

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Ανάλυση Ευθείας Φόρτου
- 2.3 Συνδεσμολογίες Διόδων σε Σειρά
- 2.4 Συνδεσμολογίες Διόδων Παράλληλα και σε Σειρά/Παράλληλα
- 2.5 Πύλες AND/OR
- 2.6 Ημιτονοειδείς Είσοδοι, Ημιανόρθωση
- 2.7 Πλήρης Ανόρθωση
- 2.8 Περιοριστές
- 2.9 Κυκλώματα Επαναφοράς Στάθμης DC
- 2.10 Δίοδοι Zener
- 2.11 Κυκλώματα Πολλαπλασιαστών Τάσης
- 2.12 Πρακτικές Εφαρμογές
- 2.13 Περίληψη
- 2.14 Ανάλυση με H/Y

## ΣΤΟΧΟΙ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Να κατανοήσετε την έννοια της ανάλυσης της ευθείας φόρτου και πως αυτή εφαρμόζεται σε κυκλώματα διόδων.
- Να εξοικειωθείτε με τη χρήση των ισοδύναμων κυκλωμάτων για την ανάλυση κυκλωμάτων διόδων σε σειρά, παράλληλα και σε σειρά/παράλληλα.
- Να κατανοήσετε τη λειτουργία της ανόρθωσης για τη δημιουργία μίας στάθμης dc από μία ημιτονοειδή είσοδο ac.
- Να μπορείτε να προβλέψετε την έξοδο ενός περιοριστή και ενός κυκλώματος επαναφοράς στάθμης.
- Να εξοικειωθείτε με την ανάλυση και το εύρος των εφαρμογών για τις διόδους Zener.

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάστηκαν η κατασκευή, τα χαρακτηριστικά και τα μοντέλα των διόδων ημιαγωγών. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε τη λειτουργία της διόδου σε ένα πλήθος συνδεσμολογιών χρησιμοποιώντας μοντέλα κατάλληλα για το πεδίο της επιλεγμένης εφαρμογής. Στο τέλος του κεφαλαίου, το πλαίσιο της βασικής συμπεριφοράς των διόδων στα κυκλώματα dc και ac θα είναι πλήρως κατανοητή. Οι βασικές αρχές που θα μάθετε σε αυτό το κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθούν σε πολύ μεγάλο βαθμό και στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν. Για παράδειγμα, οι διόδοι χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στην περιγραφή της βασικής κατασκευής των τρανζίστορ και στην ανάλυση των κυκλωμάτων τρανζίστορ στα πεδία dc και ac.

Το κεφάλαιο αυτό καταδεικνύει μία ενδιαφέρουσα και πολύ χρήσιμη άποψη της μελέτης του πεδίου των ηλεκτρονικών διατάξεων και συστημάτων:

*Μόλις γίνει κατανοητή η βασική συμπεριφορά μιας διάταξης, μπορεί να αναλυθεί η λειτουργία της και η απόκρισή της σε μία πληθώρα συνδεσμολογιών.*

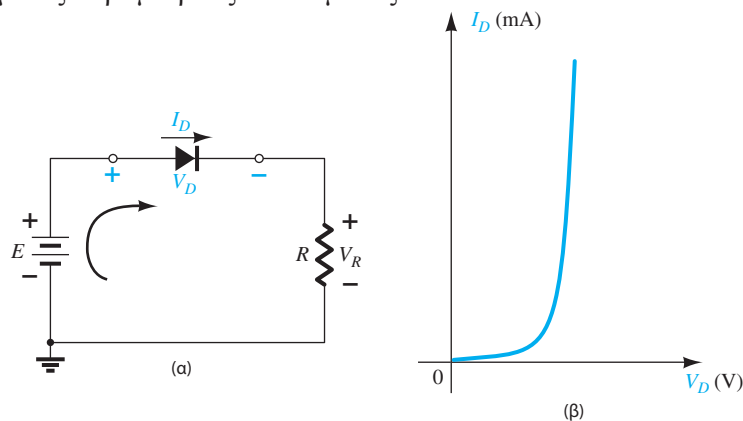
Με άλλα λόγια, τώρα που έχουμε μία βασική γνώση των χαρακτηριστικών μίας διόδου και της απόκρισής της στις εφαρμοζόμενες τάσεις και ρεύματα, μπορούμε να τη χρησιμοποιήσουμε για την ανάλυση μία πληθώρας κυκλωμάτων χωρίς να χρειάζεται να επανεξετάσουμε την απόκρισή της για κάθε εφαρμογή. Γενικά ισχύει ότι:

*Η ανάλυση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: ή με τη χρήση της πραγματικής χαρακτηριστικής ή με την εφαρμογή ενός προσεγγιστικού μοντέλου.*

Για τη δίοδο, η αρχική συζήτηση θα περιλαμβάνει την πραγματική χαρακτηριστική για να φανεί καθαρά ο τρόπος που αλληλεπιδρούν η χαρακτηριστική μιας διάταξης με τις παραμέτρους του κυκλώματος. Μόλις δούμε ότι τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι σε γενικές γραμμές αυτά που θα περιμέναμε, τότε θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο τμηματικής προσέγγισης για να επαληθεύσουμε αυτά που πήραμε χρησιμοποιώντας την ολοκληρωμένη χαρακτηριστική. Είναι πολύ σημαντικό ο ρόλος και η απόκριση των διαφόρων διατάξεων ενός ηλεκτρονικού συστήματος να γίνει κατανοητός χωρίς να είναι απαραίτητη η συνεχής χρήση μεγάλων μαθηματικών τύπων και πράξεων, γεγονός που συνήθως επιτυγχάνεται με την προσεγγιστική μέθοδο. Αν και τα αποτελέσματα που προκύπτουν με τη χρήση των πραγματικών χαρακτηριστικών μπορεί να διαφέρουν λίγο αυτά που παίρνουμε από τη μέθοδο διαδοχικών προσεγγίσεων, να θυμάστε ότι και οι χαρακτηριστικές που λαμβάνονται από τα φύλλα προδιαγραφών μπορεί να διαφέρουν λίγο από αυτές που εμφανίζει η διάταξη κατά τη χρήση της. Για παράδειγμα, οι χαρακτηριστικές μία δίοδου ημιαγωγού 1N4001 μπορεί να διαφέρουν από τη μία στην άλλη μεταξύ διόδων της ίδιας παρτίδας. Η διαφορά μπορεί να είναι μικρή, αλλά συνήθως είναι αρκετή για να δικαιολογήσει τις προσεγγίσεις στην ανάλυση. Επίσης, υπάρχει και κάτι άλλο που πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν σε ένα κύκλωμα. Η αντίσταση των 100 Ω είναι ακριβώς 100 Ω; Η τάση της πηγής είναι ακριβώς 10 V ή μήπως είναι 10,08 V; Όλες αυτές οι ανοχές ενισχύουν τη γενικότερη αίσθηση ότι η απόκριση που καθορίζεται από το κατάλληλο σύνολο προσεγγίσεων μπορεί πολλές φορές να είναι “τόσο ακριβής” όσο είναι και η απόκριση που καθορίζεται χρησιμοποιώντας τις πλήρεις χαρακτηριστικές. Σε αυτό το βιβλίο δίνεται έμφαση στην κατανόηση της λειτουργίας μιας διάταξης με τη χρήση των κατάλληλων προσεγγίσεων, αποφεύγοντας με τον τρόπο αυτό περιττές μαθηματικές εξηγήσεις. Φυσικά, για όποιους επιθυμούν μία περισσότερο μαθηματική ανάλυση θα δίνονται, στο βαθμό που χρειάζεται, οι σχετικές λεπτομέρειες.

## 2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΘΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Το κύκλωμα του Σχ. 2.1 είναι η πιο απλή συνδεσμολογία δίοδου που υπάρχει. Θα χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της ανάλυσης ενός κυκλώματος δίοδου χρησιμοποιώντας την πραγματική χαρακτηριστική της. Στην επόμενη ενότητα θα αντικαταστήσουμε τη χαρακτηριστική από ένα προσεγγιστικό μοντέλο της δίοδου και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα. Η επίλυση του κυκλώματος του Σχ. 2.1 έχει ως ζητούμενο την εύρεση των τιμών τάσης και ρεύματος που θα ικανοποιούν ταυτόχρονα και τη χαρακτηριστική της δίοδου και τις επιλεγμένες παραμέτρους κυκλώματος.



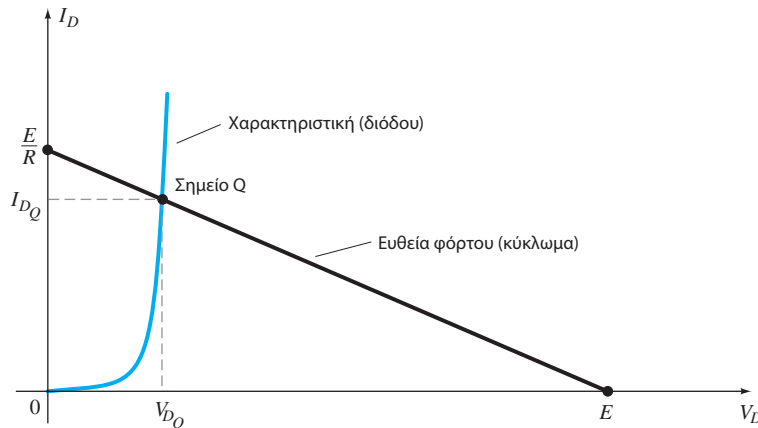
ΣΧΗΜΑ 2.1

Συνδεσμολογία δίοδου σε σειρά: (α) κύκλωμα, (β) χαρακτηριστική.

Στο Σχ. 2.2, η χαρακτηριστική της δίοδου τοποθετείται στο ίδιο σύστημα αξόνων με μία ευθεία γραμμή που ορίζεται από τις παραμέτρους του κυκλώματος. Η ευθεία γραμμή ονομάζεται *γραμμή φορτίου* ή *ευθεία φόρτου* (*load line*) επειδή το σημείο τομής της με τον κατακόρυφο άξονα καθορίζεται από την τιμή του φορτίου  $R$  και γι' αυτό το λόγο η ανάλυση που θα ακολουθήσει ονομάζεται *ανάλυση γραμμής φορτίου* ή *ανάλυση ευθείας φόρτου* (*load-line analysis*). Το σημείο τομής των δύο καμπυλών αποτελεί τη λύση για το κύκλωμα και θα ορίσει τις τιμές του ρεύματος και της τάσης.

Πριν εξετάσουμε τον τρόπο σχεδίασης της ευθείας φόρτου πάνω στη χαρακτηριστική, πρέπει να καθορίσουμε την αναμενόμενη απόκριση του απλού κυκλώματος του Σχ. 2.1. Προσέξτε στο Σχ. 2.1 ότι η επίδραση της “πίεσης” που προκαλείται από την πηγή τροφοδοσίας dc είναι η δημιουργία ενός συμβατι-

κού ρεύματος σύμφωνα τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Το γεγονός ότι η φορά αυτού του ρεύματος είναι ίδια με τη φορά του βέλους στο σύμβολο της διόδου δείχνει ότι η διόδος είναι στην κατάσταση “on”, δηλαδή ότι η διόδος άγει. Με άλλα λόγια, η εφαρμοζόμενη τάση έχει προκαλέσει μια κατάσταση ορθής πόλωσης. Έχοντας ορίσει τη φορά του ρεύματος, μπορούμε να ορίσουμε και την πολικότητα των τάσεων στα άκρα της διόδου και της αντίστασης. Η πολικότητα της  $V_D$  και η φορά του  $I_D$  δείχνουν ξεκάθαρα ότι η διόδος βρίσκεται πράγματι στην κατάσταση ορθής πόλωσης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μίας τάσης στα άκρα της διόδου γύρω στα 0,7 V και ενός ρεύματος της τάξης των 10 mA ή και μεγαλύτερο.



ΣΧΗΜΑ 2.2

Σχεδίαση της ευθείας φόρτου και εύρεση του σημείου λειτουργίας.

Τα σημεία τομής της ευθείας φόρτου με τη χαρακτηριστική του Σχ. 2.2 μπορούν να καθοριστούν εφαρμόζοντας τον νόμο τάσης του Kirchhoff σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Έτσι, έχουμε

$$+E - V_D - V_R = 0$$

ή

$$E = V_D + I_D R \quad (2.1)$$

Οι δύο μεταβλητές της Εξ. (2.1),  $V_D$  και  $I_D$ , είναι ίδιες με τις μεταβλητές αξόνων της διόδου στο Σχ. 2.2. Η ομοιότητα αυτή επιτρέπει τη σχεδίαση της Εξ. (2.1) πάνω στη χαρακτηριστική του Σχ. 2.2.

Τα σημεία τομής της ευθείας φόρτου με τη χαρακτηριστική μπορούν πολύ εύκολα να προσδιοριστούν θεωρώντας ότι σε οποιοδήποτε σημείο του οριζόντιου άξονα  $I_D = 0$  A και σε οποιοδήποτε σημείο του κατακόρυφου άξονα  $V_D = 0$  V.

Αν θέσουμε  $V_D = 0$  V στην Εξ. (2.1) και λύσουμε ως προς  $I_D$ , τότε θα πάρουμε την τιμή του  $I_D$  πάνω στον κατακόρυφο άξονα. Άρα, για  $V_D = 0$  V, η Εξ. (2.1) γίνεται

$$E = V_D + I_D R = 0 \text{ V} + I_D R$$

και τελικά

$$I_D = \frac{E}{R} \Big|_{V_D=0\text{V}} \quad (2.2)$$

όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.2. Αν θέσουμε  $I_D = 0$  A στην Εξ. (2.1) και λύσουμε ως προς  $V_D$ , τότε θα πάρουμε την τιμή της  $V_D$  στον οριζόντιο άξονα. Επομένως, για  $I_D = 0$  A, η Εξ. (2.1) γίνεται

$$E = V_D + I_D R = V_D + (0 \text{ A})R$$

και τελικά

$$V_D = E \Big|_{I_D=0\text{A}} \quad (2.3)$$

όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.2. Η ευθεία γραμμή που ενώνει αυτά τα δύο σημεία ορίζει την ευθεία φόρτου, όπως μπορείτε να δείτε και στο σχήμα. Αν αλλάξετε την τιμή της  $R$  (δηλ., του φορτίου), τότε θα αλλάξει το σημείο τομής της ευθείας φόρτου με τον κατακόρυφο άξονα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να αλλάξει η κλίση της ευθείας φόρτου και κατ' επέκταση το σημείο τομής της με τη χαρακτηριστική της διόδου.

Έτσι τώρα έχουμε την ευθεία φόρτου που καθορίζεται από το κύκλωμα και τη χαρακτηριστική καμπύλη της διόδου. Το σημείο τομής μεταξύ αυτών των δύο είναι το σημείο λειτουργίας του συγκεκριμένου κυκλώματος. Αν από το σημείο αυτό χαράξουμε τις κάθετες ευθείες προς τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα, τότε θα ορίσουμε την τάση διόδου  $V_{DQ}$  και το ρεύμα διόδου  $I_{DQ}$ . Το ρεύμα  $I_D$  είναι το ρεύμα που διαρρέει όλο το κύκλωμα του Σχ. 2.1α. Το σημείο λειτουργίας συνήθως αναφέρεται ως *σημείο ηρεμίας* ή *σημείο Q* (*quiescent point* ή *Q-point*) για να υποδηλώσει την “ακίνητη” φύση του, όπως ορίζεται από ένα κύκλωμα dc.

