

TERMOREZISTENTE

GHID COMPLET

RTD · PT100 · PT500 · PT1000 · NTC · IEC 60751

Principii de functionare · Ecuatii · Standarde internationale

Circuite de masurare · Transmitere 4-20 mA · Instalare

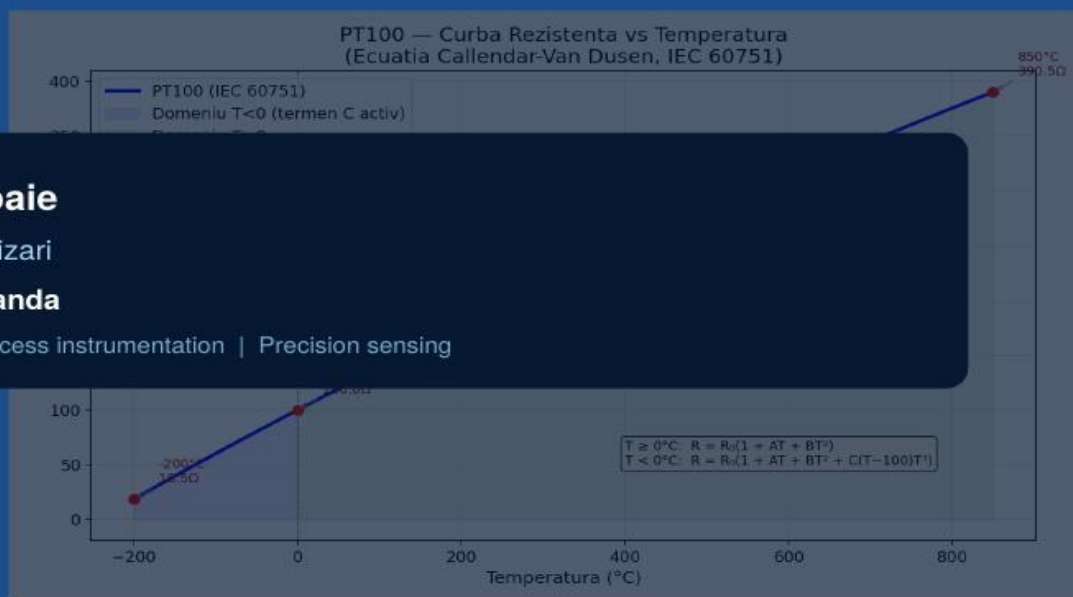
Cod C++ & Python · Calibrare · ITS-90

Constantin Agavriiloaie

Inginer Software / Automatizari

ASML — Veldhoven, Olanda

Semiconductor equipment | Process instrumentation | Precision sensing



Titlu: Termorezistențe — Ghid Complet

Autor: Constantin Agavriloaie

Funcție: Inginer software / automatizări

Companie: ASML — Veldhoven, Olanda

Email: constantin.agavriloaie@gmx.com

Domeniu: Echipamente litografie semiconductori · Instrumentație de proces

Standard: IEC 60751 | ASTM E1137 | ITS-90 | ASME PTC 19.3 TW

An: 2026

Acest ghid acoperă în detaliu principiile de funcționare, formulele matematice, standardele internaționale și aplicațiile practice ale termorezistențelor (RTD). Materialul este structurat pentru ingineri de automatizări, tehnicieni de instrumentație și studenți care doresc o înțelegere profundă a senzorilor de temperatură de tip rezistiv.

Conținut: ecuația Callendar-Van Dusen, standarde IEC/ASTM/GOST/JIS, metode de conectare 2/3/4 fire, circuitul Wheatstone, transmiterea 4-20 mA, interfețe digitale (HART, Modbus, Profibus, IO-Link), termowell, calibrare, cod C++ și Python, scala ITS-90.

Note: Valorile numerice și coeficienții din acest ghid sunt conform IEC 60751:2022 și BIPM ITS-90. Verificați întotdeauna datasheet-ul producătorului pentru aplicații critice.

Licență: Această lucrare poate fi descărcată, tipărită și distribuită liber, fără nicio restricție. În cazul în care anumite pasaje sau exemple de cod sunt preluate și utilizate în alte lucrări, este suficientă menționarea sursei: Constantin Agavriloaie — Termorezistențe: Ghid Complet (2026).

CUPRINS

1. CE ESTE O TERMOREZISTENȚĂ	5
2. FORMULA DE CALCUL A REZISTENȚEI	7
3. COEFICIENTUL ALPHA (TCR — Temperature Coefficient of Resistance)	9
4. STANDARDELE PENTRU PLATINĂ ȘI VALORILE ALPHA	10
5. TABEL COMPLET — MATERIALE ȘI COEFICIENȚI	11
6. METODE DE CONECTARE	14
7. AUTOÎNCĂLZIREA (Self-heating)	15
8. CLASE DE PRECIZIE (IEC 60751)	16
9. TIMP DE RĂSPUNS	17
10. CIRCUITUL WHEATSTONE BRIDGE	18
11. COMPARAȚIE CU TERMOCUPLURI	20
12. SURSE DE EROARE ȘI SOLUȚII	21
13. CONSTRUCȚIE FIZICĂ	22
14. TRANSMIȚĂTOR 4-20 mA	23
15. MONTAJ ȘI INSTALARE	26
16. TERMOWELL (ȚEAVA DE PROTECȚIE)	28
17. CALIBRARE ȘI VERIFICARE	30
18. PROTECȚII ȘI CERTIFICĂRI	32
19. INTERFEȚE DIGITALE MODERNE	34
20. JUSTIFICARE MATEMATICĂ ȘI COD C++	36
21. METODE MAI PRECISE DECÂT CALLENDAR-VAN DUSEN	41
22. TABELELE BIPM — ITS-90 COMPLET	45
23. METODA NEWTON-RAPHSON — PREZENTARE MATEMATICĂ	51
BIBLIOGRAFIE	53
RESURSE ȘI LINKURI UTILE	55
LISTA FIGURILOR	57
GLOSAR DE TERMENI ȘI PRESCURTĂRI	58
INDEX ALFABETIC	60

1. CE ESTE O TERMOREZISTENȚĂ

O termorezistență (RTD — Resistance Temperature Detector) este un senzor de temperatură care își schimbă rezistența electrică în funcție de temperatură.

PRINCIPIU DE FUNCȚIONARE

- Metale (Pt, Ni, Cu): rezistența CREȘTE cu temperatura (coeficient pozitiv — PTC)
- Semiconductori (NTC thermistor): rezistența SCADE cu temperatura (coeficient negativ — NTC)

TIPURI COMUNE

Tip	Material	Rezistență nominală	Utilizare tipică
PT100	Platină	100 Ω la 0°C	Standard industrial — cel mai răspândit
PT500	Platină	500 Ω la 0°C	HVAC, instrumente Europa, sensibilitate x5
PT1000	Platină	1000 Ω la 0°C	Cabluri lungi, electronică modernă, x10
NTC	Semiconductor	variabilă	Aplicații consumer, domeniu îngust

UTILIZĂRI

- Măsurarea temperaturii industriale (-200°C ... +850°C)
- Sisteme HVAC
- Echipamente medicale
- Automatizări și control de proces

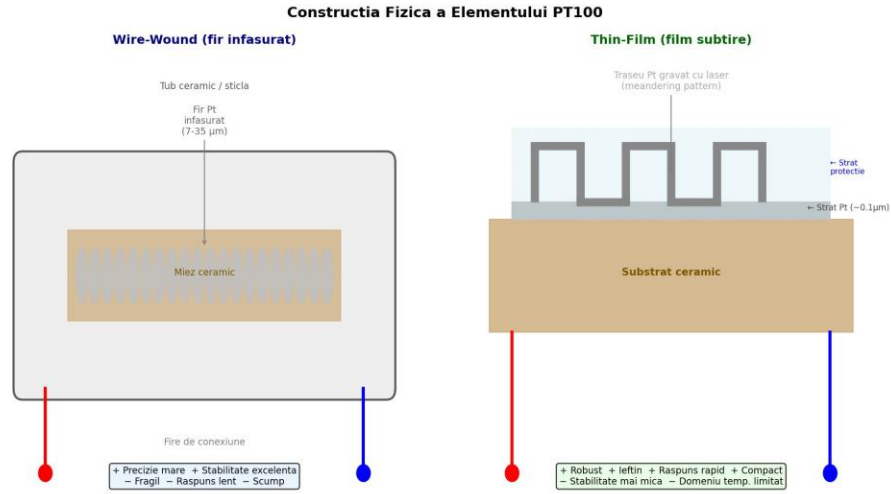


Fig. 1 — Construcția fizică a elementului PT100: Wire-Wound vs Thin-Film

2. FORMULA DE CALCUL A REZISTENȚEI

FORMULA SIMPLĂ (doar aproximare liniară, valabilă pentru temperaturi pozitive mici):

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$$

unde $\alpha = 0.00385$ pentru platină (IEC 60751)

FORMULA COMPLETĂ — Callendar-Van Dusen (IEC 60751):

Pentru $T \geq 0^\circ\text{C}$:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2)$$

Pentru $T < 0^\circ\text{C}$:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100) \cdot T^3)$$

COEFICIENȚI PENTRU PLATINĂ (PT100 / PT500 / PT1000)

Coeficient	Valoare
A	$3.9083 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$
B	$-5.775 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}^2$
C	$-4.183 \times 10^{-12} / ^\circ\text{C}^4$ (doar pentru $T < 0$)

Coeficienții A, B, C sunt aceiași pentru toate variantele Pt — singura diferență o face rezistența nominală R_0 :

- $R_0 = 100 \Omega$ pentru PT100
- $R_0 = 500 \Omega$ pentru PT500
- $R_0 = 1000 \Omega$ pentru PT1000

Sensibilitatea ($\Delta R/\Delta T$) crește proporțional cu R_0 : PT500 are 5x sensibilitatea PT100, iar PT1000 are 10x. La 100°C , PT100 dă 138.5Ω , PT500 dă 692.5Ω , iar PT1000 dă 1385Ω .

Notă: Termenul $C \cdot (T-100) \cdot T^3$ devine semnificativ sub -50°C .

EXEMPLU COD PYTHON

```
def pt100_resistance(T, R0=100):
    A = 3.9083e-3
    B = -5.775e-7
    C = -4.183e-12
    if T >= 0:
        return R0 * (1 + A*T + B*T**2)
    else:
        return R0 * (1 + A*T + B*T**2 + C*(T - 100)*T**3)

pt100_resistance(0)    --> 100.0  Ω
pt100_resistance(100) --> 138.5  Ω
pt100_resistance(-50) --> 80.3   Ω
```

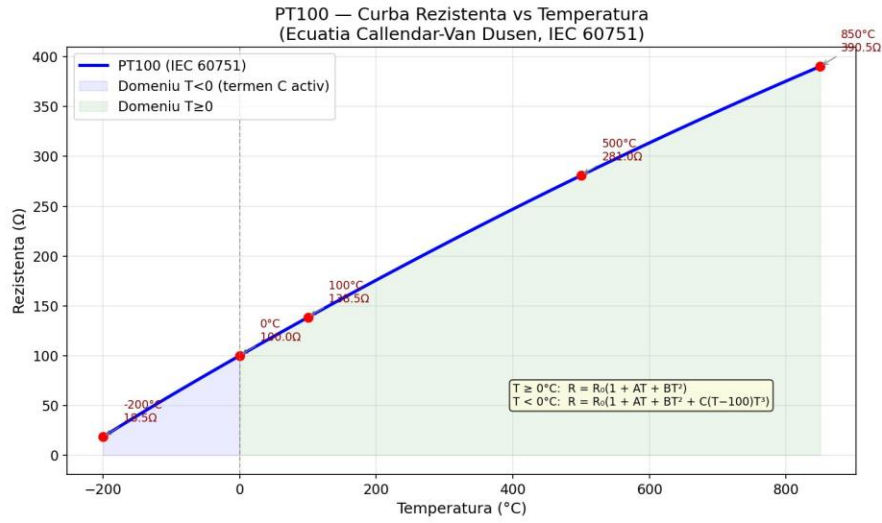


Fig. 2 — Curba Rezistență vs Temperatură PT100 (Callendar-Van Dusen, IEC 60751)

3. COEFICIENTUL ALPHA (TCR — Temperature Coefficient of Resistance)

α exprimă cât de mult se schimbă rezistența unui material la o variație de 1°C.

DEFINIȚIE

$$\alpha = (R(T) - R_0) / (R_0 \cdot T)$$

sau echivalent:

$$\alpha = \Delta R / (R_0 \cdot \Delta T) \quad [\text{unitate: } \Omega/\Omega/^\circ\text{C sau } 1/^\circ\text{C}]$$

INTERPRETARE

- $\alpha > 0$: rezistența CREȘTE cu temperatura (metale: Pt, Ni, Cu)
- $\alpha < 0$: rezistența SCADE cu temperatura (semiconductori NTC)
- Cu cât $|\alpha|$ este mai mare, cu atât senzorul este mai sensibil

DE CE PT100 FOLOSEȘTE $\alpha = 0.00385$?

Aceasta este media coeficientului platinei între 0°C și 100°C, standardizată prin IEC 60751:

$$\begin{aligned} \alpha &= (R(100) - R(0)) / (R(0) \cdot 100) \\ &= (138.5 - 100) / (100 \cdot 100) \\ &= 0.00385 / ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Practic, PT100 câștigă ~0.385 Ω pentru fiecare grad Celsius.

