

УДК 534.6: [539+544]:519.2

И.Ю. Аникин¹, В.В. Залетин², О.А. Савицкий³, В.Н. Сороковиков^{1,4}

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
Пермь, Российская Федерация

²НПО «Специальных материалов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева,
Москва, Российская Федерация

⁴Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Москва, Российская Федерация

КОМПЛЕКСНАЯ ДИАГНОСТИКА КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Обоснована возможность построения систем реального времени, обеспечивающих вибродиагностику и акустическую диагностику корпусных конструкций сложных техногенных объектов на основе распределенных волоконно-оптических датчиков. Рассмотрена задача обнаружения и локализации источников акустической эмиссии с помощью размещенной на поверхностной корпусной конструкции волоконно-оптической измерительной системы. При решении задачи обнаружения поток сигналов акустической эмиссии характеризуется статистически средней частотой следования импульсов, их амплитудным и временным распределением. Все параметры эмиссионных сигналов являются случайными величинами с априори неизвестными характеристиками. Для решения задачи обнаружения используются алгоритм последовательного анализа Вальда по критерию обнаружения «М из N». Разработана и изготовлена волоконно-оптическая измерительная система, сочетающая возможности вибродиагностики и акустической диагностики корпусной конструкции. Для повышения помехоустойчивости волоконно-оптической измерительной системы предложено выполнять ее опрос широкополосным сигналом, например, сигналом с линейной частотной модуляцией.

Ключевые слова: акустодиагностика, вибродиагностика, акустическая эмиссия, корпусные конструкции, интегрирующий волоконно-оптический датчик.

I.Y. Anikin¹, V.V. Zaletin², O.A. Savitsky³, V.N. Sorokovikov^{1,4}

¹Perm Scientific and Production Instrument-Making Company,
Perm, Russian Federation

²SPA «Special Materials», Saint Petersburg, Russian Federation

³Acoustic Andreyev Institute, Moscow, Russian Federation

⁴M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

COMPREHENSIVE HULL STRUCTURES DIAGNOSTICS USING A DISTRIBUTED FIBER-OPTIC SENSORS SYSTEM

The possibility of constructing real-time systems that provide vibration diagnostics and acoustic diagnostics of complex man-made objects hull structures based on distributed fiber-optic sensors is substantiated. The problem of detecting and localizing sources of acoustic emission using a fiber-optic measuring system placed on a surface housing structure is considered. When solving the detection problem, the flow of acoustic emission signals is characterized by a statistically average pulse repetition rate, their amplitude and time distribution. All parameters of emission signals are random variables with a priori unknown characteristics. To solve the detection problem, the sequential Wald analysis algorithm is used according to the "M out of N" detection criterion. A fiber-optic measuring system has been developed and manufactured, combining the capabilities of vibration diagnostics and acoustic diagnostics of the hull structure. To increase the noise immunity of a fiber-optic measuring system, it is proposed to interrogate it with a broadband signal, for example, a signal with linear frequency modulation.

Keywords: acoustic emission diagnostics, vibration diagnostics, hull structures, optical fiber, integrating fiber-optic sensor.

Системы распределенных волоконно-оптических датчиков предоставляют широкие возможности для акусто-вибродиагностики корпусных конструкций сложных техногенных объектов и могут быть основой для создания соответствующих диагностических технических средств.

Оценка динамических параметров конструкций, имеющих большую протяженность и площадь поверхности, таких, например, как крылья и фюзеляж самолета, корпуса надводных и подводных кораблей и т.д., с заведомо неизвестным амплитудно-фазовым распределением уровней нормального смещения поверхности, всегда представлялась сложной задачей по определению двумерного поля вибраций. Для решения такой задачи требуется установка системы датчиков в узлах сетки, шаг которой не превышает наименьшего пространственного масштаба поля. В результате, для того чтобы контролировать всю площадь поверхности сложной конструкции, необходимо использовать тысячи (десятки тысяч) применяемых в настоящее время акселерометров, тензодатчиков, предварительных усилителей и другой аппаратуры, что с практической точки зрения трудно осуществимо. Кроме того, помимо высоких требований к метрологическим характеристикам датчики

должны обладать высокой надежностью, долговечностью, стабильностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением, совместимостью с электронными устройствами обработки информации и иметь небольшую стоимость.

Этим требованием в максимальной степени соответствует томографическая система интегрирующих волоконно-оптических датчиков (ИВОД), которая позволяет выполнять оценку распределения амплитуд колебаний по поверхности корпуса и решить задачу локализации источников возникновения повышенных вибраций [1, 2].

Другим физическим явлением, характеризующим состояние корпусных конструкций техногенных объектов во время их эксплуатации, является акустическая эмиссия, т.е. излучение импульсов упругих волн ультразвукового диапазона (от нескольких сотен килогерц до единиц мегагерц) из областей конструкции, где происходит локальная динамическая перестройка структуры ее материала [3–6]. Особенно важны случаи, когда такая перестройка является предвестником начала усталостного разрушения ответственных конструкций вследствие воздействия циклических динамических или ударных нагрузок на объекты авиационно-космической техники [7, 10]. Метод акустической эмиссии (АЭ) основан на регистрации параметров сигналов АЭ, включая время прихода, частоту их следования, интенсивность и др.

Акустико-эмиссионные методы диагностики и неразрушающего контроля конструкций благодаря своей высокой информативности, достоверности и оперативности находят все большее применение в диагностических информационных системах реального времени. Такие системы могут быть источниками информации в аппаратно-программном комплексе оперативного контроля за состоянием корпусных конструкций, находящихся как под воздействием высоких динамических нагрузок, так и статических нагрузок, близких к предельным.

Для обеспечения непрерывности мониторинга приём и преобразование сигналов акустической эмиссии от источника возникновения в процессорный модуль для последующей обработки должны осуществляться системой встроенных в конструкцию или прикрепленных к элементам конструкции датчиков. В работах [8–12] показана перспективность построения систем мониторинга реального времени объектов ракетно-космической, авиационной техники и подводных аппаратов на основе интегрированной сети распределенных волоконно-оптических датчиков. Применение таких датчиков позволяет объединить функции

приема, преобразования и передачи оптических сигналов, повысить помехозащищенность, упростить прокладку и крепление датчиков на объекте контроля.

