

**ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**«ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ &
ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ»**

5^η ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ

**ΔΙΔΑΣΚΩΝ
ΚΑΡΑΚΑΤΣΑΝΗΣ Σ. ΘΕΟΚΛΗΤΟΣ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ.Π.Θ.**

- **ΒΑΣΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΑΝΟΡΘΩΤΩΝ**

Οι ανορθωτές είναι διατάξεις που μετατρέπουν εναλλασσόμενη ισχύ σε συνεχή.

Διαφορετικά κυκλώματα ανορθωτών παράγουν συνεχή έξοδο με διαφορετικό βαθμό εξομάλυνσης το καθένα.

ΚΥΜΑΤΩΣΗ (Ripple) της εξόδου

$$r = \frac{V_{ac, rms}}{V_{dc}} \times 100 \% \quad \text{ή}$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{dc}}\right)^2 - 1} \times 100 \%$$

όπου

$V_{ac,rms}$ η ενεργός τιμή των εναλλασσόμενων συνιστωσών της τάσης εξόδου.

V_{dc} η μέση τιμή της τάσης εξόδου.

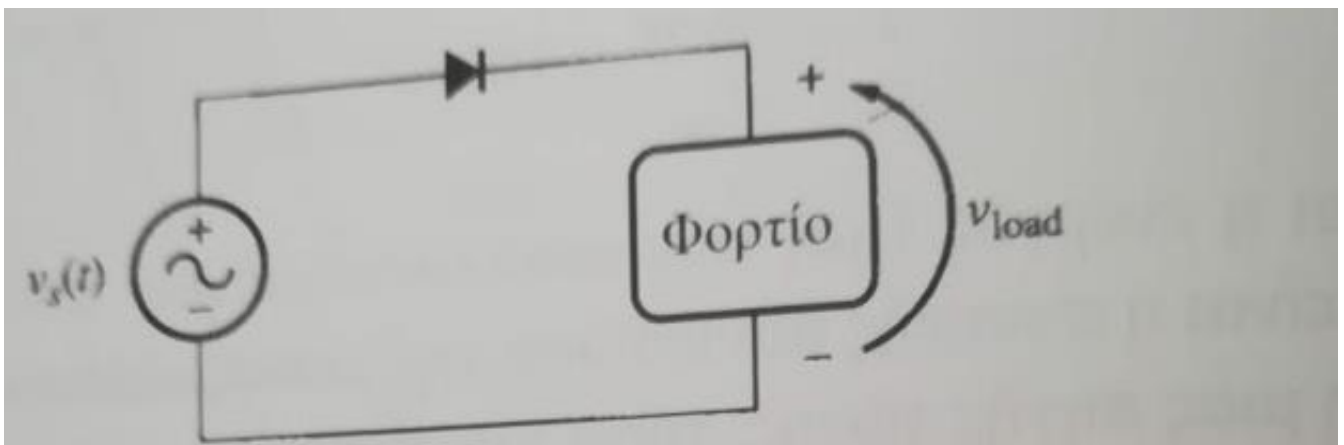
και V_{rms} η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου.

1. **ΗΜΙΑΝΟΡΘΩΤΗΣ.** Μονοφασικός ανορθωτής μισού κύματος.
2. **ΓΕΦΥΡΑ ΠΛΗΡΟΥΣ ΑΝΟΡΘΩΣΗΣ.**
3. **ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΗΜΙΑΝΟΡΘΩΤΗΣ.**
4. **ΠΛΗΡΗΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΟΡΘΩΤΗΣ.**

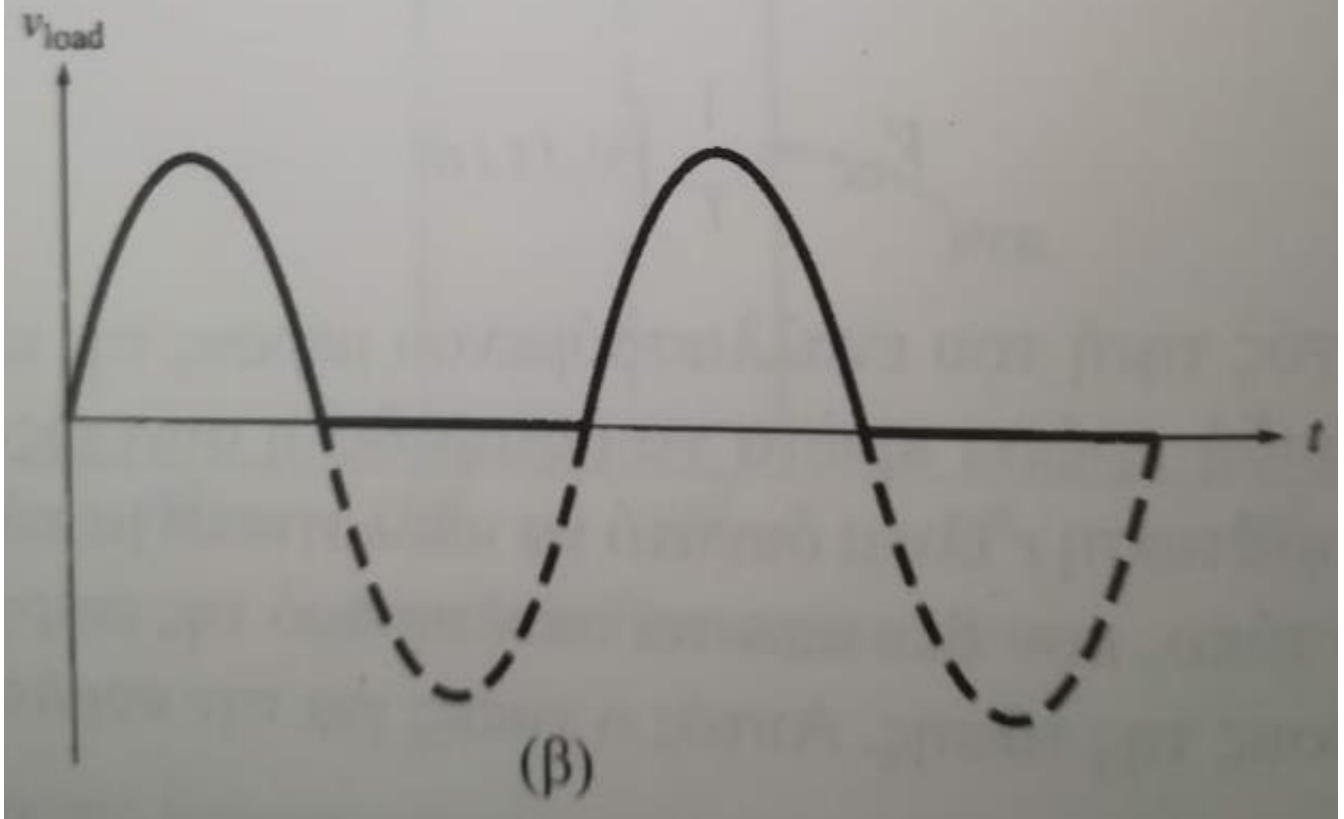
Οι ανορθωτές πλήρους κύματος παράγουν λιγότερο παλλόμενο και ισχυρότερο (με μεγαλύτερη μέση τιμή) συνεχές ρεύμα από ότι οι ανορθωτές μισού κύματος.

Οι τριφασικοί ανορθωτές χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές με μεγαλύτερες απαιτήσεις φορτίου.

- **ΦΙΛΤΡΑ** Η κυμάτωση που παράγεται με την αλλαγή της τάσης ac σε dc μπορεί να γίνει πολύ ομαλότερη με την χρήση φίλτρων.



(α)



(β)

Κύκλωμα ημιανόρθωσης και Τάση εξόδου

$$v_s(t) = V_M \sin \omega t$$

$$v_{\text{load}}(t) = \begin{cases} V_M \sin \omega t & 0 < \omega t < \pi \\ 0 & \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases}$$

Τάση της πηγής $V_s(t)$ και τάση εξόδου $V_{\text{load}}(t)$ στο φορτίο

Μέση τιμή της τάσης εξόδου του ανορθωτή.

$$V_{\text{DC}} = V_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{\text{load}}(t) dt$$

$$= \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\pi/\omega} V_M \sin \omega t dt$$

$$= \frac{\omega}{2\pi} \left(-\frac{V_M}{\omega} \cos \omega t \right) \Big|_0^{\pi/\omega}$$

$$= -\frac{V_M}{2\pi} [(-1) - (1)]$$

$$= \frac{V_M}{\pi}$$

Ενεργός τιμή της τάσης εξόδου του ανορθωτή.

$$V_{\text{rms}}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{\text{load}}^2(t) dt}$$

$$= \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\pi/\omega} V_M^2 \sin^2 \omega t dt}$$

$$= V_M \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\pi/\omega} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt}$$

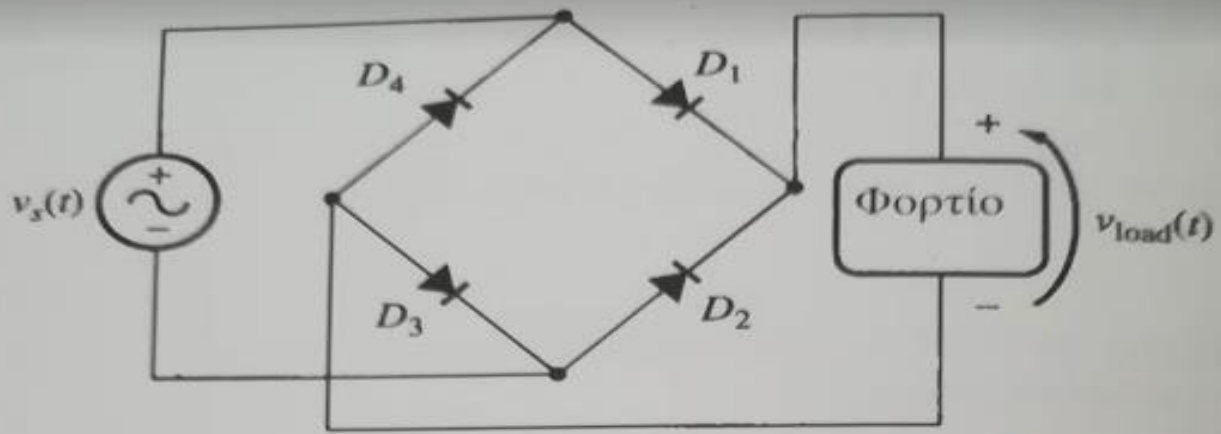
$$= V_M \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\pi/\omega} \frac{1}{2} dt - \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\pi/\omega} \frac{1}{2} \cos 2\omega t dt}$$

$$= V_M \sqrt{\left(\frac{\omega}{4\pi} t - \frac{1}{8\pi} \sin 2\omega t \right) \Big|_0^{\pi/\omega}}$$

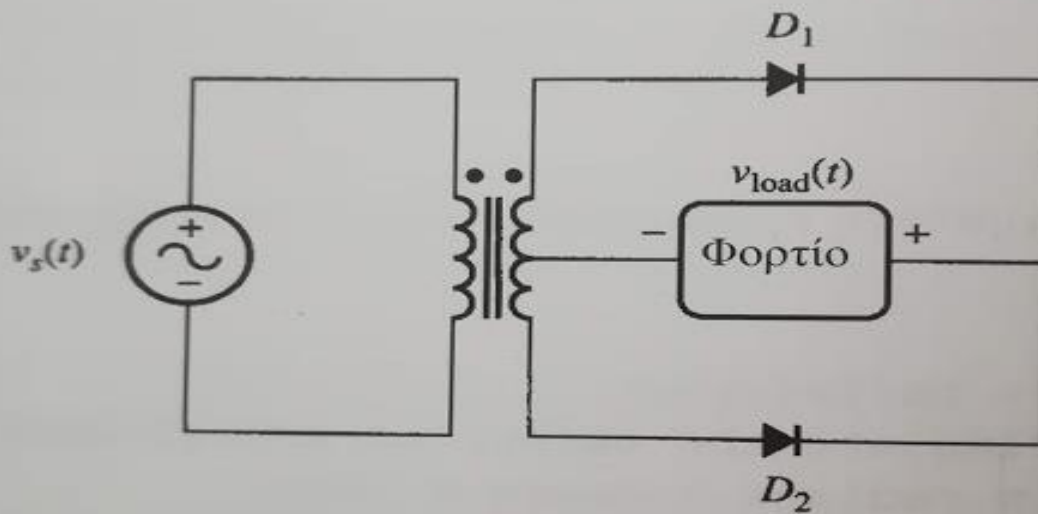
$$= V_M \sqrt{\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{8\pi} \sin 2\pi\right) - \left(0 - \frac{1}{8\pi} \sin 0\right)}$$
$$= \frac{V_M}{2}$$

Κυμάτωση του ανορθωτικού κυκλώματος

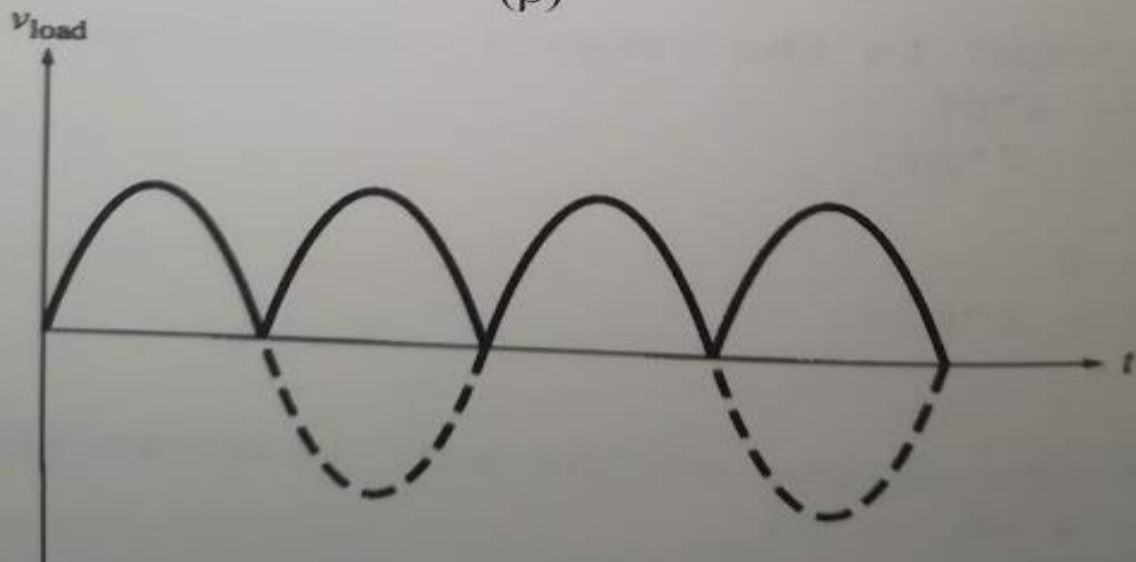
$$r = \sqrt{\left(\frac{V_M/2}{V_M/\pi}\right)^2} - 1 \times 100\%$$
$$r = 121\%$$



(α)

