МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621:658.512

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-1-11-21

**РАЗРАБОТКА ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ,
ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ОСТАТОЧНУЮ ДЕФОРМАЦИЮ
УПРУГОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА**

И.В. АНТОНЕЦ¹, В.А. БОРСОЕВ², Р.А. БОРИСОВ¹, С.М. СТЕПАНОВ¹

¹*Ульяновский институт гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева,
г. Ульяновск, Россия*

²*Институт аэронавигации, г. Москва, Россия*

Основным направлением в конструировании средств взвешивания и дозирования становится создание весовой техники, способной обеспечить не только измерение массы – взвешивание с необходимыми точностью и быстродействием, но и автоматическое управление технологическими процессами, а также их контроль и регулирование. В этом случае при проектировании весоизмерительных устройств реализуют возможность двухсторонней связи с ЭВМ, что позволяет осуществлять дистанционный контроль и решение логических задач, связанных с процессом управления. Современные автоматические весовые и дозирующие устройства являются важным звеном комплексной автоматизации в различных отраслях промышленности. Существующие разработки электроизмерительной, радиоэлектронной, счетно-вычислительной и других отраслей приборостроительной техники позволяют осуществлять преобразования измеряемой величины с весьма высокой степенью точности. Однако если в процессе взвешивания измеряемая величина воспринимается упругим чувствительным элементом низкого качества, то, как бы ни была высока точность дальнейших преобразований, характеристики упругого элемента будут ограничивать точность прибора в целом. Хотя упругие элементы являются простыми механическими деталями и многие виды упругих элементов известны и широко применяются в течение многих десятков лет, их рабочие характеристики часто не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, что тормозит создание приборов высоких классов точности. Рост требований к первичным преобразователям делает актуальным решение проблемы повышения качества упругих чувствительных элементов не только при изготовлении, но и при проектировании. Это обусловило появление работ, направленных на развитие расчетных и экспериментальных методов, которые изменили общую методологию проектирования силоизмерительных устройств.

Ключевые слова: упругий чувствительный элемент, весоизмерительное устройство, величина деформации, конструктивный угол прилива, сравнительный кольцевой упругий элемент.

ВВЕДЕНИЕ

Применение упругих элементов оказалось наиболее эффективным в весо- и силоизмерительной технике, причем в современном приборостроении измерительные упругие элементы получают все большее распространение, так как позволяют создать точные и компактные приборы. Технические расчеты на упругую деформацию материалов основываются на законе Гука, но в процессе определения точных значений деформаций при приложении нагрузок обнаруживаются отклонения от этого закона, которые объясняются неупругими необратимыми явлениями материалов. К указанным явлениям относятся прямое и обратное упругое последствие, упругий гистерезис, релаксация напряжений и внутреннее трение. Исследования [1, 2, 3] показывают, что последствие прямо пропорционально логарифму времени, в течение которого действует нагрузка, и возрастает с ростом напряжений в материале упругого элемента. Таким образом, для обеспечения высокой точности весоизмерения необходимо контролировать величину остаточной деформации упругого элемента.

Однако в различных отраслях промышленности достаточно широко распространены [4, 5, 6] дискретные дозаторы сыпучих грузов, где имеется необходимость дистанционного весового контроля массы порций компонентов, выдаваемых в технологический поток. При этом

решение традиционных задач весоизмерения: повышения точности и надежности дозирования, упрощения конструкции и снижения трудоемкости при эксплуатации – сочетается с невозможностью осуществления прямого доступа к конструкции весоизмерительного устройства. Нами были разработаны конструкции устройств, решающих задачу учета остаточной деформации кольцевого упругого чувствительного элемента для систем дистанционного весового контроля.

В основе работы первых двух конструкций лежит использование физических моделей [7], дублирующих работу основного весоизмерительного устройства, но позволяющих в комфортных условиях осуществить измерение и компенсацию погрешностей, возникающих на измерительном устройстве, размещенном в труднодоступном месте.

