

УДК 681.586.326:53.087.92

## УПРУГИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

канд. техн. наук Д.А. ДОВГЯЛО, В.А. РЫМАРЕВ,  
Р.Н. БАСАЛАЙ, А.И. КУЗЬМИЧ  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассмотрены упругие чувствительные элементы современных датчиков давления. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований предложен механизм определения упругой характеристики гофрированной мембраны при наличии на ее жестком центре присоединенной массы.*

**Введение.** В современных датчиках давления измеряемая величина - давление газообразных, жидких или сыпучих сред - преобразуется в перемещение или силу, как правило, упругими чувствительными элементами (УЧЭ), в качестве которых используются разнообразные мембраны, мембранные и анероидные коробки, витые трубки, трубки Бурдона, сильфоны и колпачки.

Сильфоны предназначены для работы в качестве УЧЭ в измерительных приборах и устройствах контроля и регулирования различных конструкций и служат для преобразования измеряемого давления в перемещение, а также используются как компенсаторы и разделители сред [1]. При действии нагрузки (внешнего или внутреннего давления) длина сильфона увеличивается или уменьшается в зависимости от направления приложенной силы. В пределах рабочего диапазона давлений от  $10^3$  до  $2 \cdot 10^7$  Па деформация сильфона приблизительно пропорциональна действующей силе, т.е. упругая характеристика (УХ) близка к линейной. В пределах прямолинейности УХ отношение действующей силы к деформации остается постоянным и называется жесткостью сильфона. Сильфоны изготавливаются из сплава марки 36НХТЮ, бериллиевой бронзы марки БрБ2, нержавеющей стали, например 12Х18Н10Т, и латуни марки Л-80; выпускаются диаметрами от 9 до 100 мм при толщине стенки 0,08 - 0,25 мм и пригодны для работы в средах, не вызывающих коррозии материала при температурах [2]:

- от минус 60 до плюс 200 °С - для сплава марки 36НХТЮ;
- от минус 60 до +100 °С - для бериллиевой бронзы марки БрБ2 и латуни Л-80;
- от минус 200 до плюс 400 °С - для нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т.

Существенным недостатком сильфонов является значительный гистерезис УХ. Для увеличения жесткости, уменьшения влияния гистерезиса и нелинейности часто внутрь сильфона помещают винтовую цилиндрическую пружину. В этом случае УХ сильфона изменяется, так как к жесткости сильфона добавляется жесткость пружины, обычно в несколько раз превышающая жесткость сильфона.

Для измерения абсолютных и избыточных давлений также находят применение датчики с мембранными и анероидными коробками. Эти УЧЭ имеют значительную чувствительность и в зависимости от геометрических размеров, формы и материала ими может быть перекрыт диапазон давлений от  $10^3$  до  $5 \cdot 10^5$  Па. Динамической полостью в датчиках абсолютного давления (анероидные датчики) является объем внутри герметичного корпуса, а в датчиках избыточного давления (манометрические датчики) - динамическая полость (динамическая полость - это внутренний объем одной или двух манометрических коробок, а статическая - объем внутри корпуса датчика). При изменении давления газовой среды в корпусе датчика абсолютного давления или при изменении перепада давлений во внутренних полостях УЧЭ и корпусе датчика избыточного давления мембранные (анероидные) коробки деформируются и посредством передаточно-множительного механизма перемещают измерительный элемент. Измеряемое давление нейтральной газовой среды может подаваться как в динамический, так и в статический штуцеры, а давление агрессивных газовых и любых жидких сред - только в динамический штуцер. Из анализа характеристик датчиков статических и медленно меняющихся давлений следует, что с их помощью возможно измерение давления с основной погрешностью 0,5 - 1 % при температуре окружающей и рабочей среды  $\pm 60$  °С [1]. Однако отдельные модификации могут использоваться до +120 °С при одновременном воздействии влияющих факторов. Основным недостатком этого класса УЧЭ - узкий частотный диапазон, не превышающий нескольких десятков герц.

