

УДК 629.7

## АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНО- И ДВУХМАГНЕТРОННЫХ ГИРОИЗМЕРИТЕЛЕЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ И ИХ БОРТОВЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Статья поступила в редакцию 02.04.2018, в окончательном варианте 12.06.2018.

**Сытник Александр Александрович**, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

доктор технических наук, профессор, e-mail: as@sstu.ru

**Львов Алексей Арленович**, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

доктор технических наук, профессор, e-mail: alvova@mail.ru

**Плотников Петр Колестратович**, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

доктор технических наук, профессор e-mail: plotnikovpk@mail.ru

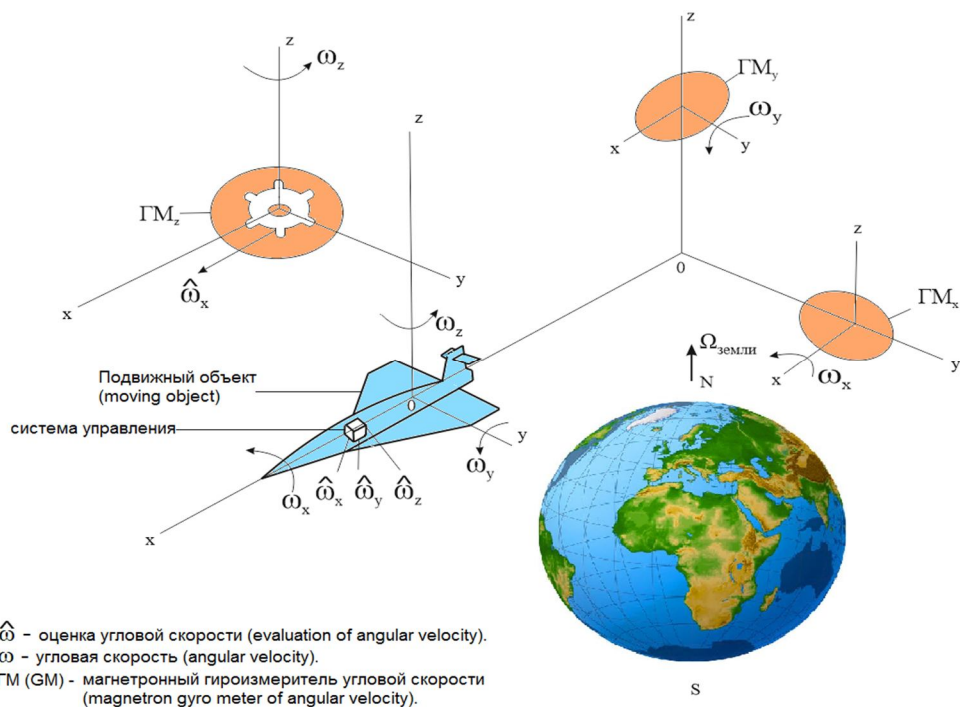
**Карамышев Артем Николаевич**, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

бакалавр, e-mail: karamyshev.artiom@gmail.com

Показаны достоинства и недостатки магнетронных измерителей угловой скорости и проанализированы их конкретные аппаратно-программные решения. Приведена конструктивная схема одного из двух двухмагнетронных, а также электрические функциональные схемы двух одномагнетронных гироскопических однокомпонентных измерителей абсолютной угловой скорости подвижного объекта. Первый одномагнетронный гироскопический измеритель угловой скорости не содержит устройство реверсирования вектора магнитной индукции, а второй – содержит. Описаны физические особенности работы приборов, приведены аналитические соотношения, связывающие измеряемую угловую скорость с пропорциональной её частотой выходного сигнала. Представлены выведенные авторами уравнения погрешностей измерений для приборов. Для назначенных параметров произведен расчет погрешностей. Он показал, что при указанных параметрах погрешность у одномагнетронного гироскопического измерителя угловой скорости с реверсированием вектора магнитной индукции несколько меньше, чем у двух других типов устройств. Показано, что частоты генерации магнетронов высокие, порядка 0,1...10 ГГц. Поэтому их требуется измерять и запоминать в бортовых микропроцессорных устройствах, обладающих высокими точностью и быстродействием. Приведены сравнительные данные по современным измерителям частот (времени) с процессорами до 2.4 ГГц с погрешностями порядка  $10^{-16}$ ... $10^{-17}$  с. Показано, что для двухмагнетронных приборов требования к частоте выходного сигнала на несколько порядков ниже, чем для одномагнетронных. Причина – в двухмагнетронных приборах производятся измерения разностей частот встречных потоков электромагнитных волн, и, как следствие, результирующая частота ниже.

**Ключевые слова:** магнетрон, гироскопический измеритель угловой скорости, дрейф сигнала, масштабный коэффициент, погрешность, бортовой микропроцессор, диапазоны СВЧ частот, погрешность измерения времени

### Графическая аннотация (Graphical annotation)



## ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF ONE- AND TWO-MAGNETRON GYROSCOPIC METERS OF ANGULAR VELOCITY AND THEIR ON-BOARD MICROPROCESSOR DEVICES

The article was received by editorial board on 02.04.2018, in the final version – 12.06.2018.

**Sytnik Aleksandr A.**, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: as@sstu.ru

**Lvov Aleksey A.**, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: alvova@mail.ru

**Plotnikov Petr K.**, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: plotnikovpk@mail.ru

**Karamyshev Artem N.**, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation

Bachelor, e-mail: karamyshev.artiom@gmail.com

Advantages and disadvantages of magnetron meters of angular velocity are shown; specific hardware and software magnetron meters of angular velocity solutions are analyzed. A construction scheme of one of two two-magnetron and electrical connections of two one-magnetron one-component gyroscopic meters of absolute angular velocity of a mobile object are presented. First one-magnetron gyroscopic meter of angular velocity does not possess a device for reversing magnetic induction vector, while second one does. Physical characteristics of devices functioning are described; analytical correlations connecting measurable angular velocity with its proportional output frequency are presented. Measurement error equations, derived by the authors, are presented. Calculation of errors is made for the assigned parameters. It showed that under these parameters error of a one-magnetron gyroscopic meter of angular velocity with reversing magnetic induction vector is smaller than those of two other types of devices. It is shown that frequencies of generating magnetrons are high, some 0,1 ... 10 GHz. That is why it is necessary to measure and store them in microprocessor devices, characterized by high accurateness and operation speed. Comparative data on the current frequency (time) meters up to 2.4 GHz with errors of up to  $10^{-16}$ ... $10^{-17}$  s is presented. It is shown that requirements to output frequency for two-magnetron devices are several orders lower than those for one-magnetron devices. The reason is that there is measurement of frequency differences of electromagnetic waves counter streams in two-magnetron devices; consequently, the resultant frequency is lower.

**Keywords:** magnetron, gyroscopic meter of angular velocity, signal drift, scale factor, error, on-board microprocessor, SHF range, error of time measuring

**Введение.** Измерение угловых скоростей вращений объектов, а также их текущих угловых положений актуально при решении различных задач, в том числе связанных с навигацией подвижных объектов. Несмотря на наличие достаточно многочисленных разработок в этой области [1], вопросы высокоточного измерения угловых скоростей в настоящее время в полной мере не решены. Поэтому цель настоящей статьи – представление вариантов конструкций магнетронных гироскопических измерителей угловых скоростей и обоснование их преимуществ для таких задач, в которых эти измерения необходимо производить непрерывно и с высокой точностью.

**Общая характеристика предметной области.** Во введении к книге [7] дан обзор развития прикладной теории гироскопов. В частности, отражено открытие в 1913 г. Саньяком так называемого оптического «вихревого эффекта», названного его именем. Суть эффекта состоит в том, что в замкнутом оптическом контуре с встречными световыми лучами, при установке его на платформе и вращении вокруг оси перпендикулярной плоскости контура, на выходе наблюдают смещение интерференционной картины, пропорциональное угловой скорости вращения.

