



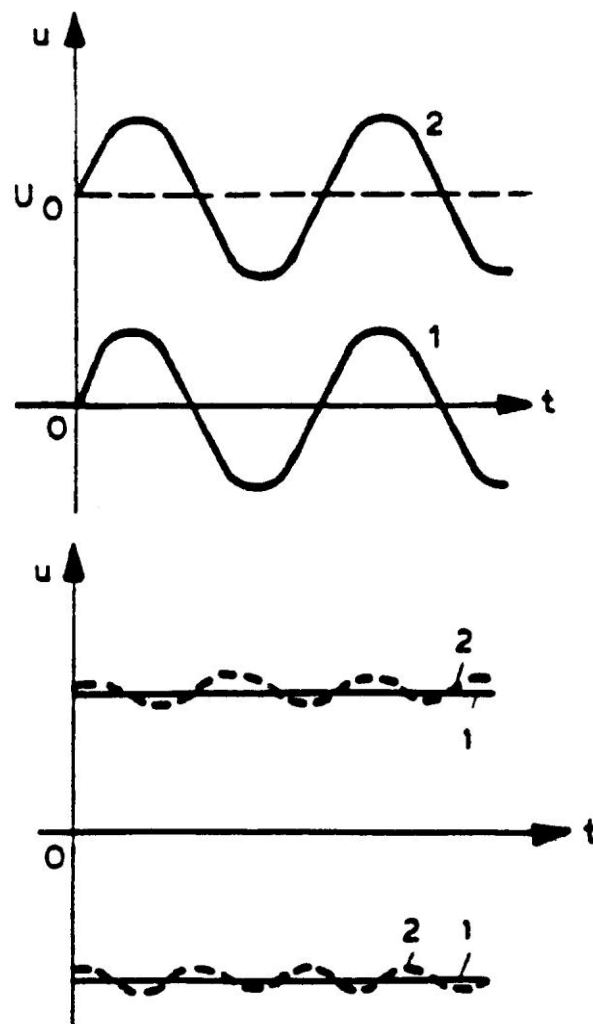
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Μηχανικών Υπολογιστών
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

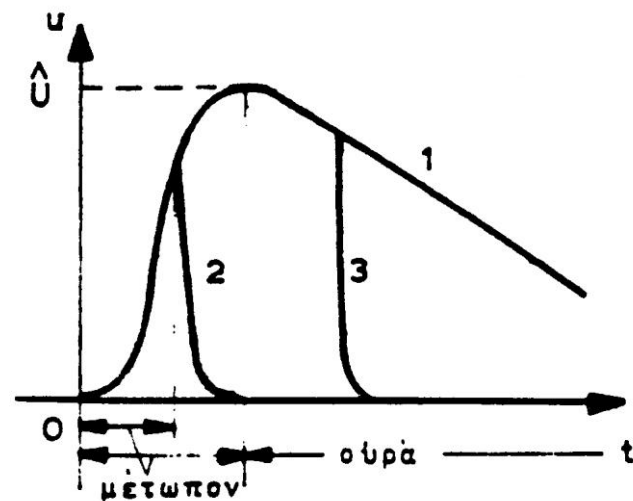
Μορφές υψηλών τάσεων δοκιμών (1)

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

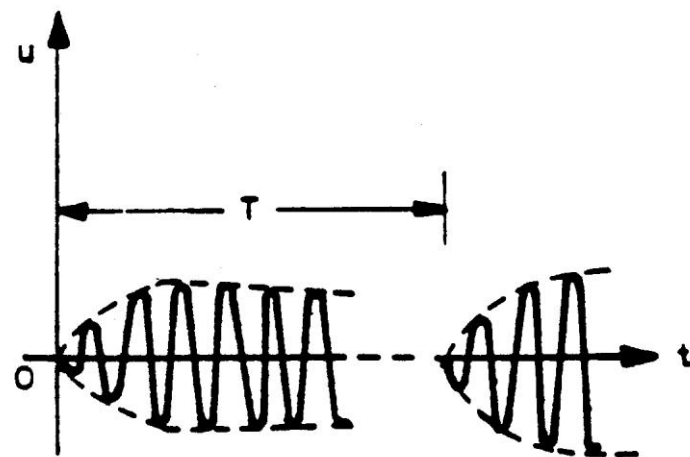


Μορφές υψηλών τάσεων δοκιμών (2)

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



- Συρμός αποσβεσμένων ταλαντώσεων



Υψηλή συνεχής τάση (1)

Ορισμοί (IEC 60060-1)

- Πλάτος συνεχούς τάσης = αριθμητική μέση τιμή

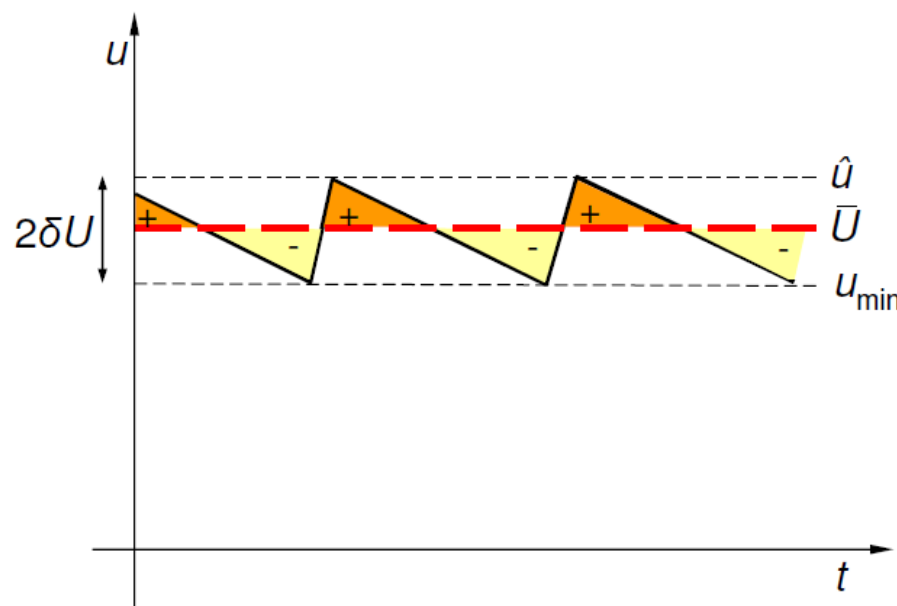
$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

- Κυμάτωση

$$\delta U = \frac{1}{2} (\hat{U} - U_{\min})$$

- Συντελεστής κυμάτωσης

$$\frac{\delta U}{\bar{U}}$$



Υψηλή συνεχής τάση (2)

Απαιτήσεις (IEC 60060-1)

- Συντελεστής κυμάτωσης $\leq 3\%$
- Για διάρκεια δοκιμής $\leq 60s$, μέγιστη μεταβολή στο πλάτος $\pm 1\%$
- Για διάρκεια δοκιμής $> 60s$, μέγιστη μεταβολή στο πλάτος $\pm 3\%$
- Φόρτιση του κυκλώματος δοκιμής σε 'λογικά σύντομο χρόνο'
- Αντιστροφή πολικότητας (αν απαιτείται) σε σύντομο χρόνο

Παραγωγή υψηλής συνεχούς τάσης

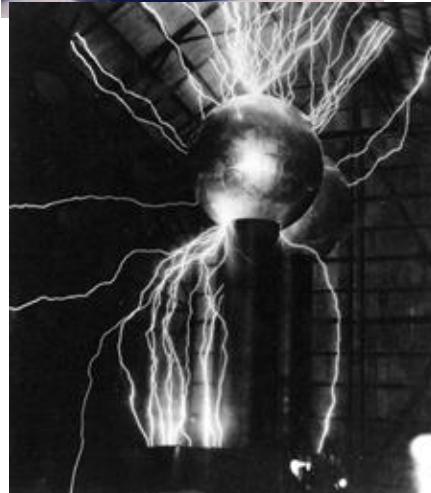
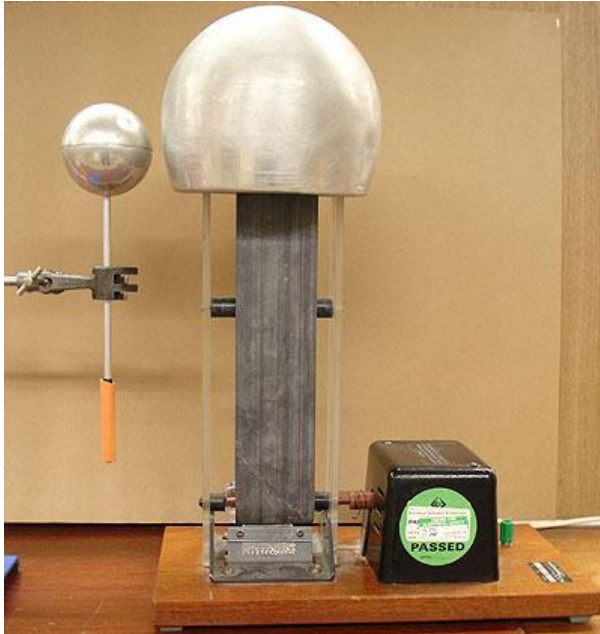
Υψηλή συνεχής τάση

```
graph TD; A[Υψηλή συνεχής τάση] --> B[Με διαχωρισμό φορτίου  
(Γεννήτρια Van de Graaff)]; A --> C[Με ανόρθωση της υψηλής  
εναλλασσόμενης τάσης  
(Απλή ανόρθωση, διπλή ανόρθωση,  
ανορθωτικές γέφυρες, πολυβάθμιες  
ανορθωτικές διατάξεις)];
```

Με διαχωρισμό φορτίου
(Γεννήτρια Van de Graaff)

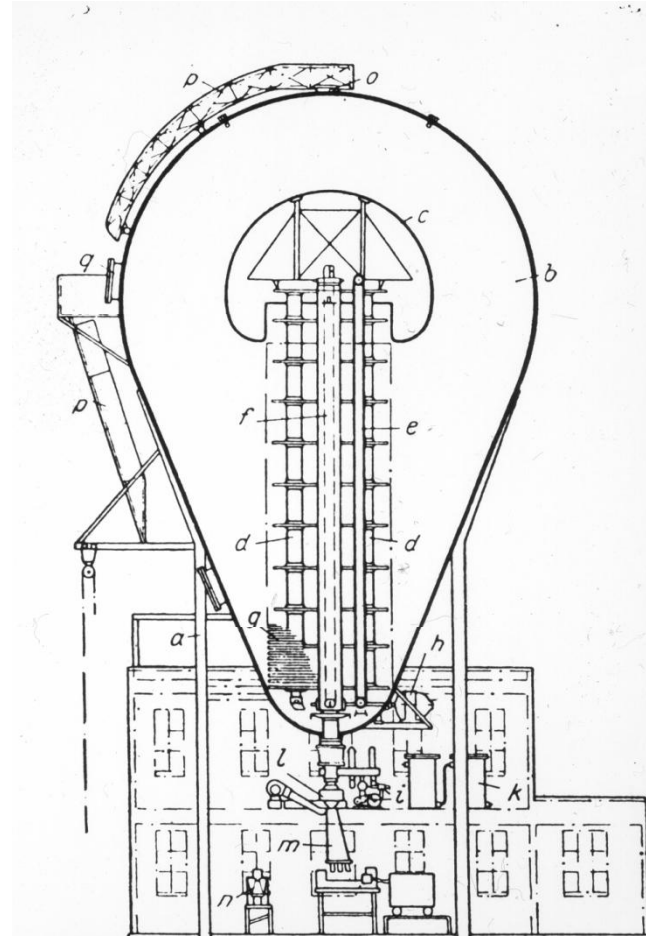
Με ανόρθωση της υψηλής
εναλλασσόμενης τάσης
(Απλή ανόρθωση, διπλή ανόρθωση,
ανορθωτικές γέφυρες, πολυβάθμιες
ανορθωτικές διατάξεις)

Ηλεκτροστατική γεννήτρια Van de Graaff (1)



Ηλεκτροστατική γεννήτρια Van de Graaff (2)

5 MV



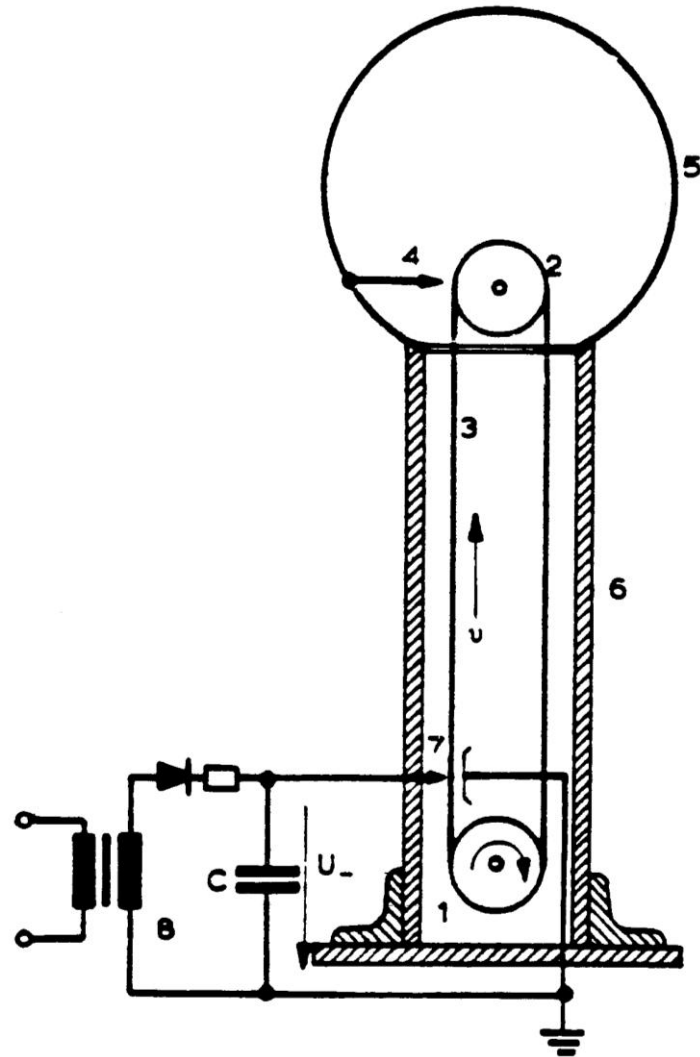
Ηλεκτροστατική γεννήτρια Van de Graaff (3)

25 MV

Η μεγαλύτερη, παγκοσμίως, γεννήτρια Van de Graaff με μόνωση τον αέρα (USA).



Ηλεκτροστατική γεννήτρια Van de Graaff (4)



1,2 τροχαλίες

3 ταινία από μονωτικό υλικό

4 ακίδα

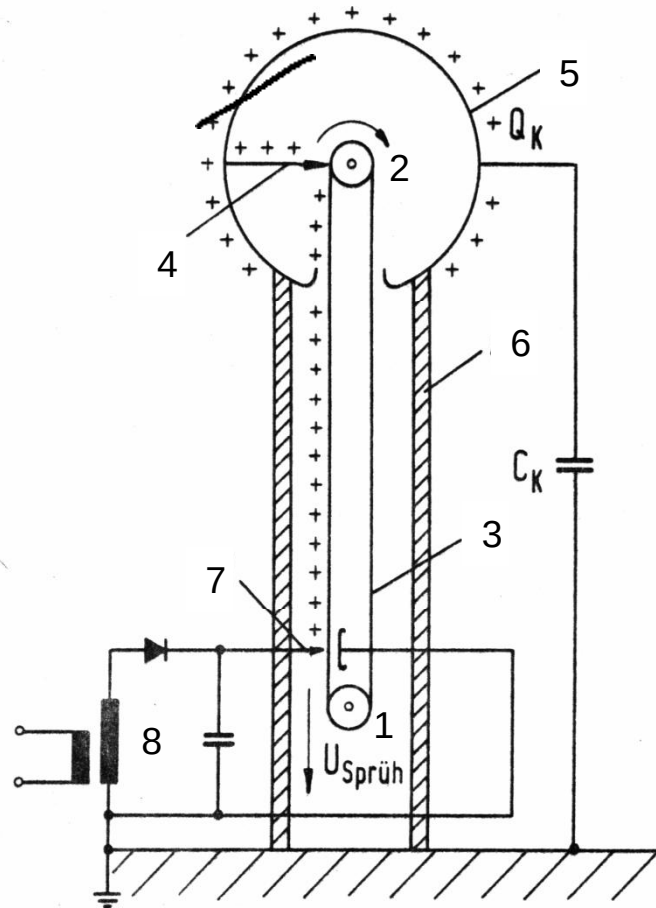
5 μεταλλική σφαίρα (ηλεκτρόδιο
υψηλής τάσεως)

6 κύλινδρος από μονωτικό υλικό

7 σπινθηριστής ακίδας (ή
αιχμής) – πλάκας

8 διάταξη παραγωγής της
συνεχούς τάσης φόρτισης της
γεννήτριας

Ηλεκτροστατική γεννήτρια Van de Graaff (5)



Q_k Συσσωρευμένο φορτίο στην επιφάνεια της σφαίρας
 C_k (Παράσιτη) χωρητικότητα της σφαίρας ως προς γη

$$U_k = \frac{Q_k}{C_k}$$

$$E_{\max} = \frac{U_k}{r_k} \Rightarrow U_k = r_k \cdot E_{\max}$$

Μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου στον
αέρα χωρίς προ-εκκενώσεις:

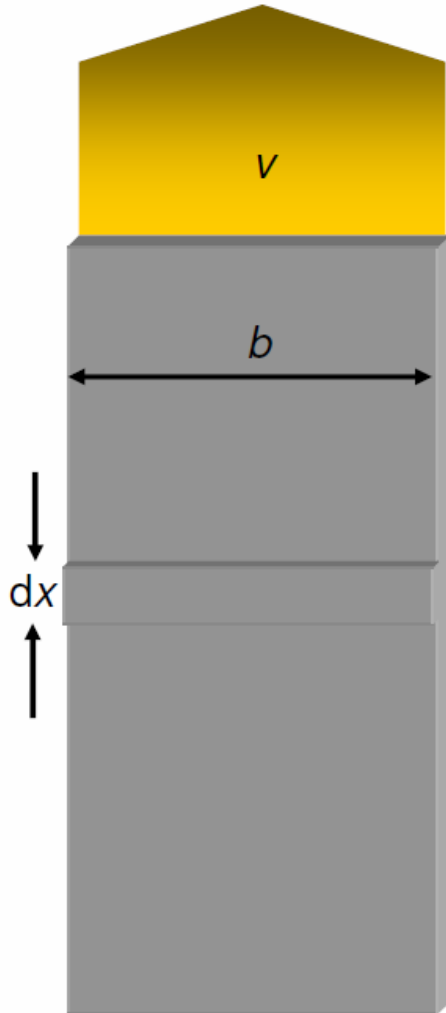
$$E_{\max} = 25 \text{ kV/cm}$$

Παράδειγμα: Ακτίνα σφαίρας $r_k = 2 \text{ m}$

$$\Rightarrow U_k = 200 \text{ cm} \cdot 25 \text{ kV/cm} = 5 \text{ MV}$$

Η μέγιστη τάση περιορίζεται από τις προ-
εκκενώσεις στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.

