

Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн

УДК 531.768

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-5-116-129>

Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах с кольцевым резонатором на анизотропном материале

Д. П. Лукьянов¹, А. М. Боронахин¹, С. Ю. Шевченко¹, М. А. Хиврич^{2✉}, Т. А. Амиров³

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²АО "Авро-МКС", Санкт-Петербург, Россия

³Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

✉mariya-khivrich@yandex.ru

Аннотация

Введение. Состояние объектов эксплуатации (например, на железной дороге) контролируется системами диагностики. В их составе используются микроэлектромеханические системы, комплектуемые датчиками ускорения (акселерометрами). В процессе эксплуатации акселерометры подвергаются значительным вибрациям и многократно повторяющимся ударным воздействиям. Это накладывает ограничения на конструкцию и материалы, из которых изготавливаются акселерометры.

Цель работы. Разработка микромеханического акселерометра (ММА) на поверхностных акустических волнах (ПАВ), способного измерять ударные воздействия.

Материалы и методы. Теоретическая часть работы выполнялась с применением математической теории дифференциальных уравнений, теоретической механики, конечно-элементарного анализа и элементов теории ПАВ. В ходе работы применялась математическая обработка в программах MATLAB, Mathcad, Maple, COMSOL Multiphysics, OOFELIE::Multiphysics, ПО Bluehill3, CorelDRAW. Экспериментальные исследования проведены с привлечением напольной автоматизированной испытательной системы INSTRON 5985.

Результаты. Разработана концепция построения и предложена оригинальная конструкция ММА на ПАВ, способного измерять ударные воздействия в сотни g. Разработан чувствительный элемент (ЧЭ) сенсора. Анализ материалов для пластин в составе конструкции ММА на ПАВ показал, что ЧЭ из кварца ST-среза отличается более широким диапазоном измеряемых ускорений и более высоким порогом чувствительности, чем ЧЭ из ниобата лития среза YX-128°. Выработаны требования и исследована возможность повышения порога чувствительности датчика. Сформулированы требования к проектированию и предложена топология встречно-штыревого преобразователя (ВШП) в виде кольцевого резонатора. Предложена оригинальная топология резонатора с неэквидистантным ВШП для учета анизотропии материала чувствительного элемента. Оценены выходные характеристики: порог чувствительности, динамический диапазон, масштабный коэффициент. Предложена методика расчета ММА на ПАВ с кольцевым резонатором на анизотропном материале. ЧЭ ММА такой конструкции имеет высокий порог чувствительности, широкий динамический диапазон и малую поперечную чувствительность.

Заключение. Предложенная методика проектирования ЧЭ твердотельного датчика линейных ускорений позволяет выбрать материал и систему съема измерительной информации в зависимости от технических требований. Благодаря оригинальности конструкторско-технологического решения предложенный акселерометр позволяет проводить измерения в широком диапазоне ударных воздействий.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, микромеханический акселерометр, чувствительный элемент, поверхностно-акустические волны, встречно-штыревой преобразователь, анизотропный материал

Для цитирования: Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах с кольцевым резонатором на анизотропном материале / Д. П. Лукьянов, А. М. Боронахин, С. Ю. Шевченко, М. А. Хиврич, Т. А. Амиров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 116–129. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-116-129

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.09.2019; принята к публикации после рецензирования 14.10.2019; опубликована онлайн 29.11.2019

© Лукьянов Д. П., Боронахин А. М., Шевченко С. Ю., Хиврич М. А., Амиров Т. А., 2019



Microaccelerometer on Surface Acoustic Waves with a Ring Resonator on Anisotropic Material

Dmitry P. Lukyanov¹, Alexander M. Boronakhin¹, Sergey Yu. Shevchenko¹,
Mariya A. Khivrich², Temurmaliq A. Amirov³

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² JSC "Avro-MCS", St Petersburg, Russia

³ Tashkent State Technical University n. a. Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

✉ mariya-khivrich@yandex.ru

Abstract

Introduction. Diagnostic systems are designed to monitor the condition of operational components (for example, on the railway). It is imperative that micro-electromechanical systems (MEMS) equipped with acceleration sensors (accelerometers) be used as part of measuring diagnostic systems. It is known that accelerometers are operated under increased vibration and repeated shock loads. This imposes a limitation both on the accelerometer design and the properties of materials from which these devices are produced.

Aim. To develop a micromechanical accelerometer (MMA) for surface acoustic waves (SAW), capable of measuring shock effects.

Materials and methods. The theoretical part of the study was carried out using the mathematical theory of differential equations, theoretical mechanics, finite element analysis and elements of SAW theory. In the course of the work, the following methods of mathematical processing were applied: MATLAB, Mathcad, Maple, COM-SOL Multiphysics, OOFELIE: Multiphysics, Bluehill3 software, CorelDRAW. Experimental studies were also conducted using the INSTRON 5985 floor automated test system.

Results. An original design of MMA on a SAW capable of measuring shock effects in hundreds of g was proposed. A sensing element (SE) of the sensor was developed. An analysis of the plate materials for their use as part of the SAW-based MMA design showed that SE from the quartz ST-cut material has a wider range of measured accelerations and a higher sensitivity threshold than SE from the YX-128° cut-off lithium niobate material. Requirements were developed to increase the SE sensitivity threshold. Design requirements were developed, and an interdigital transducer (IDT) topology in the form of a ring resonator was proposed. The following output characteristics were assessed: sensitivity threshold, dynamic range and scale factor. In addition, a procedure was developed for calculating MMA on a SAW with a ring resonator on an anisotropic material. It was found that the developed SE is characterized by a high sensitivity threshold, a wide dynamic range and a low transverse sensitivity.

Conclusion. The technique proposed for designing a sensing element for use in solid-state linear acceleration sensors facilitates, depending on technical requirements, selection of construction materials and sensor design. Due to the originality of the design and engineering solutions, the proposed accelerometer allows measurements to be carried out across a wide range of impact loads.

Key words: microelectromechanical systems, micromechanical accelerometer, sensitive element, surface acoustic waves, interdigital transducer, anisotropic material

For citation: Lukyanov D. P., Boronakhin A. M., Shevchenko S. Yu., Khivrich M. A., Amirov T. A. Microaccelerometer on Surface Acoustic Waves with a Ring Resonator on Anisotropic Material. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 116–129. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-116-129

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Submitted 16.09.2019; accepted 14.10.2019; published online 29.11.2019

Введение. Последние десятилетия микроэлектромеханические системы (МЭМС) стали неотъемлемой частью современной техники [1–3]. Они применяются как в составе приборов персональной

электроники, так и в тяжелой промышленности, военной технике. МЭМС активно применяются в специальной технике с особыми условиями эксплуатации, в контрольно-измерительной аппара-

Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах с кольцевым резонатором на анизотропном материале

Microaccelerometer on Surface Acoustic Waves with a Ring Resonator on Anisotropic Material

туре, например в составе системы диагностики железнодорожного полотна, где необходимо измерять ударные воздействия в сотни g [4–6]. Указанные возможности определяют актуальность проектирования таких приборов.

В результате анализа основных видов МЭМС-датчиков [7–17] сделано заключение, что для микромеханического акселерометра (ММА), способного выдерживать большие перегрузки и измерять высокие ускорения, необходимо выполнение следующих рекомендаций:

- чувствительный элемент (ЧЭ) должен быть жестко закреплен;
- для уменьшения поперечной чувствительности необходимо применять осесимметричные конструкции ЧЭ и равномерное их закрепление;
- для повышения порога чувствительности необходимо нагружать ЧЭ инерционной массой.

Для выполнения указанных рекомендаций предлагается выполнять твердотельный датчик на поверхностных акустических волнах (ПАВ), использующих молекулярную кинетику твердого тела.

