

# Экспериментальные исследования беспроводных пассивных датчиков вибродеформации на основе резонаторов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) с оптимизированным опрашивающим сигналом

Швецов А.С.<sup>1</sup>, Меркулов А.А.<sup>1</sup>, Жгун С.А.<sup>1</sup>, Минеев Б.И.<sup>2</sup>, Маслов В.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

<sup>2</sup> Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: shvetsov\_as@mail.ru

Экспериментально подтверждена возможность измерения быстропеременных деформаций вибрирующего образца с использованием беспроводных датчиков с чувствительными элементами на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Проведено сравнение результатов измерения вибродеформации беспроводным датчиком на ПАВ и проводным датчиком на основе тензорезистора. Испытан активный датчик, в котором резонатор на ПАВ задает частоту автогенератора, и пассивный датчик, не содержащий активных электронных компонентов и элементов питания (в составе датчика, размещенного непосредственно на объекте). Эксперименты произведены как с неподвижными датчиками, так и с беспроводными датчиками, размещенными на вращающихся объектах. Определены параметры опрашивающего сигнала, наиболее подходящие для функционирования пассивного датчика вибродеформации, и проведены испытания датчиков с их опросом оптимизированным сигналом. Испытанные датчики на ПАВ перспективны в применении при испытаниях авиадвигателей.

**Ключевые слова:** беспроводной датчик, датчик на ПАВ, пассивный датчик, датчик вибродеформации

## Experimental studies of wireless passive sensors of vibration-induced strain based on surface acoustic waves (SAW) resonators with an optimized interrogation signal

Shvetsov A.S.<sup>1</sup>, Merkulov A.A.<sup>1</sup>, Zhgoon S.A.<sup>1</sup>, Mineev B.I.<sup>2</sup>, Maslov V.P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National research university "MPEI", Moscow

<sup>2</sup> CIAM, Moscow

The possibility of measuring vibration-induced fast varying strain using wireless sensors with sensitive elements based on surface acoustic waves (SAW) devices has been proven experimentally. A comparison has been made between the results of measuring vibration-induced strain with a wireless SAW sensor and with a wired sensor based on a strain gauge. Both an active sensor, in which a SAW resonator sets the frequency of an oscillator, and a passive sensor, which does not contain active electronic components and batteries (as part of a sensor located directly on the object), have been tested. Experiments were carried out both with motionless sensors and with wireless sensors placed on rotating objects. The parameters of the interrogation signal that are most suitable for the functioning of a passive vibration-induced strain sensor have been determined, and these sensors have been tested with interrogation by an optimized signal. The SAW sensors that were tested show promise for use in aviation engine testing.

**Keywords:** wireless sensor, SAW sensor, passive sensor, vibration-induced strain sensor

---

## Введение

Получение информации о состоянии узлов авиационного двигателя является важной задачей. Техническая сложность измерения многих параметров двигателя при его испытаниях обусловлена наличием в нем высокотемпературного, высокоскоростного и высокотурбулентного газового потока, большими нестационарными механическими и тепловыми нагрузками, в том числе на детали, вращающиеся с большой скоростью. Для повышения надежности, увеличения ресурса и расширения рабочего диапазона средств измерения, применяемых для определения состояния элементов ротора двигателя, предпочтительна замена проводных соединений и щеточных токосъемников на беспроводные системы телеметрии. При измерениях в условиях высоких температур питание датчиков от аккумуляторов и батарей становится проблематичным, так же как использование полупроводниковой электроники. По этой причине имеет смысл обратиться к техническим решениям, использующим энергию внешнего сигнала для формирования переизлученного сигнала, содержащего информацию об измеряемом параметре. Среди таких решений заслуживают внимания измерительные системы, использующие в качестве чувствительных элементов датчиков устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ), ввиду их способности работать при повышенных температурах [1]. Одним из основных параметров, которые необходимо измерять в процессе испытаний авиационных двигателей, является быстропеременная вибродеформация элементов ротора.

О применении датчиков на ПАВ для измерения повышенных температур хорошо известно [2]. Ряд публикаций содержит данные об экспериментальном подтверждении сохранения рабочих характеристик датчиков на ПАВ под воздействием повышенных температур при соответствующем выборе материала подложки и электродов. Так, в [3] проверено сохранение характеристик датчиков при воздействии температуры 600°C в течение 384 ч, а в [4] продемонстрировано сохранение работоспособности при кратковременном воздействии температуры 1140°C. Также хорошо известны измерения механических величин, основанные на измерениях деформации, в нормальных условиях [5]. Публикации о применении датчиков на ПАВ для измерения механических величин при повышенных температурах [6–8], в том числе об измерении параметров вибрации [9], стали появляться сравнительно недавно.

При повышенных температурах измерение механических величин усложняется в связи с проблемой обеспечения надежного механического крепления датчика к объекту, деформация которого измеряется. Перспективным направлением развития ПАВ-устройств, в рам-

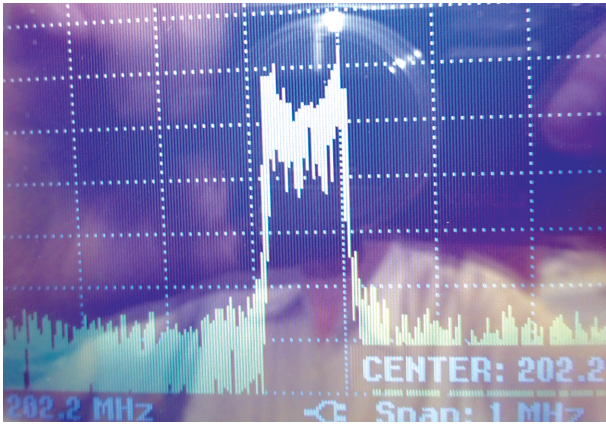
ках которого эта проблема может быть легко устранена, является использование датчиков на основе наносимых на объект тонкопленочных пьезоэлектриков (таких как нитрид алюминия [7; 10] или оксид цинка [11]) вместо прикрепляемых к объекту монокристаллических датчиков. Вместе с тем дальнейшие исследования в области монокристаллических датчиков также представляют интерес в связи с более развитой технологией их производства и возможностью достижения лучших характеристик собственно устройства на ПАВ, независимостью параметров датчика от механических свойств объекта, более универсальной (применимой к более разнообразным объектам) технологией крепления. Кроме того, многие результаты, полученные для монокристаллических датчиков, впоследствии могут быть применены и к тонкопленочным датчикам.

В качестве чувствительного элемента датчика быстропеременной деформации в настоящей работе используется изготовленный на пьезоэлектрической подложке резонатор на ПАВ. Принцип работы датчика с резонатором на ПАВ заключается в изменении его резонансной частоты при появлении внешнего воздействия, деформирующего подложку. При возникновении в объекте деформаций кристаллическая подложка резонатора, зафиксированная на объекте, также деформируется, в результате чего меняется расстояние между элементами конструкции резонатора и скорость распространения ПАВ, что приводит к изменению резонансной частоты резонатора.

