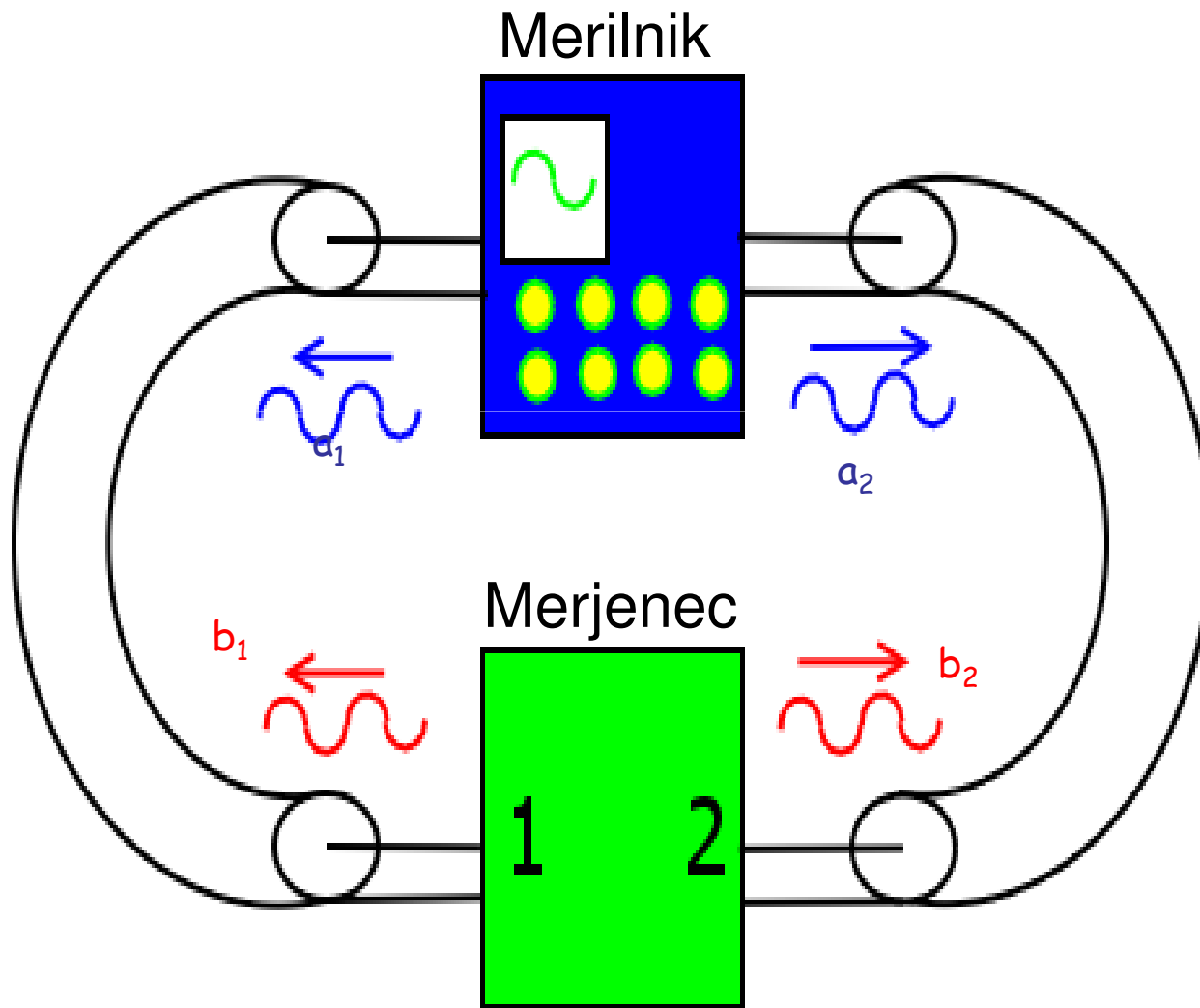


Meritve in inštrumenti¹



Mobitel d.d.,
izobraževanje

18.12. 2009,
predavanje 29

Prof. dr. Jožko
Budin

Vsebina

1. Primer sodobnega mikrovalovnega merilnika parametrov matrike [S]
2. Meritve odboja in prenosa
3. Merilne metode na osnovi smernega sklopnika
4. Merilne metode z napetostno-tokovno sondo
5. Kalibracija merilnih inštrumentov

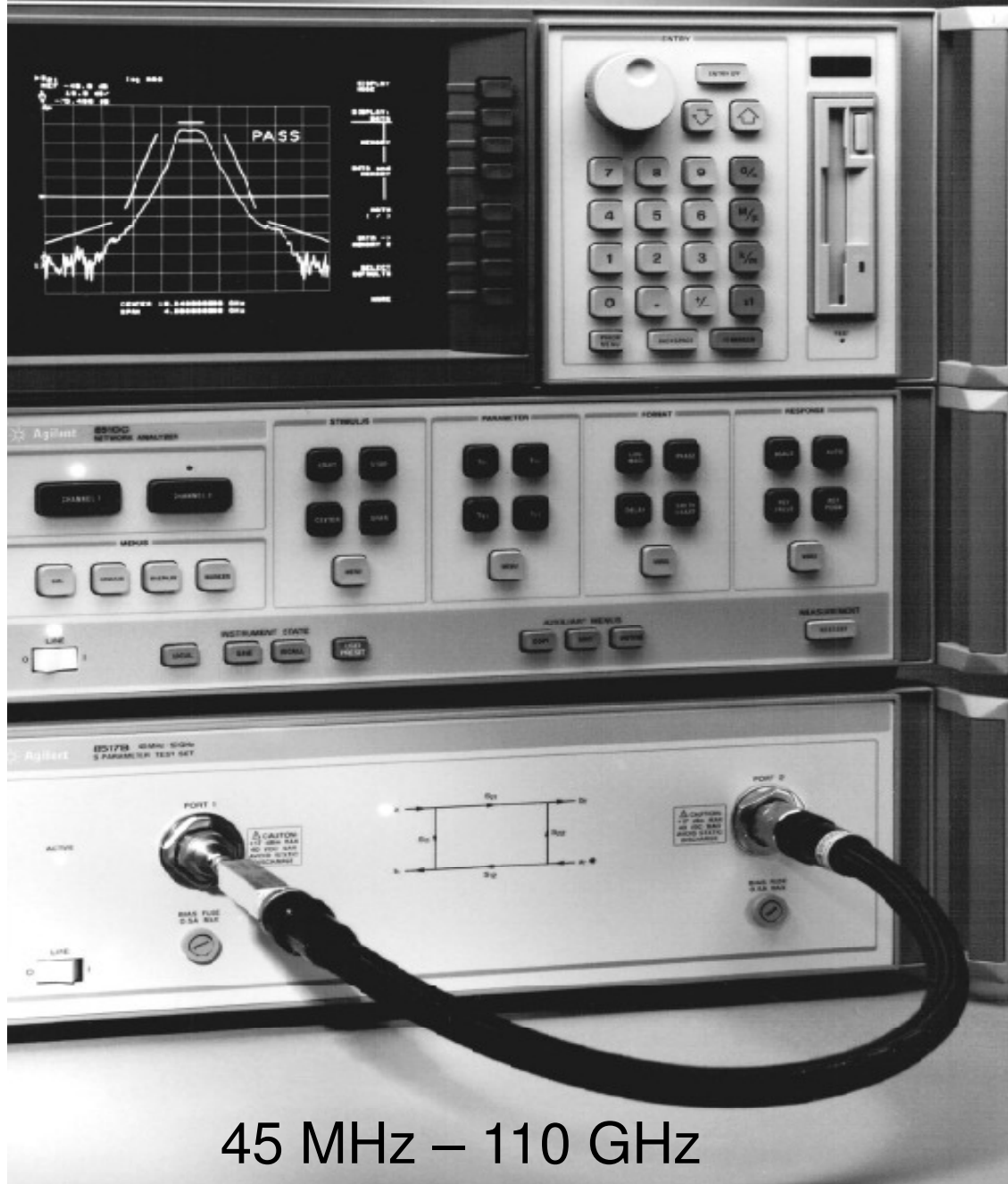
Agilent 8510C Network analyzer

3

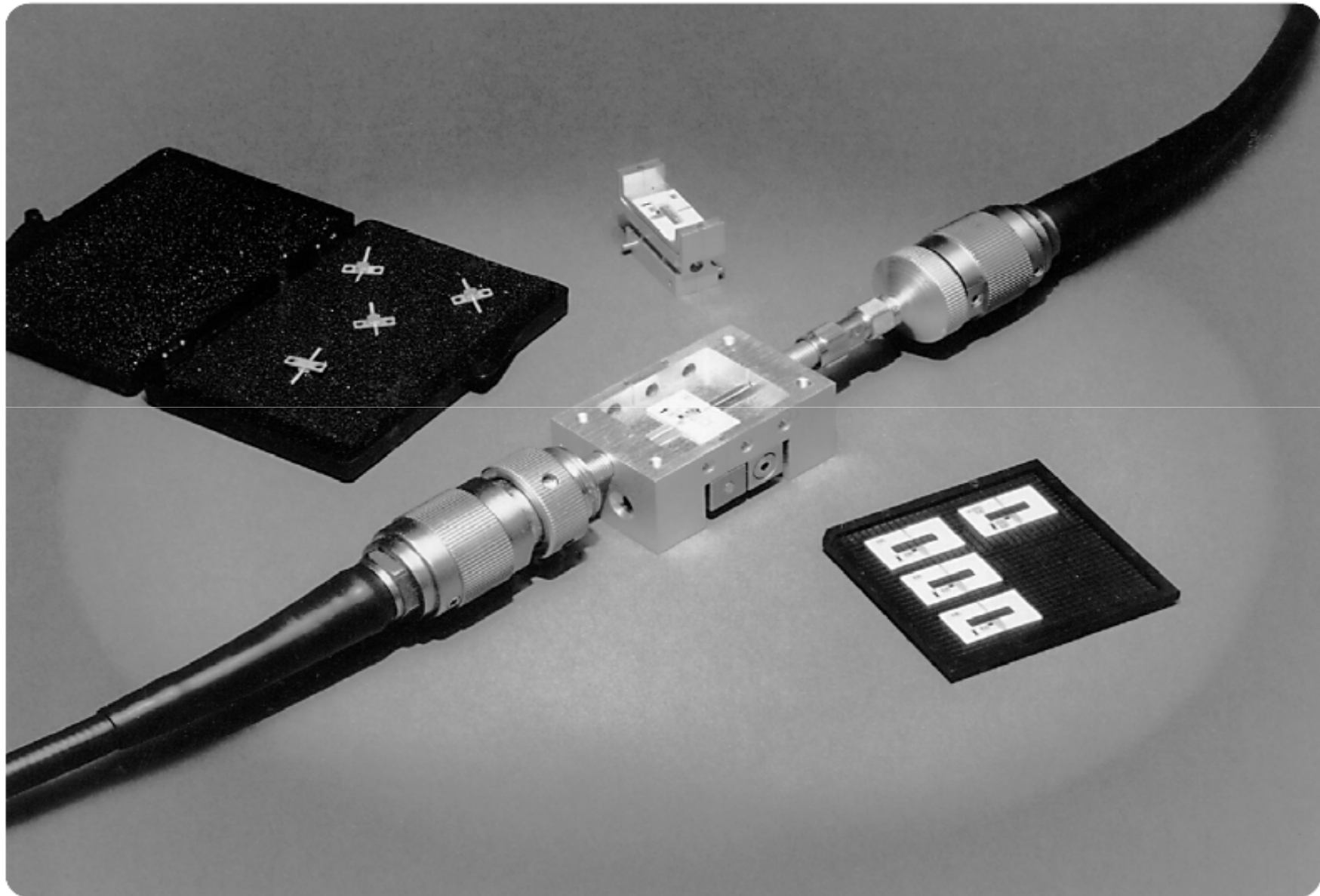
Načini priključitve:

- 45 MHz – 50 GHz
2,4 mm koax.
- 45 MHz – 110 GHz
1 mm koax.
- 33 MHz – 110 GHz
valvodni

45 MHz – 110 GHz



Meritev 4-polnega vezja

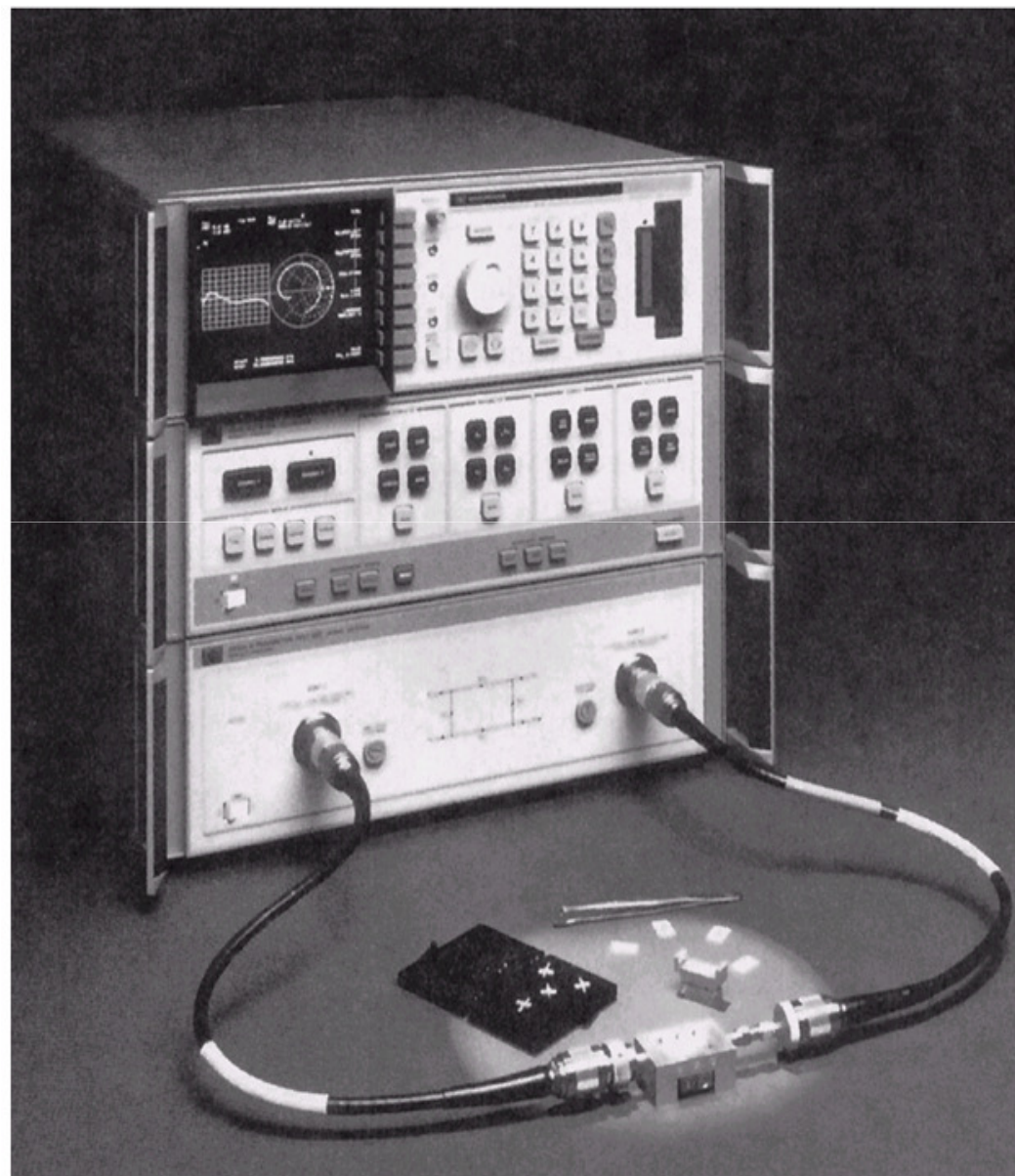


Analizator vezij

5

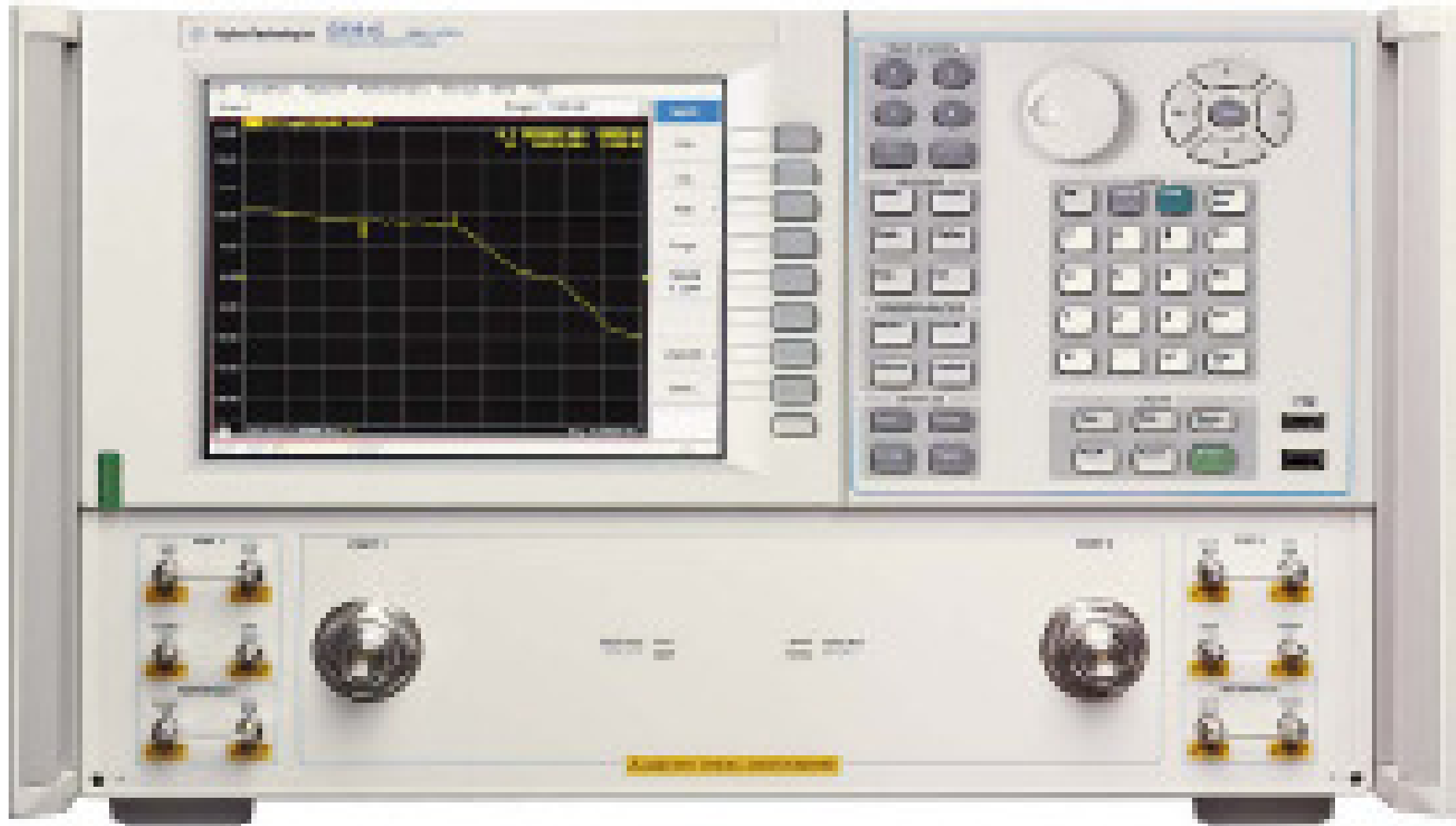
HP 8510 B

- Meritev pasivnih in aktivnih vezij:
 - 45 MHz – 20,5 oz. 40 GHz
 - 60 dB efektivna smernost
 - 80 – 100 dB dynamic range
- Kalibracija pogreška
 - Resolucija: 0,001 dB
 - 0,01 stopinje
 - 0,01 ns
- Hitra Fourierova transformacija za prikaz v časovnem prostoru.



