

Рисунок 3 – Зависимость напряжения на выходе OUTL- триггера Шмидта от времени

Заметим, что увеличение напряжения питания компаратора до  $\pm 6$  В и оптимизация его режимов работы позволили расширить диапазон допустимого входного напряжения на 1,86 В по сравнению с АФ011В. В тоже время суммарный ток потребления новой ИС уменьшился на 45 %.

УДК 681.2.082:531.45

### УСТРОЙСТВО И МЕТОДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ С УНИКАЛЬНОЙ ТОЧНОСТЬЮ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ТРЕНИЯ И КОНТАКТНОЙ АДГЕЗИИ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ КАЧЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ТЕЛА

Джилавдари И.З., Ризнооккая Н.Н.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Основным источником погрешности систем точного позиционирования, является трение элементов на самых начальных этапах их движения. Эти этапы получил название «предварительное смещение». С целью уменьшения трения и износа, в особо точных технических устройствах и приборах, часто используют элементы качения, работающие в условиях малых нагрузок, смещений и скоростей. Нелинейный и гистерезисный характер, а также малая величина трения качения не позволяют измерять его параметры с высокой точностью и чувствительностью с помощью существующих устройств и методов.

Поэтому механизмы и законы изменения моментов трения качения в процессах предварительных смещений до сих пор не вполне изучены. Это ограничивает точность существующих

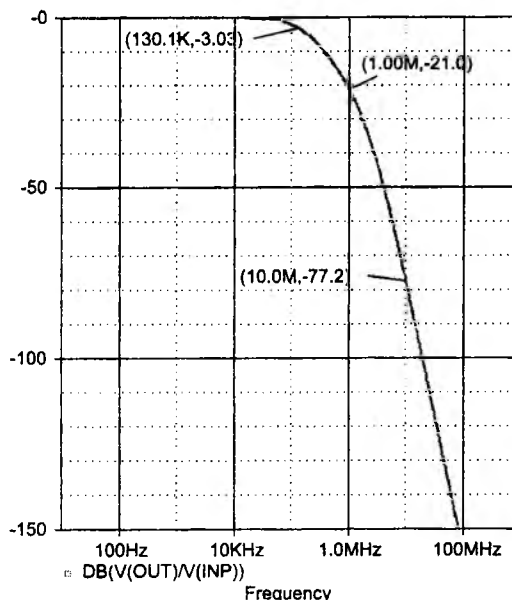


Рисунок 4 – Амплитудно-частотная характеристика ФНЧ в логарифмическом масштабе

1. Дворников, О.В. Элементная база нового поколения радиоизмерительной техники / О.В. Дворников//Компоненты и технологии. – 2004. – № 6. – С. 58–63.
2. Дворников, О.В. Микросхема АФ011В для высокоточных временных измерений / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, А.Г. Петрович // Chip News. – 2003. – No 7. – С. 18–21

ющих приборов и возможность управления этим трением.

Авторами предложено устройство для исследования предварительного смещения и контактной адгезии при качении [1], принцип действия которого показан на рисунке 1. Объект исследования в виде двух плоских пластин крепят на площадках 15. На эти пластины опускают маятник 13, пользуясь механизмом установки и регулировки положения маятника 14, и ожидают его успокоения. Фокусируют с помощью устройства 5 луч 8 лазера 6, отраженный от зеркала 12, закрепленного на маятнике, на линейку 7, фиксируют это положение, и принимают его за положение покоя. Затем маятник 13 отклоняют до регулируемого упора 2 на заданный угол, фиксируя этот угол по положению лазерного луча 8 на линейке 7, и маятник освобождают.

Угловые отклонения маятника в процессе колебаний фиксируют по положению луча 11 ного на маятнике. Луч 11 фокусируется с помощью устройства 3 на оптико-электронный приемник 9, защищенный светофильтром 10, где формируется электрический сигнал, поступающий на персональный компьютер. Измерения проводят до тех пор, пока маятник не вернется в состояние равновесия.

Сигнал с оптико-электронного приемника 9, записывают и обрабатывают на персональном компьютере, с помощью которого получают значения амплитуд, соответствующие им моменты времени и значения длительностей циклов (периодов) колебаний.