Ηλεκτροστατική γεννήτρια Van de Graaff (6)



Το μέγιστο ρεύμα εξαρτάται από

- την εφαρμοζόμενη πυκνότητα επιφανειακού φορτίου σ
- το πλάτος b της ταινίας
- την ταχύτητα v της ταινίας

Ηλεκτρικό φορτίο ενός τμήματος dx της ταινίας:

$$dq = \sigma \cdot b dx \Rightarrow \frac{dq}{dx} = \sigma \cdot b$$

Ταχύτητα της ταινίας:

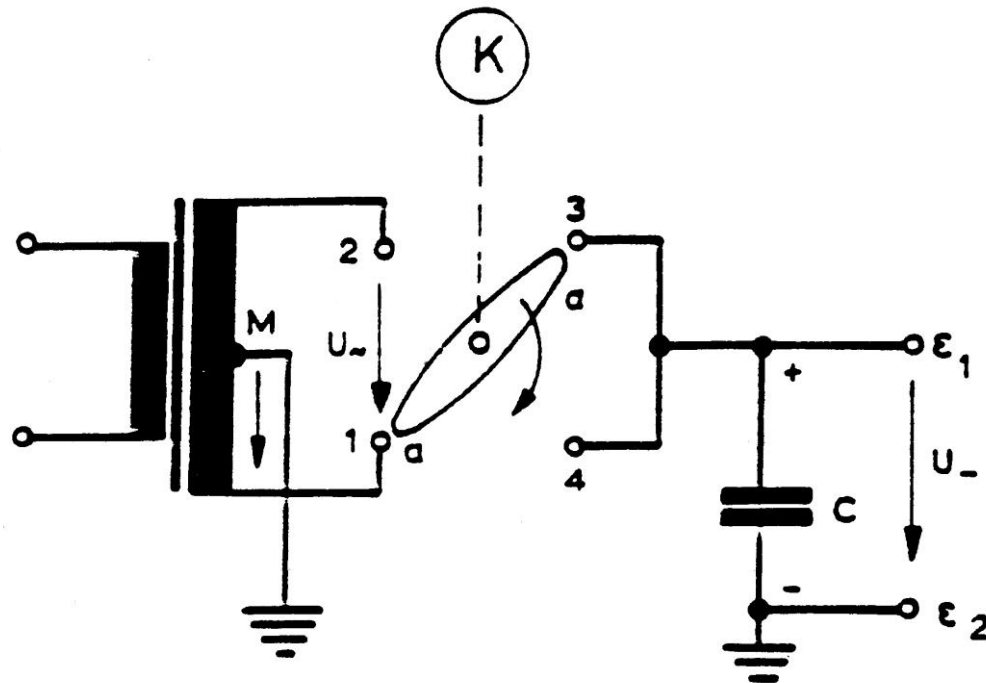
$$v = \frac{dx}{dt}$$

Ρεύμα:

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \sigma \cdot b \cdot v$$

Ανορθωτικές διατάξεις (1)

Διάταξη διπλής ανόρθωσης, για την επεξήγηση της λειτουργίας του μηχανικού ανορθωτή



1,2 ακροδέκτες υψηλής τάσης του μετασχηματιστή
3,4 ακροδέκτες πλευράς κατανάλωσης

Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος

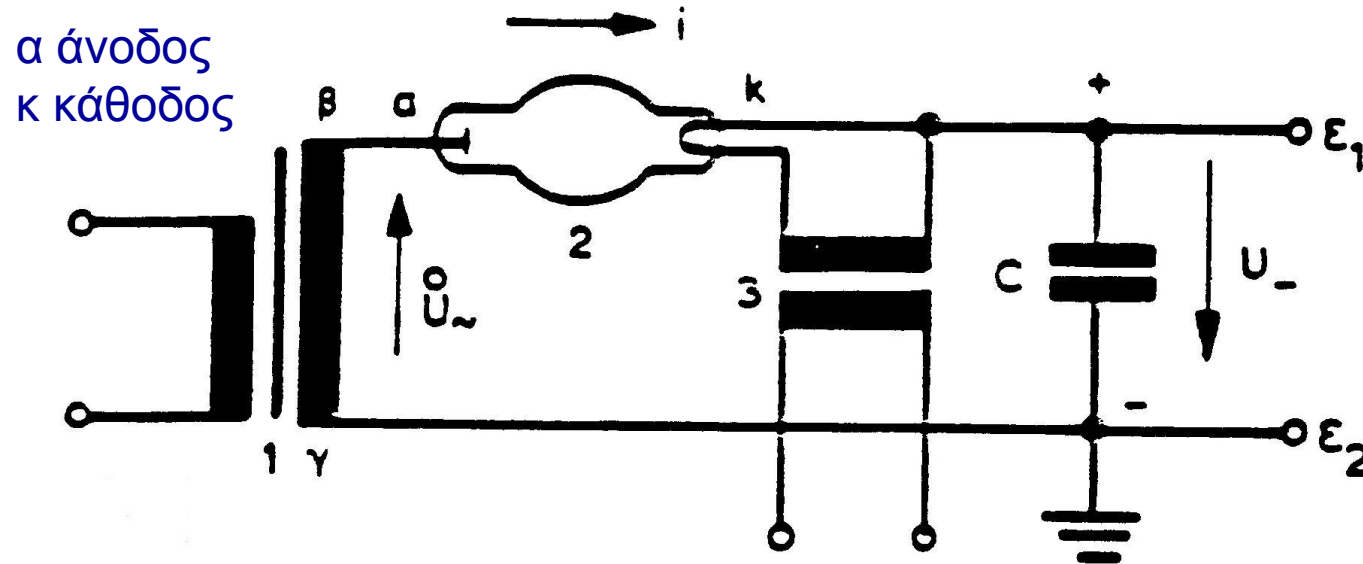
$$U_- = \frac{1}{2}(\sqrt{2} U_{\sim})$$

Μειονεκτήματα

- Κινητήρας
- Μόνωση βραχίονα
(έναντι κιβωτίου κινητήρα)

Ανορθωτικές διατάξεις (2)

Διάταξη απλής ανόρθωσης, για την επεξήγηση της λειτουργίας λυχνίας κενού



1 μετασχηματιστής υψηλής τάσης

2 λυχνία κενού

3 μετασχηματιστής θέρμανσεως (της καθόδου)

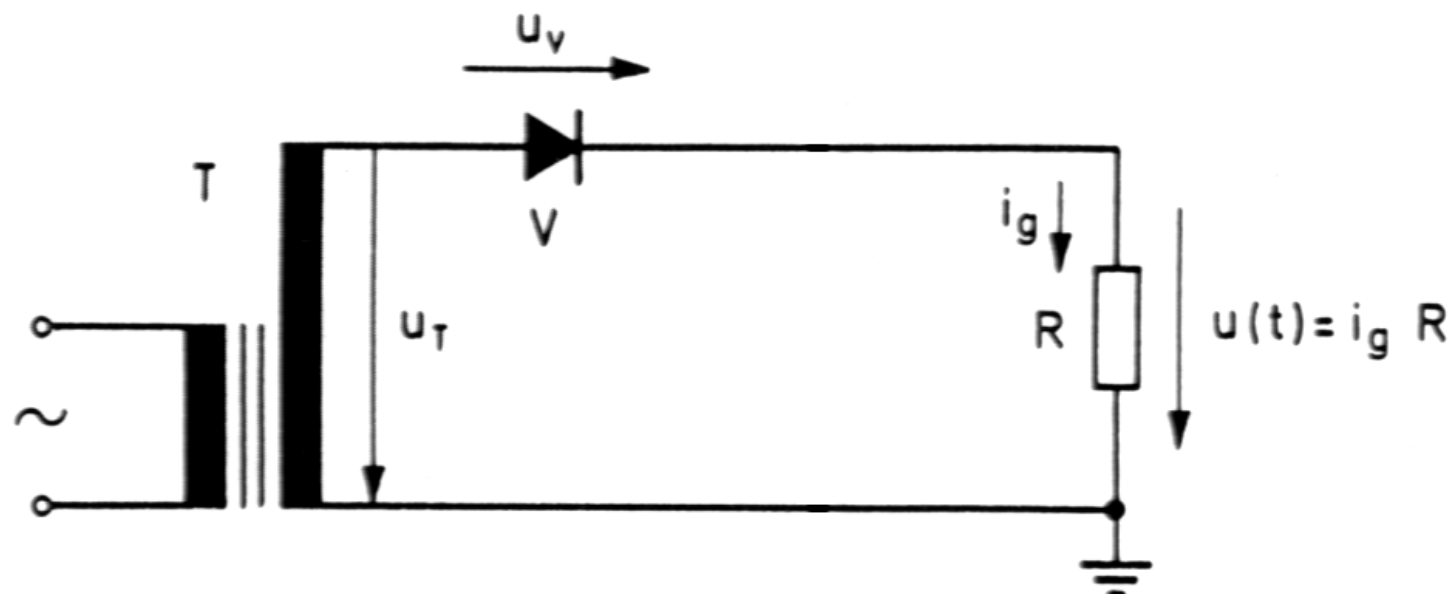
Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος

$$U_- = \sqrt{2} U_{\sim}$$

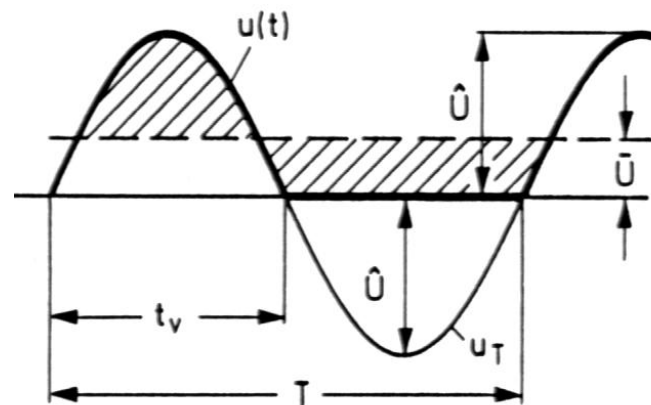
Μειονεκτήματα

- Μ/Σ θέρμανσης
- Μόνωση Μ/Σ

Διάταξη απλής ανόρθωσης (1)

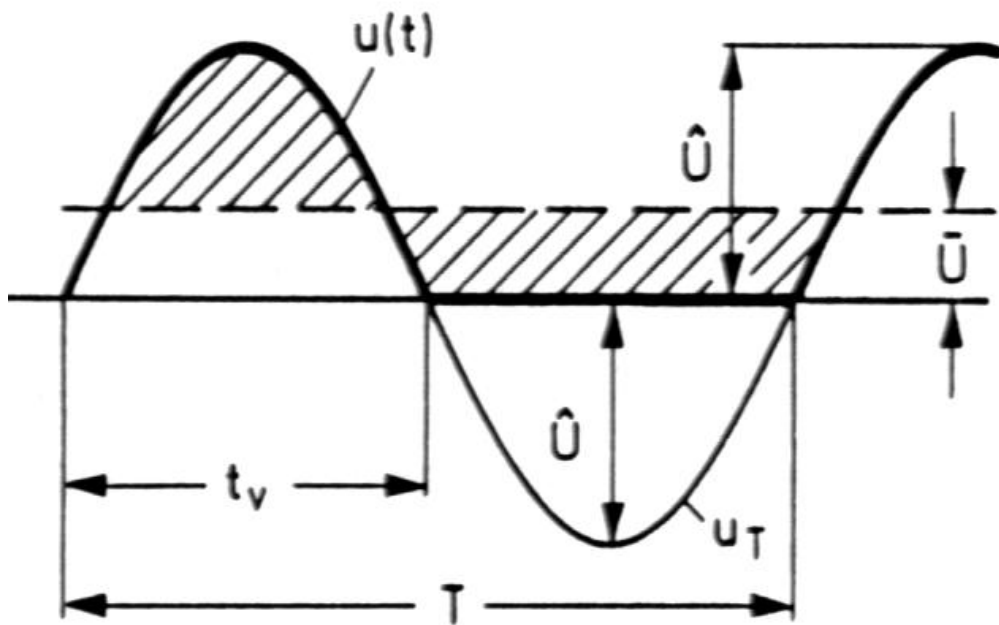


High Voltage Test Techniques, D. Kind & K. Feser



Διάταξη απλής ανόρθωσης (2)

Χρονική μεταβολή της τάσης εξόδου, διάταξης απλής ανόρθωσης, χωρίς πυκνωτή εξομάλυνσης



High Voltage Test Techniques, D. Kind & K. Feser

$$U_{rms} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \hat{U}$$

- Τιμή κορυφής

$$\hat{U} = \hat{U}_T$$

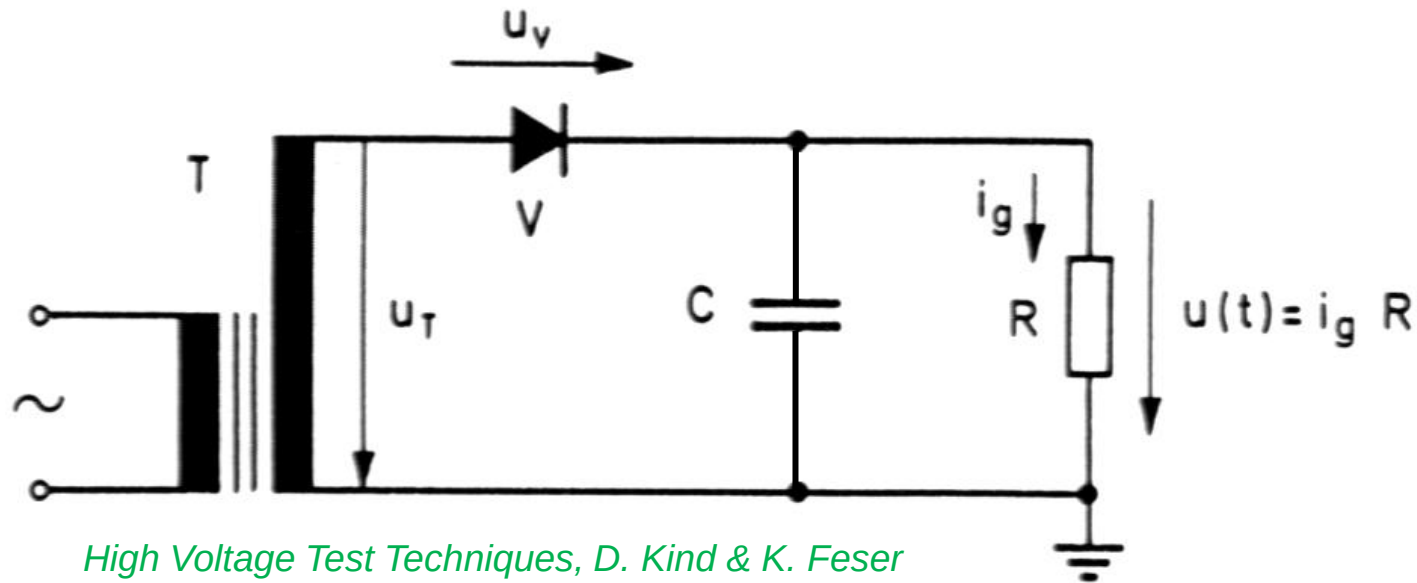
- Αριθμητική μέση τιμή

$$\bar{U} = \frac{1}{\pi} \hat{U}$$

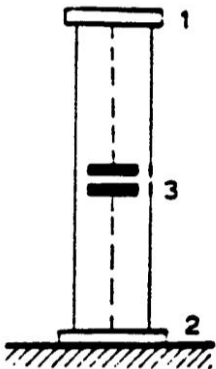
- Μέγιστη ανάστροφη τάση

$$\hat{U}_V = \hat{U}_T$$

Διάταξη απλής ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης (1)

