Наука и Образование МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сетевое научное издание ISSN 1994-0408

УДК 621.375.826:681.3

Цифровой автогенератор виброподставки лазерного гироскопа

Енин В.Н.^{1,*,} Санеев В.И.¹

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 05. С. 154–177.

DOI: 10.7463/0515.0766380

Представлена в редакцию: 14.04.2015 Исправлена: 24.04.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

*<u>enin@bmstu.ru</u>

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Предлагается схема построения цифрового автогенератора виброподставки (ВП) и исследуется способ управления параметрами ВП (параметрами крутильных колебаний чувствительного элемента ЛГ) с помощью широтно-импульсной модуляции сигнала управления датчиком момента (ДМ) автогенератора.

Описываются основные особенности функциональной схемы построения автогенератора и способа управления ДМ, исследуются динамические режимы работы автогенератора с помощью вычислительного эксперимента.

Изучены характер и параметры автоколебаний для обеспечения режима частотной подставки комбинированного типа с ошумлением. Влияние на параметры автоколебаний маневров объекта и вибраций основания ЛГ на «опасных» частотах.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, цифровой автогенератор, кольцевой лазер, гармоническая виброподставка, широтно-импульсная модуляция, численный метод

Введение

Точностные характеристики распространенного типа современных прецизионных лазерных гироскопов (ЛГ) с виброподставкой во многом определяются законом и параметрами угловых колебаний кольцевого лазера (КЛ) относительно основания ЛГ (вибрационная частотная подставка) [1] и точностью удаления составляющей сигнала виброподставки из выходного сигнала КЛ. Существующие автогенераторные схемы возбуждения вибрационной частотной подставки (ВЧП) ЛГ [2-4] строятся на аналоговых датчиках угловой скорости, аналоговых нелинейных преобразователях и аналоговых способах управления датчиком момента виброподставки, что вызывает существенную нестабильность амплитуды и частоты виброподставки в реальных условиях эксплуатации.

Обязательное включение в процесс измерения режима частотной подставки требует обязательного последующего исключения из выходного сигнала ЛГ составляющей, обусловленной частотной подставкой. Использование аналоговых датчиков относительного угла (или угловой скорости) не позволяет достигнуть необходимой точности подавления составляющей ВЧП [5]. Использование цифровых режекторных

фильтров требует решение таких проблем, как повышение качества подавления сигнала ВЧП при реальных параметрах нестабильности частоты (1%), увеличение коэффициента подавления фильтра при минимально допустимых фазовых искажениях [6,7]. Вышеперечисленные проблемы не позволяют обеспечить высокие точностные характеристики ЛГ на коротких интервалах измерения.

Известны два классических варианта совершенствования измерителей любых типов – конструкторско-технологический и структурно-алгоритмический [5]. Первый из них характеризуется большой трудоемкостью и себестоимостью, и в своем развитии вышел на уровень технологического насыщения (в области лазерной гироскопии). Более эффективным считается второй вариант, основанный на разработке новой структуры измерителя, позволяющей использовать цифровые методы управления режимами работы основных структурных элементов прибора и современных методах обработки информации. Этот вариант далек от насыщения, но для своего полномасштабного внедрения предполагает наличие класса цифровых инерциальных измерителей, к которым современные ЛГ нельзя отнести в полной мере.

Главная цель цикла работ, который открывает настоящая статья, показать и обосновать пути построения цифрового ЛГ с виброподставкой, что в конечном счете, позволит построить интеллектуальную измерительную систему на основе ЛГ, и существенно улучшить точностные и эксплуатационные характеристики методами и средствами современных информационных технологий.

Цель настоящей статьи – обосновать техническую возможность построения цифровой версии основного электромеханического модуля ЛГ с ВП – автогенератора ВЧП. Для этого решаются следующие задачи:

- структурное проектирование цифрового автогенератора ВЧП без аналоговых датчиков в контуре обратной связи и с импульсным управлением датчиком момента;
- исследование динамических режимов и параметров автоколебаний в режиме комбинированной частотной подставки с ошумлением;
- исследование режимов работы и параметров автоколебаний при «опасных» возмущениях обусловленных вибрациями основания и маневрами объекта.

Исследования работоспособности и динамических характеристик автогенератора с широтно-импульсным управлением датчиком момента проведены путем численного моделирования совместной работы измерительного канала ЛГ и автогенератора.

Функциональная блок-схема автогенератора и измерительного канала ЛГ

Функциональная блок-схема измерительного канала ЛГ с автогенератором с широтно-импульсным управлением датчиком момента представлена на рис 1.