РАЗРАБОТКА ПЕРВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Первое [8] из данных устройств (рис. 1) содержит измерительный кольцевой упругий элемент 1 с приливами 2, источник 3 и приемник 4 излучения, между которыми расположены шторки 5, усилительное устройство 6 и измерительный прибор 7.

Устройство содержит также сравнительный кольцевой упругий элемент 8 с приливами 9, идентичный измерительному кольцевому упругому элементу 1. Кроме того, имеется электромагнит, состоящий из ферромагнитного стержня 10, катушки 11 и ярма 12, две рамки 13 и 14. Кроме того, катушка 11 электромагнита связана через усилительное устройство 6 с приемником излучения.

Рис. 1. Весоизмерительное устройство, использующее сравнительный кольцевой упругий элемент с электромагнитом для компенсации остаточной деформации

Fig. 1. The weight measurement device using the comparative annular elastic element with an electromagnet to compensate residual strain

Устройство работает следующим образом. При приложении внешней нагрузки упругий элемент 1 деформируется, образуя зазор между шторками 5. Световой поток от источника излучения 3, воспринимаемый приемником излучения 4, прямо пропорционален величине нагрузки, причем величина светового потока фиксируется измерительным прибором 7. Одновременно через усилительное устройство 6 ток поступает на катушку 11 электромагнита, в стержне 10 которого возникает магнитное поле, взаимодействующее с ферромагнитным ярмом 12, установленным на рамке 14. В результате деформируется сравнительный кольцевой упругий элемент 8 совершенно аналогично тому, как деформируется измерительный кольцевой упругий элемент 1. Таким образом, оба упругих элемента 1 и 8 работают в одинаковых условиях, при этом остаточная деформация сравнительного кольцевого упругого элемента 8 может быть измерена и учтена при определении результата измерения на измерительном кольцевом

упругом элементе 1 (или вручную или автоматически). К недостаткам рассмотренной конструкции [9] можно отнести относительно большое электропотребление и нагрев обмоток электромагнита, приводящий к нагреву упругого элемента.

РАЗРАБОТКА ВТОРОЙ КОНСТРУКЦИИ

Указанного недостатка лишено второе [10] из устройств с физической моделью (рис. 2), также состоящее из двух идентичных кольцевых упругих элементов. Левый упругий элемент воспринимает прилагаемые нагрузки, а правый упругий элемент деформируется на величину, определяемую углом поворота постоянного магнита 10. Вращение осуществляется от двигателя M , управляет которым усилительное устройство 4. Вращающийся постоянный магнит взаимодействует с постоянными магнитами 8, закрепленными на концах кронштейнов 7 и обращенными к нему одноименными полюсами. Чем меньше угол между осью постоянного магнита и вертикальной осью, тем больше сила отталкивания и больше деформация упругого элемента.

Так же, как и в предыдущей конструкции, остаточная деформация сравнительного кольцевого упругого элемента 9 может быть измерена и учтена при определении результата измерения на измерительном кольцевом упругом элементе 2 (или вручную или автоматически). В качестве основного недостатка рассмотренных выше вариантов систем двух идентичных кольцевых элементов следует отметить относительную идентичность двух конструкций и условий их эксплуатации.

Рис. 2. Весоизмерительное устройство,
содержащее физическую модель с поворотным магнитом

Fig. 2. The weight measurement device
that contains a physical model with a bending magnet

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Для устранения недостатков, присущих физическим моделям, предлагается метод прогнозирования [11, 12] остаточных деформаций упругих измерительных колец, описывающий содержание, последовательность, а также инструментарий получения и использования математических моделей для компенсации погрешностей указанных деформаций.

Математическую основу метода, определяющего конструкцию данного устройства, составляет решение уравнения (1) деформации упругого элемента во времени, которое в упрощенном виде может быть представлено следующим образом:

$$\delta_{\text{деф}} = x_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\infty} Q_i n_i \Delta t_i \right) \right] + x_2 \exp \left(-\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\infty} Q_i n_i \Delta t_i \right), \quad (1)$$

где x_1 – остаточная деформация при длительно приложенной нагрузке; x_2 – начальное значение деформации (погрешность изготовления); Q_i – среднее значение нагрузки; n_i – число циклов приложения нагрузки; Δt_i – продолжительность цикла приложения нагрузки; τ – длительность переходного процесса.