Имеются многочисленные примеры применения распределенных волоконно-оптических систем в целях обеспечения безопасной эксплуатации объектов аэрокосмической отрасли. В [10] показано, что оснащение распределенной волоконно-оптической системой контроля состояния корпусных конструкций коммерческих самолетов позволяет постоянно проверять наличие структурных дефектов, увеличивая периоды между плановыми осмотрами или совсем устраняя их необходимость. В работах [13–16] продемонстрирована эффективность применения системы волоконно-оптических датчиков с решетками Брэгга для контроля динамических нагрузок в фюзеляже, а в [17–21] – для контроля состояния крыльев и спойлеров самолета.

В работах [1, 2, 22, 23] авторами была предложена измерительная система томографического типа на основе распределенных интегрирующих волоконно-оптических датчиков деформации. Такие датчики размещаются на корпусе летательного, надводного или подводного объекта и обеспечивают решение задач шумо- и вибродиагностики корпуса протяженного техногенного объекта.

Оценим возможность обнаружения и локализации источников АЭ с помощью подобной поверхностной волоконно-оптической измерительной системы (ВОИС).

Система распределенных интегрирующих волоконно-оптических датчиков представляет собой регулярную сетку, образованную пересекающимися под углом (в частном случае 90°) оптическими волоконными датчиками, образующими сетку на поверхности или в теле конструкции (рис. 3, б). Размер формируемых таким образом ячеек сетки из волоконно-оптических датчиков определял разрешающую способность метода. Далее под термином «интегрирующий волоконно-оптический датчик» (ИВОД) мы будем понимать отрезок оптического волновода, прикрепленный к поверхности корпуса, для которого тем или иным способом реализована возможность измерения вариаций его длины, вызванной деформациями корпуса.

Таким образом, отклик каждого датчика на поле деформаций конструкции, возникающий при распространении сигналов от источников акустической эмиссии, пропорционален его абсолютному удлинению Δl в поле волн, которое в линейном приближении определяется выражением:

$$\Delta l = \int_0^L \epsilon_{ik} \frac{dx_i}{dl} \frac{dx_k}{dl} dl, \quad (1)$$

где использована тензорная форма записи с суммированием по повторяющимся индексам. Интегрирование в (1) выполняется вдоль пространственной кривой – направляющей, форма которой задается при прокладке оптического волновода (волокна) в теле или на поверхности диагностируемой конструкции. Направляющая кривая для отдельного датчика системы задана в (1) параметрически системой уравнений $x_i = x_i(l), i = 1, 2, 3, l \in (0, L)$. Из (1) следует, что локальная чувствительность датчика к полю деформаций акустоэмиссионного сигнала определяется произведениями $\frac{dx_i}{dl} \frac{dx_k}{dl}$, которые имеют смысл направляющих косинусов касательной в точке к кривой, описываемой оптическим волноводом.

В случае, если конструкция, на которой размещен волновод оптического датчика, представляет собой плоскую пластину, то (1) в развернутой записи принимает вид:

$$\Delta l = \int_0^L \epsilon_{11} \left(\frac{dx}{dl} \right)^2 + \epsilon_{22} \left(\frac{dy}{dl} \right)^2 + \epsilon_{12} \left(\frac{dx}{dl} \right) \left(\frac{dy}{dl} \right) dl, \quad (2)$$

причем $\left(\frac{dx}{dl} \right) = \cos \alpha$, $\left(\frac{dy}{dl} \right) = \cos \beta$, $(\cos \alpha)^2 + (\cos \beta)^2 = 1$.

Для корпусной оболочки цилиндрической формы удобно применить цилиндрическую систему координат с осью z , совпадающей с осью симметрии корпусной оболочки. Тогда удлинение каждого датчика ВОИС, размещенного на этой оболочке, будет следующим:

$$\Delta l = \int_0^L \epsilon_{\varphi\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dl} \right)^2 + \epsilon_{zz} \left(\frac{dz}{dl} \right)^2 + \epsilon_{\varphi z} \left(\frac{d\varphi}{dl} \right) \left(\frac{dz}{dl} \right) dl, \quad (3)$$

где функции $\varphi = \varphi(l), z = z(l)$ задают расположение ВОИС ИВОД на оболочке.

Входящие в выражения (1)–(3) направляющие косинусы $\frac{dx_i}{dl}$ обуславливают пространственную (угловую) избирательность ИВОД

к различным компонентам тензора деформаций, вызванных распространением по конструкции сигнала акустической эмиссии.

Для определения отклика ИВОД на воздействие с произвольной временной зависимостью найдем импульсную характеристику датчика. При этом будем считать, что сенсор ВОИС представляет собой отрезок прямой, расположенной на участке поверхности корпуса аппарата в виде упругой металлической оболочки. Размеры участка корпусной конструкции будем считать существенно меньшими радиуса кривизны корпуса. Тогда рассматриваемый фрагмент корпуса можно считать тонкой пластиной.

Введем полярную систему координат на срединной плоскости пластины с началом в точке O расположения источника эмиссии. Взаимное расположение источника эмиссии и отрезка ИВОД с концами в точках 1 и 2 представлено на рис. 1. Проекция O_1 точки O на отрезок ИВОД отстоит от начала координат на расстоянии y_0 .

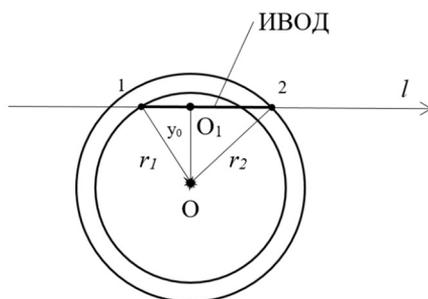


Рис. 1. Взаимное расположение источника сигнала акустической эмиссии и отрезка ИВОД

При этом сам источник эмиссионного сигнала будем считать точечным монополюсного типа. Такая модель соответствует часто встречающемуся на практике источнику типа раскрывающейся вертикальной микротрещины.

Источник эмиссии создает в пластине поле механических напряжений, которые распространяются в ней в виде круговых волн. В принятом здесь приближении распространение волн происходит без волноводной дисперсии с постоянной фазовой скоростью [24]:

$$c_{pl} = \sqrt{\frac{4\mu(\lambda + \mu)}{\rho(\lambda + 2\mu)}}, \quad (4)$$

что верно для относительно низких частот $f < \frac{c_{pl}}{2d}$. В (4) и далее λ , μ – постоянные Ламе материала оболочки, ρ – его плотность, d – толщина пластины.

