

УДК 531.383–11:681.7

# ОПЫТ СОЗДАНИЯ БИНС С АВТОКОМПЕНСАЦИОННЫМ ВРАЩЕНИЕМ

**Д.В. Волынский**

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*  
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30  
E-mail: silent\_d@mail.ru

**Е.В. Драницына**

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*  
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30  
Университет ИТМО,  
Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49  
E-mail: evdranitsyna@itmo.ru

**Д.П. Елисеев**

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*  
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30  
Университет ИТМО,  
Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49  
E-mail: eliseev\_dp@elprib.ru

**Д.А. Радченко**

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*  
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30  
E-mail: radchenko\_da@elprib.ru

**А.А. Павлов**

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*  
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30  
E-mail: pavlov\_aa@elprib.ru

**А.А. Унтилов**

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*  
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30  
E-mail: untilov\_aa@elprib.ru

**Ключевые слова:** волоконно-оптический гироскоп, автокомпенсационное вращение, БИНС, бесплатформенная инерциальная навигационная система.

**Аннотация:** В докладе представлен опыт проектирования бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) на волоконно-оптических гироскопах (ВОГ) в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Рассматриваются характеристики ВОГ, схемы конструктивного построения БИНС, преимущества применения автокомпенсационного вращения измерительного модуля БИНС. Приводятся результаты моделирования и испытаний БИНС. Обсуждаются перспективы дальнейшего развития.

## 1. Введение

В настоящее время практически вся навигация в области средней и высокой точности осуществляется на основе БИНС на оптических гироскопах, в частности на ВОГ [1]. Благодаря улучшению характеристик и прогрессу в развитии фотонных технологий БИНС на ВОГ занимают около четверти рынка гироскопической техники, и их доля постепенно растет, вытесняя системы на лазерных гироскопах.

Мировыми лидерами в области разработки и производства высокоточных ВОГ, а также БИНС на них являются компании Northrop Grumman, Honeywell (США), IXblue (Франция) и ряд других [2-7]. В нашей стране в этой области работают компании: ООО НПК «Оптолинк», АО «Пермская НППК», АО «НИИ ПМ» (филиал ЦЭНКИ), АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» [8-13].

Повысить точность БИНС можно либо путем совершенствования точностных характеристик инерциальных датчиков, либо использованием автокомпенсационного вращения инерциального измерительного модуля (ИИМ) в соответствующем подвесе вокруг одной или более осей [14, 15]. Основным назначением подвеса в этом случае является обеспечение заданного изменения ориентации ИИМ относительно корпуса объекта, а не воспроизведение какой-либо навигационной системы координат, поэтому такие системы остаются бесплатформенными. Автокомпенсационное вращение (АКВ) позволяет автоматически компенсировать вклад инструментальных погрешностей инерциальных датчиков в накопленную погрешность навигационных параметров системы, что позволяет значительно повысить точностные характеристики БИНС при использовании инерциальных датчиков того же класса точности [16].

Разработки БИНС с АКВ ведутся как в России, так и за рубежом. В западных странах разработкой подобных систем занимались с начала 1980-х годов, где был создан ряд новых систем на ЛГ и ВОГ с для надводных и подводных объектов [17, 18].

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» имеет значительный опыт создания БИНС на базе ВОГ с автокомпенсационным вращением. В настоящее время в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разработана линейка БИНС повышенной точности на ВОГ с дрейфом нуля  $1 \cdot 10^{-2}$  °/ч с одноосным и двухосным автокомпенсационным вращением. Настоящая работа посвящена описанию опыта АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор» в применении технологии автокомпенсационного вращения для повышения точности БИНС на ВОГ тактического и навигационного класса точности.

## **2. Изделия АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» на ВОГ с АКВ**


АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» длительное время занимается разработкой БИНС на базе ВОГ как с АКВ, так и без него. Отправной точкой стало создание в начале 2000х системы «Мининавигация-К» на ВОГ с нестабильность смещения нуля гироскопов на уровне 1-3 °/ч производства АО «Физоптика» [19]. Система разрабатывалась для пилотируемого автономного глубоководного аппарата, малый внутренний объем которого устанавливал жесткие ограничения на массогабаритные характеристики и энергопотребление [20]. Разработка детальной модели погрешностей довольно грубых ВОГ, калибровка ее коэффициентов и одноосное АКВ позволили создать малогабаритный гирогоризонткомпас с точностью определения курса  $0,4^\circ \text{сесф}$  (здесь  $\varphi$  – географическая широта). Внешний вид и характеристики системы «Мининавигация-К» представлены в Таблице 1. Система успешно прошла испытания на глубоководном аппарате и подтвердила требуемую точность курсоуказания.

