

# VIESTITEKNIIKAN OPAS

(VteknOpas)



1991



00270 /  
1

04.7

# VIESTITEKNIIKAN OPAS

(VteknOpas)

Pääesikunnan koulutusosasto 1991

ISBN 951-25-0552-5  
VMN 7610-448-3944

Pieksämäki 1992  
Sisälähetysseuran kirjapaino Raamattutalo

PÄÄESIKUNTA

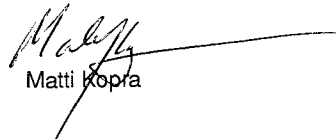
Helsinki

29.5.1991

---

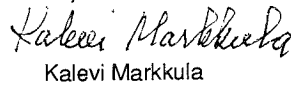
Vahvistan tämän **Viestitekniiikan oppaan** käyttöön otettavaksi.

Koulutuspäällikkö  
Kenraaliluutnantti



Matti Kopra

Viestitarkastaja  
Eversti



Kalevi Markkula



**SISÄLLYS****Sivu**

<b>JOHDANTO</b>		11
<b>1</b>	<b>SÄHKÖTEKNIikka</b>	12
<b>1.1</b>	<b>Sähkötekniikan perusteet</b>	12
1.1.1	Perussuureet ja mittayksiköt	12
1.1.2	Suurelaskenta	12
<b>1.2</b>	<b>Tasasähkö</b>	13
1.2.1	Virta, virtapiiri ja jännite	13
1.2.2	Ohmin laki	14
1.2.3	Aineen johtavuus ja ominaisvastus	15
1.2.4	Vastuskytkennät	16
1.2.5	Virtalähteiden kytkennät	19
1.2.6	Tasavirtapiirin laskeminen	20
1.2.7	Energia, työ ja teho	21
1.2.8	Tasasähkölähteet	22
<b>1.3</b>	<b>Vaihtosähkö</b>	26
1.3.1	Vaihtosähkön synty	26
1.3.2	Taajuus ja amplitudi	27
1.3.3	Vaihtosähkösuureet	28
<b>1.4</b>	<b>Värähtelypiirit</b>	34
<b>1.5</b>	<b>Sähköturvallisuuden perusteet</b>	37
1.5.1	Turvallisuusmääräysten tarkoitus	37
1.5.2	Sähkönsyöttöjärjestelmät	37
1.5.3	Maadoitukset	39
1.5.4	Kenttäviestiasemien sähköturvallisuus	43
<b>2</b>	<b>DIGITAALIELEKTRONIIKKA</b>	46
<b>2.1</b>	<b>Käsitteistö</b>	46
<b>2.2</b>	<b>Digitaalielektroniikan peruskomponentit</b>	47
2.2.1	Loogiset piirit	47
2.2.2	A/D -muuntimet	48
2.2.3	D/A -muuntimet	50
2.2.4	Mikroprosessorit, muistipiirit ja liitäntäpiirit (I/O-piirit)	51
<b>2.3</b>	<b>Mikrotietokone</b>	53
<b>2.4</b>	<b>Digitaalielektroniikan sovelluksia</b>	55
2.4.1	Puhelinvaihte mikroprosessorin ohjaamana	55
2.4.2	Mikroprosessori sanomalaitteen ohjaajana	56

2.4.3	Mikroprosessoriohjattu NMT -puhelin	57
2.4.4	Erikaisprosessorit	58
<b>3</b>	<b>VIESTINSIIRTOTEKNIikka</b>	<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>Signaalin käsittely</b>	<b>59</b>
3.1.1	Signaalityypit	59
3.1.2	Modulaatio ja demodulaatio	60
3.1.3	Johtokoodaus	68
3.1.4	Kanavointi	70
3.1.5	Viestinsiirtotekniikan käsitteitä	72
3.1.6	Puhekanavan käyttö signaalin siirrossa	76
3.1.7	Datan siirto puhekanavassa	77
<b>3.2</b>	<b>Siirtojohdot</b>	<b>78</b>
3.2.1	Yleistä	78
3.2.2	Avojohto	78
3.2.3	Symmetriset kaapelit	79
3.2.4	Koaksiaalikaapelit	79
3.2.5	Optiset kaapelit	80
<b>3.3</b>	<b>Sähkömagneettinen aaltoliike</b>	<b>83</b>
3.3.1	Yleistä	83
3.3.2	Aallon pituus	84
3.3.3	Taajuusalueet	84
3.3.4	Polarisaatio	85
3.3.5	Radioaaltojen eteneminen	85
<b>3.4</b>	<b>Antennit</b>	<b>89</b>
3.4.1	Sähkömagneettisen säteilyn synty antennissa	89
3.4.2	Antennien ominaisuuksia	90
3.4.3	Tavallisimmat antennityypit	91
3.4.4	Antennin syöttö	98
<b>4</b>	<b>VIESTITEKNIIKAN MITTAUKSET</b>	<b>102</b>
<b>4.1</b>	<b>Yleistä</b>	<b>102</b>
4.1.1	Mittareiden jaottelu	102
4.1.2	Mittareiden merkinnät	103
<b>4.2</b>	<b>Mittarirakenteita</b>	<b>104</b>
4.2.1	Toimintaperiaatteet	104
4.2.2	Yleismittari	106
<b>4.3</b>	<b>Perusmittaukset</b>	<b>109</b>
4.3.1	Jännitteen mittaus	109
4.3.2	Virran mittaus	111
4.3.3	Vastuksen mittaus	111



		7
<b>4.4</b>	<b>Fysikaalisen yhteyden kunnon mittaukset</b>	112
4.4.1	Silmukkavastuksen mittaus	112
4.4.2	Eristysvastuksen mittaus	114
<b>4.5</b>	<b>Taso- ja vaimennusmittaukset</b>	115
4.5.1	Yleistä	115
4.5.2	Tason mittaus	115
4.5.3	Vaimennuksen mittaus	117
4.5.4	Ylikuulumisen mittaus	118
<b>4.6</b>	<b>Muita mittauksia</b>	119
4.6.1	Maadoitusvastuksen mittaus	119
4.6.2	Antennista takaisin heijastuvan tehon mittaus	120
<b>5</b>	<b>KENTTÄVIESTIJÄRJESTELMIIN KOHDISTUVIA ELEKTRONISIA UHKATEKIJÖITÄ</b>	122
<b>5.1</b>	<b>Elektroninen sodankäynti</b>	122
5.1.1	Elektroninen uhka	122
5.1.2	Elektroninen tiedustelu	123
5.1.3	Elektroninen häirintä ja harhauttaminen	125
5.1.4	Elektroninen suojautuminen	126
<b>5.2</b>	<b>Ydinräjähdys</b>	131
5.2.1	Elektromagneettinen pulssi	131
5.2.2	Korkearäjähdysten vaikutus radioyhteyksiin	135
<b>LIITE</b>	<b>Sl.-järjestelmä</b>	137

## Kuvat

		Sivu
1.1	Esimerkkejä erilaisista sähkönsyöttöjärjestelmistä	38
1.2	Kenttäviestiaseman sähköjärjestelmän periaate	39
1.3	Maadoituksen yleisperiaate	40
1.4	Maadoitusmalleja	41
1.5	Häiriöttömän maadoituksen periaate	43
1.6	Kenttäpääteen maadoittaminen	44
1.7	Kenttälinkkiaseman maadoitukset	45
2.1	Esimerkki binääriluvun 10010 sähköisestä vastineesta	46
2.2	Perusporttipiirit	47
2.3	Sekvenssiipiirien perustyytit	48
2.4	Pitopiiri	49
2.5	Peräkkäisten approksimaatioiden menetelmä	50
2.6	D/A-muunnin	51
2.7	Prosessori-komponentti 8080 A	52
2.8	Mikrotietokoneen lohkokaaevio	54
2.9	Puhelinvaihteen (PABX) periaatteellinen rakenne	56
3.1	Analoginen signaali	59
3.2	Digitaalinen kaksitasoinen signaali	59
3.3	Kantoaaltomodulaatiomenetelmät	60
3.4	Pulssimodulaatiomenetelmät	60
3.5	Vakiotaaajuksen siniaallon moduloima kantaalto	61
3.6	AM-modulointitulos	61
3.7	Taajuuskaistan moduloiman AM-signaalin spektri	62
3.8	Modulaatioasteen laskeminen	62
3.9	Yksisivukaistalähetteen muodostuminen	63
3.10	Moduloivan signaalin vaikutus taajuuspoikkeamaan	64
3.11	Näytteenotto jatkuvasta signaalista	65
3.12	Lineaarinen DM-koodaus	67
3.13	Adaptiivinen DM-koodaus	67
3.14	PCM-koodauksen periaate	68
3.15	Unipolaarinen ja bipolaarinen koodi	69
3.16	Signaalin teho koodauksessa	69
3.17	Yleisimmin käytössä olevat koodit	70
3.18	Taajuusjakoinen kanavointi	71
3.19	Aikajakoinen kanavointi	71
3.20	TDM-kanavoitu DM-signaali	72
3.21	Suhteellinen taso	73
3.22	Käyttövaimennus	74
3.23	Ylikuuluminen	75
3.24	Puheen tehospektri	76
3.25	Puhekanavan taajuuksilla sallittu vaimennusvääristymä	77
3.26	Datan siirto puhekanavassa	77
3.27	Modeemin merkkitaajuudet pääkanavassa	77
3.28	Nelinapa	78
3.29	Parijohdon sijaiskytkentä	78
3.30	Koaksiaalikaapelin rakenne	80

3.31	Optinen tiedonsiirtoyhteys	80
3.32	Valon kulku eri kuiturakenteissa	81
3.33	Kulkuaikeeron vaikutus vastaanotettuun pulssiin	82
3.34	Sähkömagneettinen aalto	83
3.35	Aallonpituus	84
3.36	Sähkömagneettinen spektri	84
3.37	Viestivälit erit taajuusalueilla	85
3.38	Polarisaatiotasot	85
3.39	Ionisoituneet kerrokset	86
3.40	Heijastuminen eri vuorokauden aikoina	86
3.41	Heijastumiseen vaikuttavat tekijät	86
3.42	Kriittinen taajuus	87
3.43	Kuollut alue	88
3.44	Linkkiyhteys	88
3.45	Eri teitä antenniin saapuvat aallot	89
3.46	Fresnellin alue	89
3.47	Sähkö- ja magneettikenttä dipolissa	89
3.48	Sähkömagneettisten aaltojen säteily antennissa	90
3.49	Suunta-antennin säteilykuvio	90
3.50	Dipolin sähkökenttä	91
3.51	Dipolin magneettikenttä	91
3.52	Sähkömagneettinen kenttä	92
3.53	Puoliaaltodipolin säteilykuvio	92
3.54	Vaakadipolin säteileminen	92
3.55	Eri korkeuksille rakennetun dipolin säteily pystytasossa	93
3.56	Pystydipolin säteileminen	93
3.57	Neljännesaaltoantenni	94
3.58	Jännitteen ja virran jakautuminen normaali antennissa	94
3.59	Yagi-antenni	95
3.60	Pitkälanka-antenni	95
3.61	Logaritminen antenni	96
3.62	Paraboloidiantenni	97
3.63	Sähköisesti suunnattava antenni	97
3.64	Dipoliryhmä	98
3.65	Sovitus	98
3.66	Epäsovitusilanne	99
3.67	Seisovan aallon suhde	99
3.68	Avolinja	101
4.1	Osoittavien mittareiden merkintöjä	103
4.2	Mekaaniseen voimaan perustuvan mittarin koneiston rakenneperiaate	104
4.3.	Esimerkki staattisen kentän voimavaikutuksen käytöstä jännitteen mittauksessa	105
4.4	Ajanmittausmenetelmän periaate	105
4.5	Kaksoisrampin menetelmän periaate	106
4.6	Esimerkki kompensatiomenetelmän lohkokaaviosta	106
4.7	Yleismittarin periaate	107
4.8	Tasavirran mittaus	107
4.9	Vaihtojännitteen mittaus	108

4.10	Vastuksen mittaus	108
4.11	Digitaalisen yleismittarin pelkistetty lohkokkaavio	109
4.12	Jännitelähteen mittaus	110
4.13	Virran mittaus	111
4.14	Vastuksen mittaus lyhyellä kytkennällä	112
4.15	Vastuksen mittaus pitkällä kytkennällä	112
4.16	Johdon silmukkavastuksen mittaus	113
4.17	Tasavirtageneraattorilla varustetun eristysvastusmittarin periaate	114
4.18	Erisrysvastuksen mittaaminen	114
4.19	Päättävä tasomittaus	115
4.20	Rinnanmittaus	117
4.21	Puhetaajuuskäyttöön tarkoitetun johdon vaimennuksen mittaus	117
4.22	Lähipään ylikuulumisen mittaus	118
4.23	Kaukopään ylikuulumisen mittaus	119
4.24	Maadoitusvastuksen mittaamisen periaate	119
4.25	Mittauspiikkien sijoitus	119
4.26	Suora mittaus	120
5.1	Elektroninen sodankäynti	122
5.2	Elektronisen sodankäynnin yksikkö	123
5.3	Elektronisen tiedustelun ulottuvuus	124
5.4	Signaalin paikantaminen suuntimella	124
5.5	Aktiivisen häirinnän periaate	125
5.6	Passiivisen häirinnän periaate	125
5.7	Häirintäyhtälö	126
5.8	Aikajakoinen monikanavahäirintä	126
5.9	Havaitsemisen todennäköisyys	127
5.10	Hajaspektrijärjestelmät	128
5.11	Modulo 2-yhteenlaskusääntö	128
5.12	Antennin suuntaamisen vaikutus linkkiyhteyden häirintätilanteessa	130
5.13	Esimerkki EMP:n syntymekanismista	131
5.14	Korkearajähdyksen EMP:n arvioituja pulssimuotoja	132
5.15	Korkearajähdyksen EMP:n energiaspektrejä	132
5.16	Esimerkki sähkökentän voimakkuudesta maanpinnalla pohjoisella pallonpuoliskolla	133
5.17	Sähköisesti lyhyihin antenneihin kytkeytyvän energian suhde komponenttien vaurioitumisenergioihin	133
5.18	Korkearajähdyksen paikallinen ja etäinen ionisaatioalue	136

## JOHDANTO

**Viestitekniikan opas** on tarkoitettu viestikoulutusta tukevaksi käsikirjaksi, johon on koottu viestitekniikan perustietoja sekä kouluttajia että koulutettavia varten.

Opas käsittelee sähkötekniikan, digitaalelektroniikan ja viestinsiirtotekniikan perusteita sekä viestitekniikan mittauksia ja kenttäviestijärjestelmiin kohdistuvia elektronisia uhkatekijöitä. Aiheita on käsitelty kenttäviestitoimintaan liittyvän tekniikan ymmärtämisen vaatimalla tarkkuudella.

Tämä opas kumoaa **Viestimiehen sähkö- ja radio-opin** vuodelta 1966 sekä Pääesikunnan viestiosaston antaman pysyväsiohjeen **Ohje johtomittausten suorittamisesta** (PEV-os PAK K 6:1) vuodelta 1975.

# 1 SÄHKÖTEKNIikka

## 1.1 Sähkötekniikan perusteet

### 1.1.1 Perussuureet ja mittayksiköt

Käytössä olevat perussuureet ja mittayksiköt ovat kansainvälisestä yksikköjärjestelmästä, jota kutsutaan lyhyesti SI-järjestelmäksi (Système International d'Unités, LIITE). Se on muodostettu niin, ettei tarvitse käyttää muunnoskerroimia eri yksiköiden välillä. Lisäksi yksiköitä yhdistelemällä saadaan johdannaisyksiköitä.

### 1.1.2 Suurelaskenta

SI-järjestelmästä saadaan suurin hyöty, kun matemaattisessa käsittelyssä käytetään suurelaskentaa.

Suure = lukuarvo x yksikkö

Esimerkki:  $U = 0,775 \text{ V}$ , jossa  
 $U$  on suure (= suureen tunnuskirjain)  
 $0,775$  on lukuarvo  
 $V$  voltti on yksikkö

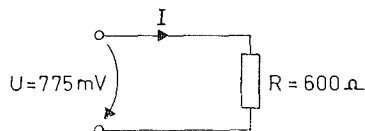
Suurelaskennassa suoritetaan laskutoimitukset sekä lukuarvoilla että yksiköillä. Tehtävän ratkaisussa käytetään apuna piirikaavioita ja piirroksia.

Ratkaisujärjestys:

- 1 Kuvion piirtäminen
- 2 Suureiden kokoaminen
- 3 Kaavojen valinta
- 4 Kaavojen ratkaisut tai osaratkaisut
- 5 Sijoitus
- 6 Ratkaisu (laskutoimitus lukuarvoilla ja yksiköillä)
- 7 Tehtävän tarkastelu

Esimerkki: Kuinka suuri virta kulkee suljetussa virtapiirissä, jonka resistanssi on  $600 \Omega$ , kun piiriin vaikuttaa  $775 \text{ mV}$ :n jännite?

1



2  $U = 775 \text{ mV}$   
 $R = 600 \Omega$   
 $I = ?$

3  $U = I * R$

$$4 \quad U = I * R \Rightarrow I = \frac{U}{R}$$

$$5 \quad I = \frac{U}{R} = \frac{775 \text{ mV}}{600 \Omega}$$

$$6 \quad I = \frac{775 * 10^{-3} \text{ V}}{600 \frac{\text{V}}{\text{A}}} = 1,29 * 10^{-3} \text{ A} \quad \Omega = \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$I = 1,29 \text{ mA} \quad 10^{-3} \Rightarrow \text{milli}$$

$$7 \quad U = I * R = 1,29 \text{ mA} * 600 \Omega = 0,775 \text{ mV}$$

tai

$$R = \frac{U}{I} = \frac{0,775 \text{ mV}}{1,29 \text{ A}} = 600 \Omega$$

Koska syntynyt jännitehäviö vastuksen R yli on yhtä suuri kuin kokonaisjännite, on tehtävä oikein suoritettu.

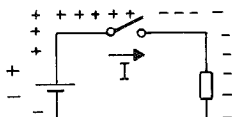
## 1.2 Tasasähkö

### 1.2.1 Virta, virtapiiri ja jännite

Sähkövirran syntymisen perusedellytykset ovat:

- 1 Virtalähde, jolla on kyky jatkuvasti ylläpitää jännitettä kahden johtavasti toisiinsa liitetyn kappaleen välillä.
- 2 Suljettu virtapiiri.

Sähkövirta lähtee liikkeelle välittömästi, kun virtalähteen sisältämä virtapiiri suljetaan.

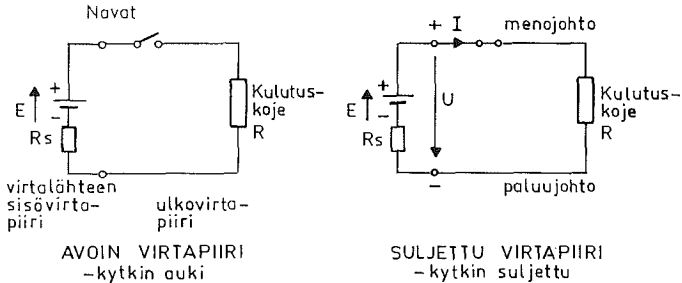


Jännite vaikuttaa kytkimen koskettimien välillä virtapiiriin ollessa avoin

Sähkövarauksen  $Q$  liikkeessa johteessa, esimerkiksi kuparilangassa, tarkastelukohdan ohi ajassa  $t$ , syntyy sähkövirta  $I$ .

$$I = \frac{Q}{t}$$

$$\left[ \frac{\text{As}}{\text{s}} \right] = [\text{A}]$$



Suljetussa virtapiirissä tarvitaan meno- ja paluujohtin kulutuskojeille, jotta virta pääsee kulkemaan koko kytkennän läpi. Virran kulkusuunnaksi on sovitettu ulkovirtapiirissä suunta plusnavasta miinusnapaan. Varauksia kuljettavien elektronien kulkusuunta on päinvastainen.

Avoimen virtapiirin virtalähteen navoista mitattua jännitettä nimitetään lähdejännitteeksi  $E$  tai sähkömotoriseksi voimaksi  $smv$ , jonka yksikkö on voltti  $[V]$ .  $E$ :n suunta on aina virtalähteen sisävirtapiirissä miinusnavasta plusnapaan.

Suljetun virtapiirin virtalähteen navoista mitattua jännitettä nimitetään napajännitteeksi  $U$ . Kuormitetun virtalähteen napajännite on pienempi kuin  $smv$ , koska virta aiheuttaa jännitehäviön virtalähteen sisäisessä vastuksessa.

### 1.2.2 Ohmin laki

Ohmin lain mukaan johtimessa kulkeva virta on suoraan verrannollinen johtimen päiden väliseen jännitteeseen. Johtimen resistanssi määritellään sen päiden välisen jännitteen ja johtimessa kulkevan virran suhteeksi.

$$R = \frac{U}{I}$$

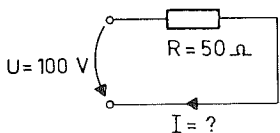
$$U = IR$$

$$I = \frac{U}{R}, \text{ jossa}$$

$U$  = jännite             $V$   
 $I$  = virta               $A$   
 $R$  = resistanssi       $\Omega$



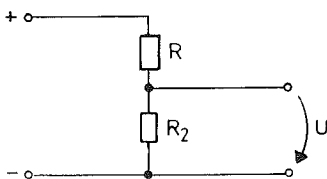
**Esimerkki:** Miten suuri virta kulkee 100 V:n jännitteeseen liitetyn vastuksen kautta, jonka resistanssi on 50  $\Omega$ ?



$$\begin{aligned} U &= 100 \text{ V} \\ R &= 50 \Omega \\ I &= ? \\ I &= 2 \text{ A} \end{aligned}$$

**Harjoitus 1** Puhelimen soittokellon resistanssi on noin 2 k $\Omega$ . Kuinka suuri jännite tarvitaan, jos soittokellon käämityksen läpi kulkee 24 mA:n virta?

**Harjoitus 2**



Kuvassa olevan vastuksen  $R_2$  yli vaikuttaa 9,1 V:n jännite, kun virta on 22 mA.

Miten suuri on kyseisen vastuksen resistanssi?

### 1.2.3 Aineen johtavuus ja ominaisvastus

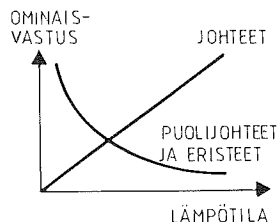
Kaikki aine koostuu atomeista. Aineen atomirakenteessa olevien "helposti" liikkuvien elektronien määrä vaikuttaa siihen, miten hyvin aine pystyy johtamaan sähkövirtaa.

Aineita, joilla on paljon helposti liikkuvia elektroneja, kutsutaan johteiksi. Tyypillisiä johteita ovat metallit, hiili ja suolaliuokset.

Aineita, joiden elektroneista osa saadaan lämpötilan ja sähkökentän avulla johtaviksi, kutsutaan puolijohteiksi. Tyypillisiä puolijohteita ovat pii, seleeni ja germanium.

Aineita, joissa on hyvin vähän sähkövirran muodostamiseen pystyviä elektroneja, kutsutaan eristeiksi. Tyypillisiä eristeitä ovat kaasut, öljyt, posliini, lasi ja paperi.

Käännteinen ilmiö aineen johtavuudelle on aineen ominaisvastus eli resistiivisyys. Johteilla ominaisvastus on pieni ja eristeillä suuri.



Aineen ominaisvastus riippuu lämpötilasta kuvan esittämällä tavalla.

Resistanssilla tarkoitetaan aineen kykyä vastustaa sähkövirran kulkua. Resistanssin arvo riippuu aineen ominaisvastuksesta ja materiaalikappaleen geometrisista mitoista.

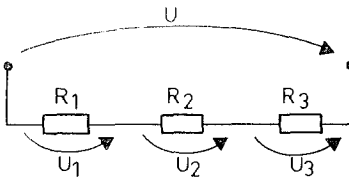
$$R = \rho \frac{l}{A}$$

, jossa:  $R$  = resistanssi  
 $\rho$  = ominaisvastus  
 $l$  = kappaleen pituus  
 $A$  = kappaleen poikkileikkauksen pinta-ala

#### 1.2.4 Vastuskytkennät

Teletekniikan kytkennöissä esiintyy yleensä useita resistansseja kytkettyinä joko sarjaan, rinnantai näiden yhdistelmiksi. Monimutkaiset kytkennät voidaan palauttaa yksinkertaisiksi sarja- ja rinnankytkennöiksi laskemalla ne paloittain sopivissa osissa.

##### Sarjakytkentä



Sarjakytkennän tunnusmerkkejä ovat:

- komponentit on kytketty siten, että toisen alku- ja toisen loppupää ovat yhdessä
- minkäänlaisia haaroituksia ei esiinny
- sarjakytkennän läpi kulkee sama virta
- Kirchoff'n II lain mukaan koko kytkentään vaikuttava jännite on eri komponentteihin vaikuttavien jännitteiden summa

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Koska kytkennän läpi kulkee virta  $I$ , on

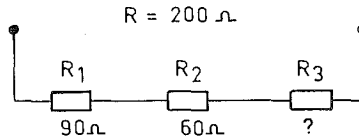
$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I}$$

Siten saadaan

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad \text{eli}$$

sarjaankytkennän kokonaisvastus on osavastusten summa.

Esimerkki: Sarjassa olevien  $90\ \Omega$ :n ja  $60\ \Omega$ :n vastusten kanssa on kytkettävä sarjaan sellainen kolmas vastus, että kokonaisvastus on  $200\ \Omega$ . Kuinka suuri on  $R_3$ ?



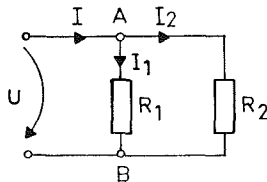
$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_3 = R - R_1 - R_2$$

$$= 200\ \Omega - 90\ \Omega - 60\ \Omega$$

$$R_3 = 50\ \Omega$$

### Rinnankytkentä



Rinnankytkennän tunnusmerkkejä ovat:

- komponentit on kytketty siten, että niiden alkupäät keskenään ja loppupäät keskenään ovat yhdessä (solmukohta)
- rinnan kytkettyihin komponentteihin vaikuttaa sama jännite
- Kirchoff'n I lain mukaan solmukohtaan tulevien virtojen summa on yhtä suuri kuin siitä lähtevien virtojen summa
- rinnankytkettyjen vastusten yhteisresistanssi on aina pienempi kuin pienimmän osaresistanssin arvo.

Pisteessä A

$$I = I_1 + I_2$$

$$I = \frac{U}{R}$$

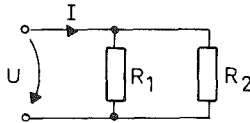
$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Kahden rinnankytketyn vastuksen laskemiseksi edellinen kaava voidaan muuntaa muotoon

$$R = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$$

Esimerkki: Kuinka suuri on vastusten yhteisresistanssi seuraavassa kytkennässä?



$$R_1 = 10 \Omega$$

$$R_2 = 20 \Omega$$

$$R = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$$

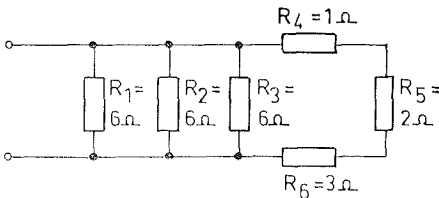
$$R = \frac{10 \Omega * 20 \Omega}{10 \Omega + 20 \Omega} = \frac{200 \Omega^2}{30 \Omega}$$

$$R = 6,7 \Omega$$

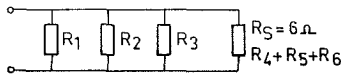
## Sekakytkentä

Käytännön virtapiireissä esiintyy yleensä sekä rinnan että sarjassa olevia vastuksia.

Esimerkki sekakytkennän yhteisresistanssin määrittämiseksi:



Laskeminen on parasta aloittaa sarjakytkennästä R<sub>4</sub>, R<sub>5</sub> ja R<sub>6</sub>, jonka jälkeen kytkentä muodostuu seuraavaksi:



$$R_s = R_4 + R_5 + R_6 = 1 \Omega + 2 \Omega + 3 \Omega$$

$$R_s = 6 \Omega$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_s}$$

Kytkenä on muuttunut neljän vastuksen rinnankytkennäksi eli

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{6 \Omega} + \frac{1}{6 \Omega} + \frac{1}{6 \Omega} + \frac{1}{6 \Omega} = \frac{4}{6 \Omega}$$

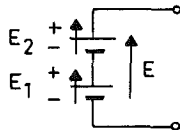
, josta käänteisarvo

$$R = \frac{6}{4} \Omega = 1,5 \Omega$$

### 1.2.5 Virtalähteiden kytkennät

Virtalähteet voidaan kytkeä sarjaan, rinnan tai sekakytkentään. Täydellinen hyöty virtalähteiden kytkennöistä saavutetaan, jos ne ovat täysin samanlaisia sähkömotoriselta voimaltaan ja sisäresistanssiltaan.

Sarjakytkentä



Virtalähteet kytketään sarjaan siten, että edellisen virtalähteen napa liitetään seuraavan virtalähteen erimerkkiseen napaan.

Tällöin virtalähteiden antama kokonais-smv on virtalähteiden smv:ien summa

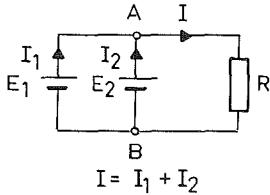
$$E = E_1 + E_2$$

eli virtalähteiden sarjakytkennän ansiosta lähdejännite kasvaa.

Esimerkiksi 4,5 V:n taskulampun paristo on muodostettu kolmesta 1,5 V:n pyöreästä elementistä sarjaan kytkemällä.

## Rinnankytkentä

Tämän kytkennän hyvät puolet tulevat esille vasta suljetussa virtapiirissä. Virtaa saadaan jokaisesta virtalähteestä samanaikaisesti. Ohmin laki määrää virran suuruuden, mutta rinnankytkentä sallii suuremman kuormitusvirran.

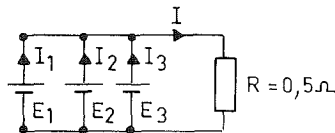


Kokonais-smv ei muutu, vaan  $E_1 = E_2 = E$ , mutta virta haarautuu Kirchoff'n I lain mukaan niin, että virta

$$I = I_1 + I_2$$

Jännitteeltään eri suuria sähkölähteitä ei kannata kytkeä rinnakkain, sillä suurempi aiheuttaa pienemmän kautta tasausvirran.

Esimerkki: Akussa on kolme kennoa rinnakkain. Jokaisen kennon smv on 2,1 V. Akun napojen väliin kytketään 0,5 Ω:n vastus. Kuinka suuri virta kustakin kennosta otetaan?



$$E_1 = 2,1 \text{ V}$$

$$E_2 = 2,1 \text{ V}$$

$$E_3 = 2,1 \text{ V}$$

$$E = E_1 = E_2 = E_3 = 2,1 \text{ V}$$

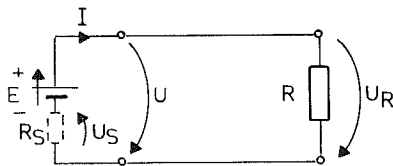
$$I = \frac{E}{R} = \frac{2,1 \text{ V}}{0,5 \Omega} = 4,2 \text{ A}$$

Virta haarautuu Kirchoff'n I lain mukaan eli I muodostuu kolmesta yhtäsuuresta virrasta, joten

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{I}{3} = \frac{4,2 \text{ A}}{3} = 1,4 \text{ A}$$

### 1.2.6 Tasavirtapiirin laskeminen

Tähän mennessä määriteltyjen ominaisuuksien perusteella voidaan tutkia ja laskea kokonaisia virtapiirejä.



Napajännite  $U$  mitataan sähkölähteen navoista. Virtapiirin ollessa avoin napajännite on yhtä suuri kuin lähdejännite  $U = E$ .

Virran kulkiessa syntyy sisä- ja ulkovirtapiireissä jännitehäviöt

$$U_S = IR_S$$

$$U_R = IR$$

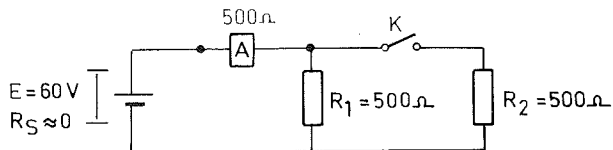
Suljetussa virtapiirissä napajännite on sisäisen jännitehäviön verran lähdejännitettä pienempi.

$$U = E - U_S \Rightarrow E = U + U_S \quad (\text{Kirchoff'n II laki})$$

Kirchoff'n II lain mukaan suljetussa virtapiirissä sähkömotoristen voimien summa on yhtä suuri kuin jännitehäviöiden summa. Tällöin virta voidaan laskea seuraavasti:

$$I = \frac{E}{R_S + R}$$

Harjoitus 3 Miten suuret jännitteet vaikuttavat kuvassa olevan releen A käämin napojen välillä, kun a) kytkin K on auki b) kytkin K on suljettu?



### 1.2.7 Energia, työ ja teho

Energia esiintyy luonnon järjestelmissä eri muodoissa: potentiaalienergiana, liike-energiana ja lämpöenergiana. Energia on häviämätöntä ja sitä voidaan muuttaa muodosta toiseen.

Järjestelmän energiataseen kasvattamiseksi siihen on tuotava jossain muodossa lisää energiaa.

Työ

Järjestelmän energian lisäämiseksi on tehtävä työtä. Energiataseen laskiessa järjestelmä luovuttaa energiaa eli järjestelmä tekee työtä siihen järjestelmään, johon energia luovutetaan. Työ on siis annos energiaa, joka joko tuodaan järjestelmään tai otetaan siitä pois.

Työn tunnuskirjain on  $W$ .

Työn ja siis myös energian perusyksiköitä ovat

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ J}$$

Newtonmetri (Nm) on mekaanisen energian yksikkö (voima \* matka), wat-tisekunti on sähköenergian ja joule lähinnä lämpöenergian yksikkö. Sähköenergia määritellään

$$\boxed{W = U * I * t}$$

jossa

$U$	=	jännite
$I$	=	virta
$t$	=	aika

$$1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ Ws}$$

Teho

Aikayksikössä suoritettua työtä sanotaan tehoksi.

$$\boxed{P = \frac{U * I * t}{t} = U * I}$$

Sähkötehon yksikkö on watti [W].

Energian tunnus  $W$  ja tehon yksikkö [W] on erotettava toisistaan, vaikka molemmissa käytetään samaa kirjainta.

### 1.2.8 Tasasähkölähteet

Tasasähkölähteitä ovat akut, sähköparit, polttokennot, aurinkokennot, tasavirtageneraattorit ja tasasuuntausjärjestelmät. Tässä oppaassa tarkastellaan edellä mainituista lyhyesti akkuja, sähköpareja sekä tasasuuntausjärjestelmiä.

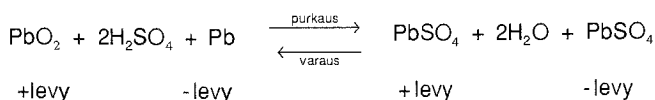
Akuissa ja sähköpareissa kemiallinen energia muuttuu tasasähköksi. Kemialliseen reaktioon perustuva virtalähde koostuu seuraavista osista:



- negatiivinen elektrodi (yleensä metallia, joka pystyy luovuttamaan elektroneja)
- positiivinen elektrodi (ainetta, joka pystyy ottamaan vastaan elektroneja)
- elektrolyytti (yleensä elektrodien välissä olevaa ainetta, joka pystyy toimimaan kemiallisen reaktion välittäjänä)
- erotin (eristävää ainetta, jonka tehtävä on erottaa elektrodit mekaanisesti ja galvanisesti toisistaan sekä samalla mahdollistaa kemiallisen reaktion tapahtuminen)

Lyijy Akku on yleisin käytössä oleva akku. Sen elektrolyytti on laimennettua rikkihappoa ja elektrodit varaustilasta riippuen joko lyijyä (Pb) ja lyijyoksidia (PbO<sub>2</sub>) tai lyijysulfaattia (PbSO<sub>4</sub>).

Purkauksen ja varauksen kemiallinen kaava:



Täysin varatun akun positiivisen elektrodin lyijyoksidin ja negatiivisen elektrodin lyijy muuttuvat akkua purettaessa lyijysulfaatiksi. Samalla rikkihappo (2H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) laimenee vedeksi (2H<sub>2</sub>O).

Varauksen loppuvaiheessa kehittyä positiivisessa elektrodissa happikaasua ja negatiivisessa elektrodissa vetykaasua. Vetykaasun vapautumisen johdosta on varaamotilassa oltava hyvä tuuletus eikä avotulen käsittely ole sallittua.

Koska rikkihappo on tiheämpää ainetta kuin vesi, voidaan lyijy Akkun elektrolyytin tiheydestä päätellä akun varaustila. Varatun lyijy Akkun tiheys on n. 1,25 g/cm<sup>3</sup> ja puretun n. 1,16 g/cm<sup>3</sup>.

Lyijy Akkun jännitteet ovat:

- varattuna, lepotilassa n. 2,2 V/kenno
- kestovarausjännite 2,2 ... 2,22 V/kenno
- pikavarausjännite n. 2,35 V/kenno
- alin purkausjännite n. 1,79 V/kenno.

**Alkaaliakku** (lipeäakku) on tyypillinen kannettavien viestivälineiden virtalähde. Rakenteeltaan akut voivat olla joko avoimia tai kaasutiiviitä.

Tavallisin alkaaliakku on nikkeli-kadmiumakku, jonka teknisistä ominaisuuksista mainittakoon

- negatiivinen elektrodi (katodi) NiO
- positiivinen elektrodi (anodi) Cd

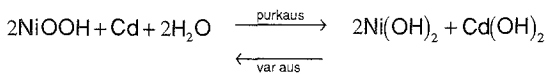
—	elektrolyytti	KOH
—	purkausjännite	1,1—1,2 V
—	purkaus/varaukset	1000—2000
—	käyttölämpötila-alue	−40...+50 °C

Nikkeli-kadmiumakun aktiiviaineet ovat nikkeli- ja kadmiumyhdisteet, joiden koostumus on seuraava

NiOOH = nikkelihydroksidi, voimakkaasti hapettunut (varattu akku)  
 Ni(OH)<sub>2</sub> = nikkelihydroksidi, heikosti hapettunut (purkautunut akku)  
 Cd = kadmium, hienojakoisena metallina, ns. kadmiumsienenä (varattu akku)

Cd(OH)<sub>2</sub> = kadmiumhydroksidi (purkautunut akku).