В настоящей статье приводятся результаты разработки методики измерения быстропеременной деформации (вибродеформации) посредством беспроводных пассивных датчиков с резонаторами на ПАВ. Описано поэтапное экспериментальное исследование датчиков данного типа. Начальные эксперименты для отработки основных принципов измерения вибродеформаций проводились с беспроводными активными датчиками на основе резонаторов на ПАВ (второй параграф). Следующим этапом было испытание беспроводного пассивного датчика вибродеформации, который на начальном этапе был размещен на неподвижном объекте (третий параграф). Далее были проведены испытания датчиков, размещенных на вращающихся объектах (четвертый параграф), и экспериментальное исследование беспроводных пассивных датчиков с оптимизированным опрашивающим сигналом (пятый параграф).

## Активный датчик вибродеформации с резонатором на ПАВ, задающим частоту автогенератора

Начальные эксперименты с датчиками вибродеформации на ПАВ проводились с механически закрепленным



**Рис. 1.** Спектр сигнала автогенератора при большой амплитуде вибраций (одно деление шкалы соответствует 100 кГц)

на вибрирующем объекте ПАВ-резонатором, гальванически соединенным с автогенератором и выполняющим роль элемента, задающего частоту автогенератора. Этот подход, с использованием миниатюрной батарейки и полупроводниковых элементов в составе автогенератора, хотя и не применим без модификаций для измерений в условиях повышенных температур, но вполне обоснован как демонстратор возможности измерения вибродеформаций с использованием резонатора на ПАВ.

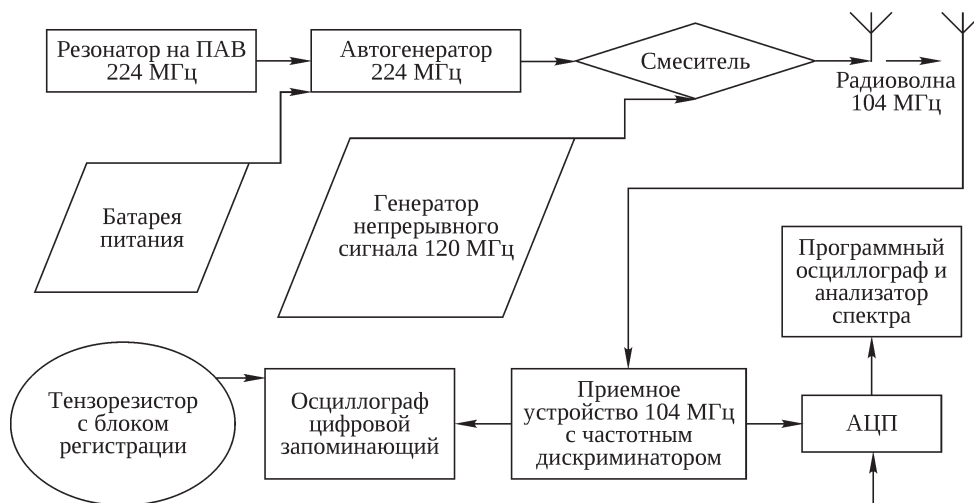
Проведенные исследования показали особенности, свойственные именно датчикам вибродеформаций. Амплитуда и диапазон частот регистрируемых вибродеформаций ограничивается скоростью изменения частоты автогенератора. В простейшем случае для исключения усложнения обработки сигнала желательно, чтобы она не превышала скорость затухания свободных колебаний в резонаторе. Это ограничение определяется добротностью резонатора. При типичной добротности 10 000 на использованной в экспериментах частоте вблизи 200 МГц можно ожидать, что спектр резуль-

тирующего частотно-модулированного (ЧМ) сигнала при относительно малой амплитуде вибродеформаций находится в полосе частот примерно  $\pm 20$  кГц от центральной частоты автогенератора. Однако в реальных экспериментах при сравнительно большой амплитуде вибродеформаций измеряемая анализатором спектра полоса частот ЧМ-колебаний достигала 100 кГц (рис. 1).

ЧМ-сигнал с таким широким спектром достаточно сложно обработать с помощью стандартных демодуляторов ЧМ-сигналов (ЧМ-демодуляторов), предназначенных для получения на выходе сигнала звуковой частоты (обрабатывающих сигнал на стандартных промежуточных частотах, например 10,7 МГц). Обработка таких сигналов приводит к проявлению нелинейных свойств ЧМ-демодулятора и к искажениям результата демодуляции с появлением ложных гармонических составляющих, отсутствующих в реальных вибродеформациях. Это осложнение, как показывает результат измерения спектра сигнала посредством анализатора спектра, можно успешно преодолевать за счет расширения рабочей полосы частот ЧМ-демодулятора.

На рис. 2 приведена блок-схема испытательного стенда, на котором проводилось сравнение результатов измерения вибродеформации беспроводным датчиком на ПАВ и тензорезистором. Подробное описание стенда приведено в [12]. Результаты сравнения сигналов от двух разных датчиков демонстрируют адекватное измерение вибродеформации беспроводным датчиком [13]. Более подробное описание сигнала от активного датчика вибродеформации на ПАВ приведено в [14].

Эксперименты с активным датчиком вибродеформации с ПАВ-резонатором в качестве чувствительного элемента подтвердили принципиальную реализуемость измерения вибродеформации посредством закрепленного на вибрирующем объекте резонатора на ПАВ.



**Рис. 2.** Блок-схема стенда для испытаний активных ПАВ-датчиков вибродеформации

## Пассивный датчик вибродеформации на основе резонаторов на ПАВ

Рассмотренный в предыдущем параграфе датчик с включением резонатора на ПАВ в цепь автогенератора имеет существенное ограничение по рабочей температуре, связанное с рабочим диапазоном температур автогенератора. В то время как верхняя граница рабочего диапазона температуры автогенератора обычно не превышает  $100^{\circ}\text{C}$  и даже при использовании специализированных компонентов в лучшем случае может достигать  $200^{\circ}\text{C}$ , собственно чувствительный элемент на ПАВ может быть работоспособен и при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$ . Для отработки опроса датчика вибродеформации, не содержащего элементов питания и активных электронных компонентов, были проведены эксперименты с пассивным датчиком, представляющим собой механически закрепленный на вибрирующем объекте ПАВ-резонатор, электрически соединенный с антенной.

