

УДК 528.526.6

## ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

И.А. Шарков<sup>а</sup>, А.В. Виноградов<sup>а</sup>, В.Н. Козлов<sup>а</sup>, В.Е. Стригалева<sup>а</sup>, Н.Е. Кикилич<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: [andrvin777@gmail.com](mailto:andrvin777@gmail.com)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 28.03.17, принята к печати 30.04.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-380-386

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Шарков И.А., Виноградов А.В., Козлов В.Н., Стригалева В.Е., Кикилич Н.Е. Влияние давления на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 380–386. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-380-386

### Аннотация

Представлены результаты исследований влияния атмосферного давления на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа. В ходе экспериментов гироскоп был помещен в герметичную камеру, давление в которой менялось по программе в диапазоне 0,8–1,5 атм. Данные эксперимента (выходной сигнал гироскопа, температура, показания датчика давления внутри прибора) синхронно регистрировались программным обеспечением компьютера. Разделение изменения масштабного коэффициента и дрейфа нуля производилось путем установки чувствительной оси волоконно-оптического гироскопа на 0°, 90° и 270° относительно направления на восток (плоскость гироскопа была установлена перпендикулярно горизонту). Установлено, что ошибка сигнала волоконно-оптического гироскопа, связанная с давлением, оказывает влияние главным образом на аддитивную составляющую. Влияние давления на мультипликативную составляющую при скоростях вращения, используемых в эксперименте (0–13 °/ч), оказалось пренебрежимо мало. Показания волоконно-оптического гироскопа имели высокий коэффициент линейной корреляции с производной давления по времени (в ряде случаев более 0,9). Показана высокая степень повторяемости дрейфа от пуска к пуску, что позволяет ввести алгоритмическую компенсацию. Использование простейшей алгоритмической компенсации на основе полинома первой степени позволило уменьшить стандартное отклонение и дрейф нуля от 2 до 9 раз.

### Ключевые слова

волоконно-оптический гироскоп, волоконный контур, дрейф нуля, влияние атмосферного давления, алгоритмическая компенсация

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.578.21.0109 от 27.10.2015 г.).

## ATMOSPHERE PRESSURE EFFECT ON THE FIBER OPTIC GYROSCOPE OUTPUT SIGNAL

I.A. Sharkov<sup>а</sup>, A.V. Vinogradov<sup>а</sup>, V.N. Kozlov<sup>а</sup>, V.E. Strigaleva<sup>а</sup>, N.E. Kikilich<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: [andrvin777@gmail.com](mailto:andrvin777@gmail.com)

### Article info

Received 28.03.17, accepted 30.04.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-380-386

Article in Russian

**For citation:** Sharkov I.A., Vinogradov A.V., Kozlov V.N., Strigaleva V.E., Kikilich N.E. Atmosphere pressure effect on the fiber optic gyroscope output signal. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 380–386 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-380-386

### Abstract

The paper describes research results of the atmospheric pressure effect on the output signal of a fiber optic gyroscope (FOG). In the course of experiments, FOG was placed into a hermetic chamber. The atmosphere pressure was varying in the range from 0.8 to 1.5 atm. All the data, including the FOG output signal, temperature, and data from the pressure sensor installed inside the FOG, were synchronously registered with the computer software. The separation of scale factor change from zero offset in the experiment was carried out by setting the sensitive FOG axis at 0°, 90° and 270° relative to the East (the FOG was set perpendicular to the horizon). After the data processing it was concluded that the FOG signal error associated with

the pressure affects mainly on the additive component. The pressure effect on the multiplicative component appeared to be negligible at rotational velocities used in the experiment (0 - 13<sup>0</sup>/h). At the same time, the FOG signal has a high linear correlation coefficient with the derivative of pressure over time (in some cases, more than 0.9). The experiment was repeated several times and the high degree of the drift repeatability was shown. That makes it possible to implement the compensation algorithm. Application of the simplest algorithmic compensation based on the polynomial of the first degree (ax + b) enabled to reduce the root-mean-square (RMS) and drift of the signal by 2-9 times.

