

ANDERSONOVA PETLJA

Dr. sc. Dušan VUJEVIĆ, Zagreb

UDK 621.317.39:621.36
STRUČNI ČLANAK

Temperatura u postrojenjima i naprezanje mehaničkih konstrukcija mjere se i otpornim osjetilima (senzorima). Promjena mjerene neelektrične veličine uzrokuje promjenu otpora osjetila koja se mjeri električnim metodama. Najčešće se u tu svrhu rabi Wheatstoneov most. Karl F. Anderson iz jednog od NASA-nih istraživačkih laboratorija patentirao je 1994. god. strujnu petlju za mjerenje temperature i naprezanja otpornim osjetilima. Taj postupak ima neke značajke bolje od klasičnog Wheatstoneovog mosta te ga se rabi za mjerenje naprezanja mehaničkih konstrukcija i temperature u postrojenjima, laboratorijima, zrakoplovima i drugim letjelicama.

Ključne riječi: mjerenje neelektričnih veličina, mjerenje temperature i naprezanja, otporno osjetilo

1 UVOD

Sve neelektrične veličine već se desetljećima, uz pomoć prikladnih osjetila (davača, pretvornika, pretvarača, senzora), mjere električnim metodama [1] i [2]. Tako se temperatura mjeri pasivnim elementima kao što su otporna osjetila (otpornici) od platinske, nikalne ili bakrene žice i termistorima (NTC i PTC otpornici). Sila i naprezanje, među ostalim, mjere se isto tako pasivnim elementima kao što su otporna osjetila iz čistih metala ili slitina u obliku žice ili folije te piezootpornicima i poluvodičkim osjetilima. Mjerenje spomenutih neelektričnih veličina zasniva se na promjeni električnog otpora osjetila prouzročene promjenom mjerene veličine.

Za mjerenje šireg raspona temperature (npr. od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $850\text{ }^{\circ}\text{C}$) pretežito se rabe platinski otpornici, žičani ili s naparenim slojem (u tehnici tankog filma), nazivnog otpora $10\ \Omega$, $100\ \Omega$ ili $1\ \text{k}\Omega$ pri $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Osjetila u tehnici tankog filma imaju površinu od desetak četvornih milimetara, a debljinu manju od jednog milimetra te zbog toga vrlo brzi odziv. Najčešće se rabe žičana platinska osjetila otpora $100\ \Omega$ pri $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, tzv. Pt100, a u tehnici tankog filma ona od $1\ \text{k}\Omega$. Od kemijskih utjecaja okoliša osjetila su zaštićena prikladnim keramičkim ili staklenim slojem, a od mehaničkih oštećenja i metalnim omotačem. Platina čistoće 99,85 % odlikuje se relativno velikim temperaturnim koeficijentom otpora α , vremenskom stalnošću i ponovljivosti ovisnosti otpora o temperaturi, pa se stoga rabi i pri najpreciznijim mjerenjima temperature. Značajke platinskih osjetila temperature propisane su međunarodnom normom IEC 751, odnosno (IEC) EN 60 751, koja je zamijenila DIN 43 760. Promjena otpora platine s temperaturom nije posve linearna i definirana je Callendar - Van Dusenovom jednadžbom,

koja za temperaturni opseg od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ima oblik: $R(t) = R_0 (1 + At + Bt^2)$, gdje je: $R(t)$ - otpor osjetila pri temperaturi t u $^{\circ}\text{C}$; R_0 - nazivni otpor osjetila pri $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; A i B - stalnice, i to: $A = 3,908\ 3 \cdot 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; $B = -5,775\ 3 \cdot 10^{-7}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$. Stalnice u ovoj jednadžbi temelje se, prema normama IEC 751, na $\alpha = 0,003\ 85\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ i mjerenju otpora osjetila na $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ (krutište kositra). Valja napomenuti, da pojedine tvrtke proizvode osjetila prema svojim nacionalnim normama (BS, ASTM, JIS itd.), u kojima se temperaturni koeficijent otpora platine, pa time i stalnice A i B, razlikuju od prije navedenih (npr. National Instruments, Application Note 046).

Bakrena osjetila se obično rabe za temperaturni opseg od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, a nikalna od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Neki proizvođači nude takva osjetila i za temperaturni raspon od $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $320\text{ }^{\circ}\text{C}$, odnosno od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $260\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Termistori imaju veliki negativni temperaturni koeficijent otpora, ali izrazito nelinearnu ovisnost otpora o temperaturi. Stoga se najčešće rabe za mjerenje uskog raspona temperature ili vrlo malih, čak reda veličine 10^{-5} K , promjena temperature.

Mehaničko naprezanje nekog objekta iskazuje se relativnom promjenom njegove duljine (relativno linerano produljenje) $\epsilon = \Delta L/L$, koje može biti pozitivno (istezanje) ili negativno (tlačenje, kompresija). Promjena duljine mjeri se otpornim osjetilima, tzv. mjernim trakama (strain gauge). One su izvedene tako da se na prikladnoj izolacijskoj podlozi nalazi više meandara od vrlo tanke (promjer reda veličine $10\ \mu\text{m}$) otporne metalne žice ili folije. Traka se lijepi posebnim ljepljivom na ispitivani objekt te je s njime podvrgnuta naprezanju. Ako se traka isteže povećava se njena duljina, a smanjuje presjek žice, pa se time mijenja

njezin električni otpor. Ovisnost otpora žice o istežanju je linearna i bez histereze, ako istežanje ne prelazi oko 0,5 % duljine žice. Promjena otpora $\Delta R/R$ pritom iznosi oko 1 %. Nazivni otpori osjetila su u rasponu od 30 Ω do 3 000 Ω , a najčešće su vrijednosti: 120 Ω , 350 Ω i 1 000 Ω . Omjer $(\Delta R/R)/(\Delta L/L)$ u literaturi se naziva faktor osjetila (gauge factor) i označava s GF . Taj je faktor obično oko 2.