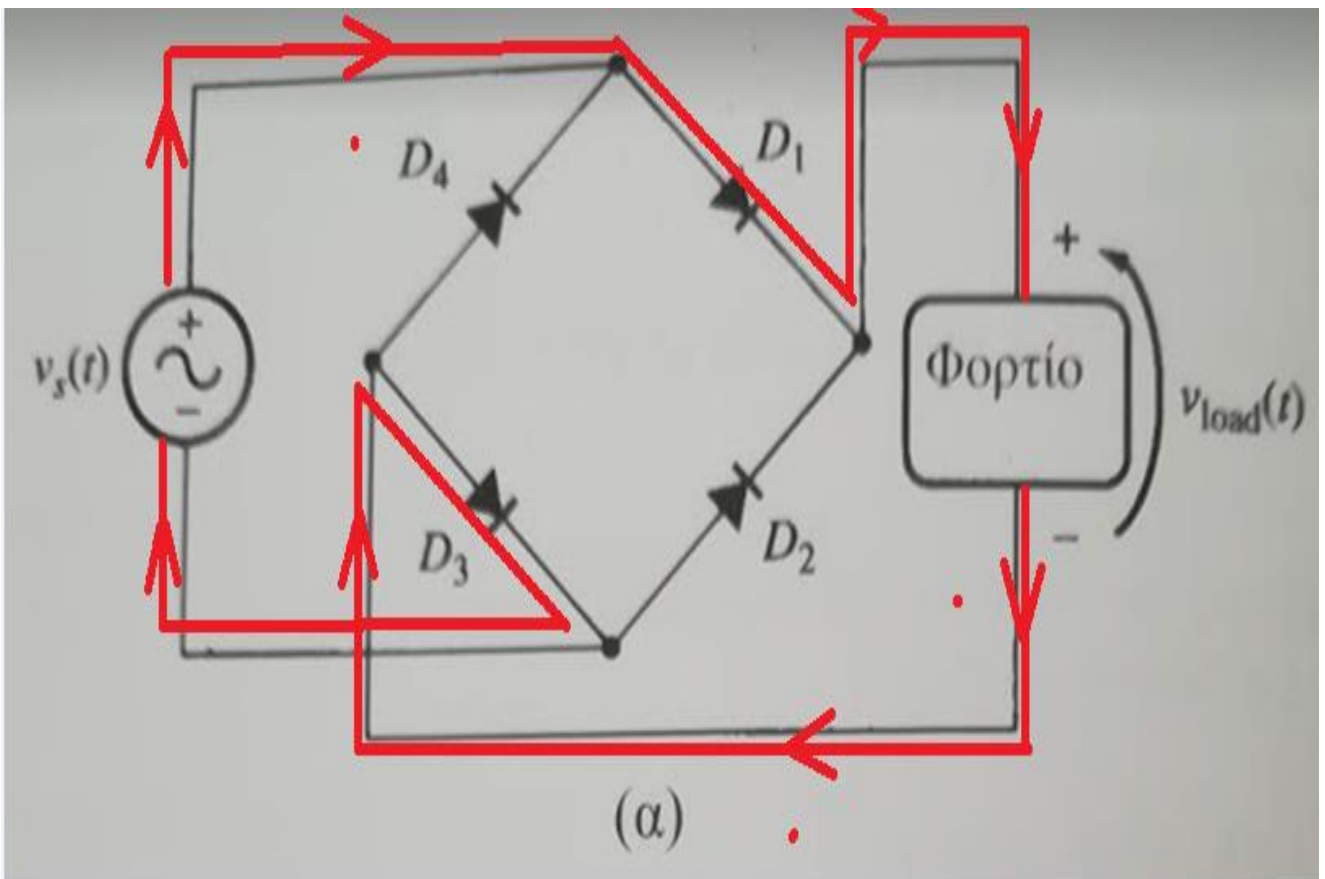


(β)

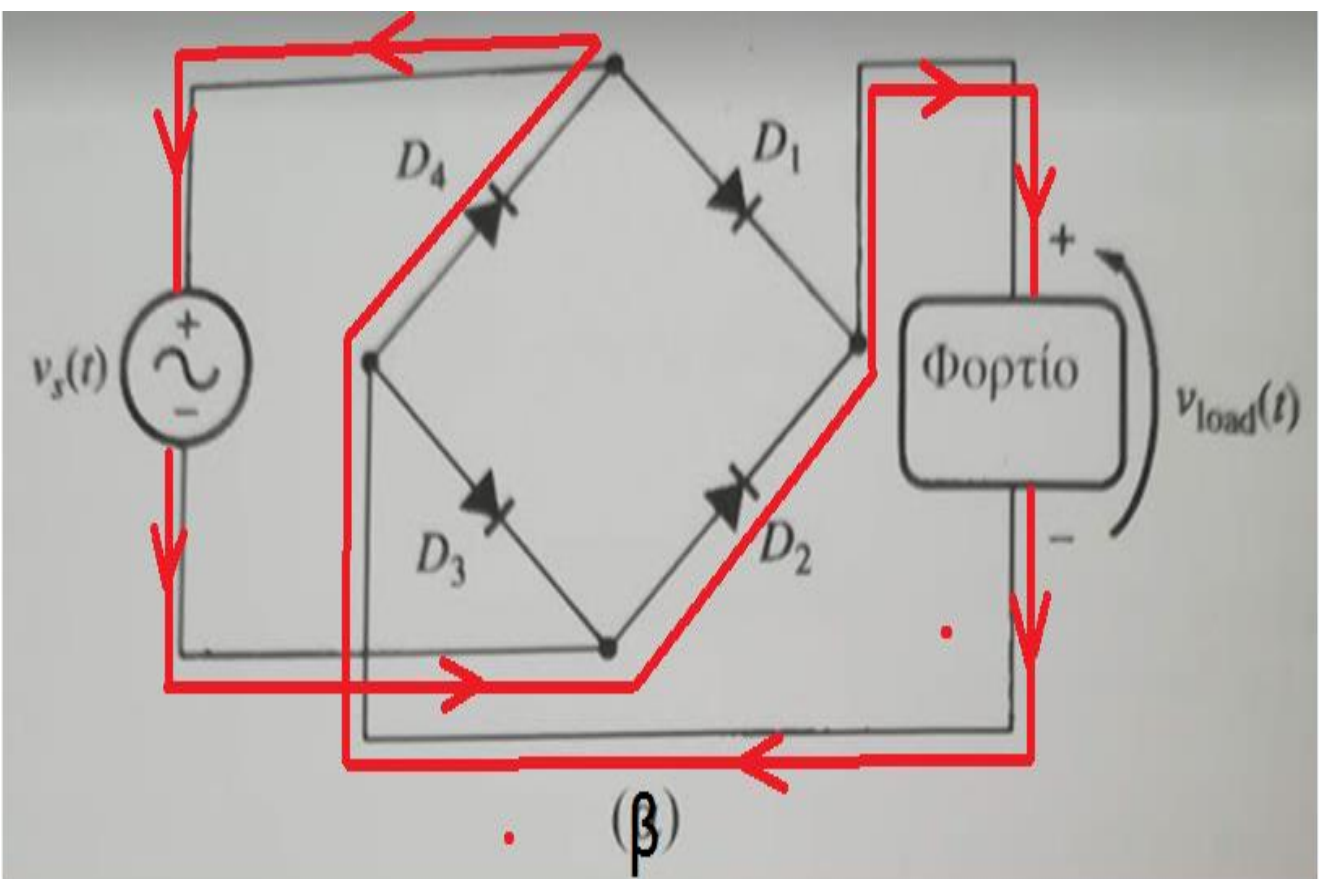


(γ)

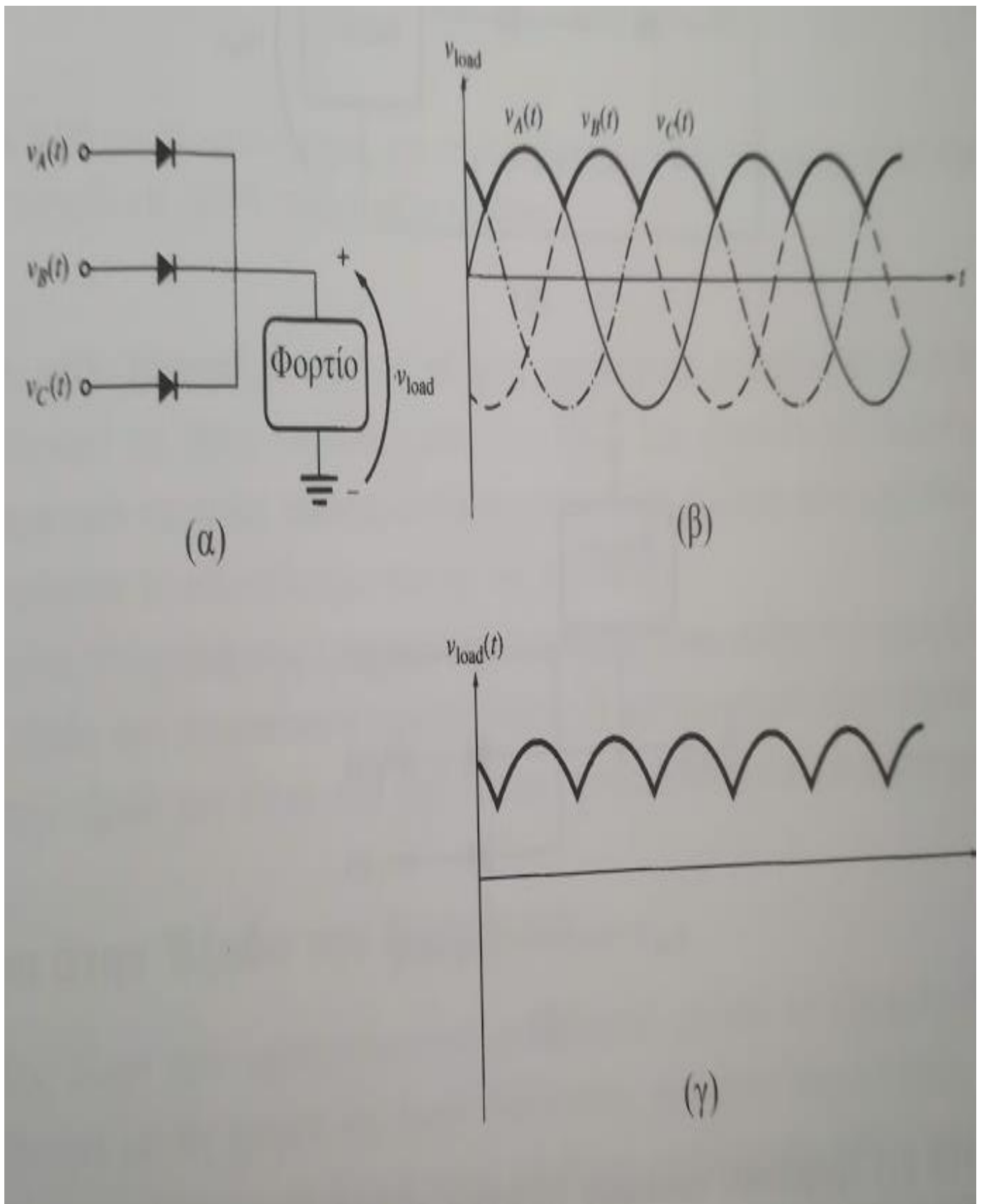
- α) Γέφυρα πλήρους ανόρθωσης
 β) Εναλλακτικό κύκλωμα μονοφασικού ανορθωτή
 γ) Τάση εξόδου του κυκλώματος ανόρθωσης
 Κυμάτωση $r = 48,2\%$



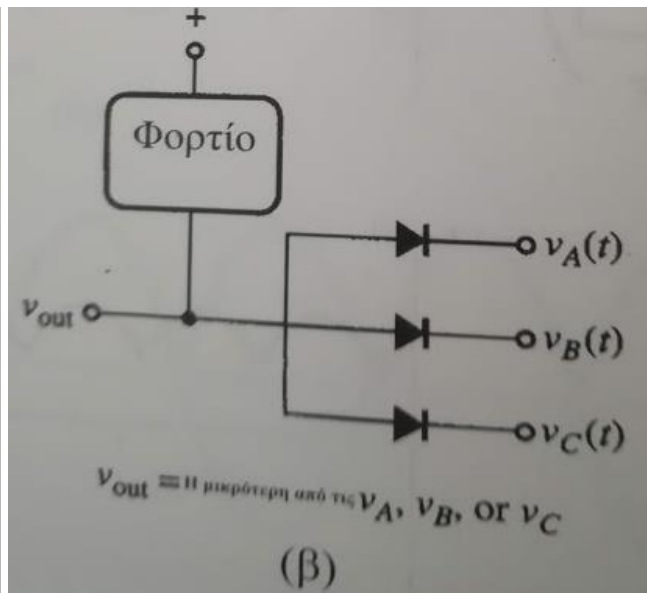
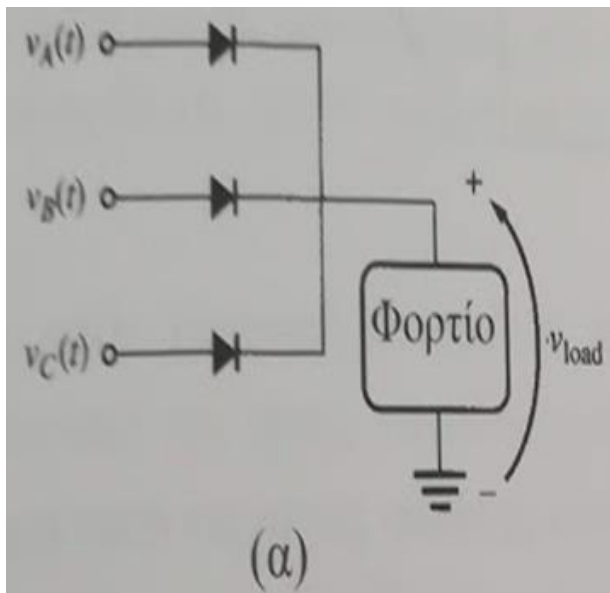
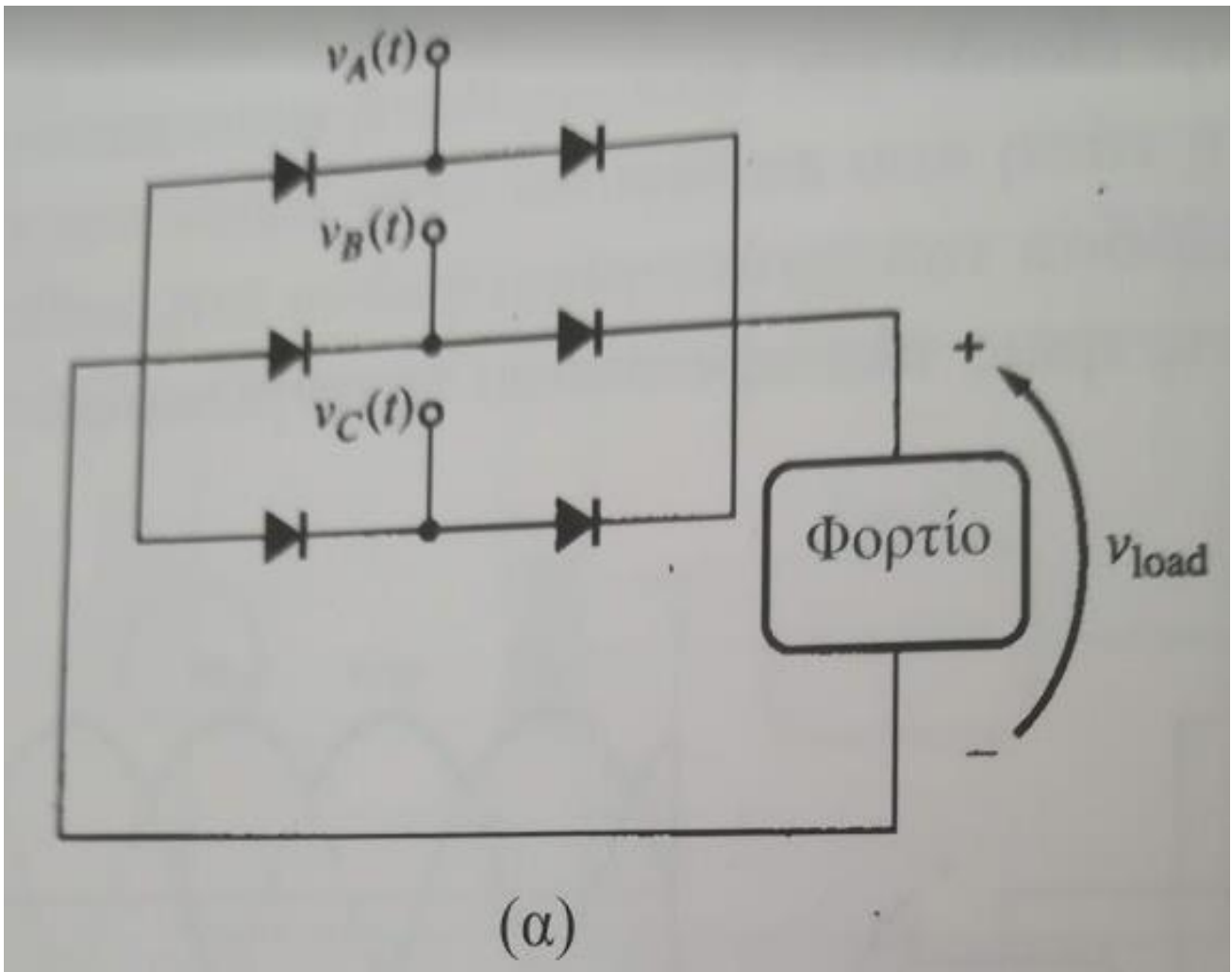
α) Θετική ημιπερίοδος – πολώνονται ορθά οι δίοδοι D1 – D3