#### Keywords

fiber optic gyro, fiber loop, zero offset, atmosphere pressure effect, algorithmic compensation

#### Acknowledgements

The work was supported by the Russian Federation Ministry of Education and Science, contract No. 14.578.21.0109 dated 27.10.2015.

### Введение

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) уже многие десятилетия успешно применяются в системах навигации [1–6]. При высокой чувствительности ВОГ к угловой скорости вращения он в то же время подвержен различным внешним воздействиям, которые приводят к паразитным дрейфам сигнала и, как следствие, к снижению точности прибора [7, 8]. К таким воздействиям относятся нестационарные температурные поля, акустические шумы и вибрации, перепады атмосферного давления, переменные электрические и магнитные поля и т.д. [9–12]. При создании ВОГ навигационного класса точности необходимо учитывать все эти эффекты.

Одним из параметров внешней среды, способным оказывать значительное влияние на сигнал гироскопа, является атмосферное давление и его изменение. В литературе встречаются упоминания об этом факторе [10, 13], но не производится оценка его влияния на ВОГ и не рассматривается природа возникновения ошибки показаний прибора. Теоретически к изменению давления чувствителен ряд элементов. Так, многофункциональная интегрально-оптическая схема обычно изготавливается из ниобата лития, т.е. материала, который является ярко выраженным сегнетоэлектриком. Как известно, этот материал чрезвычайно чувствителен к любым механическим воздействиям, которые приводят к изменению показателя преломления, электрооптических коэффициентов и т.д. [14]. Волоконно-оптический контур также обладает чувствительностью к изменению давления во времени: механические воздействия на локальные неоднородности волокна, существующие механические напряжения, геометрические погрешности укладки витков приводят к локальным изменениям длины волокна и показателя преломления [15].

Целью настоящей работы является оценка влияния атмосферного давления на показания волоконно-оптического гироскопа с последующим определением степени актуальности этой проблемы для ВОГ навигационного класса.

### Структура погрешности ВОГ

Принцип работы ВОГ основан на эффекте Саньяка [6], суть которого заключается в возникновении разности фаз между пучками света, распространяющимися в противоположных направлениях по волоконному контуру при его вращении:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega,$$

где  $L$  – длина волокна;  $D$  – диаметр катушки;  $\lambda$  – длина волны света в вакууме;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\Omega$  – угловая скорость вращения.

При этом погрешность выходного сигнала ВОГ можно разделить на мультипликативную (изменение масштабного коэффициента – МК) и аддитивную (дрейф нуля) [13]. Также в сигнале присутствует шумовая составляющая.

Таким образом, выражение для скорости вращения можно записать в следующем виде [1]:

$$\Omega_{\text{det}} = \frac{\lambda c}{2\pi LD} \Delta\varphi + \Omega_0 + \Omega_n = SF \cdot \Delta\varphi + \Omega_0 + \Omega_n, \quad (1)$$

где  $\Omega_{\text{det}}$  – детектируемая прибором скорость вращения;  $SF$  – масштабный коэффициент;  $\Omega_0$  – ошибка в сигнале ВОГ, не зависящая от скорости вращения (дрейф нуля);  $\Omega_n$  – шумовая составляющая сигнала.

Разделение ошибки на аддитивную и мультипликативную имеет большое практическое значение: для устранения ошибок необходимо использовать различные принципы компенсации.

### Описание эксперимента

Для проведения натурных испытаний исследуемый ВОГ (1) был закреплен на специальной оснастке (2) и помещен в барокамеру (3), установленную в бетонном основании (4). Данные с прибора записывали на ПК (6). Давление в барокамере меняли по программе с помощью компрессора/насоса (5) (рис. 1). Следует отметить, что для проведения подобных испытаний необходимо тщательно подходить к выбору барокамеры. У большинства серийно выпускаемых камер при изменении давления происходит

деформация стенок и дна. Это приводит к изменению положения оси чувствительности, что регистрируется ВОГ как изменение скорости вращения, которое достаточно сложно отделить от дрейфа сигнала, связанного с чувствительностью прибора к давлению. Это особенно актуально, если испытывается одноосный прибор. При работе насоса и компрессора также возникают вибрации, которые могут приводить к изменению положения ВОГ в камере.

