

Погрешности лазерного гироскопа при различных схемах возбуждения виброподставки с «ошумлением»

77-48211/622102

12, декабрь 2013

Енин В. Н., Людомирский М. Б., Санеев В. И.

УДК 621.375.826:681.3

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Россия, Москва, ООО "НПК "Электрооптика"

enin@bmstu.ru

В статье проводится сравнительный анализ влияния различных схем возбуждения ВП на величину случайной и систематической погрешности лазерного гироскопа (ЛГ), обусловленной нелинейностью выходной характеристики. Рассматриваются три схемы возбуждения ВП: в режиме автогенератора с положительной обратной связью по величине угловой скорости моноблока относительно основания прибора; в режиме автогенератора с положительной обратной связью по знаку угловой скорости моноблока относительно основания прибора и схема в режиме управляемых вынужденных колебаний. Путем численного моделирования показывается, что схема на основе управляемых вынужденных колебаний характеризуется наименьшей величиной случайной составляющей погрешности выходного сигнала ЛГ при одном и том же способе «ошумления» ВП. Для выбранного в качестве примера образца серийного ЛГ остаточная динамическая зона синхронизации в условиях ошумления виброподставки составляет величину 0.002-0.003 °/час при времени усреднения ($T_{уср}$) до 1 часа. При $T_{уср} \rightarrow \infty$ асимптотическая зависимость величины остаточной динамической зона для выбранного прибора имеет ненулевой предел, равный 0.0017 °/час.

Введение

В лазерной гироскопии применяют различные схемы возбуждения гармонической вибрационной частотной подставки (ВП) моноблока и ее «ошумления». «Ошумление» как способ существенного снижения порога чувствительности, т.е. динамической зоны захвата (ДЗЗ) лазерного гироскопа (ЛГ) оказался эффективным [3, 4, 6].

Однако, задаваемые законы изменения амплитуды виброподставки, реализующие «ошумление», приводят к возрастанию величины случайной составляющей ошибки в

выходном сигнале прибора, что затрудняет явное выделение систематической составляющей ошибки за небольшие интервалы времени. Решению этой проблемы уделено немало внимания в работах [1-6], однако полученные результаты являются приближенными, что не позволяет провести более строгое сравнение различных схем виброподставки.

В ряде работ [1, 2, 4, 6] приводятся сообщения о том, что остаточная динамическая зона захвата при наличии «ошумления» (ДЗЗош), обращается в ноль.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ влияния различных схем возбуждения ВП на величину случайного погрешности выходного сигнала и систематической, обусловленной нелинейностью выходной характеристики.

В настоящей работе принято, что ЛГ измеряют одну и ту же постоянную угловую скорость вращения, имеют идентичные масштабные коэффициенты, средние амплитуды ВП, способы и параметры квазислучайного «ошумления». Температурные дрейфы и вибрации основания при этом не учитываются.

В качестве критерия сравнительной оценки схем возбуждения ВП выбрана зависимость среднеквадратичного разброса показаний выходного сигнала прибора от времени усреднения ($T_{\text{уср}}$) этого выходного сигнала $\sigma_{\text{вых}}(T_{\text{уср}})$ – случайная составляющая выходного сигнала.

Наряду со случайной («шумовой») составляющей в выходном сигнале прибора исследуются количественные характеристики остаточной зоны нечувствительности при наличии «ошумления», а также систематическая составляющая ошибки выходного сигнала $\Omega_{\text{нл}}(T_{\text{уср}})$, обусловленная нелинейностью выходной характеристики ЛГ.

Математические модели измерительных каналов ЛГ для трех вариантов схем виброподставки

Математическая модель измерительного канала ЛГ, для которого применяются различные схемы виброподставки, представлена на рисунке 1.

