

УДК 681.7:528.022.62

**С.А. Болотнов, Ю.Н. Герасимчук, М.Ю. Шкатов,  
А.С. Болотнов, Г.В. Кондрашкин**

ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная  
компания», Пермь, Российская Федерация

## **АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МОРСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ**

Рассмотрены астрономические средства навигации для решения прикладных задач с большой продолжительностью выполнения, их преимущества по сравнению с другими источниками навигационной информации. Проанализированы предпосылки для создания нового поколения астронавигационных систем. Представлены макет астронавигационной системы, его составные части, внешний вид и внутреннее строение. Дана функциональная схема системы для различных режимов работы. Показаны ограничения на применение астросистем в морских условиях и способы их преодоления при конструировании экспериментального образца. Результаты испытаний экспериментального образца позволили определить направления дальнейшего совершенствования конструкции и характеристик астронавигационных систем нового поколения.

**Ключевые слова:** астроинерциальная система, навигация, бесплатформенная инерциальная система, астровизирующее устройство, система координат, погрешности, испытания.

**S.A. Bolotnov, U.N. Gerasimchuk, M.U. Shkatov,  
A.S. Bolotnov, G.V. Kondrashkin**

Perm Research and Production instrument-making company,  
Perm, Russian Federation

## **ASTRONOMICAL INERTIAL SYSTEMS FOR USE IN MARINE NAVIGATION COMPLEXES**

Astronomical means of navigation for solving applied tasks with a long duration of execution, their advantages in comparison with other sources of navigation information are considered. The prerequisites for the creation of a new generation of astrogation systems are analyzed. The layout of the astrogation system, its components, appearance and internal structure are presented. The functional scheme of the system for various operating modes is given. The limitations on the use of astrosystems in marine conditions and ways to overcome them when designing an experimental sample are shown. The test results of the experimental sample allowed us to determine the directions for further improvement of the design and characteristics of new-generation astrogation systems.

**Keywords:** astroinertial system, navigation, strapless inertial system, astrovising device, coordinate system, errors, tests.

В настоящее время ведутся работы по созданию авиационных и морских робототехнических комплексов (РТК) с большой продолжительностью выполнения решаемых задач. Навигационные системы таких РТК должны обладать следующими свойствами: заданная точность, автономность, помехозащищённость, скрытность работы (отсутствие демаскирующих признаков), возможность применения в любой точке земного шара, высокие эксплуатационные характеристики, обеспечивающие длительную бесперебойную работу без вмешательства обслуживающего персонала.

Астрономические средства в течение долгого времени оставались основными, наиболее точными и надёжными навигационными средствами на флоте, а с появлением летательных аппаратов большой дальности и продолжительности полета – и в авиации. Применение астрономических средств коррекции в навигации базируется на богатом арсенале научно обоснованных и опробованных методов [1, 2].

По мере прогресса в области инерциальных навигационных систем (ИНС), комплексированных с радионавигационными системами, в первую очередь с глобальными спутниковыми системами GPS и ГЛОНАСС, роль астронавигации стала принижаться. Однако наряду с высокой точностью спутниковым навигационным системам по-прежнему присущи неавтономность, высокая вероятность подавления помехами или увода сигнала, отсутствие надёжного приёма информации в ряде географических районов. В связи с этим закономерным является наметившийся пересмотр отношения к применению автономных средств коррекции на базе астрономических измерений как одного из самых надёжных средств контроля бортовых и корабельных навигационных систем.

Этому способствуют следующие преимущества астрономических средств:

- 1) возможность решения задачи определения места и поправки системы курсоуказания в любой точке земного шара;
- 2) помехозащищённость астрономических способов навигации;
- 3) возможность выполнения астронавигационных измерений даже при кратковременном наблюдении ограниченного участка небесной сферы;
- 4) автономность астрономических навигационных средств;

5) независимость точности решения навигационных задач с применением астрономических средств от времени измерения и дальности пути следования объекта.

К настоящему времени созданы предпосылки для создания нового поколения астронавигационных систем, удовлетворяющих требованиям заказчика по точности решения навигационных задач и обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками, уменьшенными габаритами и массой.

