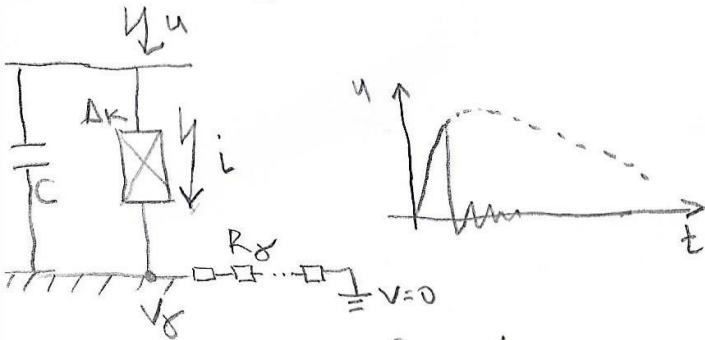


Μετρήσεις υψηλών τάσεων

Φ.Β. Τοπαλής

Μέτρηση υψηλών κραδωτικών τάσεων

Έκτοτα μεταβατικά φαινόμενα



Διάσπαση δοκίμιου $\Rightarrow$ Κατάρρευση τάσης

$$\frac{du}{dt} \uparrow$$

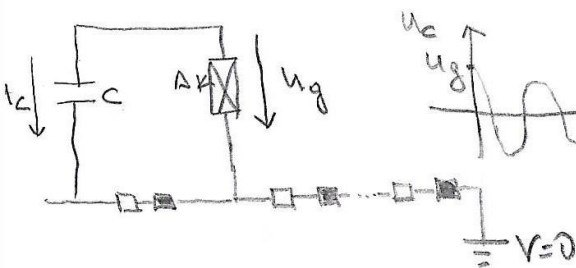
Η χωρητικότητα διατάξης παραγωγής και μέτρησης Υ.Τ.

$$i = C \frac{du}{dt} = 100 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{12} = 100 \text{ A}$$

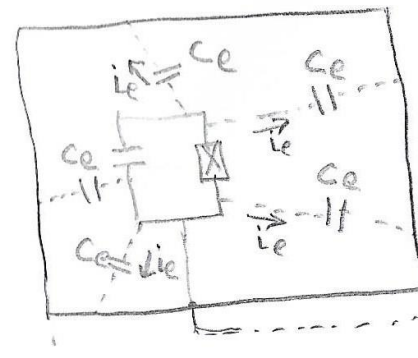
$$C = 100 \text{ pF}$$

$$\frac{du}{dt} = 1 \text{ MV}/\mu\text{s}$$

$$R_g = 1 \Omega \Rightarrow V_g = i \cdot R_g = 100 \cdot 1 = 100 \text{ V}$$

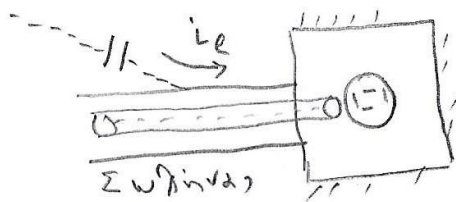
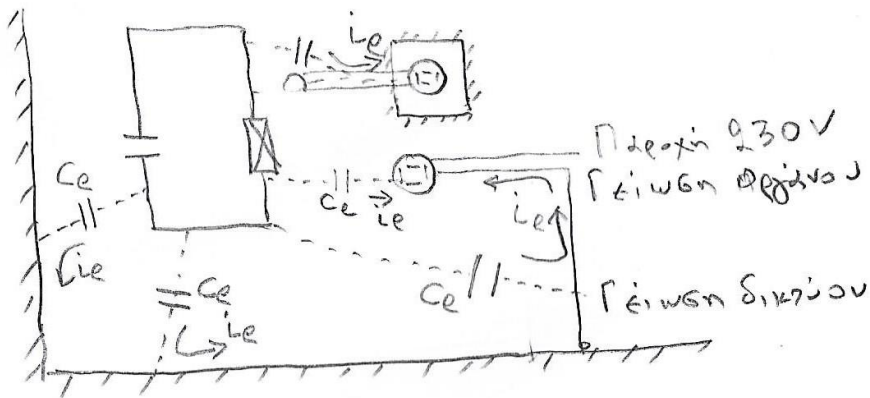


Συχνότητα 0,5 ÷ 4 MHz



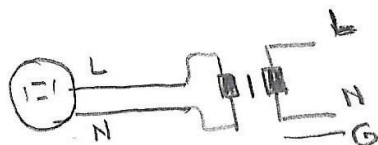
C_e Παράσιτη χωρητικότητα ως προς γη

L_e Ρεύμα ως προς γη



Ομοζωνικά καλώδια
ένανς άγωγού
σωληνά

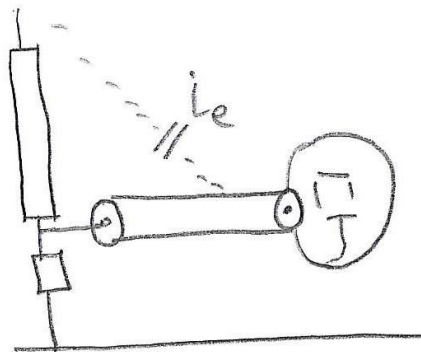
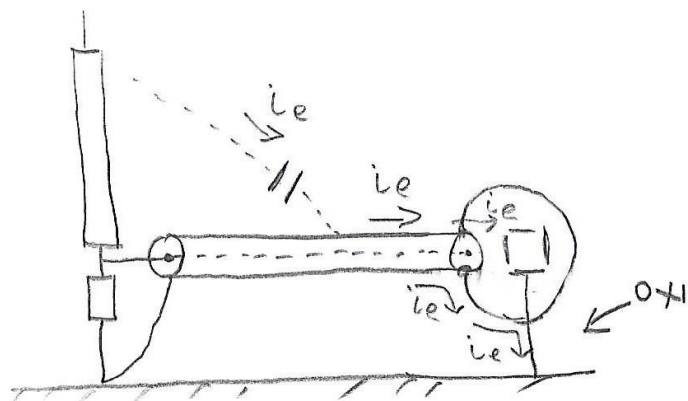
Οργάνο εντός
μεταλλικού κλωβού
(Faraday)



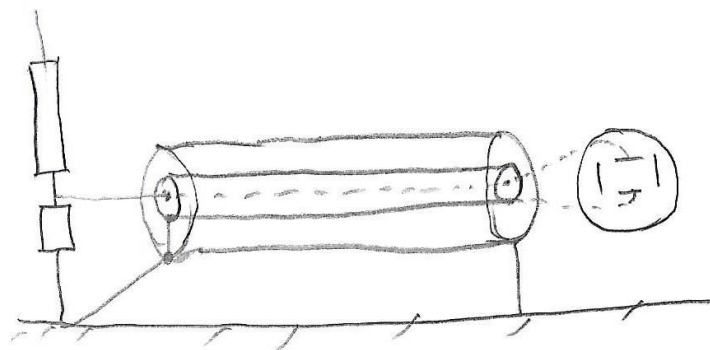
Τροφοδοσία οργάνων
μέσω ΜΣ 230/230

ή μέσω φίλτρων βαρυστατικών

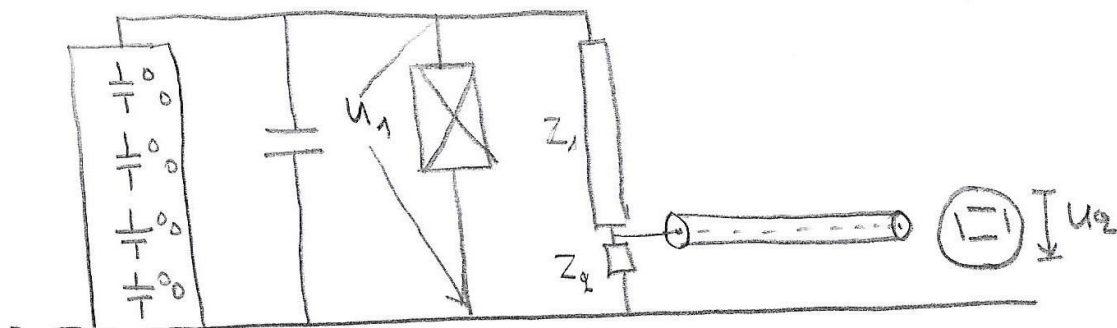




Θωράκιση καλωδίου χειωμένη μόνο στην πλευρά καταμερίδης
 Όργανο χειωμένο μέσω της θωράκισης καλωδίου δεν καταμερίδης
 Δεν κλείνει κύκλωμα $\Rightarrow$ Δεν διαρρέεται από ρεύμα



Καλώδιο εντός μεταλλικού σωλήνα
 Καλώδιο χειωμένο μόνο στον καταμερίδης
 Σωλήνας χειωμένος δεν καταμερίδης
 και στο σημείο εισόδου του στον θαλάμο



$$\Rightarrow U_1 \Rightarrow H(s) = U_2$$

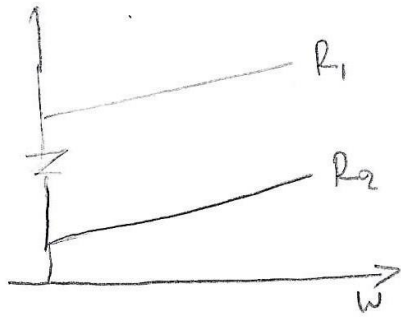
Πρέπει $\frac{U_2(t)}{U_1(t)} = K \Rightarrow H(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = K$ δηλαδή σταθερό και ανεξάρτητο συχνότητας

Στην πραγματικότητα $H(s) = K(s) \neq K$

Αιτίες

- Παράσιτα στοιχεία (C, L, R) που η τιμή τους μεταβάλλεται με τη συχνότητα
- Οδόντο κύμα
- L και R στο ίδιο το κύκλωμα Υ.Τ. που δεν μηδενίζονται λόγω μηδένων διαστάσεων
- Διαφορετική η συμπεριφορά των στοιχείων του κυκλώματος υπό διαφορετικές συχνότητες

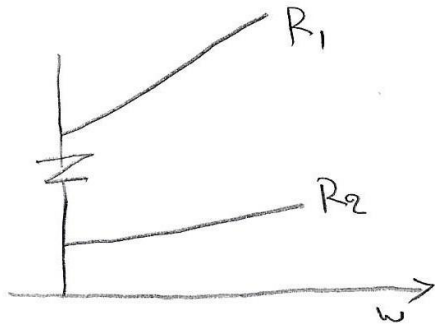
$$\left. \begin{array}{l} Z_2(0) = K_1 \cdot Z_1(0) \\ Z_2(\omega) = K_2 \cdot Z_2(\omega) \\ \vdots \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{Z_2(\omega)}{Z_1(\omega) + Z_2(\omega)} = K(\omega) \neq K$$



$$\frac{R_2(\omega)}{R_1(\omega)} = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow \frac{R_2(\omega)}{R_1(\omega) + R_2(\omega)} = K$$

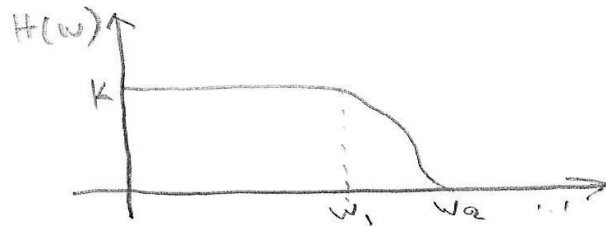
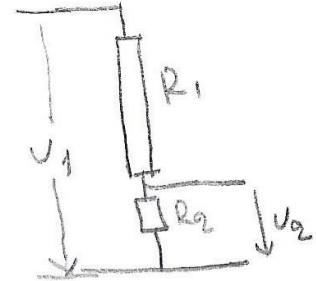
$$\text{Apo} \quad \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)} = K$$

Időválasz Kiszámítása

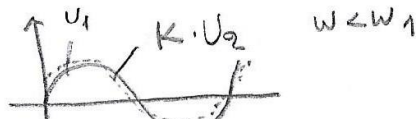


$$\frac{R_2(\omega)}{R_1(\omega) + R_2(\omega)} = K(\omega) = H(\omega)$$

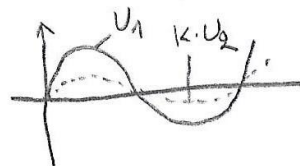
$$\text{Apo} \quad \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)} = K(\omega)$$



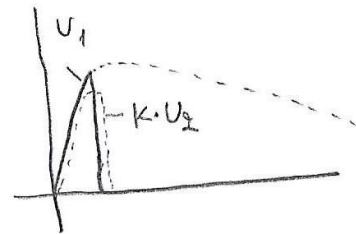
Av L.F. ($\omega < \omega_1$)

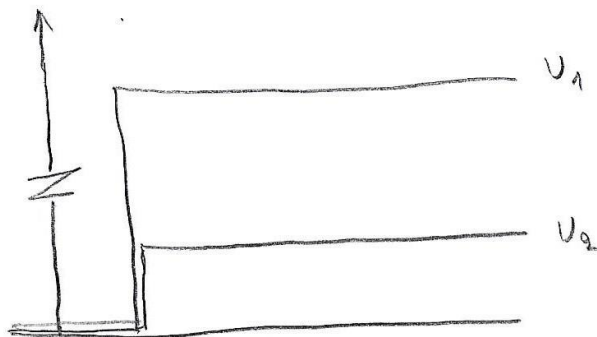


Av H.F. ($\omega > \omega_1$)

