

**СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ  
НА ОСНОВЕ КОЛЬЦЕВЫХ УПРУГИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ**

И. В. Антонец<sup>1</sup>, В. А. Борсоев<sup>1</sup>, А. В. Кацура<sup>2\*</sup>, С. М. Степанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский государственный технический университет  
Российская Федерация, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: pnk-sibsau@mail.ru

*Весомизмерительные устройства являются техническими средствами систем управления транспортно-складскими комплексами, которые не только осуществляют учет перемещаемых грузов, но и оптимизируют процесс перемещения, в частности, подъемно-транспортных механизмов периодического действия. Вместе с тем, при использовании автоматических весов, работающих в условиях динамических нагрузок, необходимо решить задачи расширения диапазона и минимизации времени измерения при заданной величине чувствительности. Создание весомизмерительных устройств на основе кольцевого упругого элемента (УЭ) и вторичного преобразователя величины деформации в электрический сигнал является перспективным направлением с учетом наилучшего сочетания конструктивных коэффициентов кольцевого УЭ (чувствительности, быстродействия и приведенной массы). Существующие весомизмерительные устройства, чувствительным элементом которых является упругое кольцо, работают в определенных интервалах нагрузки. Характерной особенностью известных весомизмерительных устройств является наличие порога чувствительности, не позволяющего осуществлять измерение малых сил с заданной точностью. С целью измерения нагрузки в диапазоне от десятков до сотен ньютонов с равной точностью во всем диапазоне, авторами разработаны оригинальные конструкции весомизмерительных устройств, у которых пара колец работает или последовательно, или параллельно. Проведены теоретические и экспериментальные исследования оригинальных конструкций силоизмерительных устройств с последовательной и параллельной работой пар кольцевых упругих чувствительных элементов (УЧЭ). Получено уравнение регрессии с коэффициентами значимости каждого фактора. Предложена последовательность выбора оптимальных параметров кольцевого УЧЭ. Представлено экспериментальное определение деформаций кольца от приложенной нагрузки на разрывной машине РМ-5. Нагрузки, прилагаемые к кольцу, изменялись в диапазоне от 1000 до 30 000 Н с шагом 1000 Н. Результаты проведенных экспериментальных исследований обрабатывались с помощью пакета прикладных программ Statgraphics. Сравнительный анализ данных показал, что экспериментальные значения деформации кольца отличаются от теоретических значений не более чем на 15 %, это свидетельствует об адекватности полученного теоретического выражения.*

*Ключевые слова: упругий чувствительный элемент, статические характеристики, величина деформации, конструктивный угол прилива, система УЧЭ.*

Sibirskii Gosudarstvennyi Aerokosmicheskii Universitet  
imeni Akademika M. F. Reshetneva. Vestnik  
Vol. 18, No. 1, P. 188–194

**STATIC DATA OF STRENGTH MEASURING SYSTEMS DEVICE BASED  
ON THE ANNULAR ELASTIC SENSITIVE ELEMENTS OF VARIABLE SECTION**

I. V. Antonets<sup>1</sup>, V. A. Borsoev<sup>1</sup>, A. V. Katsura<sup>2\*</sup>, S. M. Stepanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ulyanovsk State Technical University  
32, Severnyy Venets Str., Ulyanovsk, 432027, Russian Federation

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State Aerospace University  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: pnk-sibsau@mail.ru

*Measuring devices are the technical means of control systems of transport and storage systems, which not only carry out the accounting of transported cargo, but also optimize the process of moving, in particular lifting-transport mechanisms of periodic action. However, when you use automatic weights, working in conditions of dynamic loads, it is necessary to solve the problem of extending the range and minimize the measurement time for a given value*

