

Ю. Н. КОРКИШКО, В. А. ФЕДОРОВ, В. Е. ПРИЛУЦКИЙ, В. Г. ПОНОМАРЕВ,
И. В. МОРЕВ, С. Ф. СКРИПНИКОВ, М. И. ХМЕЛЕВСКАЯ, А. С. БУРАВЛЕВ,
С. М. КОСТРИЦКИЙ, И. В. ФЕДОРОВ, А. И. ЗУЕВ, В. К. ВАРНАКОВ

БЕСПЛАТФОРМЕННЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) стали основой навигационных комплексов современных подвижных объектов. В настоящее время в системах инерциальной навигации начинают широко применяться БИНС на основе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) с замкнутым контуром обратной связи. В статье представлены разработки бесплатформенных инерциальных навигационных систем БИНС-500К, БИНС-500М и БИНС-501 компании НПК «Оптолинк» на основе ВОГ собственного изготовления и результаты их испытаний в различных применениях, а также сравнение ВОГ и БИНС компании «Оптолинк» с приборами ведущих мировых производителей.

Введение

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) широко применяются для решения задач навигации подвижных объектов [1-10]. Это обусловлено тем, что они дают полную информацию о навигационных параметрах движения – углах курса, тангажа (дифферента), крена, ускорения, скорости движения и координатах объекта. При этом они почти автономны, так как требуют минимум внешней информации. Благодаря возможности определения углового положения объекта с высокой точностью в любом диапазоне углов и с высокой частотой выдачи информации БИНС к настоящему времени не имеют альтернативы. В качестве чувствительных элементов систем инерциальной навигации всё чаще применяются волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) с замкнутым контуром обратной связи [10–15].

Коркишко Юрий Николаевич. Доктор физико-математических наук, профессор, генеральный директор ООО НПК «Оптолинк», Москва, Зеленоград,

Федоров Вячеслав Александрович. Доктор физико-математических наук, профессор, технический директор ООО НПК «Оптолинк».

Прилуцкий Виктор Евстафьевич. Директор Саратовского отделения ООО НПК «Оптолинк».

Пономарев Владимир Григорьевич. Кандидат технических наук, ведущий конструктор, технический директор Саратовского отделения ООО НПК «Оптолинк».

Морев Иван Владимирович. Ведущий инженер, руководитель группы. ООО НПК «Оптолинк».

Скрипников Сергей Федорович. Ведущий инженер. ООО НПК «Оптолинк».

Хмелевская Мария Ильинична. Инженер ООО НПК «Оптолинк».

Буравлев Александр Сергеевич. Ведущий инженер. ООО НПК «Оптолинк»

Кострицкий Сергей Михайлович. Д.ф.-м.н., доцент, технический директор Зеленоградского отделения ООО НПК «Оптолинк».

Федоров Игорь Вячеславович. Аспирант, инженер ООО НПК «Оптолинк».

Зуев Александр Иванович. Директор Арзамасского отделения ООО НПК «Оптолинк».

Варнаков Василий Константинович. Технический директор Арзамасского отделения ООО НПК «Оптолинк».

Статья по докладу на XX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

В мире насчитывается не более десятка производителей ВОГ навигационного класса точности. Эти фирмы являются также производителями БИНС. К ведущим мировым фирмам-производителям ВОГ и БИНС на их основе можно отнести iXSea (iXBlue) (Франция) [15,16], Northrop Grumman (бывшая Litton) (США) [17], Honeywell (США) [18], КВН (США) [19]. Они значительно потеснили на рынке фирмы, выпускающие БИНС на лазерных гироскопах, например Sagem (Safran) (Франция). Так, фирмой Northrop Grumman выпущено более 25000 ВОГ LN-200 тактического (среднего) класса точности. В России первопроходцем производства ВОГ является ЗАО «Физоптика», с начала 1990-х годов выпускающая гироскопы скоростного (низкого) и тактического класса точности с открытым контуром обратной связи [20]. Также ведутся разработки ВОГ в ОАО «ПНППК» (Пермь) [21] и ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (Санкт-Петербург) [22, 23]. Ведущим же российским производителем волоконно-оптических гироскопов тактического и навигационного (высшего) класса точности [24-32] и БИНС на их основе [33-35] является ООО «НПК «Оптолинк».

Задачей данной статьи является сравнение ВОГ и БИНС компании «Оптолинк» с приборами ведущих мировых производителей.

Волоконно-оптические гироскопы

Все ВОГ компании НПК «Оптолинк» изготавливаются с замкнутым контуром обратной связи, в так называемой минимальной конфигурации, с цифровой обработкой сигналов (ЦОС). Минимальная конфигурация обеспечивает взаимность оптических путей для двух световых волн, распространяющихся навстречу друг другу в волоконном контуре.

Структурные схемы одноосных (ОИУС) и трехосных (ТИУС) ВОГ с ЦОС представлены на рис. 1 и 2, соответственно.