Ранее на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) был разработан ММА на ПАВ [18]. Он представлял из себя акселерометр маятникового типа, ЧЭ которого реализован в виде консоли, выполненной из монокристалла кварца ST-среза. ЧЭ жестко закреплялся с одной стороны и нагружался инерционной массой (ИМ) с другой. На противоположных сторонах элемента находились ПАВ-резонаторы.

Обобщенная структурная схема дифференциального ПАВ-акселерометра показана на рис. 1. Она включает ЧЭ 1, который жестко закреплен левым концом и нагружен ИМ m справа. На нем установлены два ПАВ-резонатора 2, включенные в цепи автогенераторов 3. Выходные сигналы автогенераторов подаются на смеситель 4, на выходе которого включены два полосовых фильтра 5, 6.

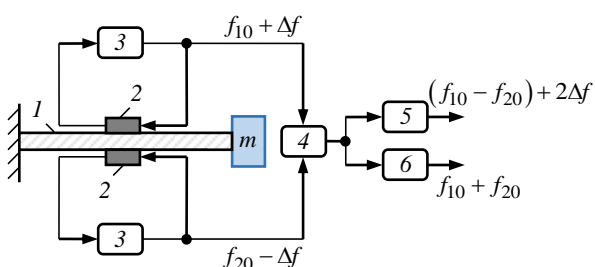


Рис. 1. Структурная схема ПАВ-акселерометра
 Fig. 1. Structural diagram of a SAW-accelerometer

Под действием ускорения ЧЭ консольного типа испытывает нагрузку на изгиб. При этом резонансные частоты резонаторов 2 изменяются, что вызывает изменение частот выходных сигналов генераторов 3 на величину Δf , пропорциональную действующему ускорению. Гармонические колебания автогенераторов 3 поступают на смеситель 4, где формируются сигналы суммарной частоты $f_{10} + f_{20}$ и разностной частоты $f_{10} - f_{20} + 2\Delta f$. Разностная частота зависит от значения ускорения, а суммарная может быть использована для уменьшения влияния дестабилизирующих факторов, прежде всего температуры, через канал автоподстройки частот генераторов.

Одним из важнейших критериев, определяющих чувствительность ММА на ПАВ, являются относительные деформации ЧЭ. В случае прямоугольной консоли распределение относительных деформаций по длине ЧЭ при действии ускорения вдоль оси чувствительности датчика является неоднородным, что при несимметричном расположении ПАВ-резонаторов приводит к различной чувствительности плеч дифференциальной схемы и, следовательно, к дополнительным погрешностям. Для уменьшения этих погрешностей предложена консоль треугольной формы [18], относительные деформации которой равномерны.

Вместе с тем, ЧЭ прямоугольной формы отличается существенной чувствительностью к ускорениям, направленным вдоль осей, перпендикулярных измерительной, в то время как ЧЭ с треугольной формой консоли к таким воздействиям практически нечувствителен.

Принимая во внимание указанные свойства, был сделан вывод, что для дальнейших разработок более перспективна консоль треугольной формы, так как она обеспечивает равномерное распределение относительных деформаций в области нанесения ПАВ-резонатора, а также имеет малую поперечную чувствительность датчика. Недостатком такой конструкции является малый динамический диапазон, что не позволяет измерять ударные воздействия.

В 2009 г. русско-немецкой научной группой предложен высокочастотный ПАВ-резонатор в виде протяженного замкнутого в кольцо одноходового резонатора, нанесенного на подложку Z-среза нитрида алюминия [19–21].

В настоящей статье предлагается совместить эти две разработки с целью создания ММА на

ПАВ с кольцевым резонатором на анизотропном материале, способного измерять ударные воздействия в сотни g . Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- выбором конструкции и материала ЧЭ ММА на ПАВ для измерения ударных воздействий;
- анализом внутренних напряжений и распределения относительных деформаций ЧЭ;
- повышением чувствительности за счет использования топологии кольцевого встречно-штыревого преобразователя (КВШП) и нагружения ЧЭ ИМ;
- оценкой динамического диапазона, порога чувствительности, масштабного коэффициента;
- расчетом топологии КВШП для анизотропной подложки и оценкой влияния технологических погрешностей на выходной сигнал;
- анализом особенностей съема выходного сигнала.

На основании решения этих задач предложен ММА на ПАВ с кольцевым резонатором на анизотропном материале (рис. 2). ЧЭ такого ММА представляет собой пластину круглой формы, закрепленную по образующей, на обе стороны которой нанесены ПАВ-резонаторы. Он решает сразу две задачи – равномерное распределение относительных деформаций и разумное использование габаритов элемента [22].

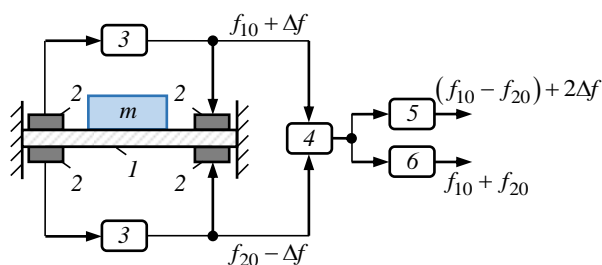


Рис. 2. Структурная схема ММА на ПАВ с кольцевым резонатором

Fig. 2. Structural diagram of the MMA using the SAW with ring resonator

Принцип работы такого акселерометра точно такой же, как у ММА, описанного ранее.

На первом этапе проектирования ММА необходимо оценить возможность применения в качестве материала для чувствительного элемента: кварца ST-среза и ниобата лития среза YX-128°. Будучи материалами для подложек акустоэлектронных устройств, каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками. Необходимо исследовать, как эти материалы будут вести себя в роли подвесной конструкции ММА.

Параметры материалов. Характеристиками любого акселерометра являются пороговая чувствительность и динамический диапазон. В ММА на ПАВ эти параметры определяются (в первом приближении) механической частью ЧЭ, в рассматриваемом ММА – круглой пластины, жестко закрепленной по образующей.

Динамический диапазон ММА определяется предельной прочностью механической части ЧЭ. Предполагается, что предложенный ЧЭ будет способен выдерживать большие нагрузки, чем ЧЭ маятникового типа [18]. В результате анализа напряженно-деформированного состояния ЧЭ, закрепленного по образующей, определено, что максимальное напряжение зависит от двух переменных: ускорения a и отношения квадрата радиуса пластины R к ее толщине h :

$$\sigma_{\max} = (3/4)\rho a (R^2/h),$$

где ρ – плотность материала.

При выборе габаритов ЧЭ для акселерометра определяющим является проникающая способность акустической волны. ПАВ обладают слабой проникающей способностью около 3λ (λ – длина ПАВ). Предполагая, что ВШП будут располагаться с противоположных сторон ЧЭ, минимальная толщина элемента из кварца должна составлять не менее 7λ . Например, для датчика с размерами не более $10 \times 10 \times 10$ мм необходимо, чтобы соотношение R_{\max}^2/h_{\min} было не более 500 для кварца и 400 для ниобата лития (R_{\max} , h_{\min} – максимальный радиус и минимальная толщина пластины соответственно). Все дальнейшие вычисления и графики приведены для значений $R_{\max}^2/h_{\min} = 25, 100, 200$ и 400.

Предельные прочности материалов. ММА на ПАВ сохраняет измерительные возможности вплоть до излома, т. е. диапазон измерений датчика и максимальные перегрузки, которые он выдерживает, совпадают. В результате для оценки динамического диапазона необходимо знать механические возможности ЧЭ – предельную прочность при изгибе, под которой понимается нагрузка, приводящая к разрушению образца.

Для определения предельных прочностей материалов были проведены статические испытания образцов кварца ST-среза и ниобата лития среза YX-128°.