**Таблица 1.** Характеристики БИНС на ВОГ, производства АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Мининавигация-К	Зенит-МП
	
Количество осей АКВ	
1	1
Точность выработки курса (3σ)	
$0,4^{\circ} \cdot \text{sec } \varphi$	$0,05^{\circ} \cdot \text{sec } \varphi$
Радиальная погрешность определения координат (3σ)	
–	5км за 12 ч
Габаритные размеры, мм и Масса, кг	
Ø252x342	Ø260x374
17	28,5

В настоящее время в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» выпускается два исполнения ВОГ навигационного класса точности, разработанных совместно с Университетом ИТМО [21]. Фотографии интерферометров со снятыми верхними магнитными экранами и основные характеристики ВОГ приведены в таблице 2. К настоящему времени изготовлено порядка 500 ВОГ. На собственных ВОГ в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разработана линейка БИНС как без вращения, так и с АКВ инерциального модуля.

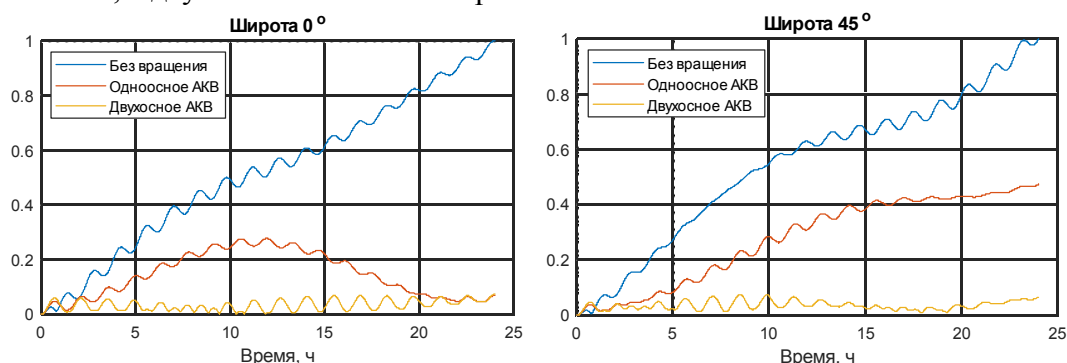
**Таблица 2.** Характеристики серийно выпускаемого ВОГ, производства АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Параметр	Значение	Внешний вид интерферометра
Диапазон измеряемой угловой скорости, %/с	$\pm 500$	
Случайная составляющая дрейфа нулевого сигнала при фиксированной температуре (3σ), °/ч	$< 0,01$	
Погрешность масштабного коэффициента (3σ), ppm	$< 50$	
Температурный диапазон предельный, °С	–40 ... + 70	
Температурный диапазон рабочий, °С	–15 ... + 55	
Габаритные размеры оптической части, мм	Ø202 × 40 Ø150 × 46	

Одноосное вращение ВОГ навигационного класса точности позволяет не только увеличить точность курсоуказания БИНС, но и увеличить время хранения вырабатываемых координат. Так в 2023 году изделие «Зенит-МП» – малогабаритная БИНС на ВОГ собственной разработки АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» с



одноосное АКВ в 2-4 раза позволяет снизить среднюю скорость нарастания радиальной погрешности, а двухосное – почти в 20 раз.



**Рис. 2.** Относительная радиальная погрешность БИНС с одноосным, двухосным АКВ и без него.

Помимо автокомпенсации инструментальных погрешностей инерциальных датчиков двухосное вращение ИИМ создает динамику движения, достаточную для калибровки составляющих их модели погрешностей, которые в условиях эксплуатации претерпевают изменения с течением времени, непосредственно на объекте без привлечения специального стендового оборудования [23]. Возможность уточнения (калибровки) составляющих модели ИД в ходе эксплуатации обусловлена наличием в интегрированных системах помимо БИНС дополнительных источников информации и позволяет снизить погрешности ее выходных параметров.

## 4. Заключение

В докладе описан опыт АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в создании БИНС на ВОГ, приведены примеры навигационных приборов как на покупных, так и на собственных ВОГ, нестабильность которых находится на уровне  $1 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ/\text{ч}$ .

