

Kapitel 4 Kablar

Inledning

I det här avsnittet skall vi diskutera störningsaspekter på kablar som är *elektriskt korta*. Kablarnas längd är då $\ll$ våglängden för de nyttosignaler som kablarna överför, och ofta också för de störningar som faller in på dem.

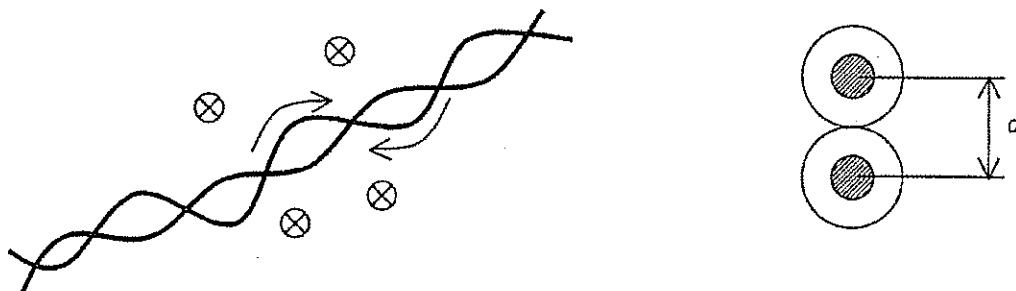
Vi kommer i huvudsak att behandla *skärmade* kablar i detta avsnitt eftersom skärmens egenskaper och relation till jord är det som är viktigt ur EMC-synpunkt.

Inverkan av balansering

Oavsett om en kabel är skärmad eller ej är det fördelaktigt med en balanserad signal. En sådan signal strålar ut mindre både elektriskt och magnetiskt. Den är också mindre känslig för störningar eftersom mottagaren av en balanserad signal måste känna en potentialskillnad. Mottagaren undertrycker likfasiga signaler (common) så att säga med automatik.

Tvinning

I ett tvinnat par utjämnas den spänning som induceras av ett yttre magnetfält genom att intilliggande slingor får motsatt polaritet:



Figur 4-1 Tvinning

Om alla slingor vore exakt lika stora och fältet homogent skulle den inducerade spänningen bli noll. I ett praktiskt fall är så inte fallet.

Men utjämnningen blir förstås bättre ju mindre slingorna är, dvs ju mindre *area* de har. Minst störningar plockas upp av en tät-tvinnad kabel av klen tråd med tunn isolation. Då blir den area som varje varv av tvinningen alstrar som minst.

Tvinningen anges oftast i antal slag per meter. För normalt förekommande parslagen industrikabel är 50 slag/m ett vanligt värde. Då gör tvinningen ett slag på 2 cm.

Slagets "bredd" utgörs av tråddiametern inklusive isolation (d i figuren ovan).

Antag att en parslagen kabel har längden ℓ och att tråddiametern är d . Då blir den totala arean A av alla slingorna i kablarn

$$A = \ell \cdot d / \sqrt{2} \quad (\text{Projektionen av slingan i ett plan är en sinusfunktion.})$$



Den effektiva störningsupptagande arean A_{eff} brukar sättas $= 1\%$ av A för en parslagen kabel av god kvalitet. Man kan säga att kabelns area-obalans är 1% . Den spänning som induceras i hela kabellängden kan uppskattas genom att man sätter in A_{eff} i exempelvis

$$\hat{u} = A_{eff} \frac{dB}{dt}$$

För icke parslagen kabel (som oftast har en viss tvinning genom att den är "vriden" som ett rep) brukar man räkna med en area-obalans av 3 – 10%.

En tvinnad kabel minskar förstås också det *utstrålade* fältet från en ström som flyter i kabeln.