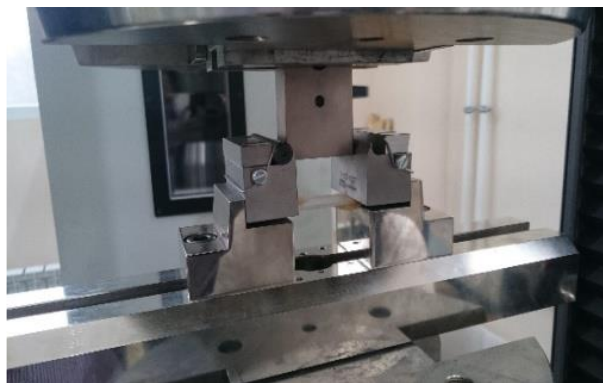


Рис. 3. Экспериментальная установка INSTRON 5985 с испытываемым образцом

Fig. 3. Experimental installation INSTRON 5985 with the testing sampler

На экспериментальной установке INSTRON 5985 устанавливались траверсы с зажимами и обеспечивалась параллельность опорных поверхностей (рис. 3). Образцы пластин кварца ST-среза и ниобата лития среза YX-128° жестко закреплялись зажимами в экспериментальной установке и подвергались механическому воздействию в виде давления "сверху вниз" равномерно распределенной нагрузкой P до разрушения материала (рис. 4). По результатам испытаний была рассчитана предельная прочность материалов: для кварца ST-среза она составила 141.8 МПа, а для ниобата лития среза YX-128° – 106.8 МПа [23–25].

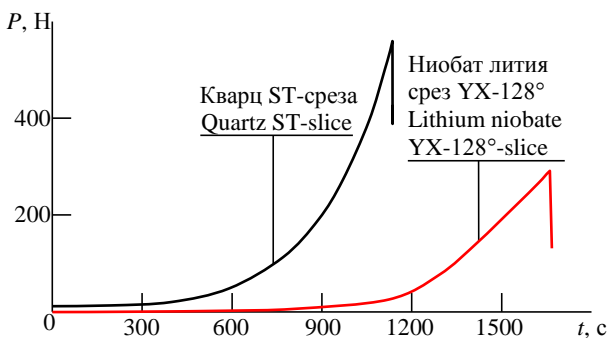


Рис. 4. График подачи нагрузки в эксперименте по определению предельной прочности образцов

Fig. 4. Graph of the load in the experiment to determine the ultimate strength of the samples

Таким образом, при равных условиях эксплуатации, характерных для ЧЭ КВШП (перегрузки в тысячи g , жесткое закрепление ЧЭ по периметру), кварц является более прочным материалом по сравнению с ниобатом лития. Это позволяет заключить, что его использование в качестве материала для ЧЭ акселерометра более рационально.

Порог чувствительности. Порог чувствительности определялся как воздействие, вызыва-

ющее сигнал, в 3 раза превосходящий уровень шумов. При оценке пороговой чувствительности ММА на ПАВ важную роль играют относительные деформации в месте расположения резонатора, с возрастанием которых увеличивается изменение частоты, а следовательно, и выходной сигнал преобразователя. Результаты измерений показали, что для ранее разработанного на кафедре ЛИНС ММА на ПАВ с ЧЭ маятникового типа [18] порог чувствительности составляет 0.21 кГц.

С целью увеличения относительных деформаций, приводящих к повышению порога чувствительности, было решено нагрузить ЧЭ ИМ и провести анализ напряженно-деформированного состояния. Варьируя параметры ИМ и структуры ВШП, можно добиться наибольшей точности измерений, простоты конструкции датчика и необходимого частотного диапазона. Аналитический расчет относительных деформаций – сложная и трудоемкая задача, поэтому для оптимизации было проведено компьютерное моделирование. Кроме того, в процессе проектирования возникает необходимость оценки предельных эксплуатационных характеристик сенсоров. Поскольку к ударопрочности сенсоров на ПАВ предъявляются крайне жесткие требования, ее экспериментальная оценка требует значительных затрат, а в некоторых случаях вовсе не возможна.

Моделирование ММА на ПАВ выполнялось в программном пакете COMSOL Multiphysics. При помощи встроенного редактора геометрии были построены модели, представлявшие собой круглые пластины, жестко закрепленные по образующей, в центре которых помещены ИМ. Модели разбивались на конечные элементы треугольной сеткой (рис. 5, а). Размеры пластин удовлетворяли выбранным ранее соотношениям $R_{\max}^2/h_{\min} = 25, 100; 200; 400$. Расчет проводился для двух видов материалов: кварца ST-среза и ниобата лития среза YX-128°. В процессе моделирования учитывались анизотропные свойства указанных материалов. Инерционная масса представляла собой цилиндр. В качестве материала ИМ был выбран немагнитный тяжелый сплав вольфрам–никель–медь (ВНМ), обладающий следующими характеристиками: высокой плотностью $\rho = 18\,000 \text{ кг/м}^3$, модулем упругости Юнга $E = 350 \text{ ГПа}$, коэффициентом Пуассона $\gamma = 0.29$. Программа позволила смоделировать воздействия различных значений ускорений (рис. 5, б) и расчи-

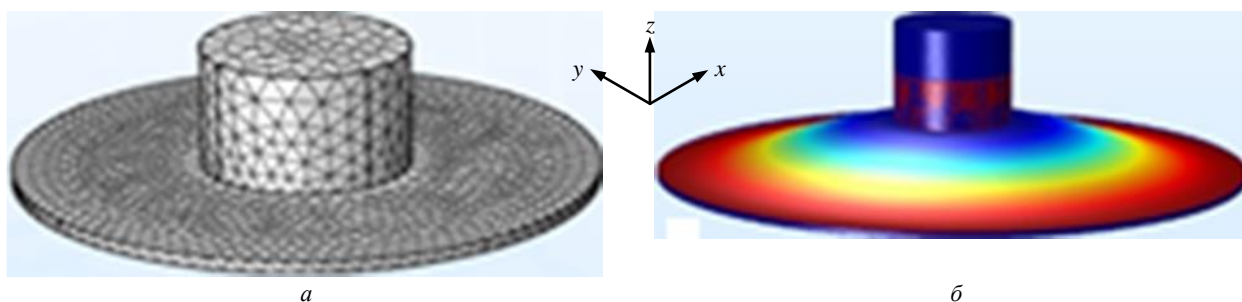


Рис. 5. Модель чувствительного элемента (ЧЭ): а – разбивка на конечные элементы; б – ЧЭ под нагрузкой вдоль оси z

Fig. 5. Model of a sensitive element (SE): а – breakdown into finite elements; б – SE under load along the z axis

тать деформационные характеристики ЧЭ (деформации, внутренние напряжения, относительные удлинения) под воздействием ускорения вдоль оси чувствительности z.

Кольцевой ПАВ-резонатор. Оба рассматриваемых материала ЧЭ – кварц ST-среза и ниобат лития среза YX-128° – являются анизотропными. Фазовые скорости ПАВ в них, коэффициенты электромеханической связи (КЭМС) меняются в зависимости от направления распространения акустической волны в материале.

При расчете и построении топологии КВШП (рис. 6, а) для повышения достоверности результатов важно учитывать изменения фазовой скорости и КЭМС. Для того чтобы рабочая частота акустического устройства оставалась постоянной, необходимо учитывать фазовую скорость в пределах каждого периода топологии кольцевого резонатора отдельно. Тогда анизотропия свойств материала ЧЭ компенсируется неэквидистантностью неаподизированного кольцевого ВШП (рис. 6, б).

Расчет топологии линейного эквидистантного резонатора сводится к определению периода, протяженности преобразователя и апертуры. Период ВШП определяется условием акустического синхронизма: равенством периода топологии длине ПАВ $\lambda = v_{м.с}/f_p$, где

$$v_{м.с} = \frac{1}{d/v_M + (1-d)/v_C}$$

– скорость ПАВ на частично металлизированной подложке, причем v_C , v_M – скорость ПАВ на свободной и металлизированной поверхностях соответственно; $d = 0.5$ – коэффициент металлизации.