Рисунок 1. Функциональная блок-схема автогенератора и измерительного канала ЛГ

Блок-схема измерительного канала ЛГ с ШИМ датчика момента ВЧП включает функциональные звенья:

– «Генератор ШИМ» - программа, реализованная в микропроцессоре, выполняющая арифметико-логические функции управления длительностью импульсов ШИМ: по сигналам положительной обратной связи и с генератора случайных чисел, предназначенного для «ошумления» ВЧП;

- моноблок с упругим торсионным подвесом;

- кольцевой лазер (КЛ);

 – схема первичной обработки информации с КЛ, состоящая из интерферометра, импульсно-фазового детектора (ИФД) и реверсивного счетчика;

– фильтр для вычитания (Фвыч) составляющей сигнала подставки;

– «Генератор тактовых импульсов» (ГТИ) – схема, генерирующая опорные тактовые импульсы с переменной частотой f₀, в N₁ большей, чем частота колебаний ВЧП;

 $-\Phi A\Pi \Psi$ – схема фазовой автоподстройки частоты ГТИ f_0/N_1 , к частоте $f_{B\Psi\Pi}$, где $f_{B\Psi\Pi}$ - частота ВЧП, температурная нестабильность которой может находиться в пределах ±1%;

- U_{УПР} – напряжение с выхода ФАПЧ, пропорциональное разности фаз (а при большой разности фаз, пропорциональное разности частот) сигналов f₀/N₁ и f_{ВЧП}, для управления частотой генерации тактовых импульсов f₀;

– «Знак(Ω_{ВЧП})» - цифровой блок (блок программы в микропроцессоре ЛГ),
 вычисляющий знак угловой скорости ВЧП;

 – U_{ПОС} – напряжение положительной обратной связи, соответствующее знаку угловой скорости ВЧП, представленное в виде импульсного сигнала например так, что сигнал «0» соответствует отрицательному значению угловой скорости, а «1» положительному;

 – фильтр для выделения (Ф_{ВЫД}) составляющей сигнала подставки из выходного сигнала ЛГ, пропорционального абсолютной угловой скорости вращения КЛ;

- делитель частоты генерации тактовых импульсов f₀ с коэффициентом деления N₂;

– частотный преобразователь выходного сигнала ЛГ $\Omega_{\rm fs}(t)_{OUT}$ с тактовой частотой следования цифровых данных fs в выходной сигнал ЛГ $\Omega(t)_{\rm BMX}$ с тактовой частотой следования данных $f_{\rm BMX}$, для частотного согласования с вычислителем последующего блока.

Работа ШИМ датчика момента автогенератора

возбуждения механических угловых колебаний моноблока (CBK) Схема воздействует на моноблок посредством пьезокерамического датчика момента или датчика другого типа. Двухполярный крутящий момент M(t), действующий на моноблок, трехпозиционен, имеет три значения: -М₀, ноль и +М₀ (рисунок 2). При отсутствии «ошумления» и U_{ПОС} длительности следования моментов Т_М равны ¹/₄ части длительности периода следования импульсов Тшим. Например, для частоты виброподставки F_{ПОД} = 400 Гц максимальное значение Т_{ШИМ} = 0,0025 сек. Для этого максимального значения периода следования импульсов T_{Mmin} = 0, для случая без «ошумления» и в отсутствии положительной обратной связи T_M = T_{MEO} = 0,000625, T_{Mmax} = 0,00125 секунд. При T_M, равном Т_{Мтах}, зависимость M(t) качественно принимает вид меандра. Т_{ШИМ} может быть только меньше или равна 1/F_{ПОД}, но обязательно кратна этому периоду. Отношение 1/F_{ПОД} к Т_{ШИМ} обозначим через N₃. На рис 2 для N₃. = 10 показана зависимость момента M(t) в процессе проведения «ошумления» виброподставки и размах временных интервалов ШИМ для $T_{\text{ШИМ}} = 0, 1/F_{\Pi O \Pi} = 0,00025 \text{сек.}$



Рисунок 2. Диапазон модуляции момента M(t) в процессе проведения «ошумления» виброподставки и размах временных интервалов ШИМ

Таким образом, выбрано симметричное расположение последовательности временных интервалов ШИМ относительно середины периода виброподставки.

