

6.YLIJÄNNITE- JA HÄIRIÖSUOJAUS

6.1. Eristyskoordinaatio

Yleistä

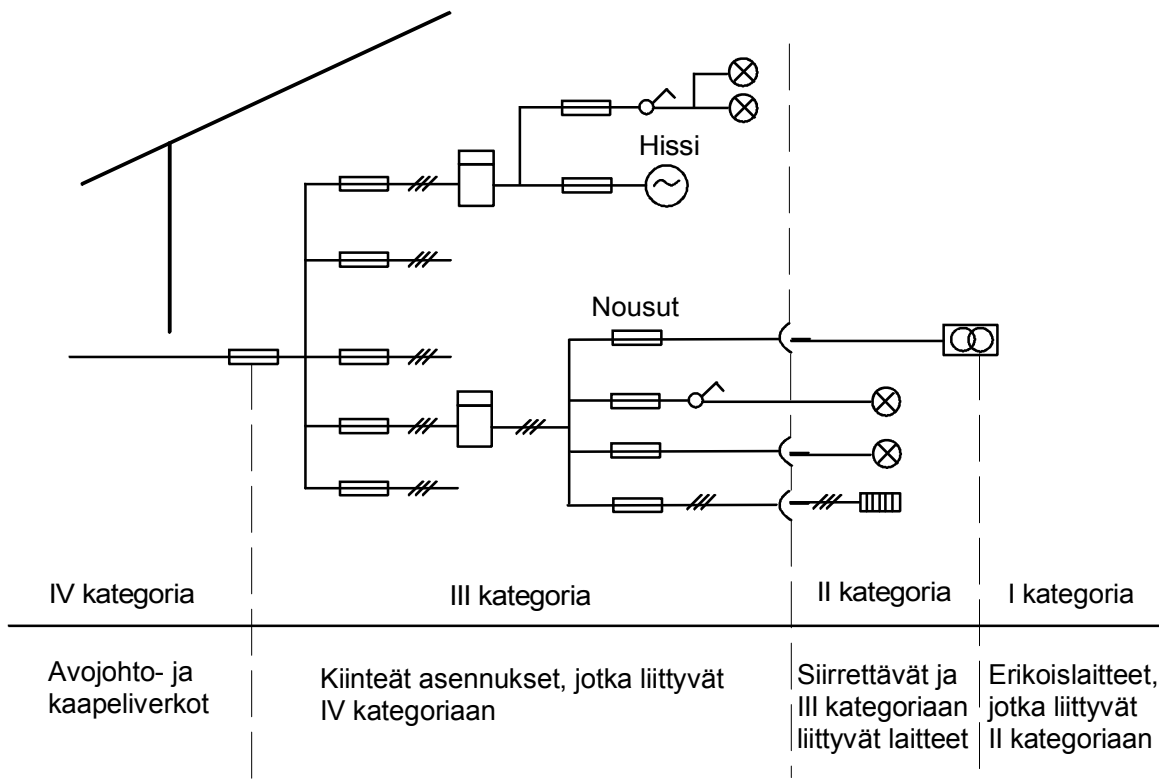
Eristyskoordinaatiolla tarkoitetaan laitteiden jännitelujuuden valintaa ja soveltamista suhteessa verkossa esiintyviin ylijännitteisiin ja suojalaitteiden ominaisuuksiin siten, että eristysvaurioiden ja käyttökeskeytysten esiintymistodennäköisyys alenee taloudellisesti hyväksyttävälle tasolle.

Eristysvaurioiden syntymiseen vaikuttavat:

- eristysrakenteisiin kohdistuvat rasitukset, joita ovat:
 - jatkuva käyttötaajuinen jännite,
 - ylijännitteet,
 - hetkelliset ylijännitteet,
 - kytkentäylijännitteet ja
 - ilmastolliset ylijännitteet.
- eristysrakenteiden jännitelujuus, joka riippuu itse eristysrakenteiden mittojen ja muotojen lisäksi mm. seuraavista seikoista:
 - jännitemuoto ja polariteetti,
 - ilmastolliset olosuhteet (paine, lämpötila, kosteus),
 - sade ja
 - likaantuminen.

6.1.1. Pienjännite-eristyskoordinaatio

Standardissa IEC 60664-1 pienjännitteen eristystasot on jaettu neljään kategoriaan, jotka ilmenevät kuvasta 6.1a. Taulukossa 6.1a on esitetty mitoitusyökykestoajännitteet.



KUVA 6.1a. Eristyskategoria pienjännitteellä.

Taulukko 6.1a. Piejännitelaitteiden mitoituskestojännitteet.

Järjestelmän nimellisjännite V		Vaihejännite (AC tai DC) V	Mitoituskestojännite (Syöksyjännite) 1)			
Kolmi- vaiheinen	Yksi- vaiheinen		Ylijännitekategoriat			
			I	II	III	IV
230/400 277/480 400/690 1000	120-240	50	330	500	800	1500
		100	500	800	1500	2500
		150	800	1500	2500	4000
		300	1500	2500	4000	6000
		600	2500	4000	6000	8000
		1000	4000	6000	8000	12000

1) Vastaa syöksykoejännitettä 2000 m korkeudella merenpinnasta. Koe tehdään yleensä alempana, jolloin koejännitettä korotetaan.

6.1.2. Suurjännite-eristyskoordinaatio

Standardissa IEC 60071-1 suurjännitteen eristystasot on jaettu suurimman käyttöjännitteen U_m perusteella kahteen ryhmään, jotka on esitetty taulukoissa 6.1b ja 6.1c .

Taulukko 6.1b. I ryhmä $1 \text{ kV} < U_m \leq 245 \text{ kV}$

Laitteen suurin käyttöjännite U_m (r.m.s) kV	Käyttötaajuinen kestokoejännite U_w (r.m.s) kV	Syöksyjännite kestoko- keissa \hat{u}_w (huippuarvo) kV
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17,5	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52	95	250
72,5	140	325
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050

Taulukko 6.1c. Ryhmä $U_m \geq 300$ kV.

Laitteen suurin käyttöjännite U_m (r.m.s) kV	Kytkejäännite kestokokeissa U_w (huippuarvo)/kV			Syöksyjännite kestokokeissa U_w (huippuarvo) kV
	Pitkittäiseristys (Erotusväli) 1)	Maaeristys	Vaihe-eristys (suhde maa-eristykseen)	
300	750	750	1,50	850
	750	850		950
362	850	850	1,50	950
	850	950	1,50	1050
420	850	850	1,60	1050
	950	950	1,50	1175
	950	1050	1,50	1300
525	950	950	1,70	1425
	950	1050	1,60	1300
	950	1175	1,50	1550
765	1175	1300	1,70	1675
	1175	1425	1,70	1800
	1175	1550	1,60	1950
				2100

1) Kytkejäännitteen arvo yhdistetyssä kokeessa

6.1.3. Vapaat ilmvälit

Sähköverkon komponenttien jännitelujuus saadaan varmimmin selville koestamalla. Mikäli tämä ei ole mahdollista, voidaan ilmaeristeisten rakenteiden vapaina ilmväleinä käyttää standardien IEC 60071-2 ja IEC 60071-3 mukaisia arvoja, jotka on esitetty taulukoissa 6.1d ja 6.1e. Taulukossa 6.1d on annettu myös standardin IEC 60076-3-1 suosittelemat ilmvälit muuntajien läpivienneissä.

Taulukko 6.1d. Vapaat ilmvälit IEC-standardien mukaan, $U_m < 300$ kV.

Syöksyjännite kestokokeissa kV	Vapaa minimi-ilmaväli mm		Vapaa minimi-ilmaväli muuntajien läpivienneissä mm
	Maaeristys	Vaihe-eristys	
20		60	
40	60	60	60
60	90	90	90
75	120	120	125
95	160	160	170
125	220	220	225
145	270	270	275
170	320	320	315
250	480	480	450
325	630	630	630
450	900	900	830
550	1100	1100	1050
650	1300	1300	1250
750	1500	1500	1450
850		1700	1600
950		1900	1800
1050		2100	

Taulukko 6.1e. Vapaat ilmvälit IEC-standardien mukaan, $U_m \geq 300$ kV.

Jännitteet kestokokeissa		Vapaa minimi -ilmaväli m			
KytKentä jännite kV	Syöksyjännite kV	Maaeristys		Vaihe-eristys	
		Johdin- rakenteet	Putkiraken- teet	Johdin – joh- din rinnakkain	Putkijohdin
(650)	750	1,4	1,5		
(650)	850	1,5	1,7		
750	850	1,6	1,9		
750	950	1,7	1,9		
850	950	1,8	2,4		
850	1050	1,9	2,4		
950	1050;1175	2,2	2,9		
1050	1175; 1300;1425	2,6	3,4		
1175	1300;1425;1550	3,1	4,1	2,4	2,8
1300	1425;1550;1800	3,6	4,8	2,7	3,2
1425	1550;1800;2100	4,2	5,6	3,1	3,6
1550	1800;1950;2400	4,9	6,4	3,5	4,1
1675				3,9	4,6
1800				4,3	5,2
1950				4,9	5,9
2100				5,6	6,8
2250				6,3	7,7
2400				7,1	8,8
2550				7,9	10,0

6.1.4. Sähköturvallisuusmääräysten vaatimukset vapaille ilmapäleille

Taulukossa 6.1f on esitetty Sähköturvallisuusmääräysten A1-1993 mukaiset paljaiden jännitteisten osien vähimmäisetäisyydet toisistaan ja jännitteettömistä osista. Vaatimukset eivät koske SETI:n hyväksymien rakenne- ja koestusmääräysten mukaisia tehdasvalmisteisia sähkölaitteita, joiden on koestamalla todettu kestävän SETI:n hyväksymien rakenne- ja koestusmääräysten mukaiset koejännitteet.

Taulukko 6.1f. Pienimmät sallitut vapaan ilmapälin arvot.

Järjestelmä	Vapaa ilmapäli/m			
	Nimellisjännite	Jännitteettömistä osista ja jännitteisten osien välillä (samassa järjestelmässä)	Erottimella erotettavissa olevien osien välillä (samassa järjestelmässä)	Pienempijännitteisen järjestelmän virtapiiriin kuuluvista osista
kV	kV			
≥1,1	≥1	0,03		
3,6	3	0,06	0,08	0,12
7,2	6	0,09	0,11	0,18
12	10	0,12	0,15	0,24
24	20	0,22	0,26	0,35
36	30	0,32	0,38	0,50
52	45	0,48	0,57	0,75
123	110	1,15	1,40	1,70
245	220	1,96 1)	2,30	2,90 1)
420	400	3.35 1)	3,90	5,00 1)

1) Arvot edellyttävät, että järjestelmä on tehollisesti maadoitettu.

6.2. Ylijännitesuojaus

6.2.1. Yleistä

Ylijännitesuojien tehtävänä on rajoittaa suojattavaan kohteeseen saapuvien ylijännitteiden amplitudi vaarattomalle tasolle. Tähän päästään valitsemalla suojauslaitteet ja suojattavien kohteiden eristystaso eristyskoordinaation periaatteiden mukaisesti siten, että suojalaitteen suojaustason ja suojattavan kohteen kestotason väliin jää riittävä marginaali. Ylijännitesuojauksen optimointi on vaikea ja kallis tehtävä. Tärkeintä on kuitenkin sijoittaa ylijännitesuoja mahdollisimman lähelle arvokkainta suojattavaa kohdetta, joka useimmiten on muuntaja. Näin sijoitettuna suojalaite yleensä suojaa riittävän tehokkaasti myös muut kohteet edellyttäen, että suoja on valittu oikein.

6.2.2. Ylijännitesuojien ominaisuudet

Aikaisemmat suojatyypit olivat levykipinävälisuoja ja aktiivikipinävälisuoja. Uusin suojatyyppi on metallioksidisuoja, jonka suojaustaso on huomattavasti parempi kuin vanhemmilla suojatyypeillä. Tavallisin metallioksidisuoja on ZnO-suoja.

ZnO-suojien valinnassa käytettyjä käsitteitä ovat:

Nimellisjännite tarkoittaa käyttötaajuuden jännitteen tehollisarvoa, jolla suojan kestoaika on 1000 s.

Jännösjännite tarkoittaa suojan liittimien välillä ylijännitteen purkauksen aikana esiintyvää suurinta jännitettä.

Suojaustaso on sama kuin jäännösjännite, joka ilmoitetaan kytkentäjännitteelle ja 8/20 μ s syöksyjännitteelle.

Virtakestoisuus annetaan 2000 μ s suorakulma-aallon virralle ja 4 / 10 μ s syöksyvirralla.

Energiakestoisuus ilmoitetaan nimellisjännitettä kohden (kJ/kV).

Jatkuva jännite, jolla suojaa voidaan käyttää aikarajoituksitta on korkeintaan 80 % nimellisjännitteestä.

6.2.3. Ylijännitesuojien valinta

Vaihesuojaa valittaessa ZnO-suojan nimellisjännite U_N valitaan maasulkukertoimen ja maasulun kestoajan perusteella. Suomessa voidaan soveltaa seuraavia maasulkukertoimen arvoja, mikäli tarkempia tietoja ei ole käytettävissä:

- eristetyissä ja sammutetuissa verkoissa $K_E = 1,8$,
- osittain maadoitetussa osassa 123 kV verkkoa $K_E = 1,7$ ja
- tehollisesti maadoitetuissa 245 ja 420 kV verkoissa $K_E = 1,4$.

Mikäli muita jännitteen nousuja ei tarvitse ottaa huomioon, valitaan ZnO-suojan nimellisjännitteeksi U_N arvo

$$U_N = K_T \cdot K_E \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

jossa U_m = on verkon suurin sallittu käyttöjännite ja
 K_T = on maasulun kestoajasta riippuva kerroin, jolle voidaan käyttää seuraavia arvoja, mikäli tarkempia tietoja ole käytettävissä:

Maasulun kesto aika/s	K_T
1	0,9
10	0,95
100	1,0
1000	1,05
10000	1,1
>10000	1,13

Vaihevälisuojan nimellisjännitteeksi U_N on valittava

$$U_N = 1,25 \cdot U_m,$$

jossa U_m = on verkon suurin sallittu käyttöjännite.

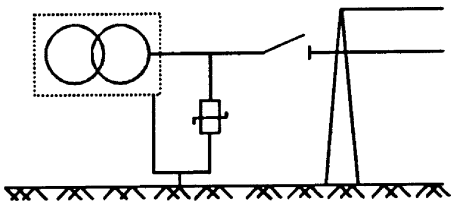
Tähtipistesuojan nimellisjännitteeksi U_N on valittava

$$U_N \geq 0,6 \cdot U_m, \text{ kun verkon } U_m \leq 123 \text{ kV ja}$$

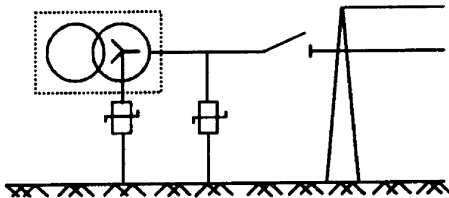
$$U_N \geq 0,34 \cdot U_m, \text{ kun verkon } U_m \geq 245 \text{ kV.}$$

6.2.4. Ylijännitesuojien sijoittaminen ja maadoittaminen

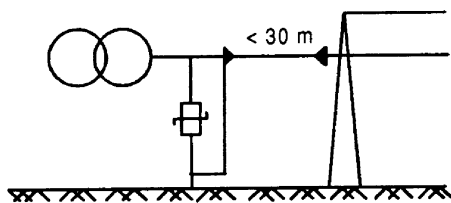
Kuvassa 6.2a on annettu yleisiä ylijännitesuojien sijoitus ja maadoitusohjeita. Ohjeet soveltuvat muuntajien molemmille puolille riippumatta siitä, mitä on toisella puolella.



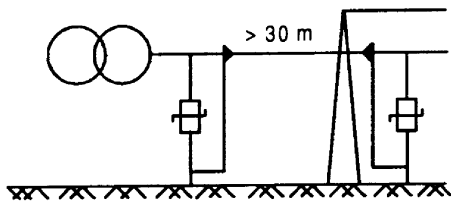
Ylijännitesuoja on sijoitettava niin lähelle muuntajaa kuin mahdollista, mieluummin muuntajan ja katkaisijan väliin. Jos suoja on sijoitettava yli 10 m etäisyydelle muuntajasta, on suojausetäisyys tarkistettava. Ylijännitesuoja on kytkettävä lyhintä mahdollista tietä asemamaadoitukseen. Muuntajan suojamaadoitus on liitettävä aina samaan maadoituspisteeseen ylijännitesuojan kanssa. Myös käyttömaa on yhdistettävä samaan pisteeseen, mikäli se on muista syistä mahdollista.



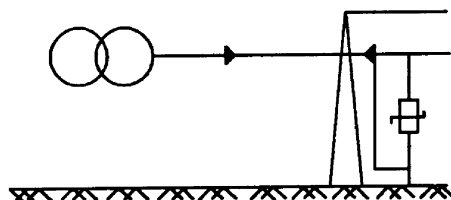
Mikäli tähtipiste on esillä, eikä sitä ole maadoitettu, se on suojattava ylijännitesuojalla.



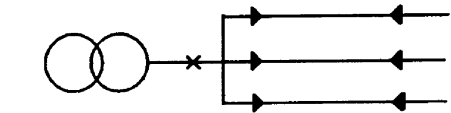
Kaapelin pituuden ollessa alle 30 m, ylijännitesuoja on sijoitettava kaapelin muuntajan puoleiseen päähän.



Muuntajan liittyessä avojohtoon kaapelilla on kaapelin vaippa maadoitettava samaan pisteeseen ylijännitesuojan kanssa mahdollisimman lyhyellä johtimella.



Mikäli kaapelin muuntajan puoleiseen päähän ei haluta tai ei voida sijoittaa ylijännitesuojaa, on avojohto suojattava erityisen huolellisesti ukkosköysillä.



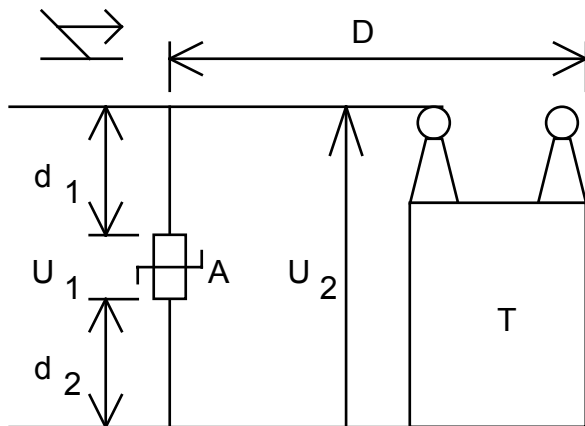
Kaapeliverkon liittyessä avojohtoverkkoon vain muuntajan välityksellä ei suojausta yleensä tarvita, mikäli kaapeliverkko on jatkuvasti liitettynä muuntajaan käytön aikana. Jos kaapeliverkko on suppea (muutamia kilometrejä) on suojaustarve siirtyviä ylijännitteitä vastaan selvitettävä erikseen.

KUVA 6.2a. Ylijännitesuojien sijoitusohjeita.

6.2.5. Todellinen suojaustaso

Ylijännitesuojan nimellissuojaustason ja suojattavan kohteen eristystason välinen marginaali on todella olemassa vain silloin, kun ylijännitesuoja on sijoitettu aivan suojattavan kohteen viereen lyhyin johdoin. Muussa tapauksessa on otettava huomioon sekä jännitteen nousu (johtuu ylijännitteen aaltoluonteesta) ylijännitesuojan jälkeisellä johtimen osalla että purkausvirran ylijännitesuojan yhdysjohtimessa aiheuttama jännitehäviö.

Ylijännitesuojan todellinen suojaustaso, kun suoja on sijoitettu johdolle kohteen eteen, voidaan määrittää kuvan 6.2b avulla. Venttiilisuojaia käytettäessä todellisen suojaustason ja suojattavan kohteen nimelliskestoajännitteen väliin on jätävä syöksyjännitteellä 20...25 % ja kytkentäjännitteellä 15 % marginaali. ZnO-suojaia käytettäessä voidaan käyttää pienempiä marginaaleja.



- U1 = Ylijännitesuojan suojaustaso
 U2 = Todellinen suojaustaso
 D = Suojattavan kohteen ja ylijännitesuojan välimatka vaihejohtinta pitkin
 S = Jännitteen jyrkkyys ($\Delta u / \Delta t$)
 v = Saapuvan jännitteen etenemisnopeus (300m/ μ s)
 d1, d2 = Ylijännitesuojan yhdysjohtimen pituus
 L = Yhdysjohtimen induktanssi pituusyksikköä kohti
 (yleensä voidaan olettaa $L \frac{\Delta i}{\Delta t} = 1...2 \text{ kV / m}$)
 T = Suojattava kohde (muuntaja)
 A = Ylijännitesuoja

$$U_2 = U_1 + \frac{2SD}{v} + (d_1 + d_2) L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

KUVA 6.2b. Ylijännitesuojan todellinen suojaustaso.

6.2.6. Verkon komponenttien eristystason valinta käytettäessä ylijännitesuojia

Suojattavan kohteen eristystason määrää I ryhmässä ($U_m < 300 \text{ kV}$) ylijännitesuojan suojaustaso ilmastollisilla ylijännitteillä ja II ryhmässä ($U_m \geq 300 \text{ kV}$) suojaustaso kytkentäyli-jännitteillä.

Eristystason valinnassa voidaan erottaa seuraavat vaiheet:

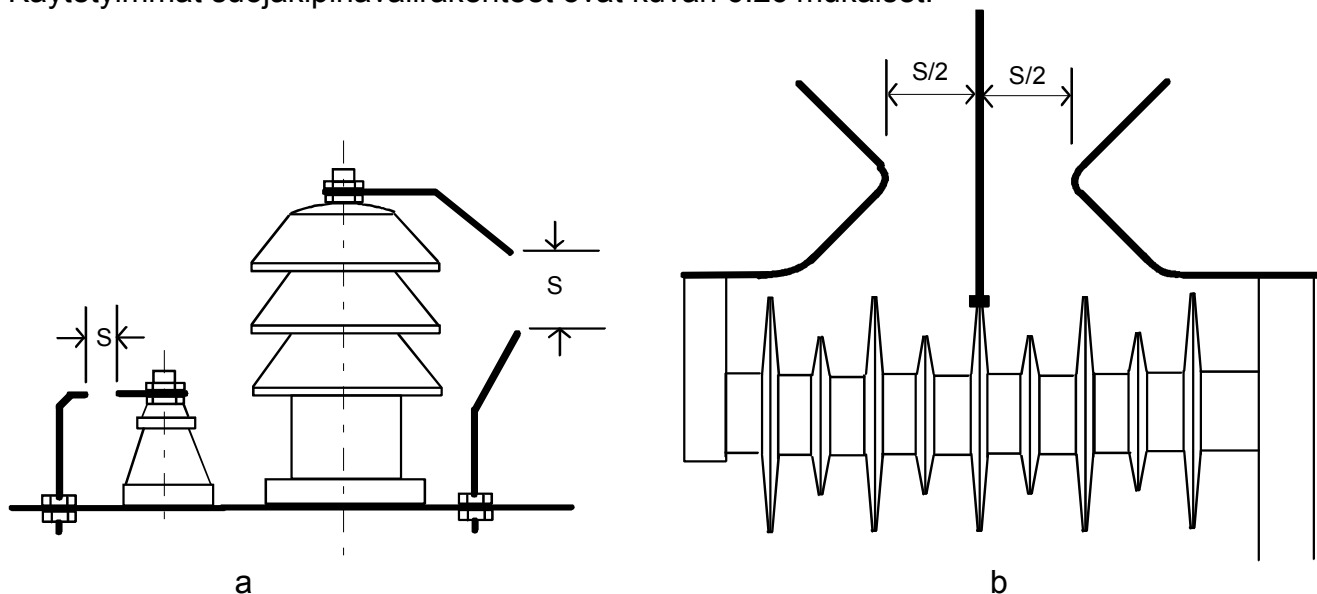
- Selvitetään ylijännitesuojien suojaustaso suojattavan kohteen luona.
- Pienin kestoajännite saadaan kertomalla suojaustaso varmuuskertoimella.
- Mitoituskestoajännitteeksi valitaan pienintä kestoarvoa lähin suurempi arvo IEC:n kesto-koeajännitesarjasta (taulukot 6.1b ja 6.1c).

II ryhmän laitteille em. tarkastelu on suoritettava sekä kytkentäjännitteiden että ilmastollisten ylijännitteiden kannalta.

6.2.7. Kipinävälin käyttö ylijännitesuojana

Suomessa vallitsevan käytännön mukaisesti ≤ 100 kVA pylväsmuuntamot varustetaan suojakipinäväleillä.

Käytetyimmät suojakipinävälirakenteet ovat kuvan 6.2c mukaiset.



KUVA 6.2c. Tavallisimmin käytetyt suojakipinävälirakenteet.
a) yksivälisuoja, b) lintuestein varustettu kaksivälisuoja.

Pylväsmuuntamoiden standardoinnin myötä on siirrytty lintuesteellä varustettuun kaksivälisuojaan, joka kiinnitetään pylväserottimen kiinteisiin eristimiin. Kipinävälin elektrodien välinen matka S on valittava niin suureksi, etteivät käyttötaajuiset ylijännitteet ja kytkentäjännitteet johda uliyohtiin kipinävälissä. Toisaalta S on valittava mahdollisimman pieneksi, jotta kipinäväli toimisi suojana ilmastollisia ylijännitteitä vastaan. Tavallisin käytetty elektrodiväli 20 kV verkossa ovat 60 ja 80 mm kaksivälisuojaalla sekä 80 ja 100 mm yksivälisuojaalla (SFS 2646 / 1987).

Taulukossa 6.2a on esitetty suojakipinävälien 1 % syttymisjännitteet ja 99 % suojaustasot käytettäessä em. asetteluja. Taulukossa 6.2a nähdään, että syttymisjännite on kaikilla mainituilla asetteluilla turvallisen korkea. Edelleen nähdään, että suojaustasot standardisyöksyjännitteellä jäävät jakelumuuntajan nimelliskestojännitettä 125 kV alhaisemmaksi. Jyrkästi nousevilla jännitteillä suojaus heikkenee. Jakelumuuntajille ($S_n \leq 100$ kVA) suositellaan kuitenkin lajikokeena koestusta lineaarisesti nousevalla syöksyjännitteellä jyrkkyydellä 2000 kV/ μ s kaksivälisuojan elektrodivälin ollessa 80 mm.

Taulukko 6.2a. Suojakipinävälien ohjearvoja sekä näillä saavutettavat suojaominaisuudet. (Suojausominaisuuksiin vaikuttaa suojakipinävälin rakenne jonkin verran)

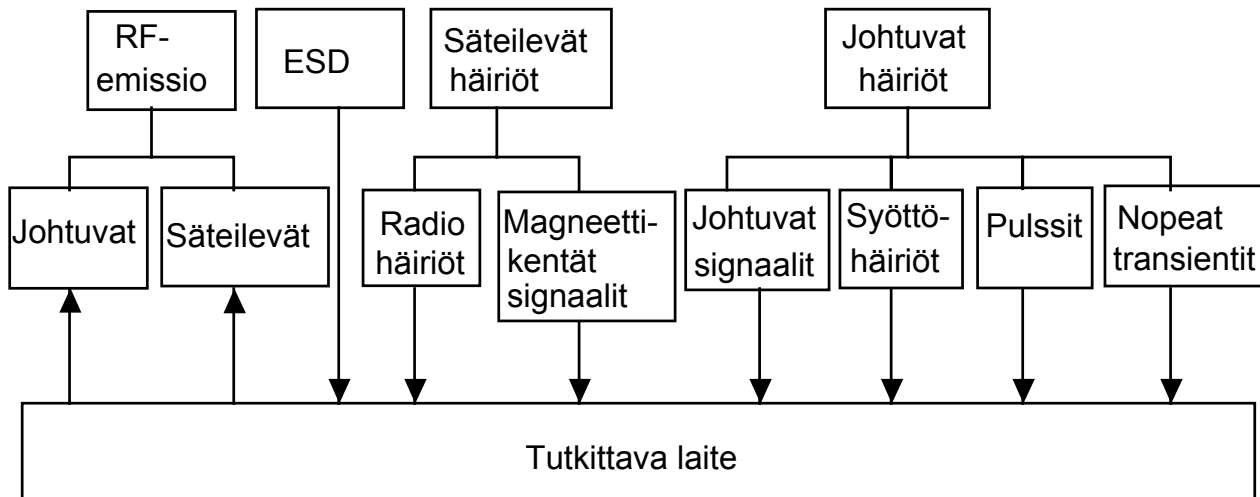
Suoja	1 % syttymistaso 50 Hz, sade, (r.m.s) kV	99 % suojaustaso		
		1,2 / 50 μ s kV	1000 kV / μ s kV	2000 kV / μ s kV
Yksivälisuoja 100 mm	40	120	266	325
Kaksivälisuoja 80 mm	42	120	229	245
Yksivälisuoja 80 mm	32	99	215	235
Kaksivälisuoja 60 mm	35	103	175	190

6.3. Sähkömagneettinen yhteensopivuus

Sähkömagneettinen yhteensopivuus (Electromagnetic compatibility, EMC) tarkoittaa järjestelmän kykyä toimia käyttöympäristössään huolimatta siinä esiintyvistä sähkömagneettisista häiriöstä ja häiritsemättä sähkömagneettisesti muita järjestelmiä. Häiriönsietoisuus on laitteen ominaisuus, joka kuvaa sen kykyä toimia häiriöllisissä olosuhteissa. Emisio on laitteesta ulospäin säteilemällä tai johtumalla siirtyvä sähkömagneettinen energia.

