

Kapasitiivinen ja induktiivinen kytkeytyminen

EMC - Kaapelointi ja kytkeytyminen

- Kaapelointi merkittävä EMC-ominaisuuksien kannalta
 - yleensä pituudeltaan suurin elektroniikan osa => toimii helposti antennina => säteilee tai vastaanottaa häiriöitä
- Tarkastelussa johtimen pituus oletetaan huomattavasti pienemmäksi kuin signaalien aallonpituus

$$\Rightarrow \text{johtimen pituus} < \frac{\lambda_{\text{signaali}}}{20}$$

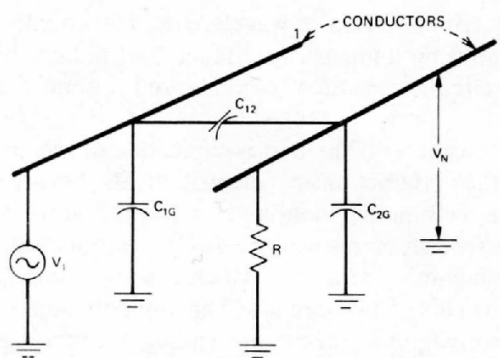
=> Häiriöiden kytkeytymistä voidaan mallintaa ja analysoida vastaavilla sähköisillä komponenteilla

EMC - Kaapelointi ja kytkeytyminen

- 3 kytkeytymistapaa
 - Kapasitiivinen kytkeytyminen
 - johtimien välillä sähkökenttä
 - Induktiivinen kytkeytyminen
 - johtimien välillä magneetikenttä
 - Sähkömagneettinen kytkeytyminen
 - molemmat kentät vaikuttavat kytkeytymiseen

EMC - Kapasitiivinen kytkeytyminen

- Kytkeytymistä kuvaava malli: johtimien välinen keskinäiskapasitanssi



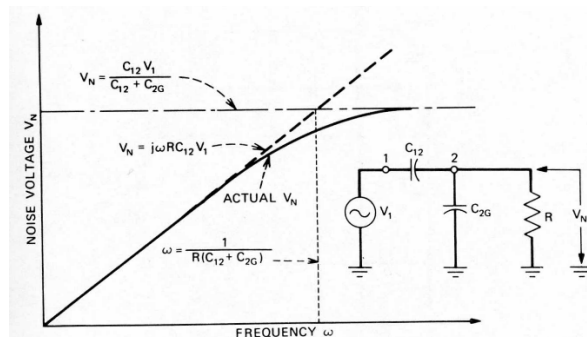
EMC - Kapasitiivinen kytkeytyminen

- Kun
$$R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G})}$$
 - kytkeytyvä häiriöjännite on suoraan verrannollinen
 - vastaanottimena toimivan piirin ja maapotentiaalin väliseen resistanssiin R
 - johtimien 1 ja 2 väliseen keskinäiskapasitanssiin C_{12}
 - jännitteen V_1 amplitudiin ja taajuuteen ($\omega = 2\pi f$)
 - yleensä taajuuteen ja amplitudiin ei voida vaikuttaa
 - => kytkeytymisen vaimentaminen
 - pienennetään joko R tai C_{12}
 - kapasitanssiin vaikuttaa
 - johtimien välinen etäisyys ja orientaatio
 - johtimen suojaaminen

EMC - Kapasitiivinen kytkeytyminen

- Kun
$$R \gg \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G})}$$

- häiriöjännite ei riipu taajuudesta



Häiriöjännitteen taajuusriippuvuus

EMC - Keskinäiskapasitanssi

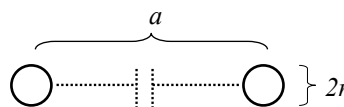
- Kahden tyhjiössä olevan johtimen välinen kapasitanssi:

$$C_m = \frac{\pi \cdot \varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{a}{\sqrt{r_1 \cdot r_2}}\right)} [\text{F}]$$