На рис. 3 представлена блок-схема для опроса датчика посредством антенн, расположенных на расстоянии более 1 м, содержащая переключатели, управляемые генераторами видеопульсов. Использование переключателей необходимо для выделения сигнала, переизлученного датчиком, на фоне сигнала, связанного с прямым прохождением радиоволн от передающей антенны к приемной и отражением радиоволн от окружающих объектов. Поскольку опрашивающий сигнал не содержит информации об измеряемых параметрах датчика, при его непосредственном приеме он представляет собой помеху, уровень которой значительно превосходит уровень сигнала от датчика. Переключатель в цепи приемника отключает приемник от антенны в моменты передачи импульсов опрашивающего сигнала, что позволяет исключить прием сигнала опроса и поддерживать близкий к максимальному коэффициент усиления приемного устройства, который при большом сигнале помехи уменьшался бы системой автоматической регулировки усиления. Это дает возможность усилить сигнал до уровня, при котором для его обработки используются все разряды аналого-цифровых преобразователей (АЦП), и таким образом добиться увеличения динамического диапазона и разрешающей способности

аппаратуры для обработки сигнала, переизлученного от датчика. Использование переключателей позволяет также предохранять приемное устройство от повреждения опрашивающими сигналами (усиленными с помощью усилителя мощности) и уменьшить уровень принимаемых помех.

Опрашивающий сигнал от источника сигнала подается на вход переключателя № 1, управляемого генератором импульсов. В случае подачи запрещающего напряжения на управляющий вход сигнал в переключателе передается на один из двух его выходов, соединенный с заземлением. В случае подачи разрешающего напряжения сигнал в переключателе передается на его второй выход, соединенный с входом усилителя, в котором сигнал усиливается на 25 дБ, и с него передается на передающую антенну. Сигнал принимается антенной датчика и преобразуется в подложке резонатора на ПАВ в акустическую волну с частотой опрашивающего сигнала.

В результате разница между частотой опрашивающего сигнала и резонансной частотой и, следовательно, накопленная в резонаторе энергия изменяются в соответствии с изменением деформации. После отключения опрашивающего сигнала в резонаторе протекает свободный процесс, представляющий собой экспоненциально затухающие колебания на резонансной частоте резонатора на ПАВ. Амплитуда этих колебаний прямо пропорциональна квадратному корню из энергии, накопленной в резонаторе во время передачи опрашивающего сигнала.

В периоды времени, когда передача опрашивающего сигнала выключена, сигнал от резонатора на ПАВ с помощью той же антенны датчика, выступающей уже в качестве передающей, передается на антенну приемного устройства. Антенна приемного устройства соединена с входом переключателя № 2, позволяющего регулировать время приема, которое определяется длительностью разрешающего импульса генератора, управляющего переключателем № 2. В случае подачи на управляющий вход переключателя № 2 разрешающего напряжения сигнал передается на выход переключателя, соединенный с приемным устройством. В первых экспериментах с импульсным опросом пассивного датчика на ПАВ в качестве приемного устройства использовался

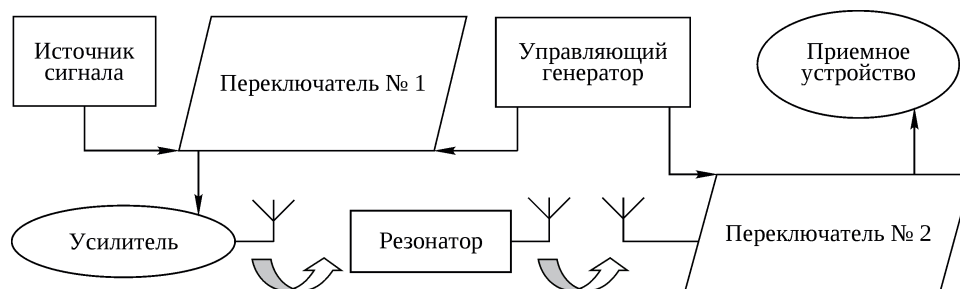
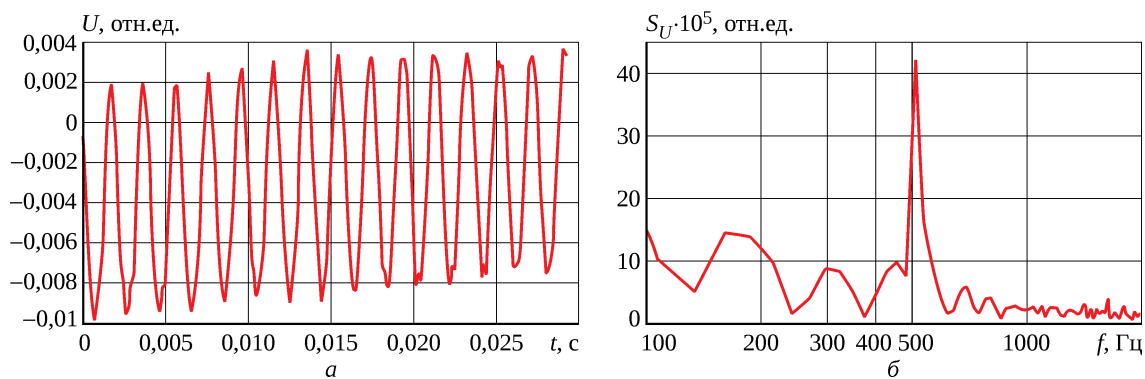


Рис. 3. Блок-схема стенда для испытаний пассивных ПАВ-датчиков вибродеформации



**Рис. 4.** Зависимость интенсивности отклика датчика вибродеформации, приклеенного к камертону с частотой механического резонанса 512 Гц, от времени (а) и спектр интенсивности отклика (б)

анализатор цепей. Измеряемая таким способом интенсивность отклика датчика пропорциональна спектральной плотности отклика на частоте опрашиваемого сигнала. При наличии вибрации отклик изменяется во времени в соответствии с изменением деформации датчика. Результат измерения интенсивности отклика датчика, опрашиваемого на расстоянии 1 м, записанный анализатором цепей в файл и обработанный на ЭВМ, изображен на рис. 4.

Несмотря на заметные искажения сигнала по сравнению со свойственным камертону гармоническим колебанием, результат измерения позволяет корректно определить частоту и период этих колебаний. Для получения более точных результатов предпочтительно производить прием сигнала не с помощью анализатора цепей (ограничивающего возможность записи сигнала 1601 точкой), а посредством приемного устройства, состоящего из преобразователя частоты, усилителя и демодулятора, сигнал с которого подается на АЦП, что позволяет получать спектр демодулированного сигнала с разрешающей способностью 0,025 Гц. В дальнейших экспериментах при использовании приемных устройств с демодуляторами амплитудно-модулированных (АМ) или частотно-модулированных сигналов, вибродеформации камертона были измерены беспроводным пассивным датчиком на ПАВ с меньшими искажениями [1; 14]. Особенности импульсного опроса пассивных датчиков при больших изменениях резонансной частоты резонаторов на ПАВ обсуждаются в [15], одновременный опрос пары пассивных датчиков на ПАВ обсуждается в [16].