Analizator vezij

6



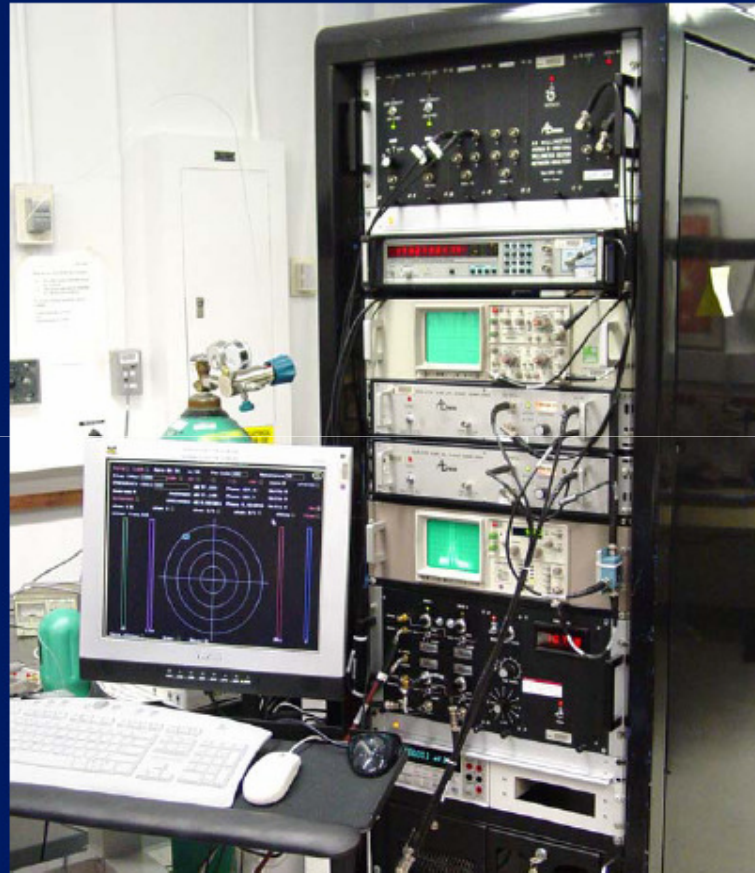
Agilent PNA Microwave Network Analyser, 10 MHz – 67 GHz

Analizator vezij



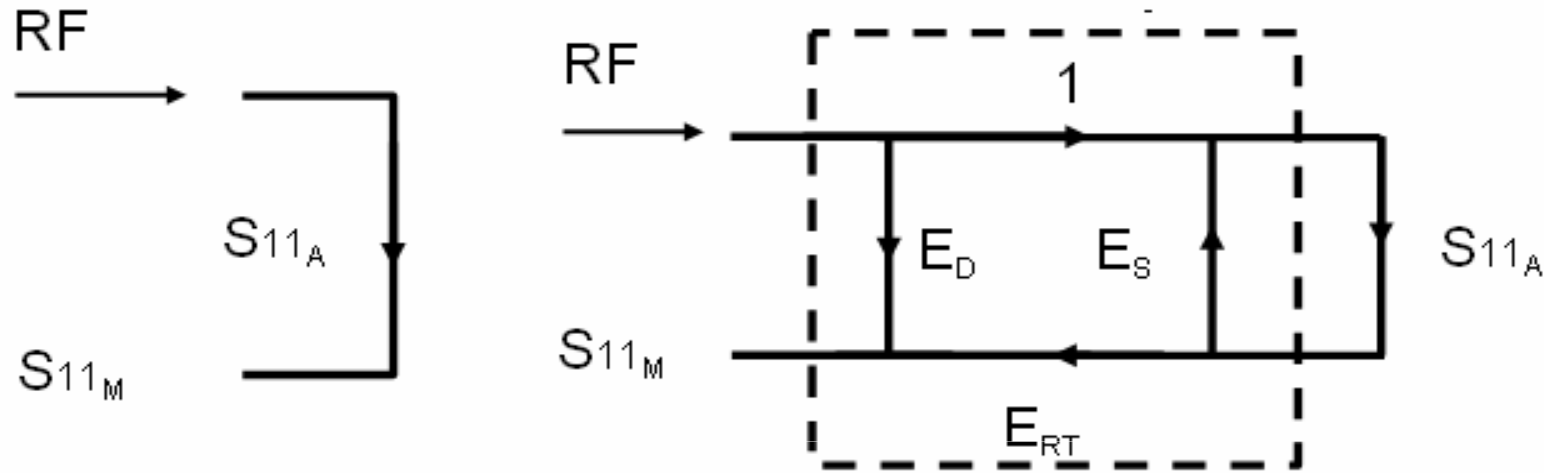


Current State-of-the-Art in Vector Measurements



ABmm MVNA-8-350: up to 1000 GHz, narrow band, ~3 GHz max. sweep @ 600 GHz (2 wide-spaced harmonically related freqs. possible)

Prava in merjena vrednost odbojnosti



E_D = napaka smernosti

E_{RT} = napaka prilagojenosti

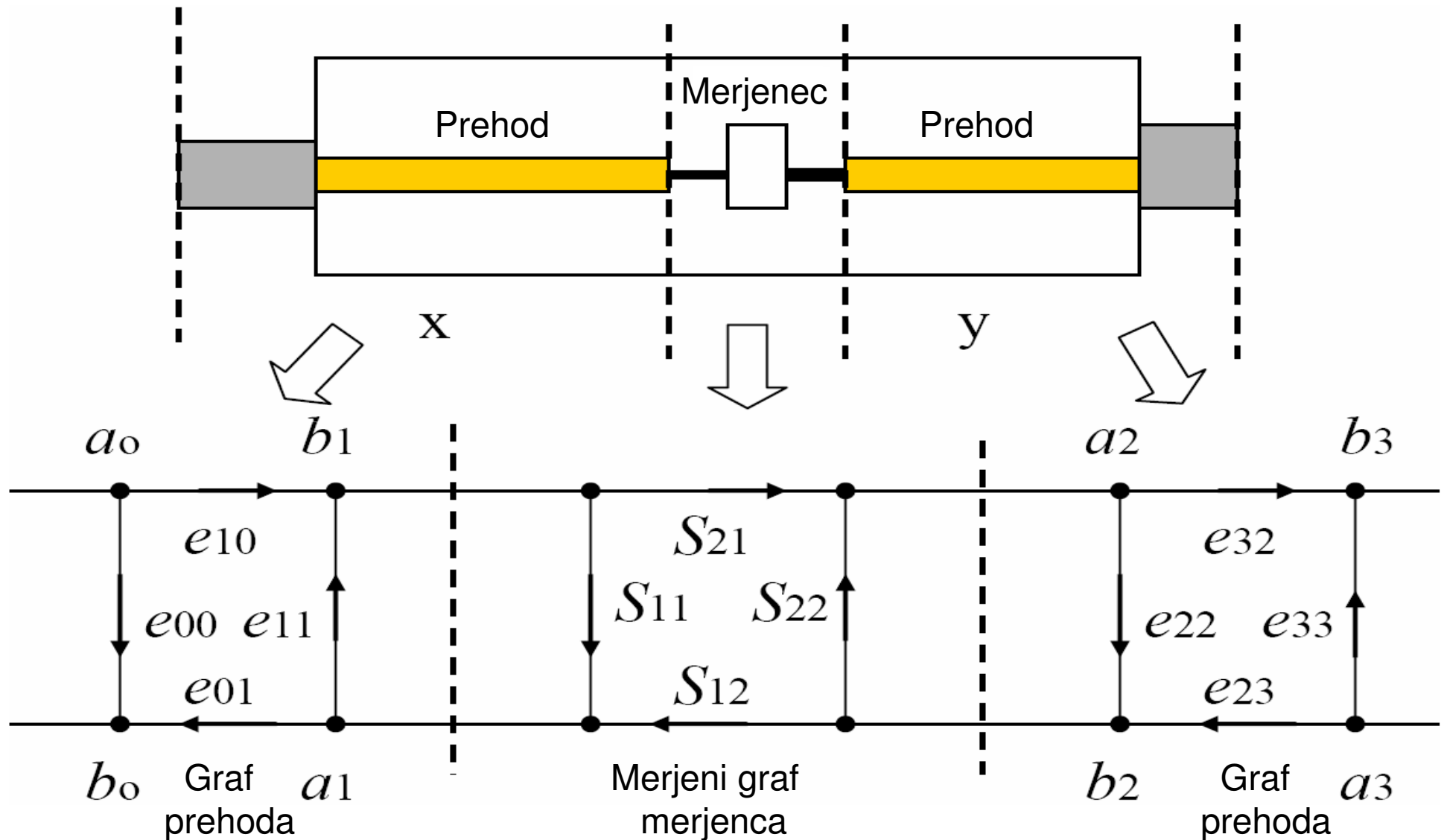
E_S = napaka sledenja

S_{11M} = merjena vrednost

S_{11A} = prava vrednost

$$S_{11M} = E_D + E_{RT} \left[\frac{S_{11A}}{1 - E_S S_{11A}} \right]$$

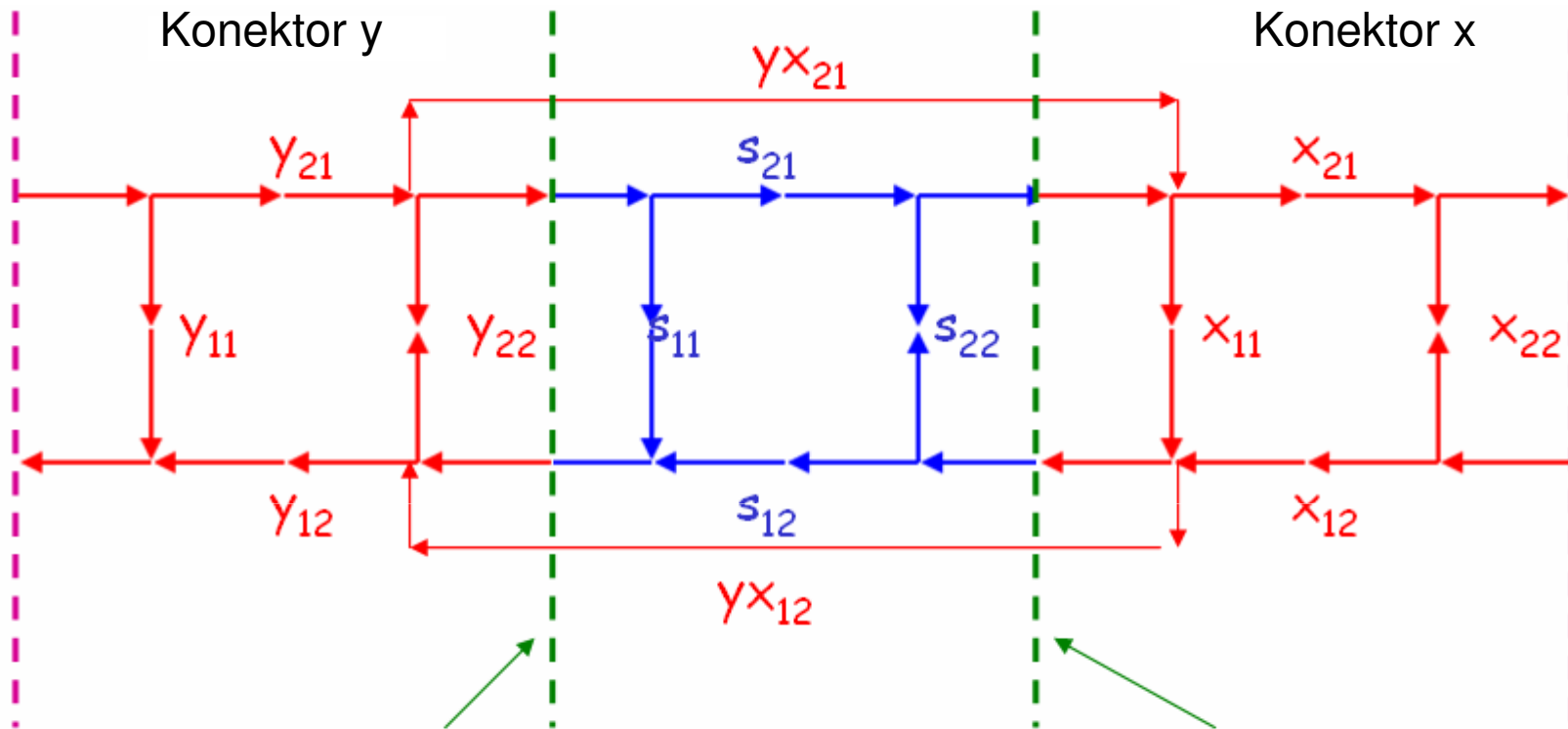
Merilni pogrešek 4- polnega vezja ¹¹



V grafu prehoda so vključene napake sklopnikov in druge napake.