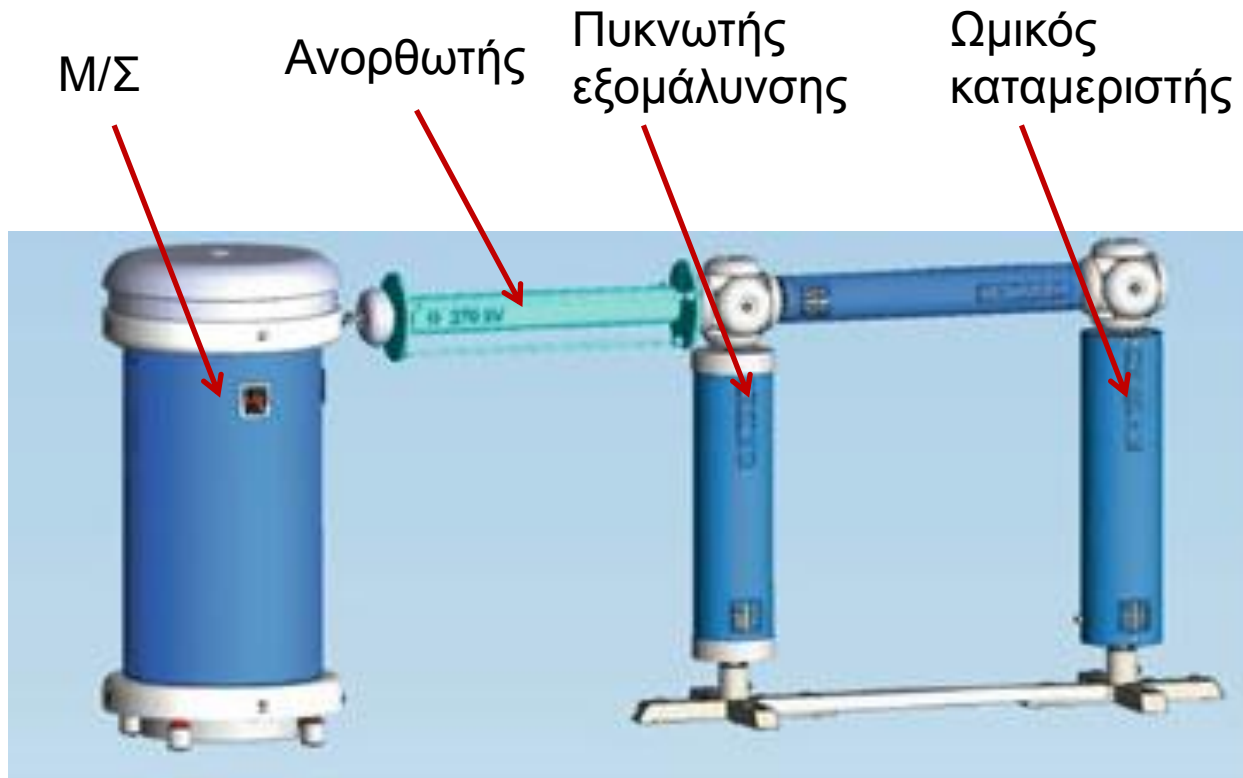


Πυκνωτής υψηλής τάσης



- 1,2 μεταλλικές βάσεις (ακροδέκτες του πυκνωτή)
- 3 σωλήνας από μονωτικό υλικό

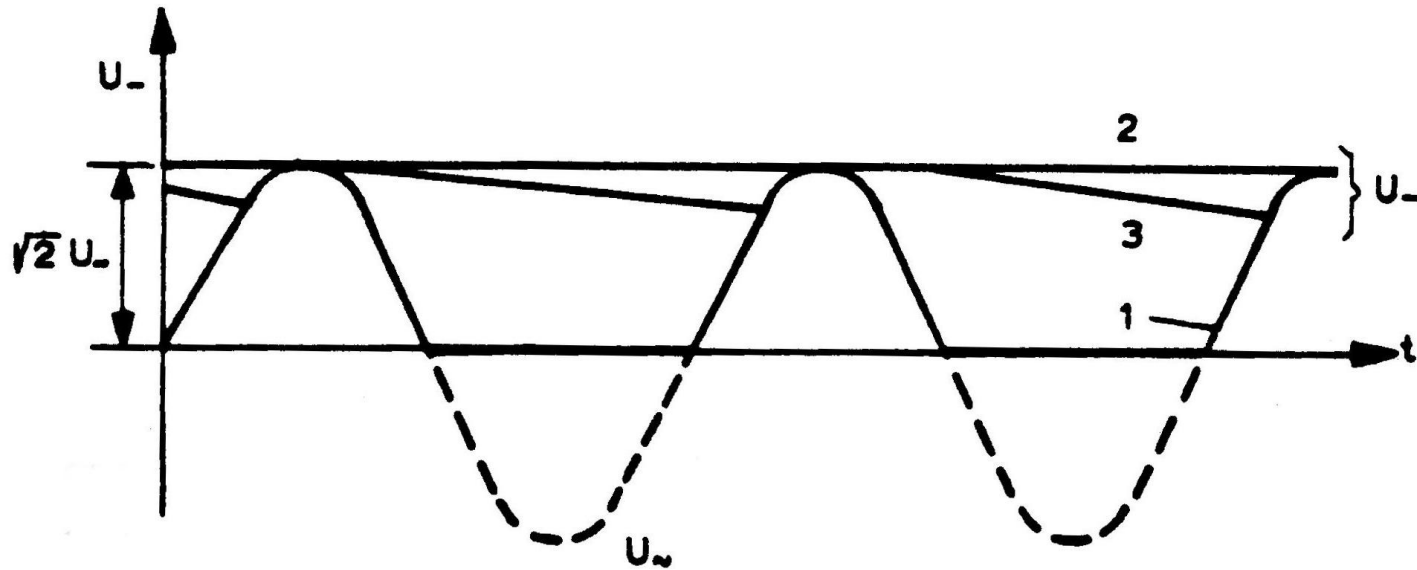
Διάταξη απλής ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης (2)



High Voltage Test and Measuring Techniques, W. Hauschild & E. Lemke

Διάταξη απλής ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης (3)

Χρονική μεταβολή της τάσης στην έξοδο της διάταξης απλής ανόρθωσης



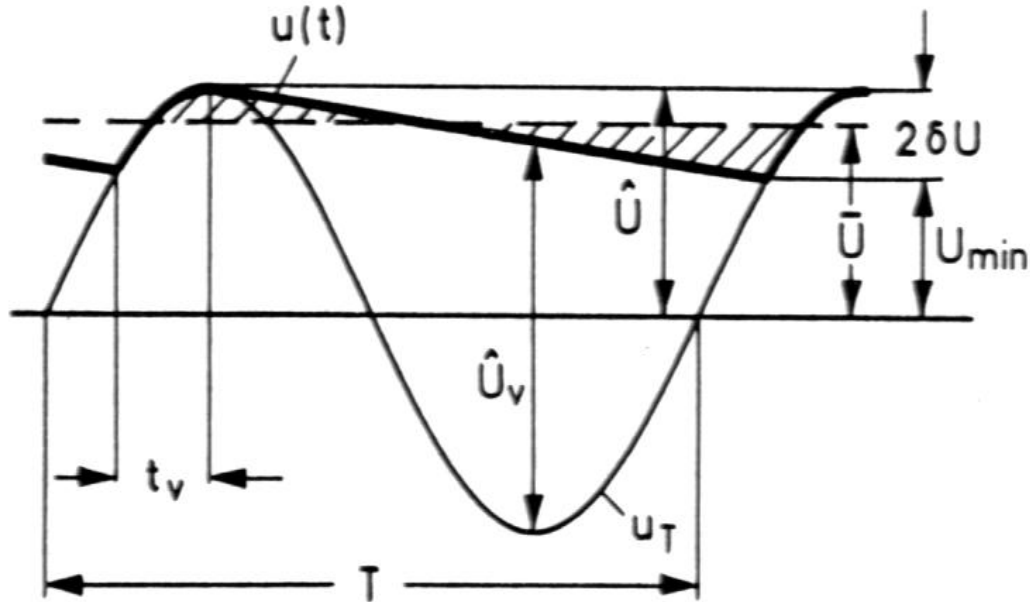
1 χωρίς πυκνωτή

2 με πυκνωτή C , χωρίς φορτίο R

3 με πυκνωτή C και φορτίο R

Διάταξη απλής ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης (4)

Χρονική μεταβολή της τάσης στην έξοδο της διάταξης απλής ανόρθωσης



High Voltage Test Techniques, D. Kind & K. Feser

- Τιμή κορυφής

$$\hat{U} = \hat{U}_T$$

- Αριθμητική μέση τιμή

$$\bar{U} \approx \hat{U} - \delta U$$

- Μέγιστη ανάστροφη τάση

$$\hat{U}_v \approx 2\hat{U}_T$$

Διάταξη απλής ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης (5)

Υπολογισμός της διακύμανσης

Επειδή $t_v \ll T = \frac{1}{f}$ και $\delta U \ll \bar{U}$

μπορούμε να υποθέσουμε ότι η εκφόρτιση του πυκνωτή είναι γραμμική (αντί για εκθετική)

Συνεπώς, η μεταβολή του φορτίου είναι:

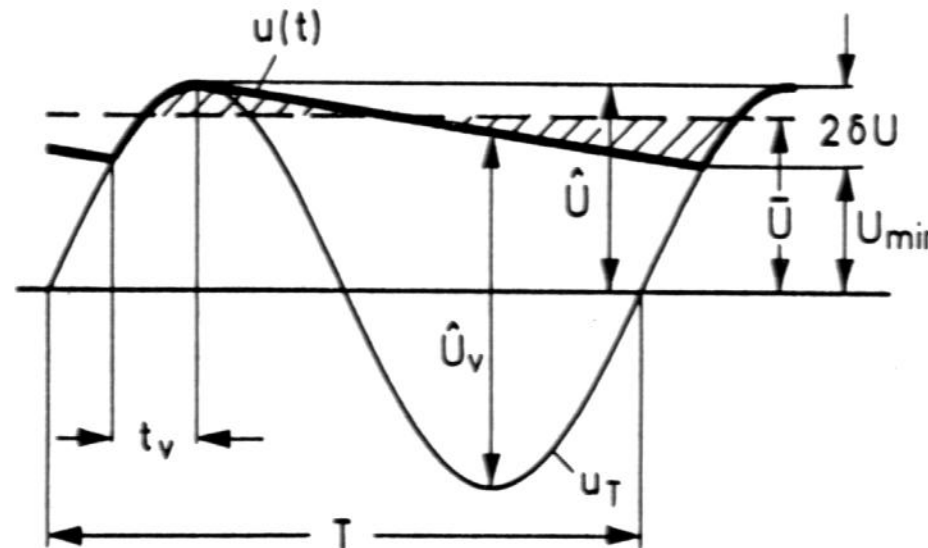
$$2\delta U \cdot C \approx \int_0^T i_g dt = T \cdot \overline{I_g} \quad \Rightarrow \quad \delta U \approx \overline{I_g} \frac{1}{2fC}$$

Η μείωση της διακύμανσης για δεδομένο ρεύμα φορτίου επιτυγχάνεται με:

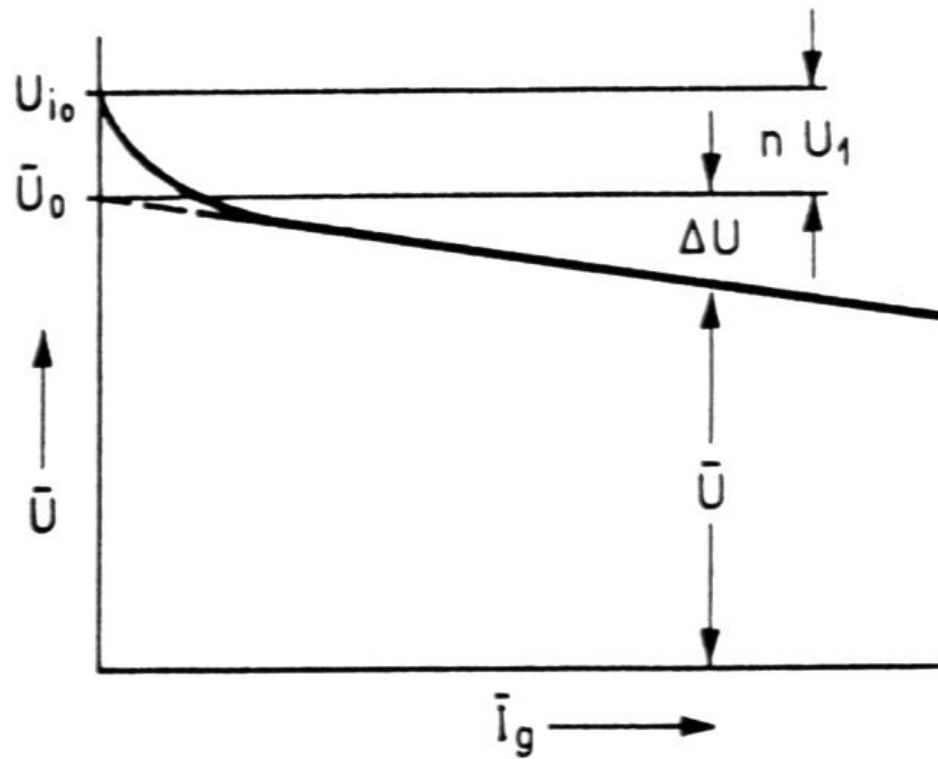
- αύξηση της χωρητικότητας
- αύξηση της συχνότητας

ή

Με χρήση διάταξης διπλής ανόρθωσης



Διάταξη απλής ανόρθωσης – χαρακτηριστική φορτίου



High Voltage Test Techniques, D. Kind & K. Feser

$$\bar{U} = U_0 - \Delta U = (U_{i0} - n \cdot U_1) - k \cdot \bar{I}_g$$

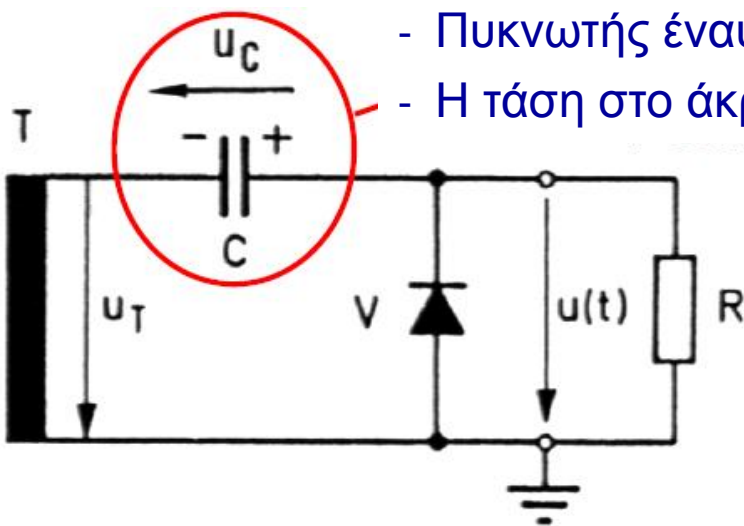
U_{i0} Τάση ανοικτοκυκλώματος (ιδανική)

n Αριθμός ανορθωτών

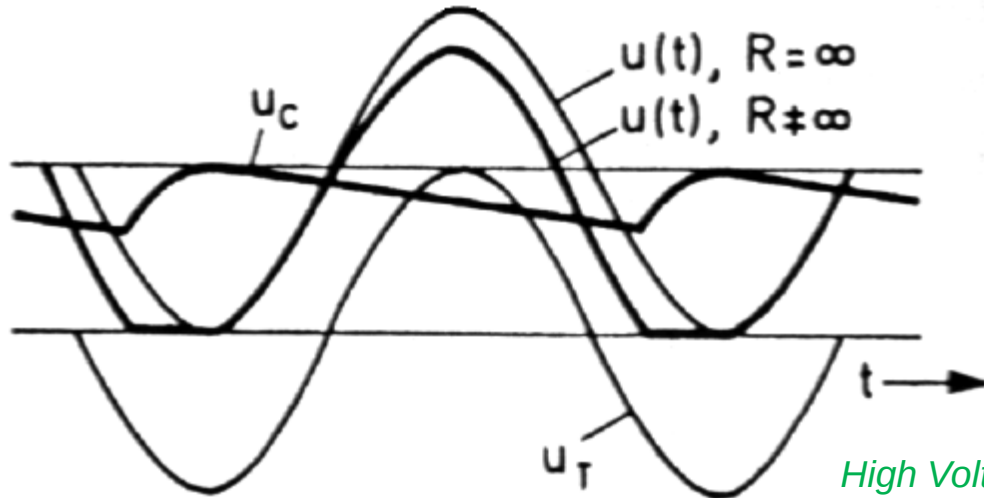
U_1 Τάση αγωγής καθενός ανορθωτή

k Συντελεστής της γεννήτριας

Διάταξη Villard (1)



- Πυκνωτής έναυσης που φορτίζεται έως: $\hat{u}_T$
- Η τάση στο άκρο υψηλής τάσης αυξάνεται έως:
 $u(t) = u_T + U_c$



