

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ЧАСТОТНО-ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С АКУСТИЧЕСКИМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Скачко Ю.В.

Московский Государственный институт электроники и математики  
109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3/12, кафедра МиС, struna1204@yandex.ru

Метрологическое обеспечение виртуальных измерительных систем (ВИС) - средств измерений, основу которых составляет ЭВМ и измерительные преобразователи, требует пересмотра ранее установленных требований к их конструктивным, эксплуатационным и, в первую очередь, метрологическим характеристикам.

Согласно основополагающим стандартам метрологическими характеристиками являются характеристики, оказывающие влияние на результаты и погрешности измерений. При измерении в статических условиях принимаются во внимание следующие характеристики.

1. Статическая характеристика измерительного преобразования (ХИП)  $y = f(x)$  измерительного преобразователя - зависимость между значениями на выходе  $y$  и входе  $x$ , полученная в результате градуировки. Функцию  $y = f(x)$  нормируют как номинальную статическую характеристику  $y_n = f_n(x)$ .

2. Суммарная погрешность  $\Delta = x - x_o$  - разность между результатом измерений и значением измеряемой величины, полученным от более точного средства измерений.

3. Систематическая составляющая  $\Delta_c$  погрешности - составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

4. Случайная составляющая  $\overset{\circ}{\Delta}$ , выраженная в виде среднего квадратического отклонения (СКО)  $\sigma[\overset{\circ}{\Delta}]$  - составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и по значению) в серии повторных измерений одной и той же величины.

5. Составляющая погрешности от гистерезиса - вариация  $b$  выходного сигнала средства измерений - разность значений выходного сигнала в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе "справа" и подходе "слева" к этой точке.

6. Прогрессирующая составляющая, вызванная дрейфом  $d$  - погрешность, вызванная изменением во времени результата измерения постоянной величины.

Принципиальное отличие метрологического обеспечения ВИС связано с высоким уровнем автоматизации, обеспечиваемом ЭВМ, позволяющим повысить точность измерений и резко снизить трудоемкость метрологических испытаний. Основными задачами определения метрологических характеристик являются следующие:

- метод нормирования метрологических характеристик;
- ввод измерительной информации от преобразователя-датчика в ЭВМ;
- использование управляемых генераторов эталонных сигналов;
- реализация автоматической коррекции погрешности измерений.

Рассмотрим проблемы метрологического обеспечения ВИС на примере цифрового устройства со струнным преобразователем (ЦУСП) линейных перемещений[1], разработанного по заказу промышленности для измерения отклонения линейных размеров с погрешностью, не превышающей 0,25 мкм в диапазоне до 100 мкм. Устройство проходило Государственные испытания во ВНИИМ им. Менделеева при его стандартизации по ГОСТ 21625-76.

Устройство состоит из струнного дифференциального модуля, электронного блока автогенераторов и цифрового частотомера.

**Метод нормирования метрологических характеристик** отличается от традиционного тем, что (ХИП)  $y = f(x)$  назначают, как правило, нелинейной и исследуют составляющие суммарной погрешности  $\Delta_c, \overset{\circ}{\Delta}, b, d$ , а не ограничиваются только исследованием общей погрешности по результатам сравнения результатов измерений поверяемого и эталонного средства измерений.

*Характеристика измерительного преобразования* выбирается на основе математической модели, полученной из физических принципов, положенных в основу работы средства измерений. Например, в ЦУСП характеристика была выбрана линейной в виде  $y = Sx$ , где чувствительность  $S = 0.1$  ед/мкм. Выбор обусловлен требованием прямого измерения и отсутствием в частотомере средств линеаризации. Из решения волнового уравнения колебаний тонкой струны характеристика имеет вид иррациональной функции вида

$$y = \frac{f_{01} \sqrt{1 + \alpha x}}{f_{02} \sqrt{1 + \beta x}} \quad (1)$$

где  $f_{01}, f_{02}, \alpha, \beta$  - конструктивные параметры преобразователя.

Для реализации ВИС на базе ЦУСП характеристика может быть выбрана согласно (1), что

позволяет существенно увеличить диапазон измерений.

**Систематическая составляющая погрешности измерений.**

Зависит от выбора ХИП. При 2-3-х физических принципах, положенных в основу функционирования средства измерений ХИП выбирается в виде полинома. Поскольку частотомер не имеет плавной регулировки чувствительности, одной из наиболее трудоемких технологических операций является настройка на заданную чувствительность  $S = 0.1$  ед/мкм. Трудоемкость механической настройки связана с реализацией перемещения порядка 0,03 мкм узла защемления струн, существенно удорожающей сборку струнного датчика.

При использовании режима ВИС для ЦУСП достаточно функции настройки перенести на программное обеспечение, обеспечивающее в простейшем случае алгоритм прямого измерения с линейной номинальной ХИП

$$x = (y - y_0)/S, \quad (2)$$

где  $y$ ,  $y_0$  – выходной сигнал и его начальное значение(нуль) соответственно. Выбором параметров преобразователя добиваются уменьшения погрешности, вызванной отклонением от линейности. Выполнение этих условий требует механической настройки преобразователя, что существенно удорожает средство измерений.

Эффективность режима ВИС особенно проявляется при обеспечении систематической погрешности менее 0,25% от диапазона измерений при существенно нелинейной ХИП. Уменьшение погрешности программным путем позволяет отказаться от дифференциальной схемы струнного преобразователя, существенно упрощая его конструкцию. Это позволило разработать измерительную головку УИП-8, заменяющей пружинную головку-микрокатор-основное средство допускового контроля в подшипниковой промышленности.

