

Povečanje izkoristka pri proizvodnji piezoupornih senzorjev tlaka za avtomobilske aplikacije

Magistrsko delo

Avtor: Marko Pavlin, HYB d.o.o.

Mentor: prof. dr. Franc Novak

Vsebina

Uvod in teorija o senzorjih tlaka

Senzorji tlaka za avtomobilske aplikacije

Postopki umerjanja senzorjev tlaka

Optimizacija postopka umerjanja

Oprema za umerjanje senzorjev tlaka

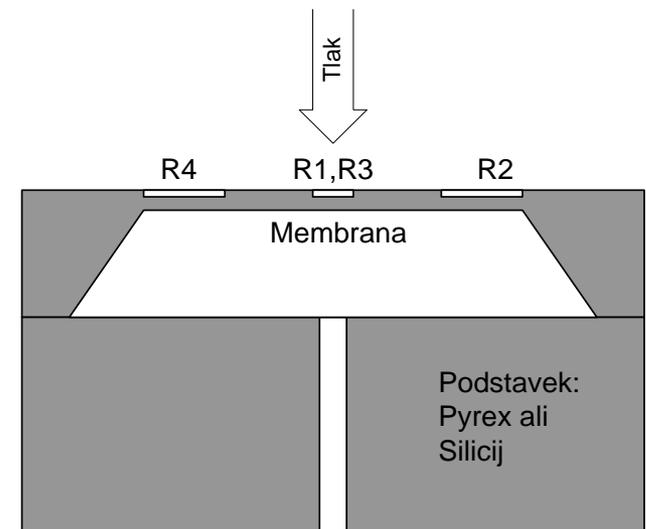
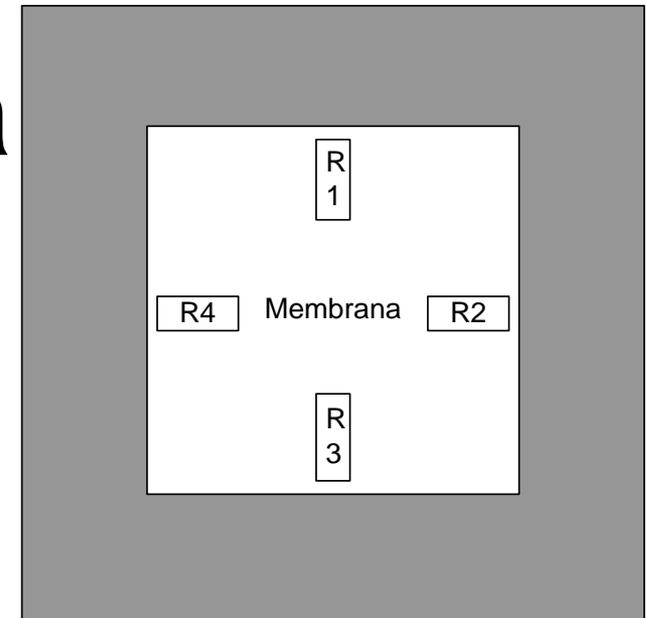
Rezultati, diskusija

Zaključki

Silicijev senzor tlaka

- Tanka membrana
- 4 upori –
Wheatstonov mostič

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t$$



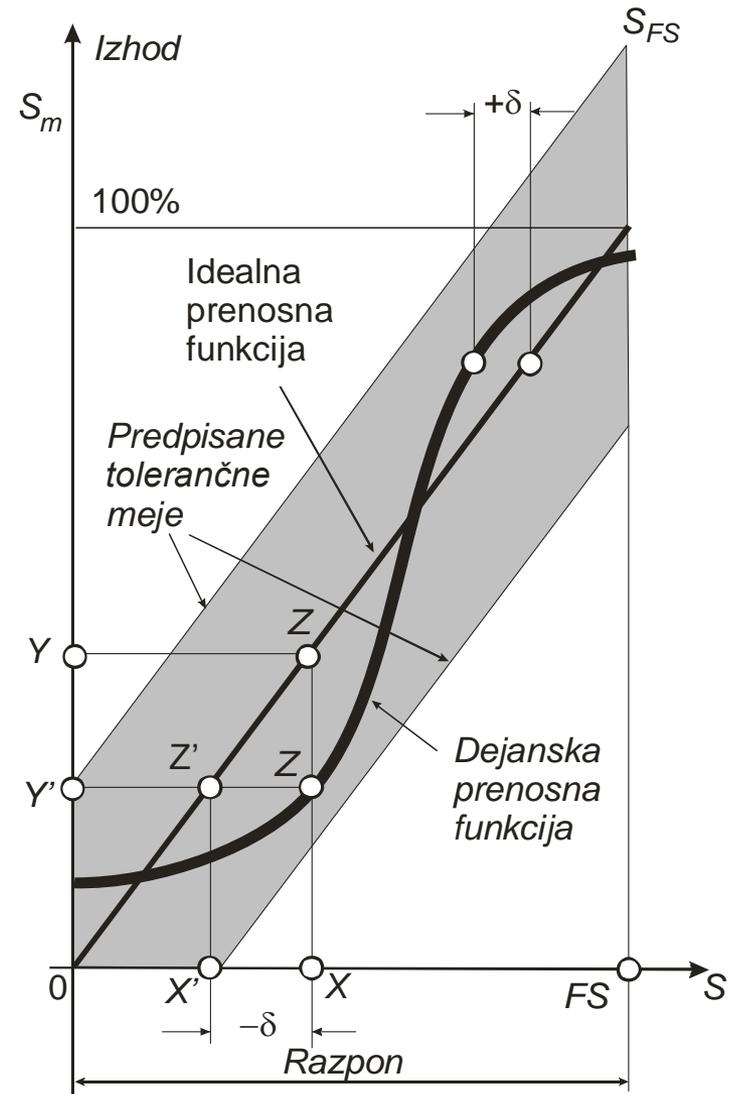
Luknja za tlak od spodaj

Karakteristike senzorjev tlaka

- Prenosna funkcija
- Vhodni razpon (polni vhodni obseg)
- Izhodni razpon (polni izhodni obseg)
- Točnost
- Kalibracija
- Napaka umerjanja
- Histereza
- Nelinearnost
- Zasičenje in omejitve izhodne vrednosti
- Ponovljivost
- Ločljivost
- Izhodna upornost
- Dinamična karakteristika

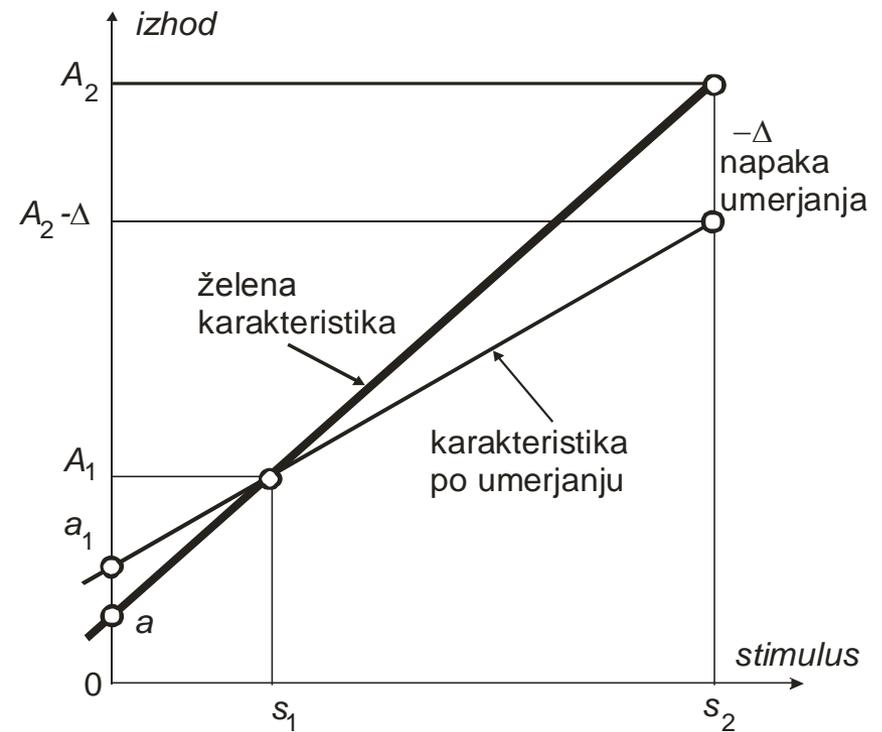
Karakteristike senzorjev tlaka

- Prenosna funkcija
- Vhodni razpon (FS)
- Izhodni razpon (FSO)
- Merilni pogrešek (δ)
- Tolerančni pas



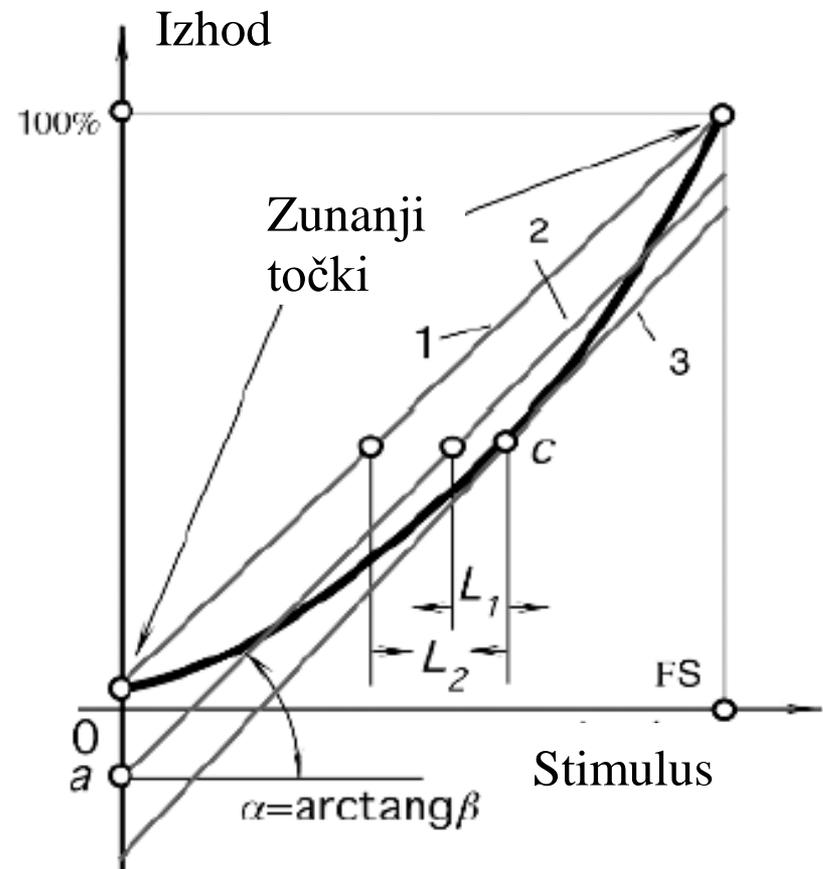
Karakteristike senzorjev tlaka

- Napaka umerjanja
- Izraža se kot sistematska napaka



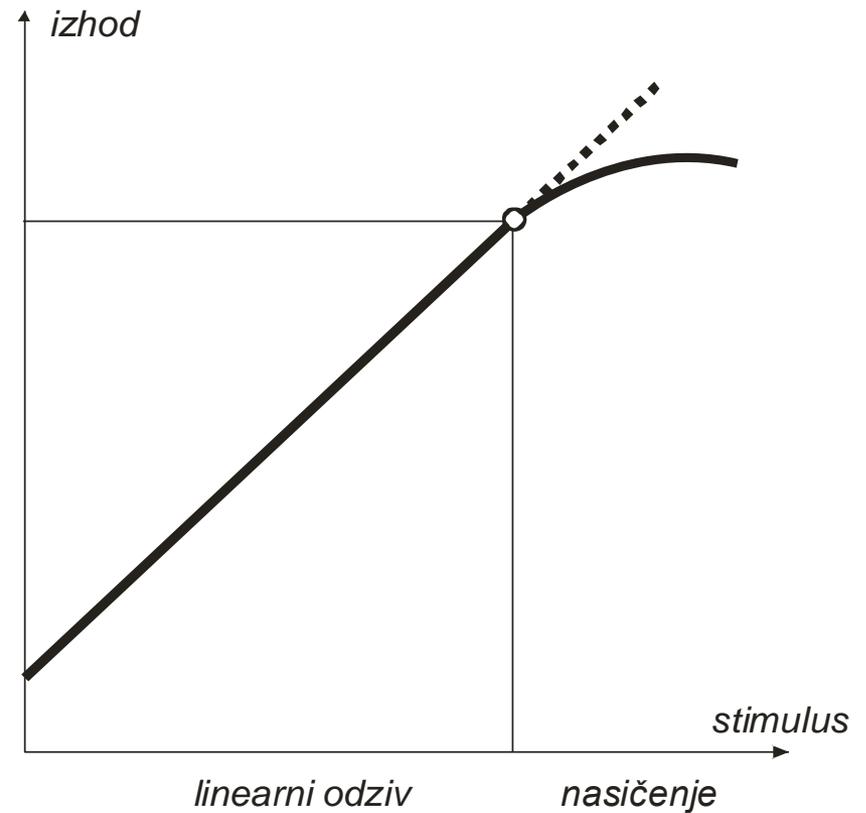
Karakteristike senzorjev tlaka

■ Napaka nelinearnosti



Karakteristike senzorjev tlaka

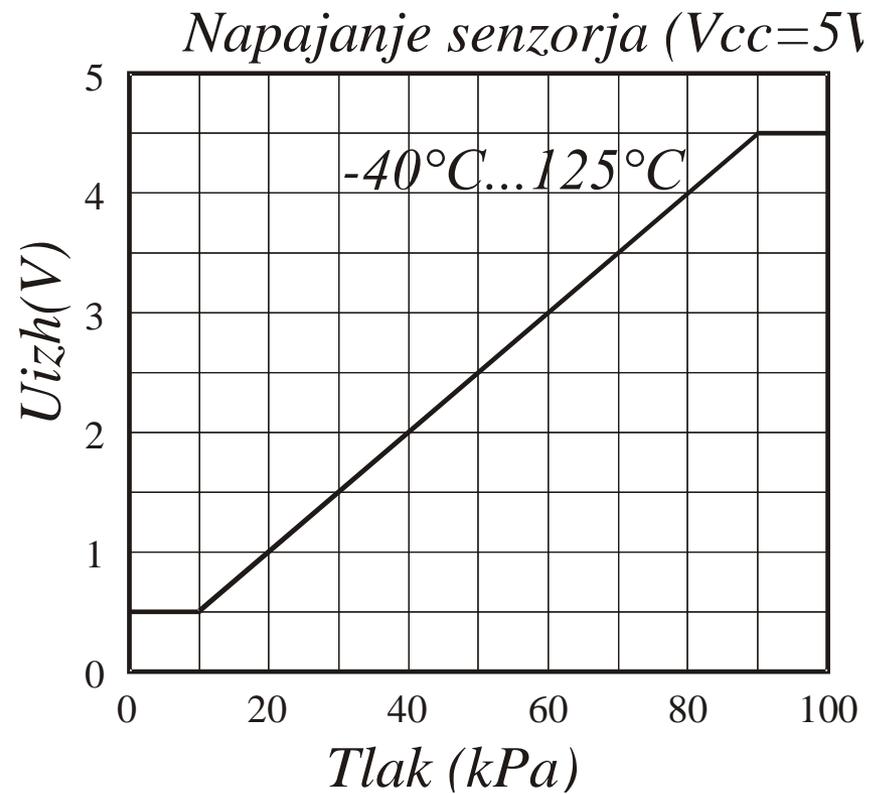
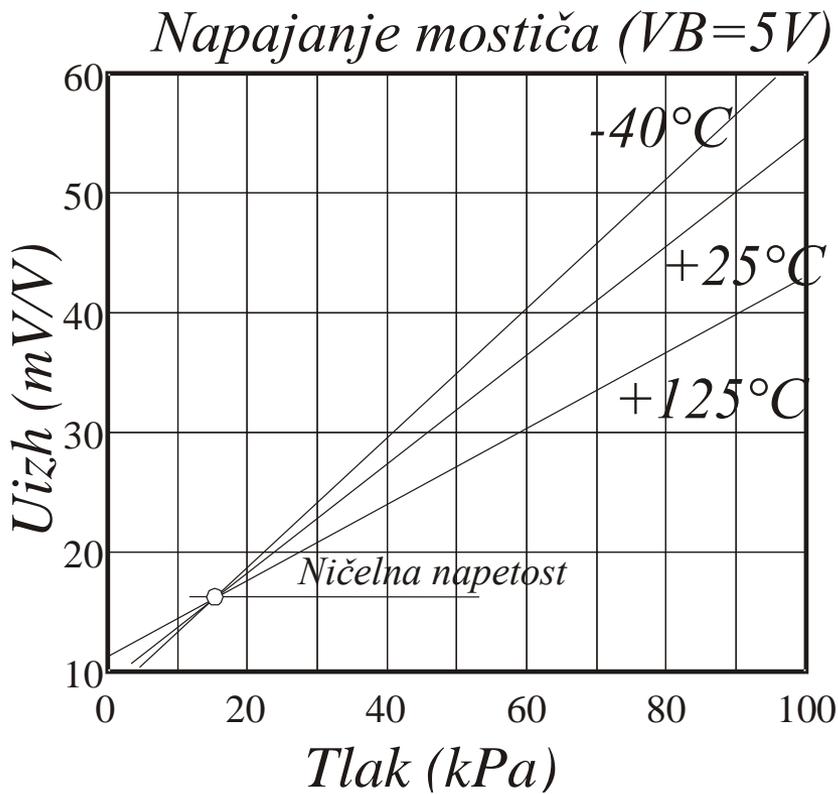
- Zasičenje izhodnega signala



