

Е. А. КАРЦЕВ
В. П. КОРОТКОВ

УНИФИЦИРОВАННЫЕ СТРУННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



Е. А. КАРЦЕВ
В. П. КОРОТКОВ

УНИФИЦИРОВАННЫЕ СТРУННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

МОСКВА « МАШИНОСТРОЕНИЕ » 1982



Scan AAW

ББК 34.9
К 68
УДК 681.2+53.08

Рецензент д-р техн. наук проф. Ю. В. Милосердин

Карцев Е. А., Коротков В. П.

К68 Унифицированные струнные измерительные преобразователи. — М.: Машиностроение. 1982. — 144 с., ил. — (Б-ка приборостроителя).
50 к.

В книге рассмотрен комплекс унифицированных по принципу действия, конструкции и виду выходного сигнала струнных измерительных преобразователей ряда физических величин (давления, температуры, усилия, перемещения, ускорения, расхода, перепада давлений и др.) в частоту. Комплекс разработан для использования как в АСУТП, так и в обычных информационно-измерительных устройствах и системах.

Изложены принцип действия, вопросы анализа погрешностей, методы инженерного расчета основных параметров преобразователей.

Книга предназначена для инженеров и техников, занимающихся разработкой средств измерения и вопросами их применения в информационно-измерительных системах.

К 2706000000-271
038(01)-82 271-82

**ББК 34.9
6П5.8**

ИБ № 3314

*Евгений Александрович Карцев,
Владимир Петрович Коротков*

**УНИФИЦИРОВАННЫЕ СТРУННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

Редактор Л. К. Тучкова
Художественный редактор С. С. Водчиц
Технический редактор Е. П. Смирнова
Корректор Л. Л. Георгиевская
Обложка художника В. И. Столярова

Сдано в набор 19.04.82. Подписано к печати 11.08.82. Т-16311. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 7,56. Уч.-изд. л. 10,3. Тираж 4000 экз. Заказ 764. Цена 50 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение», 107076, Издательство «Машиностроение», 107076, Москва, Б-76, Стромынский пер., 4

Московская типография № 32 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 103051, Цветной бульвар, 26.

© «Издательство «Машиностроение», 1982 г.

Современный этап развития промышленного производства характерен широким внедрением автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП). Как правило, такие системы реализуются на базе специализированных или универсальных ЭВМ. Для контроля и регулирования параметров технологического процесса кроме ЭВМ необходимо располагать системой информационного обеспечения АСУТП. Одним из важнейших звеньев такой системы являются измерительные преобразователи различных физических величин (температуры, давления, расхода, перемещения и др.) в электрический сигнал.

Подавляющее большинство измерительных преобразователей различных физических величин имеют выходной сигнал в форме тока или напряжения, промодулированных по амплитуде. Сравнительно низкая помехоустойчивость таких сигналов и необходимость применения промежуточных преобразователей типа аналог—код для ввода сигнала в ЭВМ существенно снижает эксплуатационные и метрологические характеристики этой группы преобразователей.

Кроме того, многообразие номенклатуры измерительных преобразователей, различных по принципу действия, конструкции и виду выходного сигнала, приводит к необходимости применения большого числа сопутствующих вторичных преобразователей. Резко возрастают затраты на эксплуатацию, ремонт и поверку средств метрологического обеспечения АСУТП.

В связи с изложенным выше в настоящее время назрела острая необходимость в унификации измерительных преобразователей. Одним из перспективных направлений унификации является создание системы унифицированных измерительных преобразователей различных физических величин в частоту. Это обусловлено тем, что погрешность воспроизведения эталона частоты лежит на уровне $(5 \div 8) \cdot 10^{-13}$, и на современном уровне развития науки и техники частота является одной из наиболее точно измеряемых физических величин. Стандартные цифровые электронно-счетные частотомеры позволяют в обычных условиях производить измерение частоты с погрешностью не более 10^{-8} — 10^{-9} . Кроме того, высокая помехоустойчивость и помехозащищенность частотопередающих трактов позволяет организовать дистанционные системы измерения и контроля, надежно работающие в промышленных условиях. Частотный выходной сигнал может быть преобразован в код практически без потери точности.

Из всего многообразия частотных измерительных преобразователей одними из перспективных являются струнные измерительные преобразователи.

Струнный преобразователь представляет собой высокочастотную механическую колебательную систему с линейно распределенными параметрами. Частота собственных поперечных колебаний струны обусловлена силой ее продольного натяжения. Преобразуя любую измеряемую физическую величину в изменение силы продольного натяжения струны, можно получить изменение частоты колебаний струны, являющееся мерой измеряемой величины. Для получения непрерывного выходного сигнала обычно реализуется струнный автогенератор, в котором струна является частото задающим элементом.

На кафедре «Метрология электронной техники» Московского института электронного машиностроения в течение ряда лет ведутся работы по созданию унифицированных по принципу действия, конструкции и виду выходного сигнала струнных измерительных преобразователей перемещений, давления, усилий, температуры, расхода в частоту.

В книге рассмотрен комплекс унифицированных струнных измерительных преобразователей ряда физических величин в частоту, разработанный для использования как в АСУТП, так и в обычных информационно-измерительных устройствах и системах.

Рассмотрены принцип действия, вопросы анализа погрешностей, методы инженерного расчета основных параметров преобразователей. Приводятся описания конкретных конструкций струнных преобразователей, результаты исследования их метрологических характеристик и возможные области практического применения преобразователей.

Материал книги в значительной части оригинален и базируется на исследованиях и разработках, проведенных авторами.

Глава первая написана В. П. Коротковым, глава вторая — Е. А. Карцевым, введение, глава третья — Е. А. Карцевым и В. П. Коротковым совместно.

В настоящее время в практику технических измерений все более широко внедряются измерительные преобразователи различных физических величин в частоту. Разработчики информационно-измерительных систем (ИИС) и АСУТП предпочитают использовать измерительные преобразователи с частотным выходным сигналом вместо традиционных преобразователей с амплитудно-модулированным выходным сигналом в виде напряжения или тока.

Это обстоятельство не является данью моде в технике, а обусловлено рядом существенных преимуществ частотных преобразователей (датчиков), сущность которых излагается ниже.

1. Точность воспроизведения эталона частоты является самой высокой среди всех эталонов известных физических величин. Погрешность воспроизведения эталона частоты составляет $(5 \div 8) 10^{-13}$. Соответственно погрешность измерения в обычных цеховых и лабораторных условиях стандартными типами широко распространенных электронно-счетных частотомеров с цифровым отсчетом лежит в пределах $1 \cdot 10^{-9}$ — $1 \cdot 10^{-7}$. Выходная информация частотных измерительных преобразователей без каких-либо затруднений может быть измерена именно с такой погрешностью. Выходной сигнал измерительного преобразователя в виде амплитуды напряжения или тока, как правило, может быть измерен с погрешностью $5 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-2}$ и лишь в отдельных случаях — с погрешностью $5 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-3}$ [25].

В связи с этим вполне объяснимо стремление разработчиков новых средств измерения преобразовать измеряемую физическую величину в соответствующее значение частоты электрического сигнала, который может быть измерен значительно точнее (на 4—6 порядков), чем любой амплитудно-модулированный сигнал.

2. Построение информационно-измерительных систем с использованием измерительных преобразователей с частотно-модулированным сигналом дает возможность исключить из состава системы аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Для связи источников информации с ЭВМ в этом случае используется преобразователь типа частота—код, осуществляющий преобразования практически с любой заданной точностью.

При использовании в информационно-измерительных системах и АСУТП измерительных преобразователей с амплитудно-модулированным выходным сигналом для связи с ЭВМ необходимо применение АЦП. В этом случае общая погрешность измерения возрастает, поскольку в результаты измерений будут входить погрешности АЦП.

Наиболее распространенные типы АЦП, выпускаемых отечественной промышленностью, и их основные технические характеристики приведены в работе [21]. При диапазоне преобразования ± 1 В класс точности различных типов АЦП лежит в пределах 0,05—0,5.

Из изложенного следует, что применение АЦП снижает точность получаемой информации о значениях измеряемых физических величин столь существенно, что практическое использование таких систем измерения и обработки информации в ряде случаев становится малоэффективным.

3. Преобразователь типа частота—код является универсальным и в сочетании с коммутаторами может обслуживать значительное число измерительных преобразователей различных физических величин в частоту. При этом изменение сопротивлений линий связи, переходных сопротивлений коммутатора, воздействие паразитных термо-ЭДС не будут вызывать дополнительных погрешностей измерения.

К коммутаторам амплитудно-модулированных сигналов малого уровня предъявляются весьма жесткие требования в отношении стабильности переходных сопротивлений, величин паразитных термо-ЭДС и уровня взаимного влияния коммутируемых каналов. Например, серийно выпускаемый аналоговый коммутатор типа Ф240 не может использоваться для коммутации сигналов, уровень которых меньше 50 мВ.

4. При использовании частотно-модулированного сигнала существенно упрощаются требования к линиям связи в отношении стабильности сопротивления, величин паразитных ЭДС и помехозащищенности.

5. Помехоустойчивость частотно-модулированного сигнала значительно выше помехоустойчивости амплитудно-модулированного сигнала, что в ряде случаев имеет весьма существенное значение при реализации ИИС метрологического обеспечения АСУТП.

На участке от выхода измерительного преобразователя до входа усилителя измерительная информация передается самым малым потоком энергии. Возникающие на этом участке потери информации являются необратимыми и никаким образом не могут быть восстановлены. При этом погрешности, возникающие, например, при использовании реостатных, индуктивных, тензорезистивных и пьезоэлектрических амплитудных преобразователей, равные соответственно 0,02; 0,1; 1,0 и 10 %, располагаются точно в такой же последовательности, как и мощности выходных сигналов преобразователей (10^{-2} ; 10^{-3} ; 10^{-5} и 10^{-7} Вт) [25]. Выходные мощности частотных измерительных преобразователей оказываются, как правило, значительно большими и лежат в пределах 10^{-1} — 10^{-3} Вт.

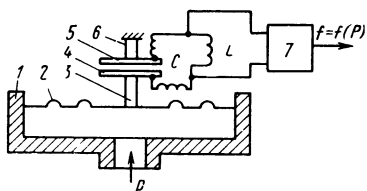
При этом чем выше добротность используемого резонатора, тем больше его колебательная мощность и выше стабильность выходной частоты.

Из приведенного краткого анализа преимуществ измерительных преобразователей различных физических величин в частоту следует, что их разработка и внедрение в ИИС и АСУТП являются весьма целесообразными и могут дать значительный технический и экономический эффект.

Все частотные измерительные преобразователи можно классифицировать по виду физического явления, положенного в основу их работы. С этой точки зрения преобразователи можно разделить на следующие классы [25]:

1) резонаторные;

Рис. 1. Схема резонаторного преобразователя давлений в частоту с LC -частотозадающим контуром



- 2) с нерезонирующими частотно-зависимыми системами;
- 3) интегрирующие;
- 4) статистические.

Из всего многообразия частотных измерительных преобразователей наибольшее практическое применение находят резонаторные преобразователи, в которых частотно-зависимая система совершает автоколебания.

По сравнению с другими видами частотных преобразователей резонаторные преобразователи обладают рядом существенных преимуществ, основными из которых являются следующие:

- 1) высокая добротность резонаторов (дает возможность существенно повысить точностные характеристики измерительных преобразователей);
- 2) возможность включения резонатора в схему автогенератора и получения непрерывного во времени выходного сигнала;
- 3) применение схем автогенераторов, что существенно повышает быстродействие частотных измерительных преобразователей;
- 4) отношение полезного выходного сигнала к уровню шумов (флуктуаций) значительно выше, чем у преобразователей других типов.

В качестве примера рассмотрим конструктивную схему резонаторного преобразователя давлений в частоту с LC -частотозадающим контуром.

Круглая гофрированная мембрана 2 (рис. 1) с жестко защемленными краями совместно с корпусом 1 образует замкнутую герметичную полость, внутрь которой подается измеряемое давление p .

На изоляционных втулках 3 и 6 закреплены пластины 4, 5 конденсатора, емкость которого изменяется при прогибе мембраны под действием измеряемого давления. Этот конденсатор включается в частотозадающий контур LC -автогенератора 7 (см. рис. 1), выходная частота которого функционально связана с измеряемым давлением.

Интенсивное развитие и внедрение в производство цифровой вычислительной техники вызвало необходимость представления информации об измеряемых физических величинах в виде кода.

Частотные измерительные преобразователи относятся к классу аналоговых, но в отличие от аналоговых преобразователей с амплитудной модуляцией выходного сигнала их выходной сигнал может быть преобразован в форму кода аналого-цифровым преобразователем типа частота—код с любой наперед заданной точностью.

Поэтому в настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом ведутся интенсивные работы по созданию частотных измерительных преобразователей, применение которых в сочетании с цифровой вычислительной техникой позволило бы реализовать высокоточные и надежные ИИС.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СТРУННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1. СУЩНОСТЬ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТРУННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Одним из рациональных методов измерения различных физических величин, удовлетворяющих характерным требованиям работы в условиях АСУТП, является струнный метод измерения [7, 22].

Струна представляет собой высокооборотную механическую колебательную систему с линейно распределенными параметрами, частота собственных поперечных колебаний которой определяется силой ее продольного натяжения.

Таким образом, если трансформировать измеряемую физическую величину в изменение силы продольного натяжения струны, то собственная частота ее поперечных колебаний будет функционально связана с измеряемой величиной.

Первые попытки использовать струнный метод для целей измерения деформаций элементов конструкций были предприняты в 1919 г. [37]. Начало практического использования струнного метода измерений в нашей стране относится к 1928 г. [7]. Под руководством акад. Н. Н. Давиденкова были проведены исследования, завершившиеся изготовлением струнных преобразователей для измерения давлений грунтов в телах плотин и фундаментов гидротехнических сооружений. Несколько десятков преобразователей такой конструкции были заложены в тело плотины Днепрогэса, и из них около 25 % функционируют до настоящего времени. Этот факт свидетельствует о высокой надежности струнных преобразователей.

Математическое описание процесса колебаний струны было разработано в конце XIX, начале XX в. Волновое уравнение колебаний струны стало классическим уравнением математической физики. Это обстоятельство существенно облегчило создание теоретических основ расчета параметров струнных преобразователей различных физических величин.

Рассмотрим идеально гибкую струну конечной длины l , жестко закрепленную с обоих концов и имеющую бесконечно малую амплитуду колебаний [31, 27]. Благодаря этому предположению будем считать, что в процессе колебаний струны сила ее продольного натяжения F постоянна и не зависит от амплитуды. Полагая, что струна колеблется в плоскости чертежа (рис. 2, а), выделим элемент струны длиной dx и массой dm (рис. 2, б).

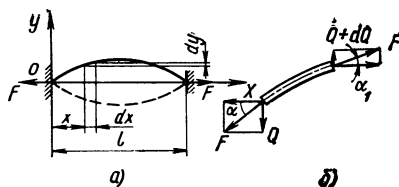
Проекции сил натяжения на концах элемента струны на ось oy дают вертикальные составляющие

$$Q = -F \sin \alpha;$$

$$Q + dQ = F \sin \alpha_1.$$

Ввиду малости углов α и α_1 можно принять

Рис. 2. Схема колеблющейся струны с жестко закрепленными концами



$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx};$$

$$\sin \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx.$$

Сумма сил Q и $Q+dQ$ должна уравниваться инерционной силой, равной произведению массы выделенного элемента dm на его ускорение $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$, т. е.

$$dm \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx.$$

Поскольку предполагается, что струна однородна, то

$$dm = \frac{m_c}{l} dx,$$

где m_c — масса струны.

Тогда дифференциальное уравнение движения струны можно записать в виде

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{Fl}{m_c} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (1)$$

или

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где

$$a^2 = \frac{Fl}{m_c}. \quad (3)$$

Чтобы решить уравнение, т. е. найти значение y в функции двух переменных x и t в виде

$$y = \varphi(x, t), \quad (4)$$

зададимся граничными условиями на концах струны, которые очевидны из физических соображений и рис. 2, а: при $x=0$ и $x=l$ $y=0$.

Зададим начальные условия при $t=0$

$$y = \varphi(x, 0).$$

С учетом граничных и начальных условий общее решение уравнения (2) можно представить в форме

$$y = C_n \sin \frac{n\pi}{l} x \cos \frac{an\pi}{l} (t - \tau_n), \quad (5)$$

где C_n, τ_n — постоянные; n — целое число, характеризующее номер гармоники колебаний, откуда период колебаний струны

$$T_n = \frac{2\pi}{an\pi/l} = \frac{2l}{an}, \quad (6)$$

а частота колебаний

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{an}{2l}. \quad (7)$$

С учетом того, что $a^2 = Fl/m_c$, частота поперечных колебаний струны

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{Fl}{m_c}} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{F}{m_c l}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}, \quad (8)$$

где σ — напряжение растяжения в струне; ρ — плотность материала струны.

Как правило, в большинстве случаев в струнных преобразователях используется возбуждение колебаний струны на первой гармонике, т. е. $n=1$. Значительно реже $n=2$. Возбуждение колебаний струн на более высоких гармониках практически не используется.

Поскольку в общем случае колебания струны представляют собой совокупность налагающихся друг на друга колебаний разных частот, то для обеспечения возбуждения колебаний только на определенной гармонике необходимо предусмотреть создание определенных начальных условий.

Приведенный выше вывод сделан без учета поперечной жесткости струны.

В работах [6, 23, 32] показано, что при соотношениях толщины струны h к ее длине l более 300—500 выражение (8) вполне пригодно для инженерных расчетов характеристик и параметров струнных преобразователей.

Однако при расчете преобразователей повышенной точности или при $h/l \leq 300$ необходимо учитывать влияние поперечной жесткости струны.

В этом случае собственную частоту поперечных колебаний струны с жесткой заделкой концов, колеблющейся на первой гармонике, можно определить на основании выражения [27]

$$f = f_0 \sqrt{1 + kF}, \quad (9)$$

где

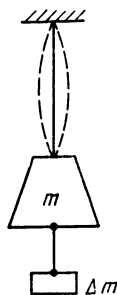
$$f_0 = \frac{h}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{6048E}{\rho}};$$

$$k = \frac{1}{42} \frac{l^2}{EI}.$$

Сущность струнного метода измерения заключается в том, что любая измеряемая физическая величина либо непосредственно, либо через цепь предварительных промежуточных преобразователей приводится к изменению силы натяжения струны, что вызывает изменение частоты ее собственных поперечных колебаний.

Естественной входной величиной струнного преобразователя является продольная сила, а выходной — частота.

Рис. 3. Схема преобразователя малых усилий в частоту поперечных колебаний струны



Струнный преобразователь малых усилий в частоту может не иметь предварительных преобразователей и измеряемая сила ΔF может быть приложена к одному из концов струны. Например, на рис. 3 верхний конец струны закреплен жестко, а к нижнему концу струны подвешена масса m , которая под действием земного ускорения g создает в струне силу начального натяжения $F_0 = mg$. При этом частота поперечных колебаний струны

$$f_0 = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F_0 l}{m_c}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F_0}{\rho S}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\sigma_0}{\rho}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{mg}{\rho S}}, \quad (10)$$

где S — площадь поперечного сечения струны.

После навески массы Δm , величину которой требуется измерить, сила натяжения струны увеличится на величину $\Delta F = \Delta mg$ и частота ее колебаний будет

$$f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F_0 + \Delta F}{\rho S}} = f_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta F}{F_0}}. \quad (11)$$

Очевидно, что приращение частоты струны будет являться мерой измеряемой массы (усилия):

$$\Delta f = f - f_0 = f_0 \left(\sqrt{1 + \frac{\Delta F}{F_0}} - 1 \right). \quad (12)$$

Для упрощения полученного выражения представим иррациональное выражение в виде степенного ряда и, ограничиваясь первыми его двумя членами, что правомерно при $\Delta F/F_0 < 0,5$, получим

$$\Delta f \cong f_0 \frac{\Delta F}{2F_0} = \frac{f_0 g}{2F_0} \Delta m. \quad (13)$$

Или с учетом выражения (10)

$$\Delta f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F_0}{\rho S}} \frac{\Delta F}{2F_0} = \frac{n \Delta F}{4l \sqrt{\rho S F_0}} = \frac{n \Delta \sigma}{4l \sqrt{\rho \sigma_0}}. \quad (14)$$

Из выражения (13) следует, что относительное изменение частоты в 2 раза меньше относительного приращения усилий

$$\frac{\Delta f}{f_0} \cong \frac{\Delta F}{2F_0} = \frac{\Delta \sigma}{2\sigma_0}. \quad (15)$$

В рассмотренной модели преобразователя один из концов струны не имеет жесткой заделки. Поэтому можно считать, что струна работает в режиме измерения силы. К положительным качествам такого преобразователя следует отнести малое влияние изменения температуры окружающей среды на метрологические характеристики, поскольку изменение температуры приводит к изменению длины струны, а не к изменению силы ее натяжения. Существенным недостатком датчика такого типа является его высокая чувствительность

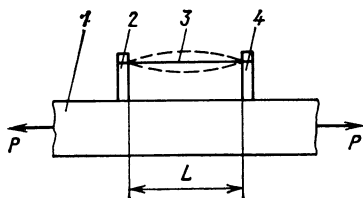


Рис. 4. Схема струнного тензометра

к вибрационным перегрузкам, ввиду того, что второй конец струны жестко не зафиксирован.

Рассмотрим вторую типовую модель струнного преобразователя, например струнного тензометра. На балке 1 (рис. 4), растягиваемой усилием P , необходимо измерить величину упругих деформаций на базе L . Для этой цели на балке жестко закреплены две стойки

2 и 4, между которыми натянута струна 3 с начальным натяжением F_0 . Концы струны жестко зафиксированы на концах стоек. При $P=0$ частота колебаний струны соответствует натяжению F_0 и равна f_0 . При возрастании усилия P появляется упругая деформация балки δ , величина которой на длине L в соответствии с законом Гука будет равна

$$\delta = \frac{PL}{S_6 E_6}, \quad (16)$$

где S_6 , E_6 — площадь поперечного сечения и модуль упругости материала балки соответственно.

При появлении деформации δ возрастает упругая деформация струны на ту же величину δ .

Поскольку начальная упругая деформация струны по аналогии с формулой (16)

$$\delta_0 = \frac{\sigma_0 l}{E}; \quad \sigma_0 = \frac{\delta_0 E}{l}, \quad (17)$$

то

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\delta_0 E}{\rho l}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\delta_0 E S}{m_c}}. \quad (18)$$

Тогда

$$\begin{aligned} f &= f_0 + \Delta f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\rho}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E(\delta_0 + \delta)}{lS}} = \\ &= f_0 \sqrt{1 + \frac{\delta}{\delta_0}} \approx f_0 \left(1 + \frac{\delta}{2\delta_0}\right), \end{aligned} \quad (19)$$

откуда

$$\Delta f = f - f_0 \approx \frac{\delta}{2\delta_0} f_0 = \frac{n}{4l} \sqrt{\frac{E}{l\rho\delta_0}} \delta. \quad (20)$$

Рассмотренная модель работы струнного преобразователя существенно отличается от изображенной на рис. 3. В этом случае входной величиной преобразователя является упругая деформация струны, которая трансформируется в изменение силы натяжения струны, а следовательно, и в частоту ее собственных поперечных колебаний.

Недостатком такого типа преобразователей является сильное влияние тепловых деформаций струн и корпуса на точность измерений.

К положительным свойствам следует отнести относительно высокую вибрационную и ударную прочность и стойкость, что делает преобразователи такого типа пригодными для использования в производственных условиях.

Оценим величину температурной погрешности двух рассмотренных выше типов преобразователей.

Выражение для собственной частоты поперечных колебаний струнного преобразователя, как это следует из выражений (8) и (10), можно представить в виде

$$f_0 = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{F_0}{m_c l_0}}.$$

Полный дифференциал частоты при использовании этого выражения

$$df = \frac{\partial f}{\partial l_0} dl_0 + \frac{\partial f}{\partial F_0} dF_0 + \frac{\partial f}{\partial m_c} dm_c. \quad (21)$$

Учитывая, что в модели преобразователя со свободно подвешенной массой $F_0 = \text{const}$ и $m_c = \text{const}$, получаем

$$df = \frac{\partial f}{\partial l_0} dl_0. \quad (22)$$

Переходя к конечным приращениям, получим

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta l}{2l_0}. \quad (23)$$

Изменение температуры на величину Δt приведет к приращению длины струны

$$\Delta l_t = l_0 \alpha \Delta t, \quad (24)$$

где α — температурный коэффициент линейного расширения материала струны.

Относительное изменение частоты вследствие изменения температуры окружающей среды с учетом выражений (23) и (24)

$$\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_1 = \frac{\alpha \Delta t}{2}. \quad (25)$$

Очевидно, что для повышения температурной стабильности преобразователей первого типа необходимо, чтобы материал струны имел как можно меньшее значение α .

В преобразователях второго типа оба конца струны жестко заделаны в корпусе и изменение температуры окружающей среды приводит к изменению величины начальной упругой деформации струны.

На основании закона Гука и выражения (10) частота собственных поперечных колебаний струны может быть выражена через величину ее начальной упругой деформации δ_0 и значение модуля упругости материала струны, т. е.

$$f_0 = \frac{n}{2l_0} \sqrt{\frac{E_0 \delta_0}{l_0 \rho}} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{E_0 S_0 \delta_0}{l_0^2 m_c}}. \quad (26)$$

Находя полный дифференциал частоты f_0 и переходя к конеч-

ным приращениям, получим связь между относительным изменением частоты и относительными приращениями параметров, определяющих эту частоту:

$$\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_{II} = \frac{\Delta \delta_0}{2\delta_0} + \frac{\Delta E}{2E_0} + \frac{\Delta S}{2S_0} - \frac{\Delta l}{l_0} - \frac{\Delta m_c}{m_c}. \quad (27)$$

Определяя приращения параметров δ_0 , E_0 , S_0 , l_0 , обусловленные приращением температуры на величину Δt , и полагая в силу жесткости заделок концов струн массу струны m_c постоянной, получим

$$\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_{II} = \frac{(\alpha_k - \alpha) \Delta t E_0}{2\sigma_0} + \frac{\alpha_E \Delta t}{2} + \alpha \Delta t - \alpha_k \Delta t, \quad (28)$$

где α_k — температурный коэффициент линейного расширения корпуса преобразователя; α_E — температурный коэффициент модуля упругости материала струны.

Например, при $\alpha = 11 \cdot 10^{-6}$ 1/K; $\alpha_k = 9 \cdot 10^{-6}$ 1/K; $E_0 = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м²; $\alpha_E = -2,5 \cdot 10^{-4}$ 1/K; $\sigma_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ Н/м² и $\Delta t = 1$ К для преобразователя первого типа

$$\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_I = 5,5 \cdot 10^{-6}$$

и для преобразователя второго типа

$$\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_{II} = 5,23 \cdot 10^{-4}.$$

Из приведенного примера следует, что влияние температуры на аддитивную погрешность преобразователя второго типа на два порядка больше.

Приведенный пример имел целью показать важность учета влияния температуры при конструировании преобразователей второго типа, но ни в коей мере не преследовал цели показать их непригодность для практического применения.

Опыт конструирования и эксплуатации струнных преобразователей показывает, что большинство их типов соответствует второй из рассмотренных моделей.

С целью повышения быстродействия струнных преобразователей и получения на выходе непрерывного сигнала струна исполь-

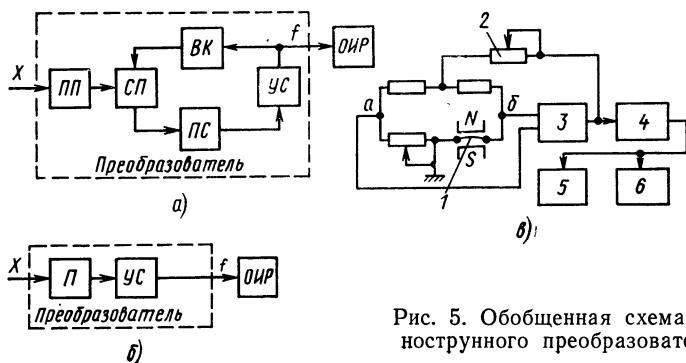


Рис. 5. Обобщенная схема однострунного преобразователя

зуется в качестве частото задающего элемента струнного автогенератора.

Обобщенная структурная схема однострунного измерительного преобразователя представлена на рис. 5, а. Входная измеряемая величина X подается на первичный измерительный преобразователь $ПП$, который трансформирует ее в изменение силы натяжения (упругой деформации) струны струнного преобразователя $СП$. Для обеспечения непрерывных автоколебаний струны использована цепь положительной обратной связи, состоящая из приемника колебаний струны $ПС$, электронного усилителя $УС$ и возбудителя колебаний струны $ВК$. Одновременно с выхода усилителя электрический сигнал подается на внешние устройства с целью дальнейшей обработки или индикации результатов измерения ($ОИР$).

Совокупность пяти измерительных преобразователей, обведенных штриховой линией, представляет собой общую структурную схему любого однострунного преобразователя.

В современных струнных преобразователях используются магнитоэлектрические, электромагнитные и электростатические преобразователи для возбуждения и поддержания незатухающих колебаний струнного резонатора.

Наиболее простыми с конструктивной точки зрения и надежными в процессе эксплуатации являются магнитоэлектрический возбудитель и приемник сигналов [25, 27]. Во всех рассматриваемых в данной работе струнных преобразователях использован магнитоэлектрический способ возбуждения и поддержания автоколебаний струны. При его грамотной реализации можно обеспечить наивысшую стабильность частоты автогенератора сравнительно с другими способами возбуждения.

Поскольку ниже будут рассматриваться структурные схемы различных вариантов струнных датчиков, введем некоторое условное упрощение в изображение структурной схемы струнного преобразователя, обозначив конструктивную совокупность преобразователей $ПП$, $СП$, $ПС$ и $ВК$ через $П$ (рис. 5, б). Обозначение же электронного усилителя оставим без изменения.

Частота собственных поперечных колебаний струны, вычисленная в соответствии с выражением (10), отличается от частоты колебаний струнного автогенератора. Однако при высокой добротности струн это различие столь незначительно, что при инженерных расчетах его можно не учитывать.

В подавляющем большинстве случаев входным устройством электронного усилителя $УС$ является четырехплечий сбалансированный мост, одним из плеч которого является струна 1 преобразователя (рис. 5, в). При колебаниях струны в поле постоянных магнитов в ней наводится ЭДС и с диагонали моста ab переменное напряжение частоты f подается на электронный усилитель 3. С выхода электронного усилителя через сопротивление обратной связи 2 на вершину моста подается ток подкачки, поддерживающий незатухающие колебания струны. Изменением сопротивления 2 можно менять величину тока в цепи положительной обратной связи, изменяя тем самым механическую амплитуду колебаний струны.

Одновременно с выхода электронного усилителя выходной электрический сигнал струнного автогенератора может быть подан на электронно-счетный частотомер 4 для реализации цифрового отсчета. С выхода частотомера информация о текущем значении частоты в виде цифрового кода может быть подана на регистрирую-

щее цифropечатающее устройство 5 и вход ЭВМ, обозначенной цифрой 6.

Очевидно, что для дифференциального струнного преобразователя необходимо иметь два электронных усилителя.

2. ОДНОСТРУННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ, ИХ ФУНКЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ПОГРЕШНОСТЬ ОТ НЕЛИНЕЙНОСТИ

На рис. 6 приведены схемы, из которых можно уяснить принцип действия струнных преобразователей и универсальность их применения для измерения различных физических величин.

Устройство для измерения массы или малых усилий (рис. 6, а) состоит из жесткого корпуса 1, внутри которого расположена струна 2, помещенная в воздушный зазор постоянного магнита 3. К нижнему концу струны подвешена масса 4, создающая начальное продольное натяжение в струне $F_0 = mg$, где g — ускорение силы тяжести. Растяжки 5 ограничивают боковое смещение массы и одновременно выполняют роль токоподвода. В соответствии с уравнением (10) частота собственных поперечных колебаний струны будет равна f_0 . При добавлении к начальной массе какой-то измеряемой массы 6 величиной $\Delta m < m$ сила продольного натяжения струны возрастет на величину $\Delta F = \Delta mg$ и частота поперечных колебаний струны изменится до значения f_1 , определяемого выражением (11).

Очевидно, что приращение частоты колебания струны

$$\Delta f = f_1 - f_0$$

будет функционально связано с приращением массы. Варьируя площадью поперечного сечения струны и начальным значением массы на базе одной конструкции можно получить гамму преобразователей с различными пределами измерения и чувствительностью.

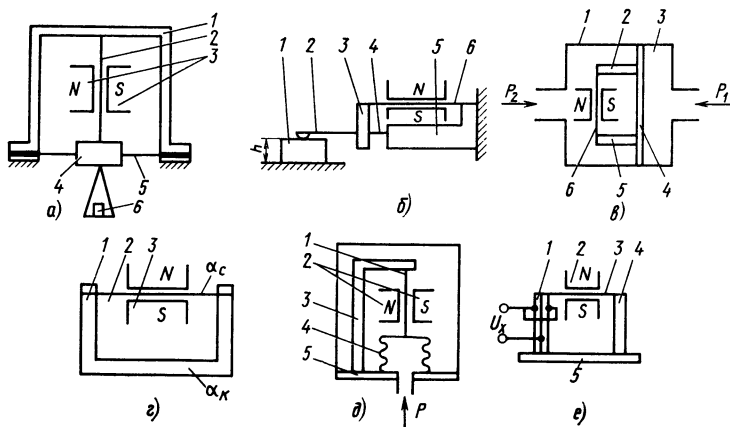


Рис. 6. Схемы однострунных преобразователей для измерения: а — малых масс и усилий; б — перемещений; в — давлений и перепадов давлений; г — температуры; д — избыточных и абсолютных давлений; е — напряжения постоянного тока; ж — состава газовой смеси

На рис. 6, б показана схема преобразователя для измерения малых перемещений. Концы струны 6 и упругой пружины 4 жестко закреплены на корпусе 5 прибора и на подвижном коромысле 3, имеющем возможность поворачиваться на упругой пружине при изменении размера h контролируемой детали 1. При этом упругая деформация струны возрастает или уменьшается. Соответственно изменяется и начальная частота колебаний струны. По изменению частоты колебаний струны можно судить о величине колебаний размера контролируемой детали. Изменяя длину измерительного наконечника 2 и начальные частоты колебаний струн, можно в широких пределах изменять чувствительность и пределы измерения преобразователей.

Преобразователь для измерения давления (рис. 6, в) состоит из корпуса 1, тонкой упругой мембраны 4, стоек 2 и 5, расположенных на мембране, и струны 6, концы которой жестко закреплены на стойках.

При подаче внутрь полости 3 преобразователя избыточного давления p_1 мембрана 4 прогибается, что вызывает угловое смещение стоек. При этом расстояние между верхними концами стоек увеличивается, что приводит к увеличению упругой деформации струны, т. е. к увеличению силы ее натяжения. Изменение частоты колебаний струны будет функционально связано с величиной измеряемого давления. Возможен дифференциальный вариант выполнения преобразователя, в котором разность частот струн или отношение частот двух струн будет линейно связано с величиной измеряемого давления p_1 .

На рис. 6, г представлена схема струнного преобразователя температуры в частоту. Струна 2 натянута в жестком корпусе 1 и помещена в поле постоянных магнитов 3. Коэффициенты линейного расширения струны и корпуса различны. Преобразователь может иметь герметичный кожух и целиком помещаться в среду, температуру которой следует измерить.

При изменении температуры среды тепловые деформации струны и корпуса будут различными, что приведет к изменению силы продольного натяжения струны, а следовательно, и к изменению собственной частоты ее поперечных колебаний.

На рис. 6, д изображен струнный преобразователь для измерения малых приращений избыточных и вакуумметрических давлений. В качестве упругого чувствительного элемента использован сильфон 4, закрепленный на основании 5. Концы струны 1 зафиксированы на кронштейне 3 и на торце сильфона. Струна помещена в воздушный зазор магнитной системы 2.

При отличии давления, подаваемого внутрь сильфона, от давления среды, окружающей наружную поверхность сильфона, изменится сила продольного натяжения струны. Частота поперечных колебаний струны будет функционально связана с измеряемым давлением.

Струнный преобразователь электрического напряжения в частоту приведен на рис. 6, е. Биморфный пьезоэлемент 1 жестко укреплен на основании 5. Между свободными концами пьезоэлемента и консольно закрепленной стойки 4 натянута струна 3, находящаяся в воздушном зазоре постоянного магнита 2. При подаче на обкладки биморфного пьезоэлемента измеряемого напряжения U_x пьезоэлемент изгибается, увеличивая или уменьшая величину упругой деформации струны в зависимости от полярности измеряемого напряжения.

Для всех рассмотренных выше схем построения однострунных преобразователей различных физических величин в частоту функция преобразования с учетом уравнения (11) может быть записана в виде

$$f_1 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F_0 + \Delta F}{\rho S}} = f_0 \sqrt{1 + \frac{KX}{F_0}}, \quad (29)$$

где ΔF — приращение силы натяжения струны, обусловленное воздействием измеряемой физической величины; X — значение измеряемой физической величины; K — коэффициент пропорциональности, обусловленный конструктивными параметрами преобразователя.

Из последнего уравнения следует, что зависимость между приращением частоты струнного преобразователя и значением измеряемой физической величины носит нелинейный характер.

Оценим нелинейность функции преобразования при аппроксимации ее касательной, проведенной через точку $(0, f_0)$. Для этого представим выражение (29) в виде степенного ряда, ограничившись первыми четырьмя членами:

$$f_1 = f_0 \left[1 + \frac{KX}{2F_0} - \frac{1}{8} \left(\frac{KX}{F_0} \right)^2 + \frac{1}{16} \left(\frac{KX}{F_0} \right)^3 - \dots \right]. \quad (29^*)$$

С целью уменьшения нелинейности функции преобразования, создания предпосылок для реальной возможности ее аппроксимации прямой и обеспечения требуемых метрологических характеристик обычно соблюдается неравенство

$$\left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)_{\max} \leq 0,2.$$

При таком ограничении кубичный член ряда на порядок меньше квадратичного, и при оценке нелинейности им можно пренебречь.

Тогда функцию преобразования можно представить в виде

$$\Delta f = f_1 - f_0 = \frac{1}{2} \frac{KX}{F_0} f_0 - \frac{1}{8} \left(\frac{KX}{F_0} \right)^2 f_0, \quad (30)$$

а погрешность от нелинейности, оцениваемая отношением второго члена правой части уравнения (30) к первому,

$$\gamma = \frac{1}{4} \frac{KX}{F_0}. \quad (31)$$

Например, для преобразователя с максимальным значением отношения $KX/F_0 = 0,1$ погрешность от нелинейности $\gamma_{\max} = 2,5\%$. Следует отметить, что погрешность от нелинейности растет пропорционально входной измеряемой величине и в середине диапазона будет иметь значения меньшие γ_{\max} .

Кроме того, при аппроксимации функции преобразования хордовой или секущей максимальная погрешность от нелинейности может быть уменьшена в 4—6 раз по сравнению со случаем аппроксимации касательной и для параметров предыдущего примера будет равна $\sim 0,5\%$.

В том случае, если погрешность от нелинейности составляет определенную часть общей допустимой погрешности и при линейной аппроксимации преобразователь обеспечивает заданную точность измерения, погрешность, обусловленная аппроксимацией, входит в результат измерения.

Большинство однострунных измерительных преобразователей спроектировано таким образом, что работают в режиме измерения упругих деформаций, а не силы. При этом концы струны закреплены в жестком замкнутом контуре, и при наличии разности температурных коэффициентов линейного расширения материалов корпуса и струны будет изменяться сила начального натяжения струны, а следовательно, и начальная частота f_0 преобразователя, т. е. будет наблюдаться температурный уход нуля преобразователя.

Из выражения (30) следует, что чувствительность преобразователя

$$S_X = \frac{\Delta f}{X} = \frac{1}{2} \frac{K f_0}{F_0} = \frac{1}{8} \frac{K}{l^2 \rho S_0 f_0} \quad (32)$$

также будет изменяться при изменении f_0 .

Для уменьшения температурной погрешности преобразователя необходимо либо вводить поправку, либо применять в его конструкции специальный термокомпенсатор.

При практическом применении однострунных измерительных преобразователей в измерительных устройствах с визуальным отсчетом существенная нелинейность функции преобразования, температурный уход нуля и чувствительности, необходимость пользоваться градуировочной характеристикой существенно снижают эффективность их использования.

Применение же однострунных измерительных преобразователей в АСУТП, реализованных с использованием ЭВМ, дает больший эффект, ибо градуировочную характеристику можно поместить в запоминающее устройство ЭВМ и автоматизировать процесс определения текущего значения измеряемой физической величины.

3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СТРУННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

По аналогии со всеми другими типами дифференциальных измерительных преобразователей двухструнные дифференциальные преобразователи отличаются от однострунных большей температурной стабильностью нуля, меньшей нелинейностью функции преобразования, что позволяет производить измерения с более высокими точностями.

В качестве примера рассмотрим схему дифференциального преобразователя малых перемещений в частоту (рис. 7, а). Две одинаковые струны 2, помещенные в поле постоянных магнитов 3, натянуты с определенным начальным усилием. Концы струн прикреплены к корпусу преобразователя 1 и центру 4, закрепленному на упругом пластинчатом подвесе 8. Рычаг 5 оканчивается измерительным наконечником 6, соприкасающимся с плоскостью изделия 7, вертикальный размер которого необходимо определить.

Установив предварительно на измерительную позицию набор концевых мер, соответствующих номиналу контролируемого размера, путем вертикального перемещения плоскости для базирования измеряемого изделия добиваются равенства частот поперечных колебаний верхней и нижней струн.

Контактное усилие P_k преобразователя определяется суммарной величиной массы m центра 4, рычага 5 и измерительного наконечника 6 и равно mg , где g — ускорение свободного падения. В зависимости от конструктивных параметров P_k составляет 0,2—1 Н.

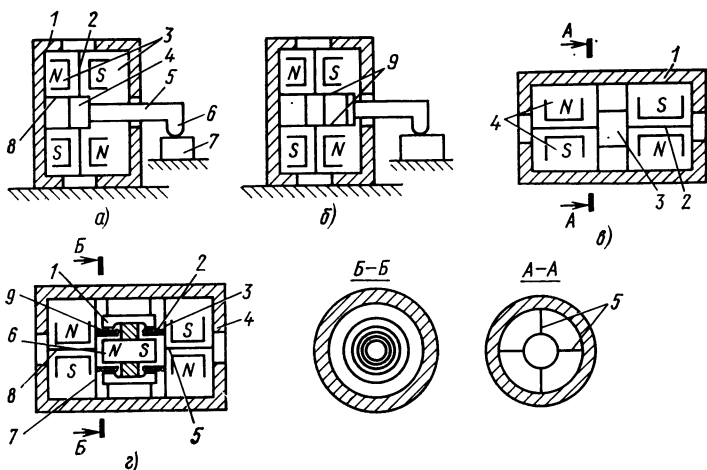


Рис. 7. Схемы дифференциальных струнных преобразователей для измерения:

а — малых линейных перемещений; б — больших перемещений; в — угловых перемещений и линейных ускорений; г — постоянного тока

При отклонении размера реального изделия от номинального (например, в сторону уменьшения) под действием ускорения свободного падения произойдет вертикальное смещение жесткого центра 4, что приведет к увеличению упругой деформации, а следовательно, и силы продольного натяжения верхней струны и уменьшению — нижней.

Изменение контактного усилия P_k зависит от продольной жесткости струн 2 и жесткости пластинчатого подвеса 8 и лежит в пределах 0,5—0,2 Н на полный диапазон измерения. При таких значениях P_k и ΔP_k погрешность от упругих деформаций в зоне контакта не превышает десятых долей микрометра.

Соответственно частоты верхней и нижней струн будут

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F_0 + \Delta F}{\rho S}} = f_0 \sqrt{1 + \frac{K\delta}{F_0}}; \\ f_2 &= \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F_0 - \Delta F}{\rho S}} = f_0 \sqrt{1 - \frac{K\delta}{F_0}}, \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

где ΔF — приращение силы натяжения каждой из струн, обусловленное отклонением размера изделия от номинального; δ — отклонение размера изделий от номинального; K — коэффициент пропорциональности.

Подавая электрические сигналы частотой f_1 и f_2 с выхода электронных усилителей УС1 и УС2 струнных преобразователей П1 и П2 (рис. 8) на смеситель СМ и выделяя разностную частоту Δf , получим

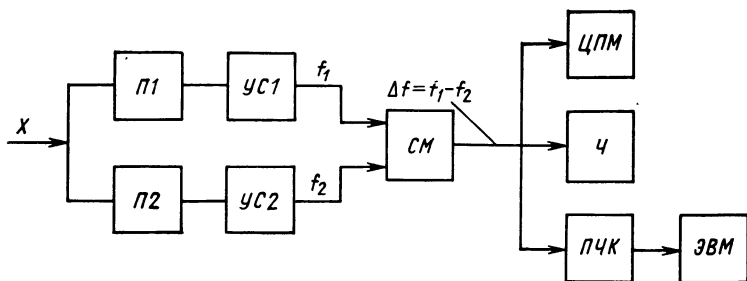


Рис. 8. Обобщенная схема измерительного устройства с дифференциальным струнным преобразователем

$$\Delta f = f_1 - f_2 = f_0 \left(\sqrt{1 + \frac{K\delta}{F_0}} - \sqrt{1 - \frac{K\delta}{F_0}} \right). \quad (34)$$

Разлагая иррациональные выражения в правой части уравнения в степенные ряды и ограничиваясь четвертым членом разложения, будем иметь

$$\begin{aligned} \Delta f = f_0 & \left\{ \left[1 + \frac{K\delta}{2F_0} - \frac{1}{8} \left(\frac{K\delta}{F_0} \right)^2 + \frac{1}{16} \left(\frac{K\delta}{F_0} \right)^3 - \dots \right] - \right. \\ & \left. - \left[1 - \frac{K\delta}{2F_0} - \frac{1}{8} \left(\frac{K\delta}{F_0} \right)^2 - \frac{1}{16} \left(\frac{K\delta}{F_0} \right)^3 - \dots \right] \right\} = \\ & = \left[\frac{K\delta}{F_0} + \frac{1}{8} \left(\frac{K\delta}{F_0} \right)^3 \right] f_0. \end{aligned} \quad (35)$$

Из приведенного выражения следует, что функция преобразования будет нелинейной. Но при определенном выборе конструктивных параметров преобразователя член $\frac{1}{8} \left(\frac{K\delta}{F_0} \right)^3$ будет давать нелинейность порядка 0,05–0,1 %, и с таким приближением можно считать функцию преобразования линейной, т. е.

$$\Delta f = \frac{Kf_0}{F_0} \delta, \quad (36)$$

где $\frac{Kf_0}{F_0}$ — коэффициент пропорциональности, обусловленный конструктивными параметрами струнного преобразователя.