Сообщается также, что в 1950 г. советским ученым С.Н. Берштейном этот эффект экспериментально наблюдался в круговом коаксиальном кабеле при частоте радиоволн СВЧ-диапазона (30 МГц). Эксперимент был проведен за 12 лет до изобретения в США лазерного гироскопа. Эффект Саньяка инициировал развитие двух основных направлений гироскопов, основанных на использовании этого эффекта для области электромагнитных волн: 1) оптической (лазерные, волоконно-оптические гироскопы) и 2) СВЧ-радиоволновой. Сейчас активно развивается направление квантовой гироскопии на основе использования эффекта Саньяка.

В данной статье отражены результаты исследований и разработок по направлению 2, в том числе в отношении полученных патентов. Все эти патенты относятся к трем группам:

**Г1).** Катушечного типа – аналоги устройства С.Н. Берштейна (Патенты РФ №2090842; №147367) – таблица 1.

Таблица 1 – Патенты по гиризмерам угловой скорости сверхвысокочастотного диапазона электромагнитных волн

Зарубежные	Отечественные
USA, № 3861220, 1975 г., H.D. Felsenthal, 1975	1. Бершгейн С.Н. Опыт Саньяка на радиоволнах. 1950. ДАН СССР. т. LXXV, № 5. 2. Патент на изобр. №2090842, 1997 г. 3. Патент на изобр №2207511, 2003 г. 4. Патент на изобр №2258908, 2005 г. 5. Патент на полезн. модель №111632, 2011 г. 6. Патент на полезн. модель №116999, 2012 г. 7. Патент на полезн. модель № 128710, 2013 г. 8. Патент на полезн. модель №147367, 2014 г. 9. Патент на полезн. модель №161198, 2016 г. 10. Патент на полезн. модель №161217, 2016 г. 11. Патент на полезн. модель №163266, 2016 г. 12. Патент на полезн. модель №174674, 2017 г.

**Г2).** Волноводные – на основе объемных резонаторов (Пат. USA №3861220, пат. на изобр. РФ №2258908, пат. на ПМ РФ №161 217).

**Г3).** Гироскопы – магнетроны. Патенты приведены в таблице 1 – это позиции: 3,5, 6, 7, 9, 11, 12.

Достоинством СВЧ-радиоволновых гироскопов, особенно групп Г2 и Г3, является более широкий диапазон нечувствительности к электромагнитным, радиоактивным, ударно-вибрационным воздействиям в силу используемых конструктивных решений. Эти свойства важны для применения СВЧ-гироскопов на подвижных объектах, работающих в критических ситуациях – работа приборов на объектах, подверженных ударам, радиационному и электромагнитно-импульсному воздействию, других помех. При этом в ряде случаев не требуется столь высокая точность, которую обеспечивают лазерные и волоконно-оптические гироскопы – в настоящее время это одни из самых точных приборов.

В книге [7] и других работах изложены также теория и вопросы практического применения классических гироскопов и гироскопов, основанных на использовании новых физических принципов. В частности, рассматриваются гироскопы магнетронного типа, относящиеся к группе «Г3». Конструктивные схемы и принципы работы двухмагнетронных гироскопических измерителей угловых скоростей (ДМ ГИУС) подвижных объектов (ПО), элементы теории их работы и расчёта изложены в [8–11, 17]. Схема, работа, а также теоретическое и расчётное обоснование полезности одномагнетронного измерителя угловой скорости (ОМ ГИУС) даны в [12]. В данной статье, на основе анализа свойств ДМ ГИУС и ОМ ГИУС, предложены подходы к определению требуемых характеристик бортовых микропроцессоров (микроконтроллеров).

Основы работы магнетронов, представленные, например, в [1, 4, 6, 15], предусматривают их применение в качестве генераторов СВЧ-электромагнитных волн, в частности, в радиолокационных станциях, а в последнее время – в СВЧ-печах и других устройствах с мощностями в диапазоне «сотни ватт – киловатты». В статьях [9, 17] излагаются вопросы теории и расчёта магнетронов в качестве гироскопических измерителей абсолютных угловых скоростей (ГИУС) различных подвижных объектов (ПО): кораблей, летательных аппаратов и др. Все это является первичной инерциальной информацией для построения систем ориентации в контурах управления ПО. В этом случае ГИУС являются маломощными с диапазоном потребления энергии в доли – единицы ватта.

Особенностью магнетронных ГИУС (МИУС) является сходство их измерительных свойств со свойствами лазерного гироскопа (ЛГ): при появлении угловой скорости ПО вокруг измерительной оси наблюдается изменение частоты генерации магнетрона, пропорциональное указанной угловой скорости. Отличие от ЛГ, излучения в них однонаправленные. Поэтому в ДМ ГИУС применены два магнетрона [10]. В конструкциях, описанных в [8, 11], магнетроны связаны общей системой возбуждения потоков электромагнитных волн с встречными направлениями их распространения в каждом и использованием устройства их вычитания. Из ряда двухмагнетронных ГИУС [8–11, 17] в данной работе рассматривается прибор, обладающий наибольшей связью между магнетронами, а также простой схемой вычитания частот генерируемых электромагнитных волн [8, 11]. В патентах [12], [13] описаны одномагнетронные ГИУС. В них с частотой генерации магнетрона сравнивается частота эталонного генератора. В результате выделяется разностная частота, пропорциональная измеряемой угловой скорости ПО. Для точного измерения частот магнетрона в интервале 0,1...10, ГГц необходимы высокоточные, высокоскоростные микропроцессорные устройства. В работе приводятся ссылки на работы [2, 3, 5] с характеристикой параметров измерителей частоты на основе используемых компьютеров. Также даются ссылки на работы [14, 16, 18] с описанием способов моделирования и обеспечения надёжности работы нейронных сетей, в состав которых входят микропроцессорные устройства.

В данной статье вместо магнитного компаса и маятника для определения трёх углов ориентации рассмотрено применение гироскопов по трём осям поворотов ПО. Причина – в середине 19 в. появились

корабли со стальным корпусом. При этом имело место влияние магнитных полей таких корпусов на указанные компасы и сильное изменение магнитных полей под влиянием ударов волн и других воздействий. Поэтому магнитные компасы неверно указывали направление на Север. Как следствие, произошло множество катастроф с гибелью людей – вплоть до нескольких тысяч. Эту проблему удается решить (однако не всегда полностью) путем размагничивания металлических корпусов с наложением на них встречных магнитных полей. Например, это может делаться за счет пропускания тока в нужном направлении по проводам, которым обмотан корпус судна.

Поэтому от магнитных компасов перешли к гироскопическим, которые не реагируют на магнитные помехи, и другим типам приборов. К ним относится и гироскоп-магнетрон (это прибор нового типа). Таким образом, магнитную стрелку, которая призвана указывать только направление на север, заменили на три гироскопа, информация от которых поступает в систему управления подвижным объектом.

Инерциальная навигация (основанная на законах инерции) обходится без магнитных полей. Поэтому гироскопический измеритель угловых скоростей (ДМ ГИУС) начал заменять магнитный компас на многих ПО. В настоящее время такая замена осуществлена и на искусственных спутниках земли (ИСЗ). На них устанавливают гироскопические 3D-орбитанты – аналоги гироскопов, но с более широкими функциями. Они измеряют ещё два угла ориентации ИСЗ (вместо маятника). На других ПО устанавливают иные типы гироскопов. Поэтому магнитное поле Земли для гироскопов нового типа является помехой, а не основой их работы (как это имеет место для магнитного компаса).

