

8 AHELAPARAMEETRITE MÕÕTMINE

8.1. Üldist

Lihtsaim elektriabel – 1-port (2-klemm) takistusega Z

Mõõtmine – antakse vooluallikalt pinge ja vool (ahel ise on passiivne !)

Alalispingel mõõdetakse elektriabelate takistust või juhtivust:

- takistus R (ühik oom, tähis Ω)
- juhtivus $G = 1/R$ (ühik siimens, tähis S)

Vahelduvpingel on vaja mõõta komplekstakistuse Z reaali- ja imaginaarosa:



Keerukamad elektriabelad

- 2-port (4-klemm)

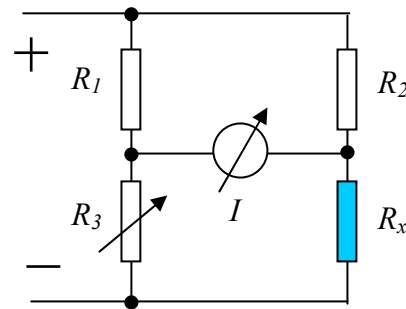
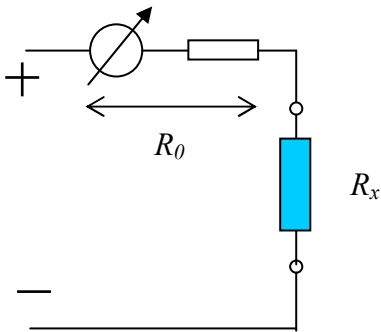


- n-port omab n porti (klemmipaari)

Kõrgemal sagedusel (üle 1 GHz) tuleb vahelduvvooluahelaid vaadelda kui hajuparaameetritega süsteeme. Nn koondparaameetritega ahela asemel minnakse üle ruumis jaotatud paraameetritele.

Allpool p.8.5 vaadeldakse kasutatavaid paraameetrite süsteeme, millest kõrgemal sagedusel on kõige enam kasutusel H-paraameetrid.

8.2 Lihtsad mõõtmised alalisvoolul: oommeeter ja sild

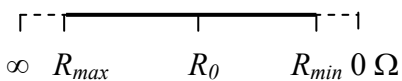


Oommeetriga mõõtmine:

- vool $I \Rightarrow I_{max}$, kui $R_x = 0$
- loetakse R_x

Omadused:

- mõõteviga 2 ... 5%
- mittelineaarne skaala



Silla tasakaaluvõrrand:

$$I = 0; \quad R_1/R_2 = R_3/R_x;$$

siit $R_x = R_2 R_3 / R_1$

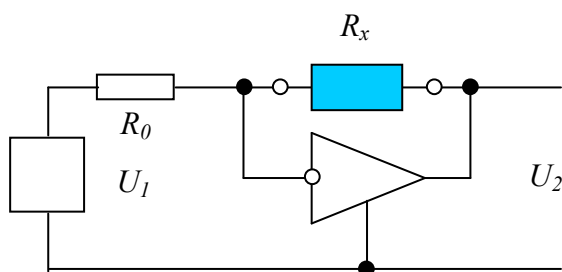
Mõõtmine:

- sild tasakaalustatakse ($I \Rightarrow 0$)
- loetakse R_x

Omadused:

- hea täpsus 0,5 ... 0,05%
- vajadus silda tasakaalustada

8.3 Lineaarne isetasakaalustuv lülitus



Tasakaal $U_1/R_0 = U_2/R_x$

siit $R_x = R_0 U_2 / U_1$

- lineaarne skaala U_2 järgi

Kasutusel uutes seadmetes
(dig. multimeetrid)

Täpsus kuni 0,01%

8.4 Vahelduvvooluahelate paraameetrid

Paraameetrite keerukus:

– paraameetrid on kompleksed

$$Z = ze^{j\varphi} = R + jX \quad Y = 1/Z \text{ jne}$$

– paraameetrid sõltuvad mõõtesagedusest

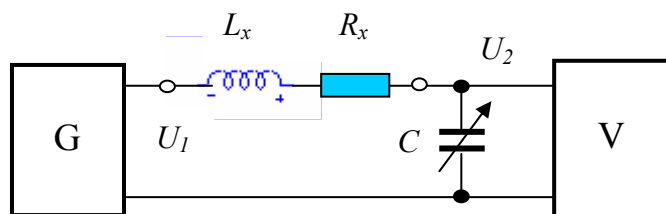
$$Z_L = j\omega L \quad G_C = j\omega C \quad Z = j\omega L + 1/(j\omega C) \text{ jne}$$

– parasiitparaameetrid (mahtuvused ja induktiivsused) on sõltuvalt seadme töösagedusest väga olulised, raske on valida otstarbekat aseskeemi

8.4.1 Resonantsmetod

Väikeste kadudega L ja C mõõtmiseks sobib resonantsmeetod. Praktiliselt kasutatakse hüveteguri mõõturit (Q-meetrit), mis koosneb järgmistest osadest:

- kõrgsagedusgeneraator (häälestatav laias sagedusalas)
- mõõtevõnkering (häälestatava mahtuvusega)
- kõrgsagedusvoltmeeter.



Põhilised mõõtmised:

1) Induktiivsuse mõõtmine – mõõdetav element L_x , võnkering häälest. resonantsi C abil, lugem saadakse $L_x = 1/(\omega^2 C)$

2) Mahtuvuse mõõtmine:

- võnkering häälest. resonantsi soovitud sagedusel ilma mõõdetava C -ta;
- C_x pannakse paralleelselt C -ga ja vähendades C -d saavutatakse teine resonants, lugem on $C_x = C_1 - C_2$.

Võimaldab mõõta: a) mahtuvust ja selle kaotegurit $\text{tg}\delta$
 b) induktiivsust ja selle hüvetegurit Q_L
 c) võnkeringi hüvetegurit Q

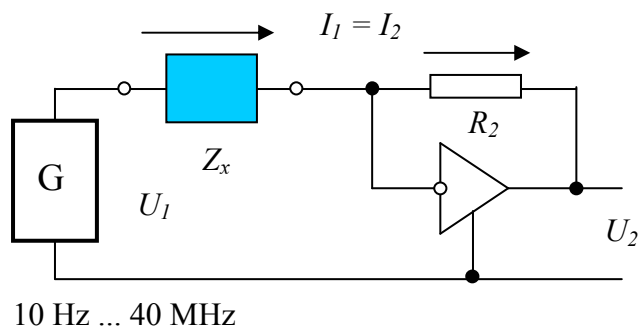
- mahtuvuste mõõtmiseks on vajalik etaloninduktiivsus;
- sagedusala 22 kHz ... 300 MHz.

8.4.2 Isetasakaalustuv sild

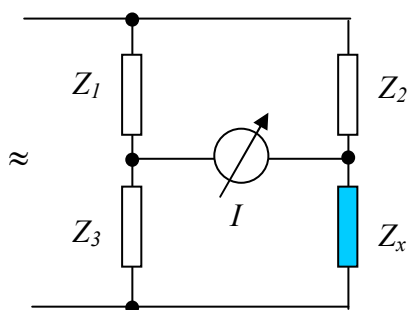
Isetasakaalustuv sild – lülitus vahelduvvoolu takistuse mõõtmiseks laias sagedusalas.