Purkauksen ja varauksen kemiallinen kaava:



+ napa      − napa                      + napa      − napa

Akkuneste on kemiallisesti puhdasta kalilipeää, jonka ominaispaino vaihtelee 1,16...1,24 g/cm<sup>3</sup> ja jossa on eräitä lisäaineita.

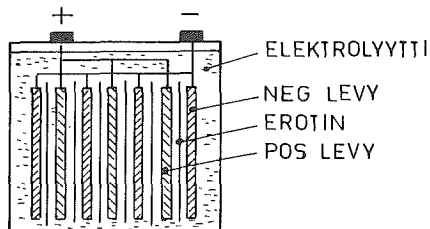
Elektrolyytin tehtävänä on ionien kuljettaminen ja alkaaliakuille tyypilliseen ominaispaino pysyy muuttumattomana purkauksen ja varauksen aikana.

### Sähköparit

Aikojen kuluessa on kehitetty useita sähköparirakenteita eri käyttötarkoituksia varten. Sähköpari voi olla joko kertakäyttöinen ns. primääriparisto tai uudelleen varattavissa oleva ns. sekundääriparisto. Sähköparin elektrolyytti voi olla joko nestemäistä, jolloin puhutaan märkäparista, tai elektrolyytti voi olla valumaton tahna tai geeliä, jolloin puhutaan kuivaparista.

Vanhin ja edelleen käytetty kuivapari on Leclanché – tyyppiä, joka koostuu anodina toimivasta sinkkiastiasta ja jossa katodina on joko mangaanidioksidi tai yleisemmin halvempi luonnonruskokiivi. Elektrolyytinä toimii ammoniumkloridi-sinkkikloridiliuos, joka on lähes kokonaan imeytetty katodimassaan.

Virrankokoojana toimii katodimassan keskellä oleva hiilisauva. Erottimena käytetään nykyisin ohuella liisterikerroksella päällystettyä paperia.



Leclanché – pariston rakenne

Yhden kuvatunlaisen kuivaparin nimellisjännite on 1,5 V. Samaan paristoon voidaan pakata useita pareja sarjaan, jolloin paristosta saatava nimellisjännite kasvaa parien lukumäärällä kerrottuna. Tyypillisiä paristokokoja ovat 1,5 V, 3 V ja 4,5 V paristot.

Paristojen kapasiteetti eli varauskyky pienenee voimakkaasti lämpötilan las-  
kiessa pakkasen puolelle. Tämän vuoksi on paristot pidettävä lämpimänä, jotta  
niistä saataisiin laitteisiin riittävästi virtaa. Toisaalta paristojen säilytys erittäin  
lämpimissä tiloissa aiheuttaa itsepurkautumisen kiihtymistä ja on siksi vältettä-  
vää.

Pakkaskestävyyden lisäämiseksi on kehitetty Leclanché-paristoja joissa on  
elektrolyyttinä Lithium. Tällainen paristo jäätyy vasta alle  $-40^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa  
kun taas tavallinen paristo jäätyy  $-20^{\circ}\text{C}$ :ssa.

Pyrittäessä pitkään pariston kestoikään jatkuvalla kuormituksella on kehitetty  
ns alkaaliparisto, jossa elektrodit ovat mangaanidioksidista ( $\text{MnO}_2$ ) ja sinkistä  
(Zn) kuten Leclanché-paristossakin. Elektrolyyttinä käytetään kaliumhydrok-  
sidia (KOH). Koska pariston elektrolyytti on voimakkaasti syövyttävää, on sen  
suljentaan kiinnitettävä erityistä huomiota ja tämä taas nostaa pariston hintaa.

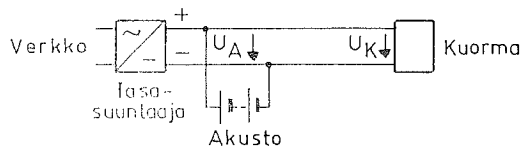
### Tasasähköjärjestelmät

Tasasähköjärjestelmillä tarkoitetaan tasasuuntaajien, akustojen ja mahdollis-  
ten jännitteensäätäjien muodostamaa kokonaisuutta. Tasasähköjärjestelmän  
tehtävänä on

- muuttaa verkon vaihtojännite kuormalle sopivaksi tasajännitteeksi ja pi-  
tää se vaadituissa rajoissa verkkojännitteen ja kuormituksen vaihteluis-  
ta huolimatta
- huolehtia akustonsa varauksesta
- syöttää kuormaa myös verkkokatkoksen aikana.

Jotta keskusten ja käyttöolosuhteiden asettamat erilaiset vaatimukset käyttö-  
jännitteen laadulle ja katkeamattomuudelle voitaisiin tarkoituksenmukaisesti  
täyttää kussakin tapauksessa, on kehitetty joukko erilaisia järjestelmiä.

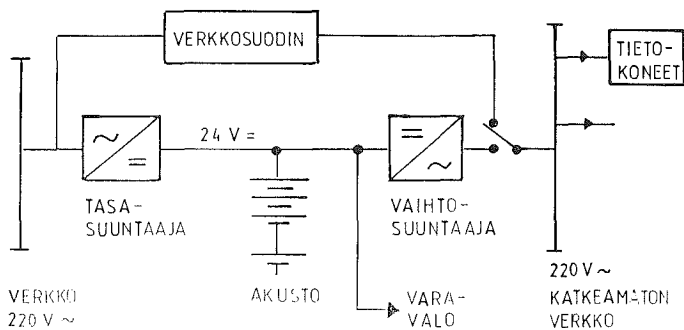
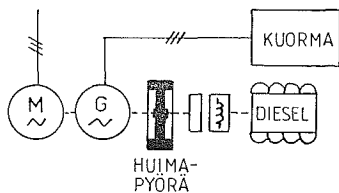
Puskurikäyttö on yleisin ja yksinkertaisin tasasähköjärjestelmä. Se koostuu  
vakiojännitetasasuuntaajasta ja akustosta.



## Katkeamaton virransyöttö

Useat tietotekniikan laitteet tarvitsevat katkeamatonta 220 V / 50 Hz vaihtosähköä. Se voidaan toteuttaa erilaisin järjestelyin, joissa käytetään tasasuuntaajaa, vaihtosuuntaajaa, akustoa tai huimapyörää sekä ohjauselektroniikkaa.

Seuraavissa kuvissa on esitetty kaksi tyypillistä katkeamattoman tehonsyötön järjestelmää.

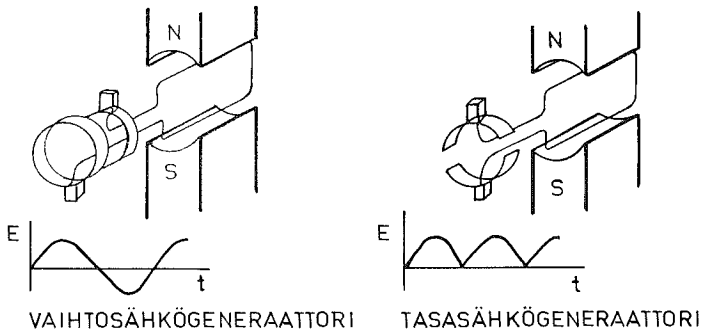


### 1.3 Vaihtosähkö

#### 1.3.1 Vaihtosähkön synty

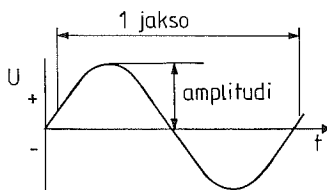
Pyöritettäessä generaattorin käämityksiä magneettikentässä syntyy jännite, joka on riippuvainen generaattorin pyörimisnopeudesta ja magneettikentän

voimakkuudesta. Virrankokoojan eli kollektorin rakenteesta riippuu, onko syntynyt jännite vaihto- vai tasasähköä.



### 1.3.2 Taajuus ja amplitudi

Vaihtosähkössä sähkösuureiden suunta ja suuruus vaihtelevat jatkuvasti. Sama suunta ja suuruus toistuvat tietyin väliajoin. Kahden samanlaisen tilan väli on jakso. Yleisin vaihtosähkön muoto on ns. sini muotoinen vaihtosähkö, jota jatkossa käsitellään.



Yhden jakson aika =  $T$ . Jaksojen lukumäärää aikayksikössä sanotaan taajuudeksi  $f$ , jonka yksikkö on hertsi

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}] = \left[ \frac{1}{\text{S}} \right]$$

Taajuuden yksikkönä käytetään myös jaksolukua (cycles per second, CPS).

Pyörimisliikkeen nopeutta kuvaa suure kulmanopeus  $\omega$ .

$$\omega = \frac{360^\circ}{T} = \frac{2\pi}{T} \quad 360^\circ = 2\pi \text{ [rad]}$$

Kulmanopeus ja taajuus riippuvat toisistaan seuraavasti:

$$\omega = 2\pi f$$

Vaihtosähkön virran tai jännitteen vaihtelun laajuus on nimeltään amplitudi. Sinikäyrän vaaka-akselilta nähdään jakson kestoaika ja pystyakselilta amplitudi.

### 1.3.3 Vaihtosähkösuureet

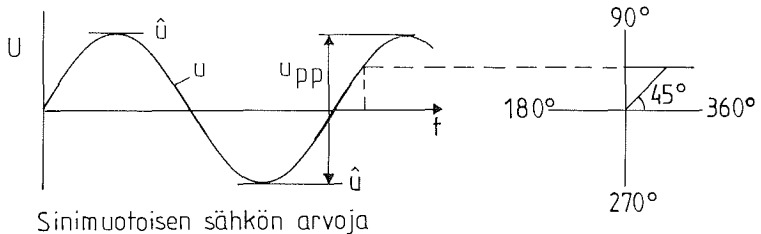
Vaihtosähköpissa ovat kaikki tasasähköopin perusteet voimassa. Ohmin laki ja Kirchoff'n lait pitävät paikkansa, kunhan otetaan huomioon vaihtosähkön luonne.

Tärkeimmät käsitteet vaihtosähkössä ovat:

- hetkellisarvo  $u$  (muuttuu koko ajan)
- huippuarvo  $\hat{u}$  (suurin positiivinen tai negatiivinen arvo)
- huipusta-huippuun arvo  $u_{pp}$  (sama kuin  $2 * \text{amplitudi}$ ,  
pp = peak to peak)
- tehollisarvo  $U$  (määritellään tasasähköä vastaavan lämpövaikutuksen avulla)

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \text{ (sinimuotoisella vaihtosähköllä)}$$

$$\varphi = \text{vaihekulma} = \omega * t$$



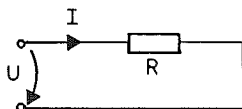
Sinimuotoisen sähkön arvoja

Sinimuotoisen sähkön käsitteitä, osoitinesitys jännitteen hetkellisarvosta vaihekulmalle  $45^\circ$ .

Varsinaisia vaihtosähkösuureita ovat kapasitiivinen ja induktiivinen reaktanssi sekä vaihtovirtavastus eli impedanssi.

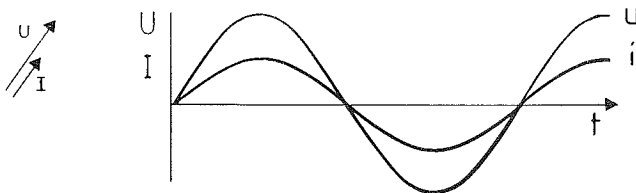
## Ohminen vastus

Aiemmin esitetyt laskentaperiaatteet ovat voimassa. Ohminen vastus ei muuta jännitteen ja virran välistä suhdetta. Vaihtosähkön tehollisarvoilla laskeminen vastaa laskemista tasasähköllä.



Ohmin lain mukaan  $U = IR$

Koska jännite vaihtelee, voidaan piirtää jännite- ja virtakäyrät sekä osoitinpiirrokset niiden mukaisesti

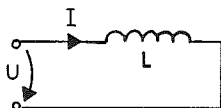


Virta ja jännite ovat samanvaiheiset.

Harjoitus 4 Kuinka suuren virran synnyttää sinimuotoinen 60 V:n ja 25 Hz:n taajuinen vaihtojännite 2 kΩ:n resistanssissa?

## Induktiivinen reaktanssi

Induktanssi  $L$  muodostuu, kun johdinta kierretään käämiksi. Induktanssin suuruus on riippuvainen käämin kierrosmäärästä sekä sydämen (ilma, rauta) laadusta. Vaihtovirran kulkiessa käämissä induktanssi aiheuttaa induktiivisen reaktanssin  $X_L$



Jaettaessa jännite virralla saadaan Ohmin lakia soveltaen

$$X_L = \frac{U}{I}$$

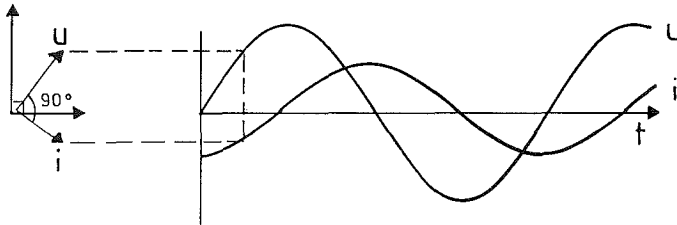
Induktiivinen reaktanssi saadaan induktanssista kertomalla kulmanopeudella

$$\begin{array}{l} X_L = \omega L \\ X_L = 2\pi fL \end{array} \quad , \text{ jolloin todetaan, että}$$

induktanssin suuruus on riippuvainen suoraan taajuudesta. Induktanssin yksikkö on henry

$$H = \left[ \frac{Vs}{A} \right].$$

Induktiivisen reaktanssin yksikkö on  $\Omega$ .



Induktanssin virta jää  $90^\circ$  jännitteestä jälkeen

”Puhdas induktanssi”, jossa ei ole mukana resistiivistä vastusta, ei kuluta energiaa, koska energia varautuu magneettikenttään. Rakenteellisesti on kuitenkin mahdollista tehdä induktanssia, joka ei sisällä myös resistanssia.

**Harjoitus 5** Kuinka suuri jännite vaikuttaa käämin napojen välille vastaanottimen värähtelypiirissä? Käämin induktanssi on  $1\mu H$ , käämin virta  $1\mu A$  ja taajuus 15 MHz.

## Kondensaattori ja kapasitanssi

Kondensaattori on komponentti, jossa on kaksi metallielektrodia erotettu eristeaineella toisistaan. Kun sen napoihin kytketään jännite, se varautuu ja varastoi sähkömäärän  $Q$ .

Kondensaattorin kapasitanssi  $C$  määritellään

$$C = \frac{Q}{U} \quad , \text{ jossa } \begin{array}{l} Q = \text{sähkömäärä} \\ C = \text{kapasitanssi} \\ U = \text{jännite} \end{array}$$

Kapasitanssin yksikkö on faradi  $[F] = \left[ \frac{As}{V} \right]$ .

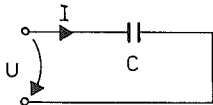
Käytännössä esiintyvät yksiköt  $\mu F$ ,  $nF$  ja  $pF$ .



Edellä olevan määritelmän mukaan kaksi eristettyä johdinta muodostavat myös kondensaattorin, jolla on määrätty kapasitanssi / pitoisuusyksikkö [ pF/km].

### Kapasiitiivinen reaktanssi

Kondensaattori vaihtosähköön kytkettynä aiheuttaa kapasiitiivisen reaktanssin  $X_C$

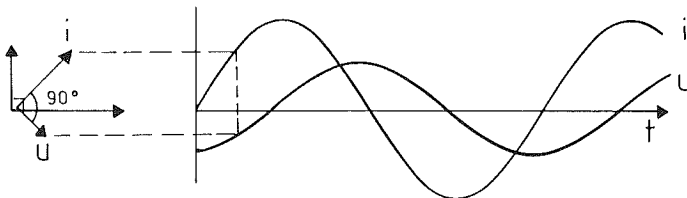


$$\text{Ohmin lakia soveltaen } X_C = \frac{U}{I}$$

Kapasiitiivinen reaktanssi taajuuden ja kapasitanssin avulla lausuttuna on

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

Kapasiitiivisen reaktanssin yksikkö on  $\Omega$ .



Kapasitanssissa virta on  $90^\circ$  edellä jännitteestä

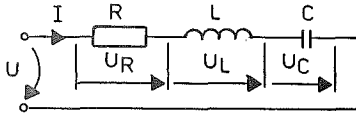
Kapasitanssi ei myöskään kuluta energiaa, koska sähkö varautuu kondensaattorissa sähkökenttään.

Harjoitus 6 Miten suuri kapasitanssin on oltava, jotta sen yli vaikuttaisi 12 V:n jännite, kun virta on 100 mA ja taajuus 5 kHz?

### Impedanssi

Vaihtovirtapiiriin kokonaisvastuksesta käytetään nimitystä impedanssi  $Z$ . Impedanssi voi sisältää joko kaikki kolme komponenttia resistanssin, induktanssin ja kapasitanssin tai vain jonkun niistä.

Sarjakytkenä



Ohmin lakia soveltaen

$$Z = \frac{U}{I}$$

Impedanssille saadaan vaihekulmat huomioon ottaen lauseke

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Vaihesiirtokulman  $\varphi$  (virran ja jännitteen välinen kulma) laskeminen on helppoa kosinin avulla

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}$$

Kuvassa virta  $I$  kulkee koko kytkennän läpi ja näin ollen eri komponenttien jännitteet ovat

$$\overline{U_R} = \overline{IR}$$

$$\overline{U_L} = \overline{IX_L}$$

$$\overline{U_C} = \overline{IX_C}$$

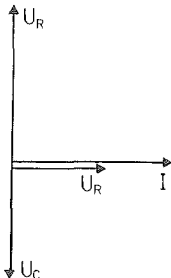
$$\overline{U} = \overline{IZ}$$

Viiva suureen symbolin päällä ilmaisee että kysymyksessä on vektorisuure, johon liittyy suuruus ja suunta.

Kirchoff'n II lain mukaan

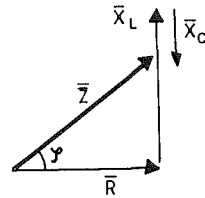
$$\overline{U} = \overline{U_R} + \overline{U_L} + \overline{U_C}$$

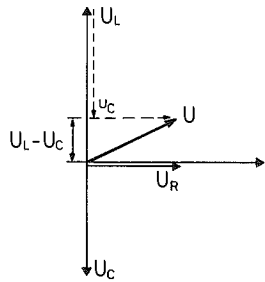
Nyt on otettava huomioon, että jännitteet ovat eri suuruisia ja -vaiheisia.



Jännitteen osoitinpiirros

Kytkenän osoitinpiirros





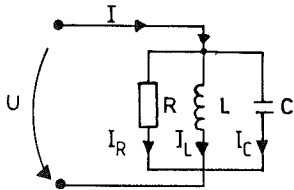
Jännitteiden yhteenlasku osoittimien avulla

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad \cos\varphi = \frac{U_R}{U}$$

Huom. Jännitteitä ei voi laskea suoraan yhteen, koska niillä on määrätty suuruus ja suunta.

### Rinnankytkentä

Rinnankytkennässä jännite on sama eri komponenttien yli ja virrat ovat eri suuria ja suuntaisia.



Ohmin lakia soveltaen

$$\bar{I}_R = \frac{\bar{U}}{R} \quad \bar{I}_L = \frac{\bar{U}}{X_L}$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{U}}{X_C} \quad \bar{I} = \frac{\bar{U}}{Z}$$

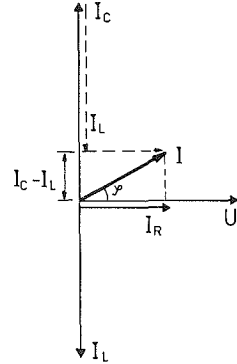
Osoitinpiirroksen avulla

$$\text{Kokonaisvirta } I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} \quad (\text{Kirchoff I})$$

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I}$$

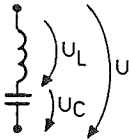
Virtoja ei voi laskea suoraan yhteen, koska niillä on määrätty suuruus ja suunta.

**Harjoitus 7** 1 km pituisen puhelinkaapelin kahden johtimen välinen kapasitanssi on 40 nF. Kuinka suuri induktanssi on kytkettävä johtoon sarjaan, jotta kapasitanssin vaikutus kumoutuisi.



## 1.4 Värähtelypiirit

Sarjaresonanssipiiri



Matalilla taajuuksilla kelan reaktanssi  $X_L = 2\pi fL$  on hyvin pieni. Kondensaattorin reaktanssi

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad \text{on suuri.}$$

Suurilla taajuuksilla vallitsee päinvastainen tilanne. Jännitteet suhtautuvat kuten reaktanssitkin.

$$Z = \sqrt{(X_L - X_C)^2}$$

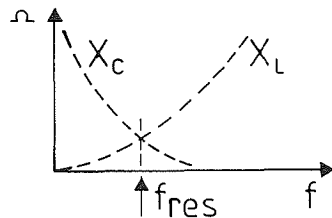
$$U = \sqrt{(U_L - U_C)^2}$$

Tietyllä taajuudella kummankin komponentin reaktanssi on itseisarvoltaan yhtäsuuri.

Resonanssitaajuudella  $|X_C| = |X_L|$

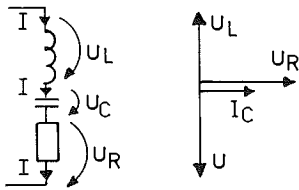
Koska reaktanssit ovat yhtä suuret, mutta vastakkaismerkkiset, ne kumoavat toistensa vaikutukset ja piirin impedanssi on hyvin pieni.

Mikäli piirissä ei olisi resistiivisiä häviöitä, piirin impedanssi olisi nolla.



Resonanssitaajuudella piiri on puhtaasti resistiivinen.

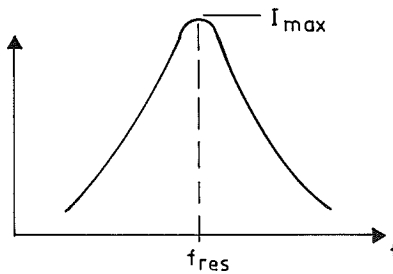
Sarjapiirissä jokaisen komponentin läpi kulkee sama virta. Siksi piiriä tarkastellaan virran kannalta.



$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

Virran suuruus riippuu impedanssista, joten virta muuttuu taajuuden mukana.

Sarjapiirin resonanssikäyrä

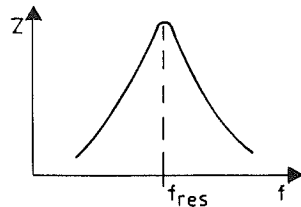
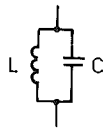


$f_{res}$  = resonanssitaajuus

$I_{max}$  = maksimaalivirta

Rinnakkaisresonanssiipiiri

Mikäli piirissä ei ole resistanssia (teoreettinen tapaus), piirin impedanssi voidaan laskea



Resonanssitaajuudella  $|X_C| = |X_L|$

$$Z = \frac{1}{0} = \infty \quad (\text{käytännössä } Z = \text{suuri})$$

## Hyvyyysluku

Resonanssipiireille voidaan laskea resonanssitaajuus  $f_{\text{res}}$  ja piirin hyvyyysluku  $Q$  seuraavien yhtälöiden avulla.

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

$$Q = 2\pi * \frac{\text{Piiriin varastoitunut maksimienergia}}{\text{Piiriin häviöenergia yhden jakson aikana}}$$

Tästä voidaan edelleen johtaa kelan  $Q$ -arvon lauseke.

$$Q = \frac{2\pi f_{\text{res}} L}{R}$$

Lausekkeessa vastus  $R$  sisältää kaikki kelan häviöt.

Piirin kaistaleveys  $B$  määritellään 3 dB eli puolen tehon pisteiden väliseksi taajuuskaistaksi. Se voidaan laskea resonanssitaajuuden ja  $Q$ -arvon avulla yksinkertaisen resonanssipiirin tapauksessa seuraavasti:

$$B = \frac{f_{\text{res}}}{Q}$$

## 1.5 Sähköturvallisuuden perusteet

### 1.5.1 Turvallisuusmääräysten tarkoitus

Sähkölaitteiden yleensäkin ja tässä tapauksessa viestijärjestelmien sekä tietojenkäsittelyjärjestelmien apulaitteineen on oltava suunnittelultaan, rakenteeltaan, valmistukseltaan, käytöltään sekä huolto- ja kunnossapitoperiaatteiltaan sellaisia, ettei niistä aiheudu hengen, terveyden eikä omaisuuden vaaraa eivätkä ne kohtuuttomasti häiritse ympäristöään.

Turvallisuusmääräyksillä ohjataan järjestelmien rakentamista siten, että edellä mainitut tavoitteet toteutuvat.

Viestijärjestelmiä koskevista määräyksistä voidaan mainita Puhelinverkkojen rakennemääräykset sekä käyttäjälaitosten laatimat erilaiset rakentamishojeet kuten Masto-ohje 1990.

Sähköturvallisuuden valvontaan ja verkkojen rakentamiseen ovat oikeutettuja vain hyväksytyt pätevyden omaavat henkilöt. He ovat tietoisia tehtäviin liittyvistä vaatimuksista ja ovat vastuussa suorittamistaan töistä.

Tietämättömyys määräyksistä ei vapauta järjestelmän suunnittelijaa, rakentajaa eikä käyttäjää vastuusta, jos järjestelmä aiheuttaa onnettomuuden.

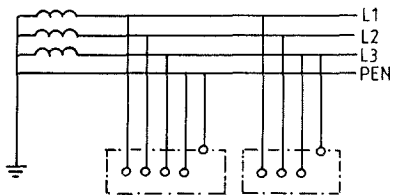
### 1.5.2 Sähkönsyöttöjärjestelmät

Sähkönsyöttöjärjestelmiä koskevat asiat on määritelty Sähkölaissa sekä Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksen mukaisissa Sähköturvallisuusmääräyksissä sekä Sähkötarkastuskeskuksen erillisjulkaisuissa. Puolustusvoimien verkoissa kiinteät asennukset tehdään normaalinennettelyllä yleisten vaatimusten mukaisesti.

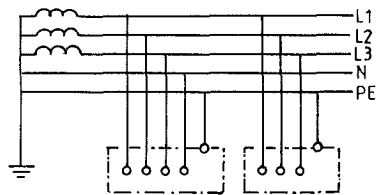
Kenttä-sähköjärjestelmät hankitaan mahdollisimman käyttövalmiina. Verkon rakentaminen on jatkojohtojen levittämistä ja liittämistä pistorasioihin ohjeiden mukaisesti ja kulutuslaitteiden liittämistä verkkoon. Työn saa suorittaa perehdyttämiskoulutuksen saanut henkilö ammattipätevyden omaavan henkilön valvonnassa.

Kenttä-sähköjärjestelmistä yli 5 kVA:n järjestelmät ovat maadoitettuja. Alle 5 kVA:n voimakoneet, jotka syöttävät lyhyellä liittämällä johdolla enintään kahta saman käyttäjän kulutuskojetta, voivat olla maadoittamattomia. Kenttäviestiasemien normaalikäytössä voimakone syöttää 220 V:n verkkojännitteellä akkujen varauslaitteita. Virransyöttöjärjestelmä on vikavirtasuojalla ja kahdella sulakeportaalla varmistettuna maasta eristetty eli kelluva.

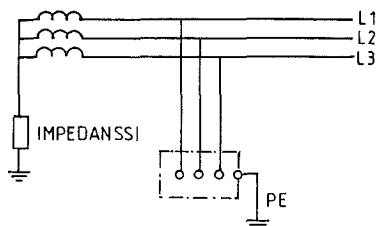
Kelluvalla järjestelmällä tarkoitetaan siis maadoittamatonta sähkönsyöttöjärjestelmää. Kelluvan järjestelmän asema ja sen laitteet on maadoitettava lähinnä suojaamaan ilmastollisilta ylijännitteiltä, mikäli asemalla käytetään korkeaa mastoa tai sille tuodaan pitkiä galvaanisista johdinyhteyksiä.



TN-C-JÄRJESTELMÄ. NOLLA- JA SUOJAJOHDTIMOINNIT YHDISTETTY JOHTIMEEN KOKO JÄRJESTELMÄSSÄ.



TN-S-JÄRJESTELMÄ. ERILLINEN NOLLA- JA SUOJAJOHDTIN KOKO JÄRJESTELMÄSSÄ.



IT-JÄRJESTELMÄ

Järjestelmien kirjainkoodi määritellään seuraavasti.

Ensimmäinen kirjain: Järjestelmän maadoitustapa

T = Yksi virtapiirin piste on yhdistetty suoraan maahan.

I = Kaikki jännitteiset osat on eristetty maasta tai yksi virtapiirin piste on yhdistetty maahan impedanssin kautta.

Toinen kirjain: Sähkölaitteiston jännitteelle alttiiden osien maadoittaminen

T = Jännitteelle alttiit kosketeltavat osat on yhdistetty galvaanisesti suoraan maahan riippumatta järjestelmän maadoitustavasta.

N = Jännitteelle alttiit kosketeltavat osat on yhdistetty jakelujärjestelmän käyttömaadoitettuun pisteeseen.

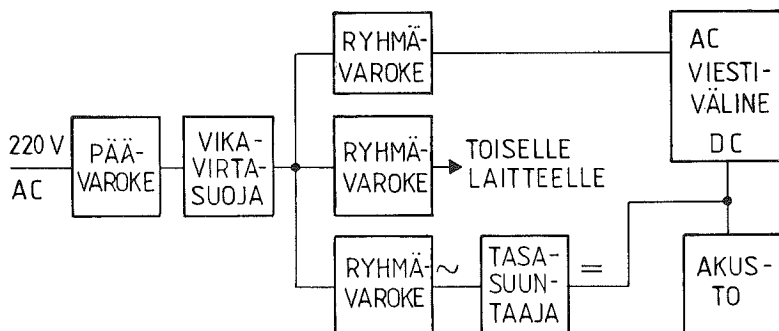
Lisäkirjaimet: Nolla- ja suojajohtimet

S = Erilliset nolla- ja suojajohtimet.

C = Nolla- ja suojajohdintoiminnot on yhdistetty yhteen johtimeen (PEN-johtin.)

Kuva 1.1 Esimerkkejä erilaisista sähkönsyöttöjärjestelmistä





Kuva 1.2 Kenttäviestiaseman sähköjärjestelmän periaate

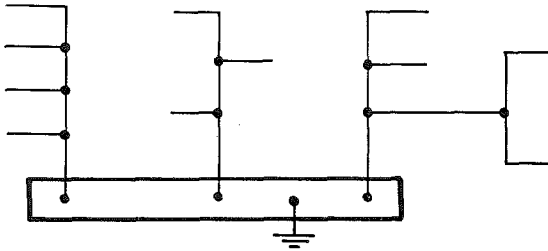
### 1.5.3 Maadoitukset

Maadoituksen tarkoituksena on

- estää vaarallisten kosketusjännitteiden syntymistä laitteiden vikatapauksessa
- estää ilmastollisten ylijännitteiden aiheuttamia vaurioita tai vaaratilanteita ja
- estää häiriöiden syntymistä elektronikkajärjestelmissä.

Eri tarkoituksia palveleville maadoituksille voi tulla ristiriitaisia vaatimuksia. Turvallisuuskäsitteitä on kuitenkin pidettävä tällöin ensisijaisina vaatimuksina, mikä voi joskus mutkistaa häiriöiden torjumismenetelmiä.

Maadoituksen yleisperiaatteena on puumainen rakenne. Silmukointia on vältettävä, joskaan se ei ole aina mahdollista. Tällöin silmukoiden koko olisi minimoitava, koska pienien silmukoiden muodostama verkko edustaa maatasoa suurilla taajuuksilla.



Kuva 1.3 Maadoituksen yleisperiaate

### Maadoitukset sähköturvallisuuden kannalta

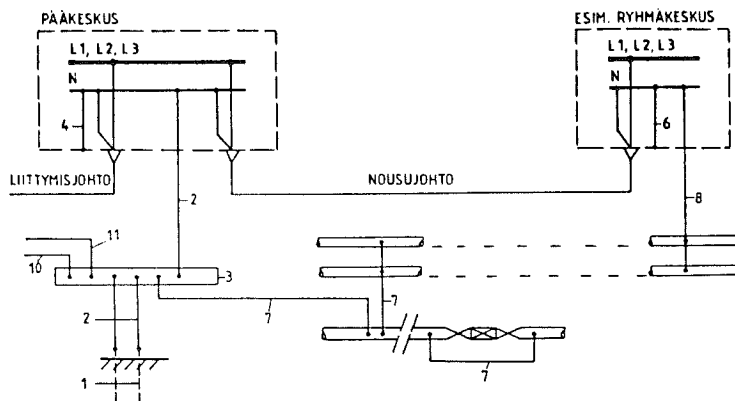
Sähköturvallisuuden kannalta maadoittamisen tarkoituksena on

- rajoittaa vikatapauksissa esiintyviä kosketus- ja askeljännitteitä
- estää vaarallisten jännitteiden siirtyminen järjestelmästä toiseen
- estää vaarallisten vuotovirtojen, kipinäiden ja valokaarien syntyminen sekä
- luoda edellytykset maasulkusuojaukselle.

Käyttömaadoittamisella tarkoitetaan virtapiiriin jonkin pisteen suoraa tai pienen impedanssin kautta tapahtuvaa maadoittamista.

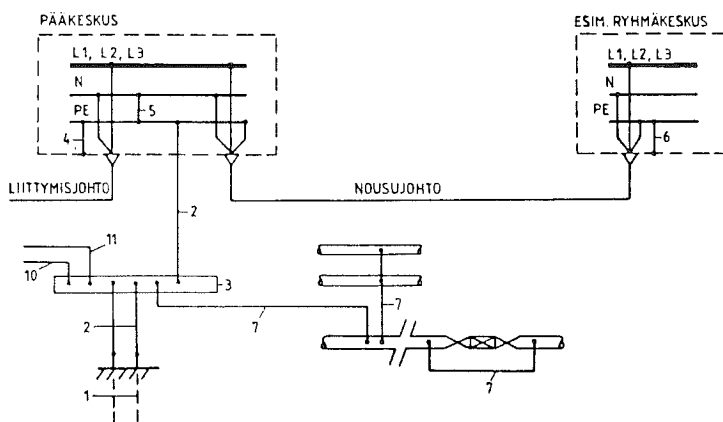
Käyttömaadoitettua järjestelmää on käytettävä useaan eri kulutuskohteeseen tapahtuvassa yleisessä sähköjakelussa.

Käyttömaadoitetuissa järjestelmissä suojamaadoitettuihin osiin tapahtuva maasulku on yksivaiheinen oikosulku. Ylivirtasuojat toimivat silloin maasulkusuojina, mikäli verkko täyttää ns. ensimmäisen nolausehdon (suojaohjtimen jännite maahan nähden ei ylitä 75 V:n jännitettä missään vaiheessa ja ylivirtasuoja kytkee oikosulun nopeasti pois).



- 1 Maadoituselektrodi
- 2 Käyttömaadoitusjohdin
- 3 Maadoituskisko
- 4 Pääkeskuksen suojamaadoitus
- 6 Keskuksen suojamaadoitus
- 7 Johtavien putkistojen yhdistys maadoituskiskoon
- 8 Johtavien putkistojen yhdistys keskuksissa
- 10 Antennimaadoitus
- 11 Puhelinmaadoitus

#### 4-Johdinjärjestelmän maadoitusmalli.



#### 5-Johdinjärjestelmän maadoitusmalli.

Kuva 1.4 Maadoitusmalleja

Suojamaadoittamisella tarkoitetaan virtapiiriin kuulumattoman, jännitteelle alttiin osan maadoittamista. Suojamaadoittaminen palvelee kaikkia alussa mainittuja tavoitteita.

Potentiaalin tasauksella tarkoitetaan johtavien metalliosien yhdistämistä toisiinsa ja yleensä myös suojamaadoituselektrodiin. Potentiaalintasauksella pienennetään kosketusjännite- ja kipinöintivaaraa.

Koneita, kojeita ja tarvikkeita ei saa sarjamaadoittaa siten, että yhden laitteen poistaminen katkaisee muiden maadoituksen.

### **Maadoitukset häiriösuojauksen kannalta**

Maadoituksia tehdään

- estämään vaarallisia kosketusjännitteitä vikatapauksissa (suoja- ja käyttömaadoitus)
- estämään häiriöiden syntymistä viesti- ja elektroniikkajärjestelmissä sekä
- estämään ilmastollisten ylijännitteiden aiheuttamia vaurioita ja vaaratilanteita.

Elektroniikkajärjestelmien herkkyys häiriöille on riippuvainen monesta tekijästä kuten

- järjestelmän hyötysignaalin taajuusalueesta ja tasosta
- häiriöiden taajuusalueesta ja tasosta
- laitteiden välisten signaalijohtojen epäsymmetriasta
- signaalivirtapiiriin maadoitustavasta (yksi vai monta) sekä
- signaaliteiden galvaanisesta erottamisesta laitteiden tulo- ja lähtöpor-teissa.

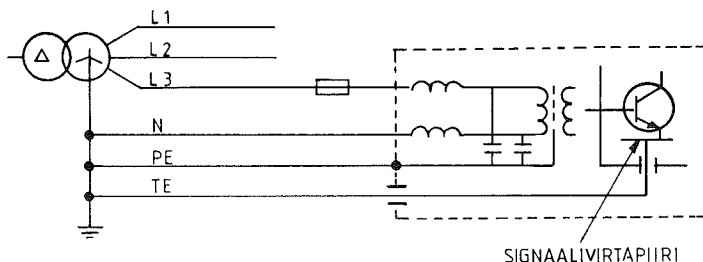
5-johdinjärjestelmällä, jota yksivaiheisessa ryhmässä kutsutaan 3-johdinjärjestelmäksi, tarkoitetaan maadoitustapaa, jossa suojamaadoitukseen käytetään nollajohtimesta erillistä suojajohdinta (PR-johdinta). Tällöin saavutetaan se etu, ettei nollajohtimessa kulkeva epäsymmetrisestä kuormituksesta ja yli-aalloista johtuva virta pääse suojamaadoitusten kautta aiheuttamaan häiritseviä harhavirtoja elektroniikkalaitteisiin ja niitä yhdistäviin kaapeleihin.

Kun nollajohdin on käyttömaadoitettu yhdessä pisteessä, mieluiten pääkeskuksessa tai muuntamalla, ei nollajohtimen virta pääse aiheuttamaan harhavirtoja myöskään metallirakenteiden kautta. Tällöin ryhmä-, nousu- ja pääjohdoissa vallitsee meno- ja paluuvirtojen tasapaino eikä johtojen ympärille pääse syntymään häiritseviä magneettikenttiä.