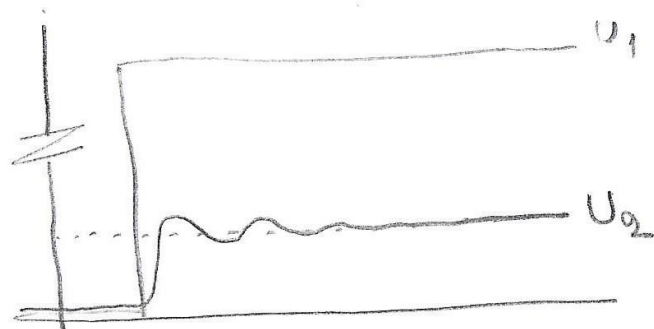


⇒

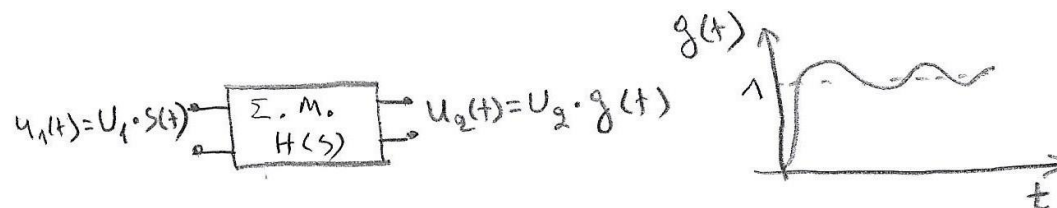
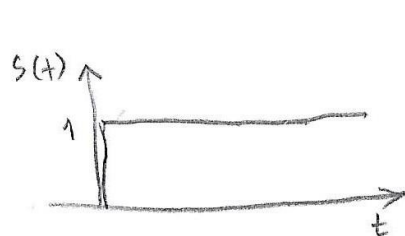




Ιδανικός καταπείσθης



Περίπλοκος καταπείσθης

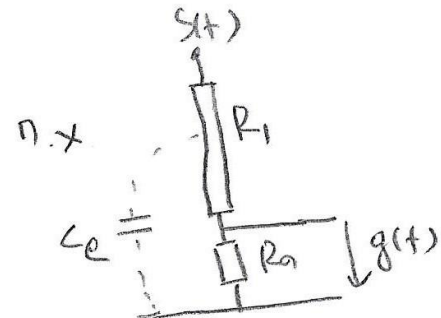
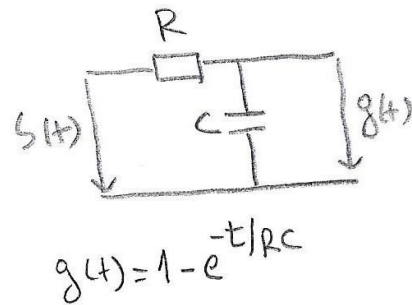
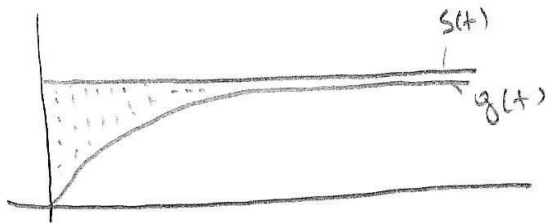
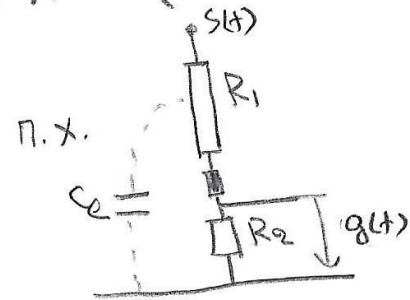
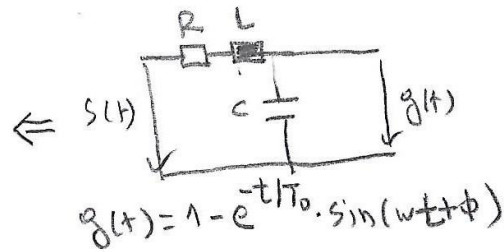
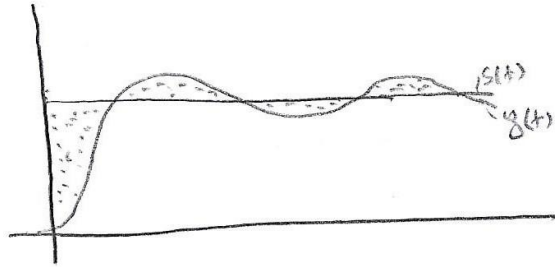


Ιδανικό σύστημα $g(t) \equiv S(t) \Rightarrow \frac{u_2(t)}{u_1(t)} = \frac{U_2 \cdot g(t)}{U_1 \cdot S(t)} = \frac{U_2}{U_1} = K$ αμφιζήτηση συχνότητας

Περίπλοκο σύστημα $g(t) \neq S(t) \Rightarrow H(s) = \frac{U_2 \cdot G(s)}{U_1 \cdot \frac{1}{s}} = \frac{U_2}{U_1} \cdot s \cdot G(s) = K \cdot s \cdot G(s)$
 $\mathcal{L}[S(t)] = \frac{1}{s}$ $\mathcal{L}[g(t)] = G(s)$

$A_v \quad H(s) = K \Rightarrow s \cdot G(s) = 1 \Rightarrow G(s) = \frac{1}{s} \Rightarrow g(t) = s(t) \Rightarrow 1 - g(t) = 0$

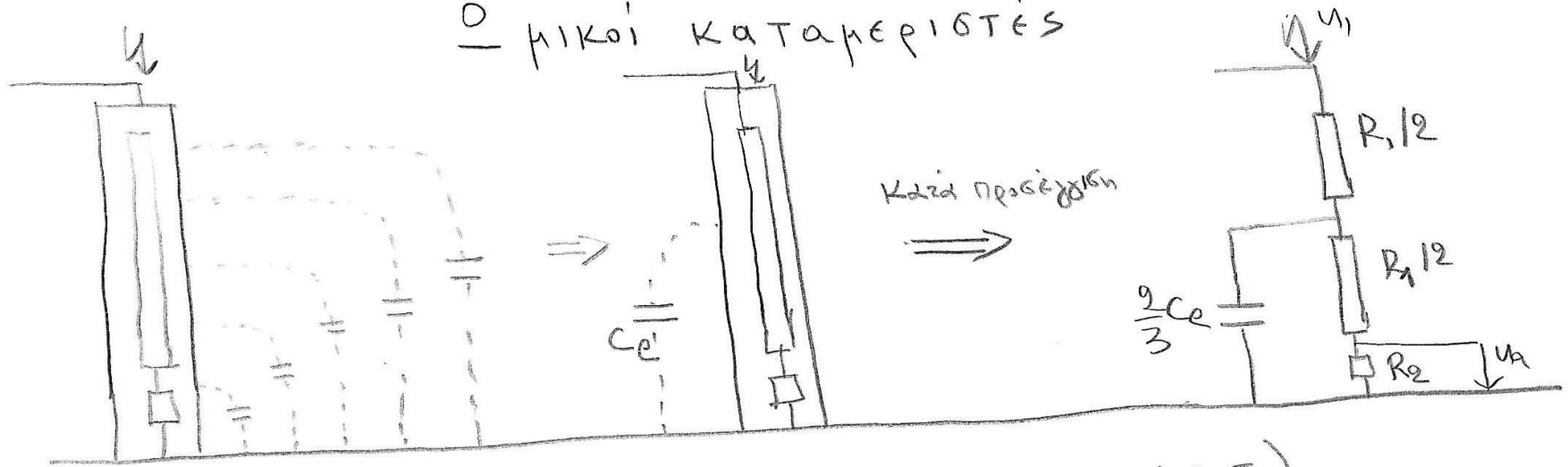
$A_v \quad H(s) \neq K \Rightarrow s(t) - g(t) \neq 0 \quad T = \int_0^{\infty} (1 - g(t)) dt \quad \text{Xpovos anoxprono}$



Ωμικοί καταμεριστές υψηλών κρουστικών τάσεων



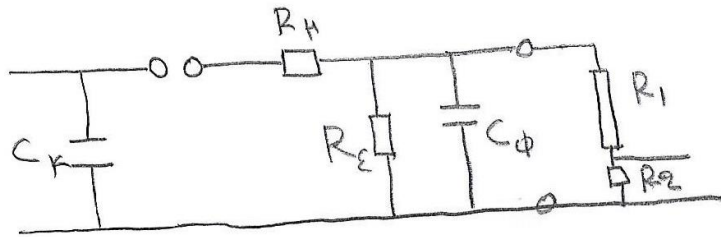
Ο μικροί καταπεριστῆς



$$C_e = 10 \div 15 \text{ pF/m} \quad \left(10 \text{ pF/m} \text{ υγροί K.T.}, 15 \text{ pF/m} \text{ χυρικοί K.T.} \right)$$



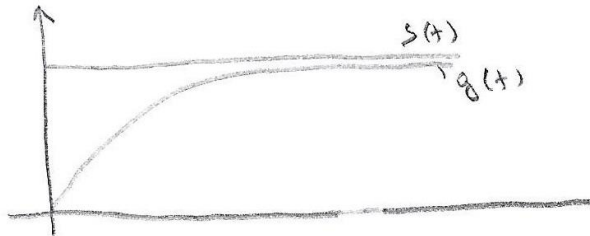
$\pi_f \in \pi_{\epsilon 1} \quad R_1 \uparrow (M_0, G_0)$



$$R_{E,15} = R_E \parallel (R_1 + R_2)$$

$$\text{Av } R_1 \gg R_E \Rightarrow R_{E,15} \approx R_E$$

$$V_{DE-b} \Rightarrow T_m = \frac{1}{\alpha} R_E (C_F + C_\phi)$$



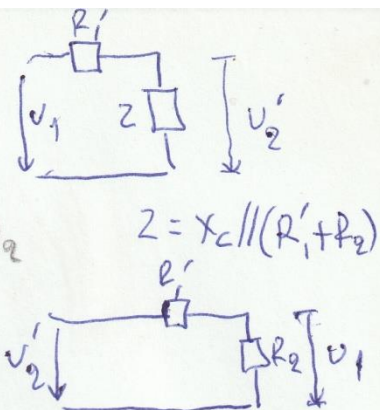
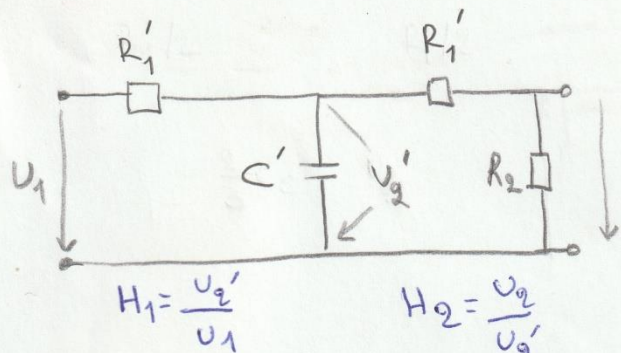
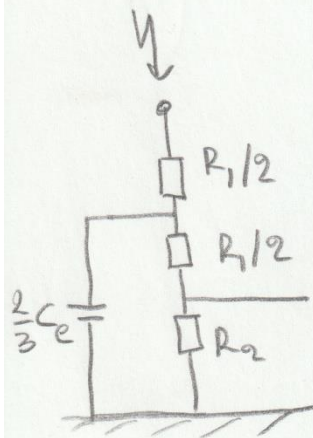
$$g(t) = 1 - e^{-t/T} \quad T = \int_0^{\infty} (1 - g(t)) dt$$

$$T = \frac{1}{6} R_{02} \cdot C_e \approx \frac{1}{6} R_1 C_e$$

$T \rightarrow 0$ or $\left\{ \begin{array}{l} R_1 \rightarrow 0 \text{ And } g(t) \rightarrow 1 \text{ for } R_1 \gg R_E \\ C_e \rightarrow 0 \text{ Minus de } D \rightarrow 0 \text{ in } H \rightarrow 0 \\ H \rightarrow 0 \text{ oscurato} \end{array} \right.$

$\downarrow$

 Flashes over



$$R'_1 = \frac{R_1}{2}$$

$$C' = \frac{2}{3} C_e$$

$$R_{02} = R_1 + R_2$$

$$H_1 = \frac{U'_2}{U_1} = \frac{\frac{1}{sC'} (R'_1 + R_2)}{R'_1 + \frac{1}{sC'} (R'_1 + R_2)} = \frac{\frac{1}{sC'} (R'_1 + R_2)}{R'_1 + \frac{1}{sC'} (R'_1 + R_2)}$$

$$H_2 = \frac{U_2}{U'_2} = \frac{R_2}{R'_1 + R_2}$$

$$H(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = H_1(s) \cdot H_2(s) = \frac{R_2}{R'_1 + R_2} \cdot \frac{\frac{1}{sC'} (R'_1 + R_2)}{R'_1 + \frac{1}{sC'} (R'_1 + R_2)} = \frac{R_2 \frac{1}{sC'}}{R'_1 (R'_1 + R_2) + \frac{1}{sC'} (R'_1 + R_2)}$$

