

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СТРУННОГО ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ГАБАРИТНО-МАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Аннотация.

Актуальность и цели. Основными недостатками известных струнных преобразователей является низкая чувствительность в области малых значений измеряемых величин. Цель работы – исследование и совершенствование технических и эксплуатационных характеристик первичных струнных преобразователей для систем управления современной мобильной техникой.

Материалы и методы. Используются методы решения гиперболических уравнений математической физики.

Результаты. Получены в аналитическом виде зависимости чувствительности первичного струнного преобразователя от конструктивных параметров и характеристик механических свойств струны, держателя и мембранного элемента.

Выводы. За счет предложенных изменений конструктивных параметров и материала струнного чувствительного элемента чувствительность первичного струнного преобразователя в диапазоне частот от 70 до 80 кГц может быть увеличена в 2 раза по сравнению с серийным аналогом.

Ключевые слова: первичный струнный преобразователь, струнный чувствительный элемент, чувствительность, конструктивные параметры, механические свойства.

D. A. Gulieva, B. V. Tsy-pin, E. V. Kuchumov

INCREASING OF THE STRING PRIMARY CONVERTER SENSITIVITY BY CHANGING THE OVERALL AND MASS CHARACTERISTICS OF THE SENSITIVE ELEMENT

Abstract.

Background. The main disadvantages of the known string transducers is their low sensitivity in the region of small values of the measured quantities. The purpose of the work is to research and improve the technical and operational characteristics of primary string converters for control systems for modern mobile equipment.

Materials and methods. We used methods for solving hyperbolic equations of mathematical physics.

Results. The dependences of the primary string transducer's sensitivity on the design parameters and characteristics of the mechanical properties of the string, holder and membrane element are obtained in an analytical form.

Conclusions. Due to the proposed changes in the design parameters and the material of the string sensing element, the primary string transducer's sensitivity in the frequency range from 70 to 80 kHz can be doubled as compared to the serial analogue.

Keywords: primary string transducer, string sensitive element, sensitivity, design parameters, mechanical properties.

Введение

В современных средствах измерения механических величин все больше внимания уделяется расширению функциональности за счет использования современных технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1–5], методов проектирования и инженерного анализа с учетом различных физико-механических аспектов измерительного процесса. Среди струнных первичных преобразователей наиболее надежными и точными являются вибрационные датчики, в которых измеряемая физическая величина преобразуется в частоту электрических колебаний, так как этот способ обладает высокой помехоустойчивостью и простотой оцифровки измерительного сигнала [2–4]. По этой причине представляет интерес усовершенствование струнных методов измерений и преобразователей на их основе [5].

1. Постановка задачи

При построении функции преобразования струнного метода измерения для второго случая рассматривают свойства и конструктивные параметры струнного чувствительного элемента (СЧЭ), пренебрегая податливостью и реакцией держателей струны и предварительного преобразователя [4, 5]. Однако анализ обобщенной зависимости чувствительности на примере струнного датчика давления с учетом всех важных составляющих его конструкции позволяет провести более строгую оценку чувствительности датчика, а также разработать методику модификации конструкции с целью улучшения метрологических характеристик.

2. Совершенствование технических и эксплуатационных характеристик первичных струнных преобразователей

Преобразователь для струнных датчиков давления выполнен в виде мембранного упругого элемента (МУЭ) и держателей струны (колки с цапгами). Он преобразует внешнее воздействие давления в общее перемещение концов колков Δl , т.е. работает в режиме заданной длины.

Для учета изгибной упругости струны и, следовательно, жесткого крепления используется уравнение балки Эйлера – Бернулли [3]:

$$m_l u''_{tt} + F u''_{xx} + J_y E u''''_{xxxx} = 0, \quad (1)$$

где J_y – момент инерции поперечного сечения струны относительно продольной оси y (экваториальный момент); m_l – масса балки на единицу ее длины; E – модуль Юнга; u – изгиб балки. Для неоднородной струны данное уравнение усложняется. Однако зависимость собственных частот от внешней (растягивающей) силы сохранит свой характер и для такого типа струны.

