

# Измервания в електрониката

## **Модул 9: Импедансни анализатори и анализатори на вериги**

# Съдържание

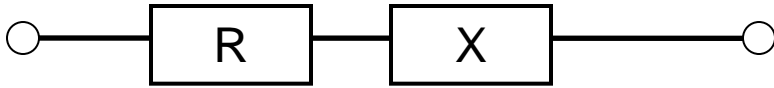
- **Пасивни двуполюсници**
- **Особености при измерване на импеданс**
- **Методи за измерване на импеданс**
- **Анализатори на вериги**

# Пасивни двуполюсници

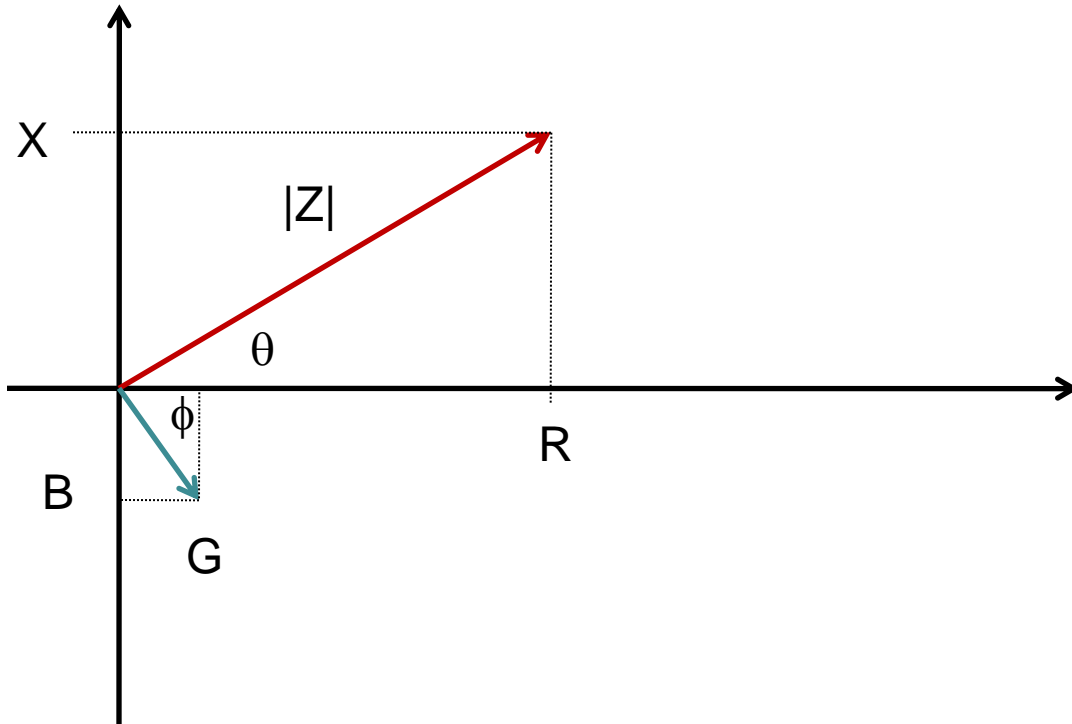
- Импедансът е физична величина, въведена в анализа на линейни електрически вериги при синусоидален ток. Импедансът е обобщение на електрическото съпротивление, включващ всички загуби от активни, индуктивни и капацитивни съставки във веригите. За разлика от активното електрическо съпротивление, импедансът се представя като комплексно число.

# Пасивни двуполюсници

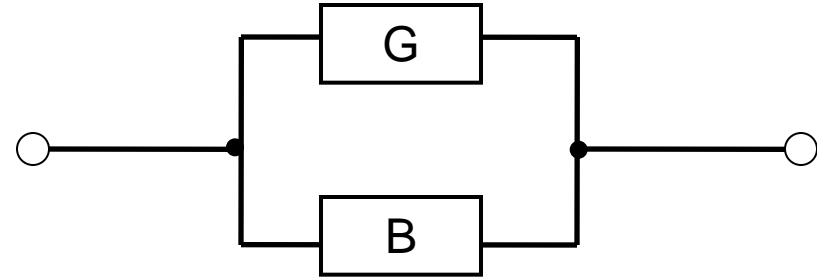
Импеданс



$$Z = R + jX = |Z| e^{j\theta} \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \theta = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$$



Адмитанс



$$Y = G + jB = |Y| e^{j\phi}$$

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$$

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{B}{G}$$

# Пасивни двуполюсници

## Индуктивност



Импеданс (Impedance)

$$Z = R + j\omega L_s = R + jX_L$$

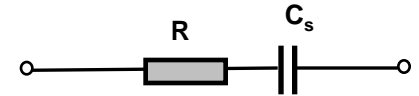
Качествен фактор  
(Quality Factor)

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L_s}{R}$$

Загуби  
(Dissipation Factor)

$$D = \frac{1}{Q}$$

## Капацитивност



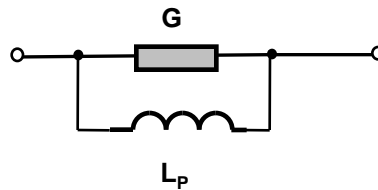
$$Z = R + \frac{1}{j\omega C_s} = R - jX_C$$

$$Q = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega C_s R}$$

$$D = \omega C_s R$$

# Пасивни двуполюсници

## Индуктивност



Адмитанс (Admittance)

$$Y = G + \frac{1}{j\omega L_p} = G - jB_L$$

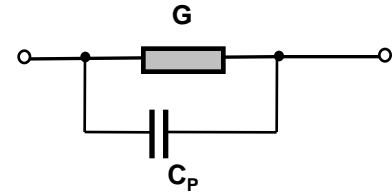
Качествен фактор  
(Quality Factor)

$$Q = \frac{B_L}{G} = \frac{1}{\omega L_p G} = \frac{R_p}{\omega L_p}$$

Загуби  
(Dissipation Factor)

$$D = \frac{1}{Q} = \omega L_p G$$

## Капацитивност

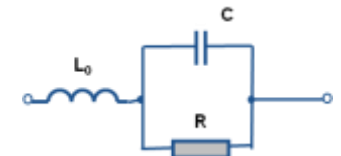
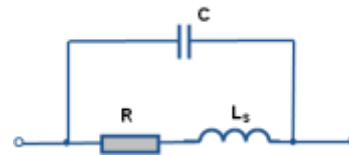
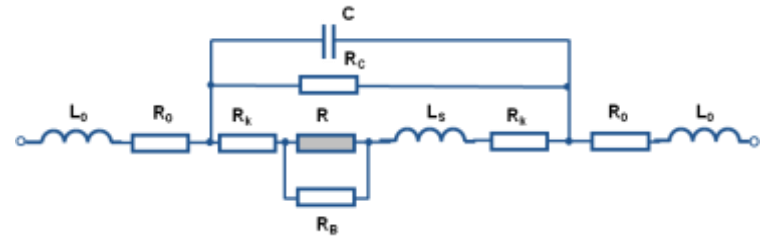


$$Y = G + j\omega C_p = G + jB_C$$

$$Q = \frac{B_C}{G} = \omega C_p R_p$$

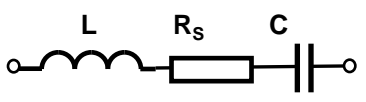
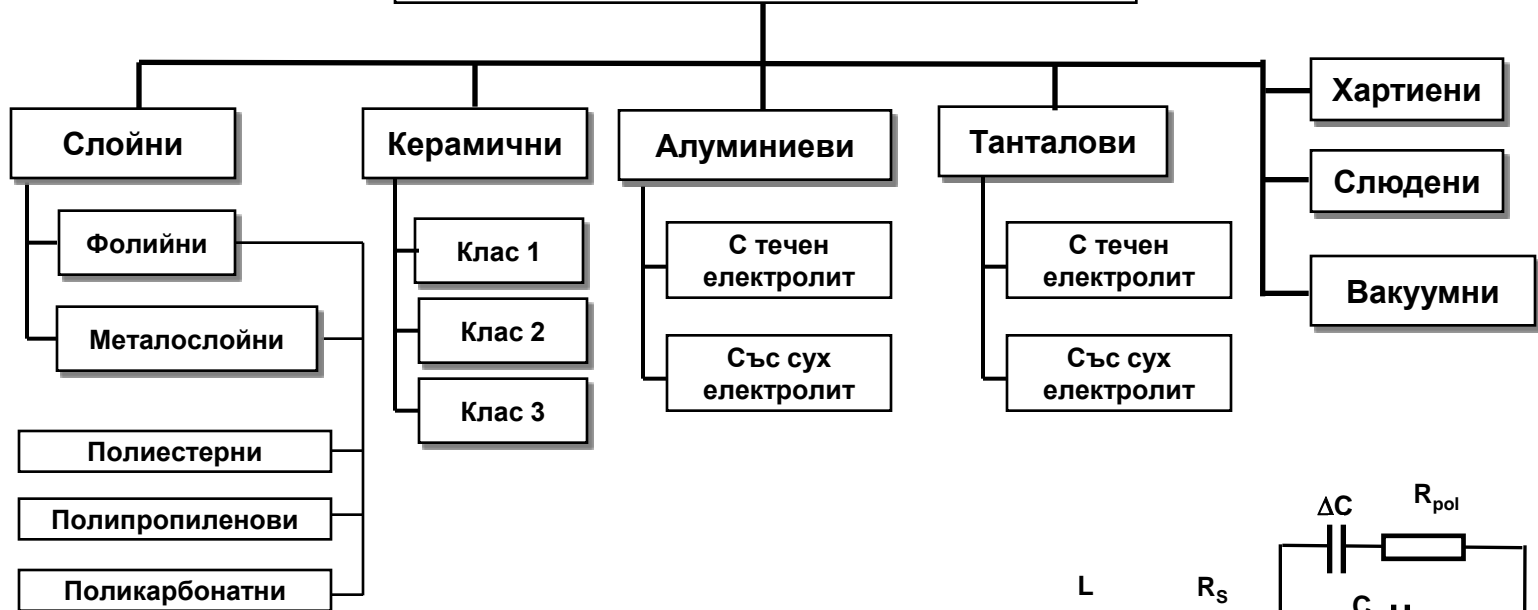
$$D = \frac{1}{\omega C_p R_p}$$