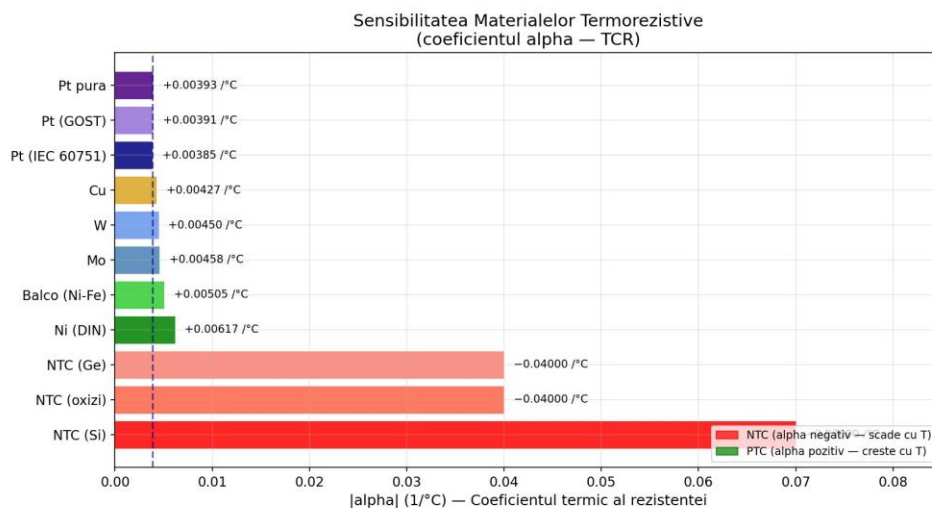


Fig. 3 — Coeficientul alpha pentru diferite materiale termorezistive

4. STANDARDELE PENTRU PLATINĂ ȘI VALORILE ALPHA

Standard	α (1/°C)	Regiune	Denumire senzor
IEC 60751 (UE)	0.003850	Europa de Vest	PT100
GOST 6651 (RU)	0.003910	Europa de Est	100P (100П)
ASTM E1137 (US)	0.003911	SUA	PT100
JIS C 1604 (JP)	0.003916	Japonia	PT100
Platină pură	0.003927	laborator	referință

DE CE DIFERĂ VALORILE?

Coeficientul depinde de puritatea platinei:

- Platină mai pură → α mai mare (aproape de 0.003927)
- Platină cu impurități sau aliaje → α mai mic

PT100 industrial ($\alpha = 0.00385$) conține mici impurități intenționate pentru stabilitate mecanică mai bună.

VERIFICAREA CALITĂȚII — W_{100} (raportul fundamental)

$$W_{100} = R(100^{\circ}\text{C}) / R(0^{\circ}\text{C})$$

Standard	W_{100} minim
IEC 60751	1.3850
ASTM E1137	1.3911

Cu cât W_{100} este mai mare, cu atât platina este mai pură.

STANDARDUL GOST (Europa de Est / bloc sovietic)

Senzori GOST comuni:

- 100П (100P) — echivalentul PT100, dar cu $\alpha = 0.003910$
- 50П (50P) — rezistența nominală 50 Ω la 0°C
- 46П — folosit în aviația sovietică

ATENȚIE — Eroare la înlocuire fără recalibrare:

$$\Delta\alpha = 0.003910 - 0.003850 = 0.000060$$

$$\text{La } 100^{\circ}\text{C: } \Delta R = 100 \cdot 0.000060 \cdot 100 = 0.6 \Omega \approx 1.5^{\circ}\text{C eroare}$$

Eroarea crește proporțional cu temperatura!

Multe țări din Europa de Est au trecut la IEC 60751 după anii '90.

5. TABEL COMPLET — MATERIALE ȘI COEFICIENȚI

PLATINĂ (Pt)

Standard	α (1/°C)	R_0 (Ω)	Domeniu (°C)	Regiune
IEC 60751	0.003850	100/500/1000	-200 ... +850	Europa de Vest
GOST 6651	0.003910	50/100	-200 ... +750	Europa de Est
ASTM E1137	0.003911	100	-200 ... +650	SUA
JIS C 1604	0.003916	100	-200 ... +650	Japonia
Pt pură 99.999%	0.003927	—	referință lab	—

VARIANTE PT — COMPARAȚIE PT100 / PT500 / PT1000

Toate variantele folosesc aceeași platină ($\alpha = 0.003850$ conform IEC 60751) și aceiași coeficienți A, B, C în ecuația Callendar-Van Dusen. Diferă doar prin rezistența nominală R_0 la 0°C, ceea ce afectează sensibilitatea, eroarea de cablare și consumul energetic.

VARIANTĂ	R_0 la 0°C	$\Delta R/\Delta T$ la 0°C	Avantaje	Dezavantaje
PT100	100 Ω	0.385 $\Omega/^\circ\text{C}$	Standard de facto, cel mai larg suportat de transmițătoare și PLC-uri	Eroare de cablare semnificativă (1 Ω fir = 2.6°C); curent mai mare → autoîncălzire
PT500	500 Ω	1.925 $\Omega/^\circ\text{C}$	Compromis bun: sensibilitate $\times 5$ față de PT100, eroare cablare $\times 5$ mai mică	Mai puțin suportat decât PT100 / PT1000 — verifică compatibilitatea echipamentului
PT1000	1000 Ω	3.85 $\Omega/^\circ\text{C}$	Sensibilitate $\times 10$, eroare cablare neglijabilă (1 Ω fir = 0.26°C); ideal pentru cabluri lungi și electronică alimentată din baterie	Tensiune mai mare la aceeași curenți → atenție la rezistența de izolație

CÂND ALEGI PT500?

- HVAC și automatizare clădiri (multe transmițătoare europene au calibrare nativă PT500)
- Aplicații cu cabluri de lungime medie (10–50 m) unde PT100 ar avea eroare prea mare dar PT1000 nu e disponibil
- Sisteme cu alimentare limitată — sensibilitate $\times 5$ înseamnă că ADC-ul are nevoie de mai puține biți pentru aceeași rezoluție termică
- Compatibilitate cu echipamente vechi din industria farmaceutică / alimentară europeană unde PT500 a fost standard în anii '80–'90

NICHEL (Ni)

Standard	α (1/°C)	R_0 (Ω)	Domeniu (°C)	Observații
DIN 43760	0.006170	100	-60 ... +180	Cel mai comun
Ni120 (US)	0.006720	120	-70 ... +150	Standard american
GOST (M-Ni)	0.006260	100	-60 ... +180	Standard sovietic

CUPRU (Cu)

Standard	α (1/°C)	R_0 (Ω)	Domeniu (°C)	Observații
OIML R 84	0.004270	10/100	-50 ... +150	Standard internațional
GOST (M50)	0.004280	50	-50 ... +200	Sovietic
GOST (M100)	0.004280	100	-50 ... +200	Sovietic
ASTM B193	0.004270	10	-200 ... +260	American

Notă: Spre deosebire de Pt și Ni, nu există un standard IEC specific pentru senzori RTD din cupru. Standardele uzuale sunt OIML R 84 (internațional) și ASTM B193 (american).

ALTE METALE

Material	α (1/°C)	R_0 (Ω)	Domeniu (°C)	Atmosferă	Utilizare
Nichel-Fier (Balco)	0.005050	604	-70 ... +150	Aer	Aviație, auto
Tungsten (W)	0.004500	100	0 ... +1200	Vid sau Ar/N ₂	Cuptoare cu vid
Molibden (Mo)	0.004579	100	0 ... +1000	Vid sau atm. inertă	Industrie grea
Iridiu (Ir)	0.004200	100	0 ... +2000	Atm. protejată > 1000°C	Aplicații extreme

Notă importantă: Tungstenul și molibdenul se oxidează rapid în aer la temperaturi peste 400°C (W) și 600°C (Mo). Oxizii formați (WO₃, MoO₃) sublimază peste 800°C, ceea ce duce la pierderea materialului. Aplicațiile la temperaturi înalte cu W și Mo necesită OBLIGATORIU atmosferă inertă (Ar, N₂), reducătoare (H₂) sau vid. Iridiul este mai stabil, dar formează IrO₃ volatil peste 1000°C — pentru aplicații peste această limită este nevoie tot de atmosferă protejată.

NTC THERMISTORI (semiconductori)

Material	α (1/°C)	Domeniu (°C)	Observații
Oxizi metalici	-0.020 ... -0.060	-50 ... +150	Foarte sensibil
Siliciu (Si)	-0.070	-50 ... +150	Circuite integrate
Germaniu (Ge)	-0.040	-270 ... +70	Criogenie

REZUMAT — SENSIBILITATEA MATERIALELOR

Material	α (1/°C)	Observație
Ni	0.00617	cel mai sensibil
Balco	0.00505	
Mo	0.00458	
W	0.00450	
Cu	0.00427	
Pt	0.00385	cel mai precis
NTC	-0.02 ... -0.06	coeficient negativ

Platina domină industria nu datorită sensibilității, ci datorită stabilității, preciziei și reproductibilității pe domeniu larg de temperaturi.

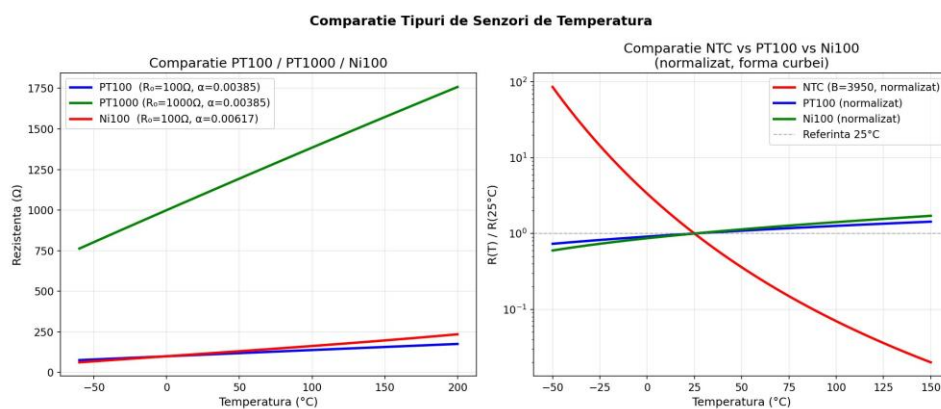


Fig. 4 — Comparație curbe R-T: PT100, PT1000, Ni100, NTC (normalizat)

6. METODE DE CONECTARE

Tip	Fire	Eroare	Utilizare
2 fire	2	Mare	Distanțe scurte, precizie mică
3 fire	3	Medie	Industrial standard
4 fire	4	Zero	Laborator, precizie înaltă

2 fire: $[R_{\text{fir}}] + [PT100] + [R_{\text{fir}}] \rightarrow$ rezistența firelor adăugată la măsurare

3 fire: compensează parțial rezistența firelor

4 fire: curent prin 2 fire, tensiune măsurată pe alte 2 \rightarrow rezistența firelor complet eliminată

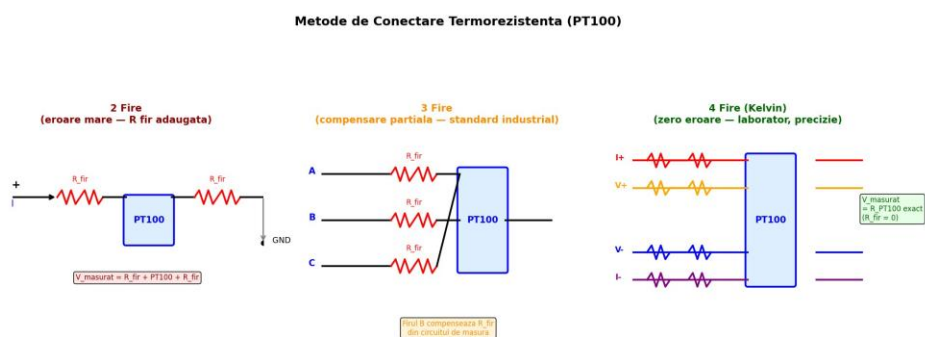


Fig. 5 — Schema de conectare: 2 fire, 3 fire, 4 fire (Kelvin)

7. AUTOÎNCĂLZIREA (Self-heating)

Curentul care trece prin senzor generează căldură și falsifică măsurarea:

$$P = I^2 \cdot R$$

Constanta tipică de disipare termică pentru un PT100 cu teacă, în aer liniștit, este aproximativ $0.1^\circ\text{C}/\text{mW}$. În lichide curgătoare, valoarea este de $5\text{--}10\times$ mai mică (răcire mai bună).

La PT100 (100 Ω) cu $I = 1 \text{ mA}$:

$$P = (0.001)^2 \cdot 100 = 0.1 \text{ mW} \rightarrow \text{eroare} \sim 0.01^\circ\text{C}$$

La $I = 10 \text{ mA}$:

$$P = (0.01)^2 \cdot 100 = 10 \text{ mW} \rightarrow \text{eroare} \sim 1^\circ\text{C}$$

La $I = 30 \text{ mA}$:

$$P = (0.03)^2 \cdot 100 = 90 \text{ mW} \rightarrow \text{eroare} \sim 9^\circ\text{C} \text{ (inacceptabil!)}$$

Curentul recomandat: 0.3 mA ... 1 mA

Notă: Constanta de disipare depinde de construcția senzorului (wire-wound vs thin-film), de mediul în care e montat (aer, apă, ulei) și de prezența unui termowell. Valorile concrete sunt în datasheet-ul producătorului (de exemplu Heraeus M422 = $0.4 \text{ mW}/\text{K}$ în aer și $50 \text{ mW}/\text{K}$ în apă curgătoare).

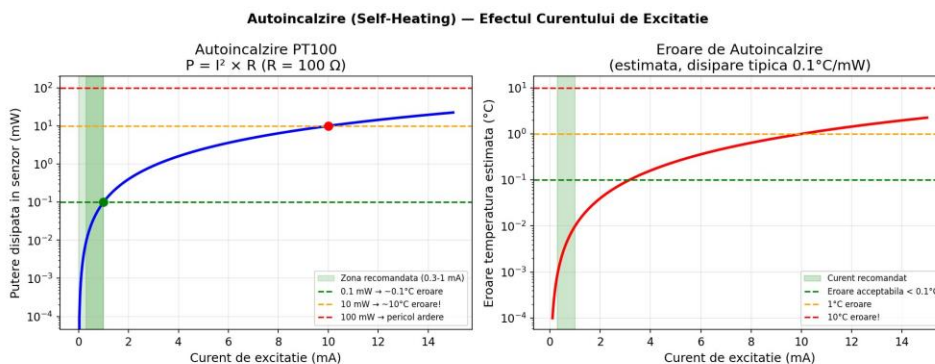


Fig. 6 — Efectul curentului de excitație: putere disipată și eroare de temperatură

8. CLASE DE PRECIZIE (IEC 60751)

Toleranța admisă depinde de clasa senzorului și crește cu temperatura. Formulele complete IEC 60751 sunt:

Clasa	Formula toleranță	Domeniu valid
AA	$\pm(0.10 + 0.0017 \cdot T) \text{ } ^\circ\text{C}$	-50 ... +250 °C
A	$\pm(0.15 + 0.0020 \cdot T) \text{ } ^\circ\text{C}$	-100 ... +450 °C
B	$\pm(0.30 + 0.0050 \cdot T) \text{ } ^\circ\text{C}$	-196 ... +600 °C
C	$\pm(0.60 + 0.0100 \cdot T) \text{ } ^\circ\text{C}$	-196 ... +600 °C

VALORI NUMERICE LA TEMPERATURI TIPICE

Clasa	Eroare la 0°C	Eroare la 50°C	Eroare la 100°C	Eroare la 200°C
AA	±0.10°C	±0.185°C	±0.27°C	±0.44°C
A	±0.15°C	±0.25°C	±0.35°C	±0.55°C
B	±0.30°C	±0.55°C	±0.80°C	±1.30°C
C	±0.60°C	±1.10°C	±1.60°C	±2.60°C

Corecție față de versiunea anterioară a acestui ghid: tabelul rapid de clase de precizie listează acum corect erorile la 50°C, 100°C și 200°C — calculate prin substituția $|T|$ în formulele oficiale IEC 60751.

