

# Mælitækni I:

## Skynjarar

### Kafi 13

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

8. október 2007

1

## Inngangur

- Skynjari (e. sensor), nemi eða merkjabreyta (e. transducer) er tól sem breytir orku (eða upplýsingum) úr einu formi í annað
- Skynjari getur t.d. breytt hitastigi í spennu
- Skynjari er fyrsta eining mælikerfis
- Línuleiki skynjarans, svið, suð og svörun ákvarða að mestu leyti upplausn, næmni og bandbreidd mælikerfis
- Skynjara má flokka á tvo vegu:
  - Flokka má saman ólíka skynjara sem notaðir eru til að mæla ákveðna tiltekna eiginleika, t.d. hitastig eða þrýsting
  - Flokka saman skynjara eftir því hvernig þeir vinna

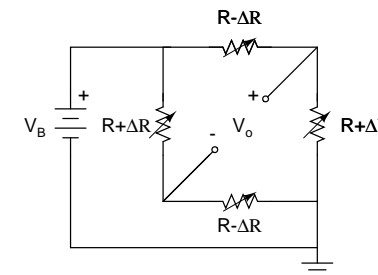
2

## Viðnámsskynjarar

- Viðnám nær allra viðnámsskynjara breytist umhverfis eitthvert tiltekið grunn- eða meðalgildi  $R_o$  þegar inngangsstærðin breytist
- Oftast er viðnámsbreytingunni breytt í spennubreytingu og til þess er gjarnan notuð Wheatstone brú
- Ef  $\Delta R/R_o \ll 1$  þá er útspennan línulega háð  $\Delta R$
- Ef  $\Delta R/R_o \rightarrow 1$  metst spennan sem fall af  $\Delta R/R_o$  og næmni og línuleiki tapast

3

## Viðnámsskynjarar



- Í sumum viðnámsskynjurum eins og t.d. við beitingu þannema eru tvö viðnám sem aukast línulega með álögðum krafti,  $R_o + \Delta R$ , og tvö viðnám sem minnka línulega með álögðum krafti,  $R_o - \Delta R$
- Þessum viðnámum er komið fyrir í fjögurra arma Wheatstone brú

4

## Viðnámsháðir hitaskynjarar

- Rafviðnám allra málma og melma eykst með auknu hitastigi
- Rafviðnámið er ekki línulega háð hitastigi
- Þessa hitastigsbreytingu má nálga með veldaröð

$$R(T) = R(T_o) + \alpha(T - T_o) + \beta(T - T_o)^2$$

þar sem  $T_o = 25^\circ\text{C}$  er tekið sem viðmiðunarhitastig

- Oft er notuð línuleg nálgun á ofangreindri jöfnu

$$\frac{\Delta R}{R_o} = \alpha(T - T_o)$$

5

## Viðnámsháðir hitaskynjarar

- Hitastuðull viðnáms (e. temperature coefficient (tempco)) er skilgreindur

$$\alpha \equiv \frac{dR(T)/dT}{R(T)}$$

- Eiginleikar nokkurra leiðara sem notaðir eru sem **viðnámsháðir hitaskynjarar** (e. resistance temperature detectors (RTD))

	Hitastuðull ( $\alpha$ )	Nothæft svið [ $^\circ\text{C}$ ]
Kopar	0.00393	- 200 - 260
Platína	0.00390	- 200 - 850
Nikkel	0.0067	- 80 - 320
Nikkel-Járn	0.00460	- 200 - 260
Thermistor	- 0.05	- 100 - 300

- Venjulega eru viðnámsháðir hitanemar tengdir sem Wheatstone brú

6

## Viðnámsháðir hitaskynjarar

- Thermistorar eru gjarnan úr myndlausum hálfleiðandi efnum og hafa mun hærri hitastuðul en hreinir málmar og melmi.
- Thermistorar eru úr efnum eins og oxíðum nikkels, kobalts og magníns og blöndum þeirra og járn-, ál-, og kopar súlfíðum
- Leiðni hálfleiðandi efna eykst við aukið hitastig
- Viðnámið hefur neikvæðan hitastuðul sem fylgir

$$R(T) = R_o \exp \left[ \beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right) \right]$$

