

Ф. ДЕЛЭЙЕ

БОРТОВАЯ ИНЕРЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ SPACENAUTE® ДЛЯ ЕВРОПЕЙСКОЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «АРИАН-6» НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА

Предполагается, что новая модульная многоцелевая ракета-носитель «Ариан-6», запуск которой запланирован на 2020 год, воплотит в себе наилучшие возможности для государственных и коммерческих пользователей. Очевидно, что существующие варианты инерциальных навигационных систем (ИНС) не подходят для этой задачи. Одним из главных условий открытого тендера на новую ИНС, который проводила компания Ariane-Group при участии Европейского космического агентства (ЕКА), было использование передовых технологий. Компания Safran, предложившая ИНС SpaceNaute® на основе волнового твердотельного гироскопа (ВТГ), одержала победу над конкурентами, чьи решения основывались на кольцевых лазерных гироскопах (КЛГ) или волоконно-оптических гироскопах (ВОГ). В статье приводится сравнительный анализ, в результате которого была выбрана необходимая технология и создана не имеющая аналогов ИНС SpaceNaute® с уникальными массогабаритными и рабочими характеристиками. Представлены основные технические параметры инерциальных датчиков системы SpaceNaute®, а также преимущества ВТГ, успешно использованные в этом изделии.

Ключевые слова: ВТГ, ВОГ, КЛГ, ракета-носитель.

Введение

В 1960-х гг. компания Safran Electronics & Defense (ранее известная как Sagem) первой в Европе создала ИНС для ракеты-носителя одноразового использования

Делэйе Фабрис. Вице-президент Научно-технологического центра навигации, Safran Electronics & Defense (Франция).

Научный редактор перевода д.ф.-м.н. М. А. Басараб.

Статья по докладу на XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2018.



Рис. 1. ИНС ракеты-носителя «Диамант»

(рис. 1). Благодаря этому Франция стала третьей космической державой в мире после СССР и США, успешно осуществив в ноябре 1965 г. первый запуск ракеты-носителя «Диамант» и вывод на околоземную орбиту спутника массой 45 кг.

С тех пор компания Safran занимается оснащением многочисленных космических аппаратов, а также стратегических баллистических ракет для стратегических сил Франции, все более сложными и точными ИНС.

В ходе подготовки технических предложений по разработке ИНС для «Ариан-6» компания Safran провела сравнительные исследования, в результате которых было предложено наиболее конкурентоспособное и оригинальное решение SpaceNaute[®], позволяющее реализовать в этой ракете-носителе все самые передовые технологии.

При относительно небольшой стоимости SpaceNaute[®] должна обладать высокими эксплуатационными характеристиками для работы в сложных условиях (резкие перепады температур и высокие уровни радиации) на сильно вытянутых эллиптических переходных орбитах, например на суперсинхронных переходных орбитах. Полеты по подобным траекториям более длительны (как правило, 10 часов и более в зависимости от широты стартового комплекса) и осуществляются на большей высоте, в связи с чем к радиационной устойчивости инерциального измерительного модуля (ИИМ) и сопутствующей электроники предъявляются более жесткие требования.

Сравнительный анализ инерциальных технологий

Занимая в Европе лидирующие позиции в сфере инерциальных технологий, компания Safran производит большинство изделий инерциальной техники на промышленном уровне. Каждая из систем имеет свои достоинства и недостатки, поэтому, чтобы выбрать оптимальный вариант для конкретного применения, необходимо осуществлять сравнительный анализ.

ИНС для ракеты-носителя должна включать датчики навигационного класса точности, при этом существует ограниченный спектр гироскопов такого класса, а именно:

- механические гироскопы, например ДНГ (гироскопы с динамической настройкой), которые все еще используются, но на сегодняшний день считаются устаревшими;
- перспективные микромеханические гироскопы (МЭМС), которые пока не способны обеспечить требуемый уровень точности;
- КЛГ на сегодняшний день, несомненно, наиболее распространены, они используются на всех летательных аппаратах гражданской и военной авиации, а также преобладают на ракетах-носителях;
- ВОГ больше всего востребованы в различных областях гражданской промышленности, однако отмечены случаи их применения в бортовых системах спутников или ракет-носителей;
- ВТГ представляет собой новое высокотехнологичное направление в гироскопии, которое освоили лишь несколько компаний. ВТГ применяются в таких высокотехнологичных областях, как дальняя космическая навигация или спутники с продолжительным сроком эксплуатации.

