

Є.Л. Запольський, В.І. Латенко, І.Ю. Скрипник,
С.О. Філь

ЗАСТОСУВАННЯ ПІДГРІВУ ПРОТИ НАСИЧЕННЯ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

Показано актуальність розробки вітчизняного вимірювача вологості повітря на основі підігрівного ємнісного сенсора. Розглядається явище зростання похибки вимірювання спричиненого вимірюванням вологості підігрітого повітря. Наведено аналіз впливу похибок термодатчиків на результат вимірювання відносної вологості повітря. Показано необхідність використання прецизійних термодатчиків для отримання прийнятної точності вимірювання.

Ключові слова: підігрівний ємнісний сенсор, вологість повітря, температура підігріву, термодатчик, аналіз похибок.

У сучасній гідрометеорології ємнісні сенсори стають найпоширенішим у світі типом сенсорів вологості повітря [1]. Особливо це стосується автоматичних та автоматизованих вимірювачів, для яких ємнісні сенсори практично не мають альтернативи. Визначальними перевагами саме ємнісних сенсорів вологості повітря є:

- здатність працювати в широкому діапазоні температур, включаючи мінусові температури;
- висока технологічність виробництва цих сенсорів, що дозволяє створювати навіть прецизійні сенсори з відносно невеликою собівартістю;
- можливість перекриття практично повного діапазону відносної вологості від мінімальних значень і до 100%;
- мініатюрність, що відкриває можливості для точкових вимірювань вологості повітря.

Незважаючи на широке розповсюдження ємнісних сенсорів, для багатьох користувачів залишається невідомим такий суттєвий їхній недолік, як схильність до тимчасової втрати дієздатності під дією високої вологості повітря. Використовуючи матеріали [2, 3] відомої фірми Vaisala, це явище насичення або намокання сенсора можна описати наступним чином.

У разі вимірювання високої відносної вологості повітря (більше ніж 90 %), сенсор, як і всі інші об'єкти у вологому середовищі, знаходиться в умовах, за яких достатньо незначної зміни параметрів середовища для конденсації вологи повітря. Особливо висока вірогідність раптової зміни фізичних параметрів середовища притаманна метеорологічним вимірюванням на відкритому повітрі. Для метеорологічних вимірювань за умов високої вологості повітря намокання сенсора практично неминуче, – це лише питання часу.

Мокрий сенсор вологості повітря неспроможний вимірювати відносну вологість. Доки в сенсорі є вода в рідкому стані, засоби вимірювання вологості повітря фактично "вимкнено" до висихання сенсора. Це може створити проблему в умовах високої вологості повітря, бо градієнта тиску пари недостатньо для ефективного випаровування рідкої води з поверхні сенсора. Сенсор може залишатися мокрим упродовж хвилин чи годин, якщо навіть зникають умови насичення. Це може призводити до тривалих періодів відсутності вимірювання.

У зв'язку з викладеним постає природне запитання, чому ж користувачі звичайних (без підігріву) сенсорів нерідко не звертають увагу на втрату працездатності приладів у періоди високої відносної вологості повітря.

Для отримання відповіді на це запитання автори дослідили поведінку в процесі намокання кількох типів сенсорів таких авторитетних виробників, як Vaisala, Honeywell та Sensirion. Дослідження проводилися експериментально та шляхом аналізу обмежених технічних відомостей від виробників сенсорів. Було встановлено, що всі досліджені сенсори в процесі намокання видають наближені до максимальних значення відносної вологості повітря від 95 % до 100 % та жодним чином не сповіщають про факт намокання. Після повного випаровування рідкої води з його поверхні працездатність сенсора здебільшого відновлюється. За відсутності інших даних вимірювань, користувачі сприймають хибні дані, що формально відповідають високим значенням вологості, за достовірні, бо намокання відбувається саме під час високої відносної вологості повітря.

Проблема полягає не тільки в тому, що під час намокання сенсор видає хибні дані приблизно в тому ж діапазоні, в якому повинні бути дійсні дані вимірювань. Ще гірше те, що хибні дані ємнісний сенсор видає ще довгий час до повного висихання, а час висихання багатократно

перевищує час намокання. Тобто користувачі ємнісних сенсорів мають зважати на можливість не просто відсутності вимірювань під час високої вологості повітря, а на можливість отримання хибних даних вимірювання впродовж тривалих періодів часу.

На сьогоднішній день поки що не винайдено іншого способу протидії явищу намокання сенсора, ніж запобігання перебуванню сенсора в умовах високої відносної вологості повітря. Найпростішим способом зниження відносної вологості повітря, у якому перебуває сенсор, є підігрів цього повітря.