5-johdinjärjestelmien käyttö on suositeltavaa häiriösuojauksen kannalta erityisesti tietokone- ja datasiirtojärjestelmien virransyötössä.

Kuten edellä todettiin, ei 5-johdinjärjestelmän suojajohtimessa kulje virtaa muulloin kuin häiriötapauksissa. Käytännössä siinä kuitenkin voi esiintyä virtaa laitteiden verkko-osassa olevien häiriösuodattimien kapasitiivisten vuotovirtojen sekä toisten järjestelmien runkorakenteiden kautta kulkevien harha-

virtojen takia. Tällaiset häiriöt voidaan torjua varustamalla järjestelmä lisämaadoitusjohtimella, johon yhdistetään ainoastaan elektroniikkalaitteiden signaalivirtapiiriin maadoitukset. Tällaisesta maadoituksesta käytetään nimitystä häiriötön maadoitus (TE).



Kuva 1.5 Häiriöttömän maadoituksen periaate

Suoja- ja käyttömaadoituksissa on tavoitteena pieni maadoitusvastuksen arvo, mutta häiriösuoja- ja ylijännitesuojamaadoituksissa pyritään lisäksi pienen aaltoimpedanssiin, joka on tarpeen transienttihäiriöiden ja ylijännitteiden vaimentamisessa.

Kiinteiden linkkimastojen ja -asemien maadoituksessa on Masto-ohjeen 1990 mukaan maston runko, harukset, kaapelivaipat, aaltoputket, betoniraudoitukset ja suoja-aidat yhdistettävä galvanisesti yhdeksi kokonaisuudeksi, jolloin vaarallisia potentiaalieroja ei synny. Maadoitusvastuksen tavoitearvo on pienempi kuin 10 ohmia.

#### 1.5.4 Kenttäviestiasemien sähköturvallisuus

Kenttäviestiasemille voi muodostua vaarallisia ylijännitteitä joko viallisten sähköjärjestelmien (220 V) tai ukkosen vuoksi.

Sähköjärjestelmien vikoja vastaan suojaudutaan varokkeilla, vikavirtasuojilla ja yhdistämällä aseman laitteiden kotelot toisiinsa sekä maahan.

Ilmastollisia ylijännitteitä vastaan suojaudutaan maadoittamalla korkeat mastorakenteet ja erityisesti johdinyhteydet.

Tavoitteena näillä toimenpiteillä on saavuttaa sellainen tilanne, ettei eri laitteiden koteloiden, aseman rakenteiden ja maan välillä ole missään tilanteessa jännite-eroa. Aseman eri maadoitukset on yhdistettävä, mikäli kalusto sen mahdollistaa.

Parhaita maalajeja maadoituksiin ovat savi, multa, lieju ja märkä turve. Vesi sopii myös hyvin maadoituspaikaksi. Seuraava taulukko esittää joidenkin

maalajien ja vesien tyypillisiä ominaisvastusarvoja.

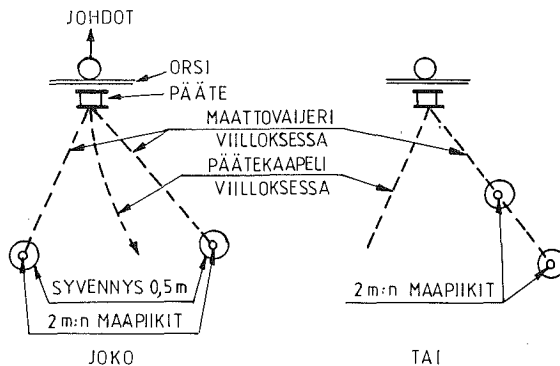
merivesi	5 $\Omega\text{m}$
järvivesi	250 $\Omega\text{m}$
savi	40 $\Omega\text{m}$
lieju, multa, turve	150 $\Omega\text{m}$
hiekkä	1000 $\Omega\text{m}$
moreenisora	3000 $\Omega\text{m}$
karkea sora	15000 $\Omega\text{m}$
kallio	20000 $\Omega\text{m}$

Kenttäviestiasemat joudutaan usein rakentamaan sellaiseen paikkaan, ettei maadoitusvastuksessa päästä tavoitearvoihin käytettävissä olevalla kalustolla. Ukonilman aikana ei saa käsitellä välityslaitteita, johdinyhteyksiä, mastorakenteita eikä maadoitusrakenteita.

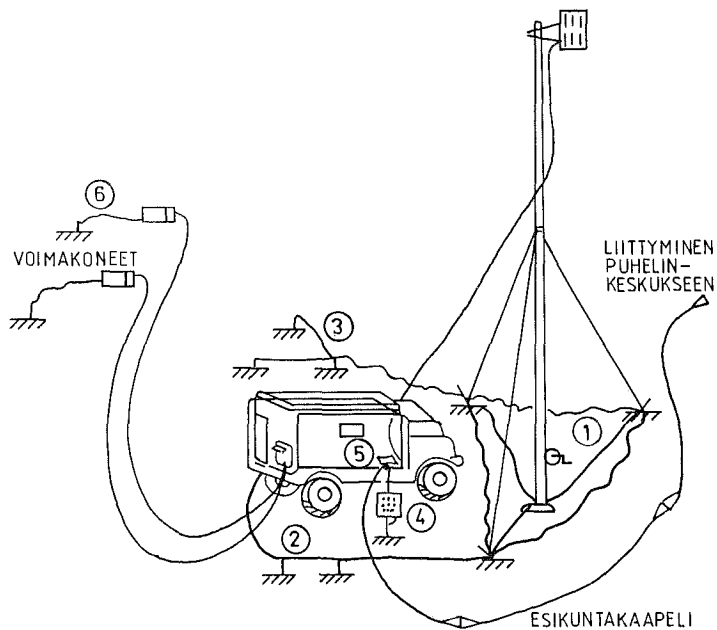
Johdinyhteydet tuodaan kenttäkeskukseen kesäaikana (1.4.–30.9.) ylijännitesuojilla varustetun päätteen kautta. Mikäli keskuksella on galvaanisella johdinyhteydellä toimiva kanavointilaite, on sen yhteyse tuotava ylijännitesuojilla varustetun liitännän kautta. Sekä päätte että kanavointilaitteen liitäntä maadoitetaan. Jos keskus sijaitsee ajoneuvossa, on ajoneuvo maadoitettava.

Kenttäradioaseman ajoneuvo maadoitetaan. Mikäli asemalla on 220 V:n voimakone, on se maadoitettava. Ympäriävän puuston yläpuolelle kohoavan antennin mastorakennelma on kesäaikana maadoitettava.

Kenttälinkkiaseman ajoneuvo ja voimakone maadoitetaan. Kesäaikana maadoitetaan lisäksi masto ja asemalta lähtevien johdinyhteyksien päätte.



Kuva 1.6 Kenttäpäätteen maadoittaminen



- 1 = maston maadoitus, jossa haruskiilat on yhdistetty toisiinsa ja maston tyveen
  - 2 = ajoneuvon maadoitus, joka on yhdistetty maston maadoitukseen
  - 3 = aseman päämaadoitus
  - 4 = esikuntakaapelipääte, joka on omalla maadoituspiikillään pistetty maahan
  - 5 = asema, jossa on ajoneuvon runkoon kytketty ylijännitesuojapääte keskusyhteyksiä varten
  - 6 = voimakoneet, jotka on maadoitettu omilla maadoitussauvoillaan.
- Kaikki aseman maadoitukset ovat sauvoilla tai maakiiloilla tehtyjä pystymaadoituksia.

Kuva 1.7. Kenttälinkiaseman maadoitukset

## 2 DIGITAALIELEKTRONIIKKA

### 2.1 Käsitteistö

**Binäärilukujärjestelmä** on lukujärjestelmä, jonka kantaluku on 2 ja jossa on vain kaksi numeroa 0 ja 1. Binäärijärjestelmän numerosta käytetään nimeä **Bitti**, joka on lyhenne englanninkielisestä käsitteestä Binary Digit.

**Binääriluvulla** tarkoitetaan nolista ja ykkösistä muodostettua lukua.

**Puolitavu** on neljäbittinen binääriluku. Esimerkiksi 1011 on puolitavu.

**Tavu** (byte) on kahdeksanbittinen binääriluku.

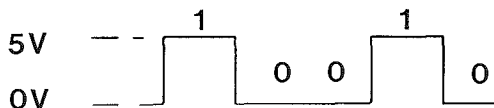
**Sanalla** tarkoitetaan tavallisesti 16 tai 32 bitin mittaista lukua.

**Tietoa** (data) käsitellään nykyisin yleensä 8, 16 tai 32 bitin mittaisina binäärilukuina. Puhutaan 8, 16 tai 32 bitin tietokoneista.

**Osoite** (address) on binääriluku, jonka perusteella määritellään muistissa olevan tiedon fyysinen sijainti. Tiedon määrän vuoksi osoitteen pituudeksi riittää tavallisesti vasta vähintään 16 bitin mittainen binääriluku.

**Digitaalinen signaali** muodostuu peräkkäisten binäärilukujen muodostamasta jonosta. Muut kuin digitaaliset signaalit voidaan muuttaa digitaalisiksi koodaamalla. Tällöin jokaista kirjoitusmerkkiä vastaa jokin binääriluku (esim. ASCII-koodi). Vastaavasti analoginen jännite voidaan muuntaa sitä vastaavaksi binääriluvuksi (A/D-muunnin) ja päinvastoin (D/A-muunnin). Puh- ja muut jatkuvasti muuttuvat viestiliikenteen signaalit muunnetaan digitaaliseen muotoon pulssikoodimodulaatio- (PCM) tai deltamodulaatiomenetelmällä (DM).

**Logiikkapiirit**, joita käytännön laitteissa käytetään, käsittelevät bitin sähköisessä muodossaan. Muoto perustuu valmistajien sopimukseen, jonka mukaisesti ykkösbittiä "1" vastaa jännite ja nolabittiä "0" jännitteetön tila. Eri logiikka-perheissä käytetään erilaisia jännitteitä. Esimerkiksi TTL-logiikalla (transistori-transistori-logiikka) on "1"-tilan vastineena 5 V ja "0"-tilan vastineena 0 V. Digitaalinen signaali voi käytännössä esiintyä myös bipolaarisessa muodossa, jolloin ykkösbitti on 5 V ja nolabitti -5 V. Tiedonsiirrossa saatetaan käyttää myös nolla- ja ykkösbittille niiden virta- tai taajuusvastineita (modeemit).



Kuva 2.1 Esimerkki binääriluvun 10010 sähköisestä vastineesta



## 2.2. Digitaalielektronikan peruskomponentit

### 2.2.1 Loogiset piirit

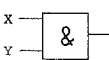
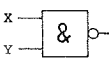
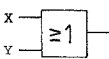
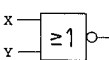
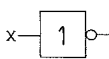
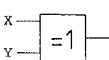
Loogiset peruspiirit ovat olleet ennen mikrotietokoneen ja sen muistikomponenttien kehittymistä markkinakelpoisiksi eli ennen vuotta 1969 kaiken digitaalisen tiedonvälityksen ja sen aikaisten tietokonesukupolvien perusta. Ne rakennettiin ns. integroiduiksi piireiksi (IC-piirit), joissa saattoi olla

- < 10 porttia (SSI-piirit)
- <1000 porttia (MSI-piirit) tai
- >1000 porttia (LSI-piirit).

Loogiset peruspiirit voidaan jakaa kahteen ryhmään

- kombinaatiopiireihin ja
- sekvenssiipiireihin.

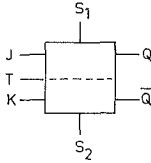
Kombinaatiopiirit toimivat siten, että lähtösignaalin arvo on täysin määrätty sen hetkisen tulosignaalin arvon perusteella. Kombinaatiopiirien alkeispiiri on looginen portti, joka toteuttaa jonkin loogisen perusoperaation JA, TAI tai EI. Monimutkaisetkin kombinaatiopiirit ovat toteutettavissa useita alkeispiirejä käyttämällä. Perusporttipiirien toiminta selviää alla olevasta totuustaulusta.

PORTTIPIIIRI	PIIRROSTAPA	BOOLEN FUNKTIO	TOTUUS TAULU															
JA-PORTTI (AND)		$F = X \cdot Y$	<table border="1"> <thead> <tr><th>X</th><th>Y</th><th>F</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	X	Y	F	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
X	Y	F																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																
EI-JA-PORTTI (NAND)		$F = \overline{X \cdot Y}$	<table border="1"> <thead> <tr><th>X</th><th>Y</th><th>F</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	X	Y	F	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
X	Y	F																
0	0	1																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																
TAI-PORTTI (OR)		$F = X + Y$	<table border="1"> <thead> <tr><th>X</th><th>Y</th><th>F</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	X	Y	F	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
X	Y	F																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
EI-TAI-PORTTI (NOR)		$F = \overline{X + Y}$	<table border="1"> <thead> <tr><th>X</th><th>Y</th><th>F</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	X	Y	F	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
X	Y	F																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	0																
EI-PORTTI (NOT)		$F = \overline{X}$	<table border="1"> <thead> <tr><th>X</th><th>F</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	X	F	0	1	1	0									
X	F																	
0	1																	
1	0																	
EHDOTON TAI-PORTTI (EXCLUSIVE OR)		$F = X\overline{Y} + \overline{X}Y$	<table border="1"> <thead> <tr><th>X</th><th>Y</th><th>F</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	X	Y	F	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
X	Y	F																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																

Kuva 2.2 Perusporttipiirit

Sekvenssiipiirit ovat luonteeltaan muistitoiminnon sisältäviä piirejä, sillä niissä lähtösignaalin arvo riippuu paitsi tulosignaalin samanhetkisestä arvosta myös aikaisemmista arvoista. Sekvenssiipiirien alkeispiiri on kaksiasentoinen värähtelijä eli multivibraattori (flip-flop). Kansanomaisesti sitä kutsutaan myös kiikkuksi. Perustyytit esitellään oheisessa taulukossa.

#### JK-KIIKKU



		$t_n$	$t_{n+1}$
J	K	Q	
0	0	$Q_n$	
0	1	0	
1	0	1	
1	1	$Q_n$	

Pakko-ohjaus:

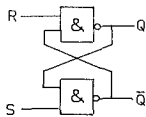
$$S_1 = 0 \quad Q = 1$$

$$S_2 = 0 \quad Q = 1$$

$t_n$  = aika ennen kellopulssin T tuloa

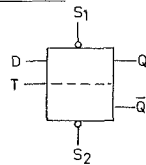
$t_n + \bar{T}$  aika kellopulssin tulon jälkeen

#### RS-KIIKKU



R	S	Q	$\bar{Q}$
0	0	1	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	Tila ei muutu	

#### D-KIIKKU



$t_n$	$t_n$
D	Q
0	0
1	1

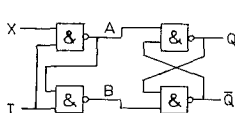
Pakko-ohjaus:

$$S_1 = 0 \quad Q = 1$$

$$S_2 = 0 \quad Q = 1$$

$t_n$  ja  $t_{n+1}$  kuten JK-kiikussa

#### LATCH-KIIKKU



$Q = X$ , kun kellopulssi T on

Kun T laskee niin  
 $A = B = 1$ , jolloin Q:n tila ei muutu (ks. RS-kiikku)

### Kuva 2.3 Sekvenssiipiirien perustyytit

Kaikki monimutkaisemmat piirit saadaan yhdistelemällä tällaisia alkeispiirejä.

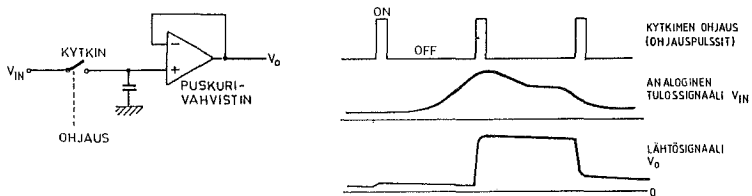
#### 2.2.2 A/D-muuntimet

Tietoliikennetekniikan laitteissa signaalin käsittely on yhä kasvavassa määrin digitaalista. Koska ympäröivän maailman antamat tulosignaalit ovat kuitenkin analogisia (esim. puhe, erilaisten anturien antamat tiedot jne.), ne on ensin koodattava digitaaliseen muotoon ennen kuin niitä voidaan digitaalisilla piireillä käsitellä, analysoida tai varastoida. A/D-muunnin muuttaa sisäänsyötetyn analogisen jännitteen sitä vastaavaksi digitaaliseksi signaaliksi.

A/D-muuntimet voivat olla 8, 10, 12... bittisiä sen mukaan, kuinka monella bitillä analogisesta signaalista otettu näyte esitetään digitaalisessa muodossa. Jos muunnos tehdään kahdeksalla bitillä ja A/D-muuntimen vertailujännite on 5 voltia, analoginen signaali voidaan esittää 5/256 voltin tarkkuudella. Tästä epätarkkuudesta johtuvaa virhettä laitteissa nimitetään kvantisointikohinaksi.

Puheen muuttamiseksi digitaaliseen muotoon käytetään kahta eri päämenetelmää: PCM = pulssikoodimodulaatio ja DM = deltamodulaatio. Ensiksi mainitussa järjestelmässä puheesta otetaan näytteitä, suoritetaan 8-bittinen A/D-muunnos 8 kHz:n kellotaajuudella, jolloin puheesta muodostuu 64 kbit/s bittijono. DM:ssa tutkitaan tavallisesti 16 kHz:n kellotaajuudella, onko senhetkinen puhetta vastaava jännitearvo suurempi vai pienempi kuin edellinen näyte. Tieto tästä koodataan yhdellä bitillä. Pienemmästä bittinopeudesta (16 kbit/s) johtuen DM:lla koodattu puhe voidaan siirtää pienemmällä taajuuskaistalla.

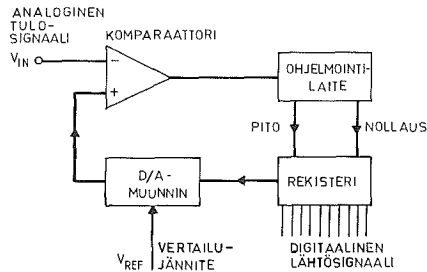
On huomattava, että useimmissa tapauksissa analogisen signaalin on pysyttävä vakiona muunnosprosessin ajan. A/D- muunninta edeltääkin ns. pitopiiri , joka jaksoittain mittaa ja tallentaa analogisen signaalin jännitearvon.



Kuva 2.4 Pitopiiri

Piirin peruskomponentit ovat nopea elektroninen kytkin, kondensaattori ja puskurivahvistin. Kytкин, joka on tavallisesti MOSFET, suorittaa näytteenotto-tehtävän. Ohjaussignaali sulkee hetkellisesti kytkimen, jolloin kondensaattorin jännite seuraa tulosignaalia. Ohjauspulssin päättyessä ja kytkimen avautuessa kondensaattorissa on analogisen signaalin hetkellinen arvo. Puskurivahvistin, jonka tuloimpedanssi on erittäin korkea, estää kondensaattorin purkautumisen ohjauspulssien välillä. Kondensaattorin tulee omata mahdollisimman pieni vuotovirta.

A/D-muunnos voidaan tehdä useita eri periaatteita käyttäen. Eräs usein käytetty menetelmä on ns. peräkkäisten approksimaatioiden menetelmä. Tässä menetelmässä käytetään hyväksi D/A-muunninta.



Kuva 2.5 Peräkkäisten approksimaatioiden menetelmä

Muunnostoiminnan alussa eniten merkitsevä bitti syötetään D/A-muuntimeen. Komparaattori vertaa muuntimen lähtösignaalia analogiseen tulosignaaliin. Mikäli muuntimen ulostulo on suurempi kuin tulosignaali, eniten merkitseväksi bitiksi sijoitetaan 0 ja päinvastoin. Sama prosessi jatkuu seuraavaksi eniten merkitsevällä bitillä. Muunnos päättyy, kun tasapaino on saavutettu eli tulosignaali juuri ja juuri ylittää D/A-muuntimen ulostulon jännitearvon.

Näytteenottotaajuuden on oltava vähintään kaksi kertaa niin suuri kuin suurin signaalissa esiintyvä taajuus, jotta alkuperäinen signaali voitaisiin rekonstruoida näytteistä uudelleen ilman vääristymiä.

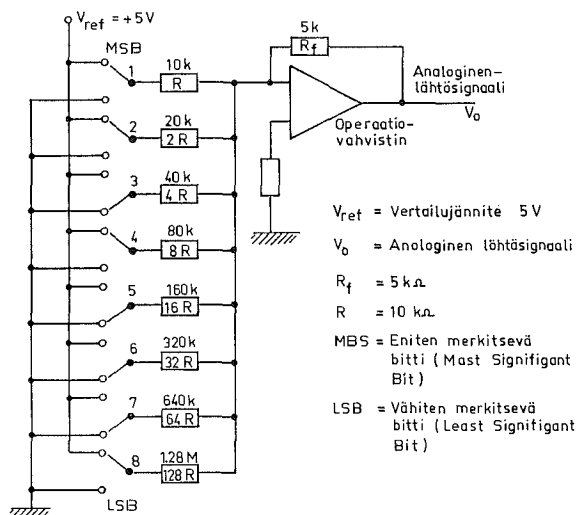
### 2.2.3 D/A-muuntimet

Digitaalinen signaali joudutaan usein loppuvaiheessa palauttamaan analogiseen muotoon. Tämän tehtävän hoitaa D/A-muunnin.

Yksinkertaisin tapa toteuttaa D/A-muunnin on käyttää painotettua vastusverkkoa ja operaatiovahvistinta. Painotetussa vastusverkossa painoarvo määräytyy binäärisen järjestyksen mukaisesti  $R$ ,  $2R$ ,  $4R$ ,  $8R$ ,  $16R$ . Muunnettava digitaalinen binääriluku käytetään ohjaamaan elektronisia kytkimiä, jotka yhdistävät vastukset esim.  $+5$  voltin vertailujännitteeseen tai  $0$  volttiin sen mukaan, onko bitti  $0$  tai  $1$ .

Oletetaan, että digitaalinen tulosignaali tarkasteluhetkellä on  $1101\ 0001$ . Tällöin kytkimet  $1$ ,  $2$ ,  $4$  ja  $8$  sulkeutuvat yhdistäen tulovastuksen  $+5$  voltin vertailujännitteeseen. Summaavan operaatiovahvistin kytkennän lähtöjännite on

$$V_0 = \frac{R_t}{R} * (1 + 1/2 + 1/8 + 1/128) * v_{ref}$$



Kuva 2.6 D/A –muunnin

## 2.2.4 Mikroprosessorit, muistipiirit ja liitäntäpiirit (I/O-piirit)

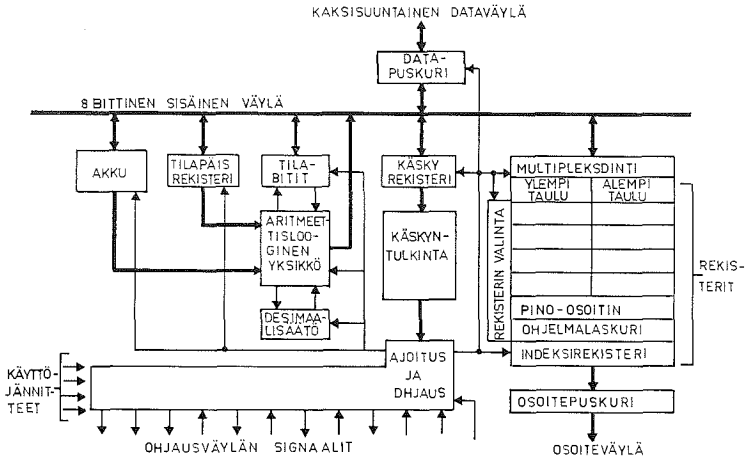
Integroitujen piirien kehitys mitattuna transistoritoimintojen lukumäärällä piisiä kohti on ollut nopeaa. Nykyisin on käytettävissä jopa miljoona transistoritoimintaa yhdellä piisurilla. Puhutaan VLSI-piireistä (Very Large Scale Integration). Samalla yhden transistoritoiminnan hinta on laskenut. Tietokoneen keskusyksiköstä (prosessori, Central Processing Unit, CPU) on tullut mikroprosessoriksi kutsuttu komponentti. Mikroprosessori voi toteuttaa muistiin varastoidun ohjelman mukaisesti erilaisia alkeisoperaatioita, joita ovat

- positiivisten ja negatiivisten binäärilukujen yhteenlasku,
- loogiset operaatiot (and, or, not),
- tiedon siirto muistin ja prosessorin välillä,
- ohjelman suoritusjärjestyksen muutokset (hyppykäskyt) ja
- muita kullekin prosessorityypille ominaisia alkeisoperaatioita (koodimuunnoksia, tilan tarkistuksia, laskuritoimintojen ohjauksia ym.).

Prosessorityyppiin kuuluva alkeisoperaatioluettelo eli prosessorin käskykanta on eräs tärkeimmistä konekielisen ohjelman suunnittelijan työkaluista.

Ensimmäinen kaupallista merkitystä saavuttanut mikroprosessori julkistettiin vuonna 1971. Vuonna 1973 tuli 8-bittinen prosessori 8080, josta tuli lajissaan yleisin mikroprosessori maailmassa ja jonka ominaisuuksiin yleensä muita

mikroproessoreita on sen jälkeen verrattu. Hankalan kolmijännitteisen virransyöttönsä takia siitä on kehitetty vuonna 1976 parempi versio 8085, jota on käytetty tietokoneohjattujen aikajakoisten puhelinkeksusten peruskomponenttina. Seuraavassa kuvassa on esitetty esimerkki prosessorikomponentin sisäisestä rakenteesta.



Kuva 2.7 Prosessorikomponentti 8080 A

Mikroprosessori (suoritin) suorittaa ohjelmansa mukaisesti alkeisoperaatioita yhden kerrallaan. Suorituksessa keskeisiä osia ovat rekisterit ja akku, joista lähtötiedot saadaan ja jonne operaation, esimerkiksi yhteenlaskun tulos siirtyy. Aritmeettislooginen yksikkö kuuluu osana jokaisen tietokoneen prosessoriin ja on mukana kaikissa aritmeettisissä ja loogisissa alkeisoperaatioissa, koska se sisältää tarpeelliset integroidut piirit. Lasku- ja/tai muun operaation tulos ilmestyy tilarekisteriin asianomaisiin tilaa ilmoittaviin lippuihin. Lippu on yksi bitti 8-bittisessä tavussa.

Prosessorikomponentti 8080 A:n ominaisuuksia ovat

- 8080A on 8-bittinen standardin mukaiseen 40-nastaiseen diil-koteloon pakattu komponentti,
- sen 16-bittinen osoiteväylä pystyy osoittamaan 65 kilotavua muistia, 256 tulo- ja 256 lähtöporttia,
- tieto siirretään erillistä kaksisuuntaista 8-bittistä kolmitilaväylää pitkin,
- 8080A:ssa on itsessään ohjauksignaali muistin ja I/O-porttien ohjaamista varten,
- prosessoria voidaan ohjata 74 käskykoodilla, joiden pituus vaihtelee,
- prosessorissa on 6 yleiskäyttöistä rekisteriä ja akku,
- pino-osoitin mahdollistaa vaihtelevan pituisen pinomuistin käytön ja tiedon osoittamiseksi on käytössä erilaisia muistin osoitusmuotoja.

Muistipiirit ovat erillisiä puolijohdekomponentteja, joihin kulloinkin käsiteltävä ohjelma ja tiedot ovat varastoituina. Piirien kehitys on ollut pakkaustiheydellä mitattuna nopeaa. Yhteen koteloon (piisruun) on pakattu

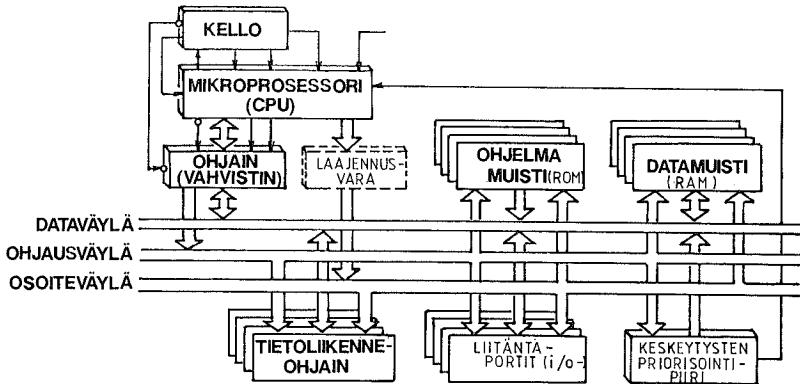
- vuonna 1969 256 bittiä
- vuonna 1971 1 kilobitti,
- vuonna 1973 4 kilobittiä,
- vuonna 1976 16 kilobittiä,
- ...
- vuonna 1988 1 Megabitti ja
- vuonna 1989 4 Megabittiä.

Myös I/O- eli liitäntäpiirit ovat kehittyneet mahdollistaen prosessorin ja ympäristön välille erilaisia tiedonsiirtomuotoja ja muita toimintoja kuten

- rinnakkaismuotoinen tiedonsiirto (rinnakkaisportit),
- sarjamuotoinen tiedonsiirto (sarjaportit),
- ajastuspulssit (kellopiirit ja ajastin-komponentit),
- jännite-taajuusmuunnos (modeemi-komponentit) ja
- analogia-digitaalimuunnos ja digitaali-analogia-muunnos (a/d- ja d/a-muuntimet).

## 2.3 Mikrotietokone

Mikrotietokone on laite, jossa mikroprosessori on keskeinen toimintaa ohjaava komponentti. Välttämättömiä ovat myös puolijohdemuistit (ROM ja RAM) sekä I/O-piirit (sarja- ja rinnakkaisportit). Puolijohdemuistiin varastoidaan kulloinkin suoritettava ohjelma ja sen käyttämät välitulokset. I/O-piirien kautta siirretään tarpeelliset tiedot ympäristöstä varsinaiseen mikrotietokoneeseen (näppäimistöä, levymuistista, kovalevyitä jne.) ja tulokset mikrotietokoneen sisältä ulos (kirjoittimelle, näyttölaitteelle jne.).



Kuva 2.8 Mikrotietokoneen lohkoakaavio

Mikrotietokoneessa on seuraavat toiminnalliset kokonaisuudet:

- Prosessori ja sen toimintanopeuden määräävä kello.
- Väylät, jotka kytkevät kaikki komponentit toisiinsa. Väyliä on kolme. Osoiteväylän signaaleilla määritetään siirron kohteena olevan tiedon osoite. Dataväylä on varsinainen tiedonsiirtoväylä ja ohjausväylä tahdistaa tiedonsiirron dataväylällä, esimerkiksi luku- ja kirjoitustapahtuman.
- Puolijohdemuistit, joita on kahta perustyyppiä. ROM-muisti on vain luettavaa tietoa varten ja RAM-muisti sekä kirjoitettavaa että luettavaa tietoa varten.
- Liitäntä- eli I/O-portit tietokoneen ja sen ympäristön välistä tiedonsiirtoa varten.
- Keskeytysten priorisointipiiri, jolla ympäristöstä tulevat palvelupyynnöt asetetaan tärkeysjärjestykseen.

**Mikrotietokoneen ohjelmointi** ei eroa merkittävästi isojen tietokoneiden ohjelmoinnista. Pääasiallinen ero on muistin laajuus ja siitä johtuva käsiteltävien sovellutusten koko. Kuitenkin hyvinkin suuret valmishjelmat toimivat sekä isossa tietokoneessa että mikrotietokoneessa. Teknisiin sovellutuksiin kuten radiolaitteiden tai digitaalivaihteiden ohjaukseen käytettävät ohjelmat voidaan valmistaa puolijohdekomponenteiksi ohjelmoimalla vakio- tai muotoiset toimintajaksot pysyvästi ROM-muistiin, josta ne eivät katoa virtakatkoksen aikaan. Tällaisten ohjelmien epäkohtana on päivityksen hankala suoritus, uuden ROM-ohjelman valmistaminen ja asennus. Tämän vuoksi järjestelmät raken-



netaan siten, että vain osa ohjelmista on ROM-muistissa ja osa ohjaustiedoista syötetään tietovälineiden avulla. Konekieltä käytetään nykyään vain erikoistapauksissa ja suurin osa ohjelmoinnista suoritetaan korkeamman tason kielten kääntäjillä, jotka kääntävät lähdeohjelman konekielille.

Tietokoneiden ohjelmointi on laaja asiakokonaisuus. Mikrotietokoneen käyttäjälle riittää tavallisesti laitteiden ja ohjelman valmistajan antamat ohjekirjat.

Toimistokäyttöön tarkoitetun mikrotietokoneen (henkilökohtainen tietokone, PC) välttämättä tarvitsemia ympäryslaitteita ovat:

- Massamuistit (levykemuistit 3 1/2" tai vanhempi 5 1/4" sekä kovalevy).
- Kirjoittimet lisälaitteineen (matriisi-, kirjasin-, laser- ja mustesuihkukirjoitin).
- Piirturit ja digitointialustat sekä kursorin ohjaushiiret.
- Kuvanlukijat eli skannerit, joilla kuva ja teksti voidaan tallentaa tietokoneen muistiin jatkokäsittelyä varten.

Ympäryslaitteet liitetään mikrotietokoneeseen liitäntäporttien kautta. Näihin liittyy liittintyyppiä, siirtotapaa ja -nopeutta sekä siirrossa noudatettavaa protokollaa koskevia standardiksi muodostuneita sopimuksia, jotka on hallittava, ennen kuin laite voidaan kytkeä porttiin.

Mikroprosessorien mukaantulo kaikkiin tietotekniikan tuotteisiin on samalla luonut perustan uuden sukupolven laitteille. Mikroprosessorilla varustettu laite osaa laskea vaativia matemaattisia laskutoimituksia, tehdä päätelmiä sille annetun ohjeen (ohjelman) puitteissa ja olla monin tavoin järkevä. Mikroprosessorit ovat mahdollistaneet automaattiset digitaaliset keskuksset ja vaihteet, sanomalaitteet ja NMT-puhelimet.

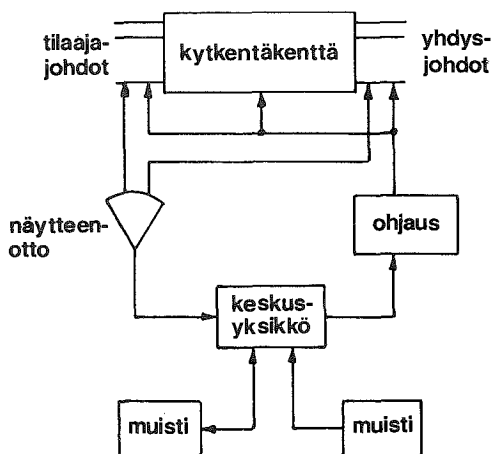
## 2.4 Digitaalielektronikan sovelluksia

### 2.4.1 Puhelinvaihte mikroprosessorin ohjaamana

Puhelinvaihteen (PABX) ohjauksessa mikroprosessorille voidaan asettaa seuraavia vaatimuksia:

- Yksi prosessori voi ohjata suurta tilaajamäärää.
- Nopeus on kriittinen tekijä, koska lyhyen aikavälikön aikana on ohjattavia tapahtumia hyvin paljon.
- Osoituskyky on tärkeä. Valikoima erilaisia tiedon osoitustapoja on suotava.
- Yksittäisen bitin käsittelykyky on hyvin tärkeä. Sen sijaan aritmetiikkakyky ei ole niin merkittävä tekijä.
- Keskeytysten käsittelykyvyn on oltava hyvä, mutta I/O-ohjauksen määrän merkitys jää vähäiseksi erillisen suoran muistiväylän (DMA) ansiosta.

Kehityksen tuloksena on syntynyt valikoima tietokoneohjattuja puhelinvaihteita, joiden periaatteellisesta rakenteesta on esimerkki seuraavassa kuvassa.



Kuva 2.9 Puhelinvaihteen (PABX) periaatteellinen rakenne

Puhelinvaihteen toiminta on yksinkertaistettuna

- tilaajajohdolta tulevan informaation vastaanotto,
- vastaanotettujen tietojen analysointi ja käsittely,
- vapaan väylän etsiminen ja kytkentä, sekä
- tietojen lähettäminen tilaajajohdolle tai yhdysjohdolle.

Näiden toimintojen hoitamista varten vaihte jakaantuu kytkentäkenttään ja sitä ohjaavaan ohjausosaan.

Puhelinvaihteista voidaan muodostaa useita vaihteita käsittävä vaihdeverkko. Taktinen digitaalinen viestiverkko on periaatteessa vaihdeverkko, jossa vaihteiden välinen yhteistoiminta perustuu digitaalisiin sanomiin. Digitaaliset sanomat ovat erikseen määriteltyjä digitaalisia signaaleja ja muodostavat merkinantojärjestelmän.

#### 2.4.2 Mikroprosessori sanomalaitteen ohjaajana

Prossessorin ohjaamia toimintoja sanomalaitteessa ovat mm.

- näppäimistön luku määrääjain ja painetun näppäimen aiheuttaman toiminnon suorittaminen,
- laitteeseen kirjoitetun viestin salaaminen ja tulkitseminen,

- varauksen ohjaus (kolme eri varausvaihtoehtoa),
- näytön ohjaus,
- modeemin ohjaus lähetyksen ja vastaanoton aikana,
- automaattinen toimintakunnon tarkastus (SELF TEST) käynnistyksen jälkeen sekä
- datasiirron ohjaus kirjoittimen ja sanomalaitteen välillä.

### 2.4.3 Mikroprosessoriohjattu NMT-puhelin

Nykyaikaisessa NMT-puhelimessa mikroprosessorin valvonta- ja ohjaustehtävä on vaativa. NMT-puhelimen käyttäjät tietävät, että puheyhteys katkeaa säännöllisesti pieneksi hetkeksi puhelun aikana. Tämän katkoksen aikana yhteys mikrofoniiin ja kuulokkeeseen katkaistaan mikroprosessorin ohjaamana, koska tämä aikaväli on varattu digitaalisen ohjausdatan siirtämiseen puhelimen, tukiaseman ja keskuksen välillä. Puhelun aikana tulevat ohjauskäskyt voivat esimerkiksi määrätä puhelimen vaihtamaan tukiasemaa ja kanavaa huonon yhteyden parantamiseksi. Digitaalinen tieto siirretään puhetiellä käytämällä NMT-puhelimen sisältämää modeemia.

NMT-puhelin saa monenlaisia ohjeita ja määräyksiä sitä ohjaavalta keskukselta. Mikroprosessorin tehtävä on tulkita vastaanotetun bittijonon sisältämät käskyt ja ohjata radiota annettujen käskyjen toteuttamiseksi. Ohjeet kunkin tehtävään suoritukseen on annettu puhelimen ohjelmistossa.

