

УДК 621:658.512

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-92-104

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ДИНАМОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ СИЛОВУЮ КОМПЕНСАЦИЮ ДЕФОРМАЦИИ УПРУГОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ОТ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

И.В. АНТОНЕЦ<sup>1</sup>, В.А. БОРСОВ<sup>2</sup>, В.В. БОРСОВА<sup>3</sup>, Р.А. БОРИСОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации  
Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия

<sup>2</sup>Институт аэронавигации, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>НИИ «Аэронавигация» ФГУП ГосНИИ ГА, г. Москва, Россия

Силоизмерительная техника широко применяется во всех отраслях народного хозяйства, и прежде всего в промышленности. Измерение силы используется с целью определения нагрузок, влияющих на работоспособность многообразных типов оборудования и их элементов, для обеспечения безопасной эксплуатации этого оборудования, а также при испытаниях и исследованиях систем и механизмов. Наиболее эффективными являются устройства, состоящие из упругого элемента и преобразователя его деформации в электрический сигнал. Анализ известных силоизмерительных приборов показывает, что при большом диапазоне нагрузок наиболее эффективной формой упругого элемента является кольцо. В качестве электрических преобразователей деформации в таких устройствах используются емкостные, индуктивные, струнные и тензометрические датчики. Недостатками существующих устройств являются высокая инерционность, пригодность для узкого диапазона нагрузок, малая надежность контактов, нелинейность характеристики. Видятся значительные перспективы в разработке датчиков кольцевого типа с оптоэлектронными преобразователями сигналов, что позволяет значительно повысить производительность, надежность и точность измерения сил. Принцип компенсации предлагается применять в динамометрических датчиках, у которых в качестве контролируемой входной переменной используется значение величины деформации упругого чувствительного элемента. Алгоритм управления схемой компенсации нежелательных отклонений управляемой переменной составляется таким образом, чтобы свести значение величины деформации к нулю. По этой причине функционирование динамометрического датчика, основанное на принципе силовой компенсации, осуществляется с большой точностью. Конструкция датчика содержит чувствительный нуль-орган, усилитель, обратную связь, измерительное устройство.

**Ключевые слова:** упругий чувствительный элемент, силоизмерительное устройство, величина деформации, силовая компенсация, изменения деформаций во времени.

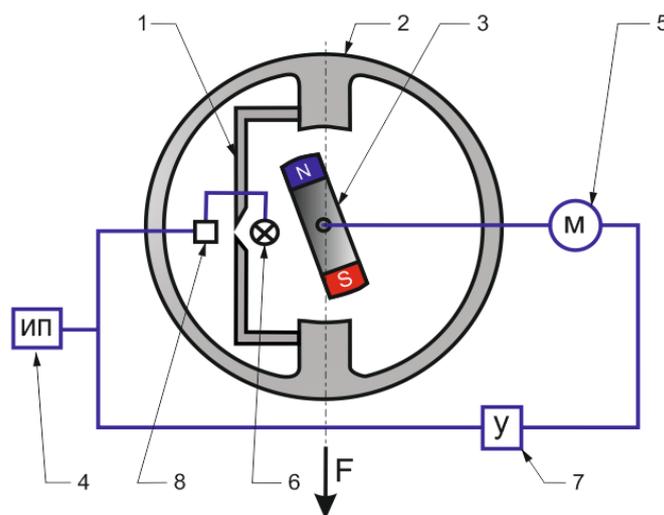
### ВВЕДЕНИЕ

Упругий чувствительный элемент (УЧЭ) является преобразователем входного силового воздействия в деформацию собственно упругого элемента [3], то есть как входным, так и выходным его воздействием являются механические величины. Отклонение от законов идеальной упругости материала заключается в том, что при воздействии постоянной нагрузки вероятно изменение деформаций с течением времени. При приложении нагрузки в начальный момент времени основная часть деформации происходит практически моментально; в последующем деформации продолжают нарастать, но с меньшей интенсивностью. В процессе снятия нагрузки деформации исчезают также с меньшей интенсивностью. При постоянных значениях напряжения и температуры деформация нарастает вначале быстро (I стадия установившейся ползучести), затем с постоянной скоростью (II стадия установившейся ползучести) и далее ускоренно вплоть до разрушения (III стадия).

В настоящее время [2] отсутствуют конструкции силоизмерительных устройств, позволяющих не только учесть, но и осуществить компенсацию остаточной деформации УЧЭ. Кроме того, отсутствует достаточно простая методика расчета УЧЭ, которая позволяет в короткий срок определить характеристики УЧЭ исходя из ограничений сразу на несколько его параметров при заданном пределе измерения, чувствительности и быстродействии. Учитывая вышеизложенное, можно сформулировать цель работы: разработка методов и конструкций силоизмерительных устройств, позволяющих учесть или осуществить компенсацию остаточной деформации УЧЭ при заданных параметрах предела измерения, чувствительности, быстродействия, а также при наличии ограничений на размеры УЧЭ.