Η λύση που παίρνουμε στο σημείο τομής των δύο καμπυλών είναι ίδια με αυτή που θα παίρναμε από την ταυτόχρονη μαθηματική επίλυση των εξισώσεων

$$I_D = \frac{E}{R} - \frac{V_D}{R} \quad [\text{προκύπτει από την Εξ. (2.1)}]$$

και

$$I_D = I_s (e^{V_D/nV_T} - 1)$$

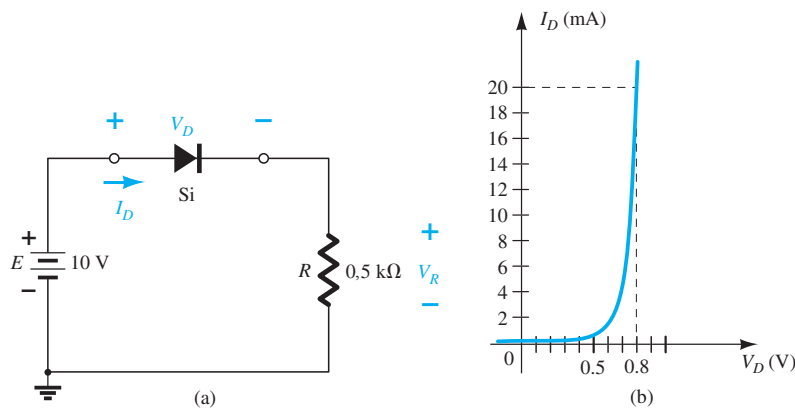
όπως θα δείξουμε και παρακάτω σε αυτή την ενότητα σε ένα παράδειγμα του Mathcad. Επειδή η καμπύλη μίας διόδου έχει μη γραμμικά χαρακτηριστικά, τα μαθηματικά που απαιτούνται χρησιμοποιούν μη γραμμικές τεχνικές οι οποίες είναι πέρα από τις ανάγκες και τους στόχους του βιβλίου. Η ανάλυση της ευθείας φόρτου που περιγράψαμε παραπάνω παρέχει μία λύση χωρίς πολύ κόπο καθώς επίσης και μία οπτική περιγραφή του τρόπου με τον οποίο προσδιορίζονται οι τιμές των  $V_{DQ}$  και  $I_{DQ}$ . Το παράδειγμα που ακολουθεί παρουσιάζει τις τεχνικές που αναφέραμε νωρίτερα και δείχνει την ευκολία με την οποία μπορεί γίνει η χάραξη της ευθείας φόρτου με τις Εξ. (2.2) και (2.3).

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.1

Για το κύκλωμα του Σχ. 2.3α, χρησιμοποιώντας τη χαρακτηριστική διόδου του Σχ. 2.3β, καθορίστε

α. τα  $V_{DQ}$  και  $I_{DQ}$ , και

β. τη  $V_R$ .



ΣΧΗΜΑ 2.3

(α) Κύκλωμα, (β) χαρακτηριστική.

**Λύση:**

$$\alpha. \text{ Εξ. (2.2): } I_D = \frac{E}{R} \Big|_{V_D=0V} = \frac{10V}{0,5k\Omega} = 20\text{mA}$$

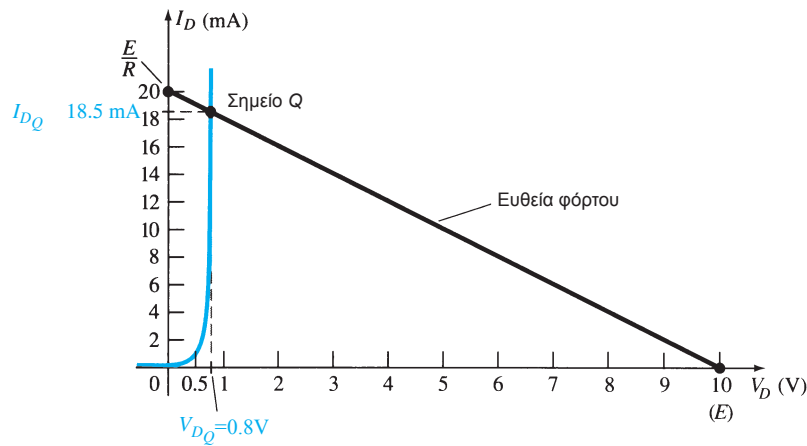
$$\text{Εξ. (2.3): } V_D = E \Big|_{I_D=0A} = 10V$$

Η ευθεία φόρτου που προκύπτει φαίνεται στο Σχ. 2.4. Το σημείο τομής της ευθείας φόρτου και της χαρακτηριστικής καμπύλης ορίζει το σημείο  $Q$  ως

$$V_{DQ} \cong 0,8V \quad I_{DQ} \cong 18,5\text{mA}$$

Η τιμή της  $V_D$  οπωσδήποτε είναι μία εκτίμηση και η ακρίβεια του  $I_D$  περιορίζεται από την κλίμακα που έχει επιλεγεί. Ένας μεγαλύτερος βαθμός ακρίβειας θα απαιτούσε ένα πολύ μεγαλύτερο και δυσλειτουργικό διάγραμμα.

$$\beta. V_R = I_R R = I_{DQ} R = (18,5\text{mA})(0,5k\Omega) = 9,25V$$



ΣΧΗΜΑ 2.4

Λύση του Παραδείγματος 2.1.

Όπως είδαμε και στο παράδειγμα, η ευθεία φόρτου καθορίζεται αποκλειστικά από το κύκλωμα ενώ η χαρακτηριστική ορίζεται από την επιλεγμένη ηλεκτρονική διάταξη. Αν πάμε στο προσεγγιστικό μοντέλο της διόδου και δεν πειράζουμε καθόλου το κύκλωμα, η ευθεία φόρτου θα είναι ακριβώς η ίδια με αυτή του παραδείγματος. Πράγματι, τα δύο επόμενα παραδείγματα επαναλαμβάνουν την ανάλυση του Παραδείγματος 2.1 χρησιμοποιώντας το προσεγγιστικό μοντέλο για να κάνουμε μία σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων.

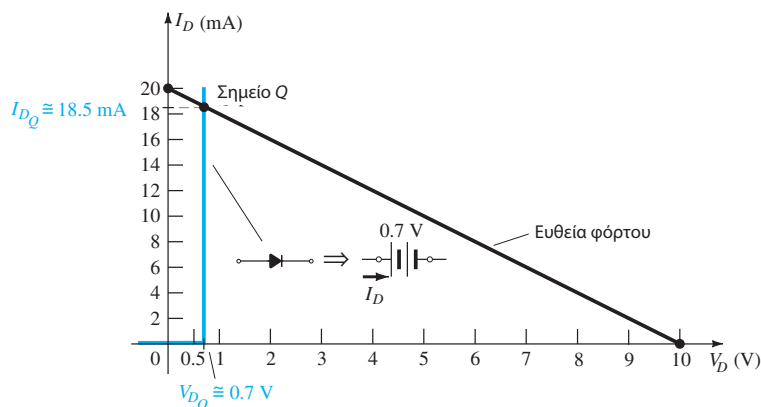
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.2

Επαναλάβετε το Παράδειγμα 2.1 χρησιμοποιώντας το προσεγγιστικό ισοδύναμο κύκλωμα για τη δίοδο πυριτίου.

### Λύση:

Η ευθεία φόρτου σχεδιάζεται ξανά, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.5, με τα ίδια σημεία τομής που ορίστηκαν στο Παράδειγμα 2.1. Στο ίδιο διάγραμμα έχει σχεδιαστεί και η χαρακτηριστική του προσεγγιστικού ισοδύναμου κυκλώματος της διόδου. Το σημείο  $Q$  που προκύπτει είναι

$$V_{DQ} = 0,7 \text{ V} \quad I_{DQ} = 18,5 \text{ mA}$$



ΣΧΗΜΑ 2.5

Λύση του Παραδείγματος 2.1 χρησιμοποιώντας το προσεγγιστικό μοντέλο διόδου.

Τα αποτελέσματα που παίρνουμε από το Παράδειγμα 2.2 έχουν πολύ μεγάλο ενδιαφέρον. Η τιμή του  $I_{DQ}$  είναι ακριβώς ίδια με αυτή του Παραδείγματος 2.1 χρησιμοποιώντας μία χαρακτηριστική καμπύλη που είναι πολύ ευκολότερη στη σχεδίαση από αυτή του Σχ. 2.4. Η τιμή της  $V_D$  εδώ είναι 0,7 V και διαφέρει σε επίπεδο δεκάτου με την τιμή των 0,8 V από το Παράδειγμα 2.1, αλλά σε σύγκριση με τα μεγέθη των υπολοίπων τάσεων του κυκλώματος οι δύο αυτές τιμές της  $V_D$  είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

Στο επόμενο παράδειγμα θα προχωρήσουμε ένα βήμα παραπέρα χρησιμοποιώντας το ιδανικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα θα υποδείξουν τις συνθήκες που πρέπει να ικανοποιηθούν για να εφαρμοστεί σωστά το ιδανικό ισοδύναμο.

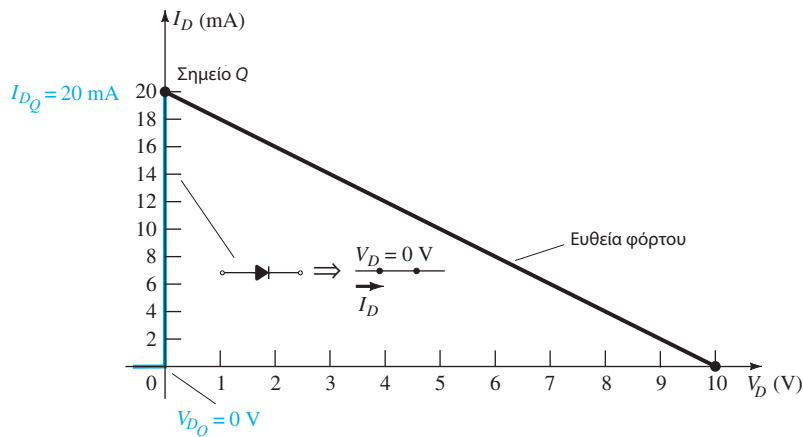
### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.3

Επαναλάβετε το Παράδειγμα 2.1 χρησιμοποιώντας το μοντέλο της ιδανικής διόδου.

#### Λύση:

Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.6, η ευθεία φόρτου είναι ίδια, αλλά η ιδανική χαρακτηριστική τώρα τέμνεται με την ευθεία φόρτου στον κατακόρυφο άξονα. Άρα, το σημείο  $Q$  ορίζεται ως

$$V_{DQ} = 0 \text{ V} \quad I_{DQ} = 20 \text{ mA}$$



ΣΧΗΜΑ 2.6

Λύση του Παραδείγματος 2.1 χρησιμοποιώντας το μοντέλο ιδανικής διόδου.

Τα αποτελέσματα είναι αρκετά διαφορετικά από αυτά του Παραδείγματος 2.1 προκαλώντας επιφυλάξεις για την ακρίβειά τους. Σίγουρα, δίνουν μία ένδειξη για το επίπεδο των αναμενόμενων τιμών της τάσης και του ρεύματος σε σχέση με τις υπόλοιπες τάσεις του κυκλώματος, αλλά η προσθήκη της τάσης απόκλισης των 0,7 V που υιοθετεί η μέθοδος στο Παράδειγμα 2.2 την καθιστά καταλληλότερη.

Κατά συνέπεια, η χρήση του μοντέλου ιδανικής διόδου θα πρέπει να περιορίζεται σε αυτές τις περιπτώσεις όπου ο ρόλος μίας διόδου είναι πιο σημαντικός από τις τιμές τάσης που διαφέρουν για δέκατα του volt και σε καταστάσεις στις οποίες οι εφαρμοζόμενες τάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από την τάση κατωφλίου  $V_K$ . Στις αμέσως επόμενες ενότητες θα χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά το προσεγγιστικό μοντέλο αφού οι τιμές τάσης που θα πάρουμε θα είναι ευαίσθητες σε μεταβολές τάξης μεγέθους ίδιου με αυτό της  $V_K$ . Αργότερα, το μοντέλο της ιδανικής διόδου θα χρησιμοποιηθεί περισσότερο επειδή οι εφαρμοζόμενες τάσεις θα είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερες από τη  $V_K$ .

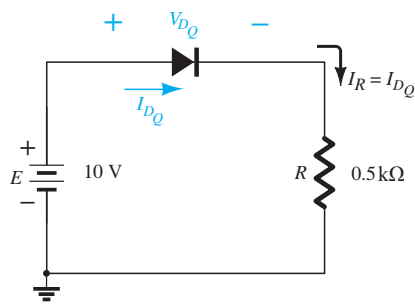
### Mathcad

Τώρα θα χρησιμοποιήσουμε το Mathcad για να βρούμε τη λύση των δύο εξισώσεων που ορίζονται από τη δίοδο και το κύκλωμα του Σχ. 2.7.

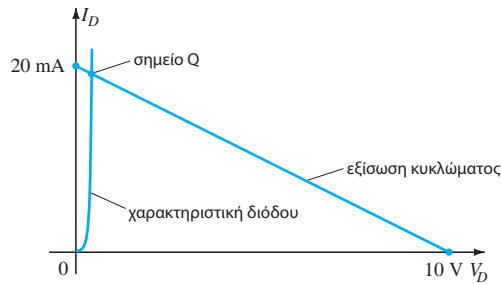
Η χαρακτηριστική της διόδου ορίζεται από την εξίσωση

$$I_D = I_s (e^{V_D/nV_T} - 1) = 10 \text{ pA} (e^{V_D/39,0 \text{ mV}} - 1)$$

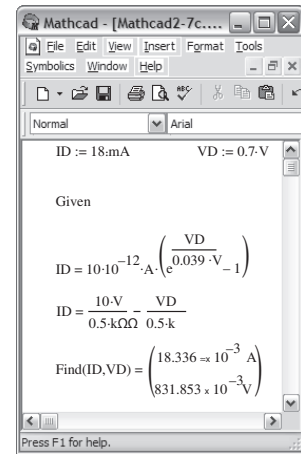
Η τιμή που επιλέξαμε για το  $n$  είναι 1,5 για να πάρουμε μία χαρακτηριστική που ταιριάζει όσο το δυνατόν περισσότερο με αυτές των διόδων του εμπορίου. Η αύξηση του  $n$  μετατοπίζει τη χαρακτηριστική προς τα δεξιά.



(α)



(β)



(γ)

### ΣΧΗΜΑ 2.7

Εύρεση του σημείου λειτουργίας που ορίζεται από τη χαρακτηριστική της διόδου και το κύκλωμα. (α) Κύκλωμα, (β) γραφική επίλυση, (γ) επίλυση με H/Y.