Устройство [13] содержит измерительный кольцевой упругий элемент 1 с приливами 2, источник 3 и приемник 4 излучения, между которыми расположены шторки 5. Кроме того, устройство содержит усилительное устройство 6 и измерительный прибор 7, функциональный элемент 8 и устройство сравнения 9. Выход приемника излучения 4 подключен к входам усилительного устройства 6 и функционального элемента 8, а их выходы связаны с входами устройства сравнения 9. Выход устройства сравнения связан с входом измерительного прибора 7 (рис. 3).

Рис. 3. Весоизмерительное устройство с функциональным элементом для компенсации остаточной деформации

Fig. 3. The weight measurement device with a functional element to compensate residual strain

Устройство работает следующим образом. При приложении внешней нагрузки измерительный кольцевой упругий элемент 1 деформируется, образуя зазор между шторками 5. Световой поток от источника излучения 3, который будет приниматься приемником излучения 4, прямо пропорционален величине нагрузки, причем величина светового потока преобразуется приемником излучения 4 в электрический ток, который фиксируется, через устройство сравнения 9, измерительным прибором 7. Одновременно ток поступает на вход функционального элемента 8, значение выходного сигнала которого определяется функцией преобразования, лежащего в основе его работы, и который через устройство сравнения 9 корректирует показания измерительного прибора 7. Функция преобразования элемента 8 определяется значениями нагрузки и числом циклов приложенных нагрузок к кольцевому упругому элементу 1 и, в соответствии с заданной зависимостью, компенсирует остаточную деформацию последнего. Практически функциональная зависимость априори определяется путем статистических исследований, причем в качестве варьируемых факторов, кроме упомянутых нагрузки и числа циклов, могут быть приняты и другие факторы (температура, вибрации и т. п.). Возможность коррекции величины остаточной деформации за счет введения функционального элемента позволяет повысить точность измерения. Кроме того, полученная на основании статистических исследований функциональная зависимость этого элемента позволяет так или иначе учесть погрешности: от нелинейности, упругих несовершенств материала, температурных колебаний, от воздействия линейных ускорений, от воздействия вибраций, от изменения свойств материала с течением времени и т. п.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились на специально изготовленном стенде (рис. 4) для создания циклических нагрузок упругого кольца. Циклическая нагрузка на упругое кольцо создается импульсным электромагнитным полем, возникающим в сердечнике электромагнита при протекании по его обмотке импульсного тока.

Рис. 4. Схема станда для создания циклических нагрузок упругого кольца
Fig. 4. The circuit of the stand to create cyclic loads of the elastic ring

Для создания импульсного тока разработана схема (рис. 5), которая позволяет создавать импульсы тока с необходимой частотой (в нашем случае частота была выбрана равной 0,5 Гц).

Рис. 5. Схема для создания импульсов тока
Fig. 5. The circuit to generate current impulses

Схема включает в себя выпрямительный мост, организованный на диодах D1–D4, с выхода которого постоянный ток через переменное сопротивление R_{var} подается на емкость C (5 мкФ), напряжение на емкости C растет по пилообразному закону до значения, равного напряжению пробоя диода D5, после чего происходит разряд емкости через обмотку электромагнита ЭМ (приводя к возникновению импульсного магнитного поля, которое притягивает упругое кольцо). Параметры катушки подобраны таким образом, что сила притяжения соответствует 1000 Н. После разряда емкости диод выключается за счет того, что ток, протекающий через него, становится меньше тока выключения. Далее процесс повторяется.