Датчики с УЧЭ в виде трубки Бурдона и витой трубки используются для измерения как абсолютных, так и избыточных статических и медленно меняющихся давлений. Трубка Бурдона по своему назначению аналогична мембранной коробке, но ее применяют для измерения высоких давлений - от  $10^6$  до  $6 \cdot 10^7$  Па. Витая трубка, или геликоидальная пружина, используется для измерений в диапазоне от  $10^3$  до  $6 \cdot 10^6$  Па [3]. Упругие чувствительные элементы в виде колпачков и полусфер применяются для измерения давления в тех случаях, когда необходимо получить равномерное механическое напряжение в области расположения механоэлектрических преобразователей.

Кроме ранее описанных УЧЭ, существует еще одна обширная категория элементов, воспринимающих давление. Это – мембраны – гибкие круглые пластины, получающие значительные прогибы  $w_0$  в зависимости от действующего давления  $P$ . Широкое использование одиночных мембран различной формы обусловлено тем, что ими перекрывается диапазон давлений от 10 до  $10^8$  Па. Наибольшей чувствительностью к измеряемой величине обладают мягкие мембраны из резины, тефлона или пластмасс. Обычно (из конструктивных соображений) эти мембраны делаются с жестким центром и гофрами.

Плоские мембраны используют там, где требуется небольшой ход, причем сама мембрана нагружается только рабочим давлением, не испытывая противодействия со стороны механизма прибора (например, в емкостных, индуктивных, тензометрических датчиках [3]). Такие мембраны используют также в качестве преобразователей давления в усилие, которое затем воспринимается различными датчиками (электросопротивления, пьезоэлектрическими, магнитоstrictionными и др.), имеющими достаточно высокую жесткость. В этих случаях мембрану можно считать практически неподвижной. Высокая частота собственных колебаний подобных датчиков с тонкими металлическими мембранами позволяет использовать их для измерения давлений, изменяющихся с частотой до нескольких сотен и тысяч Герц. В показывающих и регистрирующих приборах плоские металлические мембраны применяют редко.

Гофрированные мембраны применяют чаще, чем плоские, так как они могут работать при значительно больших прогибах [4]. В зависимости от формы профиля УХ мембрана может быть линейной, затухающей или возрастающей по давлению. В этом отношении гофрированные мембраны имеют преимущество перед другими типами УЧЭ, характеристики которых так широко не варьируются. С помощью гофрированных мембран можно легко решать задачи измерения величин, не линейно связанных с давлением (например, расхода жидкости или газа, проходящего по трубопроводу, воздушной скорости полета самолета и т.п.). Подбирая должным образом геометрические параметры мембраны, можно получить УХ, линейную по измеряемой величине, и тогда линейность шкалы прибора достигается при простейшей кинематике механизма. До тех пор, пока изменение длины волны гофрировки достаточно мало, УХ гофрированной мембраны будет оставаться близкой к линейной. При дальнейшем росте прогибов начальная плоскость мембраны будет удлиняться, шаг гофрировки будет увеличиваться, и УХ мембраны будет затухать. У мембраны с мелкой гофрировкой растяжение гофров, а следовательно, и нелинейность УХ проявляются при меньших прогибах, чем у мембраны с глубокой гофрировкой. Большое влияние на УХ гофрированной мембраны оказывает ее толщина  $h$ , особенно при небольших толщинах. Изменение же числа волн  $n$  при условии сохранения глубин гофрировки мало меняет УХ гофрированной мембраны [5]. Форма профиля оказывает значительно меньшее влияние на характеристику, чем его глубина. Если сравнить УХ мембран пильчатого, трапецеидального и синусоидального профилей при одинаковых глубинах  $Y$  гофрировки и числе волн  $n$ , то оказывается, что наименьшей начальной жесткостью обладает мембрана пильчатого профиля, наибольшей – мембрана трапецеидального профиля с достаточно большой шириной плоского участка [3]. В последнем случае УХ наиболее близка к линейной. Необходимую УХ мембраны получают подбором толщины материала или глубины гофрировки. Форму профиля и число волн обычно выбирают с учетом конструктивных или технологических особенностей.