«Ошумление» датчика момента реализуется путем квазислучайного формирования двух последовательностей frame_i и T_{Mi}. frame_i - последовательность кадров, состоящих из нескольких периодов виброподставки, с квазислучайным количеством периодов в кадре от 5 до 10, как это в реальных приборах. В течение одного кадра значение T_{Mi} не изменяется. Закон изменения T_{Mi} представляет собой самостоятельную квазислучайную последовательность, не связанную (не коррелирующую) с законом изменения значений последовательности frame_i. Диапазон значений T_{Mi} определяется параметром, называемом интенсивностью «ошумления» I_{OIII}, равному отношению (T_{Mmax} - T_{MEO}) / T_{MEO}, где T_{MEO} – ширина импульсов последовательности M(t) в отсутствии «ошумления», равного четверти периода подставки. I_{OIII} выражается в процентах и может принимать значения от 0 до 100%.

 $I_{OIII}=0\%$, соответствует полному отсутствию «ошумления» и сигнала обратной связи $U_{\Pi OC}$, на рис 2 этот режим выделен жирной линией.

I_{ОШ} =100%, соответствует максимально возможной интенсивности для данного режима «ошумления».

Случайность вариаций амплитуды «ошумления» в принятой модели обеспечивается генератором квазислучайных чисел [2].

Функция положительной обратной связи по знаку угловой скорости (U_{ПОС}) реализована путем добавления постоянной (в течение одного полупериода ВЧП)

составляющей ($\Delta I_{\Pi OC}$) к текущему значению I_{OIII} в последовательности формирования полупериодов $T_{IIIIMM}/2$ момента M(t). Дополнительная составляющая $\Delta I_{\Pi OC}$ приводит к асимметричности (относительно $T_{IIIIMM}/2$) изменения интервалов T_{M_1} и T_{M_2} так, что уменьшение интервала T_{M_1} , например, на $\Delta I_{\Pi OC} = 1\%$ приводит в увеличению интервала T_{M_2} на такую же величину, равную $\Delta I_{\Pi OC} = -1\%$ от его номинального значения.



Рисунок 3. Последовательность временных интервалов ШИМ, поясняющая связь между T_{Mi} и frame_i в процессе проведения «ошумления» виброподставки: а) «ошумления» нет, б) зависимость величины момента M(t) в режиме «ошумление»

Выше описан один вариантов возбуждения комбинированной ВЧП с импульсным управлением ДМ с помощью цифрового управляющего сигнала. Программным способом без аппаратных доработок можно переводить автогенератор на любой другой режим возбуждения ВЧП в зависимости от параметров движения объекта.

Детальное описание возможных технических решений ШИМ для управления различными объектами представлены, например в [8-10].

Полнофункциональная математическая модель измерительного канала ЛГ

Полнофункциональная математическая модель измерительного канала ЛГ, соответствующая блок-схеме на рис 1, имеет вид

$$\begin{cases} J(\alpha''(t) + \Omega' \text{изм} + \Omega' \text{виб}) + \beta(t) \alpha'(t) + k \alpha(t) = \text{MBH}(t) \\ \varphi'(t) + \Omega cm * \text{MK} \pi * Sin(\varphi(t)) = (\alpha'(t) + \Omega u_{3M} + \Omega \text{BH}) * \text{MK} \pi \\ \text{Npc}(t) = \begin{cases} \pi * \text{Floor}\left(\frac{\varphi(t)}{\pi}\right), \text{если } \varphi'(t) > 0 \\ \pi * \text{Ceiling}\left(\frac{\varphi(t)}{\pi}\right), \text{если } \varphi'(t) \le 0, \\ \alpha(t_i)_{13B} = \sum_{j=i-M-1}^{j=i} \text{Npc}(t_i), \\ \Omega(t_i)out = \Omega(t_i)_{23B} = \sum_{j=i-M-1}^{j=i} \Omega(t_i)_{13B}, \\ f_0(t_i) = \sum_{j=i-K-2}^{j=i-1} q(j-i+1)f_0(t_i) - \sum_{j=i-K-1}^{j=i} g(j-i) * N1 * f_{B'III}(t_i). \end{cases}$$
(1)

В модели (1) приняты обозначения:

J – момент инерции моноблока КЛ;

 $\alpha(t)$ – угол поворота моноблока относительно основания прибора;

Ωизм – измеряемая угловая скорость;

Ωвибр(t) – угловая скорость вибрации основания ЛГ;

β(t) – коэффициент демпфирования угловых колебаний моноблока;

k – жесткость торсионов;

Мвн(t) – вращающий момент датчика момента (рис 1,2, 3);

 $\phi(t)$ – разность фаз встречных волн в КЛ;

Ωст – статическая зона захвата;

МКп - коэффициент передачи кольцевого лазера;

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

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

Npc(t) – цифровое выражение количества импульсов, накопленное за интервал времени, равном 1/fs;

 $\Omega(t_i)_{1_{3B}}$ – i-е выходное значение первого звена фильтра вычитающего подставку, являющееся входным значением для 2-го звена этого фильтра;

 $\Omega(t_i)out$ – i-е выходное значение фильтра вычитающего подставку, одновременно являющееся выходным значением прибора;

 $f_{B \Psi \Pi}(t_i)$ – частота ВЧП, в процессе работы прибора меняется в пределах ±1%, зависит от изменяющегося значения $\beta(t)$;

 $f_0(t_i)$ – управляемая частота ГТИ

q(j) и g(j) - коэффициенты БИХ-фильтра.

Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана

Характеристики звеньев функциональной блок-схемы

Частота ГТИ $f_0(t_i)$ следящей схемой ФАПЧ в процессе работы прибора поддерживается равной $f_{BYII}(t_i) * N1$.

В качестве цифрового фильтра для вычитания (подавления) составляющей от виброподставки используется два включенных последовательно КИХ-фильтра на скользящих средних, разностное уравнение которых имеет вид

$$\Psi_{i} = (1/(M+1)\sum_{0}^{M} Npc(t_{i-k})$$
⁽²⁾

АЧХ для вычитания составляющей виброподставки представлена [11] на рисунке 4.



Рисунок 4. АЧХ КИХ-фильтра 25-го порядка для вычитания подставки, настроенного на подавление частоты 400 Гц при частоте следования цифровых данных fs = 10 кГц

Амплитудно-частотная характеристика фильтра для выделения составляющей сигнала ВЧП представлена на рис.5.



Рисунок 5. АЧХ фильтра для выделения подставки, настроенного на выделение частоты 400 Гц

В цифровой реализации [11] этот БИХ-фильтр с передаточной функцией $W(s) = s^2/(1+s/10+s^2)^2$ имеет на частоте fs = 10 кГц и частоте следования цифровых данных $\Omega_{BЧ\Pi}$, следующие коэффициенты:

a = 0, 0149324575, 0, -0,029864915, 0, 0,0149324575;

b = 1, -3, 82827336, 5, 61503986, -3, 73471156, 0, 951717924.

Программа микропроцессора на основе рассчитанных коэффициентов а и b будет выполнять следующие действия:

 $Y_n = 0.0149324575 * X_n - 0.029864915 * X_{n-2} + 0.0149324575 * X_{n-4}$

где X_n – входные сигналы фильтра, Y_n - выходные.

В предлагаемой схеме прибора (рис 1) базовая тактовая частота ГТИ f_0 переменна, в N₁ раз больше частоты ВЧП, в процессе работы прибора изменяется в диапазоне ±1% от номинально значения 400*N₁ для ВЧП с номинальной частотой 400 Гц и с диапазоном изменения ±1%. Это дает возможность существенно снизить требования к фильтрам, вычитающим и выделяющим подставку, настроить их не на полосу подавления, а на «точку», то есть на одну частоту подавления, если для всех частот изменения частоты ВЧП обеспечить высокую точность регулирования отношения $f_0/fBЧП$. Эту задачу решает схема регулирования частоты f_0 ГТИ, построенная на основе ФАПЧ. Детальное описание и исследование точностных характеристик схемы регулирования частоты выходит за рамки настоящей статьи. На практике ФАПЧ целесообразно строить в цифровом виде. Цифровые системы ФАПЧ хорошо изучены и подробно описаны, например, в [12,13].

Параметры и особенности моделирования

Для моделирования использованы следующие параметры прибора типа ГЛ [4,14,15]: J = 0,00222 кг·м²; β = 0,0558 н·м·сек/рад; k = 14023 н·м/рад для моноблока с номинальной частотой собственного резонанса 400 Гц с добротностью угловых колебаний 100; Ω ст=150 °/час = 7,272·10⁻⁴ рад/сек, МКп = 558140 (рад/сек)/(рад/сек); Ω изм = 5 °/час = 2,424*10⁻⁵ рад/сек; N₁=16384; N₂=512; N₃=32.

Вычислительные эксперименты с математической моделью (1) проводились в среде Mathematica Wolfram Research [16]. Наличие в системе (1) нелинейного дифференциального уравнения разности фаз встречных волн существенно увеличивает ресурсоемкость вычислительного процесса, в связи чем уделялось особое внимание достижению требуемой относительной точности вычислений [4]. Широтно-импульсная модуляция величины датчика момента виброподвеса в процессе вычислительного эксперимента реализована методом разбиения на временные интервалы, на границах которых происходит скачок Мвн(t), действующего на моноблок. Вращающий момент Mвн(t) имеет три значения $-M_0$, ноль и $+M_0$. Запуск вычислительного процесса происходит каждый раз, как только изменяется значение вращающего момента Mвн(t) и длится ровно столько, сколько Mвн(t) остается неизменным. После остановки вычислительного процесса запоминаются $\alpha(t\kappa)$, $\alpha'(t\kappa)$ и $\phi(t\kappa)$, которые потом используются в качестве начальных условий для запуска следующего интервала численного решения с новым значение Mвн(t).

