

Р. Л. НОВИКОВ, Д. А. ЕГОРОВ, С. Т. НЕФОРΟΣНЫЙ

## **ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ЗАКРЕПЛЕНИЯ БЕСКАРКАСНОЙ КАТУШКИ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА**

*Паразитные эффекты, возникающие в катушке волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), существенно ограничивают его точность. В частности, упруго-оптический эффект – одна из основных причин температурного смещения нуля ВОГ. Появление этого эффекта обусловлено различием термомеханических параметров входящих в катушку компонентов: оптического волокна с защитным полимерным покрытием, пропиточного компаунда и каркаса. Один из возможных путей снижения его влияния – создание бескаркасной катушки, которая в условиях меняющейся температуры меньше деформируется, чем катушка с каркасом. В статье обсуждается проблема закрепления катушки такого типа. Рассмотрены основные способы закрепления, их положительные и отрицательные стороны. Приводятся результаты испытаний ВОГ с бескаркасной катушкой, закрепленной между двумя металлическими дисками и буферными прокладками. При этом варьируются расстояние между дисками и материал прокладок. Результаты сравниваются с аналогичными данными для катушки, одна из сторон которой приклеена к основанию.*

**Ключевые слова:** волоконно-оптический гироскоп, бескаркасный волоконный контур, бескаркасная катушка, способ закрепления, температурная зависимость смещения нуля.

### **Введение**

Волоконный контур является одним из важнейших элементов волоконно-оптического гироскопа (ВОГ). Он преобразует скорость вращения основания ВОГ в оптическую мощность интерференционного сигнала, поступающего на фотодиод, и представляет собой оптическое волокно, которое, как правило, наматывается на жесткий каркас. Чтобы предотвратить долговременную деформацию укладки волокна, т.е. смещение отдельных витков, применяют специальный пропиточный компаунд.

Для реализации эффекта Саньяка, лежащего в основе работы ВОГ, световые волны по волоконному контуру распространяются во встречных направлениях [1]. Исходя из этого, участки волокна, которые световые волны проходят одновременно, пространственно могут находиться сравнительно далеко друг от друга. При динамике изменения внешних физических полей это приведет к тому, что условия рас-

---

**Новиков** Роман Леонидович. Кандидат технических наук, научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

**Егоров** Дмитрий Александрович. Ведущий инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

**Нефоросный** Сергей Тимурович. Инженер первой категории, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

пространения света по контуру будут различаться, поскольку длина и показатель преломления волокна зависят от внешних факторов, прежде всего температуры и механических воздействий [2].

Первый из этих факторов приводит к термооптическому эффекту, когда вдоль волокна возникает зависящий от времени градиент температуры. Как отмечено в [1], это происходит вследствие изменения скорости нагрева или охлаждения волокна (т.е. отклонения от нуля второй производной температуры по времени). Первым форму и амплитуду искаженного выходного сигнала ВОГ описал М. Шупе в работе [3], где также показал, что измерение угловой скорости с погрешностью не более  $0,01^\circ/\text{ч}$  потребует стабилизации температуры ВОГ на уровне порядка  $0,01^\circ\text{C}$ .

Автор предложил два возможных пути решения проблемы. Во-первых, изготавливать волокно из материалов, нечувствительных к изменению температуры. Во-вторых, таким образом укладывать волокно, чтобы симметричные относительно середины его длины участки располагались близко друг к другу, а значит, находились в максимально схожих температурных условиях. Для этого волокно необходимо наматывать не с его конца (так называемая прямая схема намотки), а с середины во встречных направлениях. В дальнейшем были предложены и конкретные схемы (дипольная, квадрупольная, октупольная и др. [4–8]) и конструкции намоточного оборудования для их практической реализации [9–11]. По причине как относительной простоты, так и экономической целесообразности возобладали именно этот второй путь, а из перечисленных выше схем намотки наибольшее распространение получила квадрупольная в силу сочетания эффективности и сравнительно несложного технического воплощения [1]. Некоторые ее модификации [12–14] позволили еще сильнее снизить температурную чувствительность ВОГ, что сделало схему предпочтительной.

Поскольку корень проблемы лежит в неравномерности прогрева катушки, очевидно, что положительный эффект могут дать методы выравнивания теплового поля. Один из них – это активная термостабилизация, которая заключается в поддержании внутри катушки постоянной, как правило, повышенной температуры с помощью нагревательных элементов, теплоизоляции и металлических экранов [15–19], причем на уровне и катушки и прибора или системы в целом. К сожалению, такой подход не всегда применим, поскольку увеличивает энергопотребление и массогабаритные характеристики. Второй метод – использование заливочного компаунда и каркаса из материалов с высоким коэффициентом температуропроводности [19–22], а также укладка гибкого теплопроводящего материала между слоями катушки [23]. Этот подход широко применяется при изготовлении катушек.

Кроме того, для уменьшения температурной зависимости ВОГ предлагаются меры по повышению качества укладки оптического волокна [10], симметрированию (выравнивание левого и правого плеч катушки) [24–26] и оптимизации геометрии волоконного контура (например, определение оптимального соотношения числа слоев и количества витков в слое с целью обеспечить минимальную погрешность определения угловой скорости) [12, 27].

