

обучения прекращается и нейронная сеть модернизируется. Важным в процессе обучения является затраченное время, которое существенно зависит от характеристик вычислительной системы. Процесс обучения построенной искусственной нейронной сети показан на рисунке 2. Начальная точка с точность 10 % соответствует начальным случайным значениям w_i весовых коэффициентов каждого слоя нейронной сети, и соответствует средним статистическим оценкам.

Эпоха в обучении нейросети представляла собой цикл прохождения всего набора из 500 000 обучающих изображений через нейронную сеть. Точность рассчитывалась как отношение количества правильно распознанных изображений к общему числу тестовых изображений равному 100 000. Через каждую 1000 эпох изменялся набор обучающих и тестовых изображений. Как показано на рисунке 2 точность распознавания достигла 81–84 % и дальнейшее обучение со сменой базы изображений не приводило к росту точности распознавания.

Обученная искусственная нейронная сеть использовалась для решения задачи распознавания класса объектов в зависимости от количества активных пикселей в изображении объекта. Результаты моделирования показаны на рисунке 3. Точность нейронной сети достигает более 90 % при количестве активных пикселей более 200 на изображении размером 28×28 .

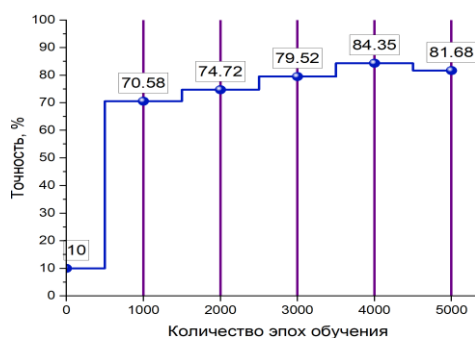


Рисунок 2 – Прогресс обучения искусственной нейронной сети

При малом числе активных пикселей изображения разных классов становятся визуально неотличимы, что и определяет низкую точность обученной нейронной сети. Важное значение

в задачах распознавания имеют два фактора: скорость работы и качество распознавания. Обученная нейронная сеть обрабатывает и распознает с высокой достоверностью более 100 000 изображений объектов за время меньше минуты, что свидетельствует о высокой эффективности такого подхода к решению задачи.

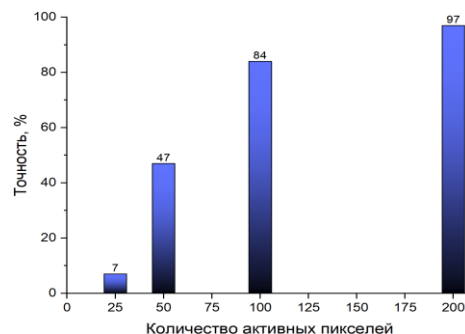


Рисунок 3 – Зависимость точности обученной искусственной нейронной сети от качества изображения

Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.12 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

1. Распознавание изображений объектов в условиях малых потоков фотонов с помощью искусственного интеллекта / М. Н. Жукова, И. Н. Балуха, Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики, аэрокосмических технологий и физики конденсированного состояния: материалы МНТК, Минск, 22–23 мая 2025 г. / Редкол.: П. В. Кучинский (гл. ред.) [и др.]. – Мн.: СтройМедиаПроект, 2025. – С. 236–237.
2. Регистрация фотонов рентгеновского диапазона при помощи ПЗС матриц / Н. В. Трапенко, И. Н. Балуха, А. Н. Петлицкий [и др.] // Новые направления развития приборостроения: материалы МНТК / редкол.: О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2024. – С. 219.
3. Распознавание изображений в условиях малых потоков фотонов / Н. В. Трапенко, И. Н. Балуха, Ю. И. Дудчик, Н. Н. Кольчевский // Приборостроение-2023: материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, нояб. 2023 г. / редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2023. – С. 282–283.

УДК 681.586:534.1

РАЗРАБОТКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА, УСТОЙЧИВОГО К ВИБРАЦИЯМ И УДАРАМ

Беницевич А. П., Люцко К. С., Чижик С. А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматривается процесс разработки микромеханического гироскопа, устойчивого к вибрациям и ударам. Разработана методика проектирования с использованием MATLAB/Simulink для моделирования. Особое внимание уделено конечному элементному анализу (КЭ-анализу) для оптимизации конструкции.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, инерциальный чувствительный элемент, сапр, вибрации, удары, моделирование, КЭ-анализ.

