

УДК 681.5.08

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА В СРЕДЕ SIMULINK**Д.В.Поляков, К.Г.Лукин, М.Н.Петров***Институт электронных и информационных систем НовГУ, Mikhail.Petrov@novsu.ru*

Описана методика синтеза математической модели волоконно-оптического гироскопа VG910Q в среде Simulink. Экстракция параметров модели гироскопа выполнена на базе статистической обработки экспериментальных данных. Адекватность полученной модели подтверждена с помощью непараметрического критерия Уэлча.

Ключевые слова: *имитационная модель, волоконно-оптический гироскоп, критерий Уэлча*

The method of simulation model synthesis of fiber-optic gyroscope VG910Q in the medium Simulink is described. The extraction of the gyroscope model parameters run from statistical analysis of experimental data. The model adequacy is confirmed by non-parametric Welch criterion.

Keywords: *simulation model, fiber-optic gyroscope, Welch criterion*

Введение

Волоконно-оптические гироскопы являются основным элементом современных инерциальных навигационных систем (ИНС), используемых для определения координат и параметров движения различных объектов. Традиционно такого рода навигация используется в морских, воздушных и космических аппаратах. Это связано с тем, что инерциальная навигационная система способна при необходимости автономно, без привлечения внешних источников (например, сигналов со спутников или радиомаяков), выдавать навигационную информацию.

В состав ИНС входит блок, называемый инерциальным измерительным модулем, основными элементами которого являются датчики линейного ускорения (акселерометры) и угловой скорости (как правило, гироскопы), а также вычислитель, в котором реализуется навигационный алгоритм. Поэтому разработка ИНС требует привлечения средств системно-

го проектирования для реализации имитационных моделей всех элементов системы.

В данной статье рассмотрен процесс разработки модели волоконно-оптического гироскопа в среде Simulink.

1. Средства системного моделирования

В настоящее время существует ряд пакетов визуального моделирования [1]. Все они позволяют создавать многоуровневые иерархические системы и представляют пользователю большой набор средств для визуализации процесса моделирования. Отличительная особенность имитационной модели от других абстрактных типов моделей заключается в том, что в имитационной модели сохранены и легко узнаваемы такие особенности моделируемой системы, как структура, связи между компонентами, информационные каналы.

В данной работе для разработки модели волоконно-оптического гироскопа использована система Simulink [2]. Преимущество этой системы над други-

ми пакетами моделирования заключается в том, что она имеет непосредственную интеграцию с пакетом Matlab, что в свою очередь позволяет использовать огромное количество методов, функций, алгоритмов, а также способов визуализации результатов работы модели.

2. Технические характеристики гироскопа

В основе работы интерференционного волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) лежит эффект Саньяка, сущность которого заключается в возникновении разности времен обхода оптического контура электромагнитными волнами (светом), распространяющимися по контуру в противоположных направлениях, если он вращается в инерциальном пространстве. В результате разность времен трансформируется в разность фаз этих волн. Благодаря этому ВОГ отличается от классических типов гироскопов тем, что не имеет вращающихся частей. Поэтому данный тип датчиков относится к числу самых надежных приборов при их эксплуатации в системе. К другим достоинствам ВОГ следует отнести небольшие габариты и относительно невысокую стоимость.

При проектировании подсистемы гиростабилизации была выбрана модель ВОГ ВГ910Q, параметры которого отвечали требованиям, предъявляемым к проектируемой системе.

Технические характеристики гироскопа ВГ910Q («Физоптика»):

диапазон измеряемых скоростей — 150 град/с,
масштабный коэффициент (МК) $k(T)$ — 7 мВ/град/с,
рабочая полоса частот — 0 ... 0,45 кГц,
угловой случайный дрейф — 0,04 град/ $\sqrt{ч}$,
дрейф нуля (1σ) — 10 град/ч,
стабильность МК (1σ) — 0,1%.

3. Разработка алгоритмической модели ВОГ

Выходной сигнал гироскопа содержит мультипликативную и аддитивную погрешности. Мультипликативная погрешность вызвана температурными искажениями масштабного коэффициента. Аддитивная погрешность связана с наличием двух факторов, чувствительных к температуре: сигналом дрейфа нуля и шума.

Выходной сигнал гироскопа в общем виде можно представить так:

$$U_{out} = k(T) \cdot \omega + U_d(T) + N(T), \quad (*)$$

где U_{out} — выходное напряжение гироскопа, В; $U_d(T)$ — дрейф нулевого значения выходного сигнала, В; $k(T)$ — масштабный коэффициент гироскопа, В/град/с; ω — измеряемая угловая скорость, град/с; $N(T)$ — шум гироскопа, В.