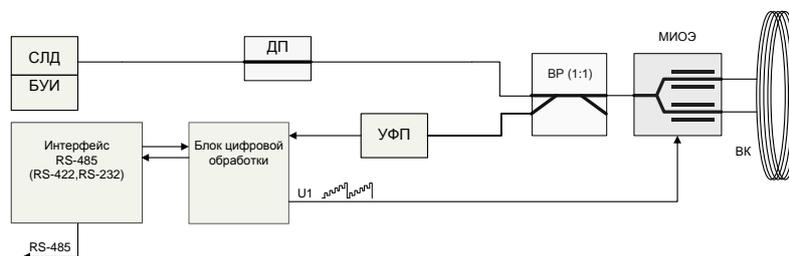


Рис. 1. Структурная схема ОИУС с ЦОС:

СЛД – суперлюминесцентный диод, БУИ – блок управления излучателем, ВР – волоконный разветвитель, ВК – волоконный контур, МИОЭ – многофункциональный интегральный оптический элемент, УФП – устройство фотоприемное, ДП – деполяризатор, RS-485 – последовательный интерфейс

В состав приборов входит один источник света с центральной длиной волны излучения 1550 нм, один или три фотодетектора; один или два разветвителя (1:1 и 1:2) для деления света, один или три интерферометра, чувствительных к ортогональным угловым скоростям, и блок электроники. Кольцевой интерферометр состоит из многофункционального интегрально-оптического элемента (МИОЭ) и из сохраняющего состояние поляризации света волоконного контура (ВК) длиной 200, 500, 1000 или 2000 м собственного производства. МИОЭ представляет собой интегрально-оптическую схему, сформированную на пла-

стине кристалла ниобата лития [36, 37]. В ТИУС-500 (и БЧЭ-500) используются один излучатель на три канала. Использование трех УФП позволяет вести обработку сигналов одновременно с трех каналов независимыми блоками цифровой обработки (БЦО). Каждый из БЦО формирует напряжения для получения пилообразной (ступенчатой) компенсирующей модуляции света для компенсации разности фаз Саньяка и для внесения постоянного фазового сдвига между встречными световыми волнами на $\pi/2$ рад с помощью вспомогательной модуляции (ВМ). Тем самым обеспечивается непрерывная работа каждого канала в режиме замкнутого контура [24-32].

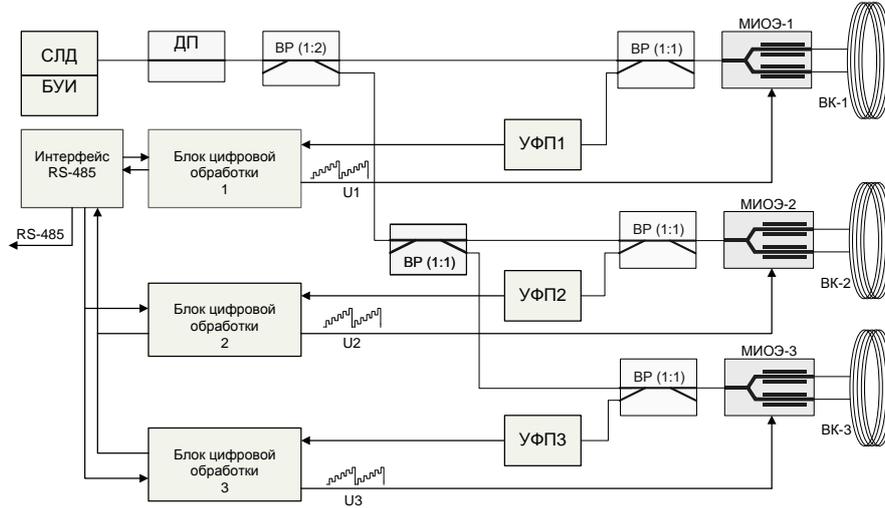


Рис. 2. Структурная схема ТИУС-500

В настоящее время разработаны и серийно выпускаются семейство одноосных ВОГ ОИУС-2000, ОИУС-1000, ОИУС-501 и ОИУС-200, отличающихся длиной и диаметром волоконного контура, а также трехосные ВОГ ТИУС-500 и блоки чувствительных элементов (БЧЭ) БЧЭ-500 и БЧЭ-501[24-32].

Таблица 1

Точностные и эксплуатационные параметры волоконно-оптических гироскопов

Характеристики	ОИУС-1000 «Оптолинк»	ОИУС-501 «Оптолинк»	ТИУС-500 «Оптолинк»	IMU-90 iXBlue [16]	IMU-120 iXBlue [16]	LN-200 Northrop Grumman [17]	IMU-600 Northrop Grumman [17]	DSP 1750 KVH [19]
Диапазон измеряемых угловых скоростей, °/с	± 90	± 250	± 300	± 500	± 260	± 1000	± 750	± 490
Нестабильность (дрейф) нулевого сигнала при постоянной температуре, град/ч	0.0005	0.0011	0.0025	0.001	0.0005	0.07	0.009	0.05
Погрешность масштабного коэффициента, ppm	200	500	700	30	30	100-500	н/д	500
Спектральная плотность мощности шума, град/ч	0.0009	0.0023	0.0065	0.0025	0.001	0.056	0.0044	0.013
Масса прибора, кг	0.8	0.35	1.2	4.8	4.0	1.25	1.47	0.14
Габаритные размеры, мм	Ø150×80	Ø100×30	110×110×90	280×136 ×150	160×160 ×160	Ø89×132	137×190×69	Ø 44×21

Точностные и эксплуатационные параметры ВОГ навигационного класса НПК «Оптолинк» и ведущих мировых производителей приборов представлены в табл. 1, при этом точностные параметры ВОГ – нестабильность (дрейфа) нулевого сигнала (Bias Instability) и спектральная плотность мощности шума (Angle Random Walk) – рассчитаны по международному стандарту – методу вариаций Аллана. Сравнение параметров волоконно-оптических гироскопов, рассчитанных по российскому и международному стандартам, см. в [32].

