

А.А. Плешаков, М.Г. Кристаль

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ ЗУБКОВ БУРОВЫХ КОРОНОК ДЛЯ ИХ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ

Предложено пневмоэлектронное измерительное устройство, в котором осуществляется временное преобразование линейного размера в интервал времени, за который сжатый воздух, заключенный в измерительной камере устройства, истекает в атмосферу через дроссель, образованный поверхностью измеряемой детали, базированной в призме, и срезом сопла, лежащим в плоскости, совпадающей с боковой поверхностью этой призмы. В результате экспериментального исследования установлено, что устройство обладает погрешностью измерения $\pm 0,27$ мкм и $\pm 0,45$ мкм при измерении диаметров в диапазонах 6...6,22 мм и 10...10,22 мм соответственно, что позволяет использовать его в составе автоматического контрольно-сортировочного устройства при сборке буровых коронок, а также для измерения диаметров цилиндрических деталей в других областях машиностроения. Предложена математическая модель временного преобразования, которая, с учетом смешанного характера дросселирования в зазоре между поверхностью измеряемой детали и срезом измерительного сопла, позволяет производить расчет передаточной функции и погрешности предложенного устройства в зависимости от его конструктивных и рабочих параметров. Экспериментально установлена адекватность предложенной модели, которую можно использовать на этапе проектирования устройств такого типа.

Ключевые слова: измерение линейных размеров, измерение диаметра, пневматическое устройство, временное преобразование.

Введение

Технология изготовления буровой коронки типа КНШ предполагает запрессовку зубков с цилиндрическим хвостовиком диаметром от 6 до 10 мм в отверстия в ее корпусе. Качество коронки во многом определяется соблюдением требуемых натягов, поэтому используют метод групповой взаимозаменяемости: зубки и отверстия сортируют по величине диаметра с допуском 220 мкм в 44 размерные группы, из которых затем комплектуют пары для сборки, точность которой зависит

от точности измерения. Отнесение зубка в несоответствующую группу из-за неточного измерения приводит к несоблюдению требуемого натяга и преждевременному выходу коронки из строя. Поэтому для повышения качества буровых коронок актуально снижение погрешности измерения и сортировки зубков по диаметру, которая, в соответствии с [1], не должна превышать $\delta = 1,4$ мкм.

При измерении в условиях производства возможны вибрационные, ударные воздействия и влияние электромагнитных полей, поэтому целесообразно применение пневматических средств измерения (СИ), нечувствительных к этим воздействиям [2] вследствие демпфирующих свойств сжатого воздуха. Использование воздуха в качестве рабочего тела также позволяет проводить бесконтактные измерения, что целесообразно при измерении большого количества деталей в силу отсутствия контактных поверхностей, подверженных износу. Это особенно актуально, когда стоит задача увеличения объема производства инструмента, которая также обуславливает необходимость автоматизации измерения и сортировки зубков.

Ширина измерительного диапазона известных пневматических СИ с заданной точностью ограничена 200 мкм [3], чего не достаточно для сортировки зубков. Если при этом используют бесконтактную оснастку, например, измерительные кольца [4], то диапазон сужается до 76 мкм.

Целью работы является обеспечение требуемой точности автоматического бесконтактного измерения диаметров зубков буровых коронок их селективной сборки, для чего предложено [5] пневмоэлектронное измерительное устройство (рис. 1), осуществляющее временное преобразование $D \rightarrow t_{\text{изм}}$ измеряемого диаметра D в интервал времени $t_{\text{изм}}$ истечения сжатого воздуха из измерительной камеры в атмосферу через зазор, образованный поверхностью детали, установленной в базирующей призме, и срезом измерительного сопла, лежащим в ее боковой поверхности. Также для оценки влияния параметров устройств такого типа на их передаточную функцию и погрешность измерения предложена математическая модель, учитывающая смешанный характер дросселирования в зазоре между срезом измерительного сопла и поверхностью детали.