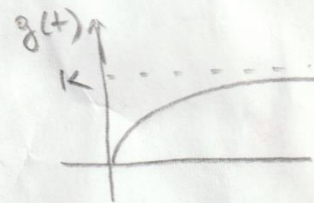
$$= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{\frac{1}{sC'}}{\frac{R'_1 (R'_1 + R_2)}{R_1 + R_2} + \frac{1}{sC'}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{1 + sC' \frac{R'_1 (R'_1 + R_2)}{R_1 + R_2}} = K \cdot \frac{1}{1 + s \cdot a}$$

$$K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad a = C' \frac{R_1'(R_1' + R_2)}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 \cdot C_e}{6} \frac{R_1 + 2R_2}{R_1 + R_2} = \frac{C_e}{6} \left(R_1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \approx \frac{C_e}{6} (R_1 + R_2) = \frac{R_2 \cdot C_e}{6}$$

$$H(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{G(s)}{\frac{1}{s}} = s \cdot G(s) \quad U_1(t) = s(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad \mathcal{L}[s(t)] = \frac{1}{s}$$

$$U_2(t) = g(t)$$

$$G(s) = K \frac{1}{s(1+sa)} \Rightarrow g(t) = K(1 - e^{-t/a})$$



$$T = \int_0^{\infty} (1 - g(t)) dt = \int_0^{\infty} e^{-t/a} dt = a \Rightarrow T = \frac{R_2 \cdot C_e}{6}$$

$$\begin{aligned}
 a &= C' \frac{R_1' (R_1' + R_2)}{R_1 + R_2} = \frac{2}{3} C_e \frac{\frac{R_1}{2} (\frac{R_1}{2} + R_2)}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 C_e}{3} \frac{\frac{R_1 + 2R_2}{2}}{R_1 + R_2} \\
 &= \frac{R_1 C_e}{6} \frac{R_1 + 2R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 C_e}{6} \frac{1 + \frac{2R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \xrightarrow[\frac{R_2}{R_1} \rightarrow 0]{R_1 \gg R_2} a = \frac{R_1 C_e}{6}
 \end{aligned}$$

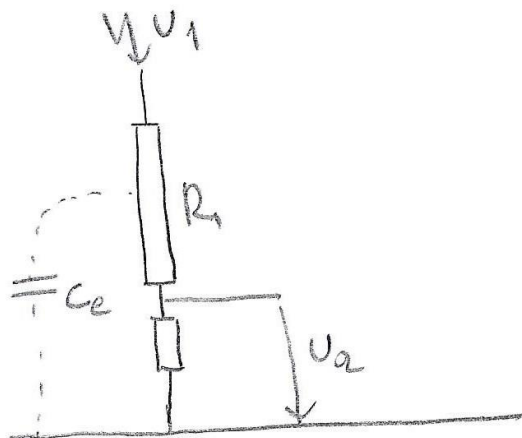
$$H(s) = K \frac{1}{1 + s \cdot a}$$

$$u_1(t) = s(t) \Rightarrow U_1(s) = \frac{1}{s}$$

$$u_2(t) = g(t) \Rightarrow U_2(s) = G(s)$$

$$H(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{G(s)}{\frac{1}{s}} \Rightarrow G(s) = \frac{1}{s} \cdot K \frac{1}{1 + s \cdot a} = K \frac{1}{s(1 + s \cdot a)}$$

$$g(t) = \mathcal{L}^{-1} G(s) = K (1 - e^{-t/a})$$



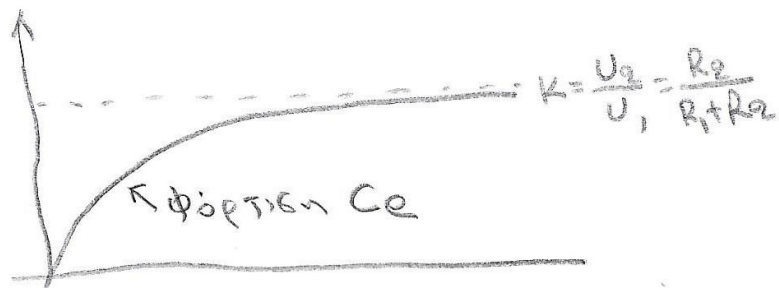
Αρχή μεταβατικού φαινομένου $\Rightarrow C_e$ βραχυκύκλωμα
 Αρα δεν φθάνει ρεύμα (και τάση) στην R_2

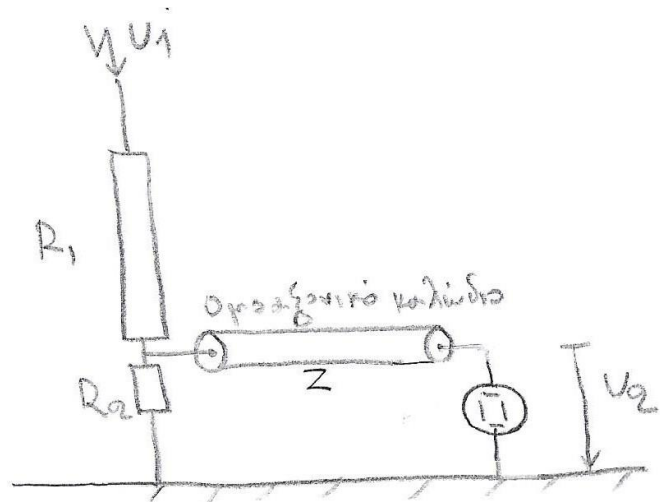
Βαθμιαία η C_e φορτίζεται και επιστρέφει
 στο ρεύμα να φθάσει στην R_2

Τέλος μεταβατικού φαινομένου $\Rightarrow C_e$ ανοιχτό κύκλωμα

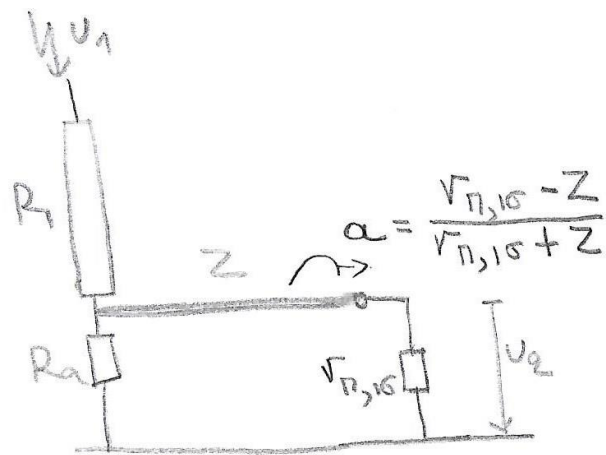
Αρα δεν συμπέρεχει στο κύκλωμα

Αρα καθαρά ωμική συμπεριφορά





$$K = \frac{R_2^*}{R_1 + R_2^*} \quad R_2^* = R_2 \parallel Z$$



$$\text{Πρέπει } a=0$$

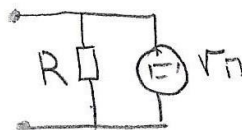
$$\text{δηλ. } V_{\pi,1\sigma} = Z$$



$$\text{Αν } V_{\pi} = Z \quad \text{π.χ. } 50\Omega$$

$$V_{\pi,1\sigma} = V_{\pi} = Z$$

$$a=0 \quad \text{Προσάρτηση}$$



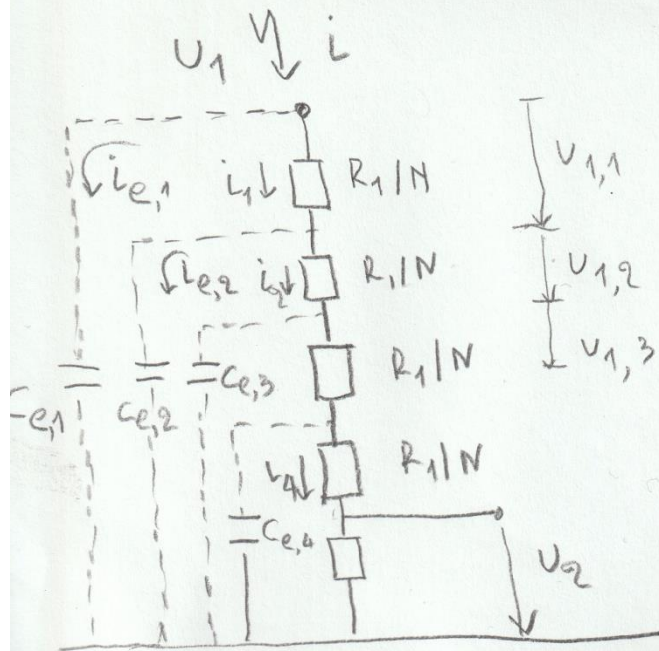
$$\text{Αν } V_{\pi} \gg Z \quad \text{π.χ. } V_{\pi} = 1\text{Μ}\Omega$$

$$\text{Προσέγγιζεται αντίστροφα προσάρτηση } R=Z$$

$$R=Z$$

$$V_{\pi,1\sigma} = R \parallel V_{\pi} \simeq R=Z$$

$$a=0 \quad \text{Προσάρτηση}$$



$$C_{e,1} < C_{e,2} < C_{e,3} < C_{e,4}$$

$$\frac{1}{\omega C_{e,1}} > \frac{1}{\omega C_{e,2}} > \frac{1}{\omega C_{e,3}} > \frac{1}{\omega C_{e,4}}$$

$$I_{e,1} < I_{e,2} < I_{e,3} < I_{e,4}$$

$$I_1 > I_2 > I_3 > I_4$$

$$U_{1,1} > U_{1,2} > U_{1,3} > U_{1,4}$$

Φθίνει το κύμα στην είσοδο του καθ'ακριβή

Διαφέρει εύρος πλάτους πάλι μέσω C_e

Μικρότερο πλάτος στα κατώτερα R_1/N

$$L = L_1 + L_{e,1}$$

$$L_1 < L$$

$$L_2 < L_1 < L$$

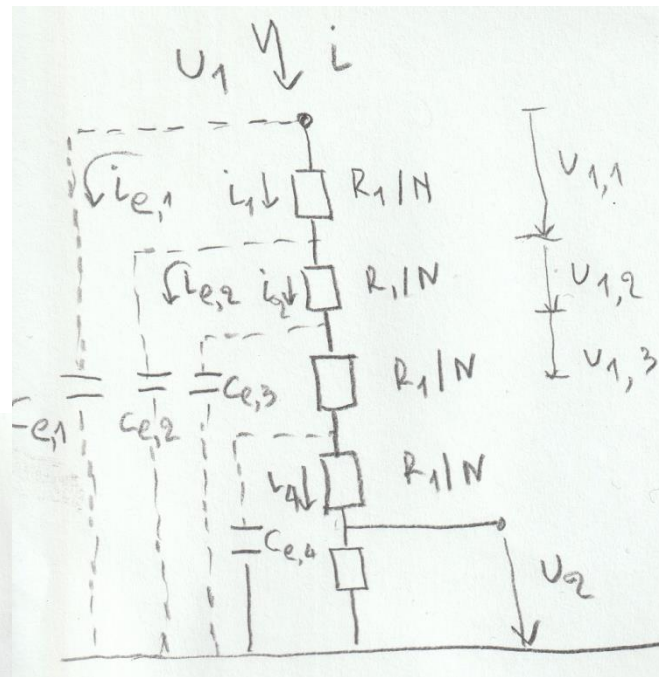
$$L_3 < L_2 < L_1 < L$$

$$L_4 < L_3 < L_2 < L_1 < L$$

Multiple T₀ pump near K₀ turned R_1/N

$$L_4 \frac{R_1}{N} < L_3 \frac{R_1}{N} < L_2 \frac{R_1}{N} < L_1 \frac{R_1}{N}$$

$$U_{1,4} < U_{1,3} < U_{1,2} < U_{1,1}$$



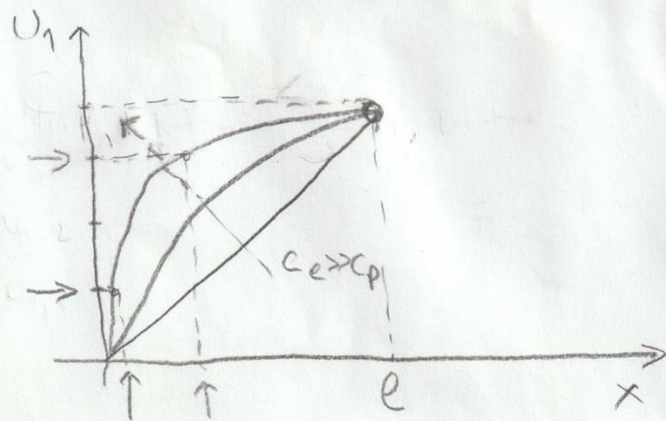
$$C_{P,1} > C_{P,4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\omega C_{P,1}} < \frac{1}{\omega C_{P,4}} \Rightarrow$$

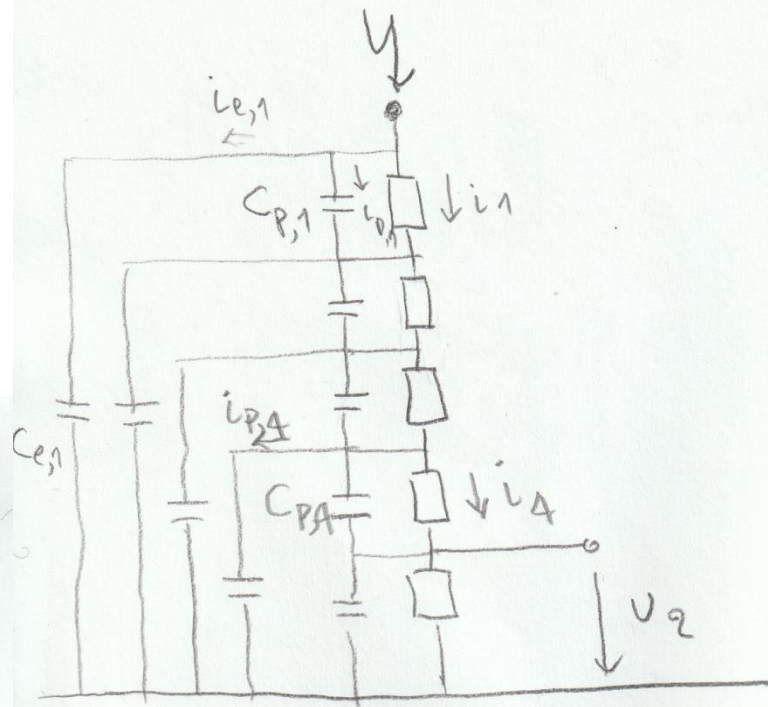
$$\Rightarrow \dot{I}_{P,1} > \dot{I}_{P,4}$$

Αρα το $\dot{I}_1$ μειώνεται περισσότερο από όσα μειώνεται το $\dot{I}_4$

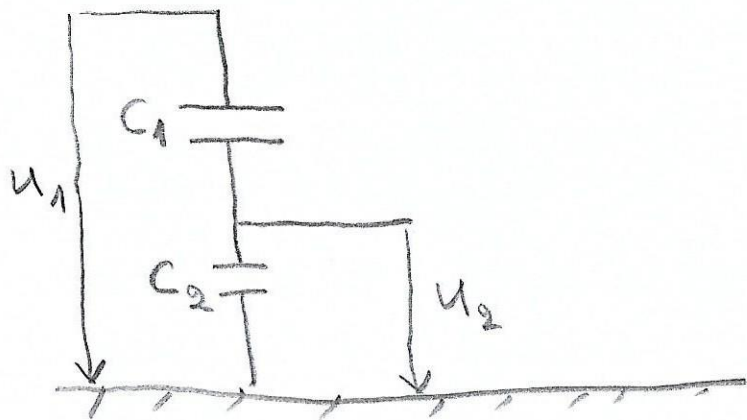
Αρα περιρρέει την διαφορά τους.



