

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Шелемба Иван Сергеевич

**Методы опроса распределенных волоконно-оптических
измерительных систем и их практическое применение**

01.04.05 «Оптика»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук
С.А. Бабин

Новосибирск-2018

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Основы точечных и распределенных сенсорных систем (обзорно-методическая).....	14
1.1. Сенсорные свойства ВБР, мультиплексирование ВБР.....	14
1.2. Распределённые сенсорные системы на основе массива ВБР и разных видов рассеяния (КР, РР, РМБ).....	17
Глава 2. Квази-распределённая сенсорная система на основе массива ВБР-датчиков.....	25
2.1. Перестраиваемый эрбиевый лазер на основе перестраиваемой ВБР ..	25
2.2. Спектральное детектирование сигналов ВБР с помощью спектроанализатора и перестраиваемого эрбиевого лазера.....	29
2.3. Гибридное спектрально-временное детектирование сигналов ВБР с помощью метода оптической временной рефлектометрии	35
2.4. Мониторинг турбогенераторов	42
2.5. Мониторинг уникальных сооружений сложной топологии на примере манежа «Заря»	55
Глава 3. Распределённая сенсорная система на основе комбинационного рассеяния	83
3.1. Разработка метода опроса распределённого волоконного датчика температуры на основе комбинационного рассеяния	83
3.2. Описание конструкции коммерческих распределенных волоконно- оптических датчиков	87
3.3. Метрологические характеристики распределённых волоконно- оптических датчиков температуры.....	89
3.4. Пожарный извещатель на базе распределённого волоконно- оптического датчика температуры	92
3.5. Мониторинг сверхпроводящего кабеля	99
3.6. Мониторинг нефтяных скважин	108
Заключение.....	116

Список литературы	118
Список цитируемой литературы.....	118
Публикации автора по теме диссертации	125
Приложения.....	132
Приложение А. Акт внедрения блока волоконно-оптического датчика извещателя пожарного теплового линейного «ЕЛАНЬ»	132
Приложение Б. Акт внедрения распределенного датчика температуры ASTRO E543.....	134
Приложение В. Письмо ФСК ЕЭС о возможности применения систем контроля температуры ОВ встроенного в грозотрос.....	135

Введение

Оптоволоконные технологии измерения физических параметров являются одной из наиболее быстроразвивающихся областей прикладной оптики. Оптоволоконные датчики обладают малым весом и размером, отсутствием электричества в измерительном тракте, нечувствительностью к электромагнитным помехам и воздействию агрессивных сред, а также возможностью мультиплексирования и объединения большого количества датчиков в распределённые информационно-измерительные системы. Благодаря этим уникальным свойствам они широко используются в решении различных научных и практических задач, в которых необходимо измерять температуру, деформации и другие параметры протяжённых объектов [1].

Оптоволоконные датчики можно условно разделить на две группы: точечные и распределённые.

Наиболее распространённый тип точечных датчиков основан на использовании волоконной брэгговской решётки (ВБР) в качестве преобразователя измеряемого воздействия в оптический сигнал [2]. ВБР представляет собой отрезок оптического волокна с периодическим изменением показателя преломления в сердцевине [3-5]. ВБР-датчик отражает свет с определённой (т.н. брэгговской) длиной волны $\lambda_{Br}=2n_{eff}\Lambda$, где n_{eff} – эффективный показатель преломления моды волоконного световода, Λ – период модуляции, которые чувствительны к температуре и деформации световода. Поскольку размеры стандартных ВБР малы (не более сантиметра), такой датчик измеряет значение температуры (или деформации) только в той точке оптического волокна, где находится ВБР. Для измерения в нескольких точках необходимо сформировать в оптическом волокне несколько ВБР. С учетом потерь света, количество ВБР в одной волоконной линии может составлять ~ 100 , сенсорную систему с большим количеством точечных ВБР-датчиков можно считать квази-распределённой.

В отличие от точечных, в распределённых волоконно-оптических датчиках (ВОД) в качестве чувствительной среды используется вся длина оптического волокна. В качестве измеряемого оптического сигнала используется рассеянный свет (за счёт эффектов Рэля, Мандельштама-Бриллюэна или Рамана), а метод оптической временной рефлектометрии (ОВР) позволяет измерять распределение температуры, деформации или другого внешнего воздействия вдоль оптического волокна [6-8]. Измерительные системы, основанные на рассеянии, могут уступать распределённым системам на основе большого количества точечных ВБР-датчиков в пространственном разрешении и чувствительности, однако имеют такое важное преимущество как пространственная непрерывность измеряемого параметра.

За последние годы волоконно-оптические датчики физических величин продемонстрировали значительный потенциал для проведения физических измерений и других практических применений [9, 10]. Это во многом обусловлено их чувствительностью к широкому кругу физических величин, химической устойчивостью, долговечностью, простотой сопряжения с высокоскоростными и помехозащищенными волоконно-оптическими линиями связи, пожаро- и взрывобезопасностью. Последнее особенно важно для применений в отраслях, связанных с горючими и взрывоопасными материалами, например, в угле-, нефте- и газодобыче и пр. Кроме этого, сенсоры на основе оптоволокна достаточно компактны, не требуют систематического обслуживания и очень устойчивы к химическому воздействию.

В угле-, нефте- и газодобыче волоконные датчики используются, в первую очередь, для измерения температуры (обычно методом комбинационного рассеяния) и давления (ВБР, интерферометры) в скважинах, а также для мониторинга трубопроводов [11]. Волоконные датчики температуры также могут применяться в системах пожарной сигнализации различных сооружений, а также в энергетике (контроль

нагрева элементов турбогенераторов, линий электропередач, трансформаторов и т.д.) [12]. В энергетике также используются датчики деформаций и вибраций на основе ВБР (например, для предупреждения разрушения турбогенераторов, что случилось на Саяно-Шушенской ГЭС). В атомной энергетике используются радиационно-стойкие датчики. Датчики деформаций и вибраций используются также для мониторинга элементов конструкций в капитальном строительстве (мосты, тоннели, дамбы, плотины, морские нефтедобывающие платформы, фундаменты, крыши, высотные здания и т.д.) [13]. В последнее время активно развиваются технологии внедрения датчиков в композитные материалы (т.н. «умные» материалы) для он-лайн мониторинга состояния изделий из этих материалов (в объектах инфраструктуры, авиастроении, космической технике и т.д.) [14].

Однако масштабы практического использования волоконных сенсорных систем ограничены достаточно высокой стоимостью оптоэлектронного устройства опроса волоконных датчиков, как в случае точечных датчиков (ВБР), так и в случае распределенных (в первую очередь, датчиков температуры на основе комбинационного рассеяния света). Необходимым свойством волоконной сенсорной системы является ее надежность и долговременная стабильность работы, что в свою очередь требует полностью волоконной схемы системы, включая устройство опроса. С этой точки зрения создание новых эффективных и недорогих устройств опроса является актуальной и важной задачей.

На момент начала работы основной задачей, определяющей практическое применение сенсоров на основе ВБР, являлась разработка методов для измерения малых сдвигов брэгговской длины волны с большой точностью. Использование широкополосного источника излучения и спектроанализатора позволяет определять изменение температуры сенсора на 0.1°C или относительное растяжение $\sim 10^{-6}$, но такая система очень дорога и не является полностью волоконной. Одним из возможных вариантов волоконной схемы является использование для опроса узкополосного

непрерывного перестраиваемого волоконного лазера (например, эрбиевого, работающего в окне прозрачности кварцевых световодов в области 1.5 мкм) и фотодетектора, на который поступает отраженное от ВБР излучение. Для опроса распределенной сенсорной системы на основе комбинационного рассеяния также перспективным представлялось использование импульсного эрбиевого лазера и волоконных фильтров на основе ВБР и волоконных ответвителей.

Таким образом, основная цель диссертационной работы состояла в разработке методов опроса распределенных волоконных сенсорных систем (как на основе массива ВБР датчиков, так и на основе комбинационного рассеяния света) в полностью волоконном варианте, максимально пригодных для практических применений.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработка перестраиваемого эрбиевого лазера на основе перестраиваемой ВБР.
2. Разработка методов опроса массива ВБР датчиков.
3. Разработка волоконной схемы и методов опроса распределённого датчика на основе комбинационного рассеяния света в волокне.
4. Применение реализованных сенсорных систем на практике.

Описание диссертации.

В главе 1 рассмотрены основы точечных и распределенных сенсорных систем. В параграфе 1.1 описан основной принцип работы датчиков на основе ВБР. Приведены формулы для сдвига брэгговской длины волны вследствие деформации и изменения температуры. Описаны принципы мультиплексирования ВБР в схемах с временным и спектральным разделением каналов.

В параграфе 1.2 определены два основных вида оптических сенсорных систем (распределенные и квази-распределенные). Описаны три варианта распределенных систем, основанных на типе рассеяния (рэлеевское

рассеяние, комбинационное рассеяние и рассеяние Мандельштама-Бриллюэна) и изложены принципы оптической рефлектометрии с разверткой по времени (optical time domain reflectometry, OTDR) и частоте (optical frequency domain reflectometry, OFDR), применяемые для определения точки измерения при регистрации обратного рассеяния (рэлеевское и комбинационное рассеяние). Указаны методы регистрации спонтанного и вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (Brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR), Brillouin optical time domain analysis (BOTDA), Brillouin optical frequency domain analysis (BOFDA)).

Для квази-распределенных систем представлена классификация волоконных датчиков по четырем категориям в зависимости от регистрируемой модуляции параметров. Представлена концепция и описаны схемы временного и спектрального разделения каналов для опроса массива датчиков.

В главе 2 рассматривается квази-распределенная система на основе массива ВБР-датчиков.

В параграфе 2.1 представлена реализация перестраиваемого эрбиевого лазера. Описаны характеристики эрбиевого лазера (выходная мощность, диапазон перестройки), перестраиваемого при помощи дифракционной решетки и ВБР. Показано, что оптимальным элементом для селекции длины волны генерации является перестраиваемая ВБР.

Реализованы три конфигурации резонатора перестраиваемого эрбиевого лазера с линейным резонатором, с кольцевым резонатором, с кольцевым резонатором и циркулятором, проведено сравнение выходных характеристик. Показано, что наименьшую ширину линии генерации и наилучшую стабильность можно получить в схеме с кольцевым резонатором и циркулятором.

В параграфе 2.2 представлена схема волоконно-оптической сенсорной системы на основе широкополосного источника и спектроанализатора Ando AQ6317B с разрешением ~ 10 пм, собранной для опроса массива из 12-ти

ВБР. Отмечено, что погрешность определения температуры в данной системе не превышает 0.5°C , а количество сенсоров может быть увеличено до нескольких десятков штук.

Также представлена схема на основе узкополосного перестраиваемого лазера с диапазоном перестройки $\sim 1530\text{-}1580$ нм и фотодетектора. Приведены зависимости мощности перестраиваемого лазера от длины волны генерации и резонансной длины волны перестраиваемой ВБР от количества оборотов шагового двигателя. Приведен спектр отражения массива из 12-ти брэгговских сенсоров, прописанный при помощи перестраиваемого волоконного эрбиевого лазера. Диапазон перестройки составил >45 нм с шагом 4 пм, что позволяет опрашивать до 45-ти датчиков температуры с разрешением 0.4°C в диапазоне изменения температуры каждого датчика $>100^{\circ}\text{C}$.

Предложен и реализован способ решения проблемы нелинейности перестроечной кривой ВБР, основанный на применении термостабилизированных реперных ВБР и интерферометра Маха-Цандера с областью свободной дисперсии ~ 30 ГГц. Отмечено, что данный метод позволяет реализовать устройство опроса до 90 датчиков с точностью $0.5\text{-}1^{\circ}\text{C}$.

В параграфе 2.3 представлено теоретическое и экспериментальное исследование метода оптической временной рефлектометрии в случае детектирования и мультиплексирования сигналов чувствительных элементов на основе ВБР. Получено выражение для изменения мощности отраженного излучения при изменении резонансной длины волны ВБР.

Представлены результаты измерения зависимости мощности, отражаемой ВБР, от относительного удлинения и от температуры брэгговской решётки, полученные в реализованной схеме опроса ВБР рефлектометрическим методом. Пороговая чувствительность метода в режиме регистрации относительного удлинения ВБР составила 80 микрострейн, в режиме регистрации температуры – 5°C . Проведена оценка

максимального количества мультиплексируемых в данной схеме ВБР (64 решетки).

В параграфе 2.4 описана практическая реализация многоканальной системы измерения температуры на базе оптоволоконных датчиков. Изложены материалы успешного опыта применения оптоволоконных датчиков температуры для измерения температуры элементарных проводников обмотки статора при стендовых испытаниях турбогенератора мощностью 225 МВт производства филиала ОАО «Силловые машины»- «Электросила». Описаны процедуры градуировки датчиков после их установки на неизолированный стержень и на полностью собранной неподвижной машине в состоянии теплового равновесия обмотки статора с окружающей средой до стендовых испытаний и после них.

Представлены измерения температуры элементарных проводников обмотки статора, выполненные в процессе стендовых испытаний турбогенератора в продолжительных режимах косвенной нагрузки (установившееся трехфазное короткое замыкание при номинальном токе статора, холостой ход при номинальном напряжении и режим без возбуждения). На базе обработки полученных температурно-временных зависимостей оптоволоконных датчиков на протяжении полного цикла испытаний определен эквивалентный коэффициент теплопроводности корпусной изоляции λ_n (в приближении одноёмкостной модели) и средний коэффициент теплоотдачи α с поверхности обмотки в лобовой зоне статора.

Параграф 2.5 посвящен мониторингу сооружений сложной топологии.

На примере манежа «Заря» приведены примеры неблагоприятных факторов, приводящих к постепенной деградации несущей способности конструкций. Перечислены параметры, мониторинг которых может производиться с помощью ВБР.

Представлен опыт реализации системы мониторинга, объединяющей в себе 85 датчиков деформации и 32 датчика температуры, установленных на

наиболее нагруженных элементах металлоконструкции. Два датчика смещения с диапазоном измерения ± 40 мм установлены на фундаменте.

Приведены данные долговременного мониторинга, описана их практическая ценность.

В главе 3 описана распределенная сенсорная система на основе комбинационного рассеяния (КР). В параграфе 3.1 представлена разработка метода опроса распределенного волоконного датчика температуры на основе комбинационного рассеяния с использованием эрбиевого волоконного лазера с модуляцией добротности. Показано, что регистрация временной динамики интенсивности антистоксовой компоненты комбинационного рассеяния при зондировании импульсным излучением позволяет проводить измерения температуры вдоль всего волокна. Разработан метод фильтрации на основе ВБР и направленных спектрально-селективных ответвителей, который позволил производить измерения интенсивности компонент КР в широком спектральном диапазоне с минимальными потерями. Чувствительность разработанного датчика по температуре составила несколько градусов для одномодовой волоконной линии протяжённостью до ~ 10 км, пространственное разрешение ~ 10 м.

В параграфе 3.2 описана конструкция серийных распределенных волоконно-оптических измерительных систем. Описаны функциональные схемы оптического и электронных модулей.

В параграфе 3.3 обсуждаются метрологические свойства распределенных датчиков температуры, приведена взаимная зависимость пространственного разрешения, чувствительности температуры, длины чувствительного элемента и времени измерения друг от друга. Приведено сравнение разработанных систем с ведущими мировыми аналогами.

В параграфе 3.4 обоснованы преимущества использования волоконных сенсоров температуры для обнаружения пожаров, обозначена область применения пожарного извещателя на основе оптоволокна. Представлено устройство и характеристики разработанного пожарного извещателя

«ЕЛАНЬ», перечислены функции, которые обеспечивает блок обработки извещателя. Отмечена возможность использования извещателя во взрывоопасных зонах.

В параграфе 3.5 представлена разработанная и созданная оптоволоконная распределённая система низкотемпературной диагностики для высокотемпературной сверхпроводящей кабельной линии (ВТСПКЛ). Проведены испытания данной системы на макете реального ВТСПКЛ постоянного тока (ПТ). Приведена качественная зависимость температуры криогента, циркулирующего в системе, на выходе из ВТСПКЛ ПТ от времени процесса. Показана динамика захлаживания 30-м отрезка ВТСПКЛ ПТ и некоторые характерные профили температуры по его длине, полученные в процессе проведения испытания в различные моменты времени. Представлен профиль температуры криогента вдоль ВТСПКЛ ПТ в квазистабильном режиме. Отмечено, что выполнение данной работы позволило сформировать технический задел для последующей реализации проектов по мониторингу высоковольтных (не сверхпроводящих) кабельных линий.

В параграфе 3.6 описана реализации системы термометрии нефтяных скважин на основе распределённых датчиков температуры. Приведен состав системы, схема монтажа. Представлены результаты измерений динамики распределения температуры по глубине скважины в режимах закачки пара и добычи нефти. Отмечена важность правильного подбора сенсорного волокна для внутрискважинных применений.

В заключении представлены основные результаты диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в статьях [71-84] и доложены на российских и международных конференциях [85-109], по материалам работы подготовлены и зарегистрированы 4 патента на изобретение [110-113].

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Полностью волоконная схема устройства опроса брэгговских датчиков на основе эрбиевого лазера с перестраиваемой ВБР, интерферометром Маха-Цандера и термостабилизированной реперной ВБР позволяет устранить нелинейности при перестройке ВБР и осуществить привязку к абсолютному значению длины волны, и тем самым повысить точность измерений резонансных длин волн массива датчиков со спектральным мультиплексированием.
2. Метод опроса ВБР датчиков с гибридным (одновременно временным и спектральным) типом мультиплексирования на основе рефлектометра и перестраиваемой брэгговской решётки позволяет увеличить количество опрашиваемых датчиков при достаточной чувствительности и низкой стоимости.
3. Схема опроса распределенного датчика температуры на основе комбинационного рассеяния света в одномодовом и многомодовом волокне с использованием волоконного импульсного лазера и волоконных фильтров стоксова и антистоксова рассеянного излучения на основе спектрально-селективных ответвителей позволяет реализовать полностью-волоконный вариант, отличающийся простотой, стабильностью и низкой стоимостью.
4. Разработанные системы на основе ВБР-датчиков эффективны для практических применений. В частности, ВБР, встроенные в изоляцию токоведущих элементов, позволяют измерить распределение температуры проводников статора мощного турбогенератора во время его работы (он-лайн), а автоматизированная система мониторинга технического состояния позволяет осуществлять он-лайн мониторинг несущих конструкций объектов инфраструктуры сложной топологии.
5. Разработанные системы распределённого измерения температуры на основе комбинационного рассеяния света позволяют реализовать в приборном исполнении эффективные системы пожарного извещения, а также системы мониторинга нефтяных скважин и силового кабеля.

Глава 1. Основы точечных и распределенных сенсорных систем (обзорно-методическая)

1.1. Сенсорные свойства ВБР, мультиплексирование ВБР

Волоконная брэгговская решётка (ВБР) представляет собой одномерную решётку показателя преломления с периодом $\Lambda \sim 300-500$ нм (Рисунок 1.1), наведённую в сердцевине волокна ультрафиолетовым лазерным излучением за счёт фотомодификации её структуры на длине волокна порядка миллиметра [3-5].

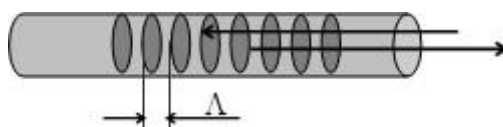


Рисунок 1.1. Волоконная брэгговская решётка.

Основным свойством ВБР является узкополосное отражение излучения, распространяющегося вдоль волокна на так называемой брэгговской длине волны, которая определяется условием конструктивной интерференции пучков, отражённых от разных слоев с разным показателем преломления:

$$\lambda_B = 2\Lambda(T, \varepsilon)n(T), \quad (1.1)$$

где n – показатель преломления сердцевины волокна, T – температура, ε – относительная деформация решётки. Внешние воздействия (T, ε) на решётку приводят к сдвигу брэгговского пика. Основным принципом работы датчиков на основе ВБР является измерение сдвига брэгговского спектрального максимума как функции температуры T или деформации решетки ε . Использование нескольких ВБР-датчиков в одном оптическом волокне возможно, например, путём записи в разных точках волокна решёток с различными положениями брэгговских пиков (на разных длинах волн), см. Рисунок 1.2.

На Рисунке 1.2 приведены измеренные спектры отражения трёх ВБР на разных длинах волн при температуре окружающей среды 25°C и при нагревании одной ВБР до температуры 54°C.

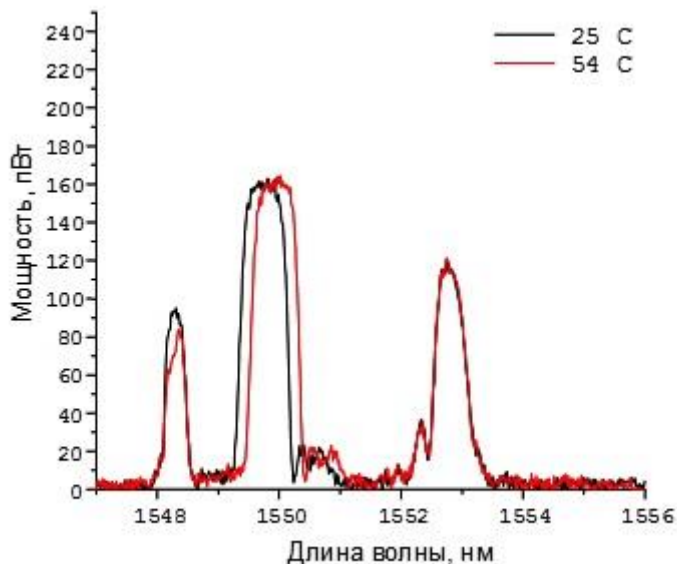


Рисунок 1.2. Спектры отражения трёх волоконных брэгговских решёток при температуре окружающей среды 25°C и при нагревании одной из решёток до температуры 54°C.

Для записи ВБР нами используется вторая гармоника аргонового лазера ($\lambda_{UV} = 244$ нм) с пространственной модуляцией интенсивности, формируемой в интерферометре Ллойда (см. [15]).

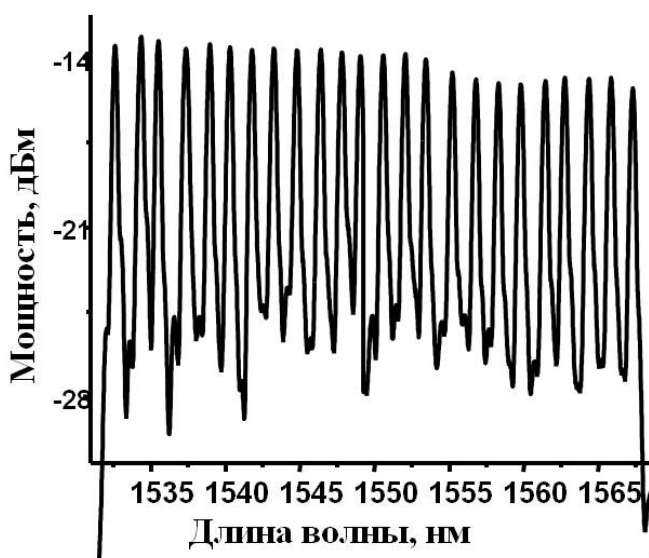


Рисунок 1.3 Спектр отражения массива брэгговских сенсоров.

Меняя угол θ между интерферирующими пучками, можно изменять период решётки $\Lambda = \lambda_{UV} / 2 \sin \theta$ в широком диапазоне. Таким образом, можно мультиплексировать ВБР, записывая решётки с последовательным сдвигом брэгговской длины волны (1.1) на ~ 1 нм в области окна прозрачности волокна (~ 1.55 мкм), Рисунок 1.3.

Смещение λ_B из-за изменения температуры на величину ΔT определяется формулой

$$\Delta \lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T = \lambda_B (\alpha + \sigma) \Delta T, \quad (1.2)$$

где $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$ – коэффициент температурного расширения, а $\sigma = \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$ – термооптический коэффициент оптического волокна. Смещение длины волны вследствие деформации ε_z

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \varepsilon_z, \quad (1.3)$$

где ε_z – осевая деформация, а p_e – коэффициент тензочувствительности, который для обычного волокна из кварцевого стекла составляет 0.22.

Для разделения вкладов деформации и температуры в сдвиг брэгговской длины волны используют две ВБР, записанные в разных волокнах, обладающих различной чувствительностью к деформации и температуре и работающих как единый чувствительный элемент. Также для этой цели вместе с ВБР-датчиком деформации и температуры можно дополнительно использовать датчик температуры, который деформации не подвергается.

ВБР-датчики имеют ряд преимуществ, включая низкие потери и возможность создания больших сетей. Квази-распределённые системы измерения температуры и деформации возможны с применением различных схем объединения ВБР в сети. ВБР обычно соединяются последовательно. Самые распространённые схемы объединения – это схемы с временным разделением каналов, спектральным, частотным и их комбинации.

В схеме с временным разделением каналов положение датчика определяется по временной задержке отражённого импульса. Длина волны отражённого излучения измеряется различными методами, в том числе интерференционными, сканирующими фильтрами, наклонными фильтрами. В такой схеме решётки могут иметь различные длины волн или одинаковые, но с низким коэффициентом отражения. Недостатком такой схемы является паразитная интерференция и взаимное влияние каналов.

В схеме со спектральным разделением каналов ВБР изготавливаются с разными центральными длинами волн. При освещении широкополосным источником света разные датчики отражают излучение на разных длинах волн. Для выделения излучения от конкретного датчика можно использовать спектральный фильтр. Для определения смещения длины волны со временем применяется частотный дискриминатор [16], для определения абсолютного смещения длины волны используется оптический спектрометр [17]. Так как каждая ВБР имеет свой диапазон изменения длины волны, то ёмкость линии в схеме со спектральным разделением каналов ограничена доступным диапазоном длин волн. Изготовление ВБР-датчиков с разными центральными длинами волн требует наличия множества фазовых масок либо интерференционной установки и сложно для массового производства.

1.2. Распределённые сенсорные системы на основе массива ВБР и разных видов рассеяния (КР, РР, РМБ)

Как было отмечено во Введении, существует два основных вида оптических сенсорных систем, которые позволяют измерять пространственно-распределённые параметры, такие как деформация и температура – распределённые и квази-распределённые сенсорные системы. В системах первого вида оптическое волокно является одновременно и датчиком, и световодом [18]. Такие системы используют эффекты комбинационного, рэлеевского рассеяния или рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в оптическом волокне, чтобы определить распределение

необходимого параметра вдоль волокна. Измерение можно произвести в любой точке с определённым пространственным разрешением. Второй тип – это квази-распределённые системы, в которых множество точечных датчиков объединены в различной топологии и схеме разделения каналов [19]. Измерение можно произвести только в месте расположения чувствительного элемента. Основная роль оптического волокна в квази-распределённых сенсорных системах – передача и сбор светового излучения с датчиков. В некоторых квази-распределённых системах, в частности, в сенсорных системах на основе массива ВБР, волокно также является чувствительным элементом.

Внутреннее распределённое детектирование позволяет измерять параметры среды в любой точке вдоль волокна с определённым пространственным разрешением. Также их называют полностью распределёнными измерительными системами. Обычное коммуникационное оптическое волокно без точек разрыва может быть использовано для измерения на протяжении нескольких километров с разрешением от нескольких сантиметров до нескольких метров. Обычно измеряются такие параметры как температура и деформация.

Многие полностью распределённые измерительные системы используют развёртку по времени для определения точки измерения, находящейся на расстоянии, которое проходит рассеянный свет за конкретное время. Хорошо известный метод оптической рефлектометрии с развёрткой по времени (optical time domain reflectometry, OTDR) часто используется для измерения обратного рассеяния импульса света, которое модулируется параметрами среды вдоль оптического волокна. В таких системах короткий оптический импульс запускается в волокно, малая часть импульса рассеивается в обратном направлении и детектируется. Пространственное разрешение определяется длительностью импульса. Измеряемые параметры могут быть определены из интенсивности или длины волны рассеянного излучения [20].

Альтернативный метод – оптическая рефлектометрия с развёрткой по частоте (optical frequency domain reflectometry, OFDR). Он происходит из метода частотно-модулированного непрерывного излучения (frequency modulated continuous wave, FMCW), используемого в радарх. В OFDR-системах непрерывное излучение модулируется по частоте и заводится в волокно. Модулируется либо огибающая импульса, либо его наполнение, тогда метод называют когерентным, либо некогерентным, соответственно [21]. В когерентном случае свет, отражённый от различных участков, будет иметь различную частоту, и будут наблюдаться биения с излучением, отражённым от опорной точки. Точное положение можно определить из частоты биений. Измеряемая величина вычисляется из амплитуды сигнала биений [22]. Некогерентная OFDR измеряет функцию пропускания отрезка волокна, а преобразование Фурье даёт временную развёртку отклика тестируемой системы.

На основе типа рассеяния полностью распределённые системы можно разделить на три основных группы: системы, регистрирующие рэлеевское рассеяние, комбинационное рассеяние и рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. Обратное рассеяние регистрируется в OTDR или OFDR системах. Рассеяние вперед можно использовать в системах с вынужденным комбинационным рассеянием или с рассеянием Мандельштама-Бриллюэна. Такие эффекты, как эффект затухающей волны, эффект Керра и др. также используются в распределённых системах [23].

Рэлеевское обратное рассеяние широко используется в системах на основе OTDR и OFDR для определения мест обрывов, измерения потерь и распределённого измерения параметров. Рэлеевское рассеяние – упругое рассеяние, при котором рассеянное излучение имеет ту же длину волны, что и падающее. В системах на основе обратного рассеяния Рэлея обычно измеряется интенсивность рассеянного излучения, которая зависит от таких параметров среды как температура и деформация. На интенсивность также влияют флуктуации источника, оптические соединения между волоконными

компонентами и изгибы волоконной измерительной линии, поэтому системы на основе рэлеевского рассеяния не всегда имеют достаточную точность и их применение в сенсорике ограничено.

Комбинационное рассеяние представляет собой нелинейный процесс в оптическом волокне. При комбинационном рассеянии генерируются две боковые линии относительно спектра падающего излучения, известные как стоксова и антистоксова компоненты рассеяния (Рисунок 1.4). Эти боковые линии используются для определения температурного профиля вдоль обычного коммуникационного оптического волокна. Соотношение между амплитудами стоксовой и антистоксовой компонент позволяет определить абсолютную температуру волокна без влияния интенсивности падающего излучения, потерь и состава волокна. Для выделения компонент комбинационного рассеяния от компонент рэлеевского рассеяния и рассеяния Мандельштама-Бриллюэна используются оптические фильтры. Возможно использование метода как в OTDR, так и в OFDR схемах [24]. Коммерчески доступны различные системы распределённого измерения температуры на основе комбинационного рассеяния.

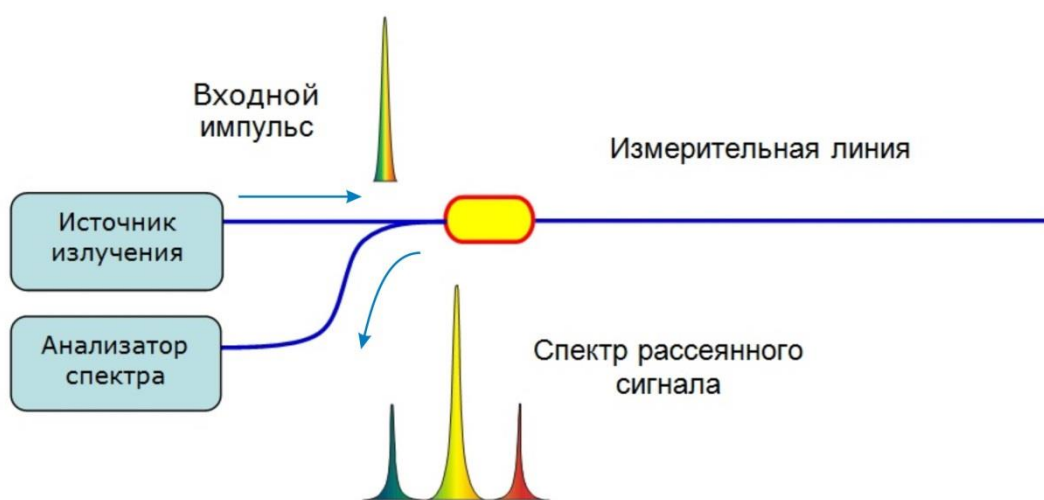


Рисунок 1.4. Схема на основе эффекта КР.

В сравнении с рэлеевским рассеянием интенсивность компонент комбинационного рассеяния мала, что приводит к низкому отношению

сигнал-шум, особенно при использовании коротких импульсов для увеличения пространственного разрешения. Низкое отношение сигнал-шум ограничивает точность распределённого измерения температуры. Таким образом, в подобных системах необходимо большое число усреднений (до нескольких сотен) или большое время интегрирования (до десятков минут).

Распределённое измерение температуры и деформации на основе рассеяния Манделъштама-Бриллюэна (РМБ) является относительно новым методом и вызывает большой исследовательский интерес в последние годы. РМБ является нелинейным процессом, вызванным вариациями показателя преломления вследствие акустических колебаний. Сдвиг длины волны рассеянного света определяется скоростью звука в оптическом волокне, которая является функцией температуры и деформации [25], таким образом, можно измерять как температуру, так и деформацию.

По сравнению со сдвигом длины волны при комбинационном рассеянии, в котором сдвиг может достигать десятков нанометров, сдвиги при РМБ очень малы (11 ГГц). Можно использовать оптические фильтры для выделения компонент РМБ [26] или использовать гетеродинную систему для определения частоты биения между рассеянным и падающим излучением [27]. В системах распределённого измерения температуры и деформации используются как спонтанное РМБ [28], так и вынужденное [29]. Преимуществом систем на основе РМБ является то, что можно одновременно наблюдать профили температуры и деформации [27].

В системах на основе спонтанного РМБ обычно используется метод BOTDR, в котором измеряется обратно рассеянное излучение [28]. В некоторых системах на основе вынужденного РМБ используются методы Бриллюэновского оптического анализа во временной развертке (Brillouin optical time domain analysis, BOTDA) [29] и Бриллюэновского оптического анализа в частотной развертке (Brillouin optical frequency domain analysis, BOFDA) [30], в которых используется взаимодействие оптического импульса накачки со встречным непрерывным излучением для генерации

вынужденного РМБ. Доступны коммерческие образцы систем распределённого измерения температуры и деформации на основе РМБ.

Квази-распределённая сенсорная система – это система объединения датчиков, в которой множество чувствительных элементов распределены в заранее определённых точках и объединены в общую измерительную систему для измерения необходимых параметров (температуры или деформации). Квази-распределённая волоконно-оптическая сенсорная система обычно состоит из составной сети точечных датчиков, источника света и устройства сбора и обработки данных.

Различные типы оптических волоконных датчиков, в которых свет может модулироваться по амплитуде, длине волны (частоте), фазе и поляризации, могут объединяться в сети различной структуры и технологии разделения для широкого круга задач.

Световую волну от датчика можно представить в виде

$$\vec{E} = \vec{e}A \exp(i\omega t + \phi), \quad (1.4)$$

где A – амплитуда, ω – угловая частота, ϕ – фаза и \vec{e} – единичный вектор поляризации. Интенсивность излучения пропорциональна $|A|^2$. Длина волны $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$, где c – скорость света в вакууме. Интенсивность, длина волны (частота), фаза и поляризация – четыре основных параметра электрического поля.