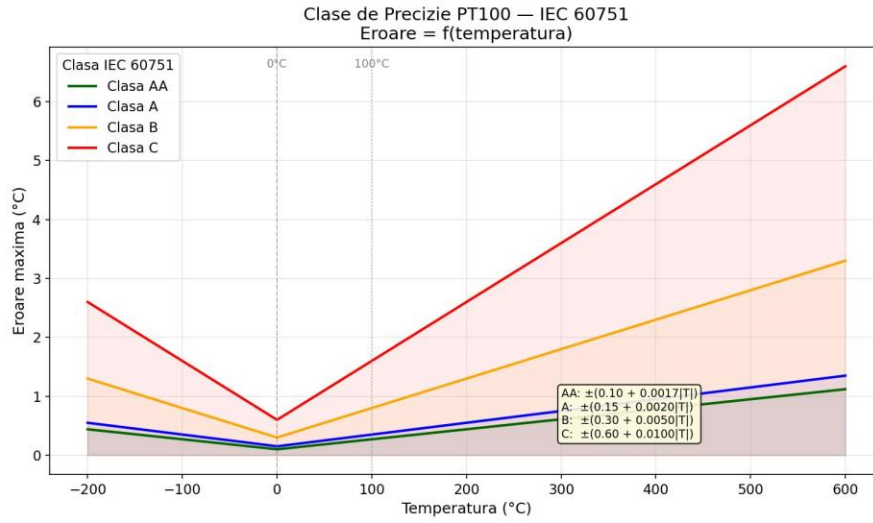


Fig. 7 — Benzi de eroare pentru clasele de precizie IEC 60751 (AA, A, B, C)

9. TIMP DE RĂSPUNS

Depinde de construcție și mediu:

Construcție	Timp răspuns ($t_{63\%}$)
Fir expus (bare wire)	0.5 ... 2 s
Cu teacă (sheathed)	2 ... 10 s
Cu masă termică mare	10 ... 30 s

$t_{63\%}$ = timpul până când senzorul atinge 63% din variația de temperatură

$t_{90\%}$ = timpul până la 90% (de obicei $\sim 2.3\times$ mai mare)

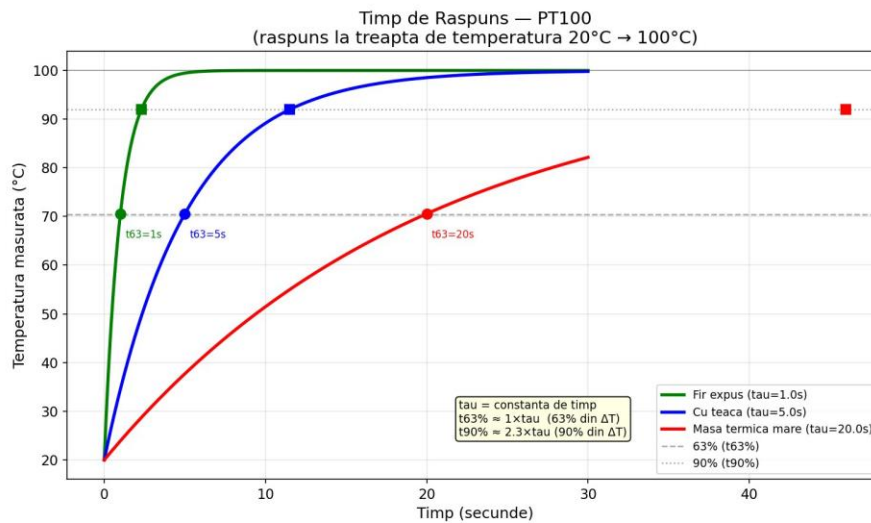


Fig. 8 — Timp de răspuns la treaptă de temperatură ($t_{63\%}$ și $t_{90\%}$)

10. CIRCUITUL WHEATSTONE BRIDGE

PRINCIPIU DE FUNCȚIONARE

Puntea Wheatstone este un circuit de măsurare diferențială format din patru rezistențe conectate în buclă. Tensiunea de alimentare V_{cc} se aplică între două noduri opuse (sus-jos), iar tensiunea de ieșire V_{out} se măsoară între celelalte două noduri (A și B).

Cele patru brațe ale punții:

- Ramura stânga-sus: R1 (rezistență de referință fixă)
- Ramura dreapta-sus: R2 (rezistență de referință fixă)
- Ramura stânga-jos: PT100 (senzor — variază cu temperatura)
- Ramura dreapta-jos: R3 (rezistență de referință fixă)

FORMULA DE IEȘIRE

$$V_{out} = V_{cc} \cdot [PT100 / (PT100 + R1) - R3 / (R3 + R2)]$$

CONDIȚIA DE ECHILIBRU

Puntea este echilibrată ($V_{out} = 0$) când:

$$PT100 / R1 = R3 / R2 \rightarrow PT100 = R1 \cdot R3 / R2$$

La $T = 0^\circ\text{C}$, $PT100 = R_0 = 100 \Omega$. Alegând $R1 = R2 = R3 = 100 \Omega$:

$$V_{out} = V_{cc} \cdot [100/200 - 100/200] = 0 \quad \checkmark$$

SENSIBILITATEA PUNȚII (DERIVARE)

La o variație mică $\Delta R = PT100 - R_0$, substituind $PT100 = R_0 + \Delta R$ în formula generală cu $R1 = R2 = R3 = R_0$:

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{cc} \cdot [(R_0 + \Delta R) / (2R_0 + \Delta R) - 1/2] \\ &= V_{cc} \cdot [(2(R_0 + \Delta R) - (2R_0 + \Delta R)) / (2 \cdot (2R_0 + \Delta R))] \\ &= V_{cc} \cdot \Delta R / (2 \cdot (2R_0 + \Delta R)) \end{aligned}$$

Pentru $\Delta R \ll R_0$ (cazul tipic în industrie), termenul ΔR din numitor devine neglijabil:

$$V_{out} \approx V_{cc} \cdot \Delta R / (4 \cdot R_0)$$

Aceasta este aproximarea liniară clasică, valabilă pentru o variație $\Delta R \lesssim 5\% R_0$ ($\approx \pm 50^\circ\text{C}$ în jurul punctului de echilibru pentru PT100).

VALORILE TIPICE PENTRU PT100

- Alimentare: $V_{cc} = 5\text{V}$ sau 3.3V (curent mic \rightarrow autoîncălzire neglijabilă)
- Rezistențe de referință: $R1 = R2 = R3 = 100 \Omega$ (clasă 0.1%)
- Sensibilitate: $\sim 0.48 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ la $V_{cc} = 5\text{V}$
- Domeniu liniar: aproximativ $\pm 50^\circ\text{C}$ în jurul punctului de echilibru

AVANTAJUL FAȚĂ DE MĂSURAREA SIMPLĂ

Măsurare directă $R \rightarrow U = I \cdot R$: semnalul depinde de curentul de excitație și de rezistența firelor de legătură.

Puntea Wheatstone elimină influența rezistenței firelor comune și oferă un semnal diferențial rezistent la zgomot de mod-comun (CMRR ridicat).

AMPLIFICATOR DIFERENȚIAL

Vout este un semnal mic (mV) și necesită amplificare:

- Amplificator de instrumentație (INA128, AD8221): CMRR > 100 dB
- Câștig tipic: 100-500 V/V
- Ieșire: 0-5V sau 0-10V către ADC sau PLC

Puntea Wheatstone cu PT100 — Circuit de Masurare

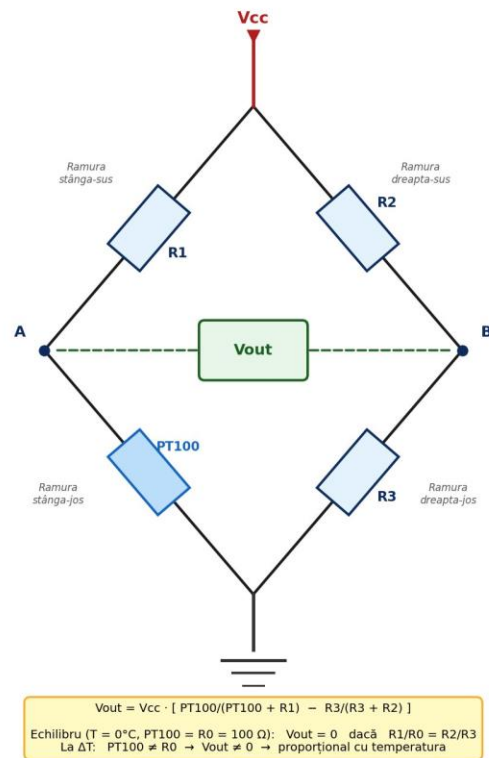


Fig. 9 — Circuitul Puntea Wheatstone cu PT100

11. COMPARAȚIE CU TERMOCUPLURI

Criteriu	Termorezistență	Termocuplu
Precizie	Foarte bună	Medie
Stabilitate	Excelentă	Bună
Domeniu temperatură	-200 ... +850°C	-270 ... +2300°C
Timp răspuns	Lent	Rapid
Cost	Mai scump	Ieftin
Rezistență mecanică	Fragilă	Robustă
Necesită alimentare	Da	Nu (autogenerat)

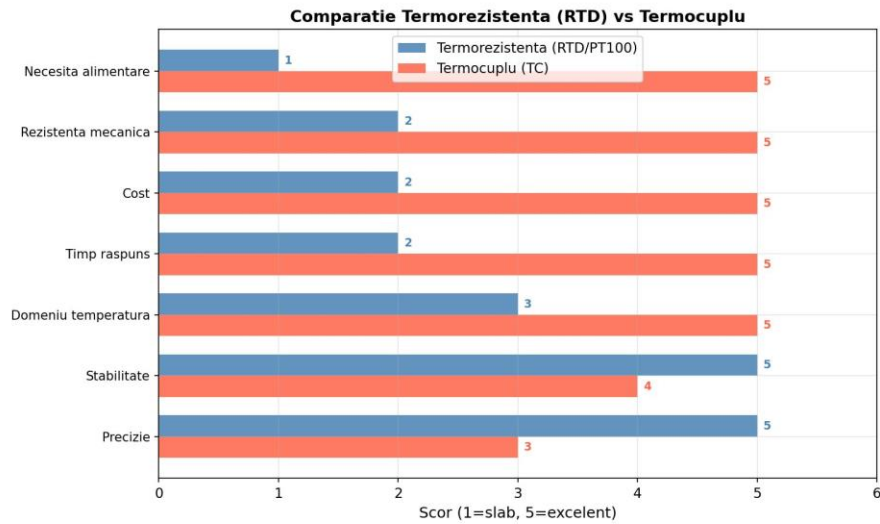


Fig. 10 — Comparație termorezistență (RTD) vs termocuplu

12. SURSE DE EROARE ȘI SOLUȚII

Sursă de eroare	Soluție
Rezistența firelor de conectare	Conectare cu 4 fire (Kelvin)
Autoîncălzire	Curent de excitație mic (≤ 1 mA)
Vibrații mecanice	Senzor robust (thin-film) sau montaj antivibrație
Interferențe electromagnetice (EMI)	Cablu ecranat, ecran la pământ la un singur capăt
Îmbătrânire (drift)	Recalibrare periodică
Contact termic slab	Pastă termică, montaj corect, adâncime de imersie suficientă
EMF termoelectrice (efect Seebeck parazit)	Conectori din același material, evitare gradient termice mari pe conexiuni
Conducție termică pe tijă (stem conduction)	Adâncime de imersie $\geq 10 \times$ diametrul tecii

13. CONSTRUCȚIE FIZICĂ

Wire-wound (fir înfășurat)

- Fir de Pt înfășurat pe suport ceramic sau de cuarț
- Diametru fir tipic: 7-35 μm
- Precizie mare, stabilitate excelentă pe termen lung
- Fragil mecanic, sensibil la vibrații peste 50 Hz
- Domeniu temperatură: -200°C ... $+850^{\circ}\text{C}$
- Mai scump (procesul de bobinare e laborios)

Thin-film (film subțire)

- Strat subțire de Pt ($\sim 0.1 \mu\text{m}$) gravat cu laser pe substrat ceramic (Al_2O_3)
- Geometrii standard: $2 \times 2 \text{ mm}$, $5 \times 2 \text{ mm}$ sau $10 \times 2 \text{ mm}$
- Robust mecanic, suportă vibrații $> 50 \text{ Hz}$
- Răspuns rapid datorită masei termice mici
- Domeniu temperatură: -50°C ... $+500^{\circ}\text{C}$ (variantele extinse până la $+600^{\circ}\text{C}$)
- Stabilitate pe termen lung mai redusă decât wire-wound (drift $\sim 0.05^{\circ}\text{C}/\text{an}$ vs $0.01^{\circ}\text{C}/\text{an}$)
- Ieftin, produs în volum mare — opțiunea preferată în industria de masă

Coiled-element (bobină liberă)

- Bobină de Pt liberă în tub ceramic, neatașată mecanic — strain-free
- Stabilitate maximă (drift sub $0.005^{\circ}\text{C}/\text{an}$ la SPRT-uri)
- Folosit în SPRT (Standard Platinum Resistance Thermometer) pentru ITS-90
- Foarte scump, fragil — exclusiv aplicații de laborator

ALEGEREA TIPULUI DE CONSTRUCȚIE

Aplicație	Tip recomandat	Motiv principal
HVAC, automatizare clădiri	Thin-film	Cost, robustețe
Proces industrial standard	Thin-film sau wire-wound	Compromis cost/precizie
Vibrații mari (motoare, turbine)	Thin-film	Robustețe mecanică
Industrie farmaceutică / validare	Wire-wound clasă AA	Stabilitate, drift mic
Laborator de calibrare	Coiled-element (SPRT)	Drift minim, ITS-90

14. TRANSMIȚĂTOR 4-20 mA

Transmițatorul convertește rezistența PT100 într-un semnal de curent standard de 4-20 mA, utilizat universal în industrie pentru transmiterea la distanță.

