

УДК 551.501.501.508

В.І. Латенко, к.т.н.

ТЕМПЕРАТУРНА ПОХИБКА ПІДІГРІВНОГО ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут Міністерства надзвичайних ситуацій України та Національної академії наук України, e-mail: uhmi@uhmi.org.ua

Показано актуальність розробки вітчизняного вимірювача відносної вологості повітря на основі підігрівного ємнісного сенсора. Наведено теоретичне обґрунтування методу підігріву повітря в робочій зоні сенсора для запобігання насичення під дією високої вологості. Виконано аналіз інструментальної похибки підігрівного сенсора. Виведена формула для оцінки допустимої похибки термодатчиків підігрівного сенсора, виходячи з необхідної точності вимірювання відносної вологості повітря

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Ємнісні сенсори вологості повітря є найбільш придатними для використання в автоматизованих метеорологічних станціях серед усіх відомих сьогодні типів сенсорів. Зайвим підтвердженням цієї тези є той факт, що визнані світові лідери в галузі виробництва датчиків вологості повітря (фінська фірма Vaisala, американська фірма Honeywell та інші) використовують у своїх виробках саме ємнісні сенсори. Основними перевагами сенсора ємнісного типу є [1]:

- перекриття повного діапазону відносної вологості повітря (від 0 до 100 %);
- широкий діапазон робочих температур, у тому числі мінусових;
- відсутність потреби у відновлювальному обслуговуванні (заправка, тощо);
- мініатюрність.

Завдяки своїм високим метрологічним та споживчим характеристикам ємнісні сенсори опинилися поза конкуренцією на сучасному ринку метеорологічних приладів і масово випускаються різноманітними виробниками.

Впродовж останнього десятиліття більшість аеродромних метеорологічних станцій України вже перейшли на використання ємнісних вимірювачів вологості повітря у оперативній роботі. На черзі стоїть переоснащення станцій мережі гідрометеорологічної служби, кількість яких не менше 180. Тобто в найближчий час на станціях гідрометеорологічної мережі України необхідно буде встановити велику кількість датчиків вологості повітря придатних для роботи в автоматичному режимі. Немає сумніву, що для цього треба обрати саме датчики на основі ємнісних сенсорів. Але на шляху масового використання ємнісних сенсорів існує суттєва перешкода, яка часто залишається поза увагою користувачів. Проблема полягає в тому, що за принципом дії ємнісний сенсор має велику вірогідність насичення в умовах високої відносної вологості ([1], [2]).

В разі насичення сенсора відбувається конденсація водяної пари, а мокрий ємнісний сенсор неспроможний вимірювати відносну вологість. Доки у сенсорі є вода у рідкому стані, його засоби вимірювання вологості повітря фактично вимкнені до висихання сенсора. В той же час в умовах високої вологості повітря градієнта тиску пари недостатньо для ефективного випаровування рідкої води з поверхні сенсора. Тому сенсор може залишатися мокрим впродовж хвилин чи годин навіть після зникнення умов насичення. Це може призводити до тривалих періодів відсутності вимірювання.

Вимірювання високої відносної вологості ускладнюється тим, що умови вимірювання завжди дуже близькі до насичення. Об'єкти вимірювання, включаючи сам сенсор вологості повітря, звичайно знаходяться під дією температури, що наближається до температури насичення. В цих умовах навіть незначні флюктуації фізичних параметрів середовища можуть призвести до насичення сенсора. Із збільшенням тривалості періоду високої вологості повітря збільшується і вірогідність насичення сенсора.

Виникає запитання, як відсутність вимірювання в процесі насичення сенсору відображається у результатах вимірювання. На щастя, всі відомі нам сенсори вологості видають значення близькі до 100% вологості, а не зовсім випадкові значення, як можна було б очікувати. Це дещо

зменшує негативний вплив проблеми на достовірність результатів.

Таким чином, проблема насичення ємнісного сенсора полягає не тільки у великій вірогідності насичення в умовах високої відносної вологості, а і у тривалих періодах відновлення після зменшення відносної вологості повітря.

Положення погіршується тим, що для клімату України ситуація тривалого періоду високої вологості повітря не є винятковою. Як характерний приклад цього, на рис. 1 наведено дані вимірювання відносної вологості повітря з АМСЦ «Донецьк», коли відносна вологість повітря перевищувала 95 % більш як добу (з 01.10.2009), а пізніше знову піднімалася вище 95 % на 5 - 6 годин і на менший час.

