

УДК 550.34.01

к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

тел.: +7 (3955) 51-22-15

Липнин Юрий Анатольевич,

к.т.н., доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

Мазур Владимир Геннадьевич,

к.т.н., доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

Пудалов Алексей Дмитриевич,

к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

тел.: +7 (3955) 51-22-15, e-mail: puddim@rambler.ru

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ НОМИНАЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИРОКОДИАПАЗОННОГО ДАТЧИКА ВЛАЖНОСТИ

Voronova T.S., Lipnin Yu.A., Mazur V.G., Poudalov A.D.

ANALYTICAL EXPRESSION OF THE NOMINAL STATIC CHARACTERISTICS OF A WIDE-BAND BAND MOISTURE SENSOR

Аннотация. Собрана лабораторная установка по исследованию широкодиапазонных пьезосорбционных чувствительных элементов при измерении влажности газа на примере азота. Определено, что все чувствительные элементы имеют разброс статистических параметров, что приводит к погрешности. Для снижения погрешности предложено ввести поправочный коэффициент. Для определения номинальной статической характеристики результаты опытов были аппроксимированы полиномом 6-й степени. В связи со сложностью идентификации параметров модели предложено использовать полиномы 3-й степени на различных участках концентрации влажности.

Ключевые слова: влажность, статическая характеристика, пьезосорбционный чувствительный элемент, широкий диапазон.

Abstract. A laboratory setup for the study of wide-range piezo-sorption sensitive elements in the measurement of gas humidity using nitrogen as an example was assembled. It is determined that all sensitive elements have a variation of statistical parameters, which leads to an error. To reduce the error, it was proposed to introduce a correction factor. To determine the nominal static characteristics, the results of the experiments were approximated by a polynomial of the 6th degree. In connection with the difficulty of identifying the model parameters, it was proposed to use 3rd degree polynomials in various parts of the humidity concentration.

Keywords: humidity, static characteristic, piezo-sorption sensitive element, wide range.

Во многих отраслях промышленности и в целом ряде областей научных исследований приходится сталкиваться с решением задач, связанных с измерением влажности газов [1-3].

Например, присутствие влаги даже на уровне 10 млн^{-1} в непредельных углеводородных газах, используемых в качестве сырья для получения полимеров, сокращает срок службы технологического оборудования и отрицательно сказывается на качестве готовой продукции. Контроль низких концентраций влаги необходим в продуктах, получаемых в результате переработки нефти, а

также в процессах добычи, хранения и транспортировки природного газа. Необходим контроль влажности топлив на газовой основе для двигателей, топливная смесь которых содержит сильные окислители. Это вызвано опасностью коррозии деталей, соприкасающихся с топливной смесью. Аналогичные ограничения предельно допустимого содержания влаги действительны и для хладагентов современных холодильных установок.

В целом ряде случаев необходим контроль газовых сред со средними и высокими концентрациями влаги (от 10^3 до 10^6 млн^{-1} ;

отн. влажностью до 100% в области положительных температур). Контроль относительной влажности воздуха необходим в метеорологии, промышленных системах кондиционирования воздуха, камерах искусственного климата, хранилищах продукции, теплицах, птицефабриках. Целый ряд задач, связанных с измерениями как низких, так и средних и высоких концентраций влаги возникает при проведении научных исследований, например, при изучении влияния влаги на свойства и поведение того или иного объекта или материала, сорбционных процессов и при создании автономных систем жизнеобеспечения.

В основе работы сорбционно-частотных гигрометров (СЧГ) положен принцип кварцевого микровзвешивания, который заключается в зависимости собственной частоты колебаний, распространяемых в пластине пьезокварца, от массы вещества, нанесенного на поверхность боковых граней пластины [4]. В случае нанесения на поверхность расположенных на этих боковых гранях электродов пленочного гигроскопического покрытия массой Δm_c , изменение частоты колебаний кварцевого резонатора ΔF_{H_2O} будет соответствовать сорбционной способности этого покрытия. В результате будет получен пьезосорбционный чувствительный элемент (ПСЧЭ), выходной сигнал которого определяется соотношением

$$\Delta F_{H_2O} = -\frac{\Delta F_c}{\Delta m_c} \cdot \Delta m_{H_2O} = -k \cdot \Delta m_{H_2O}, \quad (1)$$

где ΔF_c – изменение частоты колебаний кварцевого резонатора за счет нанесения сухого сорбционного покрытия, Гц;

Δm_{H_2O} – масса поглощенной сорбционным покрытием влаги, мкг;

k – параметр данного ПСЧЭ, связанный с нанесением сухого сорбционного покрытия, Гц/мкг.