Разность частот Δf с выхода смесителя (см. рис. 8) может быть подана на электронный цифровой частотомер Ч и цифropечатающее устройство ЦПМ, или на вход ЭВМ через соответствующий преобразователь частота—код ПЧК.

Следует отметить, что отсчетное устройство в виде, например, стандартного частотомера типа 43-24 может реализовать измерение отношения частот колебаний струн. Для этого случая, с учетом уравнений (33) функция преобразования будет иметь вид

Характеристика	Однострунные преобразо	
	усилий, веса, ускорения, скорости	деформаций, перемещений, температуры, давления, расхода
Чувствительность	$\frac{nK}{4l \sqrt{l m_c} \sqrt{F_0}} = S_F$	$\frac{n \sqrt{E} \sqrt{SK_2}}{4l \sqrt{m_c} \sqrt{\quad}}$
Пределы преобразования	$F_{\max} = (0,1 \div 0,4) \frac{F_0}{K_1}$	$\delta_{\max} = (0,1 \div 0,4) \frac{\delta_0}{K_2}$
Погрешность нуля (при функциональной связи между параметрами)	$-\frac{1}{2} \frac{\Delta l}{l} + \frac{1}{2} \frac{\Delta F_0}{F_0}$	$\frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E} + \frac{1}{2} \frac{\Delta S}{S} - \frac{\Delta l}{l} - \frac{1}{2} \frac{\Delta(\delta_0)}{\delta_0}$
Погрешность чувствительности (при функциональной связи между параметрами)	$\frac{1}{2} \frac{\Delta l}{l} - \frac{1}{2} \frac{\Delta F_0}{F_0} + \frac{\Delta K_1}{K_1}$	$\frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E} + \frac{1}{2} \frac{\Delta S}{S} - \frac{\Delta l}{l} - \frac{1}{2} \frac{\Delta(\delta_0)}{\delta_0} + \frac{\Delta K_2}{K_2}$
Погрешность от нелинейности (при оптимальной аппроксимации секущей)	$\pm 0,0425 \frac{K_1 F_{\max}}{F_0}$	$\pm 0,0425 \frac{K_2 \delta_{\max}}{\delta_0}$

Примечание. Условные обозначения: K_1, K_2, K_3 — коэффициент преобразования соответственно; S_F, S_δ, S_m — чувствительность при измерении натяжения, деформации, изменения параметров струн; $\Delta S_F, \Delta S_\delta, \Delta S_m$ — погрешность чувствительности.

$$N = \frac{n_d f_1}{f_2} = n_d \left(\frac{1 + \frac{K \delta}{F_0}}{1 - \frac{K \delta}{F_0}} \right)^{1/2}, \quad (37)$$

где n_d — коэффициент деления частоты f_2 ; N — число импульсов, зафиксированное на цифровом табло частотомера.

Очевидно, что в этом случае из схемы устройства исключается смеситель.

Таблица 1

ватели	Дифференциальные преобразователи			Примечание
толщина напыления	усилий, веса, ускорения, скорости	деформаций, перемещений, температуры, давления, расхода	толщины напыления	
$\frac{-n \sqrt{ES \delta_0} K_3}{4l \sqrt{m_c}} = S_m$	$2S_F$	$2S_\delta$	—	—
$m_{\max} = (0,1 \div 0,4) \frac{m_c}{K_3}$	То же, что и для однострунного преобразователя			Определяются допустимой погрешностью нелинейности
$\frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E} + \frac{1}{2} \frac{\Delta S}{S} - \frac{\Delta l}{l} - \frac{1}{2} \frac{\Delta(\delta_0)}{\delta_0}$	Отсутствует при идентичности условий работы и характеристик каждой из струн			При случайных изменениях параметров суммируются дисперсии
$\frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E} + \frac{1}{2} \frac{\Delta S}{S} - \frac{\Delta l}{l} - \frac{1}{2} \frac{\Delta(\delta_0)}{\delta_0} + \frac{\Delta K_3}{K_3}$	Те же, что и для однострунного преобразователя			—
$\pm 0,127 \frac{K_3 m_{\max}}{m_0}$	$\pm 0,031 \times \left(\frac{K_1 F_{\max}}{F_0} \right)^2$	$\pm 0,031 \times \left(\frac{K_2 \delta_{\max}}{\delta_0} \right)^2$	$\pm 0,15 \times \left(\frac{K_3 m_{\max}}{m_0} \right)^2$	Для однострунных в среднем 0,5—2%. Для дифференциальных 0,5—0,2%

ния измеряемого параметра в натяжение, деформацию или массу струны, соотношения и массы соответственно; Δl , ΔF_0 , ΔE , Δl_0 , $\Delta \delta_0$, ΔS , ΔK_1 , ΔK_2 , ΔK_3 —

Дополнив конструкцию струнного преобразователя перемещений промежуточным упругим трансформатором 9 (см. рис. 7, б) больших перемещений в малые, можно реализовать струнный преобразователь больших перемещений в частоту.

На рис. 7, в представлена схема струнного преобразователя угловых перемещений в частоту. Струны 2, помещенные в поле постоянных магнитов 4, своими концами закреплены на корпусе прибора 1 и на инерционной массе 3, подвешенной на упругом подвесе из тонких металлических растяжек 5. При горизонтальном расположе-

ний продольной оси симметрии преобразователя разность частот струнных автогенераторов (отношение частот) имеет вполне определенную величину. При повороте преобразователя его продольная ось наклоняется относительно горизонтальной плоскости и на струны начинает действовать сила, равная проекции силы тяжести, действующей на инерционную массу, на продольную ось преобразователя. Очевидно, что с ростом угла наклона эта сила возрастает. При этом разность (отношение) частот колебаний струн изменяется на величину, функционально связанную с углом наклона. Этот преобразователь может быть использован также для измерения величины линейных ускорений, направленных вдоль его продольной оси.

На рис. 7, *г* приведена схема струнного преобразователя величины постоянного тока в частоту. В цилиндрическом корпусе 4 жестко закреплены цилиндрический магнит 6 и кольцевой магнитопровод 1, образующие кольцевые воздушные зазоры с достаточно высокой величиной магнитной индукции. В поле этих зазоров введены две цилиндрические обмотки 2 и 9, имеющие одинаковые геометрические параметры и одинаковое число витков провода. Каркасы обмоток закреплены на упругих плоских мембранах 3 и 7. Концы струн 5 и 8 дифференциального преобразователя усилий в частоту закреплены на корпусе 4 и центрах мембраны 3 и 7. Скоммутировав концы обмоток таким образом, чтобы при протекании по ним измеряемого тока одна из обмоток создавала силу, увеличивающую натяжение первой струны, а вторая — силу, уменьшающую натяжение второй струны, получим струнный измерительный преобразователь тока в частоту. Один из конструктивных вариантов преобразователя тока в частоту, обладающий лучшими метрологическими характеристиками и технологичностью, приведен в а.с. № 323741 (СССР).

Структурная схема цифрового устройства с дифференциальным струнным преобразователем показана на рис. 8. Измеряемая величина X вызывает изменение частот двух струнных автогенераторов. Разность этих частот выделяется на выходе смесителя C и может быть подана на частотомер $Ч$, цифropечатающую машину $ЦПМ$ или преобразователь частота—код $ПЧК$ для ввода информации в управляющую ЭВМ.

Приведенные примеры наглядно иллюстрируют универсальность применения струнного метода для измерения широкого круга физических величин.

Для оценки относительной погрешности от нелинейности струнного дифференциального преобразователя определим отношение второго слагаемого правой части выражения (35) к первому. Тогда

$$\gamma = \frac{1}{8} \left(\frac{K\delta}{F_0} \right)^2 \quad (38)$$

и для параметров $K\delta/F_0=0,1$ погрешность от нелинейности $\gamma_m = 0,125\%$, т. е. в 20 раз меньше, чем в однострунном варианте преобразователя.

Чувствительность дифференциального струнного преобразователя можно определить на основании выражения (36):

$$S_X = \frac{\Delta f}{X} = \frac{Kf_0}{F_0} = \frac{K}{4f_{0\rho}^2 S_0 f_0} \quad (39)$$

В выражении (39) под X понимается любая из измеряемых физических величин. В частности, при измерении перемещений $X=\delta$.

При изменении внешних условий, например температуры окружающей среды, будет изменяться чувствительность преобразователя. Количественную оценку температурной погрешности чувствительности можно провести по методике, аналогичной приведенной в п. 1 гл. I, при анализе влияния температуры на аддитивную погрешность струнных преобразователей. В этом случае находят полный дифференциал чувствительности от выражения (39). Зная коэффициенты влияния каждого из параметров, входящих в правую часть уравнения (39), и оценивая конечные изменения этих параметров под воздействием влияющего фактора (например, температуры), можно определить значения абсолютного и относительного изменений чувствительности.

В табл. 1 приведены результаты сравнительного анализа аддитивной и мультипликативной погрешности однострунных и дифференциальных струнных преобразователей [19].

4. МЕТОДЫ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОДНОСТРУННЫХ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СТРУННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1. Применительно к однострунным преобразователям одним из наиболее просто реализуемых методов линеаризации является уменьшение приращения частоты на полный диапазон измерения.

В этом случае из равенства (31) при заданном значении относительной погрешности линейности γ_d можно определить допустимое значение относительного изменения начального натяжения:

$$\left(\frac{\Delta F}{F_0}\right)_m = 4\gamma_d$$

или

$$\Delta F_m = 16\rho S l^2 f_0^2 \gamma_d.$$

При этом из выражения (15) следует, что допустимое значение относительного изменения частоты

$$\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_d \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta F}{F_0}\right)_m = \frac{8\rho S l^2 f_0^2 \gamma_d}{F_0}. \quad (40)$$

Широкое практическое применение такого метода затруднено в связи со снижением чувствительности преобразователя и возрастанием погрешностей измерения, обусловленных дискретностью отсчета и уровнем случайных флуктуаций частоты колебаний струн. Очевидно, что эти погрешности возрастают во столько раз, во сколько раз уменьшится чувствительность преобразователя.

Поэтому такой метод линеаризации следует рекомендовать при разработке преобразователей, допустимая приведенная погрешность измерения которых составляет более 1 %.

2. Линеаризация характеристики струнного преобразователя может быть осуществлена путем формирования специальным устройством функции, являющейся обратной по отношению к функции преобразования датчика.

Существует несколько способов формирования обратной функции. Наиболее широкое распространение получил метод приближенного воспроизведения обратной функции путем ее кусочно-линейной аппроксимации. Обычно обратная функция разбивается на

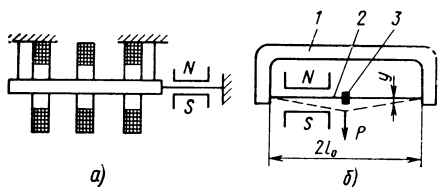


Рис. 9. Схемы линейризованных струнных преобразователей:

a — струнно-динамического преобразователя тока в частоту; *б* — однострунного преобразователя линейных перемещений в частоту

несколько интервалов равной величины и на каждом из них коэффициент деления измеряемой частоты имеет вполне определенное значение, что соответствует определенному углу наклона каждого из участков аппроксимирующей ломаной линии.

3. Весьма эффективным способом линейризации выходной характеристики однострунного преобразователя является введение в его структуру промежуточного преобразователя, формирующего силовое воздействие на струну, пропорциональное квадрату измеряемой физической величины. При этом необходимо обеспечить условие, чтобы при отсутствии на входе измеряемой физической величины натяжение струны было близким к нулю.

На рис. 9, *a* приведена схема струнодинамического преобразователя постоянного или переменного тока в частоту [18, 24]. Выходная частота преобразователя меняется по закону

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{kI^2}{\rho S}} = k_1 I, \quad (41)$$

где I — величина измеряемого тока, протекающего по последовательно соединенным обмоткам измерительного механизма электродинамической системы; k — коэффициент, зависящий от конструктивных параметров струнного преобразователя и измерительного механизма электродинамической системы;

$$k_1 = \left(\frac{k}{\rho S} \right)^{1/2} / 2l.$$

Аналогичное уравнение можно получить, если построить струнный преобразователь постоянного или переменного тока в частоту с использованием измерительного механизма электромагнитной системы.

Эффекта линейризации можно добиться и путем введения в структурную схему предварительных механических преобразователей, формирующих квадратичный закон изменения силы натяжения струны в функции входной величины [1, 22].

В некоторых случаях удастся осуществить линейризацию и без применения сложной системы кинематических звеньев. Струнный преобразователь перемещений, конструктивная схема которого изображена на рис. 9, *б*, существенно проще предыдущего преобразователя [22]. Струна 2 с нулевым начальным натяжением закреплена на выступах корпуса 1. Измерительный наконечник 3 делит струну на две равные половины, левая из которых помещается в поле постоянных магнитов и находится в режиме непрерывных автоколебаний. Приращение упругой деформации струны прямо пропорционально квадрату измеряемого перемещения y .

Легко показать, что приращение упругой деформации активной половины струны

$$\Delta l_y = l_1 - l_0 = \frac{y^2}{l_1 + l_0} \approx \frac{y^2}{2l_0},$$

где l_1 — длина струны при $y \neq 0$.

Используя закон Гука, можно получить соотношение между текущим значением частоты поперечных колебаний и измеряемым перемещением в виде

$$f = \frac{y}{2l^2} \sqrt{\frac{E}{2\rho}} = ky,$$

$$\text{где } k = \frac{1}{2l^2} \sqrt{\frac{E}{2\rho}}.$$

Основным достоинством дифференциальных струнных преобразователей является большая линейность функции преобразования и значительно меньшая температурная погрешность нуля. В первом приближении погрешность от нелинейности при аппроксимации касательной определяется выражением (38) или аналогичным ему

$$\gamma = \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^2.$$

Для преобразователя с максимальным относительным изменением натяжения 0,2 погрешность от нелинейности составит 0,5 %, что на порядок меньше, чем в однострунном преобразователе. При аппроксимации функции преобразования хордой максимальное значение приведенной погрешности от нелинейности уменьшается примерно в 2,5 раза и максимальная погрешность снижается до значений 0,2 %. При этом в отличие от предыдущего случая максимальное значение абсолютной и приведенной погрешности от нелинейности будет лежать в точке, соответствующей 0,6 полного диапазона измерения.

4. Линеаризацию характеристики можно также обеспечить путем введения предварительной и заранее просчитанной асимметрии конструктивных элементов датчика, создающей нелинейность определенных величины и знака, компенсирующей частично или полностью систематическую погрешность от нелинейности. Наиболее часто асимметрия создается за счет начальной разности длин струн или начальной разности сил натяжения струн. Этот способ позволяет снизить погрешность от нелинейности в 5—10 раз и практически не требует дополнительных конструктивных и технологических изменений, приводящих к существенному повышению трудоемкости изготовления преобразователей.

5. Линеаризация может быть обеспечена путем введения в структуру датчиков корректирующих устройств, формирующих нелинейность той же величины, что и систематическая нелинейность датчика, но противоположного знака (обратные преобразователи). Такой путь компенсации систематической нелинейности, как правило, приводит к существенному усложнению конструкции механической части преобразователя или его электронной схемы.

Рассмотренные методы не исчерпывают всех возможных путей уменьшения нелинейности струнных преобразователей, но являются наиболее распространенными и относительно просто реализуемыми.

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УНИФИЦИРОВАННЫХ СТРУННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ, ПОЛОЖЕННЫЕ В ОСНОВУ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

К числу основных нормируемых показателей, характеризующих качество преобразователя, относятся диапазон измерения, чувствительность, погрешность воспроизведения заданной функции преобразования (в частном случае — погрешность от нелинейности), температурные погрешности нуля и чувствительности.

Цель разрабатываемых методик расчета заключается в определении таких размеров и свойств конструктивных параметров струнных преобразователей, при которых обеспечиваются заданные метрологические показатели.

Сущность методики расчета параметров любого преобразователя заключается в следующем. Обычно в качестве исходных данных для расчета задают нижний и верхний пределы измеряемой физической величины и требуемое значение чувствительности преобразователя. Исходя из этого, можно определить начальные значения частот колебаний струн и приращения частот струн, соответствующие полному диапазону измерения. После определения параметров непосредственно струнного преобразователя рассчитывают конструктивные параметры первичных измерительных преобразователей, обеспечивающих требуемую величину приращения упругой деформации (силы натяжения) струн для реализации заданной чувствительности.

С точки зрения построения методик расчета конструктивных параметров струнных преобразователей различных физических величин весь комплекс преобразователей целесообразно разделить на несколько укрупненных групп.

I. Преобразователи давления: 1) избыточных давлений; 2) абсолютного давления; 3) перепадов давлений; 4) вакуумметрических давлений.

II. Преобразователи усилий и массы вещества: 1) малых усилий (0—100 Н); 2) средних и больших усилий (100—10⁴ Н); 3) массы вещества.

III. Преобразователи малых масс вещества: 1) толщины пленок вещества, наносимых напылением; 2) влажности газообразных сред.

IV. Преобразователи линейно-угловых величин: 1) малых перемещений; 2) больших перемещений; 3) угловых перемещений.

V. Преобразователи температуры: 1) температуры газообразных и жидких сред; 2) температуры поверхностей малой площади.

VI. Преобразователи параметров газов: 1) давления разреженных газов; 2) расхода или скорости газа; 3) состава газовых смесей.

В группах преобразователей давлений, усилий и массы вещества и линейно-угловых величин входная измеряемая физическая величина посредством первичных измерительных преобразователей трансформируется в малые перемещения механических элементов, на которых закреплены концы струн струнного преобразователя малых перемещений в частотно-модулированный электрический сигнал.

В группе преобразователей малых масс вещества измеряемая масса осаждается непосредственно на поверхность колеблющейся струны, увеличивая ее массу. С увеличением массы струны частота ее собственных поперечных колебаний уменьшается, что и является мерой толщины напыленной пленки. Покрывая поверхность колеблющейся струны слоем вещества, хорошо адсорбирующего влагу, можно получить датчик, реагирующий на изменение влажности.

В группе преобразователей давления разреженных газов, расхода, скорости или состава газовой смеси изменение измеряемого параметра приводит к изменению теплоотдачи от нагретой до определенной температуры струны. Изменение температуры струны приводит к изменению частоты струнного преобразователя.

В связи с изложенным выше главной задачей при разработке методик расчета струнных преобразователей различных физических величин в частоту, входящих в унифицированный комплекс, является выбор таких параметров первичных и промежуточных измерительных преобразователей, при которых гарантировался бы оптимальный режим работы струнного преобразователя с точки зрения чувствительности, стабильности, вида функции преобразования или ее линейности, допустимого значения систематической или случайной погрешности.

2. ВЫБОР ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУННОГО УНИФИЦИРОВАННОГО РЕЗОНАТОРА

От выбора геометрических параметров струн, механических свойств их материала, формы поперечного сечения, величины начального натяжения в значительной мере зависят уровень флуктуации частоты струнного автогенератора, а следовательно и метрологические характеристики струнных преобразователей.

В подавляющем большинстве разработанных струнных преобразователей используются струны из углеродистой стали, вольфрама, эльинвара, оловянно-цинковой и бериллиевой бронзы круглой и прямоугольной формы поперечного сечения. Широкое применение в струнных преобразователях получили приборные растяжки из бронз Бр ОЦ4-3, БрБ2, платиносеребряного сплава ПлСр-20, кобальтового сплава К40НХМВ [26] и вольфрамомолибденового и молибденорениевого сплавов ВР-20 и МР47-ВП [11].

В ряде случаев при колебаниях струн круглой формы поперечного сечения наблюдается прецессия плоскости их колебаний, вызывающая дополнительную нестабильность частоты струнного автогенератора [34]. В связи с этим большинство разработчиков струнных преобразователей предпочитают использовать струны с прямоугольной формой поперечного сечения с соотношением стороны $a:b = 1:10$, что практически исключает возможность прецессии плоскости колебаний.

Экспериментально установлено, что флуктуации частоты колебаний струн имеют случайный характер и их распределение подчиняется нормальному закону. При этом погрешность самого метода из-

мерения частоты в проводимых экспериментах была значительно ниже уровня флуктуаций частоты колебаний струны.

Обычно применяемая методика высокоточного измерения стабильности частоты основана на определении длительности 10^n периодов колебаний струны, т. е. на измерении с высокой точностью интервала времени,

$$T = \frac{10^n}{f}, \quad (42)$$

где f — текущая частота струны; n — любое целое число.

Этот интервал времени измеряется путем заполнения его кварцеванной высокостабильной частотой $f_k = 10$ МГц. По числу 10-мегагерцовых импульсов, «поместившихся» между двумя последовательными импульсами, сформированными измеряемой частотой, определяется усредненное значение частоты колебаний струны за время T .

Обозначим максимальный уровень флуктуаций частоты колебаний струны, определенной на основании большого числа измерений с длительностью периода измерений T_1 , через

$$\Phi_{T_1} = \frac{\Delta f_{\Phi m}}{f_0} = \frac{\Delta T_{\Phi m}}{T_0} = \frac{\Delta N_{\Phi m}}{N_0} = 3\sigma_{\Phi 1}, \quad (43)$$

где $\sigma_{\Phi 1}$ — среднее квадратическое значение относительной флуктуации частоты; $\Delta f_{\Phi m}$ — абсолютное значение максимальной флуктуации частоты; f_0 — номинальное значение частоты.

Относительная погрешность измерения входной величины или погрешность определения статической характеристики дифференциального преобразователя, обусловленная флуктуациями, определится отношением

$$\gamma_{T_1} = \frac{\sqrt{2}\Phi_{T_1}}{\Delta f/f_0}, \quad (44)$$

где Δf — приращение выходной частоты, обусловленное воздействием измеряемой величины.

С учетом уравнений (15) и (43) выражение (44) запишем в форме

$$\gamma_{T_1} = \frac{2\sqrt{2}\Phi_{T_1}F_0}{\Delta F} = \frac{6\sqrt{2}\sigma_{\Phi 1}F_0}{\Delta F}. \quad (45)$$

Из формулы (45) следует, что наибольшая относительная погрешность будет в районе малых значений измеряемой физической величины.

Погрешность γ_{T_1} определена из условия, что флуктуация частоты колебаний струны при измерении была максимальной, а число измерений равнялось единице.

На рис. 10 представлена зависимость относительной погрешности измерения, обусловленной флуктуациями частоты, от величины измеряемого усилия для струнного дифференциального преобразователя (СДП) с параметрами: $F_0 = 1,2$ Н, $f_0 = 5 \cdot 10^3$ Гц; $\sigma_{\Phi 1} = 1,5 \cdot 10^{-7}$ при длительности периода измерения частоты струны, равной 10^4 периодов ее колебаний.

Из графика следует, что при максимально допустимой относительной погрешности за счет флуктуаций порядка $5 \cdot 10^{-3}\%$ рабочий диапазон прибора ограничивается значением $\Delta F/F_0$, равным 0,04—0,4.

Рис. 10. Зависимость относительной погрешности измерения струнного дифференциального преобразователя усилий от диапазона измерения, обусловленная флуктуациями частоты струн

При меньших значениях измеряемых усилий погрешность измерения, обусловленная флуктуациями, становится неприемлемо большой.

Очевидно, что при изменении времени измерения с T_1 до T_2 уровень флуктуаций частоты колебаний струны будет изменяться, уменьшаясь с увеличением T_2 . Это естественно, поскольку увеличивается время «осреднения» частоты.

В этом случае относительная погрешность измерения, обусловленная флуктуациями частоты, может быть определена выражением

$$\gamma_{T_2} = \frac{6 \sqrt{2} F_0 \sigma_{\Phi 1} T_1^{1/2}}{\Delta F T_2^{1/2}}. \quad (46)$$

На рис. 11 приведены расчетная и экспериментальная зависимости уровня флуктуаций частоты колебаний струны из сплава ПлСр-20 от длительности периода измерения. Струна имела начальную частоту $f_0 = 5000$ Гц при длине 15 мм. В качестве исходной точки для расчетной кривой было взято значение флуктуации частоты $\sigma_{\Phi 1}$ при длительности периода измерения $T_1 = 2$ с. Временам изме-

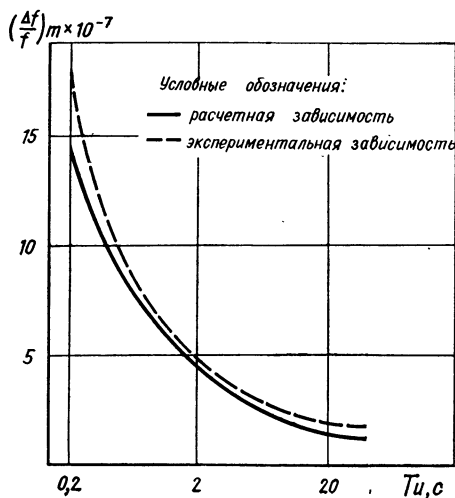


Рис. 11. Изменение уровня флуктуаций от длительности периода измерения

рения 0,2; 2,0; 20 с соответствуют коэффициенты деления 10^3 , 10^4 , 10^5 соответственно.

Уровень флуктуаций частоты струнного автогенератора имеет весьма важное значение при определении его выходной частоты путем измерения периода. Обычно это делается для повышения быстродействия измерительного устройства.

Минимальное время измерения при определении разности периодов колебаний струн преобразователя, при котором относительная погрешность не превышает допустимого уровня γ_d , можно найти из выражения

$$T_z = \frac{n_d}{f} \geq \left[\frac{3\sigma_{\Phi 1} T_1^{1/2} (f_0^2 - \Delta f^2)}{\sqrt{2} \gamma_d f_0 \Delta f} \right]^2, \quad (47)$$

где f_k — частота заполнения временного интервала.

Ниже изложена методика исследования уровня флуктуаций частоты струнного автогенератора и приведены результаты экспериментальных исследований стабильности частоты в зависимости от различных параметров струн (длины, натяжения, материала, сечения и т. д.). На основании анализа результатов экспериментов даются рекомендации относительно выбора оптимальных параметров струн.

В работе исследовалась не абсолютная, а интегральная нестабильность струн за время, равное 10^4 периодам колебаний. При таком времени измерения можно получить результаты, в которых погрешность метода измерения будет находиться в пределах 5—10% от значения измеренной величины нестабильности частоты.

Нетрудно показать, что между изменениями частоты и периода колебаний существует соотношение

$$\left| \frac{\Delta f}{f_0} \right| = \left| \frac{\Delta T}{T_0} \right|, \quad (48)$$

где T_0 — период времени, соответствующий частоте f_0 ; ΔT — изменение периода колебаний струны, соответствующее изменению ее частоты на величину Δf .

Из выражения (48) следует, что при оценке стабильности частоты струны можно измерять колебания периода.

Стабильность частоты струны оценивали следующим образом. После возбуждения колебаний струны, с помощью цифрового частотомера, работающего в режиме измерения «период», измеряли время 10^4 периодов ее колебаний. Непрерывно фиксировали серию замеров в количестве 100. При таком числе измерений достоверная вероятность полученных после обработки результатов равна 0,98. По результатам 100 измерений строили график $T = \varphi(n)$, где n — порядковый номер измерения.

После учета систематического изменения периода (частоты) колебаний струны во времени определяли значения флуктуаций периода (ΔT). Осредняющую линию на графике проводили с использованием метода наименьших квадратов. По полученным 100 значениям ΔT определяли среднее квадратическое значение

$$\Delta T_{с.к.} = \sqrt{\frac{1}{99} \sum_{i=1}^{100} \Delta T_i^2}. \quad (49)$$

Относительное среднее квадратическое значение флуктуаций частоты оценивали в соответствии с выражением

$$\sigma_{\Phi} = \frac{\Delta T_{\text{с.к.}}}{T_0}. \quad (50)$$

С целью повышения достоверности результатов каждый эксперимент при определенных условиях проводили на двух-трех макетах.

Исследуемую струну устанавливали в макете с жесткой заделкой обоих ее концов. Благодаря большой жесткости корпуса макета и отсутствию какой-либо инерционной массы промышленные вибрации практически не влияли на стабильность частоты колеблющейся струны.

Использовать макет со свободно подвешенной на конце струны сейсмической массой оказалось затруднительно в связи со значительным влиянием на результат измерения вибраций здания.

В погрешность измерения уровня флуктуаций частоты колебаний струны входят следующие составляющие: погрешность дискретности отсчета, нестабильность кварцевого генератора и погрешность, обусловленная колебаниями температуры среды, окружающей макет. Оценка влияния всех перечисленных факторов показала, что погрешность в определении численного значения уровня флуктуаций струн не превосходит 10%, что можно считать приемлемым.

Все графические зависимости, приведенные ниже, строили по значениям средних квадратических величин.

Для определения зависимости стабильности частоты колебаний струн из сплава ПлСр-20 от площади поперечного сечения и времени естественного старения исследуемые струны устанавливали в жесткие П-образные макеты и натягивали таким образом, чтобы их частота колебаний была равна 6000 ± 100 Гц. Эксперименты проводили на струнах с прямоугольной формой поперечного сечения, соотношение сторон которого равнялось 1 : 10.

Непосредственно после установки струн в макеты по приведенной выше методике была определена стабильность частоты колебаний струн при температуре 293 К.

По истечении 60 суток естественного старения струн в макетах было проведено повторное определение стабильности их колебаний.

Результаты эксперимента представлены на рис. 12 в виде зависимостей стабильности частоты от площади поперечного сечения. Из анализа полученных зависимостей следует, что непосредственно после установки в макеты стабильность струн с меньшей площадью поперечного сечения ниже; после 60 суток естественного старения стабильность струн возросла примерно в 3 раза; при этом уровень флуктуации практически не зависит от площади сечения струны.

Повышение стабильности в результате прохождения процесса естественного старения наблюдалось также и для струн из вольфрама. Процесс уменьшения флуктуаций во времени носит экспоненциальный характер и при температуре 293—298 К длится 40—60 суток.

Можно предположить, что причиной повышения стабильности частоты после старения является уменьшение количества сдвиговых явлений в кристаллах материала струны, развивающихся вследствие протекания релаксационных процессов. Дальнейшие исследования показали, что процесс уменьшения уровня флуктуаций можно существенно ускорить, проводя ускоренное старение при температуре 333—373 К. В этом случае уровень флуктуации частоты колебаний струн достигает своего минимума за 3—5 суток.

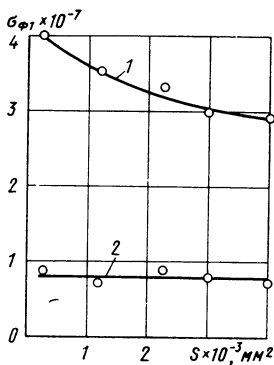


Рис. 12. Зависимость стабильности частоты колебаний струн от площади поперечного сечения и длительности естественного старения:

1 — непосредственно после установки струн в макеты; 2 — после 60 суток естественного старения при температуре 294—298 К

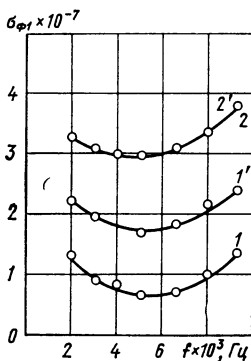


Рис. 13. Зависимости стабильности частоты колебаний струн от начальной частоты и температуры:

1 и 1' — для струн из сплава ПлСр-20; 2 и 2' — для струн из вольфрама при температурах 293 и 348 К соответственно

Во многих случаях требуется, чтобы струнный преобразователь надежно работал в интервале температур 293—343 К. Поэтому необходимо было выяснить, каким образом изменение температуры окружающей среды влияет на стабильность частоты колебаний струн.

Исследование влияния температуры окружающей среды на стабильность частоты струн из вольфрама и сплава ПлСр-20 проводили в широком диапазоне частот (3—9 кГц) при температурах 293 и 348 К. Длина исследуемых струн равнялась 15 мм. Площадь их поперечного сечения составляла (1—1,5) 10^{-3} мм².

Предварительно все макеты с заряженными струнами прошли двухмесячный цикл термостарения при температуре 348 К и можно было считать, что релаксационные процессы в струнах прекратились и они вышли на стабильный режим по уровню флуктуаций. Амплитуды колебаний струн находились в пределах 3—6 мкм и для каждой испытуемой струны устанавливались одинаковыми как при температуре 293 К, так и при температуре 348 К.

На рис. 13 приведены полученные зависимости стабильности частоты колебаний струн из различных материалов от начальной частоты и температуры. Из графиков следует, что:

изменение температуры окружающей среды с 293 до 348 К не оказывает заметного влияния на стабильность струн из вольфрама; при повышении температуры с 293 до 348 К стабильность частоты колебаний струн из сплава ПлСр-20 ухудшается в 2 раза;

эффект ухудшения стабильности частоты с повышением температуры у струн из сплава ПлСр-20 не зависит от начальной частоты (натяжения);

при температуре 348 К наилучшей стабильностью обладают струны из сплава ПлСр-20; их стабильность на 40—50% выше, чем у струн из вольфрама.

Значительное изменение стабильности частоты колебаний струн из сплава ПлСр-20 при повышении температуры с 293 до 348 К можно объяснить тем, что его температура плавления в 2,5—3 раза ниже температуры плавления вольфрама. Поэтому при повышении температуры в сплаве ПлСр-20 значительно сильнее, чем в других материалах, активизируется движение дислокаций, а следовательно, и количество возмущений, воздействующих на колеблющуюся струну.

Из приведенных исследований следует, что с точки зрения наилучшей стабильности частоты при температурах 333—343 К в преобразователях целесообразно применять струны из сплава ПлСр-20.

Результаты исследования показали, что при длине 15 мм для струн из всех исследованных материалов оптимальной является начальная частота 4—6 кГц.

Экспериментальные исследования зависимости уровня флуктуаций струн из сплава ПлСр-20 от механической амплитуды их колебаний и длины струн позволили сделать следующие выводы:

кривые изменения уровня флуктуаций от амплитуды для струн разных длин в диапазоне от 7 до 35 мм имеют ярко выраженные минимумы;

с увеличением длины струны точка минимума флуктуаций частоты сдвигается в сторону больших амплитуд;

условию максимальной стабильности при минимальной длине удовлетворяют струны длиной 15—20 мм при амплитуде колебаний 3—15 мкм;

сравнительные исследования стабильности частоты колебаний струн прямоугольной и круглой формы поперечного сечения показали, что после прохождения процесса естественного старения их стабильность практически одинакова.

Тщательные экспериментальные исследования уровня флуктуаций струн и долговременной стабильности их частоты в зависимости от конструктивного выполнения заделок концов струн позволили сделать вывод о том, что конструктивное выполнение узлов крепления концов струн в значительной мере определяет метрологические характеристики струнного преобразователя.

Исходя из имеющегося опыта разработки и эксплуатации струнных измерительных преобразователей, можно сформулировать ряд требований к качеству заделок концов струн:

- 1) стабильность усилия прижатия струны во времени;
- 2) минимальное изменение усилия поджатия струны при изменении температуры окружающей среды;
- 3) микротвердость материала заделок должна быть меньше микротвердости материала струны;
- 4) исключение возможности вытягивания струны из заделки под действием продольной силы натяжения струны;
- 5) обеспечение возможности замены струны на новую без дополнительной обработки поверхностей заделок;
- 6) обеспечение возможности изменения силы продольного натяжения струн в процессе настройки преобразователя;
- 7) отсутствие локальной концентрации напряжений в местах соприкосновения поверхностей струны и заделок;
- 8) отсутствие перегибов струны в местах ее выхода из заделок;
- 9) отсутствие ступеньки в месте выхода струны из заделок;
- 10) непрерывный контакт между поверхностями струны и заделкой на всем протяжении заделанного конца струны;
- 1) незначительное влияние температуры окружающей среды на качество закрепления струны;

12) стабильность частоты струнного автогенератора в течение длительного времени и низкий уровень флуктуаций частоты при кратковременных измерениях;

13) возможность изготовления струн с заделками в виде автономного конструктивного узла с целью подбора идентичных пар струн для установки в дифференциальные преобразователи;

14) минимальные габаритные размеры и масса узлов заделок;

15) высокая технологичность;

16) возможность контроля качества заделки концов струн;

17) сохранение структуры материала струны в состоянии поставки;

18) возможность крепления струн как круглой, так и прямоугольной формы поперечного сечения.

В работах [22, 24, 27] приведены некоторые разновидности конструктивного оформления узлов заделки концов струн. В работе [27] дан краткий сравнительный анализ достоинств и недостатков некоторых разновидностей узлов крепления. Следует отметить, что большая часть аргументов, приводимых в анализе, носит гипотетический характер. В связи с этим представляется целесообразным провести более подробный анализ возможных конструктивных вариантов узлов крепления концов струн.

Все известные разновидности узлов крепления можно подразделить на пять групп:

- 1) цанговое крепление;
- 2) крепление лайкой и сваркой;
- 3) крепление за специальные технологические утолщения, выполненные на концах струны;
- 4) крепление между двумя плоскостями;
- 5) крепление с фиксацией рабочей длины струн порошками.

Были исследованы все перечисленные выше варианты крепления концов струн. Качество каждого конструктивного вида заделок концов струн оценивали по соответствию его свойств перечисленным выше требованиям. В первую очередь оценку вели по уровню флуктуаций частоты колебаний струн и долговременной (измеряемой месяцами) стабильности начального уровня частоты колебаний струн, а также по величине упругого последействия.

Результаты исследований приведены в табл. 2, где символом 1 обозначен факт того, что рассматриваемый конструктивный вариант заделки удовлетворяет пункту перечисленных выше требований, а символ 0 указывает на несоответствие рассматриваемой конструкции данному пункту требований. Наиболее весомые требования обведены утолщенными линиями.

На основе проведенных исследований и анализа их результатов можно сделать вывод о том, что наиболее полно всем требованиям удовлетворяет заделка с креплением концов струны между двумя притертыми и соштрифованными плоскостями.

На второе место можно поставить заделку с креплением струн за специальные технологические утолщения, выполненные механическим или электролитическим методом. На третьем месте находится заделка с цанговым креплением концов струн.

Основными недостатками заделок со сварными и паяными соединениями являются:

нестабильность частоты струн, наблюдаемая в течение длительного времени и обусловленная релаксационными явлениями в местах сварки или пайки;

Таблица 2

Основные типы заделок	Номера пунктов требований																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
																	$\Sigma 1$ $\Sigma 0$
Заделки с цанговым креплением струны (двух-, трех- и четырехлепестковые цанги)	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1 4
Заделки с креплением струны пайкой или сваркой	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	9 8
Заделки с креплением струн за специальные технологические утолщения	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	14 3
Заделки с креплением струн между двумя плоскостями	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17 0
Заделки с фиксацией рабочей длины струны порожками	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6 11

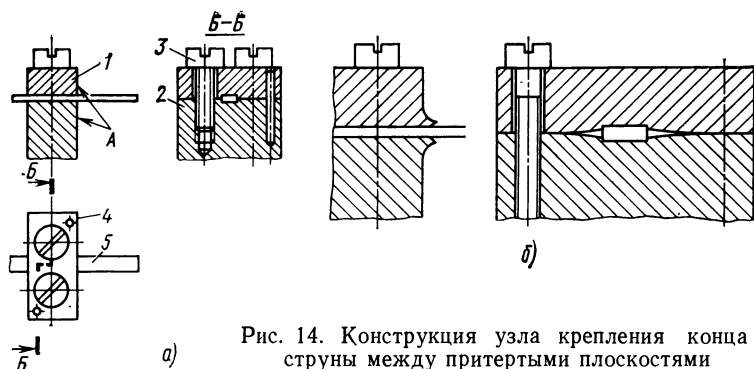


Рис. 14. Конструкция узла крепления конца струны между притертыми плоскостями

ухудшение физико-механических свойств материала струны в местах сварки и областях, прилегающих к ним;
снижение добротности струны в случае соединения плоскостей заделок пайкой;

конструкция заделок, не являющаяся разборной, что существенно снижает ремонтпригодность преобразователей и удорожает стоимость их ремонта и эксплуатации.

В высокоточных приборах, рассчитанных на длительный период эксплуатации, применение заделок струн со сварными и паяными соединениями рекомендовать не следует.

При использовании крепления концов струны между притертыми плоскостями можно дать следующие рекомендации:

шероховатость обработки плоскостей заделок, к которым прижимается струна, должна соответствовать значениям $Ra \leq 0,2$ мкм;

микротвердость материала заделок должна быть в 1,5—2 раза меньше, чем микротвердость материала струны;

минимальная длина закрепленной части струны должна быть не менее 1 мм;

торцовые поверхности заделок в месте выхода струны должны иметь шероховатость, соответствующую $Ra \leq 0,2$ мкм, и практически полное отсутствие ступеньки.

В качестве унифицированной заделки для всех типов струнных преобразователей следует рекомендовать заделку между притертыми и сошлифованными металлическими поверхностями.

Один из конструктивных вариантов такой заделки показан на рис. 14,а. Между основанием заделки 2 и накладкой 1 посредством винтов 3 зажимается струна 5. Штифты 4 необходимы для устранения возможности появления ступеньки в месте выхода струны из заделки (поверхность А). Из-за наличия упругих изгибных деформаций накладки полного сведения плоскостей, фиксирующих конец струны, может и не быть (рис. 14,б). Кроме того, при относительно больших размерах поперечного сечения струн на торцевой поверхности А заделки становятся заметными наплывы материала (см. рис. 14,б), обусловленные пластической деформацией материала заделки. Однако существенного влияния на качество заделки рассмотренные явления не оказывают.

Все приведенные в данном параграфе результаты экспериментальных исследований уровня флуктуаций частоты колебаний струн

получены на макетах с креплением концов струн между притертыми плоскостями.

Аналогичные узлы крепления применяли и в макетах для исследования долговременной стабильности частоты колебаний струн, величины упругого последействия в материале струн и их добротности.

Долговременную стабильность частоты колебаний струн исследовали при закреплении их в жесткие П-образные предварительно состаренные макеты. В этом случае релаксационные явления в материале струн вызывали изменение начальной упругой деформации, а следовательно, и частоты колебаний струн.

Методика проведения эксперимента заключалась в периодическом измерении частоты колебаний струн. Макеты с натянутыми в них струнами термостатировали с целью исключения из результатов измерения колебаний температуры окружающей среды.

Первые эксперименты показали, что в течение времени, измеряемого десятками и сотнями суток, наблюдается уход частоты колебаний струн от начального значения. Изменение частоты во времени носит экспоненциальный характер и может достигать десятков и даже сотен герц. Это изменение может быть обусловлено процессами релаксации и последействия как в области заделок концов струн, так и в материале колеблющейся части струны.

С целью определения причины изменения частоты по времени был поставлен специальный эксперимент. В жесткие П-образные макеты, изготовленные из стали и предварительно состаренные после сборки, были установлены струны из сплава ПлСр-20 равного сечения, но разных длин. Сила натяжения струн была одной и той же. Естественно, что при этом начальные частоты колебаний струн были разными. Макеты помещали в термостат с температурой 348 К и ежедневно в одно и то же время измеряли частоту колебаний струн. График изменения частот колебаний струн во времени приведен на рис. 15, а результаты обработки экспериментальных данных — в табл. 3. Отклонения экспериментальных точек от осредняю-

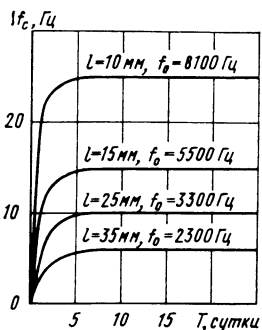


Рис. 15. Изменение частоты колебаний струн во времени

Таблица 3

Длина базы макета, мм	Начальная частота f_0 , Гц	Изменение частоты Δf , Гц	Относитель- ное измене- ние частоты $\Delta f/f_0$	Относительное изме- нение длины $\frac{\Delta l_y}{l_0} = \frac{2\Delta f}{f_0} - \frac{\sigma_0}{(E - \sigma_0)}$
10	8077	+25	0,003	$2,1 \cdot 10^{-5}$
15	5790	+15	0,0026	$1,8 \cdot 10^{-5}$
25	3360	+10	0,003	$2,1 \cdot 10^{-5}$
35	2390	+6	0,0025	$1,75 \cdot 10^{-5}$

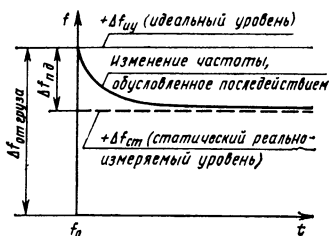


Рис. 16. Влияние процесса упругого последствия на частоту колебаний струны

щих кривых обусловлены колебаниями температуры в термостате и, как видно из графиков, носят случайный характер.

Полученные результаты дают основание сделать вывод о том, что относительная величина последствия практически не зависит от длины струны. Следовательно, изменение частот колебаний струн в основном обусловлено релаксационными процессами в струнах, а не в заделках.

Из хода графиков, приведенных на рис. 15, следует, что при температуре 348 К время, потребное для стабилизации частоты колебаний струн, не превышает 5—7 суток. Экспериментальные исследования показали, что с уменьшением температуры релаксационные процессы протекают гораздо медленнее.

Экспериментально было установлено, что частота колебаний струн из вольфрама при температурах 323—373 К также стабилизируется в течение 5—10 суток. Это явление характерно для струн, имеющих начальное напряжение растяжения вплоть до значения $0,8\sigma_{\text{в}}$.

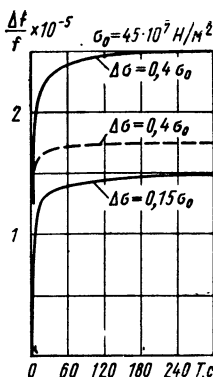
На основании результатов исследования следует рекомендовать технологическую операцию ускоренного старения собранных струнных преобразователей при температуре 353—373 К в течение 5—10 суток. В этом случае начальная частота колебаний струн остается стабильной в течение длительного времени (1—2 года).

В металлических струнах наблюдается процесс прямого и обратного упругого последствия, заключающийся в изменении длины струны в течение некоторого времени, измеряемого секундами или десятками секунд, после приложения или снятия растягивающего усилия.