β) Αρνητική ημιπερίοδος – πολώνονται ορθά οι δίοδοι D2 – D4



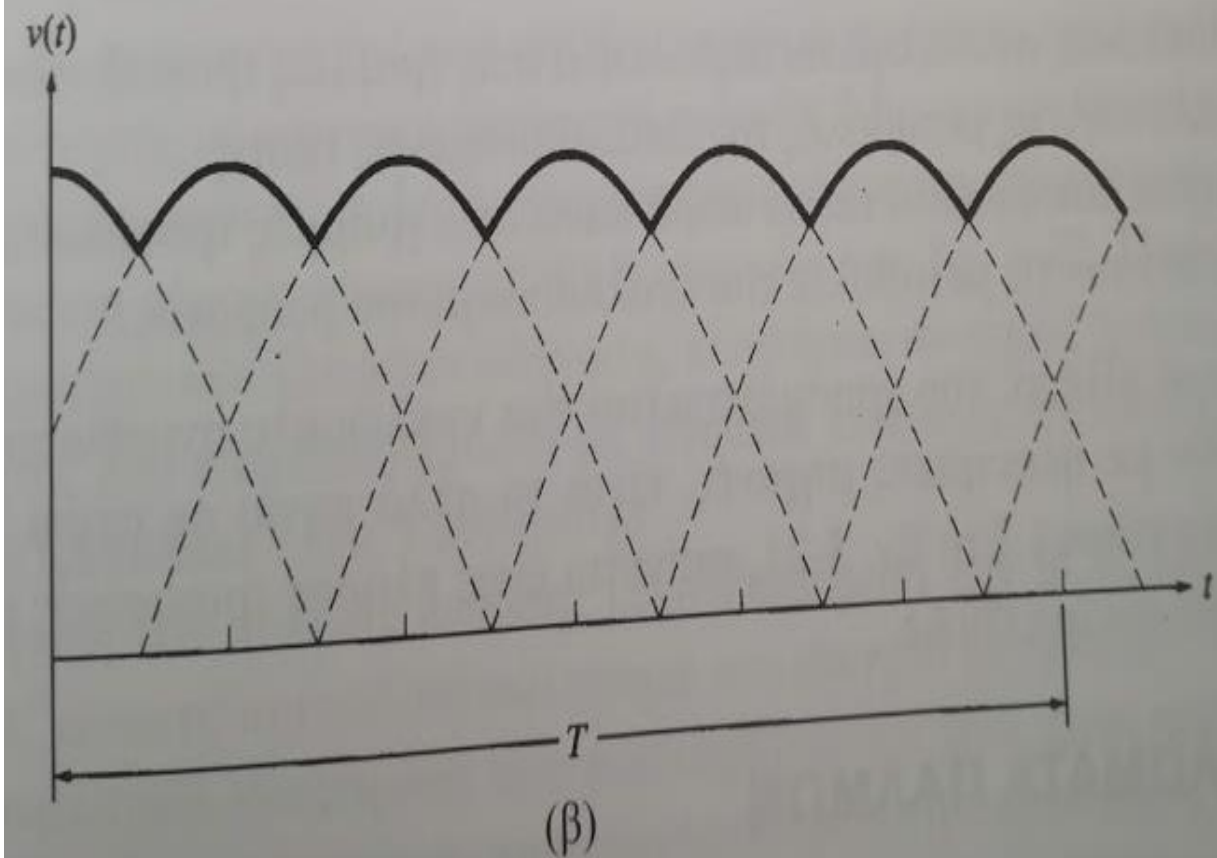
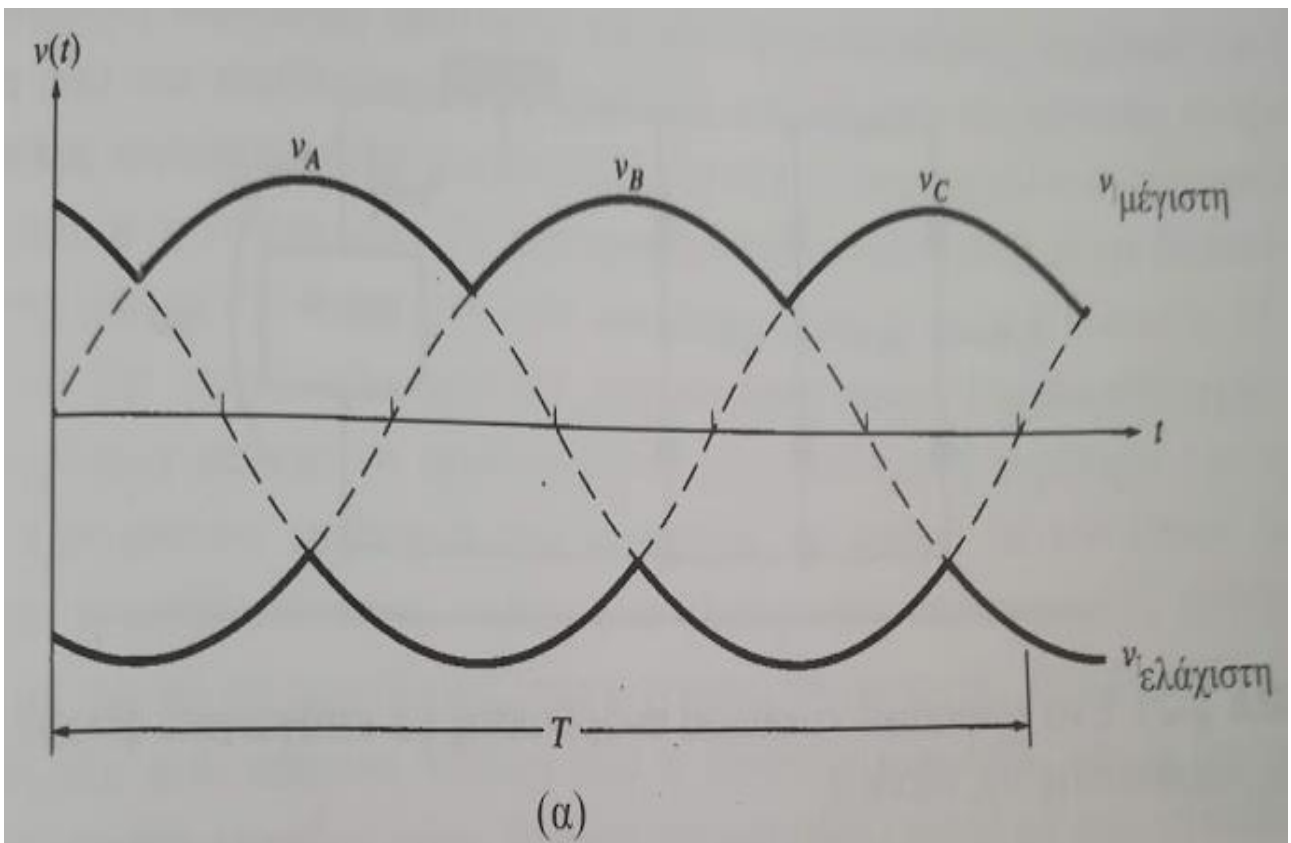
- α) Τριφασικό κύκλωμα ημιανόρθωσης
 β) Τριφασική τάση εισόδου
 γ) Τάση εξόδου κυκλώματος ημιανόρθωσης
 Κυμάτωση $r = 18,3\%$



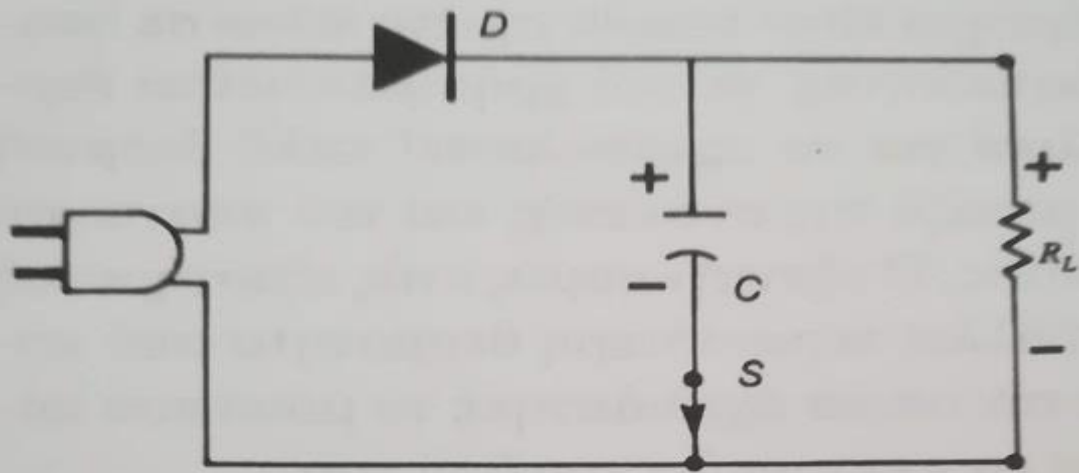
Τριφασικό κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης

α) μεταφέρει την τάση με την μεγαλύτερη τιμή στην έξοδο

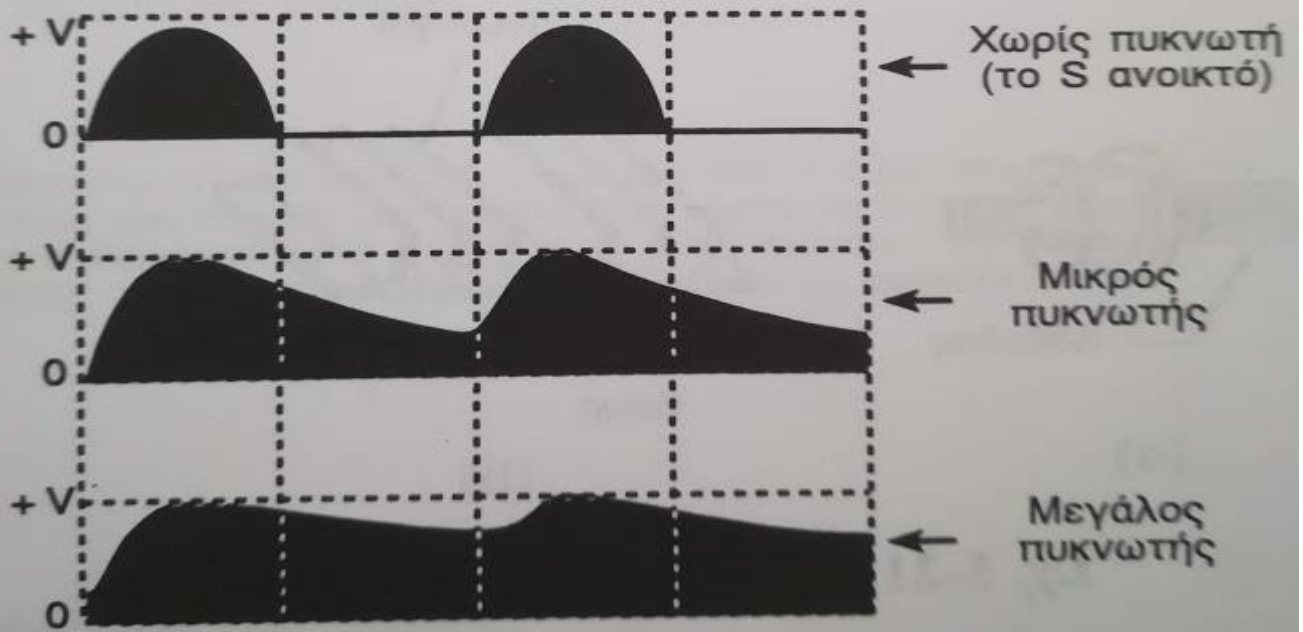
β) μεταφέρει την τάση με την μικρότερη τιμή στην έξοδο



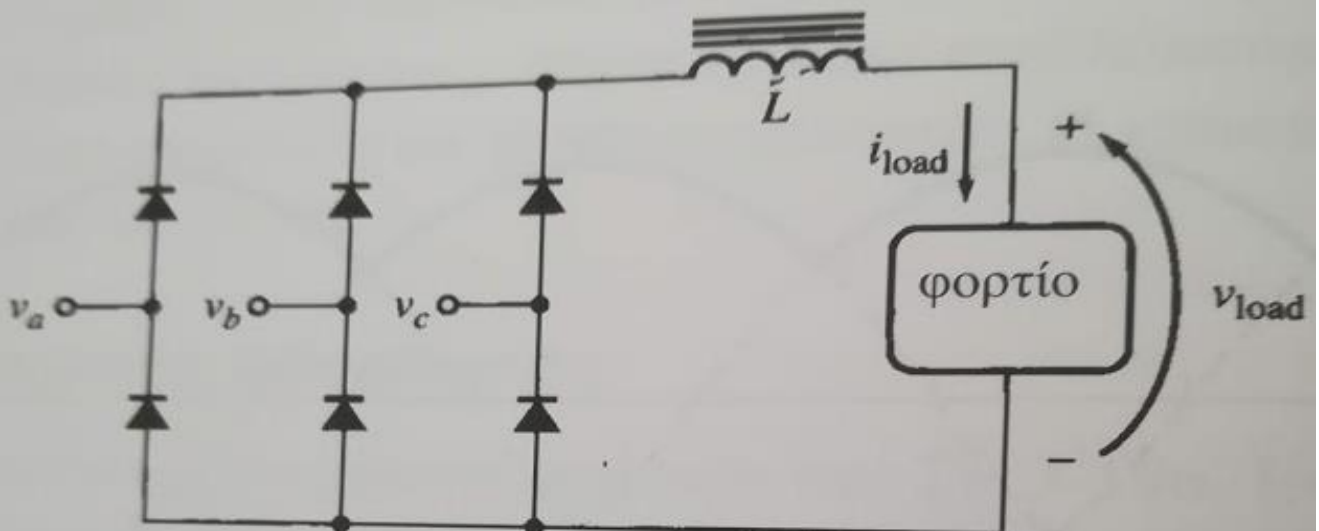
- α) Οι υψηλότερες και οι χαμηλότερες τιμές της τάσης
 β) Η τελική τάση εξόδου στον πλήρη τριφασικό ανορθωτή
 Κυμάτωση $r = 4,2\%$



(α) Σύνδεση φίλτρου με πυκνωτή



(β) Κυματομορφές τάσης φορτίου



- **ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΠΑΛΜΩΝ** (Ταλαντωτές χαλάρωσης)

1. **Αναλογικά:** Δίοδοι PNP

2. **Ψηφιακά:** Μικροϋπολογιστής που εκτελεί πρόγραμμα αποθηκευμένο στην μνήμη του.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΜΕ SCR