þar sem  $T$  og  $T_o$  eru hitastig í Kelvin og  $T_o = 298 \text{ K}$

- Hér er

$$\alpha = \frac{dR(T)/dT}{R(T)} = -\beta \frac{1}{T^2}$$

7

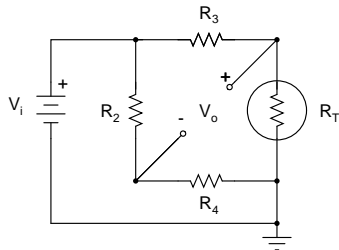
## Viðnámsháðir hitaskynjarar

- $\beta$  er efnisfasti sem liggur á bilinu 3000 - 5000 K
- Við 298 K og með  $\beta = 4000 \text{ K}$  þá er  $\alpha = -0.045/\text{K}$
- Dæmigerður thermistor með  $R_o = 2000 \Omega$  og næmni  $-0.04/\text{K}$  hefur svörun  $\Delta R/\Delta T = 80 \Omega/\text{K}$
- Næmnin er því tugþrepi betri en næst með platínuviðnámi
- Með Wheatstone brú er hægt að nema hitastigsbreytingu sem eru minni en milli Kelvin

8

## Viðnámsháðir hitaskynjarar

- Notkun thermistors sem virks búts í Wheatstone brú er sýnd á myndinni



- Gjarna er brúin upphaflega í jafnvægi ( $R_T R_3 = R_2 R_4$ ) og gera má ráð fyrir að viðnámin  $R_2$ ,  $R_3$  og  $R_4$  séu föst nákvæmnisviðnám

9

## Viðnámsháðir hitaskynjarar

- Útspennan, sem myndast við hitastigsháða viðnámsbreytingu  $\Delta R_T$  í thermistorum

$$\frac{\Delta V_o}{V_i} = \frac{\Delta R_T R_3}{(R_T + \Delta R_T + R_2)(R_3 + R_4)}$$

- Í tilfallinu  $R_2 = R_3$  og  $R_T = R_4$  þá verður jafnan

$$\frac{\Delta V_o}{V_i} = \frac{\Delta R_T / R_T}{(1 + \Delta R_T / R_T + R_2 / R_T)(1 + R_2 / R_T)}$$

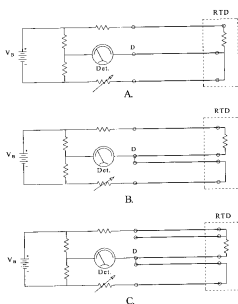
eða

$$\frac{\Delta V_o}{V_i} = \frac{\Delta R_T / R_T}{(2 + R_T / R_2 + R_2 / R_T + \Delta R_T / R_T + \Delta R_T / R_2)}$$

og útgangsspennan er ólínulegt fall af breytingu viðnámsins með hitastigi  $\Delta R_T$

10

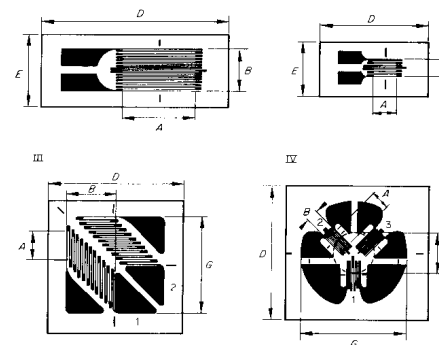
## Viðnámsháðir hitaskynjarar



- Viðnámsháðir hitaskynjarar tengdir í Wheatstonebrú.
- Þrjár leiðir til að jafna fyrir viðnámið í leiðurum
- Viðnámsháði skynjarinn er viðnámið sem er innan kassans sem brotna línar myndar

11

## Þannemar í viðnámsbrú



- Þannemar eru gerðir úr fínnum vírum eða leiðandi þunnhúðum
- Þeir eru límðir á burðarbita eða vélarlhuta til að mæla aflögun eða tognun

12

## Pannemar í viðnámsbrú

- Þensla eða samþjöppun, sem er svörun við vélrænu álagi, kemur fram í líttilli breytingu í lengd nemans
- Þessi lengdarbreyting veldur viðnámsbreytingu, sem breyta má í spennubreytingu með Wheatstone brú
- Gerum ráð fyrir vír af lengd  $L$  með þverskurðarflatarmál  $A$  og eðlisviðnám  $\rho$  [ $\Omega\text{cm}$ ]
- Viðnámið við gefið hitastig er þá

