

## EMPIR JRP 18RPT03 MetForTC

### СЕМИНАР

# ИЗМЕРВАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРА С ТЕРМОДВОЙКИ

## Основни принципи и проблеми

Сашо Недялков

## Термодвойките - най-широко използваните температурни сензори

### Предимства:

- простота;
- надеждност;
- широк температурен обхват;
- в повечето случаи ниска цена.

### Недостатъци:

- нелинейност на характеристиките;
- необходимост от компенсация на студените краища;
- нехомогенност, дрейф, хистерезис;
- ниска чувствителност.

## Принцип на работа на термоджойките

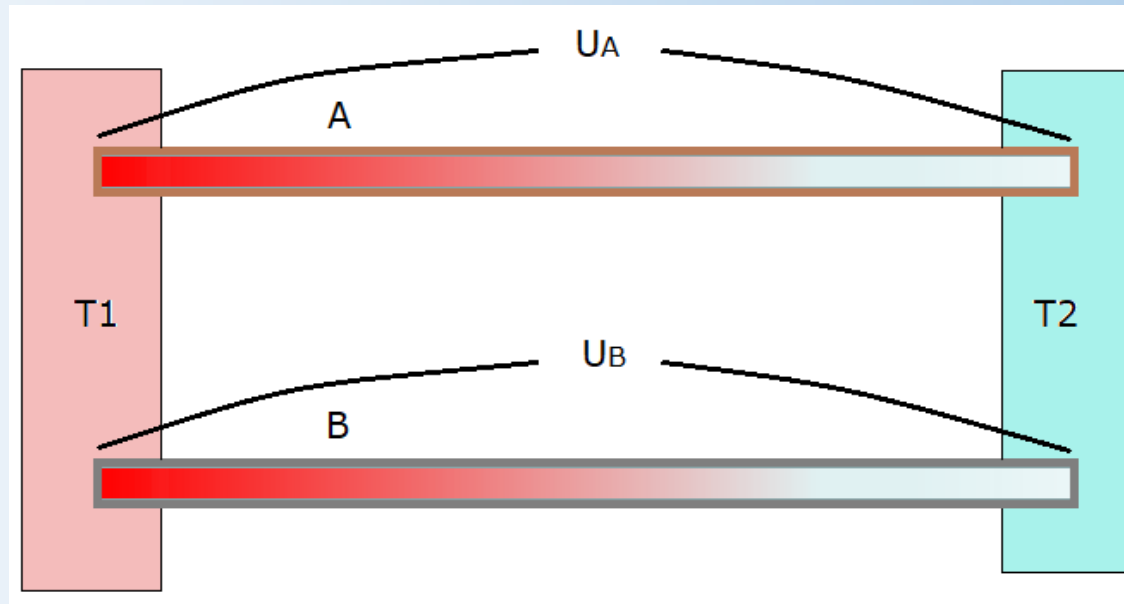
### Ефект на Зеебек

През 1821 г. Томас Зеебек открива, че когато двата края на проводник се изложат на различни температури, се генерира напрежение. Това е известният термоелектричен ефект или ефект на Зеебек.

Големината на ефекта зависи както от температурната разлика, така също и от свойствата на материала на използвания проводник.

Ако вторият проводник е от различен метал, това ще доведе до генериране на различно напрежение.

## Принцип на работа на термодвойките



Ако свържем двата проводника в топлия им край, за потенциалната разлика на студените им краища ще се получи:

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

## Принцип на работа на термодвойките

- Ефект на Пелтие.

През 1834 г. Пелтие открива обратния ефект – ако протече ток през два различни метала, той задвижва поток от топлина от единия метал към другия: единият се охлажда, а другият се нагрява.

- Термоелектрични ефекти.

В средата на 19-ти век Уилям Томсън (лорд Келвин) изследва и обяснява физичното естество на термоелектричните ефекти, открити от Зеебек и Пелтие, прогнозира и изследва ефекта, известен сега като ефект на Томсън. Той описва основните принципи на измерването с термодвойката и физическия източник на термоелектричния потенциал.

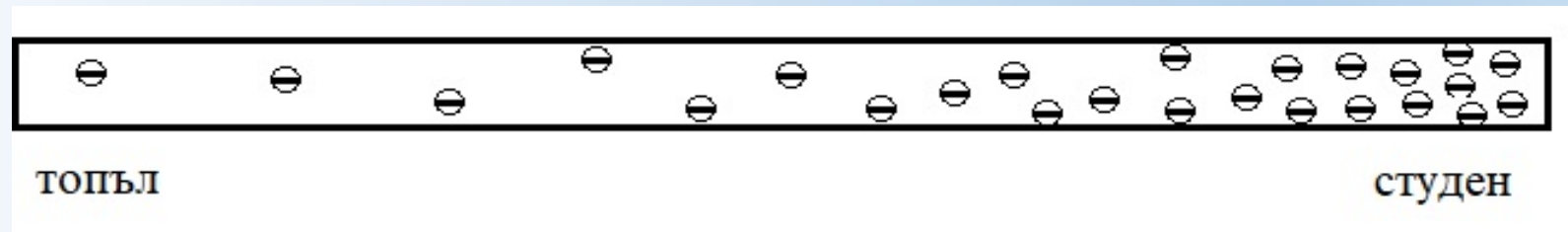
## Принцип на работа на термодвойките от физична гледна точка

- Електропроводимост и топлопроводимост - дължат се на свободното движение на електроните в метала.
- Термоелектрични ефекти – взаимодействия между електрическото и термичното поведение на метала, породени от движението на електроните и взаимодействието им с кристалната решетка.
- Два вида енергия – електроните са носители на два вида енергия – кинетична и химична потенциална.

## Принцип на работа на термодвойките от физична гледна точка

- Кинетична енергия - температурата е мярка за кинетичната енергия.
- Химична потенциална енергия - енергия, противопоставяща се на силите на привличане между електроните и положително заредените метални йони в кристалната решетка.
- Термоелектричните ефекти се дължат на взаимодействието на електроните с кристалната решетка. Това означава, че общата енергия, носена от електроните, зависи както от температурата, така и от свойствата на метала.

## Принцип на работа на термоджойките от физична гледна точка



На фиг. 1 схематично е показан единичен проводник, изложен на температурен градиент, без протичащ ток.