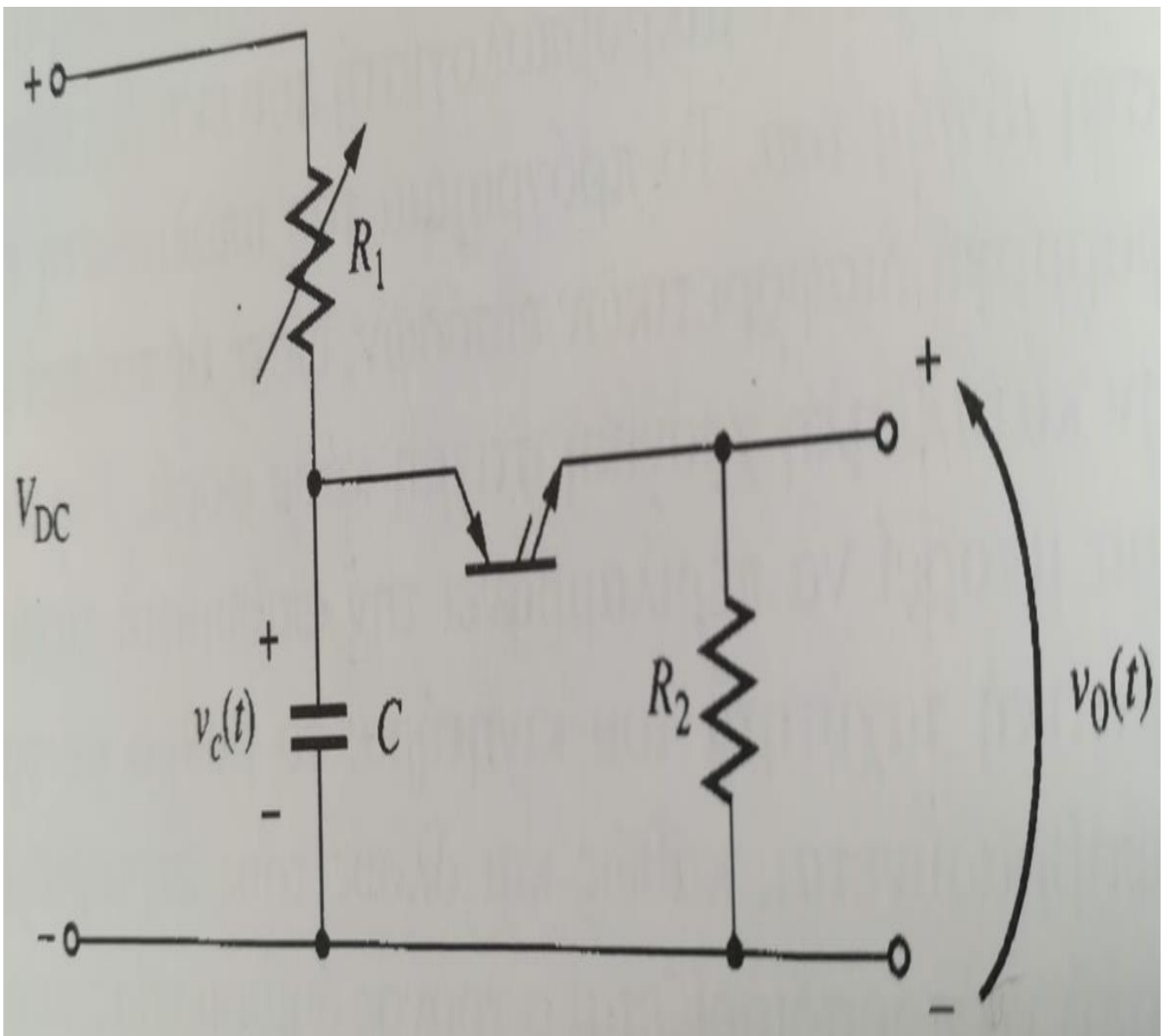
Το SCR για να δίνει μεταβλητή έξοδο χρειάζεται μετατόπιση φάσης. Ο παλμός δίνεται από ειδικό κύκλωμα παλμών ή από UJT.

ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΠΑΛΜΩΝ

Στις εφαρμογές εναλλασσομένου ρεύματος είναι σημαντικό το γεγονός ότι ο παλμός έναυσης εφαρμόζεται στο SCR την ίδια στιγμή σε κάθε περίοδο του εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του συγχρονισμού του κυκλώματος παλμών με την γραμμή ισχύος που τροφοδοτεί τα SCR.

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΦΑΣΗΣ .

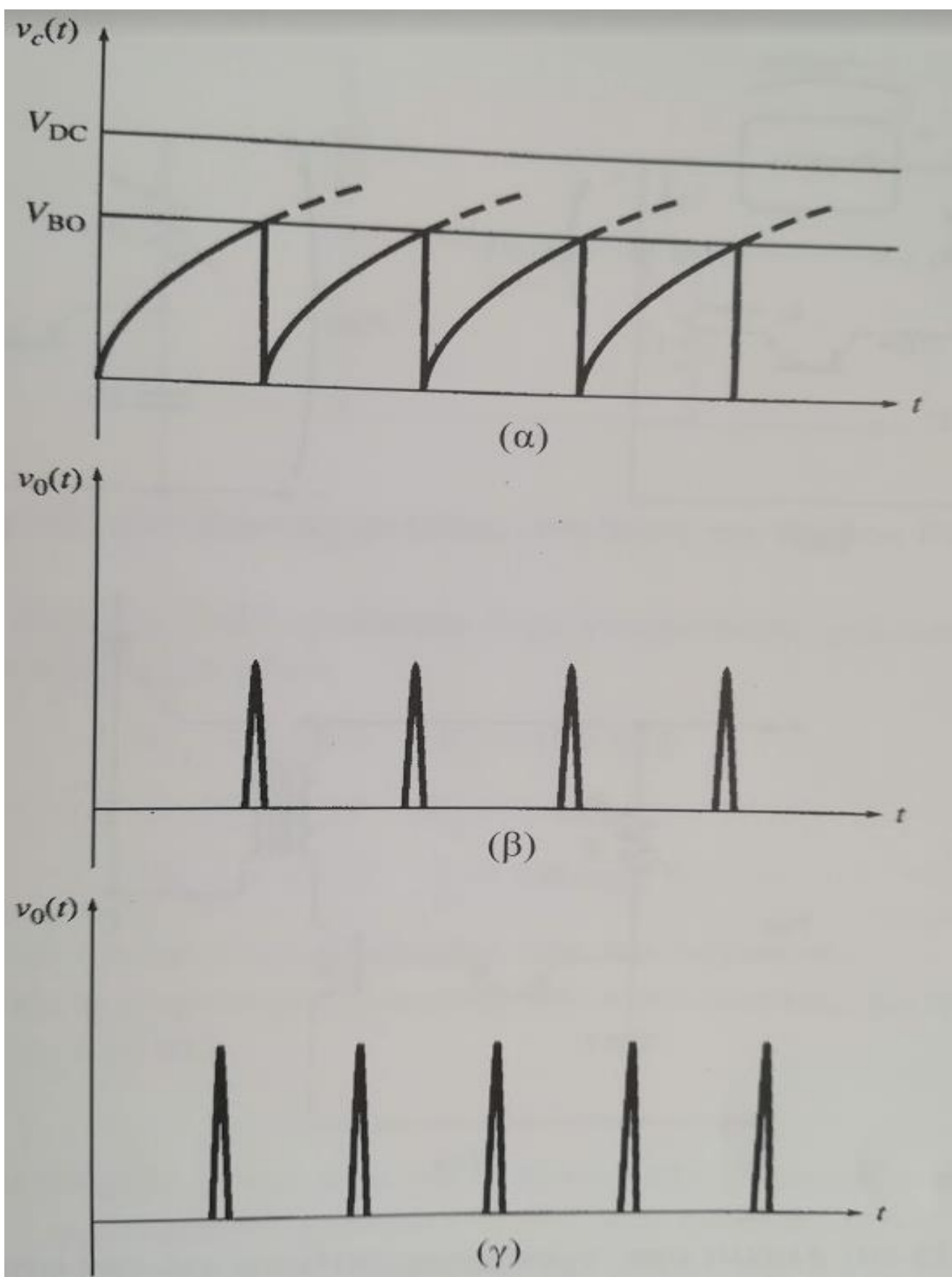
- a) Το SCR δεν οδηγείται στην έναυση. Χρησιμοποίηση ειδικού κυκλώματος παλμών μεγαλύτερης διάρκειας.
- b) Το SCR δεν οδηγείται στην αποκοπή. Εισαγωγή διόδου ελεύθερης ροής (free - wheeling diode), παράλληλα με το επαγωγικό φορτίο.



Ταλαντωτής χαλάρωσης ή γεννήτρια παλμών με δίοδο PNPN

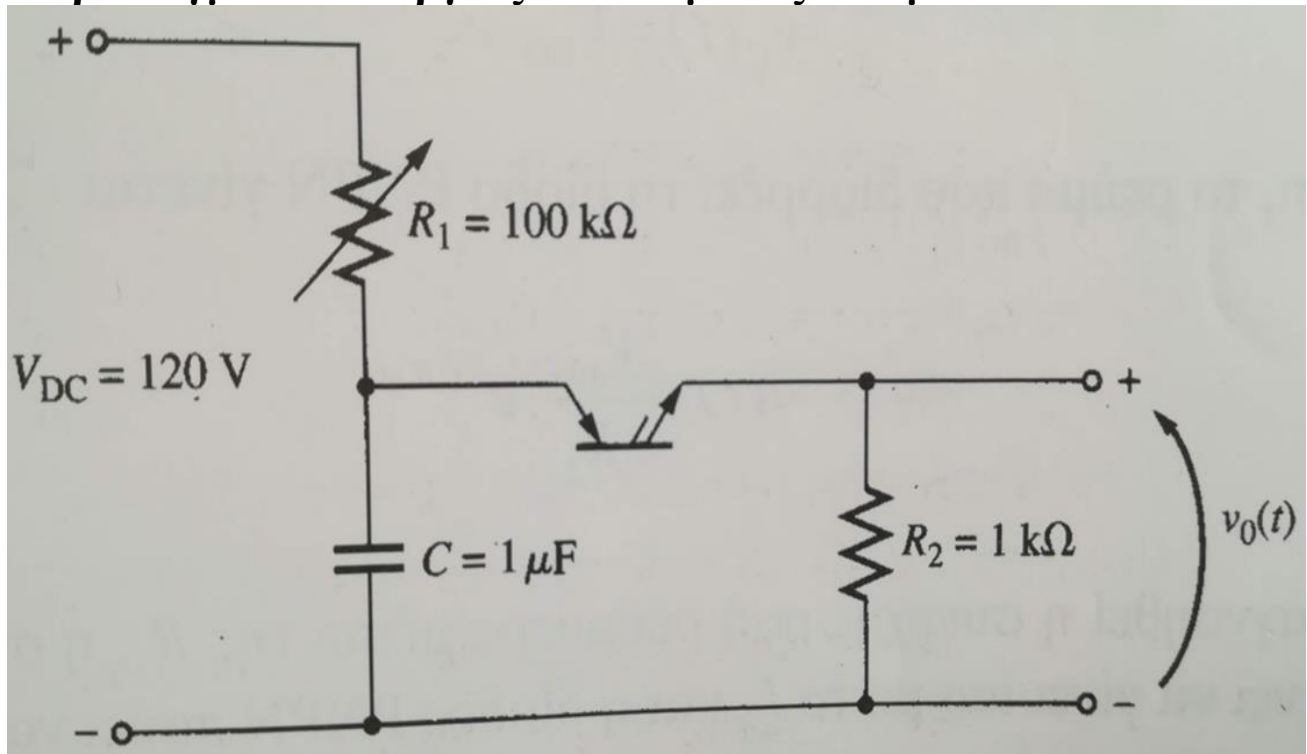
Συνθήκες Λειτουργίας

1. $V_{DC} > V_{BO}$
2. $V_{DC} / R_1 < I_H$
3. $R_1 \gg R_2$



- α) Η τάση στα άκρα του πυκνωτή της γεννήτριας παλμών
 β) Η τάση στην έξοδο του ταλαντωτή χαλάρωσης
 γ) Η τάση στην έξοδο του ταλαντωτή για R_1 μικρότερης τιμής

Παράδειγμα λειτουργίας κυκλώματος παλμών



$$V_{DC} = 120\text{ V} \quad R_1 = 100\text{ k}\Omega$$

$$C = 1\text{ }\mu\text{F} \quad R_2 = 1\text{ k}\Omega$$

$$V_{BO} = 75\text{ V} \quad I_H = 10\text{ mA}$$

Όταν η διόδος PNPN δεν άγει, ο πυκνωτής φορτίζεται μέσω της αντίστασης R_1 με σταθερά χρόνου φόρτισης $\tau = R_1 C$

Όταν η τάση στα άκρα του πυκνωτή φτάσει την τάση ορθής κατάρρευσης της διόδου V_{BO} , τότε ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω του παράλληλου συνδυασμού των αντιστάσεων $R_1//R_2$, αλλά επειδή $R_1 \gg R_2$ ο παράλληλος συνδυασμός των αντιστάσεων πρακτικά είναι ίσος με την τιμή της αντίστασης R_2 και ο χρόνος εκφόρτισης είναι πολύ μικρός $\tau = R_2 C$

Εξίσωση φόρτισης πυκνωτή

$$v_C(t) = A + B e^{-t/R_1 C}$$

$$A = v_C(\infty) = V_{DC}$$

$$A + B = v_C(0) = 0 \Rightarrow B = -V_{DC}$$

$$v_C(t) = V_{DC} - V_{DC} e^{-t/R_1 C}$$

Αν $v_C(t) = V_{BO}$ και η εξίσωση λυθεί ως προς t ισχύει

$$t_1 = -R_1 C \ln \frac{V_{DC} - V_{BO}}{V_{DC}}$$

Χρονική στιγμή όπου η τάση του πυκνωτή φτάνει την ορθή τάση κατάρρευσης της διόδου.

Με αντικατάσταση προκύπτει

$$t_1 = -(100 \text{ k}\Omega)(1 \mu\text{F}) \ln \frac{120\text{V} - 75\text{V}}{120\text{V}} = 98 \text{ ms}$$

Εξίσωση εκφόρτισης πυκνωτή

$$v_C(t) = V_{BO} e^{-t/R_2C}$$

Έτσι το ρεύμα που θα διαρρέει την διόδο PNPN θα είναι:

$$i(t) = \frac{V_{BO}}{R_2} e^{-t/R_2C}$$

Αν $I(t) = I_H$ και η εξίσωση λυθεί ως προς t ισχύει

$$t_2 = -R_2C \ln \frac{I_H R_2}{V_{BO}}$$

Χρονική στιγμή όπου η διόδος PNPN παύει να άγει.

Με αντικατάσταση προκύπτει

$$= -(1 \text{ k}\Omega)(1 \text{ }\mu\text{F}) \ln \frac{(10 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega)}{75 \text{ V}} = 2 \text{ ms}$$

Έτσι η συνολική περίοδος του ταλαντωτή χαλάρωσης είναι:

$$T = t_1 + t_2 = 98 \text{ ms} + 2 \text{ ms} = 100 \text{ ms}$$

και η συχνότητα παραγωγής παλμών είναι:

$$f = \frac{1}{T} = 10 \text{ Hz}$$

Αν η R_1 αυξηθεί στα $150 \text{ k}\Omega$, ο χρόνος φόρτισης του πυκνωτή θα μεγαλώσει και θα γίνει:

$$\begin{aligned} t_1 &= -R_1 C \ln \frac{V_{\text{DC}} - V_{\text{BO}}}{V_{\text{DC}}} \\ &= -(150 \text{ k}\Omega)(1 \mu\text{F}) \ln \frac{120\text{V} - 75\text{V}}{120\text{V}} \\ &= 147 \text{ ms} \end{aligned}$$

Ο χρόνος εκφόρτισης του πυκνωτή παραμένει σταθερός και ίσος με

$$t_2 = -R_2 C \ln \frac{I_H R_2}{V_{\text{BO}}} = 2 \text{ ms}$$

Έτσι η συνολική περίοδος του ταλαντωτή χαλάρωσης μεγαλώνει και γίνεται:

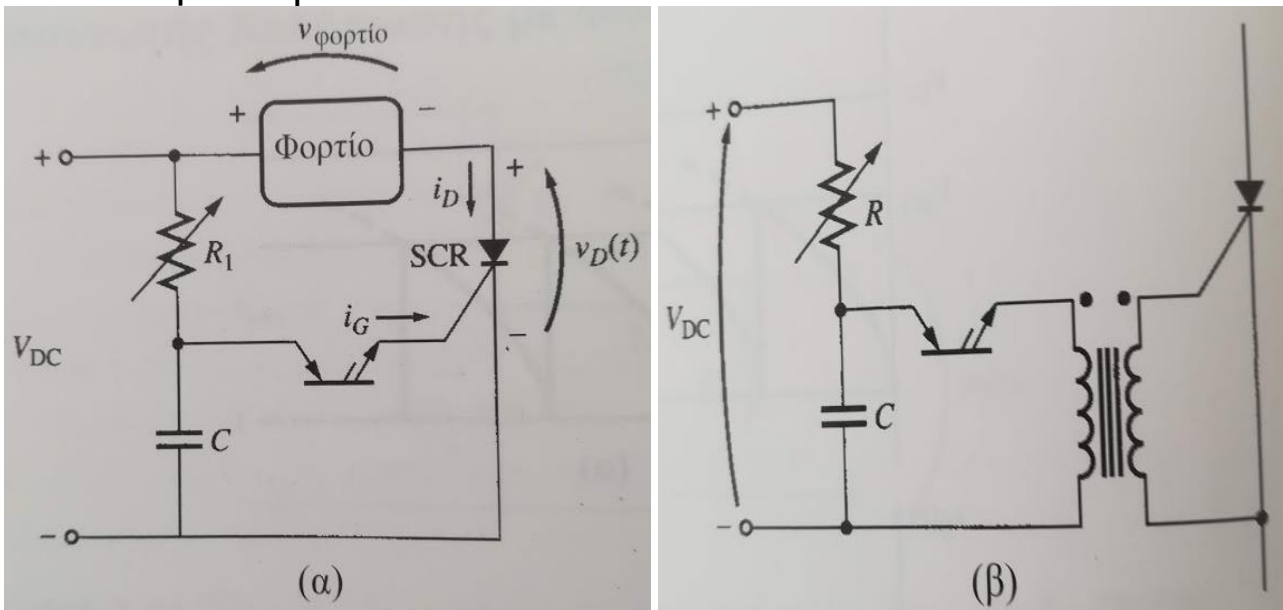
$$T = t_1 + t_2 = 147 \text{ ms} + 2 \text{ ms} = 149 \text{ ms}$$

