



dobra praktyka

Przemysłowy pomiar punktu rosy a wilgotność względna cz. 1

Granice pomiaru wilgotności względnej i dobór technologii dla gazów suchych

GRZEGORZ CIAŁOŃ

Ukończył studia na Politechnice Śląskiej w Gliwicach, na Wydziale Elektrycznym. W Introlu pracuje od 2006 roku, obecnie jest kierownikiem działu komponentów automatyki. Zajmuje się głównie doбором urządzeń pomiarowych w systemach HVAC oraz do regulacji i rejestracji procesów.

tel: 32 789 00 18

Wybór odpowiedniej aparatury kontrolno-pomiarowej decyduje o stabilności procesów przemysłowych, bezpieczeństwie instalacji oraz efektywności kosztowej przedsiębiorstwa. Choć pomiar wilgotności względnej jest standardem w wielu aplikacjach, w specyficznych warunkach technologicznych staje się on niewystarczający lub wręcz niemożliwy do prawidłowego wykonania.

Pierwsza część opracowania stanowi kompendium wiedzy na temat ewolucji metod pomiarowych, fizycznych granic czujników %RH oraz technologicznego przełomu, który redefiniuje dotychczasowe standardy rynkowe w kontroli gazów suchych.



EWOLUCJA POMIARU WILGOTNOŚCI WZGLĘDNEJ W TRUDNYCH WARUNKACH

Zagadnienie pomiaru wilgotności względnej (%RH) w aplikacjach przemysłowych było już przedmiotem licznych analiz inżynierskich. Eksperci branży wielokrotnie prezentowali zarówno absolutne podstawy fizyczne tych pomiarów, jak i szczegółowe wyzwania występujące w krytycznych procesach, takich jak suszenie wielkogabarytowe czy optymalizacja pracy suszarni. Oznacza to, że wiedza o zachowaniu czujników w standardowych środowiskach jest dobrze ugruntowana.

Osobną, wysoce wymagającą klasę aplikacji stanowią:

- **Strefy zagrożone wybuchem (Ex):** Dobór odpowiedniego przetwornika wilgotności powietrza do stref zagrożonych wybuchem wymaga restrykcyjnego przestrzegania norm bezpieczeństwa iskrobezpiecznego.
- **Środowiska o wysokiej kondensacji:** Pomiar wilgotności w warunkach bliskich 100% RH, gdzie poprawne pomiary wymagają zastosowania sensorów z podgrzewaniem.



PRZEŁOM W SEGMENTIE PÓŁPRZEMYSŁOWYM: HTS401

Przez ostatnie 14 lat standardem w trudnych warunkach kondensacji były zaawansowane przetworniki przemysłowe wyposażone w funkcję podgrzewanego sensora. Choć technologia ta doskonale zdawała egzamin, barierą dla wielu wdrożeń pozostawał wysoki koszt inwestycyjny.

Sytuacja uległa diametralnej zmianie, gdy firma E+E Elektronik wprowadziła na rynek serię

HTS401. Model ten implementuje technologię podgrzewanego sensora w segmencie znacznie tańszych przetworników półprzemysłowych. Dzięki temu zalety aktywnego zarządzania temperaturą struktury pomiarowej stały się dostępne dla szerokiego grona odbiorców.

Zastosowanie podgrzewanego sensora przynosi dwie kluczowe korzyści aplikacyjne:

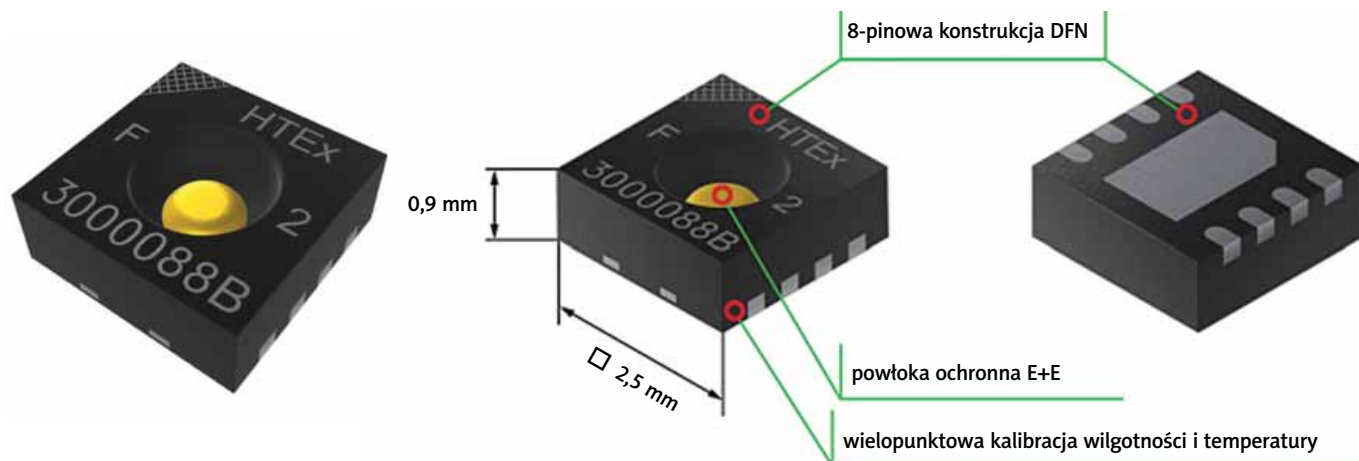
- **W aplikacjach wilgotnych:** Zapewnia samoczynne, szybkie osuszenie struktury czujnika po wystąpieniu bezpośredniego zawilgocenia lub zalania.
- **W aplikacjach zanieczyszczonych:** Umożliwia intensywne podgrzanie sensora, co prowadzi do jego termicznego oczyszczenia z lotnych substancji organicznych lub osadów procesowych.



ROLA MINIATURYZACJI I SENSORÓW CYFROWYCH

Konstrukcja przetworników z serii HTS401 opiera się na nowoczesnych sensorach cyfrowych **HTE501.** Urządzenia te występują w różnicowanych wersjach wykonania, w tym wariantach z wygodnym, wymiennym modułem pomiarowym, co znacząco skraca czas i koszt serwisu.

Rozwój struktur cyfrowych, takich jak HTE501, stanowi kamień milowy w metrologii przemysłowej. Zintegrowanie elementu mierzącego z torem przetwarzania analogowo-cyfrowego na jednym chipie pozwoliło na jednoczesną miniaturyzację układu oraz radykalne zwiększenie powtarzalności pomiarowej. Nowe serie urządzeń są nie tylko dokładniejsze i trwalsze, ale oferują zaawansowane algorytmy sterujące (np. wspomniane automatyczne osuszanie po zalaniu). Można jednoznacznie stwierdzić, że pomiar wilgotności w niekorzystnych, zawilgoco-



Rysunek 1
Cyfrowy sensor wilgotności serii HTE501

nych środowiskach wszedł na najwyższy poziom technologiczny.



DEFINICJA FIZYCZNA I INTERPRETACJA KRZYWEJ NASYCENIA

Aby w pełni zrozumieć zasadność tej decyzji, należy odwołać się do definicji krzywej nasycenia gazu parą wodną. Zależności te szczegółowo opisują fundamentalne prawa termodynamiki:

1. Wraz ze wzrostem temperatury gazu, jego wilgotność względna maleje.
2. Przy obniżaniu temperatury gazu, jego wilgotność względna rośnie.

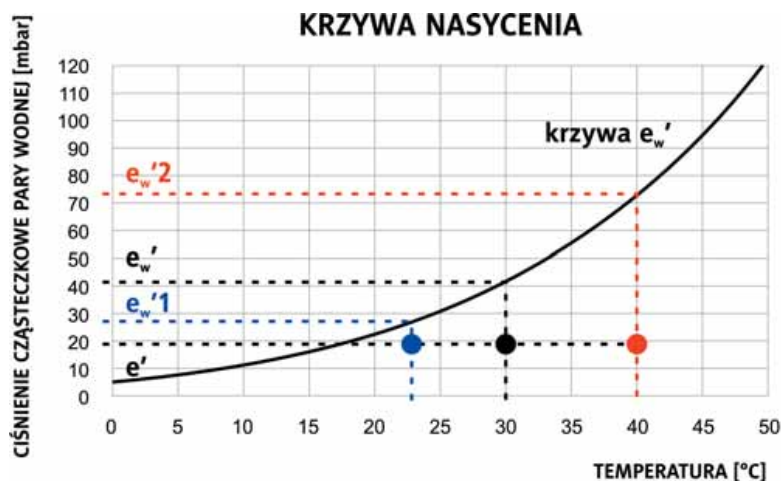
Wzrost ten dąży do granicy 100% RH. Temperatura, przy której chłodzony gaz osiąga pełne nasycenie (100% RH), nazywana jest **temperaturą punktu rosy** (T_d). Przekroczenie tej linii powoduje zmianę stanu skupienia pary wodnej z gazowego w ciecz (pojawia się kondensat).