DE CE 4-20 mA (și nu 0-20 mA)?

- 4 mA la temperatura minimă permite detectarea unui fir rupt (0 mA = defect)
- Imun la interferențe electromagnetice (EMI)
- Poate transmite pe distanțe mari (sute de metri) fără pierderi de semnal
- Un singur cablu cu 2 fire (loop-powered)

FORMULA DE SCALARE

$$I = 4 + (T - T_{\min}) / (T_{\max} - T_{\min}) \cdot 16$$

Exemplu: domeniu -50°C ... +150°C, T = 50°C:

$$I = 4 + (50 - (-50)) / (150 - (-50)) \cdot 16$$

$$I = 4 + 100/200 \cdot 16$$

$$I = 4 + 8 = 12 \text{ mA}$$

TABEL RAPID DE REFERINȚĂ (domeniu 0-100°C)

Temperatură	Curent
0°C	4.0 mA
25°C	8.0 mA
50°C	12.0 mA
75°C	16.0 mA
100°C	20.0 mA

TIPURI DE TRANSMIȚĂTOR

Cap-montat (Head-mounted):

- Se montează direct în capul de conexiuni al senzorului
- Compact, fără cablu între senzor și transmițator
- Formă standard: DIN B (rotund) sau DIN 43729
- Avantaj: minim zgomot, cablu scurt între PT100 și electronică

Șină DIN (DIN Rail):

- Montat în tabloul electric, departe de senzor
- Mai ușor de întreținut și înlocuit
- Potrivit când temperatura ambientală la senzor este mare

TIPURI DE ALIMENTARE

2 fire (loop-powered):

- Alimentat chiar din bucla de 4-20 mA
- Consum propriu: 3.5 mA (din cei 4 mA minimi)
- Cel mai simplu și comun în industrie

[Sursă 24V] — [Transmițător] — [Rezistență sarcină 250Ω] — GND

4 fire (separat alimentat):

- Alimentare separată (24V DC sau 220V AC)
- Poate livra mai multă putere / funcții avansate
- Folosit la transmițătoare cu display, HART, Profibus

REZISTENȚA DE SARCINĂ

Tensiunea pe rezistența de sarcină (shunt) permite citirea curentului:

La 250 Ω: $U = I \cdot R = 0.004 \cdot 250 = 1V$ (la 4 mA)
 $0.020 \cdot 250 = 5V$ (la 20 mA)

→ Semnal de tensiune 1-5V către intrarea PLC/SCADA

La 500 Ω: semnal 2-10V
 La 100 Ω: semnal 0.4-2V

BUGET DE TENSIUNE (compliance voltage)

Un transmițător loop-powered are o cădere de tensiune internă (drop tipic 8-12V). Sarcina maximă admisă depinde de tensiunea de alimentare:

$R_{load_max} = (V_{cc} - V_{drop_min}) / I_{max}$
 Pentru $V_{cc} = 24V$, $V_{drop} = 12V$, $I_{max} = 22$ mA:
 $R_{load_max} = (24 - 12) / 0.022 = 545$ Ω

În practică se folosesc 250 Ω, lăsând o rezervă pentru cabluri lungi și modulele de barieră ATEX.

PROTOCOL HART (Highway Addressable Remote Transducer)

- Comunicație digitală suprapusă peste semnalul 4-20 mA
- Nu perturbă semnalul analogic
- Permite configurare, diagnosticare, calibrare de la distanță
- Frecvență: 1200 Hz (bit 1) și 2200 Hz (bit 0) — modulație FSK
- Rază: până la 1500m pe cablu standard

Informații transmise prin HART:

- Valoarea măsurată (temperatura)
- Starea dispozitivului (alarme, erori)
- Informații de identificare (tag, număr serie)
- Parametri de configurare (domeniu, unitate de măsură)

EXEMPLU COD PYTHON — conversie 4-20 mA la temperatură

```
def current_to_temp(mA, T_min, T_max):
```

```
return T_min + (mA - 4) / 16 * (T_max - T_min)
```

```
def temp_to_current(T, T_min, T_max):
    return 4 + (T - T_min) / (T_max - T_min) * 16
```

```
current_to_temp(12, -50, 150) --> 50.0°C
temp_to_current(50, -50, 150) --> 12.0 mA
```

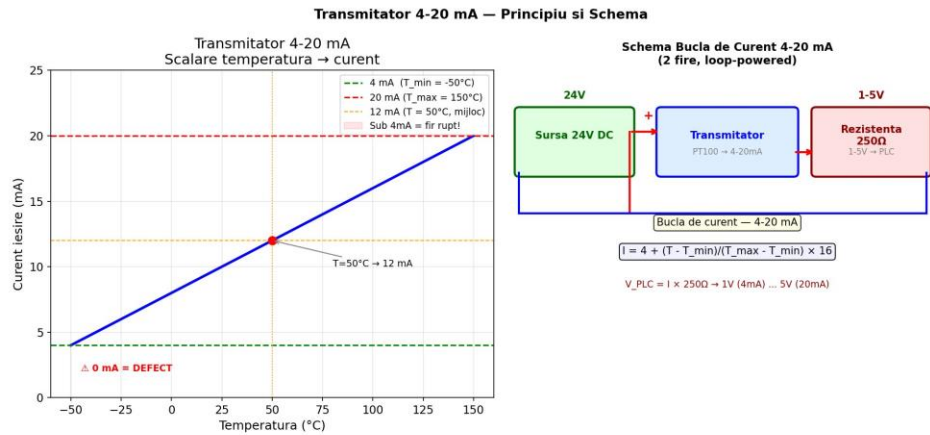


Fig. 11 — Transmițător 4-20 mA: scalare și schemă de buclă

15. MONTAJ ȘI INSTALARE

ADÂNCIMEA DE IMERSIE

Regulă generală: adâncimea minimă = 10× diametrul tecii de protecție

Exemplu: teacă de 6 mm diametru → imersie minimă 60 mm

Dacă adâncimea este insuficientă:

- Conducerea căldurii pe tijă introduce erori (stem conduction error)
- Senzorul măsoară parțial temperatura mediului ambiant

Formulă eroare de conducție:

$$\Delta T = (T_{\text{proces}} - T_{\text{ambiant}}) \cdot e^{(-n \cdot L/D)}$$

unde:

L = lungimea imersată
 D = diametrul tecii
 n = factor material (inox: ~4, cupru: ~2)

ORIENTARE DE MONTAJ

Recomandat:

- Vertical cu bulbul în jos (în lichide) → gravitația ajută contactul termic
- Unghi 45° în conducte → mai bun contact cu fluidul
- Împotriva direcției de curgere → măsurare mai precisă

De evitat:

- Orizontal în lichide cu vapori → bule de aer prind în jurul bulbului
- În zone cu turbulențe mari → vibrații, uzură mecanică

LUNGIMEA DE INSERȚIE în conducte

Poziționare optimă: în centrul conductei (1/3 din diametru pentru conducte mari)

Conductă DN25 (1"):	insertie 12 mm
Conductă DN50 (2"):	insertie 25 mm
Conductă DN100 (4"):	insertie 50 mm
Conductă DN200 (8"):	insertie 75 mm (1/3 din D)

DISTANȚA FAȚĂ DE PERTURBAȚII

- Minim 5× diametrul conductei față de coturi, valve, pompe
- Evitați montajul după o pompă (turbulență, cavitație)
- Evitați zona de aspirație a pompelor

CONTACT TERMIC

- Folosiți pastă termică la montaj în termowell
- Asigurați contact ferm între bulb și fundul termowellului
- Verificați ca bulbul să nu „atârne” în aer în interiorul termowellului

CABLURI ȘI TRASEE

- Separați cablurile de semnal de cablurile de putere (minim 30 cm)
- Folosiți cablu ecranat pentru distanțe > 10m
- Conectați ecranul la pământ doar la un capăt (capătul tabloului)
- Evitați bucle de pământ (ground loops)

PROTECȚIE LA VIBRAȚII

- Folosiți senzori wire-wound pentru vibrații < 50 Hz
- Thin-film pentru vibrații > 50 Hz (mai robust mecanic)
- Limitați lungimea liberă a tecii (risc de rezonanță)

16. TERMOWELL (ȚEAVA DE PROTECȚIE)

Termowellul este o țeavă etanșă montată în procesul industrial în care se introduce senzorul, protejându-l fără a întrerupe procesul pentru înlocuire.

AVANTAJE

- Senzorul poate fi înlocuit fără oprirea procesului
- Protejează senzorul de presiune, coroziune, abraziune
- Permite montaj în conducte sub presiune


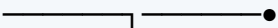
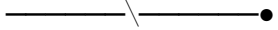
DEZAVANTAJE

- Timp de răspuns mai lent (masă termică suplimentară)
- Cost suplimentar
- Risc de rezonanță la viteze mari ale fluidului

MATERIALE

Material	Rezistență chimică	Temp. max	Utilizare
Inox 316L	Bună	600°C	General industrial
Inox 310S	Bună la temp. înalte	1000°C	Cuptoare
Hastelloy C-276	Excelentă	700°C	Acizi, cloruri
Titan	Excelentă	300°C	Marine, farmaceutic
Ceramic (Al ₂ O ₃)	Chimică extremă	1600°C	Temperaturi foarte înalte
Grafit	Reducătoare	2000°C	Topitorii

FORME CONSTRUCTIVE

Formă	Profil (secțiune)	Caracteristici
Drept (straight)		Cel mai simplu, pentru conducte mari
Cotat (stepped)		Secțiune mai mică la vârf → răspuns mai rapid
Conic (tapered)		Rezistență maximă la vibrație

CALCUL WAKE FREQUENCY (rezonanță Strouhal)

Un fluid care curge în jurul termowellului generează vârtejuri periodice. Dacă frecvența acestora coincide cu frecvența naturală a termowellului → rezonanță → rupere prin oboseală!

Frecvența Strouhal:

$$f_s = S \cdot v / d$$

unde:

S = numărul Strouhal (~ 0.22 pentru cilindru)
 v = viteza fluidului (m/s)
 d = diametrul exterior termowell (m)

Verificare: f_s trebuie să fie $< 80\%$ din frecvența naturală a termowellului.

Standardul ASME PTC 19.3 TW definește procedura completă de calcul.

PRESIUNE MAXIMĂ ADMISĂ

Depinde de material, diametru, temperatură și lungimea de inserție. Termowell-urile standard suportă 100-400 bar în funcție de construcție.

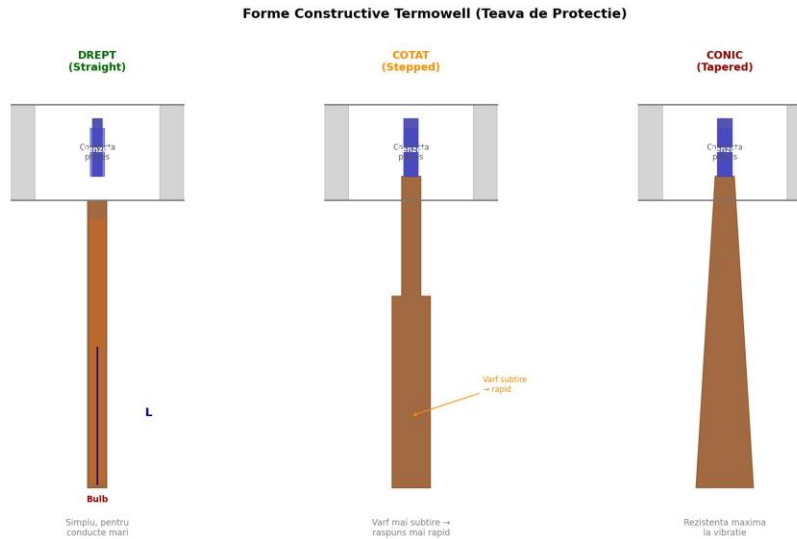


Fig. 12 — Forme constructive termowell: drept, cotat, conic

17. CALIBRARE ȘI VERIFICARE

PUNCTE DE REFERINȚĂ FIXE

Pentru calibrarea termorezistențelor se folosesc două categorii distincte de puncte de referință: puncte fixe oficiale ITS-90 (reproductibile cu precizie metrologică) și referințe practice de laborator (mai accesibile, dar cu incertitudine mai mare).

Puncte fixe oficiale ITS-90 (uz metrologic)

Punct fix	Temperatură T_{90}
Punct triplu Hg	-38.8344°C — celulă sigilată
Punct triplu apă (TPW)	0.010°C — celulă etanșă la 611.657 Pa
Punct topire Ga	29.7646°C — celulă de galiu pur
Punct înghețare In	156.5985°C — la 1 atm
Punct înghețare Sn	231.928°C — la 1 atm
Punct înghețare Zn	419.527°C — la 1 atm
Punct înghețare Al	660.323°C — la 1 atm
Punct înghețare Ag	961.78°C — la 1 atm

Referințe practice de laborator (uz industrial)

Mediu	Temperatură (aproximativă)
Amestec apă + gheață (1 atm)	0.000°C — punct de îngheț al apei
Apă fiartă (1 atm)	99.974°C — punct de fierbere ITS-90
Azot lichid (1 atm)	-195.8°C — punct de fierbere
Dioxid de carbon solid (CO ₂)	-78.5°C — sublimare la 1 atm

Notă 1: Punctul de îngheț al apei (0.000°C la 1 atm) și punctul triplu al apei (0.010°C, în vid parțial 611.657 Pa) sunt două puncte fixe DISTINCTE. Punctul triplu este folosit ca referință în ITS-90 pentru că este mai stabil și mai reproductibil decât punctul de îngheț.

Notă 2: Punctul de fierbere al apei la 1 atm NU este 100.000°C exact, ci 99.974°C în ITS-90 — diferența de 26 mK provine din redefinirile scării de temperatură (IPTS-68 → ITS-90). În plus, valoarea reală depinde de presiunea atmosferică locală: la altitudine apa fierbe la temperaturi mai mici (ex. la 1500 m altitudine, ~95°C). Pentru calibrare de precizie, punctele de fierbere/sublimare la 1 atm trebuie corectate cu valoarea reală a presiunii atmosferice.