Длина всего преобразователя находится как произведение периода топологии L на их количество N : $L_{ВШП} = LN$.

В неэквидистантном ВШП этот период меняется. Тогда

$$L = \sum_{i=0}^N L_i,$$

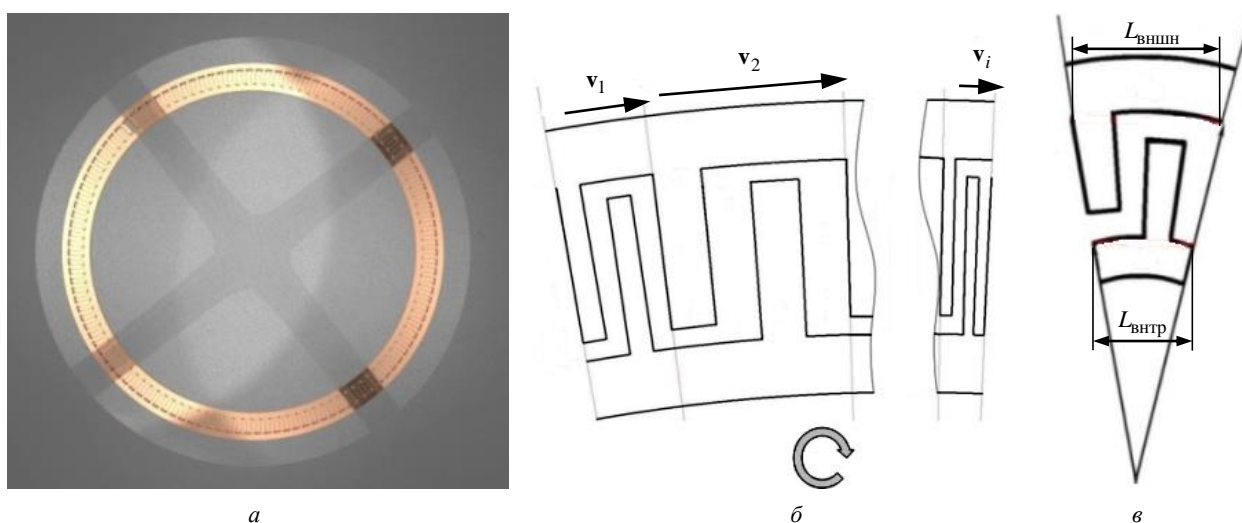


Рис. 6. Кольцевой встречно-штыревой преобразователь (КВШП): а – общий вид; б – схема неэквидистантного неаподизированного КВШП; в – определение периодов КВШП

Fig. 6. Ring interdigital transducer (RIT): а – general view; б – scheme of the non-equidistant unapodized RIT; в – determination of the periods of a ring RIT

где i – номер периода топологии, определяемого как

$$L_i = v_i / f_p.$$

Здесь v_i – фазовая скорость ПАВ на i -й паре штырей; f_p – рабочая частота, равная 433 МГц.

Выбирая апертуру преобразователя, необходимо учитывать возможные дифракционные потери, связанные с расходимостью акустического луча ограниченной апертуры. Поэтому апертура электродов ВШП не должна быть меньше значения, определяемого границей зоны Френеля:

$$W = \sqrt{\lambda L_{\text{ВШП}} |1 + \gamma|},$$

где γ – параметр анизотропии.

Длина кольцевого резонатора преобразователя – это длина окружности: $L_{\text{ВШП}} = 2\pi R$, где R – средний радиус кольца.

Апертура будет равна:

$$W = \sqrt{(v/f_p) 2\pi R |1 + \gamma|} = M \sqrt{R},$$

где $M = \sqrt{(v/f_p) 2\pi |1 + \gamma|}$. Максимальная апертура соответствует максимальной скорости ПАВ, поэтому M_{max} достигается при v_{max} . Максимальная фазовая скорость поверхностной волны в кварце ST-среза составляет 3569.53 м/с, $\gamma = +0.378$. В ниобате лития среза YX-128° максимальная фазовая скорость 3739.2 м/с, $\gamma = -0.37$. Отсюда получаем для кварца $W > 0.009\sqrt{R}$, для ниобата лития $W > 0.006\sqrt{R}$. Примем для обоих материалов $M_{\text{max}} = 0.01$, тогда $W > 0.01\sqrt{R}$.

В КВШП апертура $W = (R_2 - R_1)$. Считая, что она существенно меньше среднего радиуса $R = (R_2 + R_1)/2$, получаем требование к апертуре кольцевого резонатора:

$$R \gg W > 0.01\sqrt{R}.$$

Зависимость апертуры КВШП от радиуса кольца представлена на рис. 7. Эта кривая является границей минимального значения апертуры относительно радиуса кольцевого резонатора.

Очевидно, что для лучшего съема информации амплитудно-частотная характеристика преобразователя должна иметь узкий пик. Однако периоды топологии КВШП являются веерными: расстояние между осями симметрии штырей мо-

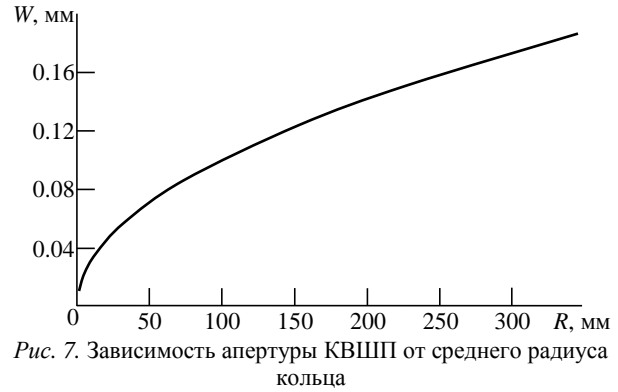


Рис. 7. Зависимость апертуры КВШП от среднего радиуса кольца

Fig. 7. The dependence of the aperture of the RIT on the average radius of the ring

нотонно изменяется по его ширине. Это расширяет АЧХ за счет топологии резонатора.

На анизотропном материале фазовая скорость ПАВ переменная, но, так как резонатор неэквидистантный, примем, что на каждом периоде топологии скорость постоянна и известна. Тогда ширина АЧХ:

$$\Delta\omega = f_{\text{вншн}} - f_{\text{внтр}},$$

где

$$f_{\text{вншн}} = v_{\text{м.с}} / L_{\text{вншн}}, \quad f_{\text{внтр}} = v_{\text{м.с}} / L_{\text{внтр}}$$

– частоты ПАВ около внешнего и внутреннего радиусов соответственно, причем ($L_{\text{вншн}}$, $L_{\text{внтр}}$ – ширина периода топологии около внутреннего и внешнего радиусов соответственно, см. рис. 6, в).

В силу малости ширины периода топологии по сравнению с длиной преобразователя L приравняем ее длине дуги соответствующего радиуса:

$$L_{\text{внтр}} = \theta_{\text{п}} R_1; \quad L_{\text{вншн}} = \theta_{\text{п}} R_2,$$

где $\theta_{\text{п}}$ – угловой период. Тогда

$$\Delta\omega = f_p \frac{R_2 - R_1}{R} = f_p \frac{W}{R}$$

и условие для узкого пика АЧХ: $W/R \rightarrow \min$.

Результаты расчетов. Динамический диапазон. Значения деформаций и внутренних напряжений были пересчитаны в значения выходного сигнала датчика для всех предложенных соотношений размеров и материалов. На рис. 8 показаны выходные характеристики для ЧЭ из двух материалов и четырех вариантов соотношений размеров: квадрат радиуса к толщине ЧЭ.

