

- **Електронни схеми за измерване и управление**

- **Измерване и регулиране на температура**

- **ITS-90 International Temperature Scale of 1990**

- Най-често използвани сензори, обхват, самонагриване:

- Класически, с обемно или линейно разширение, скали °C, °K, °F;

Обикновено са неелектрически, включват и регулиране – ютии, бойлери...

- Полупроводникови;

Напрежение на p-n преход ($-2,2\text{mV}/^\circ\text{C}$) или обратен ток, рядко и В (h_{21});

- Термодвойки – източници на напрежение;

„Компенсация на студения край“;

- Термо-съпротивления от платина, никел, мед и др.

- Термистори – полупроводникови резистори;

- Други – оптически, дистанционно измерване, спектрални (космос)

- Съвременни електронни сензори;

Интегрирани или интелигентни;

Видове според интерфейса или изходния сигнал, код, брой импулси, PWM

“Всички” са на базата на полупроводниковите сензори – обхват;

Измерват температурата на корпуса си – на печатната платка – избор на място;

Някои са предназначени за работа с външни сензори – термодвойки, RTD и др.

Има универсални интелигентни преобразуватели – не само за температура –

пример AD7730;

Консумация, самонагряване.

Примери:

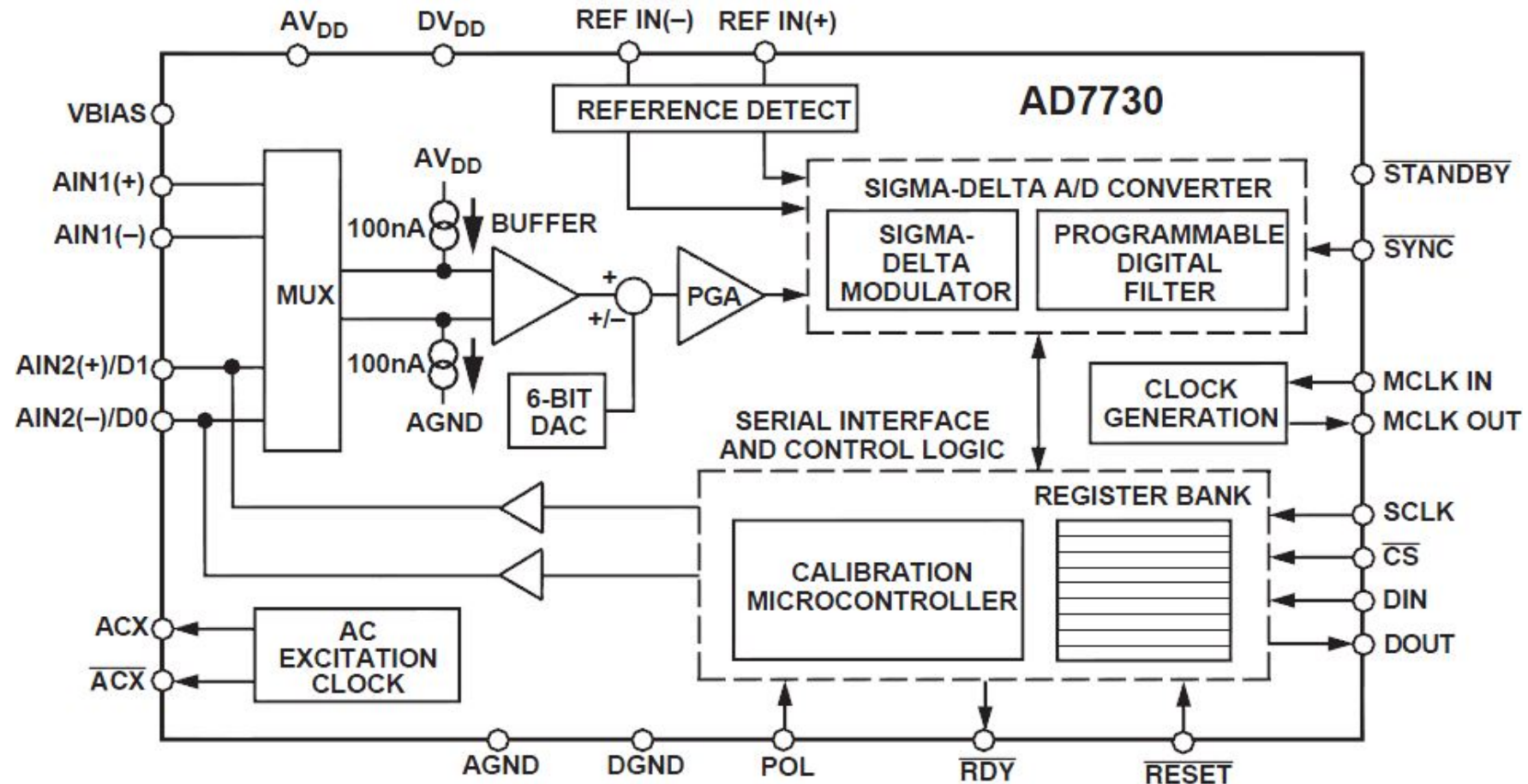
SMT172 на Smartec, точност 0,1-0.2 °C в обхват -45°C to 130°C, PWM изход;

DS18B22 1-Wire Digital Thermometer, всъщност 3-проводен интерфейс;

TMP117 = I2C съвместим интерфейс.

- Съвременни електронни сензори;

AD7730 – интелигентен „сензор“, принцип на работа;



- **Измервателни уреди за измерване и регулиране на температура:**

- Типова схема, основни блокове, отнася се и за други измервания

Микроконтролер

Първичен преобразувател, усилвател, АЦП и др.

Когато сензорът е интегриран (интелигентен), а АЦП е в микроконтролера, може и без този блок

Захранване, двуполярно захранване (еднополярен източник), източник, батерия - зареждане;

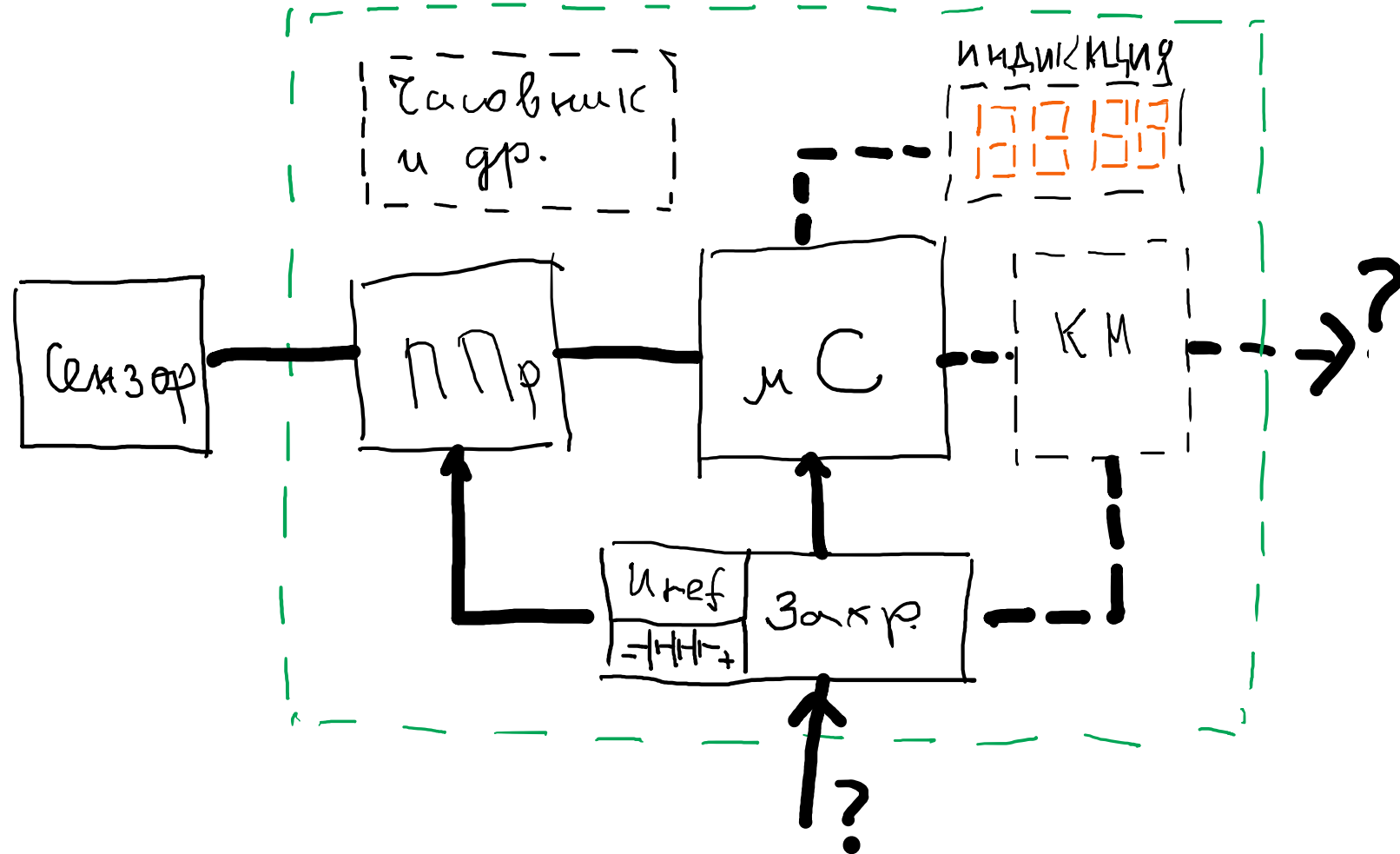
Индикация, може и само контролни диоди;

