжение между собой следующих деталей и сборочных единиц: стойка, основание 2, шайба 3, груз 4, прокладка 5, гайка 6 и блок пьзоэлементов 1. Блок пьзоэлементов, в свою очередь, состоит из пьезоэлектрических шайб и токопроводных шайб. Пьезоэлектрическая шайба выполнена из цирконата-титаната свинца, являющегося сегнетоэлектриком.

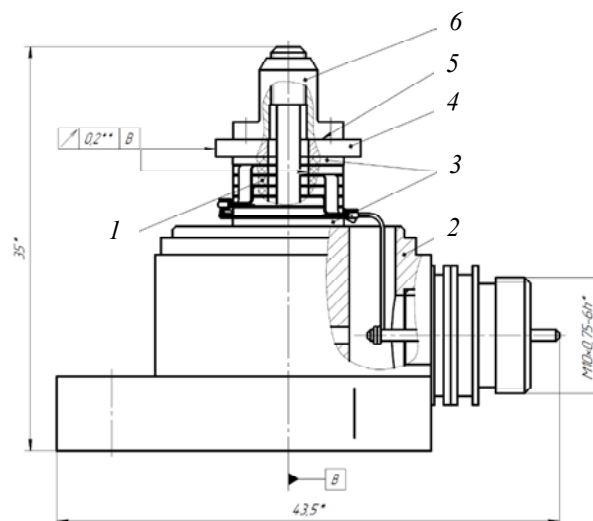


Рис. 1

Работоспособность, точность и применимость ПДВ оценивается по более чем 40 параметрам [4]. Технические характеристики ПДВ зависят от трех основных составляющих: используемой схемы вибропреобразователя, состава пьезокерамического материала и условий закрепления датчика на контролируемом объекте измерений, что, в том числе, связано с геометрической точностью деталей. Указанные характеристики определяют точность результатов

измерений параметров вибрационного ускорения и определяют область применения конкретного ПДВ.

Основными техническими характеристиками ПДВ являются (согласно ГОСТ 30296-95):

- коэффициенты преобразования по заряду и напряжению, отвечающие за минимальный уровень измеряемого вибрационного ускорения;
- частота установочного резонанса, которая определяет верхнюю границу рабочего диапазона частот при заданной погрешности измерения;
- диапазон рабочих частот;
- предельное рабочее вибрационное ускорение;
- неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в рабочем диапазоне частот;
- относительный коэффициент поперечного преобразования (ОКПП), влияющий на основную погрешность измерения вибрационного ускорения;
- нелинейность АЧХ в рабочем диапазоне ускорений;
- рабочий диапазон температур;
- масса и габаритные размеры;
- способ крепления к поверхности контролируемого объекта;
- защищенность от воздействия окружающей среды и источников помех.

Для ПДВ также важны такие характеристики, как стабильность измерений во времени и устойчивость к воздействию внешних факторов, поскольку в неподходящих условиях эксплуатации возможны обратимые и необратимые изменения коэффициентов преобразования и других характеристик. Данная особенность естественным образом ограничивает применимость ПДВ и является одним из их серьезных недостатков.

ОКПП характеризует боковую чувствительность датчика и определяется как отношение максимального значения сигнала, возникающего под действием ускорения, направленного перпендикулярно рабочей оси акселерометра, к значению сигнала, измеренному под действием того же ускорения вдоль рабочей оси датчика, этот коэффициент выражается в процентах. Следовательно, точность датчика зависит от расположения блока пьезоэлементов относительно поверхности контролируемого объекта. Ось чувствительности датчика должна быть перпендикулярна плоскости основания. В связи с этим к сопрягаемым поверхностям деталей датчика предъявляются требования к параметру шероховатости  $R_a$  не более 0,4 мкм (среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины (согласно ГОСТ 2789-73)). Единственной контактной поверхностью, шероховатость которой более грубая и равна  $R_a$  0,8, является нижняя установочная поверхность детали „основание“. При этом стоит отметить, что обеспечение заданного значения шероховатости поверхностей не гарантирует получения необходимых эксплуатационных свойств поверхности [10].

Помимо требований к шероховатости поверхности, также выдвигаются требования к геометрической точности деталей в виде допусков формы и расположения, таких как допуск параллельности, допуск плоскостности и допуск перпендикулярности. В зависимости от детали требования к допуску параллельности лежат в интервале от 0,005 до 0,05 мм, к допуску плоскостности — в интервале от 0,003 до 0,01 мм, к допуску перпендикулярности — 0,05 мм (см. табл. 1). При этом допуски на размеры регламентированы 12-м квалитетом.