Εφαρμόζοντας το νόμο τάσης του Kirchhoff στον κλειστό βρόχο, έχουμε

$$E - V_D - V_R = 0 \Rightarrow E - V_D = I_R R \Rightarrow E - V_D = I_D R$$

και λύνοντας ως προς το ρεύμα διόδου παίρνουμε

$$I_D = \frac{E - V_D}{R} = \frac{E}{R} - \frac{V_D}{R}$$

$$I_D = \frac{10\text{V}}{0,5\text{k}\Omega} - \frac{V_D}{0,5\text{k}\Omega}$$

Επειδή τώρα έχουμε δύο εξισώσεις και δύο αγνώστους ( $I_D$  και  $V_D$ ), μπορούμε να λύσουμε ως προς τον κάθε άγνωστο με το Mathcad ως εξής:

Όταν χρησιμοποιείτε το Mathcad για να επιλύσετε δύο εξισώσεις ταυτόχρονα, θα πρέπει να **υποθέσετε (guess)** μία τιμή για τον κάθε άγνωστο για να δώσετε στον H/Y μία κατεύθυνση για την **επαναληπτική του μέθοδο (iterative process)**. Με άλλα λόγια, ο H/Y θα δοκιμάσει λύσεις μέχρι να βρει την πραγματική λύση που ανταποκρίνεται στα αποτελέσματα παίρνει.

Στην περίπτωσή μας, οι αρχικές υποθέσεις για τα **ID** και **VD** ήταν 18 mA και 0,7 V, αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο πάνω μέρος του Σχ. 2.7γ. Στη συνέχεια, μετά από τη λέξη **Given** (Δεδομένου), εισάγονται οι δύο εξισώσεις, στις οποίες το σύμβολο ισότητας πρέπει να καταχωρηθεί με το συνδυασμό πλήκτρων **Ctrl + =**. Προσέξτε ότι στο Σχ. 2.7γ χρησιμοποιούνται μονάδες και στις τιμές που υποθέσαμε και στις εξισώσεις, κάτι που είναι απαραίτητο αν θέλουμε να έχουν μονάδες και τα αποτελέσματα. Μπορείτε, βέβαια, να χρησιμοποιήσετε τις συντομογραφίες των μονάδων, π.χ. mA και kΩ, αλλά η απάντηση πάντα θα εκφράζεται σε μορφή δυνάμεως του 10. Η έκφραση **Find(ID,VD)** λέει στον H/Y τι είναι αυτό που πρέπει να υπολογιστεί. Μόλις εισάγετε το σύμβολο ίσον, τα αποτελέσματα εμφανίζονται όπως φαίνεται στο Σχ. 2.7γ και όπως επαληθεύεται από το Σχ. 2.7β έχουμε  $I_D = 18,34 \text{ mA}$  και  $V_D = 0,83 \text{ V}$ .

## 2.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΟΔΩΝ ΣΕ ΣΕΙΡΑ

Στην προηγούμενη ενότητα διαπιστώσαμε ότι τα αποτελέσματα που πήραμε με τη χρήση του προσεγγιστικού (τμηματικά γραμμικού) ισοδύναμου μοντέλου ήταν πολύ κοντά, αν όχι ίδια, με αυτά που πήραμε με τις πλήρεις χαρακτηριστικές. Αν λάβουμε υπ' όψιν μας και όλες τις πιθανές αποκλίσεις που οφείλονται στις ανοχές των υλικών, στη θερμοκρασία, κτλ, τότε μπορούμε να πούμε ότι οι δύο λύσεις βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο ακρίβειας. Επειδή η χρήση του προσεγγιστικού μοντέλου προϋποθέτει λιγότερο χρόνο και προσπάθεια για να πάρουμε τα τελικά αποτελέσματα, είναι η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το βιβλίο εκτός αν ορίζεται διαφορετικά. Θυμηθείτε τα εξής:

*Ο βασικός σκοπός αυτού του βιβλίου είναι να αποκτήσετε μία βασική γνώση της συμπεριφοράς, των δυνατοτήτων και των πιθανών πεδίων εφαρμογής μιας διάταξης με τρόπο που να ελαχιστοποιεί την ανάγκη εκτεταμένων μαθηματικών πράξεων.*

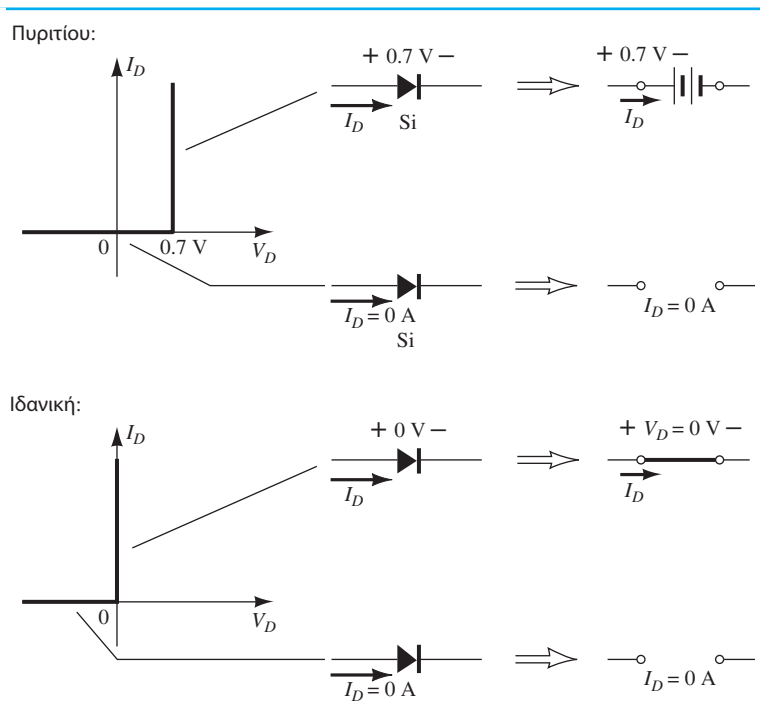
Για όλη την ανάλυση που θα γίνει στο κεφάλαιο αυτό ισχύει η παρακάτω υπόθεση:

*Η αντίσταση ορθής φοράς της διόδου είναι συνήθως τόσο μικρή σε σχέση με τις τιμές αντίστασης των άλλων στοιχείων του κυκλώματος που βρίσκονται σε σειρά με τη δίοδο ώστε μπορεί να αγνοηθεί.*

Αυτή είναι μία σωστή προσέγγιση για τις περισσότερες εφαρμογές που χρησιμοποιούν διόδους και μας οδηγεί στα προσεγγιστικά ισοδύναμα της διόδου πυριτίου και της ιδανικής διόδου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Για την περιοχή αγωγιμότητας η μόνη διαφορά μεταξύ της διόδου πυριτίου και της ιδανικής είναι η κάθετη μετατόπιση της χαρακτηριστικής η οποία εκφράζεται στο ισοδύναμο μοντέλο από μία πηγή τάσης dc  $0,7\text{ V}$  αντίθετης πολικότητας προς το ρεύμα ορθής φοράς που διαρρέει τη δίοδο. Για τάσεις μικρότερες από  $0,7\text{ V}$  για τη δίοδο πυριτίου και  $0\text{ V}$  για την ιδανική δίοδο, η αντίσταση είναι τόσο μεγάλη συγκρινόμενη με τα άλλα στοιχεία του κυκλώματος που ισοδυναμεί με ανοικτό κύκλωμα.

### ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1

Προσεγγιστικό και Ιδανικό Μοντέλο Διόδου Ημιαγωγού.



Για μία δίοδο Ge η τάση μετατόπισης είναι  $0,3\text{ V}$  και για μία δίοδο GaAs είναι  $1,2\text{ V}$ . Κατά τα άλλα, τα ισοδύναμα κυκλώματα είναι ίδια. Για κάθε δίοδο θα σημειώνεται η ένδειξη Si, Ge ή GaAs μαζί με το σύμβολο διόδου. Για κυκλώματα με ιδανικές διόδους, το σύμβολο της διόδου θα εμφανίζεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1 χωρίς ένδειξη.

Από εδώ και στο εξής τα προσεγγιστικά μοντέλα θα χρησιμοποιηθούν για την εξέταση αρκετών συνδεσμολογιών διόδων σε σειρά με σταθερές (dc) εισόδους. Έτσι θα δημιουργηθεί μία βάση στην ανάλυση διόδων η οποία θα φανεί πολύ χρήσιμη στις ενότητες και στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν ακόμα και σε κυκλώματα με πολλές διόδους και διαφορετικών συνδεσμολογιών.

Για κάθε συνδεσμολογία θα πρέπει πρώτα να καθορίζεται η κατάσταση της κάθε διόδου, δηλαδή ποιες διόδους είναι "on" και ποιες είναι "off". Μόλις γίνει αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κατάλληλο ισοδύναμο και να καθοριστούν οι υπόλοιπες παράμετροι του κυκλώματος.

*Γενικά, μία δίοδος είναι στην κατάσταση "on" αν το ρεύμα που δημιουργείται από τις εφαρμοζόμενες πηγές έχει φορά ίδια με τη φορά του βέλους του συμβόλου της διόδου και  $V_D \geq 0,7\text{ V}$  για το πυρίτιο,  $V_D \geq 0,3\text{ V}$  για το γερμάνιο και  $V_D \geq 1,2\text{ V}$  για το αρσενικούχο γάλλιο.*



Για κάθε συνδεσμολογία, αντικαταστήστε νοερά τις διόδους με αντιστάσεις και σημειώστε τη φορά ρεύματος όπως αυτή καθορίζεται από τις εφαρμοζόμενες τάσεις. Αν η φορά αυτή ταιριάζει με το βέλος του συμβόλου της διόδου, τότε η διάοδος άγει και η διάταξη είναι στην κατάσταση “on”. Αυτή η περιγραφή, φυσικά, εξαρτάται από το αν η τροφοδοσία έχει τάση μεγαλύτερη από την τάση έναυσης  $V_K$  (“turn-on” voltage) της κάθε διόδου.

Όταν η διάοδος βρίσκεται σε κατάσταση “on”, μπορείτε να σημειώσετε μία πτώση τάσης 0,7 V στη διάοδο ή να ξανασχεδιάσετε το κύκλωμα με το ισοδύναμο κύκλωμα της  $V_K$  σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1. Μόλις εξοικειωθείτε, η επιλογή σας μάλλον θα είναι απλά να σημειώνετε την πτώση τάση των 0,7 V σε κάθε διάοδο που είναι “on” και να διαγράφετε με μία γραμμή κάθε διάοδο που είναι “off”. Στην παρούσα φάση όμως, θα ακολουθήσουμε τη μέθοδο αντικατάστασης για να είμαστε σίγουροι ότι καθορίζονται οι σωστές τιμές τάσης και ρεύματος.

Το κύκλωμα σειράς του Σχ. 2.8 που εξετάστηκε στην Ενότητα 2.2 θα χρησιμοποιηθεί για να δείξουμε στην πράξη τη λειτουργία που μόλις περιγράψαμε. Πρώτα καθορίζεται η κατάσταση της διόδου αντικαθιστώντας νοερά τη διάοδο με μία αντίσταση, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.9α. Η φορά του ρεύματος  $I$  είναι ίδια με τη φορά του συμβόλου της διόδου και επειδή  $E > V_K$ , η διάοδος βρίσκεται στην κατάσταση “on”. Στη συνέχεια, το κύκλωμα σχεδιάζεται ξανά όπως φαίνεται στο Σχ. 2.9β με το κατάλληλο ισοδύναμο μοντέλο για την ορθά πολωμένη διάοδο πυριτίου. Σημειώστε για μελλοντική αναφορά ότι η πολικότητα της  $V_D$  είναι ίδια με αυτή που είχαμε αν πράγματι η διάοδος ήταν μία αντίσταση. Οι τιμές της τάσης και του ρεύματος είναι οι εξής:

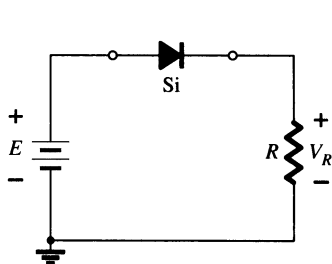
$$V_D = V_K \quad (2.4)$$

$$V_R = E - V_K \quad (2.5)$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} \quad (2.6)$$

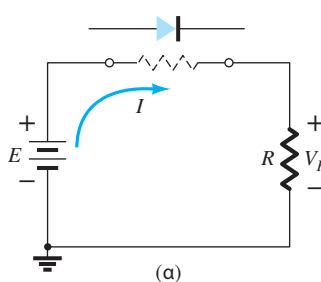
Στο Σχ. 2.10 η διάοδος του Σχ. 2.8 έχει αντιστραφεί. Αντικαθιστώντας νοερά τη διάοδο με μία αντίσταση, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.11, βλέπουμε ότι η φορά του ρεύματος δεν ταιριάζει με το βέλος του συμβόλου της διόδου και συνεπώς η διάοδος βρίσκεται σε κατάσταση “off”, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.12. Λόγω του ανοικτού κυκλώματος, το ρεύμα διόδου είναι 0 A και η τάση στα άκρα της αντίστασης  $R$  είναι η εξής:

$$V_R = I_R R = I_D R = (0 \text{ A}) R = 0 \text{ V}$$



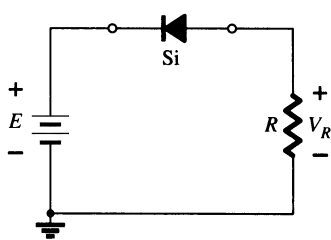
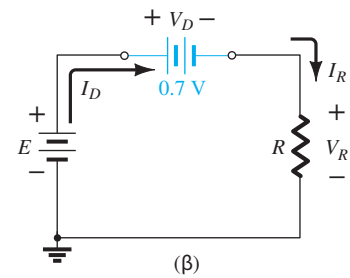
ΣΧΗΜΑ 2.8

Διάταξη διόδου σε σειρά.



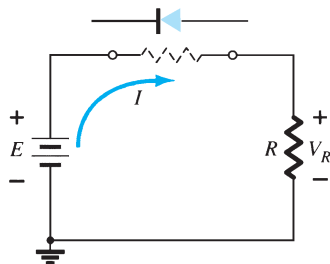
ΣΧΗΜΑ 2.9

(α) Καθορισμός της κατάστασης της διόδου του Σχ. 2.8, (β) χρήση του ισοδύναμου μοντέλου για τη διάοδο “on” του Σχ. 2.9α.



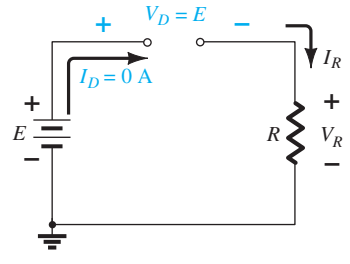
ΣΧΗΜΑ 2.10

Αντιστρέφοντας τη διάοδο του Σχ. 2.8.