DEVELOPMENT OF A VIBRATION AND SHOCK RESISTANT MICROMECHANICAL GYROSCOPE

Benitsevich A. P., Liutsko K. S., Chizhik S. A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The process of developing a vibration and shock resistant micromechanical gyroscope is considered. A literature review on the design of micromechanical gyroscopes has been conducted. A design methodology using MATLAB/Simulink for modeling has been developed, with a focus on finite element analysis (FEA) for structure optimization. The economic efficiency of the development has been calculated.

Keywords: micromechanical gyroscope, inertial sensitive element, cad, vibrations, shocks, modeling, finite element analysis.

*Адрес для переписки: Люцко К. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mnt@bntu.by*

Целью разработки микромеханического гироскопа (ММГ), устойчивого к вибрациям и ударам, является создание устройства, обеспечивающего высокую точность измерений угловой скорости в условиях динамических нагрузок. ММГ применяются в авиации, автомобильной промышленности, робототехнике и потребительской электронике благодаря низкой стоимости, компактности и надежности.

Объектом исследования является процесс проектирования ММГ с повышенной устойчивостью к внешним механическим воздействиям. Современные ММГ уступают по точности традиционным гироскопам, но превосходят их по массогабаритным характеристикам и энергопотреблению. Проектирование ММГ требует использования систем автоматизированного проектирования (САПР) и сложных методов анализа, таких как конечный элементный анализ (КЭ-анализ).

Методика проектирования такого микрогироскопа заключается в функциональной схеме ММГ, включающая инерциальный чувствительный элемент (ИЧЭ) и систему управления. На основе схемы создана математическая модель, учитывающая жесткость упругих подвесов и массу подвижных рамок. Моделирование проводилось в Matlab/Simulink для анализа динамики системы.

Для повышения устойчивости к ударам применены двухступенчатые гасители, снижающие напряжения в местах контакта подвижных и неподвижных частей конструкции.

КЭ-анализ использован для оптимизации конструкции ММГ, в частности, для определения максимальной длины гребенчатых структур, обеспечивающих измерение угловой скорости. Основные этапы КЭ-анализа:

1. Создание 3D-модели: Построена модель ММГ в САПР (например, ANSYS или COMSOL Multiphysics), включающая гребенчатые структуры, упругие подвесы и гасители ударов.

2. Дискретизация: Конструкция разбита на конечные элементы (тетраэдры), что позволяет численно решать уравнения механики сплошных сред.

3. Граничные условия: Заданы внешние воздействия (вибрации с частотой 10–1000 Гц, ударные нагрузки до 1000 g), материал (кремний, предел прочности ~7 ГПа), жесткость подвесов и масса рамок.

4. Решение уравнений: Рассчитаны напряжения, деформации и перемещения. Использованы уравнения равновесия и закон Гука для линейной упругости.

5. Анализ результатов: Выявлены зоны максимального напряжения (например, в основании гребенок). Максимальная длина гребенок оптимизирована для предотвращения разрушения при нагрузках.

Из-за того, что удары амплитудой 30 000 g приводят к перемещениям, которые превышают позволяющие зазоры (4–7,5 мкм), а КЭ-анализ позволил определить, что длина гребенчатых структур не должна превышать 500 мкм для обеспечения прочности при ударных нагрузках. Из-за этого можно рассмотреть гироскоп с сферическим типом упора, так как при нагрузках он показывает наименьшее напряжение, которое составляет 489 МПа.

Также разработаны двухступенчатые гасители ударов включающие упругие балки (ширина 7 мкм, длина 40 мкм) и жесткие элементы, снижающие напряжения до 474,19 МПа при зазорах 0,5–7,5 мкм, которые снизили пиковые напряжения на 30 %, что подтверждено моделированием. Данные гасители продемонстрированы на рисунке 1.

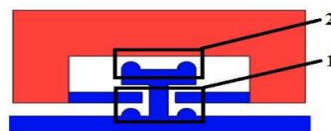


Рисунок 1 – Двухступенчатый гаситель удара

Пример такого микрогироскопа, который оборудован двухступенчатыми гасителями ударами, а также имеет сферический упор продемонстрирован на рисунке 2.