Skärmade kablar

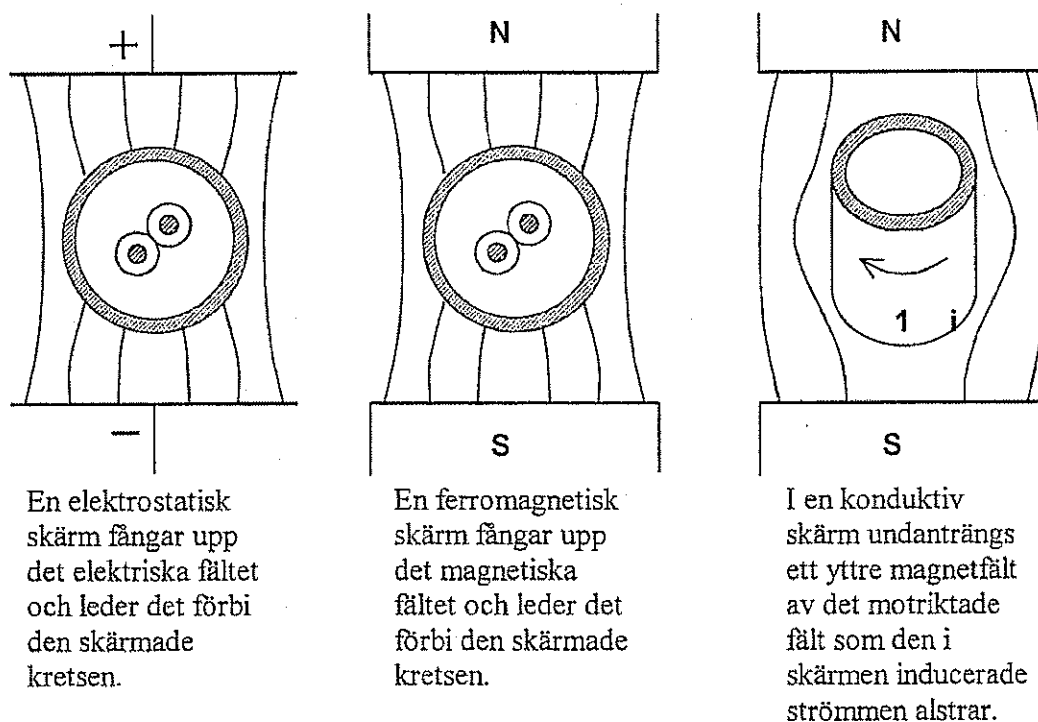
Olika typer av skärmar

Kabelskärmar kan, precis som andra skärmar, fungera på tre olika sätt:

Elektrostatisk skärm

Ferromagnetisk skärm

Konduktiv skärm



Figur 4-2 Olika typer av skärmar

En verklig skärm fungerar alltid genom en kombination av 2 eller 3 av dessa effekter. När det gäller kabelskärmar är koppar och aluminium vanligast, dessa material har givetvis ingen ferromagnetisk effekt.

Vid överföring av känsliga signaler kan det förekomma att kablarna läggs i järnrör som är ett gott skydd mot lågfrekventa magnetfält.

Olika utföranden av skärmar

De vanligaste skärmkonstruktionerna i elektroniksammanhang är:

Flätad skärm som är den vanligast förekommande och används för både låga och höga frekvenser. Den ger en flexibel kabel till låg kostnad.

En ruslindad skärm har flera lager klen koppartråd lindat runt innerledarna. Genom att de yttre lagren är skruvade åt motsatt håll mot de inre fås en mycket tät skärm. Används främst i ljudsammanhang.

Folieskärm med dräneringstråd är vanlig i industriella sammanhang, till exempel i styrsystem. Folieskärmen är av aluminium vilket ger en låg kostnad och en stor täthet som elektrisk skärm. Nackdelen är att skärmströmmen flyter nästan helt i dräneringstråden vilket ger hög kopplingsimpedans. Används till 4 - 20 mA strömsignaler som är känsliga för kapacitiva fält men som inte tar upp magnetfält så bra.

Kombinationsskärmar med till exempel fläta + folieskärm finns också och kan i bästa fall förena det goda hos de använda skärmarna.

Ferritskärmad kabel med störningsundertryckning inbyggd i kabeln finns av flera typer.

Stålfläta som fysiskt skydd är vanligt i industriellt bruk. En sådan stålfläta har en viss skärmande effekt om den jordas.

Metallrör, och speciellt järnrör, kan användas för att skapa en magnetisk skärm för känsliga ledare.

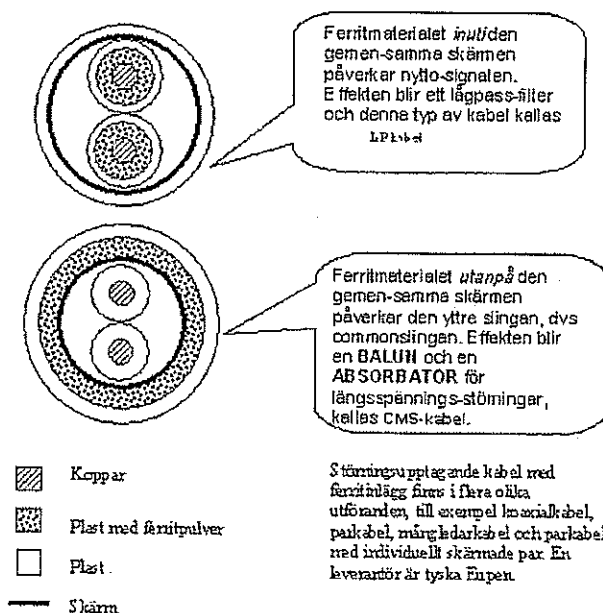
Även *flatkabel* finns med skärm, både flätad skärm och kopparfolieskärm.