Для проведения эксперимента выбраны гидробарокамеры для испытаний под давлением (до 900 атм), обладающие массивным стальным корпусом, вмонтированным в бетонный пол, что обеспечивает практически полное отсутствие деформаций и вибраций. Для устойчивого расположения ВОГ внутри камеры было изготовлено металлическое основание с тремя ножками, фиксирующееся на дне барокамеры.

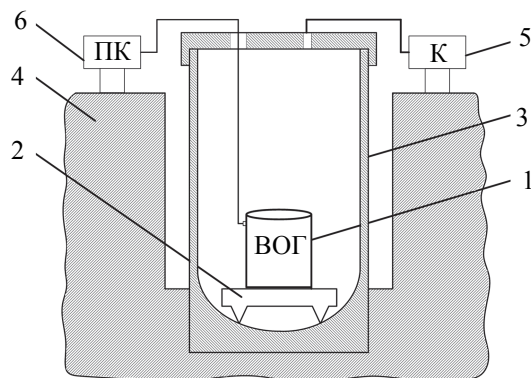


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – волоконно-оптический гироскоп; 2 – основание; 3 – гидробарокамера высокого давления; 4 – бетонное основание; 5 – компрессор; 6 – устройство регистрации – персональный компьютер

Эксперимент состоял из трех разнесенных во времени пусков, в которых плоскость катушки располагалась перпендикулярно горизонту, а направление осей вращения поочередно ориентировалось на восток, юг и север ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $270^\circ$ ), при этом измеряемая скорость вращения составляла примерно 0; 7,5 и 7,5  $^\circ/\text{ч}$  соответственно. Стоит отметить, что между первым и вторым запусками прошло более двух месяцев. Вторым и третьим были произведены в течение одного дня.

Давление в камере изменялось по заданному закону в диапазоне от 0,8 до 1,5 атм. Из-за большого объема камеры и отсутствия технической возможности температура не стабилизировалась, но производился ее контроль. Выходные данные ВОГ (скорость вращения), а также показания датчиков температуры и давления синхронно регистрировались. Результаты, полученные в ходе эксперимента, приведены на рис. 2.

Изменения положения ВОГ в ходе эксперимента контролировалось при помощи трехосной системы акселерометров, установленной на то же основание, что и сам прибор. Согласно полученным данным, изменение проекций ускорений соответствует заявленному тепловому дрейфу и не может быть связано с изменением положения основания в пространстве.

### Обсуждение полученных результатов

Несмотря на наличие интервала между пусками, во всех трех случаях сигнал ВОГ одинаково реагирует на изменение давления: при резком изменении давления происходит резкое изменение (скачок) детектируемой скорости вращения. Отклонение сигнала ВОГ во всех трех экспериментах при различном положении ВОГ происходит в одну сторону и с примерно одинаковой амплитудой (около 1,8  $^\circ/\text{ч}$ ). Из формулы (1) видно, что в нашем случае при изменении давления основной причиной дрейфа сигнала ВОГ является дрейф нуля, а влияние изменения давления на МК при данной скорости вращения пренебрежимо мало. Для определения зависимости МК от давления необходимо провести эксперимент при больших скоростях вращения, что на данный момент не представляется возможным из-за отсутствия технической возможности.

В процессе дальнейшего анализа было обнаружено, что сигнал ВОГ повторяет график первой производной давления по времени с обратным знаком (рис. 3). Рассчитанные коэффициенты корреляции сигнала ВОГ с первой производной давления от времени для пусков 1–3 приведены в табл. 1.

