

СЕТИЛА ЗА ТЕМПЕРАТУРА

Општо

За мерење на температурата се користат ефектите кои со промената на температурата предизвикуваат промена на:(1) физичката, хемиската состојба на некој објект,(2) димензиите,(3) електричните карактеристики, (4) радијационите карактеристики и друго.

Температурата на некое тело е поврзана со средната кинетичка енергија на молекулите, меѓутоа оваа енергија, засега, не може да се мери.

Термодинамичката температурна скала базирана на Carnot-овиот циклус е независна од особините на материјалот, но не е практична и дава само однос на температурите. Температурната скала базирана на законот на идеалните гасови е идентична со термодинамичката скала, но нејзиното користење е исто така непрактично, освен во лабораторија за температурски стандарди.

За разлика од другите три основни единици во мерењата (масата, должината и времето), кои се екстензивни величини (адитивни), четвртата основна единица-температурата е интензивна величина, односно кога две тела со иста температура ќе се доближат, тие се во топлотна рамнотежа и не настанува промена на температурата. Оваа е основа за користењето на фиксни точки за калибрација во меѓународната Практична температурна скала (IPTS). Практиката во инструментацијата и мерењата на температурата е покриена со голем број стандарди, но во догледна иднина, IPTS, базирана на особините на материјалите е соодветна стандардна температурна скала. Со договор таа е блиску со термодинамичката скала, колку што е тоа практично можно. IPTS е заснована на шест примарни и повеќе секундарни повторливи рамнотежни температури при кои настануваат промени на физичките својства на поедини супстанции-фиксни точки, дадени во Табела1. IPTS е поделена во четири подрачја и за секое подрачје се специфицирани инструментите, постапките и равенките за интерполација. Подрачје 1 е од 13.81 °К (тројна точка на водород) до 273.15 °К. Подрачје 2 е од 0°C до 639.74°C.Инструментот за интерполација во

подрачјата 1 и 2 е платински отпорен термометар.

Табела 1

Вредности на фиксните точки во IPTS $t[^\circ\text{C}], p=1[\text{bar}]$			
1	кислород	точка на вриење	-182.962
2	вода	тројна точка	0.01
3	вода	точка на вриење	100.00
4	цинк	точка на зацврстување	419.58
5	сребро	точка на зацврстување	961.93
6	злато	точка на зацврстување	1064.43

Подрачјето три е од 630.74 °C до 1064.43°C , а за интерполација се користи термопар платина/10%родиум со платина. Подрачјето 4 е над 1064 °C, а IPTS е дефинирана со Planck-овата формула за зрачење и оптички пирометар.

Мерењата на температура кои се вршат во индустријата, главно (80%) се со помош на термопарови и отпорни преобразувачи. Исто така присутни се и пирометри, како и интегрални кола во последно време. Меѓутоа, заради комплетно согледување на методите за мерење на температура, ќе бидат прикажани и други температурни сетила.

Термопарови

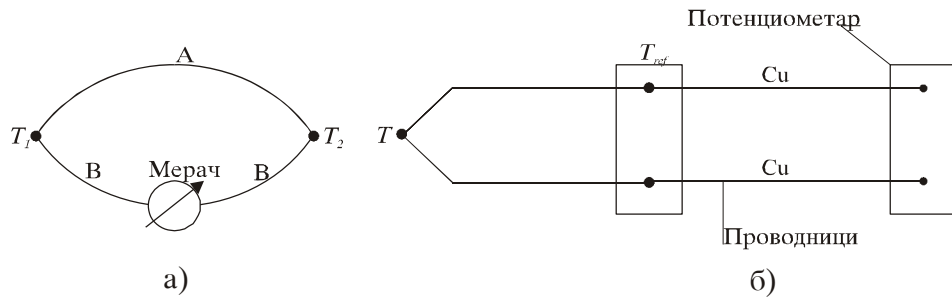
Термопарот или термоелектричниот термометар е ефтин температурен сензор применлив речиси за целиот температурен опсег, користен во 50% од мерењата на температура во индустријата. Голем број метали, легури и други материјали можат да се користат како термопар елементи.

Понатаму во текстот се опишуваат термоелектричниот ефект, конструкцијата и практичните мерења со термопарови.

- **Термоелектрични ефекти**

Термопарот се состои од две жици од различни метали А и В (сл.2а).

Сл.2. Основни термоелектрични кола
 а) термоелектрично коло
 б) коло со потенциометарско мерење

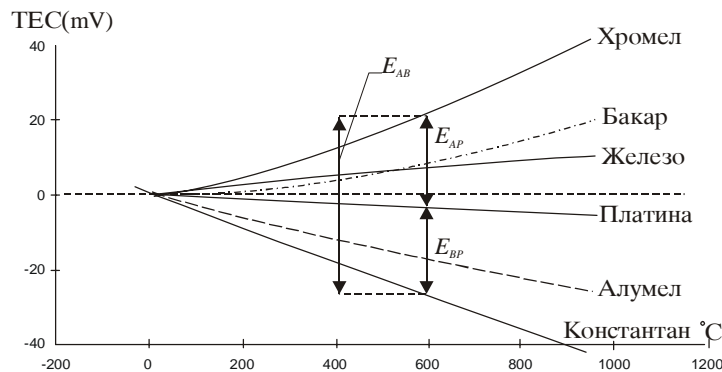


Термопарот ја мери разликата на температурите на споевите T_1 и T_2 . Електричната струја или напон во колото е во функција од $(T_1 - T_2)$. Генерално колото е како на сликата 1б со топол спој на T и ладен спој на T_{ref} , референтната температура на изолиран изотермен блок. Напонот се мери во услови на нулта струја со помош на потенциометар или осетлив волтметар со голема влезна импеданса. Со други зборови, термоелектромоторната сила се мери со отворено коло.

Физички, се јавуваат три различни ефекти во колото на термопарот: Seebeck-ов, Peltier-ов и Thomson-ов. Сибековиот ефект го опишува напонот што се развива во отвореното коло на термопарот. Пелтиевиот ефект се однесува на реверзибилното загревање и ладење што се јавува кога електричната струја поминува низ спој од различни метали, додека Томсоновиот ефект се однесува на реверзибилното ладење и загревање на хомоген проводник кој се наоѓа во термички градиент и во кој постои електрична струја.

Бидејќи генерално при температурните мерења не се зема струја од термопарот, Сибековиот ефект е доволен за опишување на однесувањето на колото на термопарот.

Карактеристиките напон температура ($E-T$) на материјалите кои обично се спаруваат како термопарови се прикажани на слика 3.



Сл.3. TEC на елементите сирема и платина

Нагибот S_A на ET кривата на материјалот е неговата напон-температурска осетливост, односно Сибеков коефициент, термоелектричната моќност S_A е

особина на материјалот, но не може да се одреди независно бидејќи се потребни два материјала за да се добие Сибекова ТЕС. Традиционално како референтен материјал се користи чиста платина. Така значи S_A не е апсолутен коефициент, туку релативен.

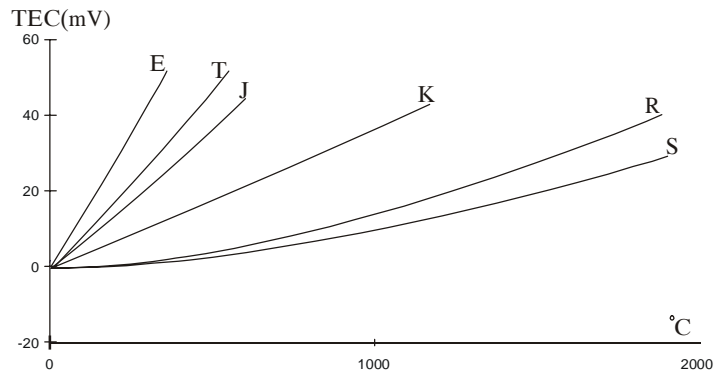
Сибековата ТЕС на еден термопар е илустрирана на сликата 3; ако хромелот е материјалот А, со позитивен коефициент S_A , бидејќи кривата А има позитивен нагиб во однос на платината, а константанот материјал В, со коефициент S_B , Сибековата ТЕС на термопарот А-В е $E_{AB}=E_{AP}-E_{BP}$, додека сибекофиот коефициент ќе биде $S_{AB}=S_{AP}-S_{PB}$.