Возмущения в измеряемых параметрах приводят к изменениям одного или нескольких параметров, указанных выше. Соответственно, оптические волоконные датчики можно классифицировать по четырём категориям: амплитудной модуляции (в частности, микроизгибные) [31, 32], фазовой модуляции (интерферометры Маха-Цандера, Майкельсона, Фабри-Перо и Саньяка) [33-37], частотной и поляризационной. В некоторых работах [31] датчики на основе поляризационной модуляции относят к категории фазовой

модуляции, аргументируя это тем, что многие системы используют интерференционный метод для определения изменения поляризации.

Датчики с модуляцией частоты (длины волны) измеряют спектр отражённого, пропущенного или испущенного излучения. Такие датчики включают в себя датчики на основе излучения черного тела, флюоресценции, фосфоресценции и волоконные брэгговские решётки [3].

Для опроса массива датчиков используют временное или спектральное разделение каналов.

Временное разделение каналов (TDM). В TDM методе датчики опрашиваются последовательно импульсом света, заведённым в сеть. Пропущенное или отражённое от разных датчиков излучение будет иметь различную временную задержку и позволит различить каждый отдельный датчик.

Метод TDM можно применять в сетях с различной топологией, таких как последовательная, лестничная, звёздная и др. Требование к расположению датчиков в системах с TDM следующее: сигналы от разных датчиков должны иметь разные задержки. Самая простая система, работающая по методу TDM, – это последовательность отражательных датчиков, работающих по принципу отражательной рефлектометрии с временной развёрткой. Такая система содержит лазерный диод, модулятор света для генерации импульсов и фотоприёмник для регистрации отражённого излучения. Для определения измеряемых величин регистрируются интенсивность, частота или фазовый сдвиг излучения. TDM-метод используется для опроса различных датчиков, таких как микроизгибные, интерферометрические и ВБР, работающие как в отражённом, так и в прошедшем свете.

Спектральное разделение каналов (WDM). Метод спектрального разделения каналов позволяет увеличить ёмкость оптических коммуникационных линий и широко внедряется как в дальнемагистральных сетях, так и в локальных.

В измерительных системах с WDM различные датчики имеют разные рабочие длины волн, таким образом, при освещении линии ВБР-датчиков каждый элемент отражает свет широкополосного источника на своей длине волны (Рисунок 1.5). С помощью оптического спектрометра можно определить длину волны отражения датчика и вычислить температуру или деформацию. Также в качестве источника может использоваться перестраиваемый лазер, а вместо спектрометра – фотоприёмник.

Разница в рабочих длинах волн датчиков в системах с WDM усложняет их разработку и производство. Из-за ограниченности ширины полосы излучения источника количество датчиков в линии ограничено отношением диапазона источника излучения (десятки нм) к спектральному промежутку работы датчика (несколько нм).

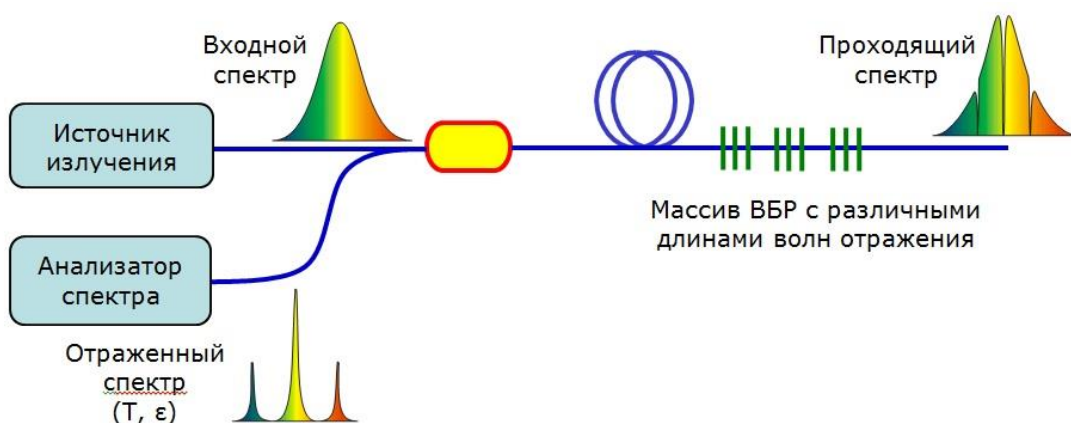


Рисунок 1.5. Метод спектрального разделения каналов для ВБР-датчиков.

Существуют также более сложные методы [38, 39].

Глава 2. Квази-распределённая сенсорная система на основе массива ВБР-датчиков

2.1. Перестраиваемый эрбиевый лазер на основе перестраиваемой ВБР

Для измерения сдвига максимума спектра отражения ВБР обычно используются широкополосный источник и спектроанализатор. Однако данная схема является громоздкой и дорогостоящей. Перспективным является использование узкополосного перестраиваемого источника и фотодетектора. В этом случае разрешение, диапазон и погрешность измерений будут зависеть от таких параметров источника как ширина линии, диапазон перестройки, стабильность мощности и длины волны излучения.

Наиболее удобно в качестве источника использовать перестраиваемый волоконный эрбиевый лазер, обладающий такими преимуществами как генерация в области 1.55 мкм, соответствующей минимуму потерь в оптоволокне, широкий диапазон перестройки, отсутствие юстировок, широко распространённая дешёвая диодная накачка.

Известно множество способов перестройки длины волны излучения волоконных лазеров. Наиболее распространёнными являются использование внешней дифракционной решетки [40] или перестраиваемой волоконной брэгговской решётки [41]. Также известно множество типов резонаторов волоконных лазеров, как линейных, так и кольцевых. Одна из первых задач диссертационной работы состояла в выборе оптимального способа перестройки и оптимальной конфигурации резонатора лазера, обеспечивающей наибольшее значение мощности, наименьшее значение ширины линии излучения и наилучшую стабильность генерации.

Для решения этой задачи исследовался волоконный эрбиевый лазер, перестраиваемый двумя разными способами: с помощью дифракционной решётки (600 штр/мм) и волоконной брэгговской решётки (коэффициент

отражения ~ 0.9 , ширина спектра отражения ~ 0.3 нм, диапазон перестройки 1530-1570 нм). Выходная мощность лазера определялась при помощи измерителя мощности Newport 1815-C и на длине волны 1560 нм составила 0.41 мВт и 0.63 мВт для схем с дифракционной решёткой и ВБР соответственно. Меньшая мощность в схеме с дифракционной решёткой объясняется потерями отражённого от неё излучения при заведении его обратно в волокно. Диапазоны перестройки оказались равными по величине: 1540-1580 нм и 1530-1570 нм соответственно. Однако у второй схемы диапазон ограничен возможностями ВБР и может быть увеличен при неизменном уровне накачки, если использовать ВБР с большим диапазоном перестройки. Таким образом, учитывая результаты эксперимента и тот факт, что полностью волоконная конструкция более стабильна и не нуждается в юстировке, предпочтение отдаётся схеме с ВБР.

На Рисунке 2.1 приведены реализованные схемы лазера. Активной средой лазера является эрбиевое волокно длиной 3.5 метра. Оптическая накачка на длине волны 980 нм осуществляется диодным лазером мощностью 14 мВт. В конфигурации *a* (Рисунок 2.1*a*) линейный резонатор образован широкополосным зеркалом (коэффициент отражения ~ 0.5), роль которого играет волоконный ответвитель, и волоконной брэгговской решёткой. Таким образом, при перестройке решётки изменяется длина волны генерации лазера. В конфигурации *б* (кольцевая схема, Рисунок 2.1*б*) часть излучения выводится из резонатора через ответвитель, а часть, отразившись от ВБР, возвращается назад, задавая длину волны генерации лазера. В конфигурации *в* (Рисунок 2.1*в*) в схему введен циркулятор.

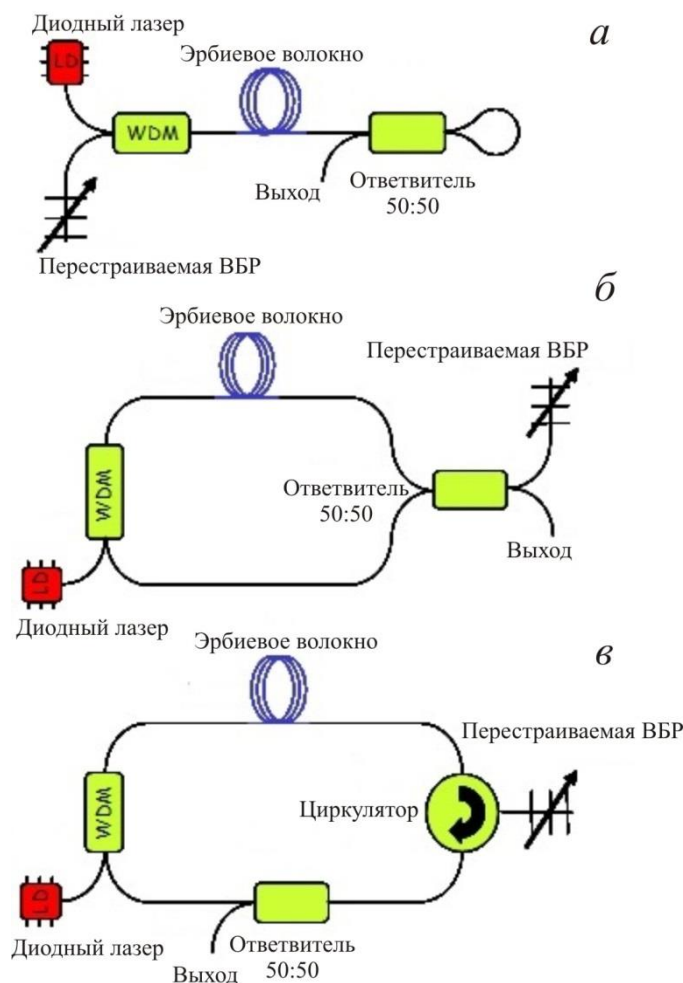


Рисунок 2.1. Схема перестраиваемого эрбиевого лазера (а) с линейным резонатором, (б) с кольцевым резонатором, (в) с кольцевым резонатором и циркулятором.

Экспериментальные данные для конфигураций а-в, представленных на Рисунке 2.1, приведены на Рисунке 2.2 и в таблице 2.1 ($P_{\text{ср}}$ – средняя мощность, $\Delta\lambda_{\text{ср}}$ – средняя ширина линии генерации, $\langle\delta\lambda\rangle$ – величина флуктуации длины волны, $\langle\delta P\rangle/P$ – величина флуктуаций мощности). В схеме с линейным резонатором (конфигурация а) достигнута наибольшая мощность, однако флуктуации мощности и длины волны генерации оказались неудовлетворительными. В кольцевой схеме (конфигурация б) получена меньшая мощность и большая ширина линии. Однако данный лазер обладает немного лучшей стабильностью по сравнению с лазером в конфигурации а (см. Таблицу 2.1). На Рисунке 2.3а приведен спектр генерации лазера с кольцевым резонатором. Он состоит из пика на длине волны генерации и подложки на уровне -40 дБм/нм, которая возникает по

причине того, что спонтанное излучение в активной среде может усиливаться и выходить из резонатора.

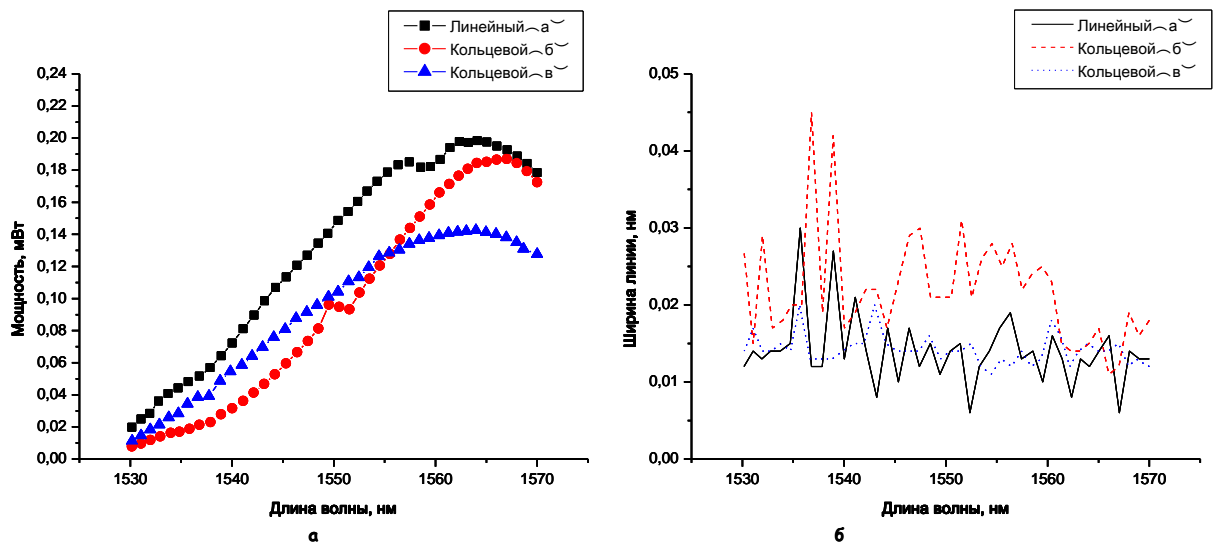


Рисунок 2.2. Зависимости мощности (а) и ширины линии излучения (б) от длины волны генерации эрбиевого лазера.

Таблица 2.1.

	$P_{\text{ср}}, \text{ mW}$	$\Delta\lambda_{\text{ср}}, \text{ nm}$	$\langle\delta\lambda\rangle, \text{ nm}$	$\langle\delta P\rangle/P$
Конфигурация а	0.130	0.014	0.024	0.052
Конфигурация б	0.097	0.022	0.002	0.022
Конфигурация в	0.093	0.014	0.0009	0.0048

В схеме, использующей циркулятор (конфигурация в, Рисунок 2.1в), усиленное спонтанное излучение не доходит до выхода (Рисунок 2.3б), так как не отражается решёткой. Это позволило обеспечить наилучшую стабильность генерации. Выходная мощность лазера оказалась наименьшей из сравниваемых, что объясняется наличием дополнительных потерь ~1 дБ, вносимых циркулятором, однако при этом кривая перестройки наиболее плавная (Рисунок 2.2а).

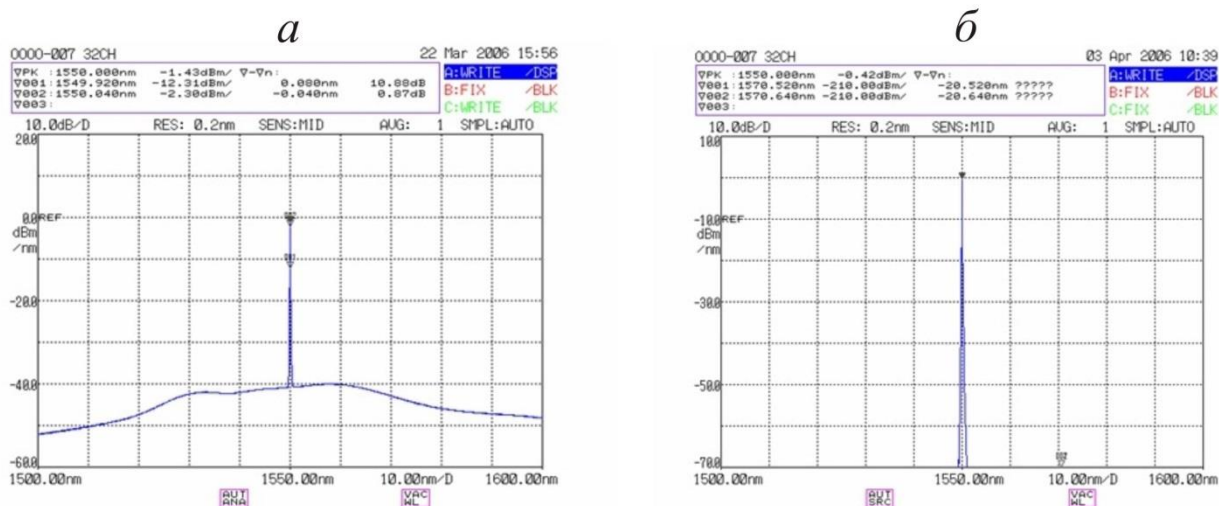


Рисунок 2.3. Спектры генерации перестраиваемого эрбиевого лазера с кольцевым резонатором (конфигурация *а*) и с кольцевым резонатором и циркулятором (конфигурация *б*).

Таким образом, было проведено сравнение выходных характеристик перестраиваемого эрбиевого волоконного лазера при использовании разных способов перестройки и в различных конфигурациях резонатора. Показано, что оптимальным является использование перестраиваемой брэгговской решётки в качестве элемента, селективирующего длину волны излучения. При этом наименьшая ширина линии излучения и наилучшая стабильность генерации получены в схеме с кольцевым резонатором и циркулятором.

2.2. Спектральное детектирование сигналов ВБР с помощью спектроанализатора и перестраиваемого эрбиевого лазера

На Рисунке 2.4 представлена схема собранной волоконно-оптической сенсорной системы на основе анализатора спектра Ando AQ6317B с разрешением ~ 10 пм. Оптическое излучение широкополосного источника поступает на массив из 12-ти сенсоров, записанных в одном волоконном световоде. Отражённый сигнал сканируется анализатором спектра, данные с которого через интерфейс GPIB поступают на компьютер, где по положениям максимумов отражения вычисляется температура каждого сенсора. В ходе тестирования системы проводились как точечные измерения

отдельными сенсорами, так и измерения поля температур с помощью 12 сенсоров, представленного в виде специально разработанного экранного интерфейса (Рисунок 2.5). Измерения показали, что возмущения одного датчика никак не влияют на соседние, а погрешность определения температуры в данной системе не превышает 0.5°C . Также необходимо отметить, что количество сенсоров ограничено только рабочими диапазонами широкополосного источника и анализатора спектра и при помощи коммерчески доступных приборов может быть расширено до нескольких десятков штук.

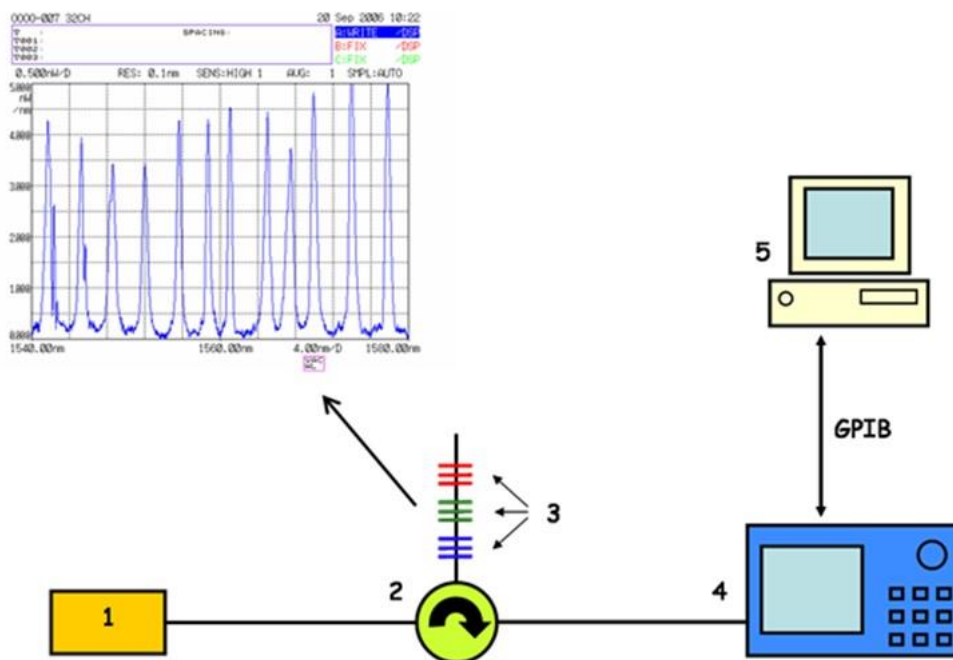


Рисунок 2.4. Устройство опроса ВБР-датчиков на основе анализатора оптического спектра: 1 – широкополосный источник излучения, 2 – циркулятор, 3 – массив брэгговских сенсоров, 4 – анализатор оптического спектра, 5 – компьютер.

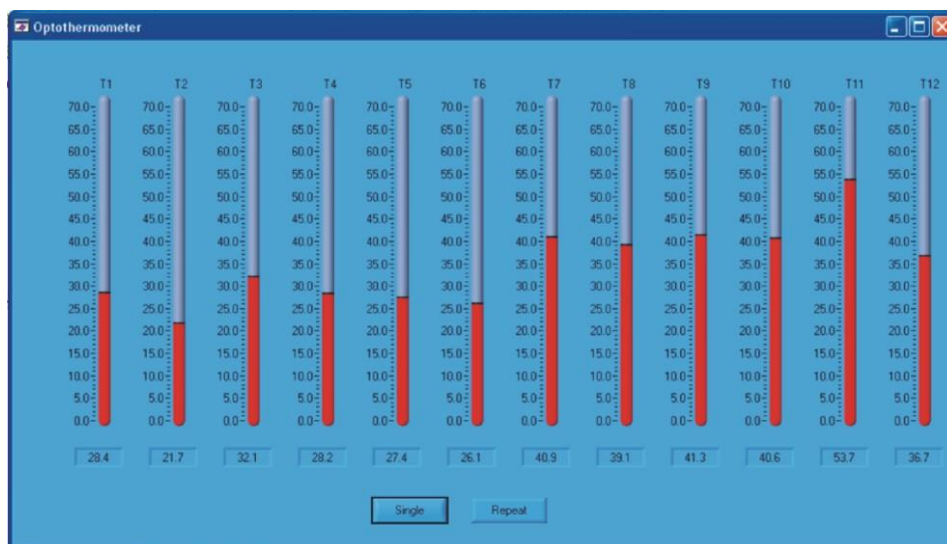


Рисунок 2.5. Интерфейс программы обработки спектров отражения брэгговских сенсоров: пример измерения поля температур.

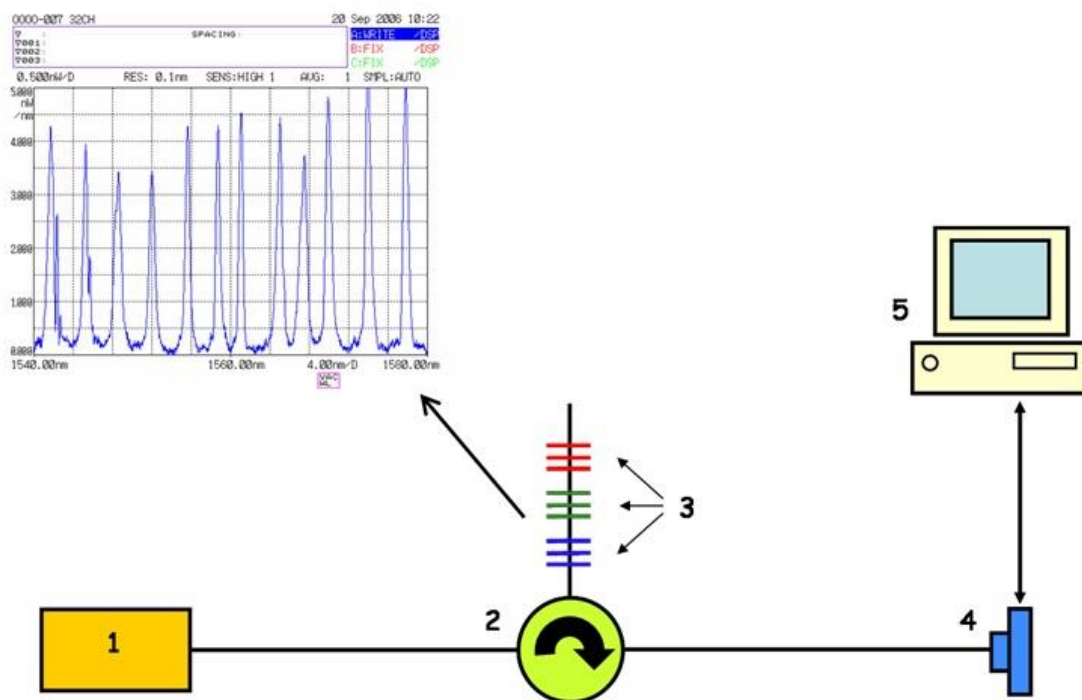


Рисунок 2.6. Устройство опроса ВБР-датчиков на основе узкополосного перестраиваемого лазера: 1 – узкополосный перестраиваемый лазер, 2 – циркулятор, 3 – массив брэгговских сенсоров, 4 – фотодетектор, 5 – компьютер.

Систему опроса ВБР также можно реализовать на основе перестраиваемого эрбиевого лазера (Рисунок 2.6), преимущества которого отмечены в параграфе 2.1. Выбор оптимальной конфигурации лазера, обеспечивающей наилучшие выходные характеристики, также описан в

предыдущем параграфе. В качестве элемента, селективирующего длину волны излучения лазера, была выбрана перестраиваемая ВБР, а наилучшая стабильность за счёт однонаправленного режима генерации и отсека брэгговской решёткой усиленного спонтанного излучения достигается в схеме с кольцевым резонатором и циркулятором. Для более равномерной зависимости выходной мощности от длины волны генерации по сравнению с предыдущим параграфом была увеличена мощность накачки (что привело к увеличению мощности генерации соответственно). Перестройка осуществлялась за счёт аксиального сжатия ВБР внутри узкой феррулы. Использование оригинальной схемы сжимающего устройства, управляемого шаговым двигателем, позволило обеспечить диапазон перестройки от ~1530 до ~1580 нм с шагом 4 пм (Рисунок 2.7).

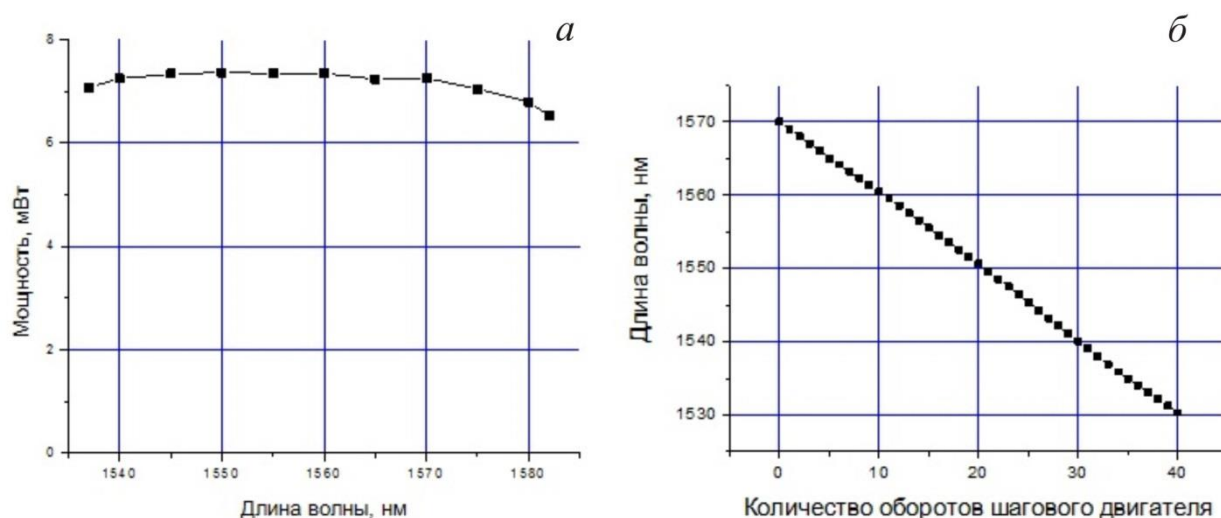


Рисунок 2.7. (а) Зависимость мощности генерации от длины волны излучения волоконного эрбиевого лазера с перестраиваемой брэгговской решёткой при мощности накачки 90 мВт; (б) зависимость длины волны отражения перестраиваемой ВБР от количества оборотов шагового двигателя.

В качестве примера при помощи данного лазера в автоматическом режиме был прописан спектр отражения массива из 12-ти брэгговских сенсоров (Рисунок 2.8). Волоконная брэгговская решётка, применённая в качестве селективирующего элемента, обеспечила перестройку длины волны

генерации лазера в диапазоне более 45 нм с шагом 4 пм, что позволяет опрашивать до 45-ти датчиков температуры с разрешением 0.4°C в диапазоне изменения температуры каждого датчика $>100^{\circ}\text{C}$.

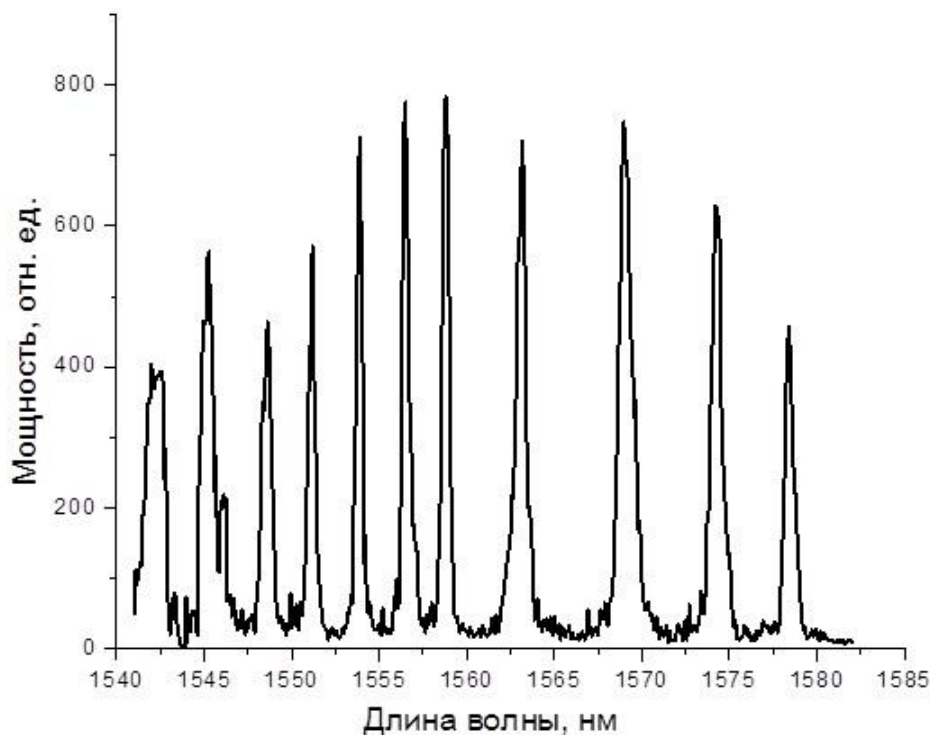


Рисунок 2.8. Спектр отражения массива из 12-ти брэгговских сенсоров, прописанный при помощи перестраиваемого волоконного эрбиевого лазера.

Основная проблема при использовании перестраиваемой решётки состоит в нелинейности её перестроечной кривой. Различная величина шагов шагового двигателя (актюатора), а также микроизгибы волокна в ферруле могут приводить к накоплению ошибки определения длины волны по мере перестройки ВБР, которая может превышать 0.1 нм при перестройке длины волны на 20 нм в стандартной схеме опроса с перестраиваемым лазером (Рисунок 2.9а). Применение термостабилизированных реперных брэгговских решёток и интерферометра Маха-Цандера с областью свободной дисперсии ~ 30 ГГц (что составляет ~ 0.3 нм в области 1.55 мкм) позволяет компенсировать этот эффект (Рисунок 2.9б). Принцип метода состоит в том, что ошибка при перестройке не накапливается, а «обнуляется» каждые 0.3 нм. При этом после компьютерной обработки спектра ошибка определения

резонансной длины волны ВБР не превышала 15 пм, что с учетом коэффициента преобразования (10-30 пм/С для разных типов датчиков) соответствует точности измерения температуры 0.5-1⁰С. Данный метод позволяет реализовать устройство, способное опрашивать до 90 датчиков.

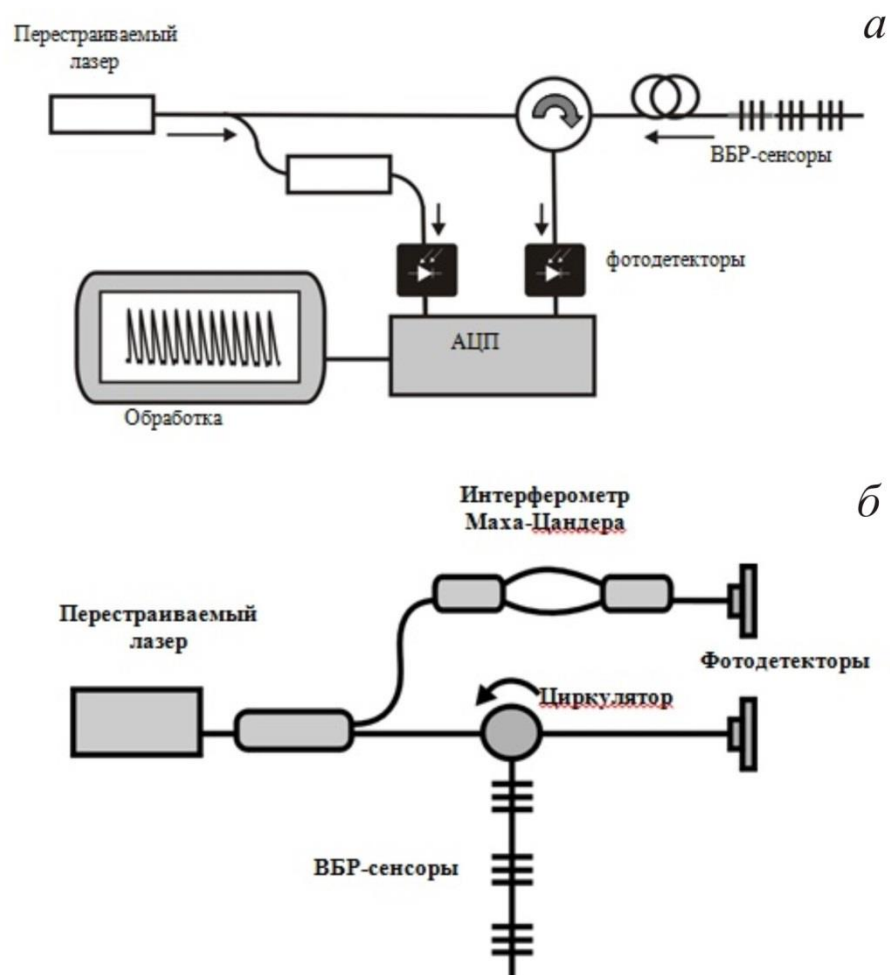


Рисунок 2.9. (а) Схема опроса ВБР-датчиков на основе эрбиевого лазера; (б) схема опроса ВБР-датчиков, использующая интерферометр Маха-Цандера.

Основным преимуществом представленного метода является возможность обеспечить высокое разрешение измерений при потенциально более низкой стоимости устройства.