Комуникация, жична или безжична

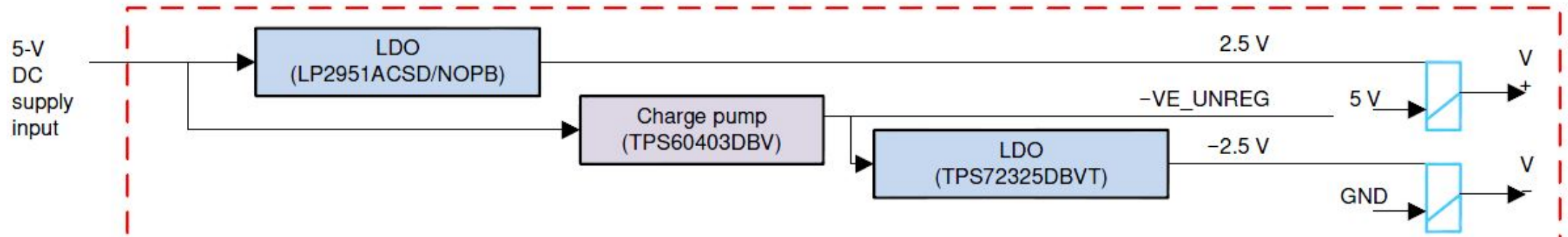
Часовник, памет за съхранение на резултати и други

Защита на входове (и изходи).

- Типова схема, основни блокове



- Генериране на отрицателно напрежение при еднополярно захранване



Входното напрежение (5V DC), всъщност може да е от батерия - 3÷4,5V. Използват се два стабилизатора за 2,5V тип LDO (**L**ow-**D**rop**O**ut regulator) и кондензаторен инвертор на напрежение (Charge pump). КПД не е голям, но и консумацията не е голяма.

Това решение се използва когато е необходимо отрицателно захранване. Кога?

- Операционни усилватели;
- Сензори с двуполярен изход, например термодвойки;

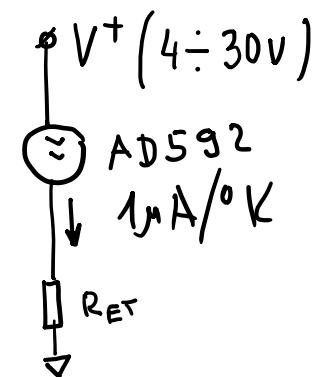
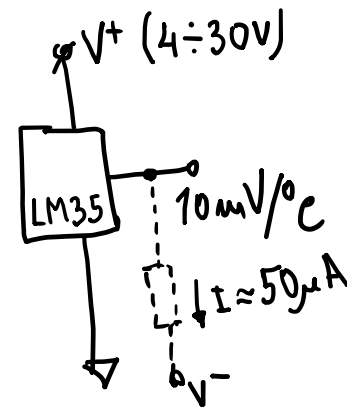
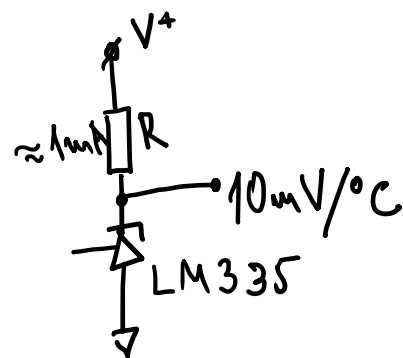
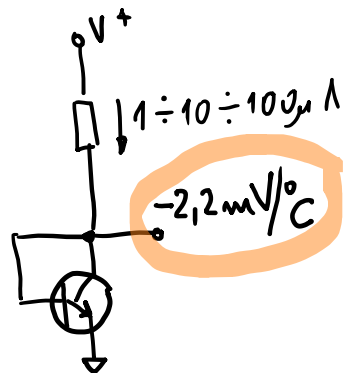
- **Полупроводникови сензори**, широко приложение но **не в индустрията**

Основни параметри, обхват, чувствителност, точност, линейност;

Ако се ползва дискретен прибор се препоръчва да се ползва U_{be} (U_{ak}), а не обратният ток или коефициентът на усилване по ток. За непрецизно приложение;

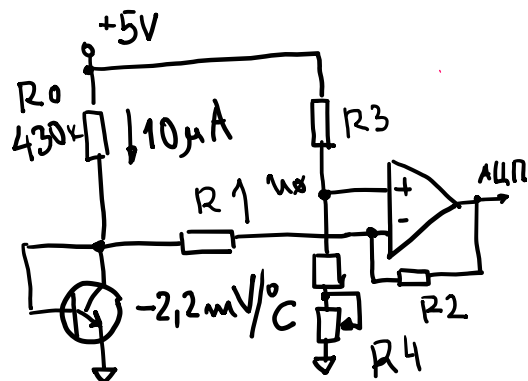
Най-простите интегрални сензори са от шунтов тип (LM335) или като източници на напрежение (LM35). Температурният коефициент най-често е 5, 10mV/°C. Има и по скалата на Фаренхайт. Да се прегледат параметрите на LMT70.

Има ИС температурно зависими източници на ток (AD592- 1μA/°K).



- Полупроводникови сензори, пример:

Изчисления с начални данни: - сензор p-n преход, $-2,2\text{mV}/^\circ\text{C}$, 550mV при 0°C



- обхват от -40 до $+60$

- разрешаваща способност $0,1^\circ\text{C}$

- 10-битов АЦП (10 разряда)

Ако опорното напрежение на АЦП е 5V при 10-битов АЦП ще има 1024 нива, т.е. около 5mV стъпка.

Ако сигналът не се усили разрешаващата способност ще бъде $5/2,2 \sim 2,3^\circ\text{C}$ т.е. по-малко от зададеното. Избира се схема на инвертиращ усилвател защото температурният коефициент е отрицателен. Максимална разрешаваща способност ще се получи, когато изменението на напрежението на сензора за 100°C ($-40\div 60$), доведе до изменение на входа на АЦП от 0 до 5V . Получава се усилване $5000\text{mV}/(2,2\text{mV} \cdot 100) = 22,7$. Нека да е 22 с малко запас. Отношението $R2/R1$ е 22, но как се определят стойностите? А U_0 ($R3/R4$)?

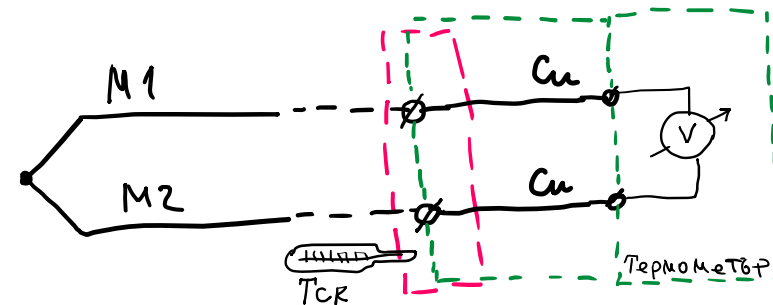
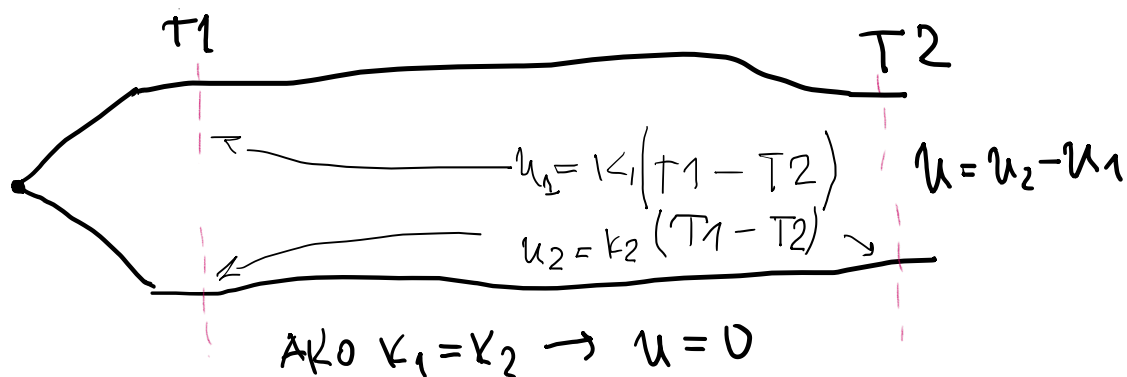
- **Термодвойки**, информация - <https://www.thermocoupleinfo.com/>

Принцип на работа, видове

Основни параметри, обхват, чувствителност, точност, линейност, клас на точност

Компенсация на студения край. Къде е студеният край? Където двата (различни по състав) проводника М1, М2 на термодвойката се свързват към входа на уреда (волтмер) с два еднакви проводника – обикновено медни. Това може и да е самият вход на уреда.

При термодвойки от скъп материал се ползват удължителни проводници със същите параметри като М1 и М2.