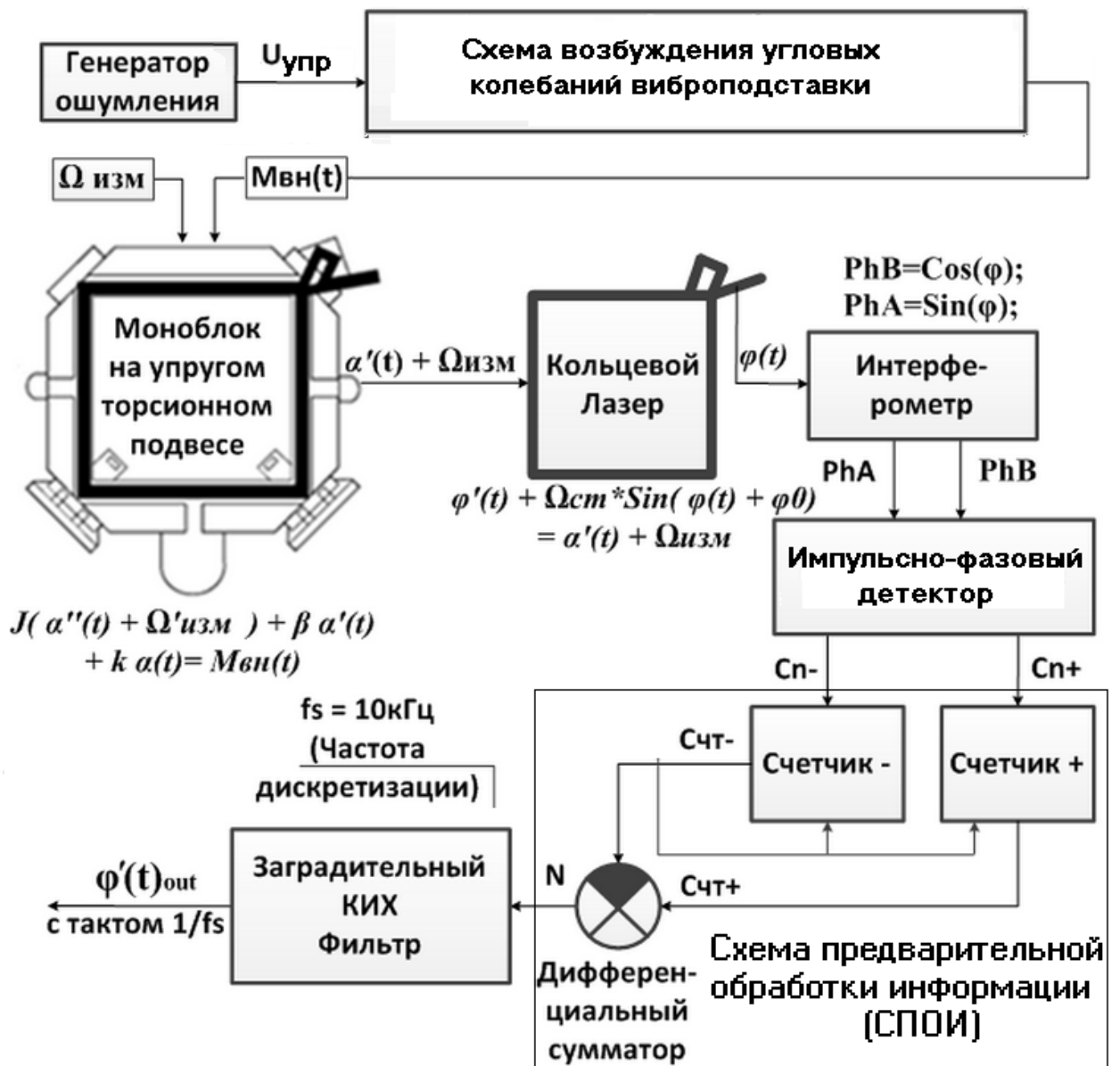


Рисунок 1 - Функциональная блок-схема ЛГ.

Функциональная блок-схема работы ЛГ, для которой разработана математическая модель, содержит следующие функциональные звенья:

- ✓ моноблок в упругом торсионном подвесе, совершающий угловые колебательные движения $\alpha(t)$;
- ✓ схема возбуждения механических угловых колебаний моноблока, генерирующая механический момент $M_{вн}(t)$;
- ✓ генератор ошумления, управляющий параметрами схем возбуждения виброподставки с целью реализации процесса ошумления виброподставки;
- ✓ кольцевой лазер (КЛ) с учетом синхронизации встречных волн;

- ✓ интерферометр с электронной схемой, преобразующей интерференционную картину в электрические сигналы на выходе PhB и PhA;
- ✓ Импульсно–фазовый детектор, который обрабатывает сигналы PhB и PhA таким образом, что изменение разности фаз в положительном направлении на π радиан вызывает 1 импульс на выходе Cnt+, а изменение разности фаз в отрицательном направлении вызывает 1 импульс на выходе Cnt-;
- ✓ Цифровые счетчики и цифровой дифференциальный сумматор, которые производят подсчет количества импульсов в течение интервала времени, определяемого частотой съема информации (дискретизации работы дальнейшей цифровой схемы) f_s , которая в качестве примера составляет 10 кГц;
- ✓ цифровой заградительный 2-х секционный КИХ-фильтр реализованный программно в цифровом сигнальном микропроцессоре, выходной сигнал которого, значение $\varphi(t)_{out}$, поступает на дальнейшую обработку в процессор вычислителя, а в данной модели является выходным сигналом.

Полнофункциональная математическая модель измерительного канала ЛГ в виде системы дифференциального уравнения разности фаз встречных волн [1], уравнения угловых колебаний моноблока на упругих торсионах и, математических моделей ИФД и 2-х секционного КИХ-фильтра имеет вид[13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} J(\alpha''(t) + \Omega'_{изм}) + \beta \alpha'(t) + k \alpha(t) = M_{вн}(t) \\ \varphi'(t) + \Omega_{см} * МКП * \sin(\varphi(t)) = (\alpha'(t) + \Omega_{изм}) * МКП \\ N_{pc}(t) = \begin{cases} \pi * Floor\left(\frac{\varphi(t)}{\pi}\right), \text{ если } \varphi'(t) > 0 \\ \pi * Ceiling\left(\frac{\varphi(t)}{\pi}\right), \text{ если } \varphi'(t) \leq 0 \end{cases} \\ \varphi(t_i)_{1зв} = \sum_{j=i-M-1}^{j=i} N_{pc}(t_j) \\ \varphi(t_i)_{out} = \varphi(t_i)_{2зв} = \sum_{j=i-M-1}^{j=i} \varphi(t_j)_{1зв} \end{array} \right. \quad (1)$$