Было очевидно, что при выборе современных типов гироскопов, оптимально соответствующих требованиям ракет-носителей будущего (в том числе «Ариан-6»), следует рассматривать КЛГ, ВОГ и ВТГ, чьи характеристики были детально проанализированы.

На первом этапе анализа рассматривались основные точностные характеристики гироскопов: стабильность смещения нуля, нестабильность масштабного коэффициента и случайный уход по углу (СУУ).

Единственным недостатком КЛГ является его СУУ, связанный главным образом с механизмом виброподставки, которая необходима для предотвращения синхронизации двух противоположно направленных лазерных лучей. СУУ влияет на продолжительность начальной выставки, однако для ракеты-носителя это не имеет значения, поскольку несколько дополнительных минут для этой цели перед стартом вполне допустимы.

Серьезный недостаток ВОГ состоит в значительной нестабильности его масштабного коэффициента, которая примерно в 10 раз больше, чем у КЛГ. Кроме того, из-за неоднородности конструкции его чувствительного элемента (катушки с волокном) сложно обеспечить долговременную стабильность его параметров и пространственного положения оси чувствительности. Эти показатели несопоставимы с КЛГ.

Точностные характеристики ВТГ сильно варьируются, поскольку они напрямую связаны со способом возбуждения поперечных упругих волн внутри резонатора; поэтому они зависят в основном от особенностей используемой электроники. ВТГ по своим рабочим характеристикам может конкурировать с КЛГ, а его СУУ, по меньшей мере, такой же, как у ВОГ.

Таким образом, все три типа гироскопов обладают достаточно высокими точностными характеристиками. Поэтому на первом этапе отбора нет оснований отказываться ни от одного из них. Вместе с тем, необходимо отметить, что КЛГ и ВТГ более удобны в конструктивном плане для обеспечения требуемых рабочих характеристик.

В табл. 1 представлены оценки данных типов гироскопов по основным точностным характеристикам (по трехбалльной шкале).

Т а б л и ц а 1

Основные точностные характеристики трех типов гироскопов

Виды гироскопов		КЛГ	ВОГ	ВТГ
Характеристики	Систематическая составляющая дрейфа нуля	3	2	3
	Нестабильность смещения нуля	3	3	3
	Случайный уход по углу	2	3	3
	Нестабильность масштабного коэффициента	3	1	3
	Рассогласование	3	2	3

На следующем этапе выполнялось сравнение технических характеристик ИНС с учетом более глубокого анализа параметров различных типов гироскопов с точки зрения их эксплуатации в условиях космоса, где требуется их по-

вышенная защищенность. Однако, несмотря на то что иногда можно защитить датчик от агрессивного воздействия среды (например, за счет использования эластичной подвески большего размера для компенсации сильных вибраций), такое техническое решение приводит к утяжелению конструкции системы, а также к увеличению ее стоимости.

ВОГ способны выдерживать значительные воздействия факторов окружающей среды, однако их точность зачастую серьезно ухудшается в агрессивных условиях (вибрация, ударные воздействия и градиенты температуры). Это связано, в частности, с неоднородностью структуры катушки с волокном, из-за которой возникает фазовая невзаимность внутри оптического интерферометра и, как следствие, смещение нуля. Повысить устойчивость к космическому излучению можно за счет оптимального выбора легирующей добавки в сохраняющее поляризацию оптическое волокно ВОГ, но для этого требуются специальные конструктивные решения.

И КЛГ и ВТГ в целом устойчивы к воздействию космической среды благодаря монолитной конструкции (их корпуса выполнены из цельного куска стеклокерамики и цельного куска плавленого кварца).

В табл. 2 представлены сравнительные характеристики гироскопов по их устойчивости к воздействию окружающей среды (по трехбалльной шкале). Как видно из таблицы, для обеспечения максимальной устойчивости ИНС к внешним воздействиям предпочтительнее использовать КЛГ и ВТГ.