Другой фактор, под воздействием которого меняются условия распространения света по контуру, – это упругооптический (или, по-другому, эластооптический) эффект, т.е. зависимость длины и показателя преломления волокна от упругих напряжений, возникающих в нем под действием деформации. Одними из первых на него обратили внимание Ф. Мор и Ф. Штадт в статье [28], где показали, что разница

в скоростях изменения деформации на участках волокна, несимметричных относительно его середины, также приводит к погрешности выходного сигнала ВОГ. Это изменение может быть обусловлено воздействием различных внешних факторов – как чисто механических, например ударов и вибрации [29], так и климатических, таких как изменение атмосферного давления или температуры. Влияние последнего фактора на сегодняшний день наиболее полно исследовано: в разных работах смоделирована динамика напряженно-деформированного состояния катушки в условиях температурной нестабильности и тот эффект, который она оказывает на температурную зависимость выходного сигнала, в частности на смещение нуля [30–32]. Показана также техническая возможность измерения деформации оптического волокна с помощью брьюллиэновских рефлектометров и анализаторов [33, 34] и когерентных рэлеевских рефлектометров [35, 36], что на практике позволит оценивать температурную чувствительность контура до сборки ВОГ.

Природа этого эффекта во многом заключается в различии температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) входящих в волоконный контур элементов: непосредственно самого оптического волокна, заливочного компаунда и каркаса [37]. Последний критически важен, поскольку для обеспечения стабильности конструкции его, как правило, выполняют из твердых материалов с большим значением модуля упругости, а значит, его расширение вносит наибольший вклад в деформацию волокна. В связи с этим каркасы рекомендуют делать из материалов с низким ТКЛР, таких как кварцевое стекло, кварцевая керамика, ковар, углепластик (карбон), титан и т.д. [18, 38–40].

Что касается компаунда, то особую роль играют его термомеханические характеристики [41–43]. Как отмечается в [42], для снижения упругооптического эффекта необходимо подбирать материал с минимальным ТКЛР и максимальным значением модуля Юнга. Авторы [43] добавляют, что первый параметр необходимо учитывать преимущественно при работе в условиях положительных температур, а второй – отрицательных.

Существенны и особенности намотки катушки:

- схема намотки (здесь действуют те же принципы, что и в случае компенсации эффекта Шупе [1]);
- качество укладки (перехлесты витков друг через друга сопровождаются малым радиусом изгиба волокна) [10, 44];
- стабильность величины натяжения волокна [45];
- симметричность катушки (равенство оптических путей от каждого из концов до начала намотки) [35].

Тем не менее в литературе указывается, что первопричиной возникновения упругооптического эффекта является само оптическое волокно, уложенное в волоконный контур [1, 33, 34, 46]. Известно, что ТКЛР оптического волокна, изготовленного из кварцевого стекла, и его полимерного защитно-упрочняющего покрытия различаются на два порядка. В силу хорошей адгезии между этими материалами их неравномерное тепловое удлинение приводит к деформации волокна даже с учетом большой разницы в модуле Юнга. Кроме того, при нагреве внешний диаметр полимерного покрытия увеличивается, а в условиях плотноупакованного волоконного контура это приводит к тому, что витки «расталкиваются» друг друга, в результате линейный размер становится больше. В радиальном же направлении картина будет двоякая: внешний диаметр увеличивается, а внутренний, наоборот, уменьшается. В последнем случае

каркас, даже сделанный из нечувствительного к температуре материала, станет дополнительным фактором, приводящим к деформации. При этом чем меньше диаметр катушки, тем большее действие каркас оказывает на волокно, чья чувствительность к внешней деформации возрастает по мере уменьшения радиуса его изгиба.

Качественным решением этой проблемы стало создание бескаркасной оптоволоконной катушки. В работе [47] показано его преимущество на примере измерения деформации брюллиэновским анализатором: для каждой температуры деформация в пределах одного слоя распределяется более равномерно, чем у каркасного варианта. Авторы [48] обнаружили, что  $h$ -параметр бескаркасной катушки значительно меньше зависит от температуры, если она положительная. Это, в частности, указывает и на существенно меньшую деформацию оптического волокна, которая приводит к изменению двойного лучепреломления, как раз и характеризующегося  $h$ -параметром.

Следует отметить, что полный отказ от каркаса влечет за собой серьезное изменение технологий, во-первых, намотки оптического волокна, а во-вторых, установки его в корпус. И если в целом понятно, как решать первую задачу (с учетом имеющегося богатого опыта в области создания катушек индуктивности), то вторая, пусть и допускает использование подходящих решений из смежных направлений, требует очень тщательной их адаптации в силу особенностей оптического волокна и чувствительности его характеристик к внешним воздействиям.

Кроме описанных выше конструктивно-технологических методов, для повышения точности определения угловой скорости применяют алгоритмическую компенсацию аддитивной составляющей влияния температуры и скорости ее изменения на смещение нуля ВОГ. Одним из наиболее популярных методов является полиномиальная регрессия, для двух переменных имеющая следующий вид [49]:

$$P(T, \dot{T}, c_0, \dots, c_{m+n}) = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i \cdot T^i + \sum_{j=1}^m c_{n+j} \cdot T^j, \quad (1)$$

где  $T$  и  $\dot{T}$  – значение и скорость изменения средней температуры катушки,  $c_0 \dots c_{n+m}$  – коэффициенты температурной модели,  $n$  и  $m$  – степени полиномов.

Природа влияния обоих параметров – температуры и скорости ее изменения – на выходной сигнал в целом хорошо известна. Например, действие скорости изменения температуры непосредственно обусловлено упругооптическим эффектом, как теоретически показано в [1] и экспериментально доказано в [18, 37, 50, 51]. Поскольку теплофизические и механические характеристики материалов зависят от температуры [52], смещение нуля выходного сигнала ВОГ тоже обусловлено ее абсолютным значением [53, 54]. Особенно на это влияет температура стеклования покрытия волокна и компаунда [43, 55] и полимеризации последнего [37] (что проявляется в «эффекте теннисной ракетки», получившем название из-за характерной формы графика зависимости смещения нуля ВОГ от температуры).