Metode umerjanja senzorjev tlaka

- **Neželene vplive** lahko v grobem strnemo v tri skupine:
 - Relativno velik in izrazito nelinearen vpliv temperature
 - Občuten ničelni izhodni signal (tudi do 100 % polnega obsega)
 - Velike spremembe ničelne napetosti s spremembo temperature (vpliv ohišja)

Temperaturna karakteristika



Topologije vezij za umerjanje senzorjev

■ Dve veliki skupini

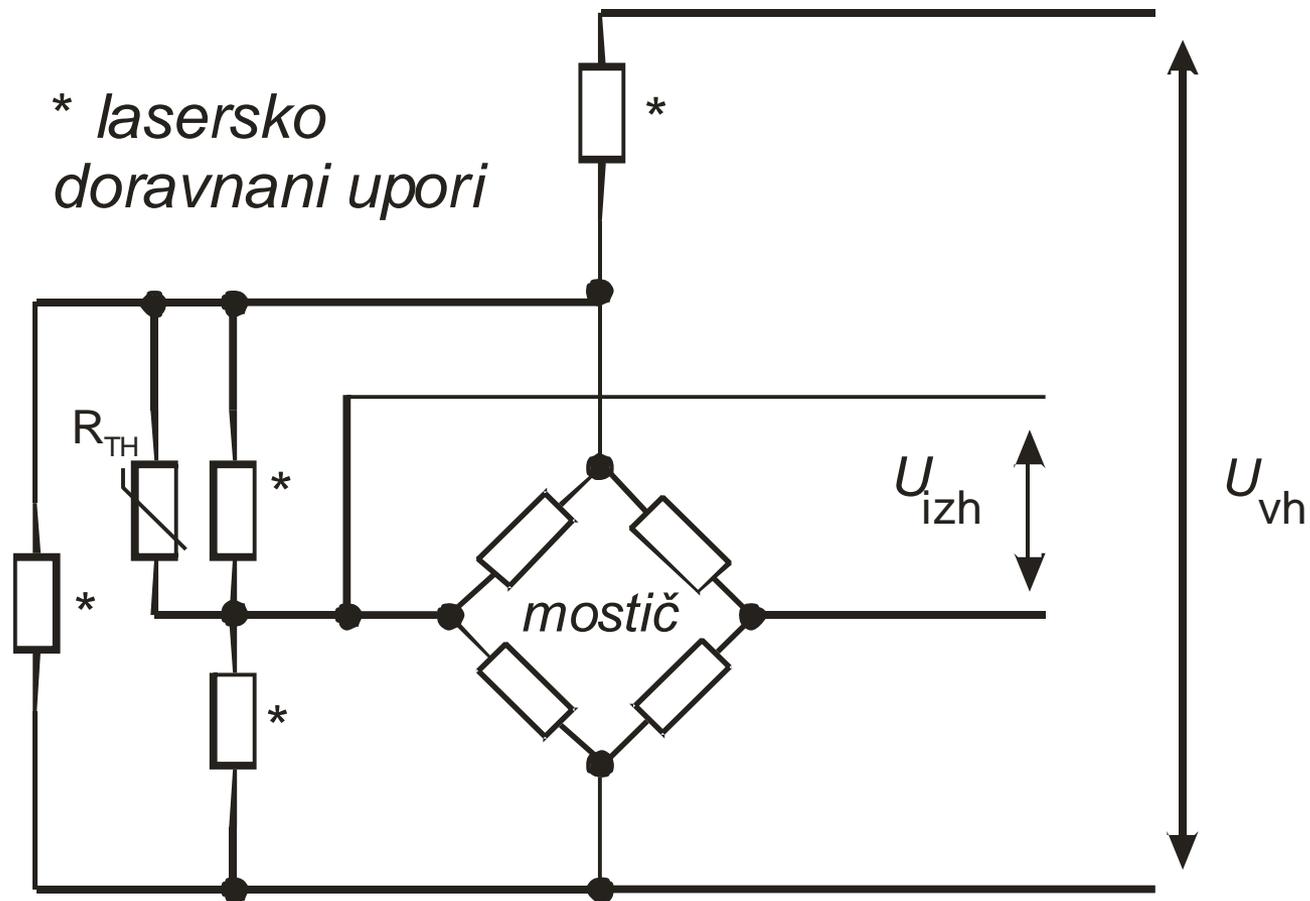
□ Analogna vezja

- temperaturno spremenljivi upori,
- analogni ojačevalniki
- lasersko trimanje

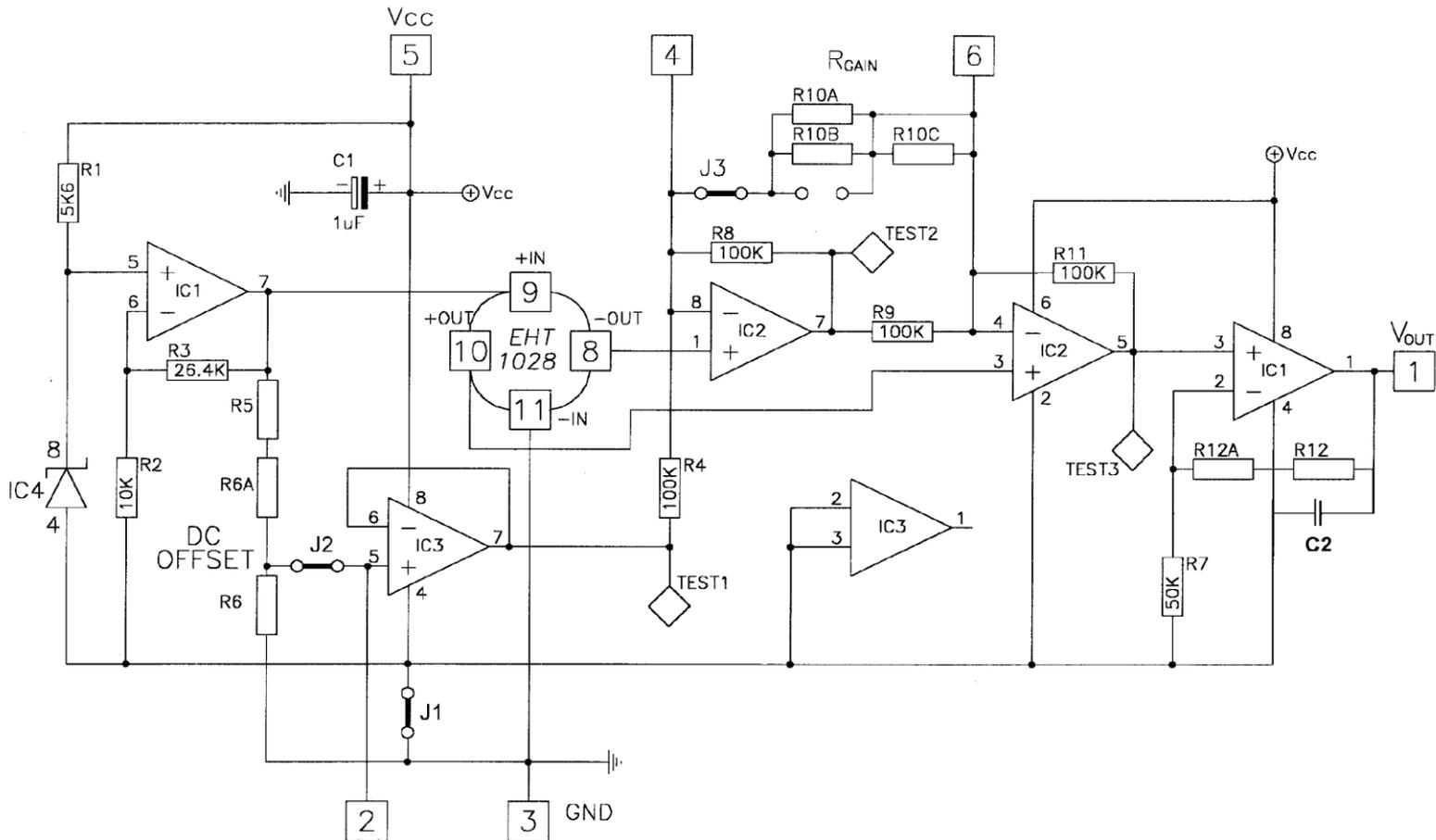
□ Digitalna vezja

- Vpliv na analogni signal z digitalnimi, programirljivimi vezji
- Popolnoma digitalizirana kompenzacija

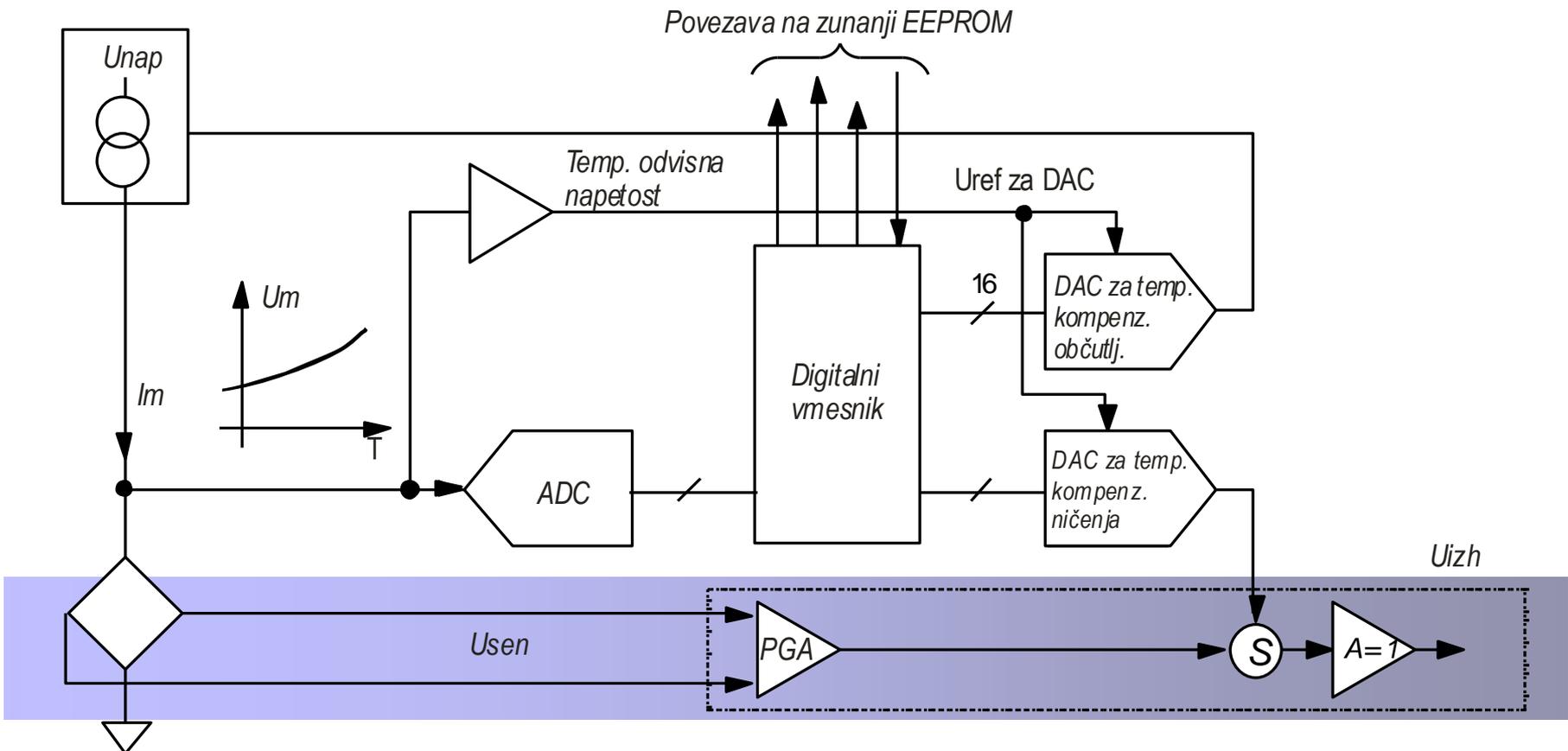
Primer analogne temp. komp.



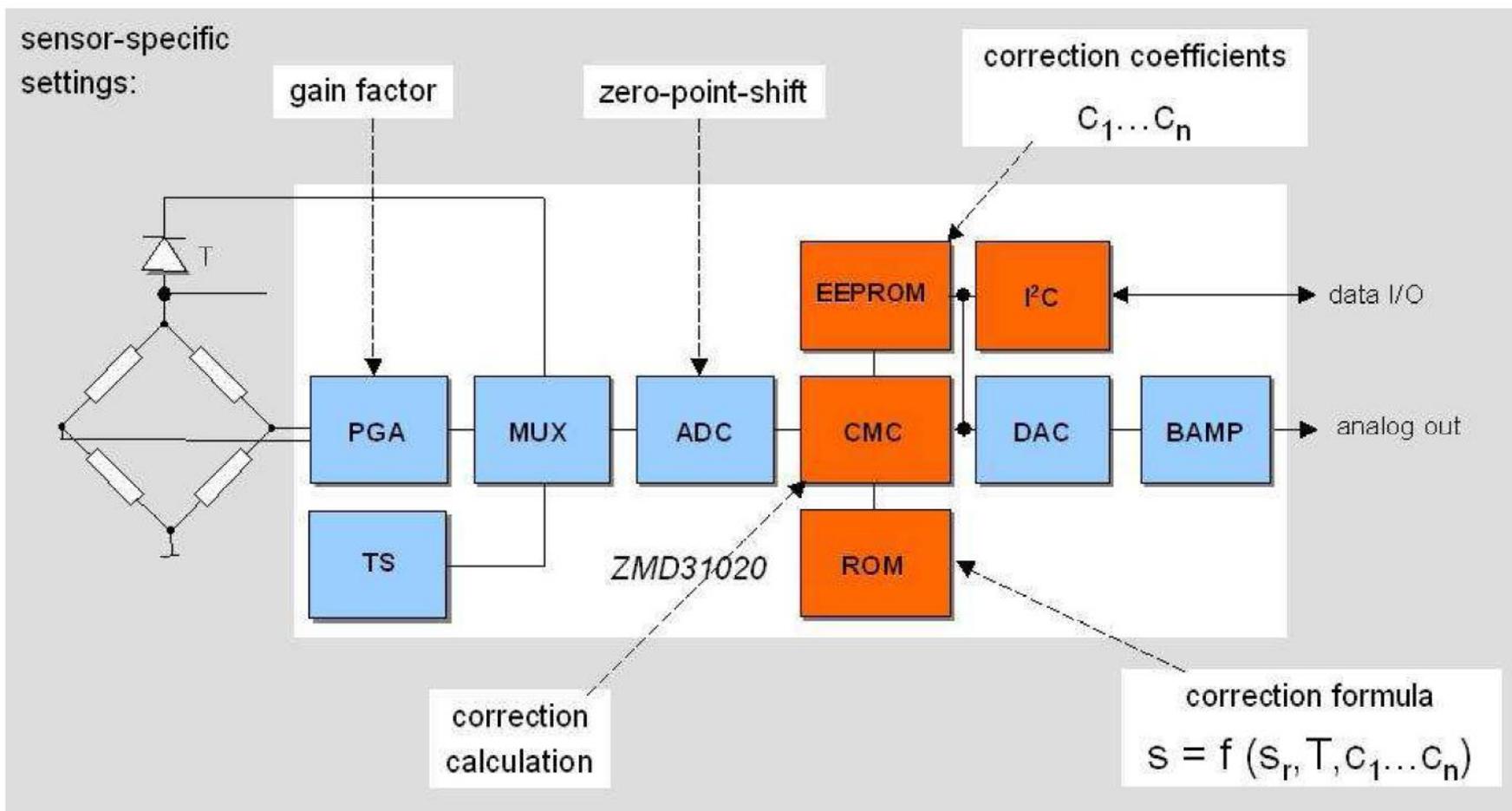
Primer analognega senzorskega ojačevalnika

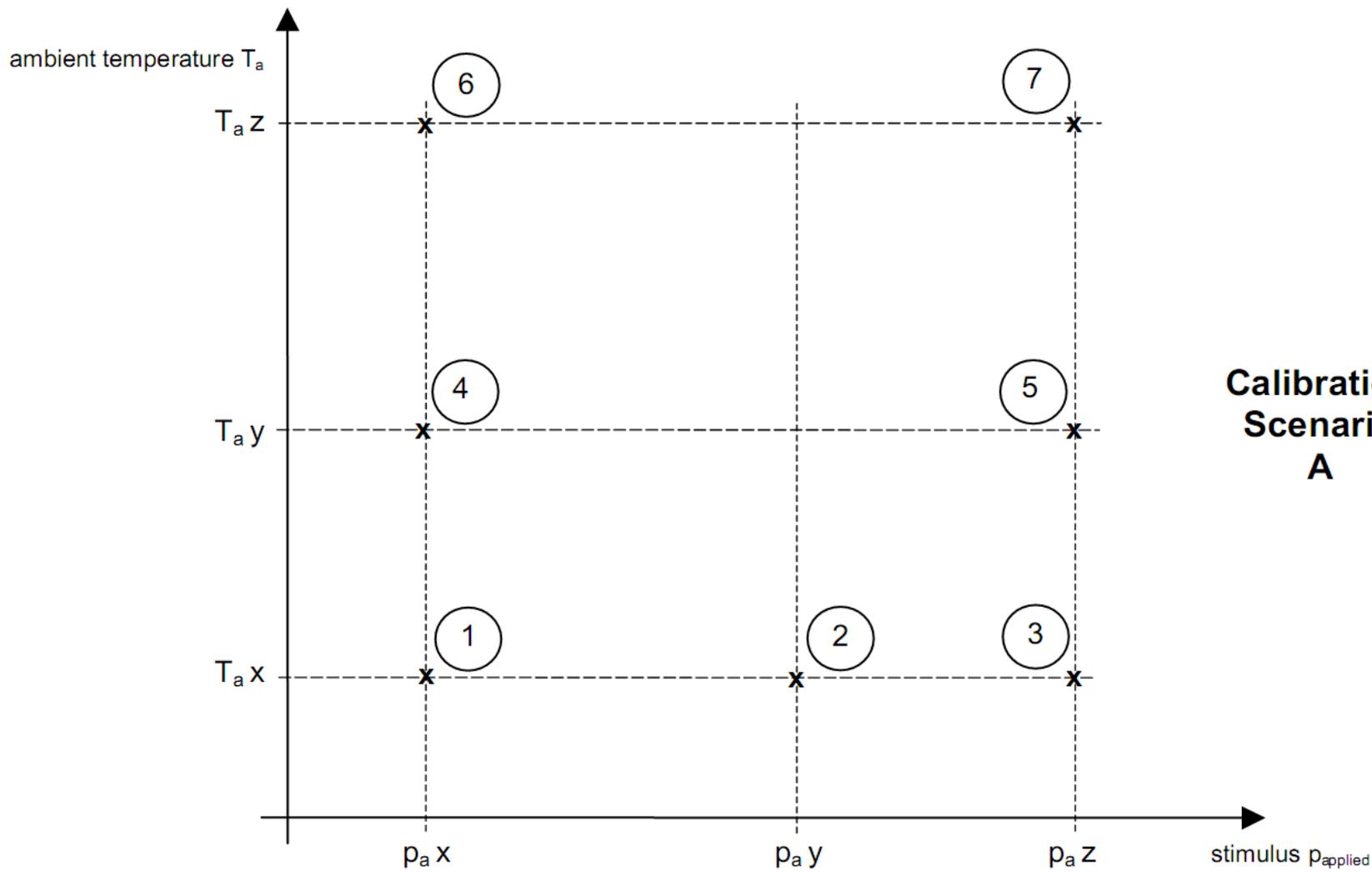


Digitalna kompenzacija z analognim senzorskim signalom



Popolnoma digitalna vezja za umerjanje (ZMD31020)





