

# Возможности применения беспроводных датчиков с чувствительными элементами на поверхностных акустических волнах при испытаниях авиационных двигателей

Швецов А.С., Меркулов А.А., Жгун С.А.<sup>1</sup>, Минеев Б.И., 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

Рассматривается возможность применения беспроводных датчиков с чувствительными элементами на поверхностных акустических волнах (ПАВ) при испытаниях и эксплуатации авиадвигателей. На основе анализа публикаций по данной теме показана принципиальная возможность использования датчиков на ПАВ в условиях высоких температур. Приведены результаты расчетов, демонстрирующие возможность использования подложек из лангасита для создания высокотемпературного ПАВ-датчика крутящего момента, аналогичного низкотемпературным датчикам, имеющим практическое применение. Предварительные исследования показали возможность создания беспроводного ПАВ-датчика вибродеформации для вращающихся объектов, функционирующего без токосъемных устройств.

**Ключевые слова:** беспроводной датчик, датчик на ПАВ, высокотемпературный датчик, датчик крутящего момента, датчик вибродеформации.

## Possibilities of wireless sensors application with sensitive elements based on surface acoustic waves during aircraft engines testing

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

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

<sup>2</sup> CIAM, Moscow

The possibility of using wireless sensors with sensitive elements based on surface acoustic waves (SAW) during testing and operation of aircraft engines is considered. Based on the analysis of publications on this topic, the fundamental possibility of using SAW sensors at high temperatures is shown. The presented results of calculations show the possibility of using langasite substrates to create a high-temperature SAW torque sensor, similar to practically used low-temperature sensors. The results of preliminary studies demonstrate the possibility of creating a wireless SAW vibration strain sensor, which can be used on rotating objects without current collectors.

**Keywords:** wireless sensor, SAW sensor, high-temperature sensor, torque sensor, vibration strain sensor.

### Введение

При испытаниях опытных авиационных двигателей одной из сложных задач является обеспечение измерений температур и вибродеформаций элементов ротора газотурбинного двигателя (ГТД), и особенно высоко-

температурных деталей турбины. Трудности вызваны малым ресурсом расположенных на роторе элементов измерительных каналов из-за высоких температур и механических нагрузок, в том числе динамических (быстропеременных), а также необходимостью обеспечения передачи информации с вращающегося ротора

с использованием различного рода токоємных и телеметрических систем. При этом требуется обеспечивать измерение десятков, а в некоторых случаях и сотен параметров, в том числе динамических, в широком частотном диапазоне и с высоким отношением сигнал/шум.

Для решения изложенных выше проблем в НИУ «МЭИ» с методическим участием ЦИАМ проводятся поисковые исследования, посвященные разработке новых средств измерения (в том числе построенных на новых физических принципах), применение которых позволило бы упростить измерение параметров ротора ГТД, особенно его высокотемпературных элементов. Такими средствами могут оказаться измерительные системы, основанные на дистанционном беспроводном измерении электрических характеристик устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ), изменяющихся под воздействием изменения измеряемого параметра.

В настоящее время датчики с чувствительными элементами на ПАВ успешно используются для решения отдельных задач в некоторых отраслях промышленности. Передача информации от датчика к устройствам регистрации и обработки происходит на несущих радиочастотах в диапазоне от 30 МГц до 5 ГГц. Чувствительный элемент такого датчика, представляющий собой резонатор или линию задержки на ПАВ, непосредственно подключается к антенне и не требует источника питания. Продемонстрирована дальность передачи сигнала от единиц до десятков метров при мощности опросного устройства от 10 мВт до 2 Вт. Датчики работоспособны при температурах до 1000°C, устойчивы к воздействию агрессивных сред и ионизирующего излучения.

Принцип действия измерительной системы с датчиками на основе ПАВ можно продемонстрировать следующим примером. Датчик на ПАВ, представляющий собой резонатор, изготовленный на пьезоэлектрической подложке из монокристаллического кварца, имеет резонансную частоту порядка 200 МГц. Датчик наклеивается на исследуемый образец. При возникновении переменной деформации поверхности образца изменяется скорость распространения ПАВ и размеры резонатора, что, соответственно, приводит к изменению его резонансной частоты. Автогенератор отслеживает эту частоту и передает сигнал в систему регистрации. Сигнал с автогенератора представляет собой частотно модулированный гармонический сигнал, в котором величина изменения резонансной частоты непосредственно связана с величиной деформации. Преобразование Фурье полученного сигнала позволяет определить амплитуды и частоты каждой из гармоник динамических деформаций.

