



50 ЛЕТ

ЛАЗЕРНОМУ ГИРОСКОПУ

ЧАСТЬ II

Д. Лукьянов, Ю. Филатов, Санкт-Петербургский Государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, dplukyanov@mail.ru, yvfilatov@mail.eltech.ru;
Ю. Голяев, В. Курятов, ОАО "НИИ "Полус" им. М.Ф. Стельмаха", Москва; В. Виноградов, ОАО "Тамбовский завод "Электроприбор", Тамбов;
К.-У. Шрайбер, Мюнхенский технический университет, Геодезическая обсерватория Ветцеля, Бад-Кецтинг, Германия;
М. Перлмуттер, Civitanavi Systems Ltd., Цуг, Швейцария

Оптические гироскопы по-прежнему сохраняют лидирующие позиции на рынке навигационных систем и систем тактического наведения. Если в области сенсоров низкой точности доминируют МЭМС-датчики в силу их дешевизны и компактности, то в области стратегической навигации доля лазерных гироскопов велика, не смотря на активную конкуренцию со стороны волоконно-оптических и микромеханических гироскопов. Статью завершает обзор состояния рынка лазерных гироскопов.

ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ В 70-е ГОДЫ

Одним из недостатков, присущих ранним моделям ЛГ, являлось большое время выхода на рабочий режим. При этом большинство потенциальных применений требовало, чтобы датчик был готов к работе в течение нескольких минут после старта. Также неудовлетворительной была потребляемая мощность. Борьба с этими недостатками стала одной из ключевых задач для американских ученых в 70-е годы [9].

Основным компонентом, над которым велась работа, являлся резонатор. Его чувствительность к температуре приводила к большому времени готовности и требовала наличия нагревателей. Последние являлись основным потребителем энергии в ЛГ. Решением поставленной задачи стал переход от алюминия к стеклокерамике. Обладая практически

LASER GYROSCOPE

IS 50 YEARS OLD

PART II

D.P.Lukyanov, Y.V.Filatov, Y.D.Golyaev, V.N.Kuryatov, V.I.Vinogradov, K.-U.Schreiber, M.Perlmutter

Optical gyroscopes still retain leading positions in the navigation systems and tactical targeting systems market. If in the low accuracy sensors market sector dominate MEMS sensors due to their low price and compactability, in the strategic navigation systems laser gyroscopes percent is large in spite of fiber-optic and micromechanical gyroscopes active competition. The article brings of an overview of laser gyroscopes market state.

LG TECHNOLOGIES IN 70s

One of shortcomings which showed up at that time in early models of laser gyroscopes (LG) was the long warm-up period. Herewith, most of the potential applications required the sensor to be ready for the operation in several minutes after start. Also, the power consumption was unsatisfactory. Effort to correct these shortcomings became one of the key tasks for American scientists in 70s [9].

Resonator was the main component on which the works were carried out. Its temperature sensitivity caused the long warm-up time and required the availability of heaters. Heaters were the main power consumer in LG. Transition from aluminum to glass ceramics became the solution of the set task. Having practically zero coefficient of temperature expansion such material made it possible to control the perimeter using the piezoelectric converters based on mirrors and abandon the heaters.

Other element affected by the temperature dependence was the totally reflecting prism (TRP). They were replaced by the multilayer dielectrical mirrors. By that time, their production technologies had made a step forward and it became possible to manufacture mirrors with the reflection coefficient of more than 0.999.

The Faraday cell was subject to replacement too. Special magneto-optic mirrors were applied instead. Their operation principle was based on the Kerr effect [13]. Such mirror under the action of magnetic field brought the nonreciprocal phase shifts into the incident



нулевым коэффициентом температурного расширения, такой материал позволил регулировать периметр при помощи пьезопреобразователей на зеркалах и отказаться от нагревателей.

Другим элементом, подверженным температурной зависимости, были призмы полного внутреннего отражения (ППВО). На их место пришли многослойные диэлектрические зеркала. К тому времени технологии их производства сделали шаг вперед, и стало возможным изготавливать зеркала с коэффициентом отражения более 0,999.

Также была подвергнута замещению и фарадеевская ячейка. Вместо нее были применены специальные магнитооптические зеркала. Их принцип работы основывался на эффекте Керра [18]. Такое зеркало под воздействием магнитного поля вносило невзаимные фазовые сдвиги в падающие на него лучи. Внедрение всех вышеперечисленных инноваций, а также совершенствование газоразрядной трубки позволили создать новое поколение ЛГ, время готовности которых было на уровне нескольких минут. Структурная схема и внешний вид одного из таких датчиков приведены на рис.10.

В середине 70-х усилиями компании Sperry (отделение Lockheed Martin) был разработан целый ряд инерциальных измерительных модулей (ИИМ) с тремя и более осями. Монолитная конструкция резонатора позволяла значительно уменьшить погрешность, вызванную неортогональностью осей по сравнению с конструкцией из трех одноосных ЛГ в одном корпусе, а также существенно уменьшить размеры блока. Некоторые примеры таких датчиков приведены на рис.11.

В Советском Союзе в этот период в разработку ЛГ активно включается КБ "Арсенал", г.Киев. Обладая собственной производственной базой, предприятие имело возможность как заниматься развитием теории ЛГ и разработкой новых концепций их построения, так и оттачивать технологический аспект производства. Эта работа велась в тесной кооперации

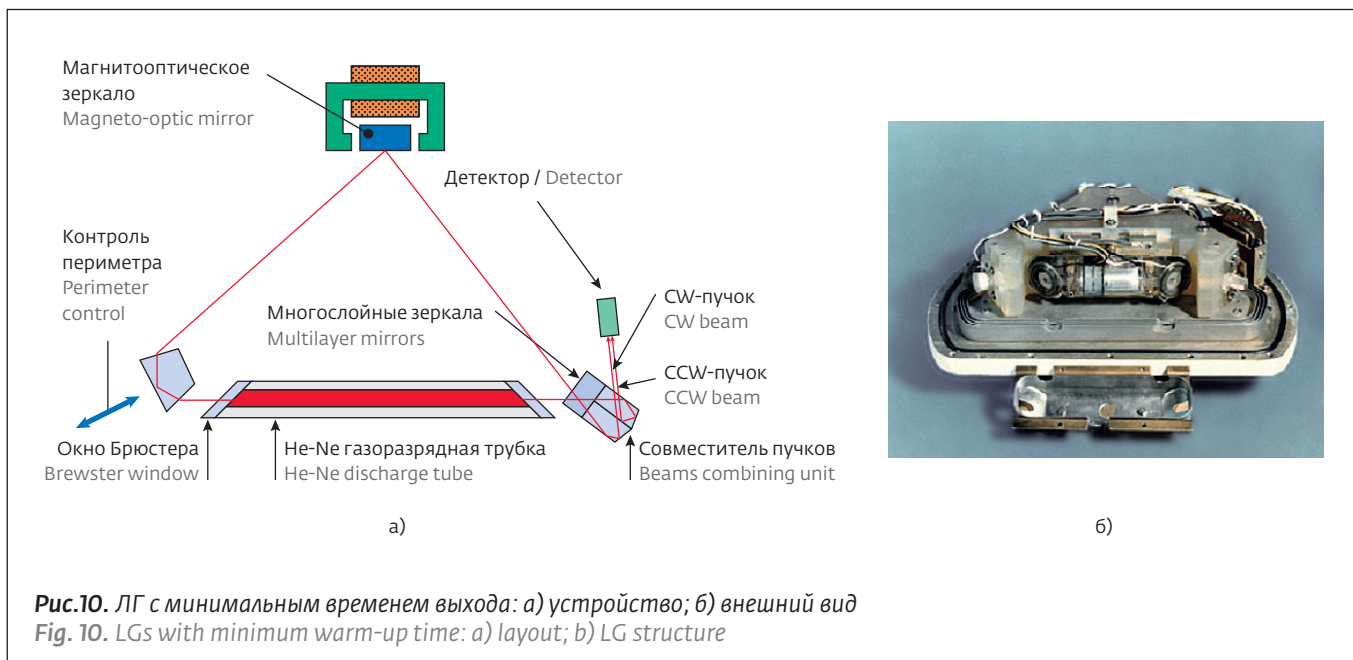
rays. Implementation of all above-listed innovations and improvement of discharge tube allowed the creation of LGs of new generation, warm-up period of which was about several minutes. Structure chart and appearance of one such sensor are given in Fig. 10.