Ако е позната ТЕС на секој материјал спрема платината, ТЕС на комбинацијата од два материјала е алгебарска сума на нивните ТЕС.

Одреден број на термопарови, општо користени, се меѓународно класифицирани и означени како типови (Табела 2).

E	хромел со константан
J	железо со константан
K	хромел/алумел
T	бакар/константан
S	платина-10%родиум/платина
R	платина-13%родиум/платина
B	платина-30%родиум/платина-6%родиум

Паровите E, J, K и T се користат до 1000°C, а паровите S,R и B до околу 2000°C. Типичните E-T карактеристики на овие парови се дадени на сликта 4.



Сл.4. E-T карактеристики на термопаровите од претходната табела

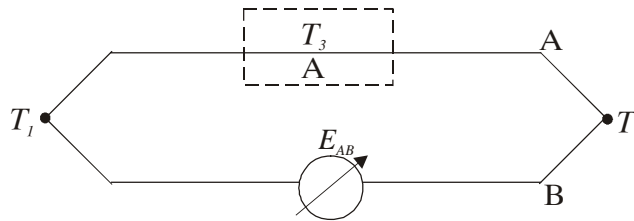
Сибековите кефициенти исто така се табелираат бидејќи се менуваат со температурата. Што се однесува до поларитетот, жицата А е позитивна во однос на В на референтниот спој, ако материјалот А е позитивен во однос на материјалот В и ако е $T > T_{ref}$. Првонаведениот материјал во термопарот е секогаш позитивен, а вториот негативен. За идентификација на типот и поларитетот се користат и бои. (секогаш црвената или црвена со други бои е негативна).

- **Термоелектрични закони**

Ако се ограничимо на однесувањето на термопарови изработени од хомоген материјал, би можеле за нив да се наведат следниве законитости:

- *интермедиарна шемперишура*

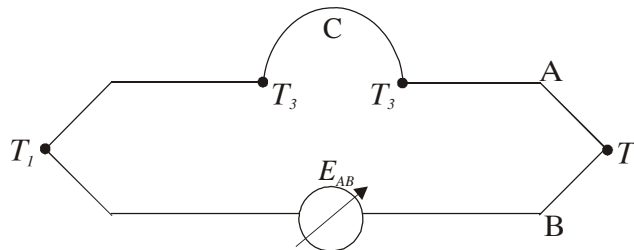
Термоелектричната сила ТЕС, E_{AB} на термопарот А-В, со температури на споевите T_1 и T_2 , не зависи од интермедиарната температура T_3 во колото (Слика 5а). Оваа дозволува жиците на термопарот да бидат изложени на непозната температура на околината.



Слика 5а

- *интермедиарен метал*

Термоелектричната сила на термопарот не зависи од воведување на трет интермедиарен метал доколку неговите споеви се на иста температура T_3 . (Слика 5б)



Слика 5б

Оваа дозволува да се воведат материјал во било која точка во колото како на сликата 5б, жиците можат да се спојуваат со лемење, заварување и друго. На пример жиците можат да се варат директно на металот чија температура се мери, бидејќи тој може да се третира како интермедиарен метал.

- *сукцесивни метали*

Ако ТЕС на термопарот А-С е E_{AC} , а на термопарот С-В е E_{CB} тогаш ТЕС на термопарот А-В ќе биде $E_{AB}=E_{AC}+E_{CB}$.

- *сукцесивни шемперишури*

Ако ТЕС на термопарот за температури на споевите (T_1, T_2) е E_{12} , а за температури (T_2, T_3) е E_{23} , тогаш ТЕС за температури (T_1, T_3) е $E_{13}=E_{12}+E_{23}$.

• Градиентна постапка

Оваа постапка дава можност за третирање на нехомогеностите, како и разбирање на однесувањето на посложени кола на термопарови. Оваа е доста важно ако се има предвид дека претходно наведените правила важат само за хомогени материјали, а нехомогеностите се често неизбежни заради загадување, селективна оксидација на високи температури и слично.

Се поаѓа од фактот дека ТЕС во термопарот, од материјали А и В, се појавува заради температурскиот градиент долж жиците.

$$[1-1] \quad E = \int_0^L S_A \frac{dT}{dx} dx + \int_L^0 S_B \frac{dT}{dx} dx$$

каде S_A и S_B е вкупниот термоелектричен коефициент на материјалите А и В, x е растојание долж жиците, L -должина на жиците. Оваа е поопшто претставување на ТЕ ефектот, бидејќи за $S_{A,B}(x, T)=S_{A,B}$ се добива:

$$[1-2] \quad E = \int_{T_0}^{T_L} S_A dT + \int_{T_L}^{T_0} S_B dT = (S_A - S_B)(T_L - T_0)$$

Користењето на оваа постапка е илустрирано на сликата 6.

Сл.6.Градиентна постапка

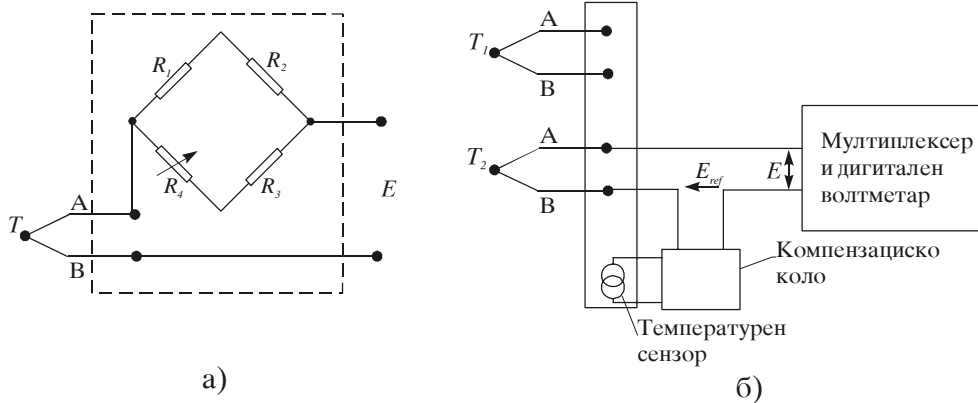
- Се идентификуваат точките кои се од интерес (1, 2, 3) и им се дава номинална температура на секоја од точките (T_{ref}, T).
- Се добиваат ТЕС спрема $E-T$ кривите за користените материјали (слика3).
- Почнувајќи од T_{ref} во точка 1, се конструира крива во $E-T$ дијаграмот со нагиб S_A до температура T , во точката 2, каде е спојот А-В.
- Слично, поаѓајќи од точката 2 се конструира крива со нагиб S_B назад до T во точката 3.
- E за термопарот се добива графички од $E-T$ дијаграмот. (ова конструкција претставува линиски интеграл на равенката за E)

• **Референтни спој**

ТЕС на термопарот е функција од $(T - T_{ref})$. Така T_{ref} на референтниот спој мора точно да се познава. Грешка од $\pm 1^\circ\text{C}$ во T_{ref} значи грешка од $\pm 1^\circ\text{C}$ во мерената температура. Ако е T_{ref} на 0°C за одредување на T можат директно да се користат конверзионите табlici ТЕС $\rightarrow T$. Користење на ледена бања е наједноставен метод за да се одржува T_{ref} на 0°C , меѓутоа оваа е главно ограничено на лабораториски услови. Кога T_{ref} е на фиксна температура, се користи софтвер кој ја претвора излезната ТЕС во температура. На пример кога, конверзијата на излезот x [mV] во T [$^\circ\text{C}$] се врши со помош на полиномот:

[1-3]
$$T = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n$$

Каде коефициентите a зависат од типот на термопарот. Слично се пресметува и кога T_{ref} е на фиксна температура повисока од 0°C . За компензација на референтниот спој се користат повеќе шеми, во основа се додава компензационен напон E_{ref} на излезниот напон на термопарот

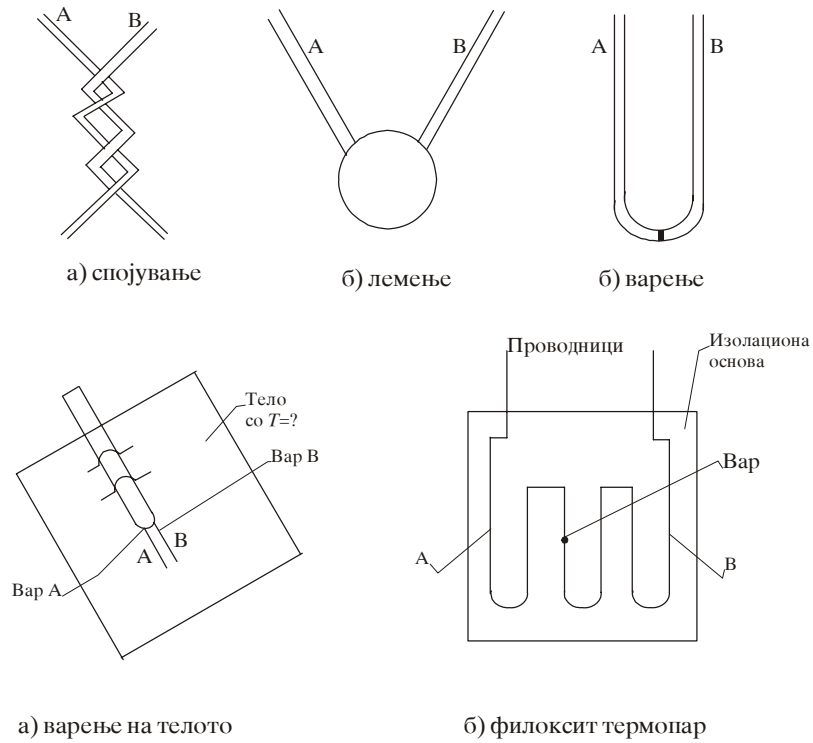


Сл.7.Компензација на T_{ref}

и така се симулира константна T_{ref} на 0°C . Шемата на сликата 7а се состои од мостно коло во кое R_4 е темпeратурно осетлив. Така со промена на температурата на амбиентот се менува T_{ref} и R_4 . Промената на напонот на R_4 се додава на излезниот напон на термопарот заради компензација. Слично но пошто, е прикажано и на слика 7б.

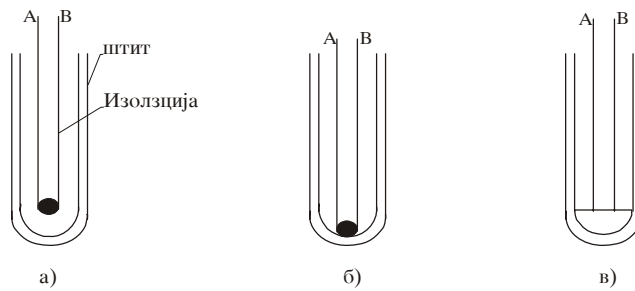
• **Т-сетила**

Температурските сетила врз база на термопарови за општа и специјална намена се расположиви за сите температурни опсези. Термопаровите се фабрикувани со варење, лемење, ладно спојување, прикажани на слика 8.



Сл.8. Термопарови сензори

Термопаровите за индустриска примена обично се заштитени со штит, тие можат да бидат изолирани од штитот, допрени на него или затворени, а за побрз одговор можат и да поминуваат низ штитот.



Сл.9. Индустриски сензори

• **Практични мерења со термопарови**

Вкупната грешка при мерење со термопар е резултат на повеќе извори на грешки, од отстапувањата на материјалот на жиците, преку сите фази на мерењето, до собирањето на податоците и документирањето на шумовите.

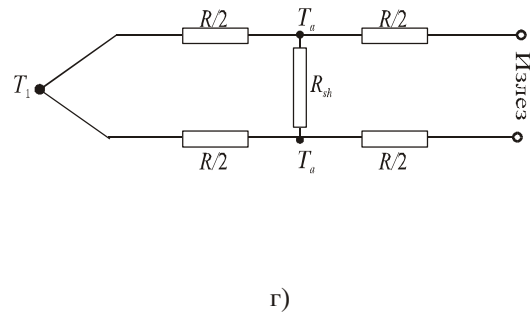
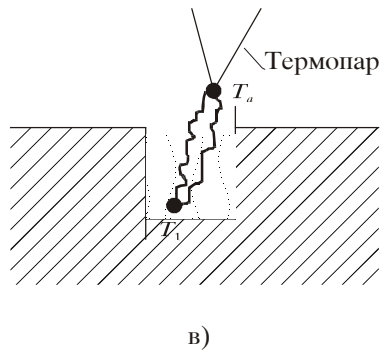
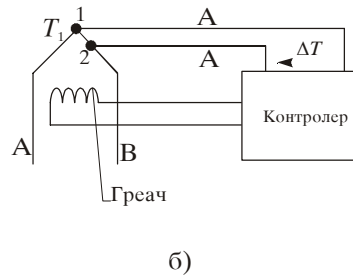
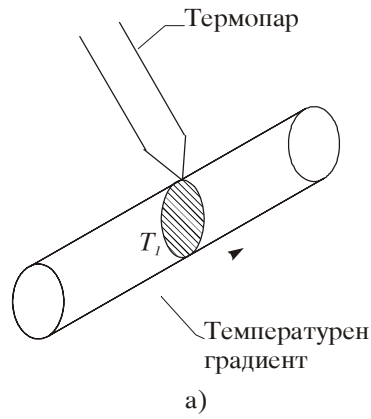
Шумовите се особено важни кај овие мерења заради ниското ниво на сигналот. Пример: Сибековиот коефициент на обичните термопарови е од редот 40 [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$], а кај термопаровите од платина 7 [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]. Така за детекција на 0.1°C ни треба резолуција на целиот систем од 4 [μV] и 0.7 [μV] респективно. Подолу се наведени некои поопшти проблеми при овие мерења.

Жици на термопарој

Квалитетот на жиците на термопарот мора да одговара по стандардите. Стандардите ги специфицираат (ANSI) дозволените отстапувања за поедини температурни подрачја. Пример: грешката за 8 AW6 тип J стандарден термопар е $\pm 2.2^\circ\text{C}$ од 0 до 277°C и $\pm 0.75\%$ од 277°C до 760°C (спрема ASTM), така да на 760°C можната грешка е $\pm(2.2+0.0075(760-277))=\pm 5.8^\circ\text{C}$. Оваа грешка е можна кај нов термопар, тоа не мора да биде и неговата точност при употреба кога може да биде изложен на разни непогодни услови. Евидентно, кога се бара поголема точност термопарот би требало да се калибрира посебно.

Практични мерења

Како прв проблем при практичните мерења е термалното оптоварување, кое се случува заради преносот на топлина на топлиот спој, а со тоа се менува температурата (локално) во точката на мерење. Еден метод да се минимизира термичкото шантирање при мерење на површинска температура е да се постават проводниците од топлиот спој долж изотерма како на слика 9а.