В табл. 1 представлены результаты расчетов: масштабные коэффициенты в дифференциальном

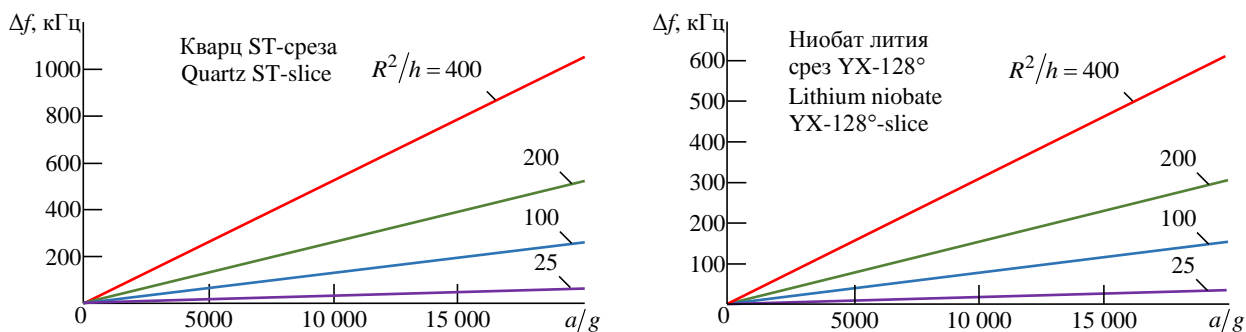


Рис. 8. Выходные характеристики чувствительных элементов

Fig. 8. The output characteristics of the sensing elements

Таблица 1. Характеристики ММА на ПАВ

Table 1. Characteristics of a micromechanical accelerometer using SAW

Параметр	R^2/h , мм			
	25	100	200	400
<i>Кварц ST-среза</i>				
Масштабный коэффициент (дифференциальный режим), кГц/g	0.0063	0.0259	0.0523	0.1053
Диапазон измеряемых ускорений, g	±200 и более	±200 и более	±200 и более	±200 и более
Порог чувствительности, g	68	17	9	4
<i>Ниобат лития срез YX-128°</i>				
Масштабный коэффициент (дифференциальный режим), кГц/g	0.0035	0.0151	0.0304	0.0612
Диапазон измеряемых ускорений, g	±200 и более	±200 и более	±200 и более	±200 и более
Порог чувствительности, g	120	29	14	7

режиме, диапазоны измеряемых ускорений, пороги чувствительности.

Модельный эксперимент показал, что при нагрузке ЧЭ инерционной массой цилиндрической формы, размещенной на ЧЭ соосно по оси z (см. рис. 5, б), повышается чувствительность КВШП. При этом с ростом ИМ увеличивается и приращение частоты. В связи с этим был проведен анализ характеристик ЧЭ в напряженно-деформированном инерционной массой состоянии.

При одинаковых условиях для двух материа-

лов пластины максимальная чувствительность наблюдается при условии $R_{ИМ} < H$ (где $R_{ИМ}$ – радиус ИМ; H – высота ИМ) и отношении $R_{ИМ}/R < 1$, а зона наибольшей чувствительности элемента смещается к месту крепления и достигает своего максимума при $R_{ИМ}/R = 3/5$, после чего происходит спад (рис. 9, а).

Таким образом, радиус ИМ должен составлять 60 % от радиуса ЧЭ. Напротив, зависимость чувствительности от соотношения высот ЧЭ и

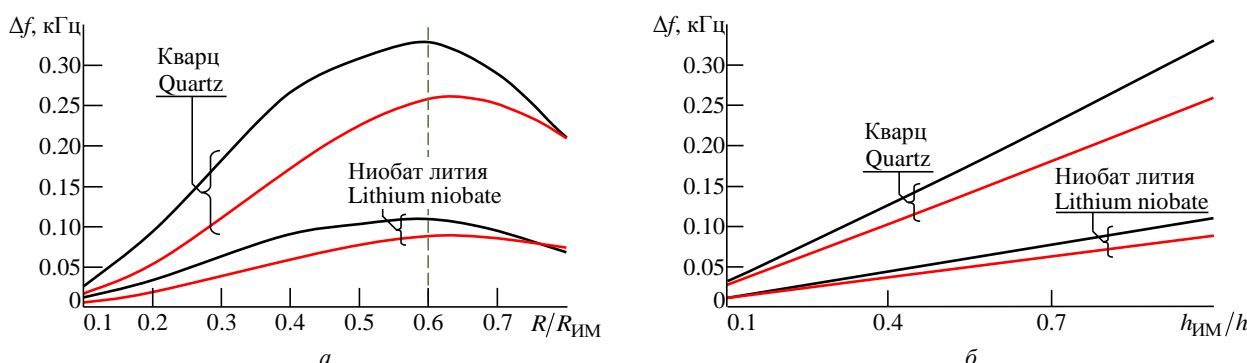


Рис. 9. Зависимости смещения частоты для исследованных ЧЭ от отношения радиуса пластины и радиуса ИМ (а) и от отношения высоты инерционной массы (ИМ) к высоте чувствительного элемента (ЧЭ) (б).

Черные кривые – вблизи крепления ЧЭ; красные кривые – вблизи крепления ИМ

Fig. 9. The dependence of the frequency shift for the investigated sensing elements (SE) on the ratio of the plate radius and the radius of the inertial mass (IM) (а) and on the ratio of IM to the height of the SE (б).

Black curves – nearly SE fixing; red curves – nearly IM fixing

ИМ (рис. 9, б) не имеет экстремума. Поэтому высота ИМ ограничивается только целесообразностью и конструктивными особенностями прибора.

Из описанных результатов можно сделать вывод, что для увеличения порога чувствительности сенсора, построенного как с применением кварца ST-среза, так и ниобата лития YX-128°, при использовании ИМ рекомендуется обеспечивать:

- расположение кольцевого резонатора вблизи места крепления ЧЭ;
- отношение радиуса ИМ к радиусу пластины $R_{ИМ}/R = 3/5$.

Получив оптимальный размер ИМ (под оптимальностью ИМ понимается размер, при котором достигается максимальная чувствительность ЧЭ) и определив зону чувствительности, можно оценить динамический диапазон.

Таким образом, размещение топологии резонатора на противоположных сторонах ЧЭ, по окружности и вблизи места крепления ЧЭ к корпусу, расположение ИМ цилиндрической формы по центру ЧЭ, обеспечение отношения радиуса ИМ к радиусу пластины равным 3/5 приводит к повышению пороговой чувствительности.

В табл. 2 представлены результаты расчетов, аналогичные табл. 1, для КВШП с ЧЭ в напря-

женно-деформированном инерционной массой состоянии при оптимальных размерах ИМ для каждого материала и расположения резонатора в зоне наибольшей чувствительности.

Результаты пересчета внутренних напряжений в значения выходного сигнала датчика с ЧЭ в напряженно-деформированном состоянии представлены на рис. 10.

По результатам проделанной работы предложена блок-схема методики расчета ММА на ПАВ с кольцевым резонатором на анизотропном материале (рис. 11).

Методика разбивает расчет на 2 последовательных этапа: расчет механической части ЧЭ и расчет топологии КВШП. Для начала необходимо задать требуемые условия: рабочую частоту устройства, динамический диапазон, пороговую чувствительность, габариты и массу. Затем – выбрать материал и размер ЧЭ, рассчитать динамический диапазон. Расширить динамический диапазон можно выбрав другие материал или размер ЧЭ, а сузить – добавив инерционную массу.