Lågbruskabel kallas en koaxialkabel där skärmen är inmängd med ett grafitpulver. Den blir då inte så mikrofönisk (= känslig för stötar och vibrationer). Sådan kabel används till piezoelektriska givare. "Triboelektrisk störning"

Zippertubing är ett fabrikat av skärnmåteriel som man kan applicera på kablage i efterhand. Zippertubing viks runt kabeln och försluts med en blixtlåsmekanism, därav namnet. Den finns med en mängd olika skärnmåteriel som t ex kopparfolie, Al-folie, folier av magnetiska legeringar med mera.

Kabel som undertrycker störningar

En speciell typ av störningsundertryckande kabel får man om man blandar ett ferritpulver i de isolerande plastlagren. Effekten blir att både längsinduktans och förluster i kabeln ökar. Ferritmaterialet kan appliceras på två olika sätt:

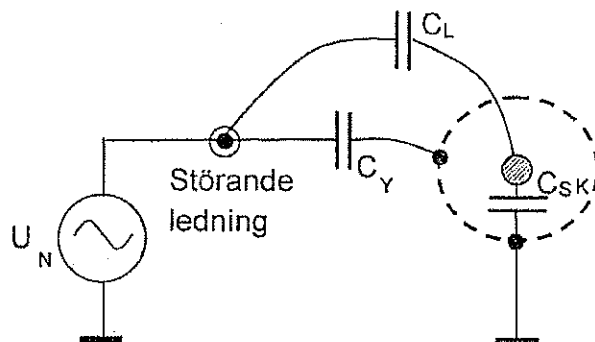


Figur 4-3 Lossy line

Lossy line® är en amerikansk produkt som funnits på marknaden sedan sextiotalet. I en lossy-line-kabel består innerledaren av en tunn tråd lindad i spiral på en kärna av plast/ferrit. Kabeln får även stor längsresistans på grund av den klena och långa innerledaren.

Läckkapacitans

Många skärmkonstruktioner som till exempel den flätade skärmen är inte helt täta utan har synliga öppningar där de elektriska fältlinjerna kan smyga sig in. Detta ger en mätbar koppling mellan signalfältet inne i kabeln och ett störningsfält utanför skärmen. Vid låga frekvenser, kabellängd $\ell \ll \lambda/2\pi$, kan man betrakta denna läckning som en *läckkapacitans* C_L . Läckkapacitansen har sorten pF/m. Vanliga värden är 0,001 till 1 pF/m.



Figur 4-4 Läckkapacitans

En yttre störning U_N dämpas genom kapacitiv spänningsdelning till

$$U_N \cdot \frac{C_L}{C_{SK}}$$

Kabelns inre kapacitans till skärm C_{SK} är vanligtvis av storleksordningen 100 till 200 pF/m.

Om den mottagande kretsen har låg impedans i förhållande till C_{SK} dämpas givetvis störningen ytterligare.

Vid beräkning av störningar via C_L är det ofta lämpligt att använda uttrycket

$$i_N = C_L \cdot \frac{du_N}{dt}$$

"Brumpickup" och läckkapacitansläckkapacitans hos några kablar

Typ av kabel:	Brumpickup från test-spole [μV]	Läckkapacitans [pF/m]
Audiokabel med ruslindad skärm "EMT"	30	0,002
Enkel flätad skärm	65	0,1
Industrikabel Telcon	110	0,04
Belden 8451	60	0,006
Folieskärmad, Al-skärm	40	0,0003
Enkel flätad skärm, billig	200	3,6
NEK typ PFSK med 60 slag/m	8	0,002
Oskärmad AWG36 med 100 slag/m	2	-
Oskärmad AWG36 med 30 slag/m	20	-

Tabellen visar en jämförande mätning på några olika kablar. Känsligheten för magnetfält jämfördes med en spole med 100 varv koppartråd på avståndet 10 cm från den testade kabeln. Ström genom spolen 4A vid 50 Hz. Läckkapacitansen är uppmätt till en jordplåt.

Testet visar bland annat att en kortslagit tvinning (många slag/m) är viktigt för att minska induktionen från *närbeliggande* storkällor. För storkällor på längre avstånd blir magnetfältet mer jämnt fördelat och tvinningen är då inte lika viktig.

