

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕЙ ВИБРАЦИИ НА МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ-АКСЕЛЕРОМЕТРЫ

А.С. Афанасьев¹, В.М. Полушкин¹, В.А. Соболев¹,
В.М. Суслов¹, Ю.Т. Котов², Т.Д. Знаменская²

¹Филиал ФГБУ «46ЦНИИ» Минобороны России, 141006, Московская обл., г. Мытищи, ул. Комарова, 13

²МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

hit-el@ya.ru

Рассмотрено влияние внешней воздействующей вибрации, действующей по оси чувствительности микроэлектромеханического акселерометра. Приведена функциональная схема устройства контроля дополнительной вибрационной погрешности. Проведена настройка угломерного устройства в нулевое положение, что позволило максимально уменьшить угол расхождения между плоскостью чувствительного элемента акселерометра и плоскостью стола стенда. Акселерометр был размещен таким образом, чтобы направление его оси чувствительности совпало с направлением ускорения вибрации. Задаются требуемые значения частоты и ускорения вибрации. Установлено, что контроль дополнительной вибрационной погрешности микроэлектромеханических систем-акселерометров в одной точке измерения недостаточен, поскольку ее максимальное значение может оказаться в любой пространственной ориентации (показано на примере диапазона ± 1 g). Разработаны метод контроля виброустойчивости микроэлектромеханических преобразователей линейного ускорения и его алгоритм на основе законов распределения вероятностей их статистических характеристик в нормальных условиях и в условиях воздействия внешних факторов. Обоснована организация процессов измерения показателей, их первичной и статистической обработки, последующего расчета и оценки имеющего существенное значение дополнительных вибрационных погрешностей. Представлена зависимость дополнительной вибрационной погрешности от пространственной ориентации микроэлектромеханических систем-акселерометров относительно измеряемого ускорения. Исследована зависимость дополнительной вибрационной погрешности от частоты воздействующей вибрации. Показано, что дополнительная вибрационная погрешность обратно пропорциональна частоте внешней воздействующей вибрации.

Ключевые слова: акселерометр, внешняя вибрация, частота, виброустойчивость

Ссылка для цитирования: Афанасьев А.С., Полушкин В.М., Соболев В.А., Суслов В.М., Котов Ю.Т., Знаменская Т.Д. Влияние внешней воздействующей вибрации на микроэлектромеханические системы-акселерометры // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 5. С. 138–143.

DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-138-143

Этапы разработки и производства отечественных микроэлектромеханических систем-акселерометров (далее акселерометров) сопряжено с решением ряда задач. Одной из главных является задача оценки точностных возможностей этих изделий в процессе эксплуатации. Это связано в первую очередь с отсутствием до настоящего времени возможности определения и достоверного подтверждения эксплуатационных требований к вновь разрабатываемым изделиям в части их стойкости к воздействиям механических внешних факторов.

Цель работы

Работа посвящена вопросам поиска способов анализа и оценки реакции акселерометров на воздействие механических внешних факторов для получения достоверных результатов по их техническим характеристикам, необходимость в которых продиктована тем, что показатель устойчивости к этим воздействиям, исходя из условий и практики применения акселерометров, является одним из наиболее важных для их применения потребителями — разработчиками систем военной техники [1–3].

Материалы и методы

Обеспечение заданных параметров демпфирования колебаний механической системы акселерометров является одной из задач, которую следует решить при их разработке [4–6]. Тем не менее, несмотря на принимаемые меры, механические воздействия на технические характеристики акселерометров наиболее критичны.

Требования к влиянию внешних воздействующих факторов на акселерометры предъявляются в объеме унифицированных групп исполнения в соответствии со стандартом [7], исходя из того, что по функциональным и конструктивно-технологическим показателям эти изделия должны быть отнесены к категории комплектующих электрорадиоизделий, включенных в сферу распространения комплекса государственных военных стандартов «Климат-7». В соответствии с областями применения акселерометров, согласно требованиям, значение вибрационной нагрузки может достигать 2000 Гц при ускорении свободного падения 20 g, при многократных ударах — до 150 g и одиночных — до 3000 g, температура воздействий может составлять 100...125 °С.

При обработке требований по стойкости акселерометров к внешним воздействующим факторам, исходя из опыта их разработчиков, важно принять во внимание, что вследствие наличия в них микромеханических частей они чувствительны к механическим и температурным воздействиям.