Т а б л и ц а 2

Устойчивость гироскопов к воздействиям окружающей среды

	Виды гироскопов	КЛГ	ВОГ	ВТГ
Устойчивость	Ударопрочность	3	2	3
	Устойчивость к вибрации	3	1	3
	Термочувствительность	3	1	3
	Устойчивость к радиации	3	2	3

Наконец, повышение конкурентоспособности ИНС для ракеты-носителя достигается также за счет оптимизации массогабаритных параметров, поскольку уменьшение массы является наиболее частым требованием для космического применения. Таким образом, габариты, масса и потребляемая мощность имеют приоритетное значение.

Для ВОГ и КЛГ, принцип действия которых основан на эффекте Саньяка, необходимы большие интерферометры, обеспечивающие рабочие характеристики навигационного класса. Вследствие этого в составе ВОГ имеется массивная катушка (при этом масса самого волокна невелика), а в составе КЛГ – тяжелое основание из стеклокерамики. В то же время ВТГ чрезвычайно компактен и легок: он примерно в 10 раз меньше оптических гироскопов.

В табл. 3 сравниваются выбранные типы гироскопов по массогабаритным характеристикам и потребляемой мощности (по трехбалльной шкале). Как видно из таблицы, с этой точки зрения ВТГ, несомненно, является наилучшим вариантом.

Массогабаритные и мощностные характеристики гироскопов

	Виды гироскопов	КЛГ	ВОГ	ВТГ
МГХ	Размер	2	1	3
	Масса	1	2	3
	Потребляемая мощность	2	3	3

Представленные обобщенные результаты фактического анализа характеристик указанных типов гироскопов, который, разумеется, проводился на гораздо более глубоком уровне, в целом позволяют сделать вывод о том, что ВТГ является оптимальным техническим решением для применения на ракете-носителе. Единственный его недостаток состоит в том, что он никогда не использовался в системах управления космических ракет-носителей, хотя на момент проведения анализа сотни систем на основе ВТГ уже были запущены с Земли на орбиту в составе бортовых систем ориентации и орбитального маневрирования спутников, в том числе в рамках программ дальних космических полетов.

Принцип действия ВТГ

Кориолисовы вибрационные гироскопы (КВГ) [2] работают по следующему принципу: волновая картина стремится продолжать колебания в той же плоскости, даже если ее материальный носитель вращается.

ВТГ представляет собой КВГ, работа которого основана на следующих принципах:

- резонатор имеет идеальную осесимметричность для обеспечения высоких характеристик по балансировке, изотропности собственной частоты и демпфирования. На практике резонатор требует точной настройки для улучшения балансировки;
- резонатор связан с основанием посредством виброузла, обеспечивающего оптимальную развязку между резонатором и внешней средой;
- управление упругой стоячей волной осуществляется за счет электростатических сил, формируемых электродами, которые находятся в непосредственной близости от резонатора;
- управление упругой стоячей волной происходит в режиме полного угла с целью минимизации требуемой энергии. В таком режиме удается минимизировать погрешности, связанные с электроникой, неидеальностью датчиков и исполнительных устройств. Кроме того, этот режим обеспечивает очень хорошие характеристики масштабного коэффициента (на основе коэффициента Брайана) и широкий диапазон измерений.

Резонатор ВТГ имеет оптимизированные рабочие характеристики:

- резонатор выполнен в форме полусферы; при такой конструкции каждый грамм материала резонатора наиболее эффективно участвует в сохранении энергии изгибных колебаний. К полюсу полусферы присоединена ножка, с помощью которой резонатор крепится к основанию;

- резонатор изготавливается из аморфного плавленого кварца, что обеспечивает оптимальную изотропию (отсутствие кристаллографической оси) и минимальное рассеяние энергии (низкое внутреннее трение);
- металлическое покрытие электрода резонатора должно быть как можно тоньше для минимизации рассеяния энергии внутри металла.

В результате выполненной оптимизации были получены выдающиеся рабочие характеристики ВТГ, которые, самое удивительное, не зависят от размеров резонатора. Они связаны с качеством резонатора, показателем которого является добротность (или время затухания), а также с качеством управления волновой картиной, то есть с характеристиками управляющей электроники.

Главным недостатком классического ВТГ является высокая стоимость, обусловленная в основном чрезвычайно высокой точностью изготовления и сборки электродного узла, который должен точно соответствовать полусферической оболочке резонатора для формирования однородного полусферического зазора между этими двумя частями [5, 7]. Компании Safran удалось найти инновационное конструктивное решение для устранения данного недостатка [3], а именно: электроды располагаются на горизонтальной плоскости и электростатические силы формируются в экваториальной плоскости резонатора (рис. 2). В этом случае сборка полусферической оболочки и пластины с электродами превращается в двумерную операцию, в результате которой формируется плоский постоянный зазор между обеими плоскостями.