Сл.9.Тойлојно и електрично шантирање на термопар

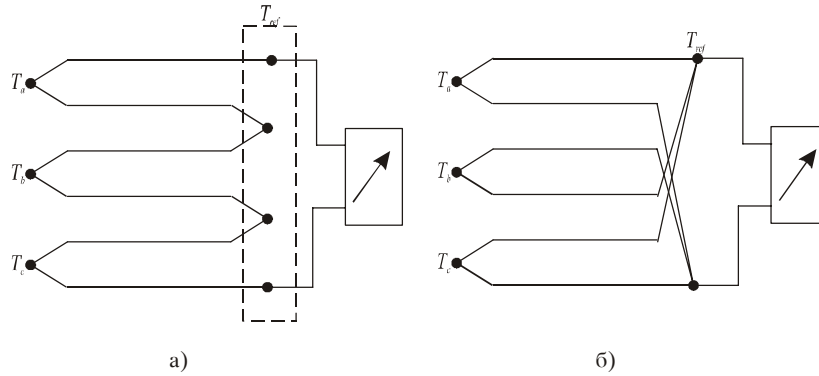
Еден поусовршен систем за одбегнување на термичкото шантирање при мерење на температура на површината е прикажан на слика 9б. Овде дел од термопарот А-В се користи за мерење на ΔT помеѓу точките 1 и 2. Овој сигнал се враќа назад и го регулира грејачот да се добие ΔT нула. Така термопарот А-В е долж изотерма.

Освен термичкото шантирање може да се јави и електричното шантирање заради локални кратки кола или ослабување на изолацијата. Ова е прикажано на слика 9в. Жиците се споени на местото каде температурата е T_a . Така T_a е температура на топлиот спој наместо T_1 . Краткиот спој може да настане заради механичко оштетување или други причини. Влагата е најчеста причина за смалување на отпорноста помеѓу жиците. Волтаичкиот ефект, поради влагата и бојата за изолација на жиците или влагата и траги од варењето, може да биде од редот на милivolти.

Распределената отпорност на шантирање во колото на термопарот, генерално е предизвикана од намалувањето на изолацијата. Отпорноста на оксидните изолации опаѓа со температурата така шантирањето е поизразено на високи температури како на пример помеѓу жиците на термопарот во заштитен цилиндар. Заради оваа треба да се одбегнува користењето на термопарот при негови максимално дозволени температури. Појавата на шантирање е

прикажана на сликата 9г, каде R е отпорноста на термопарот, а R_{sh} на шантот. Грешките за разни R_{sh} можат да се пресметаат. За $R_{sh} \ll R$ имаме виртуелен спој и термопарот ќе ја мери температурата T_a .

За зголемување на осетливоста односно излезот при практичните мерења често се користат сериски кола како на слика 9а.



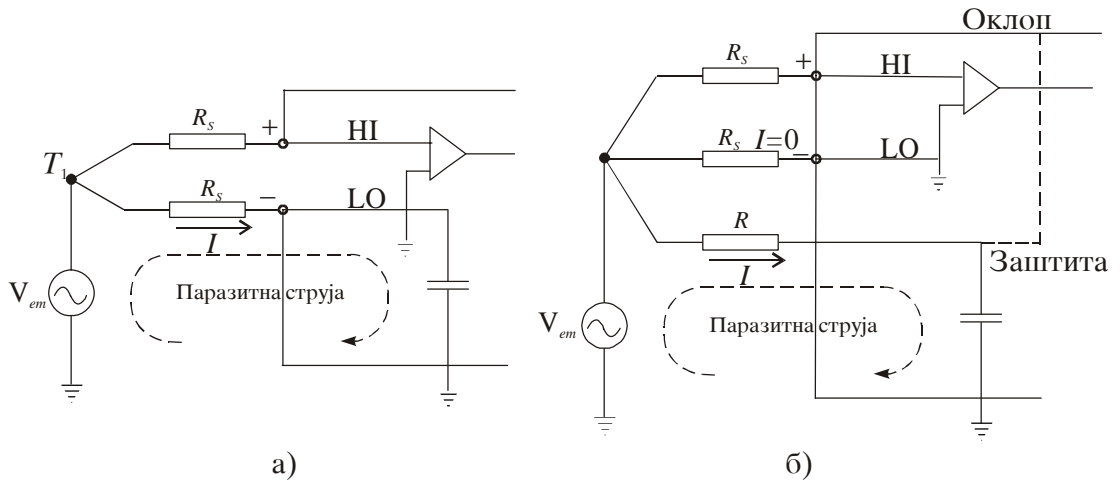
Сл.10. Сериско и паралелно поврзување на термопарови

Ако температурите на топлите споеви се различни на ваков начин се добива нивна аритметичка средина.

Пренос на податоци

Заради преносот се јавуваат грешки и шум. Едномерниот сигнал од термопарот со ниско ниво може да биде комплетно маскиран со шум. За редукција на шумот, генерално кај DVM постои заштитен влез.

Во колото на термопарот може да се појави и висок напон V_{em} . Пример: кога термопарот се користи за мерење на температура на растопен метал во електрична печка. Термопарот е во метал кој се загрева со $244 V_{ef}$. Така V_{em} за термопарот е од редот на 100 [V]. Sprema слика 11а V_{em} предизвикува паразитна струја I во колото со маса, кое се состои од V_{em} , отпорот R_s на жицата на LO и капацитивноста помеѓу влезот на DVM и земјата.



Слика11

Падот на напонот IR_s во LO проводникот е сигнал помеѓу HI и LO влезовите на DVM. Оваа се интерпретира како сигнал од термопарот. (HI влезот на DVM е со поголема влезна импеданса од LO влезот, бидејќи напојувањето на инструментот е на LO влезот. Така колото на масата оди преку LO проводникот)

Заштитата, прикажана на сликата 11б физички е метална кутија која го опфаќа целото коло на волтметарот. Таа е поврзана на оклопот на жиците на термопарот за да ја шантира паразитната струја I . Заштитниот влез овозможува пат со мала импеданса за напонот V_{em} . Ако $R_s=1$ [k Ω], заштитата може да даде 40 [dB] слабеење на *common mode*. Други техники, како оклопување, филтрирање, A/D конверзија исто така се користат за редукција на шумот.

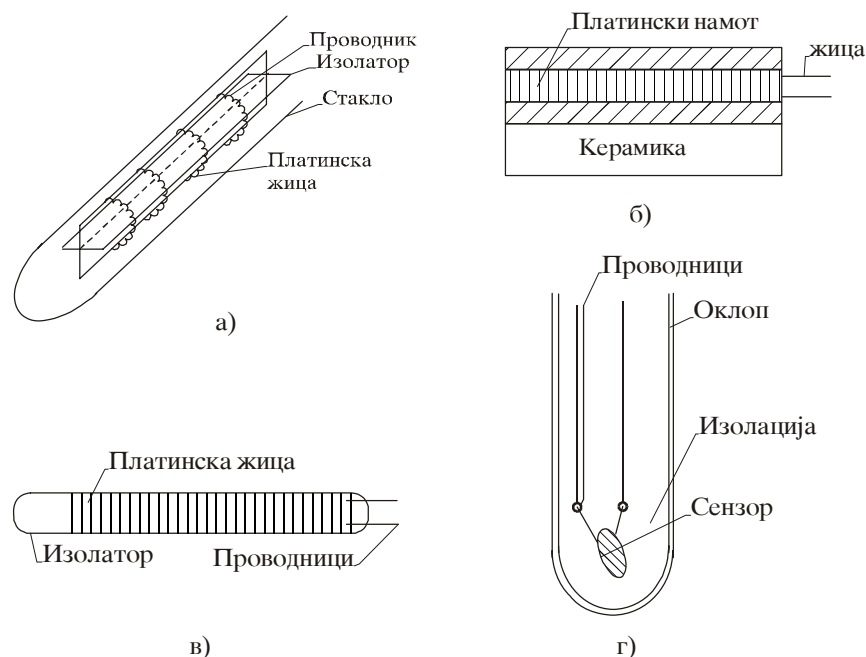
Отпорни температурни детектори

Овие детектори се едноставно отпорни елементи. Отпорноста на металите расте со температурата и тоа општо својство се користи за температурна детекција.

