

КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ ДАТЧИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ С ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ОПРОСА

В.В. Григорьев, В.А. Лазарев, Н.А. Неверова,
А.К. Митюрёв, А.Б. Пнев, С.В. Тихомиров (ГНМЦ ФГУП ВНИИОФИ)

Рассматриваются возможности и технические характеристики современных промышленных волоконно-оптических брэгговских датчиков, а также возможность создания для этих датчиков информационно-измерительной системы с применением усовершенствованного принципа калибровки на основе кюветы с ацетиленом. Сообщается о результатах работ по разработке и исследованию макета измерительной системы.

Ключевые слова: информационно-измерительные системы, распределенные волоконно-оптические датчики, разрешающая способность, динамический диапазон, брэгговские решетки, суперлюминесцентный диод, спектральная модуляция суперлюминесцентного диода, частота опроса, система калибровки на основе кюветы с ацетиленом.

За последнее десятилетие отмечается стремительное развитие производственной и социальной инфраструктуры. В связи с этим все чаще возникают задачи контроля таких инфраструктурных объектов, как мосты, тоннели, трубопроводы, гражданские и промышленные здания и сооружения. Для решения задач контроля состояния объектов инфраструктуры применяют различные промышленные датчики. В данной статье речь пойдет о датчиках механической деформации, так как своевременное обнаружение критических деформаций во многом позволит предотвратить возникновение аварийных ситуаций или катастроф. До недавнего времени основным типом датчиков для этих целей были тензодатчики на основе пьезоэлектрического эффекта. Однако благодаря интенсивному развитию волоконной оптики появились волоконно-оптические датчики физических величин. С появлением волоконно-оптических датчиков деформации и температуры были устранены проблемы, связанные с недостатками тензодатчиков, так как волоконно-оптические датчики обладают более высокой чувствительностью, помехозащищенностью и устойчивостью к воздействиям агрессивных сред, а также меньшей стоимостью. Среди волоконно-оптических датчиков перспективными представляются квазираспределенные брэгговские датчики, позволяющие контролировать объект во многих точках одновременно благодаря возможности спектрального и временного мультиплексирования.

Создание информационно-измерительных систем (ИИС) для этих задач до недавнего времени было чрезмерно дорогостоящим решением, в том числе и в смысле затрат на обслуживание и эксплуатацию таких систем. Дело в том, что традиционные измерительные преобразователи (датчики), применяемые в таких ИИС, как правило, требуют подачи электропитания, собственной линии передачи сигнала измерительной информации, а также линии для подачи управляющих сигналов. Кроме того, условия эксплуатации датчиков достаточно жестко ограничены по параметрам окружающей среды, по воздействию агрессивных сред, высоковольтного напряжения и электромагнитных помех.

Появление распределенных и квазираспределенных волоконно-оптических датчиков коренным образом изменило эту ситуацию и сделало возможным создание

ИИС для мониторинга инфраструктурных объектов с приемлемыми для практики характеристиками. Необходимо подчеркнуть, что в настоящее время такие датчики конструктивно все чаще представляют собой либо просто фрагмент оптического световода, либо тот же фрагмент, но подвергнутый определенной модификации. В обоих случаях мы имеем дело с полностью пассивными волоконно-оптическими датчиками, чувствительные элементы которых не требуют электрического питания, а степень воздействия условий внешней среды на волоконно-оптические датчики значительно ниже, чем на датчики, использующие электрическое преобразование измерительной информации.

В последние годы получили большое распространение средства измерений, в качестве чувствительных элементов которых используются решетки Брэгга — наноразмерные волоконно-оптические периодические структуры с периодом 500 нм, сформированные непосредственно в сердцевине оптического световода. Они представляют собой небольшую зону световода с периодической модуляцией показателя преломления вдоль оси волокон.