Влияние этого явления на погрешность струнного преобразователя иллюстрируется графиком, приведенным на рис. 16. Положим, что в устройстве для измерения малых масс (см. рис. 3) начальная масса m_0 под действием силы земного притяжения создает в струне начальное натяжение, соответствующее начальной частоте f_0 . После навески дополнительной массы Δm частота колебаний струны возрастает на величину $\Delta f_{\text{гр}}$. Но, начиная с этого момента, в струне начнет происходить процесс прямого упругого последствия, т. е. дальнейшее удлинение струны в течение времени без увеличения растягивающего усилия. Увеличение длины струны приведет к уменьшению частоты собственных поперечных колебаний на величину $\Delta f_{\text{п.д}}$. По прошествии определенного времени реальное приращение частоты колебаний струны уменьшится до значения $\Delta f_{\text{гр}} - \Delta f_{\text{п.д}}$. При снятии дополнительной массы Δm частота колебаний струны в первый момент времени будет равна $f_0 - \Delta f_{\text{п.д}}$, а после протекания процесса обратного последствия снова станет равной f_0 .

Из изложенного следует, что из-за этого явления струнный преобразователь имеет динамическую погрешность.

Рис. 17. Относительное изменение частоты колебаний струн, обусловленное процессом упругого последействия



Экспериментальные исследования процессов упругого последействия в струнах из различных материалов проводили на специально сконструированной для этой цели установке. Исследуемую струну располагали вертикально. Ее верхний конец крепили к жесткому основанию, а к нижнему концу подвешивали массу m_0 , создающую начальное натяжение. Дополнительная масса Δm с помощью дистанционно управляемого подъемника могла достаточно быстро навешиваться или сниматься с центрирующего конуса, расположенного на основной массе m_0 .

Всю установку тщательно термостатировали (двойное термостатирование) и располагали на виброгасящих массивных основаниях.

Частоту автоколебаний струны, возбуждаемых магнитоэлектрическим методом, измеряли стандартным электронно-счетным частотомером в режиме «период» с коэффициентом деления 10^4 и частотой заполнения временного интервала $f_k = 10$ МГц.

Методика проведения эксперимента заключалась в фиксации начальной частоты колебаний струны f_0 , навеске дополнительной массы Δm и последующем измерении частоты (по периоду) в течение 5 мин. Затем дополнительную массу Δm снимали и снова измеряли значение частоты колебаний струны в течение 5 мин.

Результаты экспериментального исследования процесса последействия в струнах из сплава ПлСр-20 прямоугольной формы поперечного сечения длиной 15 мм и площадью поперечного сечения $2,25 \cdot 10^{-3}$ мм² с начальным напряжением растяжения $\sigma_0 = 450$ МПа, соответствующим начальной частоте $f_0 = 5000$ Гц, приведены на рис. 17.

При значениях $\frac{\Delta m}{m_0} = \frac{\Delta \sigma}{\sigma_0} = 0,15$ величина относительного изменения частоты $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta l_{упл}}{l_0}$ равна $1,3 \cdot 10^{-5}$. При значениях $\frac{\Delta m}{m} = 0,4$ величина $\frac{\Delta f}{f_0}$ увеличивается до значений $2,55 \cdot 10^{-5}$ (сплошные кривые на рис. 17).

Из приведенных графиков следует, что:

процесс упругого последействия во времени носит экспоненциальный характер и большая часть деформаций последействия проходит за первые секунды после изменения силы натяжения струны; с увеличением приращения напряжений растяжения в струне величина деформации упругого последействия также возрастает по экспоненциальному закону;

величину упругого последействия можно существенно уменьшить путем циклической механической тренировки струн растягивающим усилием (штриховая кривая на рис. 17).

Аналогичные результаты были получены для струн из вольфрама и бронзы БР-Б2. Сравнительный анализ результатов показал,

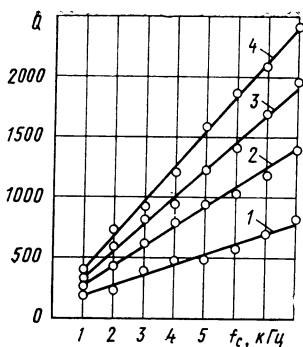


Рис. 18. Зависимость добротности струн из сплава ПлСр-20 от частоты колебаний и площади поперечного сечения при $l=15$ мм и $h:\sigma=1:10$:

1 — $S=3,2 \cdot 10^{-4}$ мм²; 2 — $S=1 \cdot 10^{-3}$ мм²; 3 — $S=2 \cdot 10^{-3}$ мм²; 4 — $S=3,4 \cdot 10^{-3}$ мм²

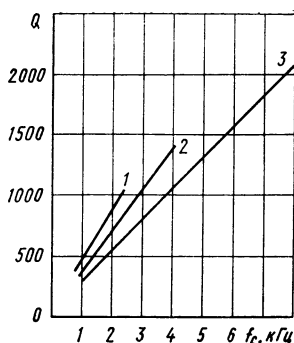


Рис. 19. Зависимость добротности струн из сплава ПлСр-20 от частоты и длины при $S=2,5 \cdot 10^{-3}$ мм²:

1 — $l=45$ мм; 2 — $l=30$ мм; 3 — $l=15$ мм.

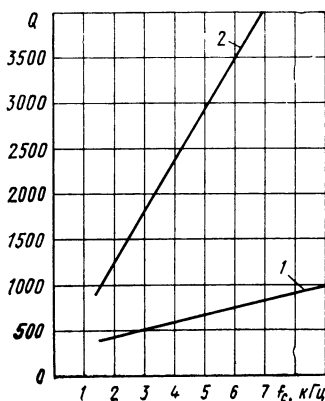


Рис. 20. Зависимость добротности круглых струн из вольфрама от частоты и площади поперечного сечения:

1 — $D=0,02$ мм; 2 — $D=0,05$ мм

что при температуре 293—343 К струны из сплава ПлСр-20 обладают наименьшей величиной упругого последействия.

Кривые, полученные в результате эксперимента, достаточно точно могут быть аппроксимированы аналитической зависимостью вида

$$\frac{\Delta f_{\text{упд}}}{f_0} = A_{\infty} (1 - e^{-bt}) (1 - e^{-d\Delta\sigma}), \quad (51)$$

где A_{∞} — коэффициент полного упругого последействия, характеризующий величину изменения частоты вследствие протекания процесса последействия при воздействии на струну дополнительного напря-

жения растяжения $\Delta\sigma$ и $t \rightarrow \infty$; b — скоростной коэффициент, характеризующий скорость нарастания деформации последствия; d — коэффициент текущей нагрузки.

Знание величины упругого последствия в струнах и его постоянной времени позволяет провести оценку погрешностей струнного преобразователя.

При разработке электронного усилителя струнного автогенератора и при анализе ряда погрешностей струнного преобразователя требуется точное знание величины добротности струны.

Результаты экспериментальных исследований величины добротности струн прямоугольной формы поперечного сечения в зависимости от геометрических параметров и начальной частоты колебаний струн из сплава ПлСр-20 приведены на рис. 18 и 19. Результаты исследования добротности струн из вольфрама представлены на рис. 20.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

добротность струн возрастает с увеличением частоты их колебаний по линейному закону;

с ростом длины струн и площади их поперечного сечения добротность струн увеличивается;

при равных площадях поперечного сечения добротность струн с круглой формой поперечного сечения выше, чем у струн с прямоугольной формой поперечного сечения и соотношением сторон 1:10.

Подробный анализ различных систем возбуждения автоколебаний струн в струнных преобразователях дан в работах [25, 27]. В подавляющем большинстве разработанных конструкций используется магнитоэлектрический способ возбуждения и поддержания автоколебаний струн. Оптимальная длина магнитной системы, при которой обеспечивается минимальный уровень субгармоник, должна составлять 0,7 длины колеблющейся части струны.

На основании приведенных исследований с целью унификации конструктивных параметров струнного резонатора можно дать следующие практические рекомендации:

1) в качестве материала струн для преобразователей, работающих при температурах окружающей среды до 333 К, следует использовать сплав ПлСр-20. При работе струнных преобразователей при температурах 333—473 К следует рекомендовать струны из вольфрама (ВА-3, ВА-5);

2) наиболее рациональным является крепление концов струн между притертыми и соштрифованными поверхностями с обработкой прижимающих и торцовых плоскостей до шероховатости $Ra=0,25 \div 0,1$ мкм. Протяженность заземленного конца струны должна быть не меньше одного миллиметра;

3) оптимальной следует считать длину струны 15—20 мм. В интервале значений $2,5 \cdot 10^{-4}$ — $4,0 \cdot 10^{-3}$ мм² площадь поперечного сечения струн не критична;

4) начальная частота колебаний струн должна быть в интервале 4—6 кГц, а изменение частоты колебаний струны на полный диапазон измерения не должно превышать 0,1—0,2 от значения начальной частоты;

5) механическая амплитуда колебаний струны должна находиться в пределах 3—15 мкм;

6) если нет острой необходимости в повышении добротности струны, то предпочтительнее использовать струны прямоугольной формы поперечного сечения;

7) длина магнитной системы возбуждения автоколебаний струны должна составлять 0,7 длины струны. Магнитная система должна быть расположена симметрично относительно середины струны.

Погрешность чувствительности струнного унифицированного преобразователя, обусловленная отклонениями параметров струнного резонатора от номинальных значений, можно определить на основании выражения, следующего из уравнения (32):

$$\Delta S_x = \left| \frac{\partial S_x}{\partial l} \right| \Delta l + \left| \frac{\partial S_x}{\partial \rho} \right| \Delta \rho + \left| \frac{\partial S_x}{\partial S_0} \right| \Delta S_0 + \left| \frac{\partial S_x}{\partial f_0} \right| \Delta f_0.$$

Соответственно относительная погрешность чувствительности

$$\frac{\Delta S_x}{S_x} = \left| \frac{2\Delta l}{l} \right| + \left| \frac{\Delta \rho}{\rho} \right| + \left| \frac{\Delta S_0}{S_0} \right| + \left| \frac{\Delta f}{f_0} \right|.$$

При параметрах унифицированного струнного преобразователя $l=15 \text{ мм}^2$; $\rho=19,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $S_0=(1 \div 2) 10^{-3} \text{ мм}^2$; $f_0=5000 \text{ Гц}$ и допусках на эти параметры $\Delta l=0,05 \div 0,1 \text{ мм}$; $\Delta \rho=19,3 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$; $\Delta S_0=(1 \div 2) 10^{-5} \text{ мм}^2$; $\Delta f_0=25 \div 50 \text{ Гц}$ относительная погрешность чувствительности за счет технологических допусков составит 3—4%. Следует отметить, что влияние допусков на чувствительность можно компенсировать соответствующим изменением начальной частоты преобразователя в процессе его окончательной юстировки.

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЙ

Преобразователи избыточных давлений и разрежений

Однострунные преобразователи. В литературе [22, 27] приводятся описания конструкций струнных и вибрационно-частотных преобразователей, имеющих частотно-модулированный выходной сигнал.

Изготовить вибрационно-частотные преобразователи давления на предел измерения ниже $5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ практически невозможно. Кроме того, вибрационно-частотные преобразователи избыточных давлений не могут быть использованы для измерения вакуумметрических давлений.

В связи с изложенным выше вопрос создания унифицированной конструкции датчиков давления, охватывающих диапазон измерения от $1 \cdot 10^5$ до $600 \cdot 10^5 \text{ Па}$, по-прежнему остается актуальным.

На рис. 21 представлена схема однострунного преобразователя давлений в частоту [16]. В корпусе 1 выполнена мембрана 2, на которой расположена стойка 3. Стойка 7 жестко закреплена на плоскости корпуса. Между концами стоек 3 и 7 натянута тонкая струна 5, помещенная в воздушный зазор магнитной системы 6. Давление внутри замкнутой полости преобразователя подается через штуцер 4.

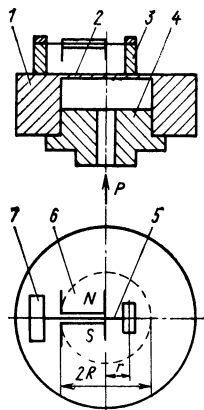


Рис. 21. Схема струнного преобразователя давлений

При подаче избыточного давления p во внутреннюю полость преобразователя мембрана прогибается, расстояние между верхними концами стоек увеличивается за счет углового перемещения стойки 3, закрепленной на мембране. Величина упругой деформации струны также увеличивается, что приводит к изменению частоты ее поперечных колебаний. Это значение частоты в соответствии с уравнениями (18) и (19) можно определить выражением

$$f = \frac{1}{2l_0} \sqrt{\frac{E(\delta_0 + \delta_p)}{\rho l_0}} = f_0 \sqrt{1 + \frac{\delta_p}{\delta_0}} = f \sqrt{1 + \frac{Kp}{\delta_0}}, \quad (52)$$

где $\delta_p = Kp$ — упругая деформация струны, обусловленная избыточным давлением; p — величина измеряемого избыточного давления; K — коэффициент пропорциональности, определяемой конструктивными параметрами преобразователя.

После разложения в степенной ряд правой части уравнения (52) можно определить функциональную связь между приращением частоты и измеряемым давлением уравнением вида

$$\Delta f = f - f_0 = \frac{Kp}{2\delta_0} f_0 - \frac{1}{8} \left(\frac{Kp}{\delta_0} \right)^2 f_0 + \frac{1}{16} \left(\frac{Kp}{\delta_0} \right)^3 f_0. \quad (53)$$

Чувствительность S_p преобразователя определяется первым членом уравнения (53) и равна

$$S_p = \frac{\Delta f}{p} = \frac{Kf_0}{2\delta_0} = \frac{\delta_p f_0}{2\delta_0 p}. \quad (54)$$

Последующие члены характеризуют нелинейность функции преобразования.

Теоретический анализ изгиба тонких круглых пластин, жестко защемленных на краях и нагруженных равномерно распределенной нагрузкой, показывает, что угол поворота нормали φ в любой точке изогнутой круглой мембраны [2, 33]

$$\varphi = \frac{p}{16D} (R^2 r - r^3), \quad (55)$$

где $D = \frac{E_m h^3}{12(1 - \mu^2)}$ — жесткость мембраны на изгиб; R — радиус мембраны; r — расстояние от центра мембраны, на котором расположена стойка для крепления струны, до оси симметрии стойки; E_m — модуль упругости материала мембраны; h — толщина мембраны; μ — коэффициент Пуассона; p — измеряемое давление.

Очевидно, что если расположить стойку на мембране в месте наибольшего угла поворота нормали, то при прочих равных условиях закрепленная струна получит наибольшее приращение упругой деформации, а следовательно, и растягивающей силы. При этом изменение частоты колебаний струны будет максимально возможным для данных параметров преобразователя [а. с. № 510659 (СССР)].

Для определения оптимального радиуса r_0 , при котором угол поворота стойки будет максимальным, возьмем частную производную по параметру r от выражения (55) и приравняем нулю:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{p}{16D} (R^2 - 3r^2) = 0, \quad (56)$$

откуда

$$r_0 = \frac{R}{\sqrt[3]{3}} \simeq 0,58R. \quad (57)$$

Вследствие малой продольной жесткости струны мембрана имеет прогиб, величина и форма которого практически равна прогибу свободной мембраны, не нагруженной колеблющейся струной.

Максимальный прогиб центра мембраны, соответствующий верхней границе диапазона измеряемых давлений, лежит в пределах 10—30 мкм при $h \geq 0,3$ мм и обеспечивает требуемую чувствительность струнного преобразователя. В связи с этим нет необходимости повышать чувствительность мембран за счет введения гофров.

Толщина мембраны преобразователя, рассчитанного на определенный диапазон измерения давлений, может быть определена исходя из следующих соображений.

Из выражения (10) следует, что при $n=1$ начальное напряжение растяжения в струне

$$\sigma_0 = 4f_0^2 l_0^2 \rho. \quad (58)$$

Задавшись приращением частоты струны Δf_m , соответствующим полному диапазону измерения, можно записать

$$f_0 + \Delta f_m = f_{\max} = \frac{1}{2l_0} \sqrt{\frac{\sigma_1}{\rho}},$$

откуда напряжение растяжения в струне, соответствующее максимальному давлению, измеряемому датчиком,

$$\sigma_1 = 4(f_0 + \Delta f_m)^2 l_0^2 \rho. \quad (59)$$

Приращение напряжения растяжения в струне

$$\begin{aligned} \Delta \sigma &= \sigma_1 - \sigma_0 = 4l_0^2 \rho (2f_0 \Delta f_m + \Delta f_m^2) = \\ &= 4l_0^2 \rho \Delta f_m (2f_0 + \Delta f_m). \end{aligned} \quad (60)$$

Этому приращению напряжения растяжения соответствует определенное приращение упругой деформации струны, относительную величину $\Delta \epsilon_m$ которой можно определить на основании закона Гука:

$$\Delta \epsilon_m = \frac{\delta_{ym}}{l_0} = \frac{\Delta \sigma}{E} = \frac{4l_0^3 \rho (2f_0 \Delta f_m + \Delta f_m^2)}{E}, \quad (61)$$

где E — модуль упругости материала струны, откуда

$$\delta_{ym} = \frac{4l_0^3 \rho (2f_0 \Delta f_m + \Delta f_m^2)}{E}. \quad (62)$$

При известной высоте стойки H , жестко закрепленной на мембране на расстоянии $r_0 = 0,58R$ от ее центра, нетрудно определить требуемый угол поворота нормали в точке крепления стойки к мембране:

$$\varphi \approx \frac{\delta_y}{H} = \frac{4l_0^3 \rho (2f_0 \Delta f + \Delta f^2)}{HE}. \quad (63)$$

Приравнивая правые части уравнений (55) и (63), с учетом выражения (55) получим

$$\frac{12p_m(R^2r - r^3)(1 - \mu^2)}{16E_M h^3} = \frac{4l_0^3 \rho (2f_0 \Delta f_m + \Delta f_m^2)}{HE}, \quad (64)$$

где p_m — верхнее значение диапазона измеряемого перепада давления.

Толщина мембраны h преобразователя определится из выражения (64):

$$h = \sqrt[3]{\frac{3p_m(R^2r - r^3)(1 - \mu^2)HE}{16E_M l_0^3 \rho (2f_0 \Delta f_m + \Delta f_m^2)}}. \quad (65)$$

На рис. 22 приведены номограммы для выбора требуемой толщины мембраны преобразователя давлений в зависимости от диапазона измерения при различных значениях диаметров мембран. Номограммы строились для следующих конструктивных параметров преобразователя: высота стоек $H=7$ мм; диаметры мембран $D_M=10, 20, 30, 40, 50$ мм; длина струны $l_0=15$ мм; материал струны — сплав ПлСр-20 с удельной плотностью $\rho=19,7 \cdot 10^3$ кг/м³ и модулем упругости $E=1,75 \cdot 10^{11}$ Па; начальная частота струны $f_0=5 \cdot 10^3$ Гц; приращение частоты колебаний струны $\Delta f_m=1000$ Гц на полный диапазон измерения; материал корпуса преобразователя и мембран — сталь 30ХГСА с модулем упругости $E_M=2,1 \cdot 10^{11}$ Па и коэффициентом Пуассона $\mu=0,3$.

Для изменения диапазона измерения унифицированного преобразователя необходимо задать требуемое значение толщины мембраны, оставив все другие параметры без изменения.

Наиболее нагруженными являются точки в месте заделки мембраны. В этих точках эквивалентное напряжение [2]

$$\sigma_{\text{эКВ}} \approx 0,666 \frac{pR^2}{h^2}. \quad (66)$$

Расчеты различных вариантов конструктивного выполнения преобразователей показали, что при максимальном измеряемом давлении $1 \cdot 10^8$ Па величина максимального напряжения не превосходит 400 МПа, что значительно ниже предела пропорциональности легированных сталей.

Оценим возможные колебания чувствительности струнного преобразователя давления.

Используя формулы (53), (55) и (18), получим выражение для чувствительности преобразователя:

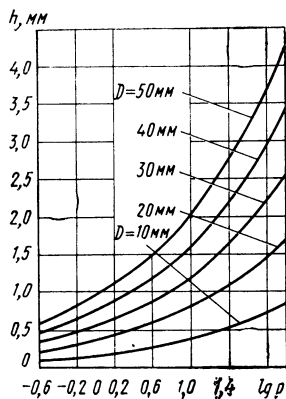


Рис. 22. Зависимость толщины мембраны от верхнего предела измерения струнного преобразователя давления

$$S_p = \frac{3(1-\mu^2)(R^2r-r^3)HE}{32h^3l_0^3f_0\rho E_M}. \quad (67)$$

Выражение для определения отклонений чувствительности имеет вид

$$\Delta S_{\max} = \left| \frac{\partial S}{\partial R} \right| \Delta R + \left| \frac{\partial S}{\partial r} \right| \Delta r + \left| \frac{\partial S}{\partial H} \right| \Delta H + \left| \frac{\partial S}{\partial h} \right| \Delta h + \\ + \left| \frac{\partial S}{\partial l_0} \right| \Delta l_0 + \left| \frac{\partial S}{\partial f_0} \right| \Delta f_0 + \left| \frac{\partial S}{\partial E} \right| \Delta E + \left| \frac{\partial S}{\partial E_M} \right| \Delta E_M, \quad (68)$$

где $\left| \frac{\partial S}{\partial R} \right|, \dots, \left| \frac{\partial S}{\partial E_M} \right|$ — коэффициенты влияния каждого из параметров на чувствительность преобразователя; $\Delta R, \dots, \Delta H, \dots, \Delta E_M$ — допуски на каждый из параметров.

Коэффициенты влияния определяются из выражения (67):

$$\frac{\partial S}{\partial R} = \frac{3(1-\mu^2)HE}{32h^3l_0^3f_0\rho E_M} 2Rr; \quad \frac{\partial S}{\partial r} = \frac{3(1-\mu^2)HE}{32h^3l_0^3f_0\rho E_M} (R^2 - 3r^2).$$

$$\frac{\partial S}{\partial H} = \frac{3(1-\mu^2)(R^2r-r^3)E}{32h^3l_0^3f_0\rho E_M};$$

$$\frac{\partial S}{\partial h} = \frac{3(1-\mu^2)(R^2r-r^3)HE}{32l_0^3f_0\rho E_M} \left(-\frac{3}{h^4} \right).$$

$$\frac{\partial S}{\partial l_0} = \frac{3(1-\mu^2)(R^2r-r^3)HE}{32h^3f_0\rho E_M} \left(-\frac{3}{l_0^4} \right);$$

$$\frac{\partial S}{\partial f_0} = \frac{3(1-\mu^2)(R^2r-r^3)HE}{32h^3l_0^3\rho E_M} \left(-\frac{1}{f_0^2} \right);$$

$$\frac{\partial S}{\partial E} = \frac{3(1-\mu^2)(R^2r-r^3)H}{32h^3l_0^3f_0\rho E_M};$$

$$\frac{\partial S}{\partial E_M} = \frac{3(1-\mu^2)(R^2r-r^3)H}{32h^3l_0^3f_0\rho} \left(-\frac{1}{E_M^2} \right).$$

При значениях параметров преобразователя $p_{\max}=25 \cdot 10^5$ Па, $R=10$ мм, $r=5,8$ мм, $H=7$ мм, $h=1,1$ мм, $l_0=15$ мм, $f_0=5000$ Гц и допусках $\Delta R=0,03$ мм, $\Delta r=0,03$ мм, $\Delta H=0,03$ мм, $\Delta h=0,02$ мм, $\Delta l_0=0,2$ мм, $\Delta f_0=100$ Гц, $S_{p0}=40 \cdot 10^{-5}$ Гц/Па в соответствии с выражением (68) максимальное отклонение чувствительности составит $4,11 \cdot 10^{-5}$ Гц/Па. При этом полагаем, что

$$\Delta E = \Delta E_M = \Delta \rho = 0.$$

Относительная погрешность чувствительности может быть определена с использованием выражения

$$\frac{\Delta S_{\max}}{S_{p0}} = \left| \frac{2R}{R^2-r^2} \right| \Delta R + \left| \frac{R^2-3r^2}{R^2r-r^3} \right| \Delta r + \left| \frac{1}{H} \right| \Delta H + \\ + \left| \frac{3}{h} \right| \Delta h + \left| \frac{3}{l_0} \right| \Delta l_0 + \left| \frac{1}{f_0} \right| \Delta f_0 + \left| \frac{1}{E} \right| \Delta E + \left| \frac{1}{E_M} \right| \Delta E_M. \quad (69)$$

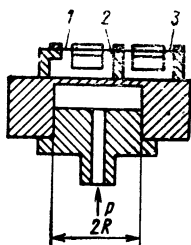


Рис. 23. Схема струнного дифференциального преобразователя давления

Проведенный анализ показал, что такие отклонения чувствительности легко можно компенсировать за счет регулировки начальной частоты f_0 преобразователя в процессе его юстировки при выпуске с предприятия-изготовителя. Приемы регулировки частоты f_0 изложены в п. 2 гл. III.

Рассмотренный преобразователь можно использовать и для измерения вакуумметрического давления.

Дифференциальные преобразователи давления. Расчет конструктивных параметров дифференциального струнного преобразователя аналогичен изложенному выше.

При проведении расчетов, с целью их упрощения, можно выбрать параметры однострунного преобразователя и считать, что чувствительность дифференциального преобразователя будет в 2 раза выше. Например, если однострунный преобразователь имеет максимальное приращение частоты $\Delta f_m = 500$ Гц, то дифференциальный с такими же геометрическими размерами мембраны и высоты стойки будет иметь $\Delta f_m \approx 1000$ Гц.

Схема дифференциального преобразователя представлена на рис. 23. При подаче избыточного или вакуумметрического давления в штуцер мембрана прогнется, что приведет к повороту стойки 2 и изменению упругих деформаций струн 1 и 3 с разными знаками. Смещение стойки 2 относительно центра мембраны равно 0,58R.

Оптимальные значения основных конструктивных параметров преобразователя можно определить на основании анализа функции преобразования.

При работе в режиме измерения разности частот струн функция преобразования имеет вид

$$\Delta f = f_1 - f_2 = f_{01} \sqrt{1 + \frac{K_1 p}{F_{01}}} - f_{02} \sqrt{1 - \frac{K_2 p}{F_{02}}}, \quad (70)$$

где K_1 и K_2 — коэффициенты пропорциональности, обусловленные геометрическими размерами струн и других конструктивных элементов; p — измеряемое давление.

Разложив иррациональные сомножители в степенные ряды и ограничившись третьей степенью разложения, получим

$$\begin{aligned} \Delta f = (f_{01} - f_{02}) &+ \frac{1}{2} \left[f_{01} \left(\frac{K_1 p}{F_{01}} \right) + f_{02} \left(\frac{K_2 p}{F_{02}} \right) \right] + \\ &+ \frac{1}{8} \left[f_{02} \left(\frac{K_2 p}{F_{02}} \right)^2 - f_{01} \left(\frac{K_1 p}{F_{01}} \right)^2 \right] + \\ &+ \frac{1}{16} \left[f_{01} \left(\frac{K_1 p}{F_{01}} \right)^3 + f_{02} \left(\frac{K_2 p}{F_{02}} \right)^3 \right]. \end{aligned} \quad (71)$$

Используя обозначения $K_1/F_{01} = K'_1$, $K_2/F_{02} = K'_2$ и $\Delta f_n = \Delta f - (f_{01} - f_{02})$, получим выражение для чувствительности преобразователя:

$$S_{p_f} = \frac{\Delta f_n}{p} = \frac{1}{2} (f_{01} K'_1 + f_{02} K'_2). \quad (72)$$

В случае полностью симметричной конструкции преобразователя $f_{01}=f_{02}$; $K'_1=K'_2$, и с учетом выражения (67) его чувствительность

$$S_{pf} = \frac{3H(1-\mu^2)(R^2r-r^3)E_1S_1}{4h^3F_{01}l_{01}E_M} f_{01}. \quad (73)$$

Погрешность от нелинейности может быть оценена в соответствии с выражением (38):

$$\gamma_{pf} = \frac{1}{8} (K'_1 p)^2 100\% \quad (74)$$

и при $K'_1 p = 0,1$ будет равна 0,125%. При соответствующем выборе аппроксимирующей прямой, принимаемой за градуировочную характеристику, погрешность от нелинейности может быть уменьшена в несколько раз. Время измерения не зависит от параметров преобразователя и равно 1 с.

Таким образом, при работе в режиме измерения разности частот колебаний струн необходимым условием получения линейной функции преобразования является возможно лучшая симметрия плеч дифференциального преобразователя.

При работе в режиме измерения отношения частот струнных автогенераторов функция преобразования имеет вид [20, 29]

$$N(p) = n_d \frac{f_1}{f_2} = n_d \frac{f_{01}}{f_{02}} \frac{\sqrt{1+K'_1 p}}{\sqrt{1-K'_2 p}}, \quad (75)$$

где n_d — коэффициент деления частоты f_{02} ;

$$\left. \begin{aligned} K'_1 &= \frac{3H(1-\mu^2)(R^2r-r^3)ES_1}{4h^3l_{01}F_{01}E_M}; \\ K'_2 &= \frac{3H(1-\mu^2)(R^2r-r^3)ES_2}{4h^3l_{02}F_{02}E_M}; \end{aligned} \right\} \quad (76)$$

Разложив функцию преобразования (75) в ряд по степеням в соответствии с выражением

$$N(p) = N(0) + N'(0)p + \frac{N''(0)}{2}p^2 + \frac{N'''(0)}{6}p^3 + \dots$$

получим

$$\begin{aligned} N(p) &= n_d \frac{f_{01}}{f_{02}} + n_d \frac{f_{01}}{f_{02}} \frac{K'_1 + K'_2}{2} p + \\ &+ n_d \frac{f_{01}}{f_{02}} \cdot \frac{(K'_1 + K'_2)(3K'_2 - K'_1)}{8} p^2 + \\ &+ n_d \frac{f_{01}}{f_{02}} \cdot \frac{(K'_1 + K'_2)(1,5K_1'^2 + 7,5K_2'^2 - 3K'_1 K'_2)}{24} p^3 + \dots \quad (77) \end{aligned}$$

Анализ функции преобразования показывает, что полученный ряд является быстросходящимся и основную погрешность от нели-

нейности дает квадратичный член разложения. Очевидно, что если путем подбора конструктивных параметров преобразователя удалось бы обратить в ноль коэффициент при p^2 , то линейность функции преобразования существенно повысилась.

Условие обращения в ноль квадратичного члена имеет вид

$$K'_1 = 3K'_2. \quad (78)$$

С учетом выражений (76) последнее равенство запишется в виде

$$\frac{E_1 S_1 H_1}{l_{01} F_{01}} = \frac{3E_2 S_2 H_2}{l_{02} F_{02}}. \quad (79)$$

Погрешность от нелинейности функции преобразования определяется отношением кубичного члена уравнения (77) к члену, содержащему первую степень измеряемого давления:

$$\gamma_{pN} = \frac{1,5K_1'^2 + 7,5K_2'^2 - 3K_1'K_2'}{12} p^2. \quad (80)$$

Практически возможны четыре варианта обеспечения полученного равенства (79).

1. Геометрические размеры струн, стоек и материал струн полностью идентичны, т. е. $l_{01}=l_{02}=l_0$, $H_1=H_2=H$, $S_1=S_2=S$, $E_1=E_2=E$. В этом случае из последнего равенства следует, что соотношение сил начального натяжения струн должно удовлетворять условию

$$F_{02} = 3F_{01}. \quad (81)$$

С учетом соотношения (10) последнее равенство можно представить в виде

$$\frac{f_{02}}{f_{01}} = \sqrt{3}. \quad (82)$$

С учетом только двух первых членов правой части уравнения (77) приращение числа импульсов

$$\Delta N = N(p) - n_d \frac{f_{01}}{f_{02}} = n_d \frac{f_{01}}{f_{02}} \frac{K'_1 + K'_2}{2} p, \quad (83)$$

откуда чувствительность преобразователя

$$S_{pN} = \frac{\Delta N}{p} = n_d \frac{f_{01}}{f_{02}} \frac{K'_1 + K'_2}{2}. \quad (84)$$

Для рассматриваемых условий

$$S_{pN} = n_d \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{K'_1 + \frac{K'_1}{3}}{2} = \frac{2}{3\sqrt{3}} K'_1 n_d. \quad (85)$$

Время измерения можно определить на основании аналитического выражения (75) для функции преобразования

$$t_n = \frac{n_d}{f_{02} \sqrt{1 - K'_2 p}} = \frac{n_d}{\sqrt{3} f_{01} \sqrt{1 - K'_2 p}} \simeq \frac{n_d}{\sqrt{3} f_{01}}. \quad (86)$$

С целью сравнительной оценки чувствительностей дифференциального преобразователя, работающего в режиме измерения отношения частот (при $f_{02} = \sqrt{3}f_{01}$) и в режиме измерения разности частот (при $f_{01}=f_{02}$), будем использовать отношение

$$\frac{S_{pN}}{S_{pf}} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{n_d}{f_{01}}. \quad (87)$$

Полагая, что f_{01} для обоих рассматриваемых случаев одинаковы и идентичны параметры первичного механического преобразователя, при $n_d = 10^4$, $f_{01} = 5 \cdot 10^3$ Гц, $K'_1 = 2,2 \cdot 10^{-6}$ м²/Н получим $t_n = 1,16$ с и $S_{pN} | S_{pf} = 0,77$.

2. Площадь поперечного сечения, модуль упругости, силы начального натяжения струн и высоты стоек одинаковы, т. е. $S_1 = S_2 = S$, $E_1 = E_2 = E$, $F_{01} = F_{02} = F_0$, $H_1 = H_2 = H$. В этом случае условие получения максимальной линейности обеспечивается за счет применения в конструкции струн разной длины и соотношение между длинами струн должно удовлетворять уравнению

$$l_{02} = 3l_{01}, \quad (88)$$

что соответствует отношению начальных частот $f_{01}/f_{02} = 3$. Чувствительность преобразователя

$$S_{pN} = 2n_d K'_1. \quad (89)$$

Отношение

$$\frac{S_{pN}}{S_{pf}} = \frac{2n_d K'_1}{K'_1 f_{01}} = \frac{2n_d}{f_{01}}. \quad (90)$$

Например, при $n_d = 10^4$ и $f_{01} = 5 \cdot 10^3$ Гц в соответствии с зависимостью (89) чувствительность S_{pN} в 4 раза выше, чем S_{pf} , что, несомненно, является положительным фактором. Однако при этом время измерения

$$t_n = \frac{n_d}{f_{02}} = \frac{3n_d}{f_{01} \sqrt{1 - K_2^1 p}} \simeq \frac{3n_d}{f_{01}} = \frac{n_d}{f_{02}} \quad (91)$$

значительно больше, чем для двух рассмотренных выше случаев, и для принятых цифровых значений n_d и f_{01} равно 6 с.

Путем соответствующего подбора коэффициента деления n_d при заданном f_{01} (а следовательно, и f_{02}) можно обеспечить требуемую чувствительность при приемлемом времени измерения.

При равных чувствительностях быстродействие рассматриваемого режима измерения в 1,5 раза ниже, чем режима измерения разности частот.

3. Площадь поперечного сечения, модуль упругости, плотность, начальные частоты колебаний струн и высоты стоек одинаковы, т. е. $S_1 = S_2 = S$; $E_1 = E_2 = E$; $\rho_1 = \rho_2 = \rho$; $f_{01} = f_{02} = f_0$.

Уравнение (79) с учетом формулы (10) можно представить в виде

$$\frac{E_1}{f_{01}^2 l_{01}^3 \rho_1} = \frac{3}{f_{02}^2 l_{02}^3 \rho_2},$$

откуда следует условие оптимальной линейности

$$l_{02}^3 = 3l_{01}^3,$$

или

$$\frac{l_{02}}{l_{01}} = \sqrt[3]{3}. \quad (92)$$

Чувствительность преобразователя

$$S_{pN} = \frac{2}{3} n_d K'_1. \quad (93)$$

Время измерения

$$t_n \simeq \frac{n_d}{f_{02}} = \frac{n_d}{f_{01}}. \quad (94)$$

Отношение чувствительностей

$$\frac{S_{pN}}{S_{pf}} = \frac{2n_d K'_1}{3K'_1 f_{01}} = \frac{2n_d}{3f_{01}}. \quad (95)$$

Для параметров рассматриваемого примера это отношение равно 4/3 при времени измерения 2 с. Очевидно, что путем изменения n_d можно снизить чувствительность до значения S_{pf} , но при этом время измерения все же будет большим, чем в режиме измерения разности частот струн.

4. Геометрические и механические параметры струн полностью идентичны, а высоты стоек, на которых закреплены концы струн, различны, т. е. $S_1=S_2=S$; $E_1=E_2=E$; $f_{01}=f_{02}=f_0$; $\rho_1=\rho_2=\rho$; $l_{01}=l_{02}=l_0$.

Условие получения максимальной линейности выходной характеристики имеет вид

$$H_1 = 3H_2,$$

или

$$\frac{H_1}{H_2} = 3. \quad (96)$$

По чувствительности и времени измерения этот вариант реализации преобразователя полностью идентичен с предыдущим, рассмотренным в п. 3.

Определим величину отношения погрешностей от нелинейности для рассматриваемых случаев, воспользовавшись выражениями (74) и (80) и учитывая, что численные значения величин K'_1 в обоих выражениях одинаковы:

$$\frac{\gamma_{pf}}{\gamma_{pN}} = \frac{12K'_1}{8(1,5K_1'^2 + 7,5K_1'^2 - 3K'_1 K'_2)}. \quad (97)$$

С учетом выражения (97) $\gamma_{pf}/\gamma_{pN} = 1,25$, откуда следует, что линейность преобразователя, работающего в режиме измерения отношения частот, выше на 12,5%, но при этом ухудшается его быстродействие.

Таблица 4

		Основные показатели					
№ групп	№ схем	Тип структурной схемы	Чувствительность S				Нелинейность γ (при аппроксимации касательной)
			4	5	6	7	
I	2	3					8
	1	Однострунная с измерением частоты	$S_f = f_{01} K'_1$	$t_f = 1$	1	1	$\frac{1}{4} K'_1 X$
	2	Однострунная с измерением периода	$\frac{n_D^* K'_1 f_k}{f_0}$	$\frac{n_D^*}{f_0 - \Delta f m}$	$\frac{n_D^* f_k}{f_0^2}$	$\frac{n_D^*}{f_0 - \Delta f m}$	$\frac{3}{4} K'_1 X$
	3	Дифференциальная симметричная с измерением разности частот колебаний	$2 f_{01} K'_1$	1	2	1	$\frac{1}{8} (K'_1)^2 X^2$
II	4	Дифференциальная асимметричная с измерением отношения частот колебаний струн	$\frac{f_{02}}{f_{01}} = \sqrt[3]{3}$	$\frac{n_D}{\sqrt[3]{3} f_{01}}$	$\frac{2 n_D}{3 \sqrt[3]{3} f_{01}}$	$\frac{n_D}{\sqrt[3]{3} f_{01}}$	$\frac{1}{9} (K'_1)^2 X^2$
			$\frac{l_{02}}{f_{01}} = \frac{3 f_{01}}{3 f_{02}} = F_{02}$	$\frac{3 n_D}{f_{01}}$	$\frac{2 n_D}{f_{01}}$	$\frac{3 n_D}{f_{01}}$	$\frac{1}{9} (K'_1)^2 X^2$
			$l_{02} = \sqrt[3]{3} l_{01}$	$\frac{n_D}{f_{01}}$	$\frac{2 n_D}{3 f_{01}}$	$\frac{n_D}{f_{01}}$	$\frac{1}{9} (K'_1)^2 X^2$
			$\frac{h_1}{f_{01}} = \frac{3 h_2}{f_{02}}$	$\frac{n_D}{f_{01}}$	$\frac{2 n_D}{-f_{01}}$	$\frac{n_D}{f_{01}}$	$\frac{1}{9} (K'_1)^2 X^2$

5	Дифференциальная с измерением разности (или отношения) частот с умножением выходных частот автогенераторов в n_y раз	$2n_y f_0 K'_1$	$\frac{1}{n_y}$	n_y	$\frac{1}{n_y}$	$\frac{1}{8} (K'_1)^2 X^2$
6	Дифференциальная симметричная с измерением периодов по каждому каналу и их вычитанием	$\frac{n_D^* K'_1 i_k}{f_0}$	$\frac{n_D^*}{f_{01} - \Delta f m}$	$\frac{n_D^* i_k}{f_{01}^2}$	$\frac{n_D^*}{f_0 - \Delta f m}$	$\frac{5}{8} (K'_1)^2 X^2$
7	Дифференциальная асимметричная с измерением отношения периодов колебаний струн	$\frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{n_D^* K'_1}{f_{01}}$	$\frac{n_D^*}{f_{01}}$	$\frac{2n_D^*}{3\sqrt{3} f_{01}}$	$\frac{n_D^*}{\sqrt{3} f_{01}}$	$\frac{1}{9} (K'_1)^2 X^2$
8	Дифференциальная линейризованная с выходным сигналом в виде разности квадратов частот колебаний струн	$2f_0^2 K'_1$	1	ωf_0	1	0
9	Дифференциальная линейризованная без стабилизации суммы частот струн и с выходным сигналом в виде разности частот	$\frac{2f_0^2 K'_1}{f_1 + f_2}$	1	$\frac{2f_0}{f_1 + f_2}$	1	—
10	Дифференциальная симметричная линейризованная со стабилизацией суммы частот и измерением разности частот	$f_0 K'_1$	1	2	1	0

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы.

1. При одинаковых параметрах механической части преобразователя и одинаковой чувствительности с точки зрения быстрого действия режим измерения разности частот является оптимальным.

2. Режимы измерения разности частот колебаний струн (при $f_{01}=f_{02}$) и отношения частот колебаний струн (при $f_{02} = \sqrt{3} f_{01}$) являются наиболее близкими как с точки зрения чувствительности, так и с точки зрения быстродействия.

3. Существенным недостатком преобразователей с измерением разности частот колебаний струн является необходимость применения специального функционального блока-смесителя выходных частот струнных автогенераторов.

4. Режим измерения отношения частот колебаний струн может быть реализован с использованием стандартного электронно-счетного цифрового частотомера, что является положительным свойством данного метода измерения.

С целью повышения быстродействия выходную частоту преобразователя можно определять по значению длительности определенного числа ее периодов. В стандартах электронно-счетных частотомеров предусмотрен режим работы «измерение периода» с перестраиваемым коэффициентом деления входной частоты.

Если для измерения выходной частоты преобразователя требуется время 1 с, то для получения такого же приращения числа импульсов, характеризующих значение входной физической величины, в режиме измерения периода частоты требуется значительно меньшее время. Для параметров преобразователя, рассмотренного в примерах настоящего параграфа, это время уменьшается в 10^3 раз.

При использовании струнных дифференциальных преобразователей можно реализовать измерение длительности определенного числа периодов каждой из струн, а затем вычислять разность измеренных периодов или отношение этих периодов. Эти операции можно выполнять, используя либо ЭВМ, либо микропроцессор, встроенный в преобразователь.

Широкое внедрение микропроцессов создает предпосылки для создания струнных преобразователей со строго линейной функцией преобразования.

Например, если с использованием микропроцессора реализовать возведение в квадрат частот колебаний струн дифференциального преобразователя и затем осуществить определение разности квадратов текущих значений частот колебаний струн, то полученный результат будет линейно связан с измеряемой физической величиной.

Если положить, что частоты колебаний струн определяются уравнением

$$f_{1,2} = f_0 \sqrt{1 \pm K'_1 X},$$

то

$$f_1^2 - f_2^2 = 2f_0^2 K'_1 X. \quad (98)$$

При вычислении суммы и разности частот колебаний струн можно получить функцию преобразования в виде

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2f_0^2 K'_1}{f_1 + f_2} X. \quad (99)$$

Из уравнения (99) следует, что при реализации системы автоподстройки суммы частот, при которой соблюдалось бы условие $f_1 + f_2 = 2f_0$, разностная частота

$$\Delta f = f_0 K'_1 X$$

линейно связана с измеряемой величиной X .

Последний вариант преобразователя требует более сложной электронной части, что существенно увеличивает его массу, габаритные размеры и стоимость. Однако этот вариант позволяет получать весьма высокие точности измерения (погрешность $1 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-2}\%$ [1]).

В табл. 4 приведены результаты сравнительного анализа метрологических характеристик всех рассмотренных выше вариантов однострунных и дифференциальных преобразователей. При этом полагалось, что начальная частота колебаний одной из струн f_{01} и коэффициент K'_1 во всех преобразователях одинаковы. Сравнение чувствительностей и времени измерения проводили с однострунным вариантом преобразователя, у которого измеряли значение выходной частоты за время 1 с. В строках графы 4 под n_d поднимается коэффициент деления входной частоты f_{02} , который при использовании стандартных электронно-счетных частотомеров обычно выбирают равным 10^4 .

В графах 4, 6, 7 через n_d^* обозначен коэффициент деления, при котором обеспечивается примерно та же чувствительность, что и в однострунном варианте преобразователя.

Преобразователи разности давлений

Однострунные преобразователи разности давлений. Погрешность измерения перепадов давлений существующими серийно выпускаемыми средствами измерения лежит в пределах 1—2,5%.

В настоящей работе приведены результаты исследований, проведенных с целью создания гаммы унифицированных струнных преобразователей перепадов давления в частотно-модулированный выходной сигнал, обладающих более высокими метрологическими показателями.

Схема, иллюстрирующая принцип действия однострунного преобразователя разности давлений, представлена на рис. 24.

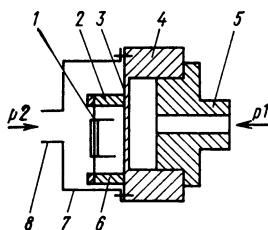


Рис. 24. Схема однострунного преобразователя разности давлений

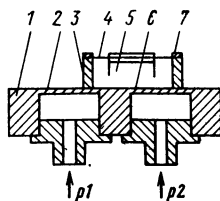


Рис. 25. Двухмембранный преобразователь разности давлений

На плоской мембране 3 закреплена стойка 2, совершающая угловые перемещения при подаче давления p_1 в штуцер 5, закрепленный на корпусе 4. Крышка 7 герметично соединяется с корпусом 4 и содержит штуцер 8, через который в полость над мембраной подается давление p_2 . Концы струны 1 жестко закреплены на подвижной 2 и неподвижной 6 стойках.