Переходные процессы после включения автогенератора

Моделирование переходного процесса после включения автогенератора с нулевыми начальными значениями переменных ($\alpha(t)$, $\varphi(t)$, Ω вибр(t), и f₀(t) для t=0) показывает отсутствие старта работы. При наличии одного импульса на выходе измерительного канала автогенератор возбуждается и за доли секунды выходит на установившееся значение (рис 7). Зависимость угла поворота моноблока относительно основания прибора $\alpha(t)$ в переходном процессе в этом случае показана на рис 6,7.



Рисунок 6. Зависимость $\alpha(t)$ в переходном процессе после включения в интервале от 0 до 0,1 сек (ошумление отсутствует, основание ЛГ неподвижно)



Рисунок 7. Зависимость $\alpha(t)$ в переходном процессе после включения в интервале от 0 до 0,5 сек (ошумление отсутствует, основание ЛГ неподвижно)

Для надежного запуска автогенератора виброподставки (при отсутствии генерации кольцевого лазера), параметры ГУН следует установить таким образом, чтобы при любом значении Uynp частота ГУН лежала в диапазоне f0±3%.

Режим ошумления виброподставки.

Влияние «ошумления» на параметры автоколебаний покажем для случая максимально возможной амплитуды «ошумления» (точнее, среднеквадратичной ее величины), которая обеспечивается при значении постоянной І_{ОШ}, равной 100%. Числа в кадре периодов ВЧП с постоянной последовательностью «ошумляющих» воздействий (frame_i) выбраны квазислучайными в диапазоне от 2 до 7, а периоды каждого «ошумляющего» воздействия находятся в диапазоне от 1/40 до 1/20 секунды, что соответствует диапазону частот от 20 до 40 Гц.

Временная функция управляющего «ошумляющего» воздействия входной величины на датчик момента получена путем обработки и цифровой аппроксимации выходной псевдослучайной последовательности генератора случайных чисел. В пересчете на амплитуду угловых колебаний ВЧП полученная временная управляющая функция имеет спектральную плотность, представленную на рис 8.



Рисунок 8. Спектральная плотность амплитуды временной функции управляющего «ошумляющего» воздействия



Динамика колебаний по углу $\alpha(t)$ представлена на рис 9-10.

Рисунок 9. Зависимость $\alpha(t)$ для t=0-0,5 сек при ошумлении



Рисунок 10. Зависимость $\alpha(t)$ для t=0-10 сек при ошумлении

Среднеквадратичное отклонение частоты ВЧП от 400 Гц, вызванное «ошумлением» ВЧП, определено путем прямого вычисления этого значения по зависимости, представленной на рис. 11. Эта величина равна 0,34 Гц. Спектральная плотность отклонения частоты ВЧП от 400 Гц представлена на рис 12.



Рисунок 11. Зависимость частоты $f_{B\Psi\Pi}(t)$ для t=0-10 сек. при ошумлении



Рисунок 12. Спектральная плотность отклонения частоты ВЧП от 400 Гц при ошумлении

Для вычисления среднеквадратического отклонения амплитуды ВЧП при ошумлении от чистого гармонического колебания с амплитудой 5 угл. минут, была построена опорная функция $\Psi_{O\Pi}(t)$ (рис 13).



Рисунок 13. Угол поворота $\alpha(t)$ моноблока относительно основания прибора и опорная функция $\Psi_{OII}(t)$

Для этого для всех квазипериодов уголf поворота $\alpha(t)$ найдены точки пересечения оси абсцисс t1 и t2 и построена функция $\Psi_{OII}(t) = 5*Sin((t-t1)*2*\pi/(t2-t1))$. Разница функций $\alpha(t)$ и $\Psi_{OII}(t)$ является результатом «ошумления» ВЧП по амплитуде (рис 14).



Рисунок 14. «Ошумление» ВЧП по амплитуде - зависимость ($\alpha(t)$ - $\Psi_{O\Pi}(t)$)

Среднеквадратическое значение отклонение амплитуды ВЧП от номинального $\Psi_{O\Pi}(t)$, вызванное «ошумлением» ВЧП, равно 0,074 угл.мин что составляет 2,1% от эффективного значения амплитуды ВЧП, равного 5/ $\sqrt{2} \approx 3,54$ угл.мин.