Võrrandist $I_1 = I_2$ saame: $Z = R_2 U_1 / U_2$

Digitaalseadme täpsus kuni 0,05%



8.4.3 Madalsageduslikud vahelduvvoolu sillad



Vahelduvvoolu takistus $Z = z e^{j\varphi} = R + jX$

Sild on tasakaalus, kui $I = 0$

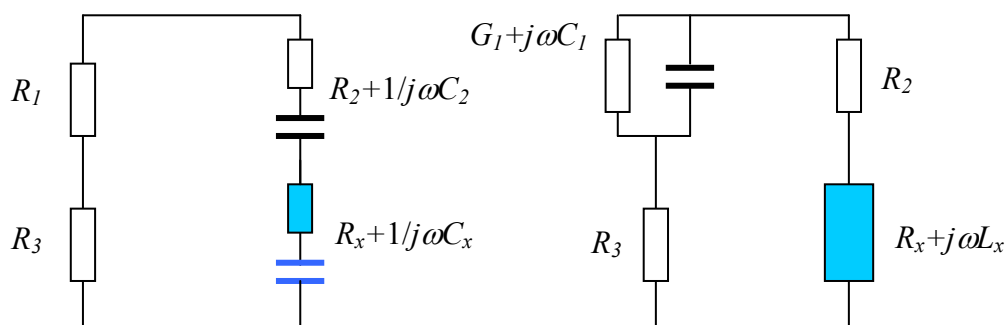
Tasakaaluvõrrand komplekskujul

$$Z_1 Z_x = Z_2 Z_3,$$

– moodulite ja faaside kaudu

$$z_1 z_x = z_2 z_3, \quad \varphi_1 + \varphi_x = \varphi_2 + \varphi_3.$$

Mõned käsitsi tasakaalustatavad sillad



Mõõdetav takistus: RC -järjestikühendus

Tasakaaluvõrrand:

$$R_1(R_x + 1/j\omega C_x) = R_3(R_2 + 1/j\omega C_2);$$

$$R_1 R_x = R_3 R_2; \quad R_x = R_3 R_2 / R_1;$$

$$R_1/j\omega C_x = R_3/j\omega C_2; \quad R_1/C_x = R_3/C_2;$$

$$C_x = R_1 C_2 / R_3;$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_x R_x = \omega C_2 R_2;$$

 RL -järjestikühendus

Tasakaaluvõrrand:

$$R_2(G_1 + j\omega C_1) = (R_x + j\omega L_x) / R_3;$$

$$R_2 G_1 = R_x / R_3; \quad R_x = R_2 G_1 R_3;$$

$$R_2 C_1 = L_x / R_3;$$

$$L_x = R_2 C_1 R_3;$$

$$Q_x = \omega L_x / R_x = \omega C_1 / G_1;$$

Mõlemad lülitused tasakaalustatakse 2 reguleeritava elemendi muutmise teel, tulemused saadakse reguleerimisskaaladelt. Kasutusel madalatel sagedustel kuni 2 kHz.

8.5 Parameetrite süsteemid

Kaksklemmi (1-pordi) parameetrik on Z : võrrand $U = IZ, \quad Y = 1/Z$.

Neliklemmi (2-pordi) parameetrite süsteemid:

Z-parameetrid (takistusparameetrid)

$$U_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2$$

$$U_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2$$



Z -parameetrite mõõtmine toimub tühijooksu olukorras:

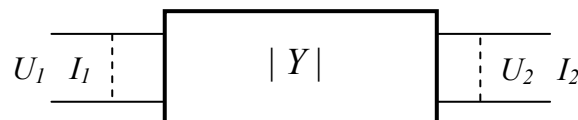
– $I_2 = 0$ (tühijooks väljundis), leiame $z_{11} = U_1/I_1$ ja $z_{21} = U_2/I_1$

– $I_1 = 0$ (tühijooks sisendis), leiame $z_{22} = U_2/I_2$ ja $z_{12} = U_1/I_2$