**Схемы, принципы работы и основные соотношения для рассматриваемых приборов.**  
**Двухмагнетронный гироскопический измеритель угловых скоростей (ДМ ГИУС).** Рассмотрим двухмагнетронные ГИУС по патентам на полезные модели (ПМ) [8, 11], улучшенные по отношению к исходному техническому решению [10] в направлении уменьшения главной для ДМ ГИУС ошибки от разности частот генерации электромагнитных волн магнетронов и имеющей место даже при отсутствии угловой скорости ПО. Оба магнетрона расположены в едином герметичном вакуумплотном корпусе с одной общей системой возбуждения. Прибор маломощный, для его возбуждения достаточно создать магнитное или электромагнитное поле с малой индукцией, а значит, магнит или электромагнит небольших размеров. При таком решении указанная погрешность кардинально снижается.

На рисунке 1 первая проекция изображает конструктивную схему ДМ ГИУС в плане, на второй – дан вид сбоку. Функциональная электрическая схема для вычитания сигналов на резисторах приведена в [10].

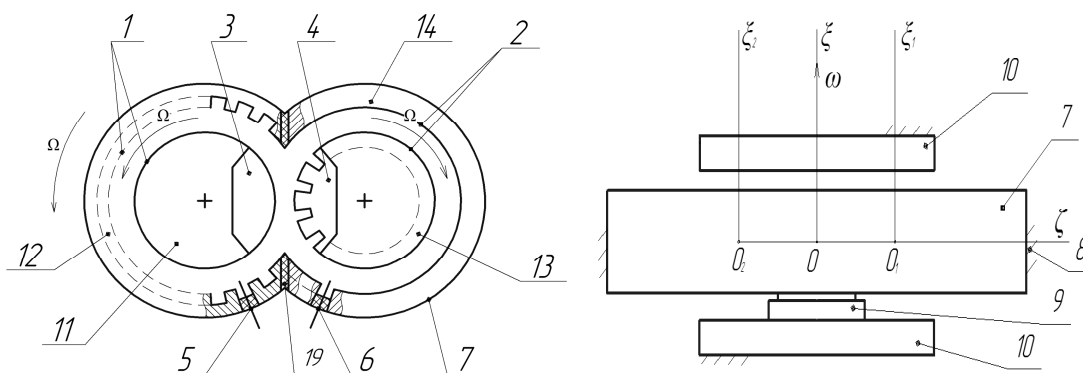


Рисунок 1 – Конструктивная схема двухмагнетронного ГИУС

ДМ ГИУС состоит из первого 1 и второго 2 резонансных узлов, малого сектора холодного катода 3 и концентричного ему малого сектора резонансного анода 4, составляющих пространство непосредственного взаимодействия указанных выше резонансных узлов 1 и 2. Кроме того, в конструкцию входят электроды 5 и 6 вывода информации из резонансных узлов 1 и 2, соответственно; металлический герметичный корпус 7 гироскопа, укрепленный на корпусе 8 подвижного объекта, электронная пушка 9, аналогичная описанной в патенте [10], магнит (электромагнит) – источник постоянного магнитного поля 10, вектор индукции которого направлен вдоль оси  $O\xi$  подвижного объекта, являющейся измерительной. Оси правой декартовой системы координат  $O\xi\eta\zeta$  связаны с корпусом 8 подвижного объекта, а также с корпусом 7 ДМ ГИУС. Оси  $O\xi_1$  и  $O\xi_2$  проходят через центры резонансных узлов 1 и 2;  $\omega$  – измеряемая абсолютная угловая скорость ПО. Ось инжектирования электронов в электронной пушке 9 направлена по оси  $O\xi$  в пространство непосредственного взаимодействия малых секторов катода 3 и анода 4.

В состав первого резонатора описываемого магнетрона входят первый резонансный узел 1, электронная пушка 9, источник постоянного магнитного поля 10 и электрод 5 вывода информации из резонансного узла 1. В состав второго резонатора входят подобные элементы, за исключением того, что в нём отличают-

ся узел 2 и электрод 6 вывода информации. В состав резонансного узла 1 входят круговые большие секторы катода 11, анода 12, а также малые секторы катода 3 и анода 4, предназначенные для согласованного когерентного возбуждения встречных потоков электромагнитных волн одной частоты. При наличии угловой скорости  $\omega$  частота волн в одном резонаторе увеличивается, а в другом – на столько же уменьшается.

Электроды 5 и 6 предназначены для вывода сигналов, которые вводятся в отдельную систему вычитания [10, 11]. Разность частот встречных электромагнитных волн пропорциональна измеряемой угловой скорости ПО:

$$\Delta\nu = \frac{4S\nu_0}{LcK_z} \omega; \quad K_z = \frac{\lambda N}{4\pi R}, \quad (1)$$

где  $\Delta\nu$  – разностная частота встречных электромагнитных волн;  $S = \pi R^2$  ( $R$  – средний радиус зазора) – площадь, охватываемая в каждом магнетроне электромагнитным потоком;  $\nu_0$  – частота электромагнитных волн в пустоте (свободном пространстве), равная

$$\nu_0 = c/\lambda,$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $c$  – скорость света,  $N$  – чётное число щелей (резонаторов), соответствующее фазовому сдвигу колебаний между соседними резонаторами, равному 180 угл. град. В магнетронах целесообразно применять  $N$  – чётное, которому соответствует  $\varphi = \pi$ , обеспечивая  $\pi$  – вид колебаний бегущих волн (он – основной в магнетронах);  $K_z$  – коэффициент замедления фазовой скорости электромагнитных волн по сравнению со скоростью света. Сопоставляя формулу (1) с формулой

$$\Delta\nu = K_2 \omega, \quad (2)$$

содержащей масштабный коэффициент  $K_2$  ДМ ГИУС, имеем:

$$K_2 = \frac{16\pi S \nu_0 R}{Lc \cdot \lambda N}. \quad (3)$$

Для получения интегральной информации (текущего углового положения объекта) используем выражение (2):

$$\varphi = \varphi_0 + K_2 \int_{t_0}^t \omega(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где  $\varphi_0, \varphi$  – начальное и текущее значения фазового угла разностного сигнала.

**Одномагнетронный гироскопический измеритель угловых скоростей (ОМ ГИУС).** Принципиальное отличие ДМ ГИУС по патенту [8] от прибора по патенту [11] состоит в том, что у обоих магнетронов одна магнитная система (в силу этого, у них единый магнитный поток). Однако векторы магнитной индукции над каждым магнетроном встречные. Поэтому в их резонаторах имеют место встречные движения электронных спиц [15], а в зоне непосредственного взаимодействия указанных спиц они вычитаются. На рисунке 2 изображена функциональная электрическая схема ОМ ГИУС. В нем применен только один магнетрон.