Как видно из (*), все коэффициенты модели зависят от температуры.

Для данного типа датчиков температурная погрешность масштабного коэффициента на порядок меньше аддитивных погрешностей. Поэтому при синтезе имитационной модели ВОГ мультипликативной составляющей погрешности можно пренебречь, и в качестве масштабного коэффициента использована величина, определяемая из экспериментальных дан-

ных как наклон зависимости $U_{out}(\omega)$, приведенной на рис.3.

Для моделирования вклада двух аддитивных составляющих погрешности (дрейфа нуля и шума гироскопа) их необходимо разделить. Для этого использовано допущение, что среднее значение шумовой составляющей равно нулю. В этом случае отличное от нуля значение среднего можно интерпретировать как величину дрейфа нуля.

Для получения количественной оценки параметров температурной зависимости шума гироскопа и дрейфа нуля были проведены экспериментальные исследования выходного сигнала гироскопа от температуры.

Для моделирования эффекта температурной зависимости дрейфа нуля использована аппроксимация среднего значения выходного сигнала гироскопа U_{out} полиномом второй степени. Ниже приведены аппроксимирующие полиномы для выборки трех гироскопов ВГ910Q:

$$U_{d1}(T) = 1,023 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 2,616 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000307,$$

$$U_{d2}(T) = 0,853 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 7,483 \cdot 10^{-6} \cdot T - 0,000002,$$

$$U_{d3}(T) = 3,049 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 3,178 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000071,$$

где T — значение температуры согласно показаниям внутреннего температурного датчика гироскопа.

Для построения модели шума гироскопа использовано выражение (*) для $\omega = 0$:

$$N(T) = U_{out} - U_d(T).$$

Анализ полученной в соответствии с приведенным выражением гистограммы распределения шумового сигнала реального гироскопа для $T = 48^\circ\text{C}$ (рис.1) показывает хорошее соответствие с аппроксимирующим ее нормальным законом распределения. Гипотеза о нормальном законе распределения подтверждается критерием согласия Пирсона. Поэтому для моделирования закона распределения шумового сигнала при заданной температуре достаточно задать величину среднеквадратичного отклонения (СКО) σ .

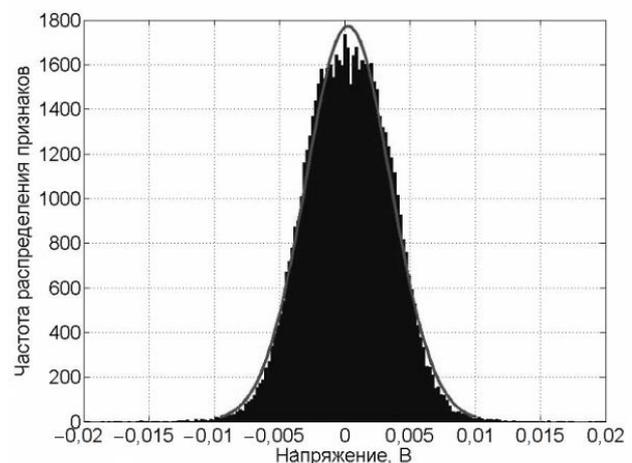


Рис.1. Гистограмма распределения шумового сигнала реального гироскопа для $\omega = 0$ и $T = 48^\circ\text{C}$ и ее аппроксимация нормальным законом

Для получения аппроксимирующих температурных зависимостей СКО были выполнены эксперименты для выборки из трех гироскопов в диапазоне

температур от 25°C до 48°C. Получены следующие результаты:

$$\sigma_1(T) = 4,26 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000012;$$

$$\sigma_2(T) = 1,77 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000037;$$

$$\sigma_3(T) = 2,45 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,000061.$$

4. Реализация имитационной модели ВОГ

На базе приведенного алгоритма средствами Simulink разработана имитационная модель ВОГ, представленная на рис.2.