В модели (1):

J – момент инерции моноблока;

β – коэффициент демпфирования угловых колебаний моноблока;

k – жесткость торсионов;

$\Omega_{ст}$ – статическая зона захвата;

$MK_{п} = \left(\frac{\pi}{60 * 60 * 57.2958} MK \right)$ - коэффициент передачи кольцевого лазера в (рад/сек)/(рад/сек),

который соответствует общепринятому масштабному коэффициенту МК в угл.сек/имп при чувствительности (коэффициенте передачи) ИФД, равной 2;

$\Omega_{изм}$ – измеряемая угловая скорость;

$M_{вн}(t)$ – вращающий момент, действующий на моноблок со стороны датчика момента;

$\varphi(t_i)_{1зв}$ – i-е выходное значение 1-го звена КИХ-фильтра;

$\varphi(t_i)_{out} = \varphi(t_i)_{2зв}$ – i-е выходное значение 2-го звена КИХ-фильтра,

одновременно являющееся выходным значением прибора;

$Floor(x)$ – целая часть числа x , меньшая либо равная x ;

$Ceiling(x)$ – целая часть числа x , большая либо равная x ;

$M = Floor(0.5 + f_s / f_{ВП})$ – порядок (размах) КИХ-фильтров, где

f_s – тактовая частота работы СПОИ;

$f_{ВП}$ – частота угловых колебаний ВП.

Работа системы «Интерферометр - ИФД» описана, например, в [2].

В качестве примера на рисунке 2 представлен расчетный график входного и выходного ИФД-РС, описываемый выражением

$$\begin{cases} \pi * Floor\left(\frac{\varphi(t)}{\pi}\right), \text{ если } \varphi'(t) > 0 \\ \pi * Ceiling\left(\frac{\varphi(t)}{\pi}\right), \text{ если } \varphi'(t) \leq 0, \end{cases}$$

для ВП с амплитудой 0.25 угловых секунд.

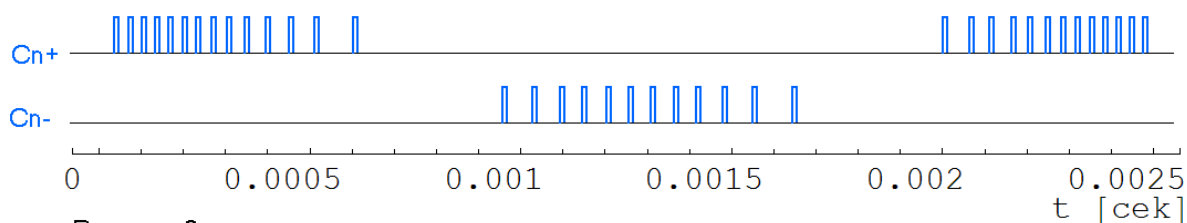


Рисунок 2 а

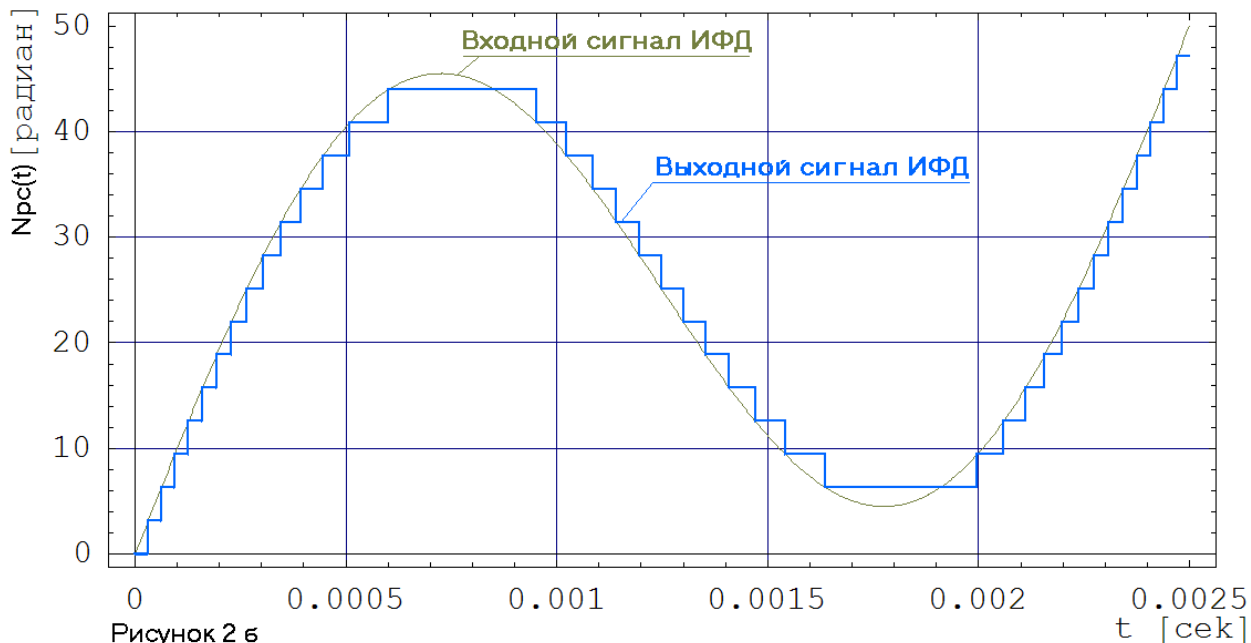


Рисунок 2 б

Рисунок 2 - Входной и выходной сигнал системы «Интерферометр - ИФД».