Причина возникновения дрейфа нуля в сигнале ВОГ, по мнению авторов, в большей степени связана с волоконно-оптическим контуром и имеет ту же природу, что и  $T \cdot \dot{\theta}$  эффект [6] – чувствительность показаний ВОГ к производной температуры по времени, которая возникает вследствие фотоупругого эффекта в точках неоднородности укладки волокна в катушке. При осуществлении воздействий на эти участки встречные лучи получают различную фазу вследствие того, что они проходят этот участок в различное время, за которое успевает измениться показатель преломления под действием теплового расширения

или изменения давления. В таком случае даже при отсутствии вращения встречные лучи имеют различный набег фаз (невзаимный эффект), что приводит к детектированию прибором паразитной фазы и к возникновению дрейфа нуля соответственно. Это объясняет наличие одинаковой зависимости дрейфа сигнала ВОГ от производной температуры [11] и производной давления.

Изменение температуры в барокамере во время проведения каждого испытания не превысило 2 °С и было достаточно плавным за счет больших объемов камеры и массы прибора. Согласно исследованиям [11] тепловой дрейф сигнала ВОГ при таких условиях не должен был превысить 0,01 °/ч.

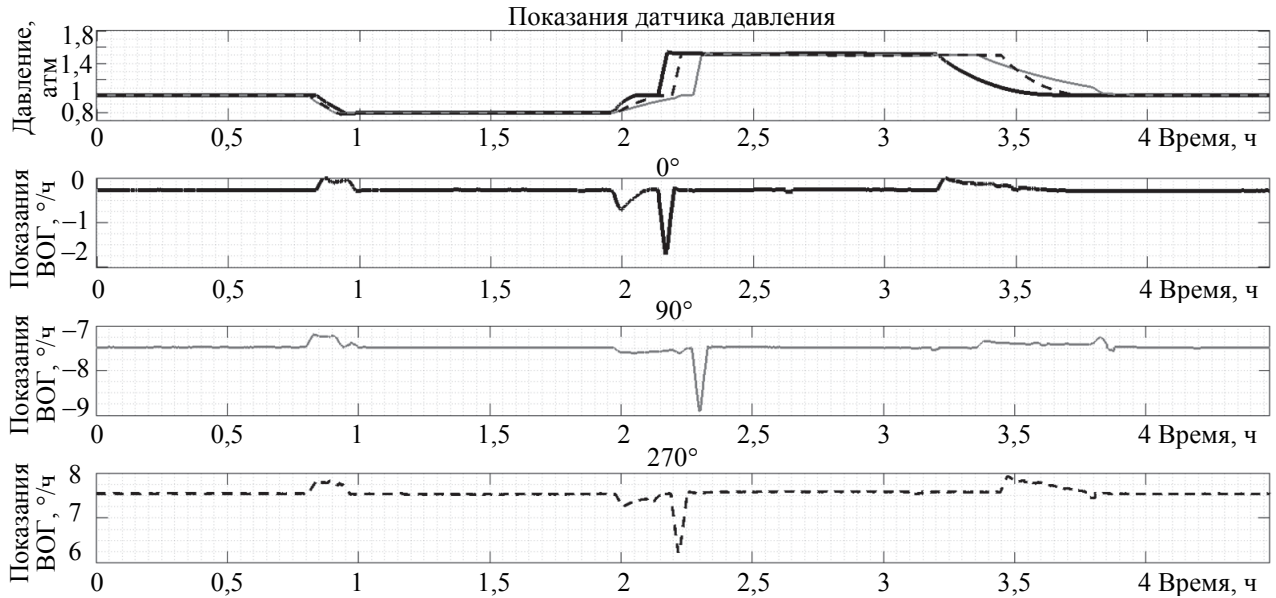


Рис. 2. Дрейф сигнала волоконно-оптического гироскопа при изменении давления (жирная линия – 0° относительно направления на восток, серая – 90°, пунктирная – 270°)