Ennen kuin puheyhteys on muodostunut haluttuun numeroon, käydään vilkas digitaalisen datan vaihto puhelimen ja keskuksen välillä tarvittavan informaation siirtämiseksi. Toimintajärjestys on karkeasti seuraava:

- 1 Puhelimen prosessori tallentaa valitun numeron muistiin.
- 2 Puhelin kuuntelee tukiaseman dataliikennettä vapaan kanavan löytämiseksi.
- 3 Kanavan löydyttyä puhelin varaa sen käyttöönsä tietyllä digitaalisella datasanomalla.
- 4 Keskus ilmoittaa puhelimelle olevansa valmis numeron vastaanottoon.
- 5 Puhelin lähettää valitut numerot tähän tarkoitukseen varatuilla datasanomilla keskukselle.
- 6 Keskus muodostaa yhteyden kiinteän puhelinverkon ja puhelimen välille.
- 7 Puhelu päättyy, kun luuri pannaan pitimeensä, jonka jälkeen puhelin lähettää puhelun päättymistä osoittavat databitit keskukselle.

Edelläoleva luettelo sisältää vain pienen osan niistä toiminnoista, jotka suoritetaan mikroprosessorin ohjaamana ja valvomana NMT-puhelimessa. Puhelun muodostamiseen, puheyhteyden valvonnan tarkkailuun ja puhelun purkamiseen liittyvien tehtävien lisäksi mikroprosessori ohjaa mm. taajuussyntetisaattoria, akkujen varausta ja yleensä ottaen kaikkia laitteen toimintoja.

#### 2.4.4 *Erikoisprosessorit*

Tavallisten yleiskäyttöisten mikroprosessorien lisäksi on olemassa prosessoreita, jotka on suunniteltu jotain erikoiskäyttöä varten. Tietoliikennetekniikan kannalta näistä tärkein on signaaliprosessori (DSP = digital signal prosessor).

Signaaliprosessori on kehitetty digitaalisen signaalin käsittelyyn. Digitaaliselle signaalille voidaan tehdä kaikki samat operaatiot kuin analogiselle signaalille. Koska signaaliprosessori on ohjelmoitava, se on ylivoimainen komponentti moniin sovelluksiin.

Signaaliprosessorilla toteutettu tyypillinen sovellus on mm. digitaalinen suodatin, joka on monessa suhteessa käyttökelpoisempi kuin analoginen suodatin. Signaaliprosessorin merkittävä ominaisuus on myös sen kyky suorittaa signaalille Fourier-muunnos eli laskea signaalin spektri taajuustasossa. Tämän ominaisuuden myötä signaaliprosessorin sovellusalue laajenee puheentunnistuksen ja -synteesin kautta nopeisiin modeemeihin.

### 3 VIESTINSIIRTOTEKNIikka

#### 3.1 Signaalin käsittely

##### 3.1.1 Signaalityypit

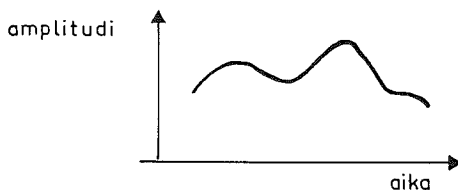
Viestinsiirtotekniikan perustehtävä on informaatiota sisältävän sanoman siirtäminen päätelaitteiden välillä. Informaation esitystapa voi olla

- puhe
- teksti
- kuva tai
- data.

Sanomaa muokataan tavallisesti siirtoketjun alussa sähköakustisen, sähkömekaanisen tai optisen muuntimen avulla sähköiseksi signaaliksi analogiseen tai digitaaliseen muotoon.

##### Analoginen signaali

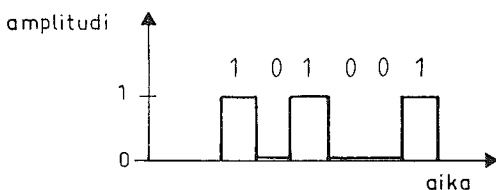
Analoginen signaali on ajan suhteen jatkuva sille ominaisella vaiheluvällillä. Ihmisen havainnointi aistien avulla on luonteeltaan analogista.



Kuva 3.1 Analoginen signaali

##### Digitaalinen signaali

Digitaalinen signaali on ajan suhteen epäjatkuvaa ja voi saada vain rajoitetun määrän arvoja.

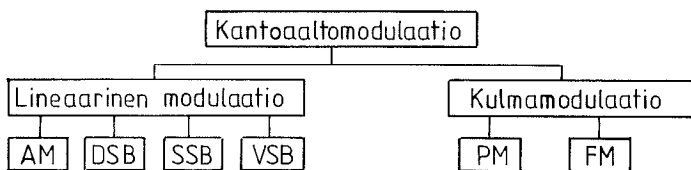


Kuva 3.2 Digitaalinen kaksitasoinen signaali

### 3.1.2 Modulaatio ja demodulaatio

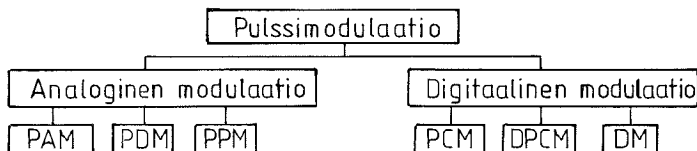
Signaalin siirtämiseksi radiotiellä tai kantoaaltojärjestelmässä se liitetään kantoaaltoon muuttamalla jotain kantoaallon ominaisuutta (amplitudia, vaihetta tai taajuutta) signaaliin verrannollisena. Tätä tapahtumaa kutsutaan modulaatioksi. Signaalin erottamista kantoaallostaa kutsutaan demodulaatioksi eli ilmaisuksi.

Modulointitavat jaetaan jatkuvan aallon modulaatioon ja pulssimodulaatioon. Jatkuvan aallon modulaatiota nimitetään yleensä kantoaaltomodulaatioksi.



Kuva 3.3 Kantaaaltomodulaatiomenetelmät

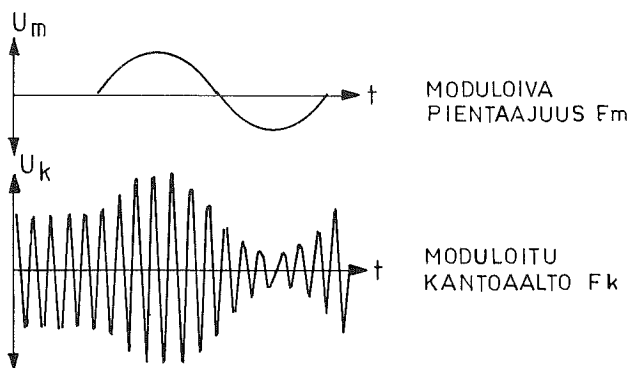
Pulssimodulaation käytön viestinsiirrossa mahdollistaa se tosiasia, että jatkuva signaali voidaan muodostaa uudelleen riittävän tiheästi otetuista näytteistä. Pulssimodulaatiomenetelmät voidaan edelleen jakaa analogisiin ja digitaalisiin modulaatiomenetelmiin.



Kuva 3.4 Pulssimodulaatiomenetelmät

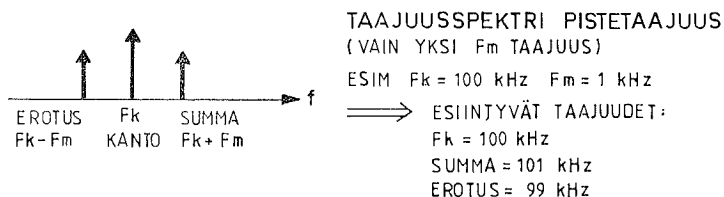
## Amplitudimodulaatio

AM-modulaatioissa kanta-aallon amplitudia muutetaan moduloivan signaalin tahdissa kanta-aallon taajuutta muuttamatta.



Kuva 3.5 Vakiotaajuisen siniaallon moduloima kanta-aalto

Tarkasteltaessa modulointitulosta taajuusspektriesityksenä, havaitaan, että tulos koostuu kanta-aallosta sekä taajuuksista, jotka sisältävät moduloivan signaalin. AM-modulointituloksessa moduloiva signaali eli siirrettävä informaatio esiintyy kahdennettuna.



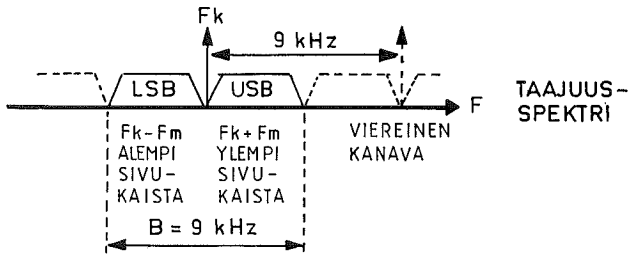
Kuva 3.6 AM-modulointitulokset

Kun kanta-aaltoa moduloidaan signaalilla, joka koostuu useista taajuuksista (esim. puhe), muodostuu taajuusspektri, jossa kanta-aallon lisäksi on sivukaistat. Tällöin modulointituloksen taajuuskaistan leveys  $B$  on:

$$B = 2 * f_{m_{\max}}$$

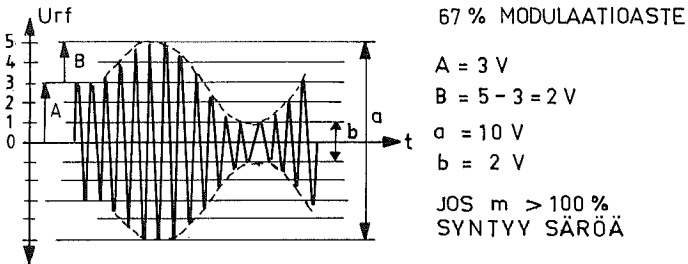
$f_{m_{\max}}$  = moduloivan signaalin  
suurin taajuus

Mikäli moduloiva taajuuskaista on 0–4500 Hz, modulointituloksen kaistanleveys on 9 kHz. Tällöin toisen radion kanta-aalto voi olla lähimmillään 9 kHz:n päässä jotta lähetteet eivät menisi päällekkäin.



Kuva 3.7 Taajuuskaistan moduloiman AM-signaalin spektri

Modulaatioaste [m] kertoo moduloivan jännitteen vaikutusvyödyden kantoaaltoon.



$$m = \frac{B}{A} * 100\%$$

$$m = \frac{2 \text{ V}}{3 \text{ V}} * 100\% = 67\%$$

$$m = \frac{a - b}{a + b} * 100\%$$

$$m = \frac{10 - 2}{10 + 2} * 100\% = 67\%$$

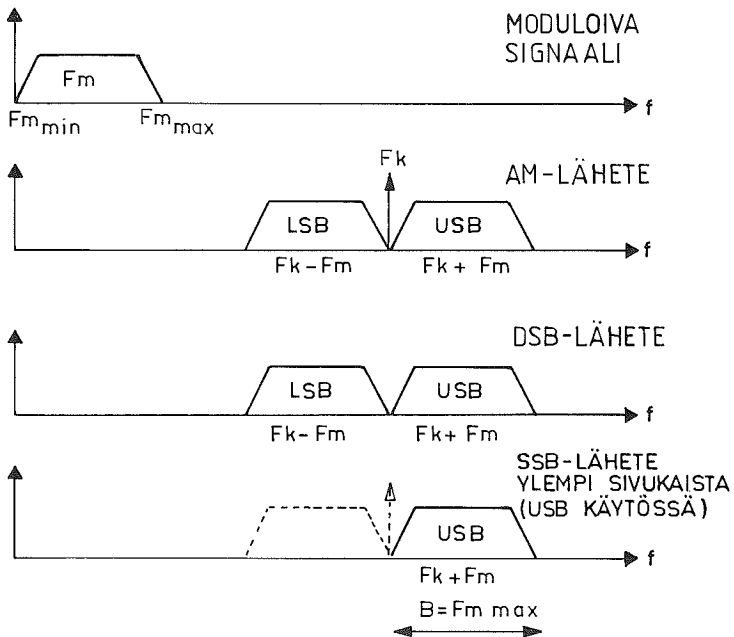
Kuva 3.8 Modulaatioasteen laskeminen

AM-modulaatio on helppo muodostaa eli se vaatii yksinkertaisen laitteiston. Toisaalta AM-modulaatio vaatii suurehkon taajuuskaistan ja tehon. AM-siirrossa esiintyy usein jännitteen vaihtelusta johtuvia häiriöitä. AM-modulaatiota käytetään lähinnä HF-taajuusalueella.



### Yksisivukaistälähete

Koska amplitudimoduloidun signaalin sekä ylempi että alempi sivukaista sisältää siirrettävän informaation, on tarpeetonta taajuuskaistan hukkaamista siirtää molempia kaistoja. Tämän vuoksi on kehitetty modulaattorirakenne, joka tukahduttaa tarpeettoman kanta-aallon, jolloin muodostuu DSB-modulointitulok. Kun tällaisen DSB-moduloinnin jälkeen suodatetaan joko ylempi tai alempi sivukaista pois, saadaan yksisivukaistälähete SSB.



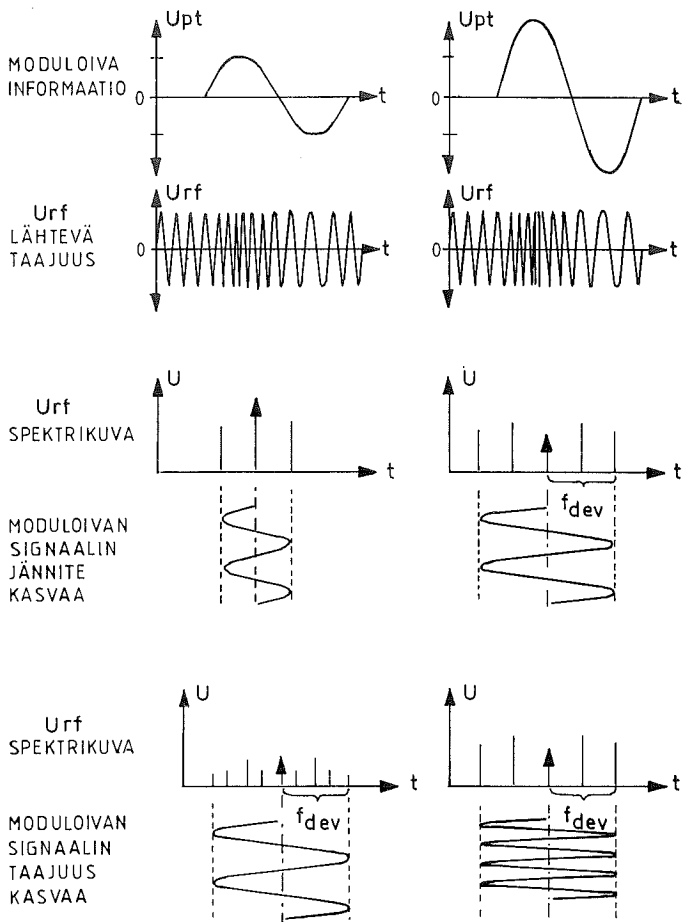
Kuva 3.9 Yksisivukaistäläheteen muodostuminen

SSB-modulaatiota käytetään yleisesti analogisissa puheensiirtojärjestelmissä, erityisesti kanavoilaitteissa.

## Taajuusmodulaatio

Taajuusmodulaatiossa kanta-aallon taajuus vaihtelee moduloivan signaalin tahdissa kanta-aallon amplitudin pysyessä vakiona.

Kanta-aallon vaihtelua nimellistaajuudesta kutsutaan taajuuspoikkeamaksi eli deviaatioksi. Taajuuspoikkeaman suuruus riippuu moduloivan signaalin jännitteestä ja poikkeamisnopeus riippuu moduloivan signaalin taajuudesta.



Kuva 3.10 Moduloivan signaalin vaikutus taajuuspoikkeamaan

Moduloivan signaalin jännitteen vaikutuksen voimakkuus määritellään modulointi-indeksillä  $m_f$

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m}$$

$\Delta f$  = taajuuspoikkeama eli deviaatio  
 $f_m$  = moduloiva taajuus

Mitä suurempaa modulointi-indeksiä käytetään, sitä suurempi on tarvittava kaistanleveys ja tehon tarve. Toisaalta käytettäessä suurta modulointi-indeksiä päästään hyvään siirron laatuun.

FM-lähetteen jännitteen hetkellisarvo saadaan lausekkeesta:

$$U = A * \sin(\omega_0 t + m_f * \sin \omega_m t)$$

jossa:

- A = kantoaallon amplitudi
- $\omega_0$  = kantoaallon kulmanopeus =  $2\pi f$
- t = tarkasteltava ajankohta
- $\omega_0 t$  = vaihekulma radiaaneina
- $\omega_m$  = moduloivan signaalin kulmanopeus

FM-lähetteen kaistanleveys saadaan lausekkeesta:

$$B = k(2\Delta f + f_{mmax})$$

jossa:

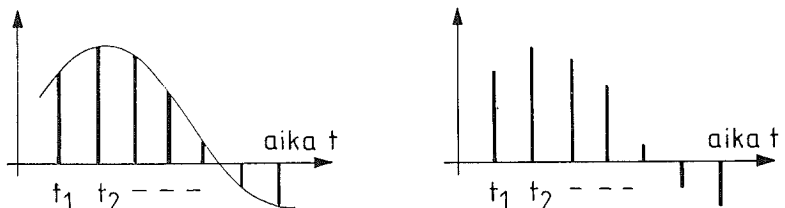
- k = varmuuskerroin (>1)
- $f_{mmax}$  = suurin moduloiva taajuus

FM on amplitudimodulaatioon verrattuna parempi häiriöiden kannalta, koska amplitudiltaan poikkeavia häiriöitä voidaan vaimentaa rajoittimilla. FM-lähetteen kaistanleveys ja tehon tarve on suurempi kuin AM (SSB)-signaalilla.

### Deltamodulaatio

Deltamodulaatio (DM) on eräs keino jatkuvan signaalin digitoimiseksi. Sen käyttö on tavallista aikajakaisissa sotilasviestijärjestelmissä.

Jatkuvan signaalin digitointi perustuu tietoon, että signaali voidaan täydellisesti muodostaa riittävän usein otetuista näytteistä.



Kuva 3.11 Näyteenotto jatkuvasta signaalista

Näytteenottotaajuuden ( $f_s$ ) on oltava vähintään kaksinkertainen suurimpaan siirrettävään taajuuteen nähden ( $f_{\max}$ ).

$$f_s \geq 2f_{\max}$$

Esim. Jos puhekanavan kaistaleveys on 0,3–3,4 kHz eli  $f_{\max} \approx 4$  kHz, on näytteenottotaajuus oltava vähintään

$$f_s \geq 2 * 4 \text{ kHz} = 8 \text{ kHz}$$

Näytteenottoväli  $T = t_2 - t_1 = \frac{1}{8 * 10^3} \text{ s} = 125 \mu\text{s}$

DM:ssa näytteenottotaajuus on tavallisesti joko 16 kHz tai 32 kHz.

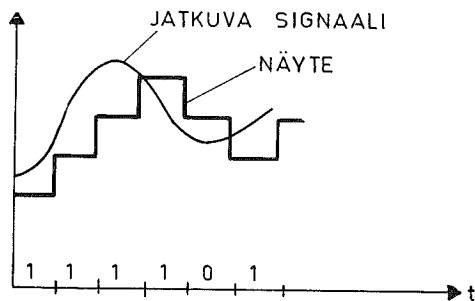
DM-siirrossa lähetetään yksinkertaisesti vain tieto näytteen arvon muutoksesta edelliseen näytteeseen verrattuna siten, että jälkimmäisen näytteen ollessa suurempi on siirrettävän koodin arvo "1" ja näytteen ollessa pienempi on koodi "0".

Deltamodulaation etuja ovat

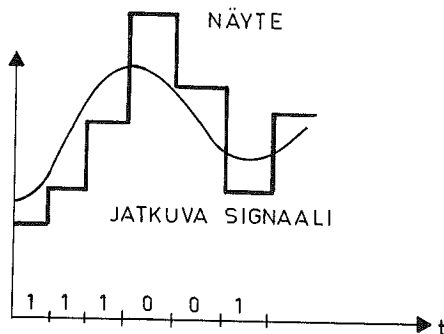
- yksinkertainen rakenne ja siitä johtuva pieni koko, edullinen hinta ja helppohuoltoisuus (vaihtoperiaate),
- riittävä koodaus puheensirtoa varten,
- bittivirheiden pienempi haittavaikutus kuin PCM:lla sekä se, että
- esimerkiksi 30 kanavan siirtoon tarvittava kaistanleveys voi olla vain neljäsosa PCM:lla toteutetusta.

Haittana on se, ettei deltamodulaatio pysty koodaamaan PSK- ja QAM-moduloitua dataa, joten se ei sovellu nopean datan siirtoon (nopeudet yli 1200 bit/s) eikä nykyaikaisten telekopiolaitteiden käyttöön.

Näytteen koodaus tapahtuu siis yhdellä bitillä. Yksinkertaisin DM-koodaus on lineaarista. Käytännön järjestelmissä käytetään adaptiivista DM-koodausta, joka seuraa edellistä paremmin analogista signaalia.



Kuva 3.12 Lineaarinen DM-koodaus

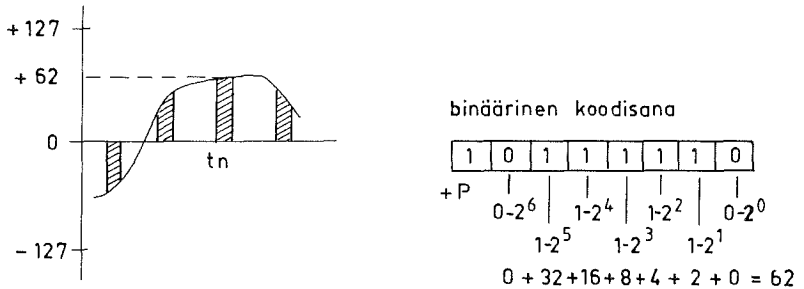


Kuva 3.13 Adaptiivinen DM-koodaus

### Pulssikoodimodulaatio

Yleisessä televerkossa käytettävässä PCM-tekniikassa jatkuvan signaalin näytteet rajoitetaan 256 tasoon ja kukin taso koodataan 8 bitillä.

Esimerkki: Näytetaso ajan hetkellä  $t_n$  on +62.



Kuva 3.14 PCM-koodauksen periaate

Muita standardoituja koodeja ovat mm.

- morse-koodi, jossa numerot, kirjaimet ja välimerkit koodataan 1—5 merkillä, esim. L = · - · · ·
- kaukokirjoitinkoodi (CCITT nro 2), jossa merkki koodataan viidellä sykäyksellä esim. L = - + - - +
- ASCII-koodi datan siirtoa varten, jossa merkki koodataan kahdeksalla bitillä, esim. L = 01001100.

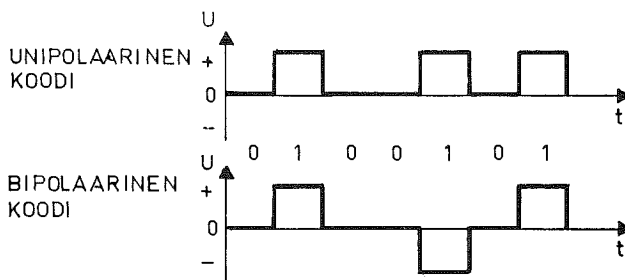
### 3.1.3 Johtokoodaus

Näytteen koodauksessa saatu signaali ei sellaisenaan yleensä sovellu siirtotielle, vaan sitä varten on koodausta muunnettava.

Johtokoodaus on tarpeen, jotta

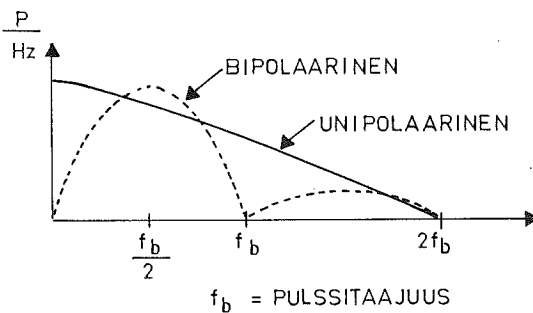
- pulssit voidaan luotettavammin ilmaista
- signaali läpäisisi siirtotiellä mahdollisesti olevat muuntajat ja kondensaattorit
- siirtojärjestelmä voidaan tahdistaa
- siirron virheitä voidaan valvoa ja
- tarvittava lisäinformaatio voidaan liittää signaaliin.

Johtokoodia on standardoitu useita ja niistä on valittava kulloiseenkin tapaukseen sopiva. Laitteiden sisällä käytetään kaksitilaista (unipolaarista) koodia ja laitteiden ulkopuolella siirtojohtolla käytetään näennäis-kolmitilaista koodia, joka on vaihtovirtasignaalinomainen (bipolaarinen).



Kuva 3.15 Unipolaarinen ja bipolaarinen koodi

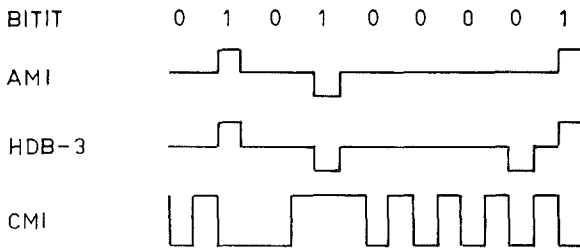
Unipolaarisen signaalin teho keskittyy taajuudelle 0 Hz eli tasavirralle, kun taas bipolaarisen signaalin spektri keskittyy pulssitaajuuden puolikkaalle.



Kuva 3.16 Signaalin teho koodauksessa

Yleisimmin käytössä olevia koodeja ovat:

AMI	=	Alternate Mark Inversion
HDB-3	=	High Density Bipolar
CMI	=	Code Mark Inversion



Kuva 3.17 Yleisimmin käytössä olevat koodit

Dekoodauksella ymmärretään koodin purkamista siten, että saadaan esille alkuperäiset näytteet, joista voidaan rekonstruoida jatkuva signaali.

### 3.1.4 Kanavointi

Viestiyhteyden käyttö on tehokkaampaa, jos siinä voidaan siirtää samanaikaisesti useita signaaleja. Tämä on mahdollista kanavointitekniikan avulla. Käytössä olevat menetelmät ovat

- tilajakoinen
- taajuusjakoinen ja
- aikajakoinen kanavointi.

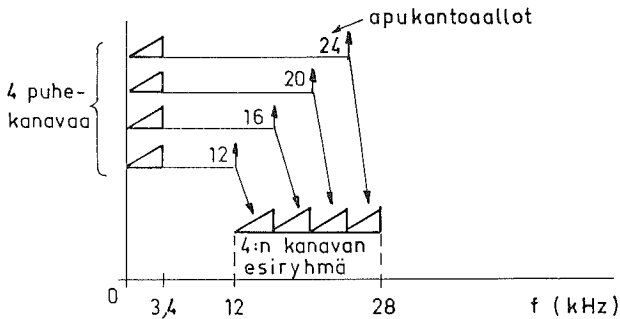
**Tilajakoisella kanavoinnilla** ymmärretään johtojen lisäämistä tarvetta vastaavaksi.

### Taajuusjakoinen kanavointi FDM

Taajuusjakoisessa kanavoinnissa siirtokanavat järjestetään peräkkäin tietylle taajuuskaistalle.

**Esimerkki:** Kanavoitaessa 4 puhekanavaa (0,3—3,4 kHz) ns. esiryhmäksi taajuusalueelle 12—28 kHz käytetään ensimmäisessä modulointiportaassa 4 kantoaaltoa, joiden taajuuDET ovat 12, 16, 20 ja 24 kHz.





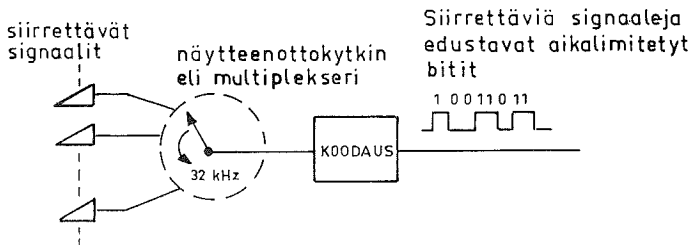
Kuva 3.18 Taajuusjakoinen kanavointi

Esiryhmiä voidaan edelleen moduloida korkeammalle taajuusalueelle ja muodostaa siten suurempia yhteysmääriä. Tällöin kasvaa luonnollisesti siirtoon tarvittava taajuuskaista.

Vastaanottopäässä modulointiportaatt puretaan ja kanavat palautetaan alkuperäisiksi (0.3—3.4 kHz). Tällöin eteenpäin siirrossa tarvitaan vastaava määrä tilajakoisia yhteyksiä.

### Aikajakoinen kanavointi TDM

Aikajakoinen kanavointi liittyy olennaisesti digitaalisessa muodossa olevan signaalin siirtoon. Kanavoitavista signaaleista otetut koodatut näytteet sijoitetaan ajallisesti peräkkäin ja ryhmitellään sopivaksi jaksoksi, joita sitten toistetaan.



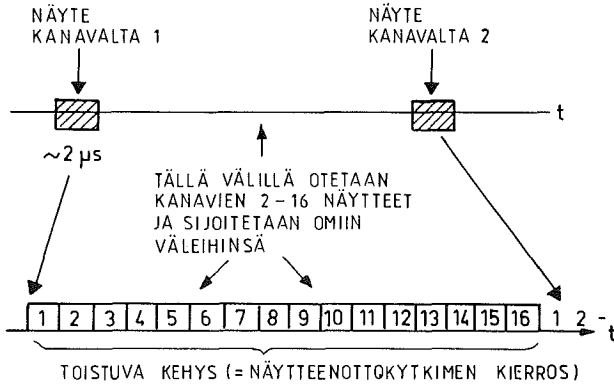
Kuva 3.19 Aikajakoinen kanavointi

Perusjakson muodostaa näytteenottoväli. Tämä aikaväli jaetaan siirrettävien kanavien kesken siten, että yhdessä aikavälissä otetaan näyte kullakin kanavalta.

Esimerkiksi DM-signaalin kanavoinnissa jokaisesta kanavasta otetaan näytettä taajuudella 32 kb/s. Tällöin kahden samalta kanavalta otetun näytteen välinen aika on

$$T = \frac{1}{32000} \text{ s} \approx 31 \mu\text{s}$$

Olkoon siirrettäviä kanavia 16 kpl. Tällöin siirrettävän bittivirran nopeus on  
 $16 \cdot 32 \text{ kbit} / \text{s} = 512 \text{ kbit} / \text{s}$



Kuva 3.20 TDM-kanavoitu DM-signaali

Aikajakoista tiedonsiirtoa voidaan edelleen tehostaa kokoamalla data tietyn muotoiseksi sanomaksi, paketiksi.

Tämä liikennöintitapa, pakettikytkentäinen tiedonsiirto, soveltuu erityisen hyvin tietokoneiden väliseen liikenteeseen. Tietokoneet vaihtavat sanomia verkossa tarkkojen yhteyssäännöksiensä mukaan. Siirtotie on varattuna tiettyä yhteyttä varten vain sanoman vaatiman ajan.

### 3.1.5 Viestinsiirtotekniikan käsitteitä

Seuraavassa esitellään eräitä keskeisiä viestinsiirtotekniikan käsitteitä

- taso
- vaimennus ja vahvistus
- vääristyminen
- signaalikohinasuhde
- virhesuhde ja
- synkronointi.

#### Tehotaso

Tasokäsitteen avulla voidaan tarkastella signaalin tehosuureita halutussa pisteessä siirtotiellä tai päätelaitteen virtapiireissä jonkin vertailuarvon suhteen. Tehotaso ilmoitetaan desibeleinä (dB) ja se määritellään seuraavasti:

Tehotaso (dB) =  $10 \lg \frac{P_1}{P_v}$  (dB) , jossa

$P_1$  on signaalin teho tarkastelupisteessä

$P_v$  on signaalin arvo vertailukohdassa

Tasosta puhuttaessa on erotettava toisistaan käsitteet absoluuttinen taso ja suhteellinen taso.

Absoluuttinen tehotaso määritellään seuraavasti:

$$\text{Absoluuttinen tehotaso (dBm)} = 10 \lg \frac{P_1}{1 \text{ mW}} \text{ (dBm)}$$

Vertailuarvona on 1 mW, jota kutsutaan nolla-tasoksi. Esimerkiksi 600  $\Omega$ :n vastuksessa yhden mW:n tehoa vastaavat suureet

$$U_o = 0,775 \text{ V}$$

$$I_o = 1,29 \text{ mA}$$

Signaalin taso on aina 0 dBm, mikäli sen teho on 1 mW, oli vastusarvo mikä hyvänsä.

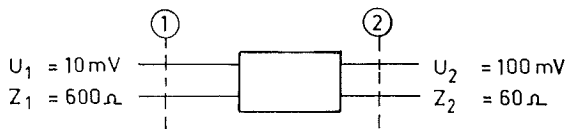
Jännitteen ja impedanssin avulla ilmaistuna tehotaso (dB) on

$$20 \lg \frac{U_1}{U_v} + 10 \lg \frac{Z_v}{Z_1}$$

Tällöin absoluuttinen tehotaso (dBm) vertailukohdassa on

$$A = 20 \lg \frac{U_1}{0,775 \text{ V}} + 10 \lg \frac{600 \Omega}{Z_1} \text{ dBm}$$

Suhteellinen taso (dBr) saadaan, kun tarkastelupisteen tehosuureita verrataan johonkin muuhun siirtojärjestelmän pisteeseen.



Kuva 3.21 Suhteellinen taso

Suhteellinen taso (dBr) pisteessä 2 pisteeseen 1 verrattuna on

$$20 \lg \frac{U_2}{U_1} + 10 \lg \frac{Z_1}{Z_2} = 20 \lg \frac{100\text{mV}}{10\text{mV}} + 10 \lg \frac{600\Omega}{60\Omega} = +30 \text{ dBr}$$

### Vaimennus ja vahvistus

Vaimennuksella tai vahvistuksella ymmärretään tarkastelupisteiden tasoeroja. Jos erotus on positiivinen, on kysymyksessä vahvistus ja päinvastaisessa tapauksessa vaimennus. Yksikkö on desibeli.

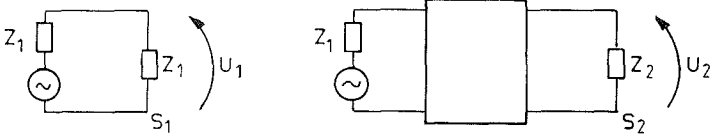
Vaimennuksesta puhuttaessa esiintyvät usein käsitteet

- kuvavaimennus (usein lyhyesti vaimennus)
- käyttövaimennus
- sovitusvaimennus ja
- ylikuulumisvaimennus.

Kuvavaimennus ilmoittaa jonkin nelinavan, esimerkiksi parikaapelin, vaimennusominaisuudet tietyllä taajuudella.

Käyttövaimennus  $A_{\text{kä}}$  kuvaa nelinavan toimintaa käytännön tilanteessa, jolloin siihen on kytketty lähettävä generaattori ja kuorma. Käyttövaimennus määritellään näennäistehojen suhteessa

$$A_{\text{kä}} \text{ (dB)} = 10 \lg \frac{S_1}{S_2} = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} + 10 \lg \frac{Z_2}{Z_1}$$



$Z_1$  = GENERAATTORIN SISÄINEN IMPEDANSSI

Kuva 3.22 Käyttövaimennus

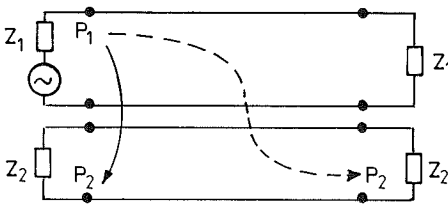
Käyttövaimennus ottaa huomioon mahdolliset sovitusvirheet. Jos  $Z_1 = Z_2$ , puhutaan nimelliskäyttövaimennuksesta.

Sovitusvaimennus (A) kuvaa kytkentäpisteiden impedanssierojen aiheuttamaa vaimennusta.



Mikäli epäsovitus on suuri, sitä voidaan korjata muuntajilla.

Ylikuulumisella tarkoitetaan signaalin häiritsevää kytkeytymistä siirtokanavalta toiselle. Yleensä tarkastellaan erikseen lähipään ja kaukopään ylikuulumista.



Kuva 3.23 Ylikuuluminen

Ylikuulumisvaimennus (A) määritellään

$$A = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ (dB)}$$

Ylikuulumisvaimennuksen tulee olla mahdollisimman suuri.

### Vaimennus- ja kulkuai kavääritymä

Signaalin siirto-ominaisuudet riippuvat voimakkaasti taajuudesta. Vaimennuksen riippuvuus taajuudesta aiheuttaa vaimennusvääristymää sekä johdoilla että suodattimissa. Tietyissä rajoissa tätä voidaan korjata vahvistimissa. Vaimennusvääristymä on merkittävä puheensirron kannalta.

Datasirrossa on tärkeä ns. kulkuai kavääritymä, joka johtuu siitä, että signaalin kulkuai ka on taajuudesta riippuvainen. Tällöin merkin siirrossa eritaajuiset komponentit tulevat perille eri aikoina ja merkit vääristyvät. Kulkuai kavääritymä voidaan korjata korjaimilla.

## Signaalikohinasuhde

Signaali siirron tärkeimpiä käsitteitä on signaalikohinasuhde  $S/N$ , joka määritellään

$$\frac{S}{N} \text{ (dB)} = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} = \text{(dB)}$$

$P_s$  = hyötysignaalin teho  
 $P_n$  = kohinan teho samassa kohdassa

Kohina häiritsee puheen ymmärrettävyyttä ja aiheuttaa virheitä datan siirrossa.

## Virhesuhde

Digitaalisen siirron hyvyttä mitataan bittivirhesuhteella, joka määritellään seuraavasti:

$$\text{Virhesuhde} = \frac{\text{Virheellisenä vastaanotettujen bittien määrä}}{\text{Lähetettyjen bittien kokonaismäärä}}$$

Virhesuhde mitataan tiettyä aikajaksoa kohti. Puheen ymmärrettävyydelle vaaditaan virhesuhteeksi  $\leq 10^{-3}$ .

