

УДК 621.896-82-762

10.18698/0536-1044-2016-10-57-63

# Частотные методы калибровки средств контроля герметичности

**В.А. Макаров<sup>1</sup>, Ю.С. Асадова<sup>1</sup>, Р.Е. Тютяев<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Московский технологический университет, 119454, Москва, Российская Федерация, Проспект Вернадского, д. 78<sup>2</sup> Группа Компаний «Русский Свет», 111123, Москва, Российская Федерация, шоссе Энтузиастов, д. 56, стр. 8

## Frequency Methods for Calibrating Leak Detectors

**V.A. Makarov<sup>1</sup>, Y.S. Asadova<sup>1</sup>, R.E. Tyutyayev<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Moscow University of Technology, 119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave, Bldg. 78<sup>2</sup> Russkiy Svet Group of Companies, 111123, Moscow, Russian Federation, Shosse Entuziastov, Bldg. 56, Block 8

e-mail: himtest@mail.ru, kunaka@bk.ru, Roman.Tyutyayev@gmail.com



Важной проблемой многих отраслей промышленности является повышение требований к качеству и надежности выпускаемой продукции, что вызывает острую необходимость совершенствования существующих и создания новых средств и методов контроля, в том числе контроля герметичности. Рассмотрены методы калибровки газоаналитических и манометрических приборов контроля герметичности, основанные на переносе определенного количества молекул из измерительной камеры, которая проверяется на герметичность, в камеру сброса через дроссельное устройство, называемое частотным сопротивлением. Предлагаемый частотный метод повышает стабильность потоков пробных газов при калибровке газоаналитического течеискателя путем исключения влияния изменения барометрического давления, температуры окружающей среды и механических примесей, находящихся в пробном газе. Определена динамическая погрешность калибровки при заполнении и опустошении калибровочной камеры. Приведены схемы калибровки газоаналитического течеискателя и манометрического прибора контроля герметичности.

**Ключевые слова:** калибровка, газоаналитический течеискатель, манометрический течеискатель, контроль герметичности, дроссельное устройство.



The increasing requirements for quality and reliability of manufactured goods is an important issue in many industries. This necessitates the upgrade of existing equipment and the development of new devices and methods of control including those for leakage testing. Calibration methods for gas-analytical and manometric leakage testing devices are reviewed. These methods are based on the transfer of a certain number of molecules from the measuring chamber that is being tested for leaks, to the discharge chamber through a throttling device called frequency resistor. The proposed frequency method increases the stability of test gas flows when the gas-analytical leak detector is calibrated by eliminating the impact of changes in barometric pressure, ambient temperature and mechanical impurities in the test gas. The dynamic error of calibration is determined when the calibration chamber is being filled and emptied. The calibration schemes for the gas-analytical leak detector and the manometric leak testing device are presented.

**Keywords:** calibration, gas-analytical leak detector, manometric leak detector, leakage testing, throttling device.

Калибровка средств контроля герметичности является одной из важных проблем метрологического обеспечения такой аппаратуры. В основном калибровку осуществляют с помощью дроссельных сопротивлений [1]: через них создается определенный поток, посредством которого и калибруются газоаналитические и манометрические приборы контроля герметичности. Стабильность этих потоков невелика, поскольку, с одной стороны, они подвержены влиянию изменения барометрического давления и температуры окружающей среды, а с другой — выходные отверстия калибровочных дросселей засоряются вследствие механических примесей и влаги, находящихся в испытательном (пробном) газе.

Цель работы — определение статических и динамических погрешностей нового метода калибровки газоаналитических течеискателей [2] и манометрических приборов контроля герметичности, основанного на переносе определенного количества молекул из проверяемой на герметичность измерительной камеры в камеру сброса через устройство, называемое частотным сопротивлением.