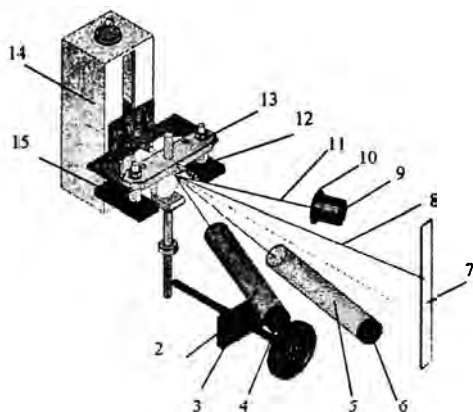


Рисунок 1 – Устройство для измерения параметров трения качения в режиме малых предварительных смещений

Данное устройство позволяет проводить измерения амплитуд колебаний маятника в интервале значений от 2 до 600 угловых секунд с погрешностью от 10 % до 0,6 %, соответственно, а также измерять длительности циклов колебаний с относительной погрешностью, не превышающей  $10^{-4}$ .

**Методы измерения параметров трения качения в режиме предварительных смещений.** Авторами предложена новая феноменологическая модель зависимости момента трения качения от перемещения тела качения [2], который имеет вид

$$M_{\text{ск}}(\varphi, \dot{\varphi}) = -mgR(c + b\varphi^p) \text{sign}(\dot{\varphi}), \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол отклонения маятника от положения равновесия;

$m$  – масса маятника;

$g$  – ускорение свободного падения;

$R$  – радиус шарика;

$b, p$  и  $c$  – постоянные, которые должны определяться из опыта методом нелинейной аппроксимации.

Это позволяет получить зависимость момента  $M$  как функцию угла  $\varphi$  по формуле (1).

лазера 4, отраженного от зеркала 12, закреплен

Далее, для любого значения  $\varphi$ , коэффициент трения качения можно определить по известной формуле:

$$f_{\text{к}} = \frac{|M_{\text{ск}}|}{mg}. \quad (2)$$

Из (1) видно, что момент  $M_0 = mgRc$  имеет смысл момента трогания (стартовый момент), который обусловлен силами контактной адгезии. Отсюда можно найти поверхностную плотность  $\sigma$  работы, необходимую для отрыва уходящей части поверхности шарика при его повороте на опорной поверхности:

$$\sigma = \frac{A_0(\varphi)}{2S(\varphi)} = \frac{mgc}{4a}, \quad (3)$$

где  $A_0(\varphi)$  – работа момента трения  $M_0$ , совершаемая при повороте маятника на угол  $\varphi \ll 1$ ;

$S(\varphi)$  – площадь, на которой происходит отрыв шарика при повороте его на угол  $\varphi$ ;

$a$  – радиус пятна контакта.

Предложен новый метод измерения коэффициента сопротивления качению  $f_{\text{ск}}$ , который, в отличие от существующего, можно применять при любых законах затухания амплитуды [3]. Здесь проводят измерения всех амплитуд  $\alpha_j$  колебаний маятника и определяют коэффициент  $f_{\text{ск}}$  по следующей формуле

$$f_{\text{ск}} = \frac{\cos \alpha_n - \cos \alpha_0}{2(\alpha_0 + \alpha_n) + 4 \sum_{j=1}^{N-1} \alpha_j}. \quad (4)$$

#### Экспериментальная часть.

**Часть.** В измерительном устройстве использовался маятник массой 1,256 кг, в опоре которого находились два шарика радиусом 5 мм, выполненные из прессованного корундового порошка. Эксперименты проводились на плоских полированных поверхностях материалов, которые широко используются в современном приборостроении: сталь ШХ15, оптическое стекло К8 и электротехнический кремний. Во всех опытах диапазон смещений шариков не превышал 8 мкм, в то время как радиус пятна упругого контакта находился в интервале от 55 мкм до 70 мкм. При этом нагрузка на шарики не превышала предела упругости материалов.

Применение процедуры нелинейной аппроксимации позволили установить аналитическую зависимость амплитуды свободных колебаний физического маятника от времени с относительным СКО порядка 0,1 %. До сих пор такая задача не могла быть решена.