6.3.1. Sähkömagneettiset häiriöt

Häiriöt voidaan jakaa neljään pääryhmään kuvan 6.3a mukaisesti.



KUVA 6.3a. Häiriöiden ryhmittely. (Benda 1990: 46)

Radiotaajuinen emissio

Laitteen tuottamille radiotaajuisille päästöille määritellään raja-arvot standardeissa.

Sähköstaattinen purkaus

Staattinen sähkö voi muodostua ongelmaksi erityisesti kuivassa ilmassa ja käytettäessä keinokuituja.

Tavallisin sähköstaattisen purkauksen aiheuttaja on ihminen. Varaus purkautuu hyvin lyhyenä virtapulssina. Pulssin nousuaika on tyypillisesti muutamia nanosekunteja, kesto alle 100 ns ja huippuvirta jopa 70 A.

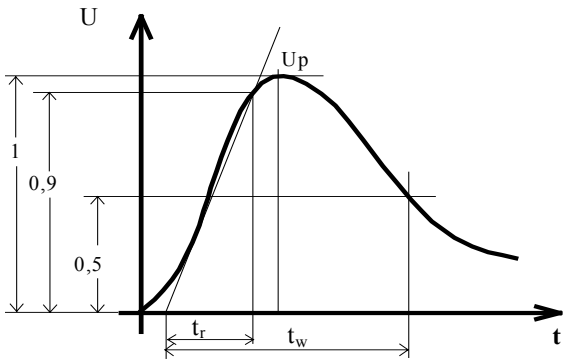
Säteilevät häiriöt

Radiotaajuiset häiriöt (radio frequency interference, RFI) jaetaan kapeakaistaisiin ja laajakaistaisiin häiriöihin. Kapeakaistaisia häiriöitä ovat erilaisten radiolähettimien synnyttämät puhtaat kanta-aallot. Suurin osa sähkölaitteista synnyttää laajakaistaisia häiriöitä. Matalataajuisia magneettikenttiä esiintyy erityisesti jakeluverkkoon liitettyjen suurivirtaisten laitteiden, kuten muuntajien ja kaapeleiden ympärillä.

Johtuvat häiriöt

Kaapelit ja johdotukset siirtävät häiriösignaaleja johtumalla ja säteilemällä. Kaapelivaipat, liittimet ja suodattimet maadoitetaan mahdollisimman häiriöttömään maatasoon.

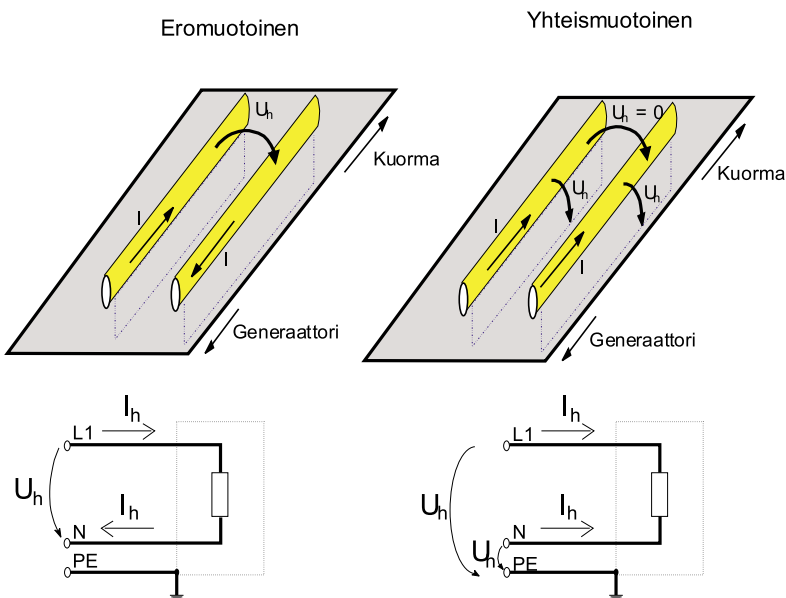
Transientti (kuva 6.3b) on muutosilmiö, joka esiintyy siirryttäessä jatkuvasta tilasta toiseen. Transientti syntyy, kun sähköisessä piirissä tapahtuu virran tai jännitteen nopea muutos.



KUVA 6.3b. Transientin määrittelyparametrit: nousuaika (t_r), kestoaika (t_w) ja amplitudi (U_p).

6.3.2. Häiriöiden kytkeytyminen

Johtuville häiriöille määritellään eromuotoinen (differential-mode) ja yhteismuotoinen (common-mode) etenemismuoto, kuva 6.3c. **Eromuotoisessa** etenemismuodossa kahden johtimen välillä on jännite U_h ja koko johdinta pitkin kulkeva virta I palaa toista johdinta pitkin. Virrat johtimissa ovat samansuuruiset ja vastakkaismerkkiset. Eromuotoinen häiriöjännite syntyy esimerkiksi kahden johtimen välille magneettikentässä, kun toiseen johtimista indusoituu voimakkaampi jännite. **Yhteismuotoisessa** etenemismuodossa johtimien välillä ei ole jännitettä, vaan johtimilla on sama jännite maatasoon nähden. Virrat ovat yhtä suuret ja samanmerkkiset. Yhteismuotoinen häiriövirta kytkeytyy vierekkäisiin johtimiin, esimerkiksi magneettikentän indusoidessa kaikkiin johtimiin yhtä suuren häiriövirran.



KUVA 6.3c. Eromuotoinen ja yhteismuotoinen etenemismuoto.

Kapasitiivinen kytkeytyminen

Kapasitiivinen kytkeytyminen tapahtuu piirien välillä, joilla on hajakapasitanssia, kuva 6.3d. C_{12} on johtimien välinen hajakapasitanssi.

C_{1g} ja C_{2g} ovat johtimien hajakapasitanssit maatasoon.

Kapasitiivinen häiriö kytkeytyy sähkökentän välityksellä.

Johtimessa 2 esiintyvä häiriöjännite V_n on verrannollinen häiriösignaalin taajuuteen ($j2\pi f$), häiritsevän johtimen jännitetasoon (V_1), johtimien väliseen hajakapasitanssiin (C_{12}) ja häiriintyvän johtimen impedanssiin (R).

$$V_n = j2\pi f \cdot V_1 \cdot C_{12} \cdot R$$

Kapasitiivinen kytkeytyminen edellyttää suuria jännitetasoja häiriötä tuottavassa piirissä sekä korkeita impedanssitasoja häiriötä vastaanottavassa virtapiirissä.

Kapasitiivisen kytkeytymisen vaimentaminen

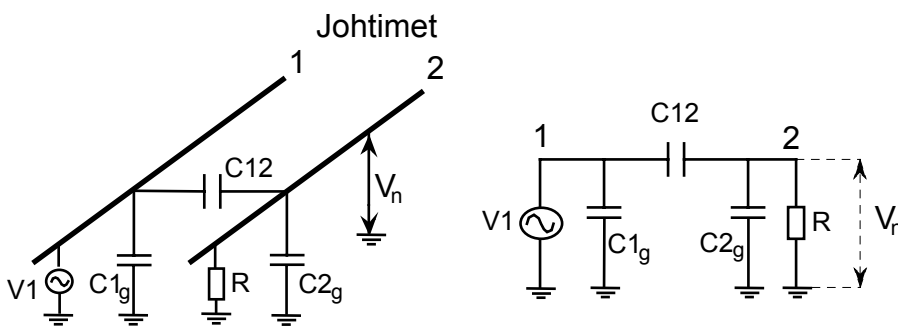
- Pienennetään johtimien välistä hajakapasitanssia (C_{12})

Hajakapasitanssia pienennetään johtimien etäisyyttä kasvattamalla, välttämällä yhdensuuntaisia johdotuksia, käyttämällä suojattuja johtimia ja yhtenäisiä maatasoja johtimien välillä, sijoittamalla kaapelit lähelle maatasoa.

-Pienennetään häiritsevän virtapiirin jännitetasoa (V_1).

-Rajoitetaan häiritsevän virtapiirin taajuusalue (f).

-Pienennetään häiriintyvän virtapiirin impedanssitasoa (R)



KUVA 6.3d. Kapasitiivinen kytkeytyminen kahden johtimen välillä.

Induktiivinen kytkeytyminen

Johtimessa 1 kulkeva virta synnyttää ympärilleen magneettivuon Φ (oikean käden sääntö). Induktiivinen häiriö kytkeytyy magneettikentän välityksellä. Kun muuttuva magneettikenttä lävistää virtapiirissä olevan silmukan, indusoituu silmukkaan häiriöjännite V_n . Johtimessa 1 kulkeva virta I_1 synnyttää johtimien keskinäisinduktanssin M_{12} välityksellä magneettivuon Φ_{12} johtimen 2 ympärille, kuva 6.3e:

$$M_{12} = \Phi_{12} / I_1$$

Indusoituneen häiriöjännitteen V_n suuruus on verrannollinen virran taajuuteen $j2\pi f$, magneettivuon tiheyteen (B) ja silmukan magneettivuota kohtisuoraan pinta-alaan $A \cos(\alpha)$:

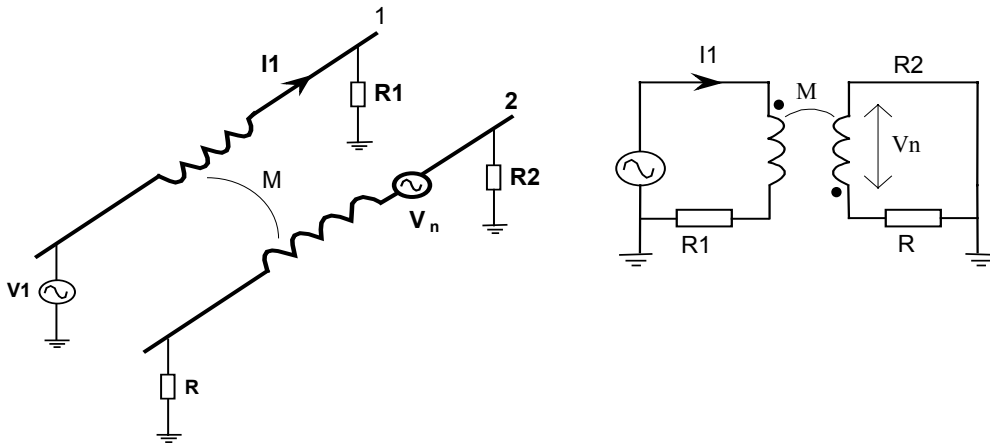
$$V_n = j2\pi f \cdot B \cdot A \cdot \cos(\alpha) = j2\pi f \cdot M_{12} \cdot I_1 = M_{12} \cdot dI_1 / dt$$

Induktiivisen kytkeytymisen vaimentaminen:

- vältetään yhdensuuntaisia johdotuksia ja keloja,
- kasvatetaan häiritsevän ja häiriintyvän johtimen etäisyyttä,
- asetetaan signaalijohdot ja maadoitusjohdot mahdollisimman lähellekään

Merkittävä lisäparannus saavutetaan, jos johtimet ovat toistensa ympärille kierrettyt. Kierretyn johdinparin silmukoihin indusoituneet jännitteet kumoutuvat vastakkaisvaiheisina viereiseen silmukkaan indusoituneen jännitteen kanssa.

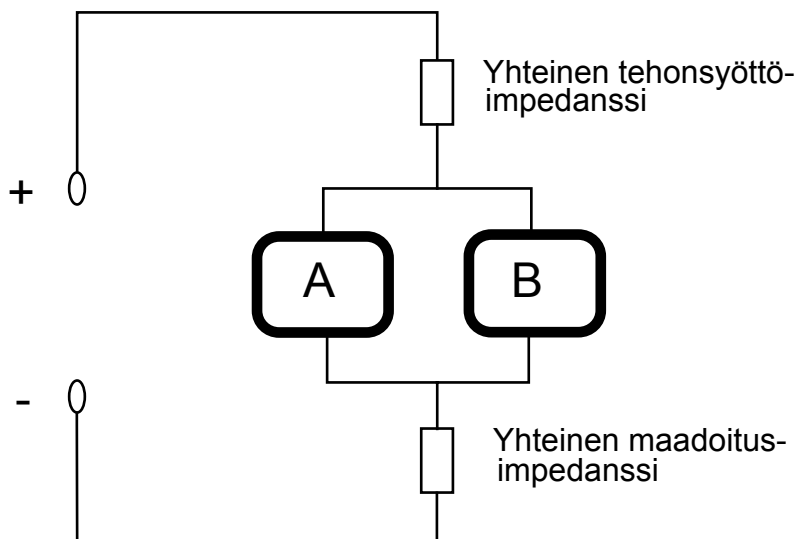
- sekä rajoitetaan häiritsevän virtapiirin taajuusaluetta.



KUVA 6.3e. Induktiivinen kytketyminen kahden johtimen välillä.

Yhteisen impedanssin välityksellä kytketyminen

Yhteisen impedanssin välityksellä kytketyminen (common impedance coupling) on olemassa, jos häiritsevällä ja häiriintyvällä virtapiirillä on yhteinen virran kulkutie (kuva 6.3f). Yleensä yhteinen impedanssi löytyy joko maadoituksesta tai tehonsyötöstä. Häiritsevän virtapiirin (A) virran muutokset aiheutuvat häiriövirran häiriintyvässä virtapiirissä (B).



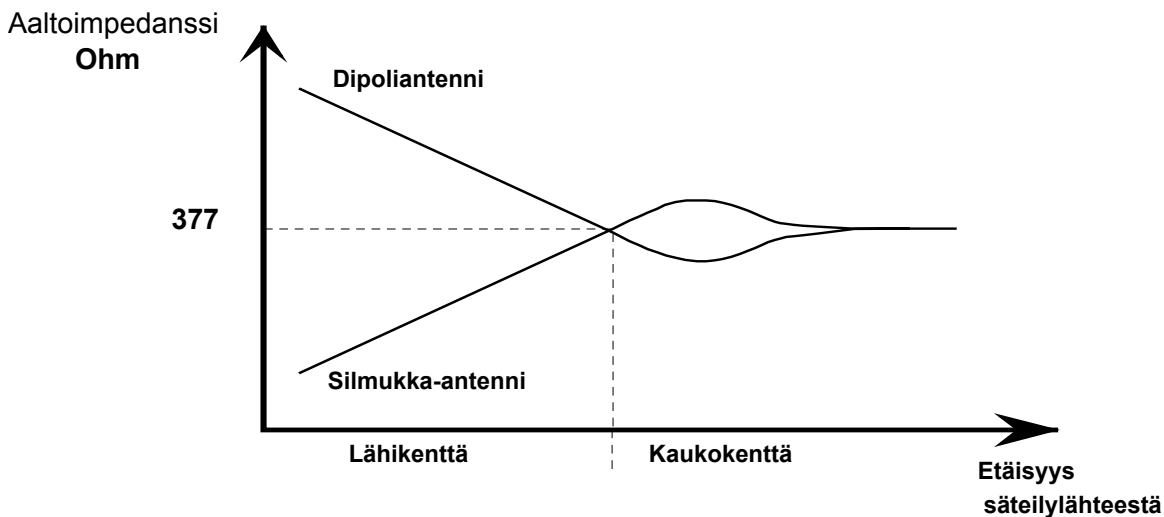
KUVA 6.3f. Häiritsevän (A) ja häiriintyvän (B) virtapiirin yhteiset impedanssit.

Sähkömagneettinen kytketyminen

Sähkömagneettinen kytketyminen on häiriöiden siirtymistä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Sähkömagneettisen kentän ominaisuudet määräytyvät säteilylähteestä, väliaineesta sekä lähteen ja tarkastelupisteen välisestä etäisyydestä. Lähteen ympäristö voidaan jakaa lähi- ja kaukokenttään, kuva 6.3g. Lähikentässä aaltoimpedanssi, eli sähkö- ja magneettikenttien suhde, määräytyy lähteen ominaisuuksista. Pieni-impedanssisessa antennissa (silmukka-antenni) virta on suuri, joten antennin lähellä magneettikenttä on hallitseva ja aaltoimpedanssi on pieni $< 377 \Omega$. Suuri-impedanssisessa antennissa (dipoliantenni) virta on pieni, joten antennin lähellä sähkökenttä on hallitseva ja aaltoimpe-

danssi on suuri $>377 \Omega$. Kaukokentässä, rajaetäisyyttä $(2\pi r / \lambda) > 1$ kauempana, sähkö- ja magneettikenttä ovat kohtisuorassa sekä toisiaan että etenemissuuntaansa vastaan. Aalto-impedanssi on tällöin 377Ω . Käytännössä aaltoimpedanssin arvo vaihtelee välillä 40...4000 Ω .

Elektronisten laitteiden johtimet toimivat sekä säteilyn lähetyksen että vastaanottoantennina. Signaali voi olla johtimena siirrettävä hyötytaajuus tai ulkopuolinen häiriötaajuus. Antenni-vaikutus on erityisen tehokas niillä taajuuksilla, joilla johtimen pituus on signaalin aallonpituuden neljäsosan monikerta $(n \frac{\lambda}{4})$. Antennivaikutus heikkenee huomattavasti, kun johtimen pituus on pienempi kuin $1/8$ signaalin aallonpituudesta. **Turvallinen** johtimen pituus on alle $1/20$ suuritaajuisimman signaalin aallonpituudesta.



KUVA 6.3g. Aaltoimpedanssi lähi- ja kaukokentässä.

6.4. Maadoitus

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden kannalta tulee laitteisto ottaa huomioon kokonaisuutena, ei yksittäisinä laitteina tai piireinä. Yhdenkin yksikön puutteellinen maadoitus saattaa pilata koko järjestelmän toiminnan.

6.4.1. Suojamaadoitus

Turvallisuusvaatimukset edellyttävät, että sähkölaitteiden metallikuori tai muut kosketeltävissä olevat metalliosat ovat maadoitettuja. Tarkoituksena on estää ihmisille vaarallisten jännitteiden kytkeytyminen näihin osiin sekä normaaleissa että epänormaaleissa olosuhteissa. Suojamaa on kytketty maapotentiaaliin, signaalimaat voivat osittain kellua.

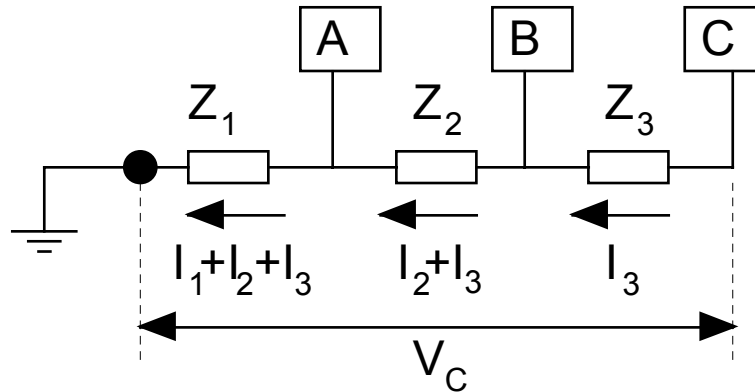
6.4.2. Signaalimaadoitus

Maadoituksen yhtenä tehtävänä on luoda tasapotentiaalinen (pieni-impedanssinen) referenssipiste laitteen kaikille piirielementeille. Piirisuunnittelussa erilaisia maadoitustapoja sovellettaessa on tarkoin selvitettävä maavirtojen todellinen kulkureitti. Paluuvirran pääasiallinen kulkureitti määrää johdinsilmukan muodostaman pinta-alan. Elementtejä voidaan kytkeä referenssipisteeseen periaatteessa kolmella eri tavalla: sarjaankytkentä (kuva 6.4a), rinnankytkentä (kuva 6.4b) ja monipistekytkeä (kuva 6.4c).

Sarjaankytketty maadoitus on yleensä huonoin mahdollinen maadoitustapa häiriönsiedon ja häiriöiden syntymisen kannalta. Matalilla taajuuksilla maasilmukoita ei esiinny, mutta yhteisten sarjaimpedanssien lävitse kulkevat virrat aiheuttavat yhteismuotoisia häiriöitä.

Sarjaankytketyssä maadoituksessa tulee yhteiset impedanssit minimoida. Esimerkiksi piirielementin C potentiaali on (kuva 6.4a):

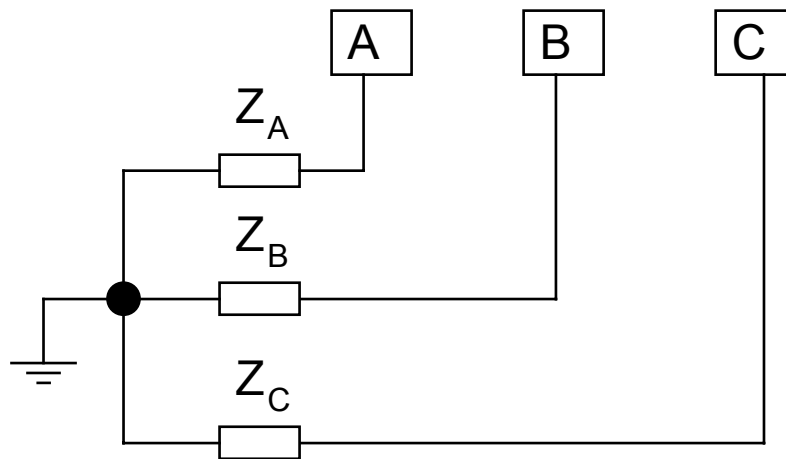
$$V_C = (I_1 + I_2 + I_3)Z_1 + (I_2 + I_3)Z_2 + I_3 Z_3$$



KUVA 6.4a. Kolmen piirielementin maadoitus sarjaankytkennällä.

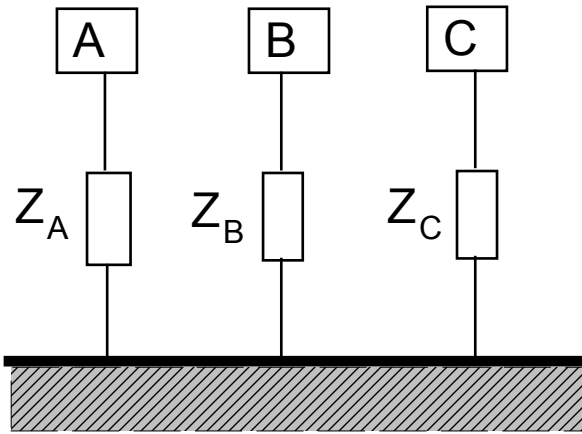
Rinnankytketyllä (kuva 6.4b) maadoituksella vältetään maaimpedanssien kautta kytkeytyvät häiriöongelmat. Ongelmina ovat useiden maakytkentöjen toteuttaminen ja suurilla taajuuksilla kasvavan induktanssin tuottama induktiivinen kytkeytyminen muihin johtoihin. Myös kapasitiivista kytkeytymistä saattaa esiintyä. Kun maajohtimen pituus lähestyy aallonpituuden neljäsosaa, alkaa johto toimia antennina ja esiintyy häiriösäteilyä. Turvallinen johtimen pituus on alle $1/20$ mahdollisen häiriösignaalin aallonpituudesta. Esimerkiksi 300 MHz:n taajuudella johdon pituuden raja-arvo on vain 5 cm.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{300 \cdot 10^6 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{300 \cdot 10^6 \text{Hz}} = 1\text{m} = 100\text{ cm} \quad \text{sitin} : \quad \frac{\lambda}{20} = 5\text{ cm}$$



KUVA 6.4b. Kolmen piirielementin maadoitus rinnankytkennällä.

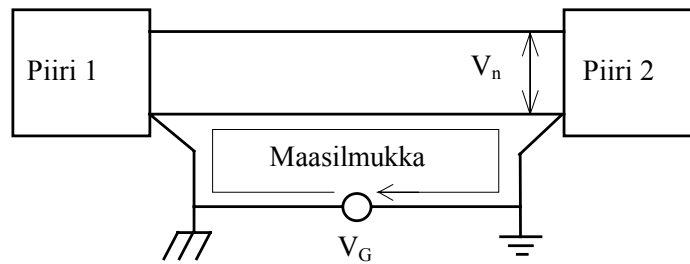
Suurilla taajuuksilla (> 10 MHz) kumpikaan edellä mainituista maadoituksista ei toimi tyydyttävästi, vaan on käytettävä **monipistemaadoitusta** (kuva 6.4c). Maataso toimii referenssitasona ja paluuvirtatienä kaikille virtasilmuille. Kukin piiri kytketään yhtenäiseen maatasoon mahdollisimman lyhyellä johtimella. Näin jäävät virtasilmuikoiden pinta-alat ja induktanssit pieniksi.



KUVA 6.4c. Kolmen piirielementin maadoitus monipistekytkenällä.

6.4.3. Maasilmukat

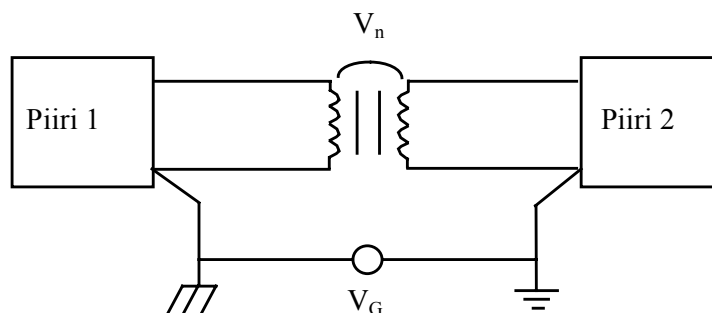
Maasilmukka syntyy, kun kaksi piirielementtiä on maadoitettu eri potentiaaleissa oleviin pisteisiin, kuva 6.4d. Potentiaaliero V_G aiheuttaa maasilmukkaan häiriövirran. Induktivisessa kytketyksessä häiriintymisen taso on suoraan verrannollinen johdinsilmukan kohtisuoraan pinta-alaan magneettivuota vastaan.



KUVA 6.4d. Maasilmukka kahden piirielementin maadoituksessa.

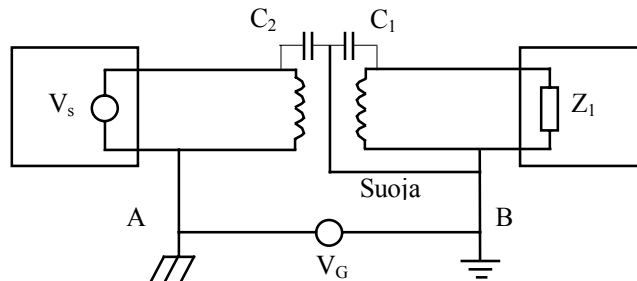
Maasilmukakytkeytymisen vaimentaminen:

- pienennetään maadoitusimpedanssia,
- pienennetään maavirtoja,
- käytetään yksipistemaadoitusta sekä
- katkaistaan mahdolliset maasilmukat:
 - muuntajalla (kuva 6.4e),
 - yhteismuodon kuristimella (kuva 6.4g),
 - optoeristimellä (kuva 6.4h),
 - symmetroinnilla ja
 - kondensaattorien avulla tehtävällä monipistemaadoituksella.



KUVA 6.4e. Maasilmukan katkaisu muuntajalla.