Схема, поясняющая суть предлагаемого метода калибровки газоаналитических течеискателей (рис. 1), включает в себя три камеры: измерительную 1 объемом  $V_i$ , находящуюся под постоянным давлением  $p_i$ ; калибровочную 7 объемом  $V_0$  и сброса 5 объемом  $V_k$ , в которой поддерживается постоянное давление  $p_k$ . Калибровочная камера 7 соединена с камерами 1 и 5 клапанами 8 и 6 соответственно. При этом давление  $p_i$  будет больше давления  $p_k$ , вследствие чего поток газа направлен из измерительной камеры через калибровочную в камеру сброса через клапаны, управляемые с помощью генератора 3 инверсными сигналами  $t$  и  $\bar{t}$ .

Калибровку газоаналитического течеискателя осуществляют следующим образом. В исходном положении клапан 8 под действием

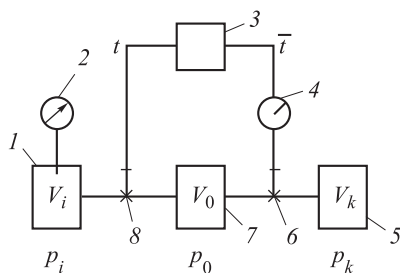


Рис. 1. Схема калибровки газоаналитического течеискателя

сигнала  $t$  открыт, а клапан 6 под действием сигнала  $\bar{t}$  закрыт. Пробный газ заполняет измерительную 1 и калибровочную 7 камеры и находится под давлением  $p_i$ . Количество молекул в камере 7 объемом  $V_0$  [3] определяется по формуле

$$N_i = \frac{p_i V_0}{kT}, \quad (1)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура газа.

По сигналу  $\bar{t}$  калибровочная камера соединяется через открытый клапан 6 с камерой сброса, а закрытый клапан 8 изолирует ее от измерительной камеры. Пробный газ заполняет камеры 7 и 5 и находится под давлением  $p_k$ . Тогда количество молекул в камере 7 определяется по выражению

$$N_k = \frac{p_k V_0}{kT}.$$

При давлении  $p_i > p_k$  количество молекул, перетекающих из измерительной камеры через калибровочную в камеру сброса за один такт, составляет

$$\Delta N = N_i - N_k = \frac{V_0}{kT} (p_i - p_k).$$

За  $n$  тактов генератора общее число молекул

$$N = \Delta N n = \frac{V_0 n}{kT} (p_i - p_k).$$

Молекулярный расход определяется по формуле [4]

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dn}{dt} \frac{V_0}{kT} (p_i - p_k). \quad (2)$$

С учетом того, что  $dn/dt = f$ , получим молекулярный расход

$$Q = \frac{dN}{dt} = \frac{f V_0}{kT} (p_i - p_k),$$

где  $f$  — частота переключений генератора.

Общий поток газа через калибровочную камеру

$$Q_N = Q k T = f V_0 (p_i - p_k).$$

Введем обозначение коэффициента расхода:

$$\alpha = f V_0.$$

Тогда

$$Q_N = \alpha (p_i - p_k). \quad (3)$$

Поскольку коэффициент расхода  $\alpha$  не зависит от температуры и давления газа, уравнение (3) представляет собой линейную функцию потока  $Q_N$  от перепада давления ( $p_i - p_k$ ).

В частном случае, если давление в камере сброса равно атмосферному  $p_0$ , то поток

$$Q_N = \alpha p^*,$$

где  $p^*$  — избыточное давление.

Значение потока при калибровке газоаналитического течеискателя, определяемое расчетным путем, зависит от частоты переключений клапанов, фиксируемой частотомером 4, давления в камере 1, измеряемого манометром 2, и калибровочного объема  $V_0$ .

Предлагаемый частотный метод повышает стабильность потоков пробных газов при калибровке газоаналитического течеискателя путем исключения влияния изменения барометрического давления, температуры окружающей среды и механических примесей, находящихся в пробном газе.