Исследование влияния числа циклов нагружения на статические характеристики осуществлялось путем подачи циклической нагрузки величиной 500 Н на упругое кольцо. Число циклических нагрузок на упругое кольцо составляло 10000, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000. Измерения проводили нутромером модели НИ 50–100 с ценой деления 0,01 мм. Исследования осуществлялись для ряда колец, изготовленных из стали 40Х и отличающихся наружным диаметром D_0 , толщиной h и шириной b . В табл. 1 приведены результаты исследования кольца со следующими параметрами: $D_0 = 137$ мм, $h = 7$ мм, $b = 40$ мм.

По результатам экспериментальных данных [14, 15] подбираются коэффициенты x_4 и x_5 слагаемых уравнения регрессии, определяющих погрешность, вызванную остаточной деформацией.

Таблица 1
Table 1

Экспериментальные данные исследования влияния числа циклов нагружения на величину остаточной деформации
The experimental data of investigation of influence of number of loading cycles on the amount of residual deformation

№	Число циклов нагружения	Значение деформации кольца, мм			
		t = 0 мин	t = 30 мин	t = 24 ч	t = 48 ч
1	10000	0,10	0,10	0,08	0,08
2	20000	0,15	0,14	0,14	0,13
3	30000	0,18	0,18	0,16	0,16
4	40000	0,20	0,19	0,19	0,19
5	50000	0,21	0,20	0,20	0,20
6	60000	0,20	0,20	0,20	0,20

При проектировании упругого чувствительного элемента (УЧЭ) необходимо решать задачи [16, 17] синтеза, связанные с выбором оптимальных параметров, при которых динамические характеристики будут наилучшими по тому или другому критерию. Одним из важных критериев динамического качества является длительность переходного процесса, определяемая как время, начиная с которого кривая переходного процесса не выходит за пределы допустимой динамической ошибки. При расчетах обычно допускают $\Delta = 0,05 \div 0,1$.

Для определения величины $\xi_{\text{ОПТ}}$ оптимальной степени успокоения пользуются приведенными в [1, 18] численными значениями $\xi_{\text{ОПТ}}$ и τ_{min} для различных значений Δ (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Оптимальная степень успокоения и минимальная длительность переходного процесса при ступенчатом воздействии
The optimal degree of damping and the minimum duration of the transition process with a steplike effect

Динамическая ошибка, Δ (%)	0	$\pm 0,025$	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,25$
Оптимальная степень успокоения, $\xi_{\text{ОПТ}}$	1,0	0,76	0,69	0,59	0,44
Длительность переходного процесса, τ_{min} (с)	∞	2,83	2,60	2,32	1,95

При оценке величины рабочих напряжений σ важно [19, 20] не абсолютное их значение, а соотношение σ/σ_y , где σ_y – предел упругости материала упругого элемента. Опыты [1] по длительному нагружению весовых пружин показали, что после снятия нагрузки у пружин с напряжением 5 кГ/мм^2 явления упругого последействия не наблюдалось вовсе. Исходя из этих соображений, для исследуемого УЧЭ принято $\tau = \tau_{\text{min}} = 2,83$. Вместо нагрузки Q_i введено отношение σ/σ_y , которое в проводимом эксперименте для данного кольца равнялось 2. Тогда уравнение (1) принимает определенный вид:

$$\delta_{\text{деф}} = 0,25 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{2n_i}{15000 \cdot 2,83}\right) \right] + 0,01 \cdot \exp\left(-\frac{2n_i}{15000 \cdot 2,83}\right). \quad (2)$$

Расчетные значения погрешности остаточной деформации в соответствии с уравнением (2) приведены в табл. 3.

Таблица 3
Table 3

Расчетные значения исследования влияния числа циклов
нагрузки на величину остаточной деформации
The estimated value of studies of the effect of number of cycles
of loading on the amount of residual deformation

№	Число циклов нагружения	Расчетные значения деформации кольца, мм
1	10000	0,0939
2	20000	0,1526
3	30000	0,1892
4	40000	0,2120
5	50000	0,2263
6	60000	0,2352

На рис. 6 приведено сравнение экспериментальных данных и расчетных значений величины остаточной деформации упругого кольца в зависимости от числа циклов приложения нагрузки.