Эксперименты с пассивным датчиком вибродеформации с ПАВ-резонатором в качестве чувствительного элемента подтвердили возможность беспроводного измерения вибродеформации посредством закрепленного на вибрирующем объекте ПАВ-резонатора без размещения на объекте активных электронных компонентов и элементов питания.

### Экспериментальное измерение параметров вибраций на вращающемся объекте

Начальные эксперименты, описанные в предыдущих параграфах, были проведены на неподвижном вибрирующем объекте. Поскольку измерения деформации на неподвижных объектах вполне успешно проводятся посредством тензорезисторов, датчики на ПАВ вызывают наибольший интерес применительно к измерению деформации на движущихся объектах. Эксперименты по измерению вибродеформации на вращающемся объекте при комнатной температуре были проведены как с пассивным датчиком на ПАВ (потенциально применимым и при повышенных температурах), так и с активным датчиком (описанным во втором параграфе), позволяющим благодаря более мощному и стабильному сигналу датчика лучше выявить особенности опроса датчика на вращающемся объекте.

Для проведения экспериментов с вращением камертона, на котором закреплен ПАВ-резонатор, устанавливался на валу испытательного стенда [12]. На стенде использовалось бесконтактное вращающееся сочленение для передачи сигнала от датчика, расположенного на камертоне, закрепленном на вращающемся валу. Статор бесконтактного вращающегося сочленения подключался кабелем к антенне датчика. Возбуждение вибрации вращающихся камертонов происходило при их ударах о неподвижный тонкий упругий металлический стержень.

При проведении начальных экспериментов с активным датчиком использовалась схема подключения подобная представленной на рис. 2, но с измерением вибродеформации только датчиком на ПАВ, без дополнительного измерения тензорезистором. В результате эксперимента показана принципиальная возможность измерения параметров вибродеформаций вращающихся объектов с помощью ПАВ-датчиков. На рис. 5 изобра-

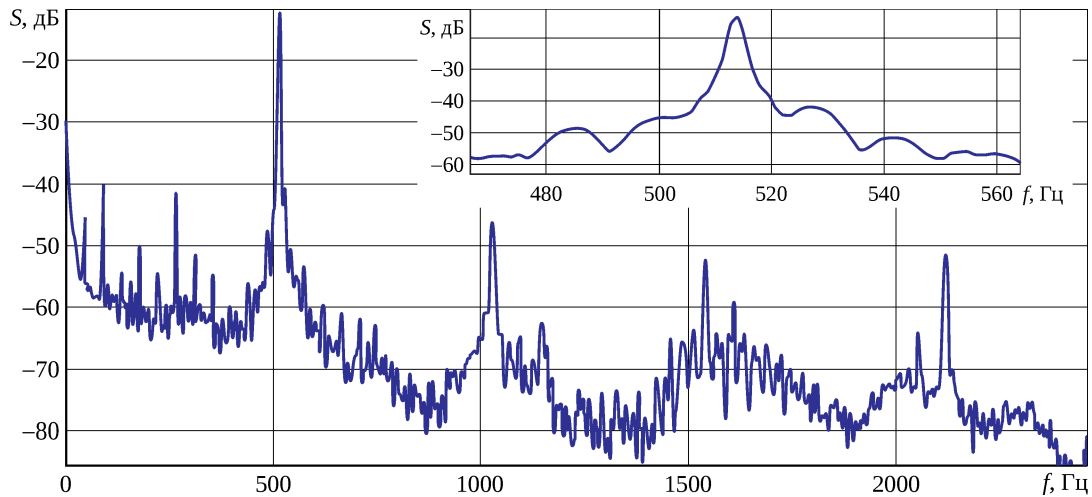


Рис. 5. Спектр демодулированного сигнала от датчика с автогенератором, расположенного на вращающемся объекте

жен спектр демодулированного сигнала от активного ПАВ-датчика, закрепленного на камертоне с частотой механического резонанса 512 Гц, вращающегося с частотой 40 Гц (2400 об/мин). На вставке более подробно показан спектр в области частоты резонанса камертона. Влияние частоты вращения на измеренные параметры вибродеформации обсуждается в [16].

При проведении экспериментов с пассивным датчиком использовалась схема подключения, представленная на рис. 3, с приемным устройством на основе демодулятора. В данной модификации этой схемы выход переключателя № 2 непосредственно подключался к преобразователю частоты (состоящему из смесителя и генератора немодулированного опорного сигнала), который преобразовывал сигнал с несущей частотой 224 МГц в сигнал с несущей частотой, соответствующей рабочей частоте демодулятора. Сигнал с выхода преобразователя частоты усиливался и подавался на вход частотного или амплитудного демодулятора (в зависимости от выбранного типа исследуемой модуляции). Сигнал с демодулятора оцифровывался с помощью АЦП с частотой дискретизации 44 100 Гц, позволяющей регистрировать

спектр демодулированного сигнала в диапазоне от 10 Гц до 22 кГц, и записывался в файлы. Последующая программная обработка сигнала (в частности, определение его спектра) осуществляется с использованием среды Matlab.

Сигнал на выходе демодулятора ( $U$ ) после единичного удара по камертону представляет собой набор гармоник с частотами кратными частоте вибрации  $F_{\text{vibr}} = 512$  Гц, амплитуда которых во времени убывает согласно экспоненте с показателем  $\alpha$ , соответствующим добротности камертона, и может быть описан выражением

$$U(t) = \Delta\omega \cdot B_i \exp(-\alpha t) \sum_i \sin(\Omega_i t),$$

где  $B_i$  – коэффициент, связывающий амплитуду  $i$ -й гармоники демодулированного сигнала с девиацией частоты резонатора на ПАВ ( $\Delta\omega$ );  $\Omega_i = 2\pi i F_{\text{vibr}}$  – циклическая частота  $i$ -й гармоники.

