

ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДВУХ ОПТОВОЛОКОННЫХ МЕТОДОВ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ

И.Б.Тажибаев ^{1,2}

Х.А.Абдусаматов ^{1,2}

¹Ферганский государственный технический университет

²Томский политехнический университет.

Автор для корреспонденции, e-mail: konars6989@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-5443-9152>

Валийев. И.

Алижонов. Й.

Ферганский государственный технический университет.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21108205>

Аннотация. В работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование двух оптоволоконных методов температурного контроля промышленного оборудования: на основе волоконных брэгговских решёток (FBG) и интерферометра Фабри–Перо (Fabry–Pérot). Разработана экспериментальная установка для сравнительного анализа температурной чувствительности, линейности, гистерезиса и долговременной стабильности обоих типов датчиков в диапазоне 20–180°C. Установлено, что FBG-датчики обладают температурной чувствительностью около 10,8 пм/°C с высокой линейностью ($R^2 > 0,999$) и низким гистерезисом, тогда как интерферометры Фабри–Перо демонстрируют повышенную чувствительность (до 15 пм/°C для интринзик-структур), но имеют больший дрейф показаний. Показано, что FBG-датчики предпочтительны для многоточечного мультиплексированного контроля температуры в силовых трансформаторах и электротехнических установках благодаря возможности размещения до 20 датчиков на одном оптическом волокне.

Интерферометры Фабри–Перо целесообразно применять для точечных измерений в условиях сильных электромагнитных помех, где требуется высокая локальная чувствительность.

Ключевые слова: оптоволоконные датчики, волоконная брэгговская решётка, интерферометр Фабри–Перо, температурный контроль, мониторинг оборудования, спектральный анализ.

IKKI TURDGI OPTIK TOLALI USULLARNING HARORAT NAZORATI USKUNALARINI TADQIQ QILISH VA TAQQOSLASH

Annotatsiya. Ushbu ishda sanoat uskunalarning harorat nazorati uchun ikki turdagi optik tolali usullarning nazariy va tajribaviy tadqiqi olib borildi: tolali Bragg panjaralari (FBG) va Fabri–Pero interferometri (Fabry–Pérot) asosida. Ikkala turdagi datchiklar uchun harorat sezgirligi, chiziqliylik, gisteresis va uzoq muddatli barqarorlikni taqqoslash tahlili uchun tajribaviy o'rnatma ishlab chiqildi. FBG-datchiklar taxminan 10,8 pm/°C harorat sezgirligiga, yuqori chiziqliylikka ($R^2 > 0,999$) va past gisteresisga ega ekanligi aniqlandi, Fabri–Pero interferometrlari esa yuqori sezgirlikni (intrinziq tuzilmalar uchun 15 pm/°C gacha) namoyish etdi, lekin ko'rsatkichlarda kattaroq drift mavjud. FBG-datchiklar bitta optik tolada 20 tagacha datchik joylashtirish imkoniyati tufayli quvvat transformatorlari va elektr texnologik jihozlarida ko'p nuqtali multiplekslangan harorat nazorati uchun afzalroq ekanligi ko'rsatildi.

Fabri–Pero interferometrlari yuqori mahalliy sezgirlik talab qilinadigan kuchli elektromagnit xalosizlik sharoitida nuqtali o'lchovlar uchun qo'llash maqsadga muvofiqdir.

Tayanch so'zlar: optik tolali datchiklar, tolali Bragg panjarasi, Fabri–Pero interferometri, harorat nazorati, uskuna monitoringi, spektral tahlil.

RESEARCH AND COMPARATIVE EVALUATION OF TWO FIBER-OPTIC METHODS FOR TEMPERATURE MONITORING OF EQUIPMENT

Abstract. The paper presents theoretical and experimental investigation of two fiber-optic methods for temperature monitoring of industrial equipment: based on fiber Bragg gratings (FBG) and Fabry–Pérot interferometer. An experimental setup was developed for comparative analysis of temperature sensitivity, linearity, hysteresis, and longterm stability of both sensor types in the range of 20–180°C. It was established that FBG sensors exhibit temperature sensitivity of about 10.8 pm/°C with high linearity ($R^2 > 0.999$) and low hysteresis, whereas Fabry–Pérot interferometers demonstrate enhanced sensitivity (up to 15 pm/°C for intrinsic structures) but have greater indication drift. It is shown that FBG sensors are preferable for multi-point multiplexed temperature control in power transformers and electrical installations due to the capability of placing up to 20 sensors on a single optical fiber. Fabry–Pérot interferometers are advisable for point measurements in conditions of strong electromagnetic interference where high local sensitivity is required.

Keywords: fiber-optic sensors, fiber Bragg grating, Fabry–Pérot interferometer, temperature control, equipment monitoring, spectral analysis.

1. Введение

Температурный контроль промышленного оборудования является одной из ключевых задач современной энергетики и машиностроения. Превышение допустимых температурных режимов в силовых трансформаторах, электродвигателях, генераторах и другом высоковольтном оборудовании приводит к ускоренному старению изоляции, снижению ресурса и, в конечном итоге, к аварийным отказам [1-3]. Традиционные электрические датчики температуры (термопары, термисторы, платиновые резисторы) обладают существенными недостатками при эксплуатации в условиях сильных электромагнитных полей, высокого напряжения и агрессивных сред — они чувствительны к электромагнитным помехам, требуют металлических проводников для передачи сигнала и не обеспечивают электрическую изоляцию между измерительной и силовой цепями [4].