# Пасивни двуполусници



# Пасивни двуполусници

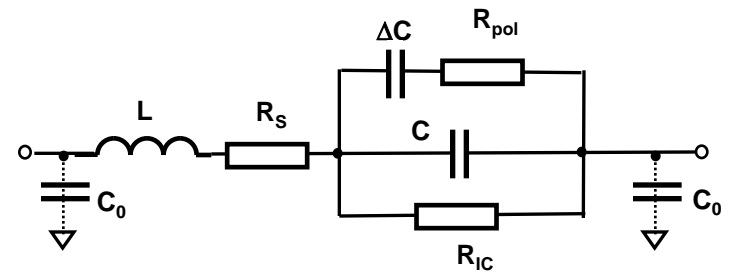
## Кондензатори с постоянен капацитет



**Еквивалентна схема**

$$Z = R_s + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

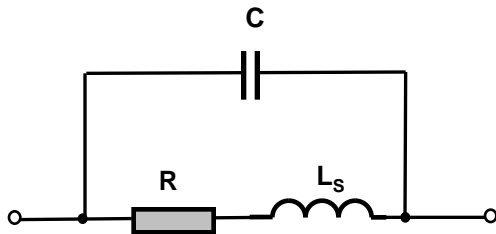


**Пълна еквивалентна схема**

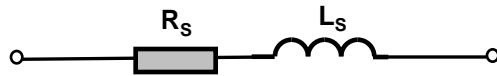


# Пасивни двуполусници

## Бобини



Еквивалентна схема



Последователна еквивалентна  
схема за променлив ток

$$Z = R_s + j\omega L_s$$

$$|Z| = \sqrt{R_s^2 + (\omega L_s)^2}$$

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg}\delta} = \frac{\omega L_s}{R_s}$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L_s}{R_s}$$

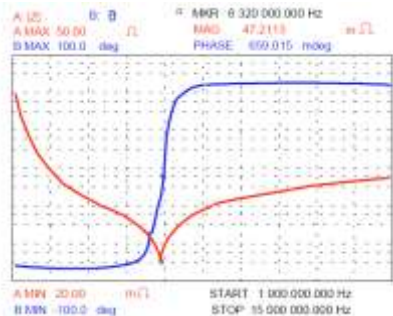
# Особености при измерване на импеданс

## Причини за несъответствията при измерването на пасивни двуполусници

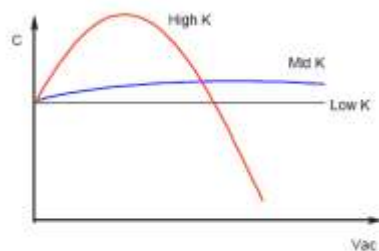
- Условия на измерването
- Идеална, реална и измерена стойност
- Грешки от измерването
- Избрана еквивалентна схема

# Особености при измерване на импеданс

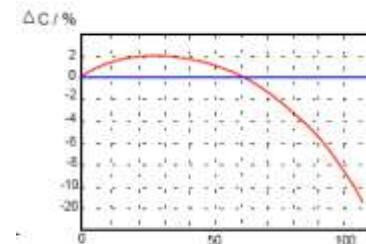
## Условия на измерването



➤ Честота на стимулиращия сигнал

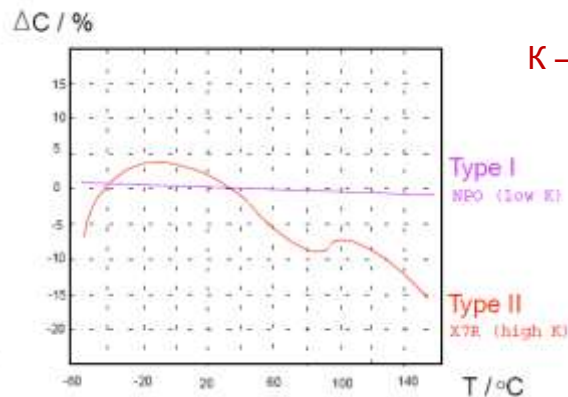


➤ Ниво на стимулиращия сигнал



➤ Постояннотоково ниво (ток или напрежение)

➤ Условия на околната среда (температура, относителна влажност)