Таблица 1

Наименование	Плоскостность, мм	Параллельность, мм	Интервал квалитетов	Шероховатость, мкм
Основание	0,003	0,05	От 7 до 14	$R_a$ 0,4
Шайба	0,003	0,005	От 12 до 14	$R_a$ 0,8
Груз	0,003	0,005	От 11 до 12	$R_a$ 0,4
Гайка	0,003	—	От 6 до 14	$R_a$ 0,4

Технические характеристики ПДВ зависят от множества факторов, большинство из которых относятся к конструкции, из чего следует, что достичь требуемого значения выбранной характеристики ПДВ можно, лишь внося изменения в его конструкцию. При этом качество изготовления пьезоэлемента, деталей и сборки вибропреобразователя, т.е. технологический фактор, влияет на ОКПП. Следовательно, при разработке технологического процесса изготовления деталей из состава вибропреобразователя необходимо учитывать требования к ОКПП, что для рассматриваемого датчика соответствует не более 5 %. Данный фактор учитывается в конструкторской документации на чертеж путем введения требования по обеспечению заданной шероховатости поверхности посредством операции доводки, которая, в свою очередь, является трудоемким процессом.

Согласно утвержденной серийной технологической документации, итоговая шероховатость поверхностей и точность формы изготавливаемых деталей достигаются шлифованием и последующей доводкой на плоскодоводочном автомате двустороннего действия — оба эти технологических метода являются подвидами абразивной обработки (см. ГОСТ 23505-79).

Шлифование производится абразивными кругами из карбида кремния. На уменьшение шероховатости поверхности при шлифовании влияют следующие параметры: выхаживание, правка круга, скорость шлифования, зернистость круга, режимы резания, материал связки, химический состав смазочно-охлаждающей жидкости [11] — параметры перечислены в порядке возрастания степени их влияния на получаемую шероховатость поверхности. При этом при неправильно подобранных режимах в процессе резания возможен перегрев обрабатываемой поверхности заготовки, что, в свою очередь, приведет к образованию шлифовочных прижогов и микротрещин. Результатом прижогов являются напряжения растяжения в поверхностном слое заготовки, которые в совокупности с микротрещинами вызывают ускоренный износ и разрушение деталей в процессе эксплуатации [12].

Доводка на плоскодоводочном автомате двустороннего действия предполагает простое движение шлифовальных кругов, заключающееся во вращении по часовой стрелке или против часовой, и сложное движение заготовок посредством их вращения вокруг собственной оси и оси станка.

Первоначально изготовителем этого автомата предполагалось использование чугунных кругов с подмешиванием абразивной смеси в процессе доводки. Применение доводочных кругов с уже нанесенным абразивом привело, с одной стороны, к автоматизации операции доводки, а с другой — к необходимости регулярной правки доводочных кругов на шлифовальных автоматах и полуавтоматах. Метод правки доводочных кругов, предложенный производителем автомата, заключается в запуске цикла доводки с помещением специальной шарошки между чугунными кругами. Это связано с недостаточной для срезания алмазного слоя скоростью вращения шарошки. Следовательно, модификация станка привела к дополнительным капитальным затратам в виде регулярной отправки доводочных кругов на правку либо приобретения шлифовального автомата.

На примере детали „основание“ из состава ПДВ в работе [13] подтверждается применение операции доводки, а на основании источников [10, 14—19] сделан вывод о необходимости использования более информативных критериев оценки и контроля оптимизации микрогеометрии поверхности, чем параметрические показатели  $R_a$  и  $R_z$ , что указывает на необходимость использования графических критериев шероховатости. Это определяется тем, что параметрические критерии шероховатости поверхности при одном и том же значении, но разных методах обработки или режущих инструментах обусловлены различными функциональными свойствами поверхности.

Для подтверждения данного суждения авторами настоящей статьи были изготовлены образцы методом точения, фрезерования и доводки с заданным значением  $R_a$ , равным 0,1 мкм,

и получены следующие значения ОКПП: 3,1, более 5 и 2,4 % соответственно. Данный эксперимент подтверждает несовершенство интегрального параметра Ra.