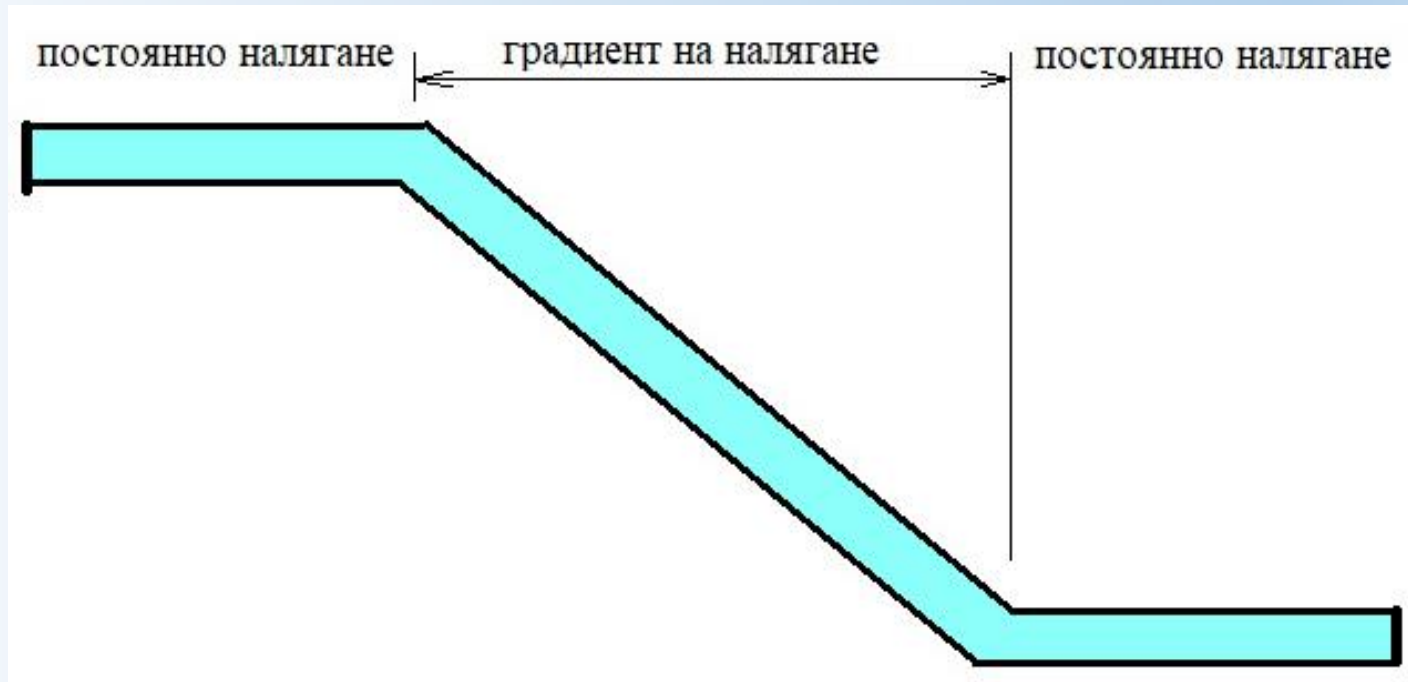
Какво се случва от физична гледна точка?

Термоелектрични ефекти  
Ефект на Зеебек



## Принцип на работа на термодвойките от физична гледна точка

Една проста аналогия:



## Принцип на работа на термоджойките от физична гледна точка

Напрежението на Зеебек,  $E_s$ , се генерира в зоната, където има температурен градиент.

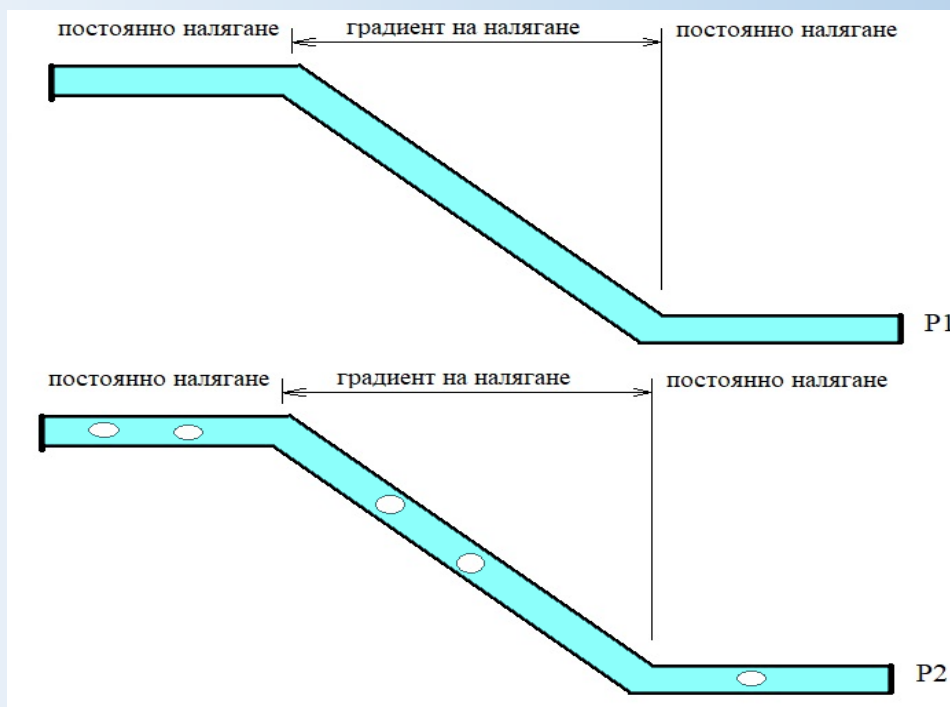
$$dE_s = s(T) dT \quad (1)$$

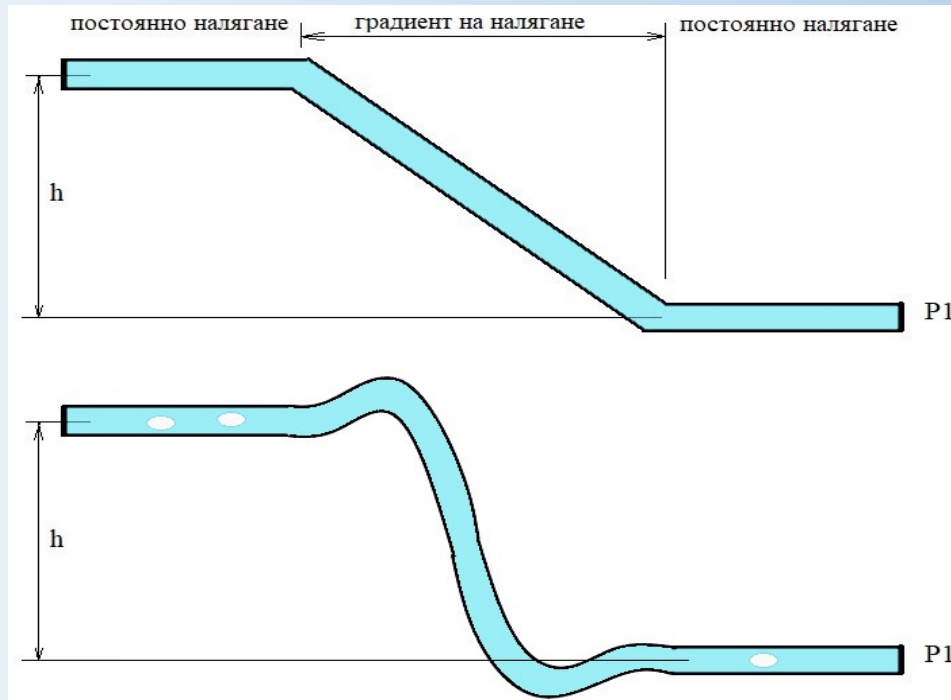
където:

- $s(T)$  - коефициент на Зеебек на проводника,
- $dE_s$  и  $dT$  – малки промени съответно в напрежението и температурата на Зеебек.

Коефициентът на Зеебек зависи от електронните свойства на проводника, така че е различен за всеки метал и сплав и се променя при наличие на дефект или замърсяване.