Kopplingsimpedans

Enkel modell av kopplingsimpedans

En annan viktig parameter för kablar är kopplingsimpedansen som även kallas *överföringsimpedans* eller på engelska *transfer impedance*, beteckning Z_t . Kopplingsimpedansen kan definieras både för enpoliga och för differentiella förbindelser. I det senare fallet är beteckningen Z_t' .

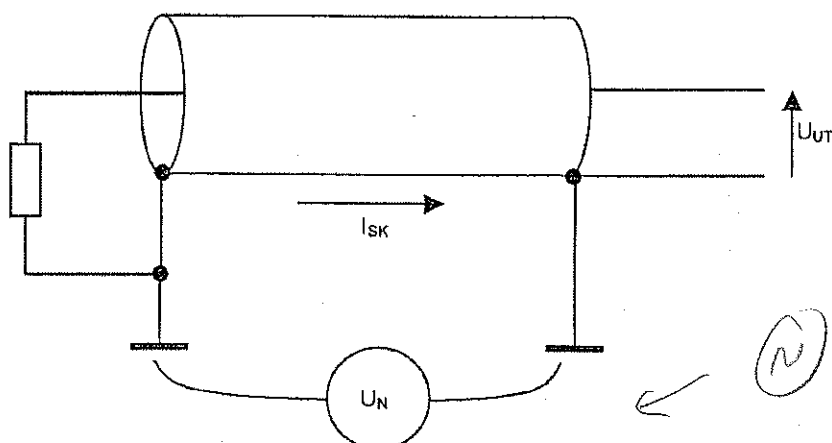
Kopplingsimpedansen är ett uttryck för hur mycket spänning kabeln tar upp när det flyter ström i skärmen. Den är frekvensberoende och anges i sorten milliohm per meter kabel, $m\Omega/m$.

Exempel: En viss kabel är 5m lång och har $Z_t = 30 m\Omega/m$. Skärmströmmen är 2A. Vad blir spänningstillskottet mellan innerledare och skärm?

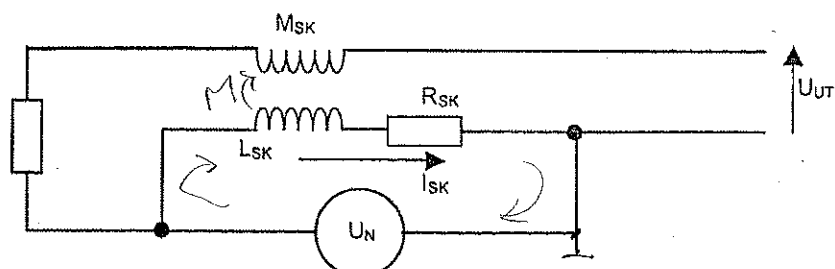
$$U_{UT} = 5 \cdot 2 \cdot 0,03 = 0,3V$$

$$U = R \cdot I = 30 m\Omega/m \cdot 5 m \cdot 2 A$$

Härledning: Se först på en koaxialkabel:



Figur 4-5 Kopplingsimpedans



Figur 4-6 Ekvivalentschema av koaxialkabel

En yttre längsspänningskälla driver en ström genom skärmen. Utspanningen blir

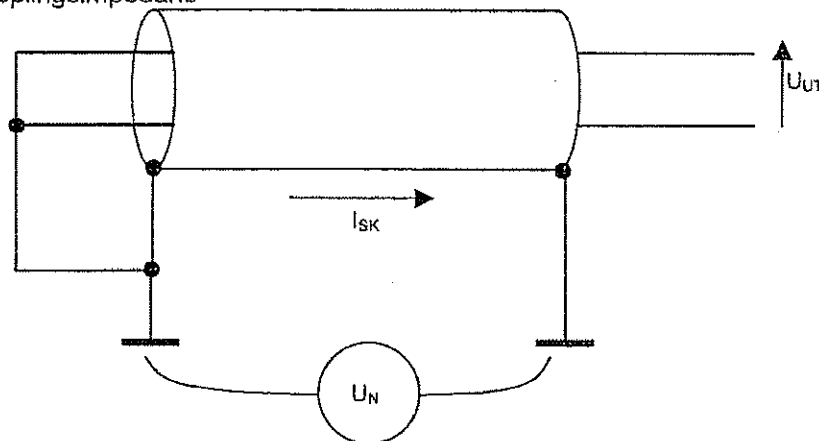
$$U_{UT} = -j\omega M_{SK} \cdot I_{SK} + j\omega L_{SK} \cdot I_{SK} + R_{SK} \cdot I_{SK}$$

Vid låga frekvenser är $M \approx L_{SK}$ och bara den resistiva delen blir kvar.