Прогиб мембраны будет пропорционален измеряемой разности давлений. Изменение частоты струны функционально связано с измеряемой разностью давлений выражением (52), где вместо давления p следует подставить значение Δp . Методика расчета конструктивных параметров преобразователя аналогична приведенной выше. Существенным недостатком преобразователя такого типа является то, что в полость, содержащую струну, можно подводить давление только газообразной среды.

На рис. 25 показана схема второго варианта однострунного преобразователя разности давлений, пригодного для измерения перепадов давлений как газообразных, так и жидких сред.

В корпусе 1 в одной плоскости расположены две плоские мембраны 2 и 6 с одинаковыми геометрическими размерами. На мембранах со смещением относительно их центра закреплены стойки 3 и 7. Между концами стоек натянута струна 4, помещенная в воздушный зазор постоянного магнита 5. Геометрические параметры стоек и координаты их закрепления относительно центра мембран также идентичны [а. с. № 591734 (СССР)].

При одинаковых значениях входных давлений p_1 и p_2 прогибы мембран и угловые смещения стоек будут одинаковы, и упругие деформации струны не изменятся. При разных давлениях p_1 и p_2 угловые смещения стоек будут неодинаковыми, что приведет к изменению частоты колебаний струнного автогенератора.

Требуемые конструктивные параметры преобразователя определяют исходя из заданных значений Δf_m и Δp_{\max} в соответствии с методикой расчета, изложенной выше. После определения толщины мембраны проводят поверочный расчет величин максимальных напряжений в материале мембраны при одновременном воздействии максимально возможного статического давления p_0 и Δp_{\max} .

В случае, если при поверочном расчете обнаружится, что мембрана нагружена до значений напряжений, превышающих предел пропорциональности, необходимо увеличивать ее толщину, одновременно увеличивая высоту стойки, и снова проводить поверочный расчет.

Чувствительность преобразователя разности давлений определяется в соответствии с выражением (67).

Влияние допусков конструктивных параметров преобразователя разности давлений на изменение чувствительности оценивается по методике, аналогичной примененной при исследовании однострунного преобразователя избыточных и вакуумметрических давлений.

Используя эти формулы, получим выражение для определения изменения чувствительности:

$$\Delta S_{\max} = |\Delta S_D| + |\Delta S_I| + |\Delta S_H| + |\Delta S_h| + |\Delta S_r|, \quad (100)$$

где $|\Delta S_i|$ — произведение коэффициента влияния на допуск i -го параметра.

Рассмотрим, как будет изменяться чувствительность преобразователя при $f_0 = 5000$ Гц; $\Delta f_m = 1000$ Гц, $R = 10$ мм; $\Delta p_{\max} = 5 \cdot 10^5$ Па, что соответствует $h = 0,65$ мм. Допуски на размеры назовем следующим образом: $\Delta R = 25 \cdot 10^{-3}$ мм; $\Delta H = 30 \cdot 10^{-3}$ мм; $\Delta h = 7 \cdot 10^{-3}$ мм; $\Delta l_0 = 35 \cdot 10^{-3}$ мм; $\Delta r = 30 \cdot 10^{-3}$ мм.

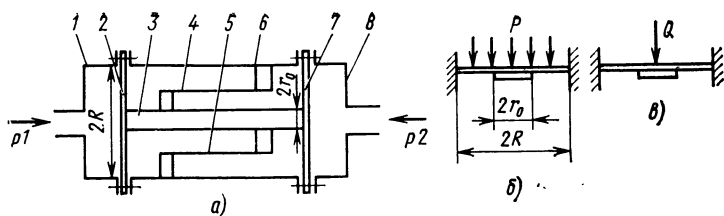


Рис. 26. Дифференциальный преобразователь разности давлений

В соответствии с выражениями (67) и (100)

$$S = 208 \cdot 10^{-5} \text{ Гц/Па}; \quad \Delta S_{\max} = 10,45 \cdot 10^{-5} \text{ Гц/Па}; \quad \Delta S_{\max}/S \approx 5\%.$$

Такое изменение чувствительности можно скомпенсировать изменением начальной частоты струны f_0 . Диапазон изменения частоты, необходимый для компенсации, определится неравенством

$$\Delta f_0 \leq \frac{\Delta S_{\max}}{|\partial S / \partial f_0|}.$$

Для параметров рассматриваемого примера $\Delta f_0 = 251$ Гц.

Компенсацию изменения чувствительности можно произвести также за счет изменения толщины мембраны h .

Дифференциальный преобразователь разности давлений. На рис. 26, а приведена схема струнного дифференциального преобразователя разности давлений [16].

Между торцовыми поверхностями корпуса 6 и фланцев 1 и 8 установлены две плоские мембраны 2 и 7, центры которых соединены жестким стержнем 3. На жестком стержне и на корпусе датчика закреплены концы струн 4 и 5, образующих струнный дифференциальный преобразователь малых перемещений стержня 3. При одинаковой эффективной площади мембран и $p_1 = p_2$ стержень 3 будет оставаться неподвижным. При $p_1 \neq p_2$ стержень будет смещаться в сторону полости, где давление имеет меньшее значение. Корпус 6 имеет технологические окна для обеспечения возможности сборки и регулировки.

Перемещение мембраны радиусом R с жестким центром радиусом r_0 , нагруженной равномерно распределенной нагрузкой p (рис. 26, б), определяется выражением [2]

$$\omega = A_p \frac{R^4 p}{E h^3}, \quad (101)$$

где

$$A_p = \frac{3(1 - \mu^2)}{16} \frac{C^4 - 1 - 4C^2 \ln C}{C^4}; \quad (102)$$

$$C = \frac{R}{r_0}. \quad (103)$$

Перемещение жесткого центра мембраны под действием сосредоточенной силы Q , приложенной в центре (рис. 26, в), определяется выражением [2]

$$\omega = A_Q \frac{QR^2}{Eh^3}, \quad (104)$$

где

$$A_Q = \frac{3(1 - \mu^2)}{\pi} \left[\frac{C^2 - 1}{4C^2} - \frac{\ln^2 C}{C^2 - 1} \right]. \quad (105)$$

В том случае, если стержень, соединяющий центры мембран, имеет прямоугольную форму поперечного сечения, вводят понятие эффективного радиуса жесткого круглого центра r_0 , к которому приводится площадь прямоугольного стержня.

Определим параметры дифференциального преобразователя, учитывая формулы (101) и (104).

Для каждой из мембран запишем уравнения прогиба под действием давлений p_1 и p_2 и силы Q , представляющей реакцию стержня на мембрану:

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= A_p \frac{p_1 R^4}{Eh^3} - A_Q \frac{QR^2}{Eh^3}; \\ \omega_2 &= A_Q \frac{QR^2}{Eh^3} - A_p \frac{p_2 R^4}{Eh^3}. \end{aligned} \right\} \quad (106)$$

Полагая, что мембраны связаны абсолютно жестким стержнем и что $\omega_1 = \omega_2$, из системы (106) получим

$$A_p \frac{(p_1 + p_2) R^4}{Eh^3} = 2A_Q \frac{QR^2}{Eh^3}. \quad (107)$$

Вводя обозначения: $p_1 = p + \Delta p$, $p_2 = p$, из формулы (107) будем иметь

$$Q = \frac{A_p}{2A_Q} (2p + \Delta p) R^2. \quad (108)$$

Подставив значение Q в одно из уравнений системы (106), найдем перемещение жесткого центра

$$\omega = A_Q \frac{A_p (2p + \Delta p) R^4}{2A_Q E h^3} - A_p \frac{p R^4}{E h^3} = A_p \frac{\Delta p R^4}{2E h^3}. \quad (109)$$

Зная $\omega_m = \delta_{p_m}$, определяемую из расчета требуемой чувствительности преобразователя, можно найти толщину мембран h :

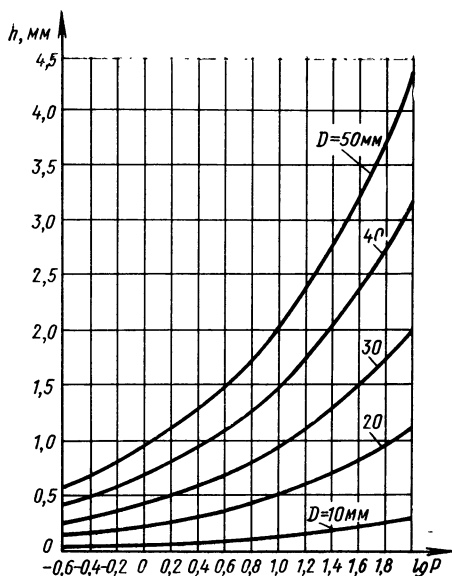
$$h = \sqrt[3]{A_p \frac{\Delta p}{2E \delta_{p_m}} R^4}. \quad (110)$$

С использованием выражения (110) были построены номограммы для выбора конструктивных параметров струнного преобразователя разности давлений (рис. 27), в котором предусматривается применение струн из сплава ПлСр-20 при $l_0 = 15$ мм; $f_0 = 5000$ Гц; $\Delta f_m = 1000$ Гц и мембраны из стали 30ХГСА.

Выразим коэффициент пропорциональности $K = \frac{\delta_p}{\Delta p}$ через параметры конструкции.

Учитывая, что в данном преобразователе перемещение центра мембраны $\omega = \delta_p$, и учитывая формулу (110), находим

Рис. 27. Номограммы для выбора толщин мембран для дифференциального преобразователя разности давлений



$$K = \frac{A_p R^4}{2Eh^3} \quad (111)$$

Подставляя в формулу (54) выражения (58) и (111), определим чувствительность преобразователя:

$$S_{\Delta p} = \frac{K f_0}{\delta_0} = \frac{A_p E R^4}{16 f_0 l_0^3 h^3 \rho E} \quad (112)$$

Изменение чувствительности за счет технологических допусков, как и для предыдущей конструкции, оценивают путем определения величины полного дифференциала от выражения (112).

4. СТРУННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ УСИЛИЙ И МАССЫ ВЕЩЕСТВА

Преобразователь малых усилий

В настоящее время имеется потребность в преобразователях усилий с верхним пределом измерения в диапазоне от 0,1 до 1000 Н с основной погрешностью, не превышающей 0,1—0,3%.

Исследования показали, что измерения с такой погрешностью могут обеспечить струнные преобразователи усилий. Схема струнного преобразователя усилий в частоту представлена на рис. 28. Центры двух плоских круглых мембран 2 и 6, зафиксированных между цилиндрическим корпусом 11 и фланцами 1 и 8, соединены жестким стержнем 13. На выступах 3, 9, расположенных на стержне,

откуда определится требуемое значение толщины мембраны

$$h = \sqrt{\frac{A_p D^2 E P_m}{32 l_0^3 \rho (f_{1m}^2 - f_0^2) E_m} - \frac{E S A_p D^2}{4 E_m l_0}}. \quad (116)$$

Преобразователи средних и больших усилий

Однострунный преобразователь. Упрощенная схема однострунного преобразователя приведена на рис. 29.

На рис. 29, а приведена схема преобразователя, в которой упругий элемент 1 выполнен в виде плоского прямоугольника, в центре которого имеется сквозное окно. Струна 2 натянута вдоль продольной оси преобразователя и помещена в воздушный зазор постоянного магнита 3. При приложении измеряемого усилия P в основном упруго деформируются суженные части упругого элемента, выделенные на рисунке штриховкой. При этом приращение упругой деформации струны δ_y равно упругой деформации суженных частей упругого элемента. В случае примерно равных модулей упругости материала упругого элемента и струны абсолютные приращения напряжений растяжения в них также будут одинаковыми. Но обычно струны имеют предел пропорциональности в несколько раз выше предела пропорциональности материала упругого элемента. Поэтому при равных значениях абсолютных приращений напряжений погрешность от гистерезиса в упругом элементе в основном и будет определять погрешность преобразователя.

С целью снижения погрешности, обусловленной гистерезисом в перемычках упругого элемента, была предложена схема построения преобразователя [а. с. № 559135 (СССР)], в которой напряжения растяжения в перемычках существенно снижаются путем увеличения их длины с одновременным увеличением площади поперечного сечения (рис. 29, б) при сохранении прежней длины струны.

При выполнении преобразователя по такой схеме площадь поперечного сечения упругих перемычек может быть увеличена во столько раз, во сколько раз увеличивается их длина. В итоге получается требуемое для обеспечения заданной чувствительности абсолютное приращение упругой деформации струны при значительном уменьшении напряжений растяжения в материале упругих перемычек.

В том случае, если задано начальное значение частоты колебаний струны и ее значение, соответствующее верхнему пределу измерения, требуемая для обеспечения заданной чувствительности упругая деформация струны δ_{ym} определится на основании выражения (62).

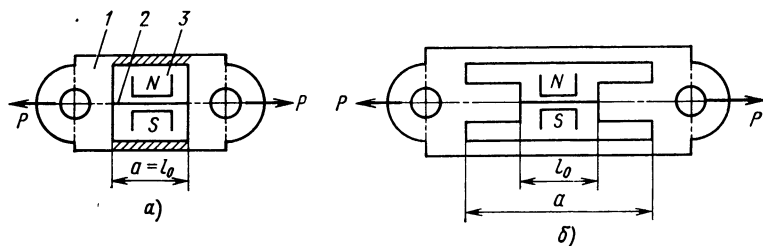


Рис. 29. Однострунный преобразователь усилий

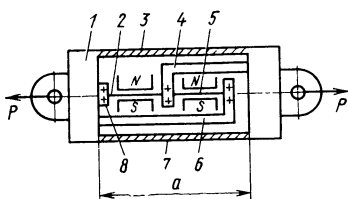


Рис. 30. Схема дифференциального преобразователя средних и больших усилий

При приложении к силовоспринимающим элементам преобразователя измеряемого усилия P его упругие перемычки деформируются на величину

$$\delta_y = \frac{Pa}{2S_y E_y} = \delta_{ym}, \quad (117)$$

где a — длина деформирующихся частей упругого чувствительного элемента (упругих перемычек); S_y — площадь поперечного сечения каждой из упругих перемычек; E_y — модуль упругости

материала упругого чувствительного элемента.

Проведенные расчеты и экспериментальные исследования показывают, что рассмотренная конструкция имеет ощутимые преимущества по точности при соотношениях $a/l_0 \geq 1.5$.

Дифференциальный преобразователь усилий. С целью линейризации функции преобразования и уменьшения температурной погрешности нуля была предложена схема струнного дифференциального преобразователя усилий [а. с. № 559136 (СССР)]. В этой схеме преимущества дифференциального преобразователя и однострунного, построенного по схеме, приведенной на рис. 29, совмещены.

В теле упругого элемента 1 (рис. 30) выполнен сквозной прямоугольный паз, внутри которого расположены выступ 8 и два Г-образных кронштейна 4 и 6. На выступе 8 и коротких сторонах Г-образных кронштейнов закреплены концы струн 2 и 5 дифференциального преобразователя упругих деформаций перемычек 3 и 7, выделенных штриховкой. При указанном на рис. 30 направлении действия сил P струна 2 получит дополнительное приращение упругой деформации, а упругая деформация струны 5 уменьшится.

Площадь поперечного сечения деформирующихся частей упругого элемента может быть определена из уравнения, характеризующегося равенством приращений упругих деформаций каждой из струн и перемычек.

В выражении (117) не учитывается продольная жесткость струн, поскольку она много меньше продольной жесткости упругих перемычек.

Условие равенства абсолютных значений упругих деформаций струны и упругих перемычек на основании выражений (62) и (117) имеет вид

$$\frac{4l_0^3 \rho (f_{1m}^2 - f_0^2)}{E} = \frac{P_m a}{2S_y E_y}, \quad (118)$$

откуда требуемая площадь поперечного сечения каждой из упругих перемычек чувствительного элемента при их заданной длине a

$$S_{ym} = \frac{P_m a E}{8l_0^3 \rho (f_{1m}^2 - f_0^2) E_y}. \quad (119)$$

При параметрах конструкции, когда размер $a > l_0$, величина относительной упругой деформации деформирующихся частей упругого элемента будет меньше, чем струны.

Соответственно и напряжения растяжения в струне будут значительно больше, чем напряжения растяжения в упругих перемычках:

$$\sigma_{\text{стр}} = \sigma_0 + \frac{\delta_y}{l_0} E > \sigma_y = \frac{\delta_y}{a} E_y. \quad (120)$$

Благодаря большому наклепу, получаемому при протяжке, струны имеют предел пропорциональности $1 \cdot 10^9 - 4 \cdot 10^9$ Па. При этом даже при значительных величинах напряжений в струне величина упругого гистерезиса практически неощутима при работе устройства.

Предел пропорциональности материала упругого элемента $[\sigma_{\text{п}}]$ имеет порядок $0,4 \cdot 10^9 - 0,6 \cdot 10^9$ Па и поэтому при рабочих напряжениях выше $0,2 [\sigma_{\text{п}}]$ погрешность за счет гистерезиса становится ощутимой и является одной из основных причин, препятствующих повышению точности измерения усилий. Поэтому значение S_y , полученное на основании уравнения (119), должно удовлетворять условию

$$S_{ym} \geq \frac{P_m}{0,4 [\sigma_{\text{п}}]}, \quad (121)$$

или

$$\frac{P_m}{0,4 [\sigma_{\text{п}}]} \approx \frac{P_m a E}{8 (f_0 \Delta f_m + \Delta f_m^2 / 4) l_0^3 \rho E_y}, \quad (122)$$

где Δf_m — полное приращение разности частот колебаний струн на весь диапазон измерения.

Струнные преобразователи малых масс вещества и цифровые измерительные устройства на их базе

Струнные преобразователи для измерения толщины напыляемого материала. Одним из наиболее ответственных этапов современной технологии изготовления полупроводниковых приборов является вакуумное напыление пленок для получения $p-n$ переходов и омических контактов.

Рассмотрим два варианта реализации цифрового метода измерения толщины напыляемого слоя с использованием электромеханической колебательной системы с линейно-распределенными параметрами струнного преобразователя [4].

В первом варианте преобразователь (рис. 31), размещенный в вакуумной камере, содержит две струны 1 и 4, натянутые в корпусе 5 и колеблющиеся в поле постоянных магнитов 7. На струну 1 в процессе напыления через окно в крышке 6 осаждается напыляемое покрытие, вследствие чего изменяется масса струны, а следовательно, и частота ее собственных поперечных колебаний.

Струна 4 необходима для компенсации температурных погреш-

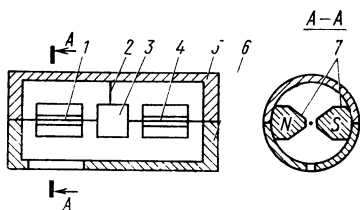


Рис. 31. Схема струнного преобразователя толщины напыляемой пленки

ностей. Обе струны связаны между собой посредством центра 3, укрепленного на плоской пружине 2. Жесткость пружины в направлении продольной оси струн выбирают на несколько порядков меньше, чем продольную жесткость струн. Преобразователь расположен вблизи подложки, толщину напыляемого слоя на которой требуется проконтролировать. При этом предполагают, что плотность потока напыления на струну 1 и на подложку одинакова.

Допустим, что струны имеют одинаковые геометрические размеры и изготовлены из одного материала. Тогда выражения для частот колебаний струн могут быть записаны в виде

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_0 - \Delta F}{lm_1}}; \\ f_2 &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_0 + \Delta F}{lm_2}}, \end{aligned} \right\} \quad (123)$$

где ΔF — составляющая реакция пружины подвеса на каждую из струн.

В качестве выходного параметра струнного преобразователя будем считать число периодов колебаний струны 4, зафиксированное цифровым счетчиком за время, пропорциональное периоду колебаний струны 1.

Число, зафиксированное в цифровом счетчике,

$$\begin{aligned} N &= \frac{n_d f_2}{f_1} = \frac{n_d \sqrt{F_0 + \Delta F} \sqrt{m + \Delta m}}{\sqrt{F_0 - \Delta F} \sqrt{m}} = \\ &= n_d \left(1 + \frac{\Delta F}{F_0}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{\Delta F}{F_0}\right)^{-1/2} \left(1 + \frac{\Delta m}{m}\right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (124)$$

где n_d — коэффициент деления частоты f_k ; Δm — масса напыленного на поверхность струны 1 вещества.

Для определения чувствительности устройства и погрешности от нелинейности характеристики будем предполагать, что реакция ΔF от пружины 2 мала, что обеспечивается соответствующей юстировкой преобразователя, т. е. $\Delta F \ll F_0$.

В силу этого из выражения (124) будем иметь

$$N = n_d \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{m} - \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \frac{1}{16} \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^3 - \dots \right].$$

Ограничиваясь первыми тремя членами степенного ряда и принимая в качестве выходного параметра отклонение n_1 показаний на табло частотомера от показаний, соответствующих $\Delta m = 0$, запишем функцию преобразования в виде

$$n_1 = N - n_d = \frac{1}{2} n_d \frac{\Delta m}{m} - \frac{1}{8} n_d \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2. \quad (125)$$

Отсюда получим выражение для чувствительности S и относительной погрешности от нелинейности γ :

$$\begin{aligned} S_d &= \frac{n_1}{\Delta m} = \frac{1}{2} \frac{n_d}{m}; \\ \gamma &= -\frac{1}{4} \frac{\Delta m}{m}, \end{aligned} \quad (126)$$

Расчеты показывают, что при контроле покрытий из алюминия толщиной порядка 1 мкм максимальная погрешность вследствие нелинейности не превышает 1%. Чувствительность устройства S в переводе на толщину покрытия равна 104 единиц/мкм.

Разложив функцию $N\left(\frac{\Delta F}{F_0}; \frac{\Delta m}{m}\right)$ в ряде Тейлора в окрестности точки $\Delta F=0, \Delta m=0$, получим выражение для абсолютной погрешности ΔN функции N :

$$\Delta N = n_d \left[\frac{\Delta F}{F} + \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{m} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta F}{F} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{\Delta F}{F} \frac{\Delta m}{m} + \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \dots \right]. \quad (127)$$

Удерживая только члены первого порядка малости, получим

$$\Delta N = n_d \frac{\Delta F}{F} + n_d \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{m}, \quad (128)$$

откуда максимальная температурная погрешность определяется выражением

$$\Delta N_t = n_d \frac{\Delta F}{F}. \quad (129)$$

Определяя величину ΔF через тепловую деформацию струны δ_t и жесткость C пружины, получим

$$\Delta F = \frac{C\delta}{2} = \frac{C\delta_t}{4} = \frac{C\alpha\Delta t}{4}. \quad (130)$$

Подставляя значения параметров элементов устройства $C=0,01$ Н/мм; $\alpha=11 \cdot 10^{-6}$ 1/К; $l=15$ мм; $\Delta t=100$ К, получим, что $\Delta F=4 \cdot 10^{-5}$ Н. Величина абсолютной температурной погрешности ΔN_t на основании выражения (129) будет равна $2,8 \cdot 10^{-1}$ единиц, что меньше погрешности дискретности.

Помимо температурной погрешности, вызываемой реакцией пружины, появится температурная погрешность, обусловленная изменением длины струны. Полагая в выражениях (123) $\Delta F=0$ и учитывая приращения длин струн, связанные с удлинением струн от температуры, на основании выражения (124) получим

$$N = n_d \frac{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{l(1-\rho_t/2l)m}}}{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{l(1+\delta_t/2l)m}}} \approx \approx n_d \left[1 + \frac{\delta_t}{2l} + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta_t}{2l} \right)^2 \right]. \quad (131)$$

Для оценки погрешности ограничимся первыми двумя членами разложения. Тогда абсолютная погрешность измерения при $\alpha_t=11 \cdot 10^{-6}$ и $\Delta t=1$ К будет равна

$$\Delta N_{t_1} = n_d \frac{\delta_t}{2l} = \frac{K\alpha\Delta t}{2} = 0,04 \text{ единиц.}$$

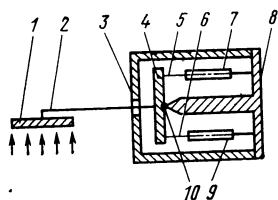


Рис. 32. Струнный преобразователь толщины напыленного покрытия, основанный на методе взвешивания

дополнительный момент, изменяющий силу натяжения струн. Разность частот струн будет пропорциональна толщине напыленного на плоскость диска 1 слоя. Для устранения влияния точность изменения в системе используется автоматическое поддержание суммы частот колебаний струн постоянной.

В этом случае выражения для частот колебаний струн будут иметь вид

$$f_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_0 + Ah + \Delta F_{\text{л}}}{m_c l}}; \quad (132)$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_0 - Ah + \Delta F_{\text{л}}}{m_c l}}, \quad (133)$$

где A — постоянный коэффициент, определяемый конструктивными параметрами преобразователя; $\Delta F_{\text{л}}$ — усиление линеаризации.

Разностная частота струн

$$\Delta f = \frac{A f_0}{F_0} h. \quad (134)$$

Крутизна преобразования измерительной системы

$$S_h = \frac{\Delta f}{h} = \frac{f_0 A}{F_0}. \quad (135)$$

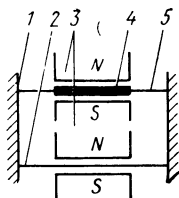
Преимущества такого метода измерения следующие: 1) постоянство крутизны преобразования; 2) линейность выходной характеристики; 3) широкий диапазон измерения; 4) возможность быстрой смены диска.

Например, для системы с параметрами датчика $f_0 = 3000$ Гц, $F_0 = 7,3 \cdot 10^{-2}$ Н, $l = 15$ мм, соотношением плеч $l_1 l_2 = 100$ и умножением выходных сигналов струн на 8 крутизна преобразования $S_h = 1000$ ед/мкм при напылении алюминиевой пленки.

Температурная погрешность такой системы имеет тот же порядок, что и предыдущая.

Струнный преобразователь для измерения относительной влажности газообразных сред. В жестком корпусе 1 (рис. 33) натянута две струны 2 и 5 из одинакового материала и с одинаковыми геометрическими параметрами. Струны помещены в воздушные зазоры

Рис. 33. Схема струнного преобразователя влажности газообразных сред



постоянных магнитов 3. На поверхность струны 5 нанесена пленка материала 4, хорошо адсорбирующего пары воды. При изменении относительной влажности окружающей газообразной среды будет меняться масса воды, адсорбирующейся в пленке, что приведет к изменению массы колеблющейся струны, а следовательно, и к изменению частоты автогенератора. При измерении разности или отношения частот колебаний струн цифровая информация будет функционально связана со значением относительной влажности.

Методика расчета параметров преобразователя аналогична методике расчета струнного преобразователя толщины напыляемых пленок.

5. СТРУННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Струнные преобразователи линейных перемещений

В ряде отраслей промышленности задача измерения геометрических параметров прецизионных деталей малой жесткости с требуемой точностью до сих пор не решена. Применение для этих целей механотронных, емкостных и других видов преобразователей не обеспечивает требуемой точности измерений. Известные типы индуктивных преобразователей перемещений обладают большим измерительным усилием порядка 1—3 Н, что неприемлемо при измерении деталей малой жесткости.

В отличие от других измерительных преобразователей, в струнном преобразователе функции пружины, создающей контактное усилие, выполняет упругий чувствительный элемент — струна, продольная жесткость которой мала в связи с малыми геометрическими размерами ее поперечного сечения и большой длиной. Поэтому начальное контактное усилие и его приращение, соответствующее верхнему пределу измерения, составляют сотые или десятки доли Ньютона. Уменьшение контактного усилия до таких значений приводит к повышению точности измерения размеров деталей малой жесткости в связи с устранением погрешностей, обусловленных упругими деформациями контролируемых деталей.

Принципиальная схема однострунного преобразователя линейных перемещений в частоту представлена на рис. 34, а. В жестком корпусе 1 установлен безлюфтовый шарнир 4, на консольном конце которого жестко закреплена стойка 5. К стойке 5 крепится рычаг измерительного наконечника 7. Концы струны 2 закреплены на корпусе преобразователя и стойке. Струна перемещена в поле магнитной системы 3.

При перемещении измерительного наконечника на величину X приращение упругой деформации струны δ_{yt} определится выражением

$$\delta_{yt} = \frac{hX}{L}. \quad (136)$$

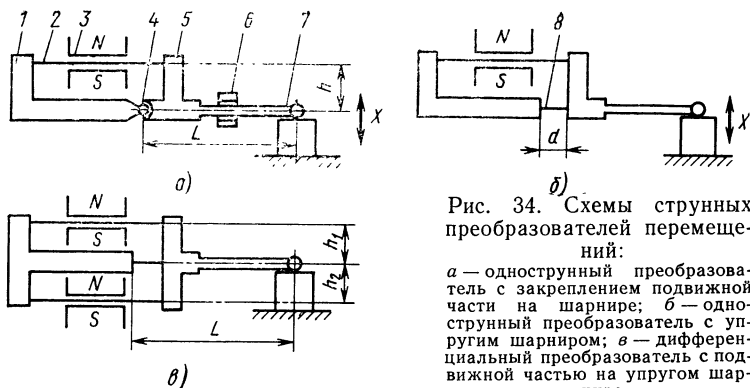


Рис. 34. Схемы струнных преобразователей перемещений:

a — однострунный преобразователь с закреплением подвижной части на шарнире; *б* — однострунный преобразователь с упругим шарниром; *в* — дифференциальный преобразователь с подвижной частью на упругом шарнире

При заданном значении приращения частоты колебаний струны Δf_m на полный диапазон измерения X_m величина δ_y в соответствии с выражением (18) может быть определена через начальное значение частоты колебаний струны f_0 и Δf_m уравнением

$$\begin{aligned} \delta_y &= \frac{4m_c l_0^2}{ES} (f_{\max}^2 - f_0^2) = \frac{4m_c l_0^2}{ES} (2f_0 \Delta f_m + \Delta f_m^2) = \\ &= \frac{4m_c l_0^2 \Delta f_m}{ES} (2f_0 + \Delta f_m) = \frac{h}{L} X_m, \end{aligned} \quad (137)$$

откуда требуемое для обеспечения заданной чувствительности соотношение плеч стойки и измерительного наконечника следующее:

$$\frac{h}{L} = \frac{4m_c l_0^2 \Delta f_m}{ES X_m} (2f_0 + \Delta f_m). \quad (138)$$

Приращение контактного усилия ΔP_k , приведенное к концу измерительного наконечника, будет обусловлено продольной жесткостью струны и соотношением h/L .

$$\Delta P_k = \frac{ESh}{l_0 L} \delta_y = \frac{4\rho S l_0^2 h \Delta f}{L} (2f_0 + \Delta f). \quad (139)$$

Величину контактного усилия при начальном положении измерительного наконечника ($X=0$) можно регулировать изменением положения центра масс стойки и наконечника за счет перемещения груза *б* (см. рис. 34, *a*) вдоль рычага измерительного наконечника.

Например, при $X_m = 1 \cdot 10^{-4}$ м; $l_0 = 15 \cdot 10^{-3}$ м; $E = 1,75 \cdot 10^{11}$ Па; $S = 1,21 \cdot 10^{-9}$ м²; $f_0 = 5 \cdot 10^3$ Гц; $\Delta f_m = 10^3$ Гц; $m_c = 3,6 \cdot 10^{-7}$ кг; $h = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 19 \cdot 10^{-3}$ м приращение контактного усилия на полный диапазон в соответствии с формулами (138) и (139) равно 0,037 Н.

Начальное же контактное усилие может быть отрегулировано в таких же пределах (0,01—0,03 Н). При этом на верхнем пределе измерения максимальное контактное усилие будет равно не более

0,07 Н, что вполне приемлемо для подавляющего большинства номенклатуры деталей малой жесткости.

С целью упрощения конструкции и улучшения метрологических характеристик преобразователя обычное шарнирное соединение можно заменить на шарнирную опору, реализованную на плоской пружине 8 (рис. 34, б). При такой конструкции опоры исключаются погрешности, обусловленные микронеровностями трущихся поверхностей шарнирного соединения и наличием зазоров. В связи с малыми угловыми перемещениями рычага измерительного наконечника изгибные деформации и напряжения в плоской пружине незначительны, и дополнительная погрешность преобразователя, обусловленная гистерезисом в материале пружины, практически неощутима.

Расчет конструктивных параметров преобразователя с упругим пластинчатым подвесом при его длине d , значительно меньшей длины струны l_0 , аналогичен приведенному выше. Путем подбора геометрических параметров плоской пружины можно на базе одной конструкции реализовать гамму преобразователей перемещения с различными приращениями измерительных усилий на полный диапазон измерения.

Путем увеличения длины d консольной пластинчатой пружины можно существенно расширить диапазон измеряемых перемещений. Это объясняется тем, что при значениях d более 2 мм смещения конца пружины в направлении измеряемого перемещения становятся соизмеримыми с самой величиной X .

Упрощенная схема струнного дифференциального преобразователя перемещений в частоту представлена на рис. 34, в. Методика расчета основных конструктивных параметров преобразователя аналогична методике, рассмотренной для одноструктурного варианта. Отличие будет заключаться только в том, что во всех приведенных выше выражениях под Δf_m следует понимать измерение частоты колебаний каждой из струн при перемещении измерительного наконечника от нуля до верхнего предела измерения.

При получении выходной информации в виде разности частот при полностью симметричной конструкции преобразователя измеряемое значение разностной частоты будет связано с измеряемым перемещением X зависимостью

$$\Delta f \approx \frac{K}{\delta_0} X = S_\delta X, \quad (140)$$

где S_δ — чувствительность преобразователя.

Погрешность линейности может быть определена на основании выражения (31).

При работе измерительной схемы в режиме измерения отношения частот колебаний двух струн функцию преобразования можно записать в виде [20, 29]

$$N = n_L \frac{f_1}{f_2} = n_L \frac{f_{01} \sqrt{1 + K_{11} X}}{f_{02} \sqrt{1 - K_{22} X}}, \quad (141)$$

где $K_{11} = \frac{K_1}{\delta_{01}}$; $K_{22} = \frac{K_2}{\delta_{02}}$; $K_1 = \frac{h_1}{L}$; $K_2 = \frac{h_2}{L}$.

Для того чтобы функция преобразования была близка к линейной, необходимо, чтобы выполнялось условие (см. п. 3 гл. II)

$$3K_{22} = K_{11}$$

или

$$\frac{3h_2}{\delta_{02}} = \frac{h_1}{\delta_{01}}, \quad (142)$$

На основании выражения (142) можно сделать выводы, что для обеспечения оптимального приближения функции преобразования к линейной при работе в режиме измерения отношения частот колебаний струн необходимо выполнить одно из следующих условий.

1. При равенстве длин струн и начальных частот их автоколебаний ($l_{01}=l_{02}$; $f_{01}=f_{02}$; $\delta_{01}=\delta_{02}$) необходимо и достаточно, чтобы плечи коромысла были разными и имели соотношение $h_1/h_2=3$.

2. При равной длине струн $l_{01}=l_{02}$ и равных плечах коромысла $h_1=h_2$ необходимо и достаточно, чтобы величины начальных упругих деформаций струн имели отношение $\delta_{02}/\delta_{01}=3$, или, что то же самое, начальные частоты колебаний струн имели соотношение $f_{02}/f_{01}=\sqrt{3}$.

3. При равных плечах коромысла $h_1=h_2$, определяя упругие деформации δ_{01} и δ_{02} с учетом выражений (18) и (142) через значения длин струн и их частот, получим

$$\frac{3h_1 E}{4\rho f_{02}^2 l_{02}^3} = \frac{h_1 E}{4\rho f_{01}^2 l_{01}^3}. \quad (143)$$

Условие соблюдения равенства (143) при $h_1=h_2$ имеет вид

$$3f_{01}^2 l_{01}^3 = f_{02}^2 l_{02}^3.$$

Вводя условие равенства начальных частот колебаний струн $f_{01}=f_{02}$, получим, что необходимым и достаточным условием линейной характеристики является соотношение длин струн

$$\frac{l_{01}}{l_{02}} = \sqrt[3]{3}. \quad (144)$$

Расчеты показывают, что для реальных значений длин струн и начальных частот их колебаний время измерения, при котором обеспечивается погрешность дискретности менее 0,1%, составляет 1—2 с. При использовании преобразователей в АСУТП в ряде случаев такое время измерения может быть неприемлемым.

Рациональным путем повышения быстродействия является точное измерение длительности некоторого целого числа периодов частот колебаний струн с последующим определением разности периодов.

Проведем сравнительную оценку быстродействия дифференциального струнного симметричного преобразователя в случае измерения разности частот и разности периодов при равной информативности обоих способов измерения. Для упрощения выкладок будем считать, что дифференциальная схема полностью линейна. Вследствие такого допущения погрешность оценки не превышает 1%.

Выходная информация дифференциального симметричного преобразователя, представленная в виде разности частот, при времени измерения 1 с

$$\Delta N \approx (f_0 + \Delta f) - (f_0 - \Delta f) = 2\Delta f.$$

При измерении разности периодов приращение числа импульсов на выходе

$$\Delta N_{T_2} = \frac{n_d f_k}{f_0 - \Delta f} - \frac{n_d f_k}{f_0 + \Delta f} = \frac{2n_d f_k \Delta f}{f_0^2 - \Delta f^2} = \frac{2T_2 f_0 f_k \Delta f}{f_0^2 - \Delta f^2}, \quad (145)$$

где $T_2 \simeq \frac{n_d}{f_0}$ — приближенная оценка времени измерения каждого из периодов.

Для обеспечения одинаковой чувствительности необходимо, чтобы $\Delta N = \Delta N_{T_2}$, т. е.

$$2\Delta f = \frac{2n_d f_k \Delta f}{f_0^2 - \Delta f^2},$$

откуда коэффициент деления частот, при котором обеспечивается чувствительность, одинаковая с режимом измерения разности частот,

$$n_d = \frac{f_0^2 - \Delta f^2}{f_k}. \quad (146)$$

Например, при $f_0 = 5000$ Гц, $\Delta f = 500$ Гц и $f_k = 10^7$ Гц в соответствии с последним выражением $n_d \leq 3$, что соответствует времени $t_n = n_d / f_0 - \Delta f = 0,67 \cdot 10^{-3}$. Полное время измерения, потребное для получения информации с преобразователя в виде разности периодов двух струн, будет несколько большим, поскольку необходимо провести операцию вычитания измерительных периодов. Современные микропроцессоры имеют достаточно высокое быстродействие, и можно считать, что в рассматриваемом примере время формирования выходной информации преобразователя в виде разности периодов не превышает $1 \cdot 10^{-3}$ с, что на три порядка меньше, чем при измерении разности частот.

При определении минимально возможного времени измерения не учитывалось влияние кратковременной нестабильности частоты колебаний струнных автогенераторов (флуктуаций частот).

Известно, что с уменьшением времени измерения (осреднения) частоты автогенератора уровень его флуктуаций возрастает. Это возрастание может привести к тому, что высокий уровень флуктуаций вызовет недопустимые погрешности измерения γ .

В связи с этим необходимо определить требуемое время измерения, при котором относительная погрешность из-за флуктуаций в режиме измерения периода не превзойдет заданного значения.

При измерении разности периодов приращение числа импульсов на выходе датчика определяется выражением (145).

В случае дифференциального струнного преобразователя число импульсов, обусловленное флуктуациями частоты колебаний струн, на основании равенства (46) определится выражением

$$\Delta N_{\Phi m} = \frac{3 \sqrt{2} \sigma_{\Phi 1} T_1^{1/2} N_0}{T_2^{1/2}}. \quad (147)$$

Относительная погрешность преобразователя, обусловленная флуктуациями частоты струн, определится отношением выражений (147) и (145):

$$\frac{\Delta N_{\Phi m}}{\Delta N_{T_2}} = \frac{3 \sqrt{2} \sigma_{\Phi 1} T_1^{1/2} (f_0^2 - \Delta f^2)}{2 T_2^{1/2} f_0 \Delta f}. \quad (148)$$

Очевидно, для того чтобы не превысить допустимой относительной погрешности измерения γ_d , должно соблюдаться неравенство

$$\frac{\Delta N_{\Phi m}}{\Delta N_{T_1}} \leq \gamma_d. \quad (149)$$

Используя уравнения (148) и (149), можно определить минимальное время измерения, при котором относительная погрешность, обусловленная флуктуациями, не произойдет допустимый уровень.

$$T_{\min} \geq \left(\frac{3\sigma_{\Phi 1} T_1^{1/2} (f_0^2 - \Delta f^2)}{\sqrt{2} \gamma_d f_0 \Delta f} \right)^2. \quad (150)$$

Например, для параметров $f_0=5000$ Гц, $\Delta f=500$ Гц, $T_1=2$ с, $\sigma_{\Phi 1}=2 \cdot 10^{-7}$, $f_k=10^7$ Гц, $\gamma_d=1 \cdot 10^{-4}$ время измерения $T_{\min} \geq 4 \cdot 10^{-3}$ с, что соответствует коэффициенту деления $n_d=20$. Без учета влияния флуктуаций для измерения требовалось время $6 \cdot 10^{-4}$ с, что соответствует коэффициенту деления $n_d=3$.

Приведенный пример наглядно показывает, что при заданной точности измерения быстродействие преобразователя ограничено уровнем флуктуаций частоты колебаний струнных автогенераторов.

Одна из разновидностей струнных преобразователей линейных перемещений в частоту приведена в работе [29].

По сравнению с рассмотренной выше конструкцией дифференциального преобразователя перемещений упругий шарнир выполнен в виде тонкого торсиона, имеющего предварительное натяжение. Коромысло с прикрепленным к нему рычагом измерительного наконечника может вращаться относительно оси торсиона (упругого подвеса).

Преимуществом конструкции преобразователя такого типа является возможность минимизировать измерительное усилие за счет меньшей жесткости упругого подвеса.

Недостатком является более низкая резонансная частота крутильных колебаний коромысла и меньшая жесткость упругого шарнира в направлении продольной оси преобразователя, а также в направлении, перпендикулярном к плоскости перемещения измерительного наконечника.

Преобразователи угловых величин

Рассмотрим принцип работы преобразователя, схема которого приведена на рис. 35, а. В жестком цилиндрическом корпусе 1, выполненном из керамики, параллельно натянуты две тонкие упругие металлические нити 2 и 5. Инерционная масса 4 жестко прикреплена к обеим нитям с помощью накладок (на рис. 35, а не показаны). Инерционная масса расположена таким образом, что свободные части упругих нитей имеют равные длины. Свободные части верхней нити помещены в поле постоянных магнитов 3, 6. Если концы струн подсоединить к электронным усилителям с положительной обратной связью, то каждая из половин нити будет находиться в режиме непрерывных автоколебаний. При этом частота резонансных поперечных колебаний каждой из половин нитей, которые мы в дальнейшем будем называть струнами, при строго гори-

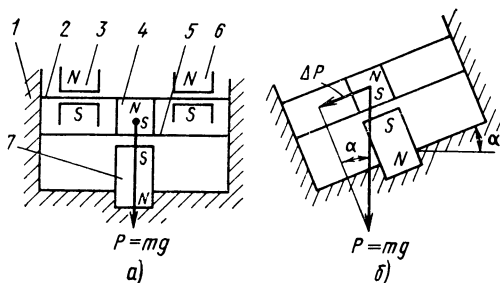


Рис. 35. Схема струнного преобразователя углов отклонения от плоскости горизонта

горизонтальном положении прибора будет определяться выражением (10).

Инерционная масса выполнена из магнитотвердого материала типа ЮНДК и имеет форму цилиндра, намагниченного вдоль продольной оси.

В корпусе 1 закреплен цилиндрический постоянный магнит 7, намагниченный в продольном направлении так, как указано на рис. 35. Между магнитом, закрепленным на нитях, и неподвижным магнитом возникает отталкивающая сила. Перемещением магнита 7 относительно корпуса в вертикальном направлении можно добиться такого положения инерционной массы 4, при котором струны будут лежать в одной горизонтальной плоскости. При этом гравитационная сила P , действующая на массу, будет полностью уравниваться силами взаимодействия двух магнитных масс. Нижняя металлическая нить служит для предотвращения возникновения крутильных колебаний инерционной массы в плоскости чертежа и выполняет функции токоподвода к общей точке колеблющихся струн.

Предположим теперь, что преобразователь наклонен на угол α относительно плоскости истинного горизонта (рис. 35, б). В этом случае проекция инерционной силы на направление продольных осей струн

$$\Delta P = P \sin \alpha = mg \sin \alpha, \quad (151)$$

где P — инерционная сила; m — масса центральной части, прикрепленной к струнам; g — ускорение свободного падения.

Появление проекции инерционной силы приведет к изменению силы начального натяжения каждой из струн на величину $\Delta P/4$. При этом предполагается, что продольные жесткости всех четырех струн равны между собой.

При достаточно малом диапазоне углов наклона можно принять, что $\sin \alpha \approx \alpha$, и тогда на основании уравнений (33), (34) и (35) можно записать выражение для разности частот струн

$$\Delta f = \frac{mg\alpha}{4F_0} f_0 + \frac{1}{8} \left(\frac{mg\alpha}{4F_0} \right)^3 f_0 + \frac{7}{128} \left(\frac{mg\alpha}{4F_0} \right)^5 f_0. \quad (152)$$

Полагая, например, что зона точных измерений лежит в пределах углов $\pm 30'$, для реальной конструкции преобразователя можно считать, что $\alpha_{\max} = 30'$ и $mg\alpha / 4F_0 \leq 0,05$. При таком ограничении

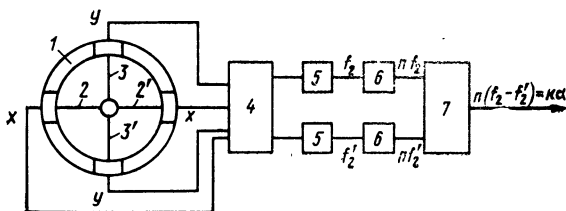


Рис. 36. Схема струнного двухкомпонентного преобразователя угловых перемещений:

1 — цилиндрический корпус; 2, 2', 3, 3' — струны; 4 — коммутатор; 5 — усилители; 6 — умножители частоты; 7 — блок вычисления разности частот

диапазона измерения приращение выходной частоты преобразователя определяется в основном первым слагаемым уравнения (152), и поэтому чувствительность преобразователя

$$S_a = \frac{\Delta f}{\alpha} = \frac{mgf_0}{4F_0}. \quad (153)$$

Например, для преобразователя со струнами из вольфрама диаметром 10 мкм и длиной 10 мм при начальном натяжении каждой из струн $F_0 = 0,0352$ Н, $f_0 = 7500$ Гц и $mg = 0,4$ Н чувствительность преобразователя $S_a = 42\,900$ Гц/рад или $S_a = 0,205$ Гц/угл. с. Таким образом, при выбранных параметрах изменение угла наклона преобразователя на одну угловую секунду легко может быть зафиксировано с помощью стандартного электронно-счетного частотомера, работающего в режиме «частота $\times 10$ » или в режиме «период».

