

## 10467 Metoder og instrumenter til fysiske målinger

### Kabling – jording - afskærmning

#### Apparatur

- Halvåben aluminiumkasse (100×20 cm<sup>2</sup>) med div. kabelforbindelser (dobbelledning, skærmbændel, parsnoet kabel (eng.: twisted pair), koaksialkabel. Desuden spole og jernanker til at generere 50 Hz magnetfelt (forsyning: nettransformator).
- Box A (Fig. 3): 1 kHz, 10 mV amplitude sinusgenerator med mulighed for udgang med stelpunkt eller svævende udgang (eng.: floating output).
- Box B (Fig. 3): ×10 forstærker med stellet indgang (eng.: single ended input) eller differentiell indgang (floating or differential input) (forstærker forskellen på to terminalers spændinger). Forstærkerindgangene trækker ubetydelig strøm.
- Pulsgenerator til måling af ledermodstand og til simulering af transienter.
- Digital storage oscilloskop (DSO) til at måle og dokumentere. Billeder kan overføres til PC via OpenChoice Desktop. Oscilloskopets indbyggede averaging mode er nyttig.
- Testspole til induktiv måling af AC-spredningsfelter.
- Nettransformatorer til demonstration af spredningsfelter og jordstrømsniveauer.
- RC-led (transientbeskytter)
- Diverse kabler, ledninger, koblingsled, og ferritkerne.

#### Baggrund

Stokastisk støj, behandlet på introduktionsdagen, er uundgåelig, men dens effekt kan reduceres ved optimalt design af måleopstilling og eventuelt ved at filtrere de målte signaler passende (se filterøvelsen og lock-in forstærker øvelsen). I praksis er det dog ofte korreleret støj, som er hovedproblemet. De væsentligste årsager for signaler ved moderate frekvenser er:

- Kapacitiv (elektrisk) kobling mellem signalkabel og nærtliggende ledere, der har hurtigt varierende potentialer. Støjen er groft set proportional med forstyrrelsens frekvens og størrelse, med den gensidige kapacitans, og med impedansniveauet af signalkablet (bestemt af det forbundne kredsløb). Støjkilder er typisk pulssagtige forstyrrelser (transienter), som kommer til eksperimentet via netkablerne, der i denne forbindelse virker som transmissionslinier. Den fysiske årsag er næsten altid kontakter, der bliver åbnet eller lukket. Denne type kobling kan reduceres kraftigt ved brug af elektrisk afskærmning, dvs. skærmede signalkabler (koaksialkabler) og omhyggelig metalafskærmning ved eksperimentet. Herved reduceres den gensidige kapacitans (kun bidrag ved kabel-ender).
- Induktiv (magnetisk) kobling forårsages af tidsvariende magnetisk flux mellem lederne i signalkablet. Denne kan stamme fra strømme i nært liggende ledere eller transformatorer. Den dominerende del skyldes ofte strømme ved netfrekvensen (50 Hz), men transienter kan også give et bidrag. Brug af par-snoede signalkabler eller coaxialkabler reducerer den direkte magnetiske kobling kraftigt. Forøgelse af afstanden til magnetfeltets kilder vil også hjælpe. Man kan også forestille sig at benytte magnetisk afskærmning. Alle ledere virker magnetisk afskærmende ved høje frekvenser, men ved fx netfrekvensen kræves anvendelse af højpermeabilitets-materialer, så som mu-metal, der leder fluxen effektivt. Da dette er en dyr og besværlig løsning, benyttes den sjældent.

- Elektromagnetisk interferens skyldes opfangning af egentlige elektromagnetiske bølger, der kan komme fra fjerne kilder (fx radiobølger). Disse vil især være et problem, hvis eksperimentet foregår i det samme frekvensområde. Afhjælpning: Opstillingen placeres i et Faraday-bur (metalskærm eller -bur, der er jordet i ét punkt).
- Jordsløjfer er en mere subtil årsag til forstyrrelser og er et hovedtema i denne øvelse. Denne type støj vil forekomme, hvis der findes lav-impedante løkker, hvori den ene leder i signalkablet indgår. En tidsvarierende netto-flux igennem en sådan løkke vil inducere en emk, der driver en relativt stor strøm rundt i løkken. Små spændingsfald forårsaget af denne strøm giver støj på signalet.