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad [\Omega]$$

13

## Pannemar í viðnámsbrú

- Ef vírinn er spenntur með álaginu  $W$  er spennan (e. stress)

$$s = \frac{W}{A}$$

- Afleiðing þessarar spennu er tognun (e. strain)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{s}{Y}$$

þar sem  $Y$  er Young stuðull fyrir efnið sem vírinn er gerður úr

- Með Taylor rakningu fæst

$$\Delta R = \left( \frac{-L}{A^2} \right) \Delta A + \left( \frac{L}{A} \right) \Delta \rho + \left( \frac{\rho}{A} \right) \Delta L$$

14

## Pannemar í viðnámsbrú

- Nú er skilgreindur **kvarðastuðullinn** (e. gauge factor)

$$\begin{aligned} \text{GF} &= \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \\ &= 1 + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta L/L} + \frac{-\Delta A/A}{\Delta L/L} \end{aligned}$$

þar sem síðasti liðurinn er Poisson hlutfallið

$$\mu = \frac{\Delta A/A}{\Delta L/L}$$

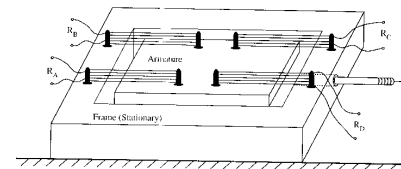
- Útspenna þannemabráar þarfnast að jafnaði mögnunar

⇒ Dæmi 13.1.

15

## Pannemar í viðnámsbrú

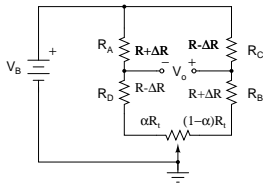
- Þannema má einnig nota til beinna mælinga á kröftum og til mælinga á þrýstingi
- Þrýstingur verkar þá á himnu eða stimpil og er breytt í kraft



- Mynd sýnir kraftnema
- Tveir víranna verða fyrir tognun og hinir tveir samþjöppun
- Viðnám tveggja víranna eykst en hinna tveggja minnkar

16

## Pannemar í viðnámsbrú

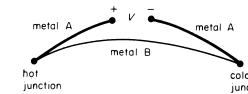


- Kraftnemi tengdur í Wheatstone brú
- Hinir fjórir armar brúarinnar hafa allir jafna teygju þegar enginn kraftur er lagður á
- Þegar kraftur er lagður á toguna  $R_A$  og  $R_B$  og  $R_C$  og  $R_D$  þjappast saman
- Viðnámið  $R_t$  er notað til að núllstilla brúna þegar engin kraftur eða einhver tiltekinn viðmiðunarkraftur er lagður á hana

17

## Hitatvinn

- Hitatvinn er oft notað til hitamælinga
- Hitatvinn hagnýtir Seebeck hrif ásamt Peltier og Thompson hrifum
- Seebeck hrif lýsa mættismuninum sem myndast þegar tveimur málum er skeytt saman til að mynda samskeyti
- Hitatvinn samanstendur af samskeytum milli tveggja eða fleiri ólíkra málmvíra



- Í einföldu tveggja samskeyta hitatvinni er öðrum samskeytunum haldið við tiltekið viðmiðunarhitastig, oft valið  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , sem fengið er með því að dýfa þeim í ísvatn

18

## Hitatvinn

- Spennuna  $V$  má nálga með

$$V = C_1(T_1 - T_2) + C_2(T_1^2 - T_2^2)$$

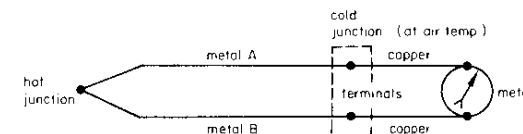
og  $T_1$  og  $T_2$  eru hitastig samskeytanna tveggja

- Óþekkta hitastigið er  $T_1$  og hinum samskeytunum er haldið við viðmiðunarhitastigið  $T_2$
- Óþekkta hitastigið  $T_1$  er mælt með því að mæla spennuna  $V$
- Samband spennunnar  $V$  og óþekkta hitastigsins  $T_1$  er ólínulegt og gjarnan birt á töflu formi fyrir tiltekna samskeytta málma