Согласно представленной в работе [20] методике, также были изготовлены образцы методом точения и подтверждена зависимость между шероховатостью и ОКПП в целом. Для получения графического критерия шероховатости при планировании эксперимента и анализе результатов использовался метод Тагути, согласно которому в качестве факторов выделены следующие параметры: подача, глубина резания, скорость резания и угол при вершине резца. Из результатов эксперимента следует, что параметры Rp (максимальная высота выступа) и Rku (эксцесс, используемый для определения угла наклона поверхностей), отвечающие за пиковые значения шероховатости и островершинность соответственно, являются определяющими факторами при определении режимов резания методом токарной обработки для получения заданного значения ОКПП. Следует отметить, что для апробации методики и получения графического критерия в работе [22] применялась исключительно технология токарной обработки.

Для определения рациональных режимов токарной обработки в работе [20] представлен эталон шероховатости поверхности, по которому следует контролировать шероховатость, и приведены графики, содержащие практически полную информацию об угловых и высотных характеристиках профиля. Анализ эталона показывает, что в профиле поверхности количество выступов и впадин равнозначно.

На основании полученных режимов токарной обработки и эталона шероховатости поверхности в работе [13] представлен технологический процесс изготовления детали „основание“ на обрабатывающем центре с ЧПУ WILLEMİN-MACODEL 508MT. Внедрение данного технологического процесса позволило снизить трудоемкость изготовления партии деталей (100 штук) в 1,4 раза. При этом следует отметить, что при обработке необходимо выполнить подрезку торца технологической оснастки на станке перед началом обработки новой партии деталей в целях обеспечения заданного допуска параллельности поверхностей.

Используемые технологические режимы обработки, например для детали „основание“, заключаются в двух циклах обработки при усилии прижима в 392 Н·м (40 кгс) в течение 40 мин каждый. Обработка осуществляется между двумя доводочными кругами с алмазным режущим слоем фракции 7/5 и 60/40 для верхней и нижней поверхностей деталей соответственно.

Для измерения фактических значений шероховатости поверхностей и допуска формы и расположения были изготовлены десять образцов из сплава 12X18H10T согласно режимам, заданным действующим технологическим процессом. Для изготовления опытных образцов были выполнены следующие технологические операции: отрезка, точение, шлифование, доводка. Для отрезки использован ленточнопильный станок ARG 130, для выполнения точения — токарно-револьверный станок Р-16, для плоской шлифовки — плоскошлифовальный станок 3Б722, для доводки — плоскодоводочный автомат ПД2С-905.

Технология доводки предполагает выполнение следующих основных действий:

- 1) установка верхнего и нижнего доводочных кругов и их протирка;
- 2) установка сепараторов на нижний доводочный круг;
- 3) установка заготовок в гнезда сепаратора;
- 4) подведение верхнего доводочного круга в рабочую зону и подача давления;
- 5) запуск двигателя и начало доводки;
- 6) выполнение циклов обработки согласно установленным режимам;
- 7) остановка двигателя с отводом верхнего круга;
- 8) изъятие заготовок из сепараторов и промывка.

Далее были измерены фактические значения шероховатости и допуски плоскостности на контактных поверхностях 1 и 2 детали „основание“ (рис. 2); результаты измерений представлены в табл. 2.

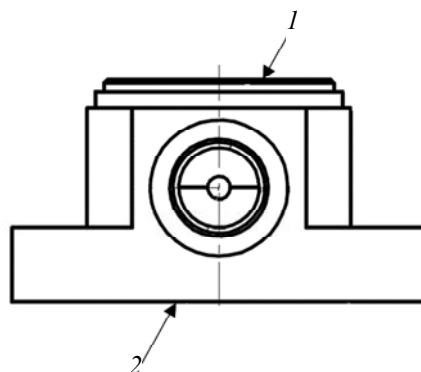


Рис. 2

Таблица 2

Условный номер поверхности	Шероховатость, мкм, среднее значение		Плоскостность, мм, среднее значение	
	заданное	фактическое	заданное	фактическое
1	Ra 0,4	Ra 0,03	0,003	0,001
2	Ra 0,8	Ra 0,05	0,01	0,002

На основе анализа приведенных в таблице результатов можно сделать вывод о нерациональности используемых технологических режимов обработки для доводочной операции. Следовательно, можно предположить фактически меньший экономический эффект и снижение эффективности производственного цикла по технологическому процессу, представленному в работе [13].