Конструкция предложенного устройства

Измеряемую деталь 1 диаметром D устанавливают в базирующую призму 2, на одной из поверхностей которой на расстоя-

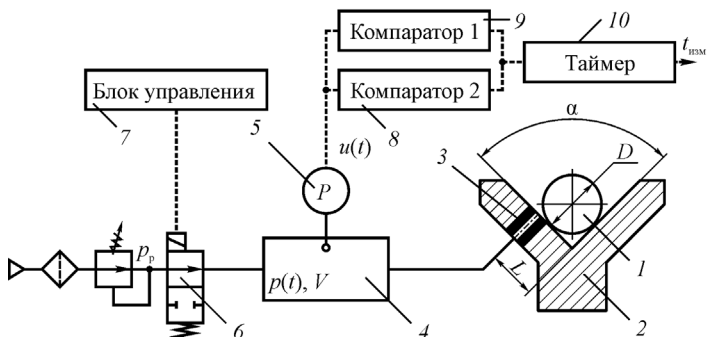


Рис. 1. Пневмоэлектронное измерительное устройство

нии L от ее вершины расположено цилиндрическое измерительное сопло 3 диаметром d (смотри рис. 1). Плоскость среза сопла 3 и базировочная поверхность призмы совпадают. Сопло 3 соединено с измерительной камерой (ИК) 4 объемом V , которая объединена с камерой преобразователя 5 давления $p(t)$ сжатого воздуха в напряжение $u(t)$ и сообщается со стабилизированным источником сжатого воздуха через канал клапана 6 , управляемого блоком управления (БУ) 7 . Сигнал $u(t)$ поступает на входы компараторов $8, 9$, выходы которых управляют соответственно пуском и остановом таймера 10 .

В начале измерительного цикла (рис. 2) клапан 6 открыт, и по нему сжатый воздух с рабочим давлением p_p от источника поступает в ИК 4 и истекает в атмосферу через зазор между поверхностью измеряемой детали 1 и срезом сопла 3 . Давление $p(t)$ воздуха в ИК 4 устанавливается на уровне $p_{\text{изм}} = f(D)$. В момент времени t_0 БУ 7 закрывает клапан 6 , прекращается подача

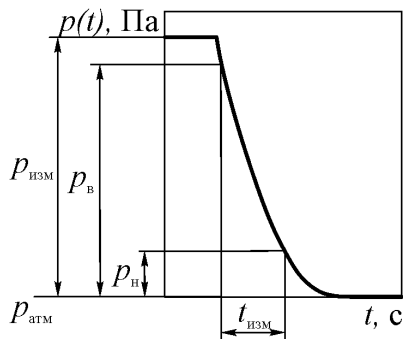


Рис. 2. Изменение давления $p(t)$ в ИК при временном преобразовании

в ИК 4 сжатого воздуха, а воздух с давлением, заключенный в ИК 4, продолжает истекать в атмосферу. В момент t_b давление $p(t)$ воздуха в ИК 4 достигает верхнего граничного значения p_b , срабатывает компаратора δ , запуская таймер 10. Затем в момент t_n давление $p(t)$ уменьшается до значения p_n , и компаратор 9 останавливает таймер 10. Величина интервала $t_{изм} = (t_n - t_b)$, зарегистрированная таймером 10, позволяет оценить диаметр D измеряемой детали, поскольку D определяет площадь F сечения дросселя, образованного срезом сопла 3 и поверхностью детали 1, через который воздух из ИК 4 истекает в атмосферу.

Математическая модель временного преобразования

Истечение воздуха из глухой камеры описывают уравнением [6]:

$$V(RT)^{-1}(dp(t) / dt) = -G, \quad (1)$$

где R – газовая постоянная для сухого воздуха, Дж·кг⁻¹·К⁻¹; T – температура воздуха, К; G – массовый расход воздуха через дроссель, кг·с⁻¹.

Дроссели подобного типа при расчете расхода часто рассматривают [7, 8] как турбулентные, расход G_T которых вычисляют как

$$G_m = \begin{cases} Fp(t) \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k-1} \sqrt{\frac{2k}{(k+1)RT}}, & p(t) > p_a \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{-k}{k-1}}, \\ Fp_a^{k-1} [p(t)]^{\frac{k-1}{k}} \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p(t)}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}, & p(t) < p_a \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{-k}{k-1}}, \end{cases} \quad (2)$$