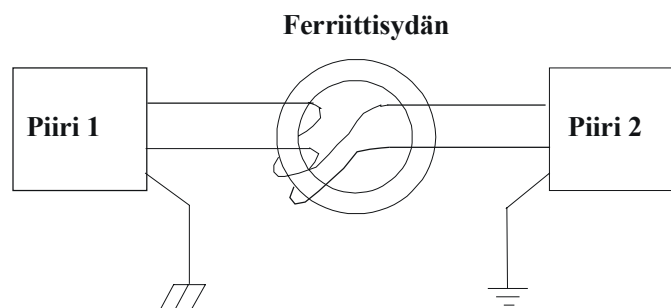
Muuntaja tarjoa hyvän häiriövaimennuksen alhaisilla taajuuksilla. Suurilla taajuuksilla muuntajan käämien välillä esiintyy hajakapasitanssia, joka oikosulkee maasilmukan syn-tyvillä resonanssitaajuuksilla. Erotusmuuntajan ylärajataajuutta voidaan nostaa käämien väliin sijoitetulla staattisella suojalla, kuva 6.4e. Maadoitettu staattinen suoja vaimentaa hajakapasitanssien C_1 ja C_2 kautta tapahtuvaa kytkeytymistä, kuva 6.4f. Maadoittamaton suoja lisää kapasitiivista kytkeytymistä. Staattinen suoja maadoitetaan pisteeseen B, kos-ka tällöin häiriövirta ei kytkeydy kuorman Z_1 kautta, kuva 6.4f. Jos suoja kytketään pistee-seen A, häiriövirta kiertää kuorman kautta ja aiheuttaa suuremman kytkeytymisen kuin il-man suojaa.



KUVA 6.4f. Erotusmuuntajan staattisen suojan oikea maadoitus.

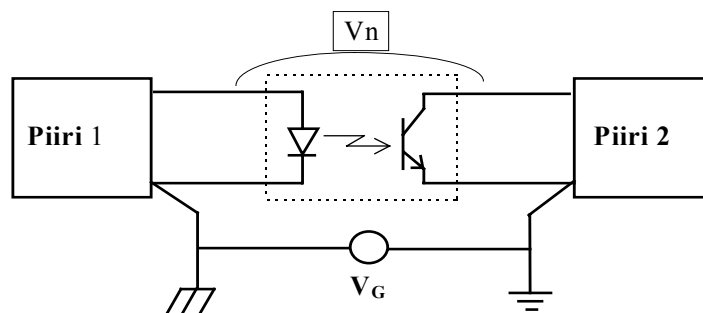
Yhteismuodon kuristin muodostetaan kietomalla johtimet samansuuntaisesti ferriittisen sydänmateriaalin ympärille, kuva 6.4g. Tämä kytkentä kasvattaa molempien johtimien in-duk-tanssia L_{12} sekä myös johtimien välistä keskinäisinduktanssia M_{12} . Molempien johti-mien induktanssi tulee olemaan saman suuruinen kuin johtimien välinen keskinäisinduk-tanssi:

$$L_1 = L_2 = M_{12}$$



KUVA 6.4g. Maasilmukan katkaisu yhteismuodon kuristimella.

Optoeristin vaimentaa yhteismuotoisia häiriöitä, koska se katkaisee galvaanisen silmukan kahden maapisteen välillä, kuva 6.4h. On huomattavaa, että optoeristimen tulon ja lähdön välillä on hajakapasitanssia, joka saattaa aiheuttaa kapasitiivista kytkeytymistä suurilla taajuuksilla.



KUVA 6.4h. Maasilmukan katkaisu optoeristimellä.

6.4.4. Suunnittelusääntöjä

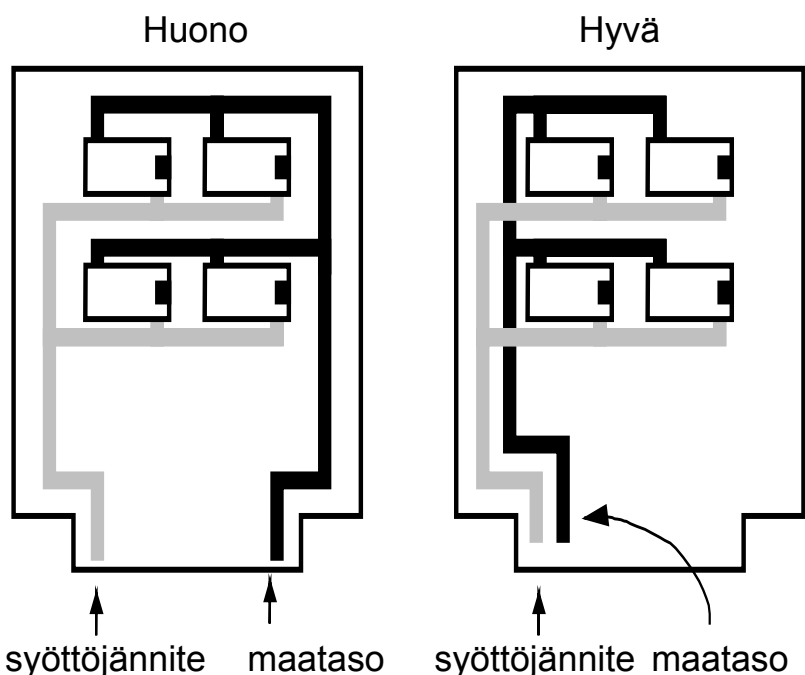
- Helposti häiriintyvät ja häiritsevät komponentit/modulit sijoitetaan mahdollisimman kauaksi toisistaan (omat maatasot ja tehonsyötöt).
- Häiriöllinen (digitaalinen) ja häiriölle herkempi (analoginen) maataso yhdistetään vain yhdestä pisteestä (kapea liuskajohdin tai pieni vastus).
- Vältetään eri yksiköiden yhteisiä impedansseja (tehonsyöttö ja maadoitus). Jos yhteisiä johtimia käytetään, minimoidaan niiden impedanssit.
- Käytetään mahdollisimman lyhyitä johtimia ($< 1/8$ suurimman signaalitaajuuden aallonpituudesta). Signaali- ja paluuvirtatie sijoitetaan mahdollisimman lähekkäin (ympäröivät maatasot, suojatut kaapelit).
- Estetään johtimien välinen ylikuuluminen: kasvatetaan johtimien välimatkaa, käytetään maadoitusta johtimien välissä, pidetään johtimien leveys kapeana verrattuna niiden välimatkaan, asetetaan johdot kulkemaan lähellä maatasoa.

6.5. Digitaalipiirit ja piirikorttien säteily

6.5.1. Tehonsyöttö

Tehonsyötössä minimoidaan virtasilmukoiden muodostamat pinta-alat, kuva 6.5a. Näin vähennetään johtimien herkkyttä häiriösäteilylle ja häiriöiden kytkeytymistä yhteisimpedanssien välityksellä.

Tähtimäinen tehonsyöttö eri yksiköille on ihanteellinen ratkaisu. Yhteisiä impedansseja ei muodostu ja lisäksi johtimien resistanssi ja induktanssi vaimentavat johtuvia häiriöitä.



KUVA 6.5a. Virtasilmukan pienentäminen tehonsyötössä.

6.5.2. Tehosyötön suodatus

Digitaalipiirien häiriötuottavuuden päätekijät ovat nopeat nousu- ja laskuajat sekä johtimien suuret induktanssit. Logiikan nopea tilamuutos generoi johtimen induktanssiin L häiriöjännitteen V_N :

$$V_N = L (di / dt)$$

Jos logiikkaportin virtatason muutos (3 mA) tapahtuu 5 ns:ssa, generoituu johtimen induktanssiin L (500 nH) 300 mV:n häiriöjännite.

Nousuaika t_r kuvaa logiikkapiirin nopeutta ja sen avulla voidaan määrittää piirin käytännössä aiheuttaman häiriösäteilyn ylärajataajuus f_{max} :

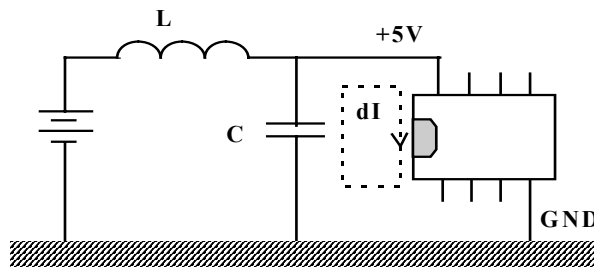
$$f_{max} = 1 / (\pi \cdot t_r)$$

Jos käytettävän logiikkapiirin nousuaika on 5 ns, ylettyy sen aiheuttamat häiriöt 32 MHz:iin.

Piirilevyn layout- suunnittelussa on nopeimmalle piirille järjestettävä lyhyimmät johtimet (väylä, tehonsyöttö). Erityisesti kellojohtimen pituus ja maatasojen kanssa muodostuva induktiosilmukka on pyrittävä minimoimaan, koska se on normaalisti häiriöllisin johdin piirilevyllä. **Kello ja maajohdin on asetettava vierekkäin piirilevyllä, kaapeleissa ja liittimissä.** Oikein suunnitellulla piirikortilla kellojohdin kulkee jatkuvasti yhtenäisten maatasojen ympäröimänä.

Piirilevysuunnittelussa tulee pyrkiä mahdollisimman lyhyisiin signaali- ja tehonsyöttöjohtoihin.

Jokaisen digitaalipiirin käyttöjännite- ja maadoitusnastan välille kytketään suodatinkondensaattori, kuva 6.5b.

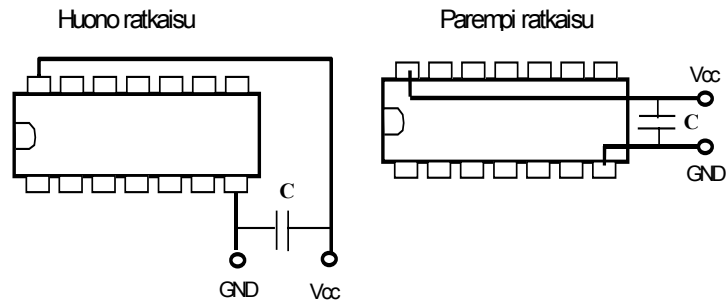


KUVA 6.5b. Suodatinkondensaattorin vaikutus häiriövirtasilmukan (dI) pinta-alaan.

Suodatinkondensaattorin tarkoitus on:

- Toimia energiavarastona, josta piirin nopeiden muutostilojen vaatimat virtapulssit saadaan häiritsemättä galvaanisesti muita piirejä. Toisin sanoen kondensaattorin toiminnallisen taajuusalueen on käytännössä oltava 10... 200 MHz. Jos kondensaattoria ei ole tai se ei toimi riittävän suurella taajuusalueella, aiheuttaa logiikan nopea tilamuutos huomattavia jänniteheilahduksia tehonsyöttölinjassa.
- Pienentää tehonsyötön muodostama silmukka, jolloin induktiivinen ja kapasitiivinen kytketyminen piirin ja ympäristön välillä on mahdollisimman vähäistä molempiin suuntiin.

Kondensaattori tulee kytkeä mahdollisimman lähelle piiriä. (kuva 6.5c)



KUVA 6.5c. Digitaalipiirin tehonsyöttökondensaattorin kytkeminen.

Suodatinkondensaattorin kapasitanssin minimiarvo C_{min} lasketaan piirin aiheuttamasta virtamuutoksesta di , siihen kuluva ajasta dt sekä hyväksyttävästä jännitemuutoksesta dv :

$$C_{min} = (di \cdot dt) / dv$$

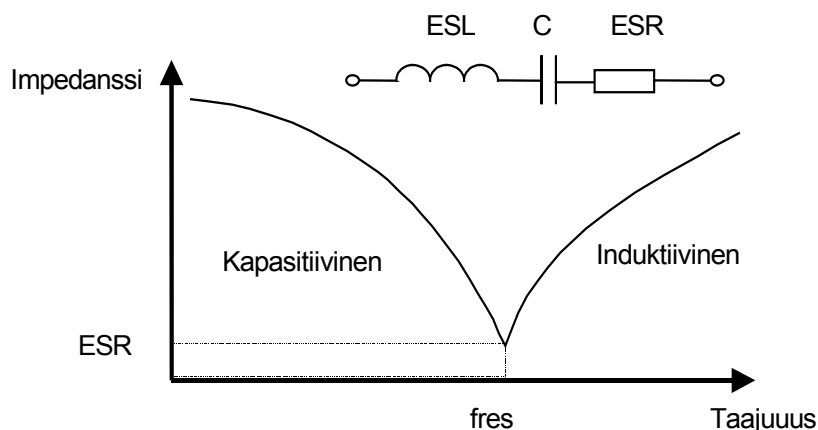
Jos digitaalipiirin tilamuutos (50 mA) tapahtuu 2 ns:ssa ja muiden piirien sietoisuuden kannalta hyväksyttävä jännitemuutos tulee olla alle 0,1 V, saadaan kondensaattorin minimiarvoksi 1 nF. Sallittua jännitemuutosta arvioitaessa on huomioitava useiden tilamuutosten yhteisvaikutus. Laskettua kapasitanssiarvoa voidaan pitää myös suositeltavana (maksimi-) arvona, koska suuremman kapasitanssin omaavalla kondensaattorilla on alhaisempi toiminnallinen taajuusalue.

Kondensaattoreiden käyttöä rajoittaa niiden resonanssitaajuus f_{res} , kuva 6.5d. Resonanssitaajuus määräytyy kondensaattorin kapasitanssista C sekä sisäisestä induktanssista ($ESL =$ Equivalent series inductance) ja johtimien muodostamasta induktanssista L :

$$f_{res} = 1 / (2\pi \sqrt{LC})$$

Kondensaattorin sijaiskytkentä muodostuu sarjainduktanssista (ESL), kapasitanssista (C) ja sarjaresistanssista (ESR), kuva 6.5d. Sarjaresistanssi käsittää kondensaattorin eristehäviöt sekä johtimien resistanssit. Kondensaattorin impedanssikäyrä määräytyy sarjaresistanssin sekä kapasitiivisen (X_C) että induktiivisen (X_L) reaktanssin perusteella:

$$impedanssi = ESR^2 + \sqrt{(X_C - X_L)^2}$$



KUVA 6.5d. Kondensaattorin sijaiskytkentä ja sen impedanssi taajuustasossa.

Edellisestä kuvasta havaitaan, että kondensaattori toimii ideaalisesti vain resonanssitaajuutta pienemmillä taajuuksilla. Suodatusvaikutus on tehokkaimmillaan resonanssitaajuuden ympäristössä, jolloin kondensaattorin kapasitiiviset ja induktiiviset reaktanssit ovat yhtäsuuret. Resonanssitaajuudella imaginääriset osat kumoavat toisensa ja jäljelle jää vain sijaiskytkennässä esiintyvä sarjaresistanssi ESR. Resonanssitaajuuden yläpuolella kondensaattorin induktiiviset ominaisuudet ovat dominoivia ja suodatusominaisuudet heikkenevät nopeasti taajuuden kasvaessa.

Suurikapasitanssisilla kondensaattoreilla on yleensä alhainen resonanssitaajuus. Tämän vuoksi sovellukseen tulee valita kapasitanssiltaan pienin malli, jolla on kuitenkin riittävä virransyöttökyky. Kondensaattorin resonanssitaajuuslausekkeesta voidaan havaita, että kapasitanssin kasvattaminen kertoimella 100 pienentää kondensaattorin resonanssitaajuutta kertoimella 10. Normaalisti piirilevyjohtimien ja kondensaattorin sisäinen yhteenlaskettu induktanssi on noin 30 nH.

1 nF:n kondensaattorin resonanssitaajuus on tällöin 29 MHz. 100 nF:n kondensaattorin resonanssitaajuus on samassa layoutissa vain 2,9 MHz. Käytännössä 100 nF:n kondensaattorin resonanssitaajuus on edellistäkin tulosta alhaisempi, koska suuremman kondensaattorin sisäinen induktanssi on suurempi kuin kapasitanssiltaan pienemmän mallin. Suodatinkondensaattorin kapasitanssiarvo on normaalisti 0,47 ... 10 nF. On huomattava, että eri rakenteen omaavilla kondensaattoreilla on omat toiminnalliset taajuusalueet.

Pintaliitoskomponenteilla voidaan nostaa kondensaattorien rajataajuutta, koska liitosjohtimien sarjainduktanssit jää pois. Mahdollista on käyttää suurta ja pientä kondensaattoria yhdessä, jolloin saavutetaan suuri varaus ja kaksi resonanssialuetta. Tällöin on kuitenkin impedanssimittauksin varmistettava, että resonanssitaajuuksien väliin ei ole jäänyt suuri impedanssisia taajuusalueita.

Lisäksi käytettävät piirilevyjohtimet tulee olla lyhyitä, leveitä sekä mahdollisimman lähekkäin toisiaan. Monikerrospiirilevyllä voidaan häiriövirtasilmukkaa tehokkaasti pienentää käyttämällä yhtenäisiä maa- ja jännitetasokerroksia. Tällöin käyttöjännite- ja maataso ovat kaikkialla mahdollisimman lähekkäin toisiaan ja suodatinkondensaattori voidaan kytkeä niiden väliin käytännössä ilman johtimia.

Jokaiselle piirilevyllä on sijoitettava vähintään yksi iso tehonsyöttökondensaattori (board decoupler), jonka tehtävänä on ladata jokaisen piirin käyttöjännitteen ja maadoitusnastan väliin kytketty suodatuskondensaattori. Piirilevyn suodatuskondensaattori sijoitetaan normaalisti mahdollisemman lähelle teholähdettä. Tämän kondensaattorin malli ja kapasitanssiarvo eivät ole niin kriittisiä kuin piirien suodatuskondensaattorien, koska kondensaattorien välinen latausvirta on pienitaajuisia. Piirilevykondensaattorin kapasitanssin C_{board} tulee olla vähintään kymmenen kertaa suurempi kuin piirien suodatuskondensaattorien yhteen laskettu kapasitanssi ($n \cdot C$), missä n on suodatettavien piirien lukumäärä.

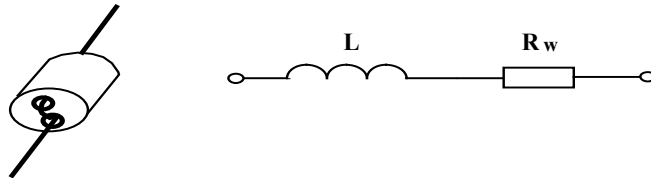
$$C_{board} > 10 n \cdot C$$

Jos piirilevyllä on suodatettavia piirejä yli 20, kytketään tällöin piirilevyllä useita isoja kondensaattoreita turvaamaan kaikkien piirien tehonsyötön häiriöttömyys. Yleisemmin käytössä on 1... 100 μ F:n elektrolyyttikondensaattori.

Piirilevyn tehonsyöttökondensaattorin tehtävänä on myös estää häiriöiden liikkuminen piirilevyn ja ympäristön välillä molempiin suuntiin. Pelkkä kondensaattori ei yleensä tarjoa riittävää vaimennusta, vaan tehonsyöttölinjaan tulee kytkeä sarjaan vähintään yksi kela. Ferriittisydäminen kela sopii hyvin tehonsyötön suodatukseen, koska se tarjoaa sarjainduktanssin L lisäksi myös sarjaresistanssia R_w , kuva 6.5e. Sarjaresistanssi ei aiheuta häviöitä DC-taajuudella. Ferriittikelan kokonaisimpedanssi Z määräytyy sen sijaiskytken-

nässä esiintyvistä näennäisestä sarjaresistanssista ja induktanssista. Molempien osatekijöiden impedanssit ovat riippuvaisia taajuudesta.

$$Z = \sqrt{R_w^2 + (2\pi fL)^2}$$



KUVA 6.5e. Ferriittisydäminen kela ja sen sijaiskytkentä.

Jos resistiivinen ominaisuus on hallitseva, on kelan tarjoama impedanssi tasainen taajuustasossa. Jos induktiivinen ominaisuus on hallitseva, kasvaa kelan impedanssi taajuuden mukaan. Normaalin ferriittikelan impedanssi on noin 100 Ω ja toiminnallinen taajuusalue on 1... 200 MHz.

Ferriittisydämisiä keloja käytettäessä on huomioitava sydämen mahdollinen kyllästyminen suurilla virtatasoilla (esim. DC-virta). Kun kuristimen lävitse kulkeva virta kasvaa tietyn rajan ylitse, ferriittisydän menettää suurimman osan permeabiliteetistään ja sen induktanssi laskee huomattavasti. Ferriittisydämiset kelat generoivat häiriöitä huomattavasti vähemmän ympäristöönsä kuin ilmasydämiset kelat, mutta ottavat herkemmin vastaan ulkopuolisia häiriöitä. **Ferriittisydämisiä keloja ei tule asettaa voimakkaasti häiriöllisten komponenttien läheisyyteen.**

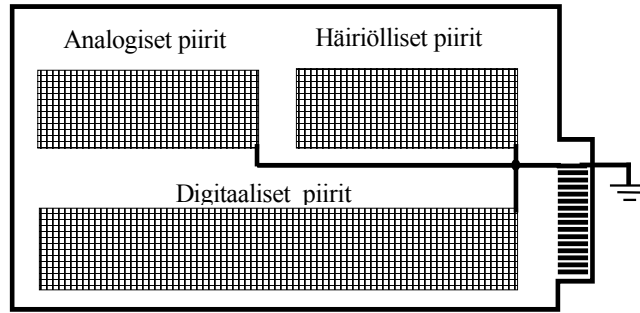
Mikroprosessorilaitteet

Ohjelmallisen häiriönsiedon suunnittelu jaetaan karkeasti kahteen osaan: virheen tai virheellisen toiminnon havaitsemiseen ja virheen korjaamiseen tai virheellisestä toiminnosta selviytymiseen. Ohjelman suorituksessa tapahtuvien virheiden havaitsemiskeinoja ovat: ohjelmalliset tarkistuspisteet, suoritusajan tarkkailu ja ohjelmalliset tunnussanat. Input/ output virheiden paljastamiskeinoja ovat: datan tyyppin ja suuruusluokan tarkistus, ohjelmallinen suodatus ja lähtötietojen takaisinluenta. Muistivirheiden paljastuskeinoja ovat: tarkistussummat, pariteettitarkistus ja virheenkorkauskoodit.

6.5.3. Analogia- ja digitaalipiirien maadoitus

Molemmille yksiköille on hyvä olla erilliset tehonsyötöt. Rajapinnoissa analogia- ja digitaalipiirit joudutaan yhdistämään. Jos maatasot on yhdistettävä tehdään se mieluummin pienellä vastuksella. Vastus estää häiriövirtojen leviämistä ja maiden välinen häiriöjännite jää sen ylitse.

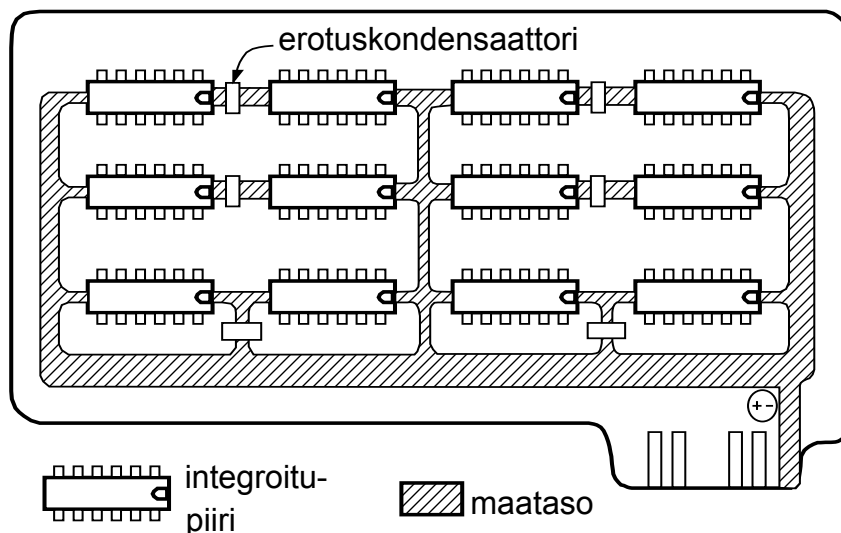
Kuvassa 6.5f esitellään piirikortti, jossa on digitaalisia, analogisia ja hyvin häiriöllisiä (releet ja hakkuriteholähteet) piirejä. Digitaalipiirit on maadoitettu monipistekytkenällä yhtenäiseen maatasoon. Analogiset ja hyvin häiriölliset piirit on maadoitettu omiin maadoitusverkkoihin. Jos nämä kolme erillistä maadoitusverkkoa yhdistetään, tehdään se rinnankytkennällä vain yhdestä pisteestä. Kotelomaadoitus ja ulkopuolinen tehonsyöttö kytketään samaan tähtipisteeseen.



KUVA 6.5f. Digitaalisten, analogisten ja hyvin häiriöllisten piirien erilliset maadoitusverkot.

Kuvassa 6.5g esitetään yleisesti käytetty maadoitustapa (gridded ground) digitaalipiirejä sisältävällä piirikortilla. Tämän tyyppinen kytkentä yhdistää sarja- ja rinnankytkentämaadoituksen ja vähentää yhteisten impedanssien kautta tapahtuvaa kytkeytymistä. Erotuskondensaattorin tehtävänä on suodattaa tehonsyötössä esiintyvät häiriöt ja pienentää tehonsyötön muodostamaa silmukkaa. Esitetty maadoitustapa sopii digitaalipiireille, jotka siirtävät samankaltaista signaalia ja sietävät kohtuullisesti häiriöitä. Mahdollinen hyöty on siten tapauskohtainen.

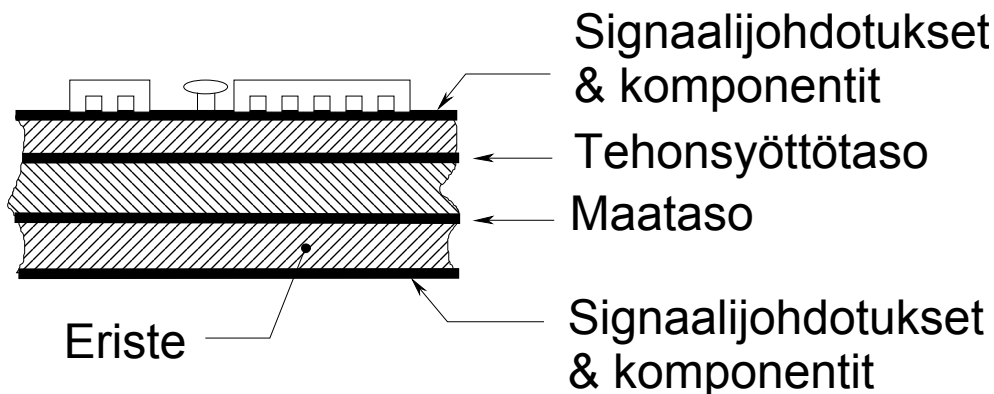
(Chatterton 1991: 260, Hewlett Packard 1989: 3-11).



KUVA 6.5g. Yleinen maadoitustapa digitaalipiirikortilla.

Kaksikerrospiirilevyllä joudutaan usein käyttämään levyn molemmat puolet johdotukseen ja komponenttisijoitteluun. Maataso tulee kuitenkin jättää mahdollisimman kattavaksi ja yhtenäiseksi. Erilliset maa-alueet yhdistetään toisiinsa pieni-impedanssisesti mahdollisimman monesta kohdasta. Yleissääntönä voidaan sanoa, että kapean maadoitusliuskan pituus ei saa ylittää $1/8$ mahdollisen häiriötaajuuden aallonpituudesta. Erityistä huomiota on kiinnitettävä kapeiden maadoitusliuskojen tasapotentialisuuteen. Esimerkiksi kapea maaliuska kahden signaalijohtimen välissä voidaan kytkeä läpikuparoitujen reikien avulla kaksikerrospiirilevyn toisella puolella olevaan maatasoon. Läpikuparoiteja tulee sijoittaa erityisesti häiritsevien ja helposti häiriintyvien johtimien ja komponenttien ympärille. Jos samalla piirilevyllä on erityyppisiä, herkkiä ja häiritseviä signaaleja, yhtenäinen maataso ei ole käyttökelpoinen ratkaisu. Tällöin eri signaalien maatasot yhdistetään toisiinsa vain yhdestä pisteestä.

Yleinen ratkaisu on nelikerroslevy (kuva 6.5h), jossa on kaksi kerrosta signaalijohdotuksille ja erilliset kerrokset tehonsyötölle ja maatasolle (signaalijohdotukset ja komponentit, tehonsyöttötaso, maataso, signaalijohdotukset ja komponentit). Yhtenäiset maatasot toimivat suojana sähkömagneettista säteilyä vastaan, johdotukset jäävät lyhyiksi ja niiden muodostamat silmukat ovat pieniä.



KUVA 6.5h. Nelikerrospiirilevyn rakenne.

