

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛАСТИЧНАТА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ЕЛЕМЕНТ ОТ МАНОМЕТРИЧЕН УРЕД

Николай Стефанов
ТУ-Габрово

STUDY OF THE ELASTIC CHARACTERISTIC OF AN ELEMENT OF A MANOMETRIC DEVICE

Nikolay Stefanov
Technical University of Gabrovo

Abstract

Bellows represent one of the most commonly used components in engineering structures. They are used to measuring vacuum, or gases or liquids under pressure.

For better sensitivity, some low-range mechanical gages (sometimes called aneroid gages) use corrugated diaphragms or capsules as sensors. The capsule is basically a short bellows sealed with end caps. These sensors are more compliant than a Bourdon tube, and a given applied pressure causes a larger deflection of the sensor.

In this work are examined the characteristics of the error from of the static characteristic of the measuring bellows.

Mathematical models are presented, in order to allow evaluation of the error from nonlinearity regarding the permissible error of the measurement result. The models are developed, based on the method of the smallest modules.

Keywords: bellows; measuring device; static characteristic of a measuring instrument; error evaluation

ВЪВЕДЕНИЕ

Означения:

A -коэффициент;

α -ъгъл на уплътнение, rad;

c -еластична константа, N/mm ;

d -диаметър, mm ;

E -модул на еластичност на материала, MPa ;

$$E = \frac{E_{bel}}{1-\mu^2};$$

F -ефективна площ, mm^2 ;

f -дължина на стената на гофрата, mm ;

I -инерционен момент, mm^4 ;

μ -коэффициент на Поасон;

n -брой на гофрите;

P -аксиална сила, N ;

p -налягане, MPa ;

r -радиус, mm ;

s -дебелина на стената, mm ;

T -стъпка между гофрите, mm ;

w -дълбочина на гофрата, mm

Индекси:

O -външен, основна дебелина;

i -вътрешен;

m -средна стойност;

w -закръгление на гофрата;

ax -аксиална;

bel -силфон;

sp -пружина

Измервателните силфони се използват като чувствителни елементи в манометричните уреди. При това са възможни две схеми за използване на силфоните.

Силфонът преобразува налягането в преместване или налягането в усилие. По втората схема работят уредите реализирани на принципа на силовата компенсация.

Грешките предизвикани от несъвършенствата на еластичните свойства на материала се изразяват в хистерезис, последей-

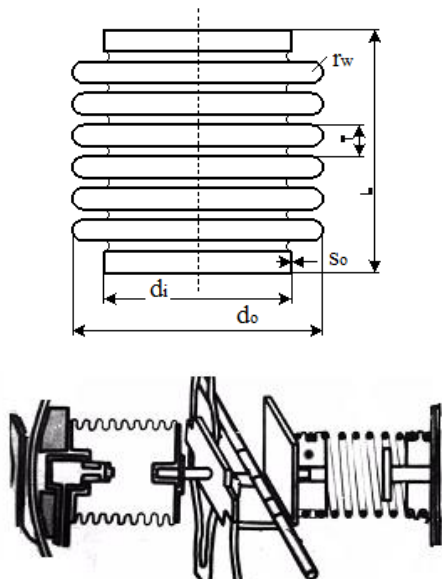
ствие, температурна грешка и грешки свързани с изменение модула на еластичност.

Всичко това оказва влияние върху надеждността и точността на уредите.

Основна цел при анализа на уредите се явява определянето на еластичността на силфона.

При избор на измервателен силфон е необходимо да се знае неговият ход в зависимост от налягането (еластична характеристика). Тази характеристика е нелинейна и това е свързано с изменение на геометрията на силфона в процеса на натоварване. С увеличаване на преместването, нелинейността на еластичната характеристика нараства и може да достигне $20 \div 30\%$. В много случаи преместването на силфона е в зависимост от ефективната му площ, която се променя с изменение на налягането. Това обстоятелство се явява една от причините за наличието на грешки при уредите със силова компенсация.

