

## ЗЕЕМАНОВСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГИРОСКОП С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ПРОДОЛЬНЫХ МОД ГЕНЕРАЦИИ

Н.Г. Вахитов, Ю.Д. Голяев, И.В. Дронов, М.А. Иванов,  
Ю.Ю. Колбас, А.П. Крутиков

ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, Москва, Российская Федерация  
e-mail: tигра\_eos@rambler.ru

*Описаны принципы построения, конструкции и точностных характеристик зеемановского лазерного гироскопа, работающего в режиме перестройки лазера на продольную моду генерации с противоположной круговой поляризацией световой волны — в так называемом квазичетырехчастотном режиме. Приведена оптимальная схема построения такого гироскопа, объяснен физический принцип его работы, выведена формула расчета суммарной ошибки исходя из разделения ошибки зеемановского лазерного гироскопа на магнитный дрейф, немагнитный дрейф и ошибку при переключении мод генерации. Рассмотрены методы компенсации ложного дрейфа лазерного гироскопа в моменты переключения мод генерации, включая использование дополнительной информации и аппроксимационные формулы. Приведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов парирования ложных показаний гироскопов в момент переключения мод генерации при различных угловых ускорениях. Показано, что постобработка, использующая показания гироскопа как до переключения, так и после него, позволяет существенно снизить ошибку, возникающую при переключении мод генерации. При этом наиболее устойчивой к шумам и угловым ускорениям, является линейная аппроксимирующая функция.*

**Ключевые слова:** лазерный гироскоп, эффект Зеемана, дрейф нуля.

## ZEEMAN LASER GYRO WITH SWITCHING OF LONGITUDINAL MODES OF GENERATION

N.G. Vahitov, Yu.D. Golyaev, I.V. Dronov, M.A. Ivanov,  
Yu.Yu. Kolbas, A.P. Krutikov

ОАО “Stel'makh Research Institute “Polyus”, Moscow, Russian Federation  
e-mail: tигра\_eos@rambler.ru

*Principles of development, construction, and accuracy characteristics of a Zeeman laser gyro are described. The gyro operates in the mode of laser switching to the longitudinal mode of generation with the opposite circular polarization of the light wave (in the so-called quasi-four-frequency mode). The optimal scheme of this gyro development is given; a physical principle of its operation is explained, a formula is deduced for the total error calculation based on partitioning the error of Zeeman laser gyro into the magnetic drift, the nonmagnetic drift, and the error in switching of generation modes. Methods to compensate for a false drift of the laser gyro at moments of the generation mode switching are considered including the usage of additional information and formulas of approximation. Experimental and theoretical results of parrying false readings of gyros at the moment of generation mode switching with different angular accelerations are compared. It is shown that the post-processing (that uses the gyro readings both before the switching and after it) allows the substantial reduction in the error arising with the generation mode switching. In this case the linear approximating function is most resistant to noise and angular accelerations.*

**Keywords:** laser gyro, Zeeman effect, zero drift.

В последнее время распространенным методом компенсации магнитного дрейфа зеемановских лазерных гироскопов (ЗЛГ) стал так называемый квази-четырёхчастотный режим генерации [1, 2], а именно: попеременная работа на продольных модах с противоположной круговой поляризацией. Переключение с одной моды генерации на другую осуществляется путем изменения периметра кольцевого лазера [3].

Поскольку мгновенная перестройка с одной продольной моды на другую невозможна, существует отрезок времени, в течение которого в лазере возникает режим большой разницы интенсивностей встречных волн, вплоть до возникновения однонаправленной генерации. При этом измеренная ЗЛГ угловая скорость содержит ложную составляющую, значение которой зависит от скорости перестройки периметра лазера. Задачей настоящей работы является выбор оптимального алгоритма как управления периметром, так и компенсации ложной составляющей сигнала на выходе ЗЛГ, исходя из условий работы ЗЛГ: требуемой точности, такта коммутации частотной подставки, времени непрерывной работы, углового ускорения ЗЛГ и собственных характеристик лазера (магнитного и немагнитного дрейфов, скорости его изменения, скорости перестройки периметра).

**Переключение мод ЗЛГ.** Зеемановский лазерный гироскоп представляет собой He–Ne-лазер с неплоским контуром, образованным четырьмя диэлектрическими зеркалами. В таком лазере снимается вырождение с продольных мод с ортогональными круговыми поляризациями [3].

Для устранения влияния захвата частот встречных волн используется частотная подставка на базе эффекта Зеемана, создаваемая путем наложения на газоразрядные промежутки знакопеременного магнитного поля с периодом коммутации  $T$  (рис. 1). Кроме того переключающееся поле приводит к модуляции интенсивности каждой из встречных волн [4]. Амплитуда модуляции зависит от расстройки лазера от центра нерасщепленного магнитным полем контура усиления активной среды по формуле [4]:

$$A_I = 4a_I \Delta \lambda \frac{c}{\Delta \nu}, \quad (1)$$

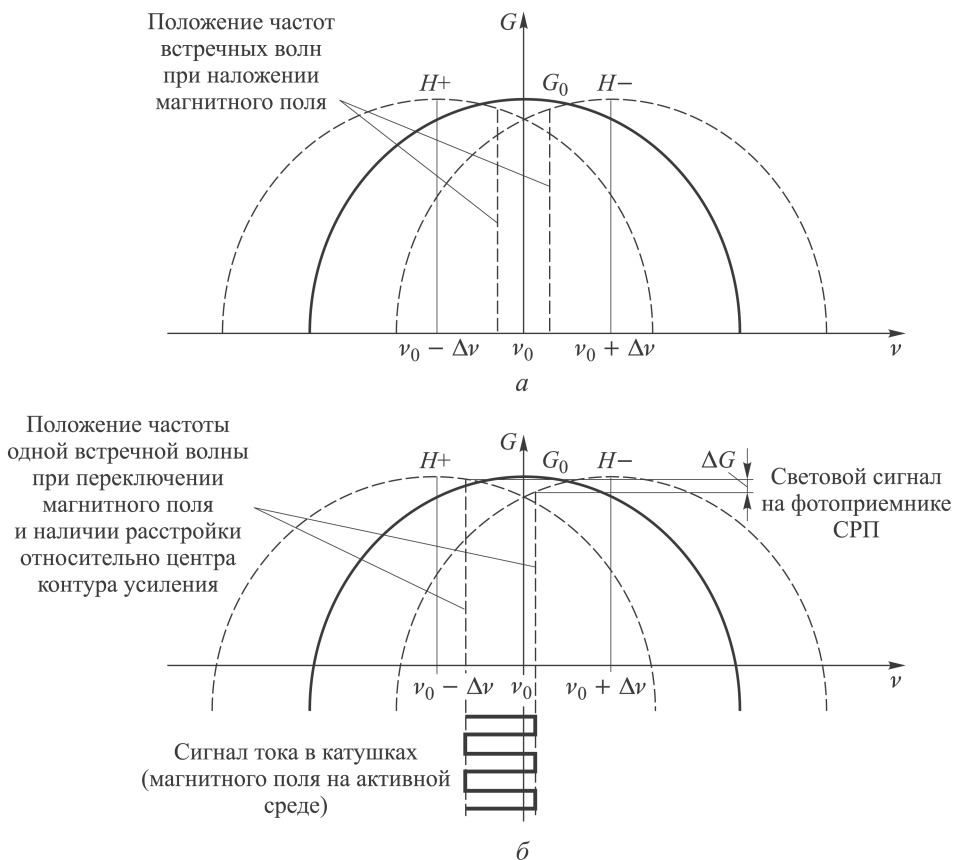
где  $a_I$  — константа, зависящая от усиления и потерь в резонаторе;  $\Delta \lambda$  — относительная расстройка периметра, выраженная в долях длины волны генерации лазера;  $c$  — скорость света;  $\Delta \nu$  — сдвиг оптического контура за счет эффекта Зеемана. Фаза модуляции (0 или  $\pi$ ) зависит от направления круговой поляризации (правой или левой).