High Voltage Test Techniques,
D. Kind & K. Feser

- Τιμή κορυφής

$$\hat{U} = 2\hat{U}_T$$

- Αριθμητική μέση τιμή

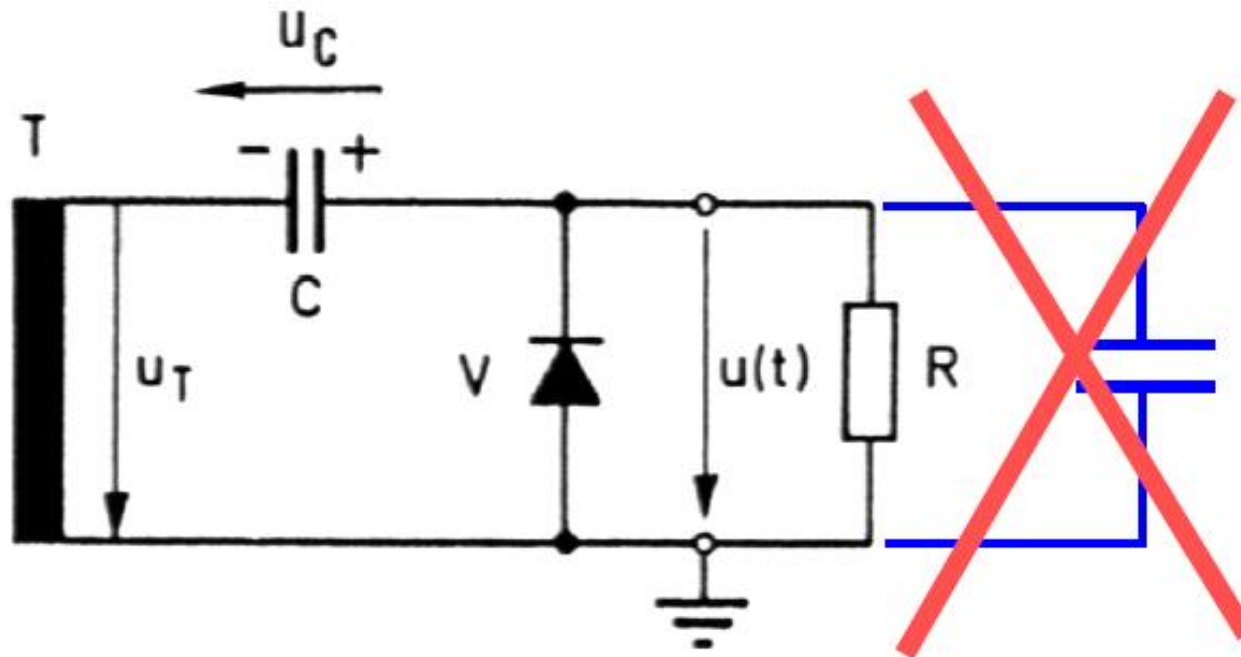
$$\bar{U} = \hat{U}_T$$

- Μέγιστη ανάστροφη τάση

$$\hat{U}_V = 2\hat{U}_T$$

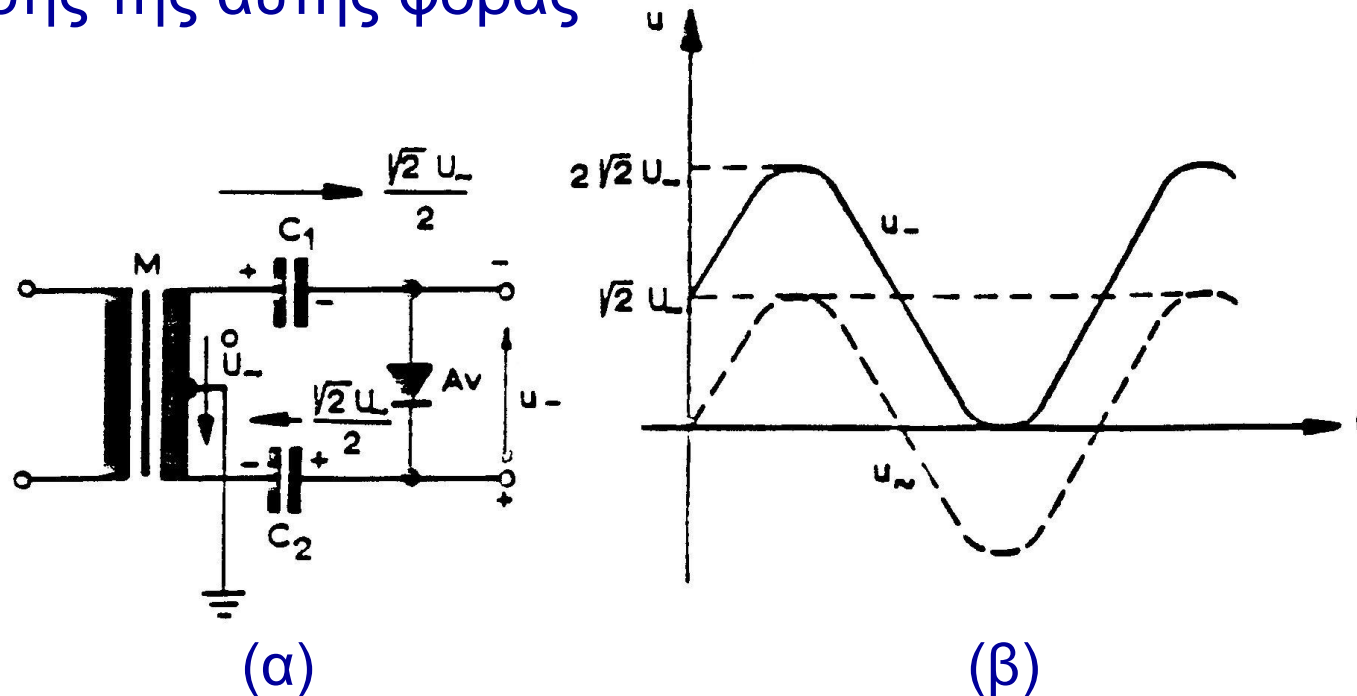
Διάταξη Villard (2)

Η εξομάλυνση της τάσης **δεν είναι δυνατή** στη διάταξη Villard.



Διάταξη Villard (3)

Μέθοδος Villard για την παραγωγή μεταβαλλόμενης τάσης της αυτής φοράς



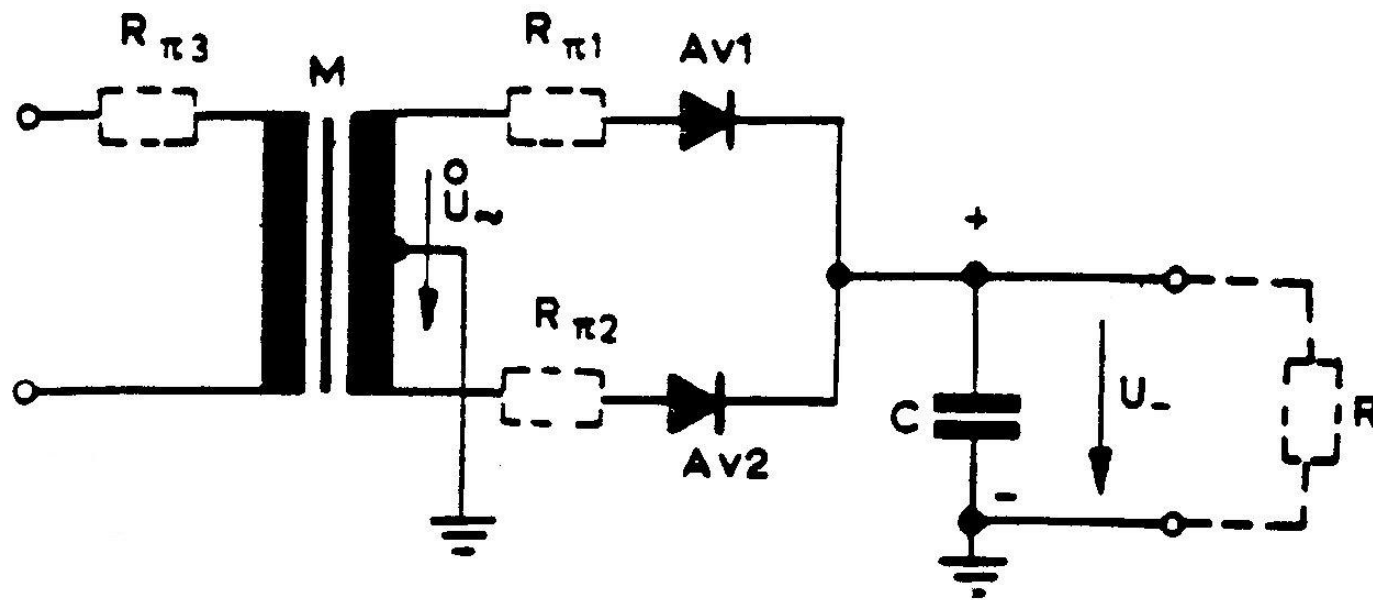
(α) Διάταξη

(β) Διάγραμμα χρονικής μεταβολής της τάσης

Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος

$$\hat{U}_{\varphi} = 2\sqrt{2} U_{\sim}$$

Διάταξη διπλής ανόρθωσης



Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος

$$U_- = \frac{1}{2}(\sqrt{2} U_{\sim})$$

$$\hat{U}_{\varphi} = 2\sqrt{2} U_{\sim} = 2U_-$$

Μειονεκτήματα

- 2 ανορθωτές (κόστος)
- Διπλασία τάση δευτερεύοντος

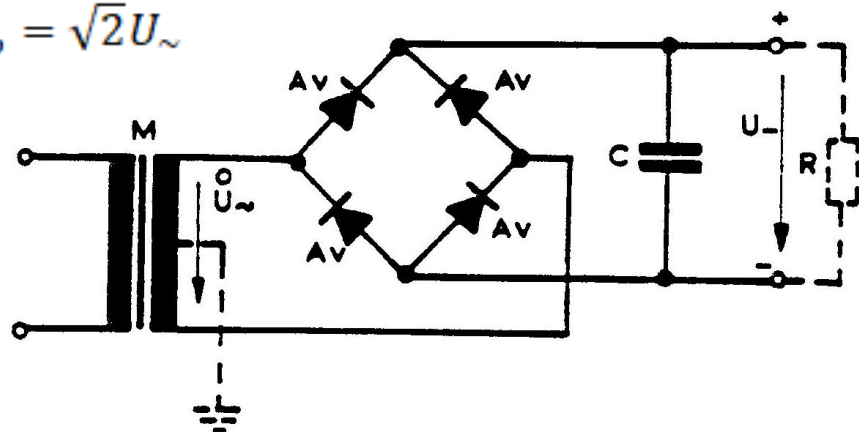
Πλεονέκτημα

- Μικρότερη κυμάτωση

Διατάξεις πλήρους ανόρθωσης

$$U_- = \sqrt{2}U_{\sim}$$

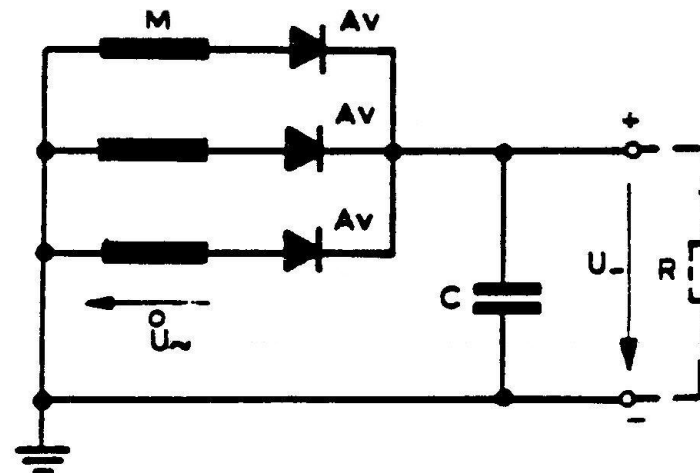
$$\hat{U}_{\varphi} = \sqrt{2}U_{\sim}$$



Πλεονεκτήματα

- Συμμετρική τάση
- Μικρότερη κυμάτωση
- Διπλάσια τάση (ως προς την απλή)

(α)



(β)

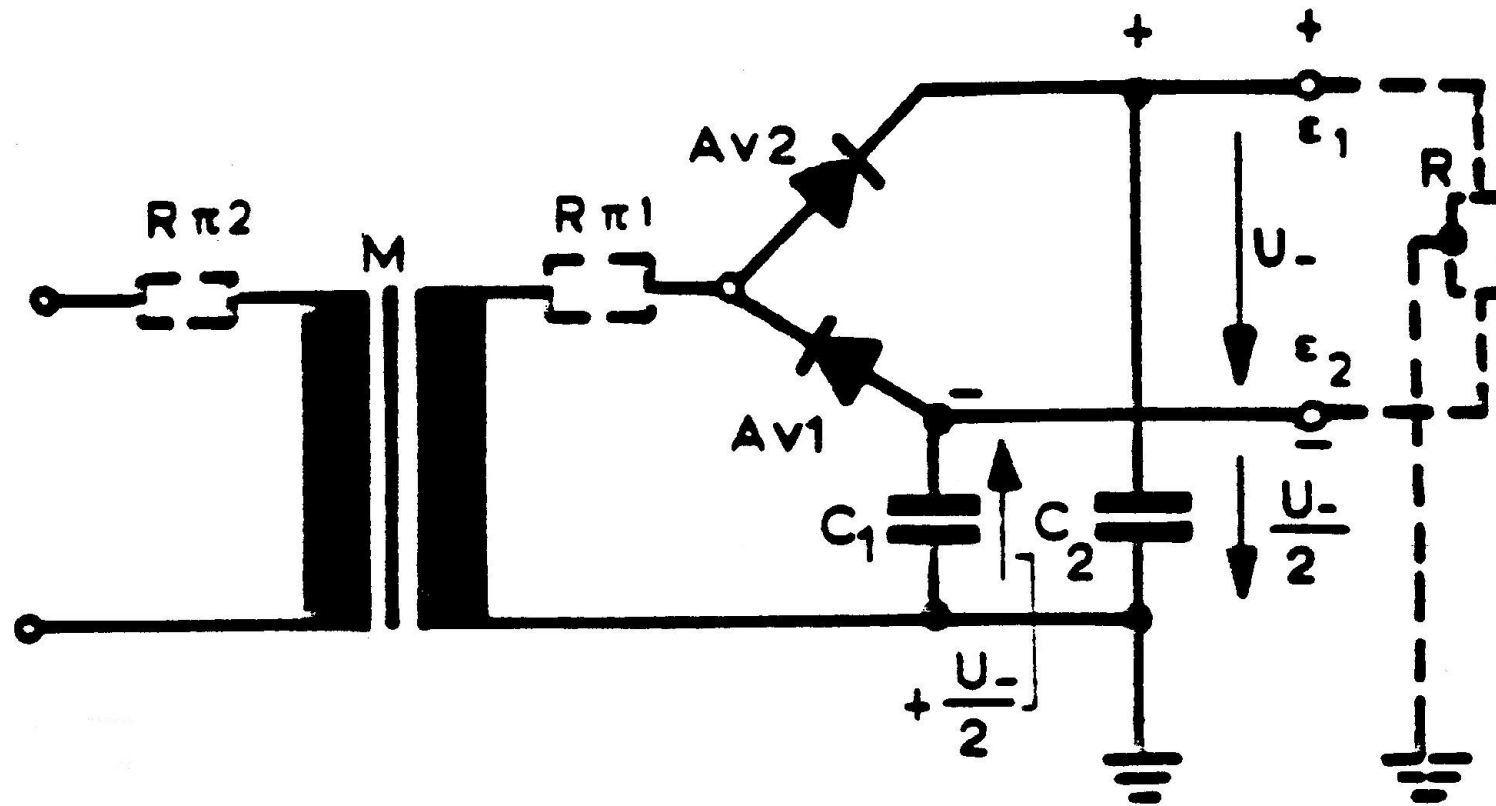
$$U_- = \sqrt{2}U_{\sim}$$

$$\hat{U}_{\varphi} = 2\sqrt{2}U_{\sim}$$

(α) Διάταξη Graetz (γέφυρα ανορθωτών)

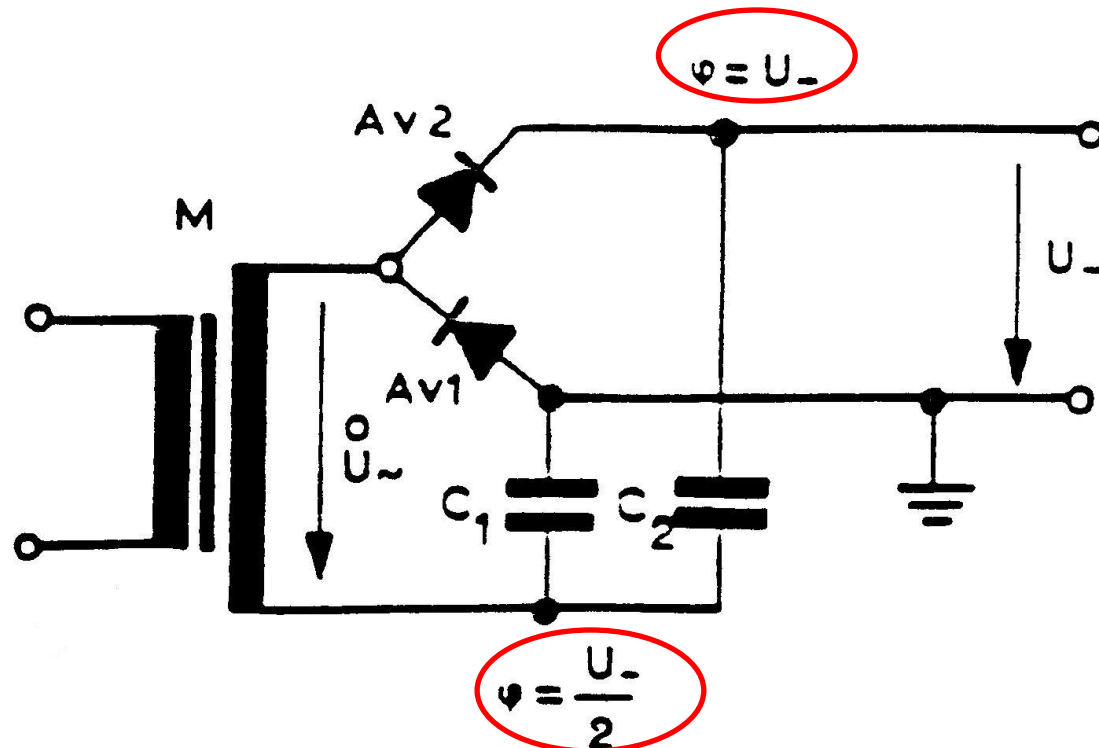
(β) Διάταξη τριφασικής ανόρθωσης

Διάταξη διπλασιασμού της τάσης κατά Liebenow-Greinacher (1)



Διάταξη διπλασιασμού της τάσης κατά Liebenow-Greinacher (2)

Διάταξη διπλασιασμού της τάσης κατά Liebenow-Greinacher με προσγειωμένο τον ένα πόλο της συνεχούς τάσης