De Lange suggestion [14] on the usage of four-wave mode in LG for the reduction of counter-propagating waves coupling should be specifically mentioned. Patent of the USA [15] issued on differential LG (Differential Laser Gyro System) appointed the common abbreviation DILAG for four-wave LGs. Development of one of the earliest DILAG models refers to 1977 [16]. Further, this gyroscope was developed in Litton and Northrop Grumman where it received the name of ZLG (Zero Lock Gyro) and became popular in many systems.

In the middle of 70s, number of inertial measurement modules (IMMs) with three and more axes was developed by the efforts of Sperry company (Lockheed Martin branch). Resonator monolithic construction allowed considerable reduction of the error caused by axes non-orthogonality in comparison with the construction of three one-axial LGs in one body as well as essential decrease of the unit dimensions. Some examples of such sensors are given in Fig. 11.

In the Soviet Union during this period Arsenal Design Bureau in Kiev was actively involved in the development of LG. Having own manufacturing capabilities it could develop the LG theory and form the new concepts of their construction as well as improve the technological aspect of manufacturing. These activities were performed in close cooperation with the leading research and technological organizations of the Soviet Union in the following main areas:

- Development of multilayer mirrors;
- Development of nonreciprocal elements based on Faraday effect;
- Formation of the vacuum treatment technology for LG resonators;
- Development of the special glass ceramics with ultralow coefficient of linear expansion;



с ведущими научно-исследовательскими и технологическими организациями Советского Союза по следующим основным направлениям:

- разработка многослойных зеркал;
- разработка невзаимных элементов на основе эффекта Фарадея;
- создание технологии вакуумной обработки резонаторов ЛГ;
- разработка специальных ситаллов со сверхнизким коэффициентом линейного расширения;
- разработка холодных катодов;
- создание исследовательской, производственной и испытательной базы на ПО "Арсенал";
- разработка математического обеспечения и аппаратных средств для обработки информации ЛГ и др.

С 1974 года начато серийное производство ЛГ типа КОГ-1 со следующими характеристиками:

- выход на режим – менее 60 мс;
- удароустойчивость – более 4g (с 1976 года – более 60g);
- погрешность измерения – 0,5град/ч.

Прибор выполнен в виде массивного ситаллового блока, в котором размещены три идентичных ЛГ, оси чувствительности которых совпадают. В каждом ЛГ используется дифференциальный невзаимный элемент. Внешний вид изделия КОГ-1 показан на рис.12а.

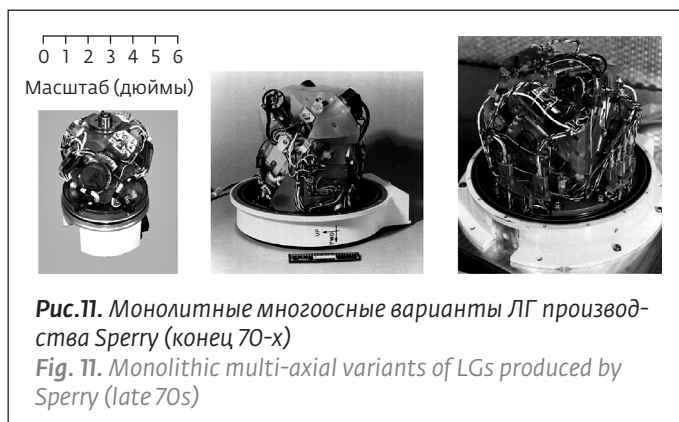
В 1976 году начаты серийные поставки хранителя опорного направления на базе КОГ-1. С 1978 года выпускается модифицированная серия КОГ-2, способных работать в условиях радиационных

- Development of cold cathodes;
 - Establishment of research, manufacturing and testing facilities at Arsenal Production Association;
 - Development of mathematical support and hardware for the processing of LG information etc.
- Since 1974 the batch production of LGs of KOG-1 type with the following characteristics had started:

- Warm-up time: less than 60 ms;
- Shock resistance: more than 4g (since 1976 – more than 60g);
- Measurement error: 0.5°/h.

Device is made in the form of solid glass-ceramic unit where three identical LGs are located with the matching sensitivity axes. Differential nonreciprocal element is used in every LG. Appearance of KOG-1 is shown in Fig. 12a.

In 1976 the serial supply of the reference boresight storage devices based on KOG-1 was started. Since 1978





и сейсмических воздействий до 40–120g с погрешностью не хуже 0,01°/ч и временем выхода на рабочий режим менее 20 мс.

В 1978–1981 годы разработаны новые ЛГ "Фанза" для наземных подвижных объектов, которые обеспечивали режим гироскопирования. Как и в первых конструкциях, использовался дифференциальный невзаимный элемент. ЛГ работал с реверсом вокруг вертикальной оси. Погрешность компасирования составила $\sigma \leq 8'$ за 10 мин работы. В режиме измерения текущей ориентации погрешность по углам курса, тангажа и крена составляла $\sigma = 0,3$ град/ч. Внешний вид прибора показан на рис.12б. На базе этого прибора в 1978–1981 годы был разработан трехосный блок ЛГ (рис.12в).

В Европе развитие ЛГ происходило аналогично, и в середине 70-х компании Sagem (Франция) и Marconi (Великобритания) начали разработку БИНС на ЛГ. Однако своего расцвета эти работы достигли только в следующем десятилетии, которое некоторые исследователи называют "декадой лазерной гироскопии" [10].

80-е ГОДЫ

С годами системы на основе ЛГ находили себе все новые и новые применения. При этом некоторые из них требовали от датчиков высокой стойкости к вибрациям и ударам. Как показали исследования, применяемый резонаторный блок из стеклокерамики не выдержит расчетных нагрузок. Необходимыми прочностными характеристиками обладал металлический блок. Однако он имел ряд очевидных недостатков:

- металл является проводником, т.е. в нем невозможно организовать газоразрядную трубку,
- металлический резонатор обладает высоким температурным коэффициентом.

При этом переход к металлическому резонатору являлся по сути возвращением к первоначальной модели образца середины 60-х годов (см. рис.4). Однако именно он оказался путем к решению задачи. Модульная структура ЛГ позволила вынести газоразрядную трубку за пределы металлического резонатора. Температурные же эффекты, как оказалось, в данном случае не важны, так как время работы прибора мало настолько, что температура резонатора не успевает измениться. Таким образом, в начале 80-х разработчикам из Lockheed Martin удалось изготовить вибро- и ударопрочный ЛГ на основе резонатора из металла (рис.13).