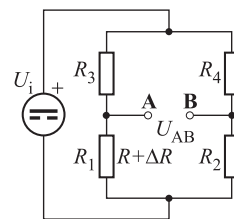
Osjetilo za mjerenje temperature ne smije biti izloženo mehaničkim naprezanjima, a ono za mjerenje naprezanja promjenama temperature, jer u oba slučaja nastaju dodatne promjene otpora osjetila što povećava mjernu nesigurnost. Ti se utjecaji mogu smanjiti ili posve ukloniti prikladnim zahvatima u oblikovanju osjetila i pripadnog mjernog sklopa.

Promjena električnog otpora osjetila mjeri se električnim mjernim instrumentima, metodama i sklopovima. Od analognih mjernih instrumenata za mjerenje temperature rabio se instrument s križnim svicima i permanentnim magnetom, pretežito u laboratorijama. Od metoda se najčešće rabi Wheatstoneov most, koji male relativne promjene otpora pretvara u razmjerne promjene napona, koje se onda mogu izravno ili nakon pojačanja mjeriti. Kao rezultat istraživanja, koja je Karl F. Anderson devedesetih godina prošlog stoljeća provodio uz potporu NASA-e (National Aeronautical and Space Administration) u njezinim laboratorijama [3] i [4], nastao je patent za tzv. Andersonovu petlju (Anderson loop) [5]. Ona se pokazala da je, u nekim primjenama, prikladnija za uporabu nego Wheatstoneov most, kako u pokusima u laboratorijama tako i u postrojenjima, zrakoplovima i drugim letjelicama.

2 WHEATSTONEOV MOST

Wheatstoneov most, koji se od sredine 19. stoljeća rabi za mjerenje otpora od 1 Ω do reda veličine $10^7 \Omega$, spada u skupinu tzv. nulmetoda kojima se nepoznata veličina određuje iz poznatih istovrsnih veličina [1] i [2]. U optimalnim uvjetima ovim mostom može se postići relativna mjerna nesigurnost reda veličine 10^{-7} .

Grane mosta čine četiri otpornika, koji stvaraju dva paralelno spojena naponska djelila (polumosta) priključena na jedan, istosmjerni ili izmjenični, naponski ili strujni izvor (slika 1). Između karakterističnih točaka A i B mosta, u tzv. dijagonali, priključuje se osjetljivi ali ne nužno i točni instrument, tzv. nulinstrument (nulindikatori), npr. mikroampermetar s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom. Umjesto nulindikatora-mikroampermetra može se rabiti milivoltmetar koji izravno mjeri razliku potencijala (napon) između tih dviju točaka.



Slika 1 - Wheatstoneov most

Kad je zadovoljen uvjet $R_1/R_3 = R_2/R_4$, točke A i B bit će na istom potencijalu, te će nulinstrument ostati bez otklona, tj. pokazat će ništicu. Ako je R_1 otpor osjetila, a npr. omjer otpora R_3 i R_4 stalan i jednak K , tada se ugađanjem otpora R_2 može postići ništica na nulinstrumentu, pa je: $R_1 = KR_2$. To se stanje naziva ravnotežom mosta. Ovaj je postupak s povratnom vezom, gdje u petlji sudjeluje mjeritelj ili elektromehanički sklop za ugađanje otpora R_2 , kako bi se postigla ništica i traje izvjesno vrijeme.

U većini industrijskih primjena, umjesto ugađanja elemenata mosta, kako bi se postigla ravnoteža, mjeri se napon U_{AB} u dijagonali mosta. Ako su otpori u svim granama mosta međusobno jednaki, taj će napon biti jednak ništici. Pretpostavimo da se osjetilo nalazi u prvoj grani i da mu je, pri određenoj vrijednosti mjerene neelektrične veličine, nazivni otpor R_1 . Uz stalan napon napajanja U_i i stalne vrijednosti otpora R_2 , R_3 i R_4 , koje su tako odabrane da budu jednake nazivnoj vrijednosti otpora R_1 ($R_2 = R_3 = R_4 = R_1 = R$), promjene mjerene veličine prouzročit će promjenu otpora osjetila za ΔR od nazivne vrijednosti. Stoga točke A i B neće više biti na istom potencijalu, pa će napon U_{AB} biti različit od ništice. Takav most nazivamo neuravnoteženim. Osjetljivost mosta, u ovom slučaju, može se definirati kao omjer najvećeg očekivanog napona U_{AB} i napona izvora U_i . Npr. ako je najveći očekivani napon $U_{AB} = 10$ mV, a $U_i = 5$ V, osjetljivost mosta je 2 mV/V. Međutim može se definirati i promjenom napona U_{AB} , npr. u ovisnosti o promjeni temperature, dakle iskazati kao mV/°C.