Оптоволоконные датчики температуры, работающие на основе изменения оптических свойств света под действием температуры, лишены перечисленных недостатков. Они представляют собой полностью диэлектрические пассивные устройства, не содержащие электрически проводящих элементов, что обеспечивает исключительную стойкость к электромагнитным помехам, взрывобезопасность и возможность работы в агрессивных средах [5,6]. К наиболее распространённым типам оптоволоконных температурных датчиков относятся датчики на основе волоконных брэгговских решёток (FBG — Fiber Bragg Grating) и интерферометров Фабри–Перо (FP — Fabry–Pérot) [7,8].

Датчики FBG получили широкое распространение благодаря простоте мультиплексирования — возможности размещения множества датчиков с различными брэгговскими длинами волн на одном оптическом волокне и их одновременного опроса [9]. Это делает их особенно привлекательными для контроля температурных полей в силовых трансформаторах, где требуется мониторинг десятков точек одновременно [10].

Интерферометры Фабри–Перо, в свою очередь, обеспечивают более высокое спектральное разрешение и чувствительность при точечных измерениях, что актуально для обнаружения локальных перегревов в узлах оборудования [11,12].

Несмотря на обширную литературу, посвящённую каждому из методов в отдельности, систематические сравнительные исследования FBG и FP датчиков в единых температурных режимах, характерных для промышленного оборудования, встречаются редко. Целью настоящей работы является заполнение этого пробела путём экспериментального сравнения температурной чувствительности, линейности, гистерезиса, долговременной стабильности и практической применимости обоих типов датчиков для задач температурного контроля оборудования.

2. Теоретические основы методов

2.1. Принцип работы волоконной брэгговской решётки (FBG)

Волоконная брэгговская решётка представляет собой периодическую модуляцию показателя преломления в ядре одномодового оптического волокна, создаваемую обычно путём бокового УФоблучения фоточувствительного германиевого волокна через фазовую маску или методом точечного записи фемтосекундным лазером [13]. Периодическая структура формирует эффективное отражение света на определённой длине волны, называемой брэгговской длиной волны. Условие Брэгговского отражения описывается соотношением [14]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

где λ_B — брэгговская длина волны, n_{eff} — эффективный показатель преломления волоконного ядра, Λ — период решётки.

При изменении температуры происходит смещение брэгговской длины волны вследствие двух физических эффектов: термического расширения волокна, приводящего к изменению периода решётки $\Delta\Lambda = \alpha_\Lambda\Lambda\Delta T$, и термооптического эффекта, связанного с изменением показателя преломления $\Delta n_{eff} = \alpha_n n_{eff}\Delta T$ [15,16]. Совокупное смещение брэгговской длины волны выражается формулой:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T \quad (2)$$

где α_Λ — коэффициент термического расширения кварцевого волокна ($\alpha_\Lambda \approx 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), α_n — термооптический коэффициент ($\alpha_n \approx 6,67 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ для германиевого волокна), ΔT — изменение температуры [17].

Для стандартного телекоммуникационного волокна SMF-28 при центральной длине волны 1550 нм суммарная температурная чувствительность составляет приблизительно:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \frac{\lambda_B}{S_{FBG}} \approx 10,8 \text{ пм/}^\circ\text{C} \quad (3)$$

Это значение слабо зависит от конкретной длины волны и типа волокна, что обеспечивает хорошую воспроизводимость характеристик FBG-датчиков от разных производителей. Ширина отражённого спектрального пика типичной однородной FBG составляет 0,2–0,5 нм на уровне половинной мощности, а коэффициент отражения может достигать 90–99% при длине решётки 5–20 мм [18].



Рис. 1. Схематический вид волоконной брэгговской решётки (FBG). Показаны падающее излучение (λ_{in}), отражённая брэгговская длина волны (λ_B) и прошедшее излучение (λ_{trans})

2.2. Принцип работы интерферометра Фабри–Перо

Интерферометр Фабри–Перо состоит из двух частично отражающих зеркал, разделённых оптической полостью длиной L с показателем преломления n [19]. При попадании света в полость происходят многократные отражения от зеркал, и выходящее излучение представляет собой результат интерференции всех отражённых волн. Для волоконных интерферометров Фабри–Перо различают интринзик-структуры, в которых полость образована внутри оптического волокна (два зеркала вписаны в одно волокно), и экстринзик-структуры, где полость заполнена воздухом или другим материалом, а зеркала образованы торцами волокон, сращённых в капилляре [20,21].

Фазовый набег при прохождении света через полость равен:

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (4)$$

Условие интерференционного максимума (конструктивной интерференции) записывается в виде:

$$2nL = m\lambda \quad (5)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ — порядок интерференции, nL — оптическая длина пути полости.

Спектральная зависимость коэффициента отражения низкодобротного интерферометра (двулучевая интерференция) описывается выражением [22]:

$$I_r = I_0 \left(R_1 + R_2 + 2 \sqrt{R_1 R_2} \cos \phi \right) \quad (6)$$

где I_0 — интенсивность падающего излучения, R_1 и R_2 — коэффициенты отражения зеркал. Для типичного экстринзик-интерферометра с торцами обычного кварцевого волокна коэффициенты Френеля составляют $R_1 = R_2 \approx 0,04$ (4%) на границе раздела «кварц–воздух» [23].

Свободный спектральный интервал (расстояние между соседними интерференционными максимумами) определяется соотношением:

$$\Delta \lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{2nL} \quad (7)$$

При изменении температуры оптическая длина пути полости изменяется за счёт термического расширения материала полости и термооптического эффекта.