↓
l/2, καλώδιο



Χωρητικοί καταπεριστῆς



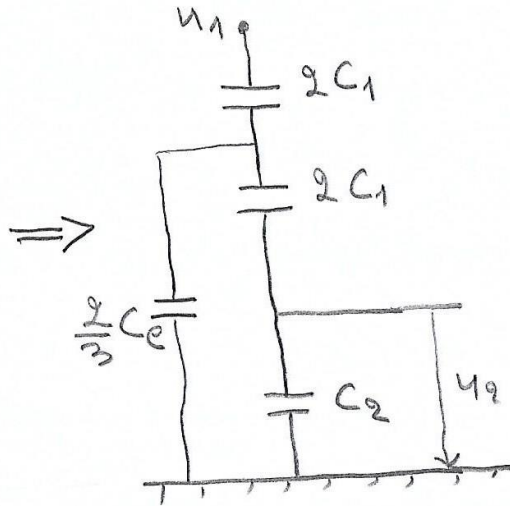
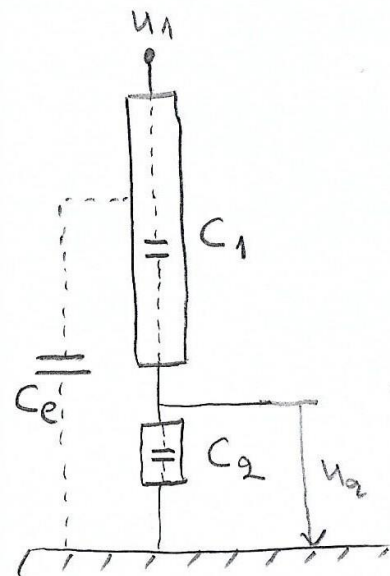
1 σειράς χωρητικός καταπεριστῆς $\Rightarrow$

$$K = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} = \frac{\frac{1}{sC_2}}{\frac{1}{sC_1} + \frac{1}{sC_2}}$$

$$K = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \stackrel{C_2 \gg C_1}{\approx} \frac{C_1}{C_2}$$

2-ης σειράς καταπεριστῆς $K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \stackrel{R_1 \gg R_2}{\approx} \frac{R_2}{R_1}$

Παράστη χωρητικότητα χωρητικών καταμεριστών



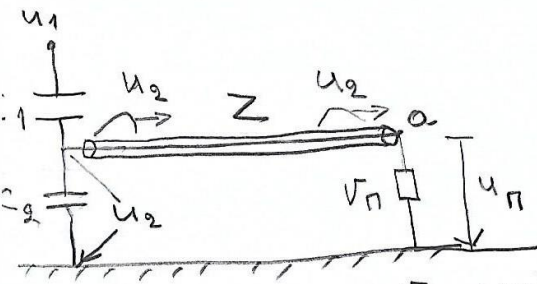
Ιδανικός καταμεριστής $K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \Rightarrow \frac{1}{K} = \boxed{\frac{C_1 + C_2}{C_1}} = K'$

Πραγματικός καταμεριστής $K' = \frac{1}{K} = \boxed{\frac{C_1 + C_2}{C_1}} \left(1 + \frac{C_e}{6C_1} \right) + \frac{C_e}{6C_1}$

$K'_{\text{πραγ}} > K_{\text{ιδαν}} \Rightarrow U_1 = K'_{\text{πραγ}} \cdot U_2 > U'_1 = K_{\text{ιδαν}} \cdot U_2 \Rightarrow U_1 > U'_{1, \text{ιδαν}}$

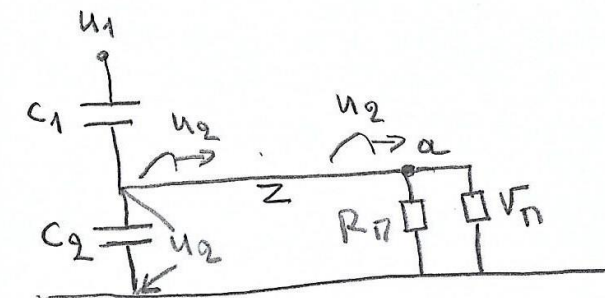
Αρα χωρίς τη συνεκτίμηση της C_e θα μετρούμε τάση στο δοκίμιο μικρότερη της πραγματικής

Προσαρμογή



r_{π} αντιστάση παλμογράφου

$$\text{Αν } r_{\pi} = 1:2 \text{ M}\Omega \approx \infty \Rightarrow a = \frac{\infty - Z}{\infty + Z} = 1 \Rightarrow \begin{cases} u_{\pi} = (1+a)u_2 = 2u_2 \\ \text{Ανάκλαση προς } C_2 \\ \text{Πολύ κοντάς ανακλ.} \end{cases}$$

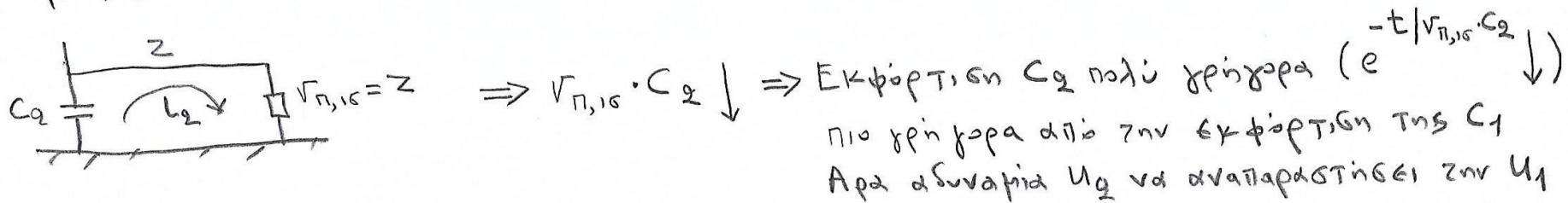


R_{π} αντιστάση προσαρμογής

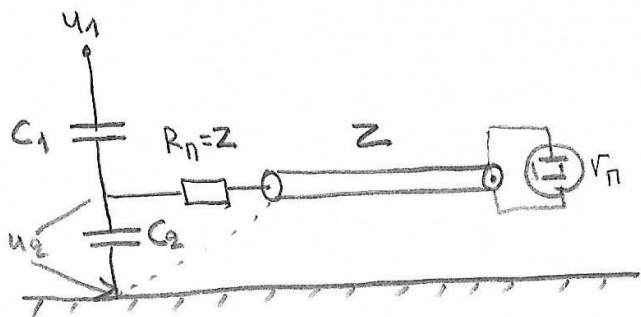
$$R_{\pi} = Z \Rightarrow \overset{\infty}{r_{\pi}} \parallel R_{\pi} \approx \overset{=Z}{R_{\pi}} \Rightarrow a = \frac{Z - Z}{Z + Z} = 0 \Rightarrow \begin{cases} u_{\pi} = (1+\overset{=0}{a})u_2 = u_2 \\ \text{0η ανάκλαση} \\ \text{προς } C_2 \end{cases}$$

Προσαρμογή

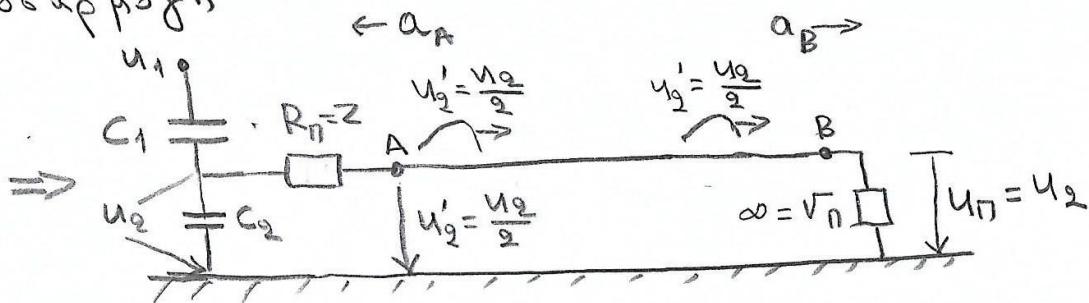
Όπως:



Επίσης: Τι γίνεται αν $r_{\pi} \downarrow$ π.χ. $r_{\pi} = 50 \Omega$ και $Z = 75 \Omega$;



Προσαρμογή



Προσαρμογή στον κλάδο χαμηλής τάσης του καταμεριστή

$$R_n = Z$$

$$r_n \uparrow \text{ π.χ. } 1 \div 2 \text{ M}\Omega \Rightarrow r_n = \infty$$

1) u_2 (στη C_2) "βλέπει" $R_n (=Z)$ και Z θα ωριένει

$$u_2' = u_2 \frac{Z}{R_n + Z} = \frac{u_2}{2}$$

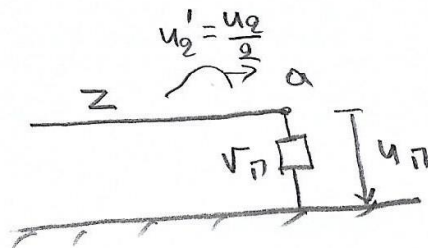
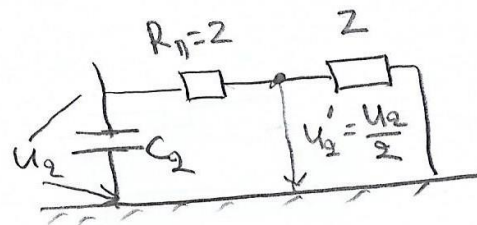
2) Κύμα $u_2' = \frac{u_2}{2}$ φεύγει προς παλμογράφο

3) Κύμα φθάνει στον παλμογράφο

$$a_B = \frac{r_n - Z}{r_n + Z} \xrightarrow{r_n = \infty} 1 \Rightarrow u_n = (1 + a_B) \frac{u_2}{2} = u_2$$

Αρα ο παλμογράφος μετρά τάση u_2

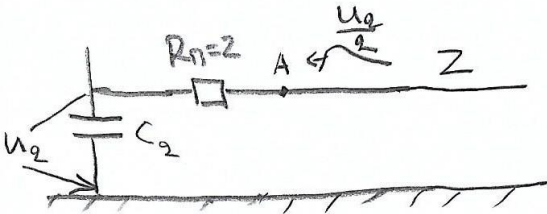
4) Ανακλώμενο κύμα στον παλμογράφο
Κύμα επιστρέφει στη χαμηλή τάση του καταμεριστή



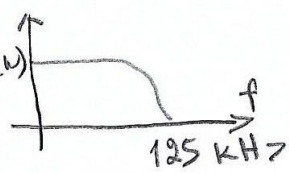
$$a_A = \frac{R_n - Z}{R_n + Z} = 0 \Rightarrow \text{Τέλος τα ανακλώμενα}$$

Προσαρμογή

Επιστρέφον κύμα από τον παλμογράφο στον κλάδο χαμηλής τάσης καταμερίστη



Βλέπει $R_{\pi} + \frac{1}{j\omega C_2}$

Αν $\omega \uparrow$ π.χ. $1,2/50 \Rightarrow v(\omega)$  $f = 125 \text{ kHz} \Rightarrow \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 125 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} \approx 1\Omega$
 $C_2 = 1 \mu\text{F}$

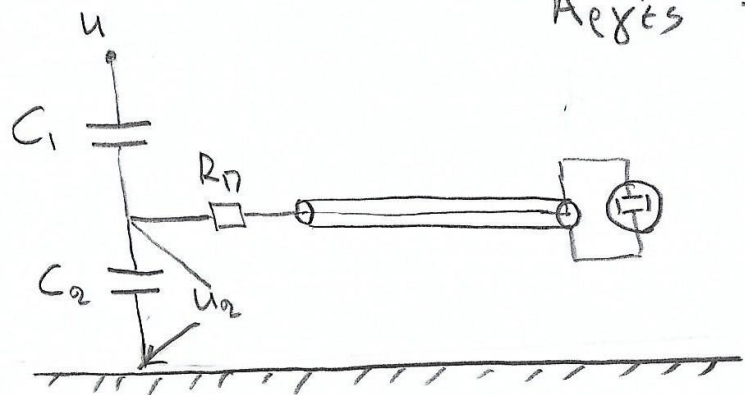
Άρα $\frac{1}{\omega C_2} \ll R_{\pi} \Rightarrow$ κύμα "βλέπει" πρακτικά μόνο R_{π}

Αν $\omega \downarrow$ π.χ. $250/2500 \Rightarrow f = 4 \text{ kHz} \Rightarrow \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} \approx 38\Omega (\sim R_{\pi})$
 Προσαρμογή

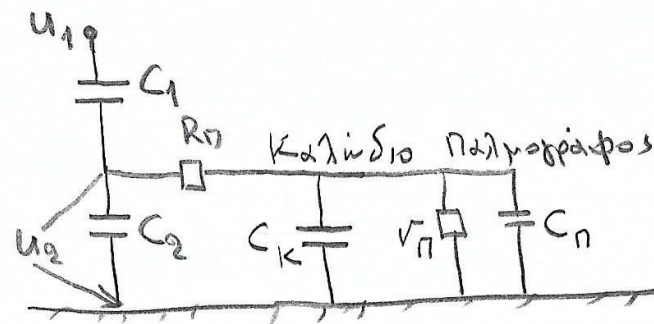
Εδώ όμως ουσιαστικά δεν υπάρχουν οδκίδες!

