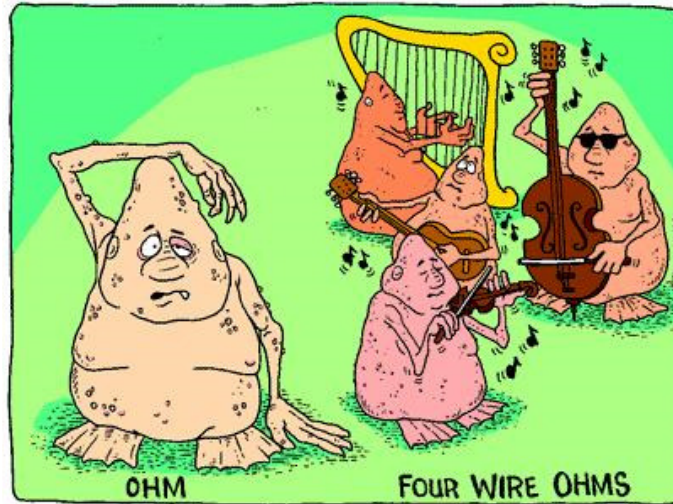


Măsurarea numerică a impedanțelor

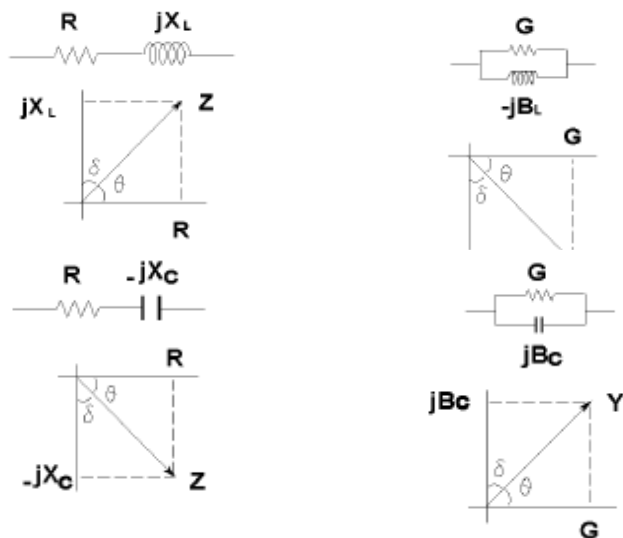


Sursa: *Agilent Technologies* (educatorscorner.com)

Cuprins

- Modele pentru Z/Y
- Dependența mărimii de măsurat de mărimile externe care intervin în măsurătoare (f, U, etc)
- Măsurarea R în c.c.
 - ohmetrul numeric
- Măsurarea Z în c.a.
 - LCR-metrul cu punte auto-echilibrată (ABB)
 - principiul punții auto-echilibrate
 - scheme de principiu Agilent 4294A
 - conectarea DUT la borne: configurațiile 2T, 3T, 4T, 5T, 8T (4TP)
 - scheme de conversie $Z_x \rightarrow T_x$ sau f_x

Modele pentru Z/Y



Sursa: *Agilent Technologies - Impedance Measurements Handbook.pdf*

serie: $Z = R + jX$ $\text{tg } \delta = R/X$ paralel: $Y = G + jB$ $\text{tg } \delta = G/B$
 $Q = 1/\text{tg } \delta$

Element pur / elemente parazite

- DUT (*device under test*) ideal = R sau L sau C
- Abaterea față de ideal: Q
- L pur: greu de obținut; $Q < 100$
- C pur: Q de ordinul sutelor
- R pur: dep. de tehnologie (ex: R bobinat)

Dependențe

R/L/C măsurat depinde **întotdeauna** de condițiile de test !

Q. $|Z_L| = \omega L$; aceasta înseamnă dependența de frecvență?

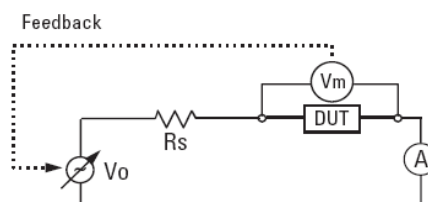
A. Fals ! $Z=f(\omega)$ dar $L \neq f(\omega)$!

$L=f(\omega) \leftrightarrow$ elemente parazite.

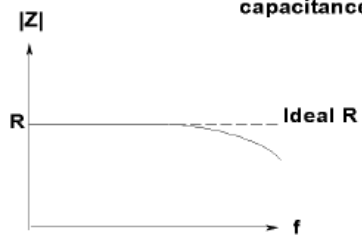
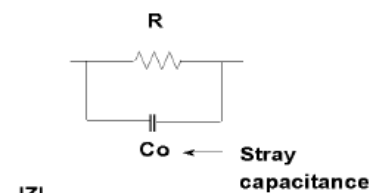
Dependența:

- de frecvență
- de tensiunea de c.c./c.a. aplicată la bornele DUT
- de curentul prin DUT

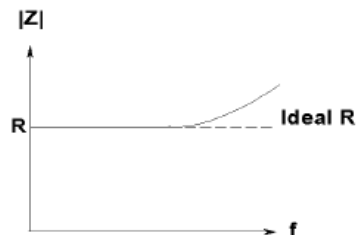
Soluție de măsurare la tensiune constantă - ALC (sursa: Agilent)