- Термодвойки, [sbaa274.pdf](#)

Изисквания към измервателните уреди за работа с термодвойки

- защитни елементи
- голямо усилване
- не е необходимо високо входно съпротивление, но защитните елементи?
- offset, дрейф
- линеаризация програмно и схемно (по-рядко)

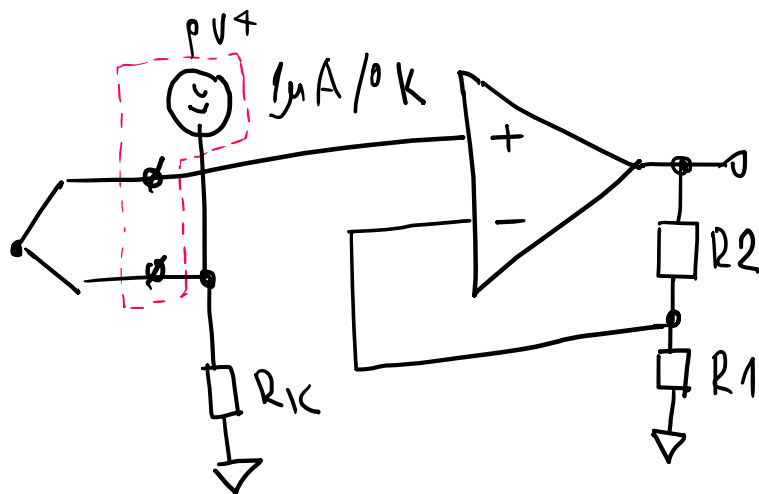
Thermocouple Type	Lead Metal A (+)	Lead Metal B (-)	Temperature Range (°C)	EMF over Temperature Range (mV)	Seebeck Coefficient ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ at 0°C)
J	Iron	Constantan	-210 to 1200	-8.095 to 69.553	50.37
K	Chromel	Alumel	-270 to 1370	-6.458 to 54.886	39.48
T	Copper	Constantan	-200 to 400	-6.258 to 20.872	38.74
E	Chromel	Constantan	-270 to 1000	-9.385 to 76.373	58.70
S	Platinum and 10% Rhodium	Platinum	-50 to 1768	-0.236 to 18.693	10.19

- Термодвойки

Изисквания към измервателните уреди за работа с термодвойки

- компенсация на студения край:

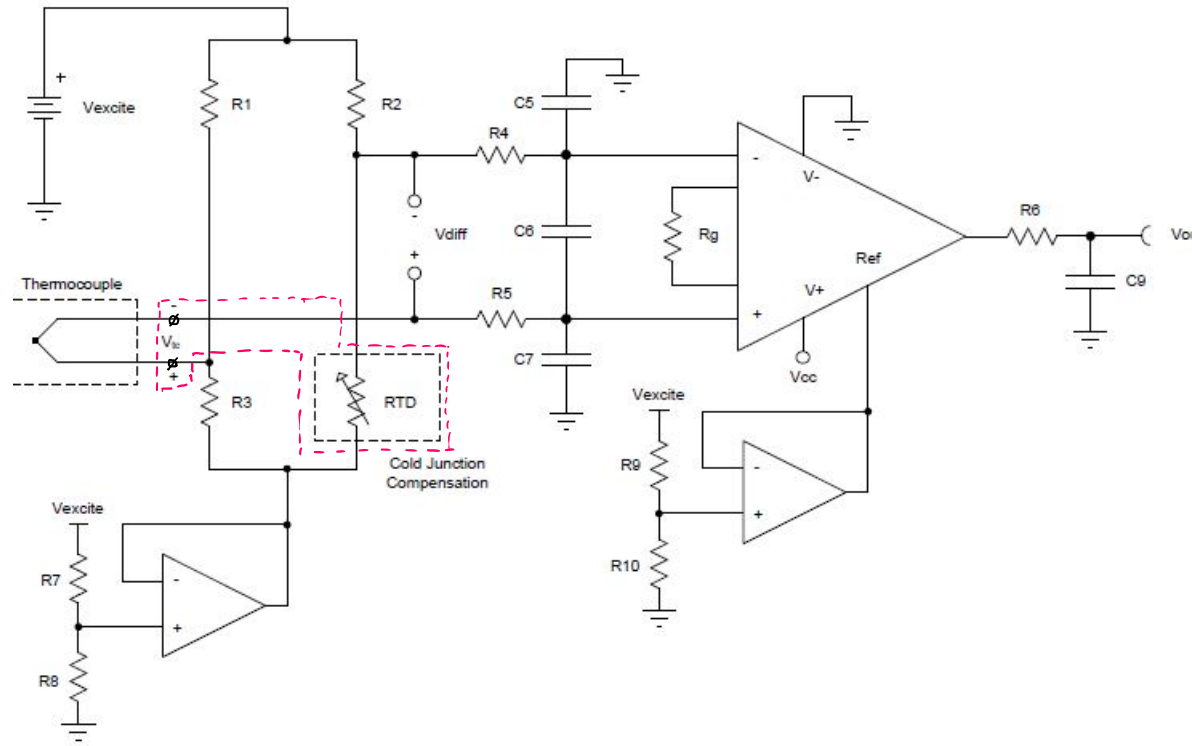
схемно (апаратно) – като към напрежението на термодвойката се добавя напрежение което съответства на това което би генерирала същата термодвойка при температурата на студения край. На схемата напрежението върху R_k съответства на



на напрежението на термодвойката когато топлият край е потопен в лед (0°C). Стойността на R_k зависи от чувствителността на термодвойката, например за тип J $R_k = 52\Omega$, за K – 41, T – 41, E – 61, S – 6 и за R – 6. Термодвойките са нелинейни и затова стойността се подбира според най-вероятната температура на студения край. Клемите на студения

край и термосензорът ($1\mu\text{A}/^{\circ}\text{K}$) трябва да са при една и съща температура.

- Термодвойки, пример за компенсация на студения край с мостова схема:



Термочувствителният елемент в моста е Pt100 (RTD).

Елементите са изчислени така, че в диагонала да се генерира напрежение което да отговаря на чувствителността на съответната термодвойка при температурата на студения край. И тук студеният край

на термодвойката трябва да е при същата температура като RTD – изотермичен блок. Това обикновено са медни плочки на които се закрепват елементите.

Електронни устройства за измерване и управление

- Термодвойки, компенсация на студения край

програмно - същото като схемното, но да се внимава да **не се събират** температури, а напрежения. Ако термодвойките бяха линейни. . . можеше да се събират и температури, но те не са!

Ред на работа:

1. Измерва се напрежението на термодвойката;
2. Измерва се температурата на студения край (с друг сензор);
3. Изчислява се (таблица) напрежението което би генерирала термодвойката при така измерената температура на студения край;
4. Изчисленото (т.3) и измереното (т.1) напрежения се събират;
5. От получената сума се изчислява или отчита от таблица температурата на топлия край на термодвойката, тази която измерваме.

Електронни устройства за измерване и управление

- Термодвойки, изчисляване на температурата от напрежението според ITS-90:

Повечето **термосензори** са нелинейни. Зависимостта на изходната величина от температурата се описва от полиноми от 3-ти ред, за най-линейните сензори, като достига 10 – 12-ти ред за най-нелинейните (някои термодвойки).

$$E = \sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i$$

За термодвойките полиномът има следният вид:

E – напрежението, c – коефициентите на полинома, t_{90} – температурата

В таблицата е даден реда на полиномите описващи най-популярните термодвойки, като са всяка термодвойка има поне два обхвата. Индексът 90 (t_{90}) идва от **ITS-90**:

Thermocouple Type	Temperature Range (°C) for Polynomials	Polynomial Order ⁽¹⁾
J	-210 to 760, 760 to 1200	8th, 5th
K	-270 to 0, 0 to 1370	10th, 9th, + $a e^{b(t - c)^2}$
T	-200 to 0, 0 to 400	7th, 6th
E	-270 to 0, 0 to 1000	13th, 10th
S	-50 to 1064.18, 1064.18 to 1664.5, 1664.5 to 1768.1	8th, 4th, 4th

⁽¹⁾ For type K thermocouples above 0 °C, there is an additional term to account for a magnetic ordering effect

Електронни устройства за измерване и управление

- Термодвойки, изчисляване на температурата според ITS-90:

Зависимостта която е необходима за изчисляване на температурата е обратната – от напрежението да се получи температура. „Инверсният” полином изглежда така:

$t_{90} = d_0 + d_1E + d_2E^2 + \dots + d_iE^i$ – температурата t_{90} се получава от напрежението E . В

таблицата са дадени коефициентите на една от най-популярните термодвойки – тип К:

Temperature Range:	-200°C to 0°C	0°C to 500°C	500°C to 1372°C
Voltage Range	-5891 μ V to 0 μ V	0 μ V to 20644 μ V	20644 μ V to 54886 μ V
d_0	0.000 000 0	0.000 000 0	-1.318 058 x 10 ²
d_1	2.517 346 2 x 10 ⁻²	508 355 x 10 ⁻²	4.830 222 x 10 ⁻²
d_2	-1.166 287 8 x 10 ⁻⁶	7.860 106 x 10 ⁻⁸	-1.646 031 x 10 ⁻⁶
d_3	-1.083 363 8 x 10 ⁻⁹	-2.503 131 x 10 ⁻¹⁰	5.464 731 x 10 ⁻¹¹
d_4	-8.977 354 0 x 10 ⁻¹³	8.315 270 x 10 ⁻¹⁴	-9.650 715 x 10 ⁻¹⁶
d_5	-3.734 237 7 x 10 ⁻¹⁶	-1.228 034 x 10 ⁻¹⁷	8.802 193 x 10 ⁻²¹
d_6	-8.663 264 3 x 10 ⁻²⁰	9.804 036 x 10 ⁻²²	-3.110 810 x 10 ⁻²⁶
d_7	-1.045 059 8 x 10 ⁻²³	-4.413 030 x 10 ⁻²⁶	
d_8	-5.192 057 7 x 10 ⁻²⁹	1.057 734 x 10 ⁻³⁰	
d_9		-1.052 755 x 10 ⁻³⁵	
Error Range	0.04°C to -0.02°C	0.04°C to -0.05°C	0.06°C to -0.05°C

