

Средства измерений линейных и диаметральных размеров со струнными преобразователями

В. С. СЕКАЦКИЙ¹, Р. И. КУТЧЕР¹, А. П. БАТРАК¹, В. Н. МОРГУН²

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия,

² Красноярский ЦСМ, Красноярск, Россия, e-mail: sekackiy@rambler.ru

Рассмотрено устройство струнного преобразователя и методика его расчета. Выявлены свойства данного преобразователя, определена возможность его использования в геометрических измерениях.

Ключевые слова: датчик, частота, колебание.

The calculation procedure and the string converter device are considered. The properties are revealed and a possibility of this converter use in geometrical measurements is determined.

Key words: sensor, frequency, fluctuation.

Повышение производительности труда и качества выпускаемой продукции до уровня лучших мировых стандартов — важнейшая задача в народном хозяйстве. Ее решение требует автоматизации технологического процесса на всех этапах, в том числе и при выполнении контрольных операций.

Большая часть средств измерений (СИ) линейных и диаметральных размеров, выпускаемая в настоящее время серийно, основана на прямом методе снятия показаний по шкале прибора. Такие средства не позволяют проводить измерения в труднодоступных местах, их сложно соединить с компьютером, поэтому альтернативой служат СИ, основанные на косвенных методах измерений.

В статье приведены результаты исследований указанных СИ с использованием струнного датчика, выполненных в Сибирском федеральном университете и Красноярском ЦСМ [1, 2].

Измерительные устройства с выходным частотным сигналом имеют следующие преимущества перед другими измерительными системами:

объективность и точность отчета (так как цифровую индикацию результатов измерений реализовать легко);

большую помехоустойчивость;

стабильность при передаче выходного сигнала на значительные расстояния;

поступление сигнала непосредственно на компьютер (для регистрации результатов измерений и их машинной обработки);

использование статистического контроля в цифровых автоматизированных системах.

При высокой точности измерений какого-либо параметра (размера детали, температуры, давления и др.) аналоговый сигнал с выхода чувствительного элемента, как правило, бывает слабый. Такие сигналы, модулированные по амплитуде, передавать без искажений значительно труднее, чем сигналы, модулированные по частоте, вследствие их лучшей помехозащищенности. Примером может служить передача на значительное расстояние эталонного значения частоты с высокой степенью точности, осуществляемая для проверки частотно-измерительных устройств.

Наиболее перспективным и рациональным направлением в последнее время является создание частотных датчиков, позволяющих получать выходную информацию в дискретной форме, так как частоту можно легко преобразовать

в такую форму без внесения погрешностей. Главный элемент всех частотных датчиков — автогенератор. Измеряемая величина оказывает влияние на параметры механического или электрического колебательного контура, изменяя его частоту. В качестве частотно-зависимой цепи используют параметрические датчики активного, индуктивного или смешанного сопротивлений, а также получившие в последнее время большое распространение струнные датчики.

Принцип действия струнных датчиков основан на зависимости собственной частоты колебаний натянутой струны от ее длины, массы и силы натяжения (или от механического напряжения и удлинения).

Точность струнного метода определяется погрешностью, с которой измеряется частота колебаний, однако изменение частоты колебаний струны в зависимости от ее удлинения повышается обратно пропорционально квадрату длины струны. Небольшое предварительное натяжение уменьшает отрицательные последствия упругости струны. Опытным путем на экспериментальном приборе (рычажной скобе) был установлен нижний предел для зависимости механического напряжения струны σ от ее удлинения Δl . В результате испытаний выяснили, что при малых напряжениях струна перестает издавать чистый звук (нестабильность частоты) из-за усиливающегося влияния жесткости.

Применение слишком короткой струны нецелесообразно, так как из-за влияния крепления ее концов нарушается устойчивость режима. Струны в местах крепления всегда подвергаются значительным местным усилиям, вызывающим пластическую деформацию и связанную с ней текучесть. Чем короче струна, тем эти явления больше сказываются на частоте ее колебаний. Для струны диаметром 0,20 мм предельной минимальной длиной можно считать 40 мм. При назначении исходных данных необходимо учитывать пределы измеряемых размеров.