Для рассматриваемых значений $Fl^2/EJ \gg 1$ можно использовать приближенную формулу зависимости собственных частот от растягивающей силы

$$f = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{F}{ml}} \left[1 + 2 \sqrt{\frac{EJ_y}{Fl^2}} + \left(4 + \frac{n^2 \pi^2}{2} \right) \frac{EJ_y}{Fl^2} \right], \quad n = 1, 2, \dots \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что влияние жесткости наблюдается во всем диапазоне работы струны и может служить одной из причин погрешности СЧЭ. Когда сила натяжения F вносит наиболее весомый вклад, уравнение (2) стремится к выражению для идеальной струны, не сопротивляющейся изгибу.

В дальнейшем в выражении (2) можно использовать первые два члена суммы в режиме основной моды $n = 1$, так как это дает возможность оценить начальную частоту СЧЭ и перейти к ее девиации с помощью характеристики для идеализированной струны:

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{ml}} + \sqrt{\frac{EJ_y}{ml^3}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{ml}} + f_0 \rightarrow f - f_0 = \Delta f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{ml}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E\Delta l}{\rho l}}, \quad (3)$$

где $f_0 = \sqrt{EJ_y/ml^3}$ – начальная частота СЧЭ, зависящая от длины l рабочей части струны; $\Delta f = f - f_0$ – девиация частоты СЧЭ, зависящая от силы натяжения F или деформации $\epsilon = \Delta l/l$ струны.

Если упругость МУЭ и держателей струны значительно превосходит упругость СЧЭ, то связь с девиацией струны проста – посредством полного перемещения концов Δl струны, которые выражаются через длину держателей h и производную изгиба u мембраны du/dr , характеризующую угол поворота φ в местах их расположения (рис. 1):

$$\Delta l = 2h\varphi = 2h \left| \frac{du}{dr} \right|, \quad (4)$$

где r – это радиус от центра мембраны.

Для обеспечения наибольшей чувствительности преобразователя необходимо найти максимальное значение производной выражения (4). Используем выражение прогиба МУЭ для измерения абсолютного давления в виде плоской жесткозаделанной круглой мембраны

$$\varphi = -\frac{du}{dr} = -\frac{d}{dr} \left(\frac{P}{64D_m} (R^2 - r^2)^2 \right) = P \frac{3(1 - \nu_m^2)}{4E_m d^3} (R^2 - r^2)r, \quad (5)$$

где $D_m = E_m d^3 / (12(1 - \nu_m^2))$ – цилиндрическая жесткость мембраны; R – радиус мембраны; P – давление; ν – коэффициент Пуассона материала МУЭ; d – толщина мембраны.

Из выражения (5) видно, что наибольшее значение производная принимает не на краях, а на меньшем расстоянии от центра мембраны $r = R/\sqrt{3} \approx 0,58R$.

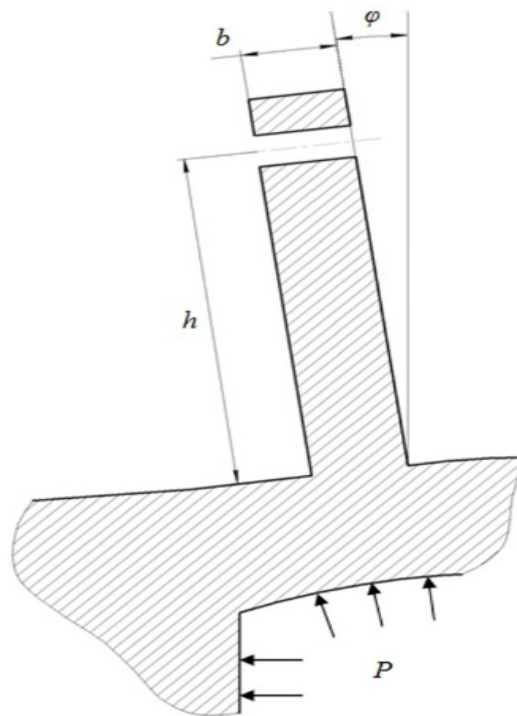


Рис. 1. Деформация МУЭ и держателей струны: h – высота колка от основания до середины цанги, b – ширина колка, φ – отклонения колка от нормали при недеформированном мембранном упругом элементе

