

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

*М.Р. Марков, О. Г. Морозов*

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ  
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

**Аннотация.** В статье представлен комплексный сопоставительный анализ физико-технологических конфигураций оптоэлектронного тракта для задач непрерывного измерения температуры и влагосодержания трансформаторного масла. С использованием разработанного цифрового датчика на базе метода матриц передач исследованы ограничения стандартных волоконных брэгговских решеток. Математически доказана проблема матричной сингулярности в системах с перекрестной чувствительностью при использовании идентичных гигроскопичных полимеров. Обоснована эффективность внедрения радиофотонных сенсорных систем на базе адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) с фазовым  $\pi$ -сдвигом, позволяющих перевести анализ в радиочастотный диапазон и повысить разрешающую способность. Выявлен эффект деградации спектра из-за многолучевой интерференции Фабри – Перо в гетерогенных оптических линиях, что обосновывает необходимость применения гомогенных трактов на базе фоточувствительного волокна PS-1500.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, влагосодержание, волоконная брэгговская решетка, адресная волоконная брэгговская структура, фазовый сдвиг, метод матриц передач.

### Введение

Надежное функционирование энергетических систем критически зависит от технического состояния силовых трансформаторов [1,2]. Основной причиной выхода данного оборудования из строя является деградация бумажно-масляной изоляционной системы, обусловленная совокупным воздействием термических перегрузок и повышенного влагосодержания [3,4].

Динамика влагосодержания в изоляционной системе носит сложный нелинейный характер. Растворимость воды в минеральном трансформаторном масле экспоненциально зависит от температуры. Если в состоянии холодного резерва (при 20 °С) влагоемкость масла минимальна, то при рабочих температурах (70-90 °С) происходит интенсивная термодинамическая миграция влаги из целлюлозы в масло, что увеличивает предел насыщения в 10–15 раз. Эта динамическая взаимосвязь делает критически важным синхронный и высокоточный мониторинг обоих параметров в режиме реального времени.

Традиционные методы диагностики (титрование по Карлу Фишеру, емкостные зонды, электрические термомпары) имеют существенные ограничения при онлайн-мониторинге из-за высокой напряженности электромагнитного поля внутри бака трансформатора и невозможности размещения датчиков непосредственно в «точках перегрева» [3]. В связи с этим наиболее перспективным решением является применение полностью диэлектрических волоконно-оптических датчиков на основе брэгговских решеток (ВБР) [5].

Однако практическое внедрение ВБР-сенсоров для многопараметрического мониторинга сопряжено с фундаментальной метрологической проблемой перекрестной чувствительности: сдвиг резонансной длины волны оптического спектра одновременно зависит как от термооптического эффекта стекла, так и от тензометрического отклика гигроскопичного полимерного покрытия при абсорбции влаги. Разделение этих параметров традиционно осуществляется путем решения системы линейных уравнений на основе показаний двух решеток.

Как показывают предварительные исследования, использование базовой конфигурации датчика со стандартными ВБР не способно обеспечить требуемую нормативную точность. Аппаратная погрешность алгоритмов цифровой локализации спектрального пика интеррогатора при математическом пересчете в абсолютное влагосодержание (ppm) многократно масштабируется в высокотемпературных режимах работы трансформатора. Попытки решить эту проблему путем нанесения идентичных чувствительных к влаге покрытий на оба резонатора приводят к математическому вырождению калибровочной матрицы (стремлению определителя к нулю) и алгоритмической сингулярности измерительной системы.

Для кардинального повышения разрешающей способности оптического тракта и преодоления проблемы перекрестного влияния целесообразен переход к радиофотонным сенсорным системам на базе адресных волоконных брэгговских структур с фазовым  $\pi$ -сдвигом [6]. Формирование двух сверхузкополосных частотных составляющих, разнесенных на уникальную адресную частоту, позволяет осуществлять измерения по результатам обработки сигнала биений на фотоприемнике, что переносит анализ в радиочастотный диапазон и радикально снижает инструментальную ошибку.

Целью настоящей работы является проведение комплексного сравнительного анализа альтернативных физико-технологических конфигураций волоконно-оптического измерительного тракта (от базовых ВБР до гетерогенных и гомогенных линий на базе АВБС) для установления границ их применимости и технико-экономического обоснования выбора оптимальной архитектуры сенсора влажности и температуры силового электрооборудования [7].

### Математическое моделирование оптоэлектронного тракта

В основу разработанного датчика измерительной системы положен метод матриц передач (ТММ), позволяющий детально моделировать спектральный отклик волоконных брэгговских решеток (ВБР). Суть заключается в описании решетки путем разбиения её на множество одинаковых маленьких отрезков длиной  $\Delta z$ . Метод матриц передачи может учитывать больше деталей структуры, включая сложные многослойные системы и дисперсию материалов.