ΣΧΗΜΑ 2.11

Καθορισμός της κατάστασης της διόδου του Σχ. 2.10.



ΣΧΗΜΑ 2.12

Χρήση του ισοδύναμου μοντέλου για τη διάοδο “off” του Σχ. 2.10.

Το γεγονός ότι  $V_R = 0 \text{ V}$  σημαίνει, σύμφωνα με το νόμο τάσης του Kirchhoff, ότι στα άκρα του ανοικτού κυκλώματος η τάση είναι  $E \text{ V}$ . Να θυμάστε πάντα ότι κάτω από οποιοδήποτε συνθήκες (dc, στιγμιαίες τιμές ac, παλμούς, κτλ) ο νόμος τάσης του Kirchhoff πρέπει να ικανοποιείται!

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.4

Για τη συνδεσμολογία διόδου σε σειρά του Σχ. 2.13 υπολογίστε τις  $V_D$ ,  $V_R$  και το  $I_D$ .

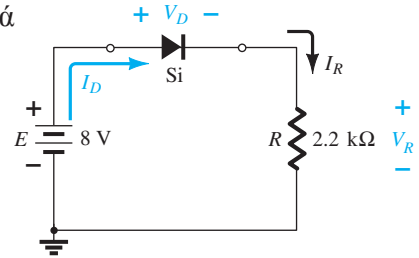
#### Λύση:

Η εφαρμοζόμενη τάση δημιουργεί ένα ρεύμα με φορά ίδια με τη φορά του βέλους στο σύμβολο της διόδου, επομένως η διάδος είναι σε κατάσταση “on”. Έτσι έχουμε

$$V_D = 0 \text{ V}$$

$$V_R = E - V_D = 8 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 7,3 \text{ V}$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{7,3 \text{ V}}{2,2 \text{ k}\Omega} \cong 3,32 \text{ mA}$$



ΣΧΗΜΑ 2.13

Κύκλωμα του Παραδείγματος 2.4.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.5

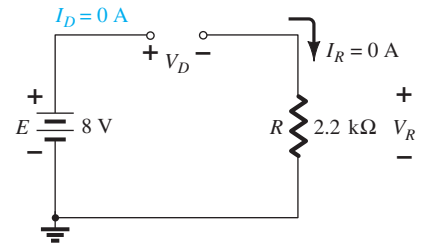
Επαναλάβετε το Παράδειγμα 2.4 αντιστρέφοντας τη διάοδο.

#### Λύση:

Αφαιρώντας τη διάοδο βλέπουμε ότι η φορά του ρεύματος  $I$  είναι αντίθετη με το βέλος του συμβόλου της διόδου και το ισοδύναμο της διόδου είναι το ανοικτό κύκλωμα ανεξάρτητα από το μοντέλο που χρησιμοποιείται. Το αποτέλεσμα είναι το κύκλωμα του Σχ. 2.14, στο οποίο  $I_D = 0 \text{ A}$  λόγω του ανοικτού κυκλώματος. Επειδή  $V_R = I_R R$ , έχουμε  $V_R = (0)R = 0 \text{ V}$ . Εφαρμόζοντας το νόμο τάσης του Kirchhoff στον κλειστό βρόχο έχουμε

$$E - V_D - V_R = 0$$

και 
$$V_D = E - V_R = E - 0 = E = 8 \text{ V}$$



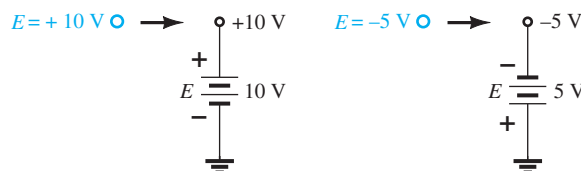
ΣΧΗΜΑ 2.14

Καθορισμός των άγνωστων μεγεθών για το Παράδειγμα 2.5.

Στο Παράδειγμα 2.5 προσέξτε τη μεγάλη τάση στα άκρα της διόδου παρά το γεγονός ότι είναι στην κατάσταση “off”. Το ρεύμα είναι μηδέν αλλά η τάση είναι μεγάλη. Για την ανάλυση που θα ακολουθήσει να θυμάστε το εξής:

**Ένα ανοικτό κύκλωμα μπορεί να έχει οποιαδήποτε τάση στα άκρα του αλλά το ρεύμα είναι πάντα 0 A. Ένα βραχυκύκλωμα έχει 0 V πτώση τάση στα άκρα του αλλά το ρεύμα περιορίζεται μόνο από το γειτονικό κύκλωμα.**

Το Σχ. 2.15 δείχνει τη συμβολογραφία που θα χρησιμοποιηθεί για την εφαρμοζόμενη τάση στο επόμενο παράδειγμα. Πρόκειται για μία πολύ συνηθισμένη συμβολογραφία της βιομηχανίας με την οποία θα εξοικειωθείτε πολύ σύντομα. Μαζί με άλλες καθορισμένες τιμές τάσης θα εξεταστεί αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 4.



ΣΧΗΜΑ 2.15

Συμβολογραφία πηγής τροφοδοσίας.

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.6**

Για τη συνδεσμολογία διόδου σε σειρά του Σχ. 2.16 υπολογίστε τις  $V_D$ ,  $V_R$  και το  $I_D$ .

**Λύση:**

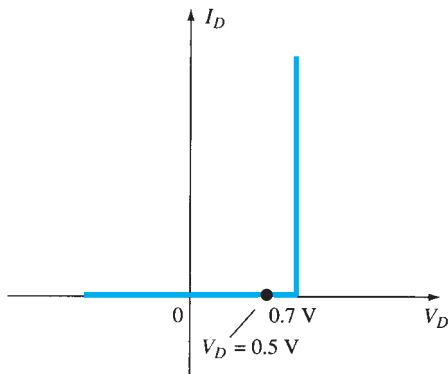
Παρά το γεγονός ότι η “πίεση” δημιουργεί ένα ρεύμα με την ίδια φορά με αυτή του βέλους στο σύμβολο, το επίπεδο της εφαρμοζόμενης τάσης δεν επαρκεί για να έρθει η διόδος σε αγωγιμότητα. Το σημείο λειτουργίας πάνω στη χαρακτηριστική φαίνεται στο Σχ. 2.17 και δίνει το ισοδύναμο ανοικτού κυκλώματος, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.18. Έτσι, οι τιμές τάσης και ρεύματος που προκύπτουν είναι οι εξής:

$$I_D = 0 \text{ A}$$

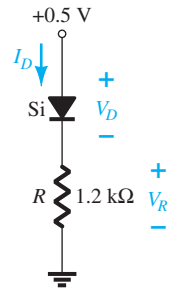
$$V_R = I_R R = I_D R = (0 \text{ A}) 1,2 \text{ k}\Omega = 0 \text{ V}$$

και

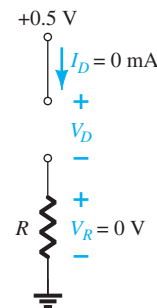
$$V_D = E = 0,5 \text{ V}$$

**ΣΧΗΜΑ 2.17**

Το σημείο λειτουργίας με  $E = 0,5 \text{ V}$ .

**ΣΧΗΜΑ 2.16**

Κύκλωμα διόδου σε σειρά για το Παράδειγμα 2.6

**ΣΧΗΜΑ 2.18**

Καθορίζοντας τα  $I_D$ ,  $V_R$  και  $V_D$  για το κύκλωμα του Σχ. 2.16.

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.7**

Υπολογίστε τη  $V_o$  και το  $I_D$  για το κύκλωμα σειράς του Σχ. 2.19.

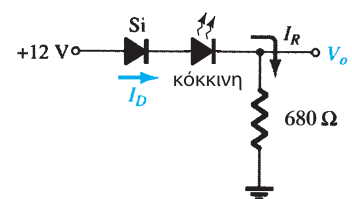
**Λύση:**

Μία προσέγγιση παρόμοια με αυτή που εφαρμόσαμε στο Παράδειγμα 2.4 θα δείξει ότι το ρεύμα που δημιουργείται έχει την ίδια φορά με τα βέλη των συμβόλων των δύο διόδων και το κύκλωμα που προκύπτει είναι αυτό του Σχ. 2.20 επειδή  $E = 12 \text{ V} > (0,7 \text{ V} + 1,8 \text{ V})$  [Πίνακας 1.8] = 2,5 V. Προσέξτε την πολικότητα της πηγής των 12 V και την πολικότητα της  $V_o$  στα άκρα της αντίστασης των 680 Ω. Η τάση  $V_o$  είναι

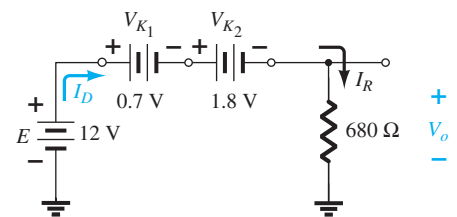
$$V_o = E - V_{K1} - V_{K2} = 12 \text{ V} - 2,5 \text{ V} = 9,5 \text{ V}$$

και το ρεύμα  $I_D$  είναι

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_o}{R} = \frac{9,5 \text{ V}}{680 \Omega} = 13,97 \text{ mA}$$

**ΣΧΗΜΑ 2.19**

Κύκλωμα για το Παράδειγμα 2.7.

**ΣΧΗΜΑ 2.20**

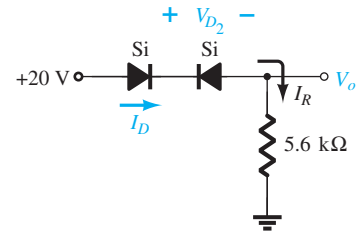
Καθορίζοντας τα άγνωστα μεγέθη για το Παράδειγμα 2.7.

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.8**

Υπολογίστε τα  $I_D$ ,  $V_{D2}$  και  $V_o$  για το κύκλωμα του Σχ. 2.21.

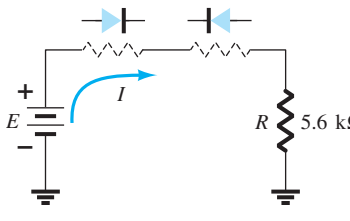
**ΛΥΣΗ**

Αφαιρώντας τις διόδους και καθορίζοντας τη φορά του ρεύματος  $I$  προκύπτει το κύκλωμα του Σχ. 2.22. Η φορά του ρεύματος είναι ίδια με τη φορά του συμβόλου της διόδου Si αλλά αντίθετη με τη φορά της διόδου Ge. Ο συνδυασμός ενός βραχυκυκλώματος σε σειρά με ένα ανοικτό κύκλωμα δίνει ένα ανοικτό κύκλωμα και  $I_D = 0 \text{ A}$ , όπως φαίνεται στο Σχ. 2.23.



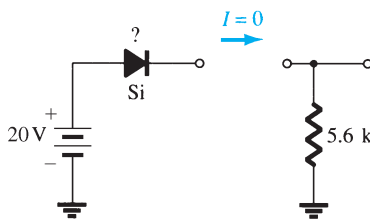
**ΣΧΗΜΑ 2.21**

Κύκλωμα για το Παράδειγμα 2.8.



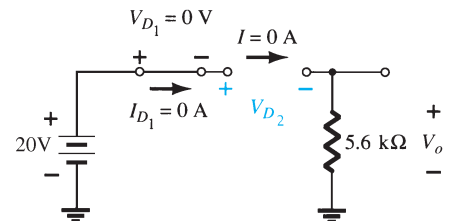
**ΣΧΗΜΑ 2.22**

Καθορισμός της κατάστασης των διόδων του Σχ. 2.21.



**ΣΧΗΜΑ 2.23**

Χρήση της ισοδύναμης κατάστασης για την ανοικτή δίοδο.



**ΣΧΗΜΑ 2.24**

Καθορίζοντας τα άγνωστα μεγέθη για το κύκλωμα του Παραδείγματος 2.8.

Το ερώτημα είναι τι τάση θα βάλουμε στη θέση της διόδου πυριτίου. Για την ανάλυση που ακολουθεί αλλά και για επόμενα κεφάλαια, απλά θυμηθείτε ότι για την πραγματική δίοδο όταν  $I_D = 0 \text{ A}$ , τότε  $V_D = 0 \text{ V}$  (και το αντίστροφο), όπως είδαμε ότι ισχύει για την κατάσταση χωρίς πόλωση στο Κεφάλαιο 1. Οι παραπάνω συνθήκες που αντιστοιχούν σε  $I_D = 0 \text{ A}$  και  $V_{D1} = 0 \text{ V}$  σημειώνονται στο Σχ. 2.24. Έτσι, έχουμε

$$V_o = I_R R = I_D R = (0 \text{ A})R = 0 \text{ V}^*$$

και

$$V_{D2} = V_{\text{ανοικ κύκλ}} = E = 20 \text{ V}$$

Εφαρμόζοντας το νόμο τάσης του Kirchhoff με τη φορά των δεικτών του ρολογιού παίρνουμε

$$E - V_{D1} - V_{D2} - V_o = 0 \text{ V}$$

και

$$V_{D2} = E - V_{D1} - V_o = 20 \text{ V} - 0 - 0 = 20 \text{ V}$$

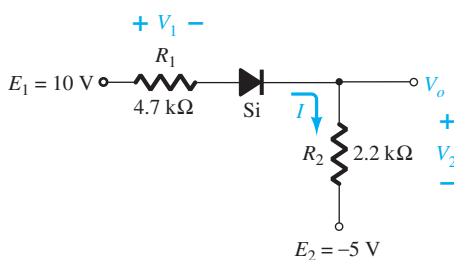
με

$$V_o = 0 \text{ V}$$

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.9**

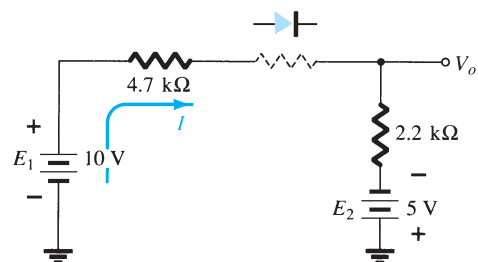
Υπολογίστε τα  $I$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  και  $V_o$  για το κύκλωμα σειράς του Σχ. 2.25.

**Λύση:**



**ΣΧΗΜΑ 2.25**

Κύκλωμα του Παραδείγματος 2.9.



**ΣΧΗΜΑ 2.26**

Καθορισμός της κατάστασης της διόδου για το κύκλωμα του Σχ. 2.25.

Οι πηγές τάσης και η φορά του ρεύματος είναι αυτές που φαίνονται στο Σχ. 2.26. Η διόδος είναι στην κατάσταση “off”, όπως δείχνει και το Σχ. 2.27, όπου  $V_D = 0,7 \text{ V}$ . Με αυτόν τον τρόπο δε χρειάζεται να ξανα-σχεδιάσουμε το κύκλωμα και να αποφύγουμε ενδεχόμενη σύγχυση με την εμφάνιση κάποιας άλλης πηγής τάσης. Όπως αναφέραμε και στην αρχή της ενότητας, αυτή είναι η συμβολογραφία που θα χρησιμοποιείτε μόλις εξοικειωθείτε με την ανάλυση των συνδεσμολογιών διόδων και τελικά ολόκληρη η ανάλυση θα γίνεται βάσει του αρχικού κυκλώματος. Η αναστροφή πολωμένης διόδου απλά θα σημειώνεται με μία γραμμή διαγραφής πάνω στη διόδο.

