

СЕНСОРНЫЕ ПРИБОРЫ НА ВНУТРИСВЕТОВОДНОМ ЭФФЕКТЕ ДОПЛЕРА

Г. Буймистрюк, В. Николаев, М. Базлов,
ООО "Сенсорное приборостроение "Интел-
Системы", info@isi.spb.ru

Предложен новый тип волоконно-оптических датчиков виброакустических сигналов, принцип работы которого основан на недавно обнаруженном внутрисветоводном эффекте Доплера – волоконно-оптический доплеровский виброакустический датчик. В статье приведены принципы его построения и технические характеристики. Рассмотрены преимущества нового датчика перед датчиками на волоконно-оптических интерферометрах и дифракционных решетках.

Принцип работы волоконно-оптического доплеровского элемента (ВОДЭ) основан на недавно обнаруженном внутрисветоводном эффекте Доплера. Его суть состоит в том, что частота световой волны f_0 лазерного излучения, прошедшего через изогнутое оптическое волокно длиной L , смещается (при воздействии акустического давления, волокно движется или вибрирует со скоростью dL/dt) в спиральном волоконном доплеровском элементе (рис.1) на величину f_D :

$$f_D = -\frac{n}{\lambda_0} \cdot \frac{dL}{dt},$$

где n – показатель преломления оптоволокна; λ_0 – длина волны света в волокне. В отличие от интерференционных виброакустических датчиков (Фабри-Перо, Маха-Цендера, Майкельсона и Саньяка), в которых анализируется изменение фазы оптического сигнала, в виброакустических датчиках Доплера анализируется изменение частоты оптического сигнала. Феноменальным результатом частотного анализа оптического сигнала при виброакустическом воздействии на прямое (рис.2а) и изогнутое оптическое волокно (рис.2б) стало появление доплеровского сдвига частоты только в изогнутом волокне [1].

Доплеровский сдвиг оптической частоты в спиральном волоконном элементе, вызванный

SENSING DEVICES ON THE IN-FIBER OPTIC DOPPLER EFFECT

G. Buymistryuk, V. Nikolaev, M. Bazlov,
Sensing instruments "Intel-Systems" LLC,
info@isi.spb.ru

A new type of fiber-optic sensors vibro-acoustic signals on the newly discovered in-fiber optic Doppler effect. The principles of construction and technical characteristics of the fiber optic Doppler vibro-acoustic sensor. The advantages of the new vibro-acoustic Doppler sensor with sensors on fiber optic interferometers and diffraction gratings are presented.

The principle of operation of the fiber optical Doppler sensor (FODS) based on the newly discovered in-fiber optic Doppler effect and consists in the fact that the frequency of the light wave f_0 laser radiation transmitted through the curved optical fiber length L moves (under the influence of acoustic pressure fiber moves or vibrates at a velocity of dL/dt) in the spiral fiber Doppler element shown in Fig. 1, on the value of f_D :

$$f_D = -\frac{n}{\lambda_0} \cdot \frac{dL}{dt},$$

where n – refractive index of the fiber; λ_0 – wavelength of light in the optical fiber. In contrast to the interferometric vibro-acoustic sensors (Fabry-Perot, Mach-Zehnder, Michelson and Sagnac), which

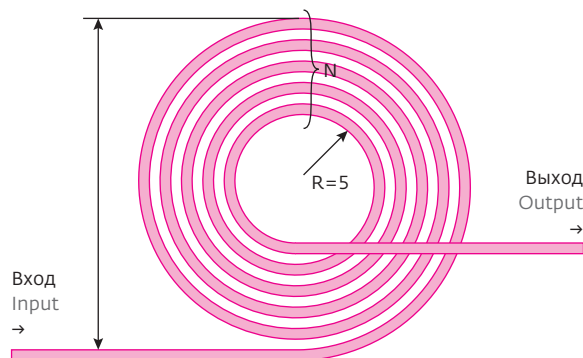


Рис.1. Конфигурация спирального доплеровского элемента
Fig. 1. Configuration of the spiral element Doppler