Использование АКВ позволяет значительно увеличить точность БИНС при использовании тех же самых чувствительных элементов. В докладе приведены результаты испытания систем с одноосным АКВ и результаты моделирования системы с двухосным АКВ. Автокомпенсация погрешностей инерциальных датчиков и возможность калибровки составляющих их моделей погрешностей позволяет получить высокую точность вырабатываемых БИНС параметров при относительно низкой стоимости, что делает технологию построения БИНС с АКВ такой привлекательной для разработчиков.

## Список литературы

1. Драницына Е.В., Егоров Д.А., Унтилов А.А. Современное состояние волоконно-оптических гироскопов и перспективы их развития // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31, № 4.
2. Northrop Grumman Corporation. <https://www.northropgrumman.com>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
3. Airins. Georeferencing and Orientation System. <https://www.ixblue.com/wp-content/uploads/2022/01/airinsds-2021.pdf>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
4. Lefevre H.C., Steib A., Claire A., Sekeriyani A., Couderette A., et al. The fiber optic gyro 'adventure' at Photonetics, iXsea and now iXblue // Optical Waveguide and Laser Sensors / Edited by R.A. Lieberman, G.A. Sanders, I.U. Scheel. Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11405. P. 1140505. DOI: 10.1117/12.2560791.
5. Exail Company. <https://www.exail.com>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
6. Navy League 2023: US Navy awards Northrop Grumman AN/WSN-12 full-rate production contract. <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/navy-league-2023-us-navy-awards-northrop-grumman-anwsn-12-full-rate-production-contract>. Дата последнего обращения: 26.10.2023.
7. Honeywell International Inc. <https://www.honeywell.com>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.

8. Оптолинк. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. [http://optolink.ru/ru/products/strapdown\\_inertial\\_navigation\\_systems](http://optolink.ru/ru/products/strapdown_inertial_navigation_systems). Дата последнего обращения: 03.10.2023.
9. ООО НПК «Оптолинк». <http://www.optolink.ru>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
10. Андреев А.Г., Ермаков В.С., Мафтер М.Б., Струк В.К. Морская интегрированная малогабаритная система навигации и стабилизации на волоконно-оптических гироскопах КАМА-НС-В 2012 // Труды XXXVIII Всероссийской конференции «Управление движением корабля и специальных подводных аппаратов». М.: ИПУ РАН, 2012. С. 11-21.
11. ПАО ПНППК. <https://pnppk.ru>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
12. Филиал АО «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова». <https://www.russian.space/filialy/nii-pm.html>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
13. АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». <http://www.elektropribor.spb.ru>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
14. Heckman D.W., Baretela L.M. Improved affordability of high precision submarine inertial navigation by insertion of rapidly developing fiber optic gyro technology // IEEE 2000. Position Location and Navigation Symposium (Cat. No. 00CH37062). IEEE, 2000. P. 404-410.
15. Драницына Е.В., Соколов А.И. Вращение инерциального измерительного модуля как способ повышения точности бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Аналитический обзор // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31. № 4 (123).
16. Зельдович С.М., Малгинский М.И., Окон И.М., Остромухов Я.Г. Автокомпенсация инструментальных погрешностей гиросистем. Ленинград: Судостроение, 1976. 255 с..
17. Giovanni S.C., Levinson E. Performance of a Ring Laser Strapdown Marine Gyrocompass // Proceedings of the ION 7th Annual Meeting. Annapolis, Maryland, U.S., 1981.
18. Levinson Dr.E., ter Horst J., Willcocks M. The Next Generation Marine Inertial Navigator is Here Now. IEEE, 1994.
19. Электронный ресурс <https://www.fizoptika.ru/>.
20. Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П., Старосельцев Л.П., Блажнов Б.А., Буравлев А.С. Гирогоризонткомпас на волоконно-оптических гироскопах с вращением блока чувствительных элементов // Гироскопия и навигация. 2002. Т. 1, № 36. С. 57-63.
21. Унтилов А.А., Егоров Д.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Нефоросный С.Т., Азбелева М.П. Результаты испытаний волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25, № 3 (98). С. 78-85.
22. Titterton D.H., John L. Weston Strapdown Inertial Navigation Technology / 2nd Edition. The Institution of Electrical Engineers, 2004.
23. Емельянцеv Г.И., Блажнов Б.А., Степанов А.П. Об оценивании параметров модели погрешностей вращающегося измерительного модуля на ВОГ бесплатформенной ИНС в условиях объекта // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29, № 4 (115). С. 97-114. DOI: 10.17285/0869-7035.0075