Merilni pogrešek 4- polnega vezja

12

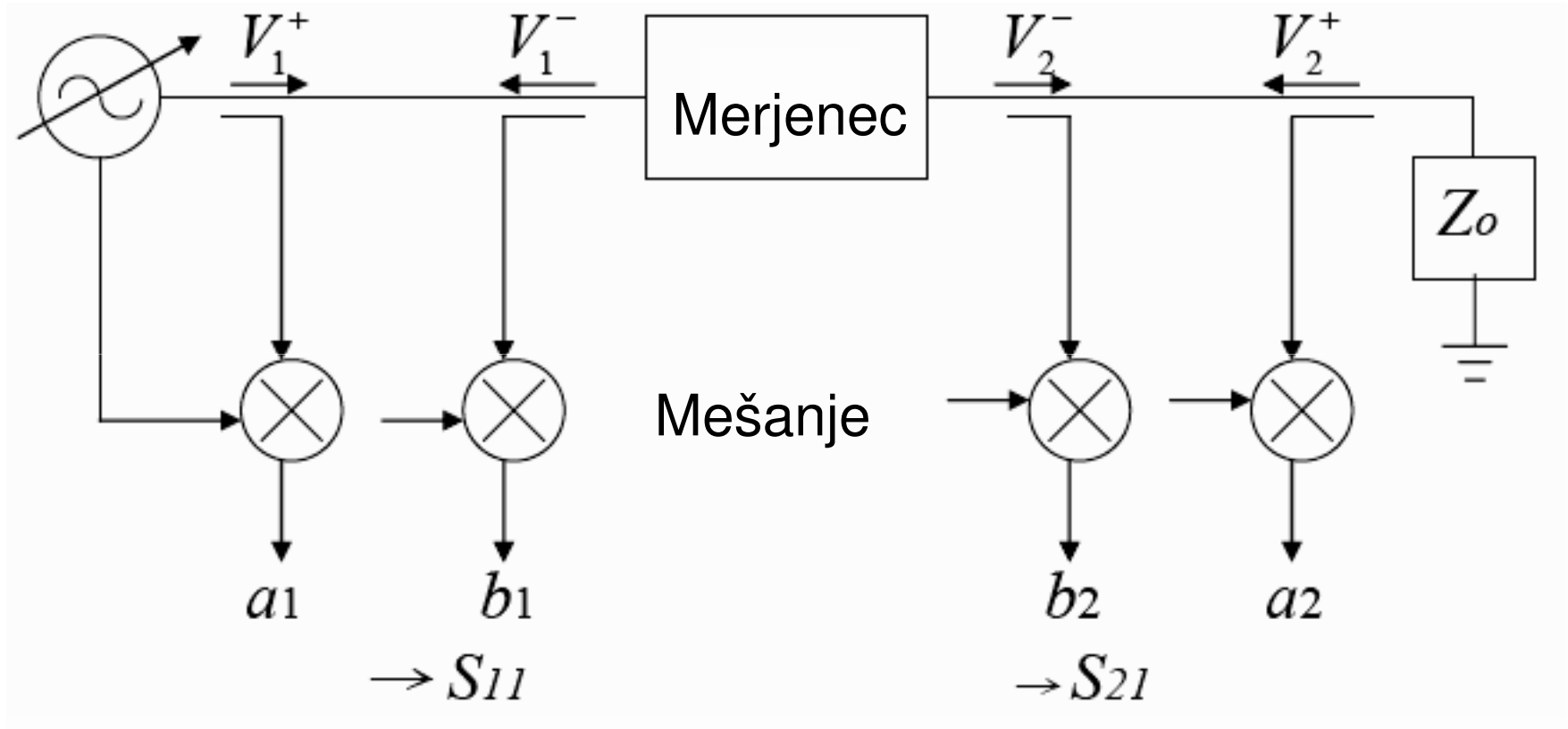


Parametre S želimo meriti
na teh priključkih

V resnici merimo parametre S
na teh priključkih

Osnovna merilna vezava

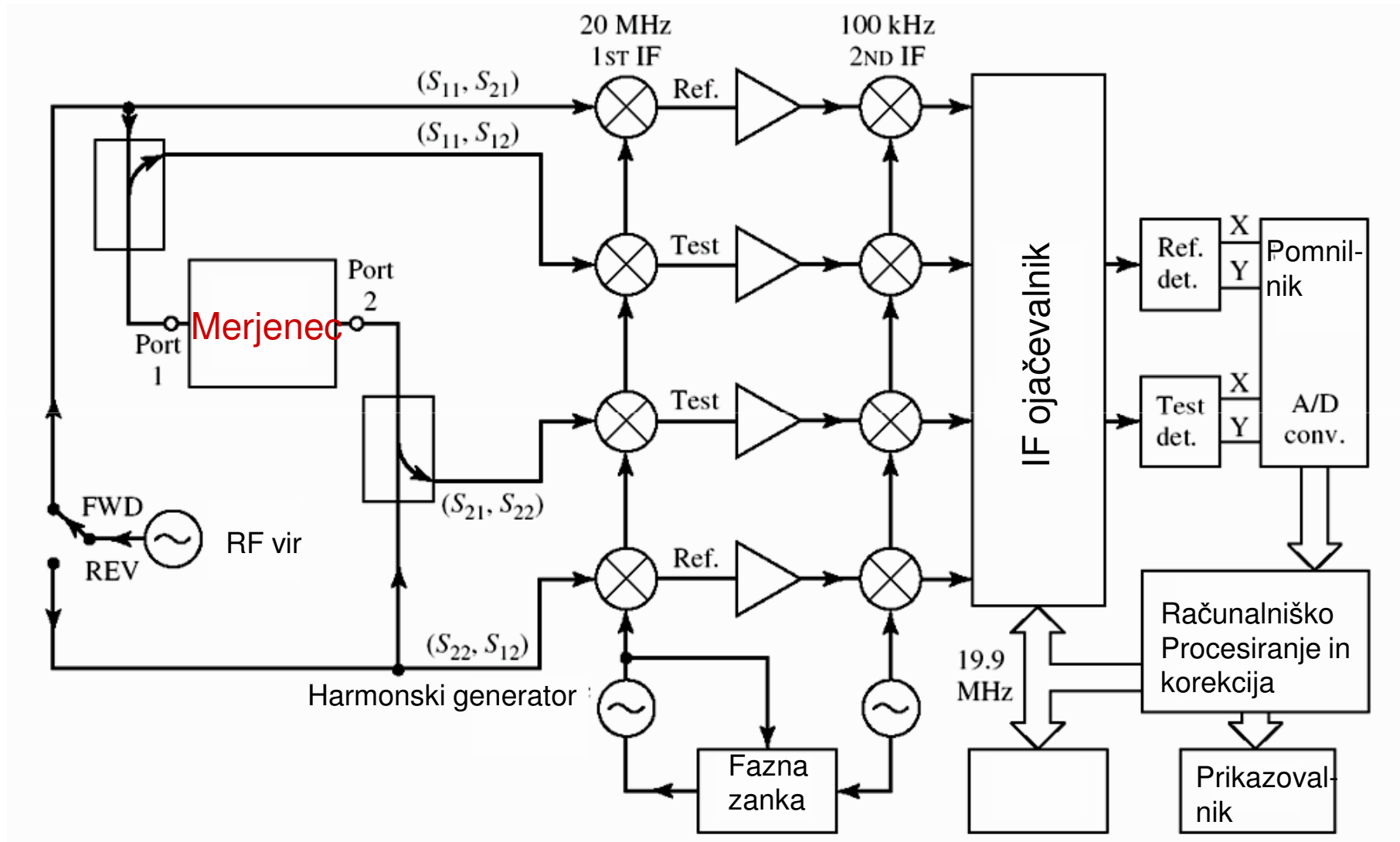
S sklopniki merimo vpadni in odbiti val na vhodu in izhodu:



$$S_{11} = b_1/a_1 \text{ pri } a_2 = 0 \quad S_{21} = b_2/a_1 \text{ pri } a_2 = 0$$

$a_2 = 0$ prilagojen izhod

Analizator vezij



RF del

IF del

Procesni del

Meritve odboja in prenosa

Meritve odboja

$$\frac{\textit{odbiti}}{\textit{vpadni}} = \frac{R}{I}$$

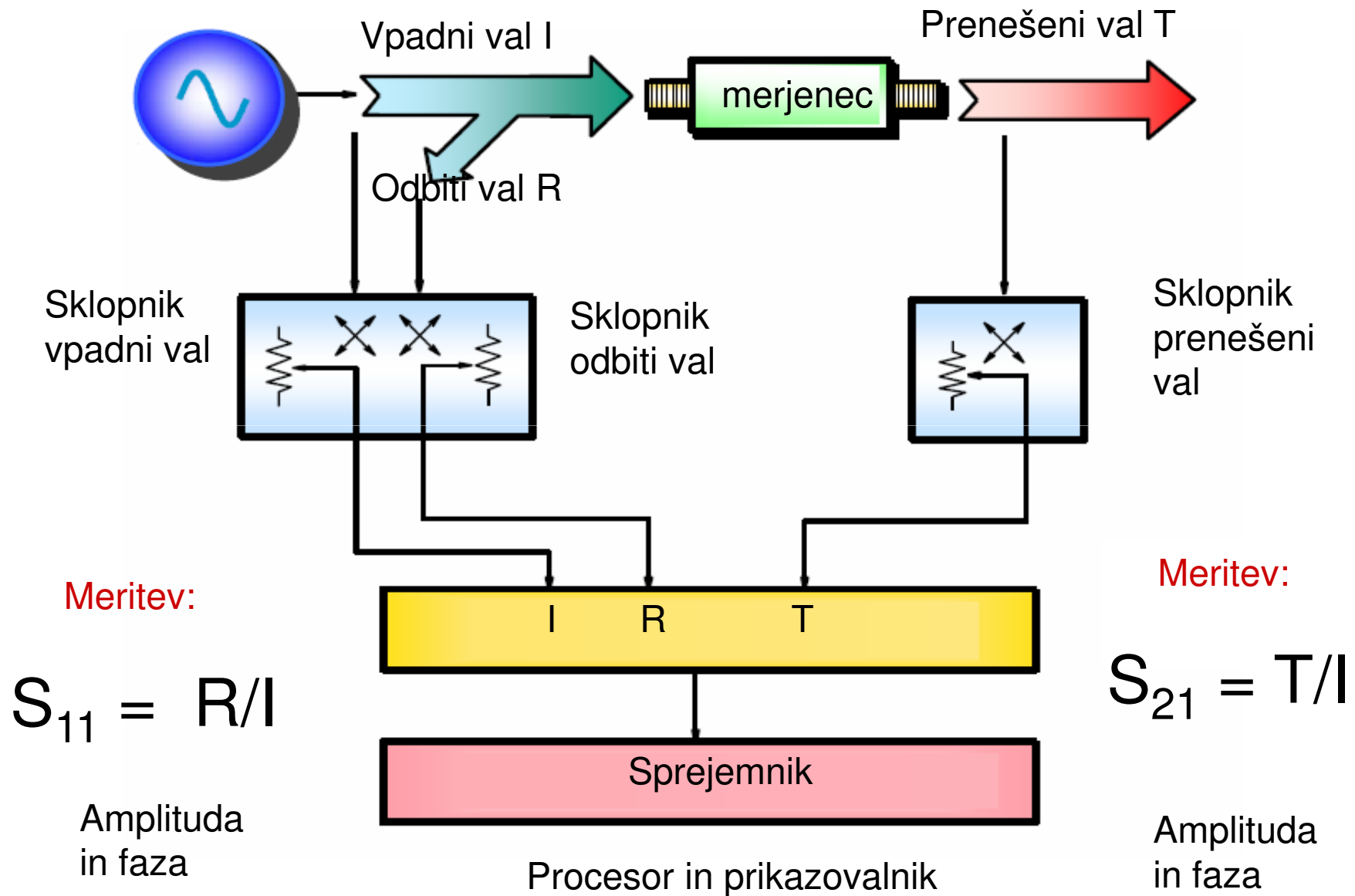
- razmerje stojnega vala SWR
- odbojna parametra S_{11} , S_{22}
- odbojnost Γ
- impedanca $R + jX$
- admitanca $G + jB$

Meritve prenosa

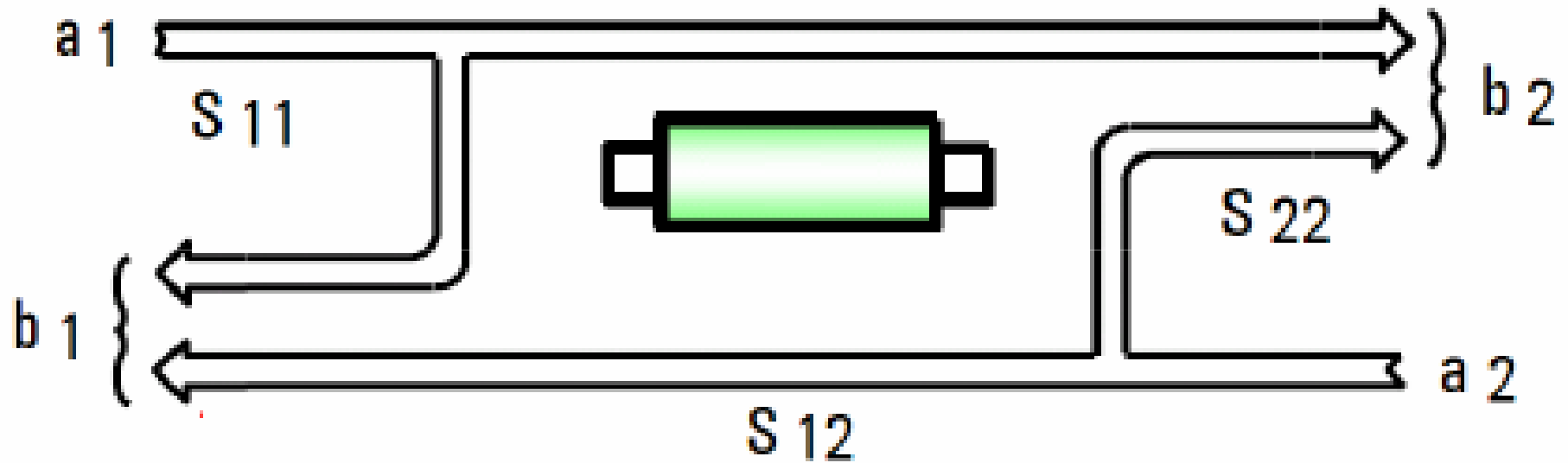
$$\frac{\textit{prenešeni}}{\textit{vpadni}} = \frac{T}{I}$$

- ojačenje, slabljenje
- prenosna parametra S_{12} , S_{21}
- prenosni koeficient T
- skupnska zakasnitev τ

Princip meritve parametrov 2-polnega vezja¹⁶



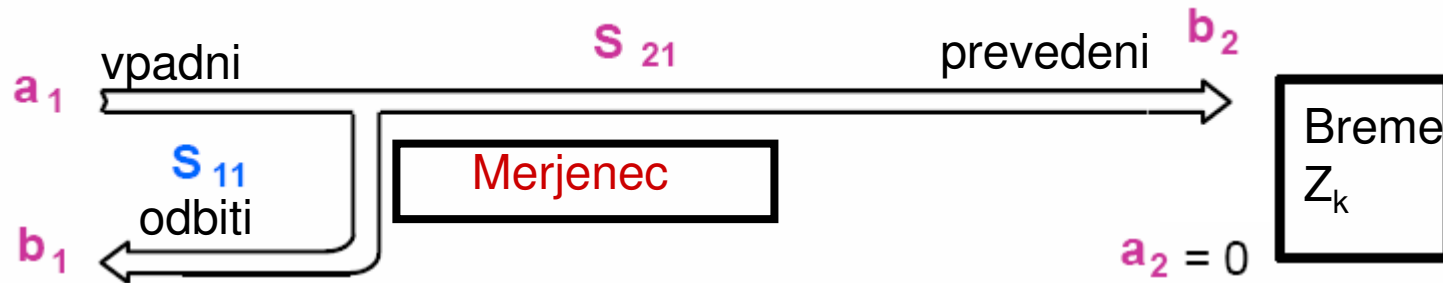
S parametri merjenja



$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$$

Parametri S in valovi

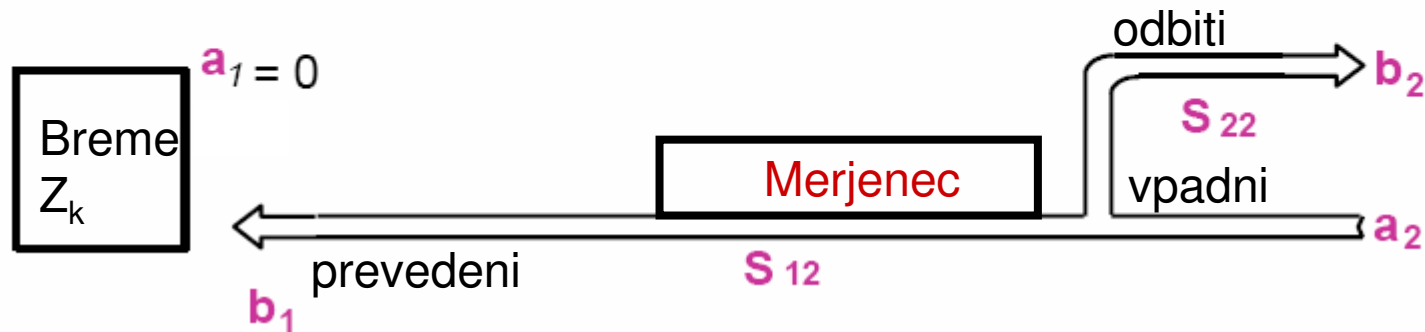


$$S_{11} = \frac{\text{Odbiti 1}}{\text{Vpadni 1}} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2 = 0}$$

$$S_{21} = \frac{\text{Prenešeni 2}}{\text{Vpadni 1}} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2 = 0}$$

$$S_{22} = \frac{\text{Odbiti 2}}{\text{Vpadni 2}} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1 = 0}$$

$$S_{12} = \frac{\text{Prenešeni 1}}{\text{Vpadni 2}} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1 = 0}$$



Kalibracija merilnika

1. Meritev dvopolnega vezja:

- 3 pogreškovne konstante (smernost, neprilagojenost generatorja, odbojno sledenje)
- 3 meritve s tremi kalibracijskimi standardi (prilagojeno breme, kratki stik, odsek linije)

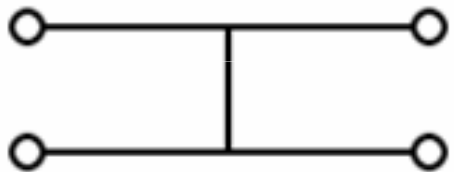
2. Meritev štiripolnega vezja:

Drugi komplet merilnih standardov²⁰



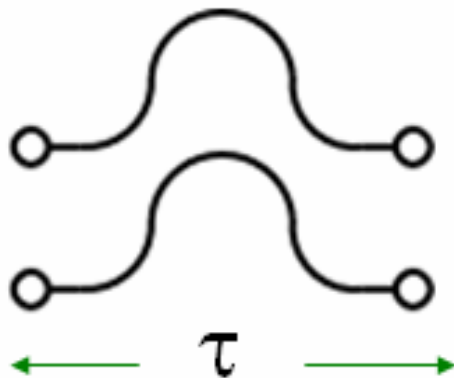
Stik skozi

$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$



Kratki stik

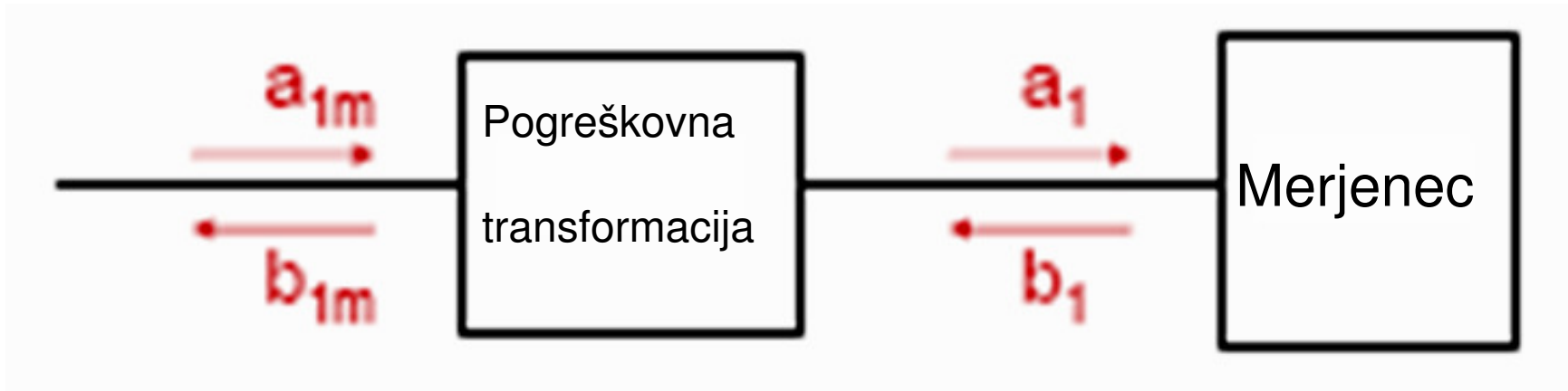
$$[s] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$