2.3. Гибридное спектрально-временное детектирование сигналов ВБР с помощью метода оптической временной рефлектометрии

Как было отмечено во Введении, существенной проблемой при практическом использовании датчиков на ВБР является сложность и, как следствие, высокая стоимость спектральных систем, предназначенных для детектирования сдвига резонансной длины волны ВБР при регистрации внешнего воздействия [9, 10]. Вместе с тем, большинство имеющихся спектральных систем обеспечивают во многих случаях избыточную для мониторинга техногенных объектов точность регистрации механического напряжения и температуры ВБР. Поэтому представляется целесообразным упростить схему декодирования сигналов чувствительных элементов за счёт некоторого снижения точности измерений. Это может быть реализовано при использовании принципа амплитудного детектирования отражаемых от ВБР оптических сигналов. Однако проведённые до настоящего времени исследования методов амплитудной демодуляции сигналов ВБР были ориентированы главным образом на применение непрерывных источников излучения, что ограничивало возможности мультиплексирования чувствительных элементов [42, 43]. Применение же импульсного источника открывает возможность использования хорошо отработанного метода оптической временной рефлектометрии (ОВР) для приёма и разделения сигналов ВБР. В этой связи целью данной части работы было исследование особенностей метода ОВР в случае детектирования и мультиплексирования сигналов чувствительных элементов на основе волоконных брэгговских решёток [74, 75].

Мощность излучения, отражённого от ВБР вследствие её зондирования коротким лазерным импульсом, определяется интегралом перекрытия между распределением спектральной плотности мощности (СПМ) зондирующего импульса $S_{LS}(\lambda)$ и спектральным коэффициентом отражения ВБР $r(\lambda, \lambda_{BR})$:

$$P_R(\lambda_{BR}) = \int_0^{\infty} S_{LS}(\lambda) \cdot r(\lambda, \lambda_{BR}) d\lambda, \quad (2.1)$$

где λ_{BR} – резонансная длина волны ВБР.

Основываясь на результатах работы [44], будем полагать, что зависимость спектрального коэффициента отражения ВБР небольшой плотности от длины волны описывается гауссианом с полушириной:

$$A_{FBG} \approx \lambda_{BR} \sqrt{\left(\frac{0,4 \Delta n_{mod}}{n_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{\Lambda_{mod}}{L}\right)^2}, \quad (2.2)$$

где L – длина брэгговской решетки, Λ_{mod} – период модуляции показателя преломления, Δn_{mod} – глубина модуляции показателя преломления, n_{eff} – локальный эффективный показатель преломления. Будем полагать, что источник излучения волоконно-оптического временного рефлектометра работает в многомодовом режиме так, что спектр его мощности можно представить в виде:

$$S_{LS}(\lambda) \approx A(\lambda)F(\lambda), \quad (2.3)$$

где $A(\lambda) = A_0 \exp\left(-\left(\frac{\lambda - \lambda_s}{\Delta\lambda_s}\right)^2\right)$, $F(\lambda) = \sum_{i=0}^{\infty} \exp\left(-\left(\frac{\lambda - i\lambda_0}{\Delta\lambda_0}\right)^2\right)$ – функции,

описывающие соответственно огибающую и пики распределения СПМ зондирующего импульса и определяемые свойствами активной среды и резонатора источника излучения, A_0 – максимальное значение СПМ зондирующего импульса, λ_s , $\Delta\lambda_s$, λ_0 , $\Delta\lambda_0$ – параметры, определяемые свойствами резонатора источника излучения.

Из анализа выражения (2.1) следует, что вследствие дискретного характера функции $F(\lambda)$ зависимость мощности отражённого света от резонансной длины волны ВБР является квазипериодической, что может затруднить регистрацию механического напряжения и температуры ВБР рефлектометрическим способом. Вместе с тем амплитуда осцилляций отражённого сигнала δP_R зависит от соотношения величин A_{FBG} и λ_0 , и при

выполнении условия $L_{FBG} > \lambda_0$ вклад в отражённую мощность отдельных спектральных компонент зондирующего импульса усредняется, и величина δP_R стремится к нулю.

В этом случае при разложении выражения (2.1) в ряд Тейлора с точностью до первого слагаемого в предположении $L_{FBG} \ll \Delta\lambda_S$ можно получить выражение для изменения мощности отражённого излучения при изменении резонансной длины волны ВБР:

$$\Delta P \approx \left[\frac{d}{d\lambda} A(\lambda_{BR}) \right] L_{FBG} \Delta\lambda_{FBG}, \quad (2.4)$$

где $\Delta\lambda_{FBG} = 2n_{eff} L_{mod} (\alpha_1 \varepsilon + \alpha_2 \Delta T)$ – сдвиг резонансной длины волны ВБР в зависимости от температуры (T) и механического напряжения (ε), α_1 , α_2 – коэффициенты, определяемые свойствами материала волоконного световода [5]. В выражении (2.4) учтены только основные линейные члены разложения в ряд Тейлора относительно $\Delta\lambda_{FBG}$.

Как видно из выражения (2.4), изменение мощности отражённого от ВБР излучения прямо пропорционально температуре и механическому напряжению брэгговской решётки. При этом для достижения максимальной амплитуды сигнала резонансную длину волны ВБР следует выбирать из условия максимальной крутизны $\frac{dA}{d\lambda}$ огибающей распределения СПМ используемого лазера.

В соответствии с вышеизложенными результатами для последующих экспериментов были изготовлены ВБР с параметрами: $L_{FBG} \approx 1$ нм, $\lambda_{Br} \approx 1530$ нм. Для исключения возможности насыщения фотоприёмного устройства рефлектометра при регистрации сигналов ВБР коэффициент отражения брэгговской решётки на резонансной длине волны выбирался равным 2%. В настоящей работе запись ВБР осуществлялась в интерференционной схеме Ллойда [44, 45]. В качестве источника ультрафиолетового излучения использовался аргоновый лазер с внутривибраторным удвоением линии 488

нм в кристалле ВВО с гауссовым профилем интенсивности выходного пучка [46].

Экспериментальные исследования рефлектометрического метода регистрации сигналов ВБР проводились на установке, представленной на Рисунке 2.10а.

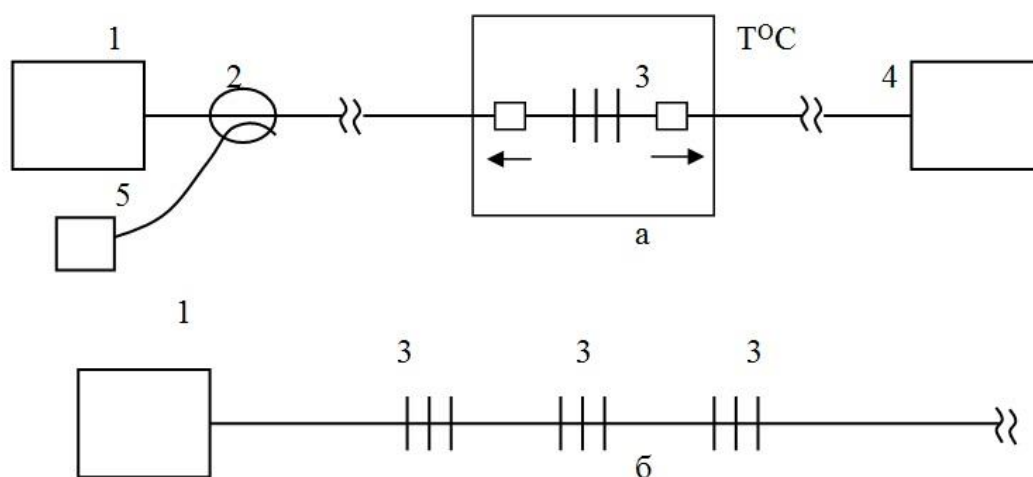


Рисунок 2.10. (а) Схема экспериментальной установки для исследования рефлектометрического метода опроса ВБР, (б) мультиплексирование ВБР. 1 – волоконно-оптический рефлектометр, 2 – разветвитель, 3 – ВБР, размещаемые на установке, позволяющей деформировать и изменять температуру, 4 – оптический анализатор спектра, 5 – широкополосный источник оптического излучения.

Результаты измерения распределения спектральной плотности мощности зондирующих импульсов, генерируемых волоконно-оптическим временным рефлектометром, полученные с помощью оптического анализатора спектра 4 представлены на Рисунке 2.11. Параметры спектра зондирующего импульса составили: $\lambda_s = 1545$ нм, $\Delta\lambda_s = 15$ нм, $\lambda_0 = 0.7$ нм, $\Delta\lambda_0 = 0.15$ нм.

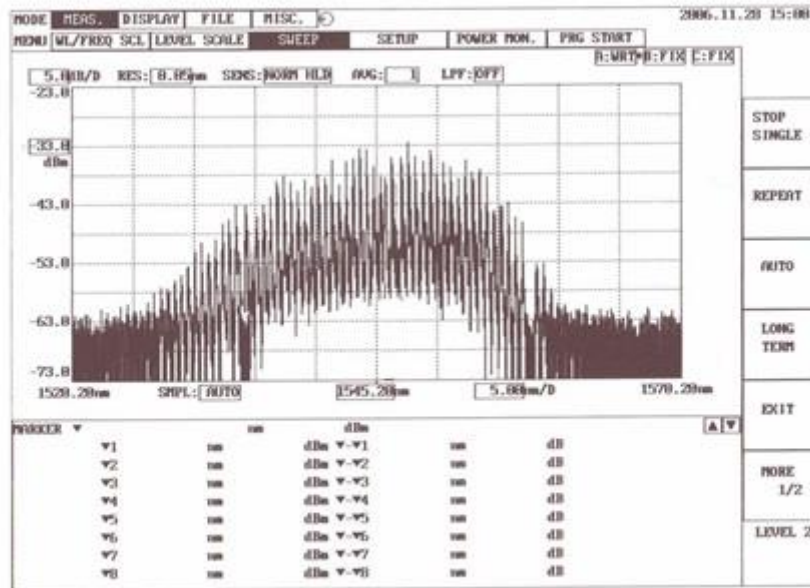


Рисунок 2.11. Результаты измерения распределения спектральной плотности мощности зондирующих импульсов, генерируемых волоконно-оптическим временным рефлектометром.

На Рисунке 2.12 представлены результаты измерения зависимости оптической мощности, отражаемой ВБР, от относительного удлинения (Рисунок 2.12а) и от температуры брэгговской решётки (Рисунок 2.12б), полученные с помощью волоконно-оптического временного рефлектометра. Для уменьшения уровня шумов рефлектометра результаты измерений усреднялись по >100 измерениям. Как видно из рисунков, зависимости носят линейный характер, что согласуется с полученными ранее выводами. Пороговая чувствительность метода в режиме регистрации относительного удлинения ВБР составила $0.8 \cdot 10^{-4}$ (80 микрострейн (μstrain)), в режиме регистрации температуры – 5°C .

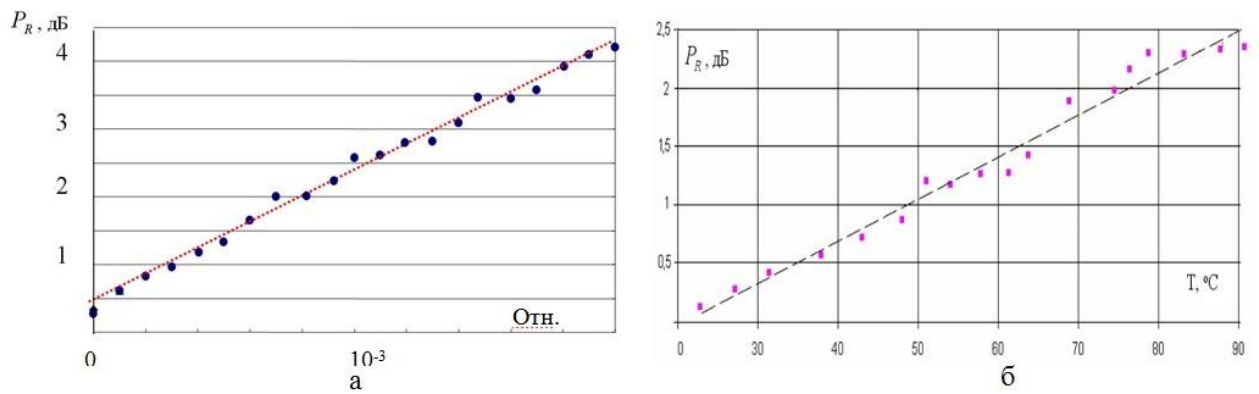


Рисунок 2.12. Экспериментальная зависимость отражаемой ВБР оптической мощности от (а) относительного удлинения, (б) температуры решётки.

Для исследования рефлектометрического метода мультиплексирования ВБР три ВБР с одинаковой резонансной длиной волны были записаны на одной волоконно-оптической линии с интервалом 20 м (Рисунок 2.10б). Рефлектограмма линии представлена на Рисунке 2.13. Три из пяти пиков отражения соответствуют брэгговским решёткам, а первый и последний – коннекторному соединению и концу волоконной линии, соответственно. Величина каждого из пиков отражения от брэгговских решёток определяется резонансной длиной волны соответствующей ВБР, при растяжении ВБР амплитуда соответствующего пика изменяется.

В ходе экспериментального исследования выяснилось, что при последовательном размещении на волоконной линии более 8 брэгговских решёток с одинаковой резонансной длиной волны наблюдается искажение формы огибающей спектра зондирующего импульса $A(\lambda)$, что приводит к нарушению линейности регистрируемой зависимости $P_R(\lambda_{BR})$. Учитывая, что в спектре источника излучения имеется два 10-нанометровых диапазона с максимальной крутизной огибающей (1535 ± 5 нм и 1555 ± 5 нм), и полагая, что диапазоны измеряемых температур и механических напряжений составляют порядка 500°C и $4000 \mu\text{Strain}$ соответственно, а также принимая во внимание возможность работы рефлектометра на длине волны 1.3 мкм, максимальное количество мультиплексируемых брэгговских решёток с применением

рефлектометра, использованного в настоящей работе, может быть оценено как 64.

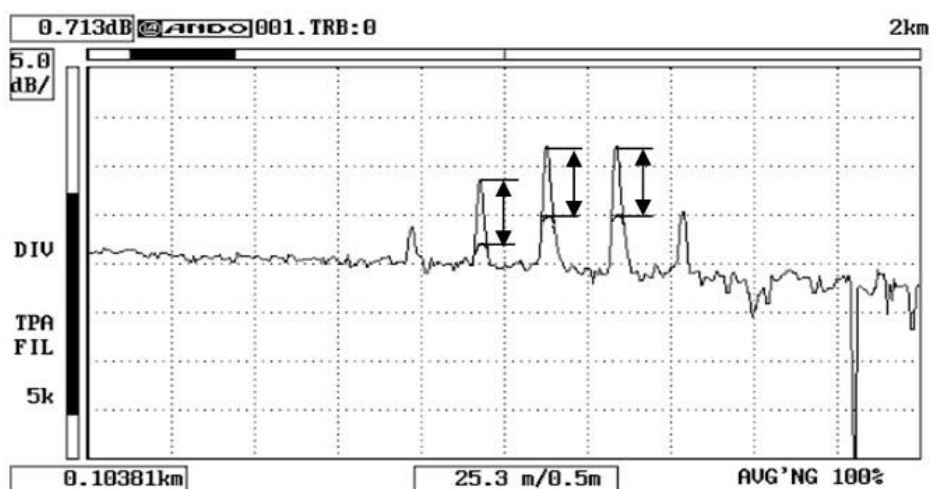


Рисунок 2.13. Рефлектограмма волоконно-оптической линии с тремя ВБР, записанными с пространственным интервалом 20 м. При внешнем воздействии на любую из ВБР амплитуда соответствующего пика изменяется.

Таким образом, экспериментально и теоретически исследован рефлектометрический метод опроса и мультиплексирования волоконно-оптических измерительных преобразователей на основе ВБР. Пороговая чувствительность метода составила: $0.8 \cdot 10^{-4}$ – при регистрации относительного удлинения, 5°C – при регистрации температуры.

Экспериментально полученные характеристики позволяют сделать вывод, что разработанный подход благодаря простоте и экономической эффективности может найти широкое применение. Следует иметь в виду, что полученная чувствительность измерения смещения резонансной длины волны в десятки пикометров (реальная точность метода еще ниже) явно недостаточна для опроса датчиков температуры, деформации, перемещения и других величин. Однако данный метод может быть перспективен для опроса индикаторов на основе ВБР-датчиков, которые различают только два положения (открыто/закрыто).

Например, чувствительность датчика LCM-600 (Рисунок 2.14) компании Cleveland electric labs составляет 1 нм, что позволяет ему работать в качестве индикатора конечного положения.



Рисунок 2.14. Датчик (индикатор) конечного положения LCM-600.

На практике данный подход может быть реализован для мониторинга открытия люков кабельной канализации (причем для опроса датчиков можно использовать уже проложенные линии связи), а также положения крановых задвижек магистральных газопроводов.

2.4. Мониторинг турбогенераторов

С развитием конструкций крупных турбогенераторов возрастает потребность в измерениях местных температур элементарных проводников обмотки статора на действующих машинах. Ценность такой информации для проектирования новых машин состоит в том, что в дополнение к прямым сведениям о реальной температуре, при которой работает корпусная изоляция, конструктор получает возможность уточнения основных тепловых параметров, а именно, удельных потерь в обмотке и тепловых сопротивлений. Априорные оценки этих параметров на проектной стадии сопровождаются известной неопределённостью, обусловленной, в частности, производственно-технологическими факторами. Так, удельные потери в обмотке небезразличны к местным замыканиям отдельных проводников, а

тепловое сопротивление между медью обмотки и стенкой паза зависит от присутствия воздушных микрополостей между наружной поверхностью изоляции и зубцом статора.

Поскольку при работе турбогенератора обмотка статора находится под высоким электрическим потенциалом, при измерении температуры должна быть исключена гальваническая связь между медью обмотки и регистрирующей аппаратурой, что может быть достигнуто с применением средств оптоволоконной термометрии [72, 97]. Реализация подобных измерений, гарантирующих безопасность для персонала и испытуемой машины, связана со специфическими затруднениями. В частности, проблема практической размещимости датчиков и измерительной трассы в обмотке статора выдвигает условие предельной миниатюризации указанных элементов измерительной системы. При этом должна быть обеспечена механическая стойкость этих элементов и выполнены требования воспроизводимости градуировочных характеристик датчиков в пределах всего производственного цикла и испытаний машины.

Мировая практика непосредственного измерения температуры меди обмотки статора при помощи оптоволоконных датчиков проходит в настоящее время начальную стадию становления. О первом опыте применения таких датчиков при испытаниях турбогенератора мощностью 250 МВА несколько лет назад сообщала японская фирма Hitachi [47].

В данном параграфе представлены материалы первого в отечественной практике успешного опыта применения оптоволоконных датчиков температуры для измерения температуры элементарных проводников обмотки статора при стендовых испытаниях турбогенератора мощностью 225 МВт производства филиала ОАО «Силовые машины»-«Электросила» [81]. Многоканальная система измерения температуры на базе оптоволоконных датчиков разработана ООО «Инверсия-Сенсор» (Новосибирск-Пермь).

Задача размещения на одной измерительной линии нескольких датчиков решается путем спектрального мультиплексирования, описанного в

параграфе 1.1. Каждому датчику предписывается свой спектральный диапазон, что позволяет распознавать его в общем спектре и измерять соответствующие показания по отдельным каналам. При этом подбирается достаточный спектральный интервал между соседними пиками, чтобы ожидаемое температурное смещение каждого пика не выводило бы его за пределы своего диапазона. В конечном счёте для комплекта датчиков, размещённых на линии, мы получаем семейство рабочих характеристик, каждая из которых связывает выходную величину λ_{Br} с температурой θ , варьируемой и измеряемой в процессе градуировки (Рисунок 2.15).

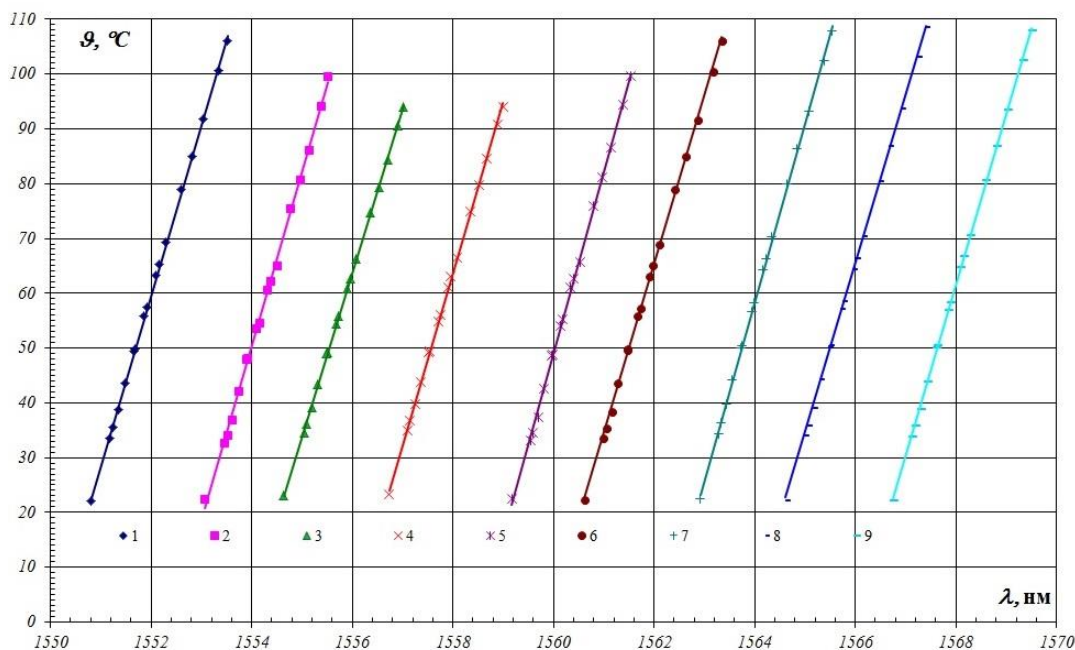


Рисунок 2.15. Градуировочные характеристики оптоволоконных датчиков.

Именно такая групповая система принята нами для измерения локальных значений температуры элементарных проводников обмотки статора турбогенератора. Четыре оптоволоконных линии, представляющие собой протяжённые световоды с локализованными на них брэгговскими решётками (по 12 в линии, общее количество датчиков температуры – 48), размещается и закрепляется на поверхности элементарных проводников стержня статорной обмотки на этапе его изготовления, непосредственно предшествующем наложению корпусной изоляции (Рисунок 2.16, 2.17).

Далее стержень, оснащенный датчиками, проходит нормальный производственный цикл (наложение корпусной изоляции, укладка обмотки в пазы статора, пайка соединений, пропитка обмотки, сушка, высоковольтные испытания и проверки) (Рисунок 2.18). На всем протяжении указанного цикла принимаются меры по поддержанию жизнеспособности измерительной системы и сохранению воспроизводимости рабочих характеристик датчиков. После сборки генератора, коммутации оптоволоконных линий и их подключения к устройству опроса система измерения температуры может использоваться как для стендовых испытаний турбогенератора, так и для последующего штатного термоконтроля.

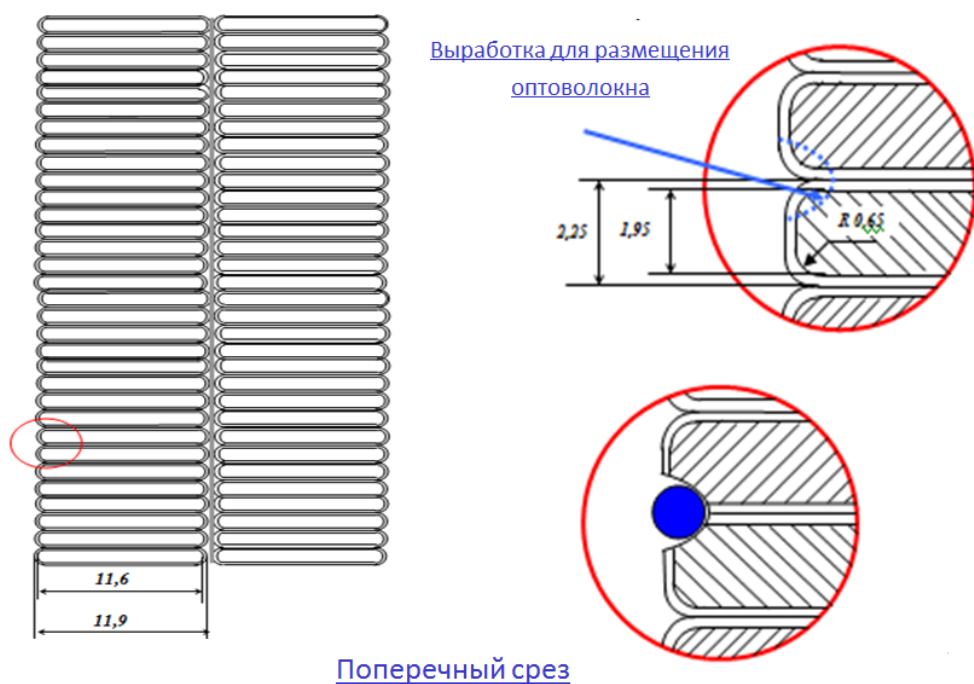


Рисунок 2.16. Схема размещения оптоволоконна на стержне обмотки статора.

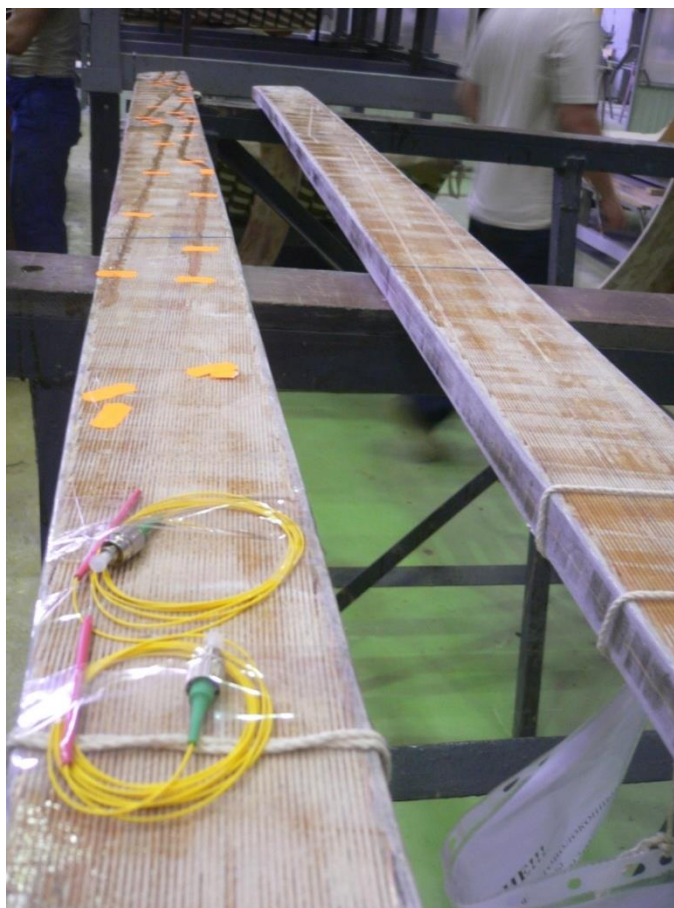


Рисунок 2.17. Процесс монтажа датчиков на стержни статора.



Рисунок 2.18. Процесс сборки статора турбогенератора.

Первая градуировка датчиков производится после их установки на неизолированный стержень. Предварительно на время градуировки в

непосредственной близости от каждого оптоволоконного датчика размещается термopара медь-константан, и стержень помещается в печь. После плавного нагрева стержня до температуры 110-120⁰С в процессе его медленного остывания для каждого датчика снимаются временные зависимости температуры $\theta = f_1(t)$ и длины волны $\lambda_{Br} = f_2(t)$. Попарные соответствия одновременных отсчётов указанных величин дают семейство градуировочных характеристик $\theta = \phi(t)$ для всех датчиков группы.

Вторая градуировка производится на полностью собранной неподвижной машине в состоянии теплового равновесия обмотки статора с окружающей средой. Роль эталона температуры при этом возлагается на платиновые термометры сопротивления, нормально устанавливаемые в пазах статора для целей штатного контроля температуры при эксплуатации машины. В рамках второй градуировки подлежит контролю единственная («холодная») точка рабочей характеристики каждого оптоволоконного датчика при естественном допущении о близком совпадении температуры этих датчиков с температурой, измеряемой по упомянутым термометрам сопротивления.

Наконец, в интересах полного контроля за воспроизводимостью рабочих характеристик датчиков желательна также их третья градуировка, осуществляемая по окончании стендовых испытаний и по содержанию полностью повторяющая вторую. В пользу такой процедуры свидетельствует соображение о сложной термомеханической обстановке, в которой находятся оптоволоконные датчики на протяжении производственного и испытательного циклов машины. С одной стороны, как показано выше, основной вклад в сдвиг длины волны отражения ВБР вносит температурное изменение показателя преломления волокна, а температурная деформация решётки играет второстепенную роль, и это в принципе положительно характеризует ВБР как термопреобразователь. Однако если указанная деформация способна стать необратимой, то даже при относительно слабом

её влиянии на рабочую характеристику датчика последняя утрачивает свойство безошибочной реакции длины волны на температурные изменения. Высказанное соображение побуждает и к вниманию в отношении клеящих составов для закрепления датчиков на проводниках обмотки, и к проведению упомянутой третьей градуировки, на основании которой могут быть выбракованы отдельные дефектные каналы.

Содержание эксперимента и результаты измерений. Измерения температуры элементарных проводников обмотки статора выполнены в процессе стендовых испытаний турбогенератора мощностью 225 МВт в продолжительных режимах косвенной нагрузки (установившееся трехфазное короткое замыкание при номинальном токе статора, холостой ход при номинальном напряжении и режим без возбуждения).

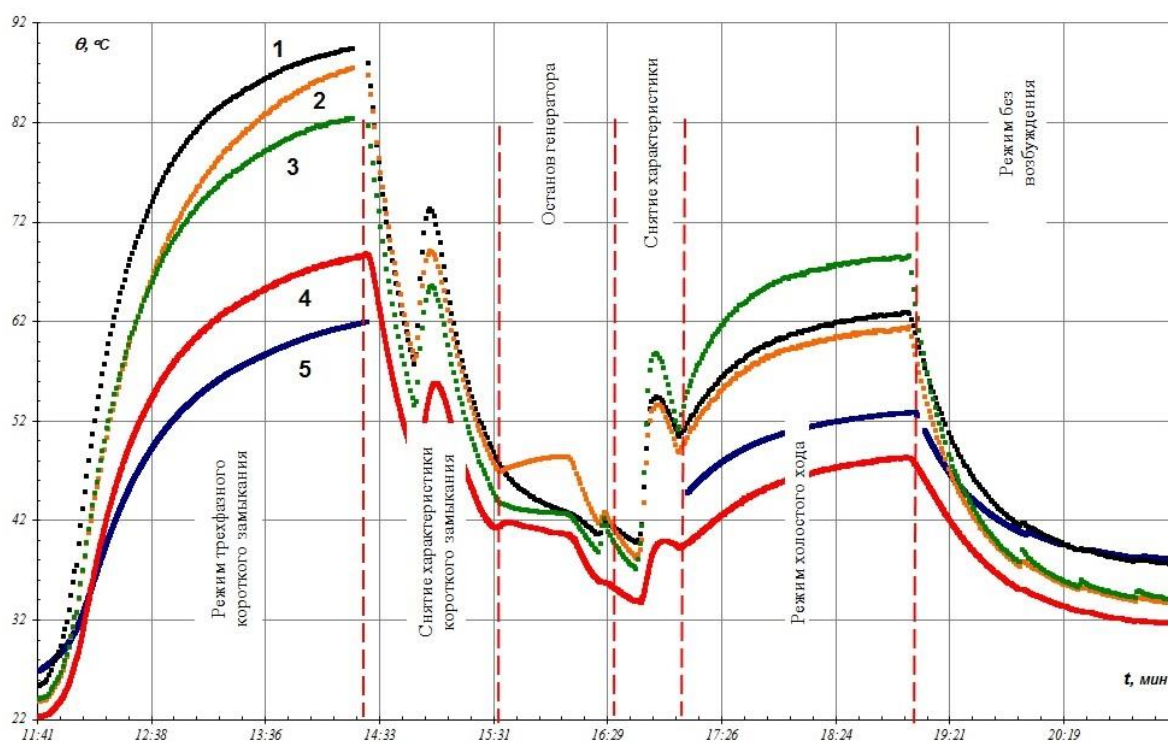


Рисунок 2.19. Опытные температурно-временные зависимости. 1 – средняя температура проводников обмотки в пазовой части; 2 – то же в лобовой части; 3 – то же на границе пазовой и лобовой частей; 4 – показания термометра сопротивления в пазу; 5 – средняя температура зубцов статора.

Одновременно с показаниями оптоволоконных датчиков, которые регистрировались по всем каналам 1 раз в минуту, производилась

непрерывная запись показаний термопар, установленных в зубцах статора, и платиновых термометров сопротивления, заложенных между стержнями для измерения температуры наружной поверхности изоляции.

Результаты измерений показаны на Рисунке 2.19 в виде зависимости показаний оптоволоконных датчиков от времени на протяжении полного цикла испытаний.

Определение тепловых параметров на базе обработки опытных температурно-временных зависимостей. Прямые измерения температуры элементарных проводников обмотки в переходном тепловом режиме дают возможность определить эквивалентный коэффициент теплопроводности корпусной изоляции $\lambda_{и}$ (с учетом воздушных включений между наружной поверхностью изоляции и стенкой паза) и средний коэффициент теплоотдачи α с поверхности обмотки в лобовой зоне статора.

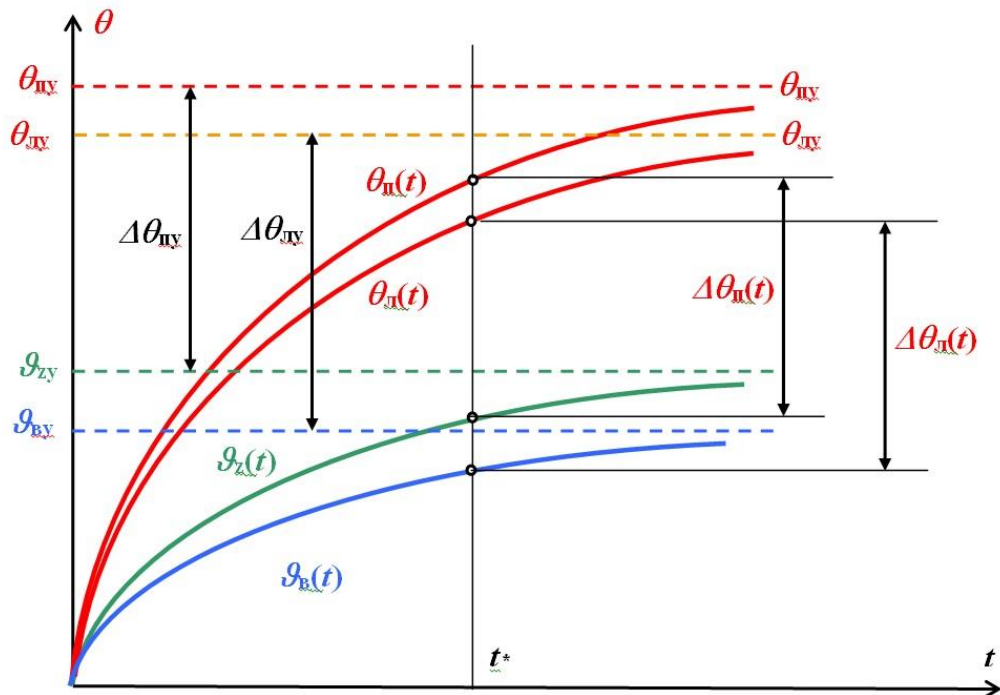


Рисунок 2.20. К обработке кривых нагрева обмотки, зубца и охлаждающего воздуха для определения коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи.