При постоянстве параметров окружающей среды и давления  $p_i$  в камере, относительная погрешность  $\delta$  калибровки течеискателя определяется как отношение количества молекул  $\Delta N$ , перетекающих из измерительной камеры в калибровочную за один такт, к количеству молекул  $N$ , перетекающих в калибровочный объем за  $n_k$  тактов [5]:

$$\delta = \frac{\Delta N}{\sum_{i=1}^{n_k} \Delta N_i} = \frac{V_0 (p_i - p_k)}{kT \sum_{i=1}^{n_k} V_0 n_k (p_i - p_k)} = \frac{1}{n_k},$$

где  $n_k$  — количество тактов генератора, необходимое для снижения давления  $\Delta p$  на значение цены деления измерительного прибора.

Таким образом, увеличивая количество тактов, можно уменьшить относительную погрешность.

Динамическую погрешность калибровки определяют исходя из времени заполнения и опустошения калибровочной камеры. В предельном случае период следования импульсов должен составлять  $t_{гр}$  (рис. 2, а), а в общем —  $t > t_{гр}$  (рис. 2, б).

Учитывая, что режим истечения газа в двух взаимосвязанных камерах является турбулентным, с помощью формул, приведенных в работе [6], определим:

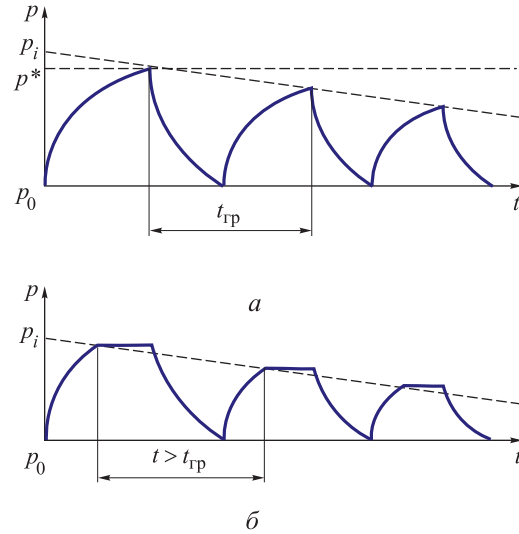


Рис. 2. Характеристики заполнения и опустошения калибровочной камеры:

а — граничная частота следования импульсов с периодом  $t_{гр}$ ; б — реальная частота следования импульсов с периодом  $t > t_{гр}$

- время заполнения калибровочной камеры в одном такте

$$t_3 = \frac{V_0}{\epsilon f \sqrt{T}} \int_{r_0}^r \frac{dr}{\xi(r)},$$

где  $\epsilon$  — коэффициент расхода при турбулентном режиме;  $f$  — площадь проходного сечения дросселя;  $r = p_i/p_k$  — отношение абсолютных давлений при заполнении калибровочной камеры;  $r_0$  — значение  $r$  при  $t = 0$ ;

$$\xi(r) = \sqrt{2gR \frac{c}{c-1} \sqrt{r^{2/c} - r^{(c+1)/c}}}$$

( $c$  — отношение теплоемкости воздуха при постоянном давлении к его теплоемкости при постоянном объеме;  $R$  — газовая постоянная;  $g$  — ускорение свободного падения);

- время опустошения калибровочной камеры в одном такте

$$t_0 = \frac{V_0}{\epsilon f \sqrt{T}} \int_{r'}^1 \frac{dr'}{r' \xi(r')}, \tag{4}$$

где  $r' = p_k/p_i$  — отношение абсолютных давлений при опустошении калибровочной камеры;

$$\xi(r') = \sqrt{2gR \frac{c}{c-1} \sqrt{r'^{2/c} - r'^{(c+1)/c}}}$$

Поскольку  $t_{гр} = t_3 + t_0$ , имеем

$$t_{гр} = \frac{V_0}{\epsilon f \sqrt{T}} \left( \int_{r_0}^r \frac{dr}{\xi(r)} + \int_{r'}^1 \frac{dr'}{r' \xi(r')} \right).$$

Следовательно, граничная частота работы генератора

$$f_{\text{гп}} = \frac{1}{t_{\text{гп}}} = \frac{1}{\frac{V_0}{\varepsilon f \sqrt{T}} \left( \int_{r_0}^r \frac{dr}{\xi(r)} + \int_{r'_0}^{r'} \frac{dr'}{r' \xi(r')} \right)}$$

Оценим значение граничной частоты для реального случая. Пусть измерительный объем  $V_i = 200 \text{ см}^3$ , избыточное давление  $p^* = 0,01 \text{ МПа}$ , падение давления за один такт работы генератора —  $50 \text{ Па}$ , тогда калибровочный объем  $V_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ , При таких данных  $t_{\text{гп}} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ,  $f_{\text{гп}} = 2 \cdot 10^3 \text{ Гц} = 2 \text{ кГц}$ .