Odsek linije

$$[s] = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j\omega\tau} \\ e^{-j\omega\tau} & 0 \end{bmatrix}$$

Pogreškovna transformacija



$$b_{1m} = p_{11} b_1 + p_{12} a_1$$

$$a_{1m} = p_{21} b_1 + p_{22} a_1$$

$$\frac{b_{1m}}{a_{12}} = \frac{p_{11} \frac{b_1}{a_1} + p_{12}}{p_{21} \frac{b_1}{a_1} + p_{22}}$$

Princip kalibracije 2- polnega vezja

22

Merjena vrednost vhodnega vpadnega in odbitega vala je sorazmerna pravim vrednostim teh valov:

$$b_{1m} = x_{11}b_1 + x_{12}a_1$$

$$a_{1m} = x_{21}b_1 + x_{22}a_1$$

$$\Gamma_m = \frac{b_{1m}}{a_{1m}} = \frac{x_{11}\frac{b_1}{a_1} + x_{12}}{x_{21}\frac{b_1}{a_1} + x_{22}} = \frac{\frac{x_{11}}{x_{21}}\Gamma_{DUT} + \frac{x_{12}}{x_{21}}}{\Gamma_{DUT} + \frac{x_{22}}{x_{21}}}$$

The equation above is annotated with red circles and letters: 'b' points to the fraction $\frac{x_{11}}{x_{21}}$, 'a' points to the fraction $\frac{x_{12}}{x_{21}}$, and 'c' points to the fraction $\frac{x_{22}}{x_{21}}$.

x_{12} , x_{21} in neenakost x_{11} ter x_{22} predstavljajo merilni pogrešek.

x_{21} ... pogrešek smernosti

x_{12} ... pogrešek smernosti in neprilagoditve gener.

$x_{11} \neq x_{22}$... sledilni pogrešek (tracking)

Merjena vrednost odbojnosti Γ_m in prava vrednost odbojnosti Γ sta povezani preko transformacijskega razmerja, v katerem nastopajo konstante a, b in c.

Če jih s kalibracijo določimo, lahko iz merjenih vrednosti dobimo prave vrednosti

Določitev kalibracijskih konstant

23

Standardna odbojnost		Merjena odbojnost
Γ_1	\longrightarrow	Γ_{m1}
Γ_2	\longrightarrow	Γ_{m2}
Γ_3	\longrightarrow	Γ_{m3}

Kalibracijska enačba:

$$\Gamma_{mi} = \frac{b\Gamma_i + a}{\Gamma_i + c}$$

Pri treh standardnih odbojnostih sledijo tri kalibracijske enačbe z neznankami a, b in c:

$$\begin{bmatrix} 1 & \Gamma_1 & -\Gamma_{m1} \\ 1 & \Gamma_2 & -\Gamma_{m2} \\ 1 & \Gamma_3 & -\Gamma_{m3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_1\Gamma_{m1} \\ \Gamma_2\Gamma_{m2} \\ \Gamma_3\Gamma_{m3} \end{bmatrix}$$

Postopek kalibracije poteka v skladu s temi enačbami.

Za standardne odbojnosti izberemo prilagojeno breme ($\Gamma = 0$), kratek stik ($\Gamma = -1$) in odprte priključke ($\Gamma = 1$). Na voljo so še druge izbire.

Zgled: Določitev kalibracijskih konstant⁴

Iz kalibracijske enačbe sledi obrnjena korekcijska enačba za določitev pravih vrednosti odbojnosti 2- polnega vezja:

$$\Gamma_{DUT} = \frac{-c\Gamma_m + a}{\Gamma_m - b}$$

Podatki o vrednostih treh kalibracijskih standardov:

$$\Gamma_1 = -1, \Gamma_2 = 1, \Gamma_3 = 0.$$

Podatki o izmerjenih vrednostih kalibracijskih standardov:

$$\Gamma_{m1} = -0,9j,$$

$$\Gamma_{m2} = 1,1,$$

$$\Gamma_{m3} = 0,1.$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -(-.9j) \\ 1 & 1 & -1.1 \\ 1 & 0 & -0.1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(-.9j) \\ 1.1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Iz teh enačb določimo 3 kalibracijske konstante a, b, c in po zgornji korekcijski enačbi popravimo izmerjene vrednosti odbojnosti.

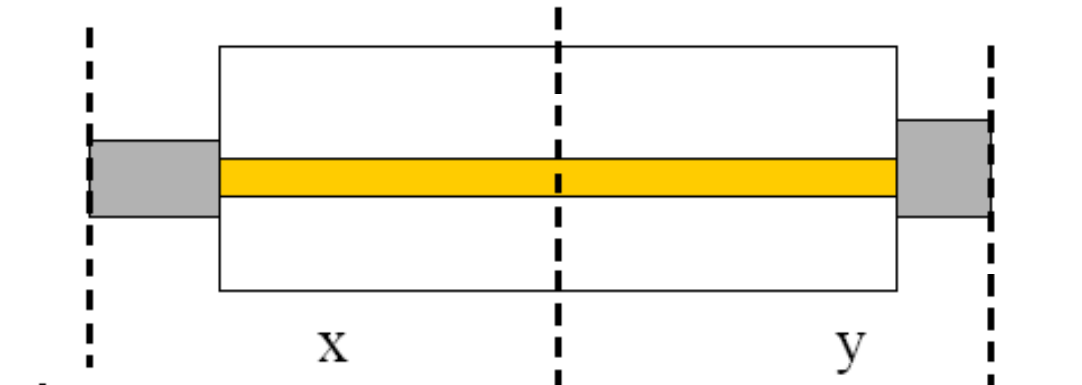
V primeru 8-polnega vezja se število kalibracijskih konstant poveča na 12. Opraviti moramo 12 meritev, s katerimi določimo vrednost konstant. Uporabljamo štiri kalibracijske normale.

Kalibracija

Calibrators

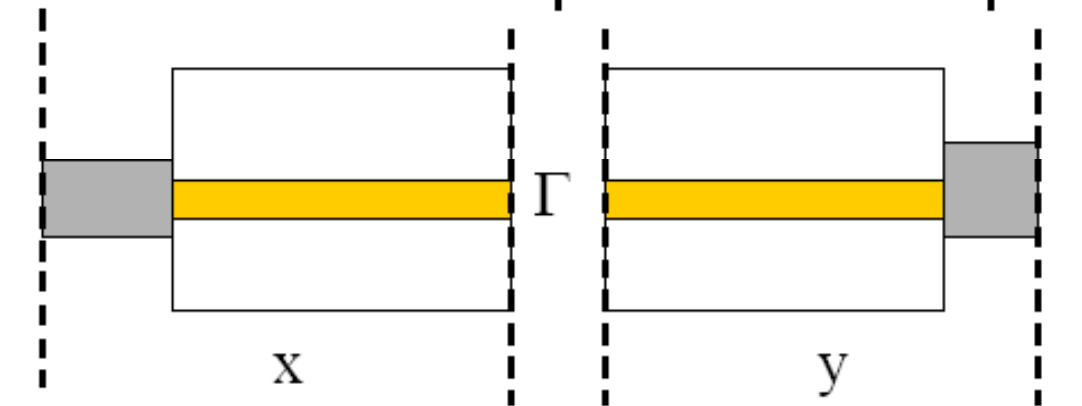
T: Through

→ 3 eqs.



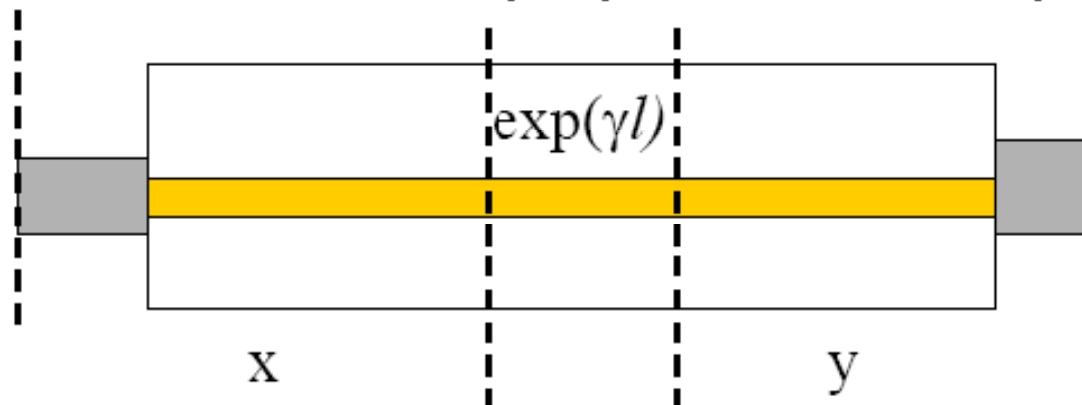
R: Reflection

→ 2 eqs.



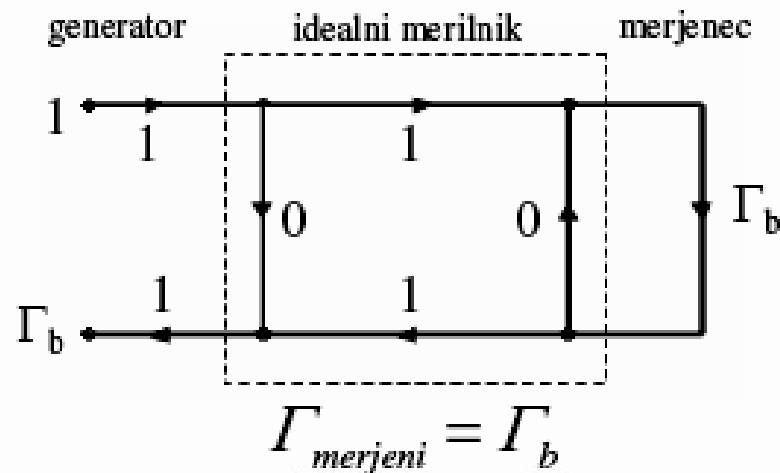
L: Line

→ 3 eqs.

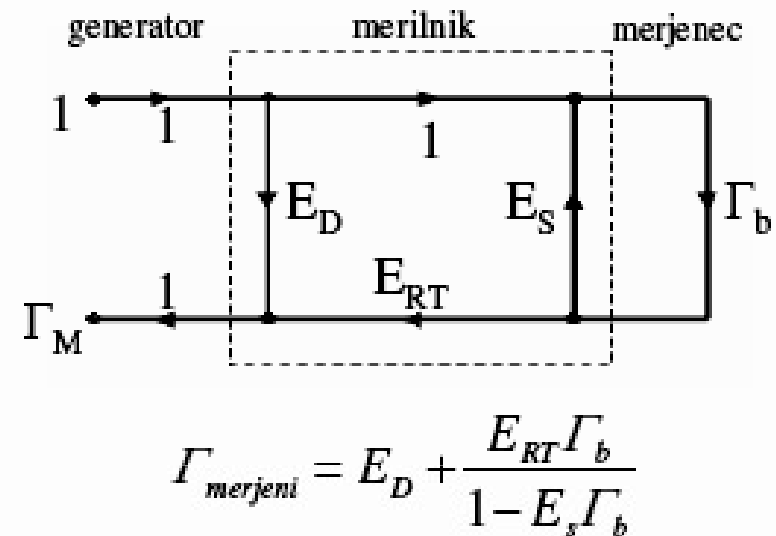


Popravek merilnega pogoška - kalibracija

Merilnik brez pogoška:



Merilnik s pogoškom:



HP 8410A - 1960, 110 MHz-12.4 GHz

Tri neznane pogoškovne koeficiente merilnika določimo po postopku kalibracije s tremi inpedančnimi normalami.