Использование датчиков на ПАВ представляется достаточно перспективным, поскольку технология изготовления таких устройств делает принципиально возможным создание чувствительных элементов непосредственно на поверхности исследуемого объекта, без клеевого слоя, который может сглаживать деформации, испытываемые датчиком. Кроме того, ПАВ-датчики, благодаря использованию беспроводного способа передачи информации, позволят в перспективе отказаться от токоємников для тензометрирования вращающихся объектов.

## Работоспособность устройств на ПАВ при высоких температурах

Среди материалов пьезоэлектрических подложек, сохраняющих работоспособность при температуре выше 1000°C, самым часто используемым является лантан-галлиевый силикат, или лангасит ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ). Более широко распространенные материалы подложек устройств на ПАВ характеризуются меньшими значениями максимальной температуры, но также значительно превосходят по этому показателю полупроводниковые компоненты и элементы питания. В частности, подтверждена работоспособность подложек из ST-X-среза кварца, Y-Z-среза ниобата лития и X-Y-среза лангасита при температурах до 550, 650 и 1085°C соответственно [1]. Помимо монокристаллических пьезоэлектриков интерес представляют и пьезоэлектрические пленки, например работоспособность устройства на основе пленки AlN, нанесенной на сапфир, проверена при температурах до 500°C [2].

Устройства на ПАВ с электродами из алюминия (наиболее используемого материала электродов) могут работать до 400°C [3]. Выбор материала электродов для устройств, стойких к более высоким температурам, обсуждался во многих публикациях (например, [1; 4–6]), и в настоящее время в этом направлении продолжается интенсивная работа. Основой таких электродов являются тугоплавкие металлы: Pt, Ir, Rh, W, Mo и др. Важным является не только достижение

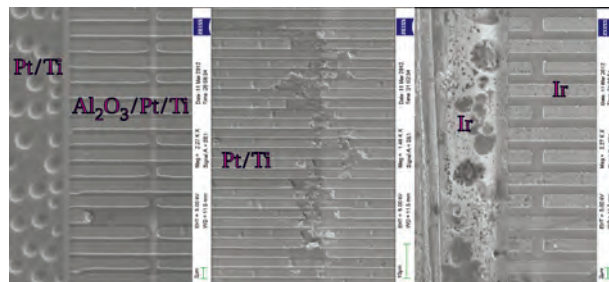


Рис. 1. Снимки электродов после воздействия высокой температуры, сделанные посредством электронного микроскопа

определенной температуры, но и время, в течение которого устройство сохраняет работоспособность при ее воздействии. Резонаторы, исследованные в [4], сохраняют работоспособность после отжига при 650°C в течение 1000 ч, несмотря на повреждения электродов (рис. 1).

Дополнительное диэлектрическое покрытие позволяет защитить как металл электродной структуры, так и незакрытую им поверхность подложки, а также ослабить взаимодействие между материалами подложки и электродов [4; 5].

## Типы датчиков на основе ПАВ

**Датчики температуры.** Измерение температуры является наиболее хорошо изученной областью применения беспроводных датчиков на ПАВ, которое насчитывает уже более 30 лет. В ряде публикаций (например, [7; 8]) экспериментально показана возможность использования ПАВ-устройств на подложках из лангасита в качестве чувствительных элементов датчиков температуры, работающих в диапазоне от комнатной температуры до 700...1000°C. Температурный коэффициент частоты существенно зависит от ориентации подложки относительно кристаллографических осей анизотропного материала, которая характеризуется тремя углами:  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  (углы Эйлера). Пример различного характера зависимости частоты от температуры для нескольких подложек (рис. 2), исследованных в [7], демонстрирует необходимость выбора ориентации подложки в соответствии с рабочим диапазоном температур датчика.

В работе [9] описывается измерение температуры ротора ГТД, достигающей 525°C (при частоте вращения ротора до 65 000 об/мин). Датчик температуры для температурной компенсации показаний датчика концентрации кислорода в выхлопных газах тестировался при температурах до 700°C [10].

**Датчики крутящего момента.** Влияние деформации на резонансную частоту резонаторов на ПАВ позволяет измерять деформацию объекта, на котором закреплен резонатор. На этом основаны датчики механических величин, в которых используются чувствительные элементы на ПАВ. Примером успешного применения такого рода датчиков являются датчики для измерения крутящего момента на вращающихся валах [11], которое осуществляется на основе измерения деформации вала.