На фиг. 1 са представени геометричните размери на безшевнен силфон с U профил на гофрите и силфонен възел.



Фиг.1. Силфон и силфонен възел

ИЗЛОЖЕНИЕ

Целта на настоящата разработка е да се изследва теоретично и експериментално еластичната характеристика на силфон и неговото включване в измервателен възел от уред и определяне на основните грешки.

За теоретичното определяне на еластичната характеристика на силфон може да се

приложат натрупаните познания от теорията на еластичността. В настоящия анализ разсъжденията се свеждат до елементарни, а това води до резултати отличаващи се в голям процент от действителните. Приема се, че отделните участъци от конструкцията на силфона са подложени на деформации при огъване.

При пренебрегване на деформациите в закръглените участъци на силфона, но като се вземат под внимание – линейните, които формират дълбочината на гофрите и при прилагане на аксиална сила, действаща по неутралната ос минаваща през центъра на тежестта на стената на гофрата, за максималното преместване на една гофра при специално огъване се получава:

$$x = \frac{f^3}{24 E I} P, \quad (1)$$

където I е инерционен момент и се представя с израза:

$$I = \frac{\pi s^3 (d_o + d_i)}{24} = \frac{\pi s^3 d_m}{12}. \quad (2)$$

Еластичната константа на една гофра се получава след като (2) се замести в (1) и се отчете дълбочината на гофрата.

При допускане, че всички размери се взимат по средната линия на профила на гофрата и е налице условието:

$$(r_o - r_i) \gg r_w,$$

то за дълбочината на гофрата се записва $w = f + 2 r_w$ или $w \approx f$. От тук следва окончателния запис за еластичната константа на една гофра:

$$c_{bel} = \frac{\pi E s^3 (d_o + d_i)}{w^3} = \frac{2 \pi E s^3 d_m}{w^3}. \quad (3)$$

Еластичната константа на силфон с n на брой гофри при два пъти по-голямо преместване, се получава по зависимостта:

$$c_{ax} = \frac{c_{bel}}{n} = \frac{\pi E s^3 d_m}{n w^3}. \quad (4)$$

Общият случай на запис на еластичната константа на силфон се свежда до зависимостта:

$$c_{ax} = \frac{c_{bel}}{n} = \frac{\pi E s^3}{(1 - \mu^2) n} C,$$

където C е параметър с размерност mm^{-2} .

В настояще време съществуват редица литературни източници при които е направено задълбочено аналитично и експериментално определяне на еластичната константа на силфон [1,2,7,8]. В следващите

редове са изложени крайните резултати от тези изследвания с кратко описание на приетите допускания по отношение на извода (определяне на параметъра С).

В [7] е изведена зависимостта за еластичната константа на силфон при осово натоварване, като се използва зависимостта получена от Федосиев по енергетичния метод на решаване на задачата на Ритц, и се представя с израза:

$$C_{ax} = \frac{E s}{1-\mu^2} \frac{A_0 - \alpha A_1 + \alpha^2 A_2 + B_0 \frac{s^2}{r_i^2}}{n}, \quad (5)$$

където:

$$\alpha = \frac{4 r_w - T}{2(r_0 - r_i - 2 r_w)}, \quad (6)$$

е т. н. „Ъгъл на уплътнение“ на силфона и се представя в рад, а A_0, A_1, A_2, B_0 са коефициенти зависещи от $\frac{r_0}{r_i}, \frac{r_w}{r_i}$ които се определят графично.

Ъгълът на уплътнение има положителни или отрицателни стойности в зависимост от това дали силфона се свива или разтяга.