Co istotne, to fizyczne zjawisko wykraplania – wbrew swojej nazwie – nie jest bezpośrednią podstawą działania przemysłowych przetworników punktu rosy. Okolice 100% RH i sam punkt rosy w warunkach wysokiej wilgotności mierzy się wspomniany-

DLACZEGO W SUCHYCH MEDIACH WYBIERAMY PUNKT ROSY?

Naturalnym echem sukcesu w obszarze wysokich wilgotności jest pytanie: czy pomiar w skrajnie suchych mediach również został udoskonalony? Odpowiedź wymaga analizy fizycznych ograniczeń czujników wilgotności względnej.

Mimo stałego wzrostu dokładności nowoczesnych urządzeń, w zakresie ekstremalnie niskich wilgotności – poniżej 5% RH – niepewność pomiarowa samego sensora stanowi zbyt wielką część mierzonej wartości. Mówiąc wprost – błąd przyrządu uniemożliwia podjęcie jakiegokolwiek decyzji procesowej. Świadomy inżynier lub kierownik produkcji w takiej sytuacji rezygnuje z pomiaru wilgotności względnej i wybiera dedykowany **przetwornik punktu rosy** (T_d).



T	RH
ROŚNIE	MALEJE
MALEJE	ROŚNIE

PRZYKŁAD Z WYKRESU:

$$RH(23^{\circ}C) = \frac{e'}{e_w'1} \cdot 100$$

$$\frac{20 \text{ mbar}}{28 \text{ mbar}} \cdot 100 = 71 \%$$

$$RH(30^{\circ}C) = \frac{e'}{e_w'} \cdot 100$$

$$\frac{20 \text{ mbar}}{42 \text{ mbar}} \cdot 100 = 47 \%$$

$$RH(40^{\circ}C) = \frac{e'}{e_w'2} \cdot 100$$

$$\frac{20 \text{ mbar}}{74 \text{ mbar}} \cdot 100 = 27 \%$$

Rysunek 2
Wpływ temperatury na wilgotność względną



mi wcześniej przetwornikami wilgotności względnej z podgrzewaniem. Z kolei przetworniki punktu rosy (T_d) stosuje się do precyzyjnego wyznaczania zawartości wody w gazach średnio wilgotnych, a przede wszystkim **w gazach skrajnie suchych**.



CZYTELNOŚĆ DANYCH I WYMAGANIA RYNKOWE DLA GAZÓW SUCHYCH

Temperatura punktu rosy łączy w sobie dwie zmienne fizyczne: wilgotność gazu oraz jego temperaturę, dzięki czemu stanowi doskonały i uniwersalny parametr procesowy. W specyfikacjach technicznych gazów przemysłowych to właśnie wartość T_d jednoznacznie definiuje stopień czystości i suchości medium.

Współczesny przemysł stawia przed systemami osuszania bardzo restrykcyjne wymagania:

- **Standardowe układy sprężonego powietrza:** Pracują w okolicach $-40^\circ\text{C } T_d$. Przekroczenie tej wartości w stronę wyższych temperatur (np. $-20^\circ\text{C } T_d$) drastycznie zwiększa ryzyko awarii całej instalacji. Podczas rozprężania gazu następuje gwałtowny spadek jego temperatury, co przy niedostatecznym osuszeniu prowadzi do natychmiastowego skroplenia wody w przewodach i zniszczenia narzędzi lub zaworów.
- **Instalacje wyższej klasy:** Osiągają stabilny poziom $-50^\circ\text{C } T_d$.
- **Przemysł farmaceutyczny:** Wymaga mediów o krytycznej czystości na poziomie od -60°C do $-70^\circ\text{C } T_d$.
- **Laboratoria wzorcowe:** Najwyższej klasy laboratoria referencyjne są w stanie generować i wzorcować aparaturę w punktach sięgających aż $-90^\circ\text{C } T_d$.