Равенство нулю амплитуды данного сигнала означает точную настройку периметра на центр контура усиления активной среды, что и поддерживает система регулировки периметра (СРП).

Частота подставки при этом описывается формулой [4, 5]:

$$f = f_0(1 - \chi \Delta \lambda^2), \quad (2)$$

где  $f_0$  и  $\chi$  — константы, зависящие от усиления активной среды, уровня потерь в резонаторе, температуры активной среды.

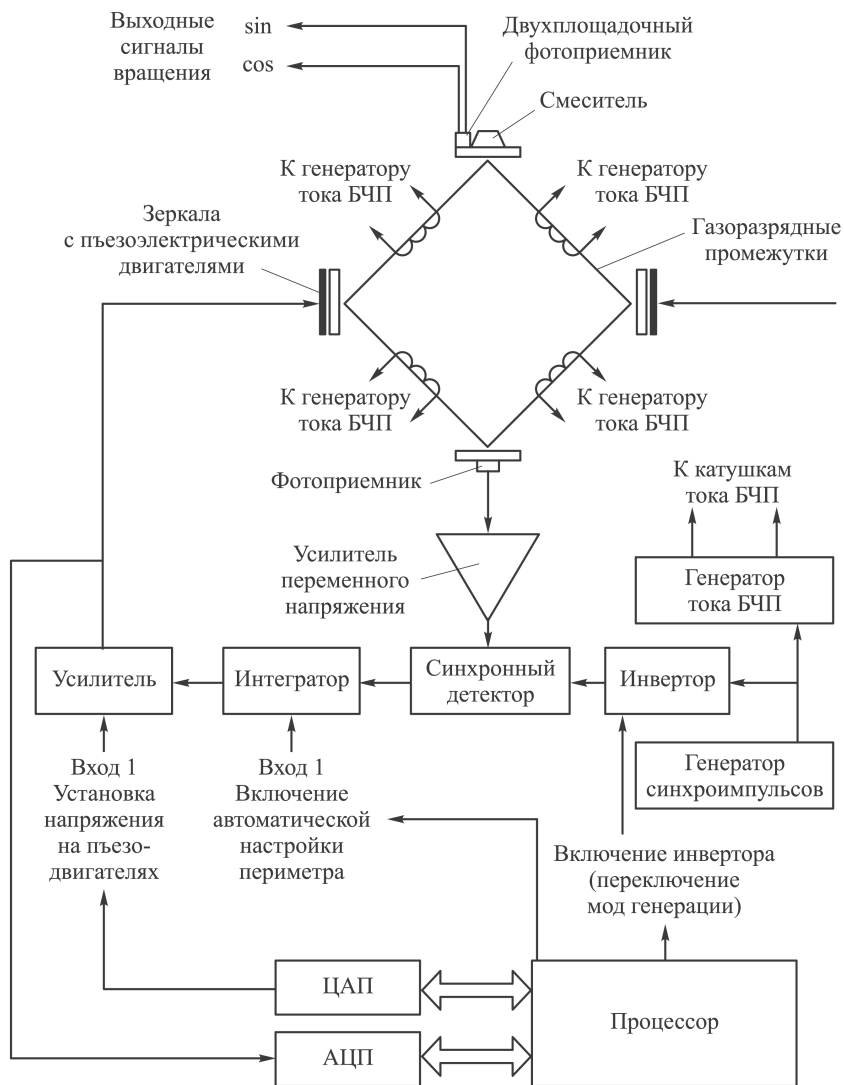


**Рис. 1. Создание частотной подставки в зеемановском кольцевом лазере и возникновение сигнала расстройки**

К СРП предъявляются следующие требования:

- обеспечение минимальной расстройки моды от центра кривой усиления;
- устойчивость при воздействиях механических ударов и вибраций, при повышенной и пониженной температурах окружающей среды;
- быстрое переключение лазера с моды с одним направлением круговой поляризации света на другую без появления колебательного режима.

Блок-схема СРП с реверсом мод представлена на рис. 2. СРП можно разделить на две части — медленный каскад, состоящий из усилителя, синхронного детектора и интегратора, и быстрый — транзисторный усилитель напряжения, нагруженный на пьезодвигатель подстройки периметра ЗЛГ. Поскольку входным сигналом для СРП является сигнал модуляции интенсивности света в одном из встречных лучей, прошедший через синхронный детектор, его частота равна удвоенной частоте коммутации подставки. Для обеспечения устойчивости системы авторегулирования необходимо, чтобы постоянная времени первого каскада составляла не менее пяти периодов входного сигнала  $T$  (периодов коммутации подставки) [6]. Система регулировки периметра имеет два входа. Первый — вход управления, отключающего вход



**Рис. 2. Блок-схема СРП с реверсом мод**

транзисторного усилителя от выхода интегратора. В этом случае напряжение на пьезодвигателе определяется напряжением на втором входе СРП.

Постоянная времени СРП в режиме автоматической подстройки периметра  $T_{СРП}$  определяется суммой постоянных времени интегратора, транзисторного усилителя напряжения, времени перезарядки емкости пьезокерамики, времени задержки установления положения пьезокерамики относительно поданного напряжения. В режиме отключенного интегратора постоянная времени перестройки определяется транзисторным усилителем напряжения, временем перезарядки емкости пьезокерамики, временем задержки положения пьезокерамики относительно поданного напряжения.

Для переключения мод используется процессор, имеющий АЦП и ЦАП. Быстрая перестройка периметра с моды на моду осуществляется следующим образом. Перед переключением измеряется напряжение на пьезодвигателях,

соответствующее текущей моде генерации (например с правой круговой поляризацией)  $U_{\text{пк}}^+$ . В момент переключения мод отключается автоматическая регулировка периметра, инвертируется синхросигнал синхронного детектора и через второй вход на пьезодвигателях устанавливается напряжение, соответствующее моде с левой круговой поляризацией  $U_{\text{пк}}^- = U_{\text{пк}}^+ \pm U_{\lambda/2}$ . Значение полуволнового напряжения  $U_{\lambda/2}$  измеряется при каждом переключении.

Через время, равное сумме постоянных времени транзисторного усилителя напряжения, времени перезарядки емкости пьезокерамики, времени задержки установления положения пьезокерамики относительно поданного напряжения, автоматическая регулировка периметра вновь включается и осуществляется дальнейшая доработка периметра на моду. Обычно данное время близко к  $T$ .

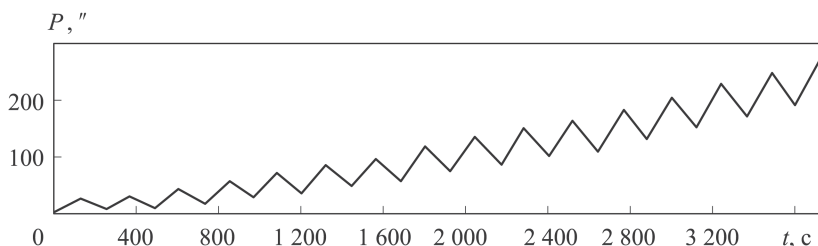
Описанное построение СРП позволяет обеспечить как устойчивость системы в режиме автоматического регулирования, так и относительно быструю перестройку с моды на моду.