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы БИНС-500 (БИНС-500К, БИНС-500М) и БИНС-501 предназначены для формирования и выдачи потребителям пилотажно-навигационной информации как в автономном (инерциальном) режиме, так и в режиме интеграции со спутниковым приемником.

Системы БИНС-500К и БИНС-500М построены на базе блока чувствительных элементов БЧЭ-500, включающего трехосный волоконно-оптический измеритель угловой скорости ТИУС500 и три установленных ортогонально акселерометра (АТ-1104, INN-203 или других). Выходная информация выдается в цифровом виде по каналу RS-422 (возможно, по RS-485, MIL-STD-1553В и др.).

Управление работой ВОГ (управление режимами работы СЛД, обработкой сигналов с фотодетекторов, управление фазовыми модуляторами) осуществляется блоком сервисной электроники. Аналоговые сигналы, пропорциональные ускорениям по ортогональным осям, с трех акселерометров поступают на три канала 24-разрядного аналогово-цифрового преобразователя. На АЦП поступает также информация от температурного датчика. Вычислитель интерфейсного устройства обрабатывает информацию от всех датчиков угловой скорости, ускорения, температуры и выдает ее в последовательный канал обмена с вычислителем БИНС. Вычислитель БИНС решает задачи автономной выставки, ориентации и навигации и обменивается с внешними устройствами по последовательному каналу.

В состав системы также входит приемник сигналов спутниковой навигации, который выдает по последовательному каналу информацию о координатах и скоростях при наличии видимых спутников ГЛОНАСС или/и НАВСТАР для коррекции инерциальной системы. При отсутствии данной информации система выдает потребителю информацию в автономном (инерциальном) режиме [19-21].

Циклограмма работы БИНС включает следующие этапы:

- грубая начальная выставка базовой навигационной системы БИНС;
- точная начальная выставка базовой навигационной системы БИНС;
- навигационный режим базовой системы БИНС.

На этапе грубой начальной выставки БИНС выполняется приближенное определение угловой ориентации блока инерциальных чувствительных элементов (ЧЭ) по выходным сигналам ЧЭ.

На этапе точной начальной выставки системы БИНС оцениваются ошибки угловой ориентации блока инерциальных ЧЭ (БЧЭ), а также остаточные дрейфы ЧЭ и параметры их динамических моделей. Данная задача решается методом аналитического гирокомпасирования с применением математического аппарата калмановской фильтрации.

Оценивание и компенсация ошибок системы БИНС в навигационном режиме выполняется по позиционным и скоростным инерциально-спутниковым наблюдениям.

Бесплатформенная инерциальная навигационная система БИНС-500К

Внешний вид и внутренняя структура прибора БИНС-500К показаны на рис. 3.

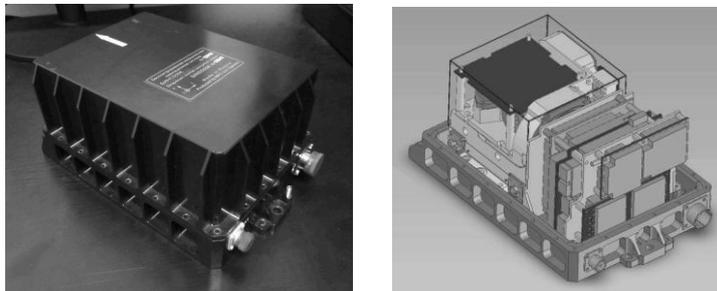


Рис. 3. Внешний вид и внутренняя структура БИНС-500К

Получены результаты испытаний серийно изготавливаемых приборов БИНС-500К в статических и динамических условиях в широком диапазоне внешних воздействий – подтверждены специфицируемые точностные характеристики – точность определения курса (гирокомпасирования) $<0.3^\circ$ (рис. 4), погрешность определения координат в инерциальном режиме <10 км/ч).

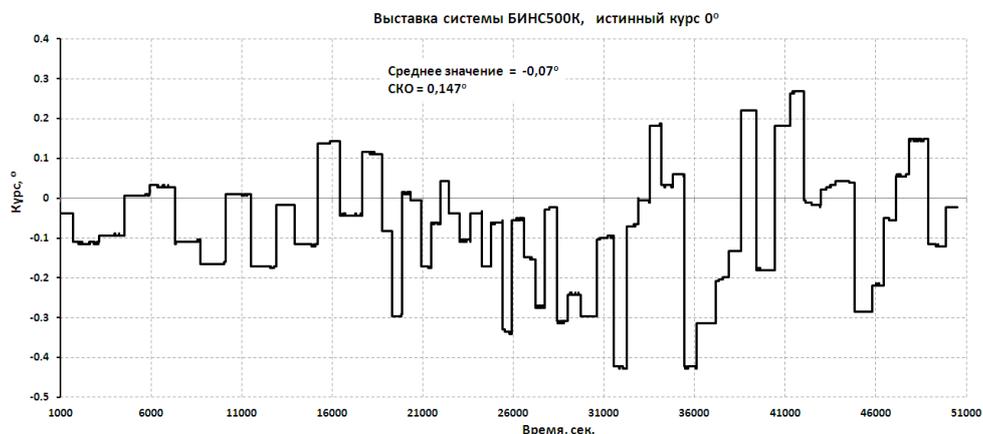


Рис. 4. Стабильность начальной выставки прибора БИНС-500К от запуска к запуску, период перезапуска (включения/ выключения) 10 мин