Підігрівні датчики відносної вологості повітря на основі підігрівного композитного ємнісного сенсора випускаються тільки фірмою Vaisala за окремим замовленням. Зважаючи на те, що ціна звичайних, не підігрівних датчиків цієї фірми перевищує 500 євро, для гідрометеорологічної служби України дуже проблематично замовити для своїх потреб партію значно дорожчих підігрівних датчиків.

Оцінимо масштаб цієї метрологічної та гідрометеорологічної проблеми для України. Не менше ніж 18 аеродромних метеорологічних станцій уже виконують метеорологічні спостереження за допомогою датчиків фірми Vaisala без функції підігріву. Заплановано переоснащення близько 190 мережевих метеорологічних станцій автоматичними датчиками. Для забезпечення достовірності даних по відносній вологості повітря необхідно оснастити мережеві станції та переоснастити аеродромні підігрівними датчиками. Тоді розробка відносно дешевого підігрівного сенсора вологості повітря постає дуже актуальним завданням.

Розглянемо три різні способи підігріву, які фірма Vaisala рекомендує для датчиків свого виробництва [3].

Технологія підігрівного сенсора передбачає використання сенсора відносної вологості повітря в поєднанні з нагрівачем поверхні сенсора та прецизійним термодатчиком для вимірювання температури поверхні сенсора. Алгоритм управління полягає в підтриманні температури поверхні сенсора на кілька градусів вищою за температуру навколишнього середовища. Цей засіб запобігає конденсації вологи на поверхні сенсора. Відносна вологість навколишнього повітря розраховується за виміряними значеннями точки роси підігрітого повітря та температур підігрітого й зовнішнього повітря.

Другий спосіб підігріву, названий "ударним нагріванням", передбачає швидкий нагрів сенсора до 100 °С та підтримання цієї температури впродовж 30 секунд для швидкого випаровування води з поверхні сенсора. Ударний підігрів не дозволяє вимірювати вологість повітря від початку нагрівання до закінчення остигання сенсора до температури навколишнього середовища, що потребує типово близько 60 секунд.

Третій спосіб підігріву, названий "хімічним очищенням", полягає в швидкому нагріві сенсора до 160 °С на короткий час для видалення включень з полімеру сенсора. Як і попередній спосіб підігріву, хімічне очищення передбачає короткострокове переривання вимірювань.

Для розробки вітчизняного варіанта підігрівного сенсора немає потреби розробляти саме сенсор вологості, бо немало авторитетних фірм випускають недорогі звичайні ємнісні сенсори відносної вологості повітря з достатньо високими метрологічними характеристиками [4, 5]. Звичайно, такі жорсткі способи підігріву, як ударне нагрівання та хімічне очищення, навряд чи можуть бути застосовані до сенсорів, які не сконструйовані спеціально для цих режимів. Залишається технологія підігрівного сенсора, яка не передбачає екстремального нагріву сенсора.

Розглянемо метрологічні аспекти застосування підігріву сенсора. Публікацій на цю тему поки що немає, хоча для розробки вітчизняного підігрівного сенсора таке дослідження необхідне.

Відносну вологість повітря можна представити у вигляді:

$$F = \frac{E(t_D)}{E(t_O)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де t_D – точка роси; t_O – температура повітря; $E(t)$ – парціальний тиск насиченої водяної пари, як функція температури.

Точка роси підігрітого повітря в робочій зоні сенсора збігається з точкою роси зовнішнього повітря, тому що в процесі нагріву кількість водяної пари залишається незмінною. Тоді відносну вологість підігрітого повітря в робочій зоні сенсора можна записати у вигляді:

$$F_H = \frac{E(t_D)}{E(t_H)} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де t_H – температура підігрітого повітря.

Зіставляючи (1) та (2), отримуємо основну формулу для визначення відносної вологості зовнішнього повітря за відотною вологістю підігрітого повітря:

$$F = F_H \cdot \frac{E(t_H)}{E(t_O)}. \quad (3)$$

Введемо позначення для коефіцієнта перерахунку вологості з останнього виразу:

$$k_H = \frac{E(t_H)}{E(t_O)}, \quad (4)$$

тоді

$$F = k_H \cdot F_H. \quad (5)$$

Якщо припустити, що сенсор відносної вологості повітря має похибку ΔF_H , тоді результат вимірювання набуває вигляду:

$$F + \Delta F = k_H \cdot F_H + k_H \cdot \Delta F_H, \quad (6)$$

де ΔF – похибка вимірювання.