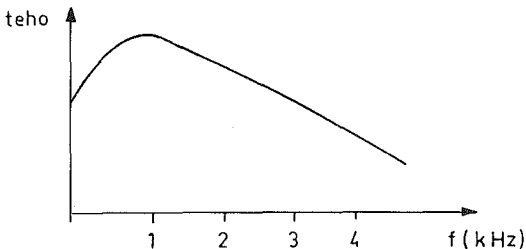
## Synkronointi

Synkronointi eli tahdistus on aikajakokanavoidun tiedonsiirron perusedellytys. Lähetyspäässä otetut näytteet on pystyttävä vastaanottopäässä jakamaan oikeille kanaville. Tahdistustieto voi sisäytyä läheteeseen tai sitten molemmissa päissä on täsmälleen samantaajuiset tahdistuskellot.

### 3.1.6 Puhekanavan käyttö signaalin siirrossa

Puhe siirrettävänä signaalina on ollut perinteisesti määräävässä asemassa viestivälineitä kehitettäessä. Tämän vuoksi muutkin signaalit on yleensä jouduttu sopeuttamaan puheensiirtoon tarkoitetuille kanaville.

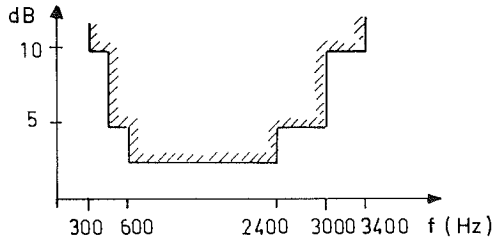
Ihmisen puheen tehotiheys keskittyy suhteellisen matalille taajuuksille.



Kuva 3.24 Puheen tehospektri

Pääosa puhetaajuuksista on alueella 100—6000 Hz, mutta tajuttavuuden kannalta riittää hyvin taajuusalueen 300—3400 kHz siirtäminen. Tämä onkin standardipuhekanavan kaista.

Viestinsirrossa vaimennus riippuu taajuudesta ja aiheuttaa vaimennusvääristymää. Tämän tulee olla määrättyissä rajoissa puhekaistalla.

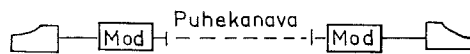


Kuva 3.25 Puhekanavan taajuuksilla sallittu vaimennusvääristymä

### 3.1.7 Datan siirto puhekanavassa

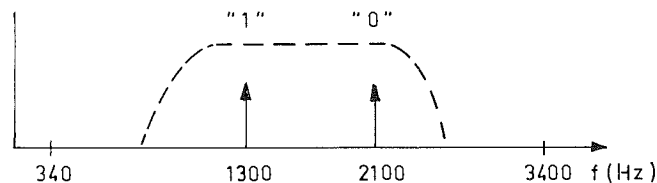
Puhekanavaa voidaan käyttää koodattujen signaalien (kaukokirjoitin, telefax, data jne.) siirtoon signaaliuuntajien eli modeemien avulla. Näissä voidaan käyttää seuraavia modulaatiomenetelmiä:

- amplitudimodulaatio (ASK)
- taajuusmodulaatio (FSK) ja
- vaihemodulaatio (PSK).



Kuva 3.26 Datan siirto puhekanavassa

Esimerkiksi 1200 bit/s modeemi lähettää bittijonon binäärisellä FSK-modulaatiolla käyttäen kahta taajuutta.



Kuva 3.27 Modeemin merkkitajuudet pääkanavassa

Datan siirtoa vaikeuttavat vaimennusvääristymä, kulkuai kavääristymä sekä erilaiset impulssihäiriöt ja katkokset.

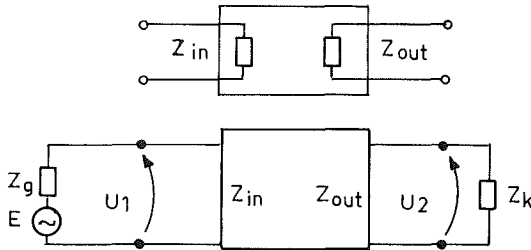
## 3.2 Siirtojohdot

### 3.2.1 Yleistä

Televerkoissa käytetään siirtojohtoina

- avojohtoja
- symmetrisiä kaapeleita
- koaksiaalikaapeleita ja
- optisia kaapeleita.

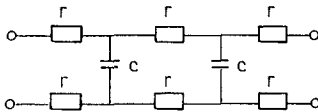
Siirtojohtoa voidaan tarkastella nelinapana, jota jännitelähde syöttää ja jonka toiseen päähän liitetään kuorma.



Kuva 3.28 Nelinapa

Lähete siirtyy kuormaan parhaiten, jos impedanssit  $Z_g$  ja  $Z_{in}$  keskenään sekä  $Z_{out}$  ja  $Z_k$  keskenään ovat samansuuruiset. Epäsovitukset aiheuttavat vaimennusta.

Parijohdolla voidaan katsoa olevan sijaiskytkentä, josta nähdään, että johtimien välillä on tietty kapasitanssi ja johtimilla resistanssi.



Kuva 3.29 Parijohdon sijaiskytkentä

### 3.2.2 Avojohto

Avojohto on eristämätön, eristimille asennettu siirtojohto.

Avojohtojen vaimennus on pieni, ylikuulumisvaara suuri ja lisäksi ne ovat häiriöalttiita. Mainittuja haittoja pienennetään vuorottelemalla johdot. Tällä tarkoitetaan parien tai nelikierteiden kiertämistä toistensa suhteen myötäpäivään tiettyjen vuorottelukaavojen mukaisesti.



Suurimmat siirrettävät taajuudet suurtaajuusvuorotelluilla avojohdoilla ovat 150 kHz.

### 3.2.3 Symmetriset kaapelit

Symmetriset kaapelit ovat parirakenteisia eristettyjä johtoja. Kaapeli voi sisältää runsaastikin pareja, jotka ovat järjestetyt samankeskeisiksi kerroksiksi tai lohkoiksi joko pareittain tai nelikierteittäin.

Kaapelien sähköiset ominaisuudet riippuvat taajuudesta. Puhetaajuusalueella on likimäärin

$$\text{impedanssi} \quad Z = 12600 \sqrt{\frac{R}{fC}} \quad (\Omega) \text{ ja}$$

$$\text{vaimennuskerroin} \quad \alpha \approx 4,86 * 10^{-4} \sqrt{RCf} \quad (\text{dB/km})$$

R	=	johtimen tasavirtaresistanssi	( $\Omega$ )
C	=	parikapasitanssi	(F)
f	=	taajuus	(Hz)
Z	=	ominaisimpedanssi	( $\Omega$ )
$\alpha$	=	vaimennuskerroin	(dB/km)

Kaapelin vaimennuksen ja vaimennusvääristymän pienentämiseksi voidaan käyttää pupinointia eli kytkeä johdolle induktanssia lisääviä keloja määrävällein kumoamaan kapasitanssia.

$$\text{Pupinikaapelin impedanssi} \quad Z \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\Omega)$$

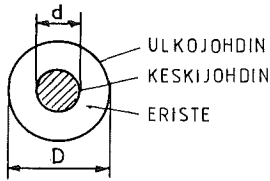
$$\text{Pupinikaapelin vaimennuskerroin} \quad \alpha \approx 4,34 R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (\text{dB/km})$$

$$\text{Tällöin siirtojärjestelmän raja-} \\ \text{taajuus on} \quad f_r \approx \frac{27}{R} \approx \frac{1}{\pi \sqrt{LC}} \text{ Hz}$$

On huomattava, että pupinoinnin yhteydessä käytetään myös tavallisesti johdotuuntajia.

### 3.2.4 Koaksiaalikaapelit

Koaksiaalikaapeli muodostuu keskijohtimesta ja sen ympärillä olevasta putkimaisesta ulkojohtimesta, joiden välillä on eristys.



NORMAALI KOAKSIAALIKAAPELIN  
 VAIMENNUSKERROIN  $\propto \approx 2,4\sqrt{f}$  (dB/km) JA  
 PIENKOAKSIAALILLA  $\propto \approx 5,3\sqrt{f}$  (dB/km)  
 TAAJUUS f MEGAHERZEINÄ

Kuva 3.30 Koaksiaalikaapelin rakenne

Koaksiaalijohdon impedanssi Z riippuu rakenteesta

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} (\Omega),$$

jossa  $\epsilon_r$  = eristeen suhteellinen dielektrisyys.

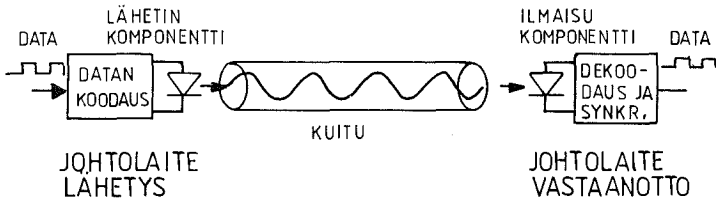
Koaksiaalikaapeli on suhteellisen tunteeton häiriöille.

### 3.2.5 Optiset kaapelit

Optisten kuitujen käyttö on valtaamassa alaa tiedonsiirtotekniikassa. Niiden tarjoamat edut ovat

- tunteettomuus ulkoisille häiriöille
- pieni vaimennus, joka mahdollistaa pitkät yhteydet ilman välivahvistimia
- laajakaistaisen siirron mahdollisuus sekä
- pieni koko ja keveys.

Optiseen kuituun perustuva tiedonsiirtoyhteys vaatii kuvan 3.30 esittämän järjestelyn.



Kuva 3.31 Optinen tiedonsiirtoyhteys

Optisessa tiedonsiirtoyhteydessä lähetettävä data koodataan johtolaitteessa erityisellä johtokoodilla, jolla rikotaan pitkät nolli- ja ykkösjaksot. Uudelleen koodatulla datalla ohjataan lähetinkomponenttia pulssimaisesti. Lähetinkomponentti on joko valoa säteilevä diodi (LED) tai puolijohdelaser. Kuituun syö-

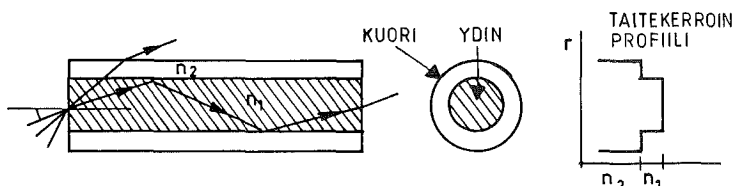
tetty valopulssi etenee kuidussa kokonaisheijastukseen perustuen. Kuitu on kvartsilasia, johon on lisätty seosaineita taitekertoimen muuttamiseksi. Ilmaisinkomponentti muuttaa valopulssit virtapulseiksi. Ilmaisinkomponentti on joko PIN- tai APD-diodi, joista jälkimmäinen on herkempi reagoimaan valoon. Vastaanotin tahdistuu ilmaistuihin pulsseihin, jotka muokataan alkuperäistä vastaaviksi databiteiksi.

Valo, jota kuidussa siirretään, on aallonpituudeltaan 0,85 tai 1,3 mikrometriä. Tekniikka on siirtymässä suurempiin aallonpituuksiin kuten 1,6 mikrometriin. Näkyvän valon aallonpituusalue on 0,45 – 0,65 mikrometriä.

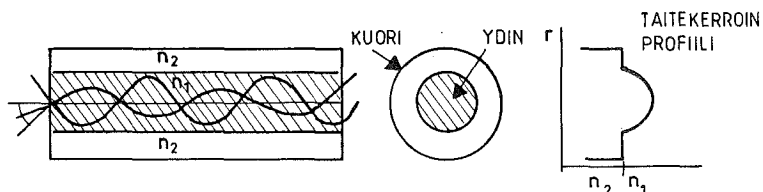
Kuitujen rakenteita on kehitetty nopeassa tahdissa ja kehitetään edelleen. Perustyytit kehitysjärjestyksessä ovat:

- askelkuitu eli askeltaitekertoiminen kuitu (SI = step index)
- gradienttikuitu eli asteittaistaitekertoiminen kuitu (GI = graded index) ja
- yksimuotokuitu (SM = single mode).

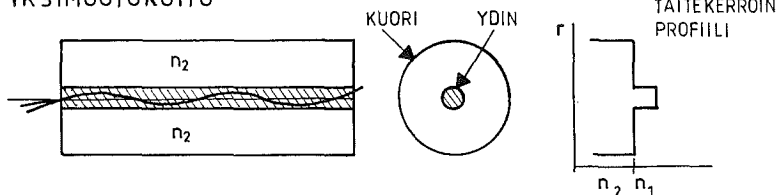
#### ASKELKUITU ELI ASKELTAITEKERTOIMINEN KUITU



#### GRADIENTTIKUITU ELI ASTEITTAISTAITEKERTOIMINEN KUITU



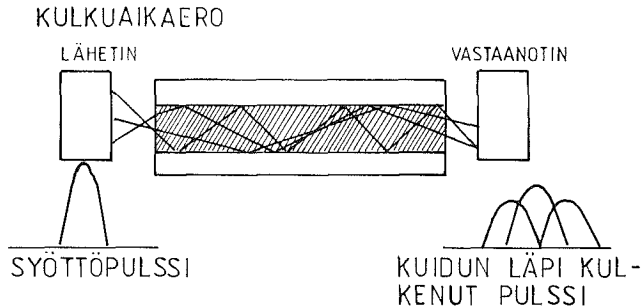
#### YKSIMUOTOKUITU



Kuva 3.32 Valon kulku eri kuiturakenteissa

Kuidun kokonaisläpimitta on 125 mikrometriä ja ytimen halkaisija on askel- ja gradienttikuidulla 50 mikrometriä ja yksimuotokuidulla 10 mikrometriä.

Kuitujen rakenteen kehityksessä on pyritty yhä suurempaan pulssitiheyteen. Tätä on rajoittanut erityisesti se, että kuidussa etenee sama valopulssi useita reittejä, josta syystä se saapuu vastaanottiin leventyneenä. Gradienttikuidussa pulssin levenemistä rajoitetaan sillä, että ytimen taitekerroin muuttuu keskeltä reunoihin päin. Eri säteiden kulkuaikeeroja on saatu pienennetyksi, koska säteet, jotka kulkevat pidemmän matkan ytimen reunoja pitkin, saavat reuna-alueilla suuremman nopeuden.



Kuva 3.33 Kulkuaikeeron vaikutus vastaanotettuun pulssiin

Yksimuotokuidun rakenteessa on pyritty estämään eri etenemisreitien muodostumista kaventamalla ydinalue niin pieneksi, ettei siinä pääse etenemään kuin yksi säde. Tämä periaate yhdistettynä suurempaan valon aallonpituuteen aiheuttaa sen, että yksimuotokuidussa pystytään siirtämään hyvin suuria datanopeuksia.

Kuidun vaimennus koostuu materiaalivaimennuksesta ja mekaanisesta vaimennuksesta. Materiaalivaimennus koostuu kuidun materiaalin, kvartsilasin ja taitekertoimen muuttamiseen käytettyjen seosaineiden aiheuttamasta vaimennuksesta. Tyypillinen gradienttikuidun vaimennus on 3 db/km aallonpituudella 0,85 mikrometriä ja 1 db/km aallonpituudella 1,3 mikrometriä. Yksimuotokuidulla päästään aallonpituudella 1,6 mikrometriä 0,3 db:iin kilometriä kohti.

Mekaanisista syistä johtuva vaimennus koostuu kuidun mikrotaipumista ja mutkista. Jo valmistusvaiheessa kuituun jää mikrotaipeita jotka lisäävät vaimennusta. Kuidun taivuttelu aiheuttaa mikrohalkeamia, jotka ajan myötä syvenevät. Ilmiötä kutsutaan kuidun vanhenemiseksi. Mikrohalkeamat lisäävät kuidun vaimennusta. Kuitua ei saa taivuttaa halkaisijaltaan alle 50 mm:n silmukalle.

Kaapelirakenteita varten kuidut päällystetään useimmiten pehmeällä puskurikerroksella, esimerkiksi silikonilla, ja tämän päällä olevalle kovalla putkella. Tästä suojauksesta käytetään nimitystä toisiosuojaus. Toisiosuojattuja kuituja sijoitetaan eri käyttötarkoituksiin rakennettuihin kaapeleihin yleensä useam-

pia. Kaapelit voivat olla ilma-, kanava-, maa- tai merikaapeleita. Kaapeleissa on yleensä metallia suojaamassa kuituja vetorasitukselta, mutta on rakennettu myös metallittomia kaapeleita erikoistarkoituksiin.

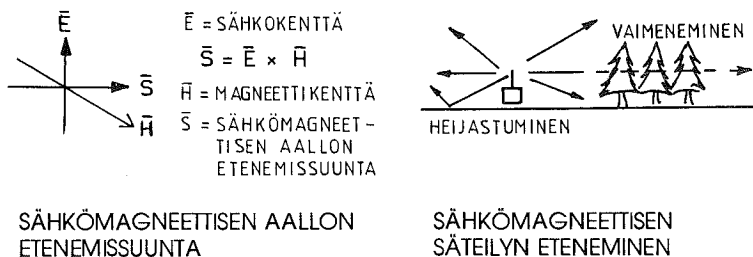
Valokaapeleiden jatkaminen on huomattavasti hankalampaa kuin metallikaapeleiden. Ongelmana on lähinnä hiuksen vahvuisten kuitujen kohdistaminen toisiinsa. Jatkamisen menetelminä käytetään hitsausta ja liimausta. Hitsausmenetelmässä kuitujen päät sulatetaan yhteen. Liimauksessa taas käytetään liimaa, jonka optiset- ja lämpötilaominaisuudet ovat lähellä kuidun vastaavia ominaisuuksia. Hitsausliitoksen vaimennus on alle 0,3 db ja liimausliitoksen hieman suurempi. Joissakin tapauksissa voidaan käyttää liitoksen tekemiseen erikoista pikaliitintä. Tällöin vaimennus on huomattavasti edellisiä suurempi ollen vähintään desibelin luokkaa.

### 3.3 Sähkömagneettinen aaltoliike

#### 3.3.1 Yleistä

Sähkömagneettinen aalto voidaan jakaa toisiaan vastaan kohtisuorassa olevaan sähkö- ja magneettikenttään. Aallon etenemissuunta on kohtisuorassa näiden kenttien muodostamaa tasoa vasten. Aalto etenee vapaassa tilassa valon nopeudella, joka on 300 000 km/s.

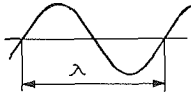
Sähkömagneettisen aallon etenemistä kutsutaan säteilyksi. Säteily etenee lähes suoraviivaisesti eikä tarvitse väliainetta. Säteilyn tiellä olevat esteet aiheuttavat heijastumista ja vaimennusta. Esteen ollessa johtavaa materiaalia säteily muuttaa suuntaansa eli heijastuu.



Kuva 3.34 Sähkömagneettinen aalto

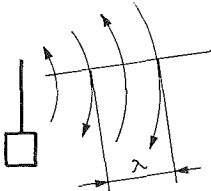
### 3.3.2 Aallonpituus

Lähettimen synnyttämä sähkömagneettinen säteily värähtelee sille ominaisen taajuuden tahdissa. Taajuus ilmoittaa, kuinka monta jaksoa lähtee sekunnin aikana. Yhden värähtelyjakson aikana säteily etenee aallonpituuden  $\lambda$  suuruisen matkan. Aallonpituudella, taajuudella ja etenemisnopeudella on seuraava yhteys:



$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$\lambda$  = aallonpituus  
 $f$  = taajuus  
 $c$  = etenemisnopeus



Taajuuden tunteminen on tärkeää mm. silloin, kun vastaanotin viritetään vastaanotettavan lähteen taajuudelle. Aallonpituutta tarvitaan esim. mitoitettaessa dipoliantennia.

Kuva 3.35 Aallonpituus

Esimerkki: Kun lähteen taajuus on 2 MHz, aallonpituus on

$$\lambda = \frac{300 * 10^6 \text{ m/s}}{2 * 10^6 \text{ 1/s}} = 150 \text{ m}$$

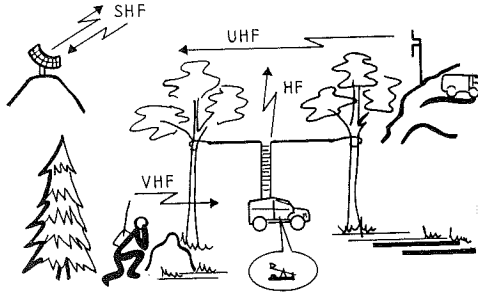
Mikäli taajuus olisi ollut 200 MHz, aallonpituudeksi olisi tullut 1,5 m.

### 3.3.3 Taajuusalueet

Radioaallot ovat osa sähkömagneettisen säteilyn alueesta, spektristä. Sähkömagneettiseen spektriin kuuluvat mm. röntgen-säteily ( $\lambda \approx 0,1 \text{ nm}$ ), näkyvä valo (esim. punainen  $\lambda \approx 610 \text{ nm}$ ) ja infrapuna- eli lämpösäteily ( $\lambda \approx 10 \mu\text{m}$ ).

taajuus	aallonpituus	lyhenne	sotilaskäyttö
3 kHz...30kHz	100 km...10 km	VLF	vedenalaiset yhteydet
30 kHz...300 kHz	10 km...1 km	LF	radioyhteydet
300 kHz...3 MHz	1 km...100 m	MF	pitkät radioyhteydet
3 MHz...30 MHz	100 m...10 m	HF	"
30 MHz...300 MHz	10 m...1 m	VHF	komentoradioyhteydet
300 MHz...3 GHz	1 m...10 cm	UHF	linkkiyhteydet
3 GHz...30 GHz	10 cm...1 cm	SHF	tutka- ja linkkiyhteydet
30 GHz...300 GHz	1 cm...1 mm	EHF	"

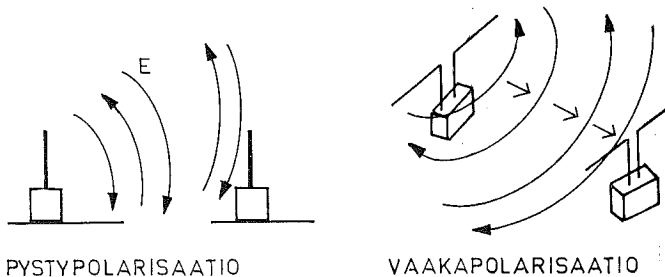
Kuva 3.36 Sähkömagneettinen spektri



Kuva 3.37 Viestivälineet eri taajuusalueilla

### 3.3.4 Polarisaatio

Sähkömagneettisen säteilyn sähkökentän (E) suunta määrää polarisaatiotasoa. Jos lähetinantenni on rakennettu siten, että sähkökenttä muodostuu kohtisuoraan maan pintaa vasten, niin kyseessä on pysty- eli vertikaalipolarisaatio. Ylimääräisen vaimennuksen välttämiseksi myös vastaanottoantenni on rakennettava samaan polarisaatiotasoon. Sähkökentän suunnan ollessa maanpinnan suuntainen on kyseessä vaaka- eli horisontaalipolarisaatio.



Kuva 3.38 Polarisaatiotasot

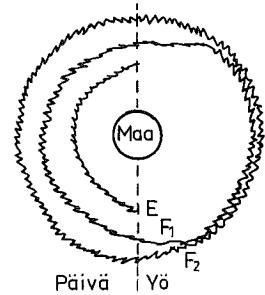
Polarisaatio voi olla edellä esitetyistä poikkeava, esim. kiertopolarisaatio. Tämä vaatii oman antennityypinsä, jollaisia käytetään mm. eräissä kenttälinkeissä.

### 3.3.5 Radioaaltojen eteneminen

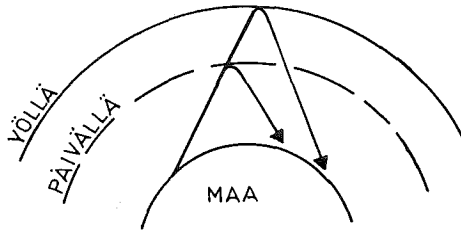
Sähkömagneettinen aalto voi edetä kolmella eri tavalla: avaruusaaltona, pinta-aaltona tai suoraan etenevänä aaltona. Etenemistapa riippuu käytetystä taajuusalueesta.

### Avaruusaalto

Sähkömagneettisen aallon kohdatessa johtavan pinnan se muuttaa etenemissuuntaansa eli heijastuu. Maapalloa ympäröi ilmakehä, jota auringon säteily ionisoi. Tällöin syntyy ionisoituneita kerroksia. Ne toimivat johtavina pintoina, joista aallot voivat heijastua takaisin maapallolle. Heijastuminen tapahtuu helpommin, kun kerrosten "johtavuus" on hyvä. Yöllä, kun aurinko ei enää ionisoi, kerrosten johtavuus heikkenee ja päivällä toimineet radioyhteydet katkeavat. Lyhyiden yhteyksien (< 200 km) saaminen yöllä on vaikeampaa kuin pitkien.



Kuva 3.39 Ionisoituneet kerrokset



Kuva 3.40 Heijastuminen eri vuorokauden aikoina

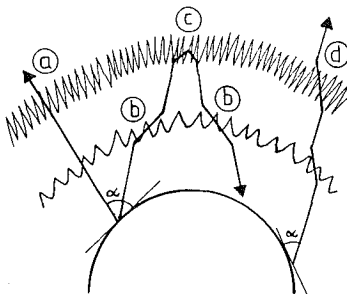
Kerrosten johtavuus riippuu

- vuorokauden ajasta
- vuodenajasta ja
- auringon säteilyn voimakkuudesta (auringonpilkut).

Heijastumiseen vaikuttavat

- kerrosten ionisoitumisaste ("johtavuus")
- lähetystaajuus ja
- lähetyskulma (antennin rakenne).

Avaruusaalto ei aina heijastu takaisin maapallolle, vaan se voi läpäistä johtavan kerroksen.



- a) ei heijastumista, koska lähetyskulma ( $\alpha$ ) on liian suuri
- b) ei heijastumista, koska kerroksen johtavuus on heikko
- c) heijastuminen, koska kerroksen johtavuus on voimakas
- d) ei heijastumista, koska lähetystaajuus on liian suuri

Kuva 3.41 Heijastumiseen vaikuttavat tekijät



Lähinnä maata 50–90 km:n korkeudessa on D-kerros. Se on heikosti ionisoitunut ja häviää nopeasti auringon laskun jälkeen. Siitä heijastuvat matalat taajuudet (n. 200 kHz) ja sillä ei ole käyttöä HF-alueella.

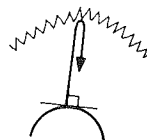
E-kerroksen korkeus maasta on n. 110 km. Se on voimakkaimmillaan keskipäivällä ja heikkenee yöksi. HF-alueen matalimmat taajuudet heijastuvat siitä takaisin. HF-taajuuksien kannalta tärkeä kerros on F-kerros, joka sijaitsee 200–800 km:n etäisyydellä maasta. F-kerros on jakautunut päivällä F1- ja F2-kerroksiksi.

## MUF (maximum usable frequency)

MUF tarkoittaa korkeinta takaisinheijastuvaa taajuutta. MUF-taajuus ilmoitetaan tietyille yhteysetäisyydelle.

## Kriittinen taajuus

Kriittiseksi taajuudeksi kutsutaan suurinta taajuutta, joka heijastuu kohtisuoraan takaisin. Se on MUF:n erikoistapaus (yhteysetäisyys = 0).



Kuva 3.42 Kriittinen taajuus

## Sporadinen E-kerros

Avaruusaalto saattaa joskus heijastua takaisin, vaikka sen ei pitäisi ennusteiden mukaan heijastua. Ilmiön kesto vaihtelee muutamasta minuutista muutama tuntiin. Satunnaisesti esiintyvää kerrosta kutsutaan sporadisiksi E-kerrokseksi.

## Pinta-aalto

Sähkömagneettinen aalto etenee johteen pinnalla hyvin. Maa ei ole varsinaisen johde, mutta aalto etenee helpommin jos

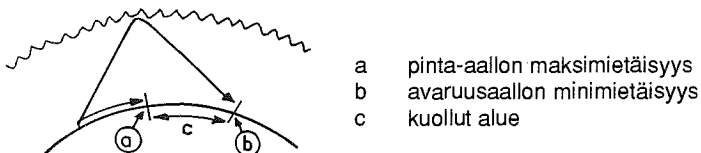
- maan johtavuus on hyvä (kosteaa maaperä, meri) ja
- taajuus on matala (HF-alue).

Pinta-aalto on käyttökelpoinen lyhyillä yhteysetäisyyksillä (< 30 km).

## Kuollut alue

Pinta-aallon kantaman ja ensimmäisen ionosfäriheijastuksen väliin voi jäädä alue, johon ei saada yhteyttä. Tätä aluetta kutsutaan kuolleeksi alueeksi. Se

syntyy yleensä 30–100 km:n etäisyydelle lähettimestä. Alue on suurempi HF-alueen yläpäässä.

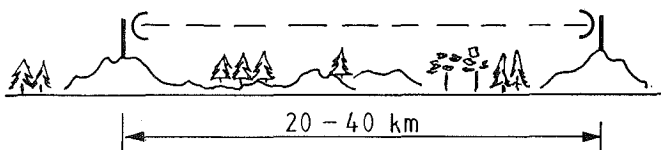


Kuva 3.43 Kuollut alue

### Suoraan etenevä aalto

VHF-alueella taajuudet ovat niin suuria, etteivät ne enää heijastu avaruudesta ja pinta-aaltonakin ne vaimenevat lyhyellä matkalla.

VHF-alueesta lähtien radioaallot etenevät suoraviivaisesti kuten valo. Etene- mistä haittaavat maastoesteet ja maanpinnan kaarevuus. Siksi antennit pyri- tään rakentamaan korkealle. Rakentamista helpottavat lyhyistä aallonpituuk- sista aiheutuvat antennien pienet koot. Linkkikalustolla toimittaessa (UHF- alue) antennit saadaan asennetuksi korkealle mastoihin. Tällöin pienillä tehoilla saadaan 20–40 km:n yhteyksiä.



Kuva 3.44 Linkkiyhteys

Kenttäradiokalustolla (VHF-alue) kantamat jäävät samoilla tehoilla lyhyem- miksi (5–20 km) siksi, että antennija ei saada tarpeeksi korkealle. Tällöin on käytettävä maaston korkeita kohtia hyödyksi ja mahdollisuuksien mukaan tur- vauduttava erilaisiin antenniratkaisuihin (pitkälanka-, maataso- ja dipolian- tenni).

### Heijastuminen

Radioaalto voi saapua vastaanottoantenniiin eri teitä. Kun suoraan lähetti- mestä saapunut aalto ja maastosta heijastunut aalto saapuvat antenniin, ne summautuvat siinä. Jos aalloilla on vastakkaiset vaiheet, ne heikentävät toisi- aan ja yhteyden laatu heikkenee tai katkeaa. Radioita siirtämällä eri suunnista tulevien aaltojen keskinäinen vaihe-ero muuttuu vaikuttaen yhteyden laatuun. Sama ilmiö esiintyy myös HF-alueella, kun avaruusaalto ja pinta-aalto sum- mautuvat samassa antennissa.

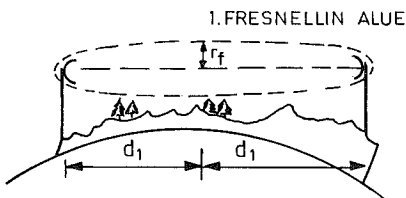


Kuva 3.45 Eri teitä antenniin saapuvat aallot

### Fresnellin alue

UHF-alueella aallonpituudet ovat niin lyhyitä (1–0,1 m), ettei pelkkä näköyhteys lähetyks- ja vastaanottoantennien välillä riitä, vaan antennit on rakennettava korkeammalle. Antennien on oltava niin korkealla, että ns. ensimmäinen Fresnellin alue jää vapaaksi. Tällöin eivät heijastuneet ja taittuneet aallot aiheuta ylimääräistä vaimentumista suoraan etenevälle aallolle. Alue laajenee yhteysvälin ja aallonpituuden kasvaessa.

UHF-alueella toimii linkkikalusto. Yhteysvälejä suunniteltaessa käytetään apuna maastoprofiilia.



Fresnellin ensimmäisen alueen säde saadaan kaavasta:

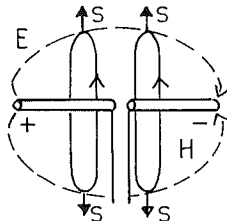
$$r_f = \sqrt{\frac{\lambda * d_1 * d_2}{d_1 + d_2}} \text{ [m]}$$

Kuva 3.46 Fresnellin alue

## 3.4 Antennit

### 3.4.1 Sähkömagneettisen säteilyn synty antennissa

Sähkömagneettisen säteilyn sähkökenttä syntyy säteilijän päiden välille ja magneettikenttä säteilijän ympärille. Sähkökenttä ja magneettikenttä vaihtavat suuntaa lähettimen syöttämän tehon taajuudella ja antennista säteilee sähkömagneettisia aaltoja.



E = sähkökenttä  
H = magneettikenttä  
S = sähkömagneettisen aallon etene-  
missuunta

Kuva 3.47 Sähkö- ja magneettikenttä dipolissa

Jotta mahdollisimman suuri osa lähetimen syöttämästä tehosta saataisiin lähemmään antennista, täytyy säteilijän sähköisen pituuden olla oikea. Sähköinen pituus poikkeaa mekaanisesta pituudesta, koska aallon etenemisnopeus vapaassa tilassa on suurempi kuin säteilijässä. Esimerkiksi puolialttopolin sähköinen pituus  $l = \lambda/2$ , kun taas mekaaninen pituus on

$$l = k \frac{\lambda}{2}$$

Lyhennyskerroin  $k$  korjaa etenemisnopeudesta johtuvan eron. Tavallisesti  $k = 0,90 \dots 0,99$  riippuen aallonpituuden ja säteilijän paksuuden suhteesta. Jos säteilijä olisi valmistettu äärettömän ohuesta materiaalista, lyhennyskerroin olisi 1.

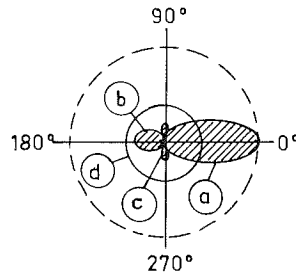
### 3.4.2 Antennien ominaisuuksia

Eri antennityyppien ominaisuudet poikkeavat toisistaan. Valittaessa antennia on tiedettävä sen edut ja haitat. Vastaanotto- ja lähetyksiantennien ominaisuuksilla ei ole eroa, jos ne ovat rakenteeltaan ja rakentamistavaltaan samanlaiset. Niiden toiminta vain on käänteinen.

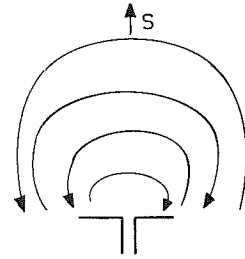
#### Säteilykuvio

Säteilykuvioista selviää, mihin suuntaan antenni säteilee parhaiten. Säteililykuvion tunteminen on välttämätöntä, kun halutaan yhteys vain tiettyyn suuntaan.

- a pääkeila
- b takakeila
- c sivukeilat
- d isotrooppisen antennin säteilykuvio



Kuva 3.49 Suunta-antennin säteilykuvio.



Kuva 3.48 Sähkömagneettisten aaltojen säteily antennista.

#### Vahvistus

Antennin vahvistusta verrataan teoreettiseen, pistemäiseen, ympärisäteilyvään ns. isotrooppiseen antenniin. Vahvistus ilmoitetaan desibeleinä. Esimerkiksi 3 dBi tarkoittaa, että antennin vahvistus on 3 dB isotrooppista anten-

nia parempi. Myös dipolin vahvistus voi olla vertailuarvona. Tällöin vahvistuksen yksikkönä on dB.

$$g = 10 \lg \frac{P}{P_i} \text{ (dB)}$$

$P$  = antennin säteilyteho vertailupisteessä  
 $P_i$  = isotrooppisen antennin säteilyteho vertailupisteessä

### Kaistaleveys

Kaistaleveys ilmoittaa sen taajuusalueen, jolla antenni toimii hyvin. Tavanomaisilla antenneilla ( $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ , dipoli...) kaistaleveys on kapea. Vaihdettaessa taajuutta antenni täytyy viritellä. Laajakaista-antenneilla (pitkälanka, logaritminen) viritystä ei tarvitse tehdä.

### Impedanssi

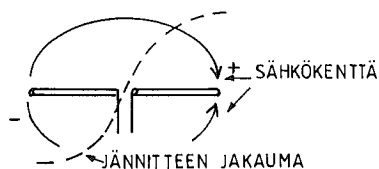
Antennin impedanssi riippuu sen tyypistä ja rakenteesta. Jotta lähettimestä saatavasta tehosta siirtyisi mahdollisimman suuri osa antenniin, täytyy lähtetimen ja antennin impedanssin olla yhtäsuuret. Dipolin impedanssi on n. 73  $\Omega$  resonanssitaajuudella. Pitkälanka-antennin impedanssi ei riipu taajuudesta, vaan se on n. 400  $\Omega$  koko alueellaan.

#### 3.4.3 Tavallisimmat antennityypit

### Puoliaaltodipoli

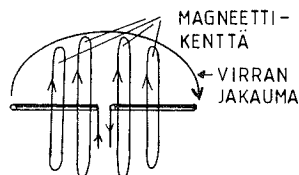
Puoliaaltodipolia voidaan pitää perusantennina. Sen toiminnan ymmärtäminen helpottaa käsittämään muiden antennityyppien säteilyperiaatteet.

Säteilijä on muodostunut kahdesta johdesauvasta tai johtimesta, joiden yhteinen pituus on noin  $\lambda/2$ . Säteilijän päiden välille syntyy sähkökenttä, sillä päiden välillä vaikuttavat vastakkaismerkkiset jännitteet.



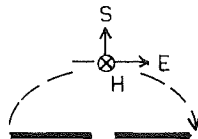
Kuva 3.50 Dipolin sähkökenttä

Magneettikentän saa aikaan säteilijässä kulkeva virta, joka on säteilijän syöttöpisteessä suurimmillaan.



Kuva 3.51 Dipolin magneettikenttä

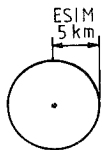
Kun sähkö- ja magneettikenttä ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan, aalto etenee kohtisuoraan edellisten muodostamasta tasosta.



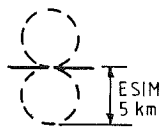
E = sähkökenttä  
S = etenemissuunta  
H = magneettikenttä (kohtisuoraan linjaa vasten)

Kuva 3.52 Sähkömagneettinen kenttä.

Johtimen suuntaan ei aalto etene, sillä siihen suuntaan osakentillä ei ole yhteisvaikutusta. Puoliaaltodipolin säteilykuvio voidaan hahmotella eri suunnista katsottuna. Puoliaaltodipolin vahvistus on 2,15 dBi.