Рис. 6. Графики зависимостей величины остаточной деформации упругого кольца в соответствии с числом циклов приложения нагрузки

Fig. 6. The dependence graphs of the residual deformation value of the elastic ring in accordance with a number of load application cycles

Максимальная погрешность составила 17,5 %, что следует признать удовлетворительным. Таким образом, результатом проделанной работы явились оригинальные конструкции весоизмерительных устройств, использующих физические модели для учета или компенсации остаточной деформации упругого элемента. Разработаны также весоизмерительные устройства, использующие для тех же целей математические модели, справедливые для упругих колец со следующими геометрическими параметрами: $D = 137 \div 143$ мм, $h = 6 \div 8$ мм, $b = 35 \div 45$ мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы для измерительных упругих элементов должны обладать малыми несовершенствами упругости, высокой релаксационной стойкостью, стабильностью упругих свойств во времени и в переменных внешних условиях [1]. Выполнение перечисленных требований осуществляется выбором: химического состава материала упругого элемента, чистоты его поверхностного слоя, защитных покрытий и других параметров. Однако все применяемые технические и технологические решения не позволяют полностью устранить упругие несовершенства материалов, в частности, упругое последствие.

Авторами статьи предлагается оригинальное решение поставленной задачи путем определения величины остаточной деформации упругого элемента вне зависимости от причин ее появления. Разработаны конструкции устройств, решающих задачу учета остаточной деформации кольцевого упругого чувствительного элемента для систем дистанционного весового контроля. В основе работы первых двух конструкций лежит использование физических моделей, дублирующих работу основного весоизмерительного устройства. Математическую основу метода, лежащего в основе третьей конструкции, составляет решение уравнения деформации упругого элемента во времени, коэффициенты которого определены по результатам экспериментальных данных. Проведенные на специально изготовленном стенде экспериментальные исследования подтвердили адекватность физических и математических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Феликсон Е.И.** Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1977. 311 с.
2. **Asch G.** Les captures en instrumentation industrielle. Lyon, 1991. 970 p.
3. **Barber J.R.** Elasticity, Second Edition. Kluwer, 2004. 431 p.
4. **Карпин Е.Б.** Средства автоматизации для измерения дозирования массы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1971. 470 с.
5. **Тихонов А.И., Мокров Е.А.** Перспективы совершенствования упругих элементов датчиков механических параметров // Измерительные элементы (датчики) информационно-измерительных систем, автоматизированных систем управления технологическими процессами и систем автоматизации. Саратов: Саратовский университет, 1979. 244 с.
6. **Алфутов Н.А.** Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1978. 312 с.
7. **Rijlaarsdam D.J.** Modelling damping in linear dynamic systems. Eindhoven, 2005. 50 p.
8. Пат. 129630 Российская Федерация, Весоизмерительное устройство / И.В. Антонец, Г.М. Горшков, В.А. Петров, А.П. Терешенок; заявитель и патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. – № 2012154614/28; заявл. 14.12.2012; опубл. 27.06.2013. Бюл. № 18. 2 с.
9. **Тихонов А.И.** Функция преобразования кольцевых упругих элементов / А.И. Тихонов, Л.И. Кулагин // Обработка информации в автоматических системах. Рязань: Рязанский радиотехнический институт, 1977. 286 с.
10. Пат. 129631 Российская Федерация, Весоизмерительное устройство / И.В. Антонец, Г.М. Горшков, В.А. Петров, А.П. Терешенок; заявитель и патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. № 2012154613/28; заявл. 14.12.2012; опубл. 27.06.2013. Бюл. № 18. 2 с.
11. **Дашенко А.Ф.** Методика расчета упругого элемента силоизмерительного устройства / А.Ф. Дашенко, Ю.А. Козинская, А.С. Лимаренко // Праці Одеського політехнічного університету. Одеса, 2013. Вип. 2 (41).
12. Design and development of precision artifact for dissemination of low forces of 1N and 2N / S.S.K. Titus, K. Jain Kamlesh, S.K. Dhulkhead, Yadav Poonam // 19 IMEKO World Congress. Lisbon, 2009.