Помимо выбора материала резонатора перед разработчиками стояли и другие задачи. Сверхмалое время работы датчика подразумевало

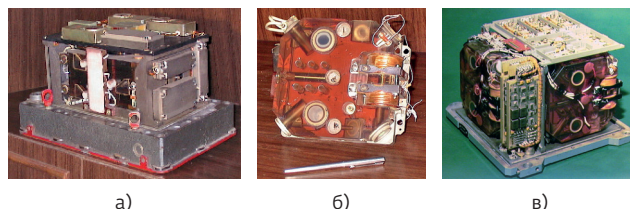


Рис.12. ЛГ производства завода "Арсенал"; а) КОГ-1, б) "Фанза"; в) трехосный ИИМ на его основе
Fig. 12. LGs manufactured by Arsenal Plant: a) KOG-1; b) Fanza; c) three-axial IMM on its basis

the modified series of KOG-2 capable to operate under the conditions of radiation and seismic exposure up to 40–120 g with the error of not worse than 0.01°/h and warm-up period of not less than 20 ms has been produced.

In 1979–1981 "Fanza", the new LGs for the surface mobile facilities which provided the gyro-compassing mode were being developed. Differential nonreciprocal element was used in them as well as the first constructions. LG operated with the reverse around the vertical axis. Compassing error was $\sigma \leq 8'$ per 10 minutes of operation. In the mode of measurement of the current orientation the error on angles of course, pitch and roll was $\sigma = 0.3$ °/hour. Appearance of the device is shown in Fig. 12b. On the basis of this

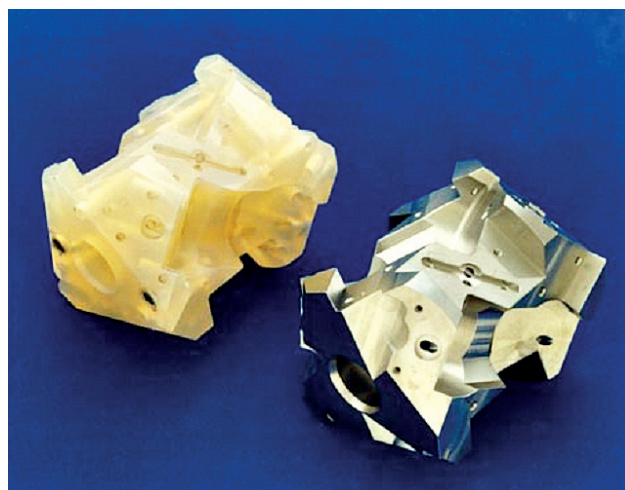


Рис.13. Резонаторы ЛГ из стеклокерамики для обычных ЛГ и из металла для ЛГ, предназначенных для ракетной техники
Fig. 13. Glass ceramic resonators for common LGs and metal resonators for LGs intended for rocket engineering



и необходимость практически мгновенного выхода на режим. При этом принцип действия газоразрядной трубки требовал порядка нескольких минут для того, чтобы прошла первая искра [19]. Для решения этой задачи в газоразрядную трубку ЛГ был добавлен небольшой радиоизотоп, который служил источником постоянной ионизации среды. В результате время готовности ЛГ снизилось до нескольких миллисекунд.

В СССР в этот период одной из основных решаемых задач являлось повышение точности ЛГ. Этого удалось достичь за счет улучшения компоновки гироскопа и сопутствующей электроники, перехода к стеклокерамическим материалам (ситалл и др.). Не было исключением и завод "Арсенал" со своим ЦКБ. В Киеве с середины 80-х годов разрабатывались ЛГ с "пустым" (без невзаимного элемента) резонатором для навигационных систем. Они использовали традиционную виброподставку и обеспечивали дрейф нуля до 0,03град/ч.

К началу 90-х годов ПО "Арсенал" и ЦКБ располагали всем спектром технологий, позволяющих выпускать различные модификации ЛГ. В качестве примера можно привести мелкосерийный выпуск специальных ЛГ треугольной конфигурации, на базе которых совместно с Ленинградским

device LG three-axial unit was being developed in 1978–1981 (Fig. 12c).

Development of LG took place in Europe in analogous manner and in the middle of 70s Sagem (France) and Marconi (Great Britain) started the development of strapdown inertial navigation systems based on LGs. However, these activities reached the fullest flourishing only in the following decade which is called "laser gyroscope decade" by some researchers [10].

80s

Over the years the systems based on LG kept finding newer and newer applications. Herewith, some of them required high vibration and shock resistance from sensors. According to the research, applied glass ceramic resonator unit did not endure the design loads. Metal unit had the necessary strength properties. However, it had a number of obvious shortcomings:

- Metal is conductor, thus it is impossible to organize the discharge tube in it;
- Metal resonator has high temperature coefficient.

Herewith, transition to the metal resonator in essence was the return to the initial model, sample of the middle of 60s (see Fig. 4). However, specifically it turned out to be the task solution. LG modular construction allowed carrying the discharge tube



электротехническим институтом был организован выпуск динамических лазерных гониометров, получивших широкое применение не только в СНГ, но и за рубежом [20].

В Великобритании в начале 80-х вновь была проведена демонстрация ЛГ на полигоне в г.Фарнборо. На сей раз свои разработки демонстрировали уже две компании: British Aerospace и Ferranti. Каждая представила свою систему на основе ЛГ с периметром 30 и 43 см соответственно. В результате правительство заключило с каждой из фирм по контракту на 1 млн. фунтов. Компании должны были представить к январю 1986 года по две новые БИНС для авиационного применения. Следует отметить, что компания British Aerospace опиралась на американские патенты, полученные при покупке отделения Sperry Gyroscope, в то время как в Ferranti занимались собственными разработками [21].

ЛГ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Начало 1990-х годов ознаменовалось в первую очередь распадом Советского Союза и окончанием холодной войны. Это привело к резкому снижению финансирования военных разработок с обеих сторон. Ключевым стал гражданский рынок. Американские компании активно реформировались, поглощая друг друга. Тем не менее, существующие и вновь разрабатываемые ЛГ уже могли обеспечить устойчивый выпуск продукции на их основе: инерциальные модули, БИНС и интегрированные навигационные системы. На рынках сбыта начинают появляться законченные образцы управляющих и навигационных систем, примеры которых приведены на рис.14.

Многие из этих систем остаются актуальными и на сегодняшний день. В частности, ИНС SIGMA 40 установлена на кораблях 35 флотов стран Европы. Британская система FIN3110 (BAE Systems) планируется к установке на минометы Agrab Mk.2 для вооруженных сил ОАЭ в 2013 году [22].

В России, несмотря на сложную экономическую ситуацию, разработки ЛГ продолжались в направлении повышения точности, создания интегрированных навигационных систем и БИНС. В 1990-1994 годы продолжают разработки новых ударопрочных и двухрежимных ЛГ. Идет поиск новых концепций построения ЛГ для наземных подвижных объектов, решающих задачи гирокомпасирования и текущей ориентации. Одним из заметных достижений лазерно-гироскопического направления в 90-е годы является создание интегрированных БИНС НСИ-2000 на лазерных зеемановских гироскопах. Некоторые примеры серийных ЛГ, выпускаемых НИИ "Полюс",

outside the metal resonator. As it turned out, the temperature effects are not important in this case because the time of the device operation is so short that there is not enough time for the change of resonator temperature. Thus, in early 80s developers of Lockheed Martin managed to produce the vibration- and shock-resistant LG based on the metal resonator (Fig. 13).