Το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα είναι

$$I = \frac{E_1 + E_2 - V_D}{R_1 + R_2} = \frac{10 \text{ V} + 5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{4,7 \text{ k}\Omega + 2,2 \text{ k}\Omega} = \frac{14,3 \text{ V}}{6,9 \text{ k}\Omega} \cong \mathbf{2,07 \text{ mA}}$$

και οι τάσεις είναι

$$V_1 = IR_1 = (2,07 \text{ mA})(4,7 \text{ k}\Omega) = \mathbf{9,73 \text{ V}}$$

$$V_2 = IR_2 = (2,07 \text{ mA})(2,2 \text{ k}\Omega) = \mathbf{4,55 \text{ V}}$$

Εφαρμόζοντας το νόμο τάσης του Kirchhoff στο βρόχο εξόδου με τη δεξιόστροφη φορά έχουμε

$$-E_2 + V_2 - V_o = 0$$

και

$$V_o = V_2 - E_2 = 4,55 \text{ V} - 5 \text{ V} = \mathbf{0,45 \text{ V}}$$

Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι η  $V_o$  έχει αντίθετη πολικότητα με αυτή που φαίνεται στο Σχ. 2.25.

## 2.4 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΟΔΩΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΚΑΙ ΣΕ ΣΕΙΡΑ/ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ

Οι μέθοδοι που εφαρμόσαμε στην Ενότητα 2.3 μπορούν να επεκταθούν και στην ανάλυση συνδεσμολογιών παράλληλης σύνδεσης και συνδυασμού σειράς και παράλληλης σύνδεσης. Για κάθε τμήμα του κυκλώματος απλώς εφαρμόστε τα διαδοχικά βήματα της ανάλυσης συνδεσμολογιών σε σειρά.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.10

Υπολογίστε τη  $V_o$  και τα  $I_1$ ,  $I_{D1}$  και  $I_{D2}$  για τη συνδεσμολογία των παράλληλων διόδων του Σχ. 2.28.

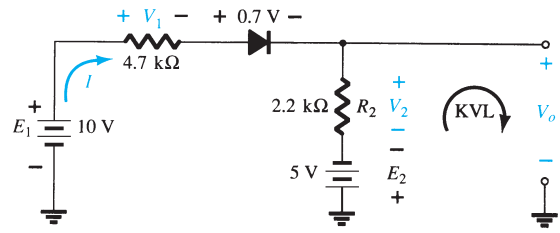
#### Λύση:

Το συνολικό ρεύμα που δημιουργείται στο κύκλωμα από την πηγή τάσης έχει τη φορά που φαίνεται στο Σχ. 2.29. Τα επιμέρους ρεύματα που διαρρέουν τις διόδους έχουν και αυτά την ίδια φορά, η οποία συμπίπτει με τη φορά του βέλους των συμβόλων των διόδων. Αυτό σημαίνει ότι επειδή η εφαρμοζόμενη τάση είναι μεγαλύτερη από  $0,7 \text{ V}$  και οι δύο διόδοι είναι σε κατάσταση “on”. Η τάση στα άκρα δύο παράλληλα συνδεδεμένων στοιχείων είναι πάντοτε ίση και συνεπώς

$$V_o = \mathbf{0,7 \text{ V}}$$

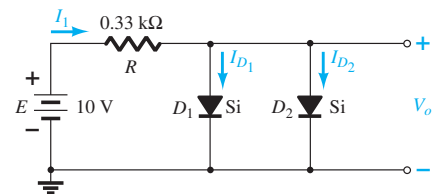
Το ρεύμα είναι

$$I_1 = \frac{V_R}{R} = \frac{E - V_D}{R} = \frac{10 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{0,33 \text{ k}\Omega} = \mathbf{28,18 \text{ mA}}$$



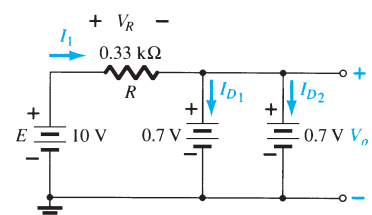
ΣΧΗΜΑ 2.27

Καθορισμός των άγνωστων μεγεθών για το κύκλωμα του Σχ. 2.25. BTK, Βρόχος τάσης Kirchhoff.



ΣΧΗΜΑ 2.28

Κύκλωμα για το Παράδειγμα 2.10.



ΣΧΗΜΑ 2.29

Καθορισμός των άγνωστων μεγεθών για το κύκλωμα του Παραδείγματος 2.10.

Υποθέτοντας ότι οι διόδοι είναι ίδιες, έχουμε

$$I_{D_1} = I_{D_2} = \frac{I_1}{2} = \frac{28,18 \text{ mA}}{2} = \mathbf{14,09 \text{ mA}}$$

Το παράδειγμα αυτό δείχνει μία εφαρμογή της χρήσης παράλληλων διόδων. Αν οι ονομαστικές τιμές ρεύματος των διόδων του Σχ. 2.28 είναι 20 mA, ένα ρεύμα της τάξης των 28,18 mA θα κατέστρεφε τη δίοδο αν χρησιμοποιούνταν μόνη της στο κύκλωμα του Σχ. 2.28. Συνδέοντας δύο διόδους παράλληλα, περιορίζουμε το ρεύμα της κάθε δίοδου στην ασφαλή τιμή των 14,09 mA με την ίδια τάση στα άκρα τους.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.11

Σε αυτό το παράδειγμα υπάρχουν δύο διόδους LED που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα κύκλωμα ανιχνευτή πολικότητας. Με την εφαρμογή θετικών τάσεων θα ανάβει το πράσινο φως και με την εφαρμογή αρνητικών τάσεων θα ανάβει το κόκκινο. Τέτοια συστήματα κυκλοφορούν και στο εμπόριο.

Βρείτε την αντίσταση  $R$  ώστε το ρεύμα που θα διαρρέει τη δίοδο που θα είναι “on” να είναι 20 mA στο κύκλωμα του Σχ. 2.30. Και οι δύο διόδους έχουν ανάστροφη τάση κατάρρευσης 3 V και τάση αγωγιμότητας 2 V.

#### Λύση:

Η εφαρμογή μίας θετικής τάσης δημιουργεί ένα συμβατικό ρεύμα του οποίου η φορά είναι ίδια με τη φορά του βέλους της πράσινης δίοδου και τη φέρνει σε αγωγιμότητα.

Η πολικότητα της τάσης στα άκρα της πράσινης δίοδου πλύνει ανάστροφα την κόκκινη δίοδο για την ίδια τιμή τάσης. Το αποτέλεσμα είναι το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 2.31.

Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm έχουμε

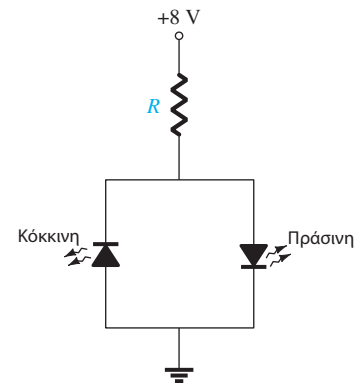
$$I = 20 \text{ mA} = \frac{E - V_{LED}}{R} = \frac{8 \text{ V} - 2 \text{ V}}{R}$$

και

$$R = \frac{6 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = \mathbf{300 \Omega}$$

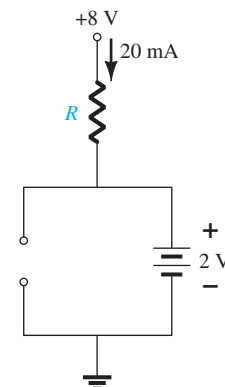
Η τάση ανάστροφης πόλωσης στα άκρα της κόκκινης δίοδου είναι 2 V, η οποία είναι πλήρως αποδεκτή για μία δίοδο LED με ανάστροφη τάση κατάρρευσης 3 V.

Αν όμως η πράσινη δίοδος αντικατασταθεί από μία μπλε δίοδο, τότε θα εμφανιστούν προβλήματα, όπως δείχνει το Σχ. 2.32. Η τάση ορθής πόλωσης που απαιτείται για να έρθει σε αγωγιμότητα μία μπλε δίοδος LED είναι περίπου 5 V. Αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση  $R$  πρέπει να είναι μικρότερη για να διατηρηθεί η τιμή του ρεύματος στα 20 mA. Τότε όμως, η τάση ανάστροφης πόλωσης της κόκκινης δίοδου LED θα είναι κι αυτή 5 V. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η τάση στα άκρα της κόκκινης LED να κλειδώσει στα 3 V, που είναι και η ονομαστική τιμή της ανάστροφης τάσης κατάρρευσης, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.33. Η τάση στα άκρα της αντίστασης  $R$  θα είναι 5 V και το ρεύμα θα διατηρηθεί στην τιμή των 20 mA με μία αντίσταση 250 Ω αλλά καμία από τις δύο διόδους δε θα είναι σε κατάσταση “on”.



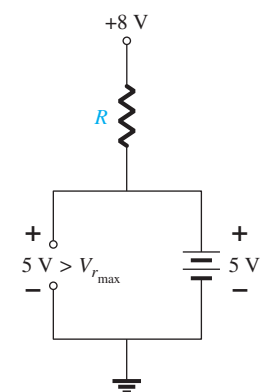
ΣΧΗΜΑ 2.30

Κύκλωμα για το Παράδειγμα 2.11.



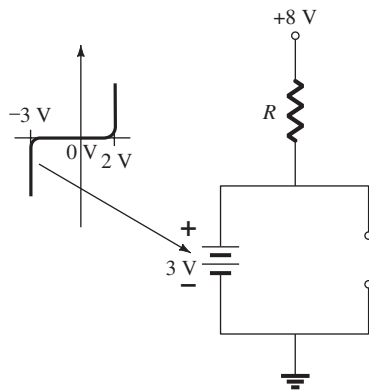
ΣΧΗΜΑ 2.31

Συνθήκες λειτουργίας για το κύκλωμα του Σχ. 2.30.



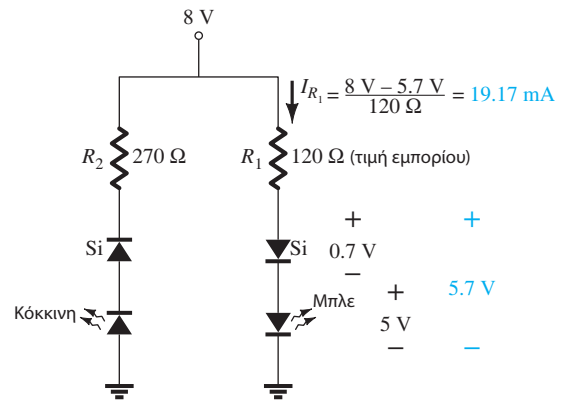
ΣΧΗΜΑ 2.32

Κύκλωμα του Σχ. 2.31 με μία μπλε δίοδο.



ΣΧΗΜΑ 2.33

Επίδειξη της καταστροφής της κόκκινης διόδου LED αν υπερβούμε την ανάστροφη τάση κατάρρευσης.



ΣΧΗΜΑ 2.34

Κύκλωμα προστασίας για την κόκκινη διόδο LED του Σχ. 2.33.

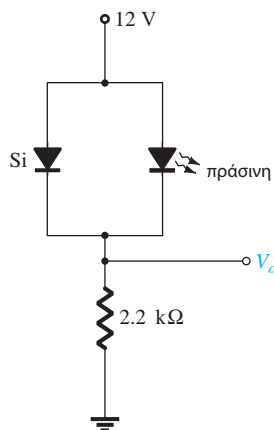
Μία απλή λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η προσθήκη της κατάλληλης αντίστασης σε σειρά με την κάθε διόδο για να διατηρήσουμε την τιμή του ρεύματος στα 20 mA και να συμπεριλάβουμε μία ακόμα διόδο για να αυξήσουμε τη συνολική τιμή της ανάστροφης τάσης κατάρρευσης στην ανάστροφη πόλωση, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.34. Όταν η μπλε διόδος άγει, η διόδος που είναι συνδεδεμένη σε σειρά με τη μπλε διόδο θα άγει και αυτή. Έτσι, η συνολική πτώση τάσης στα άκρα των δύο διόδων θα είναι 5,7 V και στα άκρα της αντίστασης  $R_1$  2,3 V δίνοντας ένα ρεύμα υψηλής εκπομπής ίσο με 19,17 mA. Ταυτόχρονα, η κόκκινη διόδος LED και η διόδος που είναι συνδεδεμένη σε σειρά με αυτή θα είναι πολωμένες ανάστροφα, αλλά τώρα η απλή διόδος που έχει ανάστροφη τάση κατάρρευσης 20 V δε θα επιτρέψει στην ανάστροφη τάση πόλωσης 8 V της πηγής να εμφανιστεί εξ' ολοκλήρου στα άκρα της κόκκινης διόδου LED. Κατά την ορθή πόλωση, η αντίσταση  $R_2$  θα δημιουργήσει ένα ρεύμα της τάξης των 19,63 mA εξασφαλίζοντας ένα ικανοποιητικό επίπεδο φωτεινότητας για την κόκκινη διόδο LED.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.12

Υπολογίστε την τάση  $V_o$  για το κύκλωμα του Σχ. 2.35.

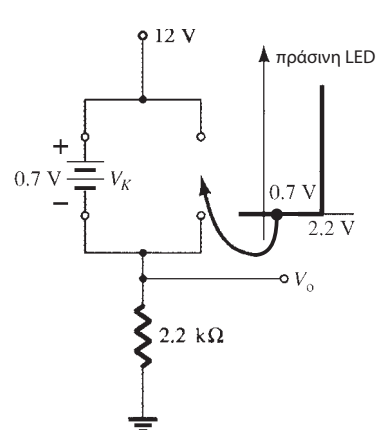
### Λύση:

Η αρχική εντύπωση που δίνει το κύκλωμα είναι ότι η εφαρμοζόμενη τάση θα ενεργοποιήσει και τις δύο διόδους προσπαθώντας να δημιουργήσει ένα συμβατικό ρεύμα μέσα από την κάθε διόδο που θα τις έφερε σε κατάσταση αγωγιμότητας. Αν όμως και οι δύο διόδοι ήταν σε κατάσταση “on”, τότε θα είχαμε δύο διαφορετικές τάσεις στο βρόχο των παράλληλων διόδων παραβιάζοντας έναν από τους βασικότερους νόμους της θεωρίας κυκλωμάτων: Η πτώση τάσης στα στοιχεία που είναι παράλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους είναι η ίδια.



ΣΧΗΜΑ 2.35

Κύκλωμα για το Παράδειγμα 2.12.



ΣΧΗΜΑ 2.36

Καθορισμός της  $V_o$  για το κύκλωμα του Σχ. 2.35.

