Sensorer och förförstärkare, extra material.

Lab 2 tar upp olika aspekter vid sensoravläsning. Man vill avläsa sensorn så noggrant som möjligt. Det finns flera tillvägagångssätt för optimering. I van Putten finns inte detta så bra beskrivet och därför ges en komplettering nedan.

Grovt kan man dela upp problemet i fyra delar:

1. Sensorns elektriska egenskaper
2. Förstärkarkoppling
3. Förstärkartyp
4. Feluppskattning

Först uppskattas sensorernas utsignalstyp (spänning eller ström) och utimpedans (dessa fås från tillverkarens datablad). Storleken på dessa styr valet av koppling och förstärkartyp. En grov feluppskattning görs utifrån kopplingen samt förstärkardatablad. Ibland kan olika kopplingar vara lika bra, och man bör jämföra feluppskattningar för flera kopplingar.

1. Sensorns elektriska egenskaper

All avläsning sker elektriskt och därför måste sensorerna beskrivas elektriskt. Från elkretsteorin vet man att det finns två sätt att beskriva en generator (= sensor här): antingen som en spänningskälla (Thenevins ekvivalenta krets) eller som en strömkälla (Nortons ekvivalenta krets). Den viktigaste elektriska egenskapen hos sensorn är dess utimpedans. I labben undersöks två sensortyper: termoelementet och fotodioden. I det utskickade materialet finns inte impedansen beskrivna, och detta görs här.

Termoelementet består av två ihopsvetsade metalltrådar av olika material. Utimpedansen blir därför mycket låg, $r_{\mathrm{ut}} \leq 10\ \Omega$.

Fotodiodens småsignalsimpedans kan beräknas med formeln:

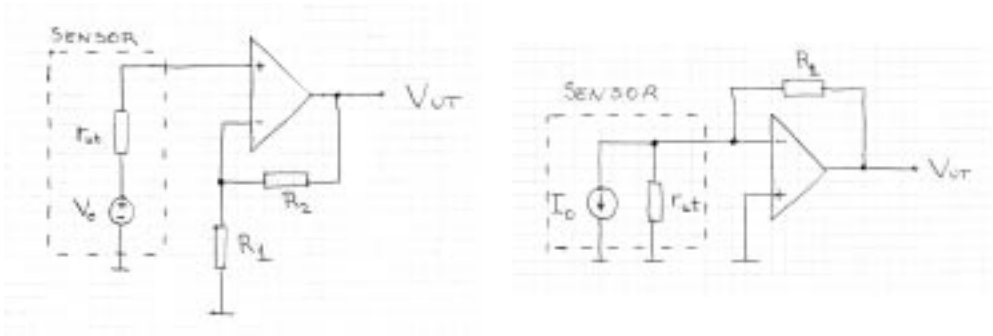
$$r_{\mathrm{ut}} = \frac{kT}{qI_{\mathrm{R}}} \tag{1}$$

där k är Boltzmanns konstant, T är diodtemperaturen, q är elektronens laddning och I_{R} är diodströmmen. Ofta arbetar dioden med en backspänning V_{r} (r = reverse). Utan belysning flyter en parasitström genom dioden. Idealt sett (ur sensorsynpunkt) skall den vara noll, men är det aldrig. Den kallas mörkerström (I_{R}, dark current, se datablad [2]). Om $I_{\mathrm{R}} = 20$ pA vid $V_{\mathrm{r}} = 10$ V, fås $r_{\mathrm{ut}} \approx 1.3$ GΩ vid rumstemperatur. I labben är $V_{\mathrm{r}} \approx 0$ V. Om tillverkaren inte ger data på strömmen här, blir en övre gräns blir därför

$I_{\mathrm{R}} = 20$ pA och $r_{\mathrm{ut}} \approx 1.3$ GΩ.