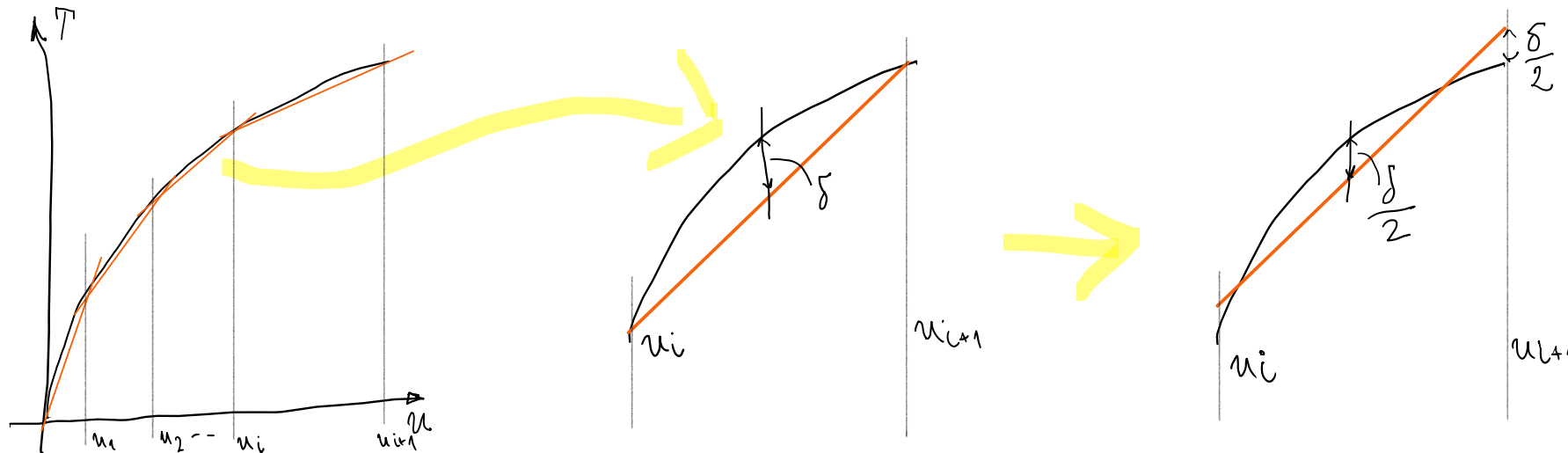
Точността на апроксимация е впечатляваща. Да му мисли софтуера на контролера. . .

Електронни устройства за измерване и управление

- Термодвойки, измерване на температурата с микроконтролери

Получената точност е всъщност математическата точност на апроксимацията. Когато се измерва, поради недостатъците на апаратната част (температурни зависимости и стареене на елементите), грешката е значително по-голяма и обикновено е $0,1 \div 1\%$.

Това е типова грешка при индустриални измервания и се отнася до измереното напрежение преди преобразуването в температура. Апроксимацията може да бъде и с по-малка точност, да се използва линейно-отсечкова апроксимация или таблици.



Електронни устройства за измерване и управление

- Термодвойки, пример за **линейно-отсечкова** апроксимация:

Таблица за термодвойка тип К – генерирани напрежения от 0 до 50°C.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509

Ако приемем, че термодвойката е линейна от 0 до 50°C, температурният коефициент ще бъде $(2,023 - 0,000)/50 = 40,46 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. За 25°C $\rightarrow 25 * 40,46 = 1,0115 \text{ mV}$, вместо 1,000.

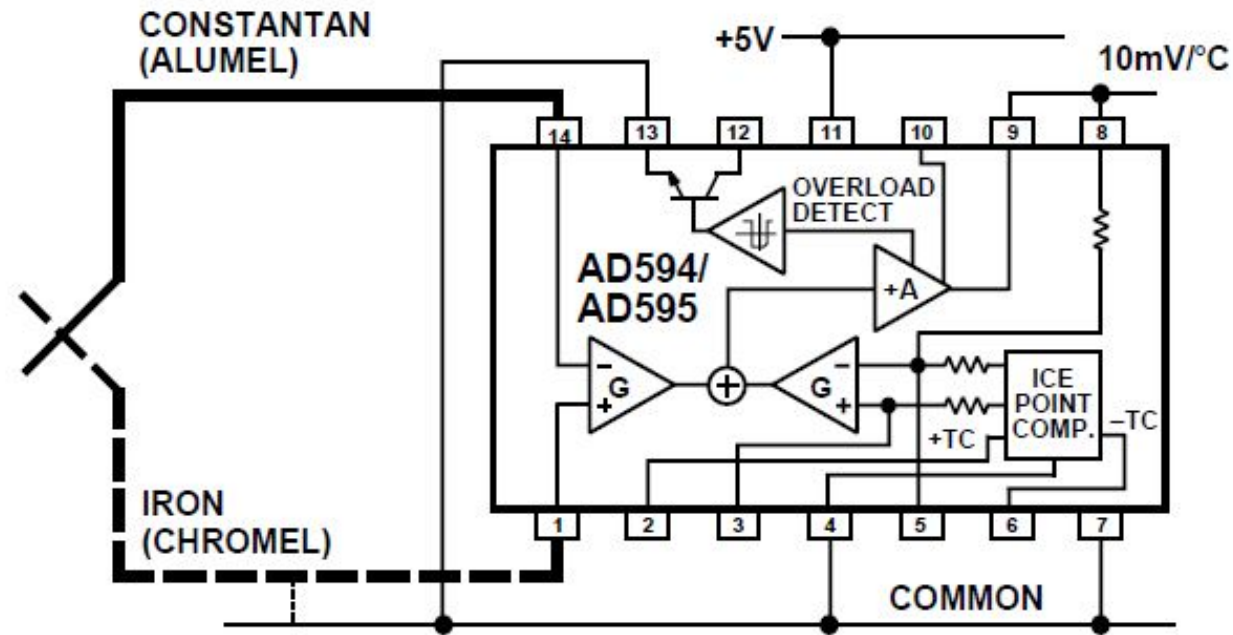
Получава се неточност от 11,5 μV \rightarrow ще отчетем 25°C вместо 25,28. Аналогично, ако приемем линейност от 0 до 100°C, за коефициента се получава 40,96 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, а грешката при 50°C $\rightarrow 2048 - 2023 = 25 \mu\text{V}$. Това е около 0,6°C, а при отместване на отсечката $\pm 0,3$.

Дали това е достатъчно зависи от предназначението и изискванията към уреда.

Електронни устройства за измерване и управление

- Термодвойки, ИС за работа с термодвойки

интегрирани - AD594 за тип J и AD595 за K, скъпички ~ 40лв.



интелигентни сензори, обикновено са универсални, [Imp90100.pdf](#), [sbas457f.pdf](#)

Как да се измерва температура с термодвойка – съображения за избор.

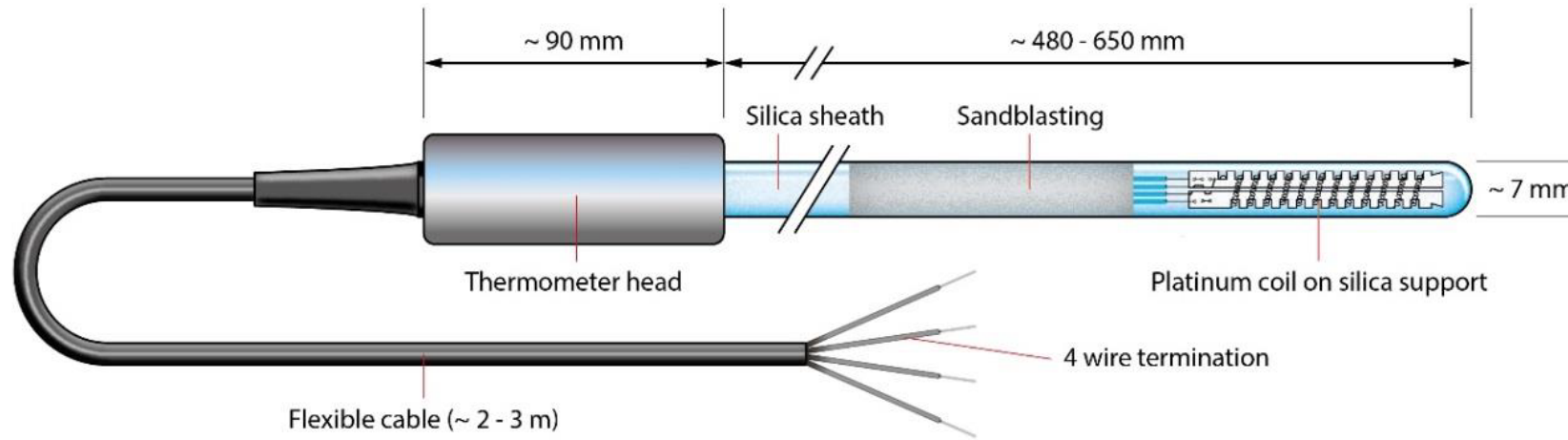
- **Термосъпротивления** – платина, никел, мед известни още като **RTD - Resistance Temperature Detectors**

Измерването на температура с термосъпротивление Pt100 – Л.У № 4.