деформациями (движениями) ϵ_x и ϵ_y , определяется как

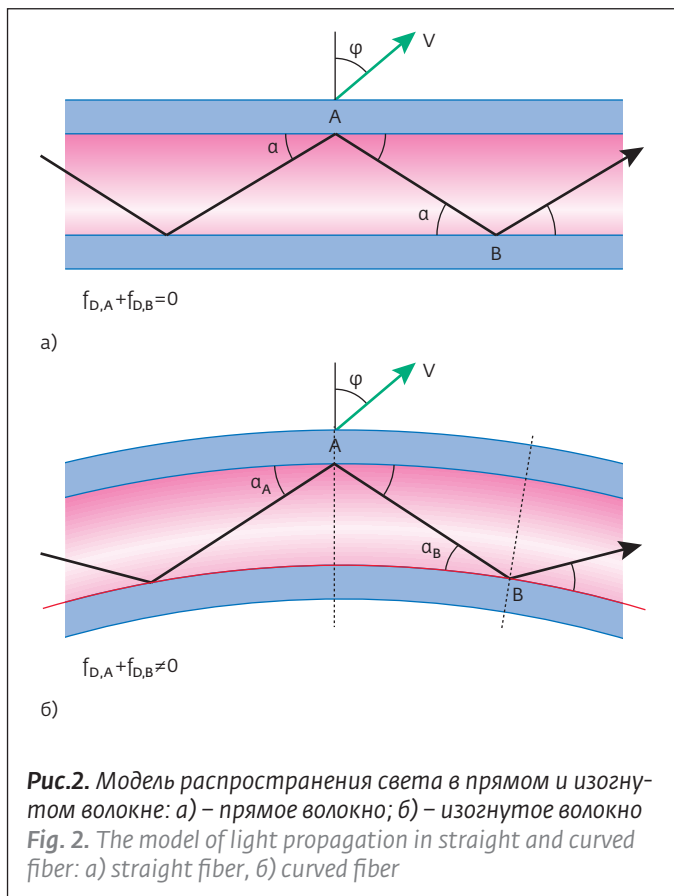
$$f_D = -\frac{N\pi R_a n_3}{\lambda_0} (\epsilon_x + \epsilon_y) = -\frac{N\pi D_a n_3}{2\lambda_0} (\epsilon_x + \epsilon_y),$$

где R_a , D_a – средний радиус и диаметр волоконного кольца; N – число витков волокна; n_3 – эквивалентный показатель преломления.

Спиральный ВОДЭ не обладает направленной чувствительностью. И это определяет его важное преимущество перед датчиками на дифракционных решетках Брэгга. Брэгговские волоконные датчики имеют пространственно-селективную чувствительность – они не чувствуют колебаний, направленных перпендикулярно оси решетки Брэгга.

Вместе с тем, при необходимости придания ВОДЭ соответствующей диаграммы направленности (селективной чувствительности) он может быть изготовлен U-образной или продолговато-эллиптической формы (рис.3). Пример спирального ВОДЭ приведен на рис.4. Для таких конфигураций, в соответствии с рис.3, допллеровская частота определяется:

$$f_D = -\frac{Nn_3}{\lambda_0} \left\{ \frac{\pi R_a}{2} (\epsilon_x + \epsilon_y) + 2l\epsilon_x \right\},$$



analyzes the change in the phase of the optical signal in the vibro-acoustic Doppler sensors analyze the change in frequency of the optical signal.

New phenomenal result of frequency analysis of the optical signal at the vibro-acoustic effect on the straight (Fig. 2a) and a curved optical fiber (Fig. 2b) is the appearance of Doppler frequency shift only in a curved fiber [1].

Doppler frequency shift in a spiral optical fiber element, caused by strains (movements) ϵ_x and ϵ_y is defined as:

$$f_D = -\frac{N\pi R_a n_3}{\lambda_0} (\epsilon_x + \epsilon_y) = -\frac{N\pi D_a n_3}{2\lambda_0} (\epsilon_x + \epsilon_y),$$

where: R_a , D_a – average radius and diameter of a fiber circular part; N – number of turns of fiber; n_3 – equivalent refractive index.

