

# Тензодатчики деформации и акселерометры FBG-технологии с волоконно-оптической СВЯЗЬЮ

## Надежда Морозоватая

Динамический и многофакторный мониторинг целостности конструкций на земле, под водой и в воздухе – особая задача и перспективное направление в производственном секторе РЭА и оборудования. На примере тензодатчиков деформации поверхности, угла деформации, перемещения, наклона, экстензометров и акселерометров, адаптированных для волоконно-оптических линий и программируемых электронных контроллеров, в статье рассматриваются их технические характеристики с вариантами применения в промышленности, строительстве и в быту.

### Преимущества и возможности применения оптоволоконных измерительных систем

В начале XXI века компания Scaime продемонстрировала успешный вывод технологии Fiber Optic Bragg Grating (FBG) на рынок структурного мониторинга строительных объектов и инженерных сооружений. В строительной сфере, судостроении, транспортной инфраструктуре и промышленных инновациях в разных сферах, включая мосто- и тоннелестроение, железнодорожную отрасль, морские и речные шлюзы, а также мощные прессы, электроэнергетику, волоконно-оптическим датчикам практически нет замены. Оптоволоконные датчики деформации и устройства на их основе

применяются для контроля деформации шельфовых нефтяных платформ, проверки целостности буровой вышки после сильных внешних воздействий, таких как обледенение, волны, шторм и воздействие атмосферных молниевых разрядов. Кроме того, в составе оптоволоконных линий датчики контроля деформации и акселерометры обеспечивают сбор и корректную передачу динамически изменяющихся данных к устройствам контроллеров, анализаторов и хранения.

Все, что касается контроля и измерения деформации, угла отклонения, ускорения перемещений и даже, в отдельных случаях, температуры обеспечивается оптоволоконными датчиками – FBG-сенсорами. Преимущества волоконно-оптических датчиков

(ВОД), волоконно-оптических акселерометров (ВОА) и систем на их основе по-разному определяются сферой применения. Наиболее наглядно зависимость контролируемых параметров от сферы применения представлена в табл. 1.

Эти особенности и перспективы подробно рассмотрены в [1] и [6]. И даже этот представленный перечень возможностей далеко не полон. К примеру, ВОД типа OBSG и др., кроме прочего, используются в локальных и передвижных конструкциях, в том числе в условиях повышенной вибрации и детонации. На рис. 1 представлен вид мощного ветрогенератора в пригороде Лаппенранты, вблизи российской границы [4].

Ветрогенераторы, установленные в Финляндии, уже много лет обеспечивают условно «бесплатную» электроэнергию в некоторых коммунах. Примерно такая же ситуация в Германии и Испании. Оптоволоконные датчики в лопастях ветрогенератора применяются как важный элемент системы контроля лопастей турбины. Несколько волоконно-оптических датчиков смонтированы внутри лопастей на этапе монтажа конструкции ветрогенератора. Оптические датчики способствуют

Таблица 1. Преимущества датчиков для различных сфер применения

Особенности оптоволоконных систем	Преимущества для сфер применения
Нечувствительность к электромагнитным помехам	Железная дорога, вблизи радиопередающих станций и радаров, высоковольтных линий и др.
Нет проблемы коррозии	Морские и речные суда, подводные конструкции, уличные применения и др.
Искробезопасность, взрывобезопасность	Опасные зоны (нефтехимия и др.)
Высокая надёжность и большой срок службы (более 20 лет)	Необслуживаемые объекты и труднодоступные зоны
Хорошая сопротивляемость циклическим нагрузкам	Конструкции, подверженные значительным деформациям (до 10 000 мкм/м)
Возможность монтажа до 16 датчиков на одну линию, слабое затухание сигнала в оптоволокне	Протяжённые объекты (до нескольких километров), объекты сложной конфигурации и др.



Рис. 1. Система возобновляемых источников энергии с мощными ветрогенераторами, обеспечивающая альтернативный и аварийный «канал» энергопитания для финских моногородов Иматра и Лаппенранта

измерению физической нагрузки на лопасть ветрогенератора в определенных местах – в непрерывном режиме. Электрические сигналы (изменение электрического тока) с ВОД поступают на программируемый логический контроллер типа MXD, преобразовываются в цифровой сигнал и анализируются в системе контроля наряду с полученными данными о скорости и направлении ветра, угле тангажа основной конструкции и т.д. Этот пример иллюстрирует рис. 2.

Контроль означенных параметров необходим для предупреждения аварийных ситуаций, выработки рекомендаций по эксплуатации и техническому обслуживанию оборудования. В том числе «необслуживаемого» и такого, доступ к которому на высоте, под водой и в иных сложных условиях ограничен.

### Датчики деформации для волоконно-оптических линий

Тензометрический датчик с оптической решеткой Брэгга, с волоконной решеткой Брэгга или волоконно-оптический датчик (ВОА), датчик деформации для оптических волоконных линий – всё это тождественные понятия и один модельный ряд датчиков, отличаются они только параметрами – техническими характеристиками и форм-фактором. Тем не менее эти отличия в диапазонах измерения, точности, комбинированной погрешности, протяженности оптоволоконных линий, в которых применяются датчики, в рабочих и критичных температурах и соединительных разъемах, адаптерах (и др. параметрах) существенно влияют на их возможное применение разработчиками современной электроники. При этом параметры надёжности, устойчивости к раздавливанию – всё то, что связано с особенностью неразборного корпуса датчика: устойчивость к циклической усталости, отсутствие чувствительности к электромагнитным помехам и коррозии, безопасность от взрывов корпуса – являются общими для всего модельного ряда. К тому же типу датчиков относятся волоконно-оптические акселерометры (ВОА).