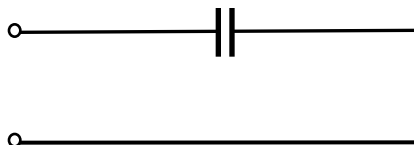
$K$  – диелектрична константа

➤ Старееене

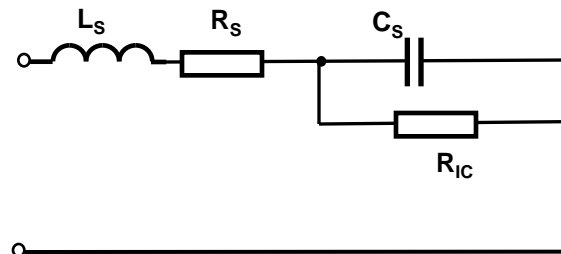
# Особености при измерване на импеданс

## Идеална, реална и измерена стойност

Идеална

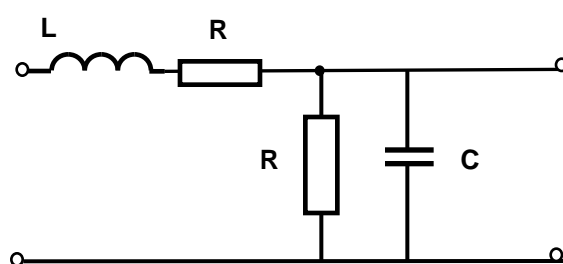


Реална

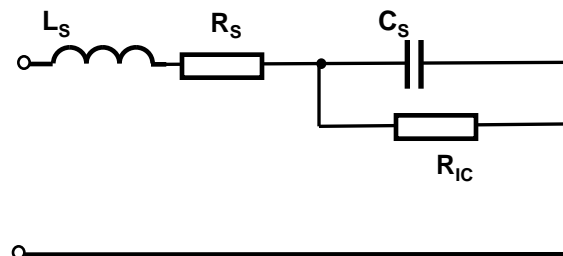


Измерена

Грешка на уреда

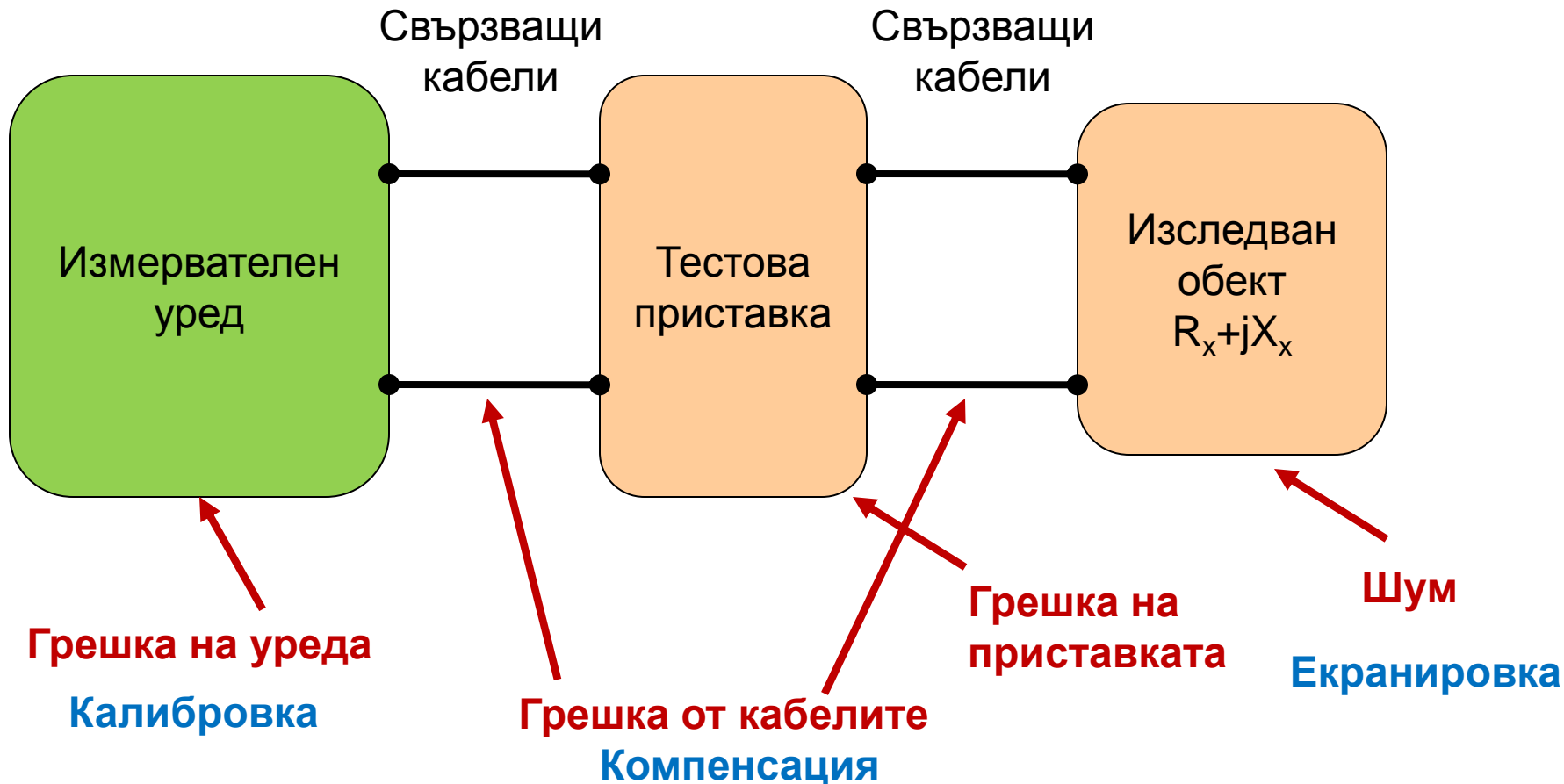


Свързващи проводници



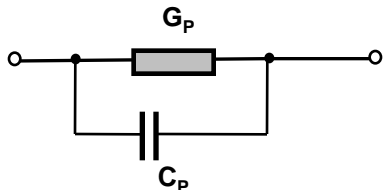
# Особености при измерване на импеданс

## Грешки от измерването

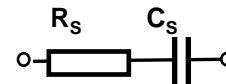


# Особености при измерване на импеданс

## Избрана еквивалентна схема



Паралелна  
еквивалентна  
схема



Последователна  
еквивалентна  
схема

$$R_S = R_P \frac{D^2}{1 + D^2}$$

$$C_S = C_P(1 + D^2) = C_P \left(1 + \frac{1}{Q^2}\right)$$

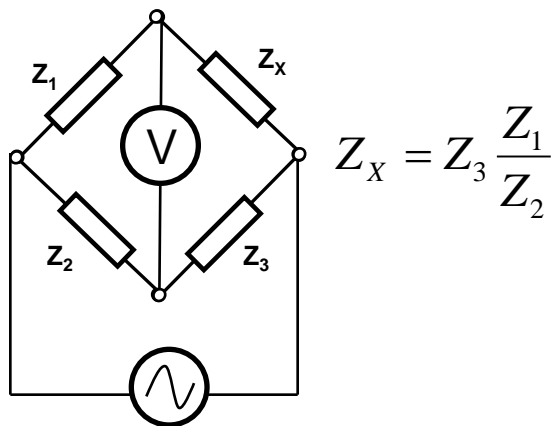
$$\begin{aligned} Q &\rightarrow \infty \\ D &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad C_S \approx C_P$$

$$R_P = R_S \left(1 + \frac{1}{D^2}\right)$$

$$C_P = C_S \frac{1}{1 + D^2}$$

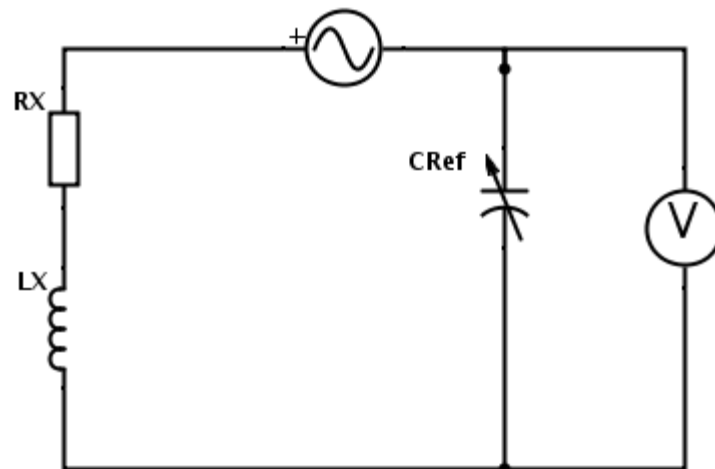
# Методи за измерване на импеданс

## Мостов метод (Bridge method)



- Използва се комбинация от еталонни R, L, C
- DC до 300 MHz, 0,1% грешка;
- Относително евтин
- Ръчно настройваем

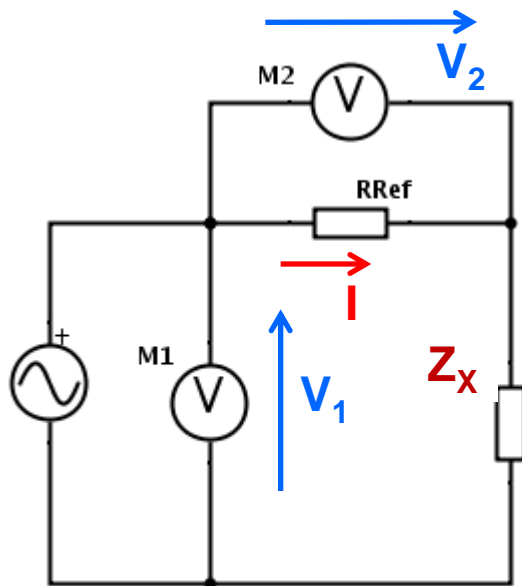
## Резонансен метод (Resonant method)



- Използва се комбинация от променливи C
- 10 kHz до 70 MHz,
- За двуполюсници с висок Q.
- Относително евтин
- Ръчно настройваем

# Методи за измерване на импеданс

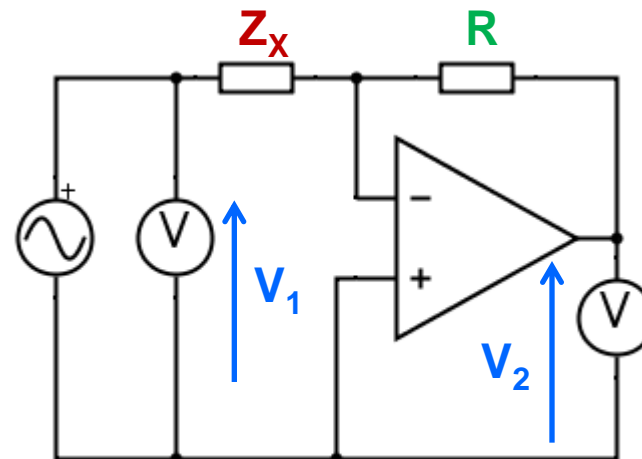
## Волт – амперметричен метод (I-V method)



- Относително евтин
- 10 kHz до 100 MHz,
- Позволява измерване на замасени двуполюсници