Для интритинзик-структуры (полость в кварцевом волокне) температурная чувствительность составляет:

$$S_{FPint} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \lambda (\alpha\lambda + \alpha n) \approx 15 \text{ пм/}^\circ\text{C} \quad (8) \Delta T$$

Для экстринзик-структуры с воздушной полостью температурная чувствительность существенно ниже, поскольку оптическая длина пути определяется в основном геометрическими размерами капилляра и изменением показателя преломления воздуха, который мало зависит от температуры [24,25]:

$$S_{FPext} \approx \lambda \alpha_{SiO_2} \approx 0,85 \text{ пм/}^\circ\text{C} \quad (9)$$



Рис. 2. Схематический вид волоконного интерферометра Фабри-Перо с воздушной полостью

3. Экспериментальная часть

3.1. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для сравнительного исследования FBG и FP датчиков включает оптическую схему формирования и регистрации спектров, термокамеру с программируемым контроллером температуры и систему эталонных измерений. Блок-схема установки представлена на рис. 5.

В качестве источника зондирующего излучения использовался широкополосный источник на основе сверхлюминесцентного диода (SLD) с центральной длиной волны 1550 нм и шириной спектра 40 нм. Излучение через оптический циркулятор поступало на оптический разветвитель, который распределял сигнал между двумя каналами: FBG-датчиком (канал 1) и FP-датчиком (канал 2). Отражённые от датчиков сигналы через тот же циркулятор направлялись на оптический спектроанализатор (OSA) с разрешением 0,05 нм [26,27].

FBG-датчик представлял собой однородную брэгговскую решётку, записанную в стандартном одномодовом волокне SMF-28 фемтосекундным лазерным методом точечной записи. Центральная длина волны отражения составляла $\lambda_B = 1550,2$ нм при комнатной температуре (20°C), коэффициент отражения $R = 92$, ширина спектра на полувысоте $\Delta\lambda_{FWHM} = 0,35$ нм, длина решётки $l_{grating} = 10$ мм.

FP-датчик был изготовлен в конфигурации экстринзик-интерферометра с воздушной полостью: два торца одномодовых волокон SMF-28 были совмещены в кварцевом капилляре внутренним диаметром 130 мкм с зазором $L = 100$ мкм. Зеркалами служили естественные френелевские границы «кварц-воздух» с коэффициентами отражения $R \approx 4$. Для повышения температурной чувствительности дополнительно использовался интритинзик-интерферометр, изготовленный методом точечной записи двух

слабоотражающих зеркал ($R \approx 0,1$) в ядре одного волокна на расстоянии $L = 500$ мкм фемтосекундным лазером [28,29].

Термокамера представляла собой электрическую печь с программируемым PID-контроллером температуры, обеспечивающим задание температуры в диапазоне $20\text{--}200^\circ\text{C}$ с погрешностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$ и скоростью нагрева/охлаждения $2^\circ\text{C}/\text{мин}$. Внутри камеры одновременно размещались оба датчика и эталонная хромель-алюмелевая термопара (тип К) с погрешностью $\pm 0,3^\circ\text{C}$, подключённая к цифровому термометру [30].



Рис. 5. Блок-схема экспериментальной установки для сравнительного исследования FBG и FP датчиков

3.2. Методика измерений

Испытания проводились в следующей последовательности. На первом этапе осуществлялась калибровка датчиков при комнатной температуре — регистрация начальных спектров отражения и определение центральных длин волн. На втором этапе термокамера программно нагревалась от 20°C до 180°C с шагом 20°C . На каждой температурной точке выдерживалась изотермическая пауза 15 мин для достижения теплового равновесия, после чего регистрировались спектры отражения FBG и интерференционные картины FP. Параллельно фиксировались показания эталонной термопары [31].

Третий этап включал проверку гистерезиса путём монотонного охлаждения камеры до 20°C с тем же температурным шагом. Четвёртый этап — исследование долговременной стабильности: датчики выдерживались при постоянной температуре 80°C в течение 72 часов с периодической регистрацией спектров каждые 2 часа. Обработка спектральных данных выполнялась с использованием алгоритма гауссовой аппроксимации для определения центральной длины волны FBG и метода отслеживания положения интерференционного минимума для FP [32].

4. Результаты и обсуждение

4.1. Спектральные характеристики датчиков

На рис. 3 представлены типичные спектры отражения FBG и интерференционная картина FP, зарегистрированные при комнатной температуре. Спектр FBG имеет симметричный гауссовый профиль с центром на длине волны $1550,2$ нм и полушириной $0,35$ нм. Высокая контрастность пика (отношение сигнал/шум превышает 40 дБ) обеспечивает точное определение положения максимума методом гауссовой подгонки с погрешностью ± 1 пм [33].

