

POMIARY WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH

Dr inż. Eligiusz PAWŁOWSKI
Politechnika Lubelska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Prezentacja do wykładu dla EMST

Semestr letni

Wykład nr 11



Prawo autorskie

Niniejsze materiały podlegają ochronie zgodnie z **Ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych** (Dz.U. 1994 nr 24 poz. 83 z późniejszymi zmianami).

Materiał ten udostępniam **do celów dydaktycznych** jako materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu Pomiar Wielkości Nielektrycznych prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Mogą z nich również korzystać inne osoby zainteresowane tą tematyką. Do tego celu materiały te można **bez ograniczeń przeglądać, drukować i kopiować wyłącznie w całości**.

Wykorzystywanie tych materiałów bez zgody autora w inny sposób i do innych celów niż te, do których zostały udostępnione, **jest zabronione**.

W szczególności **niedopuszczalne jest**: usuwanie nazwiska autora, edytowanie treści, kopiowanie fragmentów i wykorzystywanie w całości lub w części do własnych publikacji.

Eligiusz Pawłowski

Uwagi dydaktyczne

Niniejsza prezentacja stanowi **tylko i wyłącznie materiały pomocnicze** do wykładu z przedmiotu Pomiary Wielkości Nielektrycznych prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Udostępnienie studentom tej prezentacji nie zwalnia ich z konieczności samodzielnego sporządzania **notatek z wykładów** ani też nie zastępuje studiowania obowiązujących podręczników.

Tym samym zawartość niniejszej prezentacji w szczególności **nie może być** traktowana jako zakres materiału obowiązujący na kolokwium zaliczeniowym.

Obowiązujący jest **zakres materiału wyłożony podczas wykładu** oraz zawarty w odpowiadających mu fragmentach **podręczników** podanych w wykazie literatury do wykładu.

Eligiusz Pawłowski

Tematyka wykładu

Wilgotność powietrza, cele wykonywania pomiarów

Prawo Daltona, ciśnienie cząstkowe pary wodnej

Temperatura punktu rosy, ciśnienie nasycenia pary wodnej

Miary wilgotności gazów

Metody pomiaru wilgotności gazów

Przykłady czujników wilgotności gazów

Cele pomiaru wilgotności powietrza i ciał stałych

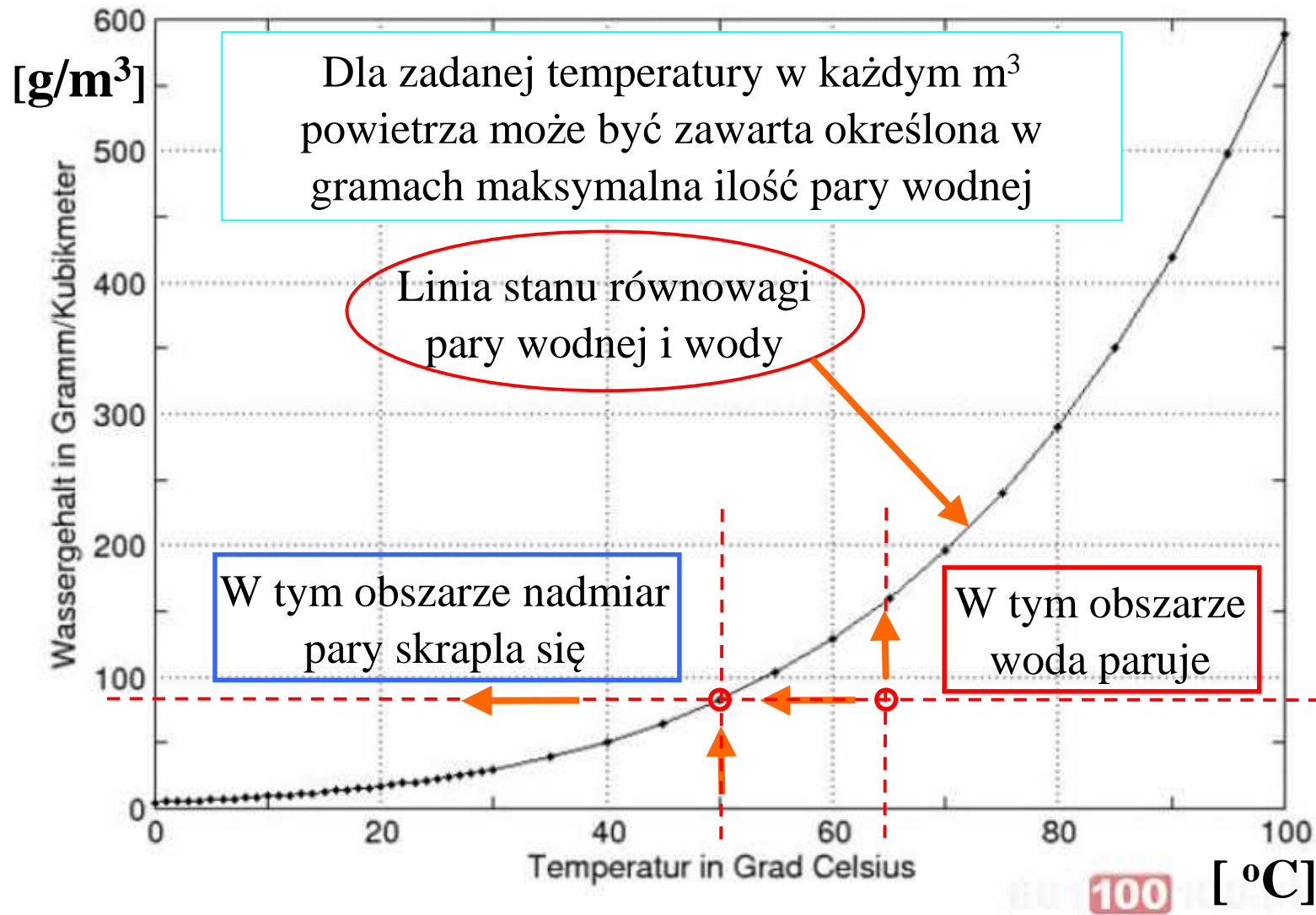
- ❑ Meteorologia - prognozowanie pogody, przewidywanie opadów, mgły, szronu itp.,
- ❑ Wentylacja i klimatyzacja - ocena komfortu w pomieszczeniach zamkniętych, pomiary skuteczności wentylacji,
- ❑ Przemysł - nadzorowanie procesów technologicznych, kontrola wilgotności gazów technologicznych, warunki magazynowania,
- ❑ Budownictwo - kontrola jakości wykonania (wylewki betonowe, tynki, konstrukcje drewniane, wykładziny podłogowe itp.),
- ❑ Przechowywanie żywności - wilgotność zboża, mąki,
- ❑ Inne: nadzór procesu suszenia drewna, tytoniu, słomy, kontrola wilgotności gleby, warunków wegetacji roślin w szklarniach ...

Wstęp, uwagi ogólne o wilgotności powietrza

Wilgotność powietrza jest określona poprzez ilość pary wodnej zawartej w powietrzu. Maksymalna wilgotność, czyli maksymalna ilość pary wodnej w określonej ilości powietrza silnie zależy od temperatury powietrza. Im wyższa temperatura powietrza, tym więcej pary wodnej może się w nim znajdować.

Przekroczenie maksymalnej wilgotności (np. w wyniku obniżenia temperatury powietrza) powoduje skraplanie się pary wodnej. Tak powstaje np. wieczorna rosa: nagrzane w dzień powietrze zawiera w sobie dużo pary wodnej, wieczorem powietrze ochładza się i spada przez to maksymalna ilość pary wodnej, która może być w nim zawarta. Nadmiar pary wodnej skrapla się, tworząc na powierzchni ziemi kropelki rosy. Zjawisko to pojawia się gdy zostanie osiągnięta tzw. **temperatura punktu rosy**.

Maksymalna ilość pary wodnej w powietrzu w g/m³



Prawo Daltona, ciśnienie cząstkowe (parcjalne)

W mieszaninie gazów (takim jak jest również powietrze) całkowite ciśnienie p_b (ciśnienie barometryczne, atmosferyczne) jest sumą **ciśnień cząstkowych** poszczególnych składników p_i :

$$p_b = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{Ar} + \dots + p_w$$

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej p_w nie może być dowolne, jej maksymalna wartość jest zależna od temperatury powietrza. Gdy ciśnienie cząstkowe pary wodnej osiąga wartość maksymalną mówimy, że para wodna zawarta w powietrzu jest **nasycona**.

Temperatura punktu rosy, ciśnienie nasycenia

Dla danej wartości ciśnienia cząstkowego pary wodnej p_w istnieje ściśle określone temperatura, przy której następuje skraplanie się pary wodnej, jest to **temperatura punktu rosy T_r** . W temperaturze punktu rosy para wodna zawarta w powietrzu staje się **nasycona**.

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nie może być więc dowolne, dla każdej temperatury T i ciśnienia powietrza p jest ściśle określona wartość maksymalnego ciśnienia cząstkowego pary wodnej, jest to **ciśnienie nasycenia p_n** :

$$p_n = f_1(p) \cdot f_2(T)$$

Wzór Magnusa

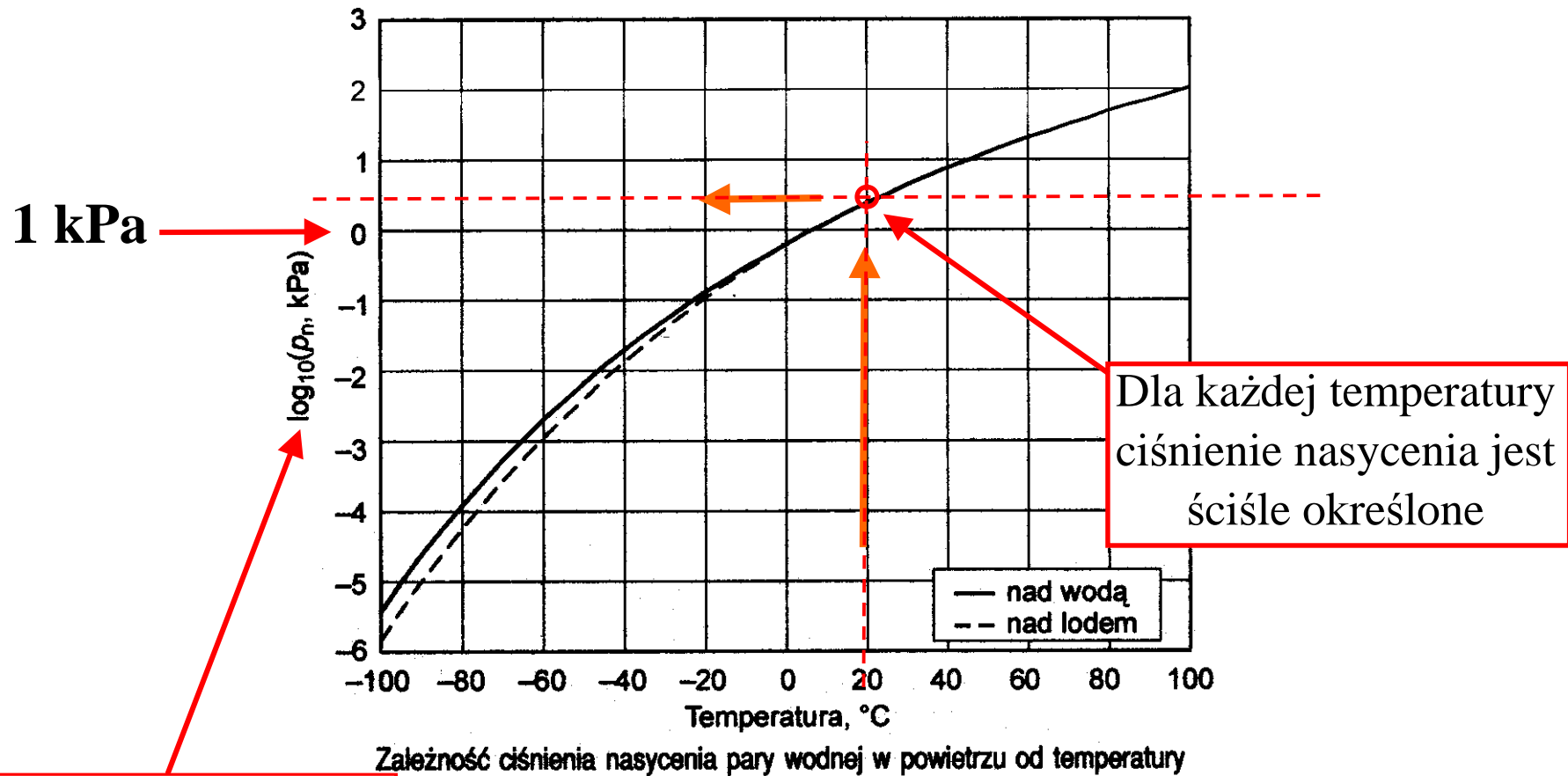
Zależności funkcyjne f_1 i f_2 są wyznaczone eksperymentalnie. Przykładowe wyrażenia mają postać:

$$f_1(p) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-5} p - 0,74 \frac{1}{p}$$

$$f_2(T) = 0,6112 e^{\frac{17,62T}{243,12+T}}$$

Druga z zależności jest to tzw. **wzór Magnusa**, obowiązujący dla mieszaniny pary wodnej i powietrza znajdującej się nad powierzchnią wody. Stosowany jest w meteorologii.

Ciśnienie nasycenia w funkcji temperatury



Bardzo duże zmiany,
skala logarytmiczna

Wielkości opisujące wilgotność powietrza i gazów

Sposoby charakteryzowania wilgotności powietrza:

- ❑ **prężność pary wodnej** - ciśnienie cząstkowe p_w (parcjalne), wywierane przez parę wodną w powietrzu - [Pa],
- ❑ **wilgotność względna** - wyrażony w procentach stosunek ciśnienia cząstkowego pary wodnej zawartej w powietrzu do prężności pary wodnej nasyconej w tej samej temperaturze - [%],
- ❑ **wilgotność bezwzględna** - masa pary wodnej wyrażona w gramach zawarta w 1 m³ powietrza - [g/ m³],
- ❑ **wilgotność właściwa** - masa pary wodnej wyrażona w gramach zawarta w 1 kg powietrza (powietrza ważonego razem z parą wodną) - [g/kg].