## Принцип на работа на термодвойките от физична гледна точка



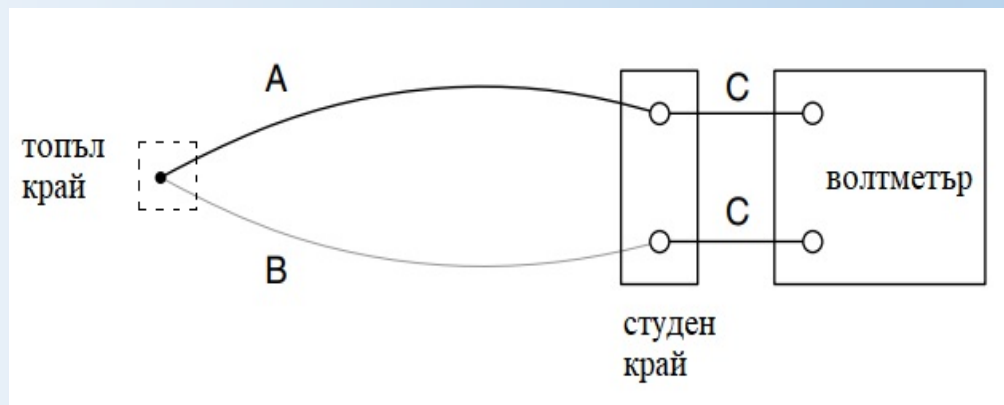


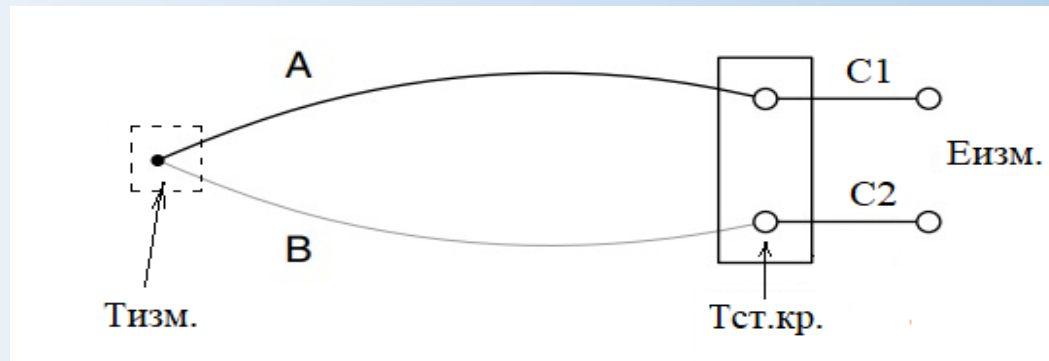
Ако проводникът на термодвойката е без дефекти (т.е. е хомогенен), напрежението на Зеебек между двата края на проводника зависи само от двете крайни температури - от температурната разлика.

## Използване на ефекта на Зеебек за измерване на температура

Два ключови факта:

- Напрежението на Зеебек се генерира само при температурни градиенти и ако градиентът е нула, генерираното напрежение е нула.
- Ако проводникът е хомогенен, тогава напрежението, генерирано по дължината на проводника зависи само от разликата на крайните температури.





Ако всеки от трите проводника е хомогенен (А и В на термодв. и С на уреда), за измереното напрежение можем да запишем следното равенство:

$$E_{изм} = E_A(T_{изм}) - E_A(T_{ст. кр}) + E_{C1}(T_{ст. кр}) - E_{C2}(T_{ст. кр}) + E_B(T_{ст. кр}) - E_B(T_{изм}) \quad (1)$$

където,  $E_A$ ,  $E_B$  и  $E_{C1}$  и  $E_{C2}$  са потенциалите на крайните точки на проводниците А, В и С, съответно за измерваната температура  $T_{изм}$  и за температурата на студените краища -  $T_{ст. кр}$ .

Ако се спазят изискванията частта на схемата около студените краища, като измервателните проводници, входни букси и др. съединители на волтметъра също да бъдат от подходящи материали и при еднаква и стабилна температура, то:

$$E_{C1}(T_{ст. кр}) = E_{C2}(T_{ст. кр}) = 0$$

Тогава от равенството (1) се получава:

$$E_{изм} = [E_A(T_{изм}) - E_B(T_{изм})] - [E_A(T_{ст. кр}) - E_B(T_{ст. кр})] \quad (2)$$

или:

$$E_{изм} = E_{AB}(T_{изм}) - E_{AB}(T_{ст. кр}) \quad (3)$$

Ако температурата на студените краища е 0 °С, можем да запишем:

$$E_{изм} = E_{AB}(T_{изм}) \quad (4)$$

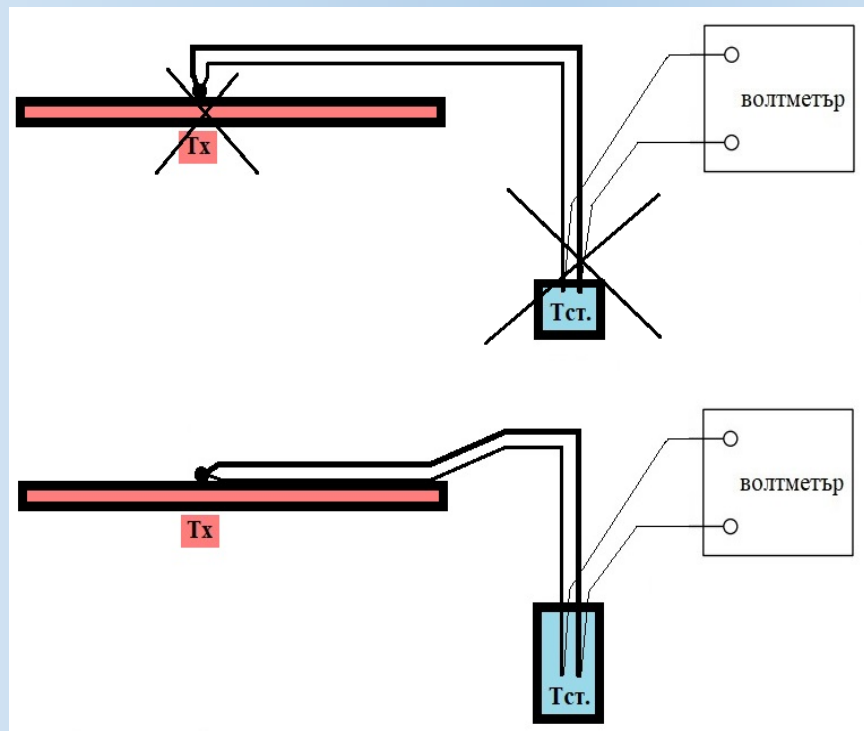
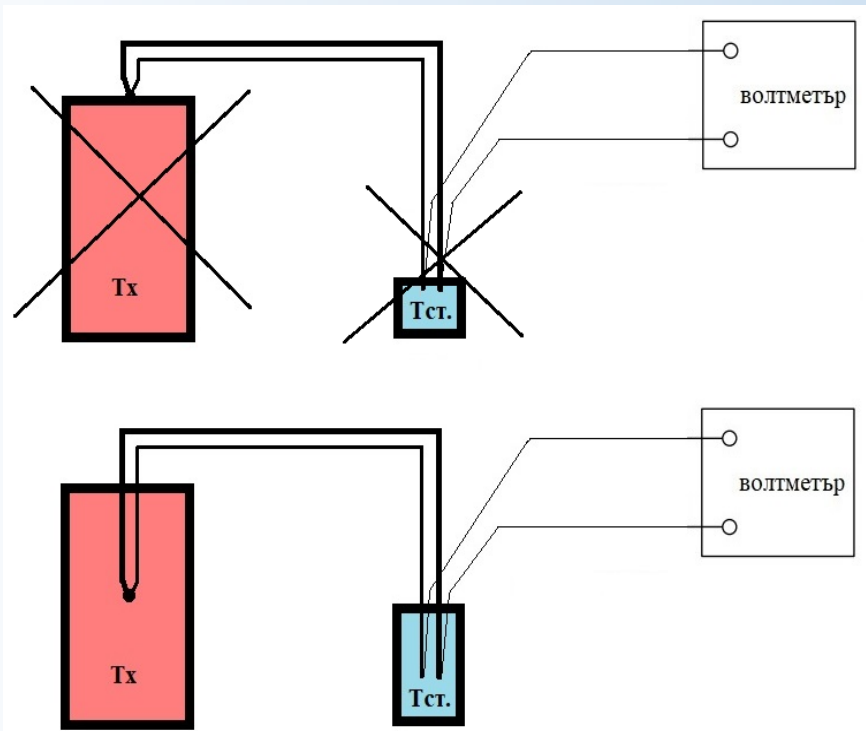
$$E_{изм} = E_{AB}(T_{изм})$$

Последното уравнение съответства на връзката между измерваната температура и полученото напрежение, която се дава в стандартните таблици и уравнения за електродвижещото напрежение на различните типове термодвойки.