Dependența R de frecvență

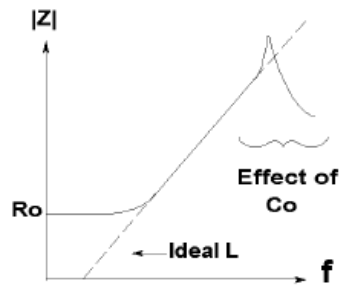
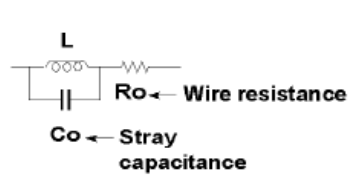


(a) High-value resistor

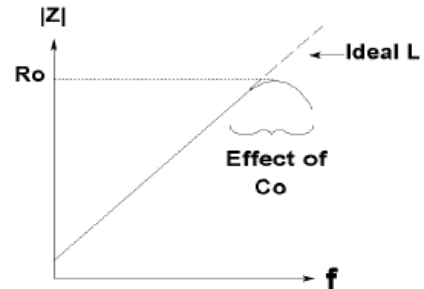
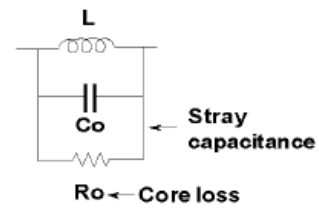


(b) Low-value resistor

Dependența L de frecvență

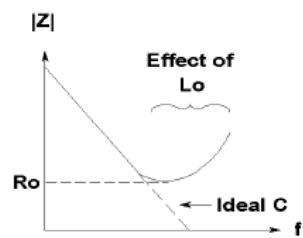
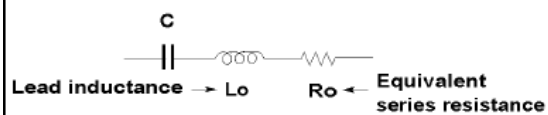


(a) General inductor



(b) Inductor with high core-loss

Dependența C de frecvență



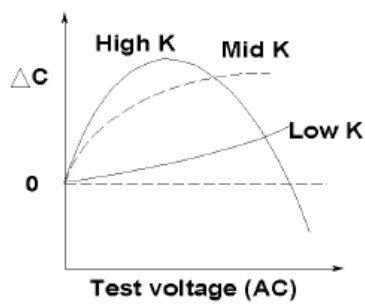
$$Z_{ech} = ESR + 1/j\omega C \quad (\text{efectul } L_o \text{ e negliabil la } f. \text{ lucru})$$

Dependența L/C de frecvență

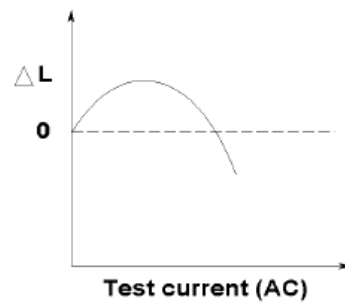
- DUT = L sau C \Rightarrow în realitate grup LC
- DUT = L \Rightarrow C = C_p
- DUT = C \Rightarrow L = L_p
- f joase: L_{ech}
- f înalte: C_{ech}
- $\omega_p = 1/\sqrt{LC_p}$

Q: calculați expresia L_{ech}(ω)

Dependența L/C de tensiunea aplicată la borne de către aparatul de măsură



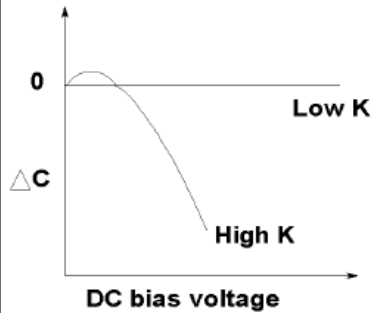
(a) Ceramic capacitor - AC voltage dependency



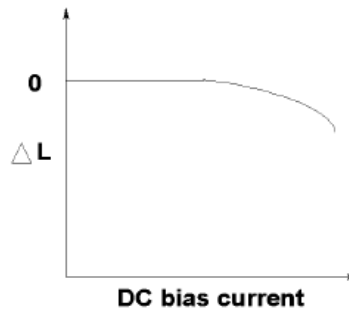
(b) Cored-inductor - AC current dependency

$$K = \epsilon \quad C = \epsilon S/d$$

Dependența C/L de tensiunea/curentul de polarizare (*bias*)



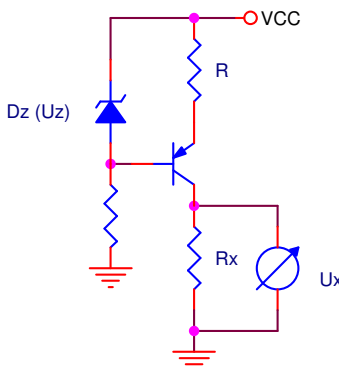
(a) Ceramic capacitor - DC bias voltage dependency