Прибор, работающий по схеме, приведенной на рис. 35, может измерять угловые перемещения, задаваемые только в одной плоскости.

Если в цилиндрическом корпусе (рис. 36) натянуть струны в двух взаимно перпендикулярных диаметральных плоскостях и прикрепить к ним один жесткий центр, то прибор может измерять угловые перемещения в двух взаимно перпендикулярных направлениях [а. с. № 300759 (СССР)].

6. СТРУННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ИХ БАЗЕ

Унифицированные преобразователи температуры газообразных и жидких сред

Однострунные преобразователи температуры. В рассматриваемом однострунном преобразователе измерение температуры основано на dilatометрическом принципе [а. с. № 445856 (СССР)]. На стойках 2 и 5 (рис. 37), установленных на основании 1, закрепляют концы тонкой металлической струны 3, имеющей определенное начальное натяжение. Натянутую струну помещают в зазор магнитной системы 4.

Струну 3 и основание 1 изготовляют из материалов с различными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР), т. е. $\alpha_c \neq \alpha_k$.

Уравнение (18), определяющее начальную частоту колебаний струны, справедливо для какой-то определенной фиксированной температуры окружающей среды t_0 . Предположим теперь, что температура окружающей среды стала $t_1 > t_0$, т. е. возросла на величину $\Delta t = t_1 - t_0$. При этом изменяются длина струны, корпуса и значения модуля упругости материала струны в соответствии с выражениями

$$\Delta l_c = l_0 \alpha_c \Delta t; \quad (154)$$

$$\Delta l_k = l_k \alpha_k \Delta t; \quad (155)$$

$$\Delta E = E_0 \alpha_E \Delta t, \quad (156)$$

где Δl_c , Δl_k — приращения длины струны и корпуса соответственно; l_k — активная длина корпуса при температуре t_0 ; α_E — температурный коэффициент модуля упругости материала струны.

Поскольку жесткость корпуса много больше продольной жесткости струны, то реальная длина колеблющейся струны будет определяться размером корпуса. Так как $\alpha_c \neq \alpha_k$, то разность температурных деформаций корпуса и струны будет компенсироваться дополнительной упругой деформацией струны δ_y , значение которой определится вычитанием уравнения (154) из (155).

$$\delta_y = \Delta l_k - \Delta l_c = l_0 (\alpha_k - \alpha_c) \Delta t.$$

Частота собственных поперечных колебаний струны при изменении температуры на величину Δt относительно исходной определяется подстановкой в уравнение (18) выражений (154), (155) и (156):

$$f_1 = \frac{1}{2l_0 (1 + \alpha_k \Delta t)} \left[\frac{(\delta_0 + \delta_y) E_0 (1 + \alpha_E \Delta t) S_0 (1 + \alpha_c \Delta t)^2}{m_c} \right]^{1/2} = \frac{f_0 (1 + \alpha_c \Delta t)}{1 + \alpha_k \Delta t} \left\{ \left[1 + \frac{l_0}{\delta_0} (\alpha_k - \alpha_c) \Delta t \right] (1 + \alpha_E \Delta t) \right\}^{1/2}. \quad (157)$$

Обозначив через ϵ_0 отношение δ_0/l_0 , полученное уравнение можно привести к виду

$$f_1 = \frac{f_0 (1 + \alpha_c \Delta t)}{1 + \alpha_k \Delta t} \left[1 + \alpha_E \Delta t + \frac{(\alpha_k - \alpha_c) \Delta t}{\epsilon_0} + \frac{(\alpha_k - \alpha_c) \alpha_E \Delta t^2}{\epsilon_0} \right]^{1/2}. \quad (158)$$

Производя сравнительную оценку членов, стоящих в квадратных скобках, можно убедиться в том, что с точностью, вполне приемлемой для инженерных расчетов, последним слагаемым можно пренебречь и для расчетов использовать приближенное выражение

$$f_1 \approx f_0 \left\{ 1 + \left[\frac{(\alpha_k - \alpha_c)}{\epsilon_0} + \alpha_E \right] \Delta t \right\}^{1/2}. \quad (159)$$

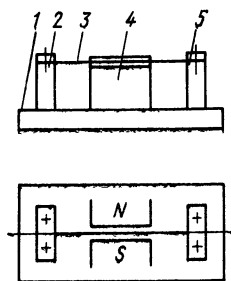


Рис. 37. Схема струнного преобразователя температуры

Представив полученное выражение в виде степенного ряда и ограничиваясь вторым членом разложения, получим

$$f_1 = f_0 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left[\frac{(\alpha_k - \alpha_c)}{\varepsilon_0} + \alpha_E \right] \Delta t - \frac{1}{8} \left[\frac{(\alpha_k - \alpha_c)}{\varepsilon_0} + \alpha_E \right]^2 \Delta t^2 + \dots \right\}. \quad (160)$$

Приращение частоты относительно начального значения f_0 , соответствующее изменению температуры на величину Δt ,

$$\Delta f = \frac{1}{2} f_0 \left[\frac{(\alpha_k - \alpha_c) + \alpha_E \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right] \Delta t - \frac{1}{8} f_0 \left[\frac{(\alpha_k - \alpha_c) + \alpha_E \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right]^2 \Delta t^2. \quad (161)$$

Соответствующим подбором материалов струны и корпуса, а также изменением начальной частоты колебаний струны можно изменять диапазон измерения и чувствительность преобразователя без каких-либо изменений конструкции. Таким образом, на базе одной конструкции можно выпускать гамму унифицированных преобразователей.

При реализации прибора с визуальным цифровым отсчетом нелинейность выходной характеристики является главным недостатком данного преобразователя и в ряде случаев затрудняет его практическое использование.

Дифференциальные преобразователи температуры. Схема дифференциального струнного преобразователя температуры жидких и газообразных сред [а. с. № 447577 (СССР)] показана на рис. 38.

На корпусе 1 устанавливаются четыре стойки 5, на торцовых плоскостях которых посредством накладок 2 фиксируются концы струн 3 и 4, помещенных в воздушные зазоры постоянных магнитов. Материал струн 3 и 4 различен и подобран таким образом, чтобы при увеличении температуры натяжение одной из струн уменьшалось, а другой — возрастало.

Одним из необходимых условий получения линейной характеристики дифференциального струнного преобразователя температуры является подбор температурных коэффициентов линейного расширения материалов струн и корпуса. При этом должно соблюдаться следующее условие:

$$\alpha_{c1} < \alpha_k < \alpha_{c2}, \quad (162)$$

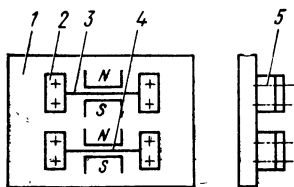


Рис. 38. Схема дифференциального преобразователя температуры

где α_{c1} , α_{c2} , α_k — температурные коэффициенты линейного расширения материалов первой струны, второй струны и корпуса соответственно.

Изменение температуры окружающей среды вызывает тепловые деформации корпуса и струны. Вследствие разности температурных коэффициентов линейного расширения струн и корпуса сила натяжения первой струны с повышением температуры увеличивается, а следовательно, увеличивается и частота ее собствен-

ных поперечных колебаний. Сила натяжения и частота колебаний второй струны при этом уменьшаются. По изменению разности или отношения частот колебаний струн определяется измеряемая температура окружающей среды.

Можно реализовать два типа информационно-измерительных устройств на базе дифференциального струнного преобразователя температуры:

1. Устройства, работающие в режиме измерения разности частот колебаний струн f_1 и f_2 .

С учетом выражения (158) функция преобразования для такого типа устройств запишется в виде

$$\Delta f = f_{1t} - f_{2t} = f_{01} \frac{1 + \alpha_{c1} \Delta t}{1 + \alpha_K \Delta t} (1 + K_1 \Delta t + K_2 \Delta t^2)^{1/2} - f_{02} \frac{1 + \alpha_{c2} \Delta t}{1 + \alpha_K \Delta t} (1 + K'_1 \Delta t + K'_2 \Delta t^2)^{1/2}, \quad (163)$$

120

$$K_1 = \alpha_{E1} + \frac{\alpha_K - \alpha_c}{\varepsilon_{01}}; \quad K_2 = \frac{\alpha_{E1} (\alpha_K - \alpha_{c1})}{\varepsilon_{01}};$$

$$K'_1 = \alpha_{E2} + \frac{\alpha_K - \alpha_{c2}}{\varepsilon_{02}}; \quad K'_2 = \frac{\alpha_{E2} (\alpha_K - \alpha_{c2})}{\varepsilon_{02}};$$

$\varepsilon_{01}, \varepsilon_{02}$ — начальные относительные удлинения первой и второй струн соответственно.

2. Устройства, работающие в режиме измерения отношения частот. Их функция преобразования с учетом выражения (158) будет иметь вид

$$N = n_d \frac{f_{1t}}{f_{2t}} = [n_d \frac{f_{01}}{f_{02}} \frac{1 + \alpha_{c1} \Delta t}{1 + \alpha_{c2} \Delta t} \left(\frac{1 + K_1 \Delta t + K_2 \Delta t^2}{1 + K'_1 \Delta t + K'_2 \Delta t^2} \right)^{1/2}] \cdot \quad (164)$$

Уравнения (163) и (164) можно записать в иной форме, представив иррациональные сомножители в виде степенных рядов.

Оценка величины членов этих степенных рядов показывает, что наибольшую долю в погрешность нелинейности выходной характеристики струнного преобразователя вносит член разложения, содержащий множитель Δt^2 . Поэтому для оптимального приближения к линейной выходной характеристике необходимо выбрать начальные частоты колебаний струн преобразователя из условия равенства нулю квадратичного члена разложения.

Подробный анализ этого условия показал, что оптимальные начальные частоты колебаний струн, отвечающие условию максимальной линейности выходной характеристики измерительного устройства с дифференциальным струнным преобразователем температуры, связаны следующим соотношением:

1) для устройства, работающего в режиме измерения разности частот,

$$\frac{f_{02}}{f_{01}} = \frac{4\varepsilon_{01} (\alpha_K - \alpha_{c1}) (\alpha_{E1} + 2\varepsilon_{01} \alpha_K) - \dots}{4\varepsilon_{02} (\alpha_K - \alpha_{c2}) (\alpha_{E2} + 2\varepsilon_{02} \alpha_K) - \dots} \cdot \dots$$

$$\dots = \frac{(\alpha_{E1} \varepsilon_{01} + \alpha_K - \alpha_{c1})^2}{(\alpha_{E2} \varepsilon_{02} + \alpha_K - \alpha_{c2})^2}; \quad (165)$$

2) для устройства, работающего в режиме измерения отношения частот,

$$f_{02} = \frac{1}{2l_{02}} \sqrt{\frac{E_{02}}{\rho_{02}} - \frac{B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}}, \quad (166)$$

где

$$A = (\alpha_{c2} - \alpha_{c1}) (2\alpha_{c2} - \alpha_{E1} + \alpha_{E2}) - 0,25 (\alpha_E^2 + 2\alpha_{E1} \alpha_{E2} - 3\alpha_{E2}^2) + \\ + \frac{E_{01} (\alpha_K - \alpha_{c1}) (\alpha_{c1} - \alpha_{c2} + 0,5\alpha_{E1} - 0,5\alpha_{E2})}{4l_{01}^2 \rho_{01} f_{01}^2} -$$

$$- \frac{0,25E_{01}^2 (\alpha_K - \alpha_{c1})^2}{16l_{01}^4 \rho_{01}^2 f_{01}^4};$$

$$B = (\alpha_K - \alpha_{c2}) (\alpha_{c2} - \alpha_{c1} - 0,5\alpha_{E1} + 0,5\alpha_{E2}) - \\ - \frac{0,5E_{01} (\alpha_K - \alpha_{c1}) (\alpha_K - \alpha_{c2})}{4l_{01}^2 \rho_{01} f_{01}^2};$$

$$C = 0,75 (\alpha_K - \alpha_{c2})^2.$$

При соблюдении условий, соответствующих выражениям (165) и (166), чувствительность измерительного устройства с дифференциальным струнным преобразователем температуры определяется следующими выражениями:

1) для режима измерения разности частот колебаний струн

$$S_{tf} = \frac{1}{2} \{ f_{01} / [K_1 - (\alpha_K - \alpha_{c1})] - f_{02} / [K_1' - (\alpha_K - \alpha_{c2})] \}, \quad (167)$$

2) для режима измерения отношения частот струн

$$S_{tN} = n_d \frac{f_{01}}{f_{02}} \left(\alpha_{c1} - \alpha_{c2} + \frac{K_1 - K_1'}{2} \right). \quad (168)$$

Погрешность от нелинейности, обусловленная кубическим членом, определяется выражениями:

1) для режима измерения разности частот

$$\gamma = \frac{f_{01} [K_1^3 - 2K_1 K_2 + 2(\alpha_K - \alpha_{c1}) (K_1^2 - 4K_2)] +}{8 \{ f_{01} [K_1 - (\alpha_K - \alpha_{c1})] - } \dots \\ \dots \frac{+ 8K_1 (\alpha_K - \alpha_{c1}) \alpha_K - 16 (\alpha_K - \alpha_{c1}) \alpha_K^2}{- f_{02} [K_1' - (\alpha_K - \alpha_{c2})] \} } \Delta t^2 - \\ - \frac{f_{02} [K_1'^3 - 2K_1' K_2' + 2(\alpha_K - \alpha_{c2}) (K_1'^2 - 4K_2')] +}{8 \{ f_{01} [K_1 - (\alpha_K - \alpha_{c1})] - } \dots \\ \dots \frac{+ 8K_1' (\alpha_K - \alpha_{c2}) \alpha_K - 16 (\alpha_K - \alpha_{c2}) \alpha_K^2}{- f_{02} [K_1' - (\alpha_K - \alpha_{c2})] \} } \Delta t^2; \quad (169)$$

2) для режима измерения отношения частот

$$\gamma = \frac{(\alpha_{c1} - \alpha_{c2}) \left[\alpha_{c2}^2 - 3\alpha_{c2} (K_1 - K'_1) + \right.}{6 \left(\alpha_{c1} - \alpha_{c2} + \frac{K_1 - K'_1}{2} \right)} \dots$$

$$\dots \frac{+ 3(K_2 - K'_2) - \frac{1}{4} (K_1 - K'_1) (K_1 + 3K'_1) \left. \right]}{\dots \frac{- \frac{1}{4} (4K_1 K_2 + K_1 K'_2 - 4K_2 K'_1 - 9K'_1 K'_2) \left. \right]}{\Delta t^2}} \quad (170)$$

На основании полученных выражений была проведена сравнительная оценка чувствительности и погрешности нелинейности двух вариантов реализации информационно-измерительных устройств (разность частот и отношение частот). При этом были выбраны следующие параметры струнного дифференциального преобразователя: $\alpha_K = 11 \cdot 10^{-6}$ 1/К (сталь Э); $\alpha_{c1} = 4,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К (вольфрам); $\alpha_{c2} = 18 \cdot 10^{-6}$ 1/К (бериллиевая бронза); $l_{01} = l_{02} = 15$ мм; $f_{01} = 5 \cdot 10^3$ Гц; f_{02} выбирали в соответствии с выражениями (165) и (166). Диапазон измерения температуры $\Delta t_{\max} = 100$ К. При этом для информационно-измерительного устройства, работающего в режиме измерения разности частот, чувствительность $S_{tf} = 2\delta$ 1/К и нелинейность $\gamma_{\max} = 0,3\%$, а для устройства, работающего в режиме отношения частот, $S_{tN} = 20$ 1/К и $\gamma_{\max} = 0,05\%$ соответственно.

Струнный дилатометр. Схема, иллюстрирующая работу струнного дилатометра, приведена на рис. 39. В жестком корпусе 1 натянуты струны 2 и 3 [а. с. № 287365 (СССР)]. Концы струн закреплены на корпусе и на консольном конце образца 4, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) которого требуется определить.

Методика определения ТКЛР образца 4 заключается в измерении начальных частот колебаний струн $f_{01} = f_{02} = f_0$ при исходной температуре t_0 и частот f_1 и f_2 после изменения температуры преобразователя на величину Δt . При нагревании преобразователя дилатометра вследствие неодинаковости ТКЛР элементов корпуса α_1 , струн α_c и исследуемого образца α_4 изменяется упругая деформация, а следовательно, и частота собственных колебаний струн.

Можно показать, что между значениями измеренных частот струн и коэффициентами линейного расширения элементов конструкции существует зависимость вида [30]

$$\frac{f_2 - f_1}{2f_0 - (f_1 + f_2)} = \frac{\alpha_4 - \alpha_1}{\alpha_c - \alpha_1} \quad (171)$$

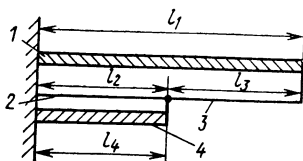


Рис. 39. Схема струнного дилатометра

При этом, если известны коэффициенты линейного расширения струн и корпуса, то значение дроби в левой части уравнения (171) однозначно определит коэффициент линейного расширения исследуемого образца.

Преобразователи температуры поверхностей малой площади

Для решения проблемы контроля температуры активированной поверхности катодов ЭЛТ и их селективного подбора необходимо применение высокоточного бесконтактного метода измерения температуры в обычных цеховых условиях.

Экспериментально установлено, что нагрев поверхности катода до температуры 473—523 К на воздухе при нормальном атмосферном давлении и пребывание его в этом состоянии в течение нескольких минут не приводит к ухудшению эмиссионных свойств катода после установки в кинескоп.

Исходя из сказанного, методику селективной сортировки катодных узлов по уровню температуры можно реализовать, нагревая катод до температуры $t \approx 473$ К, что достигается снижением напряжения накала, и по разбросу температур на этом уровне оценить реальный разброс при $U_n = 6,3$ В в условиях вакуума, а также произвести селекцию катодных узлов [12].

Следует отметить, что эмиссионную способность катода характеризуют интегральной (усредненной) температурой по всей активированной поверхности, и именно эта температура подлежит измерению.

Для измерения с высокой степенью точности температуры поверхности катода на уровне 473—573 К бесконтактным методом можно использовать следующий способ [17].

Если на некотором расстоянии h от торца катода 1 (рис. 40) расположить тонкую нить 2 (например, металлическую) с малой площадью поперечного сечения и обеспечить ей начальное натяжение с усилием F_0 , то частота ее собственных поперечных колебаний будет определяться только параметрами струны и начальной упругой деформацией (или силой F_0).

Температура участка нити АБ (рис. 40), находящегося под торцом катода в его диаметральной плоскости, будет повышаться при подаче на нагреватель катода стабилизированного, пониженного напряжения накала. За счет нагрева нить-струна на этом участке удлинится на величину тепловой деформации

$$\delta_T = D \alpha_n \Delta t, \quad (172)$$

где δ_T — величина тепловой деформации нити на участке АБ; α_n — коэффициент линейного расширения материала нити; D — диаметр торца катодного узла; Δt — приращение температуры участка нити АБ за счет передачи тепла от торца разогретого катодного узла.

Поскольку оба конца нити закреплены в корпусе, жесткость ко-

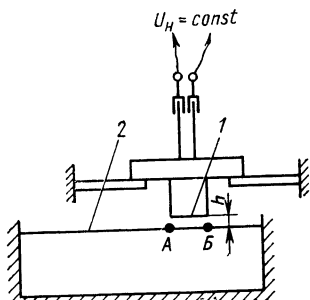


Рис. 40. Схема измерения температуры торцевой поверхности катодного узла, основанная на измерении приращения упругой деформации струны

торого значительно выше продольной жесткости самой нити, то можно считать, что упругая деформация нити уменьшится на величину тепловой деформации.

Мерой температуры катода будет значение приращения частоты колебаний нити относительно начального уровня $\Delta f = f_0 - f_1$. Это приращение частоты можно представить в виде

$$\Delta f = f_0 \left[1 - \left(1 - \frac{D\alpha_n ES}{l_0 F_0} \cdot \Delta t \right)^{1/2} \right]. \quad (173)$$

Нелинейность выходной характеристики устройства, имеющая систематический характер, оценивается выражением

$$\gamma = \frac{1}{4} \frac{D\alpha_n ES}{l_0 F_0}. \quad (174)$$

При этом полагается, что за аппроксимирующую прямую принята касательная, проведенная к выходной характеристике устройства в точке $\Delta t = 0, f_0$.

При массовых измерениях температуры в условиях серийного производства разброс температур поверхностей катодных узлов значительно меньше диапазона измерения установок. В этом случае аппроксимацию выходной характеристики целесообразно проводить хордой только в интересующем нас диапазоне температур, что уменьшает погрешность от нелинейности выходной характеристики в 5—10 раз по сравнению с методом аппроксимации касательной, проходящей через начало координат.

Проведенный тепловой расчет с учетом всех составляющих теплопередачи от торца катода к нити и теплоотвода от нити (рис. 40) в окружающую среду показал, что при расстоянии h , равном 0,5 мм, и повышении температуры торца катода на 200 К относительно температуры окружающей среды температура участка нити, расположенного под торцом катода, повышается на $\Delta t_1 = 100$ К, а при нагреве катода до 250 К — на $\Delta t_2 = 125$ К соответственно.

Если в качестве термочувствительной нити взять струну из сплава ПлСр-20 длиной $l_c = 15$ мм и прямоугольного сечения с $S = 0,01 \times 0,1$ мм², то при натяжении ее силой $F_0 = 0,175$ Н начальная частота собственных поперечных колебаний будет равна 2360 Гц. Частоты собственных поперечных колебаний нити-струны при изменении температуры катодов с 200 до 250 К будут равны соответственно 2170 и 2120 Гц, т. е. чувствительность устройства $S = 1$ Гц/К.

Проведенные вычисления показывают, что в рассматриваемом случае методическая погрешность аппроксимации $\gamma_{пр} = 0,5\%$.

Очевидно, что суммарная погрешность устройства будет включать и ряд других погрешностей, таких, как погрешность базировки контролируемого катодного узла (около 0,3%), погрешность дискретности при реализации цифрового отсчета (0,1%), погрешность, обусловленная колебаниями переходного сопротивления контактов, подводящих напряжение накала (0,1%), погрешность, обусловленная колебаниями питающего напряжения (0,1%), и т. д.

Подробный анализ всех составляющих погрешностей позволил сделать вывод о том, что суммарная погрешность измерения не превышает величины 1,5% от верхнего предела измеряемой температуры.

Второй вариант предложенного способа измерения температуры поверхности катодных узлов отличается от первого тем, что тепловая деформация нити приводит к изменению ее продольного

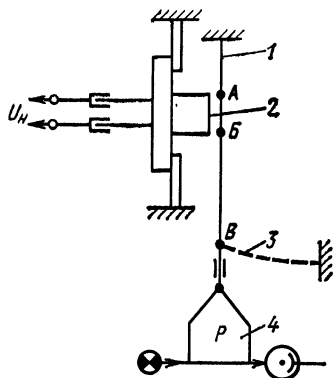


Рис. 41. Схема измерения температуры поверхности объекта малой площади, основанная на измерении приращения длины чувствительного элемента

размера за счет постоянно действующего на один из концов нити усилия (рис. 41). Усилие может создаваться, например, грузом P . Очевидно, что при нагревании участка AB нити 1, расположенного против торцевой поверхности катода 2, вследствие тепловой деформации груз 4 будет опускаться вниз. Величина смещения груза будет являться функцией измеряемой температуры.

Роль элемента, создающего постоянное напряжение нити, может выполнять не груз, а плоская пружина 3, имеющая жесткость на изгиб, приведенную к точке B , примерно на порядок меньшую продольной жесткости струны. Очевидно, что в этом случае нет необходимости возбуждать поперечные колебания нити.

Смещение груза 4 либо точки B пружины 3 может быть зафик-

сировано фотоэлектрическим, растровым либо струнным датчиком перемещений.

Проведенные эксперименты полностью подтвердили правильность приведенных расчетов и возможность практической реализации предложенного способа измерения интегральной температуры поверхности катодов.

7. СТРУННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД

Струнный преобразователь для измерения абсолютных давлений газообразных сред в диапазоне $1 \cdot 10^{-1} — 1 \cdot 10^4$ Па.

В настоящее время для измерения давлений газообразных сред в диапазоне $1,33 \cdot 10^{-1} — 1,33 \cdot 10^2$ Па широко применяют теплоэлектрические манометры абсолютного давления.

Относительная погрешность измерения теплоэлектрических манометров, выпускаемых отечественной промышленностью, находится в пределах 20—100 %.

Теплоэлектрические манометры поверяют по образцовым манометрам, например компрессионным, требующим применения большого количества ртути. Процесс градуировки теплового манометра с использованием компрессионного манометра является весьма трудоемким и малопроизводительным.

Кроме того, во многих случаях даже в производственных условиях погрешность измерения давления в 20—100 % является неприемлемой и в значительной мере влияет на качество выпускаемой продукции.

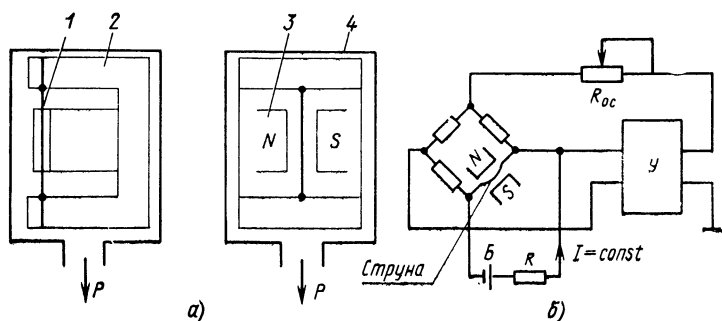


Рис. 42. Схема струнного преобразователя малых абсолютных давлений:

а — механической части преобразователя; *б* — электрической части преобразователя

В связи с изложенным выше назрела необходимость в разработке и серийном производстве образцовых средств измерения в диапазоне давлений $1,33 \cdot 10^{-1} — 1,33 \cdot 10^2$ Па.

Анализ требований, предъявляемых к образцовым вакуумметрам, показал, что одним из перспективных направлений создания образцовых средств измерения давлений является использование струнного метода измерений гермовых деформаций чувствительного элемента.

В качестве чувствительного элемента используется тонкая металлическая нить-струна 1 (рис. 42,а) с поперечным сечением прямоугольной формы, помещенная в корпус 2 теплового манометра. Концы струны жестко закреплены в корпусе, а сама струна помещена в воздушный зазор магнитной системы 3. Корпус теплового манометра помещен в герметичный цилиндрический кожух 4. Струна включена в мостовую схему (рис. 42,б), являющаяся входным устройством усилителя с положительной обратной связью Y , и образует совместно с усилителем струнный автогенератор. От специального стабилизированного источника B по струне пропускается постоянный ток I , нагревающий струну до определенной температуры. По мере уменьшения давления среды, окружающей струну, ее температура возрастает, что приводит к появлению дополнительной тепловой деформации струны, вытесняющей часть упругой деформации. В результате сила натяжения струны уменьшается, что приводит к уменьшению частоты собственных поперечных колебаний струны, а следовательно, и к изменению выходной частоты струнного автогенератора.

При расчете основных параметров струнного вакуумметра положим, что:

1) температура корпуса, в котором закреплены концы струны, равна температуре окружающей среды и не изменяется во времени, т. е. $T_k = T_0 = \text{const}$;

2) тепловая деформация струны вытесняет часть начальной упругой деформации струны δ_0 ;

3) мощность, теряемую за счет отвода тепла от струны к креплениям, не учтена вследствие малости по сравнению с мощностями, отводимыми за счет теплопроводности газа и лучеиспускания.

Определим связь между изменением давления, температурой струны и изменением частоты ее поперечных колебаний.

Уравнение теплового баланса для чувствительного элемента при любом значении измеряемого давления

$$W = W_r + W_{\text{изл}}, \quad (175)$$

где W — мощность, выделяемая на чувствительном элементе; W_r — мощность, отводимая от чувствительного элемента за счет теплопроводности газа; $W_{\text{изл}}$ — мощность, отводимая от чувствительного элемента путем теплового излучения.

Выделяемая мощность

$$W = I^2 R_0 [1 + \beta (T - T_0)], \quad (176)$$

где I — ток, протекающий по струне; R_0 — сопротивление чувствительного элемента при температуре T_0 , соответствующей атмосферному давлению $p = p_a$; T — температура чувствительного элемента, соответствующая измеряемому давлению $p < p_a$ (p_a — атмосферное давление).

Отводимая мощность, обусловленная явлением молекулярной теплопроводности газа, определяется выражением [5]

$$W_r = (\lambda_T \alpha p) (T - T_0) A, \quad (177)$$

где α — коэффициент аккомодации поверхности чувствительного элемента по отношению к газу, давление которого измеряется; λ_T — молекулярная теплопроводность газа, зависящая от рода газа и его средней температуры; p — давление газа; A — площадь поверхности чувствительного элемента.

Мощность, отводимая от чувствительного элемента путем излучения, определяется выражением

$$W_{\text{изл}} = \sigma \epsilon (T^4 - T_0^4) A, \quad (178)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ — постоянная Стефана — Больцмана ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$); ϵ — коэффициент излучения, зависящий от качества поверхности чувствительного элемента.

С учетом уравнений (176), (177) и (178) выражение для баланса мощности можно представить в виде

$$I^2 R [1 + \beta (T - T_0)] = \alpha \lambda_T A (T - T_0) p + \sigma \epsilon A (T^4 - T_0^4), \quad (179)$$

откуда

$$p = \frac{I^2 R_0 [1 + \beta (T - T_0)] - \sigma \epsilon A (T^4 - T_0^4)}{\alpha \lambda_T A (T - T_0)}. \quad (180)$$

При этом по струне кроме постоянного тока $I = \text{const}$ протекает переменный ток I_{\sim} , обеспечивающий поддержание автоколебаний струны. Но $I_{\sim} \ll I$, поэтому нагрев струны за счет тока I_{\sim} пренебрежимо мал, и в уравнении теплового баланса его можно не учитывать.

Частота поперечных колебаний струны f_0 преобразователя при температуре T_0 и $p = p_a$ может быть определена выражением (18).

После включения тока нагрева I температура струны изменится, и частота поперечных колебаний струны $f < f_0$ будет являться мерой давления p_a .

По мере уменьшения давления ($p < p_a$) температура поверхности струны возрастает до температуры T , что приводит к увеличению тепловой деформации струны, а следовательно, и к уменьшению упругой деформации струны и частоты ее поперечных колебаний до величины

$$f = \frac{f_0}{1 + \alpha_c (T - T_0)} \left\{ \left[1 - \frac{l_0 \alpha_c (T - T_0)}{\delta_0} \right] \times \right. \\ \left. \times [1 + \alpha_E (T - T_0)] [1 + \alpha_c (T - T_0)]^2 \right\}^{1/2}, \quad (181)$$

где α_c — температурный коэффициент линейного расширения материала струны; α_E — температурный коэффициент модуля упругости материала струны.

Проведя сравнительную оценку сомножителей подкоренного выражения, приходим к выводу, что два последних сомножителя в уравнении (181) можно опустить, поскольку даже для $T - T_0 = 100$ К это дает погрешность в определении значения f в пределах 1—1,5%. С учетом этого допущения из уравнения (181) следует

$$T - T_0 = \frac{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right] \delta_0}{l_0 \alpha_c} = \frac{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right] \varepsilon_0}{\alpha_c} = \\ = K \left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right], \quad (182)$$

где $\varepsilon_0 = \frac{\delta_0}{l}$ — начальная относительная упругая деформация струны;

$$K = \frac{\varepsilon_0}{\alpha_c}.$$

Из выражения (182) следует, что температуру чувствительного элемента можно определять путем измерения текущего значения частоты струнного автогенератора.

С учетом выражения (182) функция преобразования (180) будет иметь вид

$$p = \frac{l^2 R_0 \left\{ 1 + \beta K \left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right] \right\} - \sigma \varepsilon A \left\{ K \left[1 - \right. \right. \\ \left. \left. \lambda_T \alpha A K \left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right] \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right] + T_0 \right\}^4 - T_0^4}{\dots} \dots \quad (183)$$

Теоретически доказано [5], что в области низких давлений теплоэлектрические манометры имеют максимальную чувствительность при температуре струны (нити)

$$T'_{\text{опт}} = 1,36 T_0. \quad (184)$$

Исследования распределения температуры вдоль струны с учетом отвода тепловой энергии через заделки концов показали, что для создания средней температуры вдоль струны $T'_{\text{опт}}$ необхо-

дим, чтобы центральная часть струны была нагрета до более высокой температуры, чем $T_{\text{опт}}$. Поэтому окончательно принимаем

$$T_{\text{опт}} = 1,5 T_0. \quad (185)$$

Используя методику анализа, приведенную в работе [5], можно определить оптимальное значение тока нагрева струны:

$$I_{\text{опт}} = T_0^2 \sqrt{\frac{2,71 \sigma \epsilon A}{R_0}}. \quad (186)$$

Например, для использования струны из сплава ПлСр-20 с длиной $l_0 = 15 \cdot 10^{-3}$ м, сечением $(0,15 \cdot 0,015) 10^{-6}$ м², $R_0 = 4$ Ом, площадь ее поверхности $A = 5 \cdot 10^{-6}$ м² и при $\sigma = 5,76 \cdot 10^{-8}$ кг/с³·К⁴, $\epsilon = 0,5$, $T_0 = 300$ К в соответствии с выражением (186) $I_{\text{опт}} = 29 \cdot 10^{-3}$ А = 29 мА.

Чувствительность вакуумметра с учетом равенства (186)

$$Y_{\text{опт}} = \frac{dT/T}{dp} = -\frac{1}{32} \frac{\alpha \lambda T}{\sigma \epsilon T_0^3}, \quad (187)$$

а относительные изменения температуры или сопротивления струны могут быть определены выражением

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta R}{R} = -\frac{1}{32} \frac{\alpha \cdot \lambda T}{\sigma \epsilon T_0^3} \Delta p, \quad (188)$$

где Δp — приращение измеряемого давления.

Выразим относительное изменение температуры через соответствующее ему относительное изменение частоты струнного автогенератора.

На основании зависимости (182) можно записать

$$T = K \left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right] + T_0, \quad (189)$$

откуда

$$\frac{dT}{df} = -\frac{2Kf}{f_0^2}. \quad (190)$$

Переходя к конечным приращениям, получим

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{2Kf\Delta f}{f_0^2 \{K[1 - (f/f_0)^2] + T_0\}}. \quad (191)$$

Чувствительность вакуумметра по относительному изменению частоты с учетом уравнений (33) и (191)

$$Y_{\text{опт. } f} = \frac{\Delta f/f}{\Delta p} = \frac{1}{64} \frac{\alpha \lambda T}{\sigma \epsilon T_0^3} \frac{f_0^2 \{K[1 - (f/f_0)^2] + T_0\}}{Kf^2}. \quad (192)$$

Из последнего выражения следует, что чувствительность преобразователя тем выше, чем меньше отношение f/f_0 .

Таким образом, для рационального построения струнного вакуумметра необходимо, чтобы в области низких давлений текущее значение частоты струны было минимально возможным, при кото-

ром еще обеспечивается устойчивая работа струнного автогенератора.

Для получения оптимальной чувствительности преобразования необходимо, чтобы соотношение частот удовлетворяло равенству (182) с учетом принятых допущений и при $T_{\text{опт}} = 1,5T_0$.

$$\left(\frac{f}{f_0}\right)_{\text{опт}} = \left[1 - \frac{l_0 \alpha_c (1,5T_0 - T_0)}{\delta_0}\right]^{1/2} = \left[1 - \frac{0,5T_0}{K}\right]^{1/2}. \quad (193)$$

Например, для струны из сплава ПлСр-20 при $l = 15 \cdot 10^{-3}$ м, $\delta_0 = 3,87 \cdot 10^{-5}$ м, $\alpha_c = 11 \cdot 10^{-6}$ 1/К, $T_0 = 293$ К ($\Delta f/f_0$)_{опт} = 0,61, откуда следует, что максимальная чувствительность при $f_0 = 5 \cdot 10^3$ Гц получается при $f = 3040$ Гц.

Полученное расчетным путем соотношение (193) хорошо согласуется с результатами эксперимента.

Оптимальная чувствительность вакуумметра по абсолютному значению частоты с учетом выражений (192) и (193)

$$\begin{aligned} y = \frac{\Delta f}{\Delta p} &= \frac{\alpha \lambda_T}{64 \pi \epsilon T_0^4} \frac{f_0 \{K [1 - (1 - 0,5T_0/K)] + T_0\}}{K (1 - 0,5T_0/K)^{1/2}} = \\ &= \frac{3 \alpha \lambda_T \alpha_c}{128 \pi \epsilon T_0^2} \left(\frac{E}{l_0 \rho (2\delta_0 - T_0 \alpha_c l_0)} \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (194)$$

Например, при использовании ленточной струны из сплава ПлСр-20 с параметрами $l_c = 15 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho = 19,7 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, $E = 1,75 \cdot 10^{11}$ Па, $\delta_0 = 3,87 \cdot 10^{-5}$ м, $f_0 = 5 \cdot 10^3$ Гц, $\alpha_c = 11 \cdot 10^{-6}$ 1/К, $T_0 = 293$ К, $\alpha = 0,42$ в соответствии с зависимостью (194) получим, что оптимальная чувствительность вакуумметра $y = \Delta f/\Delta p = 312$ Гц/Па. Результаты исследования опытных образцов преобразователей показали, что в области давлений ~ 1 Па чувствительность равна 200—250 Гц/Па. Таким образом, точность проведенных теоретических расчетов можно считать вполне удовлетворительной. Расхождение в 15—30% можно объяснить различиями в реальных и расчетных значениях коэффициентов аккомодации α и коэффициента излучения ϵ .

Из теоретических основ построения термоэлектрических вакуумметров известно [5, 9], что чувствительность преобразователя зависит от площади поперечного сечения чувствительного элемента и площади его поверхности.

Проведенные исследования показали, что при равных площадях поперечного сечения и прочих равных условиях струнный преобразователь с чувствительным элементом прямоугольной формы поперечного сечения с соотношением сторон 1:10 обладает большей чувствительностью (в 1,5—2 раза).

На основе проведенного анализа можно дать следующие практические рекомендации.

1. Для рационального построения струнного вакуумметра необходимо, чтобы в области низких давлений текущее значение частоты колебаний струны было минимально возможным, при котором еще обеспечивается устойчивая работа струнного автогенератора; иначе говоря, отношение $f_{\text{мин}}/f_0$ должно быть по возможности меньше.

2. Для получения оптимальной чувствительности вакуумметра при нормальной температуре окружающей среды ($T_0 = 293$ К) необходимо, чтобы температура чувствительного элемента в области

измеряемого низкого давления была в 1,5 раза выше T_0 , а отношение текущей частоты к начальной $f/f_0 \approx 0,6$.

3. Струнный вакуумметр обладает оптимальной чувствительностью $\Delta f/\Delta p \approx 300$ Гц/Па (при $f_0 = 5000$ Гц), что позволяет обеспечивать малую погрешность дискретности и высокую разрешающую способность вакуумметра.

4. Качество поверхности чувствительного элемента (струны) должно быть таким, чтобы для конкретной газообразной среды отношение коэффициента аккомодации α к коэффициенту излучения ϵ было максимальным; таким условиям удовлетворяет полированная поверхность.

5. Для обеспечения максимальной чувствительности преобразователя для изготовления чувствительного элемента — струны необходимо использовать металлы и сплавы с возможно большими значениями модуля упругости и коэффициента линейного расширения и возможно меньшей удельной плотностью, т. е. отношение $E\sigma_c/\rho$ желательно иметь максимально возможным.

6. Материал струн должен обладать высокой релаксационной стойкостью при напряжениях растяжения $\sigma = 0,25\sigma_{\text{п}}$ и температурах 450—500 К.

7. В струнных вакуумметрах предпочтительно использовать струны прямоугольной формы поперечного сечения с минимально возможным (по конструктивным и технологическим соображениям) значением площади поперечного сечения.

Струнный преобразователь скорости и расхода газообразных сред

Существенным недостатком термоанемометров является относительно узкий диапазон измерений, малая точность и низкая помехоустойчивость, препятствующая реализации дистанционных систем контроля и управления скоростью потока газа или его расходом. По этой причине приборы такого типа не нашли широкого применения.

Струнный преобразователь скорости и расхода газа отличается от обычного термоанемометра тем, что термочувствительный элемент — струна, помещенная в газовый поток, находится в режиме непрерывных автоколебаний. Изменение скорости потока вызывает изменение температуры струны, что приводит к изменению величины упругой деформации струны, а следовательно, и к изменению частоты ее поперечных колебаний. Таким образом, частота струнного автогенератора функционально связана с измеряемой скоростью потока газа либо его расходом.

На рис. 43 изображена схема, поясняющая принцип работы струнного преобразователя скорости (расхода) газообразных сред. В трубопроводе 1 на двух стойках 3 и 6, одна из которых изолирована от корпуса, расположена струна 2, имеющая определенное начальное натяжение. Струна помещена в воздушный зазор магнитной системы (на рисунке не показана), а ее концы подсоединены к электронному усилителю 4 с положительной обратной связью. Колеблющаяся струна нагревается постоянным током, получаемым от стабилизированного по напряжению источника питания 7. Для регулирования величины тока нагрева используется переменный резистор 5. Ток нагрева I_n много больше, чем ток подкачки струнного автогенератора, и можно считать, что он целиком и полностью определяет температуру, до которой нагревается струна, а следовательно,

бильность уровня этой температуры определяется стабильностью напряжения источника питания 7.

При скорости газа в трубопроводе $V=0$ и $I=I_n$ струна нагревается до температуры выше, чем температура окружающего ее газа. Благодаря появлению тепловой деформации, вытесняющей часть начальной упругой деформации струны, частота колебаний струны будет ниже, чем начальная частота, соответствующая $I_n=0$. При движении газа по трубопроводу i , внутри которого размещается струнный преобразователь, будет наблюдаться эффект сноса тепла, приводящий к охлаждению струны, уменьшению величины ее тепловой деформации и росту частоты колебаний струнного автогенератора.

Определим связь между измеряемой скоростью газового потока и соответствующим значением частоты колебаний струнного автогенератора.

При протекании по струне постоянного стабилизированного тока нагрева и $V=0$ для сравнительно низких температур струны можно считать, что основная составляющая отвода тепла от струны обусловлена теплопроводностью газа. В этом случае уравнение теплового баланса для термочувствительного элемента — струны определяется выражением [25]

$$I_n^2 R = \lambda \left[\frac{l_0 a}{\delta_c} + \frac{l_0 a}{\delta_{мп}} + \frac{2l_0 b}{\delta_m} \right] (T_n - T_{oc}) = \lambda \sum_{i=1}^3 A_i (T_n - T_{oc}), \quad (195)$$

где a , b — ширина и толщина ленточной струны; δ_c , $\delta_{мп}$, δ_m — расстояния от плоскости струны до плоскостей направляющего сопла, магнитопровода и магнитных вставок соответственно; A_i — отношение площади рассматриваемой поверхности струны к ее расстоянию до соответствующего элемента конструкции; T_n — начальная температура струны, соответствующая нулевой скорости газообразной среды, окружающей струну; λ — коэффициент теплопроводности газа; T_{oc} — температура деталей корпуса преобразователя.

Уравнение теплового баланса термочувствительного элемента — струны при $V \neq 0$ можно представить в виде [25]

$$I_n^2 R = Q = \xi S_1 (T_n - T_{oc}), \quad (196)$$

где S_1 — площадь поверхности струны; ξ — коэффициент теплоотдачи, являющийся функцией скорости газового потока; T_n — температура поверхности струны, помещенной в газовый поток ($V \neq 0$).

Обычно омическое сопротивление цепи, формирующей ток нагрева, много больше R , что дает основание считать ток I_n постоянным.

Для рассматриваемого случая коэффициент теплоотдачи

$$\xi = \frac{c\lambda}{d} \left(\frac{Vd}{\nu} \right)^n = \frac{c\lambda}{d} \text{Re}^n = \frac{c\lambda d^{n-1} V^n}{\nu^n}, \quad (197)$$

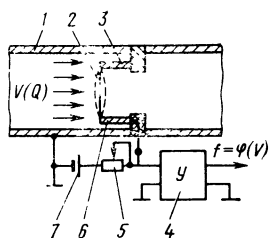


Рис. 43. Схема струнного преобразователя скорости (расхода) газообразных сред

где d — диаметр струны; ν — кинематическая вязкость газа; $Re = \frac{Vd}{\nu}$ — критерий Рейнольдса; c и n — коэффициент и показатель степени, числовые значения которых зависят от скорости и свойств газа, а также диаметра струны и определяются по значению критерия Рейнольдса

При использовании плоской струны производят перерасчет на эквивалентный диаметр d , определяемый из условия равенства площадей поперечного сечения.

Из двух последних уравнений следует

$$T_n = \frac{I_n^2 R \nu^n}{c \lambda d^{n-1} V^n S_1} + T_{oc}. \quad (198)$$

Полученное выражение справедливо при V , отличном от нуля, и температуре $T_n < T_n$.

Тепловая деформация струны, обусловленная охлаждением последней набегающим потоком газа,

$$\delta_V = l_0 \alpha (T_n - T_n) = l_0 \alpha \Delta T. \quad (199)$$

Определяя T_n из уравнения (195), с учетом формулы (198) получим

$$\delta_V = l_0 \alpha \frac{I_n^2 R}{\lambda} \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^3 A_i} - \frac{\nu^n}{c d^{n-1} S_1 V^n} \right). \quad (200)$$

Положим, что при номинальном значении тока нагрева I_n и $V=0$ струна имела начальную частоту f_0 и соответствующую ей начальную упругую деформацию δ_0 . Тогда при наличии скорости потока, отличной от нуля, упругая деформация струны будет возрастать, что приведет к увеличению частоты колебаний струны:

$$f = \frac{1}{2l_0} \left[\frac{(\delta_0 + \delta_V) E (1 + \alpha_E \Delta T)}{\rho l_0} \right]^{1/2}. \quad (201)$$

Поскольку $\alpha_E \Delta T \ll 1$, влияние изменения модуля упругости струны в дальнейшем учитывать не будем.