Y-parameetrid (juhtivusparameetrid)

$$I_1 = y_{11}U_1 + y_{12}U_2$$

$$I_2 = y_{21}U_1 + y_{22}U_2$$



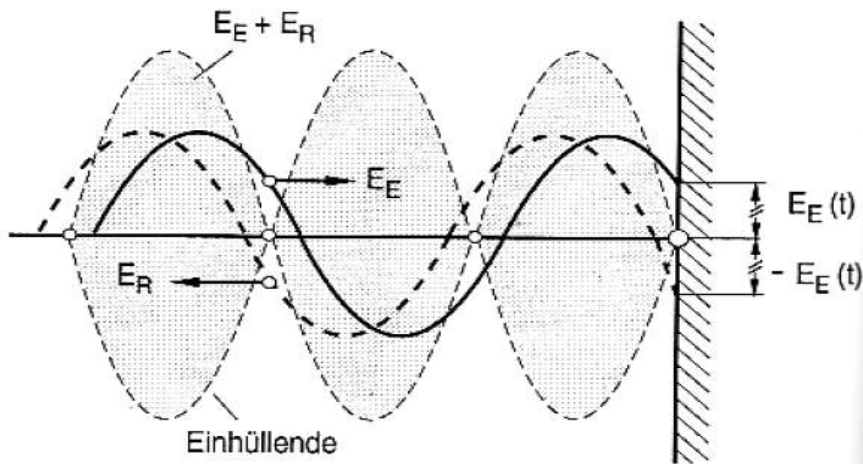
Juhtivusparameetrid leitakse lühise olukorras:

– $U_2 = 0$ (lühis väljundis), leiame $y_{11} = I_1/U_1$ ja $y_{21} = I_2/U_1$

– $U_1 = 0$ (lühis sisendis), leiame $y_{22} = I_2/U_2$ ja $y_{12} = I_1/U_2$

H-paraameetrid (hübriidparaameetrid)

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \quad I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2, \text{ kasutusel transistoritehnikas}$$



S-paraameetrid (hajuparaameetrid) on kasutusel kõrgetel sagedustel. Seosed langeva ja peegeldunud pingelaine vahel:

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{aligned}$$

Siin a on langeva pingelaine kompleks ja b – peegeldunud pingelaine kompleks.

S-paraameetrid määratakse 2-pordi kahepoolsete mõõtmiste järgi.

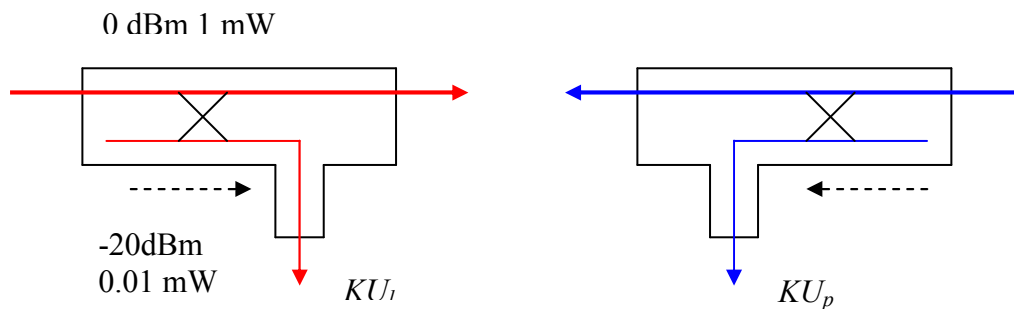
Pärisuunaline (sisendist väljundisse – **FORWARD**) edastus määrab paraameetrid S_{11} ja S_{21} , eeldusel et väljundis on sobitatud koormus ja $a_2 = 0$:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{U_{peeg}}{U_{lang}} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \\ S_{21} &= \frac{U_{edast}}{U_{lang}} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \end{aligned}$$

Vastassuunaline (väljundist sisendisse – **REVERSE**) edastus määrab paraameetrid S_{22} ja S_{12} , eeldusel et sisendis on sobitatud koormus ja $a_1 = 0$:

$$\begin{aligned} S_{22} &= \frac{U_{peeg}}{U_{lang}} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \\ S_{12} &= \frac{U_{edast}}{U_{lang}} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \end{aligned}$$

Suundhargmik on seade, mis eraldab langeva ja peegeldunud laine komponendid sisendis (a_1 ja b_1) ja väljundis (a_2 ja b_2).