**Calibration
Scenario
A**

Postopek umerjanja MAP senzorja

$$T_1 = 2^{10} \left(\frac{V_{offsetT}}{0,98V} + \frac{1}{16} \right)$$

$$p_1 = 2^{12} \left(\frac{vV_{offsetP}}{0,96V(V_{DDA} - V_{SA})} + C \right)$$

$$T_2 = 2^{10} \left(\frac{V_{temp} + V_{offsetT}}{0,98V} + \frac{1}{16} \right)$$

$$p_2 = 2^{12} \left(\frac{v(V_{sensor} - V_{offsetP})}{0,96V(V_{DDA} - V_{SA})} + C \right)$$

$$T_{OC} = T_2 - T_1 \quad p_{OC} = p_2 - p_1 = 2^{12} \left(\frac{vV_{sensor}}{0,96V(V_{DDA} - V_{SA})} \right)$$

$$Z = \frac{kp_{OC} + a_0 + a_1 p_{OC}^2 + a_2 T_{OC} + a_3 T_{OC}^2}{a_4 + a_5 T_{OC} + a_6 T_{OC}^2}$$

Izračun kalibracijskih koeficientov

- Rešiti moramo sistem enačb:

$$Z_0 = \frac{kp_{OC00} + a_0 + a_1 p_{OC00}^2 + a_2 T_{OC0} + a_3 T_{OC}^2}{a_4 + a_5 T_{OC0} + a_6 T_{OC}^2}$$

$$Z_1 = \frac{kp_{OC10} + a_0 + a_1 p_{OC10}^2 + a_2 T_{OC0} + a_3 T_{OC}^2}{a_4 + a_5 T_{OC0} + a_6 T_{OC}^2}$$

$$Z_2 = \frac{kp_{OC20} + a_0 + a_1 p_{OC20}^2 + a_2 T_{OC0} + a_3 T_{OC}^2}{a_4 + a_5 T_{OC0} + a_6 T_{OC}^2}$$

$$Z_0 = \frac{kp_{OC01} + a_0 + a_1 p_{OC01}^2 + a_2 T_{OC1} + a_3 T_{OC1}^2}{a_4 + a_5 T_{OC1} + a_6 T_{OC1}^2}$$

$$Z_2 = \frac{kp_{OC21} + a_0 + a_1 p_{OC21}^2 + a_2 T_{OC1} + a_3 T_{OC1}^2}{a_4 + a_5 T_{OC1} + a_6 T_{OC1}^2}$$

$$Z_0 = \frac{kp_{OC02} + a_0 + a_1 p_{OC02}^2 + a_2 T_{OC2} + a_3 T_{OC2}^2}{a_4 + a_5 T_{OC2} + a_6 T_{OC2}^2}$$

$$Z_2 = \frac{kp_{OC22} + a_0 + a_1 p_{OC22}^2 + a_2 T_{OC2} + a_3 T_{OC2}^2}{a_4 + a_5 T_{OC2} + a_6 T_{OC2}^2}$$

Vsebina

Uvod in teorija o senzorjih tlaka

Senzorji tlaka za avtomobilske aplikacije

Postopki umerjanja senzorjev tlaka

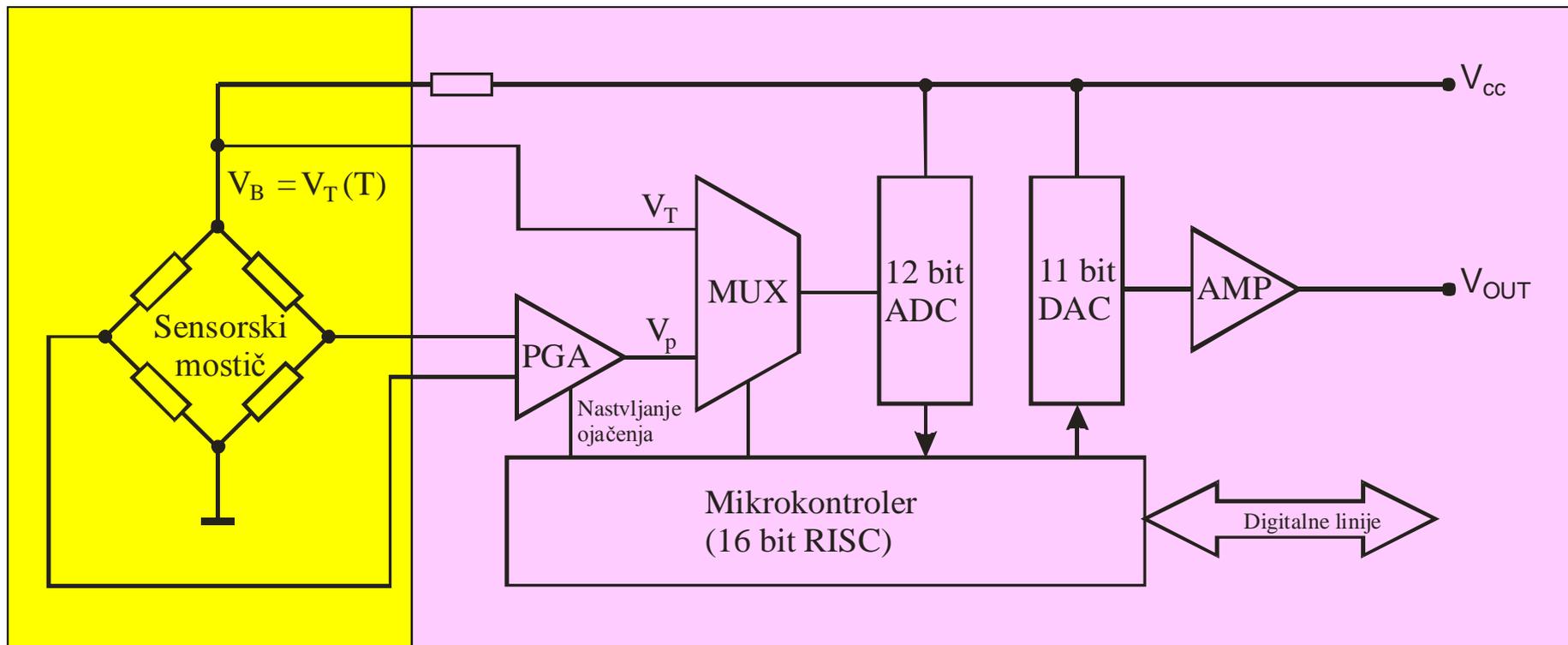
Optimizacija postopka umerjanja

Oprema za umerjanje senzorjev tlaka

Rezultati, diskusija

Zaključki

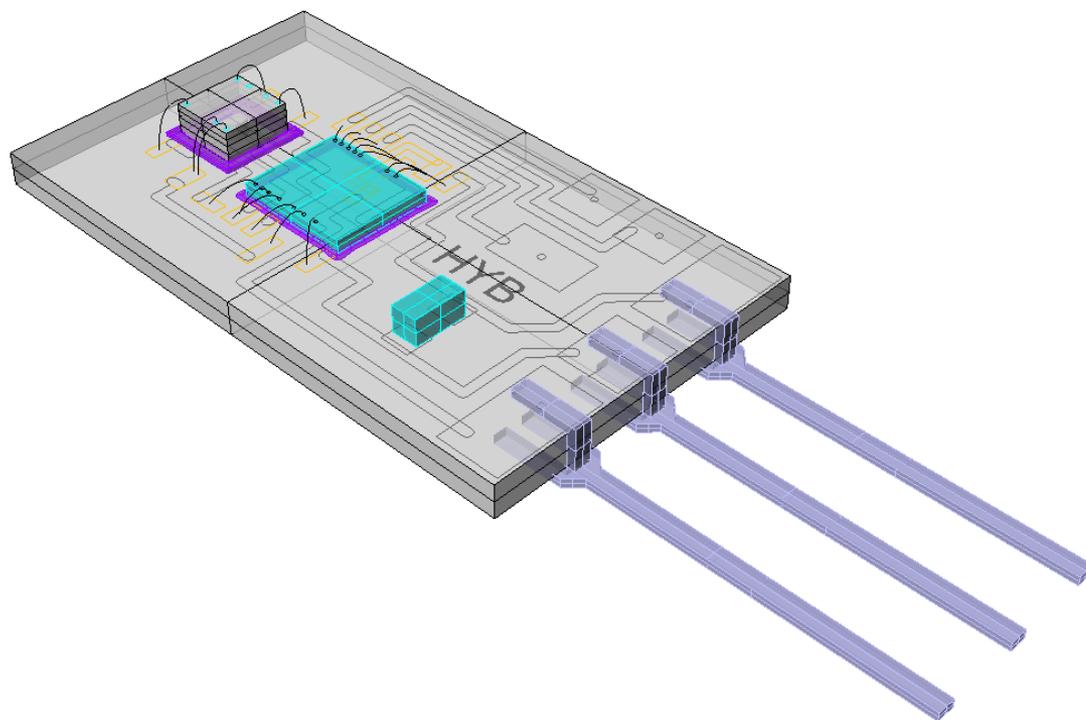
MAP senzor – kaj to sploh je?