Для обработки используются измеренные оптоволоконными датчиками значения избыточной температуры в верхнем стержне обмотки в пазовой θ_n и

лобовых $\theta_{\text{л}}$ частях, а также результаты измерения по термопарам температуры зубцов статора ϑ_z и охлаждающего воздуха в камере лобовых частей $\vartheta_{\text{в}}$. Рассматриваются кривые нагрева, показанные на Рисунке 2.20, на протяжении режима трехфазного короткого замыкания вплоть до практически установившегося теплового состояния (дополнительный индекс «у»).

В строгой постановке искомые величины $\lambda_{\text{и}}$ и α являются предметом решения обратной задачи нестационарной теплопроводности, граничными условиями для которой применительно к пазовой части являются экспериментальные функции температуры на обеих границах изоляционного слоя $f_{1\text{п}}(t)$ и $f_{2\text{п}}(t)$, а применительно к лобовой части – функции температуры на внутренней границе изоляционного слоя $f_{1\text{л}}(t)$ и температуры охлаждающего воздуха $f_{0\text{л}}(t)$. При этом для обоих случаев рассматривается одномерная модель, содержащая пару сопряженных пластин, одна из которых (имитирующая медь обмотки) имеет бесконечную теплопроводность, а другая (имитирующая изоляционный слой) – конечную теплопроводность $\lambda_{\text{и}}$ [48].

Анализ показывает, что для моментов времени, достаточно удалённых от начала переходного процесса, задача определения обсуждаемых параметров подлежит более простому решению: в основу расчета может быть положена одноёмкостная модель, в которой не учитывается аккумулярование тепла в изоляционном слое. В этих условиях для произвольного момента времени t^* процесс поглощения тепла медными элементарными проводниками и одномерного распространения его в тангенциальном направлении через слой корпусной изоляции к зубцу статора описывается уравнением теплового баланса:

$$q_{\text{в}} \delta_{\text{м}} = c_{\text{м}} \rho_{\text{м}} \delta_{\text{м}} \frac{d\theta_{\text{п}}}{dt} + \frac{\lambda_{\text{и}}}{\delta_{\text{и}}} (\theta_{\text{п}} - \vartheta_z), \quad (2.5)$$

где q_V – потери на единицу объема пазовой части стержня обмотки, Вт/м³, c_M – удельная теплоемкость меди, $c_M = 390$ Дж/кг·К, ρ_M – плотность меди, $\rho_M = 8900$ кг/м³, δ_M – половина ширины неизолированного стержня обмотки статора, м, $\lambda_{и}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности композиции на промежутке от медных проводников до стенки паза, Вт/м·К, $\delta_{и}$ – расстояние между медными проводниками и стенкой паза, м.

Выражая удельную тепловую нагрузку на единицу поверхности стержня $q_V \delta_M$ через установившиеся превышения температуры на границах изоляционного промежутка

$$q_V \delta_M = \frac{\lambda_{и}}{\delta_{и}} (\theta_{пу} - \theta_{zy}),$$

получим для искомого коэффициента теплопроводности:

$$\lambda_{и} = \frac{c_M \rho_M \delta_M \delta_{и} \frac{d\theta_{и}}{dt}}{\Delta\theta_{пу} - \Delta\theta_{и}} = \frac{c_M \rho_M \delta_M \delta_{и}}{\varepsilon_{и}}, \quad (2.6)$$

где $\Delta\theta_{пу} = \theta_{пу} - \theta_{zy}$; $\Delta\theta_{и} = \theta_{и} - \theta_z$; $\varepsilon_{и} = \frac{\Delta\theta_{пу} - \Delta\theta_{и}}{\frac{d\theta_{и}}{dt}}$.

Результаты расчета эквивалентного коэффициента теплопроводности композиции между медью обмотки и стенкой паза на основании опытных данных по формуле (2.6) представлены на Рисунке 2.21 в виде зависимости этого коэффициента от температуры на внутренней поверхности изоляционного слоя. Среднее значение коэффициента $\lambda_{и}$ в данном температурном диапазоне составляет $\lambda_{и} = 0.26$ Вт/м·К.

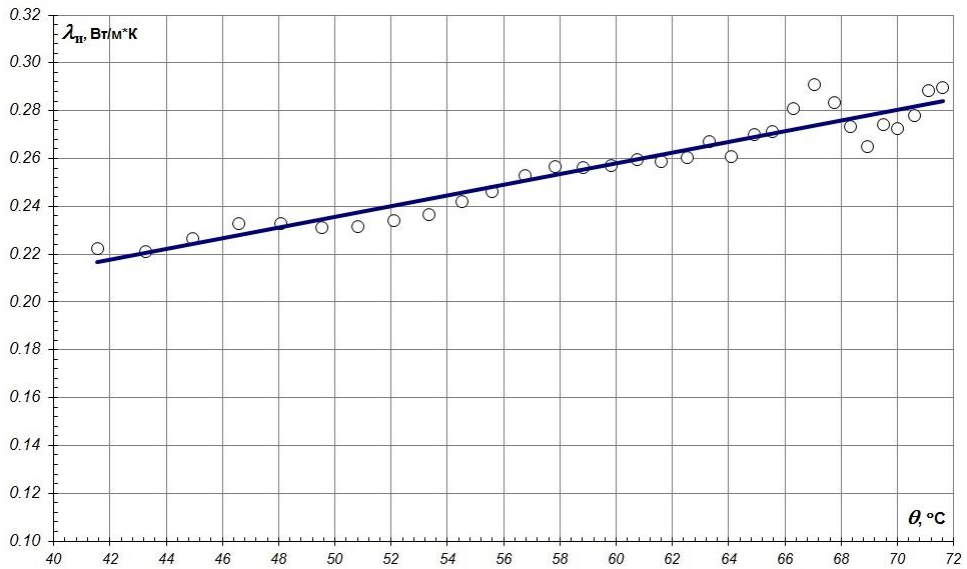


Рисунок 2.21. Зависимость коэффициента теплопроводности композиции «медь обмотки – стенка паза» от температуры на внутренней поверхности корпусной изоляции.

Распространяя полученные сведения о величине $\lambda_{и}$ на весь стержень (т.е. полагая с некоторым запасом, что изоляция в лобовой части имеет такую же теплопроводность, как и в пазовой части), используем эту величину в уравнении теплового баланса для отрезка стержня единичной длины в лобовой части обмотки:

$$P_{л} = c_{м} \rho_{м} \delta_{м} \frac{d\theta_{л}}{dt} + \frac{(\theta_{л} - \vartheta_{в})}{\frac{\delta_{и}}{\lambda_{и}} + \frac{1}{\alpha}}$$

С учетом соотношения, характеризующего установившийся режим для лобовой части обмотки,

$$P_{л} = \frac{\theta_{лв} - \vartheta_{в}}{\frac{\delta_{и}}{\lambda_{и}} + \frac{1}{\alpha}} = \frac{\Delta\theta_{лв}}{\frac{\delta_{и}}{\lambda_{и}} + \frac{1}{\alpha}}$$

и ранее полученного выражения

$$\frac{\lambda_{и}}{\delta_{и}} = \frac{c_{м} \rho_{м} \delta_{м} \frac{d\theta_{л}}{dt}}{\Delta\theta_{пв} - \Delta\theta_{л}}$$

получим следующую формулу для вычисления среднего коэффициента теплоотдачи с поверхности лобовых частей α :

$$\alpha = \frac{c_M \rho_M \delta_M}{\varepsilon_{\text{л}} - \varepsilon_{\text{п}}}, \quad (2.7)$$

$$\text{где } \varepsilon_{\text{л}} = \frac{\Delta\theta_{\text{лу}} - \Delta\theta_{\text{л}}}{\frac{d\theta_{\text{л}}}{dt}}.$$

Обработка температурно-временных зависимостей, приведенных на Рисунке 2.19, с помощью формулы (2.7) показывает, что искомый коэффициент теплоотдачи находится в пределах от 38 до 42 Вт/м²К (Рисунок 2.22). Следует помнить, что речь идет о сугубо усреднённой величине, которая относится к полной наружной поверхности изолированного стержня в лобовой части обмотки.

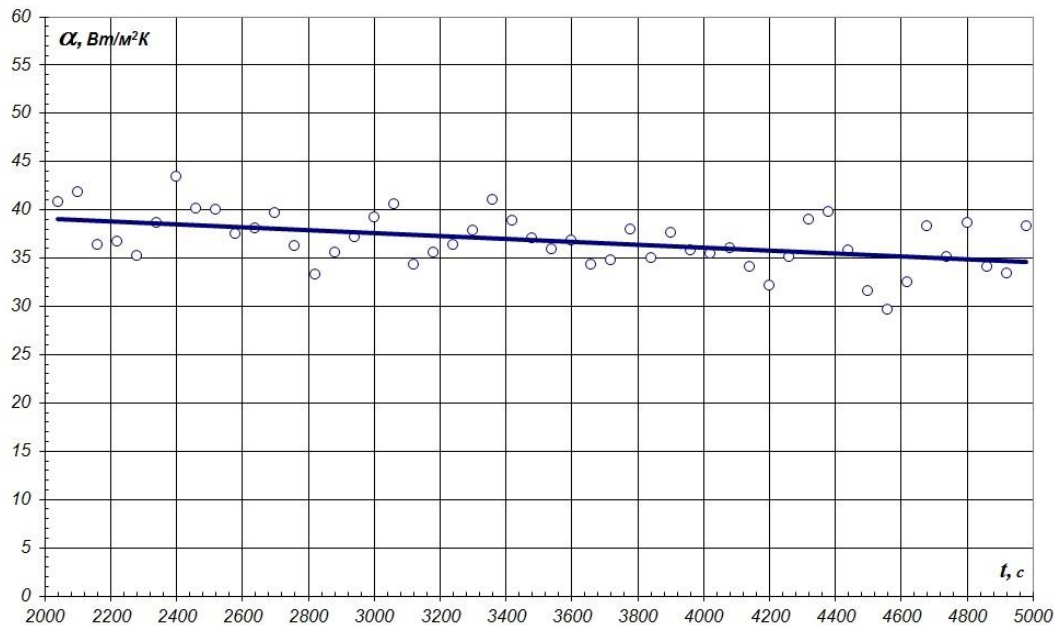


Рисунок 2.22. Эквивалентный коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности лобовых частей обмотки статора по результатам измерения температуры в различные моменты времени на протяжении испытательного режима короткого замыкания.

Участвующие в формулах (2.6) и (2.7) параметры $\varepsilon_{\text{п}}$ и $\varepsilon_{\text{л}}$, имеющие размерность времени, можно рассматривать в качестве показателей термической инерции обмотки в пазовой и лобовых частях соответственно. В частности, если тепловой процесс описывается одной экспонентой, каждый из этих показателей служит постоянной времени соответствующей

экспоненты и не изменяется на всем протяжении процесса. В иных обстоятельствах, характеризуемых более сложной функцией $\Delta\theta_{ny} - \Delta\theta_n(t) = f_1(t)$ или $\Delta\theta_{ny} - \Delta\theta_n(t) = f_2(t)$, числовые значения обсуждаемых параметров могут зависеть от времени.

Следует подчеркнуть, что предлагаемая здесь методика определения параметров теплопереноса на базе опытных кривых, получаемых в переходном тепловом режиме, не требует знания потерь, выделяющихся в стержне, чем выгодно отличается от известных стационарных методов [48].

Требуется оговорить подходящий временной интервал, в пределах которого обработка температурно-временных зависимостей является корректной, т.е. обременена приемлемо малой итоговой погрешностью. Понятно, что на ранней стадии процесса особенно заметна методическая погрешность, обусловленная неучётом теплоёмкости изоляции в исходных уравнениях теплового баланса, которые были положены в основу результирующих формул (2.6) и (2.7). С другой стороны, поздняя стадия процесса характеризуется малыми разностями температур, а также малыми значениями производных опытных функций, так что здесь можно ожидать значительного искажения конечного результата случайными погрешностями. По указанным причинам ранняя стадия (практически до текущих значений избыточных температур, составляющих порядка 30% от установившейся) и поздняя стадия (соответствующие текущие значения свыше 80% от установившихся) должны быть исключены из обработки, так что рабочий диапазон опытных зависимостей составляет $0.3\theta_y < \theta(t) < 0.8\theta_y$.

В результате проведенной работы можно сформулировать следующие выводы:

1. Успешный опыт технической подготовки и реализации температурных измерений в обмотке статора турбогенератора с применением оптоволоконных датчиков свидетельствует о принципиальной

адаптируемости данной измерительной системы к технологии производства крупных электрических машин.

2. Можно ожидать, что потребность в подобных измерениях в рамках исследовательских испытаний головных объектов будет нарастать по мере увеличения единичной мощности турбогенераторов с косвенным газовым охлаждением. Выполнение таких измерений на промышленных прототипах дает возможность получения надёжной информации о тепловых параметрах, необходимой для проектирования генераторов последующих поколений.

3. Важной задачей разработчиков оптоволоконной измерительной системы остается обеспечение стабильности градуировочных характеристик датчиков на всех этапах производства и испытания обследуемой электрической машины.

Таким образом, впервые в практике отечественного электромашиностроения при стендовых испытаниях турбогенератора мощностью 225 МВт выполнены измерения температуры элементарных проводников обмотки статора с помощью миниатюрных оптоволоконных датчиков, встроенных в обмотку в процессе её изготовления. Результаты эксперимента использованы в качестве исходных данных для определения важных параметров конструкции турбогенераторов с воздушным охлаждением (коэффициент теплопроводности корпусной изоляции в пазу, коэффициент теплоотдачи в лобовых частях обмотки статора).

2.5. Мониторинг уникальных сооружений сложной топологии на примере манежа «Заря»

Для мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений была создана система наблюдения и контроля по определённой программе, обеспечивающая безопасное функционирование зданий и сооружений за счет своевременного обнаружения на ранней стадии негативного изменения напряжённо-деформированного состояния

конструкций и грунтов оснований или крена, которые могут повлечь за собой переход объектов в ограниченно работоспособное или аварийное состояние.

Система мониторинга технического состояния несущих конструкций представляет собой совокупность технических и программных средств и позволяет осуществлять сбор и обработку информации о различных параметрах строительных конструкций (геодезические, динамические, деформационные и др.) с целью оценки технического состояния зданий и сооружений, а также повышения эффективности и уровня безопасности эксплуатации.

С помощью оптоволоконных датчиков возможна реализация систем мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений [1, 49, 104], а также иных объектов ответственного назначения, таких как угольные шахты [50-55, 82], линии электропередач, трубопроводы и др. [56-62, 83, 105-109]. Системы на основе оптоволоконных датчиков соответствуют существующим стандартам и нормативным требованиям по мониторингу объектов, таким как ГОСТ Р 53778 – 2010, ГОСТ Р 22.1.12 – 2005, ГОСТ 24846-81, МРДС 02-08, ФЗ-384 (2009), ГОСТ Р 52350.14-2006, Правила безопасности в угольных шахтах (п.41 Приказа №1158 от 20.12.2010) и др. [63-68, 112].

В качестве примера реализации системы описан опыт, полученный при оборудовании стадиона «Заря» в городе Новосибирске.

Цели и задачи мониторинга манежа.

Мониторинг технического состояния несущих конструкций центрального блока крытого футбольного манежа проводится для:

- установления соответствия фактического напряженно-деформированного состояния конструкций расчетным данным проекта;
- контроля технического состояния основных несущих элементов центрального блока (большепролетных рам, системы связей и прогонов

покрытия) и своевременного принятия мер по устранению возникающих негативных факторов, ведущих к ухудшению этого состояния;

- выявление объектов (отдельных конструктивных элементов, прежде всего большепролетных рам), на которых произошли изменения напряженно-деформированного состояния и для которых необходимо обследование их технического состояния;

- обеспечения безопасного функционирования здания манежа за счет своевременного обнаружения на ранней стадии негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкций и грунтов основания, которое может повлечь переход конструктивных элементов в ограниченно работоспособное или аварийное состояние;

- отслеживание степени и скорости изменения технического состояния объекта и принятия в случае необходимости экстренных мер по предотвращению его обрушения.

В процессе создания системы мониторинга решены следующие основные задачи:

- осуществлён выбор объектов контроля (определены типы конструкций, определено число контролируемых однотипных конструкций);
- проведены детальный статический и конструктивные расчёты несущей системы с уточнёнными нагрузками;
- на основании уточнённых расчётов произведён выбор наиболее ответственных конструктивных элементов, определены опасные сечения элементов и назначены контрольные точки для установки приборов и измерений;
- на основании уточнённых расчетов определены критические уровни контролируемых параметров (перемещений, деформаций) в контрольных точках;
- проведена вертикальная геодезическая съемка наиболее важных контрольных точек всех рам;

- на основе анализа съёмки сделаны предварительные выводы о поведении конструкций большепролетных рам;
- назначены методы определения контролируемых параметров при проведении мониторинга;
- произведён выбор серийных технических средств контроля параметров и решены вопросы их размещения (установки) в контрольных точках;
- разработан проект автоматизированной системы мониторинга;
- разработана специальная программа, производящая сбор, обработку и удобное представление данных контролируемых параметров;
- разработаны основные положения проведения очередного этапа мониторинга.

Краткое описание конструктивных решений несущих конструкций центрального блока.

Основные несущие конструкции каркаса центрального блока здания манежа предусмотрены в виде стальных стержневых пространственных трехгранных рам пролетом 99 м. Распор рам предусмотрено воспринимать затяжкой, расположенной в уровне опор. Очертание ригельной части рам ломанное. В центральной части ригель рамы имеет уклон 1:5; в приопорной зоне уклон 1:2. Шаг рам 12м. Высота рамы в коньке 24,240м (до нижнего пояса рамы).

Сечение элементов рамы предусмотрены из круглых бесшовных горячедеформированных труб по ГОСТ 8732-78 и ТУ 14-ЗР-50-2001 и ТУ 14-ЗР-51-2001 из стали 20 по ГОСТ 1050; затяжка – из листовой стали С255 по ГОСТ. Высота сечения ригеля рамы в центральной части постоянна и составляет 3.0 м (по осям труб), в приопорной зоне – переменная с увеличением высоты к рамному узлу до 4.66 м. Ширина горизонтальной грани сечения рамы 2.5м.

Монтажные стыки отправочных элементов рамы на фланцах на высокопрочных болтах диаметром 24 мм сталь 40Х «Селект» (класс

прочности условно 11.9). Заводские узловые соединения элементов рамы сварные фасонные.

Прогоны покрытия выполняются из прокатных стальных швеллеров по неразрезной многопролётной схеме с перехлестом смежных прогонов на горизонтальной грани ригеля рамы. Шаг прогонов 3 м. Сталь С245 по ГОСТ. В зоне снегового мешка у фонаря прогоны разрезные из перфорированных двутавров с шагом 1.5 м. Для обеспечения узлового опирания прогонов на ригель рамы в этой зоне применены перекидные балки. По крайним осям здания манежа прогоны покрытия опираются на конструкции торцевого фахверка. Для обеспечения общей устойчивости прогонов предусмотрена система связей из круглой стали с предварительным натяжением.

Геометрическая неизменяемость, общая устойчивость, пространственная работа конструкций каркаса манежа, а также восприятие комплекса горизонтальных нагрузок обеспечивается системой связей.

Затяжка рамы размещается в специальном железобетонном канале с размещением приборов контроля влаги.

Несущие конструкции трибун предусмотрены из стальных профилей, перекрытия трибун – монолитные железобетонные. Фахверковые конструкции из прокатных стальных профилей из стали С245.

Фундаменты рам свайные из забивных железобетонных свай длиной 12 м; под конструкции трибун и продольный фахверк сваи длиной 8 м, ростверки монолитные железобетонные.

Ограждающие конструкции стен здания манежа предусмотрены из металлических трехслойных кровельных панелей с минераловатным утеплителем толщиной 200 мм. Кровля стальная послойной сборки.

Потенциально возможные неблагоприятные факторы, воздействующие на строительные конструкции центрального блока.

На несущие конструкции центрального блока возможно воздействие ряда неблагоприятных факторов природного, техногенного, искусственного

характера, а также факторы, обусловленные неправильной (халатной) эксплуатацией конструкций.

Эти факторы могут приводить к постепенной деградации несущей способности конструкций или повлечь лавинообразное внезапное обрушение конструкций центрального блока. В настоящем разделе на основании имеющегося опыта обследования и анализа аварийных ситуаций зданий и сооружений кратко описаны возможные факторы неблагоприятного воздействия.

1. Повышенное (нерасчётное) воздействие снеговой нагрузки на покрытие в виде локального скопления снега в некоторой зоне покрытия.

В наиболее опасном случае, если нерасчётное повышенное скопление снега возникнет на значительной площади покрытия, это может повлечь перегрузку элементов большепролётных рам с угрозой их обрушения.

2. Агрессивное воздействие внутренней среды на несущие конструкции, вызывающее разрушение антикоррозионного покрытия, общую и местную коррозию стальных элементов. Как следствие, происходит постепенная потеря площади сечений стальных элементов и снижение их несущей способности.

3. Замедленное хрупкое разрушение высокопрочных болтов.

4. Непроектная подвеска различного рода оборудования к элементам рам, связей, прогонам может приводить к местным повреждениям конструкций: связей прогонов, элементов рам. В наихудшем случае непроектное размещение нового (непроектного) инженерного оборудования может приводить к перегрузке рам с угрозой их обрушения.

5. Механическое повреждение элементов каркаса при неправильной эксплуатации: демонтаж элементов каркаса (связей), вырез части сечений элементов, например, для пропуска вновь устанавливаемых коммуникаций.

6. Воздействие пожара наиболее опасный вид воздействия для рассматриваемого сооружения.

7. Воздействие террористического акта (взрывы). Наиболее уязвимые элементы несущих конструкций манежа расположены в подтрибунных помещениях, где расположены наиболее ответственные элементы большепролётных рам: стойки, наружные пояса, раскосы решетки рам, затяжки рам.

8. Качество монтажных работ оказывает существенное влияние на уровень работоспособности несущих конструкций.

9. Неравномерные осадки фундаментов, которые могут быть вызваны неравномерными деформациями грунтов. Большепролётные рамы малочувствительны к неравномерной осадке фундаментов вследствие того, что рамы шарнирно оперты на фундаменты. Однако неравномерная осадка фундаментов смежных рам связевого блока может вызвать нерасчётные усилия в элементах вертикальных связей.

В результате выполнения расчётов были получены количественные характеристики контролируемых параметров (перемещений и относительных деформаций) в контрольных точках несущих конструкций центрального блока манежа.

В качестве первого уровня контролируемых перемещений принято значение приращения перемещений от нормативной длительнодействующей снеговой нагрузки.

В качестве второго уровня контролируемых перемещений принято значение приращения перемещений от полной расчётной снеговой нагрузки.

В качестве первого уровня контролируемых относительных деформаций приняты приращения относительных деформаций, соответствующие дополнительным напряжениям от нормативных временных нагрузок.

В качестве второго уровня контролируемых относительных деформаций приняты приращения относительных деформаций, соответствующие дополнительным напряжениям от расчётных временных нагрузок.

Приняты приращения перемещений и деформаций к перемещениям и деформациям в контрольных точках несущих конструкций. При этом

перемещения определены от нормативных, а деформации от расчетных значений постоянных и длительных технологических нагрузок.

Выбор объектов контроля: конструкций, элементов, точек.

При назначении объектов для контроля руководствовались следующими принципами:

1. Контролю подлежат все типы конструктивных элементов, входящие в состав каркаса центрального блока:

- большепролётные рамы с затяжками,
- продольные связи по покрытию;
- поперечные связи по покрытию;
- вертикальные связи по стойкам рам в продольном направлении;
- прогоны покрытия;
- фундаменты;

2. Количество контролируемых конструкций в каждом типе определяется его уровнем нагруженности и степенью ответственности за работоспособность всего каркаса в целом.

3. Места расположения и количество контрольных точек в отдельном типе конструкций назначены исходя из требования получения максимально возможной информации о поведении конструкции на основании общего качественного анализа характера работы, а также на основании уточненного расчетного анализа конструкций. Прежде всего, в качестве контрольных точек назначались наиболее нагруженные сечения в наиболее нагруженных элементах конструкций.

4. С другой стороны, принималось во внимание ограничение по количеству контролируемых точек и параметров на основании имеющихся ограничений по стоимости системы мониторинга и технических ограничений коммутирующего оборудования.

На основании вышеизложенных принципов назначены следующие объекты для контроля:

1. *Большепролетные рамы* – основная наиболее ответственная несущая конструкция центрального блока. Общее количество рам – 9. Исходя из исключительной роли рам, устанавливается контроль всех рам, в том числе:

- детальный контроль для крайней рамы Р2 по оси 6 и рядовой рамы Р1 по оси 11.

- общий контроль всех остальных рам.

Детальный контроль предполагает отслеживание продольных относительных деформаций наиболее нагруженных стержней рам (включая затяжки), перемещение характерных узлов рам и перемещение опорных узлов рам. Общий контроль предполагает отслеживание перемещений характерных узлов рам и продольных относительных деформаций в затяжке.

2. *Продольные горизонтальные связи по покрытию* в виде горизонтальной связевой фермы, расположенной в уровне верхних поясов рам. Совместно с вертикальными связями по торцам центрального блока эта ферма выполняет распределительные функции для рам, обеспечивает их совместную работу на горизонтальные нагрузки, частичное восприятие горизонтальных нагрузок и передачу их на вертикальные связи по торцам центрального блока. Предусматривается контроль продольных относительных деформаций поясов горизонтальной связевой фермы в её наиболее нагруженной пролетной части в осях 9-10.

3. *Поперечные связи по покрытию* в виде двух горизонтальных ферм в уровне верхних поясов рам расположенных в осях 6-7 и 13-14. Совместно с вертикальными связями по стойкам рам обеспечивают общую устойчивость рам и восприятие горизонтальных нагрузок, действующих на здание в продольном направлении; совместно с продольной связевой фермой обеспечивают общую пространственную жесткость здания. Предусматривается контроль продольных относительных деформаций раскосов горизонтальной связевой фермы в её наиболее нагруженной приопорной части в осях 6-7 вдоль оси АО.

4. *Вертикальные связи по стойкам большепролетных рам* в продольном направлении обеспечивают геометрическую неизменяемость и восприятие горизонтальных нагрузок в продольном направлении. Предусматривается контроль продольных относительных деформаций раскосов вертикальной связи в её наиболее нагруженных элементах в осях 6-7 вдоль оси АО.

5. *Прогоны покрытия* обеспечивают восприятие нагрузки непосредственно от конструкции кровли, кроме этого выполняют функцию распорок между рамами. Предусмотрены прогоны двух типов. В центральной зоне пролёта в осях Б-К/5-15 – прогоны неразрезные из прокатных швеллеров. В крайних зонах покрытия в осях А0-Б/5-15 и К-М/5-15 разрезные из перфорированного двутавра. Для контроля назначены 9 прогонов, расположенные в характерных наиболее нагруженных местах: в зонах снеговых мешков вдоль фонарей; в середине пролета у конька, а по длине у краев здания и в середине длины. У всех прогонов контролируются продольные деформации нижнего пояса в середине пролета.

Система измерения смещений и деформаций.

Для измерения перемещений контрольных точек используется специализированный прибор для мониторинга – тахеометр. На контрольных точках устанавливаются отражатели, тахеометр регистрирует их координаты.

Деформация измеряется оптоволоконными датчиками. Устройство опроса считывает с датчиков параметры деформации по оптоволокну.

Для мониторинга в данном проекте предложено:

1. Для контроля прогибов большепролётных рам использовать тахеометр. Расположить его на западной стене стадиона. Отражатели для контрольных точек поместить на нижний пояс рам.

2. Для контроля деформации металлоконструкций разместить датчики деформации в заданных точках.

3. Для контроля смещения рам относительно фундаментов использовать датчик перемещения. Расположить его на фундаменте рамы шестой оси.

В штатном режиме работы система мониторинга делает опрос всех датчиков один раз в 6 часов. Таким образом, за один период мониторинга накапливается не менее 360 показаний для каждого датчика (например, в 4 кв. 2012 г. $92 \cdot 4 = 368$ показаний).

При использовании функции ПО «Формирование квартального отчёта» система автоматически создает табличный файл, в котором для каждого датчика указаны:

- тип и номер датчика для контроля перемещений или деформаций;
- время опроса;
- измеренные значения контролируемых параметров;
- информация о сбоях и превышениях критических уровней.

Описание измерительных приборов.

Для измерения линейных перемещений использовался датчик FS6100 (Рисунок 2.23) с двумя ВБР для эффективной компенсации температурного влияния. Основные характеристики датчика:

Чувствительность	50 пм/мм
диапазон измерений	80 мм
Разрешение	45 мкм



Рисунок 2.23. Датчик перемещения FS6100 (фундамент рамы по шестой оси).

Для измерения деформации использовался датчик FS6200 (Рисунок 2.24, слева). Термокомпенсация обеспечивалась применением датчика температуры FS6300 (Рисунок 2.24, справа).

Основные характеристики:

Чувствительность (FS6200)	1.2 пм/микрострейн
диапазон измерений(FS6200)	±2500 микрострейн
Разрешение (FS6200)	1 микрострейн
Чувствительность (FS6300)	10 пм/°С
диапазон измерений (FS6300)	от -20 до 80 °С
разрешение(FS6300)	0.1 °С



Рисунок 2.24. Датчики деформации FS6200 и температуры FS6300.

Устройство опроса датчиков (интеррогатор) FS2200RM (диапазон 1500-1600 нм, разрешение 1 пм, абсолютная погрешность ±2 пм, 8 каналов) устанавливается в серверной (Рисунок 2.25).



Рисунок 2.25. Устройство опроса датчиков FS2200RM.

Тахеометр LEICA TS15 A R400 (Рисунок 2.26) обеспечивает угловую точность 3" и точность измерения положения отражателя 1мм+1.5 ppm. Для абсолютной привязки тахеометра используется глубинный геодезический репер. Расположение тахеометра показано на Рисунке 2.27.



Рисунок 2.26. Тахеометр LEICA TS15 A R400 (3").

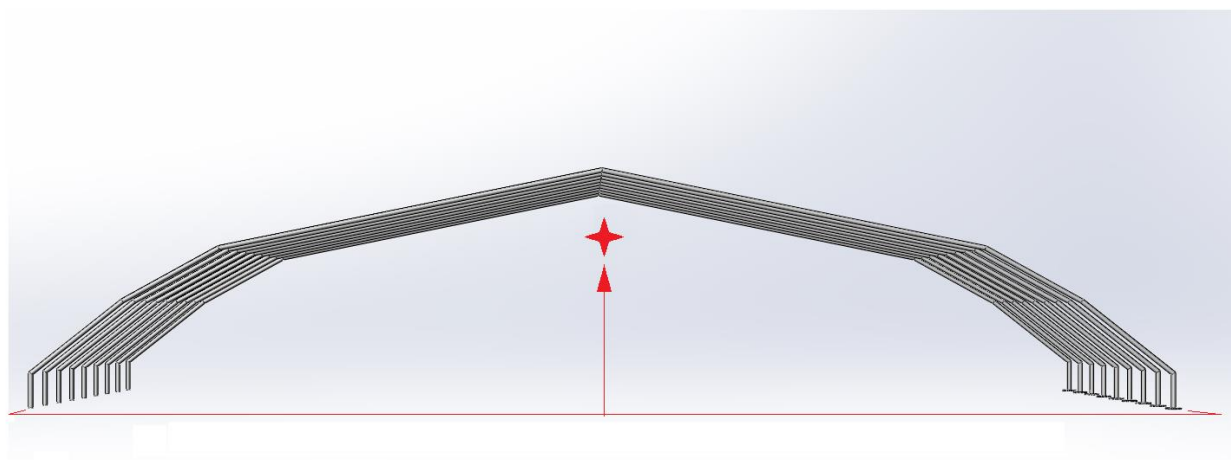


Рисунок 2.27. Расположение тахеометра на отметке 16.000 по центру, между осями Д и Е.

На Рисунке 2.28 представлена блок-схема коммутации датчиков. Датчики объединяются между собой при помощи оптоволоконного кабеля Corning PVC SM (9/125) 3мм simplex и включаются в оптоволоконную линию через сварные соединения. Схема разбивки датчиков по каналам (Таблица 2.2) разрабатывалась исходя из минимизации длины проложенного кабеля, простоты коммутации системы. При этом требовалось учитывать ширину спектрального диапазона работы каждого датчика во избежание ситуации наложения пиков отражения соседних ВБР, а также оптические потери, снижающие качество детектирования отраженных сигналов, что понижает точность измерений и надежность системы.

Таблица. 2.2.

Датчики	Каналы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Температуры FS6300 006 320 100 302	6,6			11,6			6,5	П7
	6,7			11,7			7,5	П8
	6,8			11,8			8,5	П9
	6,9			11,9			9,5	
	6,14			11,14			10,5	
	6,15			11,15			11,5	
	6,16			11,16			12,5	
	6,17			11,17			13,5	
	С3			С1			14,5	
	С4			С2				
	П1			П4				
	П2			П5				
П3			П6					
Деформации FS6200 006 220 100 302 - СТ		6.6.1	6.6.2		11.6.1	11.6.2	6.5.1	П7.1
		6.7.1	6.7.2		11.7.1	11.7.2	6.5.2	П7.2
		6.8.1	6.8.2		11.8.1	11.8.2	7,5	П8.1
		6.9.1	6.9.2		11.9.1	11.9.2	8,5	П8.2
		6.10.1	6.10.2		11.10.1	11.10.2	9,5	П9.1
		6.11.1	6.11.2		11.11.1	11.11.2	10,5	П9.2
		6.12.1	6.12.2		11.12.1	11.12.2	11.5.1	
		6.13.1	6.13.2		11.13.1	11.13.2	11.5.2	
		6.14.1	6.14.2		11.14.1	11.14.2	12,5	
		6.15.1	6.15.2		11.15.1	11.15.2	13,5	
		6.16.1	6.16.2		11.16.1	11.16.2	14,5	
		6.17.1	6.17.2		11.17.1	11.17.2		
		С3.1	С3.2		С1.1	С1.2		
		С4.1	С4.2		С2.1	С2.2		
		П1.1	П1.2		П4.1	П4.2		
		П2.1	П2.2		П5.1	П5.2		
		П3.1	П3.2		П6.1	П6.2		
Смещения FS6100 006 132 800 202 -80.	6.1.1							
	6.1.2							
ВБР в канале	17	17	17	13	17	17	20	9
Защита сварок	29	33	33	25	33	33	28	11

Коммутация системы измерения и оповещения.

Схема коммутации системы измерения и оповещения приведена на Рисунке 2.29.