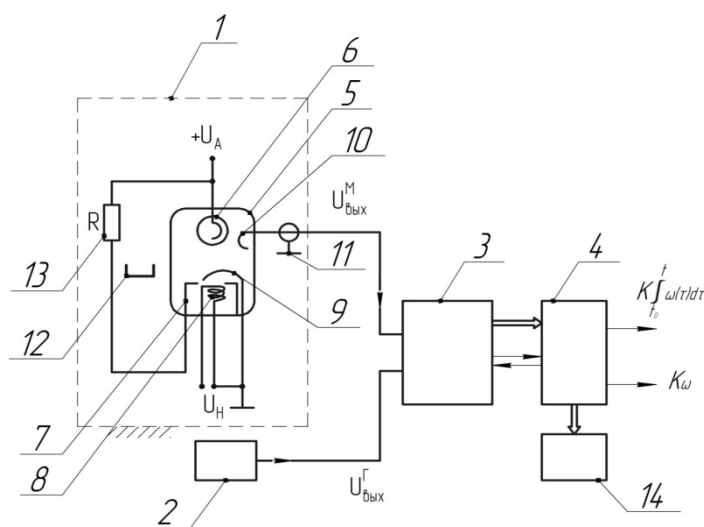


Рисунок 2 – Одномагнетронный ГИУС

На рисунке 2 приняты такие обозначения: 1 – корпус магнетрона (митрона), соединенный с корпусом подвижного объекта (ПО); 2 – сверхвысокостабильный генератор эталонной (опорной) частоты (таймер); 3 – фазовый компаратор; 4 – вычислитель в виде бортового микроконтроллерного устройства, 5 – герметичный вакуумплотный магнетрон; 6 – резонаторный анод; 7 – управляющий конический анод электронной пушки; 8 – накальный эмиттирующий катод, 9 – холодный катод магнетрона; 10 – электрод вывода информации, выполненный, например, в виде петли или коаксиально-полоскового перехода; 11 – корпус магнетрона, соединенный с корпусом ПО; 12 – магнитная система магнетрона; 13 – резистор анодной цепи; 14 – фазовый калибратор на основе второго микроконтроллера. В состав одномагнетронного гироскопа входит чувствительный элемент магнетрона 5. Он представляет собой герметичную замкнутую полость с расположенными в ее корпусе 1 резонаторным анодом 6, электродом для вывода информации 10, холодным катодом 9, накальным эмиттирующим катодом 8, управляющим коническим анодом электронной пушки 7.

В состав однорезонаторного гироскопа-магнетрона также входят магниты (электромагниты) 12; источники питающих напряжений. При этом чувствительный элемент укреплен с помощью кронштейна и регулируемых опор к корпусу так, что ось холодного катода 9 и резонаторного анода 6, являющаяся измерительной, параллельна вектору магнитной индукции магнита (электромагнита), совпадает с направлением инжекции электронной пушки, перпендикулярна плоскости размещения кольцевой анодной системы.

В состав этого прибора вместо второго магнетрона введен высокостабильный измеритель времени в виде сверхвысокочастотного генератора эталонной частоты 2 на основе третьего микропроцессорного устройства. Фазовый калибратор 14 позволяет определить собственную частоту генерации магнетрона при неподвижном объекте, равную эталонной частоте генератора. Электрод вывода информации 10 и выход высокостабильного измерителя времени соединены с соответствующими входами фазового компаратора 3, подключенного с помощью шин интерфейсов к бортовому микропроцессорному устройству 4. Его выход связан с фазовым калибратором 14.

Элемент 5 может быть как классическим магнетроном малой мощности, так и митроном [6, 15]. Крепление магнетрона к корпусу объекта аналогично описанному в патенте [10]. Схема электрическая одинакова как для магнетрона, так и для митрона. Фазовый калибратор 3 представляет собой также фазовый детектор, например, описанного выше типа. Высокостабильный измеритель времени в виде генератора эталонной частоты 2 может быть выполнен в виде «Стандарта частоты и времени водородного Ч1-95» в случае применения прибора для объектов типа корабля, подлодки, большого летательного аппарата и другого крупного транспортного средства [3]. Частоты выходных синусоидальных сигналов кварцевого генератора 5, 10 и 100 МГц настраиваются по сигналу излучения квантового водородного генератора с частотой 1420, 405 МГц. Относительная нестабильность (погрешность) частоты:  $5 \cdot 10^{-16}$  за сутки и  $1,5 \cdot 10^{-13}$  за 1 с [5].

В случае создания гироскопов-магнетронов миниатюрных и даже микроразмеров, можно применить малогабаритный рубидиевый стандарт частоты Ч1-1012, который используется в ГЛОНАСС/GPS-приемниках в качестве синхронизирующего генератора [2]. Его масса – 0,65 кг, габариты 102×76×51,5 мм. Среднеквадратическое относительное отклонение частоты  $3 \cdot 10^{-11}$  за 1 с ( $10^{-11}$  за 10 с) от номинальной 5МГц. Имеются и другие приборы для задания частоты, в том числе описанный в [3]. Его нестабильность частоты равна  $10^{-16}$  с перспективой улучшения до  $10^{-17}$  с. При наличии измеряемой угловой скорости частота магнетрона изменяется и становится равной

$$v = v_0 + \Delta v; \tag{5}$$

На выходе микропроцессора 4, наблюдают разность частот, равную:

$$\Delta v = v - v_0 = \frac{2Sv_0}{LcK_z} \omega; K_z = \frac{\lambda N}{4\pi R}. \tag{6}$$

Приращение фазы выходного сигнала измеряют через приращение  $\tau$  времени, задаваемое генератором 2 в микропроцессоре 4:

$$\varphi - \varphi_0 = v_0 \tau; \tau = \frac{\varphi - \varphi_0}{v_0} = K_1 \int_{t_0}^t \omega(\tau) d\tau / v_0. \tag{7}$$

В России и за рубежом выпускается большое количество микропроцессоров. В частности, в США – это микропроцессоры Intel XenonL 3403. Они характеризуются тактовой частотой 2 ГГц, разрядностью 64 bit и другими параметрами, обеспечивающими функционирование приборов ОМ ГИУС. Могут быть применены и микроконтроллеры, например, Texas Instrument CC2640 с тактовой частотой 2,4 ГГц и разрядностью 32 bit. В его состав входят также два компаратора. Выпускаются промышленностью и сборки компараторов. Например, отечественная микросхема цифрового фазового генератора 5861 ДФЗУ

предназначена для измерения фазового рассогласования между двумя гармоническими сигналами. В ее состав входят два делителя частоты и фазовый компаратор; формирователь сигналов рассогласования.

Рассмотрим процесс работы одномагнетронного гироскопа-магнетрона более подробно. После подключения питания прибор через небольшое время готов к работе. Фазовый компаратор 3 включает в работу при неподвижном объекте для определения собственной частоты генерации магнетрона. Производят калибровку прибора при размещении магнетрона 5, например, осью чувствительности по линии Восток-Запад в плоскости горизонта. Определяют по выходным сигналам магнетрона  $U_{\text{вых}}^M$  и генератора  $U_{\text{вых}}^G$  номинальную (при  $\omega = 0$ ) частоту магнетрона. В итоге частоты выходных сигналов магнетрона и генератора регулируют так, чтобы они стали равными  $\nu_0$ . После этого, например, с помощью поворотного стола измерительную ось прибора направляют в плоскости горизонта на Север, то есть вдоль северной составляющей угловой скорости вращения Земли. Затем после обработки сигналов в микропроцессоре 4 и калибраторе 14 определяют масштабный коэффициент прибора  $K_1$ . Масштабный коэффициент ОМ ГИУС вдвое меньше, чем в ДМ ГИУС:

$$K_1 = \frac{8\pi S v_0 R}{Lc \cdot \lambda N} \sim K_1 = \frac{4\pi}{N} \cdot \left(\frac{R}{\lambda}\right)^2. \quad (8)$$

Одномагнетронный гироскопический измеритель угловых скоростей с реверсированием вектора магнитной индукции (ОМР ГИУС). Функционально-электрическая схема однорезонаторного гироскопа – магнетрона с реверсированием вектора магнитной индукции [13] – ОМР ГИУС изображена на рисунке 3.