$$Z_X = \frac{V_1}{I} = \frac{V_1}{V_2} R_{Ref}$$

## Активен преобразувател

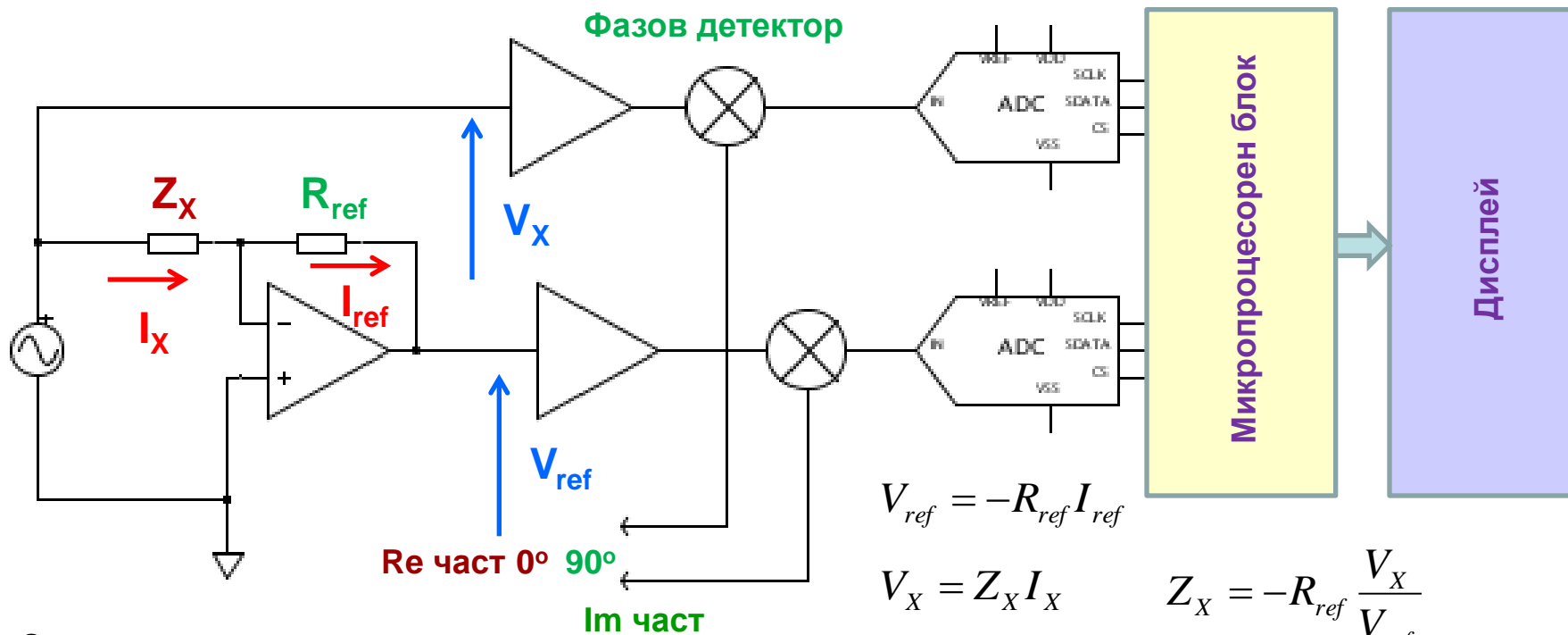


$$Z_X = -\frac{V_1}{V_2} R$$



# Методи за измерване на импеданс

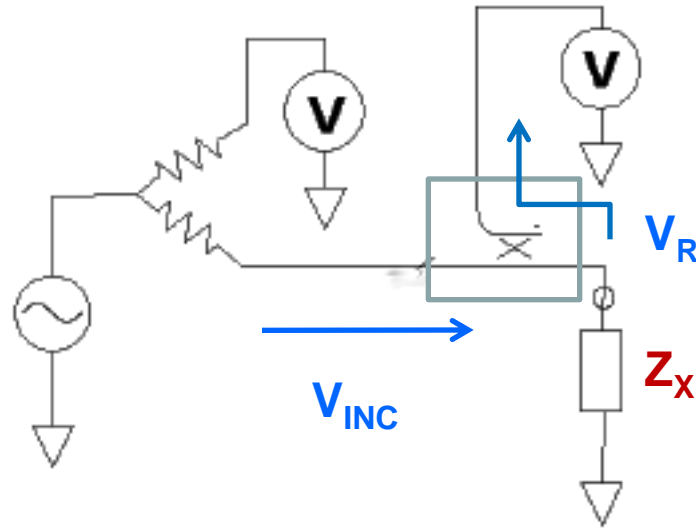
## Автобалансиран мост (Auto balancing bridge method)



- Относително евтин
- 10 kHz до 100 MHz,
- Позволява измерване на замасени двуполюсници

# Методи за измерване на импеданс

## Метод на анализатор на вериги (Network analysis method)



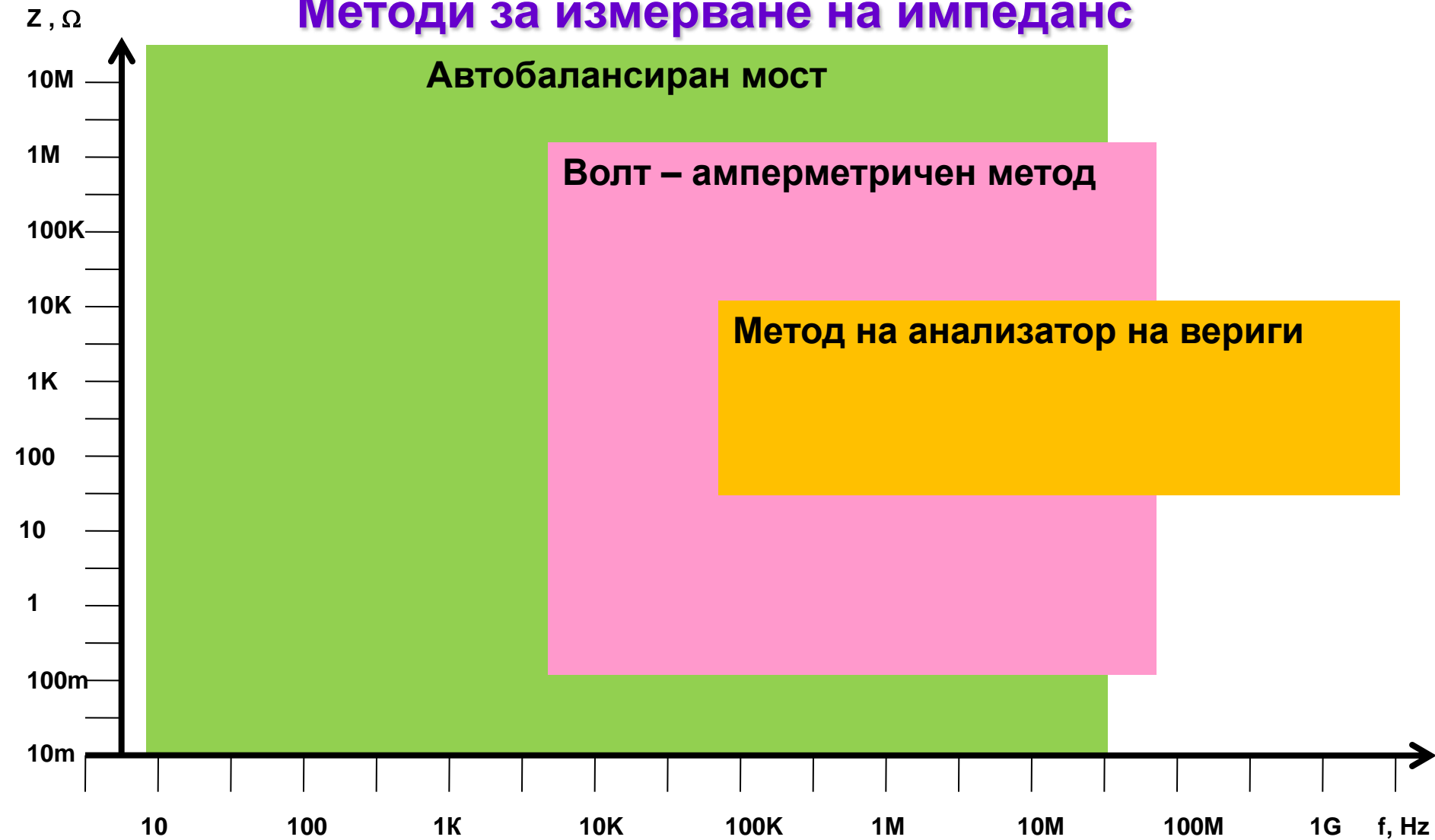
Коефициент на отражение

$$\Gamma = \frac{V_R}{V_{INC}} = \frac{Z_X - Z_0}{Z_X + Z_0}$$

$$Z_X = Z_0 \frac{V_R + V_{INC}}{V_{INC} - V_R}$$

- Относително скъп
- 100 kHz до 10 GHz
- Лоша точност
- Изисква калибровка преди работа

# Методи за измерване на импеданс



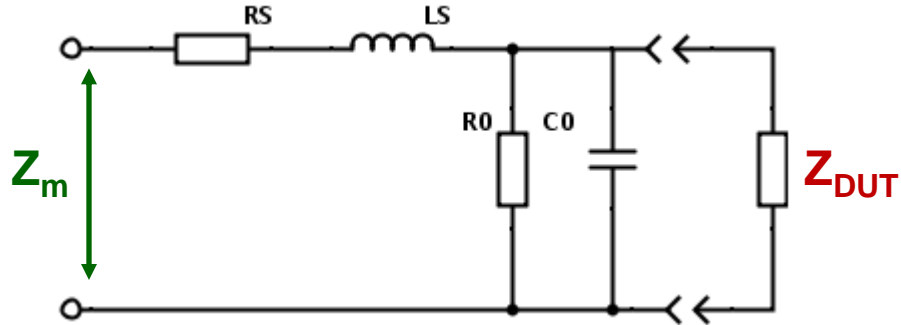
# Методи за измерване на импеданс

## Критерии за избор на метод за измерване

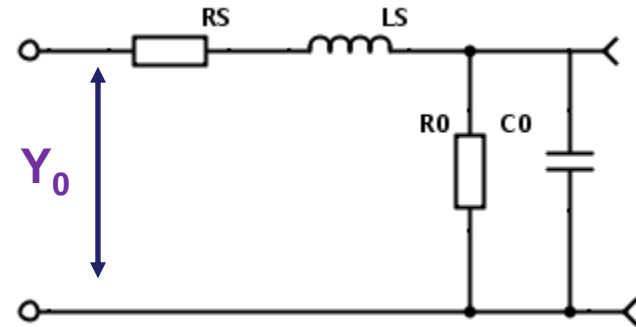
- Честотен обхват (Frequency)
- Импеданс на тествания обект
- Изисквания към точността на измерване
- Ниво на постоянното и амплитуда на променливото напрежение
- Измервани параметри
- Физически размери на изследваният обект

# Методи за измерване на импеданс

## Компенсация на тестовата приставка

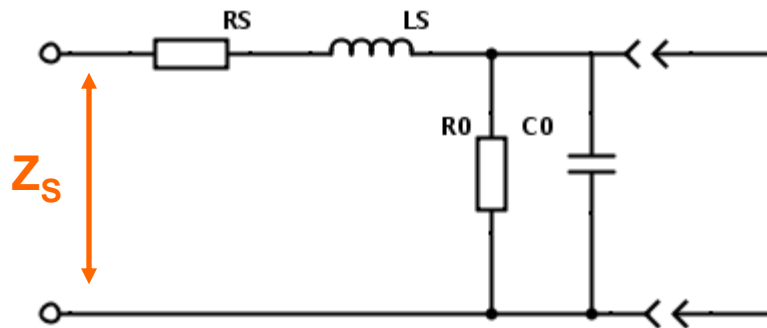


Импеданс  $Z_S$  и Адмитанс  $Y_0$



Измерване при отворена верига

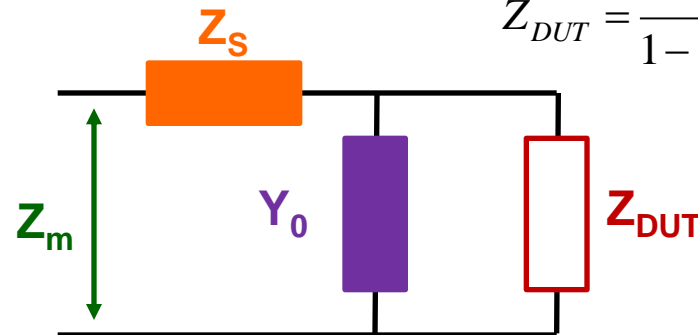
$$Y_0 = G_0 + j\omega C_0 \quad G_0 = \frac{1}{R_0}$$



