



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

# Elektronika alapjai

## 9. Gyakorlat – A/D, D/A átalakítók

Összeállította:

Ress Sándor, Jani Lázár, Krammer Olivér, Straubinger Dániel

**1. Feladat** - Egy unipoláris 16 bites A/D konverter referencia feszültsége 4,096 V. (4096 mV)

**A.** Határozzuk meg az *LSB* (least significant bit) és az *FS* (full-scale) értékeit!



Unipoláris konverternél a 0 kódhoz 0 V tartozik és a teljes tartományt  $2^n$  (itt 65536) részre bontjuk fel.

$$V_{LSB} = \frac{V_{ref}}{2^n} = \frac{4,096}{2^{16}} = 62,5 \mu\text{V}$$

A legnagyobb kódhoz, itt 65535-höz  $V_{ref} - 1 \cdot LSB$  tartozik. Ez alapján az *FS* értéke:

$$V_{FS} = (2^n - 1) \cdot V_{LSB} = 65535 \cdot 62,5 \mu\text{V} = 4,0959375 \text{ V}$$

**1. Feladat** - Egy unipoláris 16 bites A/D konverter referencia feszültsége 4,096 V. (4096 mV)

B. Milyen feszültség tartozik az  $x = 12345$  kódhoz?



Az alábbi aránypár felhasználásával:

$$\frac{V_x}{V_{ref}} = \frac{x}{2^n} \quad \rightarrow \quad V_x = V_{ref} \cdot \frac{x}{2^n} = 4,096 \cdot \frac{12345}{2^{16}} = 0,7715625 \text{ V}$$

C. Milyen  $x$  kód tartozik 4V-hoz?

Az előbbi aránypár felhasználásával:

$$x = \frac{V_x \cdot 2^n}{V_{ref}} = \frac{4 \cdot 2^{16}}{4,096} = 64000$$

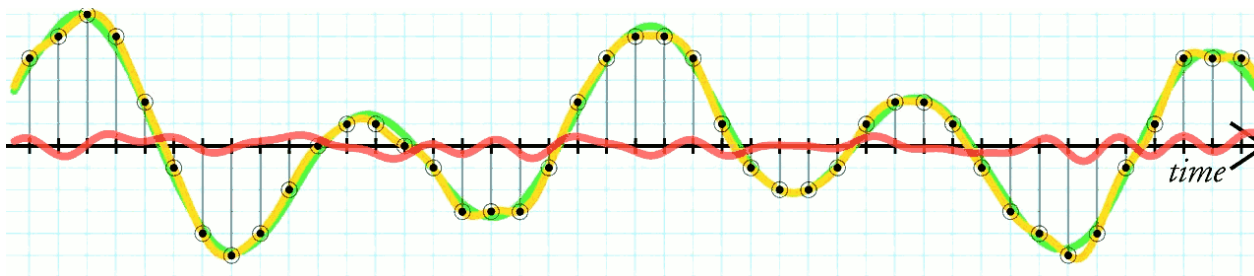
**1. Feladat** - Egy unipoláris 16 bites A/D konverter referencia feszültsége 4,096 V. (4096 mV)

**D.** Mekkora kvantálás jel/zaj viszonya (signal to noise ratio – *SNR*) ?



A zajmodell lineáris kvantálóra; három feltételezés a kvantálási hibára:

- 1) A hiba korrelálatlan a kvantált jellel
- 2) A kvantálási hiba egyenletes eloszlású  $\left[ -\frac{V_{LSB}}{2}; \frac{V_{LSB}}{2} \right]$  intervallumon
- 3) Spektruma végtelen széles, és teljesítmény-sűrűség függvénye konstans



original signal  
quantized signal  
quantization noise

[https://en.wikipedia.org/wiki/Quantization\\_\(signal\\_processing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantization_(signal_processing))