Принцип действия решётки Брэгга напоминает фильтрующее зеркало, отражающее излучение только строго определённой длины волны. Для всей остальной части оптического спектра решётка «прозрачна». Этот принцип



Рис. 2. Тензодатчики, встроенные в лопасти ветрогенератора

подробно описан и иллюстрирован в материале [2]. Упрощённо принцип работы можно объяснить так: перестраиваемый лазер излучает различные длины волн (цвета) в оптическое волокно. Когда испускаемый свет встречает «брэгговскую решетку» с той же длиной волны, световой поток отражается на чувствительное фотореле, сигнализирующее при его присутствии, – так определяется длина волны. Механические напряжения в волокне или изменениях температуры пропорционально изменяют отражающийся от решетки сигнал. Отсюда оправдано подключение по одному волокну сразу нескольких датчиков, чувствительных к разным диапазонам длины волны.

Производители изготавливают датчики деформации для волоконно-оптических линий из эпоксидно-стекловолоконного композиционного материала и армированного стекловолокном пластика, что делает их удобными в монтаже и эксплуатации, а параметр надёжности определяется сроком службы свыше 20 лет. В неразборной и неремонтопригодной конструкции датчика буквально «нечему ломаться». Поскольку обновление линейки электронного оборудования в современных реалиях происходит значительно скорее – по срокам условного апгрейда, компонент РЭА с

означенными характеристиками соответствует требованиям разработчиков с условным названием «смонтировал и забыл», ибо регламента и обслуживания в типичном смысле не предусмотрено.

Датчики деформации монтируются жёстким способом к конструкции с помощью клея, что обеспечивает не только надёжность работы компонента и модулей, с ним связанных, в различных, в том числе агрессивных средах, но и качественную, «идеальную» – как её позиционируют разработчики – передачу нагрузки между обрабатываемым элементом и решёткой Брэгга, применяемой к волокну при его включении в композитную матрицу.

После монтажа-склеивания датчики соединяются последовательно с помощью адаптера, обеспечивающего непрерывность оптического волокна. Поскольку потери сигнала с таким инженерным решением минимальны, а собственное затухание оптического волокна незначительно, датчики деформации для волоконно-оптических линий могут быть распределены на очень большие расстояния (несколько километров). Поскольку оптические системы – это проектные решения под конкретного заказчика, номенклатура электронных компонентов компании Scaimе весьма консерватив-

Таблица 2. Технические характеристики оптического фиксированного датчика напряжения SCAIME – FT-OBEG-120-HT-FE-1117

Параметр	Уточнение	Значение
Диапазон измерения (ЕМ)	Номинальный диапазон (ЕМ)	-5000 ... +5000 мкм/м
Чувствительность	Sensitivity	± 0,8 мкм/м
Разрешение	Resolution	± 1* мкм/м
Комбинированная погрешность	Ошибка	1% ЕМ тепловая*
Компенсация тепловая		0,1°С
Длина волны	Диапазон эффективной работы	1530...1565 Нм
Рабочая температура	Диапазон температур	-30...+80°С
Критичная температура внедрения	Температура установки	-30...+200°С
Соединители	Разъёмы	ST/PC, FC/PC и др. опционально

\* Значение зависит от особенностей сбора данных.

Таблица 3. Технические характеристики оптического фиксированного датчика напряжения SCAIME – FT-OBEG-120-HT-FE-1117

Параметр	Уточнение	Значение
Диапазон измерения (ЕМ)	Номинальный диапазон (ЕМ)	-5000...+ 5000 мкм/м
Повторяемость сигнала		±5 мкм/м
Разрешение	Resolution	< 1* мкм/м
Точность	Accuracy	±10 мкм/м
Максимальное расстояние	Между двумя датчиками, максимум	1,3 км
Максимальная длина оптоволоконной линии		40 км
Рабочая температура	Диапазон температур	-30...+60°С
Соединители	Разъёмы	ST/PC, FC/PC, FC/APC опционально

\* Значение зависит от особенностей сбора данных.

на и представлена модельным рядом оптоволоконных датчиков и акселерометров типа OBEG, OMSG, OMSGW, OBLG, OBDI, OBTI, OBAS, OBTS, OMSG, OMSGW, OBEG, OBLG. Среди них:

- OMSG для монтажа на клей;
- OMSGW для монтажа болтами/сваркой;
- OBEG – тензодатчики для среды бетона или гудрона;
- OBLG – экстензометры с длинным основанием 0,5/1/1,5 м;
- OBAS – акселерометр – контроллер ускорения (BOA);
- OBTS – температурный сенсор;
- OBDI – датчик перемещения;
- OBTI – измеритель наклона – датчик угла деформации.

Рассмотрим некоторые типы датчиков и акселерометров, часть которых разработана десять лет назад, однако они не потеряли актуальности; сегодня их можно встретить в качестве элементов современной электроники и оборудования практически во всех сферах, где применяются электронные конструкции, но более всего в системах оптоволоконных линий связи. Европейская номенклатура обозначается ATEX 2014/34/EU, IECEx [5].