Измерване при късо съединение

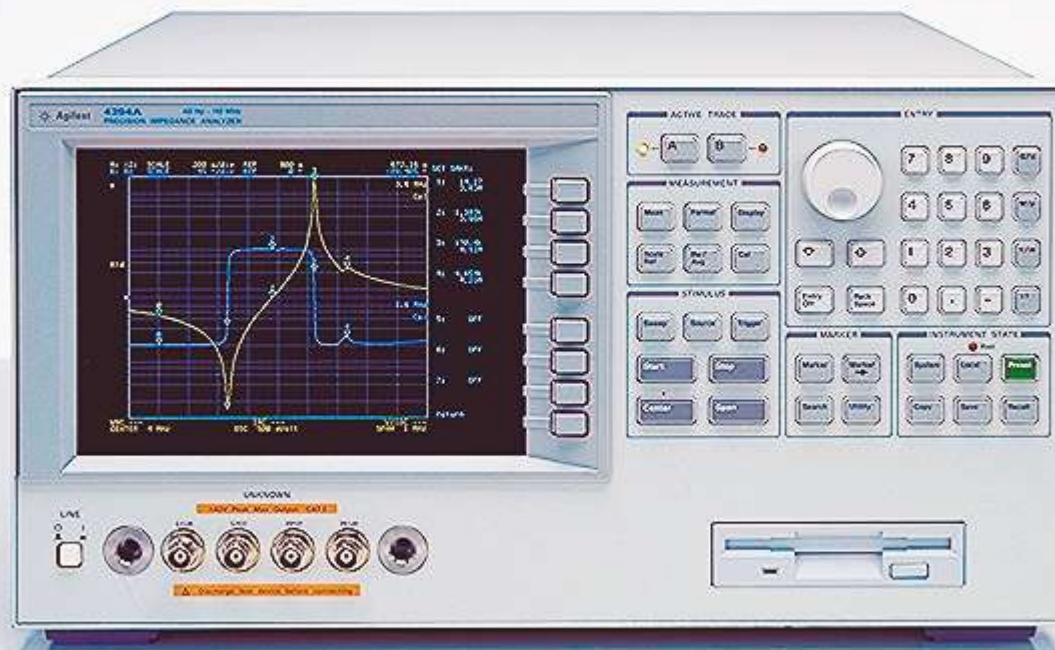
$$Z_S = R_S + j\omega L_S$$

$$Z_{DUT} = \frac{Z_m - Z_S}{1 - (Z_m - Z_S)Y_0}$$



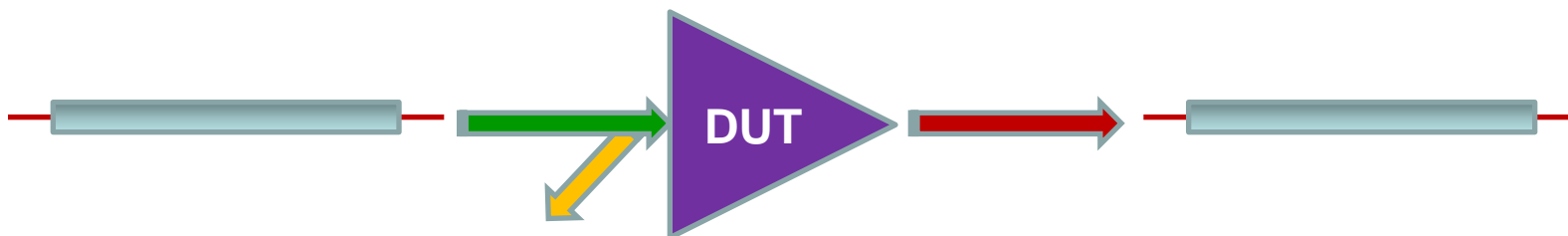
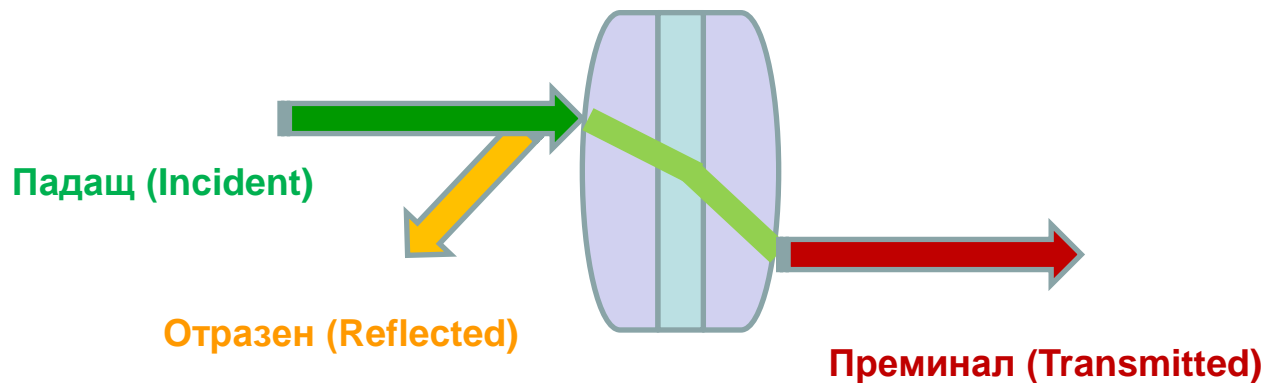
# Импедансни анализатори

Agilent 4294A

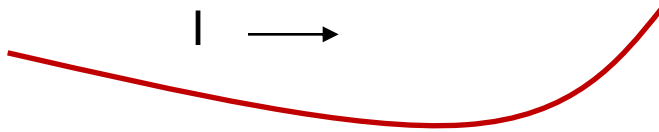


# Анализатори на вериги

Аналогия между високочестотен сигнал и светлинен сигнал



# Анализатори на вериги



## Ниски честоти

- Дължината на вълната е много по-голяма от дължината на проводника
- Пренасянето на енергията е лесно
- Стойността на тока и напрежението не зависи от позицията в проводника

Честота	Дължина на вълната
60 Hz	5000 km
10 MHz	30 m
1 GHz	30 cm
40 GHz	7,5 mm
100 GHz	3mm



## Високи честоти

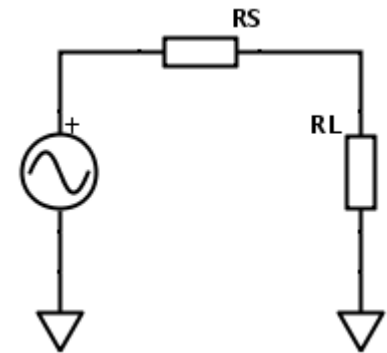
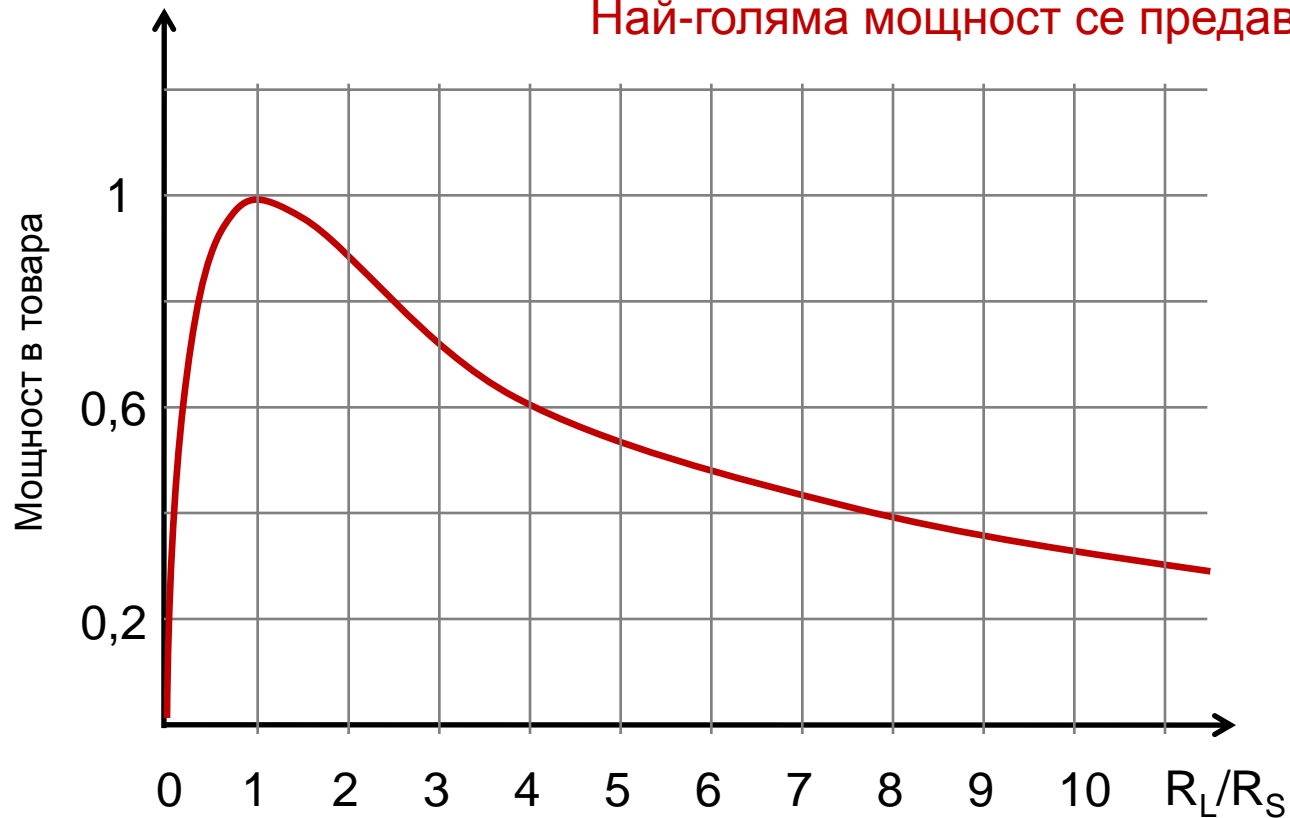
- Дължината на вълната е много по-малка от дължината на проводника
- За пренасянето на енергията е необходима предавателна линия
- Съгласуването с характеристичното съпротивление  $Z_0$  е много важно за да няма зауби
- Стойността на тока и напрежението зависи от позицията в проводника