Това уравнение е вярно само при следните условия:

- студените краища са при 0 °С;
- проводниците на термодвойката, изложени на температурни градиенти, са хомогенни;
- всички уреди и свързващи проводници са изотермични или хомогенни;
- топлия край и студените краища са при изотермични условия.





## Видове (типове) термодвойки

Три основни категории:

- стандартни термодвойки от благородни метали,
- стандартни термодвойки от неблагородни метали
- нестандартни термодвойки.

Стандартни термодвойки от благородни метали:

Използва се платина.

- тип S (платина 10% родий - платина)
- тип R (платина 13% родий - платина)
- тип B (платина 30% родий - платина 6% родий)

Предимства - хомогенни, стабилни във времето, с малък хистерезис.

Недостатъци – много по-скъпи (над 100 пъти повече от неблагородните метали), с малка чувствителност – 1 до 14  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

## Видове (типове) термодвойки

Стандартни термодвойки от неблагородни метали:

Съдържат никел.

- тип К (хромел - алумел)
- тип J (желязо - константан)
- тип Т (мед - константан)
- тип Е (хромел - константан)
- тип N (никел хром - никел - силиций)

Предимства – ниска цена, голяма чувствителност - 20 до 80  $mV/^\circ C$ , различните типове покриват широк обхват.

Недостатъци – недобра хомогенност, нестабилни във времето, голям хистерезис.

## Видове (типове) термодвойки

### Нестандартни термодвойки

Има голямо разнообразие от нестандартни термодвойки, съответно с разнообразни характеристики - подходящи работа в тежки условия - измерването на температури до 3000 °C и температури на силно реактивни газове, особено тези, богати на водород и въглероден окис. Съществува информация за повече от 200 различни термодвойки.

Високотемпературни термодвойки на базата на волфрам и рений:

- тип G (W - W 26 % Re) от 300 °C до 2400 °C;
- тип C (W 3 % Re - W 25 % Re) от 0 °C до 2400 °C;
- тип D (W 5 % Re - W 26 % Re) от 0 °C до 2400 °C.

## Видове (типове) термодвойки

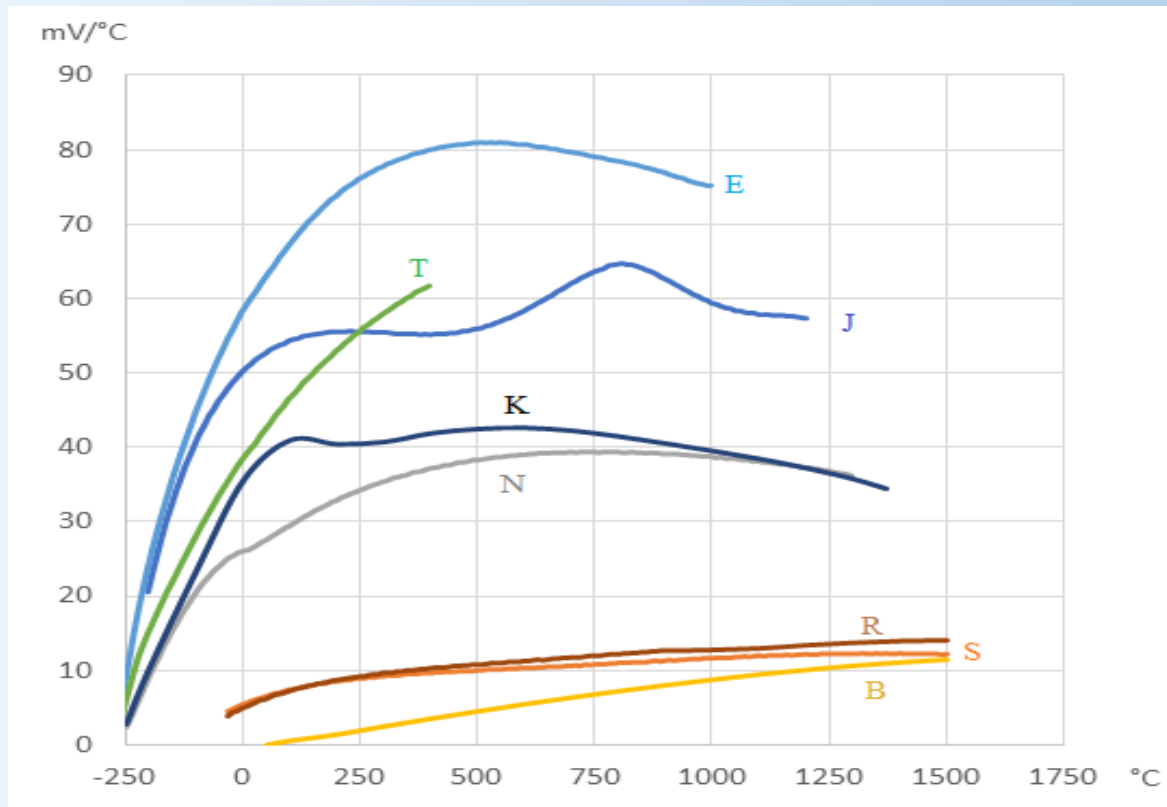
Термодвойките на базата на волфрам и рений имат висок обхват, но лоша устойчивост на окисляване и са много крехки. Необходими са подходящи защитни корпуси, за да се предотврати окисляването и да се предпазят проводниците от механично напрежение.

Алтернативна високотемпературна термодвойка е борен карбид/графит за температури до 2200 °С. Изходът на тези термодвойки е много висок, около 290  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , но имат големи вариации в коефициента на Зеебек.

Термодвойки от чисти метали - избягва се варирането на сплавта като източник на нехомогенност.

Термодвойките „платина-злато“ и „платина-паладий“ са с много добри качества. С тях може да се постигне неопределеност от няколко стотни от градуса и могат да се използват като еталони за температури съответно до 630 °С и 1500 °С.

## Видове (типове) термодвойки



На фигурата е показана чувствителността (коэф. на Зеебек) на стандартните термодвойки в зависимост от температурата.