### Оптический фиксированный датчик напряжения OBEG-120-HT

Датчик стабильно работает в условиях температурного диапазона -30...+180°С. Это обеспечено нанесением на его корпус защитного покрытия горячим способом при температуре около 200°С. Надёжное решение с выводом разъёмов с кольцевыми трубками из нержавеющей стали делает датчик устойчивым к собственным деформациям корпуса, раздавливанию под воздействием значительных внешних сил, а «заливка» корпуса позволяет применять его даже в горячей смоле (гудроне). Оптоволоконный датчик комплектуется кабелем для адаптации к сети и коммуникации.

На рис. 3 представлен внешний вид датчика SCAIME – FT-OBEG-120-HT-FE-1117.

Датчик соединяется с многожильным оптическим кабелем Ø2,8 мм в защитной трубке (оплётке) с коммутацией к линии и электронному контроллеру в распределительной коробке (шкафу оборудования).

Технические характеристики датчика OBEG-120 представлены в табл. 2.



Рис. 3. Внешний вид датчика SCAIME – FT-OBEG-120-HT-FE-1117



Рис. 4. Внешний вид оптоволоконного датчика FT-OBEG-120-FE-1117

### Датчик детонации FT-OBEG-120-FE-1117 для оптоволоконных линий

Отличительные свойства оптоволоконных датчиков FT-OBEG-120-FE-1117:

- высокая устойчивость к циклической усталости;
- отсутствие чувствительности к электромагнитным помехам;
- отсутствие коррозии;
- большая резистентность к разрушению (невзрывоопасны).

Оптоволоконный датчик FT-OBEG-120-FE-1117 представлен на рис. 4.

Его параметры сопоставимы с указанными в табл. 1. Дополнительные технические характеристики оптоволоконного датчика FT-OBEG-120-FE-1117 представлены в табл. 3.

Аксессуары к оптическому фиксированному датчику напряжения SCAIME – FT-OBEG-120-HT-FE-1117 те же, что и в рассмотренном варианте выше (для FT-OBEG-120-HT-FE-1117). То же касается и форм-фактора, представленного на рис. 5. Размеры FT-OBEG-120-HT-FE-1117 незначительно отличаются от FT-OBEG-120-HT-FE-1117.

### Волоконно-оптический акселерометр OBAS-002

Волоконно-оптические акселерометры (BOA) по определению обеспечивают иные относительно ВОД функции и контроль параметров, хотя оба рассматриваемых типа основаны на одном

принципе тензорезистивного контроля характеристик, деформации. Именно поэтому при монтаже ВОА применяют жёсткое крепление к контролируемой конструкции. Контролируемые параметры также отличаются ввиду принципа действия. Если ВОД (при сопоставимом диапазоне измерения ЕМ) в основном характеризуются чувствительностью и разрешением в значении мкм/м – см. табл. 3 и табл. 4, то ВОА по принципу своей работы характеризуются изменением в деформации конструкции и соответствующими параметрами контроля (площади, веса и т.д. в значении г/ч): актуальные сведения об этом представлены в табл. 4.

Так, волоконно-оптический акселерометр SCAIME – FT-OBAC-002-FE-0420 обеспечивает точное и надёжное измерение вибрации, измерение непрерывных ускорений, динамику ускорений. При этом ВОА отличается крайне низкой поперечной чувствительностью, точное и надёжное измерение вибрации [3].

Монтажные планки на корпусе позволяют удобно монтировать акселерометр. Они могут быть привинчены или приварены к жёсткой конструкции (оборудованию). Форм-фактор ВОА ОВАС-002 в двух видах представлен на рис. 6.

Монтажная пластина типа А (слева) или В (справа) в сочетании с многожильным оптическим кабелем расширяют возможности крепления устройства в разных конфигурациях.

На рис. 7 представлен внешний вид волоконно-оптического акселерометра ОВАС-002 с видом на точки крепления для монтажа. Технические характеристики представлены в табл. 4.

### Тензодатчики деформации OBDI

Оптический датчик перемещения OBDI обеспечивает точный контроль параметров и надёжное измерение

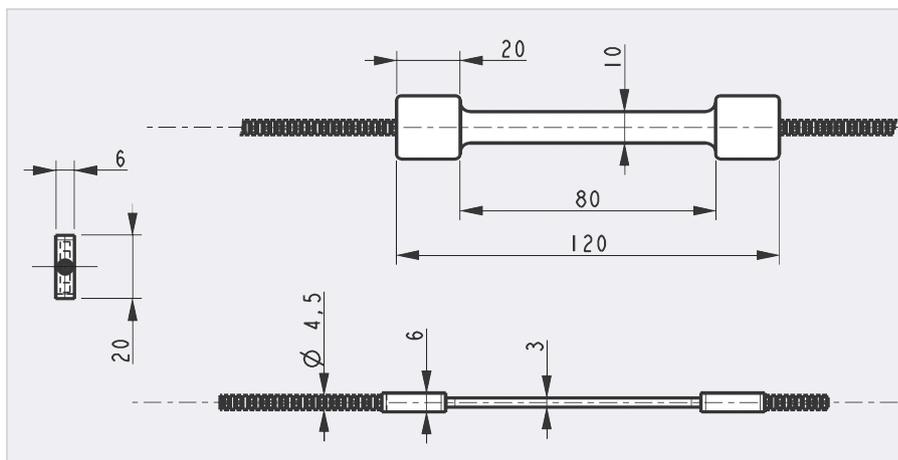


Рис. 5. Форм-фактор волоконно-оптического датчика детонации FT-OBSG-120-HT-FE-1117