a = johtimien etäisyys

l = johtimien pituus

r_1, r_2 = johtimien säteet

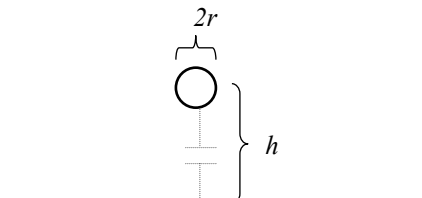


kaavat: Häkkinen, Fallström, Haapalinna - Häiriökysymykset, 1996

EMC - Keskinäiskapasitanssi

- Johtimen ja maapotentiaalin välinen keskinäiskapasitanssi:

$$C_m = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{h + \sqrt{h^2 - r^2}}{r}\right)} [\text{F}]$$



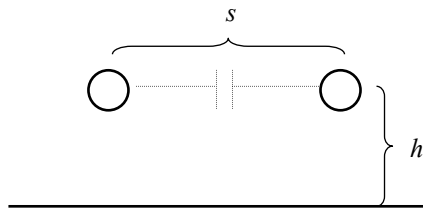
kaavat: Häkkinen, Fallström, Haapalinna - Häiriökysymykset, 1996

EMC - Keskinäiskapasitanssi

- Kahden maapinnan yläpuolella olevan johtimen keskinäiskapasitanssi:

$$C_m = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot l \cdot \ln \frac{\sqrt{s^2 + 4h^2}}{s}}{\left(\ln \frac{4h}{d}\right)^2 - \left(\ln \frac{\sqrt{s^2 + 4h^2}}{s}\right)^2} [\text{F}]$$

- s = johtimien välinen etäisyys
 h = johtimien korkeus maatasosta
 l = johtimien pituus (samansuuntainen)
 d = johtimien halkaisija
oletus: $h > d$ ja $s > d$



kaavat: Häkkinen, Fallström, Haapalinna - Häiriökysymykset, 1996

EMC - Keskinäiskapasitanssi

- Esimerkki:

Kaksi johdinta kulkevat laitekotelon sisällä samansuuntaisesti 30cm matkan, jolloin niiden välinen etäisyys on 5mm.

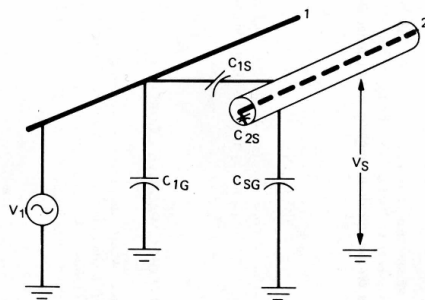
Johtimien halkaisija on 2mm ja niiden korkeus maatasosta on 5cm.

Johtimessa 1 kulkee kellosignaali, jonka amplitudi on 5V ja taajuus $f = 100\text{kHz}$.

Mikä on johtimeen 2 kytkeytyvän häiriön amplitudi, jos johtimen ja maapotentiaalin välinen resistanssi $R = 1\text{k}\Omega$?

EMC - Kapasitiivinen kytkeytyminen

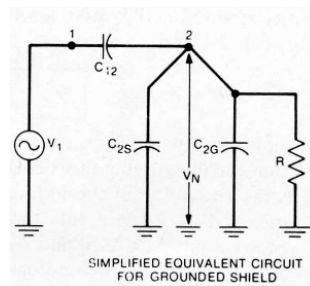
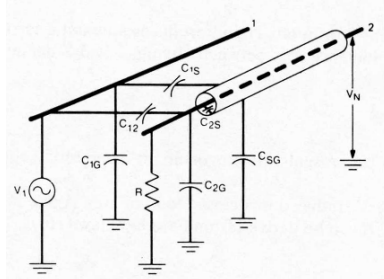
- Signaalijohtimen suojaaminen:



H.W. Ott - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems

EMC - Kapasitiivinen kytkeytyminen

- Signaalijohtimen osittainen suojaaminen:



- Tehokas suojaus:
 - maadoita suoja huolellisesti
 - mahdollisimman pieni osa signaalijohdinta ulottuu suojan ulkopuolelle

