

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ КОЛЬЦЕВОГО УПРУГОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА И ВТОРИЧНОГО СТРУННОГО ДАТЧИКА**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 университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

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

*В качестве наиболее распространенных датчиков величины деформации упругого элемента весоизмерительных устройств используют индуктивные, емкостные и тензорезисторные преобразователи деформации. В известных датчиках преобразование входной неэлектрической величины в электрический сигнал осуществляется в два этапа: сначала происходит ее преобразование в изменение одного из параметров (индуктивности, емкости, сопротивления и т. п.), а затем это изменение преобразуется в электрическую величину. Основными проблемами подобных датчиков является высокая зависимость от стабильности их параметров, температурная зависимость и относительно низкая чувствительность вследствие измерения только части величины деформации. К недостаткам следует отнести аналоговый принцип действия, в то время как основные электрические преобразователи фиксируют частотные изменения. Для устранения этого недостатка в конструкцию устройств встраивают преобразователи – блоки, переводящие аналоговый сигнал в частотный. Эти устройства имеют очень слабый выходной сигнал, и для вывода его на необходимый уровень применяются усилители. Наличие в цепи преобразования сигналов большого количества дополнительных звеньев существенно снижает точность измерения. Для силоизмерительных устройств целесообразно применение струнного датчика (СД). Этот датчик обладает высокой точностью и малой инерционностью. Погрешность СД от гистерезиса не превышает 5 г на 15 кг приложенного веса. Приведены результаты исследования статических и динамических характеристик оригинальных конструкций весоизмерительных устройств на основе кольцевого упругого элемента переменного сечения и встроенного в него струнного датчика. Проведенные исследования подтвердили работоспособность устройств в широком диапазоне нагрузок, отмечены высокая чувствительность и точность измерений. Однако существенным недостатком СД является повышенная чувствительность к внешним возмущениям. СД преобразует внешнее силовое воздействие в колебания струны, и его высокая точность будет обеспечиваться только в том случае, если будут отсутствовать любые внешние источники колебания, которые могут привести к существенным погрешностям измерения.*

*Ключевые слова: упругий чувствительный элемент, струнный датчик, статические характеристики, динамические характеристики, величина деформации.*

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 358–366

**THE STUDY OF WEIGHT MEASURING DEVICES BASED ON RING OF ELASTIC SENSITIVE ELEMENT AND SECONDARY SENSOR STRING**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, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

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

*Inductive, capacitive and strain gauge transducers of strain are used as the most common sensors of the amount of deformation of the elastic element measuring devices. In known sensors of converting nonelectrical quantities into electric signal is performed in two stages: the first stage is the conversion to change one of the parameters (inductance, capacitance, resistance, etc.), then this change is converted into an electrical value. The main problems of such sensors is their high dependence on the stability of their parameters, temperature dependence and relatively low sensitivity due to the measurement only of the magnitude of deformation. The disadvantages of analogue should include the principle of operation, while the main electric transducers are fixed frequency changes. To address this shortcoming in the design of the device is inserted into the input blocks, sending the analog signal in frequency. These devices have a very*

*weak output signal and to output it to the required level applied to the amplifiers. The presence of the circuit signal conversion of a large number of additional links significantly reduces the measurement accuracy. For force measuring devices, it is advisable to use a string sensor (SD). This sensor has high accuracy and low inertia. Error DM hysteresis does not exceed 5 g to 15 kg applied weight. The article presents the results of a study of the static and dynamic characteristics of the original structures, measuring devices based on the annular elastic element of variable cross section and built-in string gauge. The studies have confirmed the efficiency of the devices in a wide range of loads shows high sensitivity and measurement accuracy. However, a significant drawback of SD is the increased sensitivity to external disturbances. SD converts the external force in the vibration of the string, and its high accuracy will be provided only in the event if don't have any external sources of vibrations that can lead to significant errors of measurement.*

*Keywords: elastic sensing element, string sensor, static characteristics, dynamic characteristics, size of deformation.*

**Введение.** Вторичные датчики, применяемые в весоизмерительных устройствах с первичными упругими элементами (УЭ), характеризуются большим разнообразием принципов преобразования перемещений УЭ. При выборе датчика необходимо решить взаимопротиворечащие задачи: минимизировать возможные погрешности и инерционность измерения, а также максимально упростить устройство, сделать его более надежным и чувствительным к изменению нагрузки. Недостатком большинства вторичных датчиков (индуктивных, емкостных), применяемых в современных весоизмерительных устройствах [1], является аналоговый принцип действия. Для устранения этого недостатка в конструкцию устройств встраивают преобразователи – блоки, переводящие сигнал из аналогового в частотный. Эти устройства имеют очень слабый выходной сигнал (порядка мВ), и для вывода его на необходимый уровень применяются усилители. Наличие в цепи преобразования сигналов большого количества дополнительных звеньев существенно снижает [2; 3] точность измерения.