Η λειτουργία του κυκλώματος αυτού μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα αν θυμηθούμε ότι για να φτάσει η τιμή της πηγής από τα 0 V στα 12 V απαιτείται ένα χρονικό διάστημα, της τάξης των ms ή και των μs ακόμα. Τη στιγμή που η τάση της πηγής φτάνει στα 0,7 V η διόδος πυριτίου έρχεται σε αγωγιμότητα και διατηρεί στα άκρα της την τιμή αυτή επειδή η καμπύλη της είναι κατακόρυφη σε αυτό το σημείο (το ρεύμα της απλά θα αυξηθεί μέχρι την καθορισμένη τιμή του). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τάση στα άκρα της πράσινης διόδου LED να μην ξεπεράσει τα 0,7 V και να παραμείνει στην ισοδύναμη κατάσταση ανοικτού κυκλώματος, όπως δείχνει και το Σχ. 2.36. Έτσι, τελικά έχουμε

$$V_o = 12 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = \mathbf{11,3 \text{ V}}$$

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.13

Υπολογίστε τα ρεύματα  $I_1$ ,  $I_2$  και  $I_{D2}$  για το κύκλωμα του Σχ. 2.37.

#### Λύση:

Η εφαρμοζόμενη τάση είναι τέτοια που φέρνει και τις δύο διόδους σε αγωγιμότητα, όπως προκύπτει και από τη φορά των ρευμάτων στο κύκλωμα του Σχ. 2.38. Προσέξτε ότι χρησιμοποιούμε τη σύνηθες συμβολογραφία για τις διόδους που είναι “on” και ότι η λύση βρίσκεται με την εφαρμογή τεχνικών που ισχύουν για τα κυκλώματα σειράς/παράλληλα. Έτσι, έχουμε

$$I_1 = \frac{V_{K_2}}{R_1} = \frac{0,7 \text{ V}}{3,3 \text{ k}\Omega} = \mathbf{0,212 \text{ mA}}$$

Εφαρμόζοντας το δεύτερο νόμο του Kirchhoff στο δεύτερο βρόχο κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού παίρνουμε

$$-V_2 + E - V_{K1} - V_{K2} = 0$$

και  $V_2 = E - V_{K1} - V_{K2} = 20 \text{ V} - 0,7 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = \mathbf{18,6 \text{ V}}$

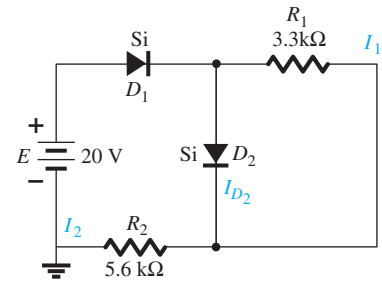
με

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{18,6 \text{ V}}{5,6 \text{ k}\Omega} = \mathbf{3,32 \text{ mA}}$$

Τέλος, στον κόμβο  $\alpha$  έχουμε

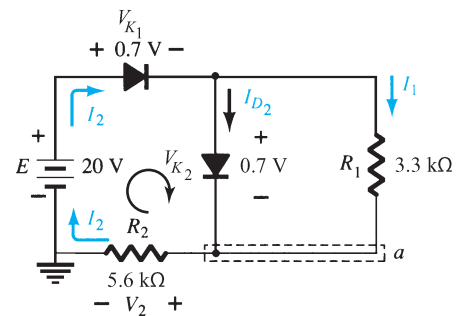
$$I_{D2} + I_1 = I_2$$

και  $I_{D2} = I_2 - I_1 = 3,32 \text{ mA} - 0,212 \text{ mA} \approx \mathbf{3,11 \text{ mA}}$



ΣΧΗΜΑ 2.37

Κύκλωμα για το Παράδειγμα 2.13.



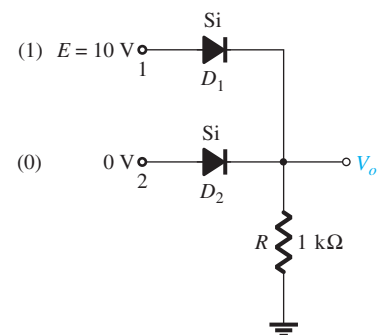
ΣΧΗΜΑ 2.38

Καθορισμός των άγνωστων μεγεθών για το Παράδειγμα 2.13.

## 2.5 ΠΥΛΕΣ AND/OR

Τα εργαλεία της ανάλυσης είναι πλέον στη διάθεσή μας και η ευκαιρία να εξετάσουμε μία συνδεσμολογία υπολογιστή είναι αυτή που θα αποκαλύψει τη γκάμα των εφαρμογών αυτού του απλού εξαρτήματος. Η ανάλυσή μας θα περιοριστεί στον καθορισμό των επιπέδων τάσης χωρίς να επεκταθεί σε λεπτομερή συζήτηση για την άλγεβρα Boole ή για τη θετική και την αρνητική λογική.

Το κύκλωμα που θα αναλυθεί στο Παράδειγμα 2.14 είναι μία πύλη OR θετικής λογικής. Δηλαδή, η τάση εισόδου 10 V στο Σχ. 2.39 ισοδυναμεί με “1” στην άλγεβρα Boole και η τάση εισόδου 0 V ισοδυναμεί με “0”. Μία πύλη OR δίνει στην έξοδο επίπεδο τάσης 1 αν μία ή και οι δύο εισοδοί είναι 1. Αν μία από τις εισόδους είναι 0 τότε η έξοδος της πύλης είναι 0.



ΣΧΗΜΑ 2.39

Πύλη OR θετικής λογικής.



Η ανάλυση των πυλών AND/OR γίνεται ευκολότερα κατανοητή χρησιμοποιώντας το προσεγγιστικό ισοδύναμο της διόδου αντί της ιδανικής επειδή μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η τάση στα άκρα της διόδου πρέπει να είναι  $+0,7\text{ V}$  (δηλ., ορθής πόλωσης) για να έρθει σε κατάσταση “on” η διάδος πυριτίου.

Γενικά, η καλύτερη προσέγγιση είναι να υποθέσουμε ότι ισχύει μία συγκεκριμένη κατάσταση για τις διόδους σημειώνοντας τη φορά ρεύματος και την πολικότητα των εφαρμοζόμενων τάσεων και η στην πορεία της ανάλυσης η υπόθεση αυτή θα επαληθευτεί ή θα καταρριφθεί.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.14

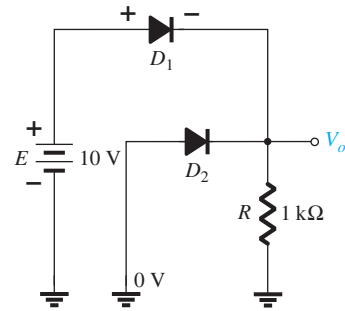
Υπολογίστε την τάση  $V_o$  για το κύκλωμα του Σχ. 2.39.

#### Λύση:

Καταρχήν προσέξτε ότι στο κύκλωμα εφαρμόζεται μόνο μία τάση, αυτή των  $10\text{ V}$  στον ακροδέκτη 1. Ο ακροδέκτης 2 με είσοδο  $0\text{ V}$  είναι ουσιαστικά γειωμένος, όπως φαίνεται στο επανασχεδιασμένο κύκλωμα του Σχ. 2.40. Το κύκλωμα αυτό υποθέτει ότι η διάδος  $D_1$  άγει λόγω της τάσης των  $10\text{ V}$  ενώ η διάδος  $D_2$  δεν άγει λόγω των  $0\text{ V}$  στην άνοδό της. Με βάση αυτές τις υποθέσεις οδηγούμαστε στο κύκλωμα του Σχ. 2.41.

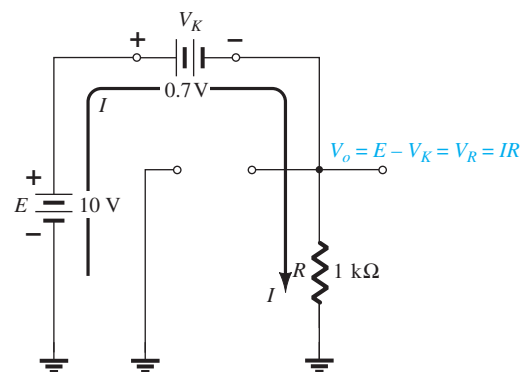
Το επόμενο βήμα είναι να ελέγξουμε ότι οι υποθέσεις μας είναι σωστές. Δηλαδή, δείτε ότι η πολικότητα της τάσης στη διάδο  $D_1$  τη φέρνει σε κατάσταση “on” και η πολικότητα της τάσης στη διάδο  $D_2$  τη φέρνει σε κατάσταση “off”. Αφού η  $D_1$  άγει έχουμε  $V_o = E - V_D = 10\text{ V} - 0,7\text{ V} = 9,3\text{ V}$ . Με  $9,3\text{ V}$  στην κάθοδο και  $0\text{ V}$  στην άνοδο, η διάδος  $D_2$  είναι σίγουρα στην κατάσταση “off”. Η φορά του ρεύματος και η διαδρομή αγωγιμότητας που προκύπτει στη συνέχεια επιβεβαιώνουν την υπόθεσή μας ότι η διάδος  $D_1$  βρίσκεται σε αγωγιμότητα. Οι υποθέσεις μας επαληθεύονται από τις τάσεις και το ρεύμα που προέκυψαν και η αρχική μας ανάλυση μπορεί να θεωρηθεί σωστή. Η τάση εξόδου δεν είναι  $10\text{ V}$  όπως ορίζεται για είσοδο επιπέδου 1, αλλά  $9,3\text{ V}$  που μπορεί ωστόσο να θεωρηθεί ως επιπέδου 1. Συνεπώς ή έξοδος είναι επιπέδου 1 με μόνο μία είσοδο, το οποίο σημαίνει ότι η πύλη είναι μία πύλη OR. Μία ανάλυση του ίδιου κυκλώματος με δύο εισόδους των  $10\text{ V}$  θα καταλήξει στο συμπέρασμα ότι και οι δύο διόδους θα είναι σε κατάσταση “on” δίνοντας έξοδο  $9,3\text{ V}$ . Μία τάση  $0\text{ V}$  και στις δύο εισόδους προφανώς δε θα παρέχει τα απαιτούμενα  $0,7\text{ V}$  για να έρθουν σε αγωγιμότητα οι διόδους και η έξοδος θα είναι επιπέδου 0. Για το κύκλωμα του Σχ. 2.41 η τιμή του ρεύματος υπολογίζεται ότι είναι

$$I = \frac{E - V_D}{R} = \frac{10\text{ V} - 0,7\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 9,3\text{ mA}$$



ΣΧΗΜΑ 2.40

Επανασχεδίαση του κυκλώματος του Σχ. 2.39.



ΣΧΗΜΑ 2.41

Υποτιθέμενες καταστάσεις των διόδων για το Σχ. 2.40.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.15

Υπολογίστε το επίπεδο εξόδου για την πύλη AND θετικής λογικής του Σχ. 2.42.

#### Λύση:

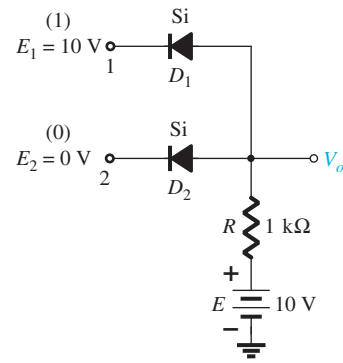
Προσέξτε ότι σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μία ανεξάρτητη πηγή τάσης στο τμήμα του κυκλώματος που καταλήγει στη γείωση. Για λόγους που σύντομα θα γίνουν προφανείς, η τιμή αυτής της πηγής έχει επιλεγεί να είναι ίση με την τιμή της τάσης εισόδου. Το κύκλωμα επανασχεδιάζεται στο Σχ. 2.43 με τις

αρχικές μας υποθέσεις για την κατάσταση των διόδων. Με 10 V στην κάθοδό της, υποθέτουμε ότι η διάδος  $D_1$  δεν άγει, παρά το γεγονός ότι η άνοδος της συνδέεται μέσω αντίστασης με την πηγή τάσης 10 V (θυμηθείτε ότι χρησιμοποιούμε το προσεγγιστικό μοντέλο στην ανάλυσή μας), ενώ η  $D_2$  υποθέτουμε ότι άγει λόγω της μηδενικής τάσης στην κάθοδό της και της πηγής τάσης των 10 V στην πλευρά της ανόδου.

Για το κύκλωμα του Σχ. 2.43 η τάση  $V_o$  είναι 0,7 V εξαιτίας της ορθά πολωμένης διόδου  $D_2$ . Με 0,7 V στην άνοδο και 10 V στην κάθοδο, η διάδος  $D_1$  δεν άγει. Το ρεύμα  $I$  θα έχει τη φορά που φαίνεται στο Σχ. 2.43 και η τιμή του θα είναι

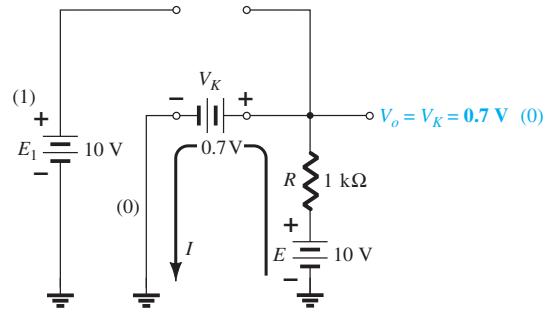
$$I = \frac{E - V_K}{R} = \frac{10\text{V} - 0,7\text{V}}{1\text{k}\Omega} = 9,3\text{mA}$$

Άρα, η κατάσταση των διόδων επαληθεύεται και η ανάλυσή μας είναι σωστή. Αν και η τάση εξόδου δεν είναι 0 V, ωστόσο είναι αρκετά μικρή για να μπορεί να θεωρηθεί ότι η έξοδος είναι επιπέδου 0. Επομένως, για την πύλη AND μία μόνο είσοδος επιπέδου 1 έχει ως αποτέλεσμα επίπεδο 0 στην έξοδο. Οι καταστάσεις των διόδων για τις περιπτώσεις δύο εισόδων επιπέδου 1 και δύο εισόδων επιπέδου 0 θα εξεταστούν σαν προβλήματα στο τέλος του κεφαλαίου.



ΣΧΗΜΑ 2.42

Πύλη AND θετικής λογικής.



ΣΧΗΜΑ 2.43

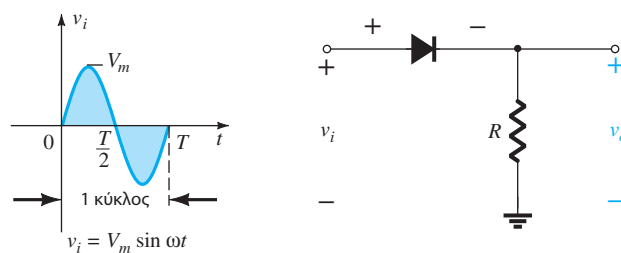
Υποτιθέμενες καταστάσεις των διόδων για το Σχ. 2.42.

