

# ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНЫХ СИГНАЛОВ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА К ВОЗМУЩЕНИЯМ ВХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

**Чиркин М. В.<sup>1</sup>, Иваненко Ю. Р.<sup>2</sup>, Серебряков А. Е.<sup>3</sup>,  
Мишин В. Ю.<sup>4</sup>**

(ФГБОУ ВО «Рязанский государственный  
радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»,  
Рязань),

**Молчанов А. В.<sup>5</sup>**

(ПАО «Московский институт электромеханики и  
автоматики», Москва)

*Сформирована математическая модель для первичных сигналов лазерного гироскопа, которая учитывает связь встречных оптических волн, механическое вращение корпуса лазерного гироскопа и аддитивный шум. Исследована чувствительность к возмущениям входной информации метода вычисления мгновенной фазы Саньяка с компенсацией динамического захвата на базе лазерного гироскопа с гармонической частотной подставкой без ошумления. Для анализа корректности работы метода вычисления мгновенной фазы Саньяка с компенсацией динамического захвата полученные результаты сравниваются с угловой скоростью, найденной в результате аналитического решения дифференциального уравнения лазерного гироскопа с нулевой зоной захвата. Зафиксированы фазовые ошибки между исследуемым и эталонным сигналами угловой скорости вращения лазерного гироскопа. Определено влияние квазибелого шума, изменения значений амплитуд первичных сигналов и сдвига фаз между квадратурными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов на зарегистрированные отсчеты угловой скорости вращения корпуса лазерного гироскопа.*

Ключевые слова: лазерный гироскоп, фаза Саньяка, динамический порог захвата, статический порог захвата, квазибелый шум.

---

<sup>1</sup> Михаил Викторович Чиркин, д.ф.-м.н., профессор ([chirk.mikhail@yandex.ru](mailto:chirk.mikhail@yandex.ru)).

<sup>2</sup> Юлия Романовна Иваненко, аспирант ([ivanenko.july@yandex.ru](mailto:ivanenko.july@yandex.ru)).

<sup>3</sup> Андрей Евгеньевич Серебряков, к.т.н., доцент ([sea89s@yandex.ru](mailto:sea89s@yandex.ru)).

<sup>4</sup> Валерий Юрьевич Мишин, к.т.н., доцент ([mishvalera@yandex.ru](mailto:mishvalera@yandex.ru)).

<sup>5</sup> Алексей Владимирович Молчанов, к.т.н., доцент ([a.v.molchanov@mail.ru](mailto:a.v.molchanov@mail.ru)).

## **1. Введение**

В настоящее время в бесплатформенных инерциальных навигационных системах летательных аппаратов в качестве датчиков угловой скорости используются лазерные гироскопы со знакопеременной частотной подставкой. Основой лазерного гироскопа (ЛГ) является кольцевой гелий-неоновый лазер, активная среда которого поддерживается симметричным двухплечевым разрядом постоянного тока.

Вследствие обратного рассеяния лазерного излучения на шероховатых поверхностях зеркал и диафрагме возникает слабая связь между встречными оптическими волнами, генерируемыми кольцевым лазером. Данная связь приводит к синхронизации частот указанных выше волн, в результате чего ЛГ теряет чувствительность к малым угловым скоростям вращения. Количественно такое явление характеризуется величиной статического порога захвата [13]. Для подавления методической погрешности, вызванной статическим захватом, применяют производственные [7, 12, 22, 23], технологические [14-16] или аппаратно-алгоритмические [1, 5, 6, 10, 11, 18, 21, 24] решения. В конкретных технических приложениях, как правило, используются комбинации из нескольких решений. Наименее затратными, а значит, наиболее предпочтительными в условиях серийного производства являются аппаратно-алгоритмические решения: их применение не затрагивает отлаженных технологических процессов.

Подавить явление статического захвата получается в случае использования в ЛГ гармонической частотной подставки. Такой прием может привести к параметрической синхронизации, т.е. к возникновению зон динамического захвата, одна из которых находится в окрестности нуля, а остальные кратны угловой скорости, равной амплитуде подставки. Решить указанную проблему удастся, если частотная подставка имеет шумовой характер [2-4, 8, 9]. Как правило, используют знакопеременную частотную подставку в виде комбинации случайного и периодического процессов. Например, случайным образом

изменяют амплитуду гармонического сигнала с глубиной модуляции от нескольких процентов до половины амплитуды полезного сигнала [13]. Однако рандомизация выходного сигнала ЛГ приводит к появлению дополнительной шумовой составляющей – случайным блужданиям регистрируемого углового положения («*angle random walk*»). В данной статье для цифровой обработки первичных сигналов ЛГ с гармонической частотной подставкой предлагается использовать метод вычисления мгновенной фазы Саньяка с компенсацией динамического захвата (МФСК) [18, 24]. Указанный метод компенсирует «паразитные» скачки фазы Саньяка, которые являются следствием динамического захвата, что создает условия для подавления случайной погрешности ЛГ вследствие отказа от модуляции частотной подставки псевдослучайным сигналом. Цель настоящей работы заключается в исследовании чувствительности метода МФСК к возмущениям входной информации, т.е. к изменениям входных параметров построенной математической модели ЛГ.

## **2. Математическая модель для первичных сигналов лазерного гироскопа**

Источником информации о вращении ЛГ являются сдвиги интерференционной картины, которую на поверхности смесительной призмы образуют лазерные пучки, выведенные из кольцевого резонатора. Первичные информационные сигналы на выходах сдвоенного фотодиода, регистрирующего движение интерференционных полос, имеют вид [5]:

$$(1) \quad U_c(t) = U_{c,0} + U_{c,m} \cos(\psi(t) + \varphi_c);$$

$$(2) \quad U_s(t) = U_{s,0} + U_{s,m} \sin(\psi(t) + \varphi_s),$$

где  $U_{c,0}$ ,  $U_{s,0}$  – постоянные смещения квадратурных сигналов;  $U_{c,m}$ ,  $U_{s,m}$  – амплитуды квадратурных сигналов;  $\psi(t)$  – разность фаз встречных волн, генерируемых кольцевым гелий-неоновым лазером (фаза Саньяка);  $\varphi_c$ ,  $\varphi_s$  – дополнительные фазовые сдвиги, обусловленные несовершенством электрооптической системы.

Изменение фазы Саньяка при слабой связи встречных оптических волн в ЛГ с гармонической частотной подставкой описывается дифференциальным уравнением [19]:

$$(3) \quad \frac{1}{K} \frac{d\psi}{dt} = \Omega + \omega_d \sin(2\pi ft) - \omega_L \sin(\psi + \rho),$$

в котором  $K$  – масштабный коэффициент;  $\Omega$  – угловая скорость вращения корпуса ЛГ;  $\omega_d, f$  – амплитуда и частота подставки соответственно;  $\omega_L, \rho$  – статический порог захвата и фазовый сдвиг, обусловленные обратным рассеянием лазерного излучения внутри кольцевого резонатора.

