

19 Elektronski elementi kot senzorji

19.1 Ozadje, prvič

Vsakemu elementu elektronike se električne lastnosti spreminjajo zaradi vpliva zunanjih dejavnikov. Za primer: upornost upornika se spreminja zaradi temperature, kapacitivnost kondenzatorja se spreminja zaradi spreminjanja razdalje med ploščami, induktivnost tuljave zaradi železa, ki ga porivamo v tuljavo. Vsem elementom se torej lastnosti (lahko) zaradi zunanjih dejavnikov spreminjajo.

Za tipičen upornik je temperaturni koeficient TC enak 50 ppm/°, torej je njegova vrednost odvisna od spremembe temperature ΔT po formuli:

$$R_T = R_{\text{nominalna}}(1 + TC * \Delta T) = R_{\text{nominalna}} * (1 + \frac{50}{10^6} * \Delta T)$$

Tak upornik, ki ima pri sobni temperaturi 20° upornost 1,0000 kohm, ima pri temperaturi 50° upornost 1,0015 kohm. Baker, na primer, ima temperaturni koeficient 4000 ppm/°, približno 100 krat toliko kot tipičen upornik. Na srečo imajo bakrene povezovalne žice le zanemarljivo majhno upornost v primerjavi z upornostjo elementov.

Kapacitivnost C ploščnega kondenzatorja je podana s formulo $C = \frac{\epsilon * A}{d}$, pri tem je A površina ene plošče, d razdalja med ploščama in ϵ dielektričnost materiala med njima. Če torej spremenimo razdaljo med ploščama za 10%, se kapacitivnost spremeni za 10%. Če med plošči vstavljamo material z drugačno dielektričnostjo, se kapaciteta prav tako spremeni. Podobno sklepanje velja za tuljavo in vstavljanje železnega jedra.

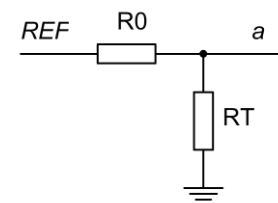
Z vsakim od teh elementov je torej mogoče narediti senzor: upornik lahko služi za merjenje temperature, kondenzator ali tuljavo za merjenje premikov. Če na lastnosti teh elementov vplivajo druge fizikalne količine, dobimo senzor za te druge fizikalne veličine. Potrebujemo samo še vezje, v katerem bo sprememba kapacitivnosti (upornosti, induktivnosti) povzročila spremembo izhodne napetosti vezja; to napetost lahko merimo na primer z osciloskopom ali volt-metrom ter tako sledimo spreminjanju izbrane fizikalne veličine. Spreminjanje lastnosti teh elementov tipično vpliva na velikost izhodne napetosti (ali na njeno fazo, kadar je v vezju za senzor uporabljen kondenzator ali tuljavo).

Takšno vezje je, na primer, delilnik napetosti. Če ga sestavimo iz dveh upornikov po sliki 19.1 je izhodna napetost a podana z:

$$a = REF * \frac{R_T}{R_0 + R_T} = REF * \frac{R_{\text{nominalna}}(1 + TC * \Delta T)}{R_{\text{nominalna}}(1 + TC * \Delta T) + R_0}$$

Po formuli sodeč je izhodna napetost odvisna od temperature, do katere segrejemo upornik R_T nad sobno temperaturo. Privzemimo, da sta oba upornika pri sobni temperaturi enaka, izhodna napetost je tedaj $REF/2$. Temperaturni koeficient TC obeh upornikov naj bo enak in znaša 50 ppm/°. Ko segrevamo upornik R_T , je izhodna napetost podana z:

$$a = REF * \frac{TC * \Delta T + 1}{TC * \Delta T + 2}$$



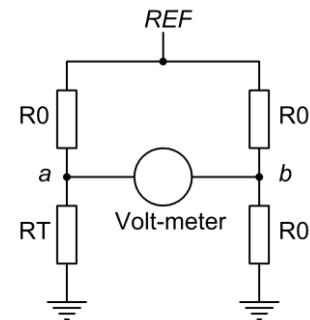
SLIKA 19.1: DELILNIK NAPETOSTI

Za referenčno napetost REF enako 12V in spremembo temperature $\Delta T = 10^\circ$ se torej izhodna napetost a spremeni za 1,5 mV (oziroma za 12,5 ppm/° za $REF = 1V$). Napetost merimo z volt-metrom, ki mora biti postavljen na obseg vhodnih napetosti 20V. Ker uporabljamo volt-metre s štirimi števki rezultata, je skrajno desna številka rezultata vredna 10 mV. S takim inštrumentom spremembe napetosti