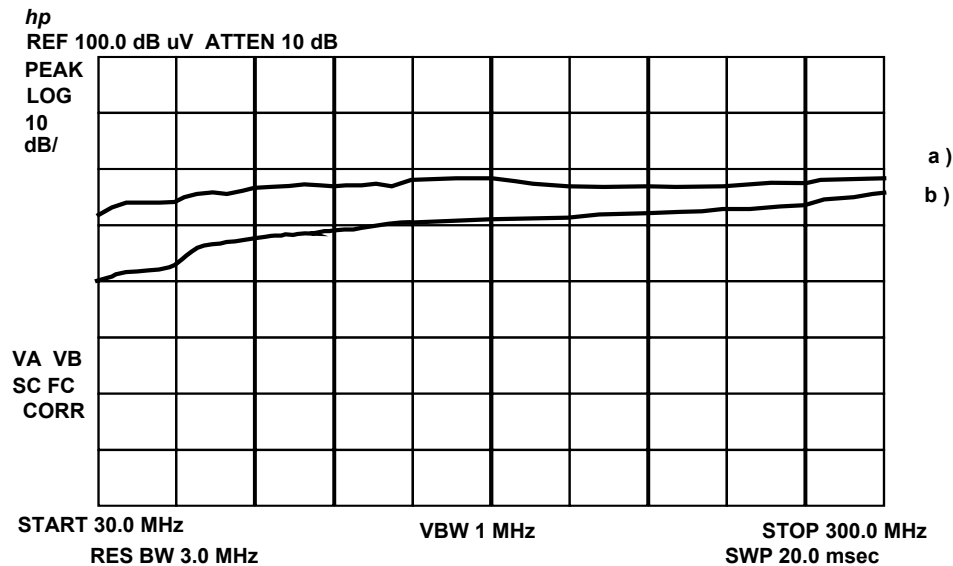
6.5.4. Suunnittelusääntöjä

- Kytetään jokaisen digitaalipiirin tehonsyöttöön suodatinkondensaattori. Kondensaattorin johdinten tulee olla lyhyet ja se sijoitetaan mahdollisimman lähelle piiriä.
- Minimoidaan virtasilmukoiden muodostamat pinta-alat (käyttöjännite- ja maadoitusjohdin mahdollisimman lähellä toisiaan).
- Signaali- ja paluuvirtatie sijoitetaan mahdollisimman lähekkäin.
- Suositetaan pyöreitä ja yhtenäisiä muotoja piirilevyjohtimissa ja maatasoissa.
- Suodatetaan tehonsyöttö mahdollisimman kapeaksi
- Suodatus sijoitetaan mahdollisimman lähelle häiriölähdettä.
- Tehonsyötön tulee kulkea suodatinkondensaattorin napojen kautta. Käytetään hyväksi kondensaattorien resonanssiominaisuudet.
- Langallisten komponenttien käytössä huomioidaan johtimien induktanssit.
- Erilliset maatiet ja tehonsyötöt häiritseville ja helposti häiriintyville piireille. Jos tämä ei ole mahdollista, tuodaan teho ensin häiritsevälle piirille, josta suodatuksen kautta herkälle piirille.
- Käytetään mahdollisimman hitaita logiikkaperheitä (hitaat tilamuutokset).
- Maadoitetaan piirit rinnankytkennällä (minimoidaan piirien yhteiset impedanssit).
- Käytetään mahdollisimman lyhyitä ja leveitä tehonsyöttöjohtimia.
- Käytetään yhtenäistä maatasoa (minimoidaan maadoitusimpedanssi). Monikerrospiirilevy on suositeltavin ratkaisu.
- Turvallinen maajohtimen pituus on alle $1/20$ suurimman signaalitaajuuden aallonpituudesta. Maadoitusliuskan pituus ei saa ylittää $1/8$ aallonpituutta.
- Minimoidaan maadoitusliuskan induktanssi ja resistanssi. Maajohtimen pituuden ja leveyden suhde on pidettävä mahdollisimman pienenä.
- Vältetään sarjamaadoitusta.
- Käytetään yksipistemaadoitusta matalalla taajuuksilla (< 1 MHz).
- Käytetään monipistemaadoitusta suurilla taajuuksilla (> 10 MHz).
- Etenkin digitaalitekniikassa pyritään yhtenäiseen ja kattavaan maatasoon.
- Kaapelivaipat, liittimet ja suodattimet maadoitetaan häiriöttämään maatasoon.

6.5.5. Johdotukset piirilevyllä

Kun signaalijohdin ja paluuvirtatie ovat kaukana toisistaan muodostuu suuri-impedanssinen, häiriöitä säteilevä ja vastaanottava silmukka. Lisäksi johtimen muodostama suuri induktanssi hidastaa nopean ja suurivirtaisen piirin toimintaa. Lähekkäin sijoitettujen signaali- ja paluuvirtateiden välinen keskinäisinduktanssi pienentää kokonaisinduktanssia. Tämä toteutetaan parhaiten yhtenäisellä maatasolla, joka ympäröi signaalitiet. Digitaalitekniikassa tämä on yleensä mahdollista vain nelikerrospiirilevyllä. Jos levyllä on erityyppisiä, herkkiä ja häiritseviä signaaleja, yhtenäinen maataso ei ole käyttökelpoinen ratkaisu. Tällöin eri signaalien maatasot yhdistetään toisiinsa vain yhdestä pisteestä.

Seuraavassa mittaustuloksessa esitetään signaalijohdinta ympäröivän yhtenäisen maatason merkitys johtimen emittoimaan säteilyyn, kuva 6.5j. Käyrä a) kuvaa suojaamattoman lankajohtimen säteilyä. Käyrä b) kuvaa yhtenäisellä maatasolla ympäröidyn piirilevyjohtimen säteilyä. Johtimiin syötettiin signaalia tracking-generaattorilla (taso 90 dBuV) ja niiden emittoimaa säteilyä mitattiin magneettikentän mittapöydällä. Johtimet päätettiin yhtenäiseen maatasoon 47 Ω:n pintaliitosvastuksella. Molempien johtamien pituus oli 100 mm.



KUVA 6.5j. Signaalijohdinten emittoima säteily, kun johtimena on a) suojaamaton lankajohtin tai b) yhtenäisellä maatasolla ympäröity piirilevyjohtin.

Edellä esitetystä mittaustuloksesta havaitaan, että yhtenäisellä maatasolla ympäröidyn piirilevyjohtimen emittoiman säteilytaso on 4...12 dB pienempi verrattuna suojaamattomaan lankajohtimeen. Säteilevän johtimen kenttävoimakkuus on suoraan verrannollinen johtimen pituuteen.

6.5.6. Siirtojohtimien sovitukset

Epäsovitukset lisäävät häiriösäteilyä ja ylikuulumista sekä aiheuttavat vääriä loogisia tiloja signaaleissa.

Piirilevyllä signaalijohdinliuskasta ja maatasosta muodostuu siirtojohto. Siirtojohtimien impedanssiin vaikuttavat: signaalijohdinten leveys, johtimien etäisyys maatasosta, piirilevyn paksuus ja dielektrisyysvakio.

Pyöreät muodot ovat parhaat piirilevyliuskissa ja sitä ympäröivissä maatasoissa.

Digitaalipiirien sovitusta mitoitettaessa on huomioitava lähtö- ja tuloporttien impedanssin muuttuminen loogisen tilan mukaan.

Siirtojohtimen alkupään sovitus tapahtuu sarjavastuksella, koska yleensä digitaalipiirien lähtöimpedanssi on liian pieni. Vastuksen tulee yhdessä piirin lähtöimpedanssin kanssa olla siirtojohtimen impedanssin suuruinen. Loppupään sovitus tapahtuu rinnakkaisvastuksella.

Monien yleisesti käytettyjen logiikkaperheiden kaistanleveydet yltävät jopa satoihin megahertzeihin. Piirikorttien on kyettävä siirtämään energiaa myös radiotaajuuksilla. Näillä taajuuksilla johdin suunnitellaan siirtojohtoksi, jolla on oltava koko johtimen matkalla tietty ominaisimpedanssi (Z_0), joka sovitetaan johtimen tulo- ja lähtöpään pääteimpedansseihin. Johtimen ominaisimpedanssin suuruuden määräävät johtimen induktanssi L sekä johtimen ja maatason välinen hajakapasitanssi C

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Signaalin etenemisnopeus tyypillisellä komponenttilevyllä on noin 20 cm/ns. Käytettävän logiikan nousuaika ja fan-out (digitaalipiirin antoon kytkettävien piirien suurin sallittu lukumäärä) määräävät johtimen sovitustarpeen. Johdin on sovitettava, jos sen pituus (l) ylittää annetun raja-arvon (KOTEL 1988: 42)

$$l [\text{cm}] \geq \frac{10 \cdot \text{nousuaika} [\text{ns}]}{\sqrt{\text{fan_out}}}$$

Esimerkiksi logiikan nousuaika on 2 ns ja fan-out 5. Johdin on sovitettava, jos sen pituus on suurempi kuin 9 cm.

Heijastuksia tapahtuu aina kun signaali kohtaa erilaisen impedanssin. Jos signaalijohtimen impedanssi Z_0 on 100 Ω ja kuormaimpedanssi Z_L on 150 Ω , on heijastuskerroin G ja vaimennus HV

$$G = \frac{(Z_L - Z_0)}{(Z_L + Z_0)}$$

$$G = \frac{(150 - 100)}{(150 + 100)} = 0,2$$

$$HV = -20 \log (0,2) = 14 \text{ dB}$$

Heijastusvaimennus on 14 dB eli takaisin heijastunut signaali on 1/5 syötetyn signaalin amplitudista. Edellisen esimerkin perusteella voidaan viiden voltin logiikkapulssiin lisätä yhden voltin häiriöpulssi. Jos kuormaimpedanssi on pienempi kuin signaalijohtimen impedanssi, vähennetään häiriöpulssi signaalipulssista.

Impedanssisovitus

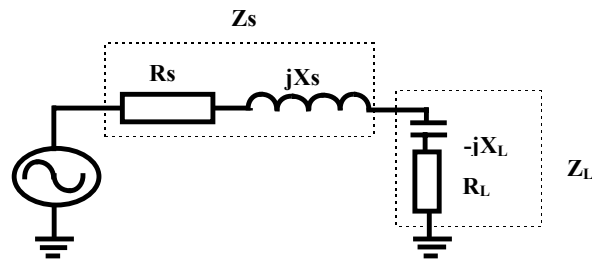
Sovitetussa piiriratkaisussa maksimiteho siirtyy signaalilähteestä kuormaan ja heijastuksia ei esiinny. DC:llä suurin teho saadaan siirrettyä, kun lähteen (R_s) ja kuorman (R_L) resistanssit ovat yhtä suuret. Jos kuorman resistanssi kasvaa tai pienenee, kuormaan saatava teho pienenee. Vaihtovirralla impedanssisovitus on täydellinen, jos signaalilähteen (Z_s) ja kuorman (Z_L) impedanssit ovat kompleksiset konjugaatit, eli resistiiviset osat ovat yhtäsuuret ja reaktiiviset osat ovat vastakkaismerkkiset:

$$Z_s = R_s + jX_s \quad \text{ja} \quad Z_L = R_L - jX_L$$

$$R_s = R_L$$

$$jX_s = -jX_L$$

Kun signaalilähteen ja kuorman impedanssit kytketään sarjaan, resistiiviset osat ovat yhtäsuuret ja vastakkaismerkkiset reaktiiviset osat kumoavat toisensa, kuva 6.5k. Tällöin sovitus on täydellinen ja heijastusvaimennus on äärettömän suuri.

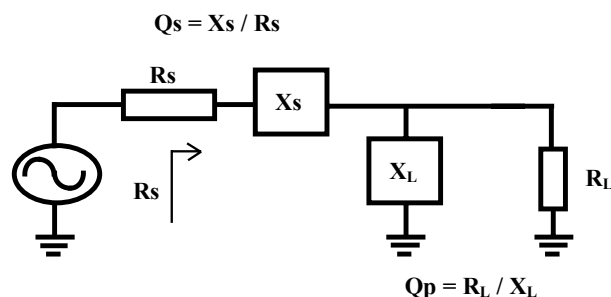


KUVA 6.5k. Signaalilähteen ja kuorman impedanssisovitus.

Impedanssisovituksessa pyritään siis kuorman impedanssi saamaan lähteen impedanssin kompleksiseksi konjugaatiksi. On huomattavaa, että täydellinen impedanssisovitus voidaan saavuttaa vain yhdellä taajuudella (f_{res} = resonanssitaajuus), koska reaktiiviset komponentit ($X_{S,L}$) ovat taajuusriippuvaisia. Sovitus heikkenee resonanssitaajuuden alaja yläpuolella. Tästä seuraa, että laajaa taajuusaluetta ei voida sovittaa yhtä hyvin kuin yksittäistä pistetaajuutta. Kytkenän resonanssitaajuus määräytyy sarjaan kytketystä induktanssista L ja kapasitanssista C

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Käytetyin sovitintyyppi on L , jossa kapasitiivinen ja induktiivinen komponentti ovat L -kirjaimen muotoon asetetut, kuva 6.5l.



KUVA 6.5l. L -sovitin, kun kuorman impedanssi on suurempi kuin signaalilähteen.

Muita käytettyjä sovitin- sekä suodatintyyppejä ovat T ja Π . Kahdella komponentilla muodostettu L -sovitin on mahdollista kytkeä neljällä tavalla. Kaksi mallia ovat alipäästösuodattimia ja loput kaksi mallia ovat ylipäästösuodattimia. Kuvassa 6.5m esitetty sovitin on alipäästösuodatin. Sovittimella pyritään halutulla taajuudella samaan kuorma näyttämään lähtöimpedanssin suuruiselta kun kuormaa katsotaan signaalilähteen suunnalta. Jos taas pyritään suodattamaan pois haluttu taajuusalue, suunnitellaan mahdollisimman suuri impedanssiero lähteen ja kuorman välille. Signaalilähteen ja kuorman impedanssien alkuperäinen suhde määrää, minkä tyyppistä sovitinta tai suodatinta voidaan käyttää.

L -sovitin haittana on, että suunnittelija ei voi vaikuttaa kytkenän hyvyyslukuun (Q = Quality factor). Resonanssiin hyvyysluku Q_{load} ilmoittaa, miten suuri on keski-taajuuden f_{res} suhde resonanssikäyrän kaistanleveyteen f_{3dB}

$$Q_{load} = \frac{f_{res}}{f_{3dB}}$$

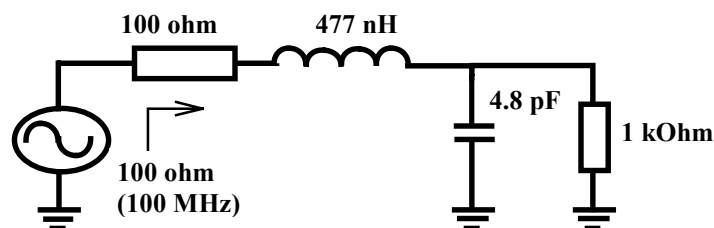
Mitä suurempi hyvyysluku on, sitä kapeampi ja puhtaampi resonanssi on. Q_{load} tarkoittaa kuormitetun resonanssipiirin hyvyyslukua, johon vaikuttavat signaalilähteen ja kuorman pääteimpedanssit sekä sovittimessa käytettävien yksittäisten komponenttien hyvyysluku Q_{comp} .

Komponentin hyvyysluku ilmoittaa komponentin todellisesta sijaiskytkennästä saatavan sisäisen reaktiivisen (X) ja resistiivisen (R) osuuden suhteen:

$$Q_{comp} = \frac{X}{R}$$

Mitä suurempi komponentin hyvyysluku, sitä puhtaampi kyseessä oleva kela tai kondensaattori on, eli sisäinen häviöllinen resistanssi on pieni verrattuna komponentin ilmoitettuun arvoon.

Kuvassa 6.5m esitetään suuri-impedanssisen kuorman (1 k Ω) sovittaminen pieni-impedanssiseen (100 Ω) signaalilähteeseen L-tyyppisellä sovittimella. Ilman sovitinta heijastusvaimennus on 2 dB ja kuormaan saadaan syötettyä vain 33% maksimitehosta. Kuten edellä todettiin, täydellinen sovitus voidaan saavuttaa vain yhdellä taajuudella. Seuraavassa esimerkissä lähde ja kuorma sovitetaan toisiinsa 100 MHz:n taajuudella.



KUVA 6.5m. Kuorman sovittaminen signaalilähteen impedanssiin.

Edellisessä kuvassa esitetyllä sovittimella saadaan kuorma näyttämään 100 Ω :n suuruiselta, kun sitä katsotaan lähteen suunnalta. Sovitus on täydellinen vain 100 MHz:n taajuudella. Yksinkertainen suunnitteluprosessi on seuraava:

- 1) Koska alkuperäinen kuorma on liian iso, kytketään sen rinnalle komponentti (4.8 pF), joka pienentää kuorman resistiivisen osuuden 100 Ω :iin halutulla taajuudella.
- 2) Sarjaan kytketyllä komponentilla (477 nH) kumotaan rinnankytketyn komponentin aiheuttama reaktiivinen osa, jolloin kuorma näyttää lähteestä katsottuna puhtaasti resistiiviseltä.

L-sovittimella ei voida vaikuttaa suunniteltavan resonanssipiirin muotoon (Q_{load}). T- ja P-sovittimilla voidaan suunnitella resonanssipiiri, jonka hyvyysluku on suurempi tai yhtäsuuri kuin L-sovittimen. Toisin sanoen useampi komponenttisella sovittimella tai suodattimella saadaan halutessa jyrkempiä sovituksia ja epäsovituksia. L-sovittimen tapauksessa signaalilähteen ja kuorman resistanssit määräävät piirin hyvyysluvun. Sarjassa olevan tuloimpedanssin (R_s ja X_s) ja rinnakkain olevan kuormaimpedanssin (R_L ja X_L) hyvyysluvut asetetaan alkuperäisten pääteimpedanssien muodostaman lausekkeen suuruisiksi, kuva 6.5m.

$$Q_s = Q_p = \sqrt{\frac{R_L}{R_s - 1}} = \sqrt{\frac{1000}{100 - 1}} = 3$$

Hyvyysluvusta voidaan laskea komponenttiarvot halutulla taajuudella ($f = 100$ MHz), kuva 6.5m. Sarjainduktanssin arvo

$$X_s = Q_s R_s = 300 \Omega$$

$$L = \frac{X_s}{2\pi f} = \frac{300 \Omega}{2\pi 100 \text{ MHz}} = 477 \text{ nH}$$

Rinnakkaiskapasitanssin arvo:

$$X_L = \frac{R_L}{Q_p} = \frac{1000}{3} = 333 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_p} = \frac{1}{2\pi 100 \text{ MHz} (333 \Omega)} = 4,8 \text{ pF}$$

Edellä esitetystä esimerkissä piiri sovitettiin vain yhdelle pistetaajuudelle. Tästä herää kysymys, onko yleensä mahdollista sovittaa impedansseja laajalla taajuusalueella? Laaja taajuusalue voidaan sovittaa, mutta sovitukselta ei saada yhtä täydellistä. Mitä leveämpi sovitettava taajuusalue on sitä huonompi sovitus voidaan saavuttaa.

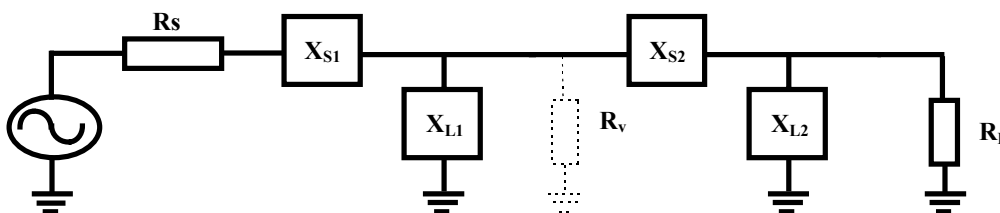
Kuvassa 6.5n esitetään laajemman taajuusalueen ja pienen hyvyysluvun omaava sovitinpiiri. Suurin taajuuskaista ja pienin hyvyysluku saavutetaan, kun kahden sovittimen väliin muodostuva näennäinen vastus R_v on alkuperäisten pääteimpedanssien geometrinen keskiarvo

$$R_v = \sqrt{R_s R_L}$$

Jos sovitettavaa taajuusaluetta halutaan edelleen kasvattaa, käytetään useampia sovittimia, joiden väliset näennäiset vastukset ovat geometrisessa sarjassa. Myös kuvassa 6.5n esitetystä esimerkistä siirtojohtimelle laskettu ominaisimpedanssi Z_0 on pääteimpedanssien geometrinen keskiarvo R_{mean} 100 MHz:n taajuudella:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{477 \text{ nH}}{4,8 \text{ pF}}} = 316 \Omega$$

$$R_{mean} = \sqrt{R_s R_L} = \sqrt{100 \cdot 1000} = 316 \Omega$$



KUVA 6.5n. Laajakaistainen sovitinpiiri.

Edellä esitettyissä sovitinpiireissä ei välttämättä tarvitse käyttää erillisiä komponentteja, vaan halutut induktanssit (piirilevyjohdin) ja kapasitanssit (johtimen ja maatason välillä oleva hajakapasitanssi) muodostetaan piirilevyn layout-suunnittelussa. Tämä tekniikka on erityisesti käytössä laajakaistaisessa suurtaajuustekniikassa. Käytännössä impedanssisovitusta ei tehdä laskemalla kaavoista, vaan käytetään piirianalysaattoria, joka näyttää halutulla taajuusalueella kytkennän heijastusvaimennuksen, impedanssitason ja läpäisyvaimennuksen.

6.5.7. Johtimen induktanssi

Johtimen induktanssi on suoraan verrannollinen johtimen pituuteen. Tämä ominaisuus tulee hyödyntää siten, että häiriöllisimmät tai häiriöille herkimmät johtimet minimoidaan layout -suunnittelussa. Johtimen induktanssi L on myös kääntäen logaritmisesti verrannollinen pyöreän johtimen halkaisijaan d tai piirilevyjohtimen leveyteen W . Johtimen etäisyys maatasosta (paluuvirtatiestä) on h .

Pyöreän johtimen induktanssi:

$$L = 0,2 \ln \left(\frac{4 h}{d} \right) \left[\frac{\text{nH}}{\text{mm}} \right]$$

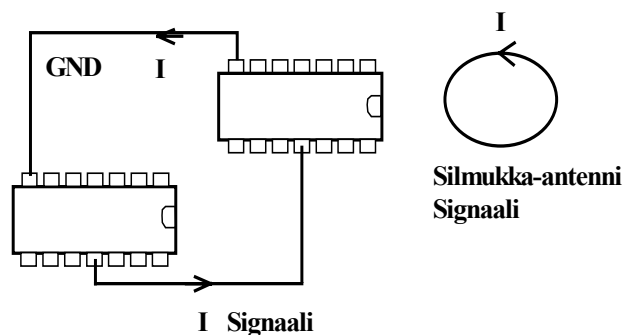
Piirilevyjohtimen induktanssi:

$$L = 0,2 \ln \left(\frac{2 \pi h}{W} \right) \left[\frac{\text{nH}}{\text{mm}} \right]$$

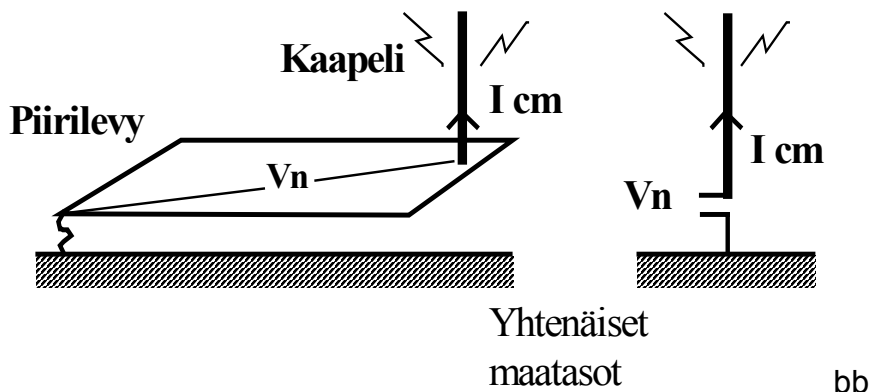
Edellisistä kaavoista havaitaan, että johtimen lyhentäminen pienentää sen induktanssia suoraan verrannollisesti, mutta johtimen leveyden kasvatus vain logaritmisesti. Jos johtimen leveys tai halkaisija kaksinkertaistetaan, pienenee induktanssi tyypillisesti vain 20 %. Myös johtimen ja maatasoin välisen etäisyyden h pienentäminen vähentää induktanssia. Parempi keino on tarjota useita rinnakkaisia paluuvirtateitä, jolloin yksittäisten johtimien induktanssien vaikutus pienenee.

6.5.8. Piirikorttien häiriösäteily

Piirikorttien häiriösäteily voidaan jakaa eromuotoiseen (differential-mode) ja yhteismuotoiseen (common-mode) häiriölähteen mukaisesti. Eromuotoinen häiriölähde syntyy, kun virta I kiertää suuressa johdinsilmukassa, kuva 6.5o. Tällainen virtapiiri toimii kuten pieni-impedanssinen silmukka-antenni. Silmukka-antennin virta on suuri ja magneettikenttä on hallitseva silmukan lähellä. Yhteismuotoinen häiriölähde syntyy, kun piirilevyn maatasossa on potentiaaliero V_n , joka synnyttää maatasoin häiriöjännitteen ja impedanssin mukaisen häiriövirran I_{cm} , kuva 6.5p. Häiriölliseen maatasoon kytketty johdin toimii suuri-impedanssisena antennina, jonka virta on pieni. Sähkökenttä on hallitseva antennin lähellä.



KUVA 6.5o. Eromuotoinen häiriölähde ja vastaava antennityyppi.



KUVA 6.5p. Yhteismuotoinen häiriölähde ja vastaava antennityyppi.

6.5.9. Eromuotoinen säteily

Eromuotoisen häiriölähteen säteilyä voidaan mallintaa pienellä silmukka-antennilla, jonka pinta-ala on A . Silmukassa kulkee virta I taajuudella f , joka synnyttää lähikentässä ympärilleen magneettikentän H . Seuraavassa kaavassa oletetaan, että sähkökenttä voidaan laskea magneettikentän perusteella. Kaukokentässä, rajaetäisyyttä ($r > \lambda/2\pi$) kauempana, saadaan pienen silmukka-antennin (silmukan kehäpituus $< \lambda/4$) lähettämän sähkökentän E voimakkuudeksi vapaassa tilassa:

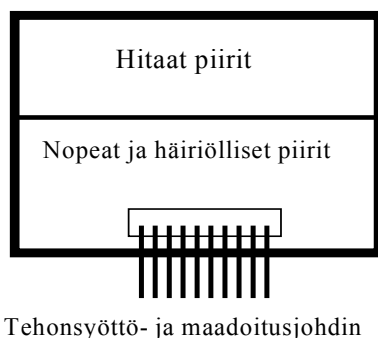
$$E = 132 \cdot 10^{-16} \left(\left(\frac{f}{[\text{Hz}]} \right)^2 \frac{A}{[\text{m}^2]} \frac{I}{[\text{A}]} \right) \cdot \frac{1}{r} \sin(\varphi) \quad [\text{V/m}]$$

Kaavasta havaitaan, että sähkökentän voimakkuus on verrannollinen taajuuden neliöön (f^2), silmukan pinta-alaan (A) ja virtaan (I), sekä kääntäen verrannollinen etäisyyteen silmukasta ($1/r$). Sähkökentän voimakkuus kohoaa erittäin nopeasti taajuuden noustessa. Tämä voi merkitä sitä, että häiriösignaalien harmoniset ovat emissiomittauksessa huomattavasti suurempia kuin alkuperäinen häiriötaajuus.

Eromuotoisen häiriösäteilyn vaimentaminen:

- Käytetään sovelluksessa mahdollisimman hitaita piirejä.
- Minimoidaan signaali- ja tehonsyöttöjohtimien muodostamien silmukoiden pinta-alat (suojatut johtimet ja yhtenäiset maatasot).
- Vähennetään signaalivirtoja (varsinkin pitkissä johtimissa).

Jos piirilevyllä on sekä hitaita että nopeita piirejä (moduleja), järjestetään nopeille piireille lyhimmät johtimet piirilevyn layout-suunnittelussa, kuva 6.5q.



KUVA 6.5q. Hitaita ja nopeita piirejä sisältävän piirikortin layout-suunnittelu.

Maksimisähkökentän voimakkuus saadaan kun vastaanottava antenni on samassa tasossa kuin mitattava silmukka (vrt. $\sin(\varphi)$ -termin vaikutus edellisessä kaavassa). Silmukka-antennin säteilykuvio muuttuu selvästi muotoaan, kun antennin kehäpituus on

suurempi kuin suurimman häiriötaajuuden aallonpituuden neljäsosa ($> \lambda / 4$). Kun kehänpituus on yhtä suuri kuin häiriötaajuuden aallonpituus, on säteilykuvio kääntynyt 90° . Tällöin suurin kentänvoimakkuus on silmukka-antennin normaalitasossa. Suuren ja pienen häiriösilmukan säteilykentän maksimi- ja minimiarvot löytyvät vastakkaisissa tasoissa. Lähikenttämittauksissa (probe) virtasilmukan emittoiman säteilyn kentänvoimakkuus tulee mitata sekä silmukan tasossa että silmukan normaalitasossa. Silmukka-antennin säteilyherkkyys määräytyy silmukan pinta-alan A mukaisesti, silmukan muodolla ei ole merkitystä.