Ενώ η συχνότητα παραγωγής παλμών μικραίνει

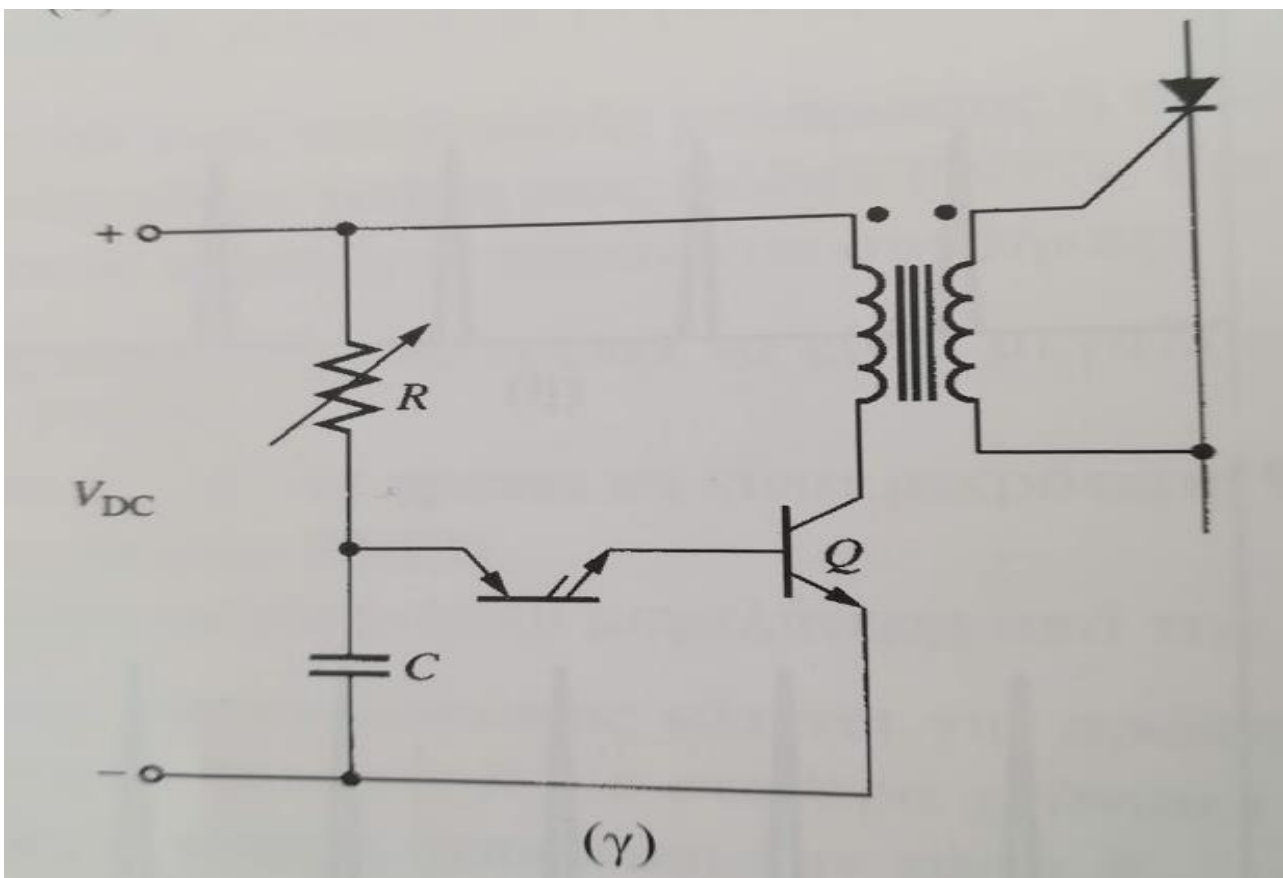
$$f = \frac{1}{0,149 \text{ s}} = 6,71 \text{ Hz}$$

ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΜΕ SCR

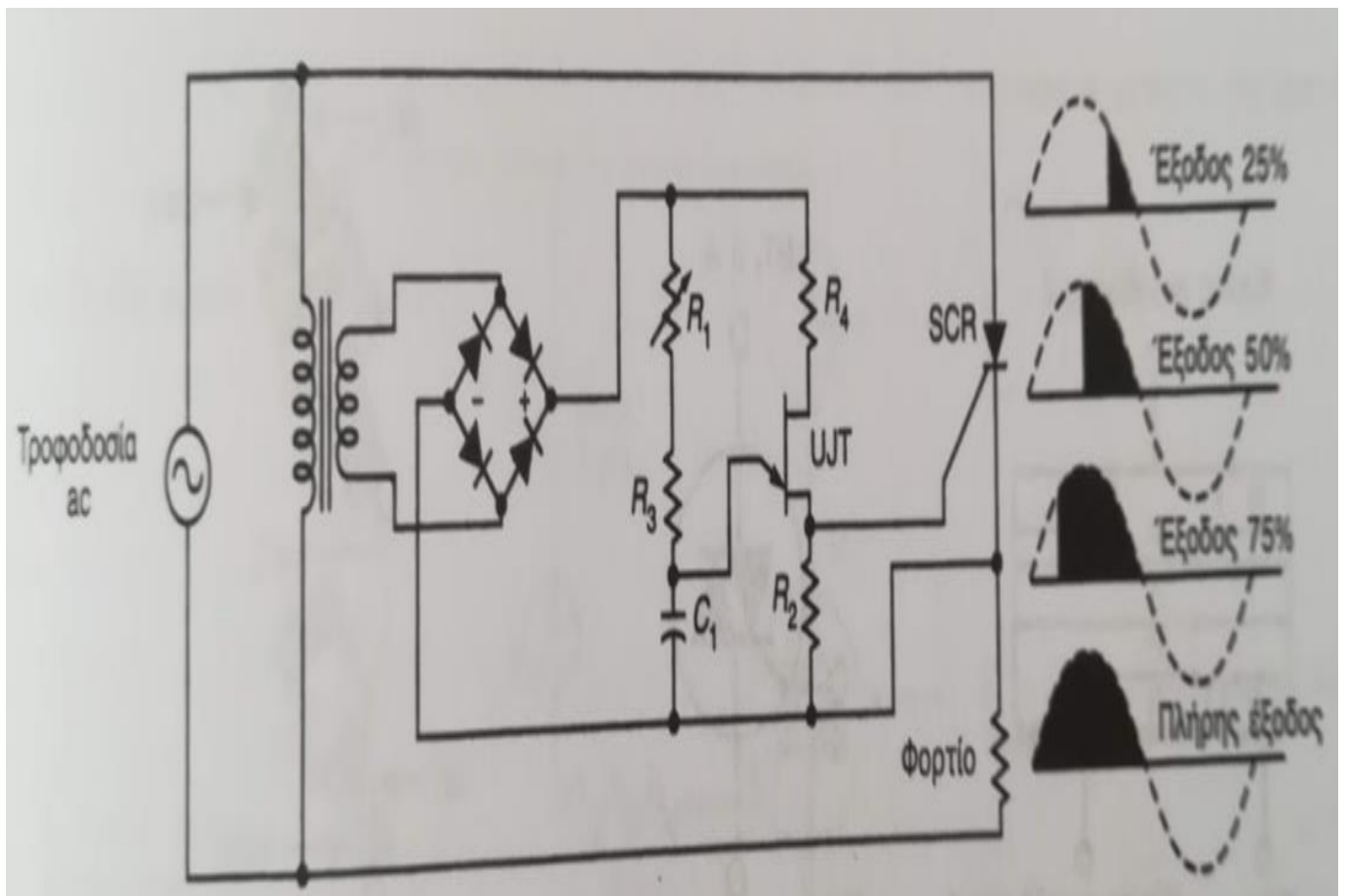
Το SCR για να δίνει μεταβλητή έξοδο χρειάζεται μετατόπιση φάσης. Ο παλμός δίνεται από ειδικό κύκλωμα παλμών ή από UJT.



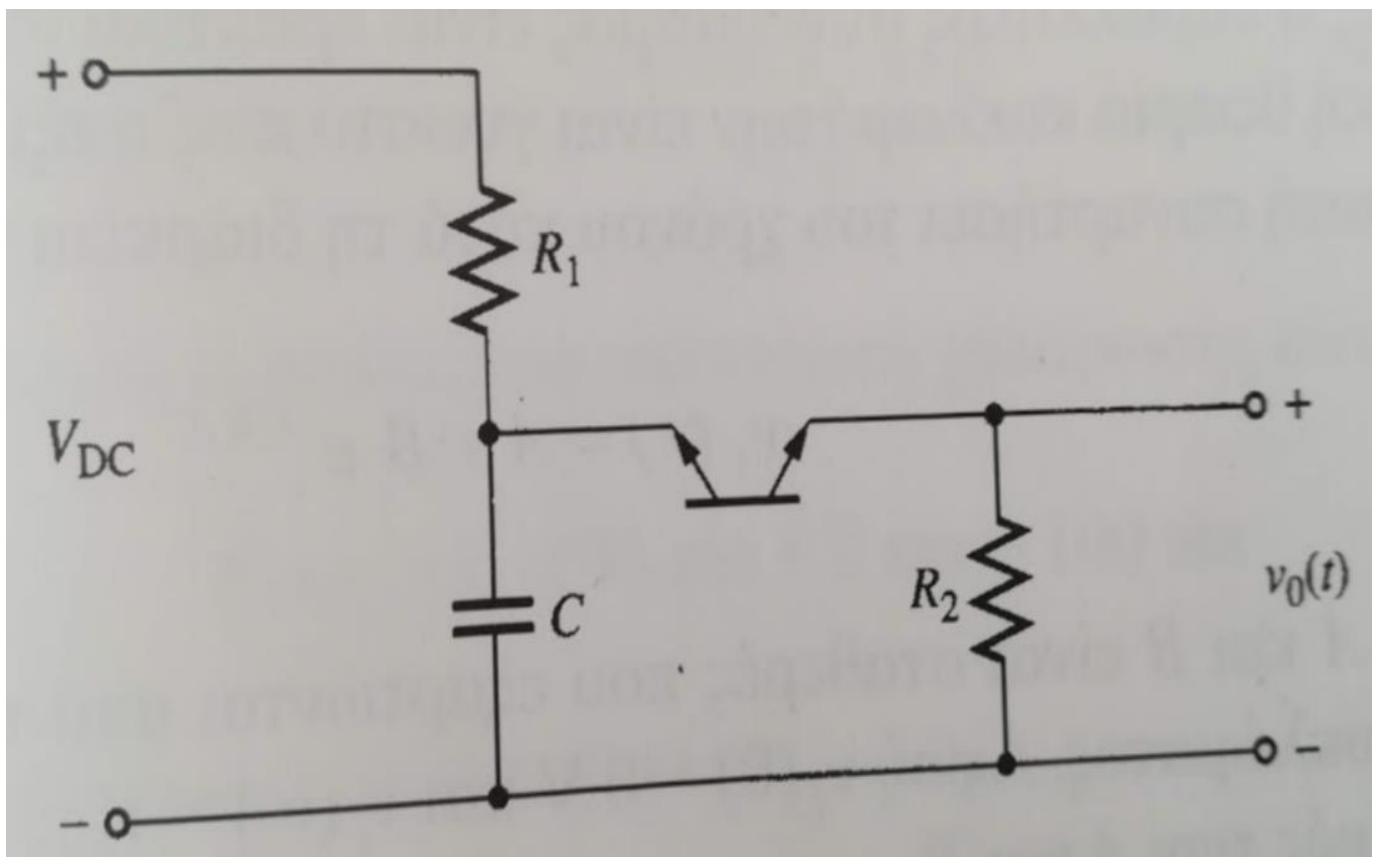
Χρήση μιας γεννήτριας παλμών για τον απευθείας σκανδαλισμό του SCR ή μέσω ενός μετασχηματιστή παλμών.



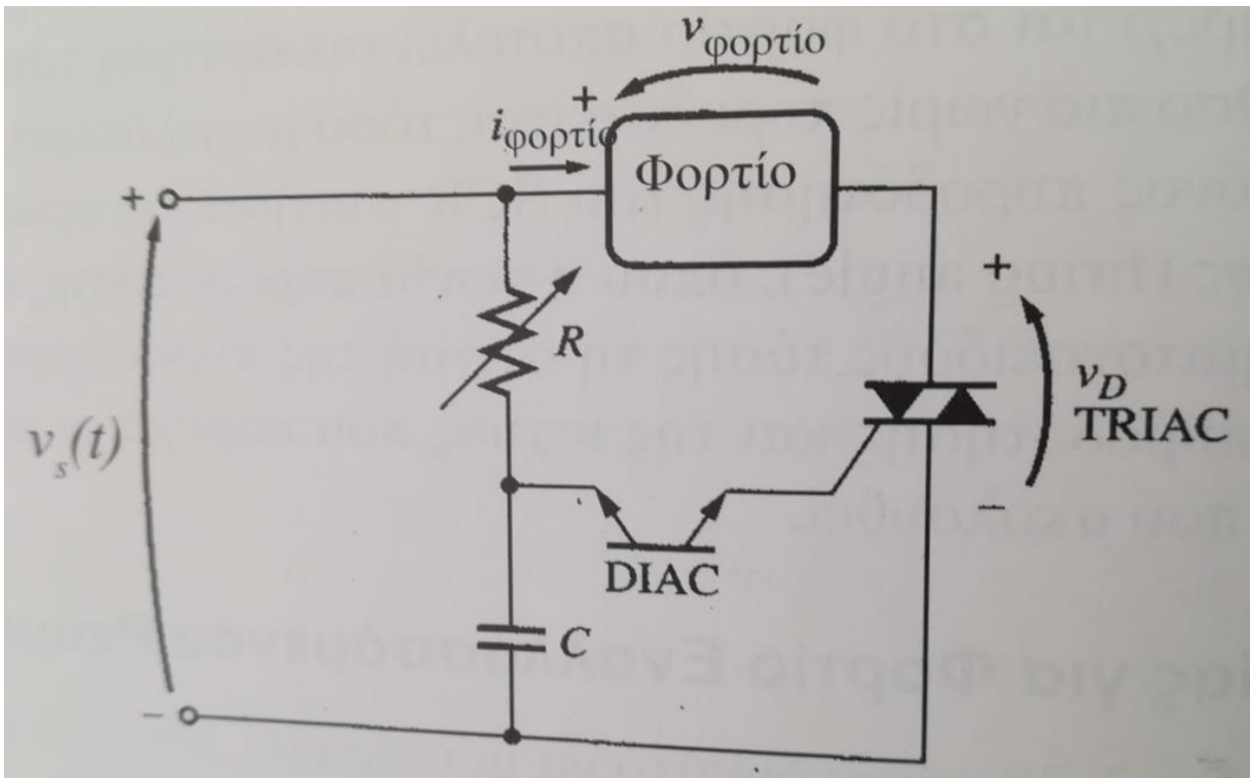
Σύνδεση μιας γεννήτριας παλμών στο SCR μέσω ενισχυτή με transistor για αύξηση της ικανότητας των παλμών έναυσης.