Säteilijän päästä katsottuna



Leikkauskuvio ylhäältä

Kuvio 3.53 Puoliaaltodipolin säteilykuvio

Puoliaaltodipolia käytetään yleisimmin VHF- ja HF-alueilla. HF-alueen alapään aallonpituudet ovat niin suuria, että säteilijän pituus vaikeuttaa antennin rakentamista.

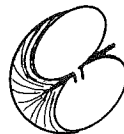
Puoliaaltodipolin pituus, kun  $f = 60$  MHz, lasketaan seuraavasti:



$$l = \frac{k * c}{2 * f} = \frac{0,95 * 300 * 10^6 \text{ m/s}}{2 * 60 * 10^6 \text{ Hz}} = 2,375 \text{ m}$$

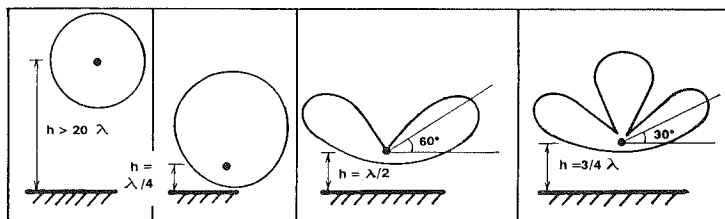
Vastaavasti taajuuksilla 6 MHz saadaan antennin pituudeksi 23,75 m ja taajuudella 2 MHz 71,25 m.

Vaakadipoli rakennetaan maanpinnan suuntaisesti. Antenni lähettää ja vastaanottaa vaakapolarisoituja aaltoja. Vaakadipolilla on suuntavaikutus. Se säteilee voimakkaimmin kohtisuoraan säteilijää vastaan. Säteilyn vastaanotto- ja lähetykulmaan voidaan vaikut-



Kuva 3.54 Vaakadipolin säteileminen

taa rakentamiskorkeudella. Maan pinta toimii heijastajana. Kun dipolista lähtevä ja maasta heijastuva aalto summautuvat ympäristössä, syntyy suuntia, joihin säteilyä ei tapahdu.



Kuva 3.55 Eri korkeuksille rakennetun dipolin säteily pystytasossa

Pystydipoli rakennetaan kohtisuoraan maanpintaa vastaan. Antenni on pystypolarisoiva ja ympärisäteilevä eikä se säteile kohtisuoraan ylös.



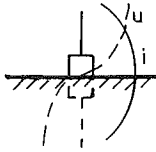
Kuva 3.56 Pystydipolin säteileminen

### Neljännesaaltoantenni

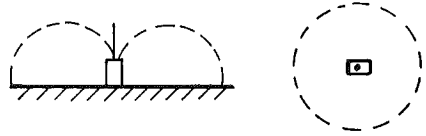
Kannettavissa kenttäradioissa käytettävää  $\lambda/4$ -antennia kutsutaan marssiantenniksi. Marssiantenni on lyhyt ja siksi se sopii kannettavan radion antenniksi. Sen sähköinen pituus on neljännes aallonpituudesta. Taajuutta muutettaessa antennin sähköistä pituutta on muutettava. Tämä tapahtuu radion sisällä rakennetun antennin virityspiirin avulla.

Jotta marssiantenni pystyisi säteilemään mahdollisimman hyvin, se tarvitsee maatasoa. Maa muodostaa ns. peilipinnan, jonka vaikutuksesta jännite ja virta jakaantuvat kuten dipolissakin. Maan johtavuus vaikuttaa säteilyn suuntaan.

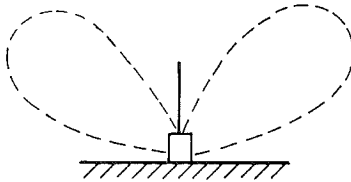
Huono johtavuus aiheuttaa säteilyn suuntautumista enemmän ylöspäin. Kei-notekoisenä maana käytetään vastapainoa. Tällöin radion runkoon on liitetty yksi tai useampia johtimia. Vastapainon tulee sijaita antennin juuressa. Jos antenni rakennetaan korkealle, niin vastapainokin on rakennettava korkealle. Antennia kutsutaan tällöin maatasoantenniksi.



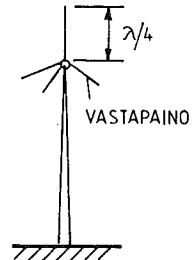
JÄNNITTEEN JA  
VIRRRAN JAKAUTUMINEN  
MARSSIANTENNISSA



MARSSIANTENNIN SÄTEILY  
VAAKA- JA PYSTYTASOSSA



HUONO MAAN JOHTAVUUS  
SUUNTAÄ SÄTEILYÄ  
YLÖSPÄIN

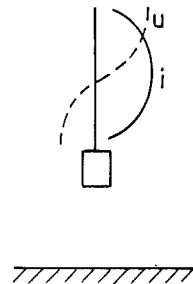


MAATASOANTENNI

Kuva 3.57 Neljännesaaltoantenni

### Puoliaalto-antenni

Puolen aallon mittaista säteilijää kutsutaan kenttäradioissa normaalian-tenniksi. Se on ympärisäteilevä vaakatasossa kuten marssiantennikin. Sen pituuden vuoksi sitä ei voida käyttää liikkeellä oltaessa. Normaalian-tenni ei tarvitse maatasoa ja siksi se voidaan rakentaa korkealle, jolloin saadaan pitempiä yhteyksiä. Impedanssi on suurempi kuin marssiantennilla, joten niitä ei voida vaihtaa keskenään ilman virittämistä.

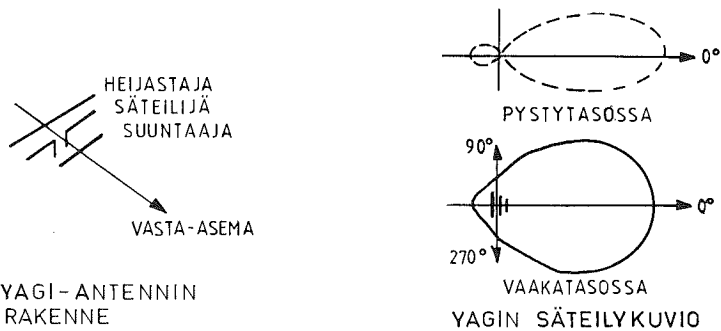


Kuva 3.58 Jännitteen ja virran  
jakautuminen normaalian-  
tennissa



## Yagi-antenni

Yagi-antennilla on voimakas suuntavaikutus. Säteilijänä toimii dipoli, jonka kummallekin puolelle on asennettu metallisauvat. Pitempi sauva on heijastaja ja lyhyempi suuntaaja. Pääsäteilysuunta on suuntaajan suuntaan. Antennin ominaisuudet riippuvat suuntaajan ja heijastajan mitoista ja niiden sijainnista säteilijän suhteen. Suuntaajien lukumäärää lisättäessä suuntavaikutus voimistuu, keila kapenee ja vahvistus kasvaa. Yagi-antennia käytetään VHF- ja UHF-alueilla.



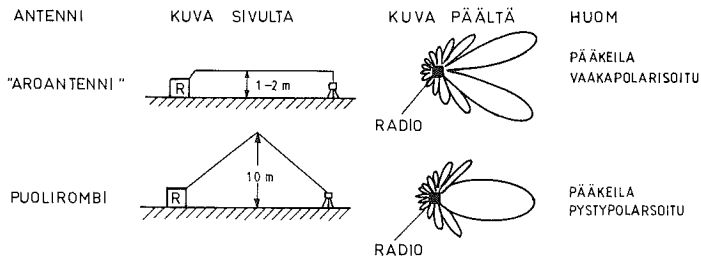
Kuva 3.59 Yagi-antenni

## Pitkälanka-antenni

Pitkälanka-antenni on laajakaistainen antenni. Säteilijänä toimii pitkä johdin, jonka toisessa päässä on vastus. Vastuksen tehtävänä on poistaa takakeilat. Johtimen pituudella ei ole merkitystä, kunhan se vain on useita aallonpituuksia.

Pitkälanka-antennin ominaisuuksia ovat

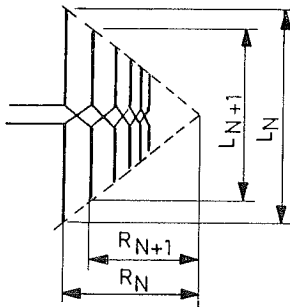
- voimakas suuntavaikutus
- suurehko vahvistus (n. 8 dB)
- laajakaistaisuus sekä
- keveys ja yksinkertaisuus.



Kuva 3.60 Pitkälanka-antenni

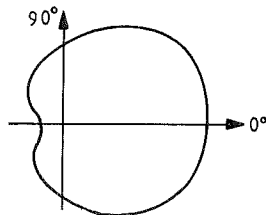
## Logaritminen antenni

Logaritminen antenni on laajakaistainen. Se on rakennettu eripituisista dipolielementeistä. Peräkkäisten elementtien syötöillä on  $180^\circ$  vaihe-ero. Kulloinkin toimiva säteilijäelementti riippuu taajuudesta. Pidemmät elementit toimivat heijastajina ja lyhyemmät suuntaajina. Kaistaleveyden määrää pisin ja lyhyin elementti. Logaritmista antennia käytetään yleensä VHF-alueella. Sen vahvistus on 6...8 dB.

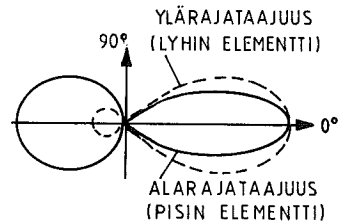


$$\frac{R_{N+1}}{R_N} = \frac{L_{N+1}}{L_N}$$

LOGARITMISEN ANTENNIN RAKENNE



ANTENNI VAAKATASOSSA



ANTENNI PYSTYTASOSSA

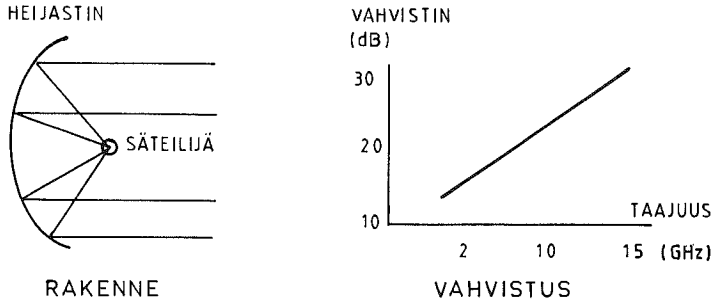
LOGARITMISEN ANTENNIN SÄTEILYKUVIO

Kuva 3.61 Logaritminen antenni

## Paraboloidiantenni

Paraboloidiantenni on säteilijän ja heijastimen yhdistelmä. Heijastimena toimii pyörähdysparaboloidei. Polttopisteessä olevasta säteilijästä lähtevät säteet kulkevat heijastuttuaan samansuuntaisesti ja samassa vaiheessa. Säteilijänä voidaan käyttää dipolia, torviantennia tai apuheijastinta (Cassegrain-syöttö).

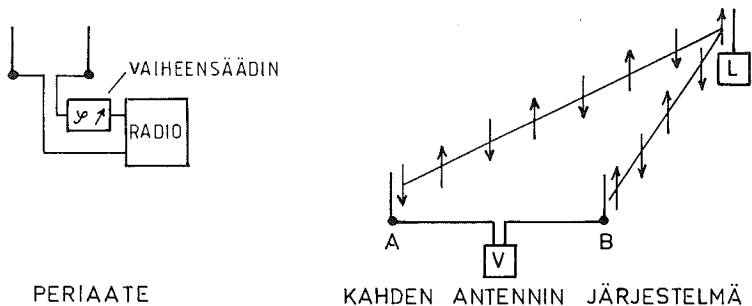
Pintasäteilijän sieppauspinta on teoriassa sama kuin sen geometrinen pinta-ala, mutta käytännössä vain noin 50 % siitä. Paraboloidiantennin suuntaavuus riippuu sen heijastimen halkaisijasta ja käytetystä aallonpituudesta. Se on mikroaaltotekniikassa eniten käytetty antenni.



Kuva 3.62 Paraboloidiantenni

### Sähköisesti suunnattavat antennit

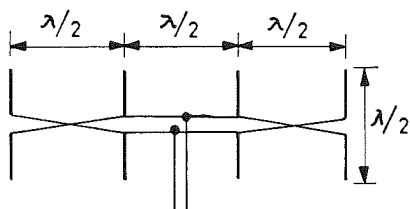
Jos vastaanotimessa on kaksi antenia ja ne sijaitsevat eri etäisyydellä lähettimestä, niihin saapuu aalto eri aikaan. Antennisignaaleilla on vaihe-ero. Vastaanotimessa antennisignaalit summataan. Jos antennisignaalit ovat yhtä suuret, mutta vastakkaisvaiheiset, ne kumoavat toisensa. Suuntaamalla antennisignaalit samanvaiheisiksi ja ne vahvistavat summautuessaan toisiinsa. Antenniyhdistelmällä on suuntavaikutus, joka riippuu antennien välisestä etäisyyksistä. Suuntavaikutukseen voidaan vaikuttaa myös sähköisesti. Antennisignaalien välinen vaihe-ero saadaan aikaan erillisillä vaiheensäätimillä. Antennit voidaan rakentaa hyvälle paikalle ja suunnata vaiheensäätimellä. Järjestelmä toimii myös lähetinantennina. Useista yksittäisantenneista ja vaiheensäätimistä voidaan rakentaa suuria sähköisesti suunnattavia antennijärjestelmiä.



Kuva 3.63 Sähköisesti suunnattava antenni

## Dipoliryhmä

Kytkemällä useita dipoleita ryhmäksi saadaan yhteisvaikutuksena antenni, jonka vahvistus on suuri. Antennin suuntavaikutus riippuu tällöin yksittäisten dipoleiden keskinäisestä asennosta toisiinsa nähden ja niiden välisistä vaiheeroista. Suuntavaikutusta voidaan lisätä ryhmän taakse asennettavalla heijastimella.



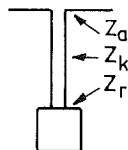
Kuva 3.64 Dipoliryhmä

### 3.4.4 Antennin syöttö

Lähettimessä synnytetty teho on saatava siirtymään antennaan mahdollisimman pienin häviöin. Sama vaatimus pätee antennaan ja vastaanottimen suhteen.

Antennin ja radion tulee olla sovitettuja toisiinsa eli niiden impedanssien tulee olla yhtäsuuret. Jos lähettimen lähtöimpedanssi on esimerkiksi suurempi kuin antennin impedanssi, antennaan ei saada siirtymään kaikkea tehoa ja kantama jää lyhyemmäksi.

Jos radio ja antenni sijaitsevat eri paikoissa, täytyy välille kytkeä syöttöjohto. Syöttöjohdolla on oma impedanssinsa. Tämänkin impedanssin tulee olla yhtä suuri kuin sen molemmissa päissä olevat impedanssit, jotta syöttöhäviöt olisivat mahdollisimman pienet.



$$\text{Sovitus: } Z_a = Z_k = Z_r$$

$Z_a$  = antennin impedanssi

$Z_k$  = syöttöjohtoon impedanssi

$Z_r$  = radion impedanssi

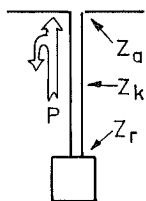
Kuva 3.65 Sovitus

## Seisovan aallon suhde SAS (SWR)

Mikäli antennin ja syöttöjohtoon impedanssit poikkeavat toisistaan ei lähetti

mestä syötetty teho menekään kaikki antenniin, vaan osa heijastuu epäsovituskohdasta takaisinpäin. Takaisin heijastuva teho voi jopa vaurioittaa laitteistoja, joten radion antenniliitäntään on aina kytkettävä kuorma.

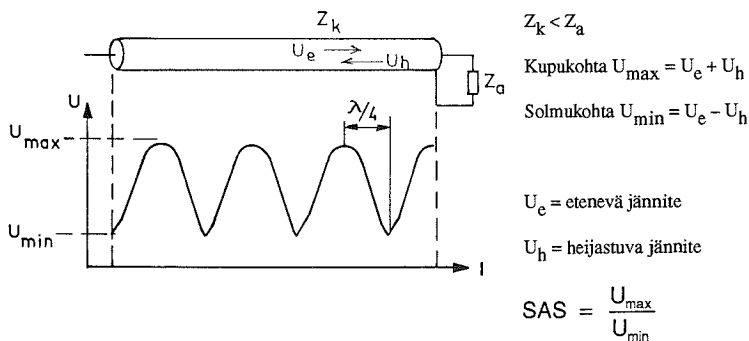
Kun syöttöjohdon impedanssi on antennin impedanssia pienempi, osa jännitteestä heijastuu takaisin. Se summautuu etenevän jännitteen kanssa. Syöttöjohtoon syntyy kohtia, joissa jännitteen arvo ei ylitä etenevän ja heijastuvan jännitteen erotusta. Näitä minimikohtia kutsutaan solmukohtiksi.



$Z_r = Z_k$  sovitus, kaikki teho siirtyy lähettimestä syöttöjohtoon

$Z_a \neq Z_k$  epäsovitus, vain osa tehosta siirtyy antenniin, osa heijastuu takaisin

Kuva 3.66 Epäsovitustilanne



Jännitteen arvo syöttöjohdon eri kohdissa

Kuva 3.67 Seisovan aallon suhde

Kupukohtiksi kutsutaan kohtia, joissa jännitteen suurin hetkellinen arvo on etenevän ja heijastuvan jännitteen summa. Kun ilmiötä tarkastellaan koko syöttöjohdon pituudelta, jännitteen jakautuma on aaltomainen. Tätä kutsutaan seisovaksi aalloksi. Seisovan aallon suhde on kupukohdan ja solmukoh-

Esimerkki: Eteneväksi jännitteeksi mitattiin 10 V ja heijastuvaksi 2 V.

$$\text{Kupukohta } U_{\max} = U_e + U_h = 10 \text{ V} + 2 \text{ V} = 12 \text{ V}$$

$$\text{Solvukohta } U_{\min} = U_e - U_h = 10 \text{ V} - 2 \text{ V} = 8 \text{ V}$$

$$\text{SAS} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{12 \text{ V}}{8 \text{ V}} = 1,5$$

Kun sovitus on oikea, mitään ei heijastu takaisin ja SAS = 1. Syöttökaapelin ollessa avoin koko teho heijastuu takaisin ja SAS = ∞. Antenneilta edellytetään yleensä, että SAS ≤ 2.

Taajuuden muuttuessa kupu- ja solvukohtien paikat muuttuvat, mutta niiden välinen etäisyys on λ/4. Jos antennin impedanssi on suurempi kuin syöttöjohdon, syntyy syöttöjohdon antennin puoleiseen päähän kupukohta. Lähettimen puoleisen pään jännitteen määrää syöttöjohdon pituus.

Seisovan aallon suhde voidaan laskea myös impedanssien avulla.

$$\text{SAS} = \frac{Z_k}{Z_a} \quad (Z_k > Z_a) \qquad \text{SAS} = \frac{Z_a}{Z_k} \quad (Z_a > Z_k)$$

Käytännössä mitataan etenevä ja heijastuva teho ja seisovan aallon suhde lasketaan oheisesta kaavasta.

$$\text{SAS} = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_h}{P_e}}}{1 - \sqrt{\frac{P_h}{P_e}}}$$

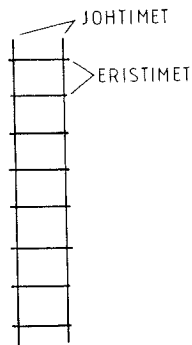
$P_h = \text{heijastuva teho}$   
 $P_e = \text{etenevä teho}$

Esimerkki: Eteneväksi tehoksi mitattiin 1,6 W ja heijastuvaksi 0,4 W.

$$\text{SAS} = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_h}{P_e}}}{1 - \sqrt{\frac{P_h}{P_e}}} = \frac{1 + \sqrt{\frac{0,4 \text{ W}}{1,6 \text{ W}}}}{1 - \sqrt{\frac{0,4 \text{ W}}{1,6 \text{ W}}}} = 3$$

## Tavallisimmat syöttöjohdot

**Avolinja** on rakennettu kahdesta rinnakkain kulkevasta johtimesta. Johtimien välinen etäisyys pidetään vakiona eristimien avulla. Avolinjan impedanssi riippuu johtimien paksuudesta ja niiden välisestä etäisyydestä. Avolinjaa kutsutaan usein tikapuukaapeliksi sen tukirakenteen vuoksi.



$$Z_0 = 276 \lg \frac{2a}{d}$$

$a$  = johtimien välinen etäisyys

$d$  = johtimen halkaisija

$Z_0$  = impedanssi

Kuva 3.68 Avolinja

Avolinjan kummassakin johtimessa tulee kulkea yhtä suuri, mutta vastakkainen virta. Jos avolinjan jossain tarkastelupisteessä virtojen suuruudet eivät ole samat tai vaihe-ero ei ole  $180^\circ$ , se alkaa säteillä. Eräissä radioissa on symmetrian säädin, jolla virtojen suhde voidaan säätää oikeaksi.

Avolinja on herkkä ympäristön vaikutuksille. Esimerkiksi lähellä olevat metallipinnat aiheuttavat eroja johtimien virtoihin. Myös häiriöt pääsevät kytkeytymään radioon avolinjan kautta. Avolinjan etuna puolestaan ovat sen pienet häviöt. Sitä käytetään yleensä HF-alueella.

**Koaksiaalikaapelissa** on ohuehko keskijohdin ja sen ympärillä eriste. Eristeen päälle on punottu toinen johdin vaipaksi. Eristeen materiaali vaikuttaa kaapelin sähköisiin ominaisuuksiin, mm. häiriöihin ja nopeuskertoimeen (esim.  $k = 0,66$ ). Koska keski- ja ulkojohdin eroavat toisistaan, kaapeli ei ole symmetrinen kuten avolinja. Kaapelin rakenteesta johtuen kaapelissa kulkeva suurtaajuinen teho kulkee ulomman ja keskijohtimen välissä. Tällainen kaapeli ei ole altis ulkoisille häiriöille. Kaapelin impedanssin määrää sen rakenne. Yleisimmät ovat  $75 \Omega$  ja  $50 \Omega$ . Koaksiaalikaapeli on mekaanisesti arka ja murtuu helposti jyrkän taitoksen kohdalta.

## 4 VIESTITEKNIIKAN MITTAUKSET

### 4.1 Yleistä

Viestiyhteyksien rakentaminen ja ylläpito koostuu monenlaisista suoritteista. Yhteyden osatekijöiden koestamisessa tarvittava tieto osatekijän kunnosta saadaan yleensä mittaamalla. Rakennus- ja ylläpitohenkilöstöllä on oltava mittausväline ja tieto sen käytöstä ja soveltuvuudesta kyseiseen koestukseen. Väärän mittalaitteen tai mittausmenetelmän valinta aiheuttaa väärän tuloksen mitattavasta suureesta ja voi lisäksi vahingoittaa mittalaitetta.

Jos mittalaite aiheuttaa sitä kytkettäessä virtapiiriin muutoksen mitattavassa suureessa, on tuon muutoksen suuruus huomioitava. Tarkan tuloksen saamiseksi mitattavasta suureesta olisi mittalaitteen oltava sellainen, ettei se aiheuta muutosta virtapiirissä. Mittalaitteen tulostustavan tulisi olla tarkka, eikä mittalaite saisi reagoida muihin virtapiiriin ilmiöihin eli mittauksen tulisi olla häiriötön.

Mittauksessa syntyy aina virheitä, jotka johtuvat mittalaitteesta, kytkennästä, luennan epätarkkuudesta ja ulkoisista tekijöistä. Mittaustulos on siis mitattavan suureen todellisen arvon ja erilaisten virheiden summa.

Virheet voidaan jakaa karkeasti kahteen pääluokkaan, menetelmävirheisiin ja satunnaisiin virheisiin. Menetelmävirheet aiheuttavat aina samansuuntaisen virheen mittausta toistettaessa. Menetelmävirheitä ovat esimerkiksi mittarin nollakohdan väärästä asetelusta, mittarin virheellisestä asennosta ja kalibroinnista johtuvat virheet. Satunnaisvirheet aiheuttavat suunnaltaan sattumanvaraisen virheen mittaustulokseen. Satunnaisvirheitä ovat esimerkiksi mittarin epätarkasta luennasta, ulkoisesta lämpötilasta ja vieraista sähkömagneettisista kentistä johtuvat virheet.

#### 4.1.1 Mittareiden jaottelu

Mittarit voidaan jakaa ryhmiin useilla eri perusteilla. Yleisimmät ryhmittelyperusteet ovat seuraavat:

- 1 Jako mittalaitteen tarkkuuden mukaan (tarkkuusluokkamerkintä etupaneelissa, % täysnäyttämästä)

Tarkkuusmittarit	Käyttömittarit
0,1	1,0
0,2	1,5
0,5	2,5
	5,0

- 2 Jako tulostuksen mukaan

- osoittavat mittarit (myös numeronäyttöiset)
- laskevat mittarit ja
- piirtävät mittarit
























- 3 Jako mitattavan suureen mukaan
- A-mittarit
  - V-mittarit
  - W-mittarit jne.
- 4 Jako toimintaperiaatteen mukaan (toimintaperiaatteen symboli etupaneelissa)
- kiertokäämimittarit
  - kiertorautamittarit
  - sähködynaamiset mittarit
  - sähköstaattiset mittarit
  - induktiomittarit
  - termiset mittarit ja
  - digitaalimittarit

#### 4.1.2 Mittareiden merkinnät

Osoittavissa mittareissa on merkintöjä, jotka helpottavat käyttäjää oikean mittarin valinnassa ja sen käytössä. Merkinnät kertovat mm. seuraavista ominaisuuksista:

- kojeiston rakenne (toimintaperiaate)
- mittarin tarkkuusluokka
- mittarin käyttöasento
- koejännite ja
- suojaus.

Kiertokäämi- mittari		Rautasydäminen sähködynaaminen ristikäämimittari		Termokier- tökäämi- mittari	
Tasasuuntauksella varustettu kierto- kelamittari		Induktorimittari		Tarkkuusluokka 1,5	
Kiertomagneetti- mittari		Kaksoismetalli- mittari		Pystys käyttöas Vaakas käyttöas 60° kaltevuus	
Kiertorauta- mittari		Kuumalanka- mittari		Koejännite 500 V Koejännite 2 kv	
Sähködynaaminen mittari		Sähköstaattinen mittari		Tasavirtamittari Vaihtovirta- mittari	
Rautasydäminen sähködynaaminen mittari		Värähdinmittari		Yleisvirta- mittari	
Sähködynaaminen ristikäämi- mittari		Ristikäämimittari		Magneettinen suojaus Staattinen suojaus	

Kuva 4.1 Osoittavien mittareiden merkintöjä

Esimerkiksi, jos mittarissa on merkintä  -1,5, kysymyksessä on kiertokäämitasavirtamittari, jonka tarkkuusluokka on 1,5 ja koestusjännite 3 kV.

Tarkkuusluokkamerkinnällä on mittarin valmistaja ilmoittanut mittalaitteen rakenteesta johtuvien virheiden suuruuden. Kyseinen numero tarkoittaa suurinta mahdollista virhettä laskettuna prosenteissa asteikon loppuarvosta. Kun kysymyksessä on merkintä 1,5 ja mitataan 100 V:n asteikolla, mittauksessa voi olla mitarista johtuva  $\pm 1,5$  V:n suuruinen virhe. On huomattava, että kysymyksessä on  $\pm$ -virhe eli todellinen jännite voi olla 1,5 V suurempi tai pienempi kuin mittarin tulostus. Koejännite on jännite, jolla on koestettu mittalaitteen eri piirien, liitinruuvien ja rungon jännitekestoisuus.

## 4.2 Mittarirakenteita

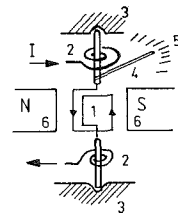
### 4.2.1 Toimintaperiaatteet

Mittalaitteen antama tulos mitattavasta sähkösuureesta perustuu kyseisen suureen aiheuttamaan

- mekaaniseen voimaan
- lämpövaikutukseen
- sähköstaattisen kentän vaikutukseen tai
- analogia/digitaalimuunnokseen.

**Mekaaniseen voimaan** perustuvaa toimintaperiaatetta käytetään yleisesti osoittavissa mittareissa. Mitattava suure, esim. sähkövirta, aiheuttaa mittakoneiston liikkuvaan osaan vääntömomentin ns. sähkövääntömomentin. Sähkövääntömomentin vastapainona on mittarissa vastavääntömomentti, joka on toteutettu esimerkiksi jousilla. Sähkövääntömomentin aiheuttama mittakoneiston liikkuvan osan kiertyminen ja osoittimen liikkuminen pysähtyy, kun sähkövääntömomentin ja vastavääntömomentin voimavaikutukset koneistoon ovat yhtä suuret. Mittarin asteikko laaditaan siten, että osoittimen pysähtymiskohdalta voidaan lukea mitattavan suureen arvo.

Mekaaniseen voimaan perustuvan mittarin koneiston rakenneperiaate on esitetty kuvassa 4.2. Kiertyvään käämiin 1 tuodaan virta  $I$  vastavääntömomenttijousien 2 kautta. Osoitinkoneisto kiertyy laakereiden 3 varassa ja osoitin 4 asetuu voimien tasapainotilassa tietylle kohdalle asteikkoon 5. Kestomagneetilla 6 muodostetaan magneettikenttä, joka käämiin magneettikentän kanssa aiheuttaa sähkövääntömomentin. Mittareita, joissa käytetään kuvan rakenneperiaatetta kutsutaan kiertokäämimittareiksi.

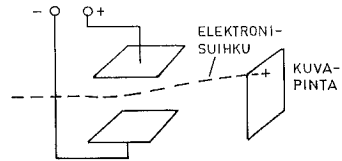


Kuva 4.2 Mekaaniseen voimaan perustuvan mittarin koneiston rakenneperiaate

**Virran lämpövaikutusta** käytetään eräissä mittareissa hyväksi siten, että mittarissa olevan tietyn lämpötilakertoimen omaavan metallilangan tai -liuskan läpi johdettava virta aiheuttaa metallissa venymistä ns. lämpöpitenemistä. Pituuden lisäys muutetaan kojeistossa osoittimen kiertymäksi. Lämpövaikutukseen perustuvia mittareita ovat esim. kuumalankamittari ja kaksoismetallimitari.

**Sähköstaattisen kentän** vaikutusta käytetään jännitteen mittaauksissa siten, että mitattava jännite ( $U_x$  kuva 4.3) kytketään metallilevyille, joista toinen varautuu positiiviseksi ja toinen negatiiviseksi.

Kun levyjen väliin ohjataan elektronisuihku, vetää positiiviseksi varautunut levy elektroneja puoleensa ja negatiiviseksi varautunut levy taas työntää niitä pois päin. Näin elektronisuihku poikkeaa radaltaan sitä enemmän mitä suurempi mitattava jännite on. Elektronisuihkun osuessa esim. sellaiselle pinnalle, joka säteilee valoa elektronien osumiskohdasta, saadaan piirretyksi näkyviin jännitteen aiheuttama muutos elektronisuihkun radassa. Tällaista toimintaperiaatetta käytetään oskilloskoopissa.

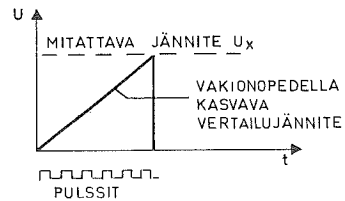


Kuva 4.3 Esimerkki staattisen kentän voimavaikutuksen käytöstä jännitteen mittaauksessa.

**Analogia/digitaalimuunnosta** käytetään numeronäyttöisissä mittalaitteissa. Muuntimen tehtävänä on muuttaa mitattava tasa- tai vaihtosuure sen arvoa vastaavaksi määräksi pulsseja. Pulseilla ohjataan numeronäyttöä, joka antaa tuloksen mittauksesta. Analogia/digitaalimuunnos voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Yleisimmin käytettävät menetelmät ovat

- ajanmittaus
- kaksoisramppi ja
- kompensatio.

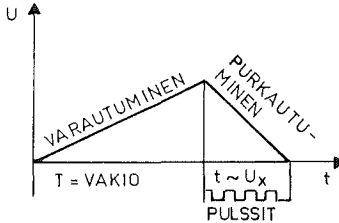
Ajanmittausmenetelmässä mitattavaa jännitettä verrataan vakionopeudella kasvavaan vertailujännitteeseen. Aika, joka kuluu vertailujännitteen nousuun yhtä suureksi mitattavan jännitteen kanssa, muutetaan pulsseiksi ja pulssit taas muutetaan mittariin numeronäytöksi.



Kuva 4.4 Ajanmittausmenetelmän periaate

Kaksoisramppi menetelmässä otetaan mitattavasta sähkösuureesta näyte. Näytteenottoajan pituus on vakio. Näyte syötetään integraattoriin, jonka tehtävänä on varastoida näyte. Tämän jälkeen integraattori puretaan tarkoin tunnetun jännitteen avulla. Purkamiseen kulunut aika muutetaan pulsseiksi, joilla

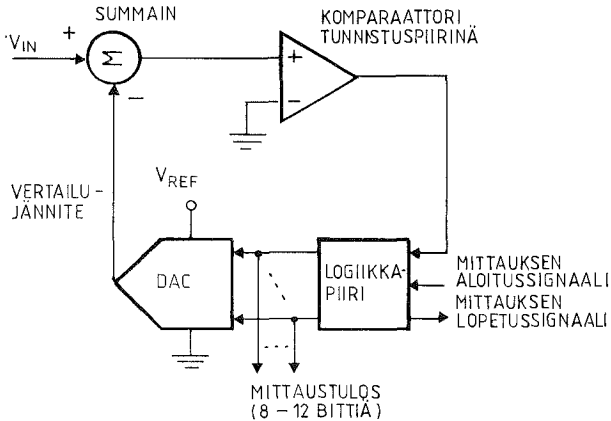
ohjataan numeronäyttöä. Mitä suurempi mitattava jännite on varautunut integraattoriin, sitä pidempi aika kuluu sen purkamiseen ja pulssien määrä kasvaa vastaavasti.



Kuva 4.5 Kaksoisrampin menetelmän periaate

Kompensaatiomenetelmässä mitattavaa jännitettä verrataan vakiojännitteeseen. Piiri, joka tunnistaa eron vakiojännitteen ja mitattavan jännitteen välillä, kytkee automaattisesti vastuksia vakiojännitelähteen ja tunnistuspiiriin väliin pienentäen näin vakiojännitelähteeltä tulevaa jännitettä, kunnes tunnistuspiiri havaitsee molempien jännitteiden olevan yhtä suuren. Logiikkapiiri, joka kytkee vastuksia, ohjaa myös mittalaitteen numeronäyttöä. Vastuskytkentöjen lukumäärä vastaa mitattavaa jännitettä ja se voidaan muuttaa numeronäytöksi.

$V_{IN}$  = MITATTAVA JÄNNITE  
 $V_{REF}$  = VAKIOJÄNNITE  
 DAC = DIGITAALI/ANALOGIAMUUNNIN



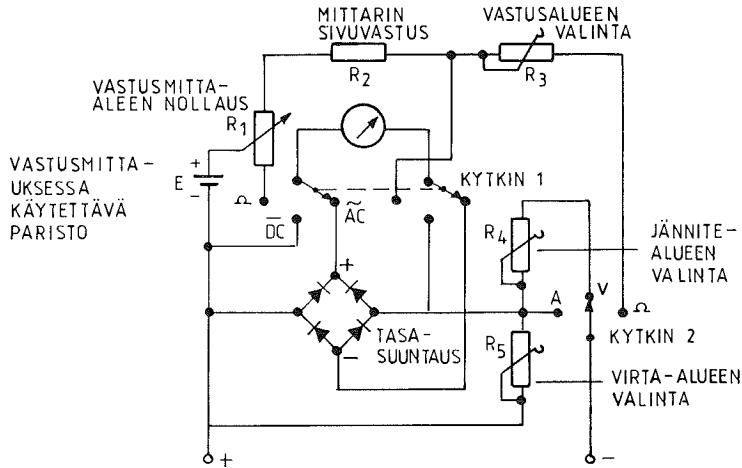
Kuva 4.6 Esimerkki kompensatiomenetelmän lohkoakaaviosta

#### 4.2.2 Yleismittari

Yleismittarilla tarkoitetaan mittaria, jolla voidaan mitata sekä tasasähkö- (DC) että vaihtosähkö- (AC) suureita ja myöskin vastusta. Yleismittari voi olla osoittava analoginen mittari tai numeronäyttöinen digitaalinen mittari.

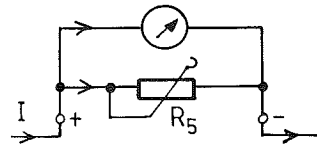
## Analoginen yleismittari

Useimmiten osoittavassa yleismittarissa käytetään kiertokäämikojeistoa, joka toimii ainoastaan tasavirralla. Tämän vuoksi joudutaan vaihtosuureet tasasuuntaamaan ennen mittausta mittarissa olevalla tasasuuntauspiirillä. Tasasuuntauspiirin rakenteen vuoksi mittari antaa tarkkuusluokkansa rajoissa oikean tuloksen vain muutaman sadan Hz:n taajuuteen asti sinimuotoisella vaihtosuureella. Kuvassa 4.7 olevan yleismittarin periaatekuvan mukaan kytketty mittalaite eri käyttötapauksissa seuraavasti:



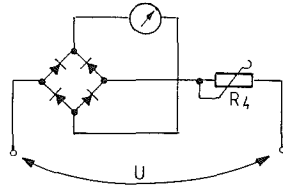
Kuva 4.7 Yleismittarin periaate

**Tasavirran** mittauksessa täytyy kytkeä kytkeä 1 ollen asennossa DC ja kytkeä 2 asennossa A. Virran mittauksessa täytyy mittarin sisävastuksen olla pieni, ettei mittari pienennä sitä kytkettäessä mitattavan virran arvoa. Osakytkennästä, kuva 4.8, nähdään, että virta kulkee jakautuneena kahteen haaraan kiertäen sekä vastuksen  $R_5$  että mittarin kojeiston läpi. Vastuksen  $R_5$  arvo on hyvin pieni, joten kokonaisvastus on pieni. Mitä suurempaa virtaa mitataan sitä pienemmäksi täytyy vastusta  $R_5$  säätää. Säätö tapahtuu käytännössä muuttamalla mittarin virta-alueita. Tällä säädöllä estetään liian suuren virran kulkeminen mittarin osoitinkojeiston läpi.