В соответствии с ГОСТ РВ 20.57.416–98 [8] стойкость к воздействию конкретного внешнего фактора — это способность изделия выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм во время и после воздействия на него этого внешнего фактора в течение всего срока службы, т. е. оно обладает такими свойствами как устойчивость и прочность.

Испытания при воздействии механических факторов следует проводить в трех взаимно перпендикулярных направлениях по отношению к оси изделия. Однако если известно наиболее опасное и критичное (для параметров изделия) направление воздействия, испытания проводят только в этом направлении.

Для проверки наличия у изделия свойства устойчивости к механическим воздействиям рекомендуется выбирать параметры, по изменению которых можно судить о вибро- или ударной устойчивости в целом (например, уровень шумов, искажение выходного сигнала или изменение его величины, целостность электроцепи и т. д.).

Тем не менее вследствие сложности решения вопросов контроля виброустойчивости акселерометров [9–11] в процессе воздействия факторов разработчики, как правило, оценивают их стойкость только на прочность [12], избегая при испытаниях наиболее опасное направление воздействия, каковым для них является направление вдоль оси чувствительности. Если когда контроль устойчивости изделия к воздействию все же проводится, то по его результатам нет возможности достоверно оценить способность изделия выполнять свои функции в этих условиях [13–23].

Ниже приведены несколько примеров по выходу из сложившейся ситуации, исходя из опыта ведущих отечественных разработчиков акселерометров [13].

Как правило, часть разработчиков рекомендует испытывать акселерометры на воздействие механических факторов по одной или двум осям, кроме оси чувствительности, т. е. исключая наиболее опасное направление, а контроль параметров проводить после испытания, т. е. только на вибропрочность. Другие разработчики акселерометров также рассматривают необходимость испытаний только на вибропрочность, при этом не контролируя изделие в процессе воздействия внешнего фактора [13].

При контроле на виброустойчивость акселерометры испытывают в условиях широкополосной вибрации заданного диапазона. Изделие в нормальных условиях располагают так, чтобы его ось чувствительности была направлена вдоль ускорения свободного падения со значением 1 g, а в условиях испытания — совпадала с направлением вибрации. Акселерометры испытывают в условиях вибрации во включенном состоянии в течение 60 с — через каждые 20 с вольтметром постоянного напряжения измеряют выходной сигнал. Акселерометр считают выдержавшим испытание на виброустойчивость, если его дополнительная погрешность при действии широкополосной вибрации будет не более 1 %. Однако максимальная дополнительная погрешность может оказаться в других пространственных положениях и будет превышать измеренную дополнительную погрешность от вибрации в этом режиме в несколько раз [14].

В реальных условиях эксплуатации акселерометров, например в аппаратуре системы навигации беспилотного летательного аппарата, на них по всем направлениям постоянно воздействует внешняя вибрация в широком диапазоне частот, которая, как установлено [15], приводит к появлению дополнительной погрешности, зависящей от пространственной ориентации и влияющей на точность выдаваемой навигационной информации. Рост амплитуды внешней воздействующей вибрации приводит к росту дополнительной погрешности от нее.

В ходе исследований была поставлена задача: установить зависимость дополнительной погрешности от частоты вибрации.

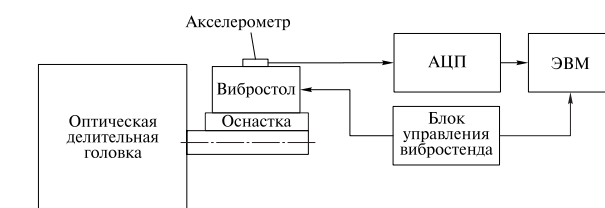


Рис. 1. Устройство контроля дополнительной погрешности акселерометров

Fig. 1. Control device for additional error of accelerometers

Устройство контроля, с помощью которого проводились экспериментальные исследования, приведено на рис. 1. Оборудование стандартное, промышленного изготовления. Дополнительно изготовлена оснастка для крепления вибростола на вал оптической делительной головки.

Устройство работает следующим образом. В зависимости от того, какой выходной сигнал имеет испытуемый акселерометр, — цифровой или аналоговый, его выход соединяется с соответствующим входом преобразователя (на рис. 1 представлен вариант для аналогового выхода).