Повышенное внимание к таким средствам измерений связано с их высокой помехозащищенностью и устойчивостью к воздействию неинформативных влияющих факторов. Принцип действия таких датчиков состоит в преобразовании измеряемой физической величины в изменение спектральных или фазовых характеристик тестового оптического излучения, распространяющегося по световоду. Вследствие этого какие-либо изменения интенсивности такого излучения не оказывают влияния на работу датчиков на основе брэгговских решеток. Учитывая сказанное, средства измерений с волоконно-оптическими датчиками на брэгговских решетках все чаще стали применяться в таких условиях, когда доступ к чувствительным элементам в течение всего срока их службы, а это может быть 10...15 лет и более, либо вообще невозможен, либо нецелесообразен или нежелателен. Среди таких применений можно упомянуть, в частности, измерения давления и температуры в нефтегазовых скважинах в процессе извлечения углеводородного сырья, измерения температуры и механических вибраций на больших пролетах высоковольтных линий электропередачи; измерения темпера-

туры обмоток силовых высоковольтных трансформаторов; измерения механических напряжений в объеме строительных конструкций и т. д. Принцип действия ИИС на брэгговских решетках поясняется на рис. 1.

На вход оптического волокна подается излучение от источника (или набора источников) с широким спектром, которое последовательно проходит набор брэгговских решеток с различной центральной резонансной длиной волны. Излучение, отраженное от набора волоконно-оптических решеток, регистрируется спектроанализатором, и на основании сдвига центральных резонансных длин волн делается вывод о температуре и деформации брэгговских решеток. Возможна регистрация и прошедшего через набор решеток излучения. Выбор метода регистрации будет определяться в конкретной задаче, исходя из конструктивных соображений.

Зависимость центральной длины волны брэгговской решетки от деформации и температуры описывается следующим выражением [1]:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{эфф}}{\partial l} + n_{эфф} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{эфф}}{\partial T} + n_{эфф} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T, \quad (1)$$

где $n_{эфф}$ — эффективный показатель преломления решетки, Λ — период решетки, Δl — удлинение, ΔT — приращение температуры.

Первое слагаемое дает значение сдвига длины волны в зависимости от деформации (удлинения), второе — в зависимости от температуры. Зависимость центральной длины волны отраженного излучения от деформации также может быть представлена в следующем виде [2]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \varepsilon_z, \quad (2)$$

где p_e — константа деформации оптического волокна, определяемая из выражения [2]:

$$p_e = \frac{n_{эфф}^2}{2} \cdot [p_{12} - \nu \cdot (p_{11} + p_{12})], \quad (3)$$

p_{11} и p_{12} — коэффициенты Поккельса в тензоре оптических напряжений, ν — коэффициент Пуассона. Для типового волокна $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$, и $n_{эфф} = 1,4682$ [3]. Исходя из этих значений чувствительность для длины волны $\lambda_B = 1550$ нм составляет 12 нм/%.

Второе слагаемое дает зависимость сдвига волны от температуры. Длина волны изменяется от температуры из-за следующих факторов: тепловое расширение оптического волокна (увеличивается период брэгговской решетки, происходит изменение геометрической длины решетки), изменение показателя преломления волокна в зависимости от температуры (изменение оптической длины решетки). Отсюда следует, что зависимость сдвига длины волны от температуры может быть описана выражением [4]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \cdot \Delta T, \quad (4)$$

где α_Λ — тепловой коэффициент расширения, α_n — термооптический коэффициент. Типовые значения этих па-

*Все идеи в науке родились
в драматическом конфликте
между реальностью и
нашими попытками ее понять.*