Osjetilo može biti samo u jednoj grani, u dvije grane ili u sve četiri grane mosta. Pri mjerenju temperature (otporni termometri) obično se osjetilo nalazi samo u jednoj grani mosta, dok se pri mjerenju naprezanja mogu nalaziti u dvije ili sve četiri grane. Kad je osjetilo samo u jednoj grani mosta, pri napajanju naponskim izvorom napona U_i , uz zanemarive otpore priključnih vodova dobiva se:

$$U_{AB} = \frac{U_i}{4} \left(\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right) = \frac{U_i}{4} \left(\frac{\frac{\Delta R}{R}}{1 + \frac{\Delta R}{2R}} \right). \quad (1)$$

Dakle, izlazni je napon nelinearna funkcija promjene otpora ΔR . Ako nelinearnost napona U_{AB} nije prihvatljiva, postoje više postupaka za njegovu linearizaciju. Analogni signal se pojačava i linearizira elektroničkim sklopovima, a pri

pretvorbi analogne u digitalnu veličinu može se to učiniti programskom potporom.

Ako se pri mjerenju temperature most napaja iz strujnog izvora strujom I_i , napon u dijagonali je:

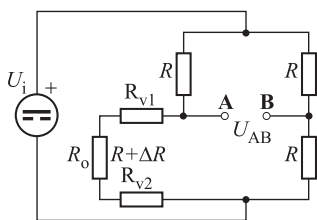
$$U_{AB} = \frac{I_i R}{4} \left(\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{4}} \right) \quad (2)$$

I u ovom slučaju izlazni je napon nelinearna funkcija promjene otpora ΔR . U praksi se, radi jednostavnosti, češće rabi naponski izvor.

Struja kroz osjetilo uzrokovat će njegovo samozagrijavanje i time dodatnu mjernu nesigurnost. Nadtemperatura osjetila, zbog samozagrijavanja, ovisit će od njegove izvedbe i odvoda topline, tj. u kakvom se sredstvu ono nalazi te da li sredstvo miruje ili struji. Proizvođači obvezno navode dozvoljene vrijednosti struje kroz osjetilo.

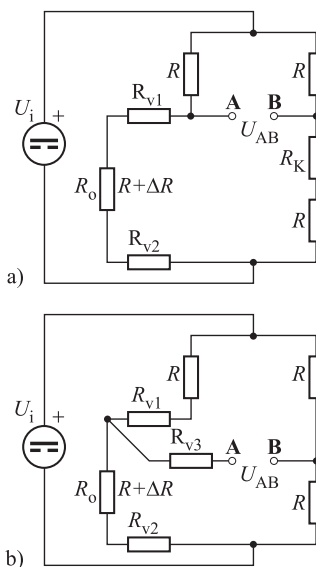
2.1 Utjecaj spojnih vodova

Pri mjerenju temperature i napreznja u pogonima osjetilo je obično udaljeno od ostalih sastavnica mosta i više desetaka metara te je povezano s njima bakrenim vodičima. Padovi napona nastali na vodičima mogu povećati mjernu nesigurnost. Pri mjerenju temperature jednim osjetilom otpori vodiča R_{v1} i R_{v2} dvožičnog voda, kao i otpori spojnih mjesta, serijski se dodaju otporu osjetila (slika 2). Utjecaj otpora voda može se smanjiti dodatkom kompenzacijskog otpornika R_K , čiji je otpor jednak otporu voda, u drugu granu mosta (slika 3.a). Napon U_{AB} bit će, u tom slučaju, praktički, neovisan o otporu vodiča. Međutim, ako se s promjenom temperature okoline jednako ne mijenjaju otpori voda i R_K opet nastaje pogreška. Vod s dva vodiča rabi se kod malih udaljenosti, ili kad je nazivni otpor osjetila 1 000 Ω , jer su tada otpori vodiča i njihova promjena zanemarivi prema otporu osjetila.



Slika 2 - Osjetilo otpora R_o spojeno na W. most

Trožičnim spojem (slika 3.b) može se smanjiti ili posve otkloniti utjecaj otpora voda. Ako se napon u dijagonali mjeri voltmetrom velikog unutarnjeg otpora, struja u tom trećem vodiču, otpora R_{v3} , bit će vrlo mala, a otpori dviju nasuprotnih grana s dodatnim otporima R_{v1} i R_{v2} vodiča bit će jednaki. Dakle, u trožičnom spoju, uključujući i napajanje, potrebno je ukupno pet vodiča.



Slika 3 - Osjetilo otpora spojeno na W. most

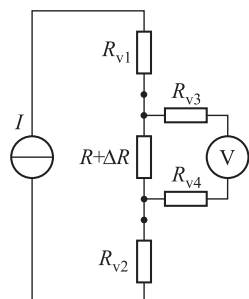
Kako je napon U_{AB} relativno nizak često ga se prije mjerenja mora pojačati prikladnim instrumentacijskim pojačalom, u načelu diferencijalnim. Ono ima sve značajke potrebne za uporabu u mjernoj i ispitnoj opremi. Odlikuje se velikom ulaznom impedancijom (reda veličine $10^{10} \Omega$), velikim i točnim pojačanjem, stabilnošću, niskim šumom, malim posmakom (drift) itd. Izrađuju se posebna pojačala koja imaju sklop za lineariziranje izlaznog napona Wheastoneova mosta s otpornim osjetilom.