Первой предпосылкой являются успехи в разработке высокоточных электронно-оптических астродатчиков. Появление в 70–80-х гг. прошлого века матричных фотоприёмников на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) привело к созданию широкопольных приборов звёздной ориентации, решающих задачу по изображению произвольного участка небесной сферы. Первоначально подобные приборы нашли широкое применение в отечественных космических аппаратах [3]. В настоящее время продолжается разработка на их основе нового поколения астроинерциальных навигационных систем (АИНС) авиационного применения [4]. Дальнейшее развитие звёздных датчиков привело к замене светочувствительной ПЗС-матрицы матрицей на КМОП-элементах [6]. Использование КМОП-матриц позволяет сократить время получения одного кадра до десятых долей секунды, а также заменить механический затвор электронным, дополнительно уменьшить габариты, массу, энергопотребление датчика [7].

Второй предпосылкой является создание высокоточных платформенных ИНС, обладающих по сравнению с платформенными ИНС уменьшенными массо-габаритными и повышенными эксплуатационными показателями. Это позволяет включить непосредственно в состав АИНС компактное и надёжное устройство для высокоточного определения положения местной вертикали, что является необходимым условием астрономических определений.

Третьей предпосылкой является развитие компактных высокопроизводительных вычислителей, позволяющих реализовывать практически в режиме реального времени обработку данных и вычисления, обеспечивающие реализацию астрономических методов без участия человека.

С учётом указанных положений в ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» был разработан

макет астроинерциальной навигационной системы, внешний вид и внутреннее строение которого представлены на рис. 1, 2.

Основными составными частями такой АИНС являются астровизирующее устройство (АВУ) и бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС). Одной из отличительных особенностей конструкции АИНС является жесткое соединение АВУ с корпусом БИНС. Это обеспечивает неподвижность приборных осей АВУ и БИНС относительно друг друга и сводит к минимуму ошибки пересчёта углов пространственной ориентации, измеренных этими устройствами.

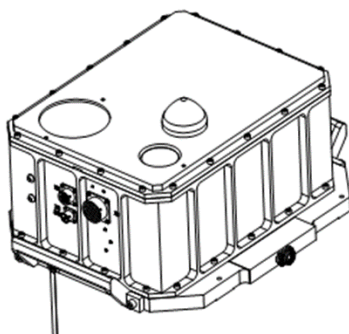


Рис. 1. Внешний вид макета астронавигационной системы

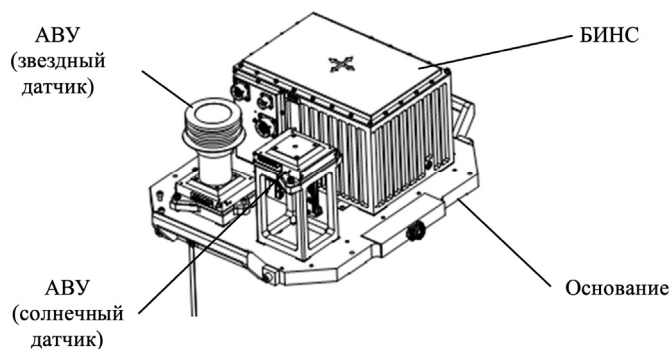


Рис. 2. Вид макета астронавигационной системы со снятым защитным кожухом

Взаимодействие АВУ и БИНС в составе АИНС обеспечивается следующим образом (рис. 3). БИНС определяет значения углов пространственной ориентации АИНС в топоцентрической системе координат (курс, дифферент, крен) и прогнозируемые значения углов

пространственной ориентации в астрономической второй экваториальной системе координат. Прогнозируемые значения углов ориентации в экваториальной системе поступают в вычислитель АВУ. Это позволяет сократить область поиска светил в электронном каталоге АВУ и существенно сократить время поиска и опознавания светил для коррекции координат места и курса.