Wilgotność względna RH

Wilgotność względna RH (*Relative Humidity*) jest to stosunek ciśnienia cząstkowego pary wodnej p_w w powietrzu do ciśnienia nasycenia p_n w danych warunkach (temperatura, ciśnienie atmosferyczne, obecność wody w innych stanach skupienia):

$$RH = \frac{p_w}{p_n} \cdot 100\%$$

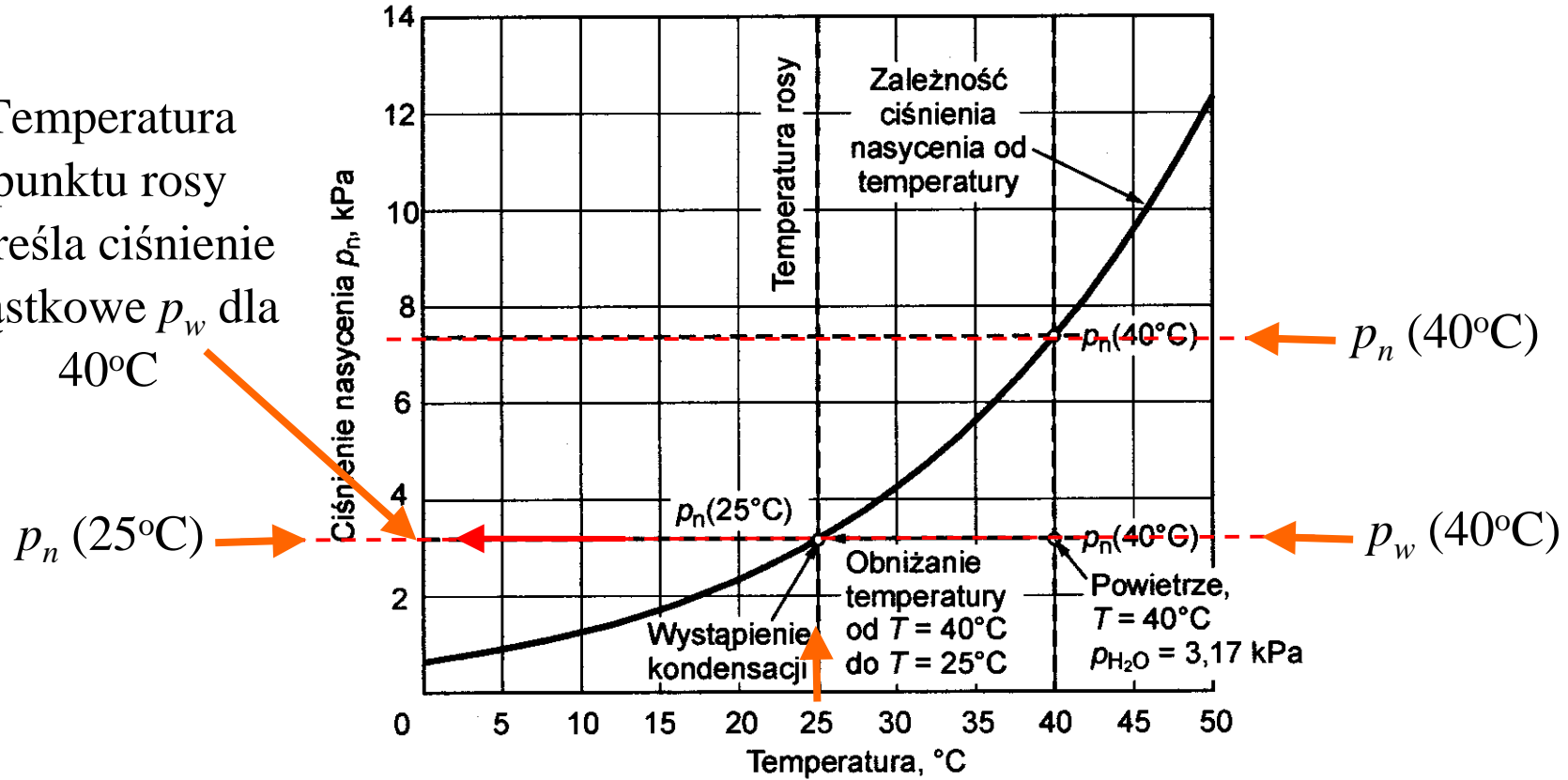
Wilgotność względna RH jest najczęściej stosowaną wielkością do wyrażania wilgotności powietrza

Metody pomiaru wilgotność powietrza i gazów

- ❑ **metody grawimetryczne** – usunięcie wilgoci z powietrza i jej zważenie (wymrażanie, pochłonięcie przez absorbent itp.) ,
- ❑ **wyznaczenie temperatury punktu rosy** – schładzanie wypolerowanego lusterka i detekcja powstającej rosy,
- ❑ **wyznaczanie potrójnego punktu roztworu soli** – pomiar temperatury czujnika chlorolitowego,
- ❑ **metody psychrometryczne** – pomiar różnicy temperatur termometru suchego i mokrego,
- ❑ **zmiana parametrów fizycznych ciała higroskopijnego** – pomiar wymiarów geometrycznych, rezystancji, stałej dielektrycznej itp.
- ❑ **inne metody** – optyczne, chemiczne,

Temperatura punktu rosy

Temperatura punktu rosy określa ciśnienie cząstkowe p_w dla 40°C



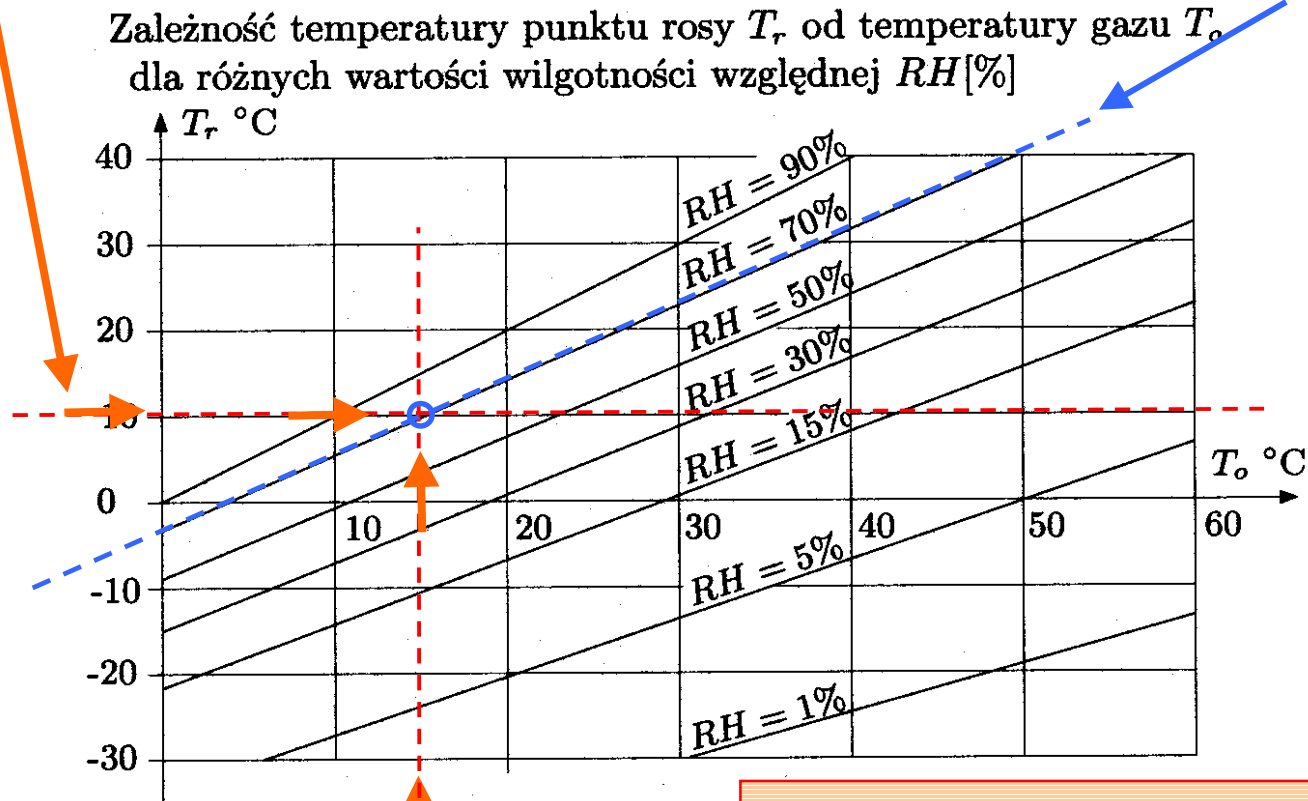
Ilustracja pojęcia temperatury punktu rosy

$$RH = \frac{p_w}{p_n} \cdot 100\% = \frac{p_n(25^\circ\text{C})}{p_n(40^\circ\text{C})} \cdot 100\% = \frac{3,17}{7,39} \cdot 100\% = 42,9\%$$

Temperatura punktu rosy – wyznaczanie wilgotności

Temperatura punktu rosy

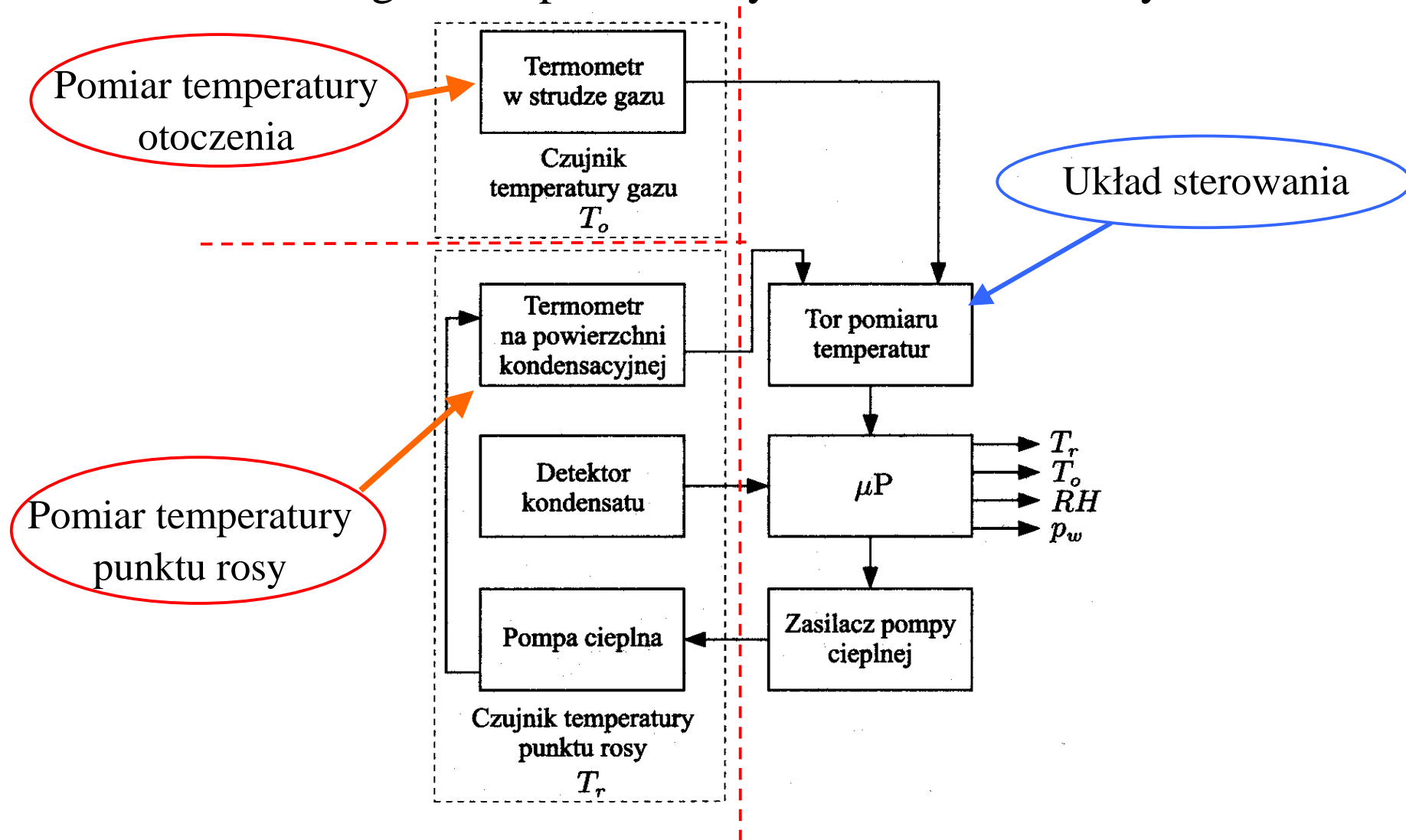
Wilgotność względna



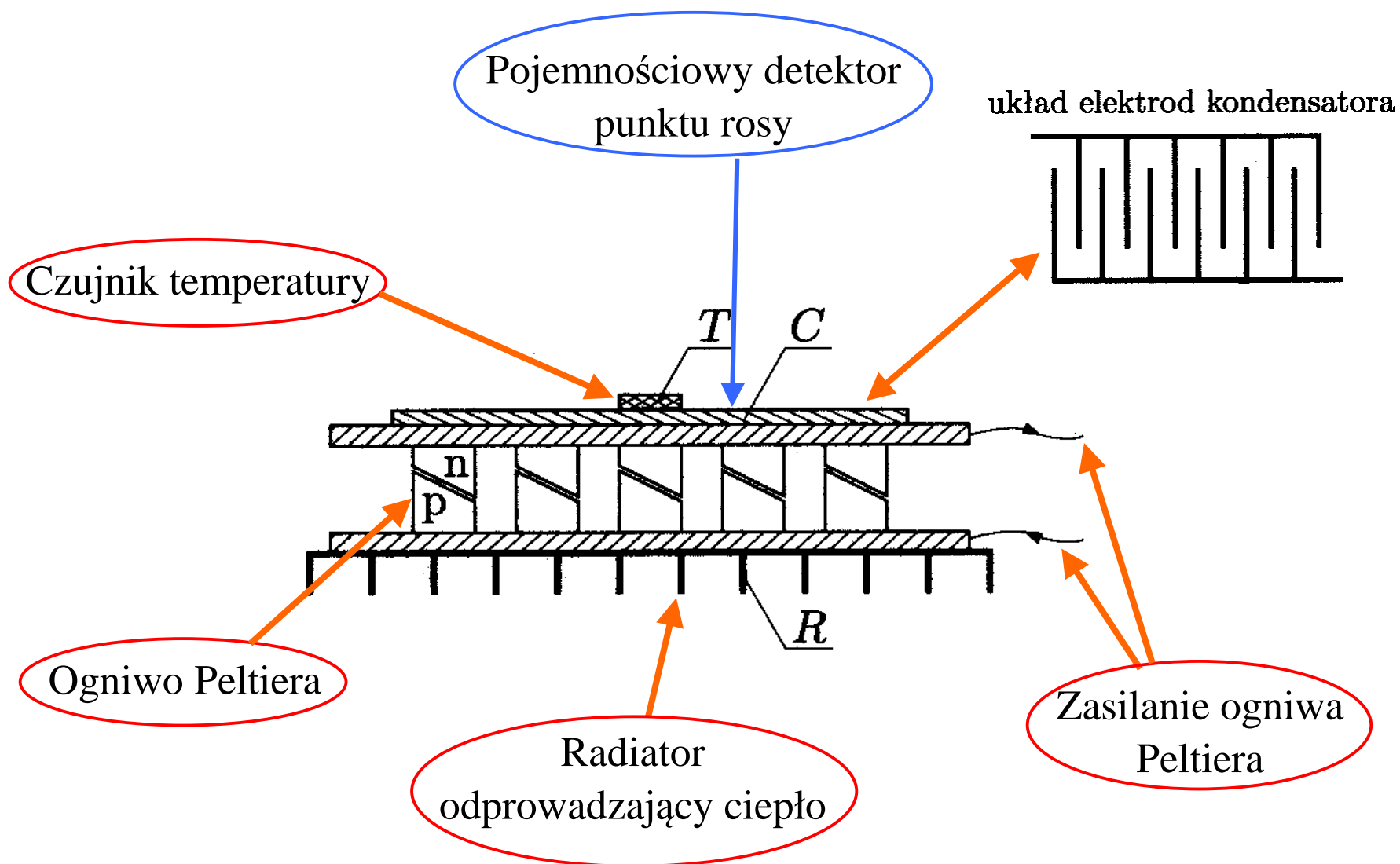
Temperatura otoczenia

Temperatura otoczenia i temperatura punktu rosy jednoznacznie określają wilgotność względną