Сама матрица передачи волоконной брэгговской решетки  $F_i$  для одного элементарного участка решетки базируется на решении уравнений связанных волн и описана в формуле (1):

$$F_i = \begin{pmatrix} \cosh(v\Delta z) - i\frac{\sigma}{v}\sinh(v\Delta z) & -i\frac{k}{v}\sinh(v\Delta z) \\ i\frac{k}{v}\sinh(v\Delta z) & \cosh(v\Delta z) + i\frac{\sigma}{v}\sinh(v\Delta z) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент связи, зависящий от глубины модуляции показателя преломления,  $\sigma$  — коэффициент рассогласования, показывающий отклонение длины волны от центральной брэгговской;  $v$  — комплексный параметр связи.

Параметры в (1) определены как:

$$k(\lambda) = \pi \frac{\Delta n}{\lambda}, \quad (2)$$

$$\sigma(\lambda) = \frac{2\pi n}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}, \quad (3)$$

$$v(\lambda) = \sqrt{k(\lambda)^2 - \sigma(\lambda)^2}, \quad (4)$$

где  $\Lambda$  — период ВБР,  $n$  — показатель преломления сердцевины оптического волокна,  $\Delta n$  — наведенный показатель преломления,  $\lambda$  — длина волны.

Результирующая матрица:

$$F = F_n \cdot F_{n-1} \cdot \dots \cdot F_1 = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

В результате такого умножения получается одна общая матрица. Коэффициент отражения решетки, по которому строится итоговый график спектра, вычисляется как:

$$R = \left| \frac{F_{21}}{F_{11}} \right|. \quad (6)$$

Главной задачей разрабатываемого волоконно-оптического датчика является одновременное измерение двух различных физических параметров трансформатора: температуры и влажности масла. Основная сложность при создании таких систем является проблема влияние одного параметра на другой. Чтобы решить эту проблему и разделить физические эффекты, в нашей работе моделируется измерительный комплекс, состоящий из двух физически разделенных, но оптически связанных брэгговских решеток. Датчик влажности и температуры получается путем печати двух различных структур ВБР с решеткой, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, на одном и том же волокне, образуя таким образом полость (рис. 1) [8].

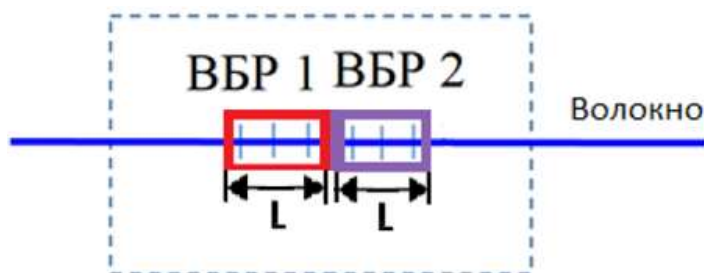


Рис. 1. Схема волоконно-оптического датчика

Каждая структура имеет фиксированную физическую длину  $L$ . Красным контуром выделено базовое акриловое покрытие опорной решетки (ВБР 1), а фиолетовым — полиимидное покрытие измерительной решетки (ВБР 2).

Центральная длина волны ВБР вычисляется как:

$$\lambda_B = 2nL. \quad (7)$$

Первая решетка представляет собой опорный канал температуры. Решетка выполняет роль идеального эталонного термометра. Она непрерывно сообщает системе точную температуру масла.

Вторая решетка является основным измерительным каналом и покрыта слоем полиимида. Полимерное покрытие впитывает влагу из масла, полиимид разбухает и растягивает оптическое волокно, сдвигая спектр решетки [5]. Поскольку на ВБР одновременно влияют и влажность, и температура, данные от первой решетки используются чтобы математически вычесть температурный эффект и получить кристально чистое значение влажности.

Математически параметры для первой решетки описываются следующим образом:

$$\begin{aligned} n_1 &= n(1 + \xi\Delta T), \\ \Lambda_1 &= \Lambda(1 + \alpha\Delta T), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\Delta T$  — изменение температуры,  $\xi$  — термооптический коэффициент кварцевого стекла,  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения.

Принцип работы второй решетки заключается в набухании полимерного слоя при поглощении влаги и механического растягивания оптического волокна. Это создает дополнительную деформацию, которая также меняет период решетки и показатель преломления. Таким образом, параметры для второй решетки зависят уже от двух воздействий одновременно — температуры и влажности:

$$\begin{aligned} n_2 &= n(1 + \xi\Delta T - P_e\beta\Delta RH), \\ \Lambda_2 &= \Lambda(1 + \alpha\Delta T + \beta\Delta RH), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\Delta RH$  — изменение влажности,  $\beta$  — коэффициент гигроскопического расширения полиимида,  $P_e$  — эффективный фотоупругий коэффициент оптоволокна.

Измерив величину сдвига центральной длины волны обеих решеток  $\Delta\lambda_1$  и  $\Delta\lambda_2$ , можно составить систему линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{T1} & 0 \\ K_{T2} & K_{RH2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta RH \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где  $K_T$  и  $K_{H2}$  — коэффициенты чувствительности решеток к температуре и влажности соответственно.

Решение системы уравнений (11) позволяет аппаратно разделить влияние температуры и влажности друг от друга.