Endelig beskriver vi et enkelt middel til dæmpning af højfrekvente forstyrrelser på signalkabler. Begge ledere vikles på en ringkerne af et højpermeabilitetsmateriale, typisk en ferrit, der har høj magnetisk permeabilitet og lav elektrisk ledningsevne. Her vil differentielle signaler (modsatte strømretninger på de 2 ledere) passere udæmpet, mens common mode strømme (samme strømretning) dæmpes.

## Tema

Det overordnede formål med denne øvelse er således opnåelse af en praktisk forståelse af (utilsigtet) kobling mellem strømkredse, forårsaget af restparametre for de indgående elektriske forbindelser. Med ordet "restparametre" for et lederstykke refereres til lederens resistans og selvinduktans per længde, samt dens gensidige induktans til andre kredse og dens kapacitans til andre ledere. Altså komponenter, som ikke fremgår af idealiserede kredsløbsdiagrammer.

Her skal følgende praktiske problemer behandles:

- 1) Kobling mellem forskellige signalkredse.
- 2) Kobling mellem lysnet (50 Hz) og signalkredse.

Begge problemer behandles fundamentalt på samme måde, men løsning af jordingsproblemet kræver kendskab til "støjkylderne", dvs. netforsyningen og transienter på nettet. Sidstnævnte er hurtigt varierende signaler typisk forårsaget af andre forbrugere, lynnedslag, omkoblinger mv.

Det forudsættes, at måleopstillingens fysiske udstrækning er lille sammenlignet med bølgelængden svarende til de højeste, indgående frekvenser. Det vil sige, at kobling ved elektromagnetisk stråling (elektromagnetisk interferens) ikke behandles i denne øvelse.

I det følgende gives en kort beskrivelse af, hvordan måleapparater sluttes til lysnettet. Derefter ser vi på måletekniske problemer forbundet med de såkaldte jordsløjfer, som man uundgåeligt skaber, både i relation til transienter og netforsyning. Vi skal også måle størrelsen af strømmen i apparaters jordledning og kort diskutere beskyttelse mod transienter.

## Nettilslutning og jording af apparatur

Lysnettets nulleleder er forbundet til fysisk jord ved el-selskabets forsyningstransformer, som kan ligge flere km borte. Beskyttelsesjord etableres på 2 forskellige måder:

1) Dersom der er tale om et såkaldt nulsikkert net (typisk i byområder) afgrenes beskyttelsesjord fra nullederen i bygningens hovedtavle. På grund af spændingsfald i nullederen mellem forsyningstransformeren og bygningens hovedtavle kan spændingen mellem beskyttelsesjord og fysisk jord være op til nogle volt. En forbindelse mellem måleopstillingen og fysisk jord (som skematisk angivet ved resistansen  $R_4$  og induktoren  $L_4$  på Fig. 1) kan derfor give anledning til kraftige strømme og bør undgås! (Fysisk jord er fx vandvær af jern og radiatorer; enkelte steder i bygning 309 findes en særlig afmærket referencejord, som har direkte forbindelse til en nedgravet metalplade ved bygningen. I Institut for Fysik's skærmede rum 127 og 149 i bygn. 309 er beskyttelsesjord forbundet til rummets skærm).

2) Dersom der ikke er tale om et nulsikkert net (typisk i landdistrikter), er beskyttelsesjord forbundet til et jordspyd lige uden for bygningen.

Alle moderne instrumenter forsynes fra lysnettet gennem et kabel med beskyttelsesjord (gul/grøn farve). Jordledningens absolut primære formål er personbeskyttelse ved at forhindre:

- a) livsfarlige elektriske stød pga isolationsfejl.
- b) ubehagelige elektriske stød pga kapacitansen mellem nettransformerens primær- og sekundærvikling og kondensatorer i eventuelle støjfiltre. Specielt ældre amerikansk udstyr kan give ubehagelige overraskelser.