## 2.6 ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΕΙΣ ΕΙΣΟΔΟΙ, ΗΜΙΑΝΟΡΘΩΣΗ

Τώρα θα επεκτείνουμε την ανάλυση των διόδων σε συναρτήσεις που μεταβάλλονται με το χρόνο, όπως η ημιτονοειδής και η τετραγωνική κυματομορφή. Χωρίς αμφιβολία ο βαθμός δυσκολίας θα αυξηθεί αλλά μόλις γίνουν κατανοητοί κάποιοι βασικοί χειρισμοί, η ανάλυση θα γίνει πιο βατή.

Το πιο απλό κύκλωμα που μπορούμε να εξετάσουμε με ένα χρονικά μεταβαλλόμενο σήμα φαίνεται στο Σχ. 2.44. Προς το παρόν, θα χρησιμοποιήσουμε το ιδανικό μοντέλο (προσέξτε την απουσία της ένδειξης Si, Ge ή GaAs) για να είμαστε σίγουροι ότι η προσέγγιση δεν θα γίνει πολύπλοκη με την εισαγωγή σύνθετων μαθηματικών τύπων.

Κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου, που ορίζεται από την περίοδο  $T$  στο Σχ. 2.44, η μέση τιμή (το αλγεβρικό άθροισμα των περιοχών πάνω και κάτω από τον οριζόντιο άξονα) είναι μηδέν. Το κύκλωμα του Σχ. 2.44, το οποίο ονομάζεται *ημιανορθωτής* ή *ανορθωτής απλής ανόρθωσης* ή *ανορθωτής ημικύματος* (*half-wave rectifier*), παράγει μία κυματομορφή  $v_o$  της οποίας η μέση τιμή έχει μία συγκεκριμένη χρήση στη διαδικασία μετατροπής από ac σε dc. Όταν μία διάδος χρησιμοποιείται σε λειτουργία ανόρθωσης, τότε ονομάζεται *ανορθωτής* (*rectifier*). Η ισχύς και οι ονομαστικές τιμές της είναι συνήθως κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των διόδων που χρησιμοποιούνται σε άλλες εφαρμογές, όπως οι υπολογιστές και τα συστήματα επικοινωνιών.



ΣΧΗΜΑ 2.44

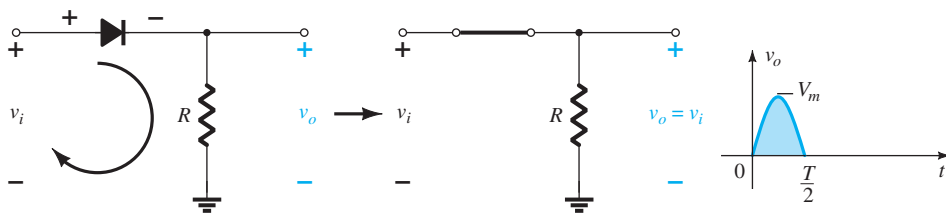
Ημιανορθωτής.

Κατά το χρονικό διάστημα από  $t = 0 \rightarrow T/2$  στο Σχ. 2.44, η τάση εισόδου  $v_i$  είναι θετική και πολώνει ορθά τη δίοδο η οποία έρχεται σε αγωγιμότητα με την πολικότητα που σημειώνεται στο σχήμα. Αντικαθιστώντας με το ισοδύναμο βραχυκυκλώματος της ιδανικής δίοδου παίρνουμε το κύκλωμα του Σχ. 2.45, όπου είναι προφανές ότι το σήμα εξόδου είναι ακριβές αντίγραφο του σήματος εισόδου. Τα δύο σημεία στα οποία παίρνουμε την τάση εξόδου συνδέονται απευθείας με την είσοδο μέσω του ισοδύναμου βραχυκυκλώματος της δίοδου.

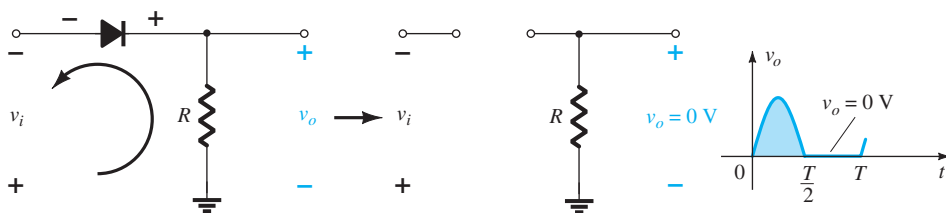
Για την περίοδο  $T/2 \rightarrow T$ , η τάση εισόδου είναι αρνητική και η δίοδος πλέον πολώνεται ανάστροφα με αποτέλεσμα να μην άγει και να αντιστοιχεί στο ισοδύναμο ανοικτού κυκλώματος, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.46. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει ροή ρεύματος και  $v_o = iR = (0 \text{ V})R = 0 \text{ V}$  για την περίοδο  $T/2 \rightarrow T$ . Η είσοδος  $v_i$  και η έξοδος  $v_o$  έχουν σχεδιαστεί μαζί στο Σχ. 2.47 για να μπορεί να γίνει σύγκριση. Το σήμα εξόδου  $v_o$  έχει ένα θετικό τμήμα πάνω από τον άξονα για μία πλήρη περίοδο και η μέση τιμή του υπολογίζεται από τη σχέση

$$V_{\text{dc}} = 0,318 V_m \quad \text{μισού κύματος} \quad (2.7)$$

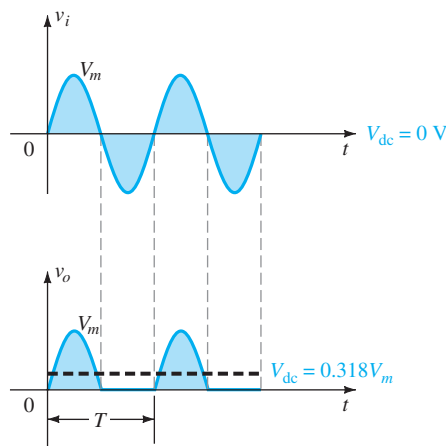
Η διαδικασία απομάκρυνσης του μισού σήματος εισόδου για τη δημιουργία μίας στάθμης dc ονομάζεται *ημιανόρθωση* ή *απλή ανόρθωση* (*half-wave rectification*).



ΣΧΗΜΑ 2.45

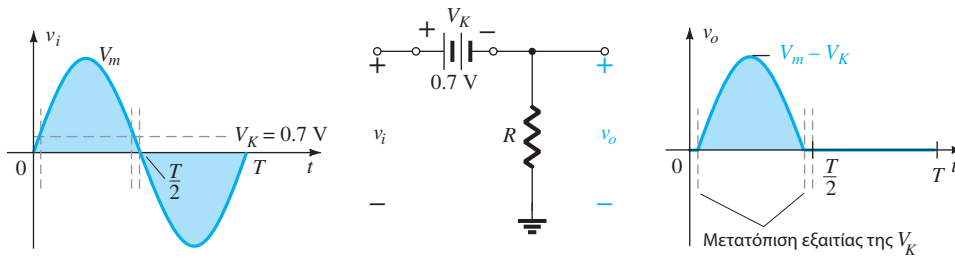
Περιοχή αγωγιμότητας ( $0 \rightarrow T/2$ ).

ΣΧΗΜΑ 2.46

Περιοχή μη αγωγιμότητας ( $T/2 \rightarrow T$ ).

ΣΧΗΜΑ 2.47

Ημιανορθωμένο σήμα.



**ΣΧΗΜΑ 2.48**

Η επίδραση της  $V_K$  στο ημιανορθωμένο σήμα.

Το αποτέλεσμα της χρήσης μίας διόδου πυριτίου με  $V_K = 0,7 \text{ V}$  παρουσιάζεται στο Σχ. 2.48 για την περιοχή ορθής πόλωσης. Το σήμα εισόδου θα πρέπει να γίνει τουλάχιστον  $0,7 \text{ V}$  για να έρθει η διάδος σε αγωγιμότητα. Για τιμές της  $v_i$  μικρότερες από  $0,7 \text{ V}$  η διάδος παραμένει ανοικτό κύκλωμα και η τάση εξόδου είναι  $v_o = 0 \text{ V}$ , όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα.

Κατά το χρονικό διάστημα που η διάδος άγει, η διαφορά μεταξύ της  $v_o$  και της  $v_i$  είναι μία σταθερή τιμή ίση με  $V_K = 0,7 \text{ V}$  και  $v_o = v_i - V_K$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μία μείωση στο τμήμα της κυματομορφής που βρίσκεται πάνω από τον οριζόντιο άξονα, δηλαδή μία μείωση στην τάση της στάθμης dc. Για περιπτώσεις στις οποίες ισχύει  $V_m \gg V_K$ , μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της μέσης τιμής με σχετικά μεγάλο βαθμό ακρίβειας.

$$V_{dc} \cong 0,318(V_m - V_K) \tag{2.8}$$

Για την ακρίβεια, αν η  $V_m$  είναι πολύ μεγαλύτερη από τη  $V_K$ , τότε η Εξ. (2.7) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μία πρώτη τιμή προσέγγισης της  $V_{dc}$ .

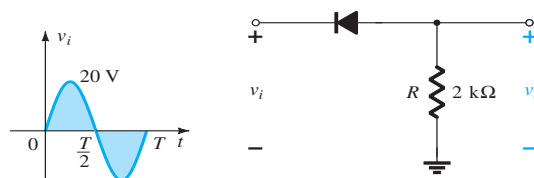
**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.16**

- α. Σχεδιάστε την έξοδο  $v_o$  και υπολογίστε τη στάθμη dc της εξόδου για το κύκλωμα του Σχ. 2.49.
- β. Επαναλάβετε το ερώτημα (α) αν η ιδανική διάδος αντικατασταθεί από μία διάοδο πυριτίου.
- γ. Επαναλάβετε τα ερωτήματα (α) και (β) αν η  $V_m$  αυξηθεί στα  $200 \text{ V}$  και συγκρίνετε τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τις Εξ. (2.7) και (2.8).

**Λύση:**

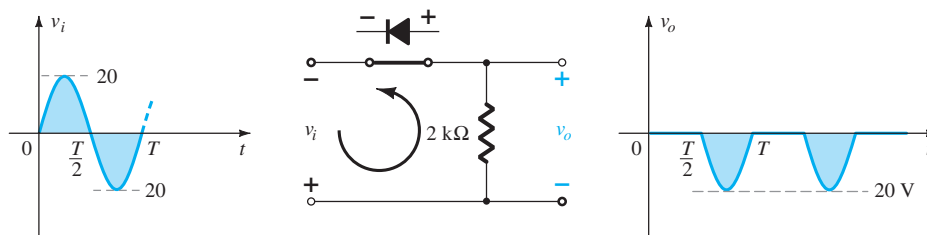
α. Σε αυτή την περίπτωση η διάδος θα άγει κατά την αρνητική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου  $v_i$  και η  $v_o$  θα έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχ. 2.50. Για τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου η στάθμη dc είναι

$$V_{dc} = -0,318V_m = -0.318(20 \text{ V}) = -6.36 \text{ V}$$



**ΣΧΗΜΑ 2.49**

Κύκλωμα για το Παράδειγμα 2.16.



**ΣΧΗΜΑ 2.50**

Η  $v_o$  που προκύπτει για το Παράδειγμα 2.16.

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η πολικότητα της εξόδου είναι αντίθετη με την καθορισμένη πολικότητα στο Σχ. 2.49.

β. Για μία δίοδο πυριτίου η τάση εξόδου έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχ. 2.51 και η τιμή της είναι

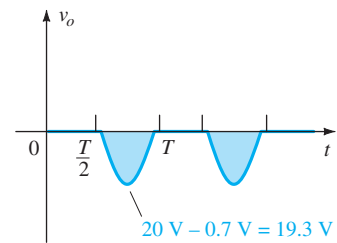
$$V_{dc} \cong 0,318(V_m - 0,7 \text{ V}) = -0,318(19,3 \text{ V}) \cong -6,14 \text{ V}$$

Η πτώση στη στάθμη dc είναι 0,22 V ή περίπου 3,5%.

γ. Εξ. (2,7):  $V_{dc} = -0,318V_m = -0,318(200 \text{ V}) = -63,6 \text{ V}$

$$\begin{aligned} \text{Εξ. (2,8): } V_{dc} &= 0,318(V_m - V_K) = 0,318(200 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) \\ &= -0,318(199,3 \text{ V}) \cong -63,38 \text{ V} \end{aligned}$$

η οποία είναι μία διαφορά που μπορεί να αγνοηθεί με ασφάλεια για τις περισσότερες εφαρμογές. Για το ερώτημα (γ), η μετατόπιση και η μείωση στο πλάτος εξαιτίας της  $V_K$  σε έναν παλμογράφο δε θα ευδιάκριτες.



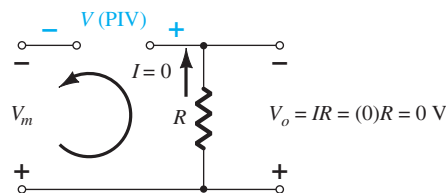
**ΣΧΗΜΑ 2.51**

Η επίδραση της  $V_K$  στην έξοδο του Σχ. 2.50.

## Τιμή PIV (PRV)

Η τιμή μέγιστης ανάστροφης τάσης PIV ή PRV (peak inverse ή reverse voltage) της διόδου είναι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στη σχεδίαση των συστημάτων ανόρθωσης. Θυμηθείτε ότι είναι η τιμή τάσης στην περιοχή ανάστροφης πόλωσης την οποία δεν πρέπει να υπερβεί η δίοδος για να μην εισέλθει στην περιοχή χιονοστιβάδας Zener. Η απαιτούμενη τιμή PIV για τον ημιανορθωτή μπορεί να υπολογιστεί από το Σχ. 2.52, στο οποίο βλέπετε την ανάστροφα πολωμένη δίοδο του Σχ. 2.44 με τη μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση. Σύμφωνα με το νόμο τάσης του Kirchhoff είναι προφανές ότι η τιμή PIV πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από τη μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση. Άρα,

$$\boxed{\text{Τιμή PIV} \geq V_m}_{\text{ημιανορθωτής}} \quad (2.9)$$



**ΣΧΗΜΑ 2.52**

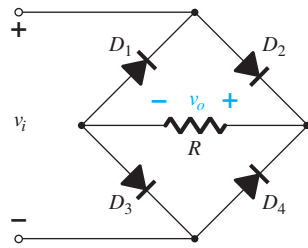
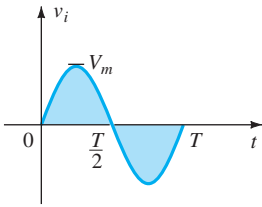
Καθορισμός της απαιτούμενης τιμής PIV για τον ημιανορθωτή.