• Материјали и конструкција

Раширени материјали за RTD се платината (од 260 до 1000°C), бакарот (од 200 до 260°C), никел и Valco (70% никел, 30% железо) (од -100 до 230) и тунгстен (од 100 до 2500°C). Температурите препорачани од производителите можат значајно да се разликуваат зависно од конструкцијата на сензорот, материјалите за оклоп и заштита и работниот циклус во примената.

Елементите можат да се класифицираат како жичани или од типот на филм, кои се понови. Разни типови на сензори се прикажани на сликата 12.



Сл.12. RTD сензор и проба

Сетила за општи и специјални намени се комерцијално достапни, било за мерење температура на флуиди, било за температура на цврсти тела. Временските константи на жичаните RTD се од 0.5 до 10 [s], зависно од брзината на пренос на топлина и другите услови.

RTD со метален филм се направени со депозиција на метален филм на

подлога и потоа енкапсулација. Овој тип се обично помали од жичаните и имаат помала временска константа.

- **Карактеристики и стандарди**

Карактеристиката отпор-температура на металите може да се претстави со полином:

$$[1-4] \quad R = R_0 (1 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5 + a_6 T^6 + a_7 T^7 + a_8 T^8 + a_9 T^9 + a_{10} T^{10})$$

каде коефициентите a се константи, а R_0 е отпорност на температурата T_0 . Оваа интерпретација е користена во IPTS за дефинирање на температурите од -190 до 660°C помеѓу фиксните точки со помош на платински RTD. Платината и бакарот имаат речиси линеарни R-T карактеристики за одреден температурен домен. Никелот и Вало се нелинеарни, но Вало сензорите се лесни за изработка и легурата има 2.4 пати поголем отпор од чистиот никел. Резултат на ова е можноста за поефтини сензори и сензори со поголема отпорност и со помали димензии. Кога материјалот е речиси линеарен може да се користи прва апроксимација, во одреден температурен опсег.

$$[1-5] \quad R = R_0 (1 + \alpha T) \Rightarrow T = \frac{\frac{R}{R_0} - 1}{\alpha}$$

За 100 Ω платински RTD $\alpha=0.003850$ и $R(100^\circ\text{C})/R_0(^\circ\text{C})=1.3850:1$. Така од 1-5 може да се пресмета непознатата температура. Меѓутоа треба да се внимава бидејќи постојат повеќе стандарди за α на пример:

$\alpha=0.00392$	US-MIL-T-24388
$\alpha=0.003850$	DIN-43760

Вкупната отпорност на RTD не е стандардизирана. Расположливи се платински RTD со 10, 50, 100, 200, 1000 и 2000 Ω за различни примени. Отпорноста на RTD со тенки филмови може да биде неколку илјади оми.

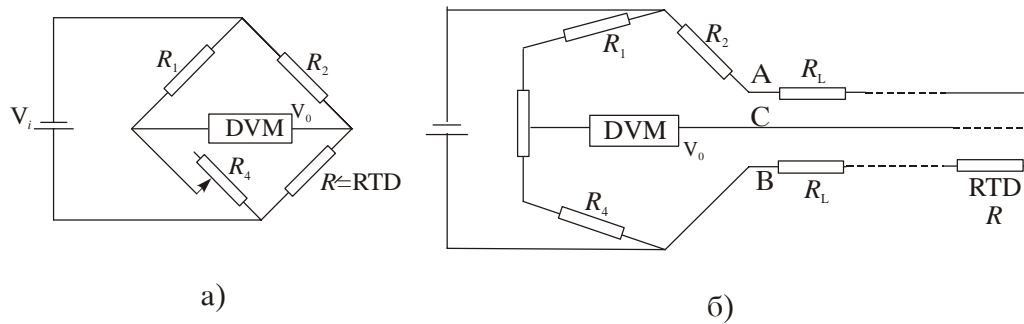
- **Мерни кола**

Како RTD е отпорен елемент основното коло за мерење е мост или омметар. Прецизен мост е неопходен за мерење на отпорноста бидејќи, на пример: осетливоста на 100 Ω платински RTD е 0.385 $\Omega/^\circ\text{C}$ и прифатлива точност од 0.1 $^\circ\text{C}$ би барала резолуција од 0.0385 Ω . Тоа е мала вредност, сепак

прецизен Милеров мост со несигурност која не поминува $3 \mu\Omega$ е применет. Од друга страна со мерење на напонот на RTD се добива доволно голем сигнал. Струја од 1 mA на 100Ω RTD дава излез 100 mV , што е голем сигнал споредено со оној на термопаровите.

Урамнотежен мост прикажан на сликата 12а е раширена техника за мерење, каде R е отпорност на RTD, а DVM се користи како нул индикатор. Колото се модифицира како на сликата 12б, бидејќи:

- R мора физички да се одвои од мостот со продолжени жици за да се избегне загревањето на другите отпорници
- мостот има три проводни жици. Напојните проводници А и В не влијаат на рамнотежата, а третиот проводник С е на нул инструментот и не проведува струја
- за балансирање се користи потенциометар, со што се одбегнува несигурноста на контактната отпорност на R_4 во колото на слика 12а.



Сл.12. Мосино коло за мерење со отворен шемперашурен дигитален индикатор

Кога се користи неуррамнотежен мост излезниот напон V_0 не е линеарно зависен од RTD. Оваа нелинеарност на неуррамнотезениот мост е прифатлива кога се работи со метални отпорни мерни ленти, бидејќи кај нив $\Delta R/R$ е мало во мерењата на сили, но кај RTD $\Delta R/R$ е големо. Пример: за $\alpha=0.00385$ за $\Delta T=100^\circ\text{C}$, $\Delta R/R$ е 38.5% . Ако мостот на почеток е урамнотежен, отпорноста R , од сликата 11а е:

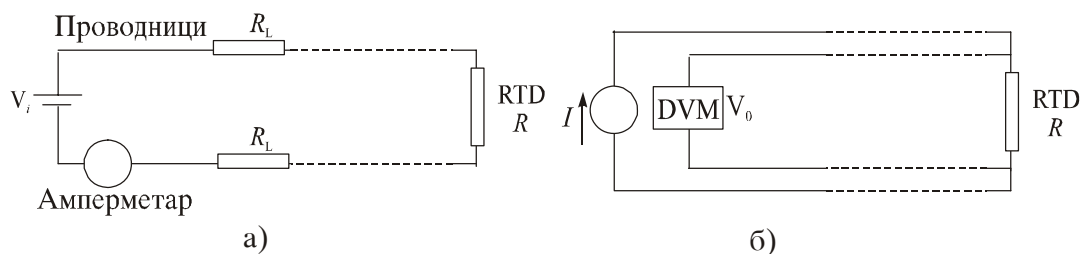
$$[1-6] \quad R = \frac{V_i + 2V_0}{V_i - 2V_0} R_2$$

Ако се зема и R_L , отпорноста на RTD од сликата 11б е:

$$[1-7] \quad R = \frac{V_i + 2V_0}{V_i - 2V_0} R_2 + \frac{4V_0}{V_i - 2V_0} R_L$$

Отпорноста R на RTD може да се мери со константен напон или константна струја. Мерење со константен напон е покажано на сликата 13а и

ова мерење не се препорачува, бидејќи отпорноста на жиците R_L може да предизвика голема грешка. Четворожичното омметарско коло со струен извор прикажано на сликата 13б е подобро бидејќи струјата не зависи од отпорноста на напојните проводници А и В. Влезната импеданса на DVM е од редот $100\text{M}\Omega$, така да отпорноста на сигналните проводници С и D нема ефект на напонскиот сигнал на DVM.