CALIBRARE ÎN DOUĂ PUNCTE

- Măsurați R la 0°C (gheață + apă) → R_0
- Măsurați R la 100°C (apă fiartă) → R_{100}

3. Calculați α real:

$$\alpha_{\text{real}} = (R_{100} - R_0) / (R_0 \cdot 100)$$

4. Comparați cu α nominal (0.00385)

5. Introduceți corecția în sistemul de achiziție

CALIBRARE MULTIPUNCT

- Minimum 5 puncte distribuite pe domeniul de lucru
- Ajustare prin regresie polinomială
- Necesară pentru aplicații de precizie înaltă (clasă AA)

DRIFT ÎN TIMP

PT100 de calitate industrială: drift tipic < 0.1°C / an

Cauze de drift accelerat:

- Contaminare chimică a firului de platină
- Vibrații mecanice (deformare fir)
- Șoc termic repetitiv
- Temperatură peste limita specificată

INTERVAL DE RECALIBRARE RECOMANDAT

Aplicație	Interval
Laborator	6 luni - 1 an
Industrial critic	1 - 2 ani
Industrial standard	2 - 5 ani
HVAC	5 ani

VERIFICARE RAPIDĂ PE TEREN

La 0°C (gheață + apă distilată):

PT100 bun: 98 - 102 Ω
 PT1000 bun: 980 - 1020 Ω

Orice abatere > 1% → senzor suspect, necesită înlocuire sau recalibrare.

18. PROTECȚII ȘI CERTIFICĂRI

GRAD DE PROTECȚIE IP (Ingress Protection — IEC 60529)

Cod IP	Prima cifră (solid)	A doua cifră (lichid)
IP20	Protejat > 12 mm	Fără protecție
IP54	Protejat la praf	Stropi din orice direcție
IP65	Total antipraf	Jet de apă
IP67	Total antipraf	Imersie 1m / 30 min
IP68	Total antipraf	Imersie continuă (specificat de producător)
IPx9 (IEC) / IP69K (ISO)	Total antipraf	Jet apă fierbinte la presiune înaltă

Notă: „IP69K” este denumirea consacrată din standardul german DIN 40050-9 (retras în 2012) și ulterior din ISO 20653 (industria auto). În standardul general IEC 60529 (Amendamentul 2 din 2013), denumirea oficială pentru testul cu apă fierbinte la presiune înaltă este IPx9 — fără sufixul „K” (acesta aparține exclusiv familiei DIN/ISO și provine de la „Kraftfahrzeug” = autovehicul în germană, NU indică temperatura). Testele IPx9 (IEC) și IPx9K (ISO 20653) sunt aproape identice tehnic — apă la ~80°C, 80–100 bar — dar metodologia de verificare diferă (IEC măsoară forța jetului 0.9–1.2 N, ISO specifică presiune+nozzle). În industria alimentară și farmaceutică denumirea „IP69K” a rămas dominantă din inerție comercială, deși nu mai există ca standard activ în forma DIN.

Standard industrial pentru PT100: minim IP65.

Medii umede, spălare cu furtun: IP67 sau IP69K (industrie alimentară/auto).

CERTIFICARE ATEX (ATmospheres EXplosibles — Directiva 2014/34/EU)

Obligatorie în zone cu pericol de explozie (gaze, vapori, praf).

Categoriile de zone:

- Zone 0 / Zone 20 → pericol permanent → echipament Cat. 1
- Zone 1 / Zone 21 → pericol ocazional → echipament Cat. 2
- Zone 2 / Zone 22 → pericol rar → echipament Cat. 3

Marcare exemplu:

©x II 2G Ex ia IIC T4 Ga

- └─ Nivel de protecție
- └─ Grupa de gaz (IIC = hidrogen, acetilenă)
- └─ Clasa de temperatură (T4 = max 135°C suprafață)
- └─ Mod de protecție (ia = securitate intrinsecă)
- └─ Tip atmosferă (G = gaz, D = praf)
- └─ Categoria (2 = zona 1/21)

Mod de protecție pentru RTD-uri:

- "ia" sau "ib" (securitate intrinsecă): cel mai comun

- Curentul și tensiunea limitate sub nivelul de aprindere

PROTECȚIE EMI/RFI

- Cablu ecranat: reducere EMI cu 40-60 dB
- Ecran conectat la pământ la un singur capăt (capătul tabloului)
- Filtru RC la intrarea modulului de achiziție
- Separare fizică de cabluri de putere (motoare, invertoare)

PROTECȚIE LA SUPRATENSIUNE (surge protection)

- Descărcătoare (TVS diodes) la intrarea modulelor
- Importante pentru instalații în exterior sau zone cu fulgere
- Standard: IEC 61000-4-5 (testare la supratensiune)

19. INTERFEȚE DIGITALE MODERNE

MODBUS RTU (cel mai răspândit în industrie)

- Protocol serial RS-485, până la 1200m, până la 32 dispozitive pe segment
- Viteză: 9600 - 115200 baud (tipic 19200 sau 38400)

Registri tipici pentru transmițător PT100:

```
40001: temperatura (valoare întreagă, ×10)
40002: curent de ieșire 4-20 mA (×100)
40003: stare alarme
40004: limită alarmă joasă
40005: limită alarmă înaltă
```

Exemplu citire temperatură (Python cu pymodbus):

```
from pymodbus.client import ModbusSerialClient

client = ModbusSerialClient(port='COM1', baudrate=19200)
result = client.read_holding_registers(address=0, count=1, slave=1)
temperature = result.registers[0] / 10.0 # ex: 253 → 25.3°C
```

FOUNDATION FIELDBUS (FF)

- Protocol digital complet (înlocuiește 4-20 mA)
- Alimentare și comunicație pe același cablu (2 fire)
- Până la 32 dispozitive pe segment, viteză 31.25 kbps
- Permite control descentralizat (PID direct în transmițător)
- Utilizat în industria petrolieră și chimică

PROFIBUS PA

- Variantă Profibus pentru instrumentație de proces
- Similar ca topologie cu Foundation Fieldbus
- Viteză 31.25 kbps, până la 32 dispozitive / segment
- Integrat cu sisteme Siemens, ABB, Endress+Hauser

IO-LINK (IEC 61131-9)

- Protocol digital punct-la-punct (senzor → master)
- Distanță max: 20m, cablu standard neecranat M12
- Viteză: până la 230.4 kbps (COM3)
- Plug-and-play: identificare automată senzor, parametrizare automată
- Potrivit pentru mașini și automatizare fabrică (nu process industry)
- Avantaj: înlocuire senzor fără reconfigurare manuală

WIRELESS (WirelessHART — IEC 62591)

- Rețea mesh, frecvență 2.4 GHz (IEEE 802.15.4)
- Rază: 50-100m între noduri, până la 250 noduri în rețea

- Alimentare: baterie (5-10 ani) sau energy harvesting
- Latență: 4-30 secunde (nu pentru control în timp real)
- Potrivit pentru: monitorizare, puncte greu accesibile, retrofit

COMPARAȚIE INTERFEȚE

Protocol	Tip	Viteză	Distanță	Dispozitive	Utilizare
4-20 mA	Analog	—	1000m	1	Universal
4-20 mA + HART	Hibrid	1.2 kbps	1500m	1 (multidrop:15)	Industrial
Modbus RTU	Serial	115 kbps	1200m	247	Industrial
Profibus PA	Serial	31.25 kbps	1900m	32/segment	Process
Foundation FB	Serial	31.25 kbps	1900m	32/segment	Process
IO-Link	Serial	230 kbps	20m	1	Mașini
WirelessHART	Wireless	250 kbps	100m/nod	250	Monitorizare

20. JUSTIFICARE MATEMATICĂ ȘI COD C++

20.1 TEMPERATURĂ → REZISTENȚĂ

Cazul $T \geq 0^\circ\text{C}$ (ecuație pătratică)

Pornim de la formula Callendar-Van Dusen:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2)$$

Aceasta este directă — se calculează simplu prin substituție.

Cazul $T < 0^\circ\text{C}$ (polinom de gradul 4)

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100) \cdot T^3)$$

Expandând termenul C:

$$C \cdot (T - 100) \cdot T^3 = C \cdot T^4 - 100 \cdot C \cdot T^3$$

Forma completă:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^4 - 100 \cdot C \cdot T^3)$$

Și aceasta este directă prin substituție.

Domeniu valid: $-200^\circ\text{C} \dots 0^\circ\text{C}$. La $T = -200^\circ\text{C}$: $R \approx 18.52 \Omega$ (PT100).

20.2 REZISTENȚĂ → TEMPERATURĂ

Această direcție este mai complexă matematic — trebuie să inversăm un polinom.

Cazul $T \geq 0^\circ\text{C}$ — inversare analitică (formulă pătratică)

Pornim de la $R = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2)$. Împărțim prin R_0 :

$$R/R_0 = 1 + A \cdot T + B \cdot T^2$$

Rearanjăm în forma standard $a \cdot x^2 + b \cdot x + c = 0$:

$$B \cdot T^2 + A \cdot T + (1 - R/R_0) = 0$$

Identificăm coeficienții:

$$\begin{aligned} a &= B = -5.775 \times 10^{-7} \\ b &= A = 3.9083 \times 10^{-3} \\ c &= 1 - R/R_0 \end{aligned}$$

Formula pătratică (Bhaskara):

$$\begin{aligned} T &= \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \\ T &= \frac{-A \pm \sqrt{A^2 - 4 \cdot B \cdot (1 - R/R_0)}}{2 \cdot B} \end{aligned}$$

Alegerea rădăcinii corecte

Ecuația are două rădăcini. Trebuie să alegem cea care dă $T \approx 0$ când $R = R_0$:

La $R = R_0$: $c = 0$

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{-A + \sqrt{A^2}}{2B} = \frac{-A + A}{2B} = 0 \quad \checkmark \text{ corectă} \\ T_2 &= \frac{-A - \sqrt{A^2}}{2B} = \frac{-2A}{2B} = -A/B \approx 6765^\circ\text{C} \quad \times \text{ rădăcină spurie} \end{aligned}$$

Prin urmare alegem TOTDEAUNA rădăcina „+”:

$$T = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4 \cdot B \cdot (1 - R/R_0)}}{2 \cdot B}$$

Verificare numerică

$R = 138.506 \Omega$ (ar trebui să dea $T = 100^\circ\text{C}$)

$$\begin{aligned} c &= 1 - 138.506/100 = -0.38506 \\ \Delta &= (3.9083e-3)^2 - 4 \cdot (-5.775e-7) \cdot (-0.38506) \\ &= 1.5275e-5 - 8.891e-7 \\ &= 1.4386e-5 \\ \sqrt{\Delta} &= 3.7929e-3 \\ T &= (-3.9083e-3 + 3.7929e-3) / (2 \cdot (-5.775e-7)) \\ &= (-1.154e-4) / (-1.155e-6) \\ &= 99.91^\circ\text{C} \approx 100^\circ\text{C} \quad \checkmark \end{aligned}$$

Cazul $T < 0^\circ\text{C}$ — inversare numerică (Newton-Raphson)

Pornim de la $R = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T-100) \cdot T^3)$. Expandând:

$$R_0 \cdot C \cdot T^4 - 100 \cdot R_0 \cdot C \cdot T^3 + R_0 \cdot B \cdot T^2 + R_0 \cdot A \cdot T + R_0 - R = 0$$

Aceasta este o ECUAȚIE DE GRADUL 4 (quartică).

Deși există soluția analitică Ferrari (1540), implică:

- Reducere la cubic rezolvent
- Discriminant cubic
- 3 rădăcini pătrate îmbricate

→ Complet impracticabil pentru sisteme embedded!

Soluție preferată: metoda Newton-Raphson (iterativă)

Algoritmul Newton-Raphson

Definim funcția de rezolvat:

$$f(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T-100) \cdot T^3) - R = 0$$

Derivata (necesară pentru iterație):

$$f'(T) = dR/dT = R_0 \cdot d/dT[1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T-100) \cdot T^3]$$

Calculăm derivata termenului C:

$$d/dT[C \cdot (T-100) \cdot T^3] = C \cdot d/dT[T^4 - 100 \cdot T^3] = C \cdot (4 \cdot T^3 - 300 \cdot T^2)$$

Deci:

$$f'(T) = R_0 \cdot (A + 2 \cdot B \cdot T + C \cdot (4 \cdot T^3 - 300 \cdot T^2))$$

Formula de iterație:

$$T_{(n+1)} = T_n - f(T_n) / f'(T_n)$$

Punct de start (T_0)

Folosim formula pătratică (ignorând termenul C) ca aproximație inițială. Aceasta dă o valoare apropiată de soluția reală, accelerând convergența.