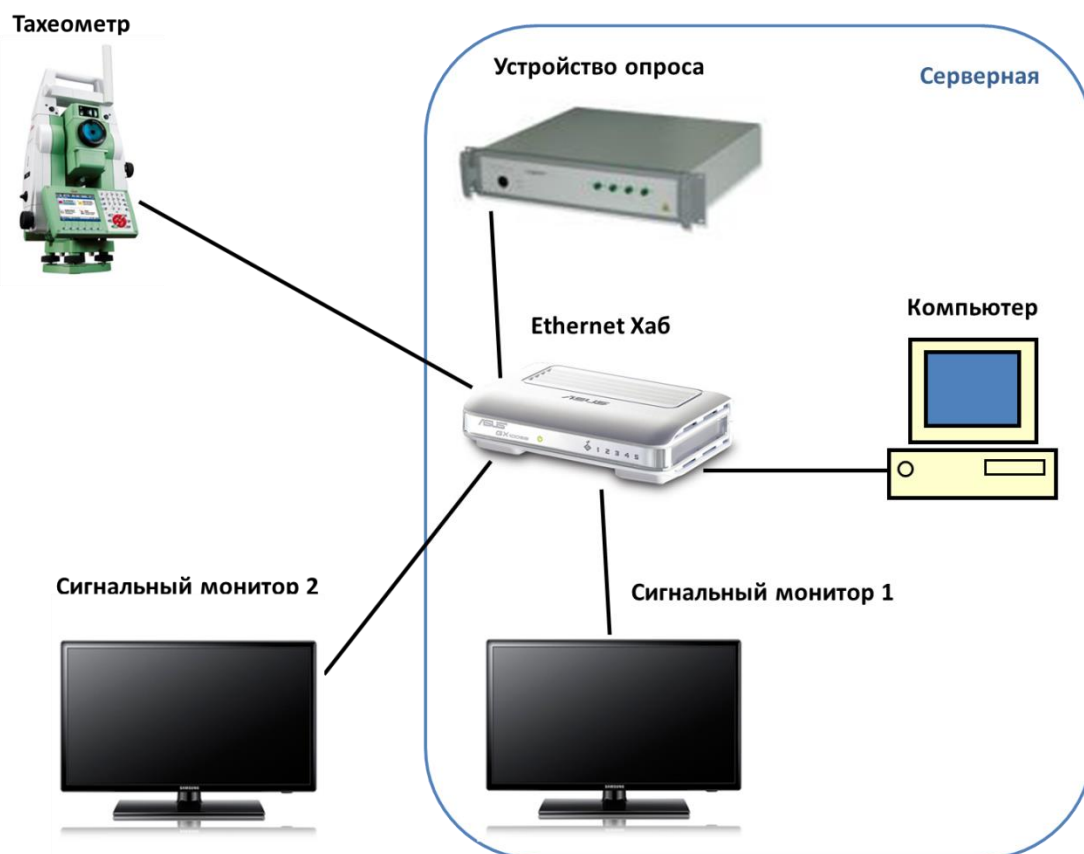


Рисунок 2.29. Схема коммутация системы измерения и оповещения.

Сбор данных со всех измерительных устройств осуществляется с помощью персонального компьютера с операционной системой Linux. Все устройства, а именно Тахеометр, Устройство опроса оптоволоконных датчиков, два сигнальных монитора и компьютер объединены в локальную сеть при помощи Хаба ASUS GigaX 1005B Fast E-net Switch 5 port (5UTP 10/100Mbps). При этом уведомления на Сигнальный монитор 2 подаются по существующей локальной сети стадиона.

Ввиду удалённости Тахеометра от Серверной комнаты, потребуется ретранслятор, а для подключения Тахеометра к Ethernet-сети переходник типа LEMO-Ethernet.

Система оповещения.

Система оповещения включает в себя два сигнальных монитора (в серверной и диспетчерской), система воспроизведения звуковых сигналов (в серверной, подключена напрямую к компьютеру), GSM-модем для передачи смс-уведомлений (в серверной, подключен напрямую к компьютеру).

Система оповещения работает по принципу светофора (красный, жёлтый и зелёный уровни). Зеленый: все измеряемые значения деформаций и перемещений ниже критических значений. На монитор выводится сообщение зелёного цвета, уведомления не рассылаются.

Жёлтый: значение одного или более параметров превысило критический уровень 1. На монитор выводится сообщение жёлтого цвета, отправляется смс-уведомление главному инженеру, отправляются email-уведомления главному инженеру, генеральному директору и генпроектировщику.

Красный: значение одного или более параметров превысило критический уровень 2. На монитор выводится сообщение красного цвета, раздаётся звуковой сигнал отправляются смс-уведомление и email-уведомления главному инженеру, генеральному директору и генеральному проектировщику. Частота опроса датчиков увеличивается до 1 опроса в 30 минут.

Программное обеспечение.

Программное обеспечение предназначено для получения спектральных данных с различных устройств опроса брэгговских датчиков, обработки и визуализации.

Программа имеет модульную структуру, что даёт широкие возможности при использовании её с различными устройствами опроса, а также большой потенциал по увеличению функциональности. Пример базовой конфигурации приведён на Рисунке 2.30. В ней реализованы следующие функции:

- Измерение спектра брэгговских датчиков в режиме реального времени

- Автоматический поиск датчиков в измеренном спектре
- Калибровка измерений (индивидуальное задание коэффициентов полиномов второго порядка для каждого датчика)
- График изменения показаний датчиков со временем
- Непрерывное сохранение откалиброванных данных в csv-файл
- Сохранение/загрузка необработанных спектров
- Экспорт графиков в форматы jpg, png, csv

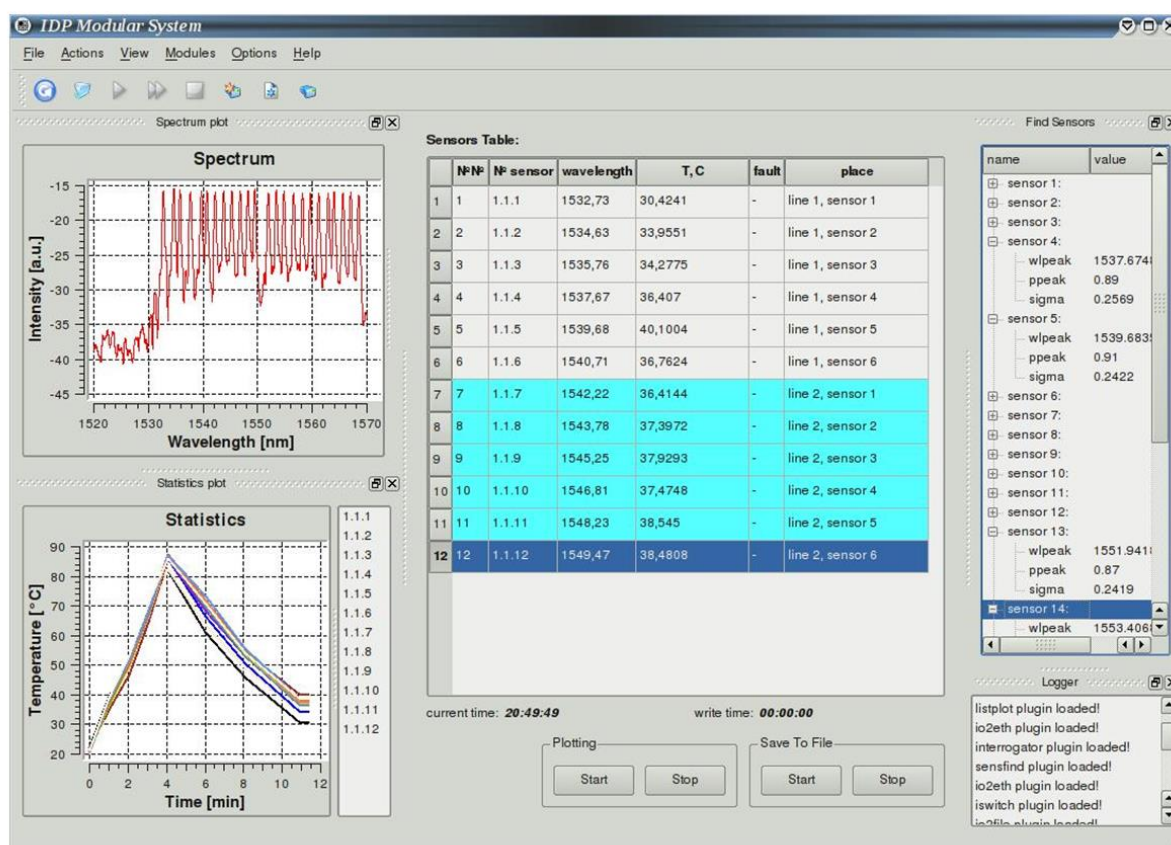


Рисунок 2.30. Главное окно приложения с выводом измеренного спектра ВБР-датчиков, таблицей текущих показаний и графиком изменения показаний датчиков со временем.

Модули и функции, разработанные специально для мониторинга Манежа:

1. Тахеометр:

Удаленное управление тахеометром, приём и обработка данных.

2. Задание граничных параметров:

Задание 2-х критических уровней для каждого датчика.

3. Настройки оповещения sms и email:

Редактирование списка телефонов и адресов для рассылки уведомлений.

4. Сигнализация:

Смс и email-оповещения, звуковые сигналы, вывод информации на табло.

5. Модуль визуализации:

3D модель конструкции стадиона; зелёные, жёлтые, красные точки в зависимости от показаний соответствующих датчиков.

6. Настройка периодического опроса:

Задание частоты и очередности опроса датчиков.

Монтажные и пуско-наладочные работы.

Датчики температуры и деформации устанавливались на металлические элементы конструкции при помощи аппарата точечной сварки. Полный цикл монтажных и пуско-наладочных работ был произведен силами сотрудниками компании «Инверсия-Сенсор» в декабре 2012 г. с использованием спецтехники, Рисунок 2.31, 2.32.

Показания датчиков деформации.

На Рисунке 2.33 показаны датчики деформации и температуры, смонтированные на затяжке. Затяжки – это стальные пластины длиной примерно 99 м, которые соединяют нижние точки арочной конструкции рам. По показаниям датчиков, установленных на затяжках, видно, что в зимний период затяжки растягивались, Рисунок 2.34.



Рисунок 2.31. Процесс монтажа датчиков.

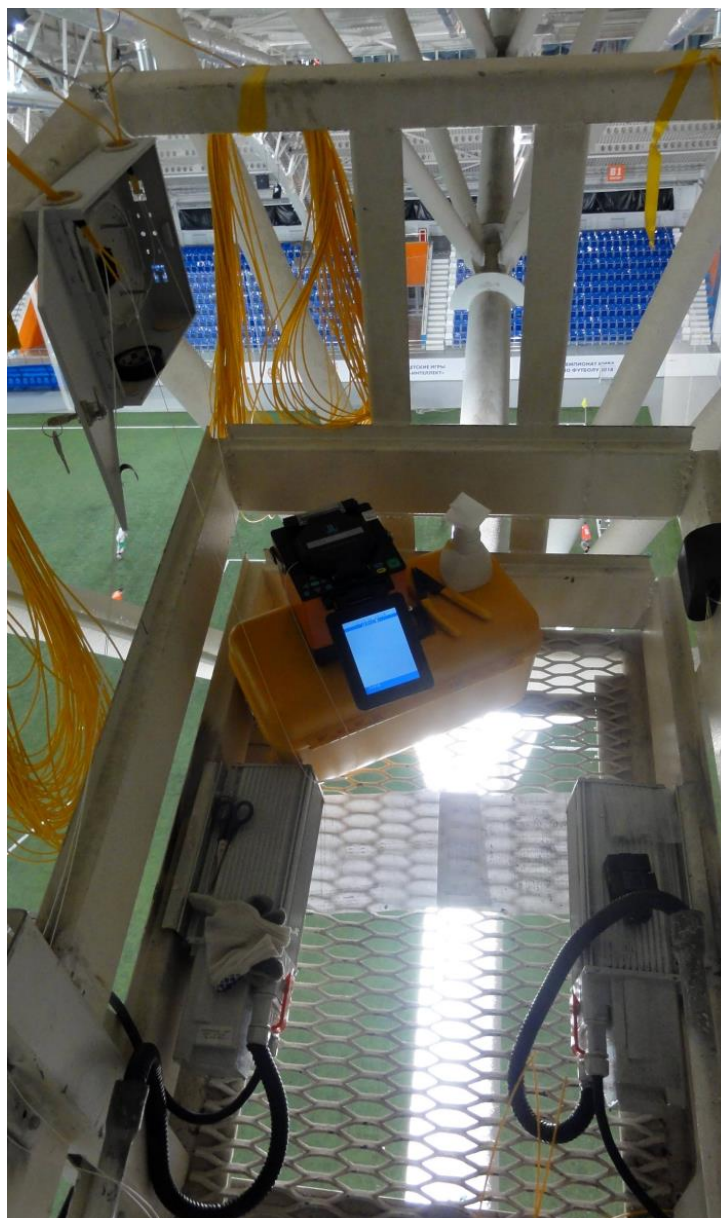


Рисунок 2.32. Процесс монтажа датчиков.



Рисунок 2.33. Датчики деформации и температуры, установленные на затяжке.

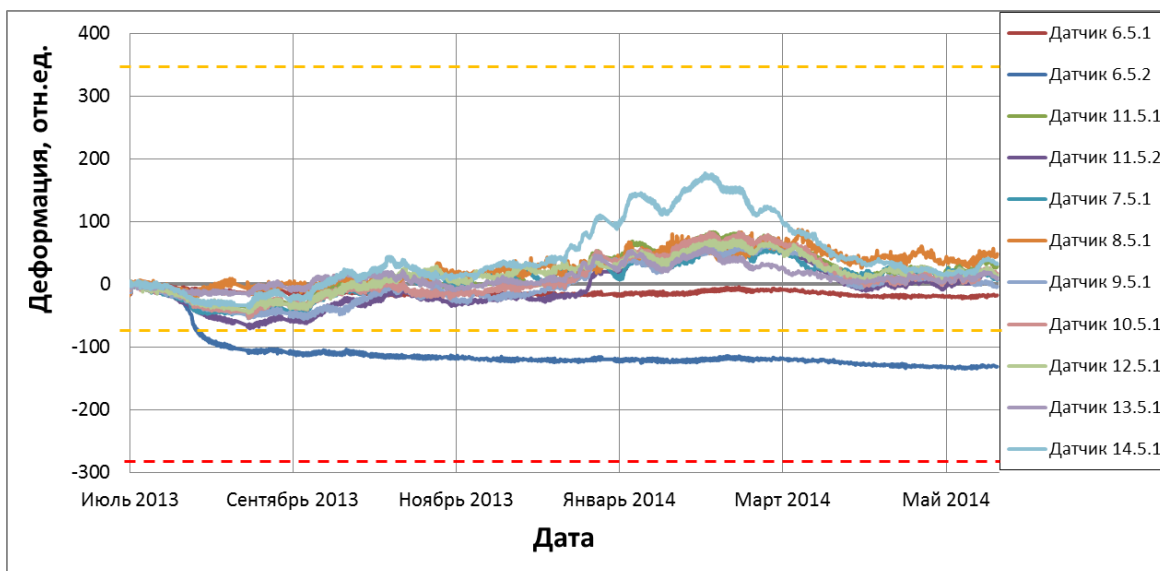


Рис 2.34. Относительная деформация затяжек.

Это связано с тем, что под воздействием снеговой нагрузки арочная конструкция прогибалась, из-за чего её нижние точки разъезжались, растягивая затяжки. Максимальная деформация зафиксирована у затяжки по 14-ой оси (самая восточная ось). Её величина достигла 168 отн. ед., что в пересчёте означает, что затяжка растянулась на ≈ 16.6 мм. Максимальная деформация затяжки по оси 6 -128 отн. ед., что соответствует сжатию затяжки на ≈ 12.7 мм.

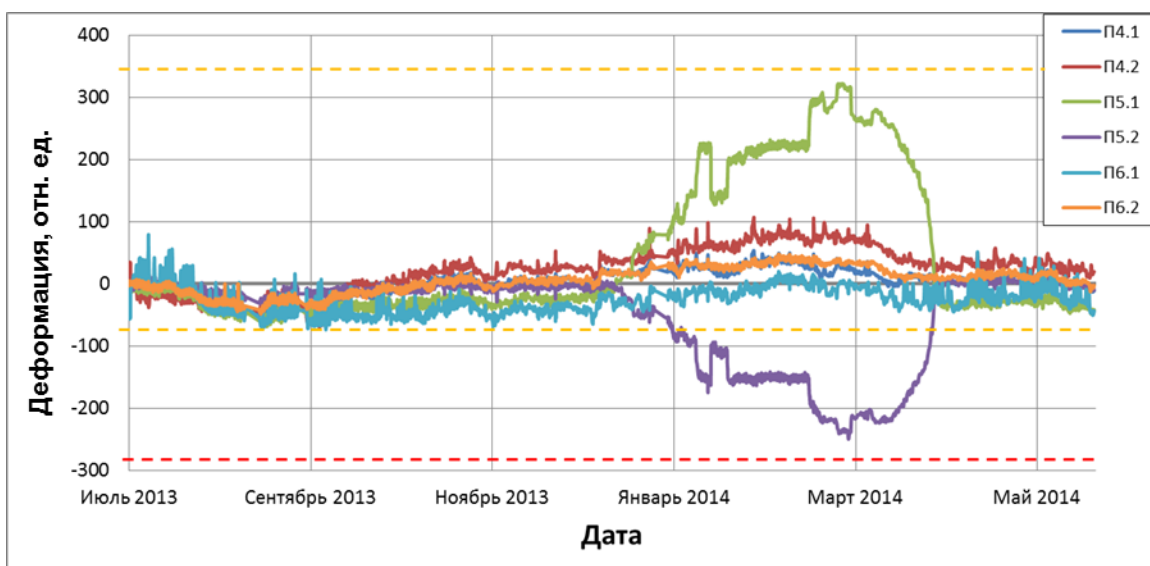


Рисунок 2.35. Деформация прогонов, расположенных в направлении Север-Юг.

Максимальная деформация зафиксирована у центрального прогона (датчик П.5.1), Рисунок 2.35. Снеговая нагрузка более всего воздействует на прогон, находящийся в коньке. Так как деформация прогона П4 немного выше, чем у П6, можно сделать вывод о том, что на северном склоне крыши снега было больше.

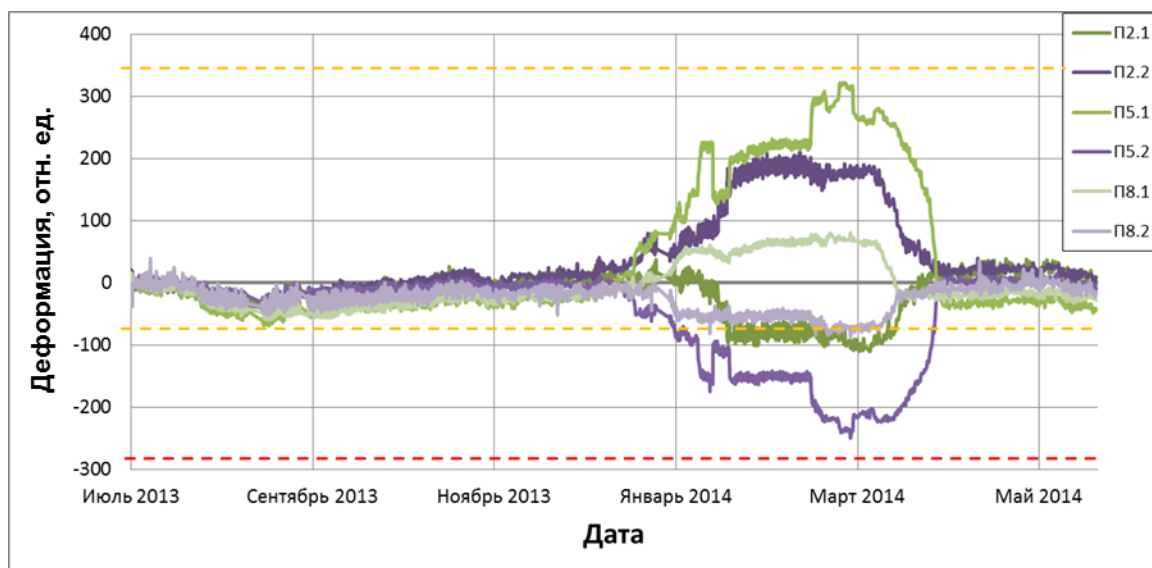


Рис 2.36. Деформация прогонов, расположенных в коньке, в направлении Запад-Восток.

Максимум нагрузки приходится на центральную часть крыши, так как деформация датчиков П5 существенно выше, чем П2 и П8, Рисунок 2.36.

Измерение перемещений элементов конструкции с помощью тахеометра.

На Рисунке 2.37 представлен график относительных вертикальных перемещений контрольных точек на большепролётной раме по 10 оси, полученный по данным измерения с помощью тахеометра. Все изменения в показаниях системы фиксируются относительно 1 июня 2013 года, поскольку в летний период конструкция находится в разгруженном состоянии. По техническим причинам с 19 марта по 1 июля 2013 года тахеометр не работал, поэтому данные за этот период отсутствуют.

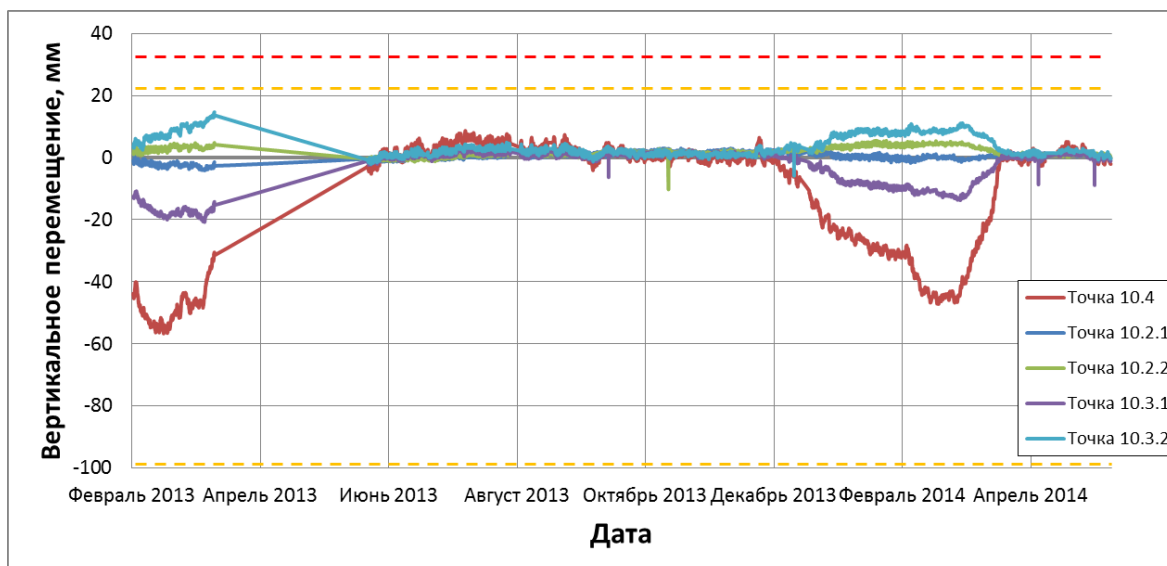


Рисунок 2.37. Перемещения контрольных точек на 10-ой раме (данные тахеометра).

Максимальное смещение наблюдается в коньке и достигает -56 мм в точке 10.4. Видно, что точки 10.2.1 и 10.3.1 смещались вниз, а точки 10.2.2 и 10.3.2 смещались вверх. Это означает, что снеговая нагрузка на конструкцию неравномерна – снега было больше на северном склоне крыши. Эти данные хорошо соотносятся с показаниями оптоволоконных датчиков, установленных на прогонах.

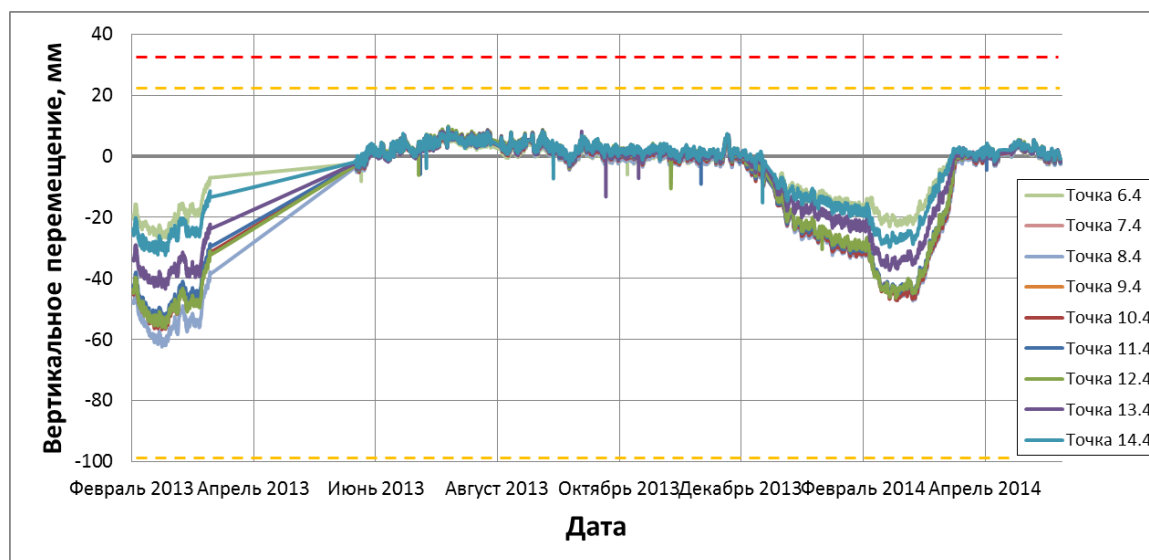


Рисунок 2.38. Перемещения контрольных точек в коньке (данные тахеометра).

В целом перемещения в коньке имеют одинаковую закономерность, Рисунок 2.38. Максимальное смещение зафиксировано на оси 8.4 в 2013 году, и на оси 10.4 в 2014 году, эти точки располагаются близко к центру. Минимальное перемещение зафиксировано на крайних осях 6.4 (самая западная ось) и 14.4 (самая восточная ось). Эти данные хорошо соотносятся с показаниями оптоволоконных датчиков. Предположительно перемещения в этих осях меньше, потому что часть нагрузки на себя берут стены. Прогонь, расположенные ближе к центру, обоими концами опираются на большепролётные рамы. Самые крайние прогонь опираются одним концом на раму, а другим – на несущую конструкцию стены.

Анализ поведения несущих конструкций.

В первый год работы системы было произведено моделирование отклика показаний системы на снеговую нагрузку.

Характерные этапы состояния снегового покрова на покрытии центрального блока в зимний период 2013-2014 гг:

1. 1 ноября: начало установления снегового покрова;
2. 1 февраля: нагрузка от снега достигает максимальных значений;
3. 15 марта: с южной стороны снег растаял, с северной снег остается;
4. 5 апреля: снег полностью растаял.

Положения контрольных точек рам в характерные моменты времени с соответствующими значениями перемещений представлены в Таблице 2.3.

Долговременные наблюдения.

На текущий момент система мониторинга действует на протяжении пяти лет. За это время на несущие конструкции каркаса оказывали воздействие все виды расчётных нагрузок, наиболее существенной из которых является снеговая. На графиках (Рисунок 2.39, 2.40) приведены значения перемещений и деформаций в контрольных точках рамы манежа. Согласно результатам измерений, наблюдается сильная корреляция между значениями деформации и перемещений точек рамы, что соответствует результатам моделирования.

Таблица 2.3.

Момент времени	Схемы перемещения контрольных точек в зависимости от наличия и положения снегового покрова	
	средней рамы (ось 10)	крайней рамы (ось 14)
1 июля 2013г.		
1 февраля 2014г.		
15 марта 2014г.		
5 апреля 2014г.		

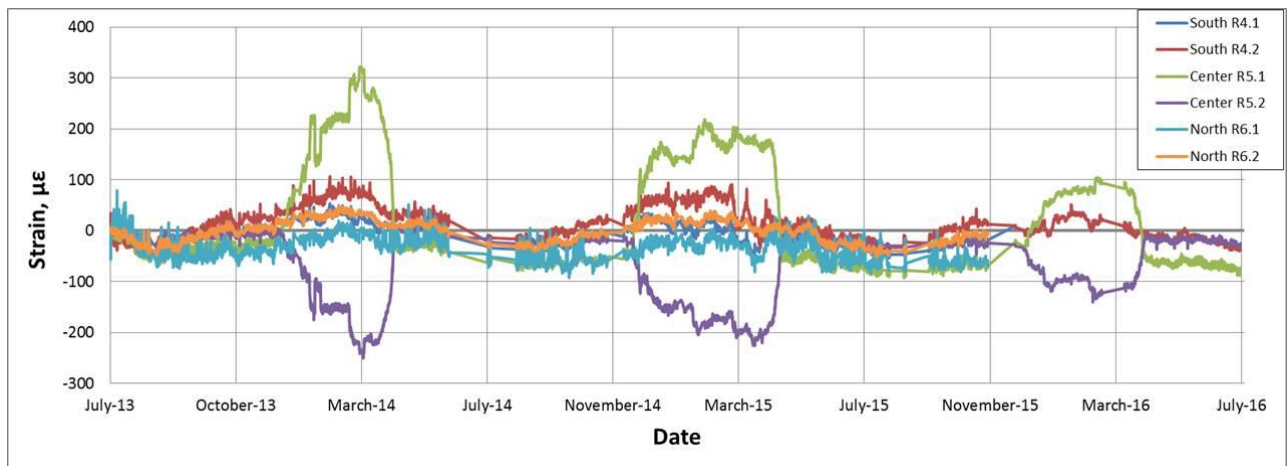


Рисунок 2.39. Значения деформаций в контрольных точках рамы манежа.

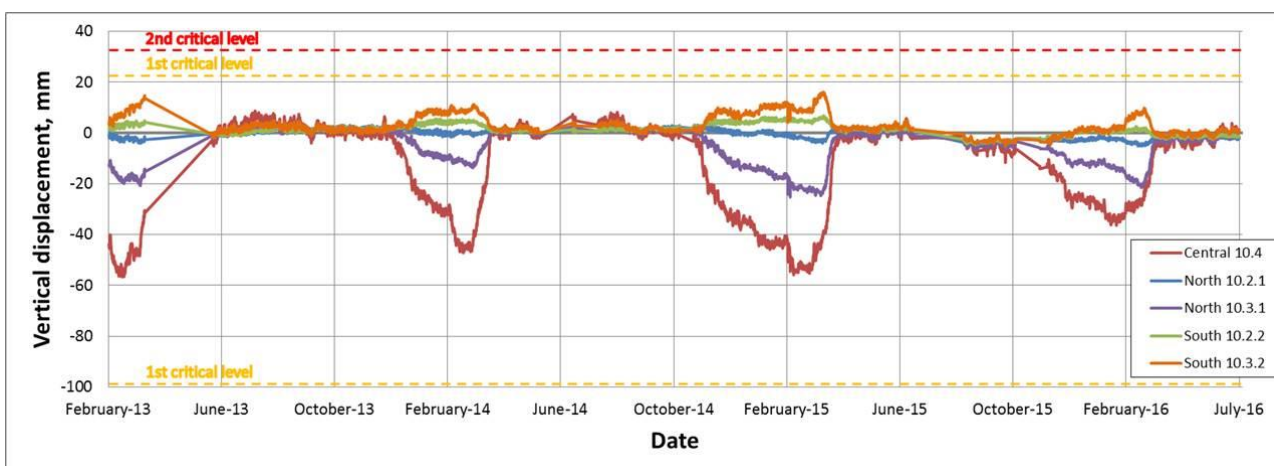


Рисунок 2.40. Значения перемещений в контрольных точках рамы манежа.

По получаемым данным эксплуатационные службы манежа принимают решение о чистке снега, что представляет высокую практическую ценность.

Кроме манежа «Заря» (Новосибирск), более десяти подобных систем было реализовано для других уникальных зданий и сооружений, среди которых:

1. Компрессорная станция Добрянская (Пермский край, Россия) – комплексная система мониторинга – 63 датчика деформации, 17 датчиков температуры (2013 год), где осуществлялась:

- оценка технического состояния трубной обвязки газоперекачивающего агрегата;
- контроль напряженно-деформированного состояния трубных элементов;
- оценка остаточного ресурса.

2. Оползневый участок магистрального газопровода Майкоп-Самурская-Сочи (Россия) – 9 датчиков деформации, 3 трех-осевых датчика деформации, 6 датчиков температуры (2014 год).

3. Магистральный газопровод Чусовой-Березники-Соликамск (Пермский край, Россия) – 4 интеллектуальных вставки (2014 год).

4. Магистральный газопровод Южный поток (Пермский край, Россия) – 22 интеллектуальных вставки (2015 год).

5. Надземный переход (Пермь, Россия) – контроль деформации надземного перехода – 34 датчика деформации, 2 трех-осевых датчика деформации, 3 датчика температуры (2015 год).

6. Жилой дом (Пермь, Россия) – мониторинг фундамента и несущих конструкций здания – 6 анкерных датчиков деформации, 2 датчика деформации, 8 датчиков температуры (2015 год).

7. Ж/д мост через р. Любовша (Орловская область, Россия) – мониторинг состояния нижних балок моста – 8 датчиков деформации (2016 год).

8. «Затонский» мост (Уфа, Россия) – контроль напряженно-деформированного состояния металлических конструкций и контроль частот колебания моста – 2 датчика линейных перемещений, 2 датчика угла наклона, 10 датчиков температуры, 8 датчиков деформации (2017 год).

9. Футбольный манеж «Пермь Великая» (Пермь, Россия) – система мониторинга с оповещением и выводом информации на пульт диспетчера – 10 датчиков линейных перемещений, 8 датчиков угла наклона, 2 датчика деформации, 2 датчика температуры.

10. Восстановительно-окислительная установка (Атырау, Казахстан) – система мониторинга железобетонных конструкций с оповещением и выводом информации на пульт диспетчера – 96 датчиков деформации, 16 датчиков перемещения, 4 датчика угла наклона.

Глава 3. Распределённая сенсорная система на основе комбинационного рассеяния

3.1. Разработка метода опроса распределённого волоконного датчика температуры на основе комбинационного рассеяния

Среди множества распределённых волоконных датчиков температуры системы на основе комбинационного рассеяния представляют особый интерес.

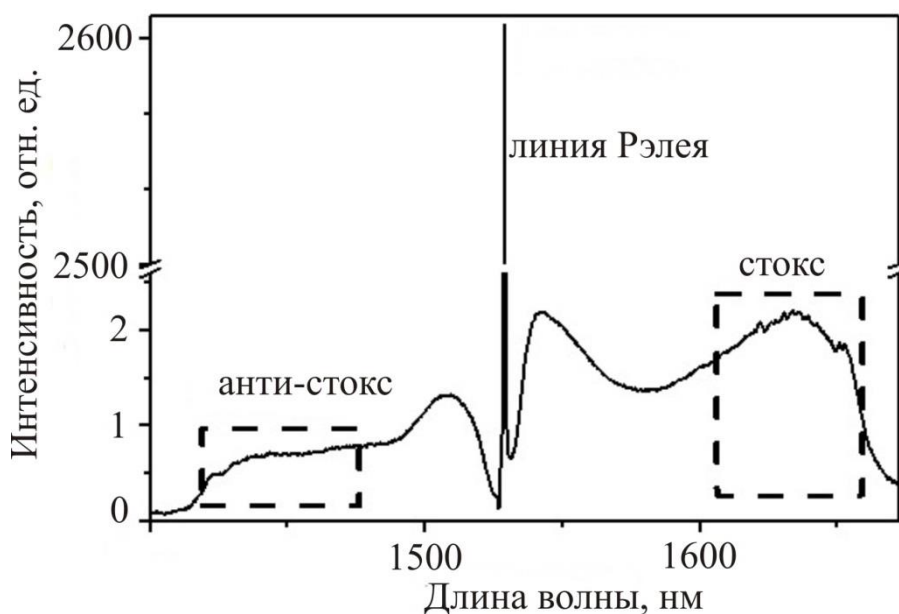


Рисунок 3.1. Спектр комбинационного рассеяния в оптоволоконке SMF-28.