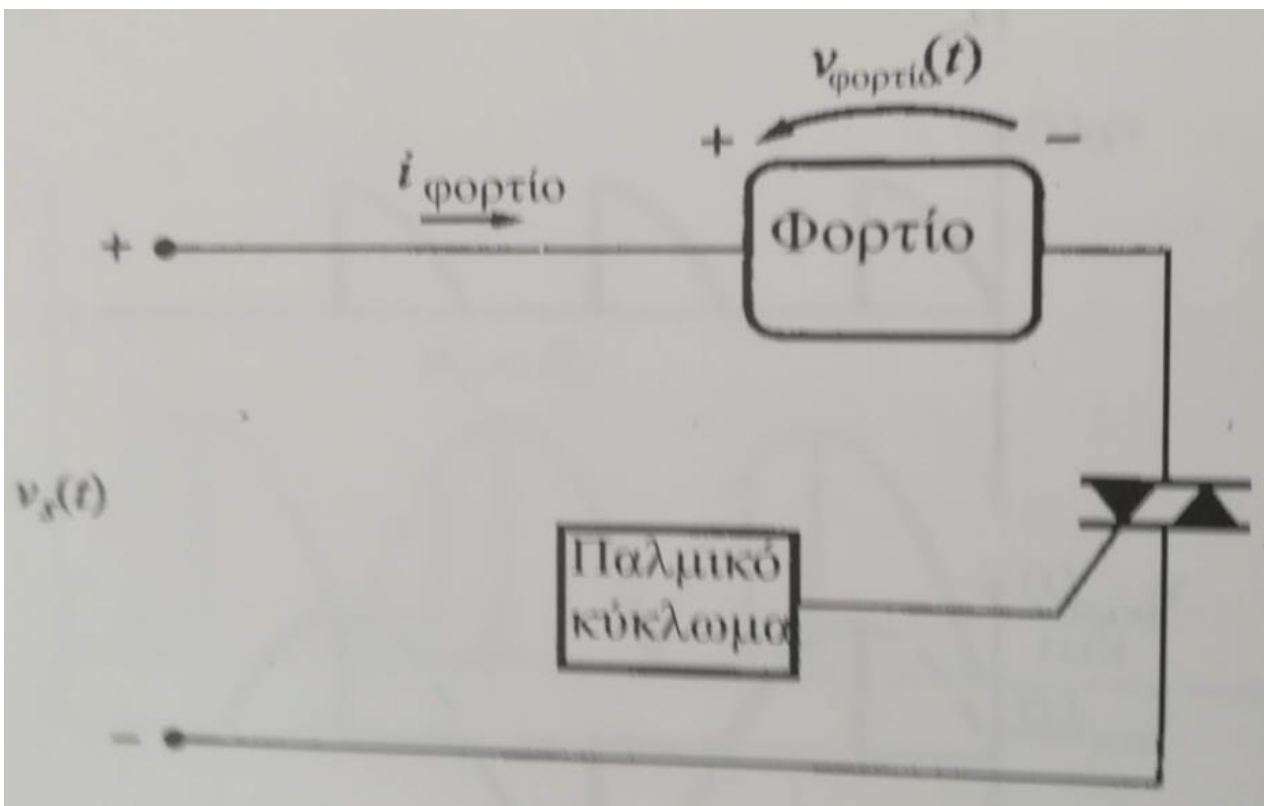
Κύκλωμα με UJT για μετατόπιση φάσης σε SCR



Ταλαντωτής χαλάρωσης με DIAC στη θέση της διόδου PNP.



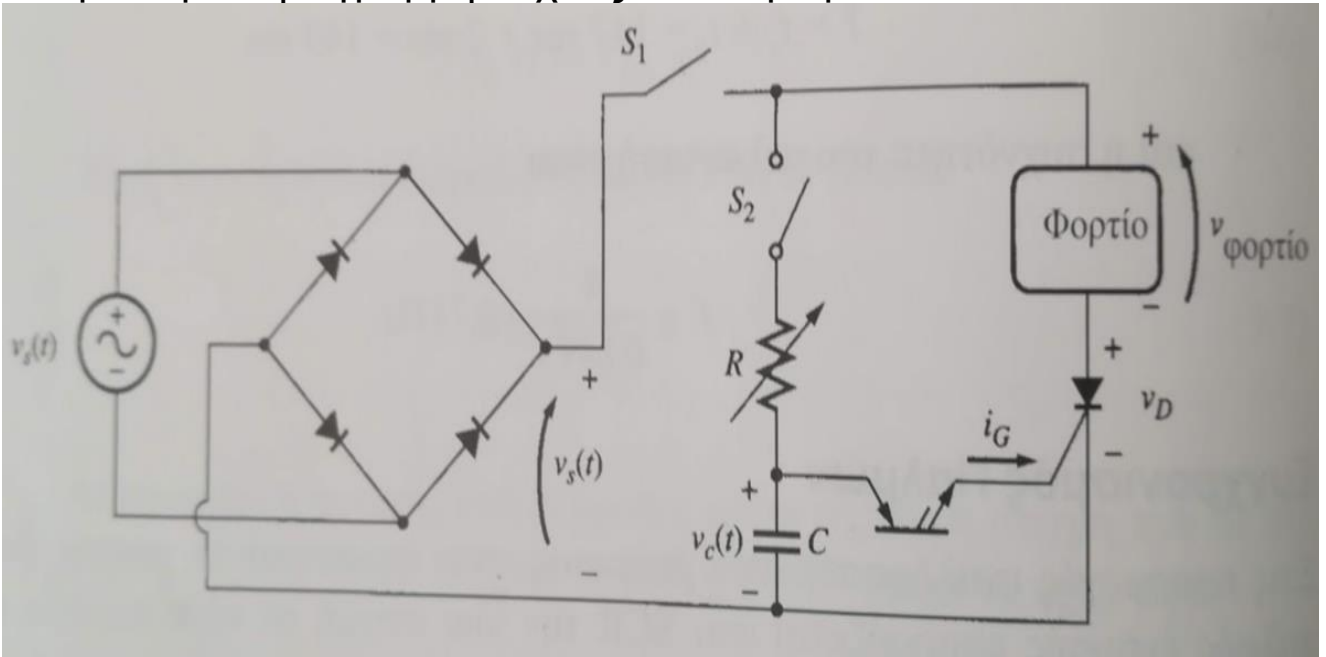
Κύκλωμα ελέγχου της τάσης σε φορτίο εναλλασσομένου ρεύματος με έλεγχο της γωνίας φάσης, που χρησιμοποιεί ένα DIAC και ένα TRIAC.



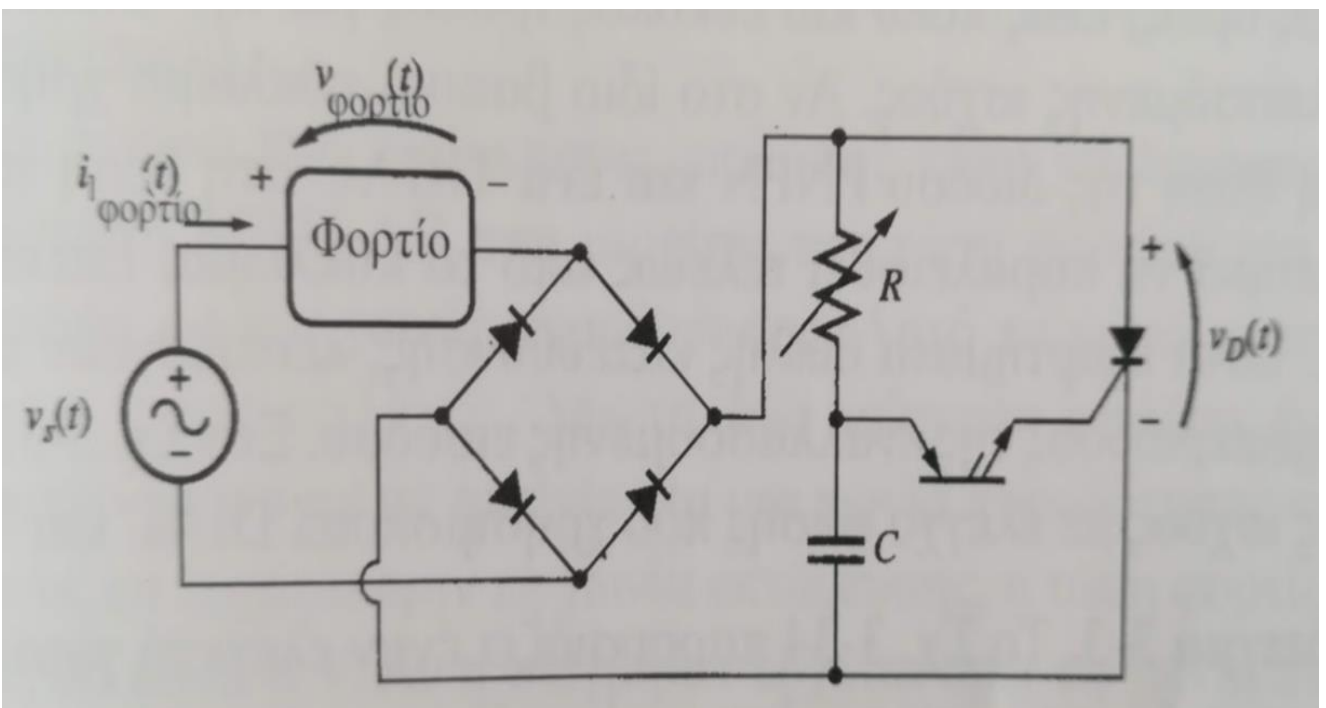
Κύκλωμα ελέγχου της τάσης σε φορτίο εναλλασσομένου ρεύματος με έλεγχο της γωνίας φάσης, που χρησιμοποιεί ένα TRIAC, που σκανδαλίζεται από ψηφιακό παλμικό κύκλωμα.

ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΠΑΛΜΩΝ

Στις εφαρμογές εναλλασσομένου ρεύματος είναι σημαντικό το γεγονός ότι ο παλμός έναυσης εφαρμόζεται στο SCR την ίδια στιγμή σε κάθε περίοδο του εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του συγχρονισμού του κυκλώματος παλμών με την γραμμή ισχύος που τροφοδοτεί τα SCR.



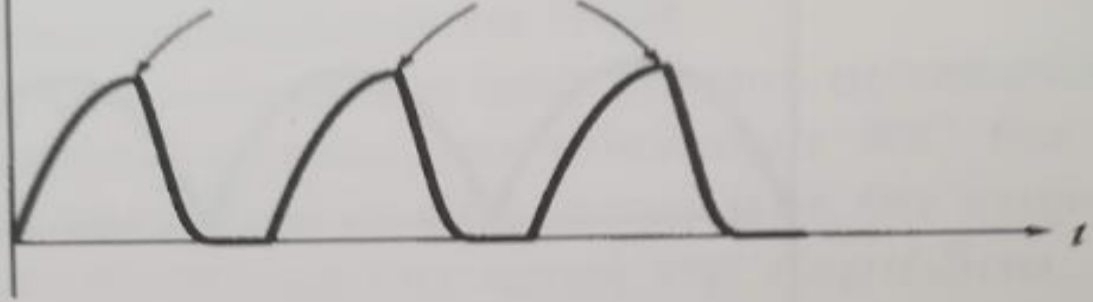
Κύκλωμα ελέγχου της τάσης ενός φορτίου συνεχούς ρεύματος με έλεγχο της γωνίας φάσης.



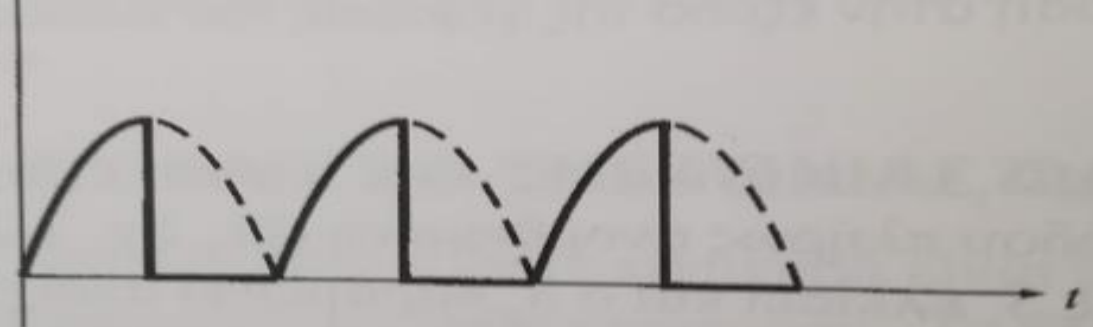
Κύκλωμα ελέγχου της τάσης σε φορτίο εναλλασσομένου ρεύματος με έλεγχο της γωνίας φάσης.