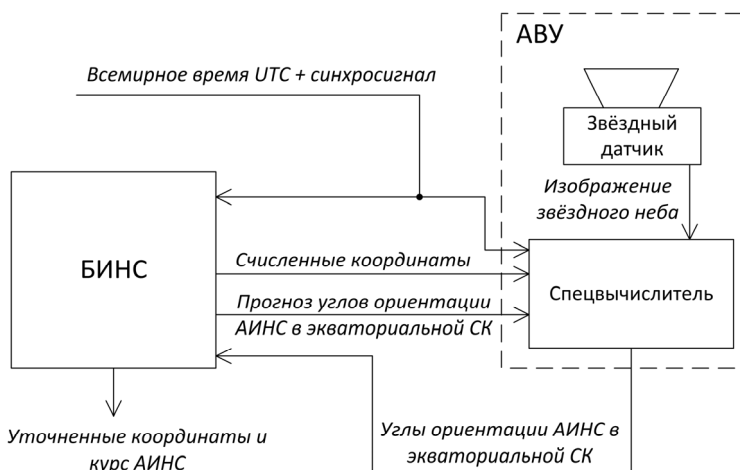


Рис. 3. Функциональная схема АИНС в режиме уточнения координат и курса

Благодаря широкому полю зрения АВУ не требуется его наведение на отдельные астроориентиры. Параметры оптической системы и светочувствительной матрицы подобраны таким образом, что обеспечивается гарантированное попадание не менее 4 различных звёзд в поле зрения АВУ. Как уже указывалось, звездный датчик ориентации АВУ выполнен на основе радиационностойких (при низких температурах), крупноформатных, малoshумящих, высокоскоростных КМОП-матриц. Самый высокоточный датчик [6] имеет величину случайной составляющей погрешности 0,25 угл. с (СКО) при частоте обновления информации 10–20 Гц и диапазоне угловых скоростей до 8 град/с.

Время получения одиночного кадра для АВУ составляет несколько десятых долей секунды. Для выделения изображений звезд на фоне засветки неба осуществляется накопление кадров. Кроме того, с учетом прогноза угловых перемещений по данным от БИНС при накоплении кадров производится их обработка для уменьшения смаза

изображения. Для предотвращения сбоев в определении ориентации в зависимости от оценки смаза и информативности полученного изображения может выполняться отбраковка кадра.

В электронном каталоге АБУ производится поиск астрономических координат, удовлетворяющих наблюдаемой группе звёзд. В результате изображению каждой звезды на полученном кадре ставятся в соответствие экваториальные астрономические координаты. По известным астрономическим координатам изображений звёзд на кадре определяется ориентация АБУ в экваториальной астрономической системе координат (углы прямого восхождения и склонения оптической оси АБУ, угол поворота АБУ относительно собственной оптической оси).

Накопление кадров производится до того момента, пока средняя квадратическая погрешность определения углов ориентации АБУ не снизится до нескольких угловых секунд по каждому углу. В зависимости от условий на это требуется от одного до 20–30 кадров. Независимо от результатов накопления осуществляется выдача данных в БИНС с частотой 1 Гц. После накопления формируется признак успешного определения углов, выдаваемый в БИНС вместе с результатами определения на очередном такте выдачи. Результаты определения углов соответствуют текущему времени выдачи.

Таким образом, измеряемыми астрономическими параметрами являются углы ориентации приборного базиса АБУ в экваториальной астрономической системе координат:

- угол прямого восхождения точки проекции оптической оси АБУ на небесную сферу;
- угол склонения точки проекции оптической оси АБУ на небесную сферу;
- угол поворота АБУ вокруг собственной оптической оси относительно звёзд.

Как уже указывалось, БИНС одновременно с работой АБУ определяет углы ориентации корпуса АИНС в топоцентрической системе координат (курс, дифферент, крен). Таким образом, указанные выше шесть величин составляют совокупность измеренных астронавигационных параметров.

Значения всемирного времени и синхросигналы могут поступать в АИНС из бортового навигационного комплекса либо вводиться в АИНС при включении и поддерживаться внутренним таймером БИНС.

Как показано в [4, 5], между ориентацией АИНС, заданной тремя углами в экваториальной астрономической системе координат, ориентацией АИНС относительно местной вертикали, заданной углами крена и дифферента, и значением всемирного времени, с одной стороны, и значениями географической широты, долготы и курса, с другой стороны, существует однозначное соответствие. Таким образом, по синхронизированным текущим данным АБУ и БИНС с учетом текущего значения всемирного времени определяются географические координаты местоположения и уточняется значение курса на данный момент времени.

Возможен вариант функционирования, когда значения координат местоположения определяются с высокой точностью спутниковыми или другими навигационными системами (рис. 4). Тогда по этим данным совместно с текущими данными АБУ и текущими значениями всемирного времени уточняются текущие значения углов пространственной ориентации АИНС в топоцентрической системе координат (курс, дифферент, крен) на данный момент времени. Этот режим может использоваться для уточнения пространственной ориентации некоторых устройств, например, высокоточных пеленгаторов, антенных систем и т.п.