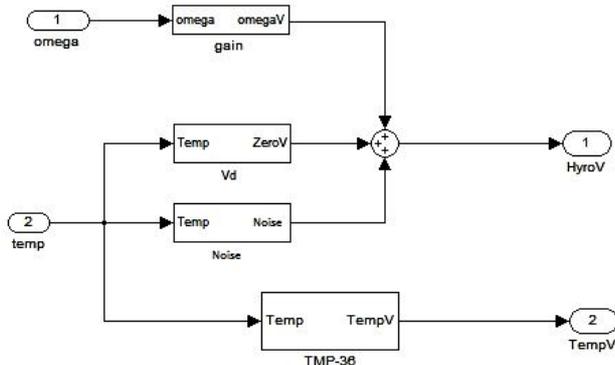
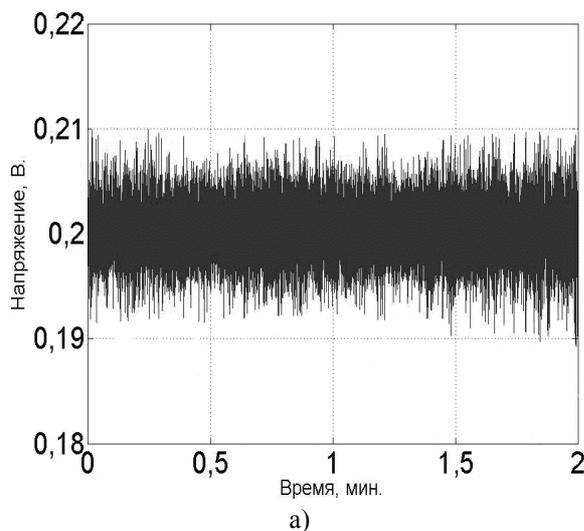


Рис.2. Блок-диаграмма имитационной модели гироскопа: omega, temp — входные порты модели; HyroV, TempV — выходные порты модели; Vd — блок, используемый для моделирования температурной зависимости дрейфа нуля; Noise — блок, имитирующий температурный шум гироскопа; gain — блок, реализующий зависимость напряжения гироскопа от угловой скорости; TMP-36 — температурный датчик (градуировочная шкала)

5. Экспериментальная проверка модели

Для проверки адекватности разработанной модели результаты имитационного моделирования сравнивались с сигналом реального гироскопа, установленного на вращающейся платформе стенда. Измерения проводились в диапазоне рабочих температур от 20°C до 48°C. Результаты эксперимента записывались в Matlab.



На рис.3 представлены экспериментальные характеристики гироскопа при изменении угловой скорости платформы от 0 до 50 град/с. На рис.4 приведены экспериментальные и смоделированные характеристики гироскопа как функции времени при фиксированном значении угловой скорости 40 град/с и температуре 48°C.

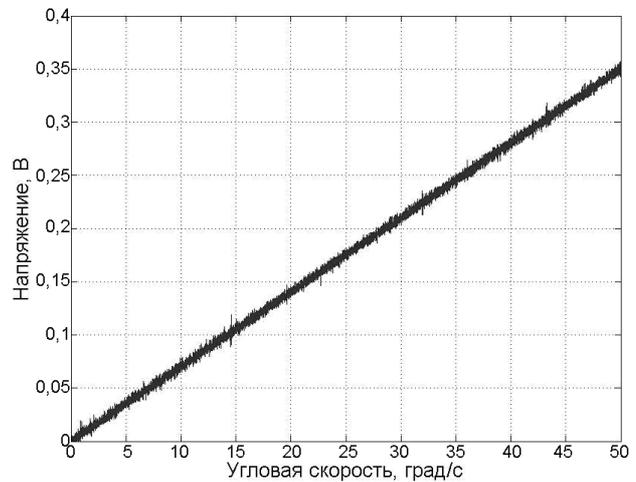


Рис.3. Экспериментальная зависимость напряжения на выходе гироскопа от угловой частоты при температуре 40°C

Проверка адекватности работы модели проводилась средствами системы Simulink и Digital Signal Processing Toolbox из состава Matlab. На вход модели подавались значения угловой скорости и температуры (рис.4б), а выходные данные транслировались в рабочую область Matlab для сравнения с экспериментальными данными.

Для оценки адекватности синтезированной модели гироскопа использован непараметрический критерий Уэлча (рис.5), демонстрирующий идентичность спектрального состава модели и реального гироскопа.

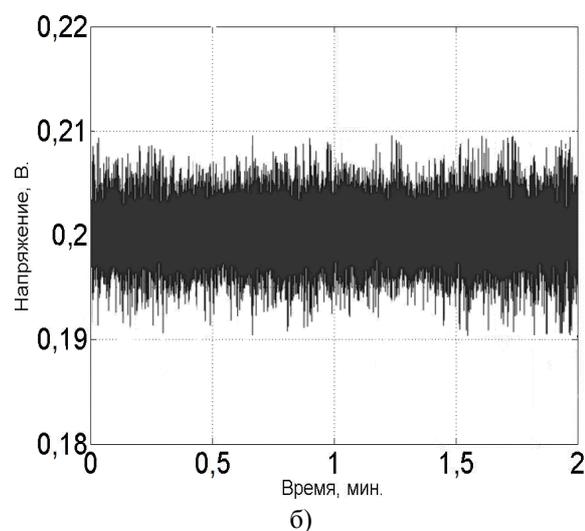


Рис.4. Экспериментальная (а) и модельная (б) зависимости напряжения на выходе гироскопа для угловой скорости 40 град/с и температуре 48°C