Обозначая импульсную характеристику интегрирующего датчика через $G_l(l, t)$ и используя выражение (2), записанное в полярной системе координат, получим:

$$G_l(l, t) = \Delta l(t) \left| G_2(r, t) = \int_l \varepsilon_{rr}(r(l), t) \left(\frac{dr}{dl} \right)^2 dl, \right. \quad (5)$$

где $r(l)$ – радиус-вектор точки фронта волны, пересекающего линию датчика в точке отрезка ИВОД, задаваемой параметром l , ε_{rr} – компонента тензора деформаций, $G_2(r, t)$ – функция Грина двухмерного волнового уравнения, имеющая вид:

$$G_2(r, t) = \frac{\theta\left(t - \frac{r}{c_{pl}}\right)}{2\pi c_{pl} \sqrt{t^2 - \left(\frac{r}{c_{pl}}\right)^2}}. \quad (6)$$

В выражении (6) $\theta\left(t - \frac{r}{c_{pl}}\right)$ – функция Хевисайда от бегущего аргумента $t - \frac{r}{c_{pl}}$. Полагая в (5)

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial G_2(r, t)}{\partial r},$$

получим:

$$G_l(l, t) = \int_l \frac{\partial G_2}{\partial r} \left(\frac{dr}{dl} \right)^2 dl = \int_l \frac{dr}{dl} dG_2. \quad (7)$$

Вычисление (7) приводит к результату:

$$G_l(l, t) = \begin{cases} 0, & \text{если } (c_{pl}t)^2 < y_0^2 + l_1^2, \\ \frac{l_1}{2\pi\sqrt{(y_0^2 + l_1^2)((c_{pl}t)^2 - (y_0^2 + l_1^2))}}, & \text{если } (c_{pl}t)^2 \geq y_0^2 + l_1^2, \\ \sum_{i=1}^2 \frac{l_i}{2\pi\sqrt{(y_0^2 + l_i^2)((c_{pl}t)^2 - (y_0^2 + l_i^2))}}, & \text{если } (c_{pl}t)^2 \geq y_0^2 + l_2^2. \end{cases} \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что сигнал от источника, вообще говоря, может состоять из двух реплик. Этот факт потенциально позволяет идентифицировать источник сигнала, проводя его корреляционный анализ.

Оценим возможность использования системы ИВОД для диагностики корпусных конструкций. Сигналы АЭ характеризуются амплитудой, длительностью, формой, временем появления. Поток сигналов АЭ характеризуется статически средней частотой следования импульсов АЭ, их амплитудным и временным распределением. Все параметры АЭ являются случайными величинами с априори неизвестными характеристиками.

Временные характеристики импульса АЭ приведены на рис. 2 и 3 [25]. Типовая форма импульса показана на рис. 2. На рис. 3 отображен процесс расплывания импульса АЭ в объекте с дисперсией акустических волн.

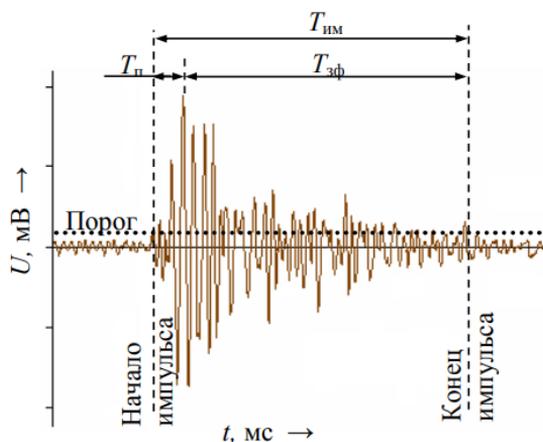


Рис. 2. Импульс АЭ и его временные информативные параметры: $T_{\text{п}}$ — длительность переднего фронта или время нарастания, мкс; $T_{\text{зф}}$ — длительность заднего фронта, мкс; $T_{\text{им}}$ — длительность импульса, мкс [25]

На расстоянии 0,3 м от источника АЭ регистрируется импульс длительностью 400 мкс (см. рис. 3, *a*), на расстоянии 0,6 м длительность импульса составляет уже 600 мкс. Дисперсия существенно искажает начальные временные параметры сигналов: в пластине толщиной 10 мм на частоте 80 кГц их длительность увеличивается на 1300 мкс на каждом метре пути.

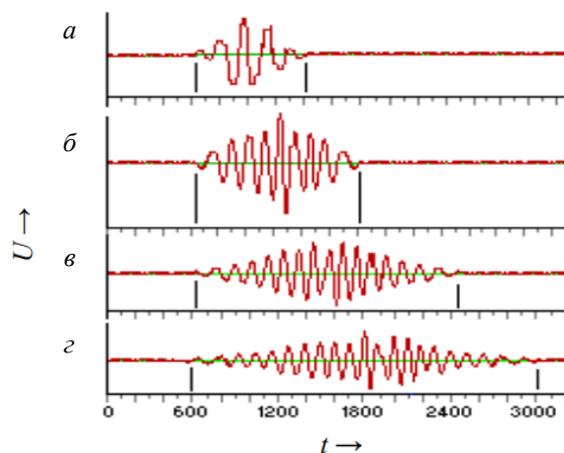


Рис. 3. Сигналы АЭ, регистрируемые в ОК с дисперсией на различных расстояниях от источника [25]: *a* – 0,3; *б* – 0,6; *в* – 0,9; *з* – 1,2 м

Значения амплитуды АЭ при образовании и росте представлены в таблице [25]. При этом предполагалось, что система ИВОД размещается на корпусной конструкции цилиндрической формы, имеющей характерные размеры по длине до 6 м и по радиусу до 3 м [26].

Энергетический спектр АЭ имеет резонансный характер. Несущая частота волнового пакета определяется соотношением [25]:

$$f_0 = \frac{c_t}{\pi R} \sqrt{1 - \left(\frac{c_l}{c_t}\right)^2}, \quad (9)$$

где c_t, c_l – поперечная и продольная скорость звука в материале.

При этом R интерпретируется как характерный размер изменения упругого поля напряжений, вызванных образованием несплошности.

В [27] приводится типовая модель импульса АЭ:

$$u(t) = e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t). \quad (10)$$

Амплитуда импульсов АЭ при образовании и росте трещин

Источники АЭ, величина приращения трещины и условные уровни деформации материала	Амплитуда волны – максимальное смещение частиц среды от положения равновесия ΔX , м
Микротрещины $\Delta a < 10$ мкм. Локальная пластическая деформация в материале, накопление повреждений на микроуровне	$< 10^{-12}$
Мезотрещины $\Delta a = 10 \dots 100$ мкм. Пластическая деформация, начало образования макротрещин	$10^{-12} \dots 10^{-11}$
Макротрещины $\Delta a > 100$ мкм. Образование трещин, формирование магистральной трещины	10^{-11}
Магистральные трещины $\Delta a > 0,5$ мм. Развитие магистральной трещины, предшествующей долому детали	$> 2 \cdot 10^{-9}$

Импульсы АЭ образуют поток сигналов. Интервалы между импульсами АЭ в простейшем случае имеют экспоненциальное распределение [27].