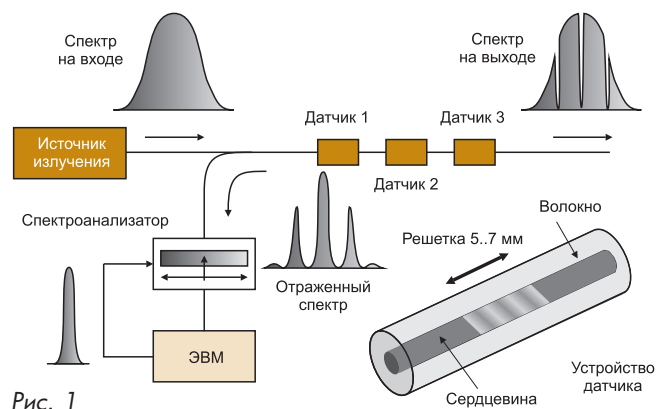
Альберт Эйнштейн

раметров для оптического волокна [3]: $\alpha_\Lambda = 0,55 \cdot 10^{-6}$ для плавленого кварца, $\alpha_n = 8,6 \cdot 10^{-6}$ для оптического волокна с легированным германием. Исходя из этих значений, чувствительность к температуре брэгговской решетки для длины волны $\lambda_B = 1550$ нм составит 13,7 пм/°С.

Минимальное расстояние между решетками по шкале длин волн определяется, исходя из условия отсутствия переналожения пиков отражения, то есть из предполагаемых эксплуатационных характеристик (диапазона температуры и деформаций). При типовых условиях эксплуатации (диапазон изменения деформации 1%, диапазон измерения температуры $\Delta T = 100^\circ\text{C}$) он составляет 15...20 нм. При этом в стандартное телекоммуникационное волокно можно включить 20...25 решеток (в спектральном диапазоне 1270...1750 нм).

Кроме того, из (2) и (4) следует, что если две решетки с разным периодом подвергнуть одинаковому воздействию как по температуре, так и по деформации получится линейная система уравнений, из которой можно определить и температуру и деформацию, то есть разделить влияние на сдвиг спектра температуры и деформации.

Однако измерительные устройства, содержащие датчики Брэгга, обладают недостатком, связанным со сравнительно низким быстродействием, под которым понимается частота опроса датчиков системы. Этот недостаток является препятствием к применению ИИС для контроля быстропротекающих процессов. Известны схемы построения системы на основе сканирующего интерферометра Фабри-Перо. Но все известные схемы обладают погрешностью измерения, связанной с нелинейностью пьезопривода сканирующего интерферометра, отраженного от датчиков. Предлагается схема построения оптико-электронной ИИС на основе волоконно-оптических брэгговских решеток, предназначенной для мониторинга деформации и температуры элементов конструкций объектов инфраструктуры. Отличительной особенностью предлагаемой системы является новый способ калибровки, основанный на использовании спектральной



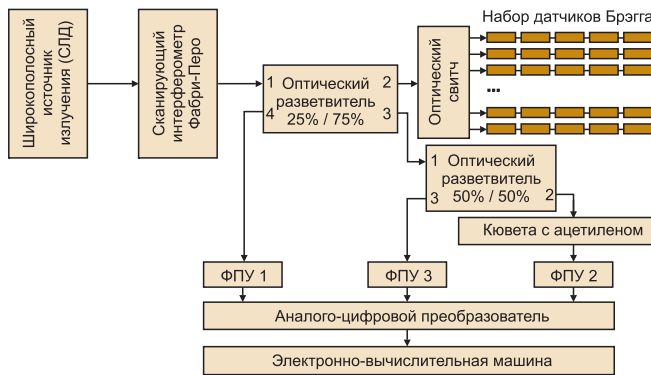


Рис. 2. Структурная схема квазираспределенной ИИС на основе волоконно-оптических датчиков Брэгга