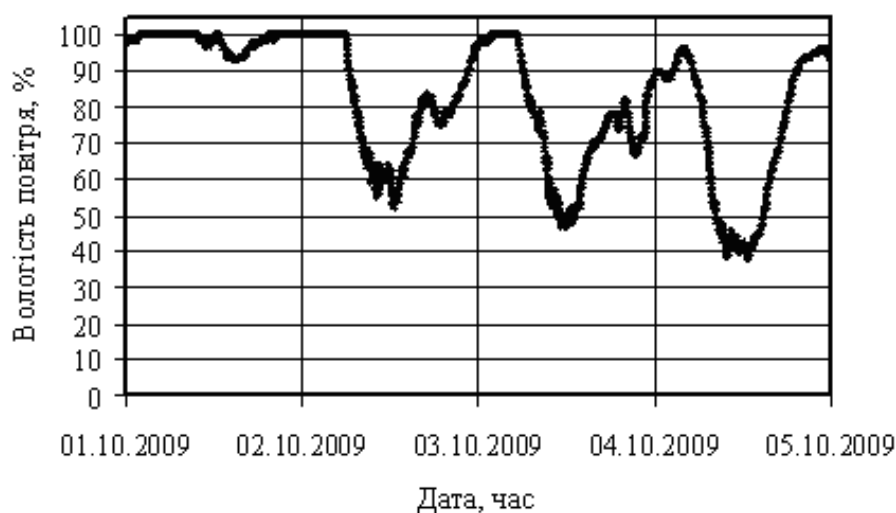


Рис.1 Дані відносної вологості повітря з АМСЦ «Донецьк»

В масштабах України проблема насичення сенсорів виглядає таким чином, що якнайменше 18 аеродромних метеостанцій, обладнаних ємнісними сенсорами і розподілених по всій території, на протязі багатьох годин можуть видавати хибні значення вологості повітря в періоди підвищеної вологості. Якщо ж до цих даних додадуться ще хибні дані багатьох станцій метеорологічної мережі, то сумнівними виявляться дані практично з усієї території України.

Таким чином, в загальному вигляді проблему можна визначити, як необхідність розробки ємнісного сенсора відносної вологості повітря здатного працювати в умовах високої вологості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття

На сьогоднішній день поки що не винайдено іншого способу протидії явищу насичення сенсора, ніж запобігання перебуванню чутливого елемента сенсора в умовах високої відносної вологості повітря [1]. Найпростішим способом зниження відносної вологості повітря, у якому перебуває чутливий елемент сенсора, є підігрів цього повітря. Хоча цей спосіб давно відомий і навіть використовується окремими виробниками вимірювачів вологості [1], він не набув широкого використання.

З усіх вимірювачів вологості повітря, що випускаються сьогодні в світі, лише в декількох типах використовується підігрів. Наприклад, авторитетна фірма Vaisala пропонує випуск підігрівного датчика вологості повітря лише за окремим замовленням. Звісно вартість підігрівного ємнісного датчика фірми Vaisala, виготовленого за окремим замовленням, суттєво перевищує і так вкрай високу вартість звичайних (без підігріву) датчиків цієї фірми.

На рис. 2 наведено часові діаграми даних вимірювача вологості повітря НМТ337 фірми Vaisala з підігрівом та без підігріву з технічної документації фірми. На діаграмах видно, що після години перебування під дією високої вологості повітря без підігріву вимірювач видає суттєво завищені дані порівняно з даними в разі підігріву. Наведені діаграми наочно демонструють явище насичення ємнісного датчика.

Окрено необхідно згадати сенсори серії SHT1х/SHT7х фірми Sensirion (Швейцарія) [3]. Хоча

в документації на ці сенсори не передбачений підігрівний режим використання, вони мають вбудовані нагрівач повітря і термодатчик з цифровим виходом. Вбудований датчик температури є також у деяких сенсорах фірми Honeywell [4]. З відомих фірм лише згадані випускають сенсори з вбудованими нагрівачами і термодатчиками. У підігрівних датчиках інших виробників використовується зовнішній підігрів ємнісних сенсорів вологості повітря і зовнішні вимірювачі температури, тому вони суттєво поступаються датчикам фірми Vaisala за своїми параметрами, особливо габаритами.