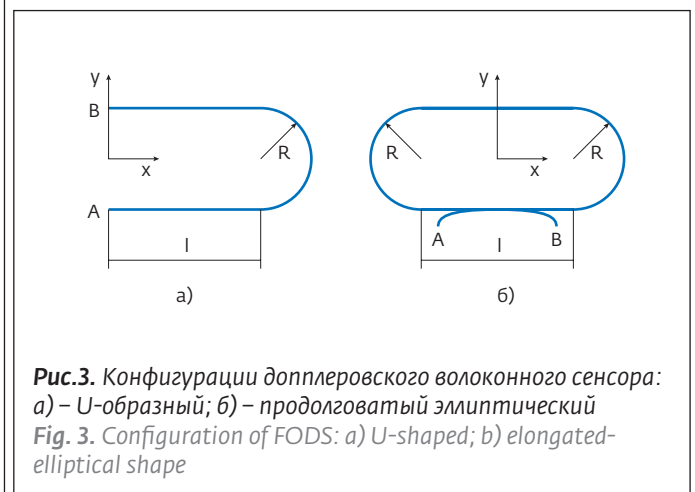
A spiral FODS haven't directional sensitivity. It is an important advantage compared to sensors based on Bragg diffraction gratings, which have spatially selective sensitivity – they do not receive vibrations perpendicular to the axis of the Bragg grating. However, with the need to make the corresponding diagram of directivity FODS (selective sensitivity), it can be made U-shaped or elongated-elliptical shape as shown in Fig.3. An example of a spiral FODS is shown in Fig.4.

For such configurations, as shown in Fig. 3 Doppler frequency is determined by the:

$$f_D = -\frac{Nn_3}{\lambda_0} \left\{ \frac{\pi R_a}{2} (\epsilon_x + \epsilon_y) + 2l\epsilon_x \right\},$$

where: l – length of an elongated portion of the sensor.

The main drawback of interference fiber optic sensors is that a system is needed to control the



где l – длина продолговатого участка сенсора. Главный недостаток интерференционных волоконно-оптических датчиков состоит в том, что необходима система управления фазой сигнала для поддержания оптимальной чувствительности.

Подчеркнем, что частотный выходной сигнал ВОДЭ не зависит от температуры – главного источника нестабильности и погрешности в интерференционных и дифракционных датчиках.

Принцип работы частотного ВОДЭ при виброакустическом воздействии – в отличие от частотной волоконной дифракционной решетки Брэгга – в прямом преобразовании темпа деформаций в доплеровский сдвиг частоты. В частности, ВОДЭ измеряет темпы деформации в x и y направлениях, поэтому его чувствительность выше, чем у решетки Брэгга.

Функциональная схема датчика акустической эмиссии на внутрисветоводном эффекте Доплера приведена на рис.5. Частота доплеровского сдвига f_D (например, 0,1 Гц – 1 МГц) выделяется из оптического сигнала с помощью акустооптического гетеродина, сдвигающего f_0 на постоянную величину модуляции f_M (например, 80 МГц), формирования биений с частотой $f_M + f_D$, оптоэлектронного преобразования в фотоприемном устройстве и преобразования девиации частоты f_D в выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ в частотном детекторе [2].