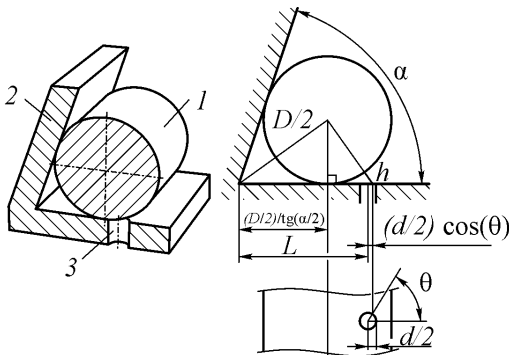


Рис. 3. Схема для расчета площади сечения выходного дросселя

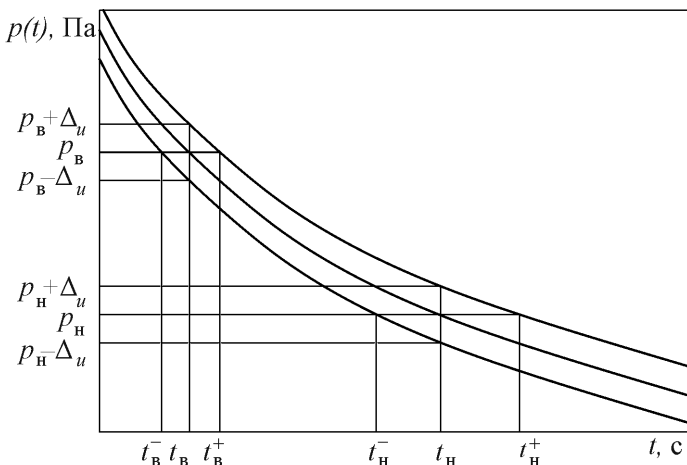


Рис. 4. Схема для оценки погрешности временного преобразования

где k – показатель адиабаты воздуха, p_a – атмосферное давление, Па.

Для вычисления площади F проходного сечения дросселя, образованного срезом измерительного сопла 3 и цилиндрической поверхностью измеряемой детали 1, принята схема, приведенная на рис. 3, где α – угол при вершине базирующей призмы 2.

Тогда площадь можно вычислить как ,

$$F = \int_{\theta=0}^{2\pi} (d/2)h \, d\theta$$

где:

$$h = \sqrt{\left[L - \left(\frac{D}{2} \right) / \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) + \left(\frac{d}{2} \right) \cos(\theta) \right]^2 + \left(\frac{D}{2} \right)^2} - \left(\frac{D}{2} \right).$$

Решением уравнения (1) при условии $p(t_B^-) = p_B$ и $p(t_H^-) = p_H$ для различных значений D нами найдена серия результатов $t_{\text{изм}} = (t_H - t_B)$ временного преобразования и передаточная функция $t_{\text{изм}} = (D)$ устройства.

Предварительно установлено, что в состав сигнала $u(t)$ преобразователя 5 давления входит высокочастотная помеха с амплитудой Δ_u , которая является источником погрешности срабатывания компараторов 8 и 9. Решая (1) при $p(t_B^-) = (p_B - \Delta_u)$, $p(t_B^+) = (p_B + \Delta_u)$, $p(t_H^-) = (p_H - \Delta_u)$ и $p(t_H^+) = (p_H + \Delta_u)$, получают значения t_B^-, t_B^+, t_H^- и t_H^+ (рис. 4). Предельную погрешность Δ_t компараторов 8 и 9 можно оценить как: $\Delta_t = (t_H^+ - t_B^-) - (t_H^- - t_B^+)$.

Чтобы оценить влияние Δ_t на погрешность Δ , по обратной функции $D = f(t_{изм})$ вычисляют: $\Delta = D(t_n^+ - t_o^-) - D(t_n^- - t_o^+)$.

С учетом того, что в рассматриваемом дросселе поток воздуха движется около цилиндрической поверхности детали, выдвинуто предположение о возникновении эффекта прилипания потока к этой поверхности и о смешанном характере дросселирования, что может приводить к ошибке расчета, поскольку принятое уравнение (2) характеризует расход воздуха при турбулентном дросселировании. Для того чтобы учесть это несоответствие введен поправочный функционал $\psi(D) = t_{изм}^m(D) / t_{изм}^3(D)$, равный отношению теоретического $t_{изм}^m$ и экспериментального $t_{изм}^3$ значений.

Экспериментальное исследование предложенного устройства

Опытный образец устройства. Для оценки влияния параметров устройства на его погрешность, вычисления функционала $\psi(D)$ и проверки адекватности предложенной модели изготовлен опытный образец (рис. 5). Конструкция призмы 2 позволяет устанавливать варьировать значения угла при ее вершине. В основании призмы 2 имеется сквозной паз для подвода к измеряемой детали 1 измерительного сопла 3 диаметром 1 мм или 2 мм. Его устанавливают в держателе механизма микроперемещений, обеспечивая возможность задания с помощью индикаторной головки величины смещения $l = [L - (D_{\max}/2) \operatorname{tg}(\alpha/2)]$ его оси в направлении, перпендикулярном линии касания поверхностей детали 1 наибольшего диаметра D_{\max} в диапазоне и основания призмы 2.

