

Marko Pavlin

Povečanje izkoristka pri proizvodnji senzorjev tlaka za avtomobilske aplikacije

Magistrsko delo

**Yield enhancement of piezoresistive pressure
sensors for automotive applications**

Master thesis

Mentor: prof. dr. Franc Novak

Somentor: -

Junij 2007

MEDNARODNA PODIPLOMSKA ŠOLA JOŽEFA STEFANA
JOŽEF STEFAN INTERNATIONAL POSTGRADUATE SCHOOL
Ljubljana, Slovenia



Kazalo

Povzetek.....	VII
Abstract	VIII
Seznam kratic.....	IX
1 Uvod.....	11
2 HYB.....	13
3 Teorija	14
3.1 Senzorji tlaka	14
3.2 Tlak	14
3.3 Silicijevi piezouporovni senzorji tlaka.....	15
3.4 Karakteristike senzorjev tlaka.....	17
3.4.1 Prenosna funkcija	17
3.4.2 Vhodni razpon (polni vhodni obseg)	17
3.4.3 Izhodni razpon (polni izhodni obseg).....	17
3.4.4 Točnost	18
3.4.5 Kalibracija in umerjanje	19
3.4.6 Napaka kalibracije	19
3.4.7 Histereza	19
3.4.8 Nelinearnost.....	20
3.4.9 Zasičenje in omejitev izhodne vrednosti	21
3.4.10 Ponovljivost	21
3.4.11 Ločljivost	21
3.4.12 Izhodna upornost.....	22
3.4.13 Dinamična karakteristika	22
3.5 Metode umerjanja senzorjev tlaka	22
3.5.1 Topologije umerjanje senzorjev	23
3.5.2 Analogna vezja za umerjanje.....	24
3.5.2.1 Analogna pasivna temperaturna kompenzacija mostičnega senzorja tlaka.....	24
3.5.2.2 Analogni ojačevalniki za mostične senzorje tlaka	26
3.5.3 Digitalna vezja za umerjanje z analognimi signali	27
3.5.3.1 Temperaturna kompenzacija	28
3.5.3.2 Kompenzacija nelinearnosti	28
3.5.3.3 Primer vezja	29
3.5.4 Popolnoma digitalna vezja za umerjanje	30
3.5.4.1 Napetostni regulator	31
3.5.4.2 Oscilator.....	31
3.5.4.3 AD in DA pretvorniki	31
3.5.4.4 Mikrokrumilnik	32
3.6 Algoritmi digitalnega umerjanja senzorjev tlaka	32
3.6.1 Splošen model umerjanja.....	32
3.6.2 Implementacija modela.....	33
3.6.3 Postopek umerjanja MAP senzorja.....	33
3.6.3.1 Izračun koeficientov digitalnega umerjanja	34

3.6.3.2 Postavitev opreme za umerjanje.....	35
3.6.3.3 Scenarij umerjanja	36
3.6.3.4 Časovna opredelitev postopka umerjanja.....	37
4 Oprema za umerjanje senzorjev tlaka	38
4.1 Vir tlaka	38
4.2 Temperaturna komora.....	38
4.3 Vmesnik za komunikacijo.....	38
4.3.1 Digitalni vmesnik za umerjanje.....	38
4.3.2 Digitalni vmesnik za hitri test.....	42
4.3.2.1 Povezovanje.....	43
4.3.2.2 Merjenje napetosti.....	43
4.4 Digitalni merilnik napetosti	43
4.5 Kalibracijska komora	43
5 Merjenci	45
5.1 Senzorji tlaka za avtomobilske aplikacije.....	45
5.2 MAP senzor	45
5.2.1 Vezje za digitalno umerjanje	47
5.2.2 Senzorska tabletka.....	47
5.3 Tehnološki koraki pri izdelavi MAP senzorja	49
5.3.1 Izdelava keramičnega substrata	49
5.3.2 Montaža komponent	50
5.3.3 Bondiranje	51
5.3.4 Zalivanje	51
5.3.5 Predtest	52
5.3.6 Umerjanje	52
5.3.7 Končni test.....	52
5.3.8 Montaža kontaktov in senzorja v ohišje	53
5.3.9 Končni hitri test.....	54
6 Postopki za povečanje izkoristka umerjanja	55
6.1 Posnetek obstoječega stanja	55
6.1.1 Podatkovna baza.....	55
6.1.2 Začetno stanje	56
6.2 Model izkoristka umerjanja	58
6.3 Običajen postopek predtesta	58
6.4 Izpopolnjen postopek predtesta.....	59
6.4.1 Določanje parametrov za predtest	60
6.4.2 Določanje referenčnih parametrov	61
6.5 Algoritem razvrščanja.....	61
6.5.1 Referenčna množica	62
6.5.2 Korelacijski koeficient.....	62
6.5.3 Korelacijski kriterij razvrščanja.....	63
6.5.4 Ujemanje vrednosti največjega koeficiente	63
6.5.5 Izločanje in nadomeščanje.....	63
7 Optimizacija postopka umerjanja	65
7.1 Optimalna velikost sistema za umerjanje.....	65
7.2 Stalno izboljševanje kriterija izločanja slabih senzorjev na osnovi samoučenja	67
7.3 Učinkovitost metod izločanja	67
7.4 Pospolitev postopka za izboljšanje izkoristka poljubnega proizvodnega procesa	68
8 Rezultati, diskusija	69
8.1 Ničelna serija	69

8.1.1 Rezultati običajnega predtesta	69
8.1.2 Analiza izvedljivosti napredne metode razvrščanja.....	71
8.1.2.1 Simulacija razvrščanja po korelacijskem kriteriju	71
8.1.2.2 Simulacija razvrščanja po kriteriju ujemanja vrednosti največjega koeficienta.....	73
8.1.2.3 Povzetek rezultatov ničelne serije.....	73
8.2 Redna proizvodnja	74
8.3 Časovna analiza	74
8.4 Izboljšave	74
9 Zaključki	76
10 Zahvala.....	77
11 Literatura in viri	78
12 Priloge.....	81
Kazalo slik	84
Kazalo tabel.....	87
Extended Abstract of Master's Degree	89



Povzetek

Prikazan je postopek izboljšanja izkoristka kalibracijskega procesa pri proizvodnji senzorjev tlaka za avtomobilske aplikacije. Osnovna ideja prikazanih postopkov je vpeljava dodatnega koraka, ki izloča potencialno slabe senzorje še preden nastopi dolgotrajen proces kalibracije. Dodatni korak je časovno zanemarljiv, obenem pa preprečuje, da ostala priključna mesta v kalibracijskem sistem neizkoriščena zaradi slabih senzorjev, ki vstopajo v proces kalibracije. Opisan algoritem razvrščanja temelji na iskanju korelacijskih faktorjev med karakteristiko opazovanega senzorja in posplošeno karakteristiko vseh dobrih senzorjev do nekega danega trenutka. Vrednosti referenčnih kriterijev, odločilnih pri ugotavljanju in izločanju potencialno slabih kosov se pri tem stalno prilagajajo glede na zgodovino rezultatov prehodno dobro izdelanih senzorjev. Podani so empirični rezultati iz realne proizvodnje senzorjev tlaka v podjetju HYB iz Šentjerneja. Rezultati ponazarjajo prednosti opisanih postopkov in izboljšanje izkoristka proizvodnih kapacetet pri izdelavi senzorjev tlaka.

Abstract

An approach of enhancing yield in the production of piezoresistive pressure sensors for automotive applications is described. The main idea is to introduce an advanced pre-check which sorts out potentially bad sensors before the actual calibration. The sorting algorithm is performed in two steps. In the first step, the linear correlation coefficient for the pre-checked sensor is calculated and compared to a margin initially estimated on the basis of the production first series and continuously adjusted during the mass production in accordance with the quality management strategy. In the second step, the actual values of coefficients of the pre-checked sensor are compared with the values of the reference coefficients. Both conditions must be met to enter the evaluated sensor in the calibration procedure. Empirical data from sensor production are given to illustrate the advantage of the described approach.



Seznam kratic

AD	=	Analog-to-Digital
ADC	=	Analog-to-Digital Converter
ASIC	=	Application Specific Integrated Circuit
BFSL	=	Best Fit Straight Line
DA	=	Digital-to-Analog
DAC	=	Digital-to-Analog Converter
EEPROM	=	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
FS	=	Full Scale
FSO	=	Full Scale Output
GMP	=	Good Manufacturing Practice
GPIB	=	General Purpose Interface Bus
IEEE	=	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIC (I ² C)	=	Inter-IC Bus
ISO	=	International Standards Organization
LPT	=	Line Printer Port
MAP	=	Manifold Air Pressure
OWI	=	One Wire Interface
PGA	=	Programmable Gain Amplifier
RAM	=	Random Access Memory
ROM	=	Read Only Memory
TEDS	=	Transducer Electronic Data Sheet

MPS

1 Uvod

Sodobna proizvodnja zahteva izbor takih tehnologij, kjer so kapacitete kar najbolj izkoriščene. Pri proizvodnji senzorjev tlaka to predstavlja zelo velik izziv, saj se karakteristike komponent senzorja tlaka med seboj precej razlikujejo. Izkoriščenost proizvodnje je v veliki meri odvisna od zaznavanja in odpravljanja ponavljajočih mehanizmov odpovedi. Na preprost način lahko izkoristek proizvodnje definiramo kot količnik števila izdelkov, ki jih lahko prodamo in števila izdelkov, ki jih lahko izdelamo. Da dobimo dejanski izkoristek moramo upoštevati število delujočih in zanesljivih izdelkov, ki jih zapakiramo in podamo, od katerega odštejemo vse zanesljivo dobre izdelke, ki so bili zavrnjeni med postopki testiranja in ga deliti s številom vseh proizvedenih kosov [A1]. Izboljševanje izkoristka je eno od ključnih strateških usmeritev *International Technology Roadmap for Semiconductors* [A2]. Koncept stalnega izboljševanja je osnovan na postopkih spoznavanja proizvodnega procesa. Stalne izboljšave dosežemo z identifikacijo in prepoznavanjem sistematičnih in naključnih dogodkov v proizvodnem procesu. Večina objavljenih in priznanih postopkov je osredotočena na proizvodnjo polprevodnikov, kljub temu pa lahko uporabljene koncepte posplošimo do te mere, da jih vpeljemo v poljubni proizvodni proces.

Senzorje srečamo na vsakem koraku, v industrijski, hišni in okoljski avtomatizaciji, avtomobilski industriji, gradbeništvu, prometu in mnogih drugih področjih. Načrtovanje senzorjev, njihova proizvodnja in podatki o izkoristkih proizvodnih kapacitet so velikokrat objavljana tema. Zelo malo pa je poročil o postopkih izboljšanja proizvodnega izkoristka.

V pričujočem delu smo osredotočeni na proizvodnjo senzorjev tlaka. Pri tem se moramo najprej vprašati, kako je s časovno razporeditvijo posameznih proizvodnih korakov. Povsem nesmiselno je namreč izboljševati izkoristek nekega proizvodnega koraka, ki pomeni samo nekaj odstotkov celotnega časa proizvodnje enega izdelka. Izdelava senzorja tlaka ima en sam ključen in časovno dolgotrajen korak in to je postopek kalibracije. Vsi ostali postopki so ali narejeni v zelo kratkem času, ali pa se jih da peljati vzporedno na množici kosov. Primer proizvodnega koraka, ki traja zelo malo časa (na en kos) je npr. polaganje senzorskih tabletk na substrat, kjer stroj položi 3000 tabletk na uro. Primer, kjer postopek poteka vzporedno je pa npr. transport substratov s senzorji, kjer v nekaj minutah prenesemo množico (ali kar celo saržo) iz enega delovnega mesta na drugega, ali od naprave do naprave, seveda kjer transport ni avtomatiziran.

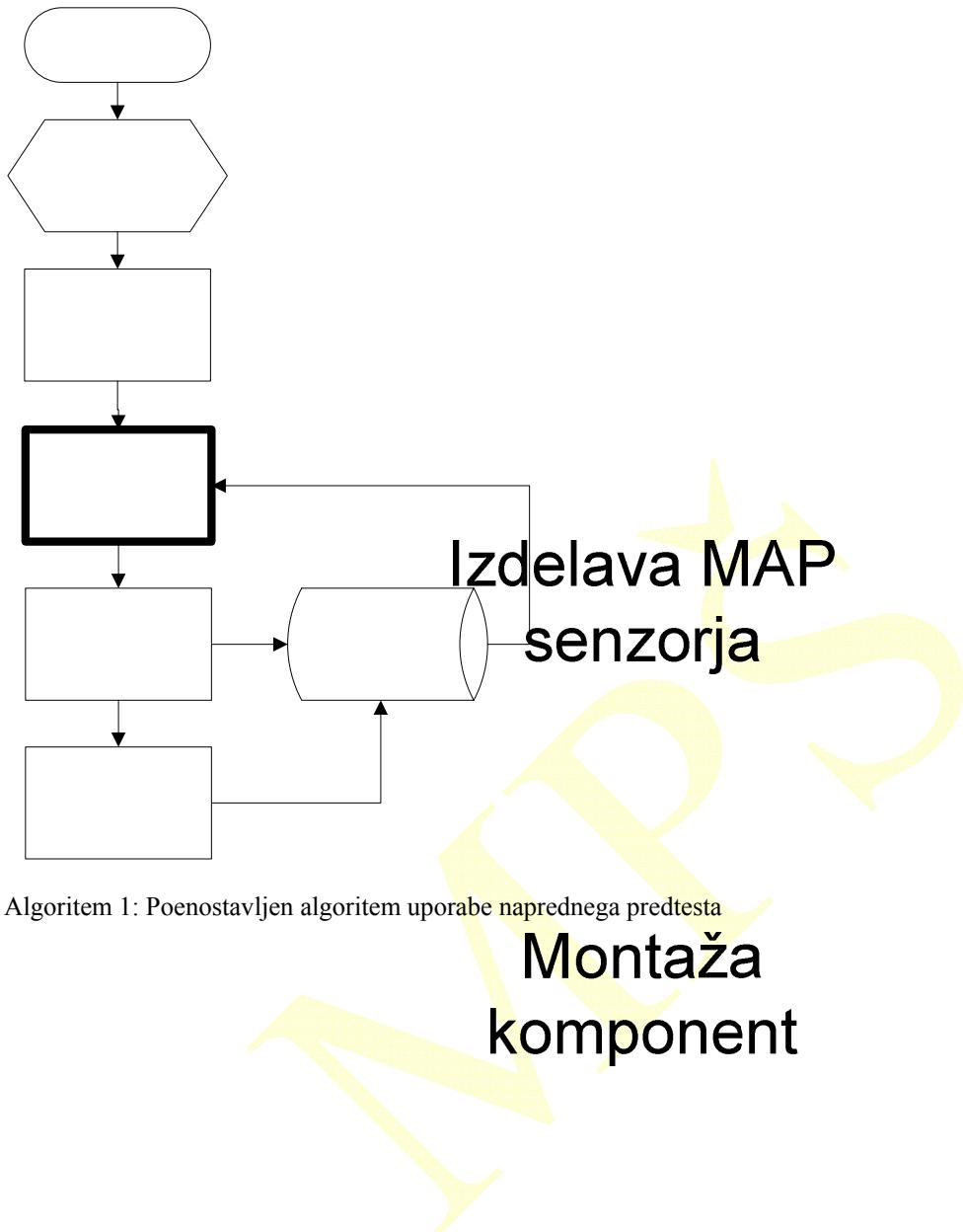
Postopek kalibracije pa je v proizvodnji vsakega senzorja tlaka zelo dolgotrajen proces. Med kalibracijo je vsak senzor izpostavljen zunanjim vplivom delovne veličine (v našem primeru tlaku) in veličine, ki vnaša napako v karakteristike končnega izdelka (v našem primeru temperatura). Kalibracijski postopek zahteva izvajanje meritev pri več tlačnih in temperaturnih točkah. Zlasti temperaturne točke znajo biti časovno potratne, saj moramo pri spremembi temperature počakati stabilne razmere, to pa lahko traja tudi nekaj 10 minut ali včasih celo več kot uro.

Če upoštevamo dejstvo, da večino proizvodnega časa porabimo pri kalibraciji, lahko zaključimo, da bo izboljšanje izkoristka kalibracijskega sistema pomenila opazno izboljšanje celotnega proizvodnega izkoristka. Vsak kalibracijski sistem za senzorje tlaka deluje tako, da je množica senzorjev priključenih na instrumentarij preko nekih vmesnikov. Končno število priključnih mest skupaj s senzorji je postavljeno v notranjost komore, ki nadzoruje temperaturo okolice kalibriranih senzorjev. Volumen komore in kompleksnost priklopa senzorjev narekuje kakšno število senzorjev bomo umerjali naenkrat. Zaradi dolgotrajnosti postopkov umerjanja bi bilo bolje, da imamo priključnih mest čimveč, po drugi strani pa lahko kompleksnost celotnega sistema naraste nad vsako mejo praktičnosti in s tem nič ne pridobimo, pa še cena celotnega sistema skokovito naraste.

Vsak senzor, ki ga umerjamo in po tem dolgotrajnem postopku ugotovimo, da je slab pomeni izgubljeno priložnost da bi izdelali dober senzor. Če takega na videz sicer dobrega, a po umerjanju slabega senzorja ne zaznamo že pred umerjanjem, s tem zmanjšamo izkoristek celotnemu proizvodnemu postopku.

Osnovna ideja, ki bo podrobno opisana v nadaljevanju vpeljuje dodatni korak, ki je dovolj enostaven in kratek, da ne predstavlja podaljšanja proizvodnega postopka ali potrebe po dodatni opremi, ampak izkorišča obstoječo kalibracijsko infrastrukturo in izkorišča rezultate preteklih umerjanj za določanje parametrov izločanja potencialno slabih senzorjev.

Poenostavljen algoritem opisane metode je prikazan na diagramu poteka (Algoritrem 1) in bo v nadaljevanju podrobno opisan. Bistveni korak, na katerem sloni opisana rešitev je debelejše obrobljen.



Algoritem 1: Poenostavljen algoritem uporabe naprednega predtesta

Funkcionalni
predtest

Napredni predtest

2 HYB

HYB d.o.o. je srednje veliko podjetje, ki se ukvarja s trženjem, razvojem in proizvodnjo debeloplastnih hibridnih vezij, senzorjev tlaka in mikroelektronike. Začetki debeloplastne hibridne tehnologije v Šentjerneju segajo v leto 1972. Na podlagi bogatih izkušenj in vedno novih znanj in spoznanj smo se razvili v moderno podjetje, ki tesno sodeluje s svojimi poslovnimi partnerji in z znanstveniki ter raziskovalci iz Slovenije in sveta.

Podjetje se nahaja v Šentjerneju na Dolenjskem, kjer je tako poslovno-razvojni kot proizvodni del podjetja. Našim kupcem ponujamo celovite rešitve, ki so plod lastnih raziskav in razvoja, od same zasnove, razvoja in dizajna do proizvodnje po meri narejenih izdelkov za znanega kupca.

Pomembne prelomnice v zgodovini podjetja HYB:

- 1972: Iskra – začetki debeloplastne hibridne tehnologije v Šentjerneju, v sodelovanju z Inštitutom Jožef Stefan
- 1983: senzorji tlaka za medicino
- 1987: senzorji tlaka za industrijo
- 1993: certifikat ISO 9001
- junij 2001: privatni lastnik – holding Novoline d.o.o.
- 2004: certifikat ISO 9001:2000
- 2004: zgrajena nova poslovno-proizvodna zgradba
- 2005: V okviru GMP standardov za hitro razvijajoče se tehnologije in medicino prejeli certifikat ISO-8 za 800 m² čistega prostora;
- 2005: ISO 13485 za proizvodnjo senzorjev krvnega tlaka

Senzorji tlaka se v podjetju HYB razvijajo in izdelujejo že od leta 1983. Znanja in izkušnje pri razvoju medicinskih senzorjev tlaka so bili dobra osnova za nadaljevanje dela na področju industrijske senzorike. Pretežno pasivni medicinski senzorji za enkratno uporabo dobijo temperaturno kompenzacijo, kalibracijsko elektroniko in s pomočjo natančnejših postopkov umerjanja nastanejo prvi industrijski senzorji tlaka za kupce širom Evrope. Logična posledica tega razvoja so senzorji za avtomobilsko industrijo, od katerih se zahteva največ: odpornost na prav nemogoče motnje iz okolice, zelo široka področja delovanja, izredno ponovljivost in nenazadnje majhno ceno za vse skupaj ob možnosti kar najbolj masovne proizvodnje. Na prvi pogled se ta naloga zdi nemogoča, a kljub vsemu smo jo zmogli in del te zgodbe je opisan v tem delu.

3 Teorija

Študij virov vsebuje pregled senzorjev tlaka s poudarkom na metodah digitalnega umerjanja. Omejeno število virov sicer navaja konkretno rešitve, vendar je razvoj področja zelo izrazit v zadnjem obdobju nekaj let. Praktične rešitve digitalnega umerjanja mostičnih senzorjev se pojavljajo na različnih nivojih integracije in z raznimi pristopi. Podrobnejša raziskava trenutnega stanja je bila potrebna zaradi lažjega razumevanja različnih prijemov digitalnega umerjanja. Uporaba takih vezij pri proizvodnji zahteva izdelavo posebne opreme in novih tehnoloških prijemov. Če primerjamo izkoristek teh novih procesov v primerjavi z obstoječimi in utečenimi tehnološkimi procesi, je vedno precej manjši. Prikazana teoretična ozadja so osnova za izboljšanje najbolj kritičnega procesa pri proizvodnji senzorjev tlaka, to je postopek umerjanja.

Z izkoristkom proizvodnega procesa povemo, koliko dobrih proizvodov, primernih za prodajo, lahko proizvedemo. To je lahko absolutna enota (npr. število senzorjev na dan) ali pa relativni odstotek izdelkov, ki so prestali končni test in jih lahko prodamo. Seveda večji izkoristek pomeni več dobrih izdelkov za (v osnovi) enako ceno. To pa je osnova za znižanje proizvodne cene.

V nadaljevanju so prikazane teoretične osnove za izvedbo novih idej, kako lahko z minimalnimi posegi v proces izboljšamo izkoristek proizvodnega procesa. Osnovna ideja je, da s pomočjo ustreznih matematičnih metod uporabimo pretekle meritve rezultate za napovedovanje poteka proizvodnih postopkov, še preden se ti zgodijo. Uporabnost metode bo prikazana na primeru MAP tlačnega senzorja, ki se uporablja v avtomobilih.

3.1 Senzorji tlaka

V splošnem senzorje tlaka, tako kot vse ostale senzorje lahko razdelimo v dve skupini: direktni in kompleksni. Direktni senzorji pretvarjajo stimulus neposredno v električni signal. Pri kompleksnih pa je potrebnih več pretvornikov energije, da dobimo izhodni električni signal. Mi se bomo srečali samo z direktnimi senzorji tlaka, ki delujejo na osnovi piezouporovnega efekta (Slika 1).

Senzor taka nikoli ne deluje kot samostojni element, ampak je vedno del večjega sistema, kjer srečamo še druge detektorje, zapisovalnike, naprave za obdelavo signalov, spominske naprave in aktuatorje. Senzor tlaka ima lahko notranjo ali zunanj vlogo v napravi. Kadar zaznava tlak iz okolice, govorimo o zunanj vlogi pri delovanju naprave. Primer take naprave je regulator nivoja tekočine v rezervoarju, kjer preko hidrostatičnega tlaka uravnavamo nivo tekočine. Kadar senzor tlaka meri neko notranje stanje v napravi (npr. tlak v tlačni posodi kompresorja), govorimo o notranji vlogi pri delovanju naprave. V vsakem primeru pa je senzor tlaka le eden od gradnikov signalne verige, večkrat znotraj večjega sistema avtomatizacije z mnogimi mehanizmi povratnih in regulacijskih zank.

3.2 Tlak

Fizikalna veličina tlak (en. 3.1), ki jo na splošno označimo s p , je definirana kot kvocient sile F , ki deluje na enoto površine A v smeri njene normale:

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (3.1)$$

V sistemih, kjer uporabljamo senzorje tlaka nas zanimajo tri različne vrste tlaka, ki se medsebojno razlikujejo glede na referenčno točko (Tabela 1).

Za **absolutni tlak** je referenčna točka prazen prostor, vakuum. Senzor tlaka na osnovi silicijeve tabletke z membrano imajo vgrajeno majhno komoro, v kateri je vakuum. Taki senzorji potrebujejo le en priključek za merjeni medij.

Nadtlak je lahko pozitiven ali negativen. Referenčna točka pri merjenju nadtlaka je vsakokratna vrednost atmosferskega tlaka. Starejša oznaka za negativne nadtlake je *podtlak*, vendar se po novih mednarodnih predpisih

(ISO 31/III) ta naziv lahko uporablja le za oznako stanja (npr. podtlačni sistem, komora...) in ne za poimenovanje veličin. Taki senzorji so izdelani v ohišju, ki mora imeti odzračevalni kanal ali priključek. Imajo natanko eden priključek za merjeni medij, referenčna stran pa je prosta proti atmosferi.

Tabela 1 Tlaci, ki jih srečamo v sistemih s senzorji tlaka

Vrsta tlaka	Ang. naziv	oznaka	primer uporabe
Absolutni tlak	Absolute pressure	p_{ABS}	zračni tlak, nadmorska višina
Nadtlak	Gauge pressure	p_G	tlak v posodi, hidrostatični tlak
Diferencialni tlak	Differential pressure	p_D	pretok, hitrost

Senzorji, ki merijo **diferencialni tlak** imajo za referenčno točko izbran poljubni tlak. Diferencialni tlak je podan kot razlika dveh absolutnih tlakov. Če sta atmosferska tlaka na obeh merjenih mestih enaka, potem je diferencialni tlak razlika dveh nadtlakov. [10]

3.3 Silicijevi piezouporovni senzorji tlaka

Za izdelavo senzorja tlaka sta potrebni dve komponenti:

1. tanko membrano znane površine A in na njej
2. elemente, ki se odzivajo na pritisnjeno silo F [en. (3.1)].

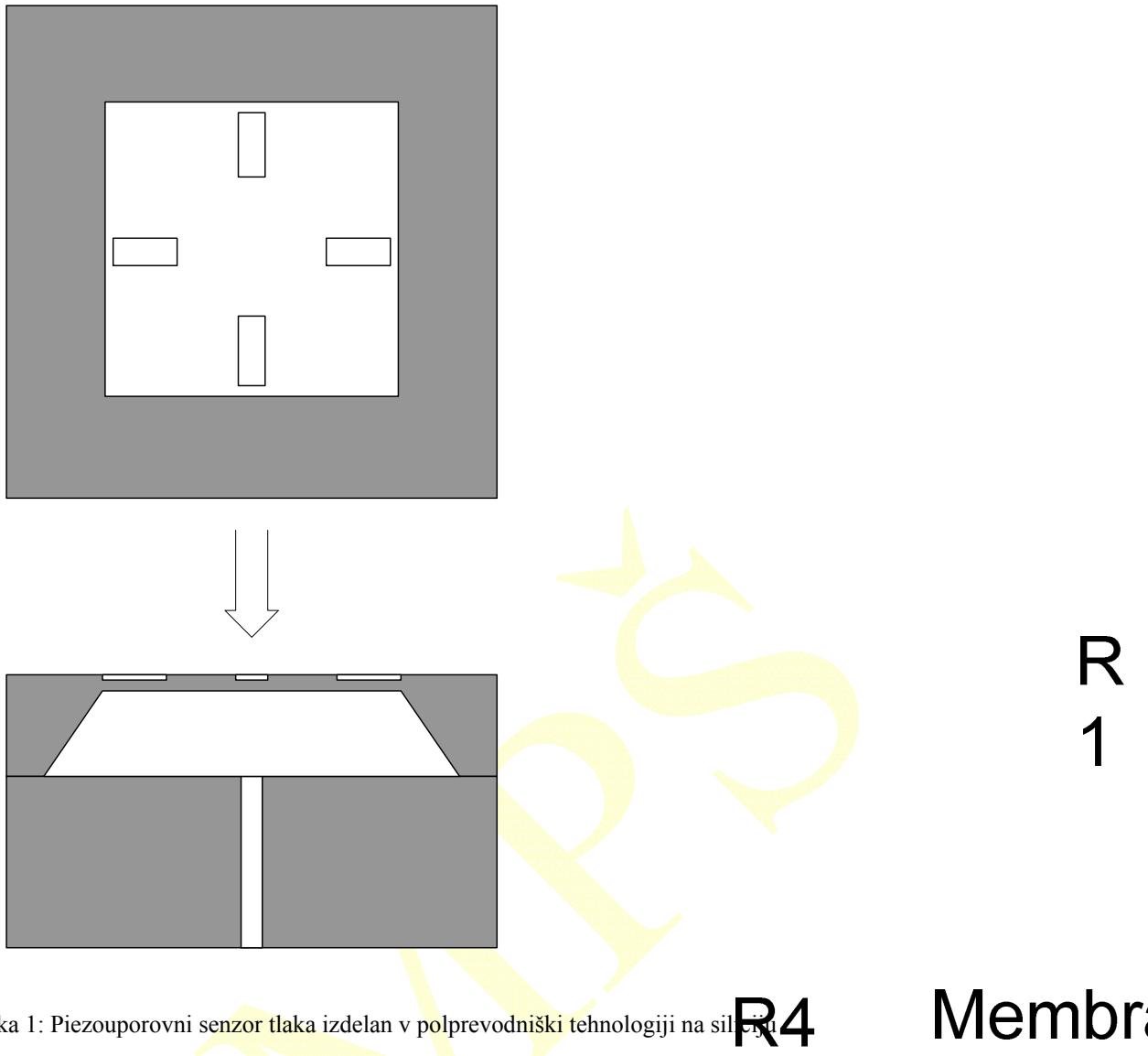
Obe komponenti lahko izdelamo na siliciju. Sile v membrani zaznavajo difundirani upori v membrani. Ti so izdelani s standardnimi polprevodniškimi postopki. Monokristalna silicijeva membrane ima idealne elastične lastnosti. Zaradi tega v sami strukturi senzorskega elementa ne zaznamo histereznih pojavov ali lezenja (creep) tudi v primeru zelo velikih statičnih obremenitev. Upori na membrani se običajno povežejo v Wheatstonov mostič. Izhodna napetost takega mostiča je v področju nekaj 100 mV, kar pomeni, da potrebujemo še neko dodatno ojačevalno vezje. Poleg tega je karakteristika takega senzorskega elementa izrazito odvisna od temperature okolice. Zaradi tega sam senzorski element skoraj ni uporaben, saj ga moramo vsaj temperaturno kompenzirati, da izničimo neželeni vpliv temperature.

Ko upor, izdelan na siliciju s polprevodniško tehnologijo, izpostavimo mehanski napetosti σ , se mu spremeni upornost:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (3.2)$$

Pri tem sta π_l in π_t , piezouporovna koeficienta v vzdolžni in prečni smeri [10]. Ti koeficienti so odvisni od smeri kristala silicija. S pravilno izbiro orientacije lahko dosežemo, da veja približek:

$$\pi_l = -\pi_t = -\frac{1}{2} \pi_{44} \quad (3.3)$$



Slika 1: Piezouporovni senzor tlaka izdelan v polprevodniški tehnologiji na siliciju

R4 Membrana

Iz tega sledi, da je sprememba upornosti proporcionalna spremembji mehanske napetosti v membrani, ta pa je proporcionalna pritisnjemu tlaku. Upori na membrani so postavljeni tako, da sta dva vzdolž roba membrane, dva pa pravokotno na rob. S tem dosežemo, da se pri nekem tlaku dvema uporoma upornost zmanjša, dvema pa poveča. Na tak način pridemo do kar največje možne občutljivosti senzorja tlaka. Spremembo upornosti lahko zapišem kot:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_{ly} - \sigma_{lx}) \quad (3.4)$$

Ko upore R1 do R4 povežemo v mostič, dobimo izhodno napetost mostiča, ki je proporcionalna tlaku in mostični napetosti:

$$U_p = \frac{1}{2} U_m \pi_{44} (\sigma_{ly} - \sigma_{lx}) \quad (3.5)$$

Sedaj lahko določimo koeficienta tlačne (s_p) in temperaturne (s_T) občutljivosti takega mostičnega vezja:

$$s_p = \frac{1}{U_m} \frac{\partial U_p}{\partial p} = \frac{\pi_{44}}{2} \frac{\partial (\sigma_{ly} - \sigma_{lx})}{\partial p} \quad (3.6)$$

$$s_T = \frac{1}{s_p} \frac{\partial s_p}{\partial T} = \frac{1}{\pi_{44}} \frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} \quad (3.7)$$

Ker pa je

$$\frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} < 0 \quad (3.8)$$

je tudi temperaturni koeficient tlačne občutljivosti negativen. To pomeni, da se z višanjem temperature pri enakem tlaku na vhodu in enaki mostični napetosti izhodna napetost zmanjšuje. Poznavanje teh nekaj osnovnih pravil je pomembno za vse temperaturne kompenzacije senzorjev tlaka.

3.4 Karakteristike senzorjev tlaka

Da pridemo do električnega izhodnega signala na izhodu senzorja, se zgodi več korakov pretvorbe. Pri piezouporovni silicijevi senzorski tabletki, tlak upogne tanko silicijevo membrano. Tako se ustvari notranja mehanska napetost, ki preko piezouporovnega efekta vpliva na upornost štirih uporov, ki se nahajajo na točno določenem mestu membrane, da dosežemo čim bolj linearen, ponovljiv odziv s kar največjo občutljivostjo za dani vhodni obseg merjenega tlaka. Štirje upori so vezani v mostič, izhodna diferencialna napetost mostiča je poleg tlaka odvisna še od napajalne mostične napetosti, temperature okolice, časa (zaradi staranja uporabljenih materialov) in še nekaterih drugih vplivov. Senzorski element na tem mestu obravnavamo kot zaprto črno škatlo, ki deluje z vsemi svojimi značilnostmi in na tak način, da pri določenem, znanem vzbujanju dobimo nek izhodni električni signal, ki ga lahko obdelujemo z nekim vezjem.

3.4.1 Prenosna funkcija

Za vsak senzor tlaka lahko poiščemo idealno relacijo med vzbujanjem in izhodnim električnim signalom. Če je senzor idealno načrtovan, izdelan iz idealnih materialov v idealni proizvodnji z idealnimi orodji in izpod rok idealnih delavcev, bo izhodna napetost vedno predstavljala *resnično* vrednost vhodnega tlaka. Idealno funkcijo lahko ponazorimo s tabelo vrednosti, grafom ali matematičnim opisom. Idealna (teoretična) funkcija, ki ponazarja odnos med izhodnim električnim signalom S in vzbujanjem na vhodu senzorja s , imenujemo prenosna funkcija $f(p)$ senzorja tlaka (en. 3.9)

$$S = f(s) \quad (3.9)$$

Ta funkcija je v splošnem večdimenzionalna, nelinearna funkcija, odvisna od več vhodnih spremenljivk. V primeru senzorja tlaka so vhodne spremenljivke vsaj tlak in temperatura. Pri kompenzaciji senzorja tlaka želimo izničiti vse ostale vplive, razen vpliva osnovne, merjene veličine. Da to dosežemo, moramo poznati prenosno funkcijo, oz. njen (segmentirani) približek [7]. V idealnem, teoretičnem primeru je prenosna funkcija pri silicijevih senzorjih tlaka enaka en. (3.5). Žal v praksi nikjer ne srečamo takega primera, saj moramo tak idealni senzorski element vgraditi v ohišje, ga zaščititi, pripeljati medij skozi priključne kanale in ga priključiti na napajanje, ki tudi ni idealno. Poleg tega ima lahko medij drugačno in drugače spremenljajočo temperaturo kot je temperatura okolice. Ko upoštevamo vse vplive, ki imajo znaten vpliv na spremembo izhodne napetosti, lahko prenosno funkcijo zapišemo v splošni obliki s Taylorjevo vrsto (3.10).

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=0}^{D(1)} \sum_{j=0}^{D(2)} \dots \sum_{p=0}^{D(n)} C_{i,j,\dots,p} [x_1 - H_1]^i [x_2 - H_2]^j \dots [x_n - H_n]^p \quad (3.10)$$

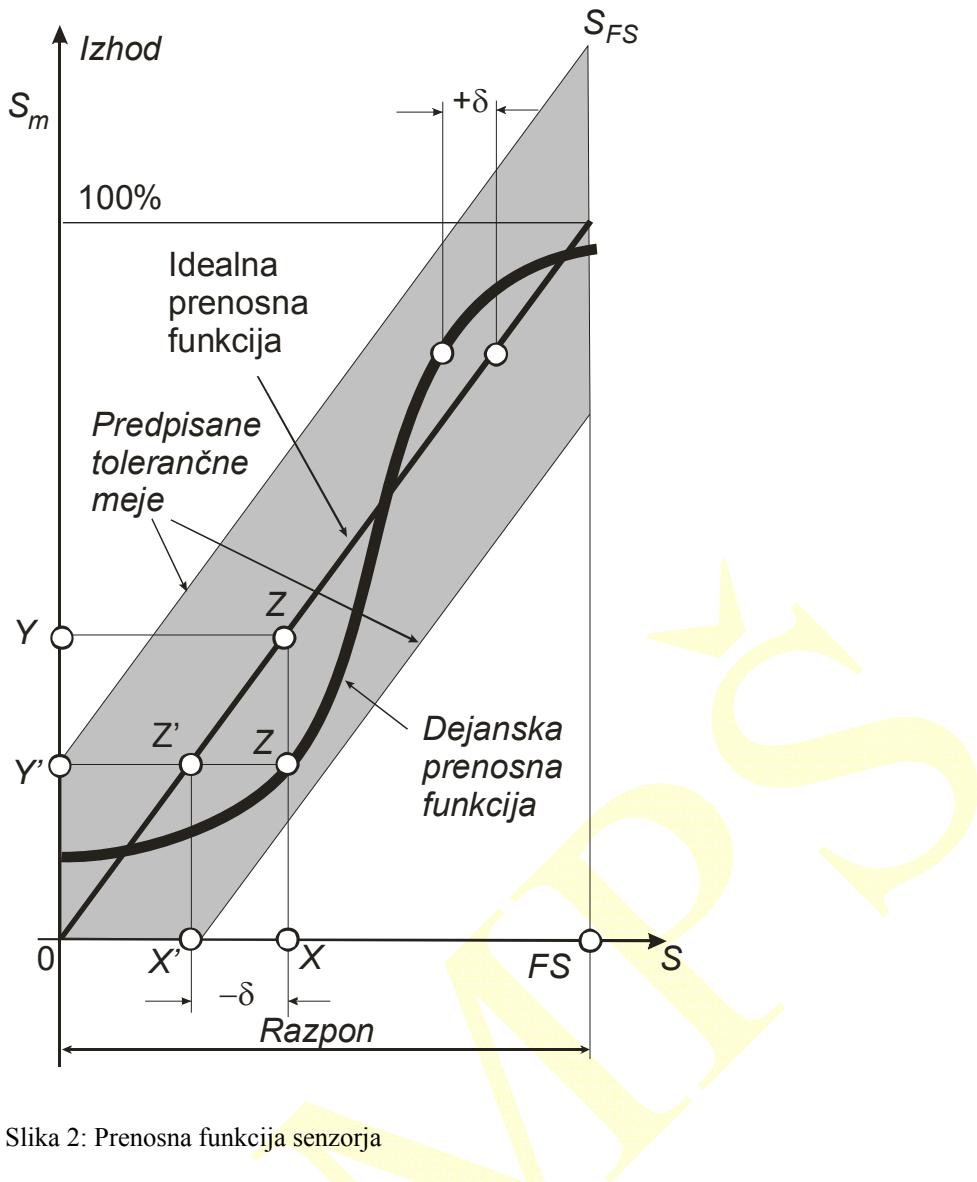
3.4.2 Vhodni razpon (polni vhodni obseg)

Dinamično področje vhodnega tlaka, ki ga je možno aplicirati na nek senzor tlaka imenujemo vhodni razpon ali kar na kratko razpon. Ovrednotimo ga z najvišjim tlakom, ki ga opazovani senzor še lahko pretvori znotraj zahtevane karakteristike.