(b) Cored-inductor - DC bias current dependency

$$K = \epsilon$$

Măsurarea electronică a R în c.c. ohmetrul electronic (liniarizat) din cadrul DMM

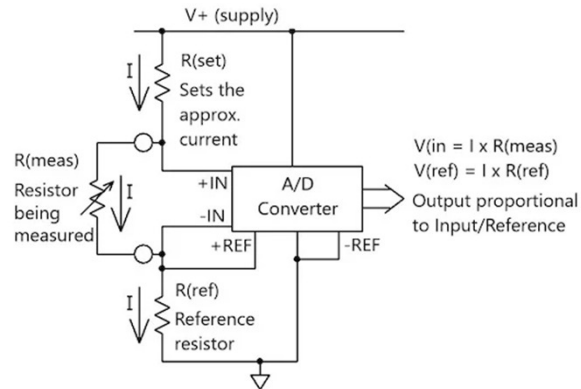


Varianta 1: sursă de curent constant

$$R_x = 1/I \cdot U_x$$

Q: calculați R necesar pentru un anumit R_{CS}

Măsurarea electronică a R în c.c. ohmetrul electronic (liniarizat) din cadrul DMM



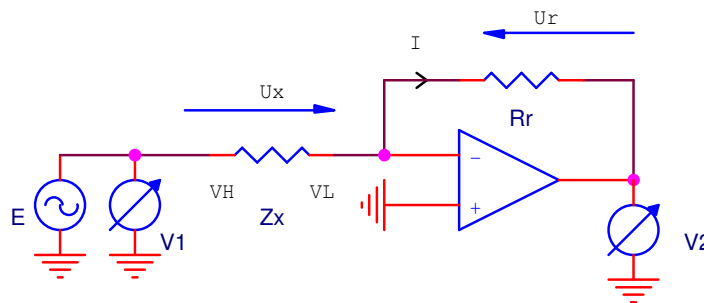
Varianta 2: măsurare ratiometrică (*ratio measurement*)

Q1: determinați relația de conversie

Q2: avantaje/dezavantaje față de varianta precedentă?

OBS: ADC are intrare diferențială; soluții?

Măsurarea electronică a Z în c.a. LCR-metru numeric folosind puntea cu echilibrare automată (ABB- *Auto Balancing Bridge*)



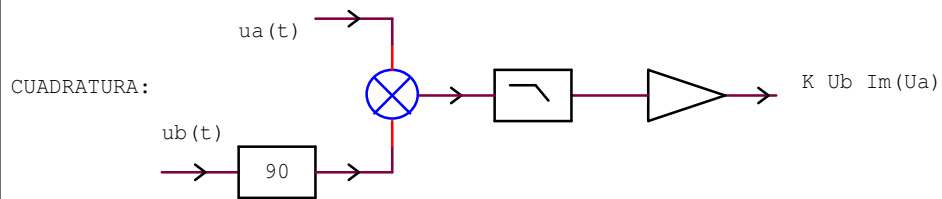
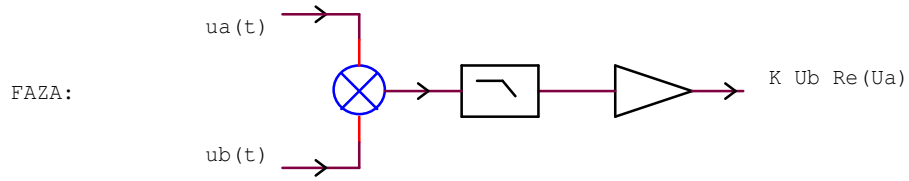
Echilibrare automată $\Rightarrow V_L = 0$

$$U_x = U_r / R_r (R_x + jX_x)$$

$$R_x = R_r / U_r \cdot \text{Re}(U_x), \quad X_x = R_r / U_r \cdot \text{Im}(U_x)$$

• cum determinăm $\text{Re}(U_x)$, $\text{Im}(U_x)$?

Principiul detectării componentelor în fază ($\text{Re}(U_x)$) și cuadratură ($\text{Im}(U_x)$) în LCR-metrul numeric



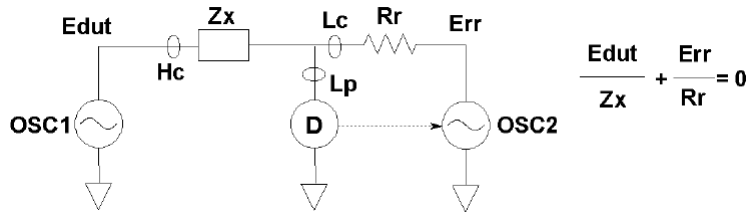
$U_a(t) = U_a \cos(\omega t + \phi)$ (necunoscut) $U_b(t) = U_b \cos \omega t$ (referință)

Q: determinați relațiile de conversie pentru I și Q

Rezumat: principiile LCR-metrului ABB:

- Transformarea unui raport de impedanțe în raport de tensiuni
- Măsurarea componentelor Re, Im a tensiunii necunoscute