Εστω καλώδιο $\ell_k = 30 \text{ m} \Rightarrow \tau_k = \frac{\ell_k}{v} = \frac{30 \text{ m}}{1,5 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,2 \mu\text{s} \Rightarrow$ Βραχεία σύνδεση
 Καλώδιο σαν
 συγκεντρωμένο στοιχείο
 Όχι όδευση
 Μόνο χωρητική συμπεριφορά

"Aegies" τάσης π.χ. 250/2500, AC



$\Rightarrow$

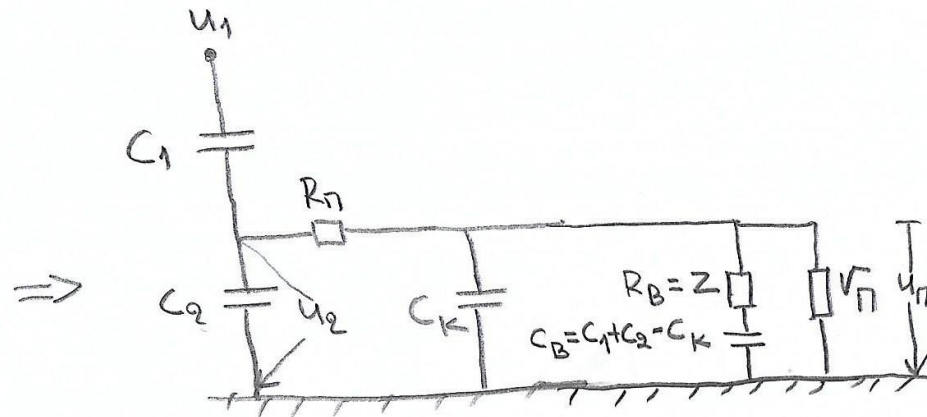
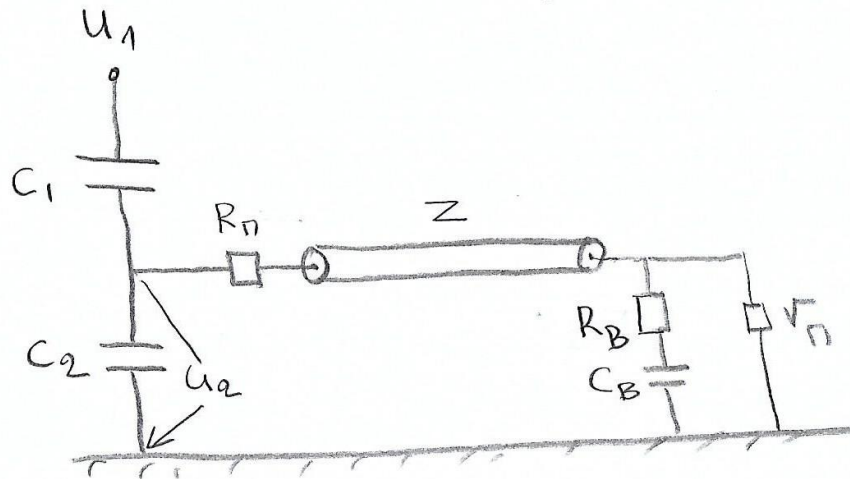


Καλώδιο βραχεία σύνδεση $\Rightarrow$ Δεν υπάρχει όδευση $\Rightarrow$ Χωρητική συμπεριφορά
Καλώδιου
 C_k

$$k = \frac{C_1}{C_1 + C_2^*} \quad C_2^* = C_2 + C_k + C_n$$

R_n σε σειρά με $V_n(\infty) \Rightarrow R_n$ αντίσταση

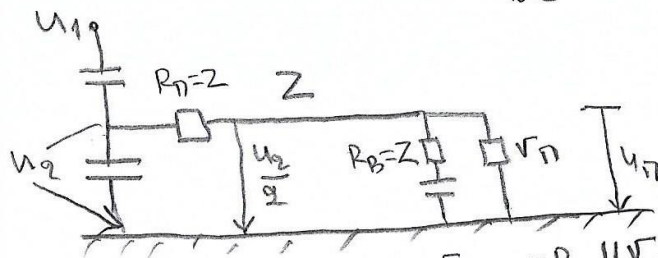
Όταν υπάρχει η χωρητική συμπεριφορά του καλωδίου
π.χ. δρχές τάσεις (250/2500) ή μεγάλα μήκη καλωδίου



1) $\omega \downarrow$ π.χ. 250/2500 $\Rightarrow K = \frac{C_1}{2(C_1 + C_2)}$

$K = \frac{C_1}{C_1 + C_2^*}$ $C_2^* = C_2 + C_K + C_B$

2) $\omega \uparrow$ π.χ. 1,2/50 $\Rightarrow \frac{1}{\omega C} \downarrow \Rightarrow$ Αρτηροειδές οι
χωρητικότητες
όση χαμηλή τάση
έναντι 700V
ΔΥΣΙΟΓΓΑΦΩΝ



$r_{\pi, \text{sc}} = R_B \parallel r_{\pi} \approx R_B = Z \Rightarrow a = 0$

$$\left. \begin{aligned} U_{\pi} &= (1+a) \frac{U_2}{2} = \frac{U_2}{2} \\ U_2 &= \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow U_{\pi} = U_1 \frac{C_1}{2(C_1 + C_2)}$$

$C_B = C_1 + C_2 - C_K$

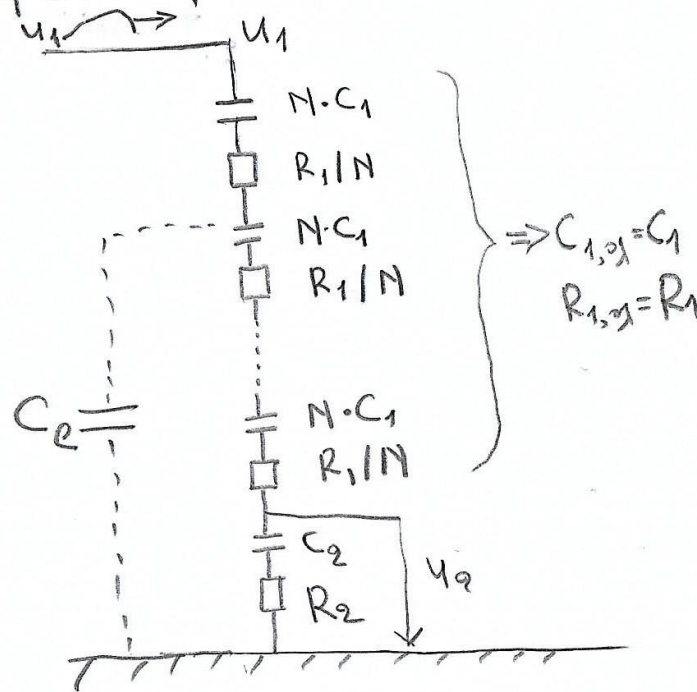
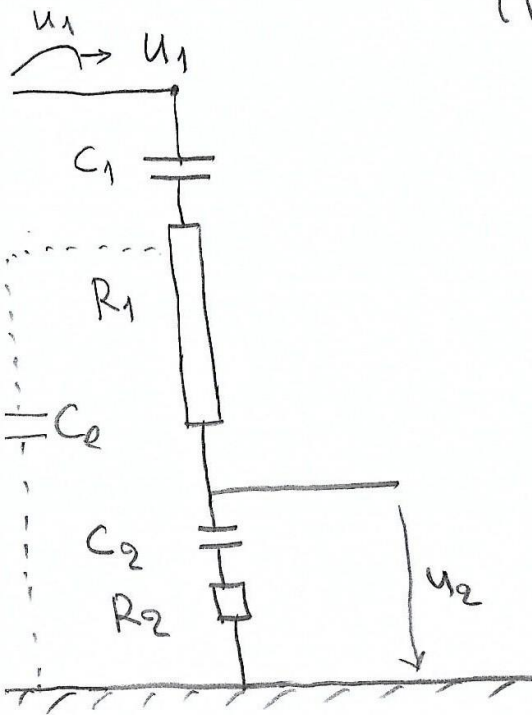
$K = \frac{C_1}{C_1 + (C_2 + C_K + C_1 + C_2 - C_K)} \Rightarrow$

$K = \frac{C_1}{2(C_1 + C_2)}$

$U_{\pi} = U_2 = K \cdot U_1 = U_1 \frac{C_1}{2(C_1 + C_2)}$

← 1501
λόγοι κατασκευής

Χωρητικοί καταμεριστές με ωμική απώσθηση (Damped capacitive dividers)



- Η προσθήκη αντιστάσεως R_1
- Αποσβένει ταλαντώσεις $L \cdot C_1$ (L παράσιτος αυτεπαγωγής)
 - Αποσβένει την ανάκλαση του κύματος U_1 όταν φθάσει στον καταμεριστή

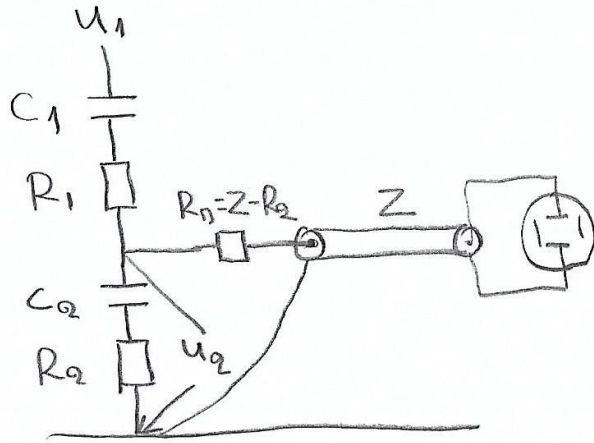
χ.κ. απώσθων $R_1 = (3 \div 4) Z$
 $Z = \sqrt{\frac{L}{C_e}}$

$$K_R = K_C \Rightarrow \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \left(1 + \frac{C_e}{6C_1} \right) + \frac{C_e}{6C_1}$$

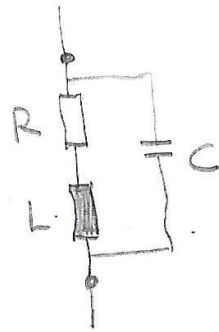
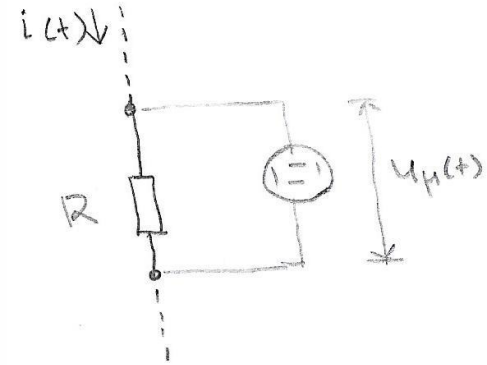
Αρχή μεζαβαζικού φαινομένου $\Rightarrow$ Πυκνωτές βραχυκυκλωμένοι $\Rightarrow$ 0 ωμική συμπεριφορά
 Τέλος " " $\Rightarrow$ " αντιστοικνωμένοι $\Rightarrow$ χωρητική "

Πάντα $K_R = K_C = K$

Προσάρτησις



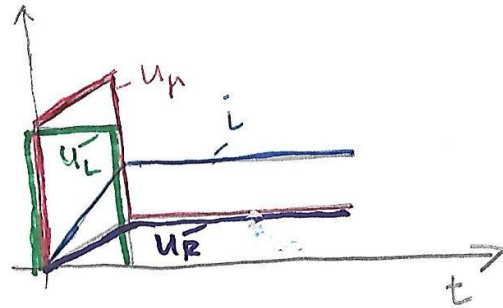
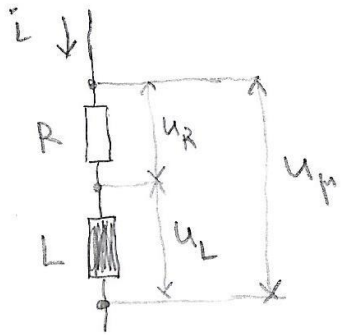
Μείωση υψηλών χωρητικών ρευμάτων



Αν $R \uparrow$ $\begin{cases} \omega \downarrow & \omega L \downarrow & \frac{1}{\omega C} \uparrow \Rightarrow \text{Αγνοείται η } L \\ \omega \uparrow & \omega L \uparrow & \frac{1}{\omega C} \downarrow \Rightarrow \text{Συμπεριέχουν } L \text{ και } C \end{cases}$