Постановка задачи. Для реализации датчика давления с гальваномангнитным преобразователем минимально необходимой структурой преобразующего блока является схема, показанная на рис. 1 [6]. Основным преимуществом такого построения датчика давления является передача механического перемещения мембранного УЧЭ в выходной электрический сигнал посредством магнитного поля, позволяющая повысить надежность и точность измерений прибора за счет отсутствия кинематической передачи усилия.

Обычно центральная плоская часть мембраны изготавливается с жестким центром, штифт которого служит для передачи перемещения (усилия) от мембраны к воспринимающему механизму прибора [3]. Для структуры, показанной на рис. 1, жесткий центр предназначен для присоединения либо магнитной системы, либо микрорелектронного преобразователя Холла.

При проектировании мембран обычно не учитывают незначительную деформацию центральных волн, обусловленную собственной массой, так как это существенно не влияет на работу устройства. Однако в преобразующем блоке (рис. 1) жесткий центр обладает такой массой, которая вносит нелинейность в УХ мембраны. Возникает задача определения влияния массы, присоединенной к жесткому центру ( $M_{пр}$ ) мембраны, на УХ.

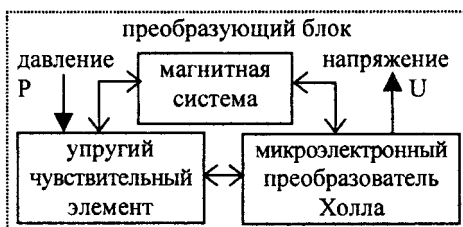


Рис. 1. Структура построения преобразующего блока датчика давления

Методы исследований. Аналитический вывод УХ мембраны с присоединенной массой из дифференциальных уравнений, приводимых в основополагающей работе [3], является непростой задачей. Это связано со сложностью построения системы дифференциальных уравнений и определения ее граничных условий. Поэтому определение влияния  $M_{пр}$  на УХ произведено по результатам экспериментов.

При проведении опытов на жесткий центр мембраны устанавливаются предварительно откалиброванные по массе грузы, имеющие форму шайбы с отверстием для установки передатчика перемещений (рис. 2).



Рис. 2. Мембрана в оправке

Значение  $M_{пр}$  изменяется через 0,2 г. Давление задается с помощью манометра избыточного давления МП-2,5 класса точности 0.05 и контролируется деформационным манометром (модель 1227, класс точности 0.15). Исследуемая мембрана в сборе с жестким центром закреплена обжимом по контуру в оправке, изготовленной из аустенитной стали 12Х18Н10Т. К жесткому центру мембраны приклеен передатчик перемещений - прозрачный стеклянный шток с нанесенными на него через 1 мм рисками, служащими для считывания информации о прогибах жесткого центра мембраны. Определение прогиба фиксируется микроскопом «Биолам-М».

Исследования влияния  $M_{пр}$  на величины прогиба мембраны  $\omega$  проведены при  $0 < M_{пр} < M_M$  (из расчета масса мембраны с жестким центром  $M_M = 3,6$  г). Расширение этого диапазона в сторону больших значений  $M_{пр}$

нецелесообразно, так как присутствие значительной массы на жестком центре приводит к появлению прогибов при отсутствии давления и к появлению гистерезиса УХ. Проверка достоверности экспериментальных значений выполнена в соответствии с [7].

Экспериментально доказано, что влияние массы  $M_{пр}$ , присоединенной к жесткому центру мембраны, имеющей массу  $M_M$ , математически удобно учитывать множителями, зависящими от отношения  $M_{пр} / M_M$ , к коэффициентам  $k_1$  и  $k_2$ , которые в методе «наложения» полностью определяют профиль гофрировки [8].