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

Основен тип сензор за измерване на температура в индустрията.

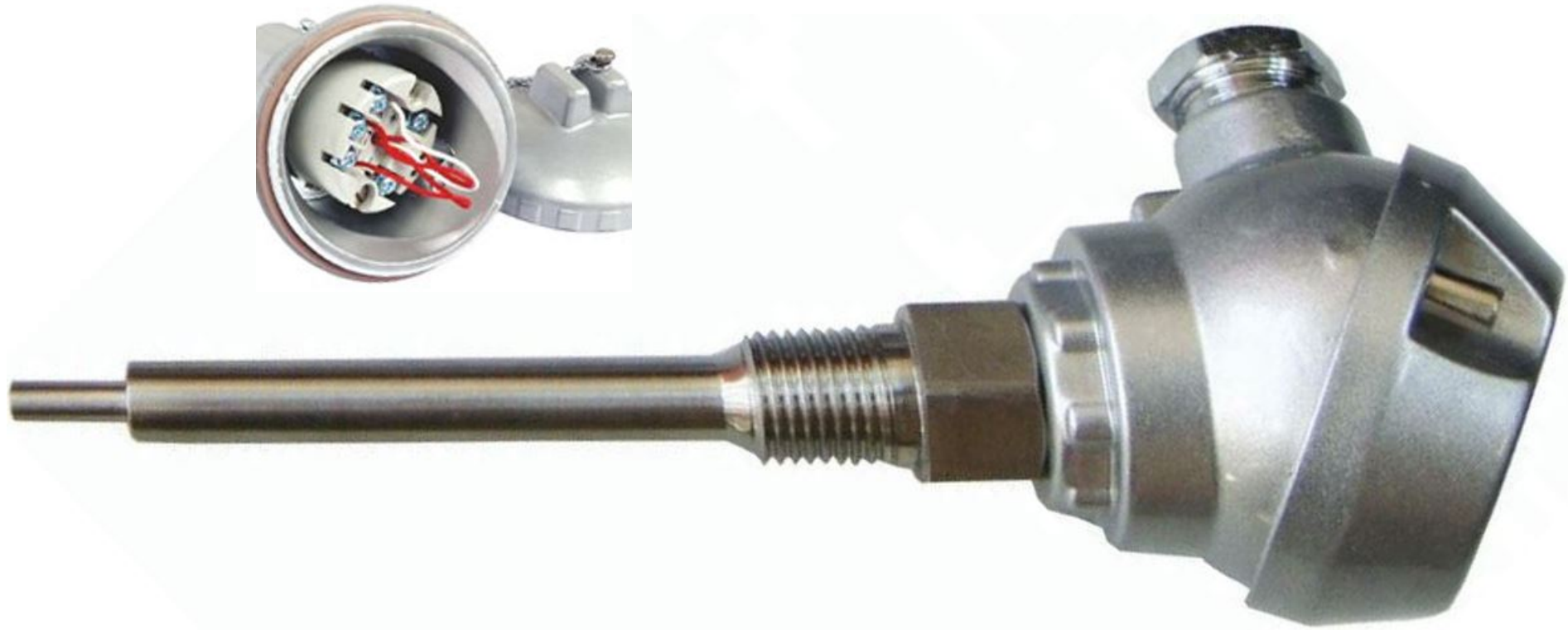
Принцип на работа. Конструкция. Корпус в който се монтира.



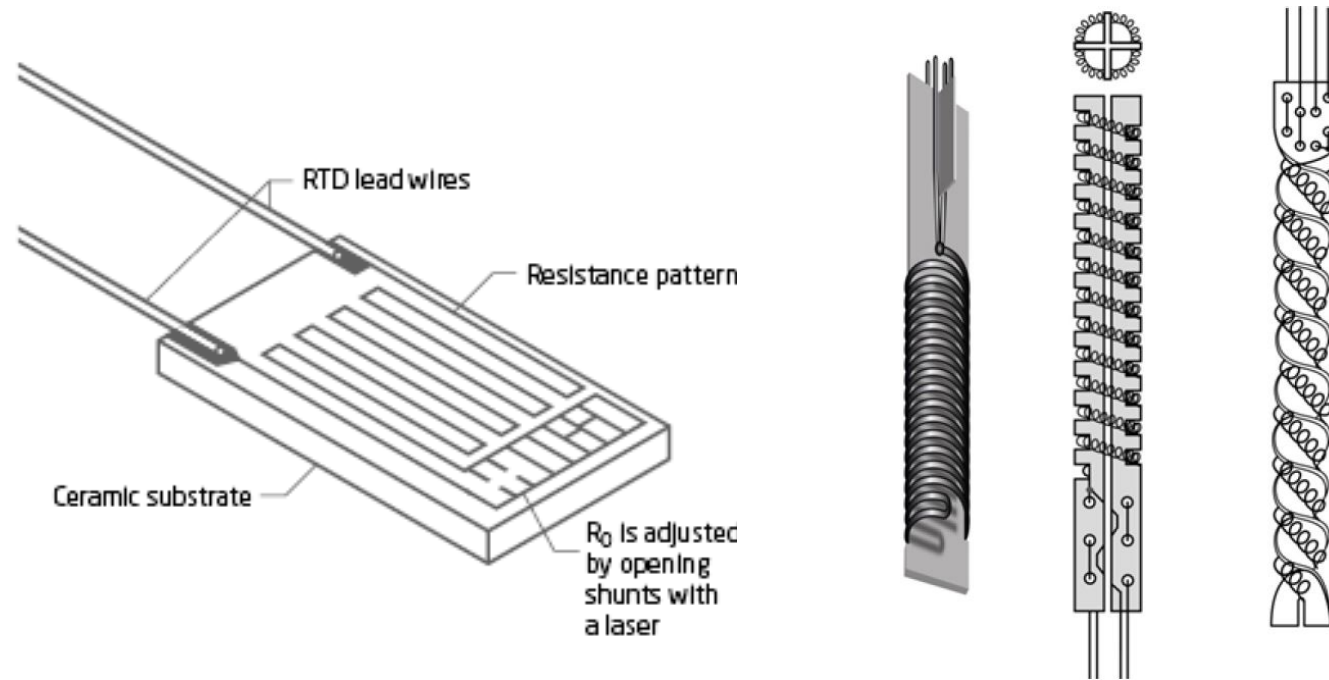
Електронни устройства за измерване и управление

Типов корпус за температурни сензори – термодвойки, термосъпротивления.

В сферичната част има керамична изолационна плоча където се свързват изводите на сензора със проводниците от измервателния уред. Там се прави 2, 3, 4-ри проводно свързване, там се монтира сензора за компенсация на студения край и други.



Електронни устройства за измерване и управление

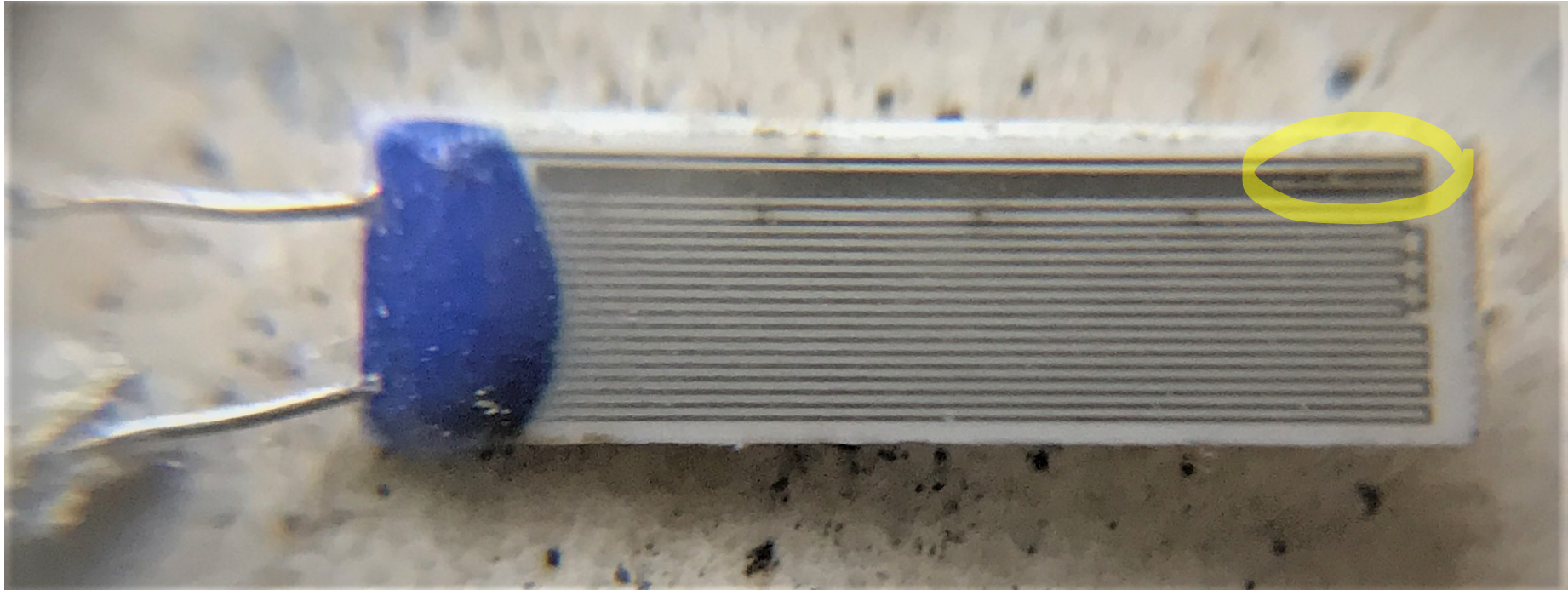


Основни параметри, обхват, чувствителност, точност, линейност, клас на точност.

