Mælitækni I:

Skynjarar

Kafli 13

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

15. nóvember 1999

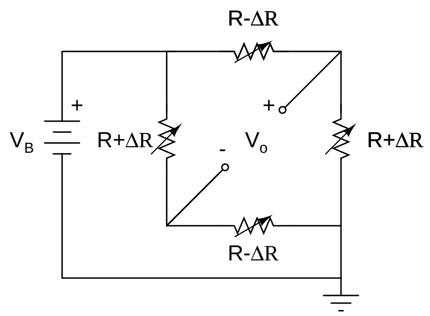
Inngangur

- **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 mæilikerfis
- 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 hverning þeir vinna

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 ΔR
- Ef $\Delta R/R_o \to 1$ mettast spennan sem fall af $\Delta R/R_o$ og næmni og línuleiki tapast

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

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 $T_o = 25$ °C er tekið sem viðmiðunarhitastig
- Oft er notuð línuleg nálgun á ofangreindri jöfnu

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

Viðnámsháðir hitaskynjarar

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

  $$\alpha \equiv \frac{\mathrm{d}R(T)/\mathrm{d}T}{R(T)}$$

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

	Hitastuðull (α)	Nothæft svið [°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

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 $T_o = 298$ K
- Hér er

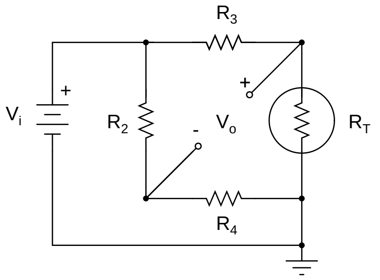
  $$\alpha = \frac{\mathrm{d}R(T)/\mathrm{d}T}{R(T)} = -\beta\frac{1}{T^2}$$

Viðnámsháðir hitaskynjarar

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

Viðnámsháðir hitaskynjarar

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



- Ef að brúin er upphaflega í jafnvægi ($R_T R_3 = R_2 R_4$) og ef viðnámin R_2, R_3 og R_4 eru föst nákvæmnisviðnám þá er útspennan, sem myndast við hitastigsháða viðnámsbreytingu ΔR_T í thermistornum

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

Viðnámsháðir hitaskynjarar

Í tilfellinu $R_2 = R_3$ og $R_T = R_4$ þá verður jafnan

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

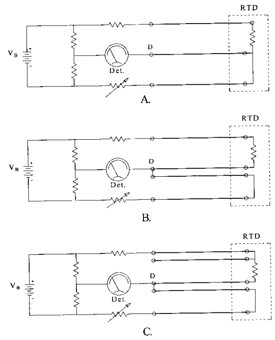
eða

$$\frac{\Delta V_o}{V_i}$$

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

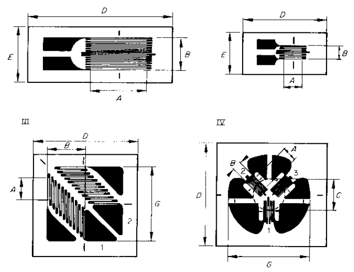
og útgangspennan er ólínulegt fall af breytingu viðnámsins með hitastigi ΔR_T

Viðnámsháðir hitaskynjarar



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

Þannemar í viðnámsbrú



- Þannnemar eru gerðir úr fínum vírum eða leiðandi þunnhúðum
- Þeir eru límdir á burðarbita eða vélarhluta til að mæla aflögun eða tognun
- Þensla eða samþjöppun, sem er svörun við vélrænu álagi, kemur fram í lítilli breytingu í lengd nemans
- Þessi lengdarbreyting veldur viðnámsbreytingu, sem breyta má í spennubreytingu með Wheatstone brú

Þannemar í viðnámsbrú

- Gerum ráð fyrir vír af lengd L með þverskurðarflatarmál A og eðlisviðnám ρ [Ωcm]
- Viðnámið við gefið hitastig er þá

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

- 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

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

Þannemar í viðnámsbrú

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

$$\mathrm{GF} = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}$$

$$= 1 + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta L/L} + \frac{-\Delta A/A}{\Delta L/L}$$

þar sem síðasti liðurinn er Poisson hlutfallið

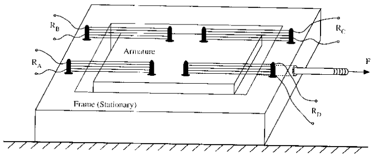
$$\mu = \frac{\Delta A/A}{\Delta L/L}$$

- Útspenna þannemabrúr þarfnast að jafnaði mögnunar

$\Longrightarrow$ Dæmi 13.1.