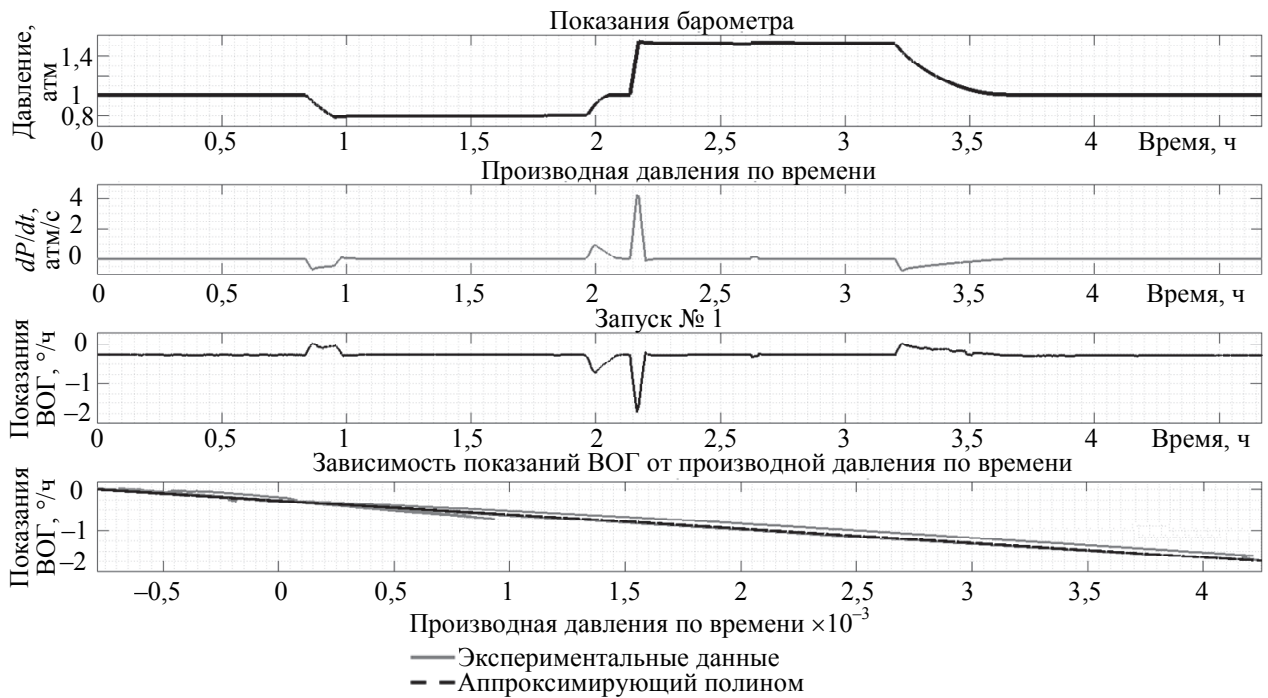


Рис. 3. Зависимость сигнала волоконно-оптического гироскопа от производной давления по времени (для 0° относительно направления на восток)

Номер запуска	1	2	3
Коэффициент корреляции	-0,987	-0,987	-0,971

Таблица 1. Коэффициент корреляции в пусках

**Практическое применение результатов исследования**

Высокая линейная корреляция сигнала ВОГ с производной давления по времени и высокая повторяемость позволяют произвести алгоритмическую компенсацию сигнала. Аппроксимируем зависимость показаний ВОГ полиномом первой степени  $y=ax+b$ . Расчет коэффициентов  $a$  и  $b$  производился по данным, полученным в первом пуске методом наименьших квадратов:  $a = -343$  и  $b = -0,272$ . При этом для компенсации сигнала ВОГ во втором и третьем пусках использовалась следующая формула (в постобработке):

$$\Omega_{corr} = \Omega_{det} - \left( a \frac{dP}{dt} - b \right),$$

где  $\Omega_{corr}$  – скомпенсированные показания ВОГ;  $\Omega_{det}$  – исходные показания ВОГ;  $dP/dt$  – производная давления по времени. Результаты компенсации дрейфа сигнала ВОГ, связанные с давлением, приведены на рис. 4 и в табл. 2.