Poza aspektem czysto technicznym, operowanie temperaturą punktu rosy jest dla personelu technicznego znacznie bardziej czytelne i intuicyjne niż posługiwanie się wartościami wilgotności względnej. Pokazuje to poniższa tabela odniesienia w warunkach ciśnienia atmosferycznego i temperatury otoczenia 20°C

Wilgotność względna (RH)	Temperatura punktu rosy (T_d) 20°C
10%	$-12,5^\circ\text{C}$
5%	$-20,8^\circ\text{C}$
2%	$-30,9^\circ\text{C}$
1%	$-38,0^\circ\text{C}$
0,8%	$-40,2^\circ\text{C}$
0,5%	$-44,6^\circ\text{C}$
0,4%	$-46,7^\circ\text{C}$
0,3%	$-49,3^\circ\text{C}$
0,2%	$-52,8^\circ\text{C}$
0,1%	$-58,5^\circ\text{C}$
0,08%	$-60,0^\circ\text{C}$
0,022%	$-70,0^\circ\text{C}$
0,005%	$-80,0^\circ\text{C}$

Tabela 1
Porównanie jednostek wilgotności względnej i temperatury punktu rosy



PRZEGLĄD TECHNOLOGII POMIARU PUNKTU ROSY

W praktyce przemysłowej i laboratoryjnej stosuje się trzy główne technologie pomiaru temperatury punktu rosy:

1. Urządzenia oparte na zjawisku schłodzonego lustra (klasa laboratoryjna)

Metoda ta wykorzystuje bezpośrednio zjawisko fizyczne kondensacji. Układ precyzyjnie schładza wbudowane lustro, a zaawansowany system optyczny rejestruje dokładny moment pojawienia się na nim pierwszych skroplin, odczytując w tym samym ułamku sekundy temperaturę powierzchni lustra.

- **Zalety:** Jest to najbardziej dokładna metoda metrologiczna na świecie, pozwalająca na wyznaczenie punktu rosy z błędem nieprzekraczającym $\pm 0,1^\circ\text{C}$.
- **Wady:** Bardzo wysoka cena (rzędu wielkości ok. 20 000 €) oraz bezwzględny wymóg zapewnienia stabilnych, niezwykle komfortowych warunków pracy. Z tego powodu urządzenia te spotyka się niemal wyłącznie w laboratoriach wzorcowych.

2. Przetworniki z sensorem z tlenku metalu

Czujnik posiada cienką, porowatą warstwę tlenku metalu, która selektywnie pochłania cząsteczki wody z przepływającego gazu, co bezpośrednio zmienia impedancję elektryczną całego komponentu. Zmiany te są ściśle skorelowane z wartością punktu rosy.

- **Zalety:** Możliwość pomiaru ekstremalnie niskich wartości punktu rosy – nawet do $-110^\circ\text{C } T_d$ – z zadowalającą precyzją na poziomie $\pm 2^\circ\text{C}$. Średni koszt zakupu wynosi od 1,5 do 2 tys. €.
- **Wady:** Sensory te ulegają natychmiastowemu, trwałemu uszkodzeniu lub drastycznemu rozkalibrowaniu w przypadku zalania wodą, ponieważ nadmiar wilgoci gwałtownie przyspiesza procesy utleniania struktury pomiarowej.
- **Ważna uwaga laboratoryjna:** Choć producenci deklarują zdolność pomiarową do $-110^\circ\text{C } T_d$, to akredytowane laboratoria wzorcowe posiadają możliwości techniczne pozwalające potwierdzić poprawność tego pomiaru wyłącznie do temperatury $-90^\circ\text{C } T_d$.

3. Przetworniki z czujnikami pojemnościowymi

Metoda ta konstrukcyjnie wywodzi się z klasycznego pomiaru wilgotności względnej, jednak reżim wykonania i precyzja sensorów stawiają przed tą technologią zupełnie inne, rygorystyczne wymagania. Wynik temperatury punktu rosy jest w tym wypadku precyzyjnie wyliczany ze wzoru matematycznego, gdzie bezpośrednimi danymi wejściowymi są

”Zaawansowane przetworniki pojemnościowe oferują najlepszy stosunek ceny do precyzji i powtarzalności.



mierzona wilgotność względna oraz dokładna temperatura medium.

- **Zalety:** Optymalna cena (od 900 do 2000 €), szeroki zakres pomiarowy (standardowo do -70°C) oraz wysoka powtarzalność i dokładność na poziomie $\pm 2^\circ\text{C}$. Z tego względu jest to technologia najczęściej i najchętniej wybierana w aplikacjach przemysłowych.



Rysunek 3
Przetwornik wilgotności i temperatury HTS401

Z punktu widzenia systemów sterowania, oczekiwana dokładność wyznaczonego punktu rosy w przemyśle nie powinna być gorsza niż $\pm 2^\circ\text{C}$.