На практике алгоритмическая компенсация крайне редко позволяет полностью устранить температурное смещение нуля ВОГ. В работе [56] это объясняется технологическими дефектами в процессе производства ВОГ, прежде всего катушки. Вносят свою лепту и ее конструктивные особенности и недостатки. Например, описанные меры борьбы с эффектом Шупе не устраняют его полностью. При этом для компенсации остаточного смещения нуля потребовалось бы измерять температуру вдоль всего оптического волокна, что технически крайне затруднительно.

В силу того что приборы и системы на базе ВОГ обычно проходят процедуру температурной калибровки [18], создание ВОГ, смещение нуля которого максимально и повторяемо коррелирует с температурой и скоростью ее изменения, – задача практически не менее важная, чем снижение температурной зависимости смещения нуля.

В настоящей работе исследуются влияние способа закрепления бескаркасной волоконной катушки на температурное смещение нуля ВОГ на неподвижном основании и эффективность его компенсации с помощью полиномиальной модели. Вначале рассматриваются возможные способы закрепления бескаркасной катушки в корпусе ВОГ, далее описывается методика проведения экспериментов, приводятся и анализируются полученные результаты и делаются выводы.

### **Способы закрепления бескаркасной катушки**

В литературе описываются три основных варианта закрепления бескаркасной катушки в корпусе ВОГ.

1. Установка катушки в полость внутри корпуса и последующая заливка полимерным компаундом [37, 54]. Важную роль здесь играют механические свойства полимера и толщина зазора между катушкой и стенками корпуса, который он заполняет. Их игнорирование может привести к упругим деформациям при изменении температуры, обусловленном влиянием заливки, и к дополнительной акустической чувствительности. В настоящей работе этот вариант исследоваться не будет.

2. Приклеивание катушки к основанию [57, 58]. Преимущество способа заключается в его сравнительной простоте, однако при этом волоконный контур становится особо чувствительным к вибрациям и ударам и в силу этого крайне требовательным к жесткости пропиточного компаунда. Кроме того, при изменении температуры односторонне закрепленная катушка будет деформироваться несимметрично вдоль своей оси, что усилит упругооптическую деформацию [59].

3. Фиксация катушки между двумя крепежными деталями, соединенными между собой [57, 60]. Для уменьшения температурной деформации также используются буферные прокладки. Как показано в работе [59], материал для них следует выбирать более упругий, например резину. Стоит отметить, что, к сожалению, в литературе практически не рассматривается технология затяжки катушки в рамках этого метода. Важность этого вопроса связана с тем, что бескаркасную катушку после намотки и полимеризации компаунда необходимо устанавливать в корпус и фиксировать таким образом, чтобы приложенное усилие не нарушило баланс между ее механической деформацией, с одной стороны, и жесткостью и устойчивостью конструкции – с другой.

### **Описание эксперимента**

В эксперименте был задействован образец бескаркасной катушки, характеристики которого приведены в табл. 1. Температурная зависимость исследовалась в термокамере, установленной на испытательном стенде. В состав стенда вошел макет ВОГ, содержащий многофункциональную интегрально-оптическую схему (МИОС), направленный ответвитель, волоконный поляризатор, эрбиевый суперлюминесцентный источник излучения, фотодиод, а также плату обработки и компьютер со специальным ПО. Температура измерялась с помощью платиновых термоматчиков,

приклеенных к внешней поверхности катушки. Обработка выходного сигнала ВОГ осуществлялась по замкнутой схеме.

Т а б л и ц а 1

### Параметры волоконной катушки

Параметр	Значение
Тип катушки	Бескаркасная
Длина оптического волокна	950 м
Тип оптического волокна	С сохранением поляризации (“panda”)
Диаметр волокна / полимерного покрытия	125 мкм / 250 мкм
Материал полимерного покрытия	акрилат
Внутренний диаметр	93 мм
Внешний диаметр	110 мм
Высота	28 мм
Суммарное число витков	3040
Тип компаунда	Силиконовый

Испытания проводились при двух вариантах закрепления одной и той же волоконной катушки: фиксации одного торца катушки на металлическом диске (рис. 1, *а*) и сжатия катушки между двух металлических кольцевых дисков с буферными прокладками (двусторонней фиксации) (рис. 1, *б*). Во втором случае варьировались материал прокладок (резина, силикон, фторопласт) и расстояние между дисками (регулировалось с помощью стоек). Базовым выбиралось максимальное расстояние, при котором отсутствовало видимое смещение контура при наклонах и переворотах макета. Полученные результаты анализировались с помощью оценки среднеквадратического отклонения (СКО) выходного сигнала ВОГ.

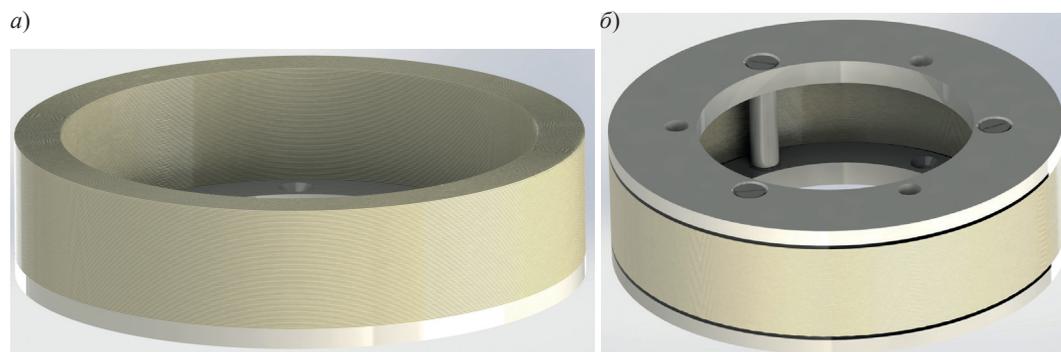


Рис. 1. Варианты закрепления бескаркасной волоконной катушки:  
*а*) фиксация одного торца на основании; *б*) сжатие между двумя кольцевыми дисками