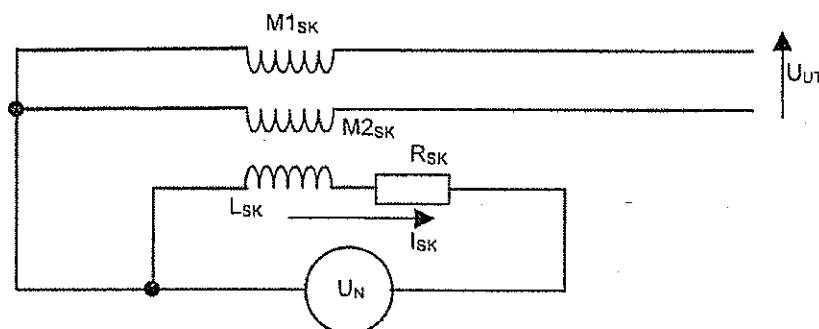
$$1/s = \frac{1}{j\omega C}$$

$$m = j\omega L$$

Differentiell kopplingsimpedans



Figur 4-7 Differentiell kopplingsimpedans



Figur 4-8 Ekvivalentschema vid differentiell kopplingsimpedans

Utspanningen blir

$$U_{UT} = -j\omega M1_{SK} \cdot I_{SK} + j\omega M2_{SK} \cdot I_{SK} \approx \cancel{\phi}$$

Teoretiskt borde M1 och M2 vara lika stora och utspänningen noll. Men på grund av olika obalanser i kabeln kommer inte potentialen i de båda ledarna att bli exakt lika utan en viss, strömberoende rest återstår. Här är alltså den differentiella kopplingsimpedansen $Z' = \frac{U_{UT}}{I_{SK} \cdot \ell}$ där ℓ = kabellängden.

$$[I_{SK}] = \frac{A}{\cancel{m^2}}$$

Typiska värden på den differentiella kopplingsimpedansen är:

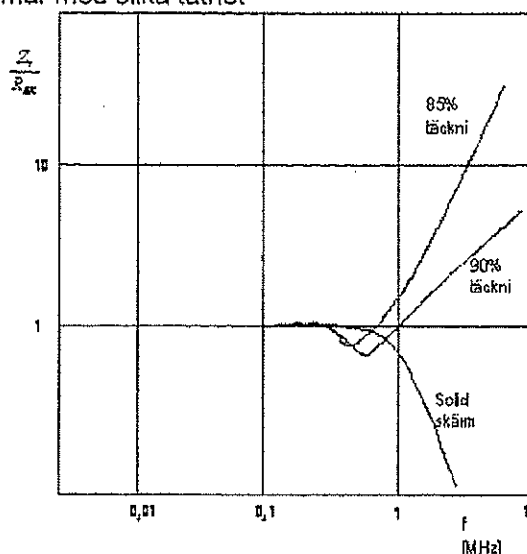
30 mΩ/m för en kabel med någorlunda tät flätad skärm.

120 mΩ/m för en folieskärmad kabel med längsgående dräneringstråd

3 mΩ/m för RG-22B/U

För en komplett analys av kopplingsimpedans i kablar, se [Vance] i litteraturlistan.

Kopplingsimpedans för skärmar med olika täthet



Figur 4-9 Kopplingsimpedans för skärmar med olika täthet

Kabeln är inkopplad till två strömkretsar, en inre som representerar nyttosignalen och en yttre som beror på längsspänningen. Den är därför omgiven av två elektromagnetiska fält, ett på insidan av skärmen och ett på utsidan.

Vid låga frekvenser beskrivs förhållandena bäst av det ekvivalenta schemat. Vid högre frekvenser måste man också ta de elektromagnetiska fälten i beaktande.

Vad som händer vid höga frekvenser beror på hur täckande skärmen är. När skärmen inte täcker helt blandas de två fälten med en ökad koppling som följd. Detta visar sig i diagrammet som en ökande kopplingsimpedans. Ju större hålen eller maskorna i skärmen är, desto tidigare börjar ökningen.

Den minskning som inträffar strax innan impedansen börjar stiga beror på att inträngningsdjupet δ börjar göra sig gällande. Det är också på grund av δ som kopplingsimpedansen sjunker för en helt tät skärm vid ökande frekvens. När skärmens tjocklek är $\gg 2\delta$ når inte strömmarna från inre och yttre kretsarna fram till varandra och någon påverkan av den ena signalen på den andra kan inte ske. Det visar sig i diagrammet som en minskande kopplingsimpedans. Ju tjockare skärmen är, desto tidigare börjar minskningen.