Przyjrzyjmy się dwóm skrajnym scenariuszom pomiarowym:

1. Pomiar w warunkach standardowych:

Przy rzeczywistych parametrach gazu RH = 17% oraz $T = 23^\circ\text{C}$, kalkulacja zwraca punkt rosy na poziomie $T_d = -3,3^\circ\text{C}$. Uwzględniając błędy czujnika ($\pm 2,5\%$ RH oraz $\pm 0,3^\circ\text{C}$) końcowa dokładność obliczonego punktu rosy wynosi $\pm 1,98^\circ\text{C}$. Rezultat ten w pełni spełnia kryteria przemysłowe.

2. Pomiar w medium osuszonym:

Jeśli spróbujemy zejść w niższe zakresy, wymagania stają się niemożliwe do spełnienia dla zwykłego urządzenia, co obrazuje poniższa tabela matematycznej propagacji błędów (dla założeń temperatury otoczenia 20°C i ciśnienia 1013 mbar):

Oczekiwany punkt rosy (T_d)	Odpowiadająca wilgotność względna (Uw %RH)	Wymagana dokładność $\pm T_d$	Wymagana precyzja czujnika wilgotności ($\pm U[\%RH]$)
-20°C	5,37	2°C	0,93
-30°C	2,18	2°C	0,41
-40°C	0,81	2°C	0,17
-50°C	0,28	2°C	0,06
-60°C	0,08	2°C	0,02
-70°C	0,02	2°C	0,01
-80°C	0,01	2°C	0,002

Tabela 2

Oczekiwane dokładności pracy oraz przeliczeń

Analiza tabeli prowadzi do jednoznacznych wniosków – punkt rosy na poziomie -40°C T_d odpowiada zaledwie 0,81% RH. Wartość ta w żaden sposób nie może być poprawnie kontrolowana przez urządzenie klasyczne, gdyż wymaga dokładności $\pm 0,17\%$ RH.

Idąc dalej: kluczowy dla farmacji punkt -60°C T_d (czyli 0,08% RH) wymusza zastosowanie przetwornika, którego wewnętrzny sensor mierzy wilgotność z dokładnością rzędu aż $\pm 0,02\%$ RH.



PUNKT ROSY JAKO UNIWERSALNY PARAMETR

Analiza matematyczna propagacji błędów jednoznacznie dowodzi, że w zakresie ekstremalnie niskich wilgotności (poniżej 5% RH) tradycyjne czujniki klimatyczne tracą rację z powodu zbyt dużej niepewności pomiarowej. Przejście na pomiar temperatury punktu rosy (T_d) pozwala na jednoznaczne kontrolowanie wilgotności (suchości) mediów w kluczowych gałęziach przemysłu, takich jak farmacja czy zaawansowane układy sprężonego powietrza.

W tym obszarze, spośród dostępnych metod metrologicznych (schłodzone lustro, tlenki metali, czujniki pojemnościowe), to zaawansowane przetworniki pojemnościowe oferują najlepszy stosunek ceny do precyzji i powtarzalności w realiach ciągłego monitoringu przemysłowego.

Do precyzyjnego wyznaczania niepewności w konkretnych punktach pracy służą zaawansowane kalkulatory online udostępniane przez producentów



ANALIZA MATEMATYCZNA I KONSTRUKCYJNA: DLACZEGO STANDARDOWY CZUJNIK RH ZAWODZI?

Aby uanoocnić, dlaczego klasyczny przetwornik klimatyczny nie poradzi sobie z pomiarem niskiego punktu rosy, należy zestawzić jego parametry z równaniem matematycznym. Przyjmijmy do analizy przeciętną klasę przetwornik wilgotności względnej, charakteryzujący się standardową dokładnością pomiaru na poziomie $\pm 2,5\%$ RH oraz dokładnością pomiaru temperatury $\pm 0,3^\circ\text{C}$.

Podstawowy wzór stosowany do kalkulacji temperatury punktu rosy ma następującą postać:

$$T_d = \sqrt[8]{\frac{H}{100}} \cdot [112 + (0,9 \cdot T)] + (0,1 \cdot T) - 112$$

Gdzie:

T_d – temperatura punktu rosy [$^\circ\text{C}$]

T – temperatura punktu rosy [$^\circ\text{C}$]

H – wilgotność względna w %

Wartości wilgotności i temperatury wpływają jednoznacznie na wynik obliczenia punktu rosy. Równocześnie niepewności składowych wpływają nieliniowo na końcowy wynik wyznaczenia niepewność punktu rosy.