Эффективность обнаружения одиночных импульсов АЭ весьма низкая [27], поэтому применяется метод обнаружения деформаций по потоку сигналов по алгоритму последовательного анализа Вальда [28] или по алгоритму обнаружения M из N [29].

Для проверки возможности использования системы ИВОД в целях не только оценки динамических параметров протяженных конструкций, но и обнаружения АЭ в ПАО «ПНППК» была разработана и изготовлена волоконно-оптическая измерительная система. Экспериментальная установка для определения пороговой чувствительности ВОИС (ПАО «ПНППК») состояла из волоконно-оптической линии (ВОЛ) с 33 последовательно расположенными ИВОД, интеррогатора для опроса датчиков и ПК со специальным программным обеспечением (рис. 4, а). Длина линии и ИВОД составляли 290 и 8 м соответственно. Датчики были защищены от виброакустических помех для измерения собственных шумов ВОИС ИВОД. ВОЛ с ИВОД опрашивалась оптическим импульсом (1550 нм) длительностью до 80 нс с частотой до 375 кГц. Пример формирования измерительной сети томографического типа на основе ВОИС на поверхности трехмерного макета объекта (ТМО) приведен на рис. 4, б (АО «АКИН»).



а

б

Рис. 4. Волоконно-оптическая измерительная система: а – ВОИС; б – измерительная сеть томографического типа на ТМО

Результаты экспериментальных исследований собственных шумов ВОИС с частотой импульсного опроса датчиков 225 кГц приведены на рис. 5, из которых следует, что собственные шумы ВОИС соизмеримы с амплитудой волны смещений частиц от равновесного состояния $\sim 10^{-12}$ при появлении микротрещины в материале (см. таблицу).

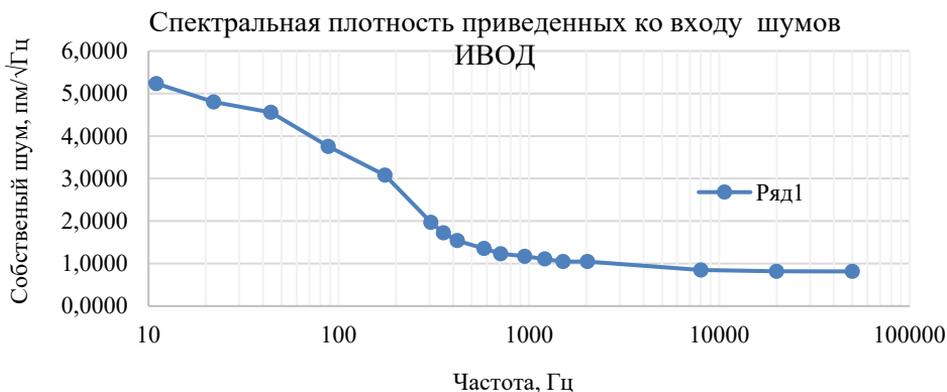


Рис. 5. Результат экспериментальных исследований собственных шумов ВОИС с ИВОД

При таком уровне собственных шумов достоверное обнаружение одиночных импульсов АЭ от микротрещин маловероятно. Вероятность локализации сигналов АЭ ближайшими датчиками к месту его

зарождения возрастает пропорционально корню из отношения длительности импульса АЭ к периоду импульсов опроса ВОЛ, умноженному на число импульсов АЭ за период опроса. Однако верхняя граница рабочего частотного диапазона ВОИС при импульсном опросе не превышает половину частоты опроса, которая ограничена временем прохождения оптического импульса через все датчики.

Для повышения вероятности обнаружения и точности локализации АЭ необходимо повысить верхнюю границу рабочего частотного диапазона и уменьшать собственные шумы ВОИС. Одним из путей снижения собственных помех является опрос ВОИС широкополосным сигналом, например, сигналом с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

На рис. 6 приведена структурная схема ВОИС с опросом сигналом с ЛЧМ.

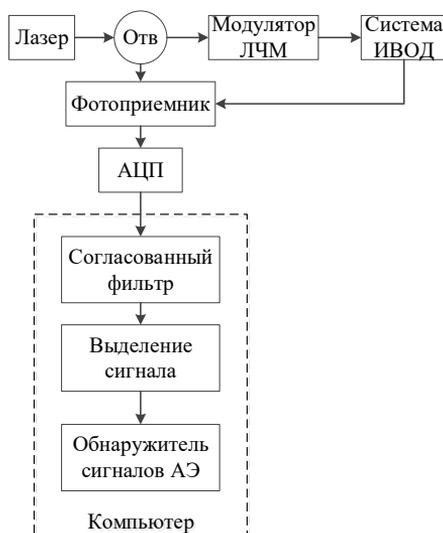


Рис. 6. Структурная схема ВОИС с опросом сигналом с ЛЧМ. Отв – ответвитель

Сигнал после согласованного фильтра является корреляционной функцией сигнала на выходе фотоприемника с сигналом модуляции (сигналом с ЛЧМ):

$$\begin{aligned}
 K(\tau) &= \int_0^{T_{\text{ЛЧМ}}} S_{\text{ФП}}(t) S_{\text{ЛЧМ}}^*(t-\tau) dt = \\
 &= \sum_{n=1}^{N_{\text{ИВОД}}} \exp(-iS_n) \int_0^{T_{\text{ЛЧМ}}} \exp(-iS_n^{\text{фш}}(t)) S_{\text{ЛЧМ}}(t-\tau_n) S_{\text{ЛЧМ}}^*(t-\tau) dt, \quad (11)
 \end{aligned}$$

где $S_{\text{ФП}}(t)$ – сигнал на выходе фотоприемника; $S_{\text{ЛЧМ}}(t)$ – сигнал с ЛЧМ

$$S_{\text{ЛЧМ}}(t) = \sigma(t) \cdot \exp\left(i2\pi \frac{\Delta F \cdot t}{T_{\text{ЛЧМ}}}\right);$$

$$\sigma(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, T_{\text{ЛЧМ}}], \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \quad f - \text{частота лазера; } T_{\text{ЛЧМ}} - \text{длительность им-} \\ \text{пульса ЛЧМ; } L = N_{\text{ИВОД}} \cdot L_{\text{ИВОД}} - \text{оптическая длина системы ИВОД;}$$