Если частотная подставка промодулирована псевдослучайным сигналом, то вместо второго слагаемого в приведенном выше уравнении можно использовать экспериментально зарегистрированный сигнал ЛГ с вибрационной частотной подставкой [20].

Дифференциальное уравнение (3) решается численно с помощью метода Рунге-Кутты четвертого порядка. Чтобы устранить эффект наложения частот («*aliasing*»), который приводит к искажениям восстановленного во времени полезного сигнала (при низкой частоте дискретизации высокочастотные составляющие накладываются на низкочастотные), шаг, с которым строится численное решение уравнения, должен быть достаточно малым. В статье [17] показано, что при решении дифференциального уравнения (3) с шагом 0,2 мкс «*aliasing*» не возникает. В настоящей работе установлено, что увеличение значения шага до 0,42 мкс также не приводит к возникновению указанного эффекта. Полученная в результате решения уравнения (3) временная зависимость фазы Саньяка позволяет рассчитать квадратурные сигналы ЛГ.

В настоящее время наряду с основным методом расчета угловых перемещений ЛГ – реверсивным счетом импульсов [6] – применяется альтернативный способ извлечения информации об угловой скорости вращения ЛГ – вычисление мгновенной фазы Саньяка [21]. В обозначенных методах в отличие от метода МФСК для устранения динамического захвата требуется

модулировать частотную подставку псевдослучайным сигналом, что приводит к увеличению случайной погрешности ЛГ.

### 3. Алгоритмическая компенсация «паразитных» скачков фазы Саньяка

Следствием динамического захвата являются «паразитные» скачки фазы Саньяка, которые возникают из-за слабой связи встречных волн, обусловленной обратным рассеянием лазерного излучения на элементах кольцевого резонатора.

В методе МФСК «паразитные» скачки фазы Саньяка компенсируются алгоритмически (рис.1, рис. 2) [18, 24]. Фотодиоды ФД<sub>1</sub> и ФД<sub>2</sub> регистрируют мощность лазерного излучения в каждой из двух встречных волн, генерируемых кольцевым гелий-неоновым лазером (рис. 1). Мощностные сигналы  $I_1$  и  $I_2$ , полученные соответственно с выходов ФД<sub>1</sub>, ФД<sub>2</sub>, усиливаются таким образом, чтобы их амплитуды соответствовали амплитудам информационных сигналов  $U_c$ ,  $U_s$ . С целью подавления противофазных помех переменные составляющие мощностных сигналов  $v_1$  и  $v_2$  складываются. Далее осуществляется синхронное детектирование сигнала  $v_{ac}$  – переменной составляющей суммы мощностных сигналов кольцевого лазера, при этом в качестве опорных сигналов используются первичные сигналы ЛГ ( $U_c$ ,  $U_s$ ).

Переменная составляющая суммы мощностных сигналов, пропорциональная мощности лазерного излучения, вычисляется по формуле [18]:

$$(4) \quad v_{ac}(t) = 2A_1A_2E_0 \sin(\psi(t) + \rho),$$

где  $A_1$ ,  $A_2$  – амплитуды электромагнитных волн, распространяющихся внутри кольцевого резонатора по часовой и против часовой стрелки соответственно;  $E_0$  – параметр, пропорциональный заданному значению  $\omega_L$ , рассчитывается следующим образом [18]:

$$(5) \quad E_0 = \sqrt{\left[ \left( \frac{r_1 A_2}{A_1} \right)^2 + \left( \frac{r_2 A_2}{A_1} \right)^2 + 2r_1 r_2 \cos(\beta_1 + \beta_2) \right]},$$

где  $r_1, r_2$  – амплитуды коэффициентов связи встречных оптических волн;  $\beta_1, \beta_2$  – фазы коэффициентов связи встречных волн.

Фазовый сдвиг, используемый в выражении (4), определяется по формуле [18]:

$$(6) \quad \rho = \arctg \left[ \frac{\frac{r_2 A_2}{A_1} \sin(\beta_2) - \frac{r_1 A_1}{A_2} \sin(\beta_1)}{\frac{r_2 A_2}{A_1} \cos(\beta_2) + \frac{r_1 A_1}{A_2} \cos(\beta_1)} \right].$$

Восстановление фазы Саньяка  $\psi_{retr}$  происходит либо по «идеальным» (без добавления шума) квадратурным сигналам ЛГ, либо по «неидеальным» квадратурным сигналам (с аддитивным шумом) (рис. 2).

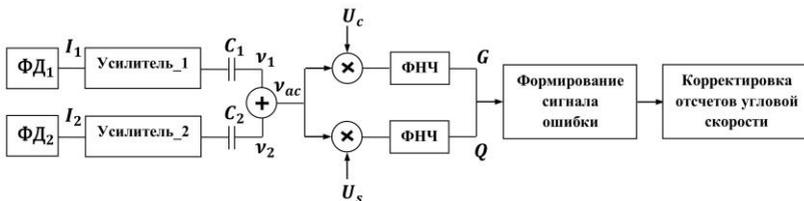


Рис. 1. Синхронное детектирование переменной составляющей суммы мощностных сигналов кольцевого лазера ( $v_{ac} = v_1 + v_2$ ).

На выходе фильтра нижних частот (ФНЧ) получены «синусный»  $Q$  и «косинусный»  $G$  сигналы, содержащие гармоники в низкочастотной области спектра (рис. 1). Указанные сигналы используются для восстановления мгновенных значений статического порога захвата и фазового сдвига с помощью функции четырехквadrантного арктангенса [18]:

$$(7) \quad \omega_L = \sqrt{G^2 + Q^2};$$

$$(8) \quad \rho = \text{atan2} \left( \frac{Q}{G} \right).$$

В данной работе в качестве ФНЧ используется двухсекционный эллиптический фильтр с бесконечной импульсной характеристикой со следующими параметрами: частота среза – 100 Гц; частота заграждения – 200 Гц; уровень допустимых пульсаций в полосе пропускания – 1 дБ; уровень затухания в полосе подавления – 60 дБ.