Таким чином, на світовому ринку метеорологічних приладів тільки фірма Vaisala пропонує підігрівний датчик вологості повітря, що відповідає сучасним метрологічним і технічним вимогам, але його висока вартість не дає можливості задовольнити попит гідрометеорологічної служби України. Тому розробка вітчизняного підігрівного ємнісного сенсора вологості повітря постає як актуальне завдання науково-дослідної роботи.

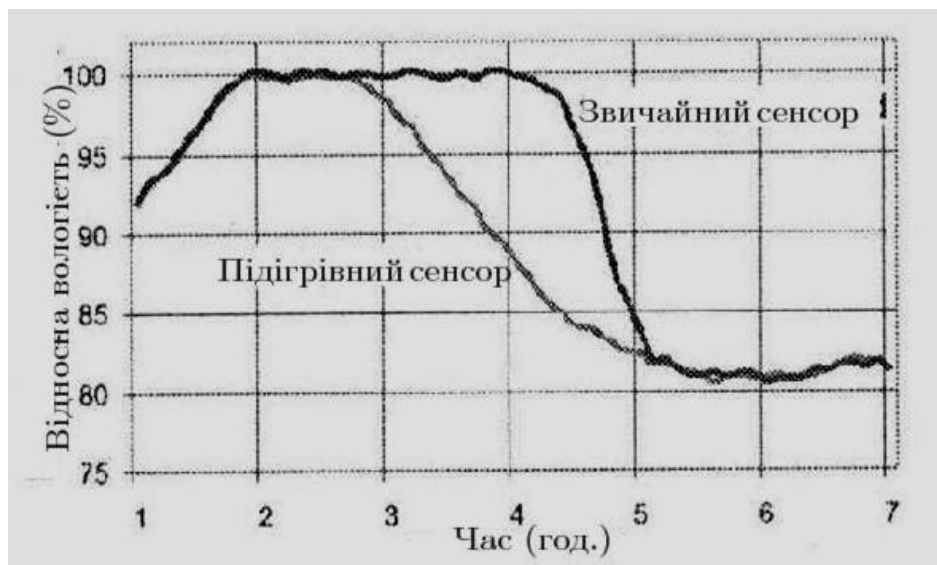


Рис.2. Часові діаграми даних вимірювача НМТ337 з підігрівом та без підігріву

Теоретичні принципи роботи підігрівного сенсора вологості повітря базуються на загальновідомих фізичних законах, тому публікацій на цю тему дуже мало. У [1] викладена у загальному вигляді проблема насичення ємнісного сенсора і три різні методи підігріву сенсора: безперервний підігрів, ударний підігрів та підігрів хімічного очищення. Зауважимо, що безперервне вимірювання відносної вологості повітря можливе тільки за умов безперервного підігріву. У статті [2] показано, як ці методи підігріву реалізовані у конкретних сенсорах фірми Vaisala. Публікації, у яких розглядалися б метрологічні аспекти підігрівних сенсорів відносної вологості повітря, відсутні.

Зауважимо, що для розробки вітчизняного підігрівного сенсора вологості повітря немає необхідності розробляти саме сенсор вологості. Достатньо вибрати досить дешевий ємнісний сенсор, мініатюрні нагрівач і термодатчик і об'єднати їх функціонально, або просто взяти придатний для цього сенсор SHT1x/SHT7x фірми Sensirion [3], згаданий раніше. За цих умов немає необхідності аналізувати метрологічні властивості сенсора вологості як такого, а можна обмежитися аналізом особливостей режиму підігріву сенсора.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою дослідження буде аналіз похибок ємнісного сенсора вологості повітря, що виникають в процесі його підігрівання для теоретичного обґрунтування розробки вітчизняного підігрівного сенсора.

Виклад основного матеріалу статті з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Відносна вологість повітря – це за визначенням співвідношення:

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

де e - парціальний тиск водяної пари в повітрі; E - парціальний тиск насиченої водяної пари над пласкою поверхнею хімічно чистої води (далі – парціальний тиск насиченої пари).

Наведемо парціальний тиск насиченої пари у вигляді функції від температури, скориставшись емпіричною формулою [5]:

$$E(t) = A \cdot \exp\left(\frac{a \cdot t}{b + t}\right), \quad (2)$$

де t – температура, °C; $A = 6,112$ гПа; $a = 17,5043$; $b = 241,2$ °C.