Сл.13. Мерење со напонски и струен извор

• Извори на грешки

Како и термопаровите и RTD се подложни на грешки заради толеранциите на материјалите, електрично шантирање и термичко шантирање. Толеранциите на материјалите кај RTD се слични како кај термопаровите. Ако стандардот за материјалот е $\pm 0.3^\circ\text{C}$ на 0°C до $\pm 3^\circ\text{C}$ на 600°C , читањето од два RTD може да се разликува за 6°C на 600°C . Термалното шантирање кај RTD е поголем проблем бидејќи кај нив масата е поголема отколку кај термопаровите.

Присутни се и грешки заради отпорноста на проводниците, самозагревањето и термоелектричниот ефект. Ефектот на отпорноста на проводниците се намалува со користење подебели проводници и четворожилно омметарско коло.

Ефектот на самозагревање е I^2R при мерење на отпорност R . Тој се дава како грешка на самозагревање во $^\circ\text{C}/\text{mW}$ за специфична околина како на пример мирен воздух, воздух со 1m/s , или вода со одредена температура и брзина. Ова се нарекува и дисипативна константа дадена во $\text{mW}/^\circ\text{C}$. Овој ефект не е проблематичен при повеќето примени. Пример: IR^2 за $I=1\text{mA}$ низ RTD од $100\ \Omega$ е 0.1mW . Ако грешката на самозагревање е $0.1^\circ\text{C}/\text{mW}$ грешењето поради самозагревањето со 1mA е 0.01°C .

Мерната струја I за RTD е во граница 2 до 20 mA. Еден метод за редуцирање на самозагревањето и зголемување на осетливоста е да се користат кратки струјни импулси за мерењето. Бидејќи се потребни неколку секунди до

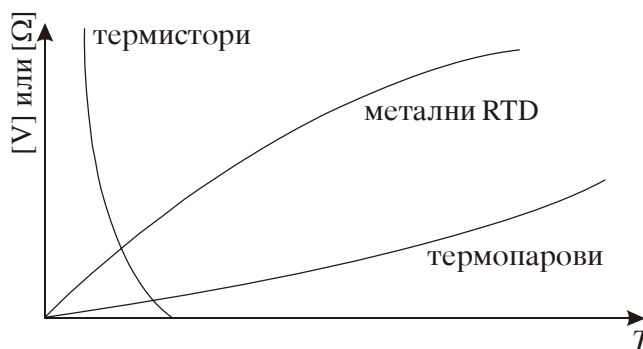
минути за самозагревањето да ја достигне конечната вредност, ако мерната струја е во импулси со траење во милисекунди, таа би можела да се зголеми 10 до 100 пати. Најмногу грешки со платински RTD се прават поради нивното користење над спецификациите, особено за температури поголеми од 550°C.

Термоелектричниот ефект се редуира со ставање на споевите од различни метали близу еден до друг и при одбегнувањето стрмен термички градиент, близу овие споеви. Алтернативно може да се користи наизменично напојување, бидејќи ТЕС не е детектибилна со АС инструменти. Една грешка својствена за RTD мерењата е невнимателното мешање на RTD и контролните показни модули, бидејќи разликата во α по US и DIN стандардите е 1.9% па еден модул за читање на одреден RTD не може да се користи за друг RTD со различна спецификација.

Термистори

Како RTD и термисторите се едноставни отпорни елементи. Тие се користат како температурни сетила и како компоненти во електронските и контролни системи.

Температурните подрачја за трите типа на термометри квалитативно се споредени на сликата 14.



Сл.14. Карактеристики на температурни сензори

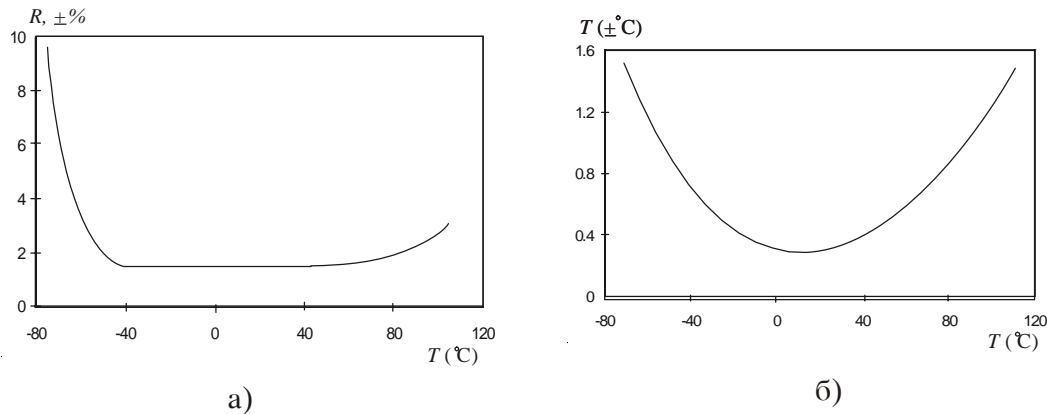
Термопаровите имаат најшироко температурно подрачје, но најмала осетливост. RTD и термисторите имаат поголема осетливост. Предностите на RTD се долготрајна стабилност и висока прецизност. Термисторите имаат подрачје од 100 до 150°C, но осетливоста е 10 пати поголема од RTD. Термисторите можат да имаат негативен (NTC) и позитивен (PTC) температурен коефициент. За температурна детекција речиси исклучиво се користи NTC.

Термисторите се расположливи во форма на топчиња, шипки, плочки и

слично. Термисторскиот сензор може да се направи многу мал и неговата временска константа е споредлива со онаа на термопаровите и многу помала отколку кај RTD. Во нивниот тесен температурски опсег, термисторите се споредливи со RTD по стабилност, повторливост и меѓусебна заменливост, но се далеку супериорни по време на реакција и осетливост.

Толеранциите за материјалите за термопаровите, RTD и термисторите се специфицирани на сличен начин. Овие податоци мора да се разгледуваат кога се зборува за грешки или меѓусебна замена. Податоците за типичен термистор се дадени на сликата 15.

Сл.15. Карактеристики на типичен термистор
 а) Толеранција на отпорноста по температура
 б) Толеранција на температурата по отпорноста



Толеранцијата е можна грешка за нов термистор пред излагање на условите во процесот.

Зависноста отпор-температура кај термисторите може да се изрази со:

[1-8]

$$R = R_0 e^{\beta(1/T - 1/T_0)}$$

каде R е отпорност во оми на температура T во $^{\circ}\text{K}$, R_0 на T_0 , а $3000 < \beta < 5000$ е константа на материјалот. Генерално T_0 е $298\ ^{\circ}\text{K}$ ($^{\circ}\text{C}$), R_0 варира од $100\ \Omega$ до $1\text{M}\Omega$, типично е $R_0 = 5\ \text{k}\Omega$. Вредноста R може да се менува од $3700\ \text{k}\Omega$ на 80°C до $100\ \Omega$ на $145\ ^{\circ}\text{C}$.

Осетливоста s на термисторот е:

[1-9]

$$s = \frac{d(R/R_0)}{dT} = \frac{-\beta + T \frac{d\beta}{dT}}{T^2} \approx -\frac{\beta}{T^2} \Rightarrow \frac{dR}{dT} \approx -\frac{\beta}{T^2} R_0$$

За $\beta = 4000$, $T = T_0 = 298\ ^{\circ}\text{K}$ и $R_0 = 5\ \text{k}\Omega$ осетливоста е 0.045 или $\Delta R/R = 4.5\%$ по $^{\circ}\text{C}$. Додека за платински RTD ако осетливоста е 0.00385 , $\Delta R/R$ е 0.38% по $^{\circ}\text{C}$, што е десет пати помалку.