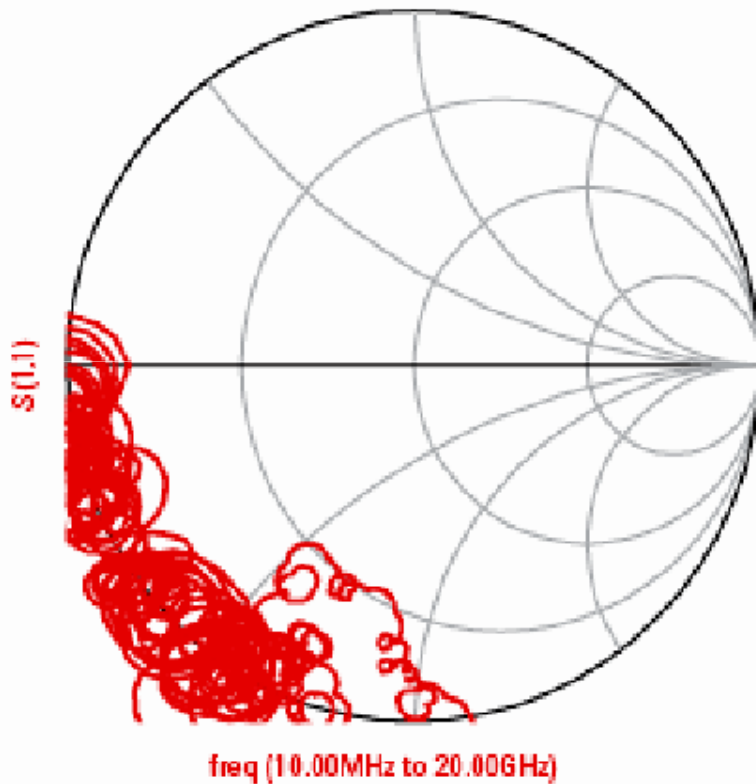
E_D ...pogrešek smernosti sklopnikov

E_S ...pogrešek neprilagojenosti merilnika

E_{RT} ...pogrešek sledenja

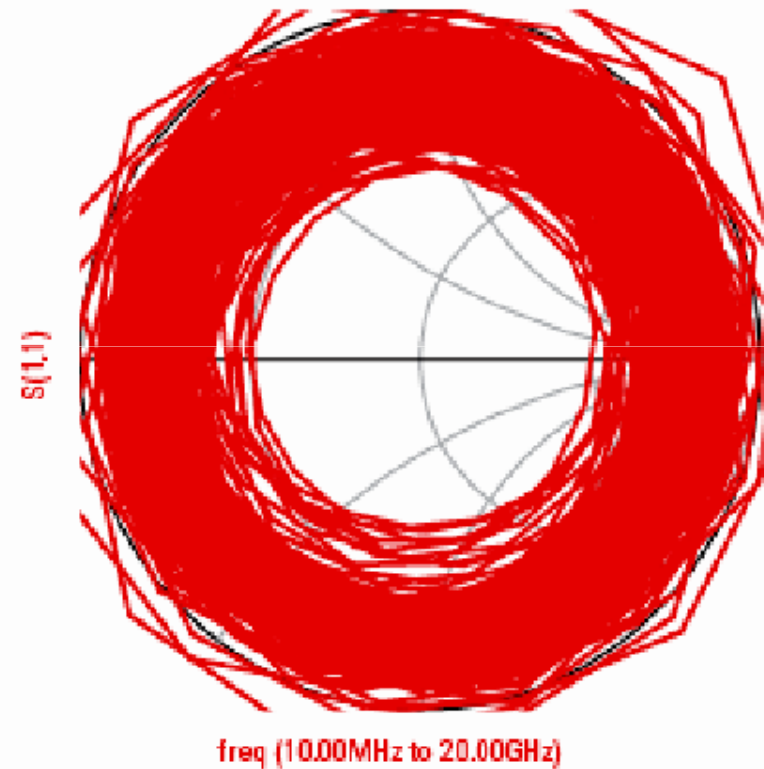
Zaključitev s kratkim stikom

Prikaz zaključitve s kratkim stikom neposredno na izhodu iz merilnika



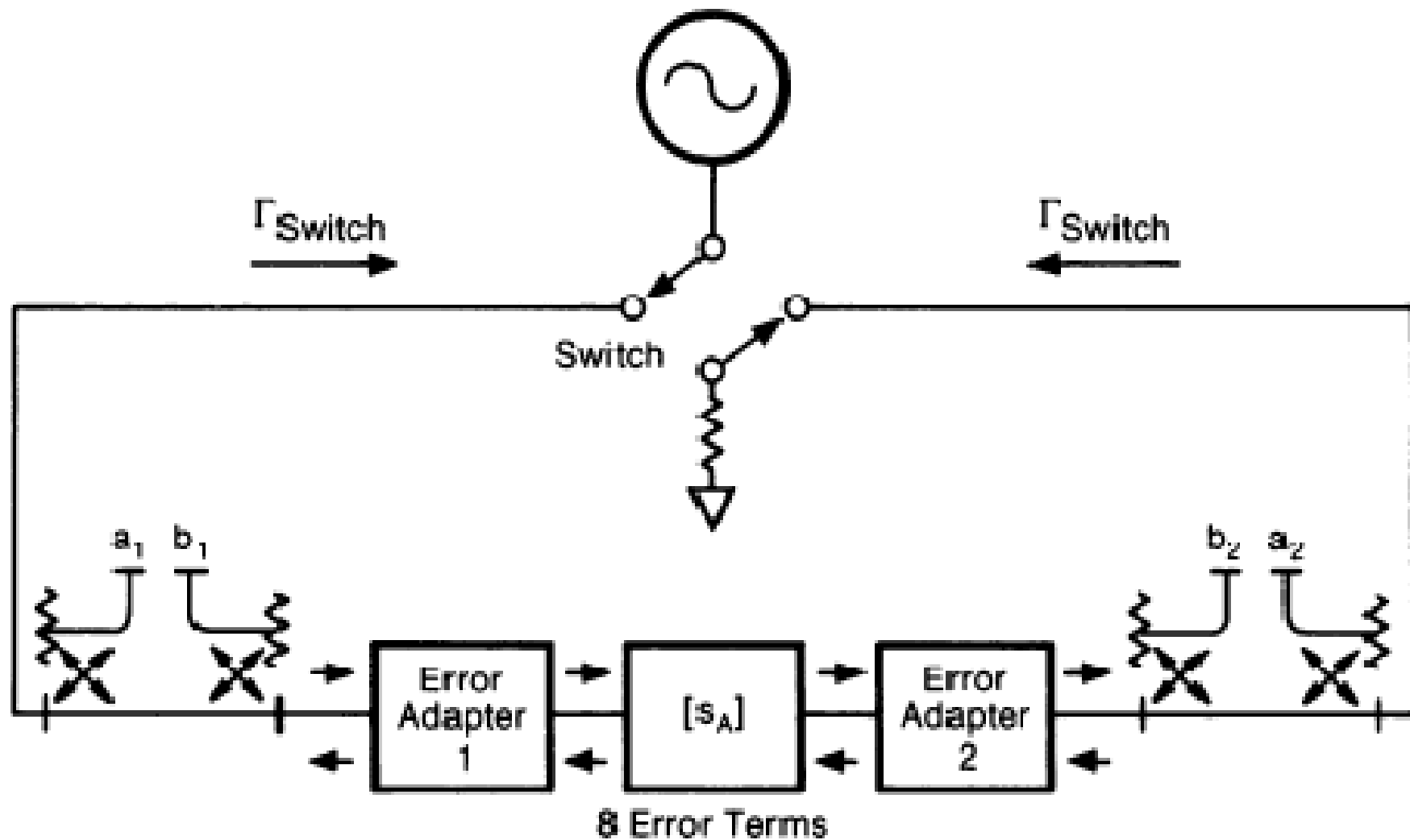
Po kalibraciji v frekvenčnem pasu prikazuje analizator točko $Z = 0$ v Smithovem diagramu.

Prikaz zaključitve s kratkim stikom 1 m dolgega kabla na izhodu iz merilnika



Po kalibraciji se se točke na krogih odvijajo v področje okoli točke $Z = 0$ Smithovega diagrama. To omogoča meritev impedance bremena na koncu kabla.

Kalibracija 4- polnega vezja



Merilne metode

1. Smerni sklopnik
 - Merilni pogrešek S parametrov
 - Merilni pogrešek reflektometra
 - Dve reflektometrijski vezavi
2. Merilna sonda napetosti in toka
 - Merilni pogrešek impedance
3. Kalibracija merilnikov
 - Princip kalibracije in dosežki

Vrste smernega sklopa

1. Elektromagnetni smerni sklop:

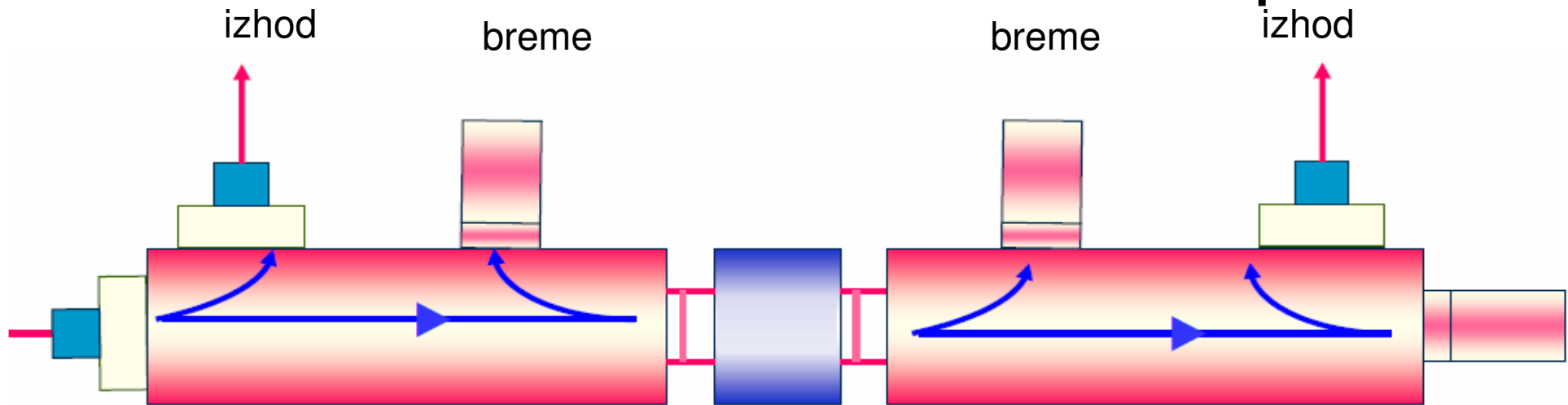
- Sklop preko električnega in magnetnega polja.
- Protismeren sklop – merjeni val in sklopljeni val se širita v nasprotnih smereh
- primer sklopa med sklopljenima linijama

2. Električni oz. magnetni sklop:

- Sosmeren sklop – merjeni val in sklopljeni val se širita v isti smeri
- primer sklopa med dielektričnima svetlovodoma
- primer električnega sklopa skozi sklopne odprtinice

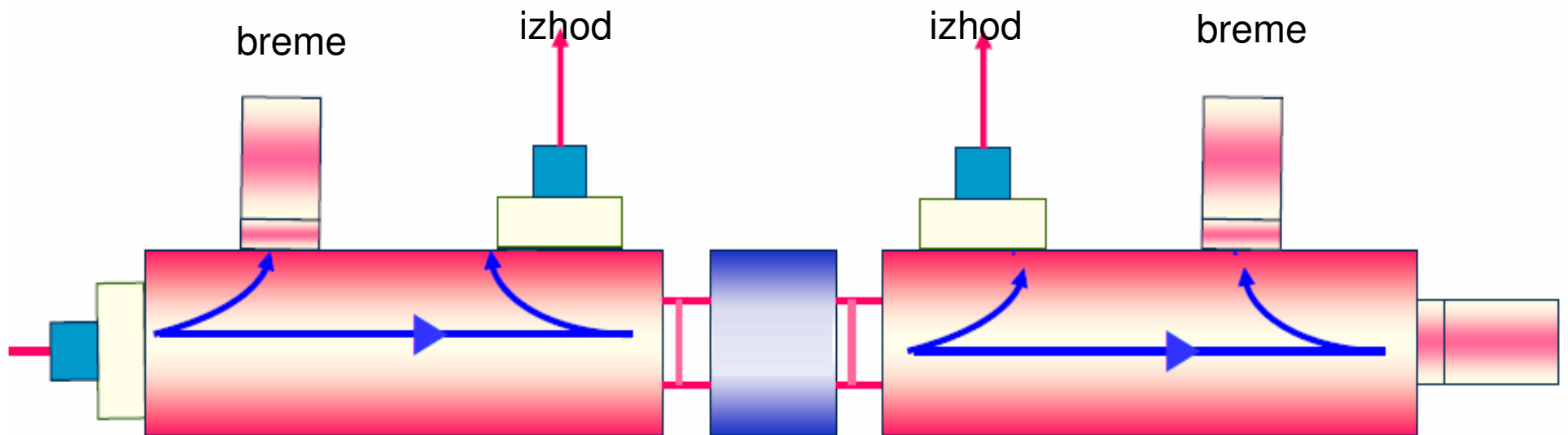
3. Obravnava sklopa s pomočjo sodih in lihih rodov

Reflektometer – smerni sklopniki



Sklopnik vpadnega vala

Sklopnik odbitega vala

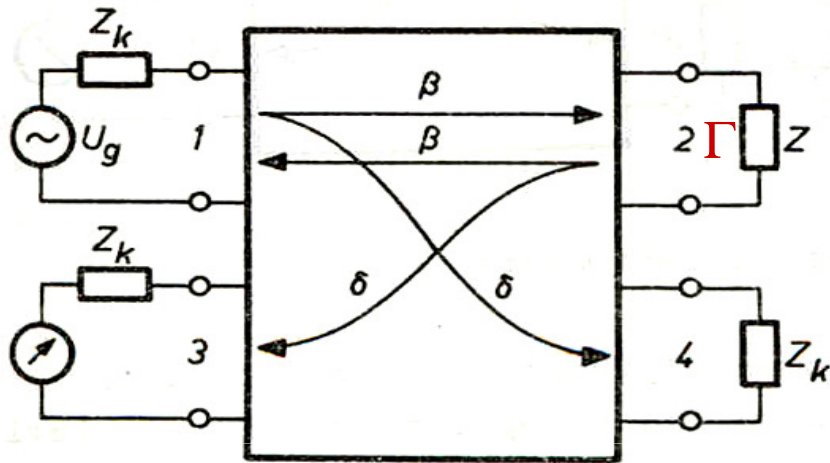


Sklopnik odbitega vala

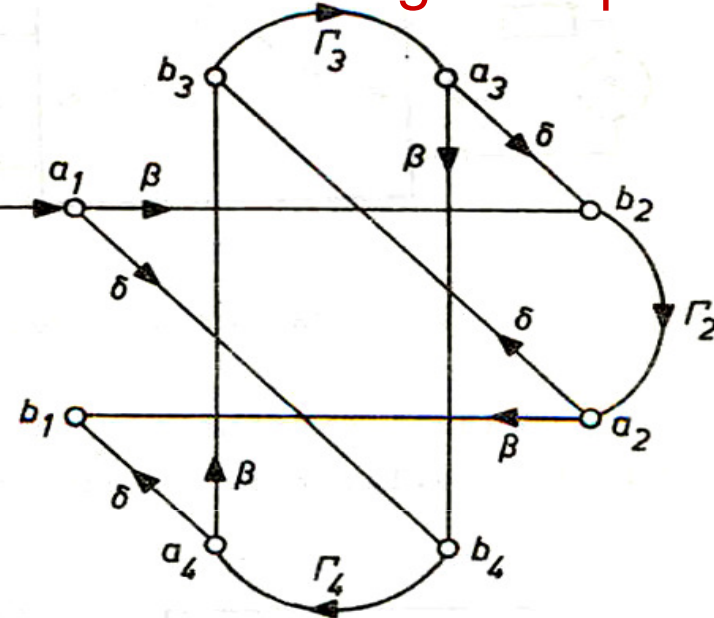
Sklopnik vpadnega vala

Meritev odbojnosti s smernim sklopnikom³²

Smerni sklopnik z merjenim Z



Graf smernega sklopnika



Predpostavke:

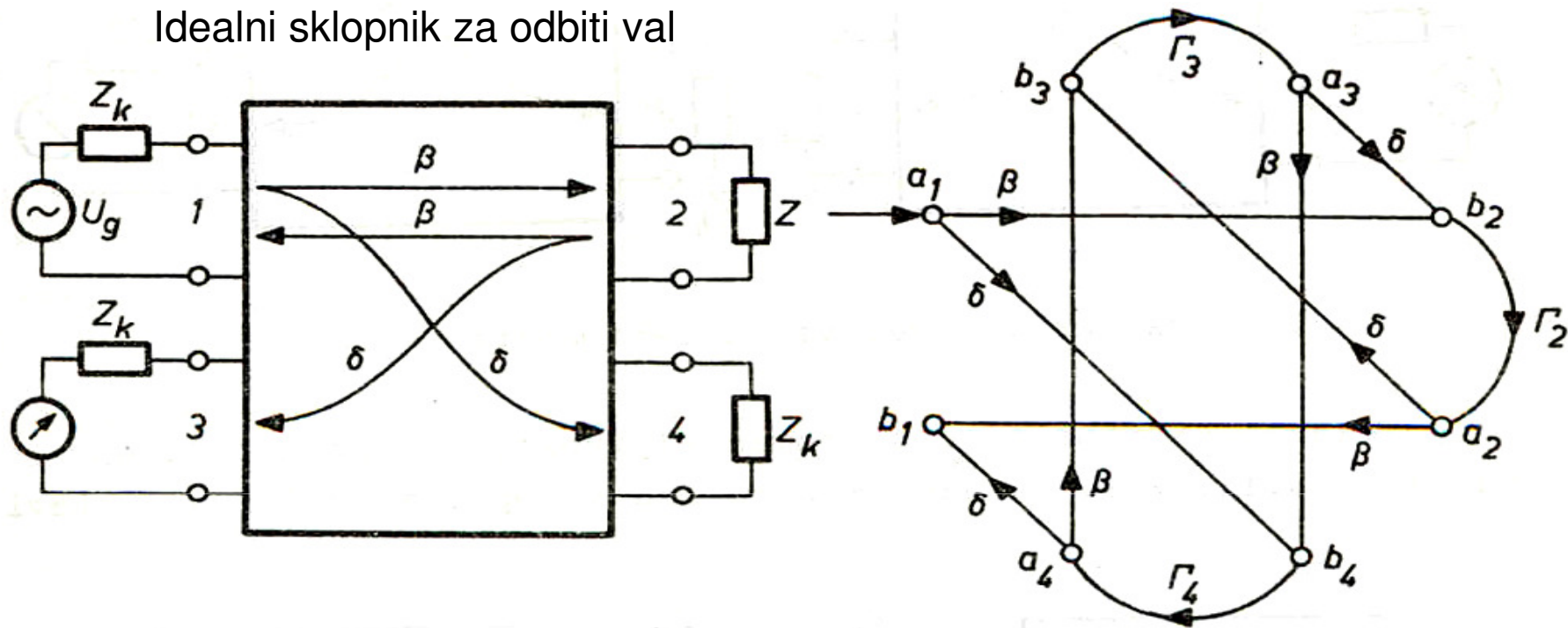
- smerni sklopnik z idealnimi karakteristikami !
- prilagojeni priključki 1, 3 in 4 (sicer pogreški) !

- $b_3 = \beta\delta\Gamma a_1$
- $b_3' = -\beta\delta a_1$ pri kratkostaknjenih priključkih 2-2 ($\Gamma_2 = -1$)
- **Razmerje $b_3/b_3' = -\Gamma$**
(zahtevamo prilagojen generator)

Sklopnik za odbiti val

33

Idealni sklopnik za odbiti val



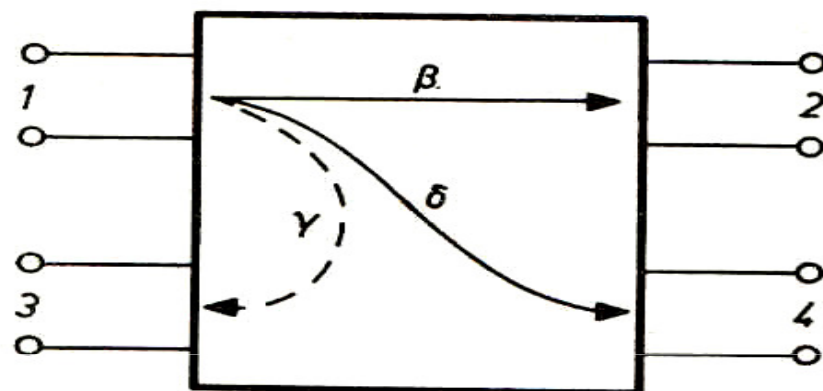
- Sosmerni sklop
- Vpadni val se sklaplja na prilagojen izhod 4, odboja ni
- Odbiti val se sklaplja na na prilagojen izhod 3, ki služi za indikacijo odbitega vala
- Indikacija je sorazmerna odbojnosti Γ bremena Z .