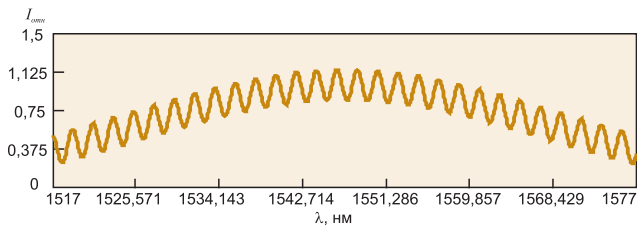


Рис. 3. Спектр суперлюминесцентного диода

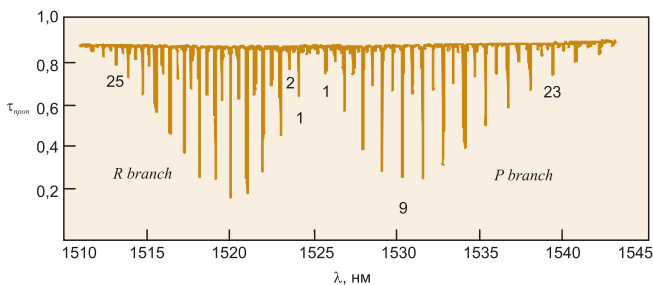


Рис. 4. Спектр пропускания ацетилена

модуляции суперлюминесцентного диода (СЛД), являющегося в схеме широкополосным источником, и двух наиболее контрастных линий поглощения ацетилена, который заполняет кювету, включенную в схему в качестве калибратора. В результате чего предлагаемая схема ИИС обладает более высокой частотой опроса датчиков Брэгга, а также большим числом датчиков, которые можно разместить в системе.

Структурная схема ИИС представлена на рис. 2. Система работает следующим образом. Источником излучения является суперлюминесцентный диод (СЛД) специальной конструкции. Грани кристалла СЛД, которые по сути являются резонатором Фабри-Перо, имеют определенный коэффициент отражения, от величины которого зависит глубина спектральной модуляции излучения диода. Глубина модуляции описывается следующим выражением [5]:

$$m = 2 \cdot G \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2}, \quad (5)$$

где G – суммарный коэффициент усиления, R_1 , R_2 – коэффициенты отражения граней СЛД. Для мощности СЛД 10 мВт коэффициент усиления G составляет около 1000. Тогда для коэффициента отражения первой

грани $R_1 = 0,001$ и коэффициента отражения второй грани получим: $R_2 = 0,001$ глубина модуляции $m = 0,2$.

Спектральную модуляцию СЛД можно использовать в качестве опорных или реперных точек для калибровки по шкале длин волн. Благодаря такому подходу можно увеличить рабочий спектральный диапазон, так как ширина спектра СЛД по полувысоте порядка 50 нм (рис. 3).

Излучение от СЛД проходит через сканирующий интерферометр Фабри-Перо и попадает на оптический разветвитель 25/75%. Разветвитель соединен с набором датчиков на основе волоконно-оптических решеток Брэгга, фотоприемным устройством (ФПУ) 1 и вторым разветвителем. На ФПУ1 регистрируется сигнал, отраженный от датчиков Брэгга. Ко второму разветвителю подсоединена ветвь с калибратором по шкале длин волн на основе кюветы с ацетиленом, имеющим набор узких резонансных линий поглощения, а также ветвь с ФПУ3, который регистрирует сигнал, прошедший от суперлюминесцентного диода. ФПУ2 считывает сигнал на выходе кюветы с ацетиленом. Используя два наиболее контрастных пика ацетилена (рис. 4), можно откалибровать спектральную модуляцию СЛД по шкале длин волн. Калибровка заключается в определении периода спектральной модуляции и определения с помощью его значений длин волн всех максимумов спектральной модуляции. С помощью полученных значений далее калибруется сигнал, полученный от датчиков Брэгга. Таким образом, калибровка сигнала от датчиков Брэгга осуществляется не по пикам поглощения ацетилена, а по откалиброванной шкале спектральной модуляции СЛД. За счет более контрастной модуляции имеем повышенное быстродействие, а за счет более широкого спектрального диапазона СЛД можем разместить в системе большее число датчиков.

Оценим предельную частоту опроса разрабатываемой системы, исходя из соотношения (6), которое говорит о том, что контраст линии поглощения должен быть больше контраста модуляции спектра люминесцентного диода с учетом шумов [6]:

$$k_{св} \cdot P_{уст} \cdot \eta (1 - \gamma \cdot m_1) - \gamma \cdot P_{уд.экв.ш} \cdot \sqrt{f_2} > k_{св} \cdot P_{уст} \cdot \eta (1 - m_2), \quad (6)$$