Согласно правилу Крамера, единственное и устойчивое решение системы (10) существует тогда и только тогда, когда матрица является невырожденной, то есть её определитель отличен от нуля:

$$D = K_{T1}K_{H2} - K_{T2}K_{H1}. \quad (11)$$

При  $D = 0$  коэффициенты чувствительности строк пропорциональны, уравнения становятся линейно зависимыми. Система не имеет решений, и раздельное измерение физических величин становится невозможным. При значении  $D > 0$  система имеет единственное решение. Чем выше абсолютное значение  $D$ , тем выше помехоустойчивость алгоритма к аппаратным шумам АЦП.

### Исследование базовой измерительной конфигурации

На первом этапе исследований была оценена эффективность применения классических однородных волоконных брэгговских решеток с широким гауссовым спектральным откликом. Традиционная конфигурация датчика подразумевает

использование двух сенсоров: первый покрывается гидрофобным акрилатом и выполняет функцию эталонного термометра, второй покрывается гигроскопичным полиимидом и выступает в роли датчика влажности [5].

На рисунке 2 продемонстрировано комплексное влияние температуры и влагосодержания на спектральный отклик волоконно-оптического датчика, состоящего из двух ВБР.

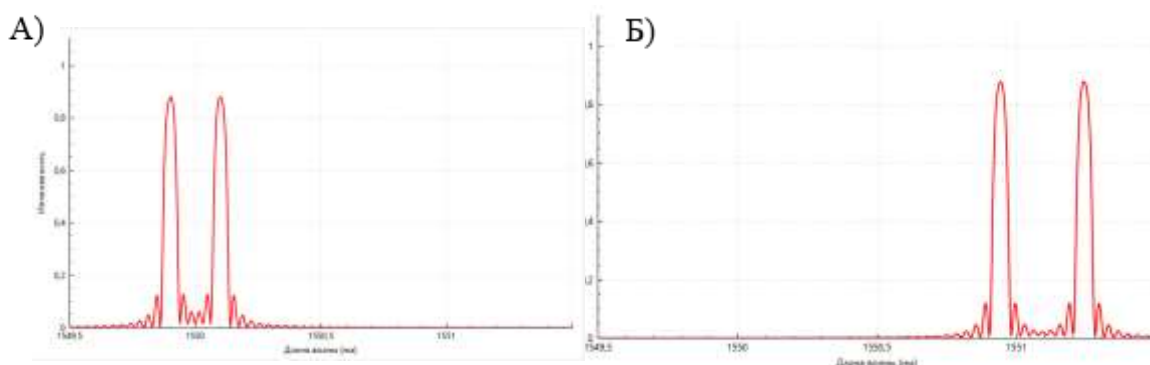


Рис. 2. Результаты моделирования базовой конфигурации:  
 А) при 0 °С и 0 ppm; Б) при 100 °С и 500 ppm

В реальных условиях аппаратно-программного опроса базовая инструментальная погрешность локализации центра широкого спектрального пика алгоритмами цифровой обработки сигналов составляет порядка 5 пм. Имитационное моделирование показало, что с учетом паспортной чувствительности кварцевого волокна разрешающая способность температурного канала является удовлетворительной и составляет  $R_T \approx \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

При пересчете относительной влажности в абсолютное влагосодержание (ppm) с использованием нелинейной функции предела насыщения минерального масла выявляется критическое ограничение данной архитектуры [9]. При температуре холодного резерва 20 °С абсолютная погрешность влажностного канала составляет приемлемые  $R_H \approx \pm 5,0 \text{ ppm}$ . Но при выходе трансформатора на высокотемпературный режим работы 90 °С, из-за экспоненциального роста влагоемкости масла, базовая оптическая ошибка многократно масштабируется, и погрешность возрастает до недопустимых значений порядка  $\pm 27,69 \text{ ppm}$ .

В качестве альтернативного решения была исследована конфигурация оптического тракта, в которой на обе брэгговские решетки наносится идентичное влагочувствительное полиимидное покрытие. Предполагалось, что симметрирование физико-химических свойств позволит компенсировать нелинейное тепловое расширение полимера и стабилизировать алгоритмы ЦОС.

Однако при расчете метрологических характеристик данной архитектуры было выявлено, что базовая аппаратная погрешность алгоритмов интеррогации осталась неизменной, итоговая разрешающая способность датчика претерпела катастрофическую деградацию. При использовании идентичных покрытий коэффициенты температурной и влажностной чувствительности обеих решеток становятся практически равными. В результате, определитель  $D$  матрицы чувствительности стремится к нулю, и матрица становится плохо обусловленной. В состоянии алгоритмического вырождения системы линейных уравнений любая, даже минимальная, оптическая шумовая флуктуация при обратном преобразовании многократно усиливается. Моделирование показало, что деление на стремящийся к нулю детерминант приводит к неконтролируемому росту ошибки, устремляя итоговую погрешность разделения параметров температуры и влажности к бесконечности.

Результаты сквозного компьютерного анализа доказывают метрологическую и вычислительную малую эффективность применения классических широкополосных ВБР для задач многопараметрического мониторинга в агрессивных средах с перекрестной чувствительностью. Построение измерительного тракта на базе идентичных покрытий делает невозможным математическое разделение параметров, а использование асимметричных полимеров приводит к критическому масштабированию аппаратной погрешности при нагреве.