Из известных схем возбуждения виброподставки [1,6,7,8] выбраны две автогенераторные схемы и схема с «внешним» возбуждением с управлением вынужденными колебаниями.

Функциональные схемы выбранных схем возбуждения виброподставки и их математические модели представлены на рисунке 3. В соответствии с этими схемами для проведения вычислительных экспериментов в данной работе разработаны математические модели.

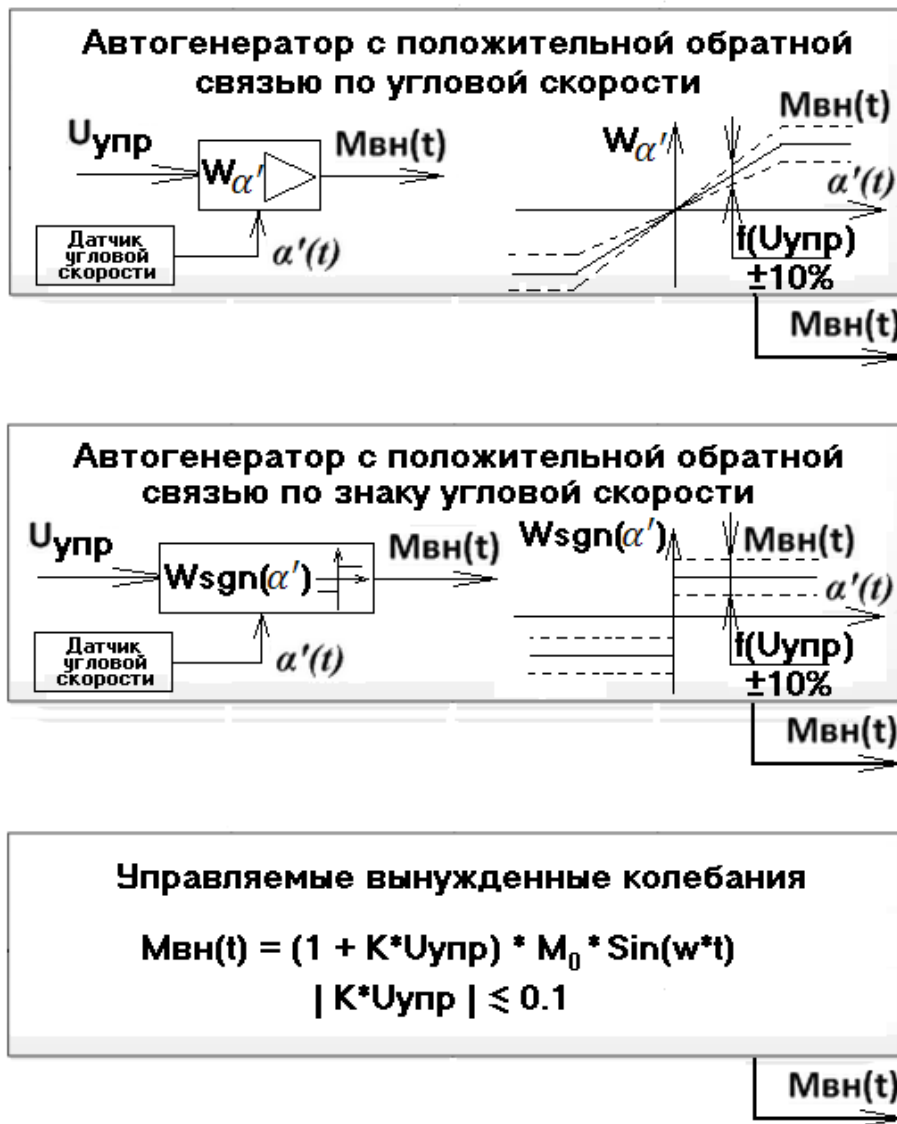


Рисунок 3 Математические модели схем возбуждения ВП.

На рисунке 3:

Схема возбуждения ВП для автогенератора с положительной обратной связью по знаку угловой скорости имеет передаточную функцию

$W_{\alpha'}$ - передаточная функция усилителя с ограничением (насыщением);

$$W_{\alpha'} = \begin{cases} K \cdot MAX_{\alpha'}, & \text{при } \alpha' > MAX_{\alpha'} \\ K \cdot \alpha' & \\ -K \cdot MAX_{\alpha'}, & \text{при } \alpha' < -MAX_{\alpha'} \end{cases}$$

Схема возбуждения ВП для автогенератора с положительной обратной связью по угловой скорости имеет передаточную функцию

$W_{sgn(\alpha')}$ – релейная передаточная функция;

$W_{sgn(\alpha')} = K \cdot sgn(\alpha')$, где

$sgn(x)$ - функция, определяющая знак числа,

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

Сигнал управления ошумлением Уупр моделировался с помощью генератора случайных чисел, разработанным корпорацией Mathematica Wolfram Research [12]. На рисунке 4 показаны первые 100 значений автокорреляционной функции АКФ(τ), вычисленной на массиве Уупр с размерностью $N = 1000, 10000$ и 100000 .