Знак «минус» означает, что при присоединении массы частота колебаний уменьшается.

Подбор подходящего сорбента дает возможность создания гигрометров как для измерения микроконцентраций влаги, так и для более широкого диапазона, вплоть до 100 % относительной влажности. Однако создание СЧГ в широком диапазоне измерения влажности с удовлетворительной погрешностью измерений при условии приме-

нения одного типа сорбционного покрытия ПСЧЭ практически невозможно, поскольку большинство сорбентов не имеет достаточно высокую чувствительность (отношение выходного сигнала ко входному) в широком диапазоне изменения влажности. Для решения этого вопроса было предложено использование комплексного покрытия, состоящего из двух типов пленочных сорбентов, полученных послойным их напылением на электроды кварцевого резонатора [5-8].

Поскольку резонансная частота колебаний ПСЧЭ составляет более 9 МГц, а полезный сигнал при измерении влажности составляет единицы килогерц, то для переноса измерений в низкочастотную область был разработан сорбционно-частотный датчик (СЧД), состоящий из герметичного опорного кварцевого резонатора (ОР) и ПСЧЭ, помещенных в общий термостат. Частота колебаний ОР была выбрана на 1,5...4 кГц выше осушенного ПСЧЭ. И ОР и ПСЧЭ были включены в электронную схему соответствующих автогенераторов, сигнал с которых подавался на смеситель, в результате чего выходным сигналом датчика ΔF являлся разностный сигнал между ОР и ПСЧЭ, составляющий единицы килогерц (низкочастотный полезный сигнал). Температура термостатирования была выбрана плюс $(52 \pm 0,2)^\circ\text{C}$, т.е. на два градуса выше наиболее распространенной верхней температуры рабочих условий применения промышленных приборов.

Исследование статических характеристик описанных СЧД производилось в Ангарском ОКБА на экспериментальной установке, включающей генератор влажного газа «Родник», обеспечивающий задание значений влажности в области макроконцентраций. Микроконцентрации газа создавались методом смешения осушенного газоносителя (азота) с влажным газом и контролировались гигрометром «Байкал-3». Принципиальная схема установки приведена на рисунке 1.

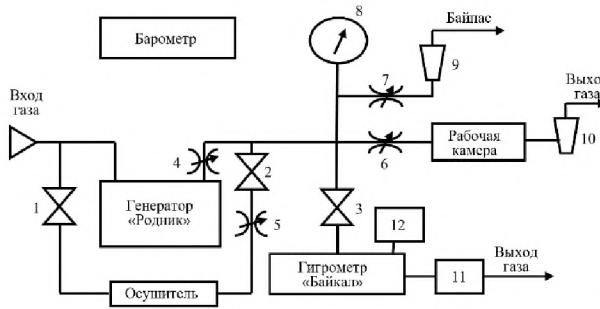


Рисунок 1 – Структурная схема экспериментальной установки

На рисунке 1 обозначено: 1-3 – вентили запорные; 4-7 – дроссели переменные; 8 – манометр образцовый; 9, 10 – ротаметры; 11 – устройство для измерений расхода газа УИРГ-2А; 12 – многопредельный микроамперметр (миллиамперметр).

Для определения возможности применения описанного СЧД в широком диапазоне с объемной долей влаги (ОДВ) от 0 до 25 000 млн⁻¹ была проведена серия опытов. Для испытаний были использованы 30 датчиков. Учитывая, что в рабочей камере одновременно могли размещаться только шесть

датчиков, было проведено пять серий опытов, в каждой из которых испытывались партии по шесть датчиков.

Полученные данные были подвергнуты статистической обработке для получения номинальной статической характеристики (СХ). На первом этапе для приведения опытных данных к единообразию было исключено влияние технологического разброса начальных показаний датчиков, для чего показания каждого из датчиков, полученные при ОДВ порядка 5 млн⁻¹, были приняты равными нулю и вычтены из последующих показаний соответствующего датчика. Далее были определены средние значения для каждой партии из шести датчиков ΔF_{CP} . Для оценки разброса индивидуальных статических характеристик относительно среднего рассчитано среднее квадратическое отклонение, S , (далее СКО) для каждого значения ОДВ и относительное значение СКО $S/\Delta F_{CP}$.