**Дрейф зеемановского кольцевого лазера в “квазичетырехчастотном” режиме работы.** На рис. 3 приведена зависимость дрейфа ЗЛГ (т.е. ошибочно накопленного угла кажущегося поворота  $P$ ) от времени работы. Токовая составляющая дрейфа проявляется в постоянном возрастании угла ошибки со скоростью немагнитной составляющей дрейфа  $\Omega_{\text{гнм}}$ . Магнитная составляющая дрейфа приводит к появлению “пилы”, амплитуда которой равна  $MT\Omega_{\text{гм}}$ , где  $M$  — число периодов коммутации подставки между переключениями мод,  $\Omega_{\text{гм}}$  — магнитная составляющая дрейфа. В моменты переключения мод возникает дополнительная ошибка, связанная с не мгновенной перестройкой лазера с одной моды на другую. Максимальная суммарная ошибка  $\Omega_g$  в момент времени  $t$  равна

$$\Omega_g(t) = \Omega_{\text{гнм}}(t) + \frac{MT\Omega_{\text{гм}}(t)}{t} + \frac{1}{t} \sum_{i=1}^n \delta P_{\text{max}}. \quad (3)$$

Здесь  $n = t/MT$  — число переключений мод на интервале от 0 до  $t$ ,  $\delta P_{\text{max}}$  — максимальная угловая ошибка на каждом переключении. Значение  $\delta P_{\text{max}}$  зависит от применяемого алгоритма подмены информации на время отсутствия двунаправленной генерации при смене мод.

Отметим, что изменение магнитного дрейфа приводит к возникновению кажущегося дополнительного немагнитного дрейфа  $\Omega_{\text{гнм}}$ , который равен



**Рис. 3. Зависимость дрейфа ЗЛГ  $P$  от времени работы**

$$\Omega_{g_{\text{нмп}}} = \frac{\int_0^{MT} \Omega_{g_{\text{м}}}(t) dt - \int_0^{MT} \Omega_{g_{\text{м}}}(t) dt}{2MT}. \quad (4)$$

Магнитная составляющая дрейфа в зеэмановском кольцевом лазере складывается из вызванной внешним магнитным полем и эффектами, связанными с конструкцией магнитных экранов.

С прогревом лазерного гироскопа уменьшается коэффициент магнитной чувствительности за счет уширения контура усиления, причем эта зависимость линейна [5]. В совокупности это приводит к тому, что зависимость  $\Omega_{g_{\text{м}}}$  от времени описывается формулой

$$\Omega_{g_{\text{м}}} = A_{q_{\text{м}}} A_T (1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}}) + \Omega_{g_{\text{м}0}}, \quad (5)$$

где  $A_{q_{\text{м}}}$  — магнитная составляющая дрейфа, зависящая от температуры;  $A_T$  — тепловой перегрев ЗЛГ;  $\tau_T$  — постоянная времени теплового перегрева;  $\Omega_{g_{\text{м}0}}$  — магнитная составляющая дрейфа, не зависящая от температуры.

В этом случае для квазинемагнитного дрейфа можно записать:

$$\Omega_{g_{\text{нмп}}} = \frac{\int_0^{2MT} A_{q_{\text{м}}} A_T e^{-\frac{t}{\tau_T}} dt - \int_0^{MT} A_{q_{\text{м}}} A_T e^{-\frac{t}{\tau_T}} dt}{2MT} = \frac{A_{q_{\text{м}}} A_T \tau_T}{2MT} (1 - e^{-\frac{MT}{\tau_T}})^2. \quad (6)$$

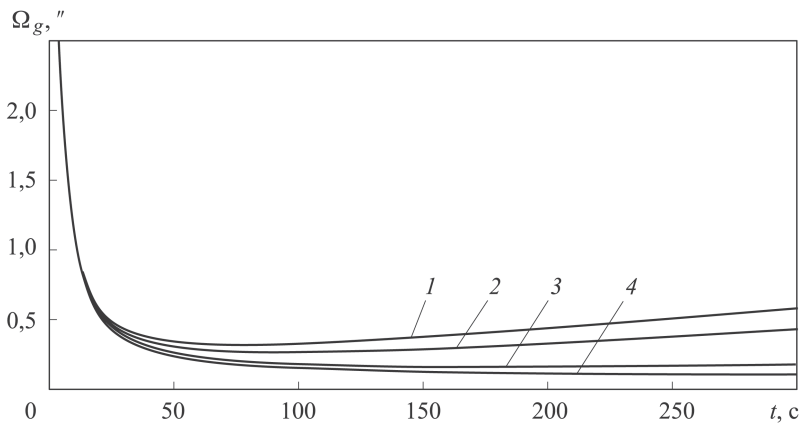
Подставим выражение (6) в (4) и получим

$$\Omega_g = \Omega_{g_{\text{нм}}} + \frac{A_{q_{\text{м}}} A_T \tau_T}{2MT} \left(1 - e^{-\frac{MT}{\tau_T}}\right)^2 + \frac{MT \Omega_{g_{\text{м}}}}{t} + \frac{1}{MT} \delta P_{\text{max}}. \quad (7)$$

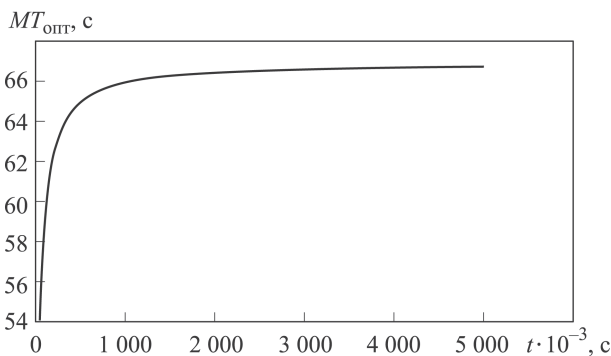
Немагнитная составляющая дрейфа от времени между переключениями мод не зависит. Вклад магнитной составляющей дрейфа линейно убывает с уменьшением времени между переключениями, включая квазинемагнитную составляющую. Вклад ложных сигналов на переключениях мод линейно растет с уменьшением времени между переключениями.

Функция  $\Omega_g$  имеет минимум зависимости от интервала между переключениями мод  $MT$ , причем с увеличением  $t$  минимум  $\Omega_g$  уменьшается и сдвигается в сторону больших  $MT$ . При очень больших  $t$  минимум  $\Omega_g \rightarrow \Omega_{g_{\text{нм}}}$ . На рис. 4 представлены результаты расчета  $\Omega_g$  от  $MT$ , проведенные для ЗЛГ со следующими параметрами.

1. Значение магнитной составляющей дрейфа, зависящее от температуры,  $A_{q_{\text{м}}} = 0,7''/\text{с}$ .
2. Постоянная времени теплового перегрева  $\tau_T = 3000$  с.
3. Тепловой перегрев ЗЛГ  $A_T = 20$  °С.
4. Значение немагнитной составляющей дрейфа  $0,05''/\text{с}$ .
5. Время непрерывной работы  $t = 600$  с;  $900$  с;  $3600$  с;  $36\,000$  с.
6. Максимальная угловая ошибка на каждом переключении  $\delta P_{\text{max}} = 10''$  (ее расчет будет приведен далее).