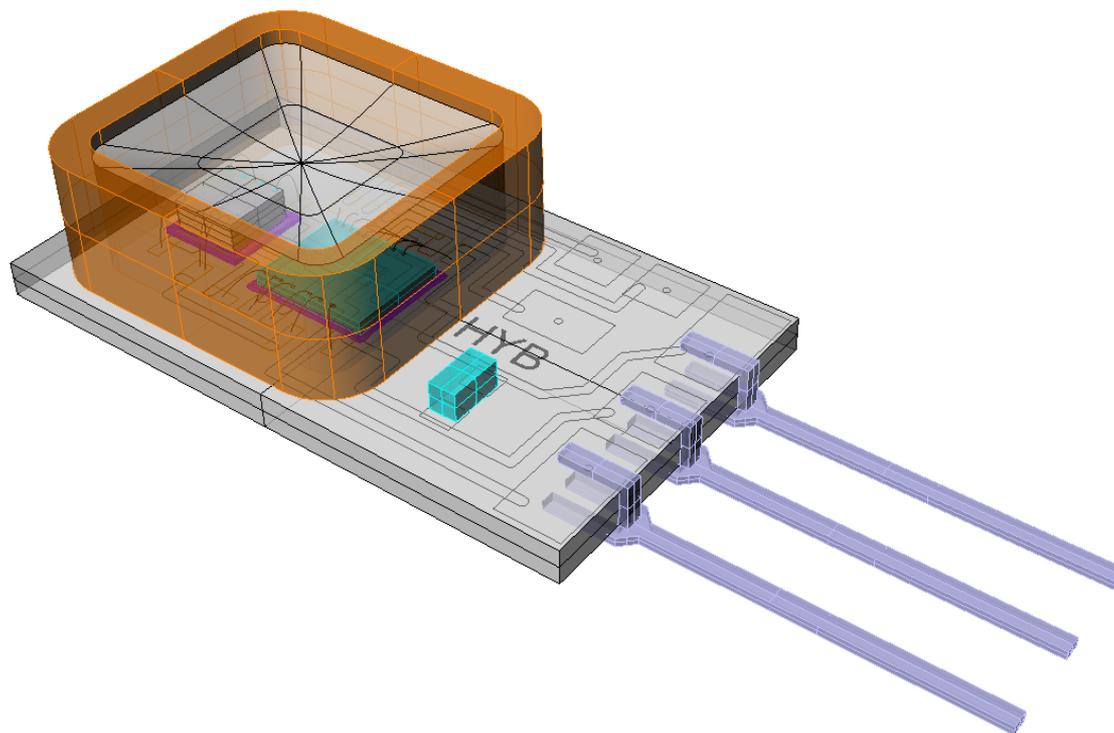
Senzorska
tabletka

ZMD31020

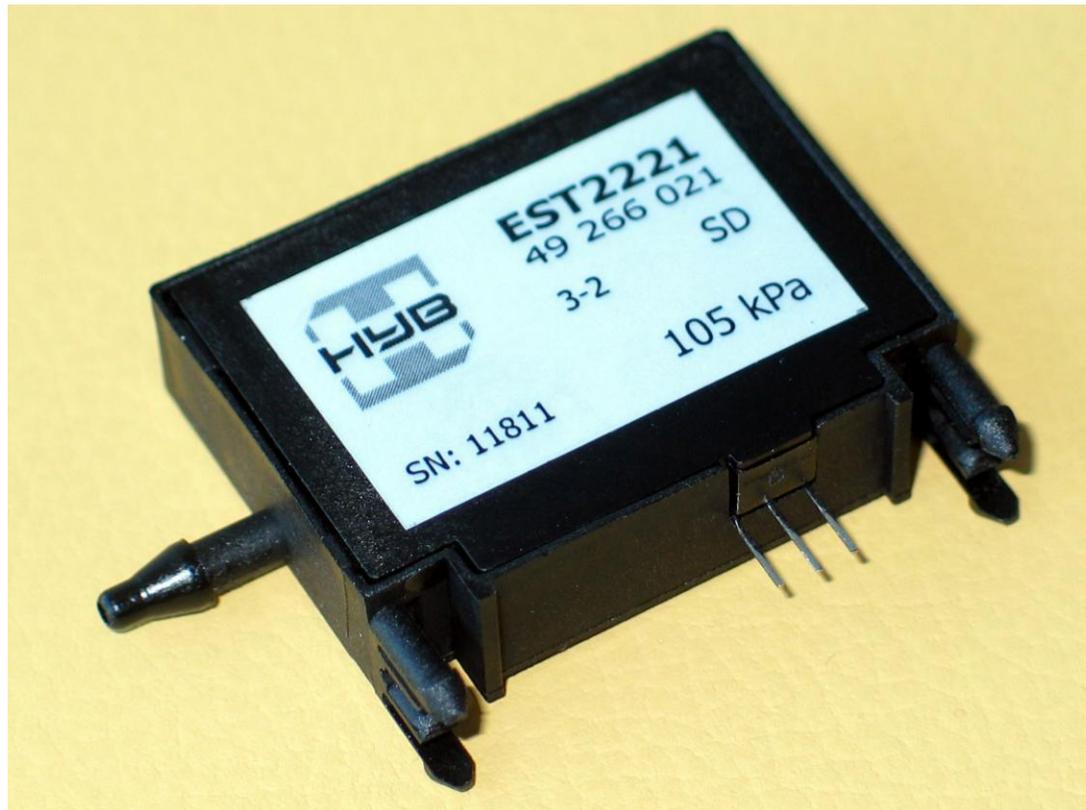
Izdelava MAP senzorja



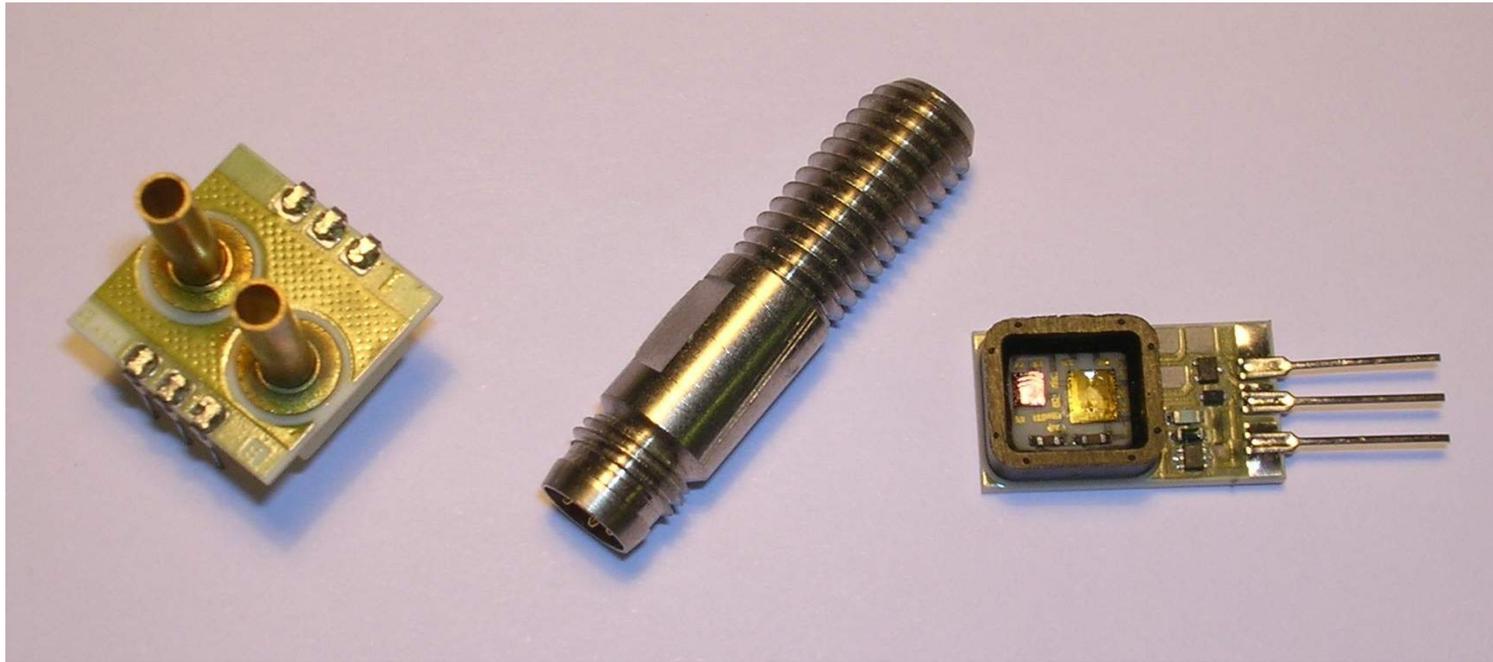
Zaščita pred vplivi medija



Končan izdelek



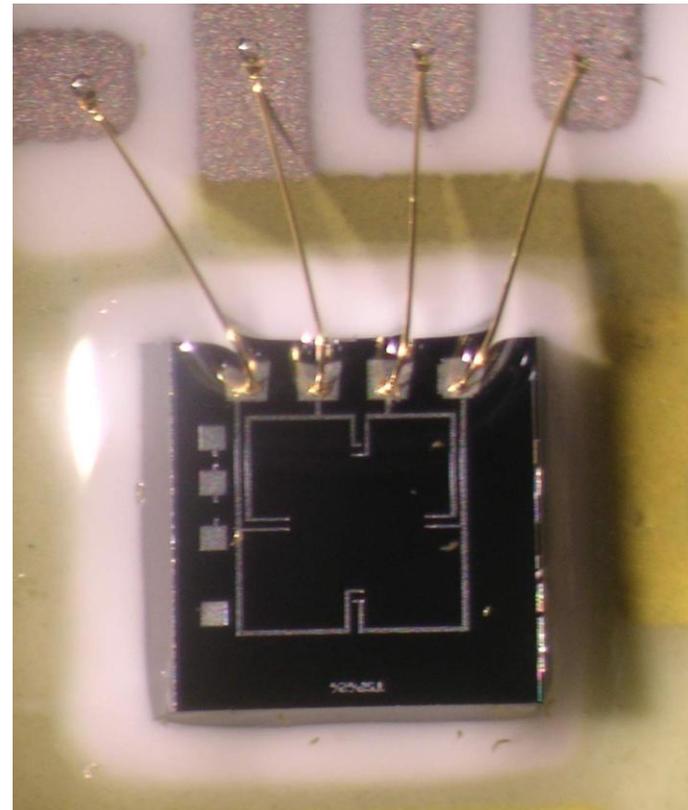
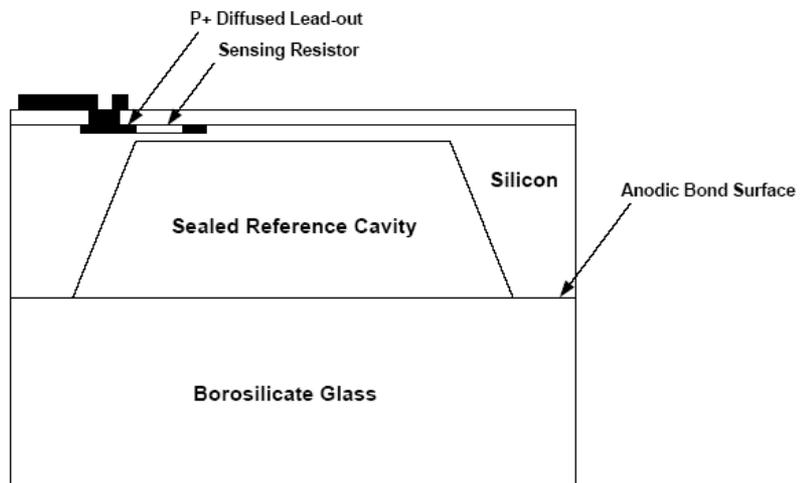
Sorodni izdelki



Sestavni deli MAP senzorja

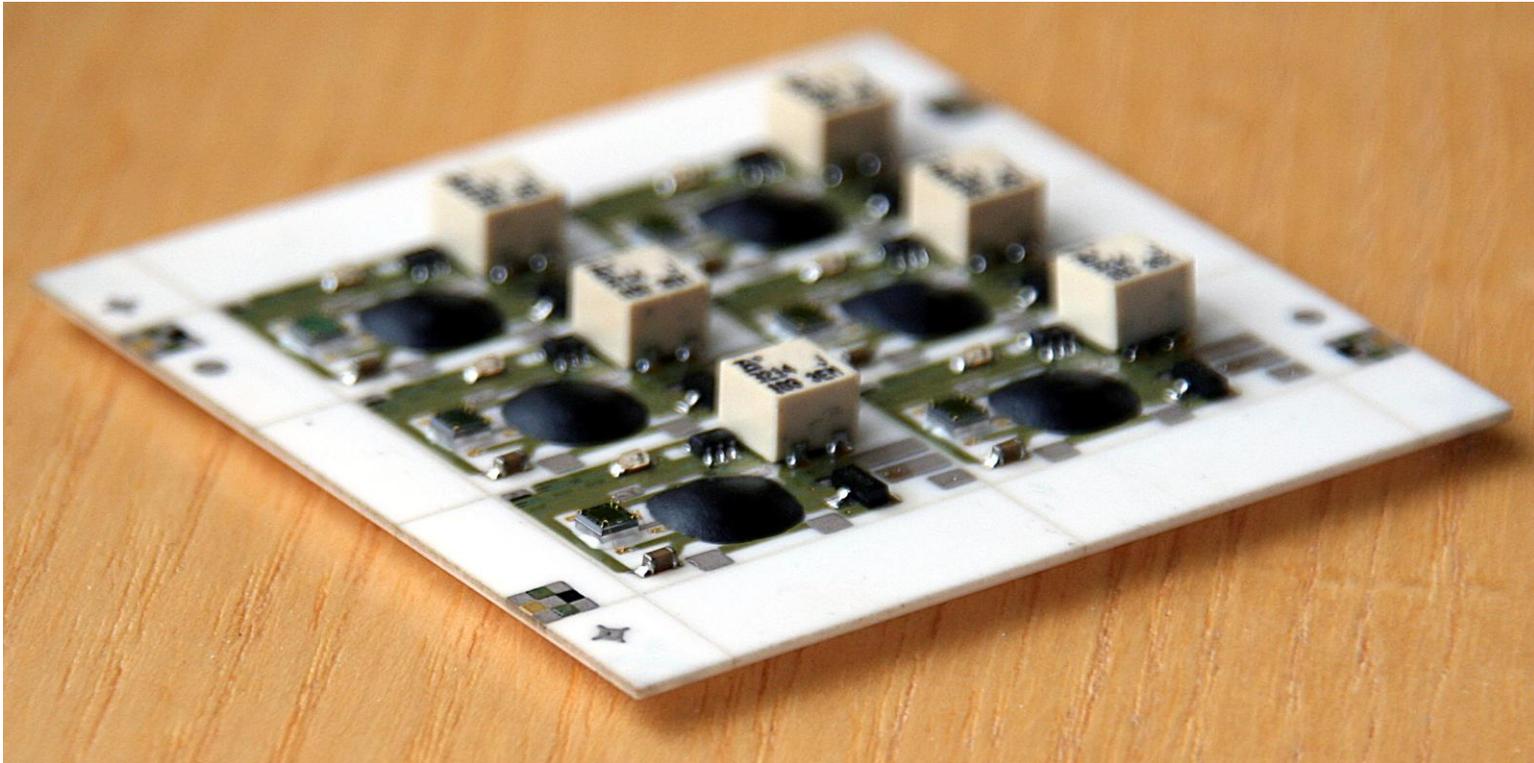
- Možna vezja za digitalno umerjanje
 - ZMD 31020
 - ZMD 31050
 - Melexis: integriran s senzorsko tabletko
- Senzorska tabletko
- Pasivne komponente
- Substrat
- Ohišje in zščita