## Видове (типове) термодвойки

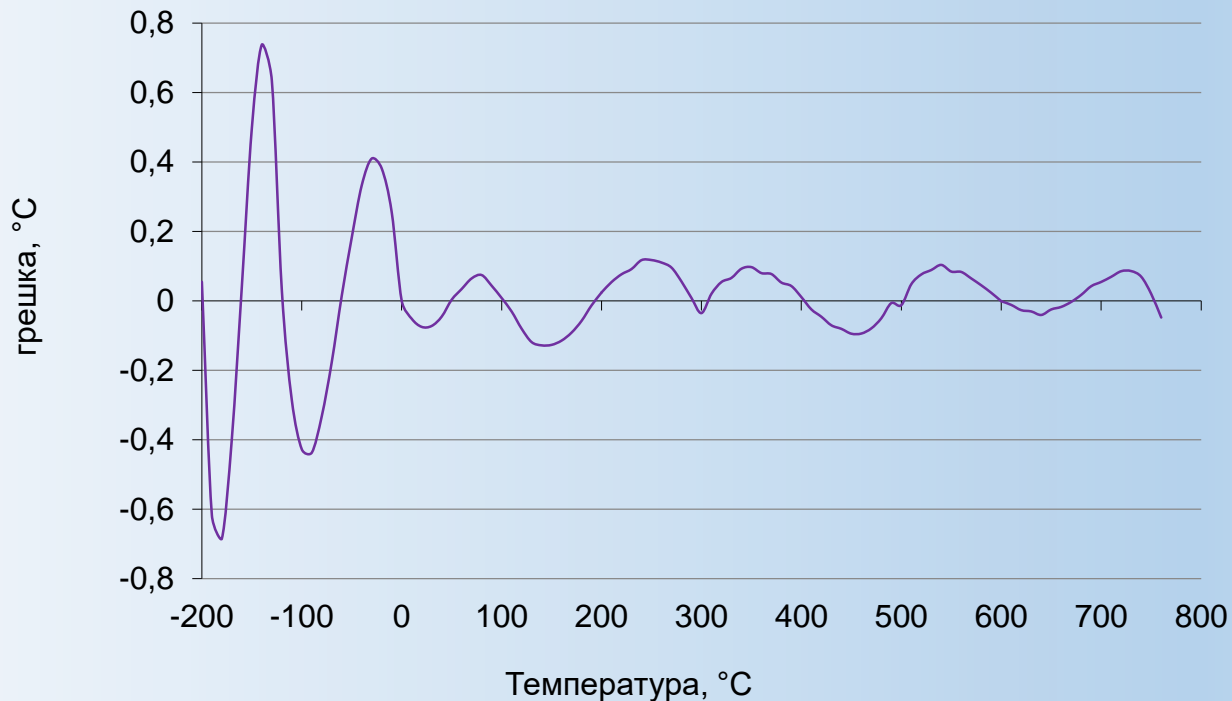
От графиките се вижда ясно общ недостатък на термодвойките – техните силно нелинейни зависимости от температурата.

Зависимостта между температурната разлика и напрежението на изхода на термодвойката е нелинейна и се дава в стандартни таблици или чрез интерполация с полиноми от висок ред:

$$T = C_0 + C_1E + C_2E^2 + \dots C_iE^i \quad (5)$$

където  $i$  достига до 10.

Линеаризация на тип J с полиноми от втори ред



На графиката е показана грешката при линеаризация на характеристиката на термодвойка тип J с множество полиноми от втори ред.



## Толеранси:

Допустимото отклонение се изразява или като отклонение в градуси по Целзий, или като процент от действителната температура. Прилага се по-голямата стойност.

Толеранси съгласно IEC584-2 (за студени краища при 0 °C):

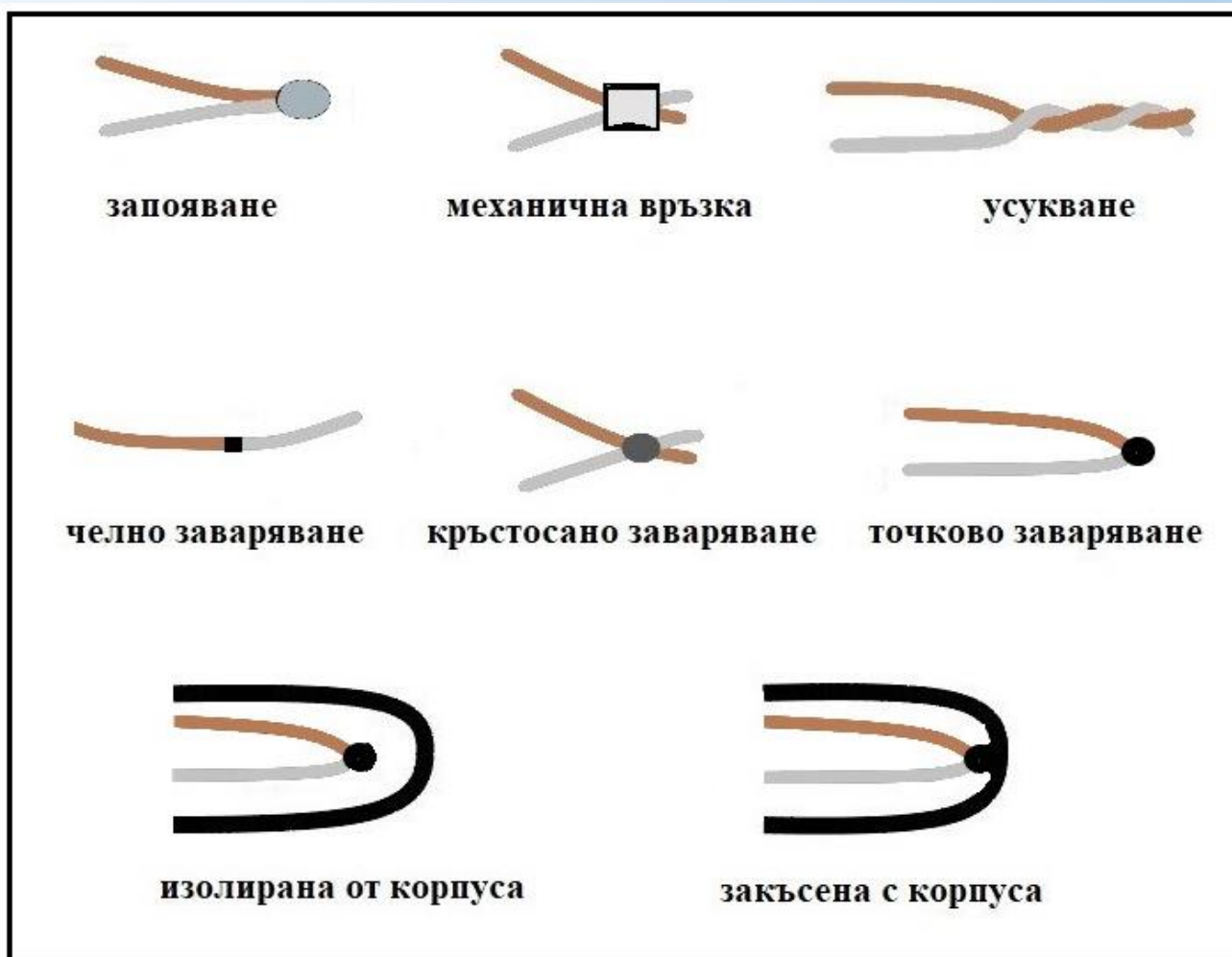
	Class 1	Class 2	Class 3 <sup>‡</sup>
<b>Tolerance values<sup>†</sup> (±)</b>	0.5 °C or 0.4%	1 °C or 0.75%	1 °C or 1.5%
	Temperature limits for validity of tolerances		
Type T	–40 °C to 350 °C	–40 °C to 350 °C	–200 °C to 40 °C
<b>Tolerance values<sup>†</sup> (±)</b>	1.5 °C or 0.4%	2.5 °C or 0.75%	2.5 °C or 1.5%
	Temperature limits for validity of tolerances		
Type E	–40 °C to 800 °C	–40 °C to 900 °C	–200 °C to 40 °C
Type J	–40 °C to 750 °C	–40 °C to 750 °C	—
Type K	–40 °C to 1000 °C	–40 °C to 1200 °C	–200 °C to 40 °C
Type N	–40 °C to 1000 °C	–40 °C to 1200 °C	–200 °C to 40 °C
<b>Tolerance values<sup>†</sup> (±)</b>	1 °C plus 0.3% of ( <i>t</i> – 1100) °C	1.5 °C or 0.25%	4 °C or 0.5%
	Temperature limits for validity of tolerances		
Type R or S	0 °C to 1600 °C	0 °C to 1600 °C	—
Type B	—	600 °C to 1700 °C	600 °C to 1700 °C