Logiikkapiirin nousuajan perusteella voidaan määrittää piirin käytännössä aiheuttaman häiriösäteilyn ylärajataajuus f . Symmetrisen puolisuunnikaspulssin verhoikäyrä taajuustasossa muodostuu perustaajuuksien harmonista komponenteista. Perustaajuuden harmonisten komponenttien virtataso I saadaan Fourier-sarjan avulla:

$$I_n = I \cdot \frac{\sin(0,5 n \pi)}{0,5 n \pi} \cdot \frac{\frac{\sin(n \pi t_r)}{T}}{\frac{n \pi t_r}{T}}$$

Edellisessä kaavassa I on puolisuunnikaspulssin amplitudi, 0.5 on oletettu pulssisuhde (50%), n on harmonisen komponentin järjestysluku, t_r on pulssin nousuaika ja T on jaksonpituus. Kaavassa oletetaan, että pulssin nousu- ja laskuajat ovat samansuuruiset. Kun pulssin nousuaika on huomattavasti pienempi kuin sen jaksonpituus ja pulssisuhde on 50%, esiintyy taajuustasossa vain parittomia harmonisia. Eromuotoista häiriösäteilyä voidaan vähentää käyttämällä mahdollisimman hitaita piirejä ja alhaista kelloaajuutta.

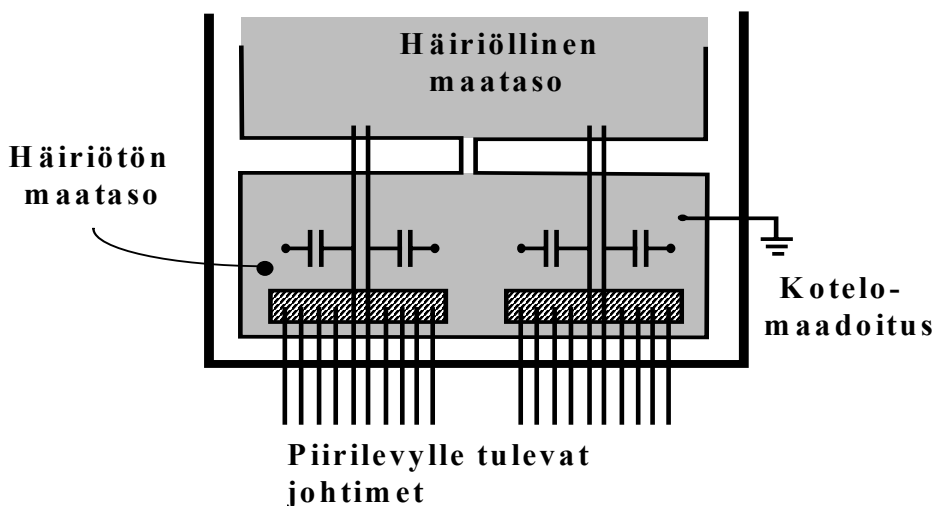
6.5.10. Yhteismuotoinen säteily

Yhteismuotoisen häiriölähteen säteilyä voidaan mallintaa lyhyellä (pituus $< \lambda / 4$) monopoli-antennilla, jota ohjataan maatasossa olevalla häiriöjännitteellä. Käytännössä antennina toimivat johtimet ja kaapelit, jotka on kytketty häiriölliseen maatasoon. Maatason häiriöt säteilevät johtamien kautta ympäristöönsä ja myös päinvastoin. Eromuotoisesti ja yhteismuotoisesti säteilevät häiriöt ovat yleensä eri taajuusalueilla. Lyhyen monopoli-antennin lähettämän sähkökentän E voimakkuudeksi saadaan etäisyydellä r säteilevästä johtimesta

$$E = 12,6 \cdot 10^{-7} (f \cdot l \cdot I) \cdot \frac{1}{r} \sin(q) \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

Yhtälöstä havaitaan, että sähkökentän voimakkuus on verrannollinen häiriötaajuuteen (f), johtimen pituuteen (l), johtimessa kulkevaan yhteismuotoiseen virtaan (I), sekä kääntäen verrannollinen etäisyyteen säteilevästä johtimesta ($1/r$). Sähkökentän voimakkuus on suurimmillaan samassa tasossa kuin häiriöllinen johdin ($\sin q$ -tekijä). Yhteismuotoista häiriösäteilyä voidaan parhaiten vähentää pienentämällä maatason häiriöjännitteitä.

Huomattavaa on, että yhteismuotoisen häiriölähteen säteily kasvaa suoraan verrannollisena taajuuteen. Eromuotoisen häiriölähteen säteily kasvaa siten huomattavasti nopeammin taajuuden noustessa. Yhteismuotoisesti säteilevät häiriöt dominoivat alhaisilla taajuuksilla - ja eromuotoiset ylemmiltä taajuuksilla. Rajataajuutena voidaan yleensä pitää 100 MHz, joka määräytyy laitteen mitoista, maatason häiriöllisyydestä, laitteen toiminnallisesta taajuusalueesta ja kaapeloinnista. Normaleissa laitemitoissa mikroampeerien yhteismuotoinen virta aiheuttaa saman häiriötason kuin milliampeerien eromuotoinen virta. Yhteismuotoista häiriösäteilyä voidaan vähentää suodattamalla kaikki piirilevylle tulevat johtimet häiriöttömään maatasoon, kuva 6.5r.



KUVA 6.5r. Piirilevylle tulevien johtimien maadoittaminen häiriöttömään maatasoon.

Häiriötön maataso yhdistetään piirilevyn muuhun maatasoon kapealla johtimena, jonka induktanssi estää suuritaajuuksien häiriöiden pääsyn häiriöttömään maatasoon. Piirilevyn maadoitetaan koteloon häiriöttömän maatasoon kautta. Tämä vähentää piirikortin ja kotelon häiriöiden siirtymistä molempiin suuntiin. Kotelon ja maatasoon yhdistäminen tulee suorittaa mahdollisimman pieni-impedanssisesti, jotta ei synny yhteismuotoisia häiriövirtoja lisääviä potentiaalieroja. Kaikki piirilevylle tulevat johtimet maadoitetaan ja suodatetaan häiriöttömään maatasoon. Suodatus hoidetaan rinnankytkettävillä kondensaattoreilla ja/tai sarjaan kytkettävillä keloilla tai vastuksilla. Johtimen pääteimpedanssit määräävät parhaan suodatinratkaisun. Maatasoon erottaminen ei aina ole kokonaisuutena suositeltava ratkaisu. Se suurentaa virtasilukoiden pinta-aloja ja lisää siten eromuotoista häiriösäteilyä.

Yhteismuotoisen häiriösäteilyn vaimentaminen:

- Minimoidaan signaalijohtimien ja väylien pituus.
- Käytetään suojattuja johtimia.
- Reititetään johtimet mahdollisimman lähellä maatasoja (säteilyn tehokkuus on suoraan verrannollinen johtimen etäisyyteen maatasosta).
- Suodatetaan johtimet mahdollisimman häiriöttömään maatasoon.
- Reititetään johtimet siten, että häiriöt eivät voi uudelleen kytkeytyä suodatettuun johtimeen.
- Käytetään yhtenäisiä maatasoja (pieni maadoitusimpedanssi).
- Käytetään johtimien ympärillä yhteismuodon kuristimia (suodattavat vain yhteismuotoiset häiriöt).
- Käytetään mahdollisimman alhaisia siirtotaajuuksia (pitkät nousuajat).
- Käytetään hidasta ja pienitehoista logiikkatyyppejä.
- Nopea logiikka vain TODELLA tarpeellisiin sovellutuksiin.
- Käytetään mahdollisimman alhaista kellotaajuuksia ja symmetristä pulssisuhdetta,
- Nopeimmalla piirillä lyhyimmät johtimet (väylä, tehonsyöttö). Tämä on huomioitava layout-suunnittelussa.
- Kello- ja maajohtin vierekkäin piirilevyltä, kaapeleissa ja liittimissä.
- Kytetään mahdollisimman monta maajohtinta symmetrisesti moninapaisissa kaapeleissa ja liittimissä, maajohtimilla rajoitetaan johdinsilmukoiden pinta-aloja.
- Piirien käyttämättömiä tulo- ja lähtöjohtimia ei saa kytkeä käytössä olevien rinnalle.
- Piirilevyjen ja moduulien väliset liittännät kytetään puskuripiirien välityksellä. Puskuroinnilla voidaan lyhentää myös samalla piirilevyltä kulkevaa väylää.
- I/O- ja puskuripiirit sijoitetaan mahdollisimman lähelle liittintä.
- Erotetaan osoite ja dataväylät riittävästi toisistaan.
- Sovitetaan johtimet ja väylät.

6.6. Teholähteet

6.6.1. Teholähteen suunnittelu

Piirilevyillä käytetään toimintaperiaatteiltaan kahdenlaisia teholähteitä: lineaarisia regulaattoreita ja hakkureita.

Lineaariset teholähteet eivät yleensä aiheuta häiriöitä. Koska lineaariset teholähteet eivät myöskään vaimenna merkittävästi lävitseen meneviä häiriösignaaleja, tarvitaan myös niiden yhteyteen suodatusta.

Teholähteen tehtävänä häiriöiden kannalta on estää sähköverkon puolelta tulevien häiriöiden pääsy laitteeseen, estää laitteesta tulevien häiriöiden pääsy sähköverkkoon ja olla itse tuottamatta häiriöitä kumpaankaan suuntaan.

Suodattimen valintaan vaikuttavat laitteiston ominaisuudet: käyttöjännite, suurin virran tehollisarvo, teholähteen tyyppi ja laitteen häiriöntuottavuus ja -sietoisuus. Tehonsyötössä esiintyy sekä yhteis- että eromuotoisia häiriöitä, jotka suodattimen tulee kyetä suodattamaan. Lisäksi tarvitaan myös ylijännitesuojaus transientteja vastaan.

Yhteismuodonkuristin on usein ainoa keino valmiin tuotteen tehonsyötön häiriösäteilyn pienentämiseksi ja sietoisuuden parantamiseksi. Yhteismuodonkuristin pyrkii estämään verkkojohdossa yhteen suuntaan kulkevan virran etenemisen. Vastakkaisuuntaisia virtoja se ei vaimenna. Yhteismuodonkuristin toteutetaan pujottamalla johto ferriittirenkään lävitse kerran tai useammin. Kuristin tulee sijoittaa aivan liittimen viereen laitteen sisäpuolelle tai läpivientikoteloon, joka on maadoitettu koteloon.

Sähköverkkoon liitettävä hakkuriteholähde aiheuttaa verkkoon niin paljon radiotaajuisia häiriöitä, että suodatin on aina välttämätön. Ne saattavat säteillä harmonista jopa 100 kertaisesti toimintataajuutensa yläpuolella. Häiriön perustaajuus on flyback- ja forward-teholähteissä sama kuin kytkentätaajuus ja push-pull- tyyppisessä teholähteessä kaksinkertainen kytkentätaajuuteen verrattuna. Hakkuriteholähde saattaa myös säteillä häiriöitä ympäristöönsä.

Nanosekuntien luokkaa olevat nousuajat synnyttävät virtapiikin (dI), joka aiheuttaa jännitemuutoksia tehonsyöttöjohtimien induktansseissa. Nämä häiriöt leviävät laitteen muihin piireihin yhteisten tehonsyöttöimpedanssien välityksellä sekä ympäristöön sähkömagneettisen kentän välityksellä. Ongelma korostuu, jos useissa piireissä tapahtuu samanaikaisia tilamuutoksia.

6.6.2. Häiriönsuojauskomponentteja

Häiriönsuojauskomponentteja valittaessa tulee tarkkaan määrittää millaisilta häiriöiltä suojaudutaan ja mitkä ovat suojattavan laitteen ominaisuudet, on selvitettävä mm. ovatko häiriöt jatkuvia vai transientteja, häiriöiden maksimiampplitudi, nousuaika, energia, taajuusalue ja hyötysignaalin taajuusalue.

6.6.3. Ylijännitesuojat

Tehonsyöttö- ja signaalijohdoissa saattaa esiintyä ylijännitteitä ja transientteja, joilla on suuri amplitudi ja pieni nousu aika. Transientteja voivat aiheuttaa salamaniskut, sähköstaattiset purkaukset ja kytkemisilmiöt. Tavanomaiset suodattimet eivät kykene riittävästi vaimentamaan transientteja, joten laitteiden suojaamiseksi tarvitaan ylijännitesuojia. Ylijännitesuoja alkaa johtaa, kun jännite kohoaa liipaisukynnyksen ylitse. Yleisimmät ylijännitesuojat ovat: kaasupurkausputket, varistorit, zener-diodit ja puolijohdesuojat.

6.6.4. Suodattimet

Signaalijohtimissa esiintyvät pienitasoiset häiriöt suodatetaan LC-komponenteilla. Signaali-johtimissa saattaa esiintyä sekä yhteis- että eromuotoisia häiriöitä. Etenkin nopeassa dataliikenteessä saattavat signaalien kaistanleveysvaatimukset olla suuret. Tällöin joudutaan käyttämään eromuodon alipäästösuodatinta, jonka ylärajataajuus on hyvin korkea. Tällöin on suositeltavaa käyttää kuristimia, jotka vaimentavat hyvin yhteismuotoisia häiriöitä, mutta vain vähän eromuotoista signaalia.

Häiriösuodattimia on saatavana valmiina yksikköinä tai niitä voidaan rakentaa erilliskomponenteista. Suodattimissa käytettävät peruskomponentit ovat parasiittisten ominaisuuksiensa perusteella taajuusriippuvaisia. Niiden ominaisuudet voivat muuttua ratkaisevasti jo 1 MHz:n taajuudesta alkaen. Ferriittisydämissä kuristimia käytettäessä on huomioitava sydänmateriaalin kyllästymisen suurilla virroilla. Tyypillisimmät suodatintyypit ovat: **L**, **T** ja **Π** (Keiser 1987: 171-182). Vaikean ongelman suodatinsuunnittelussa aiheuttaa se että suodattimen näkemiä impedansseja ei kyetä yleensä laskemaan etukäteen halutulla taajuusalueella. Paras menetelmä suodatinsuunnittelussa on kokeiluperiaate ja tarkat taajuusvas-temittaukset. Suositeltavia erotuskomponentteja ovat optoeristin ja valokaapeli. Tavanomaisempia erotuskomponentteja ovat muuntajat ja kuristimet.

6.6.5. Suunnittelusääntöjä

- Signaalitien taajuuskaista rajoitetaan hyötysignaalin vaatimuksen mukaiseksi (ali-, yli-kaistanpäästö tai kaistanesto).
- Kaikki kotelon rajapinnan ylittävät johtimet suodatetaan.
- Suodatin asennetaan siten, että häiriöt eivät voi kytkeytyä uudelleen suodatettuun johtimeen esimerkiksi toisista johtimista. Suodatin kytketään kotelon sisä- tai ulkopuolelle häiriötiivisti.
- Suodatin vaatii häiriöttömän maadoituksen.
- Suodattimen suorituskykyyn vaikuttavat merkittävästi lähteen ja kuorman impedanssit. Tämä on huomioitava suodatintyyppin valinnassa.
- Suurilla taajuuksilla (> 1 MHz) komponenttien ominaisuudet muuttuvat ratkaisevasti.
- Selvitetään suodatinkomponenttien ominaisuudet halutulla taajuusalueella (laskelmat vastinkytkennästä, mittaukset ja datakirjat).
- Ilmasydämiset kelat generoivat enemmän häiriöitä ympäristöön kuin ferriittisydämiset kelat.
- Ferriittisydämiset kelat ovat herkempiä ympäristössä esiintyville häiriöille kuin ilmasydämiset kelat.
- Huomioidaan ferriittisydämen mahdollinen kyllästymisen.
- Erotusmuuntajat varustetaan käämien väliin sijoitetulla staattisella suojalla kapasitiivisen kytkennän ehkäisemiseksi. Suoja tulee maadoittaa.
- Hakkuriteholähteet aiheuttavat AINA häiriöitä: johtuvia ja säteileviä. Hakkuriteholähde vaatii suodatuksen tulo- ja lähtöpuolelle.
- Ylijännitesuojat asennetaan siten, että ne suojaavat sekä yhteis- että eromuotoisilta ylijänniteiltä. Ne kytketään kaikista johtamista laitteen runkoon ja myös johtimien välille.
- Eromuodon ylijännitesuoja sijoitetaan yhteismuodon suojien jälkeen.
- Ylijännitesuojat kytketään mahdollisimman lähelle laitekoteloa lyhyillä johtimilla.
- Ylijännitesuojien valintaperusteet: maksimivirrat ja -jännitteet, kynnsjännite, tehonkesto, suojan nopeus ja tarkkuus.

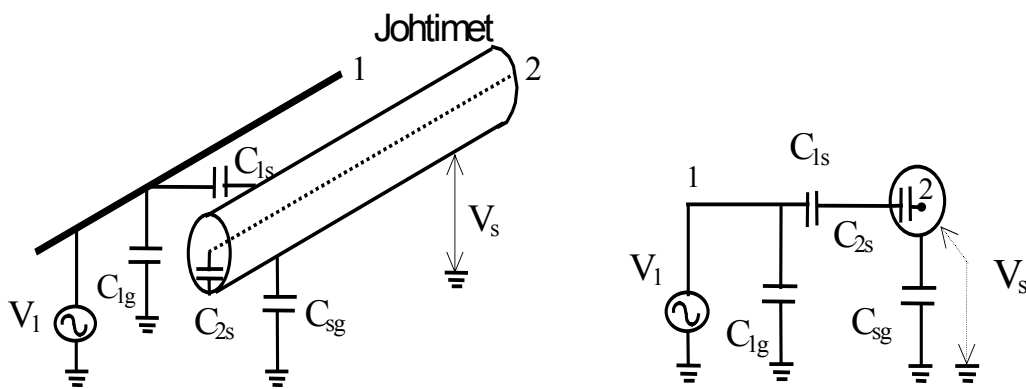
6.7. Kaapelit

Jokainen laitteeseen liitetty kaapeli toimii häiriösäteilijänä, myös maadoitusjohdin. Suojattujen kaapeleiden vuotaminen ei yleensä ole säteilyn syy, vaan kaapelivaippojen puutteellinen maadoitus.

Kaapeleiden herkkyys häiriöille perustuu niiden pituuteen ja usein puutteellisiin liitännöihin. Kaapelointeja suunniteltaessa on aina huomioitava siirrettävän signaalin taajuusalue, ta-sot, siirtoimpedanssi, siirtotien pituus sekä kapasitiivinen että induktiivinen kytketyminen läheisiin johtimiin. Kaapeleiden pituus on pyrittävä minimoimaan ja siirtotien taajuuskaista on rajattava hyötysignaalin vaatimuksen mukaiseksi. Ensimmäinen tapa välttää häiriöllisiä kytketyksiä, on suunnitella tarkoin johtimien ryhmittely ja kulkureitit. Seuraava askel on suojattujen kaapeleiden käyttö ja hyvät maadoitukset.

6.7.1. Suojavaipan merkitys kapasitiivisessa kytketyksessä

Kuvassa 6.7a esitetään kapasitiivinen kytketyminen kahden johtimen välillä, kun häiriötä vastaanottava johdin (johdin 2) on suojattu johtavalla vaipalla.



KUVA 6.7a. Kapasitiivinen kytketyminen johtavalla vaipalla suojattuun johtimeen.

V_1 on johtimessa 1 esiintyvä häiriöjännite. Johtimeen 2 kapasitiivisesti kytketty häiriöjännitteen

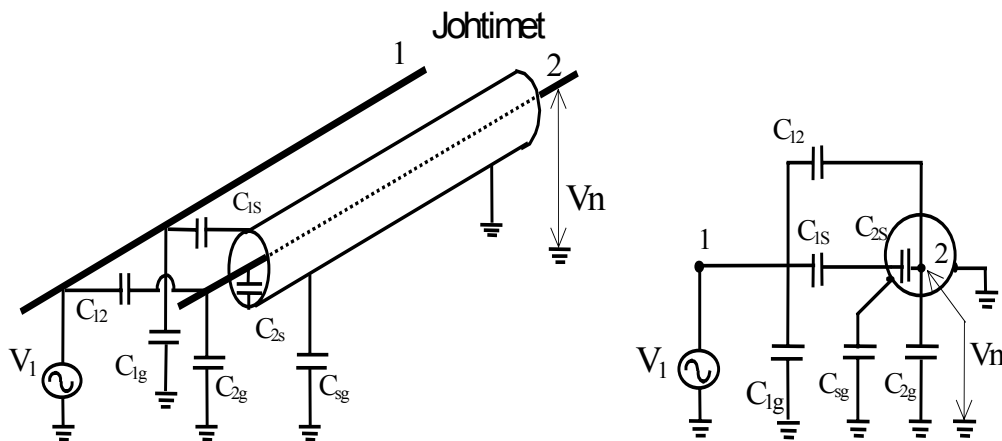
V_s taso on:

$$V_s = \left(\frac{C_{1s}}{C_{1s} + C_{sg}} \right) \cdot V_1$$

Kun johtimen 2 vaippa maadoitetaan yhdestä pisteestä, on vaippaan kytketty häiriöjännitteen taso nolla ($V_s = 0$). Signaalijohtimeen 2 kytketty häiriöjännitteen V_N taso on myös nolla, jos johtimen ja vaipan välisessä hajakapasitanssissa C_{2s} ei kulje virtaa. Yhdestä pisteestä maadoitettu häiriösignaalin aallonpituuteen nähden lyhyt (pituus $< 1/20 \lambda$) johtava vaippa suojaa johtimen kaapasitiiviselta kytketykseltä. Pidempi vaippa tulee maadoittaa monipistekytkenä vähintään suurimman häiriötaajuuden aallonpituuden kahdeksasosan välein.

Kuvassa 6.7a esitetty kytkentä ei esiinny käytännössä, koska johdin 2 on kokonaan vaipan suojassa.

Kuvassa 6.7b esitetään kapasitiivinen kytketyminen vaipalla suojattuun johtimeen, jossa johtimen 2 päät ovat suojaamattomia.



KUVA 6.7b. Kapasitiivinen kytkeytyminen maadoitetulla vaipalla suojattuun johtimeen.

C_{12} on johtimien 1 ja 2 välinen hajakapasitanssi, jonka arvo riippuu mm. suojaamattoman keskijohtimen pituudesta. C_{2g} on johtimen 2 ja maatasoon välinen hajakapasitanssi. Kun vaippa on maadoitettu täydellisesti, johtimeen 2 kytkeytyneen häiriöjännitteen V_N taso on:

$$V_N = \left(\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2g} + C_{2s}} \right) \cdot V_1$$

Kapasitiivisen kytkeytymisen vaimentaminen:

- Minimoidaan suojaamattoman signaalijohtimen pituus liitoksessa.
- Maadoitetaan johdinvaippa pieni-impedanssisesti häiriöttömään maatasoon.
- Käytetään täysin suojattuja liittimiä.

Häiriötiivillä liittimellä jatketaan kaapelin vaippaa, jolloin suojaamattoman signaalijohtimen pituus pienenee nollaan. Jos kaapelin vaippa tai liitin ei ole täysin tiivis, kytkeytyy osa häiriöistä suoraan aukkojen lävitse signaalijohtimeen. Puutteellisen vaipan hajakapasitanssit lisätään kapasitanssiin C_{12} .

6.7.2. Suojavaipan merkitys induktiivisessa kytkeytymisessä

Todettiin, että maadoittamaton tai yhdestä pisteestä maadoitettu suojavaippa ei suojaa induktiiviselta kytkeytymiseltä. Kun suojavaippa maadoitetaan molemmista päistään suojaa se sisällään olevaa signaalijohdinta induktiiviselta kytkeytymiseltä tietyn rajataajuuden yläpuolella. Rajataajuuden alapuolella induktiivinen kytkeytyminen on yhtä voimakasta suojattuun tai suojaamattomaan johtimeen.

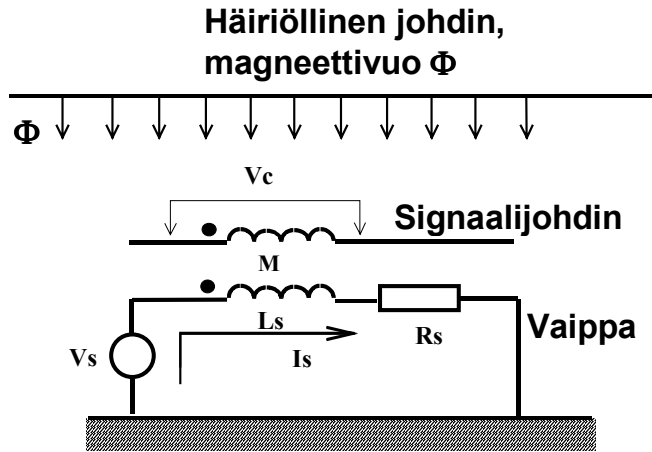
Kun suojavaippa on maadoitettu molemmista päistään, aiheuttaa läheinen häiriöllinen johdin magneettivuon F vaipan ja sen sisällä olevan signaalijohtimen ympärille. Magneettivuo aiheuttaa vaippaan häiriövirran I_s , josta määräytyy vaipan induktanssi L_s :

$$L_s = \frac{F}{I_s}$$

Koska sama magneettivuo ympäröi myös vaipan sisällä olevan signaalijohtimen, indusoituu siihen saman suuruinen häiriövirta kuin vaippaan. Tästä seuraa että suojavaipan induktanssi L_s ja suojavaipan ja signaalijohtimen välinen keskinäisinduktanssi M ovat samansuuruiset:

$$L_s = M$$

Vaipalla suojatun johtimen vastinkytkennästä havaitaan, että vaippaan indusoitunut häiriövirta I_s indusoi keskinäisinduktanssin M välityksellä häiriöjännitteen V_c signaalijohtimeen, kuva 6.7c. V_s on vaippaan indusoitunut häiriöjännite ja L_s ja R_s ovat vaipan induktanssi ja resistanssi.



KUVA 6.7c. Vaipalla suojatun johtimen vastinkytkentä.

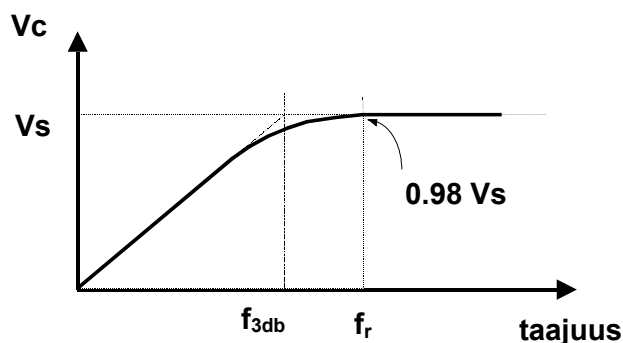
Signaalijohtimeen vaipasta kytkeytyneen häiriöjännitteen V_c taso on:

$$V_c = \frac{j\omega}{j\omega + \frac{R_s}{L_s}} \cdot V_s$$

Kuvasta 6.7d havaitaan, että vaipasta signaalijohtimeen kytkeytyneen häiriöjännitteen V_c taso alkaa lähestyä vaippaan kytkeytyneen häiriöjännitteen V_s tasoa taajuuden $f_{3db} = R_s / 2\pi L_s$ yläpuolella. Tällä taajuudella signaalijohtimeen kytkeytynyt jännite V_c on tasoltaan 3 dB pienempi kuin vaippaan kytkeytynyt jännite V_s . Signaalijohtimeen indusoituneen häiriöjännitteen taso on nolla DC:llä.

Rajataajuuden $f_r = \frac{5 \cdot R_s}{2 \omega L_s}$ yläpuolella vaipasta suojattuun signaalijohtimeen kytkeytyvän jännitteen taso on yli 98% vaippaan indusoituneesta jännitteestä V_s . Koaksiaalijohtimilla rajataajuus f on normaalisti 3... 10 kHz.