Exemplu: LCR-metrul numeric Agilent 4294A

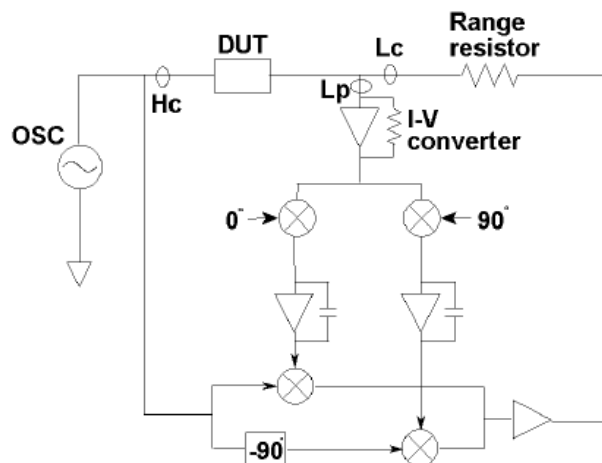


Limitarea AO: $f < 1\text{MHz}$

Agilent (Keysight) 4294A: 40Hz – 110MHz

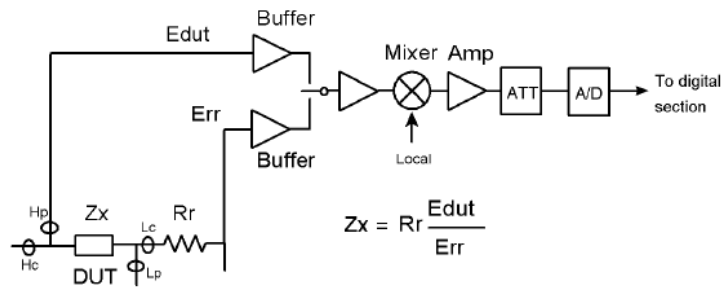
AO → D (de ec or de nul); OSC2 generează înțune de compensare Err în locul lui U_2

LCR-metrul numeric Agilent 4294A

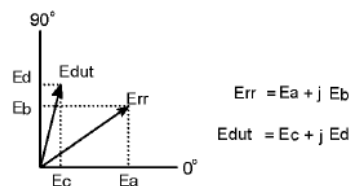


Schema de principiu a punții auto-echilibrate; OSC2 și OSC1 de pe slide precedent provin dintr-un singur OSC; tensiunile în fază, cuadratură ale OSC2 (echivalent) sînt produse în funcție de potențialul L_p de către cele 2 multiplicatoare de jos.

LCR-metrul numeric Agilent 4294A

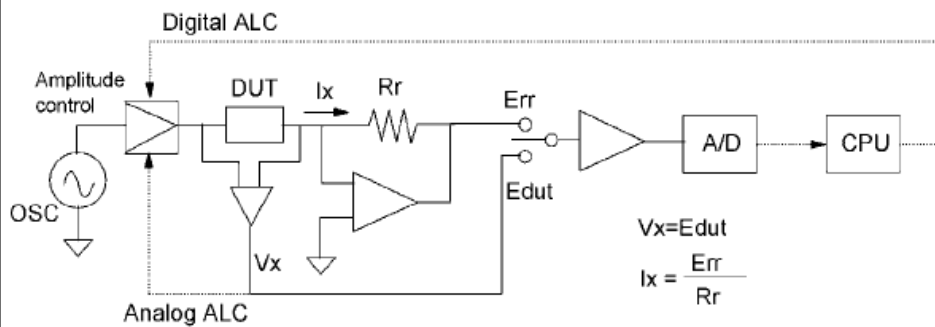


(a) Block diagram



Schema de principiu a părții de calcul numeric a celor 2 componente (fază/cuadratură)

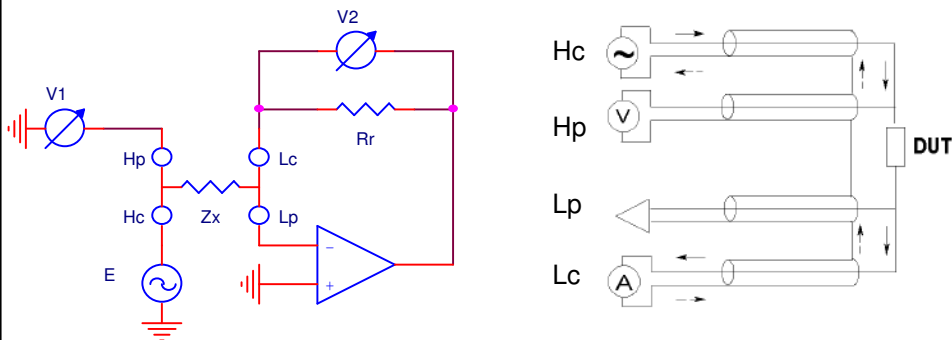
LCR-metrul numeric Agilent 4294A



Schema de principiu a părții ALC (Automatic Level Control)

Cerință: $V_x = V_{DUT} = ct$ deși $Z_x = Z_x(f)$

Cele 4 puncte de conectare a DUT la LCR-metru



Hc	High Current	Injectează curentul
Hp	High Potential	Măsoară tensiunea
Lc	Low Current	Măsoară curentul
Lp	Low Potential	Pct. virt de masă pt. măsur. tens.

Identificați cele 4 puncte și pe exemplul Keysight anterior !