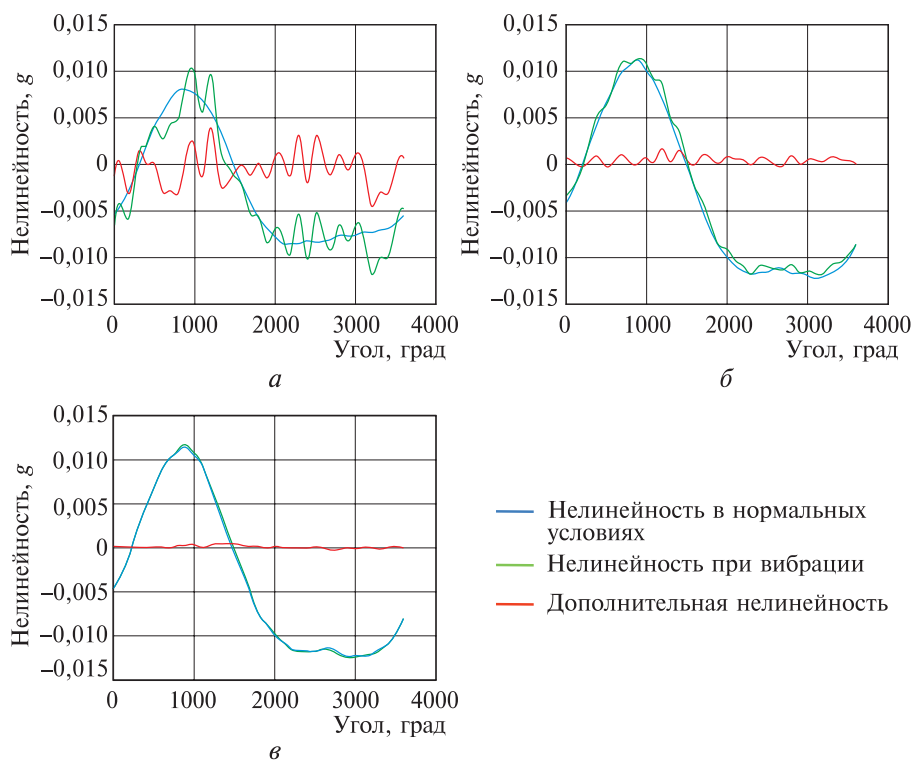


Рис. 2. Зависимость дополнительной погрешности от частоты внешней воздействующей вибрации: а — 50 Гц; б — 100 Гц; в — 400 Гц

Fig. 2. The dependence of the additional error on the frequency of external vibration: а — 50 Гц; б — 100 Гц; в — 400 Гц

Сначала выполняется настройка устройства. Угломерное устройство выставляется в нулевое положение. С помощью регулировочных винтов и уровня плоскость стола вибрационного стенда устанавливается в горизонтальное положение. Это позволяет максимально уменьшить угол расхождения между плоскостью чувствительного элемента акселерометра и плоскостью стола стенда. Акселерометр размещается таким образом, чтобы его ось чувствительности по направлению совпадала с направлением ускорения вибрации. Включается питание всех составных частей устройства контроля. Вибростенд настраивается на нужную частоту и амплитуду, создавая тем самым требуемое значение частоты и ускорения вибрации. После настройки вибрация отключается.

Подается питание на акселерометр и контролируется его выходной сигнал в нормальных условиях. Включается вибрация и проводится измерение уровня выходного сигнала акселерометра при воздействии вибрации. В результате получают первое значение передаточной характеристики как в нормальных условиях, так и при воздействии вибрации.

Затем вал угломерного устройства разворачивается на требуемый угол. Согласно программе и методике испытаний требуется разворот через каждые 10 град, для получения массива из 36 зна-

чений передаточной характеристики. Контроль выходного сигнала акселерометра в нормальных условиях и при воздействии вибрации проводится при каждом выставленном угле поворота вала угломерного устройства.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований при воздействии внешней вибрации с частотами 50, 100 и 400 Гц было выявлено, что воздействие вибрации низкой частоты оказывает существенно большее влияние на функциональные параметры, чем вибрация более высоких частот, а на частоте 400 Гц изменения практически отсутствуют. Также установлено, что при воздействии вибрации частотой 50 Гц имеют место изменения видов законов распределения вероятностей нелинейностей передаточной характеристики и их параметров (диапазона, оценок математического ожидания и среднего квадратического отклонения) в пределах от 15 до 30 %.