За $t > 0^\circ\text{C}$: $R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$, а за $t < 0^\circ\text{C}$: $R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + C (t - 100) t^3)$

$$A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}, C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$$

Самонагриване, термично съпротивление на сензора – от конструкцията.



Снимка на термосензор Pt100

Основата е керамична с размери 2 x 8 mm. Върху нея е нанесен съпротивителният слой от платина. Предвидена е настройка в широки граници. За точна настройка е предвидена широката лента в горния (на снимката) край. Лентата се срязва на две с лазер – виждат се следите. По този начин съпротивлението на Pt100 се увеличава.

- Термосъпротивления

Схеми на свързване – две, три и четири-проводна;

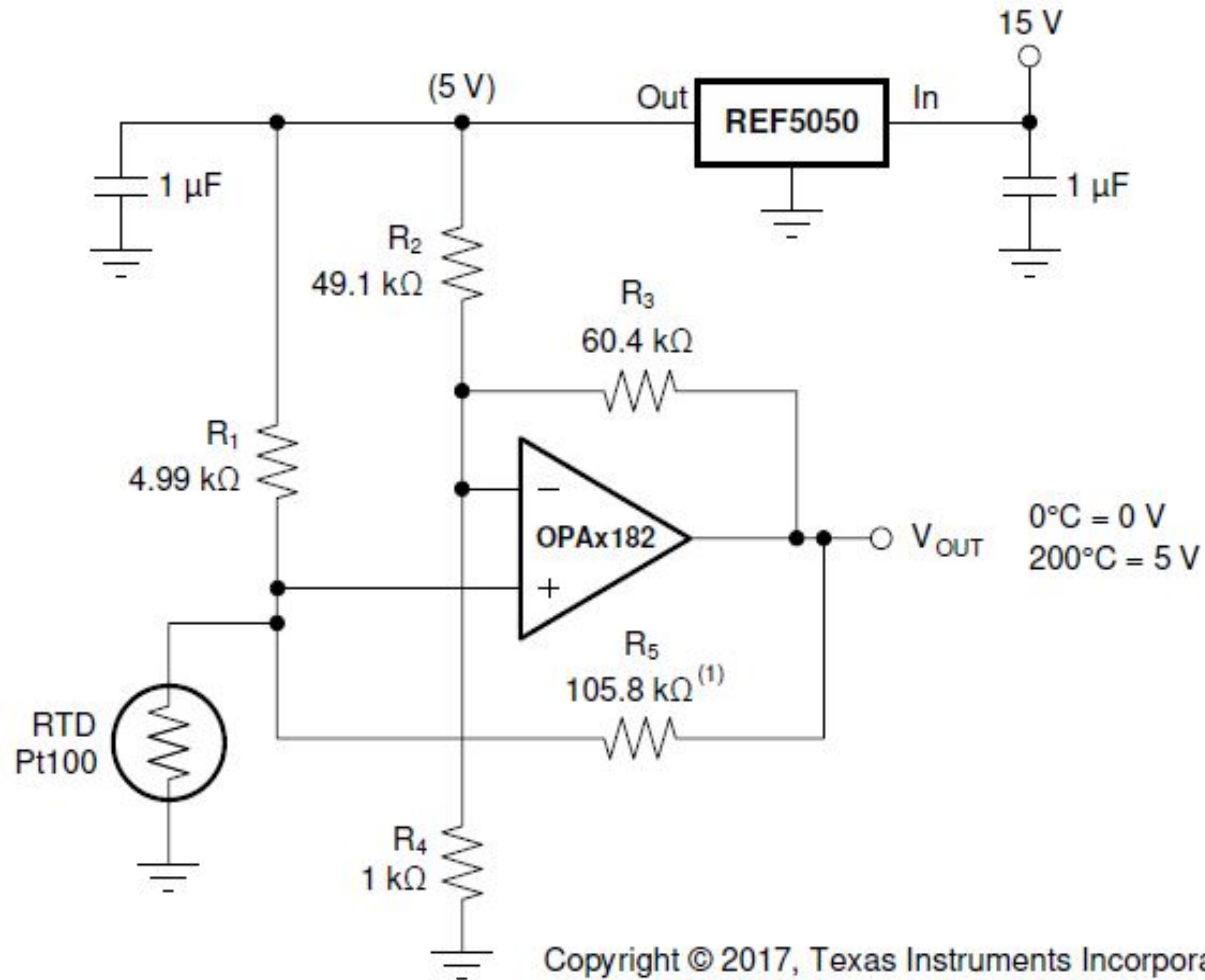
Разновидност на 4-ри проводно свързване за избягване на връзки при сензора:



Изисквания към измервателните уреди за работа с термосъпротивления:

линеаризация

- Термосъпротивления, пример за апаратна (схемна) линеаризация:



Мостова схема (R, R₂, R₄, Pt100) е балансирана при 0°C.

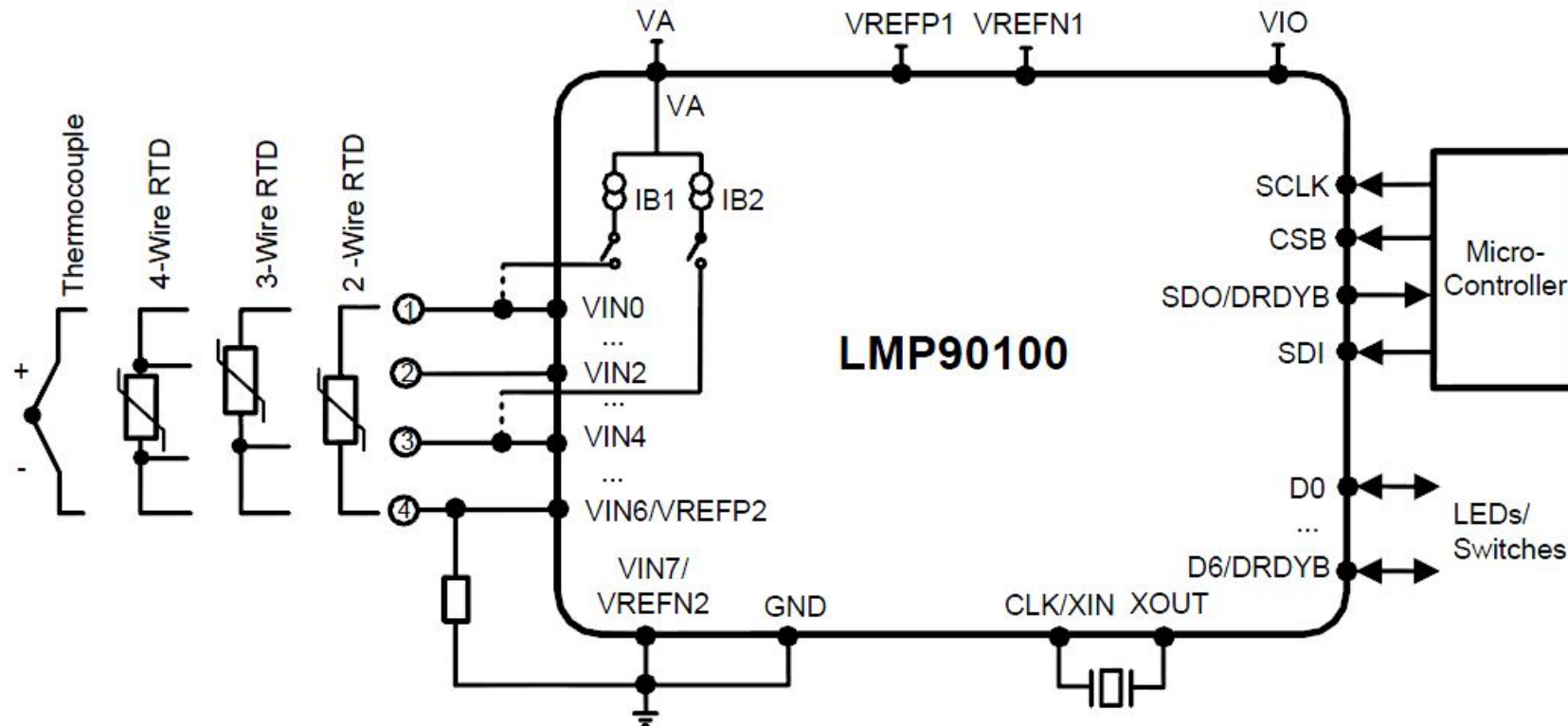
Усилването ($R_3/(R_2 || R_4)$) е така изчислено, че при 200°C в изхода да се получат 5V.