Компенсация динамического захвата в выходном сигнале ЛГ выполняется на заключительном этапе алгоритма, когда сформированный сигнал ошибки  $\psi_{err}$ , вызванной слабой связью встречных оптических волн, удаляется из отсчетов восстановленной фазы Саньяка [18]:

$$(9) \quad \psi_0 = \psi_{retr} - \psi_{err}.$$

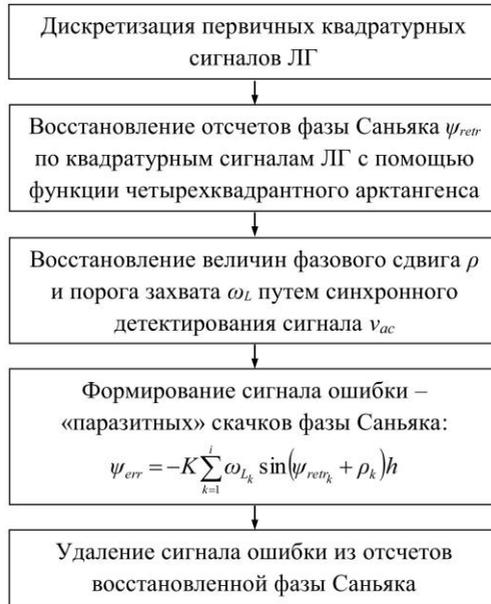


Рис. 2. Блок-схема алгоритма компенсации «паразитных» скачков фазы Саньяка в выходном сигнале ЛГ ( $h$  – шаг интегрирования).

С целью подавления гармонической частотной подставки в отсчетах угловой скорости применен режекторный фильтр со следующими параметрами: центральная частота – 400 Гц; полоса подавления – 40 Гц; переходная область – 20 Гц; коэффициент подавления – 60 дБ.

#### 4. Результаты математического моделирования

Даже в случае равномерного вращения корпуса ЛГ «паразитные» скачки фазы Саньяка на фоне восстановленной угловой скорости не компенсируют друг друга, вследствие чего угловая скорость ЛГ измеряется с ошибкой (рис. 3). В данной работе с целью компенсации «паразитных» скачков фазы Саньяка применяется метод МФСК, в результате угловая скорость равномерного вращения корпуса ЛГ восстанавливается более корректно.

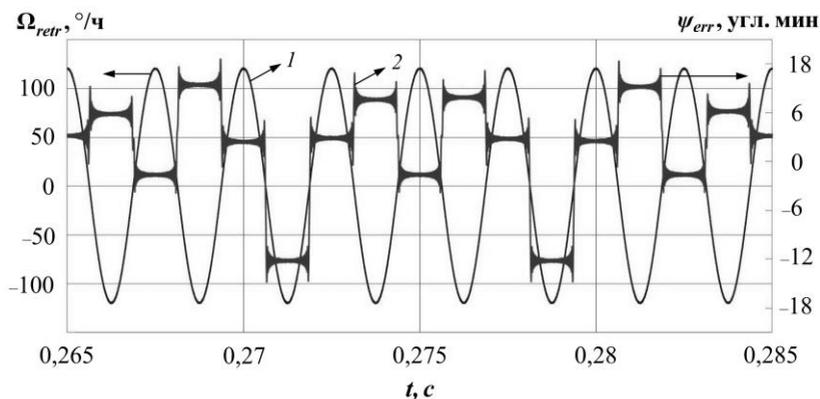


Рис. 3. Восстановленная угловая скорость ЛГ (без фильтрации колебаний гармонической частотной подставки и без коррекции динамического захвата) – кривая 1; «паразитные» скачки фазы Саньяка – кривая 2.

При численном решении дифференциального уравнения (3) были сформированы тестовые первичные сигналы ЛГ, которые впоследствии обрабатывались методом МФСК. В указанном

методе модуляция гармонической частотной подставки псевдослучайным сигналом не производилась. С целью приближения к условиям реального эксперимента к сформированным «идеальным» квадратурным сигналам и к сигналу переменной составляющей суммы мощностных сигналов добавлен квазибелый шум ( $SNR = 50$  дБ – отношение сигнал/шум). Серия численных экспериментов проводилась со следующими начальными условиями:  $\omega_L = 0,01$  °/с;  $\omega_d = 120$  °/с;  $f = 400$  Гц;  $\rho = 0,1$  рад;  $A_1 = A_2 = 1$  В;  $r_1 = r_2 = 5,69 \cdot 10^{-8}$  отн. ед.;  $\beta_1 = -1$  рад;  $\beta_2 = 1$  рад;  $\Omega_0 = 12$  °/ч – угловая скорость равномерного вращения корпуса ЛГ;  $f_s = 2,4$  МГц – частота дискретизации первичных квадратурных сигналов;  $f_{out} = 2,4$  кГц – частота обновления выходной информации;  $t_{max} = 1001$  с – максимальное время моделирования;  $L = 0,28$  м – периметр четырехзеркального кольцевого резонатора;  $\lambda = 632,8$  нм – длина волны излучения гелий-неонового лазера. После компенсации «паразитных» скачков фазы Саньяка гармоническая частотная подставка удалялась из отсчетов угловой скорости, восстановленной на частоте 2,4 кГц. Далее происходило осреднение мгновенных значений измеренной угловой скорости вращения ЛГ на трех временных интервалах:  $t_{av} = 1$  с;  $t_{av} = 10$  с и  $t_{av} = 100$  с ( $t_{av}$  – время осреднения).

Исследование метода МФСК осуществлялось на базе трех численных экспериментов. В первом эксперименте последовательно были выполнены следующие действия:

1. Моделирование «идеальных» сигналов ЛГ, т.е. квадратурных сигналов ( $U_c$ ,  $U_s$  – «косинусный» и «синусный» соответственно) с амплитудой 1 В и усиленного до 1 В сигнала переменной составляющей суммы мощностных сигналов ( $v_{ac}$ ).

2. Цифровая обработка «идеальных» сигналов  $U_c$ ,  $U_s$ ,  $v_{ac}$  методом МФСК.

3. Моделирование сигналов  $U_c$ ,  $U_s$ ,  $v_{ac}$ , каждый из которых имеет амплитуду 1 В, с добавлением квазибелого шума в указанные сигналы ( $SNR = 50$  дБ).

4. Цифровая обработка «неидеальных» сигналов  $U_c$ ,  $U_s$ ,  $v_{ac}$  методом МФСК.

Выяснено, что при работе с «идеальными» сигналами  $U_c$ ,  $U_s$ ,  $v_{ac}$  формирование сигнала ошибки  $\psi_{err}$ , которая вызвана связью встречных оптических волн, определяется точностью восстановления двух величин: статического порога захвата  $\langle\omega_L\rangle \pm \sigma(\omega_L) = (10,000 \pm 0,009) \cdot 10^{-3}$  °/с и фазового сдвига  $\langle\rho\rangle \pm \sigma(\rho) = (10,00 \pm 0,09) \cdot 10^{-2}$  рад [10]. В случае работы с «неидеальными» сигналами  $U_c$ ,  $U_s$ ,  $v_{ac}$  на формирование сигнала ошибки, наряду с указанной выше точностью восстановления величин  $\rho$  и  $\omega_L$ , влияние оказывает квазибелый шум, добавляемый к моделируемым сигналам. В табл. 1 представлены ошибки измерений угловой скорости ЛГ, рассчитанные как  $\Delta\Omega = \langle|\Omega_0 - \Omega_{МФСК}|\rangle \pm \sigma(|\Omega_0 - \Omega_{МФСК}|)$ , где  $\Omega_{МФСК}$  – угловая скорость, восстановленная по методу МФСК;  $\Omega_0$  – измеренная угловая скорость, найденная в результате аналитического решения дифференциального уравнения, описывающего быстроту изменения фазы Саньяка для ЛГ с нулевой зоной захвата (см. уравнение (3)) [13]. Установлено, что квазибелый шум является причиной фазовой ошибки в сигнале  $\Omega_{МФСК}$  в сравнении с эталонным сигналом  $\Omega_0$ . Наибольшее значение фазовой ошибки составляет  $5 \cdot 10^{-3}$  рад  $\approx 0,29^\circ$ . Фазовая ошибка между исследуемым ( $\Omega_{МФСК}$ ) и эталонным ( $\Omega_0$ ) сигналами – это разность фаз, которая возникает между этими сигналами. В данной работе фазовые ошибки определяются после вычета частотной подставки из отсчетов восстановленной угловой скорости ЛГ (до процедуры осреднения).