Далее необходимо провести анализ порога чувствительности: повысить его можно нагрузив чувствительный элемент ИМ. Переходить к расчету топологии КВШП целесообразно после рас-

Таблица 2. Характеристики ММА на ПАВ с ЧЭ в напряженно-деформированном состоянии

Table 2. Characteristics of a micromechanical accelerometer using SAW with sensing element in the tense deformed state

Параметр	R^2/h , мм			
	25	100	200	400
<i>Кварц ST-среза</i>				
Масштабный коэффициент (дифференциальный режим), кГц/g	1.48	6.69	13.81	27.58
Диапазон измеряемых ускорений, g	±200 и более	±200 и более	±177	±95
Порог чувствительности, g	0.29	0.063	0.031	0.016
<i>Ниобат лития среза YX-128°</i>				
Масштабный коэффициент (дифференциальный режим), кГц/g	0.39	1.73	3.70	7.43
Диапазон измеряемых ускорений, g	±200 и более	±200 и более	±167	±84
Порог чувствительности, g	1.08	0.24	0.11	0.06

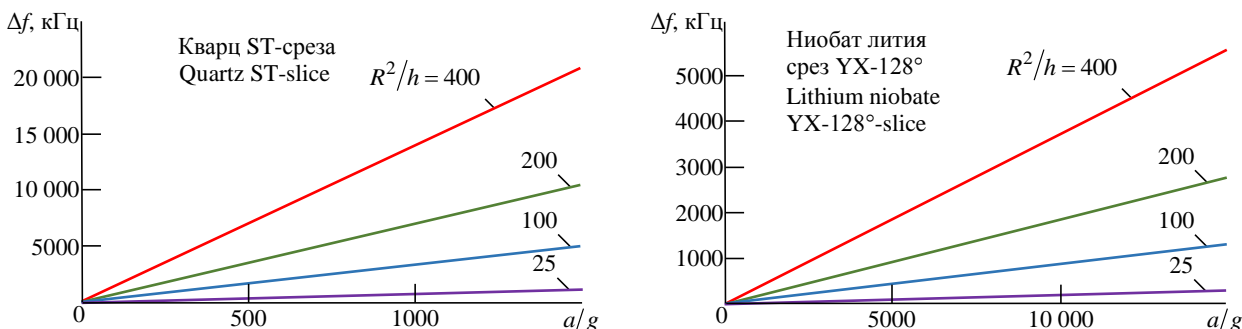


Рис. 10. Выходные характеристики ЧЭ в напряженно-деформированном состоянии

Fig. 10. The output characteristics of the sensing element in in the tense deformed state

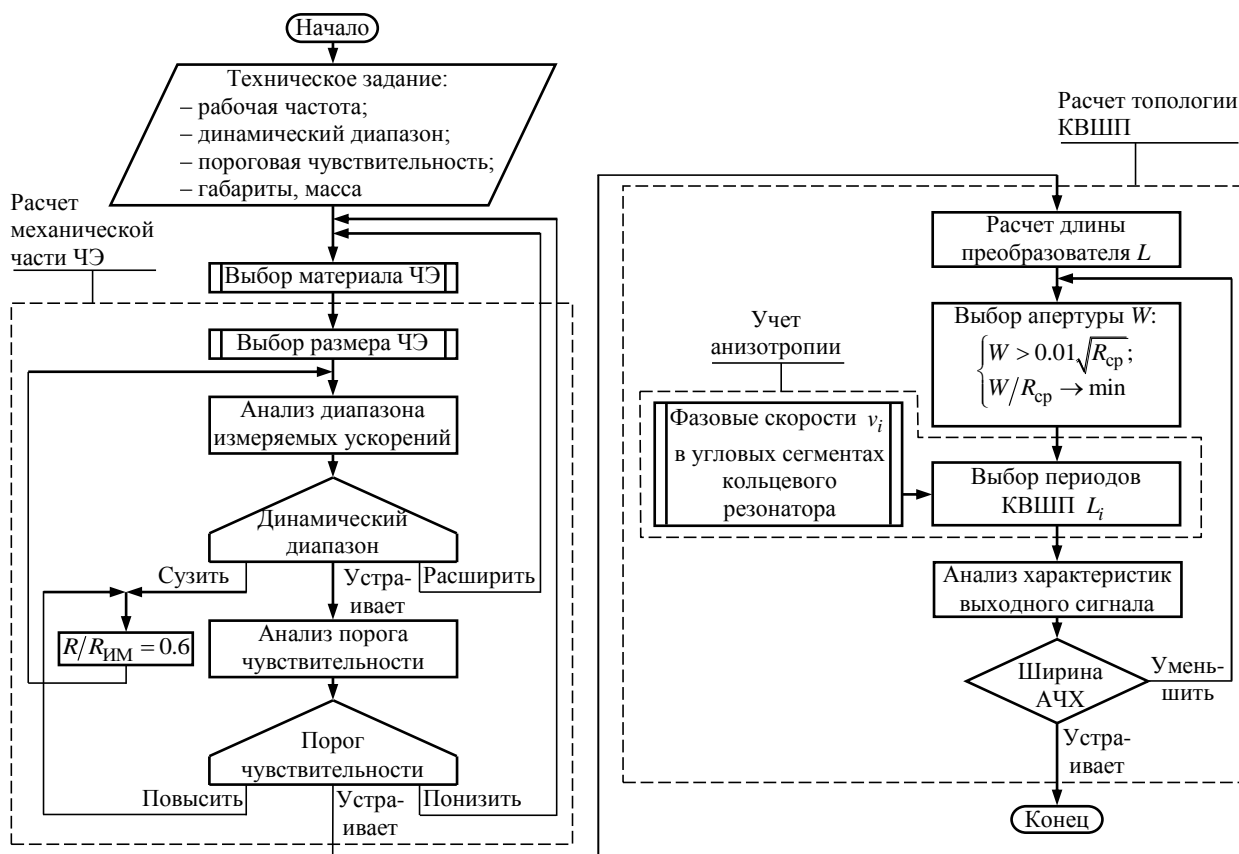


Рис. 11. Блок-схема методики расчета ММА с кольцевым ПАВ-резонатором на анизотропном материале

Fig. 11. Block diagram of the calculation method of the micromechanical accelerometer on SAW with a ring resonator using an anisotropic material

чета механической части ЧЭ, так как от нее зависит длина преобразователя. Расчет аперттуры и выбор периода КВШП являются важнейшими этапами при проектировании, так как от них зависит качество выходного сигнала.

Заключение. В описанной работе исследованы материалы для ЧЭ ММА на ПАВ: кварц ST-среза и ниобат лития среза YX-128°. Анализ материалов подложек для использования их в составе конструкции ММА на ПАВ показал, что ЧЭ из кварца ST-среза имеет более широкий диапазон измеряемых ускорений и более высокий порог чувствительности, чем ЧЭ из ниобата лития среза YX-128° при прочих равных условиях.

Для повышения порога чувствительности необходимо: размещать топологию ВШП-резонатора на противоположных сторонах ЧЭ, по окружности и вблизи места крепления ЧЭ к корпусу, а также нагружать ЧЭ ИМ цилиндрической формы, расположенной соосно ЧЭ по вертикали. Отношение радиуса ИМ к радиусу пластины должно составлять 3/5.

Для получения максимально узкого пика амплитудно-частотной характеристики резонатора ЧЭ акселерометра необходимо учитывать анизотропию материала ЧЭ неэквидистантностью встречно-штыревого преобразователя. При проектировании КВШП следует выполнять условия $R_{cp} \gg W > 0.01\sqrt{R_{cp}}$; $W/R_{cp} \rightarrow \min$.

Авторский вклад

Лукьянов Дмитрий Павлович – обзор использования ММА на ПАВ в составе системы диагностики железной дороги; обоснование принципа построения ММА на ПАВ.

Боронахин Александр Михайлович – обзор использования ММА на ПАВ в составе системы диагностики железной дороги; формулировка технических требований к ММА на ПАВ с учетом условий эксплуатации в составе системы диагностики.

Шевченко Сергей Юрьевич – обзор существующих МЭМС; основы концепции построения ММА на ПАВ.

Хиврич Мария Александровна – концепция построения ММА на ПАВ с кольцевым резонатором на анизотропном материале; расчеты; блок-схема; выходная характеристика.

Амиров Темурмалик Анвар угли– обзор существующих МЭМС.

Authors' contribution

Dmitry P. Lukyanov, a review of the use of MMA on SAW as part of a railway diagnostic system; substantiation of the principle of building MMA on SAW.

