

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

$$T \leq \frac{1}{2f_{\max}},$$

причем после дискретизации необходима фильтрация сигнала П-образным фильтром со срезом амплитудно-частотной характеристики вне диапазона частот  $(-f_{\max}, f_{\max})$ .

Отсюда очевидно, что, т. е. в рассматриваемом случае разрешающая способность спектрометра  $\Delta\lambda$  (период дискретизации) зависит от максимального значения частоты  $f_{\max}$ , при котором амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) излучения обращается в 0.

Спектральное распределение источников в пределах видимого спектра ограничено по длине волны. Отсюда следует, что АЧХ по частотной координате не ограничено, т. е. не обращается в 0 при всех значениях частоты. Поэтому при любой разрешающей способности спектрофотометра  $\Delta\lambda$ , т. е. при любом периоде дискретизации  $T$  АЧХ имеет бесконечный не обрезанный «хвост» с уменьшающимися с ростом частоты амплитудами и с максимальным значением  $\varepsilon$ . Этот «хвост» в результате дискретизации складывается с исходным значением АЧХ и создает погрешности с максимально возможным значением  $\varepsilon$ . Эти погрешности низкочастотные, т. е. их период вдвое больше разрешающей способности спектрометра  $\Delta\lambda$ . Из вышеизложенного очевидно, что значение погрешности зависит как от характера спектрального распределения излучения, так и от разрешения спектрометра.

Вышеописанная методика расчета  $\varepsilon$  была применена для спектральных распределений спектров излучения различного характера, графики которых приведены на рисунках 1–3.

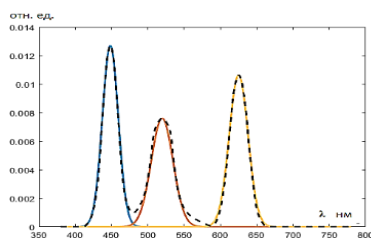


Рисунок 1 – График излучения RGB-SMD-светодиода LM1-TPP1-01 TTQ [2] (сплошные линии) и его аппроксимация (пунктир)

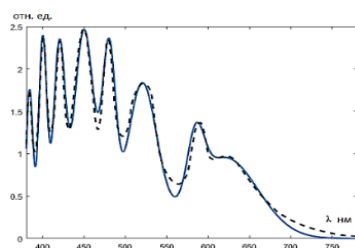


Рисунок 2 – График излучения 13 светодиодных групп, имитирующих естественное излучение [3], (сплошная линия) и его аппроксимация (пунктир)

Для каждого из трех представленных на рисунках 1–3 распределений светового излучения были рассчитаны зависимости максимально возможной

погрешности  $\varepsilon$  за счет дискретности измерений от разрешающей способности спектрометра  $\Delta\lambda$ . На рисунке 4 представлен график такой зависимости для распределения, приведенного на рисунке 1.

Абсолютное значение погрешности есть произведение относительной погрешности  $\varepsilon$  на среднее значение интенсивности исследуемого спектрального излучения.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует, что для спектрометров с разрешением 1 нм погрешность за счет дискретизации настолько мала ( $5,7 \times 10^{-12}$ ,  $7 \times 10^{-4}$  и  $14 \times 10^{-4}$  соответственно для приведенных на рисунках 1–3 распределений), что ею можно пренебречь. Для спектрометров с большим значением разрешающей способности (10 нм и выше), эти погрешности могут оказаться существенными. Например, при разрешении 10 нм эти погрешности для распределений, приведенных на рисунках 1–3, составляют соответственно  $9 \times 10^{-4}$ ,  $43 \times 10^{-3}$  и  $17 \times 10^{-3}$ .

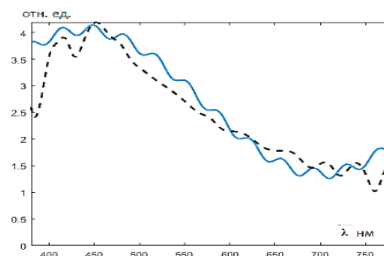


Рисунок 3 – График естественного излучения при цветовой температуре 10 000 градусов Кельвина [4] (сплошная линия) и его аппроксимация (пунктир)

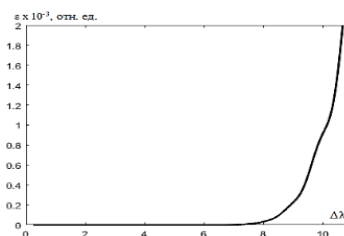


Рисунок 4 – График зависимости максимально возможной погрешности  $\varepsilon$  за счет дискретности от разрешающей способности спектрометра  $\Delta\lambda$  для излучения RGB-SMD-светодиода

## Литература

1. Руфов, А. А. Теорема отсчетов и ее применение для восстановления модулированных сигналов / А. А. Руфов, А. Д. Поздняков // Приволжский научный вестник. – 2012. – № 12 (15). – С. 13–16.
2. Никифоров, С. «S-класс» полупроводниковой светотехники / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2009. – № 6. – С. 88–91.
3. Investigation of criteria for comparing the spectral distribution of natural and LED radiation / P. S. Bogdan, E. G. Zaytseva, A. I. Stepanenko // Devices and Methods of Measurements. – 2024. – V. 15, № 2. – P. 120–130.
4. Blume, C. Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood / C. Blume, C. Garbaza, M. Spitschan // Somnologie (Berl.). – 2019. – V. 3, № 3. – P. 147–156.