2. Förstärkarkoppling

Man kan välja att avläsa sensorns spänning eller ström. Oftast används operationsförstärkare (OP:s). Dessa är nästan alltid spänningsförstärkare. Man kan dock koppla en spännings-OP antingen som en spännings- (t.ex. icke-inverteande koppling) eller som ström-till-spänningsomvandlare (transimpedansförstärkare), se fig. 1. Observera att insignalen till transimpedansförstärkaren är en ström men utsignalen är en spänning. För små r_{ut} har



Figur 1: Till vänster: Icke-inverterande förstärkare; höger: transimpedansförstärkare.

den icke-inverterande förstärkaren en spänningsförstärkning G given av

$$G \equiv \frac{V_{\mathrm{ut}}}{V_{\mathrm{o}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \tag{2}$$

För stora r_{ut} har transimpedansförstärkaren en omvandlingsfaktor Z given av

$$Z \equiv \frac{V_{\mathrm{ut}}}{I_{\mathrm{o}}} = -R_1. \tag{3}$$

3. Förstärkartyp

Det finns en uppsjö av OP:er att köpa, och det kan vara svårt att veta vilken som skall väljas för en given sensor. I labben undersöks två typer, en med bipolär- och en med FET-ingång. Resultaten av undersökningen skall förhoppningsvis kunna guida er i framtiden vid OP-val.

Skillnader mellan bipolära och FET-OP:s uppstår på grund att operationsförstärkare i allmännhet är icke-ideala och adderar fel till signalen. För bipolära OP:s är spänningsfelen (V_{os}, e_{n}, se nedan) lägre än för FET-OP:s.

Däremot är strömfelen ($I_\mathrm{b}, I_\mathrm{os}$ samt i_n, se nedan) högre för bipolära OP:s jämfört med FET-OP:s. En detaljerad beskrivning ges i kapitel 7 i [1]. De fel som tas upp här är: offsetspänning (V_os), bias- och offsetström ($I_\mathrm{b}, I_\mathrm{os}$), spänningsbrus ($e_\mathrm{n}$) samt strömbrus ($i_\mathrm{n}$). Fler felkällor existerar, men det blir för komplicerat att ta med alla här.

4. Feluppskattning

Feluppskatting görs med kretsteori. Hela mätsystemet ritas upp och de olika felkällorna summeras på utgå m.h.a. superpositionsprincipen. En mycket viktig följd av dessa uppskattningar är att sensorns utimpedans kan påverka det fel förstärkaren adderar. Det är vanligt att referera alla fel till ingången hos *förstärkaren*. Då kan sensorns utsignal direkt jämföras med förstärkarens fel. I det följande betraktar vi endast DC-fel. (AC-felen uppkommer p.g.a. brus)

För den icke-inverterande förstärkaren ges det totala ingångsfelet vid DC av

$$V_\mathrm{fel,in} \equiv \frac{V_\mathrm{fel,ut}}{G} = V_\mathrm{os} + I_+ r_\mathrm{ut} + I_-(R_1 \parallel R_2). \tag{4}$$

Här har vi omvamdlat bias- och offsetström till strömkällor vid positiva och negativa ingången enligt:

$$I_+ = I_\mathrm{b} + I_\mathrm{os}/2 \tag{5}$$

och

$$I_- = I_\mathrm{b} - I_\mathrm{os}/2. \tag{6}$$

Observera att om sensorns utimpedans är stor kan felet bli stort ty I_+-termen genererar en stor spänning. *För en spänningsförstärkare gäller att om sensorn är en ideal spänningskälla ($r_\mathrm{ut} = 0$) kan felet minimeras!* Om dessutom motstånden R_1 och R_2 görs små blir det kvarstående felet endast $V_\mathrm{fel,in} = V_\mathrm{os}$. OP:ns strömfel försvinner alltså. Då bör man välja en bipolär OP med små spänningsfel.

För transimpedansförstärkaren ges det totala ingångsfelet vid DC av

$$I_\mathrm{fel,in} \equiv \frac{V_\mathrm{fel,ut}}{Z} = I_- - \frac{V_\mathrm{os}}{R_1} - \frac{V_\mathrm{os}}{r_\mathrm{ut}}. \tag{7}$$

Observera att om sensorns utimpedans är liten kan felet bli stort ty V_os får hög förstärkning. *För en strömförstärkare gäller att om sensorn är en ideal strömkälla ($r_\mathrm{ut} \to \infty$) kan felet minimeras!* Om dessutom motståndet R_1 görs tillräckligt stort blir det kvarstående felet endast $I_\mathrm{fel,in} = I_-$. Då bör man välja en FET-OP med små strömfel.

Litteraturförteckning

[1] A. F. P. van Putten, *Electronic Measurement Systems: Theory & Practice*, 2nd ed., 1996, IOP Publishing

[2] BPW 34 Silicon PIN Photodiode Data Sheet, Siemens Semiconductor Group, 1997