**Предлагаемое весоизмерительное устройство с использованием вторичного струнного датчика.** Для весоизмерительных устройств (ВУ) целесообразно [4; 5] применение струнного датчика (СД), который обладает высокой точностью и малой инерционностью. Погрешность СД от гистерезиса не превышает 5 г на 15 кг приложенного веса. Нами были спроектированы конструкции весоизмерительных устройств на основе упругого кольца и встроенного в него струнного датчика. Эскиз первой конструкции ВУ изображен на рис. 1. Упругое кольцо 1 воспринимает приложенную нагрузку через рым-болт 6 и гайку 7, крепящиеся башмаками 3. Под нагрузкой кольцо деформируется: по вертикальной оси растягивается, а по горизонтальной – сжимается. Особенность устройства в том, что струнный датчик 2, работающий на сжатие, воспринимает деформации кольца по вертикальной оси. Это возможно из-за применения специальных уголков 4, 5, преобразующих растягивающее напряжение на кольце в сжимающее на струнном датчике. Подобная конструкция позволяет получить минимальные габаритные размеры устройства, не усложняя его конструкцию.

Крепление всех элементов между собой производится болтами 8, при этом рычаг, воспринимающий нагрузку, регулируется гайкой 9. При необходимости, для устранения зазоров в местах контакта уголков с башмаками в струнном датчике могут быть использованы металлические прокладки. Это значительно

упрощает сборку и предварительную настройку весоизмерителя и позволяет снизить себестоимость сборочных элементов, назначив экономически приемлемые допуски.

Конструкция ВУ, эскиз которого изображен на рис. 2, имеет две отличительные особенности: струнный датчик 2 воспринимает сжимающие деформации кольца 1 через стоящие враспор башмаки 3; башмаки не имеют жесткого крепления и лишь фиксируются винтами 4. Данная схема позволяет переставлять датчик в кольцо по различным осям, изменяя чувствительность устройства при постоянной нагрузке, делая его более универсальным в отличие от первой конструкции, и дает возможность измерять приложенную силу в более широких диапазонах с одинаковой точностью. Универсальность второй конструкции несколько снижает точность устройства за счет меньшей жесткости контакта между кольцом и башмаками и его быстроедействие за счет меньшей жесткости упругого кольца. Струнный датчик, применяемый в ВУ, изготовлен из прецизионного сплава 44НХТЮ. Метрологические характеристики датчика представлены в табл. 1. Струнный датчик обладает минимальными значениями упругих несовершенств [6; 7]. Упругие несовершенства материала УЭ выглядят следующим образом: прямое упругое последствие 0,08 %, обратное упругое последствие 0,02 %, гистерезис 0,07 %.

**Исследование параметров весоизмерительного устройства на базе вторичного струнного датчика.** Конструкция ВУ имеет множество элементов, снижающих его точность [8] и увеличивающих величины данных погрешностей. Рассмотрим восприимчивость весоизмерительного устройства к приложенной силе и определим погрешности измерения. Для этого ВУ будем нагружать согласно его служебному назначению. ВУ нагружали до 500 кг и с помощью частотомера регистрировали частоту колебаний струны датчика. На рис. 3 показана функция преобразования весоизмерителя конструкции № 1, изображена зависимость периода колебания струны датчика от растягивающей силы.

Измерения показали, что разработанное устройство действительно имеет значения упругих несовершенств значительно большие, чем у составляющих его элементов. Появление данных погрешностей вызывается множеством факторов. Это и различного рода упругие несовершенства материала деталей, из которых состоит ВУ, и недостаточная жесткость их конструкций. Однако наибольшее влияние [9] на точностные характеристики весоизмерителя оказывают стыки, присутствующие в его конструкции.