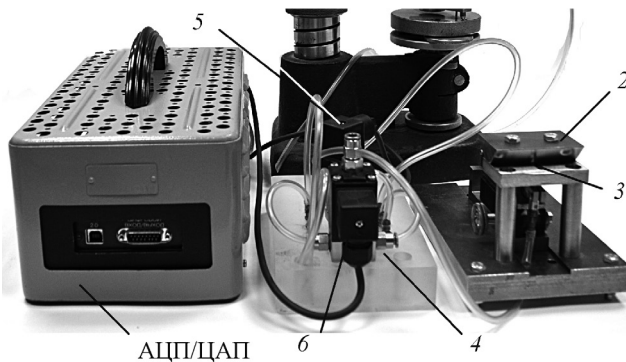


Рис. 5. Опытный образец измерительного устройства

Объем V ИК 4 составляет $16,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Присоединением дополнительной емкости V может быть увеличен до $41,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Используются преобразователь 5 давления WIKA модели S-10 ($\Delta_{\text{ц}} = 20 \text{ Па}$) и электропневматический распределитель 6 Camozzi серии 6. Функции БУ 7, компараторов 8, 9 и таймера 10 выполняет специально разработанное программное обеспечение [9], обрабатывающее сигнал $u(t)$, преобразованный в цифровую форму посредством блока АЦП/ЦАП Zet 210 (частота дискретизации 500 кГц). В качестве источника сжатого воздуха использован компрессор АВАС GENESIS 11 500. Для стабилизации рабочего давления p_p устройство оснащено блоком фильтра со стабилизатором ФСВ6–1/6–337.

Экспериментальная оценка влияния параметров устройства на погрешность измерения. Погрешность Δ предложенного устройства оценивалась как $\pm[3\sigma_t/S]$, где σ_t – среднее квадратическое отклонение величины $t_{\text{изм}}$, а S – чувствительность к изменению измеряемой величины. При этом

$$S = [t_{\text{изм}}(D_{\text{мин}}) - t_{\text{изм}}(D_{\text{макс}})] / [D_{\text{макс}} - D_{\text{мин}}],$$

где $D_{\text{мин}}$ и $D_{\text{макс}}$ – наименьший и наибольший диаметры в диапазоне измерения.

Установлено, что при уменьшении α повышается S , а σ_t не изменяется. Для уменьшения погрешности необходимо выбирать меньшие α . Для $D = 6 \dots 6,22 \text{ мм}$ при уменьшении α от 90° до 30° Δ снижается в 2,88 раза.

Увеличение l до критического $l_{\text{кр}}$ приводит к повышению S и не оказывает влияния на σ_t . Дальнейшее увеличение l приводит к снижению S . Зависимость $\Delta = f(l)$ имеет минимум в точке $l_{\text{кр}}$, причем $l_{\text{кр}}$ возрастает при уменьшении d и $D_{\text{мин}}$ и не зависит от α . Для $D = 6 \dots 6,22 \text{ мм}$ $l_{\text{кр}} = 350 \text{ мкм}$ при $d = 1 \text{ мм}$ и $l_{\text{кр}} = 300 \text{ мкм}$ при $d = 2 \text{ мм}$. Для $D = 10 \dots 10,22 \text{ мм}$ $l_{\text{кр}} = 700 \text{ мкм}$ при $d = 1 \text{ мм}$ и $l_{\text{кр}} = 550 \text{ мкм}$ при $d = 2 \text{ мм}$.

Установлено, что увеличение p_b приводит к повышению S , не оказывает существенного влияния на σ_t и, следовательно, приводит к снижению погрешности Δ . Для обеспечения наименьшей погрешности Δ следует назначать $p_b = 0,96p_{\text{изм}}(D_{\text{мин}})$, где коэффициент 0,96 введен чтобы p_b гарантированно не превышало наименьшего давления $p_{\text{изм}}(D_{\text{мин}})$. Зависимость $\Delta = f(p_b)$ имеет минимум при $p_b = 11 \text{ кПа}$ независимо от p_n .