$N_{\text{ИВОД}}$ – число ИВОД; $L_{\text{ИВОД}}$ – длина ИВОД; c – скорость света в волокне; ΔF – девиация частоты;

$S_n^{\text{ФШ}}(t)$ – фазовый шум в системе ИВОД;

τ_n – задержка отраженного сигнала от n -го ИВОД, $\tau_n = n \cdot T_{\text{ИВОД}}$;

$T_{\text{ИВОД}}$ – задержка сигнала в ИВОД, $T_{\text{ИВОД}} = 2 \frac{L_{\text{ИВОД}}}{c}$;

S_n – акустический сигнал в n -м ИВОД в одном опросе лазером, $S_n = 2\pi f \tau_n^c$; f – частота лазера; τ_n^c – задержка акустического сигнала в n -м ИВОД.

При $\tau = \tau_n$ корреляционная функция имеет максимумы, которые равны:

$$K_n = K(\tau_n) = \exp(-i2\pi f \tau_n^c) \int_0^{T_{\text{ЛЧМ}}} \exp(-iS_n^{\text{ФШ}}(t)) |S_{\text{ЛЧМ}}(t - \tau_n)|^2 dt = \\ = \sum_{n=1}^{N_{\text{ИВОД}}} \exp(-i2\pi f \tau_n^c) \int_0^{T_{\text{ЛЧМ}}} \exp(-iS_n^{\text{ФШ}}(t)) dt \cong \sum_{n=1}^{N_{\text{ИВОД}}} \exp(-i2\pi f \tau_n^c) (1 + N_n), \quad (12)$$

где $N_n = \frac{-i}{T_{\text{ЛЧМ}}} \int_0^{T_{\text{ЛЧМ}}} S_n^{\text{ФШ}}(t) dt$ – шум в n -м ИВОД.

В формуле (12) учтено, что в системах ИВОД фазовые шумы не более десятков микрорадиан, в частности, в настоящее время в ПАО «ПНППК» достигнут фазовый шум в ИВОД ~ 10 мкрад.

Наблюдаемый в n -м ИВОД акустический сигнал:

$$S_n'' = \arctg\left(\frac{\text{Im}(K_n)}{\text{Re}(K_n)}\right) = S_n^0 + N_n, \quad (13)$$

где S_n^0 – акустический сигнал, $S_n^0 = 2\pi f \tau_n^c$.

Шум в n -м ИВОД представляет случайный нормальный процесс с нулевым математическим ожиданием и спектральной плотностью:

$$\sigma = \sigma_{\text{фш}} \sqrt{\frac{T_{\text{кор}}}{T_{\text{ЛЧМ}}}}, \quad (14)$$

где $\sigma_{\text{фш}}$ – спектральная плотность фазового шума; $T_{\text{кор}}$ – время корреляции фазовых шумов.

Из формулы (15) следует, что спектральная плотность шума в ИВОД обратно пропорциональны длительности сигнала с ЛЧМ. Если длительность сигнала ЛЧМ равна удвоенному времени прохождения импульса опроса системы ИВОД, то уровень шума при опросе системы ИВОД сигналом с ЛЧМ будет в $N_{\text{ИВОД}}$ раз меньше, а ОСП возрастет в $N_{\text{ИВОД}}$ раз.

На рис. 7 приведены результаты моделирования процесса обнаружения акустического импульса АЭ с использованием опроса ВОИС сигналом с ЛЧМ. При моделировании использовались следующие параметры ВОИС: $L_{\text{ИВОД}} = 8 \text{ м}$; $N_{\text{ИВОД}} = 32$; $f = 1,935 \cdot 10^5 \text{ ГГц}$ (длина волны 1550 нм); $\Delta F = 25 \text{ МГц}$; $T_{\text{ЛЧМ}} = 1,124 \text{ мкс}$; $\Delta F = 25 \text{ МГц}$; $F_{\text{оп}}$ – частота опроса системы ИВОД, $F_{\text{оп}} = 1/T_{\text{ЛЧМ}} = 195,2 \text{ кГц}$; спектральная плотность собственных шумов соответствует смещению частиц контролируемого образца $0,8 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ (мезотрещины см. таблицу). Параметры импульса ИВОД: длительность 400 мкс; частота заполнения 80 кГц; смещение частиц контролируемого образца 10^{-11} м . На рис. 7, а приведён сигнал на выходе согласованного фильтра, на рис. 7, б – акустический сигнал АЭ в 15 ИВОД, на рис. 7, в – спектр этого сигнала.

В модельном примере ОСП составило 26 дБ. Для микротрещин величина смещения составляет $\sim 10^{-12} \text{ м}$ (см. таблицу). В этом случае ОСП будет на 20 дБ меньше, чем в модельном примере, и составит 6 дБ. При вероятности ложной тревоги 10^{-3} вероятность правильного обнаружения одиночного импульса АЭ составит 0,8. При алгоритме обнаружения 4 импульсов из 6 вероятность ложной тревоги будет 10^{-6} , а вероятность правильного обнаружения – 0,9.

Выполненные расчеты и проведенные экспериментальные исследования показывают принципиальную возможность обнаружения сигналов АЭ и локализацию их источников системой интегрирующих

волоконно-оптических датчиков с ОСП порядка 20 дБ. Применение частотно модулированных сигналов обеспечивает высокую скорость опроса ИВОД, достаточную для обнаружения и локализации источников сигналов АЭ в корпусных конструкциях в виде оболочек цилиндрической или иной формы.