H.W. Ott - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems

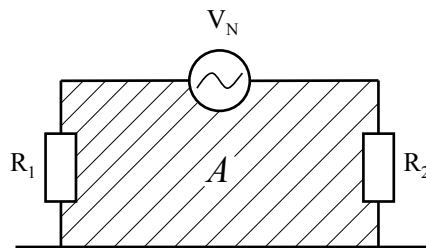
EMC - Induktiivinen kytkeytyminen

- Muuttuva magneettikenttä indusoi jännitteen johdinsilmukkaan

- Faraday:

$$V_N = \frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

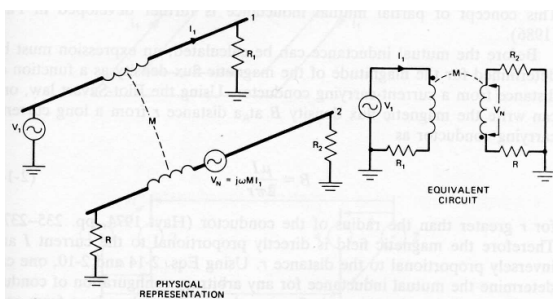
$$\Rightarrow V_N = j\omega BA \cos \theta$$



θ = magneettivuon ja johdinsilmukan välinen kulma

EMC - Induktiivinen kytkeytyminen

- Induktiivista kytkeytymistä kuvaava sijaiskytkentä:



$$\phi = BA = LI$$

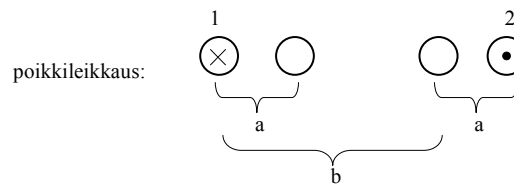
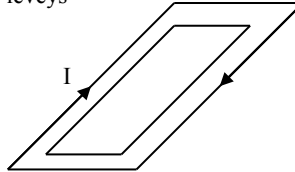
$$\Rightarrow V_N = j\omega BA \cos \theta$$

$$M_{12} = \frac{BA}{I_1}$$

$$\Rightarrow V_N = j\omega M_{12} I_1 \cos \theta$$

EMC - Keskinäisinduktanssi

- Esimerkki:
 - Laske kahden sisäkkäisen johdinsilmukan välinen keskinäisinduktanssi.
 - oletus: silmukoiden pituus \gg leveys

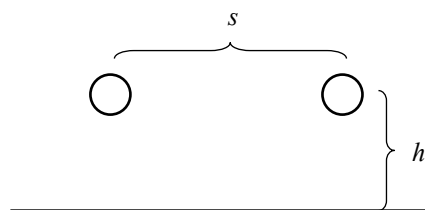


EMC - Keskinäisinduktanssi

- Kahden maapinnan yläpuolella olevan saman suuntaisen johtimen keskinäisinduktanssi:

$$L_m = M_{12} = \frac{\mu_r \mu_0 \cdot l}{2\pi} \ln \sqrt{\frac{s^2 + 4h^2}{s}} \text{ [H]}$$

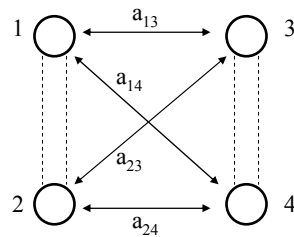
- l = johtimien pituus
(saman suuntainen osuus)
- h = korkeus maatasosta
- s = johtimien välinen etäisyys
($s \gg$ johtimien säde)



EMC - Keskinäisinduktanssi

- Kahden johdinparin keskinäisinduktanssi:

$$L_m = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi} \ln\left(\frac{a_{14} \cdot a_{23}}{a_{13} \cdot a_{24}}\right) [\text{H}]$$



EMC - Induktiivinen kytkeytyminen

- Kytkeytyvän häiriöjännitteen vaimentaminen
 - pienennä signaalin taajuutta
 - pienennä magneettivuon tiheyttä kasvattamalla johdinsilmukoiden välistä etäisyyttä
 - pienennä vastaanottimen toimivan silmukan kokoa
 - muuta johtimien orientaatiota