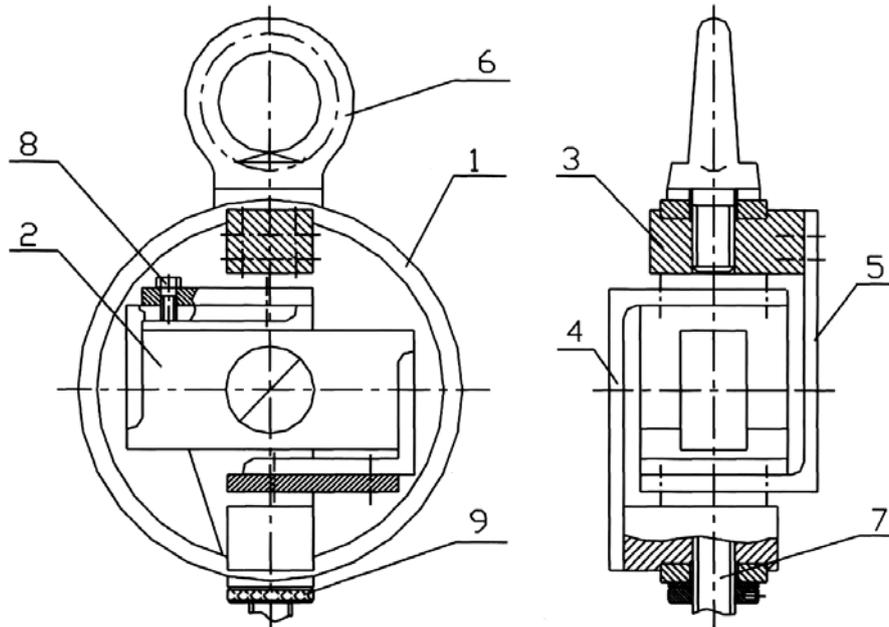


Рис. 1. Эскиз весоизмерительного устройства. Конструкция № 1

Fig. 1. The sketch of weight measuring devices. Scheme #1

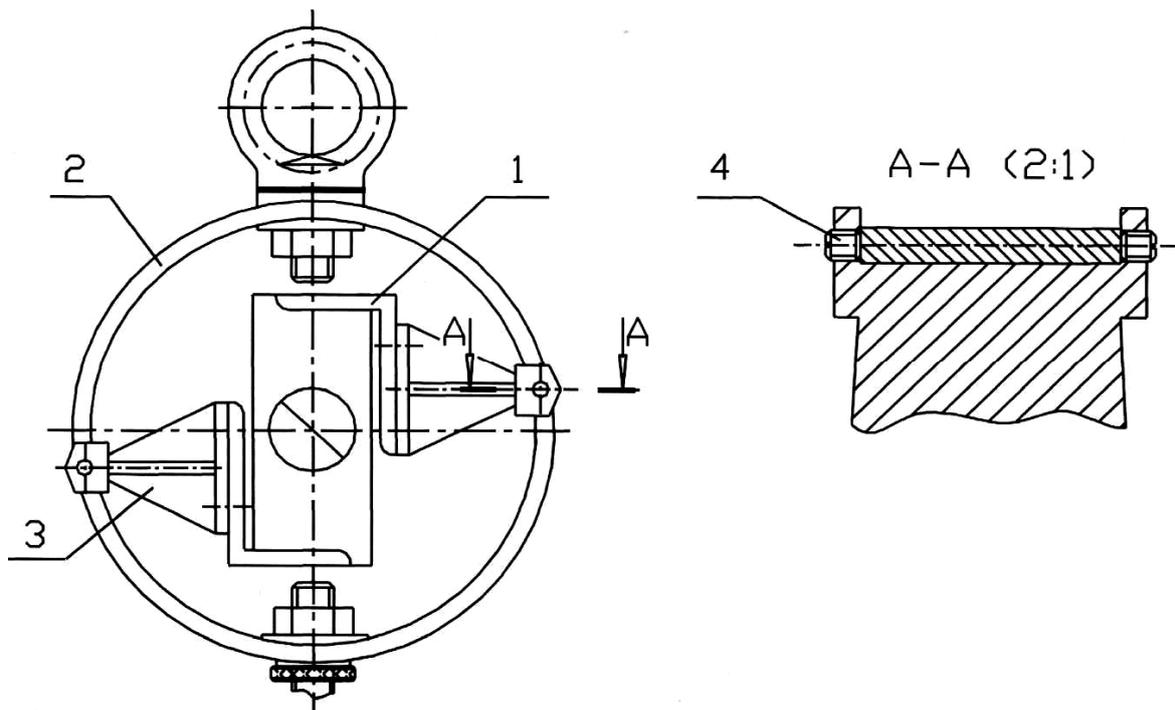


Рис. 2. Эскиз весоизмерительного устройства. Конструкция № 2

Fig. 2. The sketch of weight measuring devices. Scheme #2

Таблица 1

**Метрологические характеристики струнного датчика**

Максимальная нагрузка $P_n$ , кг	15
Максимальный гистерезис в диапазоне 0– $P_n$ , гр	не более 5
Выходной сигнал импульсной формы положительного полезного напряжения, не менее, В	3,5
Время готовности после включения, мин	3
Напряжение питания, В	$+(5 \pm 0,2)$
Масса, не более, кг	1,3

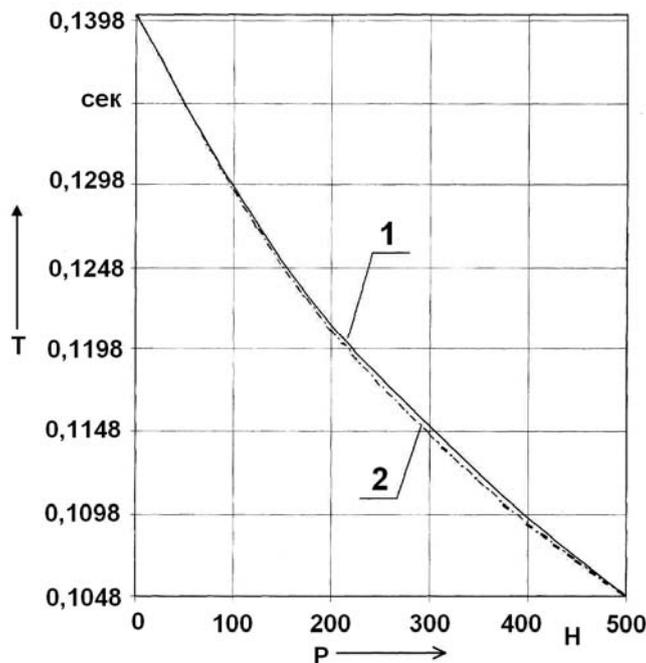


Рис. 3. Зависимость периода колебания струны датчика от величины приложенной силы: 1 – при нагружении; 2 – при разгружении

Fig. 3. Dependence of vibration period of measuring device hanger on the amount of applied force: 1 – when subjected to loadings; 2 – after unloading

При проведении исследований [10] весоизмерительного устройства мы уделяли особое внимание зоне минимальных нагрузок (от 0 до 50 кг), чтобы определить нижний предел чувствительности нашего прибора. Как уже отмечалось, струнный датчик обладает огромной чувствительностью (возможность регистрации приращения веса около 0,05 г), поэтому чувствительность весоизмерителя будет целиком определяться жесткостью упругого кольца. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Полученные погрешности являются допустимыми, однако при хранении, транспортировании, использовании весоизмерителя правила его эксплуатации могут быть серьезно нарушены, что повлечет за собой появление уже недопустимых отклонений. Для определения наиболее слабых мест конструкции проведем проверочные расчеты упругого кольца.

Основную опасность могут представлять случаи нагружения устройства сверх положенного веса. Допускаемое напряжение  $[\sigma]$  находим с учетом коэффициента запаса в зависимости от режимов нагрузки (табл. 3):

$$[\sigma] = \frac{\sigma}{n_{\sigma}}$$

Исходя из служебного назначения, выбираем второй режим нагружения, откуда получаем  $[\sigma] = 880/4 = 220$  МПа.

Рассчитаем максимальное напряжение в сечении выбранного кольца при приложении трехкратной нагрузки:

$$\sigma = \frac{P}{F} = \frac{15000}{0,007 \cdot 0,04} = 53,57 \text{ МПа}.$$

Из расчета видно, что кольцо с принятыми параметрами выдерживает перегрузки, значительно превосходящие номинальное значение.