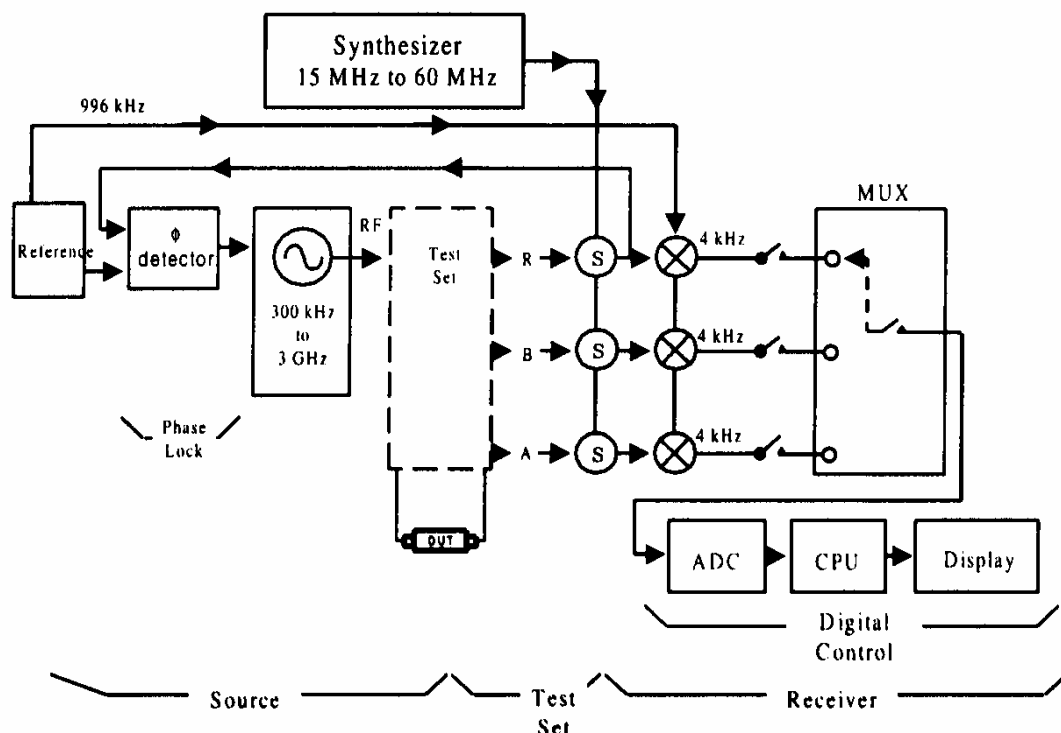


Mõõtmised tehakse komplekskujul, mis annab amplituudi ja faasi. Hetkväärtuste mõõtmiseks on kasutusel strobeeriv 3- või 4-kanaline lülitus. Allpool on toodud seadme struktuurskeemi näide sagedusalale 300 kHz ... 3 GHz.

8.6 S-paraameetrite analüsaatorid

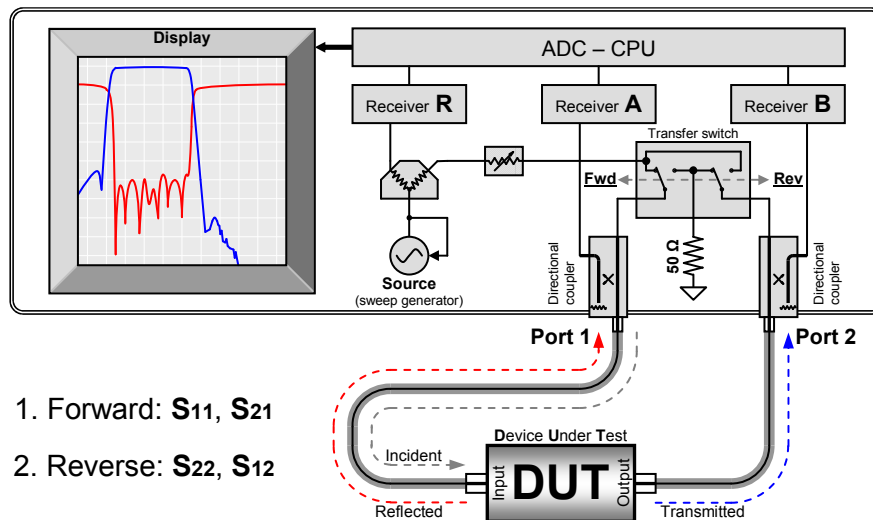
S-paraameetrite analüsaatorid on ette nähtud 2-pordi paraameetrite mõõtmiseks:

- pärisuunalisel edastusel, kui on vaja leida vaid võimendus S_{11} ja peegeldustegur S_{12} sisendi poolelt;
- kahepoolsel edastusel, kus mõõdetakse kõik S-paraameetrid; selleks tuleb teha mõõtmised nii pärisuunas kui vastassuunas.



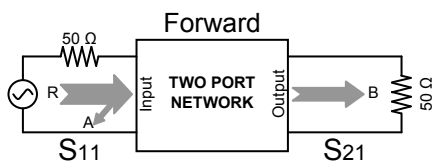
Анализатор сети включает в себя ВЧ генератор качающейся частоты (Source) и три приемника каналов (Receivers R, A, B). Генератор вырабатывает опорный сигнал (Reference signal), частота которого линейно изменяется в диапазоне измерения. Этот сигнал является падающим и измеряется приемником R – канала.

Вход испытуемого прибора подключается к Порту 1 анализатора, выход – к Порту 2. Измеряемые сигналы портов 1 и 2 снимаются направленными ответвителями (directional couplers, смотри пункт 6) и подаются на приемники A и B каналов соответственно. Сигналы приемников (R, A и B) преобразуются в цифровую форму, обрабатываются процессором и результаты измерений отображаются на дисплее в желаемом формате.



Передаточным ключом (transfer switch) осуществляется переключение между прямыми (Forward, показано на рисунке выше) и обратными (Reverse) измерениями.

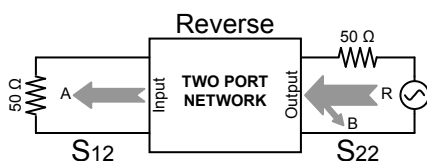
Прямые измерения. Падающий сигнал воздействует на вход тестируемого прибора, а выход нагружается 50 Ом резистором для исключения отражения. Отраженный от входа сигнал измеряется приемником A – канала, а переданный со входа на выход – приемником B – канала. Результатом прямых измерений являются параметры S_{11} и S_{21} .



$$S_{11} = \frac{\text{Input reflected}}{\text{Incident}} = \frac{A_{\text{fwd}}}{R}$$

$$S_{21} = \frac{\text{Forward transmitted}}{\text{Incident}} = \frac{B_{\text{fwd}}}{R}$$

Обратные измерения. Падающий сигнал воздействует на выход тестируемого прибора, а вход нагружается 50 Ом резистором для исключения отражения. Отраженный от выхода сигнал измеряется приемником B – канала, а переданный с выхода на вход – приемником A – канала. Результатом обратных измерений являются параметры S_{22} и S_{12} .



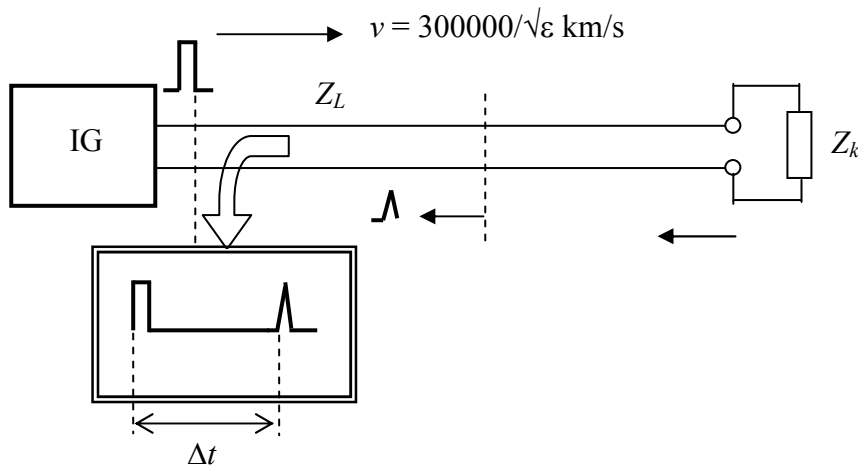
$$S_{22} = \frac{\text{Output reflected}}{\text{Incident}} = \frac{B_{\text{rev}}}{R}$$