Таким образом, при реальной частоте работы генератора  $100 \text{ Гц}$  динамическая погрешность будет исключена.

Частотное сопротивление можно использовать и при калибровке манометрических теческательей, в которых основным параметром является изменение  $\Delta p$  испытательного давления [7]. Определение  $\Delta p$  при калибровке представляет большие трудности в связи с их малыми значениями. Так, в диапазоне значений степени герметичности  $10^{-3} \dots 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$   $\Delta p$  необходимо регистрировать в интервале  $5 \dots 100 \text{ Па}$  при испытательном давлении  $p$  от  $0,02$  до  $1,0 \text{ МПа}$ . Задача определения  $\Delta p$  особенно затруднена при малых измерительных объемах, когда испытательное давление  $p$  в объеме  $V$  не остается постоянным в течение времени контроля  $\Delta t$ . Естественно, обычными средствами измерений осуществить такую поверку невозможно, поэтому предлагается использовать косвенные методы, основанные на использовании частотного сопротивления.

Число молекул, проходящих через частотное сопротивление в единицу времени, представляет собой молекулярный расход, определяемый по формуле (2). Отсюда следует

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{fV_0}{kT} p^*. \quad (5)$$

Приняв процесс изменения давления в камере изотермическим, получим из уравнения состояния  $pV = NkT$  следующее соотношение:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{V}{kT} \frac{dp}{dt}.$$

При постоянном испытательном давлении  $p_n = \text{const}$   $dp = dp^*$ , поэтому из последнего соотношения и уравнения (5) следует

$$\frac{V}{kT} \frac{dp^*}{dt} = -\frac{fV_0 p^*}{kT}. \quad (6)$$

Разделяя переменные в уравнении (6), имеем

$$\frac{dp^*}{p^*} = -\frac{fV_0}{V} dt.$$

Проведя интегрирование и представив постоянную интегрирования в форме  $C^* = \ln C$ , получим:

$$\ln p^* = -\frac{fV_0}{V} t + \ln C.$$

Отсюда

$$p^* = C e^{-\frac{fV_0}{V} t}.$$

Обозначив значение давления  $p$  при  $t = 0$  как  $p_a^*$ , находим  $C = p_a^*$ .

Тогда

$$p^* = p_a^* e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (7)$$

где  $\tau = V/(fV_0)$ .

Согласно формулы (7), давление в камере при данном процессе меняется по экспоненциальному закону. Отсюда падение давления в камере малого объема

$$\Delta p = p_a^* - p_b^* = p_a^* \left( 1 - e^{-\frac{t_{ab}}{\tau}} \right) = p_a^* \left( 1 - e^{-\frac{V_0 f t_{ab}}{V}} \right),$$

где  $f t_{ab} = n$  — число тактов генератора, необходимых для падения давления от значения  $p_a^*$  до  $p_b^*$ .

Таким образом

$$\Delta p = p_a^* \left( 1 - e^{-\frac{V_0 n}{V}} \right). \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что падение давления на каждом такте работы генератора представляет собой следующий ряд:

$$\Delta p_1 = p_a^* \left( 1 - e^{-\frac{V_0}{V}} \right);$$

$$\Delta p_2 = p_a^* e^{-\frac{V_0}{V}} \left( 1 - e^{-\frac{V_0}{V}} \right);$$

$$\Delta p_3 = p_a^* e^{-\frac{2V_0}{V}} \left( 1 - e^{-\frac{V_0}{V}} \right); \quad (9)$$

.....

$$\Delta p_n = p_a^* e^{-\frac{(n-1)V_0}{V}} \left( 1 - e^{-\frac{V_0}{V}} \right).$$

Сумма членов этого ряда за  $n$  тактов работы генератора равна падению давления

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n \Delta p_i.$$

Приняв за  $\Delta p$  цену деления прибора значение  $\Delta p_{ц}$ , разбиваем ее на  $n$  частей (рис. 3). Изменяя количество тактов генератора, можно фиксировать малые значения падения давления в камере, заданные в технической документации.