### Внедрение адресных волоконных структур с фазовым $\pi$ -сдвигом

Для преодоления выявленного эффекта алгоритмической сингулярности и критического масштабирования абсолютной погрешности влагосодержания требуется радикальное сужение спектрального отклика сенсора. В рамках данного исследования обосновывается переход к радиифотонным измерительным системам на базе адресных волоконных брэгговских структур.

Физической основой АВБС является внедрение локального дискретного фазового  $\pi$ -сдвига строго в центр периодической структуры брэгговской решетки [6]. Согласно результатам моделирования методом матриц передач, внесение данного дефекта приводит к деструктивной интерференции на центральной длине волны. В результате внутри широкого контура отражения классической решетки формируется сверхузкополосное окно прозрачности. Ширина данного резонанса на полувысоте составляет единицы пикометров, что на два порядка меньше ширины спектра классической однородной ВБР (рис. 3).

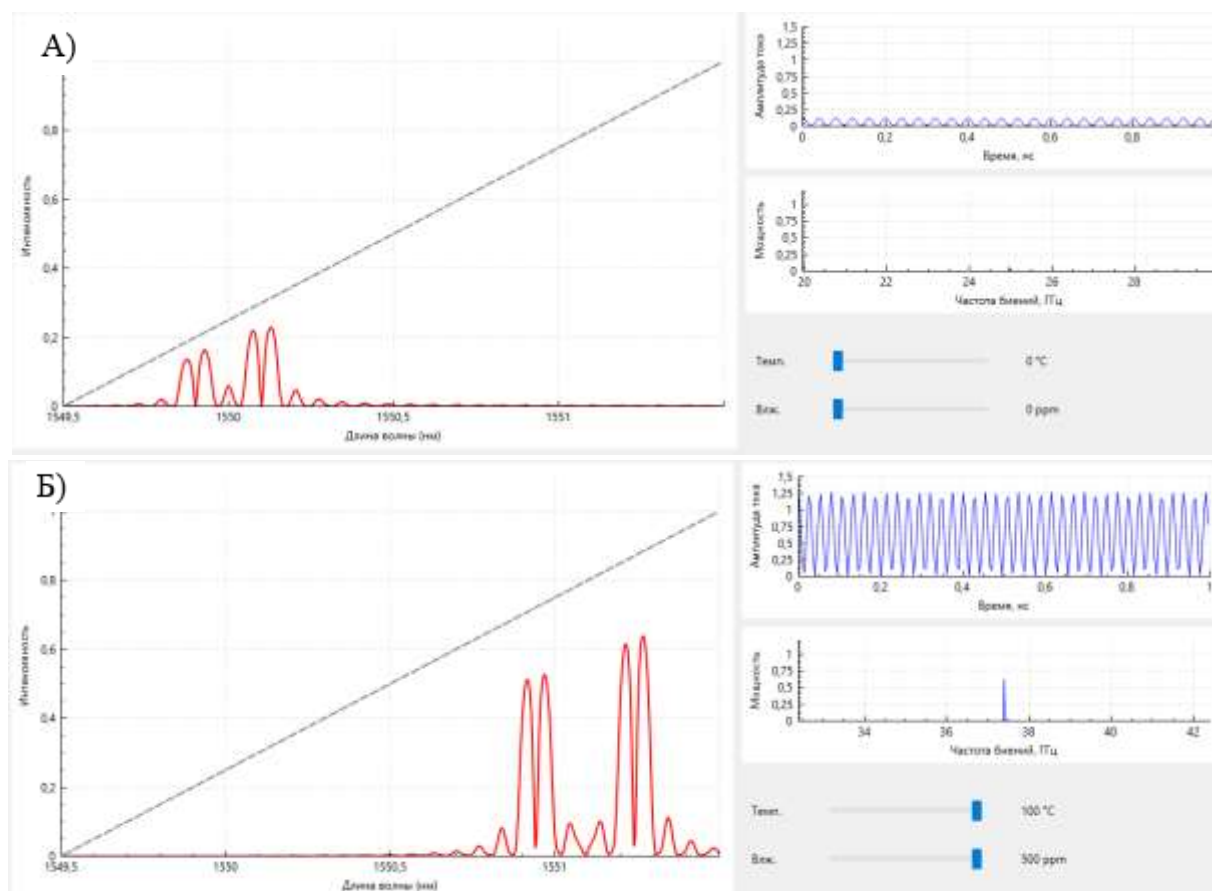


Рис. 3. Спектральная характеристика адресной волоконной брэгговской структуры с интегрированным фазовым  $\pi$ -сдвигом: А) при 0 °C и 0 ppm; Б) при 100 °C и 500 ppm

Формирование высокочастотного резонанса радикально меняет физику опроса измерительного тракта. Согласно фундаментальным работам в области радиофотоники [6], концепция АВБС позволяет отказаться от традиционного оптического спектрального анализа. Адресная структура отражает две сверхузкополосные оптические частотные составляющие, разнесенные на строго заданную уникальную адресную частоту  $\Omega$ .