torej ne bomo mogli zaznati; potreben je bolj natančen inštrument. A tudi za en velikostni razred bolj natančen inštrument, ki meri rezultat na pet števk natančno, bo komaj zaznal spremembo, saj je njegova najmanj pomembna številka vredna 1 mV. Potrebna je boljše metoda merjenja.

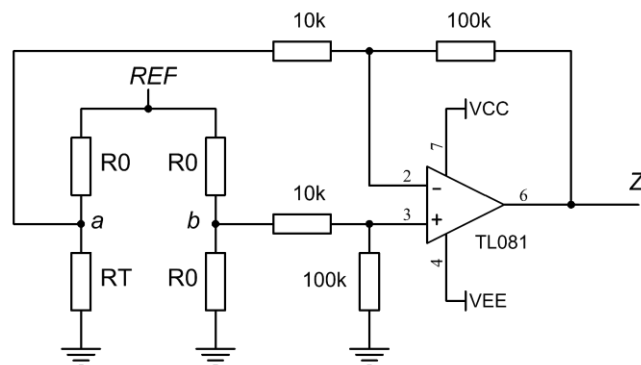
Najbolje bo, da od napetosti a odštejemo konstantni del $REF/2$ in opazujemo samo razliko, torej za koliko se spremeni izhodna napetost delilnika zaradi gretja upornika R_T . Ker je razlika majhna, lahko volt-meter postavimo na bolj občutljivo območje, na primer na najbolj občutljivo območje za 200 mV. Takrat je najmanj pomembno mesto odčitka vredno 0,1 mV in na inštrumentu zlahka vidimo spreminjanje napetosti a zaradi gretja upornika R_T ; vsak milivolt je enakovreden spremembi temperature za $10^\circ / 1,5 \text{ mV} = 6.66^\circ$ (če le drži predpostavka o temperaturnem koeficientu TC upornika, verjetno bi ga bilo treba pomeriti ali pa kalibrirati tak merilnik).

Napetost za odštevanje $b = REF/2$ dobimo s pomočjo še enega delilnika napetosti, v katerem sta oba upornika enaka in imata vrednost R_0 . Shema vezja je na sliki 19.2, dobili pa smo vezje, ki mu rečemo Wheatstone-ov mostič. Mostič je v ravnotežju, če imajo vsi štirje uporniki enako vrednost, odčitek volt-metra ($b - a$) je tedaj nič. Ko pogrejemo upornik R_T , se odčitek spremeni.



SLIKA 19.2: WHEATSTONE-OV MOSTIČ

Če je odčitek kljub mostični vezavi še premajhen in si želimo bolj občutljiv termometer, lahko razliko ($b - a$) pred merjenjem ojačimo z diferenčnim ojačevalnikom po sliki 19.3. Ta ojačevalnik ima ojačenje 10, zato je občutljivost na spremembe temperature 10x večja, kot je bila v vezju po sliki 19.2 in z volt-metrom lahko ovrednotimo že spremembe temperature upornika R_T , ki so precej manjše od ene stopinje.



SLIKA 19.3: : WHEATSTONE-OV MOSTIČ Z DIFERENČNIM OJAČEVALNIKOM

19.2 Naloga, prvič:

19.2.1 Sestavi vezje delilnika napetosti po sliki 19.1, uporabi dva upornika po 1 kohm (ali podobna)

- ✓ Pomeri izhodno napetost delilnika in potrdi, da znaša približno 6 V (vhodna napetost v delilnik naj bo 12 V)
- ✓ Pogrej enega od upornikov z roko (za približno 10°) in potrdi, da z voltmetrom ne moreš opaziti tako majhne spremembe izhodne napetosti
- ✓ Kaj narediti, da bo občutljivost večja?