Бесплатформенная инерциальная навигационная система БИНС-501

В 2011 г. была закончена разработка и начато серийное производство бесплатформенной инерциальной навигационной системы БИНС-501 (рис. 5), построенной на базе БЧЭ-501, включающего три одноосных волоконно-оптических измерителя угловой скорости ОИУС-501 (см. табл.1) и три установленных ортогонально акселерометра сторонних изготовителей.

БИНС-501 предназначены для наземного и воздушного применений (реализована выставка в статических условиях) и показали улучшенные по сравнению с БИНС-500К точностные характеристики - точность определения курса (гирокомпасирования) $< 0,1^\circ$ (рис. 6), погрешность определения координат в инерциальном режиме – 4 км/ч) и повышенную температурную стабильность.



Рис. 5. Внешний вид БИНС-501

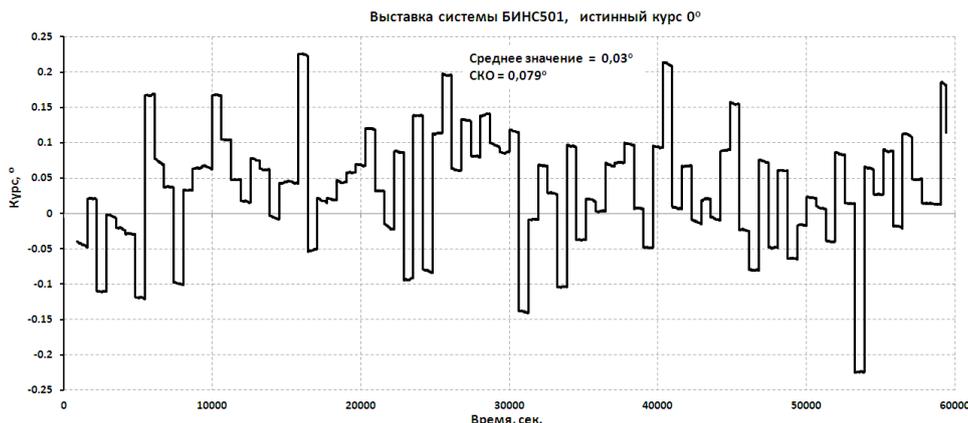


Рис. 6. Стабильность начальной выставки прибора БИНС-501 от запуска к запуску, период перезапуска (включения/ выключения) 10 мин

Бесплатформенная инерциальная навигационная система БИНС-500М

Для морских применений с возможностью начальной выставки в динамических условиях (условиях качки и движения), в 2012 г. в компании была закончена разработка морской бесплатформенной инерциальной навигационной системы БИНС-500М. Система комплексирована с датчиками внешней информации морского применения (СНС, лаг, и т.д.), при этом выставка, в отличие от БИНС-500К и БИНС-501, реализована не только в статических, но и в динамических условиях (качка). БИНС-500М построена на базе блока чувствительных элементов БЧЭ-500 и предназначена для формирования и выдачи потребителям навигационной информации, как в автономном режиме, так и в режиме коррекции от приемника GPS/ГЛОНАСС и лага,



Рис. 7. Внешний вид БИНС-500М

Информация потребителю выдается в цифровом виде по интерфейсу RS-422 (или RS-232), MIL-STD-1553B и Ethernet. Кроме того, с частотой 10 Гц идет обмен информацией с пультом штурмана. Пульт штурмана отображает основную навигационную информацию и позволяет настраивать и регулировать прибор. Прибор также имеет индикаторы для визуального контроля его состояния.

Внешний вид и общая схема прибора БИНС-500М показаны на рис. 7 и 8.

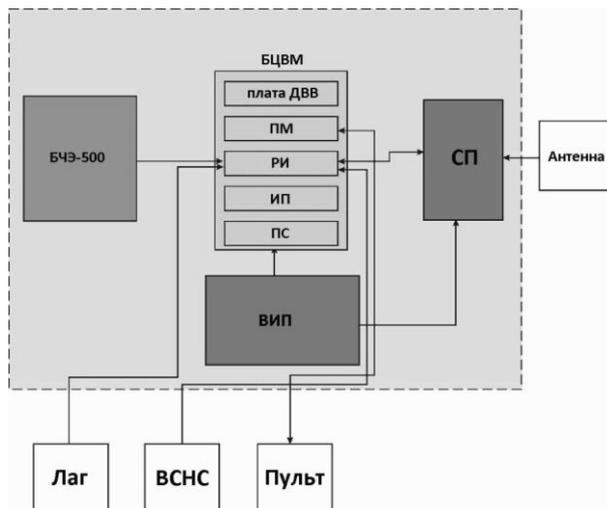


Рис. 8. Общая схема прибора БИНС-500М:

БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина, плата ДВВ – плата дискретного ввода-вывода, ПМ – процессорный модуль, РИ – расширитель интерфейса, ИП – интерфейсная плата, ПС – плата согласования, ВИП – вторичный источник питания, СП – спутниковый приемник, ВСНС – внешняя спутниковая навигационная система

Проведены испытания опытных приборов морской бесплатформенной инерциальной навигационной системы БИНС-500М на автомобиле, поворотном стенде и на судах. Задачей испытаний была отработка бортового программного обеспечения и исследование точностных характеристик прибора на этапе начальной выставки и в навигационном режиме. Проверялись различные варианты построения алгоритмов прибора.