13. Пат. 129632 Российская Федерация, Весоизмерительное устройство / И.В. Антонец, Г.М. Горшков, В.А. Петров, А.П. Терешенок; заявитель и патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. № 2013102877/28; заявл. 22.01.2013; опубл. 27.06.2013. Бюл. № 18. 2 с.

14. Tropsch U. Opto-Elektronik steuert Verpackungsvorgänge "Nene Verpackung". 1975. № 1–18.

15. Kamble V.A., Gore P.N. Use of FEM and Photo Elasticity for Shape Optimization of „S” Type Load Cell // Indian Journal of Science and Technology. 2012. Vol. 5. No. 3. pp. 2384–2389.

16. Алейников А.Ф., Гридчин В.А., Цапенко М.П. Датчики (перспективные направления развития): учеб. пособ. Новосибирск: НГТУ, 2001. 176 с.

17. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1980. 230 с.

18. Ciarlet P.G. An introduction to differential geometry with applications to elasticity. Springer, 2005. 211 p.

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

20. Elbestawi M.A. Force Measurement // Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. 1999. pp. 600–615.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Антонец Иван Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры авиационной техники УИ ГА, iv.antonec@yandex.ru.

Борсоев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой навигационного обеспечения полетов и аэронавигационной информации Института аэронавигации, borsoev@aeronav.aero.

Борисов Руслан Андреевич, аспирант кафедры авиационной техники УИ ГА, ruslanbor82@yandex.ru.

Степанов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры авиационной техники УИ ГА, dok2010@list.ru.

DEVELOPMENT OF THE LOAD MEASURING DEVICES TO DETERMINE THE RESIDUAL DEFORMATION OF THE ELASTIC SENSING ELEMENT

Ivan V. Antonets¹, Vladimir A. Borsoev², Ruslan A. Borisov¹, Sergej M. Stepanov¹

¹*Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia*

²*Institute of Air Navigation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The main focus in the design of weighing and batching devices is to create a gravimetric technique, capable of providing not only mass measurement – weighing with the required accuracy and speed, but also automatic control of technological processes and their control and regulation. In this case, the opportunity of two-way communication with a computer when designing the load measuring devices is realized, allowing remote monitoring and solution of logical problems associated with the management process. Modern automatic weighing and batching devices are important parts of comprehensive automation in different branches of industry. Existing developments of electrical, electronic, computing and other branches of instrument engineering techniques allow to implement transformations of the measured quantity with a very high degree of accuracy. However, if the measured quantity in the weighing process is perceived by the elastic sensing element of low quality, then no matter how high the accuracy of further changes is; the characteristics of the elastic element will limit the accuracy of the instrument as a whole. Although the elastic elements are simple mechanical parts, and many types of elastic elements are known and are widely used for many decades, their performance often does not meet the requirements, and hampers the device creation of high accuracy classes. Growing requirements for primary transformer makes actual the problem solution of improving the quality of elastic sensing elements not only in the manufacture but in

the design. This led to the appearance of projects aimed at the development of computational and experimental methods that have altered the methodology for the design of force measuring devices.

Key words: elastic sensing element, the load measuring device, the magnitude of deformation, a constructive angle tide, comparative annular elastic element.