Таблица 4. Технические характеристики волоконно-оптического акселерометра ОВАС-002

Параметр	Уточнение	Значение
Диапазон измерения (ЕМ)	Номинальный диапазон (ЕМ)	-2...+2 г
Чувствительность S	Sensitivity S	-3,3×10 <sup>-3</sup> г/ч
Длина волны		1530...1565 Нм
Комбинированная погрешность	Ошибка	±0,5% FS *
Поперечная чувствительность		< 1% FS
Диапазон частот ΔS		< 5% в диапазоне частот 0...20 Гц
Резонансная частота		110 Гц
Рабочая температура	Диапазон температур	-20...+50°C
Тепловой дрейф		-0,07°C/рпм
Максимальный диапазон частот		0...50 Гц
Температура хранения и консервации	Температура установки	-40...+60°C
Соединители	Разъёмы	ST/PC, FC/PC и др. опционально

\* Значение зависит от особенности сбора данных.

смещения практически в любых конструкциях с жёстким основанием. В бытовой сфере на основе рассматриваемого датчика автором неоднократно проводился мониторинг безопасности деревянного дома, который из-за длительной эксплуатации постепенно разрушался – увеличивалось смещение нижних венцов, а также части конструкций – пола, несущих стен и крыши. В этом случае датчик деформации (вариант – растяжения) устанавли-

вают между двух расходящихся поверхностей, к примеру, основного дома и пристройки к нему.

Точность фиксации смещения и высокая стабильность работы в условиях широкого температурного режима (см. табл. 5) обеспечена компенсацией температурного воздействия в технологии FBG с помощью решётки Брегга. По тому же принципу и в связи с высокой конструктивной чувствительностью тензометрического

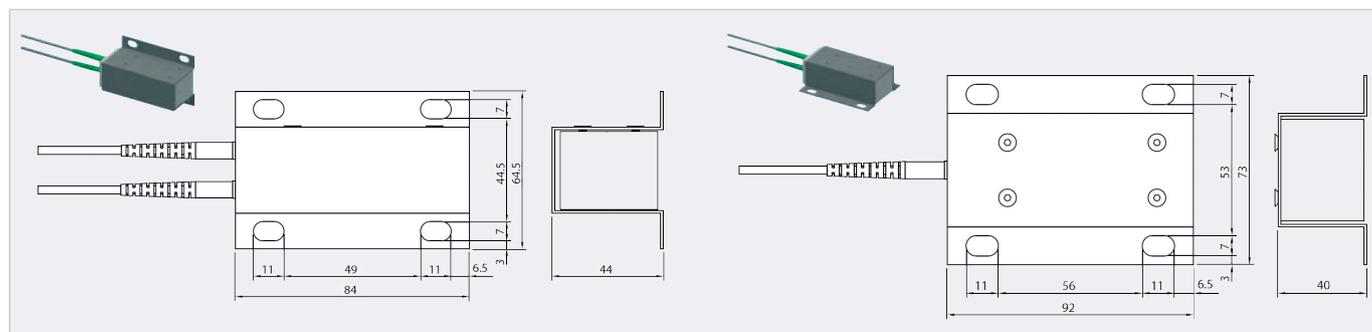


Рис. 6. Форм-фактор волоконно-оптического акселерометра ОВАС-002

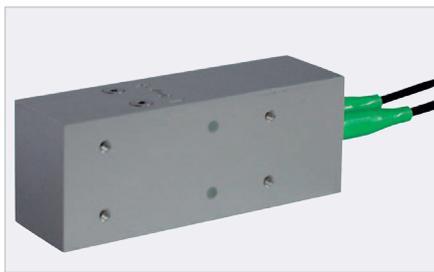


Рис. 7. Внешний вид волоконно-оптического акселерометра OVAS-002

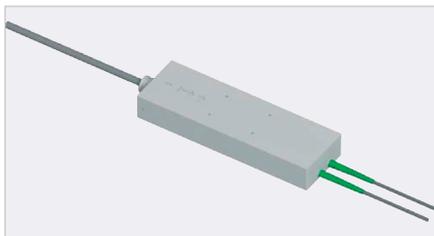


Рис. 8. Внешний вид датчика смещения OBDI

датчика смещения OBDI мы контролировали стабильность и разрушение кирпичных конструкций печей и несущих стен [4]. Применяя принцип действия датчика в относительно несложном по схемотехнике электронном устройстве, собрать которое способен каждый инженер и разработчик РЭА с помощью паяльника и нескольких дискретных элементов, уместно создать устройство, сигнализирующее при смещении контролируемых элементов конструкции и даже расширении трещин. Это то, что можно сделать буквально за пару часов [4]. Разумеется, в современных разработках электронных устройств, связанных с АЦП, анализом и хранением цифровых данных с помощью контроллеров и компьютерных систем с наглядной демонстрацией информации, с функциями ввода-вывода данных, применяются более сложные инженерные решения. Но на простом примере мы пояснили, что применение датчика OBDI, как и других, в том числе от Scaime, может носить прикладной и универсальный характер. Тензодатчик OBDI поставляется с платой и кронштейном для удобного крепления. Специальное исполнение позволяет применять датчик даже под водой и в относительно агрессивной среде. Примером тому является использование оптоволоконных датчиков деформации с длинной базой, погруженных на глубину 16 м на пирсе в Монако [1]. В табл. 5 представлены технические характеристики ВОД OBDI производства Scaime.