**Рис. 4. Зависимость дрейфа ЗЛГ от времени между переключениями мод МТ для различных времен работы:**  
 1 –  $t = 600$  с; 2 –  $t = 900$  с; 3 –  $t = 3600$  с; 4 –  $t = 36000$  с



**Рис. 5. Зависимость оптимального значения  $MT_{\text{опт}}$  от времени работы ЗЛГ**

Минимум следует определить из условия  $\frac{d(\Omega_g)}{d(MT)} = 0$ . Запишем следующее уравнение:

$$-\frac{1}{(MT)^2} \left( \frac{A_{qm} A_T \tau_T}{2} \left( 1 - e^{-\frac{MT}{\tau_T}} \right)^2 + \delta P_{\max} \right) + \frac{A_{qm} A_T}{MT} \left( 1 - e^{-\frac{MT}{\tau_T}} \right) e^{-\frac{MT}{\tau_T}} + \frac{\Omega_{gm}}{t} = 0. \quad (8)$$

Как видно на рис. 4, оптимальное значение  $MT$  лежит в пределах 1...2 мин, т.е. много меньше  $\tau_T$ . Тогда разложив показательную функцию в ряд Тейлора и ограничившись в дальнейшем только первой степенью разложения, найдем оптимальное значение  $M_{\text{опт}} T$  из уравнения

$$2\tau_T^2 \Omega_{gm} (M_{\text{опт}} T)^2 - A_{qm} A_T t (M_{\text{опт}} T)^3 = 2\tau_T^2 \delta P_{\max}. \quad (9)$$

Зависимость  $M_{\text{опт}} T$  от  $t$  приведена на рис. 5.

При малых коэффициентах температурной зависимости  $A_{qm}$ ,  $A_T$  или больших  $\tau_T$  из формулы (9) получим:  $M_{\text{опт}} T = \sqrt{\frac{\delta P_{\max} t}{\Omega_{gm}}}$ .

**Компенсация динамического дрейфа ЗЛГ при автоматической подстройке периметра после переключения мод.** Компенсация динамического дрейфа была впервые предложена в работах [7, 8].

Первичный промах  $\Delta\lambda_0$  при переключении определяется суммой ошибки измерения  $U_{\lambda/2}$ , дискрета ЦАП, гистерезиса пьезодвигателей. После включения автоматической подстройки СРП, расстройка периметра определяется формулой

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_0 e^{-\frac{t}{\tau_{\text{СРП}}}}. \quad (10)$$

Поскольку частота подставки зависит от расстройки периметра, при уменьшении расстройки после включения автоматического регулирования, частота подставки в положительных и отрицательных полупериодах подставки оказывается различной. Это приводит к возникновению кажущегося дрейфа. Исходя из формул (2) и (10), можно рассчитать кажущийся дрейф  $\Delta\Omega_{\text{СРП}i}$  на  $i$ -м такте коммутации подставки после включения автоматической подстройки периметра (начиная со второго такта):

$$\Delta\Omega_{\text{СРП}i} = \Delta\lambda_0^2 \frac{f_0 \tau_{\text{СРП}}}{2T} e^{-\frac{2(i-1)T}{\tau_{\text{СРП}}}} (e^{-\frac{T}{\tau_{\text{СРП}}} - 1})^2; \quad e^{-\frac{2(i-1)T}{\tau_{\text{СРП}}}} = \frac{f_i - f_0}{f_1 - f_0};$$

$$2^{(i-1)} \sqrt{\frac{f_i - f_0}{f_1 - f_0}} = e^{-\frac{T}{\tau_{\text{СРП}}}}; \quad f_0 \Delta\lambda_0^2 \frac{\tau_{\text{СРП}}}{2} = \frac{f_1 - f_0}{e^{-\frac{2T}{\tau_{\text{СРП}}} - 1}}, \quad (11)$$

где  $f_0$  — частотная подставка при нулевой расстройке (рассчитывается по заранее измеренной температурной зависимости);  $\Delta\lambda_0$  — амплитуда промаха при переключении мод;  $\tau_{\text{СРП}}$  — постоянная времени системы автоматической регулировки периметра;  $f_i$  — измеренная частота подставки на  $i$ -м такте коммутации подставки после включения автоматической регулировки периметра;  $f_1$  — измеренная частота подставки на первом такте коммутации подставки после включения автоматической регулировки периметра;  $T$  — период коммутации частотной подставки.

Для обеспечения работы метода при угловых скоростях, близких и превышающих амплитуду частотной подставки, измерение  $f_i$  следует проводить отдельно в положительном  $f_i^+$  и отрицательном  $f_i^-$  полупериодах  $i$ -го такта коммутации подставки с учетом знака направления вращения. При этом  $f_i = (f_i^+ - f_i^-)/2$ .

Результаты сравнения расчетов с экспериментальными исследованиями приведены в табл. 1.

Можно проводить коррекцию кажущегося дрейфа, измеряя непосредственно сигнал расстройки периметра в каждом полупериоде коммутации подставки  $\Delta\lambda_i$ . В этом случае коррекция становится возможной, начиная с первого такта коммутации подставки после включения. Из формулы (3) следует, что средняя расстройка за положительный  $\Delta\lambda_i^+$  и отрицательный  $\Delta\lambda_i^-$  полупериоды  $i$ -го такта коммутации подставки после включения автоматиче-



Номер такта коммутации подставки	Измеренный кажущийся дрейф $\Delta\Omega_{\text{СРП}}$ , °/ч	Расчетный кажущийся дрейф $\Delta\Omega_{\text{СРП}}$ , °/ч	Расхождение между измеренным и расчетным значением, °/ч
1	4056	Не корректируемый	4056
2	2956	2399	557
3	1306	497	809
4	207	178	29
Среднее значение кажущегося дрейфа	2131 (накопленный угол за 4 такта 43'', а при исключении 1-го такта 22'')	—	1362 (накопленный угол за 4 такта 27'', а при исключении 1-го такта 7'')

ской регулировки периметра определяется формулами

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_i^+ &= -\Delta\lambda_0 \frac{2\tau_{\text{СРП}}}{T} e^{-\frac{T(i-1)}{2\tau_{\text{СРП}}}} \left( e^{-\frac{T}{2\tau_{\text{СРП}}}} - 1 \right); \\ \Delta\lambda_i^- &= -\Delta\lambda_0 \frac{2\tau_{\text{СРП}}}{T} e^{-\frac{Ti}{2\tau_{\text{СРП}}}} \left( e^{-\frac{T}{2\tau_{\text{СРП}}}} - 1 \right).\end{aligned}\quad (12)$$

Из формул (12) можно найти коэффициенты, используемые при расчете  $\Delta\Omega_{\text{СРП}i}$  по формуле (11):

$$\begin{aligned}e^{-\frac{T}{\tau_{\text{СРП}}}} &= \left( \frac{\Delta\lambda_i^-}{\Delta\lambda_i^+} \right)^2; \quad -\frac{2\tau_{\text{СРП}}}{T} = \frac{1}{\ln\left(\frac{\Delta\lambda_i^-}{\Delta\lambda_i^+}\right)}; \\ \Delta\lambda_0 &= \frac{\lambda_1^+}{\left( e^{-\frac{T}{2\tau_{\text{СРП}}}} - 1 \right)} \ln\left(\frac{\Delta\lambda_1^-}{\Delta\lambda_1^+}\right).\end{aligned}\quad (13)$$

Результаты сравнения расчетов с экспериментальными исследованиями приведены в табл. 2.