Опрос датчика производится по радиоканалу с помощью бесконтактного вращающегося сочленения и позволяет избежать использования скользящих контактов. Наиболее распространенная конструкция такого датчика предполагает жесткое крепление пары резонаторов на ПАВ к участку вала с плоской поверх-

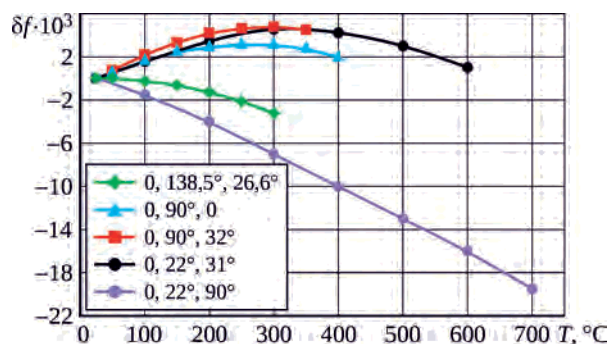


Рис. 2. Зависимость относительного изменения измеренной резонансной частоты от температуры резонаторов на подложках из лангасита с ориентацией, определяемой углами Эйлера ( $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ )

ностью под углом  $\pm 45^\circ$  к оси вала. При скручивании вала один из резонаторов растягивается вдоль направления распространения ПАВ и сжимается в перпендикулярном ему направлении, а другой резонатор, напротив, сжимается в направлении распространения ПАВ и растягивается в перпендикулярном направлении.

На рис. 3 сравнивается чувствительность датчиков, в которых использованы резонаторы из кварца и лангасита. Под чувствительностью ( $S$ ) понимается отношение изменения разности резонансных частот к вызывающему его изменению крутящего момента.  $S$  нормирована на чувствительность, характерную для пары резонаторов, у которых изменение резонансной частоты происходит только с изменением размера резонатора при деформации. Отличие нормированной чувствительности ( $S_{\text{норм}}$ ) от единицы связано с влиянием деформации на скорость ПАВ, которое сильно зависит от ориентации подложки. Как видно из приведенных линий уровня  $S_{\text{норм}}$ , изменение частоты под влиянием изменения скорости ПАВ может в несколько раз превышать изменение под влиянием изменения размера и в зависимости от ориентации подложки иметь как совпадающий с ним знак, так и противоположный.

Максимально достижимая чувствительность при использовании лангасита почти вдвое ниже, чем при применении кварца. Тем не менее вполне приемлемые значения чувствительности (не ниже, чем у некоторых практически используемых подложек из кварца) могут быть получены и для резонаторов из лангасита, что может быть использовано для создания датчика крутящего момента, работающего при повышенных температурах. Подробное рассмотрение зависимости характеристик датчика от ориентации подложки резонаторов приведено в [12] для кварца и в [13] для лангасита.

Помимо специального выбора материалов подложки и электродов для высокотемпературного датчика крутящего момента, также необходимо специальное крепление датчика к поверхности вала, позволяющее надежно

преобразовывать деформацию вала в деформацию резонатора. Возможность реализации такого крепления при температурах 300, 400 и 500°C показана в [14]. Другой способ обеспечения крепления датчика к деформирующемуся объекту заключается в использовании чувствительного элемента на основе тонкопленочного пьезоэлектрика, нанесенного непосредственно на объект. Так, в [15] показана возможность измерения деформации при температурах 25...400°C посредством измерения частоты резонатора на ПАВ, изготовленного на основе пьезоэлектрической пленки нитрида алюминия (AlN), нанесенной на металл методом тонкопленочного напыления.

**Датчики вибродеформации.** Датчики для измерения динамических (быстропеременных) деформаций – вибродеформаций – основаны на измерении деформа-

ции вибрирующего объекта посредством измерения деформации закрепленного на нем чувствительного элемента на ПАВ (аналогично датчикам крутящего момента). При этом для измерения параметров динамических деформаций (таких как частота и амплитуда) от датчика деформации требуется более высокое быстродействие, чем при измерении других механических величин. Измерение вибродеформаций посредством беспроводных датчиков на ПАВ на данный момент не имеет столь широкого применения, как измерение температуры или крутящего момента, однако представляет большой интерес, в том числе для измерения параметров динамических деформаций деталей авиационных двигателей (в частности, лопаток турбин и компрессоров).