При подаче такого двухчастотного оптического сигнала на квадратичный фотоприемник происходит процесс оптического гетеродинамирования [6]. В результате на выходе фотоприемника формируется электрический сигнал биений, частота которого в точности равна адресной частоте  $\Omega$ , лежащей в радиочастотном диапазоне. Таким образом, каждой АВБС в измерительной сети присваивается свой уникальный радиочастотный маркер, что позволяет реализовать квазираспределенные многосенсорные системы мониторинга на одной оптической линии без сложных алгоритмов спектрального уплотнения.

Для преобразования физического сдвига центральной длины волны решетки в измеряемый электрический параметр применяется метод амплитудно-фазовой конверсии на базе оптического фильтра с линейным наклонным профилем пропускания. При изменении температуры или влажности спектр АВБС смещается по склону фильтра, что приводит к пропорциональному изменению амплитуды оптических составляющих и изменению мощности генерируемого радиочастотного сигнала биений.

Главным метрологическим преимуществом такого подхода является перенос информационной нагрузки из оптического домена в радиочастотный. Применение алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС), в частности, быстрого преобразования Фурье (БПФ) для анализа микроволнового сигнала, позволяет достичь беспрецедентной точности локализации центральной частоты сенсора.

Компьютерное моделирование оптоэлектронного тракта показало, что за счет сверхузкополосного спектрального отклика  $\pi$ -сдвига и радиофотонного метода опроса базовая инструментальная ошибка локализации снижается на порядок: с 5 пм до 0,5 пм.

Данное повышение точности оказывает решающее влияние на разрешающую способность двухпараметрического датчика. Разрешающая способность температурного канала достигает значений  $R_T \approx \pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Абсолютная погрешность определения влагосодержания при выходе на рабочий высокотемпературный режим трансформатора  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  не превышает 2 ppm, что на порядок лучше результатов базовой конфигурации и полностью удовлетворяет жестким требованиям нормативной документации энергетической отрасли.

Тем не менее, реализация заложенного в АВБС потенциала предъявляет строгие требования к физико-технологическому исполнению самого оптического тракта, в частности, к однородности используемых волоконных подложек, что требует отдельного исследования.

### **Влияние оптической гетерогенности измерительного тракта**

Практическая реализация систем внутривагонного мониторинга силовых трансформаторов накладывает жесткие ограничения на выбор материалов волоконно-оптической линии. Для прокладки протяженных подводных магистралей от диспетчерского пункта до оборудования традиционно применяется стандартное телекоммуникационное волокно (например, стандарта SMF-28), обладающее минимальным затуханием [10]. Однако сердцевина такого волокна содержит малое количество легирующих примесей, что делает ее оптически жесткой и малоприспособленной для прямой записи высококонтрастных брэгговских структур.

Для качественного формирования сверхузкополосного  $\pi$ -фазового сдвига требуется использование специализированного фоточувствительного волокна (например, PS-1500),

сердцевина которого легирована диоксидом германия. Такое легирование обеспечивает высокую фоторефрактивность материала и термическую стабильность записанных решеток без необходимости предварительной выдержке в водороде, что критически важно для эксплуатации в горячем трансформаторном масле.

Следствием данного компромисса является формирование оптически неоднородного измерительного тракта, в котором участок сенсорного волокна PS-1500 приваривается к подводящему кабелю SMF-28. Моделирование физических процессов на границе раздела сред выявило негативный эффект, существенно влияющий на итоговую точность системы.

Разнородные волокна обладают ярко выраженной субстратной асимметрией: диаметр модового поля SMF-28 составляет около 10,4 мкм, в то время как у PS-1500 он сжат до 7,0 мкм. Помимо геометрического несоответствия, на месте сварного шва возникает скачок эффективного показателя преломления. Данный оптический барьер вызывает локальные переотражения зондирующего излучения. Наличие таких сварных соединений приводит к формированию паразитного оптического резонатора Фабри – Перо.

В результате многолучевой интерференции, возникающей между микрзеркалами сварных швов, генерируется высокочастотный интерференционный шум, который накладывается на полезный спектр адресной брэгговской структуры (рисунок. 4).

