Mælitækni I:

Suð

Kafli 14

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

22. nóvember 1999

Inngangur

- Í nær öllum mælingum takmarkast skynjun veikra merkja af suði
- Suð er óæskileg merki sem afbakar það merki sem óskað er eftir
- Jafnvel þó svo að merkið sem mæla skal sé ekki tiltölulega veikt þá dregur suð úr áreiðanleika mælingarinnar
- Í sumum tilfellum er ekki hægt að forðast suðið (eins og t.d. flökkt í mældri stærð) en losna má við það með því að taka meðaltal af mældri stærð eða minnka bandbreidd
- Öðru suði má draga úr eða eyða með aðgerðum eins og síun og réttri tengingu
- Þá verður til suð við mögnun merkisins sem minnka má með lág-suðs hönnun magnara

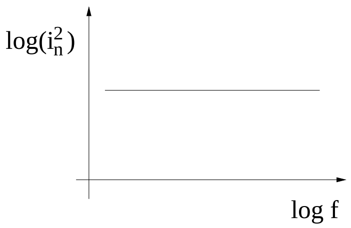
Suð: Tilurð og gerð

- Suð er sérhvað það sem, þegar því er bætt við merki, skerðir upplýsingagildi þess
- Hugtakið suð nær yfir allt það sem aflagar merki
- Suð getur verið annað merki
- Hugtakið suð er þó oftast notað til að lýsa tilviljanakenndu suði, sem oftast er af varmafræðilegum uppruna
- Suð má greina með
  - tíðnirófi
  - styrkdreifingu
  - þeim eiginleikum sem því valda
- Markmiðið er alltaf að halda hlutfalli afls merkisins og afli suðsins svo háu að suðið hafi ekki veruleg áhrif á mælikerfið
- Æskilegt er að hægt sé að greina suð nákvæmlega. Þetta er þó ekki hægt því að flest suð er tilviljanakennt í eðli sínu

Johnson suð

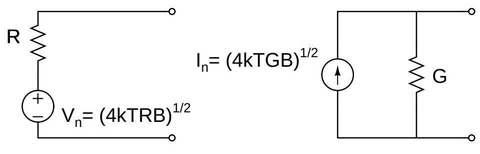
- Sérhvert viðnám framkallar suðspennu sem kölluð er **Johnson suð**
- Johnson suð eða **varmasuð** stafar af tilviljanakenndri hreyfingu hleðslubera í sérhverju leiðandi efni sem er ofan við alkul
- Hraði þessara hreyfinga eykst með auknu hitastigi þ.a. aflþéttleiki suðsins er í réttu hlutfalli við viðnám leiðarans og hitastig hans

Johnson suð



- Johnson suð hefur flatt tíðniróf, **hvítt suð**, sem segir að sama suðafl fæst fyrir allar tíðnir
- Johnson suð ákvarðar neðri mörk á öllum mælanlegum merkjum
- Suðspenna yfir viðnám er háð hitastigi viðnámsins og bandbreidd mælitækisins (eða rásar sem tengd er við viðnámið)

Johnson suð



- Líta má á viðnám sem suðlind sem lýsa má með jafngildisrásunum að ofan
- Tómgangsspennan sem framkölluð er af viðnámi R við hitastig T er

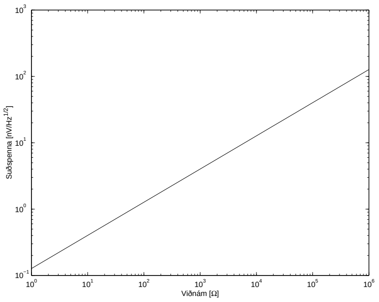
$$V_{\mathrm{noise,rms}} = V_{\mathrm{nR}} = (4kTRB)^{1/2}$$

  þar sem
  - k er fasti Boltzmann
  - T er hitastigið í Kelvin
  - B er bandbreidd í Hz
- Á sama hátt er straumurinn

$$I_{\mathrm{noise,rms}} = I_{\mathrm{nR}} = (4kTGB)^{1/2}$$

Johnson suð

- Mikilvægt er að bandbreidd mælirásarinnar sé ekki meiri en nauðsynlegt er, til að hámarka hlutfall suðs og merkis



$\Longrightarrow$ Dæmi 14.1.