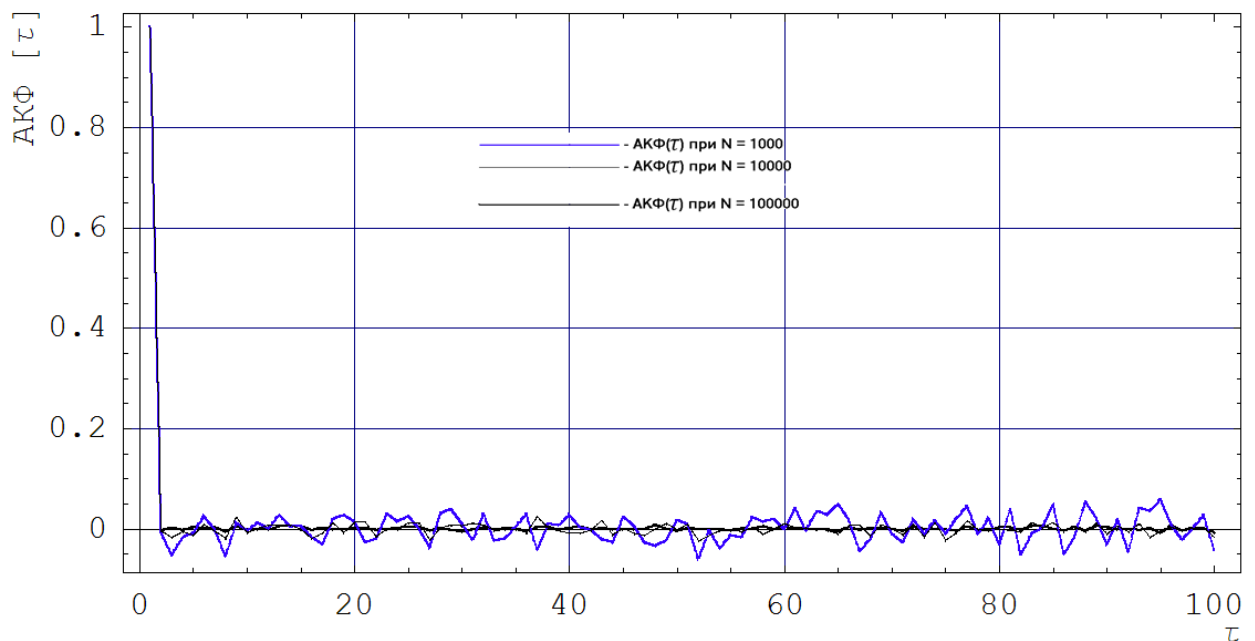


Рисунок 4 - Автокорреляционная функция, вычисленная на массиве Уупр с размерностью $N = 1000, 10000$ и 100000 .

$$\text{АКФ}(\tau) = \frac{(\sum_{i=\tau}^{i=N} (U_{\text{упр}}[i] * U_{\text{упр}}[i - \tau]))}{(\sum_{i=\tau}^{i=N} (U_{\text{упр}}[i] * U_{\text{упр}}[i]))} \quad (2)$$

Из графиков, представленных на рисунке 4 следует, что выбранный генератор случайных чисел соответствует параметрам случайной величины: амплитуды практически независимы, быстро затухают с ростом N , следовательно, параметры «ошумления» частотных подставок в моделях соответствуют характеристикам вибрационных частотных подставок с «ошумлением» реальным генератором случайных чисел с равномерной плотностью распределения значений и реальным торсионным подвесом.

При подготовке к процессу моделирования были выполнены и обоснованы следующие оценки:

- требуемых абсолютной и относительной точностей вычисления величины накопленной разности фаз (с учетом ресурсоемкости вычислений) из условия необходимости получения точными двух знаков разброса $\sigma_{\text{вых}}(T_{\text{уср}})$ и величины $\Omega_{\text{НД}}(T_{\text{уср}})$, что в числовом выражении составляет 0.0002 °/час;
- требуемого количества вычислительных экспериментов для получения $\sigma_{\text{вых}}(T_{\text{уср}})$ и величины $\Omega_{\text{НД}}(T_{\text{уср}})$, с точностью 0.0002 °/час;
- требуемого времени измерения.

Результаты оценок:

- требуемая абсолютная точность вычислений величины накопленной разности фаз встречных волн, $|\Delta(\varphi(t))| \leq 0.0027$ радиана;
- требуемая относительная точность вычислений (при измерении скорости вращения 12,4 °/час 6 минут) должна составлять величину $|\epsilon(\varphi(t))| \leq 2 \cdot 10^{-7}$;
- количество запусков для каждого нового значения время усреднения $T_{\text{уср}}$ с различными настройками генератора случайных чисел и для каждого варианта схемы возбуждения подставки должно быть не менее 163;
- оценка времени включения (с учетом случайного характера $\alpha 0$, $\alpha' 0$, $\varphi 0$) должна составлять не менее 200 периодов виброподставки или $200 \cdot 0,0025 = 0,5$ секунды.