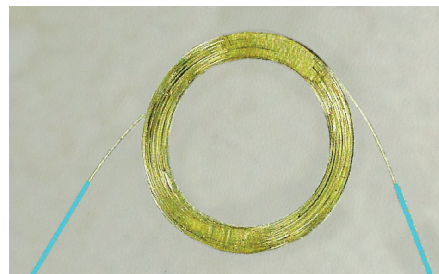


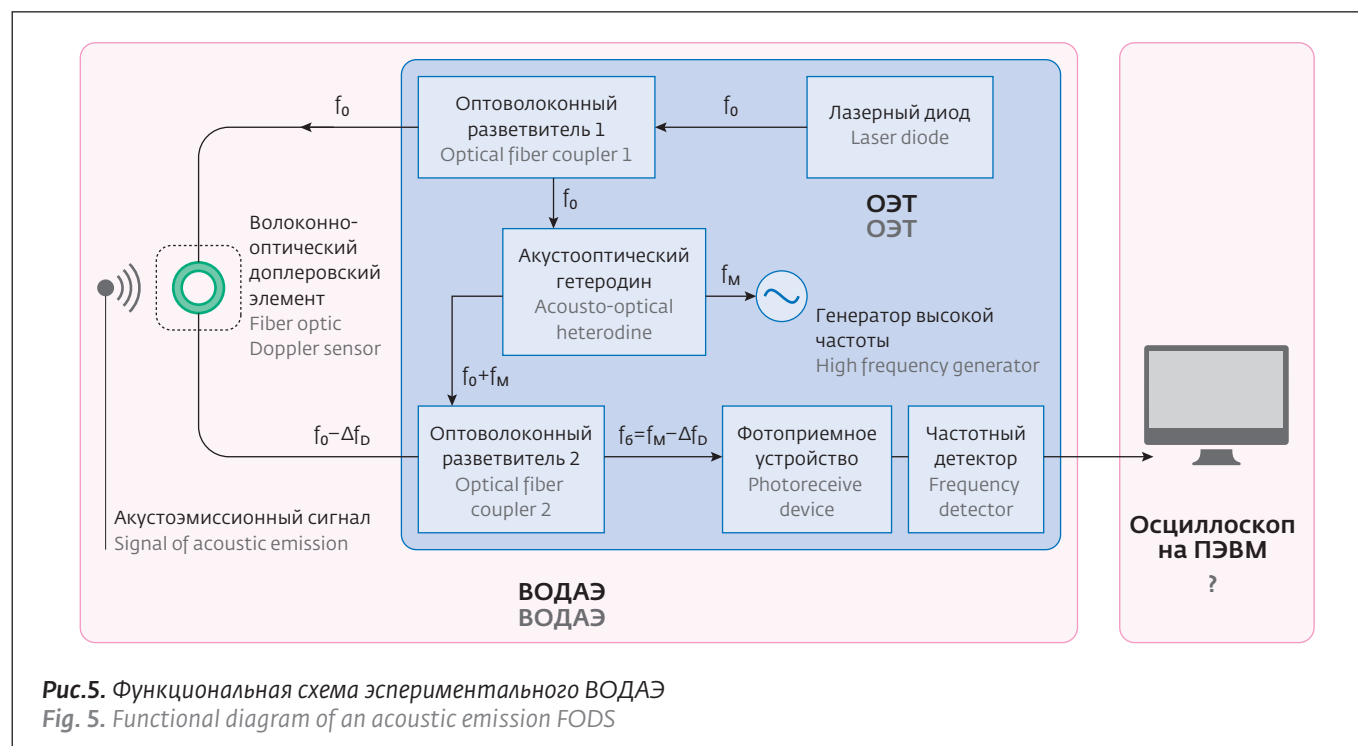
Рис.4. Спиральный виброакустический сенсор на базе ВОДЭ
Fig. 4. The spiral vibro-acoustic FODS

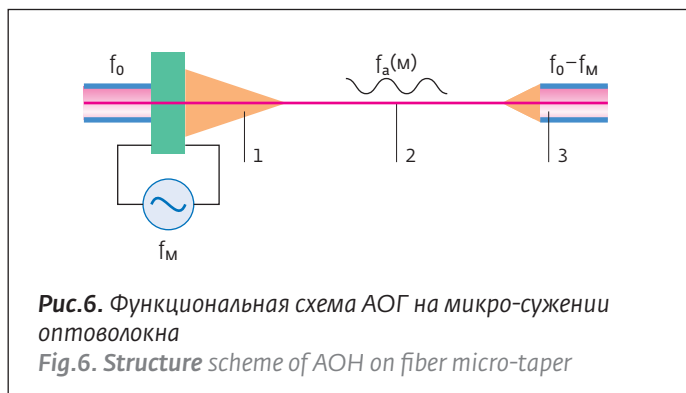
phase of the signal in order to maintain optimum sensitivity.

Frequency output signal of FODS does not depend from temperature – the main source of instability and uncertainty in the sensors based on interference and diffraction.

The principle of operation of the frequency FODS under vibro-acoustic action – in contrast to the frequency fiber Bragg grating – a direct conversion rate of deformation in the Doppler frequency shift. In particular, a FODS measures the rate of deformation in x and y directions, however, its sensitivity is higher than that of a Bragg grating.

Functional diagram of an acoustic emission sensor based on in-fiber optic Doppler effect is shown in Fig. 5.





ВОДЭ имеет очень высокую виброакустическую чувствительность. Достижимое на сегодняшний день разрешение деформации составляет 10^{-11} относительного удлинения волокна ($\sim 10^{-5}$ млн $^{-1}$) в экстремально широком диапазоне частот от 0,1 Гц до 10 МГц. Полученный результат – эффект от реализации принципа лазерного доплеровского измерения скорости (ЛДИС) микро-смещений оптического волокна. Деформации (удлинения – сжатия) волокна мы отдельно измеряли с помощью высокоточных ЛДИС (разрешение $\leq 10^{-7}$ мкм/В), типа "Vibroducer-1002" фирмы "Melectro".