Однако необходим не только прочностной расчет элементов ВУ, но и проверка работоспособности струнного датчика при таком воздействии [11; 12]. Устройство, даже после возможной перегрузки, должно полностью сохранять все настройки, четко выполнять свое служебное назначение. Следовательно, требуется специальная проверка точностных характеристик устройства при подобном нарушении правил эксплуатации, потому что весоизмеритель может вообще выйти из строя как контрольно-измерительный прибор. Для определения работоспособности ВУ мы произвели нагружение разработанной конструкции сверх допустимого веса. Результаты нагружения представлены на рис. 4 в виде двух зависимостей: 1 – изменение периода колебаний струны от приложенной силы; 2 – изменение деформации УК от приложенной силы. Зона I – предел измерения весоизмерителя. Очевидно, что обе зависимости имеют практически линейный закон распределения. Некоторую нелинейность можно объяснить упругими несовершенствами материала упругого кольца.

Увеличение нагрузки (зона II) приводит к возрастанию погрешности измерения, снижает точность устройства. Превышение нагрузки на 70–80 % от верхнего предела измерения вызывает неустойчивую работу весоизмерителя, появляется вероятность сбоя, а при перегрузке более чем в  $\approx 2,2$  раза струнный датчик перестает работать, так как собственная частота струны начинает хаотично изменяться, и процессор просто не в состоянии ее обработать. Тем не менее, такие перегрузки не ведут к поломке устройства.

После снятия нагрузки и некоторого времени релаксации напряжений (порядка 15–25 с) весоизмеритель возвращается в свое первоначальное состояние без каких-либо отклонений.

Дальнейшее увеличение приложенной силы ведет к значительному росту величины гистерезиса и упругого последействия, а превышение в 2,8 раза может вывести струнный датчик из строя. Определим критическую величину деформации упругого кольца при растягивающей силе  $P = 15\ 000\ \text{Н}$ :

$$\delta = \frac{B_{\xi} \cdot d_0^3}{b \cdot h^3 \cdot E} \cdot P = \frac{0,224 \cdot 0,137^3}{0,04 \cdot 0,007^3 \cdot 2,1 \cdot 10^{11}} \cdot 15000 = 2,79\ \text{мм},$$

где  $B_{\xi}$  – конструктивный коэффициент чувствительности;  $d_0$  – внутренний диаметр кольца, мм;  $b$  – ширина кольца, мм;  $h$  – толщина кольца, мм.

Таблица 2

**Характеристики силоизмерительного устройства на основе упругого кольца и струнного датчика. Конструкция № 1**

Параметры	Значение
Предел измерения, кг	1,3–500
Минимальное регистрируемое приращение, кг	1–1,5
Максимально допустимая перегрузка, %	200
Максимальный гистерезис во всем диапазоне нагружения, не более, кг	5
Время затухания переходного процесса, с	1,2–1,6
Геометрические параметры упругого элемента, мм: средний диаметр, ширина, толщина	137 40 7
Питание	Автономное
Напряжение питания, В	$+(5 \pm 0,2)$
Выходной сигнал импульса полезного напряжения, не менее, В	3,5
Время готовности после включения, мин	3
Масса, не более, кг	5
Рабочий диапазон температур, °С	$-30 \dots +50$

Таблица 3

**Значения коэффициента запаса прочности при различных режимах нагрузки**

Режим нагрузки	$\sigma_n$
Постоянная нагрузка	2–2,5
Пульсирующая	3–4
Знакопеременная	8–10

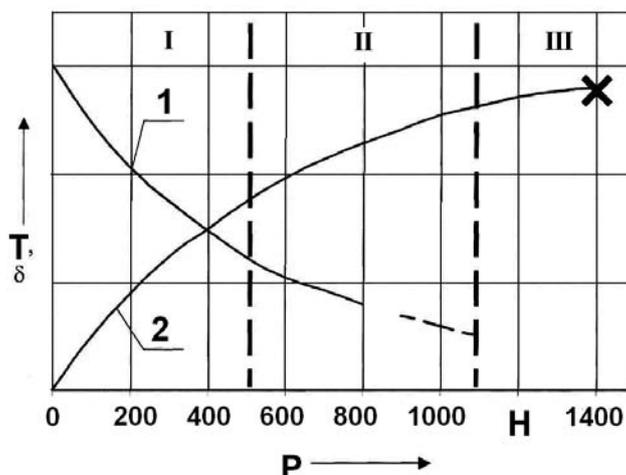


Рис. 4. Определение максимально допустимых напряжений

Fig. 4. Identifying of voltage capability

При перегрузке ВУ в сильной мере проявляются погрешности, определяющие точность устройства [13]. Значение гистерезиса достигает 9,4 %; смещение ноля функции достигает 0,05 мм. Эти погрешности имеют такую же природу, как и рассмотренные ранее, только в данном случае из-за критического увеличения приложенной силы величина их резко возрастает. Нами была также исследована разработанная конструкция № 2 универсального весоизмерителя. Отсутствие в этой конструкции стыков, работающих на растяжение и на сдвиг, несколько снижает данную составляющую погрешности измерения. Особенность исследования этой конструкции состояла в необходимости определения осей деформации, по которым должен устанавливаться струнный датчик, чтобы изменить пределы измерения ВУ, а также зоны нулевой деформации. Схематичное расположение этих элементов представлено на рис. 5.