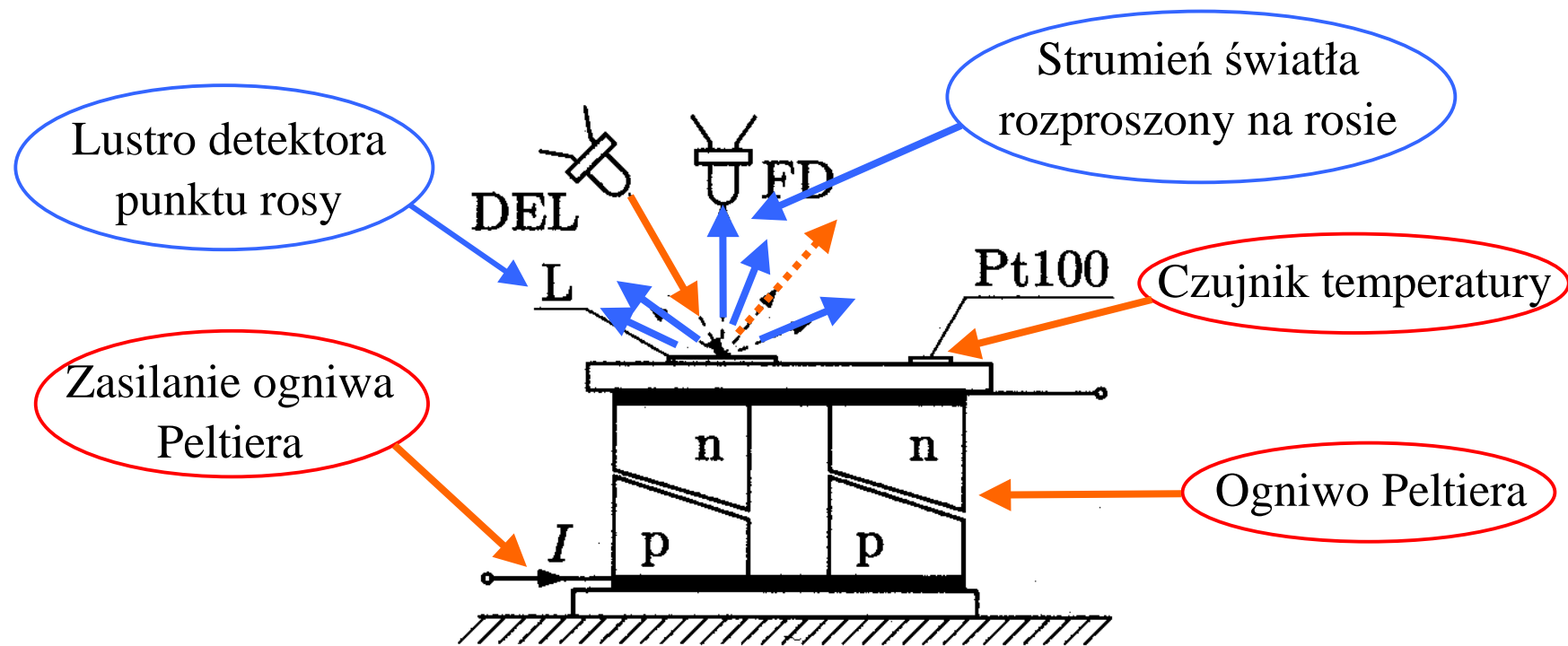
Higrometr punktu rosy – schemat blokowy



Detekcja punktu rosy – czujnik pojemnościowy

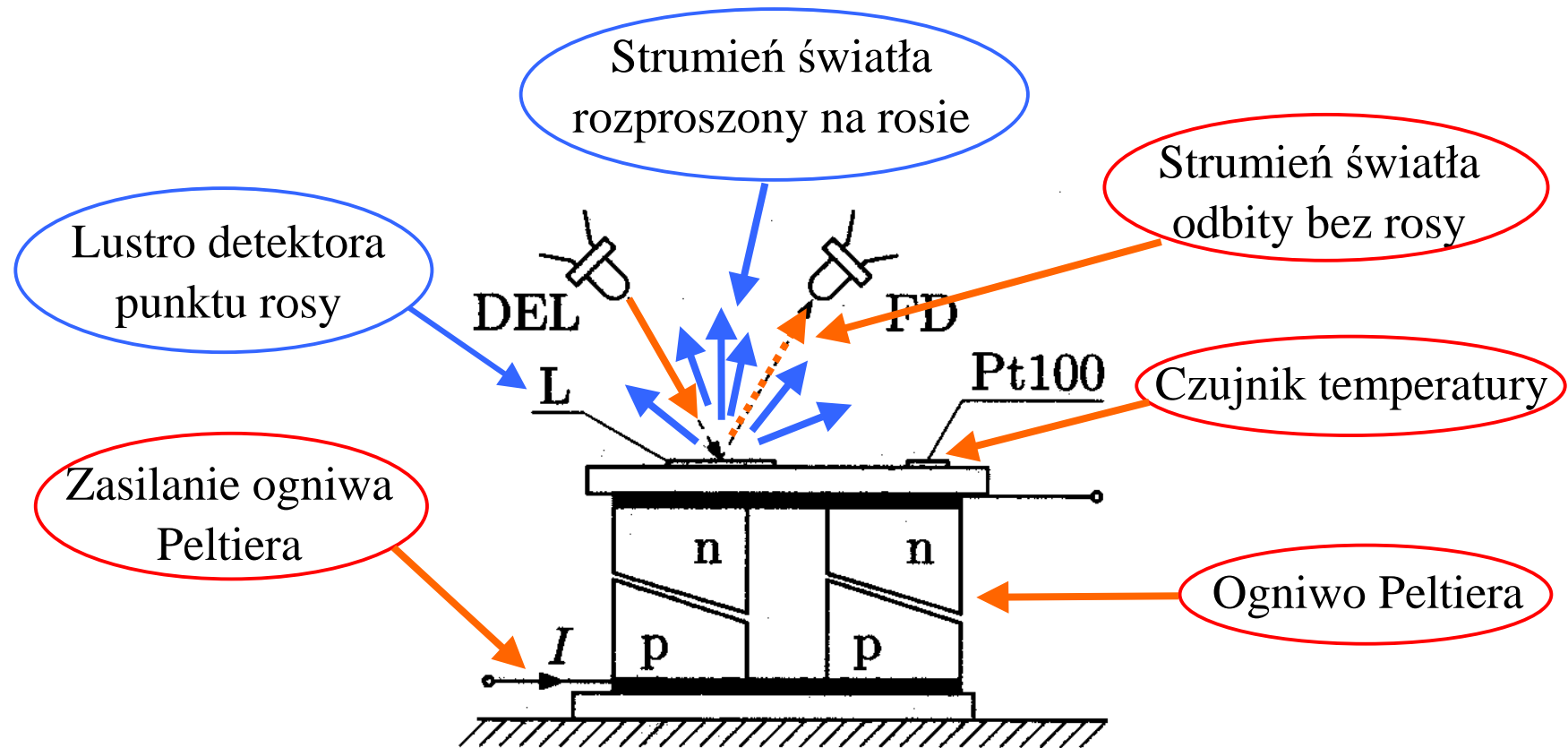


Detekcja punktu rosy – czujnik optyczny 1



Pojawiająca się rosa rozprasza strumień światła i zapewnia silne sprzężenie optyczne diody LED i fotodetektora FD

Detekcja punktu rosy – czujnik optyczny 2



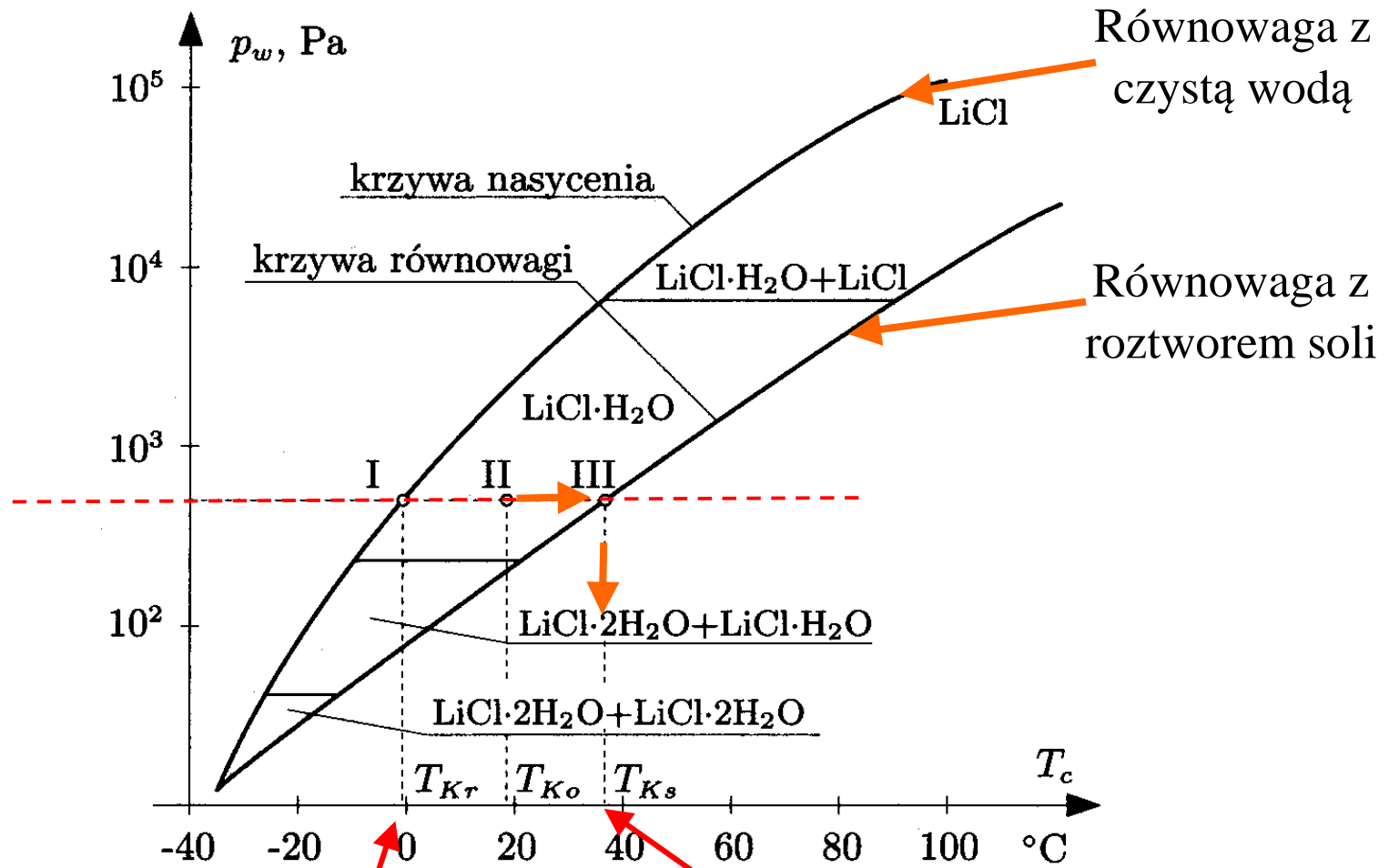
Pojawiająca się rosa rozprasza strumień światła i powoduje zmniejszenie sprzężenia optycznego diody LED i fotodetektora FD

Higrometr chlorolitowy – punkt potrójny

Punkt potrójny dla roztworu soli (np. LiCl) jest to stan równowagi pomiędzy ciśnieniem cząstkowym pary wodnej p_w nad nasyconym roztworem soli, kryształkami wykrystalizowanej soli i jej roztworem nasyconym.

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej p_w nad nasyconym roztworem soli w punkcie potrójnym jest jednoznaczłą funkcją temperatury. Zależność ta nazywana jest **krzywą równowagi**, której przebieg i sens fizyczny jest analogiczny do krzywej nasycenia pary wodnej. Wyznaczenie temperatury punktu potrójnego określa wilgotność względną powietrza nad roztworem.