Analiza merilnih pogreškov

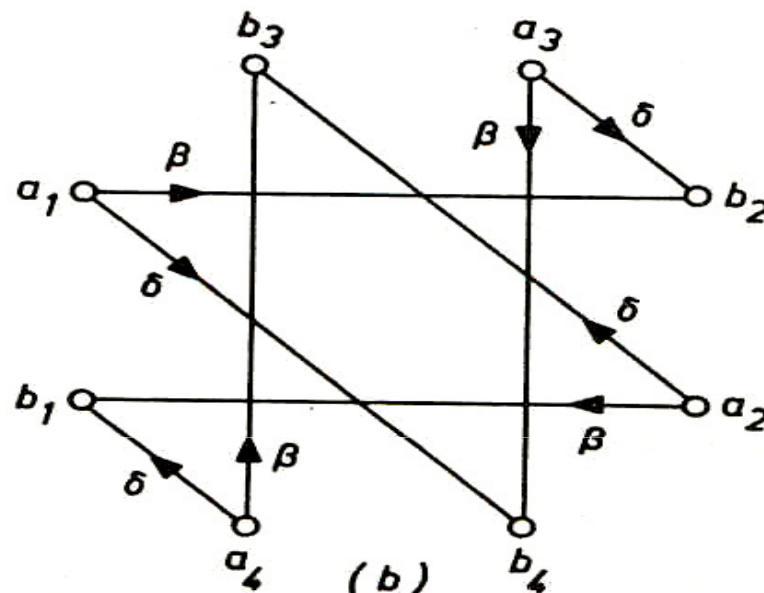
- smerni sklopnik
- sonda (senzor)

Graf smernega sklopnika

35



(a)

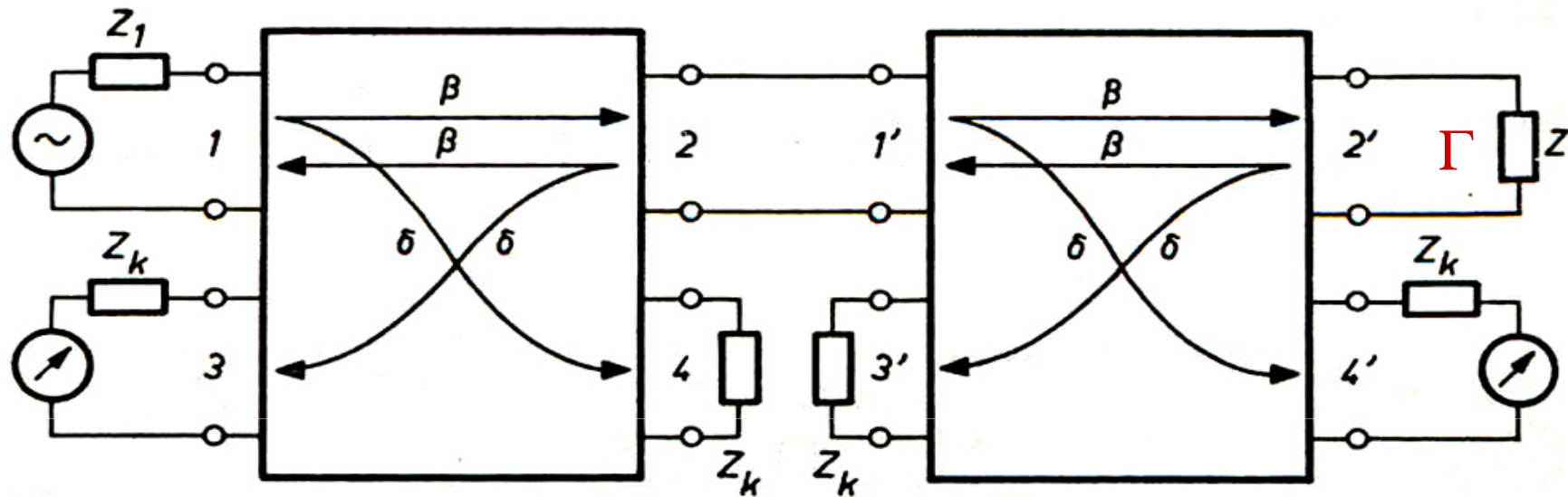


(b)

Meritev odbojnosti z reflektometrom 36

Sklopnik za odbiti val

Sklopnik za napredujoči val



- Smerna sklopnika z idealnimi karakteristikami (levi sklopnik: $S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$, enako za desni sklopnik; sklop $\gamma = 0$; priključki 3-3, 4-4, 3'-3' in 4'-4' obremenjeni brezodbojno).

- Ni potrebe po prilagojenem generatorju na priključkih 1-1

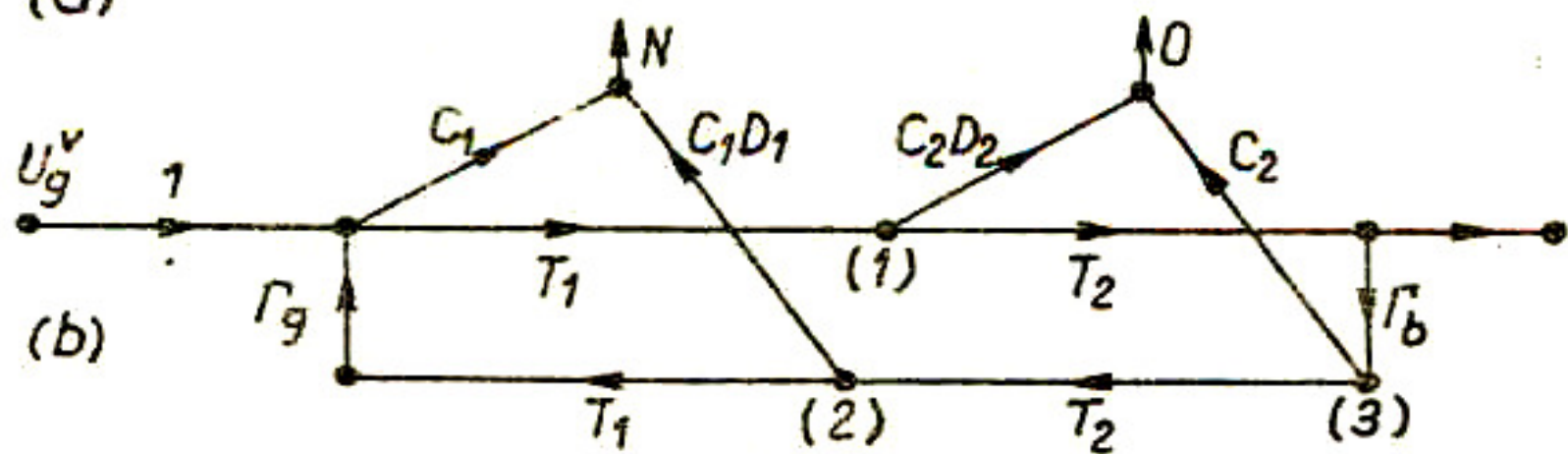
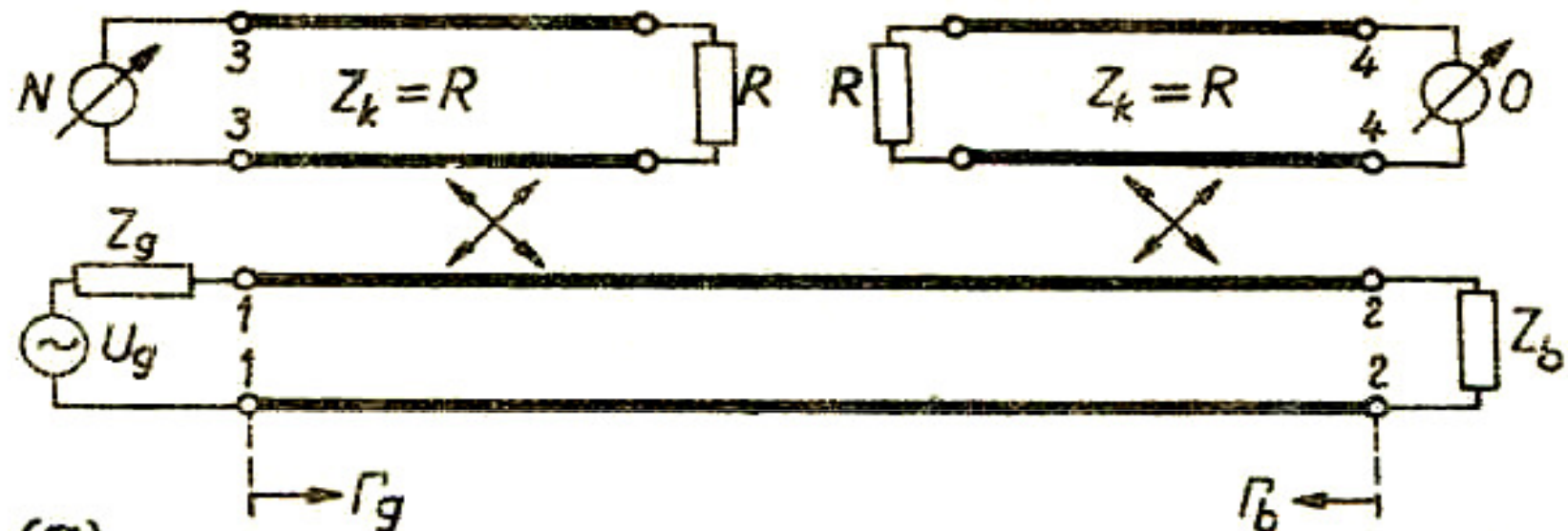
$$b_3 = \beta^3 \delta \Gamma a_1$$

$$b_4' = \beta \delta a_1$$

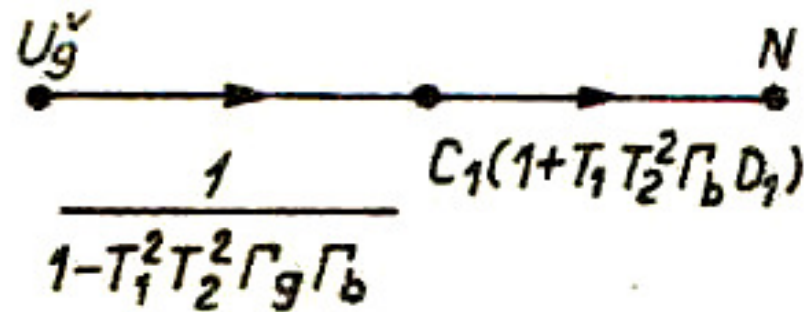
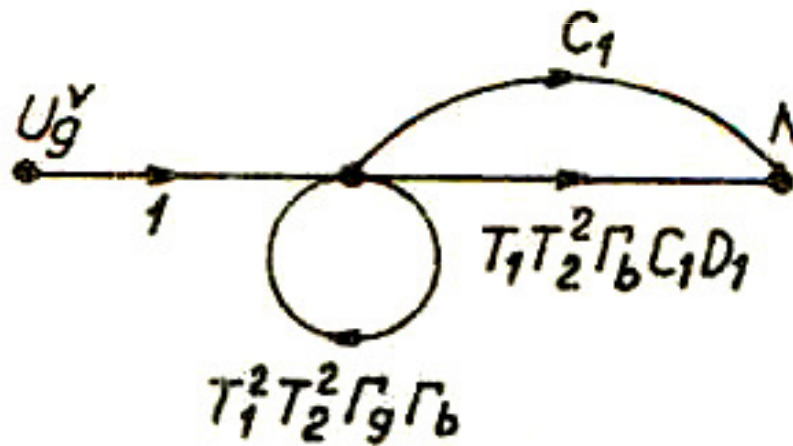
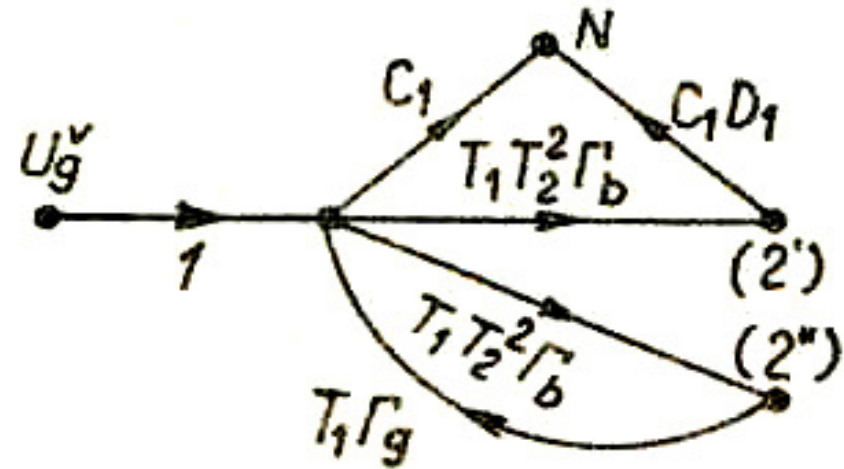
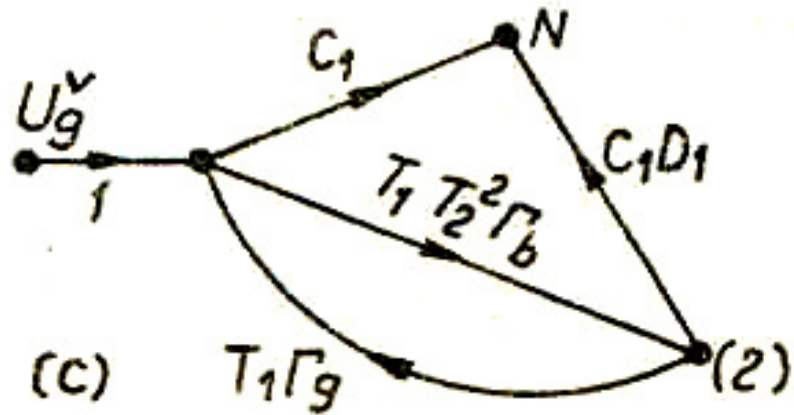
Pri $\beta = 1$ je

$$\text{Razmerje } b_3/b_4' = \Gamma$$

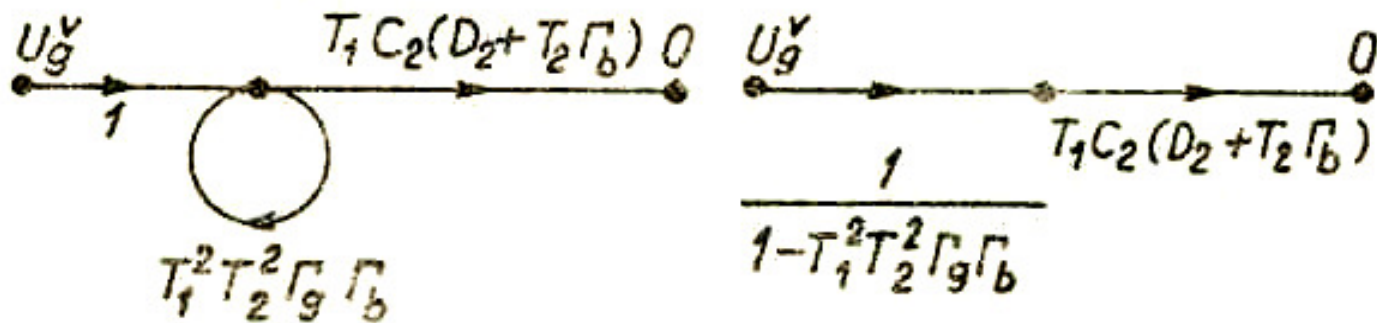
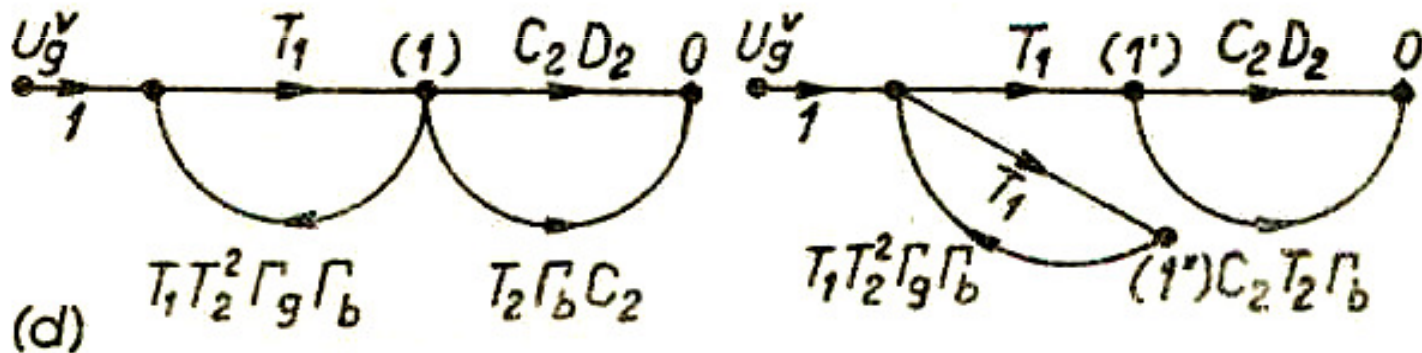
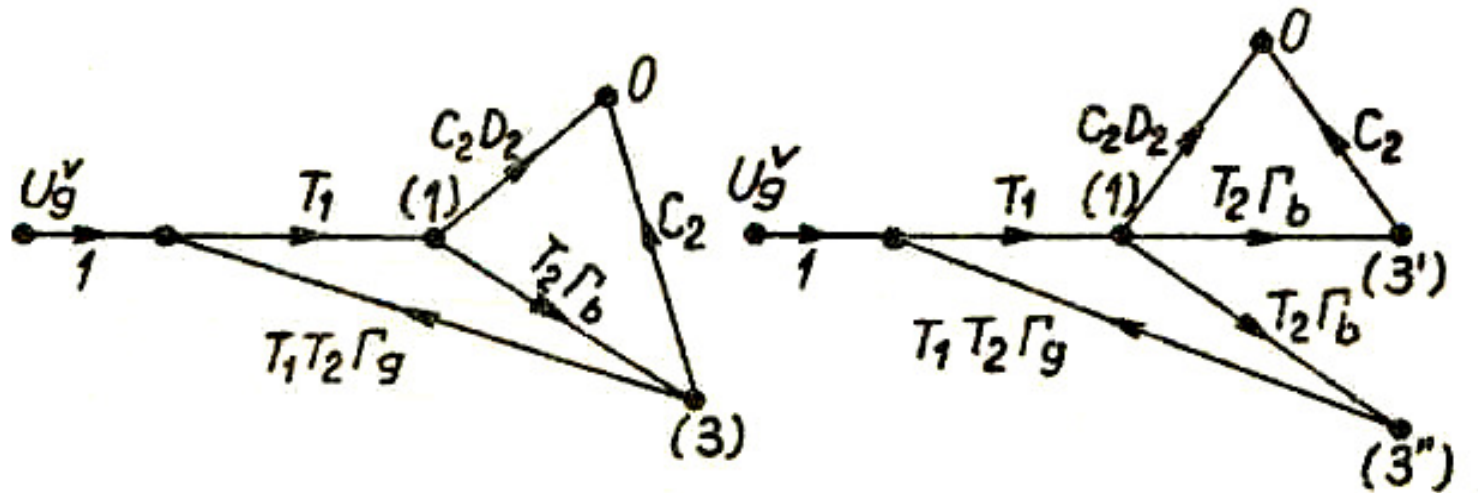
Merilni pogrešek reflektometra