Таблица 5. Технические характеристики волоконно-оптического датчика OBDI

Параметр	Уточнение	Значение
Диапазон измерения (ЕМ)	Номинальный диапазон (ЕМ)	25/50/100 мм опционально
Чувствительность	Sensitivity	-8 ~17 ~33 мкм
Разрешение		0,05% E <sub>макс</sub> *
Длина волны		1530...1565 Нм
Комбинированная погрешность	Ошибка	±0,5% E <sub>макс</sub>
Рабочая температура	Диапазон температур	-20...+50°C
Тепловой дрейф		Термокомпенсация встроенной решетки Брэгга
Особенности монтажа		Крепление на винт или клей (липкую основу)
Температура хранения и консервации	Температура установки	-40...+80°C
Соединители	Разъемы	ST/PC, FC/PC и др. опционально

\* Значение зависит от особенностей сбора данных.

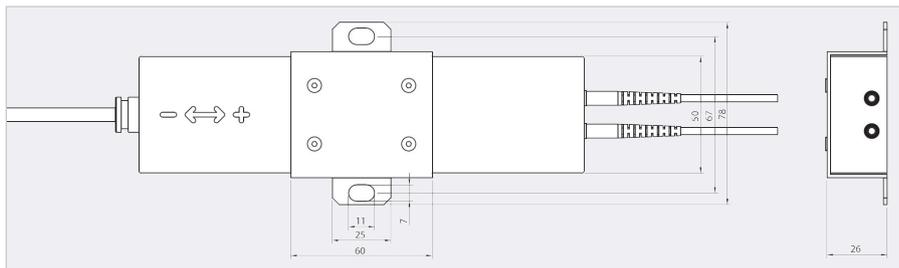


Рис. 9. Форм-фактор датчика смещения OBDI



Рис. 10. Внешний вид датчика FT-OBLG-FE-0521

На рис. 8 представлен внешний вид датчика смещения OBDI, а на рис. 9 – форм-фактор.

### Экстензометр с длинной базой OBLG

Благодаря шаровым креплениям датчики OBLG удобно монтируются на все типы поверхностей, даже если они не идеально ровные. На рис. 10 представлен внешний вид датчика FT-OBLG-FE-0521 производства Scaime.

На рис. 11 представлены возможности монтажа датчиков FT-OBLG-FE-0521 с длинной базой на неровные поверхности.

Экстензометры – волоконно-оптические датчики FT-OBLG-FE-0521 с длинной базой и с высокой чувствительностью обеспечивают контроль растяжения и сжатия поверхностей, мониторинг динамических «напряжений» в несущих конструкциях и не только. Датчик соответствует классу защиты IP66, изготовлен из нержавеющей стали с возможностью монтажа

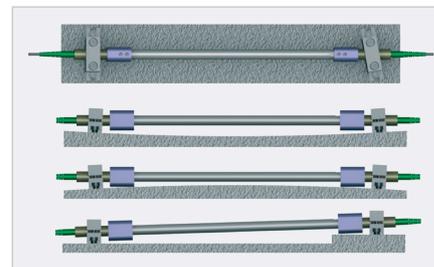


Рис. 11. Некоторые возможности монтажа датчиков FT-OBLG-FE-0521 с длинной базой на неровные поверхности

на шаровых опорах в условиях несовершенных поверхностей.

В табл. 6 представлены технические характеристики экстензометра FT-OBLG-FE-0521 производства Scaime.

На рис. 12 представлен форм-фактор экстензометра FT-OBLG-FE-0521.

### Экстензометр с длинной базой OBLG

Кроме описанных выше применительно к экстензометру OBLG назначений контроля растяжения и сжатия, мониторинга физического напряжения в конструкциях, технических характеристик и особенностей, датчик с длинной базой FT-OBSGW100-FE-0918 предназначен для пайки (корпуса) или закрепления винтом. Этот датчик существенно отличается от предыдущего относительно малая длина –

Таблица 6. Технические характеристики волоконно-оптического экстензометра FT-OBLG-FE-0521

Параметр	Уточнение	Значение
Диапазон измерения (ЕМ)	Номинальный диапазон (ЕМ)	±2000 мкм/м
Чувствительность	Sensitivity	±0,8 мкм/м
Тепловая чувствительность решётки Брегга	Grating thermal sensitivity	±9 рм/°С
Водонепроницаемость	Класс	IP66
Материал		Нержавеющая сталь класса 316L
Рабочая температура	Диапазон температур	-20...+70°С
Точность	Accuracy	±0,5 % Е.М
	Repeatability	±0,2 % Е.М
Особенности монтажа		Сварка или на винт
Температура хранения и консервации	Температура установки	-20...+70°С
Длина датчика		0,5/1/1,5 м
Соединители	Разъёмы	ST/PC, FC/PC, FC/APC и др. опционально