**Результаты и их обсуждение.** По методу «наложения» [3] УХ мембраны с неравномерной гофрировкой

$$\frac{pR^4}{Eh^4} = \eta_p a_p \frac{\omega_0}{h} + \xi_p b_p \frac{\omega_0^3}{h^3}, \quad (1)$$

где  $p$  – приложенное давление;  $R$  – радиус мембраны;  $E$  – модуль упругости материала мембраны;  $h$  – толщина мембраны;  $\omega_0$  – величина прогиба;  $\eta_p$  и  $\xi_p$  – поправочные коэффициенты для плоского жесткого центра [3], зависящие от его относительного радиуса  $\rho = r_0/L$  ( $r_0$  – радиус жесткого центра;  $L$  – проекция профиля) и от геометрии гофра;  $a_p$  и  $b_p$  – коэффициенты:

$$a_p = \frac{2 \cdot (3 + \alpha) \cdot (1 + \alpha)}{3 \cdot k_1 \cdot \left(1 - \frac{\mu^2}{\alpha^2}\right)}; \quad b_p = \frac{32 \cdot k_1}{\alpha^2 - 9} \cdot \left(\frac{1}{6} - \frac{3 - \mu}{\alpha^2 - 9}\right), \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала;  $\alpha$  – безразмерный параметр:

$$\alpha = \sqrt{k_1 \cdot k_2}, \quad (3)$$

где коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  зависят от геометрии профиля гофрированной мембраны и ее толщины:

$$k_1 = \frac{\int_0^L \sqrt{1 + \left[\frac{d}{dx} y(x)\right]^2} dx}{L}, \quad (4)$$

$$k_2 = 12 \cdot \frac{\int y^2(x) dS}{L \cdot h^2} + \frac{\int \cos^2(\theta(x)) dS}{L}, \quad (5)$$

где  $y(x)$  – уравнение кривой  $CC'$  (рис. 3);  $\Theta(x)$  – угол между касательной к кривой  $CC'$  и горизонталью. Тогда множители к коэффициентам  $k_1$  и  $k_2$  соответственно имеют вид

$$g_1 = \left( \frac{M_M + M_{пр}}{M_M - M_{пр}} \right)^3 ; \quad g_2 = 1 + \left( \frac{M_{пр}}{M_M} \right)^3 . \quad (6)$$

Введение множителей  $g_1$  и  $g_2$  для коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  является более корректным, чем для коэффициентов  $a_p$  и  $b_p$ , так как  $k_1$  и  $k_2$  не столько определяются видом УХ, сколько осевой и радиальной жесткостью, а следовательно, и самой геометрией. Коэффициенты же  $a_p$  и  $b_p$  из-за специфики метода «наложения» интерпретируются видом заделки мембраны:  $a_p$  – жесткая заделка,  $b_p$  – гибкая заделка. Согласно (4) коэффициент  $k_1$  представляет собой отношение длины кривой  $CC'$  к длине  $L$  (см. рис. 3).