Процедуру по оценке чувствительности проводили следующим образом. Напряжение, подаваемое на пьезоэлектрический излучатель (например, от генератора ГЗ-123), изменяли на соответствующей тестовой частоте так, что выходной сигнал ЧД изменялся в диапазоне от 0 до U_{\max} . В частности, напряжению U_{\max} на частоте 100 кГц соответствовала деформация волокна в 100 мкм. Затем мощность акустического сигнала снижали до минимальной, регистрируемой по выходу ЧД величины, которая соответствовала 10^{-5} мкм. Таким образом, полный динамический диапазон D на частоте 100 кГц составил величину по напряжению $D_{100 \text{ кГц}} = 20 \lg [10^2/10^{-5}] = 140$ дБ. Аналогично, на частоте 1 кГц измеренная пороговая деформация равна 10^{-6} мкм, $D_{1 \text{ кГц}} = 160$ дБ.

Однако многокомпонентная и точная механическая конструкция демодулятора широкополосных акустических сигналов на традиционном ЛДИС с объемным акустооптическим сдвигателем частоты на монокристалле TeO_2 – относительно дорогое устройство. К тому же, она обладает значительными габаритами и содержит ряд источников нестабильности сигнала, в силу обладания совокупностью нескольких оптических и электрических преобразований.

Doppler frequency shift f_D (for example, 0.1 Hz – 1 MHz) is detected from the optical signal using an acousto-optic heterodyne, shifting f_0 by a constant modulation f_M (for example, 80 MHz), the formation of the beats at a frequency $f_M + f_D$, optoelectronic conversion and photodetectors conversion frequency deviation f_D in the output signal U_{out} by means of frequency detector [2].

FODS has a very high sensitivity of the vibro-acoustic (now achievable resolution deformation is 10^{-11} elongation fiber ($\sim 10^{-5}$ ppm) in an extremely wide frequency range from 0.1 Hz to 10 MHz by implementation of the principle of laser Doppler velocity measurement (LDV) micro-displacements of the optical fiber. Deformation (elongation – strain) fibers were measured by a precision LDV (resolution $\leq 10^{-7}$ $\mu\text{m}/\text{V}$), for example type "Vibroducer-1002" from company "Melectro".

Evaluation of sensitivity was performed so that the voltage applied to the piezoelectric transducer (for example, generator G3-123) was changed to the corresponding test frequency, so that the output of the FD varies from 0 to U_{\max} . In particular, the voltage U_{\max} at 100 kHz corresponds to a deformation of fiber on the 100 microns. Then the power of the acoustic signal at the minimum recorded value of the FD at the exit, which corresponded to 10–5 microns. Thus, full dynamic range D at a frequency of 100 kHz was the magnitude of the voltage $D_{100 \text{ kHz}} = 20 \lg [10^2/10^{-5}] = 140$ dB. Similarly, at 1 kHz, the threshold strain is 10^{-6} microns, $D_{1 \text{ kHz}} = 160$ dB.

However, multi-component and precise mechanical design demodulator broadband acoustic signals in a traditional surround LDV with acousto-optic frequency shifter on a single crystal TeO_2 – relatively expensive, has considerable size and contains a number of sources of instability signal, due to a combination of several optical and electrical changes.

IN-FIBER PROCESSING METHOD ON MICRO-TAPER

With the help of laser forming is performed micro-taper optical fiber, acousto-optic frequency shifter – a key element of AOH – sold on the in-fiber interactions resulting optical modes: between fundamental mode radiation LD with frequency f_0 and mode, modulated frequency f_M , using a conical piezoelectric transducer 1 in micro-taper of the optical fiber, as shown in Fig. 6. The interaction of the optical modes occurs in

ВНУТРИСВЕТОВОДНЫЙ СПОСОБ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСУЖЕНИИ

Необходимое микросужение оптического волокна (см. рис.4) получаем с помощью лазерного формообразования [3]. Акустооптический сдвигатель частоты – ключевой элемент акустооптического гетеродина (АОГ) – реализуется на внутриволоконном взаимодействии вытекающих оптических мод (рис.6): между модой основного излучения ЛД с частотой f_0 и модой, модулированной частотой f_m . Оно осуществляется с помощью конусного пьезопреобразователя (1) в микросужении оптического волокна. Взаимодействие оптических мод происходит на участке оптического волокна (2) с поперечным размером около 10 мкм.

Частота оптического излучения в выходном волокне (3) $f_0 - f_m$ сдвинута на величину частоты модуляции f_m , например, на 40 МГц. Очевидные достоинства такого акустооптического гетеродина: компактность, отсутствие юстируемых оптических коллиматоров ввода-вывода излучения, повышенное отношение сигнал/шум. Типичный отклик и спектр Фурье доплеровского ВОДЭ акустической эмиссии при внутреннем расслаивании трубчатой композитной конструкции показан на рис.7.