Как было отмечено в параграфе 1.2, комбинационное рассеяние света сопровождается появлением дополнительных сдвинутых по частоте спектральных компонент в рассеянном свете. Количество и спектральное положение этих линий зависят от структурных характеристик рассеивающего вещества. В КР происходит обмен энергией между падающим фотоном и молекулой вещества: если молекула переходит из основного состояния в возбуждённое, то рассеянный фотон смещается по частоте в красную область спектра и таким образом генерируется стоксова компонента КР (Рисунок 3.1). Возможен также и обратный процесс, когда структурная молекула

теряет энергию и перерассеянный фотон с более высокой энергией генерирует антистоксову линию в синей области спектра относительно линии накачки. Очевидно, что заселённость возбуждённого уровня напрямую зависит от температуры вещества, а значит и интенсивность антистоксовой компоненты будет проявлять температурную зависимость. Таким образом, регистрируя временную динамику интенсивности антистоксовой компоненты КР при зондировании волокна импульсным излучением, с помощью такого датчика можно проводить измерения температуры вдоль волокна. Отношение интенсивностей стоксовой I_s и антистоксовой I_{as} компонент описывается известной формулой [69]:

$$\frac{I_{as}(T)}{I_s(T)} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T} \right), \quad (3.1)$$

где λ_s и λ_{as} – длины волн стоксовой и антистоксовой линий, k_B – постоянная Больцмана, h – постоянная планка. Коэффициенты затухания стоксовой и антистоксовой волн различны и зависят от температуры, что должно быть принято во внимание для корректного расчёта температуры.

На Рисунке 3.1 приведен спектр комбинационного рассеяния в одномодовом оптоволокне SMF-28, измеренный в направлении обратном по отношению к направлению распространения лазерного импульса. Видно, что интенсивность антистоксовой линии очень мала (на 30 дБ слабее амплитуды упругого рэлеевского рассеяния), и поэтому регистрация отношения интенсивностей стоксовой и антистоксовой компонент является сложной задачей. Кроме этого мощность зондирующего излучения не должна превышать нескольких Вт, чтобы избежать проявления таких нелинейных эффектов, как вынужденное комбинационное рассеяние и вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна. Все это требует особенно тщательного подхода к выбору метода спектральной фильтрации полезного сигнала. Нами был разработан новый метод фильтрации на основе волоконных брэгговских решёток и направленных спектрально-селективных ответвителей, который

позволил производить измерения интенсивности компонент КР в широком спектральном диапазоне с минимальными потерями, при этом чувствительности обычного p-i-n InGaAs фотоприёмника оказалось достаточно. Данный фильтр подавлял центральную область спектра на длине волны 1529 нм и пропускал антистоксову и стоксову компоненты КР, центрированные на 1430 и 1630 нм соответственно, в полосу шириной 30-50 нм (Рисунок 3.2), каждая из которых в дальнейшем направлялась на соответствующий регистрирующий фотодиод. Полная схема распределённого датчика температуры приведена на Рисунке 3.3.

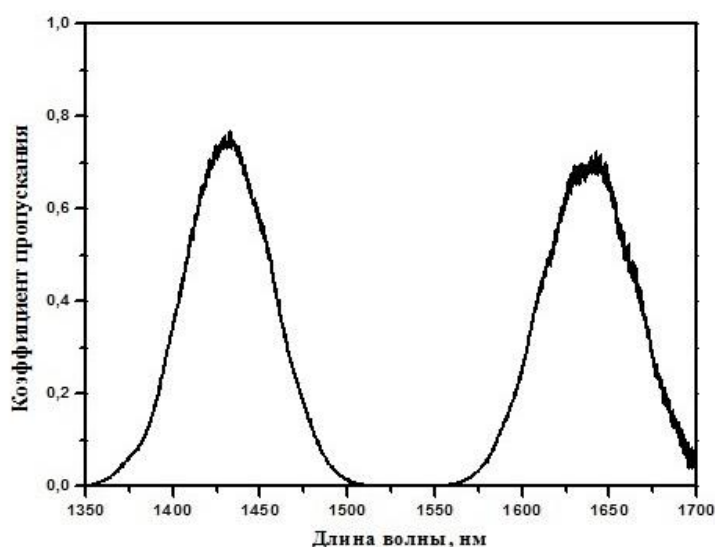


Рисунок 3.2. Спектр пропускания фильтра.

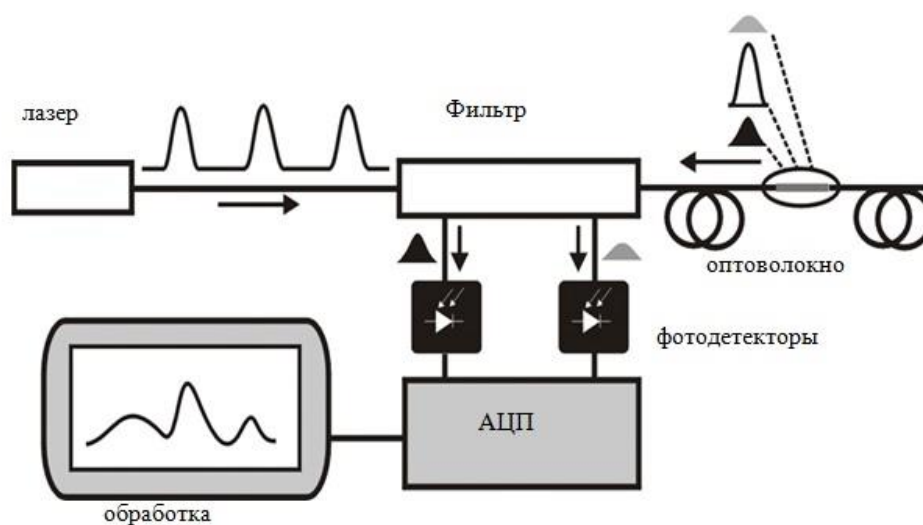


Рисунок 3.3. Схема распределенного датчика температуры.

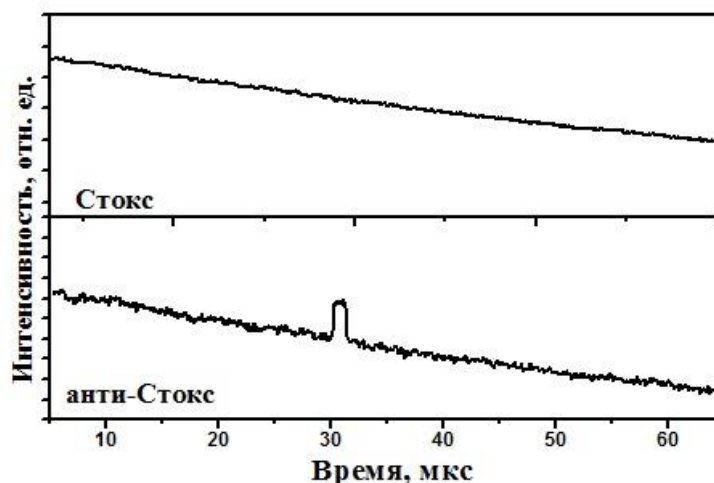


Рисунок 3.4. Временная зависимость интенсивностей стоксовой и анти-стоксовой компонент.

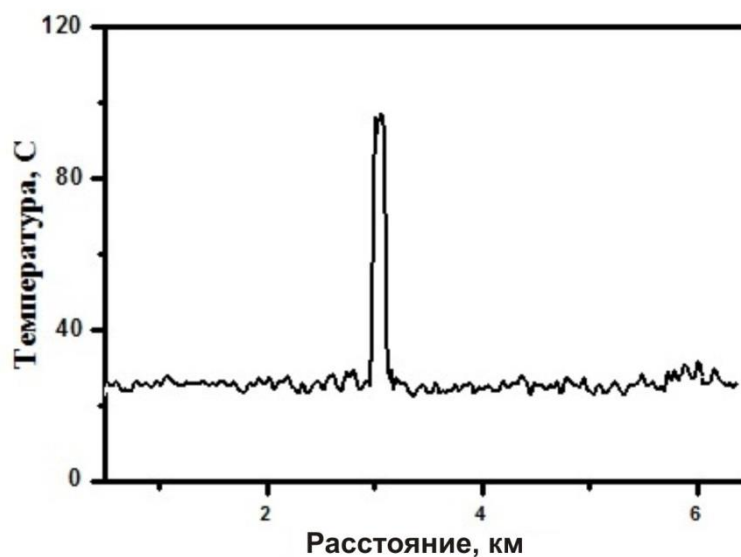


Рисунок 3.5. Распределение температуры, рассчитанное по данным, приведенным на Рисунке 3.4.

Для того, чтобы минимизировать шумы фотодетектора, требуется усреднение регистрируемых данных (~100-кратное). Как было показано в эксперименте, чувствительность разработанного датчика по температуре составляет несколько градусов для одномодовой волоконной линии протяжённостью до ~10 км (Рисунок 3.4, 3.5). Использование лавинных фотодиодов вместо р-і-п позволит существенно улучшить точность измерения температуры. Пространственное разрешение составляет ~10 м. Оно ограничено полосой пропускания фотодетектора (10 МГц) и может быть

в дальнейшем улучшено до значений единиц метров, определяющихся длительностью импульса зондирующего излучения импульсного волоконного лазера.

3.2 Описание конструкции коммерческих распределенных волоконно-оптических датчиков

На основе проведенных исследований были разработаны приборные варианты распределенных датчиков для использования на практике. Функциональная схема внутреннего устройства распределенного датчика температуры представлена на Рисунке 3.6.

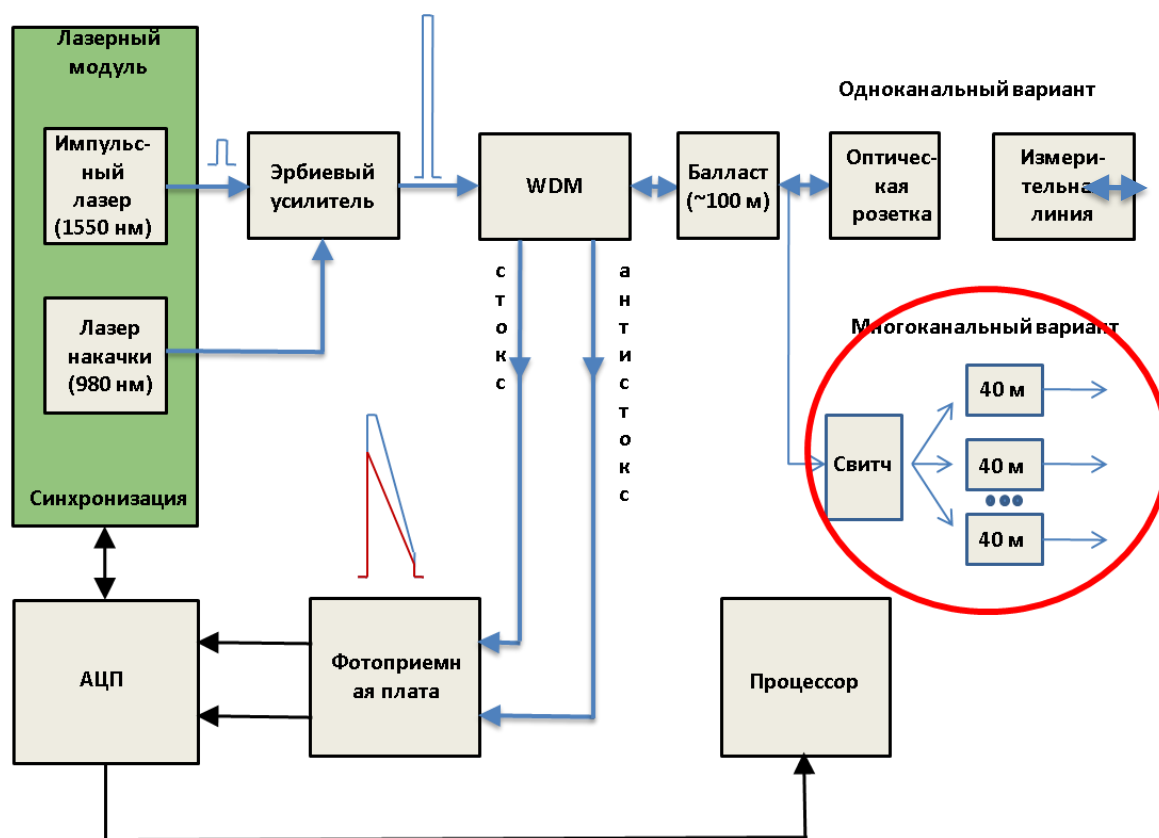


Рисунок 3.6. Функциональная схема блока обработки распределенного датчика температуры.

В состав лазерного модуля входит токовый драйвер, который обеспечивает питание, термостабилизацию и управление импульсным лазером, который создает первичный зондирующий импульс длиной 10-40 нс. Токовый драйвер имеет цифро-аналоговый преобразователь для преобразования цифрового сигнала синхронизации в аналоговый сигнал,

управляющий генерацией лазерного импульса, а также величиной силы тока, подаваемой на лазер, и аналого-цифровой преобразователь для обратной связи, управления. Малоинтенсивный лазерный импульс (типичная пиковая мощность 2-5 мВт) усиливается ($K_{\text{усил}}=30-40$ dB) при помощи двухпроходного эрбиевого усилителя с полупроводниковой накачкой (980 нм).

Система управления двумя лазерами (импульсным и лазером накачки усилителя) позволяет варьировать характеристики выходного импульса в широком диапазоне таких параметров как длина импульса, интенсивность, форма, скважность и др.

Часть чувствительного элемента с известной температурой (балласт) предназначена для сравнения соотношения интенсивности стоксовой и антистоксовой компонент в чувствительной линии и внутри блока обработки, значение температуры в этой части чувствительного элемента берётся за опорное значение, относительно которого производится пересчёт температуры в чувствительном элементе. При необходимости последовательного измерения нескольких оптических линий в схему добавляется оптический переключатель (свитч) и индивидуальные балласты каждого канала для учета и компенсации разницы в затухании компонент рассеяния для разных каналов переключателя.

Обратно отражённое рассеянное излучение фильтруется при помощи WDM, целью которого является разделение стоксовой и антистоксовой компонент в разные каналы. При этом важной задачей является подавление интенсивной (на три порядка сильнее антистокса) рэлеевской компоненты, наличие которой в полезном сигнале может привести к существенному снижению соотношения сигнал/шум.

Стоксова и антистоксова компоненты преобразуются в электрический сигнал, усиливаются, а затем оцифровываются при помощи высокоскоростного АЦП. Накопление и усреднение рефлектограмм

производится при помощи ПЛИС, а за вычисление температуры по калибровочным коэффициентам отвечает процессор.

Внутреннее устройство прибора серии E54x приведено на Рисунке 3.7.



Рисунок 3.7. Внутреннее устройство прибора серии E54x.

3.3. Метрологические характеристики распределённых волоконно-оптических датчиков температуры

Типичные характеристики распределённых волоконно-оптических датчиков температуры приведены для модели E54x в Таблице 3.1.

Одной из особенностей метрологических характеристик распределённых волоконно-оптических датчиков температуры (пространственное разрешение, чувствительность температуры, длина чувствительного элемента, время измерения) является их взаимная зависимость друг от друга [61, 108]. Так, например, увеличение времени измерения приводит к увеличению количества полученных рефлектограмм и

как следствие повышению соотношения сигнал/шум и чувствительности измерения температуры.

Таблица 3.1.

№ п/п	Наименование параметра/характеристики		Значение параметра/ характеристики модификаций
			Е54Х
1	Диапазоны измеряемых температур, °С		От -65 до +300
2	Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры в зависимости от диапазона измерений при времени измерений 600с, °С	От -40 до +80 °С	± 0,2
3	Пространственное разрешение, м		1
4	Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения расстояния (для любого времени измерения), м		± 1.0
5	Максимальная длина волоконно-оптического кабеля чувствительного элемента, м*		32000
6	Средняя мощность лазерного излучения, не более, мВт		10
7	Диаметр сердечника волоконно-оптического кабеля, мкм**		50; 62.5
8	Номинальная потребляемая мощность, не более Вт***		60
9	Температура окружающего воздуха в месте размещения блока обработки, °С		От +5 до +50 (От -20 до +60)
10	Относительная влажность воздуха в месте размещения блока обработки, % (при температуре плюс 40 °С, без конденсации)		От 10 до 90
<p>* Начальный и конечный участки волоконно-оптического кабеля не входят в рабочую зону. Длины этих участков: для Е54Х – 4 м. ** Параметры волоконно-оптического кабеля и оптического волокна определяются условиями договора на поставку *** Допустимое превышение – не более 10%.</p>			

В то же время при увеличении длины чувствительного элемента (оптического волокна) происходит большее затухание сигнала в линии. Таким образом, в конце измерительной линии соотношение сигнал/шум уменьшается, и уменьшается чувствительность.

Две вышеописанные зависимости для прибора серии E54x представлены на Рисунке 3.8. Измерения проведены при настройках с пространственным разрешением 2.2 м и различных временах усреднения (10, 60 и 600 секунд).

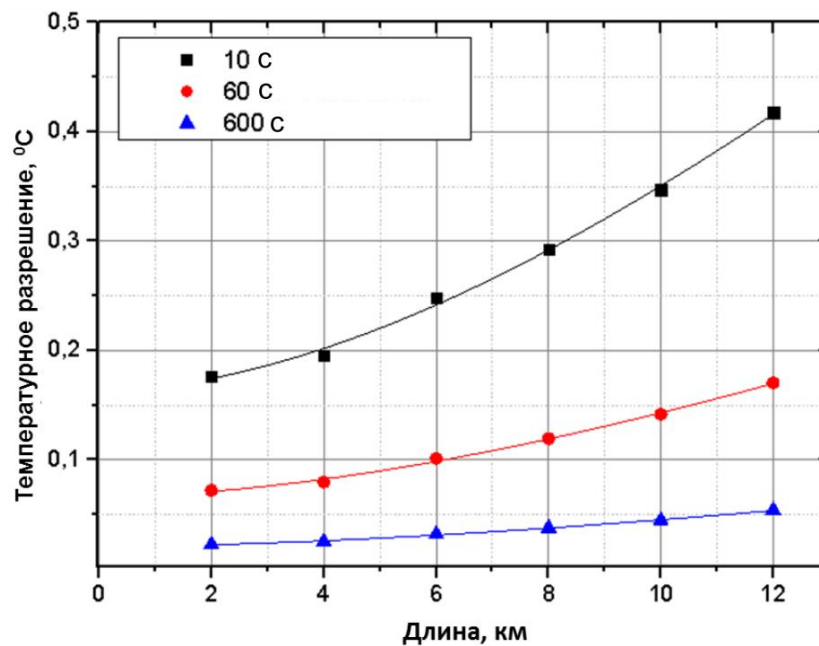


Рисунок 3.8. График зависимости разрешения по температуре от длины чувствительного элемента.

Для количественного сравнения приборов разных серий и производителей был предложен интегральный параметр М (Figure-of-Merit) [62]:

$$M_{DTS} = N_s \cdot \sigma^{-1} \cdot t_{acq}^{-1/2} .$$

где N_s – количество независимо измеряемых точек (частное длины чувствительного элемента и пространственного разрешения), σ – чувствительность по температуре, t_{acq} – время измерения.

В Таблице 3.2. приведены значения параметра М для современных коммерческих систем разных производителей [61]:

Таблица 3.2.

REFERENCE	FIBRE TYPE	PROBE WAVELENGTH (nm)	SPATIAL RESOLUTION (m)	TEMPERATURE RESOLUTION α ($^{\circ}\text{C}$)	UPDATE TIME T_{acc} (s)	FIBRE LENGTH (m)	SENSED POINTS N_s	M_{DRS} ($\text{K}^{-1} \text{s}^{-1/2}$)
Commercial Single Pulse								
First gen	MM	904	7.5	0.4	60	2,000	266	86
Second gen	MM	1,064	1	2.0	30	8,000	8,000	730
Second gen	SM	1,550	5	1	600	15,000	3,000	122
Second gen	SM	1,550	10	1.5	600	30,000	3,000	82
Third gen	MM	1,064	1	0.3	10	8,000	8,000	8,430
Third gen	MM	1,064	1	0.2	12	4,000	4,000	5,770
Commercial Pulse Compression								
	MM	1,064	1.5	0.65	600	8,000	5,333	335
	MM	1,064	1.5	0.15	600	4,000	2,666	726
Commercial – OFDR								
	MM	980	1.0	0.80	200	4,000	4,000	353
	MM	980	1.5	0.29	158	4,000	2,666	731
	MM	980	3.0	0.88	27	4,000	1,333	257
	MM	1,480	3.0	3.0	60	10,000	3,333	143

Для вышеописанного прибора серии E54x значение параметра М составило 4100, что находится практически на уровне лучших коммерческих приборов других производителей.

3.4. Пожарный извещатель на базе распределённого волоконно-оптического датчика температуры

На базе распределённого волоконно-оптического датчика температуры можно создать специализированный прибор – пожарный извещатель. Обнаружение пожара в промышленных условиях является непростой задачей по причине большого количества возмущающих факторов, многие из которых могут расцениваться извещателями как носители признаков пожара. Кроме того, пыль, осаждающаяся на чувствительных элементах извещателя, затрудняет их работу и может вывести их из строя. Необходимо учитывать и возможное тление осаждённой пыли, что также может привести к ложному срабатыванию извещателей. Наличие дымов и аэрозолей делает невозможным работу дымовых оптико-электронных пожарных извещателей. Наличие угарного газа приведет к срабатыванию газовых пожарных извещателей. Для промышленных объектов и производств характерны

большие объемы помещений, высокие потолки, возможно наличие протяжённых тоннелей, коллекторов, шахт, труднодоступных участков и помещений со сложной конфигурацией и геометрией. И в этих условиях, безусловно, возможна защита с помощью традиционных средств пожарной сигнализации, однако это сопряжено с применением большого количества извещателей, а следовательно с большими затратами, в том числе на монтаж и техническое обслуживание систем сигнализации и автоматики.

Затруднительно подобрать извещатели для взрывоопасных зон, особенно для применения в условиях подземных выработок, рудников, шахт. На химических производствах часто присутствуют агрессивные среды. Есть так же объекты морского и речного транспорта, характеризующиеся наличием агрессивного соляного тумана. Для решения подобных задач на основе распределённого датчика температуры был разработан [112, 113] извещатель пожарный тепловой линейный ИП 132-1-Р «ЕЛАНЬ» (Рисунок 3.9), имеющий сертификат соответствия (Рисунок 3.10) .

Извещатель состоит из чувствительного элемента (ЧЭ) и блока обработки (БО). В качестве ЧЭ извещателя используется оптоволоконный кабель (ОК) (Рисунок 3.11), прокладываемый в контролируемой зоне (Рисунок 3.12).



Рисунок 3.9. Извещатель пожарный тепловой линейный ИП 132-1-Р «ЕЛАНЬ».



Рисунок 3.10. Сертификат соответствия на извещатель пожарный тепловой линейный ИП 132-1-Р «ЕЛАНЬ».



Рисунок 3.11. Чувствительный элемент пожарного извещателя – оптоволоконный кабель.

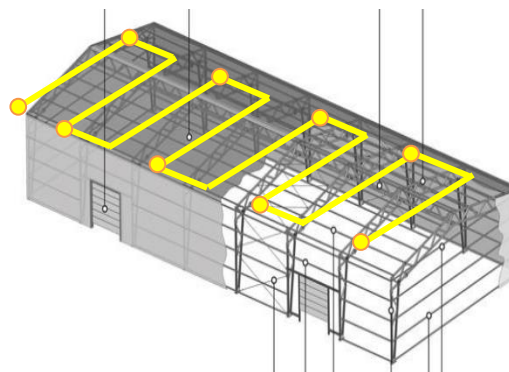


Рисунок 3.12. Пример схемы прокладки кабеля.

Область применения извещателя – отапливаемые и не отапливаемые помещения и наружные установки, в том числе линейно-протяженные, либо помещения с большими площадями потолков, например: объекты промышленности, производственные цеха, складские комплексы, торговые центры, стадионы, спортивные комплексы, театры, концертные залы, коллекторы, кабель-каналы, тоннели, шахты, объекты энергетики, транспорта, в том числе морские и речные суда, железнодорожный транспорт, в том числе метрополитен и другие объекты, Рисунок 3.13.

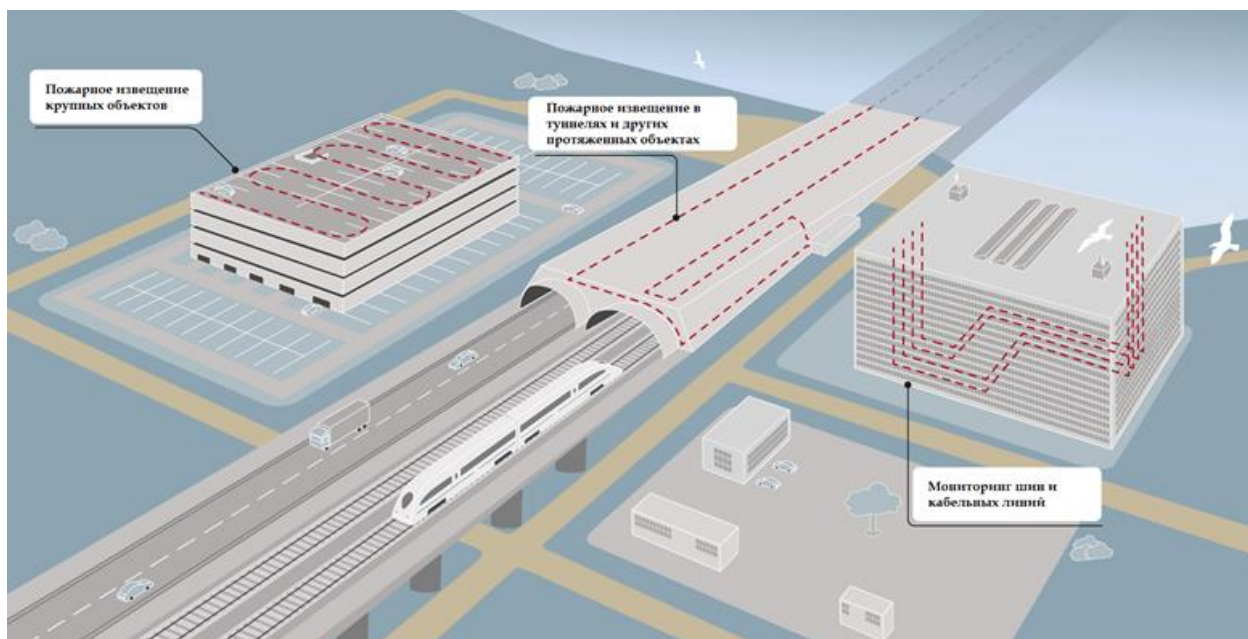


Рисунок 3.13. Область применения пожарных извещателей.

Линейный чувствительный элемент можно проложить в непосредственном контакте с защищаемым оборудованием, в любых труднодоступных местах и эксплуатировать в условиях воздействия солевого тумана, влаги, пыли, агрессивных сред, вибрации. Извещатель может также применяться во взрывоопасных зонах всех классов, электрооборудование подгрупп ПА, ПВ, ПС и температурного класса Т6 (по ГОСТ Р 52350.14-2006). Особенностью и важным преимуществом извещателя является то, что даже повреждение чувствительного элемента в условиях взрывоопасной атмосферы не приведет к взрыву. Технические характеристики пожарного извещателя приведены в Таблице 3.3.

Применение неэлектрических средств измерения, использование оптоволоконного кабеля позволяет применять извещатель на предприятиях нефтегазового комплекса, шахтах, рудниках, подземных выработках, на химических производствах (в том числе с агрессивными средами), на предприятиях металлургии и энергетики.

Таблица 3.3.

Обеспечиваемые температурные классы - ЧЭ с кабелем ОКС«п»-М1-01-1МГ2-0,7 - ЧЭ с кабелем ОКС«ф»-М1-01-1МГ2-0,7	A1,A2,B,R,A1R,A2R,BR,R A1,A2,B,R,A1R,A2R,BR,R C,D,E,F,G,CR,DR,ER,FR,GR
Маркировка взрывозащиты (для «ЕЛАНЬ-Ех») - блок обработки - чувствительный элемент	[Ex op is T6 Ga] IC или [Ex op is Ma] I Ex op is IC T6 Ga или Ex op is I Ma
Длина линейного ЧЭ (оптоволоконного кабеля), м - максимальная - минимальная	8000 100
Количество зон контроля - максимальное - минимальное	2000 125
Мощность лазерного излучения, мВт, не более	10
Напряжение питания БО, В	10-28
Потребляемый ток не более, А	1.5
Габариты блока обработки ИП (ШхВхГ), мм, не более	240x330x120
Габариты корпуса оптического балласта (ШхВхГ), мм не более	90x115x55
Габариты корпуса терминатора (ШхВхГ), мм, не более	35x114x55
Масса БО, кг, не более	4.0

Блок обработки извещателя «ЕЛАНЬ» обеспечивает:

- контроль температуры в ЧЭ на длинах от 100 до 8000м;
- условное деление всей длины оптоволоконного кабеля на зоны контроля длиной 4 м (т.е. количество контрольных зон равно длине кабеля, делённой на 4 м);
- выбор температурного класса и определение пожара по температуре для всех температурных классов от А1 до G, либо по температуре и скорости прироста температуры для всех классов от А1R до GR на основе полученных данных и их обработки;

- определение и индикацию дистанции в метрах до пожара;
- определение и индикацию нескольких зон, в которых произошел пожар;
- контроль исправности чувствительного элемента;
- самоконтроль блока обработки;
- выдачу извещений «Дежурный режим», «Пожар» «Неисправность»;
- от 1 до 30-ти реле «Пожар», цифровой выход по USB;
- взрывобезопасное оптическое излучение в оптоволоконный кабель ограничено мощностью лазера на уровне менее 10 мВт даже в условиях неисправностей.

Преимущества применения оптоволоконного кабеля в качестве чувствительного элемента (ЧЭ):

- контроль больших площадей, большая протяжённость зоны обнаружения,
- точное определение места пожара,
- ЧЭ устойчив к различным внешним воздействиям (тепло, холод, влажность, коррозии, механическим воздействиям, агрессивным средам),
- ЧЭ не подвержен электромагнитным помехам,
- малая мощность лазерного излучения делает его безопасным даже при механическом повреждении кабеля во взрывоопасных зонах,
- простая и быстрая установка оптоволоконного кабеля,
- простое обслуживание ЧЭ,
- восстанавливаемость ЧЭ после пожара.

В зависимости от типа ЧЭ и установок блока обработки ИП обеспечивает выполнение функций максимального, дифференциального или максимально-дифференциального теплового пожарного извещателя.

Несмотря на сложность конструкции извещателя, потребитель может легко программировать ИП, устанавливать любой температурный класс от A1 до G и от A1R до G1R органами управления на БО.

Применение извещателя во взрывоопасных зонах.

Извещатель «ЕЛАНЬ» выпускается также в модификации «взрывозащищенное исполнение» - «ЕЛАНЬ-Ех».

В случае использования извещателя во взрывоопасных зонах, БО извещателя располагается вне взрывоопасных зон и обеспечивает взрывозащищённость подключенного оптического кабеля, что позволяет присвоить маркировку взрывозащиты в соответствии с ГОСТ Р 52350.28-2007 [Ex op is T6 Ga] ПС или [Ex op is Ma] I.

Взрывобезопасность подключенного оптического кабеля ИП обеспечивается:

- ограничением мощности лазерного излучения на уровне 10 мВт;
- импульсным режимом лазера;
- обеспечением тройной электрической защиты, ограничивающей мощность лазера при перегреве или коротком замыкании излучателя.

В состав чувствительного элемента извещателя входят собственно оптоволоконный кабель и терминатор, которые могут располагаться во взрывоопасных зонах, а также оптический балласт, который располагается рядом с БО, во взрывобезопасной зоне.

ЧЭ извещателя имеет маркировку взрывозащиты по ГОСТ Р ЕН 13463.1-2009 Ex op is ПС Т6 Ga или Ex op is I Ma.

Фактическая максимальная температура поверхности ЧЭ зависит не от оборудования непосредственно, а главным образом от условий эксплуатации.

Извещатель «ЕЛАНЬ» соответствует ФЗ России от 22.07.2008г. № 123-ФЗ, ГОСТ Р 53325, ГОСТ Р 52350.0-2005, ГОСТ Р 52350.28-2007, ГОСТ Р ЕН 13463-1-2009.

Было произведено и установлено более сотни подобных систем.

Примеры реализованных проектов:

1. Объединённый Кировский рудник (Мурманская область, Россия) – 3 пожарных извещателя (2012 год).

2. Объединённый Расвумчоррский рудник (Мурманская область, Россия) – 2 пожарных извещателя (2012 год).

3. Белоярская АЭС (Свердловская область, Россия) – 12 пожарных извещателей (2014 год).

4. Березовский участок угольного разреза (Красноярский край, Россия) – 2 пожарных извещателя (2015 год).

5. Алабяно-Балтийский автомобильный туннель (Москва, Россия) – 15 пожарных извещателей в двух автомобильных туннелях по 1.5 км каждый (2015 год).

6. Рудник Заполярный (Красноярский край, Россия) – 6 пожарных извещателей (2016 год).

7. Аэропорт Шереметьево (Москва, Россия) – 6 пожарных извещателей в пешеходном тоннеле длиной 2 км (2017 год).

8. Разворотный тоннель на Калужском шоссе (Москва, Россия) – 3 пожарных извещателя (2017 год).

3.5. Мониторинг сверхпроводящего кабеля

Комплексы сверхпроводникового оборудования и силовые высокотемпературные сверхпроводниковые кабельные линии (ВТСПКЛ) сейчас активно разрабатываются как за рубежом, так и в России [56, 57]. При разработке ВТСПКЛ с циркуляционным криостатированием проводника, расположенного в системе каналов с принудительным потоком однофазного переохлаждённого или сверхкритического криогента, Рисунок 3.14, используемый сейчас необходимый классический набор критериев для оптимизации конструкции [56, 70] должен быть дополнен рядом простых теплогидравлических критериев [57], позволяющих более адекватно оценивать его работоспособность и энергетическую эффективность ещё на стадии проектирования.