По результатам проведенной работы можно сделать вывод о необходимости проведения исследований в области поиска рациональных режимов доводочной операции и разработки соответствующей методики. Подтвержденная малоинформативность параметрического критерия шероховатости Ra, а также возможность применения графического критерия шероховатости путем использования эталонов обуславливают необходимость проверки применимости методов оценивания топографии поверхности и трехмерных параметров оценки шероховатости с целью регламентации требований к геометрической точности деталей ПДВ с заданным значением ОКПП. Также следует исследовать степень влияния шероховатости поверхности остальных деталей пьезоэлектрического датчика вибрации на ОКПП и прочие характеристики датчика.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерение и анализ механических колебаний / Технический центр Компании Брюль и Кьер. М., 2007. 41 с.
2. Шаранов В. М., Мусиенко М. П., Шаранова Е. В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
3. Киселев Ю. В., Киселев Д. Ю., Тиц С. Н. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники. Самара: СГАУ, 2012. 207 с.
4. Янчин В. В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения: Учеб. пособие. Ростов-н/Д: ЮФУ, 2008. 77 с.
5. Головин В. А., Каплунов И. А., Малышкина О. В. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов. М.: Техносфера, 2016. 272 с.
6. А. с. 361723 СССР, МКИ G01P15/08. Пьезоэлектрический акселерометр / О. П. Крамаров. 1975.
7. Пат. 2150117 РФ, G01P15/09. Пьезоэлектрический акселерометр / Ю. С. Вусевкер, А. В. Горши, В. П. Дунаевский, А. Е. Панич. Опубл. 27.05.2000.

8. Пат. 418800 СССР, G01P15/09. Пьезоэлектрический акселерометр / В. П. Дунаевский, И. Ф. Калужная, Н. Т. Федорова. Оpubл. 05.03.1974.
9. Пат. 45704 Украина, G01P15/09. Пьезоэлектрический акселерометр / В. М. Шаранов, М. П. Мусиенко, С. В. Роттэ и др. Оpubл. 15.04.2002.
10. Валетов В. А., Юльметова О. Ю. Микрогеометрия поверхности и ее функциональные свойства // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. № 48. С. 140—142.
11. Яцерицын П. И. Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1966. 384 с.
12. Кремень З. И., Юрьев В. Г., Бабошкин А. Ф. Технология шлифования в машиностроении. СПб: Политехника, 2007. 425 с.
13. Исаев Р. М. Влияние качества поверхностей функциональных деталей пьезоэлектрических датчиков вибрации на их эксплуатационные характеристики: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2017.
14. Валетов В. А. О практической пригодности некоторых критериев для оценки шероховатости поверхности // Технология корпусостроения, судового машиностроения и сварки в судостроении: Сб. Л.: ЛКИ, 1978. С. 62—65.
15. Валетов В. А., Андреев Ю. С., Цимбал И. Р. Исследование микрогеометрии трущихся поверхностей // Трибология и надежность: Сб. СПб, 2010. С. 85—92.
16. Лишник Ю. В., Хусу А. П. Математико-статистическое описание неровностей профиля поверхности при шлифовании. М.: Изд-во АН СССР, 1954.
17. Маталин А. А. Шероховатость поверхности деталей в приборостроении. М.: Машгиз, 1949.
18. Шлезингер Г. Качество поверхности. М.: Машгиз, 1947. 284 с.
19. Хусу А. П., Виттенберг Ю. Р., Пальмов В. А. Шероховатость поверхностей. М.: Наука, 1975. 344 с.
20. Isaev R. M., Andeev Y. S., Vasilkov S. D. Effect of method for treatment of the functional surface of a piezoelectric vibration sensor on its sensitivity // Procedia Engineering. 2017. Vol. 176. P. 96—106.

#### Сведения об авторах

**Семен Алексеевич Юдин**

— аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: sayudin@itmo.ru

**Расим Мирмагмудович Исаев**

— канд. техн. наук; Техприбор, служба главного технолога; начальник отдела; E-mail: ras\_man@mail.ru