Higrometr chlorolitowy – zasada pomiaru

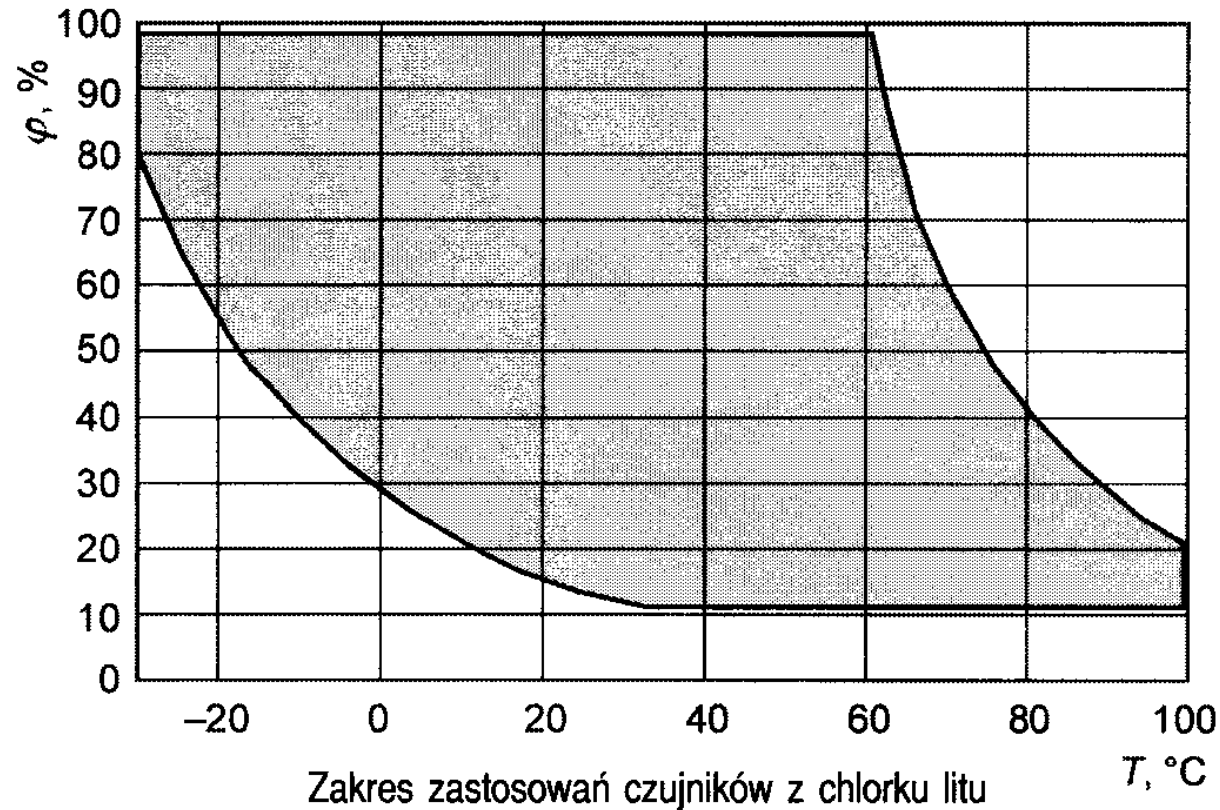


Wykres równowagi oraz nasycenia wodnego roztworu chlorolitowego

Temperatura punktu rosy

Temperatura równowagi

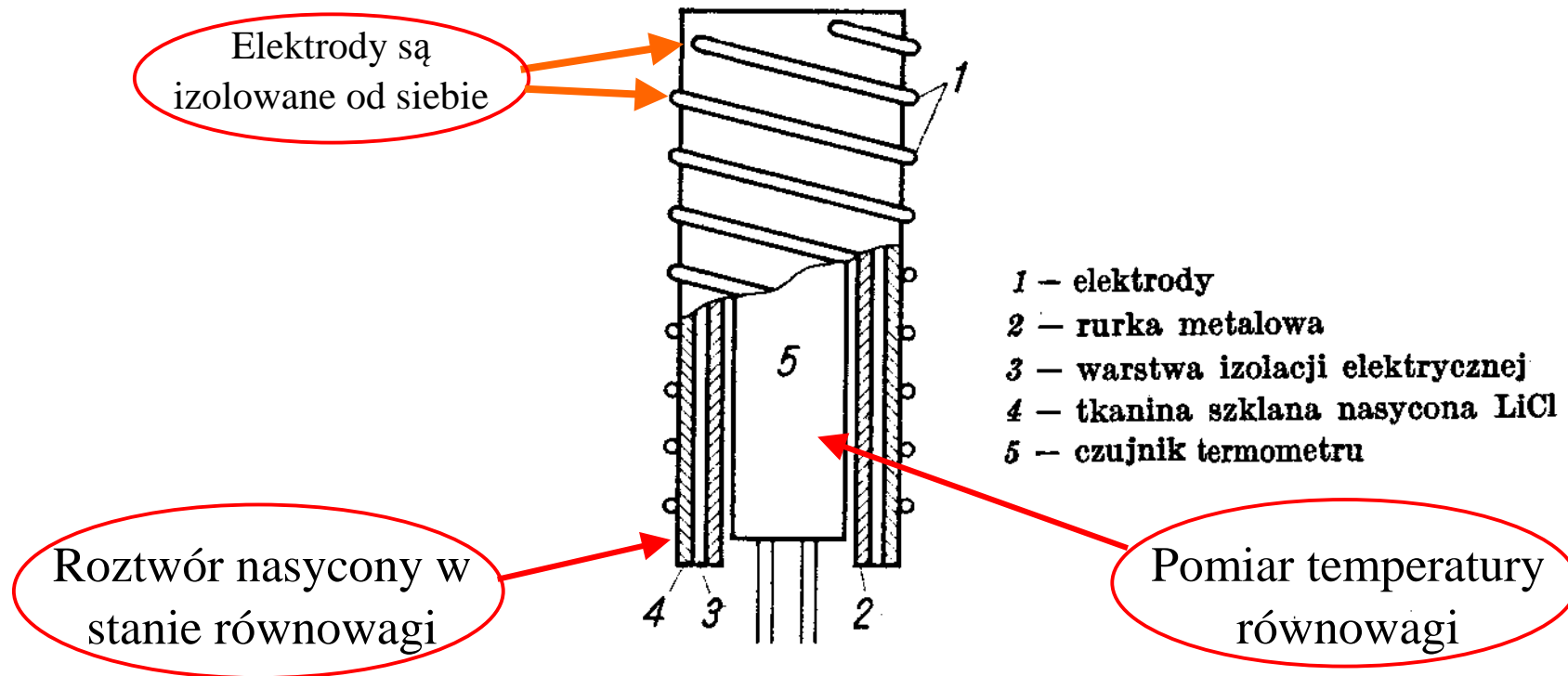
Higrometr chlorolitowy – zakres pomiarowy



Krzywa nasycenia i krzywa równowagi z roztworem określają zakres pomiarowy higrometru chlorolitowego

Higrometr chlorolitowy – konstrukcja

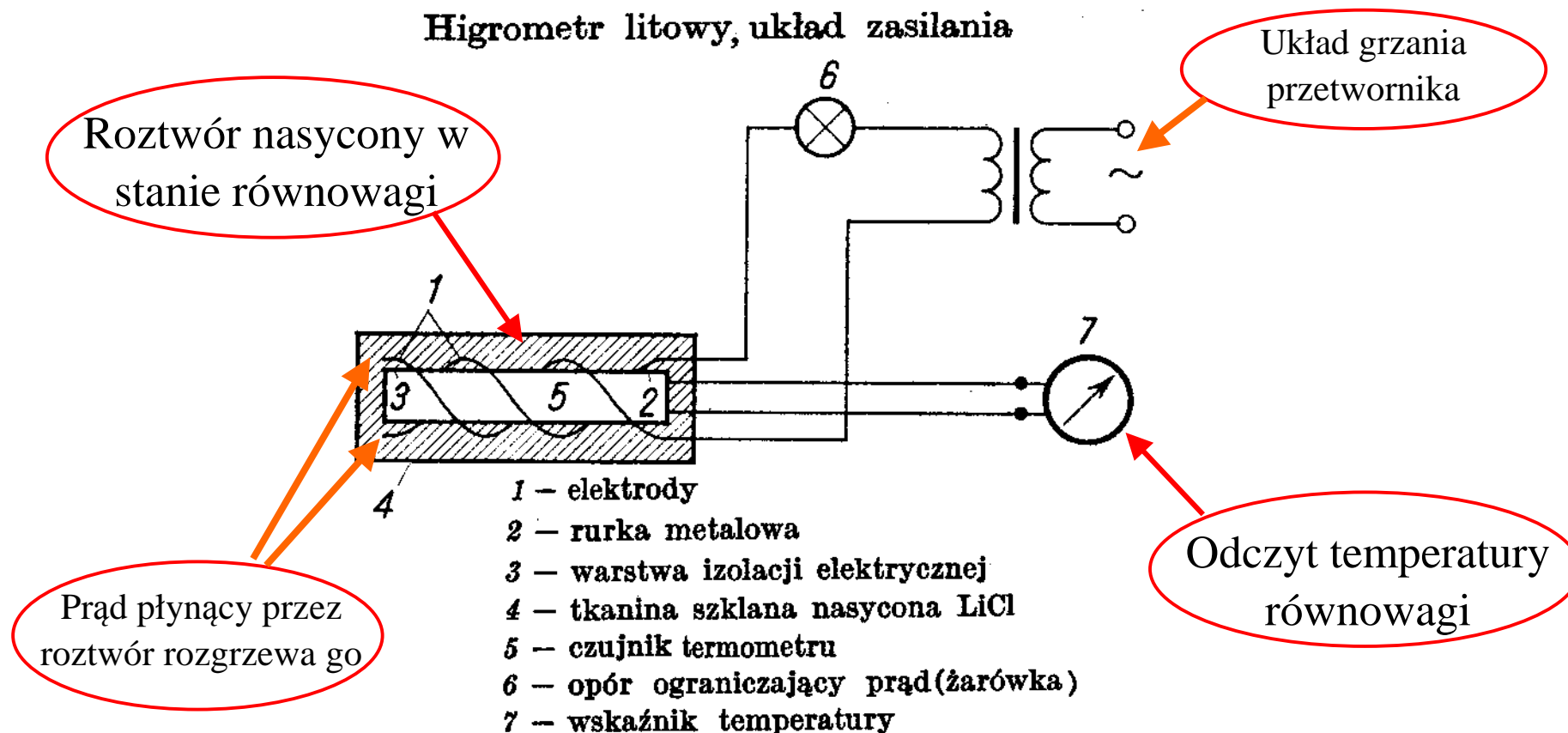
Higrometr litowy, przetwornik



Przykładowa konstrukcja przetwornika chlorolitowego

Higrometr chlorolitowy – układ pomiarowy

Higrometr litowy, układ zasilania



Układ pomiarowy przetwornika chlorolitowego

Higrometr psychrometryczny – zasada pomiaru

(gr. *psychros* - zimny, chłodny)

Metoda psychrometryczna polega na pomiarze różnicy temperatur wskazywanych przez dwa termometry: termometru suchego T_{KS} mierzącego temperaturę otoczenia oraz termometru mokrego T_{KM} – owiniętego tkaniną zwilżoną wodą. Wilgotność względna wynosi:

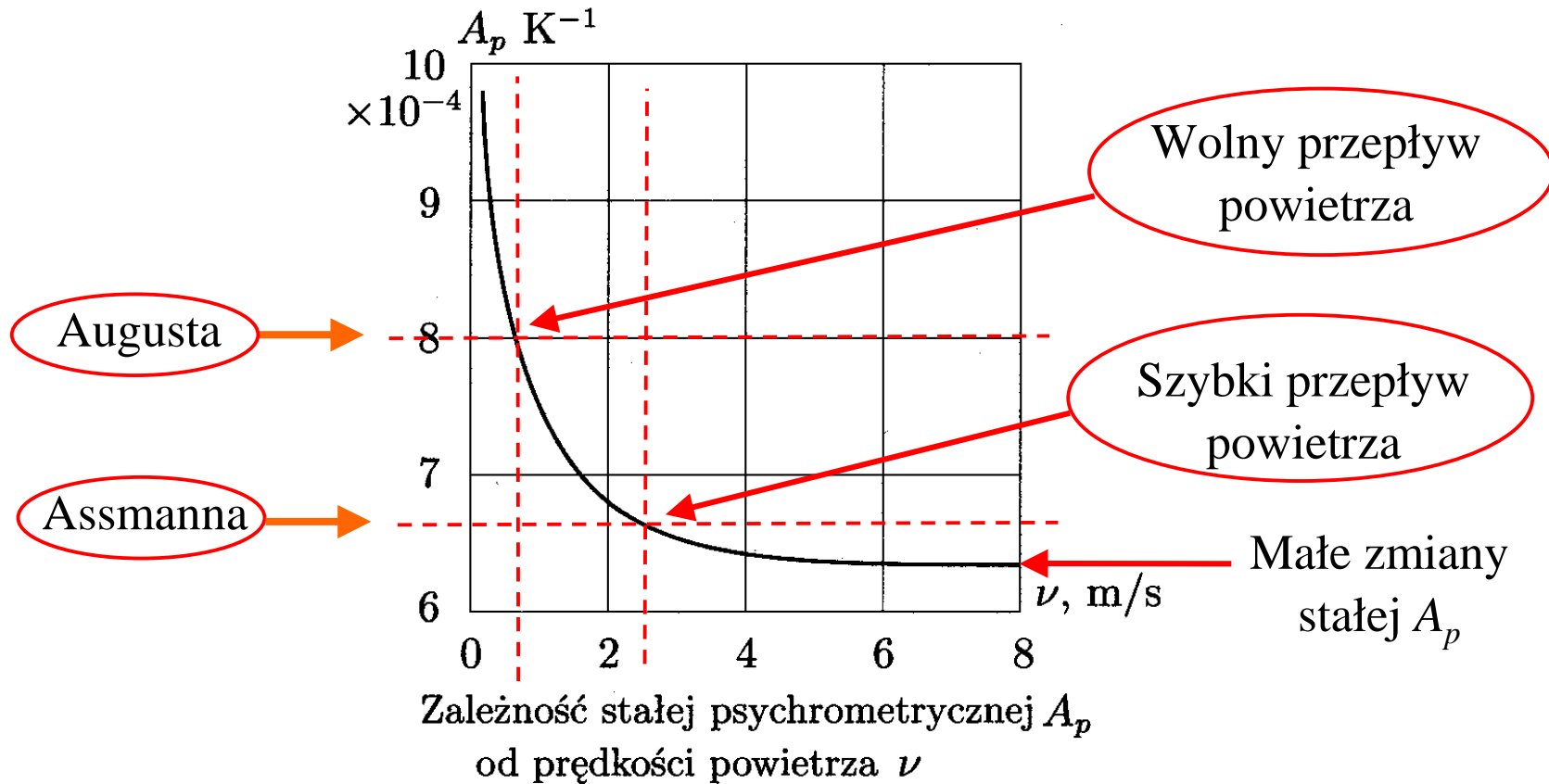
$$RH = \frac{p_w}{p_{nS}} \cdot 100\% = \frac{p_{nM} - A_p (T_{KS} - T_{KM}) p_b}{p_{nS}} \cdot 100\%$$

Diagram illustrating the psychrometric method formula with annotations:

- Blue box: ciśnienie nasycenia dla mokrego termometru (points to p_{nM})
- Green box: ciśnienie barometryczne (points to p_b)
- Red box: ciśnienie nasycenia dla suchego termometru (points to p_{nS})