### КОНСТРУКЦИЯ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

Нами разработаны конструкции силоизмерительных устройств, в которых для исключения остаточной деформации измерительного кольцевого упругого элемента используется метод компенсации внешних нагрузок. Схема силоизмерительного<sup>1</sup> устройства, использующего следящий привод с поворотным магнитом для компенсации внешних нагрузок, представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема силоизмерительного устройства, использующего электромагнитный привод с поворотным магнитом для компенсации внешних нагрузок:

1 – шторки; 2 – кольцевой упругий элемент; 3 – постоянный магнит; 4 – измерительный прибор; 5 – двигатель; 6 – источник излучения; 7 – усилительное устройство; 8 – фотоприемное устройство

**Fig. 1.** The scheme of the force-measuring device using an electromagnetic drive with a rotating magnet to compensate the external loads

1 – shutters, 2 – ring elastic element, 3 – permanent magnet, 4 – measuring device, 5 – motor, 6 – radiation source, 7 – amplifying device, 8 – photodetector

Предложенное устройство работает следующим образом. В исходном состоянии (без внешней нагрузки) ток на выходе усилителя 7 отсутствует и двигатель 5 устанавливает постоянный магнит 3 в положение, при котором взаимодействия полюсов магнита с приливами кольцевого упругого элемента 2 не происходит. Сигнал на выходе усилителя появляется после приложения внешней

<sup>1</sup> Пат. 129631 Российская Федерация, Весоизмерительное устройство / И.В. Антонец, Г.М. Горшков, В.А. Петров, А.П. Терешенко; заявитель и патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. № 2012154613/28; заявл. 14.12.2012; опубл. 27.06.2013. Бюл. № 18. 2 с.

нагрузки, вызывающей расхождение шторок  $l$  и увеличение светового потока. Указанный сигнал приводит двигатель и жестко закрепленный на его валу постоянный магнит во вращение. Для магнитного поля, образованного постоянным магнитом, энергия в зазоре, образованном прилегающим к его полюсу объемом воздуха, т. е. удельная магнитная энергия  $w_m$ , равна

$$w_m = \frac{B_2 H_2}{2}, \quad (1)$$

где  $B_2$  – индукция магнитного поля в зазоре,  $H_2$  – напряженность магнитного поля в зазоре.  
Для зазора с размерами  $S_2$ ,  $l_2$  энергия поля равна

$$w_m = \frac{B_2 H_2 S_2}{2l_2}. \quad (2)$$

Изменение площади и длины зазора при повороте постоянного магнита приведет к изменению силы притяжения, создаваемой магнитом, при этом деформация упругого элемента практически будет отсутствовать. Предлагаемая конструкция силоизмерительного устройства обладает существенным достоинством, которое заключается в том, что энергия здесь расходуется лишь на этапах переходных процессов.

Для исключения эффекта прилипания, возникающего вследствие притяжения постоянных магнитов, возникает необходимость в установке специальных прокладочных деталей из немагнитного материала в воздушном зазоре. В процессе исследований наилучшие характеристики компенсации внешних нагрузок были получены при использовании магнитных сплавов ЮНДК35Т5АА и ЮНДК40Т8АА, обладающих высокими магнитными свойствами за счет более совершенной структуры.

### **ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРИВОД ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК**

Схема конструкции [4, 5] силоизмерительного устройства, использующего гидравлический привод для компенсации внешних нагрузок и фотопреобразователь, соединенный последовательно с гидроприводом, приведена на рис. 2.

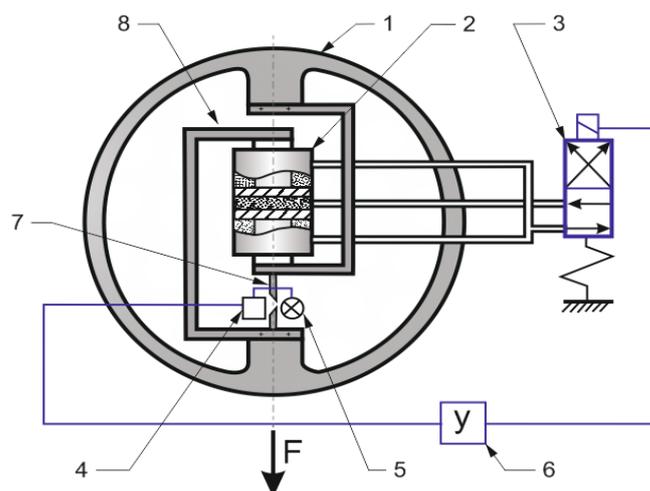
Работа устройства осуществляется по следующему алгоритму. В отсутствии внешней нагрузки шторки имеют минимальный просвет, не позволяющий сформировать световой поток на входе фотоприемника. Наличие внешней нагрузки на упругом кольце ведет к росту просвета между шторками<sup>2,3</sup>, что влечет увеличение сигнала на выходе фотоприемника и появление тока на выходе усилителя.