Andra typer av kabel

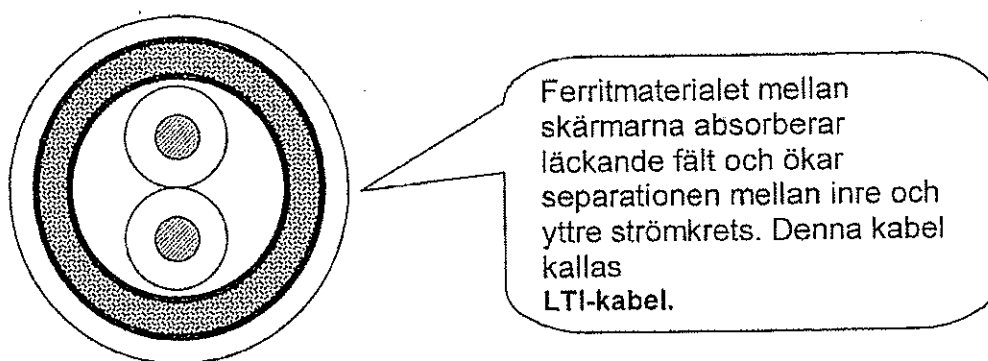
LTI-Kabel

En tredje variant av de nyss nämnda CM- och LP-kablarna är den så kallade LTI-kabeln (Low Transfer Impedance cable). Denna kabel är dubbelskärmad och har ett ferritmateriale mellan de två skärmarna. Skärmarna är flätade vilket ger en viss läckning genom maskorna i skärmen. Trots detta är kopplingsimpedansen låg vilket beror på tre faktorer:

Nyttosignalens ström flyter på den inre skärmens insida. Störströmmen flyter på den yttre skärmens utsida. Genom att skärmarna är galvaniskt skilda från varandra minskar kopplingen mellan kretsarna.

Energi som läcker genom skärmen absorberas i ferritmaterialet som förutom permeabilitet har höga resistiva förluster.

Permeabiliteten gör att induktansen i den yttre slingan ökar. Detta dämpar skärmströmmarna.



Figur 4-10 LTI Kabel

Skärmströmmar vid lågnivåsignaler.

Det är tydligt att strömmar i en kabelskärm påverkar den överförda signalen. Man kan fråga sig hur mycket skärmström en typisk lågnivåförbindelse klarar. Antag att:

Signalområdet är ± 5 mV och noggrannhetskravet 0,1%.

Kabellängden är 10m.

Kopplingsimpedansen är 50 m Ω /m vid 1MHz.

Skärmen har arean 1 mm².

Frekvensområdet är DC till 100 kHz.

Vid låga frekvenser faller den differentiella kopplingsimpedansen proportionellt med frekvensen varför man kan räkna med att den är 5 m Ω /m vid 100 kHz.

Uttrycket för differentiella kopplingsimpedansen är $Z'_{\ell} = \frac{U_{UT}}{I_{SK} \cdot \ell}$, där ℓ = kabellängden.

Vi löser ut strömmen och får $I_{SK} = \frac{U_{UT}}{Z'_{\ell} \cdot \ell}$. Den största utspänningen vi kan tillåta är $\pm 5 \mu V$, insatt ger detta en maxi-

mal skärmström av $\pm 100 \mu A$. Nu är emellertid skärmens resistans ungefär 0,17 Ω . Detta ger en maximal längsspänning mellan kabelns ändpunkter som bara är $\pm 17 \mu V$, något som är helt orealistiskt. Normala längsspänningar mellan apparater eller maskiner är av storleksordningen volt som vi tidigare har konstaterat. Slutsatsen är att vid lågnivåsignaler kan skärmen bara jordas i ena änden, i varje fall om den är elektriskt kort.

Hur specificerar en tillverkare kabel?

Vi har hittills gått igenom några ur EMC-synpunkt viktiga karakteristiska data för skärmade kablar. Men hittar man uppgifter om läckkapacitans eller tvinning i databladet? Nej oftast inte. Tyvärr är det sällsynt att en tillverkare av kabel tar upp sådana detaljer i sina kataloger.

Vanligare är givetvis tillåten spänning och ström, kabelimpedans, dämpning och grupplöptid. Ett annat sätt är att ange något som kunden primärt är intresserad av, till exempel längsta överföringsavstånd vid RS-232 eller överhörning i fram- eller backriktningen.

Det betyder att för speciella applikationer blir man tvungen att fråga tillverkarna eller att helt enkelt mäta själv.