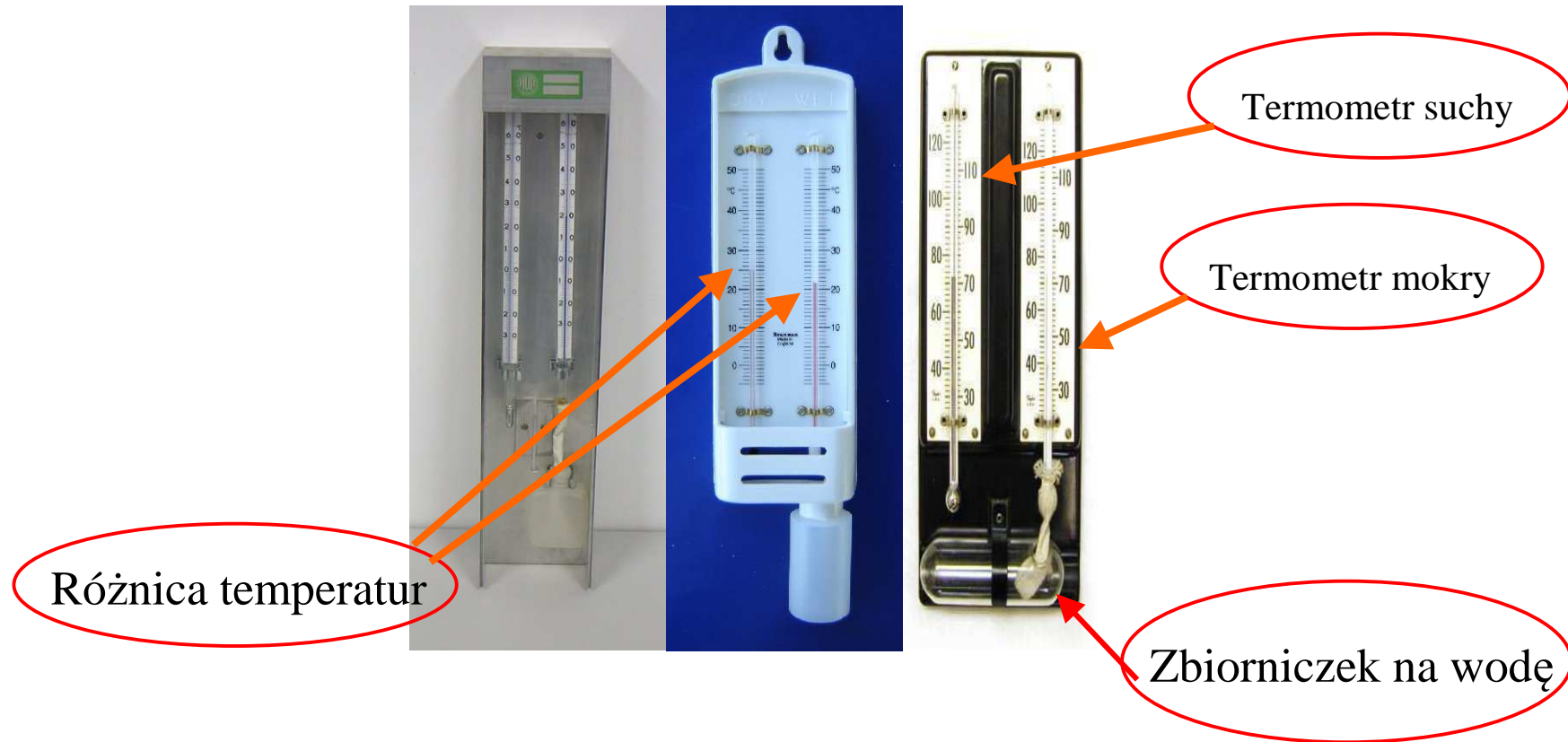
Stała psychrometryczna A_p jest zależna od szybkości przepływu powietrza wokół termometrów. W praktyce korzysta się z gotowych tablic psychrometrycznych.

Higrometr psychrometryczny, stała psychrometryczna



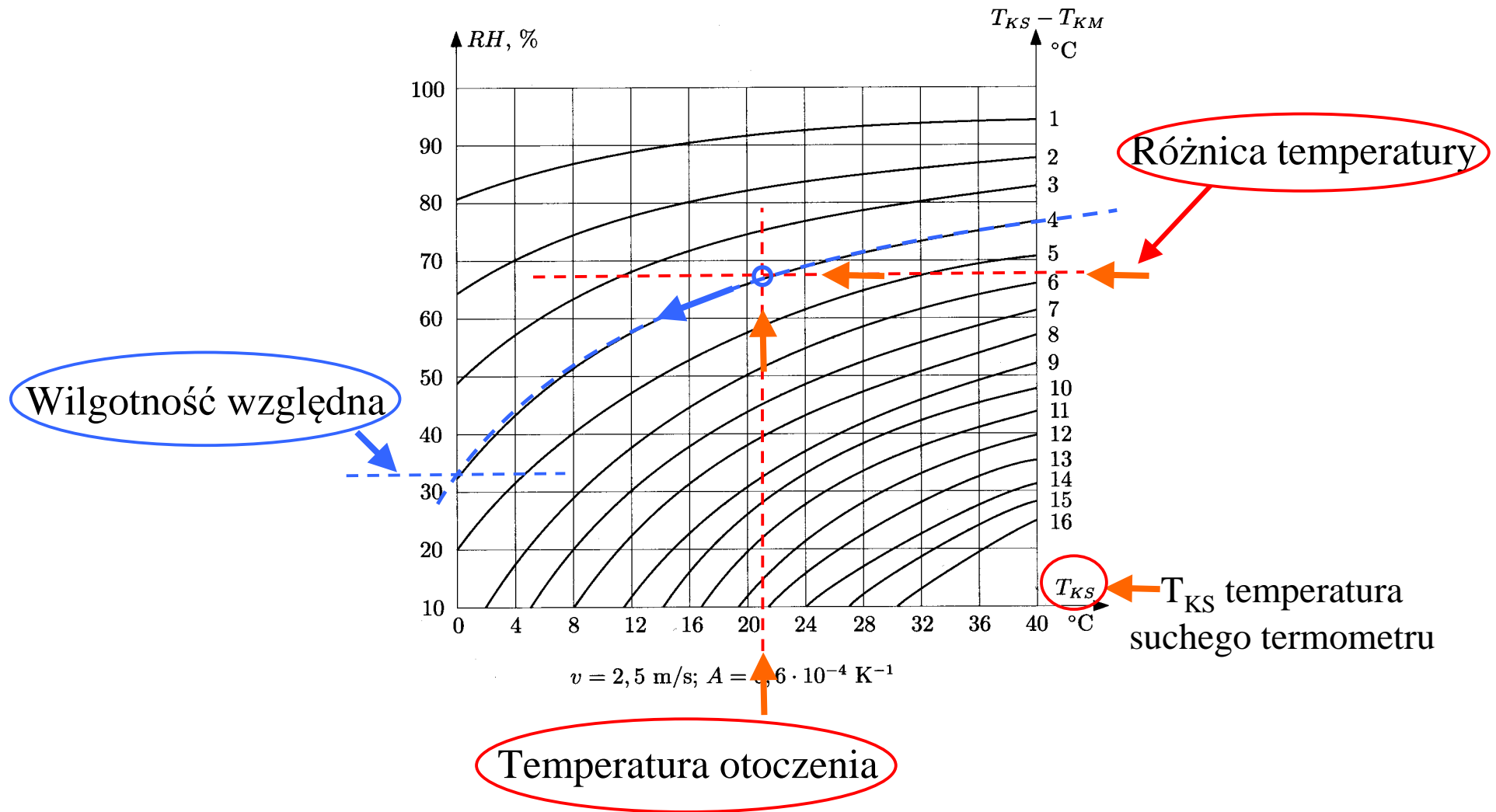
Szybkość przepływu powietrza w psychrometrze Augusta i Assmanna

Higrometr psychrometryczny Augusta

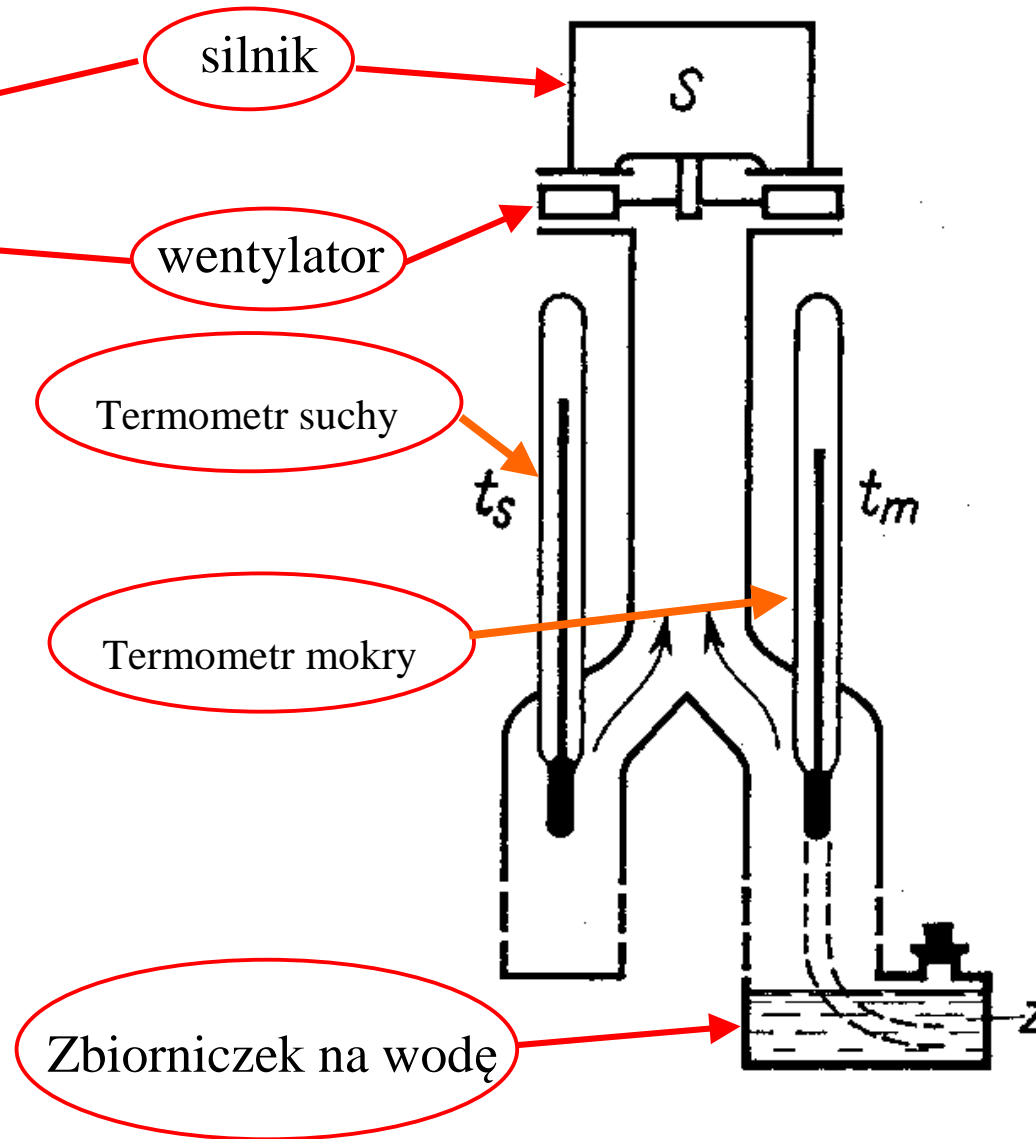


Przykładowe konstrukcje psychrometru Augusta

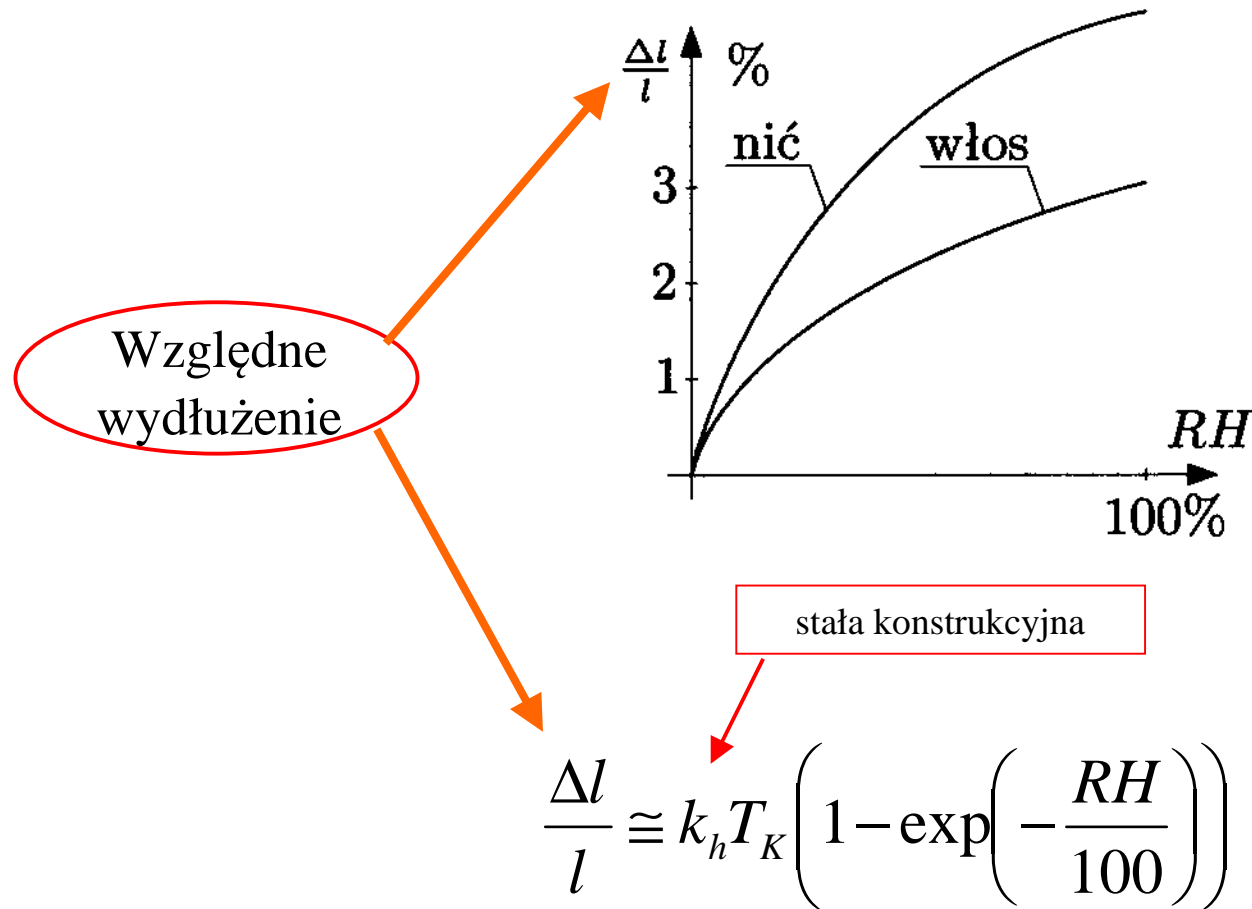
Higrometr psychrometryczny Assmanna – wykres RH