Senzorska tabletka

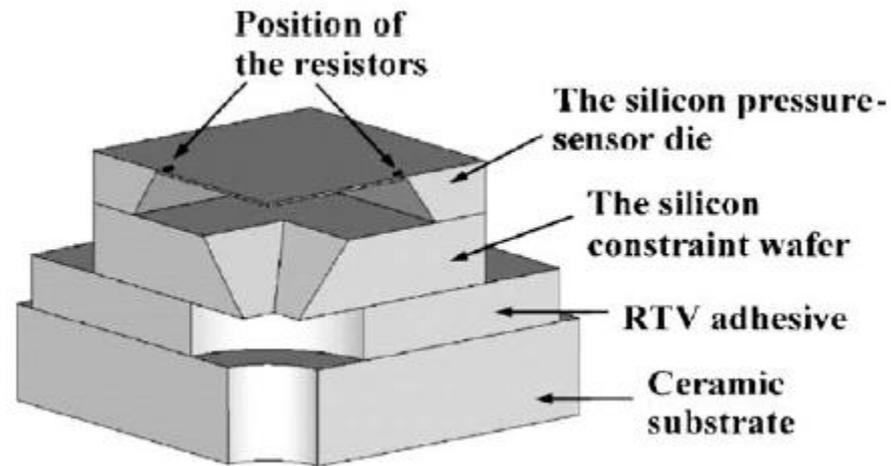


Tehnološki koraki pri izdelavi MAP senzorja

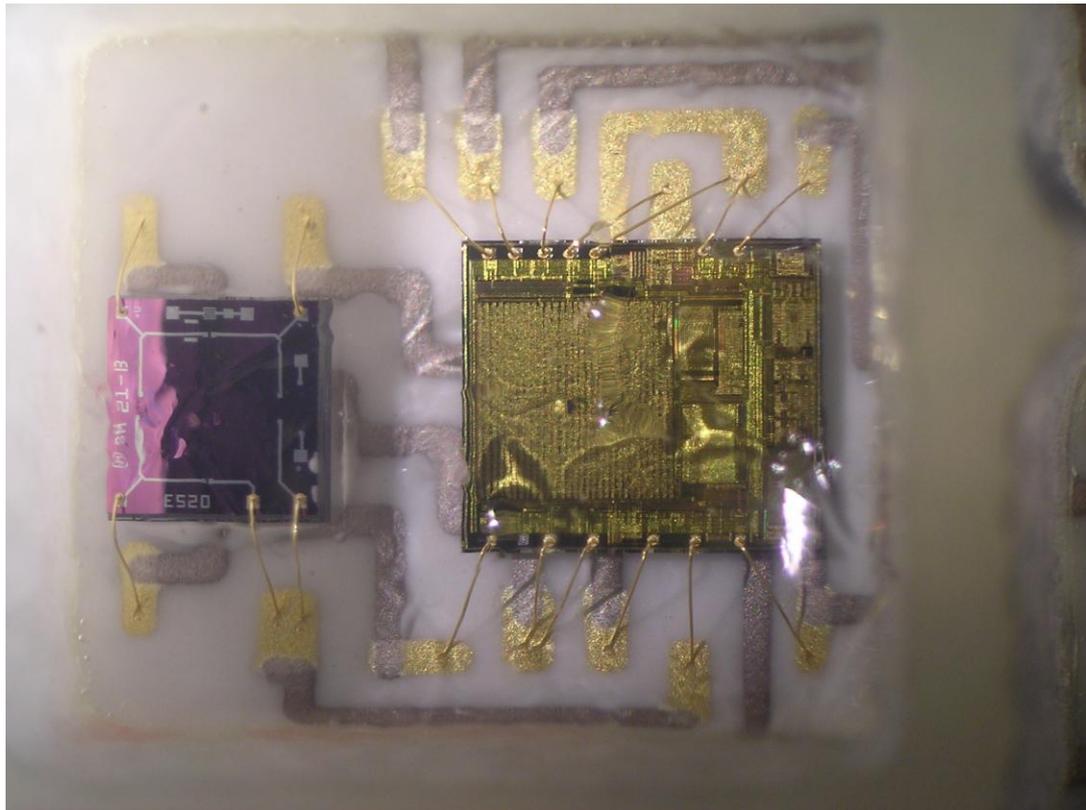
- Keramični substrat



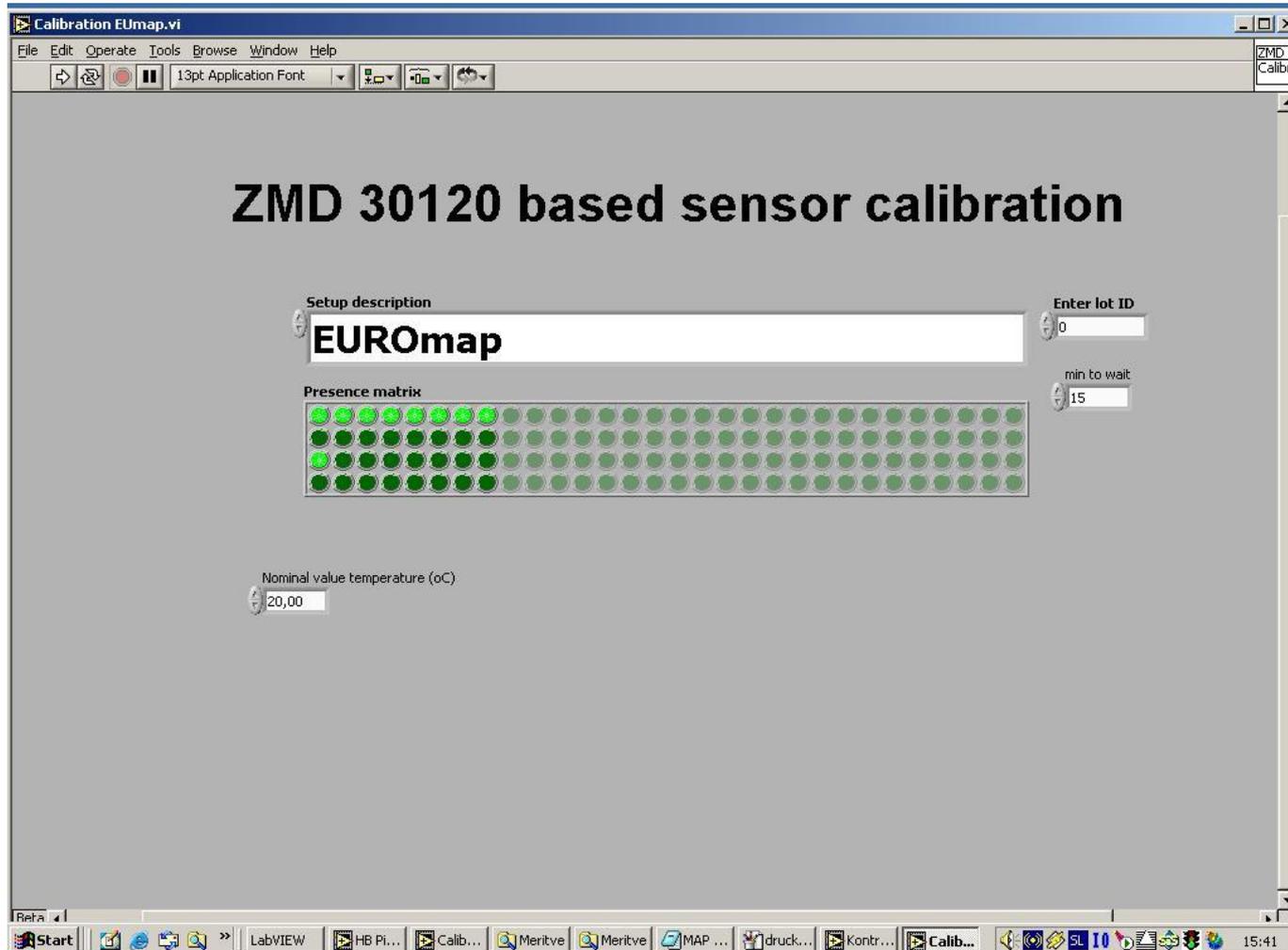
Montaža senzorske tabletk



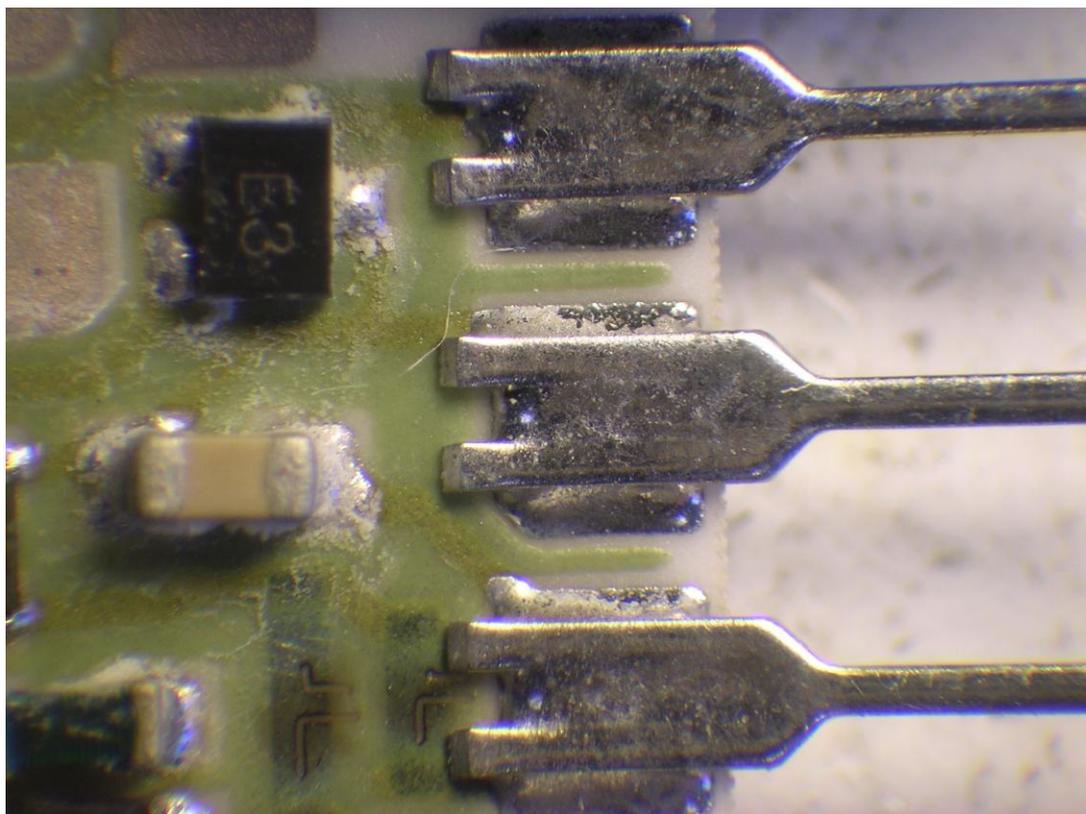
Bondiranje in zalivanje



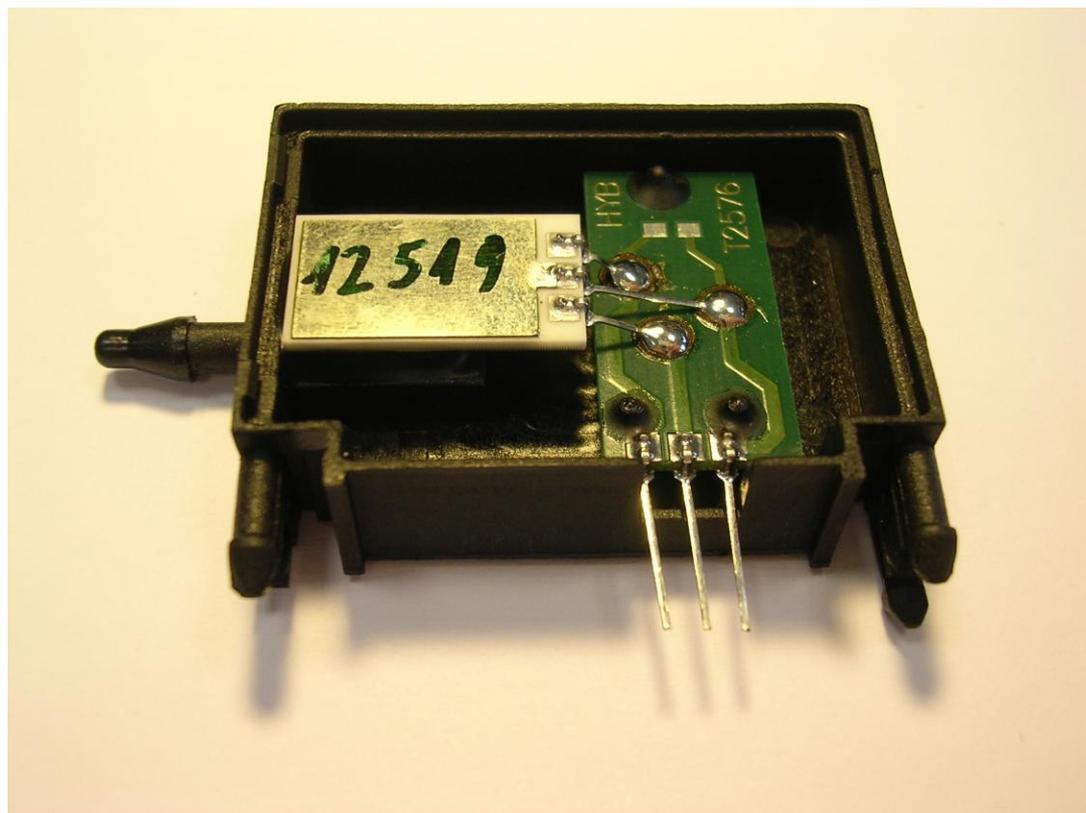
Predtest, umerjanje, končni test



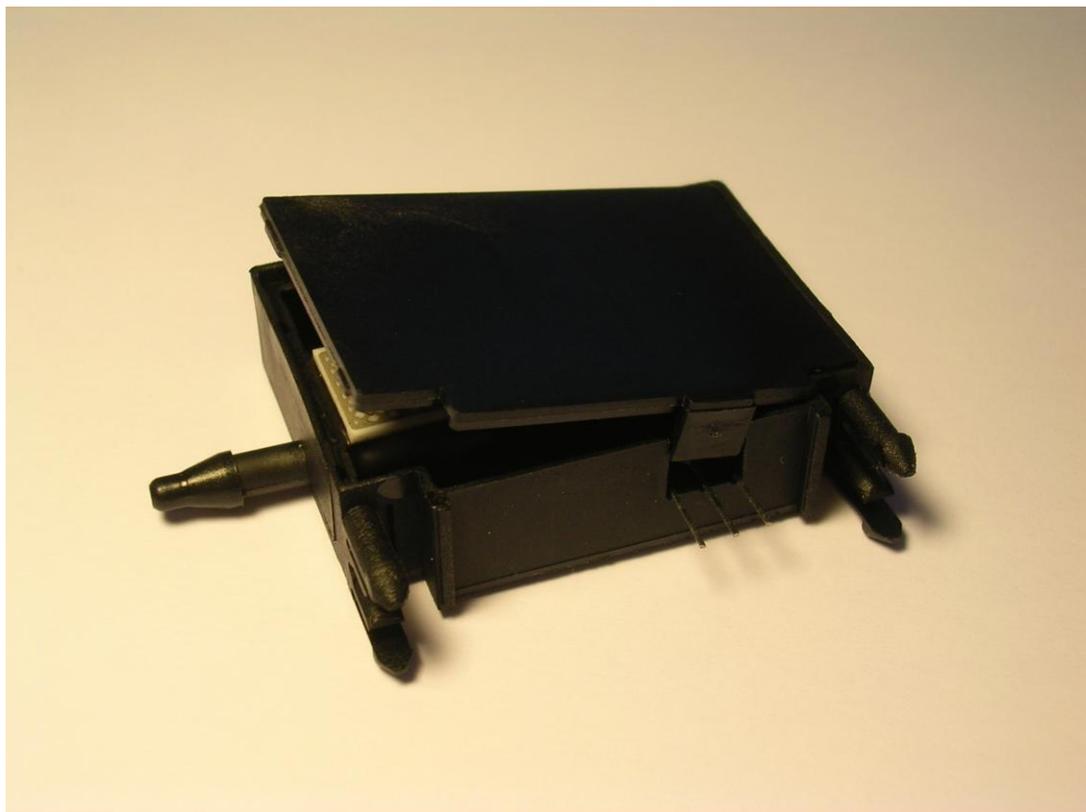
Montža kontaktov



Montaža v ohišje



Zapiranje ohišja



Vsebina

Uvod in teorija o senzorjih tlaka

Senzorji tlaka za avtomobilske aplikacije

Postopki umerjanja senzorjev tlaka

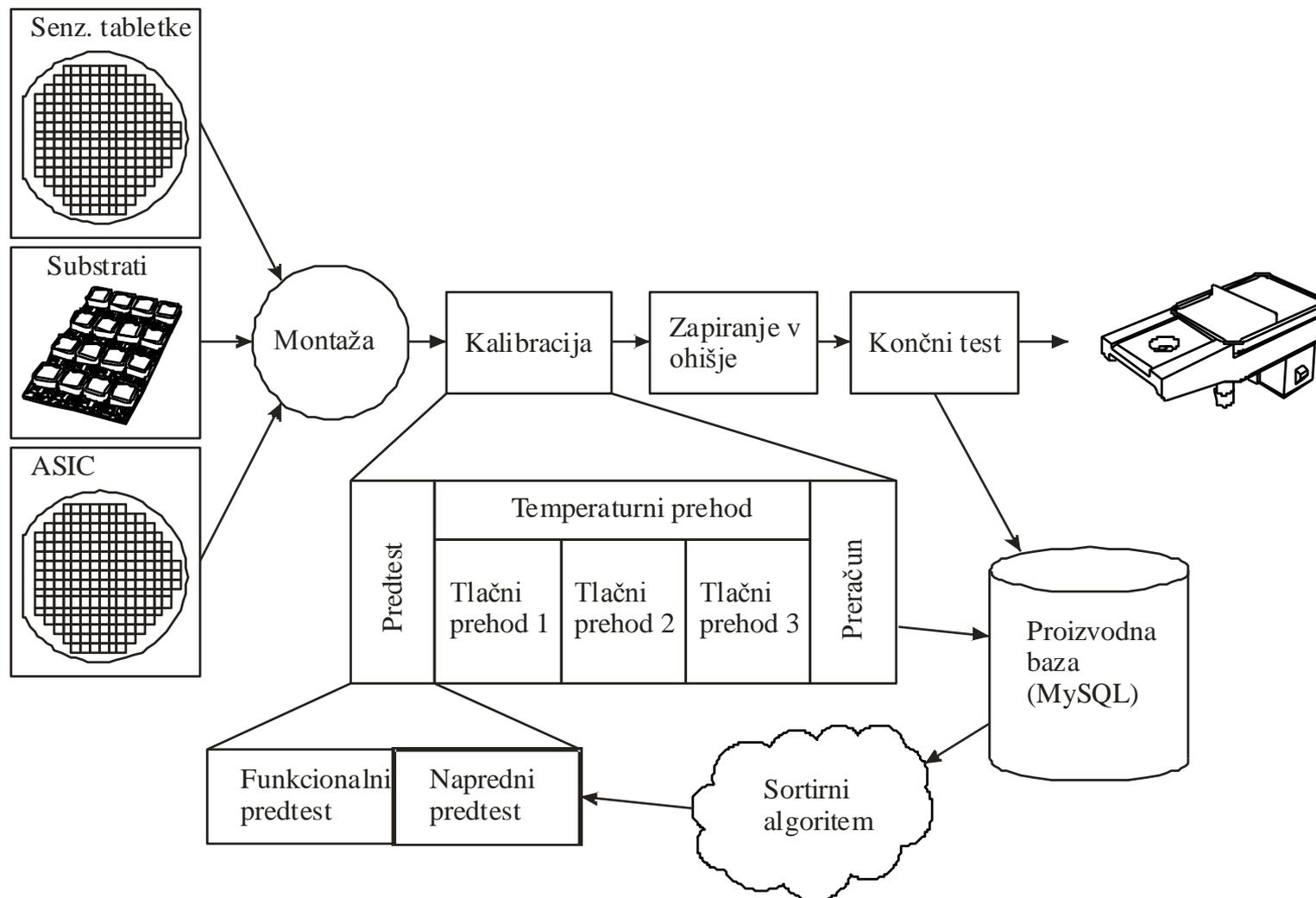
Optimizacija postopka umerjanja

Oprema za umerjanje senzorjev tlaka

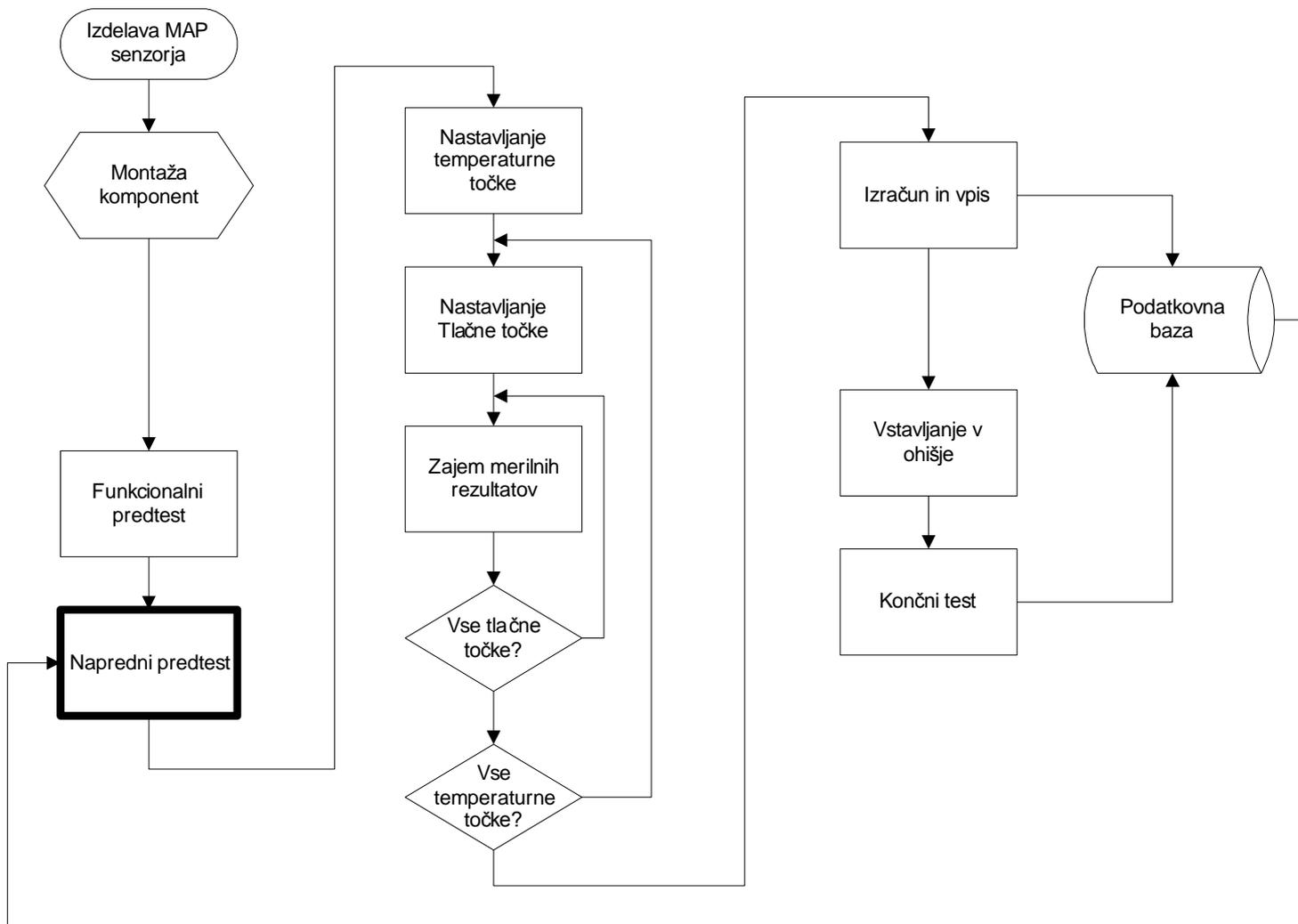
Rezultati, diskusija

Zaključki

Postopek umerjanja - podrobno



Izboljšava – napredni predtest



Algoritem razvrščanja naprednega predtesta

- Imamo poenostavljeno prenosno funkcijo, ki velja le za sobno temperaturo:

$$F(x_p, x_T) = \sum_{i=0}^2 C_{p,0} [x_p - H_i]^i [x_T - H_0]$$

Referenca

- Iz podatkovne baze dobrih senzorjev

$$M_{PC} = \begin{pmatrix} C_{00,1} & C_{10,1} & C_{20,1} \\ C_{00,2} & C_{10,2} & C_{20,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{00,N_X} & C_{10,N_X} & C_{20,N_X} \end{pmatrix}$$

\swarrow

$$S(M_{PC}) = \frac{1}{N_X} \left\{ \sum_{i=1}^{N_X} C_{00,i} \quad \sum_{i=1}^{N_X} C_{10,i} \quad \dots \quad \sum_{i=1}^{N_X} C_{N_P 0,i} \right\}$$

\nearrow

$$C_R = \left\{ \overline{C_{00}} \quad \overline{C_{01}} \quad \overline{C_{02}} \right\}$$