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

#### REFERENCES

1. *Izmereniye i analiz mekhanicheskikh kolebaniy. Tekhnicheskij Tsentr Kompanii Bryul' i K"yer* (Measurement and Analysis of Mechanical Vibrations. Brüel & Kjær Technical Center), Moscow, 2007, 41 p. (in Russ.)
2. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. *P'yezoelektricheskiye datchiki* (Piezoelectric Sensors), Moscow, 2006, 632 p. (in Russ.)
3. Kiselev Yu.V., Kiselev D.Yu., Tits S.N. *Vibratsionnaya diagnostika sistem i konstruktsey aviatcionnoy tekhniki* (Vibration Diagnostics of Systems and Structures of Aviation Equipment), Samara, 2012, 207 p. (in Russ.)
4. Yanchin V.V. *P'yezoelektricheskiye datchiki vibratsionnogo i udarnogo uskoreniya* (Piezoelectric Vibration and Shock Acceleration Sensors), Rostov-on-Don, 2008, 77 p. (in Russ.)
5. Golovin V.A., Kaplunov I.A., Malyshkina O.V. *Fizicheskiye osnovy, metody issledovaniya i prakticheskoye primeneniye p'yezomaterialov* (Physical Foundations, Research Methods and Practical Application of Piezomaterials), Moscow, 2016, 272 p. (in Russ.)
6. Certificate of authorship 361723 (USSR), G01P15/08, *P'yezoelektricheskiy akselerometr* (Piezoelectric Accelerometer), O.P. Kramarov, 1975. (in Russ.)
7. Patent RU 2150117, G01P15/09, *P'yezoelektricheskiy akselerometr* (Piezoelectric Accelerometer), Yu.S. Vusevker, A.V. Gorish, V.P. Dunaevsky, A.E. Panic, Published 27.05.2000. (in Russ.)
8. Patent USSR 418800, G01P15/09, *P'yezoelektricheskiy akselerometr* (Piezoelectric Accelerometer), V.P. Dunaevsky, I.F. Kalyuzhnaya, N.T. Fedorova, Published 05.03.74. (in Russ.)
9. Patent UA 45704, G01P15/09, *P'yezoelektricheskiy akselerometr* (Piezoelectric Accelerometer), V.M. Sharapov, M.P. Musienko, S.V. Rotte et al., Published 15.04.2002. (in Russ.)
10. Valetov V.A., Yulmetova O.Yu. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2008, no. 48, pp. 140—142. (in Russ.)

11. Yascheritsyn P.I. *Povysheniye ekspluatatsionnykh svoystv shlifovannykh poverkhnostey* (Improving the Performance Properties of Polished Surfaces), Minsk, 1966, 384 p. (in Russ.)
12. Kremen Z.I., Yuriev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroyenii* (Grinding Technology in Mechanical Engineering), St. Petersburg, 2007, 425 p. (in Russ.)
13. Isaev R.M. *Vliyaniye kachestva poverkhnostey funktsional'nykh detaley p'yezoelektricheskikh datchikov vibratsii na ikh ekspluatatsionnyye kharakteristiki* (Influence of Surface Quality of Functional Parts of Piezoelectric Vibration Sensors on Their Operational Characteristics), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2017, [http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=86&number\\_file=E023BAE9C97B17E23B203506C0E74B33](http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=86&number_file=E023BAE9C97B17E23B203506C0E74B33). (in Russ.)
14. Valetov V.A. *Tekhnologiya korpusostroyeniya, sudovogo mashinostroyeniya i svarki v sudostroyenii* (Technology of Hull Building, Ship Engineering and Welding in Shipbuilding), Leningrad, 1978, pp. 62–65. (in Russ.)
15. Valetov V.A., Andreev Yu.S., Tsimbal I.R. *Tribologiya i nadezhnost'* (Tribology and Reliability), St. Petersburg, 2010, pp. 85–92. (in Russ.)
16. Lishnik Yu.V., Khusu A.P. *Matematiko-statisticheskoye opisaniye nerovnostey profilya poverkhnosti pri shlifovanii* (Mathematical and Statistical Description of Surface Profile Irregularities During Grinding), Moscow, 1954. (in Russ.)
17. Matalin A.A. *Sherokhovatost' poverkhnosti detaley v priborostroyenii* (Surface Roughness of Parts in Instrumentation), Moscow, 1949.
18. Schlesinger G. *Kachestvo poverkhnosti* (Surface Quality), Moscow, 1947, 284 p. (in Russ.)
19. Khusu A.P., Wittenberg Yu.R., Palmov V.A. *Sherokhovatost' poverkhnostey* (Surface Roughness), Moscow, 1975, 344 p. (in Russ.)
20. Isaev R.M., Andeev Y.S., Vasilkov S.D. *Procedia Engineering*, Elsevier, 2017, vol. 176, pp. 96–106.

#### Data on authors

- Semyon A. Yudin** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;  
E-mail: sayudin@itmo.ru
- Rasim M. Isaev** — PhD; JSC Techpribor, Chief Technologist Service; Head of the Department;  
E-mail: ras\_man@mail.ru

Received 22.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.