В большом диапазоне измерений частота собственных колебаний струны с достаточной точностью описывается уравнением

$$f_0 = \frac{1}{2} \left(E \Delta l / \rho l^3 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где f_0 — собственная частота колебаний натянутой струны; E — модуль упругости материала; ρ — плотность материала струны; l , Δl — длина струны и ее удлинение, соответственно.

Наибольшее отклонение, согласно (1), вызывается изгибной жесткостью струны в областях малых напряжений, а также при работе струны с напряжениями, близкими к пределу упругости.

В литературе описаны различные физические модели жестких струн, приводящие к разной оценке влияния жесткости [3—6]. Наиболее правильный — подход Ф. Морза, который считает жесткую струну балкой с зашпеленными концами. В этом случае вблизи крепления струны появляются участки, практически незадействованные в колебаниях, и влияние жесткости уже нельзя свести к постоянному изменению напряжения или другого параметра струны.

Для расчета характеристики жесткой струны можно использовать приближенную формулу Ф. Морза:

$$f_0 = \frac{n}{2} (F/ml)^{1/2} \left[1 + 2(EI/EI^2)^{1/2} + \left[4 + (n^2\pi^2/2) \right] EI/EI^2 \right], \quad (2)$$

где n — номер гармоники; $I = \pi d^4/64$ — момент инерции круглых струн; d — диаметр струны.

Силу натяжения струны F можно выразить как

$$F = SE\Delta l/4l,$$

где $S = \pi r^2$ — площадь поперечного сечения струны; $r = d/2$ — радиус сечения струны.

В разработанной рычажной скобе применяют струну диаметром 0,2 мм из углеродистой струнной стали с $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, $l = 80$ мм.

Рассчитаем частоту колебаний струны рычажной скобы с учетом жесткости и без нее при максимально рекомендуемом удлинении $\Delta l_{\max} = 0,85$ мм, сравним полученные результаты. Частота колебаний струны с учетом жесткости, определенная по (2), составляет 1381 Гц, а эта же частота, найденная по (1) и без учета жесткости, равна 1370 Гц. Расхождение составляет 11 Гц.

Из (2) следует, что влияние жесткости сказывается одинаково во всем диапазоне работы струны, так как во втором члене $2(EI/FI^2)^{1/2}$ после раскрытия скобок в (2) исчезает сила натяжения струны. Его изменение, происходящее от нестабильности модуля упругости, может быть одной из причин погрешности преобразователя. Последний член $[4 + (n^2\pi^2/2)] (EI/FI^2)$ действует на чувствительность и линейность преобразователя, но это влияние, как следует из расчетов, незначительно.

Для сравнения покажем, как влияет жесткость струны на частоту, если в преобразователь поставить струну из того же материала, но диаметром 0,5 мм. Тогда по (2) найдем $f_0 = 1399$ Гц. Расхождение в частоте с формулой (1) при этом диаметре струны уже 29 Гц. Отсюда следует, что чем тоньше струна в преобразователе (датчике), тем меньше влияние жесткости, выше чувствительность струны и меньше нелинейность.

Разработанная рычажная скоба со струнным преобразователем смонтирована на основе корпуса от стандартной рычажной скобы (пассиметра) с регулируемым неподвижным штоком для настройки на заданный номинальный размер. Общий вид скобы представлен на рис. 1. Скоба предназначена для измерений наружных диаметров, находящихся в интервале 50—75 мм, с пределом измерений для всех размеров в диапазоне 0—1 мм. Измеряемое изделие помещают между неподвижным и подвижным штоками. Последний через рычаги связан со струной, автоколебания ко-

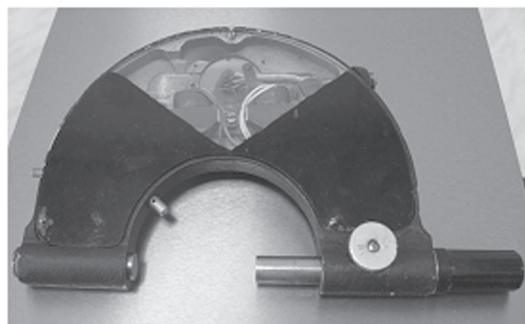


Рис. 1. Общий вид рычажной скобы со струнным преобразователем

торой поддерживаются генератором. Прибор позволяет получить результаты с погрешностью 0,002 мм. Такую погрешность прибор должен обеспечивать при нормальных микроклиматических условиях. Его производительность — около 300 измерений в час. Полученные результаты передают в компьютер, связанный со станками с числовым программным управлением.