Ток, в свою очередь, включает систему управления гидравлическим приводом, она создает давления в гидравлическом приводе, а он осуществляет компенсацию деформации кольца. Величина тока прямо пропорциональна значению нагрузки, и во всех случаях деформация кольца от нагрузки практически отсутствует. Следовательно, предлагаемая<sup>4</sup> [6] конструкция силоизмерительного устройства не будет иметь погрешности, вызванной остаточной деформацией кольца.

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> Пат. 177302 Российская Федерация, Весоизмерительное устройство / И.В. Антонец, Д.Е. Лушников, А.А. Черторийский; УФИРЭ им. Котельникова РАН. № 2017118601; заявл. 29.05.2017; опубл. 15.02.2018. Бюл. № 5. 2 с.

<sup>4</sup> Пат. 162085 Российская Федерация, Весоизмерительное устройство / И.В. Антонец, Г.М. Горшков, С.М. Степанов; заявитель и патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. № 2015148341/28; заявл. 10.11.2015; опубл. 27.05.2016. Бюл. № 15. 2 с.

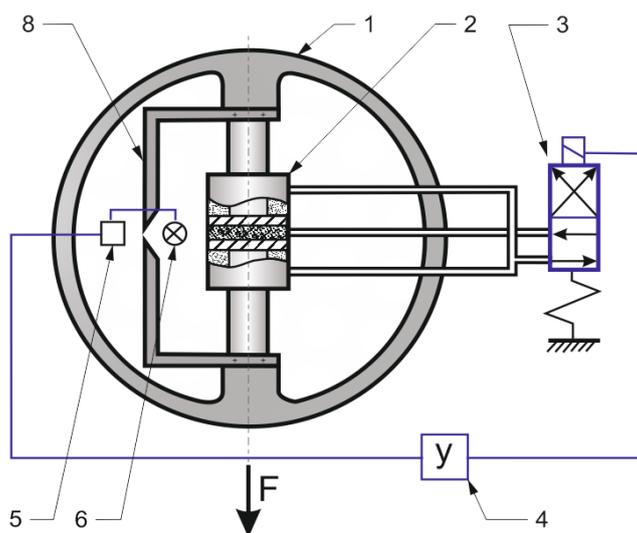


**Рис. 2.** Схема конструкции силоизмерительного устройства, использующая гидравлический привод для компенсации внешних нагрузок: 1 – кольцевой упругий элемент; 2 – гидравлический привод; 3 – распределительный золотник; 4 – приемник излучения; 5 – источник излучения; 6 – усилительное устройство; 7 – шторки; 8 – кронштейны

**Fig. 2.** The scheme of the design of the force-measuring device using a hydraulic drive to compensate the external loads: 1 – ring elastic element; 2 – hydraulic drive; 3 – slide valve; 4 – radiation receiver; 5 – radiation source; 6 – amplifying device; 7 – shutters; 8 – brackets

Схема силоизмерительного устройства, использующего гидравлический привод для компенсации внешних нагрузок и фотопреобразователь, соединенный параллельно с гидроприводом, приведена на рис. 3.

Работа устройства. Кольцо в исходном положении не деформировано, и сигнал на выходе фотоприемного устройства отсутствует. При приложении нагрузки к упругому кольцу про свет [7, 8] между шторками стремится возрасти, однако следующее за этим появление сигналов



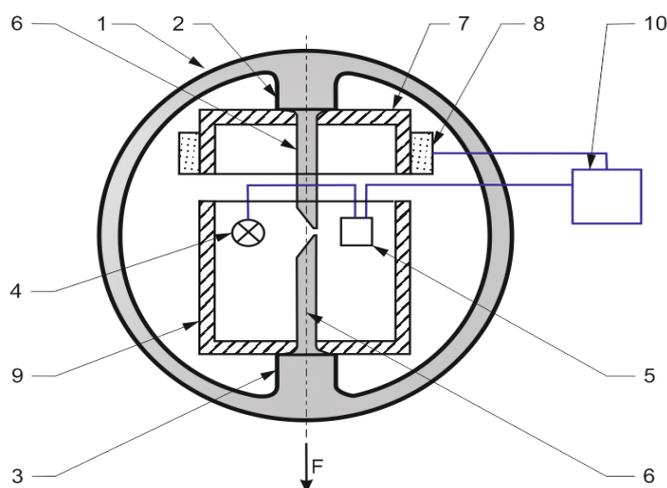
**Рис. 3.** Схема силоизмерительного устройства, использующего гидравлический привод для компенсации внешних нагрузок: 1 – кольцевой упругий элемент; 2 – гидравлический привод; 3 – распределительный золотник; 4 – усилительное устройство; 5 – источник излучения; 6 – приемник излучения; 7 – шторки

**Fig. 3.** The scheme of the force-measuring device using a hydraulic drive to compensate the external loads: 1 – ring elastic element, 2 – hydraulic drive, 3 – slide valve, 4 – amplifying device, 5 – radiation source, 6 – radiation receiver, 7 – shutters

на выходах фотоприемного устройства и усилителя преобразуется в ток, который, в свою очередь, включает систему управления распределительным золотником. Управляемое перемещение распределительного золотника ведет к перераспределению давления в гидравлическом приводе таким образом, что осуществляется компенсация деформации кольца. Величина тока прямо пропорциональна значению нагрузки, и во всех случаях деформация кольца от нагрузки практически отсутствует. Следовательно, предлагаемая конструкция силоизмерительного устройства не будет иметь погрешности, вызванной остаточной деформацией кольца.

### ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРИВОД ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

Разработка конструкции<sup>5</sup> силоизмерительного устройства, в составе которой применяется система стабилизации пространственного положения кольцевого упругого чувствительного элемента, т. е. деформация кольца, в процессе работы, определяется только величиной значения динамической погрешности данной системы. Принципиальная схема предлагаемой конструкции приведена на рис. 4. Работа устройства производится [11, 12] с использованием измерительного кольцевого упругого элемента 1, который при воздействии внешней нагрузки деформируется, создавая между шторками 6 зазор. При этом световой поток от источника излучения 4 растет прямо пропорционально величине внешней нагрузки. Приемник излучения 5 преобразует световой поток в электрический ток, значение которого также прямо пропорционально величине внешней нагрузки. Электрический ток на выходе приемника излучения через усилительное устройство 10 поступает на катушку 8 электромагнита, ферромагнитный стержень 7 которого с катушкой прикреплены к приливу 2.



**Рис. 4.** Схема силоизмерительного устройства, использующего систему стабилизации пространственного положения кольцевого упругого чувствительного элемента: 1 – кольцевой упругий чувствительный элемент; 2, 3 – приливы; 4 – источник излучения; 5 – приемник излучения; 6 – шторка; 7 – ферромагнитный стержень; 8 – электромагнит; 9 – ярмо; 10 – усилительное устройство

**Fig. 4.** The scheme of the force-measuring device using the system of stabilization of the spatial position of the ring elastic sensing element:

1 – ring elastic sensing element, 2 and 3 – tides, 4 – a radiation source, 5 – a radiation receiver, 6 – a shutter, 7 – a ferromagnetic rod, 8 – an electromagnet, 9 – a yoke, 10 – an amplifying device

<sup>5</sup> 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.

Ток, протекающий по катушке электромагнита  $\delta$ , создает в ферромагнитном сердечнике электромагнита магнитное поле, притягивающее ярмо  $\theta$ , жестко установленное на приливе 3. Сближаясь, приливы 2 и 3 стремятся компенсировать деформацию кольцевого упругого чувствительного элемента. Сила тока, протекающего по катушке электромагнита, будет определять значение внешней силы.

Сведенные к минимуму деформации упругого элемента позволят избежать [13, 14] ряда погрешностей: нелинейности, несовершенств материала, остаточной деформации. Схема сило-измерительного устройства, использующего систему стабилизации пространственного положения упругого кольца, реализует управление по принципу компенсации возмущений, при котором на вход регулятора поступает сигнал, пропорциональный внешнему воздействию. Основная задача системы – обеспечить нулевое рассогласование.

В предлагаемой системе непрерывное изменение выходной величины соответствует во времени непрерывному изменению входной величины, т. е. протекание всех процессов является непрерывным. В то же время наличие в системе нелинейных звеньев предопределяет ее общую нелинейность, что значительно усложняет решение задач, связанных с определением динамических характеристик системы.

Для обеспечения простоты расчета приведем задачу к такому виду, чтобы максимально эффективно реализовать методы исследования обыкновенных линейных систем, основываясь на том, что теория и методы для них разработаны наиболее полно. На рис. 5 показана обобщенная функциональная схема системы замкнутого типа.

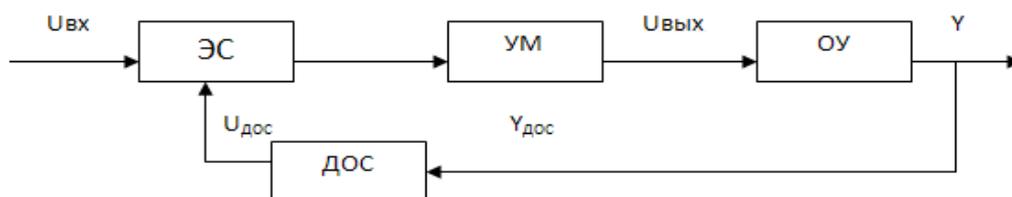


Рис. 5. Функциональная схема системы замкнутого типа  
Fig. 5. Functional diagram of a closed-loop system

На данной схеме ЭС – элемент сравнения, УМ – усилитель мощности, ОУ – объект управления, ДОС – датчик обратной связи.