Для проведения математического моделирования процесса падения давления в камере малого объема определим реальные параметры системы [8]. Для этого построим зависимости калибровочного объема от количества тактов работы генератора (рис. 4) для следующих исходных данных:  $p_a^* = 0,02; 0,04; 0,08$  МПа;  $\Delta p^* = 500$  Па;  $V = 50$  см<sup>3</sup>.

Время, в течение которого давление в измерительной камере падает от значения  $p_a^*$  до  $p_b^*$ , определяется по формуле [9]

$$t_{ab} = -\tau \ln \frac{p_b^*}{p_a^*} = -\frac{V}{fV_0} \ln \frac{p_b^*}{p_a^*}.$$

Отсюда

$$n = ft_{ab} = -\frac{V}{V_0} \ln \frac{p_b^*}{p_a^*};$$

$$V_0 = -\frac{V}{n} \ln \frac{p_b^*}{p_a^*}.$$

Анализ рис. 4 показал, что для выбранных параметров измерительной системы в диапазоне  $n$  от 5 до 100 размер калибровочного объема  $V_0$  существенно меньше размера объема  $V$ . Отсюда следует, что значения  $\Delta p_i$  равны между собой с точностью до десятых долей Па, что подтверждается следующими расчетами.

Рассмотрим камеру объемом  $V = 50$  см<sup>3</sup> с давлением в ней  $p^* = 0,02$  МПа и требуемой степенью герметичности  $B = 3 \cdot 10^{-4}$  (м<sup>3</sup>·Па)/с. В качестве регистрирующего прибора используем манометр МО-250-1 с ценой деления 250 Па [10]. Зададим относительную погрешность 2 % или абсолютную погрешность измерений 5 Па. Необходимое количество тактов генератора для достижения падения давления на одну цену деления 250 Па составляет 50. С помощью формулы (4) определим значение калибровочного объема:  $V_0 = 12,6$  мм<sup>3</sup>. По формулам (9) найдем

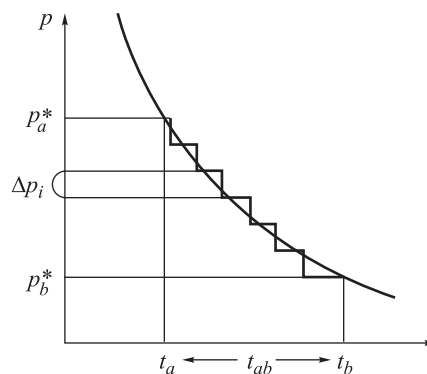


Рис. 3. Зависимость давления в измерительной камере  $p$  от времени  $t$

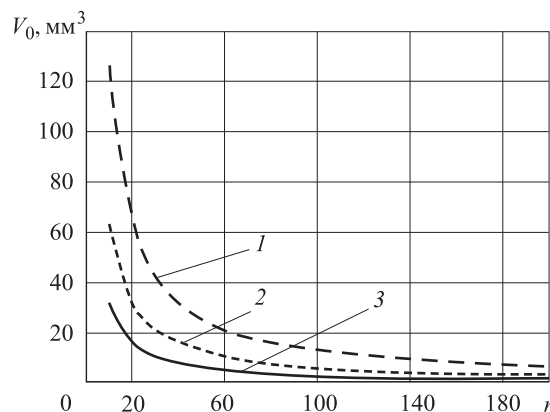


Рис. 4. Зависимость калибровочного объема  $V_0$  от количества тактов работы генератора  $n$  при  $p_a^* = 0,02$  (1); 0,04 (2) и 0,08 (3) МПа

значения 1-, 10- и 50-го членов ряда:  $\Delta p_1 = 5,04$  Па,  $\Delta p_{10} = 5,03$  Па,  $\Delta p_{50} = 4,98$  Па. Отсюда видно, что значения  $\Delta p_i$  различаются не более чем на 1,2 %.