Спектральная плотность «ошумления» ВЧП по амплитуде представлена на рис 15



Рисунок 15. Спектральная плотность «ошумления» ВЧП по амплитуде

Исследование работы автогенератора в жестких условиях эксплуатации

Жесткие условия эксплуатации определены следующим образом:

- объект маневрирует с частотой 1 Гц и переменной амплитудой, начиная с 200 °/сек, возрастающей на 40 °/сек за каждую секунду, так, что за 10 секунд набирает амплитуду 600 °/сек (рис.16);

- основание ЛГ вибрирует на частоте, близкой к частоте ВЧП, например, с частотой 405 Гц и амплитудой 0,3 °/сек.



Рисунок 16. Угловая скорость вращения основания ЛГ при маневре объекта

Переходной процесс установления автоколебаний при высокоскоростном маневре представлен на рис.17 при t=0-0,5 сек., а при t=0-10 сек. на рис. 18.





Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана







Рисунок 19. Зависимость $\alpha(t)$ для t=9,95-10 сек (увеличенный фрагмент рис 18)

Зависимость частоты $f_{B \Psi \Pi}(t)$ для t=0-10 сек. при высокоскоростном маневре представлена на рисунке 20.



Рисунок 20. Зависимость частоты $f_{BHII}(t)$ для t=0-10 сек при высокоскоростном маневре

Для случая угловых вибраций основания ЛГ на частоте, близкой к частоте ВЧП, зависимость угла поворота моноблока относительно основания и зависимость частоты ВЧП от времени имеют вид, представленный на рис.21, 22.



Рисунок 21. Зависимость $\alpha(t)$ для t=0-10 сек при угловой вибрации основания на частоте 405Гц



Рисунок 22. Зависимость частоты $f_{BHII}(t)$ для t=0-10 сек при угловой вибрации основания на частоте 405 Гц

Результаты моделирования показывают, что предложенная автогенераторная схема с широтно-импульсным управлением датчиком момента работает устойчиво при резких угловых маневрированиях объекта и при угловых вибрациях на частоте, близкой к частоте виброподставки. В рассмотренной схеме ЛГ большинство функций могут быть реализованы программно в микропроцессоре, сокращая тем самым затраты на монтаж, наладку и тестовые испытания электронных вариантов. Это функция формирования ШИМ величины датчика момента, функция формирования сигнала «ошумления», сигнала положительной обратной связи, выделения знака $\Omega_{\rm BHR}$, функций выделения и вычитания подставки и ФАПЧ. Перенос значительного числа функций в программную реализацию в микропроцессоре снижает трудоемкость изготовления и наладку прибора, повышает адаптивность в процессе эксплуатации к режимам движения объекта и сокращает затраты на проведение экспериментальных исследований с целью повышения точности прибора.

Для тех вариантов применения прибора, в которых энергопотребление не столь критично, и есть возможность установки в прибор высоко производительного микропроцессора, перенос функций ГТИ, делителя частоты $1/N_2$ и преобразователя fs в $f_{\rm BbIX}$ в микропроцессор превращает ЛГ в прибор с полномасштабным цифровым управлением.

Выводы

 Разработана структурная схема автогенератора виброподставки ЛГ. Основными особенностями автогенератора является исключение из состава аналоговых датчиков угла (или угловой скорости), выделение составляющей сигнала ВП из выходного информационного сигнала чувствительного элемента с помощью

Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана

цифрового фильтра, формирование сигнала положительной обратной связи по знаку относительной угловой скорости автоколебаний, широтно-импульсное управление ДМ с помощью цифрового сигнала, обеспечивающего заданный режим комбинированной ВП с ошумлением.

- 2) С помощью вычислительного эксперимента проведено исследование работы автогенератора в различных режимах.
 - 2.1) Исследован переходной процесс возбуждения автоколебаний после включения «без ошумления». Для выбранных параметров ЛГ автогенератор выходит в установившийся режим с заданными параметрами 400Гц, 5 угл.мин.
 - 2.2.) Исследована динамика автоколебаний в режиме комбинированной виброподставки с ошумлением. Выбранный режим широтно-импульсного управления ДМ вызывает ошумление автоколебаний по амплитуде и частоте. Максимальное отклонение частоты от заданной величины (400Гц) лежит в диапазоне плюс минус 0,6 Гц, максимальная величина спектральной плотности лежит в диапазоне частот (15-40)Гц. Максимальное отклонение амплитуды ВЧП от заданной величины лежит в диапазоне 0 0,24 угл.минуты, эффективное значение составляет 2% от эффективного значения гармонической амплитуды ВЧП, спектральная плотность ошумления по амплитуде ограничена диапазоном частот (0-40)Гц.
- 3) Исследована динамика автоколебаний в «жестких» режимах эксплуатации маневр объекта с высокими скоростями и ускорениями, вибрация основания ЛГ с частотой близкой к собственной частоте автоколебаний и показана устойчивая работа автогенератора с заданными параметрами по амплитуде и частоте.
- 4) Обоснована практическая возможность построения цифрового автогенератора виброподставки ЛГ без использования специальных датчиков угла вибрации и угловой скорости, обеспечивающего заданные параметры виброподставки.