19.2.2 Dopolni vezje v Wheatstone-ov mostič z dodatnim delilnikom napetosti po sliki 19.2, volt-meter tokrat priključi med izhodni sponki obeh delilnikov

- ✓ Pomeri izhodno napetost mostiča in potrdi, da je majhna ter je zato mogoče povečati občutljivost volt-metra na 200 mV polnega obsega
- ✓ Pogrej enega od upornikov z roko in potrdi, da je tako mogoče zaznati spremembo izhodne napetosti
- ✓ Ali lahko opraviš enako dobro meritev tudi takrat, ko se izhodni napetosti a in b močno razlikujeta, na primer za 0,5 V?

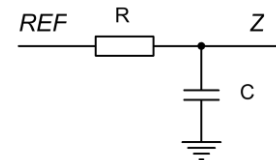
- ✓ Zakaj je smiselno uravnovežiti merilni mostič?

19.2.3 Dopolni vezje z diferenčnim ojačevalnikom po sliki 19.3, volt-meter priključi med izhodno sponko ojačevalnika in GND.

- ✓ Opazuj izhodno napetost vezja in potrdi, da je občutljivost tokrat večja kot je bila v prejšnjem eksperimentu
- ✓ Ali lahko občutljivost še povečaš?

19.3 Ozadje, drugič

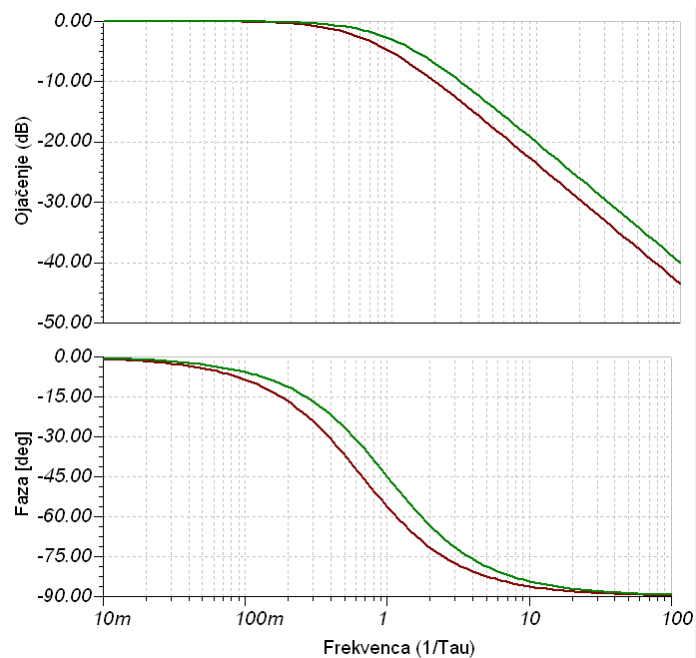
Kadar za senzor uporabimo kondenzator ali tuljavo, moramo za vzbujanje delilnika napetosti uporabiti izmenični signal REF; tok skozi kondenzator na primer teče le takrat, ko nanj pritismo izmenično (ali vsaj kako drugače spreminjajočo se) napetost. Najprimernejši je signal sinusne oblike, v nekaterih primerih pa lahko izberemo tudi drugačno obliko. Vezje delilnika napetosti s kondenzatorjem je na sliki 19.4. Ker



SLIKA 19.4: DELILNIK NAPETOSTI S KONDENZATORJEM

je vzbujalni signal REF harmonski, lahko delilnik napetosti temu signalu spremeni velikost ali fazo (ali oboje hkrati), odvisno od frekvence vzbujalne napetosti.

Izberimo najprej primerno frekvenco vzbujalne napetosti. Za RC člen lahko narišemo amplitudno in fazno karakteristiko, slika 19.5; prva prikazuje ojačenje (amplitudo) izhodnega signala v odvisnosti od frekvence vzbujalnega signala, druga pa fazo. Privzemimo, da med poskusom plošči kondenzatorja približamo za 50%, torej se zaradi tega kapacitivnost kondenzatorja poveča za 50%. Časovna konstanta $\tau = R * C$ se zaradi tega poveča za 50 %, obe krivulji pa se zaradi tega pomakneta za 50% v levo (k manjšim frekvencam), slika 19.5.