Исследования проводились с учетом величины нормальной (0,5–0,6 мм) деформации упругого кольца, необходимой для устойчивой работы струнного датчика и максимального использования его возможностей.

Были выделены основные оси, установка по которым струнного датчика изменяет характеристики устройства в целом:

I – горизонтальная ось весоизмерителя ( $\varphi = 0$  град); необходимая деформация упругого кольца достигается при воздействии растягивающей силы 3000 Н;

II – значение  $\varphi$  равно 5–7 град, воздействующая сила  $P = 5000$  Н;

III – значение  $\varphi$  равно 19–22 град, воздействующая сила  $P = 10\,000$  Н;

IV – значение ( $\varphi$  равно 43–47 град, воздействующая сила  $P = 15\,000$  Н;

V – ось нулевой деформации ( $\varphi = 52$ –53 град).

Более точные значения углов расположения осей будут рассчитаны при разработке процессора для универсального весоизмерителя.

Основные характеристики универсального весоизмерительного устройства приведены в табл. 4.

Возможность переустановки струнного датчика, несомненно, увеличивает область применения устройства, однако необходимо учесть, что его универсальность негативно скажется на чувствительности и точностных характеристиках.

**Динамические характеристики весоизмерительного устройства на базе вторичного струнного датчика.** Время затухания переходного процесса – величина, позволяющая охарактеризовать быстрдействие [14; 15] весоизмерительного устройства. Безынерционность весоизмерителя является одним из основных показателей качества, поэтому при проектировании конструкций устройств были проведены исследования зависимости времени затухания переходного процесса от величины входного воздействия. Исследования проводились для двух режимов нагружения: 1 – плавное (на интервале 3–5 с) увеличение приложенной силы; 2 – ударное воздействие с последствием. На рис. 6 представлено графическое изображение колебательного периода первого устройства при различных значениях силовых воздействий.

Методика исследования [14] заключалась в том, что собранное силоизмерительное устройство нагружали растягивающей силой величиной 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 Н. Выходным параметром при этом измерении служит величина деформации УК.

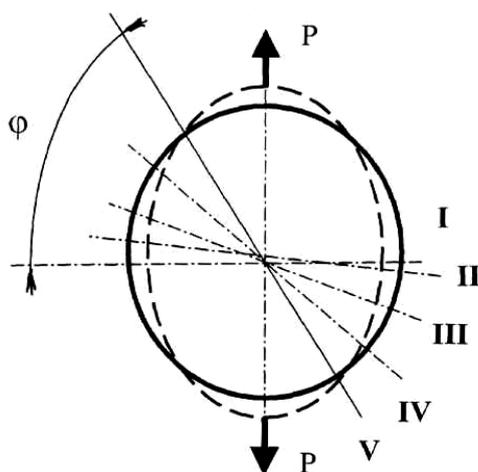


Рис. 5. Установочные оси в универсальном весоизмерителе

Fig. 5. Guiding stubs of flexible weight measuring device

Таблица 4

Характеристики универсального весоизмерителя

Параметры	Значения по осям установки			
	I	II	III	IV
Предел измерения, кг	1–300	1–500	5–1000	25–1500
Минимальное регистрируемое приращение, кг	0,9–1	1–1,2	5–6	23–27
Максимальный гистерезис, кг	3,5	5,2	7,4	14,7
Время затухания переходного процесса, с	5–6	4–5	1–2	1

При ударном силовом воздействии время успокоения и амплитуда колебания переходного процесса резко возрастают. На рис. 7 произведено сравнение времени затухания переходного процесса при статических и ударных (заштриховано) нагрузках.