Kad je udaljenost mjernog mjesta veća, umjesto mosta bolje je rabiti tzv. *UI* metodu sa četiri vodiča, dva “strujna” i dva “naponska”, u tzv. Kelvinovom spoju (slika 4). Stalna struja I iz prikladna izvora stvara na osjetilu otpora $R_o = R + \Delta R$ pad napona U_o koji se mjeri voltmetrom velikog ulaznog otpora. Tada otpori vodiča i njihove promjene ne utječu na mjerne rezultate, jer je struja kroz voltmetar zanemariva. Međutim, postoji i jedan nedostatak, a to je razlučivost. Pretpostavimo da je struja kroz osjetilo 1 mA. Kod 0 °C pad napona na osjetilu Pt100 bit će 100 mV, a kod +100 °C iznosit će 138,5 mV. Stoga pad napona na analognom ili digitalnom instrumentu valja očitati na mjernom opsegu 200 mV. U ovom primjeru korisni je signal 38,5 mV i trebalo bi ga očitati što preciznije, tj. na nižem mjernom opsegu. To se može postići tako da se od napona 138,5 mV odbije prednapon (bias) od 100 mV. Međutim, izvor takva napona morao bi biti apsolutno stabilan, jer bi njegov posmak utjecao na mjernu nesigurnost.

Osjetila se serijski proizvode s dva, tri ili četiri priključka, kako bi se jednostavno mogli rabiti u Wheatstoneovom mostu ili *UI* metodi.

Kod osjetila napreznja najveća promjena otpora, kako je to u uvodu spomenuto, iznosi oko 1 %. Time prouzročena

promjena pada napona na osjetilu bit će, uz struju reda veličine 1 mA, na razini 10 mikrovolta, pa će razlučivanje biti još lošije.

Slika 4 - UI metoda

2.2 Dobre strane i nedostaci Wheatstoneova mosta

Dobre su strane Wheatstoneovog mosta:

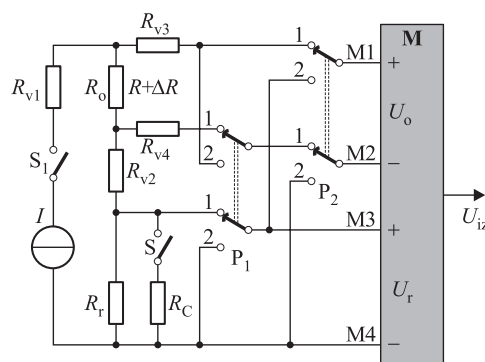
- široki raspon vrijednosti otpora koji se njime mogu mjeriti s malom mjernom nesigurnošću;
- mjerenje malih promjena otpora;

Osim dobrih strana Wheatstoneov most ima i loših [4]. Neke od njih su sljedeće:

- izlazni signal (napon dijagonale) U_{AB} nelinearna je funkcija promjene otpora u pojedinoj grani mosta;
- polovina signala nastalog promjenom otpora u jednoj grani mosta prigušena je od susjednih grana;
- istodobna promjena otpora u više grana mosta izaziva samo jedan mjerljivi izlazni signal;
- otpori spojnih vodiča i priključaka kao i njihova promjena utječu na mjernu nesigurnost izlaznog signala;
- pri istosmjernom napajanju, termoelektrični naponi teško se odvajaju od izlaznog signala.

3 OSNOVE ANDERSONOVE (STRUJNE) PETLJE

U temeljnoj Andersonovoj strujnoj petlji [5] nalaze se serijski spojeni osjetilo djelatna otpora $R_o = R + \Delta R$ i referentni otpornik djelatna otpora R_r (slika 5). Osjetilo je spojeno u petlju vodičima otpora R_{v1} i R_{v2} . Pad napona U_o na osjetilu, koji uzrokuje stalna istosmjerna struja I u petlji, iz naponskog izvora i strujnog pretvornika, dovodi se na ulaze M1 i M2 a pad napona U_r na otporu R_r na ulaze M3 i M4 sklopa M. Ulazni otpori tog sklopa, tzv. Dual-Differential Subtractor (DDS), dovoljno su veliki ($10^9 \Omega$ ili veći), pa su struje i njome prouzročeni padovi napona na spojnim vodičima otpora R_{v3} i R_{v4} zanemarivi. Također nemaju utjecaja otpori R_{v1} i R_{v2} . Opisanu strujnu petlju autor je nazvao svojim prezimenom u nekim svojim člancima, npr. [7].



Slika 5 - Osnovni sklop Andersonove petlje

Umjesto izvora istosmjerne struje može se rabiti stalna izmjenična struja i , pa općenito umjesto djelatnih otpora može biti serijski spoj osjetila impedancije $Z_o = Z + \Delta Z$ i referentne impedancije Z_r [6] i [7]. Pri napajanju izmjeničnom strujom može se smanjiti utjecaj šuma filtriranjem, ako je frekvencija šuma različita od frekvencije strujnog izvora.