Температурные испытания проходили в термокамере на неподвижном основании в диапазоне от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ , график термоцикла представлен на рис. 2. Сравнивались данные с алгоритмической компенсацией и без нее по регрессионной модели

$$P(T, \dot{T}, c_0, \dots, c_9) = c_0 + c_1 \cdot T + c_2 \cdot T^2 + c_3 \cdot T^3 + \dots + c_4 \cdot \dot{T} + c_5 \cdot \dot{T}^2 + c_6 \cdot \dot{T}^3 + c_7 \cdot T\dot{T}^2 + c_8 \cdot T^2\dot{T} + c_9 \cdot T\dot{T}. \quad (2)$$

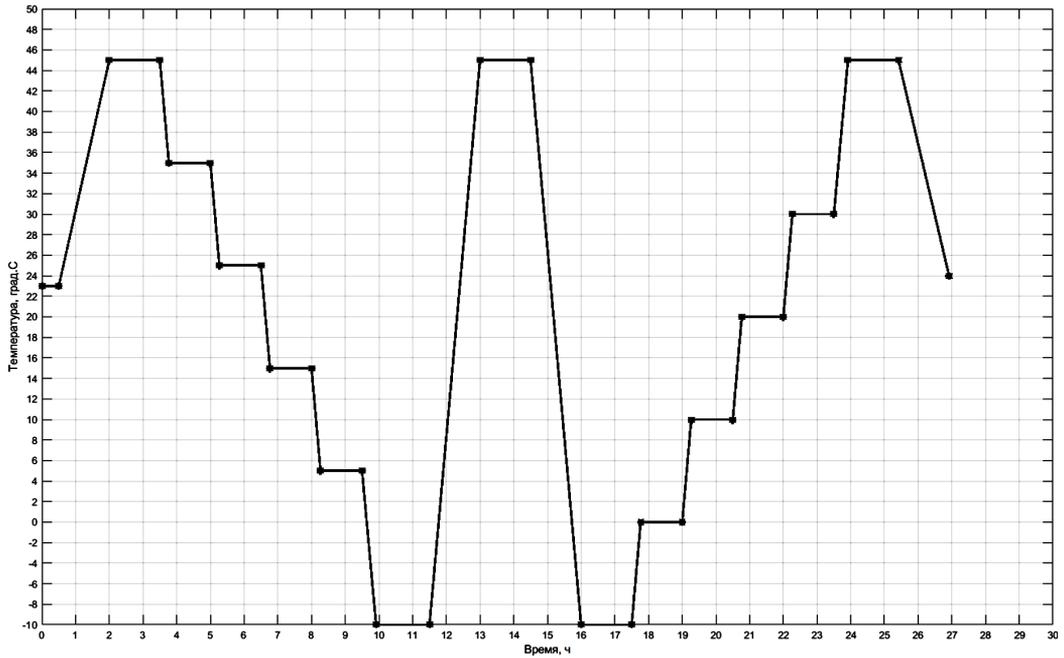


Рис. 2. График термоцикла

В [49] показано, что введение в модель (1) дополнительных членов позволяет лучше скомпенсировать температурное смещение нуля ВОГ. Авторы отмечают, что в модели (2) учитываются совместное взаимосвязанное влияние температуры и скорости ее изменения, а кроме того, различия ТКЛР составных частей катушки. В связи с этим ее применение в рамках настоящей работы представляется более эффективным за счет особенностей конструкции крепления бескаркасной катушки (прежде всего во втором варианте).

### Результаты исследований

В табл. 2 приведены результаты испытаний ВОГ с катушкой, закрепленной только с одной стороны. Здесь необходимо отметить, что первое измерение проводилось до исследований с двусторонней фиксацией, повторное — после них. Несмотря на то что без учета температурной компенсации СКО выходного сигнала возросло (возможно, это произошло по причине необратимой деформации катушки в ходе экспериментов), с учетом температурной компенсации оно практически не изменилось.

На рис. 3–5 показаны результаты температурных испытаний ВОГ при двусторонней фиксации катушки, где для разных материалов демфирующих прокладок варьируется расстояние между крепежными дисками. На базовом расстоянии между дисками наименьшая температурная зависимость смещения нуля (оцениваемая по величине СКО выходного сигнала ВОГ) без алгоритмической компенсации (рис. 3) наблюдается в случае применения силиконовых прокладок (оценка СКО выходного

сигнала – 0,114 °/ч). При использовании прокладок из резины фиксируется некоторый рост температурной зависимости (оценка СКО выходного сигнала – 0,131 °/ч). Наибольшая зависимость характерна для прокладок из фторопласта (оценка СКО в этом случае – 0,225 °/ч). Рост СКО при уменьшении расстояния между дисками на 0,6 мм по сравнению с базовым составил для силикона 22%, для резины – 41%. Из опасения повредить катушку эксперимент с фторопластовыми пластинами был остановлен, когда расстояние между дисками сократилось на 0,3 мм (вероятно, именно эта часть испытаний сказалась на увеличении смещения нуля при повторной сборке ВОГ с односторонним закреплением катушки). Если продлить соответствующую кривую на рис. 3, то для фторопласта рост СКО составил бы 52%.