Положителната обратна връзка през R₅ променя предавателната характеристика, така компенсират нелинейността.

Компенсират се нелинейността не само на сензора но и на схемата – вж. [Calc_Rx_Ret.xlsx](#)

- Термосъпротивления

Интегрирани, интелигентни сензори за работа с термосъпротивления – същите които се ползват при мостови схеми и термодвойки. Например [Imp90100.pdf](#).



- **Термистори** – полупроводников резистор

<https://web.archive.org/web/20190930105608/http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/elessons/HTML/Sensors/TempR.html>

Принцип на работа, видове NTC, PTC, линейни (пример – tmp61.pdf)

Основни параметри, обхват, чувствителност, точност, линейност, клас на точност

много голяма чувствителност и нелинейност:

[pdf-general-technical-information.pdf](#), [convtabs.pdf](#), [RESISTANCE_VS._TEMPERATURE_TABLE.pdf](#)

Приложение, за измервателни цели и други – ограничители на ток, предпазители

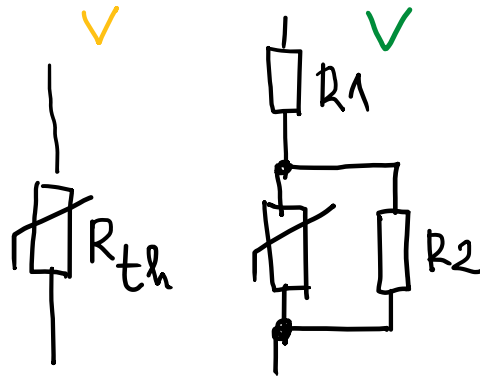
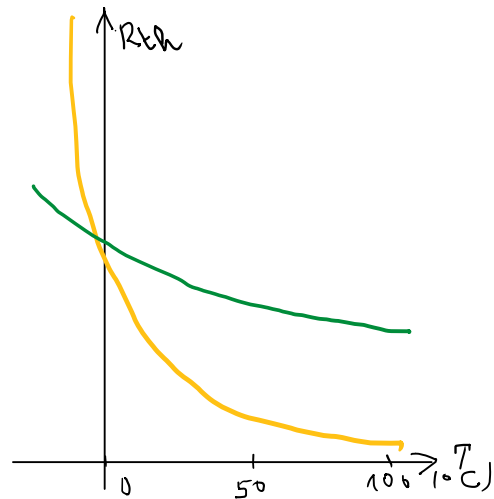
за измерване и регулиране в тесен обхват

Режим на самонагриване за някои измервания;

Начин на измерване – стандартно измерване на съпротивление. Измерване в тесен обхват или с много обхвати.

- Термистори – особености при измерване

При стандартно измерване, поради нелинейната характеристика, се получава много голяма разлика в чувствителността в краищата на обхвата. Ако ниските температури се измерват с разрешаваща способност $0,1^{\circ}\text{C}$, високите ще се измерват с 5°C ! По-често се налага линеаризация в сравнение с другите сензори. Пасивната линеаризация –



с използване на последователни и паралелни резистори позволява, в границите на измервания обхват, промяната на чувствителността да не е по-голяма от два пъти. За сметка на намаляването на чувствителността. В

литературата има много примери за схемна линеаризация. В уредите с микроконтролери, ако се ползва линеаризация, тя е само пасивна.

- **Избор на сензор при проектиране по задание**

Заданието трябва да включва основните параметри – обхват, чувствителност, точност, линейност;

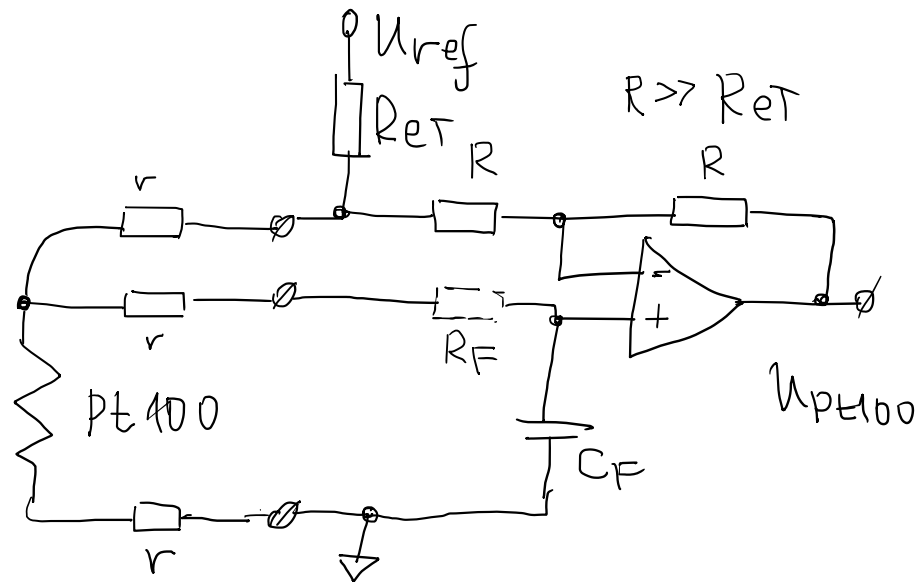
- от обхвата се определя типа на сензора
- необходимото усилване се задава от чувствителността
- от избрания сензор се решава дали да има апаратна (схемна) линеаризация
- ако е необходимо малко отместване на нулата това може да стане с $-U_{ref}$.

Определяне на цената на измерването – сензор и останалите задължителни елементи, цената на проектирането (софтуер) и производството (настройки).

Много е важна и цената на сервизното обслужване.

- Примери за измерване и регулиране на температура

Постепенно, дори и най-простите устройства се проектират с микроконтролери. Това е напълно оправдано за огромните серии при някои производители. В същото време някои задачи могат да се решат и схемно на много по-ниска цена.



Схемата е за измерване на R_{Pt100} но всъщност е за измерване на съпротивления. $U_{Pt100} = U_{ref} \times R_{Pt100} / (R_{Pt100} + R_{ref})$. Ако U_{ref} е същото като на АЦП точността ще зависи само от R_{ref} (теоретично). Функцията U_{Pt100} от R_{Pt100} е нелинейна (ако $R_{ref} \gg R_{Pt100}$ нелинейността ще е малка). При използване

на микроконтролери това не е проблем – изчислява се по формулата. В тази схема е показана и работата на **три-проводната** схема на свързване за съпротивителни сензори.

Електронни устройства за измерване и управление

При проектирането, за да се стигне до конкретните елементи, се вземат предвид много неща и винаги има няколко варианта:

- микроконтролерът се избира от фамилиите за която има развойни средства;
- АЦП се определя от необходимата разрядност и допустимата цена;
- ОУ – от напрежението на несиметрия, дрейфа и работния обхват по вход, изход;
- захранването – от работното напрежение на останалите елементи;
- капацитетът на батерията – в зависимост от консумацията и времето през което

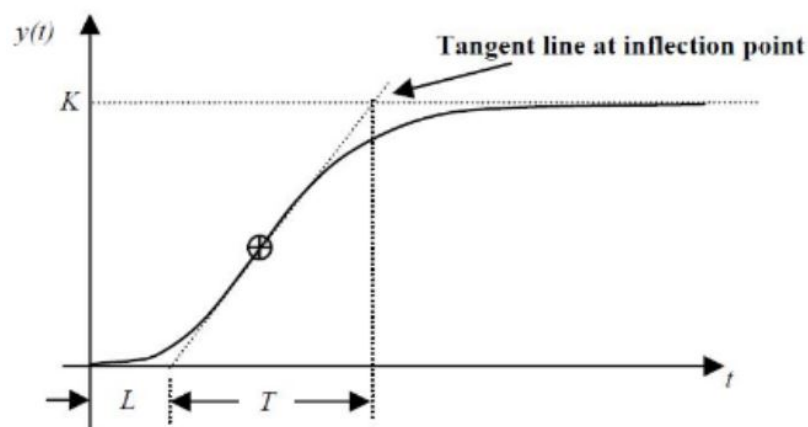
трябва да работи без презареждане;

. . . и т.н. се анализират много фактори.

Примерът на схемата е за работа с термодвойка но може да се ползва и с Pt100.

Трябва да се смени входното стъпало с операционните усилватели, няма да трябва компенсация на студения край – отпада МСР9700, отместването може да се направи с подходящ избор на -Uref и . . . ще трябва друг софтуер.

- Общи положения при регулирането (на температура):
 - Теорията на автоматичното регулиране позволява да се проектират регулатори за всякакви величини и обекти. За получаването на добри резултати е необходимо да се познават параметрите на обекта, на изпълнителните звена и останалите части на регулатора. В много случаи тези данни са неизвестни. Тогава се ползват евристични (емпирични) методи които дават добри и най-вече бързи резултати. Един от тези методи е на Ziegler и Nichols от 1942. Той се състои в изследване на реакцията на обекта при подаване на управляващ сигнал. Така се определя коефициентът на



предаване на отворената система и времевите параметри. От тях се определят коефициентите и времеконстантите на PID регулатор. От отношението на времето за нарастване T към закъснението L се определя доколко системата е управляема.