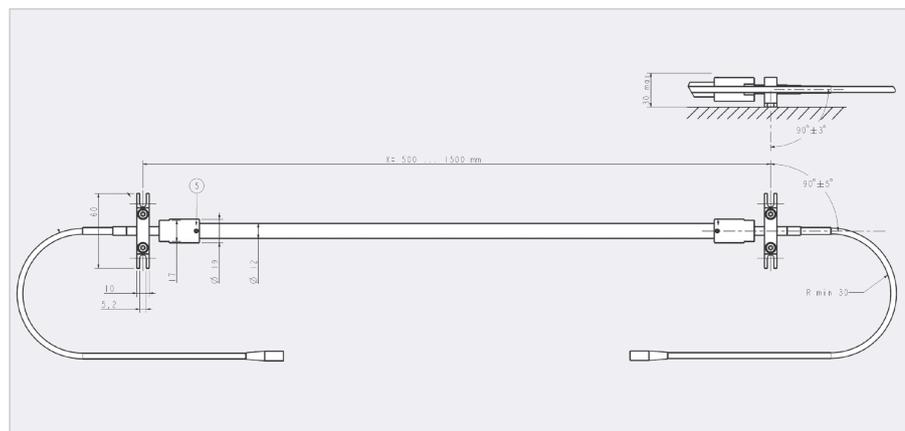


Рис. 12. Форм-фактор экстензометра FT-OBLG-FE-0521



Рис. 13. Внешний вид экстензометра FT-OBSGW100-FE-0918

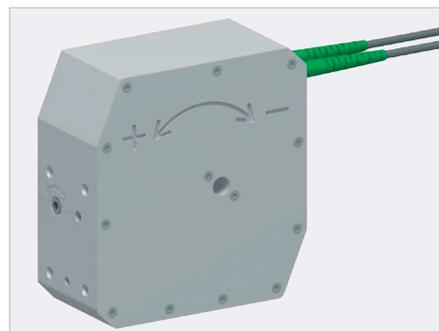


Рис. 14. Внешний вид датчика FT-OBTI-FE-1117

всего 10 см, поэтому он конструктивно предназначен для точного мониторинга в «малых средах» и участках конструкций.

В табл. 7 представлены технические характеристики экстензометра FT-OBSGW100-FE-0918 производства Scaime. Внешний вид экстензометра FT-OBSGW100-FE-0918 представлен на рис. 13.

### Датчик-измеритель наклона для волоконно-оптических линий ОВТИ

Внешний вид датчика, называемого также инклинометром, представлен на рис. 14, а форм-фактор с двумя вариантами крепления и монтажа – на рис. 15.

Как видно из рис. 15 и рис. 16, это датчик с поворотными (под шестигранный малый ключ) слотами для монтажа. В том числе благодаря этому датчик обеспечивает точное измерение отклонения угла. Эта функция применяется при мониторинге вертикальной устойчивости плотин, дамб, опор, мостов, туннелей, зданий и относительно малых конструкций. Высокая чувствительность и термостабильность в работе достигается внедрением решетки Брегга. Это один из немногих датчиков с собственным весом более 1 кг.

В табл. 8 представлены технические характеристики датчика-измерителя наклона для волоконно-оптических линий ОВТИ.

### Датчик температуры OBTS-100

Датчик температуры типа OBTS-100 с решёткой Брегга, реализованный, как и все рассматриваемые, по технологии

Таблица 7. Технические характеристики волоконно-оптического экстензометра FT-OBSGW100-FE-0918

Параметр	Уточнение	Значение
Диапазон измерения (ЕМ)	Номинальный диапазон (ЕМ)	±2000 мкм/м
Чувствительность	Sensitivity	±0,8 мкм/м
Тепловая чувствительность решётки Брегга	Grating thermal sensitivity	±9 рм/°С
Водонепроницаемость	Класс	IP66
Материал		Нержавеющая сталь класса 316L
Рабочая температура	Диапазон температур	-20...+70°С
Точность	Accuracy	±0,5 % Е.М
	Repeatability	±0,2 % Е.М
Особенности монтажа		Сварка, пайка или на винт
Температура хранения и консервации	Температура установки	-20...+70°С
Длина датчика		100 мм
Соединители	Разъёмы	ST/PC, FC/PC, FC/APC и др. опционально