Вторая конструкция весоизмерителя представляет собой более инерционную систему за счет меньшей жесткости упругого кольца. Этот универсальный

весоизмеритель способен работать в различных диапазонах сил, причем, чем ниже верхний порог силы и уже диапазон измерения, тем больше времени требуется системе, чтобы амплитуда затухающих колебаний стала меньше допустимой погрешности. На рис. 8 показано изменение времени затухания универсального ВУ в зависимости от угла расположения струнного датчика.

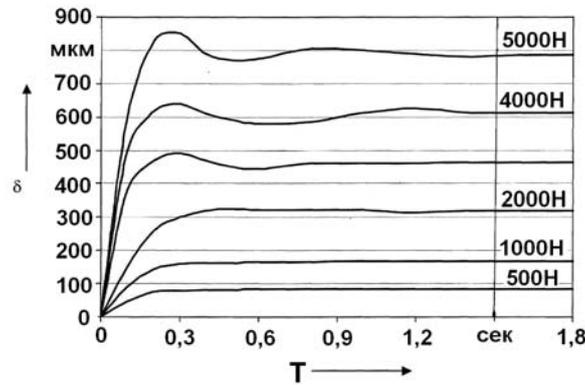


Рис. 6. Время затухания переходного процесса системы весоизмерительного устройства при различном силовом воздействии

Fig. 6. Decay time of transition process of weight measuring device under force impact

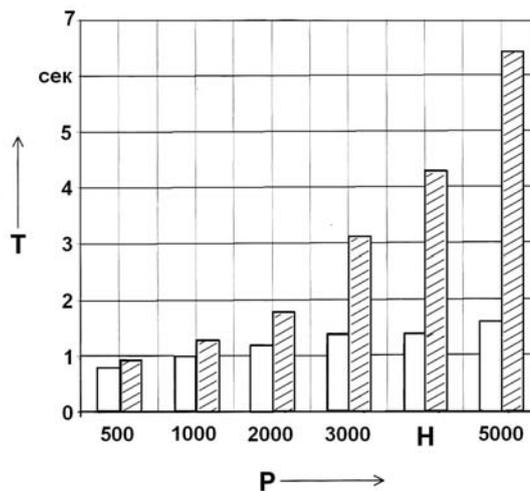


Рис. 7. Увеличение времени затухания переходного процесса при ударных нагрузках

Fig. 7. Increase of the decay time of transition process under impulse load

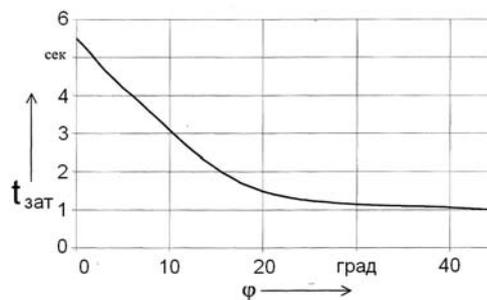


Рис. 8. Зависимость времени затухания переходного процесса универсального ВУ от угла установки  $\varphi$

Fig. 8. Dependence of decay time of transition process of flexible weight measuring device on the angle of setting  $\varphi$

**Заключение.** Проведенные исследования разработанных конструкций весоизмерительных устройств на основе кольцевого упругого элемента и вторичного струнного датчика подтвердили их работоспособность в широком диапазоне нагрузок. Отмечены высокая чувствительность и точность измерений. Вместе с тем показана негативная зависимость устройств от внешних возмущающих колебаний и относительно высокая инерционность, например, в сравнении с вторичным фотодатчиком.

#### Библиографические ссылки

1. Антонец И. В., Белов М. А. Динамометрические упругие элементы весоизмерительных устройств // Сборка в приборостроении и машиностроении. 2010. № 9. С. 35–41.
2. Сорокин Е. С. Метод учета неупругого сопротивления при расчете конструкций и колебаний. Исследования по динамике сооружений. М. : Стройиздат, 1951. 210 с.
3. Фионова А. В. Разработка конструкций, математических моделей и методов расчета силоизмерительных устройств кольцевого типа для автоматизации дозаторов : дис. канд. техн. наук. Ульяновск : УлГТУ, 2001. 198 с.
4. Справочник конструктора точного приборостроения / Г. А. Веркович [и др.] ; под общ. ред. К. Н. Явленинского, Б. Л. Тимофеева. Л. : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. 792 с.
5. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М. : Высш. шк., 1970. 271 с.
6. Технология машиностроения (специальная часть) / А. А. Гусев [и др.] // М. : Машиностроение, 1986. 480 с.
7. Тихонов А. И., Кулагин Л. И. Функция преобразования кольцевых упругих элементов // Обработка информации в автоматических системах. Рязань : Рязанский радиотехнический институт, 1977. 286 с.
8. Фионова А. В., Антонец И. В., Рябов Г. К. Оптимизационный расчет силоизмерительных устройств с последовательной и параллельной работой колец // Прогрессивные методы проектирования технологических процессов, станков и инструментов : тез. докл. МНТК. Тула : ТулГТУ, 1997. 35 с.
9. Средства контроля, управления и измерения линейных и угловых размеров в машиностроении : отрасл. кат. / ВНИИ измерения. М. : ВНИИТЭМР, 1990. 180 с.
10. 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 ун-т, 1979. 244 с.
11. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. М. : Наука, 1971. 312 с.
12. Пономарев С. Д., Андреева Л. Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М. : Машиностроение, 1980. 326 с.