U sklopu M pad napona U_r na referentnom otporniku odbija se od pada napona U_o na osjetilu pa je izlazni napon U_{iz} :

$$U_{iz} = U_o - U_r \quad (3)$$

odnosno:

$$U_{iz} = I(R + \Delta R) - IR_r \quad (4)$$

Uz $R_r = R$ dobiva se:

$$U_{iz} = I \Delta R. \quad (5)$$

Dakle, izlazni napon linearno je razmjernan promjeni otpora osjetila, a otpori vodova kojim je osjetilo spojeno na sustav kao i prednapon (vidi 2.1) nemaju utjecaja. Male moguće razlike u otporima R i R_r prouzročit će mali izlazni napon namještanja (output offset voltage), koji se može odbiti od izlaznih podataka. Iz (3) i (5) slijedi da je promjena otpora osjetila:

$$\Delta R = \frac{U_o - U_r}{I}. \quad (6)$$

Kako je: $I = U_r / R_r$ iz (5) se dobiva:

$$\Delta R = \frac{U_{iz}}{U_r} R_r, \quad (7)$$

odnosno:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{U_{iz} R_r}{U_r R}. \quad (8)$$

Kako je $R_r = R$, relativna promjena otpora osjetila je:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{U_{iz}}{U_r}. \quad (9)$$

Ako u (1) zanemarimo utjecaj drugog člana u nazivniku, izlazni napon Wheatstoneova mosta bit će:

$$U_{AB} = \frac{U_i}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right). \quad (10)$$

Za Wheatstoneov most (sl. 1) može se pisati da je $U_i = 2U_o = 2IR$ iz toga slijedi:

$$U_{AB} = I \frac{\Delta R}{2}. \quad (11)$$

Usporedimo li izraze (5) i (11) možemo zaključiti da je izlazni napon Wheatstoneova mosta, uz istu struju I kroz osjetila, dvostruko niži od izlaznog napona u Andersonovoj petlji.

Osjetljivost mjernog sustava može se ispitati poznatom namjernom promjenom otpora u petlji. Budući da je osjetilo obično nedostupno, jer je udaljeno od mjernog sustava, to se postiže promjenom otpora referentnog otpornika. Sklopom S (mehanička, MOSFET itd.) paralelno mu se spoji kalibracijski otpornik otpora R_c (slika 5), višestruko veće vrijednosti od otpora osjetila, npr. od 5 kΩ do 50 kΩ. Oba paralelno spojena otpornika imaju mali temperaturni koeficijent otpora (reda veličine $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), stalne i poznate vrijednosti te se nalaze u kontroliranim uvjetima. Time se vrijednost referentnog otpora promijeni za ΔR_c :

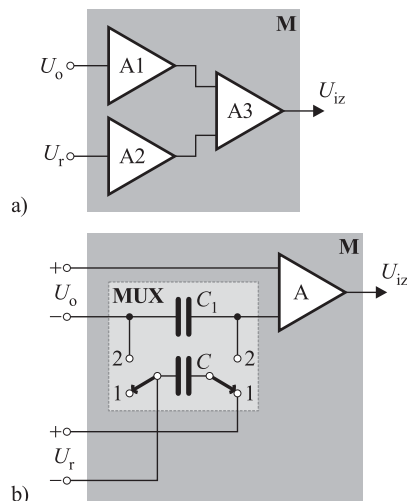
$$\Delta R_c = R_r - \frac{R_r R_c}{R_r + R_c}. \quad (12)$$

Ta će promjena otpora u strujnoj petlji, uz stalnu struju I , prouzročiti jednak učinak kao i promjena otpora osjetila R_o za ΔR , tj. $\Delta R_c = \Delta R$.

Inducirani smetajući napon u petlji može se zapaziti prebacivanjem dvostruke preklopke P_1 (mehanička, MOSFET itd.) iz položaja 1 u položaj 2. Time se kratko spajaju ulazi sklopova M1 i M2 te M3 i M4 sklopa M, pa bi pripadni instrumenti za mjerenje padova napona U_o i U_r trebali pokazati ništicu. U suprotnome postoje utjecaji induciranih napona i problemi s potiskivanjem zajedničkog potencijala (CMR). Ako je i U_{iz} različit od ništice, osim navedenog može značiti i loš rad sklopa M za mjerenje razlike padova napona. Potonje se može provjeriti prebacivanjem preklopke P_2 iz položaja 1 u položaj 2 čime se paralelno spoje ulazi M1-M2 i M3-M4 (uz P_1 u položaju 1), pa je sada na oba ulaza spojen pad napona U_r . Stoga bi napon U_{iz} trebao biti jednak ništici. Ako je napon U_{iz} različit od ništice uzroke treba tražiti u razlici pojačanja, lošeg rada sklopa M itd. Isključivanjem strujnog izvora sklopom S_1 može se provjeriti postojanje šuma u petlji.

Izlazni napon U_{iz} sklopa M može se dobiti na različite načine [5]. Spomenut ćemo samo dva. Padovi napona U_o na osjetilu i U_r na referentnom otporniku pojačavaju se prikladnim instrumentacijskim pojačalima A1 i A2. Ulazi u pojačala su diferencijalni, pa se time postiže odbacivanje smetnji izazvani okolinom. Izlazni naponi iz tih pojačala

dovode se na pojačalo pojačanja A_3 (slika 6.a) na čijem se izlazu dobije napon U_{iz} koji je razlika dvaju ulaznih napona. Taj se napon zatim može pretvoriti u digitalni oblik prikladnim analognu-digitalnim pretvornikom ili priključiti na računalo preko odgovarajućeg sučelja. Ugađanjem pojačanja pojedinih pojačala mogu se kompenzirati moguće razlike u otporima osjetila.