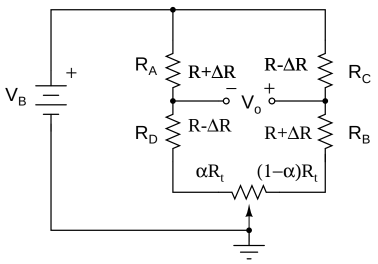
Þannemar í viðnámsbrú

- 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

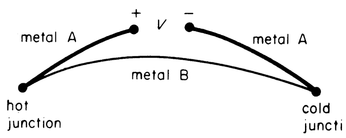
Þannemar í viðnámsbrú



- Kraftnemi tengdur í Wheatstone brú
- Hinir fjórir armar brúarinnar hafa allir jafna teygju þegar enginn kraftur er lagður á
- Þegar kraftur er lagður á togna 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

Hitatvinn

- Hitatvinn er oft notað til hitamælinga
- Hitatvinn hagnýtir Seebeck hrif ásamt Peltier og Thompson hrifum
- Seebeck hrif lýsa mættismuninum sem myndast þegar tveimur málmum 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 °C, sem fengið er með því að dýfa þeim í ísvatn

Hitatvinn

- Spennuna V má nálga með

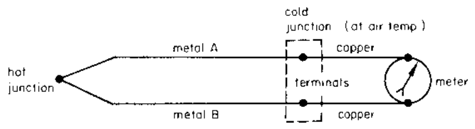
$$V = C_1(T_1 - T_2) + C_2(T_1^2 - T_2^2)$$

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

Hitatvinn

- Gjarnan er hitatvinnkerfið (mæli- og viðmiðunarskeytin), sem eru úr tveimur ólíkum málmum, tengd þriðja málminum eins og t.d. kopar til að tengja megi spennumæli
- Tenging hitatvinn málmanna 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



Hitatvinn

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

		Nothæft svið [°C]	[μV/°C] við °C
Type T	Kopar/constantan	-300 – 350	15 @ - 200
			60 @ + 350
Type J	Járn/constantan	-200 – 800	60 @ - 200
			45 @ 0
Type R	Pt/Pt90Rh10	0 – 1450	0 @ - 138
			5 @ 0
			12 @ + 1500
	Járn/Copnic	-200 – 1200	60 @ 0

- Íspenna hitatvinns er ekki línulegt fall af hitamuninum milli viðmiðunar- og mælisamskeytanna ΔT
- Almennt má rita

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

$\Longrightarrow$ Dæmi 13.2.

Hitatvinn

- Næmni hitatvinns er skilgreint sem

$$S_T \equiv \frac{\mathrm{d}E_o}{\mathrm{d}T} = A + B(\Delta T) + C(\Delta T)^3$$

og er gjarnan gefið í μV/°C

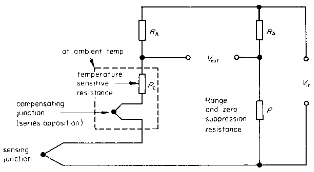
- Næmni hitatvinns fyrir hvaða málmapar sem vera skal má finna með því að frádrætti á töflugildum fyrir tiltekna málma og platínu
- T.d. fyrir kopar og konstantan er

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

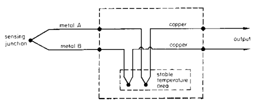
- Íspennan er síðan mæld með rafrænum spennumælum

Málmur við 0 °C	S_T vs. Pt [μV/°C]	Málmur	S_T vs. Pt [μV/°C]
Bismút	-72	Silfur	6.5
Constantan	-35	Kopar	6.5
Nikkel	-15	Gull	6.5
Platína	0	Járn	18.5
Blý	4	Kísill	440
Ál	3.5	German	300

Hitatvinn



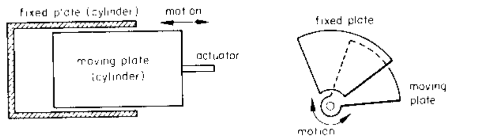
- Þegar hitastig nærri umhverfishitastigi er mælt með hitatvennd og óhentugt er að nota fast viðmiðunarhitastig, verður að setja inn leiðréttingarrás
- Ein leiðin er sjálfvirk leiðrétting í hitanæmri brúarrás. Þá er leiðrétt fyrir breytingu á umhverfishitastigi með hitaháðu viðnámi R_C og jöfnunarsamskeytum