В предлагаемой схеме использован безынерционный усилитель мощности, имеющий зону нечувствительности  $\pm U_{ВХmax}$ .

Передаточные функции ОУ (электромагнит) и ДОС (механическая система) известны:

$$W_{oy}(s) = \frac{Y(s)}{U_{вых}(s)} = \frac{K_0}{s(1+sT_a)(1+sT_e)} = \frac{0,018}{s(1+0,12s)(1+0,010s)}, \quad (3)$$

где  $T_a$ ,  $T_B$  и  $T_c$  – постоянные времени,

$$K_0 = 0,018 \frac{1}{Bc}, \quad (4)$$

$$W_{дос}(s) = \frac{U_{дос}(s)}{Y(s)} = \frac{K_{дос}}{1+sT_c}, \quad (5)$$

где

$$K_{дос} = 0,2 \frac{B}{град} = \frac{0,2 \cdot 180B}{3,14рад} = 11,465 \frac{B}{рад}. \quad (6)$$

Структурная схема системы приведена на рис. 6.

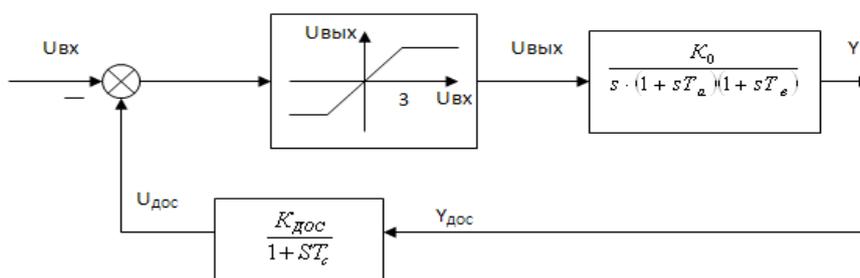


Рис. 6. Структурная схема системы  
Fig. 6. Block diagram of the system

Для упрощения расчетов введем следующие допущения:

- усилитель мощности имеет линейную характеристику;
- коэффициент передачи датчика обратной связи равен единице.

С учетом введенных допущений передаточная функция усилителя мощности может быть выражена следующим образом:

$$W_{\text{УМ}}(s) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(s)}{U_{\text{ВХ}}(s)} = K_{\text{УМ}}. \quad (7)$$

Напряжение на выходе усилителя 110 В, на входе ±3 В в зоне нелинейности усилителя мощности.

$$W_{\text{УМ}}(s) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(s)}{U_{\text{ВХ}}(s)} = \frac{110\text{В}}{3\text{В}} = 36,667. \quad (8)$$

Тогда получим (рис. 7) структурную схему линеаризованной системы.

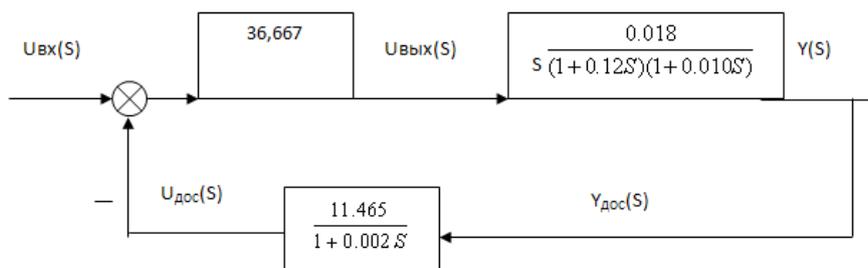


Рис. 7. Структурная схема линеаризованной системы  
Fig. 7. Block diagram of a linearized system

По критерию Гурвица проверим устойчивость системы замкнутого типа.

Передаточная функция системы замкнутого типа имеет вид

$$\Phi(s) = \frac{K_{\text{УМ}} K_0 (1 + T_c s)}{s (1 + T_a s) (1 + T_b s) (1 + T_c s) + K_{\text{УМ}} K_0 K_{\text{ДОС}}}, \quad (9)$$

$$\Phi(s) = \frac{0,66(1 + 0,002s)}{7,567 + (1 + 0,002s)(1 + 0,12s)(1 + 0,010s)s}. \quad (10)$$

Запишем характеристическое уравнение системы замкнутого типа

$$7,567 + (1 + 0,002s)(1 + 0,12s)(1 + 0,010s)s = 0, \quad (11)$$

$$24 \cdot 10^{-7} s^4 + 146 \cdot 10^{-5} s^3 + 132 \cdot 10^{-3} s^2 + s + 7,567 = 0. \quad (12)$$

Известно, что условие устойчивости системы заключается в требовании положительности определителя Гурвица и всех его диагональных миноров [3], которое в нашем случае выполняется. Для подтверждения выполнения достаточного условия устойчивости в системе четвертого порядка следует проверить знак  $\Delta_3$ :