Изменение любой из величин p_p , d и V приводит к изменению как S , так и σ_t . Зависимость $\Delta = f(p_p)$ имеет минимум в точке $p_{p \text{ кр}}$, причем $p_{p \text{ кр}}$ возрастает при уменьшении d и не

зависит от V и D . Установлено $p_{p\text{кр}} = 125$ кПа при $d = 1$ мм и $p_{p\text{кр}} = 87,5$ кПа при $d = 2$ мм. Δ снижается при одновременном увеличении или одновременном уменьшении d и V . Наименьшие значения погрешности $\Delta = \pm 0,27$ мкм и $\Delta = \pm 0,45$ мкм в соответствующих диапазонах $D = 6 \dots 6,22$ мм и $D = 10 \dots 10,22$ мм получены при $d = 1$ мм, $V = 16,6 \cdot 10^{-6}$ м³ и $[\alpha = 30^\circ, l = 350$ мкм] для $D = 6 \dots 6,22$ мм; $[\alpha = 45^\circ, l = 700$ мкм] для $D = 10 \dots 10,22$ мм.

Проверка адекватности предложенной модели. По экспериментальным характеристикам $t_{\text{изм}} = f(D)$, полученным при $V = 16,6 \cdot 10^{-6}$ м³, $d = 1$ мм, $p_{\text{в}} = 130$ кПа, $p_{\text{н}} = 11$ кПа, $\Delta_{\text{н}} = 20$ Па, $T = 297,15$ К, $[\alpha = 30^\circ, l = 350$ мкм] для $D = 6 \dots 6,22$ мм и $[\alpha = 45^\circ, l = 700$ мкм] для $D = 10 \dots 10,22$ мм, вычислены значения $\psi(D)$. Установлено, что расчетные значения принадлежат доверительному интервалу для опытных данных с вероятностью $p = 0,95$, что подтверждает адекватность модели.

Расчетные значения $\pm 0,35$ мкм и $\pm 0,46$ мкм погрешности Δ для $D = 6 \dots 6,22$ мм и $D = 10 \dots 10,22$ мм соответственно превышают экспериментальные значения $\pm 0,27$ мкм и $\pm 0,45$ мкм, что идет в запас расчета.

Заключение

Экспериментально установлено, что погрешность предложенного измерительного устройства не превышает $\pm 0,27$ мкм при измерении диаметра в диапазоне $6 \dots 6,22$ мм и $\pm 0,45$ мкм в диапазоне $10 \dots 10,22$ мм, что позволяет использовать его в цеховых условиях для селективной сборки при измерении диаметров твердосплавных зубков буровых коронок типа КНШ в составе контрольно-сортировочного автомата. Предложенное устройство может быть также использовано для измерения диаметров цилиндрических деталей в других областях машиностроения.

Предложенная математическая модель, учитывающая смешанный характер дросселирования воздуха в зазоре между срезом измерительного сопла и поверхностью измеряемой детали в пневматическом измерительном устройстве, адекватно описывает экспериментальные данные. Ее можно использовать для расчета передаточной функции и погрешности измерения при проектировании измерительных устройств такого типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ГОСТ 8.051-81*. ГСИ. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм.

2. *Jermak Cz. J., Rucki M.* Air Gauging: Still Some Room for Development // AASCIT Communications. 2015. V. 2, N. 2. Pp. 29–34.

3. *Rucki M., Barisik B., Varga G.* Air gauges as a part of the dimensional inspection systems // Measurement. 2010. N. 43. Pp. 83–91.

4. *Mahr GmbH.* Air Plugs, Air Rings, Air Snaps [Официальный сайт]. <http://www.mahr.com/en/Products/Metrology/By-Mahr-Product-Group/Millimar/Gages-and-Systems/Air-Gages/Air-Plugs,-Air-Rings---Air-Snaps/> (дата обращения 03.12.2015 г.).

5. *Плешаков А. А., Горелова А. Ю., Кристаль М. Г.* Пневмоэлектронное устройство для контроля и сортировки деталей по линейным размерам. Патент на полезную модель **RUS 154374 МПК G01B13/00** – ВолгГТУ 20.08.2015.

6. *Залманзон Л. А.* Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. – М.: Изд-во академии наук СССР, 1961. – 250 с.

7. *Ибрагимов И. А., Фарзани Н. Г., Илясов Л. В.* Элементы и системы пневмоавтоматики. – М.: Высшая школа, 1975. – 360 с.

8. *Vokov V.* Nozzle-flapper sensor mechanistic and statistical concurrent modeling // Measurement. 2005. N. 37. Pp. 47–61.