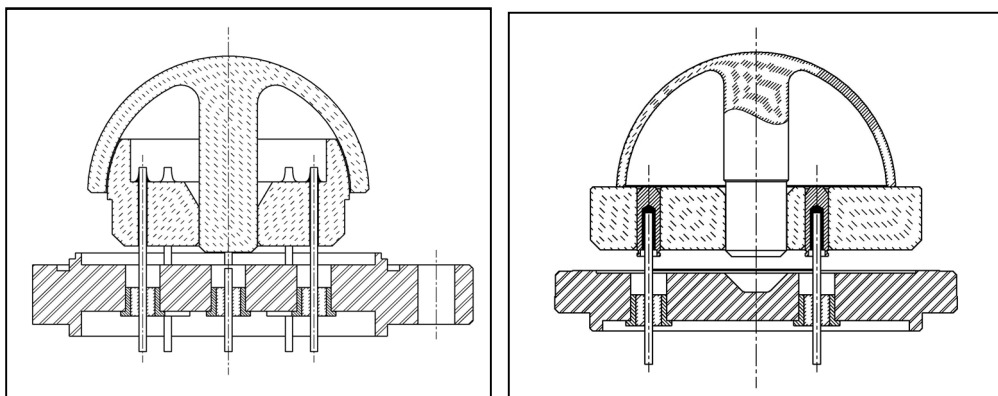


Рис. 2. Классические полусферические электроды и плоские электроды разработки Safran

Оригинальная конструкция ВТГ фирмы Safran позволяет снизить стоимость изготовления устройства, что делает его вполне доступным для массового потребителя (рис. 3).

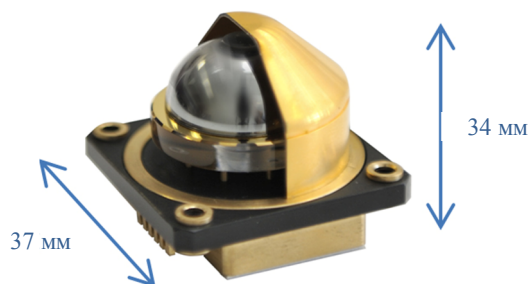


Рис. 3. ВТГ фирмы Safran

Характеристики ВТГ фирмы Safran

ВТГ фирмы Safran имеет очень гибкий диапазон настроек. При резонаторе диаметром 20 мм и массе менее 50 г можно получить различные рабочие характеристики за счет выбора способа возбуждения стоячей волны. Таким образом, характеристики ВТГ зависят главным образом от электроники. На рис. 4 представлены характеристики, присущие ВТГ навигационного класса. Очевидно, что изменения смещения нуля ВТГ во всем температурном диапазоне и с течением времени весьма малы.

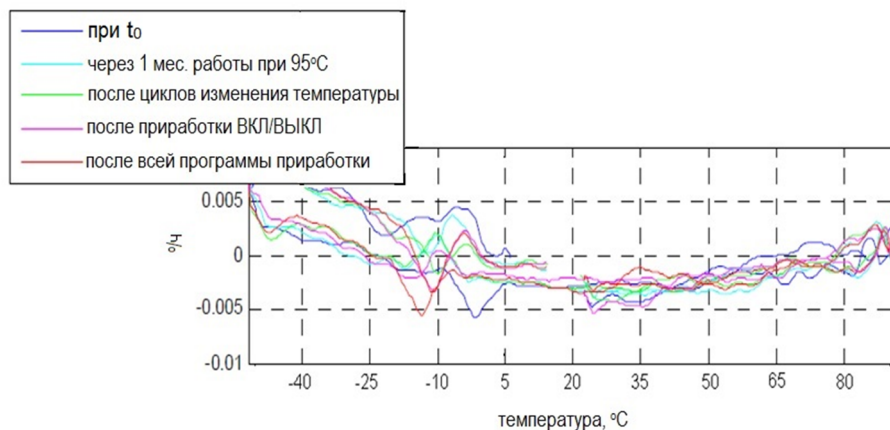


Рис. 4. Графики, характеризующие стабильность смещения нуля ВТГ фирмы Safran

Режим полного угла позволяет добиться значительного уменьшения нестабильности масштабного коэффициента, поскольку она напрямую связана со стабильностью коэффициента Брайана, как показано на рис. 5.