Враховуючи, що для точки роси t_D парціальний тиск водяної пари

$$e = E(t_D), \quad (3)$$

відносну вологість повітря (1) можна записати у вигляді:

$$F = \frac{E(t_D)}{E(t)} \cdot 100\%. \quad (4)$$

У разі підігрівання повітря у робочій зоні (всередині) сенсора, точка роси не змінюється, тому що незмінною залишається кількість водяної пари, тобто абсолютна вологість повітря. Відносну вологість повітря всередині підігрітого сенсора можна навести в аналогічному (4) вигляді як:

$$F_H = \frac{E(t_D)}{E(t_H)} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Зі співвідношення виразів (4) і (5) витікає формула для визначення відносної вологості навколишнього повітря за величиною відносної вологості повітря всередині підігрітого сенсора:

$$F = F_H \cdot \frac{E(t_H)}{E(t_0)}, \quad (6)$$

де t_0 – температура навколишнього (не підігрітого) повітря; тобто $t_0 = t$ для виразу (4).

Скориставшись формулою (2), наведемо вираз (6) в остаточному вигляді:

$$F = F_H \cdot \exp\left(\frac{a \cdot t_H}{b + t_H} - \frac{a \cdot t_0}{b + t_0}\right). \quad (7)$$

Одержана формула (7) є аналітичним виразом методу вимірювання відносної вологості повітря F з температурою t_0 , виходячи зі значення відносної вологості повітря F_H , підігрітого до температури t_H . З формули видно, що для технічної реалізації підігрівного ємнісного сенсора його необхідно доповнити нагрівачем повітря і двома вимірювачами температури: температури навколишнього повітря і температури повітря безпосередньо у зоні вимірювання (надалі - холодний термодатчик і теплий термодатчик відповідно). Основна складність полягає в технічній реалізації саме теплового термодатчика, який повинен вимірювати температуру в робочій зоні мініатюрного сенсора вологості.

З врахуванням похибок термодатчиків формула (7) набуває наступного вигляду:

$$F + \Delta F = F_H \cdot \exp\left(\frac{a \cdot (t_H + \Delta t_H)}{b + t_H + \Delta t_H} - \frac{a \cdot (t_0 + \Delta t_0)}{b + t_0 + \Delta t_0}\right). \quad (8)$$

де ΔF – похибка вимірювання; Δt_H і Δt_0 – похибка теплового та холодного термодатчиків відповідно.

З метою спрощення подальших аналітичних перетворень, визначимо діапазони складових величин формули (8). Задамо діапазони основних величин:

- робочий діапазон температур - $40^\circ\text{C} \leq t_0 \leq +50^\circ\text{C}$;

- відносна вологість повітря $0\% \leq F \leq 100\%$;
- максимальна допустима похибка холодного термодатчика $\Delta t_o \leq \pm 0,3^\circ\text{C}$;
- максимальна допустима похибка теплового термодатчика $\Delta t_H \leq \pm 0,3^\circ\text{C}$.

Задані значення максимальних допустимих похибок термодатчиків відповідають: для холодного термодатчика – похибці термометра опору класу В за міжнародним стандартом ІЕС 60751 [6]; для теплового термодатчика – похибці вбудованого термодатчика згаданого раніше сенсора вологості SHT75 [3].

Для визначення діапазонів решти величин представимо температуру теплового термодатчика у вигляді:

$$t_H = t_o + t_A, \quad (9)$$

де t_A – температура перегріву теплового термодатчика відносно холодного. Одразу зауважимо, що на відміну від фізично вимірюваних температур холодного і теплового термодатчиків температура перегріву є розрахунковою величиною. Розв'язуючи рівність (7) відносно аргументу t_A , отримаємо наступний вираз:

$$t_A = \frac{k_F \cdot (b + t_o)^2}{a \cdot b - k_F \cdot (b + t_o)}, \quad (10)$$

де:

$$k_F = \ln \frac{F}{F_H}. \quad (11)$$

З виразу (10) безпосередньо витікає, що величина t_A зростає із зростанням величини t_o та із зростанням співвідношення F/F_H . Максимальне значення температури холодного термодатчика відповідає верхній границі діапазону, тобто $\max(t_o) = 50^\circ\text{C}$. Максимальним значенням співвідношення F/F_H задамося за критерієм доцільності, як показано далі. Якщо підігрів вмикається за умов максимальної відносної вологості повітря ($F = 100\%$), тоді можна вважати за доцільне зниження відносної вологості підігрітого повітря не нижче за $F_H = 50\%$. Підставляючи ці значення у формули (10) та (11), отримаємо значення $t_A \approx 15^\circ\text{C}$, яке надалі приймемо за максимальне значення температури перегріву.