Список литературы

- Aronowitz F. Fundamentals of the ring laser gyro // Optical gyros and their application. RTO-AG-339 / ed. by D. Loukianov, R. Rodloff, H. Sorg, B. Stieler. RTO/NATO, 1999. Art. no. 3, pp. 3-1 – 3-45.
- 2. Суханов С.В. Методы и алгоритмы повышения точностных характеристик лазерного гироскопа: дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2009. 136 с.
- 3. Tazarates D.A., Mark J.G., Ebner R.E. Dither drive system for ring laser gyroscope: patent GB 2233145. 1991.
- Енин В.Н., Людомирский М.Б., Санеев В.И. Погрешности лазерного гироскопа при различных схемах возбуждения виброподставки с «ошумлением» // Инженерный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 12. Режим доступа: <u>http://engbul.bmstu.ru/doc/622102.html</u> (дата обращения 01.04.2015).

- 5. Чесноков Г.И., Поликовский Е.Ф., Молчанов А.В., Кремер В.И. Некоторые пути улучшения тактико-технических характеристик бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Х Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: матер. 2003. С. 155-164.
- 6. Кузнецов А.Г., Молчанов А.В., Чиркин М.В., Измайлов Е.А. Прецизионный лазерный гироскоп для автономной инерциальной навигации // Квантовая электроника. 2015. Т. 45, № 1. С. 78-88.
- 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 (Санкт-Петербург, 26-28 мая 2014 г.): матер. 2014. С. 327-329.
- 8. Гавриш П.Е. Энергопреобразующая аппаратура силовых гироскопических приборов космических аппаратов: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2012. 156 с.
- 9. Милешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
- 10. Соловьев В.А. Непрерывное токовое управление вентильными двигателями. М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2004. 264 с.
- 11. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов: пер. с англ. М.: Техносфера, 2010. С. 139-144. (Сер. Мир электроники).
- Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А., Карякин В.Л. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации / под ред. В.В. Шахгильдяна. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Радио и связь, 1989. 320 с.
- 13. Шахтарин Б.И., Иванов А.А. Сравнитильный анализ цифровых систем синхронизации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2007. № 1. С. 24-37.
- 14. Болотнов С.А., Вереникина Н.М., Алексейченко А.А. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на лазерных гироскопах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2007. № 3. С. 37-43.
- 15. Лукьянов Д., Филатов Ю., Голяев Ю., Курятов В., Виноградов В., Шрайбер К.-У., Перлмуттер М. 50 лет лазерному гироскопу. Ч. 2 // Фотоника. 2014. № 2. С. 20-37.
- 16. McIntire T. The Science and Art of Mathematica (about Michael Trott) // Apple science profile, 2007. Available at: <u>http://www.apple.com/science/profiles/trott/index.html</u>

Science & Education of the Bauman MSTU

Electronic journal ISSN 1994-0408 Science and Education of the Bauman MSTU, 2015, no. 05, pp. 154–177.

DOI: 10.7463/0515.0766380

Received:	14.04.2015
Revised:	24.04.2015

© Bauman Moscow State Technical Unversity

Digital Auto-Oscillator of a Dithering Ring Laser Gyro

V. N. Enin^{1,*}, V.I. Saneev¹

*<u>enin@bmstu.ru</u>

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: ring laser gyroscope, RLG, digital auto-oscillator, ring laser, harmonic dither, pulse-width modulation, numerical method

This paper presents a digital auto-oscillator for mechanically dithering Ring Laser Gyro (RLG) and method for automatic control of angular oscillation parameters of inertial sensor. A drive signal pulse-width modulation of the auto-oscillator torque sensor excites angular oscillations.

Digital auto-oscillator circuit features are as follows: excluding the analog angle sensors from RLG structure, dither signal remover at the RLG output is digital filter, angular rate positive feedback, pulse-width control of auto-oscillator torque sensor by digital signal which provides a preset mode of the dither with random noise.