Эксперименты по измерению вибродеформации на вращающемся объекте посредством пассивных датчиков на ПАВ, опрашиваемых без гальванического контакта резонатора на ПАВ с активными электронными

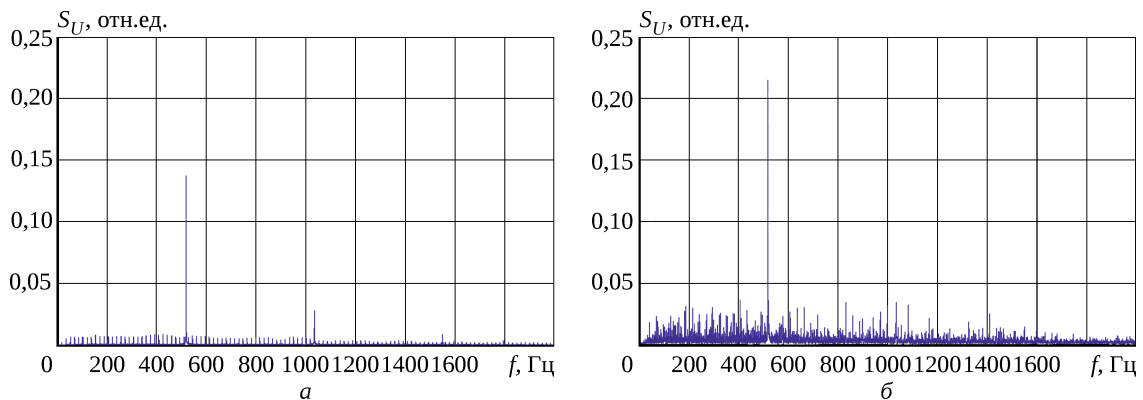


Рис. 6. Спектры демодулированных амплитудным демодулятором откликов пассивного датчика, полученных от неподвижного объекта (а) и вращающегося объекта (б)

компонентами, были проведены при частоте вращения вала от 900 до 2700 об/мин (от 15 до 45 Гц). Спектры демодулированных откликов датчика при отсутствии вращения и при его наличии приведены на рис. 6. Более высокий уровень спектра на частоте вибрации камертона на правом рисунке связан с более сильным ударом при вращении. Сравнивая спектры, полученные без вращения и с вращением, можно наблюдать увеличение уровня шума и помех от устройства управления скоростью вращения двигателя. Однако и в этом случае отношение сигнал/шум достаточно для определения частоты вибрации. Таким образом, можно сделать вывод об успешности данного эксперимента, продемонстрировавшего потенциальную возможность измерения вибродеформаций вращающихся объектов датчиком на ПАВ, опрашиваемым без гальванического контакта резонатора на ПАВ с активными электронными компонентами. Экспериментально показана возможность осуществления этих измерений с передачей сигнала по радиоканалу на расстоянии между антеннами до 1 м.

Сравнение результатов измерения вибродеформации на вращающихся объектах при использовании демодуляторов АМ- и ЧМ-сигналов приведено в [14]. При большей амплитуде вибродеформации в обоих случаях наблюдались значительные искажения сигнала от пассивного датчика [14; 15]. По сравнению с активным датчиком пассивный характеризуется значительно худшим отношением сигнал/шум и динамическим диапазоном измеряемой деформации [1]. Однако существует возможность некоторого улучшения этих параметров пассивного датчика, обусловленная зависимостью амплитуды его отклика от параметров опрашивающего сигнала и, следовательно, возможностью выбора их значений, позволяющих получить максимальную амплитуду отклика.

Эксперименты с датчиками вибродеформации на основе ПАВ-резонаторов для беспроводного измерения вибродеформации посредством закрепленного на движущемся вибрирующем объекте резонатора на ПАВ (в том числе без размещения на объекте активных электронных компонентов и элементов питания) продемонстрировали потребность в оптимизации опрашивающего сигнала пассивных датчиков.

### Оптимизация параметров опрашивающего сигнала для пассивного датчика вибродеформации

Пассивный датчик, в отличие от активного, потенциально применим при повышенных температурах, однако излучает намного более слабый сигнал, что увеличивает погрешность измерений и ограничивает дальность беспроводного опроса датчика. Для получения лучшего

отношения сигнал/шум, которое позволит улучшить точность и дальность, требуется выбрать параметры опрашивающего сигнала, позволяющие получать максимальную мощность отклика датчика. Такими параметрами являются:

- длительность опрашивающего импульса ( $T_p$ );
- период следования опрашивающих импульсов ( $T$ );
- несущая частота опрашивающего сигнала ( $f_{int}$ ).

Для поиска оптимальных параметров сигнала при импульсном опросе пассивного датчика разработан подход к моделированию, позволяющий оценить влияние параметров опрашивающего сигнала на отклик датчика [17]. Была проведена экспериментальная проверка рассчитанных зависимостей амплитуды отклика датчика от параметров опрашивающего сигнала. При проведении данных экспериментов использовалась схема подключения, представленная на рис. 3, в которой в качестве приемного устройства применялся осциллограф. В данной модификации этой схемы переключатель № 2 может быть оставлен в постоянно открытом состоянии или исключен из схемы (в этом случае к входу осциллографа подключается непосредственно антенна) при условии, что расположение антенн и мощность опрашивающего сигнала, излучаемого передающей антенной, гарантируют, что сигнал на входе осциллографа не превысит допустимого уровня во время включения опрашивающего сигнала. Такой вариант подключения интересен тем, что позволяет увидеть как полный отклик датчика, так и опрашивающий сигнал. На рис. 7 приведен пример осциллограммы, снятой в таком режиме для случая  $f_{int} = 224,5$  МГц,  $T = 140$  мкс,  $T_p = 15$  мкс.

Отклик датчика во время выключения опрашивающего сигнала представляет собой экспоненциально затухающие гармонические колебания на частоте свободных колебаний ПАВ-резонатора (с учетом влияния антенны и кабеля, связывающего антенну и резонатор).