Для примера результаты испытаний и указанной выше статистической обработки для первой серии датчиков приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты статистической обработки показаний датчиков Д1- Д6

| Объемная доля влаги, V , млн ⁻¹ | Номер датчика | | | | | | ΔF_{CP} , Гц | S , Гц | $S/\Delta F_{CP}$ % |
|--|--|------|------|------|------|------|----------------------|----------|---------------------|
| | Д1 | Д2 | Д3 | Д4 | Д5 | Д6 | | | |
| | Изменение частоты колебаний, ΔF , Гц | | | | | | | | |
| 78,6 | 120 | 132 | 127 | 122 | 147 | 144 | 132 | 11,3 | 8,5 |
| 279 | 344 | 354 | 332 | 333 | 364 | 369 | 349 | 15,6 | 4,5 |
| 561 | 570 | 581 | 548 | 551 | 591 | 599 | 499 | 20,9 | 4,2 |
| 660 | 586 | 591 | 562 | 574 | 588 | 596 | 583 | 12,6 | 2,2 |
| 990 | 770 | 780 | 741 | 749 | 788 | 801 | 772 | 23,0 | 3,0 |
| 9800 | 1967 | 1981 | 1900 | 1955 | 2002 | 1973 | 1963 | 34,6 | 1,8 |
| 11350 | 2131 | 2168 | 2081 | 2112 | 2204 | 2177 | 2146 | 45,6 | 2,1 |
| 15380 | 2335 | 2385 | 2290 | 2314 | 2426 | 2385 | 2356 | 51,3 | 2,2 |
| 24350 | 2784 | 2828 | 2719 | 2747 | 2869 | 2857 | 2801 | 60,7 | 2,2 |

На рисунке 2 представлены усредненные СХ, рассчитанные по каждой из пяти партий датчиков.

Как видно из рисунка, имеется разброс усредненных значений СХ, который вызван неточностью задания ОДВ газа в каждой из пяти серий опытов, так как внутри каждой серии разброс характеристик почти на порядок меньше.

Учитывая предположение о мультипликативном характере погрешности при определении ОДВ, был определен коэффициент мультипликативности k_j по формуле

$$k_j = \frac{\Delta F_{CP}(12000)}{\Delta F_j(12000)} = \frac{2097}{\Delta F_j(12000)}. \quad (2)$$

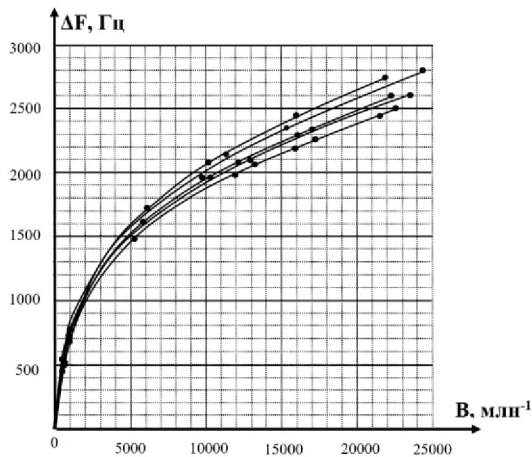


Рисунок 2 – Усредненные статические характеристики, полученные статистической обработкой пяти партий датчиков

При ОДВ $V=12\ 000\ \text{млн}^{-1}$ (середина диапазона измерений) и пересчитаны результаты измерений усредненных СХ в соответствии с этими коэффициентами, определено среднее значение, СКО и относительные СКО. Расчетные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Усредненные показания с учетом k_j

| Объемная доля влаги $V, \text{млн}^{-1}$ | Партии j датчиков с номерами | | | | | $\Delta F_{\text{CP}}, \text{Гц}$ | $S, \text{Гц}$ | $S/\Delta F_{\text{CP}} \%$ |
|--|--|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------|
| | $j=1$ Д1-Д6 | $j=2$ Д7-Д12 | $j=3$ Д13-Д18 | $j=4$ Д19-Д24 | $j=5$ Д25-Д30 | | | |
| | Изменение частоты колебаний, $\Delta F, \text{Гц}$ | | | | | | | |
| 1000 | 764 | 744 | 743 | 748 | 739 | 748 | 9,7 | 1,3 |
| 5000 | 1552 | 1568 | 1558 | 1530 | 1550 | 1551 | 14,0 | 0,9 |
| 10000 | 1965 | 1971 | 1964 | 1973 | 1965 | 1968 | 4,1 | 0,2 |
| 12000 | 2097 | 2097 | 2097 | 2097 | 2097 | 2097 | 1,0 | 0,05 |
| 15000 | 2267 | 2249 | 2265 | 2278 | 2259 | 2264 | 10,7 | 0,5 |
| 20000 | 2515 | 2495 | 2514 | 2530 | 2512 | 2514 | 12,4 | 0,5 |
| k_j | 0,973 | 1,0485 | 1,018 | 0,953 | 1,013 | - | - | - |

Визуализация уменьшения разброса усредненных статических характеристик приведена на рисунке 3.