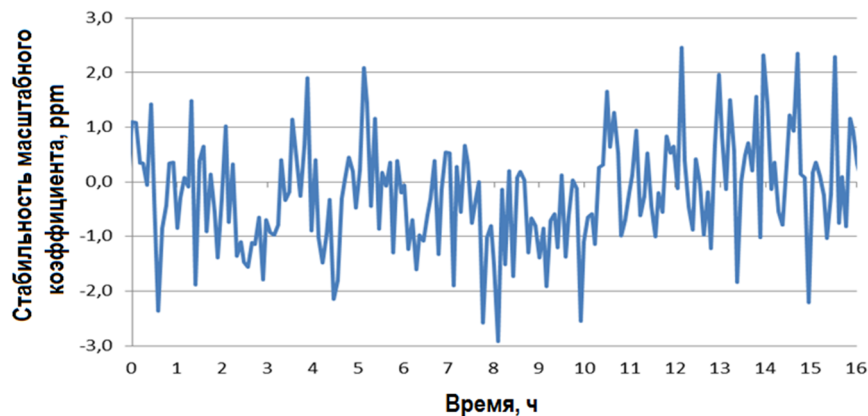


Рис. 5. График, характеризующий нестабильность масштабного коэффициента ВТГ фирмы Safran

Случайный уход по углу и нестабильность смещения нуля можно оценить по графику вариаций Аллана, представленному на рис. 6.

Следует заметить, что продолжительность теста слишком коротка для проверки нестабильности смещения нуля (минимум не достигается за время проведения теста).

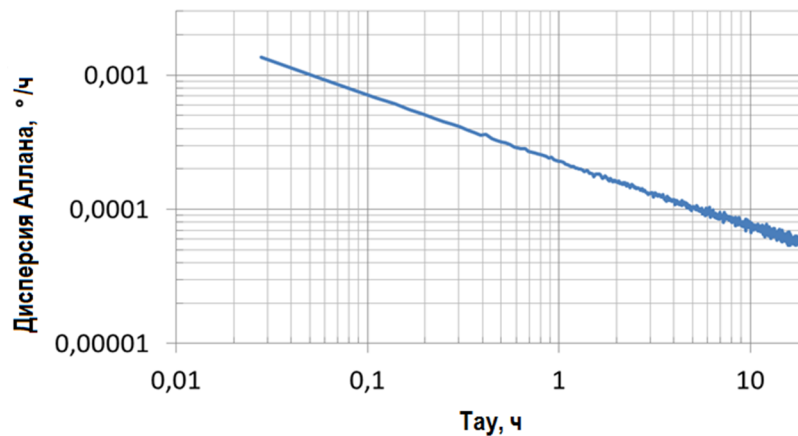


Рис. 6. График вариаций Аллана для ВТГ фирмы Safran

Обобщая вышесказанное, можно перечислить следующие основные точностные характеристики ВТГ фирмы Safran:

- долговременная стабильность смещения нуля – $0,005^\circ/\text{ч}$ (СКО);
- нестабильность масштабного коэффициента – 1 ppm (СКО);
- СУУ – $0,0002^\circ/\sqrt{\text{ч}}$.

В настоящее время ВТГ фирмы Safran используются в широчайшем спектре изделий, уровень качества которых за счет этого значительно возрастает [4, 6]. Завод по производству этих гироскопов, названный в честь французского ученого Каспара-Гюстава де Кориолиса, был построен в 2012 году (рис. 7).

Предприятие было полностью введено в эксплуатацию в 2014 году. Объем производства постоянно растет и уже в 2017 году превысил 1000 инерциальных систем на основе ВТГ.



Рис. 7. Завод им. Кориолиса компании Safran

Характеристики системы SpaceNaute®

ИНС SpaceNaute® была выбрана ArianeGroup для программы «Ариан-6» в результате открытого тендера, который проводился под эгидой ЕКА. В настоящее время программа находится в стадии разработки; первый запуск запланирован на июль 2020 года.