Dielektriskt minne

Vissa plastmaterial som används i kablar och kondensatorer har olägenheten att materialet absorberar laddning. Detta resulterar i att kabeln eller kondensatorn "programmeras" med den pålagda spänningen.

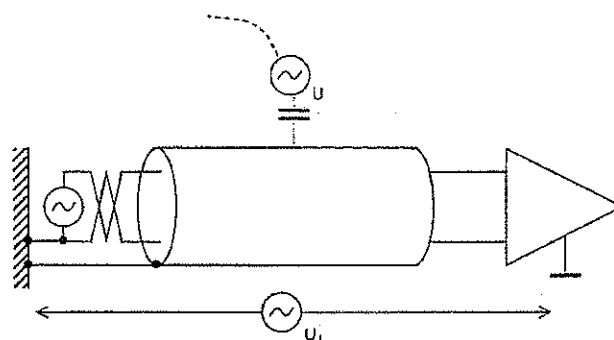
Exempel 1: En kondensator är ansluten till 100 V under en timme. Den kopplas loss och kortsluts under en minut. Efter ytterligare en timme mäts spänningen som då har återgått till 100 V (på några tiotal volt när).

Exempel 2: En kabel överför analoga signaler från flera signalkällor genom att källorna kopplas in i tur och ordning (multiplexering). Man upptäcker att överhörningen från en kanal till den efterföljande är mycket större än som kan förklaras av kretsmässiga förhållanden. Trolig orsak är då dielektriskt minne i kabeln.

Av de vanliga isolationsmaterialen är det PTFE (duPont handelsnamn "Teflon") som är bäst ur den här synvinkeln. Teflon saknar helt dielektrisk absorption.

Jordning av kabelnsskärm

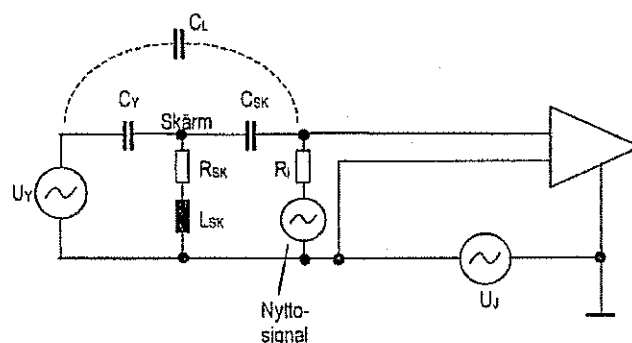
Skärmens jordning vid jordad signalkälla



Figur 4-11 Skärmens jordning vid jordad signalkälla

Det isolerande snittet ligger här i signalmottagarens ingång. Mottagaren måste kunna undertrycka längsspänningen U_j . Skärmen leder kapacitivt kopplade störströmmar till jord och skyddar därigenom signalledarna.

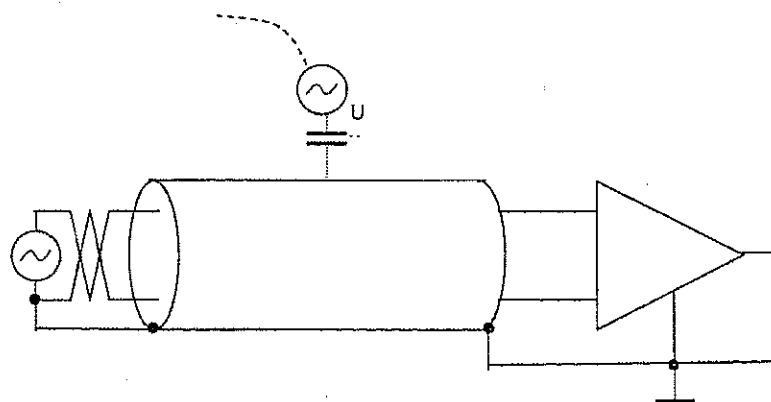
Det ekvivalenta schemat blir:



Figur 4-12 Ekvivalentschema för vid jordad singalkälla

R_{SK} och L_{SK} är skärmens resistans och induktans till jord. En stor del av denna impedans ligger i skärmens anslutningstråd till jord ("pigtail impedance")