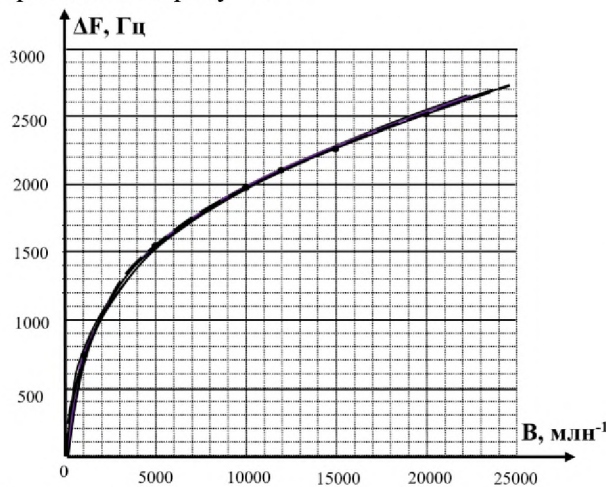


Рисунок 3 – Усредненные СХ после умножения на коэффициент мультипликативности.

Как видно из таблицы 2 и рисунка 3, полученная средняя СХ $\Delta F_{\text{CP}}(V)$ может быть использована для получения номинальной СХ при определении влажности в широком диапазоне.

Проведенная статистическая обработка экспериментальных данных позволяет получить номинальную СХ широкодиапазонного сорбционно-частотного датчика влажности в аналитическом виде. Учитывая относительно большой объем данных ($n=30$ шт.), можно полученное среднее значение показаний ΔF_{CP} , т.е. оценку математического ожидания отклика датчиков, принять за само математическое ожидание, что дает возможность построения номинальной СХ.

Аналитическое выражение номинальной СХ (зависимость выходного сигнала ΔF_{CP} от входного V) выражается полиномом шестой степени:

$$\Delta F(B) = 52,62 + 0,87 \cdot B - 2 \cdot 10^{-4} \cdot B^2 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot B^3 - 3 \cdot 10^{-12} \cdot B^4 + 10^{-16} \cdot B^5 - 2 \cdot 10^{-21} \cdot B^6. \quad (3)$$

При этом максимальная относительная погрешность в области 4 000 млн⁻¹ составляет 6,5 %, а в области 19 000 млн⁻¹ – около 4 %.

С целью снижения погрешности номинальную статическую характеристику можно разбить на два участка: от 0 до 2 500 млн⁻¹ и от 2 500 до 20 000 млн⁻¹. Такое деление оправдано тем, что в технологических процессах обычно пользователи работают либо в области микроконцентраций, либо в области макроконцентраций, а в приборе можно предусмотреть переключение с одной области измерений на другую. Этот прием позволяет снизить степень полиномиальной зависимости до третьей степени.

В этом случае аналитическое выражение номинальной СХ будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta F(B) = 11,33 + 1,18 \cdot B - 6 \cdot 10^{-4} \cdot B^2 + 10^{-7} \cdot B^3; \quad (4)$$

$$\Delta F(B) = 722,58 + 0,21 \cdot B - 10^{-5} \cdot B^2 + 2 \cdot 10^{-10} \cdot B^3. \quad (5)$$

С точки зрения приборной реализации больший интерес представляет не статическая характеристика, а обратная зависимость $B(\Delta F)$. Такая зависимость предоставляет возможность по выходному сигналу датчика ΔF рассчитать измеряемую объемную долю влаги B . На рисунке 4 представлена такая зависимость, рассчитанная по данным таблицы 2.

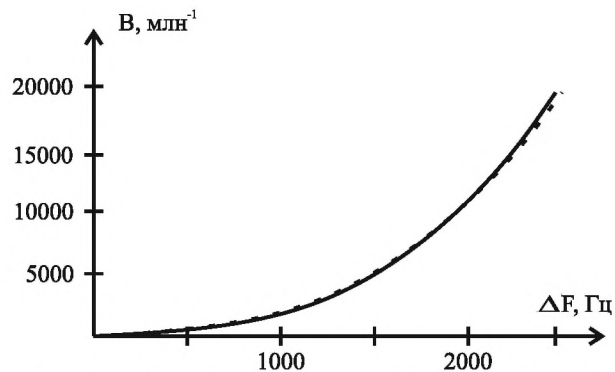


Рисунок 4 – Зависимость измеряемой влажности от выходного сигнала датчика

На рисунке 4 обозначено: пунктирная линия – экспериментальные данные, сплошная линия – данные, аппроксимированные при помощи полинома (5).