Suojausteoria perustuu siihen, että rajataajuutta (f_r) suuremmilla taajuuksilla signaalin paluuvirta palaa mieluummin kaapelin vaippaa kuin maatasoa pitkin (signaalijohtimen ja vaipan keskinäisinduktanssin M vaikutus). Vaippavirran aiheuttama häiriöjännite V_c pienentää ulkopuolisen häiriölähteen keskijohtimeen suoraan indusoiman häiriöjännitteen V_2 tasoa, kuva 6.7e. Tärkeintä on, että signaalijohtimen paluuvirta palaa TÄYDELLISESTI mahdollisimman lähellä signaalijohdinta. Rajataajuuden alapuolella ainoa keino pienentää induktiivista kytkeytymistä on johdinsilmukan pinta-alan pienentäminen.

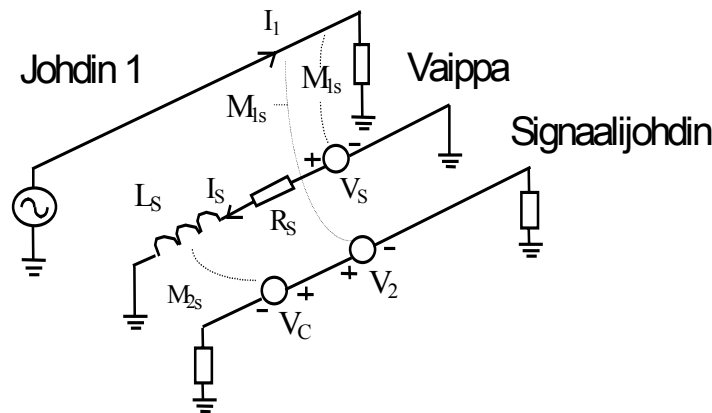


KUVA 6.7d. Koaksiaalikaapelin vaippaan indusoituneen häiriöjännitteen (V_s) kytkeytyminen signaalijohtimeen.

Kuvassa 6.7e esitetään suojaamattoman häiriöllisen johtimen (johdin 1) indusoimien häiriöiden kytkeytyminen maadoitettuun suojavaippaan ja sen sisältämään signaalijohtimeen. Häi-

riöllinen johdin indusoi molemmista päistään maadoitettuun vaippaan häiriöjännitteen V_s ja signaalijohtimeen häiriöjännitteen V_2 . Lisäksi vaippa indusoi signaalijohtimeen häiriöjännitteen V_c . Signaalijohtimeen kytkeytyneet jännitteet V_2 ja V_c ovat vastakkaisvaiheiset, joten signaalijohtimessa esiintyvän häiriöjännitteen V_N taso on:

$$V_N = V_2 - V_c$$

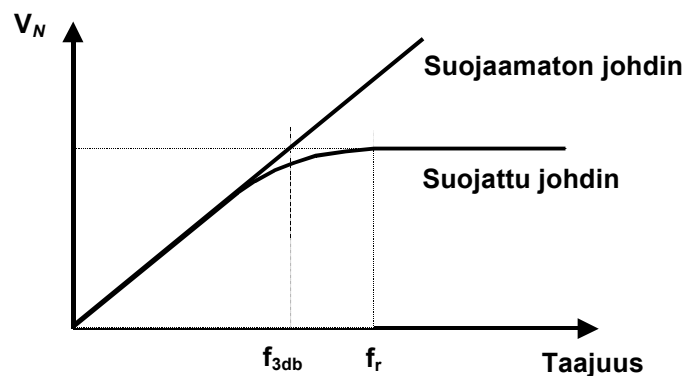


KUVA 6.7e. Induktiivisten häiriöiden kytkeytyminen maadoitettuun suojavaippaan ja sen sisältämään signaalijohtimeen.

Molemmista päistä maadoitetulla vaipalla suojatun signaalijohtimen häiriöjännitteen V_N taso tasaantuu rajataajuuden f_r jälkeen tasolle

$$V_N = \frac{M_{12} \cdot I_1 \cdot R_s}{L_s},$$

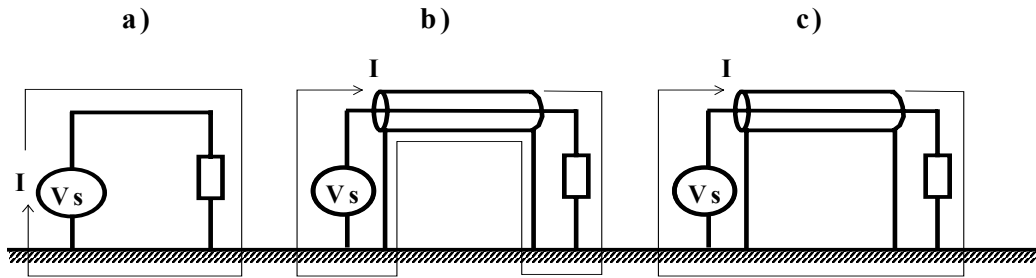
kuva 6.7f. Suojaamattoman kaapelin häiriöjännite kasvaa lineaarisesti taajuuden kasvaessa.



KUVA 6.7f. Induktiivinen kytkeytyminen suojaamattomaan ja monipistemaadoitetulla vaipalla suojattuun johtimeen.

6.7.3. Induktiosilmukan pinta-ala

Paras tapa suojautua induktiiviselta kytkeytymiseltä on minimoida signaalijohtimen ja paluuvirtajohtimen muodostaman silmukan pinta-ala. Paluuvirtajohtimena voi käytännössä toimia johtimen suojakuori, piirilevyn maataso, laitteen kotelo tai näiden yhdistelmä. Kuvassa 6.7g esitetään suojavaipan yksi- ja monipistemaadoituksen vaikutukset induktiosilmukan pinta-alaan.



KUVA 6.7g. Induktiosilmukan pinta-ala suojaamattomalla johtimella (a) tai kun suojatun johtimen vaippa on maadoitettu moni- (b) tai yksipistemaadoituksella (c).

Suojaamattomalla (a) ja yksipistemaadoitetulla vaipalla suojatulla (c) johtimella induktiosilmukan pinta-alat ovat yhtä suuret, eli nämä eivät tarjoa lainkaan suojaa induktiiviselta kytketymiseltä. Vaihtoehto (c) tarjoaa kuitenkin hyvän suojauksen kapasitiivista kytketymistä vastaan, kun vaipan pituus on alle $1/8$ häiriöllisen signaalin suurimman taajuuden aallonpituudesta. Monipistemaadoituksessa (b) induktiosilmukan pinta-ala pienenee huomattavasti, jos paluuvirta palaa suurimmaksi osaksi johdinvaipan kautta. Pienillä taajuuksilla ($< f_r$) suurin osa paluuvirrasta palaa maatasoa pitkin. Suuremmilla taajuuksilla ($> f_r$) paluuvirta palaa mieluummin kaapelin vaippaa kuin maatasoa pitkin. Vaihtoehto (b) tarjoaa suojaa kapasitiiviselta kytketymiseltä kaksi kertaa suuremmalla taajuudella kuin vaihtoehto (c).

Yksipistemaadoitus on yleensä suositeltavin ratkaisu pienillä taajuuksilla ($< 0.1 \dots 1$ MHz), kun maadoitettavan kaapelin vaipan pituus on alle $1/8$ mahdollisen häiriösignaalin aallonpituudesta. Monipistemaadoitusta tulee välttää pienillä taajuuksilla, koska a) monipistemaadoitus ei suojaa induktiiviselta kytketymiseltä suojan rajataajuuden alapuolella, b) monipistemaadoituksessa suoja toimii vastaanottavan piirin toisena johtimena ja suojaan kytketty häiriövirta aiheuttaa potentiaalimuutoksia ($I_s R_s$) vastaanottavassa piirissä ja c) jos vaipan maadoituspisteet ovat eri potentiaalissa, syntyy maasilmutkan johdosta ylimääräinen häiriövirta vaippaan. Maksimaalinen induktiivinen suojaus pienillä taajuuksilla saavutetaan, kun kuormana olevaa piiriä kellutetaan. Tällöin pienillä taajuuksilla paluuvirta palaa täydellisesti johdinvaippaa pitkin. Suuremmilla taajuuksilla esiintyy hajakapasitanssien aiheuttamia haitallisia kytketymisiä.

Suurilla taajuuksilla ($> 1 \dots 10$ MHz) käytetään monipistemaadoitusta. Johdinvaippa maadoitetaan ainakin molemmista päistään. Pidempi johdinvaippa maadoitetaan vielä mahdollisen häiriötaajuuden aallonpituuden kahdeksasosan välein. Tällöin saavutetaan hyvä suojaus sekä induktiivista että kapasitiivista kytketymistä vastaan. Maadoitukset tulee tehdä riittävän pieni-impedanssisesti, jotta suojausvaimennus olisi odotuksen mukainen. Suurilla taajuuksilla koaksiaalikaapeli toimii kolmena erillisenä johtimena: signaalijohdin, vaipan sisäpinta ja ulkopinta. Virranah-toilmiö (skin effect) eristää vaipan sähköisesti kahteen osaan. Virranah-toilmiö vähentää maasilmutkan muodostamaa yhteismuotoista kytketymistä, koska signaalin paluuvirta palaa vaipan sisäpintaa pitkin (signaalijohdinten ja vaipan keskinäisinduktanssin M vaikutus) ja ulkopuolinen häiriövirta kulkee vaipan ulkopinnassa. Vaipan sisä- ja ulkopinnan välillä on suuri erotusvaimennus. Monikerroksisen suojavaipan tarjoama parempi suojausvaimennus perustuu eri kerroksien väliseen erotukseen. Edellä esitettyä pien- ja suurtaajuusristiriitaa voidaan kiertää maadoittamalla vaipan toinen pää kondensaattorilla. Tällöin saavutetaan yksipistemaadoitus pienillä taajuuksilla ja monipistemaadoitus suurilla taajuuksilla. Huomattavaa on, että maadoituskondensaattorin sisäisen vastuksen tulee olla riittävän pieni halutulla taajuusalueella.

Suojaavaipan sähköistä hyvyttä kuvataan kytkentäimpedanssilla Z_T , joka määrittää signaalijohdinten ja vaipan väliin kytkettyneen jännitteen V ja suojavaippaan kytkettyneen virran I_s suhteena. Johtimen pituus on l .

Suojavaipan kytkentäimpedanssi signaalijohtimeen on

$$Z_T = \frac{dV}{I_s \cdot dl}$$

Pienillä taajuuksilla (< 1 MHz) umpinaisen koaksiaalikaapelin kytkentäimpedanssi on yhtä suuri kuin vaipan resistiivinen osuus. Suuremmilla taajuuksilla kytkentäimpedanssi pienenee huomattavasti johtuen virranahoitelmasta. Tällöin johtimen suojausvaimennus kasvaa. Jos vaipassa on aukkoja, syntyy induktiivista vuotoa ja kytkentäimpedanssi kasvaa suurilla taajuuksilla. Muodostuva induktiosilmukka ja sen aiheuttama kytkentäimpedanssin kasvu voi pilata aiotun suojausvaimennuksen. Kaapeleille kytkentäimpedanssi ilmoitetaan Ω/m . Koaksiaalikaapeli, jolla on pienin kytkentäimpedanssi halutulla taajuusalueella, on paras vaihtoehto.

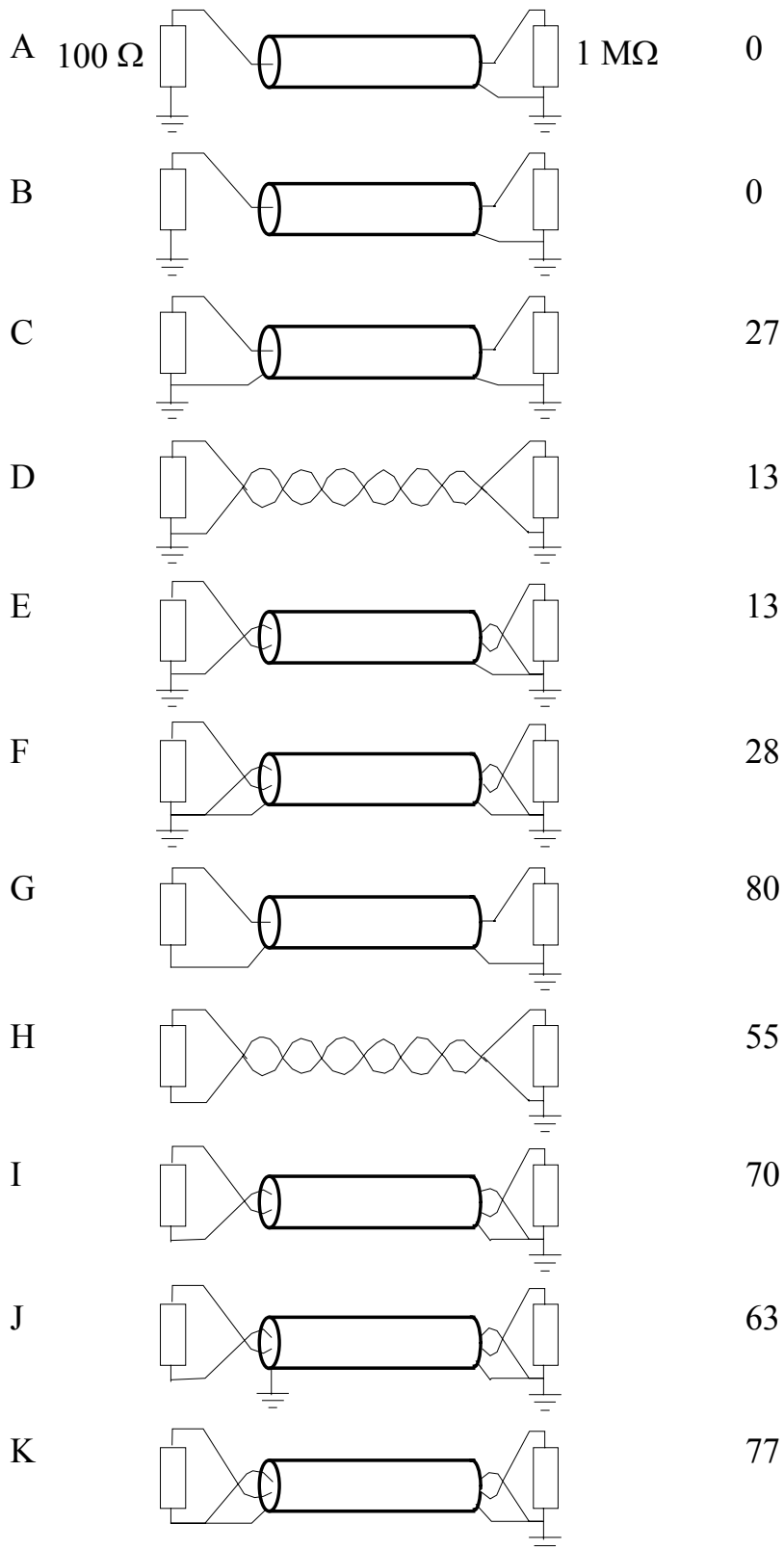
Kuvassa 6.7h esitetään koaksiaali- ja parikaapelin herkkyys induktiiviselle kytkeytymiselle, kun ne maadoitetaan yksi- tai monipistemaadoituksella. Mittaustaajuutena oli 50 kHz, joka ylitti molempien mitattujen kaapelityyppien rajataajuuden ($> f_r$).

Kuvasta 6.7h voidaan todeta, että pienillä taajuuksilla (50 kHz) yksipistemaadoitus (kohdat G...K) tarjoaa huomattavasti paremman suojausvaimennuksen induktiivista kytkeytymistä vastaan kuin monipistemaadoitus (kohdat A...F). Kohta A on valittu referenssitasoksi, koska se ei vaimenna lainkaan induktiivisesti kytkeytyviä häiriöitä (paluuvirtaa palaa kokonaisuudessaan maatasen kautta). Kohdassa B koaksiaalikaapelin suojausvaimennus on maadoitettu vain yhdestä pisteestä, eikä paluuvirta palaa vielä kukaan suojavaippaa pitkin. Kohdassa C paluuvirta palaa suurimmaksi osaksi vaippaa pitkin ja tarjoaa tällöin 27 dB:n suojausvaimennuksen. Syntynyt maasilmutta kumoaa osittain ratkaisun antamaa teoreettista vaimennusta (vrt. kohta G). Kohdassa D kierretty parikaapeli tarjoaa vain 13 dB:n vaimennuksen, koska kahden maapisteen välille syntynyt maasilmutta vastaanottaa häiriöitä tehokkaasti. Kohdassa E parikaapelin ympärille lisätään johtava vaippa. Ratkaisu ei vaimenna induktiivista kytkeytymistä (vrt. kohta D). Kohdassa F parikaapelin ympärille lisätty vaippa maadoitettiin molemmista päistään. Tämä ratkaisu nostaa suojausvaimennuksen 28 dB:iin. Kohdat C - ja F ovat suositeltavat ratkaisut, jos sovellutus vaatii pienillä taajuuksilla monipistemaadoitusta.

Kohdassa G...K suojatun johtimen toista päätä kellutetaan. Tämä ratkaisu parantaa huomattavasti suojausvaimennusta induktiivista kytkeytymistä vastaan, koska a) paluuvirta palaa kokonaisuudessaan vaippaa pitkin, b) johdinsilmukan muodostama silmutta on erittäin pieni ja c) haitallista maasilmutta ei muodostu. Kohdassa H kierretty parikaapeli tarjoaa yllyttävän alhaisen suojausvaimennuksen. Tämä johtuu kapasitiivisesta kytkeytymisestä, koska kohdassa I lisätty yhdestä pisteestä maadoitettu vaippa parantaa suojausvaimennuksen 70 dB:iin. Kohdassa J parikaapelin vaippa on maadoitettu molemmista päistään, tällöin syntyvä maasilmutta pienentää suojausvaimennusta (vrt. kohta I).

Kohta K ei ole normaalisti suositeltava ratkaisu, koska vaipassa mahdollisesti esiintyvät häiriöt kytkeytyvät galvaanisesti toiseen signaalijohtimeen. Kohta I on suositeltavin ratkaisu, jos yksipistemaadoitus on sovellutuksessa käytettävissä. Vaikka kohta G tarjoaa parhaan vaimennuksen, on kierretyllä parikaapelilla (kohta I) mahdollista saavuttaa suurempi suojausvaimennus pienillä taajuuksilla. Parikaapelin suojausvaimennusta parannetaan kierteämällä johtimet tiheämmin toistensa ympärille.

Vaimennus / dB



KUVA 6.7h. Induktiivinen kytketyminen monipiste- (A...F) ja yksipistemaadoitettuun (G...K) kaapeliin.

6.7.4. Kaapelityypit

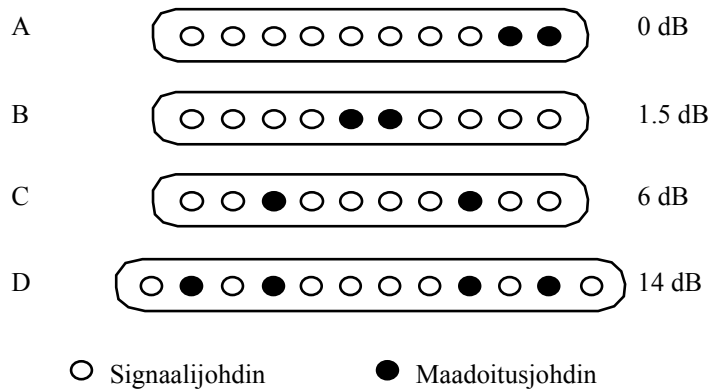
Kierretyn parikaapelin käyttökelpoinen taajuusalue rajoittuu normaalisti alle 100 kHz:iin (max. 10 MHz). Pienillä taajuuksilla kierretty parikaapeli tarjoaa erinomaisen suojauksen induktiivista kytkeytymistä vastaan. Parikaapelin johdinsilmukoiden muodostamat pinta-alat ovat pienet ja silmukoihin indusoituneet häiriöjännitteet kumoutuvat vastakkaisvaiheisina viereiseen silmukkaan indusoituneen jännitteen kanssa. Kapasitiivista kytkeytymistä vastaan kierretty parikaapeli ei suojaa. Kapasitiiviselta kytkeytymiseltä voidaan suojautua lisäämällä yhdestä pisteestä maadoitettu johtava vaippa parikaapelin ympärille. Suuremmilla taajuuksilla kierretty parikaapeli ei ole käyttökelpoinen ratkaisu, koska **a)** esiintyy hajakapasitanssien aiheuttamia kapasitiivisia kytkeytymisiä, **b)** johtimien vaimennukset kasvavat merkittävästi ja **c)** esiintyy epäsovituksen aiheuttamia heijastuksia signaalitiellä.

Koaksiaalikaapelin käyttökelpoinen taajuusalue ylettyy normaalisti 1 GHz:iin. Koaksiaalikaapeli tarjoaa pienen vaimennuksen, hyvät sovitukset ja tasaimpedanssisen siirtotien laajalla taajuusalueella. Johtava vaippa suojaa kapasitiiviselta kytkeytymiseltä, jos lyhyt kaapeli ($< \lambda/8$) on maadoitettu vähintään yhdestä pisteestä. Pidempi kaapeli maadoitetaan monipistekytkenällä suurimman häiriötaajuuden aallonpituuden kahdeksasosan välein. Koaksiaalikaapeli suojaa induktiiviselta kytkeytymiseltä, kun vaippa on maadoitettu monipistekytkenällä tai kaapelin toista päätä kellutetaan (kuormaa ei ole maadoitettu). Oleellista on, että paluuvirta kulkee kokonaisuudessaan suojatun johtimen kuoressa.

Monikerroksista kaapelia voidaan käyttää kriittisissä sovellutuksissa. Koaksiaalikaapelin suojausvaimennusta rajoittaa johtimen vaipassa mahdollisesti esiintyvän häiriövirran ja suojan resistanssin aiheuttama häiriöjännite. Tämä häiriöjännite on galvaanisesti sarjassa signaalitiellä. Kaksikerroksisessa kaapelissa sisempi vaippa maadoitetaan molemmista päistään ja ulompi kerros vain toisesta päästä. Tällöin ulompaan vaippaan kytketyt häiriöjännitteet on erotettu signaalitieltä. Koaksiaalikaapelilla tapahtuu samankaltainen ilmiö suurilla taajuuksilla (> 1 MHz), kun virranahto (skin effect) pakottaa virrat kulkemaan lähellä suojavaipan pintoja. Signaalivirta palaa vaipan sisäpintaa pitkin ja ulkopuolelta kytketyt häiriövirrat pysyvät vaipan ulkopinnalla. Juuri tämä ominaisuus parantaa koaksiaalikaapelin suojausvaimennusta suuremmilla taajuuksilla.

Punospäällysteiset kaapelit (suojaus kaapelin pinta-alasta 60...98 %) tarjoavat yleensä hyvän suojan kapasitiivista kytkeytymistä vastaan alhaisilla taajuuksilla. Suuremmilla taajuuksilla (> 300 MHz) suojausvaimennus heikkenee, koska kaapelin vaipan reiät suurenevat suhteessa häiriötaajuuden aallonpituuteen. Suojausvaimennus induktiivista kytkeytymistä vastaan on normaalisti 30 dB pienempi kuin koaksiaalikaapelin. Yleissääntönä voidaan sanoa, että vaipan tulee peittää yli 95 % kaapelin pinta-alasta, jos mahdolliset häiriötaajuudet ylittävät 10 MHz. Samanlainen suojaus on toteutettava myös kaapeliliitoksissa. Liittiminä on suositeltavaa käyttää esim. malleja BNC, F ja N, jotka tarjoavat 360° sähköisen kontaktin kaapelin vaipan ja liittimen välillä. Erityisesti on varmistettava, että liitännässä suojaamaton signaalijohdin ja vaipan maadoitusliitos ovat mahdollisimman lyhyet.

Nauhakaapelien (ribbon cable) häiriösuojaus on yleensä huono ja vaihtelee huomattavasti sovellutuksesta toiseen, koska signaali- ja maadoitusjohtimien sijoittelut vaihtelevat suunniteltavan laitteen tarpeiden mukaan. Kuvassa 6.7j esitetään nauhakaapelin signaali- ja maadoitusjohtimien sijoittelun merkitys suojausvaimennukseen.



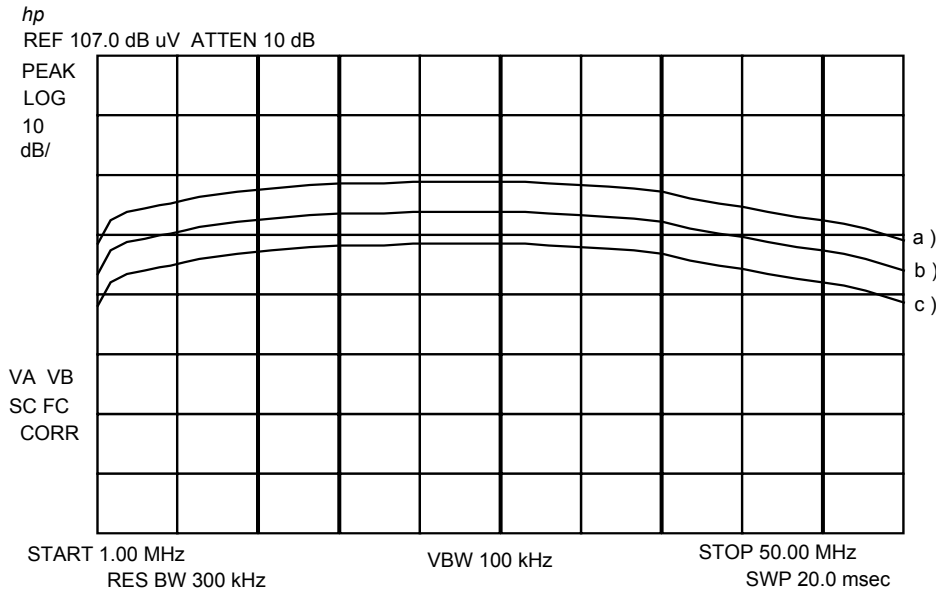
KUVA 6.7j. Nauhakaapelin signaali- ja maadoitusjohtimien sijoittelun merkitys suojausvaimennukseen.

Kuvassa 6.7j esitetään nauhakaapeli, jossa on kahdeksan signaalijohdinta ja kaksi (A - C) tai neljä maadoitusjohdinta (D). Kohta A on valittu referenssitasoksi, jolloin sen suojausvaimennus on 0 dB. On huomattava, että suojausvaimennus kaapelin ja ulkomaailman välillä on normaalisti molempiin suuntiin samansuuruinen. Kohdan A ratkaisu on huonoin, koska signaali- ja maadoitusjohtimien muodostamien silmukoiden pinta-alat ovat suuret, signaali-johtimien välillä tapahtuu yhteisten maadoitusimpedanssien välityksellä kytkeytymistä (usealla signaali-johtimella on yhteinen maadoitusjohdin) ja signaali-johtimien välillä tapahtuu suoraa ylikuulumista (induktiivinen ja kapasitiivinen kytkeytyminen).

Kohdassa B maadoitusjohtimet on sijoitettu rinnakkain keskelle nauhakaapelia. Suojausvaimennus on parantunut 1,5 dB. Kohdassa C maadoitusjohtimet on sijoitettu tasaisemmin kaapelissa ja suojausvaimennus on tällöin 6 dB. Kohdassa D on otettu käyttöön leveämpi nauhakaapeli, jolloin on voitu lisätä maadoitusjohtimien lukumäärää kahdella. Paras suojausvaimennus saavutetaan, jos jokaisen signaali-johtimen molemmilla puolilla on vähintään yksi maadoitusjohdin. Häiriöllisimmät johtimet (kellojohdin) tulee erottaa muista johtimista useilla maadoitusjohtimilla. Häiriöille herkimmät johtimet tulee sijoittaa erilleen häiriöllisistä johtimista ja keskelle kaapelia.