Convergență

Newton-Raphson converge pătratic lângă rădăcină:

- Eroarea se înjumătățește de ~ 2 ori la fiecare iterație (în sens logaritmic)
- Cu T_0 din formula pătratică: tipic 3-5 iterații sunt suficiente

- Precizie 10^{-6} °C atinsă în < 10 iterații

20.3 COD C++

▶ pt100.h

```
#pragma once
#include <cmath>
#include <stdexcept>

// Coeficienți IEC 60751 pentru platină
namespace CVD {
    constexpr double A = 3.9083e-3;    // /°C
    constexpr double B = -5.775e-7;   // /°C²
    constexpr double C = -4.183e-12;  // /°C⁴ (doar T < 0)
}

// -----
// tempToResistance()
// Temperatură [°C] → Rezistență [Ω]
// Aplicare directă Callendar-Van Dusen
// -----
double tempToResistance(double T, double R0 = 100.0)
{
    if (T >= 0.0)
        return R0 * (1.0 + CVD::A*T + CVD::B*T*T);
    else
        return R0 * (1.0 + CVD::A*T + CVD::B*T*T
                    + CVD::C*(T - 100.0)*T*T*T);
}

// -----
// quadraticApprox()
// Inversare analitică a ecuației pătratice (ignoră C)
// Valabilă exact pentru T >= 0
// Folosită ca T₀ pentru Newton-Raphson când T < 0
// Din: B·T² + A·T + (1 - R/R₀) = 0
// → T = (-A + sqrt(A² - 4·B·(1 - R/R₀))) / (2·B)
// -----
static double quadraticApprox(double R, double R0)
{
    double c = 1.0 - R / R0;
    double det = CVD::A*CVD::A - 4.0*CVD::B*c;
    if (det < 0.0)
        throw std::domain_error("PT100: rezistență în afara domeniului");
    // Rădăcină "+": singura care dă T=0 când R=R₀
    return (-CVD::A + std::sqrt(det)) / (2.0 * CVD::B);
}

// -----
// resistanceToTemp()
// Rezistență [Ω] → Temperatură [°C]
//
// T >= 0: formulă analitică exactă (pătratică)
// T < 0: Newton-Raphson pe ecuația de grad 4
//
// f(T) = R₀·(1 + A·T + B·T² + C·(T-100)·T³) - R
// f'(T) = R₀·(A + 2·B·T + C·(4·T³ - 300·T²))
```

```
// -----
double resistanceToTemp(double R, double R0 = 100.0,
                       int maxIter = 50,
                       double tol = 1e-6)
{
    // Pas 1: aproximație pătratică (exactă pt T>=0, bun T0 pt T<0)
    double T = quadraticApprox(R, R0);

    // Pas 2: dacă T >= 0, formula pătratică este exactă → gata
    if (T >= 0.0)
        return T;

    // Pas 3: T < 0 → rafinăm cu Newton-Raphson
    for (int i = 0; i < maxIter; ++i)
    {
        double T2 = T * T;
        double T3 = T2 * T;

        // f(T) = R(T) - R_măsurat
        double f = R0 * (1.0
                        + CVD::A * T
                        + CVD::B * T2
                        + CVD::C * (T - 100.0) * T3) - R;

        // f'(T) = dR/dT
        // d/dT[C·(T-100)·T³] = C·(4T³ - 300T²)
        double df = R0 * (CVD::A
                        + 2.0 * CVD::B * T
                        + CVD::C * (4.0*T3 - 300.0*T2));

        double step = -f / df;
        T += step;

        if (std::fabs(step) < tol)
            break;
    }
    return T;
}
```

► main.cpp — Testare și validare

```
#include <cstdio>
#include "pt100.h"

int main()
{
    puts("=== PT100 IEC 60751 - Validare ===\n");

    // Tabel de test: valori cunoscute din standard
    struct TestCase { double T_ref; double R_ref; };
    TestCase tests[] = {
        { -200.0, 18.52 },
        { -100.0, 60.26 },
        { -50.0, 80.31 },
        { 0.0, 100.00 },
        { 50.0, 119.40 },
        { 100.0, 138.51 },
        { 200.0, 175.86 },
    };
}
```

```

    { 400.0, 247.09 },
    { 850.0, 390.48 },
};

for (auto& t : tests) {
    double R_calc = tempToResistance(t.T_ref);
    double T_inv = resistanceToTemp(R_calc);
    printf("T=%7.1f R_calc=%9.4f T_inv=%9.4f\n",
          t.T_ref, R_calc, T_inv);
}
return 0;
}

```

20.4 NOTĂ PENTRU SISTEME EMBEDDED

Pe microcontrolere cu resurse limitate (Arduino, STM32, PIC):

1. Folosiți float în loc de double (4 bytes vs 8 bytes):

```
float tempToResistance(float T, float R0 = 100.0f) { ... }
```

2. Pentru $T \geq 0$ EXCLUSIV (aplicații industriale simple):

- Folosiți DOAR formula pătratică (nu aveți nevoie de Newton-Raphson)
- Economisiți ~200 bytes flash

3. Aproximare liniară (eroare ~0.5°C pe domeniu 0-100°C):

```

T ≈ (R - R0) / (R0 · α)
T ≈ (R - 100.0) / 0.385 // pentru PT100

```

4. Tabelă de căutare (lookup table):

- Stocați perechi (R, T) în memoria flash
- Interpolați liniar între puncte
- 100 puncte → ~400 bytes flash, eroare < 0.05°C

21. METODE MAI PRECISE DECÂT CALLENDAR-VAN DUSEN

21.1 IERARHIA PRECIZIEI

Metodă	Precizie	Utilizare
Formulă liniară simplă	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	HVAC, sisteme simple
Callendar-Van Dusen (std.)	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	Industrial standard
CVD cu coef. individuali	$\pm 0.01^{\circ}\text{C}$	Instrumente de precizie
Spline cubică pe date calibrare	$\pm 0.001^{\circ}\text{C}$	Laborator
ITS-90	$\pm 0.0001^{\circ}\text{C}$	Metrologie națională

21.2 CALIBRARE INDIVIDUALĂ (CVD CU COEFICIENȚI PROPRII)

Problema standardului

Callendar-Van Dusen folosește coeficienți identici pentru toți senzorii. Fiecare senzor real are însă coeficienți ușor diferiți din cauza:

- Variațiilor la fabricație
- Purității diferite a platinei
- Tensiunilor interne în fir

Senzor nominal:	$A = 3.9083e-3$	$B = -5.775e-7$	$C = -4.183e-12$
Senzor real măsurat:	$A = 3.9071e-3$	$B = -5.801e-7$	$C = -4.201e-12$
Diferență:	$\Delta A = -0.0012e-3 \rightarrow$ eroare $\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ la 100°C		

Procedura de calibrare individuală

Măsurare la minim 3 puncte pentru $T \geq 0$ (determină A și B):

$R(0^{\circ}\text{C}) \rightarrow R_0$
$R(T_1) \rightarrow R_1$ (ex: $T_1 = 100^{\circ}\text{C}$)
$R(T_2) \rightarrow R_2$ (ex: $T_2 = 200^{\circ}\text{C}$)

Sistem de ecuații:

$R_1/R_0 - 1 = A \cdot T_1 + B \cdot T_1^2$	[1]
$R_2/R_0 - 1 = A \cdot T_2 + B \cdot T_2^2$	[2]

Din [1] și [2] scoatem A și B:

$B = [(R_1/R_0 - 1)/T_1 - (R_2/R_0 - 1)/T_2] / (T_1 - T_2)$
$A = (R_1/R_0 - 1)/T_1 - B \cdot T_1$

Pentru C (domeniu negativ): necesită minim 4 puncte (un punct sub 0°C).

Cod C++ — Calibrare în două puncte ($T \geq 0$)

```
struct CVD_Coeffs {
    double R0;    // rezistența la 0°C [Ω]
    double A;    // coeficient /°C
```

```

double B;      // coeficient /°C²
double C;      // coeficient /°C⁴ (0 dacă nu se calibrează sub 0°C)
};

CVD_Coeffs calibrate2Point(double R0,
                           double T1, double R1,
                           double T2, double R2)
{
    if (T1 == T2)
        throw std::invalid_argument("T1 și T2 trebuie să fie diferite");

    double w1 = R1/R0 - 1.0;    // W(T1) - 1
    double w2 = R2/R0 - 1.0;    // W(T2) - 1

    // Rezolvăm sistemul:
    // w1 = A·T1 + B·T1²
    // w2 = A·T2 + B·T2²
    double B_cal = (w1/T1 - w2/T2) / (T1 - T2);
    double A_cal = w1/T1 - B_cal*T1;

    return { R0, A_cal, B_cal, 0.0 };
}

```

Exemplu de utilizare

```

// Măsurători la puncte de referință
double R0 = 100.012; // măsurat în baie de gheață 0°C
double R1 = 138.491; // măsurat la 100°C (apă fiartă)
double R2 = 175.841; // măsurat la 200°C (ulei de silicon)

CVD_Coeffs coeff = calibrate2Point(R0, 100.0, R1, 200.0, R2);
// coeff.A = 3.9071e-3 (diferit de standard 3.9083e-3)
// coeff.B = -5.801e-7

double T = rToTemp_cal(119.380, coeff);
// → 49.97°C (în loc de 50.13°C cu coeficienți standard)

```

21.3 INTERPOLAREA CU SPLINE CUBICE

Principiu

În loc de un singur polinom global (Callendar-Van Dusen grad 4), folosim un polinom de grad 3 DIFERIT pe fiecare interval dintre punctele de calibrare.

Pe intervalul $[T_i, T_{i+1}]$:

$$S_i(T) = a_i + b_i \cdot (T - T_i) + c_i \cdot (T - T_i)^2 + d_i \cdot (T - T_i)^3$$

Condiții impuse:

1. Continuitate în valori: $S_i(T_{i+1}) = S_{i+1}(T_{i+1})$
2. Continuitate în derivate: $S_i'(T_{i+1}) = S_{i+1}'(T_{i+1})$
3. Continuitate în derivate 2: $S_i''(T_{i+1}) = S_{i+1}''(T_{i+1})$
4. Valori la punctele de calibrare: $S_i(T_i) = R_i$

Rezultat: sistem tridiagonal de n-1 ecuații — se rezolvă eficient (algoritmul Thomas).

De ce e mai precis

Callendar-Van Dusen: un polinom grad 4 pe tot domeniul → compromis între acuratețe la capete și la mijloc.

Spline cubică: polinom diferit pe fiecare sub-interval → eroare mică uniform pe tot domeniul, fără fenomenul Runge (oscilații la capete).

21.4 SCALA ITS-90 (International Temperature Scale 1990)

ITS-90 este standardul internațional de temperatură adoptat în 1990, implementat prin SPRT (Standard Platinum Resistance Thermometer) — senzori din platină foarte pură, montați strain-free în suport din cuarț.

Structura ITS-90 pentru platină (13.8 K ... 1234.9 K)

Sub-interval	Puncte de referință folosite
13.8 K - 273.16 K	11 puncte fixe (He, H ₂ , Ne, O ₂ , Ar, Hg, H ₂ O)
0°C - 961.78°C	Punctul triplu al apei + Sn, Zn, Al, Ag

Funcția de referință ITS-90

$$W_r(T_{90}) = \exp \left[A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \cdot (\ln(T_{90}/754.15))^i \right]$$

Coeficienți $A_0 \dots A_{12}$ definiți în tabelul BIPM (13 valori).

Funcția de deviere (specifică fiecărui SPRT calibrat)

$$W(T_{90}) = R(T_{90}) / R(273.16 \text{ K}) \quad \leftarrow \text{raport față de punctul triplu al apei}$$

$$\Delta(W) = W(T_{90}) - W_r(T_{90})$$

Diferența practică față de Callendar-Van Dusen

Temperatură (°C)	CVD - ITS-90 (diferență)
-200	+0.013°C
-100	+0.006°C
0	0.000°C (identice prin definiție)
100	-0.001°C
300	-0.010°C
600	-0.025°C
850	-0.040°C

La temperaturi extreme (< -100°C sau > 400°C), diferența CVD vs ITS-90 devine semnificativă pentru aplicații metrologice.

Cine folosește ITS-90

- Institute naționale de metrologie: NIST (SUA), PTB (Germania), NPL (Marea Britanie), BRML (România)
- Laboratoare de etalonare acreditate
- Producători de senzori de precizie (calibrare internă)
- Industrie farmaceutică / biomedicală (validare FDA)

21.5 COMPARAȚIE FINALĂ — ALEGEREA METODEI POTRIVITE

Aplicație	Metodă recomandată	Precizie
Termostat casă, HVAC	Formulă liniară	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
PLC industrial standard	CVD coef. standard	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
Instrument de măsură	CVD coef. individuali	$\pm 0.01^{\circ}\text{C}$
Calibrator portabil	Spline pe date calibrare	$\pm 0.001^{\circ}\text{C}$
Laborator de etalonare	ITS-90 + SPRT	$\pm 0.0001^{\circ}\text{C}$
Referință națională	ITS-90 + SPRT primar	$\pm 0.00001^{\circ}\text{C}$

Regulă practică: precizia metodei NU trebuie să depășească precizia SENZORULUI. Un PT100 clasă B ($\pm 0.3^{\circ}\text{C}$) cu ITS-90 nu devine mai precis — limitează întotdeauna componenta cu precizia cea mai mică.

22. TABELELE BIPM — ITS-90 COMPLET

Sursa: BIPM — „The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)”, Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres, France, 1990. Autor: H. Preston-Thomas.

22.1 PUNCTELE FIXE DE DEFINIȚIE ITS-90

Nr	Stare	Material	T ₉₀ (K)	T ₉₀ (°C)	W _r (T ₉₀)
1	VP	He-3 sau He-4	3.0 - 5.0	-270.15...	—
2	TP	H ₂ (echilibru)	13.8033	-259.3467	0.00119007
3	VP	H ₂ (echilibru)	~17.0	~-256.15	—
4	VP	H ₂ (echilibru)	~20.3	~-252.85	—
5	TP	Ne (neon)	24.5561	-248.5939	0.00844974
6	TP	O ₂ (oxigen)	54.3584	-218.7916	0.09171804
7	TP	Ar (argon)	83.8058	-189.3442	0.21585975
8	TP	Hg (mercur)	234.3156	-38.8344	0.84414211
9	TP	H ₂ O (apă)	273.16	0.01	1.00000000
10	MP	Ga (galiu)	302.9146	29.7646	1.11813889
11	FP	In (indiu)	429.7485	156.5985	1.60980185
12	FP	Sn (staniu)	505.0780	231.9280	1.89279768
13	FP	Zn (zinc)	692.6770	419.5270	2.56891730
14	FP	Al (aluminiu)	933.4730	660.3230	3.37600860
15	FP	Ag (argint)	1234.9300	961.7800	4.28642053

Legendă stări:

- VP = Vapour Pressure (presiune de vapori)
- TP = Triple Point (punct triplu)
- MP = Melting Point (punct de topire)
- FP = Freezing Point (punct de înghețare)

$W_r(T_{90}) = R(T_{90}) / R(273.16 \text{ K})$ — raport de rezistență față de punctul triplu al apei (definiția de bază a scării ITS-90).

Notă: $W_r = 1.00000000$ la punctul triplu al apei ($273.16 \text{ K} = 0.01^\circ\text{C}$) este definiția fundamentală — nu se măsoară, se impune.