Besides the selection of resonator material, there were other tasks set before the developers. Ultrashort time of the sensor operation meant the necessity of practically momentary steady-state operation. Herewith, the operation principle of discharge tube required about several minutes for the first spark occurrence [17]. In order to solve this task small radioisotope which served as the source of the medium constant ionization was added to the discharge tube. As a result, LG warm-up time reduced to several milliseconds.

In the USSR during this period one of the main current tasks was the increase of LG accuracy. It was achieved at the expense of improvement of gyroscope and associated electronics arrangement, transition to the glass ceramic materials. Arsenal Plant with its Central Design Bureau wasn't exception. In Kiev since the middle of 80s LGs with the "empty" (without nonreciprocal element) resonator for navigation systems were being developed. They used the traditional dithering device and ensured the zero drift up to 0.03°/h.

By the beginning of 90s Arsenal Production Association and Central Design Bureau had the whole range of technologies allowing the production of different modifications of LGs. Low-volume output of the special LGs with triangular configuration can be specified as the example; on the basis of these LGs together with Leningrad Electrotechnical Institute the output of dynamic laser goniometers which were widely applied in CIS as well as abroad was organized [18].

In the beginning of 80s in Great Britain LG demonstration was carried out at the testing area in Farnborough. At this time developments were demonstrated by two companies: British Aerospace and Ferranti. Each of them represented its LG-based system with the perimeter of 30 and 43 cm respectively. As a result, the government concluded the contracts valued at £ 1 mln. with each firm. Companies had to submit 2 new strapdown inertial navigation systems each for aviation purposes by January 1986. It should be noted that British Aerospace used American patents received at the purchase of Sperry Gyroscope branch while Ferranti carried out its own development and research activities [19].



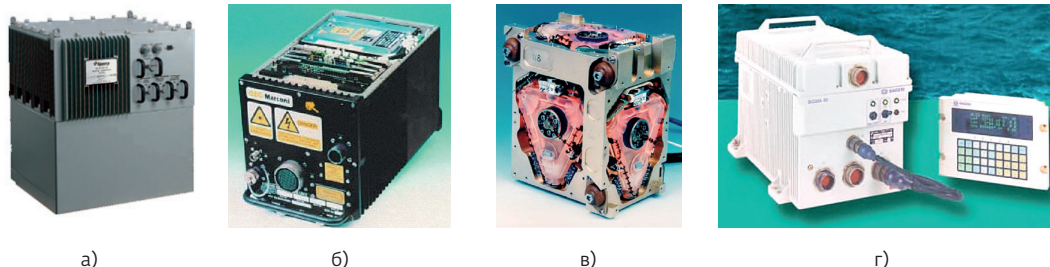


Рис.14. ИНС на основе ЛГ 90-х годов: а) морская ИНС МК-39 (Northrop Grumman, США); б) FIN3110 (Marconi, Великобритания); в) внутреннее строение ИНС FIN 3110; г) SIGMA 40 (Sagem, Франция)

Fig. 14. INS based on LG in 90s: а) marine MK-39 INS (Northrop Grumman, USA); б) FIN3110 (Marconi, Great Britain); в) internal structure of FIN 3110 INS; г) SIGMA 40 (Sagem, France)

представлены на рис.15. Характеристики наиболее употребительных современных зарубежных и отечественных ЛГ, а также систем на их основе, приведены в табл.1-4.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РЫНКА ИИМ НА ЛГ

Сегодня производители ЛГ редко поставляют на рынок отдельные ЛГ. Как правило, конечным продуктом является инерциальный измерительный модуль (ИИМ) или готовая система. Рассмотрим подробнее рынок ИИМ, опираясь на исследования Yole Développement [23]. Производство инерциальных измерительных модулей является крупным сектором промышленности, где традиционно доминируют оборонные и аэрокосмические применения. 2011 год был стабильным годом для ИИМ с объемом рынка 1,75 млрд. долл. (рис.16).

Как видно из рис.16а, наибольшая часть современного рынка ИИМ обеспечивается небольшим числом ведущих зарубежных компаний: Honeywell, Northrop Grumman и Sagem, которые являются явными лидерами. Однако входят на рынок и другие новые производители, предлагая, прежде всего, недорогие ИИМ на базе МЭМС.

Класс высокоточных инерциальных датчиков, к которым относится в первую очередь ЛГ, является динамичным сегментом рынка, так как все большее число конечных приложений требует наличия систем стабилизации, наведения или навигации. В 2011 году рынок высокоточных гироскопов был оценен в 1,29 млрд. долл., показав рост на 4,3% годовых, и, как ожидается, достигнет 1,66 млрд. долл. к 2017 году (рис.16б). Стоит отметить, что такой прирост во многом обеспечивается популярностью ВОГ и МЭМС-гироскопов, которые из года в год улучшают свои характеристики.

SECOND GENERATION OF LGS

First of all, the beginning of 90s was marked out by the collapse of the Soviet Union and end of Cold War. It resulted in the sharp reduction of the military developments financing by both sides. Civil market became the key market. American companies were actively reorganized taking over each other. Nevertheless, existing and newly-developed LGs could ensure the stable output of the products which were based on them: inertial modules, strapdown inertial navigation systems and integrated navigation systems. Finished models of control and navigation systems examples of which are given in Fig. 14 started occurring at the product markets.

Many of these systems are still applicable up to these days. Particularly, SIGMA 40 inertial navigation system is installed on the ships of 35 European marines. British system FIN3110 (BAE

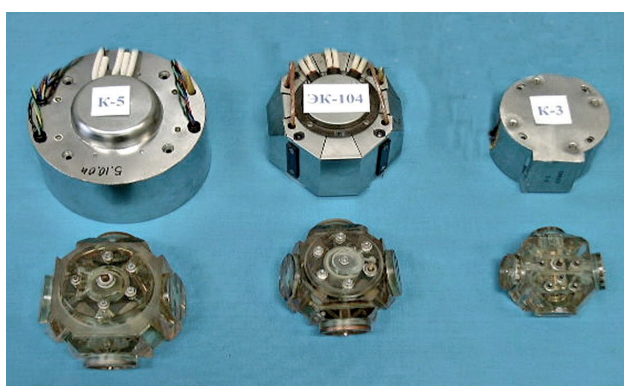


Рис.15. Современные серийные ЗЛГ, выпускаемые научно-производственным комплексом НИИ «Полюс»

Fig. 15. Modern serial ZLGs produced by the Scientific and Production Complex of Polyus Research Institute



Таблица 1. Современные ЛГ в США

Table 1. Modern LGs in the USA

Производитель	Honeywell			Northrop Grumman (Litton)		
Модель	GG-1342	GG-1320	GG-1308	LG-2728	LG-2717	ZLG
Периметр, см	32	15	6,1	28	17	18
Масса, кг	1,9	–	0,2	1,5	1,5	–
Габариты, см	15,7×14,7×5	–	–	14×17,7×5	14×11×6,5	–
Материал	Cervit			Zerodur		
Подставка	Виброподставка					4-частотный
Число отражателей	3	3	3	4	4	4
Максимальная угловая скорость, град/с	800	500	1000	400	800	400
Стабильность сдвига нуля (1–10 ч), град/ч	0,007	0,002	1,0	0,005	0,02	–
Стабильность сдвига нуля от запуска к запуску, град/ч	0,01	–	1,0	0,01	0,04	0,003
Случайный дрейф, град/√ч	0,003	0,0018	0,1	0,003	0,015	0,0015
Масштабный коэффициент (МК), угл.с/имп.	2	4	9	1,8	3,0	0,75
Стабильность МК	5×10^{-5}	1×10^{-5}	$1,5 \times 10^{-4}$	5×10^{-6}	5×10^{-5}	2×10^{-7}
Температурная зависимость сдвига нуля, (град/ч)/°С	0,002	–	–	–	–	0,002

Для того чтобы определить место ЛГ среди всего многообразия сенсоров, предлагаемых на рынке, обратимся к гистограмме на рис.17.