of sensitivity. Creating, measuring devices based on the annular elastic element (UE) and a second Converter the amount of deformation into an electrical signal is a promising direction, taking into account the best combination of constructive factors of the ring SE: sensitivity, responsiveness, and given mass. Existing measuring device, which sensitive element is elastic ring, works in certain ranges of load. A characteristic feature of the known measuring devices is the presence of a sensitivity threshold; it does not allow one to measure small forces with a given precision. With the aim of measuring loads in the range from tens to hundreds of Newton with equal accuracy over the entire range, the authors have developed an original design of weighing devices, in which a pair of rings works or sequentially, or in parallel. Theoretical and experimental studies of original designs force measuring devices with series and parallel operation of pairs of annular elastic sensing elements (CMCS) have been conducted. The regression equation with coefficients of importance of each factor has been got. The sequence of selection of optimal parameters of ring CMCS has been proposed. Experimental determination of the deformation of the ring from applied load on a tensile testing machine RM-5 has been got. The load attached to the ring, changed in the range from 1000 to 30 000 N in increments of 1000 N. The results of the conducted experimental studies were processed using the software package "Statgraphics". Comparative data analysis showed that the experimental values of deformation rings differ from the theoretical values by not more than 15 %, which confirms the adequacy of the obtained theoretical expressions.

**Keywords:** elastic sensing element, static characteristics, the amount of deformation, structural angle of tide, CMC system.

**Введение.** Упругий элемент (УЭ) осуществляет преобразование силы, момента или давления в абсолютную (в перемещение) или относительную деформацию (просто деформацию). Изучая принципы преобразования физических величин в конкретных типах УЭ, в частности, для кольца постоянного сечения, можно установить [1] связь между входной и выходной величинами, написать функцию преобразования УЭ, что дает возможность рассчитать чувствительность УЭ в конкретном случае его использования.

**Предлагаемая методика определения изгибающего момента и осевой силы в любом сечении кольца.** Нами определена функция преобразования кольца переменного сечения, расчетная схема которого представлена на рис. 1.

Система является один раз статически неопределимой. Неизвестная реакция – момент  $X$ . Кольцо будем рассчитывать как стержень малой кривизны, так как

$$\frac{H}{R} < \frac{1}{5}. \quad (1)$$

Для раскрытия статической неопределимости кольца необходимо [2; 3] составить каноническое уравнение:

$$y_{1F} + y_{11}X_1 = 0, \quad (2)$$

откуда

$$X_1 = -\frac{y_{1F}}{y_{11}}, \quad (3)$$

где  $y_{1F}$  – угол поворота от внешней нагрузки в сечении  $I$ ;  $y_{11}$  – угол поворота в сечении  $I$  от единичного момента. Изгибающий момент от нагрузки:

$$M'_F = -0,5 \cdot \sin(\varphi), \quad (4)$$

где  $\varphi$  – текущая угловая координата.

Момент от единичного силового фактора:  $M'_1 = 1$ .

Определим коэффициенты канонического уравнения:

$$y_{11} = 2 \int_0^a \frac{Rd\varphi}{EIc} + 2 \int_a^{\frac{\pi}{2}} \frac{Rd\varphi}{EI} = \frac{2R}{EI} \left[ \frac{\pi}{2} - \alpha \left( 1 - \frac{1}{c} \right) \right]; \quad (5)$$

$$y_{1F} = -2 \left[ \int_0^{\alpha} \frac{FR^2 \sin \varphi d\varphi}{2EcI} + \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \frac{ER^2 \sin \varphi d\varphi}{2EI} \right] = -\frac{FR^2}{EI} \left[ \cos \alpha \left( 1 - \frac{1}{c} \right) + \frac{1}{c} \right], \quad (6)$$

откуда

$$X_1 = \frac{FRD}{2}, \quad (7)$$

где

$$D = \frac{\cos \alpha \left( 1 - \frac{1}{c} \right) + \frac{1}{c}}{\frac{\pi}{2} - \alpha \left( 1 - \frac{1}{c} \right)}; \quad (8)$$

$X_1$  – момент в точке приложения силы;  $E$  – модуль упругости;  $I$  – момент инерции тонкостенного сечения кольца;  $Ic$  – момент инерции прилива.

Изгибающий момент в любом сечении кольца равен

$$M_F = -0,5FR \sin \varphi + 0,5ERD. \quad (9)$$

Осевая сила в любом сечении кольца

$$N = \frac{F}{2} \sin \varphi. \quad (10)$$

**Предлагаемая методика определения деформации силоизмерительного устройства с последовательной работой колец.** Существующие силоизмерительные устройства, чувствительным элементом которых является упругое кольцо, работают в определенных интервалах нагрузки. Характерной особенностью известных силоизмерительных устройств является наличие порога чувствительности, не позволяющего осуществлять измерение малых сил с заданной точностью. Однако на практике необходимо с заданной точностью измерять нагрузки в диапазоне от десятков до сотен и тысяч ньютонов. С целью решения указанной задачи нами проведены исследования оригинальных конструкций силоизмерительных устройств [4],

у которых пара колец работает или последовательно, или параллельно. Ниже представлены описания этих новых конструкций и расчет напряжений и деформаций в кольцах.