Impedansen i jordledningerne er oftest så stor, at de er uden virkning som "signal-jord". Tværtimod vil de ofte indgå i jordsløjfer (se nedenfor), som må brydes på anden måde. Vær dog opmærksom på, at jordledningerne effektivt forhindrer høje spændingsforskelle mellem instrumenter forårsaget af dels statisk elektricitet, dels kapacitans i nettransformere.

Sådanne spændingsforskelle vil let kunne ødelægge følsomme ind- og udgange (specielt hurtige logik-kredse, f. eks. i GPIB-kort (General Purpose Interface Bus), der bruges til kommunikation mellem instrumenter og computere).

Derfor bør følgende retningslinier generelt følges:

1. Kontrollér at instrumenternes egne afbrydere er på off.
2. Forbind alle netkabler til stikkontakter med jord.
3. Forbind alle signalkabler mellem instrumenterne.
4. Tænd for instrumenterne.

### **Kredsløbsmodel for jordsløjfer**

Et eksempel på en jordsløjfe er vist i Fig. 1. Kassen A indeholder en "måleopstilling", som leverer et (svagt) signal på en BNC konnektor (hvad forkortelsen BNC står for, er der ikke enighed om, men et af de hyppigste bud er British Naval Connector). Signalet føres via et koaksialkabel til en BNC konnektor på kassen B, som kan indeholde forstærkere, filtre osv. Jordsløjfen dannes af jordledningen i netkablet til kassen A, skærmen i signalkablet og jordledningen i netkablet til kassen B.

På figuren er vist relevante restparametre:  $L_1$  og  $R_1$  er selvinduktans hhv. resistans i jordledningen til kassen A.  $L_2$  og  $R_2$  er selvinduktion hhv. resistans i jordledningen til kassen B.

L3 og R3 er selvinduktans hhv. resistans i signalkablets skærm. C1 og C2 repræsenterer viklingskapacitans i nettransformerne i kasserne A og B. Disse kapacitanser kobler transienter til jordsløjfen.

"Transformerne" T1, T2, T3 og T4 repræsenterer spændingerne, som induceres i jordsløjfen af 50 Hz spredningsfelter hovedsageligt hidrørende fra nettransformerne. Med hensyn til T3 og T4 bemærkes specielt, at der induceres samme spænding i signalkablets skærm som i inderlederen.

Det ses umiddelbart af Fig. 1, at udgangssignalet fra kassen A overføres til indgangen på kassen B overlejtret med spændingsfaldet over L3 og R3, der genereres af strømmen i jordsløjfen. Der induceres jo som nævnt samme spænding i signalkablets skærm som i inderlederen.

Her skal anføres nogle metoder til at eliminere spændingsfaldet over L3 og R3:

- 1) Man kan "klippe" jordledningen til en eller begge kasser for at afbryde strømmen i jordsløjfen. Metoden er uforsvarlig og iøvrigt uanvendelig overfor transienter.
- 2) Dersom alene transienter er et problem, kan jordsløjfen afbrydes HF-mæssigt ved at føre signalkablet en eller flere gange gennem en ferritkerne (anvendes ofte ved PC-udstyr). *Forklar princippet i denne metode.*
- 3) Ved at placere netkablerne og signalkablet passende kan man undertiden reducere det effektive areal af jordsløjfen således, at den inducerede spænding bliver tilstrækkeligt reduceret.
- 4) Jordsløjfen kan effektivt afbrydes ved at anvende svævende udgang i kassen A eller differentiell indgang i kassen B som vist i Fig. 2. Bemærk at BNC konnektorerne på kasse A og B er isoleret fra stel. (NB: Anvendes både svævende udgang og differentiell indgang, bør der anvendes et dobbeltskærmet kabel (triaksial-kabel). Den yderste skærm forbindes til stel i begge ender.).

På figuren er vist 100  $\Omega$  resistorer i operationsforstærkerens udgange. Formålet med disse modstande er at forhindre overstyring af forstærkerens udgangstrin på grund af højfrekvensindstråling. Derudover forhindres selvsving på grund af belastning med kabelkapacitanser.