$k_{св} = 0,5$ – коэффициент отведения мощности в канал, содержащий калибровочную кювету с ацетиленом и ФПУ2 по шкале длин волн, T_k – коэффициент пропускания ветви, содержащей кювету с ацетиленом, $P_{уст}$ – мощность источника излучения, $P_{уд.экв.ш} = 20 \text{ пВтГц}^{1/2}$ – удельная мощность, эквивалентная шуму фотоприемного устройства, η – коэффициент пропускания интерферометра Фабри-Перо, $m_2 = 0,1$ – контраст линий поглощения цианида водорода, $m_1 = 0,02$ – относительная амплитуда модуляции спектра мощности излучения суперлюминесцентного диода, γ – коэффициент, учитывающий, во сколько раз пик поглощения должен быть глубже минимумов сигнала, вызванных шумами. Из выражения (6) получим формулу для оценки частоты опроса датчиков:

$$f_2 < \left(\frac{k_{св1} \cdot k_{св2} \cdot T_k \cdot P_{уст} \cdot \eta \cdot m_2}{\gamma \cdot P_{уд.экв.ш}} \right)^2 \cdot \frac{\delta \lambda}{\Delta \lambda_{раб}}. \quad (7)$$

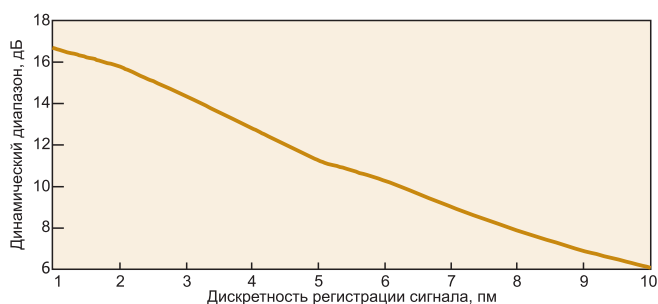


Рис. 5. Влияние дискретности сигнала на динамический диапазон, при котором погрешность измерения резонансной длины волны ≤ 10 пм

С учетом того, что $k_{ce1} = k_{ce2} = 0,75$, можно приближенно считать, что $k_{ce1} \cdot k_{ce2} \approx k_{ce} = 0,5$, и соответственно частота будет равна: $f_2 = 780$ Гц при исходных начальных условиях $m_2 = 0,5$, $\lambda = 2$, $\delta\lambda = 1$ пм, $\Delta\lambda_{раб} = 40$ нм. Получаем результаты по частоте, превосходящие известные системы примерно в 20 раз.

Далее сигналы с фотоприемных устройств подаются на аналого-цифровой преобразователь, после чего поступают на ЭВМ, где осуществляется обработка результатов.

Результаты экспериментальных исследований

Одной из основных характеристик рассматриваемых систем можно считать динамический диапазон системы — диапазон значений измеряемых сигналов. Чем больше этот диапазон, тем с более высокой точностью можно выделить полезные сигналы от датчиков на фоне шумов. С помощью численного моделирования проведено исследование влияния на динамический диапазон ряда факторов, среди которых величина дискретизации сигнала по шкале длин волн, осуществляемая сканирующим интерферометром Фабри-Перо, разрешающая способность интерферометра Фабри-Перо и шумы ФПУ. Дискретность оказывает существенное влияние на динамический диапазон (рис. 5).

На рис. 6 продемонстрировано отношение сигналов с ФПУ2 к ФПУ1 (именно на основе этого сигнала разработанный алгоритм корректирует предполагаемые значения длин волн) для двух случаев дискретности перестройки 1 пм и 10 пм, все остальные параметры одинаковые. При высокой дискретности неглубокие пики поглощения цианида водорода фактически сливаются с уровнем шумов, в то время как при дискретности регистрации 1 пм все пики достаточно четко видны. Поэтому при большом шаге дискретизации приходится значительно увеличивать энергетические характеристики сигнала, что приводит к необходимости увеличения минимально допустимого коэффициента отражения брэгговской решетки.