Как видно, в настоящее время оптические гироскопы по-прежнему доминируют на рынке с большим отрывом. В частности, ЛГ широко используются в навигационных системах и системах тактического наведения. При этом с повышением класса точности доля ЛГ значительно возрастает. Если в области сенсоров низкой точности доминируют МЭМС-датчики в силу их дешевизны и компактности, то в области стратегической навигации доля ЛГ составляет более 60%.

Systems) is to be installed on Agrab Mk.2 mortars for the armed forces of United Arab Emirates in 2013 [20].

In Russia despite the difficult economic situation LG developments continued in the area of accuracy increase, design of integrated navigation systems and strapdown inertial navigation systems. In 1990–1994 the developments of new shock-resistant and two-mode LGs continued. The search for new concepts of LG construction for the surface mobile facilities solving the tasks of gyrocompassing and current orientation was carried out. One of outstanding achievements in the laser-gyroscopic

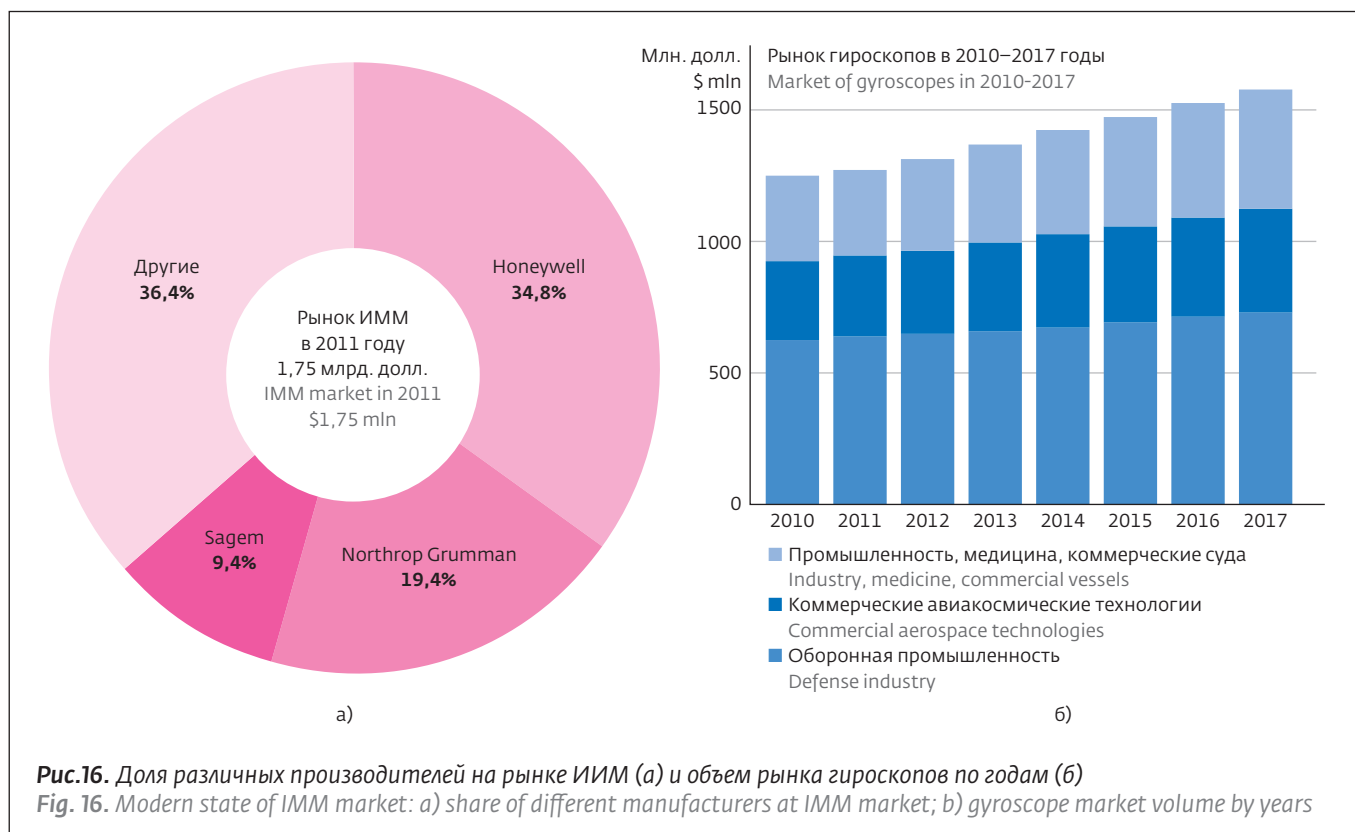


Рис.16. Доля различных производителей на рынке ИИМ (а) и объем рынка гироскопов по годам (б)
Fig. 16. Modern state of IMM market: a) share of different manufacturers at IMM market; b) gyroscope market volume by years

СВЕРХБОЛЬШИЕ ЛАЗЕРНЫЕ ГИРОСКОПЫ

Несмотря на то, что большие усилия инженеров-гироскопистов связаны с уменьшением размеров датчиков, существует и противоположное направление – разработка и создание сверхбольших ЛГ, открывающих совершенно новые области их использования.

area in 90s is the creation of NSI-2000, integrated strapdown inertial navigation systems based on Zeeman laser gyroscopes. Some examples of the serial LGs produced by Polyus Research Institute are shown in Fig. 15. Characteristics of the most common modern foreign and domestic LGs as well as systems which are based on them are specified in Tables 1–4.

Таблица 2. Современные ИНС на ЛГ в США и Европе

Table 2. Modern inertial navigation systems (INSs) based on LG in the USA and Europe

Производитель	Sagem			Northrop Grumman	Honeywell	Kearfott
	SIGMA 40	SIGMA 40 XP	SIGMA 95 N	MK-39	HG-1700	KI-4939
Применение	Морское			Авиационное	Морское	Ракетное
	Надводное	Подводное				
Габариты, мм	285×225×410		209×200×385	444×491×621	объем 541 см ³	97×89
Масса, кг	24		<15	–	<0,9	0,9
Погрешность позиционирования, морские мили/ч	0,06	0,04	<0,5	0,125	–	–
Известные потребители	Более 35 флотов стран Европы, а также ОАЭ, Индии и Южной Кореи		ВВС Франции и других стран Европы, МиГ-29 (экспортная версия)	Корабли флотов стран НАТО	–	–



В середине 80-х годов группа ученых из Кентерберийского университета (г.Крайстчерч, Новая Зеландия) занялась разработкой лазерного гироскопа, способного улавливать различные эффекты, проявляющиеся при вращении Земли. Для достижения требуемых значений чувствительности было решено увеличить периметр резонатора по сравнению с обычными гироскопами. Первый образец такого датчика был изготовлен к 1989 году. Он назывался С-1 и имел квадратный резонатор со стороной 85 см. С его помощью удалось измерить скорость вращения Земли, а также показать возможность построения ЛГ с большим периметром.