Применение ЭВМ позволяет выбор диапазона измерения ограничить требованием стабильности колебаний резонатора, а не требованием заданной погрешности нелинейности.

С учетом современных достижений вычислительной математики целесообразно в ВИС для номинальной ХИП использовать приближение сплайнами.

**Случайная составляющая погрешности измерений.** Основным методом уменьшения – усреднение  $n$  результатов многократных наблюдений, позволяющее уменьшить погрешность в  $\sqrt{n}$  раз при условии, что порог чувствительности и погрешность, вызванная дрейфом пренебрежимо малы. При преобразовании сигнала в виде электрического напряжения в цифровой сигнал усреднение серии наблюдений менее эффективно, чем для частотно-модулированного сигнала, для которого интегрирование выполняется без погрешности.

*Составляющая погрешности от гистерезиса - вариация  $b$*  в ЦУСП уменьшается введением в конструкцию арретирующего устройства, реализующим измерение со стороны больших значений измеряемой величины. В режиме ВИС программное обеспечение существенно усложняется из-за необходимости идентифицировать направление изменения измеряемой величины.

**Прогрессирующая составляющая погрешности измерений, вызванная дрейфом.** Уменьшение погрешности от дрейфа в ЦУСП обеспечивается технологическими методами (согласование материала струны с материалом конструкции по коэффициентам теплового линейного расширения), введением в конструкцию компенсаторов, использованием структурных методов повышения точности (выбором дифференциальной схемы). Экспериментальные исследования позволили получить для режима ВИС рекомендуемое число усредняемых результатов в пределах от 10 до 20 для ЦУСП.

**Ввод в ЭВМ измерительной информации** – одно из наиболее слабых звеньев в метрологическом обеспечении. На сегодня обширный парк средств измерений имеет ограниченное число устройств с интерфейсом ввода измерительной информации. Появление беспроводных средств передачи информации, таких как Wi-Fi, Bluetooth и др. особенно отражает низкий уровень автоматизации метрологического обеспечения измерительных лабораторий некоторых крупных предприятий, выполняющих не только метрологические испытания, но и оформление протоколов вручную, без ЭВМ

Для акустических датчиков звуковая карта в мультимедийных ПК является высокоточным АЦП в звуковом диапазоне частот. Как показывают экспериментальные исследования, использование методов быстрого преобразования Фурье (БПФ) с выделением основной гармоники для измерения частоты при частотно-цифровом преобразовании в ряде случаев эффективнее традиционного счетно-импульсного метода и его разновидностей, но требует обстоятельного метрологического анализа. Особого внимания требует оценка разрешающей способности БПФ в зависимости от режимов настройки параметров звуковой карты (частоты дискретизации, несущей частоты, длины базы и др.).

**Использование генераторов эталонных сигналов** является необходимой функцией в ВИС. Ограниченная точность образцовых сигналов не позволяет определить с необходимой достоверностью систематическую составляющую погрешности. Особенно актуальной является разработка управляемых от ЭВМ устройств образцовых сигналов - автоматических генераторов - магазинов мер неэлектрических величин - усилий, перемещений, расхода и др., встраиваемых в ВИС.

При исследовании метрологических характеристик струнных преобразователей целесообразно использовать режим измерения веса, вместо режима измерения перемещений, поскольку погрешность мер веса значительно меньше погрешности перемещений, получаемых посредством концевых мер длины.

Особый интерес для реализации ВИС с ЦУСП представляет дистанционная аттестация струнных преобразователей методом пропускания электрического тока по струне [1].

**Автоматическая коррекция погрешности измерений** была обстоятельно рассмотрена в трудах Земельмана М.А., Новицкого П.В., и др, однако получила распространение только при измерении электрических величин. Развитие информационных технологий позволяет реализовать автоматическую коррекцию для неэлектрических величин в ВИС методом образцовых сигналов при наличии генераторов эталонных мер. В ЦУСП была реализована автоматическая коррекция погрешности нуля и чувствительности посредством узла встроенных мер, управляемого электромагнитным механизмом по сигналу от ЭВМ.

Влияние изменения окружающей температуры вызывает изменение параметров  $\alpha$  и  $\beta$  ХИП, а, следовательно, погрешность измерений.

Для коррекции погрешности по программе устанавливают под наконечник последовательно две концевые меры длины или перемещают наконечник в пределах аттестованного зазора, обеспечивая получение двух эталонных сигналов  $x_1, x_2$ . Регистрируют соответствующие им значения выходного сигнала в режиме измерения периода и вычисляют новые значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$ .

Полученные значения вводят в уравнение (1), из которого определяют значения измеряемой величины  $x$  по выходному сигналу  $y$ . Автоматическая коррекция погрешности измерений методом образцовых сигналов в ВИС обеспечивает повышение точности измерений путем уменьшения влияния окружающей среды на результаты измерений, позволяет повысить качество средства измерений путем стабилизации характеристики измерительного преобразования при резком снижении требований к элементам конструкции преобразователя.

#### Литература

1. Скачко Ю.В. Применение ЭВМ для высокоточного измерения механических величин посредством частотных преобразователей. «Электронная техника», сер.8,1983 г., вып.2(101).
2. Цейтлин Я.М., Скачко Ю.В., Капырин В.В. Модифицированные струнные преобразователи для измерения геометрических величин. - М.; Изд-во стандартов, 1989 - 264 с.