Korelacijski kriterij

- Na začetku določimo mejo za razvrščanje:

$$\rho_{PC}$$

- Stalno popravljjanje meje

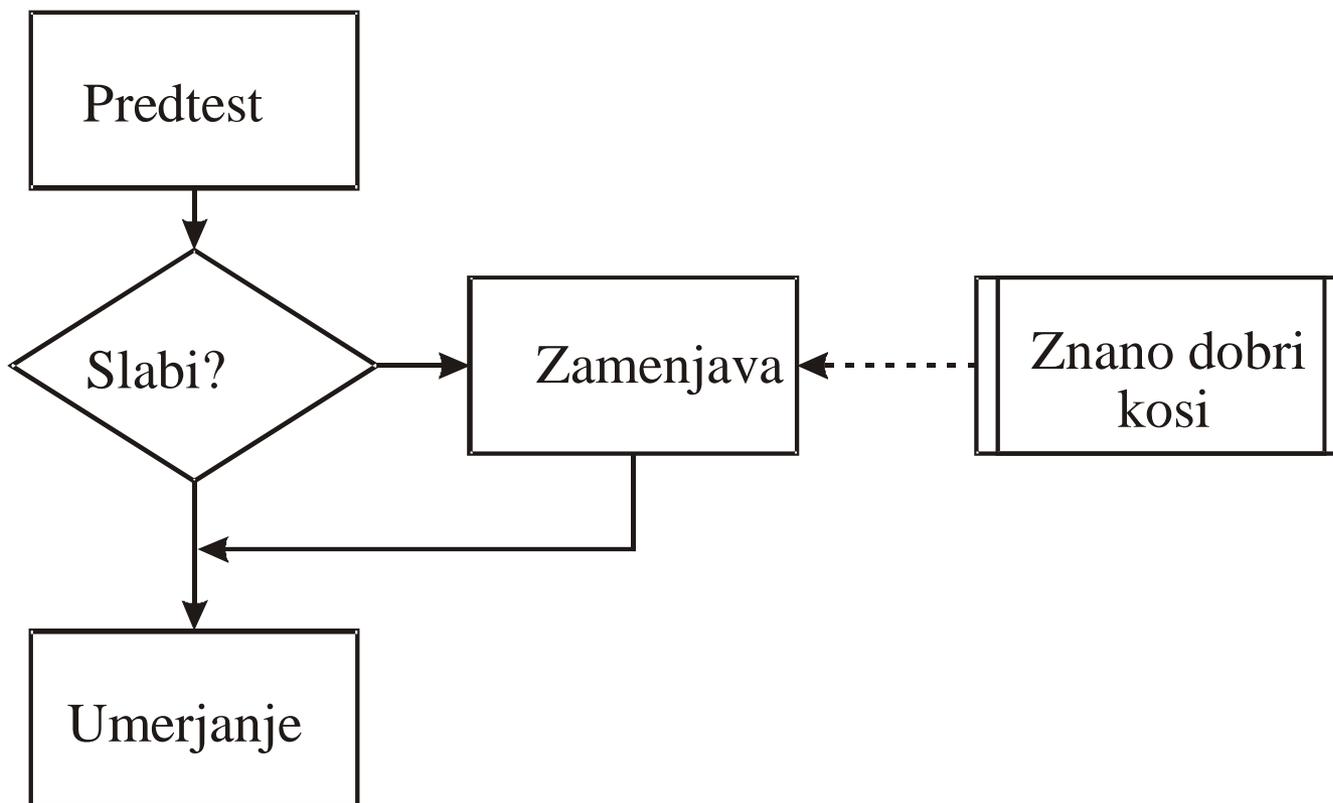
$$r(C_R, C_{PCX}) > \rho_{PC}$$

Ujemanje koeficientov

Soležni koeficient neznanega sensorja mora ležati znotraj tolerance ε_{PC} .

$$C_{PCMAX} (1 - \varepsilon_{PC}) > C_{Xi_{MAX}0} > C_{PCMAX} (1 + \varepsilon_{PC})$$

Izločanje in nadomeščanje



Vsebina

Uvod in teorija o senzorjih tlaka

Senzorji tlaka za avtomobilske aplikacije

Postopki umerjanja senzorjev tlaka

Optimizacija postopka umerjanja

Oprema za umerjanje senzorjev tlaka

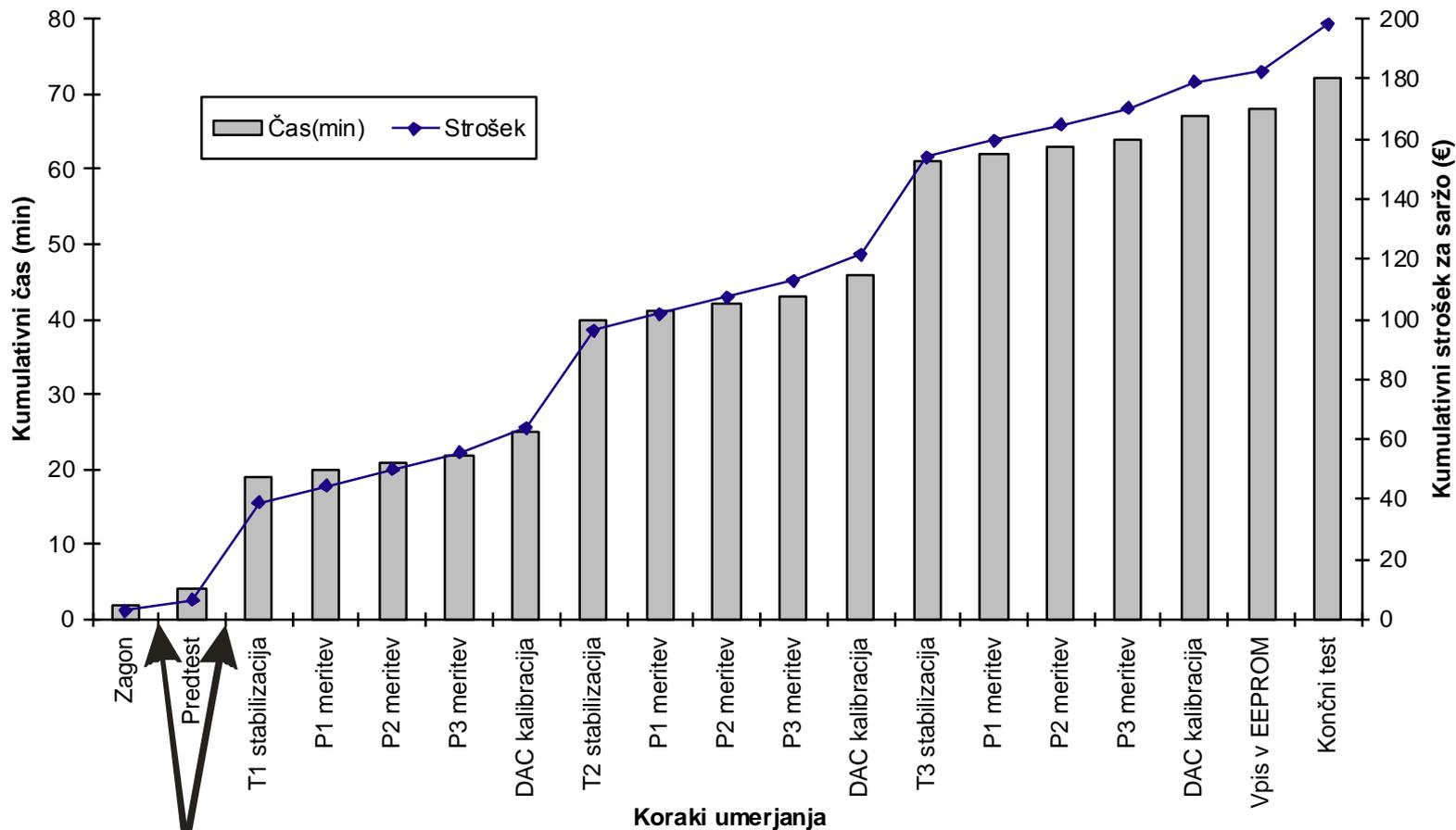
Rezultati, diskusija

Zaključki

Koraki umerjanja MAP senzorja

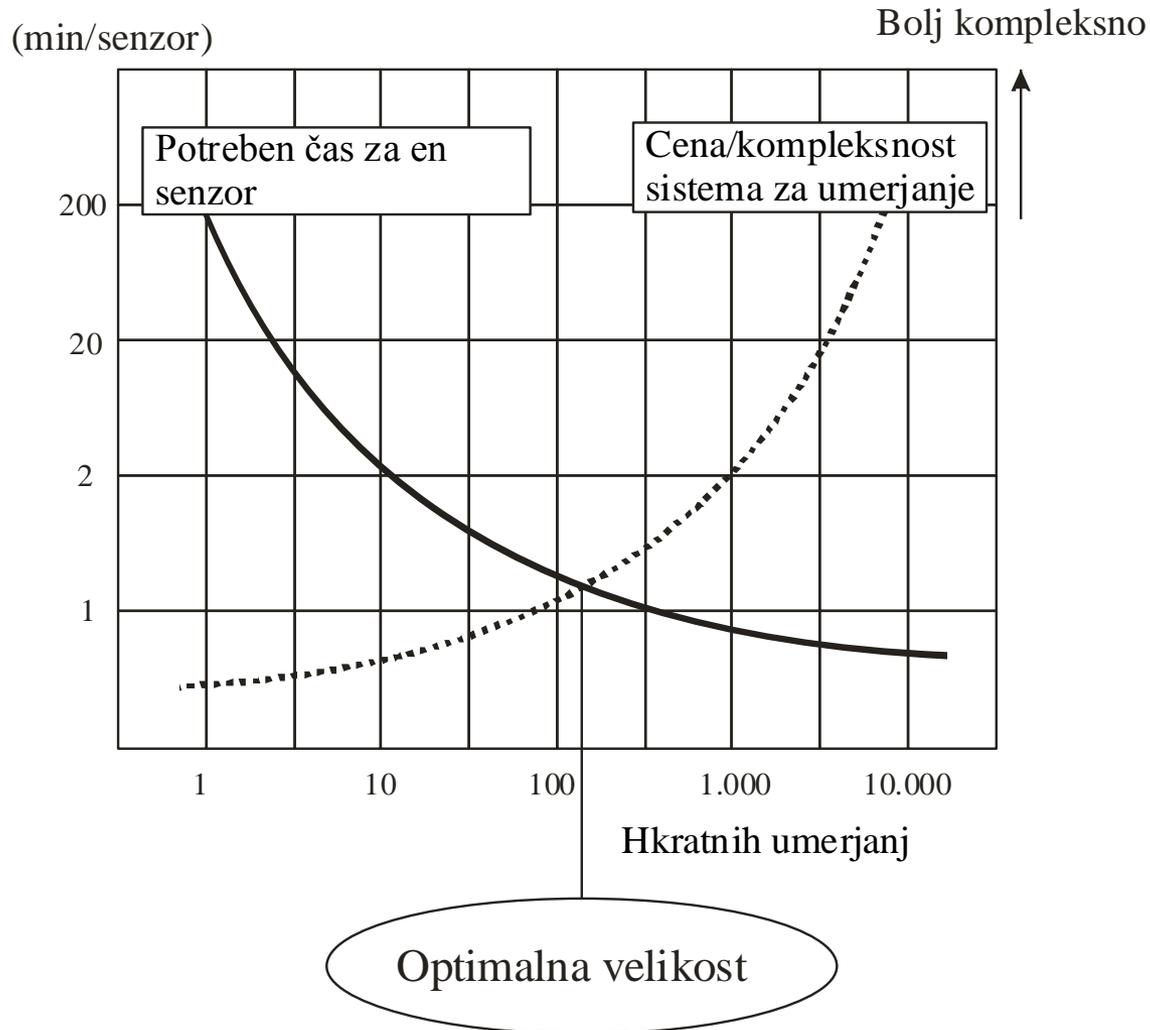
Številka koraka	Operacija	Potreben čas (min)
1	Začetna nastavitvev	2
2	Predtest	2
3	Stabilizacija pri T_1	15
4	Meritev pri p_1	1
5	Meritev pri p_2	1
6	Meritev pri p_3	1
7	Kalibracija DAC	3
8	Stabilizacija pri T_2	15
9	Meritev pri p_1	1
10	Meritev pri p_2	1
11	Meritev pri p_3	1
12	Kalibracija DAC	3
13	Stabilizacija pri T_3	15
14	Meritev pri p_1	1
15	Meritev pri p_2	1
16	Meritev pri p_3	1
17	DAC kalibracija	3
18	Vpis v trajni spomin	1
19	Končni test	4