Отдельно остановимся на необходимости учета при моделировании зависимости динамической зоны захвата от амплитуды колебаний виброподставки.

При отсутствии «ошумления» и угловых вибраций основания прибора, при стабильной ВП наблюдается хорошо выраженная, определяемая практически, зависимость динамической зоны захвата от амплитуды колебаний подставки. Эта зависимость получена приближенно, аналитически [1], и имеет вид:

$$\Omega_{\text{дин}} = \Omega_{\text{ст}} \cdot J_0(A_{\text{ВП}} \cdot MKn), \quad (3)$$

где $J_0(x)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

$A_{\text{ВП}}$ – амплитуда угловых колебаний виброподставки в радианах;

MKn – коэффициент передачи кольцевого лазера в (рад/сек)/(рад/сек).

На рисунке 5 показаны зависимости систематических составляющих выходного сигнала прибора (обусловленных нелинейностью выходной характеристики) без ошумления и с ошумлением от амплитуды возбуждающего момента и, соответственно, от амплитуды колебаний виброподставки, полученные путем численного моделирования системы (1) в среде Mathematica Wolfram Research [12]. Эти зависимости показывают насколько велико влияние «ошумления» на точность выходного сигнала прибора.

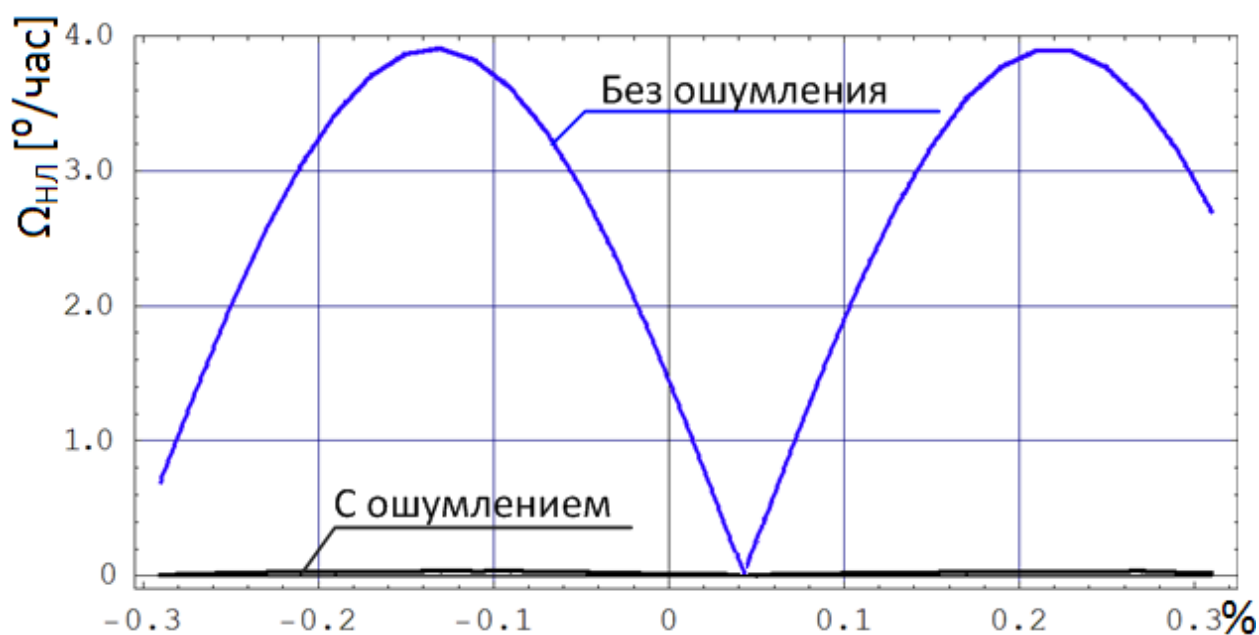


Рисунок 5 - Зависимость систематической составляющей выходного сигнала прибора без ошумления и с «ошумлением» от амплитуды угловых колебаний виброподставки, изменяемой в процентах от выбранной начальной величины, равной 1 угл. минуте.

Зависимость 2 (рисунок 5) в увеличенном масштабе представлена на рисунке 6.



Рисунок 6 - Зависимость систематической составляющей ошибки, обусловленной нелинейностью выходной характеристики, ($\Omega_{нл}(T_{уср})$ для $\Omega_{изм} = 12.4$ °/час) от амплитуды угловых колебаний виброподставки при наличии «ошумления», изменяемой в процентах от выбранной начальной величины, равной 1 угл. минуте.

Зависимость ДЗЗош выходного сигнала прибора с ошумлением от амплитуды виброподставки, представленная на рисунке 6, показывает, что величина ДЗЗош зависит от величины среднего значения амплитуды ВП в режиме «ошумления» при постоянной интенсивности «ошумления» ВП (она одинакова во всех вычислительных экспериментах и равна 10 % от амплитуды ВП). Величина ДЗЗош аппроксимируется зависимостью:

$$\Omega_{\text{дин«ош»}} \approx \Omega_{\text{ст}} * J_0(A_{\text{вп}} \cdot MKn) / K_{\text{«ош»}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{«ош»}}$ – коэффициент снижения величины динамической зоны захвата за счет использования «ошумления» подставки.