$v_c(t)$

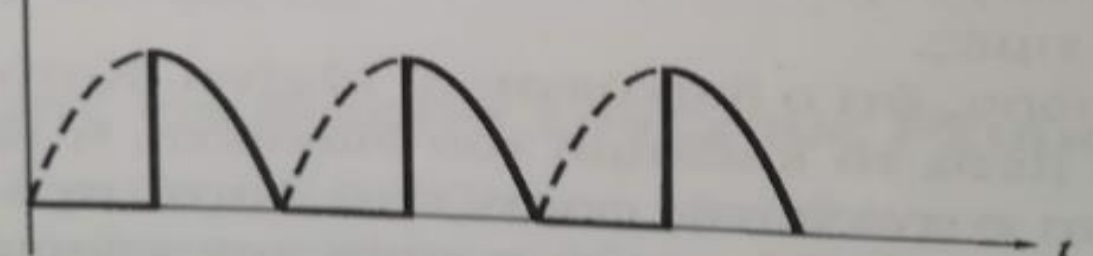
PNPN δίοδος πυροδοτείται



$v_D(t)$

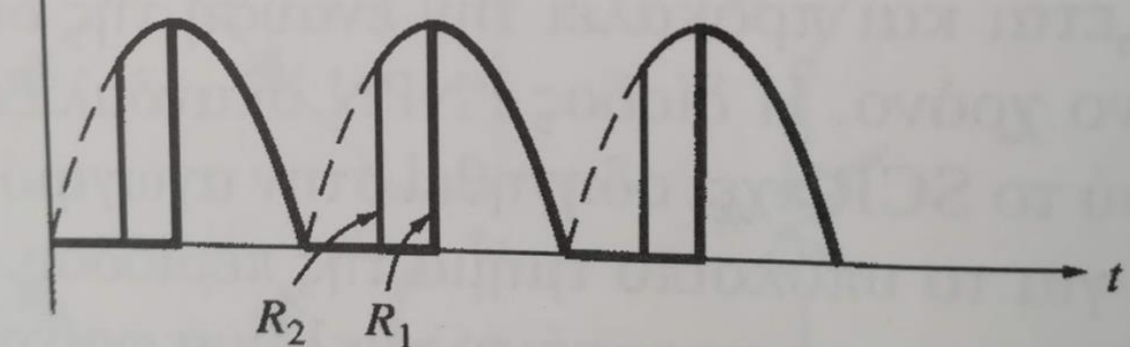


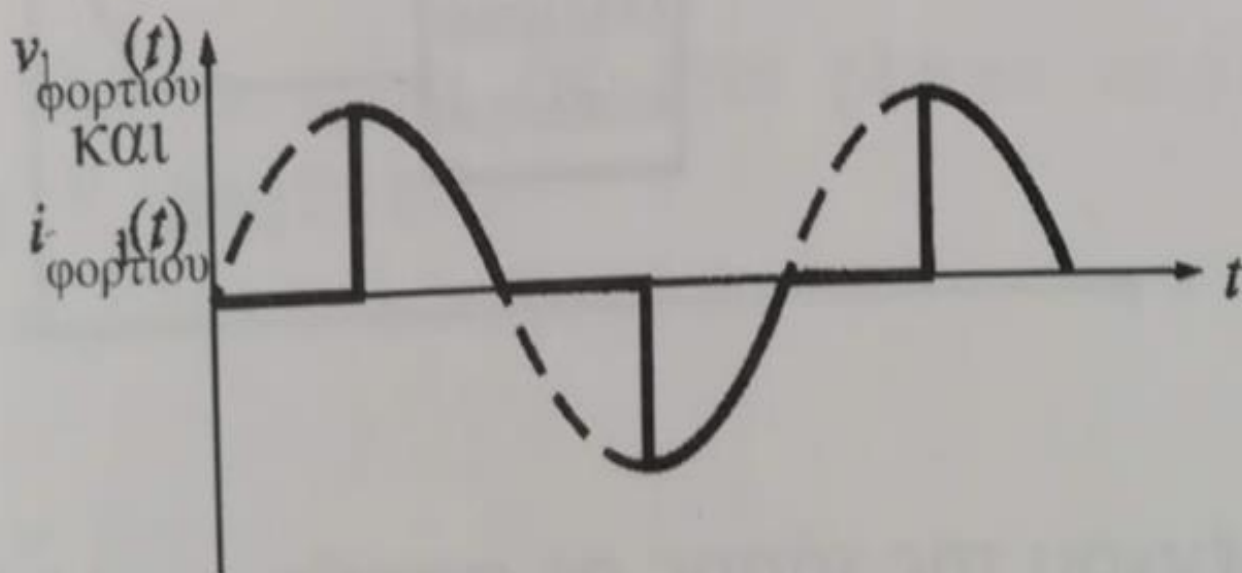
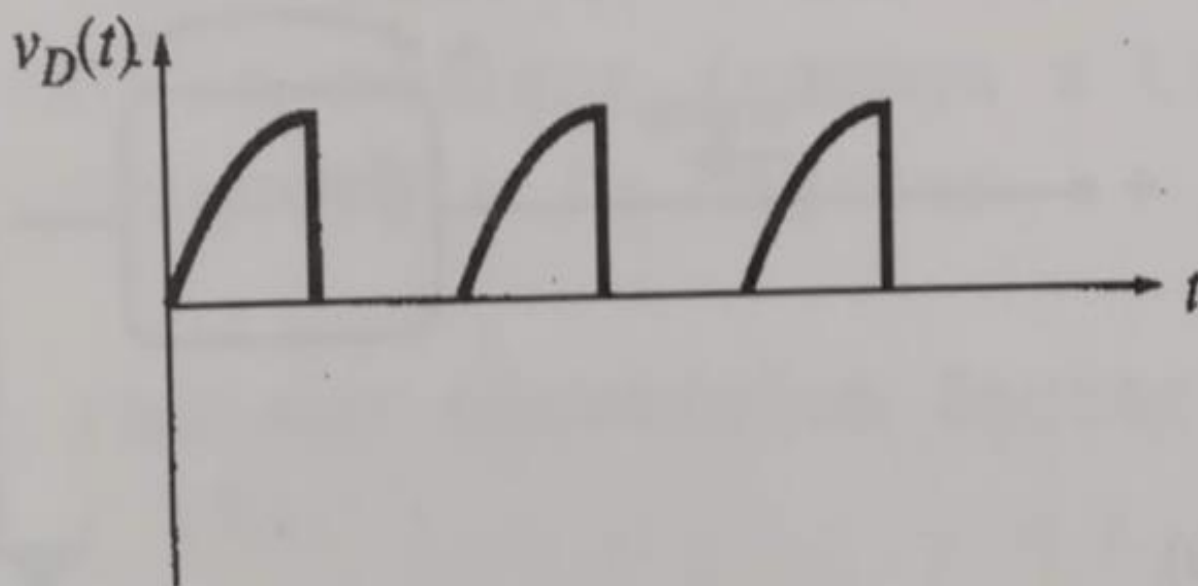
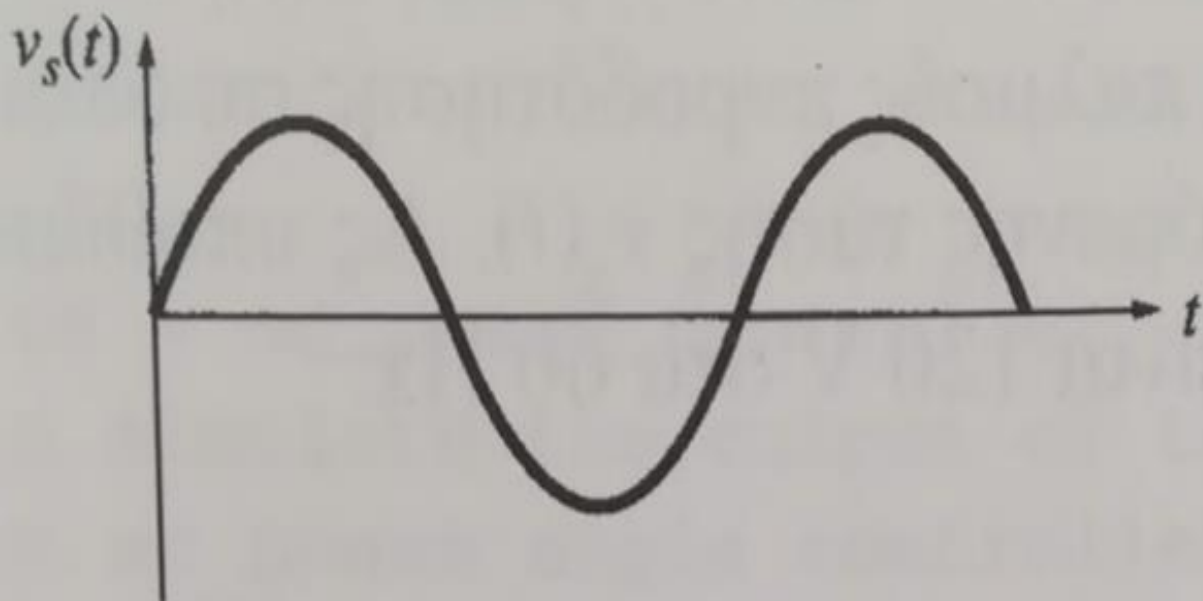
$v_{\text{φορτίο}}(t)$
 $i_{\text{φορτίο}}(t)$

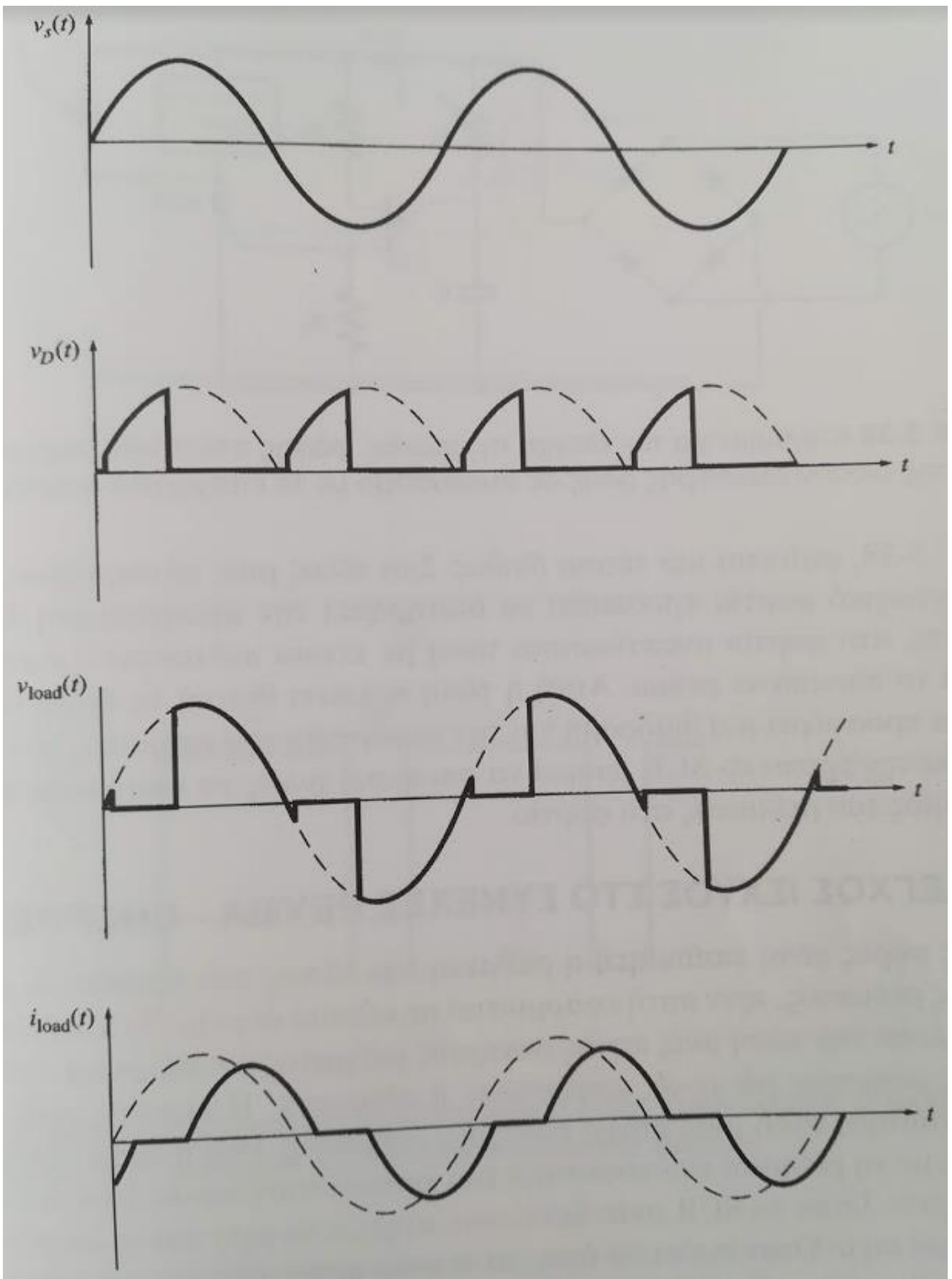


$v_{\text{φορτίο}}(t)$

$R_2 < R_1$



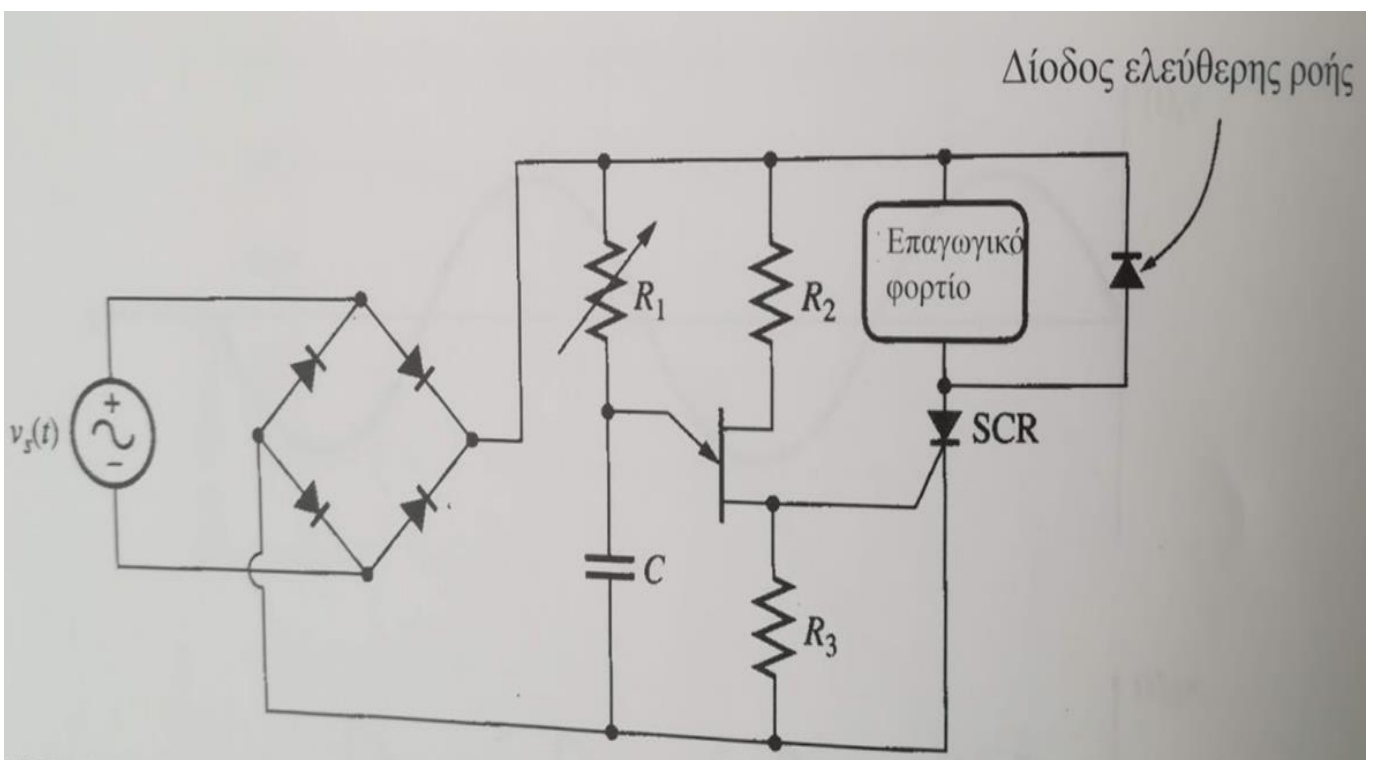




Οι επιπτώσεις του επαγωγικού φορτίου στις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος.

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΦΑΣΗΣ.

- a) Το SCR δεν οδηγείται στην έναυση. Χρησιμοποίηση ειδικού κυκλώματος παλμών μεγαλύτερης διάρκειας, έτσι ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος για να μπορέσει το ρεύμα του SCR να ξεπεράσει την τιμή I_H και να οδηγηθεί στην έναυση για όλη την υπόλοιπη ημιπερίοδο.
- b) Το SCR δεν οδηγείται στην αποκοπή. Εισαγωγή διόδου ελεύθερης ροής (free - wheeling diode), παράλληλα με το επαγωγικό φορτίο.