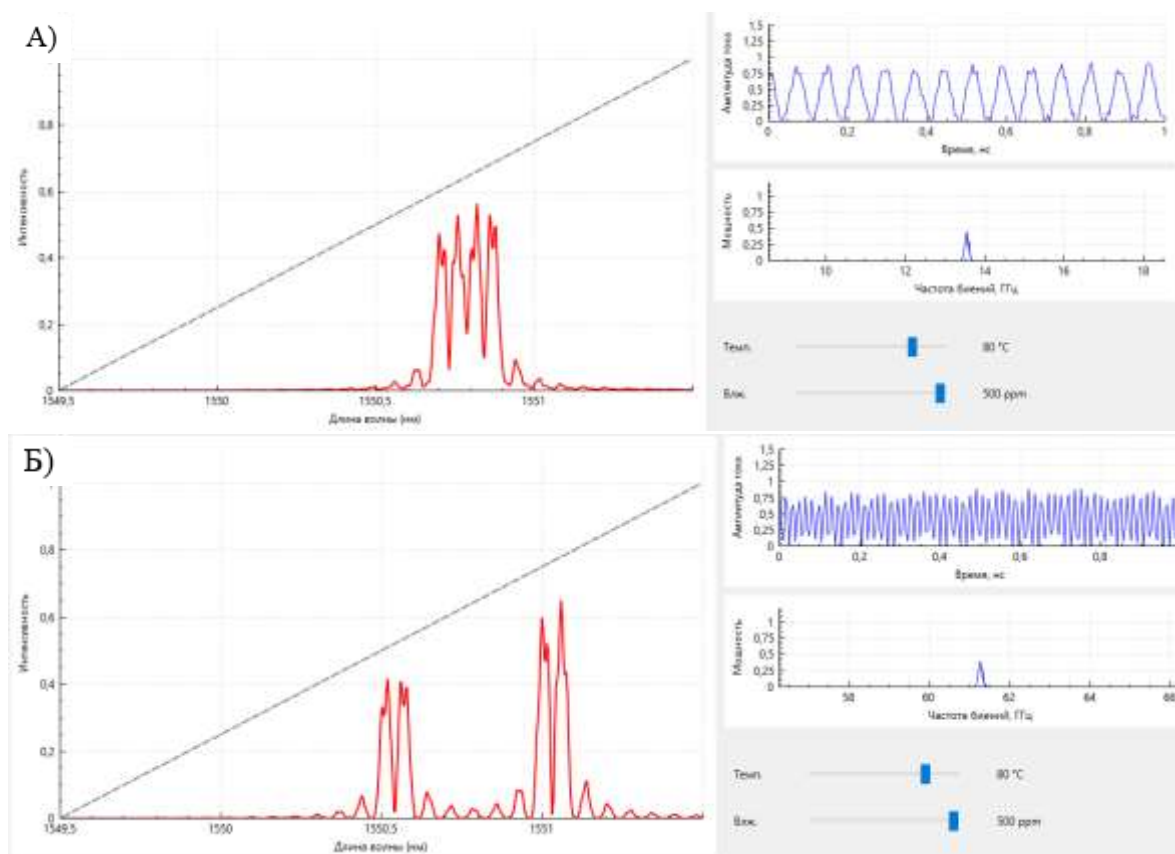


Рис. 4. Комплексное воздействие температуры и влажности на конфигурации:  
 А) БПР 1 – SMF28, БПР 2 – PS1500; Б) БПР 1 – PS1500, БПР 2 – SMF28

Наложение паразитной интерференционной ряби (Рис. 4) критически искажает функцию аппроксимации алгоритмов ЦОС. Высокочастотные гармоники маскируют истинное положение фазового  $\pi$ -сдвига, провоцируя вычислительный сбой при определении центральной частоты.

Эффект многолучевой интерференции приводит к аппаратному смещению детектируемого центра в среднем на +4.0 пм. Таким образом, суммарная инструментальная ошибка локализации возрастает с 0,5 пм до 4,5 пм, практически нивелируя все метрологические преимущества внедрения адресных структур.

С математической точки зрения конфигурация физической структуры измерительных каналов ВБР 1 – PS1500, ВБР 2 – SMF28 (Рис. 4, Б) позволяет максимизировать детерминант матрицы чувствительности ( $D = K_{T1} \cdot K_{H2}$ ) за счет сочетания высоких термооптических свойств волокна SMF-28 с деформационным откликом полиимида. Визуально это подтверждается тем фактом, что на спектрограмме (Рис. 4, А) измерительный пик ВБР 2 на подложке PS-1500 смещается медленнее, чем аналогичный пик на подложке SMF-28 (Рис. 4, Б), обладающей более высоким термооптическим коэффициентом. Однако, несмотря на улучшенную математическую обусловленность уравнений, гетерогенность оптической линии продолжает оказывать разрушительное воздействие на сигнал.

Данная оптическая деградация приводит к пропорциональному ухудшению итоговой разрешающей способности датчика. Погрешность температурного канала увеличивается до  $\pm 0,45$  ppm. При расчете перекрестной чувствительности в высокотемпературном режиме 90 °С абсолютная погрешность влажностного канала увеличивается к недопустимым значениям, достигая  $\pm 19,1$  ppm. Попытки программной фильтрации данного шума требуют значительных вычислительных мощностей микропроцессора и усложняют архитектуру радиофотонного опроса.

### Исследование измерительной конфигурации на основе однородного фоточувствительного оптического волокна PS-1500

Сердцевина волокна PS-1500 экстремально легирована диоксидом германия и бором. Высокая концентрация германия обеспечивает высокую фоточувствительность материала. Это позволяет записывать решетки с высоким коэффициентом отражения и большой амплитудой модуляции показателя преломления без применения дополнительных технологий. Именно высокая глубина модуляции является необходимым условием для качественного формирования сверхузкополосного  $\pi$ -фазового сдвига внутри АВБС.