3.4.3 Izhodni razpon (polni izhodni obseg)

Če na senzor priključimo najvišjo in najnižjo vrednost merjene veličine, dobimo na izhodu največjo in najmanjšo vrednost električnega signala. Razlika med tema dvema skrajnjima vrednostima na izhodu imenujemo izhodni razpon ali obseg.

Primer polnega izhodnega obsega za tipičen senzor tlaka je prikazan na sliki 2.



Slika 2: Prenosna funkcija senzorja

3.4.4 Točnost

Ena pomembnejših karakteristik vsakega senzorja je njegova točnost. Če striktno pogledamo, je v bistvu podana vrednost netočnosti ali največjega odstopanja vrednosti izhodnega električnega signala od idealne vrednosti.

Na sliki 2 je prikazana realna karakteristika z debelejšo črto. Ta le redkokdaj sovпадa z idealno zaradi sprememb v materialu, napak pri izdelavi ali načrtovanju, toleranc in ostalih tehnoloških omejitev realnih materialov, ki jih uporabimo pri izdelavi nekega senzorja. Kljub vsem napakam, ki se pojavijo, pa mora realni odziv senzorja vedno ležati znotraj določenega pasu okrog idealne karakteristike, kot je to nakazano s sivim področjem na sliki 2. Meje dovoljenega odstopanja od idealne prenosne funkcije ponazorimo z odstopanjem $\pm\Delta$. Resničen odziv odstopa za nek $\pm\delta$, pri čemer vedno velja $\delta \leq \Delta$.

Vzemimo resničen senzor tlaka, kjer je vrednost vhodnega tlaka enaka x . V idealnem primeru bi pričakovali vrednost Y na izhodu, ki ustreza točki z na prenosni funkciji. V resnici dobimo na izhodu vrednost Y' , ki ustreza točki Z na realni prenosni funkciji. Ta točka sovпадa s točko z' idealne prenosne funkcije, ali pretvorjeno nazaj v tlak, da dobimo na izhodu vrednost Y , bi moral biti tlak x' , če bi bil senzor idealen. Vrednost x' je v prikazanem primeru manjša od x , merilni pogrešek pa ima vrednost $-\delta$.

V primerih, ko idealna prenosna funkcija ni linearна, je ponavadi tudi tolerančni pas $\pm\Delta$ nelinearen in podan v več kalibracijskih točkah. Pri sodobnih senzorjih lahko podajamo tudi merilno negotovost, ki zajame sistematične in naključne vire pogreškov in ni omejena samo s pogreškom prenosne funkcije.

3.4.5 Kalibracija in umerjanje

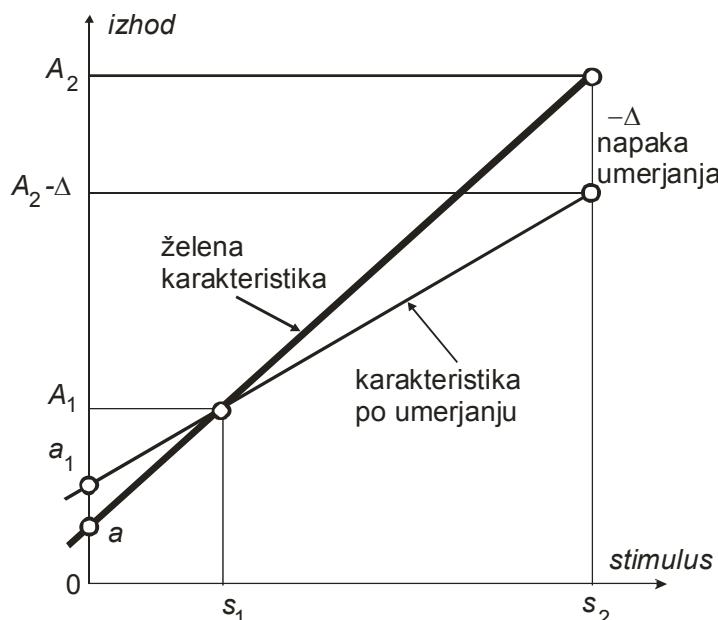
Mostični piezouporovni senzorji tlaka, s katerimi se srečujemo imajo veliko odstopanje karakteristik od kosa do kosa, kljub temu da so izdelani na isti silicijevi rezini in pod istimi tehnološkimi pogoji. Končne karakteristike so odvisne še od elektronskega vezja, ki spremeni nizko diferencialno napetosti na izhodu mostiča v nek bolj uporaben električni signal. Tudi ta vezja imajo svoje tolerance, ki prispevajo določeno napako v končnem proizvodu. Zaradi vsega naštetege moramo na vsakem posameznem senzorju izvesti kalibracijo. Med postopkom kalibracije se poskušamo čim bolj približati idealnim karakteristikam.

Ker pa so karakteristike takih senzorjev tlaka tudi močno odvisne od temperature, v istem koraku ponavadi izvedemo še temperaturno kompenzacijo. To je res za vse digitalno kompenzirane senzorje tlaka. Pri analogno kompenziranih senzorjih pa še velikokrat srečamo ločeno v enem koraku temperaturno kompenzacijo in v drugem koraku kalibracijo.

Oba postopka, kalibracija in temperaturna kompenzacija skupaj se imenujeta umerjanje.

3.4.6 Napaka umerjanja

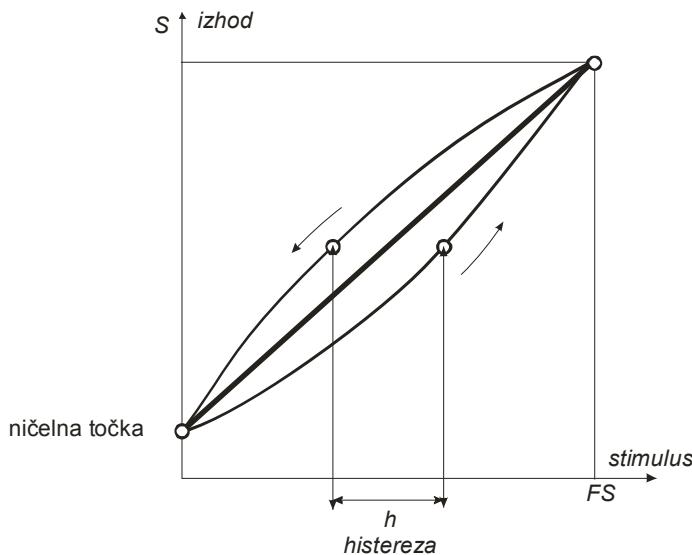
Napaka umerjanja nastane v času izdelave senzorja. Kalibracijski sistem, s katerim umerjamo senzorje po enim od v nadaljevanju opisanih postopkov, ni idealen. Nastane zaradi omejitev točnosti merilnikov in končne ločljivosti izračuna. Izraža se kot sistematska napaka in se pojavi pri vsakem senzorju. Napako najlažje ponazorimo s primerom pri umerjanju v dveh točkah (slika 3)



Slika 3: Napaka kalibracije

3.4.7 Histereza

Pri senzorjih tlaka se srečamo z dvema vrstama histerez: tlačno in temperaturno. Tlačna histereza vnaša v prenosno funkcijo odvisnost izhodnega signala od smeri spremembe tlaka. Pri določenem tlaku dobimo različne odzive v primeru, da tlak naraste ali upade v opazovano točko (slika 4)



Slika 4: Napaka histereze

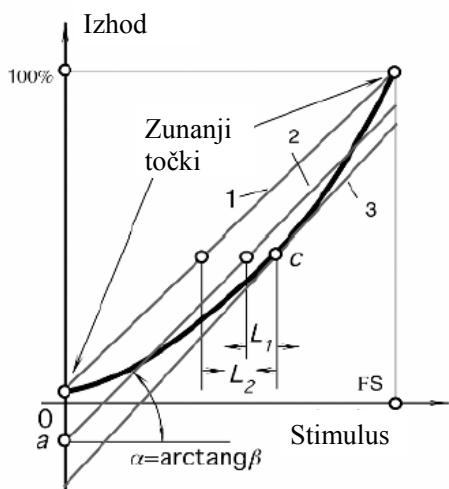
3.4.8 Nelinearnost

Napaka nelinearnosti je poleg temperaturnih napak najbolj izrazita. Nelinearnost senzorja tlaka predstavlja največje odstopanje dejanske karakteristike od srednjega linearnega približka (sl. 5) in ga pri senzorjih tlaka podajamo v razmerju tega odstopanja proti polnemu obsegu. Izračun nelinearnosti naredimo s pomočjo metode najmanjših kvadratov. Senzorju tlaka izmerimo dejanski odziv (S) v nekaj (n) tlačnih točkah (s) preko celotne karakteristike. Premico linearnega približka določimo po formulah:

$$a = \frac{\sum S \sum s^2 - \sum S \sum sS}{n \sum s^2 - (\sum s)^2} \quad (3.11)$$

in

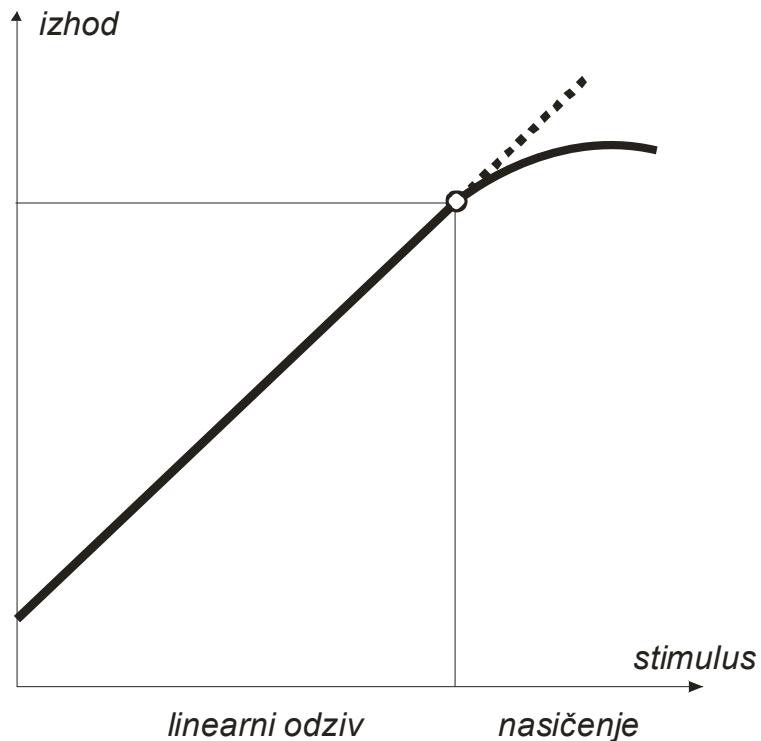
$$b = \frac{n \sum S \sum s^2 - \sum s \sum S}{n \sum s^2 - (\sum s)^2} \quad (3.12)$$



Slika 5: Napaka nelinearnosti

3.4.9 Zasičenje in omejitev izhodne vrednosti

Vsek senzor tlaka ima svoj tlačni obseg delovanja. Kadar nanj priključimo tlake, ki so višji od predpisanega področja, lahko senzor odpove zaradi mehanske odpovedi. Če senzor vseeno preživi preobremenitev, pa opazimo zasičenje in močno nelinearen odziv. Analogni senzorji tlaka imajo na izhodu večinoma ojačevalnike, ki dosegajo izhodne napetosti do nekaj mV od napajalnih napetosti. Pri takih predstavlja omejitev napajanje, delovanje izven predpisanega delovnega tlaka pa ni povsem definirano. Pri nekaterih senzorjih tlaka je ravno zaradi tega izhodni signal omejen (sl. 6). Pri tlakih pod ali nad dovoljeno mejo ostane izhodni signal konstanten. V tem primeru govorimo o omejevanju izhodnega signala. Tak način delovanja velikokrat srečamo pri senzorjih tlaka za avtomobilske aplikacije.



Slika 6: Zasičenje izhodnega signala

3.4.10 Ponovljivost

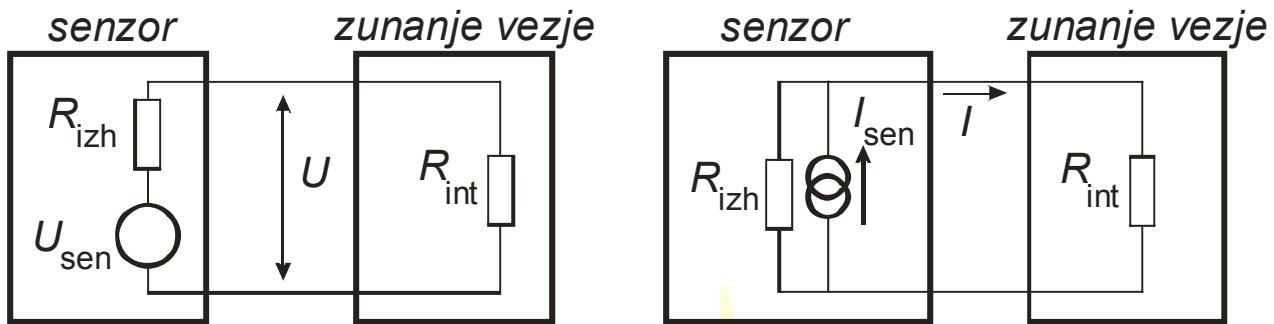
Ponovljivost odziva senzorja tlaka se pokaže kot razlika v izhodnem signalu, ki se pojavi če senzor priključimo zaporedoma poda enakimi pogoji na enak vhodni tlak. Vsak odčitek izhodnega signala se lahko malenkost razlikuje, nelinearnost pa predstavlja največje odstopanje med posameznimi zaporednimi odčitki in se podaja kot delež polnega izhodnega razpona (%FSO).

3.4.11 Ločljivost

Ločljivost senzorja tlaka predstavlja najmanjšo spremembo tlaka, ki jo senzor še zazna s spremembou izhodnega signala. O ločljivosti ponavadi govorimo pri senzorjih, ki imajo digitalno umerjanje. Pri taki vrsti senzorjev tlaka se uporabljam analogno-digitalni pretvorniki, ki imajo neko končno ločljivost.

3.4.12 Izhodna upornost

Izhodna upornost je pomembna, kadar senzor tlaka povežemo z drugim elektronskim vezjem. To vezje ima neko vhodno upornost, ki lahko spremeni izhodno napetost ali tok senzorja tlaka (sl 7). V primeru, ko ima senzor tlaka napetostni izhod, je zaželeno, da ima nizko izhodno upornost, elektronika pa čim višjo vhodno upornost. Pri senzorjih s tokovnim izhodom pa je slika ravno obrnjena. Senzor mora imeti čim višjo izhodno upornost (tokovni generator), priključne elektronika pa čim nižjo vhodno upornost.



Slika 7: Določanje izhodne upornosti

3.4.13 Dinamična karakteristika

Dokler je merjeni tlak statičen ali zelo počasi spremenljajoč, je senzor tlaka povsem zadovoljivo opisan s svojo prenosno funkcijo, razponom, točnostjo in ostalimi karakteristikami. Kadar pa se tlak hitro spreminja, govorimo o dinamičnih signalih in časovni odvisnosti odziva senzorja. Ker senzor ne sledi spremembam, ampak vedno nekoliko zaostaja, nastane neka dinamična napaka. Kadar je senzor del večjega regulacijskega sistema, ki ima svojo dinamično karakteristiko, bo v najboljšem primeru vnesel neko zakasnitev, v najslabšem primeru pa lahko pride do nihanja odziva sistema in neželenih oscilacij.

Pri senzorjih tlaka zaznavamo še eno, tudi pomembno dinamično napako in sicer t.i.m. segrevanje ob vklopu (*warm-up*). Skozi vsak senzor tlaka teče nek tok za njegovo delovanje. Pri tem se senzor segreva, saj ima neko končno notranjo upornost. Ob vklopu, ko je senzor na neki temperaturi okolice, bo ob vklopu potreboval nek znaten čas, da se mu bo izhodni signal stabiliziral pri konstantnih pogojih na tlačnem vhodu.

3.5 Metode umerjanja senzorjev tlaka

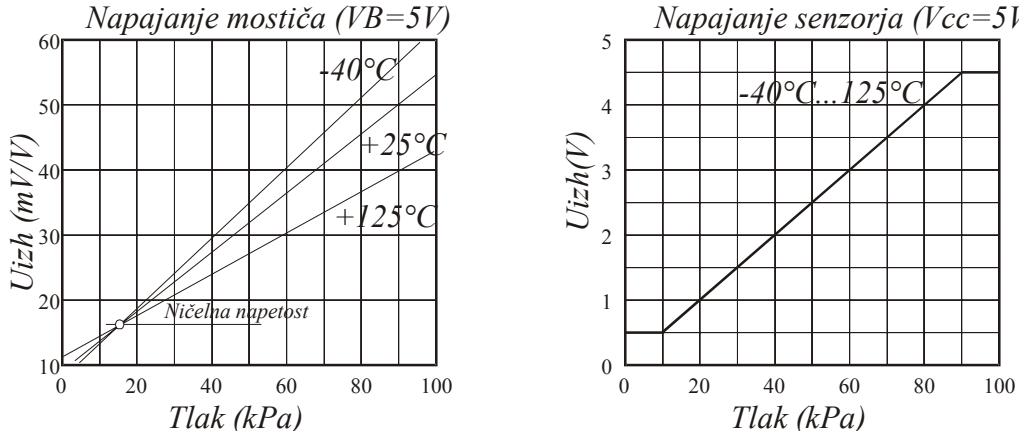
Mostična vezava je pogost in zelo učinkovit pristop v senzorskih aplikacijah na nivoju osnovnih senzorskih elementov. Osnovni wheatstonov mostič deluje v razglašenem načinu, izhodno napetost pa merimo v diagonali mostiča.

Glavna ovira pri kalibraciji in temperaturni kompenzaciji senzorjev tlaka so relativno velike napake zaradi neželenih vplivov. Poleg glavne merjene veličine (tlak), je po občutljivosti primerljiv vpliv temperature (sl. 8). Sledijo staranje, vpliv vlage, pri nizkih tlakih tudi gravitacija in nekatere povsem tehnološke napake, ki jih ne moremo povsem odpraviti, kot npr. nelinearnost, histereza odziva in podobno. Da bi senzor tlaka v obliki uporavnega mostiča na silicijevi tabletki spremenili v uporaben izdelek, ki ima znano karakteristiko, odvisno predvsem od merjene veličine, moramo goli tabletki dodati elektronsko vezje, ki poskrbi za odpravo neželenih vplivov (kompenzacija) in tudi standardizira izhodni signal (kalibracija). Kalibracijo in kompenzacijo skupaj lahko poimenujemo umerjanje.

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)

Da dosežemo zahtevano karakteristiko (Slika 2) senzorja tlaka, v našem konkretnem primeru MAP senzorja, lahko uporabimo različne tehnologije in algoritme umerjanja.



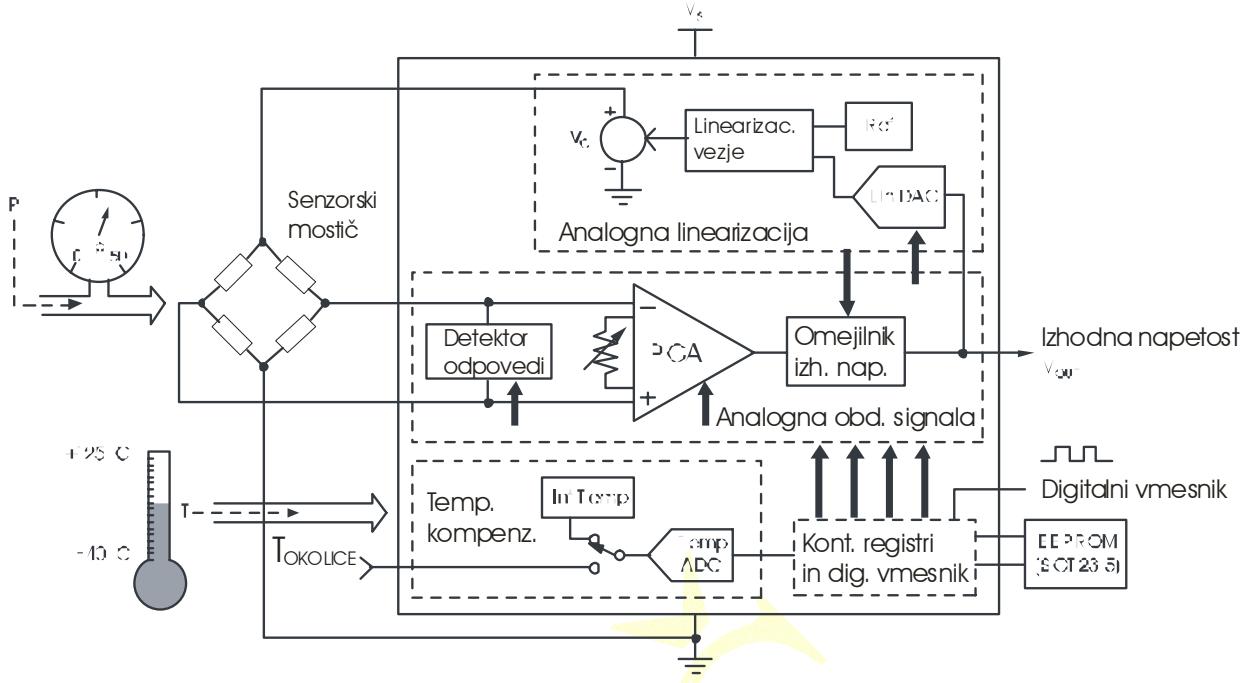
Slika 8: Temperaturna karakteristika gole piezouporovne senzorske tabletke (levo) in izdelanega, kalibriranega in temperaturno kompenziranega MAP senzorja (desno)

3.5.1 Topologije umerjanje senzorjev

Sodobna vezja za umerjanje tlačnih senzorjev lahko razdelimo v dve veliki skupini. V prvi so linearna, analogna vezja, ki s pomočjo temperaturno spremenljivih uporov in analognih ojačevalnikov v veliki meri izničijo vire napak senzorske tabletke. Taka vezja so zahtevna za izdelavo, saj pri izdelavi potrebujejo lasersko trimanje uporov v vezju na točno določene vrednosti, ki jih določimo na osnovi izračunov po opravljenih meritvah v temperaturni komori. Za lasersko trimanje uporov potrebujemo tehnološko zahtevno opremo in ustreznou tehnologijo izdelave debeloplastnih hibridnih vezij na keramičnem substratu. Glavna pomanjkljivost pri postopku laserskega trimanja je nereverzibilnost. Da uporu spremenimo upornost, ga zarežemo in s tem spremenimo geometrijo. Žal pa tako uporom v vezju lahko samo višamo upornost in v primeru prekoračitve želene vrednosti ni poti nazaj. Druga, manj moteča pomanjkljivost je pomanjkanje sledljivosti, oz. integriranega označevanja ali serializacije senzorjev. Glavna prednost analogne kompenzacije pa je enostavnost samega vezja, saj gre vendarle za uporovna vezja, ki jim sledi diferenčni ali instrumentacijski ojačevalnik. Tako vezje pa je obvladljivo in ne zahteva posebnih vmesnikov, metod in postopkov, kot jih srečamo pri digitalnem umerjanju.

Nekatere naštete slabosti analogne kompenzacije odpravimo z uporabo digitalnih kalibracijskih postopkov. To, drugo skupino vezij za umerjanje senzorjev tlaka lahko razdelimo na dve podskupini in sicer na vezja, ki delujejo v analogni domeni in popolnoma digitalna vezja, pri katerih so vsi signali digitalizirani s pomočjo AD pretvornika, kompenzacija in kalibracija pa je izvedena s pomočjo numeričnih algoritmov znotraj osrednjega mikrokrmilnika, ki nadzoruje delovanje vezja, skrbi za pretvorbo, filtriranje, omejevanje signalov, vsebuje digitalni podpis (oz. serijsko številko) in vrsto dodatnih funkcij, ki se v najbolj razširjeni obliki združijo v pametnem senzorju. Pametni senzorji (tlaka) predstavljajo sam vrh kompleksnosti in integracije, saj imamo v majhnem volumnu vgrajeno celo vrsto funkcij. Pametni senzorji znajo npr. opisati samega sebe s pomočjo elektronskega podatkovnega lista, s čimer omogočajo načelo takojšnje izmenljivosti. Tudi rezultat pretvorbe ni zgolj merilni podatek ampak je izhod merjena veličina (v našem primeru tlak), opremljena s pravimi enotami in merilno negotovostjo. Vse pojme in definicije inteligentnih senzorjev povzema standard IEEE1451. Slabost popolnoma digitaliziranih vezij za umerjanje je posledica digitalne pretvorbe in obdelave signalov. Pri tem pride do zakasnitev in posledično tudi počasnejšega odzivanja na hitre spremembe.

Druga podskupina digitalno umerjanih senzorjev so vezja, ki ohranjajo primarni senzorski signal v analogni domeni, za umerjanje pa uporabljajo digitalno-analogne in analogno-digitalne pretvornike le kot vplivne elemente. Celotna signalna pot od senzorskega mostiča do izhodnih priključkov je analogna. Digitalizirani so le signali neželenih vplivov, npr. temperature (sl. 9). Taka vrsta umerjanja združuje dobre strani analognih metod (hitrost) in digitalnih metod (programirljivost, prilagodljivost, enostavna ponovna kalibracija, sledljivost...).



Slika 9: Blokovna shema vezja PGA309, kjer je glavni senzorski signal ves čas analogen

3.5.2 Analogna vezja za umerjanje

Popolnoma analogna vezja za umerjanje senzorjev tlaka so sestavljena iz dveh delov. Najprej signal iz senzorskega mostiča temperaturno kompenziramo. V drugem delu pa ojačevalno vezje to napetost ojači in pretvori v absolutno napetost. Sledijo lahko še dodatni elementi za pretvorbo iz napetosti v tok, če gre za tlačni senzor s tokovnim izhodom ali stikalna vezja, ki primerjajo izhodno napetost z neko referenčno s čimer dobimo tlačno stikalo.

3.5.2.1 Analogna pasivna temperaturna kompenzacija mostičnega senzorja tlaka

Za uspešno temperaturno kompenzacijo najprej analizirajmo izhodno napetost whetstonovega mostiča. Tlačno občutljivost posameznega upora v mostiču označimo s koeficientom α . Posamezni upor v mostiču ima upornost:

$$R_i = R_M (1 \pm \alpha p) \quad (3.13)$$

Pri tem je R_M nominalna mostična upornost, p pa vhodni tlak. Na splošno lahko tlačno občutljivost določimo kot:

$$\alpha = \frac{1}{R_M} \frac{\partial R}{\partial p} \quad (3.14)$$

Izhodna napetost mostiča je:

$$U_{IZH} = U_M \alpha p + U_0 \quad (3.15)$$

kjer je U_M mostična (napajalna napetost), U_0 pa ničelna (offsetna) napetost. Kadar ničenje mostiča ni pravilno, je ničelna napetost tudi vir temperaturne napake. Najprej se osredotočimo na kompenzacijo temperaturne napake tlačne občutljivosti, saj ta v enačbi (3.16) predstavlja glavni vir temperaturne odvisnosti, ki jo želimo izničiti. Že iz poglavja 2.2. vemo, da je temperaturni koeficient mostične upornosti pri piezouporovnih senzorjih tlaka pozitiven, temperaturni koeficient občutljivosti pa negativen. To pomeni, da z višanjem temperature mostična upornost raste, občutljivost pa pada. Vpliv temperature na izhodno napetost določimo s parcialnim odvajanjem en.

(3.15) po temperaturi:

$$\frac{\partial U_{IZH}}{\partial T} = p \left(\alpha \frac{\partial U_M}{\partial T} + \frac{\partial \alpha}{\partial T} U_M \right) \quad (3.16)$$

Kadar temperatura ne vpliva na izhodno napetost, je senzor temperaturno kompenziran. V tem primeru je gornji odvod enak 0. Zapišemo lahko:

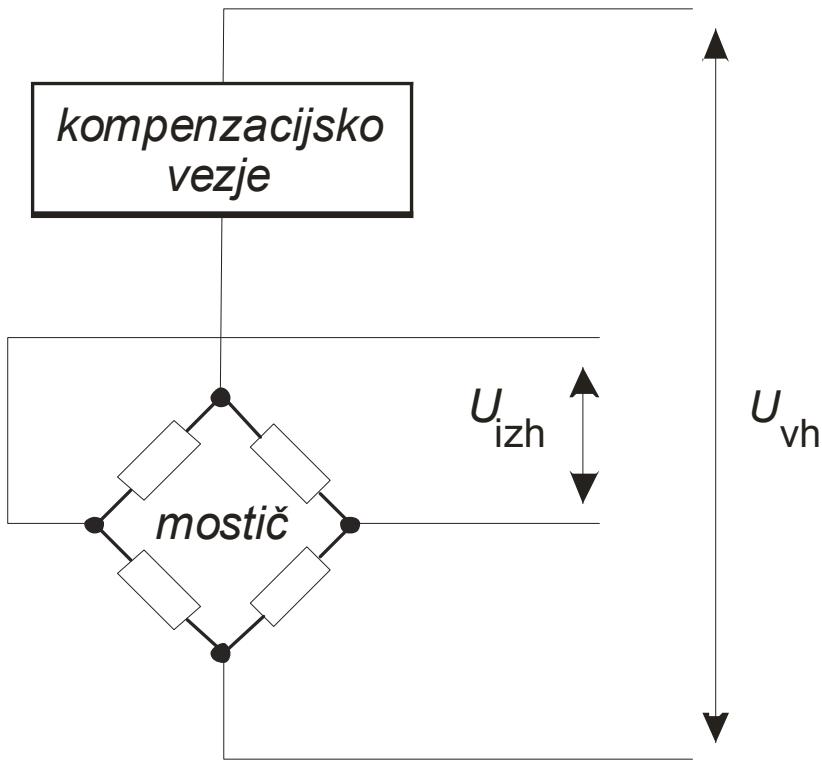
$$\alpha \frac{\partial U_M}{\partial T} = - \frac{\partial \alpha}{\partial T} U_M \quad (3.17)$$

ali

$$-\frac{1}{U_M} \frac{\partial U_M}{\partial T} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial T} = \beta \quad (3.18)$$

Pri tem je β temperaturni koeficient tlačne občutljivosti. Prikazana metoda velja za idealen mostič brez ničelne napetosti in predstavlja zgolj teoretično osnovo za pristop k realnim vejem za temperaturno kompenzacijo občutljivosti. Njenostavnejše vezje za pasivno, analogno temperaturno kompenzacijo tlačne občutljivosti vsebuje temperaturno spremenljiv upor R_T , ki ga vežemo zaporedno z mostičem in deluje skupaj z mostičem kot napetostni delilnik, katerega izhodna napetost je enaka mostični (sl. 10).

$$U_M = U_{CC} \frac{R_M}{R_M + R_T} \quad (3.19)$$



Slika 10: Kompenzacija temperaturne napake občutljivosti pri napajanju s konstantno napetostjo

Če odvajamo mostično napetost po temperaturi, dobimo:

$$\frac{\partial U_{IZH}}{\partial T} = U_{CC} \left[\frac{1}{R_M + R_T} \frac{\partial R_M}{\partial T} - \frac{R_M}{(R_M + R_T)^2} \left(\frac{\partial R_M}{\partial T} + \frac{\partial R_T}{\partial T} \right) \right] \quad (3.20)$$

Če vstavimo U_M v gornjo enačbo, dobimo pogoj za temperaturno kompenzacijo občutljivosti:

$$\frac{1}{U_M} \frac{\partial U_M}{\partial T} = \frac{1}{R_M} \frac{\partial R_M}{\partial T} - \frac{1}{R_M + R_T} \left(\frac{\partial R_M}{\partial T} + \frac{\partial R_T}{\partial T} \right) \quad (3.21)$$

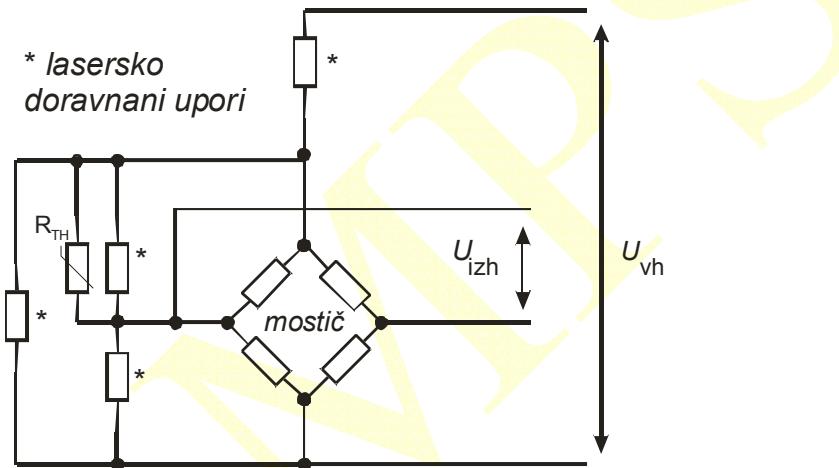
Gornji izraz mora biti enak negativnemu temperaturnemu koeficientu tlačne občutljivosti $-\beta$. Če sedaj temperaturni koeficient mostične upornosti označimo z γ :

$$\frac{1}{R_M} \frac{\partial R_M}{\partial T} = \gamma \quad (3.22)$$

dobimo končni izraz za določanje karakteristike kompenzacijskega upora:

$$-\beta = \gamma - \frac{1}{R_M + R_T} \frac{\partial R_T}{\partial T} \quad (3.23)$$

Koeficiente β , γ in $\partial R_M / \partial T$ določimo z meritvami v času proizvodnje. Iz gornje enačbe lahko izpeljemo R_T in s tem določimo vrednost in temperaturni potek kompenzacijskega upora. Tipična vezava takega vezja je prikazana na sliki (11):

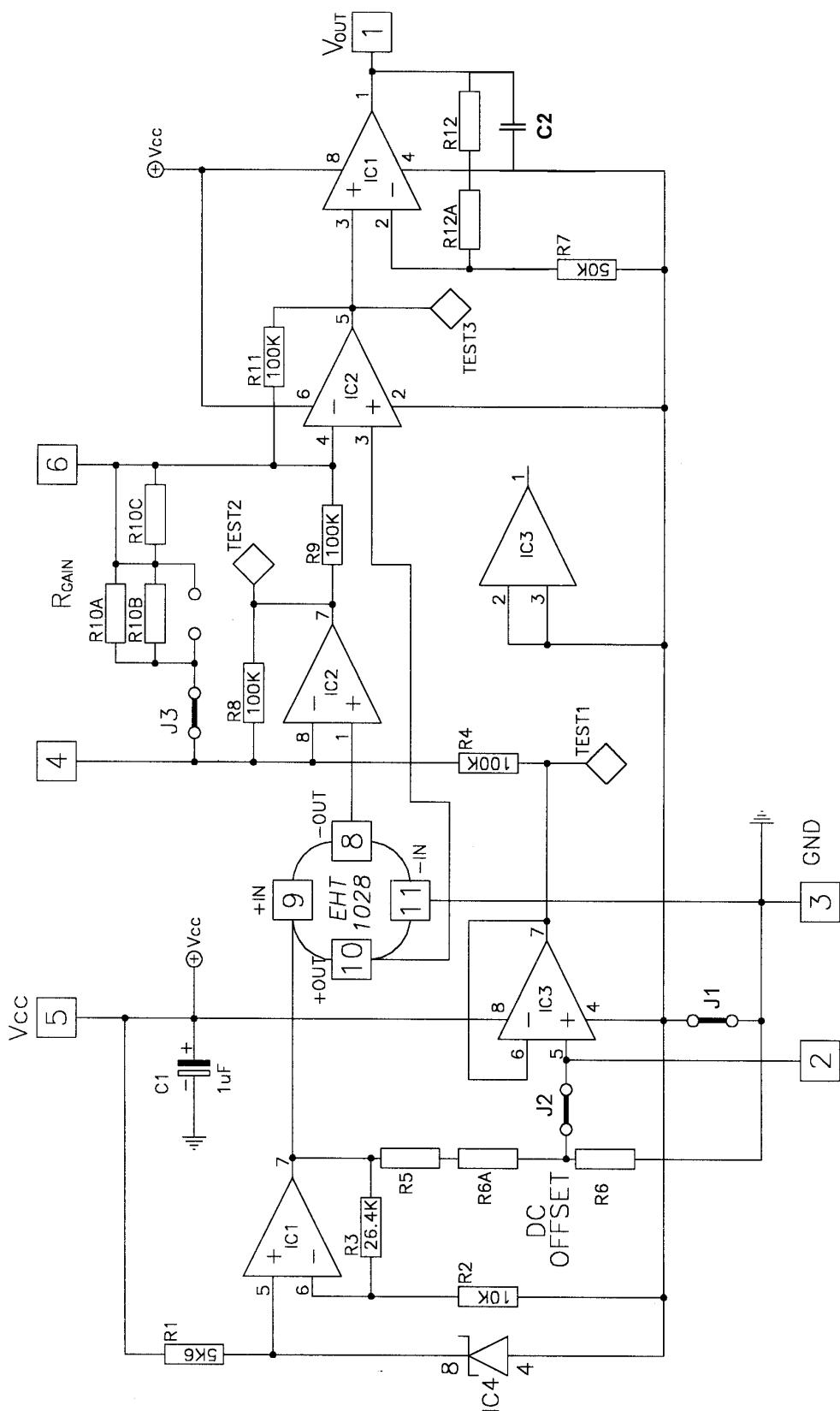


Slika 11: Temperaturna kompenzacija in kalibracija ničelne napetosti

Prikazana metoda predstavlja zgolj osnovo za pristop k načrtovanju realnih kompenzacijskih vezij. Ker pri realnih senzorjih tlaka nastopajo še drugi faktorji (dovoljena temperaturna napaka, vplivi okolice, velikost, cena in podobno), je nemogoče podati univerzalen recept za temperaturno kompenzacijo mostičnega vezja z analognimi metodami kompenzacije.