Necesitatea măsurării multipolare (3T, 4T ,...)

Aplicație 1: calculați eroarea sistematică la măsurarea 2T pentru $R_x = 1\Omega$, dacă $R_{\text{sonda+terminal+contact}} = 50m\Omega$

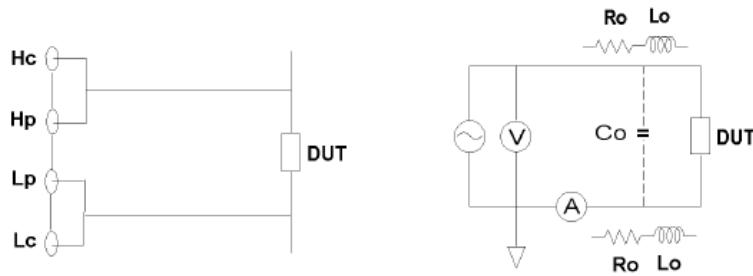
Aplicație 2: idem, pentru $R_x = 1K\Omega$

Aplicație 3: calculați eroarea sistematică la măsurarea 2T pentru $R_x = 1M\Omega$, dacă $C_p = 50pF$, $f = 1MHz$

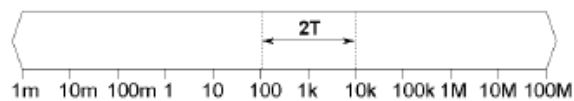
Aplicație 4: idem, pentru $R_x = 1K\Omega$

Concluzie: măsurarea 3T/4T este necesară pentru anumite domenii ale R_x sau $Z_x \rightarrow$ exemple pe slides următoare

Măsurarea bipolară (2 terminale)



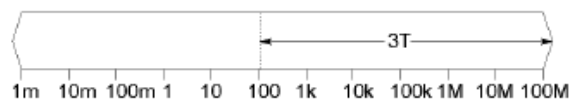
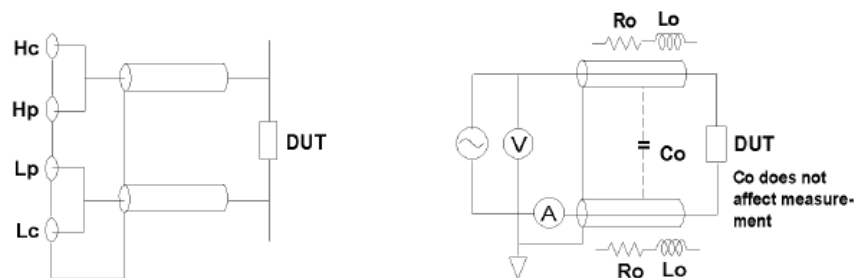
Domeniul impedanței necunoscute, ne-afectat de erori: 100-10K [Ω]



- 2 cabluri, ne-coaxiale
- Nu se elimină efectele C_0 , R_0 , L_0

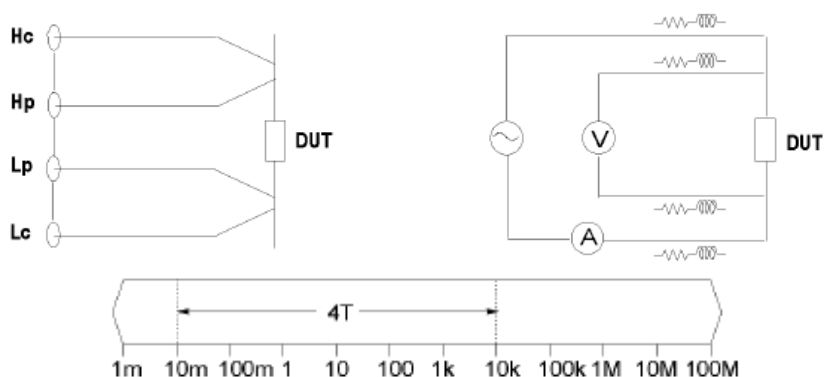
Sursa: Agilent Technologies

Măsurarea tripolară (3 terminale)



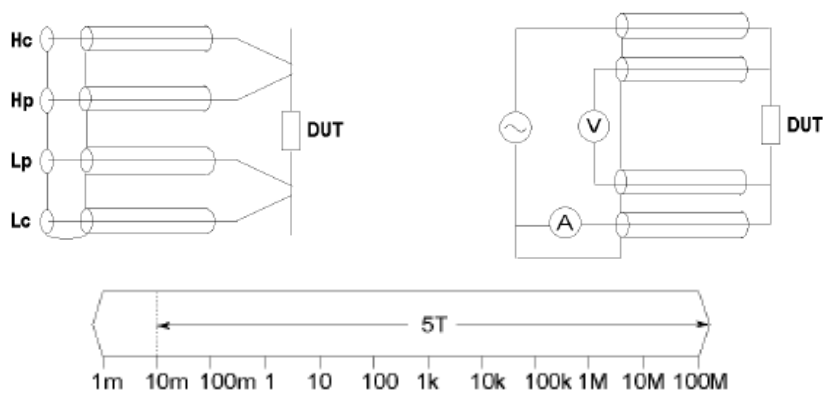
- Măsurare cu gardă
- 2 cabluri coaxiale
- Se elimină efectul C_0 (care afectează Z mari)
- nu se elimină efectele R_0 , L_0 (care afectează Z mici)