### **Eksperimentelt:**

Mål ved hjælp af pulsgenerator og oscilloskop resistansen af 2 forskellige lederstykker (0.6 mm diam. tråd og skærmstrømpe ca.  $1 \times 20 \text{ mm}^2$ ). Pulsgeneratoren forbindes gennem 50  $\Omega$  resistorer. Brug millisekundpulser og en spænding på ca. 10 V over 50  $\Omega$ . Spændingen direkte over lederstykkerne måles. *Sammenlign resultaterne med en overslagsregning.*

*Forklar hvordan man principielt burde kunne måle selvinduktansen af lederne med samme instrumentation. Prøv i praksis. Gennemfør overslagsberegninger og forklar, hvorfor det er vanskeligt at måle selvinduktansen.*

*Vil spændingsfaldet over L betyde noget sammenlignet med spændingsfaldet over R ved (1) 50 Hz, (2) 100 kHz ?*

## Kabling - afskærmning for HF og transienter

---

### Ekperimentelt:

Et 10 mV signal fra en tonegenerator (Box A) føres gennem lederne i testopstillingen og måles på oscilloskopet. Transienter simuleres med pulser (10  $\mu$ s, 10-20 kHz, 10 V) på 0.6 mm tråden

- a) Uskærmede ledere: Effekten af snoning undersøges ved at sammenligne dobbeltledning og parsnoet ledning
- b) Skærmet leder: Effekten af svævende udgang på generatoren undersøges. *Hvorfor virker svævende udgang ikke ved dette forsøg?*

Signalkilden simuleres nu med en 50  $\Omega$  resistor tilsluttet venstre ende af koaksial-kablet i testopstillingen. Den anden ende forbindes til en indgang på oscilloskopet

- c) Forsøg med jord/stel forskellige steder på signalkablernes skærm.
- d) Undersøg effekten af at føre signalkablet nogle gange gennem en ferritkerne.

*Forklar observationerne.*

---

## Jordsløjfer - 50 Hz brum

---

### Ekperimentelt:

Pulsgeneratoren slukkes, og tonegeneratoren (Box A) tilsluttes igen.

Signalet (ca. 10 mV amplitude, 1 kHz) iagttages på oscilloskopet. Der frembringes nu et 50 Hz magnetfelt ved at sende ca. 2.5 A gennem en leder, som er ført 10 gange gennem testopstillingen. Bemærk et (svagt) 50 Hz "brumsignal". Prøv at forøge den inducerede brumspænding ved at anbringe en jernkerne således, at den omslutter alle lederne i testopstillingen. Lad oscilloskopet trigge på nettet.

- a) Uskærmede ledere: Dobbeltledning: Undersøg effekten af svævende udgang på kilden. Prøv at lede fluxen ind mellem lederne. Sammenlign med og uden svævende udgang. Effekten af snoning undersøges. Effekten af svævende udgang på generatoren undersøges igen. Leg lidt med jordsløjfens længde og beliggenhed.
- b) Skærmet kabel: Effekten af svævende udgang på generatoren undersøges. Undersøg virkningen af at kortslutte højre BNC-konnektors skærmforbindelse til aluminiumkassen. Anvend derefter en isolationsforstærker (Box B) med valgfri differentielt input mellem testopstilling og oscilloskop. Undersøg alle kombinationsmulighederne.

*I alle tilfælde forklares observationerne med kredsløbsmodeller indeholdende relevante restparametre. Se afsnittet "Kredsløbsmodel for jordsløjfer".*

---

**Eksperimentelt:**

Beregn  $B$ -feltet fra 50 Hz "spolen" ved en overslagsregning. Anbring en pick-up spole i 50 Hz  $B$ -feltet og mål den inducerede spænding. Beregn pick-up spolens totale vindingsareal. Hvad er det omtrentlige vindingstal?

Udregn følsomheden for pick-up spolen og mål spredningsfeltet fra en konventionel nettransformer og fra en transformer med toroidalkerne. Mål også spredningfelter omkring pulsgenerator og oscilloskop.