19

## Hitatvinn

- Gjarnan er hitatvinnkerfið (mæli- og viðmiðunarskeytin), sem eru úr tveimur ólíkum málum, tengd þriðja málminum eins og t.d. kopar til að tengja megi spennumæli
- Tenging hitatvinn málma við kopar þýðir ein auka tengi
- Að bæta við þriðja málminum hefur engin áhrif á tveggja málma hitatvinn svo lengi sem bæði samskeytin við þriðja málminn séu við sama (viðmiðunar) hitastig



20

## Hitatvinn

- Í töflunni má sjá nokkur dæmigerð hitatvinnkerfi og nothæft svið þeirra

		Nothæft svið [°C]	[ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ] við °C
Type T	Kopar/constantan	-300 - 350	15 @ - 200 60 @ + 350
Type J	Járn/constantan	-200 - 300	60 @ - 200 45 @ 0
Type R	Pt/Pt90Rh10	0 - 1450	0 @ - 138 5 @ 0 12 @ + 1500
Járn/Copnic		-200 - 1200	60 @ 0

⇒ Dæmi 13.2.

21

## Hitatvinn

- Íspenna hitatvinnis er ekki línulegt fall af hitauninum milli viðmiðunar- og mælisamskeytanna  $\Delta T$

- Almennt má rita

$$E_o = A(\Delta T) + \frac{B}{2}(\Delta T)^2 + \frac{C}{3}(\Delta T)^3$$

- Næmni hitatvinnis er skilgreint sem

$$S_T \equiv \frac{dE_o}{dT} = A + B(\Delta T) + C(\Delta T)^2$$

og er gjarnan gefið í  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

22

## Hitatvinn

- Næmni hitatvinnis fyrir hvaða málmapar sem vera skal má finna með því að frádrætti á töflugildum fyrir tiltekna málma og platínu

- T.d. fyrir kopar og konstantan er

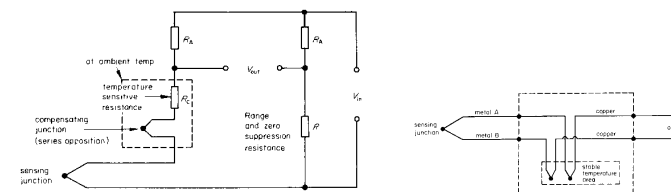
$$S_{\text{Kopar/const}} = (6.5 - (-35)) = 41.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

- Íspennan er síðan mæld með rafrænum spennumælum

Málmur við 0 °C	$S_T$ vs. Pt [ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ]	Málmur	$S_T$ vs. Pt [ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ]
Bismút	-72	Silfur	6.5
Constantan	-35	Kopar	6.5
Nikkel	-15	Gull	6.5
Platina	0	Járn	18.5
Bly	4	Kísill	440
Ál	3.5	German	300

23

## Hitatvinn



- Þegar hitastig nærri umhverfishitastigi er mælt með hitatvinnnd og óhentugt er að nota fast viðmiðunarhitastig, verður að setja inn leiðréttingarrás

- Ein leiðin er sjálfvirk leiðrétting í hitanæmri brúarrás

- Þá er leiðrétt fyrir breytingu á umhverfishitastigi með hitaháðu viðnámi  $R_C$  og jöfnunarsamskeytum

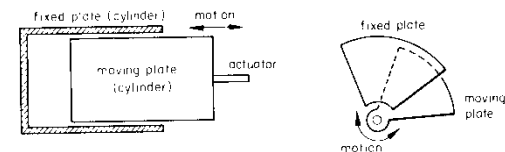
24

## Rýmdarbreytingar

- Margir vélrænir nemar og sumir raka- og hitanemar byggja á því að rýmdarbreytingu er breytt í spennu með AC brú eða annarri rafrás
- Með rýmdarnemum má mæla kraft með færslu einnar eða fleiri skauta þéttis
- Rýmdarnema má einnig nota til að mæla t.d. hröðun, þykkt og þrýsting
- Í sinni einföldustu mynd breytir vélræn færsla fjarlægð milli tveggja (eða fleiri) platna þéttis

25

## Rýmdarbreytingar



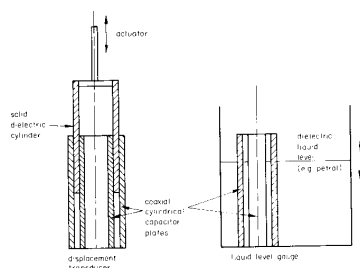
- Rýmd milli tveggja leiðandi platna, sem hvor um sig er með flatarmál  $A$ , og aðskilin með rafsvara af þykkt  $d$  er gefin með