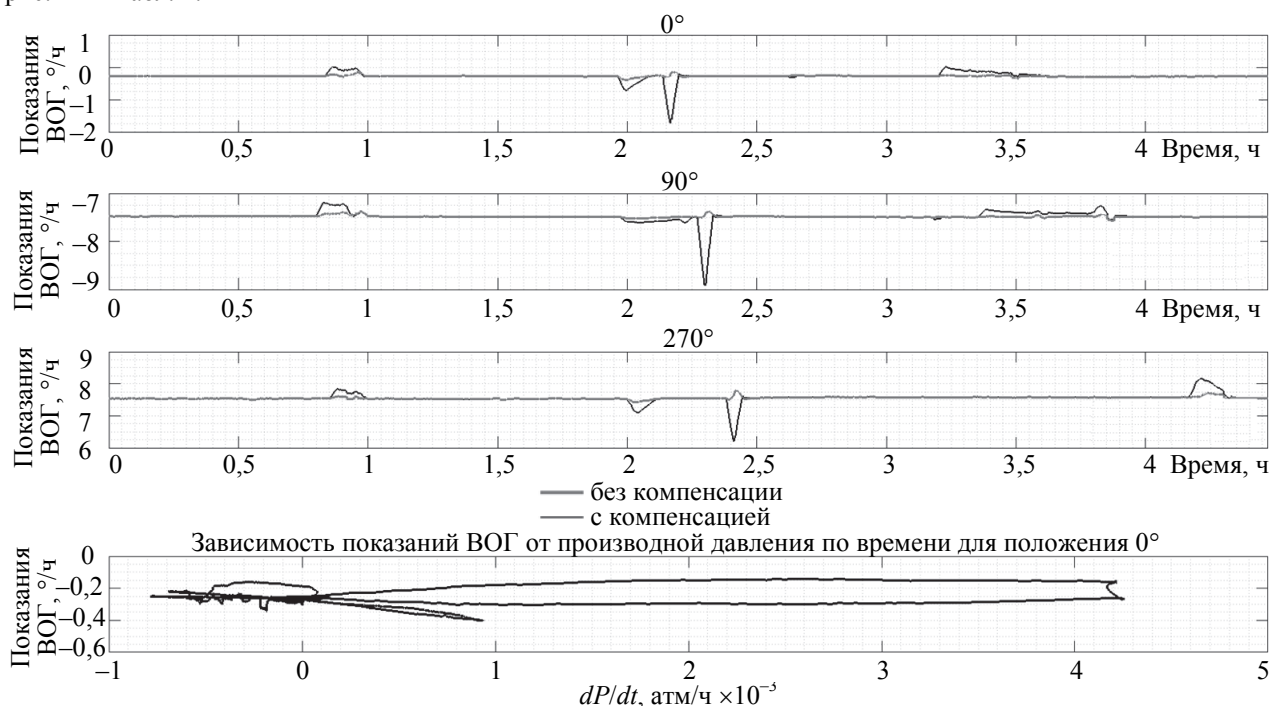


Рис. 4. Результаты компенсации сигнала ВОГ

Показания ВОГ	До компенсации		После компенсации		Относительное уменьшение параметра	
	СКО, °/ч	Дрейф, °/ч	СКО, °/ч	Дрейф, °/ч	СКО	Дрейф
Запуск 1	0,120	1,80	0,020	0,26	6	7
Запуск 2	0,120	1,70	0,019	0,19	6	9
Запуск 3	0,130	1,70	0,030	0,28	4	6

Таблица 2. Сравнение сигнала ВОГ до и после компенсации

Предложенный механизм компенсации показал эффективность во всех пусках, что позволяет предположить высокую повторяемость зависимости сигнала ВОГ от производной давления по времени: среднеквадратическое отклонение (СКО) уменьшилось в 4–6 раз, дрейф (разница между максимальным и минимальным значением показаний гироскопа) – в 6–9 раз.

Исследование другого образца ВОГ, ось чувствительности которого была установлена перпендикулярно плоскости горизонта во всех трех пусках, также показало эффективность использованного метода компенсации. Результаты исследования приведены в табл. 3.