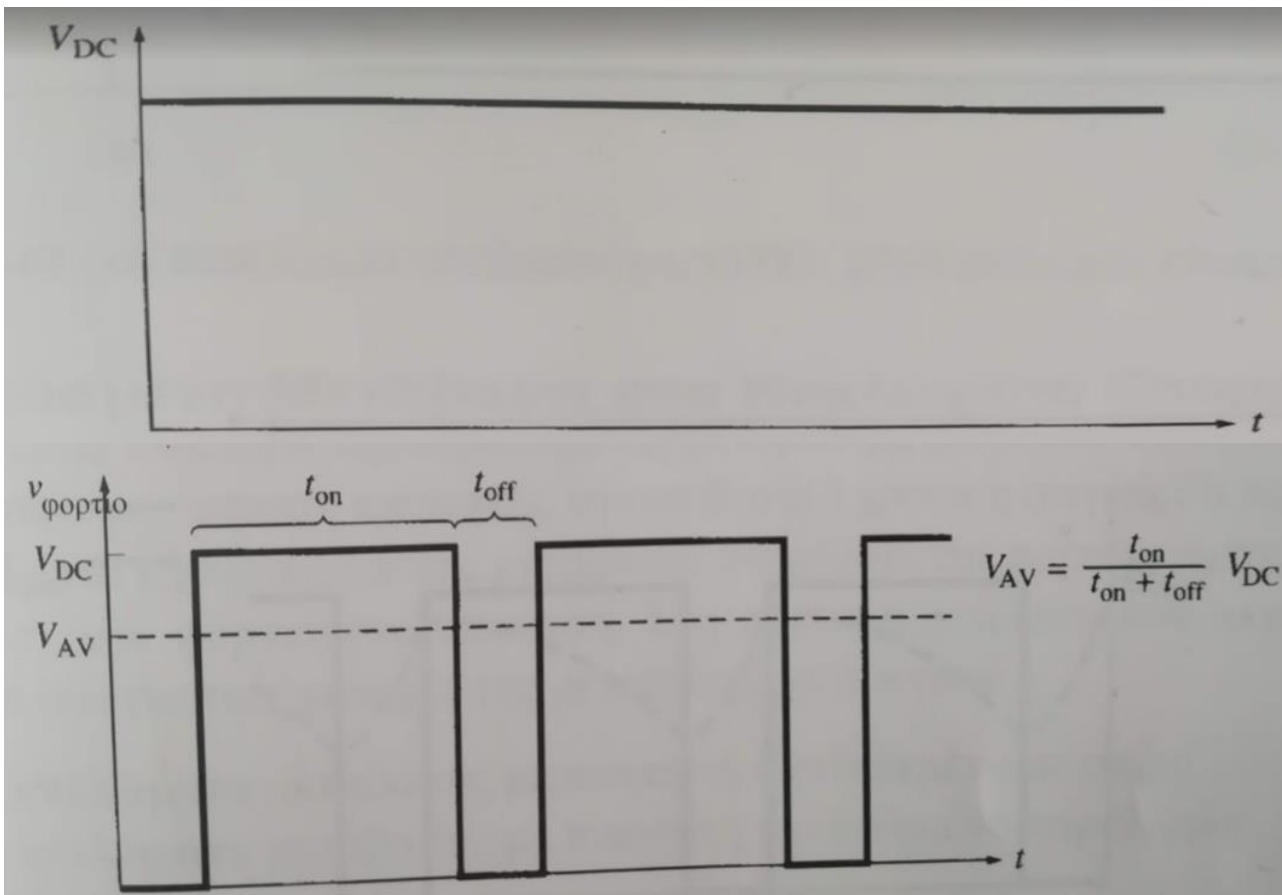
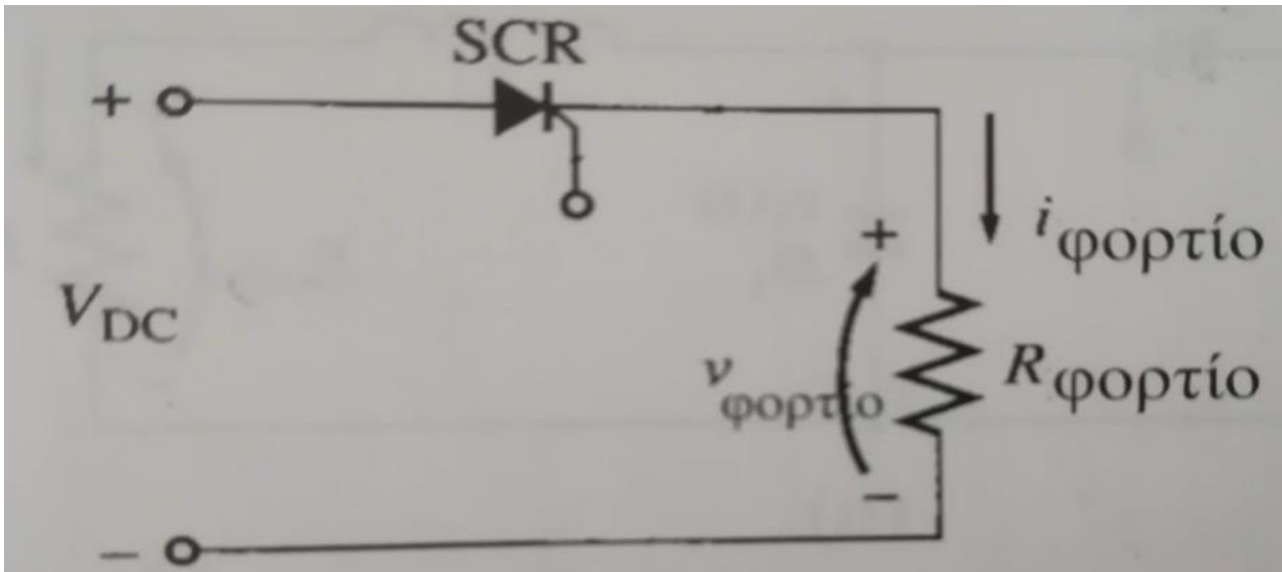
Χρήση της διόδου ελεύθερης ροής σε συνδυασμό με το επαγωγικό φορτίο.

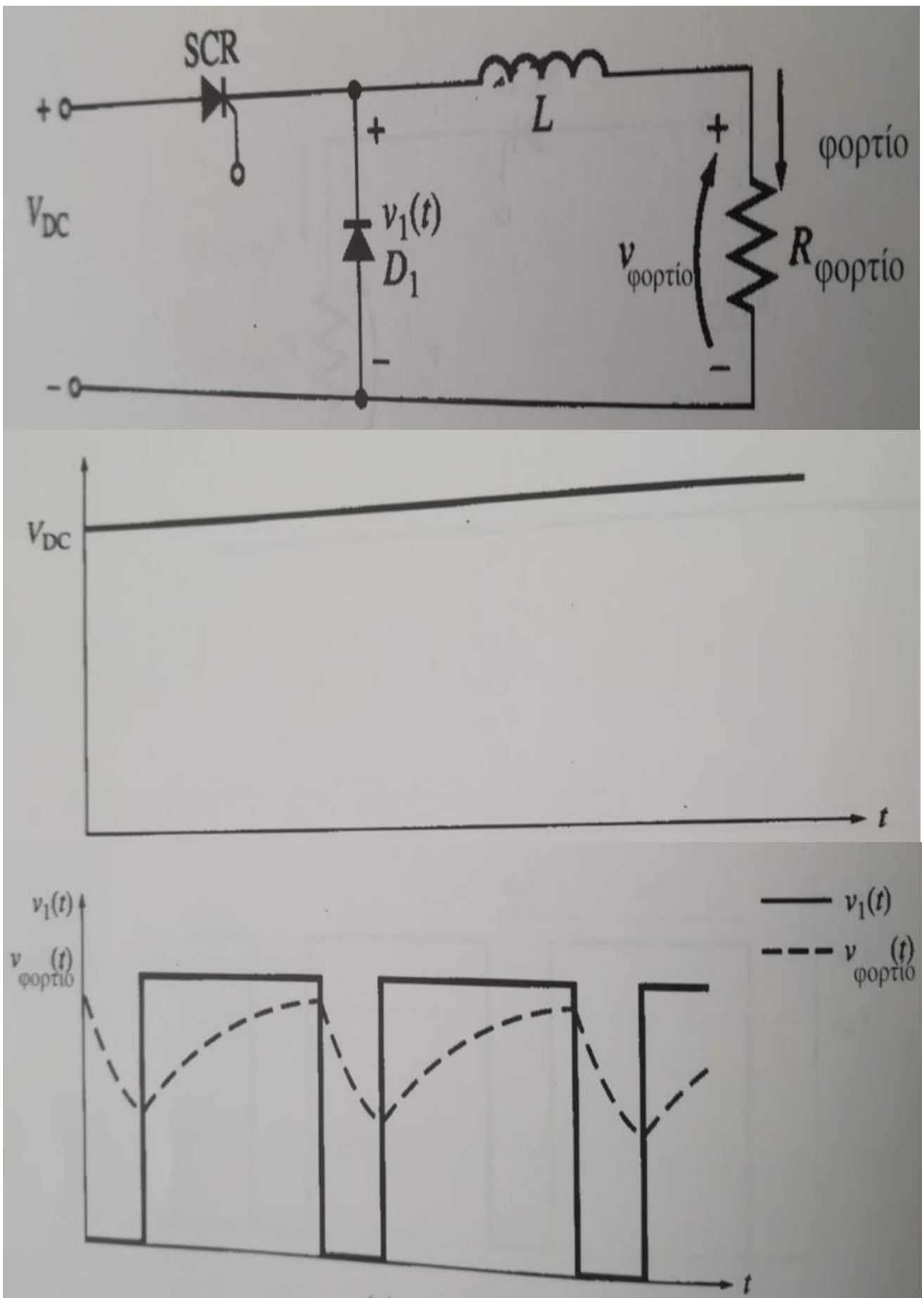
Η δίοδος ελεύθερης ροής συνδέεται παράλληλα με το επαγωγικό φορτίο και ανάστροφα πολωμένη. Ο ρόλος της είναι να διοχετεύει το ρεύμα κατά την αποκοπή του SCR έτσι ώστε να μειώνεται σχεδόν ακαριαία το ρεύμα κάτω από την οριακή τιμή συγκράτησης και να σβήνει το SCR. Κατά την κανονική λειτουργία η δίοδος ελεύθερης ροής είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν διαρρέεται από ρεύμα. Όταν στο SCR αντιστραφεί η τάση με σκοπό την εξαναγκασμένη μετάβαση και αποκοπή του το ρεύμα δεν μειώνεται ακαριαία κάτω από την τιμή I_h συγκράτησης με αποτέλεσμα να έρθει ο επόμενος παλμός έναυσης και να μην μπορεί να σβήσει. Η δίοδος ελεύθερης ροής αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα. Κατά την αποκοπή πολώνεται θετικά και το ρεύμα διοχετεύεται μέσω της ελεύθερης διόδου.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟ ΣΥΝΕΧΕΣ ΡΕΥΜΑ CHOPPERS (dc – to – dc converters) .

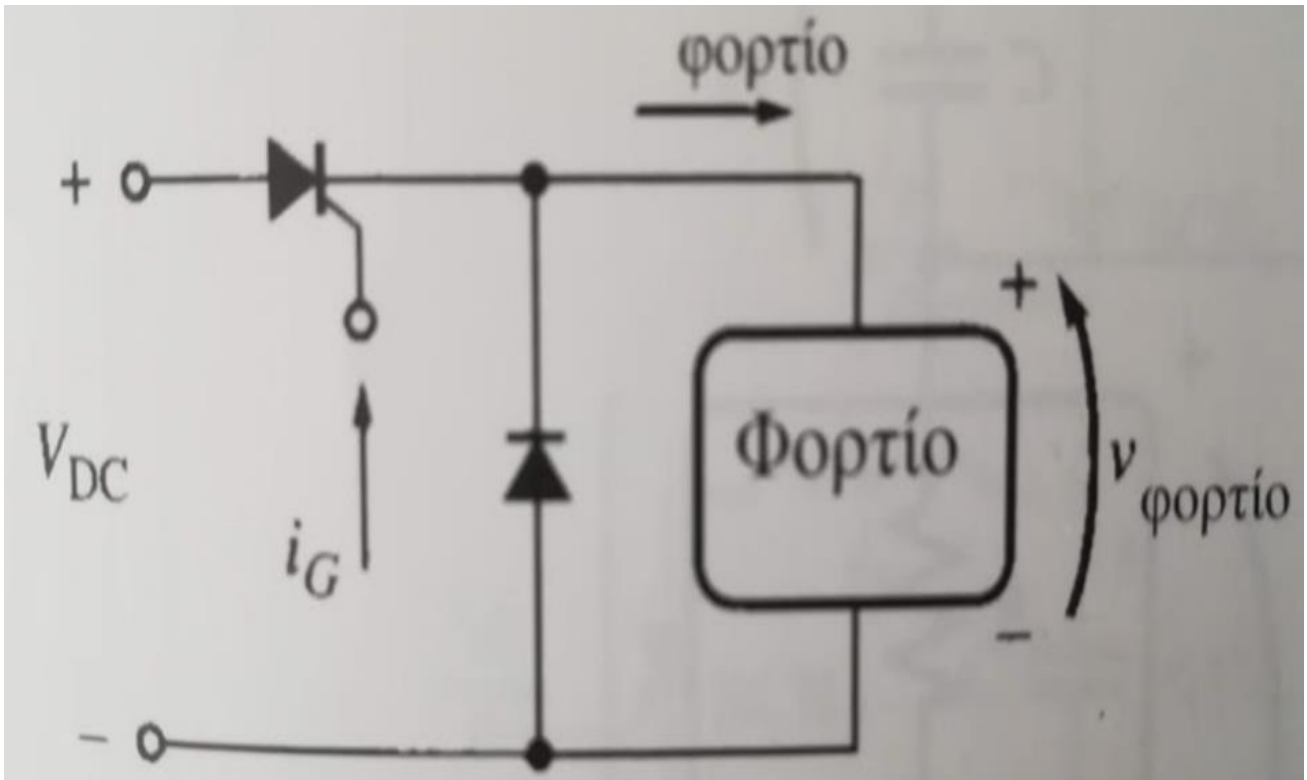
Μεταβολή του βαθμού χρησιμοποίησης.

- Με σταθερή συχνότητα και μεταβαλλόμενο χρόνο αγωγής. (PWM).
- Με σταθερό χρόνο t_{on} ή t_{off} και μεταβαλλόμενη την περίοδο του παλμού (frequency modulation).

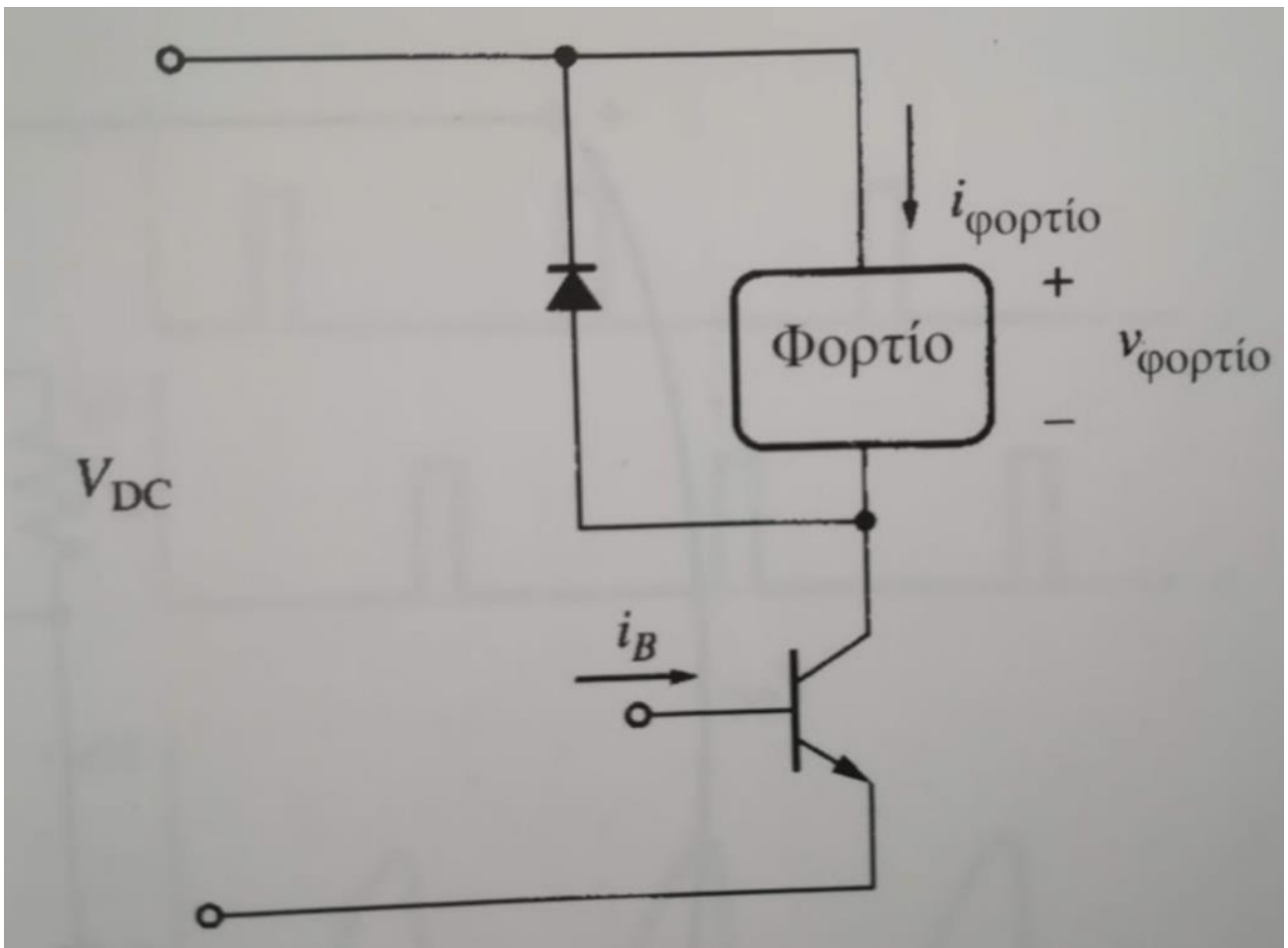




Κύκλωμα Chopper με επαγωγικό φίλτρο για την εξομάλυνση της τάσης και του ρεύματος στο φορτίο.



Κύκλωμα Chopper με GTO



Κύκλωμα Chopper με transistor.

Εξαναγκασμένη μετάβαση σε κυκλώματα Choppers.

a. Μετάβαση με πυκνωτή συνδεδεμένο σε σειρά.

b. Μετάβαση με πυκνωτή συνδεδεμένο παράλληλα.