Таблица 1. Ошибки измерений угловой скорости ЛГ

«Идеальные» сигналы $U_c, U_s, v_{ac}$	Сигналы $U_c, U_s, v_{ac}$ с добавлением шума
$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, °/ч:	
$(8 \pm 5) \cdot 10^{-5}$	$(6 \pm 4) \cdot 10^{-4}$
$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, °/ч:	
$(8,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$	$(9 \pm 6) \cdot 10^{-5}$
$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, °/ч:	

$$(8,0 \pm 0,29) \cdot 10^{-5}$$

$$(8,0 \pm 0,7) \cdot 10^{-5}$$

По данным табл. 1 построены две зависимости. Линиями 1 и 2 на рис. 4 изображены области разброса значений измеренной угловой скорости ( $\sigma(|\Omega_0 - \Omega_{\text{МФСК}}|)$ ) относительно значений средней абсолютной ошибки ( $\langle |\Omega_0 - \Omega_{\text{МФСК}}| \rangle$ ), обозначенных графическими символами 3,4. Более узкая область разброса угловых скоростей наблюдается при работе с «идеальными» сигналами  $U_c$ ,  $U_s$ ,  $v_{ac}$  во временном интервале от 1 с до 100 с. Установлено, что квазибелый шум не вносит значительных ошибок в измерение угловой скорости вращения ЛГ методом МФСК: при  $t_{av} = 100$  с средние абсолютные ошибки восстановленной угловой скорости в случае работы с «идеальными» и «неидеальными» сигналами совпадают, при этом разброс значений угловой скорости при добавлении шума увеличивается приблизительно в 2,4 раза.

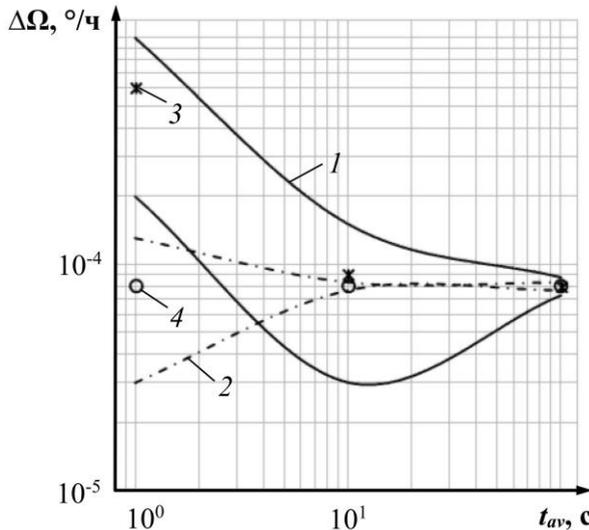


Рис. 4. Ошибки измерений угловой скорости ЛГ:  
1, 2 – разброс значений восстановленной угловой скорости при работе с «неидеальными» и «идеальными» сигналами соответственно; 3, 4 – абсолютная ошибка измеренной угловой

скорости при работе с «неидеальными» и «идеальными» сигналами соответственно.

План действий второго численного эксперимента представлен ниже:

1. Изменение амплитуды «косинусного» сигнала в диапазоне от 1 В до 1,5 В с шагом 0,1 В, при этом амплитуды сигналов  $U_s$ ,  $v_{ac}$  равны 1 В; в указанные сигналы шум не добавлен.

2. Цифровая обработка описанных в пункте 1 сигналов методом МФСК.

3. Изменение амплитуды «косинусного» сигнала в диапазоне от 1 В до 1,5 В с шагом 0,1 В, при этом амплитуды сигналов  $U_s$ ,  $v_{ac}$  равны 1 В; в указанные сигналы добавлен квазибелый шум ( $SNR = 50$  дБ).

4. Цифровая обработка описанных в пункте 3 сигналов методом МФСК.

Результаты, полученные в ходе второго эксперимента, представлены в табл. 2. При увеличении амплитуды «косинусного» сигнала на 50% по сравнению с амплитудой «синусного» сигнала наблюдается некорректное восстановление величины фазового сдвига  $\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = (15,0 \pm 0,14) \cdot 10^{-2}$  рад, при этом параметр статического захвата восстанавливается с такой же точностью, как и в первом численном эксперименте  $\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (10,000 \pm 0,009) \cdot 10^{-3}$  %/с. Максимальное значение фазовой ошибки в сигнале  $\Omega_{\text{МФСК}}$  в сравнении с эталонным сигналом  $\Omega_0$  составляет 0,9 рад  $\approx 51,6^\circ$ .

Таблица 2. Влияние амплитуды «косинусного» сигнала на погрешность измерения угловой скорости ЛГ

Амплитуда «косинусного» сигнала	«Идеальные» сигналы $U_c$ , $U_s$ , $v_{ac}$	Сигналы $U_c$ , $U_s$ , $v_{ac}$ с добавлением шума
$U_{c,m} = 1,1$ В	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, %/ч:	
	$(7 \pm 5) \cdot 10^{-3}$	$(7 \pm 5) \cdot 10^{-3}$

	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, °/ч:	
	$(1,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$	$(1,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, °/ч:	
	$(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$	$(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$
$U_{c,m} = 1,2$ В	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, °/ч:	
	$(1,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$	$(1,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, °/ч:	
	$(2,5 \pm 1,6) \cdot 10^{-3}$	$(2,5 \pm 1,6) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, °/ч:	
	$(2,2 \pm 0,19) \cdot 10^{-3}$	$(2,2 \pm 0,19) \cdot 10^{-3}$
$U_{c,m} = 1,3$ В	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, °/ч:	
	$(1,8 \pm 1,4) \cdot 10^{-2}$	$(1,8 \pm 1,4) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, °/ч:	
	$(4,0 \pm 2,3) \cdot 10^{-3}$	$(4,0 \pm 2,3) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, °/ч:	
	$(3,0 \pm 0,27) \cdot 10^{-3}$	$(3,0 \pm 0,27) \cdot 10^{-3}$
$U_{c,m} = 1,4$ В	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, °/ч:	
	$(2,3 \pm 1,8) \cdot 10^{-2}$	$(2,3 \pm 1,8) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, °/ч:	
	$(5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, °/ч:	
	$(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$	$(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$
$U_{c,m} = 1,5$ В	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, °/ч:	
	$(2,8 \pm 2,2) \cdot 10^{-2}$	$(2,8 \pm 2,2) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, °/ч:	
	$(6 \pm 4) \cdot 10^{-3}$	$(6 \pm 4) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, °/ч:	
	$(5,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	$(5,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$