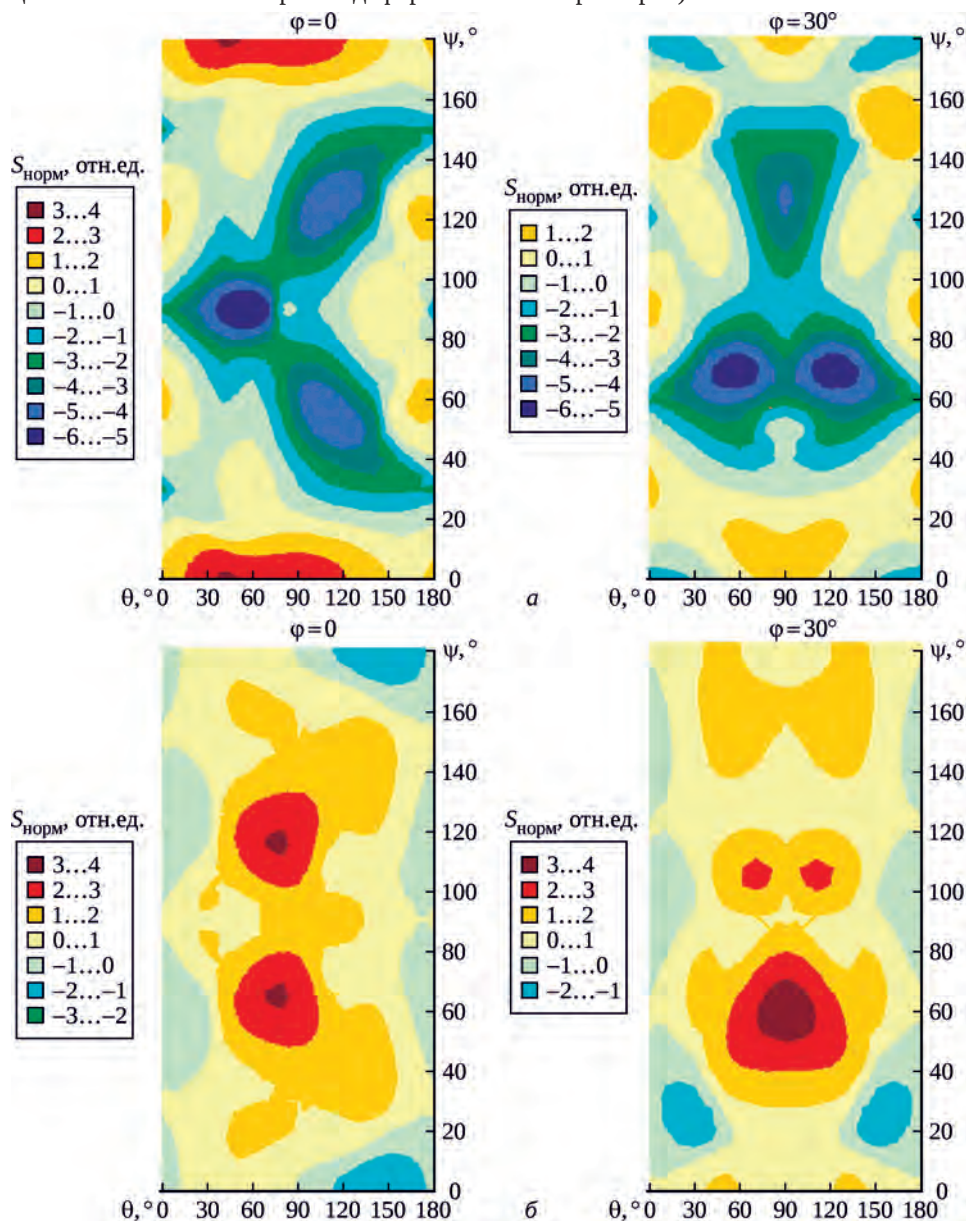


Рис. 3. Зависимость нормированной чувствительности датчика крутящего момента от значений углов Эйлера для кварца (а) и для лангасита (б)

В течение нескольких лет авторы данной статьи вели экспериментальную работу по исследованию возможности применения датчиков на ПАВ для измерения параметров вибродеформаций как на неподвижных, так и на вращающихся объектах. Предварительные экспериментальные исследования проводили при температуре исследуемых образцов, соответствующей комнатной температуре.

В качестве чувствительных элементов использовали кварцевые резонаторы на ПАВ с резонансной частотой около 224 МГц. Резонаторы приклеивали к закрепленным на валу электродвигателя камертонам с частотой механического резонанса 512 Гц. Камертоны были выбраны в качестве удобных для исследования моделей вибрирующих объектов ввиду их свойства после кратковременного механического воздействия (удара) вибрировать с известной частотой значительное время (несколько секунд). Измерения проводили при частоте вращения вала 900...2700 об/мин.