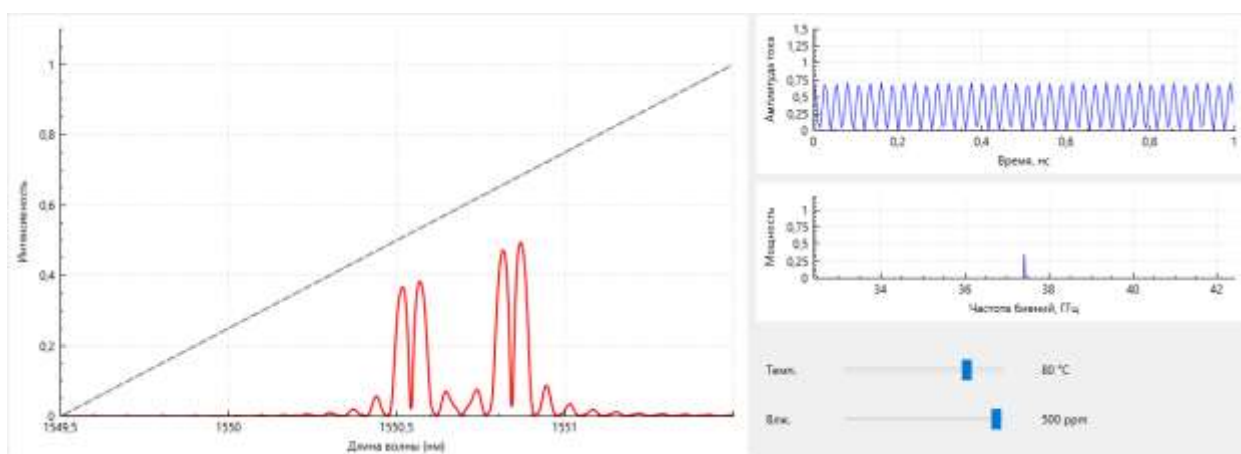


Рис. 5. Комплексное воздействие температуры и влажности на конфигурации на волоконно-оптический датчик на основе волокна PS1500

Конфигурация на базе специализированного волокна PS-1500 демонстрирует высокий уровень эксплуатационной надежности и метрологической стабильности. Использование единой, физически непрерывной оптической линии обеспечивает высокую

термомеханическую прочность измерительного зонда и исключает образование зон локальных механических напряжений при постоянных температурных нагрузках. Естественная фоточувствительность легированного кварца гарантирует долговременную стабильность резонансных характеристик оптической структуры, защищая измерительную систему от непредсказуемого временного дрейфа центральных длин волн. Кроме того, абсолютная физическая идентичность подложек под обеими решетками позволяет реализовать аппаратный механизм синфазного подавления фоновых температурных шумов при генерации радиочастоты биений. С математической точки зрения конструктивная асимметрия защитно-чувствительных полимерных покрытий надежно обеспечивает обусловленность калибровочной матрицы, позволяя алгоритмам цифровой обработки безошибочно разделять перекрестные параметры. Разрешающая способность температурного канала составила  $R_T \approx \pm 0.05$  °C. Разрешающая способность влажностного канала при температуре равной 20 °C:  $R_H \approx \pm 0.20$  ppm, при рабочей температуре равной 90 °C:  $R_H \approx \pm 2.12$  ppm. Тем не менее, данная архитектура обладает собственными физическими ограничениями. Легирование сердцевины волокна молекулами бора несколько снижает термооптический коэффициент стекла, что приводит к падению абсолютной чувствительности датчика к изменениям температуры. Также сохраняется фундаментальное материаловедческое ограничение, выражающееся в постепенной физико-химической деградации влажочувствительного полиимидного слоя при многолетнем нахождении в агрессивной высокотемпературной среде трансформаторного масла.

Проведенное исследование доказывает, что для сохранения прецизионной разрешающей способности, обеспечиваемой  $\pi$ -сдвигом, необходимо исключить паразитные переотражения на стыках. Это обосновывает техническую целесообразность использования гомогенной архитектуры измерительного зонда, погружаемого в бак трансформатора, целиком выполненной на базе фоточувствительного оптического волокна PS-1500.

### Заключение

Проведенный в работе комплексный сопоставительный анализ физико-технологических конфигураций оптоэлектронного тракта показал, что создание надежной системы непрерывного мониторинга силовых трансформаторов требует глубокого математического и материаловедческого обоснования.

Исследование доказало, что использование классических широкополосных брэгговских решеток является метрологически несостоятельным для задач контроля влагосодержания масла в высокотемпературных режимах. Экспоненциальное масштабирование аппаратной ошибки интеррогации и неизбежное возникновение матричной сингулярности при симметрировании покрытий приводят к алгоритмическому коллапсу системы и невозможности корректного разделения перекрестной чувствительности.

Установлено, что для кардинального повышения разрешающей способности системы является внедрение радиофотонных измерительных трактов на базе адресных волоконных брэгговских структур с интегрированным фазовым  $\pi$ -сдвигом. Использование сверхузкополосного окна прозрачности и перенос информационного сигнала в микроволновый диапазон (для анализа частоты биений) позволяют снизить базовую ошибку локализации на порядок (с 5,0 пм до 0,5 пм), обеспечивая прецизионную точность измерений, недостижимую для классических оптических анализаторов.