Силоизмерительное устройство с последовательной работой колец [5] функционирует следующим образом (рис. 2): в исходном состоянии внутреннее кольцо 3 свободно закреплено пластинами 2 в верхней части внешнего кольца 1. Между внутренним кольцом 3 и электромагнитом 4, закрепленным на плите 5, свободно лежащей на нижнем основании кольца 1, существует зазор  $S$ . Перед началом работы подается напряжение на электромагнит 4, и он притягивается с плитой 5 к кольцу 3, ликвидируя тем самым зазор  $S$ . После того, как на силоизмерительное устройство начинает действовать нагрузка, в первой фазе в работу вступает внутреннее кольцо 3. При достижении нагрузки  $Fh$  (пороговое значение нагрузки) электромагнит автоматически отключается, плита 5 ложится на нижнее основание кольца 1, кольцо 3 освобождается и возвращается в исходное состояние, и во второй фазе начинает работать внешнее кольцо, рассчитанное на нагрузку до  $F_{max}$ .

Каждое из колец один раз статически неопределимо, поэтому для каждого кольца необходимо одно уравнение совместности деформации. Это уравнение выражает отсутствие угла поворота сечения от действия внешней нагрузки  $F$  и неизвестного изгибающего момента  $X$ :

$$Y_{1F} + Y_{11}X = 0. \tag{11}$$

Определим коэффициенты уравнения (11):

$$Y_{11} = -[R/(EI_c)] \cdot \int_0^\alpha \partial\varphi + [R/(EI)] \cdot \int_\alpha^\pi \partial\varphi, \tag{12}$$

где  $\alpha$  – конструктивный угол прилива;  $I$  – минимальный момент инерции поперечного сечения кольца;  $I_c$  – момент инерции на участке прилива;  $R$  – средний радиус кольца;  $\varphi$  – угловая координата произвольного сечения;

$$Y_{1F} = -[R/(EI_c)] \cdot \int_0^\alpha M_F M_1 \partial\varphi + [R/(EI)] \cdot \int_\alpha^\pi M_F M_1 \partial\varphi, \tag{13}$$

где  $M_1 = -1$  – изгибающий момент от единичного момента;  $M_F$  – изгибающий момент от нагрузки:

$$M_F = -0,5FR \sin \varphi.$$

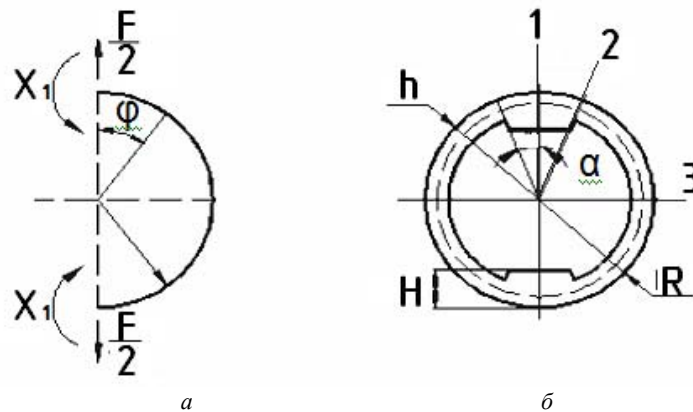


Рис. 1. Расчетная схема (а) и геометрические параметры (б) кольца с переменным сечением:  $R$  – средний радиус кольца;  $h$  – высота сечения тонкого участка кольца;  $H$  – высота прилива;  $\alpha$  – конструктивный угол прилива; 1, 2, 3 – номера сечений

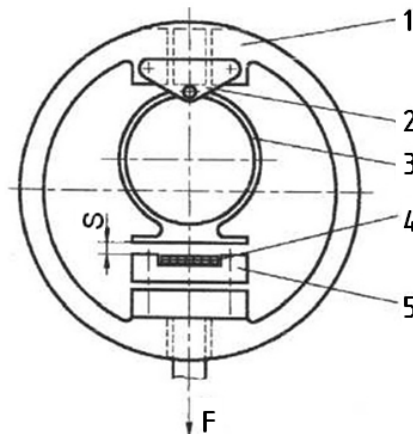


Рис. 2. Силоизмерительное устройство с последовательной работой колец

Изгибающий момент

$$X = -Y_{1F}/Y_{11} = FRB/A,$$

где  $A = \alpha + c(\pi - \alpha)$ ;  $B = 0,5[\cos \alpha(c - 1) + (c + 1)]$ .