22.2 FUNCȚIA DE REFERINȚĂ — DOMENIU SCĂZUT (formula 9a)

Domeniu: 13.8033 K ... 273.16 K (-259.3467°C ... 0.01°C)

Forma funcțională (W_r ca funcție de T_{90})

$$\ln(W_r(T_{90})) = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \cdot x^i$$

unde:

$$x = (\ln(T_{90} / 273.16 \text{ K}) + 1.5) / 1.5$$

T_{90} exprimat în Kelvin
 $W_r = R(T_{90}) / R(273.16 \text{ K})$

Coeficienții $A_0 \dots A_{12}$ (Preston-Thomas, Metrologia 27, Tab. 4, 1990)

i	A_i
0	-2.13534729
1	3.18324720
2	-1.80143597
3	0.71727204
4	0.50344027
5	-0.61899395
6	-0.05332322
7	0.28021362
8	0.10715224
9	-0.29302865
10	0.04459872
11	0.11868632
12	-0.05248134

Funcția inversă (T_{90} ca funcție de W_r) — formula 9b

Pentru a obține temperatura din raportul de rezistență măsurat (W_r), BIPM oferă o funcție inversă echivalentă cu 9a la mai bine de 0.1 mK precizie:

$$T_{90} / 273.16 \text{ K} = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \cdot z^i$$

unde:

$$z = (W_r^{1/6} - 0.65) / 0.35$$

Coeficienții $B_0 \dots B_{15}$ (formula 9b)

i	B_i
0	0.183324722
1	0.240975303
2	0.209108771

3	0.190439972
4	0.142648498
5	0.077993465
6	0.012475611
7	-0.032267127
8	-0.075291522
9	-0.056470670
10	0.076201285
11	0.123893265
12	-0.029201193
13	-0.091113542
14	0.001317696
15	0.026025526

22.3 FUNCȚIA DE REFERINȚĂ — DOMENIU RIDICAT (formula 10a)

Domeniu: 273.15 K ... 1234.93 K (0°C ... 961.78°C) — cea mai folosită zonă în practică

Forma funcțională (Wr ca funcție de T₉₀)

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \cdot y^i$$

unde:

$$y = (T_{90} / K - 754.15) / 481$$

T₉₀ exprimat în Kelvin

Coefficienții C₀...C₉ (Preston-Thomas, Metrologia 27, Tab. 4, 1990)

i	C _i
0	2.78157254
1	1.64650916
2	-0.13714390
3	-0.00649767
4	-0.00234444
5	0.00511868
6	0.00187982
7	-0.00204472

8	-0.00046100
9	0.00045724

Funcția inversă (T_{90} ca funcție de W_r) — formula 10b

Pentru a obține T direct din W_r (precizie ~ 0.13 mK):

$$T_{90} / \text{K} - 273.15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \cdot w^i$$

unde:

$$w = (W_r(T_{90}) - 2.64) / 1.64$$

Coeficienții $D_0 \dots D_9$ (formula 10b)

i	D_i
0	439.932854
1	472.418020
2	37.684494
3	7.472018
4	2.920828
5	0.005184
6	-0.963864
7	-0.188732
8	0.191203
9	0.049025

Notă pentru implementare: pentru utilizarea practică a ITS-90 într-un sistem de măsurare digital, formulele 9b și 10b (cu coeficienții B și D de mai sus) sunt cele mai utile — convertesc direct W_r măsurat în temperatură T_{90} fără iterații numerice. Eroarea introdusă de aceste forme inverse este mai mică decât incertitudinea oricărui SPRT real.

22.4 FUNCȚIILE DE DEVIERE ITS-90

Fiecare SPRT real diferă ușor de funcția de referință W_r . Devierea $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$ este o funcție de calibrare individuală.

Forma deviației depinde de sub-intervalul ales și de numărul punctelor fixe folosite la calibrare:

Sub-intervalele ITS-90 pentru platină

SI	Domeniu (K)	Forma deviere $\delta(W)$	Puncte calibrare
1	13.8033 — 273.16	$a(W-1) + b(W-1)\ln W + c(\ln W)^2 + d(\ln W)^3$	4: e-H ₂ , Ne, O ₂ , Ar

2	24.5561 — 273.16	$a(W-1) + b(W-1)\ln W + c(\ln W)^2$	3: Ne, O ₂ sau Ar, H ₂ O
3	54.3584 — 273.16	$a(W-1) + b(W-1)\ln W$	2: O ₂ , H ₂ O
4	83.8058 — 273.16	$a(W-1)$	1: Ar sau O ₂
5	234.3156 — 302.9146	$a(W-1)$	1: Ga sau Hg
6	273.15 — 302.9146	$a(W-1)$	1: Ga
7	273.15 — 429.7485	$a(W-1)$	1: In
8	273.15 — 505.0780	$a(W-1)$	1: Sn
9	273.15 — 692.677	$a(W-1) + b(W-1)^2$	2: Sn + Zn
10	273.15 — 933.473	$a(W-1) + b(W-1)^2$	2: Zn + Al
11	273.15 — 1234.93	$a(W-1) + b(W-1)^2 + c(W-1)^3$	3: Sn + Zn + Ag

SI = Sub-Interval; coeficienții a, b, c, d sunt DIFERIȚI pentru fiecare SPRT în parte.

Notă: Coeficienții a, b, c, d sunt unici pentru fiecare senzor fizic. Sunt determinați prin calibrare la un laborator acreditat. NU sunt valori standard — fiecare SPRT are propriul certificat.

22.5 FLUXUL COMPLET DE CALIBRARE ITS-90

Părțile implicate

- SPRT (senzor): Standard Platinum Resistance Thermometer — platină cu puritate > 99.999%
- Laborator acreditat ISO 17025: aplică schema ITS-90, emite certificatul de calibrare
- Sistem de măsură (utilizator): folosește parametrii din certificat pentru a obține T₉₀

Faza 1 — Calibrare (Laborator acreditat NMI / ISO 17025)

Pas	Acțiune	Instrument	Durată
1	Măsurare R _{ref} la punctul triplu al apei (273.16 K)	Punte de rezistență AC	1-2 ore
2	Măsurare R(T) la fiecare punct fix din sub-interval	ASL F18 / MTS 1521	4-8 ore
3	Calcul W _r _măsurat = R(T) / R _{ref}	Software calibrare	automat
4	Calcul deviere: $\Delta(W) = W_{\text{măsurat}} - W_{\text{ITS90}}$	Funcția referință BIPM	automat
5	Regresie: fit coeficienți a, b, c (d) din deviere	Cele mai mici pătrate	automat
6	Validare: calcul incertitudine extinsă U (k=2)	GUM / EURACHEM	1-2 ore

7	Emitere certificat de calibrare	LIMS laborator	1-5 zile
---	---------------------------------	----------------	----------

Faza 2 — Utilizare (Sistem de măsură al utilizatorului)

Pas	Acțiune	Formulă / Notă
8	Măsurare rezistență R în aplicație	$R [\Omega]$ — via punte / ADC 24-bit
9	Calcul raport: $W = R / R_{ref}$	R_{ref} din certificat de calibrare
10	Corecția devierii individuale	$W_r = W - \delta(W)$
11	Inversare numerică $W_r \rightarrow T_{90}$	Newton-Raphson conform BIPM

Comparație incertitudini tipice pe tipuri de senzori

Tip senzor / metodă	Incertitudine tip.	Standard / Referință
SPRT la NMI (BIPM, PTB, NPL)	0.1 - 0.5 mK	ITS-90 primar
SPRT calibrat ITS-90	1 - 5 mK	ISO 17025 / EURAMET
PT100 Clasă AA (IEC 60751)	$\pm 0.10^\circ\text{C}$ la 0°C	IEC 60751:2022
PT100 Clasă A	$\pm 0.15^\circ\text{C}$ la 0°C	IEC 60751:2022
PT100 Clasă B (industrial)	$\pm 0.30^\circ\text{C}$ la 0°C	IEC 60751:2022

23. METODA NEWTON-RAPHSON — PREZENTARE MATEMATICĂ

23.1 FORMULAREA PROBLEMEI

Se cunoaște rezistența măsurată R și se caută temperatura T astfel încât:

$$f(T) = 0, \quad \text{unde} \quad f(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T-100) \cdot T^3) - R_{\text{măsurat}}$$

Această ecuație de grad 4 nu are soluție analitică simplă pentru $T < 0^\circ\text{C}$, prin urmare se folosește metoda iterativă Newton-Raphson.

23.2 ALGORITMUL

Se alege o aproximație inițială T_0 (de ex. din formula pătratică pentru $T \geq 0$), apoi se construiește succesiunea:

$$T_{(n+1)} = T_n - f(T_n) / f'(T_n)$$

Derivata analitică a lui f în raport cu T :

$$f'(T) = R_0 \cdot (A + 2 \cdot B \cdot T + C \cdot (4 \cdot T^3 - 300 \cdot T^2))$$

Condiția de oprire:

$$|T_{(n+1)} - T_n| < \varepsilon \quad (\text{de exemplu } \varepsilon = 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$$

23.3 CONVERGENȚA PĂTRATICĂ

Fie T^* rădăcina exactă și $e_n = T_n - T^*$ eroarea la iterația n . Prin dezvoltare Taylor în jurul lui T^* :

$$\begin{aligned} f(T_n) &= f(T^*) + f'(T^*) \cdot (T_n - T^*) + (1/2) \cdot f''(\xi_n) \cdot (T_n - T^*)^2 \\ &= f'(T^*) \cdot e_n + (1/2) \cdot f''(\xi_n) \cdot e_n^2 \quad [f(T^*)=0] \end{aligned}$$

La pasul următor:

$$\begin{aligned} e_{(n+1)} &= T_{(n+1)} - T^* \\ &= T_n - f(T_n)/f'(T_n) - T^* \\ &= e_n - [f'(T^*) \cdot e_n + (1/2) \cdot f''(\xi_n) \cdot e_n^2] / f'(T_n) \end{aligned}$$

Pentru e_n mic, $f(T_n) \approx f'(T^*)$, deci:

$$e_{(n+1)} \approx -f''(\xi_n) / (2 \cdot f'(T^*)) \cdot e_n^2 = K \cdot e_n^2$$

Concluzie: eroarea se PĂTRĂȚEAZĂ la fiecare iterație (convergență de ordin 2). Dacă la iterația n avem 3 cifre corecte, la $n+1$ avem 6, la $n+2$ avem 12 etc.

Constanta de convergență:

$$K = |f''(T^*)| / (2 \cdot |f'(T^*)|)$$

23.4 APLICAȚIE NUMERICĂ (PT100, $R = 60 \Omega \rightarrow T \approx -100.6^\circ\text{C}$)

$$\begin{aligned} f(T) &= 100 \cdot (1 + 3.9083e-3 \cdot T - 5.775e-7 \cdot T^2 - 4.183e-12 \cdot (T-100) \cdot T^3) - 60 \\ f'(T) &= 100 \cdot (3.9083e-3 - 1.155e-6 \cdot T - 4.183e-12 \cdot (4 \cdot T^3 - 300 \cdot T^2)) \end{aligned}$$

T_0 din formula pătratică: $T_0 \approx -100.844^\circ\text{C}$

Iterație 1: $T_1 = T_0 - f(T_0)/f'(T_0) \rightarrow -100.6311^\circ\text{C}$ (eroare $\sim 0.21^\circ\text{C}$)

Iterație 2: $T_2 = T_1 - f(T_1)/f'(T_1) \rightarrow -100.6311^\circ\text{C}$ (convergență)

Iterație 3: $T_3 \rightarrow$ identic (precizie $10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}$)

Convergența rapidă (2-3 iterații) este caracteristică metodei Newton-Raphson când punctul de start T_0 este aproape de soluția reală — în acest caz, formula pătratică oferă o aproximație inițială excelentă chiar și pentru $T < 0^\circ\text{C}$, unde nu este teoretic exactă.

Pentru puncte mai îndepărtate de 0°C (ex. $T \approx -200^\circ\text{C}$), eroarea $T_0 - T^*$ poate fi de câteva grade, iar Newton-Raphson are nevoie de 4-5 iterații pentru convergență la $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$.

BIBLIOGRAFIE

Lista de standarde, lucrări de referință și surse tehnice citate pe parcursul ghidului.

Standarde internaționale

- [1] IEC 60751:2022 — Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2022. Editia 3.
- [2] IEC 60529:2013 — Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). International Electrotechnical Commission, Geneva, 2013.
- [3] IEC 61000-4-5:2014/AMD1:2017 — Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-5: Testing and measurement techniques — Surge immunity test. IEC, Geneva.
- [4] IEC 61131-9:2013 — Programmable controllers — Part 9: Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI / IO-Link). IEC, Geneva.
- [5] IEC 62591:2016 — Industrial networks — Wireless communication network and communication profiles — WirelessHART. IEC, Geneva.
- [6] ASTM E1137/E1137M-08(2020) — Standard Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [7] ASTM B193-20 — Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [8] ASME PTC 19.3 TW-2016 — Thermowells: Performance Test Codes. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2016.
- [9] DIN 43760:1987 — Grundwerte der Meßwiderstände für Widerstandsthermometer (înlocuit cu IEC 60751, dar încă referențiat istoric pentru Ni100).
- [10] GOST 6651-2009 — Государственная система обеспечения единства измерений. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Federația Rusă, 2009.
- [11] JIS C 1604:2013 — Platinum resistance thermometers. Japanese Industrial Standards Committee, Tokyo, 2013.
- [12] OIML R 84:2003 — Platinum, copper and nickel resistance thermometers (for industrial and commercial use). International Organization of Legal Metrology, Paris.
- [13] ISO/IEC 17025:2017 — General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. ISO, Geneva, 2017.

Lucrări fundamentale

- [14] Preston-Thomas, H. — The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). Metrologia, Vol. 27, Nr. 1, pp. 3-10, 1990. doi: 10.1088/0026-1394/27/1/002. Erratum: Metrologia, Vol. 27, Nr. 2, p. 107, 1990. doi: 10.1088/0026-1394/27/2/010.
- [15] Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) — Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990. Sèvres, France, 1990 (revised edition 1997).

[16] Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) — Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990. Sèvres, France, 1990.

[17] JCGM 100:2008 (GUM) — Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, BIPM.

[18] Callendar, H.L. — On the practical measurement of temperature. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 178, pp. 161-230, 1887.

[19] Van Dusen, M.S. — Platinum-resistance thermometry at low temperatures. Journal of the American Chemical Society, Vol. 47, Nr. 2, pp. 326-332, 1925.

Cărți de referință

[20] Nicholas, J.V., White, D.R. — Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration. 2nd edition, John Wiley & Sons, Chichester, 2001. ISBN 978-0-471-49291-4.

[21] McGee, T.D. — Principles and Methods of Temperature Measurement. John Wiley & Sons, New York, 1988. ISBN 978-0-471-62767-5.