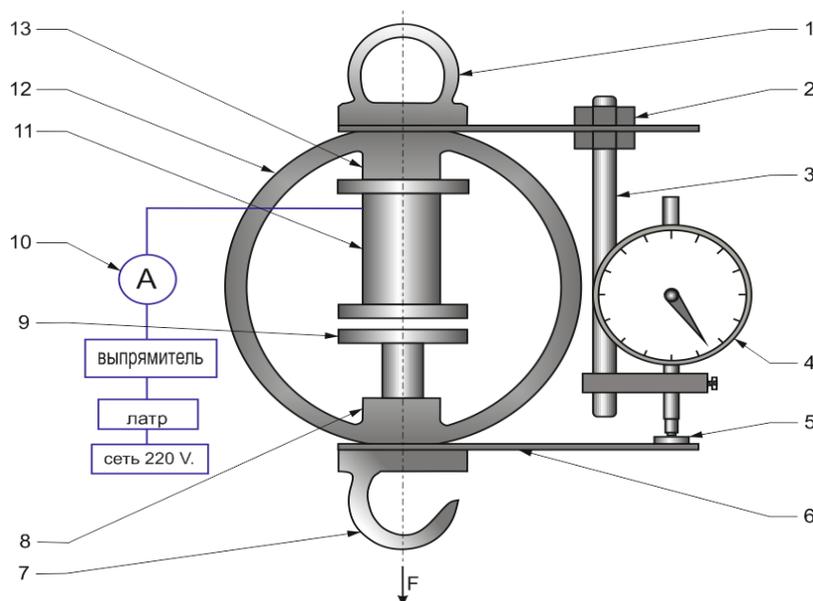
$$\Delta_3 = a_3(a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_1^2 a_4. \quad (13)$$

В результате  $\Delta_3 = 0,000174191$ ,  $\Delta_3 > 0$ .

Следовательно, система замкнутого типа устойчива.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Экспериментальное исследование [13, 14] силоизмерительного устройства, использующего электромагнитный привод для компенсации внешних нагрузок, проводилось по следующей схеме (рис. 8).



**Рис. 8.** Принципиальная схема стенда для исследования силоизмерительного устройства:  
1 – рым-гайка крюк; 2 – гайка; 3 – приспособление для крепления микрометра; 4 – микрометр;  
5 – пластина; 6 – кронштейн; 7 – рым-гайка; 8 – нижний прилив; 9 – якорь; 10 – амперметр;  
11 – электромагнит; 12 – упругий чувствительный элемент; 13 – верхний прилив

**Fig. 8.** Schematic diagram of the stand for the study of the force-measuring device:  
1 – ring nut hook, 2 – nut, 3 – clamps for mounting the micrometer, 4 – micrometer,  
5 – plate, 6 – bracket, 7 – ring-nut, 8 – lower tide, 9 – anchor, 10 – ammeter,  
11 – solenoid, 12 – elastic sensing element, 13 – upper tide

К раме стенда (рис. 8) жестко прикреплен с помощью рым-гайки 1 верхний прилив 13 упругого чувствительного элемента. При отсутствии деформации УЧЭ стрелка микрометра устанавливается на ноль. Нагрузка создается путем подвески груза к нижнему приливу 8 с помощью рым-гайки 7. Указанная нагрузка осуществляет взаимное смещение приливов УЧЭ, а следовательно, корпуса 12 относительно якоря 9 и основания электромагнита 11, при этом микрометр 4 фиксирует это смещение. Далее, используя переменное сопротивление (ЛАТР), на электромагнит 11 подается напряжение и возникающее электромагнитное поле начинает притягивать якорь. Микрометр 4 фиксирует перемещение упругого элемента в обратном направлении – в исходное положение. Сила тока, протекающего через электромагнит при компенсации полученной деформации, определяет значение величины этой деформации. Дискретные значения амплитуды тока компенсации внешней нагрузки контролировались типовым амперметром. Медианы выборок значений тока компенсации, полученные в результате эксперимента, приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Table 1

Медианы выборок экспериментов  
The medians of the samples of experiments

4,9 Нм (0,5 кг)		7,4 Нм (0,75 кг)		9,8 Нм (1 кг)		12,2 Нм (1,25 кг)	
$i_{(A)}$	$\Delta_{мм}$	$i_{(A)}$	$\Delta_{мм}$	$i_{(A)}$	$\Delta_{мм}$	$i_{(A)}$	$\Delta_{мм}$
0	0,03	0	0,05	0	0,06	0	0,066
0,2	0,025	0,21	0,045	0,2	0,055	0,33	0,06
0,3	0,02	0,32	0,04	0,2	0,04	0,45	0,05
0,4	0,015	0,43	0,03	0,5	0,03	0,62	0,04
0,5	0,01	0,47	0,025	0,62	0,02	0,74	0,03
0,6	0,005	0,5	0,02	0,47	0,01	0,9	0,02
0,67	0	0,73	0	1	0	1,64	0