Măsurarea cuadripolară (4 terminale)



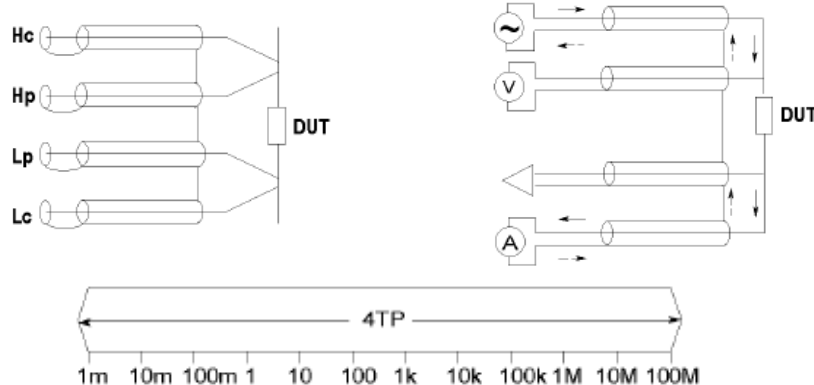
- Măsurare fără gardă
- 4 cabluri, ne-coaxiale
- Nu se elimină efectul C_0 (care afectează Z mari)
- Se elimină efectele R_0, L_0 (care afectează Z mici) – se pun în serie cu Z mari

Măsurarea pentapolară (5 terminale)



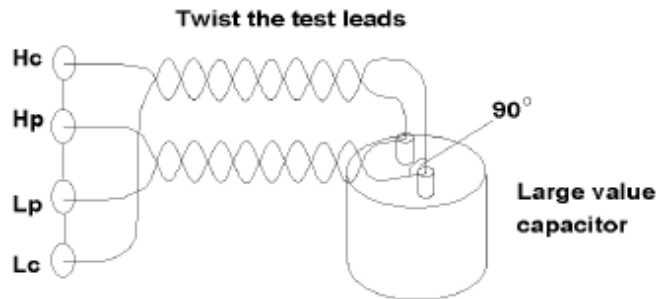
- Măsurare cuadripolară + gardă
- **corecți** ecuția $3+4=5$! ce termen trebuie adăugat ?
- 4 cabluri coaxiale (vezi LCR-metrul din laborator)
- Se elimină efectele R_0, L_0, C_0 (afectează Z mici și mari)

Măsurarea octopolară (8 terminale sau 4 perechi)



- 4 cabluri coaxiale cu trefele (ecranele) independente
- Cele 4 trefele se leagă împreună **numai** la capătul dinspre DUT
- Flux magnetic redus generat de bornele de curent (de la Hc la Lc), căci curentul se închide prin trefa exterioară
- Cuplaj magnetic redus cu calea de impedanță mare (sensibilă) Hp-Lp

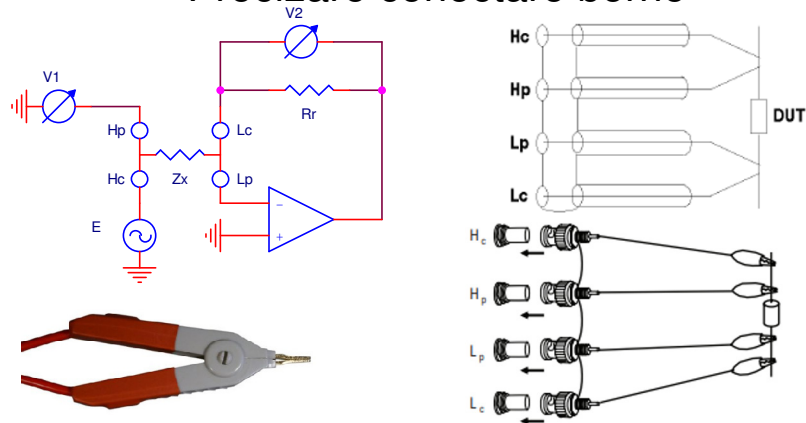
Aplicație (reducerea cuplajului mutual la măsurarea 4T, similar cu 8T)



Sursa: Agilent Technologies

- C_x mare $\rightarrow Z_x$ mic
- Bucla de curent Hc-Lc de **imped mică** \rightarrow radiază câmp magnetic
- Unghi de 90° : cuplaj magnetic redus cu calea de **impedanță mare** (sensibilă) Hp-Lp