При неуплътнен силфон ($\alpha \approx 0$) и изпълнено условие $(r_0 - r_i) \gg r_w$, тричлена $A_0 - \alpha A_1 + \alpha^2 A_2$ се пренебрегва и зависимост (5) се представя във вида:

$$C_{ax} = \frac{E s^3 B_0}{(1-\mu^2) r_i^2 n}. \quad (7)$$

В [13] анализната схема на силфона се свежда до набор от кръгли пластини съединени по вътрешен диаметър. Аксиалната еластичност е определена на основа теорията на огъване на кръгли пластини при приемане на същите допускания $(r_0 - r_i) \gg r_w$ и $\alpha = 0$. Тези допускания дават основание за пренебрегване на деформациите на закръглените участъци в сравнение с деформациите на плоските участъци на силфона.

Приема се преместването на дъното на силфона да е равно на сумата от огъването на всички пластини и да е $2n$ пъти по-голямо от преместването на всяка една пластина.

Еластичната константа се дава със зависимостта:

$$C_{ax} = \frac{E s^3}{2 A r_0^2 n}, \quad (8)$$

където:

$$A = \frac{3(1-\mu^2)}{4\pi} \left[\frac{\left(\frac{r_0}{r_i}\right)^2 - 1}{\left(\frac{r_0}{r_i}\right)^2} - \frac{4 \ln^2 \frac{r_0}{r_i}}{\left(\frac{r_0}{r_i}\right)^2 - 1} \right] \quad (9)$$

Средната дебелина на стената на силфона се дава с израза:

$$s = \sqrt[3]{\frac{1}{(r_0 - r_i)}} \int s^3(r) dr. \quad (10)$$

След заместване на (9) в (8) окончателно за еластичната константа се получава:

$$C_{ax} = \frac{\pi E s^3}{(1-\mu^2) n r_0^2} \times \frac{4}{6 \left[\frac{\left(\frac{r_0}{r_i}\right)^2 - 1}{\left(\frac{r_0}{r_i}\right)^2} - \frac{4 \ln^2 \frac{r_0}{r_i}}{\left(\frac{r_0}{r_i}\right)^2 - 1} \right]}. \quad (11)$$

В ЕЈМА std и [4,8,10] за еластичната константа е приета зависимостта:

$$C_{ax} = \frac{1.7 E s^3 d_m}{(1-\mu^2) n w^3} \frac{1}{c_f}, \quad (12)$$

където c_f е корекционен коефициент и

$$c_f = f\left(\frac{T}{\sqrt{s} d_m}; \frac{T}{2w}\right).$$

В зависимост (12) параметрите са в система “lb-in-sec”, а s и d_m се дават с изразите:

$$s = s_0 \sqrt{\frac{d_i}{d_m}}, \quad (13)$$

$$d_m = d_i + w + s. \quad (14)$$

При използването на силфоните в системите на автоматиката [5] се използва зависимостта:

$$C_{ax} = \frac{\pi E s^3}{(1-\mu^2) n w^3} \frac{d_0 a_1}{}, \quad (15)$$

където a_1 е коефициент отчитащ свойствата на материала. За бронз $a_1 = 0.111$.

В [2] геометрията на силфона е разделена на отделни участъци които се разглеждат като статично определени елементи при специално огъване. Дадени са провисванията и наклоните на еластичната линия.

На база на тези разсъждения е определена сумарната еластична константа при действието на аксиална сила:

$$C_{ax} = \frac{24 E I}{4 n \left[6 \pi r_w^3 + 24 f r_w^2 + f^3 + 3 f^2 r_w \pi \left(1 + \frac{s^2}{12 r_w^2} \right) \right]}, \quad (16)$$

където I се дава със зависимост (2).

При заместване на (2) в (16) се получава:

$$c_{ax} = \frac{\pi E s^3}{n} \times \frac{(d_0 + d_i)}{4 \left[6 \pi r_w^5 + 24 f r_w^2 + f^3 + 3 f^2 r_w \pi \left(1 + \frac{s^2}{12 r_w^2} \right) \right]} \quad (17)$$

Стойностите на c_{ax} , по гореизложените зависимости, са определени за силфон с параметри [6]: $d_0 = 50mm$, $d_i = 35.6mm$, $s_0 = 0.12mm$, $T = 3.4mm$, $n = 13$. Силфонът е изработен от материал CuBe2Ni с модул на еластичност $E_{b_{el}} = 1.31 \times 10^5 MPa$ и $\mu = 0.3$. Тези стойности са дадени в Таблица 2.

