

Mælitækni I:

Suð

Kafi 14

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

3. október 2008

1

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

2

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 gjarnan notað til að lýsa tilviljanakenndu suði, sem oftast er af varmafræðilegum uppruna

3

Suð: Tilurð og gerð

- Suð má greina með
 - tíðnirófi
 - styrkdreifingu
 - þeim eiginleikum sem því valda
- Markmiðið er alltaf að halda hlutfalli afls merkisins og affli 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

4

Suð: Tilurð og gerð

- Suðið getur orðið til innan rásar eða verið numið af rásinni frá ytri náttúrulegum eða manngerðum lindum
- Suð sem verður til í rásinni nefnum við innra suð
- Innra suð setur lægri mörk á mælingar og er fyrir hendi í öllum mælikerfum
- Innra suð stafar einkum af þremur þáttum:
 - **Varmasuð** - vegna tilviljanakenndrar hreyfingar rafeinda í leiðara eðaviðnámi
 - **Snertisuð eða $1/f$ suð** sem kemur til þegar straumur fer um ófullkomin samskeyti milli tveggja efna
 - **Skotsuð** sem kemur til þegar straumur fer yfir mættisþröskuld eins og t.d. pn-skeyti

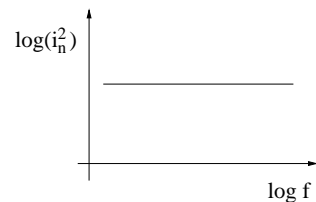
5

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

6

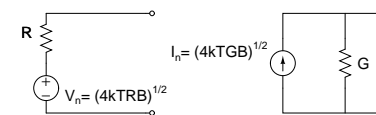
Johnson suð



- Johnson suð hefur flatt tíðniróf, stundum nefnt **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)

7

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

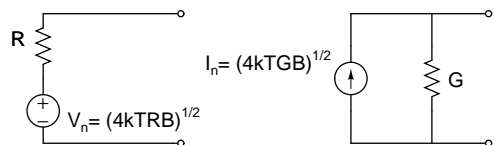
$$V_{\text{noise,rms}} = V_{nR} = (4kTRB)^{1/2}$$

þar sem

- k er fasti Boltzmann
- T er hitastigið í Kelvin
- B er bandbreidd í Hz

8

Johnson suð



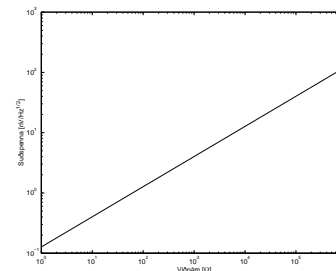
- Á sama hátt er straumurinn

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

9

Johnson suð

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



⇒ Dæmi 14.1.

⇒ Dæmi 14.2.

10

Johnson suð

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

$$p(V, V + dV) = \frac{1}{V_n \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{V^2}{2V_n^2}\right) dV$$

þannig að $p(V)dV$ eru líkur þess að augnabliksspennan liggir milli V og $V+dV$ þegar V_n er rms suðuspennan

- Mikilvægi Johnson suðs liggur í því að það setur lágsta suðstyrk sem nokkur skynjari, lind eða magnari getur haft ef í þeim eru viðnám

11

Skotsuð

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

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

þar sem

- q er hleðsla rafeindar
- B er bandvidd
- I_{dc} er jafnstraumur sem um tvistinn fer

- Æstæður straumur 1 A hefur rms flökkt 57 nA mælt með 10 kHz bandbreidd

12

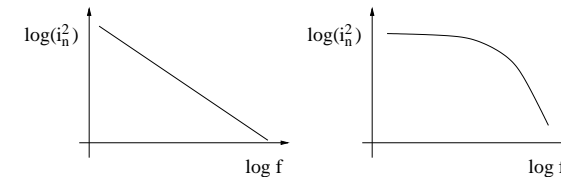
Skotsuð

- Líkanið gildir ekki um tvista sem eru bakspenntir út í niðurbrot og skriðustraum
- Þetta suð eins og Johnson suð er hvítt og Gaussískt
- 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 málni þar sem tengsl eru á milli hleðslubera
- Í tvist er hleðsluberum innspýtt með tilviljanakenndum hætti, svo að fjöldi hleðslubera flöktir frá einu augnabliki til annars

13

Snertisuð - $1/f$ -suð

- Smárar, lampar, viðnám og önnur tól sýni lágtíðnieiginleika sem þekkt er sem hvellsuð (e. flicker noise) eða $1/f$ suð
- Þá er aflþéttleikinn 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



14

Snertisuð - $1/f$ -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 $0.10 \mu\text{V}$ til $3.0 \mu\text{V}$
 - Carbon-film $0.05 \mu\text{V}$ til $0.3 \mu\text{V}$
 - Metal-film $0.02 \mu\text{V}$ til $0.2 \mu\text{V}$
 - Wire-wound $0.01 \mu\text{V}$ til $0.2 \mu\text{V}$
- Þetta suð fellur eins og $1/f$ og er stundum nefnt **bleikt suð**

15

Aflþéttleiki suðs

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

$$V_n = v_n B^{1/2} = (4kTR)^{1/2} B^{1/2}$$

- 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

16

Aflþéttleiki suðs

$$v_n = (4kTR)^{1/2} \quad \text{V/Hz}^{1/2}$$

$$v_n^2 = 4kTR \quad \text{V}^2/\text{Hz}$$

$$V_n = v_n B^{1/2} = (4kTRB)^{1/2} \quad \text{V}$$

$$V_n^2 = v_n^2 B = 4kTRB \quad \text{V}^2$$

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

$$v_n = (v_n^2 + v_s^2)^{1/2}$$

17

Suðhlutfall

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

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{P_n} = \frac{V_s^2}{V_n^2}$$

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

- Oftast er þetta þó notað sem

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{V_s^2}{V_n^2} \right) \quad \text{dB}$$

⇒ Dæmi 14.3.

18

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 afis raunverulegs magnara og suðlauss magnara með sömu mögnun, þar sem viðnámið R_s er tengt við inngang magnarans í báðum tilfellum

19

Suðtala

- Þá er Johnson suðið frá R_s inngangsmerkið

$$\text{NF} = 10 \log_{10} \left(\frac{4kTR_s + v_n^2}{4kTR_s} \right)$$

eða

$$\text{NF} = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{v_n^2}{4kTR_s} \right) \quad \text{dB}$$

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

20

Suðhitastig

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

$$T_n = T \left(10^{\text{NF}/10} - 1 \right)$$

og

$$\text{NF(dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{T_n}{T} + 1 \right)$$

þar sem T er umhverfishitastig

- Einnig er

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{v_s^2}{4kTR_s} \right) - \text{NF(dB)} \quad \text{dB}$$

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