В периоды отсутствия возможности для астронавигационных наблюдений продолжается работа БИНС, обеспечивающей счисление географических координат в автономном режиме либо в режиме совместной работы с навигационным комплексом объекта. При восстановлении условий видимости АБУ переходит в режим выдачи данных для обеспечения коррекции значений географических координат и курса.

Таким образом, жесткая механическая связь и синхронизация вычислений между АБУ и БИНС предоставляют удобную возможность одновременного получения данных астрономических наблюдений и данных о пространственном положении в топоцентрической системе координат с погрешностью привязки этих данных ко времени, определяемой частотой выдачи и не превышающей одной секунды. При этом обеспечивается непрерывная выдача результатов астронаблюдений с периодичностью в несколько секунд. Это позволяет получить значительно больший массив результатов астрономических наблюдений с привязкой ко времени и существенно сократить время на их обработку по сравнению с известными в мореходной астрономии методами работы с секстаном, хронометром и астрономическими таблицами [1].

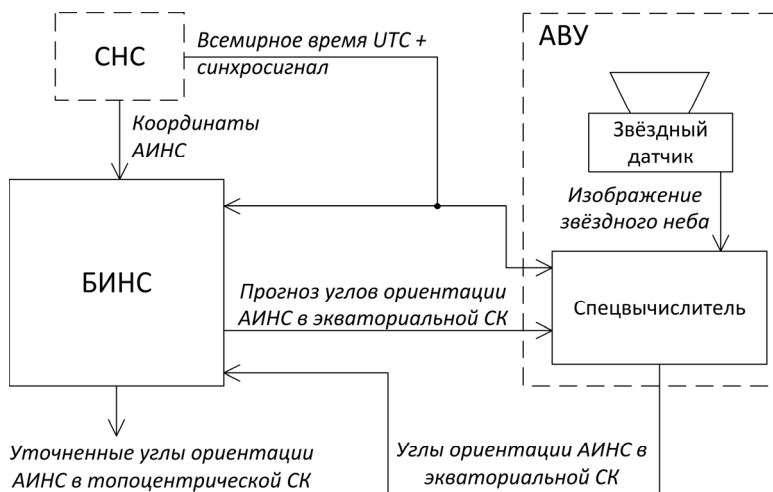


Рис. 4. Функциональная схема АИНС в режиме уточнения углов пространственной ориентации

В ходе наземных натурных испытаний была подтверждена обоснованность конструкционных, схемотехнических и программно-алгоритмических решений, положенных в основу созданного макета АИНС.

Однако применению подобных систем в морской астронавигации препятствуют следующие их особенности:

- 1) необходимость наблюдения достаточных участков неба для захвата группы звёзд;
- 2) необходимость ограничения угловых колебаний объекта применения значениями угловых скоростей порядка 2 град/с.

Дополнительно требуется учитывать возможность загрязнения оптического канала с внешней стороны (брызги, морская соль и т.д.).

Для летательных и космических аппаратов эти особенности не налагают существенных ограничений. Для корабля (судна) указанные условия обеспечиваются в зависимости от гидрометеорологической обстановки и волнения моря в районе плавания.

Для снятия указанных ограничений на применение АИНС в морских условиях в её конструкцию необходимо внести следующие изменения:

- 1) обеспечить возможность наведения системы на выбранные участки неба;
- 2) обеспечить гиросtabilлизацию системы в направлении выбранных участков неба.



Наведение системы и стабилизация её ориентации относительно заданного положения могут осуществляться электромеханическими исполнительными устройствами. При этом должен сохраняться принцип неподвижного закрепления друг относительно друга АВУ и БИНС, образующих астроинерциальный блок.

Указанные замечания были учтены в ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» при участии в создании экспериментального образца астроинерциальной навигационной системы с системой наведения и стабилизации в условиях качки (рис. 5).



Рис. 5. Экспериментальный образец морской астронавигационной системы

Данный образец успешно прошёл следующие виды испытаний:

- стендовые испытания на соответствие требованиям стойкости по группе 2.1.3 ГОСТ РВ 20.39.304-98;
- натурные испытания на геодезически оборудованной испытательной площадке;
- корабельные швартовые и ходовые испытания на соответствие требованиям заказчика.