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕФОРМАЦИИ УЧЭ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ СИЛОВОЙ КОМПЕНСАЦИИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Эксперимент по исследованию [14, 15] силоизмерительного устройства, использующего силовую компенсацию деформации кольцевого упругого чувствительного элемента, заключался в следующем: упругое кольцо было нагружено массой, равной пяти ньютонам (5 Н), при этом была включена система компенсации деформации, использующая электромагнитный привод для компенсации внешних нагрузок. Для компенсации деформации УЧЭ путем силового притяжения якоря к катушке, в ней для получения требуемого электромагнитного поля понадобилось создать ток величиной 0,67 А. После того как компенсация была проведена, стрелка индикатора часового типа вернулась в исходное (нулевое) положение. Силоизмерительное устройство было оставлено в таком состоянии на два часа.

Спустя два часа индикатор часового типа получил отклонение. Чтобы вернуть его в исходное состояние, была откорректирована сила тока. Данный эксперимент [6] проводился четыре раза в день на протяжении двенадцати дней. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Table 2

Результаты измерений  
Measurement results

№ exper.	i(A)								
1	0,67	11	0,673	21	0,671	31	0,675	41	0,67
2	0,671	12	0,675	22	0,673	32	0,675	42	0,67
3	0,671	13	0,67	23	0,673	33	0,67	43	0,675
4	0,673	14	0,67	24	0,675	34	0,67	44	0,675
5	0,67	15	0,675	25	0,67	35	0,674	45	0,67
6	0,67	16	0,675	26	0,671	36	0,675	47	0,673
7	0,675	17	0,67	27	0,675	37	0,67	47	0,675
8	0,675	18	0,67	28	0,675	38	0,673	48	0,675
9	0,67	19	0,671	29	0,67	39	0,675	49	0,67
10	0,673	20	0,671	30	0,67	40	0,675	50	0,67

Определяем поле рассеяния

$$\omega_i = i_{max} - i_{min} = 0,676 - 0,67 = 0,07i(A). \quad (14)$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны конструкции силоизмерительных устройств, использующих силовую компенсацию деформации кольцевого упругого чувствительного элемента. В основе работы первой конструкции лежит использование поворотного постоянного магнита, угловое положение которого определяет величину силы компенсации, пропорциональной приложенной нагрузке. Основу второй конструкции составляет регулируемый гидропривод. Наконец, в основе третьей конструкции лежит электромагнитный привод. Экспериментальное исследование силоизмерительного устройства, использующего электромагнитный привод для компенсации внешних нагрузок, подтвердило его работоспособность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Феликсон Е.И. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1977. 311 с.
2. Карпин Е.Б. Средства автоматизации для измерения дозирования массы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1971. 470 с.
3. Литвин Ф.Л. Справочник конструктора точного приборостроения. М.; Л.: Машиностроение, 1964. 944 с.
4. Авен О.Н., Доманицкий С.М. Бесконтактные исполнительные устройства промышленной автоматики. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 344 с.
5. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1980. 230 с.
6. Asch G. Les captures en instrumentation industrielle. Lyon, 1991. 970 p.

7. Barber J.R. Elasticity. 2<sup>nd</sup> ed. Kluwer, 2004. 431 p.
8. Ciarlet P.G. An introduction to differential geometry with applications to elasticity. Springer, 2005. 211 p.
9. Nyce David S. Linear position sensors: theory and application. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 179 p.
10. Elbestawi M.A. Force Measurement // Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. 1999. Pp. 600–615.
11. Rijlaarsdam D.J. Modelling damping in linear dynamic systems. Eindhoven, 2005. 50 p.
12. Tropf U. Opto-Elektronik steuert Verpackungsvorgänge // NEUE Verpackung. 1975. № 1–18.
13. Дашенко А.Ф., Козинская Ю.А., Лимаренко А.С. Методика расчета упругого элемента силоизмерительного устройства // Праці Одеського політехнічного університету. 2013. Вип. 2(41).
14. Titus S.S.K. Design and development of precision artifact for dissemination of low forces of 1N and 2N / K. Jain Kamlesh, S.K. Dhulkhead, Yadav Poonam // XIX IMEKO World Congress. Lisbon, 2009.
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, № 3 (Mar 2012).

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Антонец Иван Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры авиационной техники Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, iv.antonec@yandex.ru.

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

**Борсоева Вера Владимировна**, ведущий научный сотрудник НИИ «Аэронавигация» ФГУП ГосНИИ ГА, borsoeva\_vera@mail.ru.

**Борисов Руслан Андреевич**, аспирант кафедры авиационной техники Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, ruslanbor82@yandex.ru.