3.5.2.2 Analogni ojačevalniki za mostične senzorje tlaka

Ko imamo enkrat izhodno napetost iz temperaturno kompenziranega tlačnega mostiča, je ta teoretično odvisna zgolj od tlaka in je proporcionalna napajalni napetosti kompenzacijskega vezja (V_{CC} na sliki 13). Taka napetost ni najbolj uporabna v aplikacijah, kjer potrebujemo senzorje tlaka, saj je diferencialna, ni kalibrirana in je odvisna od napajalne napetosti. Zaradi tega moramo uporabiti ojačevalnik, ki spremeni diferencialno napetost v absolutno, jo kalibrira in naredi izhodno napetost neodvisno od napajanja. Prvi dve zahtevi rešimo z mostičnim ojačevalnikom. Najpogosteje uporabljeni je diferenčni ojačevalnik z dvema operacijskima ojačevalnikoma. Pogosto se uporablja tudi diferencialni instrumentacijski ojačevalnik v vezavi s tremi ali štirimi operacijskimi ojačevalniki. Na sliki 12 je primer vezja preciznega, lasersko doravnovanega ojačevalnika senzorskega signala, ki se uporablja v analognih senzorjih tlaka v podjetju HYB.



Slika 12: Električna shema preciznega ojačevalnika

3.5.3 Digitalna vezja za umerjanje z analognimi signali

Izhodna napetost mostiča je pri uporabi te vrste vezij za umerjanje ves čas analogna, kompenzacija temperaturne napake, kalibracija signala in v nekaterih primerih linearizacija se izvaja s pomočjo DA pretvornikov. Vsi DA pretvorniki delujejo kot napetostni delilniki referenčne napetosti. Ta je lahko gola napetost iz senzorskega mostiča

(pri linearizaciji) ali mostična napetost (pri temperaturni kompenzaciji). Mostič je tokovno napajan in zaradi temperaturne odvisnosti mostične upornosti predstavlja vir temperaturno odvisne napetosti.

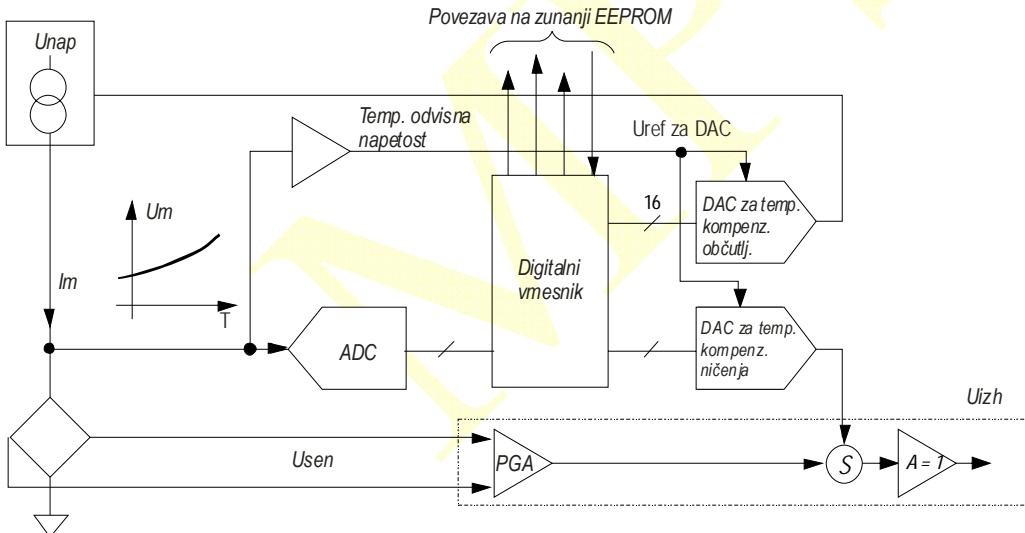
Vse preoblikovanje vhodnega signala se zgodi v enem kompleksnem nastavljivem ojačevalniku. Nastavljanje ojačevalnika nadzorujejo izhodne napetosti DA pretvornikov. Kompenzacijski koeficienti so v tem primeru digitalne vrednosti na vhodu DA pretvornikov in so shranjeni v EEPROM-u, kamor jih vpišemo po izvedenem postopku umerjanja.

Poleg konstant lahko DA pretvornik nadzoruje vrednost iz AD pretvornika. Ta digitalna vrednost se upošteva pri določanju digitalne vrednosti za DA pretvornik. V tem primeru DA pretvornik ni krmiljen direktno iz EEPROM-a, ampak na digitalno vrednost vpliva še nek drug, digitaliziran signal, npr. digitalizirana vrednost mostične napetosti, ki ob tokovnem napajanju posredno predstavlja trenutno temperaturo mostiča.

3.5.3.1 Temperaturna kompenzacija

Na sliki 13 vidimo poenostavljen shemski zapis temperaturne kompenzacije občutljivosti in ničelne napetosti. Napetostno kontroliran ojačevalnik (PGA) ojači izhodno napetost mostiča. S tem določimo osnovno karakteristiko senzorja pri eni temperaturi. Temperaturno kompenzacijo občutljivosti pa dosežemo tako, da spremojamo napajalni tok mostiča. Napetostno kontroliran tokovni vir dovaja tak tok mostiču, da se s spremembom temperature mostična napetost popravi ravno za toliko, kot se spremeni tlačna občutljivost. Zanka je zaključena preko AD pretvornika, iz katerega dobimo digitalno vrednost, ki je odvisna od temperature. Ta se preko digitalnega vmesnika tako prilagodi, da ko jo preko DA pretvornika pretvorimo v kontrolno napetost tokovnega vira, ravno iznosi temperaturno napako, ki bi nastala zaradi spremembe temperature mostiča in s tem njegove občutljivosti.

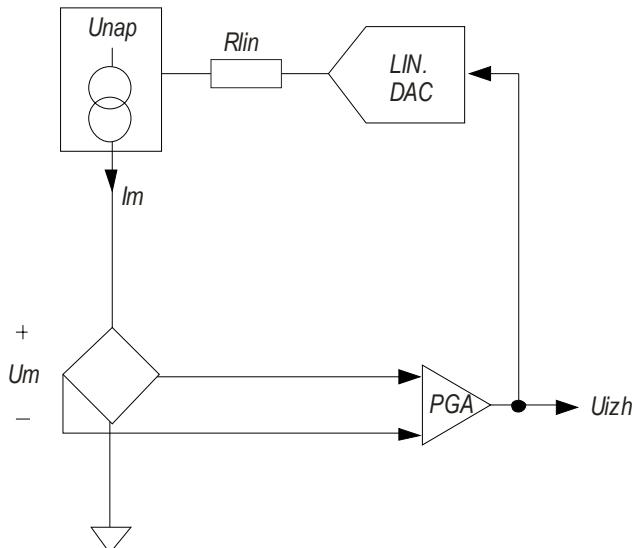
Kompenzacijo ničelne napetosti pa dosežemo s prištevanjem kompenzacjske napetosti na samem izhodu, kar je v shemi prikazano s seštevalnim vozliščem S tik pred izhodnim ojačevalnikom z ojačenjem 1.



Slika 13: Temperaturna kompenzacija občutljivosti

3.5.3.2 Kompenzacija nelinearnosti

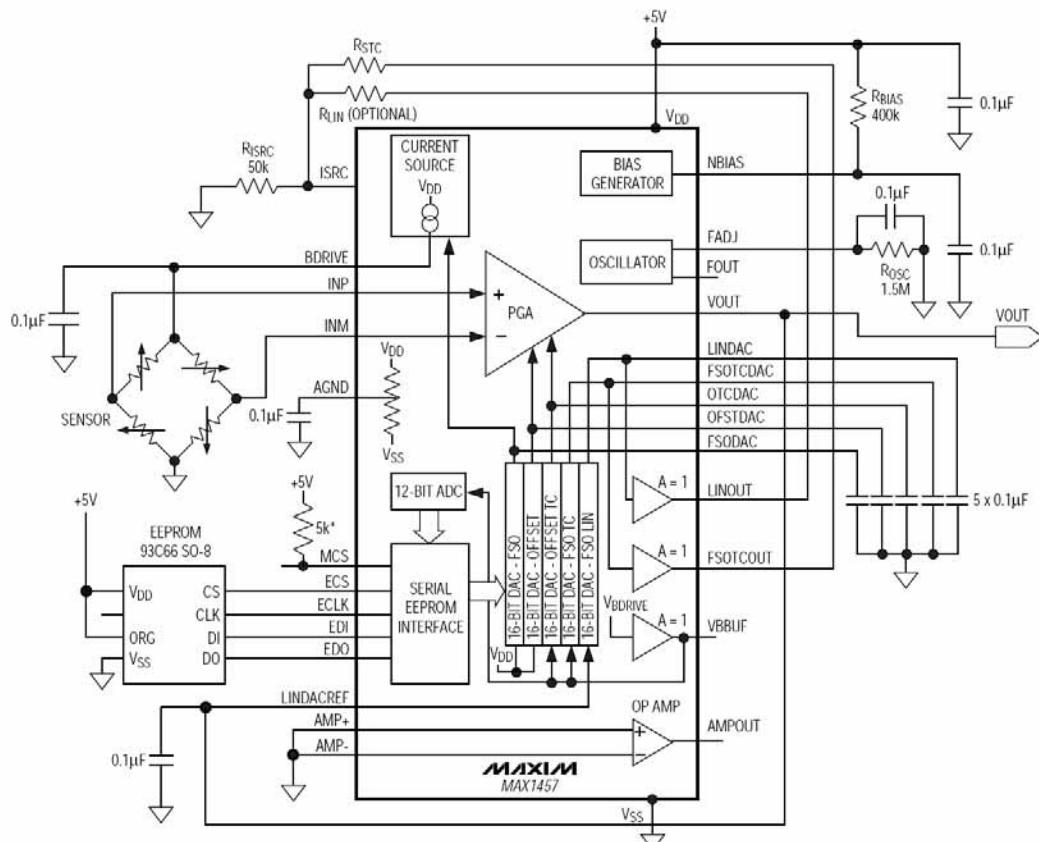
Kompenzacija nelinearnosti je narejena s pomočjo linearizacijskega DA pretvornika. Ta krmili tokovni vir za napajanje mostiča (sl. 14). Zanka kompenzacije nelinearnosti je zaključena, podobno kot pri temperaturni kompenzaciji, preko DA pretvornika, v tem primeru linearizacijskega DA pretvornika. Ta ima konstantno nastavitev pretvorbe (na digitalnem vhodu je konstanta), referenčna napetost pa je enaka izhodni napetosti senzorja. Ta vpliv na male popravke v napajальнem toku, s čimer dosežemo zadovoljivo kompenzacijo nelinearnosti.



Slika 14: Kompenzacija nelinearnosti uporablja povratno zanko s skaliranjem

3.5.3.3 Primer vezja

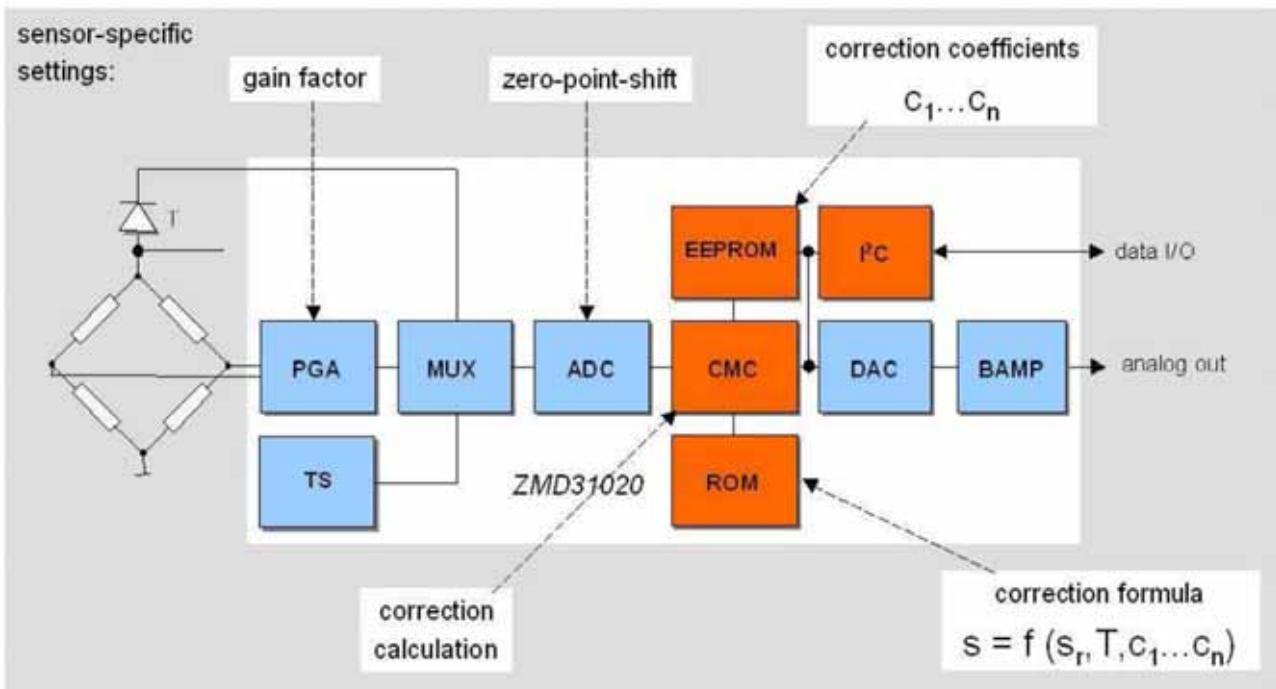
Tipičen predstavnik digitalne kompenzacije z analognimi signalni je integrirano vezje MAX1457, ki v enem vezju združuje vse, kar potrebujemo za kvalitetno kalibracijo in temperaturno kompenzacijo mostičnega senzorja tlaka. V praksi dosežene napake senzorjev, ki uporabljajo tako vezje (slika 15) so okrog 0,1%FS preko celotnega temperaturnega področja. Vezje je narejeno v CMOS tehnologiji, ki podpira analogne in digitalne gradnike. Za izdelavo senzorja potrebujemo še zunanjji EEPROM in nekaj pasivnih komponent. Kalibracijski sistem, s katerim izdelujemo senzorje na osnovi MAX1457 mora biti sposoben zajemanja analognih napetosti, nastavljanja in merjenja temperature ter tlaka glede na izbrane delovne pogoje končnega izdelka.



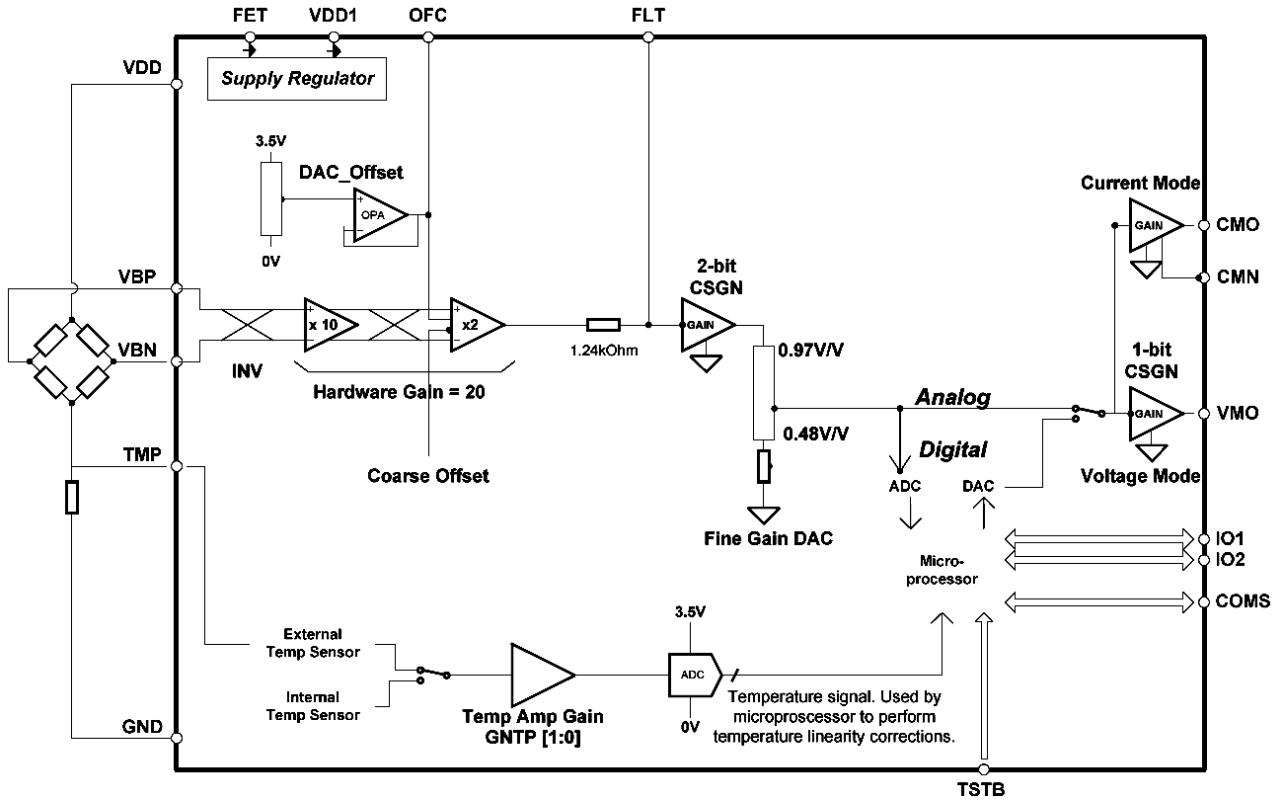
Slika 15: Primer digitalnega vezja z analognimi signalni

3.5.4 Popolnoma digitalna vezja za umerjanje

Kadar so vse analogne napetosti najprej digitalizirane in obdelane s pomočjo digitalne obdelave, govorimo o popolnoma digitalnih vezjih za umerjanje senzorskih signalov (slika 16) [6]. V svoji najkompleksnejši obliki jih srečamo tudi kot pametne senzorje [5]. V poglavju (5.2), kjer bo opisan konkreten primer na MAP senzorju, bomo imeli opravka s takim vezjem. Načrtovanju digitalnih vezij za umerjanje lahko pristopimo na dva načina. Eden je z uporabo standardnih, splošnih gradnikov, kot so ojačevalniki, analogno-digitalni in digitalno-analogni pretvorniki, mikrokrmilniki za splošno rabo in podobno. V tem primeru bomo sicer imeli popolnoma odprte roke pri izbiri algoritma, numeričnih metod, poteka izvajanja umerjanja in vseh ostalih funkcij, ki jih tako vezje opravlja, vendar bomo težko dosegli cenovne in dimenzijske zahteve končnega izdelka. Zaradi tega raje uporabimo namenska vezja (ASIC), ki je izdelan kot ena komponenta in že vsebuje vse potrebne funkcije za umerjanje mostičnega vezja [6]. Tako vezje skupaj s senzorskim mostičem že tvori celoten senzor tlaka, ki ga lahko umerimo in z ustreznim ohišjem predstavlja končni izdelek za tržišče. Včasih so celo senzorski mostiči integrirani skupaj z elektroniko za umerjanje in imamo opravka samo z eno samo komponento. V tem primeru so zaradi popolnega nadzora nad notranjim delovanjem vezja lahko celo priključne sponke deljene in imajo več funkcij. Primer takega senzorskega elementa [6] je na sliki 17.



Slika 16: Notranja zgradba tipičnega popolnoma digitalnega vezja za umerjanje senzorskih signalov (ZMD31020)



Slika 17: Integrirana izvedenka digitalnega vezja za umerjanje, kjer sta senzorska membrana z mostičem in elektronika za umerjanje izdelana monolitno na enem silicijevem substratu [46]

Kot bomo videli v naslednjih poglavjih, je zelo koristno, da vse izmerjene in izračunane vrednosti zapisujem v podatkovno bazo, saj lahko z obdelavo teh vrednosti izvlečemo koristne izsledke. Vsi praktični primeri in analize v nadaljevanju slonijo na obdelavi in preučevanju takih podatkovnih tabel.

3.5.4.1 Napetostni regulator

Senzorski mostič je lahko napajan s konstantno napetostjo, ali pa je priključen na zunanjou napajalno napetost. Kadar imamo izhodno napetost umerjenega senzorja tlaka priključeno na neko kompleksnejše vezje, ki vsebuje tudi analogno-digitalne pretvornike, je koristnejše uporabiti napajanje mostiča iz zunanjega vira. S tem se izognemo uporabi dveh preciznih napetostnih referenc. Prva mora biti v vezju za umerjanje, da stabilizira napajalno napetost mostiča, druga pa v zunanjem analogno-digitalnem pretvorniku. Če obe opustimo, za referenco pa vzamemo kar ustrezno filtrirano napajalno napetost, bo rezultat pretvorbe neodvisen od napajalne napetosti, saj ima mostič izhodno napetost, ki je proporcionalna napajalni, prav tako pa je tudi referenčna napetost proporcionalna napajalni napetosti.

Analogno-digitalni pretvornik pa pretvarja razmerje med njegovo vhodno napetostjo (ki je proporcionalna napajalni) in referenčno napetostjo, ki je tudi proporcionalna napajalni. Tako lahko privarčujemo nekaj, obenem pa poenostavimo vezje.

Napetostni regulator lahko uporabimo ali pa ne, odvisno od potrebe. Njegovo uporabo določamo peko programiranja bitov v nastavivah.

3.5.4.2 Oscilator

Vsako digitalno vezje, ki vsebuje mikrokrnilnik potrebuje oscilator. Ti so večinoma vgrajeni v samo vezje in digitalna senzorska vezja za umerjanje ne potrebujejo zunanjih komponent za generiranje takta. Oscilatorji so ponavadi preprosti RC oscilatorji, vendar zagotavljajo zadovoljiv vir takta.

3.5.4.3 AD in DA pretvorniki

Zaradi optimizacije napetosti digitalizira en sam AD pretvornik, ki ima na vhodu vezje za izbiro pretvarjanje napetosti. Pretvorniki imajo ločljivost ravno tolikšno, da preko izračuna zadovolji potrebe po točnosti, ki jo omogoča umerjanje s takim vezjem. Ponavadi imamo na izbiro kompromis med ločljivostjo in hitrostjo. Posledično ima tudi izdelan tlačni pretvornik ali manjše zakasnitve, ali pa večjo ločljivost.

3.5.4.4 Mikrokrmilnik

V digitalnih vezjih za umerjanje so uporabljeni namenski mikrokrmilniki, ki imajo optimizirano arhitekturo za izvajanje operacij umerjanja. Neredko srečamo 16 bitne mikrokrmilnike v RISC tehnologiji. Poleg osnovnega jedra vsebujejo še spomin: RAM in ROM za delovanje in shranjevanje interne programske kode, ter EEPROM za shranjevanje korekcijskih koeficientov. Povezava z zunanjim svetom je izvedena preko standardnih ali specializiranih vmesnikov. Tako srečamo standardne vmesnike I²C ali SPI in namenske, ki so ponavadi vezani na funkcijo deljenja priključka za analogno izhodno napetost. Mikrokrmilnik lahko, če ima to možnost v svoji programski kodi, ob vklopu opazuje izhodno sponko. Če v kratkem časovnem intervalu ob vklopu zazna neko predpisano zaporedje digitalnega signala, se preklopi v servisni režim. V tem načinu delovanja uporabi izhodno sponko za digitalno komunikacijo, namesto analogne izhodne napetosti iz DA pretvornika, ki je priključena na ta priključek v normalnem režimu delovanja. Take tehnologije srečamo pod imeni ZacWire [47], OneWire [48] in podobno.

3.6 Algoritmi digitalnega umerjanja senzorjev tlaka

Veliko matematičnih modelov lahko postavimo za umerjanje senzorja, ko imamo na voljo tako univerzalne pristope, kot so matematične operacije v mikrokrmilniku. Izbera ustreznega modela in algoritma umerjanja je odvisna predvsem od narave neumerjenega signala, ki ga dobimo iz senzorskega mostiča in pretvorimo z AD pretvornikom v obliko, sprejemljivo za nadaljnjo obdelavo v digitalnem svetu. Najprimernejša metoda bo seveda izkoristila fizikalna ozadja, ki nam jih naš senzor ponuja. Kadar uspemo izkoristiti vse pomembne fizikalne pojave in jih združiti s hitrim in učinkovitim algoritmom, ob tem pa imamo še relativno preprost vmesnik za izvajanje meritve in programiranje, je uspeh ponavadi zagotovljen. Vsekakor se moramo tudi potruditi in čim bolj kvalitetno sestavljalni senzorje. Kljub temu pa bo skrbno izbran algoritem omogočal kompenzacijo tudi nekaterih napak, ki se pojavijo pri tehnoških postopkih med sestavljanjem senzorjev tlaka. Ker pa imajo, tako kot vse dobre stvari, tudi algoritmi umerjanja neke svoje omejitve, lahko hitro zaidemo izven meja, ki jih je izbrano umerjanje še sposobno popraviti in pretvoriti v kvaliteten izhodni signal, ki bo imel odziv znotraj zahtevanih toleranc preko celotnega delovnega področja tlakov in temperatur.

Najbolj kritične odpovedi lahko hitro odkrijemo, težave pa nastopijo, ko imamo opravka z navidez dobrim senzorjem pred postopkom umerjanja, po končanem umerjanju pa ugotovimo, da le ni bil tako dober in da ga z izbranim vezjem ne moremo spraviti v tolerance.

3.6.1 Splošen model umerjanja

Da lahko določimo model umerjanja, moramo najprej matematično opisati prenosno funkcijo tlačnega pretvornika v celoti. Eden od pristopov je uporaba Taylorjevih vrst za opis poljubnih prenosnih funkcij. Tako lahko zapišemo splošno obliko prenosne funkcije poljubnega senzorja.

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=0}^{D(1)} \sum_{j=0}^{D(2)} \dots \sum_{p=0}^{D(n)} C_{i,j,\dots,p} [x_1 - H_1]^i [x_2 - H_2]^j \dots [x_n - H_n]^p \quad (3.24)$$

Za senzor tlaka izraz poenostavimo na dva parametra in sicer digitalizirano vrednost napetosti tlaka V_p iz izhoda senzorskega mostiča in digitalizirano vrednost napetosti V_T , ki nosi informacijo o temperaturi. Silicijevi senzorji tlaka imajo relativno linearen odziv za tlačna področja okrog 1 bar, kamor spada tudi naš MAP senzor. Zaradi linearnega odziva je dovolj, če za približek prenosne funkcije uporabimo polinom drugega reda za tlak in linearno funkcijo za temperaturo.

$$F(x_p, x_T) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^1 C_{i,j} [x_p - H_i]^i [x_T - H_j]^j \quad (3.25)$$

Napake, ki še ostanejo po opisu prenosne funkcije v prikazani obliki so v glavnem zaradi ponovljivosti in temperaturne histereze. Za kar najboljše rezultate lahko temperaturna in tlačna področja razdelimo na segmente in celotno umerjanje izvajamo po segmentih. Pri umerjanju senzorja avtomobilske aplikacije je dovolj, če umerjamo

pri treh tlakih in treh temperaturah.

3.6.2 Implementacija modela

Pri realnem senzorju tlaka je celotno delovno področje tlakov in temperatur razdeljeno na segmente. Med točkami stičišč segmentov naredimo približek karakteristike s pomočjo polinoma in s pomočjo takega približka umerimo senzor tlaka na želen odziv.

Mikrokrmilnik v vezju za digitalno umerjanje ima svoj algoritom izračuna izhodne vrednosti, ki sloni na izrazu (en. 3.25). Algoritom je optimiziran glede na izbrano arhitekturo in ločljivost pretvorbe AD in DA pretvornikov. Pri tem se upošteva kar najmanjsa možna numerična napaka ob uporabi najhitrejših postopkov izračuna. Deljenje je pri tem nekako nezaželeno, saj vnaša numerične napake, obenem pa zahteva veliko ciklov za izračun. Ker vsaj deloma poznamo pričakovane vrednosti vhodnih in izhodnih napetosti, lahko določimo obsege lokalnih vrednosti znotraj izračuna. Pomembna postavka, predvsem s cenovnega vidika je tudi potreba algoritma po pomnilniku. Večje potrebe pomenijo večji interni pomnilnik in s tem večjo površino silicija, kar posledično pomeni dražje vezje. V našem primeru se izdelujejo senzorji v velikih količinah, kjer pa vsak cent šteje. V praksi se je izkazalo, da potrebam senzorja za avtomobilsko industrijo ob uporabi tipične eno-barske silicijeve tabletke ugodimo z uporabo šestnajst bitne aritmetike. Pri tem so suroví odčitki AD pretvornika lahko 14 bitni, izhodni DA ojačevalnik pa celo 12 biten. Pri tem morajo biti napetosti pred pretvorbo na grobo skalirani in zapeljani v aktivno delovno področje s pomočjo programirljivega pred-ojačevalnika. V prikazanem primeru MAP senzorja imamo tako 7 konstant, ki so shranjene v internem EEPROM pomnilniku. Senzorski mostič je priključen na programirljiv ojačevalnik, ki tako ojači izhodno napetost mostiča, da je analogno-digitalni pretvornik kar najbolje izkoriščen. Poleg podatka o tlaku mikrokrmilnik potrebuje še podatek o temperaturi, da lahko izračuna korekcijsko formulo, v kateri nastopa tlak (x_p) in temperatura(x_T).

$$F(x_p, x_T) = 2^{12} \frac{4x_p + 2^{-24}a_0x_p^2 + a_1 + 2^{-9}a_2x_T + 2^{-18}a_3x_T^2}{a_4 + 2^{-9}a_5x_T + 2^{-18}a_6x_T^2} \quad (3.26)$$

Funkcijo še preoblikujemo v naslednjo obliko:

$$F(x_p, x_T) = \frac{C_0 + C_1x_p + C_2x_p^2 + C_3x_T + C_4x_T^2}{C_5x_T + C_6x_T^2} \quad (3.27)$$

Za izračun odziva moramo seveda poznati konstante. Te določimo v času umerjanja pri referenčnih pogojih.

3.6.3 Postopek umerjanja MAP senzorja

Izraz (en. 3.27) je konkreten primer korekcijskega polinoma, s pomočjo katerega se izračuna izhodna numerična vrednost $F(x_p, x_T)$. To vrednost izračuna mikrokrmilnik in z njim izhodni analogno-digitalni pretvornik, ki generira izhodno napetost. Na izhodu je še en ojačevalnik, ki poskrbi za ustrezno izhodno upornost. V korekcijski formuli nastopajo koeficienti a_0 do a_6 , ki jih moramo določiti za vsak senzorski mostič posebej. To se imenuje postopek umerjanja.

Ko je senzor sestavljen in pripravljen za umerjanje, ga izpostavimo več različnim referenčnim pogojem, npr. trem različnim tlakom in trem različnim temperaturam. V vsaki od teh devetih točk (tri tlaki \times tri temperature = 9 meritnih točk) preko digitalnega vmesnika odčitamo stanje na izhodu internega analogno-digitalnega pretvornika, ko ta pretvarja tlakno in temperaturno napetost. Za vsak meritni rezultat zapišemo enačbo z izmerjenimi x_p in x_T in nastavimo sistem polinomskih enačb za koeficiente a_0 do a_6 . Te enačbe potem rešimo in dobimo ven vrednosti korekcijskih koeficientov. Na koncu te vrednosti še zapišemo v interni spomin in na tak način pridemo do umerjenega senzorja tlaka.

3.6.3.1 Izračun koeficientov digitalnega umerjanja

Za izračun koeficientov potrebujemo podatek o tlaku in temperaturi, ki jih izračunamo iz surovih odčitkov iz digitalnega vezja ZMD31020. Podatek o temperaturi dobimo z merjenjem napetosti na interni diodi. Ta napetost je proporcionalna temperaturi PN spoja diode. Da dobimo vrednosti, ki so primerne za celoštevilsko aritmetiko, je odčitek te napetosti premaknjen in skaliran (En. 1.27 do 1.29).

$$T_1 = 2^{10} \left(\frac{V_{offsetT}}{0,98V} + \frac{1}{16} \right) \quad (3.28)$$

$$T_2 = 2^{10} \left(\frac{V_{temp} + V_{offsetT}}{0,98V} + \frac{1}{16} \right) \quad (3.29)$$

$$T_{OC} = T_2 - T_1 \quad (3.30)$$

Pri tem je:

T_1 - rezultat pretvorbe temperaturnega A/D pretvornika ko je na vhodu napetost PN spoja temperaturne diode pri izhodiščni temperaturi

T_2 - rezultat pretvorbe temperaturnega A/D pretvornika ko je na vhodu napetost PN spoja temperaturne diode pri opazovani temperaturi

$V_{offsetT}$ - ničelna napetost pri merjenju napetosti temperaturne diode

V_{temp} - napetost temperaturne diode

0,98 V - referenčna napetost temperaturnega A/D pretvornika za temperaturo

Za izračun koeficientov umerjanja uporabljamo vrednost T_{OC} .

Poleg podatka o temperaturi potrebujemo še podatek o izmerjenem tlaku. Surov odčitek dobimo na podoben način kot temperaturo (En. 3.31 do 3.33).

$$p_1 = 2^{12} \left(\frac{vV_{offsetP}}{0,96V(V_{DDA} - V_{SA})} + C \right) \quad (3.31)$$

$$p_2 = 2^{12} \left(\frac{v(V_{sensor} - V_{offsetP})}{0,96V(V_{DDA} - V_{SA})} + C \right) \quad (3.32)$$

$$p_{OC} = p_2 - p_1 = 2^{12} \left(\frac{vV_{sensor}}{0,96V(V_{DDA} - V_{SA})} \right) \quad (3.33)$$

Pri tem je:

p_1, p_2 - odčitek iz tlačnega AD pretvornika

v - ojačenje programljivega ojačevalnika

$V_{offsetP}$ - ničelna napetost diferencialnega ojačevalnika

0,96(V_{DDA}-V_{SA}) - referenčna napetost A/D pretvornika

C - premik A/D pretvorbe zaradi zajema negativnih vhodnih napetosti

Vrednosti parametrov a_0 do a_6 izračunamo s pomočjo sistema enačb (sistem en. 1.34), ki ga nastavimo iz korekcijske formule, ki jo mikrokrnilniku porablja za kompenzacijo surovih odčitkov p_{OC} in T_{OC} v vrednost Z , ki predstavlja umerjeni izhodni signal (en 1.33).

$$Z = \frac{kp_{OC} + a_0 + a_1 p_{OC}^2 + a_2 T_{OC} + a_3 T_{OC}^2}{a_4 + a_5 T_{OC} + a_6 T_{OC}^2} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned}
Z_0 &= \frac{kp_{OC00} + a_0 + a_1 p_{OC00}^2 + a_2 T_{OC0} + a_3 T_{OC}^2}{a_4 + a_5 T_{OC0} + a_6 T_{OC0}^2} \\
Z_1 &= \frac{kp_{OC10} + a_0 + a_1 p_{OC10}^2 + a_2 T_{OC0} + a_3 T_{OC0}^2}{a_4 + a_5 T_{OC0} + a_6 T_{OC0}^2} \\
Z_2 &= \frac{kp_{OC20} + a_0 + a_1 p_{OC20}^2 + a_2 T_{OC0} + a_3 T_{OC0}^2}{a_4 + a_5 T_{OC0} + a_6 T_{OC0}^2} \\
Z_0 &= \frac{kp_{OC01} + a_0 + a_1 p_{OC01}^2 + a_2 T_{OC1} + a_3 T_{OC1}^2}{a_4 + a_5 T_{OC1} + a_6 T_{OC1}^2} \\
Z_2 &= \frac{kp_{OC21} + a_0 + a_1 p_{OC21}^2 + a_2 T_{OC1} + a_3 T_{OC1}^2}{a_4 + a_5 T_{OC1} + a_6 T_{OC1}^2} \\
Z_0 &= \frac{kp_{OC02} + a_0 + a_1 p_{OC02}^2 + a_2 T_{OC2} + a_3 T_{OC2}^2}{a_4 + a_5 T_{OC2} + a_6 T_{OC2}^2} \\
Z_2 &= \frac{kp_{OC22} + a_0 + a_1 p_{OC22}^2 + a_2 T_{OC2} + a_3 T_{OC2}^2}{a_4 + a_5 T_{OC2} + a_6 T_{OC2}^2}
\end{aligned} \tag{3.35}$$

Ko rešimo sistem enačb, dobimo koeficiente a_0 do a_6 , ki jih ob koncu umerjanja zapišemo v interni spomin mikrokrmilnika in s tem končamo kalibracijski postopek. To moramo storiti za vsak senzor, saj se senzorski mostiči in parametri digitalnega umerjanja razlikujejo od kosa do kosa. Raztros parametrov je prevelik že za samo senzorsko tabletko, tako da statistične metode umerjanja ne pridejo v poštev.

Med izvajanjem umerjanja zajemamo gole odčitke iz senzorskega mostiča v točno določenem zaporedju. Zaporedje izvajanja meritev imenujemo scenarij (umerjanja), pri tem pa ima vsaka vrsta senzorja svoj scenarij. Ta se določi v fazi razvoja novega senzorja in omogoča kar najhitrejše izvajanje meritev za zajem podatkov pri umerjanju ob najmanjšem možnem številu tlačnih in temperaturnih točk, ki še vedno omogočajo izdelavo senzorjev z želeno končno točnostjo.