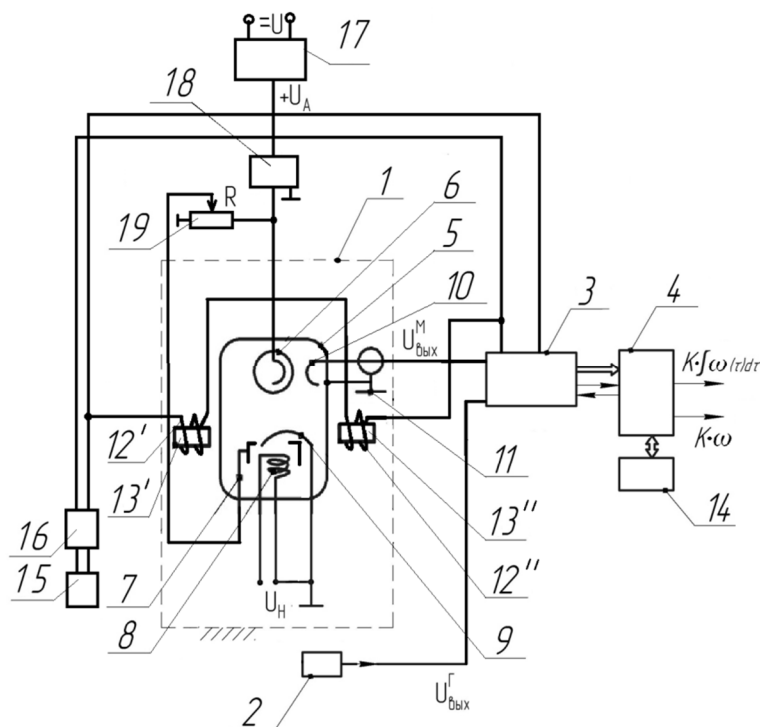


Рисунок 3 – Одномагнетронный ГИУС с реверсированием вектора магнитной индукции. Обозначения для позиций 1 – 11 такие же, как и для прибора по рисунку 2. Позициями 12', 12'' обозначены обмотки электромагнитов; 13', 13'' – магнитопроводы электромагнитов; 14 – фазовый калибратор; 15 – стабилизатор тока в обмотках электромагнитов; 16 – коммутатор тока в обмотках 12', 12''; 17 – стабилизатор анодного напряжения резонансной системы; 18 – стабилизатор анодного тока; 19 – резистор межанодной цепи

Кроме того, одномагнетронный ГИУС с реверсированием вектора магнитной индукции содержит электромагнитную систему, источники питающих напряжений. Чувствительный элемент укреплен кронштейном и регулируемыми опорами так, что ось холодного катода 9 и резонаторного анода 6, являющаяся измерительной, параллельна вектору магнитной индукции магнита или электромагнита; совпадает с направлением инжекции электронной пушки; перпендикулярна плоскости размещения кольцевой анодной системы. Высокостабильный измеритель времени в виде сверхвысокочастотного генератора эталонной частоты 2 вырабатывает опорную эталонную частоту  $\nu_0$ . Фазовый калибратор 14 предназначен для определения собственной частоты генерации магнетрона, при неподвижном объекте равной эта-

лонной частоте генератора. Электрод вывода информации 10 и выход высокостабильного измерителя времени соединены с соответствующими входами фазового компаратора 3, подключенного двусторонними каналами связи к бортовому МПУ 4, выход которого связан с фазовым калибратором 14. В составе устройства предусмотрены стабилизаторы анодного напряжения 17 и тока магнетрона 18, стабилизатор 15 и коммутатор 16 тока электромагнитов, два соосно расположенных электромагнита, оси которых совпадают с измерительной осью прибора. Обмотки электромагнитов 12', 12'' подключены к выходу коммутатора тока 16, со входом которого соединен стабилизатор тока 15. Кроме того, высокостабильный измеритель времени соединен с одним входом контроллера, с другим соединен выход коммутатора тока, с третьим – выходной электрод магнетрона. Контроллер определяет приращения частоты магнетрона по отношению к частоте эталонного генератора на каждом полупериоде коммутации тока, по алгоритмам сравнения, разность которых пропорциональна измеряемой угловой скорости, а приращение фазы, являющееся выходным сигналом, пропорционально приращению интеграла от указанной угловой скорости. Фазовый калибратор 3 определяет собственную частоту генерации магнетрона  $\nu$ .

Фазовый калибратор 3 представляет собой также фазовый детектор, например, описанного выше типа.

Рассмотрим подробнее процесс работы однорезонаторного гироскопа-магнетрона, схема которого была представлена на рисунке 3.

Фазовый калибратор 3 включают в работу при неподвижном объекте и определяют собственные номинальные частоты генерации магнетрона, а также времена коммутации тока питания электромагнитов 12'–13''.

Введенные в состав прибора элементы 15–18 предназначены для повышения его точности. Токи обмоток электромагнитов 12', 12'', 13', 13'' стабилизируются стабилизатором тока 15 и переключаются его коммутатором 16, в результате магнитная индукция стабилизируется в каждый полупериод. Реверсирование вектора стабилизированной магнитной индукции за счет коммутатора 16 предназначено для уменьшения дрейфа выходных сигналов прибора и для уменьшения количества запоминаемой информации. Стабилизаторы анодных напряжения 17 и тока 18 также служат для повышения точности. Известно [4, 6, 15], что нестабильности анодных тока и напряжения приводят к электронному смещению частоты

генерации магнетрона, что приводит к погрешностям выходных сигналов  $U_{вых}^M; K\omega; K \int_{t_0}^{t_1} \omega d\tau$ .

Кроме того, введение коммутации тока 16 сопровождается необходимостью измерять периоды коммутации порядка  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  с, что можно осуществлять с более высокой точностью с помощью таймера 2, по сравнению с измерением малых промежутков времени порядка  $10^{-8} \dots 10^{-10}$  с в приборе по [12].

После включения напряжений питания магнетрон 5 готов к работе. Производят калибровку прибора, как это сделано в приборе ОМ ГИУС, и определяют масштабный коэффициент прибора  $K$ .

При появлении измеряемой угловой скорости  $\omega$  ПО вокруг измерительной оси прибора, частота магнетрона изменяется и становится равной:

$$\nu = \nu_0 + \Delta\nu. \tag{9}$$

На стадии проектирования прибора частоту магнетрона  $\nu_0$  определяют при расчётах, например, по книге [15]. При калибровке и при эксплуатации определяют  $\nu_0$  и  $\nu$  по описанной выше методике. При этом на выходе микропроцессора определяют разность частот  $\nu_0 - \nu = \Delta\nu$ , где  $\nu_0$  – частота генератора. Для первого положительного значения тока (0,  $T_1/2$ ) получаем приращение частоты, т.е. полезный сигнал:

$$\Delta\nu_1 = \nu_1 - \nu_0 = \frac{2Sv}{LcK_3} \omega; K_3 = \frac{\lambda N}{4\pi R}. \tag{10}$$

Из (2) имеем такое выражение для масштабного коэффициента прибора:

$$K = \frac{8\pi svR}{Lc \cdot \lambda N}. \tag{11}$$

Справедлива формула, аналогичная формуле (3)

$$\Delta\nu_1 = K\omega. \tag{12}$$

Для получения интегральной информации (углового положения объекта) интегрируют выражение (12):

$$\varphi_1 = \varphi_0 + K \int_{t_0}^{t_1} \tilde{\omega}_1(\tau) d\tau, \quad t_1 = T/2, \tag{13}$$

$$\varphi_0 = 0,$$

$$\tilde{\omega}_1 = (\omega + \Delta\omega_{ЭМ} + \Delta\omega_H),$$



где  $\varphi_0, \varphi$  – начальная и текущая фазы сигнала от интеграла угловой скорости;  $t_1 - t_0 = T/2$ ;  $\Delta\omega_{эм}$  – угловая скорость дрейфа, вносимая электромагнитами;  $\Delta\omega_H$  – составляющая угловой скорости дрейфа от других его источников.