Получены следующие результаты испытаний: на автомобиле – погрешности выработки координат и курса; на стенде – погрешности выставки прибора на качке, а также точности выработки углов качки; на судне – погрешности выработки координат, скорости и курса, а также выставки прибора на реальной качке и на ходу. Проверялись также работоспособность выработки углов качки и вертикальных перемещений. Приведенные погрешности прибора определялись как при движении судна постоянным курсом, так и при его маневрах.

Графики углов бортовой и килевой качки приведены на рис. 9, а, графики углов бортовой и килевой качки в режиме начальной выставки – на рис. 9, б, а угол курса – на рис. 10. На стенде двухосная качка имитировалась с помощью двухосного поворотного стенда (рис. 11). Видна работоспособность прибора на качке. Амплитуда и период углов равны заданным значениям с точностью: килевая качка – период 10 с (10.00299 с, погрешность ~ 3 мс), амплитуда – 7° (6.9918° , погрешность $\sim 0,5'$), бортовая качка – период 6.6666 с (6.6687 с, погрешность ~ 2 мс), амплитуда – 10° ($10,015^\circ$, погрешность $0,6' \div 1,2'$).

Проведены испытания для проверки работоспособности и определения точностных характеристик прибора БИНС-500М на качке при движении по акватории открытой Ладоги на катере «Акустик» (водоизмещение 18 т, испытательная база Карельского филиала ОАО «Концерн «ЦНИИ «Океанприбор»), а также испытания на буксире РБ-394 проекта 90600 (водоизмещение 304 т.) на Ленин-

градском судостроительном заводе «Пелла» (г. Отрадное Ленинградской области).

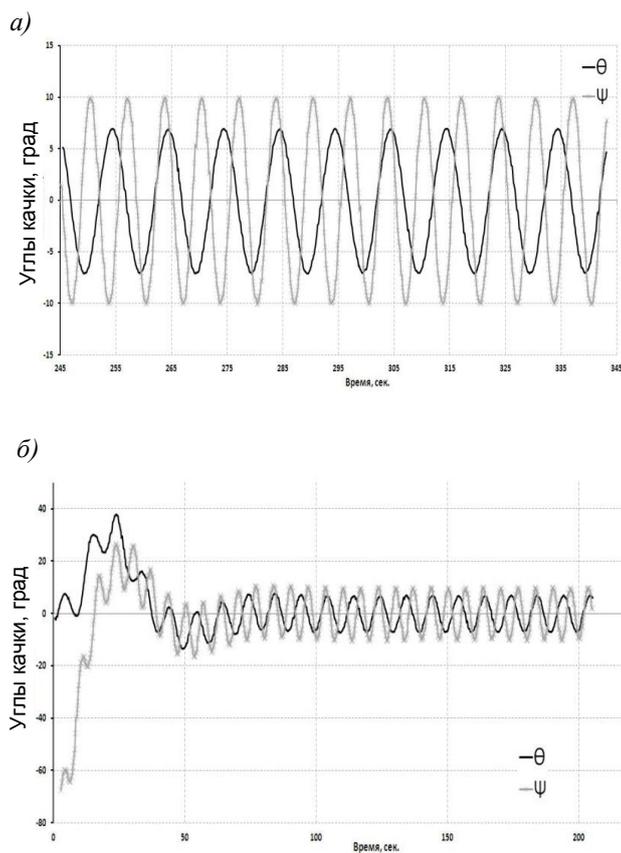


Рис. 9. Углы бортовой (ψ) и килевой (θ) качки при двухосной качке на поворотном стенде (а) и при выставке на двухосной качке (б)

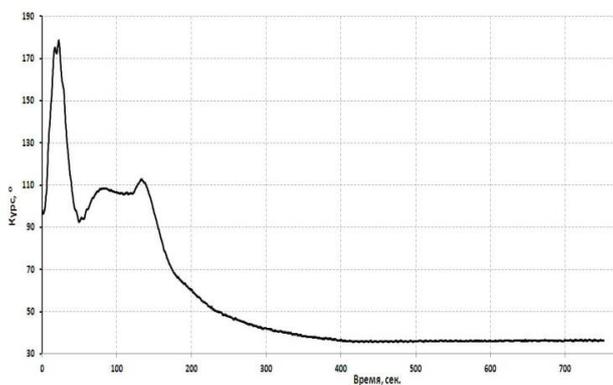


Рис. 10. Угол курса при выставке на двухосной качке



Рис. 11. Испытания БИНС-500М на двухосном поворотном стенде

Комплекс испытаний включал в себя следующее:

1. Выставка прибора при нахождении судна у пирса на швартовах 15 мин. Включение записи данных.
2. Выход в открытую Ладогу 40÷60 мин.

3. Движение галсами по 8 основным румбам с постоянной скоростью и курсом в течение не менее 20 мин на каждом курсе.