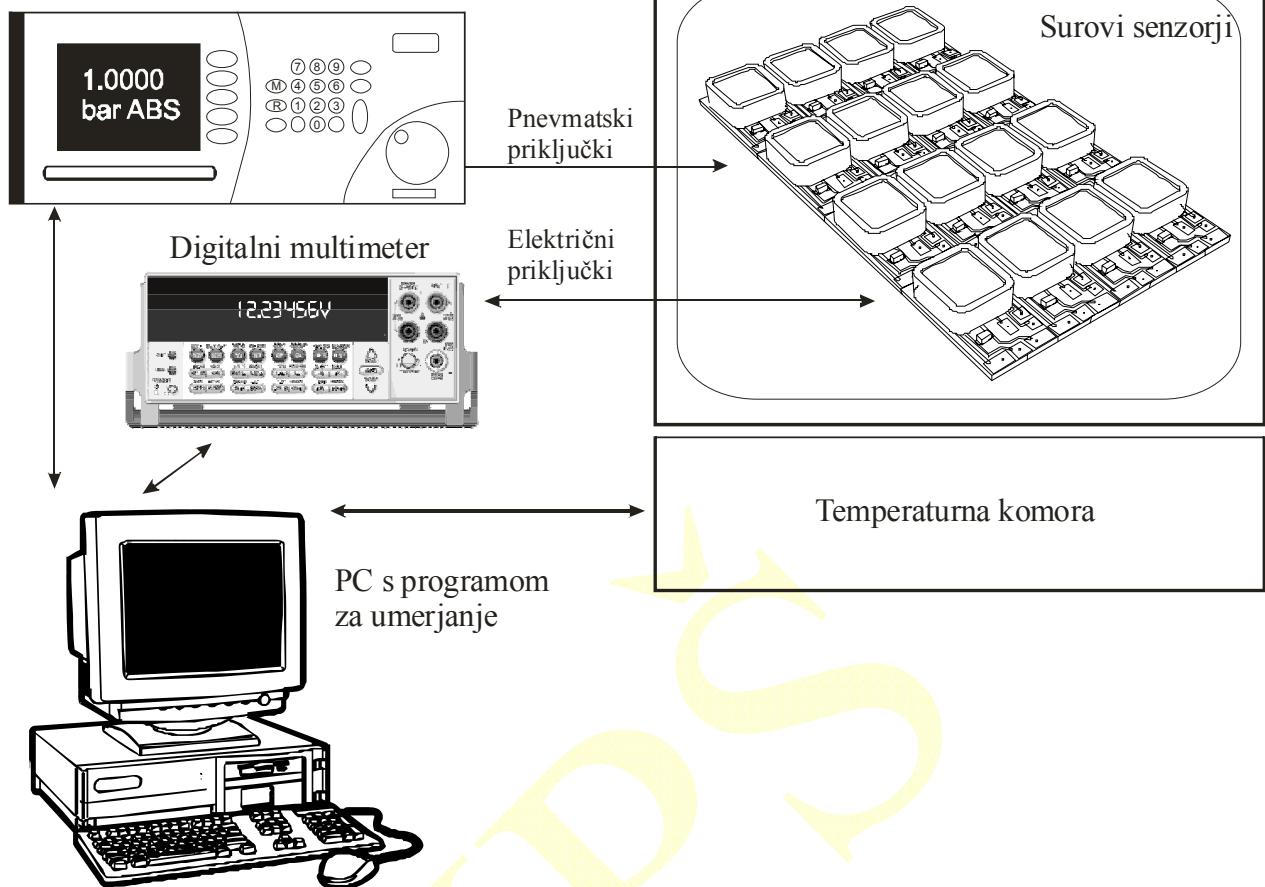
Postopek umerjanja senzorjev tlaka se izvaja v skupinah po 2^N senzorjev naenkrat. Pri umerjanju MAP senzorjev je $N=7$, ali 128 senzorjev naenkrat. Več o izbiri primernega števila senzorjev je napisano v poglavju o optimizaciji.

3.6.3.2 Postavitev opreme za umerjanje

Skupina 2^N senzorjev, ki jih umerjamo naenkrat je priključena preko meritne opreme na meritni računalnik, kjer se izvaja namenski meritni program za nadzor umerjanja senzorjev. Celotna oprema, zasnovana v podjetju HYB je tako fleksibilna, da omogoča takojšnjo izbiro poljubnega števila senzorjev ali praktično hipno zamenjavo tipa senzorja, ki se umerja. Glavni sestavni elementi opreme so tlačni vir, napetostni vir, digitalni multimeter, programirljiva temperaturna komora in digitalni vmesnik s kontaktnimi iglami za priklop merjencev. Scenariji umerjanja so shranjeni v podatkovni bazi, operater pa pri tem samo izbere tip senzorja, ki ga umerja. Vsi izmerjeni podatki se shranijo v podatkovni bazi, sledljivost pa se ohranja s pomočjo shranjene unikatne serijske številke, ki je zapisana v internem EEPROM pomnilniku vsakega senzorja in je enaka zaporedni številki zapisa v podatkovni tabeli za izbrani tip senzorja. S tem je omogočena sledljivost od kosa do kosa za vsak izdelan, digitalno umerjen senzor tlaka.

Sestavni deli sistema za umerjanje so prikazani na sliki 18.

Tlačni kalibrator



Slika 18: Sistem za umerjanje MAP in sorodnih senzorjev tlaka

3.6.3.3 Scenarij umerjanja

Ustaljeni scenarij umerjanja pri treh temperaturnih točkah in treh tlakih lahko razbijemo na 19 osnovnih korakov, kot je prikazano v tabeli 2. V prvih dveh korakih prikazanega postopka zapolnimo prosta mesta na merilnih mestih s svežimi, pravkar sestavljenimi senzorji. Pri tem upamo, da so izbrani kandidati taki, da bojo po končanem umerjanju vsi dobri. To lahko ugotovimo šele, ko je celoten scenarij umerjanja zaključen in ko smo izpostavili senzorje vsem trem tlakom in temperaturnim točкам.

Žal v praksi ni vedno tako. Če med umerjanjem zaznamo slab senzor, ko je trenutna sarža že bila izpostavljena nekaterim referenčnim pogojem, tega slabega senzorja ne moremo kar tako zamenjati, ampak je potrebno postopek končati. Postopek lahko tudi prekinemo, zamenjamo slab senzor in ponovimo vse skupaj od koraka št. 3 naprej. Za katero možnost se odločimo je odvisno od tega, kdaj smo ugotovili, da je senzor slab in od števila takih senzorjev. Če se to zgodi v začetnih korakih, ko senzorje merimo pri prvi temperaturi (ki je blizu sobni), se je še smiselno odločiti za ponovitev celotnega postopka, sploh če je teh senzorjev več. Če pa ugotovimo odpoved takrat, ko smo že preskočili na novo temperaturno točko, pa je menjava skoraj nesmiselna, saj temperaturna stabilizacija pobere večino časa.

Tabela 2 Koraki umerjanja pri scenariju {3p/3T}

Številka koraka	Operacija	Potreben čas (min)
1	Začetna nastavitev	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

Tabela 3 Tipične točnosti, ki jih lahko dosežemo pri uporabi nekaterih scenarijev umerjanja

Vrsta scenarija	N_p	N_T	Ciljna točnost (%FSO)
{2P/2T}	2	2	1%
{3P/2T}	3	2	0,5%
{3P/3T}	3	3	0,2%
{4P/3T}	4	3	0,1%

3.6.3.4 Časovna opredelitev postopka umerjanja

Kumulativni čas umerjanja za scenarij {3p/3T} je prikazan v tabeli 2. Nastavitev in hitri predtest sta končana relativno hitro. Po koraku št. 3 skupen čas hitro naraste. Vsaka stabilizacija temperature zahteva zajeten časovni interval. V praksi je celoten postopek končan nekje v 70 minutah, kadar je uporabljen tipični {3p/3T} scenarij umerjanja. V tem času lahko pričakujemo senzorje s končno napako pod 0,5% FSO preko celotnega temperaturnega področja. Če želimo izdelovati bolj točne senzorje, moramo povečati število točk zajema. S tem pa močno podaljšamo tudi celoten potrebnii čas za umerjanje in izdelavo.

V nadaljevanju prikazani MAP senzor za avtomobilske aplikacije zahteva scenarij {3p/3T}, ki zadostuje za reševanje sistema enačb za izračun kalibracijskih koeficientov. Glede na mnogo krajši čas stabilizacije tlaka v primerjavi s časom stabilizacije temperature je pametno, da nastavljamo vse tri tlake potem, ko je enkrat temperatura stabilizirana.

4 Oprema za umerjanje senzorjev tlaka

V prejšnjem razdelku smo omenili, da moramo senzorje tlaka izpostaviti referenčnim pogojem. Za ta namen uporabimo različne vire tlakov in temperaturne komore. V našem primeru je bila uporabljena temperaturna komora Vötsch in programirljiv vir tlaka Druck DPI 520. Poleg standardnih instrumentov, ki jih lahko kupimo na prostem trgu, so za digitalno umerjanje potrebni še vmesniki, ki omogočijo komunikacijo med programsko opremo za umerjanje in posameznimi tlačnimi pretvorniki. V ta namen je bilo potrebno izdelati lastne rešitve, saj take opreme ni na tržišču.

4.1 Vir tlaka

Uporabljen DPI520 proizvajalca Druck [49] omogoča popoln nadzor nad dovajanjem merilnega tlaka. Za nastavljanje uporablja dvojno krmilno zanko, ki omogoča hiter odziv in ponovljive rezultate. V praksi se je pokazal kot odličen vir tlaka na področju umerjanja in končne kontrole senzorjev tlaka. Programiranje naprave je možno preko serijskega vmesnika RS232 ali preko paralelnega vmesnika IEEE-488.

4.2 Temperaturna komora

Temperaturna testna komora je namenjena za testiranje komponent in sklopov pod različnimi temperaturnimi pogoji. Z različnimi hitrimi spremembami temperature ugotavljamo odziv komponent in jih po potrebi prilagodimo za različna temperaturna območja. Z daljšim testiranjem ugotovimo, kako se bo izdelek obnašal skozi daljše časovno območje in s tem njegovo življenjsko dobo oziroma potrebo po ponovni kalibraciji. Temperaturna komora Votsch VT 7011 [11] omogoča temperaturni razpon od -70°C do +180°C kar je izredno ugodno za dolgotrajna ciklična testiranja, ki vsebujejo tako hlajenje kot tudi segrevanje ambienta.

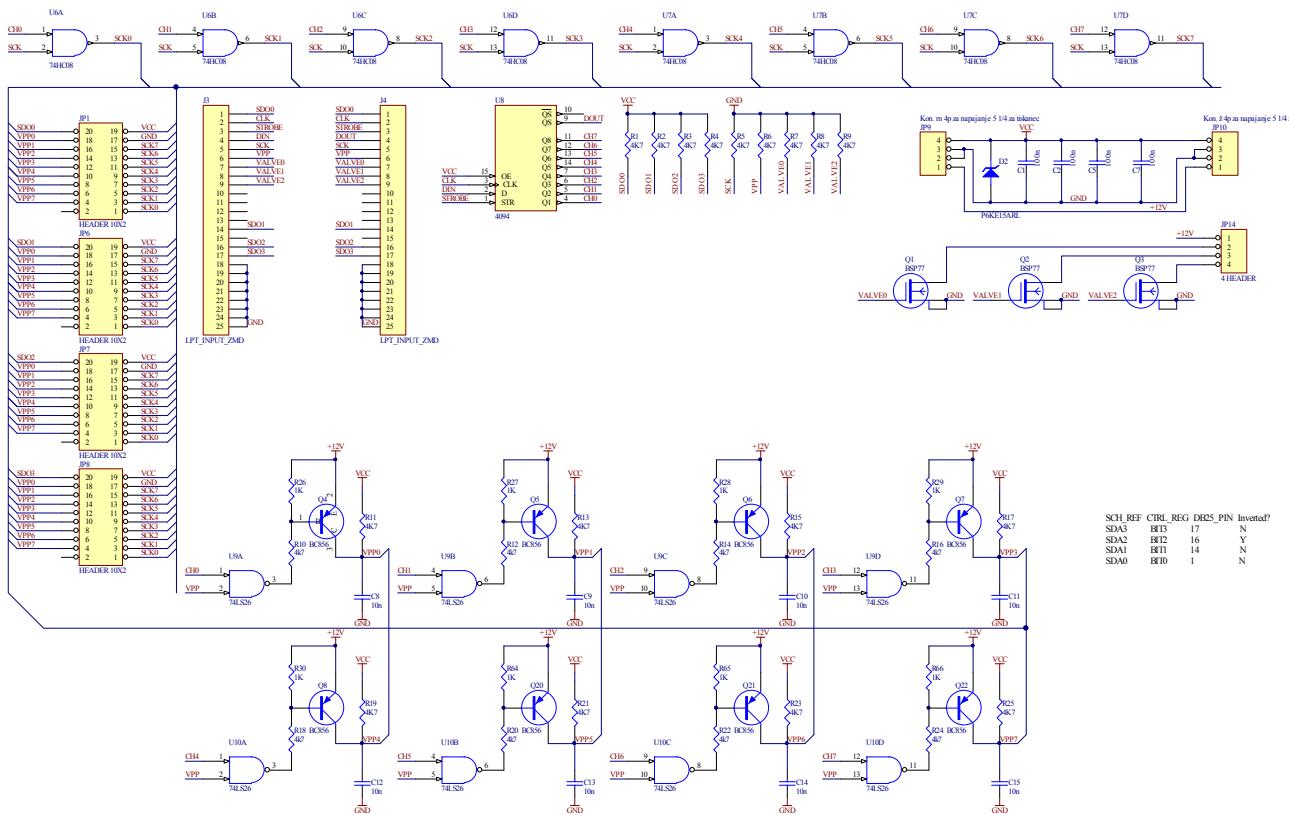
Za električna merjenja in v našem primeru priklop tlaka na senzorje ima komora posebno odprtino kjer speljemo vse potrebne signale in dodatne meritne veličine. Nastavitev lahko izvajamo preko ročnega terminala ali pa preko računalniške komunikacije.

4.3 Vmesnik za komunikacijo

Za komunikacijo med vezjem za digitalno umerjanje senzorjev in nadzorno aplikacijo se uporablja poseben vmesnik, ki omogoča priključitev množice senzorjev na en sam standardni digitalni vmesnik, ki je na voljo na vsakem sodobnem računalniku. V našem primeru smo uporabili dva različna tipa vmesnika, ki sta bila oba razvita v podjetju HYB. Prvi je namenjen digitalnemu umerjanju in je del celotnega sistema za umerjanje. Na strani računalnika je priključen na standardna (IEEE1284) vzporedna tiskalniška vrata (LPT) [12]. Drug tip vmesnika pa je vmesnik z večjo gostoto, ki omogoča hiter končni test tlačnih senzorjev in je povezan preko zaporedne povezave RS232 ali preko USB vmesnika.

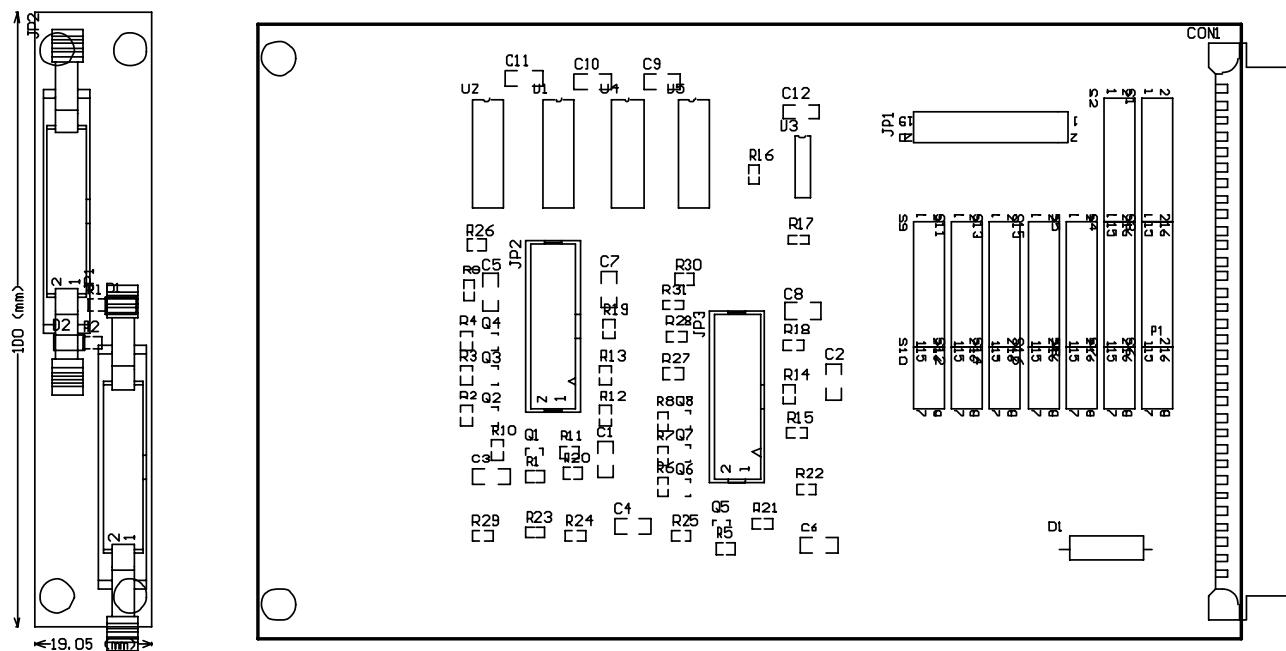
4.3.1 Digitalni vmesnik za umerjanje

Vmesnik omogoča priklop skupin po 32 senzorjev tlaka na en vmesniški modul. Module lahko povezujemo v kaskado in s tem razširimo kapaciteto sistema. Moduli so namenjeni komunikaciji s posameznimi senzorji preko I²C vodila. S kaskadnim povezovanjem dosežemo poljubne velikosti sistema. Število kanalov digitalnega vmesnika mora biti podprt z enakim številom meritnih kanalov v digitalnem multimetru, sicer je vsako širjenje nesmiselno. Ta vmesnik se uporablja med umerjanjem v masovni proizvodnji. Poleg opisanega vmesnika je na voljo še manjši za izvajanje vmesnih testov in hitrih preizkusov.



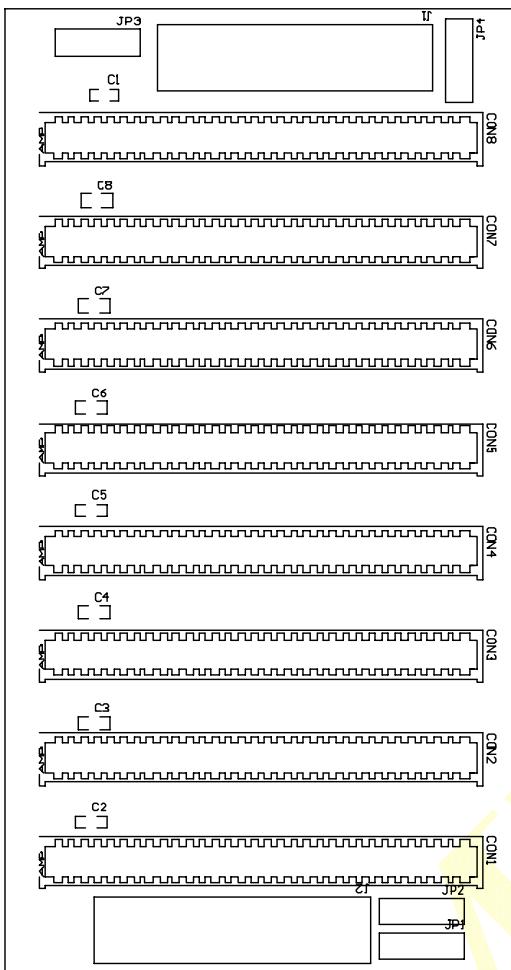
Slika 19: Shema komunikacijskega vmesnika za povezavo nadzornega računalnika s senzorji, ki jih umerjamo

Digitalni vmesnik, prikazan na sliki 19 komunicira z 32 senzorji in je izdelan na tiskanini standardnih dimenzijs 100x160mm (t.i.m. »evropa« kartica). Izgled vmesnika je prikazan na sliki 20. V sistemu je lahko več takih kartic, ki so med seboj povezane preko skupnega vodila (sl. 21).



Slika 20: Tiskano vezje komunikacijskega vmesnika za povezavo z 32 senzorji

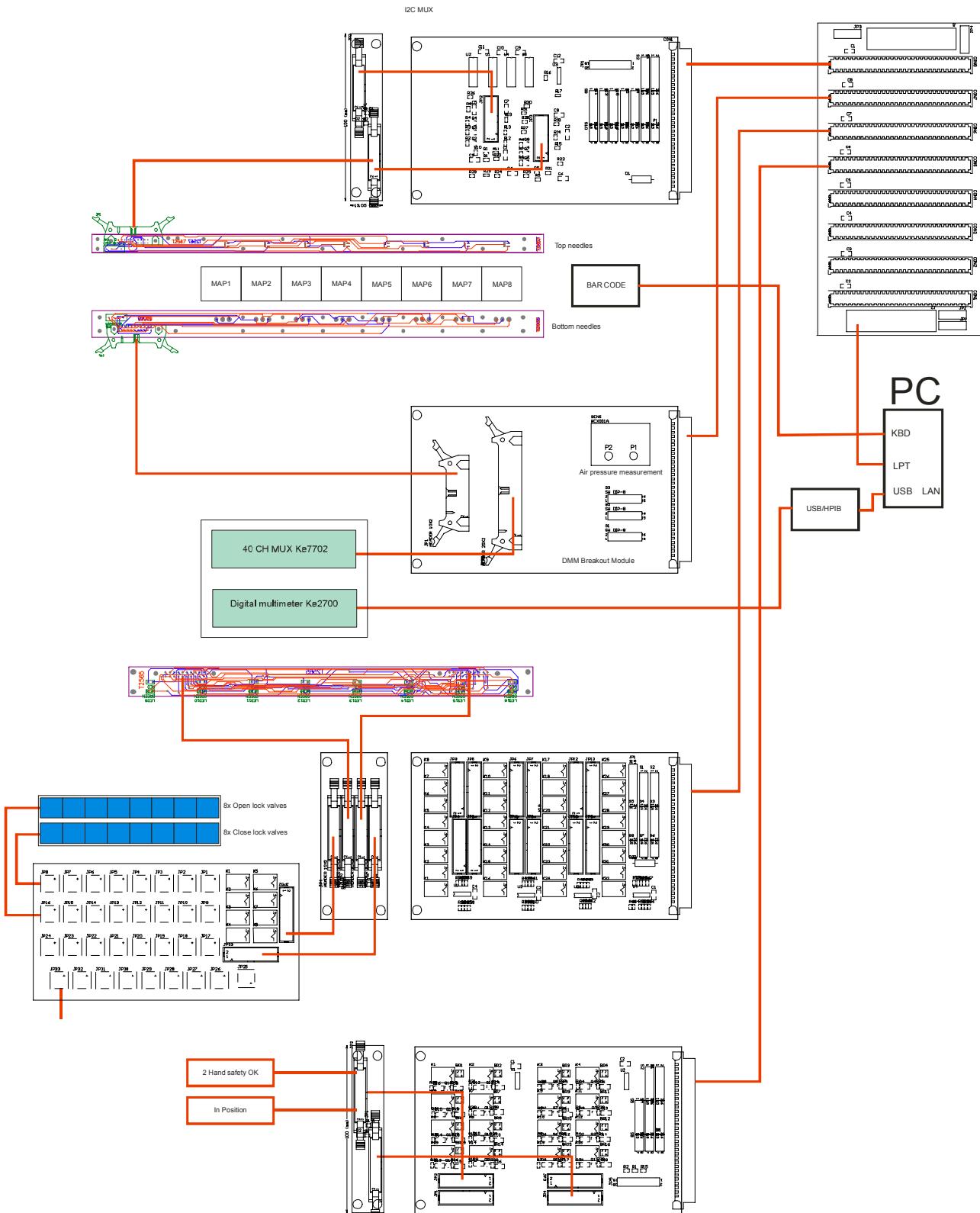
Na skupnem vodilu (slika 21) so lahko priključeni še ostali moduli, ki so bili razviti za potrebe preizkušanja, kalibriranja in razvoja novih senzorjev na osnovi digitalnih kompenzacijskih postopkov.



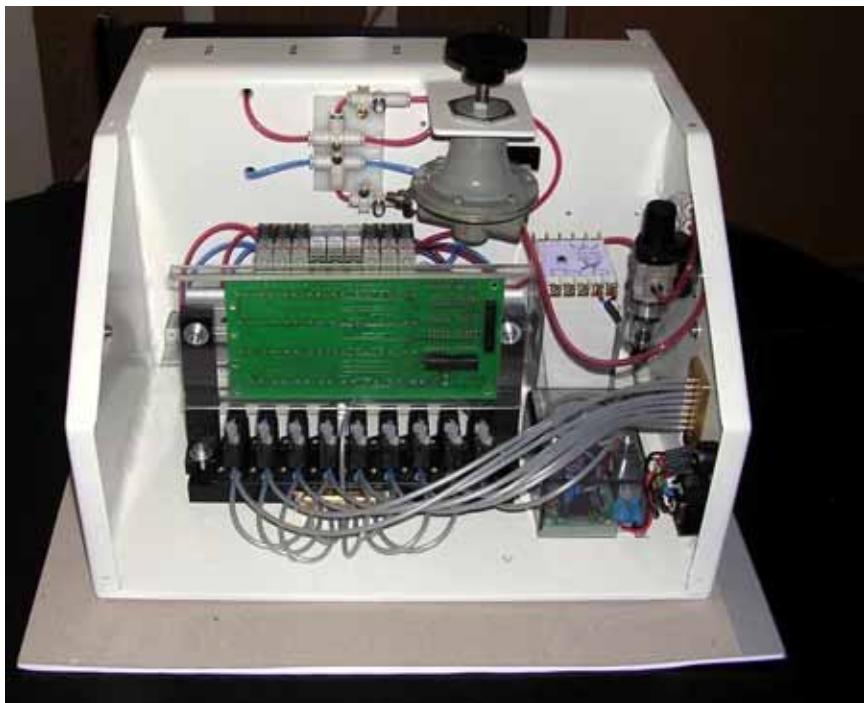
Slika 21: Tiskano vezje vodila, ki povezuje posamezne module med seboj.

Celoten sistem je prikazan na sliki 22. Razen meritnih instrumentov, komore in tlačnega vira so vsi moduli plod lastnega razvoja. Sistem je grajen modularno, kar pomeni, da ga lahko poljubno nadgrajujemo in skaliramo. V praksi je bilo preizkušeno kalibriranje 256 senzorjev naenkrat. V praksi se uporablja manjše število, saj se pri prevelikem številu hkratnih kalibracij pojavljajo druge težave, npr. puščanje v priključnih komorah, predolgi časi priprave, ne preveč priročne velikosti posameznih sarž in podobno.

Prikazan sistem smo izdelali tudi za zunanje partnerje, kjer se uporablja pri končnem sestavljanju MAP senzorjev. Pri tem gre za deljeno proizvodnjo, saj se v HYB izdelujejo samo polizdelki (kalibrirani senzorji brez plastičnega ohišja). Ti se potem prenesejo skupaj s podatki iz proizvodne podatkovne baze na oddaljeno lokacijo, kjer se posamezni kosi najprej identificirajo in ponovno pripnejo podatkom. Sledi zapiranje in končni preizkus, kjer celoten sistem poskrbi za ohranjevanje identifikacije in s tem končanje zapisa o posameznem senzorju s podatki o končni meritvi. Na koncu dobimo senzor tlaka, ki je opremljen z unikatno serijsko številko. Ta se ujema z zaporedno številko zapisa v podatkovni bazi, kjer so vsi meritni rezultati, vrednosti kalibracije, stanje referenčnih parametrov med kalibracijo, podatki o času in datumu in rezultati končnega preizkusa.



Slika 22: Blok shema povezovanja posameznih modulov digitalnega kalibracijsko preizkuševalnega sistema

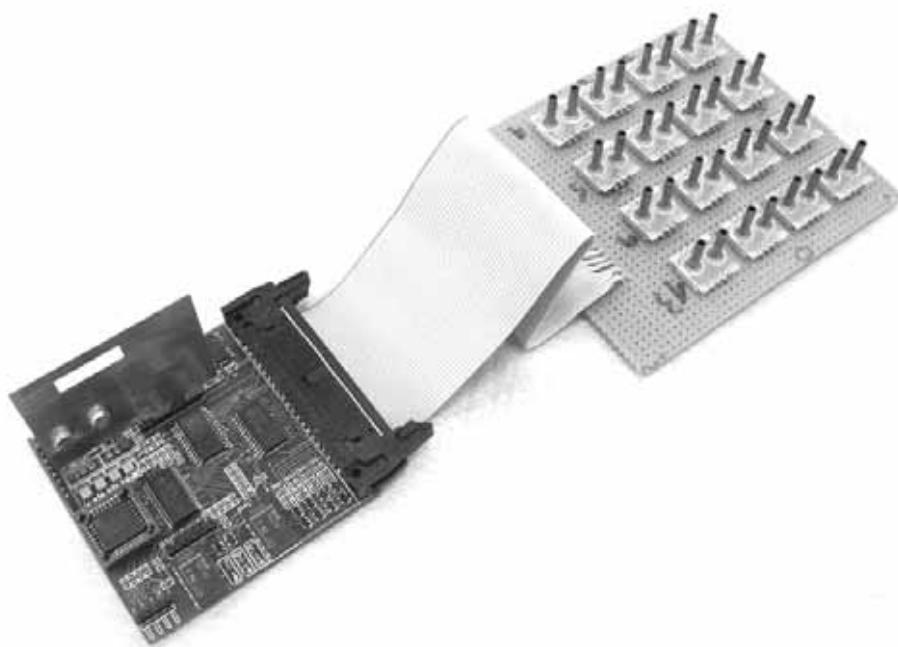


Slika 23: Izgled naprave, ki se uporablja pri proizvodnji MAP senzorjev

Izdelana naprava za preizkušanje MAP senzorjev je prikazana na sliki 23. Celotna naprava je plod lastnega znanja in je bila v celoti načrtovana in izdelana v podjetju HYB. Združuje vse opisane module za komunikacijo in nadzor avtomatičnega kalibracijskega postopka in preizkušanja MAP senzorjev.

4.3.2 Digitalni vmesnik za hitri test

Manjši vmesnik je namenjen uporabi za hitre preizkuse ali za manjše kalibracijske sisteme za izdelavo senzorjev tlaka na osnovi digitalnega umerjanja [2]. Vsak modul omogoča priklop 16 senzorjev. Do vsakega lahko dostopimo povsem neodvisno. Modul tudi omogoča merjenje izhodne napetosti senzorja brez digitalnega multimetra. Seznam vseh funkcij vmesnika je prikazan v tabeli 6.



Slika 24: Fotografija izdelanega digitalnega vmesnika z umerjanje in preizkušanje senzorjev na osnovi digitalnih vezij za umerjanje

Tabela 4 funkcije digitalnega vmesnika za hitri test senzorjev z digitalnim umerjanjem

Funkcija
Preklapljanje napajalne napetosti
Ločen digitalni vmesnik (I2C) za vsak senzor
Ločen digitalni vmesnik (OWI) za vsak senzor
Meritve izhodne napetosti s 16 bitnim AD pretvornikom
Dodatni rele za preklop delovnega tlaka

4.3.2.1 Povezovanje

Več modulov lahko povežemo preko enega vodila RS485. Vsak modul na vodilu ima lastni naslov [13], sočasno pa je lahko na enem vodilu 128 modulov, kar zadostuje za (128x16) senzorjev.

4.3.2.2 Merjenje napetosti

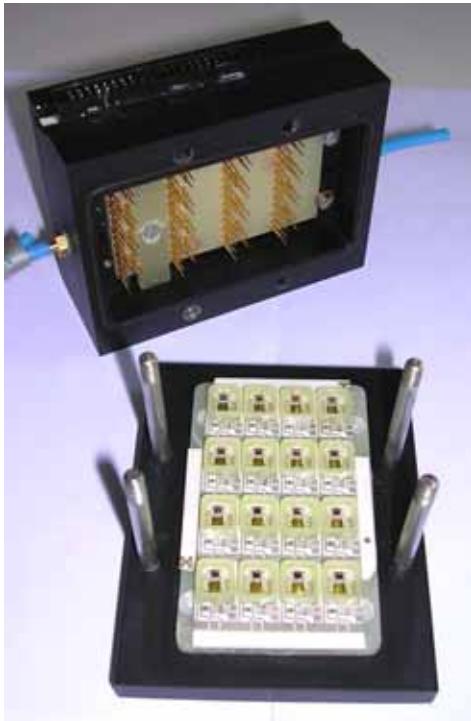
Izhod iz senzorjev merimo s 16-bitnim AD pretvornikom. Referenčna napetost pretvornika je lahko precizna 5V referenca ali pa napajalna napetost senzorjev tlaka. V primeru MAP senzorja uporabimo slednje, saj senzor nima interne reference, ampak je njegov izhod proporcionalen napajalni napetosti (ratiometric). Referenco uporabimo v primeru, ko je izhodna napetost senzorja neodvisna od napajalne napetosti [14].

4.4 Digitalni merilnik napetosti

V merilnem sistemu smo uporabili digitalni multimeter Keithley 2700, ki je zmogljiv instrument za merjenje električnih veličin. Dodamo mu lahko različne preklopne enote, ki omogočajo priklop več različnih merjencev naenkrat. Za potrebe umerjanja senzorjev tlaka uporabljamo preklopno matriko 7702 s 40 kanali, Meritve na posameznih kanalih lahko izvajamo v časovnem zaporedju, ki ga vnaprej nastavimo s pomočjo programa za nadzor postopka umerjanja [15].

4.5 Kalibracijska komora

Na sliki 25 je prikazana kalibracijska komora namenjena kalibraciji absolutnih senzorjev. Ti imajo svojo referenčno komoro, v kateri je vakuum, zato jih merimo v komori. Preko enega priključka za tlak znotraj komore ustvarimo ambient z merjenim tlakom. Tega ustvarimo s tlačnim kalibratorjem, konice pa zagotavljajo komunikacijo, napajanje in priklop analogne izhodne napetosti senzorja na merilno matriko multimetra.



Slika 25: Kalibracijska komora

Konstrukcija komore mora biti taka, da ne vnaša dodatnih sil na substrat, ki bi pomenile neželene vplive na merjeni izhodni signal. S tem bi v postopek umerjanja vnesli napake, ki bi vplivale na končni rezultat umerjanja in s tam lastnosti izdelanega senzorja. Komora deluje v zelo zahtevnih pogojih. Tesnjenje mora biti zagotovljeno pri vseh temperaturah umerjanja od -40°C do $+125^{\circ}\text{C}$, pri podtlakih do -900mbarin nadtlakih 1000mbar.

Poleg prikazane komore lahko v istem sistemu za umerjanje uporabimo še druge priključne vmesnike za ostale vrste senzorjev tlaka, ki delujejo s pomočjo istega umerjalnega vezja.



Slika 26: Primer kalibracijskih vmesnikov za različne vrste senzorjev

Na sliki 26 vidimo še dva primera merilnih priključkov. V tem primeru gre za umerjanje diferencialnih senzorjev. Leva slika prikazuje vmesnik za enega najmanjših tlačnih stikal, kjer je znotraj vijaka M8 celotna elektronika za umerjanje senzorja in senzorska tabletka. Desna slika pa prikazuje večnamenski senzor tlaka, ki je namenjen vgradnji na tiskano vezje in se izdeluje za različna tlačna področja od 20 mbar do 5 bar delovnega tlaka, namenjene merjenju diferencialnih, relativnih ali absolutnih tlakov.

5 Merjenci

5.1 Senzorji tlaka za avtomobilske aplikacije

Prikazane metode in postopke si bomo ogledali na konkretnem primeru senzorja tlaka za uporabo v avtomobilski industriji. Senzor se v podjetju HYB izdeluje v velikih serijah in je idealen kandidat za preverjanje opisanega v praksi. Senzor meri absolutni zračni tlak na mestu sesanja zraka v motor in je znan pod kratico MAP senzor. Zaradi lažjega razumevanja umestitve MAP senzorja na področju avtomobilske senzorike sledi še kratek pregled senzorjev tlaka v avtomobilu.

Zračne senzorje tlaka srečamo v naslednjih avtomobilskih aplikacijah[16]:

- Barometrični senzor za merjenje zračnega tlaka
 - 60...110kPa
 - Analogni izhodni signal
- MAP senzor za merjenje tlaka vsesanega zraka
 - Aboslutni laki pod 400kPa
 - Odzivni časi pod 1ms
 - Temp. področje -40 do 130°C
- MAP + temperatura (kombiniran senzor)
 - Dve funkciji v enem senzorju
- Senzor tlaka v pnevmatikah

Senzorji tlaka v tekočinah se delijo na dve skupini in sicer na senzorje za nižje tlake in za višje tlake.

Tlačne senzorje nižjih tlakov v tekočinah srečamo na naslednjih področjih:

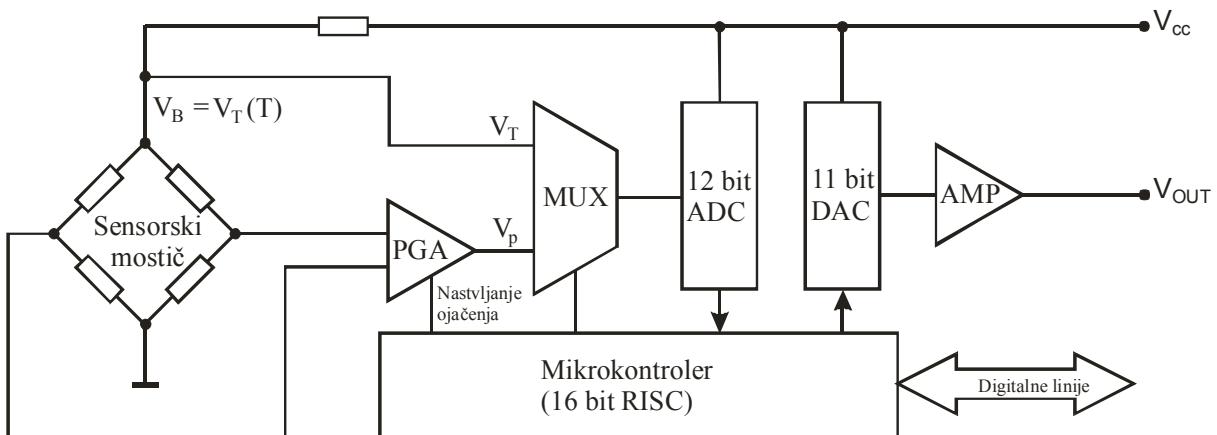
- Nadzor pritiska olja
- Merjenje stanja filtra goriva
- Merjenje pritiska hladilne tekočine
- Olje, voda, gorivo (10 bar)
- Zavorna tekočina (250 bar)
- Hidravlika sklopke (100 bar)

Senzorji morajo biti odporni na tekočine (gorivo, olje...). Merilno področje imajo do tlakov 100bar (abs). Imeti morajo hitri odzivni časi (<1ms). Delovno temperaturno področje je od -40°C do 130°C.