С учетом уравнения (200) приращение частоты колебаний струны относительно уровня f_0 будет связано с измеряемой скоростью газового потока зависимостью

$$\Delta f = f_\Delta \left[1 + \frac{l_0 \alpha I_n^2 R}{\delta_0 \lambda} \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^3 A_i} - \frac{\nu^n}{c d^{n-1} S_1 V^n} \right) \right]^{1/2} - f_0. \quad (202)$$

Представив иррациональный сомножитель в виде степенного ряда и ограничиваясь первыми двумя членами, получим уравнение,

дающее приближенную зависимость между приращением частоты и скоростью потока:

$$\Delta f \approx \frac{l_0 \alpha I_H^2 R}{2\delta_0 \lambda} \left(\frac{1}{3} - \frac{v^n}{cd^{n-1} S_1 V^n} \right) f_0. \quad (203)$$

Поскольку δ_0 можно выразить через начальную частоту поперечных колебаний струны и ее геометрические и механические параметры, то

$$\Delta f \approx \frac{\alpha I_H^2 R E}{8l_0^2 f_0 \rho \lambda} \left(\frac{1}{3} - \frac{v^n}{cd^{n-1} S_1 V^n} \right), \quad (204)$$

откуда

$$V = v \left[\frac{1}{cd^{n-1} S_1 \left(\frac{1}{3} - \frac{8\Delta f l_0^2 f_0 \rho \lambda}{\alpha I_H^2 R E} \right)} \right]^{1/n}. \quad (205)$$

Соответственно объемный расход газа

$$Q = VS_2,$$

где S_2 — эффективная площадь поперечного сечения трубопровода.

Выражение (205) дает возможность выбирать все основные конструктивные параметры преобразователя исходя из заданного значения максимальной скорости (расхода) газа и требуемой чувствительности преобразователя.

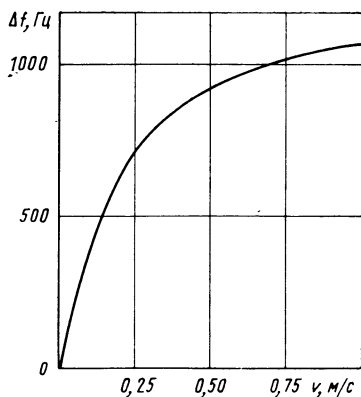


Рис. 44. Зависимость приращения частоты струнного преобразователя от скорости воздушного потока

На рис. 44 приведена расчетная зависимость изменения частоты струнного преобразователя от измеряемой скорости воздуха при следующих параметрах преобразователя и газообразной среды: $I_n = 0,14$ А; $R = 4$ Ом; $a = 0,11 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 0,011 \cdot 10^{-3}$ м; $E = 1,75 \cdot 10^{11}$ Па; $l_0 = 15 \cdot 10^{-3}$ м; $\alpha = 10 \cdot 10^{-6}$ 1/К; $f_{01} = 3,5 \cdot 10^3$ Гц; $\rho = 20$ кг/м³; $c = 1$; $\lambda = 2,75 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К); $\nu = 2 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

При проведении расчетов и сравнении их с результатами эксперимента оказалось, что лучшее приближение при оценке тепловой проводимости G дает выражение

$$G = \lambda \frac{2\pi l_0}{\ln \frac{d_1}{d}},$$

где $d = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}}$ диаметр эквивалентной струны; d_1 — величина воздушного зазора между полюсами магнитной системы.

В рассматриваемом примере $d = 3,94 \cdot 10^{-5}$ м.

Из приведенного примера следует, что преобразователь с выбранными параметрами наиболее эффективен при измерении скоростей до 0,5 м/с, где его средняя чувствительность составляет $800 \frac{\text{ед.с}}{\text{м}}$.

Задаваясь различными сочетаниями величин параметров E , ρ , f_0 , I_n , α , можно при наличии одной и той же конструкции в весьма широких пределах изменять чувствительность преобразователя.

КОНСТРУКЦИИ УНИФИЦИРОВАННЫХ СТРУННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1. ОСНОВНЫЕ СООБРАЖЕНИЯ, ПОЛОЖЕННЫЕ В ОСНОВУ УНИФИКАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ СТРУННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Для обеспечения качественного проектирования, производства и эффективной эксплуатации струнных преобразователей различных физических величин в частоту необходимо, чтобы максимальное число узлов и деталей всех преобразователей было унифицировано по конструктивным признакам, технологии изготовления и материалам, из которых они изготавливаются.

На основе сравнительного анализа конструкций струнных преобразователей различных физических величин было сделано заключение о возможности унификации следующих узлов и деталей, являющихся общими для всех видов преобразователей:

- 1) струн (форма, длина и площадь поперечного сечения);
- 2) конструкций и размеров узлов крепления концов струн;
- 3) конструкций и размеров магнитных систем возбуждения автоколебаний струн;
- 4) электронных усилителей струнных автогенераторов.

Однако полностью унифицировать все элементы унифицированного комплекса струнных преобразователей различных физических величин не представляется возможным, поскольку при измерении каждой физической величины в датчик необходимо вводить первичный и промежуточный измерительные преобразователи вполне определенного типа, обусловленного видом измеряемой физической величины.

При конструктивной проработке любого струнного преобразователя в первую очередь необходимо определить геометрические размеры струн, поскольку от них зависит компоновка и размеры всего струнного преобразователя в целом.

Исследования, проведенные в целях оптимизации параметров струн, показали (п. 2 гл. II), что с точки зрения стабильности частоты, добротности, минимальная длина струн должна быть в диапазоне 10—20 мм, а оптимальной является длина 15 мм. Эта длина струн и была принята за унифицированную во всех конструкциях струнных преобразователей независимо от вида измеряемой физической величины.

Сравнительный анализ различных способов возбуждения и поддержания незатухающих колебаний струны позволил сделать вывод о том, что практически используются только три способа: электромагнитный, электростатический и магнитоэлектрический.

Электромагнитный способ требует применения струн только из магнитного материала. Как правило, струны, обладающие высокими упругими свойствами и малыми потерями на внутреннее трение, изготавливают из дисперсионно-твердеющих сплавов, являющихся

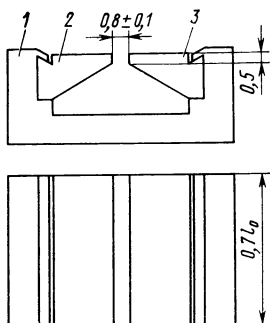


Рис. 45. Унифицированная магнитная система

немагнитными либо слабомагнитными материалами. Колебания струн из таких материалов принципиально невозможно возбудить электромагнитным способом. Кроме того, узлы электромагнитов, создающих возбуждающее поле, содержат обмотки, и в связи с этим их эксплуатационная надежность невысока.

Электростатический способ возбуждения колебаний универсален с точки зрения свойств материала струн. Однако его существенными недостатками являются относительно большие габаритные размеры электронного усилителя и необходимость подводить к преобразователю высокое напряжение порядка сотен или тысяч вольт, что вызывает дополни-

тельные конструктивные трудности и весьма нежелательно с точки зрения техники безопасности.

Магнитоэлектрический способ возбуждения колебаний струн объединяет в себе достоинства двух приведенных выше и свободен от присущих им недостатков. Системы постоянных магнитов, в воздушных зазорах которых находятся струны, весьма надежны, сохраняют во времени стабильность магнитных свойств, имеют небольшие габаритные размеры и массу. Применение высококоэрцитивных сплавов типа ЮНДК-35 или самарий-кобальтовых сплавов позволяет проектировать магнитные системы малых габаритных размеров и массы, что положительно сказывается на общей компоновке струнного преобразователя.

Исходя из изложенного выше, во всех разработанных конструкциях струнных преобразователей применен магнитоэлектрический способ возбуждения автоколебаний струн. Унифицированная магнитная система состоит из П-образного магнитопровода 1 (рис. 45) и двух вставок 2 и 3 из магнитотвердого материала. Поскольку максимальное сечение применяемых струн не превышает $0,02 \times 0,2 \text{ мм}^2$, то ширину воздушного зазора магнитной системы принимали равной $0,8 \pm 0,1 \text{ мм}$, а высоту магнитных вставок, формирующих воздушный зазор, — $0,5 \text{ мм}$.

Протяженность магнита в направлении продольной оси струны равна $0,7$ длины струны, что является оптимальным с точки зрения стабильности возбуждаемых колебаний. При длине струны 15 мм длину магнита принимали равной 11 мм .

Узлы заделок концов струн, используемые во всех конструкциях преобразователей, как правило, изготавливают из стали 45. Поверхности, прижимающие концы струн, обрабатывают до шероховатости $Ra \leq 0,2 \div 0,12 \text{ мкм}$. Верхняя накладка (см. рис. 14) должна иметь толщину не менее $1,5\text{—}2 \text{ мм}$ и надежно поджиматься к нижней стойке. Поверхности накладки и стойки в месте выхода струны из заделки не должны иметь ступеньки и обрабатываются так же, как и прижимающие поверхности. После окончательной обработки поверхностей накладок и стоек и их штифтовки фаски с острых кромок деталей не снимают. Изоляция одной из стоек, на которой фиксируется конец струны, от корпуса осуществляется посредством слюдяных прокладок и слюдяных шайб. Этот метод

изоляции является унифицированным для всех рассматриваемых ниже конструкций преобразователей.

Электронный усилитель струнного автогенератора также является унифицированным универсальным блоком, используемым во всех струнных преобразователях.

2. СТРУННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЙ И РАЗРЕЖЕНИЙ

На базе проведенных теоретических и экспериментальных исследований был разработан и испытан унифицированный струнный преобразователь давления в частоту, обеспечивающий измерения в диапазоне $0,6 \cdot 10^5$ — $600 \cdot 10^5$ Па [а. с. 510659 (СССР)].

Преобразователь состоит из плоской упругой мембраны 12 (рис. 46), выполненной за одно целое со стаканом 13 и стойкой 7. Стойка 7 расположена от центра мембраны на расстоянии 0,58 ее радиуса. Вторая стойка 1 укреплена на торцевой плоскости стакана посредством винтов 14. В струне 4 создается определенное начальное растягивающее усилие, и ее концы прижимаются к верхним плоскостям стоек 1 и 7 посредством накладок 2 и 6, поджимаемых винтами 3 и 5 соответственно. Для реализации магнитоэлектрического способа возбуждения и поддержания автоколебаний струны последняя помещена в узкий зазор магнитной системы 16, прикрепленной винтами 15 к торцевой плоскости стакана. Электрическая изоляция одного из концов струны от корпуса осуществляется за счет установки изоляционной прокладки 21 под основание стойки 1 и изоляционных шайб 20 под головки винтов 14. Стальные шайбы 18 служат для более равномерного перераспределения нагрузки, действующей на слюдяные шайбы. Провода для подсоединения концов струны к электронному усилителю подпаивают к хвостовикам фигурных шайб 17 и 19, клеммам колодки 8 и выводят через отверстие в кожухе 9. При соединительный штуцер 11 с помощью резьбового либо сварного соединения крепят к стакану 13. Фланец 10 используют как декоративный. Присоединительная резьба штуцера является стандартной и может быть выполнена в виде двух вариантов: $M12 \times 1$ и $M18 \times 1,5$.

Регулировка чувствительности при окончательной юстировке преобразователя может осуществляться путем изменения начальной частоты f_0 за счет изменения силы продольного натяжения струны. При этом возможны два способа реализации такой регулировки.

Корпус 2 (рис. 47) пре-

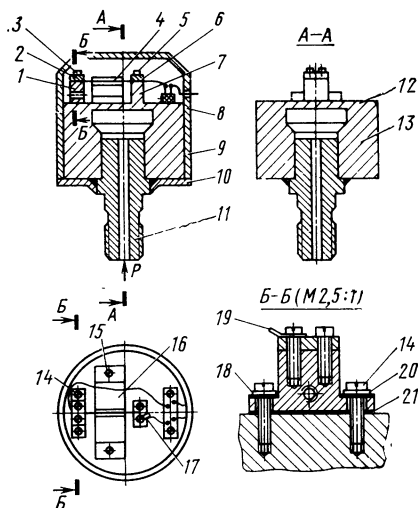


Рис. 46. Конструкция струнного преобразователя избыточных давлений и разрежений

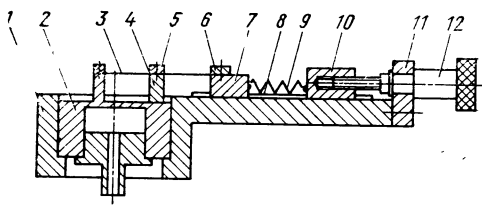


Рис. 47. Схема приспособления для регулировки начальной частоты колебаний струнного преобразователя

образователя жестко крепится в основании 1 регулировочного приспособления. Первый способ регулировки заключается в том, что технологический конец струны 3 закрепляется на ползушке 7 накладкой 6. Ползушка 7 и сухарь 10 находятся в направляющих 8 и могут осуществлять только поступательное перемещение по плоскости основания 1, в направлении продольной оси струны 3.

При вращении винта 12, закрепленного в кронштейне 11, сухарь 10 перемещается, увеличивая или уменьшая силу натяжения пружины 9. После поджатия накладки 5, фиксирующей конец струны 3 на стойке 4 преобразователя, возбуждаются автоколебания струны и измеряется частота ее колебаний. В случае необходимости винты, поджимающие накладку 5, ослабляются, и процесс регулировки повторяется.

Второй способ регулировки частоты колебаний струны, закрепленной накладками на стойках преобразователя, заключается в перемещении всей стойки 1 (см. рис. 46) в направлении продольной оси струны 3. Перемещение может осуществляться в пределах зазоров между винтами 14 и отверстиями под них в стойке 1 (сеч. Б—Б). Для плавного перемещения стойки может быть использован дифференциальный винтовой механизм, обеспечивающий перемещения порядка 50 мкм на один оборот. Для ввода конца дифференциального механизма в стойке 1 предусмотрено резьбовое отверстие. На период регулировки затяжка винтов 14 частично ослабляется.

Экспериментальные исследования метрологических характеристик струнных преобразователей давления проводились с использованием образцовых грузопоршневых манометров по десяти равномерно отстоящим точкам в пределах измеряемого диапазона. Преобразователи исследовались в диапазонах $0-0,6 \cdot 10^5$; $0-1 \cdot 10^5$; $0-2,5 \cdot 10^5$; $0-4 \cdot 10^5$; $0-6 \cdot 10^5$; $0-25 \cdot 10^5$; $0-60 \cdot 10^5$; $0-100 \cdot 10^5$; $0-250 \cdot 10^5$; $0-400 \cdot 10^5$; $0-600 \cdot 10^5$ Па.

Каждый из испытываемых преобразователей подвергался ступенчатому нагружению до верхнего предела измеряемого давления и такому же ступенчатому режиму уменьшения давления. Цикл нагружение—разгрузка повторялся по 5 раз. Выходная частота преобразователя фиксировалась на каждой измеряемой ступени.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований, проведенных по такой методике, давала возможность оценить составляющие погрешности, обусловленные гистерезисом, смещением начальной частоты, а также случайную составляющую погрешности, обусловленную воздействием ряда неучитываемых дестабилизирующих факторов. По результатам эксперимента определены приведенную погрешность преобразователя.

Следует отметить, что все испытываемые преобразователи, независимо от диапазона измерения, имели одну и ту же конструкцию, одинаковые габаритные размеры ($\varnothing 55 \times 1200$ мм) и массу (0,5 кг). Единственным конструктивным параметром, которым отличались

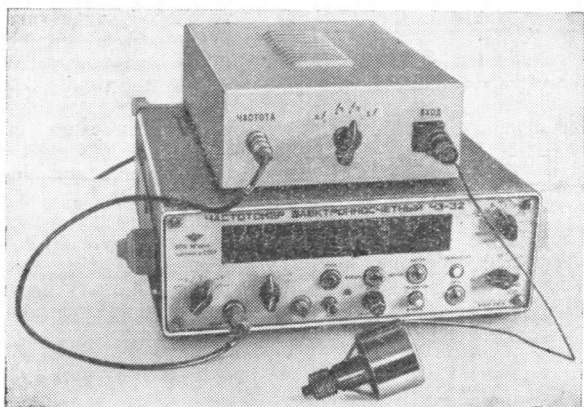


Рис. 48. Внешний вид цифрового унифицированного устройства для измерения давлений

преобразователи, предназначенные для работы в равных диапазонах, являлась толщина мембраны. Например, у преобразователя с верхним пределом измерения $4 \cdot 10^5$ Па толщина мембраны равна 0,6 мм, а у преобразователя с верхним пределом измерения $400 \cdot 10^5$ Па — 2,6 мм.

Отсюда следует, что описываемая конструкция струнного преобразователя давления в частоту является унифицированной. На базе однотипной гаммы преобразователей можно охватить весьма широкий диапазон измеряемых давлений (0— $600 \cdot 10^5$ Па).

Результаты экспериментальных исследований показали, что основная приведенная погрешность всей исследуемой гаммы преобразователей давления не превышает 0,15—0,3%.

Преобразователи на пределы измерения $0,6 \cdot 10^5$ и $1,0 \cdot 10^5$ Па были исследованы в режиме измерения вакуумметрических давлений. Результаты исследований показали, что разработанные струнные преобразователи могут успешно применяться в качестве вакуумметров и имеют приведенную погрешность 0,16—0,25%.

Электронный блок для возбуждения автоколебаний струны преобразователя питается от сети ~ 220 В, 50 Гц.

На базе разработанного преобразователя создано унифицированное цифровое устройство для измерения давления. Оно включает измерительный преобразователь давления жидких и газообразных сред в частоту с электронным блоком возбуждения и электронно-счетный частотомер любого типа, выпускаемый отечественной промышленностью.

Внешний вид цифрового унифицированного устройства для измерения давления УИД-2 приведен на рис. 48.

Опытная партия таких устройств прошла Государственную метрологическую аттестацию во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологической службы (ВНИИМС). Основная приведенная погрешность аттестованных информационно-измери-

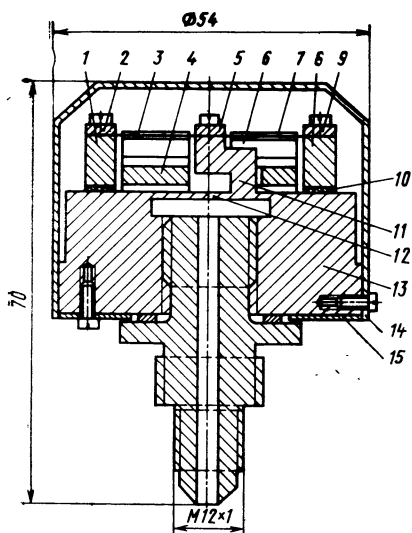


Рис. 49. Конструкция струнного дифференциального преобразователя избыточных и вакуумметрических давлений

ний в частоту приведена на рис. 49. В корпусе 13 путем механической обработки выполнена плоская мембрана 12, на которой закреплена изогнутая под прямым углом стойка 11 со смещением места крепления относительно центра мембраны на величину 0,58 ее радиуса. С целью повышения стабильности метрологических характеристик конструкции преобразователя во времени, а также при воздействии на него вибрационных и ударных ускорений корпус, мембрана и изогнутая под прямым углом стойка выполнены как одно целое из единой заготовки и представляют собой одну деталь достаточно сложной формы.

На торцевой плоскости корпуса симметрично относительно центра мембраны закреплены две стойки 1, 8 одинаковой конфигурации и две магнитные системы 4 и 6. Накладками 2, 5 и 9, поджимаемыми винтами, фиксируются концы двух струн 3 и 7, имеющих вполне определенное начальное натяжение. Плоскости стоек и накладок притерты с соблюдением необходимого класса чистоты и плоскостности. Верхние поверхности стоек 1, 8, 11 лежат в одной горизонтальной плоскости, а натянутые струны лежат на одной прямой в этой плоскости и находятся в середине воздушных зазоров магнитных систем.

Электрические выводы от изолированных посредством прокладок 10 концов струн и корпуса преобразователя осуществляются двужильным экранированным кабелем, жилы которого подпайваются к лепесткам, расположенным на стойках 1, 8, а экран — к лепестку, закрепленному на торцевой плоскости корпуса. Кабель прижимается к торцевой плоскости скобой и выводится через сквозное

тельных устройств для измерения давления находится в пределах 0,16—0,25%.

Модернизация преобразователя типа УПД-1 с целью измерения гидростатического давления привела к созданию унифицированного преобразователя гидростатического давления в частоту типа УПГД-1. По устройству и принципу действия он мало отличается от преобразователя типа УПД-1.

С целью получения функции преобразования, близкой к линейной, а также с целью повышения температурной стабильности информационного измерительного устройства для измерения давления струнный преобразователь может быть выполнен по дифференциальной схеме.

Конструкция одного из вариантов струнного дифференциального преобразователя избыточных давлений

отверстие корпуса. Кожух 14 защищает преобразователь от попадания пыли и влаги, а также выполняет роль защитного экрана при воздействии внешних электромагнитных полей. К нижней торцовой плоскости корпуса прикреплен декоративный фланец 15.

Стойка, закрепленная на мембране, имеет достаточно сложную форму и изогнута под прямым углом. Центр симметрии накладки 5 расположен над центром мембраны. Такое конструктивное решение позволяет существенно уменьшить габаритный размер преобразователя. Вопросы оптимального выбора конструктивных элементов преобразователя рассмотрены в п. 3 гл. II.

Исследование метрологических характеристик преобразователя при измерении отношения выходных частот струнных автогенераторов показало, что его основная погрешность находится в пределах 0,15—0,25 % и не отличается от погрешности однострунного датчика. Систематическая нелинейность выходной характеристики близка к расчетной.

3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ И АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ

Однострунный преобразователь разности давлений

Конструкция мембранного преобразователя разности давлений в частоту приведена на рис. 50. По своему существу эта конструкция представляет собой однострунный преобразователь избыточного давления в частоту, у которого место соединения кожуха с основанием герметизировано, а кожух снабжен еще одним входным штуцером.

В цилиндрическом корпусе 7 выполнена расточка. Дно расточки и торцовая поверхность корпуса образуют тонкую цилиндрическую мембрану 11 с жестко зашеченными краями. На мембране расположена стойка 8, выполненная за одно целое с мембраной и смещенная относительно центра мембраны на 0,58 ее радиуса. На торцовой поверхности корпуса жестко укреплен кронштейн 14. Между стойкой и кронштейном натянута тонкая металлическая струна 1, концы которой жестко закреплены посредством накладок 4 и 15. Струна выполнена из немагнитного материала и помещена в поле постоянного магнита 12.

Кожух 5 преобразователя крепится к основанию посредством восьми винтов 13. С целью герметизации в месте соединения кожуха и основания поставлена уплотнительная прокладка 6. Для подачи

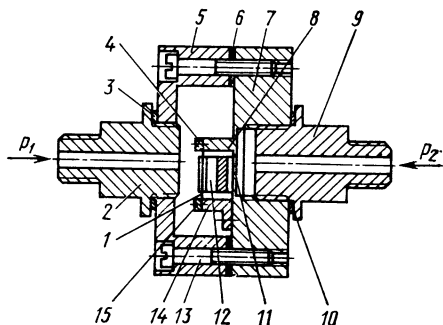


Рис. 50. Струнный преобразователь разности давлений

давлений, разность между которыми измеряется, в левую и правую полости преобразователя в конструкции установлены штуцера 2 и 9. Медные кольца 3 и 10 служат для уплотнения мест сочленения штуцеров с преобразователем.

Преобразователь работает следующим образом. При отсутствии избыточных давлений ($p_1 = p_2 = 0$) прогиб мембраны также равен нулю, и частота поперечных колебаний струны f_0 определяется уравнением (10).

Начальная частота поперечных колебаний струны останется без изменения, если избыточные давления p_1 и p_2 будут отяичны от нуля, но равны по величине, т. е. при $p_1 = p_2 \neq 0$ частота поперечных колебаний струны также будет равна f_0 .

При нарушении равенства давлений ($p_1 \neq p_2$) мембрана 11 прогнется внутрь той полости, где давление меньше.

Изменение углового положения стойки 8 вызовет изменение величины продольной упругой деформации струны, т. е. изменение силы ее продольного натяжения. При этом частота собственных поперечных колебаний струны 1 также изменяется и будет функционально связана с величиной измеряемой разности давлений Δp .

Использование предложенного преобразователя для практических целей дает ряд существенных преимуществ по сравнению с конструкцией струнного преобразователя с упругим чувствительным элементом в виде сильфона [22].

Экспериментальные исследования опытных образцов преобразователя разности давлений рассмотренной конструкции показали, что его метрологические характеристики идентичны метрологическим характеристикам однострунных преобразователей избыточного давления. Приведенная погрешность измерения преобразователя не превышает 0,25 %.

Дифференциальный преобразователь абсолютного давления

Одной из разновидностей рассмотренной конструкции является струнный преобразователь атмосферного давления в частоту. В этом случае внутренняя полость цилиндрической расточки (см. рис. 49) откачивается до давления $1,33 \cdot 10^{-2} - 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па и герметизируется. Вторая полость преобразователя соединена с атмосферой. Преобразователь измеряет разность между атмосферным давлением и давлением в откаченной и герметизированной полости. Если пренебречь погрешностью, равной давлению в герметичной полости, то можно считать, что преобразователь измеряет атмосферное давление.

При определенном атмосферном давлении мембрана имеет начальный прогиб, величина которого изменяется при изменении давления. Угловое перемещение средней стойки, закрепленной на мембране, вызывает изменение упругих деформаций струн, одинаковое по величине, но разное по знаку. Соответственно разный знак будут иметь и приращения частот колебаний струн.

В зависимости от соотношения начальных частот разность частот колебаний струн или их отношение будут функционально связаны с измеряемым атмосферным давлением.

Экспериментальные исследования метрологических характеристик струнных преобразователей атмосферного давления в частотно-модулированный электрический сигнал проводили по следующей методике.

Исследуемый преобразователь помещали в герметичный цилиндрический кожух, снабженный съемной крышкой (для замены исследуемых преобразователей), присоединительным штуцером и тремя электрическими гермовыводами. Штуцер кожуха соединяли с патрубком откачки вакуумной системы, в которой давление контролировали ртутным манометром абсолютного давления. Преобразователь подсоединяли к электронным усилителям через гермовыводы. Выходной электрический сигнал представлял собой разность частот колебаний струн; его измеряли стандартным цифровым частотомером.

В пределах исследуемого диапазона (от атмосферного до ~ 100 Па) требуемое разрежение задавалось в десяти фиксированных равноотстоящих в пределах диапазона точках. Задаваемое давление циклически снижалось и вновь увеличивалось до атмосферного. Число циклов, задаваемых в процессе исследований, равнялось пяти.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что приведенная погрешность измерения струнного преобразователя атмосферного давления лежит в пределах 0,2—0,3%.

Конструкция струнного преобразователя абсолютного давления в частоту отличается простотой, технологичностью, унификацией многих элементов с элементами конструкции преобразователей избыточных давлений.

Наряду с указанными преимуществами рассмотренные конструкции имеют ряд существенных недостатков, основные из которых перечислены ниже.

1. Расположение струны в атмосфере измеряемой среды дает возможность измерять перепад давлений только газообразных сред, поскольку в жидких средах велик декремент затухания и режим автоколебаний струны создать весьма затруднительно.

2. Расположение струны и других элементов конструкции в атмосфере измеряемой среды не дает возможности измерять разность давлений агрессивных газообразных сред, поскольку ряд элементов конструкции в силу специфики их функционального назначения не может быть выполнен из материалов, стойких к агрессивным средам.

3. Для обеспечения электрических выводов от концов струны в кожух или корпус необходимо вваривать гермовыводы, что существенно усложняет и удорожает конструкцию.

Двухмембранный преобразователь разности давлений

С целью устранения изложенных выше недостатков была предложена и разработана конструкция двухмембранного струнного измерительного преобразователя разности давлений в частоту [а. с. № 591734 (СССР)]. Основное рациональное зерно этой конструкции преобразователя заключается в том, что полости, куда подаются два давления, разность между которыми измеряется, полностью изолированы от струны и других элементов конструкции. Это позволяет измерять разность давлений не только газообразных, но и жидких сред. При соответствующем выборе материала корпуса контролируемый энергоноситель может быть агрессивным.

Конструкция струнного преобразователя перепадов давлений в частоту приведена на рис. 51. В цилиндрическом корпусе 2 выполнены две расточки, торцовые части которых образуют тонкие круглые мембраны 4 и 12, выполненные как одно целое с корпусом.

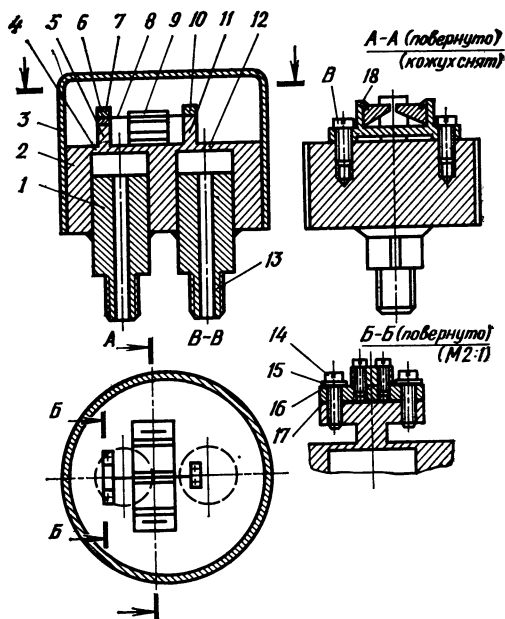


Рис. 51. Двухмембранный струнный преобразователь разности давлений

Центры мембран расположены в диаметральной плоскости корпуса. На мембранах расположены стойки 5 и 11, выполненные как одно целое с мембранами. Металлическая струна 8 находится в воздушном зазоре магнитов 9, натянута между стойками 5 и 11 и также расположена в диаметральной плоскости корпуса преобразователя. Конец струны, лежащей на горизонтальной плоскости стойки 11, фиксируется накладкой 10, соштыфованной со стойкой и поджимаемой винтами. Горизонтальная плоскость стойки 5 занижена относительно аналогичной плоскости стойки 11 на толщину прокладки 6, которая поджимается к стойке винтами 14. Конец струны фиксируется накладкой 7. С целью электрической изоляции прокладки 6 от корпуса 2 преобразователя под прокладку устанавливают тонкую слюдяную пластинку 17, а под головки винтов 14 — стальные и слюдяные шайбы 15 и 16 (рис. 51, сеч. Б—Б). При этом винты, проходящие в отверстия прокладки 6, не касаются боковых стенок отверстий. Преобразователь закрывается кожухом 3.

В нижнюю часть корпуса 2 преобразователя вставляют штуцера 1 и 13, фланцы которых герметично приваривают к корпусу. Через эти штуцера и подаются давления p_1 и p_2 , перепад Δp между которыми требуется измерить.

С целью предотвращения возможности появления недопустимо больших прогибов мембран при подаче в полости давлений, превышающих номинальные, конструкция преобразователя может быть дополнена пластинчатыми ограничителями, установленными над

мембранами с небольшим, заранее рассчитанным зазором. В качестве одного из таких ограничителей можно использовать нижнюю плоскость магнитопровода 18 магнитной системы, увеличив ширину его нижней части таким образом, чтобы он перекрывал центральную часть левой мембраны.

Рассмотрим принцип работы преобразователя. При отсутствии избыточного давления ($p_1 = p_2 = 0$) мембраны не прогибаются, и частота собственных поперечных колебаний струны равна вполне определенному начальному значению f_0 (рис. 52, а). При наличии внутри полостей преобразователя избыточных давлений $p_1 = p_2$ обе мембраны прогнутся на одинаковую величину. Соответственно обе стойки повернутся на один и тот же угол (рис. 52, б). Поскольку геометрические размеры мембран и стоек одинаковы, то в этом случае изменения величины упругой деформации струны не произойдет и частота ее собственных поперечных колебаний останется неизменной и равной значению f_0 .

Если равенство поданных в штуцера давлений нарушается, например $p_2 = p_1 + \Delta p$, то правая мембрана (рис. 52, в) увеличивает величину прогиба, и стойка этой мембраны поворачивается еще на дополнительный угол $\Delta\varphi$, что приводит к увеличению упругой деформации струны и частоты ее собственных поперечных колебаний до величины $f_1 = f_0 + \Delta f$.

Соответственно в случае уменьшения давления $p_2 = p_1 - \Delta p$ частота колебаний струны уменьшится до величины $f_2 = f_0 - \Delta f$.

Очевидно, что приращение частоты собственных поперечных колебаний струны Δf будет функционально связано с разностью (перепадом) избыточных давлений Δp .

При изготовлении преобразователя требуется введение технологической операции по окончательной подгонке толщин мембран с целью получения неизменной частоты f_0 при подаче в штуцера равных давлений. Изменение толщины одной из мембран можно осуществить как механической, так и электрохимической обработкой. Аналогичный эффект может быть получен за счет изменения высоты стоек.

Толщина мембраны преобразователя, рассчитанного на определенный диапазон измерения перепадов давлений, может быть определена на основании уравнений (65) и (67). Результаты проведенных расчетов для $H = 7$ мм сведены в номограмму, приведенную на рис. 22. При использовании номограмм вместо вели-

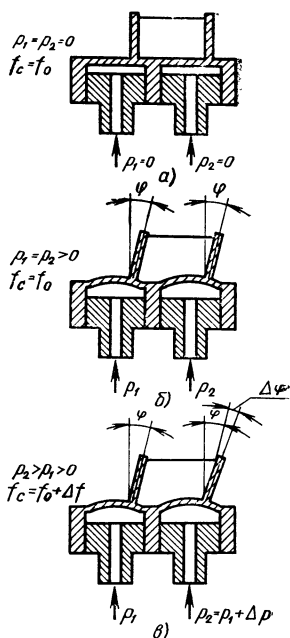


Рис. 52. Положение стоек преобразователя при различных соотношениях давлений, поданных в штуцера

чины $\ln p$ следует брать величину $\ln \Delta p$ и применять полученное значение h без каких-либо пересчетов.

Чувствительность преобразователя может быть повышена за счет увеличения высоты стоек, расположенных на мембранах.

Опытные экземпляры унифицированных преобразователей перепада давления в частоту были изготовлены и исследованы. Результаты экспериментальных исследований позволили сделать вывод, что преобразователи с верхними пределами измерения разности давлений $2,6 \cdot 10^5$ и $10 \cdot 10^5$ Па обеспечивают измерения с приведенной погрешностью не более 0,25 %.

Комбинированный преобразователь давлений и разности давлений

Путем некоторого усложнения рассмотренного преобразователя можно создать комбинированный прибор, дающий информацию не только о разности двух давлений, но и о величине каждого из двух давлений, подводимых к измерительному преобразователю. При этом схему преобразователя можно построить таким образом, что информация об обоих измеряемых давлениях и о разности между этими давлениями будет получаться одновременно (раздельно) по каждому из трех параллельных каналов.

На рис. 53 изображена конструкция струнного комбинированного преобразователя давлений и разности давлений в частоту [а. с. № 600405 (СССР)].

В корпусе 1 выполнены две цилиндрические расточки, торцовые части которых образуют тонкие круглые мембраны 9 и 12. Измеряемые давления подаются в полость расточек через штуцера 10 и 11, приваренные к корпусу.

Стойки 4 и 6 расположены на мембранах и жестко прикреплены к ним с одинаковым смещением относительно центров мембран. На корпусе 1 жестко закреплены кронштейны 2 и 8. Широкие стороны стоек 4, 6 и кронштейнов 2 и 8 расположены перпендикулярно оси, соединяющей центры мембран. Эта ось является для стоек и кронштейнов осью симметрии.

Между стойками и кронштейнами натянуты три струны 3, 5 и 7. Фиксация концов натянутых струн осуществляется притертými накладками 13, 15, 17, 19 посредством винтов. Все три струны помещены в зазоры постоянных магнитов 14, 16 и 18 соответственно, что позволяет поддерживать незатухающие поперечные автоколебания струн посредством подключения их концов к трем электронным усилителям с положительной обратной связью. При этом концы струн электрически изолированы от корпуса 1 преобразователя. С целью защиты преобразователя от воздействия пыли, влаги и электромагнитных помех верхнюю часть преобразователя закрывают защитным кожухом из магнитомягкого материала (на рисунке не показан).

При отсутствии избыточных давлений ($p_1 = p_2 = 0$) мембраны не прогибаются, и частота собственных поперечных колебаний струн 1, 2, 3 (рис. 54,а) равна вполне определенному начальному фиксированному значению. Положим, что начальная частота струны 1 равна f_{01} , струны 2 — f_{02} и струны 3 — f_{03} соответственно.

При подаче в штуцера преобразователя избыточных давлений $p_1 = p_2 \neq 0$ обе мембраны прогнутся на одинаковую величину. Соот-

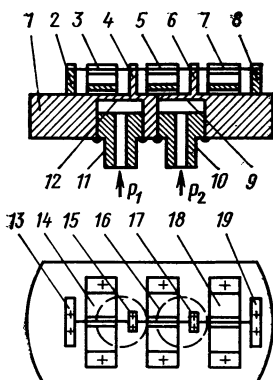


Рис. 53. Конструкция струнного комбинированного преобразователя давлений и разности давлений в частоту

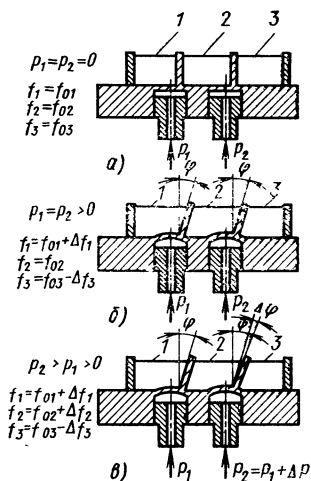


Рис. 54. Положения подвижных стоек комбинированного преобразователя давлений при различных соотношениях давлений, поданных в штуцера

ответственно стойки, жестко закрепленные на мембранах и смещенные относительно их центров на одинаковую величину, повернутся на один и тот же угол φ (рис. 54,б). Поскольку геометрические размеры мембран и стоек одинаковы, то в этом случае величина упругой деформации струны 2 не изменится. Величина начальной упругой деформации струны 1 увеличится на величину δ_1 , и ее частота изменится и станет равна

$$f_1 = f_{01} + \Delta f_1.$$

Величина начальной упругой деформации струны 3 уменьшится на δ_1 , и ее частота также изменится и станет равной

$$f_3 = f_{03} - \Delta f_3.$$

Таким образом, в ситуации, соответствующей рис. 54,б, с выхода преобразователя одновременно получается информация о давлении p_1 в виде частоты электрического сигнала f_1 , о давлении p_2 в виде частоты электрического сигнала f_3 и о разности давлений $\Delta p = p_1 - p_2 = 0$ в виде частоты электрического сигнала f_{02} .

Рассмотрим случай, соответствующий ситуации, когда измеряемые избыточные давления p_1 и p_2 не равны между собой, например $p_2 > p_1$ и $p_2 = p_1 + \Delta p$ (рис. 54,в). Под действием измеряемых давлений мембраны прогнутся, что соответственно вызовет угловое смещение стоек, закрепленных на мембранах. Вследствие

геометрической симметрии обеих половин преобразователя при $p_2 > p_1$ правая стойка повернется на угол $\varphi + \Delta\varphi$, а левая — на угол φ . Линейные перемещения концов стоек, закрепленных на мембранах, также будут неодинаковыми, что при $p_2 > p_1$ приведет к увеличению упругой деформации струны 2 и возрастанию ее частоты колебаний до значения

$$f_2 = f_{02} + \Delta f_2 \approx f_{02} + K_2(p_2 - p_1) = f_{02} + K_2\Delta p,$$

где Δf_2 — приращение частоты колебаний струны f_2 , функционально связанное с измеряемой разностью давлений; K_2 — чувствительность преобразователя по перепаду давлений.

Таким образом, приращение частоты колебаний струны 2 будет являться информацией о разности измеряемых давлений.

Соответственно частоты струн f_{01} и f_{02} (рис. 54,в) также изменяются.

Как и в предыдущей ситуации, с преобразователя одновременно получается информация в виде трех независимых частотно-модулированных выходных сигналов о каждом из измеряемых давлений и об их разности. С целью повышения стабильности метрологических характеристик во времени все основные узлы преобразователя — корпус, мембраны, стойки выполнены как одно целое из единой заготовки.

В предложенной конструкции (рис. 53) использованы однострунные преобразователи упругих деформаций мембран в частотно-модулированный выходной сигнал.

С целью линеаризации выходной характеристики преобразователя по измеряемым давлениям p_1 и p_2 в его конструкцию введены дифференциальные схемы струнных преобразователей, позволяющие получить практически линейную функцию преобразования [а. с. № 699376 (СССР)].

Конструкция такого преобразователя представлена на рис. 55. В корпусе 1 выполнены две цилиндрические расточки, торцовые части которых образуют тонкие круглые мембраны 4 и 7. Измеряемые давления подаются в полость расточек через штуцера 5 и 6.

Стойки 11 и 15 жестко закреплены на мембранах перпендикулярно их поверхности и имеют Г-образную форму. На торцовой части корпуса установлено четыре неподвижных кронштейна 8, 14, 16 и 21, по два с каждой стороны от оси, соединяющей центры мембран. Между Г-образной стойкой 11 и парой неподвижных кронштейнов 8 и 14 натянуты струны 10 и 13 дифференциального струнного преобразователя перемещений конца Г-образной стойки 11 в частоту. Для возбуждения незатухающих автоколебаний струн последние помещены в воздушный зазор сильных постоянных магнитов 9 и 12. Аналогично между Г-образной стойкой 15 и парой неподвижных кронштейнов 16 и 21 натянуты струны 18 и 20 второго дифференциального струнного преобразователя перемещений конца стойки 15. Струны помещены в 17 и 19. Между стойками 11 и 15 натянута струна 2, помещенная в поле постоянного магнита 3.

Информация об измеряемом давлении p_1 снимается с первого дифференциального преобразователя (струны 10 и 13), а о давлении p_2 — с дифференциального преобразователя, образованного струнами 18 и 20. Информация о разности давлений $p = p_1 - p_2$ определяется приращением частоты поперечных колебаний струны 2.

Лабораторные исследования макетных образцов преобразователей показали, что их погрешность не превышает 0,25 %.

Все рассмотренные выше преобразователи давлений и разности давлений в частоту имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с выпускаемыми отечественной промышленностью. К числу таких преимуществ следует отнести:

- 1) высокие метрологические характеристики;
- 2) частотно-модулированный выходной сигнал;
- 3) возможность одновременного измерения значений как входных давлений, так и их разности;
- 4) возможность получения практически линейной функции преобразования по измеряемым давлениям;
- 5) высокая ударо- и вибропрочность;
- 6) малые габаритные размеры и вес;
- 7) возможность измерения давлений и разности давлений как жидких, так и газообразных сред;

8) струнный резонатор не контактирует со средой, давление или разность давлений которой измеряется.

Однако все рассмотренные выше преобразователи имеют один существенный недостаток, заключающийся в том, что функция преобразования по измеряемому перепаду давлений нелинейна.

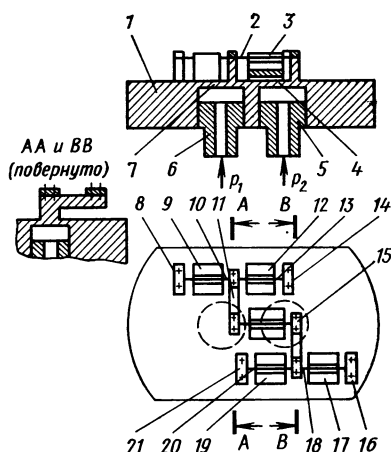


Рис. 55. Конструкция комбинированного преобразователя давлений с линейными функциями преобразования по измеряемым давлениям

Дифференциальный преобразователь разности давлений

При реализации цифровых измерительных приборов, предназначенных для визуального определения величины перепада давлений, желательно иметь линейную функцию преобразования измерительного преобразователя. В этом случае существенно упрощается электронная схема цифрового устройства, поскольку отпадает необходимость введения кусочно-линейной аппроксимации функции преобразования, уменьшаются температурные погрешности нуля, обусловленные разностью коэффициентов линейного расширения материалов струны и корпуса измерительного преобразователя. При использовании преобразователя в АСУТП существенно упрощается алгоритм обработки его выходного сигнала.

С целью реализации этих преимуществ был разработан унифицированный преобразователь разности давлений в частоту с линейной функцией преобразования, конструкция которого приведена на рис. 56 [а. с. № 591733 (СССР)].

Цилиндрический корпус 3 имеет две плоские мембраны 4 и 10, центры которых соединены жестким стержнем 5. Торцовые части корпуса соединены между собой сегментообразными переключателями 20.

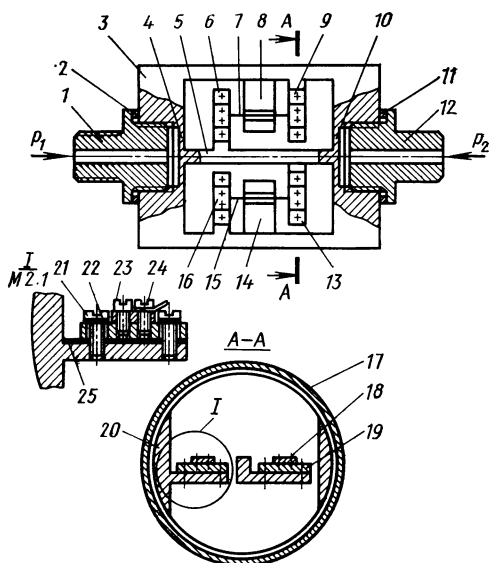


Рис. 56. Конструкция дифференциального струнного преобразователя разности давлений

На сегментообразных перемычках 20 и жестком стержне 5 расположены консольные кронштейны соответственно 9, 16 и 6, 13. Струны 7 и 15 натянуты между концами кронштейнов 6, 9 и 13, 16. Струны расположены в диаметральной плоскости корпуса 3, и концы струн жестко соединяются с консольными кронштейнами посредством накладок 18, поджимаемых с помощью винтов 23 и 24 к планкам 19. Планки 19 зафиксированы на плоскостях консольных кронштейнов посредством винтов 21. С целью электрической изоляции концов струн от корпуса преобразователя под шайбы винтов 21 и под планки 18 подложены тонкие слюдяные прокладки 22 и 25 соответственно круглой и прямоугольной формы. Струны помещены в поле постоянных магнитов 8 и 14, закрепленных на сегментообразных перемычках 20 с помощью винтов. Преобразователь закрывается защитным кожухом 17.