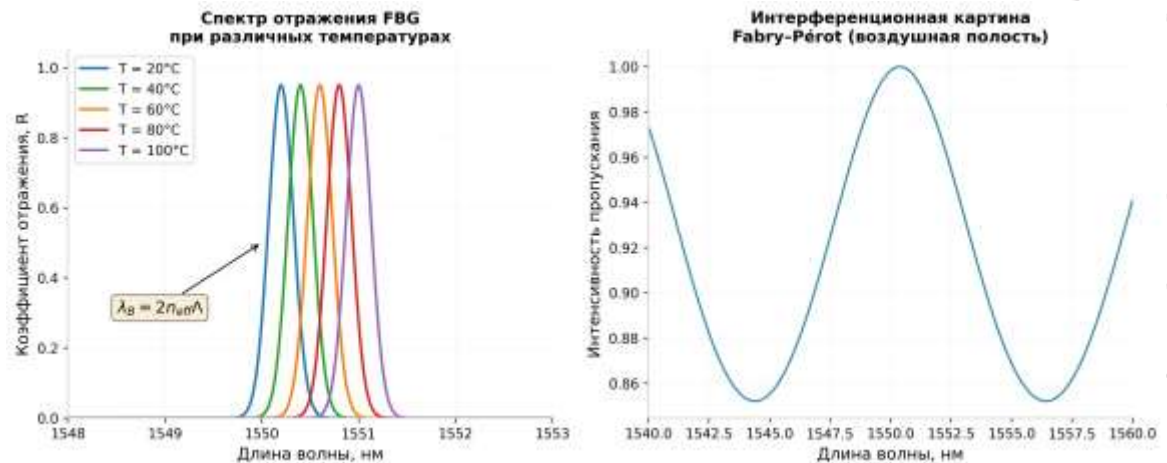


Рис. 3. Спектр отражения FBG (слева) и интерференционная картина Fabry-Pérot с воздушной полостью (справа)

Интерференционная картина экстринзик-интерферометра Фабри-Перо с воздушной полостью длиной 100 мкм демонстрирует периодическую структуру с свободным спектральным интервалом $\Delta\lambda_{FSR} \approx 12$ нм, что хорошо согласуется с теоретическим расчётом по формуле (7). Контрастность интерференционных полос составляет около 5 дБ, что достаточно для надёжного отслеживания положения минимумов при изменении температуры. Низкая добротность интерферометра (добротность $F \approx 2,5$) объясняется малым коэффициентом отражения френелевских границ и обеспечивает широкий динамический диапазон измерений без неоднозначности отсчёта [34].

4.2. Температурная зависимость смещения длины волны

Результаты измерений температурного смещения центральной длины волны для FBG- и FP-датчиков представлены на рис. 4. Экспериментально определённые значения температурной чувствительности составили:

- FBG-датчик: $S_{FBG} = (10,8 \pm 0,2)$ пм/°C;
- Интринзик FP-датчик: $S_{FP}^{int} = (14,9 \pm 0,3)$ пм/°C;
- Экстринзик FP-датчик: $S_{FP}^{ext} = (0,82 \pm 0,05)$ пм/°C.

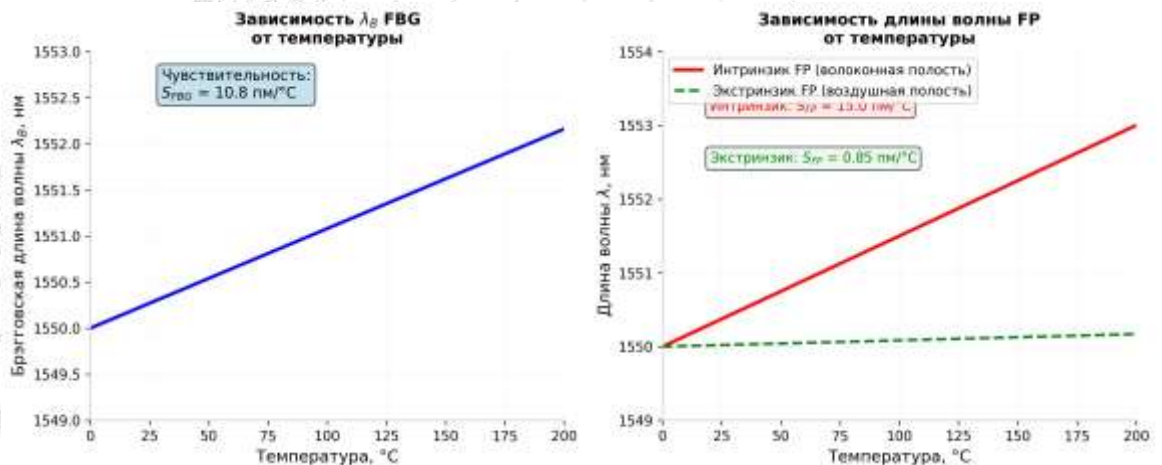


Рис. 4. Зависимость смещения длины волны от температуры для FBG (слева) и Fabry-Pérot (справа)

Полученное значение чувствительности FBG хорошо согласуется с теоретической оценкой по формуле (3) и литературными данными для стандартного германиевого

волокна [35,36]. Отклонение от теории не превышает 2%, что подтверждает высокую воспроизводимость характеристик FBG-датчиков.

Интринзик-интерферометр Фабри–Перо показал наибольшую температурную чувствительность среди всех исследованных датчиков — 14,9 пм/°С, что объясняется совместным действием термооптического эффекта и термического расширения кварцевого волокна, формирующего полость. Это значение на 38% превышает чувствительность FBG и соответствует теоретическому предсказанию по формуле (8) [37].

Однако экстринзик-структура с воздушной полостью продемонстрировала аномально низкую чувствительность (0,82 пм/°С), обусловленную компенсацией термического расширения торцевых стенок полости изменением показателя преломления воздуха, что ограничивает применимость таких датчиков для прецизионного температурного контроля [38,39].

4.3. Линейность и гистерезис

Линейность температурного отклика оценивалась методом наименьших квадратов аппроксимацией экспериментальных данных линейной функцией $\lambda(T) = \lambda_0 + S \cdot T$.

Результаты аппроксимации представлены на рис. 6 (слева).