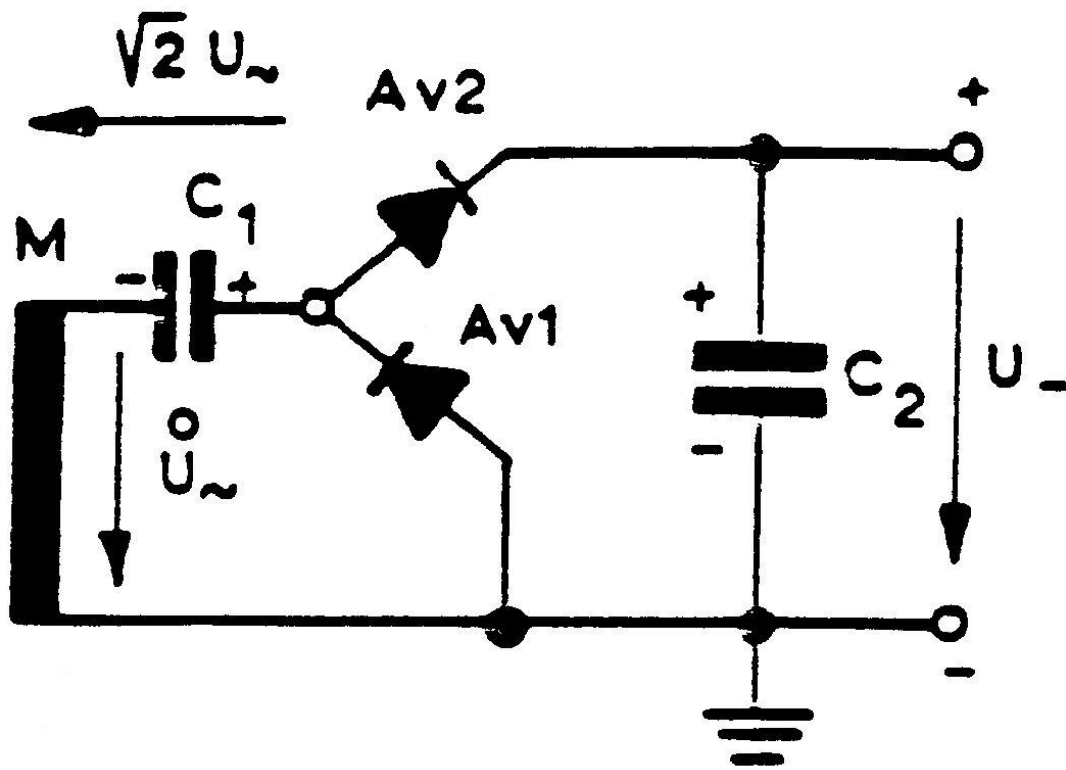


Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος

$$U_- = 2\sqrt{2} U_{\sim}$$

$$\hat{U}_{\varphi} = \frac{U_-}{2} + \sqrt{2} U_{\sim} = 2\sqrt{2} U_{\sim}$$

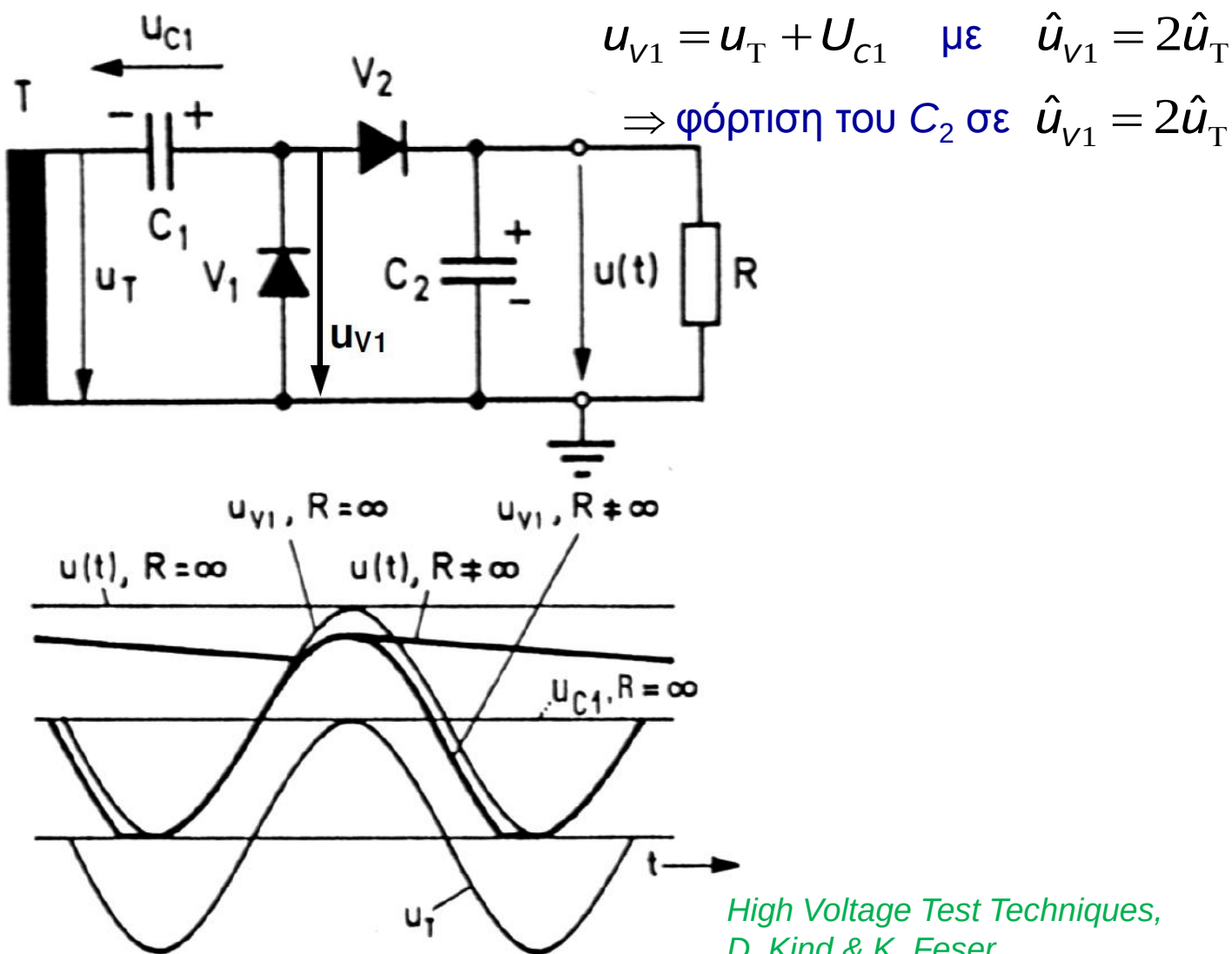
Διάταξη διπλασιασμού της τάσης κατά Cockroft (1)



$$U_- = 2\sqrt{2} U_{\sim}$$

$$\hat{U}_{\varphi 1} = \hat{U}_{\varphi 2} = 2\sqrt{2} U_{\sim}$$

Διάταξη διπλασιασμού της τάσης κατά Cockroft (2)



- Τιμή κορυφής

$$\hat{U} = 2\hat{U}_T$$

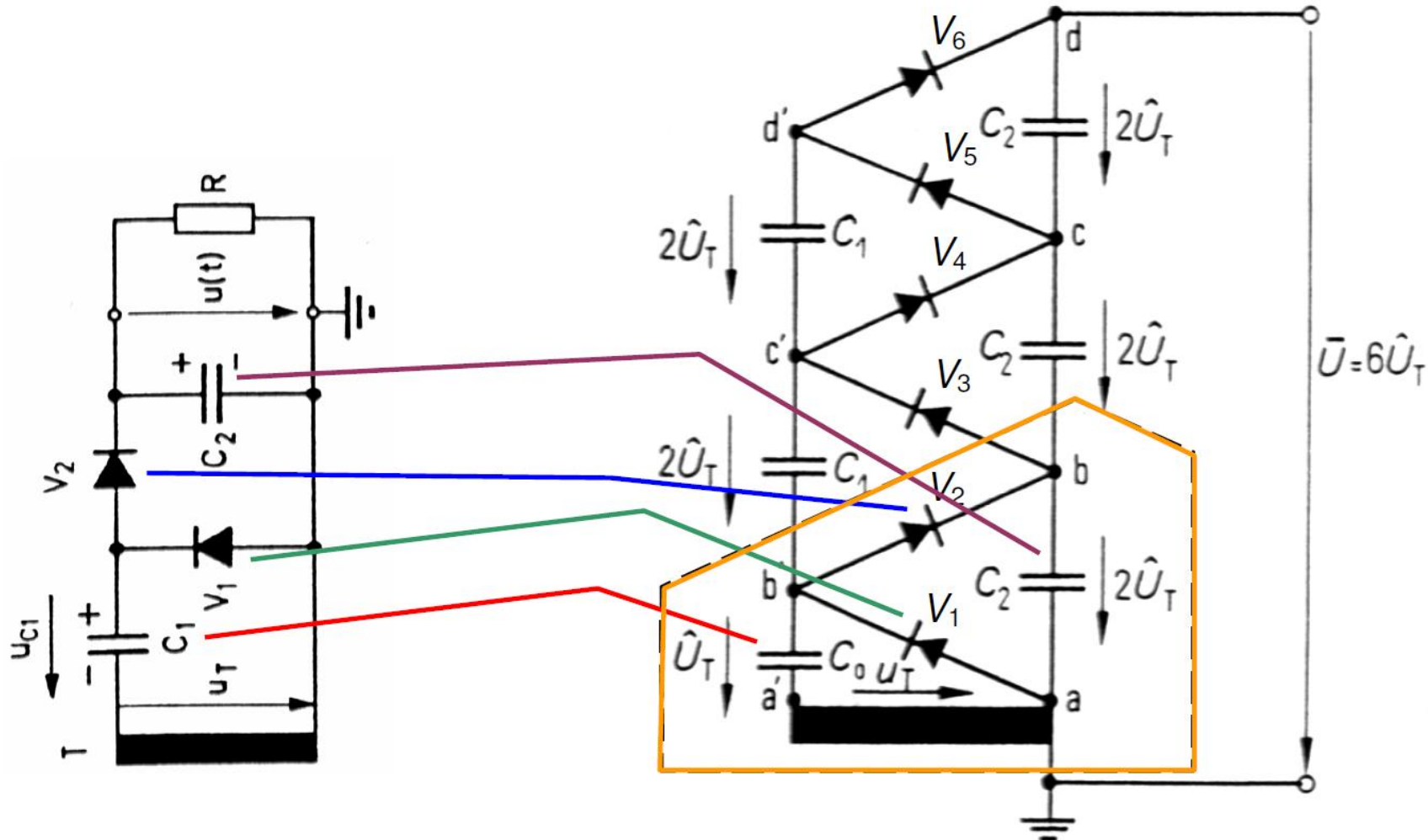
- Αριθμητική μέση τιμή

$$\bar{U} = 2\hat{U}_T$$

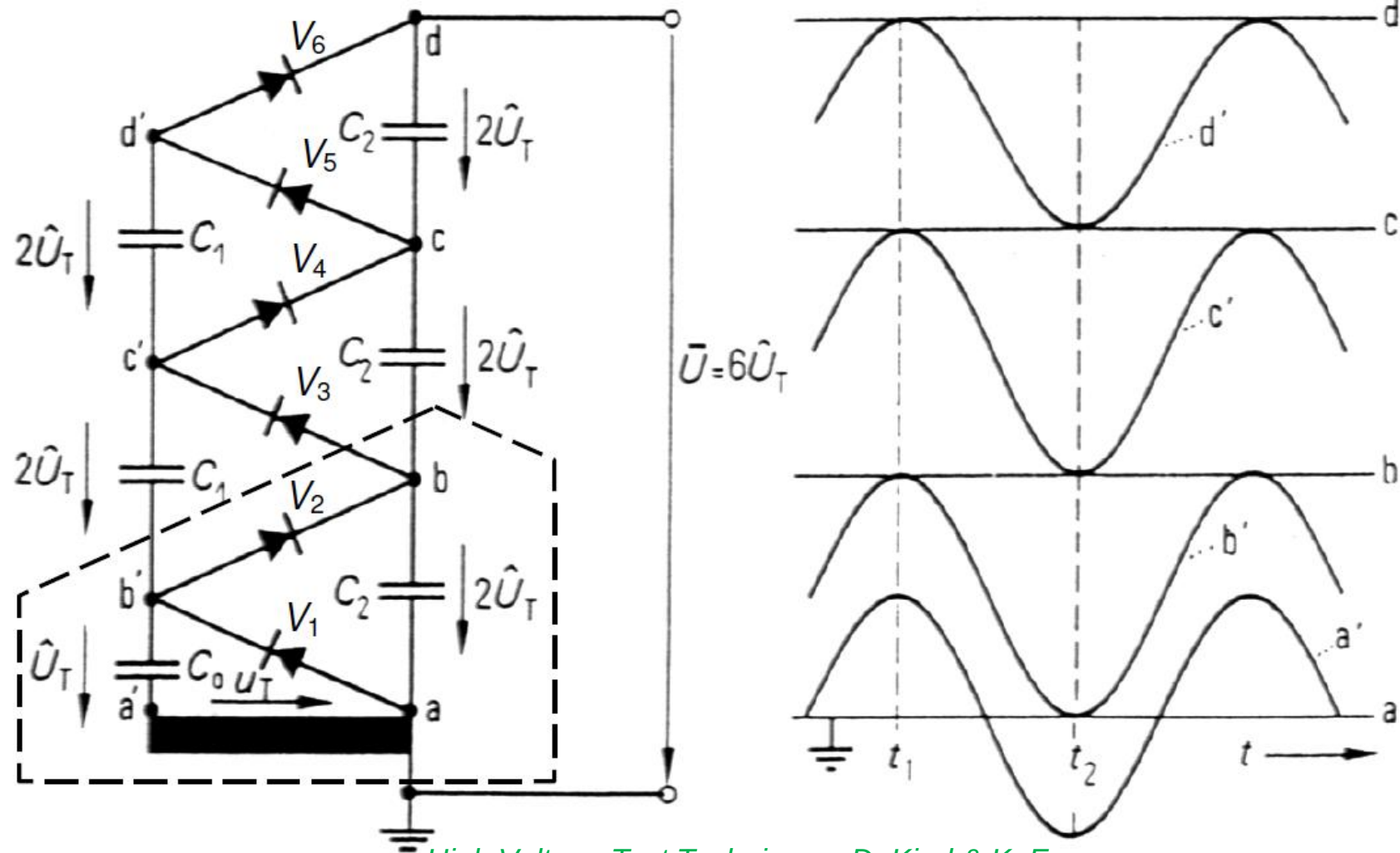
- Μέγιστη ανάστροφη τάση

$$\hat{U}_{V1} = \hat{U}_{V2} \approx 2\hat{U}_T$$

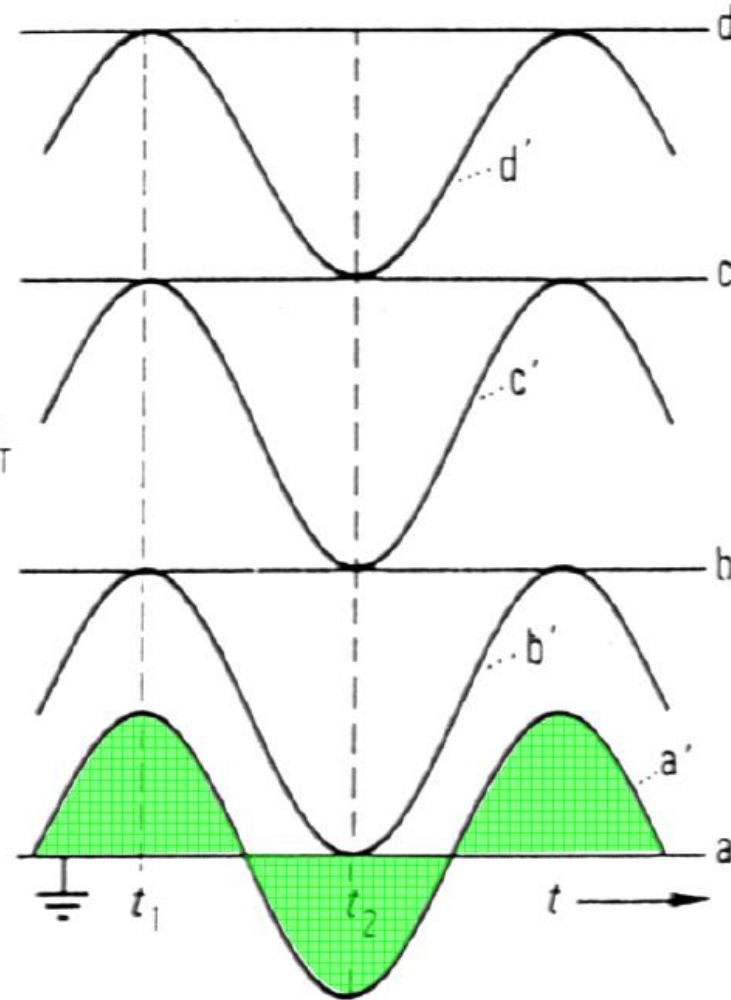
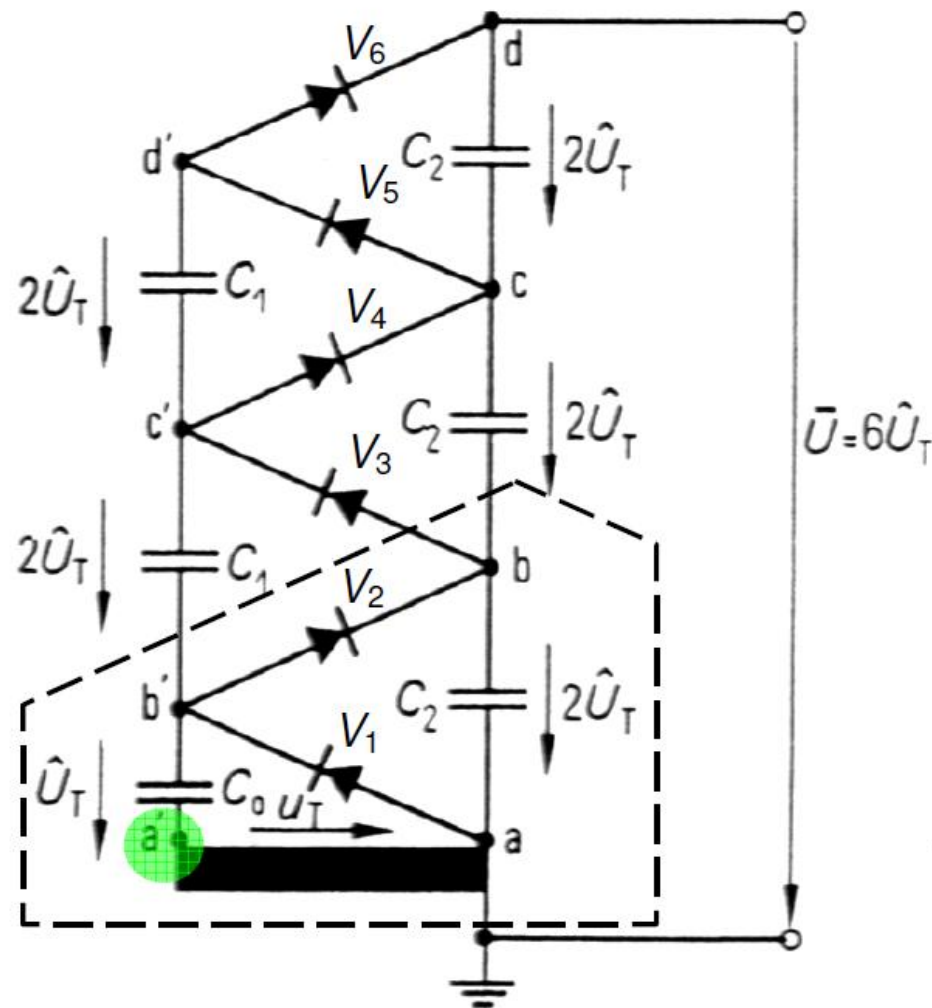
Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη (Πολλαπλασιαστής τάσης)



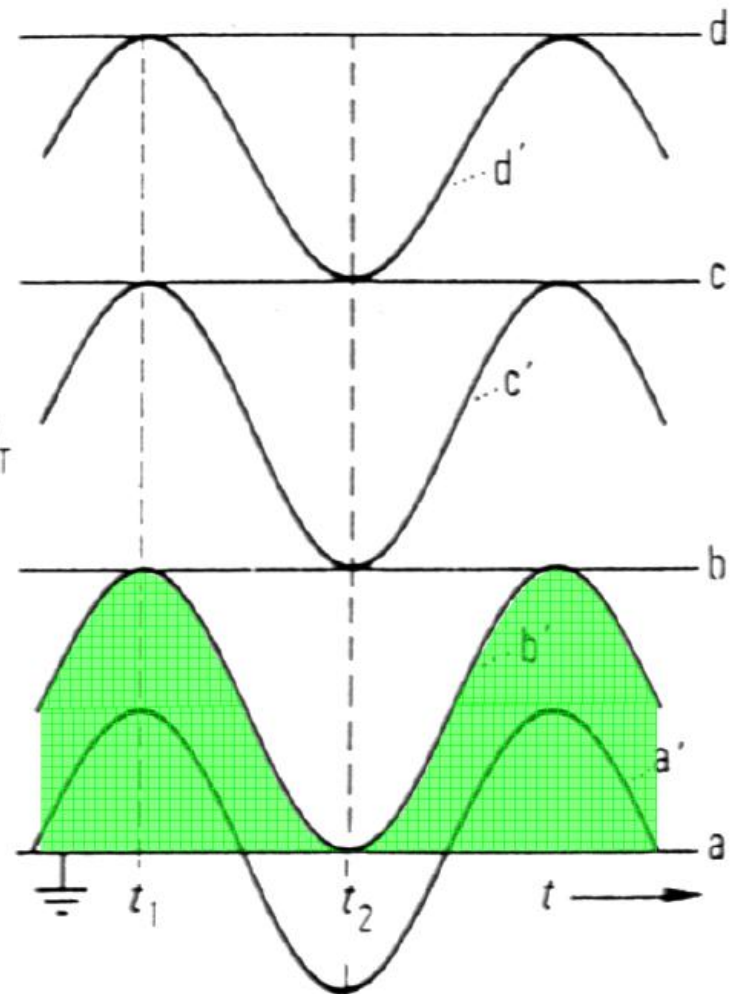
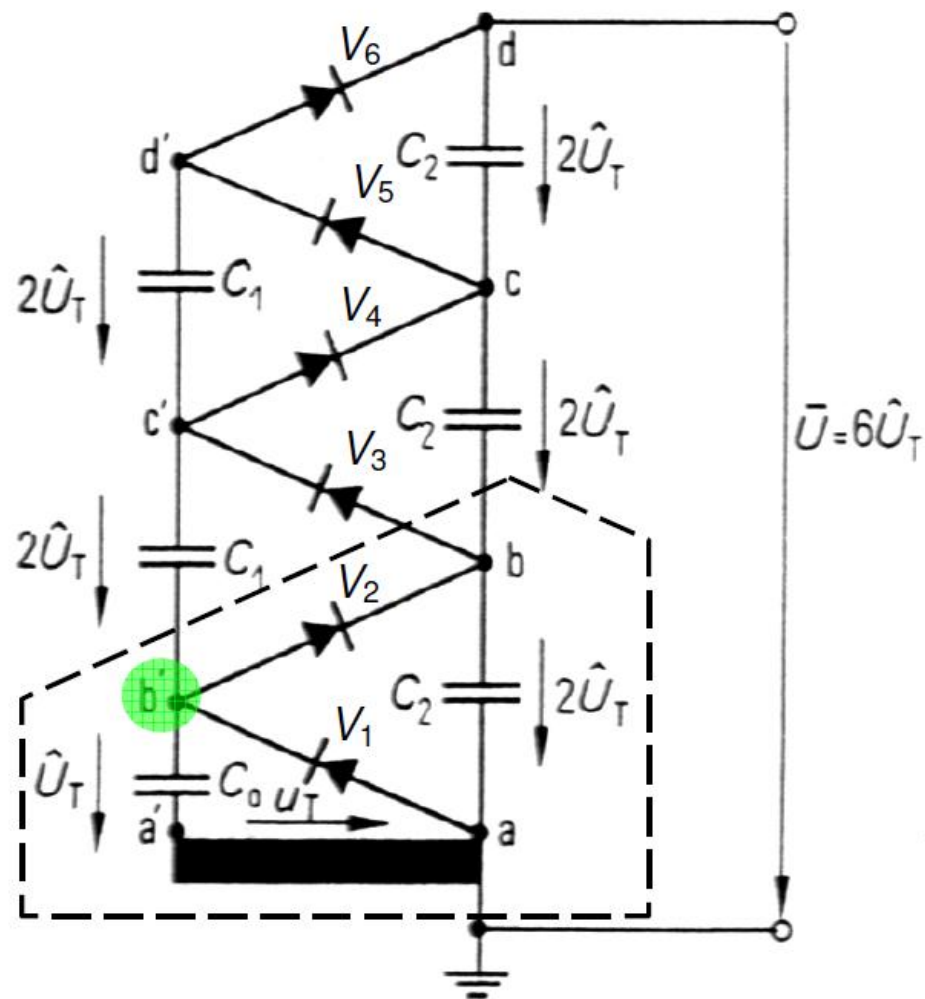
Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη



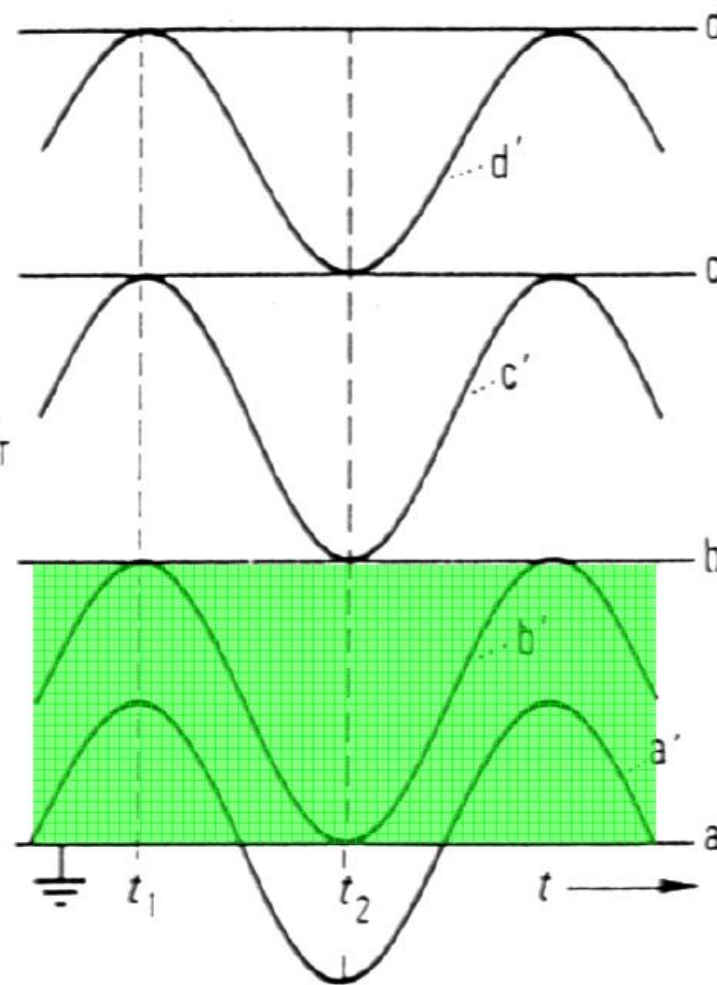
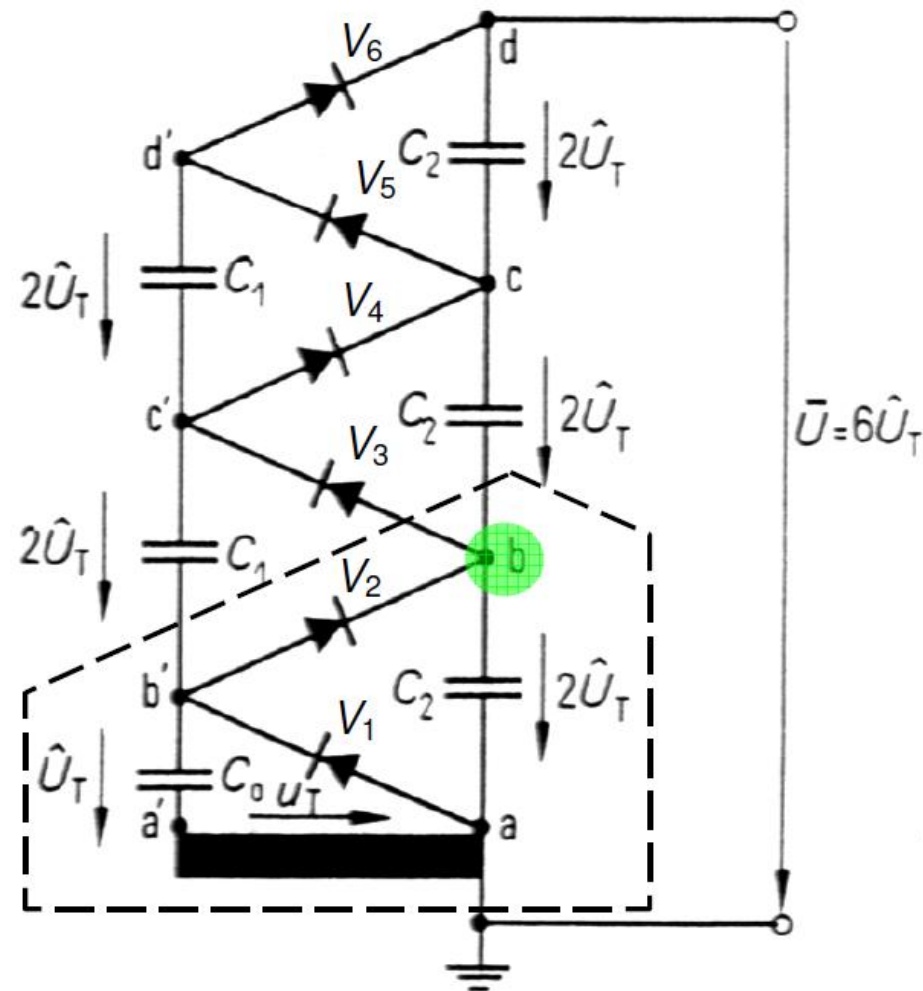
Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη



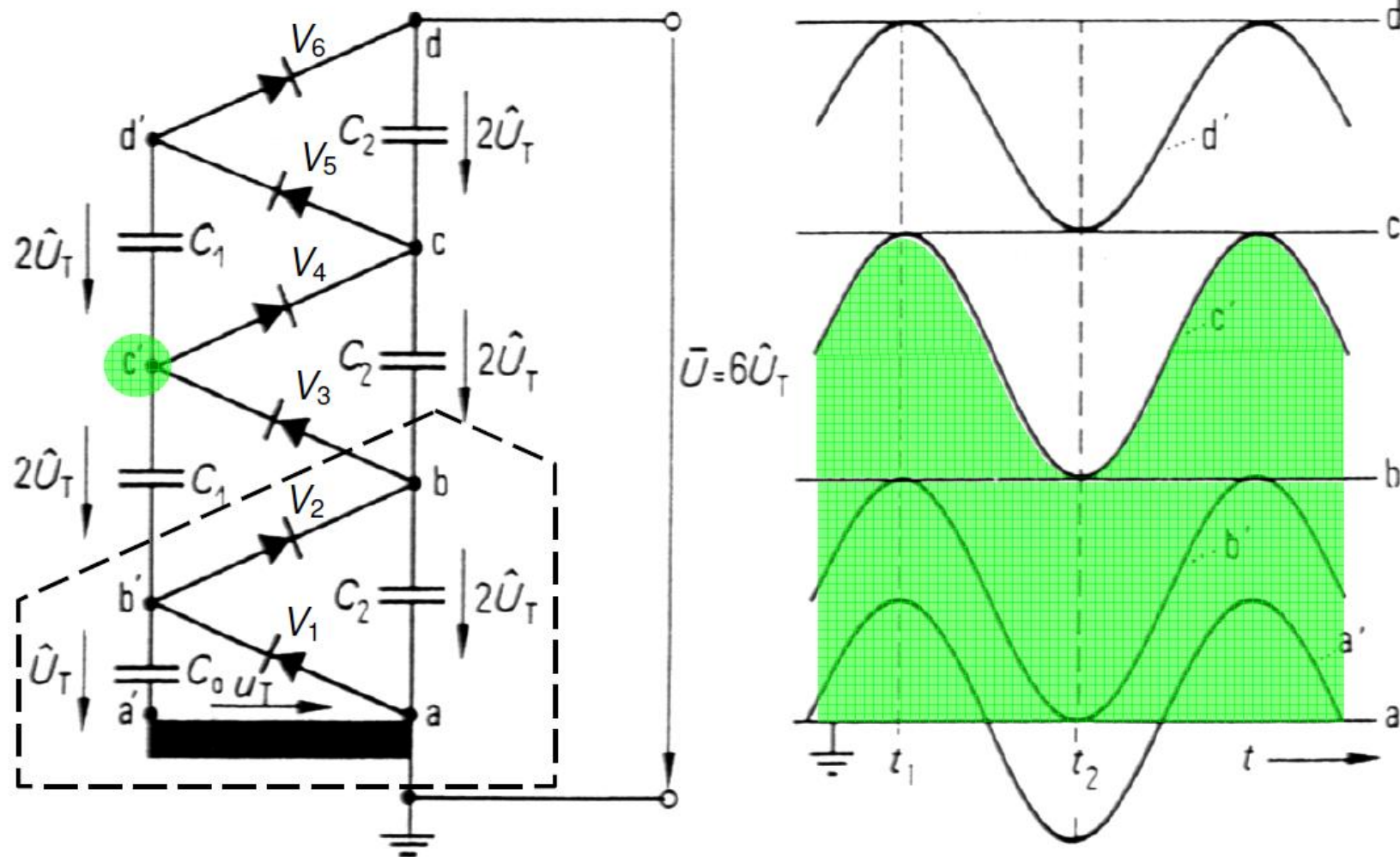
Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη



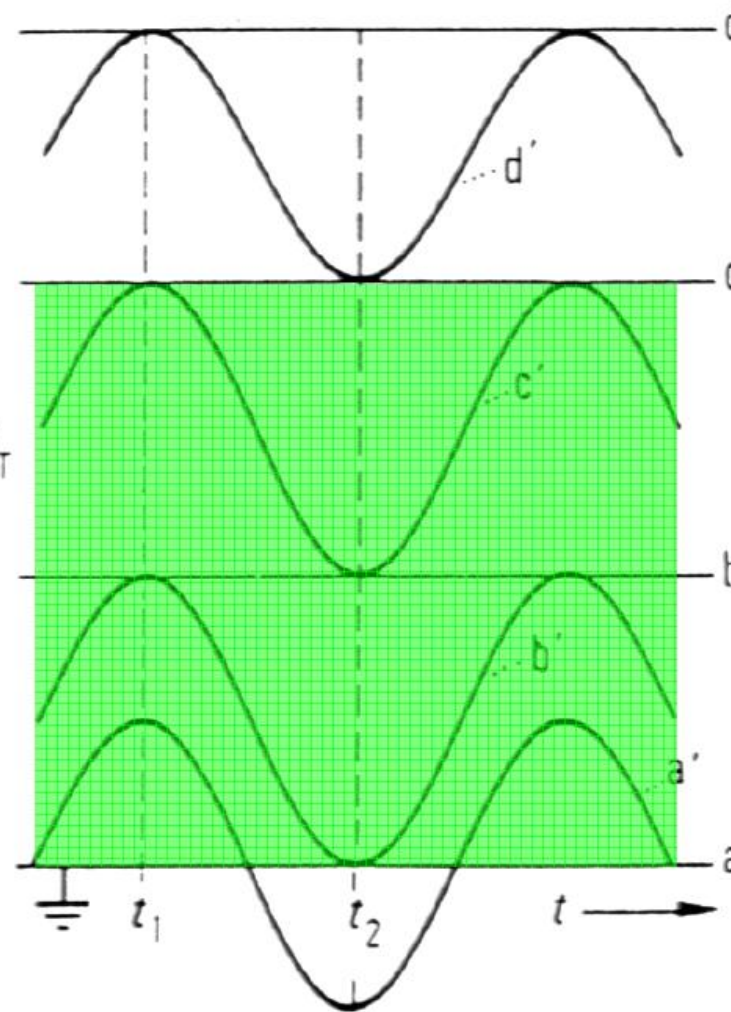
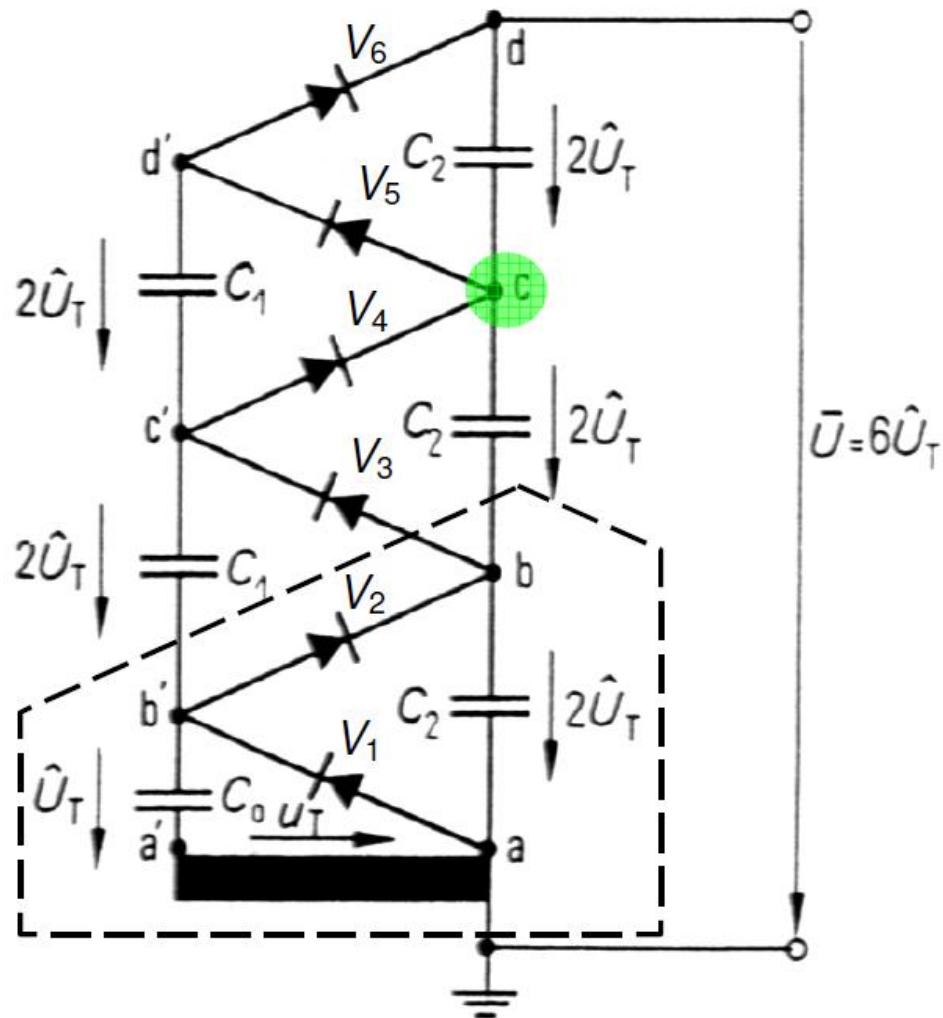
Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη



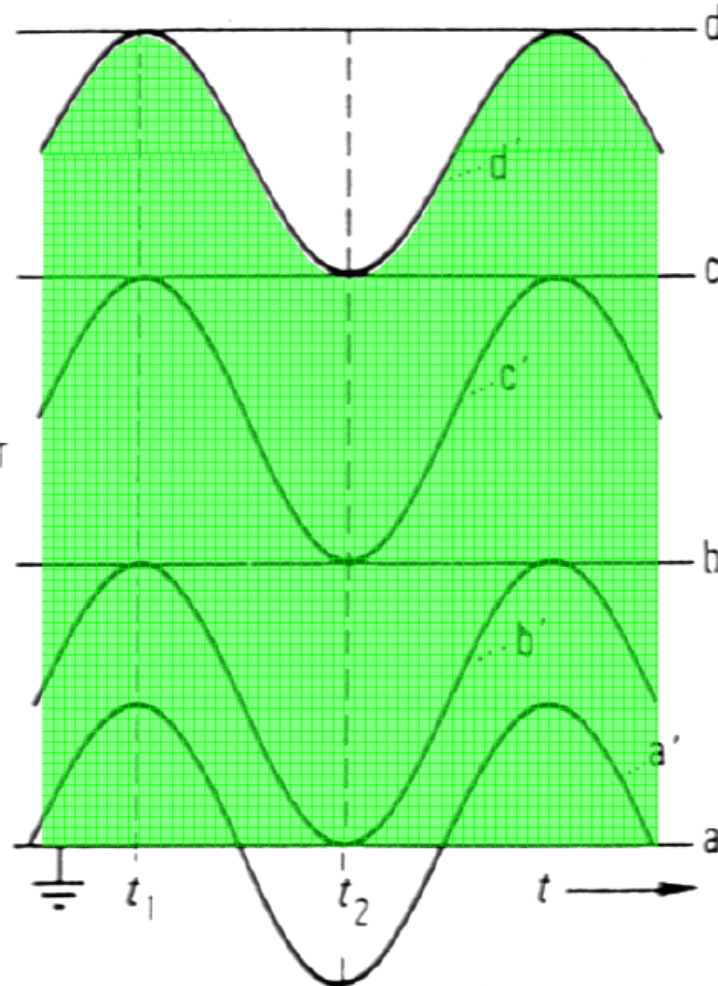
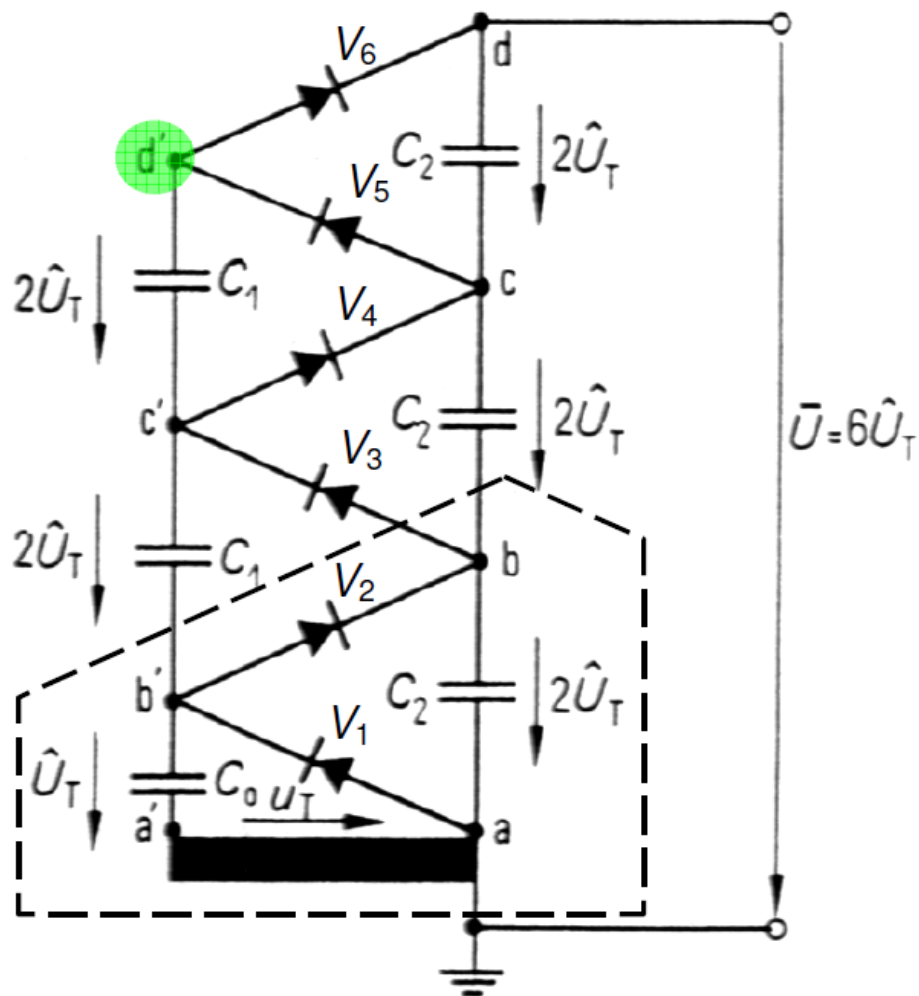
Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη



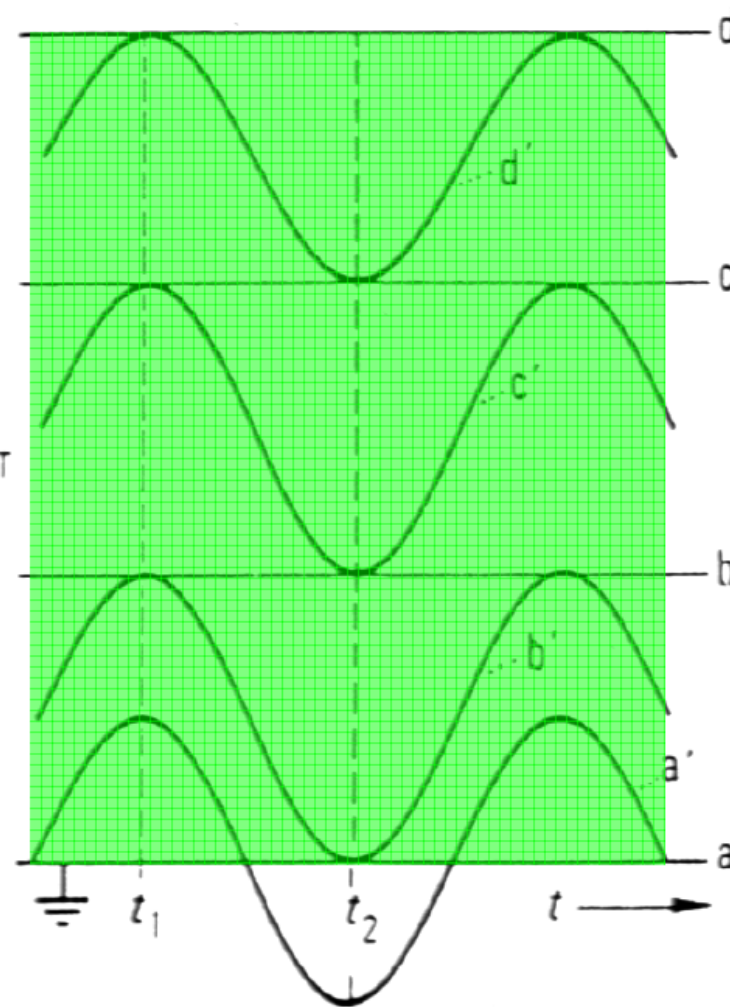
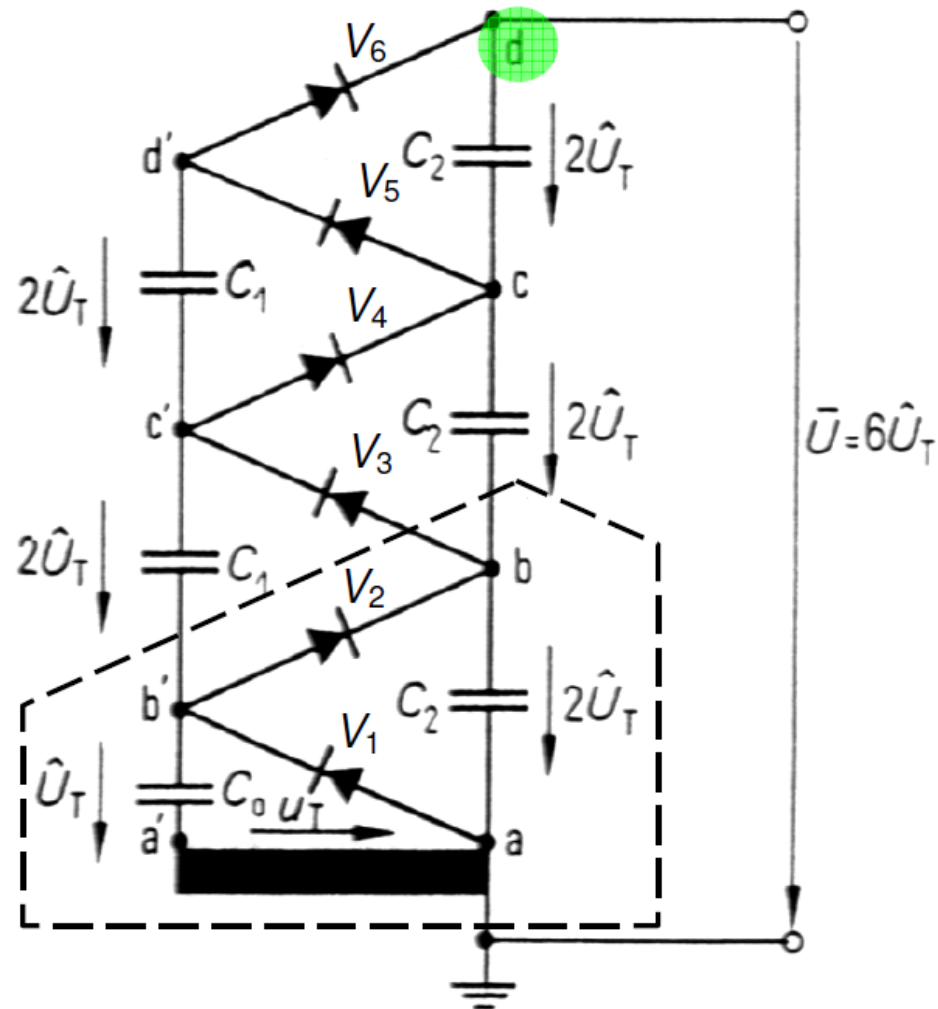
Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη



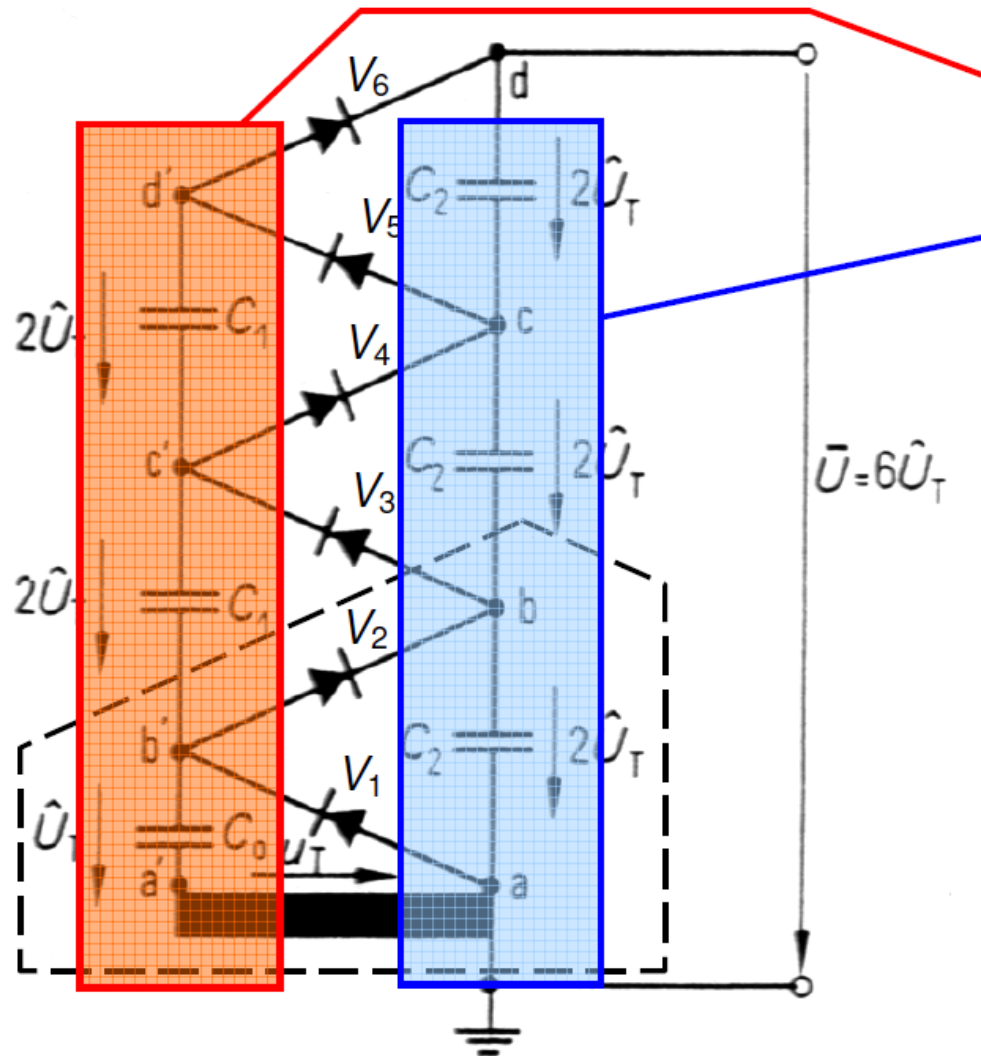
Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη



Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη



Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη



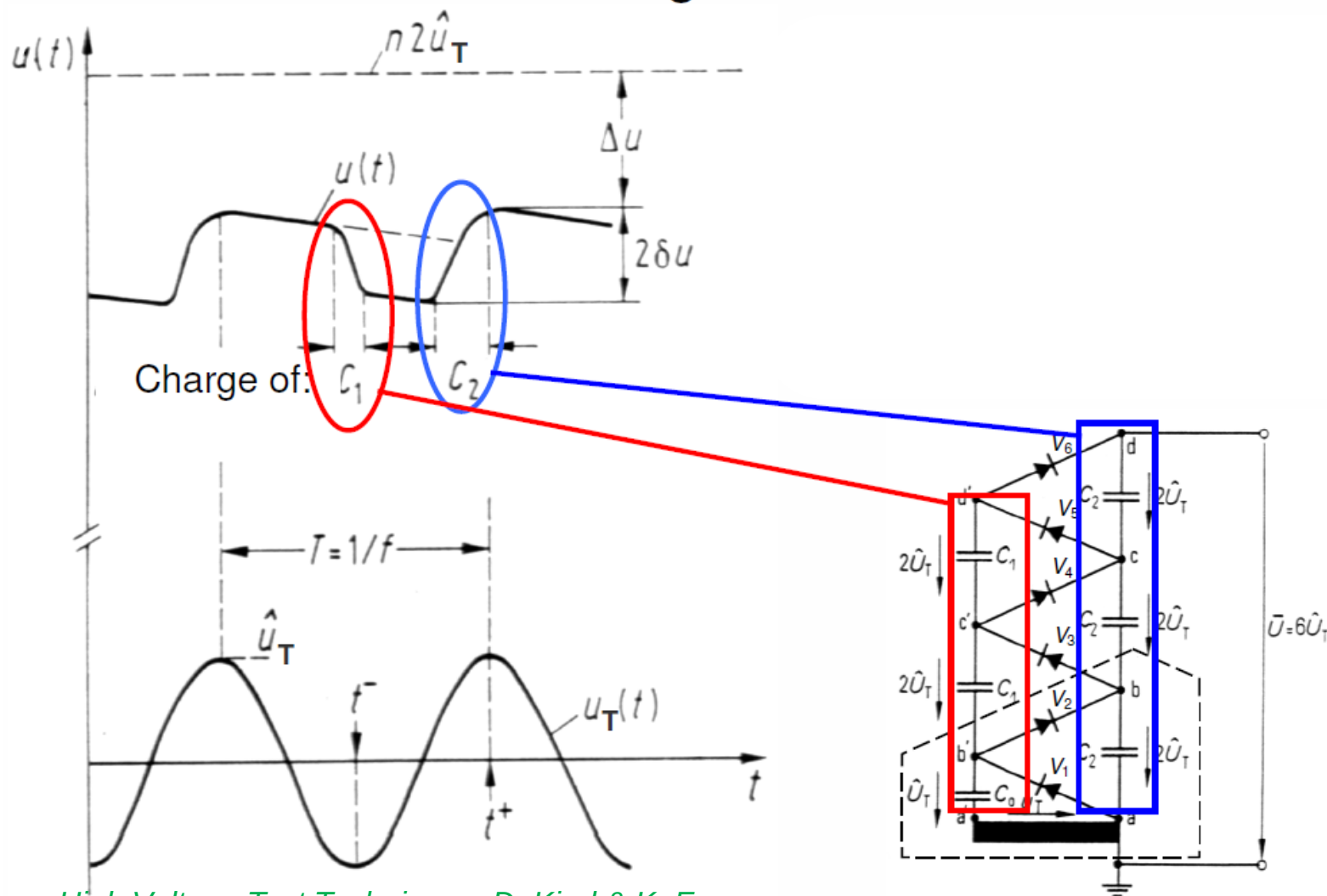
Τμήμα ενίσχυσης

Τμήμα εξομάλυνσης

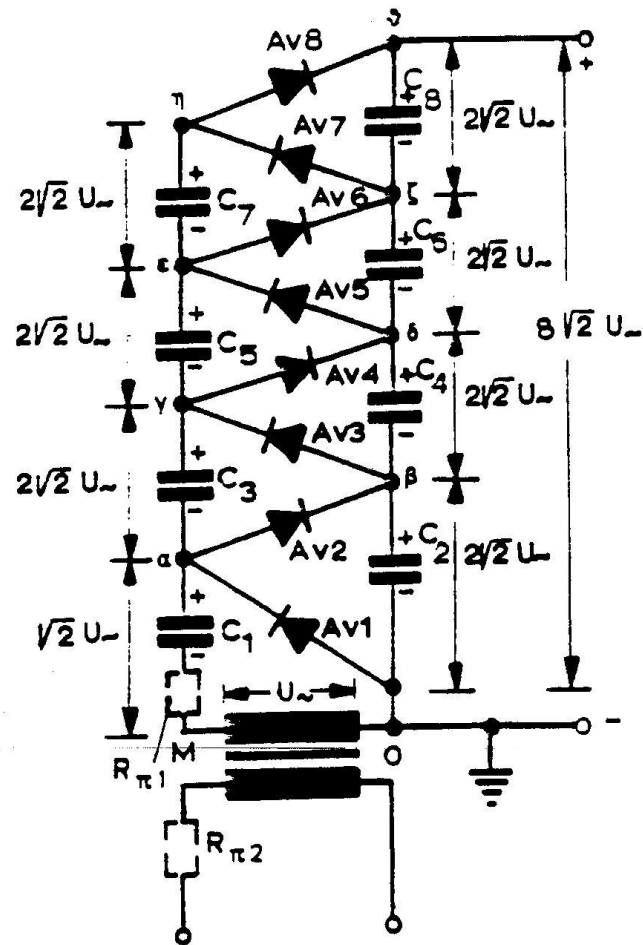
$$C_1 = C_2 = C_0/2$$

Όλοι οι πυκνωτές μεταφέρουν το ίδιο φορτίο ($Q=C \cdot U$).

Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη

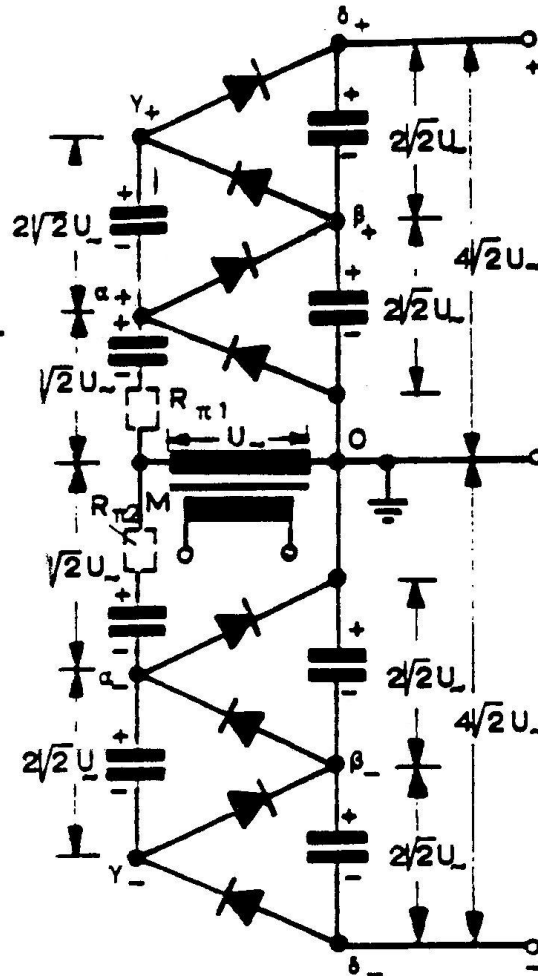


Πολυβάθμιες (οκταβάθμιες) ανορθωτικές διατάξεις



(α)

Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος



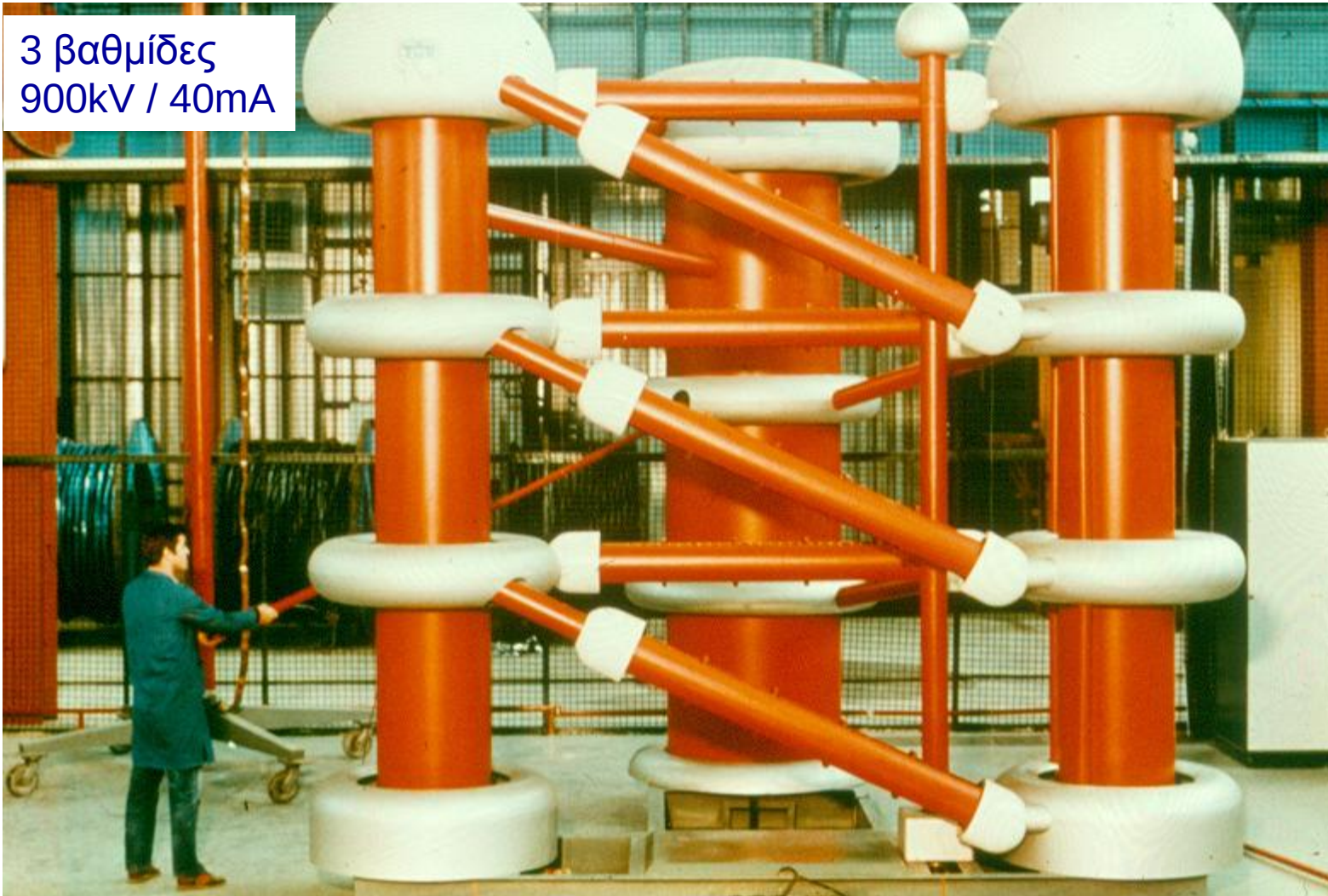
(β)

(α) ο ένας ακροδέκτης της εξόδου της διάταξης προσγειωμένος

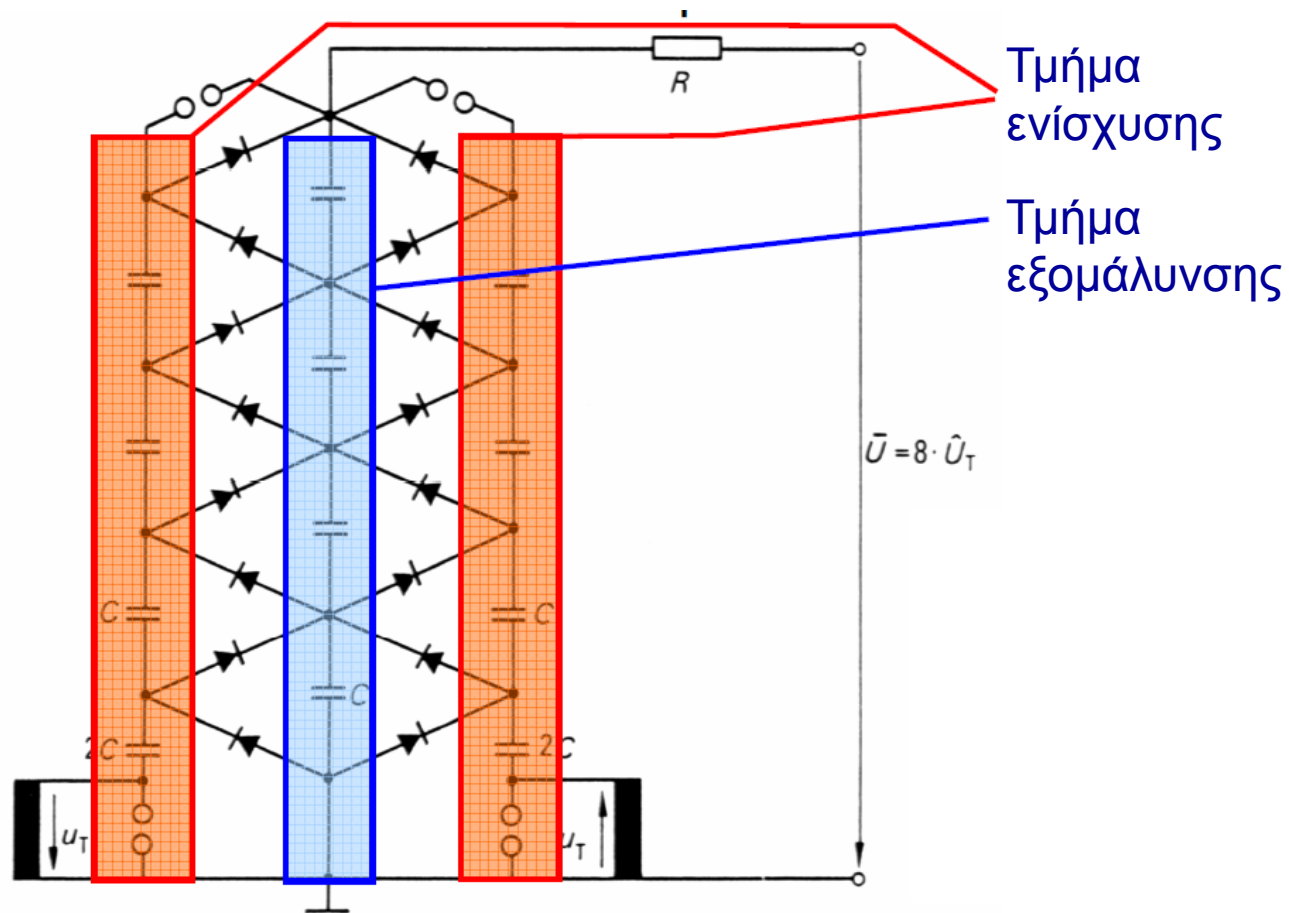
(β) αμφότεροι οι ακροδέκτες εξόδου ελεύθεροι (συνεχής τάση συμμετρική ως προς τη γη)

Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη

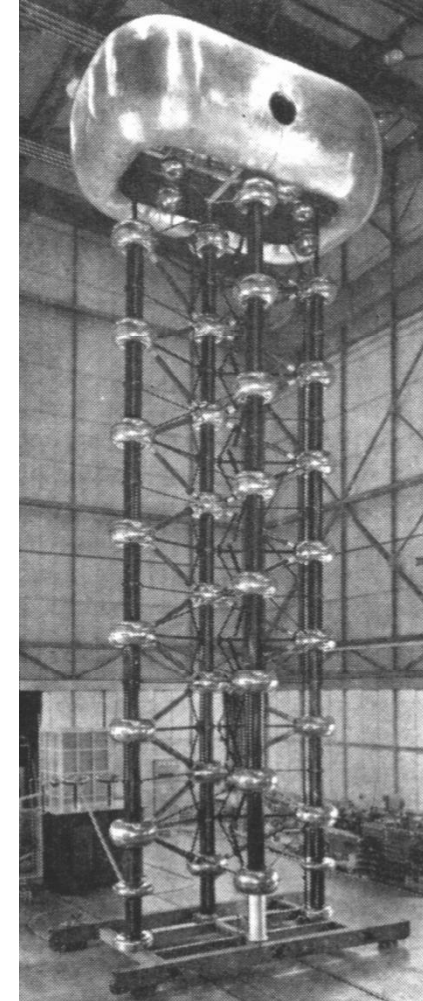
3 βαθμίδες
900kV / 40mA



Πολυβάθμια ανορθωτική διάταξη (διπλό συμμετρικό κύκλωμα)



Σημαντική βελτίωση της κυμάτωσης



Χαρακτηριστικά στοιχεία διαφόρων ανορθωτικών διατάξεων

Ανορθωτική διάταξη	Τάση			Αριθμός ανορθ. στοιχείων	Αριθμός / ονομαστική τάση πυκνωτών	Παρατηρήσεις
	2οντος του ΜΣ $U_{\sim}$	συνεχής U_{-}	φραγμού ανορθ. στοιχείων U_{φ}			
Απλής ανόρθωσης	$1/U_{-}$	$(\sqrt{2})U_{\sim}$	$(2\sqrt{2})U_{\sim} = 2U_{-}$	1	$1/U_{-}$	σημαντικός κυματισμός
Villard	$(\sqrt{2}/2)\hat{U}_{-}$	$\hat{U}_{-} = 2\sqrt{2}U_{\sim}$	$(2\sqrt{2})U_{\sim} = \hat{U}_{-}$	1	1 ή 2*	μεταβαλλόμενη
Διπλής ανόρθωσης	$(\sqrt{2})U_{-}$	$(\sqrt{2}/2)U_{\sim}$	$(\sqrt{2})U_{\sim} = 2U_{-}$	2	$1/U_{-}$	μέτριος κυματισμός
Graetz	$(\sqrt{2}/2)U_{-}$	$(\sqrt{2})U_{\sim}$	$(\sqrt{2})U_{\sim} = U_{-}$	4	$1/U_{-}$	μικρός κυματισμός
Τριφασικής ανόρθωσης	$(\sqrt{2}/2)U_{-}$	$(\sqrt{2})U_{\sim}$	$(2\sqrt{2})U_{\sim} = 2U_{-}$	3	$1/U_{-}$	
Liebenow-Greinacher	$(\sqrt{2}/4)U_{-}$	$(2\sqrt{2})U_{\sim}$	$(2\sqrt{2})U_{\sim} = U_{-}$	2	$2/\frac{U_{-}}{2}$	μέτριος κυματισμός (όσος και στη διπλή ανόρθωση)
Cockroft	$(\sqrt{2}/4)U_{-}$	$(2\sqrt{2})U_{\sim}$	$(2\sqrt{2})U_{\sim} = U_{-}$	2	2** ή 1	
n βαθμίδων	$(\sqrt{2}/2n)U_{-}$	$(n\sqrt{2})U_{\sim}$	$(2\sqrt{2})U_{\sim} = (2/n)U_{-}$	n	n	

* $1/\sqrt{2}U_{\sim}$ ή $2/\frac{\sqrt{2}U_{\sim}}{2}$

** $1/\frac{U_{-}}{2}$ ή $1/U_{-}$