Higrometr psychrometryczny Assmanna - budowa

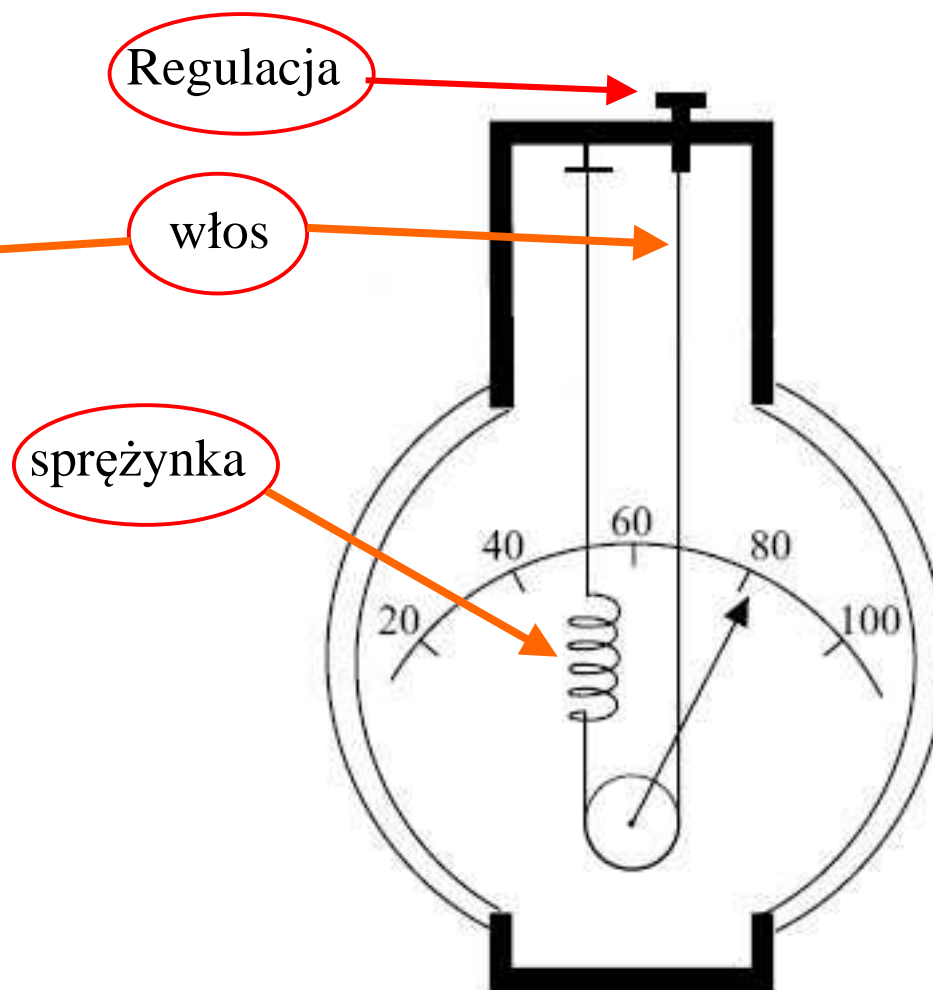
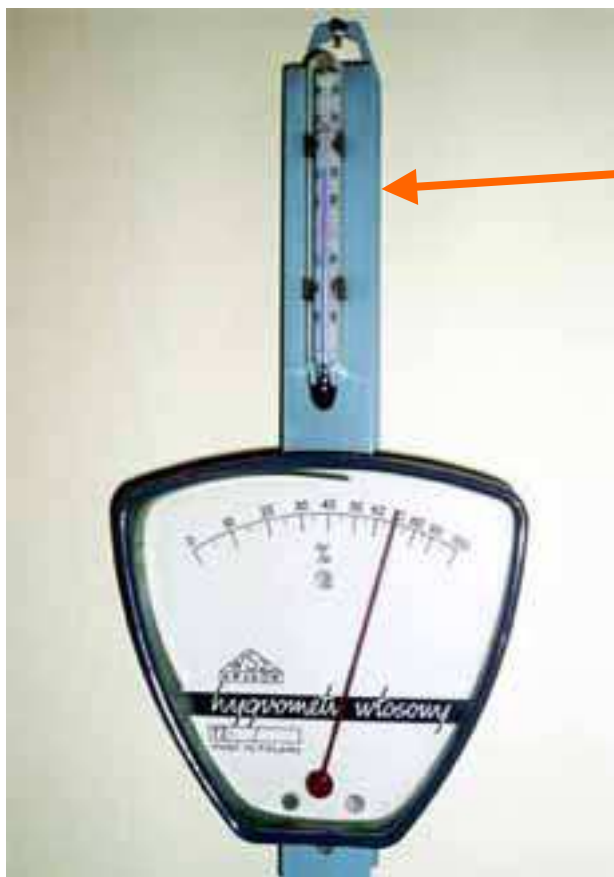


Higrometr włosowy - zasada działania



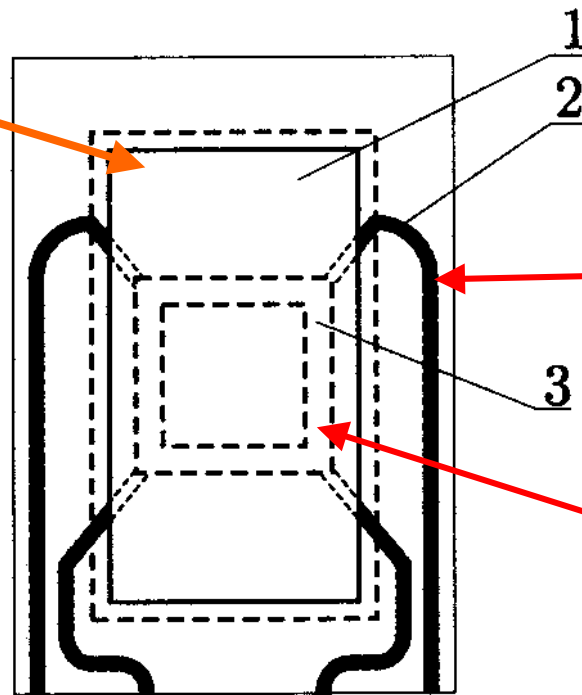
Wykorzystujemy zależność zmiany długości włosa od wilgotności

Konstrukcja higrometru włosowego



Higrometr absorpcyjny z membraną krzemową

Membrana krzemowa
pokryta higroskopijną
warstwą

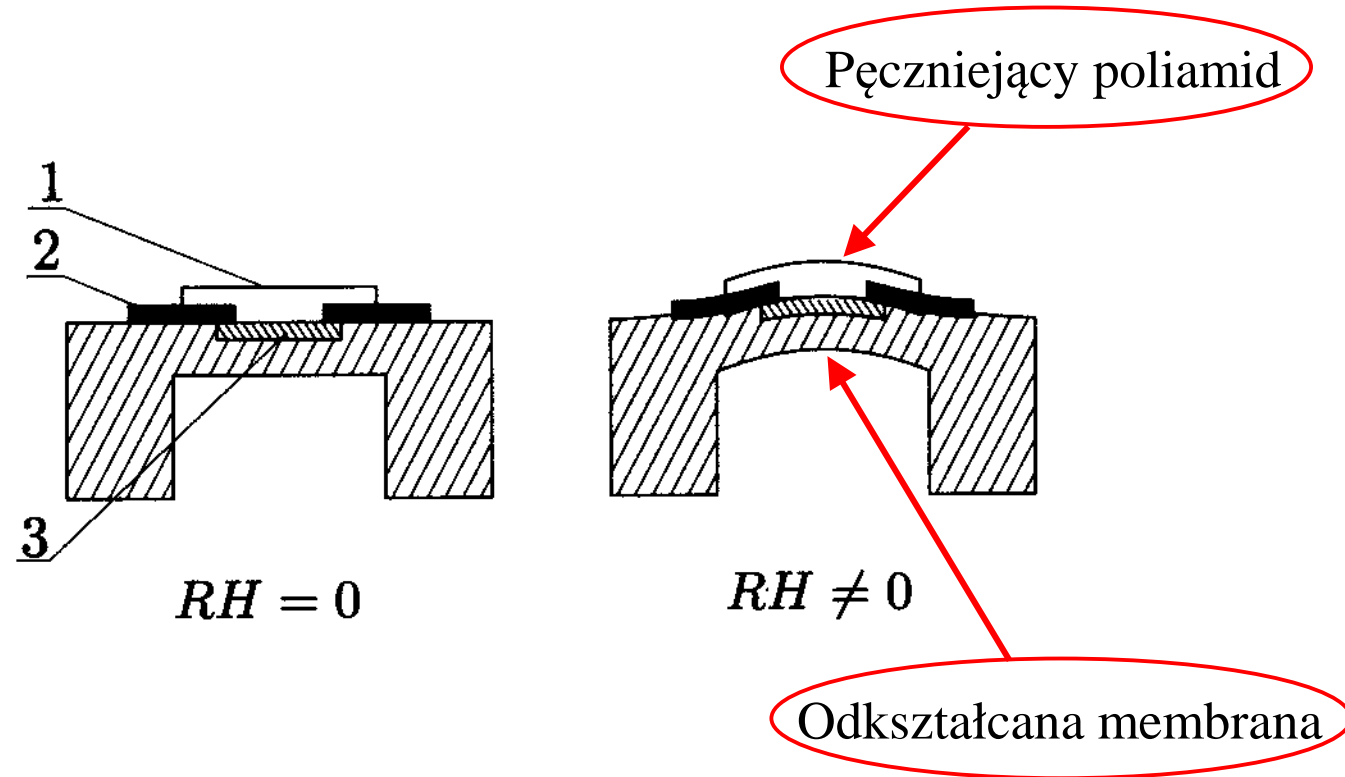


Odprowadzenia
sygnału

Piezorezystory do
pomiaru odkształceń w
układzie mostka
czteroramiennego

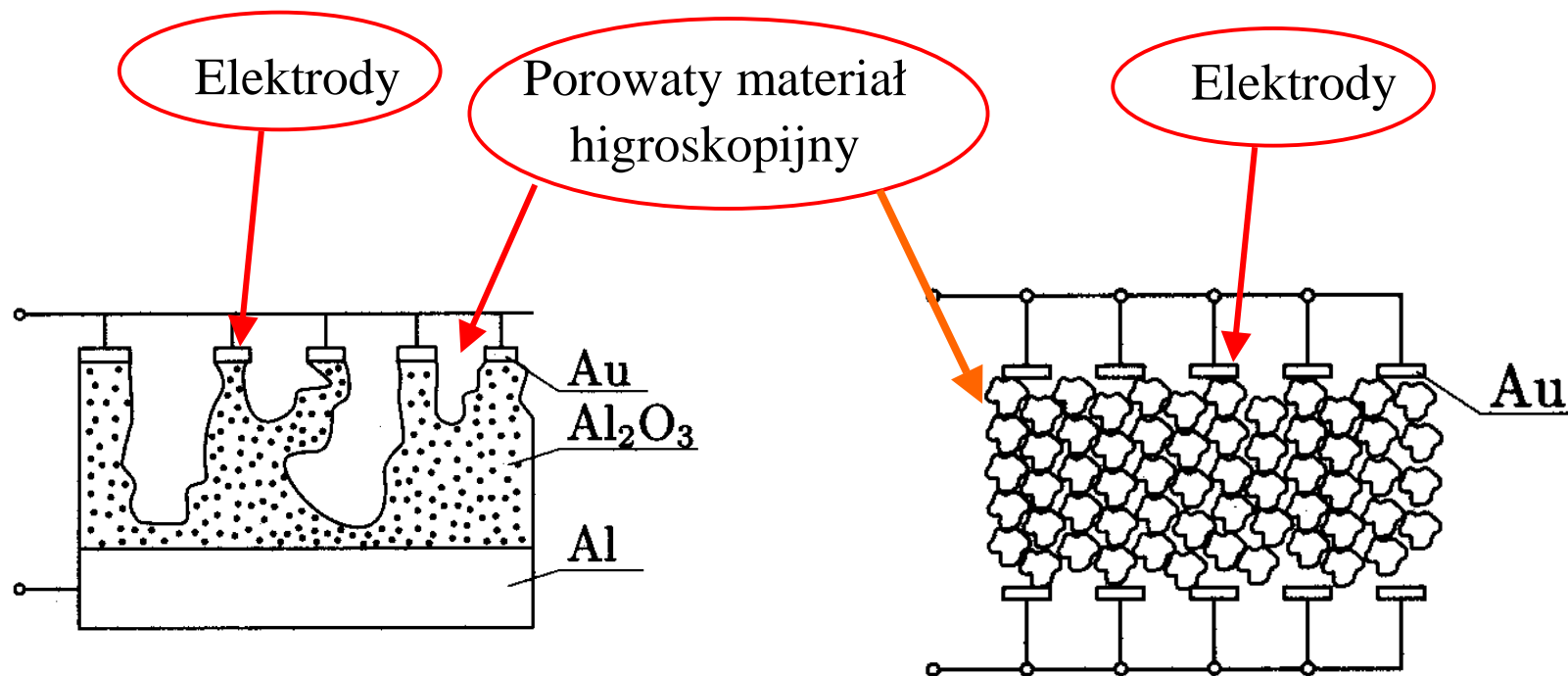
Czujnik wilgotność z membraną krzemową pokrytą materiałem higroskopijnym oraz z wbudowanymi piezorezystorami