Результаты испытаний экспериментального образца АИНС позволили определить следующие направления, по которым возможно дальнейшее совершенствование конструкции и характеристик астронавигационных систем нового поколения:

- 1) повышение точности определения положения местной вертикали в инерциальном измерительном блоке АИНС;
- 2) обеспечение возможности работы звёздного датчика АВУ в дневных условиях с поверхности моря;

3) разработка звёздного датчика АВУ, работающего в диапазонах прозрачности водяных паров (облаков);

4) расширение диапазона рабочих угловых скоростей звёздного датчика;

5) разработка методик привязки АИНС к строительным осям объекта при установке и в процессе эксплуатации.

Вместе с тем уже в существующем виде АИНС может быть применена в составе надводных обитаемых и безэкипажных кораблей и судов, обеспечивая при решении задач автономность, помехозащищённость, скрытность, отсутствие ограничений по району действия. Для применения в составе всплывающих подводных аппаратов АИНС может быть выполнена без системы стабилизации. Реализация указанных мероприятий позволяет ещё более существенно расширить возможности применения морских РТК.

### **Список литературы**

1. Скубко Р.А., Шкатов М.Ю. Мореходная астрономия: учебник. – СПб.: Изд-во СПб ВМИ, 2002. – 652 с.

2. Воробьев Л.М. Астрономическая навигация летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1968. – 280 с.

3. Звёздный координатор БОКЗ-М и перспективы его развития / Г.А. Аванесов, А.А. Форш, Р.В. Бессонов, Я.Л. Зиман, М.И. Куделин // Материалы XIV Санкт-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2007.

4. Разработка автономной бесплатформенной астроинерциальной навигационной системы / Г.А. Аванесов, Р.В. Бессонов, А.Н. Куркина, Е.А. Мыслик, А.С. Лискив, М.Б. Людомирский, И.С. Каютин, Н.Е. Ямщиков // Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов: сб. тр. Третьей Всерос. науч.-техн. конф.; Таруса, 10–13 сент. 2012. – М.: Изд-во ИКИ РАН, 2013. – С. 9–29.

5. Основы определения корректирующих поправок в бесплатформенной астроинерциальной навигационной системе / Ю.Н. Герасимчук, С.Г. Брайткрайц, С.А. Болотнов, М.Б. Людомирский, И.С. Каютин, Н.Е. Ямщиков, Р.В. Бессонов // Новости навигации. – 2011. – № 4. – С. 33–39.

6. Звёздные датчики ориентации в астроинерциальных системах летательных аппаратов / Р.В. Бессонов, Е.В. Белинская, Н.Н. Брысин,

С.В. Воронков, А.Н. Куркина, А.А. Форш // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 6. – С. 9–20.

7. Анализ современного состояния и перспектив развития приборов звездной ориентации семейства БОКЗ / Г.А. Аванесов, Р.В. Бессонов, А.А. Форш, М.И. Куделин // Изв. вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 1. – С. 3–13.

### References

1. Skubko R.A., Shkatov M.Iu. Morekhodnaia astronomiia [The Nautical astronomy]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii voenno-morskoii institut, 2002, 652 p.

2. Vorob'ev L.M. Astronomicheskaiia navigatsiia letatel'nykh apparatov [Celestial navigation of aircraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1968, 280 p.

3. Avanesov G.A., Forsh A.A., Bessonov R.V., Ziman Ia.L., Kudelin M.I. Zvezdnyi koordinatork BOKZ-M i perspektivy ego razvitiia [Star BOKZ-M coordinator and prospects for its development]. *Materialy XIV Sankt-Peterburgskoi mezhdunarodnoi konferentsii po integrirovannym navigatsionnym sistemam*. Saint Petersburg: Tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut "Elektroprigor", 2007.

4. Avanesov G.A., Bessonov R.V., Kurkina A.N., Mysnik E.A., Liskiv A.S., Liudomirskii M.B., Kaiutin I.S., Iamshchikov N.E. Razrabotka avtonomnoi besplatformennoi astroinertsial'noi navigatsionnoi sistemy [Development of an autonomous strapdown astroinertial navigation system]. *Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov. Sbornik trudov Tret'ei Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii; Tarusa, 10-13 September 2012*. Moscow: Institut kosmicheskikh issledovaniy Rossiiskoi akademii nauk, 2013, pp. 9-29.