**1. Feladat** - Egy unipoláris 16 bites A/D konverter referencia feszültsége 4,096 V. (4096 mV)

**D.** Mekkora kvantálás jel/zaj viszonya (signal to noise ratio – SNR) ?



Az ideális kvantáló zajának teljesítménye, mivel a hiba egyenletes eloszlású egy  $V_{LSB}$  széles intervallumon:

$$P_n = \frac{V_{LSB}^2}{12}$$

$n$  bites kvantáló szinuszos kivezérlése esetén a hasznos jel amplitúdója és teljesítménye:

$$A = V_{LSB} \cdot 2^{n-1} \quad P_s = \frac{V_{LSB}^2 \cdot 2^{2n-2}}{2}$$

**1. Feladat** - Egy unipoláris 16 bites A/D konverter referencia feszültsége 4,096 V. (4096 mV)

**D.** Mekkora kvantálás jel/zaj viszonya (signal to noise ratio – *SNR*) ?



Az ideális kvantáló jel-zaj viszonya:

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_n} = \frac{2^{2n-2} \cdot 12}{2} = n \cdot 6,02 + 1,76 \text{ [dB]}$$

A **D** alfeladat megoldása tehát:

$$SNR = n \cdot 6,02 + 1,76 \text{ [dB]} = 16 \cdot 6,02 + 1,76 \cong 98 \text{ dB}$$

**1. Feladat** - Egy unipoláris 16 bites A/D konverter referencia feszültsége 4,096 V. (4096 mV)

E. Az átalakítóra  $SINAD = 95$  dB (signal to noise and distortion ratio) adtak meg. Mekkora az effektív bitszám ( $ENOB$  – effective number of bits)?



A  $SINAD$  paraméter tulajdonképpen egy kommunikációs eszközről érkező jel minőségének jellemzésére szolgál. A teljes jelteljesítményt (értékes jel + zaj + torzítás) osztjuk a nemkívánatos összetevők (zaj + torzítás) teljesítményével. Az  $ENOB$  értékét a **D** alfeladat képletének átrendezésével kapjuk:

$$SNR = n \cdot 6,02 + 1,76 \text{ [dB]} \quad \rightarrow \quad ENOB = \frac{SINAD - 1,76}{6,02} = \frac{95 - 1,76}{6,02} = 15,49$$

**2. Feladat** - Egy bipoláris 16 bites A/D konverter referencia feszültsége 4,096 V. Határozzuk meg az LSB, FS értékeket!



A bipoláris konverter a  $-V_{ref} \dots +V_{ref}$  tartományt osztja fel  $2^n$  (itt 65536) részre.

$$V_{LSB} = \frac{V_{ref} - (-V_{ref})}{2^n} = \frac{4,096 - (-4,096)}{2^{16}} = 125 \mu\text{V}$$

Az FS értéke pedig:

$$V_{FS} = (2^n - 1) \cdot V_{LSB} = 65535 \cdot 125 \mu\text{V} = 8,191875 \text{ V}$$



**3. Feladat** - Legalább mekkora frekvenciával és felbontással kell mintavételeznünk egy 30 – 18000 Hz jelet, hogy a kvantálási SNR 56 dB-nél nagyobb legyen?



A Shannon-Nyquist mintavételezési tételből adódóan minimum a legnagyobb frekvencia kétszeresével, azaz **36 kHz**-zel. A kvantálási jel/zaj viszonyból számíthatjuk ki a szükséges bitszámot:

$$1,76 + 6,02 \cdot n \geq 56 \text{ dB}$$

$$n \geq \frac{56 - 1,76}{6,02} = 9,01 \cong 10$$

**4. Feladat** - Egy 12 bites D/A átalakító referencia feszültsége 4,096 V. Nagy pontosságú voltmérővel a 0 kódra 0,3 mV feszültséget, a 4095 kódra pedig 4,13625 V feszültséget mérünk. Mekkora az ofszet és az erősítés?

Az ofszet megegyezik a 0 kódnál mért feszültséggel, azaz 0,3 mV.

A  $V_{LSB}$  értéke 1 mV ( $V_{ref}/2^{12}$ ), így a 4095-ös kódra 4,095 V-ot kellene mérnünk; ehelyett mérjük a példában megadottat. Így az erősítés hibája,  $GE$  (gain error):

$$GE = \frac{V_{x=2^n-1} - V_{offset}}{V_{LSB} (2^n - 1) - 0} = \frac{4,13625 - 0,0003}{4,095 - 0} = 1,01$$

**5. Feladat** - Egyenfeszültséget szeretnénk mérni, túlmintavételezéssel és átlagolással. A mintavételezési sebességünk 20 kHz.