4. Маневрирование судна, включающее в себя как минимум три полные циркуляции в обе стороны через интервалы в 5 мин, участки набора и потери скорости на галсе 60 мин.

5. Перезапуск ПО прибора на качке при отсутствии движения 40 мин.

6. Перезапуск ПО прибора на качке при движении постоянным курсом с постоянной скоростью 40 мин.

7. Возврат судна к пирсу 40÷60 мин.

Точностные характеристики по скорости и координатам при корабельных испытаниях определялись путем сравнения данных, выработанных прибором и полученных со встроенного приемника GPS/ГЛОНАСС 1К-161-42 производства РИРВ. На судне прибор устанавливался приблизительно в диаметральной плоскости корабля (ДП). Коррекция и демпфирование осуществлялись также по данным приемника GPS/ГЛОНАСС 1К-161-42 производства РИРВ. Точности выработки скорости и координат определялись сравнением со спутниковыми данными. Точность выработки курса определялась по путевому углу. Данные с прибора и СНС записывались на технологическом компьютере в один файл. Под данными СНС понимаются координаты места, скорость и путевой угол.

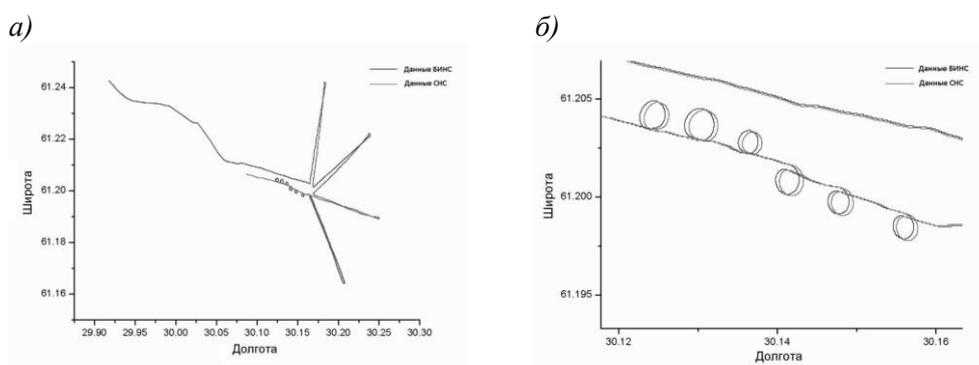


Рис. 12. Траектория движения корабля на испытаниях (а) и по циркуляциям (б)

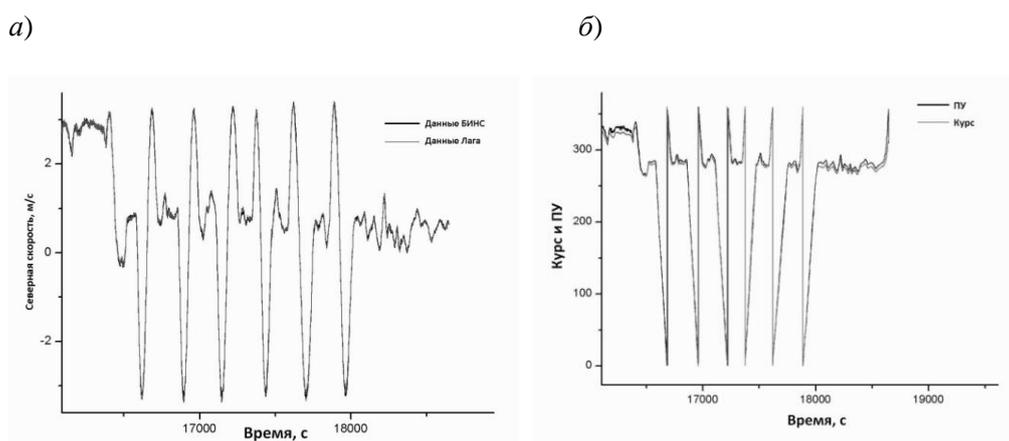


Рис. 13. График курса и путевого угла (а) и северной скорости (б) при движении по циркуляциям на испытаниях

Траектория приведена на рис. 12, а график курса, путевого угла и северной скорости при движении по циркуляциям – на рис. 13. Начальная выставка была проведена на ходу судна. Общая длительность испытаний – 8 ч. Средняя скорость судна – около 10 уз. Точность выработки координат (отклонение данных БИНС от данных СНС) в случае использования скорости от встроенного приемника GPS/ГЛОНАСС 1К-161-42 производства РИРВ составила 50/100 м по широте/долготе за 2–5 ч.

Характеристики БИНС (на ВОГ), выпускаемых компанией НПК «Оптолинк», а также ведущими мировыми производителями, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики бесплатформенных инерциальных навигационных систем на ВОГ