В дальнейшем было построено еще несколько установок с различными периметрами. Наиболее успешным является проект, реализованный в геофизической обсерватории, г. Ветцель, Германия. Структура установки, расположенной в этой лаборатории, приведена на рис.18 [24].

Здесь гироскоп имеет квадратный резонатор со стороной 4 м, выполненный из церодура. Конструкция в сборе размещается на массивном бетонном основании на глубине нескольких метров под Землей (рис.19а).

В лаборатории приняты все меры для исключения паразитного влияния на ЛГ внешних факторов.

MODERN STATE OF THE MARKET OF IMMS BASED ON LG

Nowadays, LG manufacturers rarely supply individual LGs to the market. As a rule, inertial measurement module (IMM) or finished system is the end product. Let us consider the market of IMM in details relying on the study of Yole Développement [21]. Production of inertial measurement modules is the large industrial sector where defense and aerospace applications predominate traditionally. 2011 was the stable year for IMMs with the market volume of \$1.75 bln. (Fig. 16).

As is seen from Fig. 16a the largest share of IMM modern market is supported by the small amount of the leading foreign companies: Honeywell, Northrop Grumman and Sagem which are the evident leaders. However, other new manufacturers enter the market offering, first of all, inexpensive IMMs based on microelectromechanical systems (MEMS).

Class of high-precision inertial sensors, which LGs refer to, is the dynamic market segment because increasing number of the final propositions requires the availability of stabilization, guidance and navigation systems. In 2011 the market of high-accuracy gyroscopes was estimated at \$1.29 bln., having shown the growth by 4.3% per annum, and as expected it will reach \$1.66 bln. by 2017 (Fig. 16b). It should be noted that such



Таблица 3. Современные ЛГ в России

Table 3. Modern LGs in Russia

Производитель	НПК "Электрооптика"		НИИ "Полюс"	ОАО МИЭА	ОАО "ТЕМП-АВИА"	ОАО "Раменский приборостроительный завод"	
	ГЛ-1	ГЛ-2				ГЛ-1	ЛЧЭ
Модель	ГЛ-1	ГЛ-2	МТ-401	ЛГ-2	ЛГ-2	ГЛ-1	ЛЧЭ
Периметр, см	44	28	18	28	16	–	–
Масса, кг	4	2	5,5	1,8	1,5	4	–
Габариты, см	∅20,6×10	15,4×11,6×9	∅18×14	14,5×13×4,7	–	∅20,6×10,5	∅17,6×16,6
Материал	Ситалл		Ситалл	Ситалл	–	–	–
Подставка	Виброподставка		Зеемановская знакопеременная	Виброподставка	–	–	–
Число отражателей	4	4	4	4	4	4	3×3
Разряд	ВЧ-разряд		Постоянный ток	Постоянный ток	–	–	–
Мощность, Вт	24 В/0,6 А	30 В/0,6 А	68	–	13	–	–
Максимальная угловая скорость, град/с	360	500	600	–	200	90	400
Стабильность сдвига нуля (1–10 ч), град/ч	0,07	0,01	0,5–1,0	0,01	0,4	0,05	–
Стабильность сдвига нуля от запуска к запуску, град/ч	0,01	0,01	0,3	–	–	0,02	0,1
Случайный дрейф, град/√ч	0,003	0,005	–	–	–	–	–
Масшт. коэфф. (МК), угл.с/имп.	1,3	2,24	3,33	2,2	–	–	–
Линейность МК	5×10 ⁻⁶	5×10 ⁻⁶	2×10 ⁻⁴	–	–	–	–
Стабильность МК	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁶	–	1×10 ⁻⁵	7×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁵
Температурная зависимость сдвига нуля, (°/ч)/°С	0,003	0,002	–	–	–	–	–

Таблица 4. Современные ИНС на ЛГ в России

Table 4. Modern INSs based on LG in Russia

Производитель	ОАО "ТЕМП-АВИА"		ОАО "Раменский приборостроительный завод"			НИИ "Полюс"
	БЧЭ-ТКЛ	БИНС-ЛГ	БИНС-СП	БИНС-ЛЧЭ	БЧЭ-М40	
Модель	БЧЭ-ТКЛ	БИНС-ЛГ	БИНС-СП	БИНС-ЛЧЭ	БЧЭ-М40	АИС-402
Габариты, мм	–	–	190×198×400	190×190×340	100×100×120	∅18×240
Масса, кг	4,5	10	15	15	1,4	8,5
Максимальная угловая скорость, град/с	600	300	400	400	1000	600
Мощность, Вт	27	40	70	80	15	45
Погрешность определения углов тангажа и крена, град	–	0,005	0,1	0,1	–	–
Погрешность определения истинного курса, град	–	1	0,1+0,01t	0,05	–	–



В результате получился сверхпрецизионный прибор, способный измерять вращение Земли с высокой точностью. С его помощью удалось зафиксировать суточные колебания Земной оси (период ~24 ч, амплитуда 5-60 см), чандлеровские колебания (период 433 дня, амплитуда ~9 м), приливные колебания. Особую роль устройства подобного рода играют в сейсмологии. Благодаря высокой чувствительности большие лазерные гироскопы способны улавливать сигнал от удаленных землетрясений (рис.19б).

Сегодня существует целый ряд подобных устройств, расположенных в различных странах и преследующих различные цели: обнаружение сейсмической активности, исследование движения Земли, оценка колебаний опор здания, обнаружение смещений в конструкции детектора гравитационных волн и др. Наибольшим периметром (39,7×21 м) сегодня обладает гироскоп UG-2, расположенный в Кашмирской пещерной лаборатории (Новая Зеландия). Данный проект направлен на оценку возможности дальнейшего увеличения периметра лазерных гироскопов. Как отмечают исследователи, такие макеты показали, что при увеличении размеров нестабильность масштабного коэффициента растет значительно быстрее, чем чувствительность.

increase is mainly ensured by the popularity of fiber-optic gyroscopes and MEMS-gyroscopes which improve their characteristics every year. In order to estimate the role of LG among the whole variety of sensors offered at the market let us refer to the histogram in Fig. 17.

As is seen, currently the optic gyroscopes still predominate at the market by wide margin. Particularly, LGs are widely used in navigation systems and tactical guidance systems. Herewith, LG share considerably grows when increasing the accuracy class. If MEMS-sensors predominate in the area of low-accuracy sensors due to their low cost and compact size, LG share in the area of strategic navigation is more than 60%.

VERY LARGE LASER GYROSCOPES

Despite the fact that great efforts of gyroscopic engineers are connected with the decrease of sensor size there is opposite area of activities - development and design of very large LGs discovering the new scopes of their application.

In the middle of 80s the group of scientists from the University of Canterbury (Christchurch, New Zealand) started developing the laser gyroscope capable to detect the various effects which are shown during the Earth rotation. In order to reach the required values of sensitivity it was decided to

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЛГ своим появлением в 1962 году не только открыл новую эру волновых гироскопов, но и создал условия для бурного развития бесплатформенных инерциальных и, впоследствии, интегрированных навигационных систем. За 50 лет ученые всего мира проделали большую работу для того, чтобы сегодня мы могли смело заявить: "Лазерный гироскоп – ключевое звено в современных системах навигации, ориентации и стабилизации". К сожалению, невозможно в одной статье упомянуть всех ученых и все фирмы, причастные к развитию ЛГ, поэтому в работе в качестве примеров приводятся компании, информация о которых присутствует в открытых источниках.