[22] Bentley, R.E. (ed.) — Handbook of Temperature Measurement, Vol. 2: Resistance and Liquid-in-Glass Thermometry. Springer, Singapore, 1998. ISBN 978-981-3083-38-9.

[23] Childs, P.R.N. — Practical Temperature Measurement. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001. ISBN 978-0-7506-5080-9.

Documentații tehnice ale producătorilor

[24] Heraeus Sensor Technology — Platinum Sensor Technology Handbook. Heraeus, Hanau, Germania, 2020. Datasheet M422 (constanta de disipare termică pentru PT100 thin-film).

[25] Honeywell — Temperature Sensor Handbook. Honeywell Inc., 2019.

[26] OMEGA Engineering — The Temperature Handbook, Vol. MMXII. OMEGA, Stamford CT, 2012.

[27] Analog Devices — MAX31865 Datasheet: RTD-to-Digital Converter. Analog Devices Inc., Norwood MA, rev. 2 (2015).

[28] Analog Devices — LTC2983 Datasheet: Multi-Sensor High Accuracy Digital Temperature Measurement System. Analog Devices Inc., 2014.

[29] HART Communication Foundation — HART Field Communications Protocol Specification, rev. 7.6. FieldComm Group, Austin TX, 2017.

Resurse online

[30] Bureau International des Poids et Mesures — <https://www.bipm.org/> (acces decembrie 2025). Conține tabelele oficiale ITS-90 și documentele tehnice ale Comitetului Consultativ de Termometrie (CCT).

[31] National Institute of Standards and Technology (NIST) — <https://www.nist.gov/pml/sensor-science/temperature-and-humidity> (acces decembrie 2025). Tabele de calibrare RTD, software de referință libits90.

[32] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) — <https://www.ptb.de/> (acces decembrie 2025). Buletine de calibrare SPRT, lucrări științifice.

RESURSE ȘI LINKURI UTILE

Această secțiune adună resurse online complementare materialului din carte: standarde, calculatoare, application notes și pagini ale producătorilor consacrați. Linkurile au fost verificate la data publicării (mai 2026); paginile unor producători se reorganizează periodic, iar dacă un link nu mai funcționează recomandăm căutarea cu termenul RTD PT100 sau Pt RTD pe site-ul organizației respective.

Standarde și organizații de metrologie

IEC — International Electrotechnical Commission — emitentul standardului IEC 60751 (catalog de standarde, plătite):

<https://webstore.iec.ch/>

NIST — Kelvin și ITS-90 (gratuit, autoritativ) — pagina oficială americană dedicată redefinirii kelvinului și scalei ITS-90:

<https://www.nist.gov/si-redefinition/kelvin-its-90>

BIPM — Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) — biroul internațional cu publicații, ghiduri și rapoarte ale CCT:

<https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct>

ASTM E1137 / E1137M — standardul american pentru termometre industriale cu rezistență de platină:

https://store.astm.org/e1137_e1137m-04.html

Metrologia (jurnal BIPM) — jurnal peer-review publicat de IOP, articolul Preston-Thomas 1990 pentru ITS-90:

<https://iopscience.iop.org/journal/0026-1394>

ITS-90.com (Isotech) — portal cu link-uri actualizate către documentele BIPM și CCT:

<https://its-90.com/>

Producători de termorezistențe

Pagini principale temperature-sensors / sensor-home — link-uri stabile către catalogul de produse:

Omega Engineering — gamă largă de RTD-uri (PT100/PT500/PT1000) și ghiduri:

<https://www.omega.com/en-us/temperature/rtd>

Honeywell — Temperature & Humidity Sensors — RTD, NTC, KTY și termistori industriali:

<https://automation.honeywell.com/us/en/products/sensing-solutions/sensors/temperature-and-humidity-sensors>

Heraeus Nexensos (YAGEO Nexensos) — fabricant de elemente Pt thin-film, datasheet-uri pentru proiectare:

https://www.heraeus.com/en/hne/sensor_home/sensor-home.html

National Instruments — hardware DAQ pentru măsurarea temperaturii cu RTD/termocuple:

<https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition.html>

Calculatoare și convertoare online

Fluke PT100 Calculator — convertor R↔T pentru PT100/PT500/PT1000 cu formule IEC 60751, ASTM E1137 și JIS C 1604:

<https://www.fluke.com/en/learn/tools-calculators/pt100-calculator>

Fluke PT100 Table Generator — generează tabele R-T în °C/°F/K, exportabile în CSV:

<https://www.fluke.com/en-us/learn/tools-calculators/pt100-table-generator>

Beamex — Temperature Sensor Calculator — convertor pentru toate tipurile de RTD și termocuple, cu export tabel:

<https://www.beamex.com/resources/temperature-sensor-calculator/>

Articole tehnice și application notes

Texas Instruments — SBAA275: A Basic Guide to RTD Measurements (PDF, gratuit) — application note detaliat despre lanțul de măsură RTD cu ADC sigma-delta:

<https://www.ti.com/lit/an/sbaa275a/sbaa275a.pdf>

National Instruments — Measuring Temperature with Thermocouples, RTDs, and Thermistors — ghid comparativ pentru cele trei tehnologii:

<https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-temperature-with-thermocouples-rtds-and-thermistors.html>

Analog Devices — Technical Articles (categoria temperatură) — articole de aplicație Analog Dialogue, cu accent pe convertoare ADC pentru RTD:

<https://www.analog.com/en/resources/technical-articles.html>

Wikipedia — Resistance thermometer (referință enciclopedică) — sumar bun pentru context istoric și tehnologii:

https://en.wikipedia.org/wiki/Resistance_thermometer

Notă privind sustenabilitatea linkurilor: paginile de produs ale producătorilor sunt reorganizate la fiecare 1-3 ani. Standardele oficiale (IEC, ASTM, BIPM) sunt mai stabile, însă conținutul lor de bază (cu excepția documentelor BIPM, în general gratuite) este plătit și protejat prin licențe. Pentru o copie locală a documentelor, abonamentele instituționale sau accesul prin biblioteca tehnică sunt cele mai sigure surse pe termen lung.

LISTA FIGURILOR

Nr. Figura	Titlu	Secțiunea
Fig. 1	Construcția fizică a elementului PT100: Wire-Wound vs Thin-Film	1. Ce este o termorezistență
Fig. 2	Curba Rezistență vs Temperatură PT100 (Callendar-Van Dusen, IEC 60751)	2. Formula de calcul a rezistenței
Fig. 3	Coeficientul alpha pentru diferite materiale termorezistive	3. Coeficientul Alpha
Fig. 4	Comparație curbe R-T: PT100, PT1000, Ni100, NTC (normalizat)	5. Tabel materiale și coeficienți
Fig. 5	Schema de conectare: 2 fire, 3 fire, 4 fire (Kelvin)	6. Metode de conectare
Fig. 6	Efectul curentului de excitație: putere disipată și eroare de temperatură	7. Autoîncălzirea
Fig. 7	Benzi de eroare pentru clasele de precizie IEC 60751	8. Clase de precizie
Fig. 8	Timp de răspuns la treaptă de temperatură ($t_{63\%}$ și $t_{90\%}$)	9. Timp de răspuns
Fig. 9	Circuitul Puntea Wheatstone cu PT100	10. Circuitul Wheatstone
Fig. 10	Comparație termorezistență (RTD) vs termocuplu	11. Comparație cu termocupluri
Fig. 11	Transmițător 4-20 mA: scalare și schemă de buclă	14. Transmițător 4-20 mA
Fig. 12	Forme constructive termowell: drept, cotat, conic	16. Termowell

GLOSAR DE TERMENI ȘI PRESCURTĂRI

Termen / Prescurtare	Definiție
RTD	Resistance Temperature Detector — senzor de temperatură bazat pe variația rezistenței electrice cu temperatura
PT100	Senzor de platină (Pt) cu rezistența nominală $R_0 = 100 \Omega$ la 0°C , conform IEC 60751
PT500	Senzor de platină cu $R_0 = 500 \Omega$ la 0°C — sensibilitate $\times 5$ față de PT100, comun în HVAC și instrumente europene
PT1000	Senzor de platină cu $R_0 = 1000 \Omega$ la 0°C — sensibilitate $\times 10$ față de PT100
NTC	Negative Temperature Coefficient — rezistența scade exponențial cu temperatura (materiale semiconductoare)
PTC	Positive Temperature Coefficient — rezistența crește cu temperatura (platină, nichel, cupru)
α (alpha)	Coeficientul de temperatură al rezistenței (TCR). Pt IEC 60751: $\alpha = 3.851 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$
TCR	Temperature Coefficient of Resistance — valoarea medie a α între 0°C și 100°C
CVD	Callendar-Van Dusen — formulă polinomială (grad 2 sau 4) pentru curba R-T a platinei
R_0	Rezistența nominală a senzorului la 0°C (100 Ω , 500 Ω , 1000 Ω etc.)
W(T)	Raport de rezistență standardizat: $W(T) = R(T) / R(273.16 \text{ K})$ — folosit în ITS-90
IEC 60751	Standard internațional pentru senzori de temperatură cu platină (PT100/PT1000)
ITS-90	International Temperature Scale 1990 — scala internațională de temperatură adoptată de BIPM
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures — organism internațional de metrologie, Paris
SPRT	Standard Platinum Resistance Thermometer — termometru cu rezistență de platină standard pentru ITS-90
NMI	National Metrology Institute — institut național de metrologie (NIST, PTB, NPL, BRML)
ASTM E1137	Standard american pentru senzori RTD industriali
GOST 6651	Standard rus pentru termorezistențe ($\alpha = 0.00385 / ^\circ\text{C}$)
JIS C 1604	Standard japonez pentru termorezistențe ($\alpha = 0.003916 / ^\circ\text{C}$)

Clasa AA	Cea mai precisă clasă IEC 60751: $\pm(0.10 + 0.0017 \cdot T)$ °C, domeniu -50°C...+250°C
Clasa A	Precizie IEC 60751: $\pm(0.15 + 0.002 \cdot T)$ °C, domeniu -100°C...+450°C
Clasa B	Precizie IEC 60751: $\pm(0.30 + 0.005 \cdot T)$ °C, domeniu -196°C...+600°C
Clasa C	Clasă extinsă IEC 60751: $\pm(0.60 + 0.010 \cdot T)$ °C, utilizată în industria chimică
4-20 mA	Bucă de curent industrială standard: 4 mA = 0%, 20 mA = 100% din domeniu
HART	Highway Addressable Remote Transducer — protocol digital suprapus pe bucla 4-20 mA
Modbus	Protocol de comunicație serial (RTU/ASCII/TCP) larg utilizat în automatizări industriale
Profibus	Process Field Bus — bus de teren industrial european (DP/PA), IEC 61158
IO-Link	Standard IEC 61131-9 pentru comunicație punct-la-punct cu senzori inteligenți
Wheatstone	Punte de rezistențe pentru măsurare de înaltă precizie ($R_1/R_2 = R_3/R_x$)
Termowell	Țeavă de protecție montată în procesul industrial; adăpostește senzorul termic
ATEX	Atmosphères Explosibles — directiva UE 2014/34/UE pentru echipamente în zone explozive
IP	Ingress Protection — grad de protecție la pătrunderea prafului și apei (IEC 60529)
EMF	Electromotive Force — tensiune termoelectrică parazită generată în îmbinările de materiale diferite
CMRR	Common Mode Rejection Ratio — capacitatea circuitului de a rejecta semnalele de mod comun
ADC	Analog-to-Digital Converter — convertor analog-digital, esențial în transmițătoarele digitale
PLC	Programmable Logic Controller — automat programabil industrial
DIN	Deutsches Institut für Normung — standard german (DIN 43760 = precursorul IEC 60751)
GUM	Guide to the expression of Uncertainty in Measurement — JCGM 100:2008
Ω	Ohm — unitatea SI de măsură pentru rezistența electrică
mA	Miliamper — 10^{-3} A; unitate standard pentru bucla de curent 4-20 mA

INDEX ALFABETIC

Acest index a fost generat algoritmic prin scanarea textului efectiv al cărții. Termenii care apar exclusiv în bibliografie, glosar sau aici nu sunt listați.

Termen	Secțiune(i)
4-20 mA (buclă de curent)	14, 19
ADC (convertor analog-digital)	10, 22
Alpha — coeficient TCR	2, 3, 4, 5, 17, 20
ASME PTC 19.3 TW	16
ASTM E1137 / B193	4, 5
ATEX (zone explozive)	14, 18
Autoîncălzire (self-heating)	7, 10, 12
Calibrare	13, 14, 17, 21, 22
Callendar-Van Dusen (ecuație)	2, 20, 21
Clase de precizie (AA, A, B, C)	8, 13, 17, 22
CMRR (Common Mode Rejection)	10
Conectare 2 fire	6, 14, 19
Conectare 3 fire	6
Conectare 4 fire (Kelvin)	6, 12, 14, 22
Cupru (Cu RTD)	5, 15
Curent de excitație	7, 10, 12
DIN 43760	5
EMF termoelectric (Seebeck)	12
GOST 6651	4, 5
HART (protocol)	14, 19
IEC 60751 (standard)	2, 3, 4, 5, 8, 20, 22
IO-Link	19
IP (grad de protecție)	18
ITS-90 (scala internațională)	13, 17, 21, 22
JIS C 1604	4, 5
Modbus (protocol)	19
Newton-Raphson	20, 22, 23

Nichel (Ni RTD)	5
NTC (coeficient negativ)	1, 3, 5
OIML R 84	5
Platină (senzor Pt)	1, 2, 3, 4, 5, 13, 17, 20, 21, 22
PLC (automat programabil)	10, 14, 21
Profibus PA	14, 19
PT100	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23
PT500	1, 2, 5
PT1000	1, 2, 5, 17
PTC (coeficient pozitiv)	1, 16
Punte Wheatstone	10, 22
Rezistența nominală R_0	2, 3, 4, 5, 10, 17, 20, 21, 23
RTD (definiție generală)	1, 5, 11, 18
SPRT (Standard Pt RTD)	13, 21, 22
Spline cubică	21
Termocuplu	11
Termowell (țevă de protecție)	7, 15, 16
Timp de răspuns ($t_{63\%}$)	9, 16
Transmițător 4-20 mA	14, 19
WirelessHART	19
$W(T)$ — raport rezistență	4, 21, 22