Для ускорения и упрощения метода в случае, если не поставлена задача измерения непосредственно передаточных характеристик испытуемых изделий, а только дополнительной погрешности от внешней воздействующей вибрации, возможно установление изделия на вибростол без

начальной настройки. В этом случае погрешность рассчитывается по выражению

$$\Delta_{\text{доп}} = \Delta_{\text{н}} - \Delta_{\text{в}},$$

где $\Delta_{\text{доп}}$ — дополнительная погрешность от вибрации;

$\Delta_{\text{н}}$ — суммарная погрешность в нормальных условиях;

$\Delta_{\text{в}}$ — суммарная погрешность в условиях вибрации;

$\Delta_{\text{н}}$ и $\Delta_{\text{в}}$ включают в себя и погрешность начальной выставки, которая при расчетах стремится к нулю.

Обработка результатов испытаний, проведенных описанным методом, представлена в работе [15] (рис. 2).

С повышением частоты внешней воздействующей вибрации дополнительная нелинейность от ее воздействия снижается.

Графики построены в среде MATLAB с помощью интерполяции кубическими сплайнами для сглаживания их линий посредством плавного перехода от одного значения к другому.

Выводы

Установлено, что с ростом частоты внешней воздействующей вибрации дополнительная погрешность от ее влияния уменьшается при отсутствии резонансных частот в исследуемом диапазоне.

На объектах с диапазоном внешней воздействующей вибрации до 400 Гц необходимо применять меры защиты от вибрации для аппаратуры, где применяются акселерометры для сохранения достаточной точности выдаваемой с них информации.

Список литературы

- [1] Мезенцев А.П., Доронин В.П., Новиков Л.З., Харламов С.А., Неаполитанский А.С., Логинов Б.А. Основные проблемы создания измерительных блоков на базе микромеханических гироскопов и акселерометров // Гироскопия и навигация, 1997. № 1. С. 7–14.
- [2] Токарев М.Ф., Талицкий Е.Н., Фролов В.А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1984. 220 с.
- [3] Вавилов В.Д., Поздеев В.И., Шеянов В.Н. О аэродинамическом демпфировании // Труды НИТИ, 1986. Вып. 2. С. 89–93.
- [4] Тимошенко С.П., Гудьер Д. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 575 с.
- [5] Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Тула: Тульский гос. ун-т, 2002. 392 с.
- [6] Тимофеев В.Н., Погалов А.И., Угольников С.В. Техническая механика микросистем. М.: МИЭТ, 2006. 187 с.
- [7] ГОСТ РВ 20.39.414.1–97 Комплексная система общих технических требований. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Классификация по условиям применения и требования стойкости к внешним воздействующим факторам. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200016473> (дата обращения 18.12.2018).
- [8] ГОСТ РВ 20.57.416–98 Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Методы испытаний. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200016473> (дата обращения 18.12.2018).
- [9] Полушкин В.М., Сирыченко Н.А. Вопросы контроля функциональных параметров микроэлектромеханических преобразователей параметров движения // Научно-технический сборник. Мытищи: 22ЦНИИ Минобороны России, 2008. № 60. С. 23–28.
- [10] Домрачев В.Г. Точность цифровых преобразователей угла при нестационарном воздействии эксплуатационных факторов // Метрология, 1983. № 1. С. 3–7.
- [11] Домрачев В.Г. О дополнительной погрешности цифровых преобразователей угла в условиях быстромменяющихся эксплуатационных факторов // Метрология, 1984. № 11. С. 3–7.
- [12] Зотов С.А., Анчутин С.А., Морозова Е.С. Принцип испытаний микромеханических акселерометров серии АРК. Сб. трудов / под ред. С.П. Тимошенко. М.: МИЭТ, 2007. С. 106–111.
- [13] Полушкин В.М., Сирыченко Н.А. Анализ и сравнительная оценка существующих методов контроля микроэлектромеханических преобразователей параметров движения. // Научно-технический сборник. Мытищи: 22ЦНИИ Минобороны России, 2009. № 61. С. 15–18.
- [14] Афанасьев А.С., Болдырев М.А., Воронцов П.С., Сулов В.М., Котов Ю.Т., Вороницын В.К., Камусин А.А. Система контроля и управления высокоомощных литий-ионных аккумуляторных батарей // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2019. № 1 (367). С. 161–170.
- [15] Афанасьев А.С., Комаров Е.Г., Полушкин В.М. Алгоритмическое обеспечение контроля виброустойчивости микроэлектромеханических преобразователей линейных ускорений // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2013. № 3(95). С. 181–184.
- [16] Торгонский Л.А. Проектирование интегральных микросхем и микропроцессоров. Томск: ТУСУР, 2011. Раздел 1. 254 с.
- [17] Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь, 1989. 400 с.
- [18] Антошина И.В., Котов Ю.Т. Микропроцессоры и микропроцессорные системы (аналитический обзор). М.: МГУЛ, 2005. 432 с.
- [19] Солонина А., Улахович Д., Яковлев Л. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 464 с.
- [20] Conway B.E. Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications. N.-Y.: Springer, 1999, 736 p.
- [21] Galizzioli D., Tantardini F., Trasatti S. Ruthenium Dioxide: A New Electrode Material. 1. Behavior in Acid Solutions of Inert Electrolytes // J. Appl. Electrochem, 1974, v. 4, p. 57.
- [22] Бобрикова И.Г. Введение в электрохимические технологии. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет, 2017. 184 с.
- [23] Suematzu S., Shkolnik N. Advanced Supercapacitors Using New Electroactive Polymers // Advanced Capacitor World Summit 2005. USA, San Diego CA, 2005, pp. 45–54.