Т а б л и ц а 2

Результаты температурных испытаний ВОГ с бескаркасной катушкой, приклеенной к основанию

№ измерения	Оценка СКО выходного сигнала, °/ч	
	Без алгоритмической компенсации температурной зависимости смещения нуля	С компенсацией температурной зависимости смещения нуля
1	0,195	0,033
2	0,24	0,034

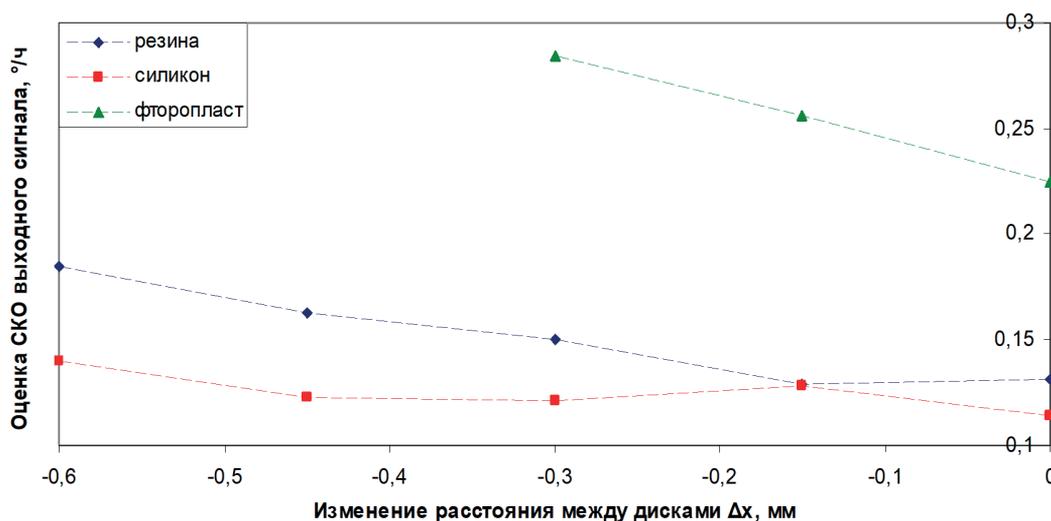


Рис. 3. Результаты температурных испытаний ВОГ с катушкой с двусторонней фиксацией (без алгоритмической компенсации температурной зависимости смещения нуля)

Алгоритмическая компенсация позволила существенно снизить остаточную температурную зависимость смещения нуля (рис. 4). СКО выходного сигнала ВОГ на базовом междисковом расстоянии для силикона уменьшилось в 3 раза, для резины – в 3,4 раза, для фторопласта – в 4,7 раз. Характер изменения СКО при сокращении расстояния между дисками для силикона и резины в целом схож: сначала СКО

уменьшается (в первом случае до  $0,025$  °/ч, в втором – до  $0,029$  °/ч), затем начинает расти. Таким образом, существует некоторый диапазон расстояний между дисками с пластинами из указанных материалов, при котором смещение нуля более очевидно зависит от температуры, скорости ее изменения и их перекрестного влияния, благодаря чему лучше компенсируется. Возможно, такая особенность температурной зависимости связана с изменением баланса между величиной и симметричностью деформации катушки в зависимости от усилия, с которым она сжата. Базовое расстояние между прокладками хоть и исключает смещение катушки при наклонах макетного ВОГ в условиях комнатной температуры, однако нагрев и/или охлаждение приводят к пространственному сдвигу и несимметричной деформации катушки, что влечет за собой дополнительное смещение нуля ВОГ, которое хуже коррелирует с членами полинома (2).

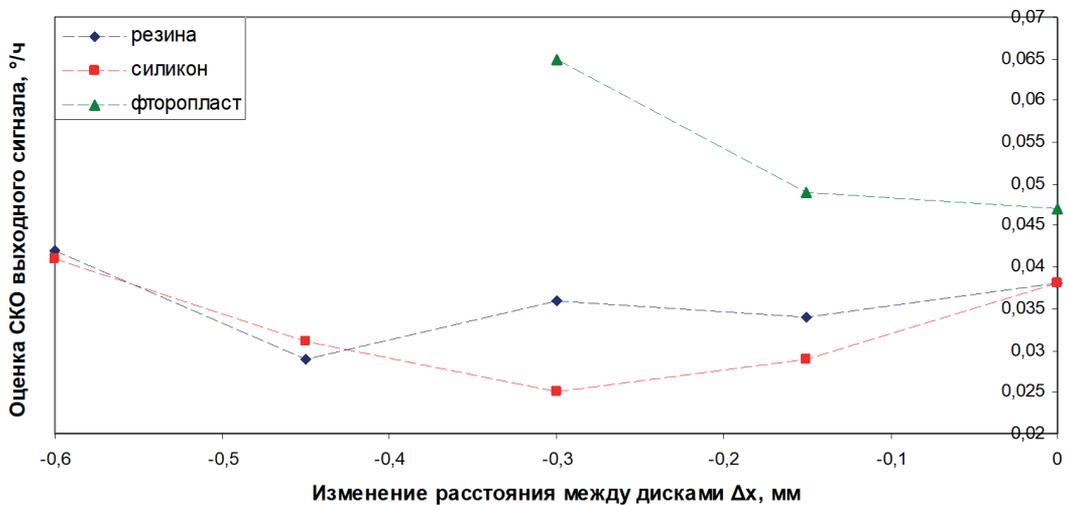


Рис. 4. Результаты температурных испытаний ВОГ с катушкой с двусторонней фиксацией (с компенсацией температурной зависимости смещения нуля)

Для фторопластовых пластин аналогичного уменьшения СКО не наблюдается: начальное плато сменяется резким ростом.

Полученные результаты показали, что и резину, и силикон можно использовать для закрепления бескаркасной катушки. Это позволяет снизить СКО выходного сигнала ВОГ в сравнении с односторонним вариантом закрепления катушки, который проигрывает с точки зрения устойчивости ВОГ к механическим воздействиям. При этом для катушки с двусторонним закреплением требуются дополнительные исследования.