Из рис. 5 видно, что абсолютная ошибка измеренной угловой скорости ЛГ пропорционально возрастает с увеличением амплитуды «косинусного» сигнала, при этом, начиная с  $U_{c,m} = 1,1$  В, рассчитанные значения указанной ошибки для «идеальных» и «неидеальных» сигналов ЛГ совпадают.

Согласно результатам второго численного эксперимента при  $t_{av} = 100$  с изменение амплитуды «косинусного» сигнала в диапазоне от 1 В до 1,1 В приводит к росту  $\Delta\Omega$  примерно в 14 раз. При дальнейшем увеличении амплитуды «косинусного» сигнала с шагом 0,1 В абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости возрастает приблизительно в 5 раз, а разброс значений угловой скорости – в 4 раза (рис. 6). Следовательно, разность амплитуд первичных квадратурных сигналов ЛГ оказывает на погрешность измерения угловой скорости ( $\Delta\Omega$ ) большее влияние, чем наличие шумов в указанных сигналах. С целью минимизации  $\Delta\Omega$  требуется введение обязательной нормировки амплитуд квадратурных сигналов.

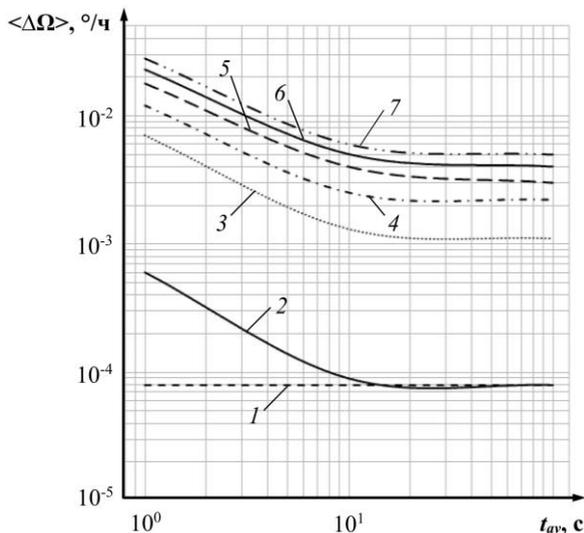


Рис. 5. Влияние амплитуды «косинусного» сигнала на погрешность измерения угловой скорости ЛГ: 1, 2 – абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами ( $U_{c,m} = 1$  В) соответственно; 3, 4, 5, 6, 7 – абсолютная ошибка измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами с последовательным изменением

амплитуды «косинусного» сигнала  $U_{c,m} = 1,1 \text{ В}$ ;  $U_{c,m} = 1,2 \text{ В}$ ;  
 $U_{c,m} = 1,3 \text{ В}$ ;  $U_{c,m} = 1,4 \text{ В}$ ;  $U_{c,m} = 1,5 \text{ В}$  соответственно.

Корректная работа метода МФСК реализуется только в условиях равенства амплитуд и фаз мощностных и информационных сигналов ЛГ. В реальном эксперименте мгновенное значение амплитуды сигнала  $v_{ac}$  в 100 раз меньше мгновенной амплитуды «косинусного» или «синусного» сигнала. Разработка и изготовление фотоусилителей для мощностных сигналов с такими большими коэффициентами усиления и одинаковыми ФЧХ являются нетривиальной задачей.

На базе построенной математической модели ЛГ проводились исследования чувствительности метода МФСК не только к добавлению шума в сигналы  $U_c$ ,  $U_s$ ,  $v_{ac}$ , изменению амплитуд квадратурных сигналов, но и к сдвигу фаз между первичными сигналами и сигналом  $v_{ac}$ .

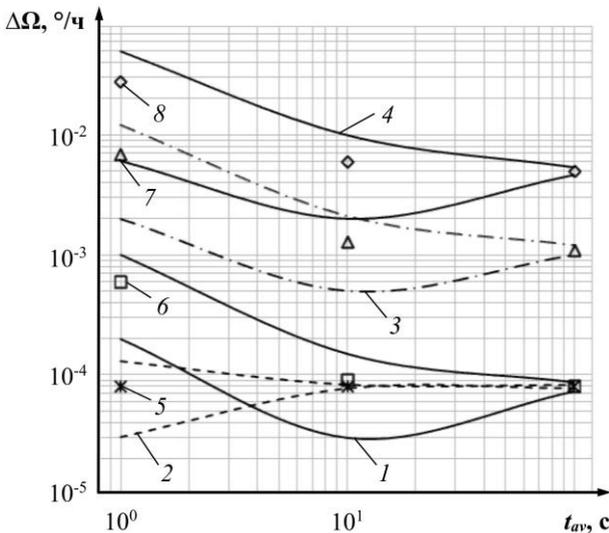


Рис. 6. Влияние амплитуды «косинусного» сигнала на погрешность измерения угловой скорости ЛГ: 1, 2 – разброс значений восстановленной угловой скорости при работе с

«неидеальными» и «идеальными» сигналами ( $U_{c,m} = 1 В$ ) соответственно;

3, 4 – разброс значений измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами для  $U_{c,m} = 1,1 В$  и  $U_{c,m} = 1,5 В$  соответственно; 5, 6 – абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами ( $U_{c,m} = 1 В$ ) соответственно; 7, 8 – абсолютная ошибка измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами для  $U_{c,m} = 1,1 В$  и  $U_{c,m} = 1,5 В$  соответственно.

В третьем численном эксперименте использовался следующий план действий:

1. Сдвиг сигналов  $U_c$ ,  $U_s$  относительно сигнала  $v_{ac}$  на заданное количество отсчетов (1, 2, 5, 8, 10, 12) вправо, т.е. квадратурные сигналы отстают по фазе от сигнала переменной составляющей суммы мощностных сигналов, при этом амплитуды сигналов  $U_c$ ,  $U_s$ ,  $v_{ac}$  равны 1 В; в указанные сигналы шум не добавлен.

2. Цифровая обработка описанных в пункте 1 сигналов методом МФСК.