SLIKA 19.5: AMPLITUDNA IN FAZNA KARAKTERISTIKA DELILNIKA NAPETOSTI, FREKVENCA JE IZRAŽENA V ENOTAH $1/RC$. DESNA KRIVULJA PRIPADA OSNOVNEMU RC ČLENU, LEVA PA ČLENU S POVEČANO KAPACITIVNOSTJO KONDENZATORJA

19.3.1 Frekvenca, zaradi katere se spreminja amplituda

Poiščimo tisto mesto v diagramu za amplitudo, kjer se zaradi spremembe vrednosti kondenzatorja čim bolj spremeni velikost signala. Tako mesto najdemo pri frekvencah, ki so večje od prelomne frekvence RC člena. Izberemo sicer lahko katerokoli frekvenco $f > 1/2\pi RC$, a prevelike frekvence ne kaže izbrati, saj bo takrat izhodni signal zelo majhen in ga bo težko pomeriti. Prav tako ne izbiramo frekvence blizu prelomne frekvence RC člena, saj sta tam obe karakteristiki še blizu skupaj. Najbolj smiselno je izbrati frekvenco, ki je nekaj kratnik prelomne frekvence, na primer trikratnik.

19.3.2 Frekvenca, zaradi katere se spreminja faza

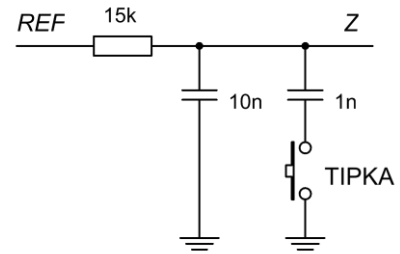
Poiščimo tisto mesto v diagramu za fazo, kjer se zaradi spremembe vrednosti kondenzatorja najbolj spremeni faza izhodnega signala. Pri frekvencah, ki so za eno dekada pod prelomno frekvenco, je faza

skoraj konstantna, prav tako pri frekvencah, ki so za dekada nad prelomno frekvenco. Faza izhodnega signala se najbolj spreminja v bližini prelomne frekvence RC člena, zato je najbolj smiselno izbrati za frekvenco vzbujalnega signala kar prelomno frekvenco RC filtra.

19.4 Naloga, drugič

19.4.1 Sestavi vezje delilnika napetosti s kondenzatorjem (RC člen, $R = 15 \text{ kohm}$, $C = 10 \text{ nF}$) in ga preskusi

- ✓ Pri vaji bomo preverili spreminjanje amplitude in faze izhodne napetosti RC člena zaradi spremembe kapacitivnosti. V ta namen sestavi vezje po sliki 19.6. Pritisk na tipko poveča kapacitivnost kondenzatorja za 10%.
- ✓ Na zaslonu osciloskopa preveri vpliv stiska tipke na amplitudi izhodne napetosti
- ✓ Na zaslonu osciloskopa preveri vpliv stiska tipke na fazo izhodne napetosti
- ✓
- ✓ Izberi primerno frekvenco vzbujalnega signala za spreminjanje amplitude in pri tej frekvenci izračunaj pričakovan vpliv spremembe vrednosti kondenzatorja za 10% na amplitudo izhodne napetosti;
- ✓ Namig: $|T(i\omega)| = \frac{1}{|1+i\omega RC|}$
- ✓ Z meritvijo potrdi izračunano spremembo amplitude izhodnega signala
- ✓
- ✓ Izberi primerno frekvenco vzbujanja izhodnega signala za spreminjanje faze in pri tej frekvenci izračunaj pričakovan vpliv spremembe vrednosti kondenzatorja za 10% na fazo izhodnega signala
- ✓ Namig: $\tan \varphi = -\omega RC$
- ✓ Z meritvijo potrdi izračunano spremembo faze izhodnega signala



SLIKA 19.6: DELILNIK NAPETOSTI S KONDENZATORJEM ZA EKSPERIMENT

19.5 Razmišljanje

Za čim večjo občutljivost iščemo tisto točko v diagramih, kjer se ob isti frekvenci vzbujanja zaradi spremembe vrednosti elementa čimbolj spremeni izhodni signal, torej področje največje strmine. Pri vezjih z enim kondenzatorjem ali eno tuljavo, torej pri vezjih prvega reda, ni veliko izbire. Lahko pa sestavimo vezja z več kondenzatorjev ali kombinacije tuljave in kondenzatorja. Pri takih je strmina spreminjanja večja, zato lahko z enako spremembo vplivne veličine dosežemo večji odziv, torej je vezje višjega reda lahko bolj občutljivo...