Таким образом, использование компенсации кажущегося дрейфа позволяет существенно уменьшить ошибку, причем наилучшие результаты получаются при использовании сигнала расстройки периметра, поскольку он позволяет проводить коррекцию с первого такта коммутации подставки после включения автоматической подстройки периметра, а не со второго, как при использовании частоты коммутации подставки.

**Компенсация ложных показаний кольцевого лазера в процессе переключения мод генерации методом аппроксимирующей функции.** При коммутации мод на участке выключения автоматической подстройки периметра имеет место пропадание двунаправленной генерации. Продолжительность этого процесса составляет 5...15 мс. Данные, получаемые с кольцевого лазера во время отсутствия двунаправленной генерации, не несут никакой полезной информации, поэтому необходимо в это время выдавать некие аппроксимированные данные, так как для интегрирования уравнений инер-

Номер такта коммутации подставки	Измеренный кажущийся дрейф $\Delta\Omega_{СРП}$ , °/ч	Расчетный кажущийся дрейф $\Delta\Omega_{СРП}$ , °/ч	Расхождение между измеренным и расчетным значением, °/ч
1	4056	3720	336
2	2956	2385	571
3	1306	1480	-174
4	207	278	-71
Среднее значение кажущегося дрейфа	2131 (накопленный угол за 4 такта 43'')	—	166 (накопленный угол за 4 такта 3,3'')

циальной навигации необходимо иметь непрерывную информацию. Самый простой подход — это использовать для аппроксимации константу, рассчитанную как среднее значение показаний ЗЛГ за несколько тактов коммутации подставки до переключения.

В реальной эксплуатации гироскоп вращается не только с постоянной угловой скоростью, но и угловым ускорением. Причем обычным явлением являются угловые колебания, т.е. переменное угловое ускорение. Таким образом возникает выбор, полиномом какого порядка выполнять экстраполяцию. Интересны три основных варианта: подмена ложных показаний константой, аппроксимация прямой и аппроксимация параболой, рассчитанными по нескольким показаниям, предшествующим смене мод.

Очевидно, что более точное приближение будет, если использовать точки, прилегающие к переходному процессу с обеих сторон. Исходя из общих принципов аппроксимации, предлагается четырехшаговый алгоритм:

- до начала смены мод по нескольким точкам вычисляются коэффициенты аппроксимирующего полинома;
- во время смены мод данные выдаются на основе аппроксимации по точкам, полученным до начала процесса реверса;
- после завершения переходных процессов, возникающих при смене мод, делается более точная аппроксимация с использованием показаний до и после переключения;
- вычисляется расхождение между этими двумя аппроксимациями, которое вычитается из полученного в следующем такте значения.

В соответствии с теоремой Котельникова для точного описания аналогового процесса дискретным, необходимо, чтобы период дискретизации был не менее, чем в 10 раз меньше периода самого процесса. Исходя из этого выбирается период коммутации подставки  $T$ , который одновременно является и периодом дискретизации. Отметим, что существенное уменьшение  $T$  затруднительно, поскольку увеличивает погрешность лазерного гироскопа в связи с возрастанием динамических зон синхронизации [9–11].

На показания ЗЛГ накладываются шумы — прежде всего дискретизация выходной информации [12]. Максимальная амплитуда шума за один такт

коммутации подставки составляет 0,5 дискрета выходной информации ЗЛГ за такт коммутации подставки, среднее значение шума равно нулю.

С выхода ЗЛГ каждый такт коммутации подставки считается приращение угла  $P_j$ , равное произведению угловой скорости вращения на период коммутации подставки  $T$ .

Для обеспечения непрерывности выдачи показаний во время первых трех тактов коммутации подставки при смене мод используется экстраполяционная функция в виде константы, прямой или параболы:

$$P_{прj} = \begin{cases} A_0; \\ A_0 + A_1 t_j; \\ A_0 + A_1 t_j + A_2 t_j^2, \end{cases} \quad (14)$$

где  $P_{прj}$  — прогнозируемые показания гироскопа,  $t_j = jT$ ,  $j = 1, 2, 3$  — номер такта коммутации подставки после сигнала на переключение моды. Коэффициенты  $A_0, A_1, A_2$  определяются методом наименьших квадратов по четырем показаниям гироскопа  $P_j$  предшествующим переключению моды ( $j = -3, -2, -1, 0$ ).

После установления генерации лазера на следующей моде, проводится новая аппроксимация с помощью функции

$$P_{прj} = \begin{cases} B_0; \\ B_0 + B_1 t_j; \\ B_0 + B_1 t_j + B_2 t_j^2. \end{cases} \quad (15)$$

Коэффициенты  $B_0, B_1, B_2$  определяются также методом наименьших квадратов по четырем показаниям гироскопа  $P_j$  — двум до переключения моды и двум после включения автоматической подстройки периметра ( $j = -1, 0, 4, 5$ ).

Поправка накопленного угла за время переключения мод  $\Delta P$  определяется по формуле

$$\Delta P = \sum_{j=1}^3 (P_{прj} - P_{кj}), \quad (16)$$

где  $P_{прj}$  — прогнозируемые показания ЗЛГ, вычисленные по формуле (14),  $P_{кj}$  — показания ЗЛГ, вычисленные по формуле (15).

Следующее показание ЗЛГ  $P_6$  заменяется значением

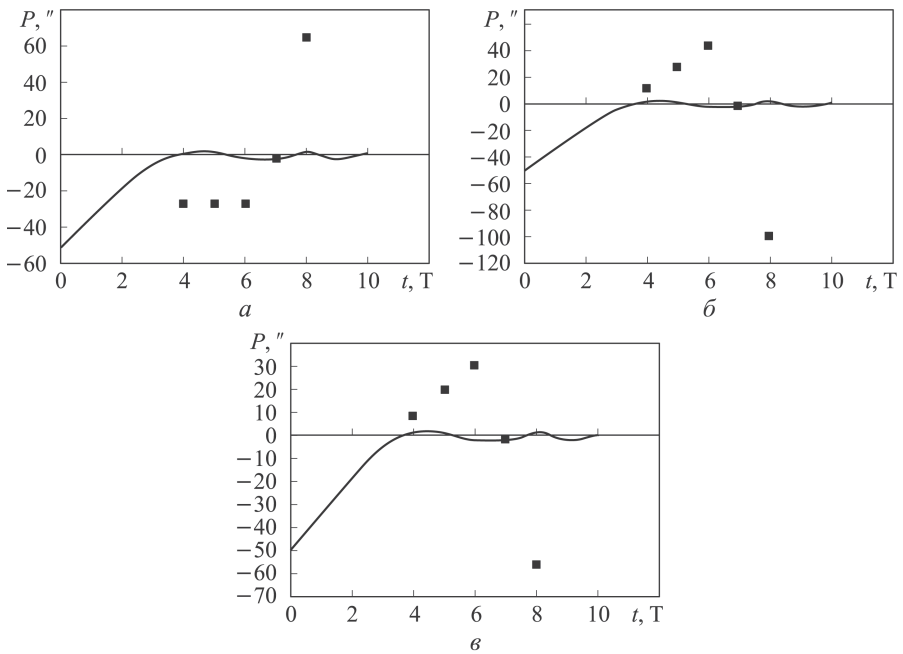
$$\tilde{P}_6 = P_6 - \Delta P. \quad (17)$$

Ошибка при переключении мод  $\delta P$  при этом будет равна

$$\delta P = \sum_{j=1}^3 (P_{кj} - P_{истj}), \quad (18)$$

где  $P_{истj}$  — истинные значения показаний ЗЛГ при отсутствии переключения мод.