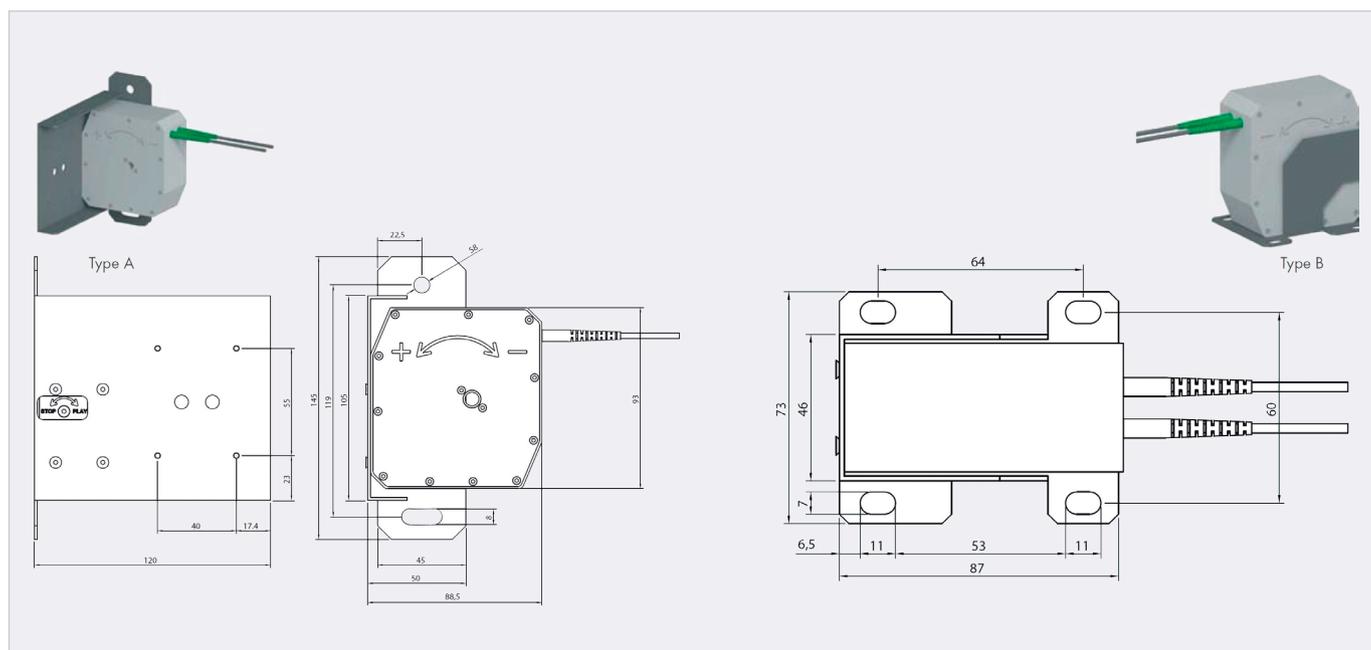


Рис. 15. Форм-фактор с двумя вариантами крепления и монтажа FT-OBTI-FE-1117

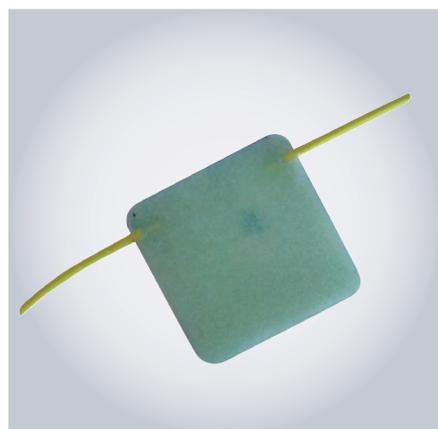


Рис. 16. Внешний вид датчика температуры FT-OBTS-100-FE-1117

Fiber Optic Bragg Grating (FBG) предназначен для измерения температуры с высокой точностью. Это также достигается за счёт технологии изготовления датчика. Дополнительные преимущества для разработчиков РЭА определяются отсутствием чувствительности к электромагнитным помехам и отсутствием возможности коррозии. Внешний вид датчика температуры FT-OBTS-100-FE-1117 представлен на рис. 16.

В табл. 9 представлены технические характеристики датчика-измерителя наклона для волоконно-оптических линий OBТИ.

В завершение для разработчиков будет небезынтересна сводная таблица отличий рассмотренных выше датчиков, она представлена далее. Сводная табл. 10, в сути которой раскрываются отличия датчиков модельного ряда, представлена ниже.

Таблица 8. Технические характеристики волоконно-оптического датчика-измерителя наклона для волоконно-оптических линий OBТИ

Параметр	Уточнение	Значение
Диапазон измерения (ЕМ)	Номинальный диапазон (ЕМ)	$\pm 3^\circ$ *
Чувствительность	Sensitivity	$-2,10...3^\circ/\text{ч}$
Длина волны		1530...1565 нм
Тепловая компенсация	Grating thermal sensitivity	Интегрированная решётка Брэгга
Время отклика		$\leq 20$ с
Комбинированная погрешность	Error	$\pm 0,5\%$ ЕМ
Рабочая температура	Диапазон температур	$-20...+50^\circ\text{C}$
Разрешение (дискретность)		$0,002^\circ$ *
Особенности монтажа		На винт
Температура установки и хранения	Температура установки	$-20...+60^\circ\text{C}$
Масса		1,2 кг
Соединители	Разъёмы	ST/PC, FC/PC, FC/APC и др. опционально

\* Значение зависит от особенностей сбора данных.

В табл. 10 первые четыре типа: OBSG, OBSGW, OBEG, OBLG – датчики деформации (ВОД). Среди них:

- OBSG для монтажа на клей;
- OBSGW для монтажа болтами/сваркой;
- OBEG – тензодатчики для бетона или гудрона;
- OBLG – экстензометры с длинным основанием 0,5/1/1,5 м;
- OBAS – акселерометр – контроллер ускорения (ВОА);
- OBTS – температурный сенсор;
- OBDI – датчик перемещения;
- OBТИ – измеритель наклона – датчик угла деформации.

### Особенности разъёмных соединений ВОД, ВОА и электронных контроллеров

Современное поколение волоконно-оптических соединителей, предложенных разработчикам РЭА от Scaime, обеспечивает высокую надёжность функционирования оборудования, коммутации и экономичности решений для наружного и внутреннего применения. Такие электронные устройства широко используются в промышленности, авиации, гражданском и военном применении. Винтовой запорный механизм с простой и безопасной установкой,

водонепроницаемость, пыленепроницаемость и устойчивость к коррозии, соответствие требованиям RoHS – лишь некоторые из рассматриваемых преимуществ.

Характеристики разъёмных соединений проверены в соответствии со следующими значениями и условиями [5]:

- защита от проникновения (сопряжённая) IEC 60529 IP68;
- сила отрыва 80 даН (80 кг);
- рабочая температура по стандарту IEC 61300-2-22 в диапазоне  $-40...+85^{\circ}\text{C}$ ;
- устойчивость к вибрации IEC 61300-2-1 на уровне 10–500 Гц/10g;
- ударная устойчивость по требованиям IEC 61300-2-9 – 100 г;
- экспериментальное исследование на манер краш-теста в условиях солевого тумана дало результаты надёжности в течение 30 суток, затем эксперимент прекратили.