Сведения об авторах

Афанасьев Алексей Сергеевич — канд. техн. наук, зам. начальника управления — начальник отдела филиала ФГБУ «46ЦНИИ» Минобороны России, hit-el@ya.ru

Полушкин Вячеслав Михайлович — канд. техн. наук, зам. начальника отдела — начальник лаборатории филиала ФГБУ «46ЦНИИ» Минобороны России, hit-el@ya.ru

Соболев Владимир Алексеевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. филиала ФГБУ «46ЦНИИ» Минобороны России, hit-el@ya.ru

Суслов Виталий Михайлович — канд. техн. наук, вед. науч. сотр. филиала ФГБУ «46ЦНИИ» Минобороны России, hit-el@ya.ru

Котов Юрий Терентьевич — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kotov46@inbox.ru

Знаменская Татьяна Дмитриевна — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), tzn957@gmail.com

Поступила в редакцию 29.08.2018.

Принята к публикации 24.06.2019.

INFLUENCE OF EXTERNAL VIBRATION ON MICROELECTROMECHANICAL CONVERTERS OF LINEAR ACCELERATION

A.S. Afanasev¹, V.M. Polushkin¹, V.A. Sobolev¹,
V.M. Suslov¹, Y.T. Kotov², T.D. Znamenskaya²

¹Branch FGBU «46TsNII» Ministry of Defense of Russia, 13, Komarova, 141006, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

hit-el@ya.ru

The influence of external influencing vibration acting along the sensitivity axis of a microelectromechanical accelerometer (MEMS-accelerometer) is presented. The functional diagram of the device for monitoring the additional vibration error is given. Before testing, the adjustment is carried out, the goniometer is placed in the zero position, which allows to minimize the angle of divergence between the plane of the sensor element of the accelerometer and the table plane of the stand. Accelerometer is placed in such a way that its axis of sensitivity in direction coincides with the direction of acceleration of vibration. The required values of frequency and acceleration of vibration are set. It is established that monitoring of the additional vibration error of MEMS-accelerometers at one point of measurement is insufficient, its maximum value can be in any spatial orientation (shown in the range ± 1 g example). As part of the research, a method for controlling the vibration resistance of microelectromechanical linear acceleration converters and an algorithm for controlling the vibration resistance of microelectromechanical linear acceleration converters are developed based on the laws of probability distribution of their statistical characteristics under normal conditions and under the influence of external factors. The process of monitoring the functional characteristics of MEMS-accelerometers is rather complicated, especially under conditions of vibration loads, therefore it is very important to organize the measurement process, the initial processing of the measured data, the statistical processing, the subsequent calculation and the estimation of additional errors of interest that are of concern to us. It is shown that the additional vibration error depends on the spatial orientation of the MEMS-accelerometer relative to the measured acceleration. The dependence of the additional error from affecting the vibration frequency, it is shown that the additional vibration error is inversely proportional to the frequency of the external vibration.