З (5) та (6) безпосередньо випливає, що

$$\Delta F = k_H \cdot \Delta F_H. \quad (7)$$

Повертаючись до мети підігріву повітря в робочій зоні сенсора, можна бачити, що відносна вологість підігрітого повітря нижча за відносну вологість холодного повітря, тобто в (5)

$$F \geq F_H, \quad (8)$$

звідки:

$$k_H \geq 1. \quad (9)$$

Тоді з виразу (7) випливає, що в результаті підігріву повітря похибка вимірювання відносної вологості повітря перевищує похибку сенсора пропорційно до коефіцієнта перерахунку вологості. Для того, щоби мінімізувати цю похибку, необхідно обмежити коефіцієнт перерахунку вологості повітря шляхом мінімально необхідного нагрівання.

Щоби оцінити величину зростання похибки в чисельному вигляді, припустимо, що відносна вологість повітря сягає максимального значення – 100 %. У першому наближенні можна припустити, що для надійного запобігання намокання сенсора достатньо підігріти повітря до досягнення відносної вологості 80 %; тоді від 90 %-ної межі намокання його відділятиме 10 %-ний запас. У такому випадку значення коефіцієнта перерахунку становитиме $k_H = 1,25$, тобто похибка збільшиться лише на 25 %. Таке збільшення похибки можна прийняти до відома, але принципового впливу воно не матиме.

Далі оцінимо вплив на результат вимірювання похибок вимірювання температур. Для цього запишемо парціальний тиск насиченої водяної пари у вигляді емпіричної формули [1]:

$$E(t) = A \cdot \exp\left(\frac{a \cdot t}{b + t}\right), \quad (10)$$

де $A = 6,112$ гПа; $a = 17,5043$; $b = 241,2^\circ\text{C}$.

З урахуванням (10) вираз (3) можна представити в такому вигляді:

$$F = F_H \cdot \exp\left(\frac{a \cdot t_H}{b + t_H} - \frac{a \cdot t_C}{b + t_C}\right), \quad (11)$$

де t_C і t_H – температура навколишнього та підігрітого повітря відповідно.

Для оцінки похибок немає потреби додержуватися максимальної точності формул, надалі цілком достатньо буде обмежитися точністю до 10 %. Врахуємо, що температура теплого повітря перевищує навколишню температуру не більше, ніж на 20°C , а в датчиків фірми Vaisala – взагалі лише на кілька градусів. Тоді для робочого діапазону температур сенсора від -40°C до 85°C можна припустити, що у формулі (11):

$$b + t_H = b + t_C = b \quad (12)$$

З урахуванням цього припущення вираз (11) можна спростити до вигляду:

$$F = F_H \cdot \exp\left(\frac{a \cdot (t_H - t_C)}{b}\right). \quad (13)$$

Припустимо, що засоби вимірювання температур (далі – термодатчики) підігрітого та зовнішнього повітря мають похибки вимірювання відповідно Δt_H і Δt_C , тоді результат вимірювання вологості може бути записаний у вигляді:

$$F + \Delta F_T = F_H \cdot \exp\left(\frac{a \cdot (t_H - t_C) + a \cdot (\Delta t_H - \Delta t_C)}{b}\right), \quad (14)$$

де ΔF_T – похибка вимірювання відносної вологості повітря, спричинена похибками термодатчиків.

Порівнюючи вирази (13) та (14), трансформуємо останній до вигляду:

$$F + \Delta F_T = F \cdot \exp\left(\frac{a \cdot (\Delta t_H - \Delta t_C)}{b}\right). \quad (15)$$

Припускаючи, що похибка вимірювання є величиною другого порядку малості, розкладемо експоненціальну функцію в ряд, обмежувачись двома першими членами ряду:

$$F + \Delta F_T = F \cdot \left(1 + \frac{a \cdot (\Delta t_H - \Delta t_C)}{b}\right). \quad (16)$$

З цього виразу безпосередньо отримуємо значення похибки вимірювання у вигляді:

$$\Delta F_T = F \cdot \frac{a \cdot (\Delta t_H - \Delta t_C)}{b}. \quad (17)$$

Використовуючи одержану формулу (17), перейдемо до середньоквадратичних значень відповідних похибок. Якщо вважати, що похибки термодатчиків некорельовані між собою, то середньоквадратичну похибку вимірювання можна записати так:

$$\sigma_F = F \cdot \frac{a}{b} \cdot \sqrt{\sigma_{\text{TH}}^2 + \sigma_{\text{TC}}^2}, \quad (18)$$

де σ_{TH} і σ_{TC} – середньоквадратичні похибки термодатчиків відповідно підігрітого та зовнішнього повітря.