Для определения деформации кольца  $f$  суммарный изгибающий момент от нагрузки равен

$$M_F = (FRB/A) - 0,5 \sin \varphi.$$

После преобразований получим

$$f = FRC/I, \quad (14)$$

где

$$C = \frac{1}{Ec} \cdot \left[ 0,5F \cdot (\alpha/2 - 0,25 \sin 2\alpha) + \frac{FB}{\cos \alpha - 1} \right] + \frac{1}{E} \left[ 0,5F \cdot (\pi/2 - \alpha/2 + 0,25 \sin 2\alpha) + \frac{FB}{A \cdot (-1 - \cos \alpha)} \right].$$

Напряжение изгиба в кольцах 1 и 3 равно

$$\sigma = 0,5h M_F/I \leq [\sigma],$$

где  $h$  – высота кольца между приливами.

**Предлагаемая методика определения деформации силоизмерительного устройства с параллельной работой колец.** Силоизмерительное устройство (рис. 3) с параллельной работой колец [6] функционирует следующим образом (рис. 3, а): внутреннее кольцо 3 закреплено в верхней части внешнего кольца 1 посредством двух пластин 2 и штифта. Снизу к кольцу 3 подвешена плита 4. Между плитой 4 и нижним основанием кольца 1 имеется зазор  $S$ . После того, как на силоизмерительное устройство начинает действовать нагрузка, в первой фазе в работу вступает внутреннее кольцо 3.

При достижении нагрузки  $F_n$  плита 4 ложится на основание внешнего кольца 1, ликвидируя тем самым зазор  $S$ , и во второй фазе нагрузку начинают воспринимать оба кольца, работая параллельно до предельной нагрузки  $F_{\max}$ .

*Первая фаза:* работает внутреннее кольцо.

После раскрытия статической неопределенности получаем:

$$Y_{11} = -R\pi / (EI); Y_{1F} = 2F_1R_2 / (EI); X = 2F_1R / \pi. \quad (15)$$

Деформация внутреннего кольца равна

$$f_1 = [F_1R_3(\pi/2 - 4)] / [\pi EI_1]. \quad (16)$$

*Вторая фаза:* параллельно работают оба кольца.

Система два раза статически неопределима (рис. 3, б). Требуется два уравнения совместности перемещений. Угол поворота сечения внутреннего кольца (в месте разреза) равен

$$Y_{1F} + Y_{11}X = 0. \quad (17)$$

Общая деформация внутреннего и наружного колец:

$$f_1 = f_2,$$

где  $f_2 = (0,5F - F_1)(B_1 + C_1)/I_2$ ;

$$A_1 = R_2/[(1 - \cos \alpha)/c + \cos \alpha]; \quad (18)$$

$$B_1 = [R_2/(EC_1)] \cdot [A_1R_2(\cos \alpha - 1) + R_2(\alpha/2 - 0,25 \sin 2\alpha)]; \quad (19)$$

$$C_1 = [2R_2/E] \cdot [A_1R_2 \cos \alpha + R_2^2(\pi/4 - \alpha/2 + 0,25 \sin 2\alpha)]. \quad (20)$$

Отсюда

$$F_1 = [0,5 EI_1 (B_1 + C_1)] / [I_2D + I_1(B_1 + C_1)], \quad (21)$$

где  $D = 1,88 R_1^3/E$ ;  $F_2 = 0,5F - F_1$ ;  $X_1 = 2F_1R_1/\pi$ ;  $X_2 = 2F_2R_2/\pi$ .