Alexander M. Boronakhin, a review of the use of MMA on SAW as part of a railway diagnostic system; formulation of technical requirements for MMA on SAW, taking into account operating conditions as part of the diagnostic system.

Sergey Yu. Shevchenko, review of existing MEMS; fundamentals of the concept of building MMA on SAW.

Mariya A. Khivrich, the concept of building MMA on SAW with a ring resonator on anisotropic material; calculations; block diagram; output characteristic.

Temurmalik A. Amirov, review of existing MEMS.

Список литературы

1. Mounier E., Troadec C., Girardin G. Status of the MEMS industry 2016. Yole Developpement. Market and Technology report. 2016. 5 p.
2. Mounier E. Status of the MEMS industry 2017. Yole Developpement. Market and Technology report. 2017. 4 p.
3. Mounier E. Status of the MEMS industry 2018. Yole Developpement. Market and Technology report. 2018. 4 p.
4. Использование МЭМС-датчиков для решения задач мониторинга состояния рельсового пути / А. М. Боронахин, Д. Ю. Ларионов, Л. Н. Подгорная, А. Н. Ткаченко, Р. В. Шалымов // Изв. Тульского гос. ун-та. Техн. науки. 2017. № 9 (2). С. 111–123.
5. Сунгуров Д. В., Шалымов Р. В. Инерциальный метод диагностики рельсового пути с учетом состояния поверхностей катания колес вагона // Навигация и управление движением: материалы XVI конф. молодых ученых / Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". СПб., 2014. С. 49–55.
6. Использование микромеханических чувствительных элементов в задачах диагностики рельсового пути / А. М. Боронахин, Л. Н. Подгорная, Е. Д. Бохман, Н. С. Филипеня, Ю. В. Филатов, Р. В. Шалымов, Д. Ю. Ларионов // Гироскопия и навигация. 2012. № 1 (76). С. 57–66.
7. Абдуллин Ф. А., Пауткин В. Е. Технологические особенности формирования кремниевых пьезорезистивных акселерометров с расширенным температурным диапазоном измерений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 2. С. 118–123.
8. Абдуллин Ф. А., Пауткин В. Е., Печерский А. В. Материалы, применяемые при изготовлении микроэлектромеханических систем (МЭМС) // Материалы и технологии XXI в. 2016. С. 131–136.
9. Багинский И. Л., Косцов Э. Г. Емкостные МЭМС-акселерометры сверхвысоких ускорений // Автометрия. 2017. Т. 53, № 3. С. 107–116.
10. Парфенов Н. М. Аналитические исследования интегральных МЭМС-акселерометров // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 2. С. 96–109.
11. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Ч. 3. Классификация и анализ базовых рабочих принципов // Компоненты и технологии. 2006. № 2. С. 42–49.
12. Петропавловский Ю. Современные МЭМС-продукты компании AnalogDevices. Ч. 2 // Элементы и компоненты. 2015. № 7. С. 24–29.
13. Сысоева С. МЭМС-технологии. Простое и доступное решение сложных систематических задач // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 7. С. 80–89.
14. Сысоева С. Введение в High-End сегменты применения МЭМС-технологии // Компоненты и технологии. 2010. № 10. С. 15–22.
15. Одинец А. И., Федорова Л. Д. Датчики МЭМС для управления и диагностирования автомобиля // Омский науч. вестн. 2015. № 2. С. 177–179.
16. Design of a Piezoelectric Accelerometer with High Sensitivity and Low Transverse Effect / B. Tian, H. Liu, N. Yang, Yu. Zhao, Zh. Jiang // Sensors. 2016. № 16. 1587. doi: 10.3390/s16101587
17. Design Strategy for a New High-G Accelerometer / R. Kuells, S. Nau, Ch. Bohland, M. Salk, K. Thoma // Proc. Sensor. 2013. P. 105–110. doi: 10.5162/sensor2013/A5.1
18. Разработка и оптимизация схемы построения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах. Ч. 2 / Д. П. Лукьянов, А. А. Тихонов, Ю. В. Филатов, М. М. Шевелько, А. Г. Поваляев, С. Ю. Шевченко, А. А. Стуров, И. В. Попова, А. М. Лестев, М. А. Лестев, В. В. Новиков, М. С. Вершинин // Гироскопия и навигация. 2007. № 3 (58). С. 62–76.
19. Biryukov S. V., Martin G., Weihnacht M. Ring waveguide resonator on surface acoustic waves // Appl. phys. lett. 2007. Vol. 90, iss. 13. doi: 10.1063/1.2731683

20. Ring waveguide resonator on surface acoustic waves: First experiments / S. V. Biryukov, H. Schmidt, A. V. Sotnikov, M. Weihnacht, T. Yu. Chemekova, Yu. N. Markarov // J. of applied physics. 2009. Vol. 106, iss. 12. doi: 10.1063/1.3272027.

21. Biryukov S. V., Schmidt H., Weihnacht M. Performance of SAW Ring Waveguide Resonator: 3D FEM and Experiments // 2009 IEEE Int. Ultrasonics Symp. Rome, Italy, 20–23 Sept. 2009. doi: 10.1109/ULTSYM.2009.5441445

22. Хиврич М. А., Шевченко С. Ю. Моделирование чувствительного элемента микромеханического акселерометра для высокочастотных объектов методом конечных элементов // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. 2018. Т. 1. С. 615–617.

23. Хиврич М. А., Кудряшова М. С., Шевченко С. Ю. Анализ чувствительного элемента микромеханического акселерометра на поверхностных акустических волнах // Навигация и управление движением: конф. молодых ученых / Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". СПб., 2018. С. 108–112.

24. Surface-acoustic-wave sensor design for acceleration measurement / S. Shevchenko, A. Kukaev, M. Khivrich, D. Lukyanov // Sensors. 2018. Vol. 18, № 7. art. no. 2301. doi: 10.3390/s18072301

25. Shevchenko S. Yu., Khivrich M. A., Markelov O. A. Ring-shaped sensitive element design for acceleration measurements: overcoming the limitations of angular-shaped sensors // Electronics. 2019. Vol. 8, № 2. art. no. 141. doi: 10.3390/electronics8020141

Информация об авторах

Лукьянов Дмитрий Павлович – доктор технических наук (1974), профессор (1979) кафедры лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Заслуженный деятель науки РФ (1996). Автор более 200 научных публикаций. Сфера научных интересов – лазерная гироскопия.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия.

E-mail: dplukyanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8171-4475>

Александр Михайлович Боронахин – доктор технических наук (2013), доцент (2005), профессор кафедры ЛИНС, декан факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 120 научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка интегрированных инерциальных технологий динамического мониторинга рельсового пути для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия.

E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Scopus Author ID: 36453475400

Researcher ID: P-5768-2017

Шевченко Сергей Юрьевич – кандидат технических наук (2007), доцент (2013) кафедры ЛИНС Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных публикаций. Сфера научных интересов – микросенсоры навигационных систем.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия.

E-mail: syshevchenko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4047-7757>

Хиврич Мария Александровна – магистр по направлению "Приборостроение" (2014). В 2018 г. окончила аспирантуру по направлению "Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии" (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)). Разработчик технической документации АО "Авро-МКС". Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – навигация, микромеханические системы.

Адрес: АО "Авро-МКС", ул. Обручевых, д. 9, Санкт-Петербург, 194064, Россия.

E-mail: Mariya-khivrich@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5152-3480>

Амиров Темурмалик Анвар угли – бакалавр по направлению "Электроэнергетика и электротехника" (2018, Ташкентский Государственный Технический Университет им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан). Сфера научных интересов – МЭМС; акселерометры и гироскопы; акселерометры и гироскопы на поверхностных акустических волнах.

Адрес: ул. Университетская, д. 2, Ташкент, 100095, Узбекистан.