---

NB: Bemærk kurveformen. Dersom man observerer et støjsignal af lignende kurveform, skyldes det sandsynligvis magnetisk pick-up i en jordsløjfe. Kommentér kurveformen.

**Jording**

---

**Eksperimentelt:**

Mål strømmen i jordledningen til

- a) Konventionel nettransformer
- b) Transformer med toroidalkerne.

Målingen kan foretages v.h.j.a. oscilloskopet, idet jordstrømmen føres gennem en 10 k $\Omega$  modstand til stel på skopet (specielt koblingsled).

Kommentér målingerne.

**Opgave:** Den effektive modstand i organismen kan godt være så lav som 10 k $\Omega$ . Kan nogle af de observerede jordstrømme være farlige?

---

**Transientbeskyttelse**

Transienter er næsten altid genereret ved gnistdannelse. I stor skala: Lyn. I mindre skala: Elektriske afbrydere. Formålet med transientbeskyttelse er først og fremmest apparaturets overlevelse.

Den almindeligste forholdsregel går ud på at dæmpe transienterne så meget, at digitale kredsløb ikke påvirkes.

Ioniseringsprocessen i forbindelse med gnister er ekstremt hurtig, og transienter vil derfor have ekstrem kort stigetid, dvs have stort indhold af høje frekvenser. Spektret strækker sig ofte op til flere hundrede MHz.

Til beskrivelse af transienter indføres normalt begreberne

- 1) Differential mode støj: Ekstra spænding mellem netkablets ledere indbyrdes.
- 2) Common mode støj: Middelværdien af ekstraspændingen på netkablets ledere i forhold til "jord".

Differential mode støj dæmpes af kabelkapacitansen på grund af korte stigetider. Hvad der måtte være tilbage fjernes stort set i instrumenternes strømforsyning (nettransformer og ladeelektrolytter (udglatningskondensatorer)) og giver normalt aldrig anledning til problemer.

Problemet er common mode støj, som ikke kan afkobles af den simple grund, at der ikke er noget at afkoble til. Et forsøg på at afkoble med en kondensator til jord vil normalt være virkningsløst på grund af selvinduktans i jordledningen!

Derimod kan man afbryde højfrekvensmæssigt ved at indskyde ferritringe på netkablet til et instrument (jvf. første del af øvelsen). Common mode støj dæmpes i øvrigt ved nedgravning af elkabler. Heldigvis bliver dette mere og mere udbredt.

Det vil være en fordel at fjerne transienter hvor de opstår, fx ved at afkoble støjende kontakter med RC-led anbragt direkte over kontakten med så korte forbindelser som muligt.

---

### **Eksperimentelt:**

Forbind oscilloscopets indgang til radiatorerne gennem RC-leddet. Sæt følsomheden til 1 V/cm og triggerniveauet til ca. 0.4 V

- a) Iagttag spontane transienter med og uden RC-led.
- b) Generér transienter ved at slukke og tænde "forbrugere" (fx pulsgeneratoren) tilsluttet lysnettet

NB: Ved anvendelse af et tilstrækkelig hurtigt oscilloscop og nogen tålmodighed vil man ikke sjældent kunne registrere transienter med en maksimal spænding på 2 kV !

---

Eksempel 1: 2 PC'er, evt. placeret i 2 forskellige bygninger, forbundet med en lang RS232 forbindelse vil være ekstremt følsomme for transienter på grund af sløjfen bestående af RS232-kablet, PC-ernes netkabler og den øvrige stærkstrømsinstallation. Et lynnedslag i nærheden vil med stor sandsynlighed ødelægge en eller begge COM porte.

Nødløsning: Optokoblere mellem COM porte og RS232 kabel.

God løsning: Lyslederforbindelse.

Eksempel 2: PC med telefonmodem. Sløjfen bestående af netkabel, stærkstrømsinstallation og telefonledning til centralen vil være følsom for transienter. Beskyttelsen afhænger i høj grad af isolationsniveauet for signaltransformeren i modem.

Eneste løsning: Fjern telefonforbindelsen til modem ved risiko for tordenvejr.

---

17/05 - 2000 C. K. Bak

Sidst revideret af C.S. Jacobsen 22/5-2008