Через штуцера 1 и 12 во внутренние полости торцовых расточек корпуса подаются давления p_1 и p_2 , разность между которыми требуется измерить.

Преобразователь работает следующим образом. При отсутствии избыточных давлений (разрежений) во внутренних полостях мембран преобразователя ($p_1 = p_2 = 0$) частоты колебаний струн будут равны между собой, т. е. $f_{01} = f_{02} = f_0$. На выходе электронного устройства разностная частота $\Delta f = f_{01} - f_{02}$ также будет равна нулю.

В рассмотренной системе разность между выходными частотами двух струнных автогенераторов будет равна нулю и при отличии входных давлений от нуля при условии, что $p_1 = p_2$ и геометрические размеры обеих мембран и их упругие свойства идентичны.

Если равенство поданных в штуцера давлений нарушается, то усилия сжатия, действующие на стержень 5 со стороны мембран, не равны, и шток сместится в сторону той мембраны, у которой

во внутренней полости будет меньшее значение поданного давления. Например, при $p_1 > p_2$ стержень, соединяющий центры мембран, сместится в правую сторону. При этом частота колебаний струны 15 возрастет, а струны 7 — уменьшится. Методика расчета параметров преобразователя приведена в п. 3 гл. II.

Конструкция преобразователя отличается от ранее рассмотренных меньшей температурой погрешностью нуля, значительно меньшей погрешностью от нелинейности, большей вибро- и ударопрочностью.

Для предотвращения возможности появления пластических деформаций в мембранах в случае подачи чрезмерно больших давлений в одну из полостей преобразователя в конструкции необходимо предусмотреть ограничители хода мембран. В качестве таких ограничителей могут быть использованы торцовые плоскости штуцеров 1 и 12 (см. рис. 56), расположенные на определенном расстоянии от плоскостей мембран. Величину зазора между плоскостями штуцера и мембраны регулируют подбором толщины прокладок 2 и 11.

Исследование метрологических характеристик опытных образцов преобразователей проводили с использованием образцовых грузопоршневых манометров типа МП-2,5 и МП-6 классов точности 0,02. Исследовали преобразователи с пределами измерения по перепаду давлений $1,6 \cdot 10^5$, $2,5 \cdot 10^5$, $4 \cdot 10^5$ Па. Приведенная относительная погрешность измерения составляла 0,2—0,3%. При изменении уровня статического давления от 0 до $2,5 \cdot 10^5$ Па изменений чувствительности преобразователей не наблюдалось.

4. СТРУННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ УСИЛИЙ И МАСС ВЕЩЕСТВА

Преобразователи малых усилий

Рассматриваемая конструкция преобразователя разработана в соответствии с конструктивной схемой, приведенной в п. 3 гл. II.

Устройство содержит упругий чувствительный элемент в виде двух плоских мембран 2 и 11 (рис. 57), жестко закрепленных по краям в цилиндрическом корпусе 9 посредством колец 6 и 10, поджимаемых винтами к кольцевым выступам корпуса. Центральные части мембран соединены жестким стержнем 14. К центральной части мембраны 2 жесткий стержень прижимается своей торцовой цилиндрической частью посредством круглой накладки 4 и равномерно расположенных по окружности винтов. Центральная часть мембраны 11 зажата между торцовыми плоскостями жесткого центрального стержня 14 и силовоспринимающего элемента 12 посредством равномерно расположенных по окружности винтов.

В корпусе устройства выполнен вертикальный прямоугольный паз, формирующий в нижней части корпуса плоскость, на которой закреплены магнитные системы 18 и 19 и две вертикальные стойки 8 и 17. Консольные кронштейны 5 и 15 жестко закреплены на стержне 14 и могут быть выполнены как одно целое со стержнем. Верхние горизонтальные поверхности консольных кронштейнов 5 и 15 и вертикальных стоек 8 и 17 расположены в одной плоскости. На верхних горизонтальных плоскостях каждого консольного кронштейна и стойки посредством накладок и винтов закреплены концы двух параллельно расположенных струн 7 и 16, помещенных в узкий воздушный зазор магнитных систем. Перед окончательным

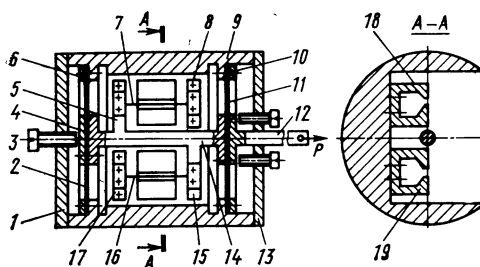


Рис. 57. Дифференциальный струнный преобразователь малых усилий

закреплением накладок струнам сообщается определенное начальное натяжение.

С торцов корпус преобразователя закрывается крышками 1 и 13, в которые ввернуты упоры 3, ограничивающие перемещение мембран и предохраняющие струны от повреждения при приложении к силовоспринимающему элементу усилий, превышающих верхний предел измерения преобразователя.

При отсутствии измеряемого усилия частоты поперечных автоколебаний струн имеют вполне определенные значения f_{01} и f_{02} , определяемые силами их начального натяжения. При приложении измеряемого усилия к силовоспринимающему элементу центральные части мембран вместе с соединяющим их жестким стержнем сместятся в направлении действия силы. Вследствие этого смещения расстояние между кронштейном 15 и стойкой 17 увеличится, а между кронштейном 5 и стойкой 8 — уменьшится. Соответственно величина упругой деформации и частота поперечных колебаний струны 16 увеличится, а струны 7 — уменьшится. Приращение разности частот струн будет пропорционально измеряемому усилию P . Устройство может работать также в режиме измерения отношения частот струн.

Конструкция преобразователя обладает следующими достоинствами.

1. За счет изменения толщины мембран на базе одной унифицированной конструкции можно создать гамму преобразователей, охватывающую весьма широкий диапазон измерений (от 0,1 до 1000 Н).

2. Жесткость преобразователя в направлении, перпендикулярном к его продольной оси, на несколько порядков больше, чем в рабочем направлении, что делает его пригодным для измерения проекции произвольно направленной силы на продольную ось преобразователя.

3. Чувствительность устройства и его начальные показания могут изменяться в широких пределах путем изменения начальных частот колебаний струн за счет перемещения вертикальных стоек вдоль продольной оси струн в пределах зазора между крепежными винтами и стенками отверстий под эти винты.

Рассмотренная конструкция устройства может применяться для измерения усилий как растяжения, так и сжатия.

Экспериментальные исследования макетных образцов преобразователей показали, что они вполне работоспособны в диапазоне усилий до 100 Н, их основная погрешность не превышает 0,3%.

Преобразователи могут найти широкое применение в высокоточных дозирующих устройствах, разрывных испытательных машинах, на стендах для испытания тяговых характеристик двигателей различного назначения во многих отраслях народного хозяйства.

Преобразователи средних и больших усилий

Под средними и большими усилиями понимаются усилия, лежащие в диапазоне $1 \cdot 10^2$ — $1 \cdot 10^4$ Н.

Конструкция струнного преобразователя усилий в частоту приведена на рис. 58 [а. с. № 559135 (СССР)]. Упругий чувствительный элемент 6 имеет цилиндрическую форму и снабжен двумя проушинами 5 для подсоединения элементов, передающих измеряемое усилие. Симметрично относительно продольной оси цилиндра выфрезерован сквозной Н-образный паз. К внутренним выступам 7 и 10 этого паза прикреплены концы струны 2 посредством накладок 1 и 8. Накладки фиксируются винтами 4 и штифтами 3. Перед закреплением накладок в струне создается начальное натяжение, соответствующее требуемой начальной частоте устройства. Струна помещена в поле постоянного магнита 9. Плоскости выступов 7 и 10, на которых зафиксированы концы струн, лежат в диаметральной плоскости цилиндра. Для защиты преобразователя от механических повреждений и попадания пыли он снабжен кожухом 11, прикрепленным к торцевой части чувствительного элемента винтами. Один конец струны электрически изолирован от упругого чувствительного элемента посредством слюдяных прокладок или электроизоляционного покрытия, нанесенного на соприкасающиеся плоскости выступа 7 и накладки 8 соответственно. Размеры длины струны l_0 и высоты a Н-образного паза выбирают таким образом, чтобы отношение a к l_0 было не менее 1,5. С выхода усилителя 12 сигнал подается на регистратор 13, фиксирующий значение частоты струнного автогенератора.

С целью расширения области применения преобразователя в ряде случаев необходимо уменьшить его пределы измерения с сохранением прежней чувствительности. Для этого поперечное сечение деформирующихся частей упругого элемента может быть выполнено Т-образной формы (см. изображение профиля штриховой линией на сечениях А—А и Б—Б на рис. 58). Такое решение дает возможность уменьшить площадь поперечного сечения деформирующихся частей, сохранив достаточно большую их жесткость на изгиб.

Экспериментальные исследования опытных образцов струнных преобразователей усилий проводили на базе одного из промышленных предприятий. Диапазоны измерения испытываемых преобразователей были равны 0—1200 и 0—5000 Н.

Начальная частота поперечных колебаний струны из сплава ПлСр-20 составляла 5000 Гц. Приращение частоты колебаний струны при нагружении преобразователей силой, соответствующей верхнему пределу измерения, составляло примерно 1000 Гц. Материал упругого элемента — сталь марки 30ХГСА. Габаритные размеры: диаметр 30 мм, длина 120 мм. Внешний вид преобразователя приведен на рис. 59.

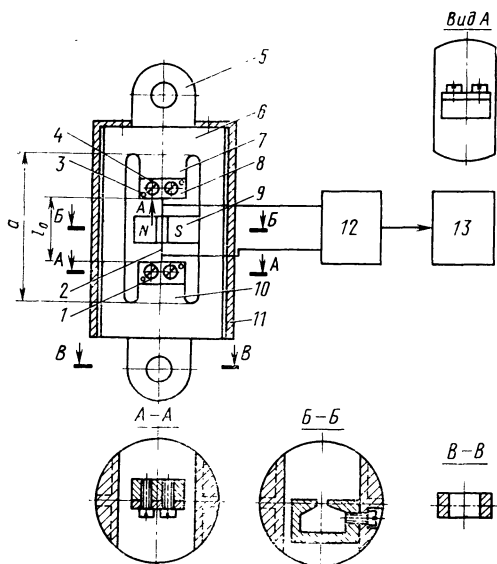


Рис. 58. Струнный преобразователь усилий

Нагружение преобразователей растягивающими усилиями в процессе испытаний проводили ступенчато по 10 точкам с помощью аттестованных грузов. Точки нагружения располагались равномерно внутри диапазона измерения. После навески каждого груза фиксировали выходную частоту преобразователя с помощью стандартного цифрового электронно-счетного частотомера, работающего в режиме «частота $\times 10$ ». По достижении верхнего предела измерения проводилось уменьшение нагрузки путем снятия грузов. При этом также фиксировалась выходная частота. После пятикратного повторения циклов нагружение — разгрузка результаты измерений обрабатывали методами математической статистики, позволившими оценить как приведенную относительную погрешность измерения, так и ее состав-

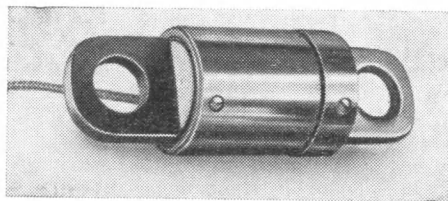


Рис. 59. Внешний вид струнного преобразователя усилий

ляющие, характеризующие величину случайной погрешности и погрешности за счет гистерезиса.

Экспериментальные исследования опытных образцов преобразователей показали, что их приведенная относительная погрешность находится в пределах 0,2—0,25 %.

Разработанные преобразователи могут найти широкое применение в автоматических дозирующих устройствах, при проведении стендовых и натурных испытаний силовых установок, в различного рода машинах для проведения прочностных испытаний изделий.

Следует подчеркнуть, что преобразователь является унифицированным. Для изменения его предела измерения нет необходимости изменять его конструкцию, габаритные размеры и параметры струнного автогенератора. Достаточно лишь изменить толщину стенок сегментообразных частей упругого элемента. Одна и та же конструкция может охватывать диапазоны измерения от 0—1000 Н до 0—10 000 Н.

Унифицированное информационно-измерительное устройство для измерения усилий состоит из измерительного преобразователя, электронного блока возбуждения колебаний струн и стандартного электронно-счетного частотомера.

Преобразователи средних и больших усилий с линейной функцией преобразования

Конструкция струнного дифференциального унифицированного преобразователя приведена на рис. 60 [а. с. № 559136 (СССР)]. Упругий чувствительный элемент 10 цилиндрической формы имеет сквозной прямоугольный паз, внутри которого расположен выступ 6, и два кронштейна 9 и 13 Г-образной формы. Проушины 14 служат для подсоединения элементов, передающих измеряемое усилие. С целью повышения стабильности метрологических характеристик датчика выступ, Г-образные кронштейны и проушины выполнены как одно целое с цилиндрическим упругим элементом.

Вдоль продольной оси симметрии преобразователя натянута две металлические струны 8 и 12. После сообщения струнам определенного натяжения их концы фиксируются накладками 1, 3 и 4.

Струны помещены в поле постоянных магнитов 7 и 11, закрепленных посредством винтов на Г-образном кронштейне большей длины, а концы каждой из струн подсоединены к электронным усилителям с положительной обратной связью. С целью электрической изоляции концов струн от массы упругого чувствительного элемента плоскости выступа 6 и Г-образного кронштейна большей длины выполнены ниже продольной оси симметрии преобразователя и на них установлены накладки 2 и 5, под которые подложены слюдяные прокладки. Под головки винтов, крепящих накладки к поверхности выступа и кронштейна, установлены слюдяные шайбы. Верхняя плоскость Г-образного кронштейна меньшей длины расположена в диаметральной плоскости упругого чувствительного элемента, и концы струн, закрепленные накладкой 3, электрически связаны с корпусом преобразователя.

При отсутствии измеряемого усилия собственные частоты поперечных колебаний струн имеют вполне определенные значения и, например, могут быть равны между собой. При приложении какого-либо измеряемого усилия P к проушинам датчика появится упругая деформация сегментообразных перемычек, и расстояние между

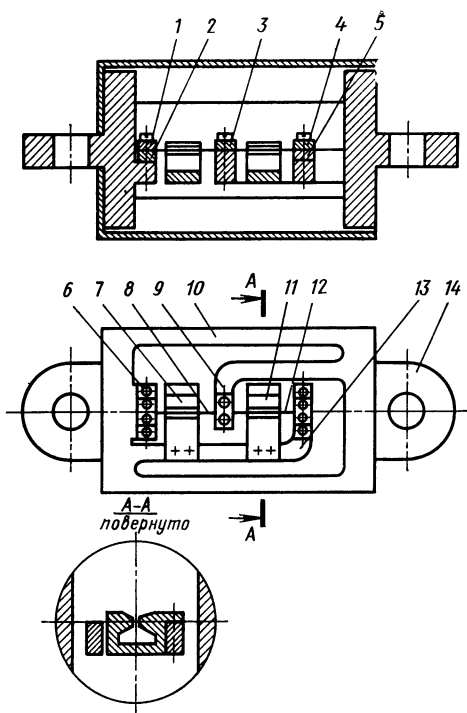


Рис. 60. Конструкция дифференциального преобразователя усилий

торцовыми стенками внутреннего прямоугольного паза увеличится. При этом увеличится расстояние между выступом и коротким концом Г-образного кронштейна меньшей длины и уменьшится расстояние между короткими концами Г-образных кронштейнов. По этой причине величина упругой деформации первой струны увеличится, а второй — уменьшится. Соответственно частота первой струны возрастет, а второй — уменьшится. Если при этом из частоты первой струны вычесть частоту второй струны, то очевидно, что полученная разность частот будет пропорциональна измеряемому усилию P . При соответствующем выборе начальных частот струн можно реализовать функцию преобразования, близкую к линейной в режиме измерения отношения частот колебаний струн. При этом погрешность от нелинейности может быть снижена до значений 0,1—0,15% в пределах всего рабочего диапазона измерений.

Конструкция разработанного преобразователя усилий является унифицированной. Преобразователи, имеющие различные пределы измерения, будут отличаться друг от друга только площадью сегмента (высотой сегмента).

В преобразователях, предназначенных для измерения небольших усилий, следует уменьшать площадь сечения сегментов до значения, определенного расчетным путем. При этом жесткость упругих элементов на изгиб сохраняется в допустимых пределах за счет придания их площади поперечного сечения Т-образной формы.

Рассмотренная конструкция преобразователя может применяться для измерения усилий как растяжения, так и сжатия. Очевидно, что в последнем случае конструктивное оформление мест подсоединения силовых тяг объекта измерения к упругому чувствительному элементу следует изменить.

Опытные образцы унифицированных струнных преобразователей усилий в частоту имели следующие параметры: предел измерения 5000 Н; габаритные размеры $\varnothing 50 \times 150$ мм; длина каждой струны 15 мм; длина деформирующейся части упругого элемента 60 мм. Внешний вид преобразователя в комплекте с электронным усилителем приведен на рис. 61.

Исследование метрологических характеристик опытных образцов преобразователей проводили путем их ступенчатого нагружения и разгружения посредством навески аттестованных грузов. С целью исключения вредного влияния изгибающих моментов штанги подвески преобразователя и грузов имели шарнирные развязки. Статистическая обработка результатов исследований показала, что относительная приведенная погрешность преобразователей находится в пределах 0,2—0,3%. Можно полагать, что в случае оптимального подбора материала упругого элемента и режимов его термомеханической обработки погрешность преобразователя может быть значительно уменьшена.

В заключение следует отметить, что рассмотренные в данном параграфе преобразователи усилий могут быть использованы и для измерения массы различных объектов. Для этого прямая, совпадающая с продольной осью преобразователя, должна проходить через центр массы, подвешенной к одному из его силовоспринимающих элементов, и совпадать с вертикалью в данной точке земной поверхности.

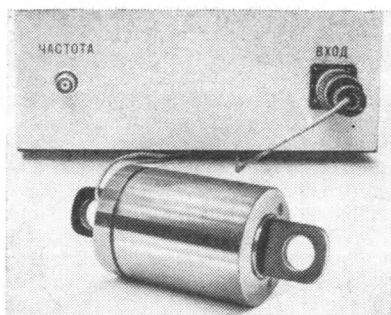


Рис. 61. Внешний вид дифференциального преобразователя усилий в комплекте с электронным усилителем

5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Преобразователи линейных перемещений

При разработке конструкции струнного дифференциального преобразователя линейных перемещений ставилась задача получения стабильности метрологических характеристик в течение длительного времени при минимальных его габаритных размерах и массе. Габаритные размеры определяют конструктивные размеры и компо-

новку измерительных устройств, в которых применяются преобразователи линейных перемещений, что, в свою очередь, влияет на точность измерений.

Конструкция малогабаритного дифференциального преобразователя линейных перемещений в частоту приведена на рис. 62.

В цилиндрическом корпусе 10 установлено основание 9 в виде цилиндра, вдоль продольной оси которого выфрезерованы два паза. Каждый паз на большей части длины основания имеет ширину, равную примерно $\frac{3}{4}$ — $\frac{4}{5}$ диаметра основания, и на меньшей части длины основания — ширину, равную примерно $\frac{1}{4}$ его диаметра. Вследствие этого на правом конце основания 9 формируется жесткое цилиндрическое утолщение, которое практически не деформируется при затяжке винтов 15, притягивающих основание к корпусу по торцевой поверхности. На правом конце основания выфрезеровано углубление, в котором с помощью пластины 8 и винтов 7 и 24 жестко закреплен конец плоской пружины 5, выполняющей функции упругого подвеса. На свободном конце пружины 5 посредством стягивающих винтов закреплено коромысло, состоящее из двух стоек 4 и 20. За одно целое со стойкой 20 выполнен выступ 23, в котором жестко зафиксирован измерительный наконечник 22. Концы струн 6, 18 струнного дифференциального преобразователя зафиксированы на плоскостях коромысла посредством накладок 3 и 19. Вторая, неподвижная пара концов струн закреплена на плоскостях Т-образных узлов, состоящих из кронштейнов 12, 16 и накладок 11, 17. Накладки прижимаются к плоскостям кронштейнов посредством винтов. К плоскости основания 9 Т-образные узлы крепятся винтами 25. Т-образные узлы крепления концов струн изолированы от основания с помощью прокладок и слюдяных шайб. Струны помещены в воздушные зазоры магнитных систем,

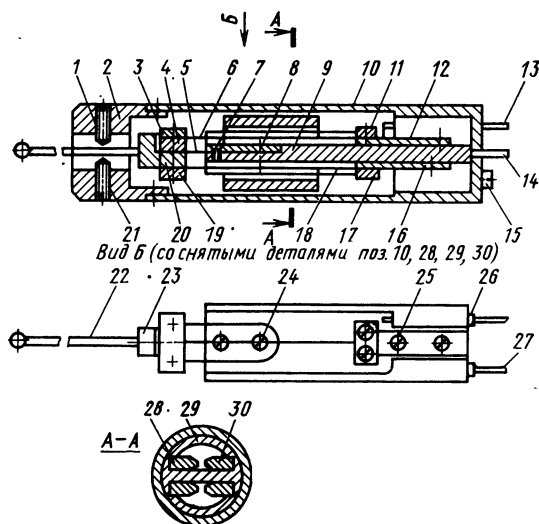


Рис. 62. Конструкция малогабаритного дифференциального преобразователя линейных перемещений

состоящих из магнитопроводов 20 и магнитных вставок 28, 36. Электрические выводы от Т-образных узлов подпаивают к штырям 13 и 27, установленным в утолщенной цилиндрической части основания и изолированным от него втулками 26. Посредством двух винтов 15 основание фиксируется в корпусе. Электрический вывод 14 массы прибора запрессован в центре торцевой части корпуса.

Для изменения пределов измерения предусмотрена возможность регулирования длины свободной части консольно-закрепленной плоской пружины подвеса коромысла. Регулирование достигается за счет перемещения плоской пружины подвеса 5 в направлении продольной оси основания. Пределы регулирования определяются размерами овальных отверстий на конце плоской пружины, сквозь которые проходят фиксирующие винты 24.

Для обеспечения точной настройки начальных частот колебаний струн на заданные значения Т-образные узлы имеют возможность перемещаться в направлении продольных осей струн. Регулирование достигается за счет ослабления винтов 25 и перемещения кронштейнов 12 или 16. Пределы регулирования определяются размерами овальных отверстий в хвостовиках Т-образных кронштейнов.

Торцевая часть корпуса закрыта фланцем 2, в котором установлены регулируемые ограничители хода измерительного наконечника 1 и 21.

Устройство для измерения перемещений работает следующим образом.

При положении измерительного наконечника, принятого за исходное, частоты струнных автогенераторов имеют вполне определенные начальные значения. Разность или отношение частот двух струнных автогенераторов также имеет вполне определенное значение.

При перемещении измерительного наконечника происходит смещение плеч коромысла, что приводит к изменению упругих деформаций струн. Приращения упругих деформаций струн имеют разные знаки. При этом частота одного струнного автогенератора возрастает, а второго — уменьшается. Разность или отношение частот двух струнных генераторов изменится по сравнению с исходным значением, и это изменение при оптимально выбранных параметрах механической части устройства будет линейно связано с измеряемым перемещением.

Для линеаризации функции преобразования в случае измерения отношения частот струн в преобразователь необходимо вводить асимметрию в соответствии с условиями, изложенными в п. 3 гл. II. Любое из этих трех условий можно реализовать в пределах рассмотренной конструкции, внося изменения в геометрические размеры одного из конструктивных элементов — либо струны, либо коромысла.

Следует отметить, что с конструктивной, технологической и эксплуатационной точек зрения наиболее рациональным является вариант конструкции, изображенный на рис. 62.

По сравнению с предшествующими разработками предлагаемая конструкция обладает следующими достоинствами.

1. Значительно повышается точность измерения. Это достигается тем, что в конструкцию введено основание с жестким цилиндрическим утолщением на одном из его концов. При этом неподвижные концы струн дифференциального преобразователя закреплены в жесткой части основания. Такое конструктивное решение не вы-

зывает распространения упругих деформаций корпуса на места заделки неподвижных концов струн, а следовательно, и на изменение частоты их автоколебаний.

По указанной выше причине и температурные деформации корпуса преобразователя для измерения линейных перемещений не вызывают ощутимой погрешности нуля и чувствительности.

2. Существенно уменьшаются габаритные размеры преобразователя и, что особенно важно, в поперечном направлении. Это достигается тем, что в конструкции упругий подвес выполнен в виде плоской консольно-закрепленной на основании пружины, на свободном конце которой зафиксировано коромысло. Продольная ось плоской пружины подвеса совпадает с продольной осью корпуса и основания устройства. Аналогично узлы крепления неподвижных концов струн выполнены Т-образной формы, что позволило сократить диаметры основания и корпуса.

Такие конструктивные приемы позволили существенно сократить диаметр механической части датчика. Например, минимально возможный диаметр ранее известной конструкции [20] 28—32 мм, а рассмотренной конструкции — 10—12 мм.

3. Напряжения в упругом подвесе, выполненном в виде плоской консольной пружины, определяются только удвоенной силой натяжения струн. Поскольку площадь поперечного сечения пружины подвеса на 2—3 порядка больше площади поперечного сечения струн, то эти напряжения весьма незначительны и их релаксация не вызывает изменения начальных частот струн.

4. Имеется возможность регулирования пределов измерения без каких-либо изменений геометрических параметров конструкции механической части устройства. Это достигается за счет изменения длины консольной части плоского упругого подвеса. При изменении длины консольной части от 0,2 до 1,5 мм пределы измерения устройства изменяются от 0,1 до 1 мм. Это объясняется тем, что с ростом длины консольной части кроме поворота коромысла происходит и смещение коромысла в вертикальной плоскости.

5. Имеется возможность регулирования чувствительности устройства путем изменения положения Т-образных узлов крепления неподвижных концов струн. При этом изменяются начальные частоты струн и, следовательно, чувствительность преобразователя.

6. Конструкция преобразователя отличается высокой технологичностью. Это объясняется тем, что основание изготовляют отдельно от корпуса, и все элементы конструкции механической части симметричны. Кроме того, в конструкцию введены элементы, позволяющие легко и быстро проводить регулирование требуемых пределов измерения и чувствительности устройства.

7. Симметричная конструкция преобразователя обеспечивает снижение дрейфа нуля преобразователя при изменении температуры окружающей среды. Полностью симметричная конструкция преобразователя повышает число унифицированных деталей и узлов, что имеет большое значение для обеспечения рациональной организации ремонта измерительного устройства в условиях эксплуатации.

Экспериментальные исследования опытных образцов преобразователей с верхним пределом измерений 300 мкм показали, что основная погрешность не превышает 0,2—0,3%.

Преобразователь может применяться не только для измерения перемещений, но также для измерения малых усилий. В этом

случае диапазон измерения можно регулировать изменением толщины плоской пружины упругого подвеса.

В предлагаемой конструкции преобразователя диапазон измерения перемещений может быть еще более расширен применением специального преобразователя механических перемещений. Это достигается применением дополнительной полый цилиндрической насадки 3 (рис. 63, а), соединяемой с торцевой части струнного преобразователя перемещений. Внутри насадки расположен стержень 4, прикрепленный к центрам двух плоских круглых мембран 2 и 5. К одному концу стержня подсоединен измерительный шуп 1, а к другому — плоскопараллельная пластина 7, закрепленная таким образом, что между ее плоскостью, находящейся в контакте с измерительным наконечником 6 преобразователя 8, и продольной осью стержня имеется фиксированный угол φ , величина которого определяется требуемыми пределами измерения.

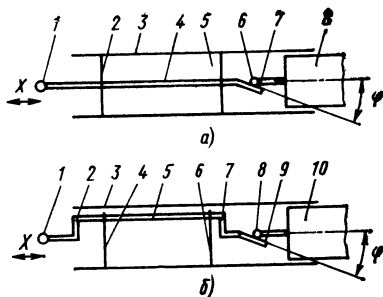


Рис. 63. Упругий трансформатор механических перемещений

В этом случае измеряемое перемещение X совпадает с направлением продольной оси механической части устройства для измерения перемещений, что дает определенные преимущества при компоновке специализированных измерительных установок.

С целью еще большего расширения пределов измерения входной величины X вместо плоских мембран, имеющих ограничение по величине прогиба их центра, в цилиндрической насадке 3 трансформатора перемещений (рис. 63, б) в качестве упругого подвеса стержня 5 можно использовать две консольно-закрепленные плоские пружины 4, 6, к концам которых прикреплен стержень 5 и два кронштейна Z-образной формы 2 и 7. К свободному концу одного из кронштейнов подсоединен измерительный шуп 1, а к свободному концу другого — плоскопараллельная пластина 9, находящаяся в контакте с измерительным наконечником 8 струнного преобразователя перемещений 10.

Из приведенных конструктивных схем следует, что с уменьшением угла φ установки плоскопараллельной пластины пределы измерения линейных перемещений увеличиваются.

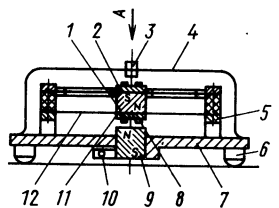
Преобразователь может найти широкое применение в машиностроительной, приборостроительной и других отраслях промышленности, где линейно-угловые измерения составляют значительную часть всех производственных измерений. Преобразователь может быть использован также в системах активного контроля и в АСУТП, реализованных с использованием ЭЦВМ.

Преобразователи угловых перемещений

Конструкция преобразователя, предназначенного для измерения углов наклона в двух взаимно перпендикулярных направлениях, приведена на рис. 64 [а. с. № 300759 (СССР)]. На жестком кера-

мическом кольце 14, имеющем в нижней части четыре прямоугольных паза, в двух взаимно перпендикулярных диаметральных плоскостях натянуты четыре упругие вольфрамовые нити 16, 17 (верхняя плоскость) и 8, 12 (нижняя плоскость). Фиксация концов нитей осуществляется с помощью накладок 5 и 15, стягиваемых винтами. Инерционная масса 1 преобразователя, имеющая форму цилиндра, прикреплена к нитям таким образом, что перекрестия нитей лежат на ее продольной оси симметрии. Инерционная масса фиксируется неподвижно относительно нитей посредством накладок 2 и 11, поджимаемых винтами. Накладки выполнены из электротехнической стали, а инерционная масса 1 — из магнитотвердого материала типа ЮНДК. Каждая нить делится инерционной массой на две равные половины — струны. Каждая из струн, расположенных в верхней плоскости керамического кольца, помещена в зазор магнитной системы, состоящей из четырех фигурных пластин 13, выполненных из магнитотвердого материала. Пластины жестко закреплены на керамическом кольце с помощью винтов. При подключении концов любой из струн к электронному усилителю с положительной обратной связью получается струнный автогенератор, частота колебаний которого практически равна собственной поперечной частоте колебаний струны. В качестве токоподводов используются струны-нити 8 и 12, не помещенные в поле постоянных магнитов и служащие для предотвращения крутильных колебаний инерционной массы 1, выполненной в виде цилиндрического магнита.

Керамическое кольцо 14 укреплено на основании 7, в котором запрессованы три опорные точки 6 преобразователя. В центре основания 7 с помощью разрезной цанги 10 закреплён постоянный цилиндрический магнит 9. Цилиндрические магниты 1 и 9 установлены соосно, намагничены в направлении продольных осей цилиндров, и одноименные полюсы магнитов находятся в непосредственной близости друг от друга. В этом случае возникает отталкивающая сила, поддерживающая инерционную массу в каком-то определенном положении. Передвигая магнит 9 вдоль оси отверстия цанги, можно выставить инерционную массу в положение, при котором струны будут лежать в одной плоскости. При этом между инерционной массой и торцом магнита 9 будет воздушный зазор.



Вид А (со снятым кожухом поз 4)

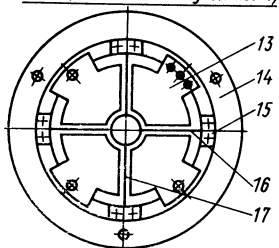


Рис. 64. Двухкомпонентный преобразователь угловых перемещений

Для демпфирования колебаний инерционной массы используется накладка 11, выполненная из электротехнической стали и взаимодействующая при колебаниях с полем магнита 9, торец которого имеет перекрещивающиеся пазы для создания неоднородности магнитного поля, взаимодействующего с вихревыми токами в накладке.

Преобразователь накрывается защитным стальным кожухом 4, выполняющим также роль магнитного экрана. Для предотвращения возможности обрыва струн при повороте прибора на 180° служит регулируемый ограничитель 3.

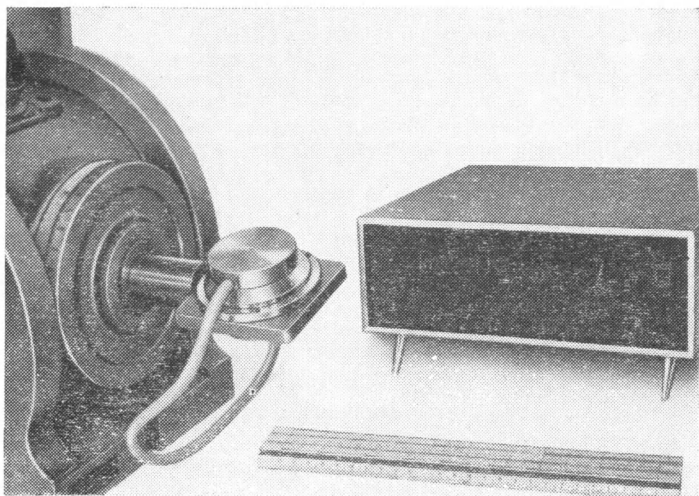


Рис. 65. Внешний вид преобразователя угловых перемещений

Макетный образец двухкомпонентного преобразователя углов наклона в частоту был собран и испытан. При коэффициенте умножения умножителей, равном 16, чувствительность преобразователя была равна 1,3 Гц/угл. с. Вариация показаний при пятикратном наклоне преобразователя с помощью синусной линейки и концевых мер первого класса второго разряда не превышала 0,3 угл. с. Стабильность показаний при нормальных условиях (без термостата) составляла 2 угл. с. за 1,5 ч.

Габаритные размеры преобразователя $\varnothing 60 \times 40$ мм, масса 0,3 кг. Внешний вид преобразователя и отсчетного цифрового устройства приведен на рис. 65.

Рассмотренный преобразователь пригоден для точного измерения небольших угловых отклонений объекта от плоскости горизонта, не превышающих нескольких градусов.

Для измерения угловых перемещений в диапазоне углов 360° может быть использован преобразователь малых усилий (см. рис. 28), в котором инерционной массой является жесткий стержень, соединяющий центры мембран, выполняющих функции упругого подвеса. Соответствующим подбором величины инерционной массы и жесткости мембран можно получить требуемую чувствительность преобразователя. Этот же преобразователь может быть использован и в качестве акселерометра.

6. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, ВЫПОЛНЕННЫЕ НА ИХ БАЗЕ

Преобразователи температуры жидких и газообразных сред

Конструкция разработанного струнного преобразователя температуры приведена на рис. 66 [а. с. № 445856 (СССР)]. На основании 1 укреплен вертикальная стойка 2 с малой площадью по-

перечного сечения, выполненная из материала с малой теплопроводностью. К верхнему торцу стойки с помощью винтов 4 прикрепляется тонкое кольцо 3. Струна 17 из токопроводящего материала натягивается по диаметру кольца, и ее концы прижимаются накладками 11 и 13 и винтами 12 и 14 к плоскости кольца. Материал струны и кольца выбирают исходя из требуемой чувствительности преобразователя и максимальной измеряемой температуры.

В том случае, если кольцо 3 выполнено из металла, для электрической изоляции концов струн кольцо и накладки 11 и 13 покрывают тонким электроизоляционным слоем, наносимым химическим, электрохимическим или механическим путем. Например, если кольцо выполнено из алюминиевого сплава, то его подвергают электроизоляционному анодированию. Концы струн подпаивают либо приваривают (в зависимости от уровня измеряемой температуры) к контактам колодок 10, укрепленных с помощью винтов на основании 1. Внешний вывод от лепестков колодок выполняют обычным экранированным проводом 15, 16. Перед выводом из кожуха 7 провода фиксируют скобой 8 таким образом, чтобы усилие, приложенное к выводным концам, не могло привести к отрыву проводов в местах их подсоединения к лепесткам колодок.

Для реализации магнитоэлектрического способа возбуждения автоколебаний струну помещают в зазор магнитной системы, состоящей из магнитопровода 9 и магнитов 5 и 6.

В случае, если запыленность газообразной среды, температура которой измеряется, незначительна, преобразователь может быть использован со снятым кожухом 7, что существенно снижает его тепловую инерционность. При значительной запыленности газообразной среды применение кожуха обязательно. Для измерения тем-

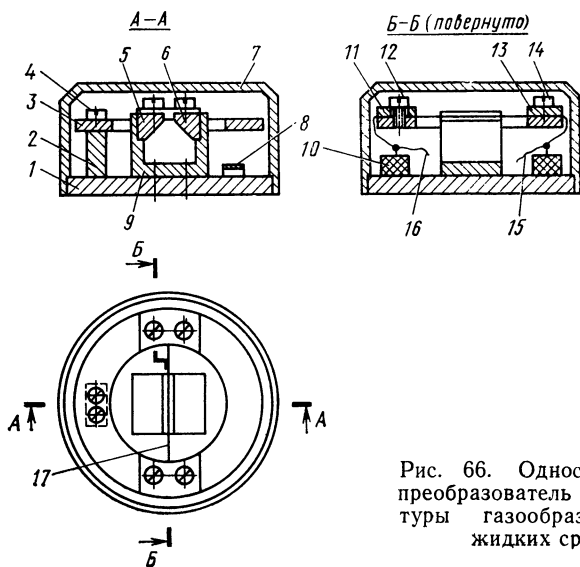


Рис. 66. Однострунный преобразователь температуры газообразных и жидких сред

пературы жидких сред соединение кожуха с основанием и место вывода проводов из кожуха герметизируют.

Принятое конструктивное решение позволяет существенно снизить инерционность и повысить точность измерений за счет следующих факторов.

1. Кольцо имеет малую массу и соединено с основанием посредством стойки с малой площадью поперечного сечения, выполненной из материала с малой теплопроводностью. Поэтому отвод тепла от кольца к основанию будет весьма незначительным, и можно считать, что инерционность преобразователя определяется тепловой инерцией кольца.

При необходимости использования защитного кожуха последний можно выполнить весьма тонкостенным (0,1—0,2 мм), поскольку он служит для защиты чувствительного элемента от пыли и влаги и не несет силовой механической нагрузки. В этом случае инерционность преобразователя возрастает не более чем в 2—3 раза по сравнению с преобразователем, работающим без кожуха.

2. Связь между кольцом со струной и основанием осуществляется посредством стойки 2 весьма небольших размеров, которую в первом приближении можно представить в виде тонкого стержня, один конец которого прикреплен к основанию, а другой — к кольцу. В том случае, если основание преобразователя жестко прикреплено к стенке объема, температуру среды внутри которого следует контролировать, механические деформации стенки объема будут передаваться основанию, но не пройдут на кольцо, а следовательно, не вызовут дополнительных погрешностей измерения температуры. Таким образом, силовая развязка кольца от основания преобразователя позволяет существенно повысить точность измерений.

3. Использование тонкого изоляционного слоя на поверхностях кольца и накладок толщиной 10—20 мкм существенно снижает погрешность преобразователя вследствие практически полного отсутствия влияния релаксационных явлений в материале изолятора на частоту резонансных колебаний струны.

Чувствительность преобразователя можно изменять в широких пределах за счет изменения начальной частоты поперечных колебаний струны и соответствующего подбора материалов кольца и струны. Вследствие этого на базе одной конструкции струнного преобразователя можно выпускать гамму унифицированных преобразователей температуры с требуемой чувствительностью и диапазоном измерения.

Внешний вид унифицированного преобразователя температуры показан на рис. 67.

На основе рассмотренных преобразователей реализовано унифицированное цифровое устройство для измерения температуры (УИТ-1).

За счет комплектования устройства различными первичными преобразователями (из гаммы унифицированных) оно обеспечивает измерение температур газов в диапазоне 273—473 К.

Техническая характеристика устройств УИТ-1

Пределы измерения, К От 273 до 323, 373, 423, 473

Основная погрешность, % $0,2 \pm 100/N$,

где N — приращение показаний по табло частотомера, соответствующее диапазону измерения

Рабочий диапазон температур вторичного устройства, К

278 — 308

Напряжение питания, В.	220 (50 Гц)
Габаритные размеры, мм:	
первичного преобразователя	$\varnothing 25 \times 15$
электронного усилителя	$\varnothing 180 \times 90 \times 65$

Конструкция варианта преобразователя, предназначенного для измерения температуры жидких агрессивных сред, отличается от рассмотренной выше тем, что ее корпус выполнен из нержавеющей стали 12Х18Н9Т, а все гермоуплотнения — из фторопласта.

Дифференциальный струнный преобразователь (рис. 68) [а. с. № 447577 (СССР)] состоит из основания 3, выполненного из магнитомягкой стали. На основании с помощью винтов 6 крепятся две стойки 4. Третья стойка 8 выполнена как одно целое с основанием. Для электрической изоляции стоек 4 от основания применяют слюдяные прокладки. Струны 7 и 10 с разными коэффициентами теплового линейного расширения натянуты между стойками 4 и стойкой 8. Концы струн закреплены накладками 5. Струны находятся в зазорах магнитной системы. Роль магнитопровода выполняют основание и центр, изготовленный как одно целое. Магниты 2 завальцованы в магнитопроводе. Концы струн подпаивают к лепесткам, к которым, в свою очередь, припаивают проводники. Экранированная оплетка проводников соединяется с основанием и выполняет функцию третьего общего вывода. Проводники жестко крепятся к основанию при помощи скобы 9. На основании крепится защитный кожух 1.

Технические характеристики унифицированных преобразователей температуры в частоту с линейной функцией преобразования типа УПТ-2 приведены в табл. 5.

Постоянная времени теплового переходного процесса в воздухе составляет 4 мин. Это объясняется тем, что основание и стойки имеют достаточно большую массу (0,05 кг).

Конструкция струнного дифференциального преобразователя с уменьшенной тепловой инерционностью приведена на рис. 69 [а. с. № 620836 (СССР)]. Кольцо 5, выполняющее роль dilatометрического элемента, с помощью стойки 9 крепится к основанию 8. В диаметральной плоскости кольца натянуты металлические струны 3

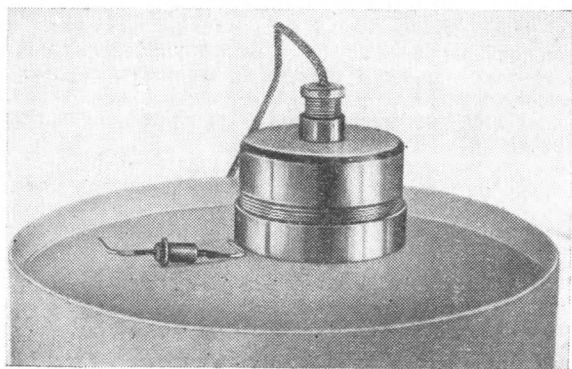


Рис. 67. Внешний вид унифицированного преобразователя температуры

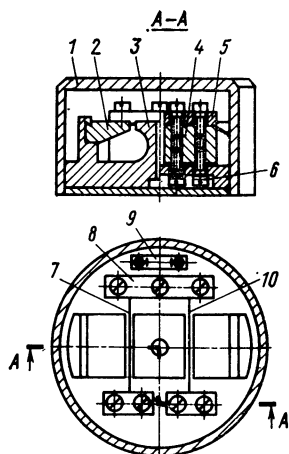


Рис. 68. Дифференциальный преобразователь жидких и газообразных сред

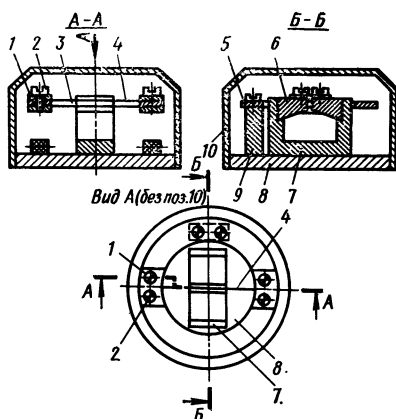


Рис. 69. Конструкция преобразователя температуры с уменьшенной тепловой инерционностью

и 4, концы которых прижимаются к торцовым плоскостям кольца при помощи накладок 1 и винтов 2. Струны помещены в поле постоянного магнита, состоящего из магнитопровода 7 и магнитотвердых вставок 6. Концы струн изолируются от кольца и накладки путем нанесения на поверхность последних неэлектропроводных покрытий в виде окисных пленок или слоев эмали. Концы струн подсоединяют к ножкам контактных колодок, от которых отходит выводной кабель. Преобразователь снабжен защитным кожухом 10.

Все рассмотренные в п. 5 и обоснованные аналитически выводы по получению максимальной линейности функции преобразования за счет оптимального выбора начальных частот струн полностью относятся к приведенной конструкции преобразователя.

Рассмотренные преобразователи и информационно-измерительные устройства (ИИУ) на их базе могут использоваться для измерения, контроля и регулирования температур жидких и газообразных сред, в том числе и агрессивных.

Наиболее целесообразно и эффективно использовать ИИУ на базе струнных преобразователей температуры в частоту в АСУТП для контроля и регулирования температур гальванических ванн, при

Таблица 5

Диапазон измерения, К	Чувствительность, Гц/К	Основная погрешность, %	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
273—373	20	0,2	0,05	Ø30×15
273—473	10	0,3	0,05	Ø30×15

проведении климатических испытаний, в термических печах и сушильных устройствах.

Преобразователь и устройство для измерения температуры объектов малой площади

Рассмотрим устройство, реализующее предложенный в п. 6 гл. II способ измерения и позволяющее бесконтактным методом с достаточной для практических целей точностью измерять температуру поверхности катодных узлов на уровне 473—573 К [а. с. № 449257 (СССР)].

В основу работы устройства положено использование явления удлинения упругой нити 1 (рис. 70) на участке АВ за счет передачи тепла от разогретой поверхности С катодного узла 2, закрепленного неподвижно. Один конец нити 1 закреплен на корпусе 3 устройства. Второй конец прикреплен к измерительному наконечнику преобразователя 4 малых перемещений, имеющего отсчетное устройство (ОУ) 5. Нить 1 имеет начальную упругую деформацию. При нормальных условиях и напряжении накала, равном нулю, фиксируются показания ОУ. После подачи напряжения накала на подогреватель (2—2,5 В) через определенный промежуток времени, необходимый для достижения стационарного теплового режима поверхности катода, снова снимаются показания с ОУ.