Експерименталната еластична характеристика на силфона е заснета на стенд описан в [3], като е спазена предписаната методика за провеждане на експеримента.

Обработката на опитните данни от измерванията са извършени съгласно предложени ред в [9], а обобщените резултати са представени на фиг. 2 в графичен вид. Максималната хистерезисна грешка е $\epsilon = 7.96\%$ при налягане $p = 0.008 MPa$.



Фиг. 2. Еластична характеристика на силфон

Регресионната права обобщаваща експерименталните резултати, получена по метода на толерансия интервал (best fit), се изчислява по метода на най-малките квадрати и се представя със зависимостта:

$$P = -0.19 + 1.64x. \quad (18)$$

При използване на метода за преминаване на регресионната права през нулевата и зададената крайна точка, за еластичната константа се получава: $c_{ax} = 1.615$. Тази стойност е най-близо до теоретично пресметнатите по зависимости (7) и (17) и се отклонява съответно в границите $0.6 \div 1.8\%$.

Силовата характеристика на силфонния възел е заснета на експериментална установка, представена в [9].

На фиг. 3 е представена експерименталната характеристика, а на фиг.4 хистерезисната характеристика.

Параметрите на силфонния възел са представени в Таблица 1.

Таблица 1. Параметри на силфонния възел

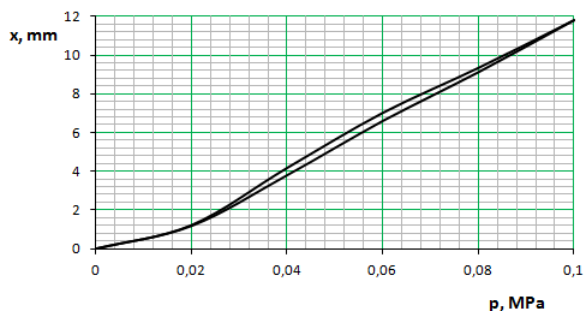
| Параметри, размерност | Стойност |
|--|--------------|
| Ефективна площ на силфона, $F mm^2$ | 1438.72 |
| Максимален ход на силфона от напълно свито положение до разтегнато, x_{max}, mm | 24 |
| Работен ход на силфонния възел, x, mm | 11 |
| Еластичност на силфона, $c_{ax}, N/mm$ | 1.64 |
| Еластичност на пружината, $c_{sp}, N/mm$ | 8.26 |
| Налягане при което силфона от неутрално положение извършва ход на 11 mm до пълно свиване, p, MPa | 0.0125 |
| Първоначално свиване на пружината, x_0, mm | 6.22 |
| Сила на пружината при свиване на 17.22 mm, P, N | 142.24 |
| Дължина на пружината в свободно състояние, L, mm | 54 |
| Максимална работна сила на пружината, P_{max}, N | 198.34 |
| Диапазон на изменение на налягането, p, MPa | $0 \div 0.1$ |

Уравнението на силите на силфонния възел, без отчитане на триещи сили, се дава във вида:

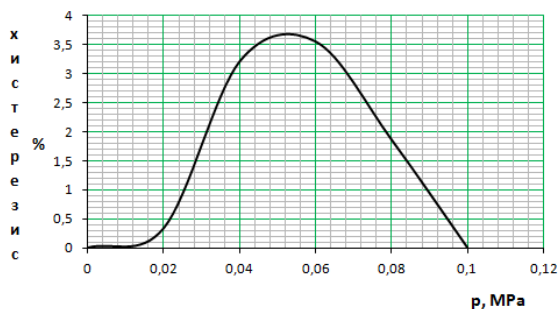
$$pF = c_{sp}(x_0 + x) + c_{ax} \left(\frac{x_{max}}{2} - 1 \right). \quad (19)$$

От (19) може теоретично да се определи коефициента на пропорционалност k от функционалната зависимост между входната величина p и изходната x .