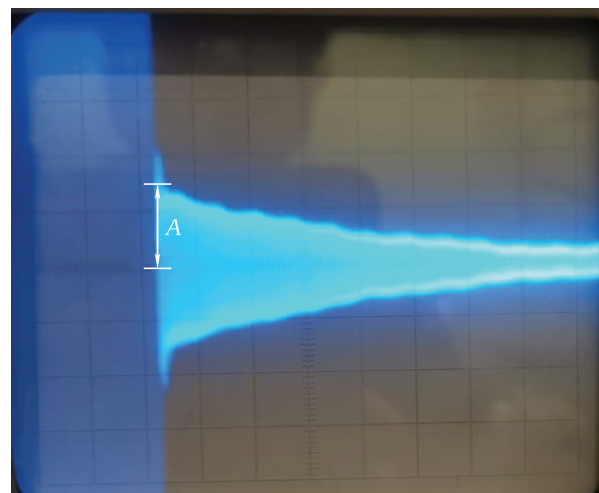


Рис. 7. Осциллограмма отклика датчика

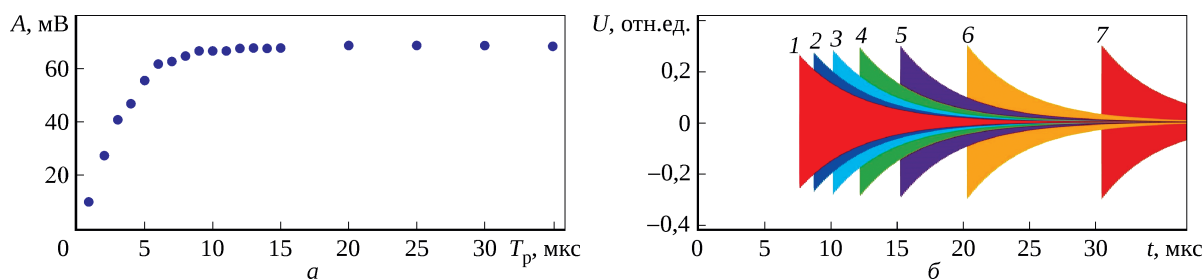
Скорость затухания колебаний определяется добротностью ПАВ-резонатора, нагруженного на антенну. На рис. 7 свободным колебаниям соответствует более яркая часть осциллограммы, находящаяся в правой части экрана осциллографа. В начальный момент свободных колебаний к ним прибавляется остаточный спад опрашивающего импульса и сигналы, связанные с реверберацией. На практике прием отклика датчика начинается после окончания этого начального участка свободных колебаний. При оптимизации параметров опрашивающего сигнала для получения наибольшего отношения сигнал/шум желательно выбирать их так, чтобы амплитуда отклика датчика в начальный момент приема ( $A$ ) достигала как можно больших значений, а время приема отклика датчика ( $T_r$ ) по возможности приближалось к 3...5 постоянным времени отклика (большее увеличение  $T_r$  не имеет смысла, так как отклик в последующие моменты времени практически равен нулю).

Увеличение  $T_p$ , приводящее к увеличению времени накопления энергии в резонаторе, является очевидным решением для увеличения  $A$ . При этом  $T$  и  $T_p$  определяют  $T_r$  и влияют на возможность наложения откликов от разных импульсов, которое может привести к искажению сигнала, излучаемого датчиком. Чтобы сохранить достаточное  $T_r$  и избежать наложения откликов, необходимо вместе с увеличением  $T_p$  увеличивать и  $T$ , что, однако, приводит к снижению максимального значения частоты вибрации, при которой возможно использование данной системы. Так как зависимость накапливаемой энергии от длительности импульса нелинейная (с ростом длительности энергия приближается

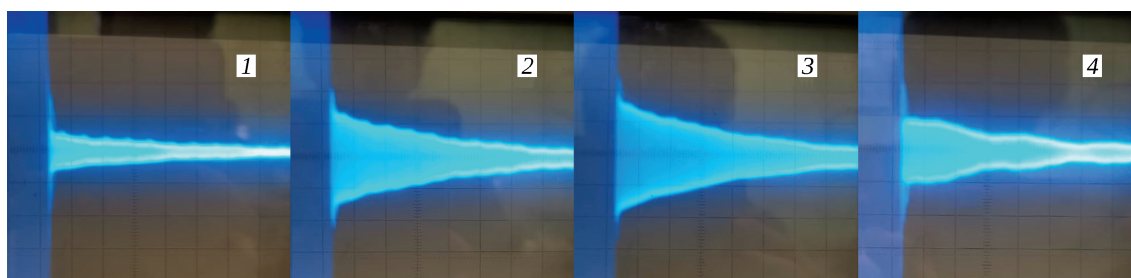
к максимальному значению с экспоненциально уменьшающейся скоростью роста), чрезмерное увеличение длительности по отношению к постоянной времени отклика нежелательно, поскольку оно приведет к снижению максимальной частоты вибрации при незначительном выигрыше в величине накапливаемой энергии.

В экспериментах использовался резонатор на ПАВ с резонансной частотой около 224 МГц и ненагруженной добротностью 9300 (с постоянной времени ненагруженного резонатора около 13 мкс) при его подключении к полуволновому вибратору с импедансом 50 Ом на этой частоте. Для этого случая расчетная оптимальная длительность опрашивающего импульса составляет от 3 до 10 мкс в зависимости от требований к максимальной частоте вибрации и расстоянию между датчиком и опрашивающим устройством.

На рис. 8 изображена экспериментальная зависимость параметра  $A$  от длительности опрашивающего импульса при  $f_{int}$  близкой к частоте свободных колебаний и  $T = 140$  мкс. Осциллограммы для измерения зависимости  $A(T_p)$  были получены в режиме с использованием переключателя № 2, который открывался через 1 мкс после закрытия переключателя № 1, что позволяло единообразно определить значение  $A$  для всех значений  $T_p$ . Для сравнения рядом приведены расчетные графики откликов датчика для разных значений  $T_p$ . Сопоставление результатов расчета и эксперимента демонстрирует их хорошее соответствие, в том числе подтверждается, что при  $T_p \approx 10$  мкс кривая зависимости  $A(T_p)$  выходит на пологий участок и дальнейшее увеличение длительности опрашивающих импульсов



**Рис. 8.** Экспериментальная зависимость амплитуды отклика в начале приема от длительности опрашивающих импульсов (а) и расчетные отклики датчика при разной длительности опрашивающих импульсов (б):  
1 – 7,625 мкс; 2 – 8,7 мкс; 3 – 10,166 мкс; 4 – 12,2 мкс; 5 – 15,25 мкс; 6 – 20,33 мкс; 7 – 30,5 мкс



**Рис. 9.** Осциллограммы отклика датчика при разной несущей частоте опрашивающего сигнала:  
1 – 224,47 МГц; 2 – 224,50 МГц; 3 – 224,53 МГц; 4 – 224,56 МГц



приводит к увеличению амплитуды отклика не более чем на 5% (к увеличению энергии и мощности отклика не более чем на 10%).

Для измерений было выбрано значение  $T = 140$  мкс, позволяющее почти полностью исключить взаимодействие откликов от разных импульсов и определить влияние собственно  $T_p$ . Для практического использования предпочтительно использовать меньшее  $T$ , чтобы не ухудшать быстродействие измерительной системы. Наилучшее сочетание быстродействия и отношения сигнал/шум достигается при скважности опрашивающих импульсов близкой к двум.

Величина энергии, накопленной в резонаторе на ПАВ во время включения опрашивающего сигнала, и, следовательно, величина  $A$  существенно зависят от несущей частоты опрашивающего сигнала. Максимальное количество энергии накапливается в резонаторе при  $f_{\text{int}}$  близкой к частоте свободных колебаний. На рис. 9 приведены осциллограммы откликов датчика, полученные экспериментально для  $T_p = 15$  мкс и  $T = 140$  мкс при различных значениях  $f_{\text{int}}$ . Частота свободных колебаний резонатора на ПАВ (с учетом влияния антенны и связывающего антенну и резонатор кабеля) находится между 224,50 и 224,54 МГц. Значение  $A$  максимально при  $f_{\text{int}}$  близкой к частоте свободных колебаний и уменьшается при удалении  $f_{\text{int}}$  от нее.