Показания ВОГ	До компенсации		После компенсации		Относительное уменьшение параметра	
	СКО, °/ч	Дрейф, °/ч	СКО, °/ч	Дрейф, °/ч	СКО	Дрейф
Запуск 1	0,056	0,88	0,030	0,49	2	2
Запуск 2	0,053	0,79	0,024	0,36	2	2
Запуск 3	0,060	0,82	0,016	0,19	4	4

Таблица 3. Сравнение сигнала ВОГ до и после компенсации

Результаты, полученные для разных образцов ВОГ, несколько отличаются друг от друга. По нашему мнению, это связано с технологическим разбросом параметров, имеющем место в процессе производства волоконно-оптических контуров. Контуров имеют различное количество дефектов намотки и их взаимное расположение внутри слоев [15]. Разработка математической модели влияния давления на дрейф сигнала ВОГ при наличии дефектов намотки, подтверждение предложенных в настоящей работе механизмов возникновения дрейфа нуля и определение влияния давления на МК является следующими задачами наших исследований.

### Заключение

Изменение атмосферного давления оказывает значительное влияние на дрейф сигнала волоконно-оптического гироскопа. При этом ошибка может достигать значения порядка  $2 \cdot 10^{-5}$  ( $^{\circ}/ч$ )  $\text{Па}^{-1}$ , что в реальных условиях эксплуатации может приводить к дрейфу порядка нескольких градусов в час.

Высокая линейная корреляция сигнала волоконно-оптического гироскопа с производной давления по времени и повторяемость от пуска к пуску позволили произвести алгоритмическую компенсацию сигнала в постобработке. При этом удалось достигнуть уменьшения дрейфа в одном из пусков в 9 раз – с 1,7 до 0,19  $^{\circ}/ч$ , уменьшения среднеквадратического отклонения в 6 раз – с 0,12 до 0,019  $^{\circ}/ч$ , что является неплохим результатом. Однако полученные данные позволяют сделать вывод, что для высокоточных волоконно-оптических гироскопов (более 0,01  $^{\circ}/ч$ ) применение метода компенсации по производной давления по времени недостаточно. Необходимо проведение дополнительных мероприятий: повышение качества намотки, герметизация и повышение жесткости конструкции потенциально чувствительных к давлению элементов волоконно-оптических гироскопов, таких как волоконно-оптический контур и многофункциональная интегрально-оптическая схема.

### Литература

1. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В. и др. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2014. № 1(84). С. 14–25.
2. Ривкин Б.С. Инерциальные системы и датчики 2016 // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. № 4(95). С. 139–148.
3. Barbour N.M. Inertial navigation sensors // NATO Report RTO-EN-SET-116. 2010. N 2-1. P. 2–28.
4. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1 (72). С. 3–16.
5. Патюрель И., Онтас И., Лефевр Э., Наполитано Ф. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на основе ВОГ с уходом одна морская миля в месяц: мечта уже достижима? // Гироскопия и навигация. 2013. № 3 (82). С. 3–13.
6. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope: achievement and perspective // Proc. 19<sup>th</sup> St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, Russia, 2012. P. 122–126.
7. Окоши Т., Окамото К. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
8. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
9. 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.
10. Курбатов А.М. О новых путях совершенствования волоконно-оптических гироскопов с открытым и закрытым контуром обратной связи // Гироскопия и навигация. 2015. № 1(88). С. 43–60.
11. 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. СПб., 2014. С. 191–202.
12. Шарков И.А., Рупасов А.В., Стригалева В.Е., Волковский С.А. Влияние температурной нестабильности характеристик источника на показания волоконно-оптического гироскопа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013.