По данни от [6, 9], за изследвания възел, който представлява част от измервател на налягане тип: 1МП30А, за коефициента на пропорционалност се получава стойността $k = 110 mm/MPa$.



Фиг. 3. Силова характеристика на силфонен възел



Фиг. 4. Хистерезисна характеристика на силфонен възел

При това положение нелинейната грешка може да се определи по зависимостта:

$$\epsilon_{nl} = \frac{k p - x}{x_{max}} 100, \% \quad (20)$$

Мултипликативната грешка представлява първата производна от функционалната зависимост между входната и изходна величина. В Таблица 2 са дадени стойностите от теоретично определените коефициенти на пропорционалност в зависимост от c_{ax} и стойностите на мултипликативната грешка.

Таблица 2. Сравнителна таблица

| Формула | c_{ax} | k | Максимална мултипликативна грешка |
|---------|----------|----------|-----------------------------------|
| - | N/mm | mm/MPa | % |
| 5 | 1.99 | 109.44 | -0.5 |
| 7 | 1.645 | 109.98 | -0.018 |
| 11 | 2.23 | 109.02 | -0.98 |
| 12 | 1.73 | 109.86 | -0.12 |
| 15 | 0.973 | 110.96 | 0.86 |
| 17 | 1.605 | 110.05 | 0.045 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инструменталната абсолютна грешка зависи от стойността на входната величина и се изразява чрез функционална зависимост. Действителната функционална зависимост на преобразуване $y = f(x)$ се отличава от номиналната $y_n = f_n(x)$. При измерването на физични величини е прието съставляващите на абсолютната грешка, пропорционални на втората и по-високи степени, да характеризират понятието „нелинейност“. Именно в настоящата разработка са дадени стойности на компонентите на абсолютната грешка от конкретен измервателен възел. Получените резултати могат да способстват при избора на чувствителен елемент за реализацията на измервателен уред.

REFERENCE

- [1] Andreeva L. E. Silfoni. Izchislyavane i projektirane. Mashinostroene. M., 1975.
- [2] Herman M., A. Jonsson. Static Characteristics of Flexible Bellows. Department of Mechanical Engineering University of Karlskrona, Sweden, 1997.
- [3] Iliev I, S. Simeonov, G. Tsvetanov, M. Nencheva. Finomehanichna tehnika. Universitetsko izdatelstvo "V. Aprilov", Gabrovo, 2008.
- [4] Jakubauskas V. F. Transverse Vibrations of Bellows Expansion Joints. Mc Master University, June, 1995.
- [5] Mol. Pnevmoavtomatika. M., 1970.
- [6] Pandurov S. P. Spravochnik po elementi i sredstva za avtomatichno izmervane, regulirane i upravljenie. Tehnika.S., 1973.
- [7] Ponomarev S., Andreeva L. Raschet uprugih elementov mashin i priborov. Mashinostroene. M., 1980.
- [8] Shutt R. P, M. L. Rehak. Instabilities of Bellows. Dependence on Internal Pressure end Supports and Interactions in Accelerator Magnet systems. Brookhaven National laboratory. Upton, New York, 1990.
- [9] Stefanov N. Metodichesko rukovodstvo za uprazhnenie po izmervane na hidro-pnevmo i toplinni velichini. Izdatelstvo "V. Aprilov", Gabrovo, 2007.

[10] Standards of the Expansion Manufactures Association (EJMA), S. EJMA, INC, Seven ed., New York, 1998.

[11] GOST 21482:76

[12] Catalogue HYDRA

[13]<http://baumankapashinin.com>>Экзамен68_