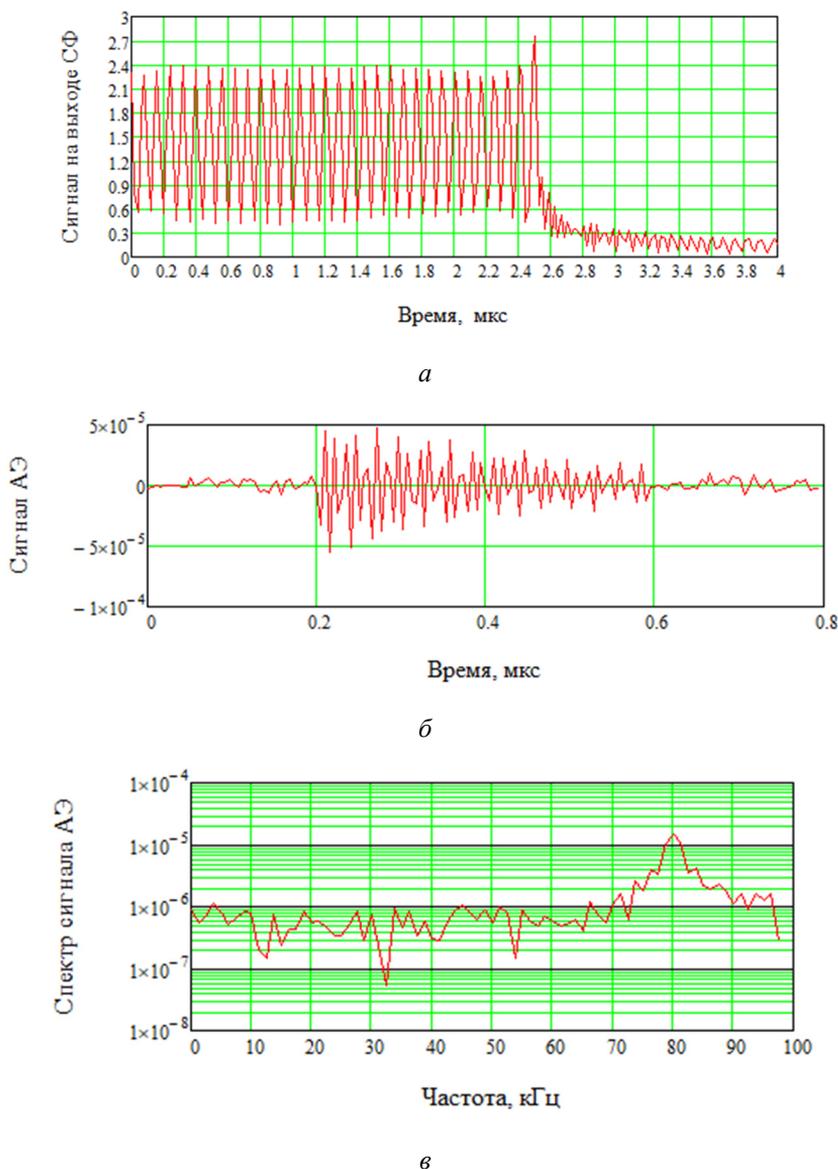


Рис. 7. Результаты моделирования процесса обнаружения импульса АЭ: *а* – сигнал на выходе согласованного фильтра; *б* – акустический сигнал АЭ в 15-м ИВОД; *в* – спектр акустического сигнала АЭ в 15-м ИВОД

Полученные расчетные соотношения позволяют определить отклик отдельного ИВОД на воздействие сигнала акустической эмиссии, определить длину каждого сенсора и их взаимное расположение при размещении корпусных конструкциях объектов аэрокосмической техники и подводных аппаратов.

Полученные результаты демонстрируют возможности распределенной системы интегрирующих волоконно-оптических датчиков для разработки технических средств реального времени, обеспечивающих комплексный мониторинг состояния корпусных конструкций сложных технических объектов, включая шумо- вибродиагностику и контроль напряженно деформированного состояния на основе метода акустической эмиссии.

Список литературы

1. Оценка возможности использования интегрирующих волоконно-оптических датчиков для контроля динамических параметров крыльев и фюзеляжа самолетов / Е.И. Якушенко, В.В. Залетин, О.А. Савицкий, В.Н. Сороковиков // Управление в аэрокосмических системах (УАКС-2020): материалы конф. им. акад. Е.А. Микрина. – 2020. – С. 87–89.

2. Экспериментальное подтверждение возможности использования интегрирующих волоконно-оптических датчиков для контроля динамических параметров протяженных конструкций / Е.И. Якушенко, В.В. Залетин, О.А. Савицкий, В.Н. Сороковиков // Морская радиоэлектроника. – 2019. – № 4. – С. 8–11.

3. Acoustic emission testing: Basics for research–applications in engineering / ed. C.U. Grosse [et al.]. – Springer Nature. – 2021. – 752 p.

4. Ono, K. Application of acoustic emission for structure diagnosis / K. Ono // Diagnostyka. – 2011. – Vol. 58, № 2. – P. 3–18.

5. Dornfeld, D. Application of acoustic emission techniques in manufacturing / D. Dornfeld // Ndt & E International. – 1992. – Vol. 25, № 6. – P. 259–269.

6. Основы диагностики технических устройств и сооружений / Г.А. Бигус, Ю.Ф. Даниев, Н.А. Быстрова, Д.И. Галкин. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2018. – 445 с.

7. Champaigne, K.D. Wireless impact and leak detection and location systems for the ISS and shuttle wing leading edge / K.D. Champaigne, J. Sumners // 2005 IEEE Aerospace Conference. – IEEE, 2005. – P. 1–8.

8. Annamdas, K.K.K. Review on developments in fiber optical sensors and applications / K.K.K. Annamdas, V.G.M. Annamdas // *Proceedings of SPIE*. – 2010. – Vol. 7677. – P. 205–216.

9. Jinachandran, S. Fibre Bragg grating based acoustic emission measurement system for structural health monitoring applications / S. Jinachandran, G. Rajan // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, № 4. – P. 897.

10. Murthy, M.N. Review on strain monitoring of aircraft: using optical fibre sensor / M.N. Murthy, P.D. Kakade // *International Journal of Electronics and Telecommunications*. – 2022. – Vol. 68, № 3.

11. Fiber optic sensors in structural health monitoring / J.M. López-Higuera [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. – 2011. – Vol. 29, № 4. – P. 587–608.

12. Willberry, J.O. Structural health monitoring using fibre optic acoustic emission sensors / J.O. Willberry, M. Papaalias, G. Franklyn Fernando // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, № 21. – P. 6369.

13. Experimental analysis of buckling in aircraft skin panels by fibre optic sensors / J.A. Güemes, J.M. Menendez, I. Fernandez, J.M. Pintado // *Smart Mater. Struct.* – 2001. – Vol. 10, № 3. – P. 490–496.

14. Flight demonstration of aircraft fuselage and bulkhead monitoring using optical fiber distributed sensing system / D. Wada, H. Igawa, M. Tamayama, T. Kasai, H. Arizono, H. Murayama, K. Shiotsubo // *Smart Mater. Struct.* – 2018. – Vol. 27, № 8.