Процесс подмены показаний приведен на рис. 6. Такой метод подмены позволяет существенно уменьшить ошибку за такт переключения.



**Рис. 6. Подмена показаний ЗЛГ на время переключения мод**

Ошибки аппроксимации складываются из неточной аппроксимации указанными функциями реальных угловых колебаний ЗЛГ и дополнительной ошибки  $\theta$ , связанной с шумом выходной информации. Поскольку эти ошибки независимы, можно считать, что максимальная ошибка при каждом переключении  $\delta P_{\max}$  равна

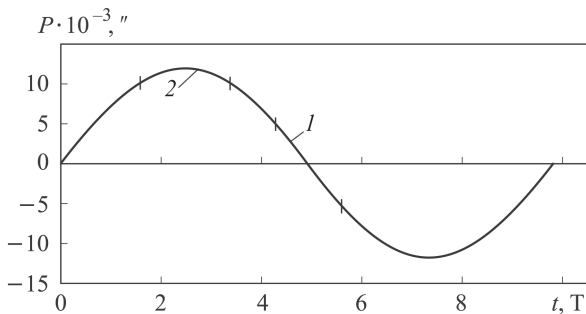
$$\delta P_{\max} = \sqrt{\delta P^2 + \theta^2}. \quad (19)$$

Значение аппроксимационной ошибки  $\delta P$  зависит от того, насколько реальное изменение угловой скорости в момент переключения отличается от предлагаемых полиномов первого и второго порядков. Отметим, что в предлагаемом методе аппроксимация константой не отличается от линейной функции, поскольку среднее значение линейной функции, проведенной через четыре равноотстоящие друг от друга точки, равно среднему значению этих четырех точек. Обычно ЗЛГ имеет ограничение сверху по частоте угловых колебаний  $\nu$ , равное  $0,1/T$ . Переключение мод может происходить в любой момент, поэтому для нас интересны две области — в районе практически постоянной угловой скорости и в районе экстремумов (рис. 7).

Разложим функцию крутильных колебаний вида  $A_{\Omega} \sin(2\pi\nu t)$  в ряд Тейлора в окрестностях точек  $t = 0$  и  $t = 1/(4\nu)$ :

$$\begin{aligned} A_{\Omega} \sin(2\pi\nu t) &= 2A_{\Omega}\pi\nu\Delta t - A_{\Omega}\pi^3\nu^3\Delta t^3 + \\ &+ \frac{4}{15}A_{\Omega}\pi^5\nu^5\Delta t^5 - O(\Delta t^7), \quad t = 0; \\ A_{\Omega} \sin(2\pi\nu t) &= A_{\Omega} - 2A_{\Omega}\pi^2\nu^2\Delta t^2 + \\ &+ \frac{2}{3}A_{\Omega}\pi^4\nu^4\Delta t^4 - O(\Delta t^6), \quad t = \frac{1}{4\nu}, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $\Delta t$  — время, на которое осуществляется подмена.



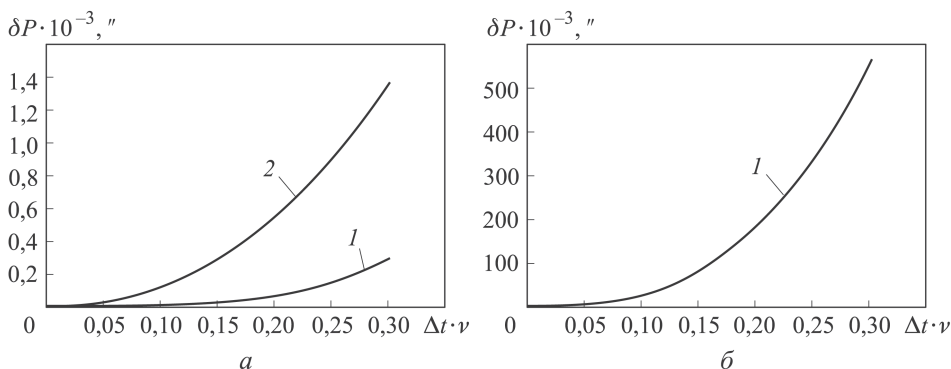
**Рис. 7. Функция крутильных колебаний:**

1 — область постоянной угловой скорости, 2 — область переменной угловой скорости

В ошибку при аппроксимации линейной или квадратичной функцией попадают члены выше первого или второго порядков соответственно. Графики зависимости ошибки  $\delta P$  от времени подмены  $\Delta t$  представлены на рис. 8. В дальнейшем точками на графике представлены экспериментальные результаты, полученные на объекте, на котором установлен ЗЛГ со следующими параметрами:

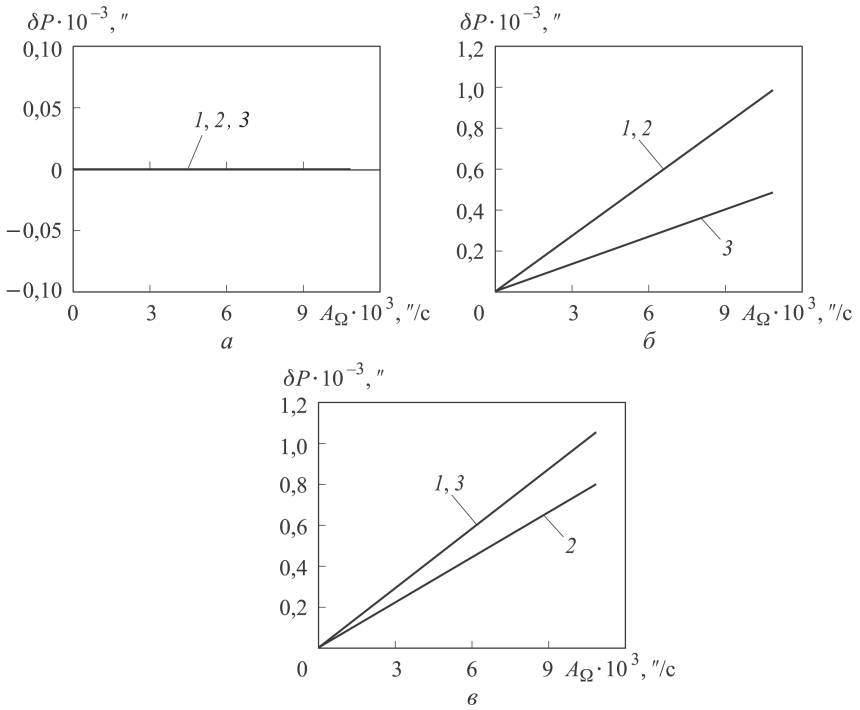
1. Значение шума за 1 такт съема —  $1,6''$ .
2. Такт съема информации  $T = 5$  мс.
3. Амплитуда угловых колебаний  $A_\Omega = 12000''/с$ .
4. Частота угловых колебаний  $\nu = 20$  Гц.