За конверзија на мерената отпорност R во температура, кај термисторот

се користи емпириска релација:

$$[1-10] \quad \frac{1}{T} = A + B \ln R + C(\ln R)^3$$

каде R е во оми, T во °К, а A , B и C се константи кои се добиваат од замената на три пара вредности (R , T) околу работната точка и решавање на трите добиени равенки. Излезот на термисторот е нелинеарен, но пресметувањето на T од мерењето R не проблем.

Заради големата отпорност и осетливост, ефектите на отпорноста на проводниците и самозагревањето се занемарливи кај термисторите. Пример: за $R=5 \text{ k}\Omega$ и $\Delta R/R=4.5 \text{ \%/}^\circ\text{C}$ се добива $\Delta R=225 \text{ }\Omega/^\circ\text{C}$ што е многу поголемо од отпорноста на 150 метри бакарна жица 3Ω .

Сите кола прикажани на сликата 12 и 13 можат да се користат за термистори, поради занемарувачката отпорност на проводниците и самозагревање. При користењето на мостот на слика 12а во нерамнотежна работа со еднакви отпорници и почетно $V_0=0$, мерената отпорност е:

$$[1-11] \quad R = R_0 \frac{1 + 2V_0/V_i}{1 - 2V_0/V_i}$$

Оваа вредност се користи за пресметка на T според емпириската релација или од табели. За колото 13б, струјата е константна и R на мерената температура T е:

$$[1-12] \quad R = R_0 \frac{V}{V_0}$$

каде R_0 и V_0 се вредности при T_0 .

Други методи и сеџила за мерење џемџераџура

Индуќиџивен метод

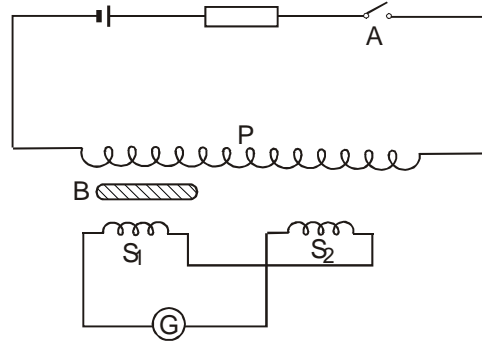
Магнетната пермеабилност ,на некои парамагнетни материјали се менува со температурата според (Curie) Кириевиот закон:

$$\mu = \frac{T}{C} \left[\frac{H}{m} \right]$$

Каде што:

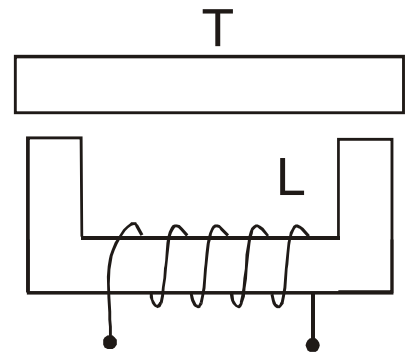
C - Кириева константа, карактеристика на парамагнетниот материјал;

T - Апсолутна температура.



Слика 4.

Парамагнетен
материјал В



Слика 5.

Термо-магнетна
метода

На Сл. 4 е дадена шема која се користи при мерење на ниски температури. Тука двете секундарни намотки S_1 и S_2 имаат ист број на навивки, но се намотани во спротивни насоки, така да во отсуство на примерокот В, напонот при затварање на прекинувачот А е нула. Со делот поставен помеѓу примарниот калем Р и секундарниот калем S_1 индуцираниот напон на овој калем се зголемува така што галванометарот покажува отклон, чија амплитуда е пропорционална со пермеабилноста на примерокот В. Калемите најчесто се чуваат во течен водород за да нивниот отпор биде мал и константен. Овој тип на термометар се користи при мерење на температури под 10°K .

Вториот метод е базиран на принципот на промената на реактансата на калемот (со јадро од термо-магнетен материјал) со температурата. Предноста на овој метод е што може да се користи кај што не е пожелен директен физички контакт. На Сл.5 е прикажана неговата шема. Овде железниот цилиндар, со променлива температура која се мери, е одвоен со мал константен воздушен простор од железното јадро на намотката L . Со промена на пермеабилноста или загубите во виорните струји на цилиндерот поради промена на температурата, величината на магнетниот флукс а со него и индуктивноста на намотката ќе се промени. Овој уред бара калибрација *инситу*.

Калибрацијивен метод

Познато е дека диелектричната константа на некои изолатори варира со

температурата. Со промената на диелектричната константа ќе се менува и капацитивноста на кондензаторот во зависност од температурата.

Таквиот термометар мора да има внимателно избран диелектричен материјал кој нема голем хистерезисен ефект и нема големи диелектрични загуби на работната температура. Една изведба, таканаречен Термакон, е со кондензатор со диелектрик од титанат, со работно подрачје од -40°C до 160°C и линеарност од $\pm 1\%$.

Метод на шум

Кај проводниците на температура над апсолутна нула електроните се во постојано движење; оваа движење на електроните ќе предизвика случаен варијабилен напон помеѓу краевите на проводникот, што се зголемува со температурата на проводникот. Средноквадратната вредност на напонот помеѓу краевите на проводникот, што е на апсолутна температура K , е пропорционален со производот на отпорноста на проводникот и температурата. Ваквите случајни напони содржат фреквентни компоненти од 0 до највисоката фреквенција што може да се мери (бел шум). Кога се мери во ограничен фреквентен опсег средната квадратна вредност на напонот е дадена со :

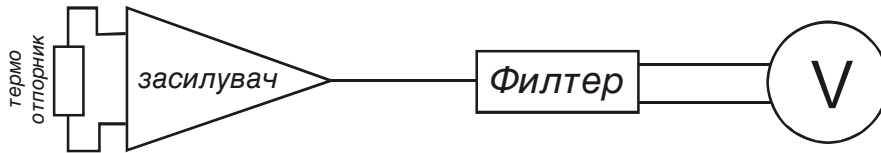
$$V = 4kTR\Delta f ;$$

каде што k е Болцманова константа $k = 1,37 \cdot 10^{-23} \left(\frac{J}{K} \right)$;

T е температура во $^{\circ}K$;

R е отпор во оми (Ω);

R претставува отпорност на температура (T), така да постои нелинеарна врска помеѓу V^2 и R ако температурниот коефициент на отпорот не е 0. На следнава слика е представен шематски дијаграм на термометар на база на шум.



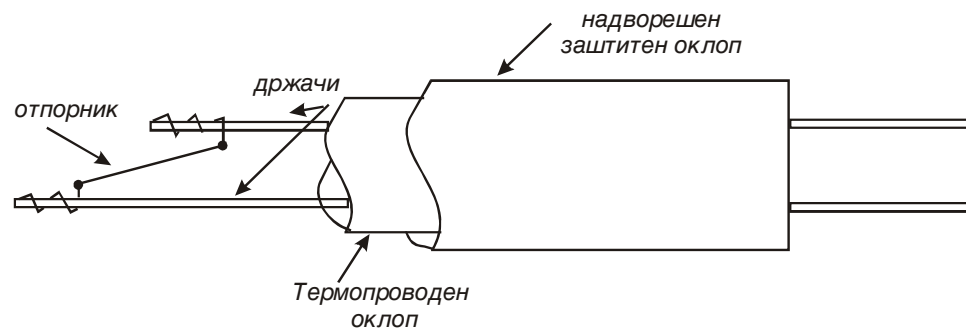
Слика 7. Шематски
дијаграм

Кај овој метод тешко би било да се измери средноквадратната вредност на напонот, која е во микроволтното подрачје. Вообичаено е да се споредат непознатата температура на отпорник со позната температура на друг. Овде отпорникот R_1 на позната температура t_1 се подесува по вредност се додека шумот од него не стане ист како од друг отпорник R_2 на непозната температура t_2 . Вредноста на температурата се определува со равенката:

$$t_2 = t_1 \frac{R_1}{R_2}$$

Во ова метода споредувањето на средноквадратната вредност на напонот на шумот се прави со повторено преклопување од еден отпорник на друг, а излезниот напон се засилува, исправа и интегрира. Со преклопување на излезните напони, можеда се елиминираат разликите во карактеристиките на засилувачот и дрефтоот.