Αν $R \downarrow \Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{\omega C} \gg R \Rightarrow \text{Αγνοείται η } C \\ \omega L \sim R \Rightarrow \text{Σημαντικός ο ρόλος του } L \end{cases}$

Συνιστώ $R \downarrow$ για να μην ενοχράει το κύκλωμα

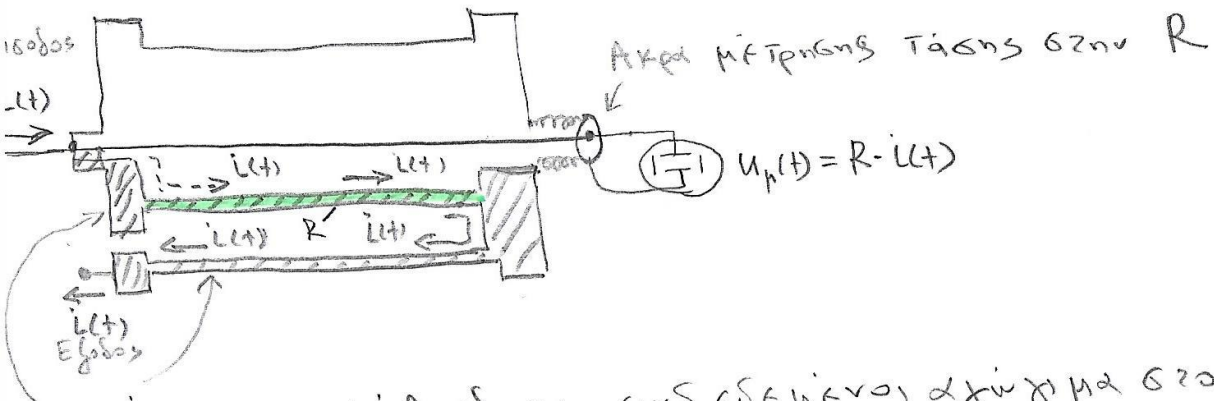


$$u_R(t) = R \cdot i(t)$$

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

$$u_H(t) = u_R(t) + u_L(t)$$

Opasarihin arzigzagan



Οι άκοντροι κύλινδροι, συνδεμένοι σχήμα στο ένα άκρο τους
Ο εσωτερικός κύλινδρος είναι η R

Κεχωριστά περίπτωση $i(t) = I_0 \cdot s(t)$

$$u_p(t) = R \cdot I_0 \left(1 + 2 \sum_{v=1}^{\infty} (-1)^v \cdot e^{-v^2 \cdot t / \tau} \right)$$

$$\tau = \frac{\mu \cdot d^2 \cdot \kappa}{\pi^2}$$

d πάχος υλικού σωλήνα R

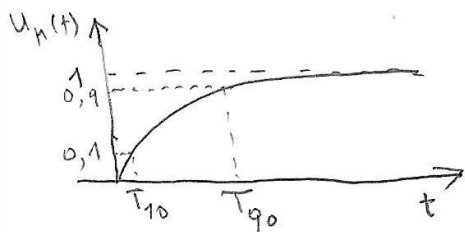
μ μαγνητική διαπερατότητα

κ ελαστική διαγωγιμότητα

R αντιστάση DC

$$u_p(t) = R \cdot I_0 \left(1 + 2 \sum_{v=1}^{\infty} (-1)^v \cdot e^{-v^2 \cdot \pi^2 \frac{R}{L} t} \right)$$

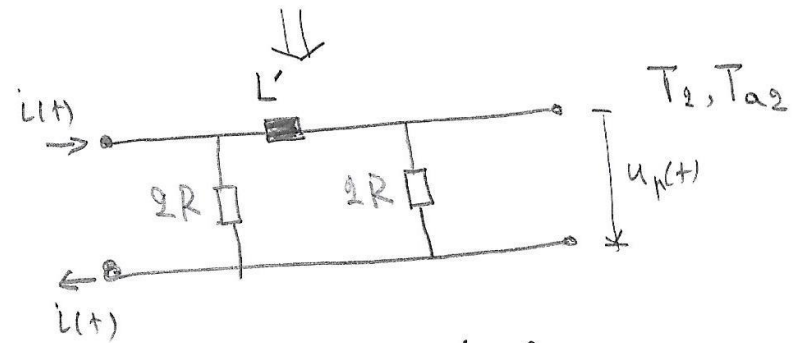
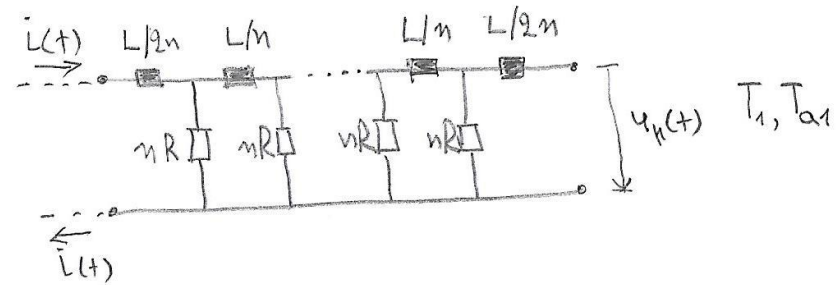
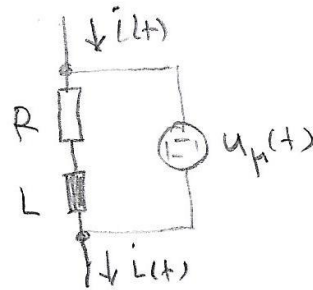
L αυτεπαγωγή



$$T = \int_0^{\infty} (1 - u_p(t)) dt$$

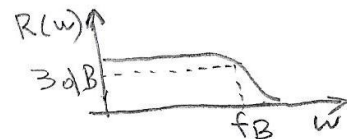
$$T_a = T_{90} - T_{10}$$

$$T = \frac{L}{6R}$$



$$\text{Av } T_1 = T_2 \Rightarrow L' = \frac{2}{3} L$$

$$\text{Av } T_{a1} = T_{a2} \Rightarrow L' = 0,43 \cdot L$$



$$f_B = 1,46 \frac{R}{L}$$

Ομοαξονικά καλώδια

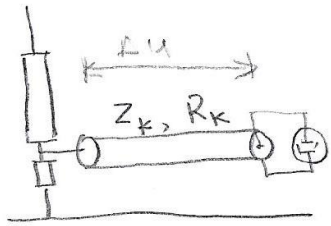
Μαγδύας $\rightarrow$ πλέγμα από λεπτά χαλκίνα σύρματα $\rightarrow$ Μη σιδηρομαγνητικό υλικό $\rightarrow$

$\rightarrow$ Ηλεκτροστατική θωράκιση

$\rightarrow$ Όχι μαγνητική θωράκιση έναντι μαγνητικού πεδίου σταθερής τιμής

Μαγνητικό πεδίο μη σταθερής τιμής $\rightarrow$ Δινορεύματα $\rightarrow$ Ανακοπή εισδοχής μαγνητικού πεδίου στον εσωτερικό αγωγό

Συχνότητα υψηλή $\rightarrow$ Δινορεύματα $\rightarrow$ Μαγνητική θωράκιση



$$L_k \uparrow \Rightarrow \sim R_k \Rightarrow \Delta u = u \frac{R_k}{R_k + Z_k}$$

Υψισυχνή τάση $\Rightarrow$ Επίδερμικό φαινόμενο $\Rightarrow R_k \uparrow \Rightarrow \Delta u \uparrow$

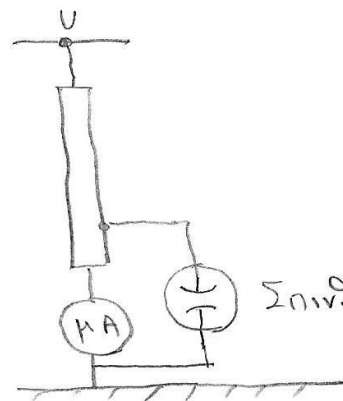
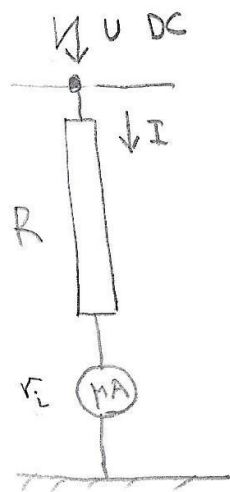
Μέτρηση υψηλών συνεχών τάσεων
 $V_i \ll R$

$$U = I(R + V_i) \approx I \cdot R$$

$R \sim 100 \text{ M}\Omega$ (για να μην αλλοιώνει το ρεύμα της διάταξης)

$V_i \sim 1 \Omega$ (αναλογικό κινητού πηνίου, ψηφιακό)

$I \sim \mu\text{τρικές εκατοντάδες } \mu\text{A}$



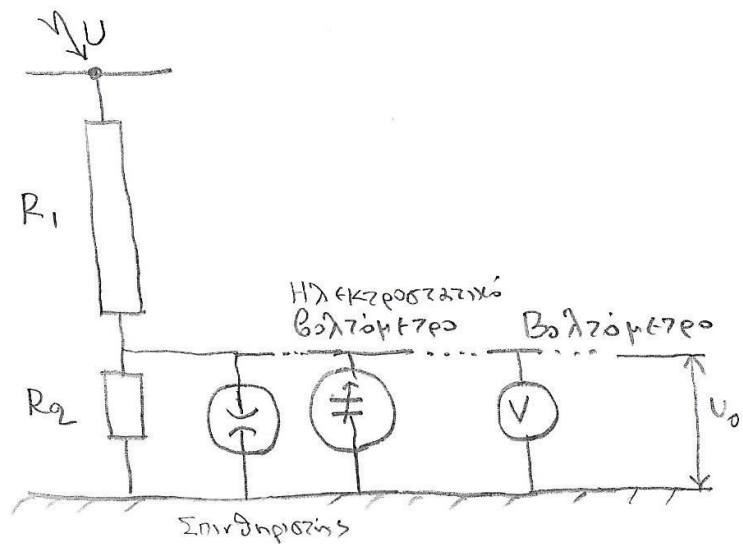
Προσασία οργάνου από υπερτάσεις $\rightarrow$ Σπινθηρισμός
 (αλγικέφανο ευχενός αέριου)

Περλαρβάναι και μέρος της R για σταθερότερη λειτουργία

Σπινθηρισμός

Προσοχή: Οι σπινθηρισμοί προσασίας σε πολύ υψηλές τάσεις επηρεάζουν τις μετρήσεις

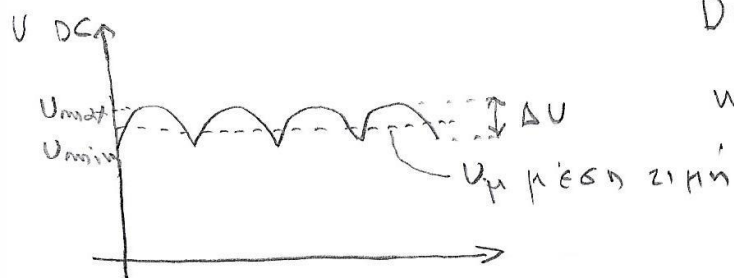
$$\omega \uparrow \Rightarrow R_{\text{σπινθ}} = \frac{1}{\omega C_{\text{σπινθ}}} \downarrow \text{αυξάνωση πιθανώς συγκρίσιμη με αντίσταση οργάνου}$$



$$U = U_0 \frac{R_2'}{R_1 + R_2'}$$

$$V_{H.B.} \uparrow \Rightarrow R_2' \approx R_2$$

$$\text{Βολτόμετρο} \rightarrow V_i \Rightarrow R_2' = R_2 \parallel V_i$$

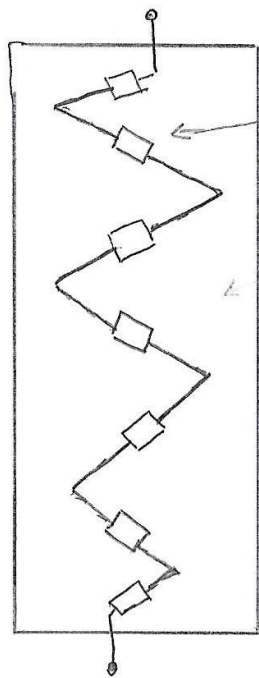


DC με κυματισμό

$$W = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_\mu} 100\% = \frac{\Delta U}{U_\mu}$$

Όργανο κινητού πηνίου $\rightarrow$ Μέτρα μέση τιμή U_μ

Ηλεκτροστατικό όργανο $\rightarrow$ Μέτρα RMS τιμή



$V = 500 \text{ V}, 2 \text{ W}$

Πάδι in αέρα
 αντίστασης 15 kV/cm 5 kV/cm

Μονωτικός κύλινδρος



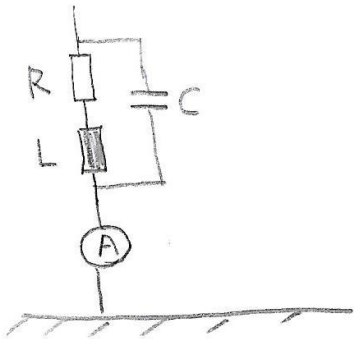
Πήματα υφαινό ολέξης

Σύρμα υψηλής αντίστασης

← Αντίσταση Schiewind

Μέτρηση υψηλών εναλλασσομένων τάσεων

Με ωμική αντιστάση και αμπερόμετρο



$$Z = (R + j\omega L) \parallel \left(\frac{1}{j\omega C} \right) = \frac{(R + j\omega L) \cdot \left(\frac{1}{j\omega C} \right)}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \cdot j\omega C = \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC} \approx \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}$$