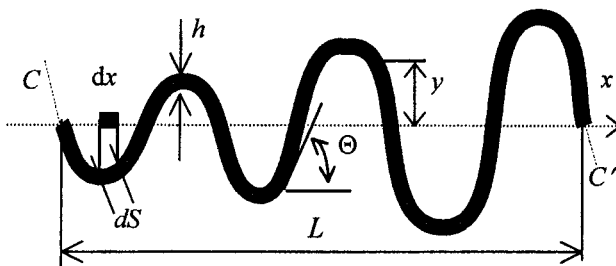


Рис. 3. Разбиение мембраны на элементарные участки

Присоединение массы можно рассматривать как адекватное увеличение высоты жесткого центра. Так как  $M_{пр} = \rho V$  ( $\rho$  – плотность материала;  $V$  – объем жесткого центра) и  $V = S \cdot h$  ( $S$  и  $h$  – соответственно площадь и высота жесткого центра), то  $M_{пр} = \rho S \cdot h$ . Величина  $L$  при внесении  $M_{пр}$  не изменяется, а величина  $CC'$  увеличивается за счет увеличения  $h$ , следовательно, с ростом  $M_{пр}$  коэффициент  $k_1$  увеличивается. Коэффициент  $k_2$ , равный отношению моментов инерции осевого сечения гофрированной и плоской мембран, в зависимости от  $M_{пр}$  определяется величиной  $y^2 \cdot x$  ( $y$  – высота относительно нейтральной оси;  $x$  – расстояние от центра мембраны). Пока  $x$  мало (небольшая  $M_{пр}$ , установленная на жестком центре),  $k_2$  возрастает незначительно. С увеличением  $M_{пр}$  происходит увеличение  $h$ , а так как зависимость  $k_2$  от  $h$  через  $y$  является квадратичной, то увеличение  $k_2$  становится более значительным. Таким образом, при небольших  $M_{пр}$  определяющую роль играет малость  $x$ , а при значительных  $M_{пр}$  – степень  $y$ , а именно  $y^2$ . Это полностью согласуется с видом (6).

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений прогибов мембраны в зависимости от различной величины  $M_{пр}$  и давления приведены на рис. 4.

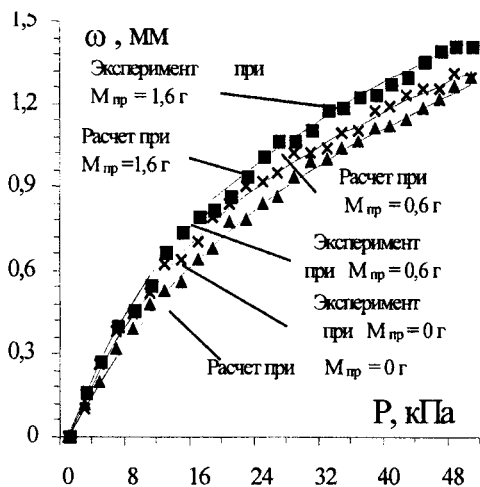


Рис. 4. Зависимости прогиба мембраны от давления при различных  $M_{пр}$

Масса, присоединенная к жесткому центру мембраны, увеличивает ее прогибы от 6 до 30 % и изменяет нелинейность УХ в пределах от 6,5 до 14,1 %, пик нелинейности наблюдается при значении  $M_{пр} \approx 0,5$  мм. Интересные результаты зависимостей (рис. 5)  $\omega (M_{пр})$  при фиксированных значениях давления:

- в области малых значений  $M_{пр}$  ( $0 < M_{пр} \leq 0,4 M_M$ ), функции  $\omega (M_{пр})$  возрастают практически линейно при  $0 < P \leq 50$  кПа;
- возрастание давления приводит к смещению максимума  $\omega (M_{пр})$  в сторону больших масс по линейному закону (см. рис. 5), а сама функция  $\omega (M_{пр})$  становится более линейной, что видно при  $P = 40$  и  $50$  кПа.

Возрастание  $M_{пр}$  приводит не только к увеличению прогибов мембраны  $\Delta \omega_{max}$ , но и к изменению нелинейности УХ  $\gamma_n$  (рис. 6). Обобщенным параметром, учитывающим оба этих значения, может служить отношение  $\Delta \omega_{max} / \gamma_n$

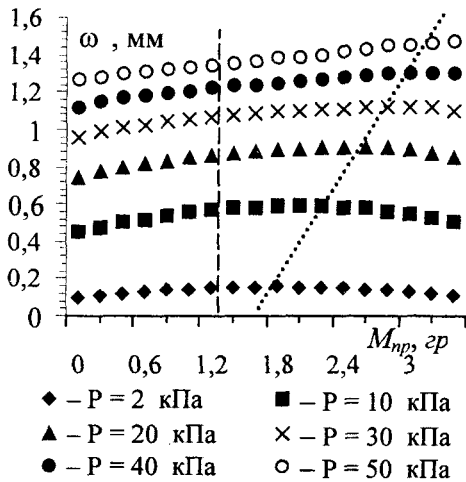


Рис. 5. Зависимости прогиба от  $M_{пр}$  при фиксированных значениях давления:

----- линия, ограничивающая диапазон линейного возрастания прогиба;  
 ..... линия, проведенная через максимумы функции  $\omega(M_{пр})$ .