Экспериментальные работы по исследованию термостойких и радиационно стойких ВОДЭ акустической эмиссии для металлических и композитных конструкций для разных отраслей промышленности находятся в стадии интенсивных исследований. Их результаты, благодаря высокой чувствительности виброакустических доплеровских датчиков, несомненно, будут интересны многим специалистам-технологам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kageyama K., Murayama H., Uzawa K. Doppler effect in flexible and expandable light waveguide and fiber optic vibration/acoustic sensor. – J.Lightwave Technology, 2006. № 4.
2. Buymistryuk G. Experience of developments and applications of intelligent optical fiber sensors. – Proc. SPIE, 2012, v. 8351, APOS Int. Conf., Sydney, Australia.
3. Буймистряк Г., Николаев В. Новые принципы и технологические возможности построения волоконно-оптических гидроакустических датчиков и антенн. – Труды XI Всерос. конф. "Прикл. технологии гидроакустики и гидрофизики", 2012, С-Пб.

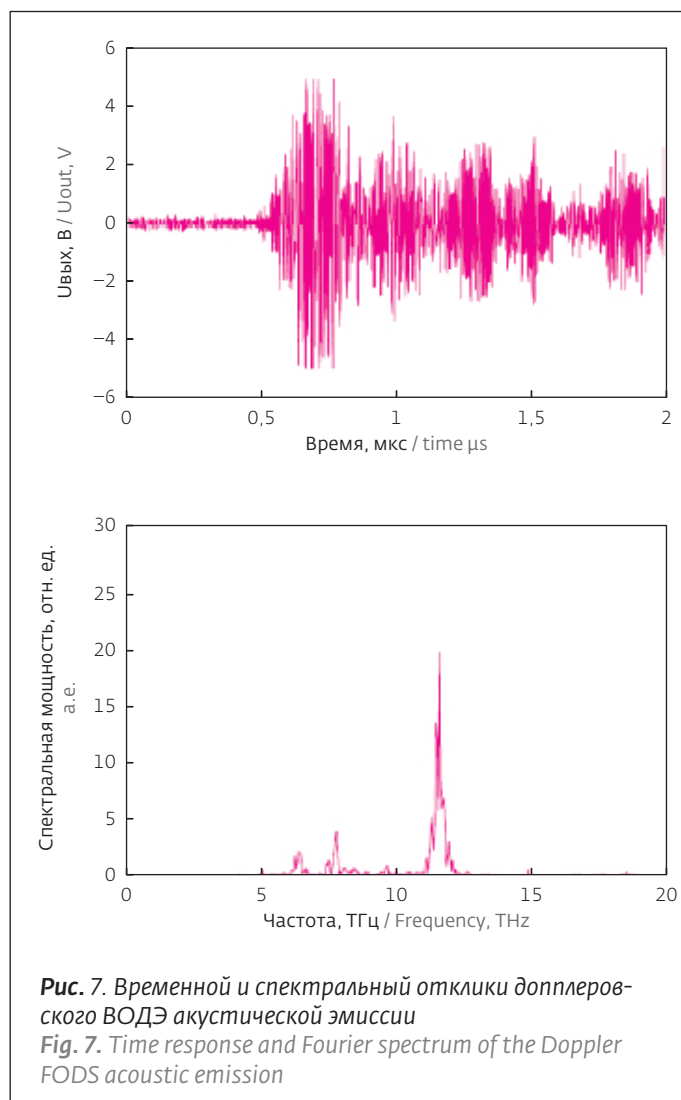


Рис. 7. Временной и спектральный отклики доплеровского ВОДЭ акустической эмиссии
Fig. 7. Time response and Fourier spectrum of the Doppler FODS acoustic emission

the area of the optical fiber 2 with a transverse dimension about of 10 microns [3].

The frequency of the output radiation into the optical fiber (3) $f_0 - f_m$ were shifted to by value of frequency f_m modulation, for example, 40 MHz.

Obvious advantages of such acousto-optical heterodine: compactness, absence of adjustable dimension optical input-output collimators of radiation, increased signal/noise ratio. Typical time response and Fourier spectrum of the Doppler FODS acoustic emission with internal exfoliating tubular composite structure shown in Fig.7.

Experimental studies of heat-resistant and radiation-hard acoustic emission for metal and composite structures for various industries now in progress and will continue intensively. They will be very interesting for researchers.