$\Longrightarrow$ Dæmi 14.2.

Johnson suð

- Ekki er hægt að segja fyrir um styrk Johnson suðs á hverjum tíma, en almennt hlýtir hann Gaussdreifingu

$$p(V, V + \mathrm{d}V) = \frac{1}{V_{\mathrm{n}}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{V^2}{2V_{\mathrm{n}}^2}\right) \mathrm{d}V$$

  þannig að $p(V)\mathrm{d}V$ eru líkur þess að augnabliksspennan liggi milli V og $V + \mathrm{d}V$ þegar V_{n} er rms suðspennan
- Mikilvægi Johnson suðs liggur í því að það setur lægsta suðstyrk sem nokkur skynjari, lind eða magnari getur haft ef í þeim eru viðnám

Skotsuð

- Rafstraumur er flæði stakra hleðslna
- Endanleiki hleðsluskammtsins kemur fram í flökkti í straumnum
- Ef hleðslurnar eru óháðar hver annarri, er flökktstraumurinn

  $$I_{\mathrm{noise,rms}} = I_{\mathrm{nR}} = (2qI_{\mathrm{dc}}B)^{1/2}$$

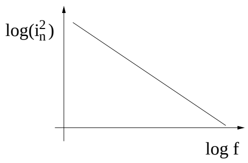
  þar sem
  - q er hleðsla rafeindar
  - B er bandvídd
  - I_{dc} er jafnspenna um tvistinn fer
- Æstæður straumur 1 A hefur rms flökkt 57 nA mælt með 10 kHz bandbreidd
- Líkanið gildir ekki um tvista sem eru bakspenntir út í niðurbrot og skriðustraum
- Þetta suð eins og Johnson suð er hvítt og Gaussískt

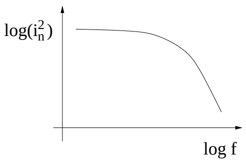
Skotsuð

- Ofangreind jafna fyrir skotsuð gildir einungis ef hleðsluberar eru óháðir
- Það er reyndin fyrir hleðslur sem eru að fara yfir þröskuld eins og tilfellið er í tvist. Það er hins vegar ekki gilt í leiðandi málmi þar sem tengsl eru á milli hleðslubera
- Í tvist er hleðsluberum innspýtt með tilviljanakenndum hætti, svo að fjöldi hleðslubera flökktir frá einu augnabliki til annars

$1/f$-suð

- Smárar, lampar, viðnám og önnur tól sýni lágtíðnieiginleika sem þekkt er sem hvellsuð (e. flicker noise) eða $1/f$ suð
- Þá er aflþéttleikinn er í réttu hlutfalli við $1/f^{\nu}$ þar sem $\nu \approx 1$
- Sum hálfleiðaratól framkalla einnig skothríðar- (e. burst) eða poppkornssuð, þar sem aflþéttleikinn fellur eins og $1/f^2$
- Hvellsuð og skothríðarsuð geta valdið verulegum vandræðum þegar unnið er við lága tíðni en venjulega er litið fram hjá þeim ofan við nokkur kHz





$1/f$-suð

- Viðnám hafa t.d. flökkt í viðnámsgildi sínu, sem veldur auka suði, sem er í réttu hlutfalli við dc strauminn sem um það fer.
- Þetta suð ræðst af nokkrum þáttum eins og t.d. efninu sem viðnámið er gert úr en einkum eru endatengingarnar ráðandi
- Hér er listi yfir auka suð nokkurra viðnámsgerða mælt yfir eitt tugþrep í tíðni:
  - Carbon-composition 0.10 μV til 3.0 μV
  - Carbon-film 0.05 μV til 0.3 μV
  - Metal-film 0.02 μV til 0.2 μV
  - Wire-wound 0.01 μV til 0.2 μV
- Þetta suð fellur eins og $1/f$ og er stundum nefnt **bleikt suð**