# Анализатори на вериги

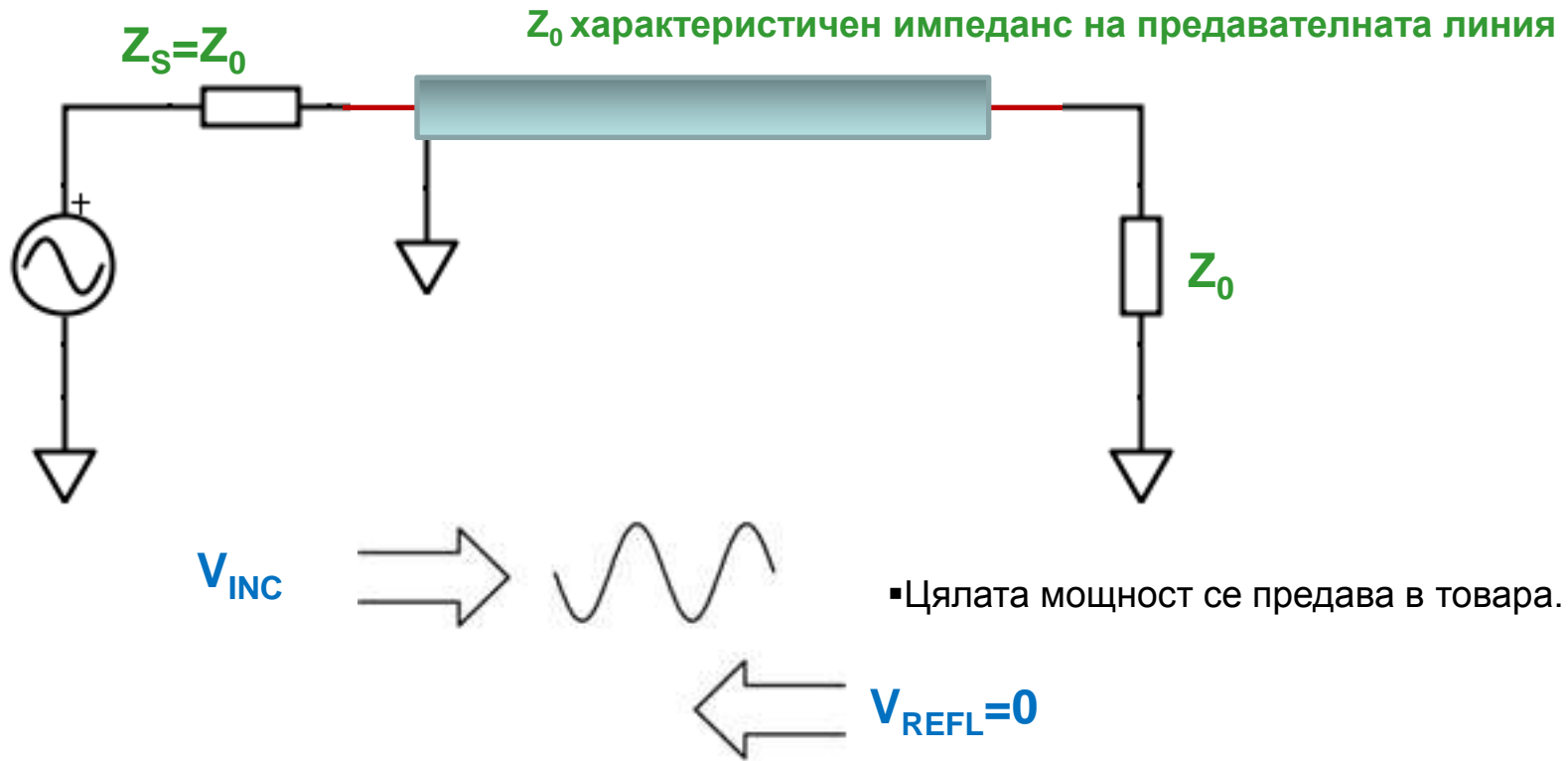
- $Z_0$  определя връзката между тока и напрежението
- $Z_0$  зависи от физическите размери и коефициента на диелектрична проникваемост
- Най често е  $50 \Omega$  ( $75 \Omega$ )