Характеристики	БИНС500К	БИНС500М	БИНС-501	Quadrans Ixblue [16]	Octans Ixblue [16]	LISA-200 Northrop Grumman [17]
Инерциальный режим:						
• Погрешность определения координат	10 км/ч	8 км/ч	4 км/ч			
• Погрешность определения скорости	2.5 м/с	2.0 м/с	1м/с			
• Точность определения курса	0.5 sec(lat)°	0.4·sec(lat)°	0.1·sec(lat)°	0.23·sec(lat)°	0.1·sec(lat)°	0.8°
• Точность определения крена и тангажа	0.1°	0.1°	0.05°	0.1°	0.01°	0.3°
Время готовности, мин	10	5-15	10	5	15	2
Дрейф нулевого сигнала гироскопов (1σ)	< 0.1 °/ч	< 0.1 °/ч	< 0.03 °/ч	< 0.1 °/ч	< 0.05 °/ч	< 0.5 °/ч
Дрейф акселерометров (1σ), g	< 5·10 ⁻⁴	< 5·10 ⁻⁴	< 1·10 ⁻⁴	< 5·10 ⁻⁴	< 5·10 ⁻⁴	< 3·10 ⁻⁴
Питание, В, пост. ток	27	27	27	12-36	24	28
Потребляемая мощность, Вт	14	20	20	13	12	40
Размер, мм	240×160×110	343×185×120	286×163×124	160×160×113	275×136×150	190×102×114
Масса, кг	3.4	6.4	4.8	2.8	4.6	2.0
Условия применения:						
• угловые скорости, °/с	<300	<300	<250	<500	<260	<1000
• диапазон температур, °С	-40 °С до +60 °С	-40 °С до +60 °С	-40 °С до +60 °С	-20 °С до +55 °С	-20 °С до +55 °С	-50 °С до +70 °С

Заключение

Таким образом, бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконно-оптических гироскопов навигационного класса точности производства ведущих отечественных и мировых компаний демонстрируют высокие точностные и эксплуатационные характеристики, достаточные для широких областей применения для различных воздушных, наземных, подземных, надводных и подводных приложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Titterton D., Weston J.**, Strapdown Inertial Navigation Technology, Institution of Engineering and Technology, 2005.
2. **Lawrence A.**, Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control, Springer, 2012.
3. **Chatfield A.B.**, Fundamentals Of High Accuracy Inertial Navigation, AIAA, 1997.
4. **Noureldin A., Karamat T.B., and Georgy J.**, Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration, Springer, 2013.

5. **О. Н. Анучин, Г.И. Емельянец** Интегрированные системы ориентации и навигации (БИНС и БИСО) / Под общ. ред. акад. РАН В.Г.Пешехонова. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1999.
6. **Матвеев В.В., Распопов В.Я.**, Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем, СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2009.
7. **Соколов С.В., Погорелов В.А.**, Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных инерциальных навигационных систем, М.: Физматлит, 2009.
8. **Мелешко В.В., Нестеренко О.И.**, Бесплатформенные инерциальные навигационные системы, Кировоград: Полимед-Сервис, 2011.
9. **Бабур Н., Шмидт Дж.** Направления развития инерциальных датчиков // Гироскопия и навигация, 2000. N1 - С.3-13.
10. **Пешехонов В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация, 2011. N1 - С.3-16.
11. **Lefevre H.**, The Fiber -Optic Gyroscope, Artech House, 1993.
12. **Optical Fiber Rotation Sensing** / Edited by Burns W.K. Academic Press, 1994.
13. **Великосельцев А. А., Филатов Ю. В.** Волоконно-оптические технологии в навигационных системах: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 58 с.
14. **Лукьянов, Д.П.** Лазерные и волоконно-оптические гироскопы: Состояние и тенденции развития // Гироскопия и навигация, 1998. N4 - С.20-45.
15. **Лефевр Э.К.**, Волоконно-оптический гироскоп: достижения и перспективы // Гироскопия и навигация, 2012. N4 - С.3-9.
16. <http://www.ixblue.com/business/area/inertial-products>
17. <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/NavigationSystems/Pages/default.aspx>, **J.M.Strus, M.Kirkpatrick, J.Sinko.** GPS/IMU development of a high accuracy pointing system for maneuvering platforms // Inside GNSS, 2008. N3, p.30–37.
18. http://www.honeywell.com/sites/aero/Inertial_Navigation_Products
19. <http://www.kvh.com/Military-and-Government/Gyros-and-Inertial-Systems-and-Compasses.aspx>
20. **Логозинский В., Сафутин И., Соломатин В.** Волоконно-оптический датчик вращения с цифровым откорректированным выходом // Гироскопия и навигация, 2002. N3 - С.93-102.
21. **Колеватов А.П., Николаев С.Г., Андреев А.Г., Ермаков В.С., Кель О.Л., Шевцов Д.И.** Волоконно-оптический гироскоп бесплатформенных инерциальных систем навигационного класса. Разработка, термокомпенсация, испытания // Гироскопия и навигация, 2010. N3 - С.49-60.
22. **Мешковский И.К., Стригалева В.Е., Дейнека Г.Б., Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П.** Трехосный волоконно-оптический гироскоп для морских навигационных систем // Гироскопия и навигация, 2009. N3 - С.3-9.
23. **Мешковский И.К., Стригалева В.Е., Дейнека Г.Б., Пешехонов В.Г., Вольнский Д.В., Унтилов А.А.** Трехосный волоконно-оптический гироскоп. Результаты разработки и предварительных испытаний // Гироскопия и навигация, 2011. N3 - С.67-74.
24. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Фенюк М.А., Марчук В.Г., Кострицкий С.М., Падерин Е.М.**, Высокоточный волоконно-оптический гироскоп с линейным цифровым выходом // Гироскопия и навигация, 2004. N1 - С.69-82.
25. **Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Марчук В.Г., Фенюк М.А., Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Кострицкий С.М., Падерин Е.М., Зуев А.И.**, Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы с линейным выходом // Гироскопия и навигация, 2004. N3 - С.62-72.
26. **Yu.N. Korkishko, V.A. Fedorov, V.E. Prilutskii, V.G. Ponomarev, V.G. Marchuk, I.V. Morev, E.M. Paderin, S.M. Kostritskii, V.N. Branets, V.S. Ryzhkov.** Space grade three-axis fiber optical gyroscope // in Proc. EOS Topical Meeting on Photonic Devices in Space, October 18-19, 2006, Paris, France. Vol.5, pp.32-35.
27. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Марчук В.Г., Кострицкий С.М., Падерин Е.М.** Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы // Фотон-Экспресс, 2007, 6(62), с. 47-49.
28. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Марчук В.Г., Морев И.В., Кострицкий С.М., Падерин Е.М., Несенюк Л.П., Буравлев А.С., Лисин Л.Г.** Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности // Гироскопия и навигация, 2008, № 1, с.71-81.
29. **Yu.N. Korkishko, V.A. Fedorov, V.E. Prilutskii, V.G. Ponomarev, I.V. Morev, S.M. Kostritskii.** Interferometric closed-loop fiber-optic gyroscopes // in Proceedings of SPIE, Vol.8351, Third Asia Pacific Optical Sensors Conference, edited by John Canning, Gangding Peng, (SPIE, Bellingham, WA, 2012), 83513L, pp. 83513L-1–83513L-8 (2012).
30. **Yu. Korkishko, V. Fedorov, V. Prilutskii, V. Ponomarev, I. Morev, S. Kostritskii, A. Zuev, V. Varnakov.** Closed loop fiber optical gyroscopes for commercial and space applications // in