Напряжение изгиба в кольцах 1 и 3:

$$\sigma = 0,5 h M_F / I \leq [\sigma].$$

**Экспериментальные исследования и сравнение рассмотренных методов.** Для проверки адекватности полученных выражений проведены [7; 8] экспериментальные исследования (табл. 1) кольца с параметрами:  $H = 40$  мм,  $b = 60$  мм,  $R_{cp} = 88$  мм,  $\alpha = 30^\circ$ , материал кольца – сталь 40Х.

Экспериментальное определение деформаций кольца от приложенной нагрузки проводилось на разрывной машине РМ-5. Нагрузки, прилагаемые к кольцу, изменялись в диапазоне от 1000 до 30 000 Н с шагом 1000 Н. Результаты экспериментальных исследований обрабатывались с помощью ППП Statgraphics.

Сравнительный анализ данных табл. 1 показал, что экспериментальные значения деформации кольца отличаются от теоретических значений не более чем на 15 %, это свидетельствует об адекватности полученного выражения (14).

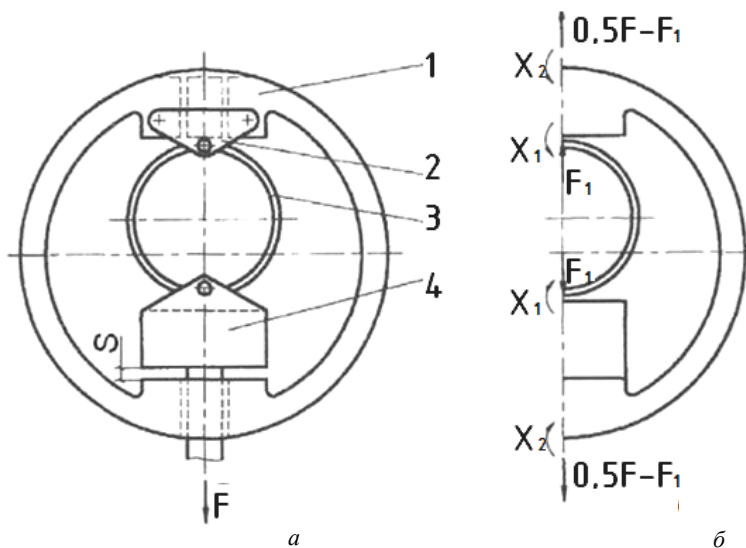


Рис. 3. Силоизмерительное устройство с параллельной работой упругих колец (а); соответствующая расчетная схема (б)

Определение величины отклонений контура упругого элемента проводилось в соответствии с существующей методикой [9; 10]. Был построен план матрицы планирования полного факторного эксперимента типа  $2^k$ , где  $k$  – число факторов. При  $k = 3$  ( $h, b, d_0$ ) – число точек плана  $N = 7$ . Результаты измерений, сведения о факторах, верхние и нижние уровни, интервалы варьирования, план матрицы планирования, проверка воспроизводимости эксперимента и значимости его коэффициентов, а также проверка адекватного описания процесса, промежуточные и конечные результаты позволили получить приведенное уравнение регрессии с коэффициентами значимости каждого фактора:

$$\delta = -1,288 + 0,238 x_1 + 0,36 x_2 + 0,121 x_3, \quad (22)$$

где  $\delta$  – величина отклонения контура в логарифмическом виде;  $x_1, x_2, x_3$  – приведенные к логарифмическому виду соответственно толщина  $h$ , ширина  $b$ , диаметр  $d_0$ .

Наибольшее влияние на величину суммарных перемещений элементов контура кольца оказывает изменение ширины кольца (коэффициент значимости  $b_2 = 0,36$ ); изменение толщины может существенно повлиять на выходной параметр лишь в случае значительного изменения габаритов ( $b_1 = 0,238$ ); наимень-

шее влияние оказывает изменение диаметра кольца ( $b_3 = 0,121$ ).

Также была получена показательная зависимость, описывающая влияние  $h, b, d_0$  на  $\delta$ :

$$\delta = \frac{D_0}{e^{51,68} h^{1,65} b^{5,37}}. \quad (23)$$

Полученная зависимость достаточно полно описывает влияние геометрических параметров упругого кольца на величину отклонения, что дает возможность выбрать оптимальные размеры колец при заданной нагрузке и чувствительности в ходе проектирования.