Вот уже много лет лазерная гироскопия удерживает звание "критических технологий". Приведенный обзор рынка показывает, что несмотря на активную конкуренцию со стороны ВОГ и микромеханических гироскопов, ЛГ сохраняют сегодня лидирующие позиции в области высокоточных БИНС. Полностью оправдывается прогноз, сделанный академиком В.Г.Пешехоновым в работе [1]: "Высокоточные и среднеточные БИНС будут строиться на оптических волновых гироскопах и выпускаться крупными партиями".

Лазерные гироскопы по праву относятся к числу самых наукоемких и уникальных лазерных приборов, производство которых аккумулирует и стимулирует развитие новейших технологий, включая нанотехнологии. Сегодня ведущим отечественным предприятием в области лазерной гироскопии является ОАО "НИИ "Полюс" им. М.Ф.Стельмаха". Руководитель НПК-470, ответственного за разработку Зеемановских ЛГ, Ю.Д.Голяев отмечает рост как спроса на ЛГ, так и объемов их производства. Существующее отставание России в области производственной базы постепенно ликвидируется. Этот

Рынок гироскопов по результатам 2011 года (всего 1289 млн. долл.)
Gyroscope market according to the results of 2011 (totally \$1289 mln.)

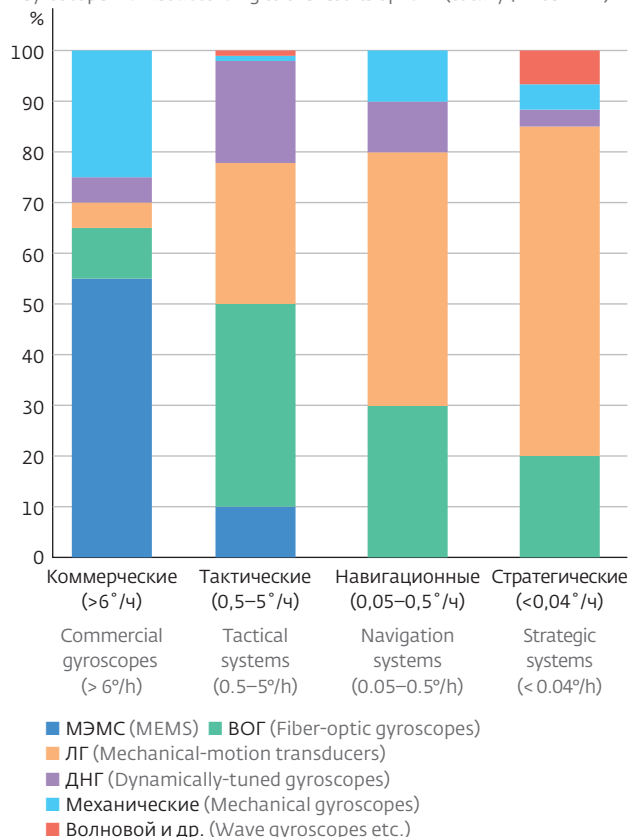


Рис.17. Объемы продаж различных типов гироскопов в 2011 году

Fig. 17. Sales volumes of different types of gyroscopes in 2011

increase the resonator perimeter in comparison with the common gyroscopes. The first model of such sensor was produced in 1989. It was called C-I and had square resonator with the side of 85 cm. With its help they managed to measure the velocity of the Earth rotation and show the

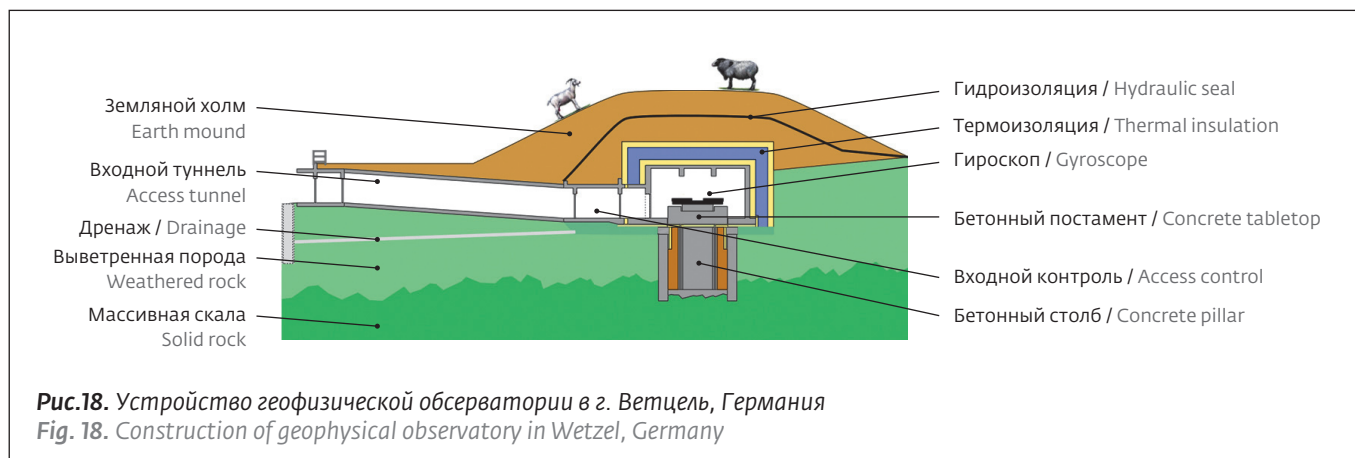
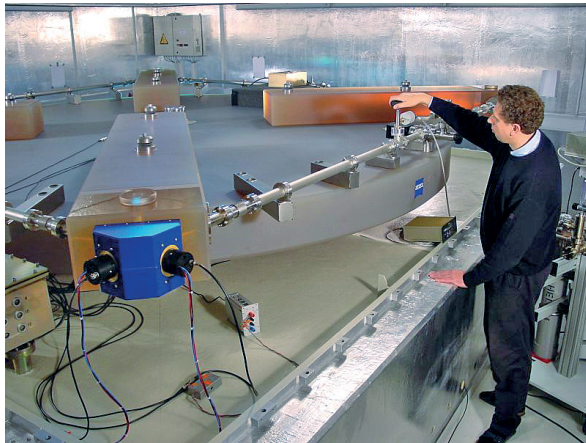
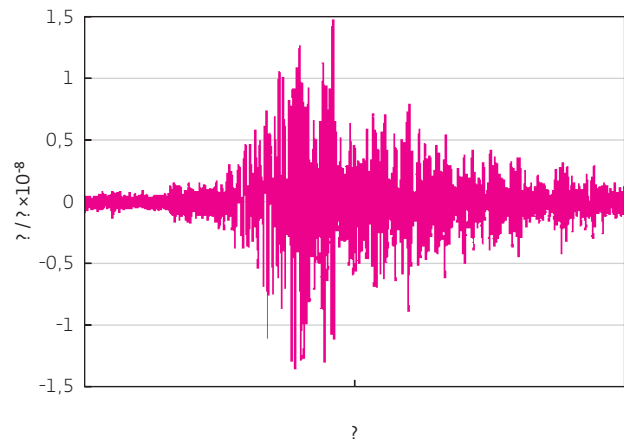


Рис.18. Устройство геофизической обсерватории в г. Ветцель, Германия

Fig. 18. Construction of geophysical observatory in Wetzelsdorf, Germany



a)



б)

Рис.19. Внешний вид гироскопа Grossring G (а) и сигнал большого лазерного гироскопа от удаленного землетрясения (б) (Алжир, 21.05.2003).

Fig. 19. Registration of geophysical phenomenon: a) Grossring G gyroscope; b) signal of large laser gyroscope from distant earthquake (Algeria, 21.05.2003)

процесс может быть ускорен за счет привлечения зарубежных технологий, как это делается в области МЭМС или в автомобильной промышленности. Уже сегодня предприятия, объединяя усилия

capability of construction of the LG with large perimeter.

Further, few more devices with various perimeters were constructed. The project which was



оптических, электронных и других производств, обеспечивают индустрию ЛГ лучшими образцами современной технологической и испытательной аппаратуры для кардинального перевооружения производственной базы. Эти шаги и имеющийся научный задел по созданию и совершенствованию новых образцов ЛГ должны обеспечить повышение качества выпускаемых приборов и систем на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем. – Гироскопия и навигация, 2011, №1, с.72.
2. **Einstein A.** Zur elektrodynamik bewegter körper. – Annalen der physic, 1905, т. 322, №10, с.891–921.
3. **Sagnac G.** – Compt. rend., 1913, v.157, №708, p.1410.
4. **Берштейн И.Л.** Опыт Саньяка на радиоволнах. – Доклады Академии наук СССР, 1950, Т. LXXV, №5, с.635.
5. **Rosenthal A.** – J.Opt.Soc.Amer., 1962, v.52, p.1143.
6. **Macek W.M., Davis J.D.** Rotation rate sensing with traveling-wave ring lasers. – Applied Physics Letters, 1963, v.2, №3, p.67–68.
7. **Loukianov D.P.** et al. The History of Laser Gyro Development in the Former Soviet Union. – Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Institute of Navigation, 2001, p.225–237.
8. **Лукьянов Д.П.** Лазерные и волоконно-оптические гироскопы: состояние и тенденции развития. – Гироскопия и Навигация, 1998, №4(23), с.23–45.
9. **Abdale J., Benischek V., Macek W.** History of Ring Laser Gyroscope Development at Lockheed Martin (Formerly Sperry). – Proceedings of the 57th Annual Meeting of The Institute of Navigation, 2001, p. 176–187.
10. **King A.D.** Inertial navigation-forty years of evolution. – GEC review, 1998, v.13, №.3, p.140–149.
11. **Бычков С.И., Лукьянов Д.П., Бакаляр А.И.** Лазерный гироскоп. – М.: Сов. радио, 1975.
12. **Виноградов В.И., Захаров М.А., Таушан Б.А.** Лазерный гироскоп с естественным невзаимным элементом. – Авиакосмическое приборостроение, 2006, №10, с.23–27.
13. **Лукьянов Д.П.** Устройство для создания начального сдвига частот в кольцевом оптическом квантовом генераторе. Авт. свид. №274871 – БИ, 1970, №21.

implemented in geophysical observatory of Wetzel, Germany, was the most successful. Structure of the unit located in this laboratory is given in Fig. 18 [22]. Here the gyroscope has square resonator with the side of 4 m made of zerodur. Assembled construction is deployed on the massive concrete foundation at the depth of several meters under the Earth (Fig. 19a).

Laboratory took all measures for the elimination of spurious influence of the external factors on LGs. As a result, the super-precision device capable to measure the Earth rotation with high precision was produced. With its help it was possible to register the daily variations of the Earth axis (period ~24 h, amplitude 5–60 cm), Chandler oscillations (period 433 days, amplitude ~9 m), tidal oscillations. Such devices play the special role in seismology. Due to high sensitivity large-size laser gyroscopes are capable to locate the signal from distant earthquakes (Fig. 19b).

Nowadays, there is a number of such devices which are located in different countries and pursue the various aims: detection of seismic activity, study of the Earth motion, estimation of oscillations of the building supports, finding of shifts in the construction of gravitational wave detector etc. Nowadays, UG-2 gyroscope has the largest perimeter (39.7×21 m); it is located in Cashmere Cave Laboratory (New Zealand). This project is aimed on the assessment of the capability of further increase of laser gyroscopes perimeter. As the researchers note, such models showed that upon the increase of dimensions the non-stability of scale coefficient grows considerably faster than the sensitivity.

CONCLUSION

By their occurrence in 1962 LGs opened the new era of wave gyroscopes as well as formed the conditions for the rapid development of strapdown inertial and subsequently integrated navigation systems. Over 50 years scientists from all over the world have accomplished great work in order to give us opportunity today to state the following boldly: "Laser gyroscope is the key part of modern navigation, position control and stabilization systems". Unfortunately, it is impossible to mention all scientists and companies participating in LG development in one report, therefore the companies, information on which is given in some open sources, are specified as examples in the paper.

For many years already the laser gyroscopy has been keeping the status of "critical technologies". Given review of the market shows that despite the active competition between fiber-optic gyroscopes



14. Лукьянов Д.П., Рогачев А.Ф. Устройство для создания невзаимного фазового сдвига линейно поляризованных колебаний. Авт. свид. №373806. – БИ, 1973, №14.
15. De Lang H. Eigenstates of polarization in lasers. – Phillips Res. Repts, 1964, v.19, p.429-440.
16. Пат. 3862803 США. Differential Laser Gyro System. Yntema G.B. – 1975.
17. Volk С.Н., Gillespie S.C., Mark J.G., Tazartes D.A. Multioscillator ring laser gyroscopes and their applications. – Optical Gyros and their Applications. NATO RTO AGARDograph 339, May 1999.
18. Jenkins F.A. and White H.E. Fundamentals of Optics. Fourth Edition. – McGraw-Hill Inc., New York, NY, 1976, p.691.
19. Meek J.M. and Craggs J.D. Electrical Breakdown of Gases. – Oxford University Press, London, 1953, p.111-118, 348-349, 355-359.
20. Filatov Yu., Loukianov D.P., Probst R. Angle measurement by means of a ring laser goniometer. – Metrologia, 1997, v.34, p.343-350.
21. Warwick G. UK follows laser path. – Flight International, 1985, v.127, p.257.
22. <http://www.army-guide.com/eng/product4037.html>.
23. Robin L., Perlmutter M. Gyroscopes and IMUs for Defence Aerospace and Industrial. – Report by Yole Développement, 2012.
24. Schreiber K.U., Klugel T., Velikoseltsev A. et al. The large ring laser g for continuous earth rotation monitoring. – Pure and Applied Geophysics, 2009, v.166 (8-9), p.1485-1498.

and micromechanical gyroscopes LGs keep the leading positions today in the area of high-accuracy strapdown inertial navigation systems. The following forecast made by V.G.Peshekhonov, Academician, in the paper [1] is completely proved to be correct: "High-accuracy and medium-accuracy strapdown inertial navigation systems will be constructed on the basis of optic wave gyroscopes and produced in bulk quantities".

Truly, laser gyroscopes refer to the number of the most science-intensive and unique laser devices, production of which accumulates and stimulates the development of advanced technologies including nanotechnologies. Nowadays, Polyus Research Institute named by M.F.Stelmakh, OJSC, is the leading national enterprise in the area of laser gyroscopy. Y.D.Golyaev, Head of Scientific and Production Complex 470, responsible for the development of Zeeman LGs, marks the growth of LG demand as well as LG production volumes. Current lag of Russia in the area of production capabilities is gradually eliminated. This process can be quickened at the expense of involvement of foreign technologies as it is accomplished in the area of MEMS or automobile industry. Even today, the enterprises combining the efforts of optic, electronic and other productions supply the best models of modern technological and testing equipment to LG industry for the drastic re-equipment of manufacturing base. These steps and existing scientific capacity for the design and improvement of new LG models must ensure the quality enhancement of produced devices and systems based on LGs.