6.7.5. Koaksiaalikaapelin liitännän säteilymittauksia

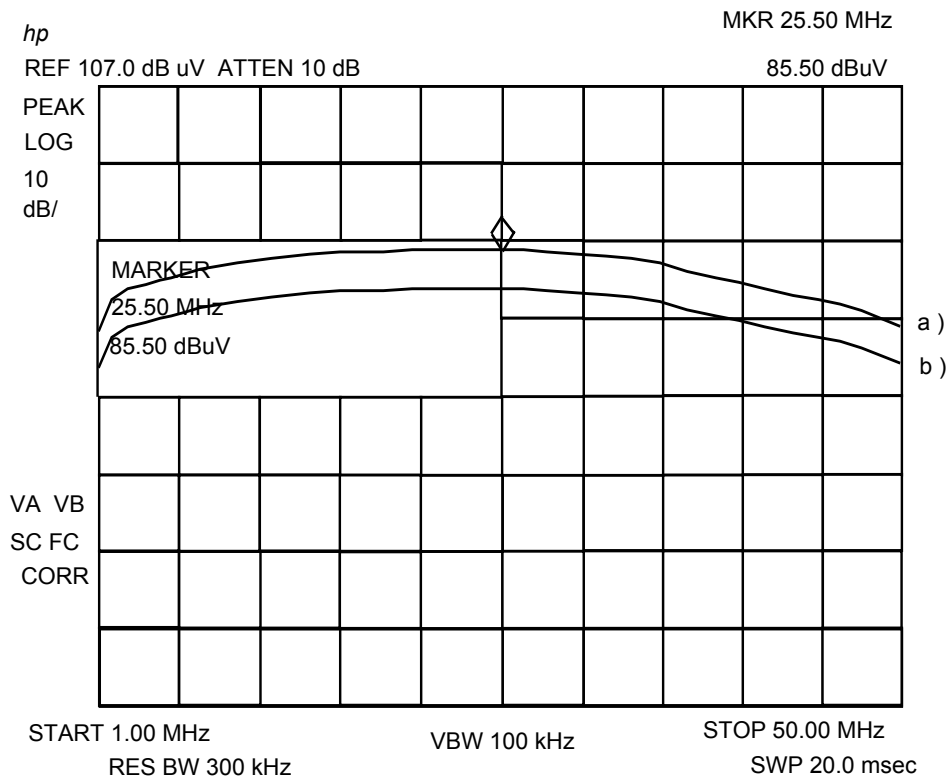
Mittauksilla tutkittiin koaksiaalikaapelin liitännän emittoimaa säteilyä. Ensimmäisessä mittauksessa koaksiaalikaapelin (50Ω) vaippa kytkettiin yhtenäiseen maatasoon lyhyellä maadoitusjohtimella (n. 2 mm) ja päätteenä käytettiin 50Ω :n lankavastusta. Kaapelin toiseen päähän syötettiin signaalia (1...50 MHz) spektrianalysaattorin tracking-generaattorilla (taso $90 \text{ dB}\mu\text{V}$) ja liitännän emittoimaa säteilyä mitattiin magneettikentän mittapöydällä. Kuvassa 6.7k esitetään eripituisten suojaamattomien signaali-johtimien vaikutus säteilyyn.



KUVA 6.7k. Koaksiaalikaapelin liitännän säteily eripituisilla suojaamattomilla signaalijohtimilla. Signaalijohtimen pituus liitoksessa on a) 25, b) 12 ja c) 7 mm.

Edellä esitetystä mittaustuloksesta havaitaan, että liitännän emittoima säteily kasvaa 6 dB, kun suojaamattoman johtimen pituus kaksinkertaistuu. Kohdassa a) säteilyn taso on korkeimmillaan n. $75 \text{ dB}\mu\text{V}$, joten koaksiaalikaapelin suojausvaimennus on liitännän kohdalla vain 15 dB. Käyrän muoto kaikissa mittaustuloksissa johtuu osittain magneettikentän mittapään ja etuvahvistimen taajuusvasteista.

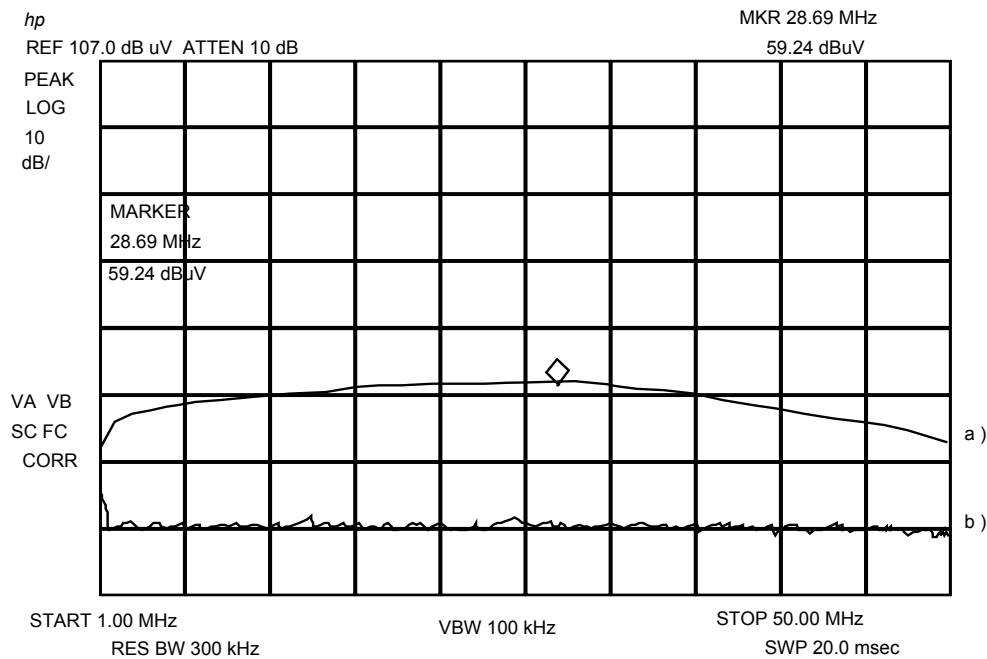
Toisessa mittauksessa tutkittiin sovituksen merkitystä koaksiaalikaapelin liitännän säteilyyn, kuva 6.7l. Kaapelin vaippa kytkettiin yhtenäiseen maatasoon 10 mm:n pituisella maadoitusjohtimella ja päätevastuksena käytettiin joko 0Ω :n (sovittamaton) tai 50Ω :n (sovitettu) lankavastusta. Suojaamattoman signaalijohtimen pituus oli 25 mm.



KUVA 6.7l. Koaksiaalikaapelin liitännän säteily sovittamattomana a) ja sovitettuna b).

Sovittamattoman koaksiaalikaapelin säteily on 6 dB korkeampi kuin sovitettun. Tulos on heijastusvaimennusteorian mukainen. Kaapeliin syötetty signaali heijastuu takaisin sovitattomasta kuormasta (0Ω) ja kulkee kahteen kertaan kaapeliliitännän lävitse. Kohdassa a) säteilyn taso oli korkeimmillaan $85,50 \text{ dB}\mu\text{V}$ (MARKER), joten sovitattomaman liitännän suojausvaimennus oli vain 4,5 dB.

Kolmannessa mittauksessa mitattiin oikein suunnitellun koaksiaalikaapelin liitännän piirilevylle. Kaapelin signaalijohdin vietiin piirilevyn lävitse ja päätettiin levyn toisella puolella 50Ω :n lankavastuksella. Kaapelin vaippa maadoitettiin läpivientireiän ympärille säteittäisesti kaapelin tulopuolelta. Kuvassa 6.7m esitetään säteilymittaustulokset piirilevyn signaalipuolelta a) ja maadoituspuolelta b).



KUVA 6.7m. Oikein suunnitellun koaksiaalikaapelin liitännän säteily piirilevyn signaalipuolelta a) ja maadoituspuolelta b).

Edellä olevasta mittaustuloksesta havaitaan piirilevyn signaalipuolen säteilyn olevan korkeimmillaan $59 \text{ dB}\mu\text{V}$ ja liitännän suojausvaimennus on näin ollen yli 30 dB. Liitännän emittoiman säteilyn taso on 6...26 dB pienempi verrattuna edellisissä mittauksissa esitettyihin tuloksiin. Piirilevyn maadoituspuolelta b) ei havaittu merkittävää säteilyä.

6.7.6. Suunnittelusääntöjä

- Käytetään mahdollisimman lyhyitä johtimia ja kaapeleita.
- Ryhmitellään häiritsevät ja häiriintyvät johtimet erikseen laitteen sisällä ja läpivientienissä. Häiritsevät johtimet reititetään pitkin kotelon metallirunkoa.
- Risteävät kaapelit sijoitetaan suorakulmaan toisiinsa nähden.
- Yksipistemaadoitus suojaa vain sähkökentältä.
- Monipistemaadoitus suojaa sekä sähkö- että magneettikentältä.
- Suojattu kaapeli maadoitetaan vain toisesta päästä matalilla siirtotaajuuksilla ($< 1 \text{ MHz}$) yhteismuodon vaimennusvaatimusten johdosta. Maadoitus suoritetaan häiriöllisemmästä päästä.
- Suojattu kaapeli maadoitetaan molemmista päistä suurilla siirtotaajuuksilla ($> 10 \text{ MHz}$). Pitkä kaapeli maadoitetaan tarvittaessa välilläkin suurimman siirrettävän taajuuden aallonpituuden kahdeksasosan välein.
- Suojattu kaapeli yhdellä maadoituksella suojaa sähkökenttää, mutta ei magneettikenttää vastaan.

- Suojattu kaapeli molemmista päistä maadoitettuna suojaa sekä sähkö- että magneettikenttää ($>$ shield cutoff frequency) vastaan. Suojattu kaapeli ei suojaa magneettiselta kytketymseltä alhaisilla taajuuksilla.
- Suurilla taajuuksilla suojatun kaapelin vaippa voi toimia antennina ja yhteismuodon häiriöt voivat edetä sitä pitkin. Kytkeytymistä voidaan vaimentaa yhteismuodonkuristimella.
- Suojatun kaapelin liitännässä signaalihohtimen ja vaipan maadoituksen tulee olla mahdollisimman lyhyet.
- Paras suojaus saavutetaan monikerroskaapeleilla.
- Kierretty parikaapeli suojaa hyvin induktiiviselta kytketymseltä matalilla taajuuksilla (<100 kHz), mutta ei suojaa kapasitiiviselta kytketymseltä.
- Kierretyn parikaapelin suojaa kapasitiiviselta kytketymseltä voidaan parantaa lisäämällä yhdestä pisteestä maadoitettu johtava vaippa.
- Kierretty parikaapeli suojaa tehokkaasti poikittaisilta häiriöiltä, mutta on tehoton pitkittäisiin häiriöihin.
- Nauhakaapelin (ribbon cable) häiriösuojaus on yleensä huono. Suojausta voidaan parantaa suodatuksella ja kytkemällä mahdollisimman monta maajohdinta symmetrisesti signaalihohtimien ympärille.
- Vältetään erityyppisten signaalien siirtämistä ja suuria tasoeroja samassa kaapelissa.

6.8. Kotelointi

6.8.1. Laitteiden ulkoinen häiriösuojaus

Laitteen häiriöherkkyyttä sähkömagneettista säteilyä vastaan voidaan pienentää koteloinnilla. Maadoitettu metallikotelo yleensä suojaa magneettisia ja staattisia häiriöitä vastaan. Kotelon päätehtävä on kuitenkin olla mekaaninen suoja.

Kaapelointi ja asennustekniikka

Kaapelin oikean valinnan ja asennustekniikan avulla voidaan häiriöjännitteitä ratkaisevasti pienentää. Seuraavassa on esitetty eräitä kaapelien valintaan ja asennukseen liittyviä perusohjeita:

- Jos elektroniikkajärjestelmän käyttöjännite on enintään 60 V, kannattaa käyttää kaapelointiin heikkovirtakaapeleita, erityisesti puhelinkaapeleita, joissa on kierretyt johdinparit. Jos kaapelointi liittyy kojeiden elektroniikkaosiin erotuselimien kautta, tullaan sisäkytkinlaitoksissa keskijännitealueelle saakka toimeen ilman johtavaa vaippaa olevilla heikkovirtakaapeleilla. Suurjännitteisissä kytkinlaitoksissa ja kaapeloinnin liittyessä suoraan elektroniikkaosaan on käytettävällä johtavalla vaipalla varustettuja kaapeleita. Erittäin vaikeissa häiriöolosuhteissa on syytä käyttää massiivisella vaipalla varustettuja kaapeleita.
- Jokaisen piirin meno- ja paluujohdina on käytettävä johdinparia. Useamman piirin yhteistä paluujohdinta on ehdottomasti vältettävä.
- Johdotuksessa olisi pyrittävä säteittäiseen järjestelmään. Silmukoita ei saa muodostua eri laitteiden välille.
- Eri virtapiireihin kuuluvia (erijännitteisiä) johtimia voidaan käyttää samassa kaapelissa, jos niitä käytetään saman laitteen syöttöön ja ohjaukseen ja jos tästä ei ole odotettavissa häiriöitä.
- Elektroniikkajärjestelmän kaapelointi on pyrittävä viemään eri reittejä kuin voima- ja ohjauskaapelit. Risteilyt vahvavirtakaapeleiden kanssa on pyrittävä tekemään kohtisuorasti.

Analogiamittauskaapeleiksi on syytä valita kaapeli, joka täyttää seuraavat vaatimukset:

- parin johtimet on kierretty lyhyellä nousulla toistensa ympärille,
- johtimien poikkipinta eristyksineen on mahdollisimman pieni,
- johdinparin ympärillä on staattinen suoja, esim. Al-nauha tai lyijyvaippa ja
- staattinen suoja on eristetty ulkopuolelta ja viereisten parien staattisesta suojasta.

Laitteen koteloinnilla pyritään suojaamaan laite ulkopuolelta tulevilta sähkömagneettisilta kentiltä ja toisaalta estämään laitteen tuottaman säteilyn leviäminen ympäristöön. Koteloinnilla ei pyritä peittelemään laitteen huonoa sisäistä rakennetta, vaan viimeistelemään suunniteltavan laitteen EMC-ominaisuudet. Kotelointi suojausratkaisuna on kallis, eikä se estä laitetta häiritsemästä itse itseään. Kotelon suojausvaimennus on sama molempiin suuntiin. Kotelon vaimennus riippuu mm. kotelon mitoista, materiaalista, säteilylähteen etäisyydestä, säteilyn taajuudesta sekä aukkojen ja läpivientien suojauksesta.

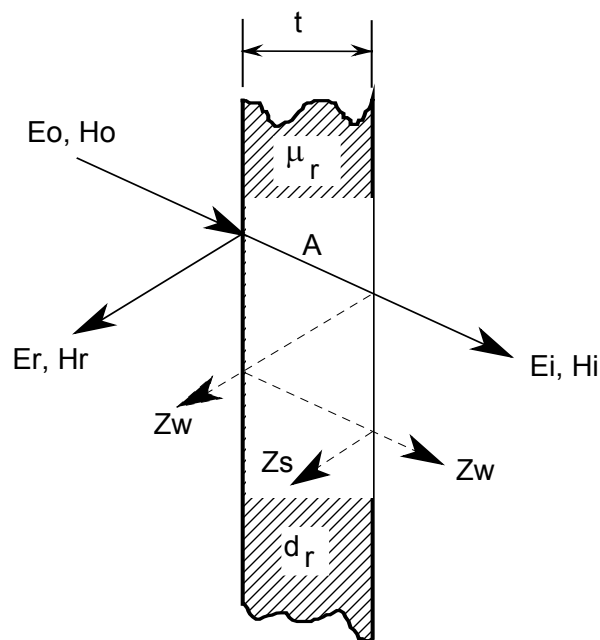
6.8.2. Suojausvaimennus

Suojausvaimennuksella tarkoitetaan ulkoisen kentän ja suojan sisäpuolelle induoituneen kentän suhdetta, se ilmoitetaan yleensä desibeleinä. Suojausvaimennus riippuu mm. kentän taajuudesta, aaltoimpedanssista, suunnasta ja polarisaatiosta sekä suojan materiaalista, muodosta ja etäisyydestä säteilylähteeseen.

Sähkömagneettinen aalto vaimenee kohdatessaan metallipinnan, kuva 6.8a. Suojausvaimennus A_s on heijastusvaimennuksen R , absorptiovaimennuksen A ja edestakaisista heijastuksista johtuvan tekijän B summa.

$$A_s [dB] = R [dB] + A [dB] + B [dB]$$

Kun sähkömagneettinen aalto kulkee väliaineen lävitse, sen amplitudi pienenee eksponentiaalisesti, osa aallon energiasta muuttuu häiriöiden takia lämmöksi. Osa heijastuu ja osa väliaineen läpi kulkeneesta energiasta heijastuu takaisin väliaineeseen rajapinnasta aiheuttaen väliaineeseen moninkertaisia heijastuksia, (kuva 6.8a).



KUVA 6.8a. Tasaallon vaimeneminen metalliseinässä.

6.8.3. Heijastusvaimennus

Heijastusvaimennus (R) johtuu ilman ja metallin rajapinnan erilaisista aaltoimpedansseista. Myös metallilevyn läpäissyt aalto kohtaa muuttuvan aaltoimpedanssin rajapinnan ja heijastuu osittain takaisin. Mitä paremmin johtava suojamateriaali on, sitä suurempi on ominaisimpedanssien ero ja sitä suurempi on myös heijastuminen. Suuremmilla taajuuksilla suojamateriaalin pintaimpedanssi kasvaa virran ahtautumisen takia ja heijastusvaimennus heikkenee.

Materiaalin heijastusvaimennukseksi saadaan

$$R = 20 \log \left(\frac{Z_w}{4 Z_i} \right) \quad [\text{dB}],$$

jossa Z_w = törmäävän aallon aaltoimpedanssi,
 Z_i = materiaalin pintaimpedanssi.

6.8.4. Absorptiovaimennus

Absorptiovaimennus (**A**) on suoraan verrannollinen materiaalin paksuuteen sekä verrannollinen säteilyn laajuuteen, materiaalin suhteelliseen permeabiliteettiin ja johtavuuteen (kupari = 1). Säteilyn aaltoimpedanssi ei vaikuta materiaalin absorptiovaimennukseen. Huomattavaa on, että teräksen absorptiovaimennus on huomattavasti parempi verrattuna kupariin, mutta matalalla taajuuksilla teräslevynkin tulee olla paksu tarvittavan vaimennuksen aikaan saamiseksi. Materiaalin absorptiovaimennukseksi saadaan:

$$A = 131 \cdot \frac{t}{[\text{mm}]} \cdot \sqrt{\mu_r \cdot G_r} \cdot \frac{f}{[\text{MHz}]} \quad [\text{dB}],$$

jossa t = materiaalin paksuus,
 μ_r = materiaalin suhteellinen permeabiliteetti,
 G_r = materiaalin suhteellinen johtavuus ja
 f = taajuus.

6.8.5. Edestakaiset heijastukset

Edestakaiset heijastukset (**B**) pienentävät kokonaisvaimennusta, jos suojakuori on ohut ja absorptiovaimennus pieni (alle 15 dB). Tekijällä B on käytännön merkitystä vain pienitaajuuksien magneettikenttien yhteydessä, koska sähkökentille ja tasoaalloille heijastusvaimennus on suuri pienillä taajuuksilla ja suuremmilla taajuuksilla absorptiovaimennus kasvaa merkittävästi.

6.8.6. Suojausvaimennus lähikentässä

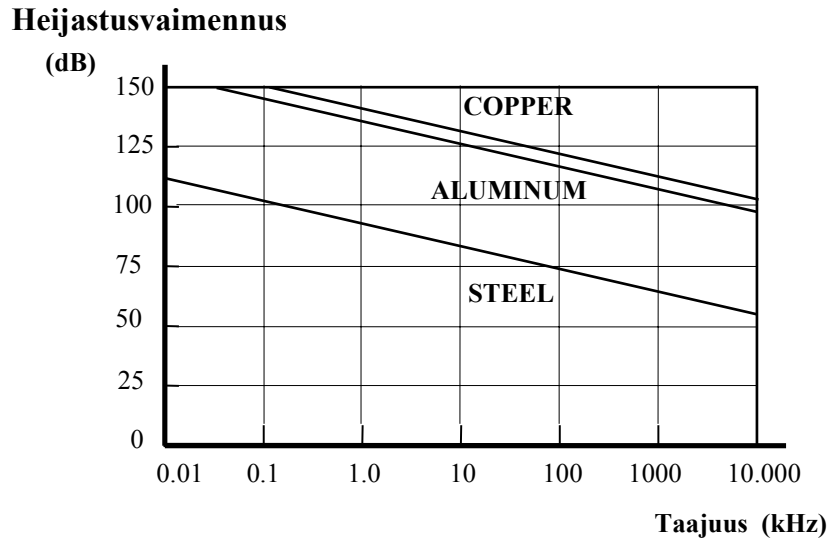
Lähikentässä aaltoimpedanssi ei ole tarkkaan tiedossa vaan riippuu säteilylähteestä. Jos lähde approksimoi sauva-antennia, sen lähellä aaltoimpedanssi on $> 377 \Omega$, eli sähkökenttä on hallitseva. Heijastusvaimennus kohteesta on suuri, mutta pienenee etäisyyden kasvaessa. Jos lähde approksimoi silmukka-antennia, sen lähellä aaltoimpedanssi on $< 377 \Omega$ eli magneettikenttä on hallitseva. Aaltoimpedanssi ja suojan pintaimpedanssi ovat lähellä toisiaan ja heijastusvaimennus on pienillä taajuuksilla huono.

Suojausvaimennusteoria ei huomioi normaalien laitekoteloiden mittojen suhdetta mahdollisen häiriösäteilyn aallonpituuteen. Tämä merkitsee sitä, että laitteen sisältä tulevan säteilyn aaltoimpedanssi on alemmilla taajuuksilla määrittelemätön kohdatessaan kotelon seinämän. Esimerkiksi pienen laitekotelon (50 x 50 x 50 cm) sisäinen häiriösäteily on tasoaaltoa (aaltoimpedanssi = 377Ω) vasta yli 200 MHz:n taajuudella. Oletuksena on, että säteilylähde sijaitsee kotelon keskellä.

Sähkö- ja magneettikentän kotelovaimennukset eroavat merkittävästi toisistaan alhaisilla taajuuksilla. Käytännössä eroa voi olla jopa useita kymmeniä desibelejä. Sähkökentän vaimennus on yleensä riittävä kaikilla metallikoteloilla. Magneettikentän vaimennukseen tulee kiinnittää erityistä huomiota, koska piirikorteilla ja sisäisessä johdotuksessa muodostuu aina magneettisesti säteileviä ja säteilylle herkkiä induktiosilmukoita.

6.8.7. Sähkökentän vaimennus

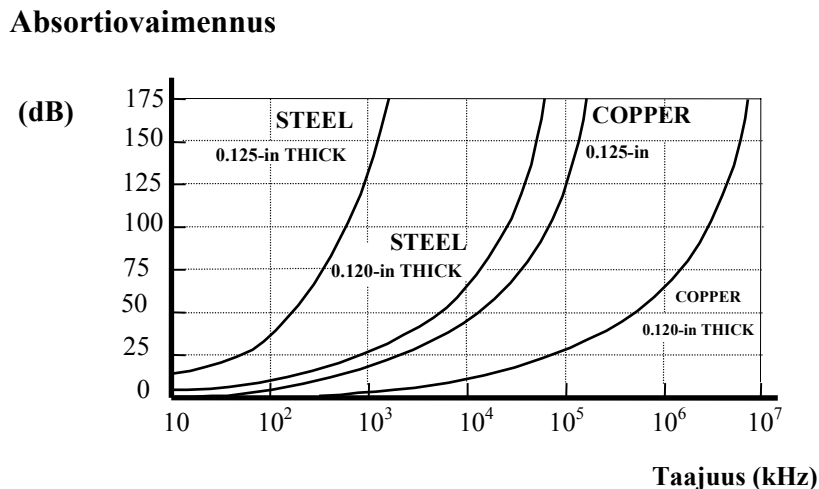
Kuvassa 6.8b esitetään sähkökentän heijastusvaimennus eri materiaaleilla. Sähkökentän heijastusvaimennus on suuri materiaaleilla, joilla on hyvä johtavuus ja pieni permeabiliteetti. Heijastusvaimennus pienenee taajuuden kasvaessa. Kuparilla ja alumiinilla on sama permeabiliteetti, mutta kuparin johtavuus on parempi. Teräksen permeabiliteetti on selvästi suurempi.



KUVA 6.8b. Sähkökentän heijastusvaimennus eri materiaaleilla. (Ott 1988: 172).

6.8.8. Magneettikentän vaimennus

Kuvassa 6.8c esitetään teräksen ja kuparin magneettikentän absorptiovaimennus eri materiaalipaksuuksilla.



KUVA 6.8c. Magneettikentän absorptiovaimennus teräksellä ja kuparilla. (Ott 1988: 168).

Absorptiovaimennus on suuri materiaaleilla, joilla on suuri permeabiliteetti ja hyvä johtavuus. Vaimennus kasvaa materiaalin paksuuden mukaan. Teräksen absorptiovaimennus on selvästi parempi kuin samanpaksuisen kuparin.

Jotta pientaajuisia magneettikenttiä vastaan voitaisiin tehokkaasti suojautua, tulisi kentälle tarjota pienen magneettisen vastuksen omaava sulkeutumistie. Magneettisesta materiaalista rakennetun suojakuoren permeabiliteetti on suuri. Pienillä taajuuksilla magneettinen

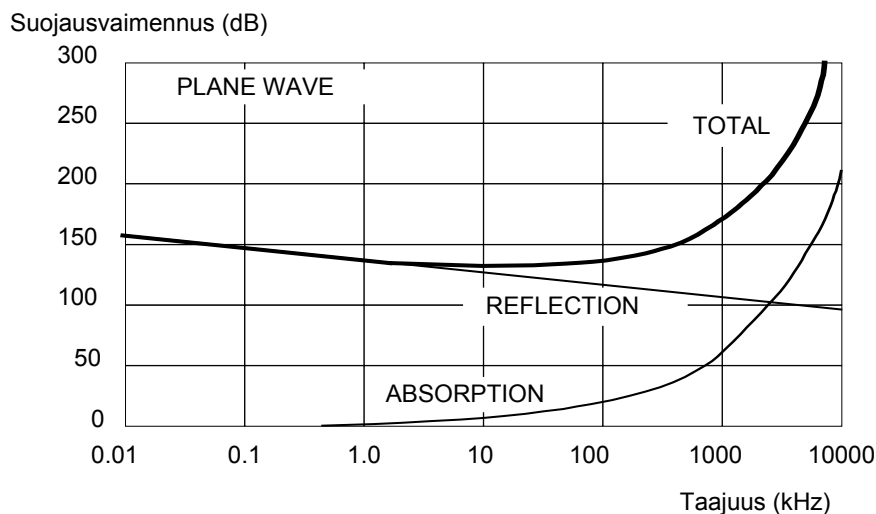
ABB:n TTT-käsikirja 2000-07

vaimennus on vakio, kun vaimennettavan aallon tunkeutumissyvyys on suurempi kuin suojakuoren paksuus. Suuremmilla taajuuksilla magneettinen oikosulku menettää vaikutuksensa vuon ahtautumisen vuoksi ja tällöin suojausvaimennus syntyy heijastuksien ja absorption ansiosta.

Ympäristössä, jossa on voimakkaita magneetti- ja sähkökenttiä, saavutetaan korkeita vaimennusarvoja useampikerroksisilla suojilla, jossa on käytetty hyvin johtavan metallin ja suuripermeabiliteettisen materiaalin yhdistelmää. Magneettisia materiaaleja käytettäessä on huomattava, että materiaalin permeabiliteetti riippuu taajuudesta ja magneettikentän voimakkuudesta ja saattaa muuttua työstettäessä.

6.8.9. Tasoallon vaimennus

Kuvassa 6.8d esitetään kuparin suojausvaimennus tasoallolle. Tämä tulos on määritelty kaukokentässä. Lähikenttämittauksissa magneettikenttä voi olla hallitseva, jolloin heijastusvaimennus pienenee huomattavasti.



KUVA 6.8d. Kuparin suojausvaimennus tasoallolle kaukokentässä.
(Williamsson 1987:9-10)

6.8.10. Aukot kotelossa

Ideaalitapauksessa laitteen kotelo on pallon muotoinen suljettu johtava ja homogeeninen suojakuori laitteen ympärillä. Käytännössä yhtenäisellä suojakuorella voidaan helposti saavuttaa 40...60 dB suojausvaimennus sähkömagneettisia kenttiä vastaan, lukuunottamatta matalataajuisia magneettikenttiä.

Käytännön syistä joudutaan suojakotelot varustamaan aukoilla ja saumoilla, mitkä saattavat pilata kokonaan suunnitellun suojausvaikutuksen. Määräävänä tekijänä kotelon suojausvaimennukselle onkin usein aukkojen ja saumojen määrä, koko, muoto ja sijainti. Tasaaisessa johtavassa seinässä oleva rako vuotaa siten, että kentän voimakkuus on verrannollinen raon leveyden neliöön ja kääntäen verrannollinen etäisyyteen raosta. Vuodon määrä riippuu siis raon tai aukon maksimimitasta, ei sen pinta-alasta. On siis suojauksen kannalta parempi tehdä monta pientä reikää kuin yksi iso.

Kotelon aukot ja raot voidaan käsittää ylipäästösuodattimiksi, joilla on tietty maksimidiimensiosta riippuva rajataajuus (KOTEL 1988: 33, Ott 1976:164-171). Aukon maksimidiensio (d) on joko halkaisija (pyöreä aukko) tai lävistäjä (suorakulmainen aukko) ja se ilmoitetaan millimetreissä. Rajataajuus (f_c) saadaan kaavoista:

pyöreä aukko: $f_c = \frac{176}{d}$; f_c [GHz] , d [mm] ja

suorakulmainen aukko: $f_c = \frac{150}{d}$; f_c [GHz] , d [mm].