REFERENCES

1. **Felikson E.N.** *Uprugie ehlementy priborov* [Elastic elements of instruments]. M., Mechanical Engineering publ., 1977, 311 p.
2. **Asch G.** *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Lyon, 1991, 970 p.
3. **Barber J.R.** *Elasticity*, Second Edition. Kluwer, 2004, 431 p.
4. **Karpin E.B.** *Sredstva avtomatizacii dlya izmereniya dozirovaniya massy* [Automation means to measure mass dosing]. 2nd edition revised and added. M., Mechanical Engineering publ., 1971, 470 p. (in Russian)
5. **Tikhonov A.I., Mokrov E.A.** *Prospects for improving the elastic elements of mechanical parameters sensors* [Measuring elements (sensors) of information-measuring systems, automated systems of technological processes control and automation systems]. Saratov, Saratov University, 1979, 244 p. (in Russian)
6. **Alfutov N.A.** *Osnovy rascheta na ustojchivost' uprugih sistem* [Basics of calculating the stability of elastic system]. M., Mechanical Engineering publ., 1978, 312 p. (in Russian)
7. **Rijlaarsdam D.J.** *Modelling damping in linear dynamic systems*. Eindhoven, 2005, 50 p.
8. **Antonets I.V., Gorshkov G.M., Petrov V.A., Tereshenok A.P.** RF Patent, №129630. *Vesoizmeritel'noe ustrojstvo* [Weight measurement device]. Applicant and patent holder Ul'yanovsk State University. Application of 14.12.2012, publ. on 27.06.2013. Bulletin № 18. 2 p.
9. **Tikhonov A.I., Kulagin L.I.** *The transformation function of the annular elastic elements* [Information processing in automated systems]. Ryazan, Ryazan Radio Engineering Institute publ., 1977, 286 p. (in Russian)
10. **Antonets I.V., Gorshkov G.M., Petrov V.A., Tereshenok A.P.** RF Patent, № 129631. *Vesoizmeritel'noe ustrojstvo* [Weight measurement device]. Applicant and patent holder – Ul'yanovsk State University. № 2012154613/28; application of 14.12.2012; published on 27.06.2013. Bulletin № 18. 2 p.
11. **Datshenko A.F., Kozinskaya Y.A., Limarenko A.S.** *Method of calculating the elastic element of a force measurement device* [Praci Odes'kogo politekhnichnogo universitetu]. Odessa, Odessa Polytechnic University Publ., 2013, Vol. 2 (41). (in Ukrainian)
12. **Titus S.S.K., Kamlesh K. Jain, S.K. Dhulkhead, Poonam Yadav.** *Design and development of precision artifact for dissemination of low forces of 1N and 2N* 19. IMEKO World Congress, 2009.
13. **Antonets I.V., Gorshkov G.M., Petrov V.A., Tereshenok A.P.** RF Patent № 129632. *Vesoizmeritel'noe ustrojstvo* [Weight measurement device]. Applicant and patent holder – Ul'yanovsk State University № 2013102877/28; application of 22.01.2013; published on 27.06.2013. Bulletin № 18. 2 p.
14. **Tropf U.** *Opto-Elektronik steuert Verpackungsvorgange "Nene Verpackung"*. 1975, Vol. 1–18.
15. **Kamble V.A., Gore P.N.** *Use of FEM and Photo Elasticity for Shape Optimization of „S” Type Load Cell*. Indian Journal of Science and Technology, 2012, Vol. 5, No. 3, pp. 2384–2389.
16. **Aleinikov A.F., Gridchin V.A., Tsapenko M.P.** *Datchiki (perspektivnye napravleniya razvitiya)* [Sensors (perspective directions of development)]. Novosibirsk, NSTU publ., 2001, 176 p. (in Russian)
17. **Andreeva L.E.** *Uprugie jelementy priborov* [Elastic elements of devices]. M., Mechanical Engineering publ., 1980, 230 p. (in Russian)
18. **Ciarlet P.G.** *An introduction to differential geometry with applications to elasticity*. Springer, 2005, 211 p.
19. **Nyce David S.** *Linear position sensors: theory and application*. [John Wiley & Sons, Inc.], Hoboken, New Jersey, 2004, 179 p.

20. Elbestawi M.A. Force Measurement. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, 1999, pp. 600–615.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan V. Antonets, Doctor of Technical Sciences, Professor of Aeronautical Engineering Chair, iv.antonets@yandex.ru.

Vladimir A. Borsoev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Navigational Support of Flight and Aeronautical Information Chair, borsoev@aeronav.aero.

Ruslan A. Borisov, Postgraduate Student of Aeronautical Engineering Chair, ruslanbor82@yandex.ru.

Sergei M. Stepanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aeronautical Engineering Chair, dok2010@list.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

07.09.2017
28.12.2017

Received
Accepted for publication

07.09.2017
28.12.2017