3. Сдвиг сигналов  $U_c$ ,  $U_s$  относительно сигнала  $v_{ac}$  на заданное количество отсчетов (1, 2, 5, 8, 10, 12) вправо, при этом амплитуды сигналов  $U_c$ ,  $U_s$ ,  $v_{ac}$  равны 1 В; в указанные сигналы добавлен квазибелый шум ( $SNR = 50$  дБ).

4. Цифровая обработка описанных в пункте 3 сигналов методом МФСК.

Один отсчет, на который осуществляется сдвиг сигналов  $U_c$ ,  $U_s$  относительно сигнала  $v_{ac}$  на частоте первичного сигнала 0,2 МГц, соответствующей максимальной амплитуде подставки, приблизительно равен 0,6 рад (см. табл. 3). Установлено, что порядок величины  $\Delta\Omega$  не изменяется при сдвиге квадратурных сигналов относительно сигнала  $v_{ac}$ , начиная с двух отсчетов, независимо от наличия шума.

Таблица 3. Влияние разности фаз между квадратурными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов на погрешность измерения угловой скорости ЛГ

Количество отсчетов	«Идеальные» сигналы $U_c, U_s, v_{ac}$	Сигналы $U_c, U_s, v_{ac}$ с добавлением шума
1 отсч $\approx$ $\approx 0,6$ рад $\approx 34^\circ$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$	$(5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(5,00 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$	$(5,0 \pm 0,11) \cdot 10^{-3}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(5,00 \pm 0,024) \cdot 10^{-3}$	$(5,00 \pm 0,028) \cdot 10^{-3}$
2 отсч $\approx$ $\approx 1,2$ рад $\approx 69^\circ$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(1,7 \pm 1,2) \cdot 10^{-2}$	$(1,7 \pm 1,2) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(1,70 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$	$(1,70 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(1,700 \pm 0,009) \cdot 10^{-2}$	$(1,700 \pm 0,009) \cdot 10^{-2}$
5 отсч $\approx$ $\approx 3$ рад $\approx 172^\circ$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(7 \pm 5) \cdot 10^{-2}$	$(7 \pm 5) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(7,0 \pm 0,12) \cdot 10^{-2}$	$(7,0 \pm 0,12) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(7,00 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$	$(7,00 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$
8 отсч $\approx$ $\approx 4,8$ рад $\approx 275^\circ$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(6 \pm 5) \cdot 10^{-2}$	$(6 \pm 5) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(6,0 \pm 0,11) \cdot 10^{-2}$	$(6,0 \pm 0,11) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(6,00 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$	$(6,00 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$
10 отсч $\approx$ $\approx 6$ рад $\approx 344^\circ$	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	
	$(4 \pm 3) \cdot 10^{-2}$	$(4 \pm 3) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, $^\circ/\text{ч}$ :	

	$(4,00 \pm 0,08) \cdot 10^{-2}$	$(4,00 \pm 0,08) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, °/ч:	
12 отсч $\approx$ $\approx 7,2$ рад $\approx 413^\circ$	$(4,00 \pm 0,023) \cdot 10^{-2}$	$(4,00 \pm 0,023) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 1$ с, °/ч:	
	$(4,0 \pm 2,6) \cdot 10^{-2}$	$(4,0 \pm 2,6) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 10$ с, °/ч:	
	$(4,00 \pm 0,07) \cdot 10^{-2}$	$(4,00 \pm 0,07) \cdot 10^{-2}$
	$\Delta\Omega$ при $t_{av} = 100$ с, °/ч:	
	$(4,00 \pm 0,02) \cdot 10^{-2}$	$(4,00 \pm 0,02) \cdot 10^{-2}$

Неправильное восстановление порога захвата происходит при сдвиге сигналов  $U_c$ ,  $U_s$  относительно сигнала  $v_{ac}$  на 5, 8, 10 и 12 отсчетов (с добавлением или без добавления шума):

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (2,70 \pm 0,011) \cdot 10^{-3} \text{ °/с (5 отсчетов);}$$

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (2,20 \pm 0,011) \cdot 10^{-3} \text{ °/с (8 отсчетов);}$$

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (1,70 \pm 0,012) \cdot 10^{-3} \text{ °/с (10 отсчетов);}$$

$$\langle \omega_L \rangle \pm \sigma(\omega_L) = (2,90 \pm 0,013) \cdot 10^{-3} \text{ °/с (12 отсчетов).}$$

Некорректное восстановление  $\rho$  наблюдается при сдвиге рассматриваемых сигналов на 5 и 8 отсчетов независимо от добавления квазиглового шума:

$$\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = (3,000 \pm 0,004) \text{ рад (5 отсчетов);}$$

$$\langle \rho \rangle \pm \sigma(\rho) = (3,000 \pm 0,005) \text{ рад (8 отсчетов).}$$

Из рис. 7 видно, что абсолютная ошибка измеренной угловой скорости максимальна при сдвиге фаз квадратурных сигналов на 3 рад (5 отсчетов) относительно фазы сигнала  $v_{ac}$ , т.е. рассчитанные значения указанной ошибки не находятся в прямой зависимости от значений разности фаз (количество отсчетов). Начиная с двух отсчетов, значения  $\Delta\Omega$  при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами ЛГ совпадают.

Согласно результатам третьего численного эксперимента при  $t_{av} = 100$  с сдвиг фаз между сигналами  $U_c$ ,  $U_s$  и  $v_{ac}$  на 0,6 рад (1 отсчет) приводит к увеличению абсолютной ошибки измеренной угловой скорости вращения ЛГ примерно в 63 раза, а разброса значений угловой скорости – в 4 раза (рис. 8). При сдвиге исследуемых сигналов на 3 рад абсолютная ошибка возрастает в 875 раз, а разброс ее значений – в 57 раз; при

сдвиге на 7,2 рад (12 отсчетов) абсолютная ошибка увеличивается в 500 раз, а разброс значений – приблизительно в 29 раз. Следовательно, точность измерения угловой скорости методом МФСК не хуже чем  $5 \cdot 10^{-3}$  °/ч при  $t_{av} = 100$  с достигается, если разность фаз между квадратурными и мощностными сигналами ЛГ не превышает 0,6 рад.

Корректная работа метода МФСК реализуется только в случае предварительной нормировки первичных сигналов ЛГ по амплитуде и фазе. Например, для этой цели можно использовать метод вычисления мгновенной фазы Саньяка с аппроксимацией первичных сигналов полиномиальным уравнением второго порядка [21].