Во второй полупериод изменения тока знак его и индукции изменятся на обратный. Направление движения потока электронной спицы и бегущих электромагнитных волн в установившемся режиме будет обратным. Полагаем, что за время  $T$  знаки  $\omega$  и  $\Delta\omega_H$  не изменятся, а знак  $\Delta\omega_{эм}$  изменится на обратный. Следовательно, соответствующие выходы контроллера по частоте и фазе изменятся:

$$\Delta v_2 = v_2 - v_0 = -\frac{2Sv}{LcK_3} \tilde{\omega}_2, \quad \tilde{\omega}_2 = (\omega - \Delta\omega_{эм} + \Delta\omega_H), \quad (14)$$

$$\varphi_2 = -K \int_{t_1}^{t_2} \tilde{\omega}_2(\tau) d\tau. \quad (15)$$

В микроконтроллере (микропроцессорном устройстве) определяется разность частот и фазовых углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ :

$$\Delta v_1 - \Delta v_2 = 2K(\omega + \Delta\omega_H); \quad \varphi_1 - \varphi_2 = 2K \int_0^T (\omega + \Delta\omega_H) d\tau; \quad T = t_2 - t_1.$$

Приращение фазы измеряют через приращения  $\Delta\tau$  времени, задаваемое генератором 2 в микропроцессоре 4:

$$\varphi_2 - \varphi_0 = v_0 \Delta\tau; \quad \Delta\tau = \frac{\phi_2 - \phi_0}{v_0} = K \int_{t_0}^{T/2} \tilde{\omega}(\tau) d\tau / v_0; \quad \tilde{\omega} = \omega + \Delta\omega_H. \quad (16)$$

$$\text{Так как } \int_{t_0}^T \tilde{\omega}(t) dt = \Delta\psi, \text{ то } \Delta\psi = \frac{\varphi_2 - \varphi_0}{2K},$$

где  $\Delta\psi$  – приращение угла поворота.

После  $n$ -го периода для фазы имеем:

$$\phi_n - \phi_0 = 2K \int_{t_0}^{nT} \tilde{\omega}(\tau) d\tau. \quad (17)$$

Вид формул (14)–(16) будет повторяться для каждого периода «Т».

Отметим, что, в силу закона Био – Савара – Лапласа, индукция определяется магнитной проницаемостью сердечника, величиной тока в катушке и конструктивными параметрами.

Рассмотрим числовой (расчетный) пример для прибора ОМР ГИУС.

Одномагнетронный гироскоп-магнетрон имеет следующие параметры:  $R=3.82$  см;  $N=4$ ;  $\lambda=2$  см.

$$\text{Так как } K = \frac{8\pi \cdot \pi r^2 \cdot r \cdot v}{2\pi r \cdot c \lambda \cdot N} = \pi \cdot \left(\frac{r}{\lambda}\right)^2, \text{ то получим:}$$

$$K = \pi \cdot (1,91)^2 = 3,14 \cdot 3,65 = 11,46.$$

Для выходного сигнала на первом периоде  $T$  имеем для частот по полупериодам и за период (в том числе для фазы):

$$\Delta v_1 = K \cdot (\omega_\xi + \Delta\omega_{эм} + \Delta\omega_H);$$

$$\Delta v_2 = K \cdot (\omega_\xi - \Delta\omega_{эм} + \Delta\omega_H)$$

$$\Delta v = \Delta v_1 - \Delta v_2;$$

$$\Delta v = 11,46(\omega_\xi + \Delta\omega_H), \text{ рад/с;}$$

$$\Delta\varphi = 11,46(\omega_\xi + \Delta\omega_H)T, \text{ рад.}$$

После  $n$ -го периода  $\Delta\varphi = 11,46(\omega_\xi + \Delta\omega_H)nT$ . Погрешность измерения прибора в приборе снижена по расчёту в два раза по отношению к ПМ № 163266 [12]. Возможно и большее снижение погрешностей при практическом использовании прибора. Проведенные для данного примера расчеты свиде-

тельствуют о достоинстве предложенного технического решения по отношению к первым двум вариантам приборов. Требования к объёму памяти микропроцессорного устройства для данного прибора по патенту [8] ниже, чем для прибора по патенту [12].

Для ОМ ГИУС справедливы соотношения (2), (4) с заменой в них масштабного коэффициента  $K_2$  на  $K_1$ .

**Анализ погрешностей приборов ДМ ГИУС и ОМ ГИУС.** Выведем уравнения ошибок для обоих приборов на основе выражений выходной информации (1) и (6). Для ДМ ГИУС с различными малыми погрешностями магнетронов для выходного сигнала имеем следующее выражение:

$$\delta v_2 = 2 \cdot \left( \frac{2S_1 v_0}{L_1 c K_{z1}} + \frac{2S_2 v_0}{L_2 c K_{z2}} \right) \cdot \omega + \Delta v_{m1} + \Delta v_{m2} + \Delta v_{d2} \quad (18)$$

где  $S_i, L_i (i = 1, 2)$  – площади и периметры резонаторов, соответствующие радиусам анодов [8,9];  $K_{zi} (i = 1, 2)$  – коэффициенты замедления скоростей распространения электромагнитных волн или электронных спиц в магнетронах;  $\delta v_{mi}$  – частоты погрешностей генерации магнетронов по отношению к расчётной частоте  $V_0$ , вызванные разными масштабными коэффициентами магнетронов, электронным смещением частот и другими причинами;  $\Delta v_{d2}$  – частота дрейфа одного магнетрона по отношению к другому, на несколько порядков меньшая 1 Гц, вызванная изменением температуры, наличием внешних магнитных и электрических полей и т.д. При учёте дрейфов частот встречных электромагнитных волн появляется погрешность выходного сигнала  $\Delta v_{d2} = K_{02} \cdot \omega_{dr}$ , где  $\omega_{dr}$  – угловая скорость дрейфа сигнала, пересчитанного к измеряемой угловой скорости. Разложим это выражение в ряд Тейлора и примем в качестве нулевого члена разложения уравнение идеальной работы (1), в качестве погрешности – линейные члены разложения. Тогда получим формулу:

$$\delta v_2 = K_2 \cdot \left( \frac{\Delta S_1}{S} + \frac{\Delta S_2}{S} - \frac{\Delta L_1}{L} - \frac{\Delta L_2}{L} - \frac{\Delta K_{z1}}{K_z} - \frac{\Delta K_{z2}}{K_z} \right) \cdot \omega + \Delta v_{m1} + \Delta v_{m2} + \Delta v_{d2}. \quad (18)$$

По аналогии для ОМ ГИУС формула погрешности выходной разностной частоты имеет вид:

$$\delta v_1 = K_1 \cdot \left( \frac{\Delta S_1}{S} - \frac{\Delta L_1}{L} - \frac{\Delta K_{z1}}{K_z} \right) \cdot \omega + \Delta v_{m1} + \Delta v_d + \Delta v_g, \quad (19)$$

где  $\Delta v_d$  – частота дрейфа магнетрона;  $\Delta v_g$  – частота дрейфа эталонного генератора. Алгоритм идеальной работы ОМ ГИУС имеет вид:

$$\Delta v_1 = K_1 \omega \quad K_1 = \frac{8\pi S v_0 R}{L c \cdot \lambda N} \quad \varphi = \varphi_0 + K_1 \int_{t_0}^t \omega(\tau) d\tau. \quad (20)$$

Определим основные параметры и погрешности приборов при следующих конструктивных значениях устройств:  $\lambda = 1$  см;  $R = 5.095$  см;  $L = 32$  см;  $N = 64$ . Масштабные коэффициенты:  $K_1 = 4$ ;  $K_2 = 8$ .