Анализ указанной зависимости приводит к необходимости того, что при проведении вычислительных экспериментов для определения погрешностей прибора ($\sigma_{\text{вых}}(\text{Туср})$ и $\Omega_{\text{нл}}(\text{Туср})$) необходимо проводить уже не 163 «замера», а $163 * N_A$, где N_A – количество различных вариантов средней амплитуды колебаний ВП. Это «удорожание» вычислительного эксперимента необходимо для усреднения «бесселевского» влияния амплитуды колебаний ВП на систематическую, обусловленную нелинейностью выходной характеристики, и разброс случайной составляющей выходного показания прибора.

С учетом выполнения перечисленных оценок проведено моделирование в системе компьютерной математики Mathematica Wolfram Research [12]. Сначала было получено эталонное решение системы уравнений (1) с числами высокой разрядности (32 значащих разряда) с точностью на 2-4 порядка выше требуемой величины. Имея эталонное решение производились решения с типовой разрядностью чисел (16 значащих разрядов), манипулируя различными параметрами решения. Таким образом, при приемлемом времени решения достигнута требуемая абсолютная и относительная точность вычислений математической модели.

Для моделирования использованы следующие параметры прибора ГЛ-2 [5,9,10]:

- $J = 0.00222 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент инерции моноблока;
- $\beta = 0.0557968 \text{ н} \cdot \text{м} \cdot \text{сек} / \text{рад}$ – коэффициент демпфирования угловых колебаний моноблока;
- $k = 14023.435 \text{ н} \cdot \text{м} / \text{рад}$ – жесткость торсионов;
- $\Omega_{\text{ст}} = 50 \text{ }^\circ / \text{час} = 2.42407 \cdot 10^{-4} \text{ рад} / \text{сек}$ – статическая зона захвата;
- $MKn = \frac{\pi}{60 \cdot 60 \cdot 57.2958} = 558140 \text{ (рад/сек) / (рад/сек)}$, коэффициент передачи кольцевого лазера, соответствует общепринятому масштабному коэффициенту МК, равному 1.161 дуг.сек/имп при чувствительности детектора 2 импульса за период;

- $\Omega_{изм} = 12.4 \text{ }^\circ/\text{час} = 12.4 \cdot (1 / (57.296 \cdot 3600)) \text{ рад/сек} = 0.000060117 \text{ рад/сек} = 6.0117 \cdot 10^{-5} \text{ рад/сек}$
- $\Omega_{изм} * MKn = 0.000060117 \cdot 558140 = 33.5537 \text{ рад/сек.}$
- $\Omega_{ст} * MKn = 2.42407 \cdot 10^{-4} \cdot 558140 = 135.297 \text{ рад/сек}$
- $R_{КИХ} = 25$ – порядок (размах) КИХ-фильтров

Вычислительные эксперименты с математической моделью (1) проводились в среде Mathematica Wolfram Research [12]. Наличие в системе (1) дифференциального уравнения разности фаз встречных волн существенно увеличивает ресурсоемкость вычислительного процесса. В связи с чем были разработаны методы оптимизации вычислений, позволившие снизить время вычислений 1630 зависимостей $\sigma_{вых}(T_{уср})$ и 1630 зависимостей $\Omega_{нл}(T_{уср})$ до 40 часов на компьютере с процессором Intel Core i7-3630QM 3.4ГГц(Turbo Boost) .

Результаты моделирования сведены в графиках рисунка 8:

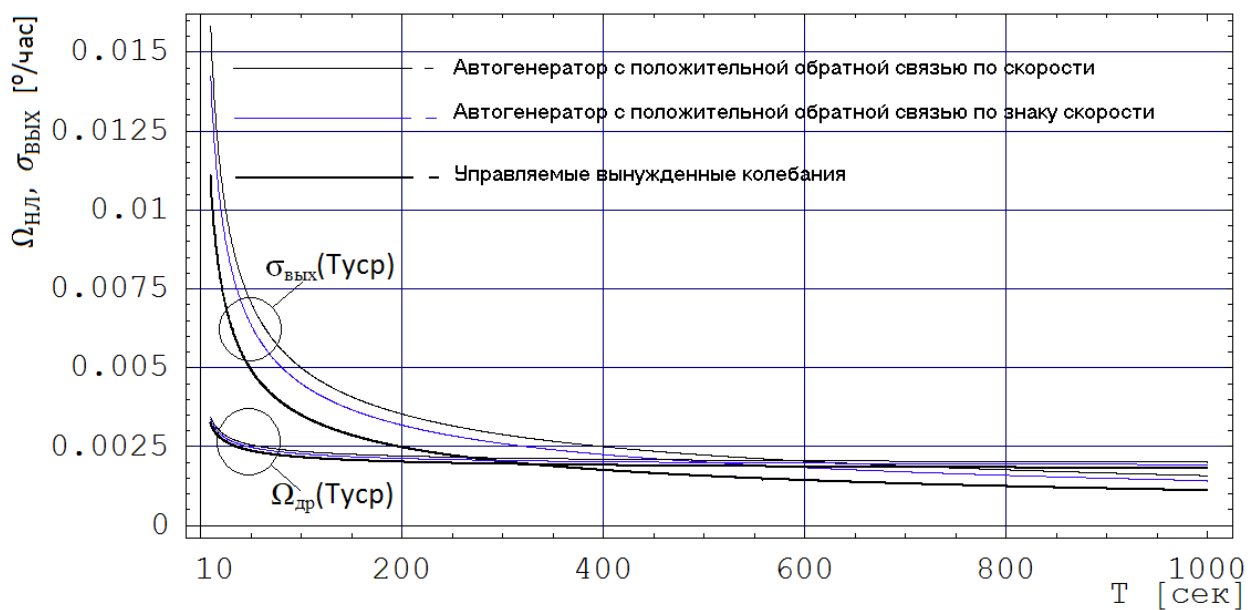


Рисунок 8 – Сравнительные зависимости $\sigma_{вых}(T_{уср})$ и $\Omega_{нл}(T_{уср})$ для трех вариантов схем возбуждения ВП.

Выводы

- 1) Показано, что при всех исследованных схемах возбуждения виброподставки в выходном сигнале прибора имеется случайная $\sigma_{вых}(T_{уср})$ и систематическая $\Omega_{нл}(T_{уср})$ составляющие погрешности;
- 2) Количественно систематические составляющие, обусловленные нелинейностью выходной характеристики $\Omega_{нл}(T_{уср})$, отличаются от схемы к

схеме незначительно, а отличие случайных $\sigma_{\text{вых}}(\text{Туср})$ при малом Туср (меньше 200 секунд) достигает 50 % и более;

- 3) Схема с управляемыми вынужденными колебаниями по параметру $\sigma_{\text{вых}}(\text{Туср})$ наиболее предпочтительна и, например, для выбранного серийного прибора составляет величину $\sigma_{\text{вых}}(\text{Туср}) = 0.0035$ °/час при времени усреднения $\text{Туср}=100$ секунд, при $\Omega_{\text{изм}} = 12.4$ °/час. Выбор такой схемы возбуждения виброподставки позволяет более чем на 70 % при времени усреднения $\text{Туср}=100$ секунд уменьшить случайную составляющую выходного сигнала лазерного гироскопа по сравнению с рассмотренными другими двумя схемами;
- 4) Для исследованных типов подставки $\sigma_{\text{вых}}(\text{Туср})$ существенно возрастает при уменьшении времени усреднения, для $\text{Туср}=10$ секунд для прибора типа ГЛ составляет величину 0.011 °/час, что значительно лучше чем для ЛГ с другими схемами виброподставки;
- 5) Систематическая составляющая погрешности, обусловленная нелинейностью выходной характеристики, для прибора типа ГЛ-2 составляет величину 0.018-0.020 °/час при времени усреднения Туср до 1000 секунд. При $\text{Туср} \rightarrow \infty$ асимптотическая зависимость указывает на наличие ненулевого предела, равного 0.0017 °/час при измеряемой угловой скорости, равной $\Omega_{\text{изм}} = 12.4$ °/час.

Список литературы

1. Ароновиц Ф.В., Лазерные гироскопы. // В сб.: Применение лазеров, пер. с англ. под ред. В.П. Тычинского, М.: «Мир» – 1974, С. 182-269.
2. Ароновиц Ф.В. Optical gyros and their application. RTO-AG-339 – 1999.
3. Бакин Ю.Б., Болотнов С.А., Людомирский М.Б., Алексейченко А.А., Лазерные гироскопы с призмами полного внутреннего отражения // в сб.: Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана – 2007.
4. Суханов С.В. Методы и алгоритмы повышения точностных характеристик лазерного гироскопа // 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и промышленности) по техническим наукам, Дис. на соискание ученой степени техн.наук.
5. Молчанов А.В. Исследование конструктивно-технологических характеристик лазерного гироскопа с целью повышения его качества // Дис. на соискание ученой степени техн.наук., «МАТИ», РГТУ им. К.Э. Циолковского.

6. Суханов С.В., Чуманкин Е.А., Халеев К.И., Мишин А.Ю., Эффективный алгоритм ошумления виброподставки лазерного гироскопа. // Мир авионики, Журнал Российского Авиаприборостроительного Альянса. – 2007. – № 2.С. 26-29.
7. Бычков С.И., Лукьянов Д.П., Бакаляр А.И., Лазерный гироскоп // М: Советское радио – 1975.
8. Енин В.Н., Лазерные гироскопы для бесплатформенных систем ориентации // Учебное пособие по курсу «Проектирование систем ориентации», МВТУ им. Н.Э. Баумана – 1988.
9. Болотнов С.А., Вереникина Н.М., Лазерные информационно-измерительные системы Часть 2 // Учебное пособие, МВТУ им. Н.Э. Баумана – 2005.
10. Болотнов С.А., Вереникина Н.М., Алексейченко А.А., Лазерные информационно-измерительные системы Часть 3 // Учебное пособие, МВТУ им. Н.Э. Баумана – 2006.
11. Корн Г., Корн Т., Справочник по математике для научных работников и инженеров, М.: Наука – 1973, С. 619,633.
12. Michael Trott, The Science and Art of Mathematica by Tim McIntyre // Science, Apple.com – 2007.
13. Айфичер Э.С., Джервис Б.У., Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание, М., «Вильямс» – 2008.