13. Феликсон Е. И. Упругие элементы приборов. М. : Машиностроение, 1977. 311 с.
14. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. М. : Наука, 1971. 192 с.
15. Табаков В. П., Антонец И. В., Плетнев Д. А. Исследование системы упругих чувствительных элементов кольцевого типа методом конечных элементов // Известия Самарского НЦ РАН. Спец. выпуск. Четверть века изысканий и экспериментов по созданию уникальных технологий и материалов для авиаракетостроения УМТЦ–ФГУП ВИАМ. 2008. Т. 1. С. 240–246.

#### References

1. Antonets I. V. [Dynamometric spring elements of weight measuring device]. *Sborka v priborostroenii i mashinostroenii*. 2010, No. 9, P. 35–41 (In Russ.).
2. Sorokin E. S. *Metod ucheta neuprugogo soprotivleniya pri raschete konstruktсий i 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.
3. Fionova A. V. *Razrabotka konstruktсий, matematicheskikh modeley i metodov rascheta siloizmeritel'nykh ustroystv kol'tseвого tipa dlya avtomatizatsii dozatorov. Dis. kand. tekhn. nauk* [The development of designs, mathematical models and methods of calculation of force measuring ring-type devices for the automation of feeders. Cand. Diss.]. Ulyanovsk, UIGTU, 2001, 198 p.
4. Yavlenskogo K. N., Timofeeva B. L., *Spravochnik konstruktora tochnogo priborostroeniya* [Reference precision of instrument designer]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, 792 p.
5. Sotskov B. S. *Osnovy teorii i rascheta nadezhnosti elementov i ustroystv avtomatiki i vychislitel'noy tekhniki* [Fundamentals of the theory and calculation of reliability elements, and automation and computer technology devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970, 271 p.
6. Gusev A. A., Koval'chuk E. R., Kolesov I. M. *Tekhnologiya mashinostroeniya (spetsial'naya chast')* [Technology of mechanical engineering (special part)] Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 480 p.
7. Tikhonov A. I. *Funktsiya preobrazovaniya kol'tsevykh uprugikh elementov* [Function transformation of ring elastic elements]. Ryazan, Ryazanskiy radiotekhnicheskii institute Publ., 1977, 286 p.
8. Fionova A. V. *Optimizatsionnyy raschet siloizmeritel'nykh ustroystv s posledovatel'noy i parallel'noy rabotoy kolets* [Optimization account force measuring devices with serial and parallel operation of the Rings]. Tula, TulGTU, 1997, 35 p.
9. *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, VNIITEMR Publ., 1990, 180.
10. Tikhonov A. I. *Perspektivy sovershenstvovaniya uprugikh elementov datchikov mekhanicheskikh parametrov* [Prospects for improving the mechanical properties of the elastic elements of the sensors]. Saratov, Saratov Univ., 1979, 244 p.

11. Fedorov V. V. *Teoriya optimal'nogo eksperimenta* [The theory of optimal experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 312 p.

12. 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.

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

14. Rumshinskiy L. Z. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [The mathematical processing of

the experimental results]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 192 p.

15. Tabakov V. P. [The research system of elastic sensitive ring-type elements of finite element method]. *Izvestiya Samarskogo NTs RAN. Spetsial'nyy vypusk. Chetvert' veka izyskaniy i eksperimentov po sozdaniyu unikal'nykh tekhnologiy i materialov dlya aviaraketostroeniya UMTTs-FGUP VIAM*. 2008, Vol. 1, P. 240–246 (In Russ.).

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