## Конструкция на термодвойки

- Връзка в топлия край

Целта на връзката в топлия край е да осигури надежден електричен контакт. Докато усукване и мека спойка може да са подходящи при ниски температури, за излагане на висока температура връзката се прави чрез заваряване. За всеки конкретен случай размерът на връзката е от голямо значение. Размерът се определя от изискването топлия край винаги да е в изотермична среда. От значение разбира се е и диаметърът на проводниците. При направата на връзката се вземат мерки да се минимизира причинената нехомогенност на проводниците в близост до връзката.

## Начини на свързване в топлия край



- Връзка на студените краища към уреда



## Удължителни и компенсационни проводници

Трябва да се има предвид, че всички съединения в измервателната верига внасят нехомогенност. По възможност те да се избягват. Съединенията са нежелани, но в много случаи в практиката се налага да се използват подходящи гъвкави проводници за удължаване на изводите на термодвойката. Ако е възможно свързващият проводник да се поддържа изотермичен, тогава няма да се генерира напрежение на Зеебек от свързващия проводник и следователно няма грешка. Това на практика е невъзможно.

- Удължителни проводници - от същия материал като този на термодвойката.
- Компенсационни проводници - те са от други материали, но при връзката си с изводите на термодвойката генерират незначително напрежение (обикновено в обхвата от 0 °C до 50 °C). По този начин се избягва внасянето на голяма грешка.

## Защитни корпуси

В повечето случаи се използват термодвойки в защитни корпуси. Тяхното разнообразие като размери и материали е много голямо в зависимост от предназначението.

Минималната дължина се определя от необходимата дълбочина на потапяне и температурните градиенти. Дълбочината на потапяне трябва да бъде по възможност над 10 пъти по-голяма от диаметъра на корпуса. Някои често използвани материали са:

Материал	Макс. температура
PVC	85 °C
Полиуретан	85 °C
Полимер / стъклен ламинат	280 °C
Стъклени влакна	480 °C
Керамични тръбички	1200 °C
Керамични мъниста	1950 °C
Стомана	900 °C
Инконел	1200 °C



## Компенсация на температурата на студените краища

Както беше показано при теоретичното разглеждане на принципа на работа на термодвойките, уравнението за измерване е:

$$E_{изм} = E_{AB}(T_{изм}) - E_{AB}(T_{ст. кр}) \quad (3)$$

Следователно за измерване на температура с термодвойка са необходими две измервания – изходното напрежение на термодвойката и температурата на студените краища, за която да бъде направена компенсация.

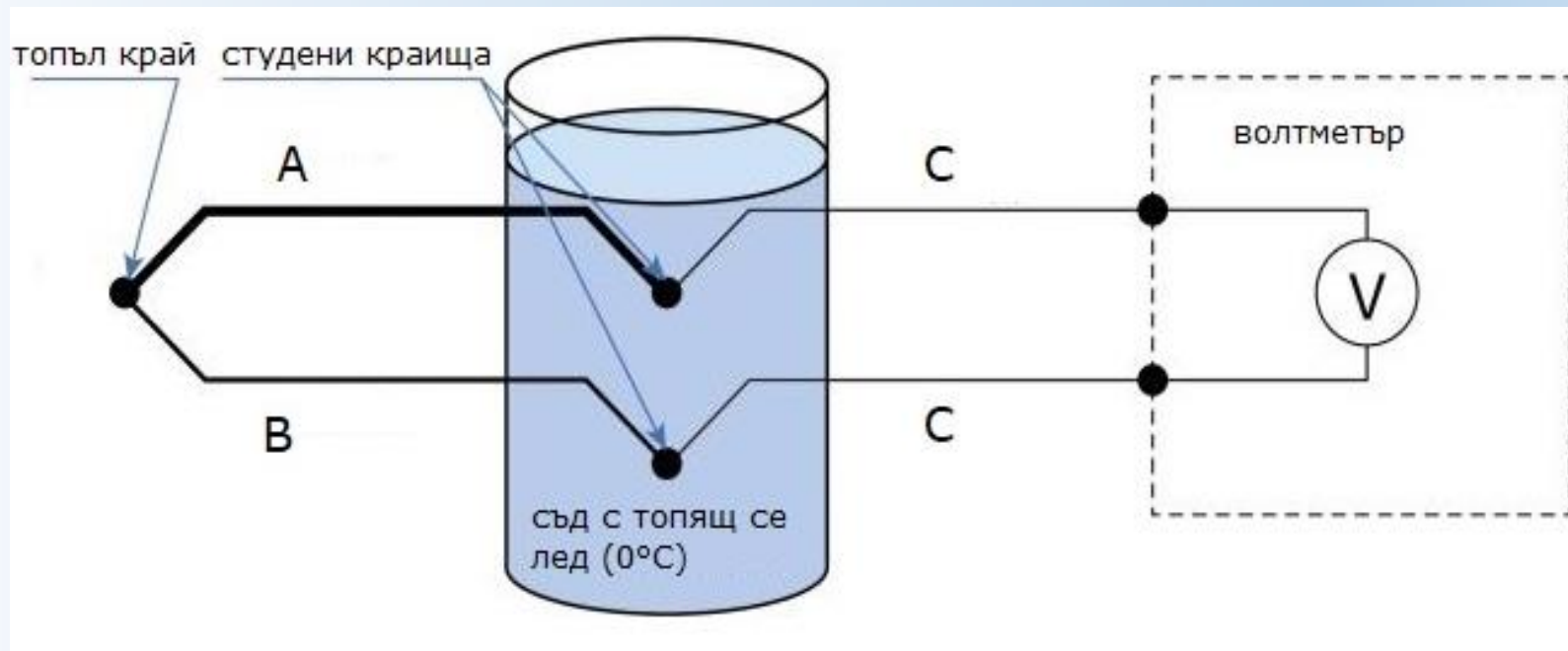
## Студени краища при 0 °C

Ако поставим студените краища са при 0 °C:

$$E_{изм} = E_{AB}(T_{изм}) \quad (4)$$

Измерва се изходното напрежение и се преобразува в температура, като се използват таблиците или полиномите за съответната термодвойка (не се налага компенсация).