Таким образом, выражение для девиации частоты системы идеализированных МУЭ, держателей и СЧЭ можно записать в следующем виде:

$$\Delta f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{(1-\nu_m^2) E}{\sqrt{3}\rho} \frac{hR^3}{E_m l_p d^3} P_H} .$$

Девиация связана с чувствительностью первичного струнного преобразователя K соотношением $K = \Delta f / P_H$, где P_H – значение измеряемого (номинального) давления. Для снижения температурного влияния все элементы конструкции стараются делать из одного и того же материала, поэтому имеет место упрощенное соотношение

$$\Delta f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{(1-\nu^2) hR^3}{\sqrt{3}\rho l_p d^3} P_H} . \quad (6)$$

Из выражения (6) можно составить общий характер влияния геометрических параметров конструкций-подсистем (рис. 1) на чувствительность датчика, определяемую девиацией частоты СЧЭ. В частности, видно, что при уменьшении значения P_H для компенсации чувствительности толщина мембраны d должна уменьшаться по закону третьей степени, тогда как для достижения аналогичного эффекта радиус МУЭ R нужно увеличивать с тем же степенным порядком.

Выражение (6) также позволяет объяснить, почему при уменьшении длины рабочей части струны l начальная частота СЧЭ f_0 возрастает сильнее, чем девиация частоты – при сохранении пропорций струны длина l_p может измениться менее значительно. Как указывалось выше, введение двух длин является необходимым для струны переменного сечения, так как исходные формулы рассчитаны на СЧЭ постоянной толщины, для которых $l = l_p$.

Полученная функция преобразования (6) не учитывает дополнительную механическую сопротивляемость конструкций держателей и СЧЭ при деформации МУЭ. А именно – в реальной конструкции преобразователей колки располагаются ближе к краю МУЭ, а не на расстоянии, рассчитанном выше. Это вызвано тем, что держатели имеют заданные конечные размеры, определяемые ограниченными механическими свойствами материала и технологией изготовления.

Таким образом, держатели представляют собой элементы типа консольных балок, влияющие на жесткость мембраны в области заделки. Их влияние можно охарактеризовать как наличие дополнительного момента сил на краю МУЭ. Дополнительный вклад в сопротивление изгибу мембраны вносит и упругость СЧЭ. В этом случае нужно описывать влияние держателей на струну посредством растягивающей силы F , возникающей в результате деформации колков с цапгами под действием изгибающего момента МУЭ.

Рассмотрим случай, когда жесткость мембраны и соответствующее давление заведомо больше напряжений и сил, возникающих в держателях. Держатель будет деформироваться совместно с МУЭ в месте его расположения. Угол поворота основания колков можно оценивать с помощью усредненного значения $\bar{\varphi}$, определяемого с помощью специальной точки r^* :

$$\bar{\varphi} = \varphi(r^*) = -\frac{du}{dr}(r^*).$$

Более точное выражение для расчета угла можно определить с помощью численного моделирования.

Учесть сопротивляемость (жесткость) держателей при изгибе мембраны можно следующим приближенным способом: представить воздействие на МУЭ не в виде непрерывно распределенной нагрузки, а зависящей от радиуса и уменьшающейся к краю мембраны:

$$Q = P[1 - Q_0 g(r)], \quad (7)$$

где Q_0 включает в себя жесткости и держателя, и струны. Так как точный характер влияния данных жесткостей неизвестен и может быть количественно оценен только на основе имитационного моделирования, то имеет смысл на начальном этапе анализа использовать линейную функцию их влияния, т.е. $g(r) = r$, где параметр Q_0 имеет размерность объемных сил. В этом случае прогиб мембраны будет определяться с помощью выражения

$$u(r) = \left[\frac{1}{64D_m}(R^2 - r^2)^2 - \frac{Q_0}{450D_m}(2r^5 - 5R^3r^2 + 3R^5) \right] P, \quad (8)$$