$$S_{12} = \frac{\text{Reverse transmitted}}{\text{Incident}} = \frac{A_{\text{rev}}}{R}$$

8.7 Sideliini rikkekoha määramine

Liinides tekkivate rikete – katkestuste, ülemäärase takistuse, isolatsiooni rikete jne määramine ja rikkekoha lokaliseerimine impulss-reflektomeetriga.

Reflektomeetri tööpõhimõte



Rikke kaugus l on määratud peegelduse hilistumisega : $l = 0,5v\Delta t$.

Peegeldunud impulsi kuju (reflektogramm) võimaldab ligikaudu määrata rikke iseloomu. Peegeldustegur oleneb rikkekoha takistuse ja lainetakistuse ρ suhtest:

$\rho > 0$ kui $|Z_k| > |Z_L|$, ja $\rho < 0$ kui $|Z_k| < |Z_L|$.

Katkestus $R_k \rightarrow \infty$, $\rho = 1$



Suur koormus $R_k > |Z_L|$, $0 < \rho < 1$



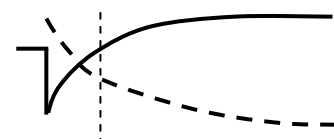
Väike koormus $R_k < |Z_L|$, $0 > \rho > -1$



Lühis $R_k = 0$, $\rho = -1$



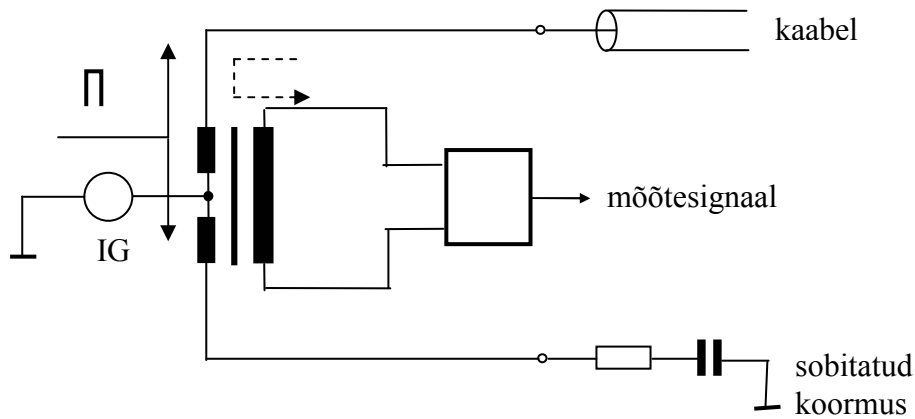
RC-koormus – alghetkel lühis



RL-koormus – lõppväärtus lühis

Impulsi kestus määrab lahutusvõime ($1 \text{ ns} \rightarrow 20 \text{ cm}$). Impulsside kordussagedus võib olla kuni 10 kHz .

Langeva ja peegeldunud impulsi eraldamine – suundhargmik vms sobitusseade.



Reflektomeetri kasutamine valgusjuht-liinides (fiibrites):

- on jälgitav nii valgussignaali nõrgenemine piki liini (peegeldused optilistelt ebaühtlustelt liinis) kui liini liitekohad,
- mõõtmine ilma märgita (faasita), kuna toimub vaid intensiivsuse järgi (langus ühikutes dB/km).