Tlačni senzorji za visoke tlake se uporabljajo za nadzor vbrizga na dovodu goriva. Področje tlaka je odvisno od vrste goriva. Za bencin so tlaki 140 do 260 barov, pri dizelskih gorivih pa 1500 do 2000 barov. Odzivni časi teh senzorjev so pod 2ms.

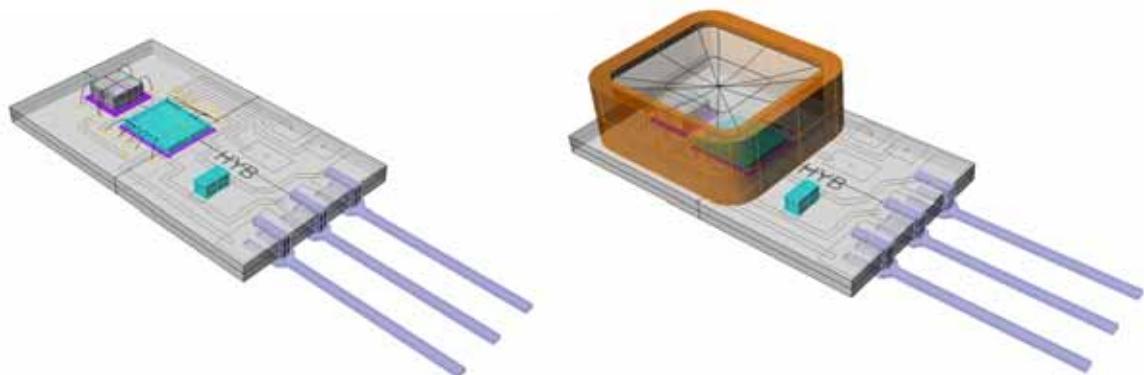
5.2 MAP senzor

Električna shema MAP senzorja je prikazana na sliki 27. Celotno vezje je sestavljen na keramičnem substratu in ga sestavlja dve ključni komponenti. Prva je senzorska tabletka. Gre za absolutno senzorsko tabletko s polnim obsegom 1 bar in je namenjena za aplikacije, kjer se meri zračni tlak. Drug del je namensko digitalno vezje za procesiranje mostičnih senzorskih signalov [17].



Slika 27: Električna blokovna shema MAP senzorja

Celoten senzor je brez ohišja velik $18 \times 10\text{mm}$ in je prikazan na sliki 28. Aktivni del vezja, ki je v stiku z medijem je zaščiten proti vplivom okolice s silikonskim gelom. Ta preprečuje vdor nečistoč med električne povezave, kar bi lahko povzročilo spremembo karakteristike. Ta senzorski element je vgrajen v plastično ohišje, ki omogoča vgradnjo v sklope avtomobilske elektronike (sl.29)

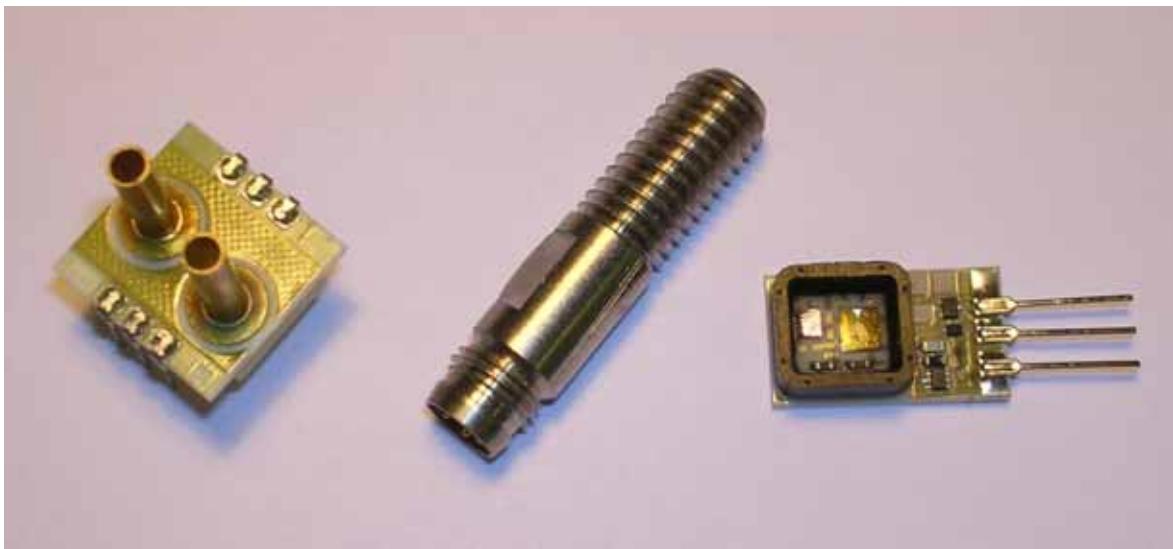


Slika 28: Senzorski del MAP senzorja (levo brez zaščitnega gela, desno z zaščito)



Slika 29: Končna oblika MAP senzorja v plastičnem ohišju

V HYB se proizvajajo še drugi senzorji, ki tudi vsebujejo enako digitalno vezje za umerjanje kot opisani MAP senzor [18].



Slika 30: Primeri sorodnih izdelkov, ki imajo enako električno shemo, a drugačni pnevmatski in električni priključek

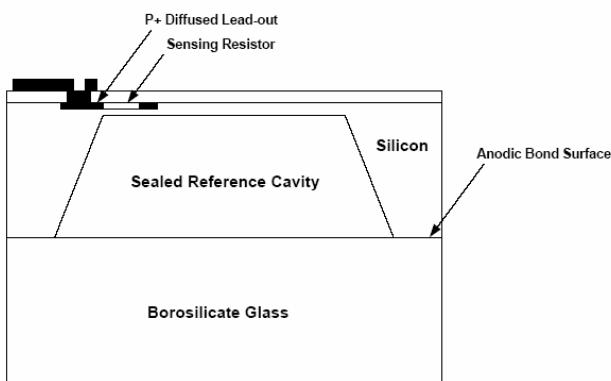
5.2.1 Vezje za digitalno umerjanje

Vezje ZMD31020 deluje na principu popolnoma digitalnega umerjanja, kot je opisano v poglavju 3.5.4. Vsebuje vse potrebne sklope za popolno umerjanje senzorjev, ki imajo mostično vezavo. Vgrajeni programirljivi ojačevalnik omogoča uporabo senzorjev z različno občutljivostjo. Vezje meri izhodno napetost senzorskega mostiča in napetost temperaturne diode. Obe napetosti sta digitalizirani, vrednost pa predstavlja podatek o tlaku in temperaturi. Referenčne napetosti ne potrebuje, saj deluje relativno glede na napajalno napetost. Taka je tudi izhodna napetost [19].

Navzven se lahko povezuje z digitalnim vmesnikom, ki deluje po standardu I²C in omogoča programiranje internih registrov in EEPROM spomina, kjer so shranjeni kalibracijski koeficienti.

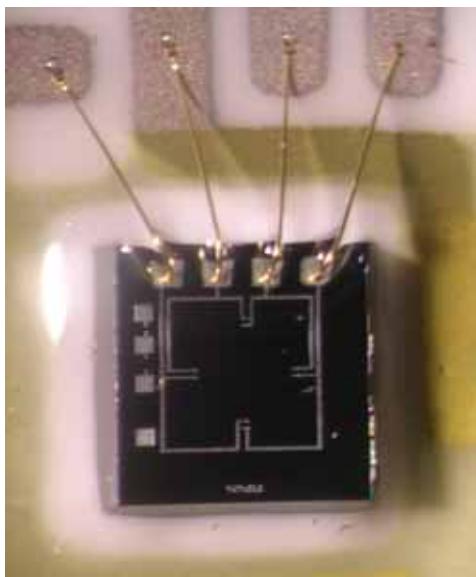
5.2.2 Senzorska tabletka

V MAP senzorju je uporabljena senzorska tabletka za merjenje absolutnega tlaka (sl. 31). Na referenčni strani membrane je vakuum. Silicijevi senzorji tlaka za industrijsko in avtomobilsko uporabo imajo čvrsto mehansko izolacijo, ponavadi iz posebnega stekla. Kadar je senzorska tabletka namenjena merjenju relativnih ali diferencialnih tlakov, je v tem steklenem podstavku majhna luknja, ki omogoča dostop do obeh strani membrane. Pri absolutnih senzorjih pa je podstavek poln, brez luknje [20]. V času spajanja silicijeve tabletke z membrano in steklenega podstavka, je v okolici vakuum. Zaradi tega je po postopku spajanja v majhni votlini, ki ostane pod membrano še vedno vakuum in senzor lahko meri absolutni tlak.



Slika 31: Prerez senzorske tabletke za merjenje absolutnih tlakov

Silicijeva senzorska tabletka je prilepljena z mehkim lepilom na keramično podlago (sl. 32). Električne povezave so narejene s tanko, zlato žičko s pomočjo žičnega bondiranja.



Slika 32: Fotografija senzorske tabletke, ki se uporablja v HYB

Specifikacije senzorske tabletke, ki se uporablja za avtomobilske in industrijske aplikacije so prikazane v tabeli 5. Glede na končno aplikacijo in predvsem največji tlak, pri katerem se bo senzor še uporabljal, se izbere primerno tabletko. Te so narejene z različno debelo membrano in namenjene za različne tlake (tabela 5).

Tabela 5 Specifikacije SM5102 [21]

	Min.	Tip.	Maks.	Opomba
Napajalna napetost [V]	0	5	10	1
Napajalni tok [mA]	0	1,5	3	
Razpon (tlačni doseg)				2
5 [mV]	75	100	125	
15 [mV]	115	145	175	
30 [mV]	130	165	195	
60 [mV]	130	180	220	
100 [mV]	130	200	250	
300 [mV]	130	220	275	
U _{offset} [mV]	- 50	0	50	
U _{out} (T) [%FS/100 °C]	- 24	- 19	- 15,5	3
Offset(T) [%/100 °C]	- 7	- 1	7	
Upornost(T) [%/100 °C]	24	27,5	33	
Mostična upornost [kΩ]	2,70	3,15	4,00	
Linearnost [%FS]	- 0,3	± 0,05	0,3	4
Dopustna preobremenitev [glede na FS]	3X			
Trenutna preobremenitev [glede na FS]	5X			
Delovna temperatura [°C]	- 40		125	
Temperatura skladiščenja [°C]	- 55		150	

FS – Full Scale; polni doseg (napetost nazivnega tlaka)

1 – Mostič lahko krmilimo s pozitivno ali negativno napetostjo, za pozitivni odziv s pozitivno napajalno napetostjo moramo nadtlak priklopiti na zunanj stran vezja.

2 – Merjeno pri konstantnem napajanju 5 V

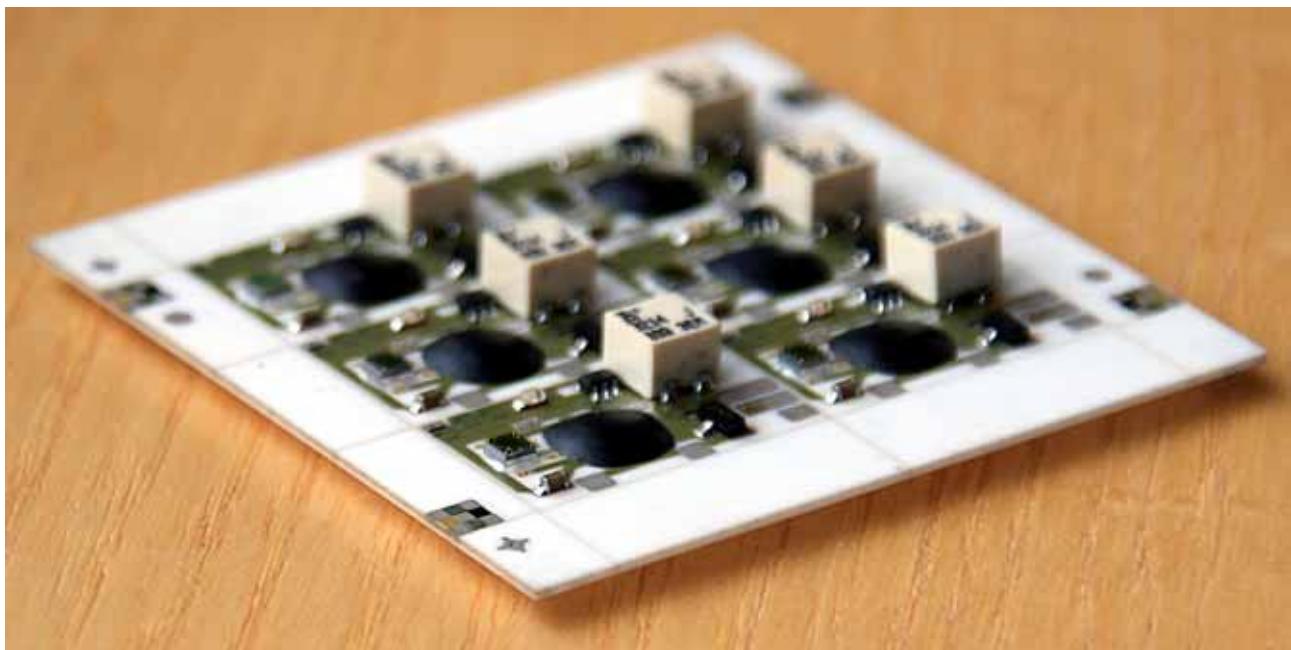
3 – Merjeno od 0°C do 70°C

4 – Definirano na premico

5.3 Tehnološki koraki pri izdelavi MAP senzorja

5.3.1 Izdelava keramičnega substrata

Keramični substrat (slika 33) je narejen s pomočjo debeloplastne hibridne tehnologije. Ta omogoča izdelavo miniaturnih, samostojnih elektronskih sklopov, narejenih na tiskanem keramičnem substratu, na katerega so s pomočjo drugih tehnologij pritrjene druge komponente. Beseda »hibridna« v imenu tehnologije pomeni, da gre za skupek tehnologij, torej najmanj dve različni tehnologiji [22]. Pri izdelavi MAP senzorja se tako srečamo s tiskanjem substrata, bondiranjem z zlato žico, pritrjevanjem tabletk, zalivanjem z zaščitnimi zalivkami in še bi lahko naštevali. Vidimo torej, da relativno preprost element zahteva kar nekaj različnih tehnologij. Seveda moramo vsako zelo dobro obvladati, če želimo kvalitetne izdelke in čim boljši izkoristek proizvodnega procesa.



Slika 33: Primer debeloplastnega hibridnega vezja na keramičnem substratu, kot se izdelujejo v podjetju HYB

Na keramični substrat natiskamo prevodne linije s pomočjo sitotiska. Pri tem se uporabljajo posebne paste, ki vsebujejo srebro, paladij in platino. Tiskane sledi se najprej posušijo pri temperaturi 150°C, potem pa še žgejo v pečeh z nadzorovanim temperaturnim profilom, kjer temperature dosežejo najvišjo vrednost okrog 850°C.

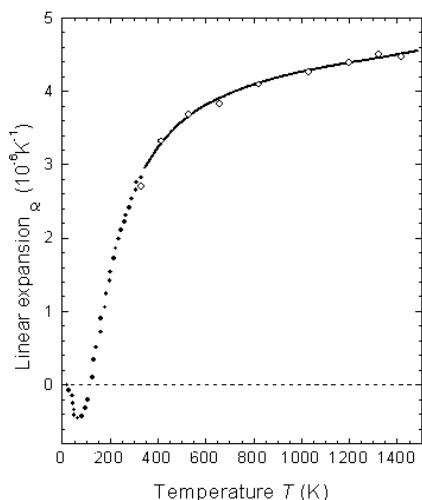
Prevodne linije se lahko natisnejo ena nad drugo z vmesno izolacijsko plastjo dielektrika, da dosežemo večje gostote. Poleg tega lahko natisnemo upore in nekatere druge strukture. Vsega tega pri izdelavi MAP senzorja sicer ne potrebujemo, saj uporabljam keramični substrat samo kot mehanski nosilec za povezovanje silicijevih tabletk do električnih kontaktov in za povezovanje med dvema tabletkama.

Uporaba keramičnega substrata iz Al_2O_3 ima pa še eno zelo pomembno prednost pri uporabi silicijevih senzorskih tabletk. Temperaturni razteznostni koeficient silicija in 96% Al_2O_3 sta zelo podobna [23]. Velika razlika v temperaturnem raztezku bi namreč povzročila notranje mehanske napetosti, kar bi zelo poslabšalo temperaturne napake same senzorske tabletke. Zaradi tega bi se občutno povečal temperaturni koeficient ničelne napetosti, saj bi se ustvarjene mehanske napetosti prenesle na tabletko in s tem povzročile neželene odzive, ki niso posledica sprememb vhodnega tlaka, ampak temperaturnih sprememb.

V naslednji tabeli je primerjava nekaterih razteznostnih koeficientov. Material PA66 je poliamid, ki se uporablja za plastično ohišje MAP senzorja. Vidimo lahko, da je neujemanje raztezkov silicija in plastike zelo veliko. Vmesna plast keramike v tem primeru poskrbi za razbremenitev.

Tabela 6 Koeficienti temperaturnega raztezka za nekatere materiale, uporabljene pri izdelavi senzorjev tlaka

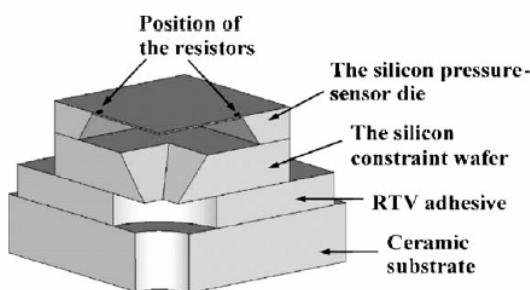
Material	Koeficient temperaturnega raztezka Pri 20°C	
96% Al ₂ O ₃	8,2	$10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Si	2,6	
Pyrex	4	
PA66	2300-5500	
Aluminij	24	
Medenina	19	



Slika 34: Koeficient temperaturnega raztezka za Si v odvisnosti od temperature

5.3.2 Montaža komponent

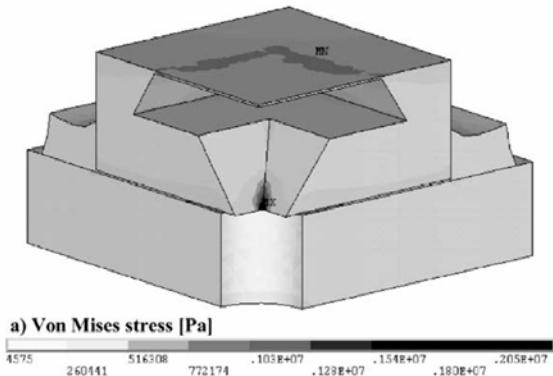
Komponente na MAP senzorju so prilepljene na keramični substrat. Lepilo za senzorsko tabletko mora biti elastično, saj se v plasti lepila deloma razbremenijo mehanske napetosti, ki nastanejo zaradi neujemanja temperaturnih raztezkov silicija in keramike. To neujemanje je sicer majhno, vendar je tudi plast lepila zelo tanka. Od oblike te plasti so odvisne karakteristike ničelne napetosti senzorske tabletke, obnašanje izhodne napetosti ob vklopu in nekatere druge karakteristike. Pri načrtovanju in optimizaciji tehnoloških postopkov se uporablja tudi postopki numerične analize. Analizirali smo vpliv parametrov plasti lepila [9]. Zaradi simetrije je bila analizirana le četrtnina strukture (slika 35):



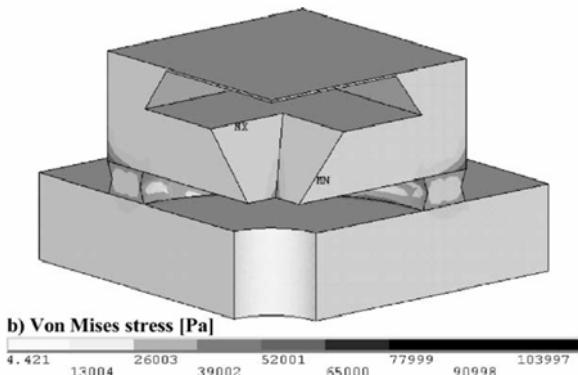
Slika 35: Četrtnina preseka strukture pritrjevanja senzorske tabletke na keramični substrat

Na sliki 36 je prikazan najslabši primer lepljenja, ko je plast lepila pretanka. Vidimo, da se rezidualne mehanske napetosti močno prenašajo na membrano, kar povzroča neželene napake in tudi temperaturne vplive, ki jih

večinoma ni možno kompenzirati, tudi če uporabimo digitalne postopke kompenzacije. Na sliki 37 pa je prikazan optimiziran model lepljenja, ki vnaša najmanjše možne mehanske napetosti v celotno strukturo pritrjevanja senzorske tabletke.



Slika 36: Primer simulacije slabega lepljenja senzorske tabletke, ki se je potrdila tudi v praksi



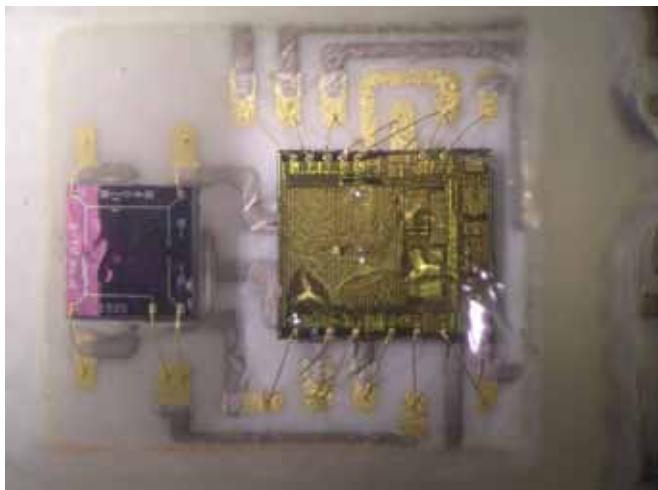
Slika 37: Primer idealnega lepljenja senzorske tabletke

5.3.3 Bondiranje

Pri postopku povezovanja kontaktnih blazinic na silicijevih tabletkah z zlatimi blazinicami na keramičnem substratu poskrbimo za električne povezave med komponentami (slika 32). Pri običajnih elektronskih komponentah to naredimo s spajkanjem, kadar pa imamo opravka z golimi tabletkami, pa je potrebno uporabiti bondiranje. Ločimo dva tipa žičnega bondiranja: bondiranje z aluminijem in bondiranje z zlatom. Prednost zlatega pred aluminijevim bondom je v večji elastičnosti povezav, ki so pri integriranih vezjih za mejenje tlaka bolj zašljene. Pri zlatem bondiranju je potrebno gretje substrata (120°C) zaradi boljših lastnosti bonda medtem, ko za aluminijev bond ni potrebno gretje substrata.

5.3.4 Zalivanje

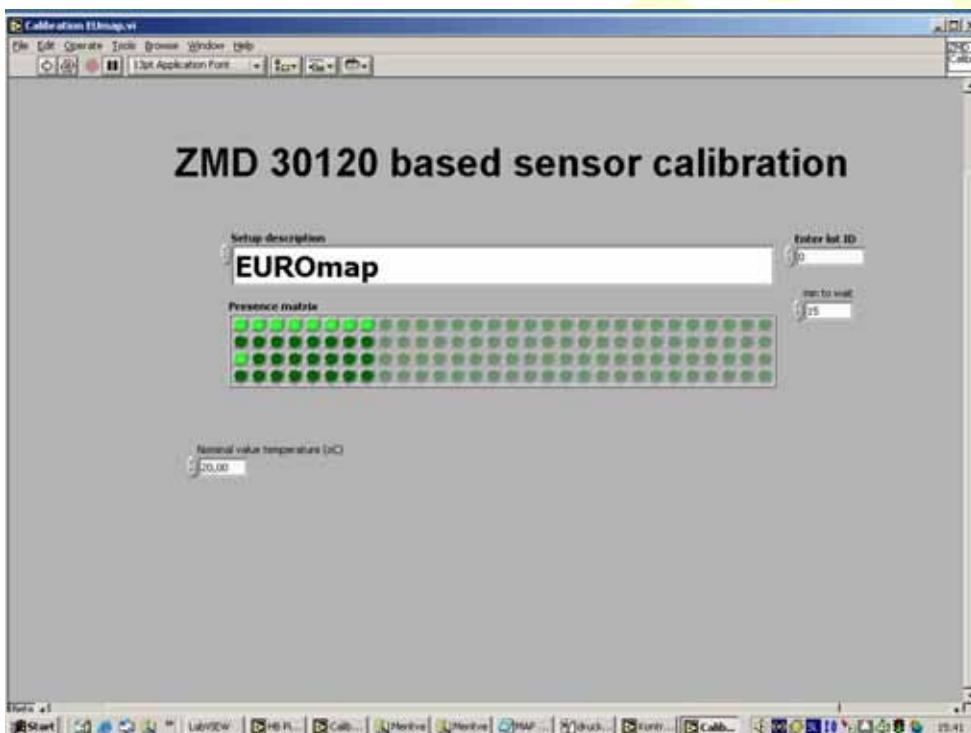
Za zalivanje se uporablja silikonska zalivka (slika 38), ki je ustrezno tekoča in se dobro oprijema materialov brez korozije brez predhodnih obdelav. Zalivka je odporna na goriva in topila in je odličen električni izolator. Svoje lastnosti ohranja skozi širok temperaturni obseg, od -70°C do 150°C .



Slika 38: S silikonskim gelom zaščitena senzorska tabletka in vezje za digitalno umerjanje

5.3.5 Predtest

Predtest je enostaven postopek, pri katerem se ugotavlja, ali sestavljeni senzorji delujejo. Nesmiselno je, da bi nefunkcionalni senzorji zasedali merilna mesta na opremi za umerjanje. Predtest je del programa za umerjanje. Rezultat predtesta je trenuten in prikazan na uporabniškem vmesniku programa za umerjanje s semaforjem, kot je prikazano na sliki 39.



Slika 39: Pogovorno okno za hitri predtest

5.3.6 Umerjanje

Umerjanje se izvaja popolnoma avtomatično. Substrate s senzorji, ki so prestali predtest se vstavi v merilne komore (slika 25), ki so postavljene v temperaturni komori. Potrebno je še izbrati oznako sarže (lot) in pognati program za umerjanje s pritiskom na start (slika 39 zgoraj).

5.3.7 Končni test

Po končanem umerjanju so vsi senzorji preizkušeni pri dveh temperaturah. Rezultat končnega testiranja je znana

tlačna in temperaturna karakteristika za vsak senzor. Primer rezultatov končnega testiranja je prikazan v tabeli 7.

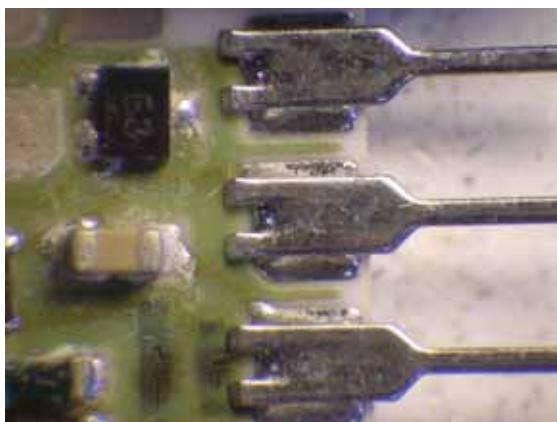
Tabela 7 Primer merilnih rezultatov končnega testa

								VCC	TLAK
Temperature of measurments: 85°C									
22502	22501	22500	22499	22506	22505	22504	22503	0	
0,1618	0,0958	0,2687	0,0224	0,1282	0,1666	0,0146	0,1182	5,0046	170
0,3836	0,2566	0,4264	0,0218	0,2933	0,3297	0,0145	0,2787	5,0045	200
1,0629	0,7984	0,9512	0,0211	0,8291	0,8647	0,0145	0,8238	5,0042	300
1,7737	1,3366	1,4763	0,0205	1,3726	1,3989	0,0144	1,3625	5,0041	400
2,492	1,8795	1,9974	0,0199	1,908	1,9313	0,0143	1,9003	5,0041	500
3,1921	2,4205	2,5289	0,0197	2,4501	2,4666	0,0142	2,4397	5,004	600
3,878	2,9643	3,0571	0,0196	2,9902	3,0051	0,0142	2,9829	5,0039	700
4,0761	3,5028	3,5821	0,0195	3,5264	3,5381	0,0142	3,5182	5,0039	800
4,0761	4,0449	4,1062	0,0194	4,0644	4,0751	0,0141	4,0601	5,0039	900
4,0763	4,5864	4,6303	0,0194	4,5964	4,6096	0,0141	4,5991	5,0039	1000
4,0787	4,8553	4,8914	0,0194	4,865	4,8778	0,014	4,8693	5,0039	1050

								VCC	TLAK
Temperature of measurments: 19°C									
22502	22501	22500	22499	22506	22505	22504	22503	0	
0,0174	0,3157	0,2861	0,019	0,3379	0,3045	0,0149	0,3466	5,0073	170
0,0174	0,4753	0,4436	0,019	0,4977	0,4645	0,0147	0,5096	5,0073	200
0,0171	1	0,9722	0,0189	1,0313	0,9941	0,0142	1,0364	5,007	300
0,4946	1,528	1,5004	0,0189	1,5619	1,5254	0,014	1,5635	5,007	400
1,032	2,0566	2,0308	0,0191	2,0894	2,0504	0,0139	2,0886	5,0069	500
1,5765	2,5874	2,563	0,0189	2,6189	2,5801	0,0138	2,6192	5,0069	600
2,118	3,1158	3,092	0,0192	3,1453	3,11	0,0138	3,1445	5,0069	700
2,661	3,6439	3,6194	0,0191	3,6764	3,638	0,0137	3,6691	5,0068	800
3,1878	4,1651	4,1467	0,019	4,1958	4,1643	0,0137	4,1944	5,0069	900
3,7319	4,697	4,674	0,019	4,719	4,6913	0,0136	4,7253	5,0068	1000
3,9985	4,9567	4,9396	0,019	4,9758	4,9621	0,0136	4,9754	5,0069	1050

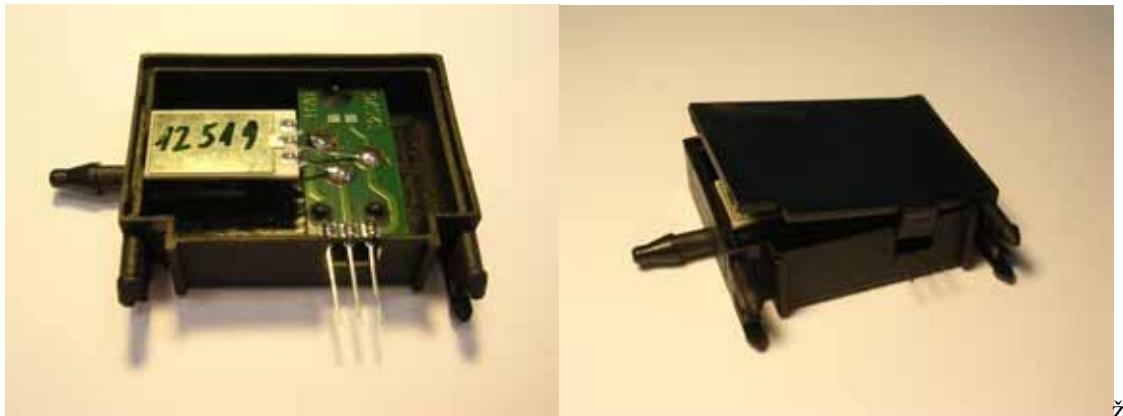
5.3.8 Montaža kontaktov in senzorja v ohišje

Po končanem končnem testu se na substrate prispejka kovinske kontakte, na katere se povezuje konektor zunanjega ohišja (slika 40).



Slika 40: Električni kontakti na keramičnem substratu MAP senzorja

Senzorje se potem še vstavi in prilepi v plastično ohišje (slika 41).



Slika 41: MAP senzor zaprt v plastično ohišje

Ohišje je še potrebno zapreti in nareediti končni hitri test.

5.3.9 Končni hitri test

Pred pakiranjem je potrebno senzorje še na hitro preizkusiti, saj se med postopkom spajkanja kontaktov in lepljenja v ohišje lahko zgodi kaj nepričakovanega. Končni hitri test je enostaven funkcionalni test pri sobni temperaturi in dveh tlakih. Poleg točnosti odziva se preizkusi še tesnjenje.

6 Postopki za povečanje izkoristka umerjanja

Proces umerjanja je relativno dolgotrajen postopek in zavzema velik delež proizvodnega časa pri izdelavi senzorjev z digitalnim umerjanjem. Da bi bil izkoristek celotnega proizvodnega procesa kar najboljši, bomo v prvi vrsti stremeli k temu, da so najdlje trajajoči postopki kar najbolj izkoriščeni in če se le da, zasedeni le z izdelki, za katere vemo, da bojo na koncu dobri.

Bistvo problema predstavljajo senzorji, ki smo jih na hitrem predtestu označili kot dobre, a so se na koncu izkazali za slabe. Taki senzorji nam odžirajo čas in razpoložljiva mesta v postopku umerjanja. Najprej moramo ugotoviti, koliko je sploh teh senzorjev in oceniti ali se sploh splača »komplikirati«. Izkaže se, da je takih senzorjev relativno veliko za masovno proizvodnjo. Kot bo v nadaljevanju prikazano, je delež senzorjev, ki so na tak skrit način slabí kar okrog 5%. Na prvi pogled ni veliko, vendar ko upoštevamo še masovnost proizvodnje, lahko hitro pridemo do vrtoglavih številk.

Ovrednotenja obstoječega stanja se lotimo s preprosto statistično analizo obstoječega stanja. Kasneje bomo uporabili naprednejše metode preverjanja pred samim umerjanjem in ugotovili, kolikšen delež izboljšanja nam taka metoda prinese.

6.1 Posnetek obstoječega stanja

Če želimo uvesti metodo, ki izboljša stanje v proizvodnji, moramo najprej ugotoviti, kakšno je stanje pred spremembo. Koristno je, da se opazovani senzor proizvaja v večjih količinah, kar omogoča boljše zaupanje v statistično analizo. Dobro je tudi, da proizvodnja teče kontinuirano. S tem izločimo zagonske vplive proizvodnega procesa, ki so lahko zanemarljivi, ko je proces stabilen in poteka daljši čas.

Predmet opazovanja je podatkovna baza s podatki o umerjanju senzorjev in vsi zabeleženi meritni rezultati v času umerjanja. Na osnovi statistične analize te podatkovne baze lahko potegnemo zaključke o trenutnem stanju izmeta zaradi navidezno dobrih senzorjev. Te rezultate bomo kasneje uporabili za prikaz učinkovitosti vpeljanih metod.

6.1.1 Podatkovna baza

V podatkovni bazi sta dve tabeli, ki opisujeta na kakšen način se senzorji umerjajo (opis scenarija) in kakšni so bili rezultati umerjanja (podatkovna tabela). Za nas je pomembna podatkovna tabela z meritnimi rezultati umerjanja. Ta vsebuje polja, ki so našteti v tabeli 8.

Tabela 8 Polja podatkovne tabele z meritnimi rezultati

ID	Enolični identifikator
TIMESTAMP	Trenutek vpisa v tabelo
ISO63YEAR	Standardna oznaka letnice
ISO63LOTNR	Standardna oznaka sarže
CONFWORD	Konfiguracijska beseda
HILIMITP	Zgornja meja tlaka
LOLIMITP	Spodnja meja tlaka
A0	Kalibracijski koeficient a0
A1	Kalibracijski koeficient a1
A2	Kalibracijski koeficient a2
A3	Kalibracijski koeficient a3

A4	Kalibracijski koeficient a4
A5	Kalibracijski koeficient a5
A6	Kalibracijski koeficient a6
POC1	Izmerjena vrednost tlaka v scenariju umerjanja za točko 1
POC2	Izmerjena vrednost tlaka v scenariju umerjanja za točko 2
POC3	Izmerjena vrednost tlaka v scenariju umerjanja za točko 3
POC4	Izmerjena vrednost tlaka v scenariju umerjanja za točko 4
POC5	Izmerjena vrednost tlaka v scenariju umerjanja za točko 5
POC6	Izmerjena vrednost tlaka v scenariju umerjanja za točko 6
POC7	Izmerjena vrednost tlaka v scenariju umerjanja za točko 7
TOC1	Izmerjena vrednost temperature v scenariju umerjanja za točko 1
TOC2	Izmerjena vrednost temperature v scenariju umerjanja za točko 2
TOC3	Izmerjena vrednost temperature v scenariju umerjanja za točko 3
TOC4	Izmerjena vrednost temperature v scenariju umerjanja za točko 4
TOC5	Izmerjena vrednost temperature v scenariju umerjanja za točko 5
TOC6	Izmerjena vrednost temperature v scenariju umerjanja za točko 6
TOC7	Izmerjena vrednost temperature v scenariju umerjanja za točko 7
DAC1	Digitalna vrednost DAC v scenariju umerjanja za točko 1
DAC2	Digitalna vrednost DAC v scenariju umerjanja za točko 2
DAC3	Digitalna vrednost DAC v scenariju umerjanja za točko 3
DAC4	Digitalna vrednost DAC v scenariju umerjanja za točko 4
DAC5	Digitalna vrednost DAC v scenariju umerjanja za točko 5
DAC6	Digitalna vrednost DAC v scenariju umerjanja za točko 6
DAC7	Digitalna vrednost DAC v scenariju umerjanja za točko 7
NUMBER	Zaporedna številka lege znotraj posameznega kanala v digitalnem vmesniku
CHANNEL	Številka kanala v digitalnem vmesniku
CAL_SETUP_ID	Relacijska oznaka v tabeli nastavitev umerjanja

V tabeli bomo opazovali le vrednosti, ki so izmerjene ali direktno povezane z izmerjenimi vrednostmi. To so koeficienti a0 do a6, ter vse izmerjene vrednosti (POCn, TOCn, DACn) in poskušali ugotoviti, ali obstaja kakšna povezava med senzorji, ki so sicer prestali hitri predtest, a na koncu niso prestali končnega testa. Številske vrednosti POCn in TOCn predstavljajo numerično optimizirane surove odčitke tlaka in temperature. Te dobimo po postopku, ki je opisan v poglavju 3.6.3.