15. Strain and damage monitoring in CFRP fuselage panels using fiber Bragg grating sensors. Part I: Design, manufacturing and impact testing / K.I. Tserpes, V. Karachalios, I. Giannopoulos, V. Prentzias, R. Ruzek // *Compos. Struct.* – 2014. – Vol. 107. – P. 726–736.

16. Strain and damage monitoring in CFRP fuselage panels using fiber Bragg grating sensors. Part II: Mechanical testing and validation / R. Ruzek, P. Kudrna, M. Kadlec, V. Karachalios, K.I. Tserpes // *Compos. Struct.* – 2014. – Vol. 107. – P. 737–744.

17. Monitoring concrete deterioration due to reinforcement corrosion by integrating acoustic emission and FBG strain measurements / W. Li, C. Xu, S.C.M. Ho, B. Wang, G. Song // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17. – P. 1–12.

18. Buckling behavior monitoring of a composite wing box using multiplexed and multi-channeled built-in fiber Bragg grating strain sensors / C.Y. Ryu, J.R. Lee, C.G. Kim, C.S. Hong // *NDT & E International*. – 2008. – Vol. 41. – P. 534–543.

19. Experimental modal analysis of an aircraft model wing by embedded fiber Bragg grating sensors / A. Cusano, P. Capoluongo, S. Campopiano, A. Cutolo, M. Giordano, F. Felli, A. Paolozzi, M. Caponero // IEEE Sens. J. – 2006. – Vol. 6. – P. 67–77.

20. Embedded fiber Bragg grating sensor-based wing load monitoring system for composite aircraft / H. Kwon, Y. Park, J.H. Kim, C.G. Kim // Struct. Heal. Monit. – 2019. – Vol. 18. – P. 1337–1351.

21. Strain measurements along zero-strain trajectories as possible structural health monitoring method for debonding initiation and propagation in aircraft sandwich structures / T. Bergmayr, M. Winklberger, C. Kralovec, M. Schagerl // Procedia Struct. Integr. – 2020. – Vol. 28. – P. 1473–1480.

22. Якушенко, Е.И. Система оценки низкочастотных колебаний корпуса морского подвижного объекта в режиме реального времени системой интегрирующих волоконнооптических датчиков / Е.И. Якушенко, О.А. Савицкий, В.В. Залетин // Морская радиоэлектроника. – 2019. – № 3. – С. 18–21.

23. Assessment of static and dynamic deformations of the orbital station shell by a system of integrating fiber-optic sensors / S.N. Vassilyev, A.A. Galyaev, E.I. Yakushenko M.V. Silnikov, N.M. Silnikov, V.V. Zaletin, O.A. Savitsky, V.N. Sorokovikov // Acta Astronautica. – 2022. – Vol. 194. – P. 417–424.

24. Исакович, М.А. Общая акустика: учеб. пособие / М.А. Исакович. – М.: Наука, главная ред. физ.-мат. литературы. – 1973. – 496 с.

25. Бехер, С.А. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии / С.А. Бехер, А.Л. Бобров. – Новосибирск: Изд-во СГУПС. – 2013. – 145 с.

26. Гапонов, В.А. Станция «МИР»: от триумфа до... / В.А. Гапонов, А.Б. Железняков. – СПб.: СИСТЕМА. – 2007. – 380 с.

27. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. / В.М. Баранов, А.И. Гриценко, А.М. Карасевич [и др.]. – М.: Наука. – 1998. – 304 с.

28. Вальд, А. Последовательный анализ / А. Вальд. – М.: Физматлит. – 1960. – 328 с.

29. Кузьмин, С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь. – 1986. – 352 с.

References

1. Yakushenko E.I., Zaletin V.V., Savitskii O.A., Sorokovikov V.N. Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniia integriroiushchikh volokonno-opticheskikh datchikov dlia kontrolya dinamicheskikh parametrov kryl'ev i fiuzeliya zha samoletov [Estimation of the possibility of using integrating fiber-optic sensors for control of dynamic parameters of aircraft wings and fuselage]. *Proceedings of the 13th Multiconference on Control Problems*, 2020, pp. 87-89.
2. Yakushenko E.I., Zaletin V.V., Savitskii O.A., Sorokovikov V.N. Eksperimental'noe podtverzhdenie vozmozhnosti ispol'zovaniia integriroiushchikh volokonno-opticheskikh datchikov dlia kontrolya dinamicheskikh parametrov protiazhennykh konstruktсии [Experimental confirmation of the possibility of using integrating fiber-optic sensors for control of dynamic parameters of prolonged structures]. *Marine Radio Electronics*, 2019, no. 4, pp. 8-11.
3. Acoustic emission testing: Basics for research—applications in engineering. Ed. C.U. Grosse et al. Springer Nature, 2021, 752 p.
4. Ono K. Application of acoustic emission for structure diagnosis. *Diagnostyka*, 2011, vol. 58, no. 2, pp. 3-18.
5. Dornfeld D. Application of acoustic emission techniques in manufacturing. *Ndt & E International*, 1992, vol. 25, no. 6, pp. 259-269.
6. Bigus G.A., Daniev Iu.F., Bystrova N.A., Galkin D.I. Osnovy diagnostiki tekhnicheskikh ustroystv i sooruzhenii. Second edition. Moscow: Bauman Press, 2018, 445 p.
7. Champaigne K.D., Summers J. Wireless impact and leak detection and location systems for the ISS and shuttle wing leading edge. *2005 IEEE Aerospace Conference. IEEE*, 2005, pp. 1-8.
8. Annamdas K.K.K., Annamdas V.G.M. Review on developments in fiber optical sensors and applications. *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7677, pp. 205-216.
9. Jinachandran S., Rajan G. Fibre Bragg grating based acoustic emission measurement system for structural health monitoring applications. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 4, p. 897.
10. Murthy M.N., Kakade P.D. Review on strain monitoring of aircraft: using optical fibre sensor. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 2022, vol. 68, no. 3.
11. López-Higuera J.M. et al. Fiber optic sensors in structural health monitoring. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, vol. 29, no. 4, pp. 587-608.

12. Willberry J.O., Papaelias M., Franklyn Fernando G. Structural health monitoring using fibre optic acoustic emission sensors. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 21, p. 6369.

13. Güemes J.A., Menendez J.M., Frövel M., Fernandez I., Pintado J.M. Experimental analysis of buckling in aircraft skin panels by fibre optic sensors. *Smart Mater. Struct.*, 2001, vol. 10, no. 3, pp. 490-496.