а угол наклона с помощью его производной:

$$\varphi(r) = -\frac{du}{dr}(r) = \frac{r}{D_m} \left[\frac{1}{16}(R^2 - r^2) - \frac{Q_0}{45}(R^3 - r^3) \right] P = \varphi_k(r)P. \quad (9)$$

Из соотношения (9) видно, что угол поворота нормали МУЭ при наличии держателей уменьшается. При сохранении геометрии конструкции держателей струны и самой струны изменения толщины мембраны в данном приближении приводят к таким же последствиям, что и для простого МУЭ, тогда как влияние вариации его диаметра (радиуса R) МУЭ не подчиняется классической зависимости для идеальной тонкой мембраны и может существенно уменьшить или увеличить угол наклона колков.

Необходимо учесть, что множитель Q_0 из выражения (9) включает также упругость СЧЭ, которая пропорциональна растяжению струны, т.е. углу поворота держателя. Из этого следует, что $\varphi(r) = \bar{\varphi}(\Delta l)$, и поэтому применение выражения (9) к численным оценкам требует отдельного, более глубокого анализа.

Рассматривая держатель как однородную балку длины h под действием поворота на угол $\bar{\varphi}$ на одном конце и силы F на другом, ее перемещение можно описать с помощью выражения

$$w(x) = \bar{\varphi}x - \frac{Fh}{2E_b J_b} x^2 + \frac{F}{6E_b J_b} x^3 = \bar{\varphi}x - (6h - 2x) \frac{x^2 F}{E_b a b^3}, \quad x \in [0, h], \quad (10)$$

где a – эффективная (усредненная) ширина балки-держателя; b – эффективная толщина балки-держателя.

Перемещение конца держателя $x = h$ равно половине полного перемещения концов струны, т.е. $w(h) = \Delta l / 2$. С учетом выражения для силы (1) формула (10) запишется в следующем виде:

$$\frac{\Delta l}{2} = \bar{\varphi}h - \Delta l \frac{\bar{S}E}{l_p} \frac{4h^3}{E_b a b^3},$$

откуда перемещение струны равно

$$\Delta l = \frac{2\bar{\varphi}h}{1 + \frac{8\bar{S}Eh^3}{l_p E_b a b^3}}. \quad (11)$$

При пренебрежении сопротивлением струны выражение (11) переходит в выражение (4). Из полученного соотношения видно, что увеличение длины колков при сохранении их толщины может существенно снизить перемещение (деформацию) струны.

С учетом выражения (11) и изготовления деталей преобразователя из одинаковых материалов девиация СЧЭ запишется в виде

$$\Delta f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{2Eh\bar{\varphi}_k}{\rho \left(l_p + 8 \frac{\bar{S}}{a} \left(\frac{h}{b} \right)^3 \right)}} P_H, \quad (12)$$

где использована замена $\bar{\varphi} = \varphi_k(r^*)P = \bar{\varphi}_k P$.

Из полученного соотношения отчетливо видно, что учет вклада жесткости держателя интерпретируется как увеличение длины СЧЭ, снижающего чувствительность первичного преобразователя. Снизить это влияние можно за счет уменьшения усредненного поперечного сечения струны \bar{S} . В случае низкого качества применяемого материала и ограничений технологии изготовления СЧЭ не представляется возможным, так как в этом случае значительно возрастает технологический отход. Более эффективным способом с учетом зависимости выражения (12) можно считать снижение отношения h/b .

Далее, если представить коэффициент Q_0 эмпирически в виде аддитивной суммы вклада упругостей держателя и струны

$$Q_0 = Q_D + Q_S \varepsilon = Q_D + Q_S \frac{\Delta l}{l_p},$$

то можно, используя замену

$$\bar{\varphi} = \bar{\varphi}_k P = \left(\bar{\varphi}_{kD} - \bar{\varphi}_{kS} \frac{\Delta l}{l_p} \right) P,$$

переписать выражение (11) в следующем уточненном виде:

$$\Delta l = \frac{2\bar{\varphi}_{kD} h P}{\left(1 + \frac{\bar{S} E}{l_p} \frac{8h^3}{E_b a b^3} + \frac{2\bar{\varphi}_{kS} h P}{l_p} \right)}. \quad (13)$$

Последнее соотношение описывает также и тип обратной связи СЧЭ с МУЭ, которая может привести к дополнительной степени свободы всей системы при колебаниях струны.