Разработанный ММГ может использоваться в системах стабилизации автомобилей (например, в системах ESP), беспилотных летательных аппаратах (дронах) и промышленных роботах.

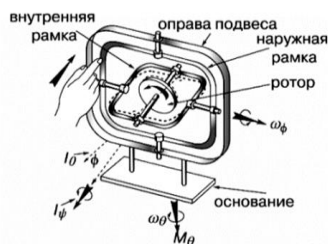


Рисунок 2 – Модель традиционного гироскопа с тремя степенями свободы

Устойчивость к вибрациям (до 1000 Гц) и ударам (до 1000 g) делает его пригодным для суровых условий эксплуатации, таких как авиационные и военные приложения. Интеграция с микроконтроллерами (например, STM32) обеспечивает низкое энергопотребление и высокую скорость обработки данных. Применение двухступенчатых гасителей повысило надежность конструкции. практическая значимость заключается в возможности использования ММГ в автомобильной электронике, робототехнике и авиации, где требуется высокая надежность

в условиях динамических нагрузок. Методика проектирования микромеханического гироскопа, устойчивого к вибрациям и ударам состоит из следующих шагов:

1. Входные данные.
2. Функциональная схема, математическая модель.
3. Технологические нормы изготовления
4. 3D-модель.
5. Компьютерное моделирование влияния вибраций и ударов.
6. КЭ анализ влияния вибраций и ударов.
7. Установка двухступенчатых гасителей удара.
8. Оптимизация длины гребенок.

Литература

1. Песин, А. Б. Гироскопические системы: теория и практика / А. Б. Песин. – М.: Машиностроение, 2018. – 320 с.
2. Матвеев, В. А. Микроэлектромеханические системы (MEMS): проектирование и применение / В. А. Матвеев, Л. Н. Баскин. – СПб.: Лань, 2020. – 256 с.
3. Журавлев, В. Ф. Основы теоретической механики гироскопов / В. Ф. Журавлев. – М.: Физматлит, 2015. – 288 с.

УДК 621.317

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СПЕКТРОМЕТРОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Богдан П. С., Зайцева Е. Г., Чайкова Л. Д.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Использование теоремы отсчетов позволило установить, что наличие дискретизации при измерениях спектрофотометров приводит к возникновению составляющей погрешности измерений. Значение этой погрешности зависит от спектрального состава измеряемого излучения, с одной стороны, и разрешающей способности спектрометра, с другой. Проведены расчеты погрешности для различных спектральных излучений и разной разрешающей способности спектрометров.

Ключевые слова: спектрометр, оптический спектр излучения, дискретизация, теорема отсчетов

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SPECTROMETER RESOLUTION FOR MEASUREMENT ERROR

Bogdan P. S., Zaytseva E. G., Chaikova L. D.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The use of the sampling theorem made it possible to establish that the presence of sampling during spectrophotometer measurements leads to a component of measurement error. The value of this error depends on the spectral composition of the measured radiation, on the one hand, and the resolution of the spectrometer, on the other. There were calculations of errors carried out for various spectral radiations and different resolutions of spectrometers.

Keywords: spectrometer, optical radiation spectrum, sampling, sampling theorem

Адрес для переписки: Богдан П. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pbogdan@bntu.by

В современных спектрометрах измерение развернутого по пространственной координате спектрального распределения светового излучения производится с использованием совокупности щелей и линейки светочувствительных элементов. При этом происходит дискретизация измеряемого сигнала по длине волны излучения и, соответственно в приборе, по пространственной координате. Наличие дискретизации сигнала может явиться источником появления ложных гармонических составляющих, которые, складываясь с исходным сигналом, являются одним из

источников погрешности измерений. Целью настоящей работы является исследование влияния разрешающей способности спектрометра, определяющей шаг дискретизации по длине волны, на значение составляющей погрешности измерений, обусловленной наличием дискретизации.

Исключить появление ложных гармонических, составляющих возможно при соблюдении теоремы отсчетов [1]. Теорема гласит: если сигнал, не содержащий частот выше f_{max} , можно полностью передать последовательностью отсчетов, следующих через период T , где