### Заключение

В статье приведены результаты, полученные в ходе исследования того, как способ закрепления бескаркасной волоконной катушки влияет на температурное смещение нуля ВОГ на неподвижном основании и на эффективность его компенсации с помощью полиномиальной модели, учитывающей зависимость от температуры, скорости ее изменения и их взаимного перекрестного действия. Показано, что при фиксации катушки между двумя корпусными дисками с помощью буферных про-

кладок существует некоторый диапазон расстояний между ними, обеспечивающий наилучшую компенсируемость температурного смещения нуля ВОГ. При этом для практического применения подходят прокладки из упругих материалов. Существенно более жесткие материалы приводят к заметному увеличению СКО выходного сигнала при изменении температуры. Отметим, что вопрос надежности подобного способа закрепления для реальных условий эксплуатации ВОГ – тема дальнейших исследований.

Результаты для ВОГ с катушкой, закрепленной на основании одной стороной, оказались несколько хуже. Ввиду этого такой способ наименее подходит для проектирования гироскопов, особенно с учетом слабой устойчивости подобного крепления к механическим воздействиям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lefevre H.C. *The Fiber Optic Gyroscope*, 3rd ed. Norwood: Artech House Publishers, 2022, 512 p.
2. Черненко В.Д. Оптомеханика волоконных световодов: учебное пособие. СПб.: Политехника, 2011. 291 с.
3. Shupe, D.M., Thermally Induced Nonreciprocity in the Fiber-Optic Interferometer, *Applied Optics*, 1980, vol. 9, no. 5, pp. 654–655.
4. Lofts, C.M., Ruffin, P.B., Parker, M., Sung, S.S., Investigation of the effects of temporal thermal gradients in fiber optic gyroscope sensing coils, *Optical Engineering*, 1995, vol. 34, no. 10, pp. 2856–2863.
5. Mohr, F., Thermo-optically Induced Bias Drift in Fiber Optical Sagnac Interferometers, *Journal of Light-wave Technology*, 1996, vol. 14, no. 1, pp. 27–41.
6. Dai, X., Zhao, X., Cai, B., Quantitative analysis of the Shupe reduction in a fiber-optic Sagnac interferometer, *Optical Engineering*, 2002, vol. 41, no. 6, pp. 1155–1156, doi:10.1117/1.1478078.
7. Lu, C., Zhang, R., Wu, X., Ge, C., A Theoretical and Experimental Study on Thermal-Induced Non-Reciprocity Noise of Fiber Optical Coil, *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, vol. 22, no. 6, pp. 798–802.
8. Li, X., Ling, W., He, K., Xu, Z., Du, S., A Thermal Performance Analysis and Comparison of Fiber Coils with the D-CYL Winding and QAD Winding Methods, *Sensors*, 2016, 16, 900, doi:10.3390/s16060900.
9. Da Silva, A.C., Rabelo, R.C., De Carvalho, R.T., Blake, J.N. Coil Architectures for Optical Fiber Rotation Sensing, *Revista de Fisica Aplicada e Instrumentacao*, 1998, vol. 13, no. 3, pp. 44–49.
10. Новиков Р.Л. Технологическое оборудование и методы повышения качества намотки волоконного контура волоконно-оптического гироскопа: диссертация ... к.т.н. СПб., 2014. 94 с.
11. Page, J.L., Bina, D.R., Milliman, D., *Optical fiber coil and method of winding*, U.S. Patent 5841932, Nov. 24, 1998.
12. Курбатов А.М., Курбатов Р.А. Температурные характеристики чувствительных катушек волоконно-оптического гироскопа // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. №7. С. 735–742. DOI:10.7868/S0033849413060107.
13. Ling W., Li, X., Xu, Z., Zhang, Z., Wei, Y., Thermal effects of fiber sensing coils in different winding pattern considering both thermal gradient and thermal stress, *Optics Communications*, 2015, 356, pp. 290–295, doi:10.1016/j.optcom.2015.08.002.
14. Patterson, R.A., Wilde, J.D., Method for tuning fiber optic sensor coils, U.S. Patent 5329349, Jul. 12, 1994.
15. Vasek, R., Thermal stability of fibre coils for Sagnac interferometers, *SPIE Proceedings*, 1995, vol. 2510, pp. 92–98.
16. Голиков А.В. Температурные погрешности волоконно-оптических гироскопов: диссертация ... к.т.н. Саратов, 2001. 197 с.
17. Kato, H., Saito, H., Sakai, S., Shupe Effect Compensation of Temperature Controlled Fiber Optical Gyroscope, *The 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, 2010, pp. 262–267.
18. Драницына Е.В., Егоров Д.А., Унтилов А.А., Дейнека Г.Б., Шарков И.А., Дейнека И.Г. Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2012. №4 (79). С. 10–20.
19. Громов Д.С. Тепловая защита и термостабилизация волоконно-оптических гироскопов: диссертация ... к. т. н. СПб., 2014. 134 с.