**A.** Legalább hány mintát kell venni, hogy elnyomjuk a hálózati váltakozófeszültségből (50 Hz) származó zavart? (származhat pl. induktív, kapacitív csatolásból)

Az 50 Hz-es hálózati váltakozó feszültség és a 20 kHz-es mintavételezés egy-egy periódusa:

$$T_h = \frac{1}{f_h} = \frac{1}{50} = 20 \text{ ms} \qquad T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{20 \cdot 10^3} = 50 \text{ } \mu\text{s}$$

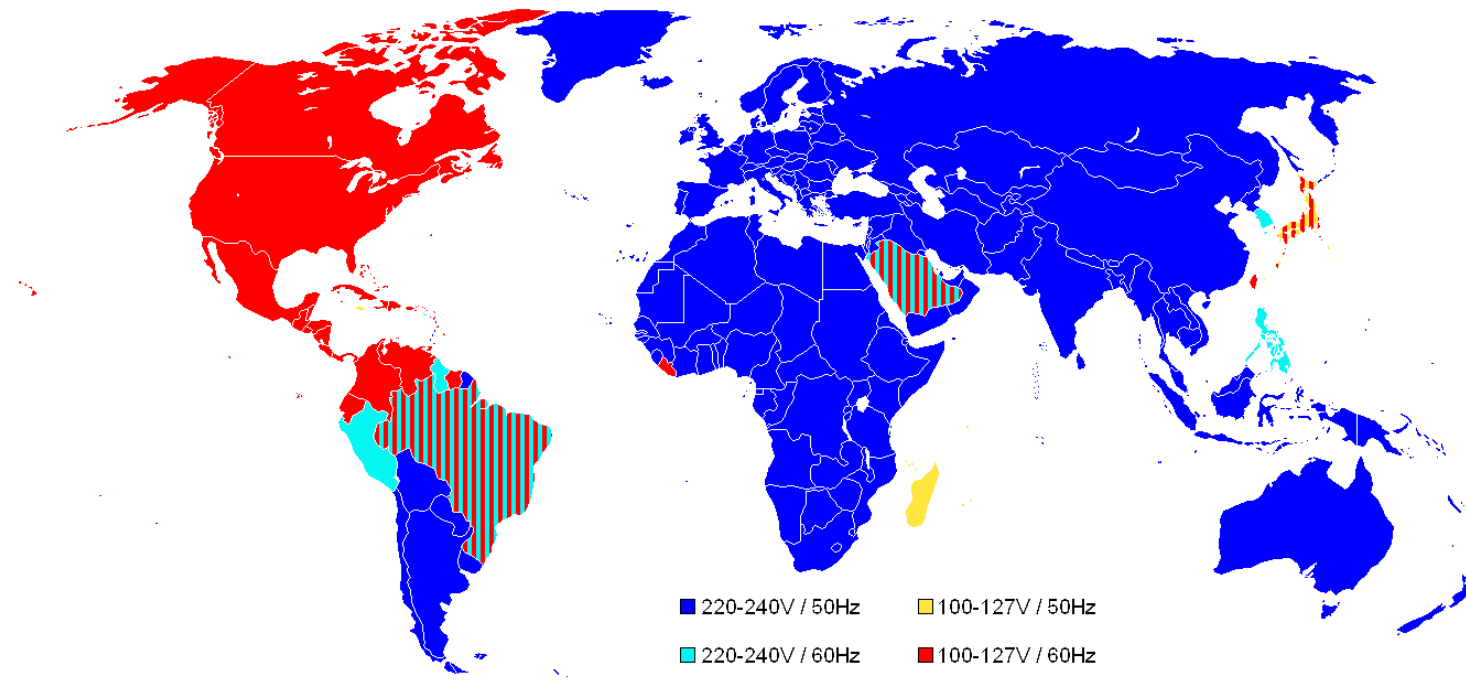
Annyi mintát kell venni, amennyi a hálózati váltakozó feszültség egy teljes periódusát lefedi; a szinusz jelből vett minták előjeles összege 0.

$$N = \frac{T_h}{T_s} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}} = 400$$

**5. Feladat** - Egyenfeszültséget szeretnénk mérni, túlmintavételezéssel és átlagolással. A mintavételezési sebességünk 20 kHz.