### THE DEVELOPMENT OF DYNAMOMETRIC GAUGE CONSTRUCTIONS USING FORCE COMPENSATION OF THE ELASTIC SENSING ELEMENT DEFORMATION FROM EXTERNAL LOADS

Ivan V. Antonets<sup>1</sup>, Vladimir A. Borsoev<sup>2</sup>, Vera V. Borsoeva<sup>3</sup>, Ruslan A. Borisov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Air Navigation, Moscow, Russia

<sup>3</sup>State Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

### ABSTRACT

Force-measuring equipment is widely used in all sectors of the economy, primarily in industry. Force measurement is used to determine loads affecting operation capability of various types of equipment and their components to ensure safe operation as well as during tests and research of the systems and mechanisms. The most effective are devices consisting of an elastic element and a transducer of its deformation into an electric signal. An analysis of known force-measuring devices shows that at a large range of loads the most effective form of the elastic element is the ring. As electric transducers of deformation in similar gauges, capacity,

inductive, vibrating-wire and strain gauges are used. The disadvantages of existing devices are slow response, suitability for a narrow range of loads, low contact reliability, non-linearity. There are significant prospects of the circular type sensors development with optoelectronic signal transducers, which allows increasing significantly the efficiency, reliability and accuracy of force measurement. The compensation principle is supposed to be used in the dynamometric gauges where as a control input variable, a value of an elastic element deformation is used. The control algorithm of a compensation scheme of undesirable discrepancies of a control variable is made so that to reduce a deformation value to naught. Due to this fact, operation of a dynamometric gauge based on the principle of force compensation is carried out with a lot of accuracy. The construction of the gauge contains a sensing zero-body, an amplifier, feedback and a measuring device.

**Key words:** elastic sensing element, force-measurement device, deformation value, force compensation, change of deformation through time.

## REFERENCES

1. **Felikson, I.E.** (1977). *Uprugie elementy priborov* [Elastic elements of instruments]. Moscow: Mashinostroenie, Mechanical Engineering, 311 p. (in Russian)
2. **Karpin, E.B.** (1971). *Sredstva avtomatizatsii dlya izmereniya dozirovaniya massy* [Automation tools to measure mass dosing]. 2<sup>nd</sup> ed., revised and add. Moscow: Mashinostroenie, Mechanical Engineering, 1971. 470 p. (in Russian)
3. **Litvin, F.L.** (1964). *Spravochnik konstruktora tochnogo priborostroeniya* [Directory of the designer of precision instrumentation]. Moscow: Leningrad: Mashinostroenie, Mechanical Engineering, 944 p. (in Russian)
4. **Aven, O.N. and Domanitskiy, S.M.** (1960). *Beskontaktnye ispolnitelnye ustroystva promyshlennoy avtomatiki* [Non-contact actuators of industrial automation]. Moscow: Leningrad: Gosenergoizdat, 344 p. (in Russian)
5. **Andreeva, L.E.** (1980). *Uprugie elementy priborov* [Elastic elements of devices]. Moscow: Mashinostroenie, Mechanical Engineering, 230 p. (in Russian)
6. **Asch, G.** (1991). *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Lyon, 970 p.
7. **Barber, J.R.** (2004). *Elasticity*. 2<sup>nd</sup> ed. Kluwer, 431 p.
8. **Ciarlet, P.G.** (2005). *An introduction to differential geometry with applications to elasticity*. Springer, 211 p.
9. **Nyce, David S.** (2004). *Linear position sensors: theory and application*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 179 p.
10. **Elbestawi, M.A.** (1999). *Force Measurement*. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, pp. 600–615.
11. **Rijlaarsdam, D.J.** (2005). *Modelling damping in linear dynamic systems*. Eindhoven, 50 p.
12. **Tropf, U.** (1975). *Opto-Elektronik steuert Verpackungsvorgange*. NEUE Verpackung, no. 1–18.
13. **Dashchenko, A.F., Kozinskaya, J.A. and Limarenko, A.S.** (2013). *Metodika rascheta uprugogo elementa siloizmeritel'nogo ustroystva* [Method of calculation of the elastic element of a force-measuring device]. Praci Odeskogo politekhnichnogo universitetu, OPI, iss. 2(41). (in Ukrainian)
14. **Titus, S.S.K., Kamlesh, K. Jain, Dhulkhead, S.K. and Poonam, Yadav.** (2009). *Design and development of precision artifact for dissemination of low forces of 1N and 2N*. XIX IMEKO World Congress.
15. **Kamble, V.A. and Gore, P.N.** (2012). *Use of FEM and photo elasticity for shape optimization of S type load cell*. Indian Journal of Science and Technology, vol. 5, no. 3 (Mar 2012).

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ivan V. Antonec**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Chair of Aeronautical Engineering, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, iv.antonec@yandex.ru.

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

**Vera V. Borsoeva**, Leading Researcher of the State Research Institute of Civil Aviation, borsoeva\_vera@mail.ru.

**Ruslan A. Borisov**, Post-graduate Student of the Chair of Aeronautical Engineering, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, ruslanbor82@yandex.ru.

Поступила в редакцию 13.08.2018  
Принята в печать 20.11.2018

Received 13.08.2018  
Accepted for publication 20.11.2018