14. Wada D., Igawa H., Tamayama M., Kasai T., Arizono H., Murayama H., Shiotsubo K. Flight demonstration of aircraft fuselage and bulkhead monitoring using optical fiber distributed sensing system. *Smart Mater. Struct.*, 2018, vol. 27, no. 8.

15. Tserpes K.I., Karachalios V., Giannopoulos I., Prentzias V., Ruzek R. Strain and damage monitoring in CFRP fuselage panels using fiber Bragg grating sensors. Part I: Design, manufacturing and impact testing. *Compos. Struct.*, 2014, vol. 107, pp. 726-736.

16. Ruzek R., Kudrna P., Kadlec M., Karachalios V., Tserpes K.I. Strain and damage monitoring in CFRP fuselage panels using fiber Bragg grating sensors. Part II: Mechanical testing and validation. *Compos. Struct.*, 2014, vol. 107, pp. 737-744.

17. Li W., Xu C., Ho S.C.M., Wang B., Song G. Monitoring concrete deterioration due to reinforcement corrosion by integrating acoustic emission and FBG strain measurements. *Sensors*, 2017, vol. 17, pp. 1-12.

18. Ryu C.Y., Lee J.R., Kim C.G., Hong C.S. Buckling behavior monitoring of a composite wing box using multiplexed and multi-channeled built-in fiber Bragg grating strain sensors. *NDT & E International*, 2008, vol. 41, pp. 534-543.

19. Cusano A., Capoluongo P., Campopiano S., Cutolo A., Giordano M., Felli F., Paolozzi A., Caponero M. Experimental modal analysis of an aircraft model wing by embedded fiber Bragg grating sensors. *IEEE Sens. J.*, 2006, vol. 6, pp. 67-77.

20. Kwon H., Park Y., Kim J.H., Kim C.G. Embedded fiber Bragg grating sensor-based wing load monitoring system for composite aircraft. *Struct. Heal. Monit.*, 2019, vol. 18, pp. 1337-1351.

21. Bergmayr T., Winklberger M., Kralovec C., Schagerl M. Strain measurements along zero-strain trajectories as possible structural health monitoring method for debonding initiation and propagation in aircraft sandwich structures. *Procedia Struct. Integr.*, 2020, vol. 28, pp. 1473-1480.

22. Yakushenko E.I., Savitskii O.A., Zaletin V.V. Sistema otsenki nizkochastotnykh kolebaniy korpusa morskogo podvizhnogo ob"ekta v rezhime real'nogo vremeni sistemoi integriruiushchikh volokonnoopticheskikh datchikov [System for real-time assessment of low-frequency vibrations of the hull of a marine mobile object by a system of integrating fiber-optic sensors]. *Marine Radio Electronics*, 2019, no. 3, pp. 18-21.

23. Vassilyev S.N., Galyaev A.A., Yakushenko E.I., Silnikov M.V., Silnikov N.M., Zaletin V.V., Savitsky O.A., Sorokovikov V.N. Assessment of static and dynamic deformations of the orbital station shell by a system of integrating fiber-optic sensors. *Acta Astronautica*, 2022, vol. 194, pp. 417-424.

24. Isakovich M.A. Obshchaia akustika. Uchebnoe posobie. Moscow: Nauka, 1973, 496 p.

25. Bekher S.A., Bobrov A.L. Osnovy nerazrushaiushchego kontrolya metodom akusticheskoi emissii. Novosibirsk: Siberian Transport University Publ., 2013, 145 p.

26. Gaponov V.A., Zhelezniakov A.B. Stantsiia "MIR": ot triumfa do... Saint Petersburg: Sistema, 2007, 380 p.

27. Baranov V.M., Gritsenko A.I., Karasevich A.M. et al. Akusticheskaiia diagnostika i kontrol' na predpriiatiakh toplivno-energeticheskogo kompleksa. Moscow: Nauka, 1998, 304 p.

28. Wald A. Posledovatel'nyi analiz. Moscow: Fiziko-matematicheskaiia literatura, 1960, 328 p.

29. Kuz'min S.Z. Osnovy proektirovaniia sistem tsifrovoy obrabotki radiolokatsionnoi informatsii. Moscow: Radio i sviaz', 1986, 352 p.

Сведения об авторах

АНИКИН И.Ю.

e-mail: anikin1952@bk.ru

Кандидат технических наук, заместитель начальника по науке ОГ УВОКСС НТЦ ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь, Российская Федерация.

About the authors

I.Y. ANIKIN

e-mail: anikin1952@bk.ru

PhD, PJSC "Perm Scientific and Production Instrument-Making Company"; Deputy Head of Science, Perm, Russian Federation.

ЗАЛЕТИН В.В.

e-mail: vzaletin@mail.ru

Начальник Центра полигонных испытаний АО «НПО Спецматериалов»; кандидат технических наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

V.V. ZALETIN

e-mail: vzaletin@mail.ru

Phd, SPA "Special Materials", Head of the testing center, Saint Petersburg, Russian Federation

САВИЦКИЙ О.А.

e-mail: osav66@mail.ru

Кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева», г. Москва, Российская Федерация.

O.A. SAVITSKY

e-mail: osav66@mail.ru

Assoc. prof., Phd, JSC «Acoustic Andreyev Institute», Leading Researcher, Moscow, Russian Federation.

СОРОКОВИКОВ В.Н.

e-mail: sorokovikov@mail.ru

Кандидат физико-математических наук, главный конструктор ОГ НТЦ «ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания»; старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт общей физики им. А.М. Прохорова» РАН, г. Москва, Российская Федерация.

V.N. SOROKOVIKOV

e-mail: sorokovikov@mail.ru

PhD, PJSC "Perm Scientific and Production Instrument-Making Company", Chief designer; «M. Prokhorov General Physics Institute» of Russian Academy of Sciences, Senior Researcher, Moscow, Russian Federation.

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 21.01.2024

Одобрена: 23.01.2024

Принята к публикации: 26.01.2024

Financing. The work was not sponsored.

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

Author Contributions. All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 21/01/2024

Approved: 23/01/2024

Accepted for publication: 26/01/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Комплексная диагностика корпусных конструкций с использованием системы распределенных волоконно-оптических датчиков / И.Ю. Аникин, В.В. Залетин, О.А. Савицкий, В.Н. Сороковиков // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 1. – С. 50–72.

Please cite this article in English as: Anikin I.Yu., Zaletin V.V., Savitsky O.A., Sorokovikov V.N. Comprehensive hull structures diagnostics using a distributed fiber-optic sensors system. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 1, pp. 50-72.