Цілком природним було б застосування для вимірювання температур однотипних термодатчиків з однаковими допустимими похибками σ_T , тоді вираз (18) набуває вигляду:

$$\sigma_F = F \cdot \frac{a}{b} \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_T. \quad (19)$$

Скориставшись отриманою формулою, оцінимо величину похибки вимірювання в чисельному вигляді. Найпридатнішими для використання термодатчиками в комплекті з ємнісним сенсором можна вважати резистивні платинові сенсори [6]. Оберемо, наприклад, резистивні датчики класу DIN A з допустимою похибкою 0,3 °C. Тоді за найгіршого сполучення значень інших параметрів (за відносної вологості повітря 100 % та за температури -40 °C) значення похибки вимірювання сягатиме 3,7 %.

Необхідно зауважити, що максимальна допустима похибка сучасних серійних вимірювачів відносної вологості повітря [4, 5] не перевищує 3 %, а в багатьох з них обмежується навіть 1 %. У такому разі отримане значення 3,7 % тільки для однієї складової похибки підігрівного сенсора вологості повітря є неприпустимо великим.

Компромісним вирішенням цієї проблеми може бути застосування прецизійних сенсорів температури класу DIN A/3 з допустимою похибкою 0,1 %. З такими сенсорами температури похибку вимірювання можна знизити до значення 1,2 %, що принаймні не перевищує 3 %.

З виконаної оцінки похибок підігрівного сенсора вологості повітря стало зрозумілим, що підігрівні сенсори до цього часу не знайшли широкого розповсюдження через занадто високі вимоги до метрологічних характеристик термодатчиків, що забезпечують їх роботу.

Висновки

1. Великий дефіцит датчиків вологості повітря для автоматизованих метеостанцій і занадто висока ціна єдиного на сьогоднішній день підігрівного ємнісного датчика фірми Vaisala сприяють розробці вітчизняного підігрівного вимірювача вологості повітря.

2. Метод підігріву ємнісного сенсора вологості повітря призводить до незначного зростання похибки вимірювання в результаті розрахунку.

3. Для зменшення впливу похибок вимірювання температур підігрітого та зовнішнього повітря на результат вимірювання вологості до допустимого рівня необхідно застосовувати прецизійні сенсори температури.

4. Доцільно продовжити науковий пошук способів зменшення впливу похибок сенсорів температури на результат вимірювання відносної вологості повітря.

* *

1. Всемирная метеорологическая организация. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. Гл. 4. Измерение влажности // ВМО – № 8 – 2000. – Женева. – С. 1-28.
2. Ranta-aho T., Stormbom L. Real Time Humidity Measurement Using the Warmed Sensor Head Method // Proceedings of 4th Int. Symp. on Humidity and Moisture ISHM 2002, Taipei. – P. 583-588.
3. Warmed Probe Technology // Vaisala Reliable, www.vaisala.com. – P. 1-2.
4. Datasheet for SHT – series humidity sensor // www.sensirion.com. – P. 1.
5. Еманов А. (КОМПЭЛ). Новые емкостные датчики влажности // Новости электроники. – Рыбинск. – 2008. – № 5. – С. 26-28.
6. Гутников В., Ядевич А. Платиновые тонкопленочные датчики температуры фирмы HERAEUS SENSOR TECHNOLOGY // Электронные компоненты. – М. – №5. – 2005.– С. 1.

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*

Е.Л. Запольский, В.И. Латенко, И.Ю. Скрипник, С.А. Филь

Использование подогрева против насыщения емкостного сенсора влажности воздуха

Показано актуальность разработки отечественного измерителя влажности на основе подогревного емкостного сенсора. Рассмотрено явление роста погрешности измерения, вызванного измерением влажности подогретого воздуха. Приведен анализ влияния погрешностей термодатчиков на результат измерения относительной влажности воздуха. Показана необходимость использования прецизионных термодатчиков для получения приемлемой точности измерения.

Ключевые слова: подогревной емкостный сенсор, влажность воздуха, температура подогрева, термодатчик, анализ погрешностей.

E.L. Zapolsky, V.I. Latenko, I.U. Skrypnyk, S.O. Fil

The use of heat against the saturation of capacitive humidity sensor

It is shown the actuality of the development of the domestic moisture meter based on heated capacitive sensor. The phenomenon of growth of measurement errors caused by the measurement of humidity of heated air is considered. It is presented the analysis of the effect the errors of temperature sensors on the result of relative humidity measurement. The necessity of the use of high-precision sensors to obtain an acceptable accuracy of measurement is shown.

Keywords: warmed up capacity sensor, humidity of air, temperature of heating, thermoprobe, analysis of errors.