Карактеристична напонска сонда е платинска жица (со дијаметар $0,0025\text{mm}$) со отпорност во килооми, поставена во заштитен цилиндер од платина (Сл. 8). Оваа сонда е погодна за температури до 1400°C , за поголеми температури се користи жица од тунстен.



Слика 8.

Со правилен избор на електронските компоненти, можно е да се постигне точност и до $\pm 0.1\%$ за температурен опсег $100\text{-}1700^\circ\text{K}$ дури и без

посебни мерки точноста од $\pm 1\%$ може да се постигне. Линеарноста на системот зависи од температурниот коефициент на отпорноста на материјалот во сондата.

Акустичен метод

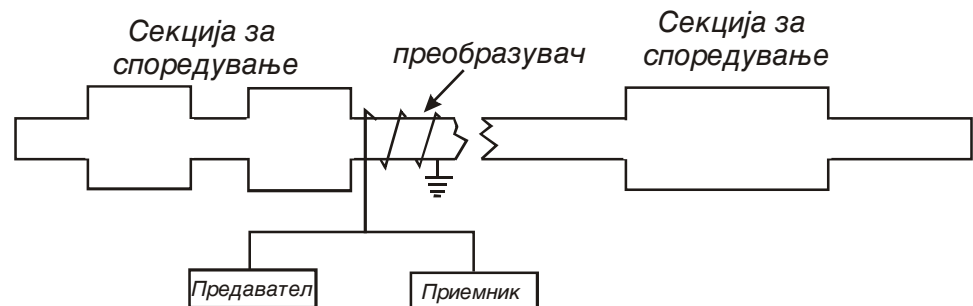
Акустичните методи за мерење на температурата се базираат на зависноста на брзината за звукот (во гасови, течности и цврсти материјали) од температурата. Во идеалните гасови брзината се зголемува со квадратниот корен од апсолутната температура. Додека, кај повеќето тврди материјали и течности има постојана стапка на опаѓање на брзината со покачување на температурата. Практичните акустични техники се во две групи:

- а) Акустичниот бран е пренесен директно низ медиум чија што температура се мери;
- б) Брановите патуваат низ познат секундарен материјал (кварцен кристал или тенка жица) кој е во термичка рамнотежа со медиумот чија што температура се бара.

Најчесто употребувани акустични методи се: резонантен метод, пулсен метод или комбинација на овие две методи.

Ултразвучен метод

Ако фреквенцијата е фиксирана, должината на ултразвучниот резонатор е цел број четвртини бранови должини.



Слика 7. Ултразвучен метод на мерење на температура

Преобразувач за мерење на температура кој користи таков резонатор е развиен од Бел (Белл) Сл. 9. Магнетнострикциона направа С, се побудува од електричните импулси на ултразвучна фреквенција, со импулси кои се движат нагоре надолу низ акустичната преносна линија во вид на механичко напрегање, со брзина на звук, а потоа одат во резонаторот низ спојниот дел. Ако големината на резонаторот е непарен број од четвртини бранови должини, одбиениот сигнал и ехото од спојниот дел ќе бидат во противфаза, така да резултантниот бран ќе биде разлика помеѓу двата брана. Со правилно спојување помеѓу резонаторот и линијата, може да се воспостави ехото чија фреквенцијата се поклопува со резонантната фреквенција на резонаторот. Ехото може да биде прикажано на осцилоскоп, со цел да се нагоди осцилаторот кој го побудува магнетнострикционото сетило на резонантната фреквенција на резонаторот.

Овде температурниот сензор е во форма на резонатор чија што должина се менува со температура, со што се менува и резонантната фреквенција. Температурата може да се одреди со помош на табела на зависноста температурата - фреквенција. Највисоката работна температура за овој уред се определува според точката на топење на материјал на резонаторот. Овој метод е користен за мерење на температура во нуклераните реактори.

Метод на Фарадеев ефект

Фарадеевиот ефект се појавува кај оние материјали кои имаат способност да ја менуваат рамнината на поларизацијата на светлосниот сноп кој поминува низ нив, кога се поставени во магнетно поле. Јачината на магнетното поле ја одредува големината на промената на аголот на поларизација.

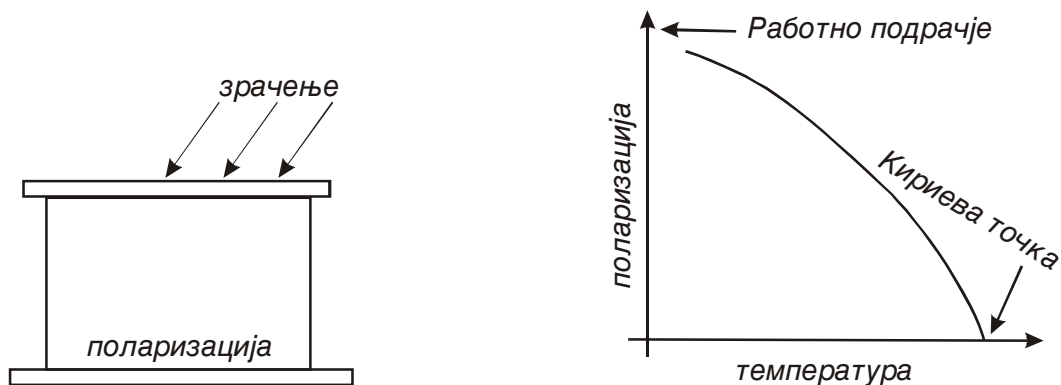
Материјали кај кои Фарадеевиот ефект е зависен од температурата се **terbium iron garnet** и **yttrium iron garnet**, иако кај последниов не е толку ефективен како кај предходниот. И двата материјали не се прозрачни за видливата светлина, и работат со инфрацрвена радиација во опсег 1,1-4,5 микрометри.

Во типичен систем, диск од TlG се прицврстува за перманентниот магнет со рефлектирачка површина помеѓу нив. Склопот се прицврстува на тело чија што температура се мери. Поларизирачки сноп на инфрацрвена радиација од хелиумско неонски ласер се насочува на дискот и се рефлектира назад низ анализатор за да се определи поларизацијата. Фарадеевиот ефект предизвикува промена на поларизацијата, чија што големина зависи од дебелината на кристалот и неговата температура. Бидејќи дискот има фиксен напречен пресек, температурните промени се причина за промена на правецот на поларизацијата на снопот.

Грешките кои што се должат на прекршување на снопот се елиминираат со усмерување на двата снопа вертикално на рамнината на кристалот.

Со фарадеевите елементи меѓу поларизаторот и анализаторот и со електронски модул за засилување и обработка на сигналот, системот може директно да ја покажува температурата.

Квалитетот на оптиката во системот ја одредува точноста на оваа метода. Опсегот е од -20°C до 200°C .



Слика 10. Дијаграм на
пиезо-електричен кристал со

Пиро-електричен метод

Пироелектричниот ефект го покажуваат некои, но не и сите пиезоелектрични материјали. Нивната електрична поларизација се менува рапидно близу до Кириевата точка, така што површинскиот полнеж се менува со температурата. Со инфрацрвено зрачење фокусирано на таков кристал може да се добие многу чувствителен детектор. Полнежот на кристалот го определува излезниот напон кој од друга страна може да биде пропорционален со флуksот на зрачењето или на вкупната емитирана енергија. Детекторот може да биде следен од електронски диференцијатор, ако треба да се мери температура. За оваа цел обично се става чопер за радијација така да кристалот ја покажува промената од амбиенталната температурат до температурата што треба да се измери . Со овој метод можно е лесно да се детектира и промените од $\frac{1}{10^6}^{\text{D}} \text{C}$.