Нутромер со струнным датчиком предназначен для измерений диаметров отверстий в труднодоступных местах, в условиях слабой освещенности. Как и индикаторный нутромер, он позволяет измерять отклонения от правильной геометрической формы. Пределы измерений находятся в интервале 150—225 мм. Результаты отображаются на цифровом табло, они могут быть внесены в память компьютера и использованы для статистического анализа. Погрешность отсчета составляет 0,005 мкм.

Схематическое изображение разработанного и изготовленного нутромера представлено на рис. 2. Нутромер состоит из корпуса 10 с подвижным 7 и неподвижным регулируемым 9 штоками и двухплечевого рычага 8, через который перемещения подвижного наконечника передаются на струну 6. Предварительное натяжение струны осуществляется червячным механизмом 1. Струна диаметром 0,5 и длиной 450 мм обеспечивает предел измерений 2 мм без перенастройки наконечника 9. Во избежание дрейфа частоты колебаний необходимо, чтобы струна работала на более высокой частоте и с меньшей амплитудой. Чем короче струна, тем выше частота ее собственных колебаний, но тем меньше диапазон измерений без перенастройки. Для разрешения этого противоречия решили оставить длину струны 450 мм, а рабочую, т. е. колеблющуюся часть, ограничить до 180 мм. Это выполнили с помощью двух порожков 2 по принципу струнных музыкальных инструментов. Установка порожков позволила увеличить частоту колеблющейся струны до 600—700 Гц и выше.

Шток 11 с рукояткой 12 служит для отвода подвижного наконечника 7 при погружении нутромера в измеряемое отверстие. Датчик 5 предназначен для регистрации колебаний струны, возбудитель 4 — для создания автоколебаний. Для проведения исследований разработали генератор с электромагнитным возбуждением.

Исследования показали, что температурная погрешность сравнительно невелика и обусловлена в основном различными коэффициентами линейного расширения материалов струны и корпуса прибора. Основные требования к материалу струны следующие:

высокая прочность при вибрационных нагрузках;

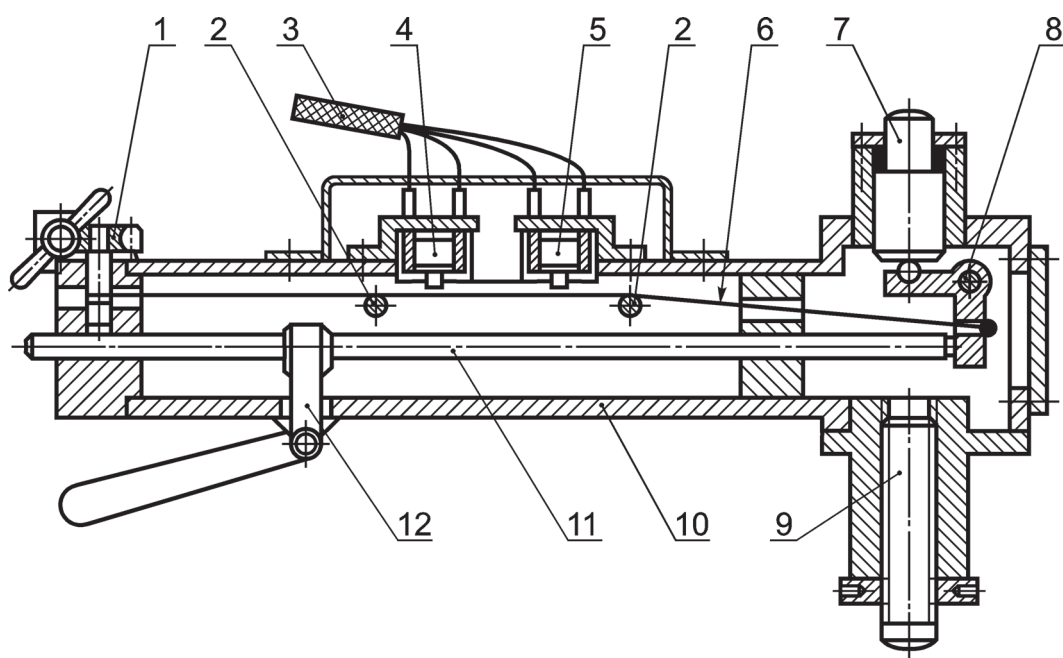


Рис. 2. Схематическое изображение нутромера:

1 — червячный механизм; 2 — порожки; 3 — провода; 4 — возбудитель; 5 — датчик; 6 — струна; 7 — подвижный шток; 8 — двухплечевой рычаг; 9 — неподвижный шток; 10 — корпус нутромера; 11 — шток; 12 — рукоятка

определенное значение коэффициента линейного расширения (либо малое, либо равное температурному коэффициенту конструкционного материала измерительного прибора);

стабильность и температурная независимость упругих свойств, малость упругого последствия и внутренних потерь колебательной энергии;

возможность получения максимальной чувствительности преобразователя при малых погрешностях.

Этим требованиям в наибольшей мере соответствуют струны из стали. Корпус и рычаги скобы также должны быть изготовлены из этого материала. Температурная погрешность при этом минимальна, так как коэффициенты линейного расширения материала струны и деталей скобы практически одинаковы.

Особым достоинством обладает сплав K40HXMB, разработанный специально для растяжек. Сплав имеет очень малое упругое последствие и высокую прочность, по которой он уступает только вольфрамовым сплавам.

Размеры струны обычно выбирают, исходя из противоречивых требований к чувствительности, линейности и стабильности струнного преобразователя. Струну, как правило, стремятся взять покороче, так как при этом уменьшаются габаритные размеры струнных датчиков, пропорционально повышаются все частоты, а следовательно, растет чувствительность и улучшается виброустойчивость. В проектируемой рычажной скобе струна имеет длину 85 мм, а в нутромере — 180 мм.

Сечение струны выбирают по требуемому пределу изменения натяжения и целесообразному напряжению в струне. Определив сечение, надо проверить, не слишком ли толстой получилась струна при заданной длине. Для обеспечения малой погрешности от собственной жесткости струны следует придерживаться условия $l/d \geq 300 \dots 500$. Так в раз-

работанных устройствах при $d = 0,2$ мм отношения длины струны к диаметру составили: 425 — для рычажной скобы и 900 — для нутромера, что укладывается в рекомендуемые пределы.

На частоту колебаний и стабильность влияет способ крепления концов струны. Крепление пайкой применяют при малых механических напряжениях $\sigma \leq 200$ Н/мм². При увеличении σ до 300—400 Н/мм² и выше пайку как мягкими, так и твердыми припоями применять нежелательно. Крепление же с помощью винтов сопровождается местными перенапряжениями на смятие, что ухудшает стабильность частоты.

Погрешность измерений зависит от ряда причин, но не все они одинаково влияют на общую погрешность. К основным относятся:

погрешности прибора (рычажной скобы или нутромера) и установочных мер;

погрешности от температурных деформаций и измерительного усилия.

Одной из погрешностей прибора является упругое последствие в струне. При точности, с которой струна реагирует на изменение напряжения, невозможно пренебрегать явлениями вторичной упругости в металлах, проявляющимися в виде гистерезиса упругости, упругого последствия и ползучести. Упругое последствие заставляет струну после прекращения изменений ее напряженности самопроизвольно в течение некоторого времени менять свои размеры, даже если напряжение и не выходит за пределы упругости. Так как концы струны жестко закреплены, вместо изменения длины можно наблюдать изменение напряжения в ней. При этом отмечается не только снижение строя после натяжки, хорошо известное музыкантам, но и его самопроизвольное повышение.

Ползучесть проявляется в самопроизвольном снижении строя при повышении напряжения выше предела упругости. Это состояние отличается от упругого последствия своей сильной выраженностью, а также необратимостью. Известны следующие закономерности.

1. Протекание упругого последствия во времени при напряжениях, не превышающих предела упругости струны, во всех случаях (кроме первых 1—2 суток) описывается эмпирической формулой

$$\Delta\sigma = A (\sigma - \sigma_0) (t^{0,23} - B),$$

где $\Delta\sigma$ — упругое последствие, выраженное напряжением; σ , σ_0 — верхняя и нижняя границы интервала напряжения, соответственно; в случае старых струн σ_0 — некоторая нижняя граница напряжения, не вызывающая последствия, обычно 13 кг/мм²; A , B — постоянные; t — время, выраженное в сутках.