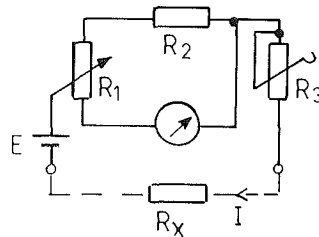
Kuva 4.8 Tasavirran mittaaminen

**Vaihtojännitteen** mittauksessa täytyy kytkimen 1 olla asennossa AC ja kytkimen 2 asennossa V. Jännitteen mittauksessa täytyy mittarin sisävastuksen olla suuri, ettei mittari kuormita mitattavaa piiriä ja samalla pienennä mitattavan jännitteen arvoa. Osakytkennästä nähdään, että vaihtojännite tasasuunnataan diodisillalla ja tasasuunnattu virta kulkee sitä rajoittavan suuren vastuksen  $R_4$  ja mittarin läpi, jotka ovat sarjassa. Mitä suurempaa jännitettä mitataan, sitä suuremmaksi täytyy vastusta  $R_4$  säätää, että virta mittarin läpi pysyisi mahdollisimman pienenä mutta kuitenkin riittävänä mittarin osoitinkojeiston toiminnalle.



Kuva 4.9 Vaihtojännitteen mittaus

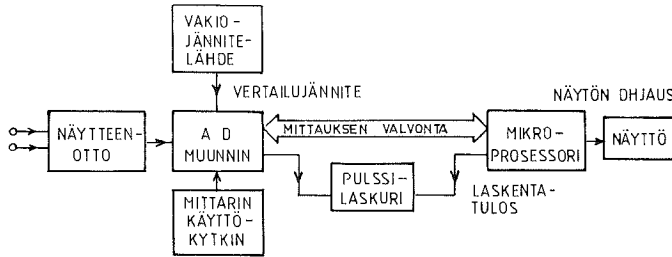
**Vastuksen** mittauksessa on kytkimien 1 ja 2 oltava asennossa  $\Omega$ . Mittauksessa käytetään mittarin omaa paristoa E, joka syöttää virran mitattavan vastuksen  $R_x$  läpi. Mitattavan vastuksen kasvaessa pienenee mittaussiirin virta. Ennen mitausta on käytettävä vastusasteikko nollettava. Nollaus suoritetaan vastuksen  $R_1$  säädöllä. Käytännössä säätö suoritetaan oikosulkemalla mittalaitteen liitännät ja säätämällä mittarissa olevalla säädöllä mittarin osoitus vastusasteikolla nolaksi. On huomattava, että vastusasteikko on käänteinen muiden mittausten asteikkoihin nähden, koska mittauksessa maksimivirtaa eli täysnäyttämää vastaa arvo 0 ohmia.



Kuva 4.10 Vastuksen mittaus

## Digitaalinen yleismittari

Digitaalinen yleismittari koostuu näytteenottopiiristä, mittaussiiristä ja tulossiiristä. Näytteenottopiiriin tehtävänä on nimensä mukaisesti poimia näyte mitattavasta jännitteestä. Mittaus- ja koodauspiirissä muodostetaan analogia/digitaalimuunnos eli poimittu näyte muutetaan laskettaviksi pulsseiksi. A/D-muunnos voidaan toteuttaa käyttäen esim. aiemmin esiteltyjä ajanmittaus-, kaksoisramppi- tai kompensatiomenetelmää. Tulossiiriin tehtävänä on muuttaa A/D-muuntimelta saadut pulssit numeronäytöksi. Numeronäyttö on yleisimmin toteutettu nestekidenäytöllä. Tuloksena voidaan saada numeroiden lisäksi tekstiä ja pylväsdiagrammeja. Digitaalisissa yleismittareissa on yleensä myöskin puolijohteiden testausmahdollisuus. Digitaaliset yleismittarit antavat huomattavasti suuremmalla taajuusalueella oikean tehollisarvon vaihtosuureille kuin analogiset yleismittarit.



Kuva 4.11 Digitaalisen yleismittarin pelkistetty lohkokaavio

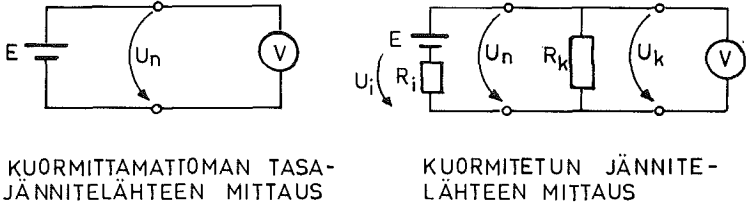
### 4.3 Perusmittaukset

#### 4.3.1 Jännitteen mittaus

Jännitemittari kytketään niihin pisteisiin, joiden välinen jännite on mitattava. Jännitteen esiintymiseksi tarvitaan jännitelähde. Jännitelähteitä ovat esimerkiksi paristo, akku, sähkövoimakone ja valtakunnan sähköverkko. Jännitelähteen jännitettä kutsutaan sähkömotoriseksi voimaksi, josta käytetään symbolia E ja lyhennettä smv.

#### Kuormittamattoman jännitelähteen mittaus

Kuormittamattoman jännitelähteen mittauksessa on tiedettävä, onko se tasavai vaihtojännitelähde. Mittari on ennen kytkemistä jännitelähteeseen asetettava kyseistä suuretta tunnistavaksi. Kuvassa 4.12 on esitetty tasajännitelähteen mittausta ja sen muodostama sähköpiirikaavio. Kuvan mittari on asetettu mittaamaan tasajännitettä DC, koska paristo on tasajännitelähde. Mitattavasta jännitteestä on tiedettävä sen suuruusluokka oikean mitta-alueen asettamiseksi. Jollei suuruusluokka ole tiedossa, on mittausta aloitettava suurimmalta asteikolta ja sitä on tarvittaessa pienennettävä. Näin menetellen suojataan mittaria vaurioitumiselta. Tämä periaate pätee kaikkiin mittauksiin. Kytkettäessä mittari jännitelähteen napoihin saadaan selville jännitelähteen smv, joka on yhtä suuri kuin napajännite  $U_n$ . Jos smv:n arvo on 4,5 V, mittarin tulee näyttää 4,5 V.



KUORMITTAMATTOMAN TASA-  
JÄNNITELÄHTEEN MITTAUS

KUORMITETUN JÄNNITE-  
LÄHTEEN MITTAUS

Kuva 4.12 Jännitelähteen mittaus

### Kuormitetun jännitelähteen mittaus

Kun jännitelähteeseen kytketään kuormittava laite, muodostuu kuvan 4.12 mukainen tilanne. Esimerkissä pariston kuormaksi on kytketty taskulampun polttimo. Mittaamalla polttimoon vaikuttava jännite  $U_k$  saadaan samalla selville kuormitetun jännitelähteen napajännite. Jos oletetaan, että mittarin ottama virta on 0, niin voidaan todeta, että

$$U_k = I * R_k \quad \text{ja} \quad U_i = I * R_i$$

$R_i$  on jännitelähteen rakenteessa oleva sisäinen vastus. Kirchoffin II lain mukaan suljetussa virtapiirissä jännitehäviöiden summa on yhtä suuri kuin sähkömotoristen voimien summa, joten voidaan merkitä

$$E = U_k + U_i$$

Kun annetaan piirin häviövastuksille  $R_k$  ja  $R_i$  numeeriset arvot, voidaan havainnollistaa napajännitteessä tapahtunutta muutosta

$$R_k = 9 \, \Omega \quad \text{ja} \quad R_i = 1 \, \Omega \quad , \quad \text{joten kokonaisvastus } R = 10 \, \Omega$$

$$\text{Piirin virta } I = \frac{E}{R} = \frac{4,5 \, \text{V}}{10 \, \Omega} = 0,45 \, \text{A}$$

Napajännitteen ja kuormaan vaikuttavan jännitteen arvo saadaan

$$U_k = U_n = I * R_k = 0,45 \, \text{A} * 9 \, \Omega = 4,05 \, \text{V}$$

tai Kirchoffin II lain mukaan

$$U_k = U_n = E - U_i = 4,5 \, \text{V} - 0,45 \, \text{A} * 1 \, \Omega = 4,05 \, \text{V}$$



Havaitaan, että säätämättömän jännitelähteen, kuten pariston navoista mitatun jännitteen arvo vaihtelee kuormituksen muuttuessa. Jännitteen pieneneminen on sitä suurempi mitä suurempi on kuormitus eli mitä pienempi vastus jännitelähteeseen on kytketty. Pariston kunto kannattaakin käytännössä todeta mittaamalla sen oikosulkuvirta. Hyvän pariston oikosulkuvirta on n. 4 A.

### Mittarin sisäisen vastuksen vaikutus mittaukseen

Jännitemittauksessa on mittarin sisäisen vastuksen oltava mahdollisimman suuri. Tällöin mittari ei kuormita virtapiiriä ja anna väärää mittaustulosta.

Edellisessä esimerkissä oletettiin mittarin ottama virta nolllaksi, mikä tarkoittaisi käytännössä sitä, että mittarin sisäinen vastus olisi äärettömän suuri. Analogisten mittareiden sisäinen vastus on kuitenkin yleensä 10 kΩ—100 kΩ voltia kohti ja digitaalisilla jo megaohmien luokkaa.

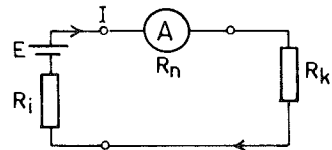
Jos mitataan piiriä, jonka jännitelähteen sisäinen vastus on suuri, esimerkiksi kilo-ohmin luokkaa, ja mitattava jännite on pieni, on tällaisessa tilanteessa laskettava mittarin aiheuttama jännitteen pieneneminen tarkan tuloksen saamiseksi.

#### 4.3.2 Virran mittaus

Virta mitataan kytkemällä mittari sarjaan kuorman kanssa, jolloin mittarin läpi kulkee sama virta kuin kuormankin läpi. Virran kulku edellyttää, että virtapiiri on suljettu. Mittarin sisäinen vastus  $R_m$  on mukana piirin kokonaisvastuksessa eli

$$R = R_i + R_m + R_k$$

Käytännössä virtamittareiden sisäinen vastus rakennetaan hyvin pieneksi, jotta mittarin kytkeminen ei aiheuttaisi mainittavaa muutosta piirin virtaan. Mittarin sisäinen vastusarvo on virranmittauksessa yleensä muutamista ohmeista ohmin murto-osiin. Mittarin sisäisellä vastuksella voi olla vaikutusta vasta silloin, kun kuormavastus on hyvin pieni, esimerkiksi alle 10 ohmia ja mitattava virta on pieni.



Kuva 4.13 Virran mittaus

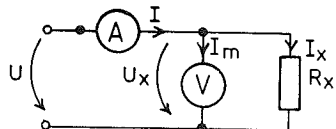
#### 4.3.3 Vastuksen mittaus

Vastusmittaus suoritetaan yleisimmin yleismittarin ohmialueella, erityisellä vastusmittarilla tai mittasilalla. Vastusmittauksessa kytketään vastusmittari mitattavan vastuksen napoihin. Kysymyksessä on tällöin aina tasavirtamittaus, johon tarvittava virta saadaan mittarin omasta paristosta. Yleismittarilla ei saada kovin tarkkaa tulosta, koska mittaus tapahtuu pienellä virralla. Ennen mittausta on käytettävä vastusmitta-alue aina nolllattava.

## Vastuksen mittaus V- ja A-mittarikeinolla

Vastusmittaus voidaan suorittaa myös jännitteen ja virran avulla, kun tarvitaan vastusmittaria suurempaa tarkkuutta eikä mittasiltaa ole käytössä, tai kun mitataan vaihtovirtavastusta verkkotaajuudella.

Mittaus voidaan suorittaa joko lyhyellä tai pitkällä kytkennällä. On huomattava, että mittaukseen tarvitaan ulkoinen jännitelähde  $U$ .



Kuva 4.14 Vastuksen mittaus lyhyellä kytkennällä

Lyhyt kytkentä

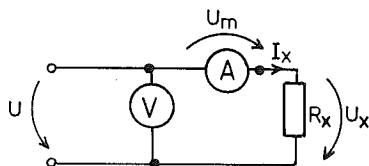
$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{I - I_m}$$

Jos mitattavan vastuksen arvo on huomattavasti pienempi, kuin jännitemittarin sisäisen vastuksen arvo, voidaan laskea likiarvokaavalla

$$R_x = \frac{U_x}{I}$$

Pitkä kytkentä

$$R_x = \frac{U_x - U_m}{I_x}$$



Kuva 4.15 Vastuksen mittaus pitkällä kytkennällä

Jos mitattavan vastuksen arvo on huomattavasti suurempi kuin virtamittarin sisäisen vastuksen arvo, voidaan laskea likiarvokaavalla

$$R_x = \frac{U}{I_x}$$

## 4.4 Fysikaalisen yhteyden kunnan mittaukset

### 4.4.1 Silmukkavastuksen mittaus

Silmukkavastuksella tarkoitetaan johdon päästä mitattua resistanssia silloin, kun johdon toisen päänt johtimet ovat kytketyt yhteen eli oikosuljetut.

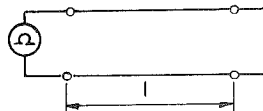
Silmukkavastus voidaan laskea kaavasta:

$$R_s = \rho * \frac{2 * l}{A} \quad , \text{ jossa}$$

$\rho$  = ominaisvastus

$l$  = johtimen pituus

$A$  = johtimen poikkipinta - ala mm<sup>2</sup>



Kuva 4.16 Johdon silmukkavastuksen mittaus

Seuraavassa eräitä ominaisvastusarvoja:

Kupari, sähköjohtimia varten	0,0176 Ωm
Kadmiumkupari	0,022 "
Teräskupari	0,044 "
2,2 mm teräs	0,144 "
3 mm teräs	0,133 "

Johdinaineen ominaisvastus riippuu aina hieman lämpötilasta. Edellä mainitut arvot ovat täysin oikeita vain +20 °C:n lämpötilassa. Lämpötilan noustessa vastusarvo kasvaa ja sen laskiessa pienenee. Muutos on n. 0,45 % astetta kohti.

Silmukkavastuksen mittauksella voidaan johdon vikaantuessa päätellä myös johdolla olevan vian laatu ja täydellisen oikosulun tapauksessa jopa etäisyys mittauskohdasta seuraavasti:

- jos  $R_s$  on äärettömän suuri, on kysymyksessä täydellinen katkos johdolla
- jos  $R_s$  on lasketun ja äärettömän suuren välillä, on kysymyksessä osittainen katkos tai huonot kosketukset liitännäkohdissa
- jos  $R_s$  arvo vaihtelee mittauksen aikana, on vikapaikka mahdollisesti johdon ilmaan rakennetulla osuudella ja mittaustulos vaihtelee esimerkiksi tuulen vaikutuksesta sekä
- jos  $R_s$  on pienempi kuin laskettu arvo, on kysymyksessä eristyksen huononemisesta aiheutuva vuoto johtimien välillä tai täydellinen oikosulku, jolloin vikapaikan etäisyys mittauspisteestä voidaan laskea kaavasta

$$\text{etäisyys} = \frac{\text{mitattu silmukkavastus}}{\text{ehjän johdon silmukkavastus}} * \text{johdon pituus}$$

Silmukkavastuksen mittauksessa on aina varmistettava siitä, ettei johdolle ole kytketty vastusarvoon vaikuttavia laitteita kuten muuntajia, puhelinkeskusta, kenttäpuhelinta jne. Jos johto on päätetty johonkin edellä mainitun kaltaiseen laitteeseen, on mittaustuloksesta vähennettävä kyseisen laitteen tasavirtavastus. Kanavointilaitteeseen kytketty johto täytyy aina irroittaa ja oikosulkea johtimet ennen silmukkamittausta, koska kanava katkaisee tasavirtatien estä-

en mittauksen. Mitattaessa muuntajalla varustettuja johtoja on huomioitava, että mittaustulokseen sisältyy muuntajan johdon puoleisen käämin vastus. Mahdollinen muuntajan toisella puolella oleva vika ei näy tuloksessa.

#### 4.4.2 Eristysvastuksen mittaaminen

Eristysvastuksen mittauksella on tarkoitus selvittää, onko kaapelin tai kojeen eristyksessä vikaa muihin johtimiin, kojeen osiin tai maahan nähden. Eristysvastuksen suuruus riippuu mm. eristysaineesta, eristyksen kunnosta ja kosteudesta. Normaalisti eristysvastus on hyvin suuri, hyvillä kenttäjohdoilla jopa megaohmien luokkaa. Koska eristysvastuksessa on kysymys hyvin suurista resistanssiarvoista, häiritsevät mm. eristyskerrosten muodostamat kapasitaansit mittausta. Tämän vuoksi mittausta on suoritettava suurehkoilla, vähintään mitattavassa johdossa tai laitteessa käytettävän suuruisella tasajännitteellä. Luotettavan tuloksen saamiseksi on jännitteen annettava vaikuttaa vähintään yhden minuutin ajan.

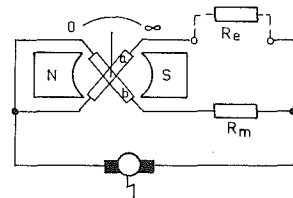
Eristysvastuksen mittaukseen käytetään tavallisesti erityistä eristysvastusmittaria. Tarvittava tasavirta muodostetaan joko paristokäyttöisellä elektronisella vaihtosuuntaajalla, jonka jännite nostetaan muuntajalla suureksi ja sen jälkeen tasasuunnataan, tai käsi käyttöisellä kammesta kierrettävällä tasavirtageneraattorilla. Mittarin tulostus on yleensä toteutettu ristikkäämikojeistolla.

Kuvassa 4.17 oleva eristysvastusmittari toimii seuraavasti:

- kun  $R_g$  on äärettömän suuri, esimerkiksi silloin kun mittaria ei ole kytketty kulkee kammesta kiertämällä synnytetty tasavirta käämin  $b$  kautta, jolloin käämin  $b$  ja kestopagneetin  $N/S$  vaikutuksesta osoitin kääntyy näyttämään ääretöntä ( $\infty$ )
- kun  $R_g$ :n arvo on yhtä suuri kuin vertailuvastuksen  $R_m$  arvo, on käämien

voimavaikutus yhtä suuri ja osoitin on keskellä ja

- kun  $R_g$ :n arvo on nolla eli mittarin liitännät ovat oikosulussa, kääntää käämin  $a$  voimavaikutus osoittimen näyttämään nollaa.

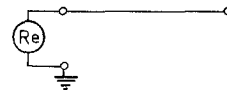


Kuva 4.17 Tasavirtageneraattorilla varustetun eristysvastusmittarin periaate

Johdon eristysvastus mitataan kuvan 4.18 mukaisesti.



JOHTIMIEN VÄLISEN ERISTYSVASTUKSEN MITTAUS



JOHTIMIEN JA MAAN VÄLISEN ERISTYSVASTUKSEN MITTAUS

Kuva 4.18 Eristysvastuksen mittaaminen

Johdon eristysvastusarvon täytyy olla vähintään 20 M $\Omega$ . Arvojen ollessa pienemmät kyseisten mittauspisteiden välillä on vuotoa. Kenttäjohtojen eristysvastusta voidaan mitata myös yleismittarilla, mutta tällöin saadaan tulokseksi vain suuntaa antava arvo virtapiirin eristysten kunnosta, koska yleismittareiden vastusmitta-alueiden virtalähde on yleensä huomattavasti alle 20 V. Tämän vuoksi ei saada selville esimerkiksi sitä, miten eristeet kestävät kenttäpuhelimen lähes 100 V:iin nousevaa soittojännitettä.

## 4.5 Taso- ja vaimennusmittaukset

### 4.5.1 Yleistä taso- ja vaimennusmittauksista

Viestiyhteydellä signaalia saatetaan siirtää erilaisten moduloitien avulla suuriakin taajuuksia käyttäen ja usein myöskin varsin pienellä teholla. Tästä syystä ei kaikkia siirtotien signaaleita pystytä mittaamaan tavallisella yleismittarilla.

Siirtotiellä esiintyvien analogisten signaalien voimakkuudet ilmoitetaan yleensä teho- tai jännitetasoina ja näitä arvoja mitataan suuriohmisella V-mittarilla tai erityisellä tasomittarilla. Suuriohminen V-mittari on erittäin herkkä jännitemittari, jonka taajuusalue on varsin laaja. Tasomittari on suuriohminen selektiivinen jännite- tai tehomittari, joka on varustettu säädettävillä suotimilla. Sillä pystytään mittaamaan tietyn taajuuden signaalin voimakkuus pisteessä, jossa esiintyy useita taajuuksia.

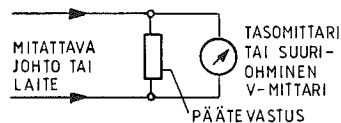
### 4.5.2 Tason mittaus

Tason mittaus voidaan suorittaa tilanteesta riippuen joko päättävänä tai rinnanmittauksena. Päättävää mittausta käytetään yleensä silloin, kun mittaus suoritetaan signaalitien päästä kohdasta, jossa signaalitie voidaan katkaista. Muutoin käytetään rinnanmittausta.

#### Päättävä mittaus

Päättävällä mittauksella tarkoitetaan mittausta, jossa mitattavat lähtönavat päätetään vastuksella, jonka impedanssi on nelinavan lähtöimpedanssin suuruinen. Suuriohminen V-mittari tai tasomittari mittaa päätevastuksen yli olevan jännitteen ja tulostaa sen tasoarvona, jolloin laatuna on dB. Monissa mittareissa on päätevastus rakennettu mitalaitteen sisälle ja sen arvo on valittavissa laitteessa olevalla valintakytkimellä. Kuormavastuksen arvo on puhetaajuuksilla 600  $\Omega$  ja kantoaaltoaajuuksilla n. 150 tai 75  $\Omega$ .

Suuriohmiset V-mittarit ja jännitetasomittarit on kalibroitu näyttämään tasoa 0 dBm, kun mittauspisteen impedanssi on 600  $\Omega$  ja vastuksen yli vaikuttaa jännite 0,775 V. Jos impedanssi poikkeaa 600 ohmin arvosta, ei tasoasteikko pidä paikkaansa ja



Kuva 4.19 Päättävä tasomittaus

siksi on laskettava korjausarvo oikean tason selvittämiseksi. Jos käytössä on tehotasomittari, se näyttää oikean tuloksen aina impedanssista riippumatta, kunhan päätevastuksen impedanssi on nelinavan lähtöimpedanssin suuruinen.

**Esimerkki:** Korjausarvon laskeminen. Johdon impedanssi mitattavalla taajuudella on  $150 \Omega$ . Johto on päätetty  $150 \Omega$  vastuksella ja suuriohminen V-mittari näyttää jännitettä  $0,435 \text{ V}$  ja tasoarvona  $-5 \text{ dB}$ . Mittari on kalibroitu näyttämään  $0 \text{ dBm}$ , kun impedanssi on  $600 \Omega$ . Mittarin näyttämä  $-5 \text{ dB}$  on ns. jännitetasoarvo, jonka suuruus riippuu kuormavastuksen suuruudesta. Todellinen tehotaso  $n$  saadaan kaavasta

$$\text{tehotaso} = \text{jännitetaso} + \text{korjausarvo}$$

$$n = -5 \text{ dB} + 10 \lg \frac{600}{150} = -5 \text{ dB} + 6 \text{ dB} = +1 \text{ dBm}$$

Sama tehtävä mittarin näyttämän jännitearvon mukaan

$$\begin{aligned} n &= 20 \lg \frac{0,435 \text{ V}}{0,775 \text{ V}} + 10 \lg \frac{600}{150} \\ &= -5 \text{ dB} + 6 \text{ dB} = +1 \text{ dBm} \end{aligned}$$

Nyrkkisääntö korjausarvolle on se, että impedanssisuhteen kaksinkertaistaminen aiheuttaa aina tasoarvoon  $3 \text{ dB}$ :n lisäyksen ja impedanssien suhteen puolituminen aiheuttaa  $3 \text{ dB}$ :n vähennyksen tasoarvoon.

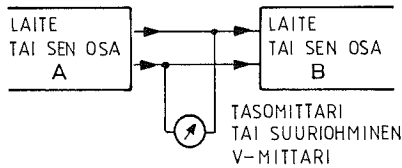
**Esimerkki:**

$$\frac{600 \Omega}{300 \Omega} \Rightarrow +3 \text{ dB}, \quad \frac{600 \Omega}{150 \Omega} \Rightarrow +6 \text{ dB}, \quad \frac{600 \Omega}{75 \Omega} \Rightarrow +9 \text{ dB}, \quad \frac{600 \Omega}{1200 \Omega} \Rightarrow -3 \text{ dB}$$

Kun mittaus joudutaan suorittamaan selektiivisenä eli poimimaan mitattava taajuus muiden mittauspisteessä esiintyvien taajuuksien joukosta, on käytettävä suotimilla varustettua tasomittapaikkaa, jonka taajuusasteikko on kalibroitava laitteen ohjeiden mukaisesti.

### Rinnanmittaus

Rinnanmittauksella tarkoitetaan mittausta, jossa mitataan suuriohmisesti siirtotien väliltä jostain pisteestä signaalin jännite. Päätevastusta ei mittauspisteeseen kytketä, koska laite tai sen osa B kuormittaa laitetta tai sen osaa A nimellimpedanssilla ja näin ollen on mittalaitteen impedanssin oltava mahdollisimman suuri, ettei se aiheuta mitattavaan jännitteeseen muutosta. Jännitetasomittarilla tai suuriohmisella V-mittarilla mitattaessa pätevät tasoarvoon samat laskentaperiaatteet kuin päättyvässä mittauksessakin.

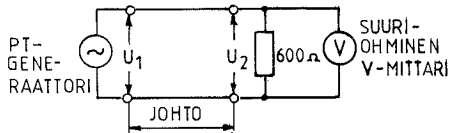


Kuva 4.20 Rinnanmittaus

#### 4.5.3 Vaimennuksen mittaus

Vaimennuksen mittaus suoritetaan syöttämällä mitattavaan siirtojärjestelmään, esimerkiksi johtoon, kanavoitilaitteen kanavaan tai näiden yhdistelmään mittasignaali, jonka arvo mitataan yhteyden toisesta päästä. Puhetaajuuskäyttöön tarkoitetun johdon vaimennus mitataan yleensä 800 Hz:n taajuisella signaalilla. Suurempia taajuuksia, esim. kantoaaltoaajuuksia varten käyttönötettävän johdon vaimennus on selvitettävä mittaamalla se kyseisillä taajuuksilla. Puhetaajuussiirtoon tarkoitetun johdon mittaus voidaan suorittaa kuvan 4.21 mukaisella kytkennällä.

Mittasignaalin syöttöön käytettävän pientaajuusgeneraattorin impedanssin on oltava n. 600  $\Omega$  ja johto on päättävä 600  $\Omega$ :n vastuksella, jonka yli vaikuttava jännite mitataan suuriohmisella V-mittarilla. Johdon vaimennus saadaan syöttöpisteen ja mitauspisteen tasojen erotuksena.



Kuva 4.21 Puhetaajuuskäyttöön tarkoitetun johdon vaimennuksen mittaus

Esimerkki: Syötetään johtoon pt-generaattorilla taso 0 dBm (0,775 V/600 $\Omega$ ) ja mitataan suuriohmisella V-mittarilla taso -10 dBm. Johdon vaimennus on tällöin 10 dB.

$$A = 0 \text{ dBm} - (-10 \text{ dBm}) = 10 \text{ dB}.$$

Suoritettaessa mittaus jännitearvoilla saadaan vaimennus A kaavasta

$$A = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} \text{ (dB)}$$

0 dBm tasoista signaalia vastaava jännitearvo 600  $\Omega$ :n vastuksessa saadaan kaavasta

$$P = I * U = \frac{U^2}{Z} \quad U = \sqrt{P * Z} = \sqrt{1 \text{ mW} * 600 \Omega} = 0,775 \text{ V}$$

Jos mitattu jännite on ollut 0,245 V ja syöttöjännite 0,775 V, saadaan vaimennukseksi

$$A = 20 \lg \frac{0,775 \text{ V}}{0,245 \text{ V}} = 10 \text{ dB}$$

Jännitearvoilla suoritettua mittausta varten voidaan esittää nyrkkisääntönä, että syötetyn jännitteen puolilutumisen vastaa 6 dB:n vaimennusta.

#### 4.5.4 Ylikuulumisen mittaus

Ylikuulumisella tarkoitetaan kaapelissa johdinparilta toiselle sähkö- ja magneettikentän välityksellä siirtynyttä häiriöjännitettä. Ylikuulumisvaimennuksella tarkoitetaan tämän häiriöjännitteen vaimennusta. Jos esimerkiksi johdinpariin syötetään +3 dBm tasoinen signaali ja toisesta johdinparista mitataan -60 dBm tasoinen signaali, on ylikuulumisvaimennus 63 dB.

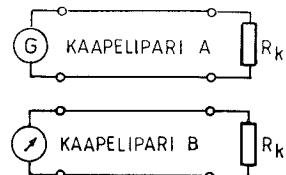
Mittaussignaalin taajuuden on oltava johdolla siirrettävää taajuutta vastaava. Tasonäkätetään yleensä vähintään 0 dBm tasoista signaalia. Mittaus suoritetaan sekä lähi- että kaukopäässä.

Suurtaajuisissa mittauksissa on mittaus suoritettava molemmille pareille, koska mittaustulos ei ns. vaihtovaikutuksen vuoksi ole aina sama. Yleisen televerkon kaapeleissa on ylikuulumisvaimennuksen oltava sekä lähi- että kaukopäässä vähintään 60 dB. Kenttäviestiverkoissa puhetaajuutta siirtävissä kaapeleissa on vaimennuksen oltava vähintään 30 dB.

Kanavointilaitteen kantoaalto-signaalia siirtämään tarkoitettua kaapelin lähipään ylikuulumisvaimennuksen on oltava suurempi kuin kanavointilaitteen vastaanotto puolen tasonsäätöpiirin toiminta-alue. Ylikuulunut signaali voisi muuten olla tasoltaan suurempi kuin vasta-aseman lähettämä ja ohjaisi tällöin kanavointilaitteen tason säätöä.

#### Lähipään ylikuulumisen mittaus

Lähipään mittauksessa sekä signaalia syöttävä generaattori että jännitetä tai tasoa mittaava laite ovat samassa päässä kaapelia. Sekä generaattorin että mittarin impedanssin on oltava kaapelin impedanssin suuruisen. Kaapeliparien toiset päät on päätettävä kaapelin impedanssin suuruisilla vastuksilla.

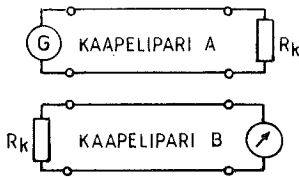


Kuva 4.22 Lähipään ylikuulumisen mittaus



## Kaukopään ylikuulumisen mittaus

Kaukopään mittauksessa ovat generaattori ja mittalaite eri päissä kaapelia.

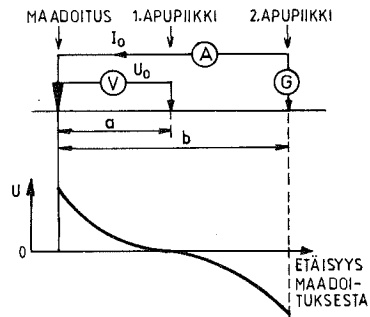


Kuva 4.23 Kaukopään ylikuulumisen mittaus

## 4.6 Muita mittauksia

### 4.6.1 Maadoitusvastuksen mittaus

Maadoitusvastuksen mittaus suoritetaan yleisimmin ns. kahden apupiikin menetelmällä. Kuva 4.24 esittää mittauksen periaatetta. 1. apupiikki on jännitepiikki ja 2. apupiikki virtapiikki. Virtapiikki on vietävä riittävän kauaksi maadoituselektrodista. Etäisyyden  $b$  olisi oltava hiekkaja moreeniperäisessä maassa lähes 200 m oikean tuloksen saamiseksi. Savi-, savihiekka-, multa- ja turveperäisissä maalajeissa etäisyys voi olla huomattavasti lyhyempi. Jännitepiikki on pyrittävä sijoittamaan etäisyydelle, jossa jännitekäyrä on vaakasuoralla osuudella. Maaperässä, jonka ominaisresistanssi ei vaihtelee, saadaan jännitepiikin etäisyys kaavasta

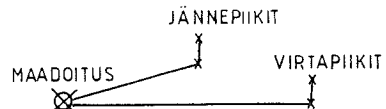


Kuva 4.24 Maadoitusvastuksen mittauksen periaate

Mittatuloksen oikeellisuuden parantamiseksi on jännitepiikki vietävä pari metriä sivuun virtaelektrodien yhdyssuorasta kuvan 4.25 mukaisesti ja lisäksi on käytettävä molempien apupiikkien kanssa rinnakkaispiikkiä.

Varsinaisista maadoitusmittareista saadaan suoraan maadoitusvastus ilman erillisiä laskutoimituksia virta- ja jännitearvoilla. Käytettäessä erillisiä jännite- ja virtamittareita saadaan maadoitusresistanssi kaavasta

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0}$$



Kuva 4.25 Mittauspiikkien sijoitus

Mittauksessa tarvittava jännite muodostetaan yleensä käsikäyttöisellä vaihtovirtageneraattorilla, jonka tyhjäkäyntijännite on suuruusluokkaa 200–500 V ja taajuus 50–100 Hz.

Yleisen televerkon rakennemääräysten mukaiset maadoitusvastukset ovat

- keskus-, linkki- ja radiopuhelinasemalla korkeintaan 50  $\Omega$
- ylijännitesuojapäätteellä 20  $\Omega$
- yhden parikaapelin tai avojohdon haaroituspisteessä korkeintaan 300  $\Omega$
- ylijännitesuojattomalla päätteellä 20–100  $\Omega$
- kaapelivaipalla korkeintaan 100  $\Omega$  ja
- tilaajamaadoituksessa 300  $\Omega$ .

#### 4.6.2 Antennista takaisin heijastuvan tehon mittaus

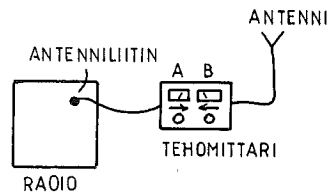
Monissa radiolaitteissa antennin sovituksen viritäminen ja tarkastaminen suoritetaan laitteessa olevan SAS- tai takaisin heijastuvan tehon mittarin avulla. Kyseiset mittarit näyttävät sovitustilanteessa minimilukemaa. Jos antennin tai antennikaapelin impedanssi poikkeaa lähettimen impedanssista kyseisellä taajuudella, aiheutuu mittarin näyttämään kasvanut lukuarvo, joka on sitä suurempi mitä virheellisempi sovitus on kysymyksessä. Suurin näyttö saadaan silloin, kun antenniliitin on oikosulussa tai siihen ei ole kytketty lainkaan antennia. Antennin sovitus voidaan mitata myös ulkoisesti joko suoraan kaksisuuntaisella tehomittarilla tai epäsuorasti yksisuuntaisella tehomittarilla.

#### Suora mittaus

Kaksisuuntainen tehomittari kytketään antenniliitimeen. Mittarin tehokytkimien on oltava suurimman tehoarvon kohdalla. Mittarin toiseen antennikaapeliliitintään kytketään antennikaapeli ja antenni. Radiolaitteen tehoja kytkettäessä ei mittalaitteen suurinta sallittua tehoa saa ylittää.

Kuvan 4.26 mittari A näyttää radiosta lähtevän tehon ja mittari B antennista takaisin heijastuneen tehon. Mittarin tehokytkimiä on tarvittaessa käännettävä pienemmälle alueelle selvän tuloksen saamiseksi. Sovitustilanteessa on mittarin B näytettävä herkimmillä alueella nolaa.

Suoraan mittaukseen voidaan käyttää myös mittaria, jossa tehon mittaussuunnan vaihto tapahtuu kytkimellä. Tällöin tarkastetaan ensin lähtöteho ja sen jälkeen mittaussuunta vaihtamalla antennipiirin sovitus.



Kuva 4.26 Suora mittaus

## **Epäsuora mittaus**

Epäsuoraan mittaukseen pätevät edellisessä kohdassa mainitut tehoa koskevat kohdat. Epäsuorassa mittauksessa mitataan tehomittarilla ensin lähtöteho ja sen jälkeen kytketään antenni mittarin tuloliitimeen ja radio lähtöliitimeen, jolloin mittarin näyttöön saadaan mahdollinen takaisin heijastunut teho.

## 5 KENTTÄVIESTIJÄRJESTELMIIN KOHDISTUVIA ELEKTRONISIA UHKA- TEKIJÖITÄ

### 5.1 Elektroninen sodankäynti

#### 5.1.1 Elektroninen uhka

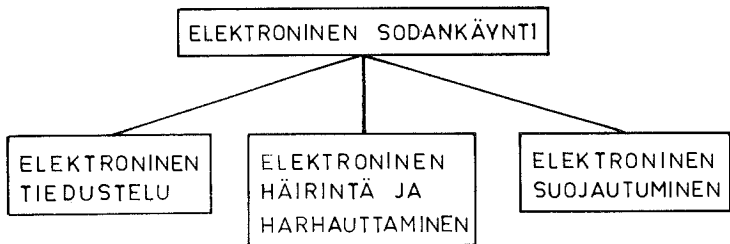
Elektroninen uhka on vaikuttamassa aina ja kaikkialla. Taistelukentällä se uhkaa erityisesti lamauttaa johtamisen ja estää tulenkäytön. Uhka on poistettava tai ainakin sen vaikutusmahdollisuuksia on pienennettävä. Tämä taistelu elektronista uhkaa vastaan on elektronista sodankäyntiä.

Elektronisen sodankäynnin päämääränä on

- käyttää hyväksi sähkömagneettista säteilyä tietojen saamiseksi
- vähentää vihollisen mahdollisuuksia käyttää hyväkseen sähkömagneettista säteilyään sekä
- suojata oma sähkömagneettisen säteilyn käyttö.

Elektroninen sodankäynti jakautuu elektroniseen

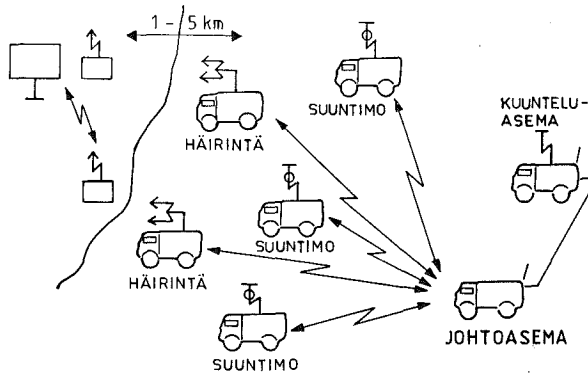
- tiedusteluun
- häirintään ja harhauttamiseen sekä
- suojautumiseen.