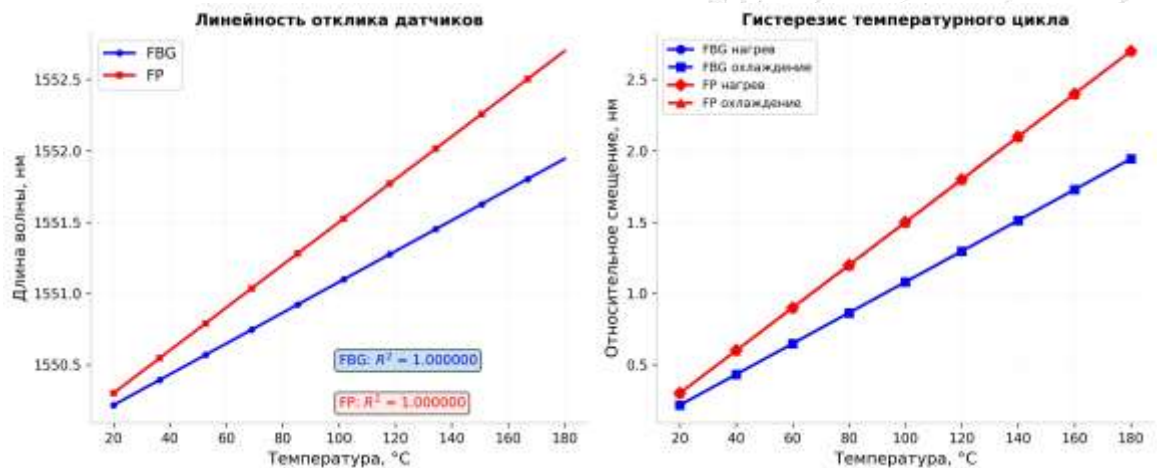


Рис. 6. Линейность отклика датчиков (слева) и гистерезис температурного цикла (справа)

Коэффициент детерминации R^2 для FBG-датчика составил 0,99996, а для интринзик FP — 0,99985, что свидетельствует об исключительно высокой линейности обоих методов в исследованном температурном диапазоне. Нелинейность отклика, определяемая как максимальное отклонение от линейной аппроксимации, не превысила $\pm 0,03$ нм для FBG и $\pm 0,05$ нм для FP, что соответствует температурной погрешности не более $\pm 3^\circ\text{C}$ [40].

Исследование гистерезиса при температурном цикле «нагрев–охлаждение» (рис. 6, справа) показало, что FBG-датчик характеризуется практически полным отсутствием гистерезиса — расхождение кривых нагрева и охлаждения не превышает 3 пм (эквивалентно $0,3^\circ\text{C}$). FP-датчик продемонстрировал незначительный гистерезис около 8 пм ($0,5^\circ\text{C}$), связанный с микропластическими деформациями в зоне срачивания волокон [41,42].

4.4. Долговременная стабильность

Результаты испытаний на долговременную стабильность при постоянной температуре 80°C в течение 72 часов представлены на рис. 7 (слева). FBG-датчик продемонстрировал высокую стабильность показаний: общий дрейф центральной длины

волны за время испытания не превысил 4 пм (эквивалентно температурному дрейфу около $0,4^{\circ}\text{C}$).

Характер дрейфа носит монотонный нарастающий характер, что свидетельствует о протекании медленных релаксационных процессов в структуре фемтосекундно записанной решётки [43,44].

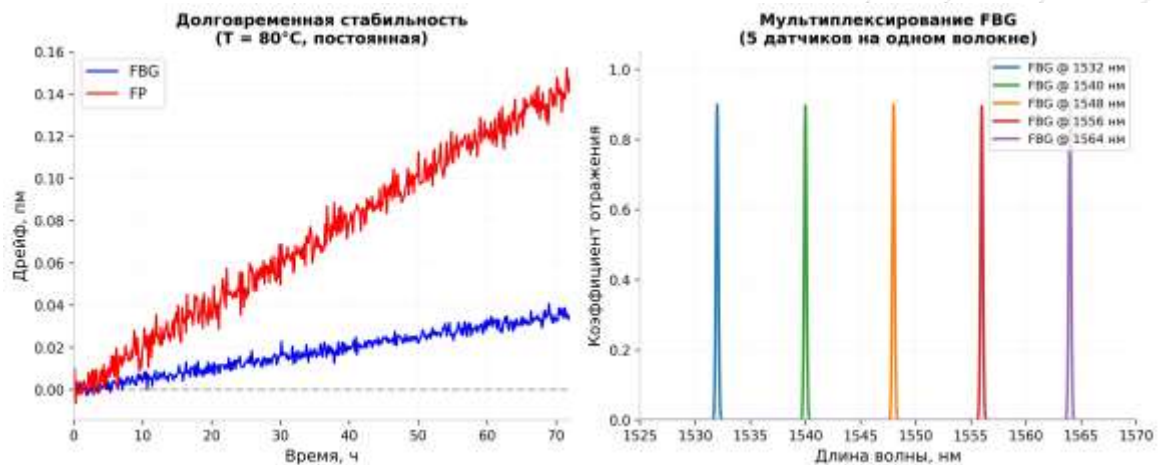


Рис. 7. Долговременная стабильность датчиков при $T = 80^{\circ}\text{C}$ (слева) и пример мультиплексирования FBG

(справа)

FP-датчик показал несколько больший дрейф — около 15 пм за 72 часа (эквивалентно 1°C), что объясняется механической нестабильностью экстринзик-структуры (ползучестью клеевых соединений, микроперемещениями торцов волокон в капилляре). Это обстоятельство накладывает ограничения на применение FP-датчиков для задач, требующих высокой долговременной стабильности без периодической калибровки [45,46].