Исследовалась возможность создания беспроводных датчиков вибродеформации двух типов: с использованием автогенератора, частота колебаний которого определяется резонансной частотой резонатора на ПАВ, и с опросом датчика путем его облучения радиоимпульсами и приема переизлученных им сигналов. В первом случае резонатор на ПАВ был подключен в качестве цепи обратной связи к схеме миниатюрного автогенератора, выход которого подключался к вращающемуся сочленению (паре антенн ближнего поля). При осуществлении эксперимента с автогенератором на валу закреплялась также плата автогенератора и элемент питания (рис. 4). Во втором случае резонатор на ПАВ был подключен непосредственно к вращающемуся сочленению для опроса внешними сигналами без размещения на вращающемся валу аккумулятора и автогенератора, содержащего полупроводниковые элементы.

Датчик без автогенератора и элементов питания опрашивался в импульсном режиме. Импульсы опрашивающего сигнала с несущей частотой, близкой к резо-

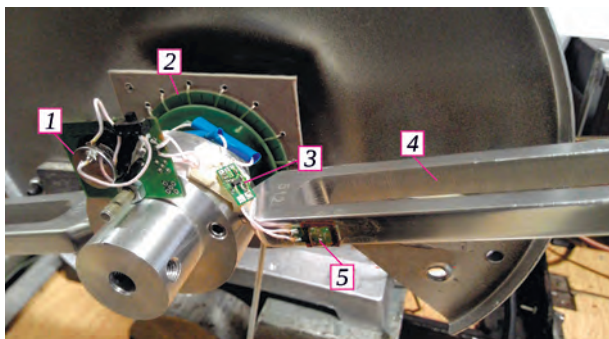


Рис. 4. Фотография стенда для испытания беспроводных датчиков вибродеформации:

1 – элемент питания; 2 – вращающееся сочленение; 3 – автогенератор; 4 – камертон; 5 – резонатор на ПАВ

нансной частоте резонатора, формировались с помощью переключателя, управляемого генератором импульсов, и излучались антенной передатчика. Приемник имел отдельную антенну и был защищен от воздействия опрашивающего сигнала таким же управляемым переключателем, включенным между антенной и приемником. Резонатор был подключен к ротору вращающегося сочленения, а его статор – к антенне датчика, находящейся от антенн передатчика и приемника на расстоянии, превышающем 1 м. Сигнал от датчика представляет собой свободные электрические колебания резонатора на ПАВ, наблюдаемые после выключения опрашивающих импульсов. Резонансная частота датчика изменяется в зависимости от деформации резонатора, вызванной вибрацией, в результате чего получаемый от датчика сигнал имеет одновременно амплитудную и частотную модуляцию [16].

Сигнал, получаемый от датчика с автогенератором, при наличии вибрации имеет характер частотно-модулированного колебания с мгновенным значением частоты, определяемым резонансной частотой резонатора, зависящей от деформации резонатора на ПАВ.

В обоих случаях для демодуляции (как частотной, так и амплитудной) использовался специальный демодулятор сигнала. Сигнал поступал на него после преобразования частоты в смесителе, при котором спектр переносился в область частот около 100 МГц для частотной демодуляции или в область частот около 1,5 МГц для амплитудной демодуляции. Демодулированный сигнал поступал на аналого-цифровой преобразователь и записывался в виде файлов.

На рис. 5 приведена осциллограмма демодулированного частотным демодулятором сигнала, полученного от датчика с автогенератором. В демодулированном сигнале преобладает составляющая, представляющая собой экспоненциально затухающие колебания с частотой около 512 Гц (это отчетливо видно в правом верхнем углу рисунка), соответствующей собственной частоте камертона, колеблющегося после ударного механического воздействия. По прошествии 12 с полезный сигнал неразличим на фоне шума. Амплитуда сигнала в начале свободных колебаний камертона примерно в 80 раз больше амплитуды сигнала через 12 с. На рис. 6 показана спектральная плотность демодулированного сигнала. В правом верхнем углу рисунка видно, что измерение частоты демодулированного сигнала позволяет определять частоту вибродеформаций. В левой верхней части рисунка показана часть спектра сигнала, вносящая наиболее заметный вклад в шум и помехи, возникающие при включении электродвигателя в диапазоне частот до 250 Гц.

На рис. 7 изображена осциллограмма демодулированного амплитудным демодулятором сигнала, полу-

ченного от датчика без автогенератора. В этом сигнале также содержится составляющая, соответствующая экспоненциально затухающим колебаниям камертона. Но в данном случае она не столь сильно превышает шум и помехи в начальный момент колебаний камертона, как в случае сигнала от датчика с автогенератором, и становится неразличимой на фоне шума через 3...6 с. Амплитуда сигнала в начале свободных колеба-

ний камертона примерно в 3,5 раза больше амплитуды сигнала через 3 с.