**B.** Mennyi ideig érdemes mintavételezni, hogy készülékünk világszerte ne legyen érzékeny a hálózati váltakozó feszültségből származó zavarra?

A váltakozó feszültség világszerte 50 Hz vagy 60 Hz frekvenciájú.



**5. Feladat** - Egyenfeszültséget szeretnénk mérni, túlmintavételezéssel és átlagolással. A mintavételezési sebességünk 20 kHz.

**B.** Mennyi ideig érdemes mintavételezni, hogy készülékünk világszerte ne legyen érzéken a hálózati váltakozó feszültségből származó zavarra?

---

Annyi mintát kell venni, amelybe az 50 Hz-es és a 60 Hz-es szinuszjel egész számú periódusa belefér. Tételezzük fel, hogy az 50 Hz-en  $n$ , 60 Hz-en pedig  $m$  periódust mintavételezünk. Ennek egyforma ideig kell tartania, azaz:

$$\frac{n}{50} = \frac{m}{60} \quad \rightarrow \quad 6n = 5m$$

Mivel 5 és 6 relatív prímekek, ezért  $n = 5$ ,  $m = 6$ . Tehát 100 ms-ig kell mintavételezni; ekkor az 50 Hz-es váltakozófeszültségből 5, a 60 Hz-esből pedig 6 teljes periódust fogunk mintavételezni.

**6. Feladat** - Egy TMP35 hőmérsékletmérő szenzor tápfeszültsége 3 V, kimeneti feszültsége 25 °C-on 250 mV, érzékenysége 10 mV/°C. A szenzor kimenetét egy mikrokontroller 12 bites A/D átalakítójával mintavételezzük, amelynek referencia feszültsége a tápfeszültség, 3 V.

**A.** Hány fokot mérünk, ha az A/D átalakító regiszterében 733 (decimális érték) van?

Az 1-es példa alapján:

$$\frac{V_x}{V_{ref}} = \frac{x}{2^n} \quad \rightarrow \quad V_x = V_{ref} \cdot \frac{x}{2^n} = 3 \cdot \frac{733}{2^{12}} = 0,5369 \text{ V} \cong 537 \text{ mV}$$

A szenzor offsetje 0 (250 mV – 25 °C · 10 mV/°C). Így a  $V_x$  feszültségnek megfelelő hőmérséklet:

$$T = \frac{V_x}{S} = \frac{537 \text{ mV}}{10 \text{ mV/°C}} = 53,7 \text{ °C}$$

**6. Feladat** - Egy TMP35 hőmérsékletmérő szenzor tápfeszültsége 3 V, kimeneti feszültsége 25 °C-on 250 mV, érzékenysége 10 mV/°C. A szenzor kimenetét egy mikrokontroller 12 bites A/D átalakítójával mintavételezzük, amelynek referencia feszültsége a tápfeszültség, 3 V.

**B.** A szenzor katalógus szerinti nemlinearitása 0,5 °C. Hány bites A/D konverter lenne elegendő, hogy a nemlinearitásból eredő hiba épphogy kisebb legyen, mint egy LSB?

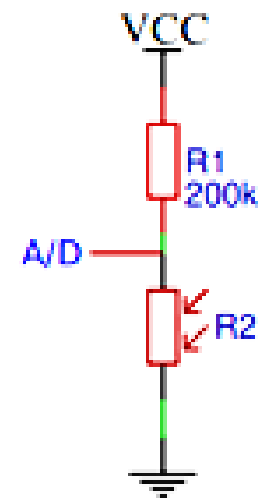
A 0,5 °C-os nemlinearitáshoz 5 mV feszültségváltozás tartozik. Az *LSB*-nek ennél kell épphogy nagyobbak lennie, azaz:

$$V_{LSB} = \frac{V_{ref}}{2^n} \geq 5 \text{ mV} \quad \rightarrow \quad 2^n \leq \frac{V_{ref}}{V_{LSB}} \quad \rightarrow \quad n \leq \log_2 \left( \frac{V_{ref}}{V_{LSB}} \right)$$

$$n \leq \log_2 \left( \frac{3}{5 \cdot 10^{-3}} \right) \leq 9,23$$

Tehát egy 9 bites A/D esetén már nem tudnánk észrevenni a nemlinearitási hibát. Ilyenkor 1 bit-hez 0,586 °C hőmérsékletváltozás tartozik.