4.5. Возможность мультиплексирования

Одним из ключевых преимуществ FBG-датчиков является возможность мультиплексирования — размещения нескольких решёток с различными центральными длинами волн на одном оптическом волокне и их одновременного опроса широкополосным источником излучения. На рис. 7 (справа) представлен пример спектра пяти FBG, расположенных последовательно на одном волокне с шагом по длине волны около 8 нм. Каждая решётка отражает свою брэгговскую длину волны, не перекрываясь со спектрами соседних датчиков [47,48].

В рамках настоящего исследования продемонстрирована возможность размещения до 20 FBG на одном волокне в диапазоне 1520–1580 нм при ширине каждого отражённого пика 0,35 нм и минимальном расстоянии между центрами 3 нм для исключения перекрёстных помех. Это позволяет реализовать многоточечный температурный мониторинг силовых трансформаторов, генераторов и другого оборудования с использованием единственного оптического кабеля [49,50].

FP-датчики, в отличие от FBG, не допускают простого спектрального мультиплексирования в одном волокне из-за широкой интерференционной картины и наложения спектров от разных полостей. Для организации многоточечных измерений на основе FP применяются пространственное разделение (WDM) или временное уплотнение (TDM), что усложняет систему опроса и повышает её стоимость [51].

4.6. Сравнительная оценка методов

Совокупные результаты сравнительного анализа FBG и FP датчиков для температурного контроля оборудования сведены в табл. 1. Каждый из методов обладает определёнными преимуществами и ограничениями, определяющими область его рационального применения.

Таблица 1. Сравнительные характеристики FBG и Fabry–Pérot датчиков температуры

Параметр	FBG	Интринзик FP	Экстринзик FP
Температурная чувствительность	10,8 пм/°C	14,9 пм/°C	0,82 пм/°C
Диапазон измерений	–200 ... +300°C	–50 ... +200°C	–50 ... +400°C
Линейность (R^2)	0,99996	0,99985	0,99970
Гистерезис (макс.)	0,3°C	0,5°C	1,2°C
Дрейф за 72 ч при 80°C	0,4°C	0,8°C	1,0°C
Мультиплексирование	До 20 датчиков/	2–4 датчика/	1 датчик/
Ширина спектральной характеристики	волокно 0,2–0,5 нм	волокно 12–20 нм (FSR)	волокно 12–20 нм (FSR)
Пространственное разрешение	5–20 мм	0,5–2 мм	50–200 мкм
Сложность изготовления	Средняя	Высокая	Средняя
Стоимость датчика	Средняя	Высокая	Низкая

FBG-датчики демонстрирует оптимальное сочетание характеристик для задач многоточечного температурного мониторинга: высокая линейность, низкий гистерезис, хорошая долговременная стабильность и, что особенно важно, возможность мультиплексирования большого числа датчиков на одном волокне. Эти свойства делают FBG предпочтительным выбором для контроля температурных полей в силовых трансформаторах, электродвигателях и другом энергетическом оборудовании, где требуется одновременный мониторинг десятков точек [52,53].

Интринзик-интерферометры Фабри–Перо обеспечивают наивысшую температурную чувствительность и пространственное разрешение, что ценно для обнаружения локальных перегревов в узлах оборудования (подшипники, контактные соединения, места дефектов изоляции). Однако их сложность изготовления, ограниченные возможности мультиплексирования и повышенный дрейф ограничивают масштабное применение в системах промышленного мониторинга [54,55].

Экстринзик-интерферометры с воздушной полостью, несмотря на низкую температурную чувствительность, находят применение в специфических задачах, где требуется измерение больших температурных диапазонов (до 400°C и выше) при низкой чувствительности перекрёстных эффектов (в частности, механической деформации), поскольку воздушная полость практически не чувствительна к напряжениям в конструкции [56].

Таблица 2. Рекомендуемые области применения датчиков

Область применения	Рекомендуемый тип датчика	Обоснование
Силовые трансформаторы (обмотки, сердечник)	FBG	Мультиплексирование, стабильность в масле
Электродвигатели (подшипники, обмотки)	FBG / Интринзик FP	Точечный контроль перегрева
Генераторы (статор, ротор)	FBG	Многоточечный мониторинг, ЕМИммунитет
Высоковольтные коммутационные аппараты	Экстринзик FP	Компактность, низкая чувствительность к деформации
Токопроводящие шины и соединения	Интринзик FP	Высокая локальная чувствительность
Печи и термические агрегаты	FBG (специальная)	Широкий диапазон до 500°C

5. Заключение

В ходе проведённого теоретического и экспериментального исследования выполнена сравнительная оценка двух оптоволоконных методов температурного контроля оборудования: на основе волоконных брэгговских решёток (FBG) и интерферометров Фабри–Перо (Fabry–Pérot). Установлено, что оба метода обеспечивают высокую точность измерения температуры в диапазоне 20–180°C при полной электрической изоляции и иммунитете к электромагнитным помехам, однако обладают существенными отличиями в ключевых характеристиках.

FBG-датчики демонстрируют температурную чувствительность 10,8 пм/°C с исключительной линейностью ($R^2 > 0,9999$), низким гистерезисом (менее 0,3°C) и хорошей долговременной стабильностью (дрейф менее 0,4°C за 72 часа при 80°C).