ИНС SpaceNaute® предназначена для обеспечения точной навигации, наведения и управления в полностью автономном режиме ракетой-носителем, выполняющей любые полетные задания, включая отделение ступеней или вывод спутника на суперсинхронную переходную орбиту (ГПО+). Кроме того, SpaceNaute® позволяет выполнять сложнейшие и продолжительные по времени задачи, предполагающие множественные повторные запуски двигателей, например исследования дальнего космоса.

Требования к точности ИНС SpaceNaute® зависят от нужд ракеты-носителя с учетом орбитальных параметров, ориентации, скорости и местоположения.

На рис. 8 и 9 описан профиль полета на ГПО+.

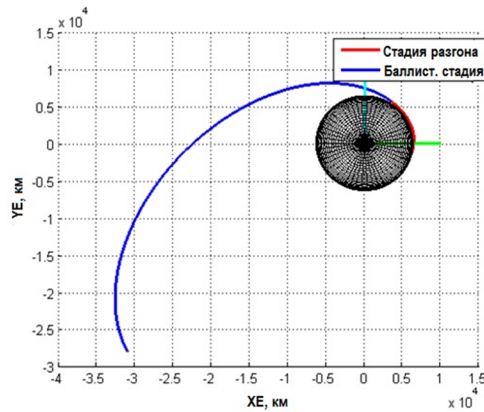


Рис. 8. Траектория орбиты ГПО+

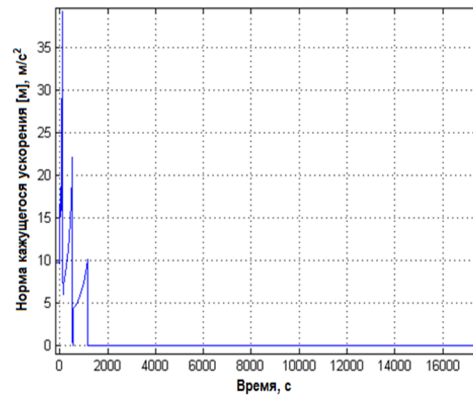


Рис. 9. Кажущееся ускорение на траектории ГПО+

Из рисунков видно, что баллистический участок полета достаточно продолжительный. В связи с этим потенциальная навигационная погрешность, вызванная агрессивным воздействием окружающей среды на стадии разгона, сильно повлияет на общую навигационную точность и точность отделения ступеней или вывода спутника на орбиту.

Поскольку внешние средства поддержки не предусмотрены, точность ИНС SpaceNaute® зависит только от точности ее инерциальных датчиков с учетом негативного воздействия внешней среды во время полета.

Следует отметить, что на раннем этапе разработки проводились серии специальных испытаний блока инерциальных датчиков SpaceNaute®, целью которых была проверка его способности сохранять свои рабочие характеристики под агрессивным воздействием окружающей среды. В состав блока входят три ВТГ и три высокоточных маятниковых акселерометра А600 производства компании Safran. Эти шесть датчиков установлены на жесткой конструкции, механически изолированной от помех высокочастотного спектра, которую дополняет эффективный упругий подвес, уменьшающий воздействие пиродаров на датчики блока с 5000 g до 150 g. Такая конструкция гарантирует, что ИНС SpaceNaute®, сохраняя практически неизменными свои навигационные функции, сможет выдерживать пиродары 5000 g и случайные вибрации 27 g (СКО).

ИНС SpaceNaute® рассчитана на работу на ГПО+ в условиях космического радиационного излучения (потoki протонов и тяжелых ионов). Защита от естественного космического излучения обеспечивается за счет резонатора ВТГ, выполненного из плавленого кварца. Такая защита уже была опробована в ряде миссий на гироскопах Regys20 фирмы Safran в составе спутниковых систем ориентации и орбитального маневрирования.

На баллистическом участке полета на ГПО+ иногда целесообразно обеспечить постоянное вращение ракеты вокруг своей оси. Благодаря превосходным характеристикам масштабного коэффициента ВТГ поддержание такого рабочего режима не влечет за собой снижение общей точности навигации.

Следует также отметить, что ИНС SpaceNaute® предусматривает автономную выставку на стартовой площадке с использованием гироскопирования, что позволяет избежать передачи данных азимута от внешнего устройства. Ги-

рокомпасирование (или приведение в меридиан) по сути представляет собой определение ориентации оси вращения Земли путем нахождения проекций ее угловой скорости в горизонтальной плоскости. Решение этой задачи сильно усложняют конические движения ракеты-носителя на стартовой площадке, вызванные ветром. Амплитуда этих движений может достигать 30 см на частоте 0,4 Гц. Тем не менее ИНС SpaceNaute® способна осуществить точную выставку в течение нескольких десятков минут.