5. Gerasimchuk Iu.N., Braitkraits S.G., Bolotnov S.A., Liudomirskii M.B., Kaiutin I.S., Iamshchikov N.E., Bessonov R.V. Osnovy opredeleniia korrektruiushchikh popravok v besplatformennoi astroinertsial'noi navigatsionnoi sisteme [Basics of determining adjustments in a strapdown astroinertial navigation system]. *Novosti navigatsii*, 2011, no. 4, pp. 33-39.

6. Bessonov R.V., Belinskaia E.V., Brysin N.N., Voronkov S.V., Kurkina A.N., Forsh A.A. Zvezdnye datchiki orientatsii v astroinertsial'nykh sistemakh letatel'nykh apparatov [Stellar orientation sensors in astro-inertial

systems of aircraft]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2018, no. 15, no. 6, pp. 9-20.

7. Avanesov G.A., Bessonov R.V., Forsh A.A., Kudelin M.I. Analiz sovremennogo sostoiianiia i perspektiv razvitiia priborov zvezdnoi orientatsii semeistva BOKZ [Analysis of the current state and prospects for the development of stellar orientation devices of the BOKZ family]. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 3-13.

### **Сведения об авторе**

#### **БОЛОТНОВ С.А.**

e-mail: [BolotnovSA@pnppk.ru](mailto: BolotnovSA@pnppk.ru)

Кандидат технических наук, доцент, начальник отдела прецизионных навигационных систем ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь.

#### **ГЕРАСИМЧУК Ю.Н.**

e-mail: [GerasimchukUN@pnppk.ru](mailto: GerasimchukUN@pnppk.ru)

Кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника отдела прецизионных навигационных систем ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь.

#### **ШКАТОВ М.Ю.**

e-mail: [ShkatovMU@pnppk.ru](mailto: ShkatovMU@pnppk.ru)

Кандидат технических наук, доцент, научный консультант отдела прецизионных навигационных систем ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь.

### **About the author**

#### **BOLOTNOV S.A.**

e-mail: [BolotnovSA@pnppk.ru](mailto: BolotnovSA@pnppk.ru)

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Precision Navigation Systems, PJSC PNPPC, Perm.

#### **GERASIMCHUK U.N.**

e-mail: [GerasimchukUN@pnppk.ru](mailto: GerasimchukUN@pnppk.ru)

Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Precision Navigation Systems Department of PNPPC PJSC, Perm.

#### **SHKATOV M.U.**

e-mail: [ShkatovMU@pnppk.ru](mailto: ShkatovMU@pnppk.ru)

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Scientific Consultant of the Precision Navigation Systems Department of PNPPC PJSC, Perm.

**БОЛОТНОВ А.С. SPIN 2102-2943**

e-mail: *BolotnovAS@pnppk.ru*

Инженер-программист отдела прецизионных навигационных систем ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь.

**BOLOTNOV A.S. SPIN 2102-2943**

e-mail: *BolotnovAS@pnppk.ru*

software engineer of the department of precision navigation systems, PNPPC PJSC, Perm.

**КОНДРАШКИН Г.В.**

e-mail: *yaegor93@mail.ru*

Инженер-конструктор отдела прецизионных навигационных систем ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь.

**KONDRASHKIN G.V.**

e-mail: *yaegor93@mail.ru*

Design Engineer, Precision Navigation Systems Department, PNPPC PJSC, Perm.

**Финансирование:** работа не имела спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад автора:** 100 %.

**Получена:** 02.07.2023

**Одобрена:** 05.07.2023

**Принята к публикации:** 07.07.2023

**Conflict of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions:** All authors have made an equivalent contribution to the publication.

**Received:** 02/07/2023

**Approved:** 05/07/2023

**Accepted for publication:** 07/07/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Астрономические инерциальные системы для применения в морских навигационных комплексах / С.А. Болотнов, Ю.Н. Герасимчук, М.Ю. Шкатов, А.С. Болотнов, Г.В. Кондрашкин // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 4. – С. 89–101.

Please cite this article in English as: Bolotnov S.A., Gerasimchuk U.N., Shkatov M.U., Bolotnov A.S., Kondrashkin G.V. Astronomical inertial systems for use in marine navigation complexes // Applied photonics, 2023, no. 4, pp. 89-101.