Redukcija grafa vpadnega vala



Redukcija grafa odbitega vala



Pogrešek v meritvi odbojnosti

40

Napetost na priključkih 3-3
(indikacija napredujočega vala)

$$U_3 = U_g^v \frac{C_1(1 + T_1 T_2^2 \Gamma_b D_1)}{1 - T_1^2 T_2^2 \Gamma_g \Gamma_b}$$

Napetost na priključkih 4-4
(indikacija odbitega vala)

$$U_4 = U_g^v \frac{T_1 C_2 (D_2 + T_2 \Gamma_b)}{1 - T_1^2 T_2^2 \Gamma_g \Gamma_b}$$

Merjena odbojnost (razmerje U_3/U_4)

$$\left| \frac{U_4}{U_3} \right| = |T_1| \left| \frac{D_2 + T_2 \Gamma_b}{1 + T_1 T_2^2 \Gamma_b D_1} \right| = |\Gamma'_b|$$

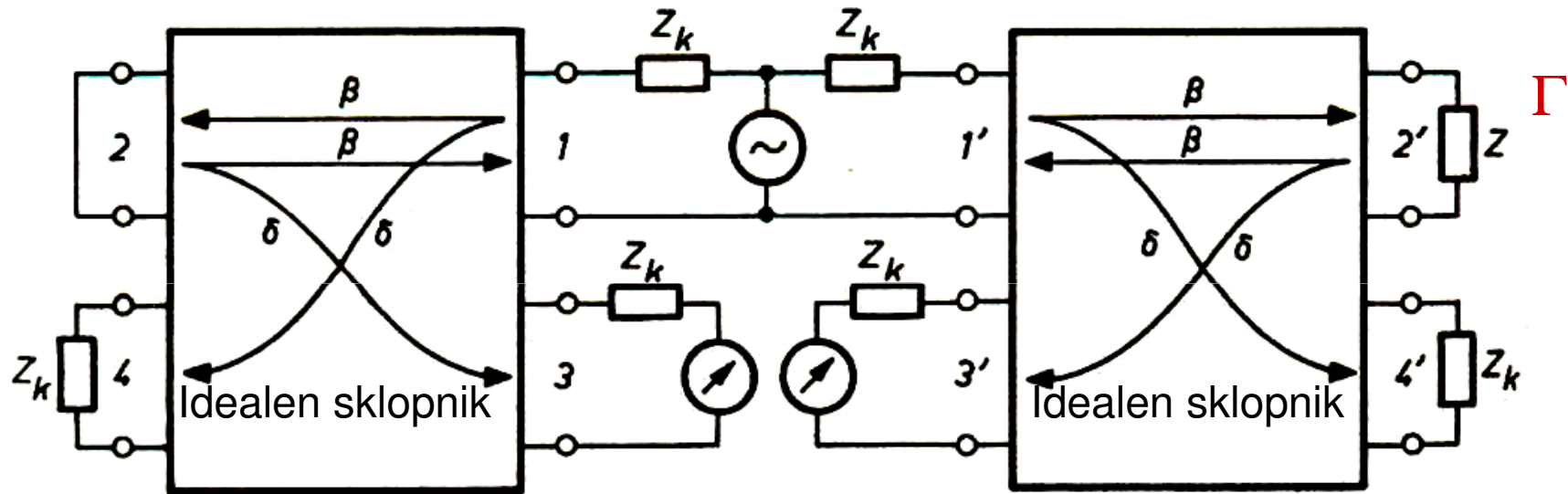
Interval pogreška v meritvi odbojnosti)

$$\frac{|D_2| - |\Gamma_b|}{1 + |\Gamma_b D_1|} \leq |\Gamma'_b| \leq \frac{|D_2| + |\Gamma_b|}{1 - |\Gamma_b D_1|}$$

Meritev z dvema sklopnikoma za odbiti val⁴¹

Primerjalna veja

Sosmerni sklopnik
za odbiti val



Odboj od kratko staknjenega sklopnika pri prilagojenem generatorju

Merilna veja

Sosmerni sklopnik
za odbiti val

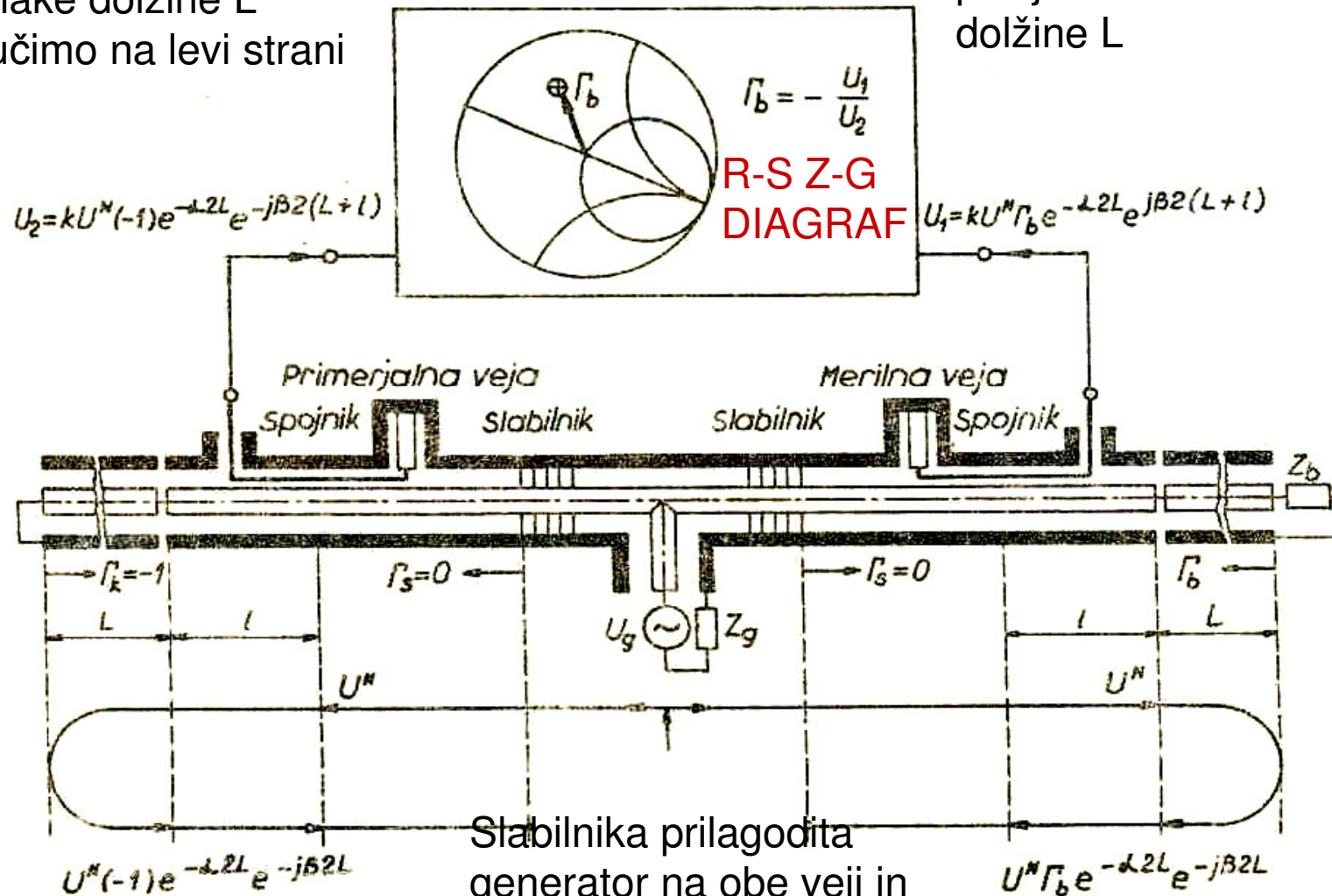
Odboj od merjenega bremena odbojnosti Γ pri prilagojenem generatorju

Meritev dislociranega bremena

Kratkostični kabel ($\Gamma_k = -1$) enake dolžine L priključimo na levi strani

Merimo Γ_b bremena

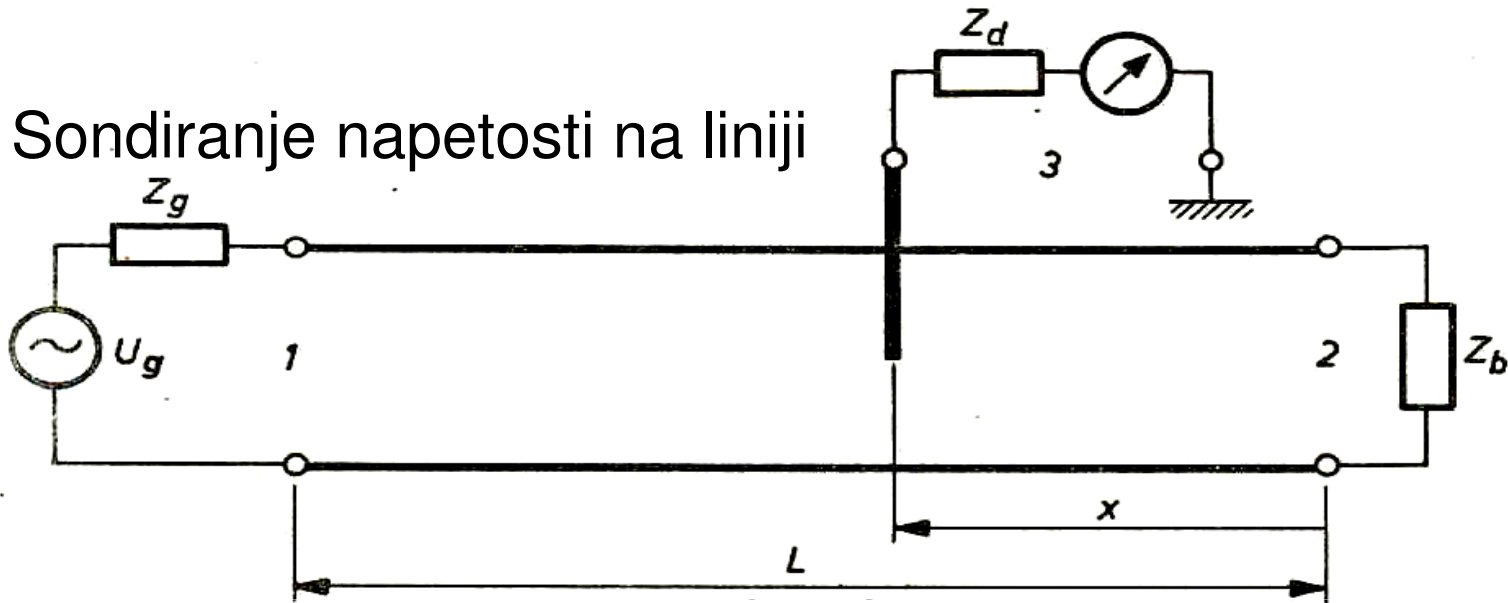
Merjeno breme (anteno) priključimo na koncu kabla dolžine L



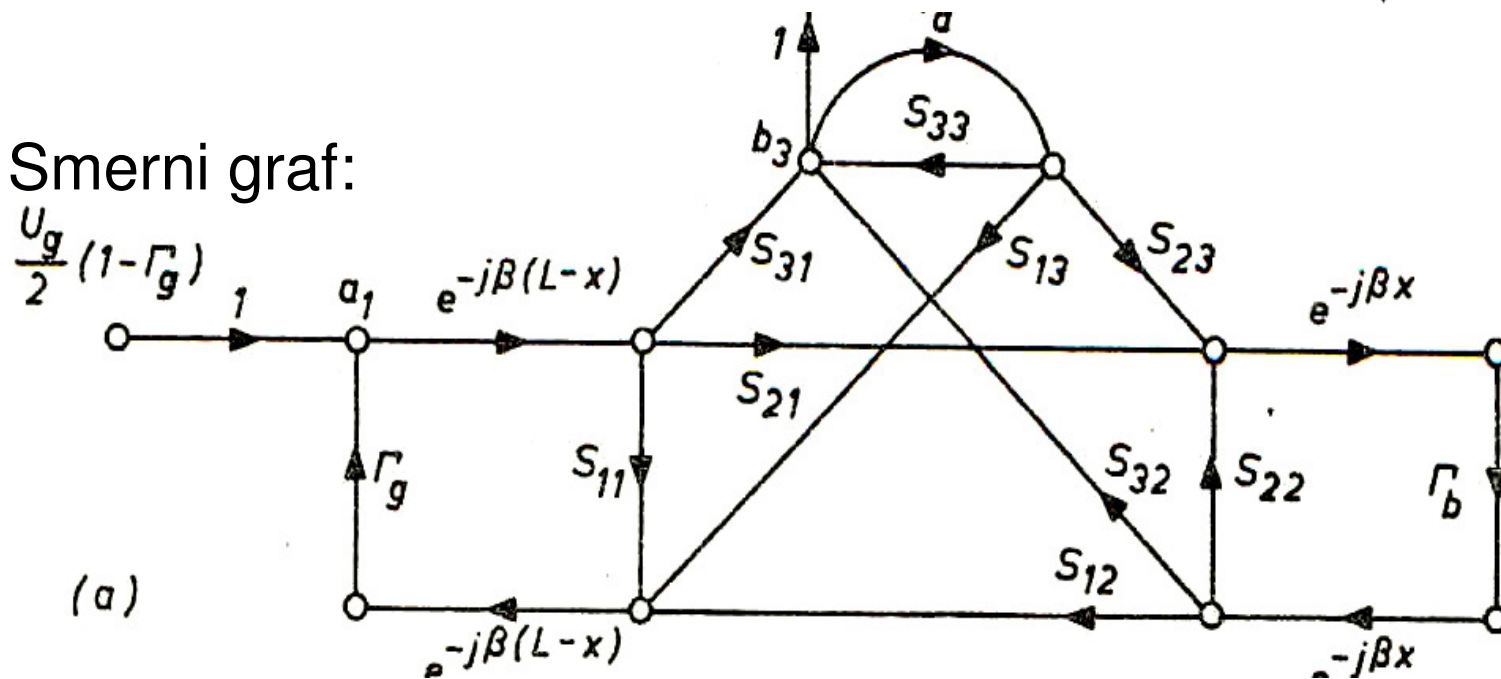
Stabilnika prilagodita generator na obe veji in dajeta napredujoča valova enake jakosti

Pogrešek sondiranja 1/2

Sondiranje napetosti na liniji

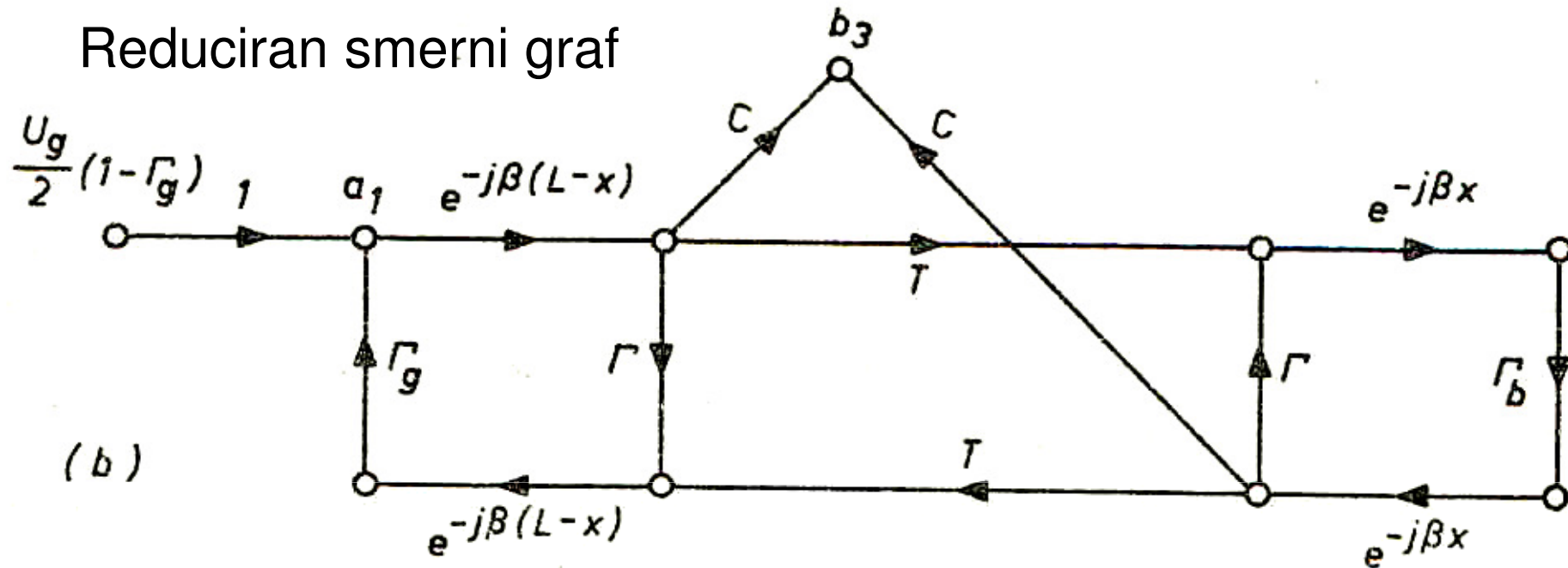


Smerni graf:



Pogrešek sondiranja 2/2

Reduciran smerni graf

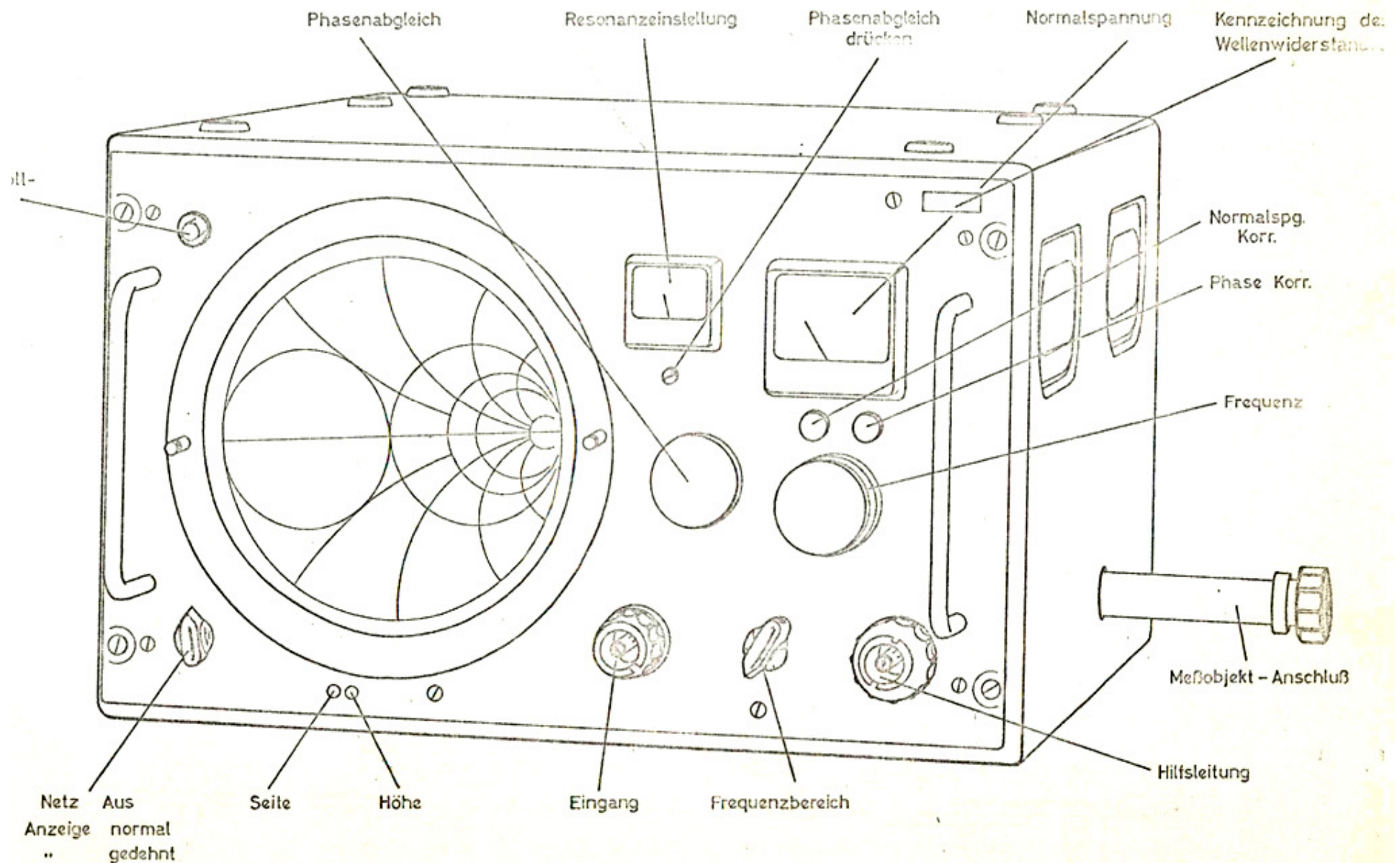


Merjena napetost:

$$b_3 = \frac{U_g}{2} (1 - \Gamma_g) \frac{C e^{-j\beta(L-x)} (1 + \Gamma_b (T - \Gamma) e^{-j\beta 2x})}{1 - \Gamma_g \Gamma e^{-j\beta 2(L-x)} - \Gamma \Gamma_b e^{-j\beta 2x} + \Gamma_g \Gamma_b (\Gamma^2 - T^2) e^{-j\beta 2L}}$$

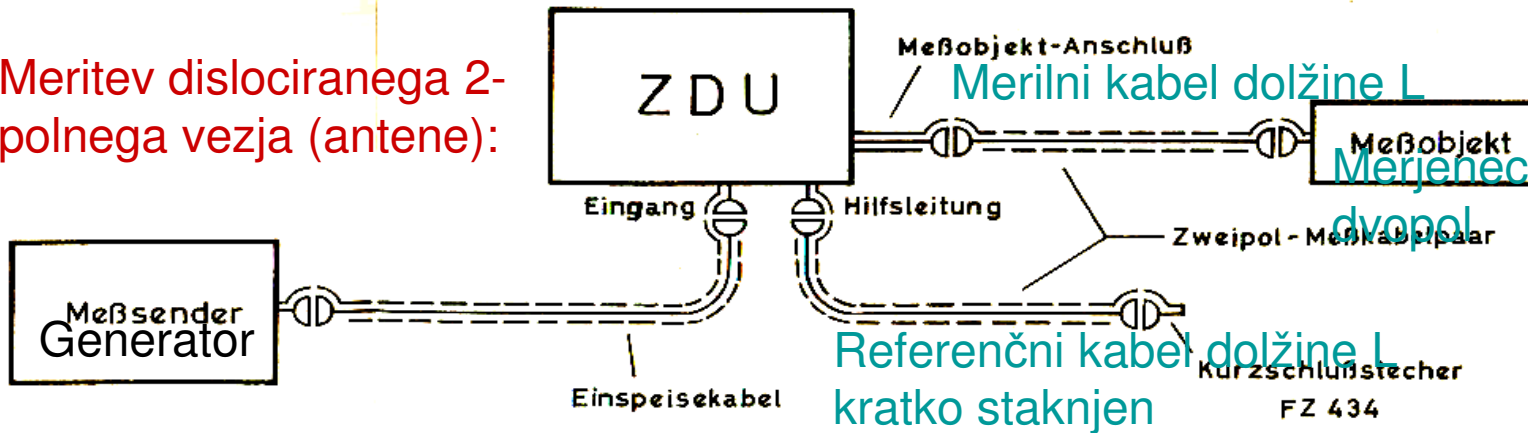
Merjena napetost brez pogreška pri $T = 1$ in $\Gamma = 0$

Z-G Diagramm

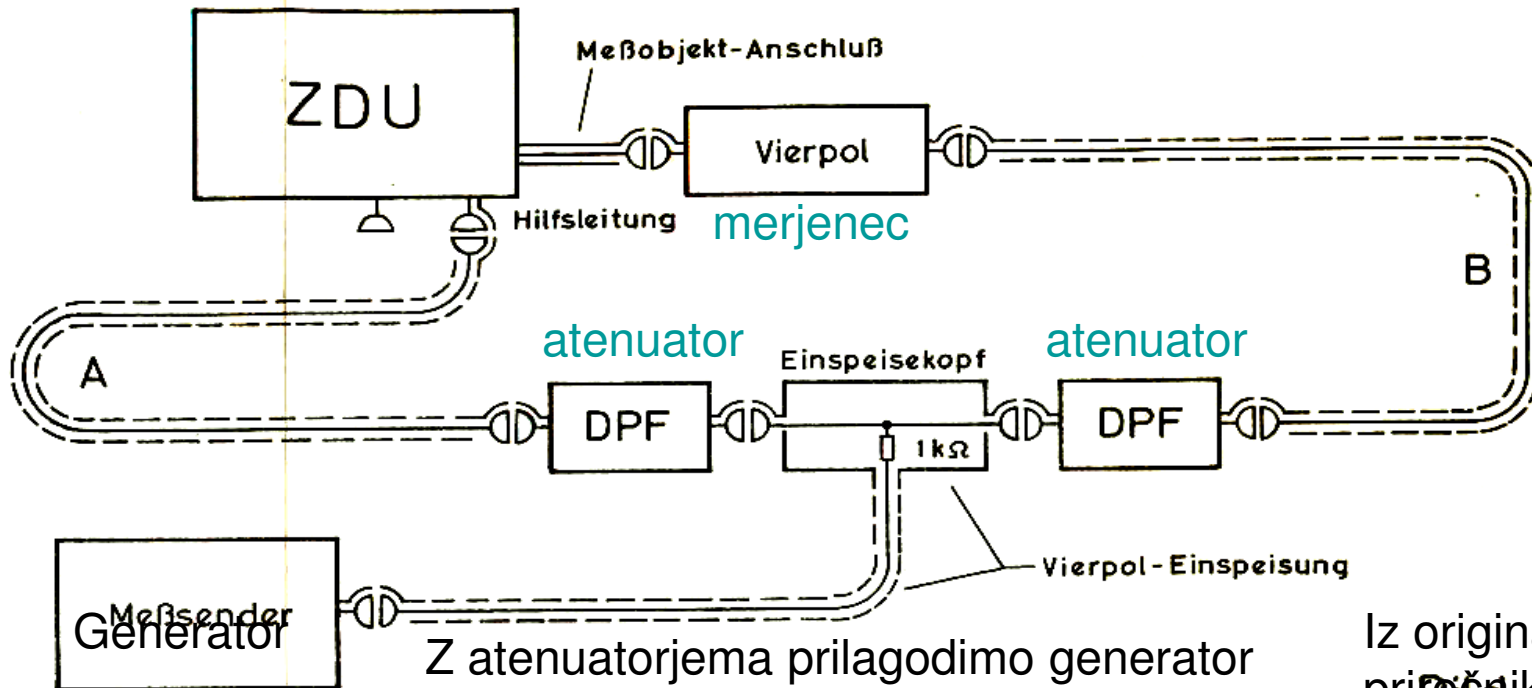


R/S Z-G Diagram

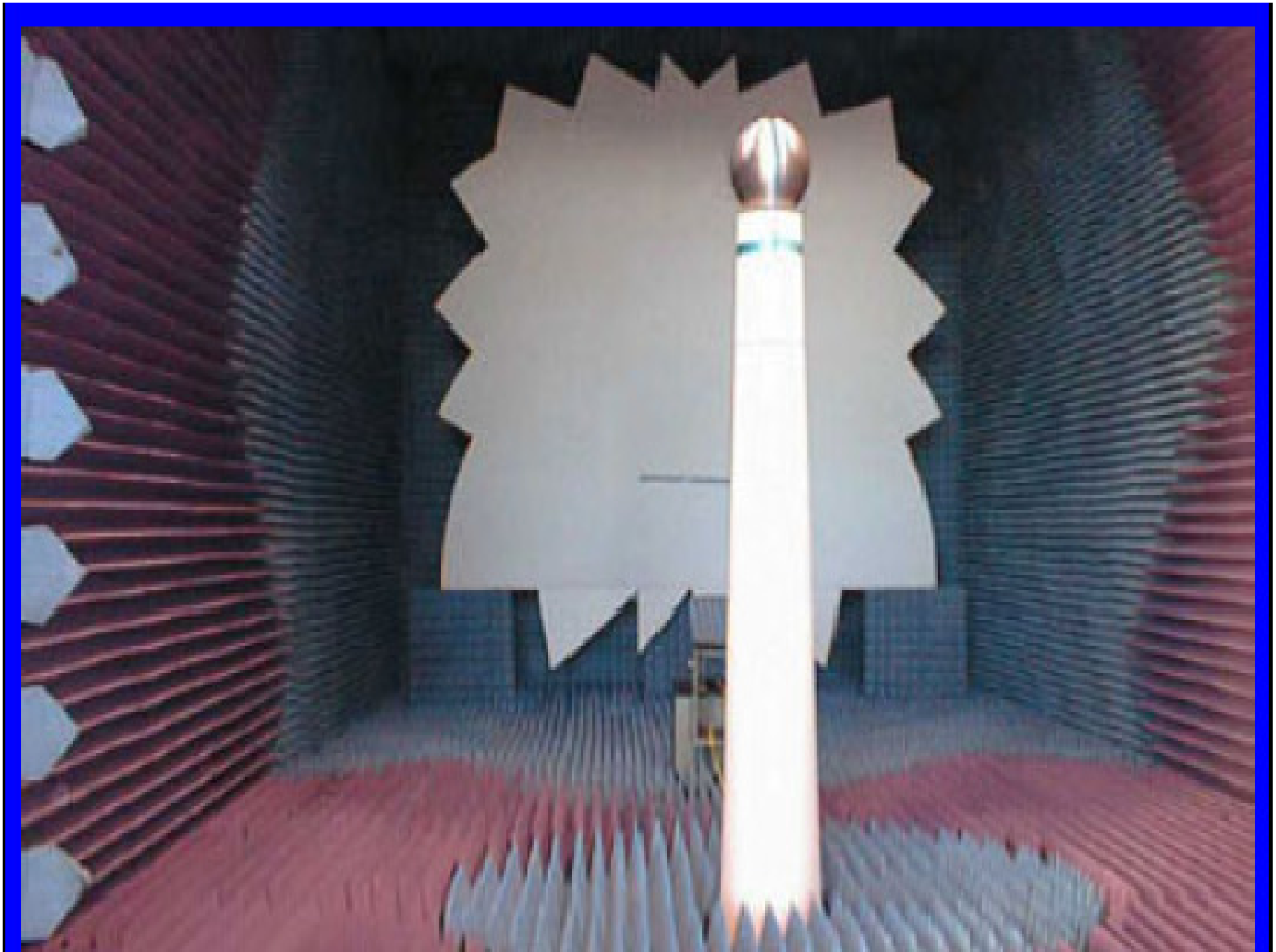
Meritev dislociranega 2-polnega vezja (antene):



Meritev 4-polnega vezja:

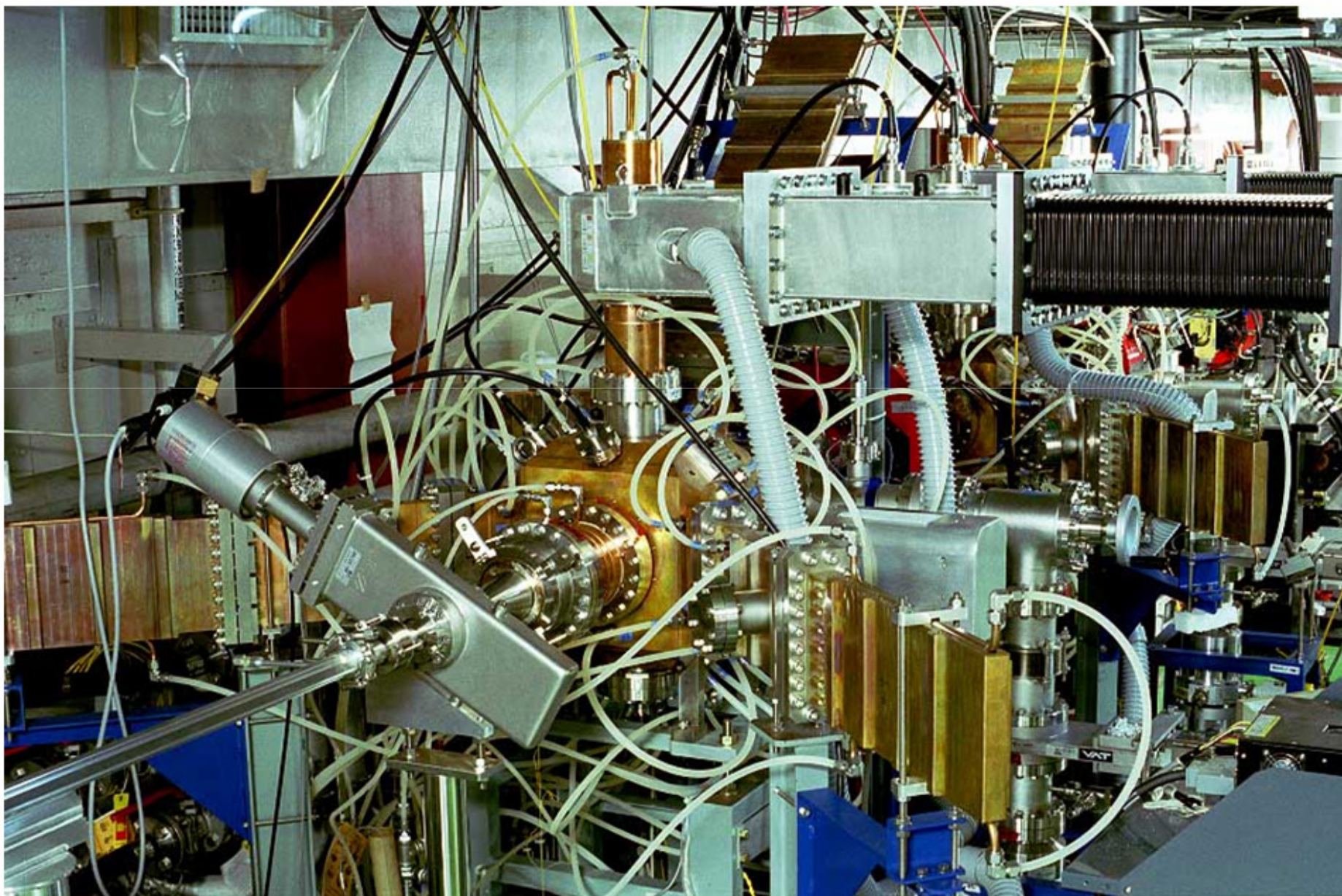


Iz originalnega priročnika



Vse le ni tako preprosto...

48



Sklep

Teorija in tehnika mikrovalovnih merilnikov sta na zelo visoki ravni razvoja.

Frekvenčni pas merilnikov, ki sega do 110 GHz zadošča trenutnim potrebam po širitvi mikrovalovnega spektra (ITS-inteligenčni transportni sistemi).

Karakteristike merilnikov zadovoljujejo ali presegajo sedanje potrebe.