Електронни устройства за измерване и управление

- Общи положения при регулирането (на температура):

$T/L > 10$ - много добро (лесно) управление

$T/L > 3$ - може да се управлява с компромиси (точност и бързодействие)

$T/L < 3$ - трудно управление, може и да не е възможна устойчива система

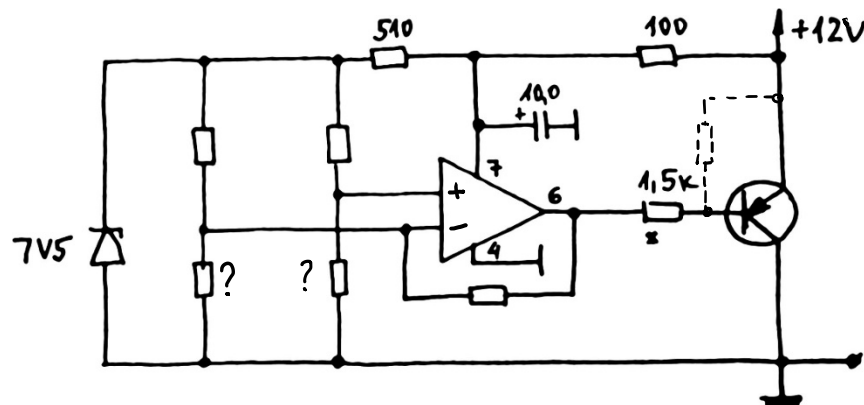
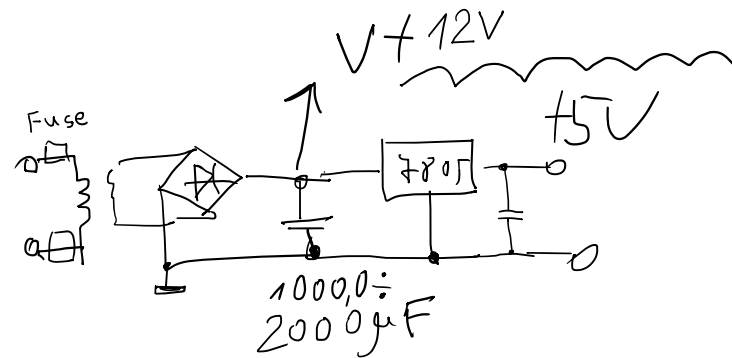
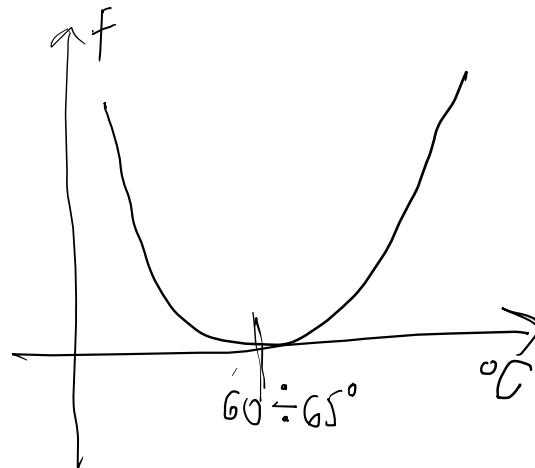
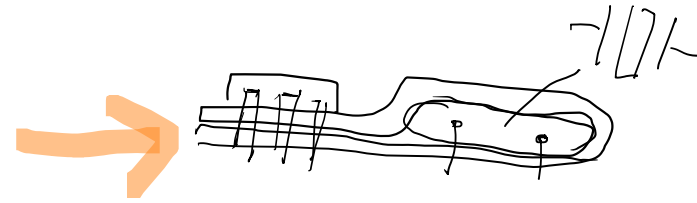
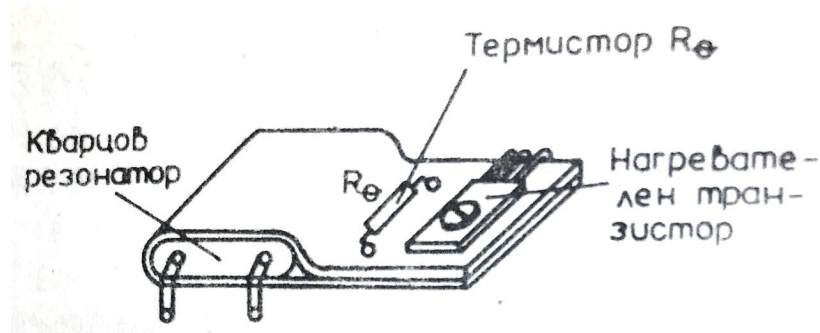
При малките стойности на T/L , когато управлението е трудно, може да се променят някои от съставните части на системата, да се промени видът на сензора или мястото му в обекта и т.н. Целта е да се намали закъснението L .

В таблицата са дадени емпирични стойности на параметрите на основните регулатори:

PID Type	K_p	$T_i=K_p/K_i$	$T_d=K_d/K_p$
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Електронни устройства за измерване и управление

- Термостат за поддържане на температурата на кварцов генератор:



Параметри:

задание - 63°C,

точност - 0,5°C, на

термистора - 0,1°C,

захранване - 7 ÷ 10 V;

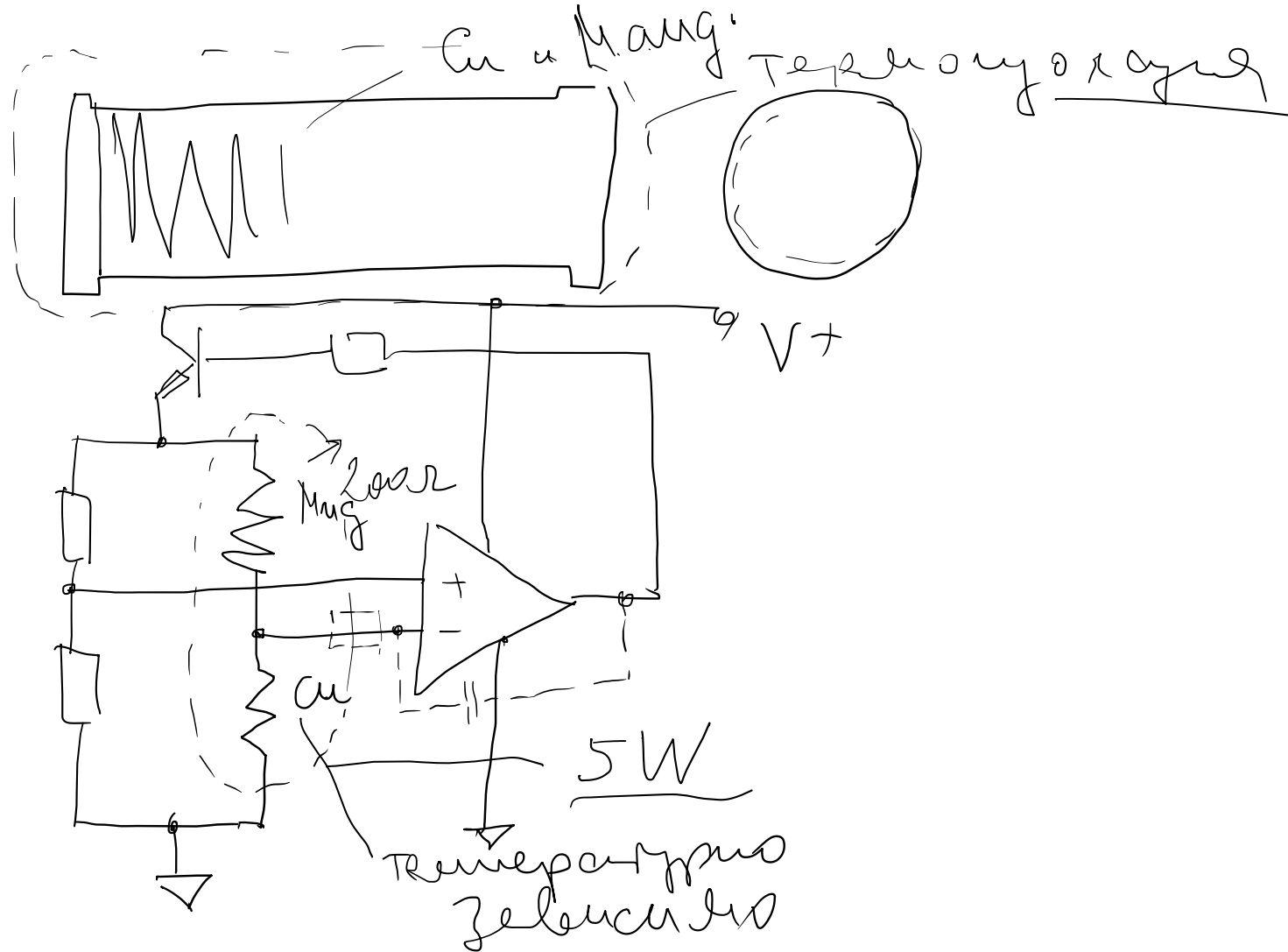
Нагревател е самият транзистор.

Резисторът с * ограничава максималния ток.

Да се определи мястото на термистора (-TCR)!

Електронни устройства за измерване и управление

- Термостат за изследване на темп. зависимост на електронни елементи:



Параметри:

Фиксирани температури-

50, 75, 100, 125°C;

точност $\pm 2^\circ\text{C}$,

захранване – 10 V $\pm 5\%$;

Алуминиев цилиндър се

нагрява от манганинов и
меден проводник.

Медният проводник е и
сензор за температура –
подобен на Pt100.

Самонагряване