Keywords: the microelectromechanical converter of linear acceleration, external vibration, frequency, vibrating stability

Suggested citation: Afanasev A.S., Polushkin V.M., Sobolev V.A., Suslov V.M., Kotov Y.T., Znamenskaya T.D. *Vliyaniye vneshney vozdeystvuyushchey vibratsii na mikroelektromekhanicheskie sistemy-akselerometry* [Influence of external vibration on microelectromechanical converters of linear acceleration]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 138–143. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-138-143

References

- [1] Mezentsev A.P., Doronin V.P., Novikov L.Z., Kharlamov S.A., Neapolitanskiy A.S., Loginov B.A. *Osnovnyye problemy sozdaniya izmeritel'nykh blokov na baze mikromekhanicheskikh giroskopov i akselerometrov* [The main problems of creating measuring units based on micromechanical gyroscopes and accelerometers] *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 1997, no. 1, pp. 7–14.
- [2] Tokarev M.F., Talitskiy E.N., Frolov V.A. *Mekhanicheskie vozdeystviya i zashchita radioelektronnoy apparatury* [Mechanical influences and protection of electronic equipment]. Moscow: Radio i svyaz' [Radio and communication], 1984, 220 p.
- [3] Vavilov V.D., Pozdeev V.I., Sheyanov V.N. *O aerodinamicheskoy dempfirovaniy* [On aerodynamic damping] *Trudy NITI* [Proceedings NITI], 1986, iss. 2, pp. 89–93.
- [4] Timoshenkov S.P., Gud'er D. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1975, 575 p.
- [5] Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory* [Micromechanical devices]. Tula: Tula State Univ., 2002, 392 p.