Наиболее опасным является участок с переменным угловым ускорением. На рис. 9 приведены графики зависимости ошибки от амплитуды угловой скорости угловых колебаний для подмены на время  $0,1/\nu$ ,  $0,15/\nu$ ,  $0,2/\nu$  (т.е. на  $T$ ,  $2T$ ,  $3T$ ). Как видно из рис. 9 и 10, линейная функция (константа) эффективна только до  $0,1/\nu$ , квадратичная — до  $0,2/\nu$ . На рис. 11 представлена зависимость шумовой ошибки  $\theta$  неподвижного ЗЛГ от времени подмены  $\Delta t$ . Наилучшие результаты получены при подмене константой. При этом ошибка по уровню  $3\sigma$  составляет  $A_{ш}\sqrt{n}/2$ , где  $A_{ш}$  — угловая амплитуда шума в одном такте съема информации,  $n$  — число подменяемых тактов съема информации.

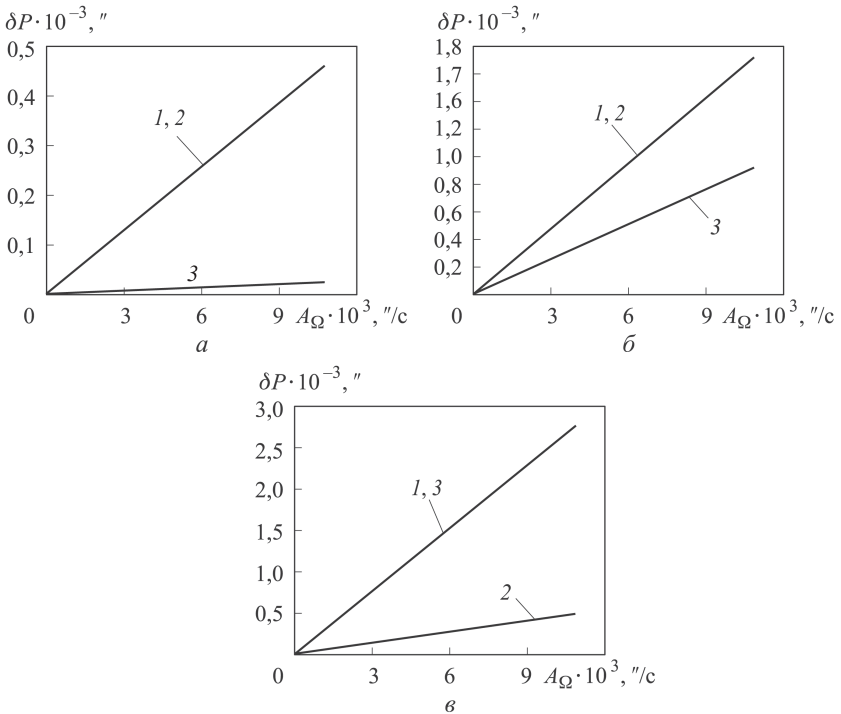


**Рис. 8. Зависимости ошибки  $\delta P$  от произведения времени подмены  $\Delta t$  и частоты крутильных колебаний  $\nu$ :**

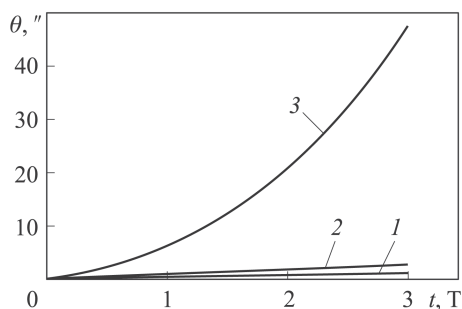
$a$  — область постоянной угловой скорости,  $b$  — область переменной угловой скорости; 1 — подмена квадратичной функцией; 2 — подмена линейной функцией



**Рис. 9.** Зависимость ошибки  $\delta P$  от амплитуды крутильных колебаний в области постоянной угловой скорости для времени подмены  $\Delta t = 0,1/\nu$  (а),  $\Delta t = 0,15/\nu$  (б),  $\Delta t = 0,2/\nu$  (в); подмена константой (1), линейной (2) и квадратичной (3) функциями



**Рис. 10.** Зависимость ошибки  $\delta P$  от амплитуды крутильных колебаний в области переменной угловой скорости (обозначения см. рис. 9)



**Рис. 11. Зависимость шумовой ошибки  $\theta$  неподвижного ЗЛГ от времени подмены (обозначения см. рис. 9)**

Для линейной аппроксимации ошибка в 1,8–2,5 раза хуже, для квадратичной — в 8–35 раз в зависимости от числа подменяемых тактов съема информации.

Суммарная ошибка при переключении мод  $\delta P_{\max}$  вычисляется по формуле (8).

Из данного исследования следуют следующие выводы.

1. Использование аппроксимации по приведенному алгоритму позволяет существенно уменьшить ошибку измерения угловой скорости при переключении мод.

2. Использование константы и линейной функции приводит к одинаковым погрешностям из-за крутильных колебаний, но ошибка, обусловленная шумом, для константы значительно меньше.

3. Выбор порядка полинома аппроксимации зависит от амплитуды шума, амплитуды угловых колебаний и отношения периода угловых колебаний ко времени между переключениями мод. В общем случае для малых  $\Delta t\nu$  оптимальной является подмена константой, для больших — полиномом второго порядка.

**Заключение.** Использование ЗЛГ в квазичетырехчастотном режиме позволяет примерно на порядок уменьшить дрейф гироскопа, прежде всего за счет компенсации магнитной составляющей. Оптимальный период переключения мод составляет несколько минут. Возникающие дополнительные ошибки в момент переключения мод могут быть парированы с использованием дополнительной информации о сигнале расстройки периметра или частоте подставки. На интервале же полного отсутствия генерации, эффективным средством парирования ложного дрейфа является аппроксимация с постобработкой после завершения переключения. В зависимости от шумовых характеристик ЗЛГ и заданных значений амплитуды и частоты угловых крутильных колебаний, эффективными являются аппроксимации константой или полиномом второго порядка.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев В.Г., Голяев Ю.Д., Винокуров Ю.А., Колбас Ю.Ю., Тихменев Н.В. Лазерный гироскоп повышенной точности // Материалы 17 Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб., 2008.

2. Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г., Казаков А.А., Колбас Ю.Ю., Назаренко М.М., Тихменев Н.В., Якушев А.И. Способ измерения угловых перемещений лазерным гироскопом. Патент РФ № 2408844, от 10.01.2011 г.
3. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г. Кольцевые газовые лазеры с магнитооптическим управлением в лазерной гироскопии // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 2. С. 96–104.
4. Голяев Ю.Д., Мельников А.В., Соловьев Ю.Н., Телегин Г.И., Яременко С.О. Влияние нелинейности характеристик активной среды на стабильность выходных сигналов в квантовых приборах с автоматической стабилизацией параметров // Электронная техника. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1991. 1 (57). С. 11.
5. Хромых А.М., Якушев А.И. Влияние пленения резонансного излучения на эффект Зеемана в кольцевом лазере // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. № 1.
6. Попов Е.П. Автоматическое регулирование и управление. М.: Наука, 1966.
7. Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г., Казаков А.А., Колбас Ю.Ю., Назаренко М.М., Тихменев Н.В., Якушев А.И. Способ измерения угловых перемещений лазерным гироскопом. Патент РФ № 2408844, 2011 г.
8. Винокуров Ю.А., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г., Казаков А.А., Колбас Ю.Ю., Тихменев Н.В., Якушев А.И. Способ измерения угловых перемещений лазерным гироскопом. Патент РФ № 2418266, 2011 г.
9. Волновые и флукутационные процессы в лазерах / под. ред. Ю.Л. Климантовича. М.: Наука, 1974.
10. Хромых А.М. Динамическая характеристика кольцевых лазеров с периодической частотной подставкой // Электронная техника. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1990. Вып. 1 (53). С. 44.
11. Хошев И.М. К теории кольцевого лазера со знакопеременной частотной подставкой // Квантовая электроника. 1980. Т. 7. № 5. С. 953.
12. Ю.Д. Голяев, Ю.Ю. Колбас. Ошибка дискретности выходного сигнала кольцевого лазера с периодической подставкой // ЖТФ. Т. 17. Вып. 8. 1991. С. 162–165.