## Выводы и перспективы

Как видно из приведённых сведений, рассмотренные датчики работают в широком спектре задач, диапазоне температур, а некоторые даже в сложных условиях погружения в жидкости (воду) и строительные растворы, неокислотные смеси. ВОД и ВОА остаются незаменимыми в промышленности и быту вне зависимости от фирмы производителя. Однако на рассмотренных примерах фирмы Scaime наиболее чётко видна перспектива и особенности в сравнительном анализе всех аналогичных датчиков деформации поверхности, угла деформации, перемещения, наклона, экстензометров и акселерометров других производителей. По сути, принцип их действия сопоставим. Автор благодарит Александра Константинова за содействие в получении сведений о востребованной разработчиками РЭА продукции компании Scaime – проспектов на французском языке. Из изучения французской культуры и опыта сохранения памятников старины мы узнали, что в своё время в Пантеоне для мониторинга состояния здания установили 8 экстензометров с длинным основанием типа OBLG-1000 (длиной 1 м) и 6 датчиков температуры OBTS-100 – последние для устройств термокомпенсации экстензометров. Подключённые к электронному программируемому контроллеру MDX400T-R, сопряжённому с Campbell, тензодатчики обеспечили

Таблица 9. Технические характеристики волоконно-оптического датчика измерителя наклона для волоконно-оптических линий ОВТИ

Параметр	Уточнение	Значение
Разрешение (дискретность)		0,05...0,1 $^{\circ}\text{C}$
Точность метрологии	Ассурасу	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
Повторяемость	Периодичность замера	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Диапазон измерения (ЕМ)	Номинальный диапазон (ЕМ)	$-30...+80^{\circ}\text{C}^*$
Рабочая температура	Диапазон температур	$-30...+100^{\circ}\text{C}^{**}$
Максимальное расстояние между двумя датчиками		1,5 км
Максимальная длина оптоволоконной линии		40 км
Температура установки и хранения	Температура установки	$-20...+60^{\circ}\text{C}$
Чувствительность к физическому напряжению (воздействию)	Чувствительность к деформации	$< 0,3^{\circ}\text{C}/1000 \text{ мкм/м}$
Соединители	Разъёмы	ST/PC, FC/PC, FC/APC и др. опционально

\*  $+80...+100^{\circ}\text{C}$  в пике – максимальная температура.

\*\* Значение зависит от особенностей сбора данных.

Таблица 10. Сводная таблица отличий ВОД и ВОА типов OBSG, OBSGW, OBEG, OBLG, OBDI, OBTI, OBAS, OBTS

Модель	OBSG	OBSGW	OBEG	OBLG	OBDI	OBTI	OBAS	OBTS
Вместимость	$-5000...5000 \text{ мкм/м}$	$-2000...2000 \text{ мкм/м}$	$-5000...5000 \text{ мкм/м}$	$-2000...2000 \text{ мкм/м}$	25/50/100 мм	$-3...3$	$-2...+2 \text{ г}$	$-30...+180^{\circ}\text{C}$
Разрешение	1 мкм/м	1 мкм/м	1 мкм/м	1 мкм/м	10/25/50 мкм	0,002 $^{\circ}$	0,10 %	0,05...1,1 $^{\circ}\text{C}$
Комбинированная ошибка (% Н.Р.)	0,25	1	0,25	1	0,5	0,5	0,5	0,3...1
Чувствительность	1,2 мкм/м	1,25 мкм/м	1,2 мкм/м	1,25 мкм/м	9/17/33 мкм	$2 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}/\text{мкм}$	$\pm 3,3 \times 10^{-3} \text{ г/мкм}$	10...25 мкм/ $^{\circ}\text{C}$

высокоточный мониторинг состояния памятника архитектуры. Этот пример мы могли бы использовать в России, где пока техническая оснащённость для устройств мониторинга во многих сферах оставляет желать лучшего. Но ситуация поправима, если отечественные разработчики РЭА повысят внимание к тензодатчикам и устройствам мониторинга растяжения-сжатия с соединением по волоконно-оптическим линиям, в том числе по полевой шине CANopen.

## Литература

1. Бабушкина Л. Оптоволоконные системы контроля деформации корпуса судна // Презентация Прософт. URL: [https://tp.prosoft.ru/docs/shared/webdav\\_bizproc\\_history\\_get/191850/191850/](https://tp.prosoft.ru/docs/shared/webdav_bizproc_history_get/191850/191850/).

2. Варжель С.В. Волоконные брегговские решётки: учебное пособие. СПб.: ИТМО, 2015.
3. Вестерский Н.М., Дубинко Т.Ю. и др. Измеритель деформаций G01B21/32 – для измерения деформации твердых тел // URL: <https://poleznayamodel.ru/model/10/108133.html>.
4. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. М.: ДМК-Пресс, 2011. 144 с.
5. Техническая документация фирмы «Scaime Sas», Франция // URL: <https://scaime.com/weighing-knowledge-center>.
6. Широков Ю. Scaime – эксперт по взвешиванию // СТА. 2021. № 1. URL: <https://www.cta.ru/articles/otrasli/kontrolno-izmeritelnye-sistemy/138157/>.