Skärmens jordning vid flytande signalkälla

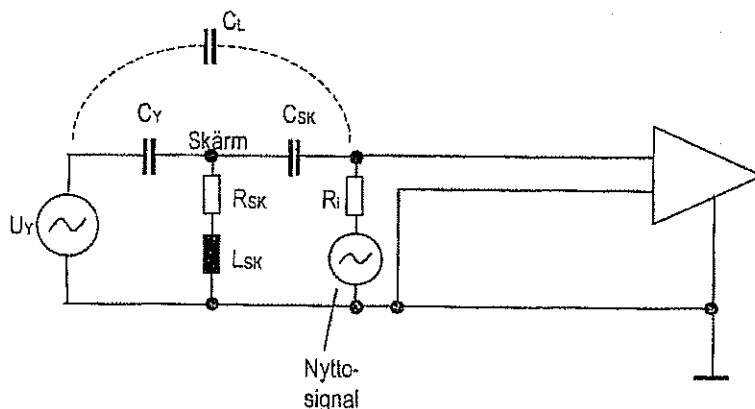


Figur 4-13 Skärmens jordning vid flytande signalkälla

I det här fallet kopplas inte längsspänningar till kretsen eftersom ingen jordanslutning finns i givaränden. Skärmen leder kapacitivt kopplade störströmmar till jord och skyddar därigenom signalledarna.

Kraven på förstärkarens CMRR blir mycket måttliga i detta fall.

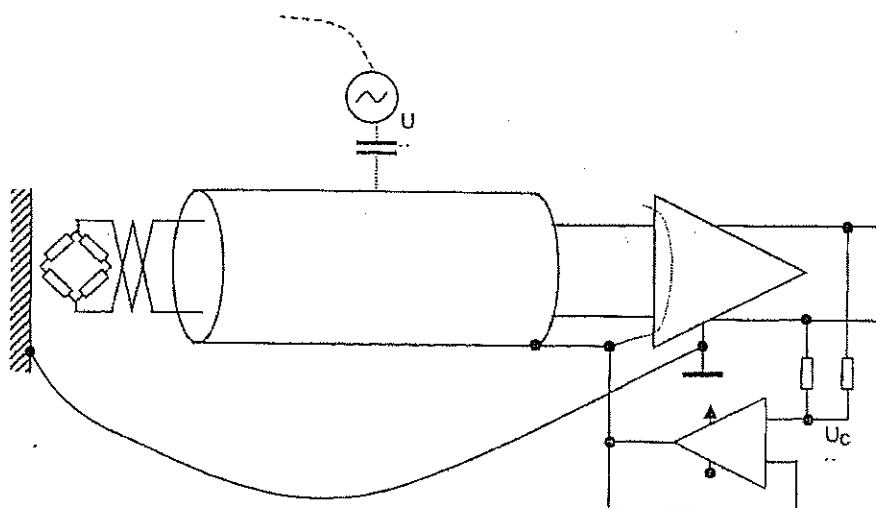
Ett fördelaktigt alternativ är att skärma signalkällan och ansluta denna skärm till kabelskärmen. Ekvivalent schema:



Figur 4-14 Ekvivalentschema vid flytande signalkälla

Skärmens jordning när signalkällan har kapacitans till jord

I detta fall kan man välja en hybrid av de två föregående fallen. Man utnyttjar då det faktum att signalkällan är flytande vid låga frekvenser men kopplad till jord vid höga frekvenser:



Figur 4-15 Skärmens jordning vid kapacitans till jord

I exemplet är signalkällan en töjningsgivarbrygga (matningen är inte inritad). Det signalmottagande organet är en förstärkare som är differentiell både in och ut. Med två lika stora motstånd på förstärkarens utgång får man längsspänningen U_{CM} . Denna matas tillbaka till kabelskärmen och också till ingångsstegets skärm, man får en så kallad *gard*, eng. *guard*.

Kopplingar med gard används inom mättekniken vid små signalnivåer eller högimpediva givare. Tillämpningar finns inom medicin och forskning.

Det isolerande snittet ligger även här i signalmottagarens ingång. Mottagaren måste kunna undertrycka den långsspänning som återstår. Skärmen leder kapacitivt kopplade störströmmar till jord och skyddar därigenom signalledarna. Följaren måste kunna leda dessa skärmströmmar till jord.

Regler för skärmens jordning

Det är mycket svårt att ge några generella regler för skärmens jordning. Följande regler är att betrakta som "grundsatser" som gäller i de enklaste fallen:

A: När skärmen är mycket kortare än störningens våglängd:

Skärmen kopplas till den punkt som bäst följer innerledarnas potential. Denna punkt måste kunna leda skärmströmmarna till jord.

Skärmen får inte jordas över det isolerandesnittet

B: När skärmen är mycket längre än störningens våglängd:

Skärmen jordas i båda ändar.

(Men det är ett annat kapitel...)

För skärmjordning i industriella sammanhang finns speciella produkter som till exempel det svenska *EMC Rox System*. Med detta system kopplas alla skärmar i en utrustning ihop till en *intagsplåt* med mycket låg överföringsimpedans för de anslutna skärmarna.