The paper presents a designed mathematical model of the RLG measurement channel together with the auto-oscillator. The mathematical model includes two nonlinearities. The computational experiment allowed us to conduct the following researches: transition process of establishing auto-oscillations since switching on, quasi-steady auto-oscillation mode with frequency and amplitude noise, parameters of auto-oscillations affected by severe operating conditions such as object maneuvers at high speeds and accelerations, high-frequency angular vibration of the RLG base near the resonance frequency of a dither remover. The paper shows efficiency of autooscillator with the specified parameters of a combined type dither with frequency fluctuations.

References

- 1. Aronowitz F. Fundamentals of the ring laser gyro. In: Loukianov D., Rodloff R., Sorg H., Stieler B., eds. *Optical gyros and their application. RTO-AG-339.* RTO/NATO, 1999, art. no. 3, pp. 3-1 3-45.
- 2. Sukhanov S.V. *Metody i algoritmy povysheniya tochnostnykh kharakteristik lazernogo giroskopa. Kand. diss.* [Methods and algorithms of improving the accuracy characteristics of a laser gyroscope. Cand. diss.]. N. Novgorod, 2009. 136 p. (in Russian).
- 3. Tazarates D.A., Mark J.G., Ebner R.E. *Dither drive system for ring laser gyroscope*. Patent GB, no. 2233145, 1991.

- 4. Enin V.N., Lyudomirskii M.B., Saneev V.I. Errors of a laser gyroscope at different excitation schemes of vibro supports with amplitude-modulation noise. *Inzhenernyi vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Engineering Herald of the Bauman MSTU*, 2013, no. 12. Available at: <u>http://engbul.bmstu.ru/doc/622102.html</u>, accessed 01.04.2015. (in Russian).
- 5. Chesnokov G.I., Polikovskii E.F., Molchanov A.V., Kremer V.I. Some ways to improve the performance characteristics of strapdown inertial navigation systems. 10 Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam: mater. [Proc. of the 10 St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems]. 2003, pp. 155-164. (in Russian).
- Kuznetsov A.G., Molchanov A.V., Chirkin M.V., Izmailov E.A. Precise laser gyroscope for autonomous inertial navigation. *Kvantovaya elektronika*, 2015, vol. 45, no. 1, pp. 78-88. (English version of journal: *Quantum Electronics*, 2015, vol. 45, no. 1, pp. 78-88. DOI: <u>10.1070/QE2015v045n01ABEH015420</u>).
- Chirkin M.V., Mishin V.Yu., Morozov D.A., Golovan A.A., Molchanov A.V. Filtration of output signals of triad laser gyroscopes. 21 Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam: mater. [Proc. of the 21 St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems], St. Petersburg, 26-28 May 2014, pp. 327-329. (in Russian).
- 8. Gavrish P.E. *Energopreobrazuyushchaya apparatura silovykh giroskopicheskikh priborov kosmicheskikh apparatov. Kand. dis.* [Energy conversion equipment of power gyroscopic devices of spacecraft. Cand. diss.]. Tomsk, 2012. 156 p. (in Russian).
- 9. Mileshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor converter equipment]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 632 p. (in Russian).
- 10. Solov'ev V.A. *Nepreryvnoe tokovoe upravlenie ventil'nymi dvigatelyami* [Continuous current control of brushless motors]. Moscow, Kosygin MGTU Publ., 2004. 264 p. (in Russian).
- Kester W., ed. *Mixed-Signal and DSP Design Techniques*. Analog Devices Inc, 2000. (Russ. ed.: Kester W. *Proektirovanie sistem tsifrovoi i smeshannoi obrabotki signalov*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2010, pp. 139-144.).
- 12. Shakhgil'dyan V.V., Lyakhovkin A.A., Karyakin V.L. *Sistemy fazovoi sinkhronizatsii s elementami diskretizatsii* [Phase synchronization systems with elements of sampling]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 320 p. (in Russian).
- 13. Shakhtarin B.I., Ivanov A.A. Comparative Analysis of Digital Synchronization Systems. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering, 2007, no. 1, pp. 24-37. (in Russian).
- 14. Bolotnov S.A., Verenikina N.M., Alekseichenko A.A. Strap-down Inertial Navigatiion System with Laser Gyroscopes. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie = Her-*

ald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering, 2007, no. 3, pp. 37-43. (in Russian).

- 15. Luk'yanov D., Filatov Yu., Golyaev Yu., Kuryatov V., Vinogradov V., Shraiber K.U., Perlmutter M. Laser Gyroscope Is 50 Years Old. Part 2. *Fotonika = Photonics*, 2014, no. 2, pp. 20-37. (in Russian).
- 16. McIntire T. *The Science and Art of Mathematica (about Michael Trott)*. Apple science profile, 2007. Available at: <u>http://www.apple.com/science/profiles/trott/index.html</u>