При измерениях коэффициента  $f_{ск}$  были получены значения порядка от  $10^{-6}$  до  $10^{-8}$  при абсолютной погрешности на уровне  $10^{-8}$  в интервале амплитуд колебаний от 300 до 2 угловых секунд, соответственно.

Был установлен вид реальных гистерезисных кривых для зависимости момента трения качения от перемещения, в том числе, в самом начале качения, что решает одну из основных проблем, возникающих при разработке систем точного позиционирования. Чувствительность измерения моментов  $M_{ск}$  была порядка  $10^{-10}$  Н·м. Погрешность этих измерений при всех проведенных измерениях не превышала 10 %.

Во всех опытах были измерены значения стартовых моментов  $M_0$ , которые оказались в интервале от  $10^{-9}$  Н·м до  $10^{-10}$  Н·м при погрешности измерений от  $1,6 \cdot 10^{-10}$  Н·м до  $1,2 \cdot 10^{-13}$  Н·м, соответственно.

Разработанная теория позволила проводить измерение поверхностной плотности работы адгезии на уровне  $10^{-3}$  Дж/м<sup>2</sup>. Среднее по всем измерениям значение погрешности измерений составило 9 %. Полученные значения по порядку величины согласуются с аналогичными значениями, приведенными в литературе и полученными с помощью сложных по

конструкции контактных адгезиометров и силовых зондовых микроскопов.

#### Заключение

Полученные результаты могут найти применение при разработке приборов и механизмов, в которых предъявляются повышенные требования к точности позиционирования подвижных узлов и деталей, а также при разработке эталонных средств измерений предельно слабого трения качения.

1. Ризноокая, Н.Н. Об измерении амплитуд и периода микрокачаний физического маятника с опорой качения / Н.Н. Ризноокая // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2011. – № 2. – С. 32–37.
2. Джилавдари, И. З. Об измерении малых моментов трения качения маятниковым методом / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Метрология и приборостроение. – 2011. – № 1. – С. 29–32.
3. Джилавдари, И. З. Методика и средство измерения малых коэффициентов сопротивления качению маятниковым методом / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая // Метрология и приборостроение. – 2010. – № 4. – С. 13–17.

УДК 004.383.4

## СОЗДАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОТЛАДКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Дмитриев С.М., Рындык А.Г., Потапов Н.Н., Тупиков П.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Минск, Республика Беларусь

Большинство радиотехнических систем выполняют схожий набор функций, среди которых приём, фильтрация и обработка аналоговых сигналов, управление сопрягаемыми устройствами, ввод-вывод данных. В процессе отладки готового устройства часто требуется подготовка сложных экспериментов с одновременной имитацией сигналов, управлением испытуемым устройством, обработкой ответных сигналов от испытываемого устройства. Качественное решение подобных задач с использованием универсальных генераторов сигналов является затруднительным.

Для комплексной отладки был создан стенд, содержащий в себе:

- 18 аналоговых выходов с полосой формируемого сигнала до 120 МГц, и возможностью вывода как униполярных, так и дифференциальных сигналов;
- 60 цифровых входов/выходов;
- 16 аналоговых входов, мультиплексированных на два 10 битных АЦП с частотой дискретизации до 8 МГц;

- 4 порта RS422/485 со скоростью передачи данных до 2 Мбит/с;
- 4 порта RS232 со скоростью передачи данных до 460 кбит/с;
- 4 порта USB;
- 3 порта Ethernet 10/100/1000TX;
- порты PCI и PCI-Express для расширения функциональности стенда;
- интерфейс SPI с поддержкой до 8 устройств;
- интерфейс I2C;
- два контроллера ШИМ с соответствующими выходами.

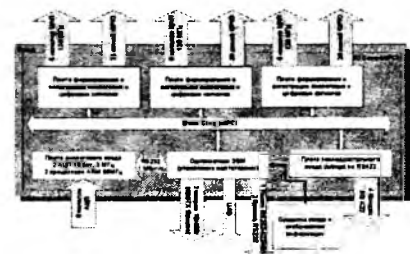


Рисунок 3 – Структурная схема стенда для отладки радиотехнических систем