**7. Feladat** - Egy fényérzékeny ellenállás segítségével készítünk szenzort az ábrán látható módon. A fényérzékeny ellenállás értéke teljes sötétben  $200\text{ k}\Omega$ , maximális tervezett megvilágításon  $5\text{ k}\Omega$ . A szenzor tápfeszültsége  $V_{CC} = 5\text{ V}$ , kimenetét egy mikrokontroller 12 bites A/D átalakítójával mintavételezzük, amelynek referencia feszültsége szintén  $5\text{ V}$ .



**A.** Milyen érték lesz az A/D átalakító regiszterében sötétben?

Feszültségosztás alapján sötétben:

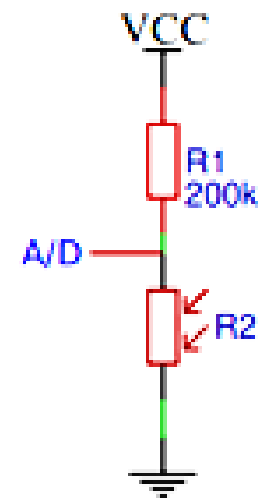
$$V_{AD} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5 \frac{200}{200 + 200} = 2,5\text{ V}$$

Az A/D átalakító értéke pedig:

$$x = \frac{V_{AD} \cdot 2^n}{V_{ref}} = \frac{2,5 \cdot 2^{12}}{5} = 2048$$



**7. Feladat** - Egy fényérzékeny ellenállás segítségével készítünk szenzort az ábrán látható módon. A fényérzékeny ellenállás értéke teljes sötétben  $200\text{ k}\Omega$ , maximális tervezett megvilágításon  $5\text{ k}\Omega$ . A szenzor tápfeszültsége  $V_{CC} = 5\text{ V}$ , kimenetét egy mikrokontroller 12 bites A/D átalakítójával mintavételezzük, amelynek referencia feszültsége szintén  $5\text{ V}$ .



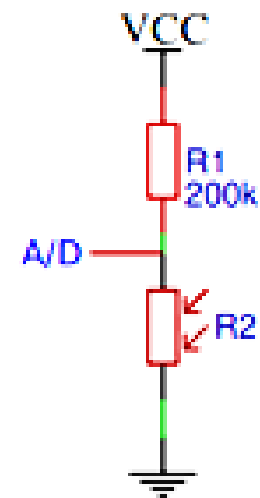
**B.** Hogyan lehet kiszámolni a fényérzékeny ellenállás értékét az A/D regiszterében található  $b$  értékből? Adja meg a képletet!

Az előző dia egyenleteit felhasználva:

$$V_{AD} = b \cdot V_{LSB} = b \cdot \frac{V_{CC}}{2^n}; \quad \text{és} \quad V_{AD} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow R_2 = R_1 \frac{V_{AD}}{V_{CC} - V_{AD}}$$

Behelyettesítve: 
$$R_2 = R_1 \frac{b \frac{V_{CC}}{2^n}}{V_{CC} - b \frac{V_{CC}}{2^n}} = R_1 \frac{b}{2^n - b} = 200 \frac{b}{4096 - b}$$

**7. Feladat** - Egy fényérzékeny ellenállás segítségével készítünk szenzort az ábrán látható módon. A fényérzékeny ellenállás értéke teljes sötétben  $200\text{ k}\Omega$ , maximális tervezett megvilágításon  $5\text{ k}\Omega$ . A szenzor tápfeszültsége  $V_{CC} = 5\text{ V}$ , kimenetét egy mikrokontroller 12 bites A/D átalakítójával mintavételezzük, amelynek referencia feszültsége szintén  $5\text{ V}$ .