Окончательно чувствительность первичного струнного преобразователя с учетом сопротивления держателя и СЧЭ при деформации МУЭ описывается выражением

$$\Delta f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{2Eh\bar{\varphi}_{kD}}{\rho \left(l_p + 8 \frac{\bar{S}}{a} \left(\frac{h}{b} \right)^3 + 2\bar{\varphi}_{kS} h P_H \right)}} P_H. \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что жесткость (сопротивление) струны приводит к искажению передаточной функции идеальной струны. Вклад слагаемых, формально увеличивающих длину СЧЭ, можно снизить за счет уменьшения площади усредненного поперечного сечения струны \bar{S} , так как параметр $\bar{\varphi}_{kS}$, характеризующий сопротивление струны, также уменьшается вместе с данной площадью.

Введенные слагаемые в знаменателе выражения (13) характеризуют снижение чувствительности первичного струнного преобразователя для малых диапазонов измерения. Для больших диапазонов они несут незначительный вклад.

однако в этом случае имеет наибольшее критическое значение параметр Q_0 . В этих диапазонах размеры МУЭ сравнимы с толщинами корпуса, поэтому часть деформаций и механических напряжений мембраны передается корпусу, искусственно повышая сопротивляемость держателей. Даже простой учет податливости стенок упругого элемента показывает, что в них может передаваться до 10 % общей деформации.

Если условие $Fl^2/EJ \gg 1$ не выполняется, например в случае малого натяжения струны, можно вместо приближения (2) использовать другое приближенное выражение для девиации [6]:

$$\Delta f = \tilde{f}_0 \left(\sqrt{1 + k \frac{Fl^2}{(4,73)^2 EJ_y}} - 1 \right), \quad (15)$$

где $\tilde{f}_0 = (4,73)^2 f_0$, а коэффициент k подбирается эмпирически. Он приблизительно равен $k \approx 0,55$. При $Fl^2/EJ \ll 1$ чувствительность можно представить в еще более упрощенном виде:

$$\Delta f = k \frac{f_0 l^2}{EJ_y} F. \quad (16)$$

Так как взаимное влияние элементов учитывалось независимо от формулы чувствительности (девиации), то не составляет труда представить формулы (15) и (16) по аналогии с выражением (14):

$$\Delta f = \tilde{f}_0 \left(\sqrt{1 + k \frac{\bar{S}l^2}{(4,73)^2 J_y} \frac{2h\bar{\Phi}_{kD}}{\left(l_p + 8 \frac{\bar{S}}{a} \left(\frac{h}{b} \right)^3 + 2\bar{\Phi}_{kS} h P_H \right)} P_H} - 1 \right), \quad (17)$$

$$\Delta f = k f_0 \frac{\bar{S}l^2}{J_y} \frac{2h\bar{\Phi}_{kD}}{\left(l_p + 8 \frac{\bar{S}}{a} \left(\frac{h}{b} \right)^3 + 2\bar{\Phi}_{kS} h P_H \right)} P_H. \quad (18)$$

Из полученных выражений видно, что все выводы для выражения (14) остаются в силе и для выражений (17) и (18).

Анализ построенных соотношений показывает, что по сравнению с выражением (6) для идеализированного случая учет конечной жесткости держателей и МУЭ приводит только к снижению значению девиации СЧЭ, т.е. чувствительность реального первичного струнного преобразователя всегда ниже рассчитанной по классической схеме. Причем вклад в снижение со стороны СЧЭ пропорционален прикладываемому (номинальному) давлению P_H . Для держателей струны проявляется более однозначная, но и алгебраически более сложная зависимость от их геометрических параметров: линей-

ная – от отношения площади поперечного сечения балки-держателя к ее ширине S/a , и кубическая – от отношения длины к толщине h/b . Отсюда можно сделать вывод, что для малых диапазонов измерения МУЭ (с учетом того, что геометрия СЧЭ и держателей остается неизменной) в ослабление чувствительности делают наибольший вклад держатели струны, в первую очередь отношение длины держателя к толщине.