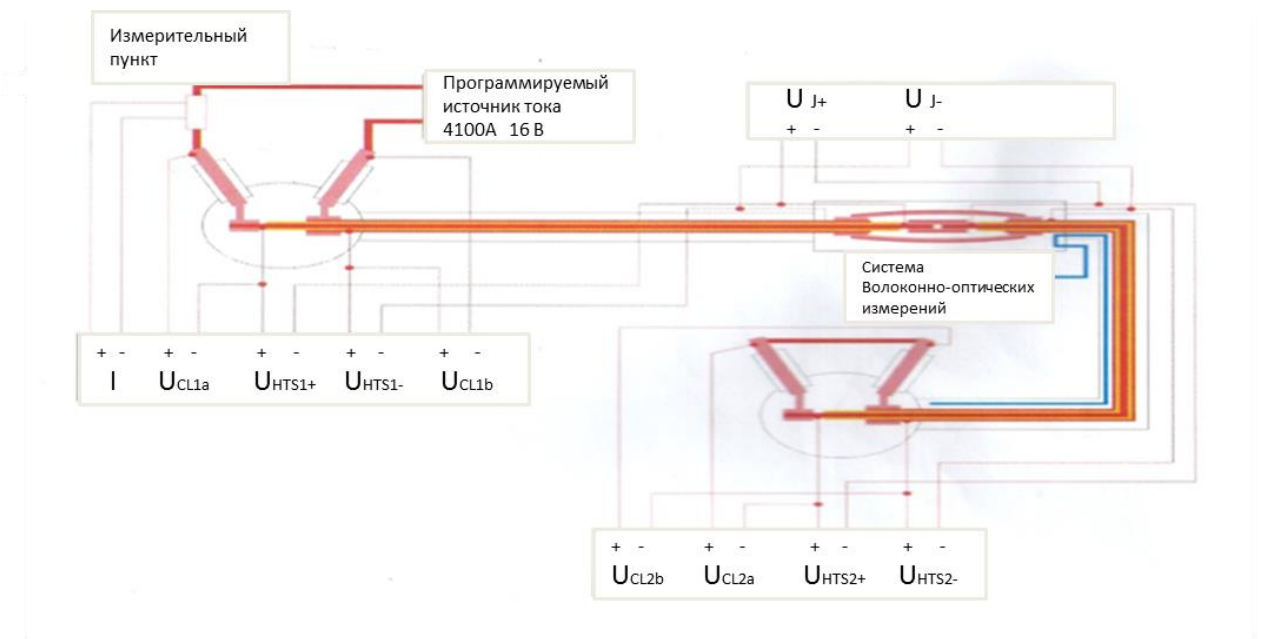


Схема измерения потенциалов на ВТСП кабеле постоянного тока

U_{CL1a} , U_{CL1b} , U_{CL2a} , U_{CL2b}	напряжения на токовводах с учетом перемычек и соединителей
U_{HTS1+} , U_{HTS1-} , U_{HTS2+} , U_{HTS2-}	напряжение на жилах ВТСП кабеля
U_{J+} , U_{J-}	напряжение на ВТСП перемычках в соединительной муфте

Рисунок 3.14. Основные элементы и система измерений ВТСПКЛ ПТ-60.

Например, оптимизация по простому критерию $K_m = m/m_{\min} \geq 1$, где элементарная оценка минимально допустимого рабочего массового расхода криогента m_{\min} в единичном канале при заданных его длине L , погонном теплоступлении q , средней изобарной теплоёмкости c_p и разностях соответственно энтальпий ΔI и температур ΔT потока криогента на его входе и выходе будет необходимой и рассчитывается как $m_{\min} = qL/\Delta I \approx qL/c_p\Delta T$.

Для решения задач оптимизации и, в дальнейшем, мониторинга результатов решения этих задач должны быть разработаны программы прогнозного компьютерного имитационного математического моделирования различных режимов работы сверхпроводникового оборудования и новые оптические методы и технологии измерения текущих параметров кабеля и криогента под нагрузкой в рабочем режиме, под высоким напряжением и рабочим током, в условиях влияния сильных постоянных и переменных электрических и магнитных полей и высокого уровня электромагнитных помех.

Создание оптоволоконной системы низкотемпературной диагностики ВТСПКЛ позволяет получать в режиме реального времени достоверную и свободную от негативного влияния сильных электромагнитных помех информацию об эксплуатационных рабочих и перегрузочных параметрах кабеля и аналогичных высоковольтных и «высокополевых» изделий сверхпроводниковой криоэнергетики [57], прикладной сверхпроводимости, криогенной техники, что, в свою очередь, позволяет разработать и внедрить в практику новый необходимый и эффективный инструмент оперативного контроля и управления в реальном времени штатными эксплуатационными и перегрузочными режимами работы сверхпроводниковых электроэнергетических объектов, своевременно диагностировать и предотвращать возможные нештатные, аварийные ситуации.

Для некоторых протяжённых существующих и перспективных ВТСПКЛ [58-61] и кабелей типа ВТСПКЛ-2500 постоянного тока (ПТ), Рисунок 3.15 [60], требования по точности измерения составляют ± 0.5 К, что позволяет использовать для диагностики профиля температуры по длине ВТСПКЛ распределённый метод, основанный на эффекте комбинационного рассеяния света (см. параграфы 3.1-3.3), в то время как при повышенных требованиях к точности, локальности и быстрдействию измерений, предпочтительны ВБР-сенсоры. Для каждого конкретного случая выбор системы диагностики должен производиться индивидуально, с учётом всех особенностей и требований конкретной задачи, однако в общем случае безусловно целесообразным является совместное использование той и другой методики, позволяющее объединить их достоинства и минимизировать недостатки, а подчас получить и дополнительный синергетический эффект от объединения технологий.

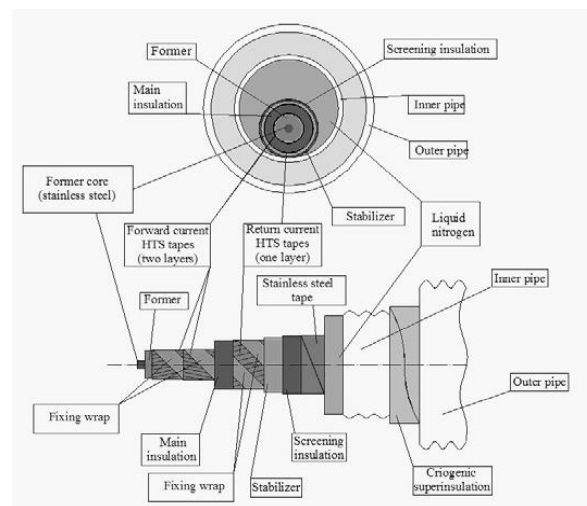
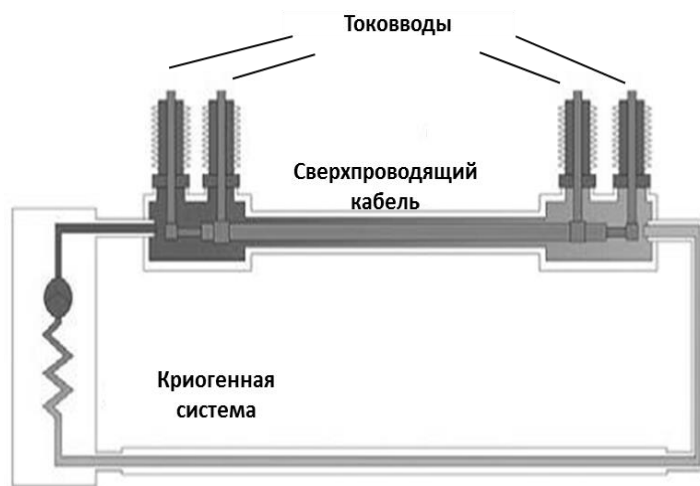


Рисунок 3.15. ВТСПКЛ-2500 постоянного тока.



Рисунок 3.16. Токовводный терминал.



Рисунок 3.17. Отрезки ВТСПКЛ длиной 30 м и промежуточная муфта.

Испытания разработанной и созданной оптоволоконной системы измерения температуры [102] были проведены в испытательном зале НИЦ «Курчатовского института» 11.10.2013г. на макете реального ВТСПКЛ ПТ,

состоящего из двух отрезков ВТСП кабеля в гибком криостате длиной по 30 м каждый с токовводными терминалами, Рисунок 3.16, на входе и выходе кабеля из криостатов и промежуточной муфтой, Рисунок 3.17, расположенной посередине между отрезками кабеля.

В качестве криогента использовалась паро-жидкостная смесь жидкого азота. Циркуляция криогента осуществлялась посредством прокачки (передавливания) криогента из одного азотного танка ёмкостью 7 м^3 через неизолированный от окружающей среды 3-4 метровый заправочный стальной трубопроводный шланг, через входной (по потоку криогента) токовый терминал, первый 30-метровый отрезок криостата с кабелем, промежуточную муфту, второй отрезок кабеля, выходной токовый терминал, сбросной неизолированный стальной трубопроводный шланг во второй азотный танк ёмкостью 2 м^3 , первоначально сообщающийся с атмосферой в процессе захолаживания. По мере заполнения второго танка процесс должен был быть реверсирован и т.д.

Подобная система захолаживания и «криостатирования» ВТСПКЛ ПТ характеризуется не только сильной нестационарностью протекающих в ней термодинамических процессов, но и их существенной неравновесностью даже при длительной её эксплуатации, не говоря уже о периодах не более 1.5-2 часов, а данная оптоволоконная система предназначена для корректного измерения квазистационарной температуры, характерной для штатных режимов работы ВТСПКЛ ПТ и при существенно нестационарных режимах может давать дополнительную погрешность за счёт усреднения быстрых температурных колебаний. В этих условиях нам пришлось ограничиться визуальным контролем возможных изменений параметров процесса и фиксацией некоторых из них, по мере возможности, «от руки» на листе бумаги. Полученная в результате обработки зафиксированных таким образом данных чисто качественная зависимость температуры криогента на выходе из последнего по потоку токовводного терминала от времени процесса в минутах, приведена на Рисунке 3.18.

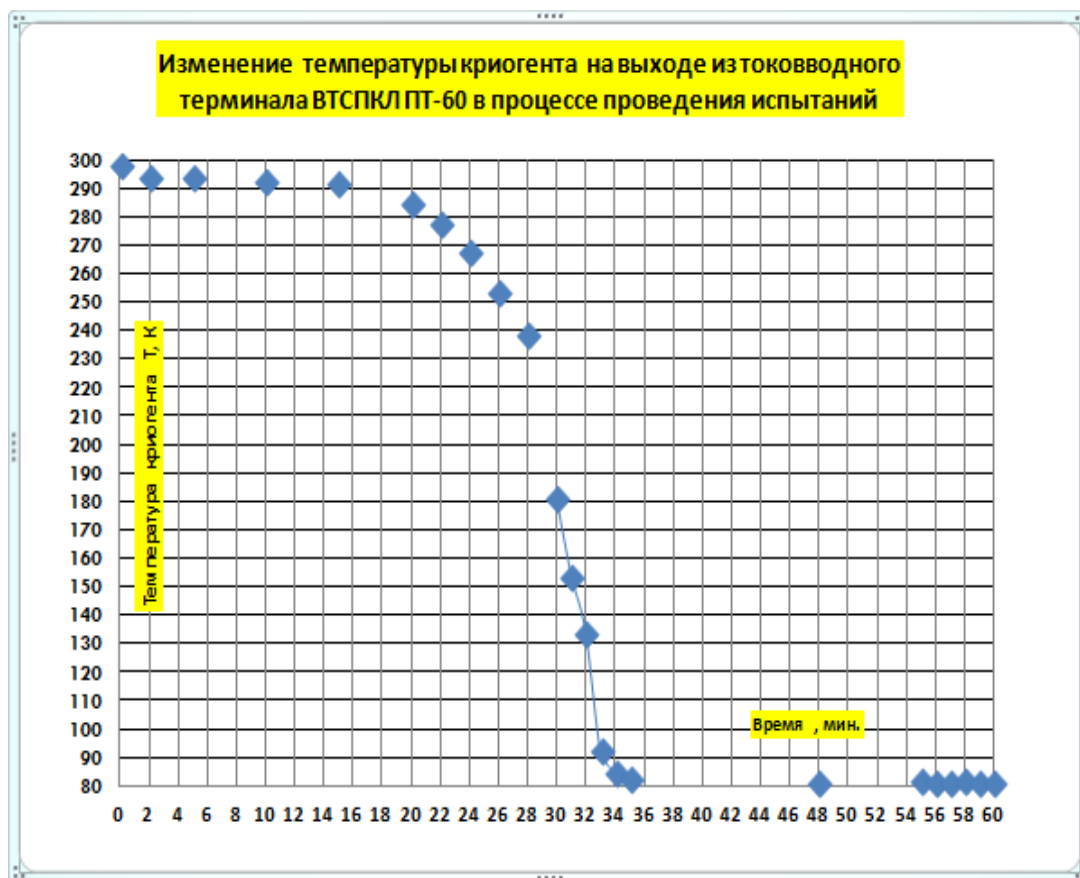


Рисунок 3.18. Зависимость температуры криогента на выходе из ВТСПКЛ ПТ от времени (мин).

В процессе испытаний был получен достаточный объём данных как в режиме захлаживания, так и в режиме криостабилизации кабеля. На Рисунке 3.19 показана полученная в результате обработки результатов испытаний динамика захлаживания последнего по потоку криогента тридцатиметрового отрезка ВТСПКЛ ПТ и некоторые характерные профили температуры по его длине в различные моменты времени, полученные в процессе проведения испытания. По оси абсцисс отложена длина отрезка оптоволоконного сенсора в метрах, находящегося в стабильном потоке криогента. Из анализа графика видно, что его длина составляет около 25 метров и именно на этой длине регистрация профиля температур проводилась с разрешающей способностью по температуре в районе ± 1 К и разрешающей способностью по длине кабеля, равной 1 м. Профили температуры по длине кабеля в различные моменты захлаживания

выделены различными цветами линий в соответствии с «легендой» в правой части рисунка.

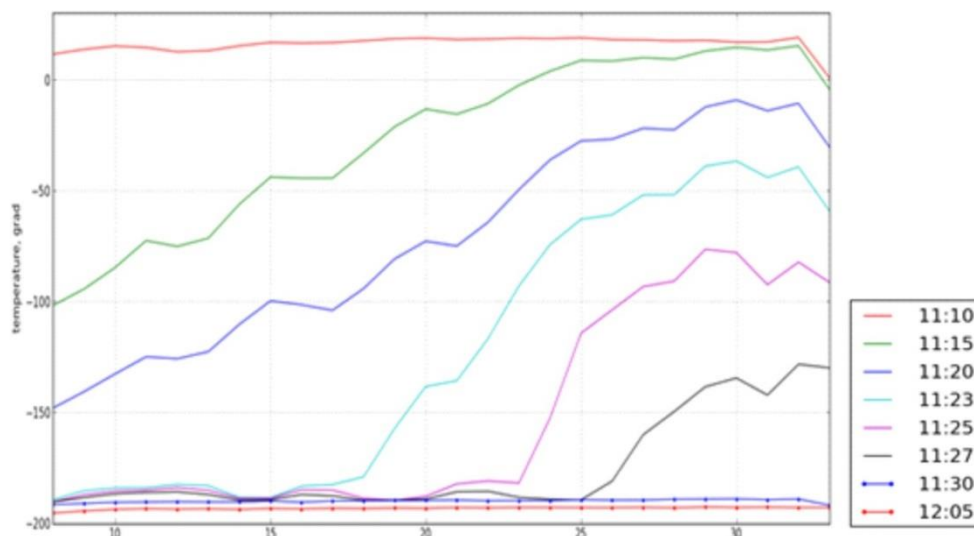


Рисунок 3.19. Динамика процесса захлаживания ВТСПКЛ ПТ.



Рисунок 3.20. Профиль температуры криогенга вдоль ВТСПКЛ ПТ в квазистабильном режиме.

Неравномерность и немонотонность профилей связана с высокой тепловой и гидродинамической нестационарностью и неравновесностью самих процессов захлаживания и криостатирования. Однако нам удалось добиться необходимой точности отображения профиля температуры путём увеличения периода усреднения при регистрации и обработке полученных данных, что является ещё одним дополнительным инструментом,

повышающим гибкость и универсальность методики, и дополнительным положительным результатом проведённого испытания.

Типичное полученное в процессе испытания распределение аналогичного профиля температуры по длине кабеля в относительно криостабилизированном режиме приведено на Рисунке 3.20.

Из анализа графика на Рисунке 3.20 видно, что минимально достигнутая и предоставленная нам принимающей стороной температура криогента на выходе из кабеля составляет $T_{\text{мин.}} = (80.2 \pm 0.5 \text{ K})$, и хорошо соответствует температуре, регистрируемой в конце эксперимента.

Результаты проведенного испытания показали полную пригодность, работоспособность разработанной, созданной и успешно испытанной нами первой в России оптоволоконной системы, предназначенной для низкотемпературной криогенной диагностики параметров ВТСПКЛ ПТ и других изделий прикладной сверхпроводимости, криогенной техники и сверхпроводниковой криоэнергетики в условиях влияния сильных электрических, магнитных полей и наличия высокого уровня электромагнитных помех в рабочих и перегрузочных (вплоть до аварийных) режимах эксплуатации.

Для дальнейшего улучшения параметров системы и повышения точности, надёжности, воспроизводимости, разрешающей способности и информативности системы диагностики требуется создание специализированных прецизионных калибровочных стендов, полностью имитирующих разнообразные режимы эксплуатации ВТСПКЛ ПТ и других изделий прикладной сверхпроводимости, криогенной техники и сверхпроводниковой криоэнергетики в условиях влияния сильных электрических, магнитных полей и наличия высокого уровня электромагнитных помех в рабочих и перегрузочных (вплоть до аварийных), режимах.

Также желательно объединение в одном кабеле (или защитной оболочке) нескольких распределённых и квази-распределённых (на основе ВБР)

волоконно-оптических сенсоров и проведение целевой НИОКР по дальнейшей доработке элементов системы, а также оптимизации технологии монтажа оптоволоконных сенсоров непосредственно внутри или на поверхности токоведущих и сопряжённых с ними как криогенных низкотемпературных, так и высокотемпературных элементов ВТСПКЛ и других изделий прикладной сверхпроводимости, криогенной техники и сверхпроводниковой криоэнергетики непосредственно в процессе их создания, монтажа и подготовки к испытаниям и исследованиям.

Работа выполнялась в рамках договора между ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» и ОАО «Иркутсккабель» № П-017 от «06» ноября 2012 г. Основанием для проведения работ по созданию, поставке, исследованию и испытаниям оптоволоконной системы низкотемпературной диагностики являлся Договор от 22.01.2013г. № 12-15 между ООО «СибСенсор» и ОАО «Иркутсккабель».

Другие применения для кабельных линий.

Выполнение данной работы позволило сформировать технический задел для последующей реализации проектов по мониторингу высоковольтных кабельных линий (не сверхпроводящих) среди которых:

1. Южноуральская ГРЭС-2 840 МВт (Южноуральск, Россия) – мониторинг силового кабеля, 2 распределённых системы термомониторинга, 2 волоконно-оптических линии по 600 метров каждая (2015 год).

2. Подстанция «Кингисеппская» 400 МВт (Ленинградская обл., Россия) – мониторинг силового кабеля, распределённая система термомониторинга, 6 волоконно-оптических линий по 300 метров каждая (2016 год).

3. Подстанция «Шагол» (Челябинск, Россия) – мониторинг подземного силового кабеля, распределённая система термомониторинга, 1 волоконно-оптическая линия длиной 10.6 км (2015 год).

4. Подстанция «Акжар» (Алма-Ата, Казахстан) – мониторинг силового кабеля, распределённая система термомониторинга, 1 волоконно-оптический кабель длиной 4.5 км (2016 год).

5. Алматинская электростанция-2 (Алма-Ата, Казахстан) – мониторинг силового кабеля, распределенная система термомониторинга, 1 волоконно-оптический кабель длиной 4.5 км (2016 год).

6. Подстанция «Пулковская Южная» (Санкт-Петербург, Россия) – мониторинг силового кабеля, 1 распределенная система термомониторинга, 2 волоконно-оптических кабеля по 300 метров каждый (2016 год).

7. Подстанция «Пулковская» (Санкт-Петербург, Россия) – мониторинг силового кабеля, 2 распределенных системы термомониторинга, 2 волоконно-оптических кабеля по 300 метров каждый (2016 год).

8. Подстанция «Восточная» (Санкт-Петербург, Россия) – мониторинг силового кабеля, 1 распределенная система термомониторинга, 1 волоконно-оптический кабель 8 км (2017 год).

9. МЭС «Юг» (Ростовская область, Россия) – мониторинг грозотроса длиной 87 (!) км – 1 распределенная система термомониторинга (2017 год).

3.6. Мониторинг нефтяных скважин

Активная разработка месторождений высоковязкой нефти, выдвигающая жёсткие требования к добывающему оборудованию, и сильное истощение большинства нефтегазовых месторождений (75% газовых месторождений России находится в режиме падающей добычи) требуют от добывающих организаций проведения поисково-разведочных работ, изменения технологий добычи и контроля технического состояния скважин. Основной задачей для добывающих компаний для повышения дебитоотдачи скважины в реальном режиме времени является отслеживание информации о процессах, происходящих в скважинах и месторождениях. Решения на основе классических датчиков предполагают каротаж скважины точечными средствами измерения, что влечёт за собой недостоверность полученных

данных. К недостаткам таких средств измерения можно отнести невозможность фиксации распределения одного из самых важных параметров скважины – профиля температуры в режиме реального времени, а также необходимость электропитания, влияние на результаты измерений внешних электромагнитных полей, трудовые и временные затраты, необходимые для выезда бригады и выполнения различных операций, в том числе погружения чувствительного элемента и его перемещения по стволу скважины, обработки данных и т.д..

Оптоволоконная система мониторинга состоит из волоконно-оптической распределенной системы термометрии, предназначенной для измерения температуры вдоль ствола скважины, и точечных волоконно-оптических датчиков давления. Оптические волокна распределённой системы термометрии и датчиков давления конструктивно могут быть выполнены в одном кабеле. Датчики давления не рассматриваются в данной работе, поэтому дальнейшее упоминание о них исключено из описания системы.

Регистрирующее оборудование располагается в блок-боксе с системами обогрева, вентиляции, пожарной сигнализации, освещения. Связь регистрирующего оборудования, расположенного в блок-боксе, с чувствительными элементами, опущенными в скважину, обеспечивается наземным волоконно-оптическим кабелем с соединительной муфтой. Длина наземного волоконно-оптического кабеля определяется исходя из условий эксплуатации.

Принципиальная схема работы комплексной оптоволоконной системы мониторинга представлена на Рисунке 3.21, а характеристики системы представлены в Таблице 3.4.

Спуск в скважину волоконно-оптического кабеля производится совместно с насосно-компрессорными трубами (НКТ) с применением мобильной лебёдки.

Волоконно-оптический кабель имеет устойчивость к механическим повреждениям. Дополнительная защита кабеля при проведении спуско-

подъемных операций не требуется, однако защита оптоволоконного кабеля от механических повреждений при спуско-подъемных операциях может быть обеспечена за счет применения кабельных протекторов или гибкой НКТ.

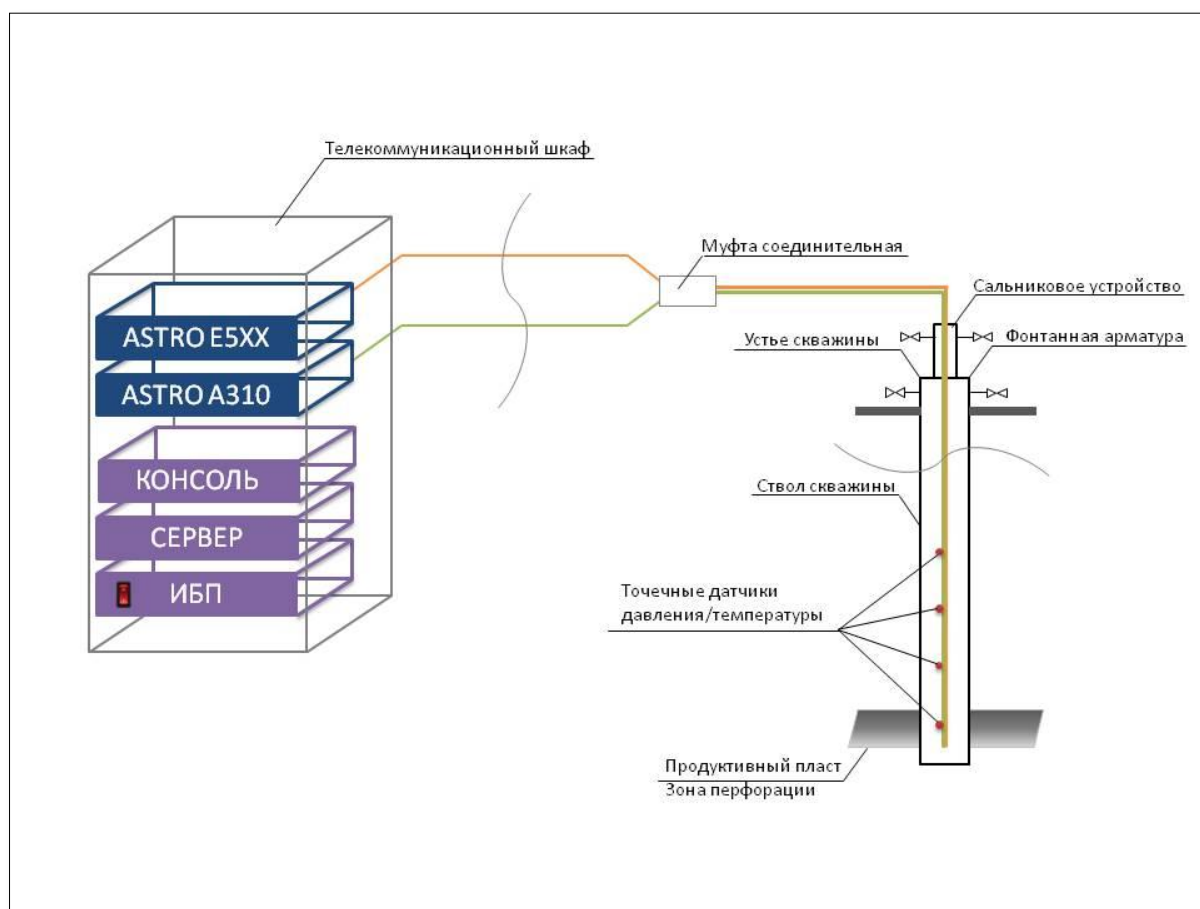


Рисунок 3.21. Принципиальная схема работы комплексной оптоволоконной системы мониторинга.

Таблица 3.4.

№ п/п	Наименование параметра / характеристики	Значение параметра
1	Максимальное рабочее давление, МПа	25
2	Рабочая температура, °С	От -50 до +250
3	Максимальное затухание оптического волокна распределенной подсистемы термометрии на длине волны 1550 нм, дБ/км	2
4	Диаметр кабеля, мм	6.35

Состав системы:

1. Блок обработки распределенного волоконно-оптического датчика типа ASTRO E54x (характеристики приведены в параграфе 3.3).
2. Волоконно-оптический кабель-датчик (Рисунок 3.22).

Для скважинных применений, как правило, используются специальные (не телекоммуникационные) типы оптических волокон, обеспечивающие:

- более высокие рабочие температуры за счет специальных покрытий (полиимид, полиэфиркетон),

- стойкость к действию водорода (отсутствие водородного затемнения) за счет использованию кварцевой сердцевины и/или углеродных покрытий.

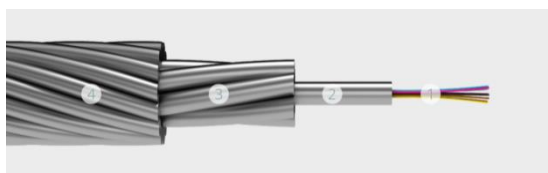


Рисунок 3.22. Волоконно-оптический кабель. 1 – оптическое волокно, 2 – стальной оптический модуль, 3-4 – бронирование из стальной проволоки.

3. Устройство вымотки кабеля. Вид и параметры устройства вымотки кабеля представлено на Рисунке 3.23. и Таблице 3.5.



Рисунок 3.23. Устройство вымотки кабеля.

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1.	Тяговое усилие на первых 2-х витках намотки	1000 кг.
2.	Диапазон скоростей	100 – 1000 м/ч
3.	Диаметр бочки барабана	630 мм

4. Программное обеспечение.

Все варианты системы мониторинга поставляются с программным обеспечением, позволяющим обрабатывать, хранить и отображать полученные данные.

Пример реализации системы для мониторинга скважин месторождения высоковязкой нефти.

➤ Технология добычи тяжелой нефти - SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage)



Рисунок 3.24. Технология добычи высоковязкой нефти.

При добыче сверхвязкой (тяжёлой) нефти часто используется паронагнетательная технология (Рисунок 3.24.). Её суть состоит в бурении не только добывающих, но и паронагнетательных скважин, куда под высоким

давлением и температурой до 250 градусов Цельсия подается пар. Прогрев нефтяного пласта позволяет понизить вязкость нефтяных фракций и соответственно облегчить ее подъём. Применение данного метода требует понимания распределения температуры по глубине пласта. Недостаточный прогрев нефти не позволит её эффективно поднимать, а перегрев может привести к выходу из строя насосного оборудования. Для измерения распределения температуры по глубине нефтяного пласта использованы распределенные волоконно-оптические датчики. Для обеспечения защиты кабель может спускаться внутри гибкой насосно-компрессорной трубы (Рисунок 3.25). Скважины находились на отдалении до 200м от блок-боксов, где было размещено оборудование. Для коммутации использовался наземный или подвесной волоконно-оптический кабель.



Рисунок 3.25. Процесс спуска кабеля.

На Рисунке 3.26 представлена динамика прогрева нефтяного пласта для одной из паронагнетательных скважин в течение нескольких суток. Участок 0-35 метров соответствует оптическому кабелю, проложенному открытым способом от прибора опроса до скважины. Участок с 35 метра – распределение температуры по глубине скважины. По полученным данным можно также отследить изменение температуры окружающего воздуха.

На Рисунке 3.27 показана динамика изменения температуры в добывающей скважине в течение трех месяцев. После окончания прогрева идет медленное понижение температуры пласта. Локальный пик на отметке 330 метров от устья скважины соответствует месту расположения насоса.

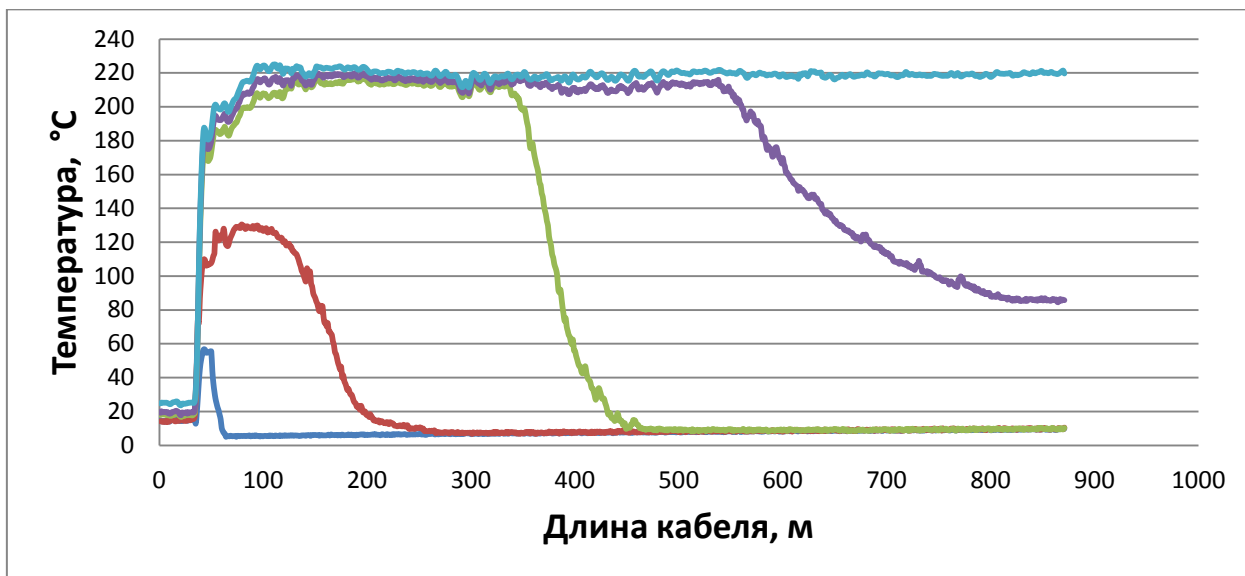


Рисунок 3.26. Прогрев нефтяного пласта горячим паром.

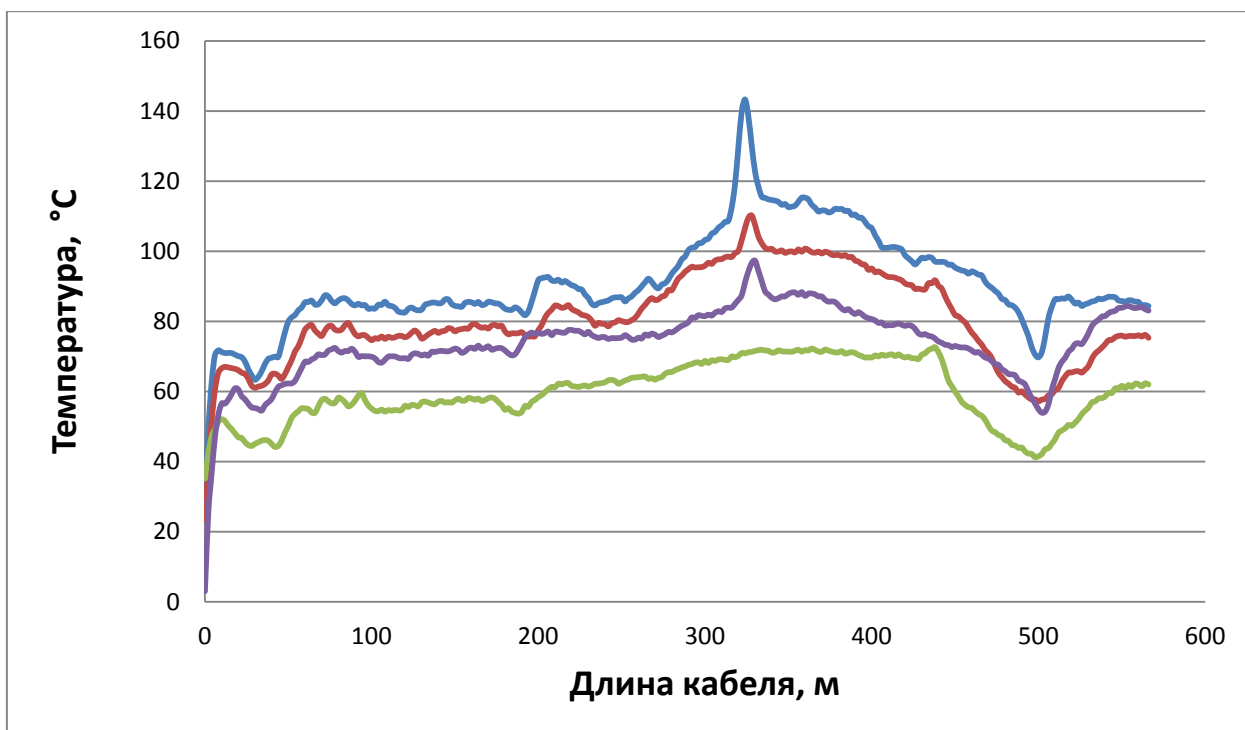


Рисунок 3.27. Измерение температуры в процессе добычи нефти.