C. A fényérzékeny ellenállás pontossága  $\pm 20\%$ , a vele sorbakötött ellenállást pontosnak feltételezzük. Mi lesz az A/D bit mért minimuma és maximuma a tervezett megvilágítás esetén?

$$5\text{ k}\Omega - 20\% = 4\text{ k}\Omega$$

$$5\text{ k}\Omega + 20\% = 6\text{ k}\Omega$$

$$V_{AD} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5 \frac{4}{200 + 4} = 0,098\text{ V}$$

$$V_{AD} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5 \frac{6}{200 + 6} = 0,1456\text{ V}$$

$$x = \frac{V_{AD} \cdot 2^n}{V_{ref}} = \frac{0,098 \cdot 2^{12}}{5} = 80$$

$$x = \frac{V_{AD} \cdot 2^n}{V_{ref}} = \frac{0,1456 \cdot 2^{12}}{5} = 120$$

**8. Feladat** - Egy mikrokontroller 12 bites, unipoláris A/D konverterének referencia feszültsége 4096 mV. Egy Pt100 szenzor ellenállása 0 °C-on 100 Ω, érzékenysége 0,385 Ω/°C. Az ellenálláson 10 mA áramot bocsátunk keresztül és a mikrokontroller A/D átalakítójával mérünk.

**A.** Milyen érték található az A/D regiszterében szobahőmérsékleten (25°C)?

A Pt100 ellenállás feszültsége 25 °C-on :

$$V_{PT} = IR = I(R_{off} + S_T \cdot \Delta T) = 10 \text{ mA} \cdot (100 \text{ } \Omega + 0,385 \text{ } \Omega/^{\circ}\text{C} \cdot 25 \text{ } ^{\circ}\text{C}) = 1096,25 \text{ mV}$$

$$x = \frac{V_x \cdot 2^n}{V_{ref}} = \frac{1,096 \cdot 2^{12}}{4,096} = 1096$$

azért is, mert az *LSB* 1 mV, mert 12 bites az átalakító

(ezért kedveltek a mV-ban kettő hatványaként kifejezhető referencia feszültségek, 1,024 V; 2,048 V; 4,096 V stb.)

**8. Feladat** - Egy mikrokontroller 12 bites, unipoláris A/D konverterének referencia feszültsége 4096 mV. Egy Pt100 szenzor ellenállása 0 °C-on 100 Ω, érzékenysége 0,385 Ω/°C. Az ellenálláson 10 mA áramot bocsátunk keresztül és a mikrokontroller A/D átalakítójával mérünk.

**B.** Az A/D konverter elé egy erősítőt kapcsolunk. Mekkora legyen az erősítés, ha azt szeretnénk, hogy kb. 160 °C-nál az A/D konverter maximális értéket mutasson?

---

A Pt100 ellenállás feszültsége 160 °C-on :

$$V_{PT} = IR = I(R_{off} + S_T \cdot \Delta T) = 10 \text{ mA} \cdot (100 \text{ } \Omega + 0,385 \text{ } \Omega/\text{ } ^\circ\text{C} \cdot 160 \text{ } ^\circ\text{C}) = 1616 \text{ mV}$$

160 °C-on 1616 mV feszültséget mérnénk erősítés nélkül, azaz  $4095/1616 = 2,53$  erősítés lenne szükséges. Állítsuk az erősítést 2,5×-re a biztonság kedvéért

**8. Feladat** - Egy mikrokontroller 12 bites, unipoláris A/D konverterének referencia feszültsége 4096 mV. Egy Pt100 szenzor ellenállása 0 °C-on 100 Ω, érzékenysége 0,385 Ω/°C. Az ellenálláson 10 mA áramot bocsátunk keresztül és a mikrokontroller A/D átalakítójával mérünk.

C. Mekkora ebben az esetben a hőmérsékleti felbontás, azaz egy bit megváltozáshoz tartozó hőmérsékletváltozás?

---

Egy bit megváltozása 1 mV ( $V_{LSB}$ ); a 2,5 szerez erősítés miatt ehhez  $1/2,5 = 0,4$  mV feszültségváltozás tartozik a Pt100 szenzoron.

10 mA mérőáram mellett ez a feszültségváltozás  $0,4/10 = 0,04$  Ω ellenállás-változást jelent.

Az ellenállás-változást osztva az érzékenységgel:

$$\Delta R = S_T \cdot \Delta T \quad \rightarrow \quad \Delta T = \frac{\Delta R}{S_T} = \frac{0,04}{0,385} = 0,104 \text{ °C}$$