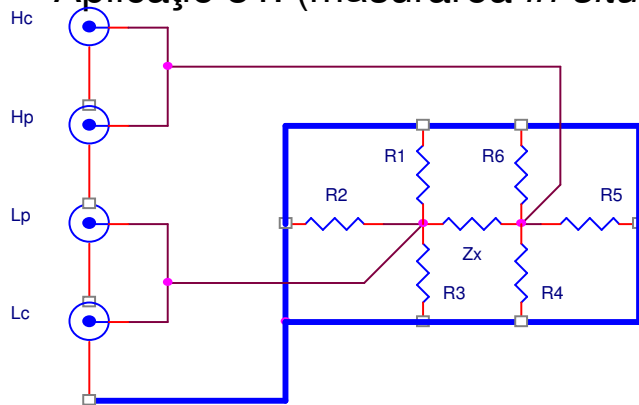
Precizare conectare borne



Sursa: Agilent Technologies

- H_P , H_C trebuie conectate nepărat împreună! la fel L_P , L_C altfel schema nu funcționează. La 2T, conexiunea este internă
- la 3T, 4T conexiunile tb obligatoriu făcute de user !
- sugestie: 2 crocodili dubli în loc de 4 crocodili simpli a.î. conex. H_P - H_C și L_P - L_C se fac direct pe terminalul componentei

Aplicație 3T: (măsurarea *in-situ*)



Se adauga _____

- „In-situ” versus „Ex-situ”: Z_X nu se scoate din circ.
- imped. nedorite *în paralel* → se pretează o măsurare 3T
- $R_1..R_6$ apar în paralel pe impedanțe mici ⇒ efect redus
- **Q: desenati schema echiv. si identificati aceste impedante mici!**

Măsurarea Z în multimetre numerice (DMM)

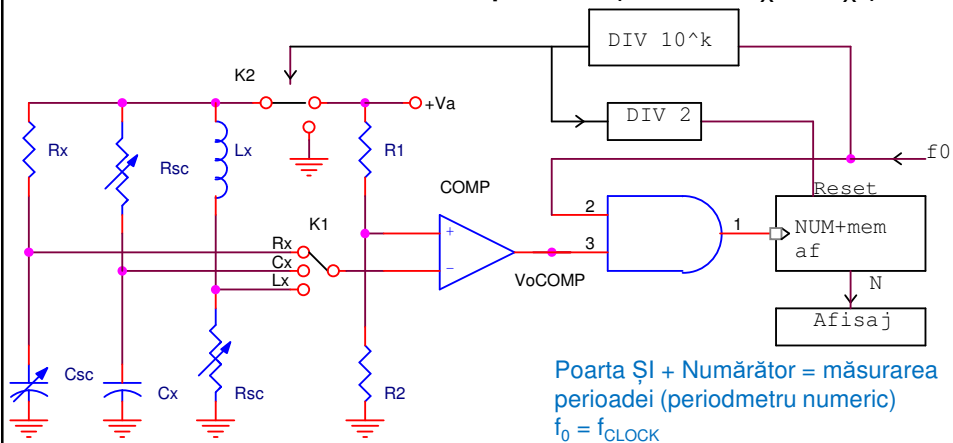


principii de funcționare:

d1) conversia $Z_x \rightarrow T_x$ (măsurarea constantei de timp RC, RL) urmată de măsurarea T_x

d2) măsurarea T_x/f_x de oscilație a circ. LC

Convertorul cu MS în punte (conv. $Z_x \rightarrow T_x$)



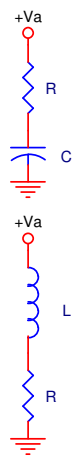
K1: selecție imped. necunoscută (ex: R_x); cealaltă impedanță din punte este etalon și valoarea sa determină capul de scară (ex: C_{SC})

K2=1 încărcare, K2=0 descărcare

DIVizorul cu 10^K : durata unui ciclu de încărcare sau descărcare

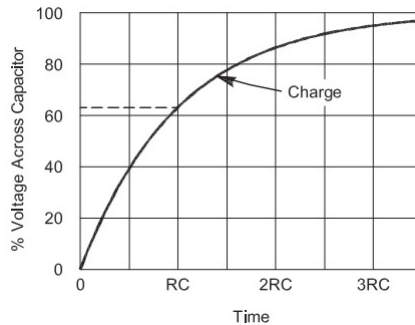
DIVizorul cu 2: revenire la 0 după un ciclu încărcare+descărcare

Convertorul cu monostabil în punte



circuit RC: $V_C = V_A(1 - e^{-t/t_0})$, $t_0 = \tau = RC$

- la $t=t_0 \rightarrow 1 - e^{-1} = 0.632$ deci $V_C = 63.2\%$ din V_A



- la $t=5t_0 \rightarrow 1 - e^{-5} = 0.9924$ deci $V_C = 99.24\%$ din V_A
(după $5RC$ se consideră că regimul tranzitoriu practic s-a încheiat).

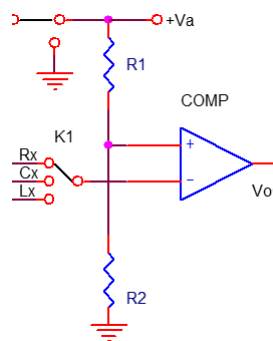
circuit RL: $V_R = V_A(1 - e^{-t/t_0})$, $t_0 = L/R$

Convertorul cu MS în punte

în funcție de poz. K1:

$V_C = V_A(1 - e^{-t/t_0})$, $t_0 = RC$ sau

$V_R = V_A(1 - e^{-t/t_0})$, $t_0 = L/R$



comparatorul compară următoarele tens. :