## Използване на съд с топящ се лед



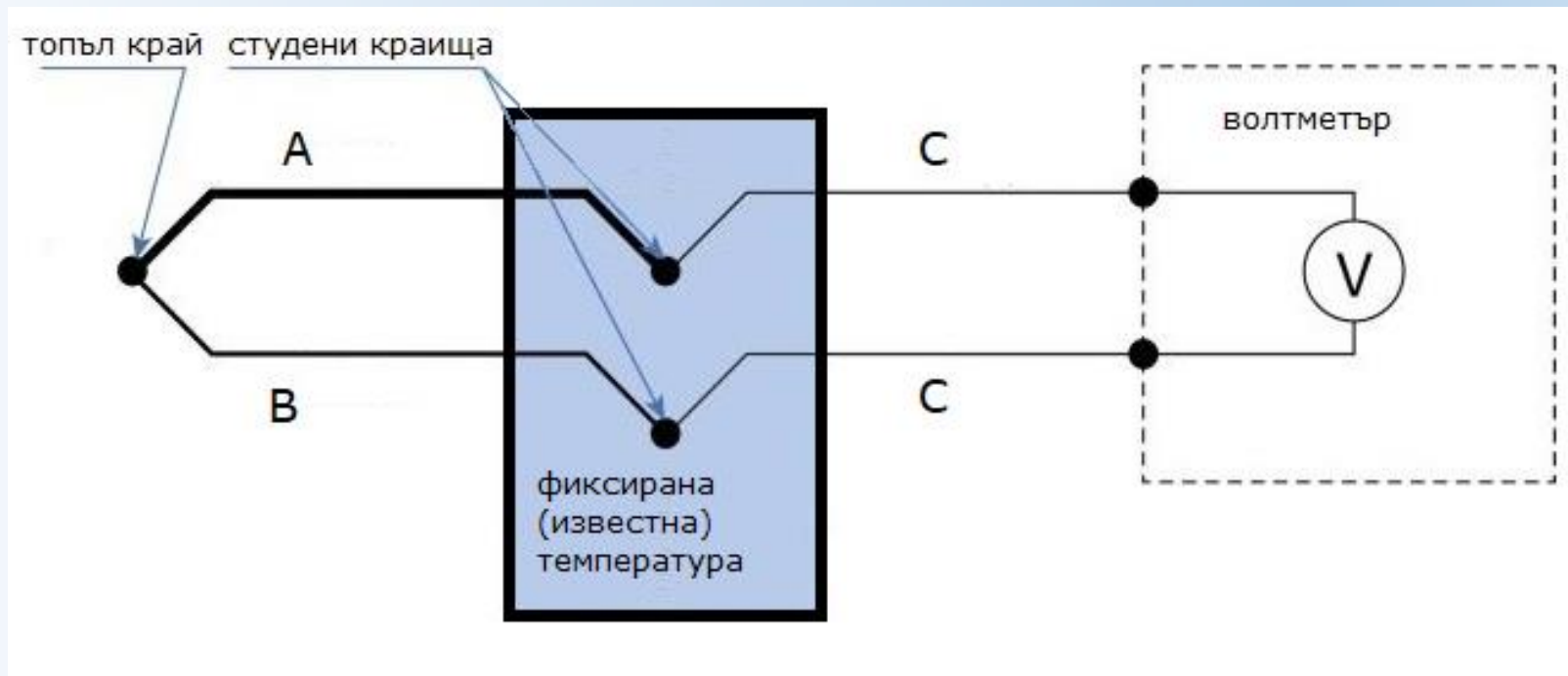
Вместо съд с топящ се лед може да се използва термостат с автоматично поддържане на 0 °С.



## Компенсация на температурата на студените краища

### - Студени краища при температура, различна от 0 °C

В тези случаи също е важно да се осигури еднаква температура на студените краища, която трябва да е известна.



## Компенсация на температурата на студените краища

### - Студени краища при температура, различна от 0 °C

В тези случаи също е важно да се осигури еднаква температура на студените краища, която трябва да е известна. Алгоритъмът на измерване е:

- осигурява се еднаква температура на студените краища;
- измерва се тази температура;
- определя се напрежението на Зеебек за тази температура, като се използват стандартните таблици или полиноми за съответната термодвойка;
- измерва се изходното напрежение от термодвойката;
- сумират се двете напрежения;
- определя се измерената температура, която съответства на така получената стойност на напрежението, като се използват стандартните таблици или полиноми.

## Компенсация на температурата на студените краища

- **Студени краища при температура, различна от 0 ° C**
- Много често се допуска следната грешка!!!
  - измерва се изходното напрежение от термодвойката;
  - определя се съответната температура от стандартните таблици;
  - измерва се температурата на студените краища;
  - **сумират се двете температури!!!**

Този алгоритъм е грешен!

Не може да се прави компенсация на температурата на студените краища по този начин, защото температурната характеристика на термодвойките е нелинейна.

Тази грешка може да се илюстрира добре с един конкретен пример.

Използвана термодвойка - тип N.

При **правилния начин**:

- Измерва се температура на студените краища - 30 °C;
- определя се напрежението, съответстващо на тази температура, като се използва стандартната таблица – 0,793 mV.
- измерва се напр. на изхода на термодвойката - 31,578 mV.
- сумират се двете напрежения:

$$U = 31,578 \text{ mV} + 0,793 \text{ mV} = 32,371 \text{ mV}$$

От стандартната таблица се определя измерената температура, съответстваща на напрежение 32,371 mV:

$$T_x = 900 \text{ °C.}$$

При **неправилния начин**:

- измерва се температура на студените краища - 30 °С;
- измерва се напр. на изхода на термодвойката - 31,578 mV.

от стандартната таблица се определя температура, съответстваща на измереното напрежение (31,578 mV):

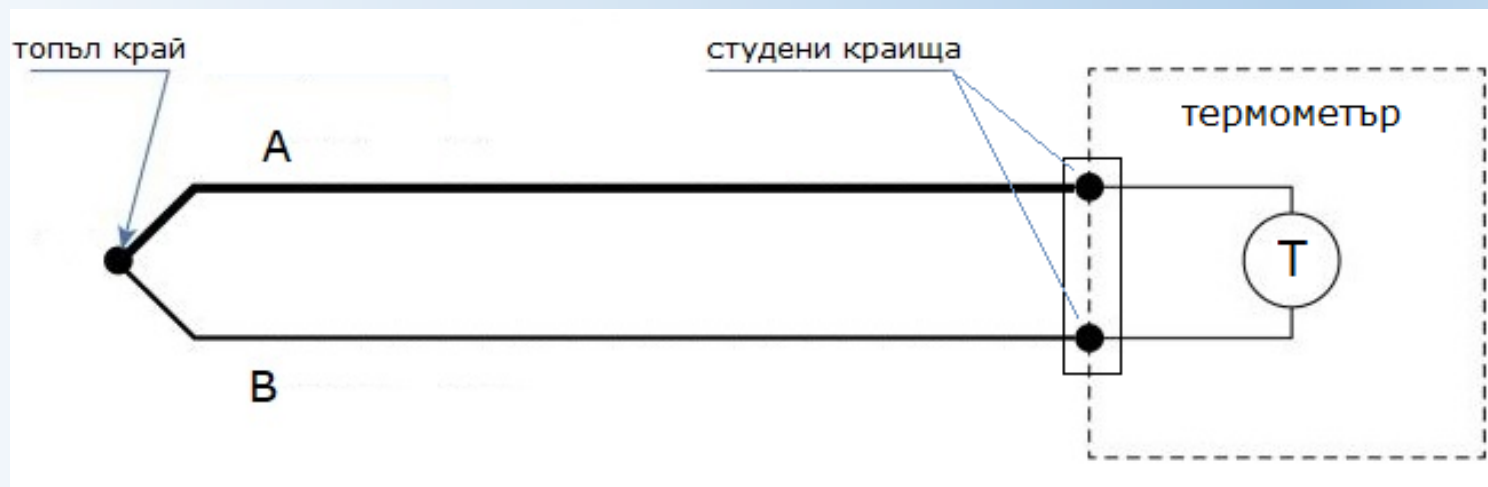
- на напрежение 31,578 mV съответства температура 880,5 °С;

Като добавим температурата на студените краища, ще получим:

$$T_x(\text{грешно}) = 880,5 \text{ °С} + 30 \text{ °С} = 910,5 \text{ °С}$$

От примера се вижда, че при този неправилен подход се получава значителна грешка - 10,5 °С.