Заключение

Полученные выражения (17) и (18) позволяют в аналитическом виде провести инженерный анализ чувствительности первичного струнного преобразователя в зависимости от конструктивных параметров и характеристик механических свойств струны, держателя и мембранного упругого элемента. Их применение при проектировании первичных струнных преобразователей позволит получить выигрыш в массе и габаритах. Для серийного аналога масса блока датчиков составляет порядка 8400 г при габаритных размерах блока 87×64×52 мм. Разработанный первичный струнный преобразователь позволит получить соответственно значение массы блока датчиков порядка 400 г при габаритных размерах 50×20×15 мм. Чувствительность первичного струнного преобразователя в диапазоне частот от 70 до 80 кГц превышает чувствительность серийного аналога в 2 раза и составляет от 20 до 86 кГц/мкм.

Библиографический список

1. **Милохин, Н. Т.** Частотные датчики систем автоконтроля и управления / Н. Т. Милохин // Библиотека по автоматике. – 2013. – № 310. – С.131–138.
2. Microsystem for micro- and small currents stabilization on the base of Field Effect Hall Sensor / V. N. Mordkovich, M. L. Baranochnikov, A. V. Leonov, D. M. Pazhin, M. P. Karpushin // 10th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators (EMSA 2014). – Vienna, Austria, 2014.
3. **Крысько, В. А.** Нелинейная динамика балок Эйлера – Бернулли и типа Тимошенко / В. А. Крысько, М. В. Жигалов, О. А. Салтыкова // Известия вузов. Машиностроение. – 2008. – № 6. – С. 7–27.
4. **Кучумов, Е. В.** Особенности динамики колебаний металлического струнного чувствительного элемента датчика / Е. В. Кучумов // Измерительная техника. – 2011. – № 3. – С. 226–231.
5. **Guangtao, D.** MEMS magnetic field sensor based on silicon bridge structure / D. Guangtao, D. Xiangdong, L. Guangtao // Journal of Semiconductors. – 2010. – Vol. 31, № 10. – P. 104011.

References

1. Milokhin N. T. *Biblioteka po avtomatike* [Automation library]. 2013, no. 310, pp.131–138. [In Russian]
2. Mordkovich V. N., Baranochnikov M. L., Leonov A. V., Pazhin D. M., Karpushin M. P. *10th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators (EMSA 2014)*. Vienna, Austria, 2014.
3. Krysko V. A., Zhigalov M. V., Salytkova O. A. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [University proceedings. Mechanical engineering]. 2008, no. 6, pp. 7–27. [In Russian]
4. Kuchumov E. V. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2011, no. 3, pp. 226–231. [In Russian]
5. Guangtao D., Xiangdong D., Guangtao L. *Journal of Semiconductors*. 2010, vol. 31, no. 10, pp. 104011.

Гулиева Дарья Александровна

соискатель, кафедра ракетно-космического и авиационного приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: dashuliy2308@yandex.ru

Gulieva Dar'ya Aleksandrovna

Applicant, sub-department of rocket-space and aviation instrumentation, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Цыпин Борис Вульфович

доктор технических наук, профессор, кафедра ракетно-космического и авиационного приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: cypin@yandex.ru

Tsypin Boris Vul'fovich

Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of rocket-space and aviation instrumentation, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кучумов Евгений Владимирович

кандидат технических наук, инженер-разработчик, Научно-промышленное предприятие КуйбышевТелеком-Метрология (Россия, г. Самара, ул. Земеца, 26Б)

E-mail: evgenii_kuchumov@mail.ru

Kuchumov Evgeniy Vladimirovich

Candidate of engineering sciences, development engineer, Scientific and industrial enterprise KuibyshevTelecom-Metrology (26B Zemetsa street, Samara, Russia)

Образец цитирования:

Гулиева, Д. А. Повышение чувствительности струнного первичного преобразователя путем изменения габаритно-массовых характеристик чувствительного элемента / Д. А. Гулиева, Б. В. Цыпин, Е. В. Кучумов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 3 (55). – С. 88–97. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-3-9.