При использовании опрашивающего сигнала с фиксированной несущей частотой для измерения вибродеформации с использованием демодулятора АМ-сигнала нежелательно выбирать несущую частоту слишком близкую к резонансной частоте, несмотря на возможность получать в этом случае максимальную мощность отклика. Это связано с наличием вблизи резонанса максимума зависимости амплитуды отклика от  $f_{\text{int}}$ , что приводит к подавлению в демодулированном сигнале основной гармоники и росту уровня высших гармоник [15]. В этом случае выбор значения  $f_{\text{int}}$  обусловлен двумя параметрами: крутизной зависимости амплитуды отклика от частоты и величиной накапливаемой в резонаторе энергии. Тогда оптимальная  $f_{\text{int}}$  находится между значениями частоты, при которых достигаются максимумы одного и другого параметра. Зависимость  $A$  от  $f_{\text{int}}$  также демонстрирует предпочтительность использования опрашивающего сигнала с подстраиваемой несущей частотой, следящей за частотой свободных колебаний. Использование такой системы слежения позволяет при вибрации постоянно сохранять близкую к максимальной амплитуду отклика и, таким образом, достигать лучшего усредненного отношения сигнал/шум.

Экспериментальное исследование влияния параметров опрашивающего сигнала на амплитуду отклика датчика показало, что максимальная амплитуда отклика

достигается при параметрах близких к расчетным оптимальным параметрам:  $T_p$  около двух постоянных времени отклика и  $f_{\text{int}}$  близкой к частоте свободных колебаний. Соответствие друг другу результатов расчетов и измерений показывает корректность расчета, в результате которого определены параметры опрашивающего сигнала, оптимальные для достижения компромисса между быстродействием измерительной системы, чувствительностью к деформации и мощностью отклика датчика, а также показана возможность улучшения отношения сигнал/шум при использовании подстройки несущей частоты опрашивающего сигнала.

## Заключение

В рамках работ по оценке возможности применения датчиков нового типа для измерения быстропеременных вибродеформаций элементов авиационных двигателей в процессе их испытаний проведены исследования беспроводных пассивных датчиков на основе резонаторов на поверхностных акустических волнах с оптимизированным опрашивающим сигналом.

Активный датчик вибродеформации, состоящий из антенны, элемента питания и автогенератора, частоту которого задает резонатор на ПАВ, закрепленный на вибрирующем объекте, был испытан в начальных экспериментах. Хотя такой датчик не подходит для работы при повышенной температуре, его успешные испытания подтвердили реализуемость измерения вибродеформации посредством резонатора на ПАВ. Последующие эксперименты с пассивным датчиком вибродеформации, состоящим только из резонатора на ПАВ и антенны, продемонстрировали также возможность беспроводного измерения вибродеформации без размещения на объекте активных электронных компонентов и элементов питания. Испытания пассивного датчика проведены при комнатной температуре, но потенциально он работоспособен и при повышенных температурах. Эксперименты с датчиками обоих типов были проведены как на неподвижных, так и на движущихся объектах (вращающихся с частотой до 2700 об/мин).

Оптимизация параметров сигналов, используемых для опроса пассивных датчиков, является актуальной задачей для получения лучшего отношения сигнал/шум при приеме отклика датчика в сочетании с требуемым быстродействием датчика. Повышение отношения сигнал/шум позволяет уменьшить погрешность измерений и увеличить дальность беспроводного опроса датчика. Области оптимальных значений параметров опрашивающего сигнала (длительности опрашивающего импульса, периода следования опрашивающих импульсов и несущей частоты опрашивающего сигнала) определены на основании проведенных расчетов.

---

Корректность расчета проверена экспериментальным исследованием влияния параметров опрашивающего сигнала на амплитуду отклика датчика. Результаты экспериментов демонстрируют, что при параметрах опрашивающего сигнала, находящихся в определенных расчетом диапазонах, достигается максимальная

амплитуда отклика датчика, позволяющая получать большую дальность регистрации сигнала и меньшую погрешность измерений.

*Авторы статьи выражают благодарность студенту НИУ «МЭИ» Н.О. Игнатьеву за помощь в проведении измерений.*

## Литература

1. Возможности применения беспроводных датчиков с чувствительными элементами на поверхностных акустических волнах при испытаниях авиационных двигателей / Швецов А.С., Меркулов А.А., Жгун С.А., Минеев Б.И., Маслов В.П. // *Авиационные двигатели*. 2020. № 4 (9). С. 67–74.
2. Langasite SAW temperature and oxygen multi-sensor / P. Zheng, D.W. Greve, I.J. Oppenheim, V. Malone // 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS 2011) : 2–5 May 2011. IEEE, 2011. P. 72–75.
3. De Sousa Lopes Moreira A., Arapan L., Bartasyte A. New approach of interdigitated transducers engineering for high-temperature surface acoustic wave sensors // 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) : Las Vegas, September 7–11, 2020 : proceedings. IEEE, 2020. Paper 2162. 4 p.
4. Iridium interdigital transducers for ultra-high-temperature SAW devices / T. Aubert, O. Elmazria, J. Bardong, G. Bruckner // 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium : 18–21 October 2011. IEEE, 2011. P. 2065–2068.
5. Kalinin V. Wireless physical SAW sensors for automotive applications // 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium : Orlando, FL, USA, 18–21 October 2011. IEEE, 2011. P. 212–221.
6. Maskay A., Pereira da Cunha M. High temperature static strain microwave acoustic sensor // 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) : 18–21 September 2016. IEEE, 2016. P. 1–4.
7. The investigation of integrated SAW strain sensor based on AlN/TC4 structure / L. Shu, X. Wang, L. Lib, D. Yan, L. Peng, L. Fan, W. Wu // *Sensors and Actuators A : Physical*. 2019. Vol. 293. P. 14–20.
8. Strain measurements with langasite SAW resonators at high temperature / L. Li, B. Peng, J. Zhu, Zh. He, Y. Yang, W. Zhang // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, nr 4. P. 4688–4695.
9. Maskay A., Pereira da Cunha M. High-temperature microwave acoustic vibration sensor // 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2018) : 22–25 October 2018. IEEE, 2018. P. 1516–1518.
10. Is AlN/sapphire bilayer structure an alternative to langasite for ultra-high-temperature SAW applications? / T. Aubert, O. Elmazria, J. Bardong, G. Bruckner, B. Assouar // 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium : 18–21 October 2011. IEEE, 2011. P. 2082–2085.
11. SAW sensors directly integrated onto industrial metallic parts for manufacturing 4.0 / P. Mengue, S. Hage-Ali, O. Elmazria, S. Zhgoon // 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT : virtual conference : June 3–5, 2020 : proceedings. 2020. P. 158–161.
12. Испытательный стенд для датчика быстропеременных деформаций / Меркулов А.А., Жгун С.А., Швецов А.С., Лобов Г.Д., Минеев Б.И., Маслов В.П. // XXVI Международная конференция «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)» : материалы / Национальный исследовательский университет «МЭИ». М. : Инфра-М, 2018. С. 317–324.
13. Перспективы применения датчиков на ПАВ (поверхностные акустические волны) в авиационном моторостроении / Жгун С.А., Швецов А.С., Смирнов Ю.К., Меркулов А.А., Раков А.В., Маслов В.П., Минеев Б.И. // *Авиакосмическое приборостроение*. 2018. № 3. С. 48–55.
14. Merkulov A., Shvetsov A., Zhgoon S. SAW-based wireless measurements of the fast varying deformations in rotating vibrating objects // 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2019) : 6–9 October 2019. IEEE, 2019. P. 2545–2548.
15. Peculiarities of wireless interrogation of SAW-resonator vibration sensor by RF pulse-signal / A. Merkulov, A. Shvetsov, B. Paulmier, S. Zhgoon, S. Hage-Ali, O. Elmazria // 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) : Las Vegas, September 7–11, 2020 : proceedings. IEEE, 2020. Paper 1210. 4 p.
16. Properties of SAW vibration sensors applicable in the field of power engineering / A.A. Merkulov, S.A. Zhgoon, A.S. Shvetsov, N.A. Belyankin // *Proceedings of the 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)* : 11–13 March 2021. IEEE, 2021. P. 1–5.