Принимая за достоверное значение абсолютную погрешность 5 Па, получим необходимое количество тактов работы генератора для достижения падения давления в камере  $\Delta p = 50$  Па, равное 10. Отсчитав 10 тактов работы генератора, фиксируем малое падение давления, равное 50 Па.

## Выводы

1. Разработан новый метод калибровки газоаналитических и манометрических приборов контроля герметичности, позволяющий повысить стабильность потоков пробных газов при калибровке теческателей.

2. Определены статические и динамические погрешности калибровки в заданной области контролируемых параметров.

## Литература

- [1] Евлампиев А.И., Попов Е.Д., Сажин С.Г., Сумкин П.С. *Течеискание*. Москва, Спектр, 2011. 208 с.
- [2] Макаров В.А., Тютяев Р.Е., Тютяева Л.Н. *Способ калибровки газоаналитического течеискателя*. Пат. 2504748 С2 РФ, 2014, бюл. № 2, 4 с.
- [3] Ключев В.В., ред. *Неразрушающий контроль: Справочник*. Москва, Машиностроение, 2003, т. 2. 181 с.
- [4] Квасников И.А. *Молекулярная физика*. Москва, Изд-во Лаброком, 2013. 304 с.
- [5] Макаров В.А., Асадова Ю.С., Тютяев Р.Е. Калибровка газоаналитических течеискателей. *Современная наука: теоретический и практический взгляд. Матер. Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1*. Уфа, Аэтерна, 2015, с. 19–24.
- [6] Ланис В.А., Левина Л.Е. *Техника вакуумных испытаний*. Москва, Госэнергоиздат, 1963. 264 с.
- [7] Макаров В.А., Асадова Ю.С., Тютяев Р.Е. Определение параметров течения газов в дефектах изделий методом электрогидравлической аналогии. *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Матер. IV Междунар. науч. конф.* Москва, ИМАШ РАН-МИРЭА, 2015, с. 151–154.
- [8] Белокрылов И.В. *Основы вакуумной техники*. Омск, Изд-во ОмГТУ, 2007. 40 с.
- [9] Лещинский В.П. *Основы гидropневмоавтоматики*. Москва, МИРЭА, 2006. 104 с.
- [10] Пухаренко Ю.В., Норин В.А. *Метрология, стандартизация и сертификация*. Москва, Изд-во Лань, 2016. 308 с.