Primeren trenutek

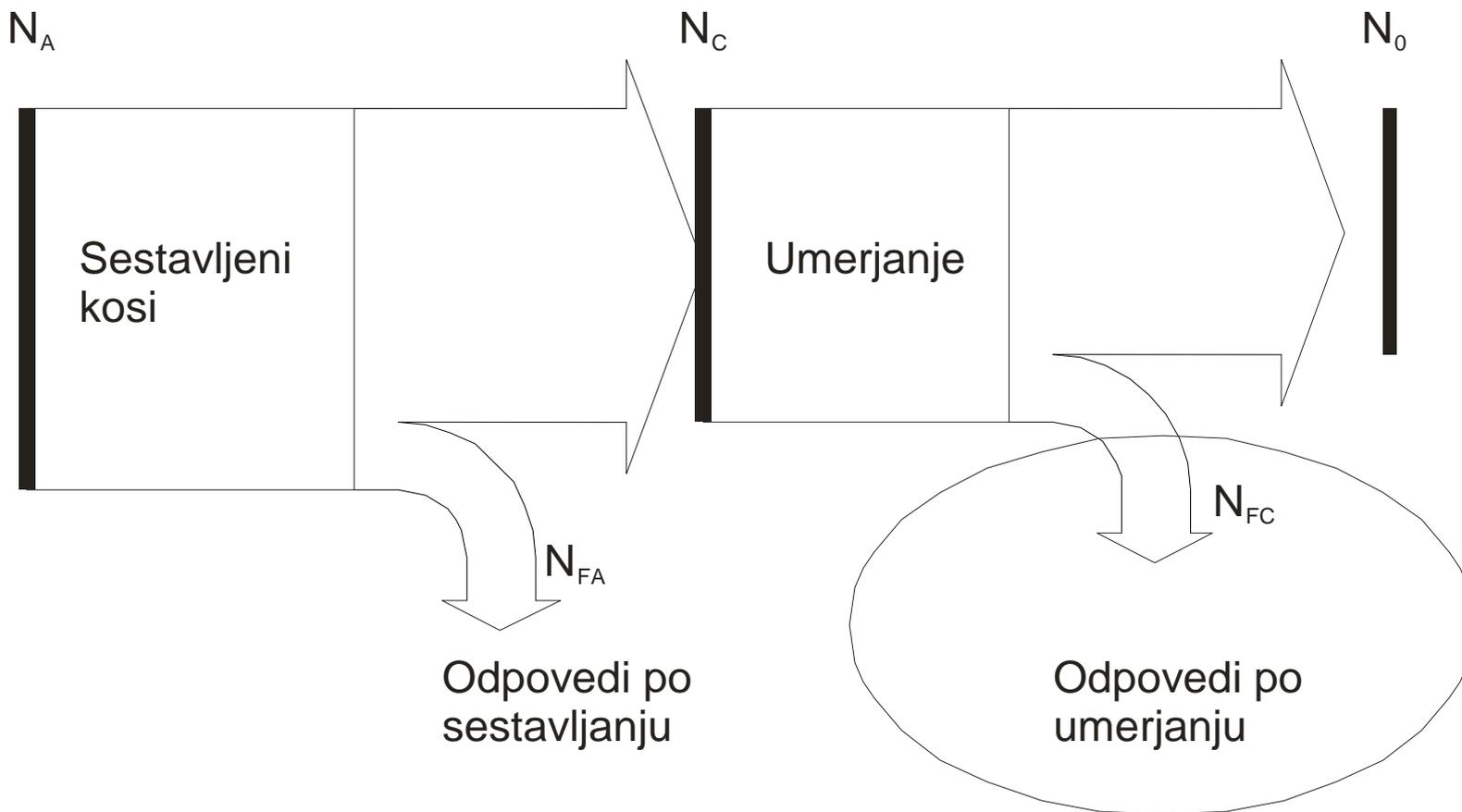


Dva možna trenutka za izvajanje n aprednega predtesta

Optimizacija postopka



Učinkovitost



Vsebina

Uvod in teorija o senzorjih tlaka

Senzorji tlaka za avtomobilske aplikacije

Postopki umerjanja senzorjev tlaka

Optimizacija postopka umerjanja

Oprema za umerjanje senzorjev tlaka

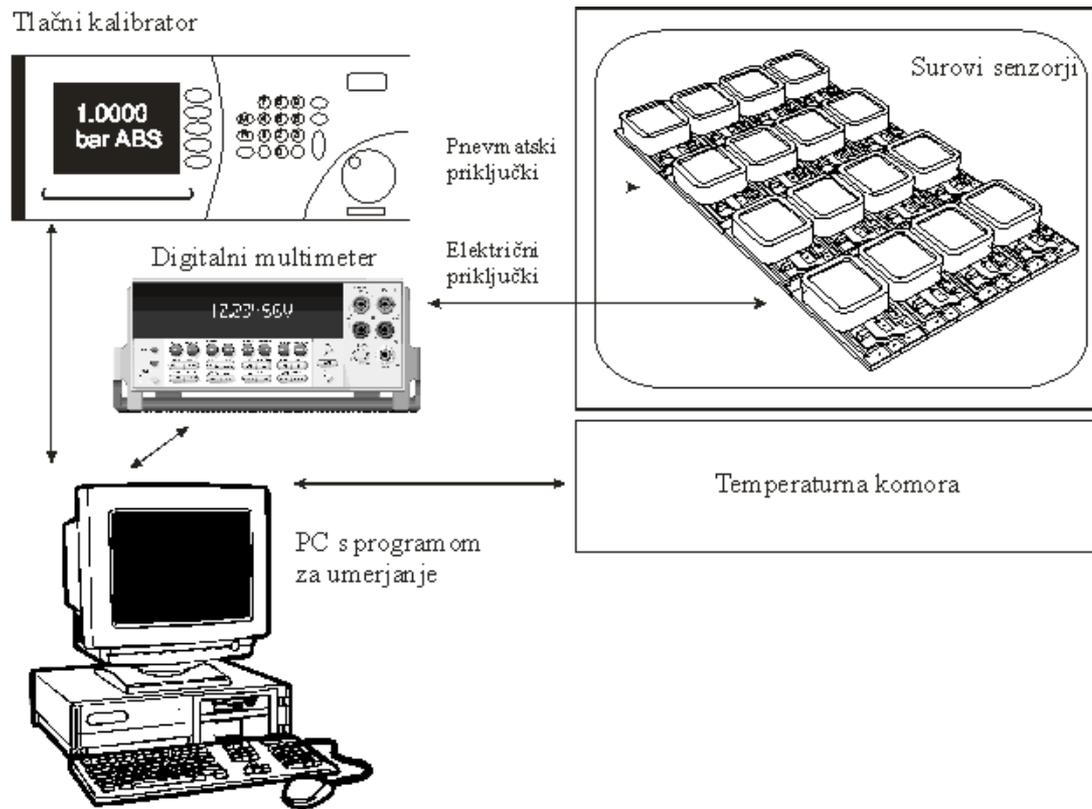
Rezultati, diskusija

Zaključki

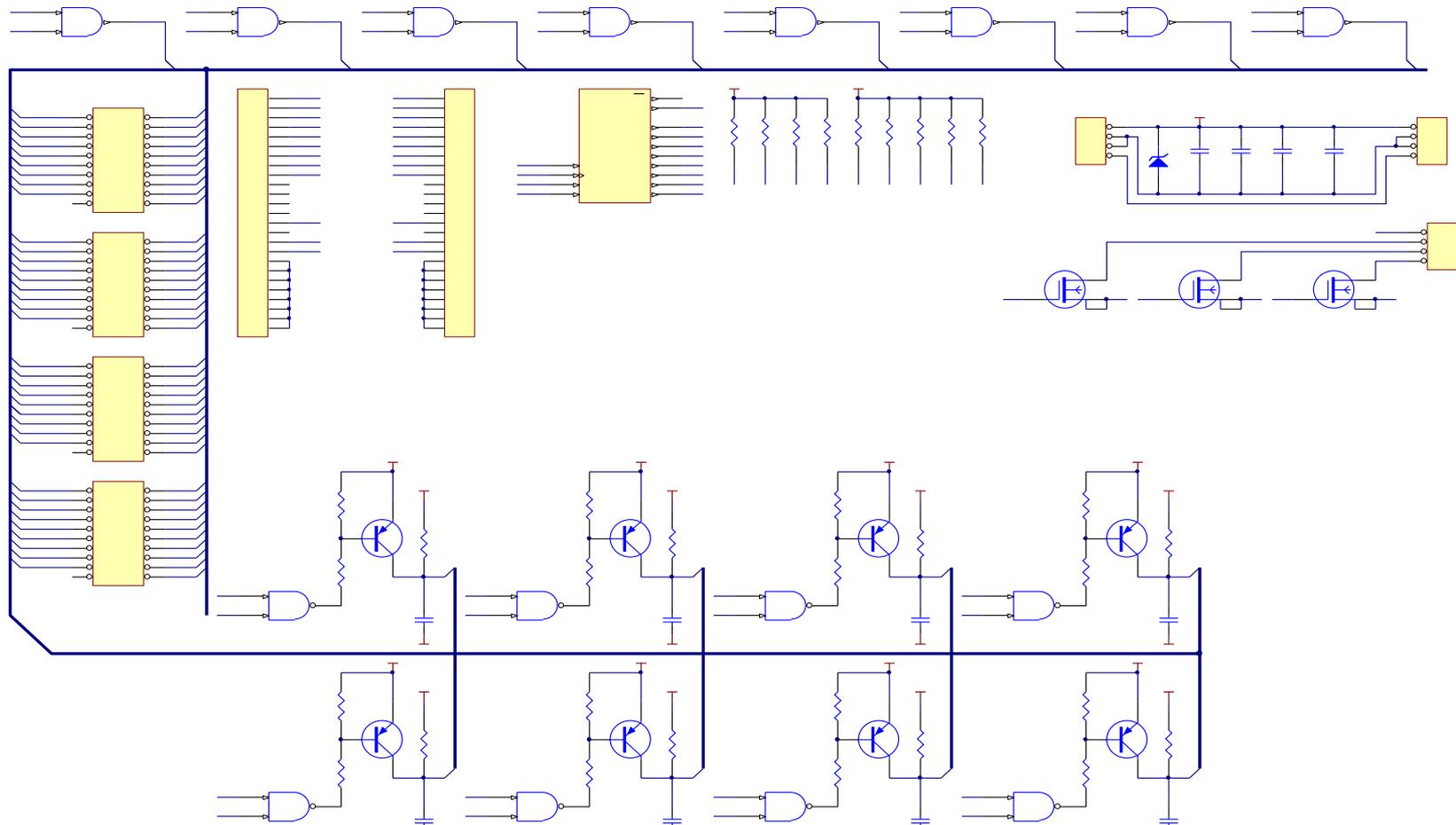
Potrebna oprema

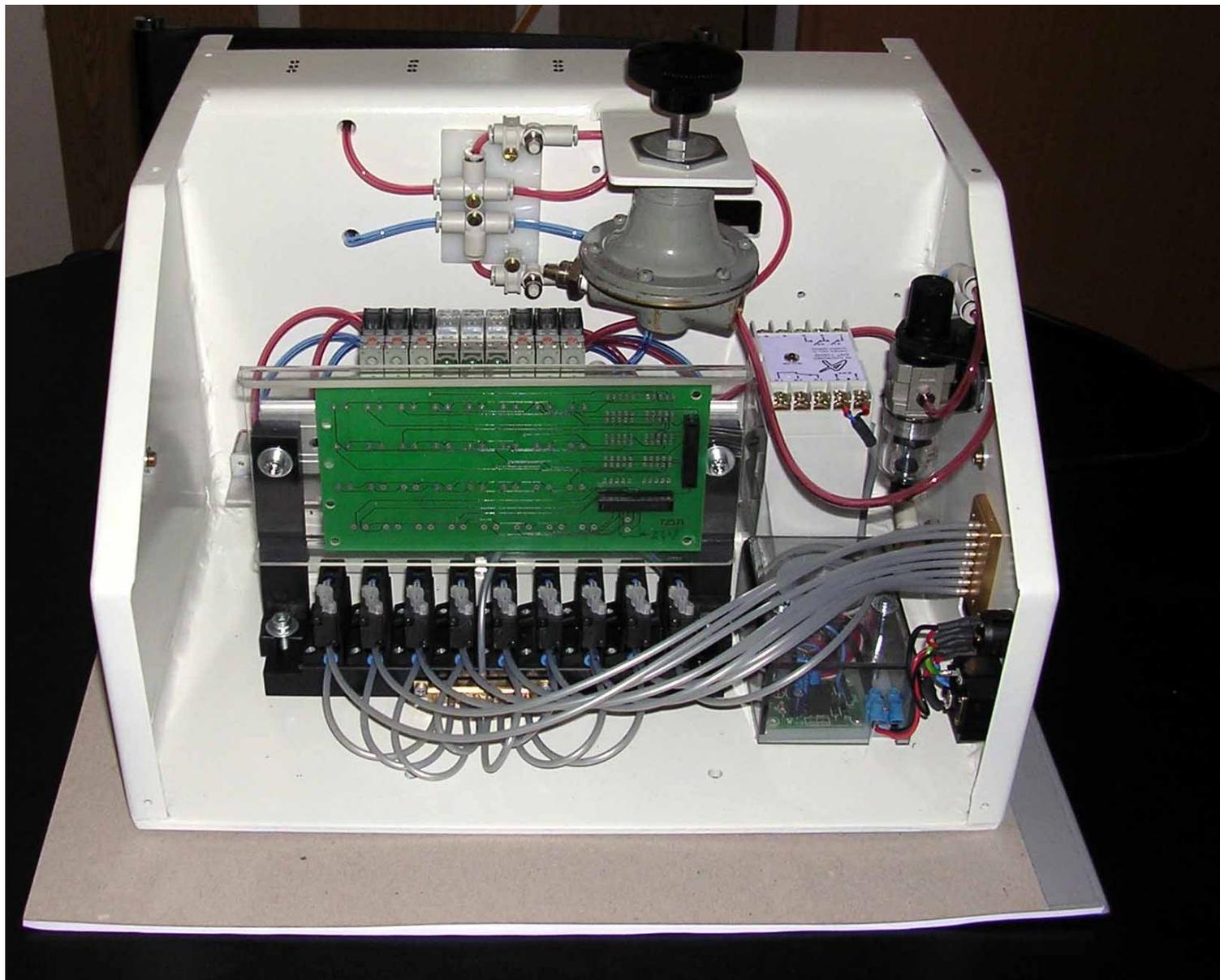
- Vir tlaka
- Temperaturna komora
- Vmesnik za komunikacijo med MAP in PC
- Več kanalni digitalni multimeter
- Digitalni vmesnik za hitri test
- Pnevmatška in električna priklopna mesta
- Programska oprema za zajem meritev, izračun, shranjevanje in vpis rezultatov

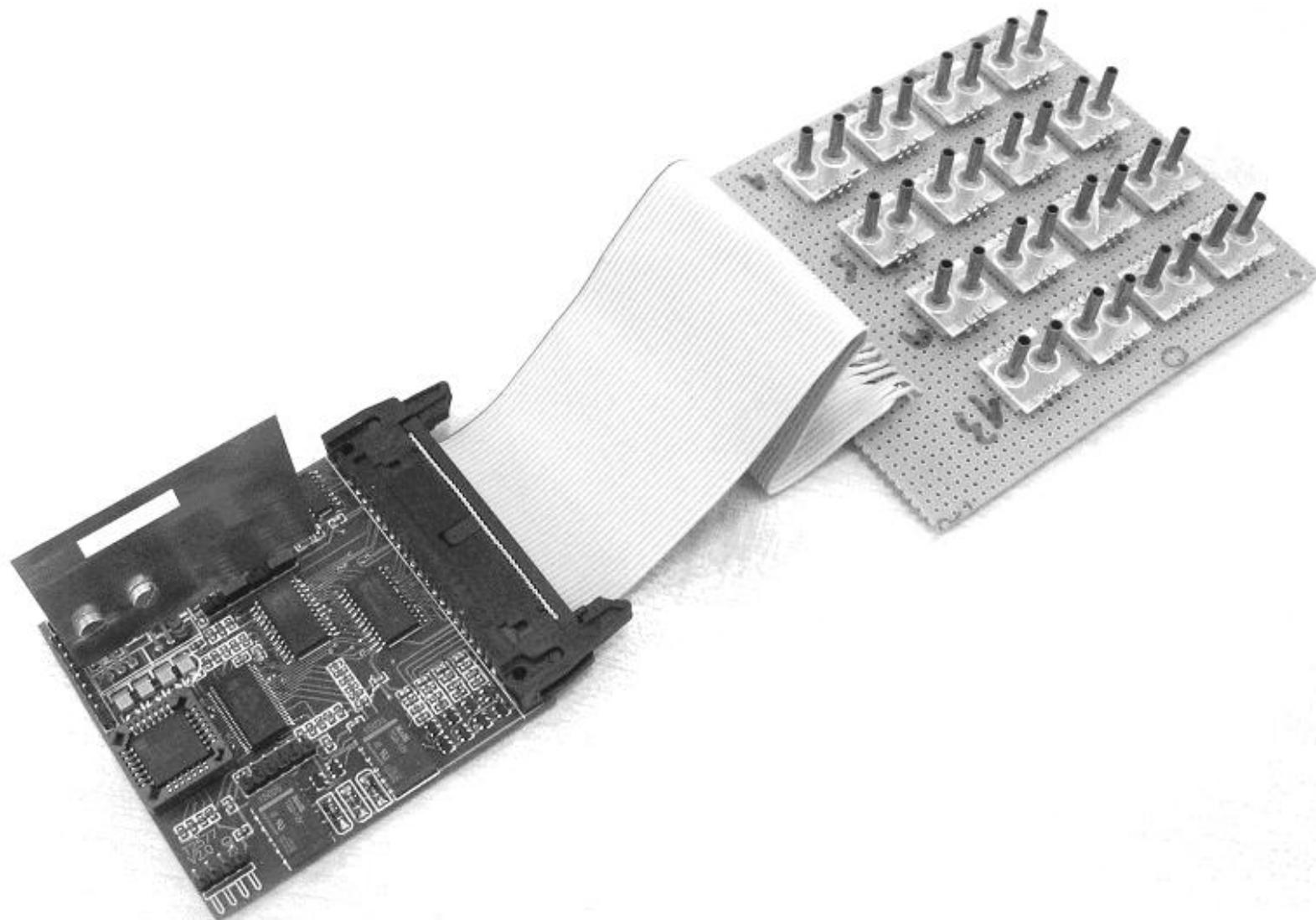
Oprema za umerjanje MAP senzorjev

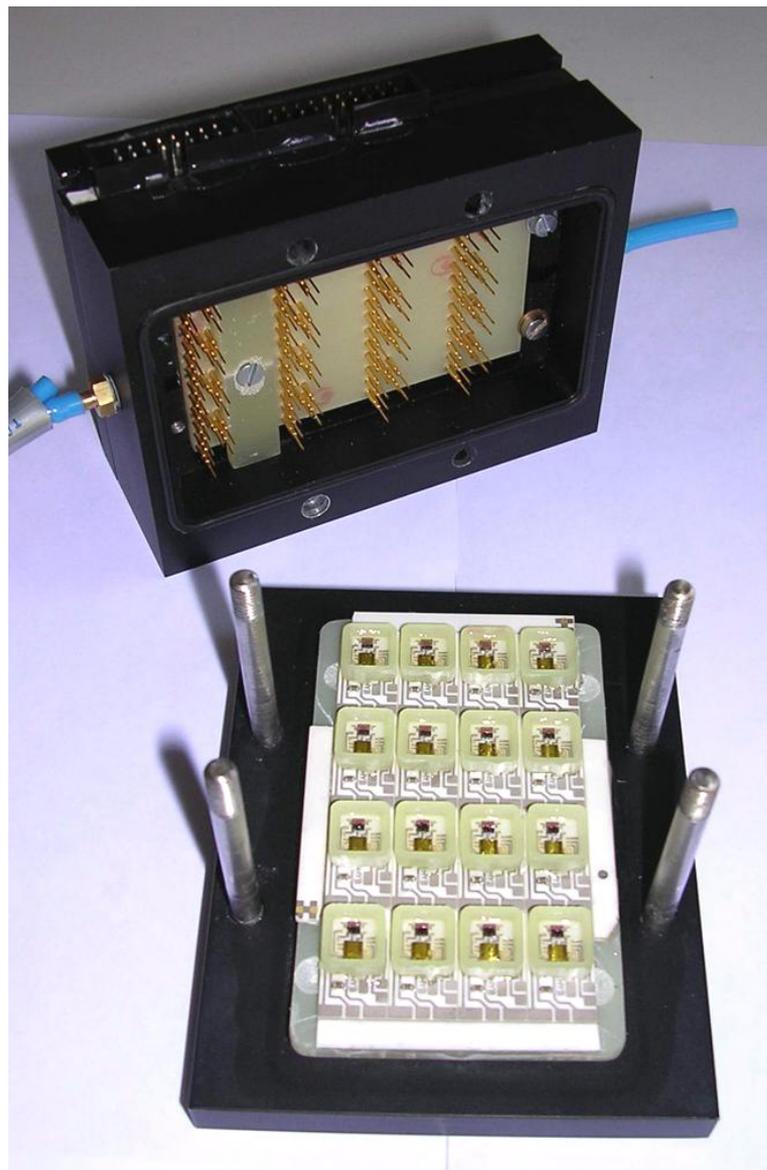


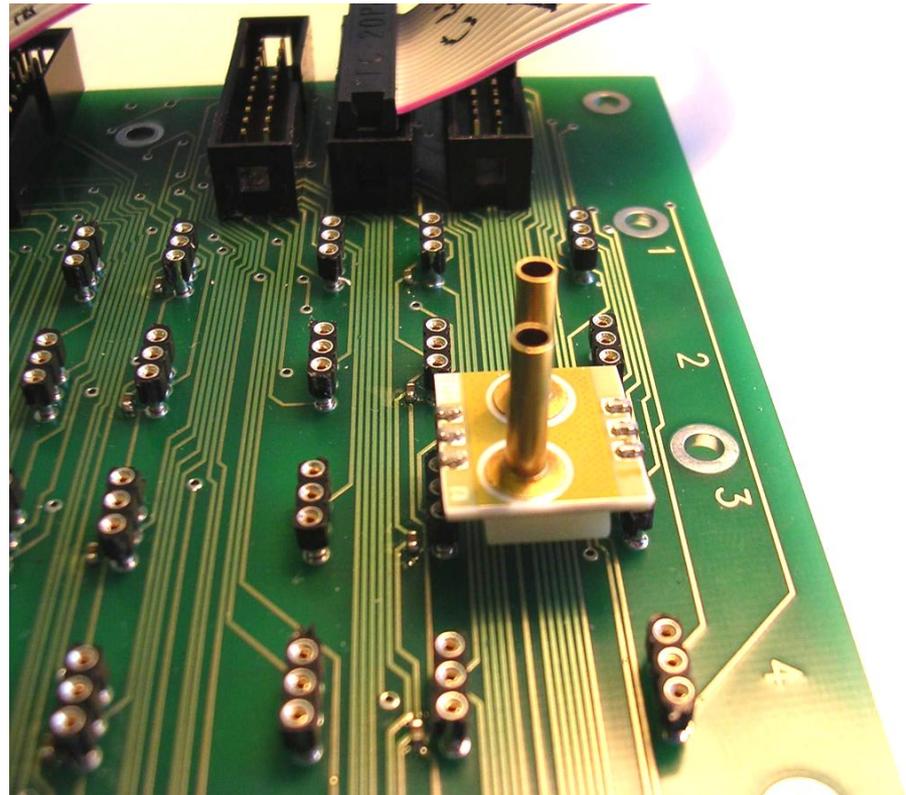
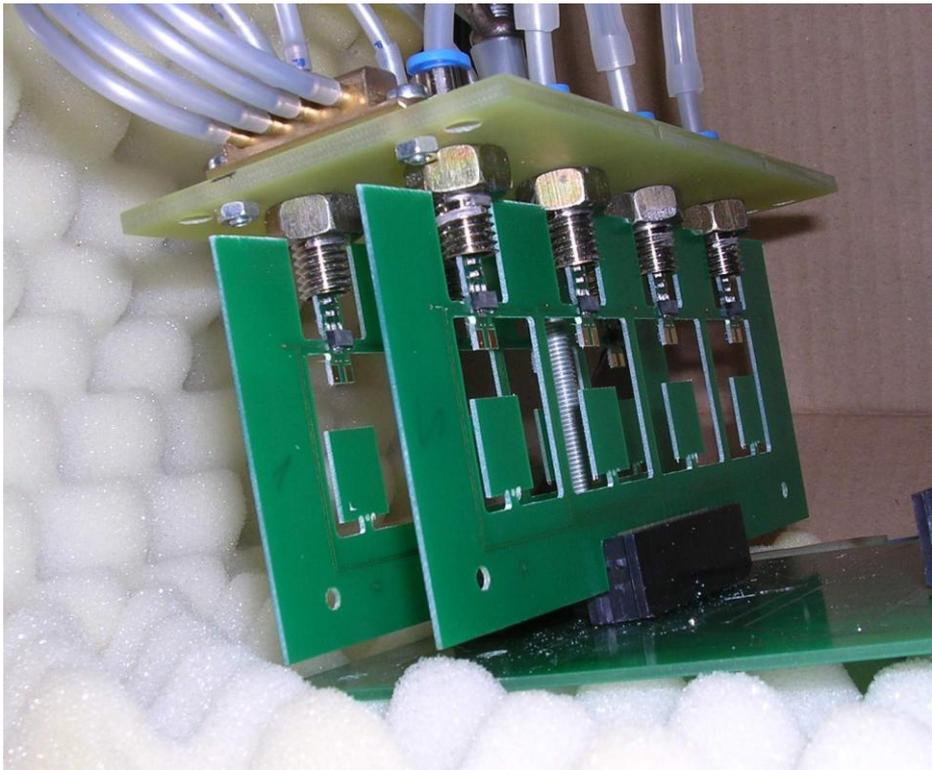
Oprema za umerjanje in testiranje