Slika 6 - Elektronički sklop M

Razlika padova napona može se dobiti i uporabom multipleksora s preklapajućim kondenzatorom (flying capacitor). Načelo rada sastoji se u tomu da se kondenzator kapaciteta C (slika 6.b), s preklopkom u položaju 1-1, nabija na napon U_r , a zatim se, s preklopkom u položaju 2-2, tim nabojem nabija kondenzator kapaciteta $C_1 = C$ koji je spojen u seriju s jednim ulazom u instrumentacijsko pojačalo A. Napon U_r na kondenzatoru kapaciteta C_1 suprotnog je predznaka od U_o , pa se na izlazu pojačala dobiva pojačana razlika napona U_o i U_r . Frekvencija preklapanja, integriranih sklopova s preklopkama i oscilatorom, može biti od reda veličine 10 kHz do reda veličine 100 kHz, pa je razina napona stalna.

Ispravan rad sustava postiže se sa strujnim izvorom stabilnosti boljom od 0,1 %, malog izlaznog šuma, koji je vodljivo i elektrostatski izoliran od napojne mreže.

3.1 Andersonova petlja s više osjetila

U jednoj Andersonovoj petlji može se, teorijski, nalaziti neograničeni broj serijski spojenih, prostorno razmaknutih, osjetila. Na slici 7 prikazana je petlja sa četiri serijski spojena osjetila R_{o1} , R_{o2} , R_{o3} i R_{o4} od kojih je svako priključeno na instrumentacijsko pojačalo u tzv. Differential Half-Subtractoru (DHS) [6] i [7], na čijim se izlazima osim prikladnog pojačanja dobivaju naponi prema točki na koju je njihova referentna priključnica spojena. Ako su osjetila blizu, npr. pri mjerenju naprežanja, mogu imati

po jedan zajednički vodič, pa je za njihovo povezivanje nužno ukupno sedam vodiča. Općenito, tri plus broj osjetila u petlji. Ako je početni otpor svakog osjetila jednak referentnom otporu, prema oznakama na slici, mogu se dobiti sljedeće razlike:

$$U_{o1} - U_r = I\Delta R_1 \quad (13)$$

$$U_{o2} - U_r = I\Delta R_2 \quad (14)$$

$$U_{o3} - U_r = I\Delta R_3 \quad (15)$$

$$U_{o4} - U_r = I\Delta R_4 \quad (16)$$

$$U_{o1} - U_{o2} = I(\Delta R_1 - \Delta R_2) \quad (17)$$

$$U_{o1} - U_{o3} = I(\Delta R_1 - \Delta R_3) \quad (18)$$

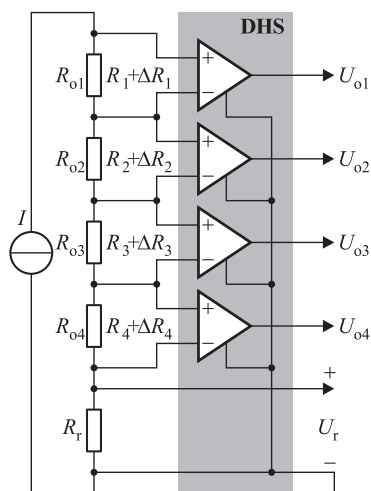
$$U_{o1} - U_{o4} = I(\Delta R_1 - \Delta R_4) \quad (19)$$

$$U_{o2} - U_{o3} = I(\Delta R_2 - \Delta R_3) \quad (20)$$

$$U_{o2} - U_{o4} = I(\Delta R_2 - \Delta R_4) \quad (21)$$

$$U_{o3} - U_{o4} = I(\Delta R_3 - \Delta R_4) \quad (22)$$

Iz (13) do (16) može se jednostavno odrediti promjena otpora svakog pojedinog osjetila, npr. prvog osjetila: $\Delta R_1 = (U_{o1} - U_r)/I$.



Slika 7 - Primjer Andersonove petlje s četiri osjetila

Ako se u shemi na slici 7 umjesto pojačala upotrijebe četiri DDS-a [8] na čije se ulazne stezaljke dovede pad napona na referentnom otporniku i pad napona na pripadnom osjetilu, prema (5) dobivaju se izlazni naponi:

$$U_{iz1} = I\Delta R_1 \quad (23)$$

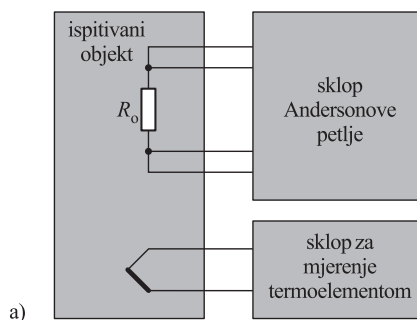
$$U_{iz2} = I\Delta R_2 \quad (24)$$

itd.,

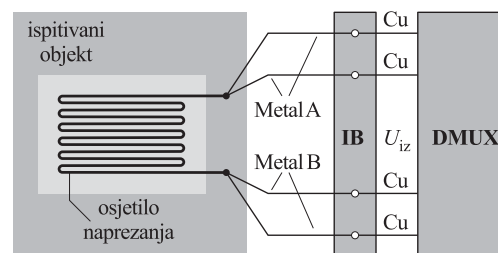
koji se mogu dalje analogno ili digitalno obrađivati.