Higrometr absorpcyjny z membraną krzemową



Zasada działania higrometru absorpcyjnego z membraną krzemową

Higrometr absorpcyjny impedancyjny - budowa



Technologia
cienkowarstwowa

Technologia proszków
spiekanych

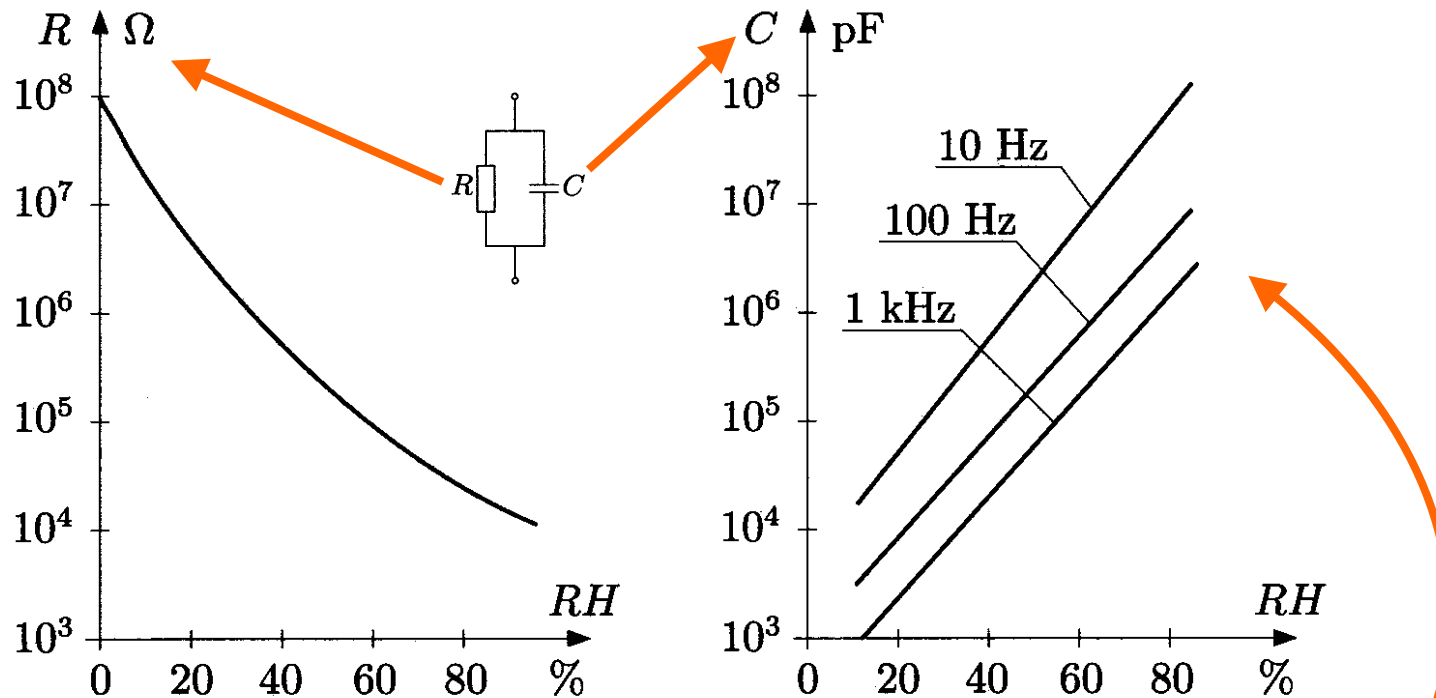
W pory materiału higroskopijnego wnikają molekuly wody zmieniając jego rezystywność i stałą dielektryczną

Higrometr absorpcyjny impedancyjny - materiały

Rezystancja wybranych czujników wilgotności przy zmianach RH od 10% do 100%

Skład	$R_{10\%}, M\Omega$	$R_{100\%}, M\Omega$
$MgCr_2O_4 - TiO_2$	10	0,01
$TiO_2 - V_2O_5$	1,3	0,04
$MgAl_2O_4$	2,5	0,0025
$ZnCr_2O_4 - LiZnVO_4$	0,3	0,004

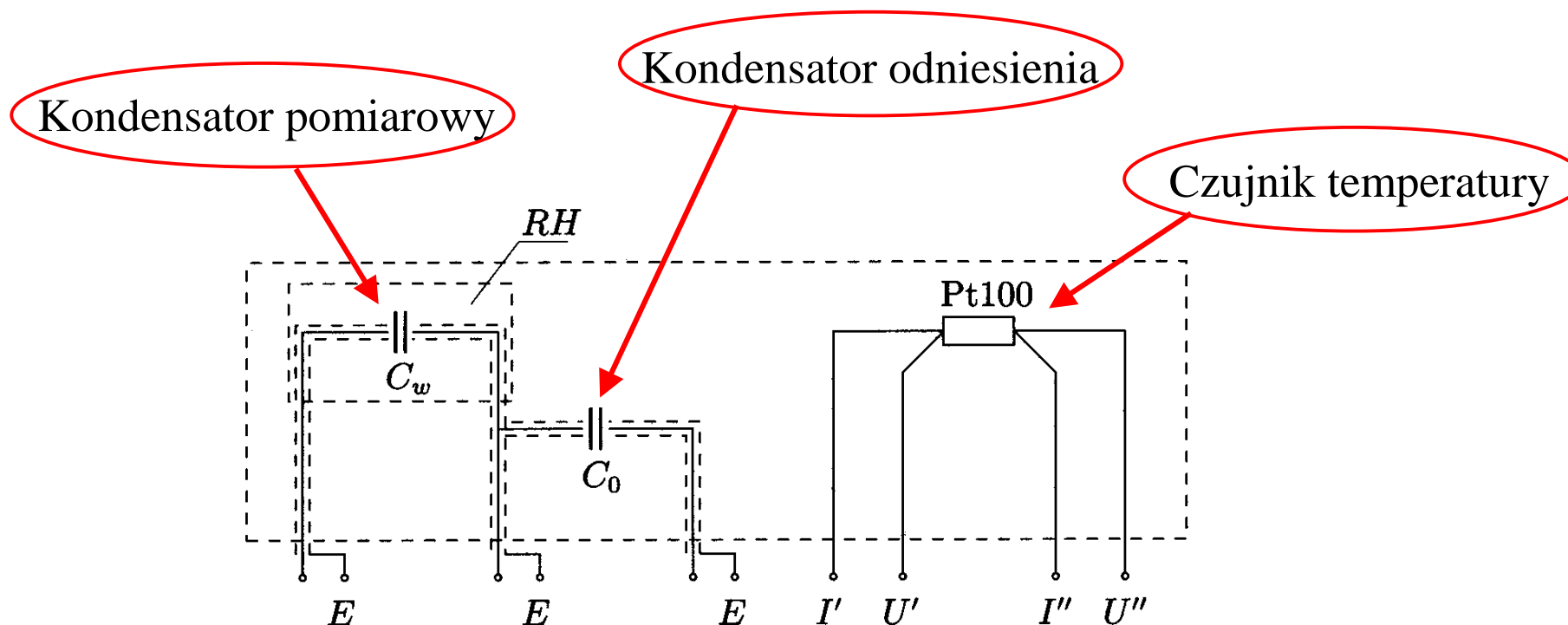
Higrometr absorpcyjny impedancyjny - wykresy



Charakterystyki: a – rezystancji, b – pojemności przetwornika wykonanego z ceramiki spiekanej ($\text{MgCrO}_4 - \text{TiO}_2$), dla $T_K = \text{const.}$

Częściej realizowane są pomiary pojemności przy zasilaniu czujnika napięciem przemiennym, wtedy nie występuje elektroliza

Higrometr absorpcyjny impedancyjny – głowica pomiarowa

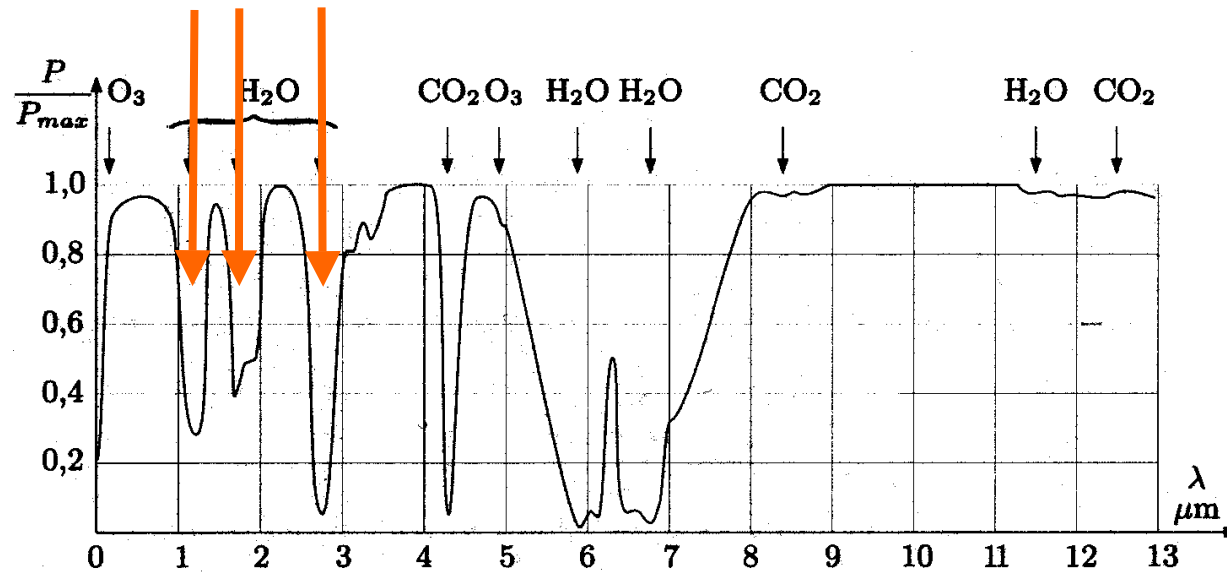


W głowicy pomiarowej znajduje się czujnik temperatury oraz kondensator odniesienia nieczuły na wilgotność powietrza

Higrometr spektrometryczny

Tłumienie promieniowania podczerwonego w atmosferze

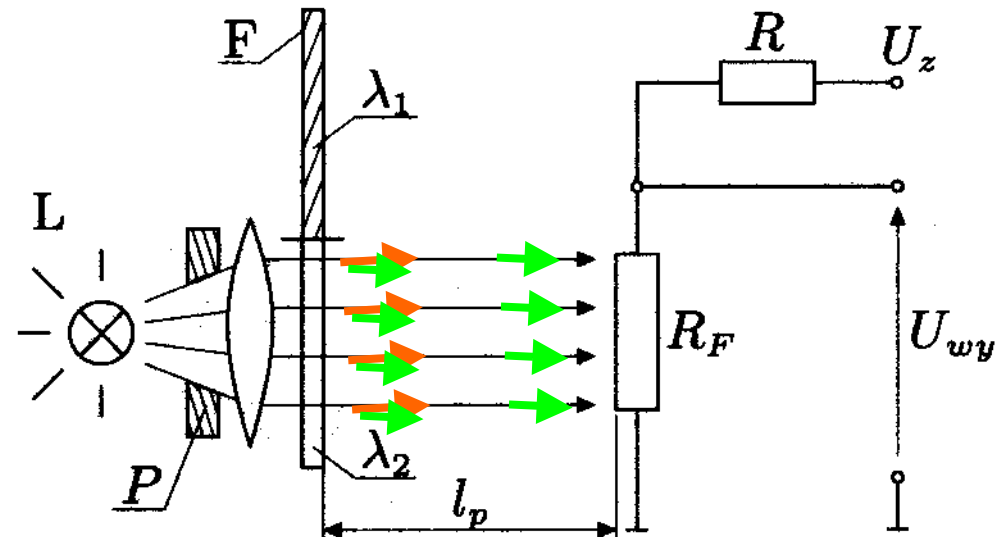
Silne tłumienie w zakresie
długości fali 1..3 μm zależne
od zawartości pary wodnej



Efekt ten wykorzystuje higrometr spektrometryczny

Higrometr spektrometryczny - budowa

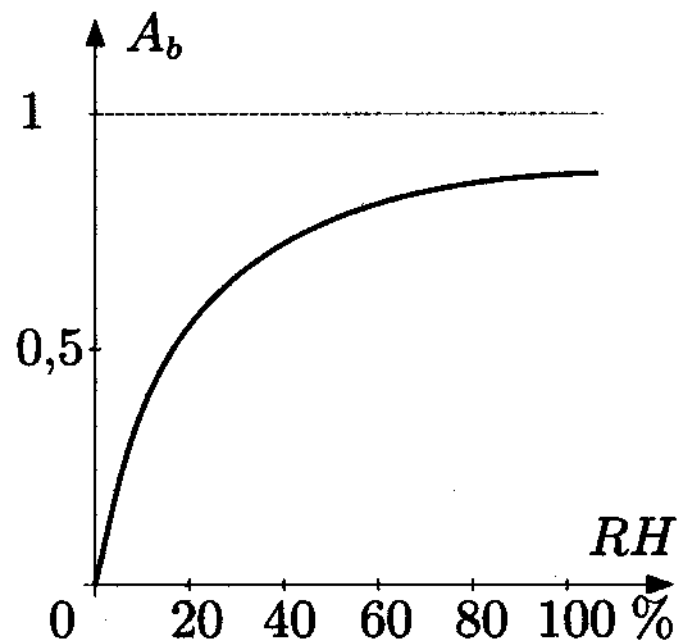
Zakres długości fali
 $1..3 \mu\text{m}$



Higrometr spektrometryczny – schemat układu

Higrometr spektrometryczny wykorzystuje silne tłumienie niektórych długości fali w zakresie bliskiej podczerwieni przez parę wodną zawartą w atmosferze

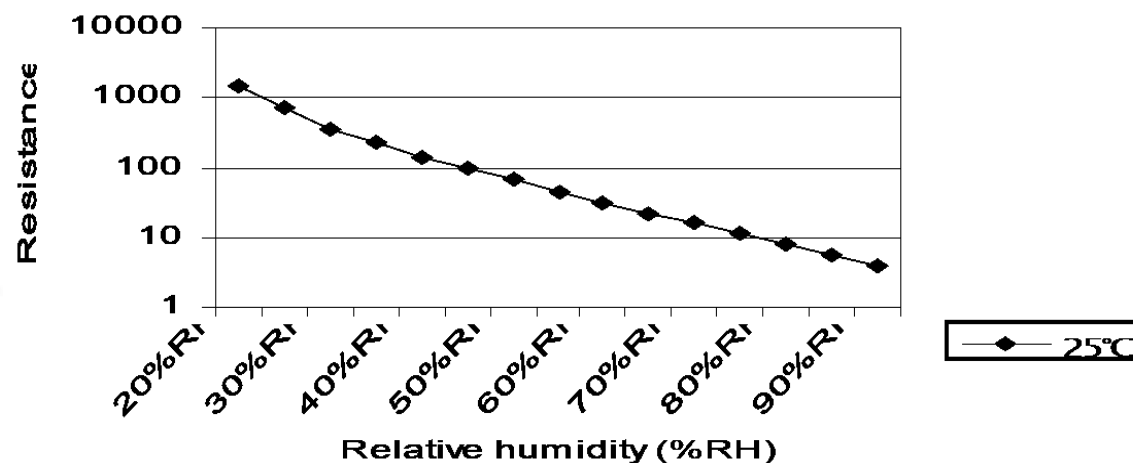
Higrometr spektrometryczny - wykres



Higrometr spektrometryczny – zależność współczynnika absorpcji A_b w funkcji wilgotności względnej RH

Zależność tłumienia promieniowania podczerwonego od wilgotności względnej RH jest silnie nieliniowa!