При более сильном воздействии на камертон амплитуда его колебаний в начале процесса имеет большие значения, что может приводить к искажению полученной временной зависимости вибродеформации на начальных участках свободных колебаний камертона [17]. В случае датчика с автогенератором это обуслов-

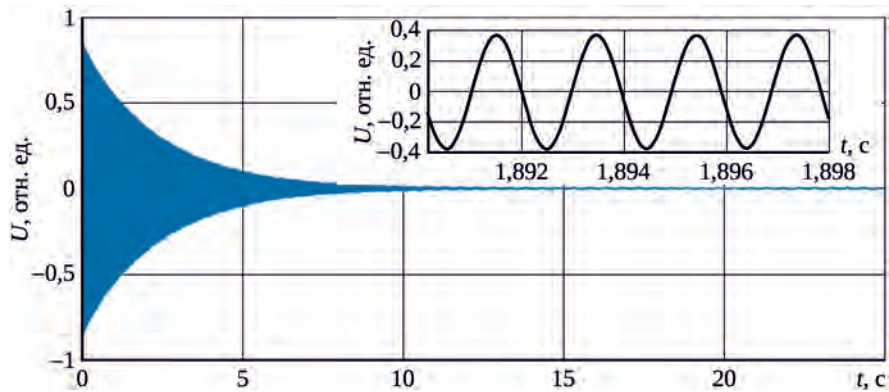


Рис. 5. Демодулированный частотным демодулятором сигнал от датчика с автогенератором

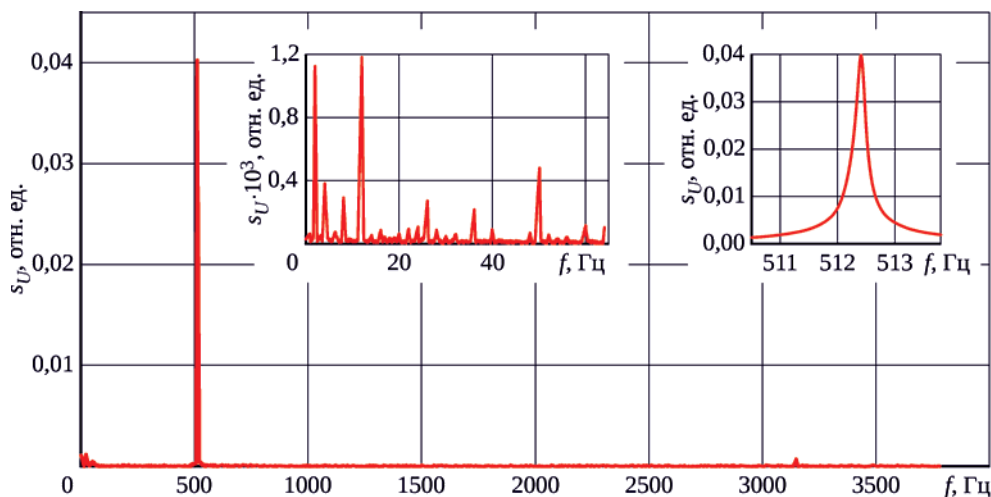


Рис. 6. Спектральная плотность демодулированного частотным демодулятором сигнала от датчика с автогенератором

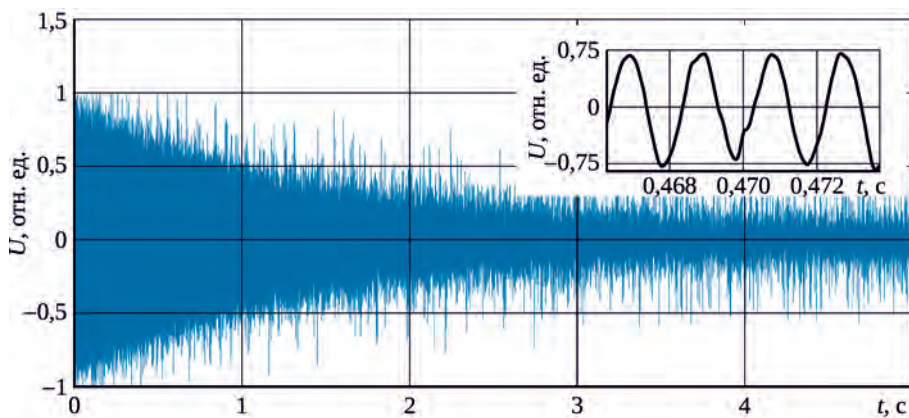


Рис. 7. Демодулированный амплитудным демодулятором сигнал от датчика без автогенератора