E-mail: a.temurmalik95@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1070-5453>

References

1. Mounier E., Troadec C., Girardin G. Status of the MEMS industry 2016. Yole Developpement. Market and Technology report. 2016, 5 p.
2. Mounier E. Status of the MEMS industry 2017. Yole Developpement. Market and Technology report. 2017, 4 p.
3. Mounier E. Status of the MEMS industry 2018. Yole Developpement. Market and Technology report. 2018, 4 p.
4. Boronakhin A. M., Larionov D. Yu., Podgornaya L. N., Tkachenko A. N., Shalymov R. V. Using MEMS-Sensors for Solving the Railway State Monitoring Problems. *Izvestiya Tula State University* [Proc. of the TSU]. Technical sciences. 2017, no. 9 (2), pp. 111–123. (In Russ.)
5. Sungurov D. V., Shalymov R. V. Inertial Method for Diagnosing a Rail Track, Taking into Account the Condition of the Rolling Surfaces of the Car Wheels. Proc. of the XVI Conf. Young Scientists Navigation and Traffic Control. Concern CRI Elektropribor. SPb., 2014, pp. 49–55. (In Russ.)
6. Boronakhin A. M., Podgornaya L. N., Bokhman E. D., Filipenya N. S., Filatov Yu. V., Shalymov R. V., Larionov D. Yu. MEMS-Based Inertial System for Railway Track Diagnostics. Gyroscopy and Navigation. 2012, no. 1 (76), pp. 57–66. (In Russ.)
7. Abdullin F. A., Pautkin V. E. Technological Features of the Formation of Silicon Piezoresistive Accelerometers with Extended Temperature Range of Measures. Measuring. Monitoring. Management. Control 2016, no. 2, pp. 118–123. (In Russ.)
8. Abdullin F. A., Pautkin V. E., Pecherskii A. V. Materials Used in the Manufacture of Micro-Electromechanical Systems (MEMS). Proc. of the 21st Century Materials and Technologies. 2016, pp. 131–136. (In Russ.)
9. Balaginsky I. L., Kostsov E. G. Capacitive MEMS Accelerometers for Measuring High-G Accelerations. *Avtometriya*. 2017, vol. 53, no. 3, pp. 107–116. (In Russ.) doi: 10.15372/AUT20170314
10. Parfyonov N. M. Analytical Research of the Integral MEMS Accelerometers. Nano- and Microsystems Technology. 2016, vol. 18, no. 2, pp. 96–109. (In Russ.)
11. Sysoeva S. Car accelerometers. P. 3. Classification and Analysis of Basic Operating Principles. Components & Technologies. 2006, no. 2, pp. 42–49. (In Russ.)
12. Petropavlovsky Yu. Modern MEMS Products from AnalogDevices. P. 2. Elements and Components. 2015, no. 7, pp. 24–29. (In Russ.)
13. Sysoeva S. MEMS Technology. A Simple and Available Solution for Complex System Tasks. Electronics: STB. 2009, no. 7, pp. 80–89. (In Russ.)
14. Sysoeva S. Introduction to High-End MEMS Technology Segments. Components & Technologies. 2010, no. 10, pp. 15–22. (In Russ.)
15. Odinets A. I., Fedorova L. D. MEMS Sensors for Vehicle Control and Diagnostics. Omsk Scientific Bulletin. 2015, no. 2, pp. 177–179. (In Russ.)
16. Tian B., Liu H., Yang N., Zhao Yu., Jiang Zh. Design of a Piezoelectric Accelerometer with High Sensitivity and Low Transverse Effect. Sensors. 2016, no. 16, 1587. doi: 10.3390/s16101587
17. Kuells R., Nau S., Bohland Ch., Salk M., Thoma K. Design Strategy for a New High-G Accelerometer. Proc. Sensor 2013, pp. 105–110. doi: 10.5162/sensor2013/A5.1
18. Lukianov D. P., Tikhonov A. A., Filatov Yu. V., Shevelko M. M., Povalyaev A. G., Shevchenko S. Yu., Sturov A. A., Popova I. V., Lestev A. M., Lestev M. A., Novikov V. V., Vershinin M. S. Development and Optimization of the Surface Acoustic-Waves Microaccelerometer Construction Scheme. Part 2. Gyroscopy and Navigation. 2007, no. 3 (58), pp. 62–76. (In Russ.)
19. Biryukov S. V., Martin G., Weihnacht M. Ring Waveguide Resonator on Surface Acoustic Waves. Applied Physics Letters. 2007, vol. 90, iss. 13. doi: 10.1063/1.2731683
20. Biryukov S. V., Schmidt H., Sotnikov A. V., Weihnacht M., Chemekova T. Yu., Makarov Yu. N. Ring Waveguide Resonator on Surface Acoustic Waves: First Experiments. J. of applied physics. 2009, vol. 106, iss. 12. doi: 10.1063/1.3272027
21. Biryukov S. V., Schmidt H., Weihnacht M. Performance of SAW Ring Waveguide Resonator: 3D FEM and Experiments. 2009 IEEE Int. Ultrasonics Symp. Rome, Italy, 20–23 Sept. 2009. doi: 10.1109/ULTSYM.2009.5441445
22. Khivrich M. A., Shevchenko S. Yu. Modeling a Sensitive Element of a Micro-Mechanical Accelerometer for Highly Dynamic Objects Using the Finite Element Method. Proc. of the Intern. Conf. on Soft Calculations and Measurements. 2018, vol. 1, pp. 615–617. (In Russ.)
23. Khivrich M. A., Kudryashova M. S., Shevchenko S. Yu. Analysis of a Sensitive Element of a Micromechanical Accelerometer on Surface Acoustic Waves. Conf. of Young Scientists Navigation and Motion Control. SPb., 2018, pp. 108–112. (In Russ.)
24. Shevchenko S., Kukaev A., Khivrich M., Lukyanov D. Surface-Acoustic-Wave Sensor Design for Acceleration Measurement. Sensors. 2018, vol. 18, no. 7, art. no. 2301. doi: 10.3390/s18072301
25. Shevchenko S. Yu., Khivrich M. A., Markelov O. A. Ring-Shaped Sensitive Element Design for Acceleration Measurements: Overcoming the Limitations of Angular-Shaped Sensors. Electronics, 2019, vol. 8, no. 2, art. no. 141. doi: 10.3390/electronics8020141

Information about the authors

Dmitry P. Lukyanov, Dr. Sci. (Eng.) (1974), Professor (1979) of the Department of Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Honored Scientist of the Russian Federation (1996). The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: laser gyroscopy.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: dplukyanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8171-4475>

Alexander M. Boronakhin, Dr. Sci. (Eng.) (2013), Associate Professor (2005), of the Department of Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: development of integrated inertial technologies for dynamic monitoring of the rail track to ensure the safety of rail traffic.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Scopus Author ID: 36453475400

Researcher ID: P-5768-2017

Sergey Yu. Shevchenko, Cand. Sci. (2007), Associate Professor (2013) of the Department of Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: microsensors of navigation systems.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: syshevchenko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4047-7757>

Mariya A. Khivrich, Master on Instrument Engineering (2014). In 2018, she completed postgraduate studies in the field of "Photonics, Instrument Engineering, Optical and Biotechnological Systems and Technologies" (Saint Petersburg Electrotechnical University). Technical documentation developer in JSC Avro-MKS. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: navigation, micromechanical systems.

Address: JSC "Avro-MKS", 9 Obruchevykh Str., St Petersburg 194064, Russia

E-mail: Mariya-khivrich@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5152-3480>

Temurmalik A. Amirov, Bachelor in Electrical Engineering and Electrical Engineering (2018, Tashkent state technical University Named after Islam Karimov). Area of expertise: MEMS; accelerometers and gyroscopes; accelerometers and gyroscopes on surface acoustic waves.

Address: Tashkent state technical University Named after Islam Karimov, 2 Universitetskaya Str., Tashkent 100095, Uzbekistan

E-mail: a.temurmalik95@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1070-5453>