20. Mohr, F., Kiesel, P., Thermal Sensitivity Of Sensing Coils For Fibre Gyroscopes, *SPIE Proceedings*, 1984, vol. 0514, pp. 305–308, doi:10.1117/12.945103.
21. Zhang, C., Du, S., Jin, J., Zhang, Z., Thermal analysis of the effects of thermally induced nonreciprocity in FOG sensing coils, *Optik*, 2011, 122, pp. 20–23, doi:10.1016/j.ijleo.2009.10.004.
22. Голиков А.В., Панкратов В.М., Панкратова Е.В. Применение пассивных способов уменьшения температурных перепадов в волоконно-оптическом гироскопе на основе использования наноматериалов // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. №2 (93). С. 33–40. DOI:10.17285/0869-7035.2016.24.2.033-040.
23. Chen, X., Wang, J., Hu, X., Zhang, P., Jiang, W., Chen, H., Research on Rapid Thermal Balance Technology of Fiber Coil, *29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2022.
24. Li, Z., Meng, Z., Liu, T., Yao, X.S., A Novel Method for Determining and Improving the Quality of a Quadrupolar Fiber Gyro Coil Under Temperature Variations, *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 2, pp. 2521–2530.
25. Рупасов А.В. Исследование метода локального температурного воздействия и его применение для компенсации дрейфа волоконно-оптического гироскопа ... к.т.н. СПб., 2014. 135 с.
26. Zhang, Y., Zhang, Y., Gao, Z., Thermal-induced phase-shift error of a fiber-optic gyroscope due to fiber tail length asymmetry, *Applied Optics*, 2017, vol. 56, no. 2, pp. 273–277, doi:10.1364/AO.56.000273.
27. Gao, Z., Zhang, Y., Gao, W., Method to determine the optimal layer number for the quadrupolar fiber coil, *Optical Engineering*, 2014, vol. 53, no. 8, 084106, doi:10.1117/1.OE.53.8.084106.
28. Mohr, F., Schadt, F., Bias error in fiber optic gyroscopes due to elasto-optic interactions in the sensor fiber, *SPIE Proceedings*, 2004, vol. 5502, pp. 410–413, doi:10.1117/12.566654.
29. Kahveci, O., Gencoglu, C., Yalcinkaya, T., Experimental Analysis and Multiscale Modeling of the Dynamics of a Fiber-Optic Coil, *Sensors*, 2022, 22, 582, doi:10.3390/s22020582.
30. Osunluk, B., Ogut, S., Ozbay, E., Thermally Induced Bias Errors for a Fiber Coil with Practical Quadrupole Winding, *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, 2017, pp. 152–155, doi:10.1109/ISISS.2017.7935682.
31. Есипенко И.А., Лыков Д.А., Сметанников О.Ю. Применение трансверсально-изотропных характеристик контура для расчета параметров теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Оптический журнал. 2019. Т. 86. №5. С. 36–44. DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-05-36-44.
32. Елсукова Т.В. Прогнозирование термодформационного дрейфа ВОГ с использованием термоупругих параметров катушки // Математика и междисциплинарные исследования – 2019: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием. Пермь, 2019. С. 121–125.
33. Есипенко И.А., Лыков Д.А. Метод верификации упругих деформаций в контуре волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. №8. С. 728–733.
34. Есипенко И.А. Построение и верификация модели нестационарного теплового воздействия на контур волоконно-оптического гироскопа: ... к.т.н. Пермь, 2017. 103 с.
35. Hong, W., Hu, X., Zang, Z., Zhang, P., Lou, S., Huang, B., Li, Y., Zhang, M., Accurate measurement and enhancement of fiber coil symmetry, *Applied Optics*, 2023, vol. 62, no. 16, pp. E109–E118, doi:10.1364/AO.483537.
36. Boiron, H., Pillon, J., Marin, E., Rattier, M., Peter, E., Morana, A., Lorraine, N., Guattari, F., Girard, S., Lefevre, H.C., Use of Rayleigh-OFDR to Estimate the Bias Drift Induced by Quasi-Static and Homogeneous Temperature Variation of a Free-Standing Fiber-Gyro Coil, *Journal of Lightwave Technology*, 2023, vol. 41, no. 15, pp. 5146–5152, doi:10.1109/JLT.2023.3253186.
37. Mohr, F., Schadt, F., Error Signal Formation in FOGs Through Thermal and Elasto-optical Environmental Influences on the Sensing Coil, *Inertial Sensors and Systems*, Karlsruhe, Germany, 2011, pp. 2-1–2-13.
38. Minakuchi, S.; Sanada, T., Takeda, N., Mitani, S., Mizutani, T., Sasaki, Y., Shinozaki, K., Thermal Strain in Lightweight Composite Fiber-Optic Gyroscope for Space Application, *Journal of Lightwave Technology*, 2013, vol. 33, no. 12, pp. 2658–2662, doi:10.1109/JLT.2014.2375198.
39. Osunluk, B., Ogut, S., Ozbay, E., Thermally induced bias error due to strain inhomogeneity through the fiber optic gyroscope coil, *Applied Optics*, 2020, vol. 59, no. 33, pp. 10416–10421, doi:10.1364/AO.406045.
40. Чувствительный элемент волоконно-оптического гироскопа: пат. 2807020 РФ: МПК G 01 C 19/64 / Безмен В.С., Евстифеев М.И., Егоров Д.А., Новиков Р.Л., Унтилов А.А., Чапурский А.П.; опубл. 08.11.2023. 13 с.
41. Bi, C., Sun, G., Wu, Yanji., Zhao, K., Potted fiber optic sensor coil by novel adhesives for high-stability FOG, *SPIE Proceedings*, 2011, vol. 8191, pp. 8191D-1–8191D-8, doi:10.1117/12.898760.