3.2 Istodobno mjerenje naprezanja i temperature

U uvodu je spomenuto da na promjenu otpora osjetila naprezanja utječe i temperatura. Stoga je, za pouzdane podatke, potrebno istodobno mjeriti naprezanje i temperaturu. To se obično radi tako da se tik uz osjetilo za mjerenje naprezanja (mjernu traku), npr. na udaljenosti od 7 mm do 10 mm, stavi termoelement (termočlanak, termopar), na čijem se izlazu dobiva istosmjerni napon razmjernan temperaturi. Za povezivanje takavog sustava, ako se rabi Andersonova petlja, potrebno je ukupno šest vodiča (slika 8.a). Međutim, kombinacijom dvaju osjetila u jedno, tzv. osjetilo za termonaprezanje (termostrain gage), i posebnim demultipleksorom broj se vodiča može smanjiti na četiri [4]. Pri tome se rabi jedan od empirijski dobivenih zakona za termoelement. Naime, umetanje metala C između metala A i B, koji tvore termoelement, nema utjecaja na izlazni napon prouzročen temperaturom na mjestu spojišta, ako ne postoji temperaturni gradijent uzduž metala C [9]. Na slici 8.b prikazana je takva kombinacija, gdje ulogu metala C ima osjetilo naprezanja otpora $R_o = R + \Delta R$, na koje su spojeni metali A i B termoelementa te bakrenim vodičima povezani s demultipleksorom (DMUX).



a)



b)

Slika 8 - Mjerenje naprezanja Andersenovom petljom

Načelo rada takvog sklopa prikazano je na slici 9. Izlazni napon termoelementa U_T i pad napona na osjetilu naprezanja, kojeg stvara elektronički komutirana stalna istosmjerna struja I_i vrijednosti $+I$ i $-I$, npr. reda veličine 10 mA, kombinira se u izlazni napon U_{iz} . Taj se napon dovodi demultipleksoru. On se sastoji iz dva istovjetna sklopa D i E za uzorkovanje s preklapanjem kondenzatora te sklopova za oblikovanje signala. Rad sklopova D i E, koji svaki ima po dva ulaza i izlaza, sinkroniziran je

s elektroničkim komutatorom kojeg nadzire digitalni programirani logički sklop (PLD - Programmable Logic Device). Na ulaze D i E dovodi se plivajući (floating) napon U_{iz} , a na izlazima se dobivaju nesimetrični naponi U_D i U_E . Kad struja I_i ima vrijednost $+I$ na izlazu sklopa D dobivaju se dva istovjetna napona U_D , a kod vrijednosti $-I$ na izlazu sklopa E dobivaju se dva istovjetna napona U_E . Ti se naponi pohranjuju u kondenzatorima na njihovim izlazima. Budući da komutacija struje I_i nema utjecaja na U_T , kao i na temperaturu osjetila naprezanja, za napone U_D vrijedi:

$$U_D = R_o + U_T, \quad (25)$$

a za napone U_E :

$$U_E = -R_o + U_T. \quad (26)$$

Jedan od napona U_E se invertorom A3 u sklopu za oblikovanje signala pretvara u $-U_E$ i dovodi na jedan od ulaza diferencijalnog pojačala A1. Na drugi ulaz tog pojačala dovodi se jedan od napona U_D , pa se na izlazu dobiva:

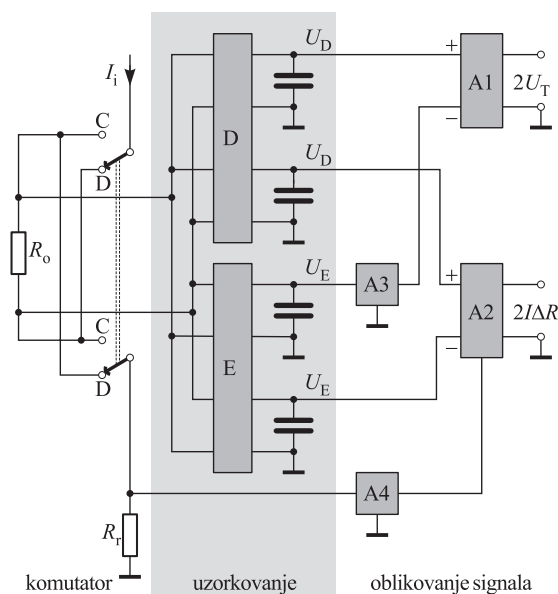
$$U_D - (-U_E) = [R_o + U_T + (-R_o) + U_T] = U_T + U_T = 2U_T. \quad (27)$$