Получив зависимость суммарных перемещений элементов контура кольца от геометрических параметров, мы провели сравнение значений  $\delta$ , рассчитанных по нашей модели, с теоретически рассчитанными по формуле. Результаты расчетов и экспериментальные данные для исследуемых колец при приложении растягивающей силы  $P = 1000$  Н приведены в табл. 2.

Сравнение данных показало следующее: величины суммарных перемещений элементов контура кольца, рассчитанные по полученной нами на основе экспериментальных данных модели, в определенной степени подтверждают теоретические.

Таблица 1

Экспериментальные и теоретические значения деформации кольца

Значение нагрузки, Н	1000	6000	9000	12000	15000	18000	21000	24000	27000	30000
Экспериментальное значение деформации, мм	0,101	0,575	0,867	1,279	1,470	1,762	2,117	2,842	3,771	4,297
Теоретическое значение деформации, мм	0,116	0,588	0,898	1,257	1,491	1,756	2,125	2,756	3,691	4,354
Погрешность, %	14,9	2,3	3,6	1,7	1,4	0,3	0,4	3,0	2,1	1,3

Таблица 2

Сравнительная характеристика рассмотренных методов

№ кольца	Параметры кольца, мм	Теоретический расчет	Данные эксперимента	$\varepsilon, \%$	Расчетная модель	$\varepsilon, \%$
1	$h = 8$ $b = 40$ $D_0 = 137$	0,26	0,29	10,3	0,25	4
2	$h = 7$ $b = 35$ $D_0 = 137$	0,23	0,21	9,52	0,25	8
3	$h = 6$ $b = 40$ $D_0 = 137$	0,31	0,33	6,1	0,29	6,8
4	$h = 7$ $b = 35$ $D_0 = 137$	0,42	0,40	5	0,41	2,4
5	$h = 7$ $b = 45$ $D_0 = 137$	0,20	0,18	4,1	0,21	4,7
6	$h = 7$ $b = 40$ $D_0 = 140$	0,28	0,25	12	0,27	3,7
7	$h = 7$ $b = 40$ $D_0 = 143$	0,30	0,31	3,3	0,28	7,1

Неточность эмпирической модели можно объяснить ошибками измерения и обработки результатов. Погрешности теоретически рассчитанных значений [11] появляются из-за невозможности реально описать и учесть все вероятные процессы, происходящие в деформируемом кольце.

Теоретическая зависимость более универсальна [12; 13], однако в ограниченной области наиболее часто встречающихся типоразмеров колец эмпирическая зависимость не только применима, но и предпочтительна [14; 15] по точности.

На основе полученной зависимости была предложена такая последовательность выбора оптимальных параметров кольца.

1. Конструктивно задаются значения диаметра и толщины кольца с целью достижения достаточной прочности и минимизации габаритных размеров устройств.

2. Задается чувствительность упругого кольца при известной нагрузке (данная регрессионная модель рассчитана для силы  $P = 1000$  Н). Данный параметр назначается исходя из назначения устройства и его пределов измерения.

3. При известных данных вычисляется оптимальная ширина кольца данного силоизмерительного устройства.

4. Производится проверочный расчет полученного кольца на прочность. При необходимости корректируются значения, задаваемые в пп. 1, 2.

**Заключение.** На базе теоретических и экспериментальных исследований оригинальных конструкций силоизмерительных устройств с последовательной и параллельной работой пар кольцевых УЧЭ получены теоретические и эмпирические зависимости для определения функции преобразования кольца переменного сечения. На основе полученных зависимостей предложена последовательность выбора оптимальных параметров кольцевого УЧЭ.

#### Библиографические ссылки

1. Антоненко И. В., Терешенко А. П. Анализ статических характеристик упругих чувствительных элементов весоизмерительных устройств // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2012. № 10. С. 21–26.

2. Пономарев С. Д., Андреева Л. Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М. : Машиностроение, 1980. 326 с.

3. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. М. : Машиностроение, 1979. 147 с.

4. Романенко В. Н., Орлов А. Г., Никитина Г. В. Книга для начинающего исследователя-химика. Л. : Химия, 1987. 280 с.