42. Zhang, Z., Yu, F., Quantitative analysis for the effect of the thermal physical property parameter of adhesive on the thermal performance of the quadrupolar fiber coil, *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 24, pp. 30513–30525, doi:10.1364/OE.25.030513.
43. Wang, X., Yang, S., Zhang, Y., Wu, X., Zhao, X., Effect of Temperature Sensitivity of Coating Adhesive on Thermal Induced Non-reciprocal Bias in Fiber Optic Gyroscopes, *Inertial Sensors and Systems*, Braunschweig, Germany, 2018, PP5.
44. Pillon, J., Collignon, M., Rattier, M., Louf, F., Peter, E., Boucard, P.A., Lefèvre, H.C., Three-Dimensional Topological Reconstruction of the Sensing Coil of a Fiber-Optic Gyroscope Using X-ray Computed Tomography, *Journal of Lightwave Technology*, 2021, vol. 39, no. 14, pp. 4861–4872, doi: 10.1109/JLT.2021.3068605
45. Zheng, Z., Wang, Y., Yu, J., Liu, B., Li, M., Chen, G., Full-parameters mathematical model of high precision fiber optic gyroscope coil and automatic forming technology, *2020 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Hiroshima, Japan, 2020, pp. 1–5, doi:10.1109/INERTIAL48129.2020.9090051.
46. Pillon, J., Louf, F., Boiron, H., Rattier, M., Peter, E., Boucard, P.A., Lefèvre, H.C., Thermomechanical analysis of the effects of homogeneous thermal field induced in the sensing coil of a fiber-optic gyroscope, *Finite Elements in Analysis and Design*, 2022, 212, 103826, doi:10.1016/j.finel.2022.103826.
47. Беспровзванных В.Г., Кривошеев А.И., Кель О.Л. Исследование влияния температурного фактора на состояние контура волоконно-оптического гироскопа методом бриллиантовой рефлектометрии // Прикладная фотоника. 2015. Т. 2. №4. С. 329–341.
48. Егоров Д.А., Новиков Р.Л. Исследование температурной зависимости h-параметра катушки волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31. №4 (123). С. 206–214, EDN XZQJDB.
49. Гонгарь Д.А., Драницына Е.В. Повышение эффективности компенсации температурной чувствительности волоконно-оптического гироскопа // XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. СПб., 2022. С. 39–41.
50. Jo, M., Chong, K., Do, J., Choi, W., Song, K., Kang, S., Shin, W., The Bias Drift Due to Fiber Coil Temperature Variation and the Temperature Compensation in Fiber Optic Gyroscopes, *Journal of Military Science and Technology*, 2009, vol. 12, no. 2, pp. 222–227.
51. Мешковский И.К., Мирошниченко Г.П., Рупасов А.В., Стригалева В.Е., Шарков И.А. Исследование влияния тепловых воздействий на работу волоконно-оптического датчика угловой скорости // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. СПб., 2014. С. 191–202.
52. Choi, W., Analysis of temperature dependence of thermally induced transient effect in interferometric fiber-optic gyroscopes, *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, vol. 15, no. 3, pp. 237–243, doi:10.3807/JOSK.2011.15.3.237.
53. Ogut, S., Osunluka, B., Ozbaya, E., Modeling of thermal sensitivity of a fiber optic gyroscope coil with practical quadrupole winding, *SPIE Proceedings*, 2017, vol. 10208, pp. 1020806-1–1020806-6, doi:10.1117/12.2258030.
54. Wang, Y., Ma, L., Zhao, J., Wu, W., Qiao, L., Theoretical and Experimental on the Shupe-like Bias caused by Thermal Stress of Fiber Optic Gyros, *SPIE Proceedings*, 2016, vol. 10158, pp. 101580Y-1–101580Y-6, doi:10.1117/12.2246977.
55. Wang, Y., Wang, T., Ma, L., Yu, H., Liu, B., Effect of the glass transition of coating adhesive on temperature performance of fiber optic gyroscope and its optimization, *SPIE Proceedings*, 2015, vol. 9679, pp. 967914-1–967914-6, doi:10.1117/12.2202813.
56. Колеватов А.П., Ульяновская Т.А., Злыгостева М.П., Ившина Ю.В., Легостаев С.С. Классификация дефектов теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10. № 8. С. 59–81.
57. Cordova, A., Fersht, S.N., *Fiber optic sensor coil including buffer regions*, U.S. Patent 5767509, Jun. 16, 1998.
58. Bilinski, D.J., Chin, G.H., Cordova, A., Fersht, S.N., *Gyro sensor coil with low-friction hub interface*, U.S. Patent 5545892, Aug. 13, 1996.
59. Савин М.А. Математическое моделирование дрейфа волоконно-оптического гироскопа в условиях внешних воздействий: ... к.т.н. Пермь, 2018. 151 с.
60. Malkin, M.M., Williams, W.H., Summers E., *Sensing coil assembly and method for attaching a sensing coil in a fiber optic gyroscope*, U.S. Patent 7369245, May 6, 2008.

**Novikov, R.L., Egorov, D.A., Neforosny, S.T.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)

Influence of Methods for Fixing a Frameless Fiber Coil on Temperature Dependence of the FOG Output Signal, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2024, vol. 32, no. 4 (127), pp. 15–27.

**Abstract.** Parasitic effects in the coil of a fiber-optic gyroscope (FOG) significantly limit its accuracy. In particular, the elastic-optical effect is one of the main causes of the FOG temperature-dependent zero bias. The latter is due to the difference in the thermomechanical parameters of the coil components: optical fiber with a protective polymer coating, impregnating compound, and the frame. One of the possible ways to reduce the impact of this effect is to use a frameless coil that has less deformation under varying temperature conditions than a coil with a frame. The paper discusses the methods for fixing a coil of this type, their advantages and disadvantages. The experimental results of testing a FOG with a frameless coil fixed between two metal disks and buffer gaskets obtained for different distances between the disks and the material of the gaskets are presented. The results are compared with similar data for a coil with one side glued to the base.

**Key words:** fiber-optic gyroscope, frameless fiber coil, fixing methods, zero bias thermal dependence.

Материал поступил 30.09.2024