$\omega^2 LC \rightarrow L \text{ [nH]}$
 $\omega RC \rightarrow C \text{ [pF]}$

$$\approx \frac{R + j\omega L}{1 + j\omega RC} \cdot \frac{(1 - j\omega RC)}{(1 - j\omega RC)} = \frac{(R + j\omega L)(1 - j\omega RC)}{1 + \omega^2 R^2 C^2} \approx \frac{(R + j\omega L)(1 - j\omega RC)}{1 + \omega^2 R^2 C^2}$$

$\omega^2 R^2 C^2 \rightarrow \omega^2 R^2 C^2$

$$\approx (R + j\omega L)(1 - j\omega RC) = R + j\omega L - j\omega R^2 C + \omega^2 R L C \approx R + j\omega L - j\omega R^2 C =$$

$\omega^2 R L C \rightarrow \omega^2 R L C$

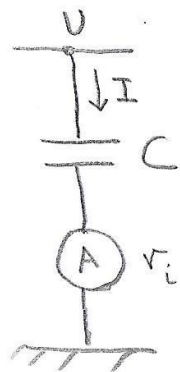
$$= R \left\{ 1 + j \left(\frac{\omega L}{R} - \omega RC \right) \right\} = R (1 + j\lambda)$$

$$\lambda = \frac{\omega L}{R} - \omega RC$$

$$\text{Εξ' αλ' Αψη σφ' αλ' ατο} \Rightarrow Z = R \Rightarrow \lambda = 0 \Rightarrow \frac{\omega L}{R} - \omega RC = 0 \Rightarrow R = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Για $\left\{ \begin{array}{l} \text{μείωση υπερθέρμανσης } R \text{ (θερμότητα joule)} \\ \text{μείωση επίδρασης στο κύκλωμα υψηλής τάσης} \end{array} \right\} \Rightarrow R \uparrow \text{ (πάλι no)}$

τότε $R \gg \omega L$
αρα L αμελητέα



Μέτρηση υψηλής εναλλασσόμενης τάσης
με πυκνωτή και αμπερόμετρο

$$C \downarrow \text{π.χ. } 100 \text{ pF} \Rightarrow \frac{1}{\omega C} \gg r_i \Rightarrow I = \omega C U_{\text{rms}} \Rightarrow U_{\text{rms}} = \frac{I}{\omega C}$$

Συνήθως αντί στα αμπερόμετρα συνδεύονται από τον πυκνωτή
και βαθμολογούνται σε kV (προσοχή: δεν είναι βολτόμετρα)

Επίδραση αρμονικών κατά τη μέτρηση AC τάσης με ουκωτή και (A)

$$w_1 = w, w_2 = 2w, w_3 = 3w, \dots, w_n = n \cdot w$$

Προς μέτρηση τάση $U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$

Μετρούμενο ρεύμα $I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}$

$$I_1 = w_1 C U_1 = w C U_1$$

$$I_2 = w_2 C U_2 = 2w C U_2$$

$$I_3 = w_3 C U_3 = 3w C U_3$$

$$\vdots$$

$$I_n = w_n C U_n = n w C U_n$$

$$\Rightarrow I = w C \sqrt{U_1^2 + (2U_2)^2 + (3U_3)^2 + \dots + (nU_n)^2}$$

$$I = w \cdot C \cdot U'$$

$$U' = \sqrt{U_1^2 + (2U_2)^2 + \dots + (nU_n)^2}$$

Αππεριόριστο μέτρο $I \Rightarrow$ υπολογίζει $\frac{I}{wC} = U' \Rightarrow$ Άρα μετρούμενη τάση U'

Παράδειγμα

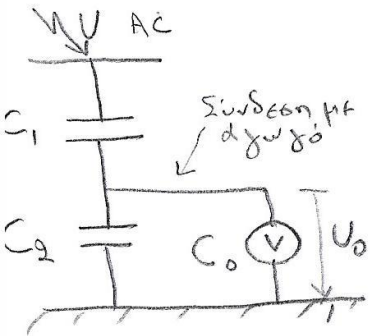
Έστω τάση με 5η αρμονική = 10% διαμελιώδους

$$U = \sqrt{U_1^2 + (0,1 \cdot U_1)^2} = 1,005 \cdot U_1$$

$$U' = \sqrt{U_1^2 + (5 \cdot 0,1 \cdot U_1)^2} = \sqrt{U_1^2 + 0,25 \cdot U_1^2} = 1,118 \cdot U_1$$

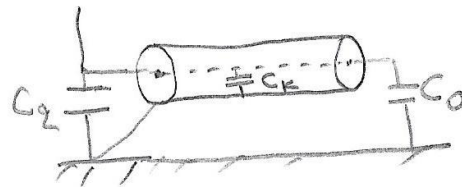
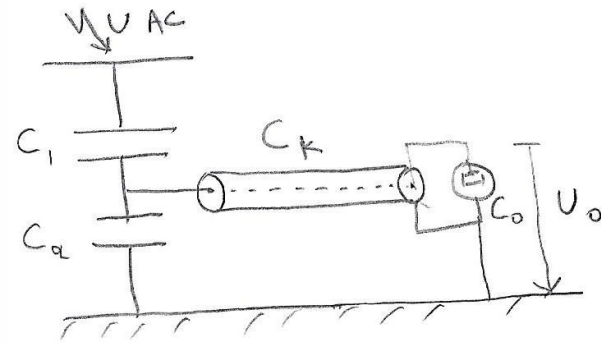
$$\Rightarrow \Sigma \phi\alpha\lambda\mu\alpha \frac{1,118 U_1 - 1,005 \cdot U_1}{1,005 \cdot U_1} = 11,2\%$$

Μέτρηση υψηλής AC με χωρητικό κατακρίστη



$$C_2' = C_2 + C_0$$

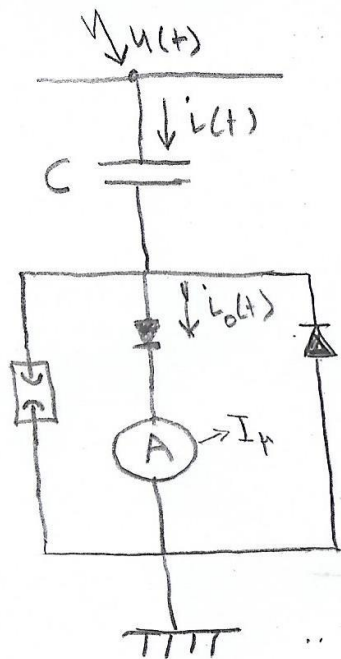
$$U = U_0 \frac{C_1 + C_2'}{C_1} = U_0 \frac{C_1 + C_2 + C_0}{C_1}$$



$$C_2' = C_2 + C_K + C_0$$

$$U = U_0 \frac{C_1 + C_2'}{C_1} = U_0 \frac{C_1 + C_2 + C_K + C_0}{C_1}$$

Μέτρηση υφελών AC τάσεων με τη μέθοδο Chubb-Fortescue



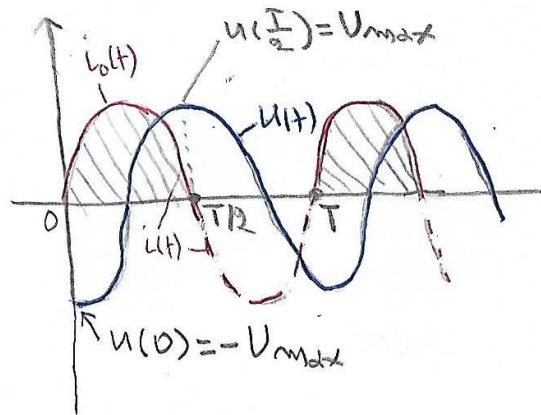
$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$

$$I_p = \frac{1}{T} \int_0^T i_d(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_{u(0)}^{u(\frac{T}{2})} C \cdot du(t) = \frac{C}{T} [u(\frac{T}{2}) - u(0)] = \frac{C}{T} 2 U_{max}$$

$\downarrow$ U_{max} $\downarrow$ $-U_{max}$

$i_d(t)$ είναι το $i(t)$ για ημι-περίοδο

$$U_{max} = I_p \cdot \frac{T}{2C} \xrightarrow{T = \frac{1}{f}} I_p \frac{1}{2fC} \quad \begin{matrix} f, C \text{ γνωστά} \\ I_p \text{ ενδείξην } \textcircled{A} \end{matrix}$$



Προσοχή: Η μέθοδος δίνει U_{max} και όχι U_{RMS}

Το αμπερόμετρο βαθμονομείται σε $\frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$

Chubb - Fortescue (συνέχεια)

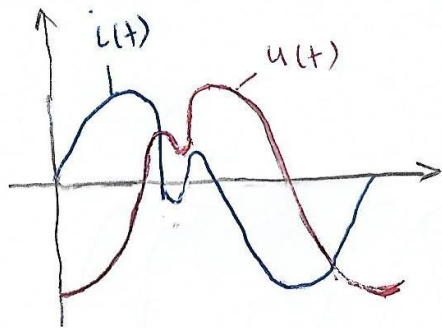
Η σχέση $U_{max} = I_p \frac{1}{2fC}$ ισχύει αν:

α) η $u(t)$ είναι συμμετρική ως προς τον άξονα του t

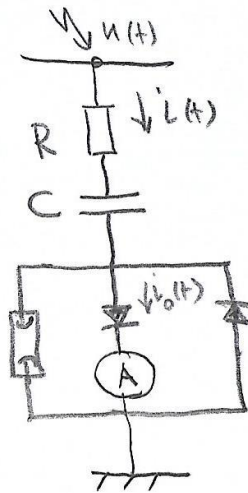
β) η $u(t)$ έχει μόνο 1 μέγιστο ανά ημiperίοδο. λόγω της $i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$ διαφορετικά το $i(t)$ θα γίνει αντιστροφής φοράς οπότε δεν θα δ,έρχεται από το **(A)**

Αρα, μειονέκτημα της μεθόδου / εξάρτηση από συχνότητα

✓ έλεγχος της $u(t)$ για περισσότερα μέγιστα ανά ημiperίοδο

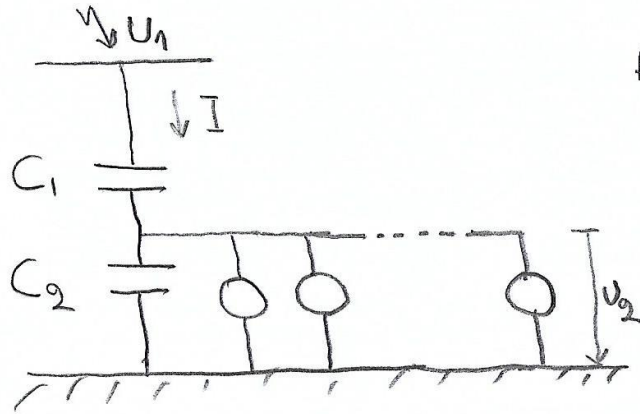


Για απόβλεψη ταλαντώσεων προσθήκη $R \ll \frac{1}{\omega C}$



$$F_R = \left[1 - \frac{1}{1 + (\omega RC)^2} \right] \cdot 100\%$$

Χωρητικοί μετατροπείς τάσης



Αν πολλά όργανα στην πλευρά χαμηλής τάσης
(βολτόμετρα, αμπερομετρες, βαρτόμετρα, ηλεκτρονόμοι κ.α.)
π.χ. μετρητικές διατάξεις σε ηλεκτρικά δίκτυα

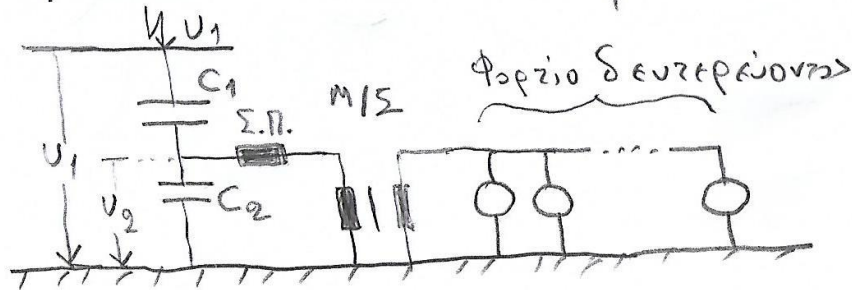
$$C_{2,ολ} \uparrow \Rightarrow Z_2 \downarrow \Rightarrow I \uparrow \Rightarrow \text{φόρτιση κυκλώματος}$$

Αφού $C_{2,ολ} \uparrow \Rightarrow C_1 \uparrow$ για διατήρηση λόγου καταμερισμού $K = \frac{C_1 + C_{2,ολ}}{C_1}$ σε λογική τιμή

$C_1 \uparrow \Rightarrow Z_1 \downarrow \Rightarrow I \uparrow \Rightarrow$ Επιβαρύνεται η φόρτιση

Επιλέγεται $C_2 \downarrow \Rightarrow$ μικρός λόγος καταμερισμού $\Rightarrow U_2 \uparrow (10 \div 30 \text{ kV}) \quad U_2 = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$

Άρα απαιτείται υποβιβασμός της $U_2 \Rightarrow M/\Sigma$



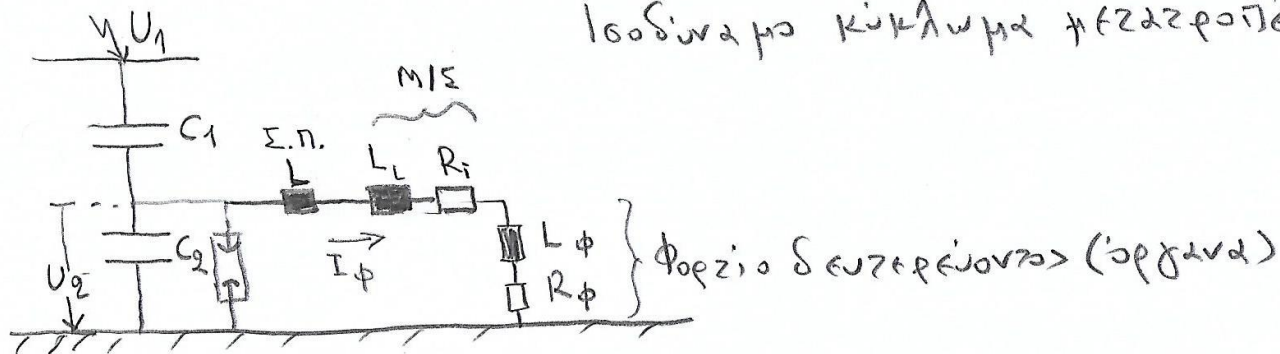
Πλεονέκτημα: Όργανα στο δευτερεύον του Μ/Σ

Αρα : Ρεύμα πρωτεύοντος μικρό

Αρα : Χαμηλή φόρτιση κυκλώματος
Υ.Τ.