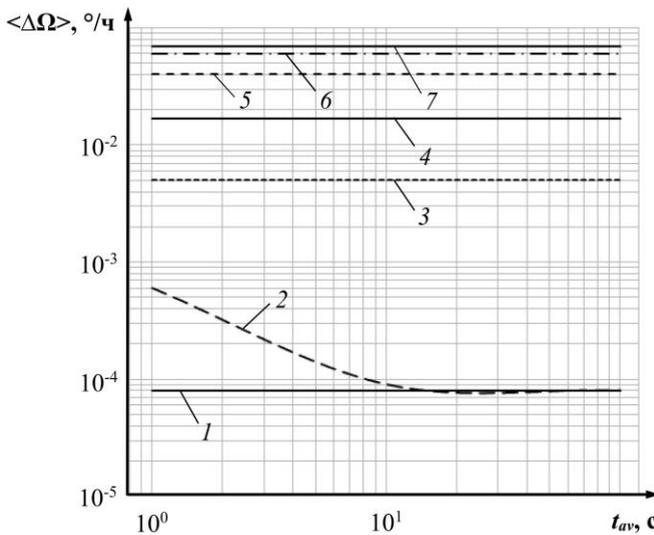


Рис. 7. Влияние разности фаз между квадратурными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов на погрешность измерения угловой скорости ЛГ: 1, 2 – абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами соответственно (0 отсчетов); 3, 4, 5, 6, 7 – абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости при работе с

«идеальными» или «неидеальными» сигналами с учетом увеличения сдвига фаз между сигналами  $U_c$ ,  $U_s$  и  $v_{ac}$  на указанное в скобках число отсчетов соответственно (1, 2, 12 (10), 8, 5 отсчетов).

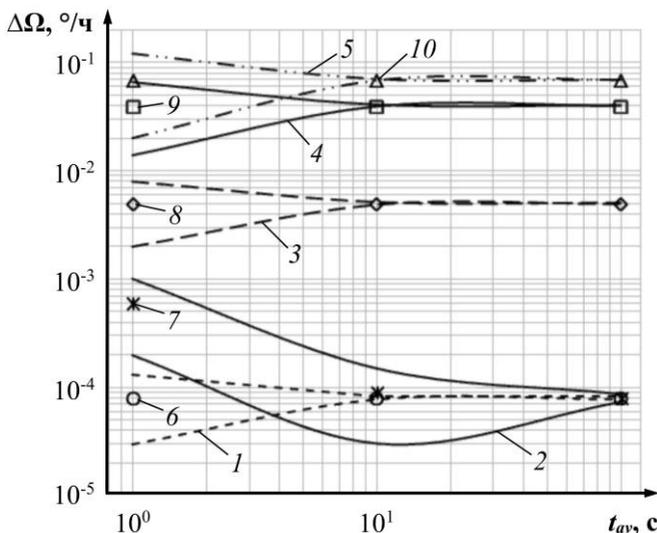


Рис. 8. Влияние разности фаз между квадратурными сигналами и сигналом переменной составляющей суммы мощностных сигналов на погрешность измерения угловой скорости ЛГ: 1, 2 – разброс значений восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами соответственно (0 отсчетов); 3, 4, 5 – разброс значений восстановленной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами, сдвинутыми друг относительно друга на 1, 12 (10) и 5 отсчетов соответственно; 6, 7 – абсолютная ошибка измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» и «неидеальными» сигналами соответственно (0 отсчетов); 8, 9, 10 – абсолютная

*ошибка измеренной угловой скорости при работе с «идеальными» или «неидеальными» сигналами, сдвинутыми друг относительно друга на 1, 12 (10) и 5 отсчетов соответственно.*

## **5. Заключение**

Метод МФСК имеет малую чувствительность к наличию квазibelого шума в квадратурных сигналах и сигнале переменной составляющей суммы мощностных сигналов: средняя абсолютная ошибка восстановленной угловой скорости не изменяется, однако разброс ее значений увеличивается приблизительно в 2,4 раза.

Изменение разности амплитуд квадратурных сигналов ЛГ на 10% приводит к резкому – в 14 раз – увеличению ошибки измерений угловой скорости.

Точность измерения угловой скорости методом МФСК не хуже чем  $5 \cdot 10^{-3}$  °/ч на интервале осреднения, равном 100 с, достигается, если разность фаз между квадратурными и мощностными сигналами ЛГ не превышает 0,6 рад.

Следовательно, корректная работа метода МФСК реализуется только в случае предварительной нормировки первичных квадратурных сигналов ЛГ по амплитуде и фазе. Для этой цели можно использовать метод вычисления мгновенной фазы Саньяка с аппроксимацией первичных сигналов полиномиальным уравнением второго порядка [20].

## **Литература**

1. ВИТЯЗЕВ С.В., ВАЛУЙСКИЙ Д.В., МИШИН В.Ю., МОЛЧАНОВ А.В., СЕРЕБРЯКОВ А.Е., ЧИРКИН М.В. *Определение фазы Саньяка в цифровом лазерном гироскопе при применении DSP процессора // Навигация и управление летательными аппаратами. – 2021. – № 1(32). – С. 22–37.*

2. ЕФИМОВ Б.В., КРЕМЕР В.И., МОЛЧАНОВ А.В., ПОЛИКОВСКИЙ Е.Ф. *Компенсация случайного дрейфа лазерного гироскопа* // VIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов конференции, Санкт-Петербург, 28–30 мая 2001 г. – Государственный научный центр Российской Федерации: концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2001. – С. 91–92.
3. КРЕМЕР В.И., ОСИПОВ А.М., ПОЛИКОВСКИЙ Е.Ф. *Компенсация погрешностей лазерного гироскопа, вызываемых действием вибрационной частотной подставки* // Гироскопия и навигация. – 2001. – № 1(32). – С. 14–19.
4. КРОБКА Н.И., СВИРИДОВ М.В. *Влияние случайной частотной подставки в кольцевом лазере на точность измерения вращения* // Квантовая электроника. – 1985. – Т. 12, № 2. – С. 363–367.
5. МИШИН В.Ю., МОЛЧАНОВ А.В., ЧИРКИН М.В. *Проблема цифровой обработки первичных квадратурных сигналов в лазерных гироскопах* // Приборы. – 2013. – №1 (151). – С. 33–38.
6. СЕРЕБРЯКОВ А.Е., ТЕПЦОВ Д.Б., ВИТЯЗЕВ С.В., МОЛЧАНОВ А.В. *Алгоритм вычисления фазы Саньяка по квадратурным сигналам кольцевого лазера* // Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2023: доклады XXV Международной конференции, Москва, 29–31 марта 2023 г. – М: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2023. – С. 106–109.
7. ФЕДОРОВ А.Е., ЗБОРОВСКИЙ В.А., РЕКУНОВ Д.А. *Оценка точностных параметров резонатора лазерного гироскопа в производстве* // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов, Санкт-Петербург, 26–28 мая 2014 г. – Концерн «Центральный

- научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2014. – С. 250–257.
8. ЧЕСНОКОВ Г.И., ПОЛИКОВСКИЙ Е.Ф., МОЛЧАНОВ А.В., КРЕМЕР В.И. *Некоторые пути улучшения тактико-технических характеристик бесплатформенных инерциальных навигационных систем* // X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов конференции, Санкт-Петербург, 26–28 мая 2003 г. – Государственный научный центр Российской Федерации: концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2003. – С. 155–164.
  9. ЧИРКИН М.В., МИШИН В.Ю., МОРОЗОВ Д.А., ГОЛОВАН А.А., МОЛЧАНОВ А.В. *Фильтрация выходных сигналов триады лазерных гироскопов* // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов, Санкт-Петербург, 26–28 мая 2014 г. – СПб: «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2014. – С. 327–329.
  10. ЧИРКИН М.В., МИШИН В.Ю., СЕРЕБРЯКОВ А.Е., МОЛЧАНОВ А.В., ИВАНЕНКО Ю.Р., ДАВЫДОВ Г.В. *Подавление случайной погрешности лазерного гироскопа без ошумления частотной подставки* // XXX Юбилейная Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов конференции, Санкт-Петербург, 29–31 мая 2023 г. – Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2023. – С. 225–228.
  11. ЧИРКИН М.В., СЕРЕБРЯКОВ А.Е., ИВАНЕНКО Ю.Р., МИШИН В.Ю., МОЛЧАНОВ А.В. *Компенсация динамического захвата в кольцевом лазерном гироскопе* // Навигация и управление летательными аппаратами. – 2022. – № 3(38). – С. 12–27.

12. ALEKSEEV S.YU., MOROZOV D.A., BORISOV M.V., MOLCHANOV A.V., ZAKHAROV M.A. *Technological aspects of precision ring laser production: synchronization threshold measurements in manufacture and operation* // 19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2012 – Proceeding: 19, Saint Petersburg, 28–30 May 2012. – P. 54–56.
13. ARONOWITZ F. *Fundamentals of the ring laser gyro* // Optical gyros and their application. – 1999. – P. 3–45.
14. BESSONOV A.S., MAKEEV A.P., PETRUKHIN V.A. *Measurements of complex coupling coefficients in a ring resonator of laser gyroscope* // Quantum electronics. – 2017. – Vol. 47, No. 7. – P. 675–682.
15. BESSONOV A.S., PETRUKHIN V.A., KHODYREV V.YU. *Setup for integral light scattering irregularities measurements on the surface of laser gyro mirrors* // 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016 – Proceeding: 23, Saint Petersburg, 30 May 2016. – P. 108–111.
16. CHIRKIN M.V., SEREBRYAKOV A.E., MOLCHANOV A.V., ZAKHAROV M.A. *Technological aspects of precision ring laser production: monitoring mirror surfaces of optical resonators* // 20th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2013 – Proceeding, Saint Petersburg, 27–29 May 2013. – P. 66–68.
17. GOLOVAN A.A., MISHIN V.YU., MOLCHANOV A.V., CHIRKIN M.V. *Method for analyzing the influence of the errors induced by the gyroscopic channel of a strapdown INS in the autonomous mode* // Journal of computer and systems sciences international. – 2021. – Vol. 60, No. 4. – P. 627–638.
18. JAE-CHEUL LEE, HYUN-JU CHO, HO-SOON YANG. *Zero lock-in implementation by phase wrapping/unwrapping in a ring laser gyroscope* // Applied Optics. – 2021. – Vol. 60, No. 34. – P. 10529–10538.
19. KUZNETSOV A.G., MOLCHANOV A.V., CHIRKIN M.V., IZMAILOV E.A. *Precise laser gyroscope for autonomous iner-*

- tial navigation* // Quantum electronics. – 2015. – Vol. 45, No. 1. – P. 78–88.
20. MOLCHANOV A.V., BELOKUROV V.A., CHIRKIN M.V., KAGALENKO M.B., KOSHELEV V.I., MISHIN V.YU., MOROZOV D.A. *The application of advanced processing technique to the triad of precision laser gyroscopes* // 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016 – Proceedings: 23, Saint Petersburg, May 2016. – P. 120–122.
  21. MOLCHANOV A.V., BELOKUROV V.A., CHIRKIN M.V., KOSHELEV V.I., MISHIN V.YU., MOROZOV D.A. *Precision laser gyro with a digital channel for quadrature signal processing* // 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2015 – Proceeding: 22, Saint Petersburg, 25–27 May 2015. – P. 307–314.
  22. PERTRUKHIN E.A. *Prediction of the lock-in threshold value in a ring cavity of the laser gyro* // 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016 – Proceeding: 23, Saint Petersburg, May 2016. – P.103–107.
  23. PETRUKHIN V.A., BESSONOV A.S. *Setup for measuring complex coupling parameters in laser gyro cavity* // 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2020 – Proceedings: 27, Saint Petersburg, 25–27 May 2020. – P. 9133777.
  24. SIN-WOO SONG, JA-CHEUL LEE, SUK-KYO HONG, DONGKYOUNG CHWA. *New random walk reduction algorithm in ring laser gyroscopes* // Journal of Optics. – 2010. – Vol. 12. – P. 115501–115509.

## **SENSITIVITY OF DIGITAL PROCESSING METHOD FOR LASER GYROSCOPE PRIMARY SIGNALS TO INPUT PERTURBATIONS**

**Mikhail Chirkin**, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor (chirk.mikhail@yandex.ru).

**Julia Ivanenko**, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, PhD student (ivanenko.july@yandex.ru).

**Andrey Serebryakov**, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Candidate of Technical Sciences, assistant professor (sea89s@yandex.ru).

**Valery Mishin**, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Candidate of Technical Sciences, assistant professor (mishvalera@yandex.ru).

**Alexey Molchanov**, Moscow Institute of Electromechanics and Automatics, Moscow, Candidate of Technical Sciences, assistant professor (a.v.molchanov@mail.ru).

*Abstract. The mathematical model for laser gyroscope primary signals that includes coupling between counter-propagating optical waves, mechanical rotation of laser gyroscope body and additive noise is formed. The sensitivity of the method to calculate the instantaneous Sagnac phase to compensate for dynamic lock-in to input perturbations is studied on the basis of laser gyroscope having a harmonic dither without noising. To analyze the method to calculate the instantaneous Sagnac phase to compensate for dynamic lock-in, the results obtained are compared with the angular rate being the analytical solution of differential equation for laser gyroscope with zero lock-in zone. Phase errors between a test signal and a reference signal of angular rotation rate of laser gyroscope are recorded. The effect of quasi-white noise, changes in primary signal amplitudes and phase shift between quadrature signals and the signal being the alternating component of power signal sum is determined on the registered counts of angular rotation rate of laser gyroscope body.*

Keywords: laser gyroscope, Sagnac phase, dynamic lock-in threshold, static lock-in threshold, quasi-white noise.

УДК 629.7

ББК 39.56

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии ...заполняется редактором...*

*Поступила в редакцию ...заполняется редактором...*

*Опубликована ...заполняется редактором...*