При цифровите термометри, работещи с термодвойки, обикновено като температура на студените краища на термодвойката се явява температурата на входните букси или съединители на уреда.



В този случай в принципа на действие на термометъра е заложена автоматична компенсация на студените краища. За целта има вътрешна схема за аналогова или цифрова корекция на измереното напрежение в съответствие с горепосочения алгоритъм.

## **Калибриране на термодвойки и на термометри, работещи с термодвойки.**

При калибриране на термодвойки и средства за измерване на температура, използващи термодвойки, е в сила всичко казано дотук.

Понякога по различни причини се калибрират и термометри без използване на сензора (като вторични уреди) чрез подаване на електрично напрежение към входа им (симулиране на сигнал от термодвойка). За целта се използва еталонен калибратор, който генерира желаното напрежение.

От разгледаното дотук е ясно, че ако от калибратора зададем напрежение, съответстващо на дадена температура от стандартната таблица, а термометърът добави автоматична корекция за студените краища, това ще доведе до некоректно показание.



В зависимост от функционалните възможности на еталонния калибратор и калибрирания термометър са възможни различни подходи за компенсация на студените краища.

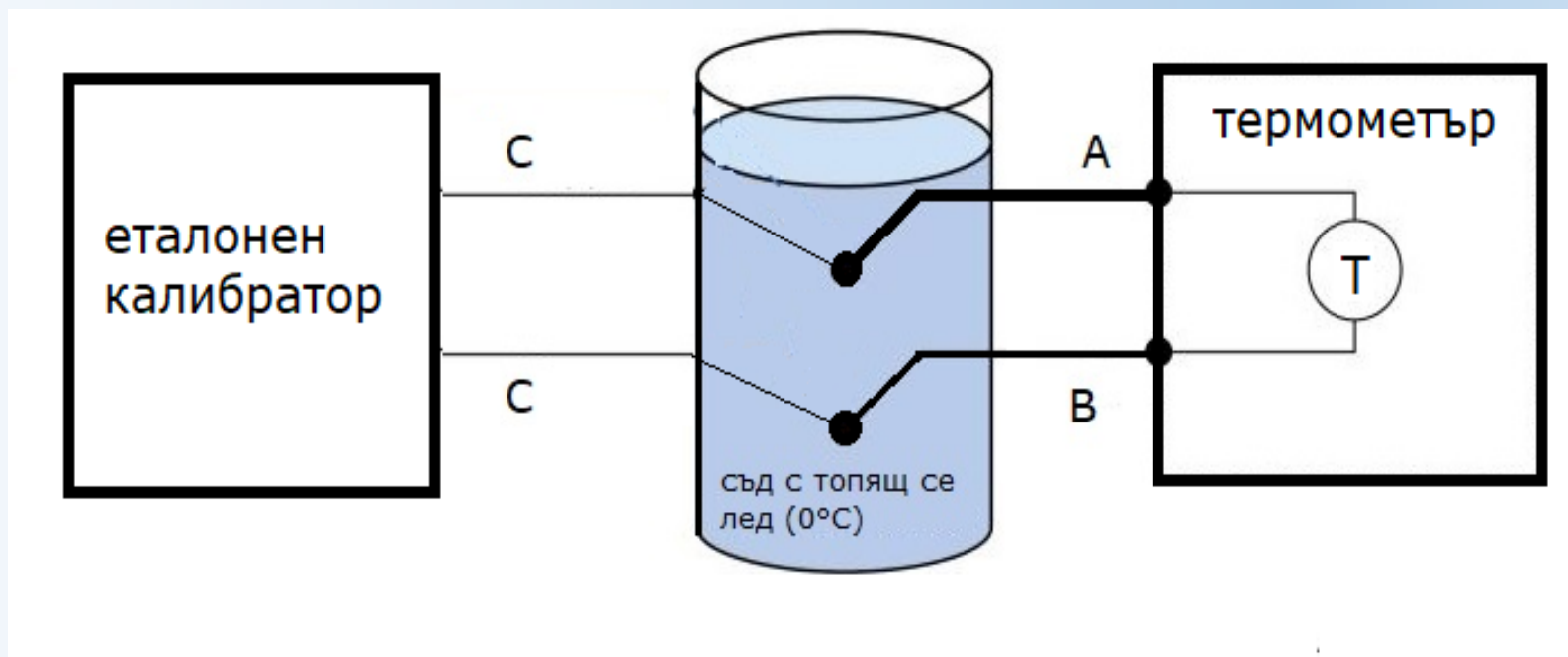
1. Изключва се автоматичната корекция за студените краища и се задава съответното напрежение от калибратора, в случай, че калибрираният термометър има такава възможност.

2. В случай, че няма възможност за изключване на автоматичната корекция за студените краища, трябва тази температура да се измери с подходящ термометър и да се направи съответната корекция по напрежение (задава се коригирана стойност на напрежението от калибратора).

3. В случай, че менюто на еталонния калибратор дава тази възможност, се включва неговата автоматична корекция за студените краища. Тогава трябва да се зададе температурата на студените краища (т.е. на входните букси на термометъра) или калибраторът трябва да има възможност да измери тази температура.



## 4. Използва се схемата:



В този случай термометърът се свързва с проводници от същия материал, за който тип термодвойка е предназначен термометърът.

## **Източници на неопределеност при калибриране на термодвойки в пещ с използване на еталонни термодвойки**

1. Първата група компоненти на неопределеност е свързана с определянето на температурата в пещта (точката на калибриране):

- неопределеност от дисперсия на резултатите при многократно измерване на изходното напрежение на еталонната термодвойка
- неопределеност от калибриране на еталонната термодвойка
- неопределеност от дрейф на еталонната термодвойка
- неопределеност от калибриране на еталонния волтметър
- неопределеност от дрейф на еталонния волтметър
- неопределеност от паразитни т.е.д.н. в измервателната верига на волтметъра
- неопределеност от температурни градиенти в пещта
- неопределеност от компенсацията на температурата на студените краища на еталонната термодвойка

2. Втората група компоненти на неопределеност е свързана с определянето на изходното напрежение на калибрираната термодвойка:

- неопределеност от дисперсия на резултатите при многократно измерване на изходното напрежение на калибрираната термодвойка
- неопределеност от калибриране на еталонния волтметър
- неопределеност от дрейф на еталонния волтметър
- неопределеност от паразитни т.е.д.н. в измервателната верига
- неопределеност от използваните компенсационни проводници
- неопределеност от компенсацията на температурата на студените краища на калибрираната термодвойка
- неопределеност от отклонението на температурата в пещта (определена от първата група компоненти)
- неопределеност от нехомогенност на проводниците на калибрираната термодвойка.

Обикновено най-големите компоненти на неопределеност са тези, дължащи се на температурни градиенти в пещта и на нехомогенност на проводниците на калибрираната термодвойка (когато тя е от неблагородни метали).

Не се препоръчва като еталонна термодвойка да се използва такава от неблагородни метали, нейният дрейф и хистерезис ще увеличат значително неопределеността.

Благодаря за вниманието!