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

þar sem  $\epsilon_r$  er hlutfallslegur rafsvörunarstuðull efnisins sem aðskilur plöturnar og  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m er rafsvörunarstuðull lofttæmis

26

## Rýmdarbreytingar



- Litlar breytingar í rýmd  $C$ , sem við köllum  $\Delta C$ , má mæla á ýmsa vegu
- Þær geta stafað af:
  - færslu skauta þéttisins
  - breytingu á hlutfallslega rafsvörunarstuðlinum  $\epsilon_r$  vegna þrýstings, raka, hitastigs eða vélræns álags o. s. frv.

27

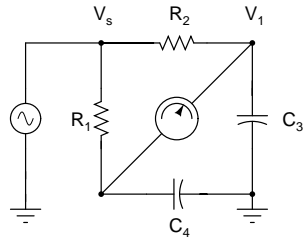
## Rýmdarbreytingar

- Einnig má renna efni með tilteknum hlutfallslegum rafsvörunarstuðli á milli platna þéttis
- Þá hefur einhver hluti, flatarins  $A$ , sem við köllum  $\alpha$ , hlutfallslegan rafsvörunarstuðul  $\epsilon_{r1}$  og hinn hluti flatarmálsins á milli platnanna,  $(1 - \alpha)A$ , hafi hlutfallslegan rafsvörunarstuðul  $\epsilon_r = 1$
- Flatarmál skauta þéttis má einnig breyta með því að færa aðra plötuna yfir hina en halda fjarlægðinni á milli þeirra,  $d$ , fastri

28

## Rýmdarbreytingar

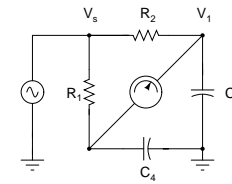
- Til að mæla rýmdarbreytingar má nota ýmsar rýmdarbrýr eða með því að ákvarða sveiflutíðni stilltrar  $LC$  rásar
- Ein næmasta leiðin til að mynda spennu í réttu hlutfalli við  $\Delta C$  er að nota De Sauty brú



- Þar eð útspena er ólínulegt fall af stórum rýmdarbreytingum er De Sauty brú yfirleitt notuð með  $\delta C/C_o \ll 1$  þannig að útspennan sé línulegt fall af rýmdarbreytingunni

29

## Rýmdarbreytingar



- Einnig eru viðnámin  $R_1$  og  $R_2$  valin jafn stór og táknuð með  $R$  og jafnvægi er fundið þegar  $C_4 = C_3 = C$
- Útspena brúarinnar er nú fall af  $R$ ,  $C$ ,  $\omega$  og  $\delta C$  og má rita

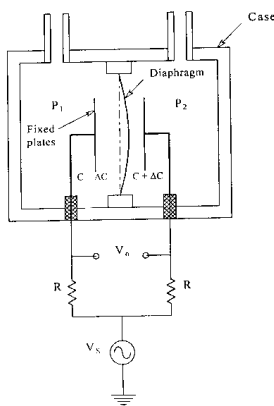
$$V_o = V_s \frac{j\omega RC(\delta C/C)}{(1 + j\omega RC)(1 + j\omega R(C + \delta C))}$$

- Ef  $\omega = 1/RC$  þá má rita útspennuna

$$V_o = V_s \frac{\delta C}{C}$$

30

## Rýmdarbreytingar



- Á mynd sést þrýstingsnemi, þar sem himna breytir um stöðu við þrýstingsmun milli tveggja hólfa,  $p_1$  og  $p_2$

31

## Rýmdarbreytingar

- Himnan er jarðtengd og er sameiginlegt skaut tveggja þétta þ.a.