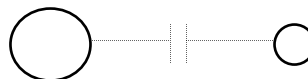
EMC - Kapasitiivinen ja induktiivinen kytkeytyminen

- Ero:
 - kapasitiivinen: häiriö aiheuttaa virran vastaanottimena toimivan johtimen ja maapotentiaalin välille
 - häiriölähteen tyyppi: jännite
 - induktiivinen: häiriö aiheuttaa jännitteen vastaanottimena toimivaan johtimeen
 - häiriölähteen tyyppi: virta
- Kytkeytymistavan määrittäminen:
 - mittaa vastaanottimen ja maapotentiaalin välinen jännite vastuksen R_1 yli
 - pienennä johtimen ja maapotentiaalin välistä resistanssia R_2
 - => jos häiriöjännite kasvaa => magneettinen kytkeytyminen
 - => jos häiriöjännite pienenee => kapasitiivinen kytkeytyminen

EMC - Keskinäiskapasitanssi

- Maan ja kuun välinen keskinäiskapasitanssi:

$$C_m = \frac{4\pi \cdot \varepsilon}{\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} - \frac{2}{d}\right)} [\text{F}] ; r_1, r_2 \ll d$$



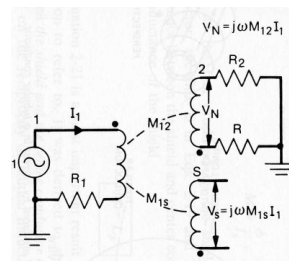
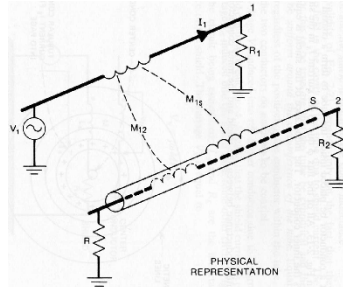
- d = kappaleiden etäisyys (keskipisteet) ($\approx 300\,000$ km)
- r_1 = maapallon säde (≈ 6000 km)
- r_2 = kuun säde (≈ 1800 km)
- $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ [Nm²]

EMC - Induktiivinen kytkettyminen ja suojattu kaapeli

- Kaapelin suojaan indusoituu häiriö suojan ja johtimen 1 välisen keskinäisinduktanssin vaikutuksesta

- jos suoja ei ole maadoitettu, tai se on maadoitettu vain yhdestä kohdasta
=> suojan päiden välille indusoituu jännite, mutta suojaassa kulkeva virta $I_s = 0$

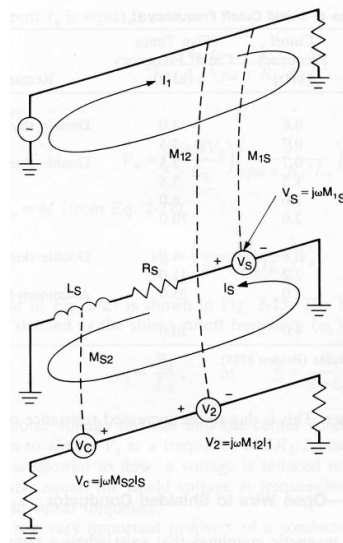
=> maadoittamattomalla tai yhdestä kohdasta maadoitetulla suojalla ei vaikutusta induktiiviseen kytkettyymiseen



H.W. Ott - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems

EMC - Induktiivinen kytkettyminen ja suojattu kaapeli

- Maadoitetaan suoja molemmista päistä
=> suojaan indusoituu virta I_s
=> suojan ja sisäjohtimen välillä keskinäisinduktanssi
=> virta I_s indusoi sisäjohtimeen jännitteen V_C
=> indusoitunut jännite vastakkaisuuntainen jännitteen V_2 kanssa
=> häiriöjännitteet kumoavat toisensa
- Johtimen ja suojan välinen induktanssi tunnettava