Частота в свободном пространстве  $v_0 = c / \lambda$ ;  $v_0 = 3 \cdot 10^{10}$  Гц. Замедленная частота генерации магнетрона [9]:  $v_{0z} = \frac{2v_0}{N} = 2 \cdot 3 \cdot 10^{10} / 64 = 9.375 \cdot 10^8$ , Гц. Алгоритмы идеальной работы приборов с численными коэффициентами:

$$\text{ОМ ГИУС: } \Delta v = 4 \cdot \omega \quad ; \quad \varphi = \varphi_0 + 4 \cdot \int_{t_0}^t \omega(\tau) d\tau ;$$

$$\text{ДМ ГИУС: } \Delta v = 8 \cdot \omega \quad ; \quad \varphi = \varphi_0 + 8 \cdot \int_{t_0}^t \omega(\tau) d\tau .$$

Вначале рассчитаем погрешности для ОМ ГИУС, учитывая, что калибровка состоит в определении калибратором 14 масштабного коэффициента  $K_1$  при  $\omega = 0$  и его запоминании без проведения регулировок. Предполагается, что индукция, анодные напряжения и ток в приборе стабилизированы с высокой точностью. Для уменьшения электронного смещения частоты может быть применён митрон. Определим при калибровке ( $\omega = 0$ ) частоту магнетрона  $V_{0z}$  и зададим ему угловую скорость  $\omega$ . Затем определим указанный коэффициент, точность определения будет высокой. При погрешности эталонного генератора по частоте  $10^{-16}$  находим ошибку измерения частоты, равную  $0.9375 \times 10^{-7}$ . На основе этого

имеем  $\Delta v_g = 0.9375 \times 10^{-7}$ . Из формулы (11) получаем значение показателя дрейфа измеренной угловой скорости за счёт ошибки эталонного генератора:  $\Delta \omega_g = \Delta v_g / K_1 = 2.34 \cdot 10^{-8}$ ,  $\Gamma_{\text{ц}} = 1.47 \cdot 10^{-7}$ , рад/с. Учтём теперь другие погрешности по формуле (11). Погрешность дрейфа  $\Delta v_d$ . Расчёт производим из соображений снижения, стабилизацией анодных тока и напряжения, а также магнитной индукции, величины электронной частоты смещения от 0.5 кГц в  $10^9$  раз. Тогда получаем  $\Delta \omega_d = 0.89 \cdot 10^{-6}$ , рад/с. Погрешность  $\Delta v_{m1}$  принимаем равной погрешности  $\Delta \omega_d$ . Рассчитаем погрешность  $\Delta v_{k1}$  от нестабильности масштабного коэффициента. Примем допуски на параметры, входящие в выражение для заданной погрешности

$$\Delta v_{k1} = K_1 \cdot \left( \frac{\Delta S_1}{S} - \frac{\Delta L_1}{L} - \frac{\Delta K_{z1}}{K_z} \right) \cdot \omega = K_1 \cdot \left( \frac{2\Delta R}{R} - \frac{2\Delta R}{R} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right) \cdot \omega \quad (21)$$

и состоящие из случайных погрешностей изготовления, сборки, влияния температуры, равными следующим значениям: первые два члена взаимно уничтожаются, а  $\Delta \lambda = 0.02$ , мкм. Находим значение в скобках в (21). Оно равно  $2 \times 10^{-6}$ . Тогда при  $\omega = 0.1$  рад/с получаем:

$$\delta v_{k1} = 5.095 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \times 0.1 = 10.2 \times 10^{-7} \text{ или } \Delta \omega_{k1} = 1.37 \cdot 10^{-6}, \text{ рад/с.}$$

Суммарная погрешность ОМ ГИУС, приведенная к измеряемой угловой скорости, равна:

$$\Delta \omega_{v1} = \Delta \omega_{m1} + \Delta \omega_d + \Delta \omega_g + \Delta \omega_{k1} = 3.3 \times 10^{-6}, \text{ рад/с.} = 0.62 \text{ угл. град/час.}$$

Ошибка ОМ ГИУС с реверсированием вектора магнитной индукции рассчитывается по формулам (19), (21) с учетом погрешности от коммутации вектора магнитной индукции. Как показано выше, она будет несколько ниже ошибки ОМ ГИУС без реверсирования вектора магнитной индукции.

Ошибки ДМ ГИУС рассчитываются аналогично, но на основе формул (18), (21), выводимых из соотношений (1), (2), (3). Ошибки  $\Delta v_{m1} + \Delta v_{m2}$  и  $\Delta \omega_d$  имеют место, погрешность  $\Delta \omega_g$  отсутствует. Для уменьшения погрешностей  $\Delta \omega_{m1}$ ,  $\Delta \omega_{m2}$  нужно производить настройку и стабилизацию частот магнетронов, в первую очередь их резонансных частот, за счёт изменения его параметров, в т.ч. конструктивных. Этим ДМ ГИУС принципиально отличается от ОМ ГИУС. Выше указано, что за несущую частоту магнетрона в ОМ ГИУС принимается измеренная при калибровке частота генерации магнетрона в диапазоне 0.1...10 ГГц, которая запоминается в микропроцессоре и учитывается в расчётах и при работе прибора. Согласно анализу развития вычислительной техники [18], подобные параметры вполне достижимы. Этот приём неприменим к ДМ ГИУС. Поэтому погрешности  $\Delta \omega_{m1}$  и  $\Delta \omega_{d1}$  примем в 15 раз больше, чем в ОМ ГИУС, так что его суммарная погрешность будет равна примерно  $\Delta \omega_{v1} = 10$  угл. град/час.

**Заключение.** Описаны физические основы работы и уравнения идеальной работы пары двухмагнетронных ДМ ГИУС и двух одномагнетронных ОМ ГИУС, ОМР ГИУС, связывающих через масштабные коэффициенты их выходные сигналы с измеряемыми угловыми скоростями. Выведены уравнения ошибок указанных приборов. Произведены расчёты основных параметров и ошибок приборов. Показано, что бортовые микропроцессорные устройства должны обрабатывать с высокой точностью высокочастотные сигналы в диапазоне 0.1...10 ГГц ГИУС, при этом обеспечивать вычисление фазовых углов с погрешностью долей и единиц угловой секунды. Это требует применения соответствующего компьютерного оборудования

Достоинства предлагаемых устройств: широкий диапазон температур, перегрузок, вибраций, воздействие магнитных и электрических полей и др. Показано, что для прибора ДМ ГИУС, где физически выделяется разность частот встречных потоков электромагнитных волн двух магнетронов, требования по быстродействию и объёму памяти бортового микропроцессора гораздо ниже, чем для одномагнетронных ГИУС. В них вычислители обрабатывают СВЧ информацию в процессе выделения из неё сигнала о низкочастотной угловой скорости ПО. Анализ современных образцов компьютеризированных устройств, основанных на описываемых принципах, показал, что измерения могут производиться с приемлемой точностью при частотах генерации магнетронов до 2–2,5 ГГц.

#### Список литературы

1. Бычков С. И. Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа / С. И. Бычков. – Москва : Советское радио, 1967. – 216 с.
2. Главный метрологический центр государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ (НИО – 7)). – Режим доступа: <http://www.vniiftri.ru/index.php/ru/struct/gsvch#get-1-201>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 16.10.2017).