6.1.2 Začetno stanje

Najprej si oglejmo nekaj tipičnih vrednosti opazovanih parametrov za izmerjene digitalne vrednosti tlaka, temperature, vrednosti DAC za izbrani izhodni signal v opazovanih točkah scenarija in na koncu še izračunanih vrednostih kalibracijskih koeficientov.

Tabela 9 Tipične izmerjene vrednosti opazovanih parametrov (tlak)

ID	POC1	POC2	POC3	POC4	POC5	POC6	POC7
18962	264	1706	1566	908	247	214	1404
18961	201	1654	1514	850	183	151	1351
18960	252	1658	1542	899	253	235	1398
18959	374	1801	1679	1026	371	353	1532
18967	372	1801	1681	1028	372	353	1532

Tabela 10 Tipične izmerjene vrednosti opazovanih parametrov (izhodni DAC)

ID	DAC1	DAC2	DAC3	DAC4	DAC5	DAC6	DAC7
18962	296	3816	3822	2064	290	296	3826
18961	284	3822	3826	2070	312	314	3830
18960	310	3816	3820	2064	310	302	3824
18959	316	3818	3822	2072	316	316	3826
18967	314	3820	3824	2072	312	314	3826

Tabela 11 Tipične izračunane vrednosti kalibracijskih koeficientov

ID	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6
18962	118	-457	-686	1013	5549	2225	2170
18961	356	-174	-393	-75	5653	2589	1020
18960	516	-536	-292	954	5480	2466	1513
18959	215	-987	-299	846	5563	2422	1734
18967	222	-991	-408	1204	5561	2373	1917

Če opazujemo posamezne izmerjene vrednosti lahko opazimo, da imajo relativno majhen raztros.

6.2 Model izkoristka umerjanja

Kadar se senzorji tlaka proizvajajo v velikih količinah, postane izkoristek proizvodnega procesa ključen ekonomski kriterij. Če dosežemo dober izkoristek še ni rečeno, da smo bili pri tem uspešni, saj je pomembno tudi to, kako hitro smo to dosegli. Kadar imamo opravka s proizvodnjo v velikih serijah, je število različnih tipov izdelkov verjetno zelo omejeno. Tudi število izpeljank nekega izdelka ponavadi ni prav veliko, sploh če vsaka izpeljanka pomeni drugačna orodja (glej poglavje 4.5 – kalibracijska komora in adapterji za druge senzorje). V podjetju HYB uporabljamo tri različne osnovne tipe vezij za digitalno umerjanje. Posamezni tip se razdeli na različne izpeljanke, od katerih je ena tudi v tem delu opazovani MAP senzor. V isti bazični model senzorja spadajo tudi drugi modeli senzorjev, ki se med seboj razlikujejo le po mehanski obliki, področju merjenih tlakov in načinu priključitve. Osnovni pristopi umerjanja, merjenja in tehnološki koraki pa so več ali manj enaki za vse modele ene generične skupine, kjer imajo senzorji enako vezje za umerjanje. Kadar vpeljujemo nov model senzorja na znani platformi bomo zagotovo zaznali padec izkoristka proizvodnega procesa. Mimo tega dejstva ne moremo in s tem živimo v realnem življenju. Kljub temu pa imamo kar nekaj prijemov, da to omilimo. Eden takih je ta, da po padcu izkoristek spet naraste v najkrajšem možnem času. S tem zaznamo samo začasen in ponavadi neboleč padec brez opaznih posledic.

Izkoristek umerjanja lahko definiramo kot količnik števila senzorjev, ki so prestali končni test po končanem umerjanju in celotnim številom merilnih mest, ki so na voljo v sistemu umerjanja. Pri tem predpostavljamo, da je sistem v celoti zaseden, torej da nimamo praznih merilnih mest. To je vedno res, kadar imamo opravka z masovno, velikoserijsko proizvodnjo.

Če smo po končnem testu prešeli N_P dobrih senzorjev, naš sistem pa ima N_0 merilnih mest, lahko izkoristek umerjanja zapišemo kot

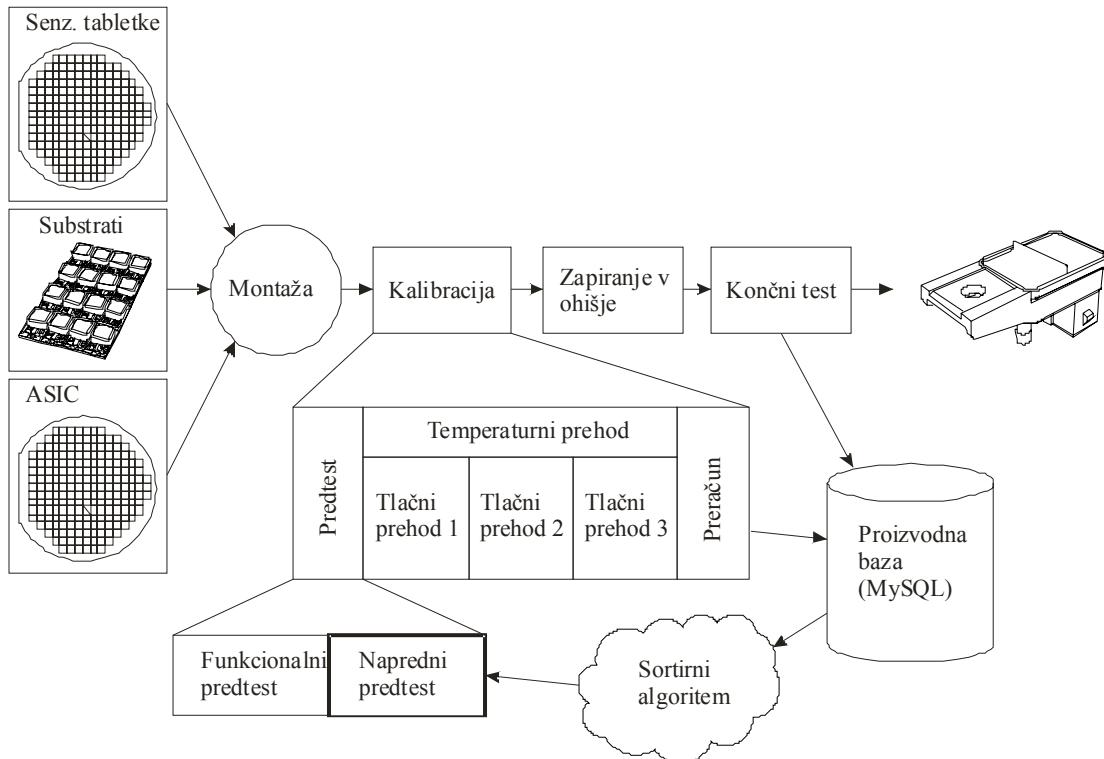
$$\eta = \frac{N_P}{N_0} \quad (6.1)$$

6.3 Običajen postopek predtesta

Običajen postopek predtesta pred umerjanjem uporablja preprost način izločanja slabih senzorjev preden dejansko začnemo z umerjanjem (korak 2 v tabeli 2). Vse senzorje, ki smo jih prepoznali za slabe nadomestimo z drugimi in postopek toliko časa ponavljamo, da so vsa mesta zasedena z dobrimi senzorji.

V opisanem postopku razvrščanja slabih senzorjev pred umerjanjem izločimo le nefunkcionalne senzorje in take, ki imajo katastrofalne odpovedi. To so senzorji brez odziva na digitalnem vmesniku. Žal na tak način ne moremo zaznati senzorjev, ki so navzven povsem normalni, na koncu umerjanja pa so vseeno slabi. Vzrok za take odpovedi so numerične omejitve digitalnih algoritmov umerjanja. To se zgodi v primeru, ko imamo opravka z zelo velikimi ničelnimi napetostmi senzorskega mostiča, ko ima ta zelo veliko nelinearnost, majhno občutljivost v izbranem območju ali poljubno kombinacijo vseh treh. Tak senzorski mostič ima lahko navidez povsem normalen odziv. Digitalni vmesnik se odzove normalno in tak senzor prestane kriterij za izločanje. Zaradi prevelikih odstopanj v enem ali več parametrih (npr. prevelika ničelna napetost), dobimo pri preračunu koeficientov umerjanja take vrednosti, ki povzročijo velike numerične napake. To se na primer zgodi, ko delimo cela števila z majhnimi vrednostmi. Zaradi tega je končni odziv izven želenih toleranc in senzor je na koncu slab.

Zaradi opisanih slabosti je nujno, da uporabimo boljši postopek izločanja potencialno slabih senzorjev pred postopkom umerjanja (Slika 42).



Slika 42: Shematski prikaz postopka izdelave MAP senzorja

6.4 Izpopolnjen postopek predtesta

Postopek umerjanja je dolgotrajen zaradi dolgih časov temperaturne stabilizacije. Če želimo opremo za umerjanje kar najbolj izkoristiti, je nujno da še pred dolgim postopkom umerjanja izločimo vse potencialno slabe senzorje. Tega se lotimo s postopki primerjave delnih karakteristik opazovanega senzorja z referenčnimi parametri. Tu se srečamo z dvema pojmom in sicer:

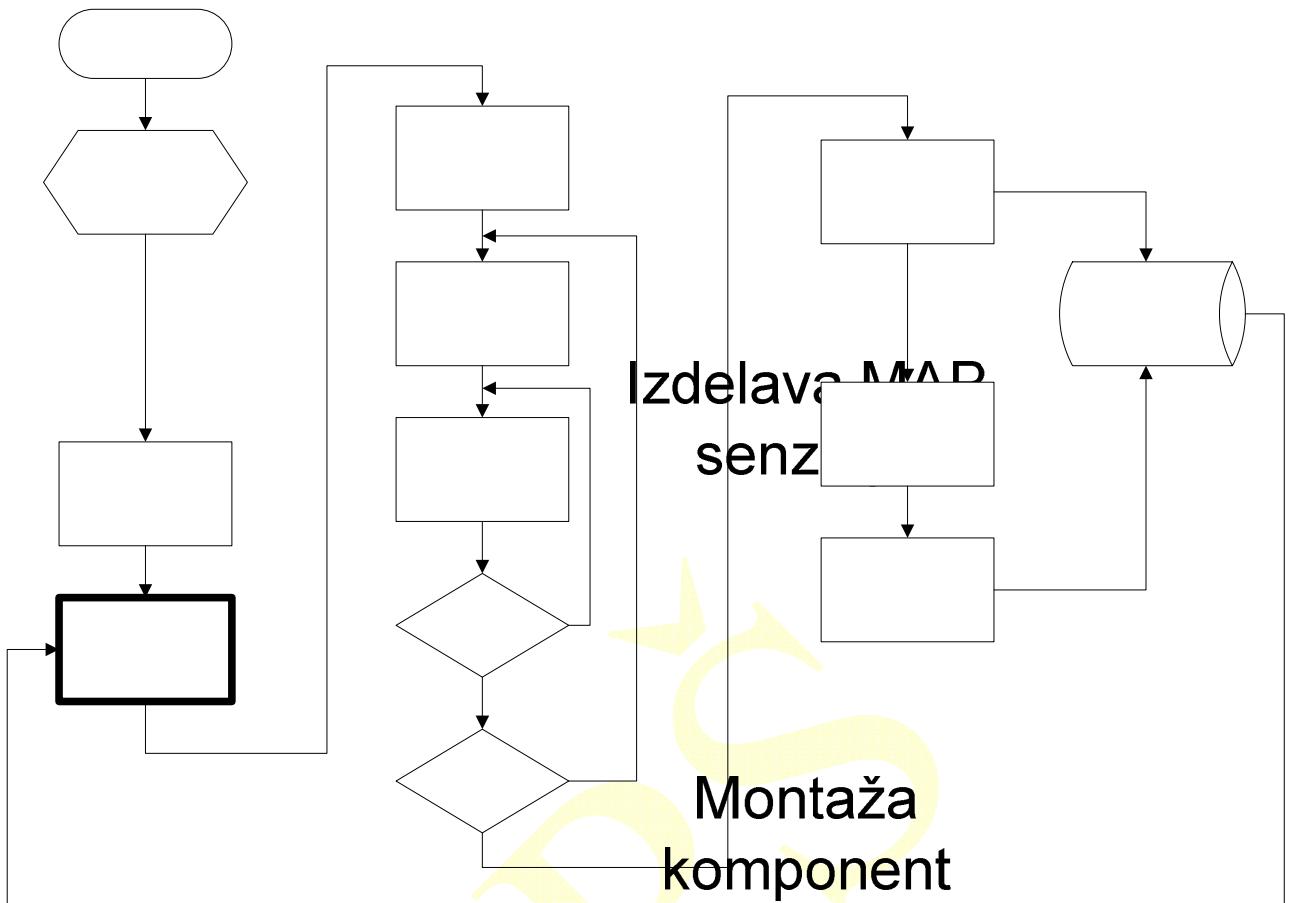
Parametri predtesta
Referenčni parametri

Parametri predtesta so okrnjene karakteristike senzorja tlaka, ki jih pridobimo na čim bolj enostaven in hiter način. Pri postopku predtesta si lahko privoščimo največ tri različne tlačne točke, zagotovo pa ne bomo delali pri različnih temperaturah, ampak bomo izvajali predtest pri sobni temperaturi. Ta se lahko spreminja, vendar ne v času izvajanja predtesta.

Referenčne parametre pridobimo iz rezultatov predhodno izmerjenih in umerjenih senzorjev istega tipa. Pri tem upoštevamo le senzorje, ki so bili dobri tudi po koncu umerjanja. Iz proizvodne podatkovne baze izločimo referenčne vrednosti po matematičnem postopku, ki bo opisan v nadaljevanju.

Oboje vrednosti, referenčne parametre in parametre predtesta opazovanega senzorja med sabo primerjamo po določenem postopku. Ta postopek je lahko več-nivojski in upošteva vrednosti vseh parametrov in odnose med njimi.

Na sliki Algoritem 2 je prikazan podroben postopek pri izdelavi MAP senzorjev.



Algoritem 2: Podroben postopek izdelave MAP senzorjev

6.4.1 Določanje parametrov za predtest

Največji izziv je določanje parametrov predtesta, ki nam zadovoljivo opišejo obnašanje senzorja in omogočijo učinkovito izločanje potencialno slabih senzorjev. Najpreprostejši način bi bil, da uporabimo kar vse izmerjene vrednosti, ki so tudi sicer potrebne za izračun koeficientov umerjanja. Toda v tem primeru nismo naredili nič drugega, kot izmerili vse potrebno za umerjanje že kar v samem predtestu in s tem nismo pridobili prav nič. Pravzaprav smo pridobili en majhen, zanemarljiv delček proizvodnega časa, saj lahko po umerjanju označimo senzorje, ki ne prestanejo kriterija takega predtesta in teh potem ne merimo na končnem testu. Tako sicer malenkost izboljšamo učinkovitost končnega testa, vendar je to tako majhen delež v celotnem izkoristku proizvodnega postopka, da ga lahko mirno zanemarimo.

Bolj smiselna in učinkovita je izbira takega nabora parametrov za predtest, do katerih pridemo na enostaven in hiter način. V praksi se je izkazalo, da je najbolj učinkovito merjenje odziva pri zračnem tlaku in še dveh drugih tlakih. Tako dobimo tri meritne točke ob samo dveh nastavitevah (pod)tlaka. To velja za MAP senzor, ki uporablja senzorsko tabletko za absolutne tlake. Na zračnem tlaku, ki znaša okrog 1000mbar je tak senzor skoraj nazivno obremenjen. Zaradi tega moramo tabletko izpostaviti še dvema tlakom, ki sta nižja od zračnega. Podobno bi pri relativnih senzorjih merili ničelni odziv na zraku in še dva tlaka, ki sta višja.

Ko z izbranimi parametri predtesta izvedemo algoritem izločanja moramo s kar največjo možno verjetnostjo ugotoviti, ali bo senzor slab zaradi prekoračitve dovoljenega obsega digitalnega umerjanja. Take senzorje nadomestimo z dobrimi, ki smo jih predhodno pripravili in tako v enem samem ciklu predtesta zagotovimo, da so vsa mesta v opremi za umerjanja zasedena s senzorji, ki bojud na vseh umerjanjih dobr. Z nastavljanjem kriterijev pri primerjavi parametrov predtesta z referenčnimi parametri lahko določimo dva izida razvrščanja na predtestu. Lahko se odločimo, da bomo raje umerjali kakšen slab senzor, ki ima med slabimi senzorji imeli res samo slabe. Drug primer pa je, da hočemo v postopku umerjanja samo take senzorje, ki morajo zagotovo biti dobri tudi po končanem umerjanju. Cena za tako odločitev pa bo morda kakšen dober senzor, ki bo pristal med slabimi. Za kateri scenarij izločanja se odločimo je odvisno od količine izdelanih senzorjev in njihove cene.

6.4.2 Določanje referenčnih parametrov

V naprednem postopku izločanja na predtestu določimo referenčne parametre iz vseh izmerjenih vrednosti, ki so na voljo za že izdelane senzorje, katerih izid je bil dober. V začetku proizvodnje nekega novega tipa senzorja so meje in kriteriji razvrščanja na široko odprti. S tem spustimo v postopek umerjanja vse senzorje, tudi take, ki so potencialno slabi. Meje in kriterije razvrščanja pa sproti prilagajamo in pri tem opazujemo izid po končanem umerjanju. Ko imamo enkrat vzpostavljeni orodje razvrščanja (napredni predtest in beleženje merilnih podatkov po končanem umerjanju), lahko s stalnim oženjem mej in prilagajanjem kriterija izločanja stalno izboljšujemo sam postopek izločanja in s tem ves čas večamo izkoristek proizvodnega procesa. Pomembna prednost takih postopkov je tudi v tem, da ukinejo človeške napake in subjektivne odločitve pri izločanju slabih senzorjev. Ko število proizvedenih senzorjev naraste, se algoritem izločanja na predtestu drastično izboljša. S tem imamo veliko manj slabih senzorjev v postopku umerjanja, s čimer pripomoremo k skrajšanju povprečnega časa za izdelavo posameznega senzorja in tako pripomoremo k nižjim stroškom proizvodnje opisanih MAP senzorjev.

6.5 Algoritem razvrščanja

Algoritem razvrščanja deluje na osnovi meritev pri eni sami temperaturi. S tem se izognemo prekomernemu podaljševanju postopka predtestova. Karakteristiko senzorja lahko poenostavimo na eno samo temperaturo [4]:

$$F(x_p, x_T) = \sum_{i=0}^2 C_{p,0} [x_p - H_i]^i [x_T - H_0] \quad (6.2)$$

Kljub eni sami temperaturni točki pa si lahko privoščimo izvajanje meritev predtesta v več tlačnih točkah. Število različnih tlakov, pri katerih izvajamo predtest označimo z N_p . Praktične izkušnje pokažejo, da je dovolj, če uporabimo največ 3 točke ($N_p = 2$). S tem zajamemo tudi morebitne prevelike nelinearnosti v karakteristikki, ki so izven zmožnosti umerjanja izbranih topologij in algoritmov.

Predpostavimo, da smo do nekega trenutka umerili N_X senzorjev istega tipa. Pri sobni temperaturi lahko vsakega od teh senzorjev opišemo s tremi koeficienti s pomočjo izraza (6.2): C_{00} , C_{10} in C_{20} . Ti koeficienti podajajo v bistvu tlačno karakteristiko senzorja pri konstantni sobni temperaturi. Koeficienti so označeni z dvema indeksoma. Prva cifra podaja zaporedno številko tlačne točke, druga pa temperaturne točke. Ker opazujemo poenostavljen karakteristiko pri sobni temperaturi, je drugi indeks enak 0. V danem trenutku v proizvodnji pogledamo zbirkovo meritev vseh N_X senzorjev in jih zapišemo v obliki tabele:

$$M_{PC} = \begin{pmatrix} C_{00,1} & C_{10,1} & C_{20,1} \\ C_{00,2} & C_{10,2} & C_{20,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{00,N_X} & C_{10,N_X} & C_{20,N_X} \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

Prikazana tabela vsebuje N_X vrstic in tri stolpce. Tabela predstavlja učno množico in nam služi kot osnova pri razvrščanju **novih** senzorjev na predtestu. Na podoben način kot vse do sedaj znane in dobro umerjene senzorje, lahko tudi vsak nov senzor opišemo s pomočjo izraza (en. 6.3). Pri tem mu določimo tri koeficiente pri sobni temperaturi:

$$C_{PCX} = \{C_{00,N_X+1}, C_{10,N_X+1}, C_{20,N_X+1}\} \quad (6.4)$$

Sam algoritem razvrščanja na predtestu uporablja funkcijo razvrščanja, ki določi verjetnost nezmožnosti umerjanja opazovanega senzorja. Funkcija $s(M_{PC})$, ki ločuje potencialno dobre senzorje od tistih, ki jih skoraj zagotovo ne bomo sposobni umeriti z izbranim vezjem primerja opisano učno množico M_{PC} z izmerjenimi koeficienti C_{PCX} novega senzorja.

Funkcija $s(M_{PC})$ izkorišča nekatere ideje iz algoritmov, ki so opisani v [12]. Teoretično optimalni algoritem razvrščanja išče vse možne kombinacije koeficientov v vseh izbranih podmnožicah učne množice. Kadar je koeficientov veliko, lahko postane tak način zelo nepraktičen in časovno zamuden. Ponavadi so računalniki, ki

nadzorujejo merilne sisteme manjši vgrajeni sistemi. Ti imajo omejeno količino spomina in procesorske moči, zato se raje izogibamo postopkom, ki bi tak sistem zelo obremenili, saj lahko pričakujemo nenadejane izpade ali predolge zakasnitve v proizvodnem postopku, sploh v primeru, ko število zapisov v tabelah naraste nad neko mejo, ki še omogoča stabilno in hitro delovanje. Zaradi tega uporabimo nekatere poenostavite funkcije $s(M_{PC})$, ki omogočajo izvajanje algoritma razvrščanja v času, ki je sprejemljiv za uporabo v pogojih serijske proizvodnje.

6.5.1 Referenčna množica

Vzemimo končno število senzorjev N_X , ki so že umerjeni in so prestali končni test. Za te senzorje poznamo koeficiente predtesta M_{PC} . Iz te učne množice najprej izračunamo referenčno množico na način:

$$S(M_{PC}) = \frac{1}{N_X} \left\{ \sum_{i=1}^{N_X} C_{00,i} \quad \sum_{i=1}^{N_X} C_{10,i} \quad \dots \quad \sum_{i=1}^{N_X} C_{N_p 0,i} \right\} \quad (6.5)$$

Rezultat izračuna je referenčna množica koeficientov

$$C_R = \{\overline{C_{00}} \quad \overline{C_{01}} \quad \overline{C_{02}}\} \quad (6.6)$$

Sedaj imamo osnovo za primerjavo in razvrščanje. Neznani, opazovani senzor, ki ravno vstopa v postopek umerjanja ima koeficiente predtesta zapisane v množici C_{PCX} . Te primerjamo z referenčno množico C_R . Primerjavo izvedemo v dveh korakih. V prvem koraku določimo korelacijski koeficient med množicama koeficientov neznanega senzorja C_{PCX} in referenčne množice C_R . V drugem koraku pa primerjamo absolutne razlike vrednosti soležnih koeficientov v obeh množicah.

6.5.2 Korelacijski koeficient

Med izračunanimi množicama koeficientov neznanega senzorja C_{PCX} in referenčne množice C_R lahko izračunamo linearji korelacijski koeficient r .

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6.7)$$

V gornjem izrazu so x_i vrednosti koeficientov C_{PCX} , y_i pa posamezne vrednosti referenčne množice $S(M_{PC})$. Povprečna vrednost \bar{X} množice C_{PCX} in \bar{Y} množice $S(M_{PC})$ določimo tako:

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} C_{Xi,0} \\ \bar{Y} &= \frac{1}{N_p} \frac{1}{N_X} \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_X} C_{j0,i} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Rezultat izračuna korelacijskega koeficienta leži na intervalu [-1,1]. Vrednosti blizu 1 pomenijo, da imajo vrednosti koeficientov preizkušenega senzorja in referenčne množice zelo dobro soležnost. Žal pa nam korelacijski koeficient ne pove veliko o ujemaju samih vrednosti. V tem koraku torej določimo, ali je lega koeficientov opazovanega senzorja in referenčne množice dovolj podobna.

6.5.3 Koreacijski kriterij razvrščanja

Na tem mestu lahko določimo že prvi kriterij za razvrščanje na predtestu. Določimo neko vrednost ρ_{PC} , ki jo v začetku ocenimo na tak način, da ne izločamo dobrih senzorjev. Vrednost ocenimo na osnovi rezultatov iz prve serije v proizvodnji, ko še ne poznamo novega senzorja. Vrednost ρ_{PC} potem stalno popravljamo do te mere, da nam zadovoljuje izpolnjevanje zastavljenih ciljev strategije upravljanja kakovosti. Ti cilji so lahko različni, v grobem pa srečamo dva tipa razvrščanja. V enem režimu zavestno spustimo v proizvodni proces tudi kakšen slab senzor, vendar s tem zagotovimo, da na predtestu ne zavržemo nobenega dobrega senzorja. V drugem primeru pa v proizvodni korak umerjanja zagotovo ne spustimo nobenega slabega senzorja, vendar to na račun kakšnega dobrega senzorja, ki izпадa na predtestu. V obeh primerih imamo opravka z nekim minimalnim tveganjem dodatnih stroškov negotovosti razvrščanja. Izbera vrste strategije razvrščanja pa je odvisna od tega, ali nam predstavlja večji strošek slab senzor v delovnem procesu ali izmet dobrih senzorjev.

Kriterij razvrščanja po koreacijskem koeficientu zapišemo s pogojem:

$$r(C_R, C_{PCX}) > \rho_{PC} \quad (6.9)$$

Če pogoj ni izpolnjen, je senzor slab in ne gre v postopek umerjanja.

6.5.4 Ujemanje vrednosti največjega koeficienta

V drugem koraku razvrščanja primerjamo še same vrednosti koeficientov, če se dovolj dobro ujemajo. Primerjavo malenkost poenostavimo in opazujemo razliko samo pri koeficientu, ki ima v referenčni množici absolutno največjo vrednost.

$$C_{PCMAX} = \max(C_R) \quad (6.10)$$

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

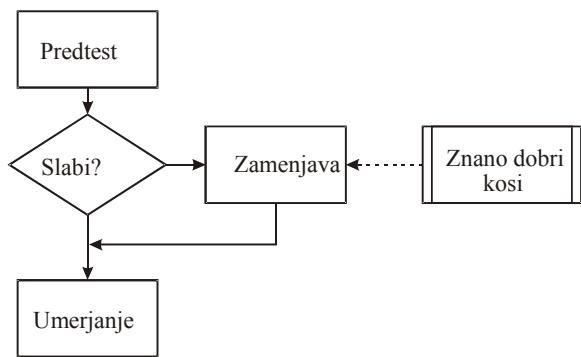
$$C_{PCMAX}(1 - \varepsilon_{PC}) > C_{x_{i_{MAX}} 0} > C_{PCMAX}(1 + \varepsilon_{PC}) \quad (6.11)$$

Kadar gornji pogoj ni izpolnjen, senzor ne nadaljuje postopka umerjanja, ampak se ga nadomesti z novim.

6.5.5 Izločanje in nadomeščanje

Kadar pri izvajaju naprednega predtesta naletimo na slab senzor, moramo tega izločiti in zamenjati z dobrim v enem samem koraku. Nesmiselno je, da pri tem uporabimo senzorje, ki jih še ne poznamo. Če bi med senzorji za nadomeščanje ponovno naleteli na slabega, bi bilo potrebno pri vsaki menjavi ponavljati celoten postopek predtesta. S tem bi brez potrebe izgubljali dragoceni čas. Zaradi tega si raje predhodno pripravimo neko količino dobrih senzorjev, za katere smo prepričani, da prestanejo oba koraka predtesta. Ko bomo pri preizkušanju ponovno naleteli na potencialno slab senzor, ga bomo nadomestili z dobrim in ponavljanje predtesta ne bo potrebno.

Postopek zamenjave slabih senzorjev je prikazan na sliki Algoritem 3. Celoten postopek izdelave MAP senzorjev pa je prikazan na sliki Algoritem 2.

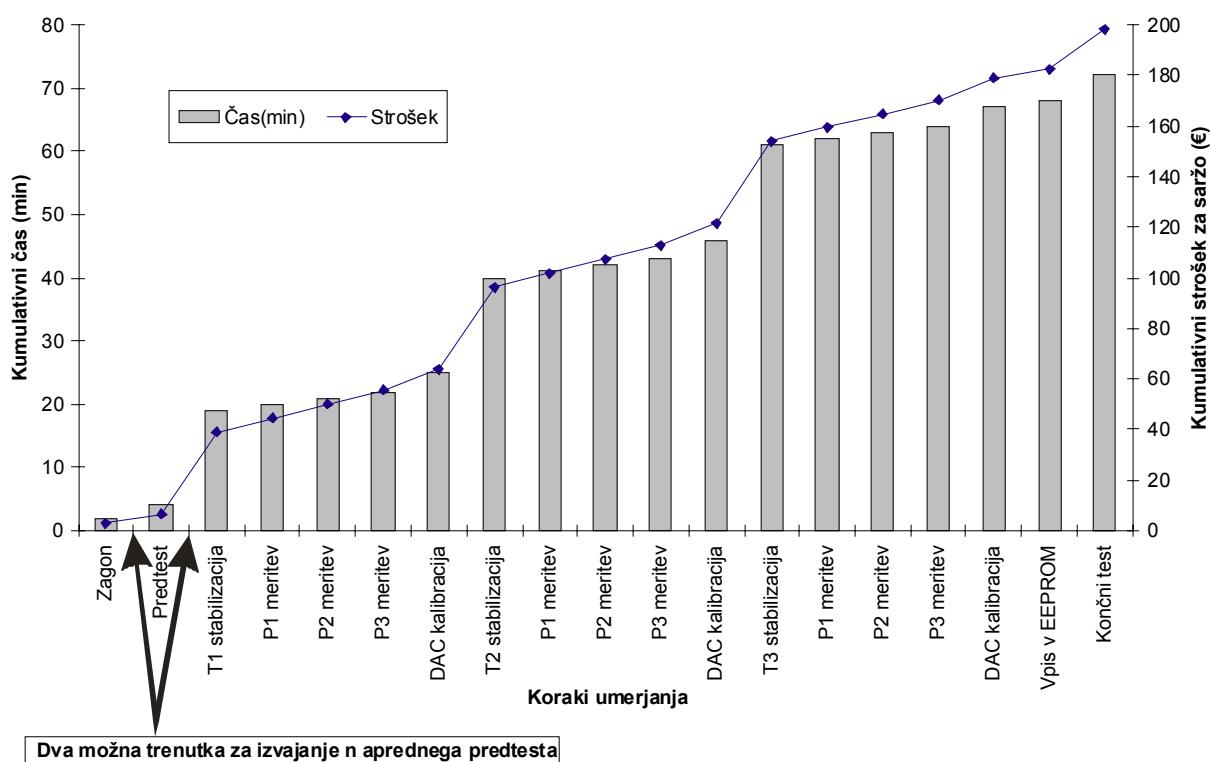


Algoritem 3: Postopek zamenjave potencialno slabih senzorjev tlaka, izločenih pri naprednjem predtestu



7 Optimizacija postopka umerjanja

Če želimo, da je postopek umerjanja kar najbolj izkoriščen, moramo zagotoviti, da se izvaja kar v največji meri nad potencialno dobrimi senzorji. Vsak senzor, ki je na koncu umerjanja slab, predstavlja zmanjševanje izkoristka proizvodnje tega senzorja. Omenili smo že, da postopek umerjanja predstavlja večino proizvodnega časa tlačnih senzorjev. Kumulativni časovni razpored, potreben za izvajanje umerjanja je prikazan na sliki 43. Vidimo lahko, da je prvi daljši korak v celi postopku stabilizacija na prvi temperaturi. Smiselno je, da je postopek predtesta izveden pred tem korakom. V prejšnjem poglavju smo se seznanili s teoretičnim ozadjem razvrščanja. Tak postopek bi lahko uporabili kadarkoli med samim izvajanjem umerjanja. Optimizacija torej predstavlja smiselno izbiro zaporedja korakov naprednega predtesta znotraj utečenega postopka umerjanja.



Slika 43: Dva možna trenutka za vstavljanje naprednega predtesta v postopek umerjanja MAP senzorja

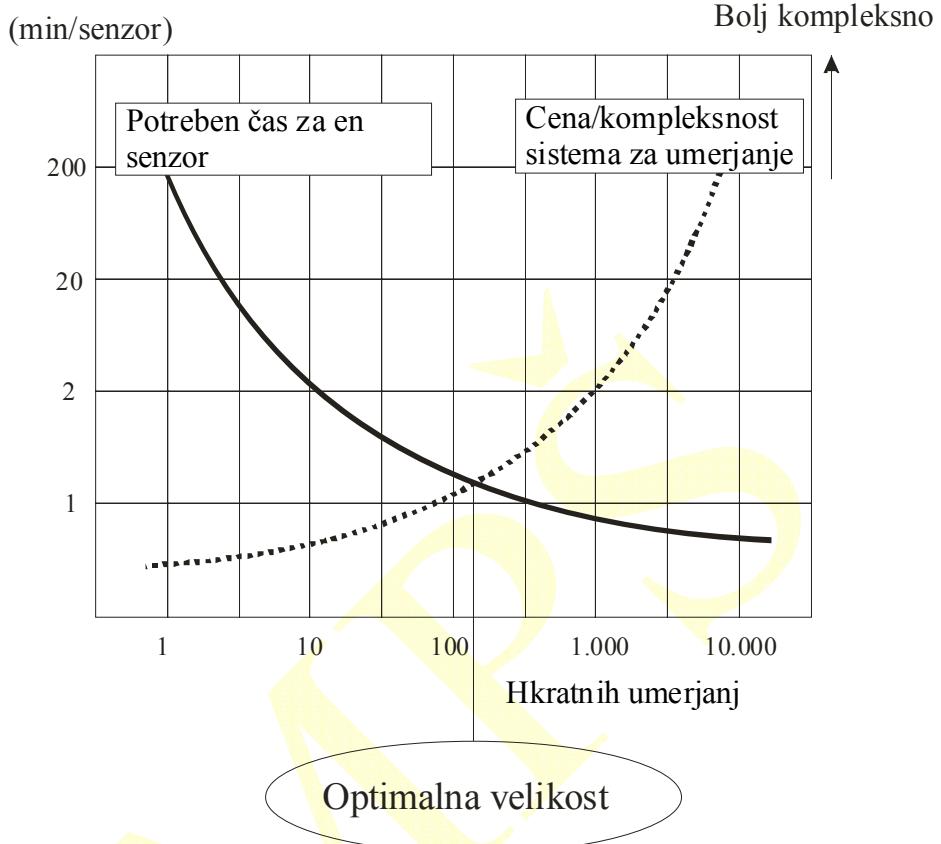
7.1 Optimalna velikost sistema za umerjanje

Umerjanje senzorjev se vedno odvija na več senzorjih naenkrat. Dolgotrajna stabilizacija temperature v komori med umerjanjem nam onemogoča postavitev linijske proizvodnje v koraku umerjanja. Zaradi tega moramo na mestu, kjer se odvija postopek umerjanja zbrati določeno število senzorjev, ki vzporedno vstopijo v ta del procesa. Želimo si seveda proizvesti čimveč senzorjev v čim krajšem času, vendar smo omejeni z nekaj faktorji. Do vsakega senzorja moramo imeti v nekem trenutku povsem individualen dostop do priključka izhodne napetosti in do digitalnih linij, ki nam omogočajo nadzor nad vezjem za umerjanje. Tudi referenčni tlak mora biti pripeljan do vsakega senzorja. Zaradi tega ne moremo neomejeno povečevati števila sočasno procesiranih senzorjev, saj bi umerjalni vmesniki zaradi svoje kompleksnosti prerasli mejo praktične uporabnosti.

Iz prakse se je pokazalo, da je trajanje umerjanja skorajda neodvisno od števila naenkrat umerjanih senzorjev. Ker je strošek procesa proporcionalen njegovemu trajanju, lahko zaključimo, da je strošek umerjanja na izdelan

kos obratno sorazmeren številu senzorjev, ki jih umerjamo naenkrat. Po drugi strani pa kompleksnost sistema za umerjanje narašča z večanjem tega števila. Relacija ni linearja in če upoštevamo, da je strošek opreme odvisna od njene kompleksnosti, lahko skozi izkušnje zaključimo, kakšna je optimalna količina senzorjev, ki jih naenkrat umerjamo.

Za lažjo predstavo sta na sliki 44 prikazani kompleksnost in trajanje umerjanja na kos v odvisnosti od količine sočasno umerjanih senzorjev.