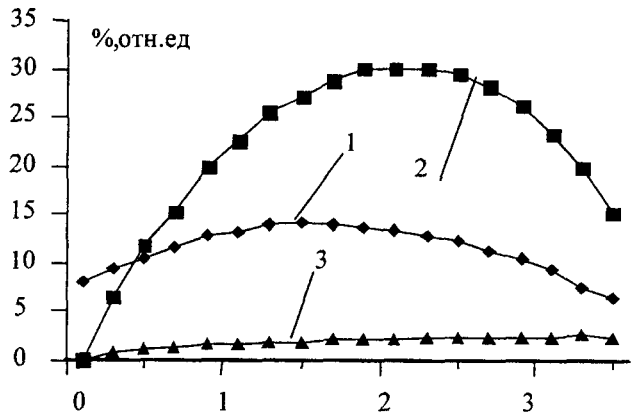


Рис. 6. Зависимости:  
 1 – нелинейности  $\gamma_n$  (в %);  
 2 – относительного изменения прогиба  $\Delta\omega_{max}/\gamma_n$  (в отн. ед.) от величины  $M_{пр}$

Из рис. 6 видно, что оно незначительно изменяется при  $M_{пр} = 0,6 - 3,4$  г. Кроме того, увеличение массы нецелесообразно по технологическим и конструктивным соображениям.

Выводы. Результаты исследований УХ металлических мембран с неравномерным гофром и соединенной массой показывают, что применение предложенного механизма расчета позволяет определять УХ с погрешностью, не превышающей 1,5 %. Такие значения дают приемлемые результаты по точности на этапе проектирования мембран и не требуют численного решения сложных математических выражений, представленных в работе [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник: В 3 т. / Под общ. ред. Ю.Н. Коптева; Под ред. А.Е. Багдадыева, А.В. Гориша, Я.В. Малкова. - М.: ИПРЖР, 1998. - Т. 1 (кн. 2). - 562 с.
2. [http://www.pribor.moris.ru/silfon\\_izm.shtml](http://www.pribor.moris.ru/silfon_izm.shtml)
3. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. - М.: Машиностроение, 1981.-391 с.
4. Довгяло Д.А. Упругие чувствительные элементы датчиков быстропеременных давлений с микроэлектронным преобразователем Холла // Современные направления развития производственных технологий: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 1999 г. / ММИ. - Могилев, 1999. - С. 31.
5. [http://www.asp.tstu.rU/rus/el\\_uch/metrolog/texts/NonElect/Pressure/G13/M\\_S\\_Pri.htm](http://www.asp.tstu.rU/rus/el_uch/metrolog/texts/NonElect/Pressure/G13/M_S_Pri.htm)
6. Гальваномагнитные датчики давления / Д.А. Довгяло, Ю.Г. Грозберг, С.А. Тарасов, А.И. Демченко // Теория и техника передачи, приема и обработки информации: Сб. науч. тр. по материалам 5-й междунар. конф., Харьков, 1999 г. / ХГТУР. - Харьков, 1999. - С. 271 - 273.
7. ГОСТ 8207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Введ. 01.1977. -М.: Изд-во стандартов, 1979. - 10 с.
8. Довгяло Д.А., Рымарев В.А. Гофрированная металлическая мембрана с неравномерной гофрировкой // Метрологическое обеспечение качества-2000: Материалы науч.-техн. конф., Минск, 2000 г. / Мн: Тесей, 2000.-С. 191-196.