$$C_1 = C_o - \Delta C$$

og

$$C_2 = C_o + \Delta C$$

og

$$\Delta C = k(p_1 - p_2)$$

- Ef De Sauty brú er drifin með tíðninni

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC_o}$$

og lindarspennu  $V_s$

32



## Rýmdarbreytingar

- Þá er

$$\frac{V_o(s)}{V_s(s)} = \frac{\frac{1}{s(C_o - \Delta C)}}{\frac{1}{s(C_o - \Delta C) + R}} - \frac{\frac{1}{s(C_o + \Delta C)}}{\frac{1}{s(C_o - \Delta C) + R}}$$

sem gefur

$$\frac{V_o(s)}{V_s(s)} = \frac{2Rs\Delta C}{(1 + sRC_o)^2 - s^2R^2C_o^2(\Delta C/C_o)^2}$$

þegar  $s = j\omega = j/RC_o$  og þar sem  $(\Delta C/C_o)^2 \ll 1$  fáum við

$$\frac{V_o(s)}{V_s(s)} = \frac{\Delta C}{C_o}$$

33

## Rýmdarbreytingar

- Þetta getum við þess vegna ritað

$$v_o(t) = V_s \left( \frac{\Delta C}{C_o} \right) \sin \left( \frac{t}{RC_o} \right)$$

- Útspennan hefur því útslagið  $V_o = V_s(\Delta C/C_o)$
- Upplausn í spennumælingu getur verið allt að  $1 \mu\text{V}$  og ef  $V_s = 5 \text{ V}$  og  $C_o = 100 \text{ pF}$ , þá getur  $\Delta C$  verið allt að  $2 \times 10^{-4} \text{ pF}$

34

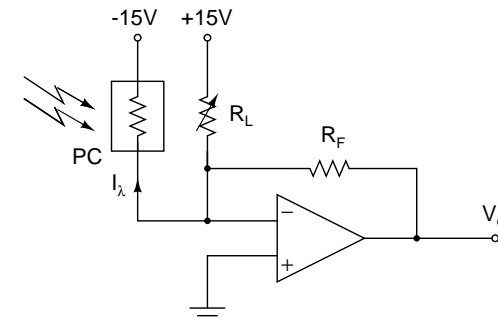
## Ljósvakinn rafeiðni

- **Ljósvakinn rafeiðni** (e. photoconductors) byggja á efnum sem falla í viðnámi þegar á þau er lýst
- Ljósvakinn rafeiðni er nýtt í m.a. ljósmælum í myndavélum, sem ljósnemar í teljurum eða hreyfiskynjurum og í þjófavarnarkerfum
- Í hálfleiðandi efnum veldur ljós með tiltekna bylgjulengd myndun rafeinda-holu pars
- Rafeindin nær upp í leiðniborða og rekur þar undan álögðu rafsviði og leggur til straumsins sem fer um hálfleiðarann
- T.d. er kadmín brennisteinn (CdS) með orkugeil  $2.42 \text{ eV}$  heppilegur til að gefa ljósvakta rafeiðni á sýnilega sviðinu
- German og indín antímon með orkugeilar  $0.67 \text{ eV}$  og  $0.18 \text{ eV}$  eru notaðir á nær- og fjærinnrauðum bylgjulengdum

35

## Ljósvakinn rafeiðni

- CdS ljósnemar eru gerðir með því að rækta þunnt lag á einangrandi undirlag
- Ljósnemar eru oft tengdir í Wheatstone brú, en einnig má nota aðgerðamagnararás til að breyta ljósörvaða straumnum í spennu



36

## Frekara lesefni

Ítarlega umfjöllun um skynjara af ýmsu tagi er að finna hjá Northrop (1997, kafli 6), Wolf and Smith (2003, kafli 14) og Gregory (1981, kafli 5). Dally et al. (1984) gefur yfirsýn yfir ýmsar lausnir með notkun skynjara. Rásir fyrir tengingar á skynjurum er að finna hjá Sheungold (1980).

## References

Dally, J. W., W. F. Riley, and K. G. McConnell (1984). *Instrumentation for Engineering Measurements*. New York: John Wiley & Sons.

Gregory, B. A. (1981). *Introduction to Electrical Instrumentation and Measurement Systems* (2 ed.). Houndmills, UK: Macmillan.

Northrop, R. B. (1997). *Introduction to Instrumentation and Measurements*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.

Sheungold, D. H. (1980). *Transducer Interfacing Handbook: A Guide to Analog Signal Conditioning*. Analog Devices.

Wolf, S. and R. F. M. Smith (2003). *Student Reference Manual for Electronic Instrumentation Laboratories* (2 ed.). Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice Hall.