Влияние разрешающей способности интерферометра Фабри-Перо на динамический диапазон приведено на рис. 7. Разрешающая способность интерферометра Фабри-Перо влияет на энергетические характеристики сигнала не так сильно, как дискретность перестройки, что позволяет при выборе интер-

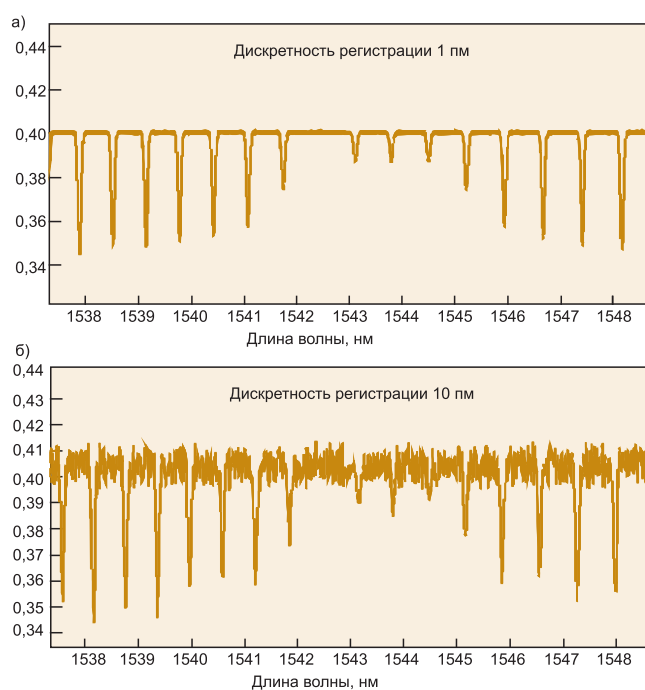


Рис. 6. Отношение сигналов с ФПУ2 к ФПУ1 для дискретизации а) 1 пм; б) 10 пм



Рис. 7. Влияние разрешающей способности интерферометра Фабри-Перо на динамический диапазон, при котором погрешность измерения резонансной длины волны ≤ 10 пм

ферометра пользоваться стандартным рядом фактора резкости производителя — 16000, 8000, 4000, 2000, что эквивалентно разрешению 12,5 пм, 25 пм, 50 пм, 100 пм, и вследствие этого существенно снизить стоимость компонента (стоимость устройства из стандартного ряда значительно ниже) и несущественно ухудшать энергетические характеристики системы.

Исследование влияния уровня шумов проводится с целью выявления потенциала частоты опроса системы, так как шумы растут пропорционально корню из частоты сигнала. В данной системе, где для одного цикла измерения необходимо осуществить регистрацию сигнала в 35000 точках (отношение ширины рабочего спектрального диапазона к дискретности), минимальный уровень шума 20 пВт соответствует частоте опроса 1 Гц (частота информационного сигнала 35 кГц, удельные шумы ФПУ 0,11 пВт/Гц^{1/2} — соответствуют паспортным характеристикам ФПУ FEMTOLAB [7]). Соответственно анализ динамического диапазона системы для в 10 раз больших шумов — это анализ системы, имеющей в 100 раз большую частоту опроса датчиков.

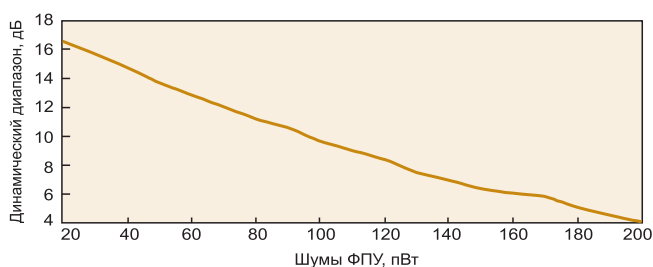


Рис. 8. Влияние уровня шума на динамический диапазон, при котором погрешность измерения резонансной длины волны ≤ 10 пм

На рис. 8 представлены результаты моделирования системы для различных уровней шумов, демонстрирующие, что зависимость динамического диапазона от уровня шумов не подчиняется линейному закону. Также из результатов моделирования видно, что в диапазоне 20...90 пВт характеристика системы фактически линейна и изменяется незначительно, что позволяет потенциально реализовать систему с частотой опроса датчиков 20...25 Гц с приемлемым динамическим диапазоном (10 дБ).