Надалі приймемо наступний діапазон температури перегріву і відповідний діапазон температури теплового термодатчика:

- діапазон температури перегріву $0^\circ\text{C} \leq t_A \leq +15^\circ\text{C}$;
- діапазон температури теплового термодатчика $t_o \leq t_H \leq t_o + 15^\circ\text{C}$.

Задавши діапазони допустимих значень всіх складових величин, повернемося до аналізу формули (8). За заданих діапазонах значень величин для знаменників у формулі (8) справедливі співвідношення:

$$\Delta t_H \ll b + t_H; \quad (12)$$

$$\Delta t_o \ll b + t_o. \quad (13)$$

Враховуючи ці співвідношення, вираз (8) можна спростити:

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

В результаті простих перетворень з врахуванням формули (7) цей вираз набуває наступного вигляду:

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

Оскільки оцінка похибок не потребує високої точності розрахунків, розкладемо цю функцію в ряд, обмежувачись двома першими членами ряду:

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

З останнього виразу нескладно виділити значення похибки вимірювання:

$$\Delta F = F \cdot \left(\frac{a \cdot \Delta t_H}{b + t_H} - \frac{a \cdot \Delta t_O}{b + t_O} \right). \quad (17)$$

Враховуючи зв'язок (9) між температурами теплового і холодного термодатчиків, вираз (17) представимо у вигляді:

$$\Delta F = F \cdot \left(\frac{a \cdot \Delta t_H}{b + t_O + t_A} - \frac{a \cdot \Delta t_O}{b + t_O} \right). \quad (18)$$

Використовуючи одержану формулу (18), перейдемо до середньоквадратичних значень відповідних похибок. Будемо вважати, що температури вимірюються незалежними термодатчиками, тобто похибки термодатчиків є випадковими і некорельованими. В такому разі середньоквадратичну величину похибки вимірювання відносної вологості повітря можна записати у вигляді:

$$\sigma_F = F \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{b + t_O + t_A} \right)^2 \cdot \sigma_{tH}^2 + \left(\frac{a}{b + t_O} \right)^2 \cdot \sigma_{tO}^2}, \quad (19)$$

де σ_{tH} і σ_{tO} – середньоквадратичні величини похибок теплового і холодного термодатчиків відповідно.

За прийнятих діапазонів величин з похибкою менше 10% можна вважати, що:

$$\left(\frac{a}{b + t_O + t_A} \right)^2 \cong \left(\frac{a}{b + t_O} \right)^2. \quad (20)$$

В такому разі вираз (19) можна спростити до вигляду:

$$\sigma_F = F \cdot \left(\frac{a}{b + t_O} \right) \cdot \sqrt{\sigma_{tH}^2 + \sigma_{tO}^2}. \quad (21)$$

З одержаної формули видно, що похибки обох термодатчиків однаково впливають на похибку вимірювання. Коефіцієнт впливу (розмірний) можна визначити, як:

$$k_{tF} = F \cdot \left(\frac{a}{b + t_O} \right). \quad (22)$$

Максимального значення коефіцієнт впливу набуває, коли $F = 100\%$, а $t_O = -40^\circ\text{C}$: $\max k_{tF} \approx 8,7\%/^\circ\text{C}$. Тоді за прийнятих значень максимально допустимих похибок термодатчиків похибка вимірювання сягатиме значення $\sigma_F \approx 3,7\%$.

Одержане значення похибки, спричиненої тільки похибками термодатчиків, неприпустимо велике. Причина полягає у надто великому значенні коефіцієнту впливу (22). За вибраного методу вимірювання немає механізмів для зменшення значення цього коефіцієнту. Тому для зменшення похибки вимірювання доведеться використовувати прецизійні термодатчики. Якщо застосувати однотипні холодний і теплий термодатчики, тоді вираз (21) можна спростити до наступного вигляду:

$$\sigma_F = F \cdot \left(\frac{a}{b + t_O} \right) \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_t, \quad (23)$$

де σ_t – максимальна допустима похибка термодатчика.