Подводя итоги, можно сказать, что ИНС SpaceNaute® благодаря характеристикам ВТГ фирмы Safran обладает целым рядом преимуществ: высокой точностью, небольшой стоимостью, оптимизированными массогабаритными параметрами, она весит в два раза меньше, чем похожая продукция конкурирующих компаний (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Основные характеристики системы SpaceNaute®

Объем	7 л
Масса	7 кг
Электропитание	55 В
Энергопотребление	18 Вт макс.
Запаздывание	<5 мс
Диапазон частот	>10 Гц

Заключение

В статье показано, что ВТГ производства компании Safran, обладающий высочайшей точностью, надежностью и оптимальными массогабаритными характеристиками, идеально подходит для ракеты-носителя. ИНС SpaceNaute® на основе данного ВТГ является прорывом с точки зрения снижения массы ракеты-носителя при сохранении точности навигации.

Возможны и более усовершенствованные решения, приведенные в [1]. Вместе с тем ракета-носитель «Ариан-6» не дает возможности для полноценной реализации этих предложений, поскольку ее бортовая электроника не обладает специальной архитектурой, способной эффективно обеспечить обнаружение и определение местоположения неисправностей. Предполагается, что описанное решение может быть реализовано в следующей версии ракеты «Ариан» и что одиночная ИНС с улучшенной системой обнаружения и локализации неисправностей сможет эффективно заменить дублированную ИНС и выполнять задачи более успешно.

Компания Safran параллельно занимается исследованиями и других интересных решений для обеспечения космических аппаратов многообразного применения экономичными вариантами систем наведения, навигации и управления, позволяющими выйти на новый уровень использования ИНС совместно с видеоизмерениями и/или интеграцией с глобальными навигационными спутниковыми системы. Таким образом, с учетом наработок за пять десятилетий Safran готовится к успешной реализации программ по созданию передовых ракет-носителей как одноразового, так и многоразового использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Negri, C., Labarre, E., Lignon, C., Brunstein, E., Salaün, E.**, A new generation of IRS with innovative architecture based on HRG for Satellite Launch Vehicle, *Proceedings of the 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, Saint Petersburg, 2015, pp. 298–306.
2. **Remillieux, G., Delhaye, F.**, Sagem Coriolis Vibrating Gyros : a vision realized, *Inertial Sensors and Systems. Karlsruhe*, Germany, 2014.
3. **Jeanroy, A., Leger, P.**, HRG flat electrodes, Patent US 6474161.
4. **Delhaye, F.**, HRG by SAFRAN, The game-changing technology, *5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems*, Lake Como, Italy, 2018.
5. **Meyer, D., Rozelle, D.**, Milli-HRG inertial navigation system, *19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, Proceedings, 2012, pp. 7–14.
6. **Jeanroy, A., Bouvet, A., Remillieux, G.**, HRG and marine applications, *20th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, Proceedings, 2013, pp. 182–190.
7. **Rozelle, D.**, The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets, Northrop Grumman Corporation, 2009.

Delhaye, F. (Safran Electronics & Defense, France)
SpaceNaute® The HRG based inertial reference system of Ariane 6 European space launcher, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2018, vol. 26, no. 4 (103), pp. 3–13.

Abstract. Modular, flexible and competitive, Ariane 6 is intended to offer the best space launch solution, by 2020, to commercial and institutional customers. Therefore it can't anymore rely on legacy inertial reference. Advanced solutions were requested through an open tender conducted by ArianeGroup under European Space Agency (ESA) supervision. SpaceNaute®, the Safran solution based of HRG technology, was then selected against RLG and FOG based solutions proposed by the competitors. This paper describes the trade-off studies conducted to select the proper technology and describe the unique SWaP (Size, Weight and Power) breakthrough of SpaceNaute®, unveils key performance characteristics of the inertial sensors for SpaceNaute® and how HRG benefits are capitalized into the product

Key words: HRG, FOG, RLG, Space launcher.

Материал поступил 19.07.2018