Как видно из рисунка 4, зависимость $B(\Delta F)$ прекрасно описывается полиномом третьей степени: эмпирические и расчетные данные практически совпали:

$$B(\Delta F) = -2,68 + 1,03(\Delta F) - 7 \cdot 10^{-4} \times (\Delta F)^2 + 10^{-6} \cdot (\Delta F)^3. \quad (6)$$

Таким образом, в гигрометре по выходному сигналу датчика ΔF для представления на цифровом табло измеряемой объемной доли влаги газа B можно использовать зависимость (6).

Задача идентификации параметров модели номинальной СХ может быть значительно упрощена путем разбиения всего диапазона влажности на два поддиапазона. Это позволит использовать в качестве модели СХ для каждого из поддиапазонов полиномы третьей степени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липнин Ю.А., Мазур В.Г., Пудалов А.Д. Исследование динамических свойств широкодиапазонных пьезо-сорбционных датчиков влажности органических жидкостей // Измерительная техника. – 2014. – № 7. С. 65–68.

2. Липнин Ю.А., Мазур В.Г., Пудалов А.Д. Анализ суммарной погрешности сорбционно-частотного измерителя влажности органических жидкостей // Современные технологии. Системный анализ. Моделиро-

вание. Иркутск: Издательство ИрГУПС – 2014. – № 1 (41). – С. 153-160.

3. Иващенко В.Е., Мазур В.Г., Пудалов А.Д. Исследование широкодиапазонных пьезокварцевых влажочувствительных элементов // Известия Томского политехнического университета – Томск, 2012. – Т. 321, № 4. – С. 160-165.

4. Sauerbrey G. Verwendung von Schwingquarzen zur Wagung dünner Schichten zur Vicrowagung.- Ztschr. für Physic., 1959, 155, s. 206-222.

5. Воронова Т.С., Пудалов А.Д. Экспериментальные исследования широкодиапазонных пьезо-сорбционных датчиков влажности газов // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2017. – № 11. – С. 119–121.

6. Кожевин А.С., Пудалов А.Д. Модель статической характеристики широкодиапазонных пьезо-сорбционных датчиков влажности для неразрушающего контроля органических растворителей // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – Ангарск : Издательство АНГТУ, 2017. – С. 103–111.

7. Воронова Т.С., Липнин Ю.А., Мазур В.Г., Пудалов А.Д. Исследование чувствительности широкодиапазонных пьезо-сорбционных влажочувствительных элементов для неразрушающего контроля органических растворителей // Измерительная техника. – 2017. – № 3. С. 65–68.

8. Mazur V.G., Poudalov A.D. Measuring humidity of organic liquids in a wide concentration range of nondestructive testing // 13th international scientifictechnical conference on actual problems of electronic instrument engineering (apeie - 2016) – Novosibirsk, Proceedings: in 12 volumes, Volume 1, Part 1, 2016 – P 263 –266.

УДК 65.018:378

*к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,*

e-mail: alexey-kol@narod.ru

Григорьева Юлия Евгеньевна,

обучающаяся группы АТП-16-1,

ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: 79041525694@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ

Kolmogorov A.G., Grigoreva U.E.

EXPERIMENTAL STUDY OF CONTACT TEMPERATURE TRANSDUCERS ON A LABORATORY BENCH

Аннотация. Рассмотрено методическое обеспечение для исследования контактных преобразователей температуры на лабораторном стенде.

Ключевые слова: лабораторный стенд, температура, методическое обеспечение, контрольно-измерительные приборы, термоэлектрические преобразователи, термометры сопротивления.

Abstract. The methodological support for the study of contact temperature transducers on a laboratory bench is considered.

Keywords: laboratory stand, temperature, methodological support, control and measuring devices, thermoelectric converters, resistance thermometers.

Измерение и регулирование температуры в производственных процессах является распространенной задачей, как в области научных исследований, так и в инженерной практике. Основными методами измерения температуры в нефтехимической промышленности являются методы, основанные на использовании контактных преобразователей температуры: термометров сопротивления и термоэлектрических преобразователей (термопар).

Для более эффективного освоения ряда специальных дисциплин по направлению

«Автоматизация технологических процессов и производств» (АТП) АНГТУ и приобретения обучающимися необходимых навыков в областях автоматизации технологических процессов, технических измерений, метрологии, разработан учебный лабораторный стенд по измерению и регулированию температуры в тепловом объекте [1]. Стенд позволяет изучить контактные методы измерения температуры, освоить алгоритмы программирования вторичных приборов, нормирующих преобразователей, терморегуляторов, изучить и подобрать спецификацию оборудования для