3. КВАРЦ Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт. – Режим доступа: <http://www.kvarz.com/general/ch1-76a.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 13.10.2017).
4. Коваленко В. Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот / В. Ф. Коваленко. – Москва : Советское радио, 1955. – 344 с.
5. Кравец А. Г. Формальные метрики для автоматизированной оценки изобретений / А. Г. Кравец, М. С. Легенченко // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 3. – С. 8–19 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3\(39\)/8-19.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3(39)/8-19.pdf)).
6. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ / И. В. Лебедев. – Москва : ВШ, 1972. – 376 с.
7. Лукьянов Д. П. Прикладная теория гироскопов / Д. П. Лукьянов, В. Я. Распопов, Ю. В. Филатов. – Санкт-Петербург : Электроприбор, 2015. – 316 с.
8. Пат. 161198 Российская Федерация, МПК G01C 19/00. Резонансный гироскоп на основе магнетрона / С. Ф. Нахов, Л. А. Мельников, П. К. Плотников, С. Г. Наумов. – 2016. – Бюл. № 10.
9. Мельников Л. А. Вопросы теории и применения радиоволновых сверхвысокочастотных гироскопов / Л. А. Мельников, П. К. Плотников // Сб. мат-лов 19. – Санкт-Петербург : Электроприбор, 2012. – С. 59–62.
10. Пат. 2207511 Российская Федерация, МПК G01C 19/64. Кольцевой резонансный гироскоп сверхвысокочастотного диапазона / П. К. Плотников. – 2003. – Бюл. № 18.
11. Пат. 116999 Российская Федерация, МПК G01C 19/00. Резонансный гироскоп сверхвысокочастотного диапазона / П. К. Плотников, Л. А. Мельников. – 2012. – Бюл. № 16.
12. Пат. 16326 Российская Федерация, МПК G01C 19/00. Однорезонаторный гироскоп-магнетрон / П. К. Плотников. – 2016. – Бюл. № 19.
13. Пат. 174674 Российская Федерация, МПК G01C 19/00. Одномагнетронный гироскоп с реверсированием вектора магнитной индукции / П. К. Плотников, Л. А. Мельников, С. Г. Наумов. – 2017. – Бюл. № 30.
14. Сытник А. А. Распознавание неисправностей в технических системах на основе автоматных моделей нейронных сетей / А. А. Сытник, Т. Э. Шульга, И. В. Гвоздок // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2017) : сб. тр. V Междунар. юбилейн. науч. конф. / под ред. А. А. Львова и М. С. Светлова. – Саратов : Лоди, 2017. – С. 358–365.
15. Шевчик В. Н. Электронные приборы сверхвысоких частот / В. Н. Шевчик. – Саратов : Саратовский ун-т, 1980. – 416 с.
16. Шульга Т. Э. Современные проблемы онтологического моделирования в информационных системах / Т. Э. Шульга, А. А. Сытник // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. междунар. науч. конф. : в 12 т. / под общ. ред. А. А. Большакова. – Санкт-Петербург : Политехн. ун-т, 2017. – Т. 11. – С. 43–52.
17. Melnikov L. A. The Perspective of Microwave Gyros / L. A. Melnikov, P. K. Plotnikov // Symposium Gyro Technology. – Karlsruhe, Germany, 2011. – P. 6.1–6.9.
18. Scripal E. N. Test Methods and Results of the MEMS Inertia Sensors / E. N. Scripal, R. V. Ermakov, D. E. Gutcevitich, A. A. Lvov, A. A. Sytnik // Proceedings of the 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2018 EIConRus), January 29 – February 1, 2018. – Saint Petersburg, 2018. – P. 1000–1003.

#### References

1. Bychkov S. I. *Voprosy teorii i prakticheskogo primeneniya priborov magnetronnogo tipa* [The issues of practice and theory usage of magnetronic devices], Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1967. 216 p.
2. *Glavnyy metrologicheskij tsentr gosudarstvennoy sluzhby vremeni i chastoty (GMC GSVCH (NIO – 7))* [Main metrological center of the state service of time and frequency]. Available at: <http://www.vniiftri.ru/index.php/ru/struct/gsvch#get-1-2012> (accessed 16.10.2017).
3. *KVARTs Nizhegorodskiy nauchno-issledovatel'skiy priborostroitel'nyy institut* [KVARC research instrument-making Institute of Nizhny Novgorod]. Available at: <http://www.kvarz.com/general/ch1-76a.html> (accessed: 13.10.2017).
4. Kovalenko V. F. *Vvedenie v elektroniku sverkhvysokikh chastot* [Introduction to ultrahigh frequency electronics], Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1955. 344 p.
5. Kravets A. G., Legenchenko M. S. Formalnye metрики dlya avtomatizirovannoy otsenki izobreteniy [Formal metrics for the automated evaluation of inventions]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2017, no. 3, pp. 8–19 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3\(39\)/8-19.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3(39)/8-19.pdf)).
6. Lebedev I. V. *Tekhnika i pribory SVCH* [Microwave Equipment and Devices], Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1972. 376 p.
7. Lukyanov D. P., Raspopov V. Ya., Filatov Yu. V. *Prikladnaya teoriya giroskopov* [Applied theory of gyroscopes], Saint Petersburg, Elektropribor Publ., 2015. 316 p.
8. Patent 161198 Russian Federation, MPK G01C 19/00. Nahov S. F., Melnikov L. A., Plotnikov P. K., Naumov S. G. Resonance gyroscope, based on the magnetron. 2016, byul. no. 10.
9. Melnikov L. A., Plotnikov P. K. Voprosy teorii i primeneniya radiovolnovykh sverkhvysokochastotnykh giroskopov [Questions of the theory and applications of radio wave superhigh-frequency gyroscopes]. *Sb. mat-lov 19* [Proceedings 19], Saint Petersburg, Elektropribor Publ., 2012, pp. 59–62.
10. Patent 2207511 Russian Federation, MPK G01C 19/64. Plotnikov P. K. Ring resonance gyroscope of ultrahigh frequency range, 2003, byul. no. 18
11. Patent 116999 Russian Federation, MPK G01C 19/00. Plotnikov P. K., Melnikov L. A. Ring resonance gyroscope of ultra-high frequency range, 2012, byul. no. 16.
12. Patent 163266 Russian Federation, MPK G01C 19/00. Plotnikov P. K. Single-resonator gyroscope, 2016, byul. no. 19.

13. Patent 174674 Russian Federation, MPK G01C 19/00. Plotnikov P. K., Melnikov L. A., Naumov S. G. One-magnetron gyroscope with reversal of a vector of magnetic induction, 2017, byul. no. 30.
14. Sytnik A. A., Shulga T. E., Gvozdyuk I. V. Raspoznavanie neispravnostey v tekhnicheskikh sistemakh na osnove avtomatnykh modeley neyronnykh setey [Fault detection in technical systems based on automatic models of neural networks]. *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii (UOPI – 2017) : sb. tr. V Mezhdunar. yubileyn. nauch. konf.* [International Anniversary Scientific Conference], Saratov, Lodi Publ., 2017, pp. 358–365.
15. Shevchik V. N. *Elektronnye pribory sverkhvysokikh chastot* [Electronic devices of ultra-high frequencies], Saratov, Saratov University Publ. House, 1980. 416 p.
16. Shulga T. E., Sytnik A. A. Sovremennye problemy ontologicheskogo modelirovaniya v informatsionnykh sistemakh [Modern issues of ontological modeling in information systems]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh : sb. tr. Mezhdunar. nauch. konf.* [Mathematical Methods in the Equipment and Technologies. Proceedings of the International Scientific Conference], Saint Petersburg, Polytechnical University Publishing House, 2017, vol. 11, pp. 43–52.
17. Melnikov L. A., Plotnikov P. K. The Perspective of Microwave Gyros. *Symposium Gyro Technology*, Karlsruhe, Germany, 2011, pp. 6.1–6.9.
18. Scripal E. N., Ermakov R. V., Gutcevitich R. V., L'vov R. V., Sytnik R. V. Test Methods and Results of the MEMS Inertia Sensors. Proceedings of the 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2018 ElConRus), January 29 – February 1, 2018, Saint Petersburg, Russia, pp. 1000–1003.