## References

- [1] Evlampiev A.I., Popov E.D., Sazhin S.G., Sumkin P.S. *Techeiskanie* [Leak Testing]. Moscow, Spektr publ., 2011. 208 p.
- [2] Makarov V.A., Tiutiaev R.E., Tiutiaeva L.N. *Sposob kalibrovki gazoanaliticheskogo techeiskatel'ia* [The process calibration gas detection leak detector]. Patent RF no. 2504748, 2014. 4 p.
- [3] *Nerazrushaiushchii kontrol': Spravochnik* [Non-destructive testing: a handbook]. Ed. Kliuev V.V. Moscow, Mashinostroenie publ., 2003, vol. 2. 181 p.
- [4] Kvasnikov I.A. *Molekuliarnaia fizika* [Molecular physics]. Moscow, Labrokom publ., 2013. 304 p.
- [5] Makarov V.A., Asadova Iu.S., Tiutiaev R.E. Kalibrovka gazoanaliticheskikh techeiskatelei [Calibration gas analytical leak detectors]. *Sovremennaiia nauka: teoreticheskii i prakticheskii vzgliad. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern science: theoretical and practical view. International scientific-practical conference]. In 2 pt. Pt. 1, Ufa, Aeterna publ., 2015, pp. 19–24.
- [6] Lanis V.A., Levina L.E. *Tekhnika vakuumnnykh ispytaniia* [Technique vacuum test]. Moscow, Gosenergoizdat publ., 1963. 264 p.
- [7] Makarov V.A., Asadova Iu.S., Tiutiaev R.E. Opredelenie parametrov techeniia gazov v defektakh izdelii metodom elektrogidravlicheskoii analogii [Determination of gas flow parameters in the manufacturing defects by an electrohydraulic analogy]. *Fundamental'nye issledovaniia i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii. Materialy 4 Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Fundamental research and innovation in engineering. Proceedings of the 4 International Scientific Conference]. Moscow, IMASH RAN-MIREA publ., 2015, pp. 151–154.
- [8] Belokrylov I.V. *Osnovy vakuumnoi tekhniki* [Fundamentals of vacuum technology]. Omsk, OmSTU publ., 2007. 40 p.
- [9] Leshchinskii V.P. *Osnovy gidropnevmoavtomatiki* [The basics of hydraulic and pneumatic automation equipment]. Moscow, MIREA publ., 2006. 104 p.
- [10] Pukharensko Iu.V., Norin V.A. *Metrologiia, standartizatsiia i sertifikatsiia* [Metrology, standardization and certification]. Moscow, Lan' publ., 2016. 308 p.

## Информация об авторах

**МАКАРОВ Валерий Анатольевич** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Интеллектуальные технологии и системы». Московский технологический университет (119454, Москва, Российская Федерация, Проспект Вернадского, д. 78, e-mail: himtest@mail.ru).

**АСАДОВА Юлия Сергеевна** (Москва) — аспирант кафедры «Интеллектуальные технологии и системы». Московский технологический университет (119454, Москва, Российская Федерация, Проспект Вернадского, д. 78, e-mail: kunaka@bk.ru).

**ТЮТЯЕВ Роман Евгеньевич** (Москва) — руководитель направления по проектам электроэнергетической отрасли. Группа Компаний «Русский Свет» (111123, Москва, Российская Федерация, шоссе Энтузиастов, д. 56, стр. 8, e-mail: Roman.Tyutyayev@gmail.com).

## Information about the authors

**MAKAROV Valeriy Anatolievich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Intelligent Technology and System Department. Moscow Technological University (119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave, Bldg. 78, e-mail: himtest@mail.ru).

**ASADOVA Yulia Sergeevna** (Moscow) — Postgraduate, Intelligent Technology and System Department. Moscow Technological University (119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave, Bldg. 78, e-mail: kunaka@bk.ru).

**TYUTYAEV Roman Evgenievich** (Moscow) — Manager, Electric Power Industry Projects. Russkiy Svet Group of Companies (111123, Moscow, Russian Federation, Shosse Entuziastov, Bldg. 56, Block 8, e-mail: Roman.Tyutyayev@gmail.com).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышла в свет монография

**В.М. Ачильдиева, Ю.К. Грузевича,  
В.А. Солдатенкова**

### «Информационные измерительные и оптико-электронные системы на основе микро- и наномеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения»

Рассмотрены основные физические принципы работы и особенности функционирования гироскопов различных видов. Исследованы микромеханические гироскопы и акселерометры с рамочной и консольной конструкциями чувствительного элемента с емкостными и автоэлектронными преобразователями и наноэлектромеханические измерительные преобразователи для измерения тепловых полей малой интенсивности в инфракрасной и терагерцовой областях спектра. Предложены способы изготовления и локальной инициализации вискера по переменному току после формирования механической структуры чувствительного элемента. Описан синтез регуляторов методом модального управления и идентификации коэффициентов чувствительности к температуре и напряжению питания. Приведены примеры схем построения, моделирования и испытаний систем управления и навигации летательных микроаппаратов на основе бесплатформенных инерциальных блоков, различных информационно-измерительных средств с использованием наклономеров, оптико-электронных устройств наблюдения с определением координат удаленных объектов и нашлемных систем ориентации.

Для студентов, аспирантов, инженеров и научных работников.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru