



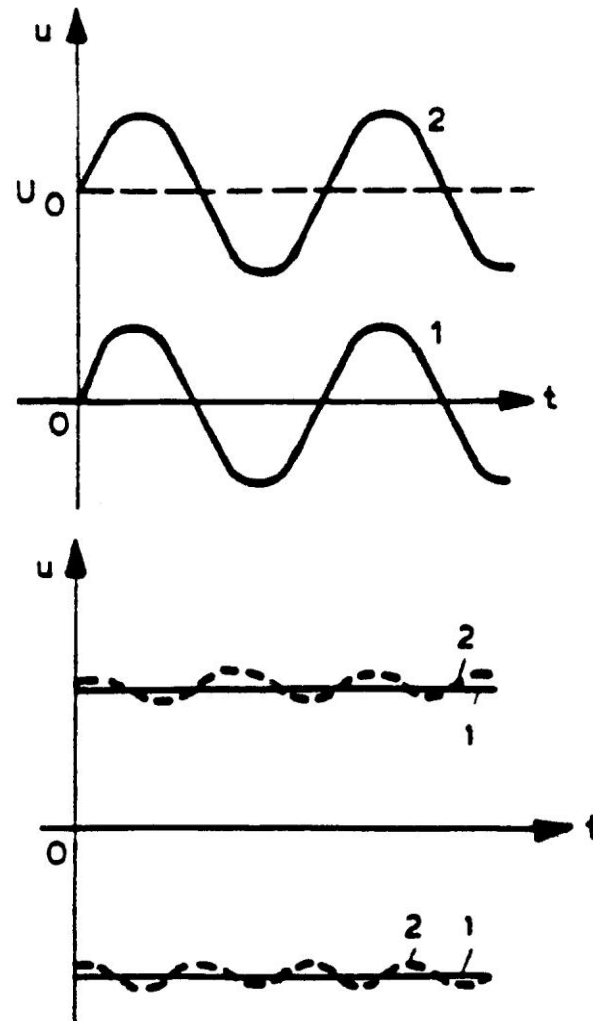
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Μηχανικών Υπολογιστών
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

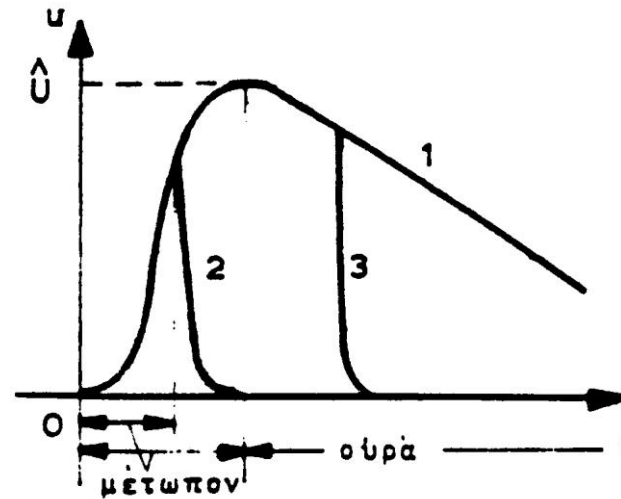
Μορφές υψηλών τάσεων δοκιμών (1)

- Εναλλασσόμενη
 - 1 χωρίς συνεχή συνιστώσα
 - 2 με συνεχή συνιστώσα
- Συνεχής (θετική ή αρνητική)
 - 1 χωρίς κυματισμό
 - 2 με κυματισμό

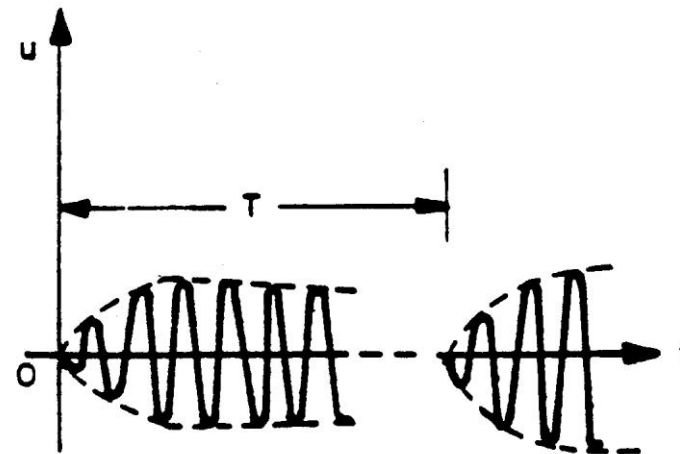


Μορφές υψηλών τάσεων δοκιμών (2)

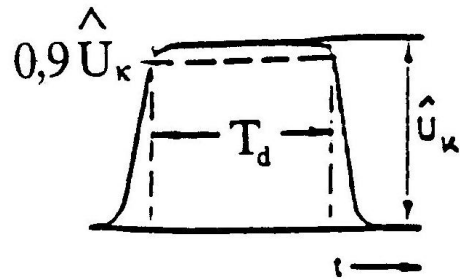
- Κρουστική
 - 1 πλήρης
 - 2 αποκομμένη στο μέτωπο
 - 3 αποκομμένη στην ουρά



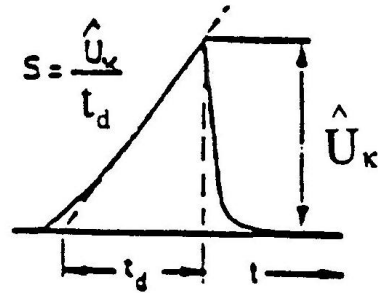
- Συρμός αποσβεννυμένων ταλαντώσεων



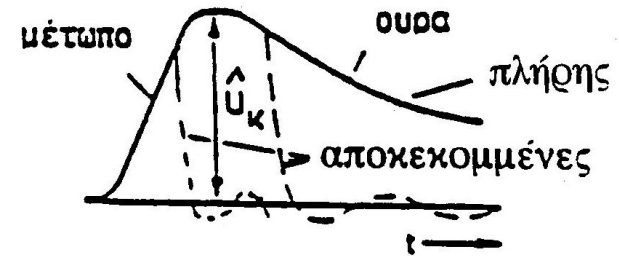
Κρουστικές τάσεις



(α)



(β)



(γ)

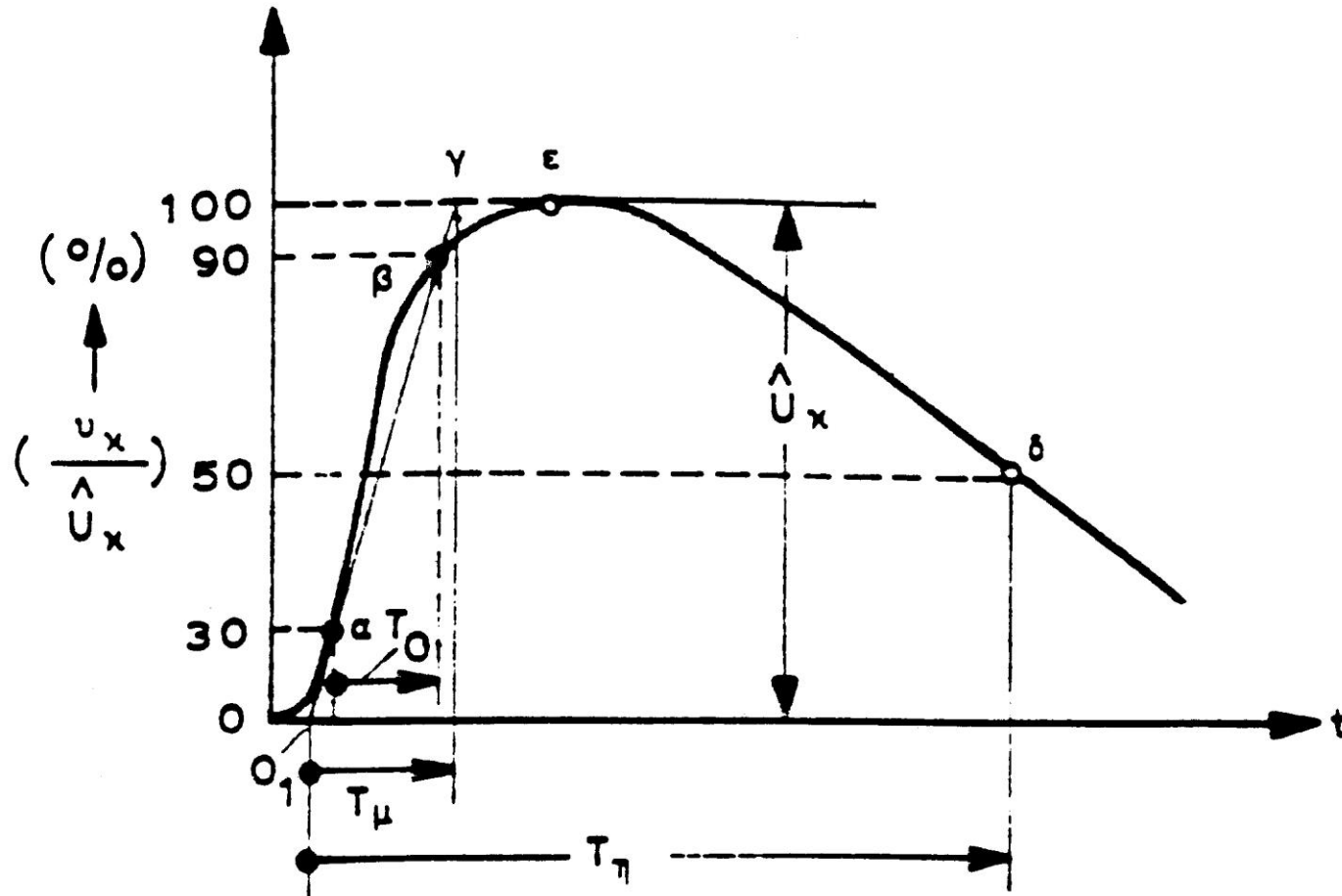
Τύποι κρουστικών τάσεων

(α) Ορθογωνική

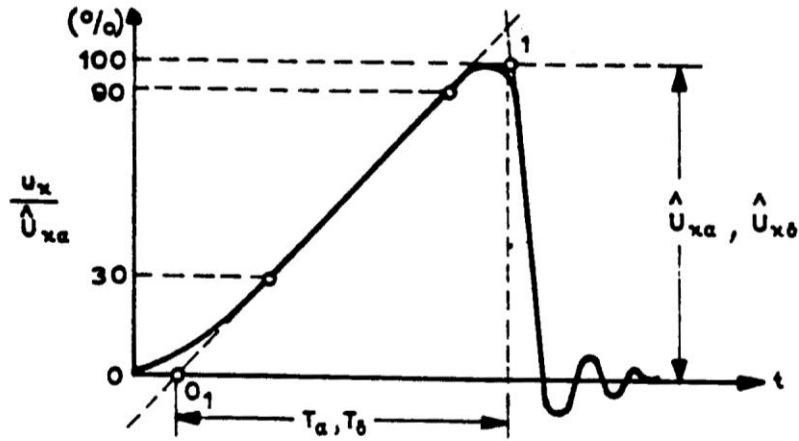
(β) Σφηνοειδής

(γ) Κρουστική

Ονομαστικά μεγέθη διπλοεκθετικών κρουστικών τάσεων μικρής διάρκειας (1)

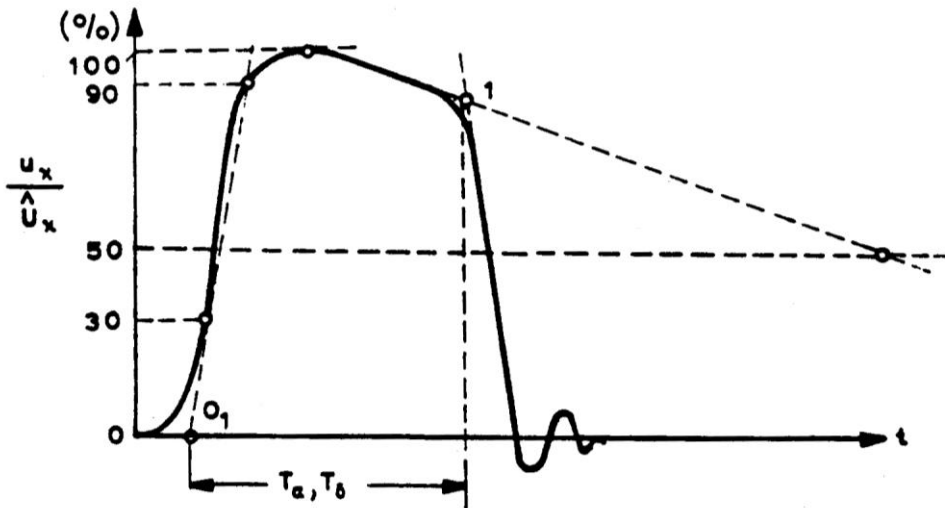


Ονομαστικά μεγέθη διπλοεκθετικών κρουστικών τάσεων μικρής διάρκειας (2)



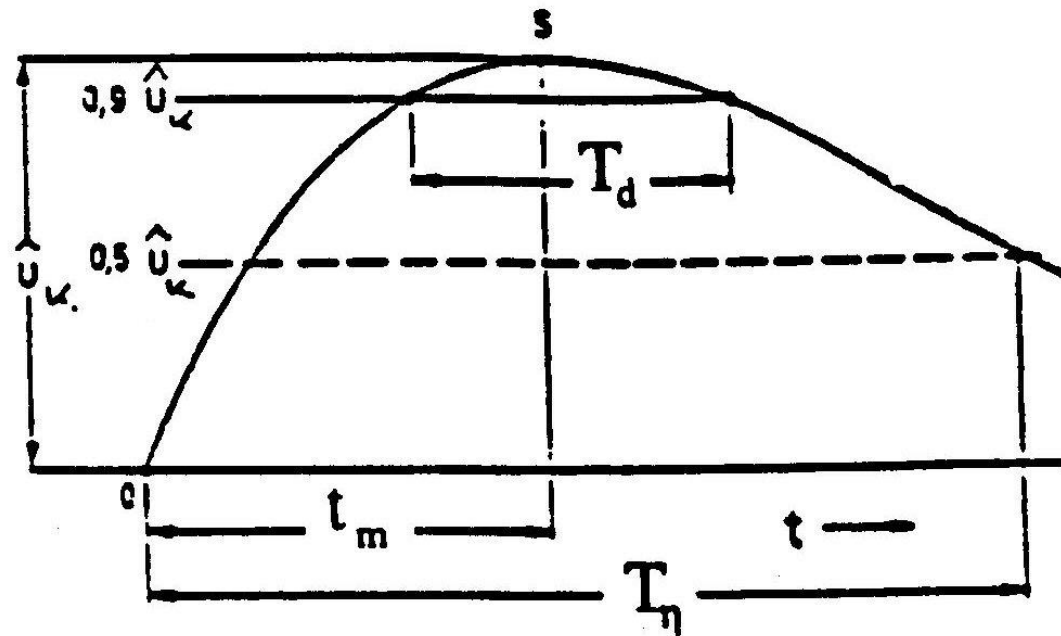
Αποκεκομμένη στο μέτωπο κρουστική τάση

$$T_\alpha = T_\delta = t_{\text{breakdown}} - O_1$$

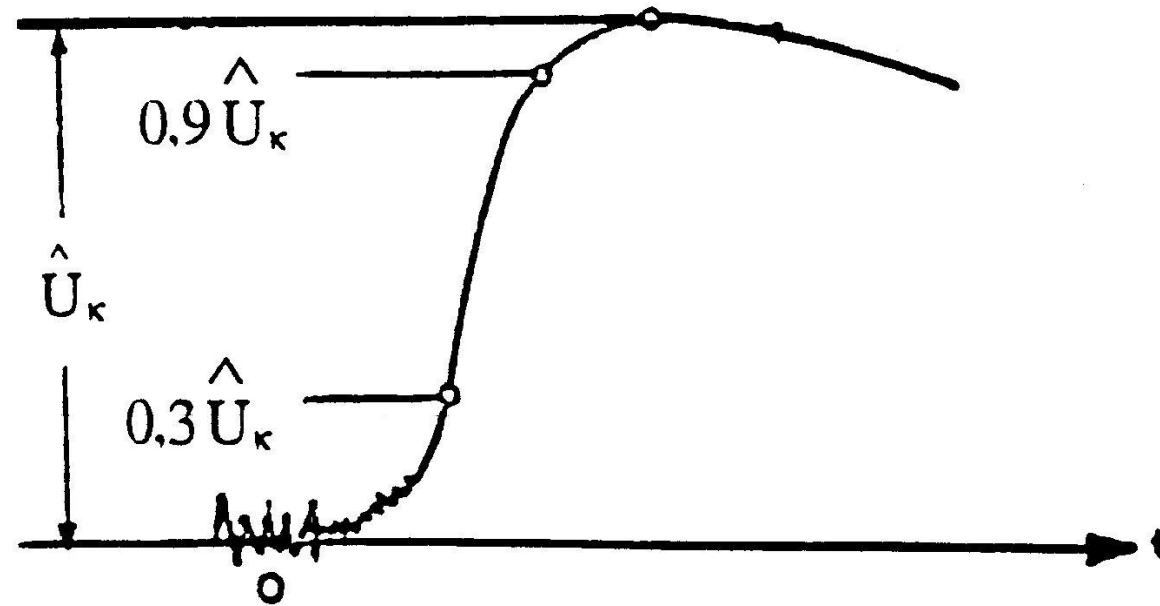


Αποκεκομμένη στην ουρά κρουστική τάση

Ονομαστικά μεγέθη διπλοεκθετικών κρουστικών τάσεων μεγάλης διάρκειας

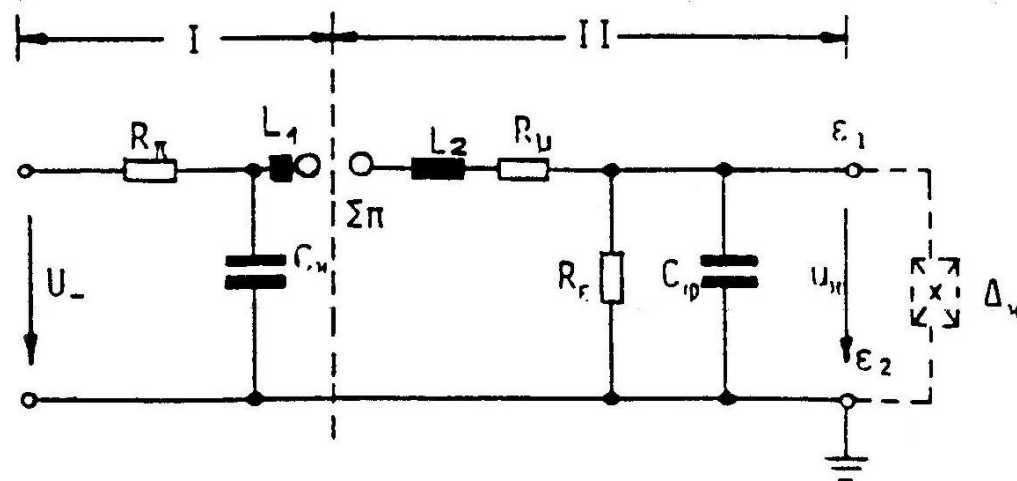


Ταλαντώσεις στην αρχή κρουστικής τάσης μικρής διάρκειας



Μονοβάθμιες γεννήτριες κρουστικών τάσεων (1)

Κύκλωμα a



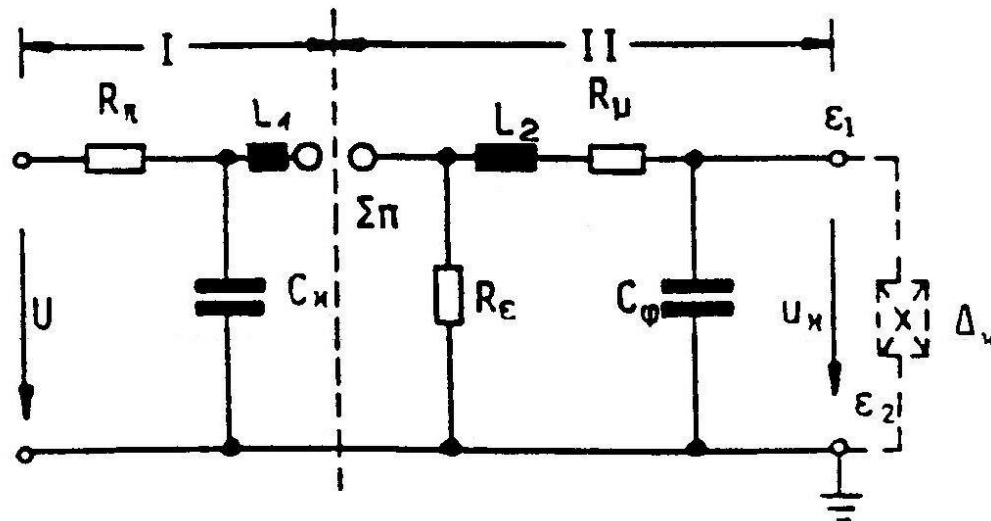
R_{μ} : Αποσβέσεως / μετώπου

R_{ϵ} : Εκφορτίσεως / ουράς

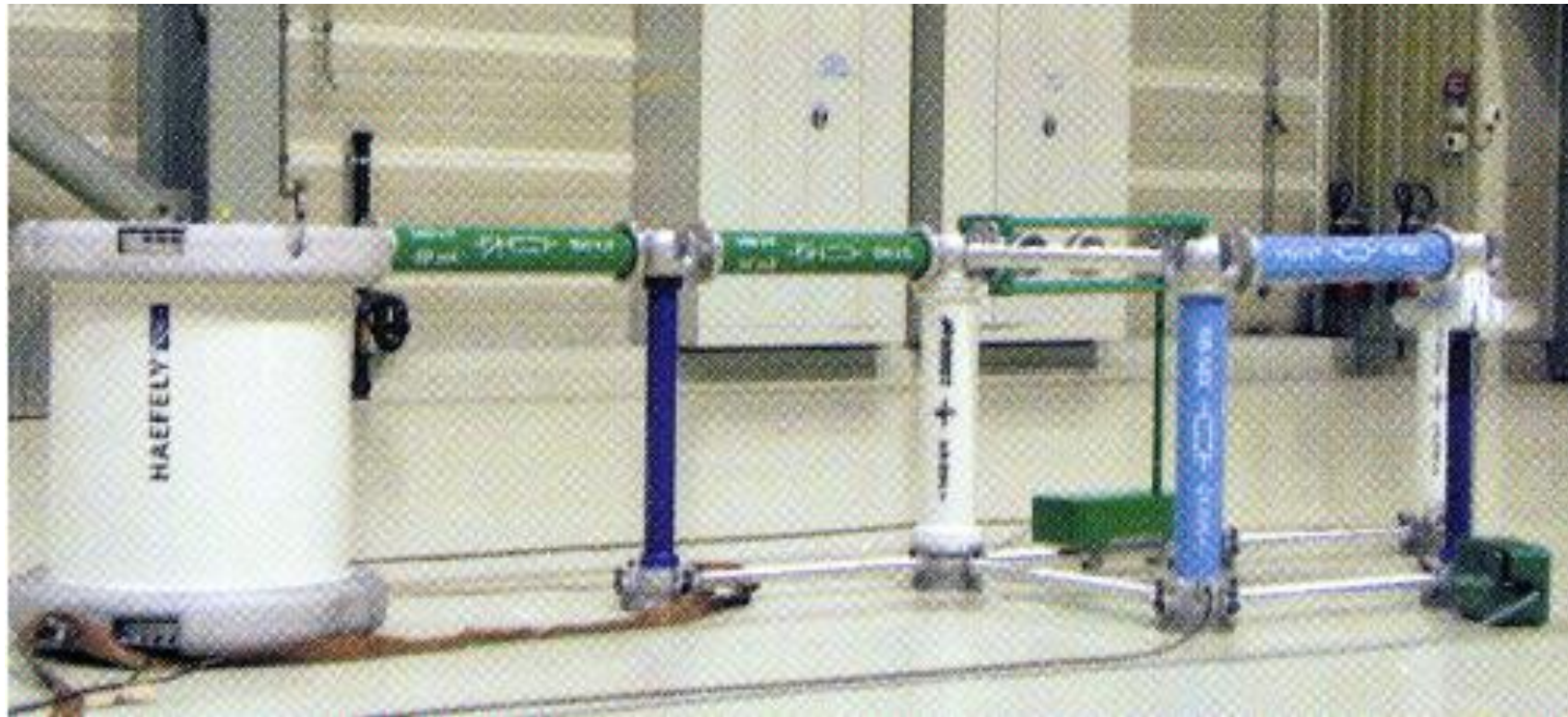
C_{κ} : Κρούσεως / βασική

C_{ϕ} : φορτίου

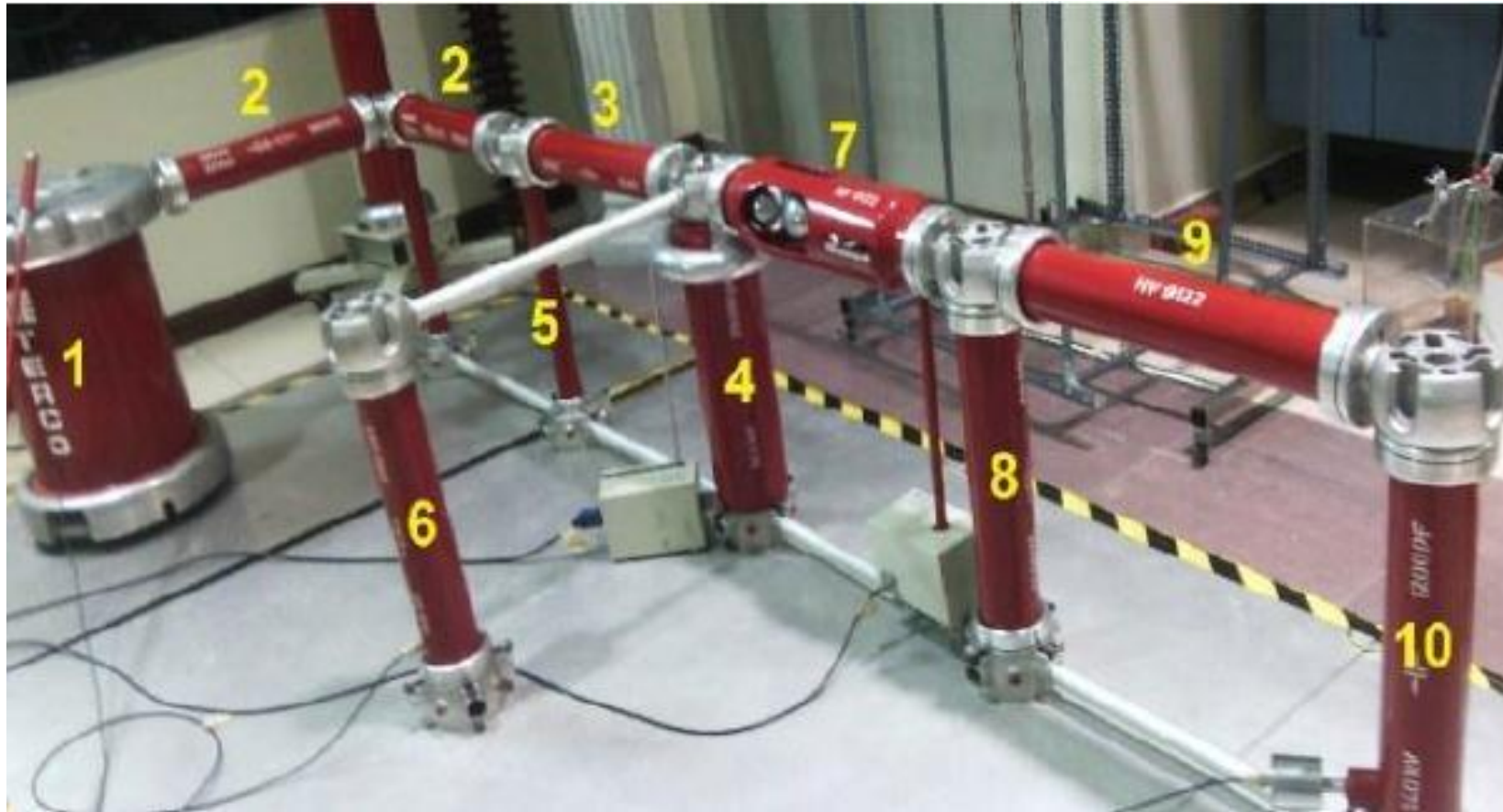
Κύκλωμα b



Μονοβάθμιες γεννήτριες κρουστικών τάσεων (2)

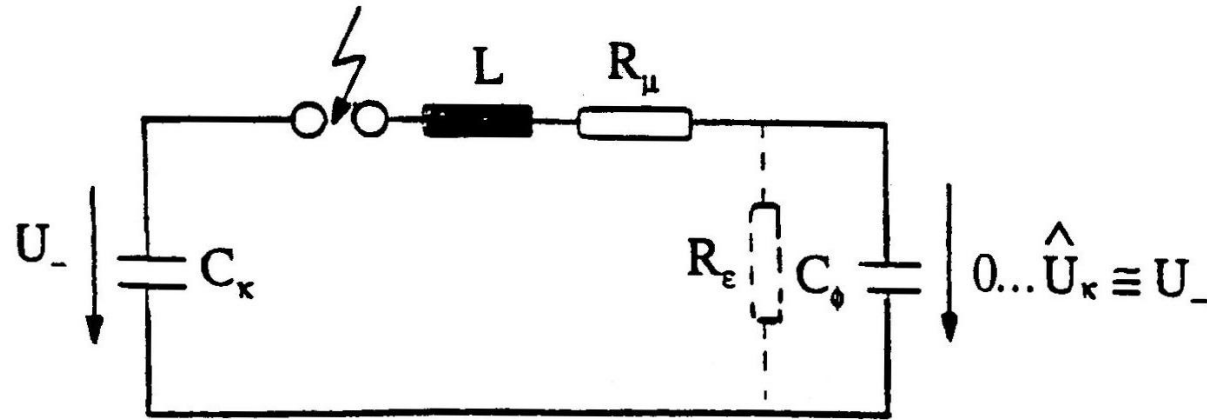


Μονοβάθμιες γεννήτριες κρουστικών τάσεων (3)

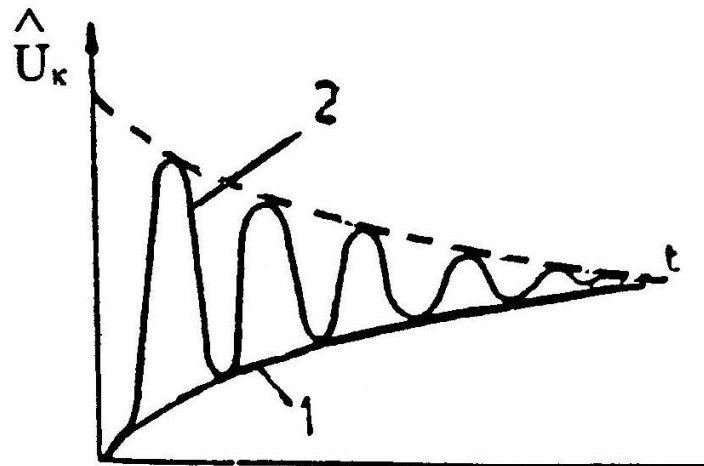


- (1) Μ/Σ δοκιμής, (2) Ανορθωτής, (3) Αντίσταση φόρτισης, (4) Πυκνωτής κρούσης, (5) Αγωγός, (6) Αντίσταση μέτρησης, (7) Σπινθηριστής, (8) Αντίσταση ουράς, (9) Αντίσταση μετώπου, (10) Πυκνωτής φορτίου

Ισοδύναμο κύκλωμα (1)



Ισοδύναμο κύκλωμα
για τη μελέτη
διαμόρφωσης του
μετώπου κρουστικής
τάσης



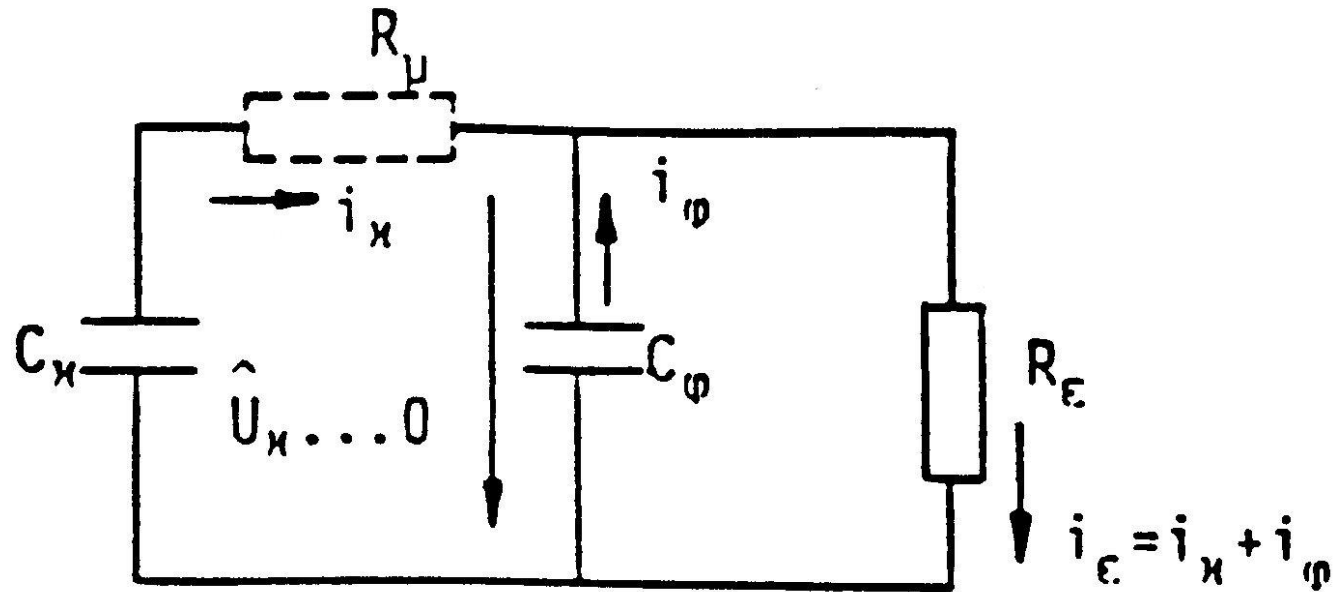
Μέτωπο κρουστικής τάσης

1: εκθετική μεταβολή

2: αποσβεννυμένη ταλάντωση

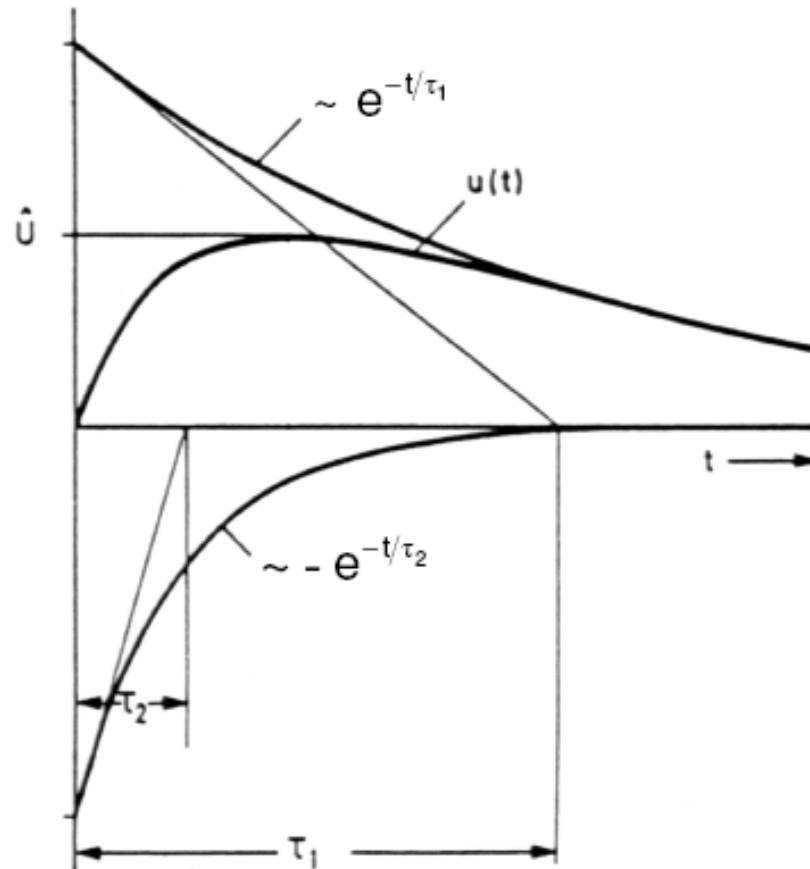
Ισοδύναμο κύκλωμα (2)

Ισοδύναμο κύκλωμα για τη μελέτη διαμόρφωσης της ουράς κρουστικής τάσης



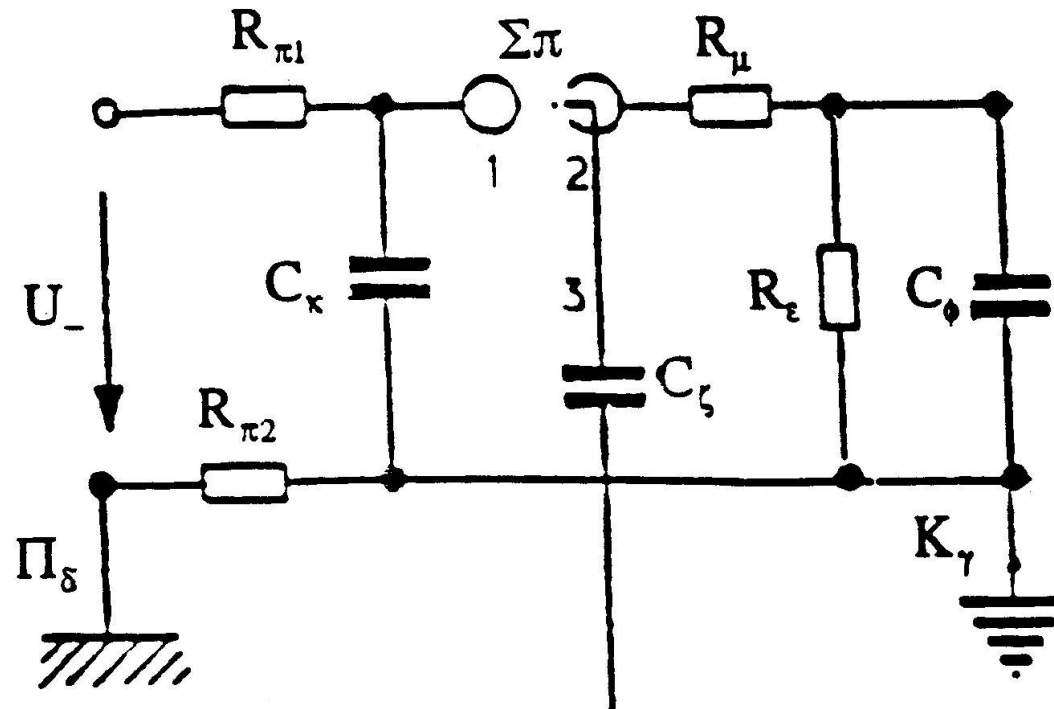
Κυματομορφή κρουστικής τάσης

Κυματομορφή κρουστικής τάσης ως διαφορά δύο φθινουσών εκθετικών συναρτήσεων



Μονοβάθμια γεννήτρια κρουστικών τάσεων με σπινθηριστή έναυσης (1)

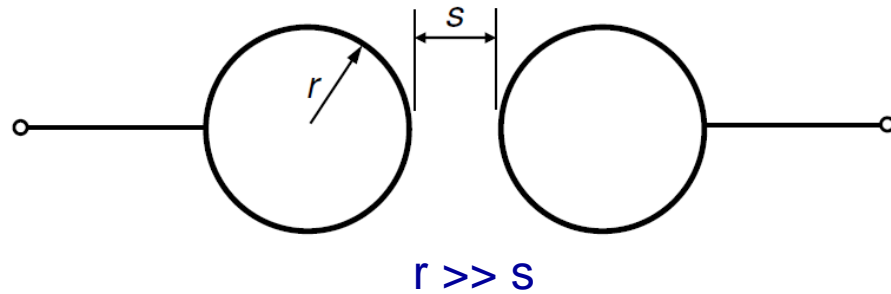
ΜΕ πυκνωτή ζεύξεως



- 1: σφαίρα υψηλής τάσης
- 2: σφαίρα χαμηλής τάσης (αρχικά γειωμένη)
- 3: βοηθητικό ηλεκτρόδιο

- Σπ: σπινθηριστής έναυσης
- C_{ζ} : πυκνωτής ζεύξης
- Π_{δ} : προσγείωση δικτύου
- K_{γ} : κρουστική γη

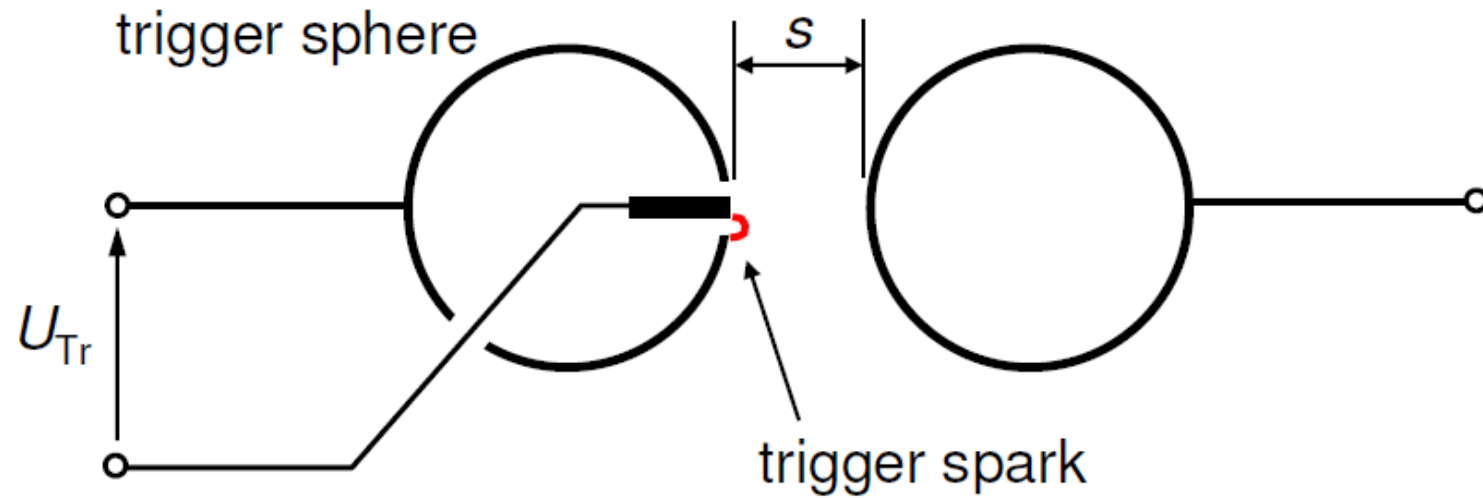
Σπινθηριστής



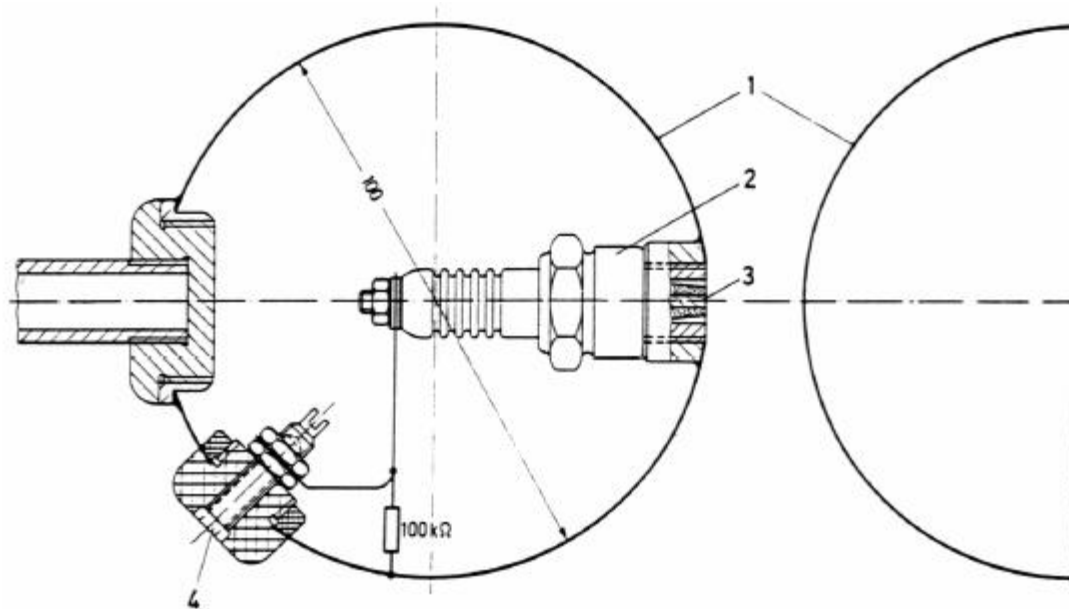
Η τάση υπερπήδησης εξαρτάται από:

- την ατμοσφαιρική πίεση
- τη θερμοκρασία
- απόλυτη υγρασία

Σπινθηριστή με σύστημα έναυσης



Συσκευή trigatron (1)



Συσκευή trigatron με μονωμένο βοηθητικό ηλεκτρόδιο έναυσης

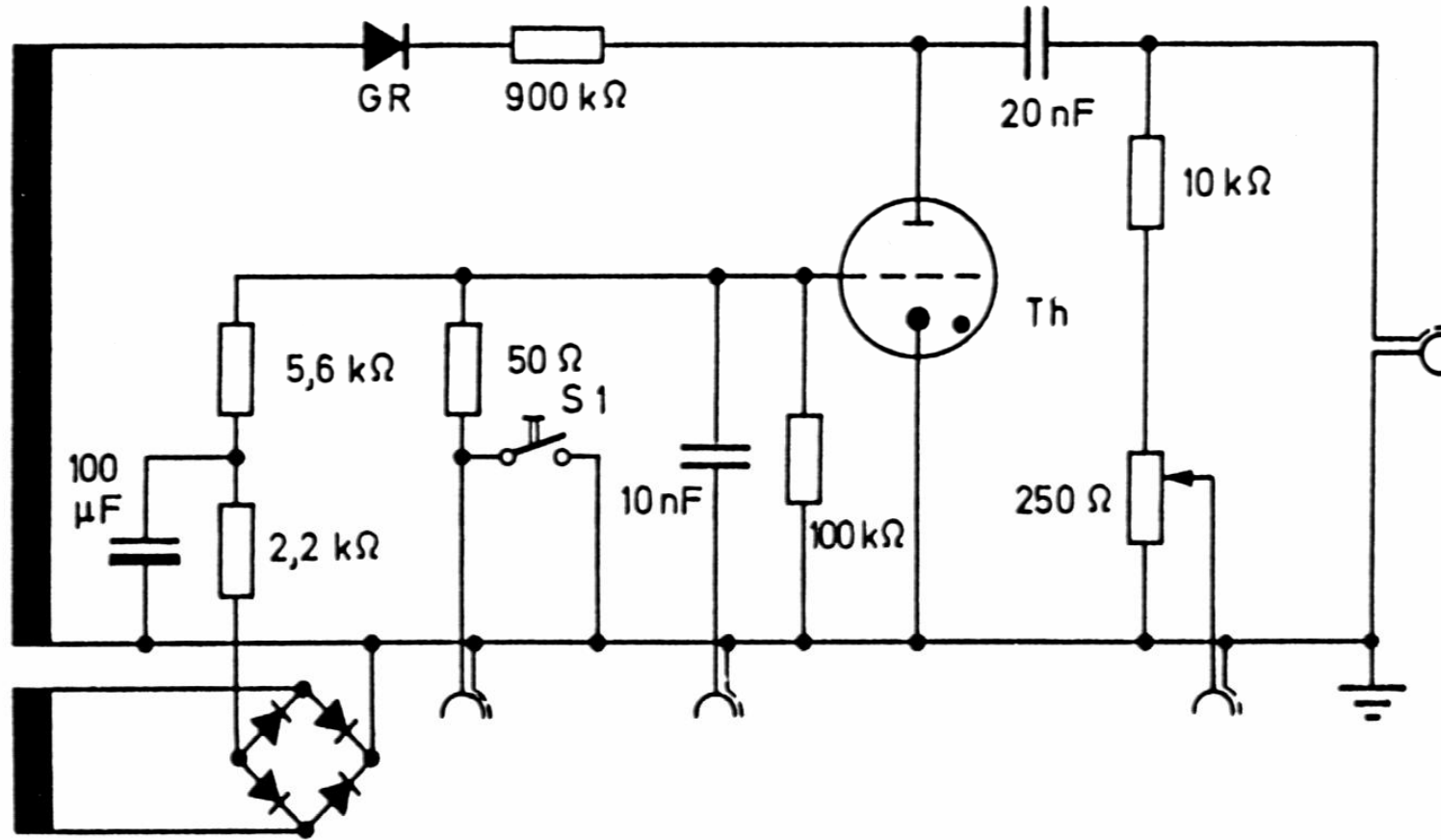
1: διάκενο σπινθηριστή

2: μονωτήρας διέλευσης

3: μονωμένο βοηθητικό ηλεκτρόδιο έναυσης

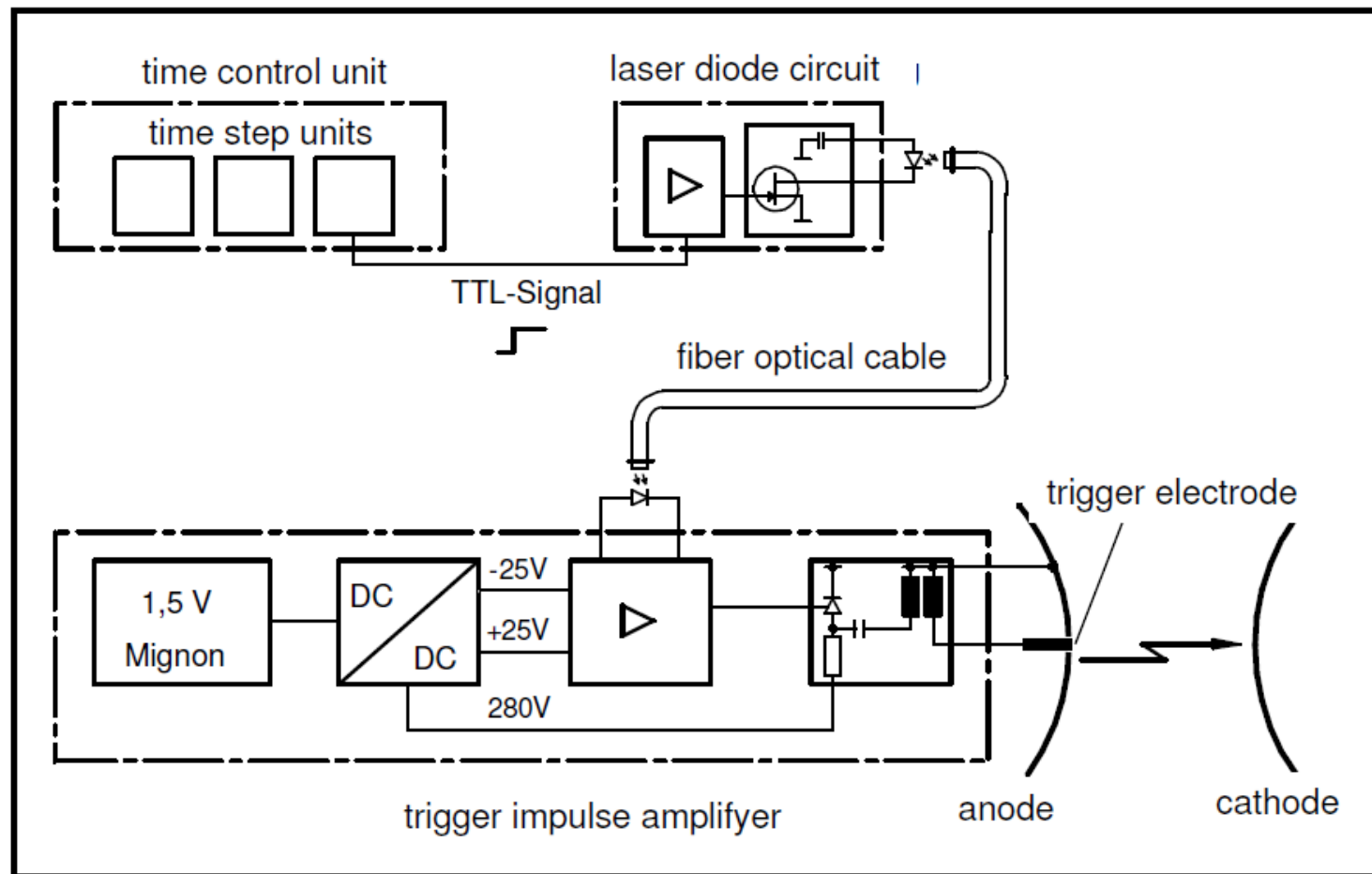
4: είσοδος παλμού έναυσης

Συσκευή trigatron (2)



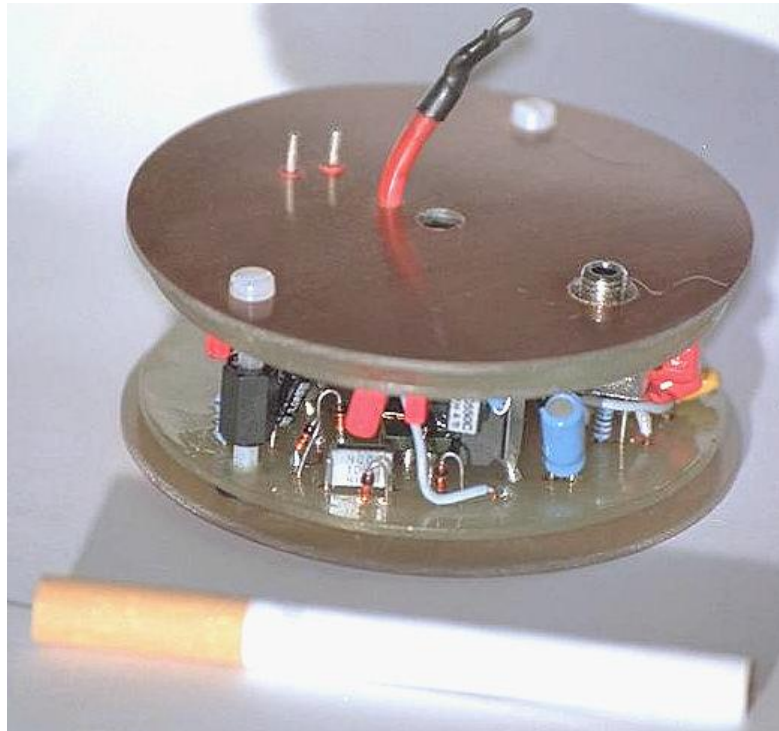
Κύκλωμα έναυσης

Σπινθηριστής με ηλεκτρονικό κύκλωμα έναυσης



Ηλεκτρονικό κύκλωμα έναυσης

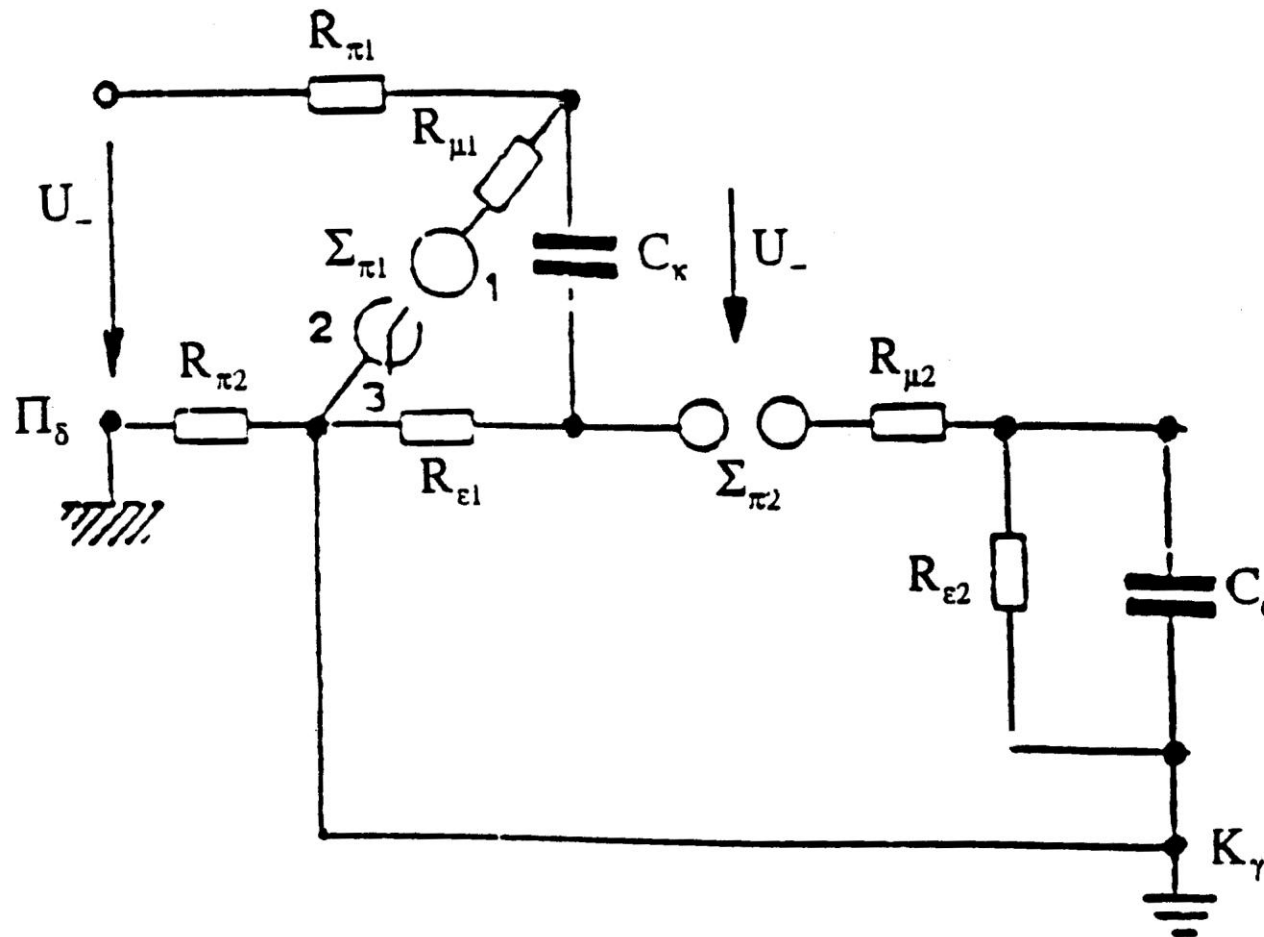
Σπινθηριστής με ηλεκτρονικό κύκλωμα έναυσης



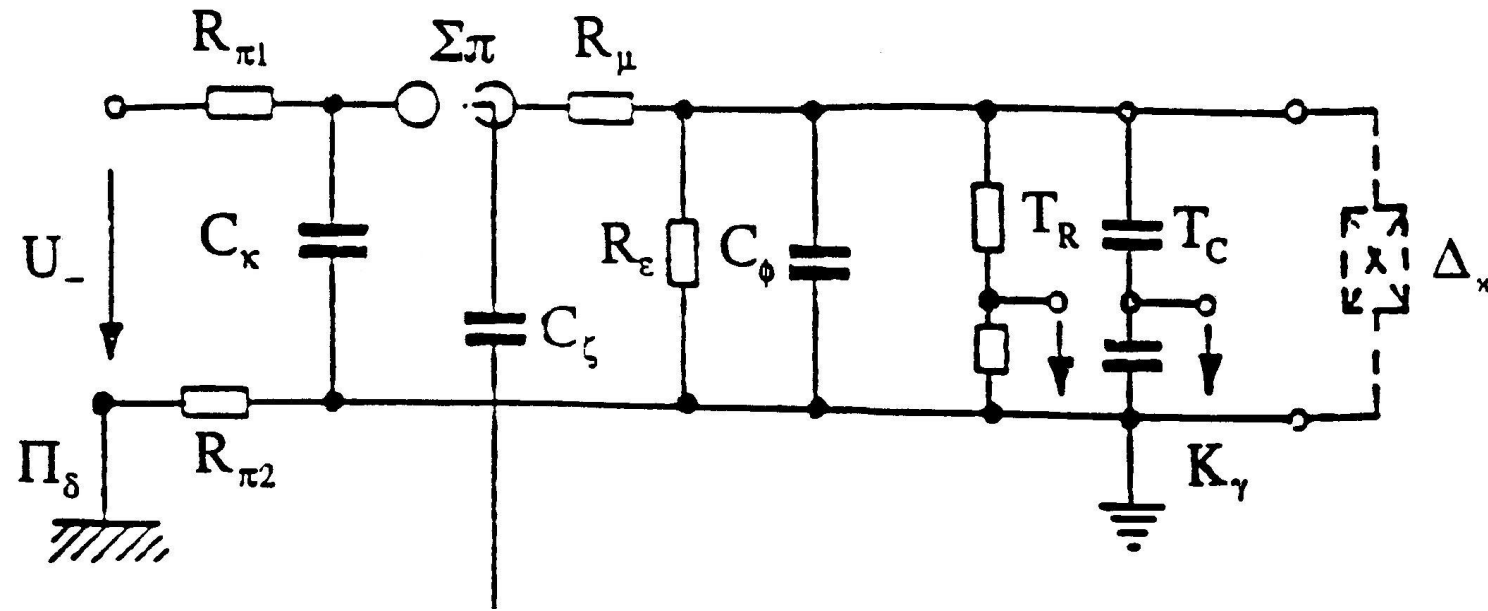
Ηλεκτρονικό κύκλωμα έναυσης

Μονοβάθμια γεννήτρια κρουστικών τάσεων με σπινθηριστή έναυσης (2)

ΧΩΡΙΣ πυκνωτή ζεύξεως



Μονοβάθμια γεννήτρια κρουστικών τάσεων με καταμεριστές

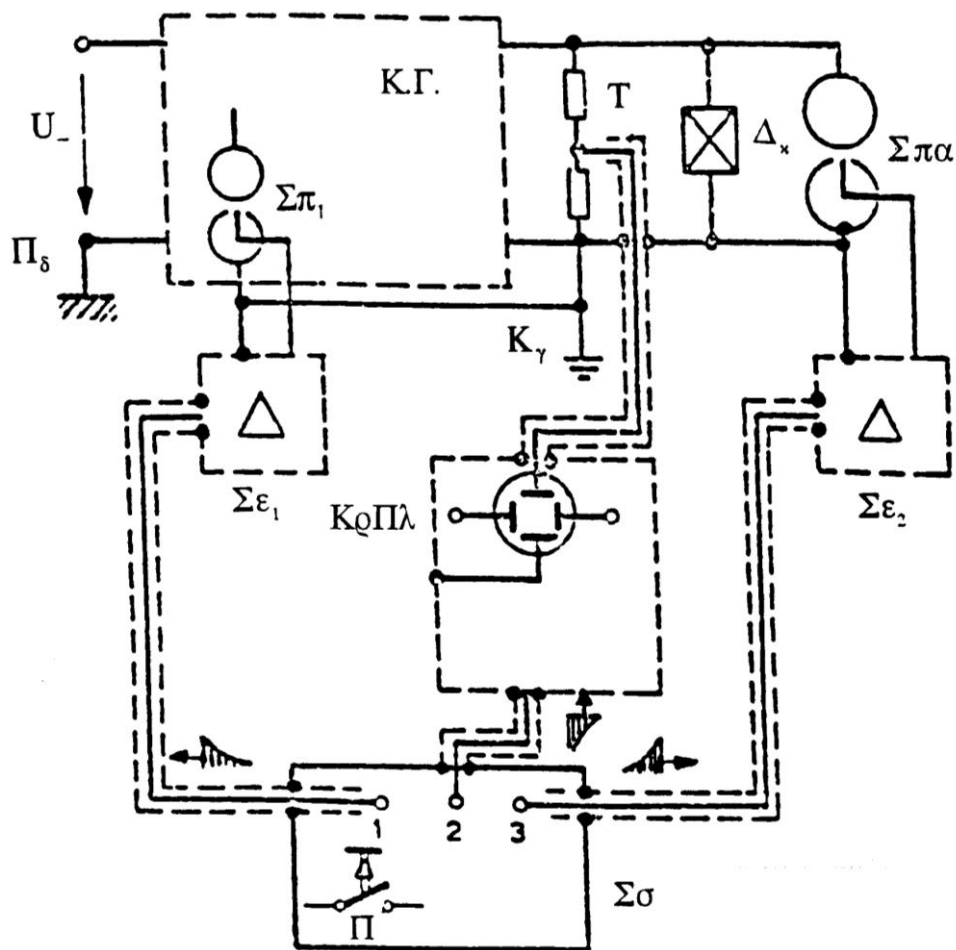


T_R : Ωμικός καταμεριστής

T_C : Χωρητικός καταμεριστής

Δ_k : Δοκίμιο

Διάταξη συγχρονισμού



Κ.Γ.: Γεννήτρια κρουστικών τάσεων

Τ: Καταμεριστής τάσης

Δκ: Δοκίμιο

Σπ₁: Σπινθηριστής έναυσης

Σπ_α: Σπινθηριστής αποκοπής

ΚρΠλ: Παλμογράφος κρουστικών τάσεων

Σε: Συσσκευή έναυσης

Σσ: Συσσκευή συγχρονισμού τριών σημάτων

1: προς γεννήτρια κρουστικών τάσεων

2: προς παλμογράφο κρουστικών τάσεων

3: προς διάταξη αποκοπής της κρουστικής τάσης

Π: Πλήκτρο

Χαρακτηριστικά μεγέθη κρουστικής γεννήτριας τάσης

- Η κυματομορφή της κρουστικής τάσης εκφράζεται ως:

$$u_{\kappa}(t) = U_o \cdot (e^{-at} - e^{-\beta t})$$

- Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης \hat{U}_{κ}

- Χρόνος μεγίστου t_m

- Συντελεστής χρησιμοποίησης η

- Χρόνος μετώπου T_{μ}

- Χρόνος ημίσεος εύρους T_{η}

- Ανοχές για την κυματομορφή 1,2/50μs ($T_{\mu} = 1,2\mu\text{s}$, $T_{\eta} = 50\mu\text{s}$)

$$\hat{U}_{\kappa} \pm 3\%$$

$$T_{\mu} \pm 30\%$$

$$T_{\eta} \pm 20\%$$

Χαρακτηριστικά μεγέθη κρουστικής γεννήτριας τάσης (αναλυτικοί τύποι)

- Αναλυτική μορφή της κρουστικής τάσης

$$u_{\kappa}(t) = U_{-} \cdot \frac{R_{\varepsilon} \cdot C_{\kappa}}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \left(e^{\frac{t}{\tau_1}} - e^{\frac{t}{\tau_2}} \right)$$

- Χρόνος μεγίστου

$$t_m = \frac{\ln\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}}$$

- Μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης

$$\hat{U}_{\kappa} = U_{-} \cdot \frac{R_{\varepsilon} \cdot C_{\kappa}}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}} \cdot \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)$$

- Συντελεστής χρησιμοποίησης

$$\eta = \frac{\hat{U}_{\kappa}}{U_{-}} = \frac{R_{\varepsilon} \cdot C_{\kappa}}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}} \cdot \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)$$

$$\tau_2, \tau_1 = \frac{2 \cdot C_{\kappa} \cdot C_{\phi} \cdot R_{\varepsilon} \cdot R_{\mu}}{R_{\varepsilon} \cdot (C_{\kappa} + C_{\phi}) + R_{\mu} \cdot C_{\kappa} \pm \sqrt{[R_{\varepsilon} \cdot (C_{\kappa} + C_{\phi}) + R_{\mu} \cdot C_{\kappa}]^2 - 4 \cdot C_{\kappa} \cdot C_{\phi} \cdot R_{\varepsilon} \cdot R_{\mu}}}$$

$$\tau_2, \tau_1 = \frac{2 \cdot C_{\kappa} \cdot C_{\phi} \cdot R_{\varepsilon} \cdot R_{\mu}}{R_{\varepsilon} \cdot (C_{\kappa} + C_{\phi}) + R_{\mu} \cdot C_{\phi} \pm \sqrt{[R_{\varepsilon} \cdot (C_{\kappa} + C_{\phi}) + R_{\mu} \cdot C_{\phi}]^2 - 4 \cdot C_{\kappa} \cdot C_{\phi} \cdot R_{\varepsilon} \cdot R_{\mu}}}$$

Χαρακτηριστικά μεγέθη κρουστικής γεννήτριας τάσης (αναλυτικοί τύποι)

- Μικρής διάρκειας κρουστικές τάσης

$$t_{30\%}, t_{90\%} < t_m$$

$$t_{50\%} > t_m$$

Χρόνος μετώπου: $T_\mu = (t_{90\%} - t_{30\%}) \cdot 10/6 = (t_{90\%} - t_{30\%}) \cdot 1,67$

Ονομαστική αρχή των χρόνων: $t_{o1} = t_{30\%} - (t_{90\%} - t_{30\%})/2$

Χρόνος ημίσεος εύρους: $T_\eta = t_{50\%} - t_{o1}$

- Μεγάλης διάρκειας κρουστικές τάσης

$$t_{90\%1} < t_m$$

$$t_{90\%2}, t_{50\%} > t_m$$

Χρόνος ημίσεος εύρους: $T_\eta = t_{50\%}$

Χρονική διάρκεια: $T_d = t_{90\%2} - t_{90\%1}$

Χαρακτηριστικά μεγέθη κρουστικής γεννήτριας τάσης (προσεγγιστικοί τύποι)

$$R_\varepsilon \gg R_\mu$$

$$C_\kappa \gg C_\phi$$

$$R_\varepsilon \cdot C_\kappa \gg R_\mu \cdot C_\phi \quad \tau_1 \gg \tau_2$$

$$T_\eta = \frac{1}{\alpha} \cdot \tau_1$$

$$T_\mu = \frac{2}{b} \cdot \tau_2$$

T_μ/T_η	1,2/5 μs	1,2/50 μs	1,2/200 μs
Συν/τές			
1/α	1,435	0,733	0,704
2/β	1500	2,963	3,150

a

$$\tau_1 \cong (R_\varepsilon + R_\mu) \cdot (C_\kappa + C_\phi)$$

$$\tau_2 \cong \frac{R_\varepsilon \cdot R_\mu}{R_\varepsilon + R_\mu} \cdot \frac{C_\kappa \cdot C_\phi}{C_\kappa + C_\phi}$$

$$\eta \cong \frac{R_\varepsilon}{R_\varepsilon + R_\mu} \cdot \frac{C_\kappa}{C_\kappa + C_\phi}$$

b

$$\tau_1 \cong R_\varepsilon \cdot (C_\kappa + C_\phi)$$

$$\tau_2 \cong R_\mu \cdot \frac{C_\kappa \cdot C_\phi}{C_\kappa + C_\phi}$$

$$\eta \cong \frac{C_\kappa}{C_\kappa + C_\phi}$$

Χαρακτηριστικά μεγέθη κρουστικής γεννήτριας τάσης (προσεγγιστικοί τύποι)

$$t_m = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \ln\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)$$

$$R_\varepsilon = 1410 \cdot \eta \cdot \frac{T_\eta}{C_\kappa}$$

$$T_\eta = \tau_1 \cdot \ln \frac{2}{\eta}$$

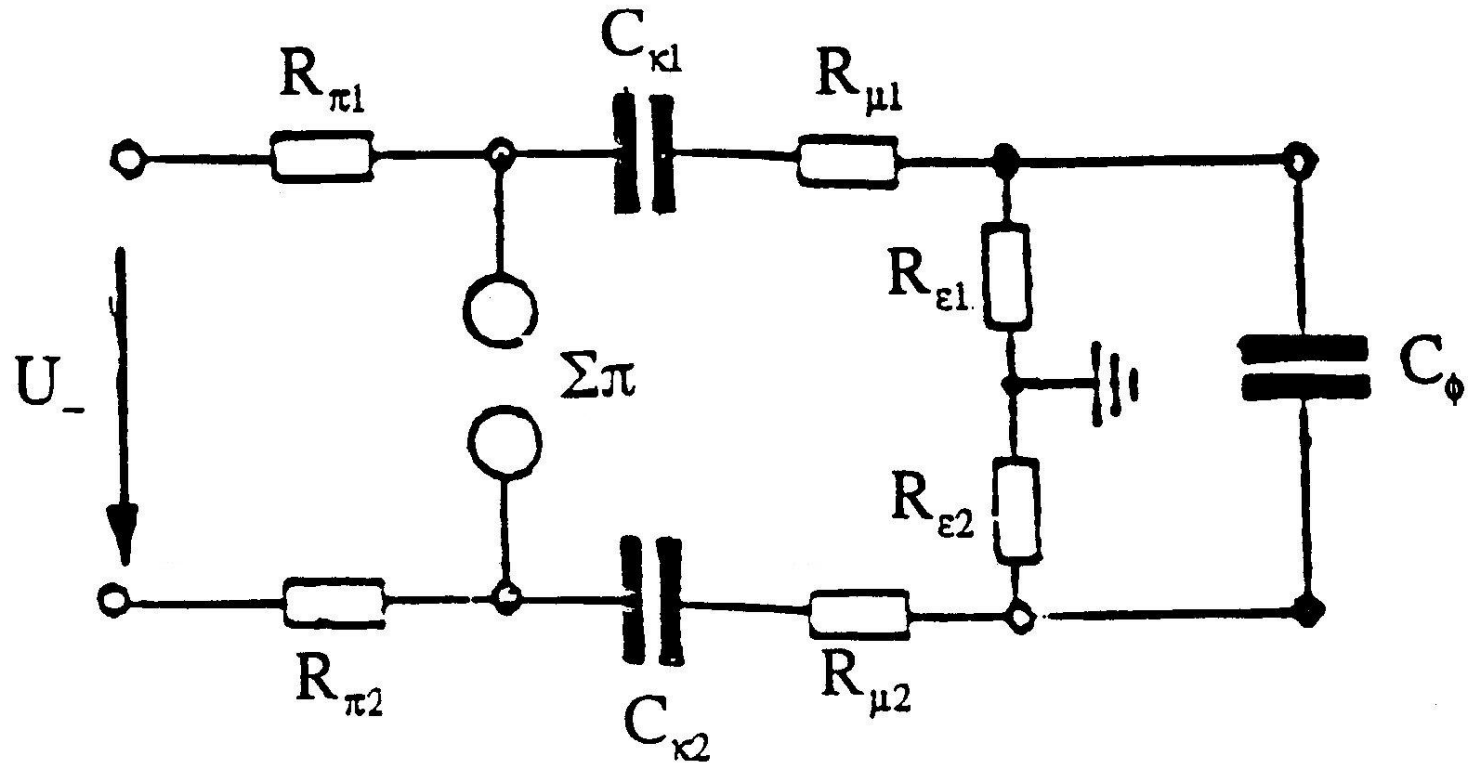
$$R_\mu = \frac{333}{\eta} \cdot \frac{T_\mu}{C_\phi}$$

C_ϕ / C_κ Συν/τέζ	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20
α	0,850	0,820	0,810	0,800	0,770
β	0,932	0,899	0,868	0,837	0,810

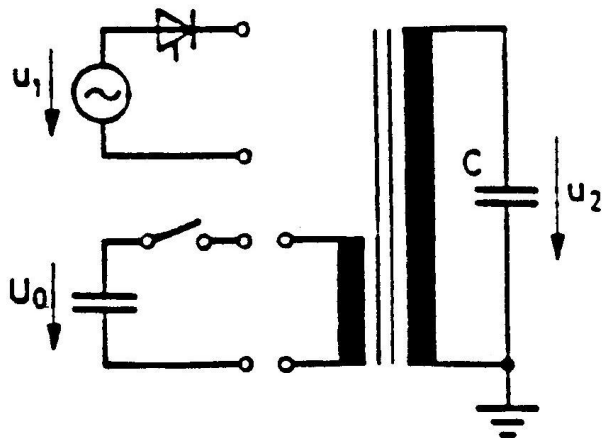
Χαρακτηριστικά μεγέθη κρουστικών γεννητριών

Συνολική τάση φόρτισης U_0 [kV]	Χωρητικότητα κρούσης C_k [nF]	Ενέργεια W [kWs]	W / U_0 [kWs/MV]
200	25	0,5	2,5
400	25	2,0	5
1000	25	12,5	12,5
2000	25	50	25
4000	25	200	50

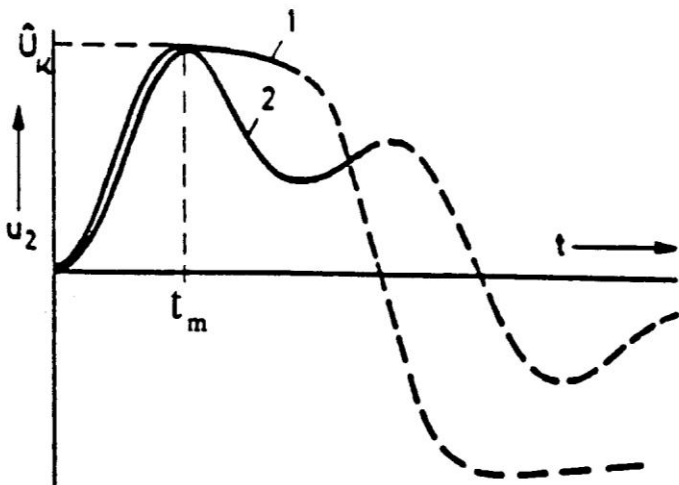
Μονοβάθμια γεννήτρια παραγωγής κρουστικών τάσεων συμμετρικών προς γη



Παραγωγή κρουστικών τάσεων ζεύξης με μετασχηματιστές δοκιμής



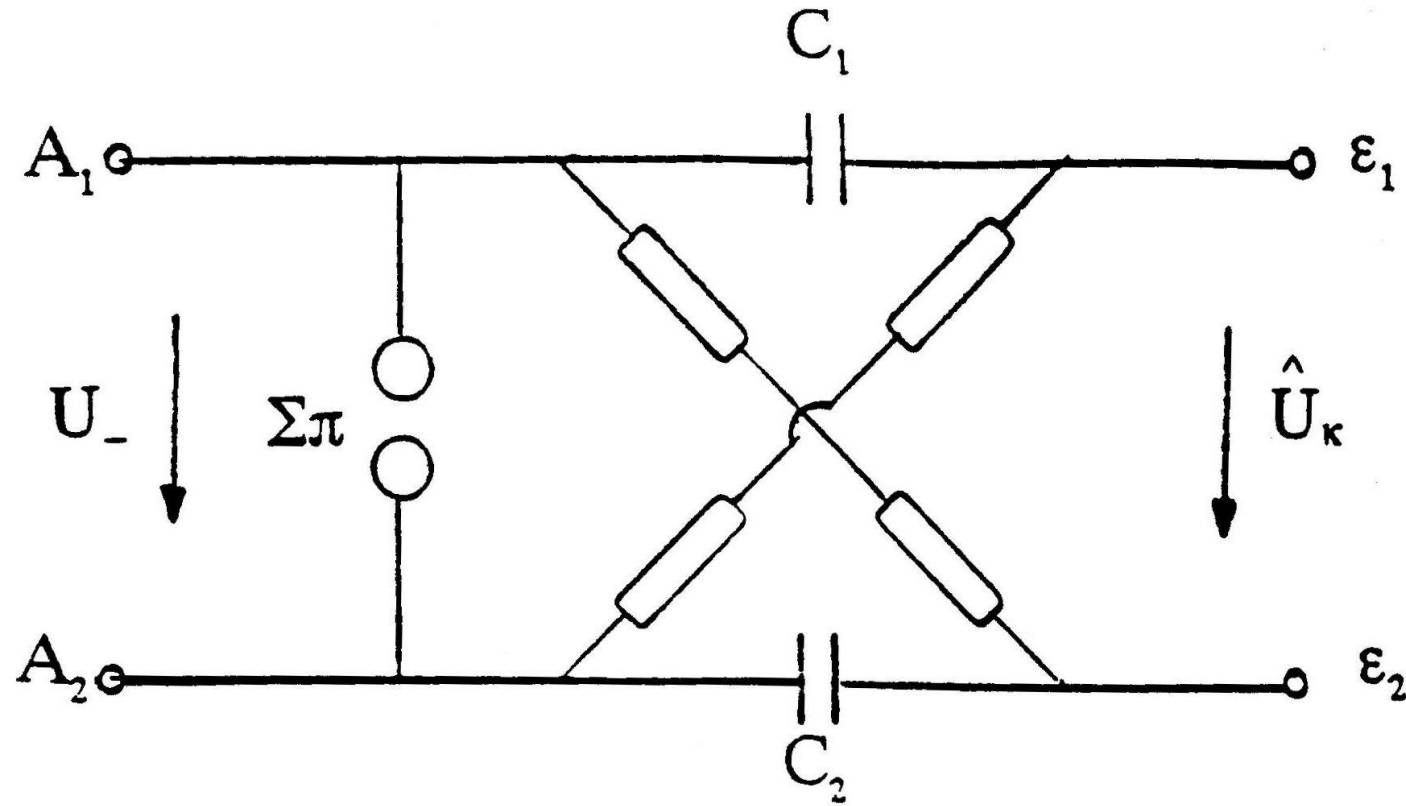
Κυκλωματικά διαγράμματα για διέγερση μέσω του δικτύου εναλλασσόμενης τάσης και μέσω φορτισμένου πυκνωτή



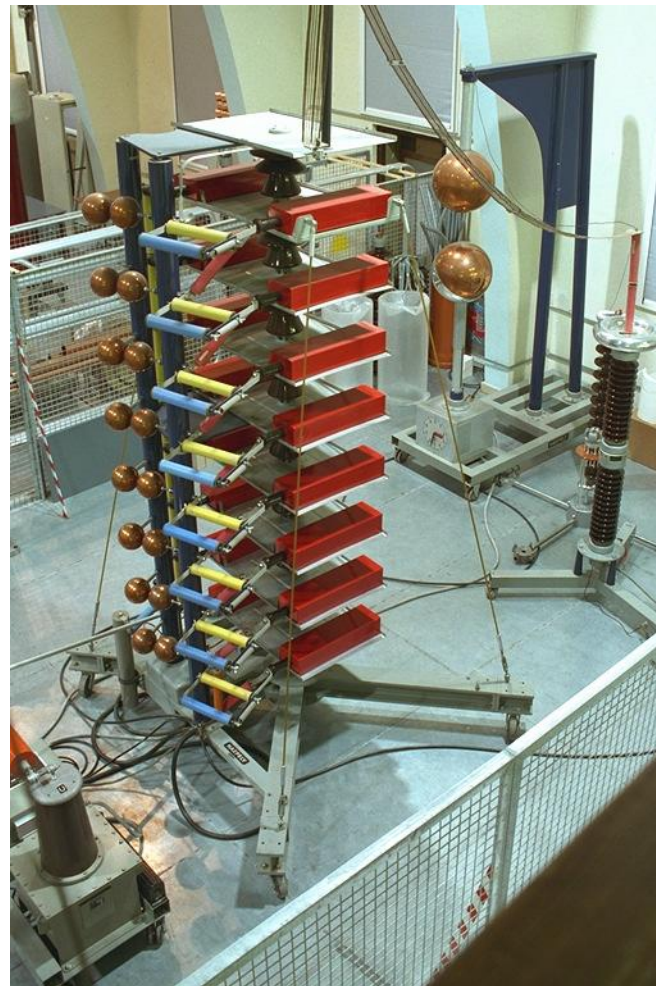
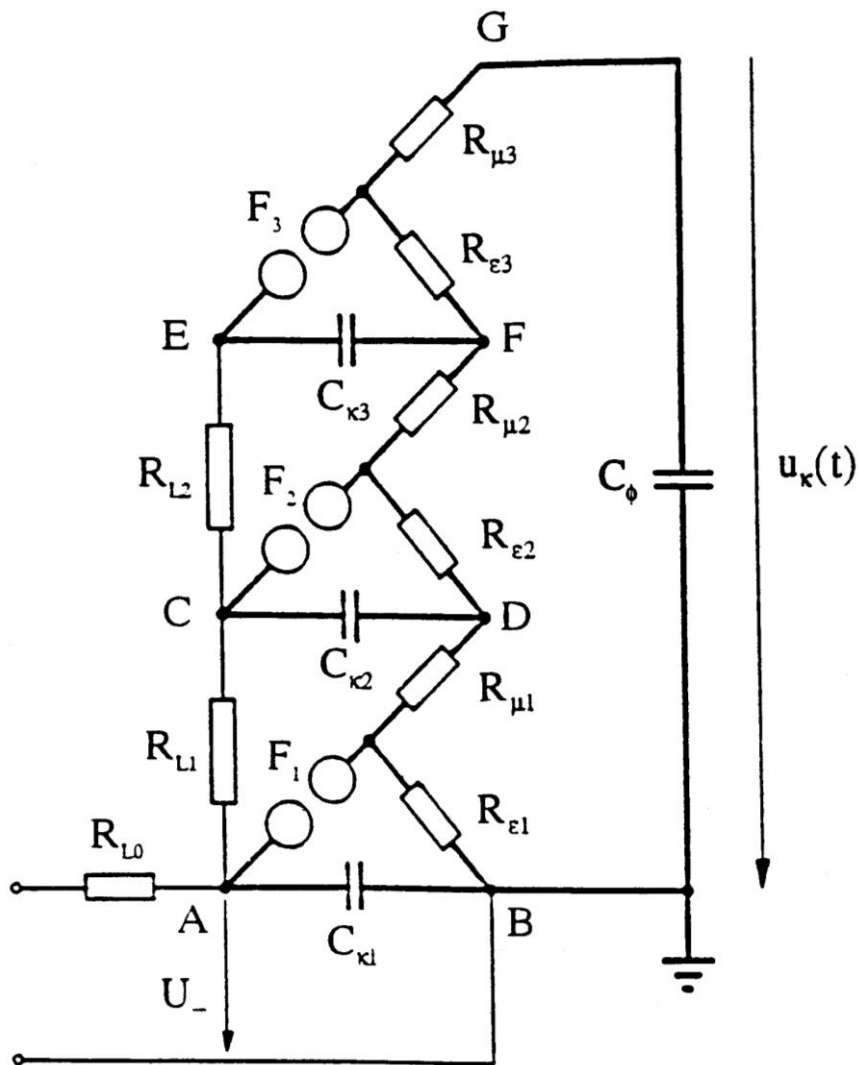
Κυματομορφές εξόδου αναλόγως του στοιχείου ζεύξης

- 1: θυρίστορ
- 2: διακόπτης

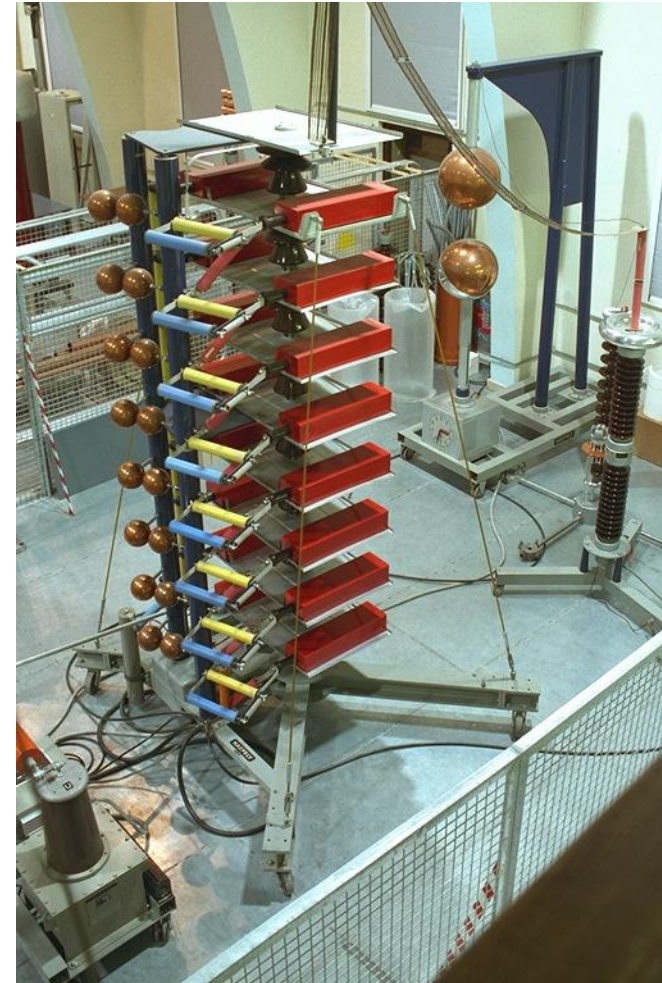
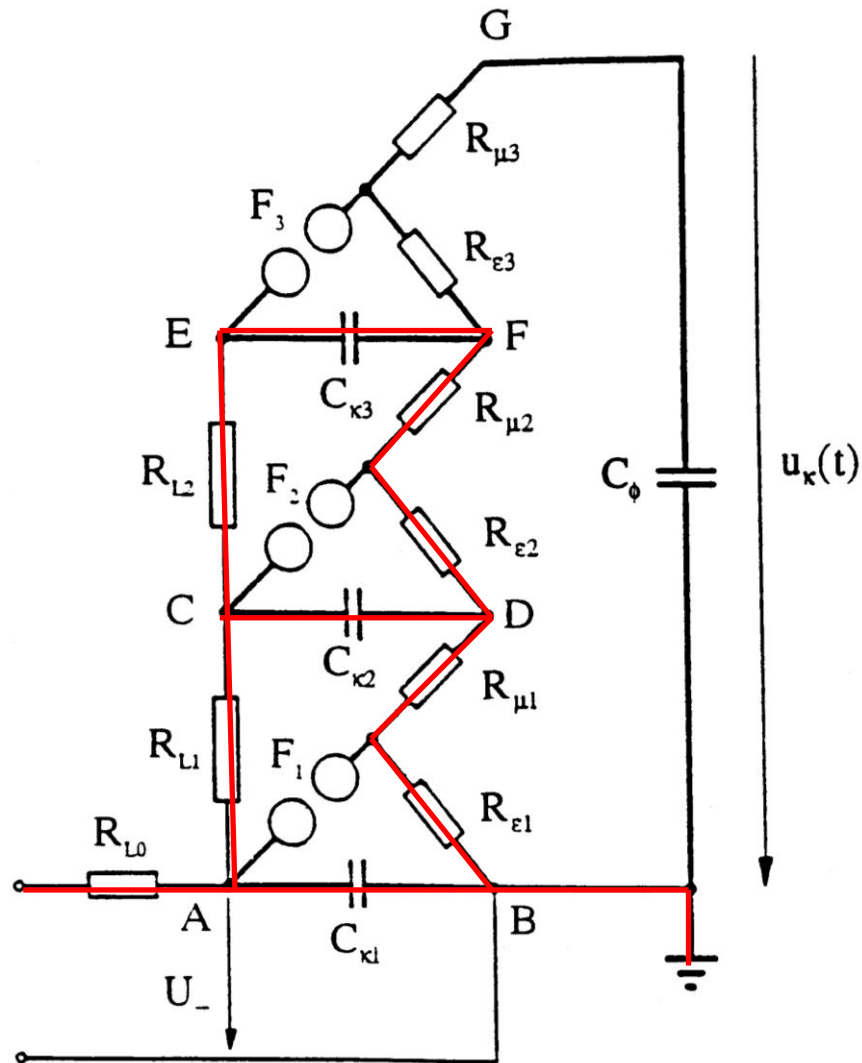
Αρχικό κύκλωμα Marx για διπλασιασμό της τάσης



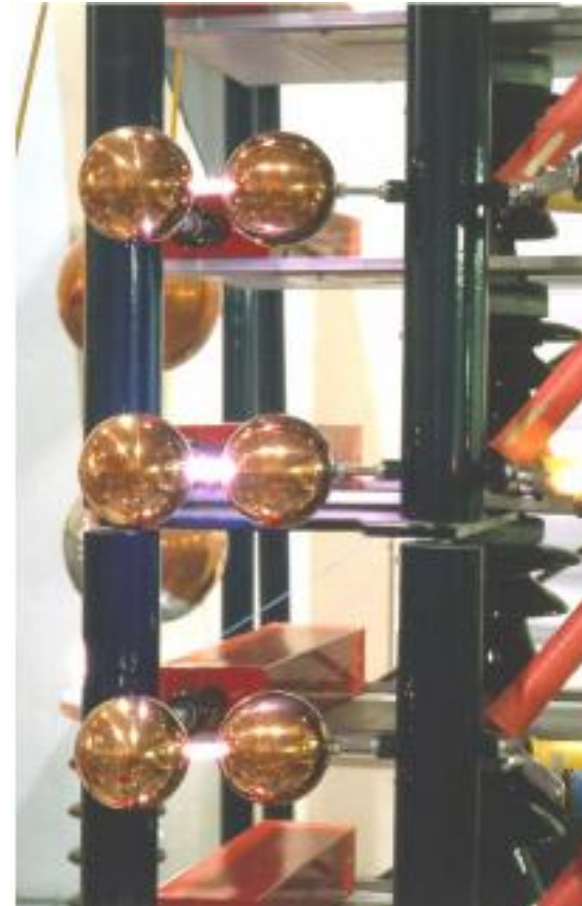
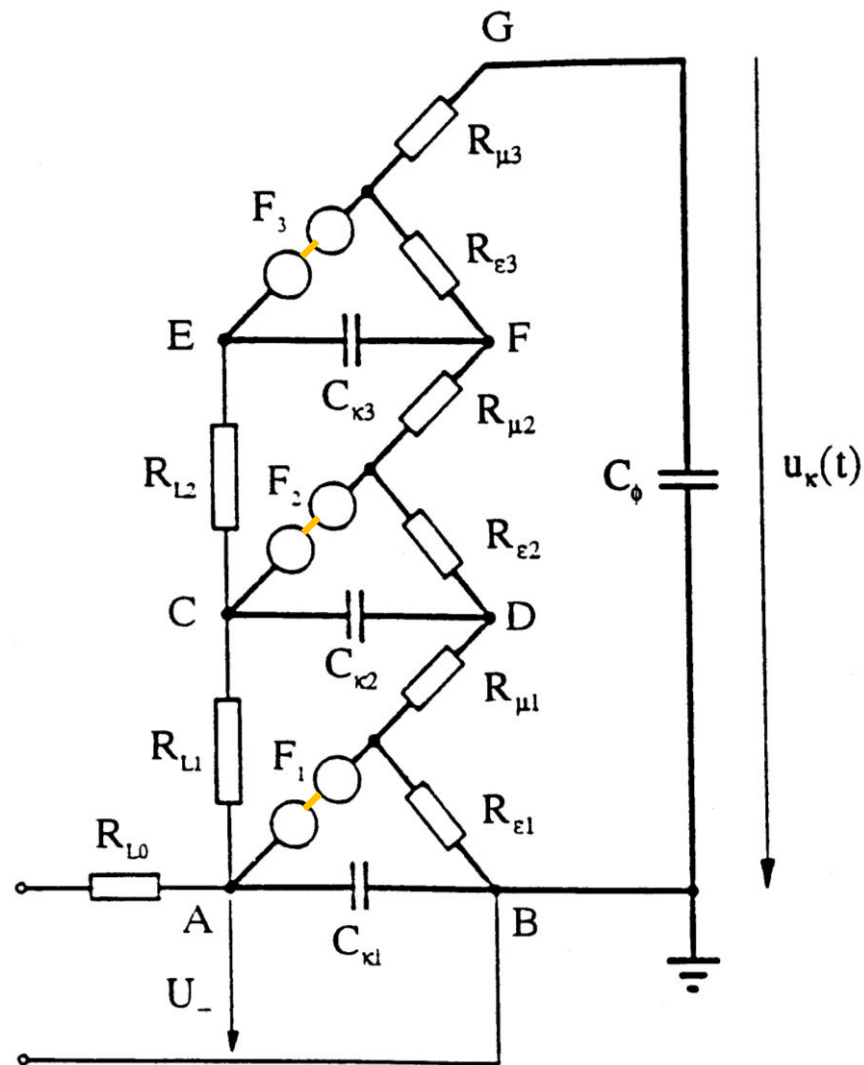
Τριβάθμια κρουστική γεννήτρια Marx (κύκλωμα b)



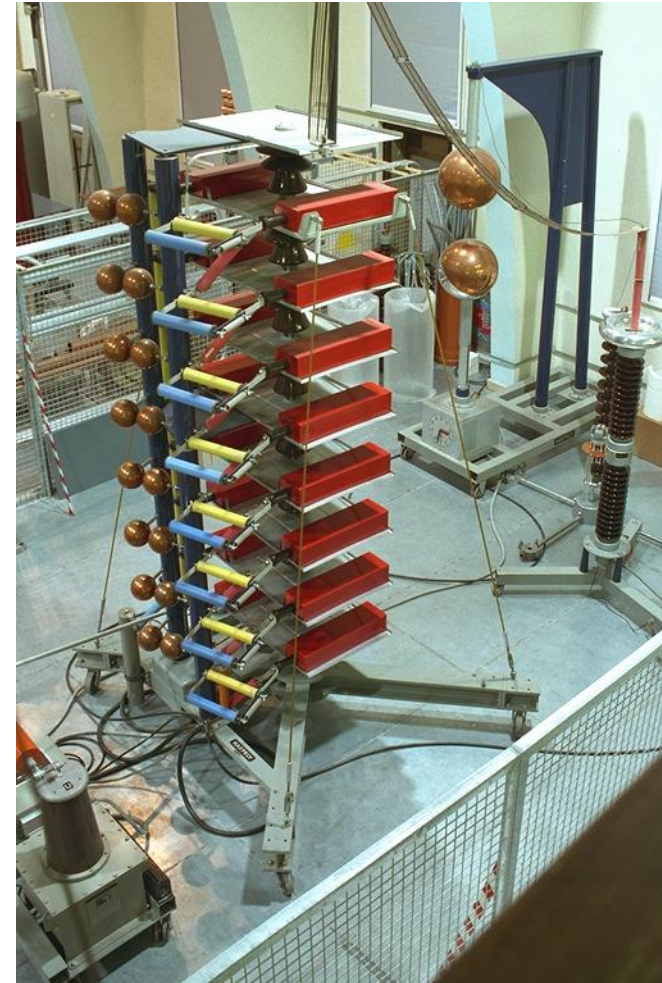
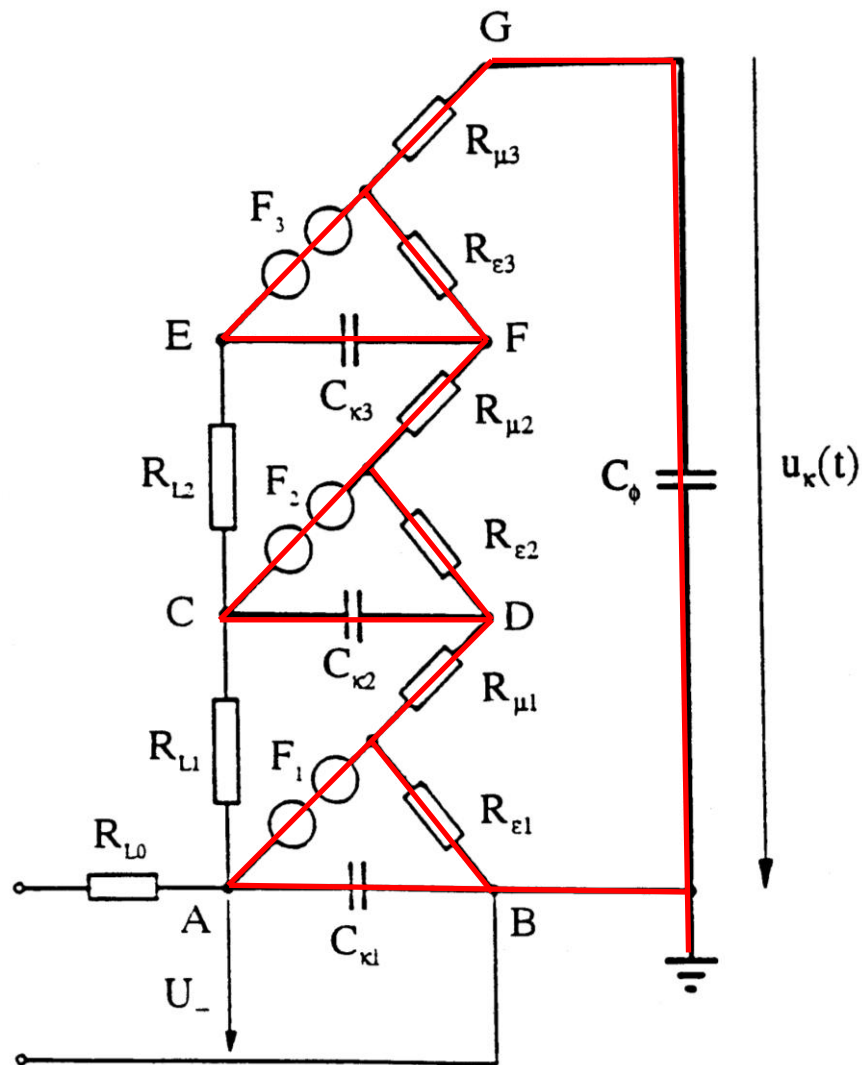
Τριβάθμια κρουστική γεννήτρια Marx (κύκλωμα b)



Τριβάθμια κρουστική γεννήτρια Marx (κύκλωμα b)



Τριβάθμια κρουστική γεννήτρια Marx (κύκλωμα b)



Χαρακτηριστικά μεγέθη πολυβάθμιας κρουστικής γεννήτριας τάσης

$$C_{\kappa 1} = C_{\kappa 2} = \dots = C_{\kappa n} \quad R_{\mu 1} = R_{\mu 2} = \dots = R_{\mu n} \quad R_{\varepsilon 1} = R_{\varepsilon 2} = \dots = R_{\varepsilon n}$$

$$C_{\kappa} = \frac{C_{\kappa i}}{n} \quad R_{\mu} = n \cdot R_{\mu i}$$

$$R_{\varepsilon} = n \cdot R_{\varepsilon i} \quad C_{\varphi} = C_{\varphi}$$

$$\eta = \frac{\hat{U}_{\kappa}}{n \cdot U_{-}}$$

$$W = n \cdot W_i = \frac{n}{2} \cdot C_{\kappa i} \cdot U_{-}^2 = \frac{1}{2} \cdot C_{\kappa} \cdot U_{o\lambda}^2 \quad (U_{o\lambda} = nU_{-})$$

Πολυβάθμιες κρουστικές γεννήτριες (1)



2,4 MV



4,8 MV



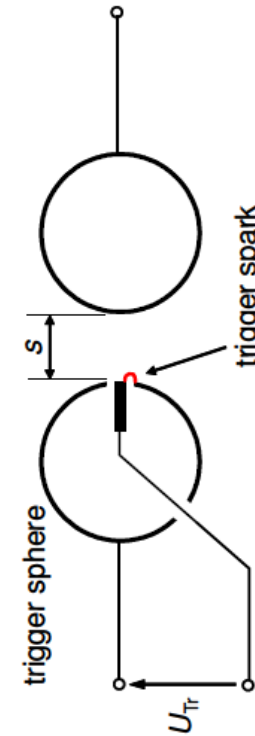
5 MV

Πολυβάθμιες κρουστικές γεννήτριες (2)



1,8 MV

Πολυβάθμιες κρουστικές γεννήτριες (3)



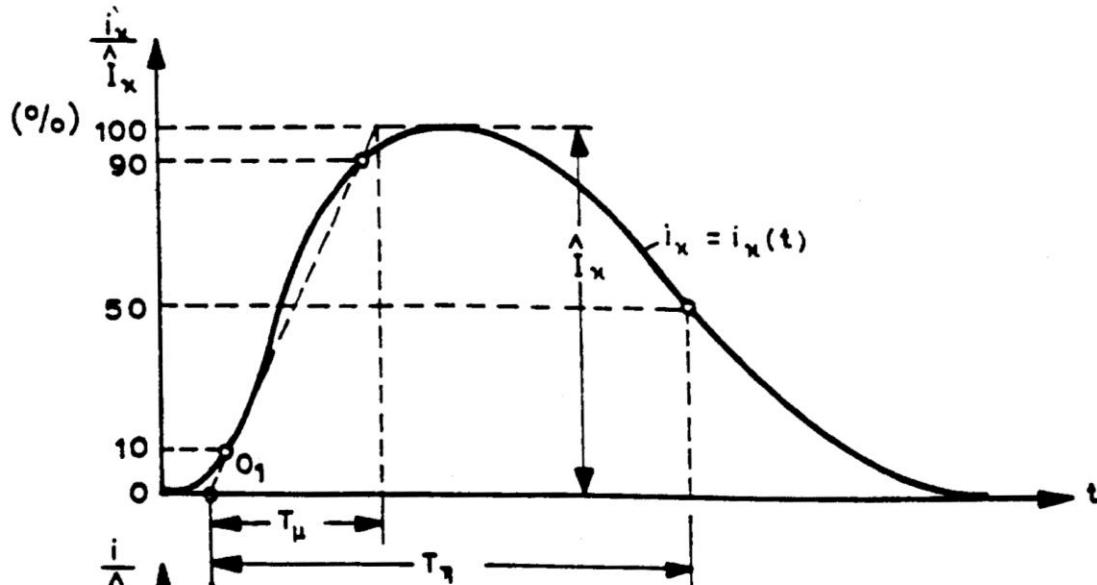
Σπινθηριστής μίας βαθμίδας για παραγωγή αποκεκομμένης κρουστικής τάσης

Πολυβάθμιες κρουστικές γεννήτριες (4)

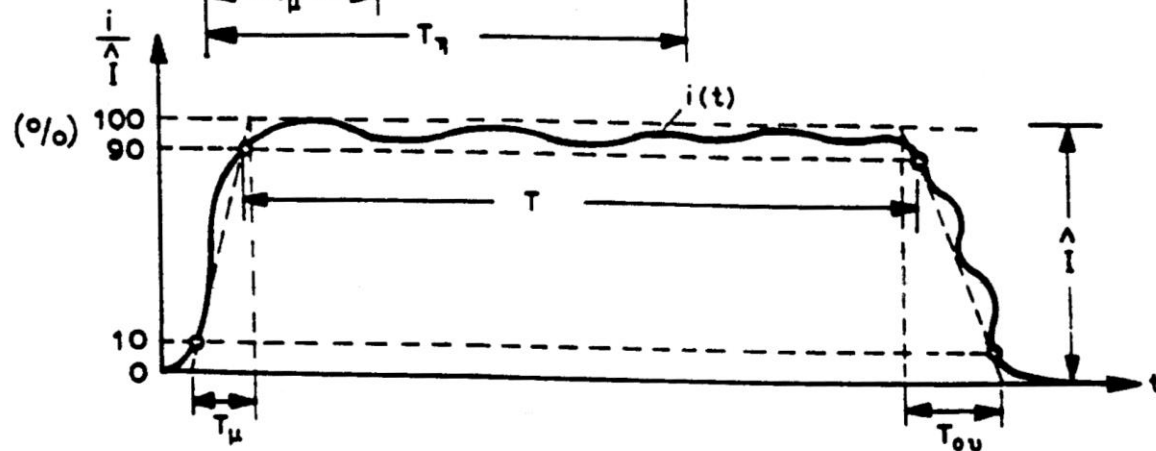


Πολυβάθμιος σπινθηριστής για παραγωγή αποκεκομμένης κρουστικής τάσης

Παλμογραφήματα κρουστικών ρευμάτων

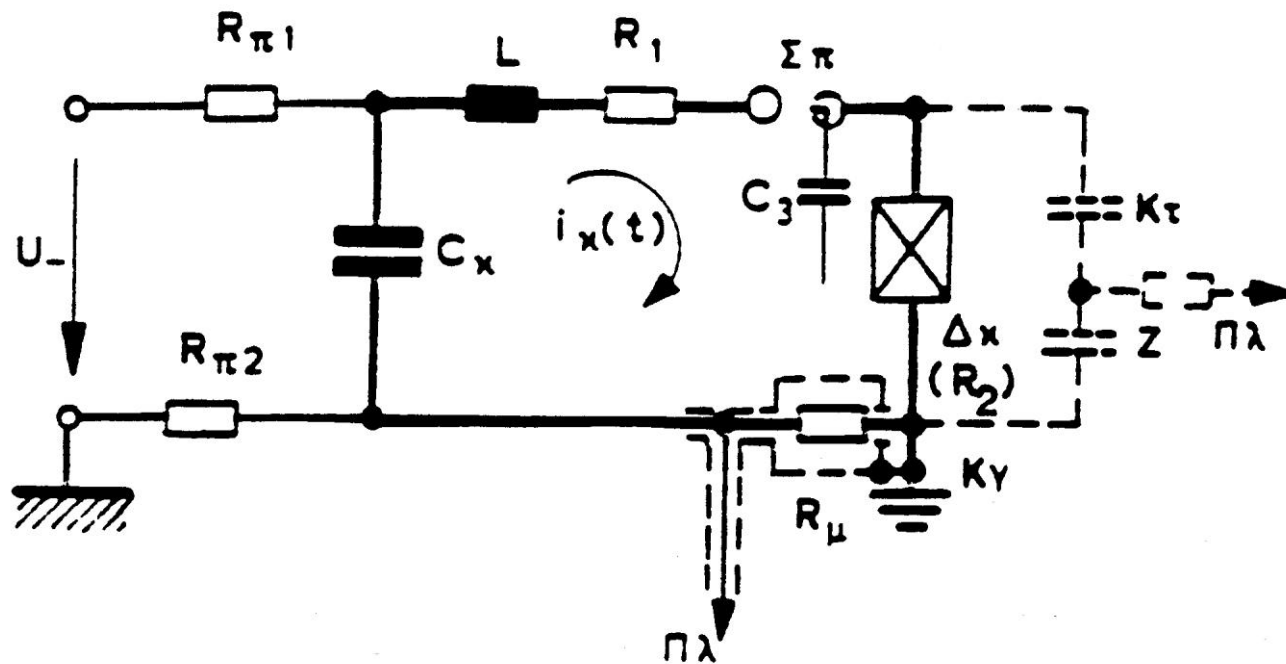


Εκθετικό
κρουστικό ρεύμα



Ορθογωνικό
κρουστικό ρεύμα

Γεννήτρια εκθετικών κρουστικών ρευμάτων



C_k : Χωρητικότητα κρούσης

L : Παράσιτη αυτεπαγωγή

R_1 : Αντίσταση απόσβεσης

$\Sigma\pi$: Σπινθηριστής ζεύξης

Δk : Δοκίμιο

$R_{\pi 1}, R_{\pi 2}$: Προστατευτικές αντιστάσεις

R_{μ} : Αντίσταση μέτρησης

K_t : Καταμεριστής τάσης

$\Pi\lambda$: Προς παλμογράφο

C_3 : Πυκνωτής ζεύξης

K_{γ} : Κρουστική γη

Γεννήτρια εκθετικών κρουστικών ρευμάτων

Η αντίσταση περιλαμβάνει:

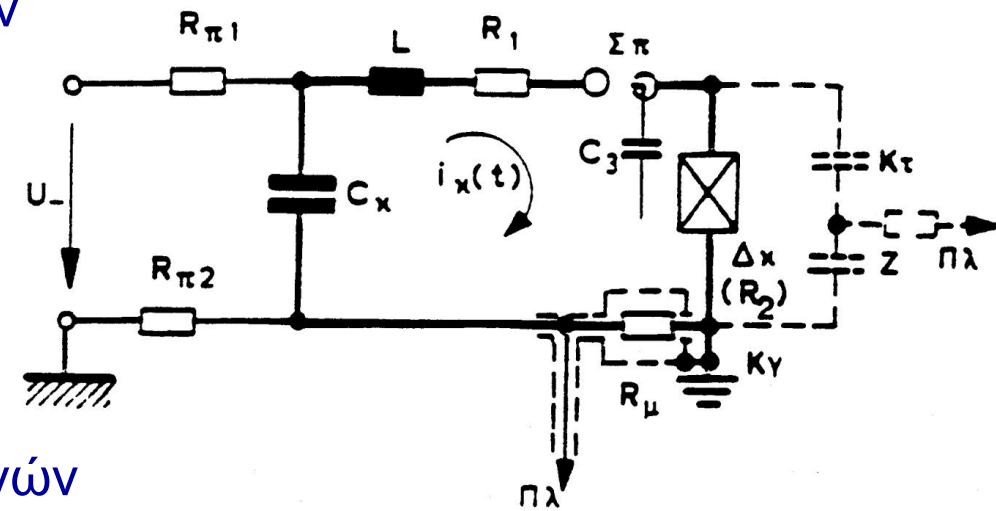
- την αντίσταση του δοκιμίου και των διαφόρων αγωγών
- την τυχόν υπάρχουσα αντίσταση μέτρησης
- την όποια πρόσθετη αντίσταση

$$R = R_1 + R_2 + R_\mu$$

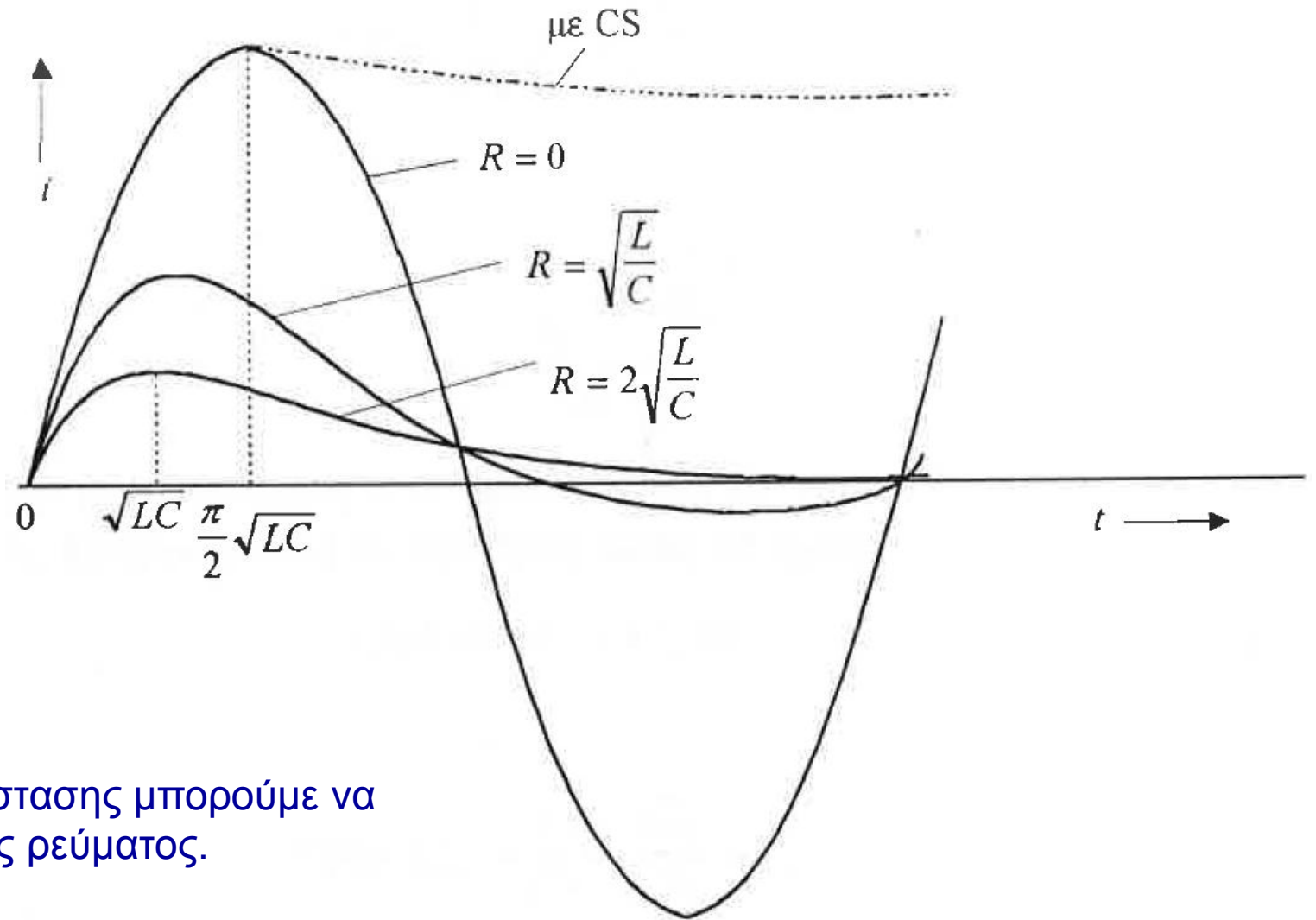
Η αυτεπαγωγή περιλαμβάνει:

- την αυτεπαγωγή του δοκιμίου και των διαφόρων αγωγών
- την αυτεπαγωγή των αγωγών του κυκλώματος
- την πρόσθετη αυτεπαγωγή

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$



Καμπύλες κρουστικού ρεύματος



Μεταβάλλοντας την τιμή της αντίστασης μπορούμε να πάρουμε διάφορες κυματομορφές ρεύματος.

Εξίσωση του κρουστικού ρεύματος

$$U_- = Ri_{\kappa}(t) + L \frac{di_{\kappa}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{\kappa}} \int i_{\kappa}(t) dt$$

Παραγωγίζοντας:

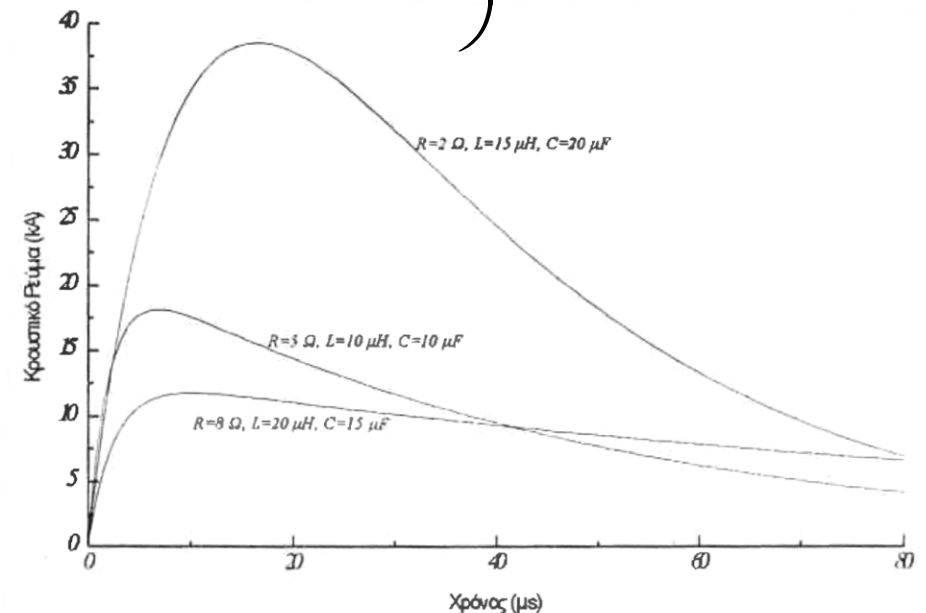
$$L \frac{d^2 i_{\kappa}(t)}{dt^2} + R \frac{di_{\kappa}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{\kappa}} i_{\kappa}(t) = 0$$

η οποία ανάλογα με την ποσότητα $R^2 - 4L \frac{1}{C}$ έχει διαφορετική λύση.

Εξίσωση του κρουστικού ρεύματος

Υπερκρίσιμη απόσβεση: $R^2 - 4L \frac{1}{C} > 0$

$$i_K(t) = \frac{U_-}{\sqrt{R^2 - 4 \frac{L}{C}}} \left(e^{\frac{-R + \sqrt{R^2 - 4 \frac{L}{C}}}{2L} t} - e^{\frac{-R - \sqrt{R^2 - 4 \frac{L}{C}}}{2L} t} \right)$$



Εξίσωση του κρουστικού ρεύματος

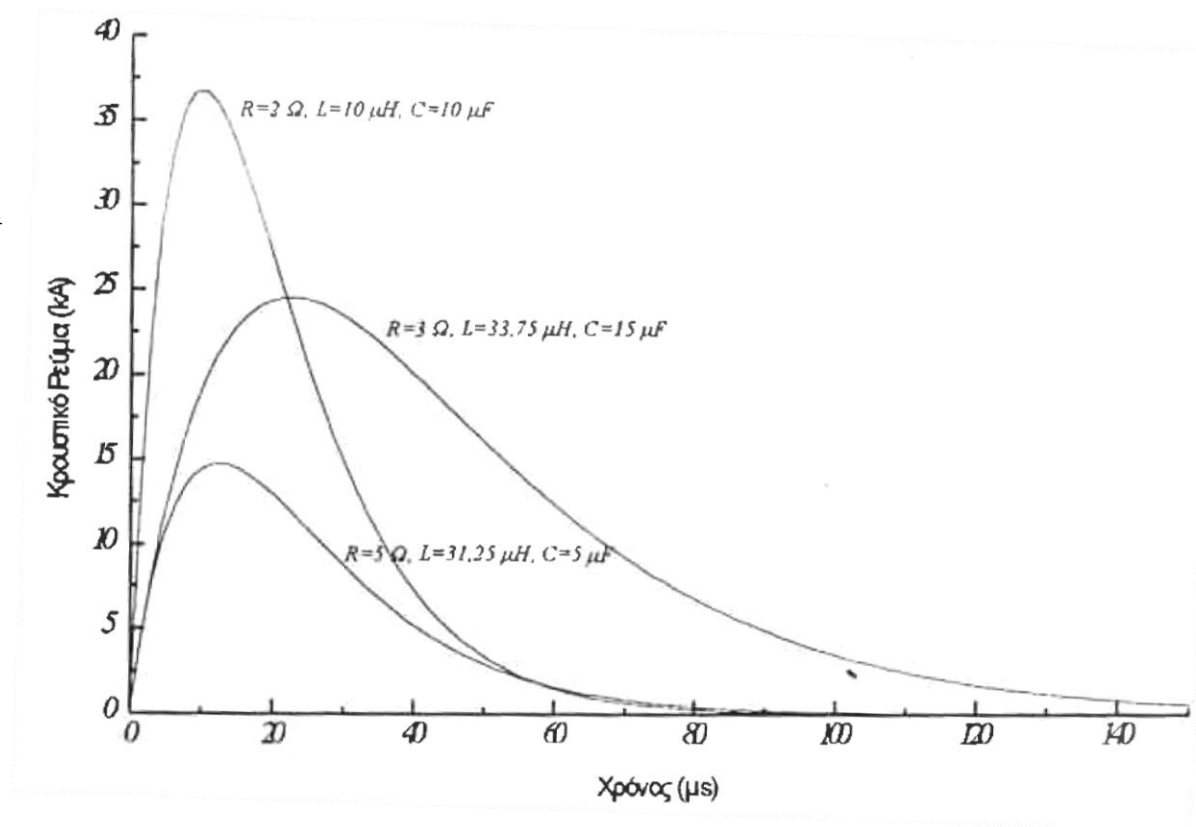
Κρίσιμη απόσβεση: $R^2 - 4L \frac{1}{C} = 0$

$$R = 2\sqrt{\frac{L}{C_K}} \quad (i_K = 0) \Rightarrow i_K = U_- \cdot \frac{1}{L} \cdot t \cdot e^{-\frac{R}{2L}t}$$

$$t_m = 2\frac{L}{R} \Rightarrow \hat{I}_K = 0,736 \frac{U_-}{R} = \frac{2}{e} \cdot \frac{U_-}{R}$$

$$t_{50\%} = 5,36 \frac{L}{R}$$

$$T_\mu = 1,43 \frac{L}{R} \quad T_\eta = 5,42 \frac{L}{R}$$

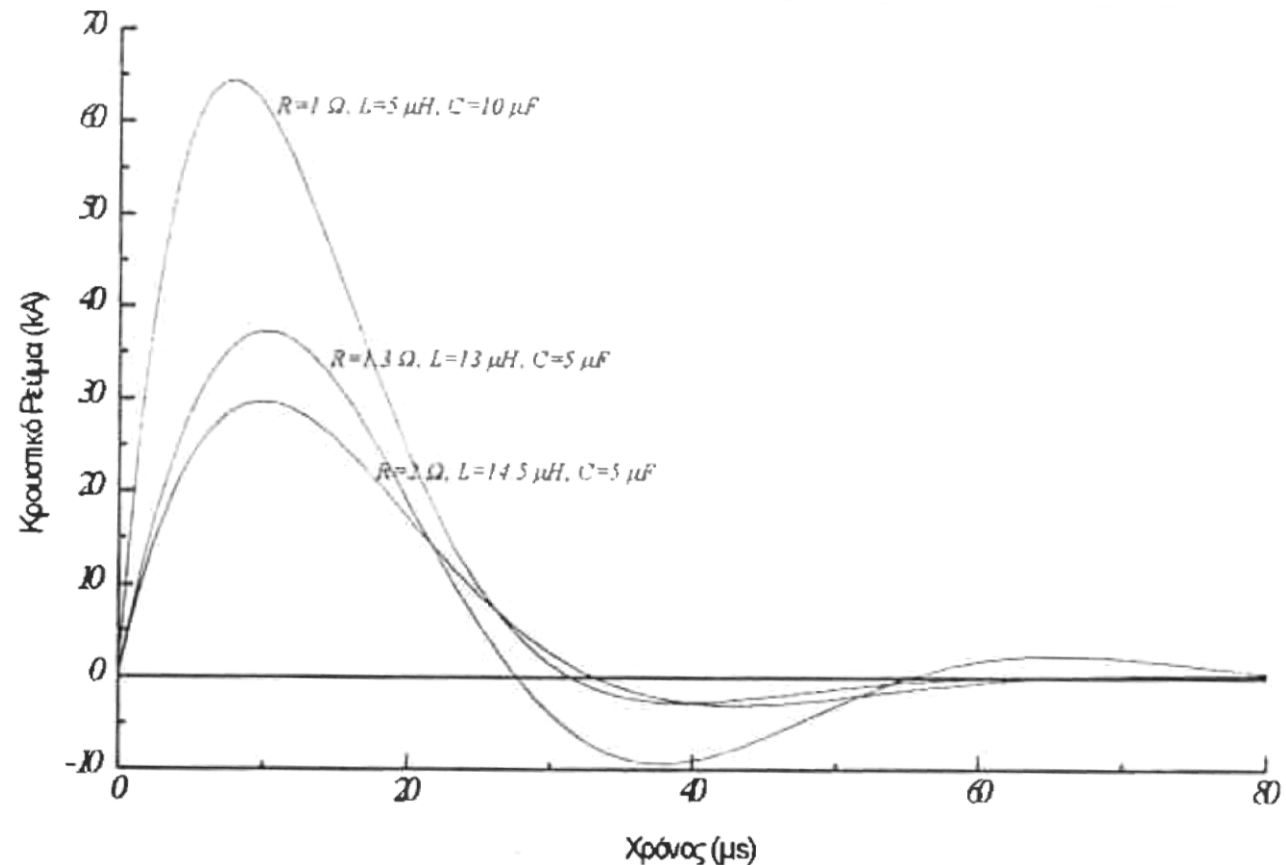


Εξίσωση του κρουστικού ρεύματος

Υποκρίσιμη απόσβεση: $R^2 - 4L \frac{1}{C} < 0$

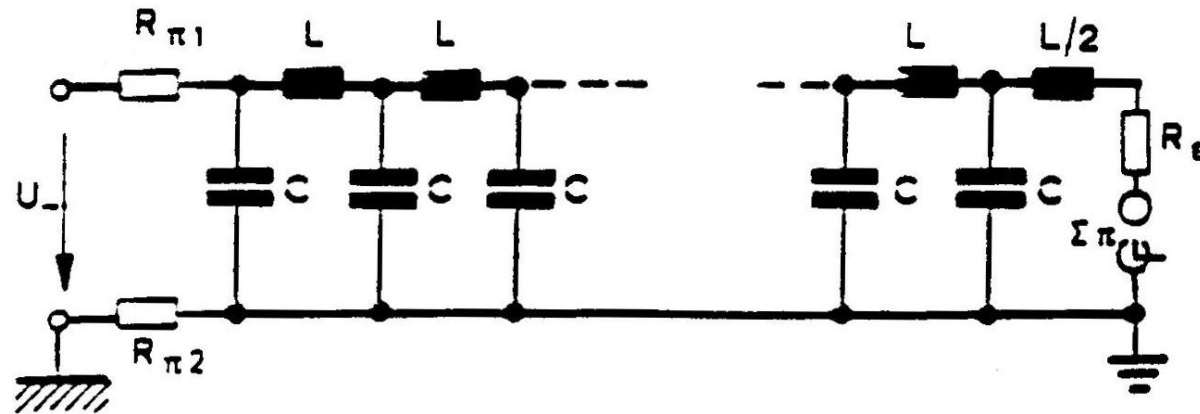
$$i_{\kappa}(t) = \frac{U_{-}}{\omega_{\text{N}}L} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega_{\text{N}}t)$$

όπου $\omega_{\text{N}} = \frac{\sqrt{4L \frac{1}{C_{\kappa}} - R^2}}{2L}$

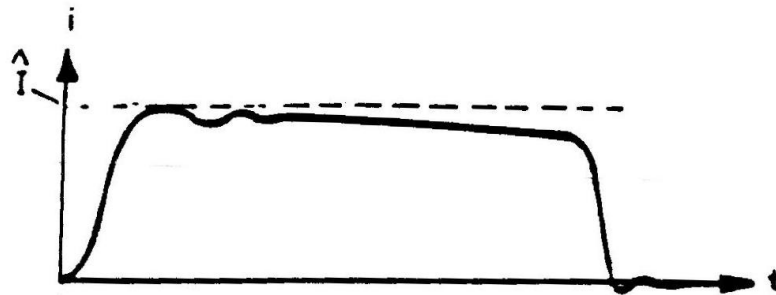
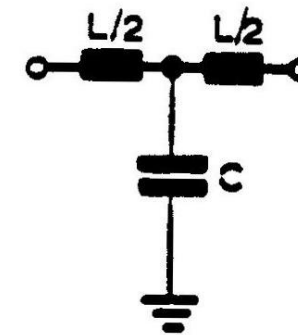


Διάταξη παραγωγής ορθογωνικών κρουστικών ρευμάτων

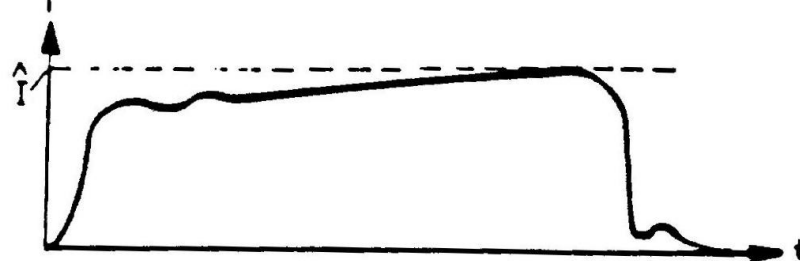
Αλυσίδα τετραπόλων



Τετράπολο

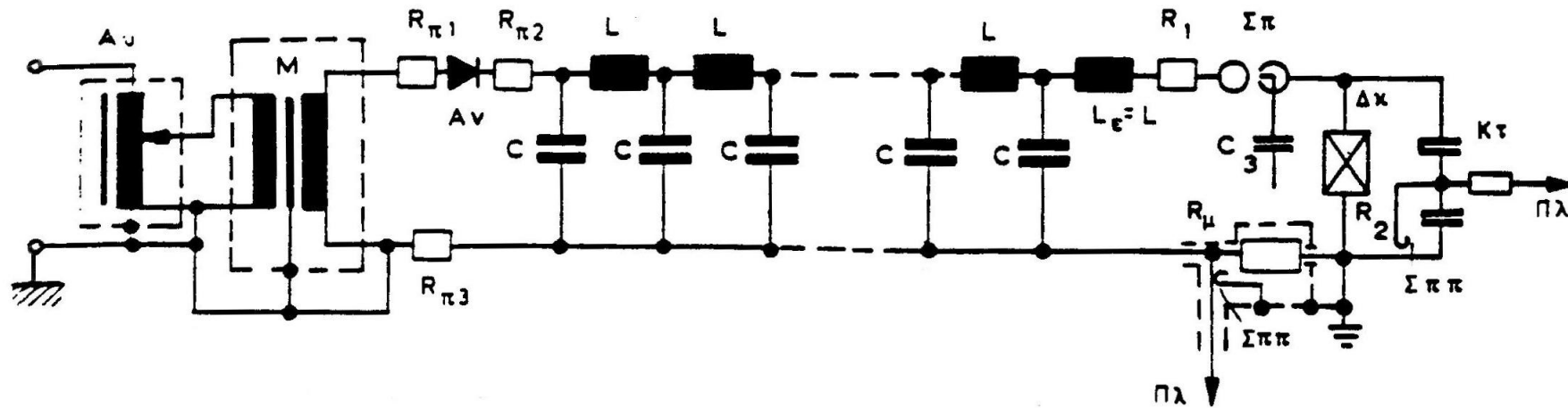


Κρουστικό ρεύμα, μειούμενο με το χρόνο (σταθερή αυτεπαγωγή ανά τετράπολο στην αλυσίδα)

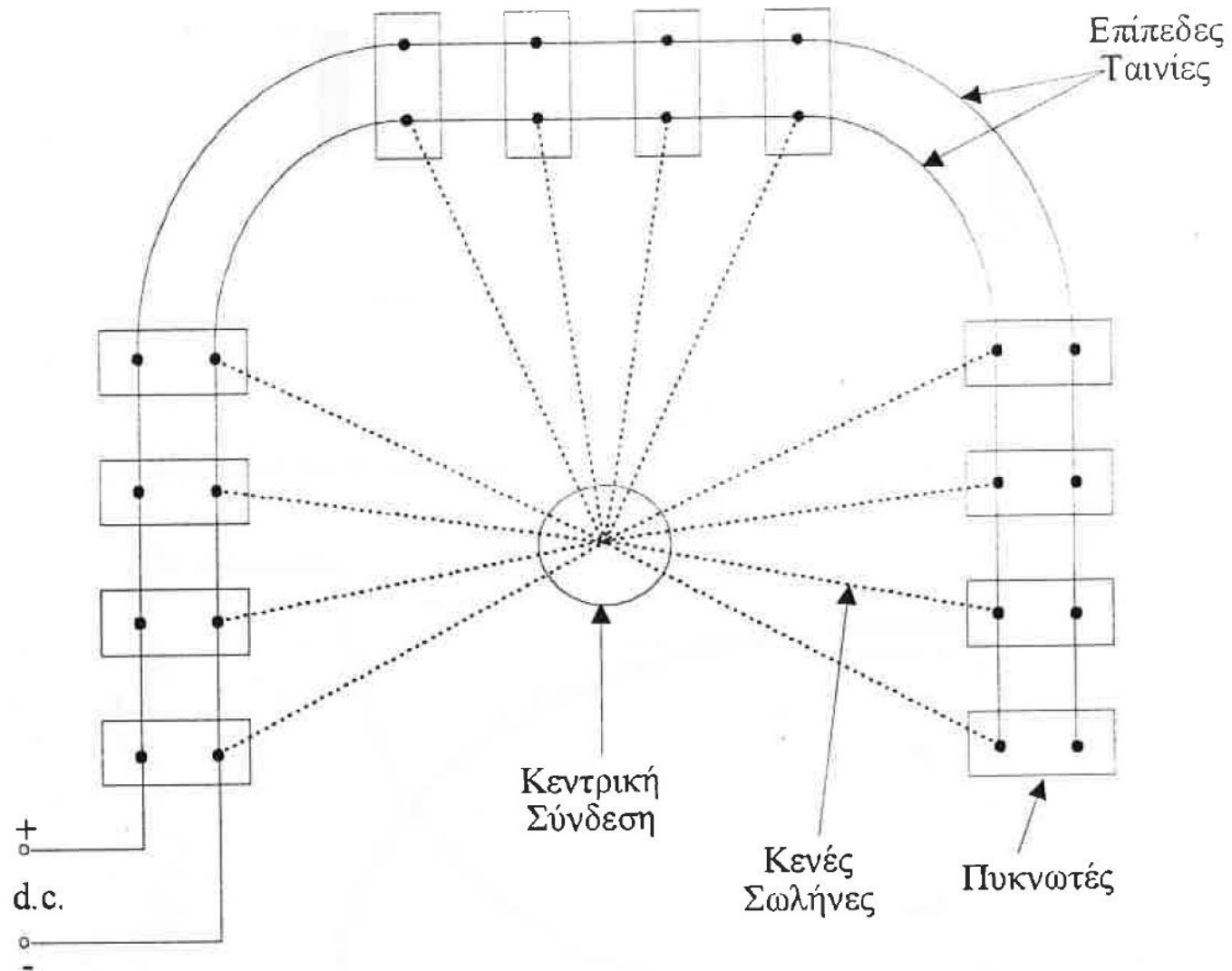


Κρουστικό ρεύμα, αυξανόμενο με το χρόνο (μεταβλητή αυτεπαγωγή ανά τετράπολο στην αλυσίδα)

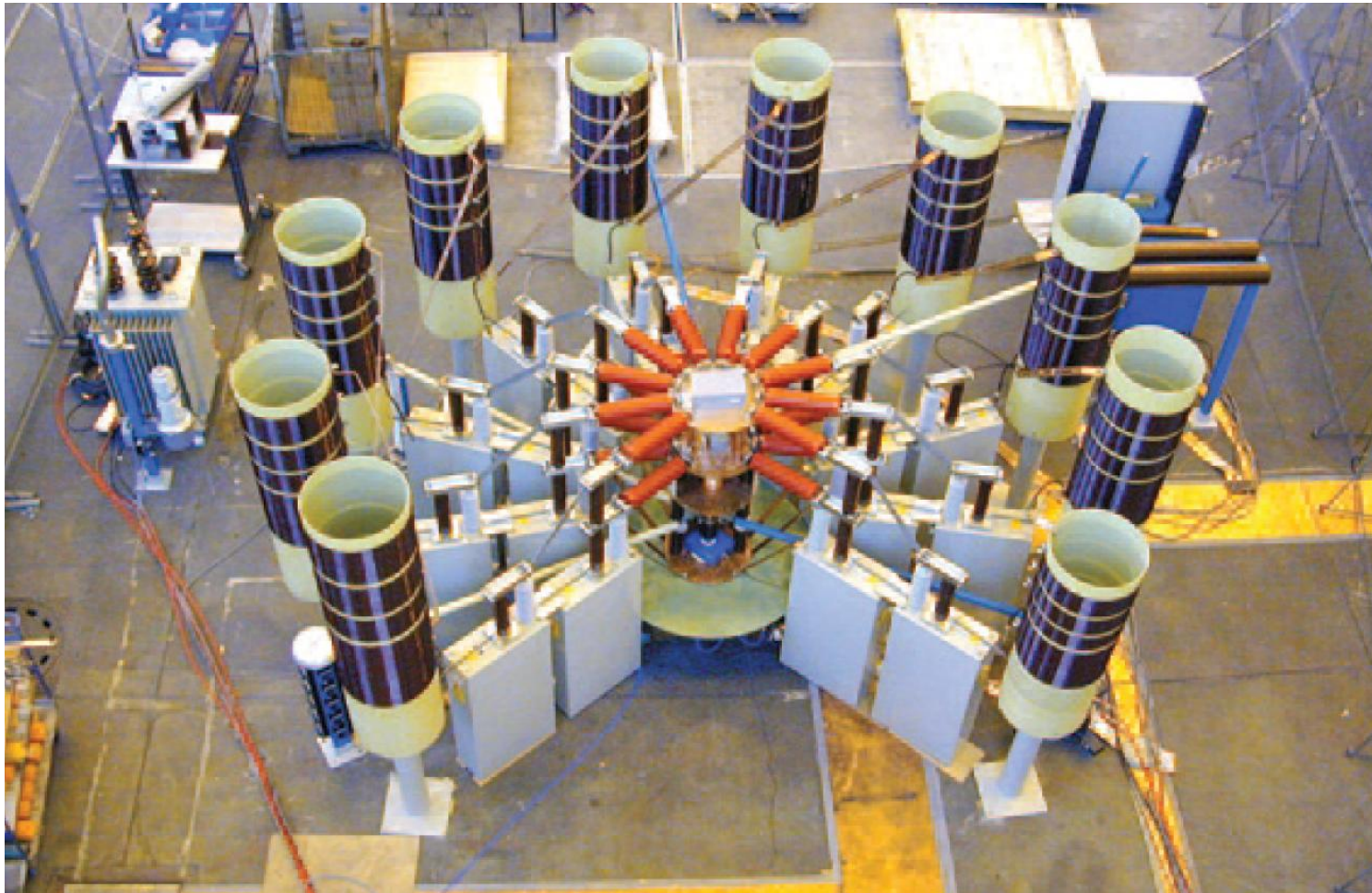
Πλήρης διάταξη γεννήτριας ορθογωνικών κρουστικών ρευμάτων



Μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια ρεύματος



Μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια ρεύματος



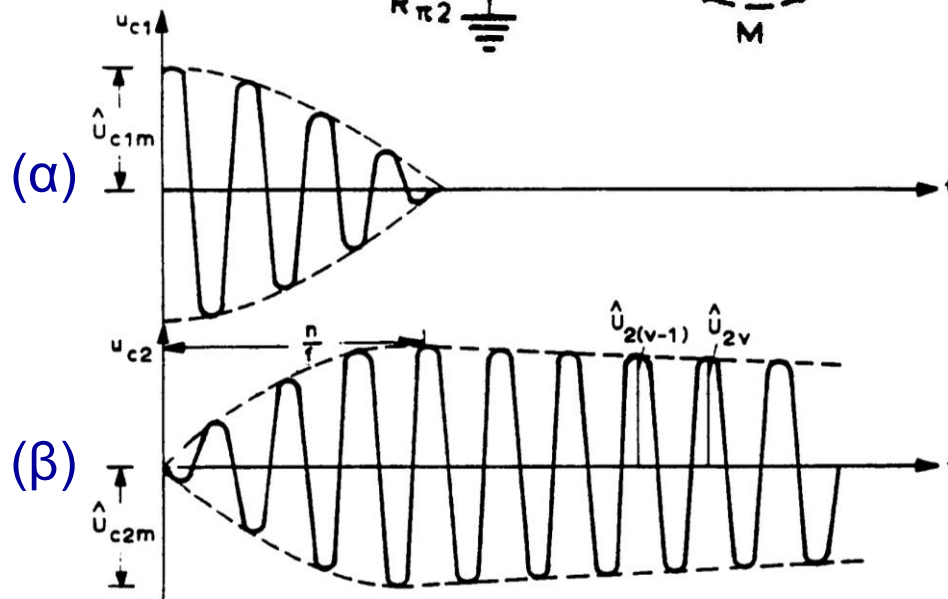
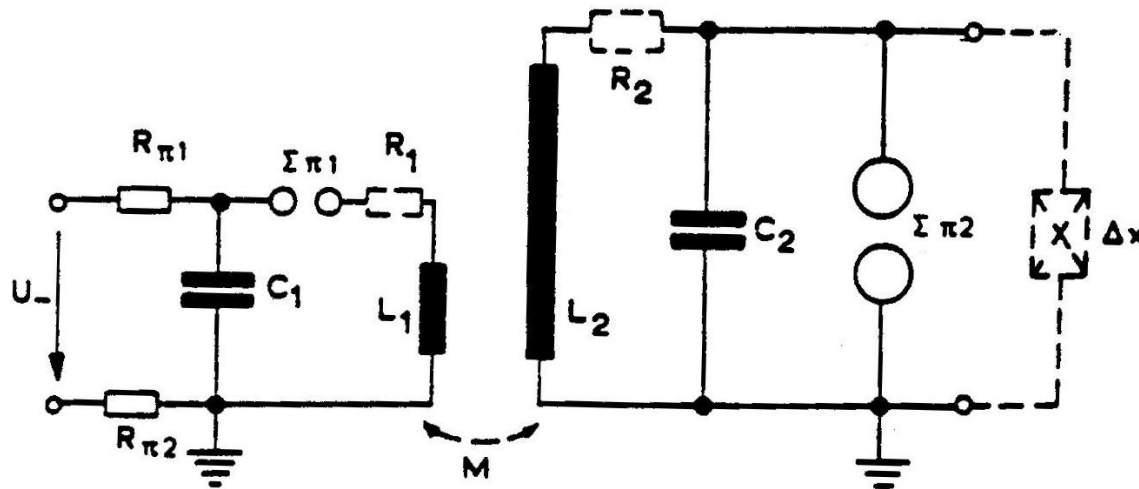
150kA (4/10 μ s), τάση φόρτισης 100kV, ενέργεια 250kJ

Μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια ρεύματος



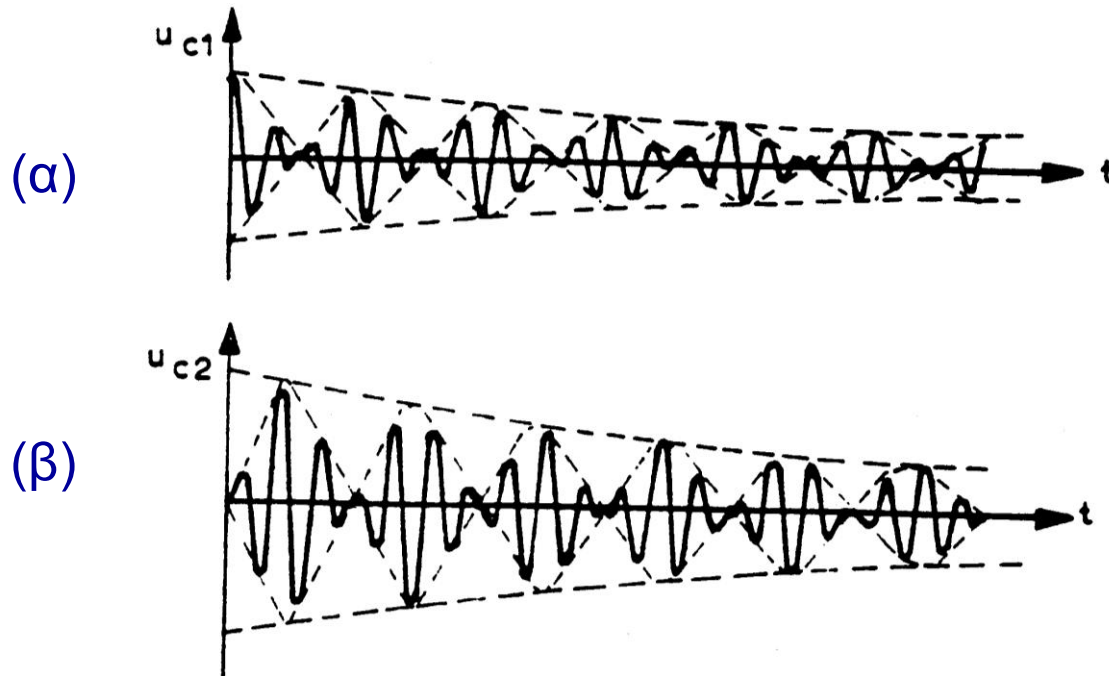
10kA (8/20 μ s), τάση φόρτισης 600kV, ενέργεια 90kJ

Διάταξη παραγωγής αποσβεννυμένων ταλαντώσεων (1)



Χρονική μεταβολή της τάσης
 (α) στο πρωτεύον και
 (β) στο δευτερεύον
 της διάταξης παραγωγής
 αποσβεννυμένων ταλαντώσεων,
 υπό ίση συχνότητα ταλάντωσης και
 ασθενή μαγνητική ζεύξη μεταξύ
 πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

Διάταξη παραγωγής αποσβεννυμένων ταλαντώσεων (2)



Χρονική μεταβολή της τάσης

(α) στο πρωτεύον και

(β) στο δευτερεύον

της διάταξης παραγωγής αποσβεννυμένων ταλαντώσεων, υπό ισχυρή μαγνητική ζεύξη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.