### References

1. Korkishko Y.N., Fedorov V.A., Prilutskii V.E., Ponomarev V.G., Morev I.V. et al. Strapdown inertial navigation systems based on fiber-optic gyroscopes. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 195–204. doi: 10.1134/S2075108714040154
2. Rivkin B.S. Inertial sensors and systems-2016. *Гироскопия и Навигация*, 2016, vol. 24, no. 4, pp. 139–148. (In Russian)
3. Barbour N.M. Inertial navigation sensors. *NATO Report RTO-EN-SET-116*, 2010, no. 2-1, pp. 2–28.
4. Peshekhonov V.G. Gyroscopic systems: current status and prospects. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 111–118. doi: 10.1134/S2075108711030096
5. Paturel Y., Honthaas J., Lefevre H., Napolitano F. One nautical mile per month FOG based strapdown inertial navigation system: a dream already within reach? *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 1, pp. 1–8. doi: 10.1134/S207510871401009X
6. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope: achievement and perspective. *Proc. 19<sup>th</sup> St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*. St. Petersburg, Russia, 2012, pp. 122–126.
7. Okoshi T., Okamoto K., Otsu M., Nisihara H., Kuma K., Hatate K. *Fiber-Optic Sensors*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990, 256 p. (in Russian)
8. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. Ed. E. Udd. NY, John Wiley & Sons, 2011, 512 p. doi: 10.1002/9781118014103
9. Dranitsyna E.V., Egorov D.A., Untilov A.A., Deineka G.B., Sharkov I.A., Deineka I.G. Reducing the effect of temperature variations on FOG output signal. *Gyroscopy and Navigation*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 92–98. doi: 10.1134/S2075108713020041
10. Kurbatov A.M. New methods to improve the performance of open and closed loop fiber-optic gyros. *Gyroscopy and Navigation*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 207–217. doi: 10.1134/S2075108715030098
11. Meshkovskii I.K., Miroshnichenko G.P., Rupasov A.V., Strigaleva V.E., Sharkov I.A. Investigation of thermal effects influence on the operation of a fiber-optic angular velocity sensor. *Proc. XXI St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*. St. Petersburg, 2014, pp. 191–202. (In Russian)
12. Sharkov I.A., Rupasov A.V., Strigaleva V.E., Volkovskii S.A. Thermal instability influence of the radiation source characteristics on the signal of fiber-optic gyroscope.

- № 6 (88). С. 31–35.
13. Lefevre H.C. *Fiber Optic Gyroscope*. 2<sup>nd</sup> ed. London: Artech House, 2014. 416 p.
  14. Кузьминов Ю.С. Электро-оптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987. 264 с.
  15. Новиков Р.Л. Технологическое оборудование и методы повышения качества намотки волоконного контура волоконно-оптического гироскопа: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2014. 94 с.

- Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6, pp. 31–35. (In Russian)
13. Lefevre H.C. *Fiber Optic Gyroscope*. 2<sup>nd</sup> ed. London, Artech House, 2014, 416 p.
  14. Kuz'minov Yu.S. *Electro-Optical and Nonlinear-Optical Lithium Niobate Crystal*. Moscow, Nauka Publ., 1987, 264 p. (In Russian)
  15. Novikov R.L. *Technological equipment and methods for quality improving of the fiber loop winding of a fiber optic gyroscope*. Eng. Sci. Diss. St. Petersburg, 2014, 94 p. (In Russian)

### Авторы

**Шарков Илья Александрович** – кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, isharkov@corp.ifmo.ru

**Виноградов Андрей Владимирович** – инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, andrvin777@gmail.com

**Козлов Виталий Николаевич** – инженер, аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, zoomtark@gmail.com

**Стригалева Владимир Евгеньевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vestrigalev@corp.ifmo.ru

**Кикилич Никита Евгеньевич** – инженер, аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kikelich@mail.ru

### Authors

**Ilya A. Sharkov** – PhD, assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, isharkov@corp.ifmo.ru

**Andrey V. Vinogradov** – research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, andrvin777@gmail.com

**Vitaly N. Kozlov** – engineer, postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, zoomtark@gmail.com

**Vladimir E. Strigalev** – PhD, Associate professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vestrigalev@corp.ifmo.ru

**Nikita E. Kikelich** – engineer, postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kikelich@mail.ru