Slika 44: Optimalno število senzorjev v eni sarži umerjanja

Trajanje umerjanja na kos lahko določimo v začetnih serijah, ko pričenjamamo s proizvodnjo novega tipa senzorja. Naš sistem za umerjanje ima N_0 merilnih mest, celoten postopek pa traja t_0 . Izračunamo lahko trajanje umerjanja na kos:

$$\tau_n = \frac{t_0}{N_0} \quad (7.1)$$

V urejeni proizvodnji poznamo stroške procesa, ki jih lahko izrazimo v ceni za časovno enoto C_T procesa. V tej ceni so bolj ali manj kvalitetno zajeti vsi stroški. Ocenimo lahko, koliko nas stane umerjanje v odvisnosti od velikosti sarže umerjanja N_0 .

$$c_0 = \tau_n C_T \quad (7.2)$$

Izračun kompleksnosti je lahko veliko bolj zapleten. Če se osredotočimo le na parametre, ki imajo največji vpliv, pa lahko tudi to poenostavimo. Vzemimo primer, ko poznamo celotno količino senzorjev, ki jih bomo proizvedli na izbranem sistemu umerjanja N_T , ceno opreme C_O in kumulativne stroške C_A njenega obratovanja za čas, ko bomo proizvedli N_T senzorjev. Upoštevati moramo še čas, ki ga porabimo za pripravo enega kosa v merilni napravi t_S . Najprej izračunajmo strošek priprave. Ta je odvisen od števila merilnih mest N_0 in znaša:

$$c_S = N_0 t_S C_T \quad (7.3)$$

Ocenimo še strošek opreme za posamezni kos. Ta znaša:

$$c_T = \frac{C_O + C_A}{N_T} \quad (7.4)$$

Celoten strošek umerjanja enega kosa v odvisnosti od N_0 merilnih mest je torej:

$$c_I = c_0 + c_S + c_T \quad (7.5)$$

Prikazan izračun ponavadi uporabimo za oceno izbire velikosti nekega sistema za umerjanje. Pri končni izbiri moramo upoštevati še druge, bolj dinamične dejavnike. To so npr. dinamika proizvodnje, naročil, zmožnost uporabe zalog polizdelkov in končnih proizvodov, cenovna politika za izbrani izdelek in nenazadnje tudi univerzalnost sistema ter zmožnost in hitrost prilagajanja celotnega sistema različnim izdelkom. V podjetju HYB imamo npr. zelo univerzalno osnovo za izvajanje postopka umerjanja, ki se v zelo kratkem času lahko prilagodi za umerjanje kateregakoli tipa senzorja, ki deluje na osnovi istega kalibracijskega vezja. To je bilo doseženo s primerno univerzalnostjo vmesnikov za umerjanje in programske opreme, ki omogoča uporabo receptov. V receptih so zapisani vsi nastavljeni parametri za potrebe umerjanja. Ko pride do zamenjave tipa, je potrebno izbrati drug recept in zamenjati pnevmatske in električne priključke. Ostalo ostane nespremenjeno. Tako je možno samo v nekaj minutah začeti z umerjanjem (navzven) popolnoma drugega senzorja tlaka.

7.2 Stalno izboljševanje kriterija izločanja slabih senzorjev na osnovi samoučenja

Načine, kako ugotovimo, ali bo nek senzor slab smo spoznali v poglavju 6. Konkreten primer algoritma razvrščanja pri proizvodnji MAP senzorja uporablja dva kriterija za tako ugotavljanje. Če sta pogoja (6.9) in (6.11) izpolnjena, je senzor dober, v nasprotnem primeru pa bo skoraj zagotovo slab. V obeh pogojih nastopajo neke meje, ki jih določamo s pomočjo vrednosti koeficientov, ki smo jih shranili v podatkovno bazo med umerjanjem. Iz teh vrednosti določimo ρ_{PC} in ε_{PC} . Na začetku, ko nov izdelek šele uvajamo izberemo take vrednosti, da zavestno spustimo tudi kakšen slab senzor v proces umerjanja. S tem sicer ne poboljšamo izkoristka proizvodnje, vendar tako zajamemo kar največje število vzorcev za pripravo učne množice. Načinov, kako določiti vrednosti iz učne množice je več. Najpreprostejše je kar ročno »po občutku«, vendar taka metoda ni najboljša, saj vnaša subjektivni pristop. Tak način postavljanja kriterijev je morda dober v začetku. Kasneje, ko serije narastejo pa ne moremo imeti več pregleda nad dogajanjem.

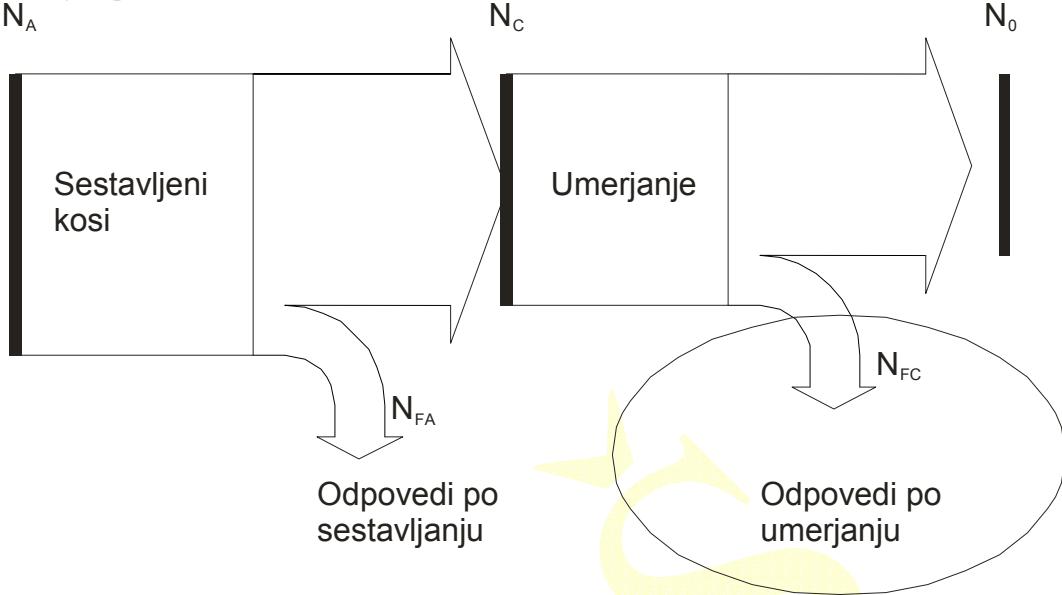
Boljša kot »ročna« metoda je uporaba ustreznih algoritmov za določanje kriterijev. V našem primeru bi lahko uporabili npr. metode z uporabo mehke logike. Žal podrobnejši vpogled v take postopke presega obseg tega dela[38]. Modeliranje s pomočjo mehke logike naj bi med drugim kar v največji meri omogočalo predvidevanje tudi za področja, kjer v času izdelave modela nismo imeli na voljo dovolj podatkov. Pri tem se srečamo s posploševanjem, ki je lahko nadzorovano z začetnimi ugotovitvami povezav med vhodnimi podatki in posledicami. V našem primeru so to koeficienti predtesta in kriteriji izločanja. V literaturi [36] se srečamo z metodo RLS (recursive least squares), ki predstavlja eno od metod za stalno izboljševanje opisanega postopka [8].

7.3 Učinkovitost metod izločanja

Učinkovitost metod izločanja najlažje ponazorimo s konkretnimi rezultati na osnovi meritev. Natančna analiza rezultatov je podana v poglavju 8. Na tem mestu si pa poglejmo, na kakšen način ovrednotimo učinkovitost opisanih metod.

Prvi in najpomembnejši pogoj za uporabo opisanih statističnih metod je beleženje rezultatov. Najboljše

rezultate lahko pričakujemo takrat, ko so rezultati sledljivi, še najbolje do posameznega kosa. Vzemimo omenjeni primer umerjanja MAP senzorjev. Iz montaže dobimo N_A kosov, od katerih po običajnih postopkih izločimo N_F kosov kot slabe (slika 45). Med postopkom kalibracije ustvarimo nekaj izmeta, ki ga označimo kot N_{FC} . Če ponovimo: ves čas se sprašujemo, ali je morda mogoče vnaprej napovedati, kateri kos od vseh N_C kosov bo na koncu kalibracije izpadel slab?



Slika 45: Pregled izmeta med postopkom izdelave MAP senzorja

Merilo za kvaliteto postopka umerjanja je njegov izkoristek:

$$\eta = \frac{N_0}{N_C} \quad (7.6)$$

Izkoristek koraka umerjanja lahko zapišemo tudi kot:

$$Y_B = 100\% - \frac{N_{FC}}{N_A - N_F} = 98,05\% \quad (7.7)$$

Pri tem poskušamo z našimi postopki čim bolj zmanjšati N_{FC} .

7.4 Posplošitev postopka za izboljšanje izkoristka poljubnega proizvodnega procesa

S pomočjo simulacije nad bazo podatkov je v poglavju 8 prikazano, da se da izboljšati izkoristek kalibracije za dobrih 5%. Vemo tudi, da je ravno kalibracijski korak najdaljši in najdražji. Prikazani postopki pa so dovolj splošni, da jih je mogoče uporabiti na kateremkoli proizvodnem procesu, ki omogoča beleženje merilnih rezultatov.

8 Rezultati, diskusija

Na začetku proizvodnje novega izdelka se ustvari prazna podatkovna baza za shranjevanje merilnih podatkov, izračunanih vrednosti koeficientov umerjanja, pogojev med merjenjem in nekaterih splošnih podatkov. Podatkovne tabele v bazi rezultatov so na začetku prazne. Med merjenjem in umerjanjem poskusnih prvih serij senzorjev se vsi rezultati shranjujejo v podatkovno bazo. Tako dobimo že na začetku, ko izdelek šele uvajamo nek nabor rezultatov, s pomočjo katerih določimo vrednosti kriterijev za razvrščanje. V prvem delu rezultatov je prikazano, kakšen izmet dobimo brez uporabe naprednih metod razvrščanja na predtestu. V nadaljevanju pa so prikazani rezultati opisanih metod.

8.1 Ničelna serija

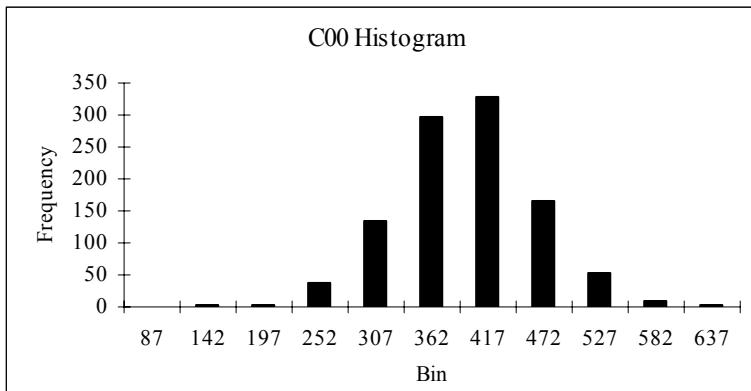
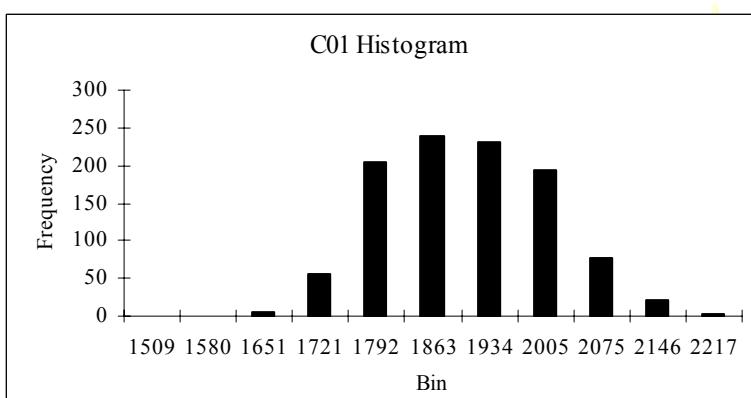
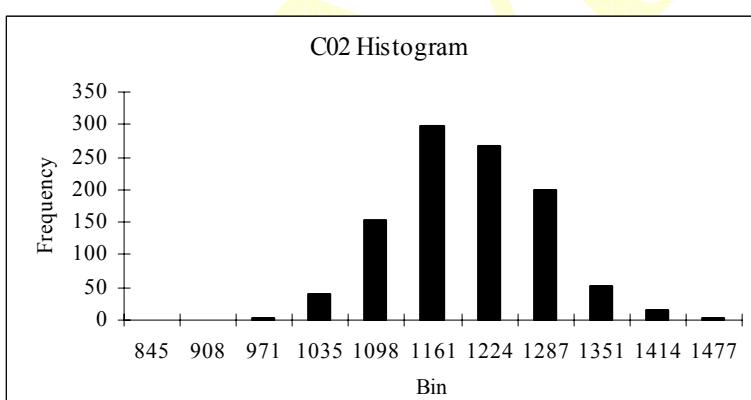
Za izdelavo ničeln serije smo uporabili običajen predtest in pri tem naredili nekaj izmeta. Ogledali si bomo nekaj statističnih podatkov o ničelni seriji in pridelan izkoristek umerjanja. Ta prvi del predstavlja izhodišče oz. stanje, ki želimo izboljšati. Količina merjenih in umerjenih senzorjev v tem koraku je že zadovoljiva, da predstavlja statistično dovolj pomemben vzorec, na osnovi katerega lahko delamo zaključke o učinkovitosti prikazanih metod.

8.1.1 Rezultati običajnega predtesta

V ničelni seriji je bilo 1088 senzorjev, ki so bili umerjeni brez da bi uporabili napredne metode razvrščanja. Od celotne količine je bilo na koncu, po končnem testu dobrih 1034 senzorjev. Te vrednosti so bile uporabljeni za pripravo učne množice. Za ponazoritev in lažje razumevanje je najprej prikazano nekaj osnovnih statističnih dejstev o teh 1034 senzorjih. Razpon vrednosti koeficientov za predtest je relativno širok. To je posledica začetnih serij, ki imajo dokaj velik raztros ničelne napetosti. Z redno proizvodnjo se ta distribucija oži in s tem tudi razpon vrednost manjša.

Tabela 12 Povzetek statističnih podatkov za učno množico (N=1034)

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

Slika 46: Histogram koeficijenta C00 iz učne množice ($N=1034$)Slika 47: Histogram koeficijenta C01 iz učne množice ($N=1034$)Slika 48: Histogram koeficijenta C02 iz učne množice ($N=1034$)

Oglejmo si še izmet. Od vseh $N_A=1088$ senzorjev iz redne proizvodnje ničelne serije je bilo 11 senzorjev izloženih s hitrim funkcionalnim predtestom pred postopkom umerjanja ($N_F=11$). Po umerjanju je bilo na končnem testu izloženih še $N_{FC}=43$ senzorjev. Ti so sicer prestali funkcionalni predtest, vendar so izpadli na končnem testu. Izkoristek umerjanja v tem primeru je torej:

$$Y_A = 100\% - \frac{N_{FC}}{N_A - N_F} = 96\% \quad (8.1)$$

8.1.2 Analiza izvedljivosti napredne metode razvrščanja

Po analizi izmeta in rezultatov ničelne serije je bil narejen preizkus izvedljivosti opisanih metod naprednega predtesta. Pri tej študiji so bili uporabljeni zgolj zbrani rezultati ničelne serije. Najprej je bila določena učna množica:

Tabela 13 Učna množica za izračun korelacijskega koeficenta (N=1034)

C_{00}	C_{01}	C_{02}
369.37	1870.61	1169.02

8.1.2.1 Simulacija razvrščanja po korelacijskem kriteriju

Za vsakega od senzorjev, ki so izpadli na končnem testu je bil določen korelacijski faktor in preverjen tolerančni pogoj. Za primerjavo je bil isti postopek izveden na vsakem od na končnem testu dobrih senzorjev in sicer za potrditev pravilnosti nastavljenih metod in kriterijev razvrščanja.

Kot referenco si poglejmo vrednosti $r(C_R, C_{PCX})$ za prvih 35 **dobrih** senzorjev. Zaradi lažje predstavitve so vrednosti v tabeli malenkost prirejene. Namesto dejanskih vrednosti $r(C_R, C_{PCX})$ so podane vrednosti \tilde{R} :

$$\tilde{R}(C_R, C_{PCX}) = 1000[1 - r(C_R, C_{PCX})] \quad (8.2)$$

Tabela 14 - Vrednosti $r(C_R, C_{PCX})$ za prvih 35 **dobrih** senzorjev

ID senzorja	\tilde{R}	ID senzorja	\tilde{R}
20271	0.000115043	20292	0.146655322
20272	0.000924819	20293	0.001846937
20273	0.004088563	20294	0.000689901
20276	0.001991275	20295	0.007859142
20277	0.001857479	20296	0.001219999
20278	0.00051011	20297	0.003333261
20279	0.00031561	20298	0.021459904
20280	0.000105624	20299	0.002723313
20281	0.006844556	20300	0.013308383
20282	1.36907E-05	20301	0.011678253
20284	8.00383E-05	20302	5.47907E-05
20285	5.25003E-05	20303	0.005507755
20286	0.00051467	20304	0.019309435
20287	0.003114395	20305	0.003397742
20291	0.006321672	20306	0.000266661
20312	0.000132385	20308	0.002391415
20310	0.003223285	20309	0.00302486
20311	0.001032859		

Nad vrednostmi \tilde{R} vseh 1034 dobrih senzorjev naredimo še nekaj statistike. Zanima nas predvsem največja vrednost \tilde{R} , ki predstavlja najmanjši korelacijski koeficient $r(C_R, C_{PCX})$. Ta znaša v danem primeru:

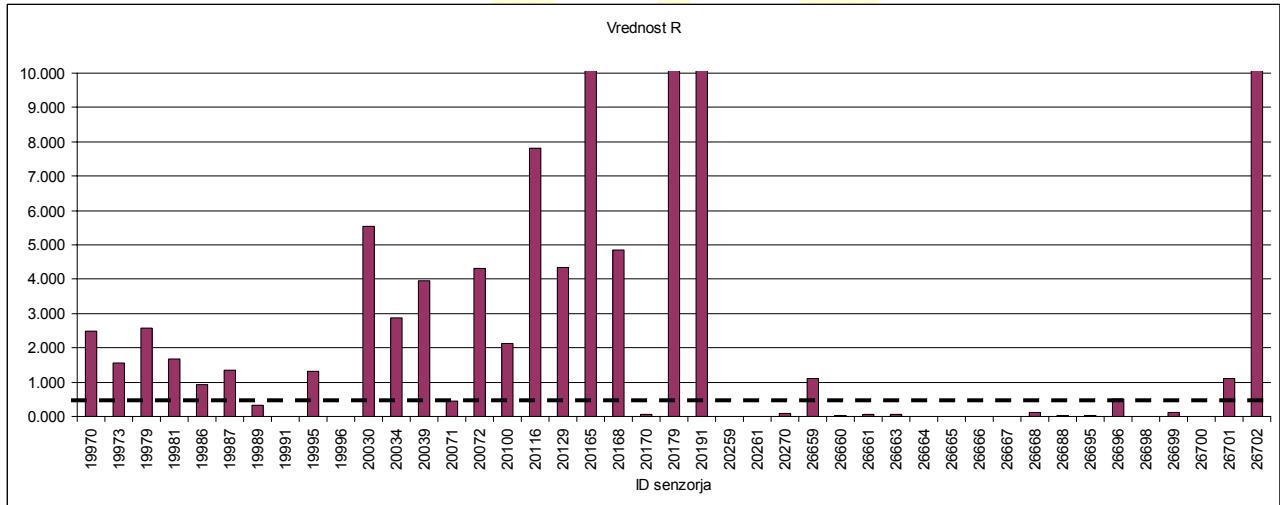
$$\tilde{R}(C_R, C_{PCX}) = 0.511 \quad (8.3)$$

Sedaj vzemimo vseh 43 senzorjev, ki so prestali hitri predtest, na končnem testu pa so bili slabi. Opazujemo vrednost korelacijskega koeficienta $r(C_R, C_{PCX})$ za vsakega od teh 43 senzorjev in zapišemo izpeljanko njegove vrednosti \tilde{R} . V tabeli 15 so prikazane vrednosti \tilde{R} , od katerih je 22 izpadlo na kriteriju korelacije in so označeni z inverznim zapisom v tabeli.

Tabela 15 - Vrednosti $r(C_R, C_{PCX})$ za senzorje, ki so bili po končnem testu slabi

ID	R	ID	R	ID	R	ID	R	ID	R
19970	2.477	20030	5.545	20170	0.067	26664	0.015	26700	0.005
19973	1.545	20034	2.872	20179	73.373	26665	0.008	26701	1.097
19979	2.587	20039	3.964	20191	710.677	26666	0.001	26702	7233.996
19981	1.679	20071	0.44	20259	0.012	26667	0.004		
19986	0.934	20072	4.325	20261	0.01	26668	0.12		
19987	1.347	20100	2.112	20270	0.083	26688	0.022		
19989	0.333	20116	7.82	26659	1.107	26695	0.016		
19991	0	20129	4.332	26660	0.024	26696	0.524		
19995	1.322	20165	110.244	26661	0.049	26698	0.001		
19996	0.011	20168	4.842	26663	0.049	26699	0.133		

Vrednosti so prikazane tudi v grafikonu (Sl. 49).



Slika 49: Pregled izločenih senzorjev po kriteriju korelacije

Meja za razvrščanje po kriteriju korelacije je prikazana s črtkano črto.

Če bi vzeli samo postopek razvrščanja po korelacijskem kriteriju na naprednem predtestu, bi s tem izboljšali izkoristek umerjanja za 22 kosov pri skupnih 1077 kosih, ki smo jih peljali skozi postopek umerjanja. Upoštevamo $N'_{FC}=43-22=21$ in s tem lahko povečamo izkoristek umerjanja iz 96% pri uporabi zgolj običajnega predtesta na:

$$Y_B = 100\% - \frac{N'_{FC}}{N_A - N_F} = 98,05\% \quad (8.4)$$

Vendar to še ni vse. Sedaj uporabimo še drug del iz naše orožarne, to je kriterij ujemanja koeficientov.

8.1.2.2 Simulacija razvrščanja po kriteriju ujemanja vrednosti največjega koeficienta

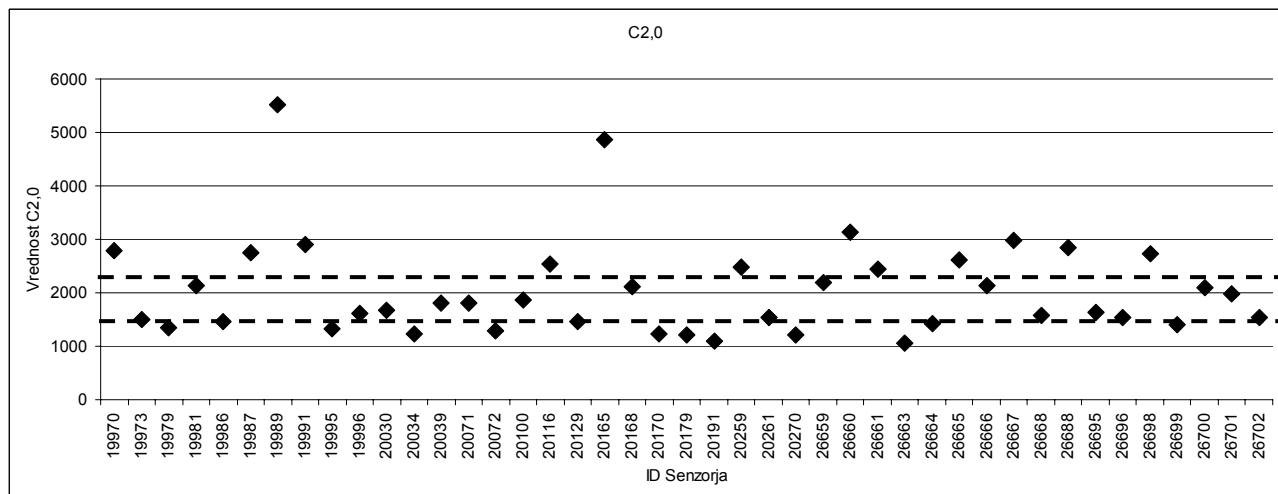
V učni množici je največji koeficient C_{01} . Iz prikazanih statističnih podatkov lahko določimo tolerančne meje razvrščanja. Za prvi poskus uporabimo kar meje iz učne množice in sicer vse vrednosti C_{01} izmed 43 slabih senzorjev, ki ležijo izven intervala (1509, 2217) označimo kot slabe po kriteriju ujemanja koeficientov.

Če bi uporabili še ta kriterij, bi lahko izločili še dodatnih 13 kosov (slika 50). Pri nekaterih opazovanih senzorjih se, razumljivo, kriterija izločanja pokriva. V tabeli 16 so prikazane vrednosti za senzorje, ki so bili izločeni na osnovi kriterija ujemanja vrednosti največjega koeficienta v simuliranem naprednem predtestu:

Tabela 16 – Vrednosti koeficiente C2,0 za senzorje, ki so bili po končnem testu slabi

ID	C2,0								
19970	2793	20030	1676	20170	1237	26664	1429	26700	2091
19973	1501	20034	1232	20179	1212	26665	2624	26701	1981
19979	1343	20039	1802	20191	1093	26666	2129	26702	1539
19981	2143	20071	1813	20259	2473	26667	2989		
19986	1456	20072	1289	20261	1539	26668	1586		
19987	2748	20100	1871	20270	1216	26688	2838		
19989	5516	20116	2546	26659	2190	26695	1633		
19991	2905	20129	1462	26660	3137	26696	1541		
19995	1335	20165	4858	26661	2451	26698	2739		
19996	1615	20168	2124	26663	1055	26699	1395		

Vrednosti prikažemo v diagramu, kjer se lepše vidi raztros izven tolerančnega obsega:



Slika 50: Izločeni senzorji po tolerančnem kriteriju

Če upoštevamo še 13 senzorjev, ki sicer prestanejo korelacijski test, izloči jih pa test ujemanja koeficientov, pridemo na koncu zgolj do 8 senzorjev, ki jih nobeden od opisanih načinov izločanja z naprednim predtestom ne zazna kot slabe (slika 50). Teh 8 senzorjev prestavlja končni izpad izkoristka umerjanja. Izkoristek se pri $N''_{FC}=43-22-13=8$ tako lahko zviša na

$$Y_B = 100\% - \frac{N''_{FC}}{N_A - N_F} = 99,2\% \quad (8.5)$$

8.1.2.3 Povzetek rezultatov ničelne serije

Prvi sklop meritev in analize smo izvajali na 1088 senzorjih. Videli smo, da s preprostim izločanjem potencialno slabih senzorjev pred umerjanjem lahko dosežemo okrog 96% izkoriščenost proizvodnega postopka umerjanja. Po končnem umerjanju smo zaznali 43 slabih senzorjev na končnem testu. S simulacijo izločanja potencialno slabih senzorjev je bila prikazana uporaba algoritmov naprednega predtesta. Z izvajanjem izločanja v

dveh korakih nad shranjenimi vrednostmi koeficientov predtesta bi bilo mogoče izločiti še 35 senzorjev izmed teh 43, ki nikoli ne bi zasedli mesta na opremi za umerjanje. S tem bi lahko izboljšali izkoristek umerjanja iz prvotnih 96% na 99,2%. To predstavlja odličen rezultat ob upoštevanju velikoserijske proizvodnje.

ZAKLJUČKI ANALIZE NIČELNE SERIJE NA 1088 KOSIH

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

8.2 Redna proizvodnja

Po dobrih in obetaajočih rezultatih pri povečanju izkoristka umerjanja na ničelni seriji bomo te metode uporabili tudi v redni proizvodnji. V prvi redni seriji je bilo proizvedenih $N_A = 13832$ senzorjev. Od tega je bila količina celotnega izmeta enaka 916 senzorjev, od česar je bilo kar 793 slabih senzorjev zaznanih s pomočjo naprednega predtesta, oz. metod, opisanih v tem delu.

Pri analizi izmeta redne serije uberemo obratno pot kot pri ničelni seriji. Tam smo gledali, koliko senzorjev bi lahko prepoznali z uporabo nove metode. Tu pa poglejmo, kolikšen je delež senzorjev v redni seriji, če napredne metode izločanja ne uporabimo. Samo z običajnim predtestom bi bil izkoristek umerjanja le 93,4%. Z uporabo napredne metode pri proizvedenih $N_A = 13832$, slabih $N_F = 916$ in po končnem testu še slabih $N_F = 123$ kosov pa dosežemo izkoristek

$$Y_B = 100\% - \frac{N''_{FC}}{N_A - N_F} = 99,1\% \quad (8.6)$$

Do trenutka pisanja tega dela je bil izkoristek še izboljšan na 99,4% s prilagoditvijo parametrov razvrščanja.

8.3 Časovna analiza

Z analizo potrebnega časa za umerjanje z uporabo naprednega predtesta in brez je pokazala, da z novim postopkom pridelamo v povprečju dodatnih 940ms zakasnitve na izdelan dober kos. To je za primer, ko imamo sistem za umerjanje s 128 mesti za merjence. Lahko trdimo, da je taka zakasnitev zanemarljiva v primerjavi s sicer potrebnimi časi za proizvodnjo in umerjanje senzorjev.

8.4 Izboljšave

Prikazana metodologija predstavlja občutno izboljšavo pri povečanju učinkovitosti velikoserijske proizvodnje. Kljub temu pa je prostora še za nekaj izboljšav, ki bi te postopke pripeljale praktično do perfektnosti. Prva je samoučenje sistema s pomočjo mehkih (fuzzy) metod, kot je bilo deloma nakazano v poglavju 7.2. Na začetku si sami postavimo določene pogoje sortiranja, ki se kasneje prilagajajo rezultatom. S tem se kalibracijski sistem (ali pa katerikoli proizvodni postopek) samodejno uči na osnovi preteklega dela.

Druga izboljšava je uporaba še naprednejših metod izračuna, metodologij razvrščanja in samega ocenjevanja. Prikazan postopek je samo eden od možnih in je tudi dokaj preprost. Namesto preproste korelacije lahko uporabimo množico drugih statističnih metod preizkušanja [3].

Prikazani algoritmi predstavljajo prvi tak primer v podjetju HYB in na opisanih metodah se šele učimo. Zaradi tega lahko predlagamo še tretjo izboljšavo, ki je abstrakcija metodologije in prenos v vse nivoje proizvodnje. Pogoj za to je seveda enotna informacijska podprtost vseh proizvodnih postopkov, enotno beleženje vseh vplivnih parametrov proizvodnje in ustrezno modeliranje odvisnosti med njimi.

V prikazanih postopkih se nikjer nismo vprašali, zakaj pa pride do tega, da bo nek senzor slab. To je pa žal izrazito tehnološko vprašanje, ki je zelo namensko usmerjeno v nek konkretni izdelek. Da bi ugotovili vzroke moramo iskati krivdo v tehnologiji izdelave opazovanega izdelka. Taka znanja pa so bistvo nekega podjetja, njegov t.im. know-how, ki se gradijo skozi leta izkušenj. Ponavadi so vsa ta znanja sicer zapisana in natančno dokumentirana, a nedostopna za javno objavo, saj predstavljajo nekatere bistvene konkurenčne prednosti, ki jih podjetje skrbno varuje. Tudi v podjetju HYB ni nič drugače.

9 Zaključki

Izkoristek proizvodnega procesa je zelo pomemben zaradi svojega direktnega vpliva na stroške proizvodnje nekega izdelka. Kadar želimo dosegati izkoristke, ki so blizu 100% ni dovolj le, da vzpostavimo čim boljše pogoje in kakovost v proizvodnji, ampak moramo vse to stalno izboljševati. Da to lažje dosežemo, moramo uporabiti tudi naprednejše prijeme, kot je prikazani postopek ugotavljanja, ali je nek izdelek potencialno slab.

Izboljševanje izkoristka zajema ugotavljanje napak in njihovo identifikacijo. Prikazani prijemi izboljševanja izkoristka se osredotočijo na vzorčenju napak na proizvodni liniji. Bistvo je v tem, da znamo ugotoviti korelacije med odpovedmi in njihovimi vzroki.

Pri masovni proizvodnji MAP senzorjev se srečujemo z dolgotrajno operacijo, ki je ne moremo prekinjati in ponavljati. Ta korak je umerjanje senzorja, ki zahteva večino proizvodnega časa. Če uspemo izboljšati izkoristek tega koraka, lahko rečemo, da smo znatno izboljšali celotni proizvodni proces. Na tej predpostavki sloni celotno delo in lahko rečemo, da je tudi uspešno dokazana s konkretnimi rezultati analize redne proizvodnje. Dobra lastnost prikazanih metod naprednega predtesta je tudi ta, da v proces ne vnaša dodatnih zakasnitev, ki bi znatno podaljšali čas izdelave senzorjev, kar bi konec koncev tudi v splošnem poslabšalo izkoristek.

Izpeljan matematični model izkoristka ter korelacije med potencialnimi odpovedmi in zgodovino meritev so dovolj splošni, da jih lahko uporabimo na kateremkoli proizvodnem postopku ali procesu, kjer imamo možnost beleženja merilnih podatkov. Eden od pogojev za dober rezultat je tudi masovnost proizvodnje. Večje kot je število izdelanih proizvodov, bolj natančni smo in bolj ostre meje lahko postavljamo. To omogoča postopek stalnega prilagajanja na osnovi zabeleženih rezultatov s pomočjo prikazanih metod samoučenja.

Vsi prikazani postopki in izpeljane metode so bile uporabljenе in preizkušene v praksi, v masovni proizvodnji. Z vpeljavo naprednega predtesta je bil pri izdelavi 13832 senzorjev izkoristek kar 99,1%. S simulacijo brez uporabe naprednega predtesta pa bi bil le 93,4%. Teh 5,7% izboljšave pa v masovni proizvodnji pomeni opazen prihranek, za katerega se je splačalo potruditi.

10 Zahvala

Iskreno se zahvaljujem vsem, ki so mi pomagali pri izdelavi tega magistrskega dela. Pomoč tistih, ki so konkretno pripomogli pri nastanku tega dela pa navajam v spodnji tabeli. Vrstni red je v časovnem sosledju nastajanja tega dela.

Tabela 17 – Seznam oseb, katerim gre posebna zahvala

Ime	Zaposlen	Vrsta pomoči
prof. dr. Franc Novak	IJS	»Pogabil« 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 tabletka
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

11 Literatura in viri

- [A1] R.Madge, New test paradigms for yield and manufacturability, IEEE Design and Test of Computers, 22(3), (2005) 240-246.
- [A2] International Technology Roadmap for Semiconductors, <http://www.itrs.net/home.html>
- [1] Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. & Vetterling, W. T. (1988), Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, Cambridge
- [2] M. Pavlin, A universal sensor calibrator, EMPS 2006
- [3] An Effective Diagnosis Method to Support Yield Improvement
- [4] Orel, B. Osnove numerične matematike, 2. izdaja, ISBN: 961-6209-19-1, Ljubljana : Fakulteta za računalništvo in informatiko, 1999
- [5] IEEE Std 1451.2, IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats
- [6] ZMD31020 Differential Sensor Signal Conditioner Application Note Rev. 1.3 July 25th, 2002
- [7] Efficient Function Approximation for Embedded and ASIC Applications. In Proceedings of the international Conference on Computer Design: VLSI in Computers & Processors (September 23 - 26, 2001). ICCD. IEEE Computer Society, Washington, DC, 507.
- [8] Shen, X. and Zhai, C. 2005. Active feedback in ad hoc information retrieval. In Proceedings of the 28th Annual international ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (Salvador, Brazil, August 15 - 19, 2005). SIGIR '05. ACM Press, New York, NY, 59-66. DOI= <http://doi.acm.org/10.1145/1076034.1076047>
- [9] Santo Zarnik M., Ročak D., Maček S. 2004. Residual stresses in a pressure-sensor package induced by adhesive material during curing: a case study. In Sensors and Actuators A: Physical. Volume 116, Issue 3, 29 October 2004, p. 442-449
- [10] Sze, S.M.: Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons Inc., New York, 1981
- [11] C. Hora et al., An Effective Diagnosis Method to Support Yield Improvement, International Test Conference, Baltimore, USA, October 7-10, 2002, pp. 260-269.
- [12] IEEE 1284-1994: Standard Signaling Method for a Bi-directional Parallel Peripheral Interface for Personal Computers
- [13] EIA-485 Specification
- [14] MAP sensor datasheet, Hyb d.o.o.
- [15] Model 2700 Multimeter/Data Acquisition System Service Manual Rev. F
- [16] G. Brasseur: "Robust Automotive Sensors"; Talk: IMTC IEEE Conference on Instrumentation and Measurement Technology, Ottawa, Canada; 05-19-1997 - 05-21-1997; in: "IEEE Conference Proceedings on Instrumentation and Measurement Technology (IMTC/97)", (1997), 1278 - 1283.
- [17] ZMD31020 Application Note_Rev1.3
- [18] Internetna stran www.hyb.si in interna dokumentacija HYB d.o.o.
- [19] ZMD31020 Datasheet_Rev1.4
- [20] W. H. Ko, J. T. Suminto, and G. J. Yeh, "Bonding techniques for microsensors," in *Micromachining and Micropackaging of Transducers*, C. D. Fung, P. W. Cheung, W. H. Ko, and D. G. Fleming, Eds. Amsterdam: The Netherlands: Elsevier, 1985, p. 41.
- [21] SM5102 OEM Pressure die, Datasheet,
http://www.si-micro.com/fileadmin/pdf/Datasheets/datasheet_SM5102.pdf
- [22] Darko Belavič, "Trendi na področju hibridne debeloplastne tehnologije", Inf. MDEM, vol. 30, str. 133-143, 2000.

- [23] http://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html
- [24] Hauptmann, Peter. Sensors: Principles & Applications , Hertfordshire, UK, Carl Hanser Verlag (1991).
- [25] Moon Key Lee, Bo Na Lee, and Seung Min Jung, ``A bipolar integrated silicon pressure sensor," Sensors & Actuators A (Physical), Vol. 34, July 1992, pp. 1-6.
- [26] A. Pohl, G. Ostermayer, L. Reindl, F. Seifert: "Monitoring the Tire Pressure at Cars Using Passive SAW Sensors"; Talk: IEEE Ultrasonics Symposium, Toronto; 11-15-1997 - 11-17-1997; in: "Proc.IEEE Ultrasonics Symp.", 2 (1997), 471 - 474.
- [27] A. Buchleitner, E. Benes, M. Gröschl, K. C. Harms, R. Chabicovsky: "Thin film multilayer system acting as acoustic bulk wave mirror in a novel piezoelectric pressure transducer"; Talk: IEEE International Frequency Control Symposium, Orlando, USA; 05-28-1997 - 05-30-1997.
- [28] S. Clark, and Kensall Wise, ``Pressure sensitivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensors," IEEE Transactions on Electron Devices , Vol. ED-26, No. 12, December 1979, pp. 1887-1896.
- [29] H.T.M. Pham et al., Proc. Micromachining and Microfabrication Process Tech., SPIE 2001, Vol.4557, pp. 272-279.
- [30] G. Box, G. Jenkins: (1970), Time Series Analysis, Forecasting and Control (Holden Day, San Francisco, CA)
- [31] C. Peña: (2002), "Coevolutionary fuzzy modeling," Ph.D. thesis, 'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- [32] A. Grace: (1992), Optimization Toolbox - For use with MATLAB, Mathworks, Inc.
- [33] J. Abonyi, H. Andersen, L. Nagy, F. Szeifert: "Inverse fuzzy-process-model based direct adaptive control"
- [34] Ramage, M. "Computation and Competitiveness: Managing Technology in the Information Age," FOCAPPO '98, Snowbird, Utah, July 5-10, 1998.
- [35] Process Plant Performance: Measurement and Data Processing for Optimization and Retrofits
- [36] Linear Regression Analysis (Wiley Series in Probability and Statistics)
- [37] PGA309 Voltage Output programmable analog signal conditioner, Burr Brown / Texas Instruments datasheet
- [38] Dallas/Maxim semiconductors. APPLICATION NOTE 871: Demystifying Piezoresistive Pressure Sensors
- [39] John Essick: Advanced LabVIEW Labs, Prentice Hall, New Jersey, 1999
- [40] Jeffrey Travis: LabVIEW for everyone second addition, Prentice Hall, 2002
- [41] M. Možek: Inteligentni senzor tlaka, Magistrska naloga
- [42] Granger C.W.J., Terasvirta T., (1993), Modelling nonlinear relationships, Oxford University Press, Oxford.
- [43] Tong H., (1983), Threshold models in nonlinear time series analysis, Springer-Verlag, New York.
- [44] Pollock, D.S.G., (1999), Time-Series Analysis, Signal Processing and Dynamics, The Academic Press, London.
- [45] Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., Weiber, R., 2000: Multivariate Analysemethoden, 9. Auflage, Berlin: Springer
- [46] Melexis MLX90269 Absolute Integrated Pressure Sensor datasheet, Melexis Microelectronic Integrated Systems, Sep.2005, rev. 004
- [47] ZMD31010 RBic™ Technical Notes Lite ZACwire™ Communication, ZMD A.G., 2006
- [48] 1-Wire Products, Mixed-Signal Design guide, Maxim Integrated Products, 2005
- [49] Druck DPI 520 User Manual, Druck Limited 1998
- [50] The design of a monolithic, signal conditioned pressure sensor Baskett, I. Frank, R. Ramsland, E. Motorola Semicond. Products Sector, Phoenix, AZ
- [51] Dancaster, J. Kim, W. Do, D. Sampson, S. Logan, J. Merrill, R. GE NovaSensor Inc., Fremont, CA, USA: Two-chip pressure sensor and signal conditioning
- [52] D.C. Montgomery, Applied statistics and probability for engineers, Wiley, 3rd. edn., 2003, p. 720.