9. *Плешаков А. А., Чан К. Т., Горелова А. Ю., Измайлов А. Д., Кристаль М. Г.* Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2014616406 (РФ). Программа управления устройством для сортировки деталей на группы по линейным размерам. – 2014. **ПААБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Плешаков Алексей Андреевич*¹ – аспирант,
инженер-исследователь,
e-mail: akrense@yandex.ru,

*Кристаль Марк Григорьевич*¹ – доктор
технических наук, профессор,
e-mail: cnyumar@mail.ru,

¹ Волгоградский государственный технический университет.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 2, pp. 149–158.

UDC 681.5.08

A.A. Pleshakov, M.G. Kristal'

ENSURING REQUIRED TCI DIAMETER MEASUREMENT ACCURACY FOR HAMMER BITS' SELECTIVE ASSEMBLY

Improvement of the quality of the TCI hammer bits demanded by Russian mining industry requires improvement of the accuracy cylindrical TCIs' diameter measurements, which are being cold-pressed into the sockets of the bit's body during its selective assembly, since sending a TCI into wrong bin leads to the violation of the recommended interference fit value and hammer bit premature fault. The purpose of the research is to ensure required accuracy of the automatic non-contact measurement of the cylindrical TCIs' diameters prior to the hammer bits' selective assembly. A pneumo-electronic gauge is proposed, which performs a temporal

conversion of the linear quantity into time interval, during which the measurement chamber containing the compressed air discharges into the atmosphere through the restrictor formed by the surface of the target part, located in the channel of a V-block, and the measuring nozzle exit section, contained by one of the channel's faces. Experimentally established measurement error of the gauge is $\pm 0,27 \mu\text{m}$ in the measuring range of 6...6,22 mm and $\pm 0,45 \mu\text{m}$ in the range of 10...10,22 mm, allowing it to be used as a measuring device of an automatic sorting device for hammer bits' selective assembly and for cylindrical parts' diameter gauging in other industrial areas. Paper also covers a computational model of the temporal conversion, which allows evaluating the proposed gauge's transfer function and measurement error depending on its design and operational parameters with respect to the transitional mode of air flow in the restrictor formed by the exit section of the measuring nozzle and the surface of the target part. Experimentally established adequacy of the model allows using it during the designing stage of such gauges.

Key words: linear measurement, diameter measurement, pneumatic device, temporal conversion.

AUTHORS

*Pleshakov A.A.*¹, Graduate Student, Research Engineer,
e-mail: akrense@yandex.ru,

*Kristal M.G.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: crysmar@mail.ru,

¹ Volgograd State Technical University,
Volgograd, Russia.

REFERENCES

1. *GSI. Pogreshnosti, dopuskaemye pri izmerenii lineynykh razmerov do 500 mm. GOST 8.051-81* (The state system of ensuring the uniformity of measurements. Permissible errors of measurement of linear dimensions to 500 mm. State Standart 8.051-81).

2. Jermak Cz.J., Rucki M. Air Gauging: Still Some Room for Development. *AASCIT Communications*. 2015. V. 2, no 2, pp. 29–34.

3. Rucki M., Barisik B., Varga G. Air gauges as a part of the dimensional inspection systems. *Measurement*. 2010, no 43, pp. 83–91.

4. Mahr GmbH. Air Plugs, Air Rings, Air Snaps, available at: <http://www.mahr.com/en/Products/Metrology/By-Mahr-Product-Group/Millimar/Gages-and-Systems/Air-Gages/Air-Plugs,-Air-Rings---Air-Snaps/> (accessed 03.12.2015).

5. Pleshakov A. A., Gorelova A. Yu., Kristal' M. G. Patent RUS 154374 G01B13/00, 20.08.2015.

6. Zalmanzon L. A. *Protochnye elementy pnevmaticheskikh priborov kontrolya i upravleniya* (Components for pneumatic control instruments), Moscow, Izd-vo akademii nauk SSSR, 1961, 250 p.

7. Ibragimov I. A., Farzane N. G., Ilyasov L. V. *Elementy i sistemy pnevmoavtomatiki* (Elements and systems of pneumoautomatics), Moscow, Vysshaya shkola, 1975, 360 p.

8. Bokov V. Nozzle-flapper sensor mechanistic and statistical concurrent modeling. *Measurement*. 2005, no 37, pp. 47–61.

9. Pleshakov A. A., Chan K. T., Gorelova A. Yu., Izmaylov A. D., Kristal' M. G. *State Computer Software License 2014616406 (Russian Federation)*, 2014.