Kuva 5.1 Elektroninen sodankäynti

Elektronisen sodankäynnin yksikössä ovat edustettuina kaikki elektronisen sodankäynnin osa-alueet siten, että se sisältää esimerkiksi

- johtoaseman
- kuunteluaseman
- suuntimoita ja
- häirintäasemia.



Kuva 5.2 Elektronisen sodankäynnin yksikkö

Elektronisen sodankäynnin vaikutus saattaa olla taistelun ratkaisuvaiheessa merkittävä, jos vihollinen kykenee viestiyhteyksiä lamauttamalla ja viestikeskuksia tuhoamalla esimerkiksi estämään tykistön keskitetyn tulenkäytön tai havaitsemaan reservijoukkojen siirrot.

### 5.1.2 Elektroninen tiedustelu

Elektronisen tiedustelun päämääränä on ilmaista uhka ja hankkia tietoja omaa elektronista sodankäyntiä sekä muuta omaa toimintaa varten.

Elektroninen tiedustelu on sähkömagneettisen signaalin

- sieppaamista
- tunnistamista
- paikantamista ja
- analysointia.

Signaaleja etsitään hakuvastaanottimilla, joiden pyyhkäisy nopeus voi olla jopa 100 MHz/s. Signaalin löytymiseen vaikuttaa oleellisesti etäisyys. Jos hakuvastaanotin on sijoitettu ilma-alukseen, etäisyyttä rajoittaa lähinnä vapaan tilan vaimennus ( $A$ ). Signaali vaimenee tällöin verrannollisena etäisyyden toiseen potenssiin.

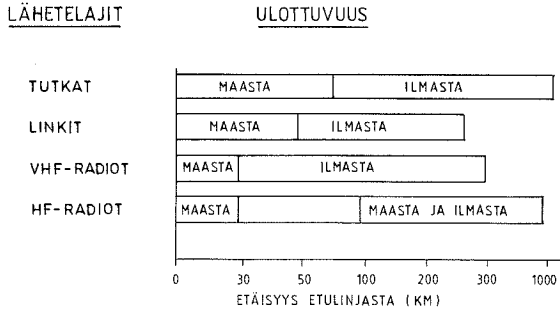
$$A = 10 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \text{ (dB)}$$

$$\approx 22 \text{ dB} + 20 \lg \frac{d}{\lambda} \text{ (dB)}, \text{ jossa}$$

$d$  = kuuntelu etäisyys ja

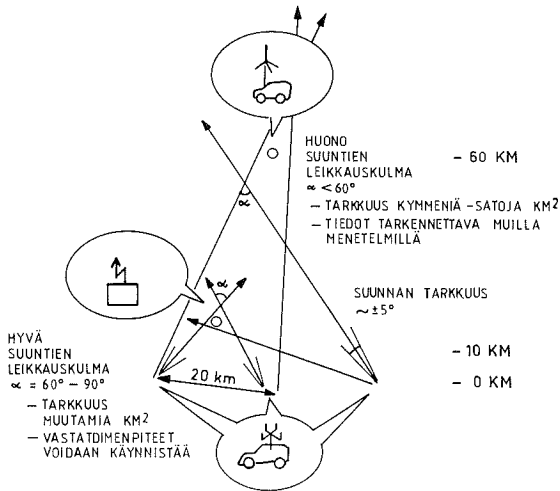
$\lambda$  = aallonpituus

Käytännössä maanpinnan kaarevuuden ja maastoesteiden vaikutuksesta vaimennus on taajuusalueella 20–1000 MHz verrannollinen etäisyyden 3–5 potenssiin.



Kuva 5.3 Elektronisen tiedustelun ulottuvuus

Signaaleja lähettävät asemat pyritään paikantamaan suuntimalla. Suuntimot ryhmitetään siten, että vähintään kahden aseman suuntien leikkauskulma on toiminnan painopistealueella 60–90°. Paikantamistarkkuus kasvaa mittavien suuntimoiden lisääntyessä ja huononee mittausetäisyyden kasvaessa. Käytännössä yhden suuntimion suuntimistarkkuus on HF-alueella 5–10° ja VHF-alueella 2–5°. Yleensä tarkkuus riittää vain muun tiedustelun kohdentamiseen leikkausalueelle.



Kuva 5.4 Signaalin paikantaminen suuntimalla

Tietotekniikkaa apuna käyttäen signaalitiedot kootaan tiedostoiksi sekä analysoidaan tunnistamista ja johtopäätösten tekoa varten. Analysointi kohdistuu sekä signaalin teknisiin ominaisuuksiin että viestityksen muihin piirteisiin. Tuloksena saadaan teknisiä ja taktisia tietoja.

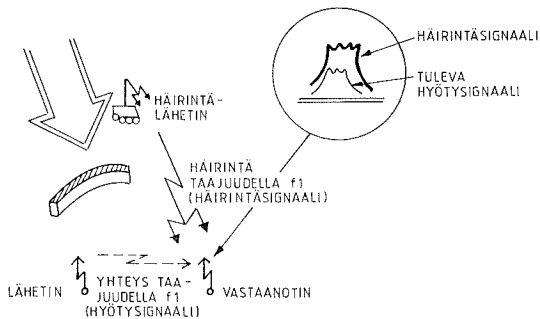
Teknisiä tietoja ovat esimerkiksi käytetyt taajuudet, tehot, modulaatiolajit ja polarisaatiotasot. Taktisia tietoja ovat esimerkiksi välineiden ja järjestelmien käyttö- ja ryhmittymisperiaatteet.

Tärkeintä olisi saada selville siepatun informaation sisältö. Selväkieliset tiedot voidaan hyödyntää sellaisenaan. Salatun tiedon sisältö saadaan selville vain, jos siinä käytetty tietosuoja pystytään murtaamaan. Murtaaminen perustuu tietokoneavusteiseen materiaalin analysointiin ja avainten kokeiluun.

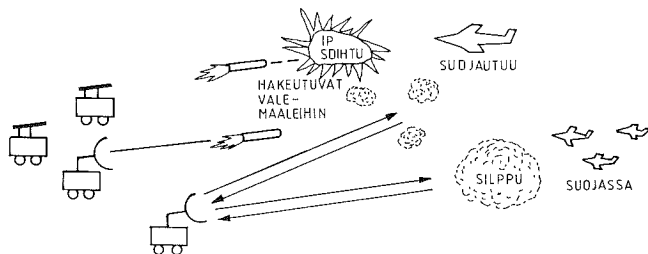
### 5.1.3 Elektroninen häirintä ja harhauttaminen

Elektronisen häirinnän ja harhauttamisen tavoitteena on elektronisten järjestelmien alueellinen ja ajallinen lamauttaminen.

Häirintä voi olla aktiivista tai passiivista riippuen siitä, tapahtuuko häirintä lähettämällä aktiivista häirintää vai käyttämällä erityisesti tutkasignaaleja ja -mentavia tai heijastavia materiaaleja.

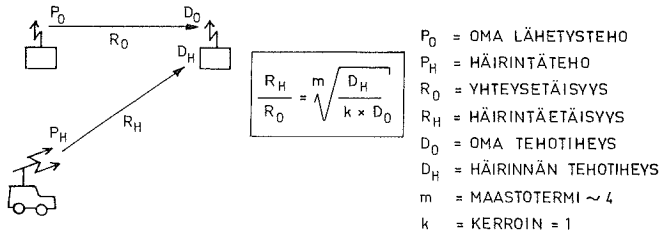


Kuva 5.5 Aktiivisen häirinnän periaate



Kuva 5.6 Passiivisen häirinnän periaate

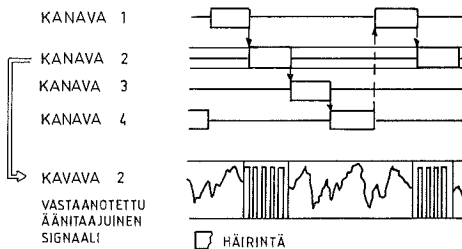
VHF-radioyhteydellä on häirintätilanteessa kysymys tehotehoyksiä kysymys vastaanottimen asemapaikalla, sillä käytettävälle FM-modulaatiota-valle on luonteenomaista vain voimakkaimman lähteen kuuluminen. Lopputulos voidaan laskea häirintäyhtälöstä.



Kuva 5.7 Häirintäyhtälö

Häirintä voi olla tavallaan kapeakaistaista, laajakaistaista tai pyyhkäisevää. Kapeakaistaista häirintää käytetään häirittäessä yksittäisiä taajuuksia. Laajakaistainen häirintä mahdollistaa useiden rinnakkaisten taajuuksien häirinnän samanaikaisesti yhdellä suuritehoisella laajakaistaisella häirintäsignaalilla. Pyyhkäisevässä häirinnässä siirretään kapeakaistaista häirintäsignaalia edestakaisin läpi koko taajuusalueen.

VHF-radioyhteyksiä häirittään tavallisesti käyttämällä aikajakoista monikanavahäirintää, missä hakuvastaanotin etsii häirittäviä signaaleja vuorotellen eri taajuuksilta ja sellaisen löydettyään käynnistää automaattisesti häirintälähtettimen.



Kuva 5.8 Aikajakoinen monikanavahäirintä

#### 5.1.4 Elektroninen suojaus

Elektronisen suojaus päämääränä on suojaus vihollisen elektroniselta sodankäynniltä ja mahdollistaa omien elektronisten järjestelmien käyttö lisäämällä niiden häirinnänsietokykyä taktisin, teknisin ja toiminnallisin keinoin.

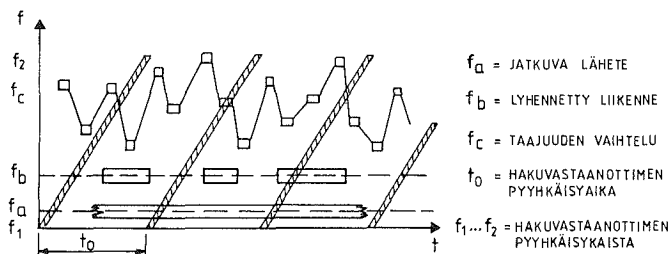


Viestijärjestelmiin kohdistuvaa elektronista tiedustelua voidaan vaikeuttaa

- pienentämällä havaitsemisen todennäköisyyttä
- salaamalla viestitettävä tieto ja
- antamalla harhauttavaa informaatiota.

Havaitsemisen todennäköisyyttä voidaan pienentää

- tuottamalla mahdollisimman pieni signaalin kenttävoimakkuus vihollisen suuntaan
- lyhentämällä viestitysaikaa
- vaihtamalla taajuutta tai levittämällä lähete laajalle taajuusalueelle sekä
- käyttämällä salaamislaitteita.



Kuva 5.9 Havaitsemisen todennäköisyys

Signaalin kenttävoimakkuutta vihollisen suuntaan voidaan VHF-alueella pienentää

- vähentämällä lähetystehoa
- pienentämällä antennikorkeutta
- käyttämällä tehokkaammin suuntaavaa antennia ja
- valitsemalla asemapaikka siten, että vihollisen suuntaan osuu säteilyä vaimentava maastoeste.

Viestitysaikaa voidaan lyhentää

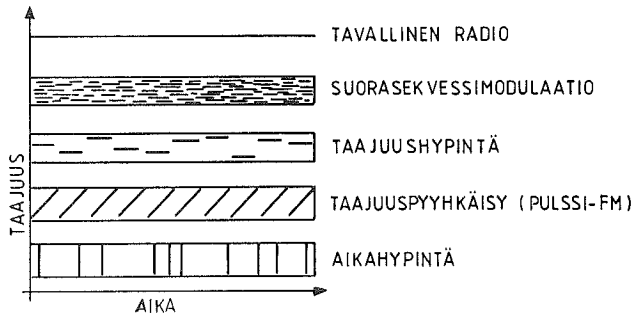
- valmistelemalla viestit huolella etukäteen
- käyttämällä viestin sisältöä lyhentäviä koodeja ja
- viestittämällä sanomalaitteella, jolloin viestitys lyhenee merkittävästi puheviestitykseen verrattuna.

Taajuutta voidaan vaihtaa manuaalisesti tai automaattisesti. Tällä hetkellä on käytössä radioita, joissa taajuus vaihtuu jopa 1000 kertaa/s laajalla taajuusalueella tietyn koodin mukaisesti.

Lähete voidaan levittää signaalin siirtoon tarvittavaa kaistaleveyttä huomattavasti laajemmalle taajuusalueelle erilaisilla hajaspektrijärjestelmillä. Näitä ovat

- suorasekvenssimodulaatio
- taajuushypintä
- taajuuspyyhkäisy (pulssi-FM) ja
- aikahypintä.

Hajaspektrijärjestelmissä keskimääräinen tehoteiheys jää pistetaajuuksilla pieneksi, mikä vaikeuttaa lähetteen havaitsemista.



Kuva 5.10 Hajaspektrijärjestelmät

Nykyaikaisessa salaamisenetelmässä on useimmiten kysymys digitaalisessa muodossa olevan tiedon, bittijonon salaamisesta. Tällöin salaamislaitteen avaingeneraattori muodostaa mahdollisimman satunnaista bittijonoa, joka summataan MODULO 2 -yhteenlaskulla salattavan bittijonon kanssa.

$$0 + 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 0$$

Kuva 5.11 MODULO 2 -yhteenlaskusääntö

Avaingeneraattori käynnistetään perusavaimella, joka voi olla esimerkiksi aakkosista vapaasti valittava määrätynmittainen merkkijono. Saman perusavaimen käynnistämä avaingeneraattori tuottaa aina samaa bittijonoa. Salaus tapahtuu esimerkiksi seuraavasti:

selväkieli	-- 0 0 1 1 0 1 0 --
avain	-- 1 0 1 0 1 1 0 --
salakieli	-- 1 0 0 1 1 0 0 --

Avattaessa suoritetaan summaus uudelleen, jolloin tuloksena on selväkieli edellyttäen, että bittijonot ovat täsmälleen oikein kohdistetut:

salakieli	-- 1 0 0 1 1 0 0 --
avain	-- 1 0 1 0 1 1 0 --
selväkieli	-- 0 0 1 1 0 1 0 --

Salaamisvarmuuteen vaikuttavat tällöin

- avaingeneraattorin tuottaman bittijonon satunnaisuus
- toistumattoman avainjonon pituus ja
- perusavaimen vaihtelumahdollisuus.

Jos esimerkiksi perusavain valitaan aakkosmerkeistä (  $n = 30$  ) kahdeksan merkin mittaisena (  $k = 8$  ) merkkijonona, voidaan erilaisia perusavaimia valita  $n^k$  kappaletta:

$$n^k = 30^8 = 6,561 * 10^{11}$$

Silloinkin, kun salaamisen menetelmä on riittävän luotettava, jää salaamisvarmuuden lopullisesti määrääväksi tekijäksi se, miten käyttäjät käsittelevät, vaihtavat ja säilyttävät avaimia.

Häirinnän vaikutuksia voidaan vähentää osaksi samoilla toimenpiteillä, joilla pienennetään havaitsemisen todennäköisyyttä. Häirintäyhtälöstä voidaan päätellä, että tärkeimmät tekijät, joihin voidaan vaikuttaa tehojen lisäksi ovat yhteysetäisyys ja antennien suunta vaikutus. Häirintätilanteessa tulisi saada

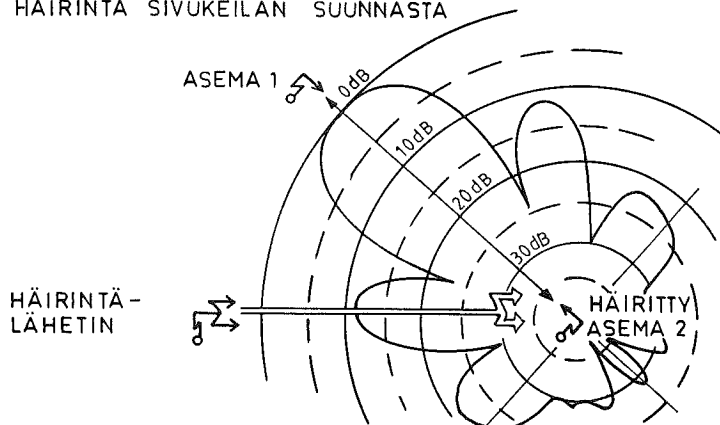
- lähetystehot sekä omalla että vasta-asemalla mahdollisimman suuriksi
- yhteysetäisyys omaan vasta-asemaan mahdollisimman pieneksi sekä
- antennivahvistukset oman vasta-aseman suuntaan mahdollisimman suuriksi ja vihollisen suuntaan mahdollisimman pieniksi.

Häirinnän väistämisen tämän hetken parhaita teknisiä ratkaisuja on hajapektrijärjestelmien käyttö. Hyppivätaajuista lähetettä on häirintäjärjestelmän vaikea seurata. Kaistaleveyttä lisäämällä voidaan saavuttaa hyvä siirtokapasiteetti (C) huonollakin signaalikohinasuhteella, sillä kapasiteetti on verrannollinen kanavan kaistaleveyteen (W) ja signaalikohinasuhteeseen (S/N).

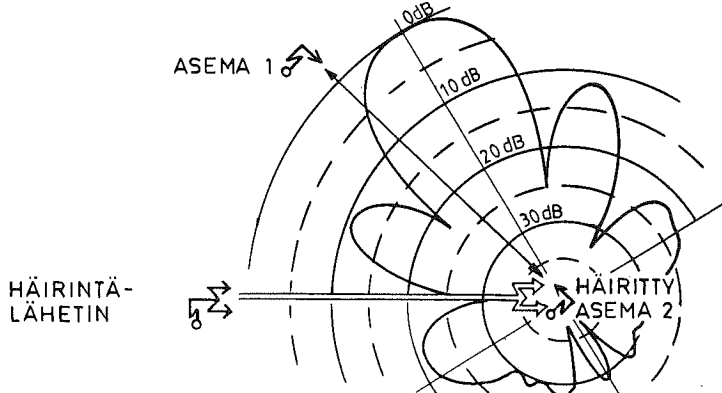
$$C = W * \frac{S}{N}$$

Suunta-antennien avulla voidaan myös pyrkiä selvittämään häirinnän suunta. Antenneja kääntämällä saadaan häirinnän suunnasta voimakkain häirintääni tai mittaustulos. Häirinnän suunnan selvittyä voidaan antenna kääntämällä tai asemapaikkaa vaihtamalla suunnata oman lähteen heikoin kenttävoimakkuus häiritsijää kohti. Vaikka esimerkiksi linkkiyhteydellä tällöin tulee oman vasta-aseman suuntaan 5–10 dB lisävoimennus, saavutetaan häirintäsuuntaan jopa 20 dB vaimennus.

#### HÄIRINTÄ SIVUKEILAN SUUNNASTA



#### ANTENNIN KÄÄNTÄMINEN HÄIRITYLLÄ ASEMALLA



VAIMENNUS HÄIRINTÄSUUNTAAN LISÄÄNTYY JOPA 20 dB. YHTEYSSUUNNAN LISÄVAIMENNUS 5-10 dB KOMPENSOIDAAN LÄHETYSSTEHOJA LISÄÄMÄLLÄ.

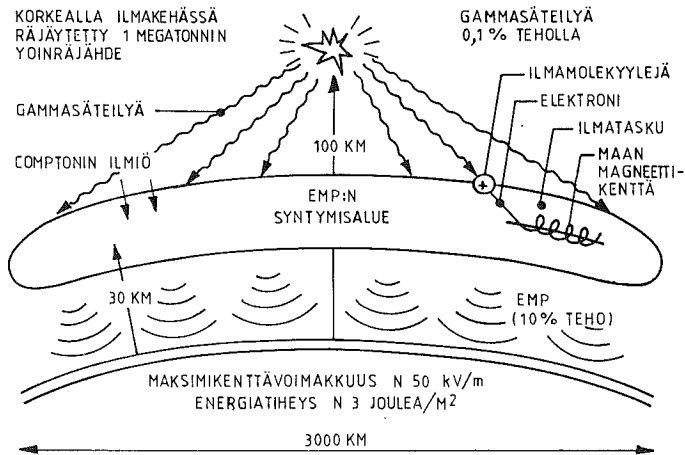
Kuva 5.12 Antennin suuntaamisen vaikutus linkkiyhteyden häirintätalanteissa

## 5.2 Ydinräjähdys

### 5.2.1 Elektromagneettinen pulssi

Ydinräjähdysten eräänä seurauksena syntyy hyvin nopea ja voimakas sähkömagneettinen energiapurkaus, elektromagneettinen pulssi (EMP). Se aiheuttaa elektronisten laitteiden rakenteisiin, antenneihin ja johtimiin energiapulsseja, joiden voimakkuus vaihtelee riippuen ydinräjähdysten räjähdyskorkeudesta, etäisyydestä ja voimakkuudesta. Vaikutuksiltaan laaja-alaisin on korkealla tapahtuva ydinräjähdys.

Korkealla ilmakehässä tapahtuvassa ydinräjähdyksessä leviää vapautuvasta energiasta 0,1 % ympäristöön gammasäteilypulsseina. Gammasäteilyn muodostavat fotonit törmäävät ilmamolekyyleihin vapauttaen elektroneja. Nämä niin sanotut Compton-elektronit jättävät jälkeensä positiivisia ioneja, liikkuvat ulospäin ja törmätessään uudelleen molekyyleihin synnyttävät tuhansittain uusia elektroni-ionipareja. Negatiivisten ja positiivisten varausten jakautuminen aiheuttaa voimakkaan sähkökentän ja varausten liikkeestä syntyy sähkövirta.



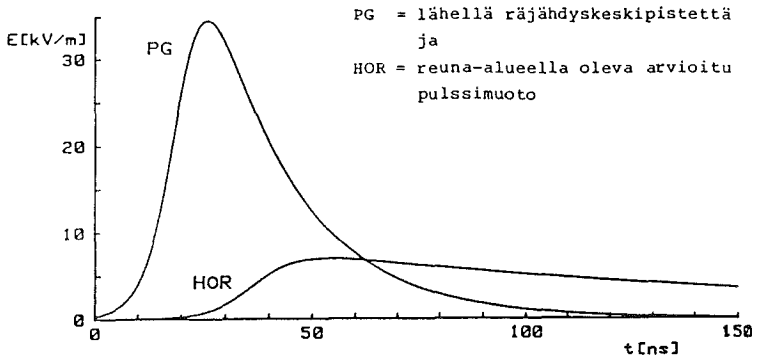
Kuva 5.13 Esimerkki EMP:n syntymekanismista

Maan pinnalla tapahtuva ydinräjähdys synnyttää myös voimakkaan EMP-vaiikutuksen. Koska räjähdyksessä syntyvä gammasäteily törmää heti ilmakehän molekyyleihin eikä pääse vapaasti etenemään pitkiä matkoja, jää EMP:n synnyttävä lähdealue melko pieneksi ja vaikutukset paikallisiksi.

Elektromagneettista pulssia luonnehtivia ominaisuuksia ovat

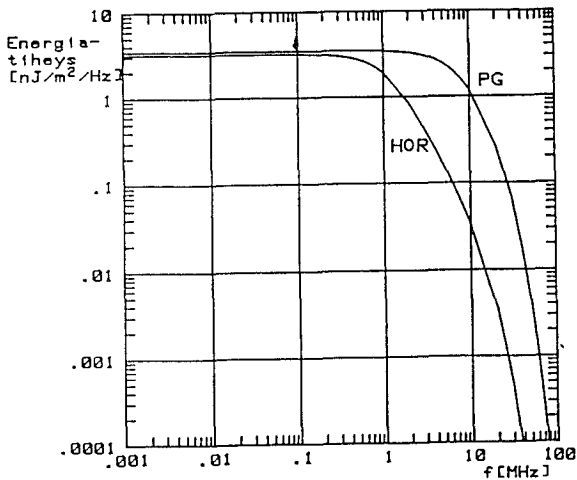
- pulssin nousuaika
- energiaspektri ja
- syntyvät sähkökentän voimakkuudet.

Syntyvän pulssin nousuajat vaihtelevat 10–20 nanosekuntiin. Vertailun vuoksi todettakoon, että salaman nousuaika on vain mikrosekuntien luokkaa.



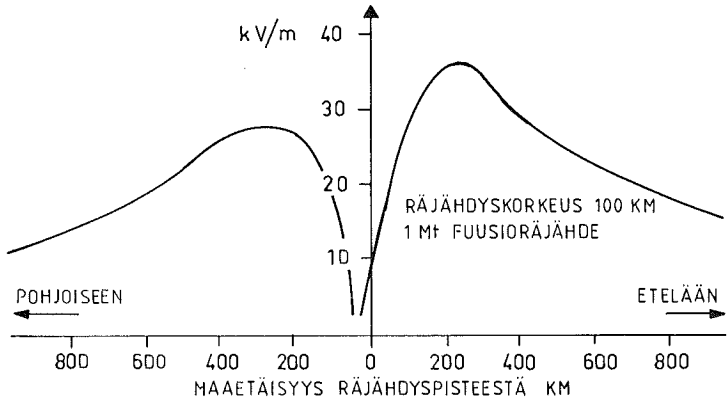
Kuva 5.14 Korkearäjähdyksen EMP:n arvioituja pulssimuotoja

Pulssin taajuusvaste ulottuu noin 80 MHz:iin asti, mutta 95 % sen energiasta esiintyy alle 20–30 MHz:n taajuuksilla. Salaman taajuusvaste ulottuu vain 640 kHz:iin.



Kuva 5.15 Korkearäjähdyksen EMP:n energiaspektriä

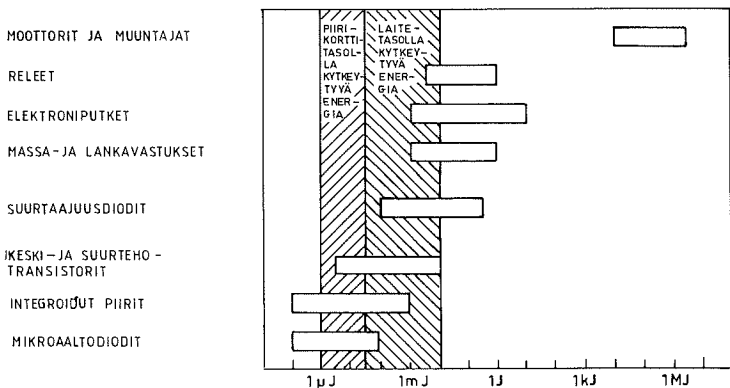
Korkearäjähdyksessä maanpinnalle syntyvät sähkökentän voimakkuudet riippuvat etäisyydestä ja suunnasta räjähdysen kantapisteeseen ja ovat suuruusluokaltaan 10–50 kV/m.



Kuva 5.16 Esimerkki sähkökentän voimakkuudesta maanpinnalla pohjoisella pallonpuoliskolla

Elektromagneettinen pulssi kykenee sille edullisissa olosuhteissa aiheuttamaan vaurioita kaikenlaisille elektroniikkaan perustuville laitteille. EMP:n vaurioittava vaikutus perustuu siihen, että se pystyy indusoimaan antenneihin ja johtimiin energiapulsseja, jotka voivat tuhota herkkiä komponentteja sekä aiheuttaa tietokoneissa ohjelmien katoamisia ja käyttöhäiriöitä.

Sotilaskäyttöön tarkoitettujen laitteiden ja niiden komponenttien kestoisuus on huomattavasti suurempi normaaliin kulutuselektroniikkaan verrattuna.



Kuva 5.17 Sähköisesti lyhyihin antenneihin kytkeytyvän energian suhde komponenttien vaurioitumisenergioihin

Elektromagneettisesta pulssista laitteisiin pääsevä energia pyritään pienentämään suojuuksella niin pieneksi, ettei se aiheuta vaurioita. Tämä toteutetaan

- vaimentamalla sähkömagneettista kenttää laitteiden ympärillä
- huonontamalla kentän kytkeytymistä johtoihin sekä
- rajoittamalla johtoihin kytkeytynyttä jännitettä ja virtaa.

Kentän vaimentaminen laitteiden ympärillä toteutetaan ympäröimällä suojatava laitteisto yhtenäisellä metalliverhouksella tai -verkolla. Näin estetään EMP:n kytkeytyminen laitteiden sisäisiin johdotuksiin ja laitekokonaisuutta yhdistäviin kaapeleihin.

Haitallisen kentän kytkeytymistä suojatun tilan ulkopuolelle ulottuviin johtoihin huononnetaan maadoitetuilla metallivaipoilla.

Avojohtoihin ja antenneihin induoituneiden virtojen ja jännitteiden etenemistä suojattuihin laitteisiin estetään sulakkeilla ja ylijännitesuojilla, jotka rajoittavat läpi pääsevän pulssin amplitudia. Hyötylähetteen salliessa käytetään suodattimia, jotka päästävät lävitseen vain osan pulssin sisältämästä taajuusalueesta.

Laitteistoja voidaan suojata johtoja pitkin tulevilta jännitteiltä ja virroilta myös erottamalla laitteet johdoista lähetteen siirtoon sopivilla optoeristimillä tai käytämällä ulkoisille sähkömagneettisille kentille lähes tunteettomia valokuituja.

Esimerkkinä VHF-kenttäradion vastaanottimeen EMP:n vaikutuksesta induoituvista energiapulsseista tarkastellaan radiota, jonka taajuusalue on 30–76 MHz ja jossa voidaan käyttää kolmea eri antennia. Antennityypit ja niiden sieppauspinta-alat ( $A_e$ ) ovat

— marssiantenni	$A_e = 4 \text{ m}^2$
— normaaliantenni	$A_e = 8 \text{ m}^2$
— pitkälanka-antenni	$A_e = 13 \text{ m}^2$

Oletetaan vastaanottimen etupiirin kaistaleveydeksi  $B = 20 \text{ MHz}$ . Korkearajähdyksen EMP:n energiaspektrin perusteella voidaan laskea vastaanottimen etupiireihin kohdistuva energiapulssi kaavasta

$$\text{Energia} = A_e * \text{energiatiheys} * B$$

Energiatiheys riippuu vastaanottimessa käytetystä taajuusalueesta siten, että se on esimerkiksi

— 10	MHz:n alueella	1	nJ/Hz/m <sup>2</sup>
— 30	"	0,1	"
— 80	"	0,01	"



Esimerkkiradion etupiireihin kohdistuvat energiapulssit eri antennityypeillä ja taajuusalueilla ovat näin ollen seuraavan taulukon mukaiset:

antennityyppi	10 MHz	30 MHz	80 MHz
— marssiantenni	80 mJ	8 mJ	0,8 mJ
— normaaliantenni	160 mJ	16 mJ	1,6 mJ
— pitkälanka-antenni	260 mJ	26 mJ	2,6 mJ

Taulukko osoittaa, että radion etupiirien puolijohteet saattavat kestää EMP:n vaikutuksen käytettäessä marssiantennia yli 30 MHz:n taajuusalueella.

### 5.2.2 Korkearäjähdyksen vaikutus radioyhteyksiin

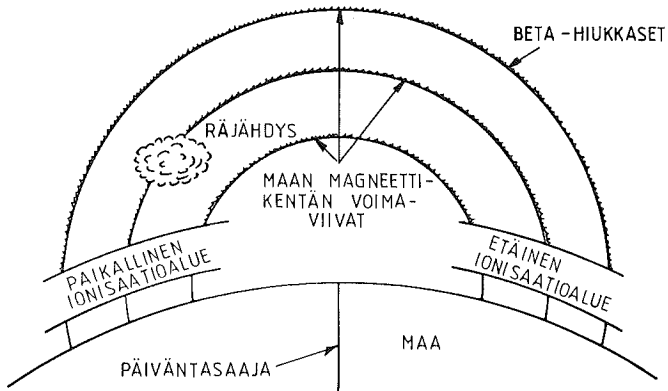
Ilmakehä vaikuttaa kaikkiin radiotaajuuksia käyttäviin viestijärjestelmiin joko helpottaen tai vaikeuttaen radioaaltojen etenemistä. Esimerkiksi ionosfäärin ylemmät kerrokset parantavat HF -radioyhteyksiä heijastamalla signaalit takaisin maahan ja mahdollistaen hyvinkin pitkät yhteysetäisyydet. Samalla kuitenkin ionosfäärissä alempana oleva D-kerros heikentää yhteyksiä vaimentamalla signaaleja ja lähettämällä kohinaa.

Ilmakehässä tapahtuva ydinräjähdys tuottaa tavallisesti vapaita elektroneja ja lisää ionosfäärin kerrosten ionisaatiota. Tästä seuraa muutoksia radioaaltojen etenemiseen vaikuttavien kerrosten ominaisuuksissa. Muutokset riippuvat räjähdyskorkeudesta ja vuorokauden ajasta. Räjähdyskorkeus määrää myös tapahtuvien muutosten maantieteellisen ulottuvuuden.

Ydinräjähdys tulipallo edustaa suunnaton ionisaatiotasoa, mikä ilmenee alueen radioyhteyksissä lämpökohinan lisääntymisenä ja radiosignaalien etenemisen estymisenä.

Räjähdys yöllä ionosfäärin D-kerroksessa voi aiheuttaa pinta-aaltojen vaimenemista ja heijastumista. Räjähdys lähellä F-kerrosta voi lisätä tai vähentää kerroksen heijastavuutta riippuen vuorokauden ajasta ja kerroksessa vallitsevasta tilasta.

Korkearäjähdys kehittää myös beta-hiukkasia tai vapaita elektroneja, jotka levittäytyvät maan magneetikentän voimaviivojen suuntaisesti. Tästä seuraa D-kerroksen ionisaation kasvua ei ainoastaan paikallisesti vaan samanaikaisesti myös vastakkaisella puolella maapalloa. Syntyneillä ionisaatioalueilla radioaaltojen etenemisolosuhteet voivat vaihdella äkillisesti tai yhteyksien aikaansaanti voi olla jopa mahdotonta.



Kuva 5.18 Korkearäjähdyksen paikallinen ja etäinen ionisaatioalue

Korkearäjähdys vaikuttaa eri tavoin eri taajuusalueilla. Muiden kuin HF-radioaaltojen etenemisen kannalta päävaikutus on D-kerroksen ionisaation lisääntyminen ja sen aiheuttama vaimennuksen kasvu.

Korkearäjähdyksen johdosta HF-radioliikenne saattaa estyä kokonaan. Sen sijaan VLF-, LF- ja MF -yhteydet eivät ole yhtä herkkiä. Myöskin suoraan säteilyyn perustuvat VHF- ja UHF -yhteydet ovat tavallisesti tunteettomia ydinräjähdysten vaikutuksille. Kuitenkin on mahdollista, että VHF- ja UHF -yhteydet vaimenevat, siroavat tai estyvät lähetyks- ja vastaanottpisteiden välillä tapahtuvan ydinräjähdysten vuoksi. Samoin satelliittiyhteys voi estyä satelliitin kulkiessa muuttuneen ionosfäärin kautta.

Ydinräjähdysten aiheuttamat ionosfääri-ilmiot ovat kestoaltaan muutamasta sekunnista useisiin tunteihin.

Radioyhteyksien onnistuminen tilanteessa, jossa käytetään ydinräjähkeitä edellyttää, että käytettävissä on eri taajuusalueilla toimivia radioita. Parhaita ovat VHF- ja UHF -alueen laitteet. Yhteyden saantia voi parantaa myös muuttamalla antennirakenteita ja vaikuttamalla näin radioaaltojen etenemiseen. Lisäksi radioiden on oltava riittävän hyvin suojatut EMP:n vaikutuksilta.

## SI — JÄRJESTELMÄ

TAULUKKO 1

## PERUSYKSIKÖT

Suure	Tunnus	Yksikkö	Tunnus
pituus	l, s	metri	m
massa	m	kilogramma	kg
aika	t	sekunti	s
sähkövirta	I	ampeeri	A
lämpötila	T	kelvin	K
ainemäärä	n	mooli	mol
valovoima	I	kandela	cd

TAULUKKO 2

## JOHDANNAISYKSIKÖJÄ

Suure	Tunnus	Yksikkö	Tunnus	Huom
tasokulma	$\alpha, \beta \dots$	radiaani, aste	rad, °	
avaruuskulma	$\Omega, \omega \dots$	steradiaani	sr	
voima	F	newton	N	1 N = 1 kg m/s <sup>2</sup>
paine	p	pascal	Pa	1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup>
valovirta	$\emptyset$	lumen	lm	1 lm = 1 cd sr
valaistusvoimakkuus	E	luxi	lx	1 lx = 1 lm/m <sup>2</sup>
sähkövaraus	Q	coulombi	C	1 C = 1 As
sähkökentän voim	E		V/m	
sähköpotentiaali	V	voltti	V	
jännite	U	voltti	V	
sähkömotorinen voima	E	voltti	V	
kapasitanssi	C	faradi	F	1 F = 1 As/V
magneettikentän voima	H		A/m	
magneettivuon tih	B	tesla	T	1 T = 1 Wb/m <sup>2</sup>
magneettivuo	$\emptyset$	weber	Wb	1 Wb = 1 Vs
induktanssi	L	henry	H	1 H = 1 Vs/A
keskinäisinduktanssi		M, L <sub>mn</sub>	henry	H
resistanssi	R	ohmi		1 = 1 V/A
konduktanssi	G	siemens	S	1 S = 1 $\Omega^{-1}$
ominaisvastus	$\rho$		$\Omega$ m	
impedanssi	Z	ohmi	$\Omega$	
reaktanssi	X	ohmi	$\Omega$	
kapasitiivinen reaktanssi	X	ohmi	$\Omega$	
induktiivinen reaktanssi	X	ohmi	$\Omega$	

138

teho	P	watti	W	1W=1J/s
kulmanopeus	$\omega$		rad/s, °/s	1°/s= 2 $\pi$ /360rad/s
taajuus	f	hertsi	Hz	
pyörimisnopeus	n		s <sup>-1</sup>	
työ, energia	W, E	joule	J	1J=1Nm

### TAULUKKO 3

### ETULIITTEET

Kerroin	Nimi	Tunnus
10 <sup>12</sup>	tera	T
10 <sup>9</sup>	giga	G
10 <sup>6</sup>	mega	M
10 <sup>3</sup>	kilo	k
10 <sup>-1</sup>	desi	d
10 <sup>-2</sup>	sentti	c
10 <sup>-3</sup>	milli	m
10 <sup>-6</sup>	mikro	$\mu$
10 <sup>-9</sup>	nano	n
10 <sup>-12</sup>	piko	p

















00270/1 Kirjasto  
04 VTEKNOPAS  
Pääesikunnan koulutusosasto  
Viestitekniiikan opas  
Puolustusvoimien kehittämiskeskus

TKKK MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU



600 000 1766