Разность между первым и вторым показаниями будет пропорциональна тепловой деформации нити, а следовательно, и температуре поверхности С катодного узла.

Проанализируем измерительную схему применительно к струнному преобразователю малых перемещений, представляющему собой преобразователь, построенный на комбинации системы рычагов и упругого элемента-струны (см. п. 4 гл. II).

Из рис. 70 следует, что упругая нить 1 и упругая система

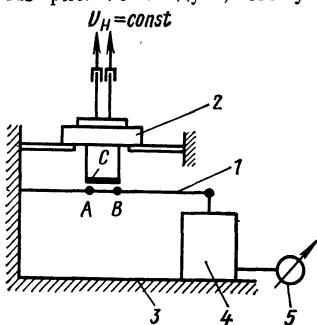


Рис. 70. Схема устройства для измерения температуры поверхностей малой площади бесконтактным методом

струнного преобразователя малых перемещений соединены последовательно. При включении напряжения накала участок нити, расположенный под катодом, нагревается и удлиняется.

Величина тепловой деформации нити распределится между двумя упругими системами в соответствии со значениями их жесткостей. Если жесткость упругой нити C_1 на порядок больше жесткости упругой системы преобразователя перемещений C_2 , то практически почти вся тепловая деформация нити будет измеряться струнным преобразователем перемещений, что приведет к повышению точности измерений.

Если до удлинения нити выходная частота струнного преобразователя перемещений равнялась f_0 , то после нагрева участка нити от поверхности разогретого катода выходная частота струнного преобразователя изменится и будет равна f_1 . Приращение частоты будет пропорционально величине тепловой деформации нити, а следовательно и приращению температуры поверхности катода проверяемого катодного узла, т. е.

$$\Delta f = f_1 - f_0 = KK_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} d\alpha \Delta t_k, \quad (206)$$

где K — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбранного при измерениях расстояния между торцом катода и упругой нитью; K_1 — чувствительность струнного преобразователя; d — диаметр контролируемого объекта (катода).

В случае использования однострунного преобразователя чувствительность K_1 можно принять постоянной только на определенном участке выходной характеристики. При использовании дифференциального струнного преобразователя чувствительность можно принять практически постоянной на всем протяжении выходной характеристики.

При $C_1 = 10C_2$; $K = 0,5$; $K_1 = 100$ Гц/мкм; $d = 2$ мм; $\alpha = 11 \times 10^{-6}$ 1/К; $\Delta t_k = 200$ К на основании зависимости (206) получим, что изменение частоты струнного преобразователя перемещений равно 200 Гц. Конструкция устройства для измерения температуры поверхности катодных узлов электронно-лучевых приборов приведена на рис. 71.

Чувствительным элементом устройства является тонкая упругая металлическая нить 4. Один конец нити жестко крепится к корпусу 1 с помощью накладки 2 (12) и винтов 3 (13). Второй конец нити крепится к рычагу 8 струнного датчика перемещений 9. Корпус датчика перемещений жестко соединен с корпусом 1.

Натяжение струны, расположенной в датчике малых перемещений, а следовательно, и частота собственных поперечных колебаний этой струны обусловлена величиной начальной упругой деформации нити 4, которая создается перед окончательным закреплением накладки 2 винтами 3.

Катодный узел 5, температуру торца которого необходимо контролировать, закрепляется в кронштейне 14 и удерживается в нем неподвижно с помощью прижимных пружин 7.

Кронштейн 14 закреплен на двух плоских упругих пружинах 15 и 16. Вторые концы пружин закреплены жестко в стойке 17. Такая подвеска дает возможность перемещать кронштейн с закрепленным на нем узлом катода строго поступательно без угловых перекосов. Стойка 16, жестко прикрепленная к основанию 1, на верхнем конце имеет упор 11, выполненный в форме тонкой пластины из материала с малой теплопроводностью (например, из сапфира). Упор 11 по вертикали расположен выше нити 4.

Расположение кронштейна 14 относительно корпуса 1 регулируется при сборке таким образом, чтобы упругая нить проходила через диаметральную плоскость активированной торцевой поверхности катодного узла, закрепленного в кронштейне. Пластина упора 11 располагается вертикально и параллельно упругой нити 4. При этом упор смещен вправо от продольной оси нити на величину $l = \frac{d}{2} - 0,4$ мм, где d — диаметр керн катода, мм.

Для вертикального перемещения кронштейна 14 на оси 18 жестко закреплен эксцентрик 21. При вращении оси, установленной в кронштейне 20 и стойке 17, посредством рукоятки 19 эксцентрик упирается в нижнюю плоскость кронштейна 14. При этом вертикальное положение кронштейна 14 будет определяться угловым положением эксцентрика. В крайнем верхнем положении кронштейна 14 катодный узел устанавливают на горизонтальную плоскость и поджимают пружинами 7. На выводы подогревателя катода

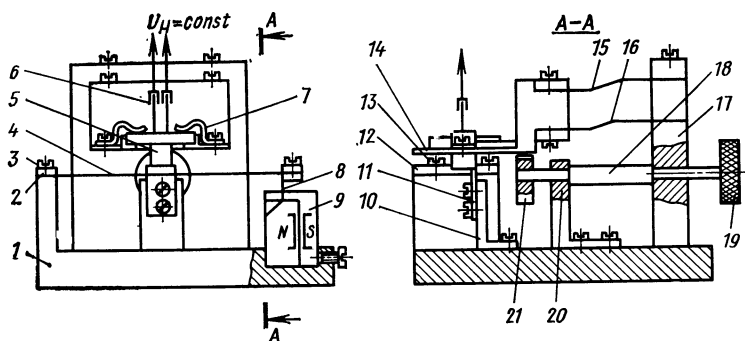


Рис. 71. Конструкция устройства для измерения температуры поверхности катодных узлов электронно-лучевых приборов

надевают токопроводящие зажимы 6. В крайнем нижнем положении катодный узел ложится кромкой торцевой поверхности на упор 11, обеспечивающий неизменным расстояние между торцевой поверхностью катода и нитью 4. В этом случае поверхность эксцентрика 21 отходит вниз и не соприкасается с поверхностью кронштейна 14. Высота стойки 17 должна быть такой, чтобы в крайнем нижнем положении кронштейна давление катода на упор не превышало 0,02 Н. Остальная часть силы тяжести верхнего подвижного узла компенсируется за счет прогиба пружин 15 и 16. Экспериментально установлено, что при таком контактном усилии и реальной площади соприкосновения между торцом катода и упором активированная поверхность катода не изменяет своих свойств и механически не разрушается.

Профиль эксцентрика 21 обеспечивает безударное касание торца катода с упором 11.

Выполнение операций контроля температуры на предлагаемом устройстве производят в следующем порядке:

- 1) поворотом рукоятки 19 кронштейн 14 устанавливают в крайнее верхнее положение;
- 2) на горизонтальную плоскость кронштейна 14 устанавливают контролируемый катодный узел 5, фиксируемый неподвижно с помощью пружин 7;
- 3) по табло электронно-счетного частотомера берут начальный отсчет;
- 4) на выводы подогревателя надевают контактные наконечники 6 и на подогреватель подают напряжение накала (1—2 В);
- 5) поворотом рукоятки 19 кронштейн с закрепленным на нем катодным узлом опускают в крайнее нижнее положение до соприкосновения торцевой поверхности катода с упором 11;
- 6) через 30 с (время, необходимое для достижения состояния теплового равновесия катода) производят отсчет по цифровому табло частотомера нового значения частоты;
- 7) разность между первым показанием, снятым по п. 3, и показанием, снятым по п. 6, будет пропорциональна температуре поверхности контролируемого катода.

В том случае, если конструкция устройства не критична к изменению температуры окружающей среды (температуры в помещении) и начальный уровень частоты струнного преобразователя не изме-

няется, оценку температуры поверхности катода можно производить только по значению частоты, фиксируемому после подачи напряжения на катала на подогреватель. В этом случае процесс контроля существенно ускоряется и упрощается.

Макетный образец устройства для измерения температуры поверхности катодов был изготовлен и испытан. Основные параметры устройства были выбраны следующими: длина металлической нити 20 мм; коэффициент линейного расширения материала нити $\alpha_c = 11 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$; расстояние от нити до поверхности катода 0,5 мм; упор изготовлен из сапфира, струнный преобразователь малых перемещений имеет чувствительность 200 Гц/мкм, контактное усилие между упором и поверхностью катода в крайнем нижнем положении равнялось примерно 0,015 Н. Внешний вид устройства показан на рис. 72.

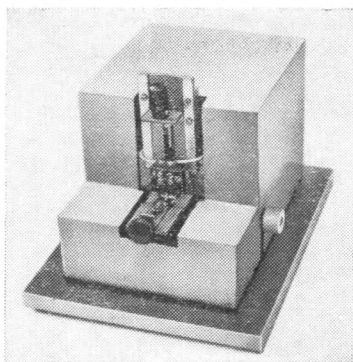


Рис. 72. Внешний вид устройства для измерения температуры поверхности катодов

Экспериментальные исследования макетного образца установки показали, что чувствительность всего устройства, приведенная к поверхности катода, равна 1 Гц/К. Разброс показаний при многократном измерении температуры одного и того же катодного узла на уровне 473 К не превышал ± 2 Гц, что соответствует погрешности измерения ± 2 К.

Следует ожидать, что при дальнейшем усовершенствовании конструкции можно получить еще большую точность измерения.

Время, потребное для выхода чувствительного элемента устройства (металлической нити) на установившийся тепловой режим, после того как к нему подводится торец разогретого катода, составляет 5—10 с. Время, потребное для фиксации результатов измерений, не превышает 1 с.

Таким образом, если автоматизировать операции выставки контролируемого катодного узла на измерительную позицию и его съема, а также осуществить предварительный прогрев катодного узла до подачи его на измерительную позицию, то контрольно-сортировочный автомат с предложенным устройством может обеспечить производительность контроля около 240—300 катодных узлов в час.

7. СТРУННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СТЕПЕНИ РАЗРЕЖЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД

Струнный тепловой вакуумметр предназначен для измерения давлений в диапазоне $1,33 \cdot 10^{-1}$ —133 Па и состоит из преобразователя и электронной части.

Преобразователь содержит две струны, одна из которых является термочувствительным элементом вакуумметра, а вторая—

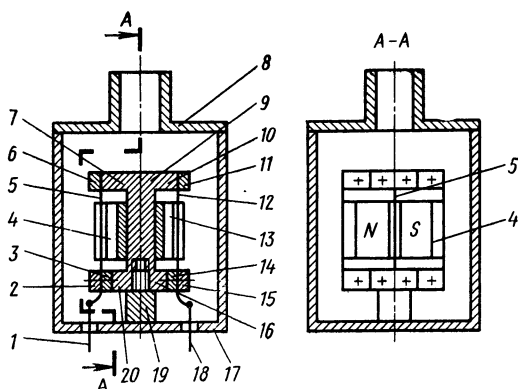


Рис. 73. Преобразователь степени разрежения
газообразных сред

термокомпенсационным элементом. Введение второй (термокомпенсационной) струны необходимо для уменьшения погрешности вакуумметра при изменении температуры окружающей среды и корпуса датчика.

Преобразователь состоит из корпуса 17 (рис. 73), внутри которого на резьбовой шпильке 19 установлен кронштейн 9. На кронштейне жестко закреплены (как одно целое) стойки 7, 20 и 10, 16 симметрично относительно вертикальной оси кронштейна. На торцовых плоскостях стоек 20 и 16 укреплены планки 3 и 14 соответственно. Торцы стойки 7 и планки 3 лежат в одной вертикальной плоскости, а стойки 10 и планки 14 — в другой вертикальной плоскости. Концы струны 5, выполняющей роль нагревательного и термочувствительного элемента и имеющей начальную упругую деформацию растяжения, закреплены на стойках кронштейна посредством накладок 2 и 6. Концы струны 12, выполняющей роль термокомпенсационного элемента и также имеющей начальную упругую деформацию растяжения, закреплены на стойках кронштейна посредством накладок 11 и 15. Обе струны помещены в воздушные зазоры магнитных систем возбуждения колебаний 4 и 13, жестко установленных на кронштейне.

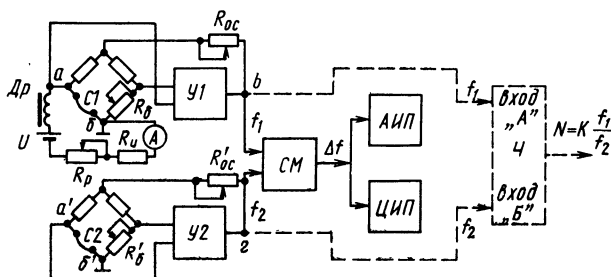


Рис. 74. Структурная схема струнного вакуумметра

Концы струн, закрепленных на стойках 7 и 10, электрически связаны с корпусом датчика. При фиксации концов струн накладками 6, 2, 11, 15 прижимаются к соответствующим плоскостям винтами. Струны 5 и 12 могут иметь как круглую, так и прямоугольную форму поперечного сечения.

Концы струн, электрически изолированные от корпуса преобразователя, посредством проводников соединяются с гермовыводами 1 и 18. Электрические выводы со вторых концов струн снимаются с корпуса. Корпус герметично закрывается крышкой 8.

Концы струны 5 подсоединены к входным клеммам *аб* электронного усилителя У1 (рис. 74) с положительной обратной связью. Сопротивление R_6 служит для балансировки моста после подключения струны. Сопротивление R_{0c} обеспечивает регулировку тока обратной связи, т. е. регулировку амплитуды колебаний струны С1. Параллельно входу *аб* усилителя подключена цепь задачи тока нагревательного элемента. Эта цепь состоит из последовательно включенных дросселя D_r , стабилизированного источника постоянного напряжения U , переменного резистора R_p , измерительного сопротивления R_n и амперметра А. Введение дросселя D_r необходимо для того, чтобы практически устранить эффект шунтирования струны цепью подачи тока подогрева по переменному току подкачки.

После балансировки моста путем изменения величины сопротивления R_6 и включения напряжения питания усилителя У1 струна С1 вместе с усилителем образует струнный автогенератор, частота которого определяется температурой струны. Температура этой струны, в свою очередь, определяется давлением газообразной среды, в которой находится струна.

Вторая струна С2 (термокомпенсационная) подключается ко входу *а'б'* электронного усилителя У2 с положительной обратной связью и совместно с ним образует второй автогенератор. В отличие от первого автогенератора по струне С2 ток разогрева не пропускается, и частота автогенератора определяется только температурой окружающей среды и температурными коэффициентами линейного расширения материалов струны С2 и кронштейна.

Выходы усилителей У1 и У2 соединены со входом смесителя частот СМ. Выход смесителя подключен ко входам аналогового (АИП) и цифрового (ЦИП) измерительных приборов, измеряющих разностную частоту, выделяемую смесителем.

При работе в режиме измерения отношения частот сигналы с точек *в* и *г* измерительной схемы (рис. 74) могут быть поданы на входы А и Б стандартного цифрового электронно-счетного частотомера Ч любого типа.

В случае использования теплового манометра в АСУТП с выхода смесителя СМ сигнал может быть подан на преобразователь частота-код и далее на ЭВМ, управляющую технологическим процессом.

При уменьшении давления газа в корпусе преобразователя струна, по которой пропущен ток нагрева, увеличивает свою температуру, поскольку теплопроводность газа уменьшается. Увеличение температуры струны приводит к уменьшению величины ее упругой деформации и к уменьшению частоты струнного автогенератора со значения f_{01} (при $I=I_n$ и $p \simeq p_{атм}$) до значения f_1 . Приращение частоты струнного автогенератора $\Delta f = f_{01} - f_1$ будет функционально связано с измеряемым давлением.

Положим, что частота колебаний термокомпенсационной струны равна f_{02} . Тогда при неизменной температуре окружающей сре-

ды разность частот струн на выходе смесителя $\Delta f_D = f_{02} - f_1$ также будет функционально связана с измеряемым давлением.

Полученные в п. 7 гл. II выражения для функции преобразования струнного вакуумметра носят приближенный характер в силу принятых упрощений, а также в силу того, что значения коэффициентов α , λ_T , β могут отличаться от значений, указанных в справочной литературе. Поэтому для измерения низких давлений с минимальными погрешностями струнный вакуумметр должен иметь индивидуальную или групповую градуировочную характеристику.

Современные успехи, достигнутые в области использования микросхем и микропроцессоров в средствах измерения, дают основание утверждать, что путем введения кусочно-линейной аппроксимации функции преобразования вакуумметра можно реализовать систему цифрового отсчета непосредственно в единицах давления.

В качестве аналогового измерительного прибора (АИП) может быть использован любой электронный частотомер со стрелочным показывающим прибором.

На практике всегда будет существовать некоторая разница в температурных коэффициентах линейного расширения материалов струн и кронштейна. В этом случае изменение температуры корпуса, кронштейна и струн, обусловленное изменением температуры окружающей среды, приведет к изменению частот струнных автогенераторов.

При получении информации с одной струны появилась бы погрешность нуля и чувствительности преобразователя. Введение термокомпенсационной струны позволяет исключить температурную погрешность нуля Δf_1 , что снижает суммарное значение температурной погрешности струнного теплового манометра в зависимости от выбранных конструктивных параметров в 2—10 раз.

Можно показать, что в случае работы измерительной схемы в режиме измерения отношения частот двух струнных автогенераторов, при соответствующем выборе начальных частот струн f_{01} и f_{02} , можно получить аналогичный эффект уменьшения температурной погрешности.

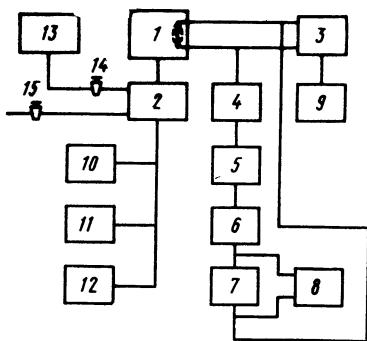


Рис. 75. Структурная схема установки для исследования метрологических характеристик струнного вакуумметра

Разработанный тепловой струнный вакуумметр по сравнению с существующими промышленными типами обладает следующими преимуществами.

1. Значительно снижена величина температурной погрешности за счет введения термокомпенсационной струны.

2. Выходной электрический сигнал является частотно-модулированным, что предопределяет высокую точность его измерения.

3. Высокая помехоустойчивость частотно-модулированного выходного сигнала дает возможность широко применять струнный вакуумметр в

производственных условиях в системах АСУ и АСУТП, реализованных на базе ЭВМ.

4. Чувствительность струнного вакуумметра может изменяться в широких пределах (в несколько раз) за счет изменения силы начального натяжения струн без какого-либо изменения конструкции.

5. Благодаря представлению результатов измерения на цифровом табло из результатов измерения исключаются ошибки субъективного характера.

6. Разработанная конструкция является восстанавливаемым изделием, которое можно многократно ремонтировать.

Структурная схема установки для исследования метрологических характеристик струнного вакуумметра показана на рис. 75.

Преобразователь вакуумметра 1 посредством грибкового уплотнения подсоединяется к вакуумной установке 2, позволяющей задавать и измерять низкие давления в диапазоне $1,33 \cdot 10^{-2}$ — $1,33 \cdot 10^3$ Па.

Концы одной из струн подсоединяются ко входу электронного усилителя 3 с положительной обратной связью, образуя с ним струнный автогенератор. Ток нагрева струны подается от выходных клемм стабилизатора напряжения 4 через последовательно включенные дроссель 5, миллиамперметр 6 и измерительное сопротивление 7. Величину тока нагрева регулируют путем изменения выходного напряжения стабилизатора и грубо измеряют по стрелочному миллиамперметру. Точное значение тока определяют по падению напряжения на образцовом измерительном сопротивлении 7, измеренному посредством цифрового вольтметра 8. Частоту струнного автогенератора измеряют стандартным электронно-счетным цифровым частотомером 9 типа ЧЗ-22. Для приближенной оценки величины давления в вакуумной системе применяют систему из двух манометров — теплового термоэлектрического 10 и ионизационного 11. Для точного определения величины давления применяют образцовый компрессионный манометр 12 первого разряда.

Низкое давление в системе создается вакуумными ионизационными насосами 13, работающими в режиме непрерывной откачки. Изменение давления осуществляется изменением проходного сечения вакуумного клапана 14 и натекателя 15. При этом вакуумная установка при определенном заданном уровне давления находится в режиме динамического равновесия.

Методика проведения исследований заключалась в установлении в вакуумной системе заданного уровня давления посредством изменения положений запорных вентилей вакуумного клапана и натекателя. Заданный уровень давления ориентировочно оценивали по рабочим средствам измерения — манометрам 10 и 11 и уточняли по образцовому компрессионному манометру первого разряда. Практически одновременно с отсчетом величины низкого давления по компрессионному манометру по частотомеру определяли текущее значение выходной частоты струнного вакуумметра.

В зависимости от цели эксперимента число фиксированных точек в пределах рабочего диапазона выбирали от 3—5 до 10—30, а число циклов повышения и понижения давлений в исследуемом диапазоне колебалось от 1 до 10.

Полученные в результате проведения эксперимента данные обрабатывали с использованием методов математической статистики.

Экспериментальные исследования показали, что температурный коэффициент частоты пяти испытываемых преобразователей лежит в пределах 0,2—0,3 Гц/К. При работе в условиях кондициониро-

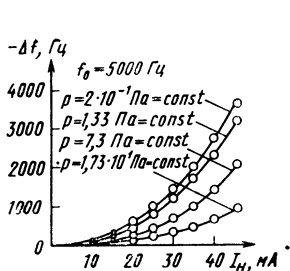


Рис. 76. Зависимость приращения частоты колебаний струны от тока нагрева

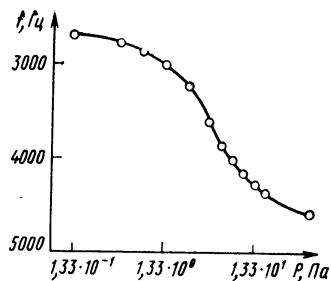


Рис. 77. Градуировочная характеристика струнного вакуумметра

ванного помещения, где температура поддерживается постоянной в пределах 293—295 К, температурная погрешность частоты вызвала погрешности измерения давления не более 1% в области давлений $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па. При измерении более высоких давлений температурная погрешность уменьшается до значений 0,2%.

Для образцовых средств измерения в диапазоне давлений $1,33 \cdot 10^{-1}$ —133 Па допускается погрешность измерения до 15% на краях диапазона и до 10% внутри него. С учетом этого было решено, что температурная погрешность в условиях проводимых экспериментов незначительна по сравнению с допустимой величиной суммарной погрешности и нет необходимости в применении термокомпенсационной струны.

Таким образом, при работе в помещениях, где температура воздуха изменяется в пределах $\pm 2 \text{ К}$ ($\pm 5 \text{ К}$), разработанный преобразователь может использоваться как однострунный с резервированием, у которого внутри одного корпуса расположено два термочувствительных элемента. Очевидно, что эксплуатационная надежность такого вакуумметра значительно выше, чем вакуумметра с одним чувствительным элементом и термокомпенсационной струной.

Поэтому во всех нижеследующих экспериментах обе струны использовались в качестве термочувствительных, а оценка метрологических характеристик проводилась по выходной частоте струнного автогенератора, а не по разности или отношению частот струн.

На рис. 76 представлено семейство экспериментальных зависимостей приращения частоты колебаний струны от тока нагрева при постоянных давлениях и $f_0 = 5000 \text{ Гц}$. Из анализа полученных зависимостей следует, что:

1) зависимость приращения частоты от тока при $p = \text{const}$ носит квадратичный характер;

2) струнный вакуумметр имеет наибольшую чувствительность в интервале измеряемых давлений $1,33$ — $1,73 \cdot 10^1 \text{ Па}$ ($1 \cdot 10^{-2}$ — $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$); в области давлений $2 \cdot 10^{-1}$ — $1,33 \text{ Па}$ чувствительность преобразователя становится значительно меньшей;

3) при уменьшении частоты струнного автогенератора до значений 2000—2500 Гц частота его колебаний отличается повышенным уровнем флуктуаций, особенно при давлениях ниже $2 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$;

4) струнный вакуумметр целесообразно использовать для измерения давлений не ниже $1 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$;

5) для обеспечения стабильной частоты вакуумметра при начальной частоте $f_0=5000$ Гц частота колебаний струны не должна снижаться ниже уровня 2000 Гц, т. е. приращение частоты должно быть порядка 2500—3000 Гц;

6) для обеспечения требований по максимально допустимому значению приращения частоты ток нагрева струны вакуумметра должен лежать в пределах 35—40 мА (плотность тока $i=I_n/S=33$ А/мм²);

7) для струн из сплава ПлСр-20 длиной 15 мм прямоугольной формы поперечного сечения в качестве оптимального следует считать ток, подсчитанный из условия, что плотность тока лежит в пределах 29—33 А/мм².

Градуировочная характеристика, полученная для одного из струнных вакуумметров со струной из сплава ПлСр-20, приведена на рис. 77. Параметры струны те же, что и в предыдущем примере. Градуировку осуществляли на образцовом компрессионном манометре. В пределах каждого порядка измеряемого давления задавали пять-семь точек.

Из графика следует, что наименьшая чувствительность струнного вакуумметра наблюдается при давлении $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па и в области давлений 65—133 Па.

Исследования, проведенные с целью определения требуемой стабильности тока нагрева струны, позволяют сделать следующие выводы.

1. При работе в области давлений 1,33—133 Па следует использовать источник тока нагрева, нестабильность которого в течение длительного времени не превышает 0,07%.

2. При расширении пределов измерения в область низких давлений требования к стабильности источника тока возрастают, и при измерении давления $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па эта нестабильность должна быть порядка 0,01—0,02%.

При современном уровне развития элементной базы создание стабилизатора тока с нестабильностью 0,01—0,02% не является сложной технической проблемой и вполне реально.

Эксперименты по определению метрологических характеристик струнных вакуумметров проводились в следующем порядке. Большой объем, к которому была подсоединена гребенка с пятью струнными вакуумметрами, отключали до давлений порядка $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Фиксировали начальные значения частот колебаний струн при токе нагрева 35 мА, одинаковом для всех струн. В течение всего эксперимента ток во всех струнах поддерживали постоянным с точностью не хуже 0,01%. Затем методом напуска из малого объема в большой устанавливали давление $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па и снова фиксировали значения частот колебаний струн всех вакуумметров при токе 35 мА. В пределах каждой степени давления задавали от шести до девяти точек, на каждой из которых определяли частоты струнных вакуумметров. После достижения давления $6,66 \cdot 10$ Па большой объем сно-

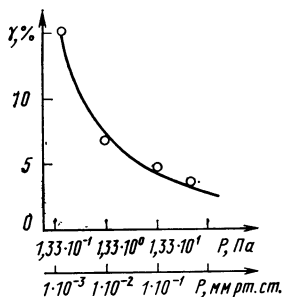


Рис. 78. Зависимость относительной погрешности струнного вакуумметра от измеряемого давления

ва откачивали до давления $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па и весь цикл измерений повторяли снова. Для каждого вакуумметра было проведено 7—10 циклов измерений.

Значения относительных погрешностей измерения, полученные путем статистической обработки экспериментальных данных, увеличенные на возможное значение систематической погрешности определения уровня задаваемого давления, приведены на рис. 78. Для каждого из пяти исследованных вакуумметров такие графики примерно одинаковы, и приведенный график можно рассматривать как обобщенный.

Из полученных результатов следует:

1) погрешность измерения давлений струнным вакуумметром в диапазоне давлений $1,33 \cdot 10^{-1}$ — $6,66 \cdot 10$ Па не превышает 15%;

2) на большей части исследованного диапазона погрешность измерения находится в пределах 5—7%;

3) по своим метрологическим характеристикам разработанные струнные вакуумметры соответствуют образцовым средствам измерения второго разряда.

Результаты экспериментального исследования возможности расширения диапазона измерения струнного вакуумметра в область более высоких давлений путем повышения чувствительности за счет повышения тока нагрева приведены на рис. 79. Анализ полученных зависимостей позволил сделать следующие выводы.

1. Имеется возможность повышения чувствительности струнного вакуумметра в области давлений 66 — $1,33 \cdot 10^4$ Па за счет увеличения тока нагрева.

2. Для измерения давлений в диапазоне $1,33$ — 133 Па следует рекомендовать ток нагрева струны 40 — 50 мА.

3. Для измерения давлений в диапазоне 133 — $1,33 \cdot 10^2$ Па следует рекомендовать ток нагрева струны 110 — 120 мА.

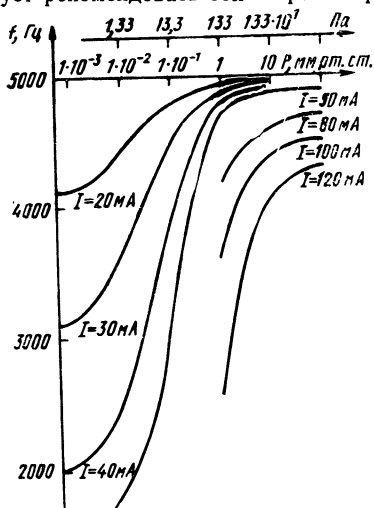


Рис. 79. Семейство градуировочных характеристик струнного вакуумметра при различных токах нагрева струны

4. В многопредельном вакуумметре следует рекомендовать использовать два—три поддиапазона для измерения давлений в различных интервалах диапазона с приемлемой чувствительностью и погрешностью. При переключении поддиапазонов должен изменяться ток нагрева струны.

5. С целью устранения возможности перегрева струны при низких давлениях во время протекания по ней повышенных токов в электронную часть вакуумметра необходимо ввести устройство блокировки, отключающее ток нагрева струны при уменьшении частоты автогенератора до 2000 Гц.

Результаты экспериментальных исследований показали, что относительная погрешность измерения давления в диапазоне $1,33 \cdot 10^2$ — $1,33 \cdot 10^3$ Па не превышает 3%.

Дальнейшие исследования показали, что относительная погрешность измерения 3% сохраняется до давлений $5,32 \cdot 10^3$ Па и увеличивается до 5% в интервале давлений $6,65 \cdot 10^3$ — $1,33 \cdot 10^4$ Па.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать вывод о возможности использования струнного манометра для измерения давлений в диапазоне от $1,33 \cdot 10^{-1}$ до $1,33 \times 10^4$ Па, охватывая одним устройством с одним датчиком давления в пределах пяти порядков и производя измерения с погрешностью 2—10%.

8. СТРУННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СКОРОСТИ И РАСХОДА ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД

Ранее уже отмечалось, что тепловой струнный преобразователь реагирует на скорость потока, набегающего на струну. При этом эффект охлаждения, обусловленный сносом тепла, трансформируется в изменение упругой деформации струны, что приводит к изменению частоты колебаний струнного автогенератора. Поскольку между скоростью истечения газа и его расходом в случае ламинарного течения существует жесткая функциональная связь, то можно расчетным или экспериментальным путем определить градуиро-

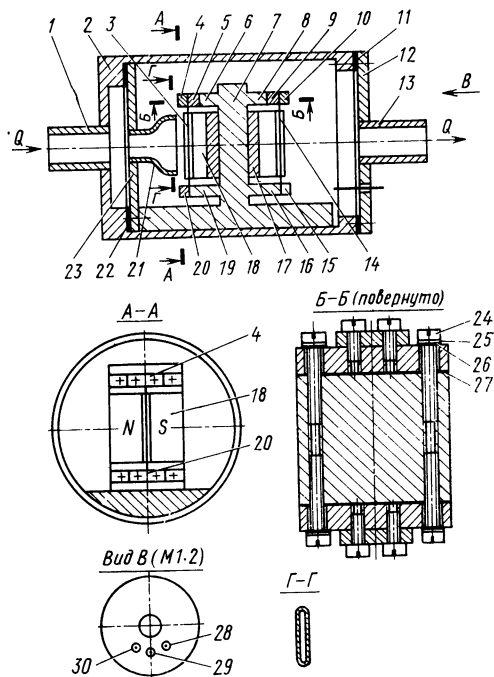


Рис. 80. Конструкция струнного преобразователя скорости и расхода газообразных сред

бочную характеристику струнного преобразователя по расходу. На рис. 80 изображена механическая часть преобразователя расхода газов.

Преобразователь содержит основание 7, на котором жестко укреплены две массивные стойки 6 и 19. Концы термочувствительного элемента 3, выполненного в виде струны с поперечным сечением прямоугольной формы, закреплены на плоскостях стоек 6 и 19 посредством накладок 4 и 26, поджимаемых винтами. Перед окончательным закреплением концов термочувствительного элемента (струны) в нем создается начальное напряжение растяжения. Термочувствительный элемент помещен в узкий воздушный зазор магнитной системы 18 (сеч. А—А), закрепленной на основании 7. Основание 7 установлено внутри цилиндрического корпуса 2, снабженного торцовкой крышкой 12, входным и выходным штуцерами 1 и 13 соответственно. Направляющее сопло 21 жестко укреплено на перегородке 23, которая, в свою очередь, посредством винтов закреплена внутри цилиндрического корпуса. Выходное отверстие сопла формируется путем деформирования конца круглой трубки (сеч. Г—Г), внутренний диаметр которой определяется расчетным путем исходя из заданного предела измерения расхода. Один из концов струны изолирован от корпуса преобразователя посредством изоляционной прокладки 27 (сеч. Б—Б) и шайб 25 и 26, установленных под головки винтов 24, крепящих стойку 5 к основанию. Накладка 4 крепится к стойке посредством винтов. С целью предотвращения утечки газа из корпуса преобразователя предусмотрены уплотнительные прокладки 11 и 22. Концы термокомпенсационной струны 14 крепятся на стойках 8 и 16 посредством накладок 9, 10 и 15. Струна помещена в зазор магнитной системы 17. Электрические выводы 28, 29 и 30 предназначены для подсоединения концов термочувствительного элемента-струны и термокомпенсационной струны ко входам электронных усилителей струнных автогенераторов.

Мостовая схема, в качестве одного из плеч которой используется термочувствительный элемент-струна, является частью входного каскада электронного усилителя. Для нагрева струны до температуры T_n (при $V=0$) параллельно входу электронного усилителя включается цепь, состоящая из последовательно соединенных дросселя, стабилизированного по напряжению источника питания, регулируемого переменного резистора. Функциональное назначение всех перечисленных выше элементов этой цепочки изложено при описании электрической схемы струнного вакуумметра.

При выборе материалов для изготовления деталей конструкции следует учитывать химический состав, влажность, возможные колебания температуры газообразной среды, расход которой измеряется.

Для ввода поправки на изменение температуры при определении объемного и массового расходов газа может быть использована информация, получаемая со второго струнного автогенератора.

Структурная схема цифрового устройства для измерения расхода газа, содержащего преобразователь с измерительной и термокомпенсационной струной, аналогична схеме, приведенной для струнного вакуумметра.

Структурная схема установки для проведения исследований метрологических характеристик преобразователей показана на рис. 81.

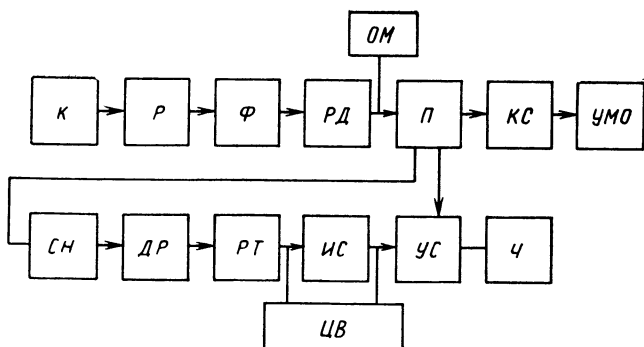


Рис. 81. Структурная схема установки для проведения исследований метрологических характеристик струнных преобразователей скорости и расхода газообразных сред

Компрессор K на выходе создает давление воздуха, которое ограничивается редуктором P до $4 \cdot 10^5$ Па. После прохождения фильтров грубой и тонкой очистки Φ , содержащих также отстойники, сжатый воздух подается на регулятор-стабилизатор давления $РД$ типа ФВС6-1. Стабилизированное после регулятора давление воздуха посредством шланга подается на входной штуцер струнного преобразователя Π . В качестве высокоточного задатчика расхода применяется скоба измерительная пневматическая $КС$, выпускаемая серийно для градуировки длиномеров пневматических. Относительно торца неподвижного сопла измерительной скобы посредством микровинта перемещается ее подвижная пята. Величину перемещения подвижной пяты можно фиксировать по шкале измерительной скобы. Постоянство давления на входе преобразователя контролировалось образцовым манометром $ОМ$ и в случае необходимости корректировалось посредством перестраиваемого регулятора давления $РД$. В процессе эксперимента необходимо было многократно задавать фиксированные значения расходов воздуха. Это выполнялось посредством установки фиксированных значений зазоров между соплом и пятой измерительной скобы по оцифрованным делениям ее шкалы. С целью устранения больших субъективных погрешностей при определении положения стрелки указателя измерительной скобы изображение шкалы увеличивалось оптическим методом. Для определения величины расхода воздуха, соответствующей каждому фиксированному значению зазора между соплом и подпятником шкалы, воздух, выходящий из зазора измерительной скобы, посредством эластичной герметичной муфты подавался на установку мерного объема ($УМО$). Фиксируя время вытеснения определенного объема воды, определяли расход воздуха, проходящий через преобразователь. После многократного повторения опытов с $УМО$ и осреднения полученных результатов каждому фиксированному значению шкалы измерительной скобы ставили в соответствие определенное значение расхода воздуха при фиксированном значении давления на входе преобразователя. После установления такой жесткой связи при исследовании метрологических характеристик преобразователя расходы задавали установкой

соответствующих зазоров по шкале измерительной скобы. Такой подход позволил существенно сократить время испытаний и набрать значительно больший объем статистики, необходимой для оценки метрологических характеристик преобразователя.

Ток, протекающий по активной струне преобразователя, задается посредством электрической цепи, подключенной параллельно струне преобразователя и состоящей из стабилизированного источника питания *СН*, дросселя *ДР*, реостата *РТ*, предназначенного для регулирования величины тока нагрева струны, измерительного сопротивления *ИС*, по падению напряжения на котором оцениваются величина и стабильность во времени тока нагрева. Падение напряжения на измерительном сопротивлении измеряется высокоточным цифровым вольтметром *ЦВ* с погрешностью не более 0,005%. Струна преобразователя подключается ко входу усилителя *УС*, образуя совместно с ним струнный автогенератор. Выходная частота преобразователя измеряется стандартным электронно-счетным цифровым частотомером *Ч*.

Методика проведения эксперимента заключалась в том, что при определенном постоянном давлении на входе преобразователя и при строго фиксированном токе нагрева струны определяли зависимость изменения частоты колебаний струны от величины расхода газа (в рассматриваемом случае — воздуха). Фиксированные значения расходов задавали путем установки определенных зазоров между подпятником и выходным пневмосоплом измерительной скобы. Объектом исследований являлись опытные образцы струнных преобразователей расхода со струной из сплава ПлСр-20 длиной 15 мм и площадью сечения $0,011 \times 0,11 \text{ мм}^2$.

Результаты экспериментальных исследований позволили сделать вывод о том, что приведенная погрешность измерения расхода для преобразователей с пределами измерений от 20 до 400 л/ч не превышает 1%.

1. Агейкин Д. И., Костина Е. Н., Кузнецова Н. Н. Датчики контроля и регулирования. М.: Машиностроение, 1965. 928 с.
2. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. М.: Машгиз, 1962. 456 с.
3. Бабаков И. М. Теория колебаний. М.: Наука, 1968. 560 с.
4. Власов В. Е., Скачко Ю. В., Карцев Е. А. Метод и средства активного контроля толщины пленки в процессе напыления. — Электронная техника, сер. 8, 1974, вып. 2(20), с. 88—94.
5. Грошковский Я. Техника высокого вакуума. М.: Мир, 1976, 622 с.
6. Гусев Е. Д. К расчету некоторых параметров струнных датчиков. — Приборостроение, 1965, № 4, с. 1—4.
7. Давиденков Н. Н. Акустический метод измерения деформаций. — Журнал прикладной физики, 1928, т. 5, с. 37.
8. Доржиев Д. Д., Рамм Д. В., Эткин Л. Г. Некоторые вопросы теории вибрационно-частотных датчиков. — Приборостроение, 1965, № 3, с. 10—13.
9. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. М.: Мир, 1964. 570 с.
10. Жаботинский М. Е., Свердлов Ю. Л. Основы теории и техники умножения частоты. М.: Советское радио, 1964. 327 с.
11. Жермунская Л. Б. Исследование физико-механических свойств и разработка упругих элементов для эксплуатации в условиях динамического нагружения. — Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Л.: ЛИАП, 1967.
12. Иофис Н. А., Кацнельсон Б. В., Филимонова И. Л. О возможности прогнозирования рабочей температуры катодно-подогревательных узлов. — Электронная техника, сер. 8, МЭП, 1974, вып. 5(23), с. 105—109.
13. Карцев Е. А., Коротков В. П. Устройство для измерения температуры рабочей поверхности катодных узлов электронно-лучевых приборов. — Электронная техника, сер. 8, 1975, вып. 5(35), с. 116—122.
14. Карцев Е. А. Унифицированный преобразователь усилий в частоту. — Электронная техника, сер. 8, 1979, вып. 5(75), с. 62—69.
15. Карцев Е. А., Колотиев А. Г. Струнный преобразователь разности давлений в частоту. — Метрология, 1979, № 10, с. 28—34.
16. Карцев Е. А. Частотный преобразователь давления. — Электронная техника, сер. 8, МЭП, 1974, вып. 2(20), с. 75.
17. Карцев Е. А., Коротков В. П. Способ измерения интегральной температуры поверхности катодных узлов кинескопов и электронно-лучевых трубок. — Электронная техника, сер. 8, 1975, вып. 9(39), с. 42—48.

18. Кондрашкова Г. А. Струнные электроизмерительные преобразователи. — В кн. Электроизмерительная техника и автоматика. ЛПИ им. М. И. Калинина, 1963, с. 3—9.
19. Коротков В. П., Тайц Б. А. Основы метрологии и теории точности измерительных устройств. М.; Изд-во стандартов, 1978, 352 с.
20. Коротков В. П., Скачко Ю. В. Цифровое устройство для контроля качества продукции электронной промышленности. — Электронная техника, сер. 8, 1972, вып. 1, с. 11—17.
21. Мардин В. В., Кривонос А. И. Справочник по электронным измерительным приборам. М.: Связь, 1978. 416 с.
22. Милохин Н. Т. Частотные датчики систем автоконтроля и управления. М.: Энергия, 1968. 128 с.
23. Морз Ф. Колебания и звук. Гос. изд-во техн. теор. литературы, 1959. 329 с.
24. Новицкий П. В. Проблемы создания частотных датчиков для всех электрических и неэлектрических величин. — Измерительная техника, 1961, № 4, с. 16—21.
25. Новицкий П. В., Кнорринг В. Г., Гутников В. С. Цифровые приборы с частотными датчиками. Л.: Энергия, 1970. 423 с.
26. Приборы электроизмерительные. Растяжка и подвесы. ГОСТ 9444—60. М.: 1962. 16 с.
27. Проектирование датчиков для измерения механических величин/ Под ред. Е. П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. 480 с.
28. Прохорова С. Б. Карцев Е. А. Информационное устройство для измерения температуры. — Электронная техника, сер. 8, 1974, вып. 2(20), с. 81—87.
29. Скачко Ю. В. Основные вопросы теории цифровых устройств со струнными преобразователями в режиме измерения отношения частот. — Электронная техника, сер., 8, 1974, вып. 2(20), с. 48—49.
30. Скачко Ю. В., Карцев Е. А. Цифровой dilatометр на базе струнного частотного преобразователя. — Электронная техника, сер. 8, 1974, вып. 2(20), с. 97—103.
31. Сопротивление материалов / Под ред. Г. С. Писаренко. Гос. изд-во техн. лит. УССР, Киев, 1963. 792 с.
32. Стретт Дж. (Релей). Теория звука. Т. I, гос. изд-во техн.-теор. литературы, 1955. 330 с.
33. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. 536 с.
34. Цодиков Ю. М. Исследование струнных преобразователей в режиме автоколебаний. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. М.: ИАТ АН СССР, 1965. 16 с.
35. Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. П. В. Новицкого. Л.: Энергия, 1975. 576 с.
36. Эткин Л. Г. Вибрационные динамометры. — Измерительная техника, 1961, № 12, с. 27—30.
37. Schaefer O. Колеблющаяся струна как измеритель натяжения. — Zeitschrift VDT, т. 63, № 47, 1919. с. 1008.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
ГЛАВА I. Принцип действия струнных измерительных преобразователей	8
1. Сущность и теоретические основы струнного метода измерений	8
2. Однострунные измерительные преобразователи, их функция преобразования и погрешность от нелинейности	16
3. Дифференциальные струнные измерительные преобразователи	19
4. Методы линеаризации функций преобразования однострунных и дифференциальных струнных преобразователей	25
ГЛАВА II. Расчет основных конструктивных параметров унифицированных струнных измерительных преобразователей	28
1. Основные принципы, положенные в основу разработки методики расчета	28
2. Выбор основных конструктивных параметров струнного унифицированного резонатора	29
3. Методика расчета основных параметров струнных измерительных преобразователей давлений	44
4. Струнные преобразователи усилий и массы вещества	61
5. Струнные преобразователи линейных и угловых перемещений	69
6. Струнные преобразователи температуры и измерительные устройства на их базе	76
7. Струнные преобразователи для измерения параметров газообразных сред	84
ГЛАВА III. Конструкции унифицированных струнных измерительных преобразователей и их метрологические характеристики	95
1. Основные соображения, положенные в основу унификации конструкций струнных измерительных преобразователей	95
2. Струнные преобразователи давлений и разрежений	97
3. Преобразователи разности давлений и абсолютного давления	101
4. Струнные преобразователи усилий и масс вещества	111
5. Преобразователи линейных и угловых перемещений	118
6. Преобразователи температуры и измерительные устройства, выполненные на их базе	124
7. Струнные преобразователи степени разрежения газообразных сред	132
8. Струнные преобразователи скорости и расхода газообразных сред	139
Список литературы	145

50 коп.



«МАШИНОСТРОЕНИЕ»