Най-голяма мощност се предава, когато  $R_L = R_S$



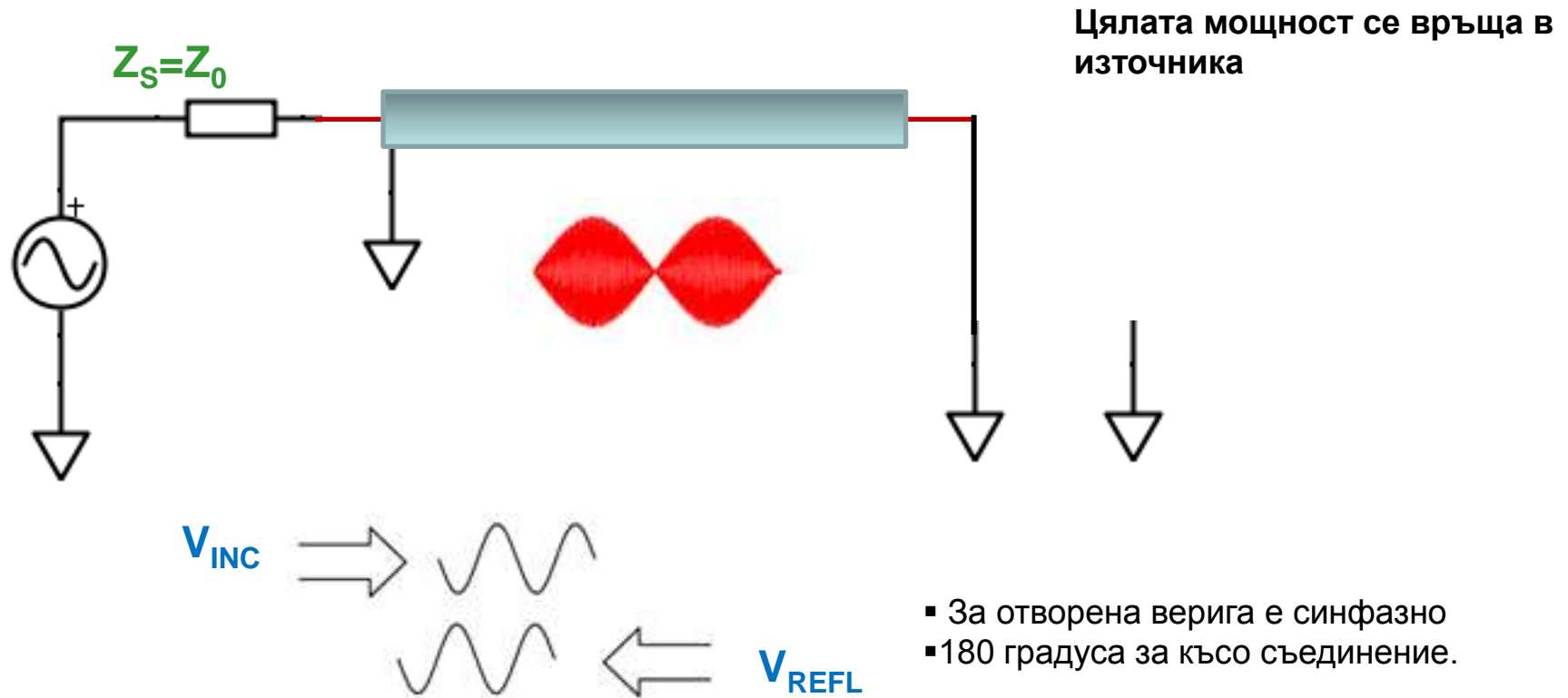
# Анализатори на вериги

Предавателна линия натоварена със  $Z_0$



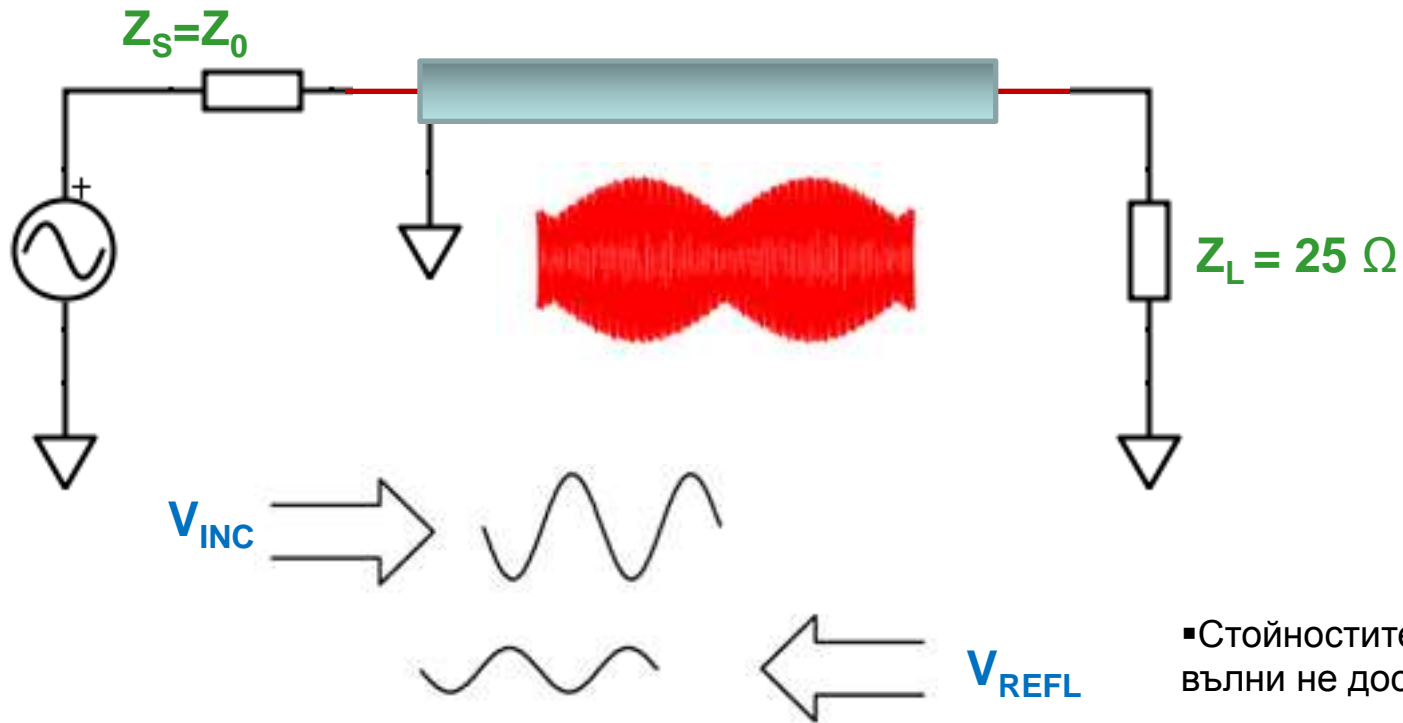
# Анализатори на вериги

## Предавателна линия при късо съединение и отворена верига



# Анализатори на вериги

Предавателна линия натоварена със  $Z_L = 25 \Omega$



▪ Стойностите на стоящите вълни не достигат до нула.

# Анализатори на вериги

## Параметри за окачествяване на неизвестно устройство H, Y и Z параметри

- Линеен модел на устройството
- Изследват се токовете и напреженията като функции на честотата и товара
- От измерените данни се изчисляват параметрите
- Моделира поведението на устройството при различни източници и товари

### H - параметри

$$V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2$$

### Y - параметри

$$I_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2$$

$$I_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2$$

### Z- параметри

$$V_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2$$

$$V_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2$$



$$h_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0}$$

късо съединение



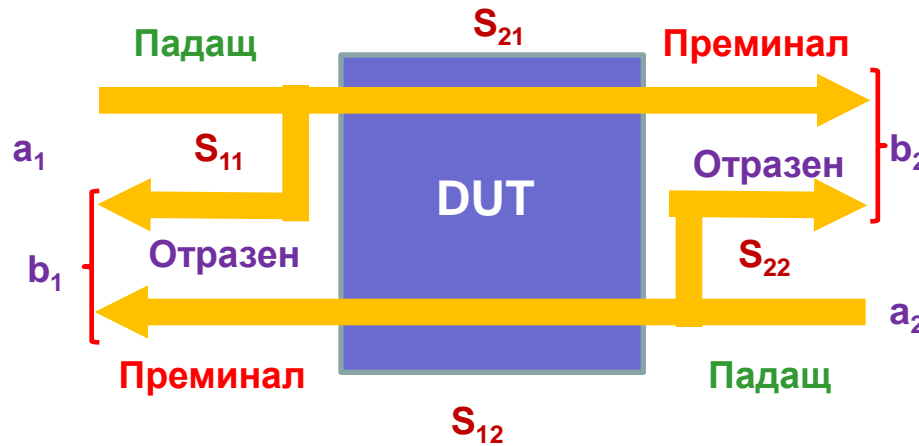
$$h_{12} = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1=0}$$

отворена верига

# Анализатори на вериги

## S - параметри

- Относително лесни за определяне при високи честоти
- Не е необходимо късо съединение и отворена верига, които могат да предизвикат възбуждане на изследваното устройство
- От измерените S – параметри могат да се изчислят H, Y и Z параметрите



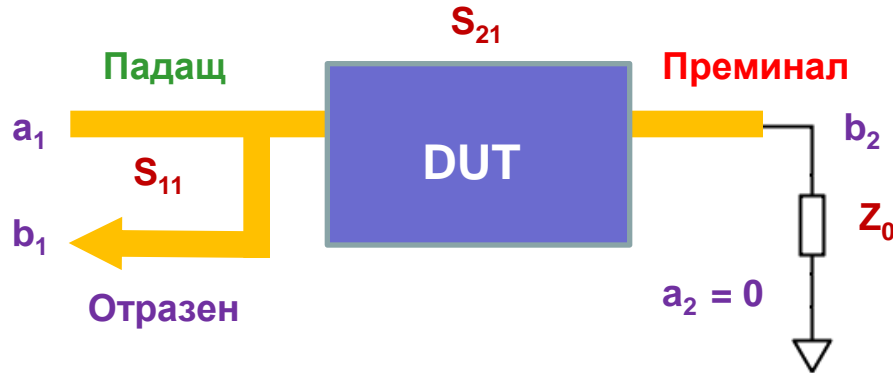
## S- параметри

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

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

# Анализатори на вериги

## Измерване на S - параметри



$$S_{11} = \frac{\text{Отразен}}{\text{Падащ}} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

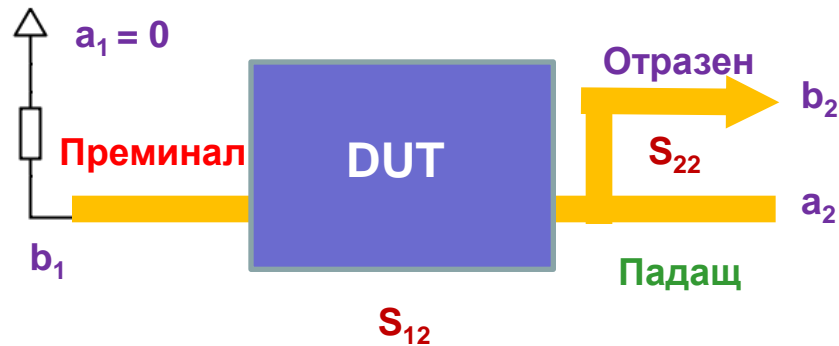
$$S_{21} = \frac{\text{Преминал}}{\text{Падащ}} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

## Права посока

$$S_{22} = \frac{\text{Отразен}}{\text{Падащ}} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

$$S_{12} = \frac{\text{Преминал}}{\text{Падащ}} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

## Обратна посока



# Анализатори на вериги

## S - параметри

- $S_{11}$  Коефициент на отражение в права посока (входно съгласуване)
- $S_{22}$  Коефициент на отражение в обратна посока (изходно съгласуване)
- $S_{21}$  Коефициент на предаване в права посока (усилване или затихване)
- $S_{12}$  Коефициент на предаване в обратна посока (изолация)