Αρα : και εξοικονόμηση ενέργειας

Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπείας



Αν αφαιρεθούν όργανα $\Rightarrow \Phi \downarrow \Rightarrow I_\phi \uparrow \Rightarrow U_2 (= \frac{I_\phi}{\omega C_2}) \uparrow \Rightarrow$ Υπόταση στον C_2
Κίνδυνος καταστροφής

Ρόλος σταθμαλιστικού πηνίου (Σ.Π.)

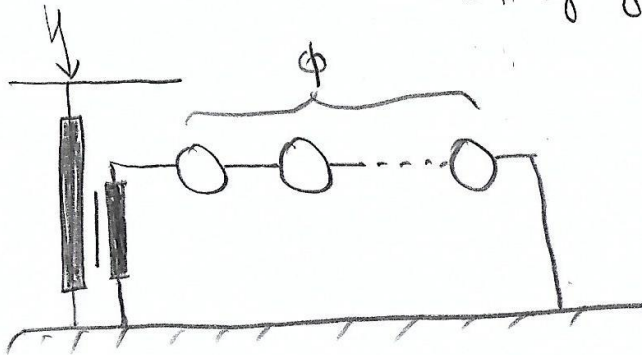
$$u = L \frac{dI_\phi}{dt} \quad \left. \begin{array}{l} \\ I_\phi \uparrow \end{array} \right\} \Rightarrow u \uparrow \text{ αντίθεση πολικότητας} \Rightarrow U_2 \downarrow$$

↓
Αναγκαιότητα
συνθροιστή
στον C_2

Εφαρμογές

- 1) Μέτρηση RMS τιμής AC τάσης
- 2) Ανίχνευση ανωμαλιών λειτουργίας δικτύου π.χ. βραχυκυκλωμάτων

Επαγωγικοί μετασχηματιστές τάσης



Ουσιαστικά μονοφασικοί Μ/Σ τάσης

Μεγάλη διατομή συλινμάτων χαλκού και σιδηρομαγνητικού υλικού $\Rightarrow$

Μικρές επαγωγικές και ωμικές απώλειες

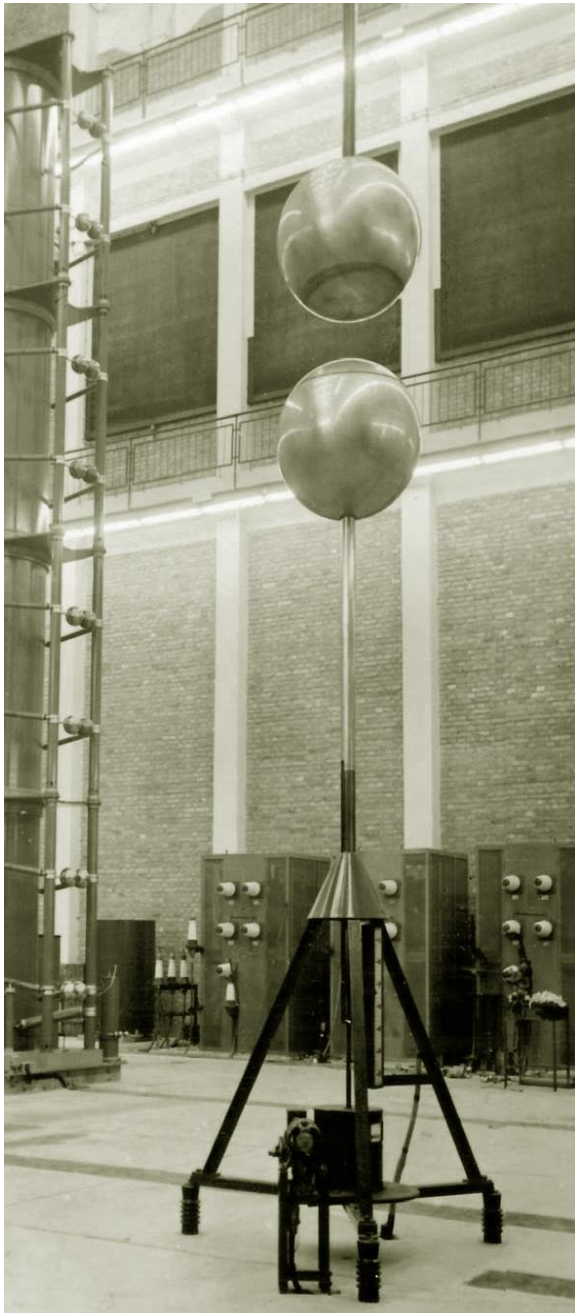
Χαμηλή οριακή συχνότητα (μέχρι kHz)

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ακατάλληλοι για κεραυνικές τάσεις} \\ \text{Κατάλληλοι για κρουστικές τάσεις} \\ \text{Χαρισμών (δεν έχουν υψισυχές συνελ.)} \end{array} \right.$

Φορτίο Φ χωρητικό $\Rightarrow$ φαινόμενο Ferranti $\Rightarrow$ Ανύψωση τάσης $\Rightarrow$ Σφάλμα στις μετρήσεις

Για υψηλές τάσεις $\Rightarrow$ Μεγάλοι Μ/Σ $\Rightarrow$ Μεγάλες διαστάσεις και υψηλό κόστος

Διάκενα σφαιρών



Διάκενα σφαιρών
για DC, AC_{max}, $\hat{U}_{max}$

Ομοιογενές διάκενο $\Rightarrow$ Σταθερή τάση διάσπασης

Διαχρονική μέθοδος για τη διακρίβωση διατάξεων μέτρησης υψηλών τάσεων

$$\text{Ομοιογενή διάκενα} \Leftrightarrow E_{max} \leq 5 \cdot \bar{E}$$

$\downarrow$
 μέγιστη
 τιμή
 πεδίου
 έντασης

$\downarrow$
 μέση
 τιμή
 πεδίου
 έντασης

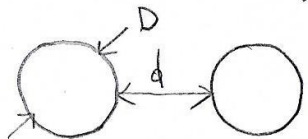
$= \frac{U}{d}$

Ανομοιογενή διάκενα $\Rightarrow$ Πιθανότητα διάσπασης καζαρόν Gauss ($U_{50\%}$)

ομοιογενή διάκενα $\rightarrow$ Gauss $\rightarrow$ Τυπική απόκλιση περί την $U_{50\%}$ πολύ μικρή

$U_5 \sim U_{50\%}$ Τάση διάσπασης σταθερή

Διάκενο σφαιρών $\rightarrow$ Ομοιογενές πεδίο



$$d \leq 0,5 \cdot D \text{ ή } D \geq 2 \cdot d \quad \text{AC, κρουστικές}$$

$$d \leq 0,4 \cdot D \text{ ή } D \geq 2,5 \cdot d \quad \text{DC}$$

Διάσπαση σφαιρικών διακένων υπό υψηλή AC τάση



Maximum spark length [cm] between spherical electrodes in dry air at normal conditions.

U_{peak} [kV]	diameter [cm]					U_{peak} [kV]	diameter [cm]		
	2.5	5	10	25	needle		50	75	100
5	0.13	0.15	0.15	0.16	0.42	140	5.15		
10	0.27	0.29	0.30	0.32	0.85	160	5.95		
15	0.42	0.44	0.46	0.48	1.30	200	7.60	7.50	7.50
20	0.58	0.60	0.62	0.64	1.75	240	9.20	9.10	
25	0.76	0.77	0.78	0.81	2.20	250			9.55
30	0.95	0.94	0.95	0.98	2.69	260	10.0	9.95	
35	1.17	1.12	1.12	1.15	2.69	300	11.8	11.6	11.5
40	1.41	1.30	1.29	1.32	3.81	340	13.7	13.2	
45	1.68	1.50	1.47	1.49	4.49	350			13.5
50	2.00	1.71	1.65	1.66	5.20	360	14.7	14.1	
60	2.82	2.17	2.02	2.01	6.81	400	16.8	15.9	15.5
70	4.05	2.68	2.42	2.37	8.81	440	19.2	17.9	
80		3.26	2.84	2.74	11.1	450			17.7
90		3.94	3.28	3.11	13.3	460	20.6	18.9	
100		4.77	3.75	3.49	15.5	500	23.6	20.9	19.9
110		5.79	4.25	3.88	17.7	540	26.8	23.1	
120		7.07	4.78	4.28	19.8	550			22.2
130			5.35	4.69	22.0	560	28.5	24.2	
140			5.97	5.10	24.1	600	33.0	26.7	24.7
150			6.64	5.52	26.1	640		29.3	
160			7.37	5.95	28.1	650			27.3
170			8.16	6.39	30.1	660		30.5	
180			9.03	6.84	32.0	700		33.4	30.0
190			10.0	7.30	33.9	740		36.8	
200			11.1	7.76	35.7	750			32.8
210			12.3	8.24	37.6	760		38.5	
220			13.7	8.73	39.5	800		42.2	36.0
230			15.3	9.24	41.4	840		46.5	
240				9.76	43.4	850			39.3
250				10.3	45.2	860		49.0	
300				13.3	54.7	900		53.7	43.0

Τάσεις
διάσπασης
τυποποιημένων
σφαιρικών
διακένων

Ισχύς $U_s = f(D, d)$ με ακρίβεια $\begin{cases} \pm 3\% & \text{AC, Κρουστικές} \\ \pm 5\% & \text{DC} \end{cases}$

Τιμές $U_s = f(D, d)$ ισχύουν για κ.σ. $\begin{cases} T = 20^\circ \text{C} \\ P = 760 \text{ mm Hg} \approx 1013 \text{ mbar} \end{cases}$

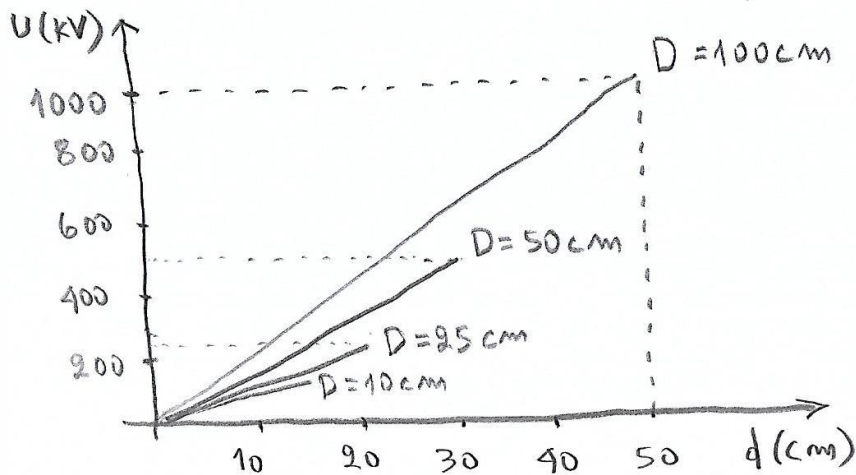
Αν όχι κ.σ. $U_s = \delta \cdot U_{s, \text{μετ}}$

Επίδραση υγρασίας: Αμελητέα

Σκόνη, ατμορραλίες: Αλλοίωση ομοιογένειας > διακένω.
Απαιτείται καθαρισμός

$$\delta = 0,386 \frac{P}{273 + T} \quad \begin{matrix} P [\text{mm Hg}] \\ T [^\circ \text{C}] \end{matrix}$$

Αν $\delta \notin [0.95, 1.05] \rightarrow$ Πίνακας διορθωσης



Εμπειρικά: $U_{\text{μετρητέα}} (\text{kV}) \leq D (\text{mm})$

π.χ. $U < 100 \text{ kV}$ μετρούνται με $D \approx 100 \text{ mm}$

$D > 1 \text{ m}$ $\begin{cases} \text{Δύσκολο κατασκευαστικά} \\ \text{Αποστάση ασφαλείας} \\ \text{από χειμερινά μέρη δυσχερής} \end{cases}$

$U_s > 1 \text{ MV}$ Δύσκολη μέτρηση

Τάση διάσπασης $U_{50\%}$

- Μέθοδος πολλαπλών επιπέδων
5 επίπεδα τάσης, 20 δοκιμές/επίπεδο,
Πιθανότητα διάσπασης/επίπεδο, Κατανομή
Gauss, Ευθεία γραμμή, Υπολογισμός $U_{50\%}$
- Μέθοδος up-and-down
30 καταπονήσεις
Διαδοχικές μετρήσεις για προσέγγιση της
τάσης διάσπασης

Υπολογισμός U50% σε χάρτη πιθανοτήτων

Wahrscheinlichkeitsnetz