Vsebina

Uvod in teorija o senzorjih tlaka

Senzorji tlaka za avtomobilske aplikacije

Postopki umerjanja senzorjev tlaka

Optimizacija postopka umerjanja

Oprema za umerjanje senzorjev tlaka

Rezultati, diskusija

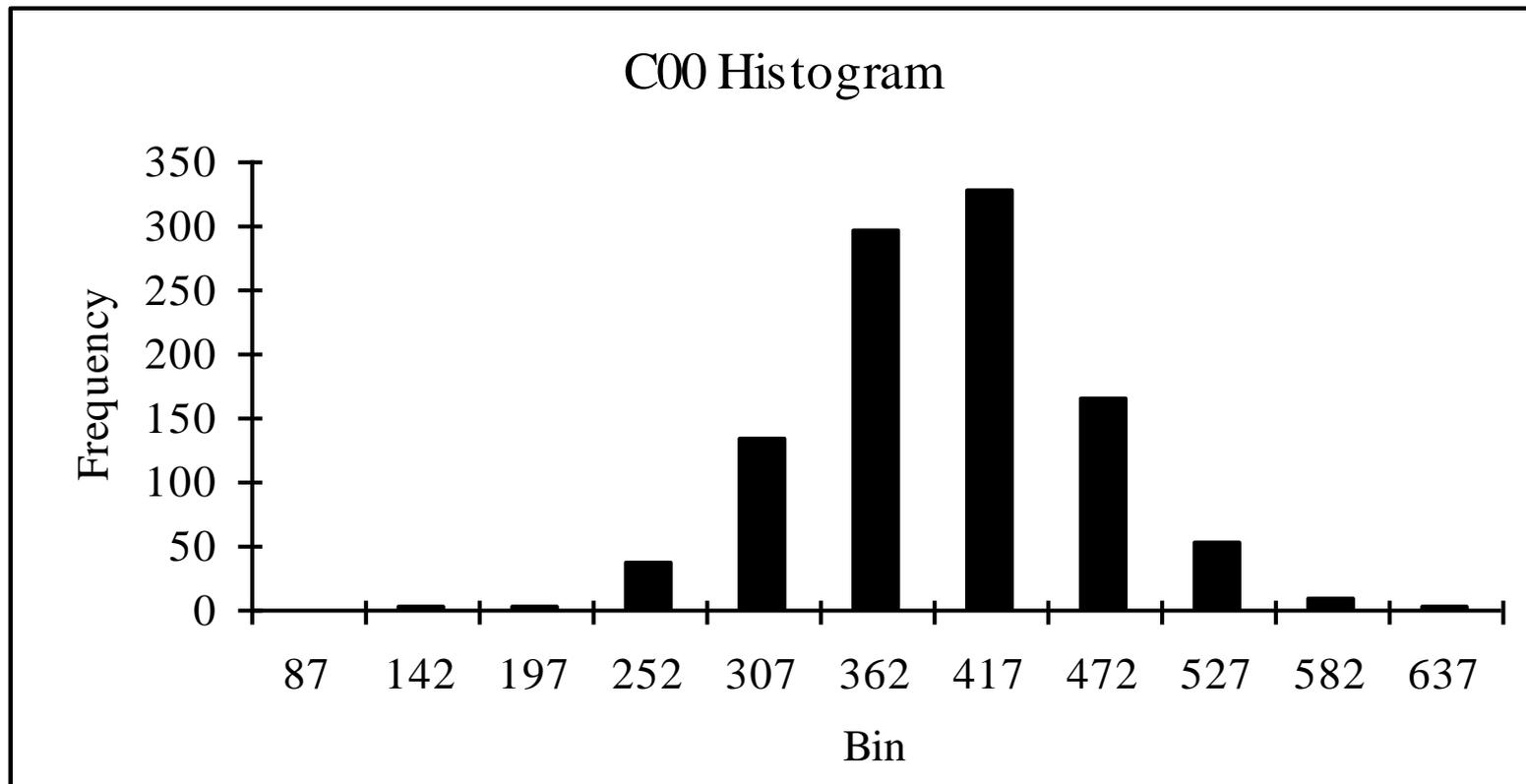
Zaključki

Rezultati

■ Ničelna serija

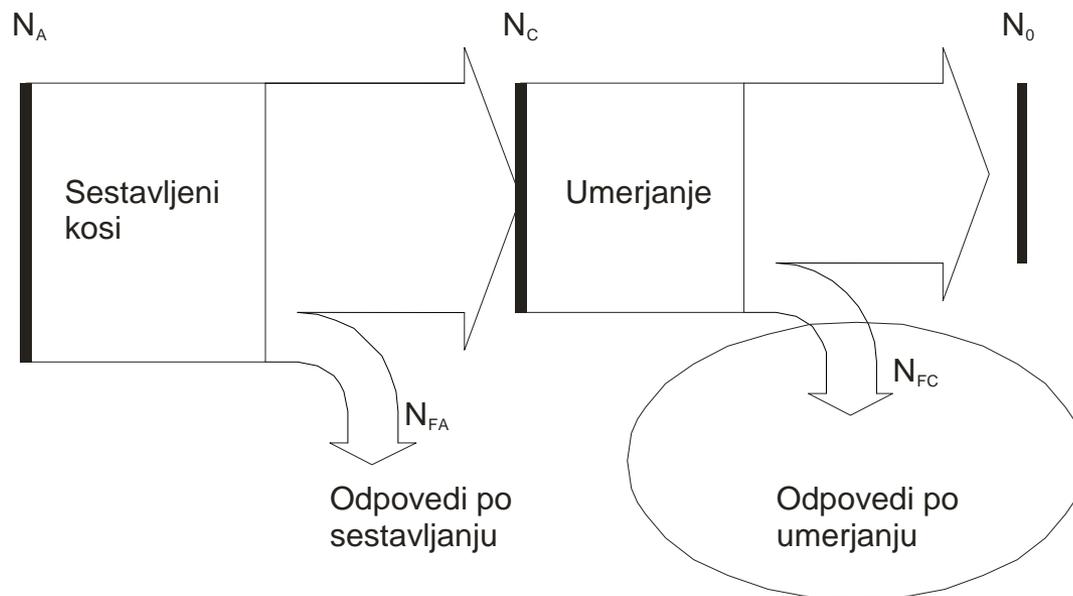
	C_{00}	C_{01}	C_{02}
<i>Povprečje</i>	369.37	1870.61	1169.02
<i>Standardna deviacija</i>	2.10	3.21	2.53
<i>Varianca vzorca</i>	4548.01	10622.37	6602.36
<i>Obseg</i>	550	708	632
<i>Maksimum</i>	637	2217	1477
<i>Minimum</i>	87	1509	845

Histogram koeficientov



Izmet ničelne serije

- Vseh: $N_A = 1088$
- Funkcionalni predtest: $N_F = 11$
- Po umerjanju: $N_{FC} = 43$



$$Y_A = 100\% - \frac{N_{FC}}{N_A - N_F} = 96\%$$

Analiza izvedljivosti napredne metode s simulacijo na ničelni seriji

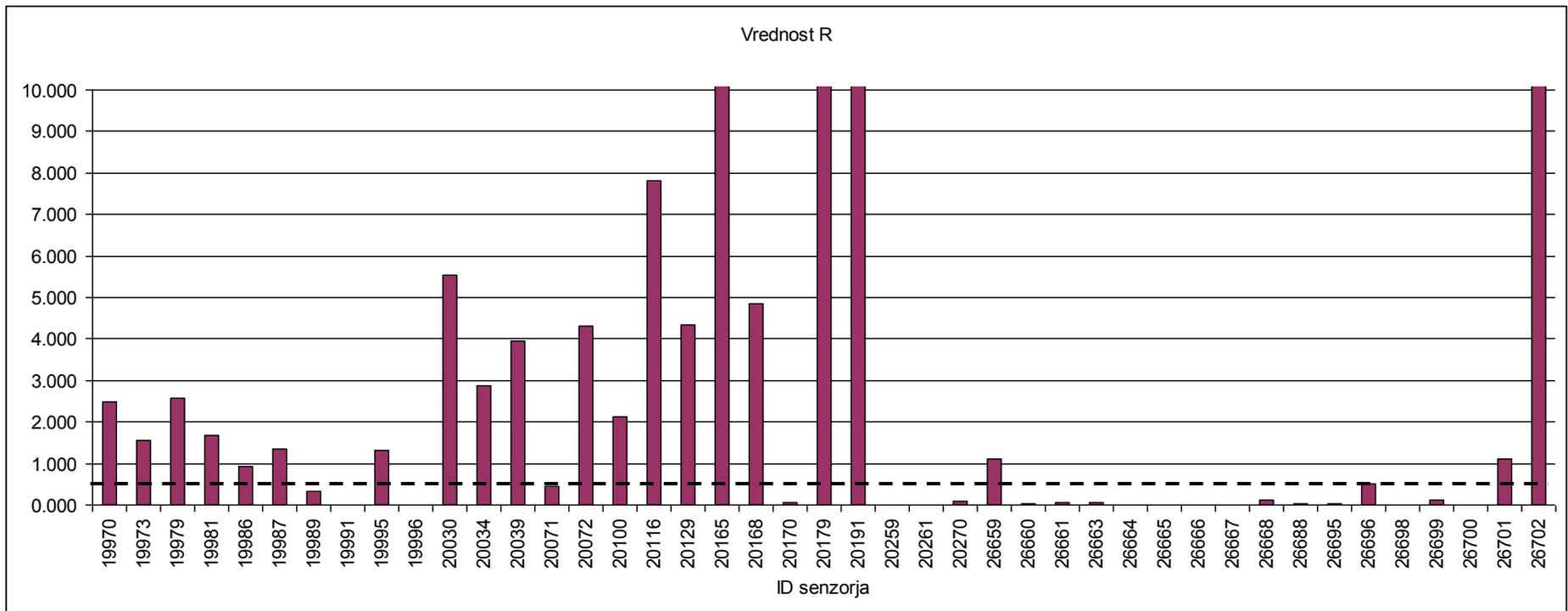
- Simulacija korelacijskega kriterija
 - Med 43 izločenih še 22 (za 50% manj izmeta)
- Simulacija kriterija ujemanja
 - Med 43 izločenih še 13 slabih
- Oba kriterija se prekrivata
 - Povečanje izkoristka (simulacija):

Iz 96% na 99,2%

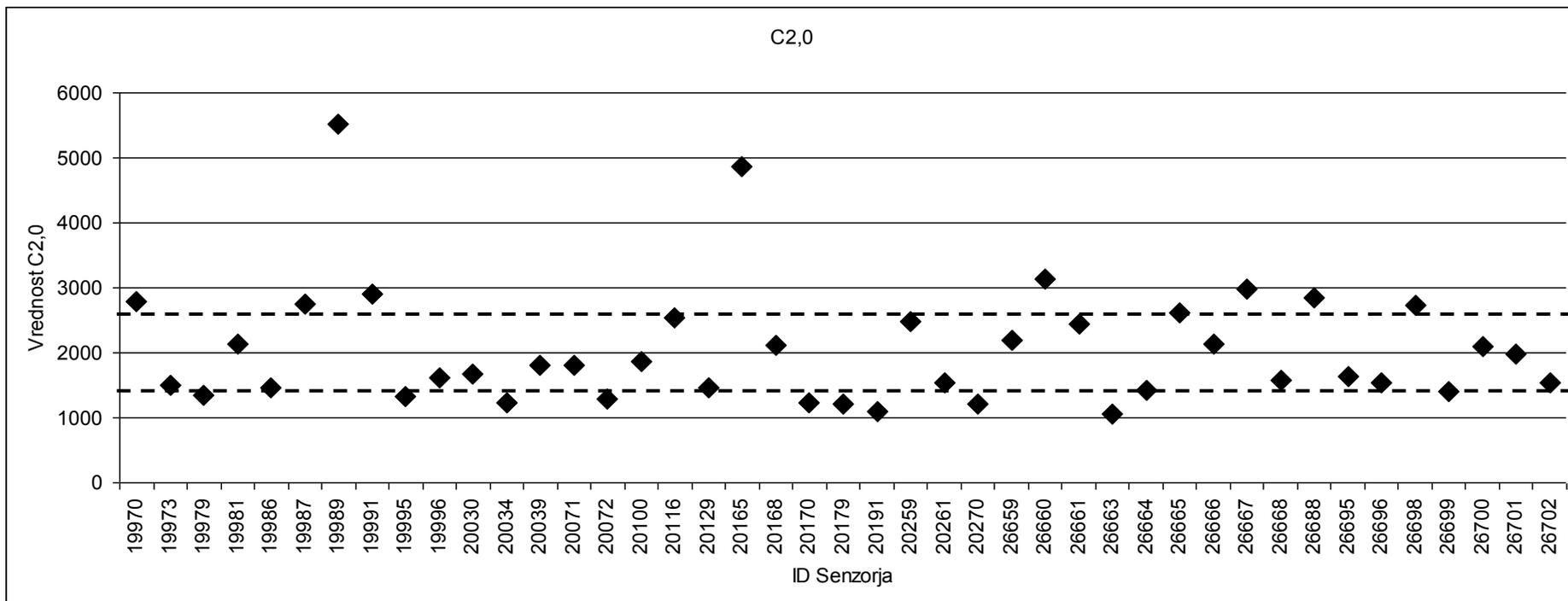
Simulacija – rezultati kriterija korelacije (22 od 43)

- Zaradi nazornejšega prikaza uporabimo:

$$R(C_R, C_{PCX}) = 1000 [1 - r(C_R, C_{PCX})]$$



Simulacija – rezultati kriterija ujemanja (13 od 43)



Vsebina

Uvod in teorija o senzorjih tlaka

Senzorji tlaka za avtomobilske aplikacije

Postopki umerjanja senzorjev tlaka

Optimizacija postopka umerjanja

Oprema za umerjanje senzorjev tlaka

Rezultati, diskusija

Zaključki

Zaključki analize na ničelni seriji (1088 kos)

- Samo s preprostim predtestom lahko izločimo 96 % slabih senzorjev pred postopkom umerjanja.
- Uporaba naprednega postopka izločanja poveča delež izločenih slabih senzorjev na 99,2 %

Časovna analiza

- Nov postopek doda v povprečju:
940ms po izdelanem dobrem kosu
- Dodatna zakasnitev je zanemarljiva v primerjavi s sicer potrebnimi časi

Izboljšave

- Povratna zveza za samoučenje in sprotno nastavljanje kriterijev
- Boljše metode razvrščanja in postavljanja kriterijev
- Upeljava takih postopkov v začetnejše faze, s čimer še bolj zgodaj odstranimo vzroke za izmet

Zaključek

- Večji izkoristek proizvodnega procesa pomeni manjše stroške
- Za izkoristke, ki so blizu 100 %:
 - Čim boljši pogoji in kakovost v proizvodnji
 - Stalne izboljšave
 - Naprednejši prijemi
- Uporaba naprednega predtesta pri izdelavi 13832 senzorjev je omogočila **99,1 %**
- Brez uporabe naprednega predtesta bi bil le **93,4 %**

Zahvala

Ime	Zaposlen	Vrsta pomoči
prof. dr. Franc Novak	IJS	»Pograbik« osnovno idejo usmerjal skozi celotno delo konstruktivno priganjanje
Janez Gramc	HYB d.o.o.	Ves čas bil pripravljen poslušat »nore« ideje in podati koristna mnenja
Boštjan Hudoklin	HYB d.o.o.	Priprava vzorcev Pomoč pri izvajanju in pripravi meritev pregled merilnih rezultatov
Matej Možek	FELJ	Potrditev osnovnih idej koristni nasveti okrog umerjanja avtor kalibracijske programske opreme in elektronike pomagal pri matematičnih modelih
Slavko Klobučar	HYB d.o.o.	Sestavil module za kalibracijo sestavil in preizkusil univerzalni kalibracijski modul
Sandi Kocjan	HYB d.o.o.	Koristni napotki skozi celotno delo
dr. Marina Santo Zarnik	Hipot RR	Simulacija lepljenja tabletk
dr. Uroš Mali	Silica	Za dobavo brezplačnih vzorcev pri izdelavi modulov za umerjanje
Rehar Tomaž		
Franc Urbanč	ARM Slovenia	Pomoč pri razvoju RTOS aplikacije za kalibracijske module
Robi Rostohar		Pomoč pri razvoju programske opreme za ARM7, ko se je zataknilo pri USB povezovanju
Darja Vrevc Pavlin		Mi je stala ob strani, tudi ko sem že sam obupoval