Оцінемо тепер, до якого значення зменшиться похибка вимірювання, якщо в якості термодатчиків застосувати термометри опору класу В/3, які мають максимально допустиму похибку $\sigma_t = 0,1^\circ\text{C}$. Підставляючи решту значень параметрів у формулу (23), як і в попередньому випадку, отримаємо значення похибки $\sigma_F = 1,2\%$.

Наведені розрахунки пояснюють технічні проблеми, які виникають в процесі розробки підігрівних емнісних сенсорів вологості повітря і заважають широкому використанню підігріву емнісних сенсорів. З іншого боку, ці ж розрахунки показують принципову можливість розробки вітчизняного підігрівного сенсора, якщо використовувати найбільш точні сенсори вологості та термодатчики.

Далі трансформуємо вираз (23) до більш зручного для практичного застосування вигляду:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_F}{F \cdot \sqrt{2}} \cdot \left(\frac{b + t_o}{a} \right). \quad (24)$$

Отримана формула дозволяє пов'язати вимоги до максимальної допустимої похибки термодатчиків з допустимим значенням температурної похибки вимірювання відносної вологості повітря.

З метою висвітлення ще однієї проблеми підігрівного режиму сенсора звернемося до формули перетворення (7), яку запишемо у спрощеному вигляді:

$$F = k_H \cdot F_H, \quad (25)$$

де k_H – коефіцієнт трансформації, який є функцією температур холодного і теплового термодатчиків:

$$k_H = \exp \left(\frac{a \cdot t_H}{b + t_H} - \frac{a \cdot t_o}{b + t_o} \right). \quad (26)$$

Як видно з виразу (26) і у відповідності до принципу дії підігрівного сенсора: $t_H \geq t_o$, $k_H \geq 1$. Припустимо, що сенсор вимірює відносну вологість підігрітого повітря з похибкою ΔF_{SH} , тоді з виразу (25) випливає наступне рівняння:

$$F + \Delta F_S = k_H \cdot (F_H + \Delta F_{SH}), \quad (27)$$

де ΔF_S – похибка вимірювання після перетворення.

Виходячи з рівняння (27) і значень, які може набувати коефіцієнт трансформації ($k_H \geq 1$), впливає наступне співвідношення:

$$\Delta F_S = k_H \cdot \Delta F_{SH} \geq \Delta F_{SH}. \quad (29)$$

Тобто в результаті перетворення абсолютна похибка вимірювання вологості повітря збільшується пропорційно коефіцієнту перетворення. Цей факт необхідно приймати до уваги в процесі проектування підігрівного сенсора вологості повітря. Мінімізувати зростання похибки можна шляхом зменшення коефіцієнту трансформації за рахунок зменшення температури перегріву до мінімально достатнього значення.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку

1. Отримана формула дозволяє оцінити в чисельному вигляді вимоги до точності термодатчиків, яка необхідна для побудови датчика вологості повітря на базі підігрівного ємнісного сенсора.
2. Для зменшення температурної похибки підігрівного ємнісного сенсора принаймні до практично застосовних значень необхідно вимірювати температуру у робочій зоні сенсора та зовнішню температуру з прецизійною точністю.
3. Для обмеження зростання похибки від перерахунку відносної вологості повітря слід обмежити коефіцієнт перетворення відносної вологості повітря мінімально необхідним значенням шляхом мінімізації перегріву.
4. Велика потреба у підігрівних ємнісних сенсорах диктує необхідність наукового пошуку у напрямку способів їх побудови зі зниженням вимог до точності вимірювання температур.

Список літературних джерел

1. 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, pp. 583 - 588.
2. Warmed Probe Technology // Vaisala Reliable, www.vaisala.com, pp.1-2.
3. Datasheet for SHT- series humidity sensor // www.sensirion.com, p.1.
4. Еманов А. (КОМПЭЛ). Новые емкостные датчики влажности // Новости электроники, №5, 2008, Рыбинск, с.26 – 28.
5. Всемирная метеорологическая организация. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. Гл. 4. Измерение влажности // ВМО-№8, 2000, Женева, с.1.4-1 – 1.4-28.
6. Гутников В., Ядевич А. . Платиновые тонкопленочные датчики температуры фирмы HERAEUS SENSOR TECHNOLOGY // Электронные компоненты - №5, 2005, Москва, с.1.