Przykłady – czujnik wilgotności rezystancyjny GY-HR002(25°C)



5. Electric characteristic:

5.1 rate voltage: AC 1.5V(max ,sine wave)

5.2 rate power: AC 0.2mW(max peak value ,sine wave)

5.3 working frequency: 50HZ—2000HZ

5.4 operating temperature range: 0°C ~ 60°C

5.5 operating humidity range: 0% ~ 95%RH

5.6 temperature characteristic: $\leq 0.5\%RH/^\circ C$

5.7 hysteresis : within 2%RH

5.8 response time : humidity $\leq 20S$, dehumidy $\leq 40S$

5.9 reliability: $\leq 2\%RH/year$

5.10 Humidity accuracy: $\leq \pm 5\%RH$

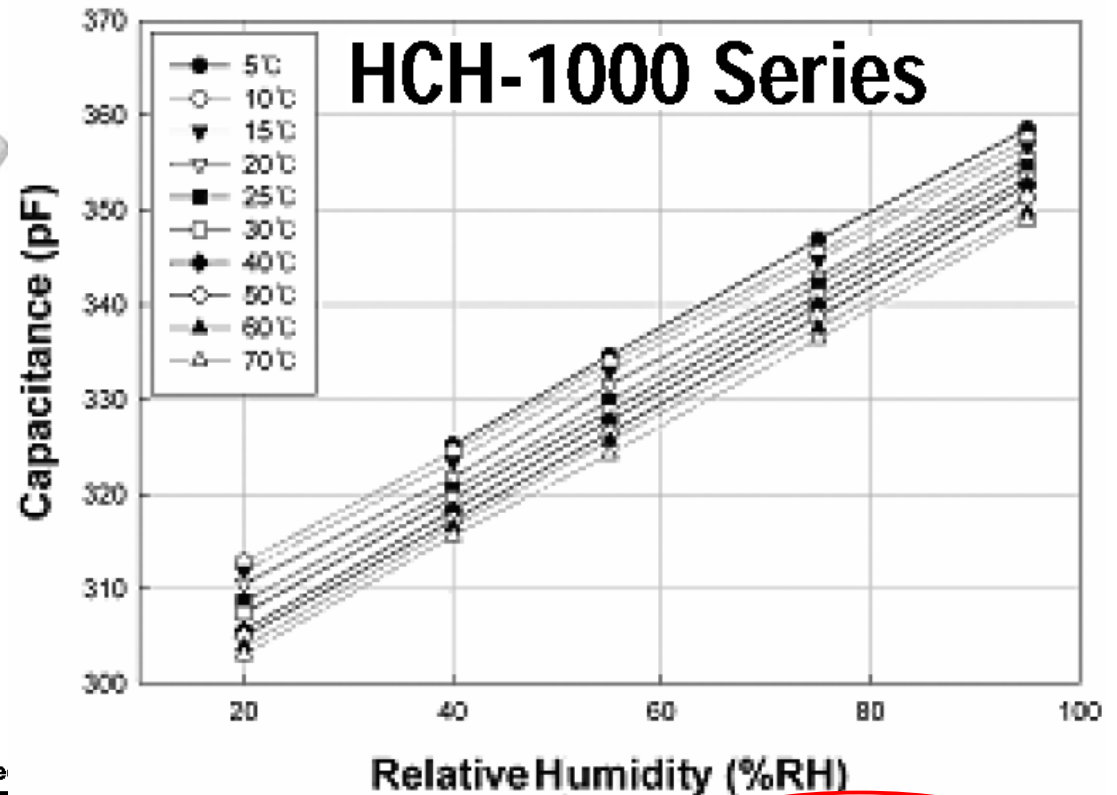
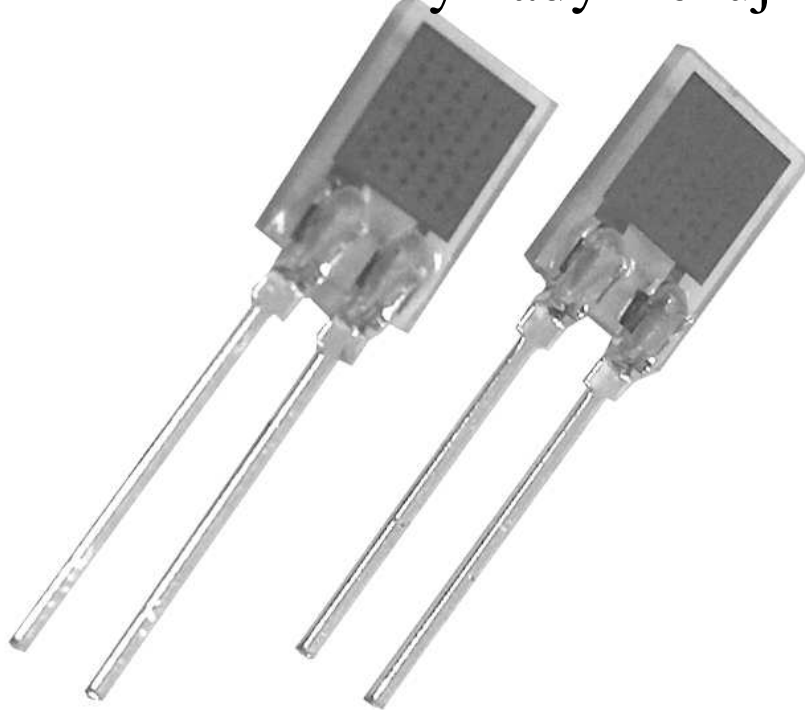
5.11 relative humidity - resistance characteristic (25°C, 1KHZ, AC1V, sine wave), as

figure

Istotny wpływ
temperatury !!!

Pomiar napięciem
sinusoidalnym

Przykłady – czujnik wilgotności pojemnościowy



SPECIFICATIONS ($T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ [77 °F], Input Voltage = 1 V_{RMS} , f_{re})

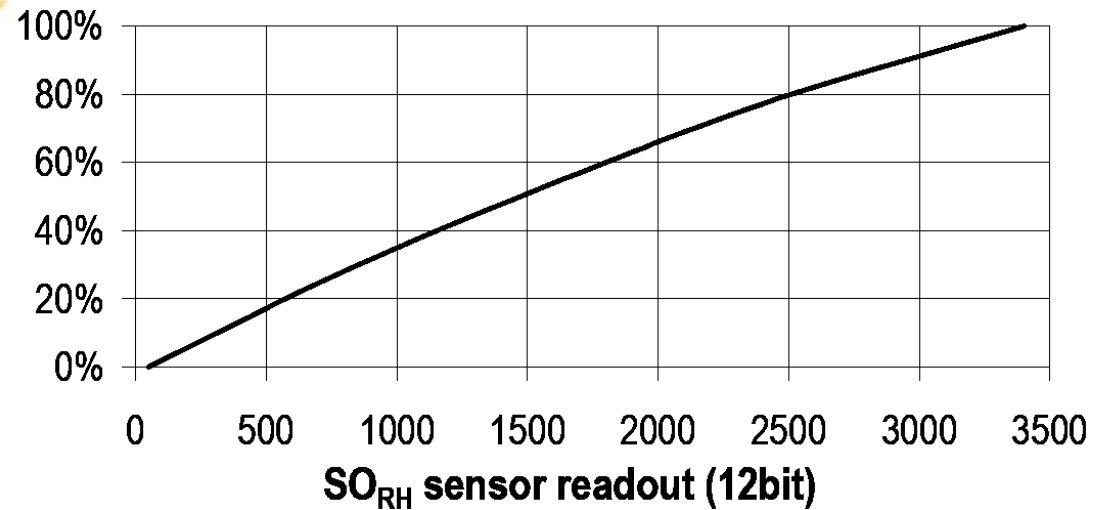
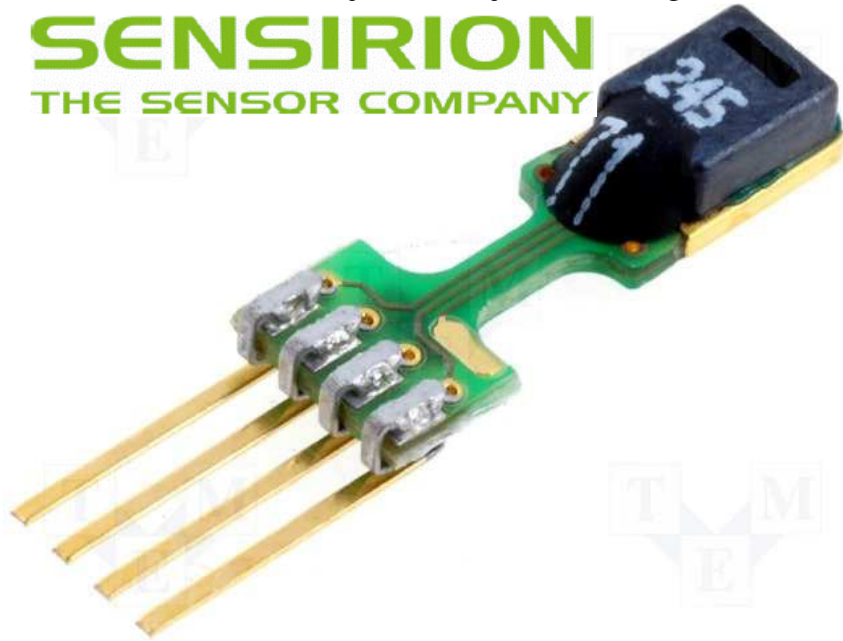
Characteristic	Min.	Typ.	Max.	Unit	Note
Normal capacitance	310	330	350	pF	at 55% RH
Sensitivity	0.55	0.60	0.65	pF/%RH	10% RH to 95% RH
Humidity hysteresis	–	±2	–	%RH	–
Linearity	–	±2	–	%RH	–
Response time	–	15	–	sec	30% RH to 90% RH
Temperature coefficient	0.15	0.16	0.17	pF/°C	5 °C to 70 °C [41 °F to 158 °F]
Long-term stability (drift)	–	0.2	–	%RH/year	–
Operating temperature range	-40 [-40]	–	120 [248]	°C [°F]	–
Operating humidity range	0%	–	100%	RH	–
Operating frequency range	1	–	100	kHz	–

Istotny wpływ temperatury !!!

Pomiar napięciem sinusoidalnym

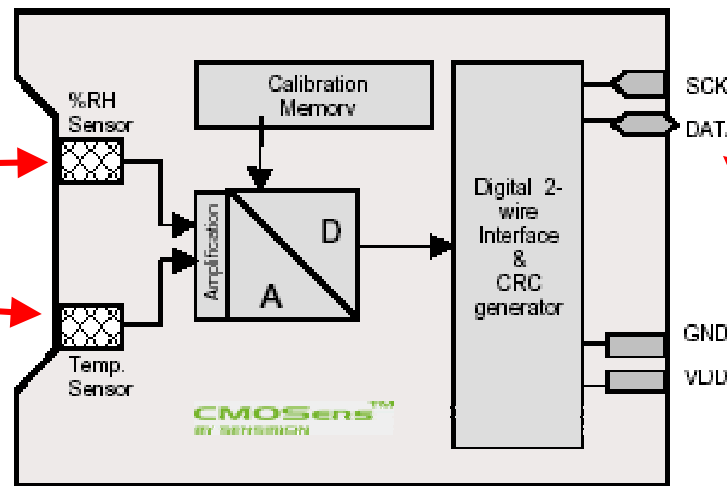
Przykłady – czujnik wilgotności z interfejsem cyfrowym

SENSIRION
THE SENSOR COMPANY



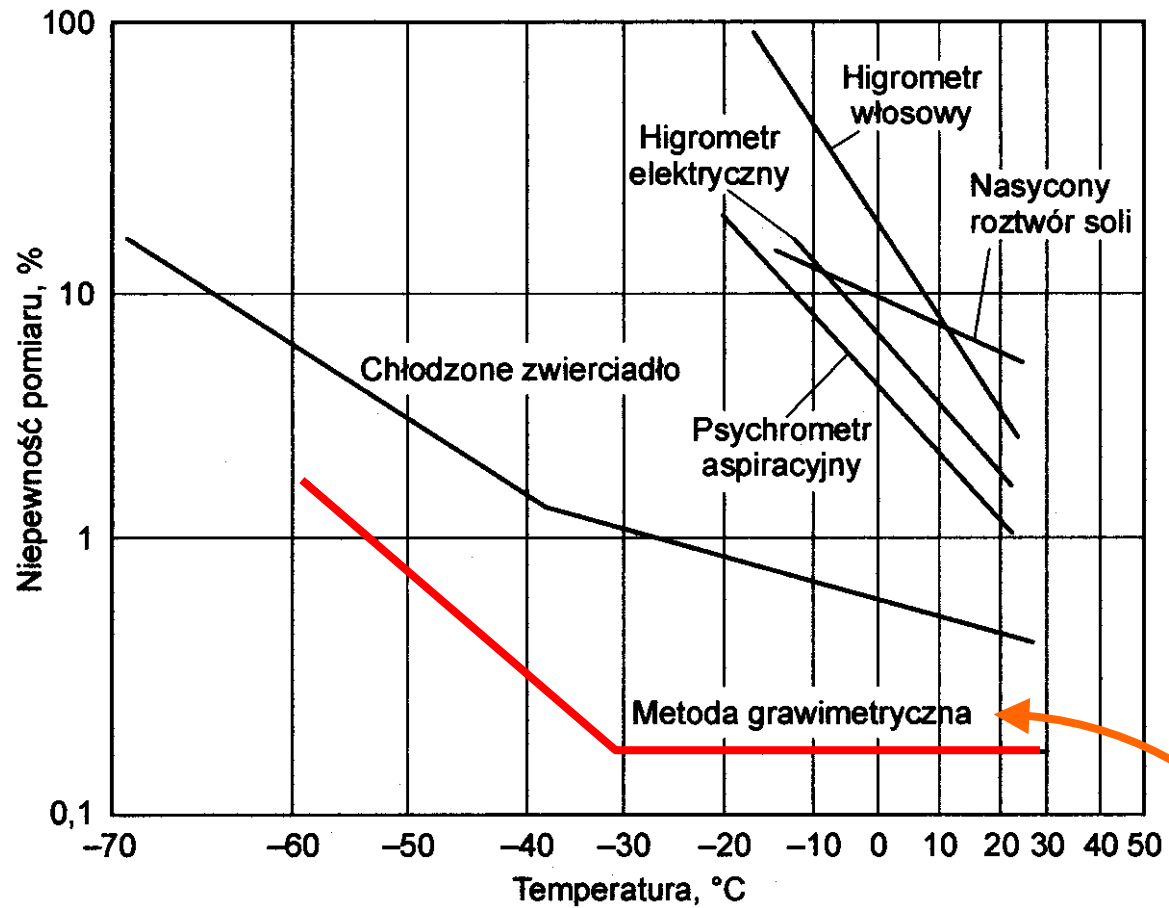
Czujnik wilgotności

Czujnik temperatury



Interfejs I2C

Podsumowanie dla gazów – zakresy pomiarowe metod



Najdokładniejsze są metody grawimetryczne !!!