5. Пат. 2108959 Российская Федерация, МКИ В 66 С 15/00. Ограничитель грузоподъемности / Антоненко И. В., Полянсков Ю. В., Фионова А. В. Заявл. 15.02.1996 ; опубл. 20.04.1998, Бюл. № 11.

6. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. М. : Наука, 1971. 192 с.

7. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера. Киев : Техника, 1975. 766 с.

8. Сорокин Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М. : Госстройиздат, 1960. 180 с.

9. Сорокин Е. С. Метод учета неупругого сопротивления при расчете конструкций и колебаний. Исследования по динамике сооружений. М. : Стройиздат, 1951. 210 с.

10. Пат. 2108958 Российская Федерация, МКИ В 66 С 15/00. Ограничитель грузоподъемности / Антоненко И. В., Полянсков Ю. В., Фионова А. В. Заявл. 15.02.1996 ; опубл. 20.04.1998, Бюл. № 11.

11. Пятин Ю. М. Проектирование элементов измерительных приборов. М. : Высш. шк., 1977. 303 с.

12. Справочник конструктора точного приборостроения / Г. А. Веркович [и др.] ; под общ. ред. К. Н. Явленского, Б. Л. Тимофеева. Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 792 с.

13. Средства контроля, управления и измерения линейных и угловых размеров в машиностроении : отрасл. кат. / ВНИИ измерения. М. : ВНИИТЭМР, 1990. 180 с.

14. Феликсон Е. И. Упругие элементы приборов. М. : Машиностроение, 1977. 311 с.

15. Nyce D. S. Linear position sensors: theory and application. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2004. 179 с.

#### References

1. Antonets I. V. [Analysis of static performance elastic sensitive elements of weight measuring devices]. *Sbornik v mashinostroenii i priborostroenii*. 2012, No. 10, P. 21–26 (In Russ.).

2. Ponomarev S. D. *Raschet uprugikh elementov mashin i priborov* [The calculation of the elastic elements of machines and devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 326 p.

3. *Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mekhanicheskikh velichin* [Designing sensors for measuring mechanical quantities]. Ed. E. P. Osadchiy. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 147 p.

4. Romanenko V. N. *Kniga dlya nachinayushchego issledovatelya-khimika* [The book for the novice researcher-chemist]. Leningrad, Khimiya Publ., 1987, 280 p.

5. Antonets I. V., Polyanskov Yu. V., Fionova A. V. *Ogranichitel' gruzopod'ernosti* [Elevating capacity indicator]. Patent RF, No 2108959.

6. Rumshinskiy L. Z. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [The mathematical processing of the experimental results]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 192 p.

7. Sigorskiy V. P. *Matematicheskii apparat inzhenera* [The mathematical apparatus of the engineer]. Kiev, Tekhnika Publ., 1975, 766 p.

8. Sorokin E. S. *K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyakh uprugikh sistem* [The theory of internal friction at fluctuations of elastic systems]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1960, 180 p.

9. Sorokin E. S. *Metod ucheta neuprugogo soprotivleniya pri raschete konstruktivnykh kolebaniy. Issledovaniya po dinamike sooruzheniy* [The method of accounting for inelastic resistance in the calculation of

structures and vibrations. Studies on the dynamics of structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1951, 210 p.

10. Antonets I. V., Polyanskov Yu. V., Fionova A. V. *Ogranichitel' gruzopod'emnosti* [Elevating capacity indicator]. Patent RF, No 2108958.

11. Pyatin Yu. M. *Proektirovanie elementov izmeritel'nykh priborov* [The design of measuring instruments]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977, 303 p.

12. Yavlenskogo K. N., Timofeeva B. L. *Spravochnik konstruktora tochnogo priborostroeniya* [Reference precision instrument designer]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, 792 p.

13. *Sredstva kontrolya, upravleniya i izmereniya lineynykh i uglovykh razmerov v mashinostroenii: Otrasl.*

*kat* [Controls, management and measurement of linear and angular dimensions in mechanical engineering]. *VNIИ izmereniya*. Moscow, VNIИTEMР Publ., 1990, 180 p.

14. Felikson E. I. *Uprugie elementy priborov* [Elastic elements of the devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 311 p.

15. Nyce David S. *Linear position sensors: theory and application*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2004, 179 p.

© Антоненц И. В., Борсоев В. А.,  
Кацура А. В., Степанов С. М., 2017