- Proc. Inertial Sensors and Systems - Symposium Gyro Technology 2012, Karlsruhe, Germany, 18-19 September 2012, p.14.1-14.15.
31. **Yu.N.Korkishko, V.A.Fedorov, V.E.Prilutskii, V.G.Ponomarev, I.V.Morev, S.M.Kostritskii, A.I.Zuev, V.K.Varnakov.** Interferometric closed loop fiber optical gyroscopes for commercial and space applications // in Proceedings of SPIE, Vol.8421, OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, edited by Yanbiao Liao, Wei Jin, David D. Sampson, Ryozo Yamauchi, Youngjoo Chung, Kentaro Nakamura, Yunjiang Rao, (SPIE, Bellingham, WA, 2012), 842107, pp. 842107-1–842107-8 (2012).
 32. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Обухович Д.В., Федоров И.В., Кробка Н.И.** Исследование и идентификация структуры шумов высокоточных волоконно-оптических гироскопов // *Доклады XX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам*, Санкт-Петербург, 27-29 мая 2013, с. 32-35.
 33. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Плотников П.К., Михеев А.В., Наумов С.Г.** Исследование работы БИНС в условиях высоких широт с учетом погрешностей реальных датчиков // Доклады XVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 25-27 мая 2009, с. 57-60.
 34. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Патрикеев А.П., Чернодаров А.В., Матюшин В.А., Переляев С.Е.** Объектно-ориентированная технология интеграции навигационных измерителей и её реализация в бесплатформенной инерциальной навигационной системе БИНС-1000 на волоконно-оптических гироскопах // Доклады XVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 25-27 мая 2009, с. 21-30.
 35. **A.V.Chernodarov, A.P.Patrikeev, Yu.N.Korkishko, V.A.Fedorov, S.E. Perelyaev.** Software Seminalural Development for FOG Inertial Satellite Navigation System SINS-500 // Gyroscopy and Navigation, 2010, Vol. 1, No. 4, pp. 330–340.
 36. **Yu.N.Korkishko, V.A.Fedorov, S.M.Kostritskii, A.N.Alkaev, E.M. Paderin, E.I.Maslennikov, D.V.Apraksin.** Multifunctional integrated optical chip for fiber optical gyroscope fabricated by high temperature proton exchange // in Proceedings of SPIE, Vol.4944, Integrated Optical Devices: Fabrication and Testing, edited by Giancarlo C. Righini, (SPIE, Bellingham, WA, 2003), pp. 262-267.
 37. **Yu.N.Korkishko, V.A.Fedorov, V.E.Prilutskii, V.G.Ponomarev, I.V.Morev, S.M.Kostritskii, A.I.Zuev, V.K.Varnakov.** Optimization of multi-function integrated optics chip fabricated by proton exchange in LiNbO₃// in *Proceedings of SPIE*, Vol.9065, Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies 2013, 90650E (November 28, 2013). (doi:10.1117/12.2051638).

Abstract. At present time fiber-optic gyroscopes (FOGs) with closed-loop feedback scheme of operation are becoming widely used in inertial navigation systems. In the current work the series of devices developed and produced by LLC RPC “Optolink” are discussed. The first group is single-axis fiber-optic gyroscopes (FOGs) with different fiber length and fiber coil diameter: SRS-2000, SRS-1000, SRS-501, SRS-200. The second group comprises three-axis devices (TRS) and inertial measurement units (IMUs): TRS-500, IMU-500, IMU-501. All FOGs are produced in a so-called “minimal” configuration. The major components of FOGs and their impact on FOGs accuracy characteristics are discussed.

Key words: strapdown inertial navigation systems, fiber-optic gyroscopes