## REFERENCES

- [1] Dmitriev V.G., Golyaev Yu.D., Vinokurov Yu.A., Kolbas Yu.Yu., Tikhmenev N.V. High-precision laser gyroscope. *Mater. 17 Mezhdunar. Konf. Integr. Navig. Sist.* [Proc. 17th Int. Conf. Integr. Navig. Syst.]. St. Petersburg, 2008.
- [2] Golyaev Yu.D., Dmitriev V.G., Kazakov A.A., Kolbas Yu.Yu., Nazarenko M.M., Tikhmenev N.V., Yakushev A.I. Sposob izmereniya uglovykh peremeshcheniy lazernym giroskopom [A method for measuring angular movements by laser gyroscope]. Patent RF, no. 2408844, 2011.
- [3] Azarova V.V., Golyaev Yu.D., Dmitriev V.G. Ring gas lasers with magneto-optical control in laser gyroscopes. *Kvantovaya Electron.* [Quantum Electron.]. 2000, vol. 30, no. 2, pp. 96–104 (in Russ.).
- [4] Golyaev Yu.D., Mel'nikov A.V., Solov'ev Yu.N., Telegin G.I., Yaremenko S.O. The influence of nonlinearity of active medium characteristics on the stability of output signals in quantum devices with automatic stabilization. *Elektron. Tekh. Lazernaya Tekh. Optoelektron.* [Electron. Eng. Laser Technol. Optoelectron.], 1991, vol. 57, no. 1, p. 11 (in Russ.).
- [5] Khromykh A.M., Yakushev A.I. The influence of resonance radiation trapping on the Zeeman effect in a ring laser. *Kvantovaya Electron.* [Quantum Electron.]. 1977, vol. 4, no. 1 (in Russ.).
- [6] Popov E.P. Avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie [Automatic control and management]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 388 p.
- [7] Golyaev Yu.D., Dmitriev V.G., Kazakov A.A., Kolbas Yu.Yu., Nazarenko M.M., Tikhmenev N.V., Yakushev A.I. Sposob izmereniya uglovykh peremeshcheniy lazernym giroskopom [A method for measuring angular movements by laser gyroscope]. Patent RF, no. 2408844, 2011.



- [8] Vinokurov Yu.A., Golyaev Yu.D., Dmitriev V.G., Kazakov A.A., Kolbas Yu.Yu., Tikhmenev N.V., Yakushev A.I. Sposob izmereniya uglovykh peremeshcheniy lazernym giroskopom [A method for measuring angular movements by laser gyroscope]. Patent RF, no. 2418266, 2011.
- [9] Klimantovich Yu.L. Volnovye i fluktuatsionnye protsessy v lazerakh [The wave and fluctuation processes in lasers]. Moscow, Nauka Publ., 1974.
- [10] Khromykh A.M. The dynamic characteristics of ring lasers with a periodic frequency support. *Elektron. Tekh. Lazernaya Tekh. Optoelektron.* [Electron. Eng. Laser Technol. Optoelectron.], 1990, vol. 53, no. 1, p. 44 (in Russ.).
- [11] Khoshev I.M. The theory of a ring laser with an alternating-sign frequency base. *Kvantovaya Electron.* [Quantum Electron.], 1980, vol. 7, no. 5, pp. 953 (in Russ.).
- [12] Golyaev Yu.D., Kolbas Yu.Yu. Output signal sampling errors in a periodic-base ring laser. *Zh. Tekh. Fiz.* [J. Tech. Phys.], 1991, vol. 61, no. 8, pp. 162–165 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 18.02.2013

Вахитов Н.Г. — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”. Автор 75 научных работ в области волновой оптики и лазерной техники, инерциальных навигационных систем на базе лазерных гироскопов.

ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3.

N.G. Vakhitov — Cand. Sci. (Phys.–Math.), leading researcher of ОАО “Stel’makh Research Institute “Polyus”. Author of 75 publications in the field of wave optics and laser technology, inertial navigation systems based on laser gyroscopes.

ОАО “Stel’makh Research Institute “Polyus”, ul. Vvedenskogo 3, Moscow, 117342 Russian Federation.

Голяев Ю.Д. — канд. физ.-мат. наук, начальник научно-производственного комплекса ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, действительный член академии навигации, член-корреспондент академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Автор более 140 научных работ в области твердотельных лазеров, нелинейной оптики и лазерной гироскопии.

ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3.

Yu.D. Golyaev — Cand. Sci. (Phys.–Math.), head of the scientific and production complex of ОАО “Stel’makh Research Institute “Polyus”, Member of the Academy of Navigation, Corresponding Member of the Academy of Engineering Sciences n.a. A.M. Prokhorov. Author of more than 140 publications in the field of solid-state lasers, nonlinear optics and laser gyroscope.

ОАО “Stel’makh Research Institute “Polyus”, ul. Vvedenskogo 3, Moscow, 117342 Russian Federation.

Дронов И.В. — начальник лаборатории ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”. Автор шести научных работ в области микропроцессорной техники.

ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3.

I.V. Dronov — head of laboratory of ОАО “Stel’makh Research Institute “Polyus”. Author of six publications in the field of microprocessor technology.

ОАО “Stel’makh Research Institute “Polyus”, ul. Vvedenskogo 3, Moscow, 117342 Russian Federation.

Колбас Ю.Ю. — начальник отдела ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”. Автор 28 научных работ в области лазерной гироскопии и лазерной медицины.

ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3.

Yu.Yu. Kolbas — head of department of OAO “Stel’makh Research Institute “Polyus”.  
Author of 28 publications in the field of laser gyroscopy and laser medicine.

OAO “Stel’makh Research Institute “Polyus”, ul. Vvedenskogo 3, Moscow, 117342  
Russian Federation.

Иванов М.А. — начальник лаборатории ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”  
ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, Россия, 117342, Москва, ул. Введенского,  
д. 3.

M.A. Ivanov — head of laboratory of OAO “Stel’makh Research Institute “Polyus”.  
OAO “Stel’makh Research Institute “Polyus”, ul. Vvedenskogo 3, Moscow, 117342  
Russian Federation.

Крутиков А.П. — ведущий инженер-программист в лаборатории ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”.

ОАО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, Россия, 117342, Москва, ул. Введенского,  
д. 3.

A.P. Krutikov — leading engineer-programmer of OAO “Stel’makh Research Institute  
“Polyus”.

ОАО “Stel’makh Research Institute “Polyus”, ul. Vvedenskogo 3, Moscow, 117342  
Russian Federation.