В период 2015-2018 гг. подобными системами было оснащено более 150 скважин, многие из которых находятся в эксплуатации более 2-х лет. Данные термомониторинга в режиме он-лайн поступают заказчикам, что приводит к существенному сокращению эксплуатационных расходов.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы:

1. Реализована полностью волоконная схема устройства опроса брэгговских датчиков на основе эрбиевого лазера с перестраиваемой ВБР, интерферометром Маха-Цандера для устранения нелинейностей перестраиваемой ВБР, и термостабилизированными ВБР для привязки к абсолютному значению длины волны. Точность определения длины волны составила 15 пм для диапазона перестройки 20 нм и 30 пм для диапазона 45 нм.
2. Реализована схема устройства опроса ВБР датчиков с гибридным (одновременно временным и спектральным) типом мультиплексирования на основе рефлектометра и перестраиваемой брэгговской решетки. Достигнута чувствительность деформации ВБР на уровне $0.5 \cdot 10^{-4}$. Предложено применение метода для мониторинга датчиков конечных положений.
3. Разработана схема опроса распределенного датчика температуры на основе комбинационного рассеяния в одномодовом и многомодовом волокнах с использованием импульсного волоконного лазера и волоконных фильтров стоксова и антистоксова излучения на основе спектрально-селективных ответвителей. Реализованы коммерческие версии приборов с характеристиками на уровне мировых аналогов: температурное разрешение 0.4°C на длине 16 км.
4. При помощи массива ВБР датчиков, встроенных в изоляцию токоведущих элементов, впервые измерено распределение температуры проводников статора мощного турбогенератора. На базе обработки полученных температурно-временных зависимостей оптоволоконных датчиков на протяжении полного цикла испытаний определен эквивалентный коэффициент теплопроводности корпусной изоляции $\lambda_{\text{и}}=0.26$ Вт/м \cdot К (в приближении одноёмкостной модели) и средний

коэффициент теплоотдачи $\alpha = 38-42 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ с поверхности обмотки в лобовой зоне статора.

5. Реализована автоматизированная система мониторинга технического состояния несущих конструкций футбольного манежа на основе оптоволоконных датчиков. Приведены результаты длительного наблюдения за конструкцией. Зафиксированы ежегодные деформации стержней центрального прогона (до 300 микрострейн) и перемещения в коньке (до 56 мм), обусловленные снеговой нагрузкой на конструкцию в зимний период.
6. Предложена и реализована оригинальная система пожарного извещения на основе распределенного датчика температуры, позволяющая контролировать протяженные объекты длиной до 8000 метров с использованием одного блока детектирования.
7. Реализована система мониторинга температуры токоведущих и конструктивных элементов ВТСП и НТСП объектов при азотных температурах. Показана динамика захлаживания сверхпроводника.
8. Реализована система мониторинга нефтяных скважин, позволяющая измерять температуру в диапазоне $-50..250^{\circ}\text{C}$ на длине до 4000 метров. Продемонстрирована динамика распределения температуры по глубине скважины в режимах закачки пара и добычи высоковязкой нефти.

Список литературы

Список цитируемой литературы

1. Grattan K.T.V., Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview // Sensors and Actuators. – 2000. – V.82, №1-3. – P.40-61.
2. Kersey A.D., Davis M. A., Patrick H. J., LeBlanc M., Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebele E.J. Fiber grating sensors // Journal of Lightwave Technology. – 1997. – V.15, №8. – P.1442-1463.
3. Kashyap R. Fiber Bragg gratings // San Diego: Academic Press. – 1999. – 458 P.
4. Othonos A., Kalli K. Fiber Bragg gratings // London: Artech House. – 1999. – 422 P.
5. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г. и др. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника – 2005. – Т.35, №12. – С.1085-1103.
6. Dakin J. P., Pratt D.J., Bibby G.W., Ross J.N. Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector // Electronics Letters – 1985. – V.21, №13. – P.569-570.
7. Juškaitis R., Mamedov A.M., Potapov V.T., Shatalin S.V. Interferometry with Rayleigh backscattering in a single-mode optical fiber // Optics Letters. – 1994. – V.19, №3. – P.225-227.
8. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы // Москва: Физматлит. – 2001. – 272 С.
9. Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors // Optical Fiber Technology. – 2003. – V.9, №2. – P.57-79.
10. Rao Y.J. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors // Optics and Lasers in Engineering. –1999. – V.31, №4. – P.297-324.

11. Inaudi D., Glisic B. Fiber optic sensing for innovative oil & gas production and transport systems // 18th International Conference on Optical Fiber Sensors – OFS – 2006. – Paper №14.
12. Bohnert K., Gabus P., Kostovic J., Brändle H. Optical fiber sensors for the electric power industry // Optics and Lasers in Engineering. – 2005. – V.43, №3-5. – P.511-526.
13. Lopez-Higuera J.M., Cobo L.R., Incera A.Q., Cobo A. Fiber optic sensors in structural health monitoring // Journal of Lightwave Technology. –2011. – V.29, №4. – P.587-608.
14. Ramakrishnan M. Optical fiber sensors for smart composite materials structures. Chapter in book: Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications // New York: CRC Press. – 2015. – P.491-520.
15. Абдуллина С.Р., Власов А.А., Бабин С.А. Сглаживание спектра волоконных брэгговских решеток в схеме записи с интерферометром Ллойда // Квантовая электроника – 2010. – Т.40, № 3. – С.259-263.
16. Berkoff T.A., Kersey A.D. Fiber Bragg grating array sensor system using a bandpass wavelength division multiplexer and interferometric detection // IEEE Photonics Technology Letters. – 1996. – V.8, №11. – P.1522-1524.
17. Ezbiri A., Munoz A., Kanellopoulos S.E., Handerek V.A. High resolution fibre Bragg grating sensor demodulation using a diffraction grating spectrometer and CCD detection // IEE Colloquium on Optical Techniques for Smart Structures and Structural Monitoring. – 1997. – №1997/033. – P.5/1- 5/6.
18. Rogers A. Distributed optical-fiber sensing in Handbook of optical fiber sensing technology // New York: John Wiley & Sons. – 2001. – Ch.14. – P.271-312.
19. Kersey A.D. Fiber optic sensor multiplexing technique in Fiber Optic Smart Structures // New York: John Wiley & Sons. – 1995. –Ch.15. – P. 409-444.
20. Shatalin S.V., Treschikov V.N., Rogers A.J. Interferometric Optical Time-Domain Reflectometry for Distributed Optical-Fiber Sensing // Applied Optics. – 1998. – V.37, №24. – P.5600-5604.

21. Jungerman R.L., Dolfi D.W. Frequency domain optical network analysis using integrated optics // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1991. – V.27, №3. – P.580-587.
22. Juškaitis R., Mamedov A.M., Potapov V.T., Shatalin S.V. Distributed interferometric fiber sensor system // *Optics Letters*. – 1992. – V.17, №22. – P.1623-1625.
23. Horiguchi T., Rogers A., Michie W.C., Stewart G., Culshaw B. Distributed sensors: recent developments in *Optical Fiber Sensors: Applications, analysis, and future trends* // London: Artech House. – 1988. – V.4. – Ch.14. – P.309-369.
24. Hartog A.H., Leach A.P., Gold M.P. Distributed Temperature Sensing in Solid-Core Fibres // *Electronics Letters*. – 1985. – V.21, №23. – P.1061-1062.
25. Parker T.R., Farhadiroushan M., Handerek V.A. V.A., Rogers A.J. A Fully Distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1997. – V.9, №7. – P.979-981.
26. Kee H.H., Lees G.P., Newson T.P. All-fiber system for simultaneous interrogation of distributed strain and temperature sensing by spontaneous Brillouin scattering // *Optics Letters*. – 2000. – V.25, №10. – P.695-697.
27. Maughan S.M., Kee H.H., Newson T.P. Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter // *Measurement Science and Technology*. – 2010. – V.12, №7. – P.834-842.
28. Maughan S.M., Kee H.H., Newson T.P. 57-km single-ended spontaneous Brillouin-based distributed fiber temperature sensing using microwave coherent detection // *Optics Letters*. – 2001. – V.26, №6. – P.331-333.
29. Smith J., Brown A., DeMechant M., Bao X. Simultaneous distributed strain and temperature measurement // *Applied Optics*. – 1999. – V.38, №25. – P.5372-5377.

30. Garus D., Gololla T., Krebber K., Schliep F. Brillouin Optical-Fiber Frequency Domain Analysis for Distributed Temperature and Strain Measurements // *Journal of Lightwave Technology*. – 1997. – V.15, №4. – P.654-662.
31. Krohn D.A. *Fiber Optical Sensors: Fundamentals and Applications* // North Carolina, Research Triangle Park: Instrument Society of America. – 2000. – 288 P.
32. Lagakos N., Cole J.H., Bucaro J.A. Microbend sensors // *Applied Optics*. – 1987. – V.26, №11. – P.2171-2180.
33. Kersey A.D., Dandridge A. Multiplexed Mach-Zehnder ladder array with ten sensor elements // *Electronics Letters*. – 1989. – V.25, №19. – P.1298-1299.
34. Kersey A.D., Marrone M.J., Dandridge A. Experimental investigation of polarization induced fading in interferometric fibre sensor arrays // *Electronics Letters*. – 1991. – V.27, №7. – P.562-563.
35. Marrone M.J., Kersey A.D., Dandridge A. Fiber optic Michelson array with passive elimination of polarization fading and source feed-back isolation // *Proc. IEEE Optic Fiber Sensors*, 8th – 1992. – P.69-72.
36. Chen X., Shen F., Wang A., Wang Z., Zhang Y. Novel Fabry-Perot fiber optic sensor with multiple applications // *Proc. SPIE*. – 2004. – V.5590. – P.111-121.
37. Murphy K.A. Extrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensor // *Proc. IEEE Optical Fiber Sensors*, 8th – 1992. – P.193.
38. Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference // *Applied Optic*. – 2004. – V.43, №21, – P.4189-4198.
39. Brooks J., Wentworth R., Youngquist R., Tur M., Kim B., Shaw H. Coherence multiplexing of fiber-optic interferometric sensors // *Journal of Lightwave Technology*. – 1985. – V.3, №5. – P. 1062-1072.
40. Reekie L., Mears R.J., Poole S.B., Payne D.N. Tunable single-mode fiber laser // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 1986. – V.LT-4. – P.956-960.

41. Song Y.W, Havstad S.A., Starodubov D., Xie Y., Willner A.E., Feinberg J. 40-nm-wide tunable fiber ring laser with single-mode operation using a highly stretchable FBG // IEEE Photonics Technology Letters. – 2001. – V.13, №11. – P.1167-1169.
42. Rao Y.J., Jackson D.A., Zhang L., Bennion I. Dual-cavity interferometric wavelength-shift detection for in-fiber Bragg grating sensors // Optics Letters. – 1996. – V.21, №19. – P.1556-1558.
43. Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M. Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebele E.J. Fiber Grating Sensors // Journal of Lightwave technology. – 1997. – V.15, №8. – P.1442-1463.
44. Медведков О.И., Королев И.Г., Васильев С.А. Запись волоконных брэгговских решеток в схеме с интерферометром Ллойда. Препринт № 6 // М.: Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М. Прохорова. – 2004. – 46 С.
45. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // Optics Letters – 1989. – V14, №15. – P.823-825.
46. Абдуллина С.Р., Бабин С.А., Власов А.А., Каблуков С.И. Внутррезонаторное удвоение частоты генерации в широкоапертурном аргоновом лазере // Квантовая электроника. – 2005. – Т.35, №9. – С.857-861.
47. Hattori K., Okabe Y., Ide K., Kobashi K., Watanabe T. Performance Evaluation and Measurement of the 250-MVA Class Air-Cooled Turbo Generator // CIGRE Session. – 2004. – Report A1-107.
48. Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах // Ленинград: Энергоатомиздат. – 1983. – 216 С.
49. Glisic B., Inaudi D. Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring // Chichester: John Wiley & Sons, Inc. – 2007.
50. Culshaw B., Steward G., Dong F. Fibre optic techniques for remote spectroscopic methane detection – from concept to system realization // Sensor and Actuators B. – 1998. – V.51, №1. – P.25-37.

51. Ni J., Chang J., Liu T., Li Y., Zhao Y., Wang Q. Fiber methane gas sensor and its application in methane outburst prediction in coal mine // Journal of Electronic Science and Technology of China. – 2008. – V.6, №.4. – P.373-376.

52. Liu J., Chai J., Wei S., Li Y., Zhu L., Qiu B. Theoretical and experimental study on fiber Bragg grating sensing of rock strata settlement deformation // Journal of coal science & engineering. – 2008. – V.14, №.3. – P.394-398.

53. Liu X., Wang C., Liu T., Wei Y., Lv J. Fiber grating water pressure sensor and system for mine // ACTA Photonica Sinica. – 2009. – V.38, №1. – P.112-114.

54. Liu T. All fiber optic coal mine safety monitoring system, (invited) SC3. SC3.2 IEE Explorer, Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronic Exposition & Conference (AOE). – 2008.

55. Zheng L., Huang X., Bi G. Study of optical fiber carbon monoxide gas sensor with DFB LD // International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007: Related Technologies and Applications. Proceedings of the SPIE. – 2008. – V.6625. – P.1-7.

56. Сытников В.Е., Высоцкий В.С. Основы конструирования высокотемпературных сверхпроводящих силовых кабелей // Известия Академии Наук, Серия: Энергетика. – 2008. – №1. – С.89-107.

57. Терентьев Ю.А. К вопросу соблюдения некоторых элементарных инженерных критериев энергетической эффективности и работоспособности силовых ВТСПКЛ // ГК Росатом, материалы конференции Прикладная сверхпроводимость. – 2011.

58. Sytnikov V., Vysotsky V., Fetisov S., Nosov A., Shakaryan Yu., Kochkin V., Kiselev A., Terentyev Yu., Patrikeev V., Zubko V. Cryogenic and electrical test results of 30 m HTS power cable // AIP Conference Proceedings, Advances in Cryogenic Engineering. – 2010. – V.1218, №1. – P.461-468.

59. Zijderduin R., Chevtchenko O., Smit J., Aanhaanen G., Ross R. Strengthening future electricity grid of the Netherlands by integration of HTS

transmission cables // Journal of Physics: Conference Series. –2014. – V.507, №3.
EUCAS 2013 – Paper 1A-LS-O4.

60. Sytnikov V.E., Bemert S.E., Ivanov Yu.V., Kopylov S.I., Krivetskiy I.V., Rimorov D.S., Romashov M.S., Shakaryan Yu.G., Berdnikov R.N., Dementyev Yu.A., Goryushin Yu.A., Timofeev D.G. HTS DC cable line project: on-going activities in Russia // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2013. – V.23, №3.

61. Hartog A.H. An introduction to distributed optical fibre sensors // Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group – 2017. –442 P.

62. Chen Y., Hartog A.H., Marsh R.J., Hilton I.M., Hadley M.R., Ross P.A. A fast, high-spatial-resolution Raman distributed temperature sensor // Proc. SPIE, 23rd International conference on optical fibre sensors. – 2014. – 91575M.

63. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

64. ТР 182-08. Технические рекомендации по научно-техническому сопровождению и мониторингу строительства большепролетных, высотных и других уникальных зданий и сооружений. ГУП «НИИМосстрой» Москва, 2008.

65. МДС 13-22.2009. Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений. ООО «Тектоплан» Москва, 2010 г.

66. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003.

67. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. М., 2011.

68. ГОСТ 24846-81. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений государственный строительный комитет СССР. Москва – 1986.

69. Long D.A. Raman Spectroscopy // New York: McGraw-Hill – 1977.

70. Ерошенко В.М. и др. Экспериментальное исследование теплоотдачи и структуры потока при течении низкотемпературного гелия в каналах в условиях вынужденной конвекции // Труды Международной школы-семинара «Тепло- и массообмен при кипении и течении криогенной жидкости. –1980.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в журналах

71. Babin S.A., Vlasov A.A., Kablukov S.I., Shelemba I.S. An interrogator for fiber Bragg sensor array based on the tunable erbium fiber laser // Laser Physics. – 2007. – V.17, №11. – P.1340-1344.

72. Бабин С. А., Власов А. А., Каблуков С. И., Шелемба И. С. Сенсорная система на основе волоконно-оптических брэгговских решеток // Вестник НГУ: Серия Физика. – 2007. – №3. – С. 54-57.

73. Бабин С. А., Власов А. А., Шелемба И. С. Волоконно-оптические сенсоры на основе брэгговских решеток // Химия высоких энергий. – 2008. – Т.42, №4. – С.35-37.

74. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V., Shalagin A.M., Babin S.A., Shelemba I.S., Vlasov A.A. Combined time-wavelength interrogation of fiber-Bragg gratings based on an optical time-domain reflectometry // Laser Physics. – 2008. – V.18, №11. – P.1301-1304.

75. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Дышлюк А.В., Шалагин А.М., Бабин С.А., Шелемба И.С. Спектрально-временное детектирование сигналов ВБР с помощью метода оптической временной рефлектометрии // Фотоника. – 2008. – Т.9, №3. – С.18-19.

76. Исмагулов А.Е., Бабин С.А., Подивилов Е.В., Федорук М.П., Шелемба И.С., Штырина О.В. Модуляционная неустойчивость при распространении узкополосных наносекундных импульсов в волоконном световоде с аномальной дисперсией // Квантовая электроника. – 2009. – Т.39, №8. – С.765–769.

77. Кузнецов А.Г., Бабин С.А., Шелемба И.С. // Распределенный волоконный датчик температуры со спектральной фильтрацией направленными волоконными ответвителями // Квантовая электроника. – 2009. – Т.39, №11. – С.1078-1081.

78. Бабин С.А., Кузнецов А.Г., Шелемба И.С. Сравнение методов измерения распределения температуры с помощью брэгговских решёток и комбинационного рассеяния света в оптическом волокне // Автометрия. – 2010. – Т.46, №4. – С.70-77.

79. Babin S.A., Kuznetsov A.G., Vlasov A.A., Shelemba I.S. Comparison of Raman and Fiber Bragg Grating-Based Fiber Sensor Systems for Distributed Temperature Measurements // Key Engineering Materials. – 2010. – V.437. – P.309-313.

80. Babin S.A., Ismagulov A.E., Podivilov E.V., Fedoruk M.P., Shelemba I.S., Shtyrina O.V. Modulation instability at propagation of narrowband 100-ns pulses in optical fibers of various types // Laser Physics. – 2010. – V.20, №2. – P.334-340.

81. Гуревич Э.И., Лямин А.А., Шелемба И.С. Опыт измерения температуры обмотки статора оптоволоконными датчиками при стендовых испытаниях турбогенератора // Электрические станции. – 2010. – №4. – С.42-47.

82. Бабин С.А., Голушко С.К., Цыба А.М., Чейдо Г.П., Шелемба И.С., Шакиров С.Р. Концепция многофункциональной системы безопасности угольной шахты с использованием волоконно-оптических технологий // Вычислительные технологии. – 2013. – Т.18, Спец. выпуск. – С.95-101.

83. Шишкин В.В., Гранёв И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. – 2016. – Т.3, №1. – С.61-75.

84. Shishkin V.V., Terentyev V.S., Kharenko D.S., Dostovalov A.V., Wolf A.A., Simonov V.A., Fedotov M.Y., Shienok A.M., Shelemba I.S., Babin S.A. Experimental method of temperature and strain discrimination in

polymer composite material by embedded fiber-optic sensors based on femtosecond-inscribed FBGs // Journal of Sensors. – 2016. – V.2016. – Article ID 3230968.

Тезисы и труды конференций

85. Шелемба И.С. Волоконно-оптическая сенсорная система на основе брэгговских решеток // Материалы научно-практической конференции молодых ученых и студентов НГУ и ИАиЭ СО РАН «Информационно-вычислительные системы анализа и синтеза изображения» – 2006 г. – Новосибирск. – С.108-109.

86. Бабин С.А., Исмагулов А.Е., Каблуков С.И., Чуркин Д.В., Шелемба И.С. Перестраиваемый волоконный эрбиевый лазер для сенсорных применений // Материалы VIII Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006» – 26-28 сентября 2006 г. – Новосибирск. – Т.2, С.234-236.

87. Бабин С.А., Власов А.А., Каблуков С.И., Шелемба И.С. Интеррогатор массива брэгговских сенсоров на основе перестраиваемого волоконного эрбиевого лазера // Труды Российского семинара по волоконным лазерам 2007. – 4-6 апреля 2007 г. – Новосибирск. – С.74-75.

88. Babin S.A., Kablukov S.I., Shelemba I.S., Vlasov A.A. Simple fiber Bragg grating sensors interrogator based on tunable Erbium-doped fiber laser // LPHYS'07. – August 20-24, 2007. – León, Mexico. – Book of Abstracts, P.271.

89. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V., Shalagin A.M., Babin S.A., Vlasov A.A., Shelemba I.S. Combined time and wavelength multiplexing of fiber Bragg gratings using optical time domain reflectometer and fiber optic circulator // APCOM 2007. –September 15-18, 2007. – Vladivostok, Russia. – Adv. Program, paper 8.

90. Babin S.A., Shelemba I.S., Vlasov A.A. Tunable Erbium-doped fiber laser for interrogation of fiber Bragg grating sensors // APCOM 2007. – September 15-18, 2007. – Vladivostok, Russia. – Adv. Program, paper 10.

91. Бабин С.А., Власов А.А., Шелемба И.С. Волоконно-оптические сенсоры на основе брэгговских решёток // Симпозиум «Нанофотоника 2007». – 18-22 сентября 2007 г. – Черногоровка. – Сборник тезисов докладов, С.35.

92. Шелемба И.С. Волоконно-оптическая система охраны периметров // Материалы школы-семинара «Инновации: от идеи до продукта». – 2008. – Новосибирск. – С.40-41.

93. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Дышлюк А.В., Шалагин, Бабин С.А., Шелемба И.С. Комбинированное спектрально-временное детектирование сигналов от волоконных брэгговских решеток с применением метода оптической временной рефлектометрии // Труды второго Российского семинара по волоконным лазерам. – 1-4 апреля 2008 г. – Саратов. – С.93-94.

94. Shelemba I.S., Nikulin M.A., Vlasov A.A., Babin S.A. Comparison of different techniques for fiber Bragg grating sensor interrogation // 13th conference on Laser Optics 2008. – June 23-28, 2008. – St.-Petersburg, Russia. – Tech. Program, P.56, paper ThR1-p13.

95. Babin S.A., Nikulin M.A., Shelemba I.S. Simple technique for nonlinearity compensation of a tunable Erbium laser // LPHYS'08. – June 30- July 4, 2008. – Trondheim, Norway. – Book of Abstracts, P.543.

96. Исмагулов А.Е., Бабин С.А., Подивилов Е.В., Федорук М.П., Шелемба И.С., Штырина О.В. Модуляционная неустойчивость узкополосных 100-нс импульсов при распространении в оптическом волокне в присутствии шума // Труды третьего Российского семинара по волоконным лазерам. – 31 марта - 2 апреля 2009. – Уфа. – С.71-73.

97. Babin S.A., Ismagulov A.E., Kuznetsov A.G., Vlasov A.A., Shelemba I.S. Fiber-optic sensor systems and their applications // The 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII-2009). – 28 June-2 July, 2009. – Saint-Petersburg, Russia. – Proceedings of ISMTII-2009, V.3, P.3-011 – 3-015.

98. Shelemba I.S., Babin S.A., Ismagulov A.E., Podivilov E.V. The role of modulation instability effect in the phase-sensitive OTDR sensor operation.

// LPHYS'09. – July 13-17, 2009. – Barcelona, Spain. – Book of Abstracts, P.645.

99. Кузнецов А.Г., Бабин С.А., Шелемба И.С. Распределенный оптоволоконный датчик температуры на основе комбинационного рассеяния света с WDM-фильтрацией сигнала // Труды всероссийской конференции по волоконной оптике. – 8-9 октября 2009 г. – Пермь. – С.100-101.

100. Шелемба И.С., Харенко Д.С. Измерение распределения температуры статора турбогенератора при помощи датчиков на основе волоконных брэгговских решеток // Материалы молодежной конференции «Фотоника и оптические технологии». – 10-11 февраля 2010 г. – Новосибирск. – С.34.

101. Шелемба И.С., Власов А.А., Харенко Д.С., Бабин С.А. Измерение температуры статора турбогенератора с помощью волоконных брэгговских датчиков // Материалы IV Российского семинара по волоконным лазерам. – 19-22 апреля 2010 г. – Ульяновск. – С.133.

102. Терентьев Ю.А., Шелемба И.С. Измерение температуры токоведущих и конструктивных элементов ВТСП и НТСП объектов с помощью волоконно-оптических датчиков // Материалы Первой Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости. – 6-8 декабря 2011 г. – Москва. – С.80.

103. Васюта Б.Н., Шелемба И.С. Система мониторинга технического состояния несущих конструкций центрального блока футбольного манежа в г. Новосибирске // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные вопросы строительства». – 9-11 апреля 2013 г. – Новосибирск. – С.5.

104. Shishkin V.V., Churin A.E., Kharenko D.S., Zheleznova M.A., Shelemba I.S. Structural health monitoring system of soccer arena based on optical sensors // 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors, Proceedings SPIE. – 2014. – V. 9157, article 9157D3.

105. Кузнецов А.Г., Харенко Д.С., Бабин С.А., Цыденжапов И.Б., Шелемба И.С. Разработка и исследование сверхдлинных оптоволоконных

распределённых систем измерения температуры на основе комбинационного рассеяния // Фотон–Экспресс. – 2017. – Т.6, №142. – С.165-166 (Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2017, г. Пермь).

106. Лисков Д.В., Оглезнев А.А., Лисовин И.Г., Рукавишников В.Е., Россик М.В., Шелемба И.С. Использование волоконно-оптических датчиков температуры при стендовых испытаниях газотурбинных установок // Фотон–Экспресс. – 2017. – Т.6, №142. – С.231 (Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2017, г. Пермь).

107. Зырянов С.В., Шелемба И.С. Автоматизированный метод аподизации волоконных брэгговских решёток вращающимися экранами // Фотон–Экспресс. – 2017. – Т.6, №142. – С.231-233 (Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2017, г. Пермь).

108. Скворцова В.А., Оглезнев А.А., Шелемба И.С. Испытательный стенд для проверки волоконно-оптических систем термометрии распределенного типа в соответствии с международным стандартом качества ИЕС 61757 // Фотон–Экспресс. – 2017. – Т.6, №142. – С.236-237 (Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2017, г. Пермь).

109. Гуляев А.П., Оглезнев А.А., Салгаева У.О., Шелемба И.С. Оптический переключатель для опроса ВОД на основе фотонно-интегрального модуля, разработка и перспективы применения // Фотон–Экспресс. – 2017. – Т.6, №142. – С.242-243 (Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2017, г. Пермь).

Патенты

110. Бабин С.А., Кузнецов А. Г., Шелемба И. С., Никулин М.А. Волоконно-оптическое устройство для измерения температурного распределения (варианты). Патент РФ № 2413188 (приоритет от 09.04.2009), опубл. 27 февраля 2011 г.

111. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Дышлюк А.В., Шалагин А.М., Бабин С.А., Шелемба И.С. Способ регистрации сигналов

измерительных преобразователей на основе брэгговских решеток, записанных в едином волоконном световоде. Патент РФ № 2413259 (приоритет от 20 июля 2009 г.), опубл. 27 февраля 2011 г.

112. Кузнецов А.Г, Шелемба И.С., Харенко Д.С. Волоконно-оптический линейный пожарный извещатель. Патент РФ № 2467397 (приоритет от 21.11.2011 г), опубл. 20.11.2012 г.

113. Шелемба И.С., Харенко Д.С., Сычев И.В., Кузнецов А.Г. Способ определения температурного распределения вдоль оптоволоконной линии. Патент РФ № 2580151 (приоритет от 19.11.2014 г), опубл. 10.04.2016 г.

Приложения

Приложение А. Акт внедрения блока волоконно-оптического датчика извещателя пожарного теплового линейного «ЕЛАНЬ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «ЭТРА-спецавтоматика»

 /Сайдулин Е.Г./
«10» декабря 2017 г.

АКТ

внедрения блока волоконно-оптического датчика извещателя пожарного теплового линейного

Блок волоконно-оптического датчика ВОД ИПТЛ разработки ООО «СибСенсор» входит в состав извещателя пожарного ИП132-1-Р «Елань» как покупное изделия. Извещатель ИП132-1-Р «Елань» предназначен для обнаружения пожара вдоль чувствительного элемента, которым является оптоволоконный кабель, длиной до 8000 метров. Извещатель используется на категорийных промышленных объектах, зачастую в сочетании с адресными системами пожаротушения. Пожар обнаруживается по критериям превышения порога температуры, скорости приращения температуры. Измерение температуры обеспечивается волоконно-оптическим датчиком ВОД ИПТЛ ДСАЕ.431.352.002.

Благодаря оригинальному подходу к конструированию блока ВОД ИПТЛ удалось использовать фиксированные длины зон контроля. В результате этого удешевился блок ВОД ИПТЛ, упростился алгоритм выделения зон с признаками пожара, значительно улучшилась помехозащищённость и защита от ложного срабатывания. Алгоритм блока ВОД ИПТЛ позволяет с нужной пространственной точностью определить место (места) пожара, что, в итоге, позволяет провести адресную ликвидацию пожара, в т.ч. с помощью адресных систем пожаротушения.

Конструкция блока ВОД ИПТЛ обеспечивает необходимый срок непрерывной эксплуатации в составе извещателя на время 60.000 часов или 10 лет.

Извещатель ИП132-1-Р «Елань» с блоком ВОД ИПТЛ сертифицирован в 2012 году на соответствие Техническому регламенту пожарной безопасности, по окончании срока сертификата повторно сертифицирован в 2017 году на срок до 2022 года, сертифицирован на соответствие требованиям взрывозащиты.

С момента выпуска в апреле 2012 года извещатель ИП132-1-Р «Елань» с блоком ВОД ИПТЛ эксплуатируется на 40 объектах промышленности.

Среди них:


- Подземный перегрузочный пункт эмульсионной матрицы на горизонте +410 м, Объединённый Кировский рудник ОАО «Апатит», 3 шт. Монтаж август 2012 года.

- Поверхностно-подземный перегрузочный пункт эмульсионной матрицы Расвумчоррского рудника ОАО «Апатит», 2 шт. Монтаж август 2012 года.
- АО «Мосинжпроект» Алабяно-Балтийский тоннель, Москва, 16 шт. Монтаж ноябрь 2014 года. Сдача в эксплуатацию декабрь 2015 г.
- Белоярская АЭС, г.Заречный, Свердловская обл., 12 шт., сдача в эксплуатацию 2014 г.
- АО «Разрез Березовский» Красноярский край, Берёзовский участок ООО "Назаровское ГМНУ", 2 шт. Эксплуатируется с января 2015 г.
- Сургутская ГРЭС, г.Сургут, ХМАО, 2015 г.
- АО «Норникель», рудник «Заполярный», 4 шт. Монтаж февраль 2016 года. Сдача в эксплуатацию декабрь 2017 года.
- Калужский разворотный тоннель, Москва, 3 шт. Монтаж февраль 2017 года. Сдача в эксплуатацию октябрь 2017 года.
- ОАО «Международный аэропорт Шереметьево», терминал «В», Москва, 6 штук. Монтаж июль 2017 года, сдача в эксплуатацию октябрь 2017 года.
- АО «Назаровская ГРЭС», Красноярский край, 6 шт. Монтаж декабрь 2017 года.

Зам.директора

 /Кононов И.А./

Гл.конструктор

 /Жойков В.Г./

Приложение Б. Акт внедрения распределенного датчика температуры ASTRO E543



«УТВЕРЖДАЮ»



Генеральный директор

/Мячин Д.Ю./

«10» октября 2018 г.

АКТ внедрения распределенного датчика температуры ASTRO E543

Распределенный датчик температуры ASTRO E543 применяется для непрерывного температурного мониторинга протяженных (до 16 км) объектов. Благодаря использованию волоконно-оптической технологии датчик является абсолютно искро- и взрывобезопасным, а также может работать в условиях высоких электромагнитных полей, что делает перспективным его применение в электроэнергетике.

Компания «Титан-Инжиниринг» разработала и успешно поставляет систему мониторинга высоковольтных кабельных линий, реализованную на основе распределенного датчика ASTRO E543. С момента начала поставок в 2015 системы эксплуатируются более, чем на десяти объектах, среди которых:

1. Подстанция «Кингисеппская» 400 МВт (Ленинградская обл., Россия) – мониторинг силового кабеля, распределенная система термометрии, 6 линий по 300 метров каждая
2. Подстанция «Пулковская» (Санкт-Петербург, Россия) – 2 распределенных системы термометрии, 2 кабеля по 300 метров каждый
3. Подстанция «Авиагородок» – подстанция «Чесменская» (Санкт-Петербург, Россия) – подземный силовой кабель: распределенная система термометрии, 6 каналов;
4. Подстанция «Лаврики» – подстанция «Черная речка» (Санкт-Петербург, Россия), подземный силовой кабель – распределенная система термометрии, 6 каналов;
5. Подстанция «Парнас» (Санкт-Петербург, Россия) – распределенная система термометрии, 6 каналов;
6. Подстанция «Шушары» (Санкт-Петербург, Россия) – распределенная система термометрии, 6 каналов;
7. Подстанция «Гвардейская» (Санкт-Петербург, Россия) – распределенная система термометрии, 6 каналов.

Начальник ОВП

/Макаров А.В./

ООО «Титан Инжиниринг»
195030 г. Санкт-Петербург
ул. Электропультовцев, дом 7, лит X.
тел./факс: (812) 612-05-51, e-mail: te@szte.ru, www.szte.ru

Приложение В. Письмо ФСК ЕЭС о возможности применения систем контроля температуры ОВ встроенного в грозотрос

Федеральная
Сетевая Компания



Единой
Энергетической Системы

МАГИСТРАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ
ЮГА - ФИЛИАЛ ПАО «ФСК ЕЭС»
357431, Ставропольский край, г. Железноводск,
пос. Инзаумово, пер. Даринский, д.2
тел.: (8793) 36-99-90, 34-36-11; факс: (8793) 34-36-64
e-mail: org@urns.kmv.ru, www.fsk-ees.ru

10.11.2017 № М572/3560

На Ваш от 02.11.2017г. №39/804

Первому заместителю ГД
Главному конструктору
ООО «Инверсия-С»
Шелемба И.С.

О возможности применения систем
контроля температуры ОВ встроенного
в грозотрос

Уважаемый Иван Сергеевич!

Филиал ОАО «ФСК ЕЭС» - МЭС Юга выражает благодарность ООО «Инверсия-Сенсор» за оперативность и высокое качество выполненных работ, проявленные сотрудниками компании при реализации титула «Строительство ЛЭП 220 кВ Шахты – Донецкая с заходами на ПС 500 кВ Шахты и ПС 220 кВ Донецкая».

Оборудование волоконно-оптической системы термометрии «ASTRO E581 PLC», используемое для контроля температуры волоконно-оптического кабеля встроенного в грозотрос при проведении плавки гололеда на ВЛ, имеет высокое быстродействие, хорошее качество исполнения и интуитивно понятный интерфейс.

На сегодняшний день МЭС Юга планирует внедрение систем распределенного контроля температуры волоконно-оптического кабеля встроенного в грозотрос при реализации титулов нового строительства:

1. ВЛ 500 кВ Ростовская АЭС – Ростовская с расширением ПС 500 кВ Ростовская;
2. ВЛ 500 кВ Невинномысск – Моздок с расширением ПС 500 кВ Невинномысск и ПС 330 кВ Моздок;
3. ВЛ 500 кВ Кубанская – Бужора с расширением ПС 500 кВ Кубанская и ПС 220 кВ Бужора;
4. Строительство заходов ВЛ 330 кВ Нальчик - Владикавказ-2 на Зарамагскую ГЭС.

По предварительным оценкам подобных распределенных волоконно-оптических измерительных систем с длиной чувствительного элемента не менее 100 км потребуется порядка 9 единиц анализаторов в период с 2017 по 2021 год.

Первый заместитель генерального директора -
главный инженер

Попов С.В.
(8793) 36-99-90



Г.Н. Ковтун