лено рабочей полосой приемника (в частности, полосой частотного демодулятора); при конструировании датчика для практического применения, а не для исследований аналогичное ограничение величины измеряемой вибродеформации сверху будет обусловлено в первую очередь ограниченной разрешенной полосой частот. Демодулированный амплитудным демодулятором сигнал от датчика без автогенератора начинает искажаться при меньшей амплитуде вибрации, чем сигнал от датчика с автогенератором. Это связано с тем, что изменение резонансной частоты резонатора может многократно превышать ширину спектра импульса опроса (несущая частота которого в данных экспериментах была неизменной) и ширину резонансного пика частотной характеристики резонатора.

Проведенные эксперименты подтвердили возможность создания беспроводных датчиков вибродеформации различных типов. Датчик с автогенератором, частота которого определяется резонатором на ПАВ, может использоваться только при сравнительно невысокой температуре, но обеспечивает лучшую разрешающую способность и более широкий динамический диапазон измеряемых параметров. Эти преимущества обусловлены более высокой мощностью излучаемого им сигнала, не зависящей от значения измеряемой величины (информация о вибродеформации содержится в его частотной модуляции). Датчик второго типа потенциально может работать при более высоких температурах, благодаря отсутствию активных радиоэлектронных компонентов и элементов питания в составе датчика, размещенного непосредственно на объекте, вибродеформация которого измеряется.

На сегодняшний день известны публикации, посвященные измерению параметров вибродеформаций при повышенных температурах посредством датчика на ПАВ только при его проводном соединении с устройствами, обеспечивающими его опрос. Так, в [14] приведены результаты измерения амплитуды вибродеформации при температуре 300, 400 и 500°C. В этих экспериментах в качестве чувствительного элемента использовался резонатор на ПАВ из лангасита с электродами из палладия. Передача на резонатор опрашивающего сигнала и передача сигнала от резонатора к анализатору спектра осуществлялась посредством высокотемпературного коаксиального кабеля. Хотя с повышением температуры наблюдалось снижение чувствительности датчика к вибродеформации, датчик сохранял работоспособность при температурах до 500°C. Эти данные подтверждают целесообразность продолжения исследований по созданию беспроводного датчика вибродеформаций, предназначенного для работы при повышенных температурах.

## Заключение

Работоспособность устройств на ПАВ при высоких температурах подтверждается как исследованиями, в которых принимали участие авторы данной статьи, так и множеством других публикаций. Имеющиеся в них данные показывают возможность сохранения устройствами на ПАВ работоспособности при температурах до 700°C (потенциально возможно достижение и некоторое превышение 1000°C) и содержат информацию о выборе подложек и материалов электродов для достижения соответствующих рабочих температур. Сохранение работоспособности устройств при их продолжительном пребывании в условиях высокой температуры все еще является актуальной задачей, над которой работают разные научные группы во всем мире.

Существуют примеры использования беспроводных датчиков на ПАВ для измерения температуры в диапазоне до 700°C, в том числе известны экспериментальные датчики температуры для применения в авиадвигателях. Датчики на ПАВ, основанные на измерении деформации, широко используются для беспроводного измерения механических величин (в частности, крутящего момента) в нормальных условиях. Вместе с тем, есть публикации, показывающие возможность измерения деформации посредством датчиков на ПАВ при температурах до 500°C. Такие эксперименты демонстрируют возможность создания беспроводных датчиков на ПАВ и для измерения механических величин при повышенных температурах.

Эксперименты, проведенные авторами данной статьи, показывают возможность создания беспроводных датчиков вибродеформации с использованием чувствительного элемента на ПАВ. Такие датчики позволяют измерять вибродеформации в том числе на вращающихся объектах без гальванического контакта датчика с активными электронными компонентами и источниками питания.

Наряду с этим опубликованы результаты экспериментов, демонстрирующих измерение амплитуды вибродеформаций с помощью датчика на ПАВ при температурах до 500°C.

Объединение опыта по применению устройств на ПАВ при высоких температурах и опыта по беспроводным измерениям вибродеформаций посредством датчиков на ПАВ позволит создать беспроводные пассивные датчики механических величин, работающие при температурах, свойственных отдельным узлам авиадвигателей.

*Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-32-90090.*

---

## Литература / Reference

1. Surface acoustic wave sensors for high-temperature applications / J. Hornsteiner, E. Born, G. Fischerauer, E. Riha // Proceedings of the 1998 IEEE International Frequency Control Symposium / sponsored by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society. 1998. P. 615–620.
2. Platinum/AlN/sapphire SAW resonator operating in GHz range for high temperature wireless SAW sensor / E. Blampain, O. Elmazria, O. Legrani, S. McMurtry, F. Montaigne, C. Fu, K.K. Lee, S.S. Yang // 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2013), Prague, Czech Republic, 21–25 July 2013. IEEE, 2013. P. 1081–1084.
3. Remote sensing of physical parameters by means of passive surface acoustic wave devices (“ID-TAG”) / Schmidt F., Sczesny O., Reindl L., Magori V. // 1994 IEEE Ultrasonics Symposium: proceedings / M. Levy, S.C. Schneider, B.R. McAvoy (ed.). IEEE, 1994. Vol. 1. P. 589–592.
4. Optimization of wafer orientation and electrode materials for LGS high-temperature SAW sensors / S. Sakharov et al. // 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium, Dresden, Germany, 7–10 October 2012. IEEE, 2012. P. 1525–1528.
5. Thin films and techniques for SAW sensor operation above 1000°C / R. Behanan et al. // 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2013), Prague, Czech Republic, 21–25 July 2013. IEEE, 2013. P. 1013–1016.
6. Characterization of materials for the design of wireless SAW sensors in a high temperature environment / G. Wong, T. Baron, L. Arapan, B. Dulmet, J.-M. Lesage // 2016 IEEE International Frequency Control Symposium, New Orleans, Louisiana, USA, 9–12 May 2016. IEEE, 2016. P. 464–468.
7. Theoretical and experimental investigation of langasite as material for wireless high temperature SAW sensors / S. Sakharov, S. Kondratiev, A. Zabelin, N. Naumenko, A. Azarov, S. Zhgoon, A. Shvetsov // 2010 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2010), San Diego, California, USA, 11–14 October 2010. IEEE, 2010. P. 535–538.
8. Pulse-mode temperature sensing with langasite SAW devices / P. Zheng, T.-L. Chin, D.W. Greve, I.J. Oppenheim, L. Cao // 2010 IEEE International Frequency Control Symposium (FCS 2010), Newport Beach, California, USA, 1–4 June 2010. IEEE, 2010. P. 297–300.
9. Wireless acoustic wave sensors and systems for harsh environment applications / M. Pereira da Cunha et al. // 2011 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet 2011), Phoenix, Arizona, USA, 16–19 January 2011. IEEE, 2011. P. 41–44.
10. 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), San Francisco, California, USA, 2–5 May 2011. IEEE, 2011. P. 72–75.
11. Non-contact torque sensors based on SAW resonators / J. Beckley, V. Kalinin, M. Lee, K. Voliansky // Proceedings of the 2002 IEEE International Frequency Control Symposium & PDA Exhibition / symposium sponsored by: IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society; exhibition sponsored by: Piezoelectric Devices Association. 2002. P. 202–213.
12. Deformation sensitive cuts of quartz for torque sensor / A. Shvetsov, S. Zhgoon, A. Lonsdale, S. Sandacci // 2010 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2010), San Diego, California, USA, 11–14 October 2010. IEEE, 2010. P. 1250–1253.
13. Швецов А.С., Жгун С.А., Лобов Г.Д. Влияние деформации на лангаситовые ПАВ-резонаторы в датчике крутящего момента // XX Международная конференция «Электромагнитное поле и материалы». 2012. С. 562–568. Shvetsov A.S., Zhgoon S.A., Lobov G.D. Vliianie deformatsii na langasitovye PAV-rezonatory v datchike krutiashchego momenta [Effect of deformation on langasite SAW-resonators in a torque sensor]. XX International Conference "Electromagnetic Field and Materials". 2012. P. 562–568.
14. Maskay A., Pereira da Cunha M. High-temperature microwave acoustic vibration sensor // 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2018), Kobe, Japan, 22–25 October 2018. IEEE, 2018. P. 1516–1518.
15. 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.
16. Maskay A., Hummels D.M., Pereira da Cunha M. In-phase and quadrature analysis for amplitude and frequency modulations due to vibrations on a surface-acoustic-wave resonator // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2019. Vol. 66, nr 1. P. 91–100.
17. Merkulov A., Shvetsov A., Zhgoon S. SAW-based wireless measurements of the fast varying deformations in rotating vibrating objects // 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium, Glasgow, United Kingdom (IUS 2019), 6–9 October 2019. IEEE, 2019. P. 2545–2548.

*Материалы получены редакцией 16.09.2020*

---