Вместе с тем, моделирование выявило критическую уязвимость высокодобротных резонансов к оптической гетерогенности линии. Формирование паразитных резонаторов Фабри-Перо на стыках разнородных волокон генерирует многолучевую интерференцию, полностью нивелирующую достигнутые метрологические преимущества.

Таким образом, не существует единой универсальной архитектуры волоконно-оптического датчика: конфигурация измерительной системы должна проектироваться строго индивидуально, исходя из конструктивных особенностей конкретного энергообъекта и требуемой глубины погружения сенсора. Однако для обеспечения нормативной абсолютной точности измерений в условиях нелинейной температурной деградации масла применение адресных радиофотонных структур в составе полностью гомогенных оптических зондов (на базе фоточувствительного волокна) является объективной и безальтернативной технологической необходимостью.

### Список литературы

1. Влияние климата и окружающей среды на работу трансформатора. Защита от экстремальных условий. – Текст: электронный // ВТ-Энерго: [сайт]. – URL: <https://vt-energo.ru/info/articles/vse-publikatsii/vliyanie-klimata-i-okruzhayushchey-sredy-na-rabotu-transformatora-zashchita-ot-ekstremalnykh-usloviy/> (дата обращения: 01.05.2026).
2. Фокеев А. Е. Анализ режимов работы масляных силовых трансформаторов напряжением 10(6)/0,4 кВ / А. Е. Фокеев, И. Н. Тумаков // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2021. – Т. 24, № 4. – С. 80–91. – DOI: 10.22213/2413-1172-2021-4-80-91.
3. Arakelian V. G. Water in Oil-Filled High-Voltage Equipment Part II: Water Content as Physicochemical Tools for Insulation Condition Diagnostic / V. G. Arakelian, I. Fofana // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2007. – Vol. 23, No. 5. – P. 15–24.
4. Arakelian V. G. Water in Oil-Filled High-Voltage Equipment Part I: States, Solubility, and Equilibrium in Insulating Materials / V. G. Arakelian, I. Fofana // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2007. – Vol. 23, No. 4. – P. 15–27.
5. Lu P. Polymer-Coated Fiber Bragg Grating Sensors for Simultaneous Monitoring of Soluble Analytes and Temperature / P. Lu, L. Men, Q. Chen // IEEE Sensors Journal. – 2009. – Vol. 9, No. 4. – P. 340–345.
6. Морозов О. Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах / О. Г. Морозов, А. Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 535–543. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543.
7. Мисбахов Р.Ш. Адресный волоконно-оптический датчик для измерения относительной влажности в комплектных распределительных устройствах / Р.Ш. Мисбахов, А.Н. Васёв, А. Ж. Сахабутдинов [и др.] // Радиостроение. – 2020. – № 1. – С. 1–16. – DOI: 10.36027/rdeng.0120.0000157.
8. Akre S. On the Feasibility of Monitoring Power Transformer’s Winding Vibration and Temperature along with Moisture in Oil Using Optical Sensors / S. Akre, I. Fofana, Z. Yéo [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 4. – P. 2310. – DOI: 10.3390/s23042310.
9. Особенности контроля влагосодержания в масле и в твердой изоляции силовых трансформаторов в режиме мониторинга. – Текст: электронный // Dimrus.ru: [сайт]. – URL: [https://dimrus.ru/texts/oil\\_moisture.html](https://dimrus.ru/texts/oil_moisture.html) (дата обращения: 02.05.2026).
10. Cosme M. Accurate Determination of the Temperature Sensitivity of UV-Induced Fiber Bragg Gratings / M. Cosme, M. Pota, J. Preizal [et al.] // Sensors. – 2026. – Vol. 26, No. 2. – P. 435. – DOI: 10.3390/s26020435.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF FIBER-OPTIC MEASUREMENT PATH ARCHITECTURES FOR MONITORING POWER TRANSFORMER OIL

*M. R. Markov, O. G. Morozov*

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI  
10, K. Marx str., Kazan, 420111, Russian Federation

**Annotation.** This article presents a comprehensive comparative analysis of the physical and technological configurations of an optoelectronic path for the continuous measurement of temperature and moisture content in transformer oil. Using a developed digital sensor based on the transfer matrix method, the limitations of standard fiber Bragg gratings are investigated. The problem of matrix singularity in systems with cross-sensitivity when using identical hygroscopic polymers is mathematically proven. The efficiency of implementing microwave photonic sensor systems based on addressed fiber Bragg structures (AFBS) with a phase  $\pi$ -shift is substantiated, enabling the transfer of signal analysis to the radio-frequency range and significantly improving resolution. The effect of spectral degradation due to multipath Fabry-Perot interference in heterogeneous optical lines is revealed, justifying the necessity of using homogeneous paths based on PS-1500 photosensitive fiber.

**Keywords:** power transformer, moisture content, fiber Bragg grating, addressed fiber Bragg structure, phase shift, transfer matrix method.

Дата отправка статьи в редакцию 08.06.26