Таким образом, упругое последствие пропорционально интервалу напряжения.

2. Нагревание струны значительно ускоряет ход последствия. Например, при температуре 90 °С за 1,4 ч происходит тот же эффект, который при комнатной температуре требует 500 сут, т. е. отмечается ускорение процесса в 6000 раз.

3. Предварительный нагрев до 200 °С за 4 ч в натянутом состоянии вызывает большое изменение строя и приводит к полной стабилизации струны.

4. Предварительный нагрев до такой же температуры, за это же время, но на малых напряжениях уменьшает упругое последствие при последующих деформациях в 2,5 раза по сравнению с «сырыми» струнами.

На основании этих законов можно сделать вывод, имеющий отношение к струнному методу: струны приборов, предназначенные для длительной службы, должны быть предварительно стабилизированы путем прогрева при напряжении более высоком, чем рабочее. Установка нестабилизированных струн может привести к очень большим погрешностям, достигающим через полгода в неблагоприятных случаях 10 % и выше.

Литература

1. Кутчер Р. И., Секацкий В. С. Струнный датчик // Датчики и преобразователи информационных систем измерения, контроля и управления. Датчик — 2000: Тез. докл. XII науч.-техн. конф. с участием международных специалистов. М., 2000. С. 87—89.
2. Кутчер Р. И., Секацкий В. С. Устройство для линейных и угловых размеров на основе колебаний // Качество продукции машиностроения: Тез. науч.-техн. конф. Красноярск, 1998. С. 32—33.
3. Эткина Л. Г. Вибрационно-частотные преобразователи. Ч. 1. М.: Энергия, 1970.
4. Карцев Е. А., Коротков В. П. Унифицированные струнные измерительные преобразователи. М.: Машиностроение, 1981.
5. Цейтлин Я. М., Скачко Ю. В., Капырин В. В. Модифицированные струнные преобразователи для измерения геометрических величин. М.: Изд-во стандартов, 1989.
6. Щепетов А. Г. Теория, расчет и проектирование измерительных устройств: Ч. 2. Расчет измерительных устройств. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2007.

Дата принятия 17.12.2014 г.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

620.22.419:620.19:537.531.04

Измерения коэффициентов пропускания образцов новых материалов в субтерагерцовом диапазоне частот

А. С. ЕРМОЛОВ¹, Г. Н. ИЗМАЙЛОВ², А. С. КУЗЬМИН², С. П. ЛЕБЕДЕВ³,
Ю. А. МИТЯГИН¹, В. Н. МУРЗИН¹, С. В. ЧУЧУПАЛ³

¹ Физический институт РАН им. П. Л. Лебедева, Москва, Россия

² Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

³ Институт общей физики РАН им. А. М. Прохорова, Москва, Россия
e-mail: izmailov@mai.ru

Рассмотрено прохождение излучения в диапазоне частот 0,2—0,3 ТГц через образцы композитных материалов. Образцы — планка из углеродных волокон, уложенных в ленты, пропитанные эпоксидной смолой, и брусок из хаотично расположенных кварцевых нитей, скрепленных боросиликатным стеклом. Показана возможность использования результатов измерений в терагерцовом диапазоне частот для изучения структурных параметров и дефектоскопии композитных материалов.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон частот, коэффициент пропускания, композитные материалы, углеродные волокна, кварцевые нити, дефектоскопия.

The radiation propagation through the composite materials samples in the range 0,2—0,3 THz is considered. The samples are strips of carbon fibers packed in tapes impregnated with epoxy resin, and a block of randomly arranged quartz threads bound by borosilicate glass. Show the possibility of using this method to study the structural parameters and for composite materials flaw detection.

Key words: terahertz frequency range, coefficient transmission, composite materials, carbon fiber, quartz thread, flaw detection.

В литературе неоднократно подчеркивают важность развития техники, работающей в терагерцовом диапазоне частот, для высокоскоростных систем передачи и обработки

информации, идентификации состава материала и химического анализа (в фармакологии, медицинском обследовании), измерений свойств новых конструкционных материалов, не-