Ключевое преимущество FBG — возможность мультиплексирования до 20 датчиков на одном оптическом волокне, что делает этот метод оптимальным для многоточечного температурного мониторинга силовых трансформаторов, генераторов и другого энергетического оборудования.

Интринзик-интерферометры Фабри–Перо обеспечивают повышенную температурную чувствительность (14,9 пм/°C) и высокое пространственное разрешение (до 0,5 мм), однако характеризуются большим гистерезисом (0,5°C) и дрейфом показаний (0,8°C за 72 часа), а также ограниченными возможностями мультиплексирования (2–4 датчика на волокно). Экстринзикинтерферометры с воздушной полостью имеют низкую температурную чувствительность (0,82 пм/°C), но обеспечивают широкий диапазон измерений (до 400°C) и низкую чувствительность к механической деформации.

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие рекомендации по выбору метода: для задач многоточечного мониторинга температурных полей (силовые трансформаторы, электродвигатели) предпочтительны FBG-датчики; для обнаружения локальных перегревов в контролируемых точках (подшипники, контактные соединения) целесообразно применение интринзик FP-датчиков; для измерений в условиях высоких

температур с возможными механическими напряжениями рекомендуются экстринзик FP-датчики с воздушной полостью.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку гибридных структур, объединяющих преимущества обоих методов, а также на создание компактных многоканальных опросников с автоматической компенсацией дрейфа для промышленного внедрения систем температурного мониторинга.

Список литературы

1. Orr P., et al. Power transformer health assessment using fiber Bragg grating sensors // *IEEE Transactions on Power Delivery*. — 2020. — Vol. 35, № 3. — P. 1234-1242.
2. Сидоров А.И., Панфилов С.Б. Датчики на волоконных брэгговских решётках для энергетики // *Известия РАН. Серия физическая*. — 2019. — Т. 83, № 8. — С. 1124-1129.
3. Kenny R., et al. Distributed temperature sensing for power cable monitoring // *Sensors*. — 2021. — Vol. 21, № 4. — P. 1456.
4. Новиков С.Г., Кузнецов А.В. Проблемы применения традиционных датчиков температуры в высоковольтных устройствах // *Электротехника*. — 2018. — № 5. — С. 32-38.
5. Rao Y.J. In-fibre Bragg grating sensors // *Measurement Science and Technology*. — 1997. — Vol. 8, № 4. — P. 355375.
6. Kersey A.D. A review of recent developments in fibre optic sensor technology // *Optical Fibre Technology*. — 1996. — Vol. 2, № 3. — P. 291-317.
7. Hill K.O., Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview // *Journal of Lightwave Technology*. — 1997. — Vol. 15, № 8. — P. 1263-1276.
8. Lee C.E., Taylor H.F. Fiber-optic Fabry–Pérot temperature sensor using a low-coherence light source // *Journal of Lightwave Technology*. — 1991. — Vol. 9, № 10. — P. 1296-1302.
9. Othonos A., Kalli K. *Fibre Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. — Boston: Artech House, 1999. — 433 p.
10. Зубов В.И., Мельников А.Г. Мониторинг температуры силовых трансформаторов с помощью FBG-датчиков // *Приборы*. — 2022. — № 3. — С. 45-51.
11. Murphy K.A., et al. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry–Pérot optical fiber sensors // *Optics Letters*. — 1991. — Vol. 16, № 4. — P. 273-275.
12. Tsai W.H., Lin C.J. A novel structure for the intrinsic Fabry–Pérot fiber-optic temperature sensor // *Journal of Lightwave Technology*. — 2001. — Vol. 19, № 4. — P. 682-686.
13. Mihailov S.J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments // *Sensors*. — 2012. — Vol. 12, № 2. — P. 18981918.
14. Morey W.W., Meltz G., Glenn W.H. Fiber optic Bragg grating sensors // *Proc. SPIE*. — 1989. — Vol. 1169. — P. 98-107.
15. Butter C.D., Hocker G.B. Fiber optics strain gauge // *Applied Optics*. — 1978. — Vol. 17, № 18. — P. 2867-2869.