Na ulaze diferencijalnog pojačala A2 dovode se naponi U_D i U_E , pa se na izlazu dobiva:

$$U_D - U_E = [R_o + U_T - (-R_o) + U_T] = R_o + R_o = 2R_o. \quad (28)$$

Pad napona U_r na referentnom otporniku otpora $R_r = R$ dovodi se na pojačalo A4 s pojačanjem 2 i pritom se invertira. Izlazni se napon $-2U_r = -2IR_r$ iz A4 dovodi na referentni ulaz pojačala A2, tako da se na njegovu izlazu konačno dobiva:

$$2R_o - 2U_r = 2R + 2I\Delta R - 2R_r = 2I\Delta R. \quad (29)$$



Slika 9 - Načelna shema demultipleksora

Dakle, tim smo postupkom dobili izlazne signale razmjerne dvostrukom naponu termoelementa U_T (27) i dvostrukom promjenu pada napona $I\Delta R$ (29) na osjetilu, tj. odstranjen je smetajući pad napona nastao na njegovoj početnoj vrijednosti $R_o = R$. Uspoređujući (11) i (29) može se ustanoviti da je tako dobiven napon četiri puta veći nego onaj u Wheatstoneovom mostu.

3.3 Prednosti i nedostaci Andersonove petlje

Na temelju dosadašnjih razmatranja mogu se utvrditi neke osnovne prednosti Andersonove strujne petlje:

- Veći i linearni izlazni padovi napona na svakom od osjetila;
- Dvostruko veći izlazni napon osjetila uz istu disipiranu snagu u usporedbi s Wheatstoneovim mostom;
- Potreban je manji broj tanjih i jeftinijih spojnih vodiča u instalaciji;
- Promjene otpora spojnih vodiča i priključnica ne utječu na mjerni signal.

Budući da ne postoji idealnih sklopova i Andersonova petlja ima nedostatke u usporedbi s Wheatstoneovim mostom. Najveći nedostatak je viša razina šuma zbog nužne uporabe djelatnih sastavnica, kao što su DDS-ovi, multipleksori itd. Međutim, kako je izlazni signal petlje dvostruko viši nego u Wheatstoneovom mostu, omjer signal-šum zadovoljava.

4 ZAKLJUČAK

Usporedbena analiza Wheatstoneova mosta i Andersonove petlje pokazuje da potonja ima niz prednosti. Među njima valja istaknuti veći izlazni i linearni signal bez utjecaja otpora vodiča, mogućnost istodobnog mjerenja s više osjetila, kao i istodobno mjerenje naprezanja i temperature s manjim brojem spojnih vodiča.

ZAHVALA

Suradniku Ivici Kunštu, dipl. ing. zahvaljujem na trudu pri izradi crteža za ovaj članak.

LITERATURA

- [1] BEGO, V., Mjerenja u elektrotehnici, 9. dopunjeno izdanje, Graphis, Zagreb 2003.
- [2] VUJEVIĆ, D., Ferković B.: Osnove elektrotehničkih mjerenja, I i II dio, Školska knjiga, Zagreb 1996.
- [3] ANDERSON, F. K., The Constant Current Loop: A New Paradigm for Resistance Signal Conditioning, NASA Technical Memorandum 104260, 1992.
- [4] PARKER, R. A., Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using Four Connecting Wires, NASA Technical Memorandum 104271, 1993.

- [5] Constant Current Loop Impedance Measuring System that is Immune to the Effects of Parasitic Impedances, United States Patent No. 5 371 469, 1994.
- [6] ANDERSON, F. K., The New Current Loop: An Instrumentation and Measurement Circuit Topology, IEEE Transactions on Instrumentation. and Measurement, Vol.46, No.5, October 1997.
- [7] ANDERSON, F. K., NASA's Anderson Loop, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, March 1998.
- [8] ANDERSON, F. K., Looking Under the Bridge, Measurement Science Conference Paper, January 2001.
- [9] DOEBELIN, O. E ., Measurement Systems; Application and Design, McGraw-Hill, 1976. str. 520-521

ANDERSON'S LOOP

Temperature in plants and the straining of mechanical constructions are measured by resistive temperature detectors (sensors). The change of measured non-electrical value causes the change of resistive temperature detectors measured by electrical methods. Wheatstone's bridge is most commonly used for this purpose. In 1994 Karl F. Anderson from NASA research laboratories patented a current loop for temperature and strain measurement by the resistive temperature detector. The characteristics of that procedure are better than the classical Wheatstone's bridge and it is used to measure the straining of mechanical

construction and temperature in plants, laboratories, airplanes and other types of flying machines.

DIE ANDERSONSCHLEIFE

Die Temperatur in den Anlagen und die mechanische Beanspruchung in Konstruktionen werden mit Widerstandsfühlern gemessen. Eine Änderung der gemessenen nichtelektrischen Größe bewirkt die Änderung des fühlerviderstandes, welcher mittels elektrischer Verfahren gemessen wird. Zu diesem Zweck wird meistens die Wheatstonbrücke verwendet. Karl F. Anderson aus einem Forschungslaboratorium der NASA hat eine Schleife für die Messung der Temperatur und der mechanischen Beanspruchung mittels Widerstandsfühler im Jahre 1994 patentiert. Manche Merkmale dieses Verfahrens sind besser als jene der klassischen Wheatstonbrücke. und wird deshalb für die Messung der Beanspruchung in mechanischen Konstruktionen und der Temperatur in Anlagen, Laboratorien, Flugzeugen und anderen Flugkörpern verwendet.

Naslov pisca:

Dr. sc. Dušan Vujević, dipl.ing.
Cankarova 2a, 10000 Zagreb, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
2005-05-09