- $V_-/V_A = V_C/V_A = V_R/V_A = 1 - e^{-t/t_0}$
 \Rightarrow la $t=t_0$, $V_-/V_A = 1 - 1/e$
- $V_+ = V_A R_2 / (R_1 + R_2)$

\Rightarrow la $t=t_0$, egalitatea $V_- = V_+$

dacă se alege $R_2 / (R_1 + R_2) = 1 - 1/e$

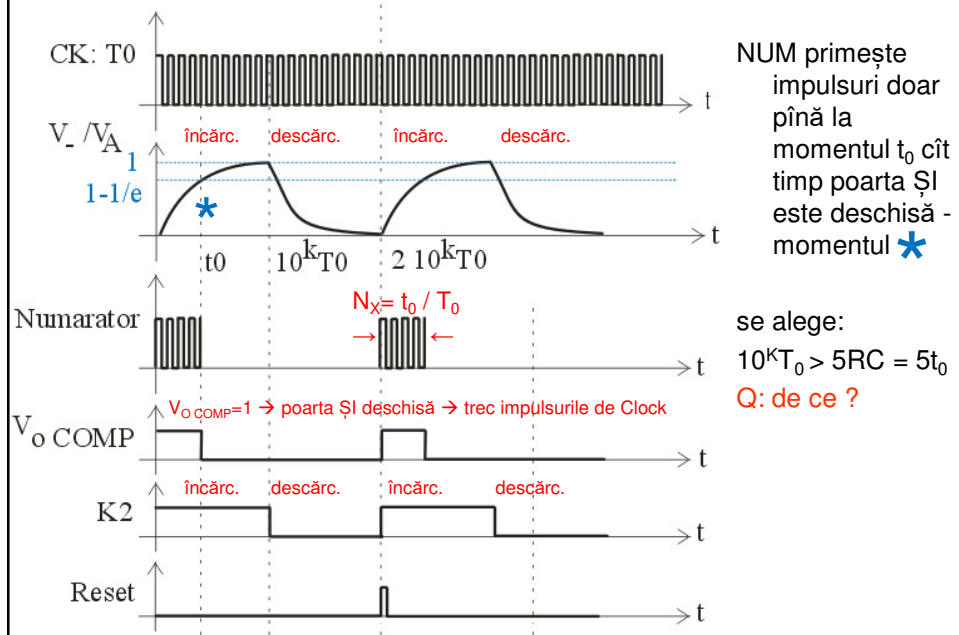
momentul (*) pe slide următor

Q1: de ce se numește monostabil ?

A1: monostabil = *one-shot timer* = gen. de impuls de durată controlată

Q2: identificați puntea pe schemă !

F.U. - Convertorul cu MS în punte



Convertorul cu MS în punte

În numărător în timpul t_0 ajunge următorul număr de impulsuri de durată T_0 ($T_0 = T_{CK} \ll t_0$):

$$N_x = t_0 / T_0$$

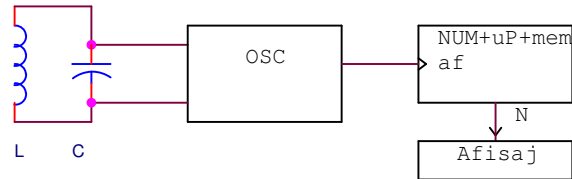
$$= R_x C_{SC} / T_0 \quad \text{sau}$$

$$= C_x R_{SC} / T_0 \quad \text{sau}$$

$$= L_x / T_0 R_{SC}$$

$N_x = k \cdot R_x$ etc, deci relații de conversie *liniare*

Convertorul cu oscilator LC Conversia $Z_x \rightarrow T_x$ sau f_x



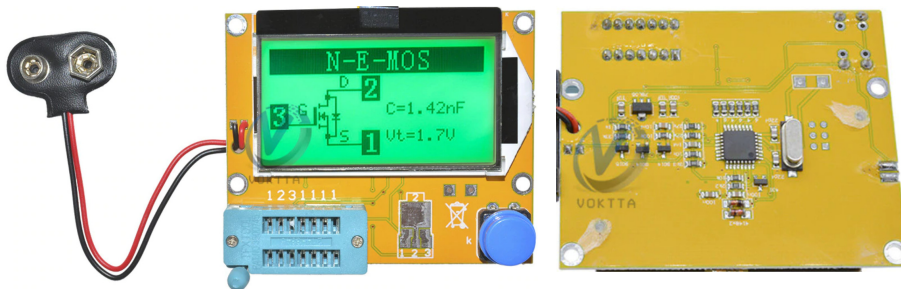
L_e, C_x sau L_x, C_e

$$f_x = 1/2\pi\sqrt{LC}$$

impulsurile de f_x numărate de NUM

relație de conversie *neliniară* \Rightarrow necesar uP pt calcul

Aplicație



Aliexpress: „Mega328 Digital Display Transistor Tester”

Sub 4\$!!!

măsoară: R,L,C, diode, tranzistoare BJT/FET/MOS

identifică *automat* pinii ! (se pot pune oricum în soclul ZIF)

proiect cu AtMega328 dezvoltat de amatori germani, copiat în China

detalii despre funcționare:

https://www.mikrocontroller.net/articles/AVR_Transistortester

<https://hackaday.com/tag/transistor-tester/>