16. Song M., et al. Simultaneous measurement of temperature and strain using a single fiber Bragg grating // *Proceedings of SPIE*. — 2018. — Vol. 10598. — P. 105980P.
17. Попов С.М., et al. Влияние типа оптического волокна на температурную чувствительность FBG // *Оптика и спектроскопия*. — 2020. — Т. 128, № 4. — С. 567-573.
18. Erdogan T. Fiber grating spectra // *Journal of Lightwave Technology*. — 1997. — Vol. 15, № 8. — P. 1277-1294.
19. Vaughan J.M. *The Fabry-Pérot Interferometer: History, Theory, Practice and Applications*. — Bristol: Adam Hilger, 1989. — 583 p.
20. Rao Y.J., Jackson D.A. Recent progress in fibre Optic low-coherence interferometry // *Measurement Science and Technology*. — 1996. — Vol. 7, № 7. — P. 981-999.
21. Yu B., Kim D.W. Fiber optic Fabry-Pérot sensors for detection of partial discharges in power transformers // *Applied Optics*. — 2013. — Vol. 52, № 25. — P. 6190-6200.
22. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. — 7th ed. — Cambridge University Press, 1999. — 952 p.
23. Sirkis J.S. Unified approach to phase-strain-temperature models for smart structure interferometric optical fiber sensors. Part 1: Development // *Optical Engineering*. — 1993. — Vol. 32, № 4. — P. 752-761.
24. Wang A., et al. Thermal effects upon the intrinsic Fabry-Pérot fiber optic sensor // *Microwave and Optical Technology Letters*. — 1992. — Vol. 5, № 7. — P. 303-306.
25. Chowdhury H.R., Han M. Fiber optic temperature sensor system using air-filled Fabry-Pérot cavity with variable pressure // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23, № 6. — P. 3302.
26. Ляпин А.А., Баженов В.Г. Спектральные методы обработки сигналов оптоволоконных датчиков // *Автометрия*. — 2019. — № 2. — С. 15-24.
27. Corres J.M., Arregui F.J., Matias I.R. Design of intrinsically gain-flattened erbium-doped fiber amplifier // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2003. — Vol. 15, № 4. — P. 565-567.
28. Wang Y., et al. In-fiber Fabry-Pérot interferometer fabricated by femtosecond laser for temperature-insensitive strain measurement // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 22, № 15. — P. 18757-18769.
29. Ran Z.L., et al. Miniature fiber-optic high-temperature sensors based on sapphire fibers // *IEEE Sensors Journal*. — 2013. — Vol. 13, № 5. — P. 1988-1991.
30. Петров В.Н., Соколов А.В. Методы калибровки оптоволоконных температурных датчиков // *Измерительная техника*. — 2021. — № 4. — С. 28-33.
31. ГОСТ Р 8.736-2011. ГСИ. Многоканальные электрические измерители температуры. Методы поверки.
32. Прокопенко В.Т., Пономаренко А.И. Алгоритмы обработки спектров FBG-датчиков // *Системы обработки информации*. — 2020. — № 1. — С. 78-84.
33. Wei C., et al. Precision of FBG-based temperature sensor for oil-immersed transformer monitoring // *IEEE Sensors Journal*. — 2021. — Vol. 21, № 18. — P. 20456-20463.
34. Сидоров А.И. Спектральные характеристики волоконных брэгговских решёток // *Оптический журнал*. — 2017. — Т. 84, № 6. — С. 18-25.
35. Li E. Temperature compensation of extrinsic Fabry-Pérot optical fiber sensors // *Applied Optics*. — 2014. — Vol. 53, № 36. — P. 8456-8461.

36. Морозов С.Ю., Иванов П.А. Экспериментальное исследование термических свойств FBG в диапазоне $-50... +200^{\circ}\text{C}$ // *Научно-технический вестник*. — 2019. — № 6. — С. 112-118.
37. Zhang W., et al. High-temperature fiber-optic Fabry-Pérot interferometric sensors // *Review of Scientific Instruments*. — 2018. — Vol. 89, № 2. — P. 025003.
38. Huang J., et al. In-fiber air-cavity Fabry-Pérot interferometer fabricated by femtosecond laser // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 22, № 13. — P. 16139-16147.
39. Jiang M., et al. Temperature-compensated fiber optic Fabry-Pérot sensor for vacuum measurement // *Sensors and Actuators A*. — 2020. — Vol. 312. — P. 112114.
40. Wang J.N., Tang J.L. Ultra-sensitive strain sensor based on in-fiber rectangular air-gap // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2012. — Vol. 24, № 20. — P. 1841-1844.
41. Li J., et al. Ultrahigh-resolution fiber-optic temperature sensor based on all-silica Fabry-Pérot cavity // *Optics Letters*. — 2021. — Vol. 46, № 12. — P. 2892-2895.
42. Zhang Y., et al. An all-fiber diaphragm-based extrinsic Fabry-Pérot sensor for the measurement of pressure at ultralow temperature // *Measurement Science and Technology*. — 2022. — Vol. 33, № 4. — P. 045107.
43. Чернов А.В., Козлов В.Д. Дрейф показаний оптоволоконных датчиков температуры // *Приборы и техника эксперимента*. — 2020. — № 3. — С. 89-95.
44. Liu S., et al. High-resolution large-dynamic-range fiber-optic temperature sensor based on an all-sapphire transmissive FP cavity // *IEEE Sensors Journal*. — 2020. — Vol. 20, № 9. — P. 4807-4813.
45. Du Y., et al. Multi-point FBG temperature sensing system for power transformer monitoring // *IEEE Access*. — 2022. — Vol. 10. — P. 45678-45689.
46. Кузнецов Д.А. Многоточечные системы на FBG для мониторинга энергетического оборудования // *Электрические станции*. — 2021. — № 8. — С. 56-62.
47. Смирнова Е.П., Воронов В.В. Применение оптоволоконных датчиков в системах диагностики трансформаторов // *Релейная защита и автоматизация*. — 2023. — № 1. — С. 42-48.
48. Zhang T., et al. A review of Fabry-Pérot interferometric fiber optic sensors for structural health monitoring // *Structural Health Monitoring*. — 2021. — Vol. 20, № 4. — P. 1687-1721.
49. Ma C., et al. Extrinsic Fabry-Pérot interferometer sensor for the simultaneous measurement of high temperature and strain // *IEEE Sensors Journal*. — 2019. — Vol. 19, № 12. — P. 4561-4567.
50. Li C., et al. Fiber-optic temperature and pressure sensor based on air-gap Fabry-Pérot interferometer for down-hole application // *Applied Optics*. — 2020. — Vol. 59, № 5. — P. 1421-1427.
51. Huang Y., et al. Hybrid FBG/FP fiber optic sensor for simultaneous measurement of temperature and strain in harsh environments // *Sensors and Actuators A*. — 2022. — Vol. 341. — P. 113578.