H.W. Ott - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems

EMC - Induktiivinen kytkeytyminen ja suojattu kaapeli

- Johtimen ja suojan välinen keskinäisinduktanssi

- sylinterimäinen johdin, jossa tasaisesti jakautunut virta

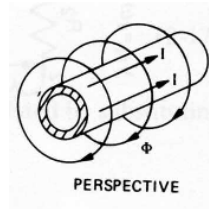
=> virran indusoima magneettikenttä johtimen ympärillä

=> johtimen induktanssi: $L_S = \frac{\phi}{I_S}$

- laitetaan sylinterijohtimen sisälle toinen johdin (signaalijohdin)

=> johtimien välinen keskinäisinduktanssi: $M = \frac{\phi}{I_S}$

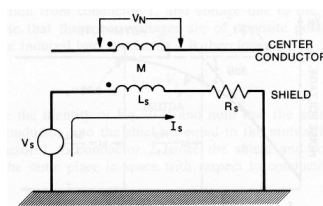
=> magneettivuot samat => $M = L_S$



H.W. Ott - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems

EMC - Induktiivinen kytkeytyminen ja suojattu kaapeli

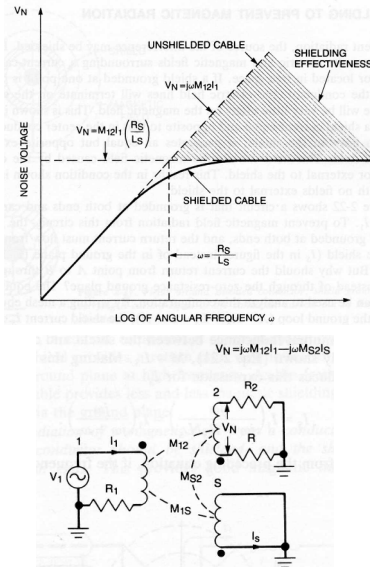
- Johtimen ja suojan keskinäisinduktanssin vaikutus:



H.W. Ott - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems

EMC - Induktiivinen kytkeytyminen ja suojattu kaapeli

- Alhaisilla taajuuksilla induktiivinen kytkeytyminen sama kuin suojaamattomalla kaapelilla
- Korkeammilla taajuuksilla johtimen ja suojan keskinäis-induktanssin vaikutuksesta kytkeytyminen vaimenee



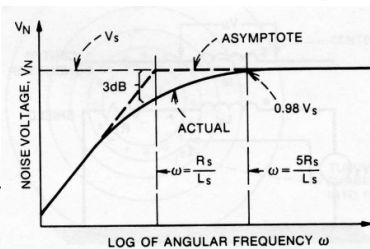
H.W. Ott - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems

EMC - Induktiivinen kytkeytyminen ja suojattu kaapeli

Table 2-1 Measured Values of Shield Cutoff Frequency (f_c)

Cable	Impedance (Ω)	Cutoff Frequency (kHz)	Five Times Cutoff Frequency (kHz)	
Coaxial cable				
RG-6A	75	0.6	3.0	Double shielded
RG-213	50	0.7	3.5	
RG-214	50	0.7	3.5	Double shielded
RG-62A	93	1.5	7.5	
RG-59C	75	1.6	8.0	Double shielded
RG-58C	50	2.0	10.0	
Shielded twisted pair				
754E	125	0.8	4.0	Double shielded
24 Ga.	—	2.2	11.0	
22 Ga.*	—	7.0	35.0	Aluminum-foil shield
Shielded single				
24 Ga.	—	4.0	20.0	

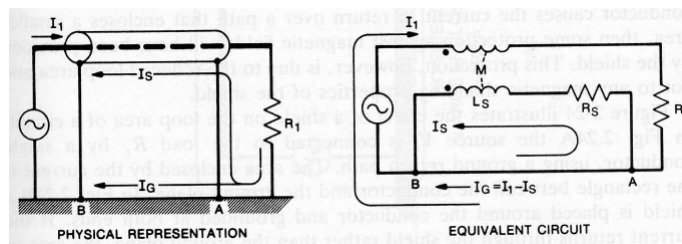
*One pair out of an 11-pair cable (Belden 8775).