Mps

12 Priloge

Kazalo algoritmov (Format: List of)

Algoritem 1: Poenostavljen algoritem uporabe naprednega predtesta.....	12
Algoritem 2: Podroben postopek izdelave MAP senzorjev	60
Algoritem 3: Postopek zamenjave potencialno slabih senzorjev tlaka, izločenih pri naprednjem predtestu.....	64

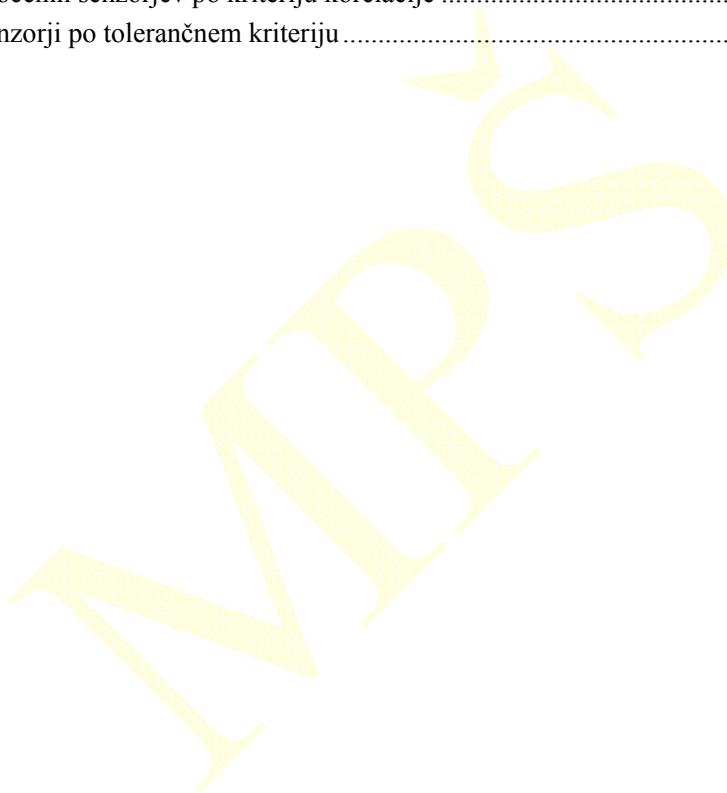




Kazalo slik

Slika 1: Piezouporovni senzor tlaka izdelan v polprevodniški tehnologiji na siliciju	16
Slika 2: Prenosna funkcija senzorja.....	18
Slika 3: Napaka kalibracije.....	19
Slika 4: Napaka histereze	20
Slika 5: Napaka nelinearnosti	20
Slika 6: Zasičenje izhodnega signala	21
Slika 7: Določanje izhodne upornosti	22
Slika 8: Temperaturna karakteristika gole piezouporovne senzorske tabletke (levo) in izdelanega, kalibriranega in temperaturno kompenziranega MAP senzorja (desno)	23
Slika 9: Blokovna shema vezja PGA309, kjer je glavni senzorski signal ves čas analogen.....	24
Slika 10: Kompenzacija temperaturne napake občutljivosti pri napajanju s konstanto napetostjo.....	25
Slika 11: Temperaturna kompenzacija in kalibracija ničelne napetosti.....	26
Slika 12: Električna shema preciznega ojačevalnika	27
Slika 13: Temperaturna kompenzacija občutljivosti.....	28
Slika 14: Kompenzacija nelinearnosti uporablja povratno zanko s skaliranjem.....	29
Slika 15: Primer digitalnega vezja z analognimi signali.....	29
Slika 16: Notranja zgradba tipičnega popolnoma digitalnega vezja za umerjanje senzorskih signalov (ZMD31020).....	30
Slika 17: Integrirana izvedenka digitalnega vezja za umerjanje, kjer sta senzorska membrana z mostičem in elektronika za umerjanje izdelana monolitno na enem silicijevem substratu [46].....	31
Slika 18: Sistem za umerjanje MAP in sorodnih senzorjev tlaka	36
Slika 19: Shema komunikacijskega vmesnika za povezavo nadzornega računalnika s senzorji, ki jih umerjamo	39
Slika 20: Tiskano vezje komunikacijskega vmesnika za povezavo z 32 senzorji	39
Slika 21: Tiskano vezje vodila, ki povezuje posamezne module med seboj.	40
Slika 22: Blok shema povezovanja posameznih modulov digitalnega kalibracijsko preizkuševalnega sistema.....	41
Slika 23: Izgled naprave, ki se uporablja pri proizvodnji MAP senzorjev	42
Slika 24: Fotografija izdelanega digitalnega vmesnika z umerjanje in preizkušanje senzorjev na osnovi digitalnih vezij za umerjanje	42
Slika 25: Kalibracijska komora	44
Slika 26: Primer kalibracijskih vmesnikov za različne vrste senzorjev	44
Slika 27: Električna blokovna shema MAP senzorja.....	46
Slika 28: Senzorski del MAP senzorja (levo brez zaščitnega gela, desno z zaščito).....	46
Slika 29: Končna oblika MAP senzorja v plastičnem ohišju.....	46
Slika 30: Primeri sorodnih izdelkov, ki imajo enako električno shemo, a drugačni pnevmatski in električni priključek	47
Slika 31: Prerez senzorske tabletke za merjenje absolutnih tlakov	47
Slika 32: Fotografija senzorske tabletke, ki se uporablja v HYB	48
Slika 33: Primer debeloplastnega hibridnega vezja na keramičnem substratu, kot se izdelujejo v podjetju HYB	49
Slika 34: Koeficient temperaturnega raztezka za Si v odvisnosti od temperature	50
Slika 35: Četrtnina preseka strukture pritrjevanja senzorske tabletke na keramični substrat	50

Slika 36: Primer simulacije slabega lepljenja senzorske tabletke, ki se je potrdila tudi v praksi	51
Slika 37: Primer idealnega lepljenja senzorske tabletke.....	51
Slika 38: S silikonskim gelom zaščitena senzorska tabletka in vezje za digitalno umerjanje	52
Slika 39: Pogovorno okno za hitri predtest.....	52
Slika 40: Električni kontakti na keramičnem substratu MAP senzorja	53
Slika 41: MAP senzor zaprt v plastično ohišje	54
Slika 42: Shematski prikaz postopka izdelave MAP senzorja.....	59
Slika 43: Dva možna trenutka za vstavljanje naprednega predtesta v postopek umerjanja MAP senzorja	65
Slika 44: Optimalno število senzorjev v eni sarži umerjanja.....	66
Slika 46: Pregled izmeta med postopkom izdelave MAP senzorja	68
Slika 47: Histogram koeficijenta C00 iz učne množice (N=1034)	70
Slika 48: Histogram koeficijenta C01 iz učne množice (N=1034)	70
Slika 49: Histogram koeficijenta C02 iz učne množice (N=1034)	70
Slika 49: Pregled izločenih senzorjev po kriteriju korelacije	72
Slika 51: Izločeni senzorji po tolerančnem kriteriju	73



MPS

Kazalo tabel

Tabela 1 Tlaki, ki jih srečamo v sistemih s senzorji tlaka	15
Tabela 2 Koraki umerjanja pri scenariju {3p/3T}	37
Tabela 3 Tipične točnosti, ki jih lahko dosežemo pri uporabi nekaterih scenarijev umerjanja	37
Tabela 4 funkcije digitalnega vmesnika za hitri test senzorjev z digitalnim umerjanjem	43
Tabela 5 Specifikacije SM5102 [21]	48
Tabela 6 Koeficienti temperaturnega raztezka za nekatere materiale, uporabljene pri izdelavi senzorjev tlaka.....	50
Tabela 7 Primer merilnih rezultatov končnega testa.....	53
Tabela 8 Polja podatkovne tabele z merilnimi rezultati.....	55
Tabela 9 Tipične izmerjene vrednosti opazovanih parametrov (tlak).....	56
Tabela 10 Tipične izmerjene vrednosti opazovanih parametrov (izhodni DAC)	57
Tabela 11 Tipične izračunane vrednosti kalibracijskih koeficientov.....	57
Tabela 12 Povzetek statističnih podatkov za učno množico (N=1034)	69
Tabela 13 Učna množica za izračun korelacijskega koeficienta (N=1034).....	71
Tabela 14 - Vrednosti $r(C_R, C_{PCX})$ za prvih 35 dobrih senzorjev	71
Tabela 15 - Vrednosti $r(C_R, C_{PCX})$ za senzorje , ki so bili po končnem testu slabi.....	72
Tabela 16 – Vrednosti koeficiente C2,0 za senzorje , ki so bili po končnem testu slabi	73
Tabela 17 – Seznam oseb, katerim gre posebna zahvala	77

MPS

Extended Abstract of Master's Degree

Yield enhancement of piezoresistive pressure sensors for automotive applications

Abstract

An approach of enhancing yield in the production of piezoresistive pressure sensors for automotive applications is described. The main idea is to introduce an advanced pre-check which sorts out potentially bad sensors before the actual calibration. The sorting algorithm is performed in two steps. In the first step, the linear correlation coefficient for the pre-checked sensor is calculated and compared to a margin initially estimated on the basis of the production first series and continuously adjusted during the mass production in accordance with the quality management strategy. In the second step, the actual values of coefficients of the pre-checked sensor are compared with the values of the reference coefficients. Both conditions must be met to enter the evaluated sensor in the calibration procedure. Empirical data from sensor production are given to illustrate the advantage of the described approach.

Keywords: piezoresistive sensors, calibration, yield, production test

1. Introduction

In manufacturing of modern electronic devices achieving and maintaining high yield level is a challenging task, which depends on the capability of identifying and correcting repetitive failure mechanisms. In most industries, yield has been defined as the number of products that can be sold divided by the number of products that can be made. The true yield number, however, is the number of functional and reliable products - shipped and paid for - minus the number of innocent bystanders (the perfectly good products rejected in the testing process) divided by the total manufactured [1]. Yield Enhancement defined as the process of improving the baseline yield for a given technology generation from R&D yield level to mature yield is one of the strategic topics of International Technology Roadmap for Semiconductors [2]. The concept is based on yield learning, which is a collection and application of knowledge of manufacturing process in order to improve device yield through the identification and resolution of systematic and random manufacturing events. Although primarily focused on semiconductor wafer technology the concept of yield improvement is general and can be applied to other electronic technologies.

Electronic sensors are massively involved in modern industrial automation applications. While sensor design and fabrication techniques including yield reports have been published in numerous papers, little publicity has been given in particular to the yield enhancement. One of the most time consuming steps in sensor production is calibration. Each sensor is individually exposed to several reference input signals and its transfer function is calibrated such that electrical output signal corresponds to the measured physical signal within the prescribed tolerance ranges. Significant loss in total production yield may result from the loss in calibration system. The calibration system has finite number of calibration places. Every sensor, which has failed after calibration represents missed opportunity to produce a good part and diminishes overall yield of the production process.

In this paper we describe the approach of enhancing yield in the production of piezoresistive pressure sensors for

automotive applications. The main idea is to introduce an advanced calibration pre-check based on continuous learning from the calibration results of the past production. The process is schematically depicted in Fig. 42 and will be described in more details in subsequent sections.

2. General approaches to pressure sensor calibration and compensation

A major obstacle in piezoresistive sensors compensation and calibration is the wide range of errors they exhibit. Primary error sources are [3]:

- strong, nonlinear dependence of the full-scale signal on temperature (up to 1%/°K),
- large initial offset (up to 100% of full scale or more at low pressure sensors),
- strong drift of offset with temperature (packaging influence).

In order to get the desired characteristic of the final product as for example the MAP pressure transducer shown in Fig. 8, different algorithms and design strategies for pressure sensor calibration and temperature compensation are employed.

Modern calibration circuits for piezoresistive bridge sensors apply in general two types of temperature compensation and calibration, distinguished by the compensation domain: Analog- or Digital- sensor signal conditioners (ASSC or DSSC, respectively).

ASSC is a programmable analog signal conditioning circuit employing error reduction with digitally adjusted offset and gain of amplifiers as well as sensor bridge excitation voltage. Sensor calibration and compensation remains in analog domain over the whole signal path without being digitized.

Digital type of sensor signal conditioners (DSSC) operate in digital domain. Pressure and temperature signals from sensor's bridge are converted with Analog-to-Digital Converter (ADC) and fed to microcontroller or custom logic. The output signal is calculated using different numerical methods and algorithms. Output voltage is generated by the DAC output controlled by the result computed by the calibration algorithm. There exist several implementations of DSSC calibration circuits. In general they can be classified into two groups: (1) integrated with diaphragm as single chip [4] or (2) just as signal conditioning circuit, requiring separate sensor bridge chip [5]. Both types have advantages and disadvantages. Single chip solution has lower price, while two chip solution is more flexible.

3. Automotive pressure sensor

In our case, the pressure sensing element is a silicon piezoresistive transducer shown in Fig. 1 and the calibration circuit is sketched in Fig. 27. The implanted piezoresistive structure forms a Wheatstone bridge. Provided in die form, the silicon dice is bonded on Pyrex socle. The complete measurement structure is mounted on a ceramic substrate. The sealed Pyrex socle allows using the sensor for absolute pressure measurement with vacuum as reference pressure. This type of pressure sensor consists of a micro-machined silicon diaphragm with diffused piezoresistive strain gauges.

The bridge resistance between Vcc and ground is constant over the operating pressure range. However, the bridge resistance changes with temperature at typically 800 ppm/°C rate. When the bridge excitation is constant-current source, the bridge voltage V_B is proportional to the bridge resistance. The bridge resistance change results in a bridge voltage change, which can be used as temperature signal for temperature compensation.

At given ambient temperature T and applied pressure p , the differential output voltage V_p is proportional to the bridge voltage V_B . Sensitivity S is sensor characteristics and is temperature dependant.

$$V_p = pS(T)V_B \quad (1)$$

The sensitivity S decreases with temperature due to the temperature dependence of piezoresistive coefficients in sensor's silicon structure.

The temperature compensation and calibration are done by two-chip DSSC. Sensor bridge is piezoresistive silicon pressure sensor with vacuum as reference to measure absolute pressures.

As shown in Fig. 27, sensor bridge is connected to a digital sensor signal conditioner. The main task for the signal

conditioning electronics is to correct errors induced in the sensing element by stimuli other than the primary sensing parameter. Magnitudes of errors vary from unit to unit, requiring calibration process in which each sensor is individually measured over the required operating range. Calibration is based on a numerical model, which can be defined by a multidimensional Taylor's series [6]. Calibration coefficients are represented by constants in Taylor's series. Based on the test data and calibration algorithm, the digital signal conditioning electronic circuit for each sensor is programmed with digital calibration coefficients stored in the internal calibration memory. Digital programming procedure minimizes sensor, interface, and electronics errors and makes external calibration components or laser trimming unnecessary.

In our case, a semi-custom ASIC is optimized for ratiometric differential sensors. Differential bridge signal is amplified with chopper-stabilized programmable gain amplifier, programmable to 3 differential gains (15.66, 24 and 42) and then converted with a single 12-bit input ADC. The 16-bit RISC microcontroller performs permanent correction calculation based on the pressure and temperature measurement. The corrected output signal is generated by a 11-bit output DAC. The temperature is sensed optionally through off-chip or on-chip diode. The correction processor has 16-bit ALU & (16 x 16 bit) RAM, (1k x 16)-bit instruction ROM and (12 x 16)-bit parameter EEPROM. The correction formula is based on 7 calibration coefficients stored in an EEPROM. The EEPROM stores the configuration word, calibration coefficients, upper and lower output signal limits and customer specific identifiers. Provided I2C interface serves for calibration purposes and the corrected sensor signal is also available as 12-bit digital word.

The MAP (manifold absolute pressure) sensor, described in our case, is used for automotive applications. In particular, it takes part in the internal combustion engine's electronic control system. The manifold absolute pressure measurement is critical to an engine's electronic control unit (ECU) in order to calculate fuel and spark requirements. MAP sensor measures the "absolute pressure" (not manifold vacuum) in the engine's intake manifold. The mass of the air entering the engine is directly proportional to its density, which is directly proportional to the air's absolute pressure, and inversely proportional to the air's absolute temperature. Besides, MAP sensor can also be used to measure the barometric absolute pressure. [3]

4. Calibration algorithms

Numerous correction equations are available for sensor correction. The choice mostly depends on the behavior and nature of the uncorrected output of the sensor represented by the raw AD readout. The most appropriate compensation and calibration equation is based on the physics of the sensor element and its interfacing electronic circuit.

In general, sensor transfer function can be expressed by a multidimensional Taylor series [7][6]:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=0}^{D(1)} \sum_{j=0}^{D(2)} \dots \sum_{p=0}^{D(n)} C_{i,j,\dots,p} [x_1 - H_1]^i [x_2 - H_2]^j \dots [x_n - H_n]^p \quad (2)$$

Typical pressure sensor compensation takes two parameters: digitized pressure voltage V_p from the pressure sensor element and digitized temperature feedback signal V_T (Fig. 4). The temperature signal is extracted from the pressure sensing element or generated by a separate temperature sensor. Measured voltages are digitized and converted by using higher order, multi segment calculation of formula (2).

Silicon piezoresistive sensors have normally linear responses in the range below 0,1% FSO for pressure ranges around 1bar and above. For automotive applications it is sufficient to use cubic polynomial approximation for pressure signal and linear function for temperature signal (3). The errors limiting final accuracy are in this case thermal hysteresis and sensor repeatability.

$$F(x_p, x_T) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^1 C_{i,j} [x_p - H_i]^i [x_T - H_j]^j \quad (3)$$

Full operating range is divided into several segments by using piecewise polynomial segmentation.

Sensor signal conditioner has its calibration algorithm based on formula (3). The algorithm is optimized for the employed microcontroller. General form of sensor function is transferred to very specific formula, eq. (4), based on raw, integer ADC readouts and scaled for minimal numerical errors and minimal required memory space for storing calibration coefficients [8][9]. Numerical operations are reduced to integer algebra within 16-bit precision.

$$F(x_p, x_T) = 2^{12} \frac{4x_p + 2^{-24}a_0x_p^2 + a_1 + 2^{-9}a_2x_T + 2^{-18}a_3x_T^2}{a_4 + 2^{-9}a_5x_T + 2^{-18}a_6x_T^2} \quad (4)$$

Equation (4) is rewritten to form (3) in (5)

$$F(x_p, x_T) = \frac{C_0 + C_1x_p + C_2x_p^2 + C_3x_T + C_4x_T^2}{C_5x_T + C_6x_T^2} \quad (5)$$

Calculations are performed with minimal table size (number of polynomials) at maximal accuracy. There are other methods for approximation of sensor transfer function, like cubic splines [10]. The drawback of splines is larger number of multiplications required for same output resulting in prolonged sensor signal delays and slower output signal update rate.

Transfer function approximation is adjusted to the target calibration range for each device. This is done by specifying the values of the calibration coefficients Ci stored in the DSSC internal nonvolatile memory.

5. Calibration procedure

Calibration procedure is a process of determining coefficients in formula (5) by means of collected raw measurements from the pressure sensor bridge. The sequence of measurements is called *calibration scenario*. Each pressure sensor type has its own calibration scenario which is defined in the product development phase. Scenario provides the shortest possible calibration time to obtain the required final accuracy for the specific sensor type.

Pressure sensors are calibrated in groups (128 sensors, in our case) at the same time. There is no general rule for determining the calibration lot size. It depends on calibration complexity, required production throughput and volume, calibration sensor type and requirements, etc. Normally, the calibration equipment is flexible to suit different requirements. Calibration system consists of a data acquisition station, temperature chamber and controlled pressure source. Readouts are acquired in sequence from each individual sensor. During this scanning process, the environment conditions must be stable to avoid measurement induced errors in input vectors for calibration coefficient calculation. Elements of the calibration setup are shown in Fig. 18.

Standard calibration scenario with 3 pressure points and 3 temperature points {3p/3T} has 19 steps as shown in Table 1. Non-calibrated sensors are exposed to 3 different temperatures inside climatic chamber. During the first two steps, the calibration places are populated with assembled non-calibrated parts, hopefully without failures. The data for coefficient calculation is collected only after the whole scenario is completed (i.e., all sensors must be exposed to all temperature and pressure points).

If a failure is detected during calibration (for example, failures due to infant mortality, parametric failures, etc), it is not possible to simply replace the failed sensor and continue with the scenario. Complete process has to be restarted from step 3. Consequently, replacement of bad sensors detected during calibration would cause enormous delays. It is therefore advisable to completely finish the running calibration even with some bad sensors. On the other hand, early detection of potential failures may have a significant impact on achieving high yield in mass production.

Step number	Operation	Time taken (min)
1	Setup	2
2	Precheck	2
3	T1 stabilisation	15
4	P1 measurement	1
5	P2 measurement	1
6	P3 measurement	1
7	DAC calibration	3
8	T2 stabilisation	15
9	P1 measurement	1
10	P2 measurement	1
11	P3 measurement	1
12	DAC calibration	3
13	T3 stabilisation	15
14	P1 measurement	1
15	P2 measurement	1
16	P3 measurement	1
17	DAC calibration	3
18	Programming	1
19	Final test	4

Table 1 Calibration steps for {3p/3T} scenario

Scenario	N _P	N _T	Typical target accuracy
{2P/2T}	2	2	1%
{3P/2T}	3	2	0,5%
{3P/3T}	3	3	0,2%
{4P/3T}	4	3	0,1%

Table 2 Target accuracy of some other possible scenarios

Cumulative time and cost during calibration process for calibrating 128 sensors is shown in Fig. 6. Setup and pre-check are finished quickly. The curve exhibits rapid rise after step #3. Every temperature stabilization step requires significant time interval. Complete calibration process is finished in about 70 minutes for typical {3p/3T} calibration scenario. The presented scenario is just one of the possible calibration progressions. Other possible scenarios run at two pressure and temperature points. More than three measuring points on each axis are needed for higher targeted accuracy (Table 2). For standard industrial or automotive pressure sensors, scenario with three pressure points (NP=3) and two temperature points (NT=3) is sufficient for the accuracy 0,5%. MAP sensor requires {3P/3T} scenario in order to acquire data for solving the system of polynomial equations to derive coefficients $C_{p,t}$ from eq. (5). Since pressure sweep is an order of magnitude faster than temperature sweep it is optimal to avoid multiple, unnecessary temperature transitions. Normally, temperature is set and after stabilization, pressure sweep is done to collect raw sensor responses (fig. 43).

Before calibration, sensors are stored at room temperature. Since no temperature stabilization is allowed to keep any additional delays as short as possible, sensors are pre-checked at room temperature on docking working place. General sensor transfer function (3) is simplified to a single temperature point:

$$F(x_p, x_T) = \sum_{i=0}^2 C_{i,0} [x_p - H_i]^i (x_T - H_0) \quad (6)$$

This simplified formula is the basis for sorting algorithms.

6. Calibration yield improvement

When pressure sensors are produced in high volume (automotive or medical applications), the manufacturing yield becomes a major economic factor. Not only achieved yield, but also the ability to rapidly achieve high yields is of crucial importance. High volume production of pressure sensors is usually based on a limited number of different types. While in most cases common circuit design, calibration algorithm and testing are employed there are, however, variations in housing and pressure range. Whenever a new sensor type is introduced, the yield drops at the beginning. A rapid yield ramp-up phase is required to catch the economic goals.

Normally, there are three distinctive sets of activities in the process of improving the yield: detection of yield loss, identification of the failure source (defect diagnosis) and corrective actions [11]. Due to the specific nature of pressure sensor production it is imperative to improve calibration yield since it has a direct consequence on the actual manufacturing yield. Calibration yield is the ratio between good parts after final test in calibration N_P and total number of calibration positions available N_0 . It is assumed that calibration system is 100% occupied which is true for mass production.

$$\eta = \frac{N_P}{N_0} \quad (7)$$

Calibration yield can be improved by optimizing the number of sensors calibrated in a batch and by advanced pre-checking.

The balance between the number of parts in a batch and the cost of establishing conditions for such parallel process gives the optimal number of simultaneous calibrations. When the number of sensors calibrated in a batch is low, total production time for specific production volume may become prohibitively large. On the other hand, the cost and complexity of calibration system grow with the number of sensors simultaneously processed (Fig. 44).

Conventional pre-check sorts out only totally failed sensors. They are replaced with potentially good ones in the calibration system and the calibration procedure continues with step 3. Calibration is a time consuming task hence in order to be effective it should be performed on potentially good devices. Sensor bridges with large offsets or very small sensitivity can not be calibrated. Calibration algorithm and its implementation in DSSC have limiting capability. Limitations come from different sources within the calibration electronic circuit (like saturation voltages) or limited precision resulted in numerical errors (e.g. integer division with small numbers). Every failed sensor occupying any of the 128 available calibration places increases yield loss. Identification of potentially bad sensors in the early pre-check phase is a prerequisite for calibration yield improvement.

The main challenge addressed in this paper is to find the set of pre-check parameters to sort out potentially bad sensors, which are out of calibration range. The objective is to find ranges for pre-check coefficients of expression (6) and their correlation to failures, which would distinguish possibly bad sensors from those which can be calibrated early in the pre-check phase 2.

In such an advanced pre-checking, pre-check coefficients are calculated from the measurements performed at pressure sweep at room temperature. At the beginning of the sorting process, the limits are wide open allowing all sensors to pass the pre-check test. During early production stages for specific (or new) pressure sensor type these limits are continuously adjusted on the basis of correlation between the sensors failed after calibration and the values of pre-check coefficients. Ranges become more narrow and close to the optimal values. During the learning process it is possible to trim the sorting algorithm to be stricter and sort out even some sensors which might be good at the end of calibration. The opposite direction of manual algorithm trimming results in relaxed margins allowing to pass even some bad sensors, which helps to avoid unnecessary losses on the expense of increased average calibration time. The line for sorting is not always sharp. Implemented algorithm presented in this paper allows flexible margins. An important feature is that it eliminates human errors due to wrong or subjective decisions.

7. Pre-check sorting background

Sorting algorithm is based on the measurements obtained at single, room temperature only. Consequently sensor characteristic (3) is simplified to

$$F(x_p, x_T) = \sum_{i=0}^2 C_{p,0} [x_p - H_i]^i [x_T - H_0] \quad (8)$$

Measurements for pre-check are performed at N_p pressure points. Normal praxis is to measure at the offset pressure and at two different pressure points ($N_p = 2$), one close to the middle of the range and one near the full scale.

Assume that we have measured N_X sensors of the same type. Each sensor can be characterised at fixed room temperature with three coefficients from formula (8): C_{00} , C_{10} and C_{20} . Remember, the second index is 0 as the temperature is not changing and we are working at room temperature only. At specific time point in production the set of pre-check parameters is collected and used as a learning set table:

$$M_{PC} = \begin{pmatrix} C_{00,1} & C_{10,1} & C_{20,1} \\ C_{00,2} & C_{10,2} & C_{20,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{00,N_X} & C_{10,N_X} & C_{20,N_X} \end{pmatrix} \quad (9)$$

First line in the learning set table M_{PC} describes characteristics at room temperature of the first measured sensor, next line, the second sensor from earlier production and so on... The above learning set will be used for pre-checking a **new** sensor with the following pre-check coefficients

$$C_{PCX} = \{C_{00,N_X+1}, C_{10,N_X+1}, C_{20,N_X+1}\} \quad (10)$$

The sorting algorithm uses custom function $s(M_{PC})$, which calculates the probability of failure of each pre-checked sensor after calibration. Sorting function is specific for each sensor type and is based on the implementation of the corresponding calibration algorithm. Practical example is shown in the next section. Function $s(M_{PC})$ borrows some ideas from the algorithms reported in [12]. From theoretical point of view, optimal coefficient sorting algorithm for active feedback learning problems requires an exhaustive search of all possible subsets of pre-check coefficients of the chosen cardinality. For a large number of coefficients, this is may become quite impractical.

In our case, a limited set of coefficients allows us to simplify function $s(M_{PC})$ and to perform sorting algorithm within reasonable time limits.

Assume the finite number N_X of calibrated sensors with pre-check set of coefficients M_{PC} and the unknown sensor under evaluation with pre-check set of coefficients (10).

The sorting algorithm first calculates the reference set of sorting coefficients from the learning set (9) in the following way

$$S(M_{PC}) = \frac{1}{N_X} \left\{ \sum_{i=1}^{N_X} C_{00,i} \quad \sum_{i=1}^{N_X} C_{10,i} \quad \dots \quad \sum_{i=1}^{N_X} C_{N_P 0,i} \right\} \quad (11)$$

The result is the reference set C_R representing the mean value of all calibration coefficients.

$$C_R = \{\overline{C_{00}} \quad \overline{C_{01}} \quad \overline{C_{02}}\} \quad (12)$$

Next, the linear correlation coefficient r (also called the product-moment correlation coefficient, or Pearson's r) between unknown sensor coefficients C_{PCX} (10) and the average set C_R is calculated

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (13)$$

In the above expression, x_i are coefficients in C_{PCX} (10), y_i are the average reference coefficients in the set $S(M_{PC})$ (12). Average values \bar{X} and \bar{Y} of sets C_{PCX} and $S(M_{PC})$, respectively, are calculated by

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} C_{xi,0} \\ \bar{Y} &= \frac{1}{N_p} \frac{1}{N_X} \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_x} C_{j0,i} \end{aligned} \quad (14)$$

The linear correlation coefficient r has values in the range in the interval [-1,1]. Its value is close to 1 when the coefficients of the pre-checked sensor are in good correlation with the average reference coefficients.

The sorting algorithm is performed in two steps. In the first step, the linear correlation coefficient r for the pre-checked sensor is calculated and compared to a margin ρ_{PC} .

The value of ρ_{PC} is initially estimated on the basis of the production first series and continuously adjusted during the mass production in accordance with the quality management strategy. Depending on the type, production volume and sensor characteristics, adjustments can be performed manually or autonomously within the calibration software. If

$$r(C_R, C_{PCX}) > \rho_{PC} \quad (15)$$

the sensor is passed to the second step otherwise it is replaced by a known good part.

In the second step, the actual values of coefficients of the pre-checked sensor are compared with the values of the reference coefficients. Only the largest coefficient is compared with the corresponding reference coefficient

$$C_{PCMAX} = \max(C_R) \quad (16)$$

Assuming a predefined acceptance tolerance ε_{PC} the evaluated coefficient must lie within the interval

$$C_{PCMAX}(1 - \varepsilon_{PC}) > C_{xi_{MAX},0} > C_{PCMAX}(1 + \varepsilon_{PC}) \quad (17)$$

Both conditions (15) and (17) must be met to enter the evaluated sensor in the calibration procedure. Failed sensors are replaced with good parts and the calibration starts only by sensors that passed the pre-check procedure. For this purpose it is necessary to have some pool of good pre-checked sensors on stock. Some small additional time is needed when the failed sensors at pre-check are replaced in a single pass pre-check procedure as shown in Fig. 42.

8. Test results

The calibration phase in MAP sensor production (Figure 42) employs modular calibration system consisting of several sensor calibrator modules shown in Figure 9. A calibrator module provides interfacing to maximum 16 sensors. Each sensor is individually addressed and controlled by the instrumentation electronics. Interface provides the following control functions for each individual sensor being calibrated: power supply switching, I2C

and single wire interface for each sensor, output voltage measurement with 16-bit precision and valve control for switching pressure or other actuators. The module is operated via RS-485 interface. Each module has its own 8-bit address which allows up to 255 slave modules on same bus. Interconnection is done with 4 wires (two differential RS485 lines and unregulated 12V power supply). Sensor calibrator modules are connected to a single master module, with interfacing options to standard test equipment: ethernet with TCP/IP, USB or serial port [13]. The data acquisition application is prepared in LabView.

When a new product is introduced production database is created with no calibration data. Measurement results obtained from the good sensors in zero-series serve as the basis for the calculation of the initial learning set (9). In our case, the lot size of the zero-series was 1088 sensors resulting in 1034 good sensors after final calibration. Some basic statistics relating the initial learning set are summarized in Table 3. Notice that the ranges of the initial values of coefficients are quite large due to a wide distribution of sensors' offsets. As the production quality improves, the deviation of parameters characterizing the product converge to a sharper distribution which narrows the ranges of pre-check coefficients.

As mentioned above, preliminary data collection was performed on total $N_A=1088$ sensors from regular production. Functional pre-check (Fig. 42) revealed 11 faulty sensors before calibration step ($N_F=11$). After calibration, 43 sensors did not pass the final test ($N_{FC}=43$). Calibration yield for zero-series was

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

The feasibility study indicated that 35 sensors out of 43 failed sensors would be detected if the advanced pre-check on the zero-series was employed. Hence, the total number of failed parts could be minimized to $N'_{FC}=8$ and the calibration yield would increase to 99,2%.

$$Y_B = 100\% - \frac{N'_{FC}}{N_A - N_F} = 99,2\%$$

After initial promising results, the method was implemented in the production calibration software. By using the advanced pre-check in regular MAP sensor production the calibration yield is now maintained above 99%. Total number of produced sensors in the first series was $N_A=13832$. The number of failed sensors was 916, from which 793 sensors were sorted out by the advanced pre-check. With only functional pre-check the calibration yield would be only 93,4%. The actual yield as the result of successfully implemented advanced calibration pre-check was 99,1%.

Subsequent series yield was further improved to 99,4% by the adjustments of sorting coefficients based on continuous learning.

Analyzing the total amount of time for calibration with and without the advanced pre-check, we assessed that 940ms additional delay per sensor is spent for advanced pre-check when using 128 places for calibration. This time is negligible in comparison with the total calibration time (Table 1).

Conclusions

Manufacturing yield is an important issue because of its direct connection to profitability. Achieving yield close to 100% requires advanced and constantly improving techniques. Yield enhancement includes detection of failures and identification of defect sources in production process. Traditional approaches concentrate on sample based in-line inspection and the ability to diagnose faults and to correlate the results with possible sources of variation or defectivity.

In massive MAP sensor production, calibration scenario takes several minutes and its run-time optimization directly impacts production yield. Calibration yield can be improved by optimizing the number of sensors calibrated in a batch and by advanced pre-checking. The approach described in the paper employs fast pre-check based on a sorting algorithm with a margin continuously adjusted during production. Empirical production test data show that a significant yield improvement is achieved with little additional test time.

Acknowledgment

This work was supported by the Ministry of Higher Education, Science and Technology of the Republic of Slovenia under grant P2-0098.



Življenjepis

Marko Pavlin je končal srednjo elektrotehnično šolo v Novem mestu. Študiral je na ljubljanski univerzi, na fakulteti za elektrotehniko, smer elektronika. Po končanem študiju leta 1995 se je zaposlil v podjetju HYB d.o.o. v Šentjerneju in opravljal pripravnštvo na Institutu Jožef Stefan, na odseku za keramiko (K5). Od takrat je redno zaposlen v razvojnem oddelku podjetja HYB, kjer se več kot 10 let ukvarja z raziskavami in razvojem senzorjev za medicinske, industrijske ter avtomobilske aplikacije. Svoje znanje in izkušnje uporablja tudi pri načrtovanju elektronskih vezij za zajem, obdelavo in distribucijo senzorskih signalov, za načrtovanje merilnih, kalibracijskih in proizvodnih strojev in naprav, ki se redno uporabljajo v proizvodnem procesu. Kot avtor strokovnih člankov se redno udeležuje strokovnih konferenc s svojega področja. Je soavtor več patentov.



Fotografija



Mrs

Kratek povzetek

Prikazan je postopek izboljšanja izkoristka kalibracijskega procesa pri proizvodnji senzorjev tlaka za avtomobilske aplikacije. Osnovna ideja prikazanih postopkov je vpeljava dodatnega koraka, ki izloča potencialno slabe senzorje še preden nastopi dolgotrajen proces kalibracije. Dodatni korak je časovno zanemarljiv, obenem pa preprečuje, da ostala priključna mesta v kalibracijskem sistem neizkorističena zaradi slabih senzorjev, ki vstopajo v proces kalibracije. Opisan algoritem razvrščanja temelji na iskanju korelacijskih faktorjev med karakteristiko opazovanega senzorja in posplošeno karakteristiko vseh dobrih senzorjev do nekega danega trenutka. Vrednosti referenčnih kriterijev, odločilnih pri ugotavljanju in izločanju potencialno slabih kosov se pri tem stalno prilagajajo glede na zgodovino rezultatov prehodno dobro izdelanih senzorjev. Podani so empirični rezultati iz realne proizvodnje senzorjev tlaka v podjetju HYB iz Šentjerneja. Rezultati ponazarjajo prednosti opisanih postopkov in izboljšanje izkoristka proizvodnih kapacetet pri izdelavi senzorjev tlaka.