Из полученных результатов моделирования можно сделать выводы, что наиболее существенно на динамический диапазон влияют дискретность регистрации сигнала и шумы ФПУ.

Заключение

Проведенный анализ позволяет обосновать возможность создания измерительной системы на основе брэгговских решеток. К достоинствам таких систем следует отнести их высокую точность, высокую помехозащищенность и устойчивость к воздействию неинформативных влияющих факторов, относительно высокое быст-

родействие. Рассмотренная структурная схема с использованием усовершенствованного принципа калибровки обладает хорошими точностными характеристиками, что нашло подтверждение в испытании макетного образца. Проведенный анализ влияния различных факторов на динамический диапазон разработанной системы показал, что наиболее существенно на динамический диапазон влияют дискретность регистрации сигнала и шумы ФПУ. Предлагаемый тип датчиков может найти применение в области контроля состояния объектов инфраструктуры, таких как мосты, тоннели, трубопроводы, здания и сооружения различного назначения.

Список литературы

1. *Othonos A., Kalli K.* Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing // London: Artech House. 1999.
2. *Васильев С.А.* Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квантовая Электроника. 2005. № 35.
3. *Ivanov V.S., Kravtsov V.E., Tikhomirov S.V.* Problems of metrological support of measurements in fiber-optic transmission systems // Proceedings of SPIE. Vol. 4900. 2002.
4. *Кульчин Ю.Н.* Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети. Владивосток: Дальнаука. 1999.
5. *Григорьев В.В., Митюрёв А.К. и др.* Информационно-измерительные системы на основе волоконно-оптических датчиков для мониторинга состояния инфраструктурных объектов // Фотон-Экспресс. 2006. №5.
6. *Потапов В.Т.* Волоконно-оптические технологии в контрольно-измерительной технике // Там же. 2004. №37.
7. *Sophisticated Tools for Signal Recovery: Photoreceiver overview / FEMTO Messtechnik GmbH; Managing Director Steffen Prein; Messtechnik GmbH, Paul-Lincke-Ufer 34, D-10999 Berlin, Germany. 2005. http://femto.de*

Григорьев Василий Викторович, Митюрёв Алексей Константинович — мл. научные сотрудники, Лазарев Владимир Алексеевич, Неверова Наталья Александровна — инженеры, Пнев Алексей Борисович — канд. техн. наук, мл. научный сотрудник, Тихомиров Сергей Владимирович — д-р техн. наук, ст. научный сотрудник, начальник лаборатории ФГУП "ВНИИОФИ". Контактный телефон (495) 781-45-85.

Датчики вибрации ИВД "ПРОСОФТ-СИСТЕМЫ"

П.И. Галаган, А.И. Елов (Инженерная компания ООО "Прософт-Системы")

Рассматриваются технические характеристики, функциональные, коммутационные и конструктивные особенности "интеллектуальных" датчиков измерения абсолютной и относительной вибрации, разработанных ООО "Прософт-Системы" (г. Екатеринбург). Рассматривается вариант комплексной системы контроля и диагностики, в составе которой используются данные датчики.

Ключевые слова: виброконтроль, "интеллектуальные" функции, диагностика, преобразователь механических колебаний в цифровую величину, виброскорость, виброперемещение.

Эффективное решение задач контроля вибрации невозможно без использования надежных многофункциональных датчиков. Современные требования, предъявляемые к таким устройствам, предполагают: наличие "интеллектуальных" функций, способность работы в агрессивных условиях окружающей среды, дистанционное конфигурирование устройств и пр. Инженерная компания ООО "Прософт-

Системы" предлагает линейку датчиков, удовлетворяющих приведенным требованиям. Конструктивно-технологические решения, заложенные в данные устройства, позволяют создавать полнофункциональные системы вибрационного контроля, защиты и диагностики турбоагрегатов, насосов, электродвигателей и другого оборудования, подверженного воздействию вибрации.