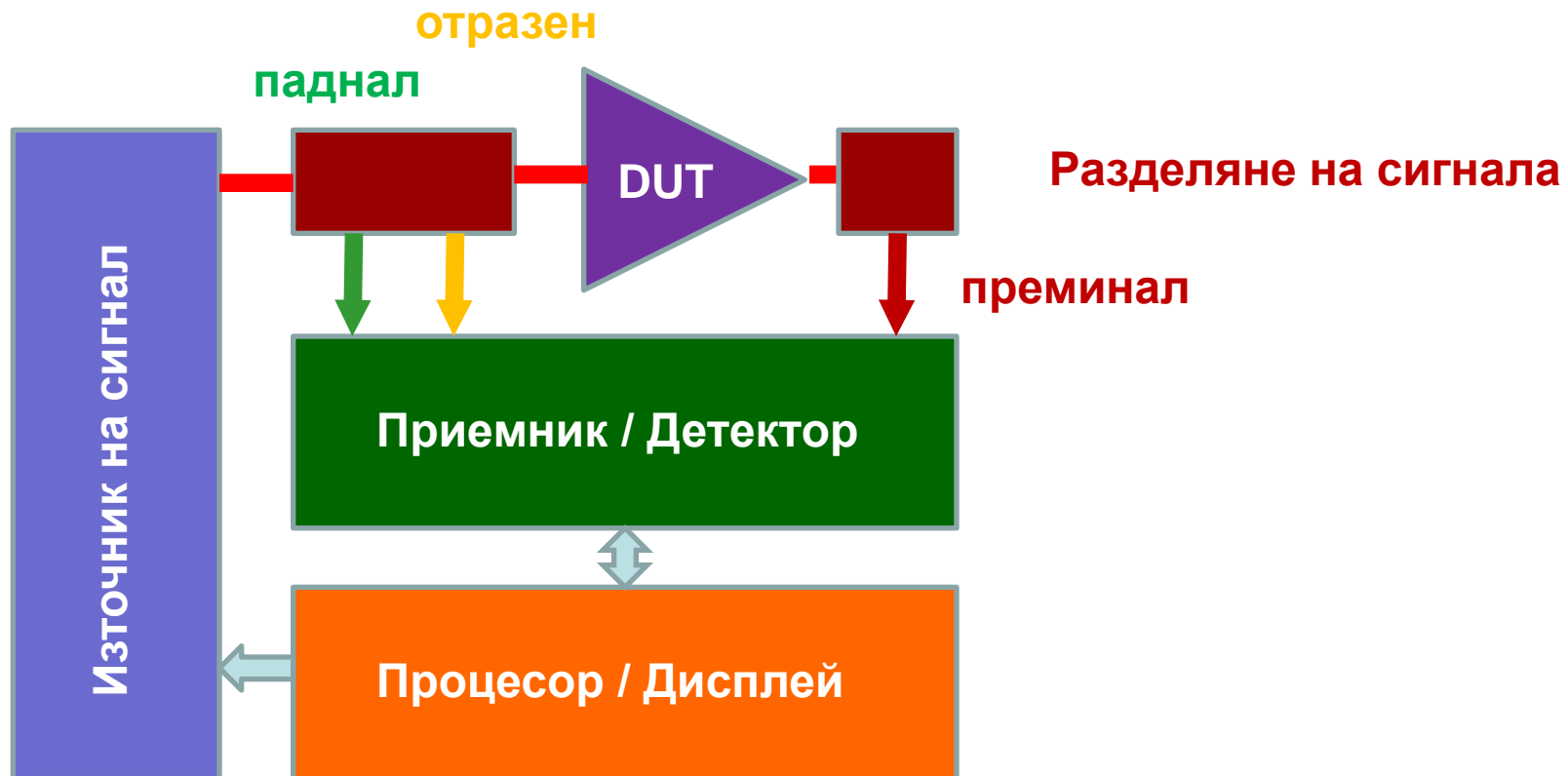
- S параметрите са комплексни величини
- Често се представят в логаритмичен вид

$$S(dB) = 20 \log_{10} |S|$$



# Анализатори на вериги

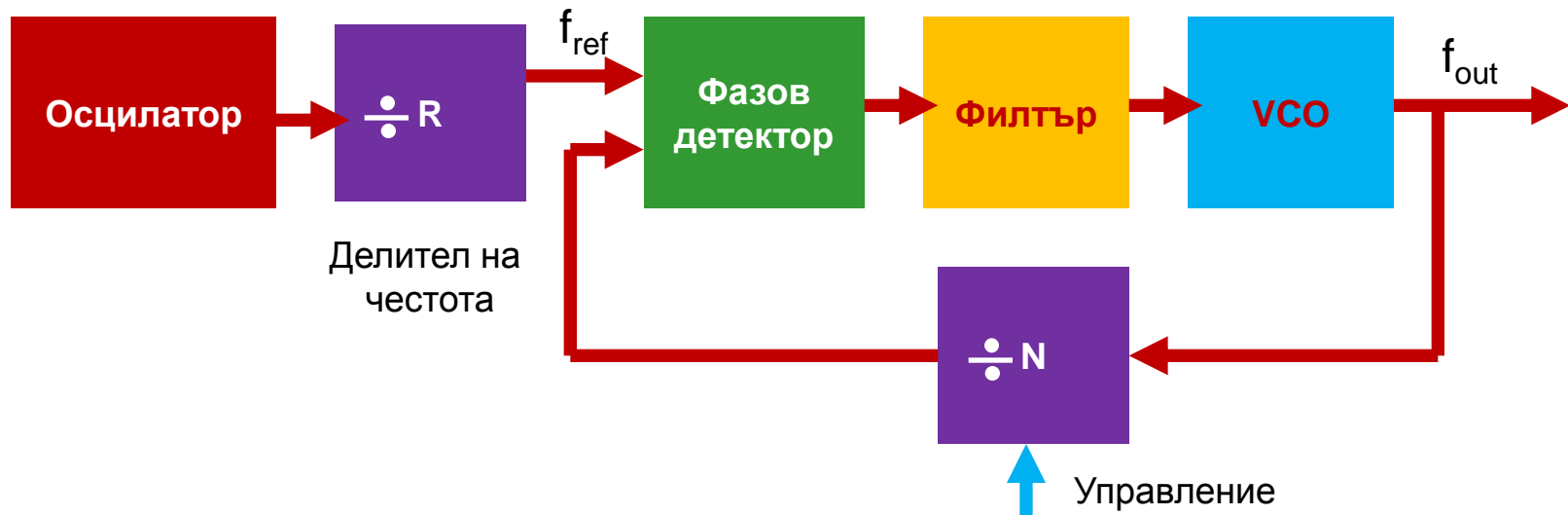
## Блокова схема на анализатор на вериги



# Анализатори на вериги

## Източник на сигнал (Source)

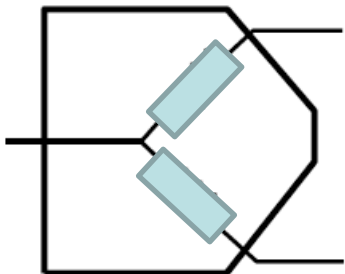
- Осигурява стимул за системата
- Развивка по мощност или по честота
- Вграден синтезатор на честота



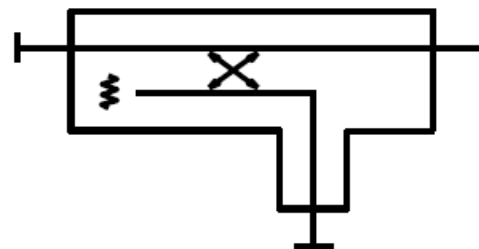
# Анализатори на вериги

## Разделяне на сигнала

- Измерва падналия сигнал за еталон
- Разделя падналия и отразения сигнал



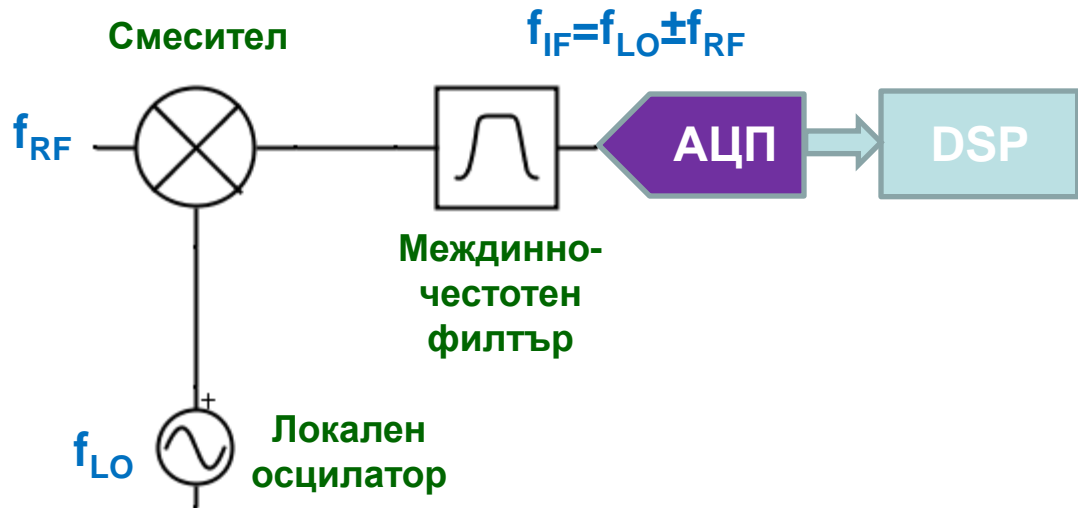
**Делител на мощност  
(Power Splitter)**



**Насочен разклонител  
(Directional Coupler)**

# Анализатори на вериги

## Приемник / Детектор



**Настройваем приемник (Tuned Receiver)**

- Измерва амплитуда и фаза
- Добра чувствителност
- Динамичният обхват се подобрява за сметка на увеличаване на мощността, стесняване на честотния обхват на междинно-честотния филтър или усредняване.

# Анализатори на вериги

## Процесор / Дисплей

- Блок, в който резултатите се подготвят за визуализация и анализ
- Управлява всички останали блокове
- Преобразува резултатите в различни мащаби (честотна област, полярни координати, диаграми на Смит и др.
- Осигурява връзка с компютър
- Оптично развързан от измервателните блокове.

# Анализатори на вериги

## ROHDE&SCHWARZ ZVB 4



- Честотен обхват 300 kHz – 4 GHz
- Многовходови измервания
- Измерва S параметри
- Отделен източник за всеки вход
- Позволява набор от калибровъчни процедури
- Динамичен обхват >123 dB
- Честотен обхват на IF 1 Hz до 500 kHz
- Развивка по мощност до 50 dB
- До 20 001 измерени точки за развивка.

# Анализатори на вериги

## N5245A PNA-X Agilent



- Честотен обхват 10 MHz – 50 GHz
- Четири входа (два канала)
- Измерва S параметри
- Отделен източник за всеки канал
- Позволява набор от калибровъчни процедури
- Динамичен обхват >126 dB
- Честотен обхват на IF 5 MHz
- Развивка по мощност до 41 dB
- До 32 001 измерени точки за развивка