- 
17. Моделирование импульсного опроса беспроводного датчика вибрации на основе резонатора на поверхностных акустических волнах / А.А. Меркулов, С.А. Жгун, А.С. Швецов, Г.Д. Лобов, Б.И. Минеев, В.П. Маслов // Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования) : XXVIII Международная конференция : материалы. М. : Изд-во МЭИ, 2020. С. 345–353.

## References

1. Shvetsov A.S., Merkulov A.A., Zhgoon S.A., Mineev B.I., Maslov V.P. Possibilities of wireless sensors application with sensitive elements based on surface acoustic waves during aircraft engines testing. *Aviatsionnye dvigateli [Aviation engines]*. 2020. № 4 (9). P. 67–74.
2. Langasite SAW temperature and oxygen multi-sensor / P. Zheng, D.W. Greve, I.J. Oppenheim, V. Malone // 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS 2011) : 2–5 May 2011. IEEE, 2011. P. 72–75.
3. De Sousa Lopes Moreira A., Arapan L., Bartaszyte A. New approach of interdigitated transducers engineering for high-temperature surface acoustic wave sensors // 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) : Las Vegas, September 7–11, 2020 : proceedings. IEEE, 2020. Paper 2162. 4 p.
4. Iridium interdigital transducers for ultra-high-temperature SAW devices / T. Aubert, O. Elmazria, J. Bardong, G. Bruckner // 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium : 18–21 October 2011. IEEE, 2011. P. 2065–2068.
5. Kalinin V. Wireless physical SAW sensors for automotive applications // 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium : Orlando, FL, USA, 18–21 October 2011. IEEE, 2011. P. 212–221.
6. Maskay A., Pereira da Cunha M. High temperature static strain microwave acoustic sensor // 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) : 18–21 September 2016. IEEE, 2016. P. 1–4.
7. The investigation of integrated SAW strain sensor based on AlN/TC4 structure / L. Shu, X. Wang, L. Lib, D. Yan, L. Peng, L. Fan, W. Wu // *Sensors and Actuators A : Physical*. 2019. Vol. 293. P. 14–20.
8. Strain measurements with langasite SAW resonators at high temperature / L. Li, B. Peng, J. Zhu, Zh. He, Y. Yang, W. Zhang // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, nr 4. P. 4688–4695.
9. Maskay A., Pereira da Cunha M. High-temperature microwave acoustic vibration sensor // 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2018) : 22–25 October 2018. IEEE, 2018. P. 1516–1518.
10. Is AlN/sapphire bilayer structure an alternative to langasite for ultra-high-temperature SAW applications? / T. Aubert, O. Elmazria, J. Bardong, G. Bruckner, B. Assouar // 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium : 18–21 October 2011. IEEE, 2011. P. 2082–2085.
11. SAW sensors directly integrated onto industrial metallic parts for manufacturing 4.0 / P. Mengue, S. Hage-Ali, O. Elmazria, S. Zhgoon // 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT : virtual conference : June 3–5, 2020 : proceedings. 2020. P. 158–161.
12. Merkulov A., Zhgun S., Shvecov A., Lobov G., Mineev B., Maslov V. Ispytatel'nyy stend dlya datchika bystroperemennykh deformatsiy [A testbed for sensor of rapidly varying deformations]. XXVI International Conference “Electromagnetic Field and Materials (Fundamental Physical Researches)”. Proceedings. Moscow: Infra-M, 2018. P. 317–324.
13. Zhgoon S.A., Shvetsov A.S., Smirnov Yu.K., Merkulov A.A., Rakov A.V., Maslov V.P., Mineev B.I. Perspektivy primeneniya datchikov na PAV (poverkhnostnye akusticheskie volny) v aviatsionnom motorostroenii [Prospects of SAW (surface acoustic wave) sensors application in aviation engines]. *Aerospace Instrument-Making*. 2018. Nr 3. P. 48–55.
14. Merkulov A., Shvetsov A., Zhgoon S. SAW-based wireless measurements of the fast varying deformations in rotating vibrating objects // 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2019) : 6–9 October 2019. IEEE, 2019. P. 2545–2548.
15. Peculiarities of wireless interrogation of SAW-resonator vibration sensor by RF pulse-signal / A. Merkulov, A. Shvetsov, B. Paulmier, S. Zhgoon, S. Hage-Ali, O. Elmazria // 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) : Las Vegas, September 7–11, 2020 : proceedings. IEEE, 2020. Paper 1210. 4 p.
16. Properties of SAW vibration sensors applicable in the field of power engineering / A.A. Merkulov, S.A. Zhgoon, A.S. Shvetsov, N.A. Belyankin // Proceedings of the 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) : 11–13 March 2021. IEEE, 2021. P. 1–5.

- 
17. Merkulov A.A., Zhgoon S.A., Shvetsov A.S., Lobov G.D., Mineev B.I., Maslov V.P. Modelirovanie impul'snogo oprosa besprovodnogo datchika vibratsii na osnove rezonatora na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh [Simulation of pulse interrogation of a wireless vibration sensor based on a surface acoustic wave resonator]. Electromagnetic Field and Materials (Fundamental Physical Researches). XXVIII International Conference. Proceedings. Moscow: MPEI, 2020. P. 345–353.

*Материалы получены редакцией 10.09.2021*