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

Rýmdarbreytingar

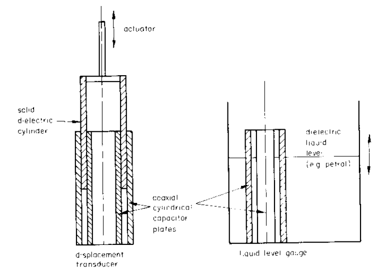


- Rýmd milli tveggja leiðandi platna, sem hvor um sig er með flatarmál A, og aðskilin með rafsvara af þykkt d er gefin með

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

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

Rýmdarbreytingar



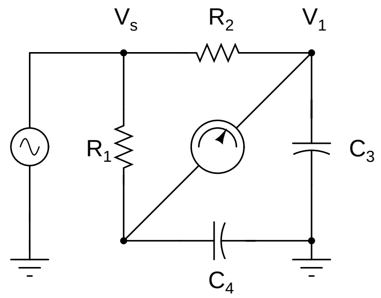
- Litlar breytingar í C, sem við köllum ΔC, má mæla á ýmsa vegu
- Þær geta stafað af:
  - færslu skauta þéttisins
  - breytingu á hlutfallslega rafsvörunarstuðlinum ϵ_r vegna þrýstings, raka, hitastigs eða vélræns álags o. s. frv.

Rýmdarbreytingar

- Einnig má renna efni með tilteknum hlutfallslegum rafsvörunarstuðli á milli platna þéttis svo að einhver hluti, α, af A hafi hlutfallslegan rafsvörunarstuðul ϵ_{r1} og hinn hluti flatarmálsins á milli platnanna, $(1-\alpha)A$, hafi 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

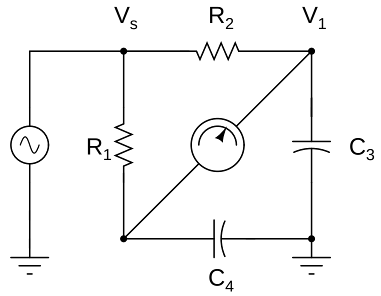
Rýmdarbreytingar

- 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 ΔC er að nota De Sauty brú



- Þar eð útspenna 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

Rýmdarbreytingar



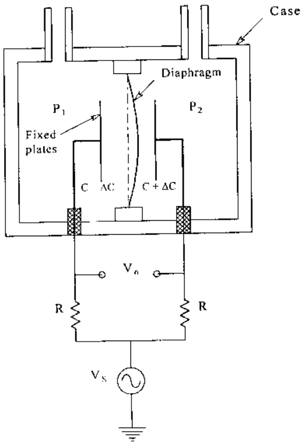
- Einnig eru viðnámin R_1 og R_2 valin jafn stór og táknuð með R og jafnvægi er fundið þegar $C_4 = C_3 = C$
- Útspenna brúarinnar er nú fall af R, C, ω og δC og má rita

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

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

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

Rýmdarbreytingar



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

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

$$f_o = \frac{1}{2\pi R C_o}$$

og lindarspennu V_s

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

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

eða

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

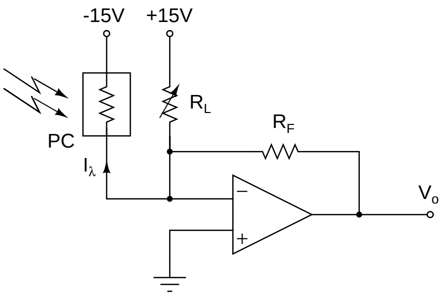
- Útspennan hefur því útslagið $V_o = V_s(\Delta C/C_o)$
- Upplausn í spennumælingu getur verið allt að 1 μV og ef $V_s = 5$ V og $C_o = 100$ pF, þá getur ΔC verið allt að 2×10^{-4} pF

Ljósvakin rafleiðni

- **Ljósvakin rafleiðni** (e. photoconductors) byggja á efnum sem falla í viðnámi þega á þau er lýst
- Ljósvakin rafleiðni 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 eV heppliegur til að gefa ljósvakta rafleiðni á sýnilega sviðinu
- German og indín antímon með orkugeilar 0.67 eV og 0.18 eV eru notaðir á nær- og fjærinnrauðum bylgjulengdum

Ljósvakin rafleiðni

- 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



Heimildir:

- Robert B. Northrop, *Introduction to Instrumentation and Measurements*, CRC Press, 1997, kafli 6
- J. W. Dally, W. F. Riley and K. G. McConnell, *Instrumentation for Engineering Measurements*, John Wiley & Sons, 1984
- D. H. Sheungold ed., *Transducer Interfacing Handbook: A Guide to Analog Signal Conditioning*, Analog Devices, 1980
- B. A. Gregory, *An Introduction to Electrical Instrumentation and Measurement Systems*, 2 ed., Macmillan, 1981, kafli 5