Rajataajuuden yläpuolella aukon valmennus on erittäin pieni. Kun kotelon sisäiset tai ulkoiset taajuudet ovat huomattavasti alle aukon rajataajuuden ($f \ll f_c$), niin tällöin aukon magneettikentän suojausvaimennukseksi (S) saadaan (Keiser 1987:137):

pyöreä aukko $S = 32 \cdot \left(\frac{\text{aukonpituus}}{\text{aukon_halkaisija}} \right)$ [dB] ja

suorakulmainen aukko $S = 27 \cdot \left(\frac{\text{aukonpituus}}{\text{aukon_lävistäjä}} \right)$ [dB].

Edellä esitetyistä kaavoista havaitaan, että aukon tarjoama suojausvaimennus on lähes 100 dB, kun aukon pituus on kolminkertainen verrattuna sen halkaisijaan tai lävistäjään. Putken antama valmennus on suuri, kun putken poikkipinnan suurin pituus on pienempi kuin putken kriittinen aallonpituus. Kriittisen taajuuden alapuolella sähkömagneettinen aalto ei etene putkessa. Käytännössä laitekoteloihin joudutaan tekemään useita aukkoja lähelle toisiaan (esim. tuuletusritilä), useiden lähekkäisten aukkojen suojausvaimennukseksi saadaan (Carlsen 1991: 2.3.6).

Magneettikentän suojausvaimennus lähikentässä (S_s)

$$S_s = 32 \left(\frac{t}{d} \right) + 4 + 60 \log \left(\frac{D}{d} \right) - 20 \log (N) \quad [\text{dB}].$$

Tasoaallon suojausvaimennus kaukokentässä (S_d)

$$S_d = 103,5 - 20 \log (d \cdot f) \quad [\text{dB}]$$

t = kotelon paksuus [mm]

d = aukon halkaisija [mm]

N = aukkojen lukumäärä

D = lävistetyn pinta-alan neliöjuuri [mm]

f = taajuus [MHz]

Aukkojen vaimennusta voidaan parantaa edellä esitetyllä ns. savupiippuilmioilla. Esimerkiksi tuuletusaukkojen eteen voidaan asettaa hunajakennomainen ritilä. Mittarit ja kuvaputket voidaan suojata johtavasta langasta tehdyllä verkolla, johtavalla muovilla tai lasilla. Avattavat kannet saadaan liitospinnoiltaan sähkömagneettisesti tiiviiksi jousirakenteilla, johtavilla tiivisteillä tai voiteluaineilla.

6.8.11. Johtavat muovimateriaalit

Eri muovilaadut ovat syrjäyttämässä metallit kotelomateriaalina. Muoveilla on metalleihin verrattuna erinomaisia mekaanisia ja taloudellisia ominaisuuksia. Muovikoteloiden suo-

jausvaimennusta voidaan parantaa päällystämällä kotelo johtavalla materiaalilla tai lisäämällä johtavaa täytettä muovimateriaaliin. Johtavalla päällysteellä saavutetaan yleensä vain heijastusvaimennusta, kun taas johtava täyte lisää sekä heijastusvaimennusta että absorptiovaimennusta. Johtavan päällysteen etuina täytteisiin verrattuna ovat: edullisuus, muovin mekaanisten ominaisuuksien säilyminen ja materiaalin vähäinen painon nousu. Yleisesti käytettyjä täyteaineita ovat: ruostumaton teräskuitu, alumiinihiutale ja hiilikuitu. Mitä suurempi on johtavan täytteen massan osuus koko muovimassan osuudesta, sitä suurempi on johtavuus ja suojausvaimennus. Johtavat täyteaineet saattavat kuitenkin huonontaa muovin mekaanisia ominaisuuksia ja liitännän aikaansaaminen johtavaan täyteaineeseen saattaa tuottaa vaikeuksia

6.8.12. Suunnittelusääntöjä

- Sähkökentän vaimennus on yleensä riittävä kaikilla yhtenäisillä ja johtavilla metallikoteloilla.
- Magneettikentän kotelovaimennus on yleensä alhainen varsinkin matalalla taajuuksilla.
- Magneettisilla materiaaleilla saavutetaan hyvä suojausvaimennus matalataajuiselle (10...100 kHz) magneettikentälle.
- Johtavilla muovikoteloilla (pinnoitteet ja seostetut) ei saavuteta yleensä riittävää suojausvaimennusta matalilla taajuuksilla.
- Hyvän johtavuuden omaavalla materiaalilla saavutetaan hyvä suojausvaimennus sähkökentälle, tasoallolle ja suuritaajuiselle (> 100 kHz) magneettikentälle.
- Huomioidaan ferriittisten materiaalien kyllästymisen suurilla kentänvoimakkuuksilla. Tarvittaessa voidaan käyttää kaksikerroksista kotelointia. Ensimmäisellä (100 kHz) kerroksella on matala permeabiliteetti ja korkea kyllästymistaso. Toisella materiaalilla on suuri permeabiliteetti (alhainen kyllästymistaso) ja siten suuri suojausvaimennus.
- Määräävänä tekijänä kotelon suojausvaimennukselle on aukkojen ja saumojen määrä, koko, muoto ja sijainti. Aukon suurin dimensio määrää säteilyn alarajataajuuden. Vältetään mahdollisen säteilylähteen polarisaation suuntaisia aukkoja. Minimoidaan aukkojen ja saumojen lukumäärä ja dimensiot. Korvataan suuri aukko monella pienellä (verkko).
- Varmistetaan hyvä sähköinen kontakti kotelon eri osien välille.
- Liitosten suojausvaimennusta parannetaan hyvillä liittimillä, jousirakenteilla, urilla sekä johtavilla tiivisteillä ja voiteluaineilla.
- Kotelo ja modulien maatasot kytketään toisiinsa mahdollisimman monesta kohdasta käyttäen laajoja ja tasaisia pintoja. Johtavia osia EI saa kelluttaa.
- Liitoksissa on käytettävä riittävää PAINETTA.
- Metalliliitoksissa on huomioitava eri materiaalien mahdollinen korroosio.

6.9. Sähköstaattinen purkaus

6.9.1. Yleistä

Sähköstaattinen purkaus (electrostatic discharge, **ESD**) on yleensä kolmivaiheinen:

1) eriste varautuu, **2**) johtava materiaali saa varauksen eristeeltä ja **3**) varautunut johtava materiaali joutuu kosketuksiin kohteen kanssa. Sähköstaattinen varautuminen voi tapahtua myös ilman galvaanista kosketusta. Staattinen varaus syntyy, kun kaksi keskenään erilaista materiaalia saatetaan kosketukseen keskenään ja sen jälkeen erotetaan toisistaan. Toinen materiaaleista saa positiivisen ja toinen negatiivisen varauksen. Varauksen polariteetti määräytyy aineiden keskinäisestä sijainnista triboelektrisessä sarjassa. Triboelektrisessä sarjassa materiaalien järjestys määräytyy sen perusteella, miten helposti ne luovuttavat elektroninsa ja varautuvat positiiviseksi.

Staattisessa varauksessa syntyvä jännite V on varauksen Q ja kapasitanssin C suhde

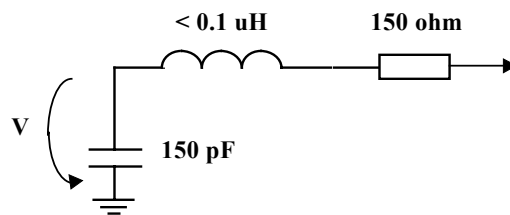
$$V = \frac{Q}{C}$$

Staattinen varaus on pintailmiö. Varaus esiintyy ainoastaan materiaalin pinnalla. Kun eriste varautuu, pysyy varaus samassa kohdassa eristeen pintaa. Varausta ei voida purkaa eristeestä maadoituksella.

Syntyvän varauksen suuruuteen vaikuttavia tekijöitä on useita: **a)** materiaalien keskinäinen sijainti triboelektrisessä sarjassa, **b)** hankaus, **c)** ympäröivän ilman suhteellinen kosteus, **d)** materiaalien välinen paine, **e)** materiaalien erotusnopeus sekä **f)** pintojen puhtaus ja pinta-ala.

6.9.2. Ihminen

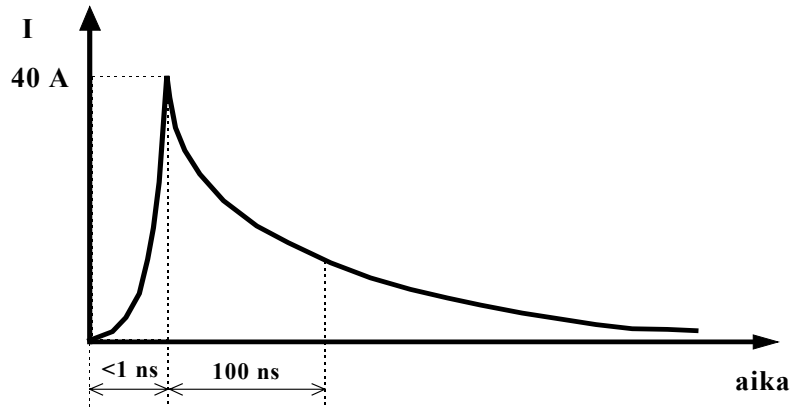
Ihmisen kehoa voidaan pitää ympäristöstään eristettynä johtavana kappaleena. Varaus syntyy tavallisesti liikkumisen yhteydessä esim. tuolista nouseminen tai käveleminen. Staattisen varauksen kannalta ihminen muodostaa kondensaattorin toisen navan ja ympäristö toisen. Ihmisen kapasitanssi ympäristöönsä on normaalisti 50... 250 pF. Ihmisen sijaiskytkentänä käytetään normaalisti kuvan 6.9a esittämää mallia. Varaus on varastoitunut mallin kapasitanssiin C ja se purkautuu kohteeseen induktanssin L ja resistanssin R välityksellä. Kondensaattorin varaus vaihtelee suuresti ympäristötekijöiden vaikutuksesta.



KUVA 6.9a. Sähköstaattisessa purkauksessa käytetty ihmisen sijaiskytkentä.

Merkittävimmät ympäristötekijät ovat ilman suhteellinen kosteus ja lattian pintamateriaali. Induktanssia ei yleensä esitetä sijaiskytkennässä, mutta käytännössä sillä säädetään pulssin nousuaikaa. Ihmisen resistanssi vaihtelee 500...10000 Ω :iin, määräytyen kosketuspaineesta ja ruumiin osasta koskettaessa kohteeseen. Kun staattisesti varautunut ihminen tai esine koskettaa varauksetonta ja usein maadoitettua kohdetta, purkautuu varaus hyvin lyhyenä virtapulssina. Pulssin nousuaika on tyypillisesti muutamia nanosekunteja, kesto alle 100 ns ja huippuvirta jopa 40...70 A, kuva 6.9b. Käytännössä purkausjännitteet voivat olla 10...20 kV. On huomattavaa, että ihminen havaitsee staattisen sähkön vasta noin 3 kV:n jännitetasolla.

Sähköstaattisen purkauksen sietotesti määritellään perusstandardissa IEC 61000-4-2. Testaus suoritetaan laitteella, jossa tiettyyn jännitteeseen ladattu kondensaattori (150 pF) puretaan vastuksen (150 tai 330 Ω) kautta testattavaan kohteeseen. Staattiselle purkaukselle on kaksi menetelmää: kontakti- ja ilmapurkaus. Kontaktipurkauksessa (contact discharge) testausgeneraattorin purkauselektrodi pidetään kiinni testattavassa laitteessa ja purkaus suoritetaan generaattorissa olevalla kytkimellä. Ilmapurkauksessa (air discharge) varautunut purkauselektrodi tuodaan niin lähelle testattavaa laitetta, että purkaus tapahtuu ilmapälissä. Käytetyt testausjännitteet (2... 15 kV) määräytyvät käytettävästä testausmenetelmästä ja rasitusasteesta.



KUVA 6.9b. Sähköstaattisen purkauksen tyypillinen virtapulssi.

6.9.3. Staattisen purkauksen vaikutus

Kaikki MOS komponentit (metal oxide semiconductors) ovat erityisen herkkiä ylijännitteille. Yleisesti komponenttien vikaantumisjännite on 100...5000 V. Staattisen purkauksen aiheuttamat viat: **a)** viat, jotka aiheuttavat komponentin toiminnan muuttumisen, **b)** piilevät viat, jotka eivät muuta komponentin välitöntä toimintaa, mutta huonontavat sen luotettavuutta ja johtavat myöhemmin komponentin toiminnan muuttumiseen sekä **c)** ohjelmistovirheet. Piilevät viat ovat ongelmallisia, koska vian löytäminen mittauksilla on mahdotonta ja ylijännitteiden vaikutusta komponenttien luotettavuuteen ei tunneta riittävästi.

Staattinen purkaus on luonteeltaan hyvin nopea ja aiheuttaa laajakaistaista sähkömagneettista säteilyä. Laitteen johdotukseen kytkeytyvä häiriökenttä saattaa aiheuttaa toimintahäiriöitä laitteen sisällä. Usein säteilylähteenä toimiva virtatie sijaitsee laitteen sisällä, jolloin huolellisesti toteutettu kotelointikaan ei suojaa laitteen elektroniikkaa. Tällaisissa tilanteissa staattinen purkaus kohdistuu laitteen ulkoisiin johtimiin, jotka johtavat purkausvirran laitteen sisälle. Ulkoisiin johtimiin kytkeytyillä komponenteilla on suurin vioittumistodennäköisyys, mutta myös muut komponentit voivat vioittua induktiivisen tai kapasitiivisen kytkeytymisen kautta.

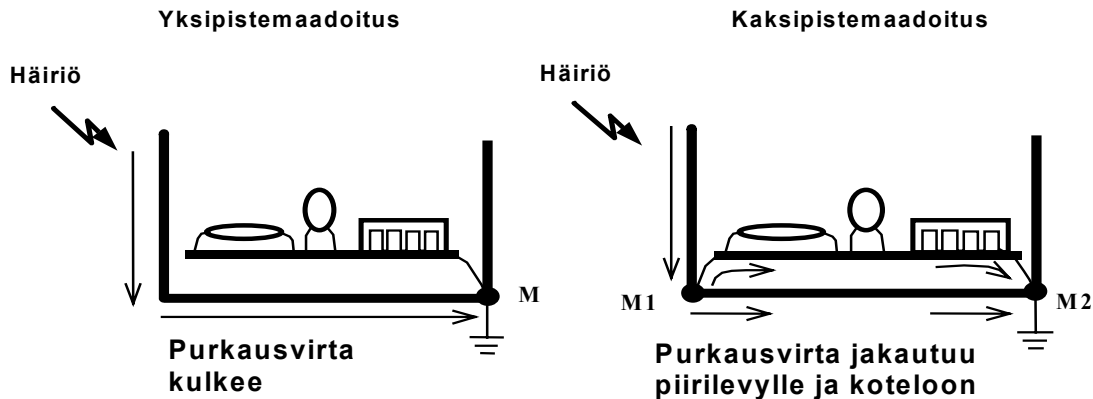
Staattinen varaus purkautuu joko vuotovirtana tai valokaari- ilmiönä. Varaus tulee purkaa turvallisesti hitaana vuotovirtana. Varautumisen estämiseksi laitteet ja varauksen kuljettajat (ihminen) tulee maadoittaa. Maadoitus voidaan tehdä hyvin pieni-impedanssisesti tai pehmeästi. Pehmeässä maadoituksessa kohde maadoitetaan puolijohtavalla materiaalilla suuri-impedanssisesti (100...1000 k Ω), jolloin varaus purkautuu turvallisesti hitaasti. Laitteet maadoitetaan pieni-impedanssisesti ja ihminen maadoitetaan normaalisti rannekeella, jonka impedanssi on noin 1 M Ω .

6.9.4. Tuotesuunnittelu

Staattisen purkauksen kytkeytymismekanismi: **a)** suora-, **b)** toisio-(secondary arcing), **c)** induktiivinen ja **d)** kapasitiivinen kytkeytyminen. Suora kytkeytyminen tapahtuu, kun purkausvirta kulkee galvaanisesti laitteeseen. Toisiokytkeytymisessä laitteeseen syntynyt varaus purkautuu uudelleen laitteen sisällä. Tällainen tilanne syntyy, kun esimerkiksi laitteen huonosti maadoitettu kotelosa varautuu. Tällöin kotelosa ja elektroniikan välinen potentiaaliero saattaa nousta liian korkeaksi ja tapahtuu toinen purkautuminen kotelosa ja laitteen sisällä olevien modulien välillä. Toisiopurkautuminen on yleensä huomattavasti nopeampi ja vahingollisempi, koska purkauspulssin nousunopeutta rajoittavat induktanssi ja resistanssi puuttuvat (vrt. kuva 6.9c). Johtavan kotelosa impedanssi on hyvin pieni.

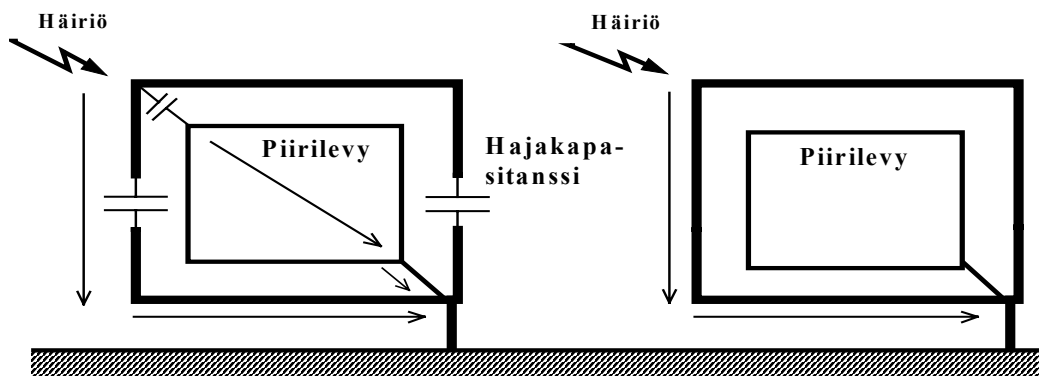
Staattisen purkauksen estäminen:

Laitteet suojataan staattiselta purkaukselta maadoituksella. Kuvassa 6.9c esitetään purkausvirtojen kulkureitit, kun piirilevy on maadoitettu yhdestä tai kahdesta pisteestä. Piirilevy tulee maadoittaa koteloon vain yhdestä pisteestä. Yksipistemaadoitus estää purkausvirtojen kulkemisen piirilevyn kautta ja toisiopurkautumisen. Kotelon varautuessa potentiaaliero kotelon ja piirilevyn välillä ei nouse suureksi, koska molemmat on maadoitettu samaan potentiaaliin (jännitemuutokset ovat yhtäsuuret kotelossa ja piirilevyn maatasossa).



KUVA 6.9c. Purkausvirran kulkureitit, kun piirilevy on maadoitettu yhdestä tai kahdesta pisteestä.

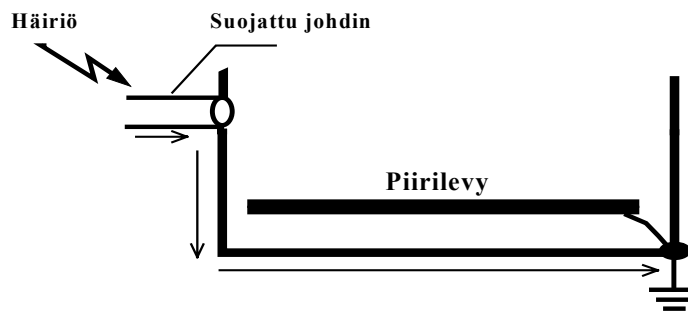
Laitteen kotelon tulee tarjota yhtenäinen ja pieni-impedanssinen maadoitustie riittävän korkealla taajuusalueella. Kotelointia ja eristyksiä suunniteltaessa tulee huomioida mahdollisten staattisten purkauksien tulokohta esim. "Mihin kohtaan laitetta ihmiset koskevat ensimmäiseksi" Yleisiä vastauksia ovat näppäimistö ja etulevy. Maadoituksia tehtäessä on erityistä huomiota kiinnitettävä maadoitettavien osien impedanssitason, eli maadoitusjohtimien tulee olla mahdollisimman lyhyitä ja leveitä. Esimerkiksi useasta osasta muodostuvan metallikotelon eri osien suojamaadoittaminen erillisillä laitteen sisällä kulkevilla maadoitusjohtimilla saattaa tehdä laitteen herkäksi koteloon kohdistuville staattisille purkauksille. Parempi tapa on jättää erilliset maadoitukset pois ja huolehtia kotelon osien maadoituksista niiden välisillä kiinnityksillä. Kotelon johtavat osat eivät saa kellua, kuva 6.9d. Aukot kotelossa aiheuttavat potentiaalieroja laitteen sisällä ja ne voivat purkautua sisäisten hajakapasitanssien kautta aiheuttaen herkkiin osiin vaurioita. Jos maadoitus joudutaan tekemään liikkuvien osien esim. saranan ylitse, varmistetaan maadoitus mahdollisimman lyhyellä ja leveällä johtimella (kuparipunos).



KUVA 6.9d. Sähköstaattisen purkausvirran eteneminen laitteessa, joka on osittain tai täydellisesti maadoitettu.

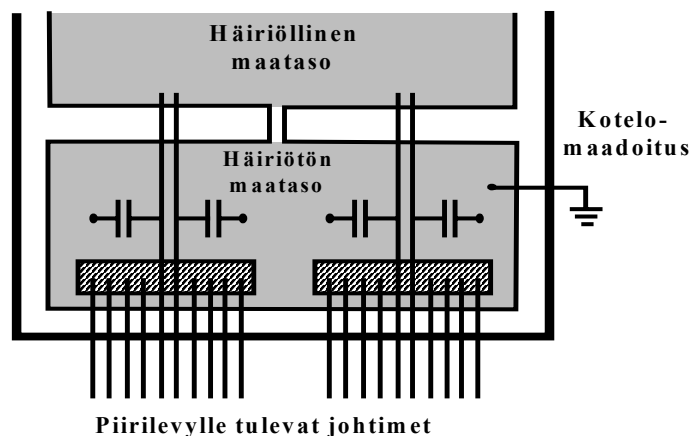
Ensimmäinen vaihe sähköstaattisten purkausten kestäväen laitteen suunnittelussa on tehdä täysin ehjä kotelo huomioiden mm. kansien, liittimien, näppäimistöjen ja merkkivalojen pieni-impedanssinen maadoitus. Tarvittaessa voidaan lisätä laitteen sisälle toinen johtava suoja, joka vähentää kapasitiivista kytkeytymistä kotelosta laitteen sisäisiin osiin. Johtava suoja tulee maadoittaa laitteen koteloon. Maadoittamaton lisäsuoja lisää kapasitiivista kytkeytymistä. Johtavaa suojaa käytetään usein näppäimistöjen ja säätimien läheisyydessä. Toisiopurkautumisen todennäköisyyttä voidaan pienentää kasvattamalla herkkien moduulin etäisyyttä purkausvirtojen etenemisteiltä. Jos kotelo on asianmukaisesti maadoitettu, tulee kotelon ja modulin välisen erotuksen kestää 1...5 kV:n potentiaaliero. Maadoitetun kotelon ja modulin välisen ilmavälin tulee olla >1 mm.

Sähköstaattinen purkaus voi edetä myös johtimia pitkin. Staattisen purkauksen taajuusalue on hyvin korkea ja purkausvirta etenee suojatun johtimen vaipan ulkopintaa pitkin. Tämän vuoksi kaikki ulkoiset kantit tulee suojata johtavalla vaipalla. Johtava vaippa maadoitetaan pieni-impedanssisesti laitteen johtavaan koteloon (ei piirilevylle), kuva 6.9e. Liittiminä käytetään malleja jotka tarjoavat 360° suojauksen johtimen ja kotelon välillä. Purkausvirran aiheuttamat potentiaalimuutokset ovat suoraan verrannollisia kaapelin ja maadoituksen väliseen sarjaimpedanssiin. Huonosti maadoitetussa liittännässä syntyy suuri impedanssi, joka lisätään maadoitustien kokonaisimpedanssiin. Esim. 40 A:n purkausvirta aiheuttaa helposti useiden kilovolttien häiriöjännitteen huonosti maadoitetussa liittimessä.



KUVA 6.9e. Suojatun kaapelin vaipan maadoittaminen koteloon.

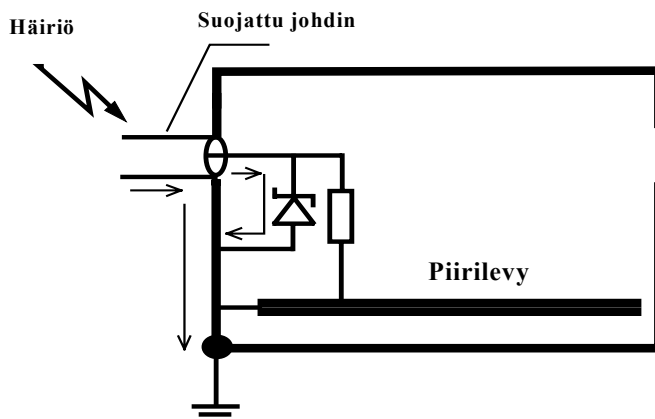
Staattisen purkauksen vaikutusta voidaan vähentää kytkemällä kaikki piirilevylle tulevat johtimet erilliseen häiriöttömään maatasoon samalla tavoin kuin vähennettiin yhteismuotoisten häiriöiden säteilytasoa, kuva 6.9f.



KUVA 6.9f. Piirilevylle tulevien johtimien maadoittaminen häiriöttömään maatasoon.

Häiriötön maataso kytketään muuhun maatasoon vain kapean liuskajohtimen kautta, jonka induktanssi estää nopean purkausvirran etenemisen herkkiin komponentteihin ja moduleihin. Häiriötön maataso maadoitetaan pieni-impedanssisesti koteloon. Kaikki staat-

tiselle purkaukselle alttiit johtimet suodatetaan koteloon tai häiriöttömään maatasoon, ei varsinaiselle piirilevyllä, kuva 6.9g. Suodatinkomponenttien (esim. zener-diodit, kondensaattorit) tulee olla erittäin nopeita ja laajakaistaisia, koska purkausjännitteen nousunopeus voi olla < 1 ns. Yhteismuotoisen purkausvirran etenemistä voidaan vaimentaa käyttämällä kaikkien ulkoisten johtimien ympärillä yhteismuodon kuristinta.



KUVA 6.9g. Ulkoisen häiriön suodatus laitteen koteloon.

6.9.5. Suunnittelusäännöt

- Pääsuojausperiaatteena on, että purkausvirta ei saa kulkea herkkien piirikomponenttien kautta. Tämä toteutetaan asianmukaisilla maadoituksilla tai suodatuskomponenteilla, jotka tarjoavat purkausvirralle laitteen häiriöttömän toiminnan kannalta parhaan kulkutien.
- Järjestetään laitteessa pieni-impedanssinen varauksen purkautumistie suorassa kytketyksessä.
- Suojataan laite täysin tiiviillä koteloinnilla ja asianmukaisilla liittimillä induktiiviselta ja kapasitiiviselta kytketykseltä.
- Siirretään herkät osat mahdollisimman kauaksi mahdollisista purkaukskohdista ja purkausvirran kulkureiteiltä (hajakapasitanssit pienevät).
- Minimoidaan kaapelien ja piirilevyjohtimien muodostamien silmukoiden pinta-ala (herkkyys induktiiviselle kytketykselle vähenee).
- Tehdään yhtenäinen kotelo (tarvittaessa käytetään ylimääräisiä johtavia ja maadoitettuja lisäsuojia).
- Suojamaadoitetaan kotelo pieni-impedanssisesti (suuritaajuinen purkausvirta kohottaa kotelon potentiaalia huomattavasti, jos kotelon maadoituksessa esiintyy liikaa induktanssia).
- Piirilevy tulee maadoittaa koteloon vain yhdestä pisteestä.
- Tarvittaessa voidaan lisätä laitteen sisälle toinen johtava suoja, joka vähentää kapasitiivista kytketyksistä kotelosta laitteen sisäisiin osiin. Johtava suoja tulee maadoittaa laitteen koteloon.
- Kaikki ulkoiset kaapelit tulee suojata johtavalla vaipalla. Johtava vaippa maadoitetaan pieni-impedanssisesti laitteen johtavaan koteloon (ei piirilevyllä). Liittiminä käytetään malleja, jotka tarjoavat 360° suojauksen johtimen ja kotelon välillä.