- [6] Timofeev V.N., Pogalov A.I., Ugol'nikov S.V. *Tekhnicheskaya mekhanika mikrosistem* [Technical mechanics of microsystems]. Moscow: MIET, 2006, 187 p.
- [7] *GOST RV 20.39.414.1–97 Kompleksnaya sistema obshchikh tekhnicheskikh trebovaniy. Izdeliya elektronnoy tekhniki, kvantovoy elektroniki i elektrotekhnicheskikh voennogo naznacheniya. Klassifikatsiya po usloviyam primeneniya i trebovaniya stoykosti k vneshnim vozdeystviyushchim faktoram* [GOST RV 20.39.414.1–97 A comprehensive system of general technical requirements. Products of electronic engineering, quantum electronics and electrical engineering for military purposes. Classification under the terms of use and requirements of resistance to external influencing factors]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200016473> (accessed 18.12.2018).
- [8] *GOST RV 20.57.416–98 Kompleksnaya sistema kontrolya kachestva. Izdeliya elektronnoy tekhniki, kvantovoy elektroniki i elektrotekhnicheskikh voennogo naznacheniya. Metody ispytaniy* [GOST RV 20.57.416–98 Integrated quality control system. Products of electronic engineering, quantum electronics and electrical engineering for military purposes. Test methods]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200016473> (accessed 18.12.2018).
- [9] Polushkin V.M., Siryachenko N.A. *Voprosy kontrolya funktsional'nykh parametrov mikroelektromekhanicheskikh preobrazovateley parametrov dvizheniya* [Issues of control of functional parameters of microelectromechanical transducers of motion parameters] Nauchno-tehnicheskii sbornik [Scientific and technical collection]. Mytishchi: 22 TsNII of the Ministry of Defense of Russia, 2008, no. 60, pp. 23–28.
- [10] Domrachev V.G. *Tochnost' tsifrovyykh preobrazovateley ugla pri nestatsionarnom vozdeystvii ekspluatatsionnykh faktorov* [The accuracy of digital angle transducers with unsteady exposure to operational factors] Metrologiya [Metrology], 1983, no. 1, pp. 3–7.
- [11] Domrachev V.G. *O dopolnitel'noy pogreshnosti tsifrovyykh preobrazovateley ugla v usloviyakh bystromenyayushchikhsya ekspluatatsionnykh faktorov* [About additional error of digital angle converters in conditions of rapidly changing operational factors] Metrologiya [Metrology], 1984, no. 11, pp. 3–7.
- [12] Zotov S.A., Anchutin S.A., Morozova E.S. *Printsip ispytaniy mikromekhanicheskikh akselerometrov serii ARK* [The test principle of micromechanical accelerometers of the ARK series] Sb. trudov [Collected Works]. Ed. S.P. Timoshenkov. Moscow: MIET, 2007, pp. 106–111.
- [13] Polushkin V.M., Siryachenko N.A. *Analiz i sravnitel'naya otsenka sushchestvuyushchikh metodov kontrolya mikroelektromekhanicheskikh preobrazovateley parametrov dvizheniya* [Analysis and comparative evaluation of existing methods for monitoring microelectromechanical transducers of motion parameters] Nauchno-tehnicheskii sbornik [Scientific and technical collection]. Mytishchi: 22 TsNII of the Ministry of Defense of Russia, 2009, no. 61, pp. 15–18.
- [14] Afanas'ev A.S., Boldyrev M.A., Vorontsov P.S., Suslov V.M., Kotov Yu.T., Voronitsyn V.K., Kamusin A.A. *Sistema kontrolya i upravleniya vysokomoshchnykh lity-ionnykh akkumulyatornykh batarey* [Monitoring system and control of high-power lithium-ion batteries]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal [News of higher educational institutions. Forest Journal], 2019, no. 1 (367), pp. 161–170.
- [15] Afanas'ev A.S., Komarov E.G., Polushkin V.M. *Algoritmicheskoe obespechenie kontrolya vibroustoychivosti mikroelektromekhanicheskikh preobrazovateley lineynykh uskoreniy* [Algorithmic support of the vibration resistance control of microelectromechanical transducers of linear accelerations] Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2013, no. 3 (95), pp. 181–184.
- [16] Torgonskiy L.A. *Proektirovanie integral'nykh mikroskhem i mikroprotssessorov* [Designing integrated circuits and microprocessors]. Tomsk: TUSUR, 2011, Section 1, 254 p.
- [17] Koledov L.A. *Tekhnologiya i konstruktii mikroskhem, mikroprotssessorov i mikrosborok* [Technology and design of microcircuits, microprocessors and micro assemblies]. Moscow: Radio i svyaz', 1989, 400 p.
- [18] Antoshina I.V., Kotov Yu.T. *Mikroprotssessory i mikroprotssessornye sistemy (analiticheskiy obzor)* [Microprocessors and microprocessor systems (analytical review)]. Moscow: MGUL, 2005, 432 p.
- [19] Solonina A., Ulakhovich D., Yakovlev L. *Algoritmy i protssessory tsifrovoy obrabotki signalov* [Algorithms and processors of digital signal processing]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2009, 464 p.
- [20] Bobrikova I.G. *Vvedenie v elektrokhimicheskie tekhnologii* [Introduction to electrochemical technology]. Novocherkassk: Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet [South Russian State Polytechnic University], 2017, 184 p.
- [21] Conway B.E. *Electrochemical Supercapacitors. Scientific Fundamentals and Technological Applications*. N.-Y.: Springer, 1999, 736 p.
- [22] Galizzioli D., Tantardini F., Trasatti S. *Ruthenium Dioxide: A New Electrode Material. 1. Behavior in Acid Solutions of Inert Electrolytes*. J. Appl. Electrochem, 1974, v. 4, p. 57.
- [23] Suematzu S., Shkolnik N. *Advanced Supercapacitors Using New Electroactive Polymers*. Advanced Capacitor World Summit 2005. USA, San Diego CA, 2005, pp. 45–54.

Authors' information

Afanasyev Aleksey Sergeevich — Cand. Sci. (Tech.), Deputy Head of Department – Head of Department of the branch FGBU «46CNII» of the Ministry of Defense of Russia, hit-el@ya.ru

Polushkin Vyacheslav Mikhailovich — Cand. Sci. (Tech.), Deputy Head of Department — Head of the laboratory of the branch of the FGBU «46CNII» of the Ministry of Defense of Russia, hit-el@ya.ru

Sobolev Vladimir Alekseevich — Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher of the branch of the FSBI «46CNII» of the Ministry of Defense of Russia, hit-el@ya.ru

Suslov Vitaly Mikhailovich — Cand. Sci. (Tech.), Leading Researcher of the Branch of the FSBI «46CNII» of the Ministry of Defense of Russia, hit-el@ya.ru

Kotov Yuri Terent'evich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), kotov46@inbox.ru

Znamenskaya Tat'yana Dmitrievna — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), tzn957@gmail.com

Received 29.08.2018.

Accepted for publication 24.06.2019.