Aflþéttleiki suðs

- Johnson suð og skotsuð eru bæði háð bandvídd mælitækisins B ásamt eiginleikum suðlindarinnar (R og I)
- Því getur verið hentugt að skilgreina spennuþéttleika suðs v_n

$$V_\mathrm{n} = v_\mathrm{n} B^{1/2} = (4kTR)^{1/2} B^{1/2}$$

- Fyrir hvítt suð er v_n óháð tíðni
- Fyrir bleikt suð fellur v_n með tíðni sem nemur 3 dB/áttund
- Oft er ritað v_n^2, meðalkvaðrat suðþéttleikans

Aflþéttleiki suðs

$$v_\mathrm{n} = (4kTR)^{1/2} \qquad \mathrm{V/Hz}^{1/2}$$

$$v_\mathrm{n}^2 = 4kTR \qquad \mathrm{V}^2/\mathrm{Hz}$$

$$V_\mathrm{n} = v_\mathrm{n} B^{1/2} = (4kTRB)^{1/2} \qquad \mathrm{V}$$

$$V_\mathrm{n}^2 = v_\mathrm{n}^2 B = 4kTRB \qquad \mathrm{V}^2$$

- Þegar lögð eru saman tvö ótengd merki t.d. suðmerki við merki frá lind, þá leggjum við saman kvarðata þeirra eða

$$v_\mathrm{n} = \left(v_\mathrm{n}^2 + v_\mathrm{s}^2\right)^{1/2}$$

Suðhlutfall

- **Suðhlutfall** (e. signal-to-noise ratio (SNR)) er skilgreint sem

$$\mathrm{SNR} = \frac{P_\mathrm{s}}{P_\mathrm{n}} = \frac{V_\mathrm{s}^2}{V_\mathrm{n}^2}$$

þar sem spennurnar V_s og V_n eru í rms og mið tíðni og bandbreidd eru tilgreind

- Oftast er þetta þó notað sem

$$\mathrm{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{V_\mathrm{s}^2}{V_\mathrm{n}^2} \right) \qquad \mathrm{dB}$$

$\Longrightarrow$ Dæmi 14.3.

Suðtala

- Í öllum raunverulegum spennulindum myndast suð vegna Johnson suðs í lindarviðnáminu
- Til viðbótar getur svo verið annað suð vegna annarra þátta
- **Suðtala** (e. noise figure (NF)) magnara er hlutfall útgangs afls raunverulegs magnara og suðlauss magnara með sömu mögnun, þar sem viðnámið R_s er tengt við inngang magnarans í báðum tilfellum
- Þá er Johnson suðið frá R_s inngangsmerkið

$$\mathrm{NF} = 10 \log_{10} \left(\frac{4kTR_\mathrm{s} + v_\mathrm{n}^2}{4kTR_\mathrm{s}} \right)$$

eða

$$\mathrm{NF} = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{v_\mathrm{n}^2}{4kTR_\mathrm{s}} \right) \qquad \mathrm{dB}$$

þar sem v_n^2 er kvaðrat meðal suðspennunnar sem magnarinn leggur til á hvert Herz

Suðhitastig

- **Suðhitastig** er önnur stærð sem nota má til að lýsa suði frá magnara
- Suðhitastig magnara þegar lindarviðnámið er R_s er gefið með

$$T_\mathrm{n} = T\left(10^{\mathrm{NF}/10} - 1\right)$$

og

$$\mathrm{NF(dB)} = 10\log_{10}\left(\frac{T_\mathrm{n}}{T} + 1\right)$$

þar sem T er umhverfishitastig

- Einnig er

$$\mathrm{SNR} = 10\log_{10}\left(\frac{v_\mathrm{s}^2}{4kTR_\mathrm{s}}\right) - \mathrm{NF(dB)} \qquad \mathrm{dB}$$

þar sem suðtalan er við R_s

Heimildir:

- Paul Horowitz and Winfield Hill, *The Art of Electronics*, Cambridge University Press, 1989, kafli 7 bls. 428 – 436
  - Góður almennur inngangur á tiltölulega einföldu máli um suð
- H. L. Krauss, C. W. Bostian and F. H. Raab, Solid State Radio Engineering, John Wiley & Sons, 1980, kafli 2
  - Góður almennur inngangur um suð með áherslu á fjarskiptarásir
- Y. Netzer, The Design of Low-noise Amplifiers, Proceedings of the IEEE, **69** (1981) 728
  - Yfirlitsgrein um hönnun lágsuðs magnara sem ekki var farið í hér