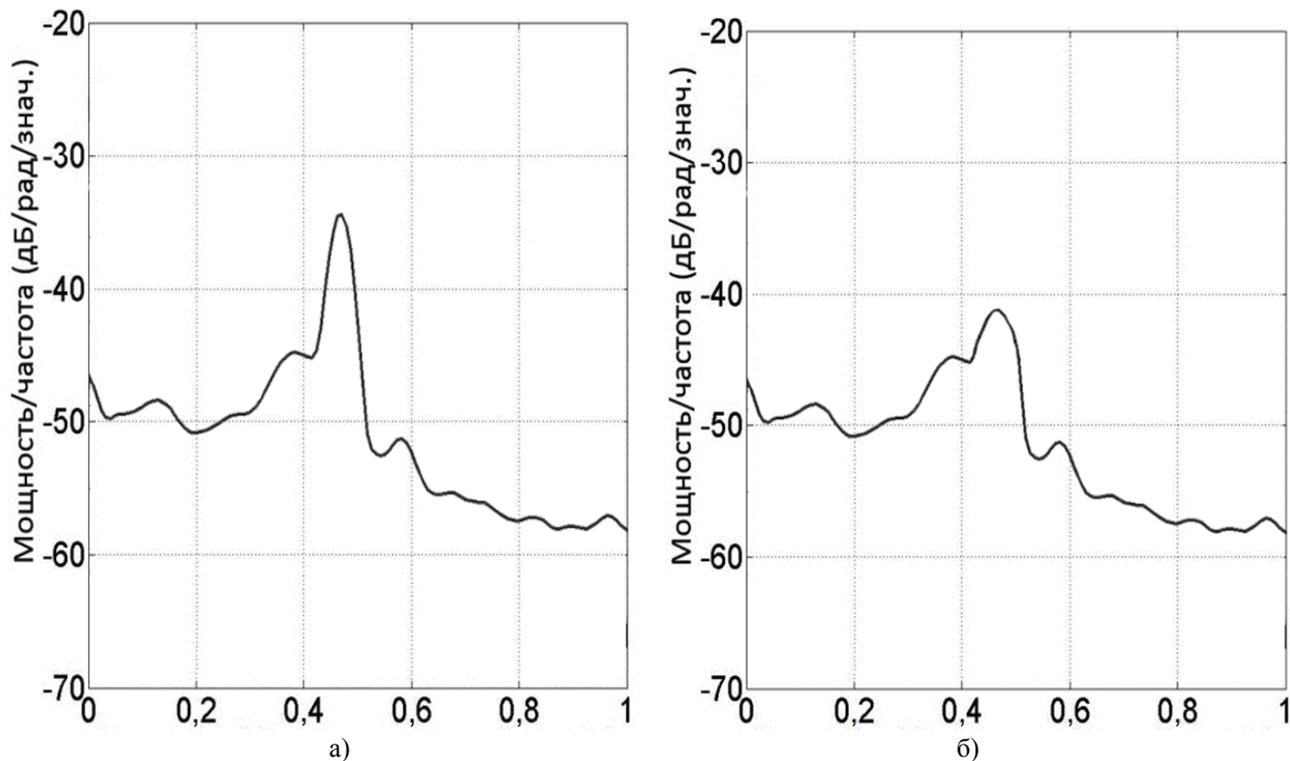


Рис.5. Сравнительные результаты спектрального анализа сигналов гироскопа (а) и его имитационной модели (б) для угловой скорости 40 град/с и температуре 48°C

Выводы

Разработана модель ВОГ ВГ910Q в среде Simulink. Для моделирования дрейфа нуля и шума гироскопа использованы аппроксимирующие полиномы 2-го и 1-го порядков, соответственно. Адекватность синтезированной имитационной модели гироскопа доказана сравнением ее с экспериментальными данными с использованием непараметрического критерия Уэлча.

1. Асафьев Г.К. Современные системы имитационного моделирования. СПб.: СПбГУ — http://sdk.ifmo.ru/publications/articles/MajorRead2009/MREAD2009_AsafevGK.pdf
2. Simulink — Simulation and Model-Based Design — <http://www.mathworks.com/products/simulink/>

Bibliography (Transliterated)

1. Asaf'ev G.K. Sovremennye sistemy imitacionnogo modelirovaniya. SPb.: SPbGU — http://sdk.ifmo.ru/publications/articles/MajorRead2009/MREAD2009_AsafevGK.pdf
2. Simulink — Simulation and Model-Based Design — <http://www.mathworks.com/products/simulink/>