H.W. Ott - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems

EMC - Induktiivinen kytkettyminen ja suojattu kaapeli

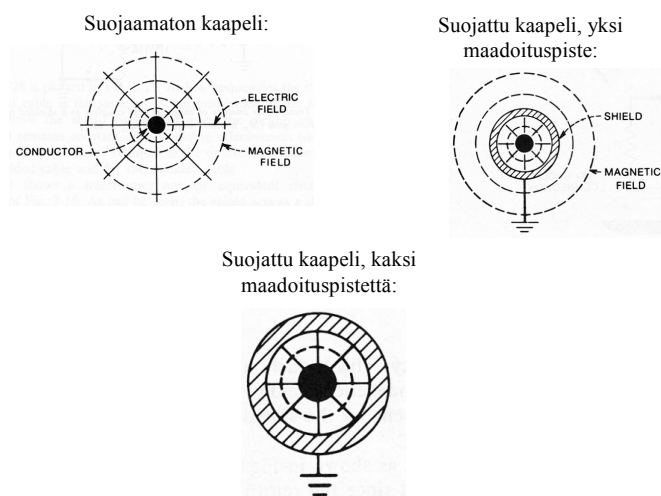
- Virtamuotoisen häiriölähteen vaimentaminen
 - suojattu johdin
 - maadoitus johtimen molemmista päistä
 => keskinäisinduktanssin vaikutuksesta paluuvirta kulkee suoja pitkin
 => paluuvirran indusoima magneettivuo kumoaa johtimessa kulkevan virran magneettivuon => ei häiriötä



H.W. Ott - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems

EMC - Induktiivinen kytkettyminen ja suojattu kaapeli

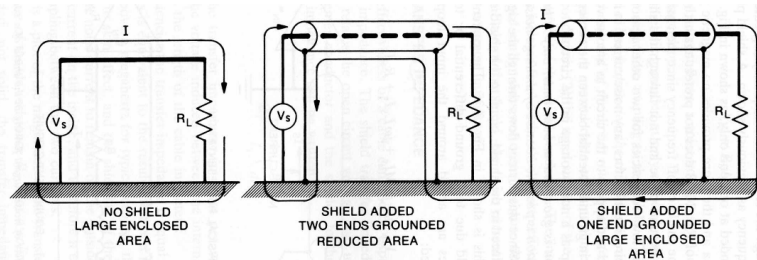
- Virtamuotoisen häiriölähteen vaimentaminen:



H.W. Ott - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems

EMC - Induktiivinen kytkeytyminen ja suojattu kaapeli

- Induktiiviselta häiriöltä suojautuminen
 - sama menetelmä kuin häiriölähteen vaimentamisessa
 - => minimoidaan johdinsilmukka maadoittamalla suoja kaapelin molemmista päistä

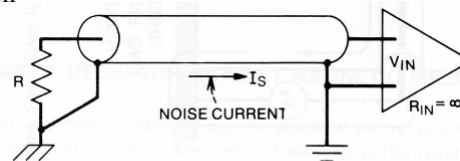


H.W. Ott - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems

EMC - Induktiivinen kytkeytyminen ja suojattu kaapeli

- Maadoituksen kääntöpuoli:

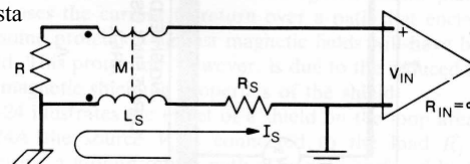
- Pitkä johdin => maapotentiaalien välillä jännite-ero => suojaa pitkin kulkee maavirta I_S
- => häiriöjännite $V_S = R_S I_S$



PHYSICAL REPRESENTATION

- Optimaalinen suojaus

- erillinen suoja, joka maadoitettu molemmista päistä
- signaalijohtimet erillään suojasta ja maapotentiaalista vähintään toisessa päässä johdinta



EQUIVALENT CIRCUIT

H.W. Ott - Noise Reduction Techniques in Electronic Systems