## 2.7 ΠΛΗΡΗΣ ΑΝΟΡΘΩΣΗ

### Κύκλωμα Γέφυρας

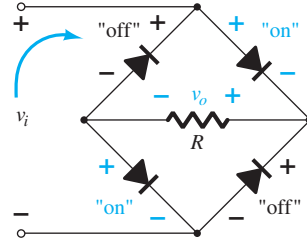
Η στάθμη dc που παίρνουμε από μία ημιτονοειδή είσοδο μπορεί να βελτιωθεί κατά 100% χρησιμοποιώντας μία λειτουργία που ονομάζεται *πλήρης ανόρθωση* ή *διπλή ανόρθωση* (*full-wave rectification*). Το πιο δημοφιλές κύκλωμα για τη λειτουργία αυτή που φαίνεται στο Σχ. 2.53 χρησιμοποιεί 4 διόδους σε διάταξη *γέφυρας* (*bridge*). Κατά τη διάρκεια της θετικής ημιπεριόδου,  $t = 0 \rightarrow T/2$ , η πολικότητα της εισόδου και των τάσεων στα άκρα των διόδων είναι αυτή που σημειώνεται στο Σχ. 2.54 και το συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι οι δίοδοι  $D_2$  και  $D_3$  είναι σε κατάσταση “on” ενώ οι δίοδοι  $D_1$  και  $D_4$  είναι σε κατάσταση “off”. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η διάταξη του Σχ. 2.55 με τη φορά ρεύματος και την πολικότητα της τάσης στα άκρα της αντίστασης  $R$  που σημειώνεται. Επειδή οι δίοδοι είναι ιδανικές, η τάση φορτίου είναι  $v_i = v_o$ , όπως επίσης φαίνεται στο ίδιο σχήμα.

Κατά τη διάρκεια της αρνητικής ημιπεριόδου οι δίοδοι που άγουν είναι οι  $D_1$  και  $D_4$  και το κύκλωμα είναι αυτό του Σχ. 2.56. Το σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η πολικότητα της τάσης στα άκρα της αντίστασης φορτίου  $R$  είναι ίδια με αυτή του Σχ. 2.54, δίνοντας ένα δεύτερο θετικό παλμό, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.56. Στη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου οι τάσεις εισόδου και εξόδου είναι αυτές που δείχνει το Σχ. 2.57.



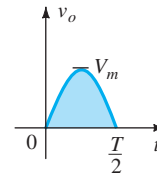
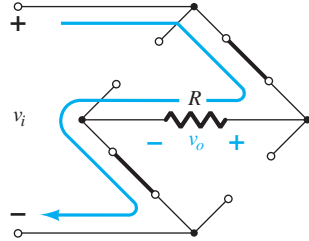
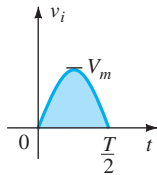
**ΣΧΗΜΑ 2.53**

Ανορθωτής γέφυρας πλήρους ανόρθωσης.



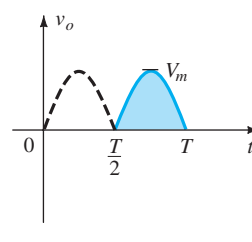
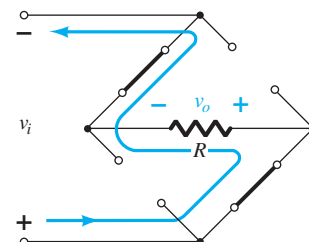
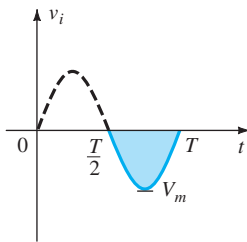
**ΣΧΗΜΑ 2.54**

Το κύκλωμα του Σχ. 2.53 για την περίοδο του σήματος εισόδου  $v_i$  από  $0 \rightarrow T/2$ .



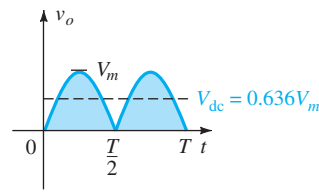
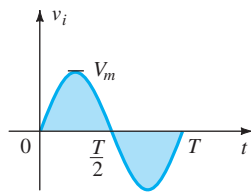
**ΣΧΗΜΑ 2.55**

Διαδρομή ρεύματος για τη θετική ημιπερίοδο της  $v_i$ .



**ΣΧΗΜΑ 2.56**

Διαδρομή ρεύματος για την αρνητική ημιπερίοδο της  $v_i$ .



**ΣΧΗΜΑ 2.57**

Κυματομορφές εισόδου και εξόδου για έναν ανορθωτή πλήρους ανόρθωσης.

Επειδή η περιοχή που βρίσκεται πάνω από τον άξονα για έναν πλήρη κύκλο είναι τώρα διπλάσια από την αντίστοιχη ενός ημιανορθωτή, η στάθμη dc έχει διπλασιαστεί και αυτή, δηλαδή

$$V_{dc} = 2 [\text{Εξ. (2.7)}] = 2(0,318V_m)$$

ή

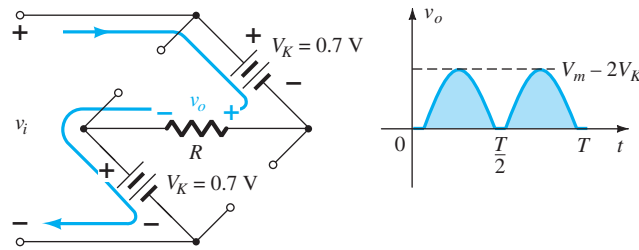
$$V_{dc} = 0,636V_m \text{ πλήρους κύματος} \tag{2.10}$$

Αν οι ιδανικές δίοδοι αντικατασταθούν από δίοδους πυριτίου όπως δείχνει το Σχ. 2.58, η εφαρμογή του νόμου τάσης του Kirchhoff στη διαδρομή ρεύματος δίνει

$$v_i - V_K - v_o - V_K = 0$$

και

$$v_o = v_i - 2V_K$$



ΣΧΗΜΑ 2.58

Καθορισμός της  $V_{o_{max}}$  για διόδους πυριτίου στη διάταξη γέφυρας.

Επομένως, η τιμή κορυφής της τάσης εξόδου  $v_o$  είναι

$$V_{o_{max}} = V_m - 2V_K$$

Για περιπτώσεις στις οποίες ισχύει  $V_m \gg 2V_K$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της μέσης τιμής με σχετικά μεγάλο βαθμό ακρίβειας:

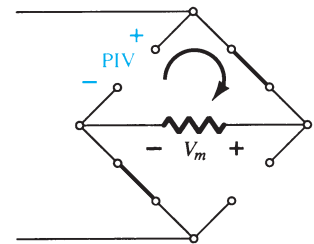
$$V_{dc} \cong 0,636(V_m - 2V_K) \quad (2.11)$$

Και πάλι, αν η  $V_m$  είναι πολύ μεγαλύτερη από  $2V_K$ , τότε η Εξ. (2.10) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μία πρώτη τιμή προσέγγισης της  $V_{dc}$ .

### Τιμή PIV

Η απαιτούμενη τιμή PIV για κάθε δίοδο (ιδανική) μπορεί να καθοριστεί από το Σχ. 2.59, το οποίο ισχύει για τη μέγιστη τιμή της θετικής ημiperόδου του σήματος εισόδου. Για το σημειωμένο βρόχο η μέγιστη τάση στα άκρα της αντίστασης  $R$  είναι  $V_m$  και η τιμή PIV ορίζεται από τη σχέση

$$\text{PIV} \geq V_m \quad \text{ανορθωτής πλήρους ανόρθωσης} \quad (2.12)$$

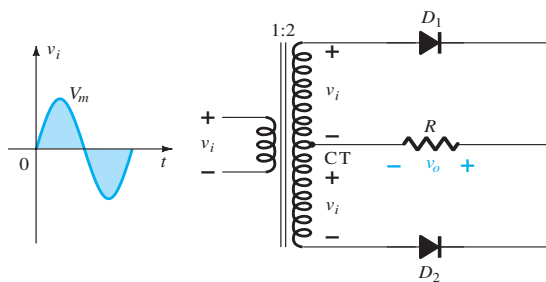


ΣΧΗΜΑ 2.59

Καθορισμός της απαιτούμενης τιμής PIV για τη διάταξη γέφυρας.

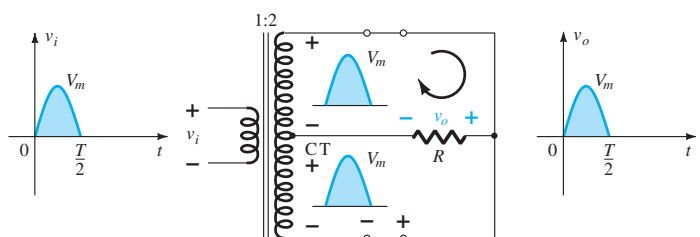
### Μετασχηματιστής Μεσαίας Λήψης

Το δεύτερο πιο δημοφιλές κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης είναι αυτό που φαίνεται στο Σχ. 2.60. Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιεί μόνο δύο διόδους αλλά είναι απαραίτητη η χρήση ενός μετασχηματιστή μεσαίας λήψης (*center-tapped (CT) transformer*) που θα ορίσει το σήμα εισόδου στο κάθε τμήμα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Κατά τη διάρκεια της θετικής ημiperόδου του σήματος της  $v_i$  που εφαρμόζεται στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, το κύκλωμα έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχ. 2.61. Η δίοδος  $D_1$  είναι το ισοδύναμο βραχυκυκλώματος και η δίοδος  $D_2$  είναι το ισοδύναμο ανοικτού κυκλώματος, όπως καθορίζεται από τις τάσεις του δευτερεύοντος και τις φορές ρευμάτων που προκύπτουν. Η τάση εξόδου είναι αυτή που φαίνεται στο Σχ. 2.61.



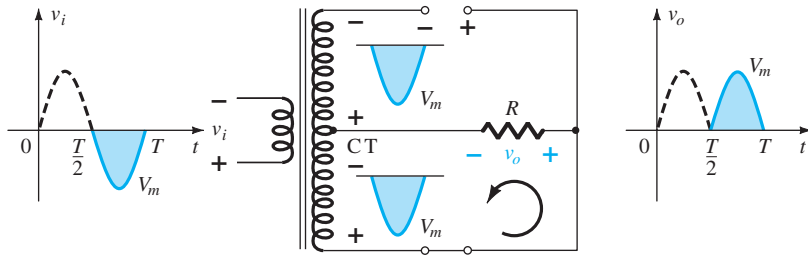
ΣΧΗΜΑ 2.60

Ανορθωτής πλήρους ανόρθωσης με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης.



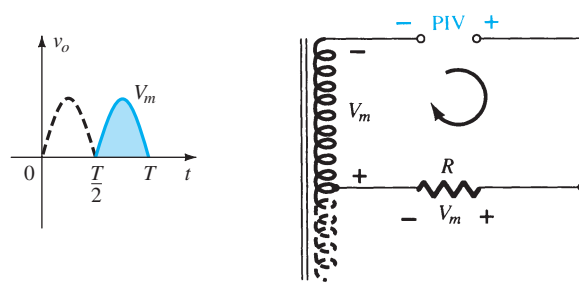
ΣΧΗΜΑ 2.61

Συνθήκες κυκλώματος για τη θετική ημiperοδο της  $v_i$ .



ΣΧΗΜΑ 2.62

Συνθήκες κυκλώματος για την αρνητική ημιπερίοδο της  $v_i$ .



ΣΧΗΜΑ 2.63

Καθορισμός της τιμής PIV για τις διόδους του ανορθωτή πλήρους ανόρθωσης με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης.

Κατά τη διάρκεια της αρνητικής ημιπεριόδου του σήματος εισόδου το κύκλωμα έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχ. 2.62, αντιστρέφοντας τους ρόλους των διόδων αλλά διατηρώντας την ίδια πολικότητα για την τάση στα άκρα της αντίστασης φορτίου  $R$ . Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι έχουμε την ίδια τάση στην έξοδο με αυτή του Σχ. 2.57 με τις ίδιες στάθμες dc.

**Τιμή PIV**

Το κύκλωμα του Σχ. 2.63 θα μας βοηθήσει να καθορίσουμε την τελική τιμή PIV για αυτόν τον ανορθωτή πλήρους ανόρθωσης. Εισάγοντας τη μέγιστη τάση για την τάση του δευτερεύοντος και την τάση  $V_m$  που προκύπτει από το συνδυασμό των βρόχων έχουμε

$$PIV = V_{\text{δευτερεύοντος}} + V_R = V_m + V_m$$

και τελικά

$PIV \geq 2V_m$

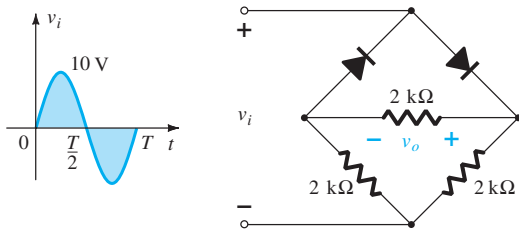
ανορθωτής πλήρους ανόρθωσης με μετ/στη μεσαίας λήψης (2.13)

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.17**

Προσδιορίστε την κυματομορφή εξόδου για το κύκλωμα του Σχ. 2.64 και υπολογίστε τη στάθμη dc της εξόδου και την απαιτούμενη τιμή PIV για κάθε δίοδο.

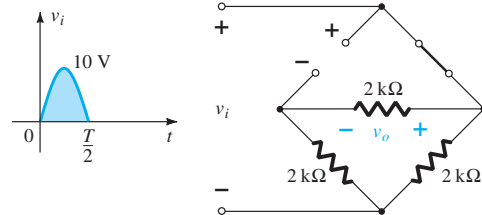
**Λύση:**

Κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου, το κύκλωμα έχει τη μορφή του Σχ. 2.65. Σχεδιάζοντας ξανά το κύκλωμα προκύπτει η συνδεσμολογία του Σχ. 2.66, όπου  $v_o = 1/2v_i$  ή  $V_{o\text{max}} = 1/2V_{i\text{max}} = 1/2(10\text{ V}) = 5\text{ V}$ . Στην αρνητική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου η λειτουργία των διόδων αντιστρέφεται και η  $v_o$  έχει τη μορφή του Σχ. 2.67.



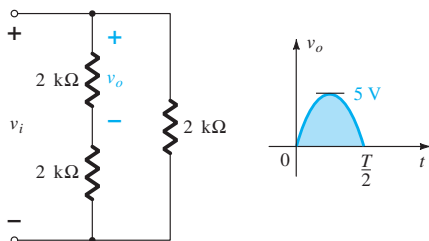
ΣΧΗΜΑ 2.64

Κύκλωμα γέφυρας για το Παράδειγμα 2.17.



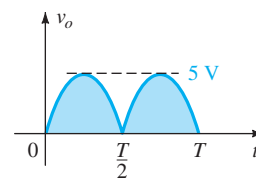
ΣΧΗΜΑ 2.65

Το κύκλωμα του Σχ. 2.64 για τη θετική ημιπερίοδο της  $v_i$ .



ΣΧΗΜΑ 2.66

Επανασχεδίαση του κυκλώματος του Σχ. 2.65.



ΣΧΗΜΑ 2.67

Η έξοδος που δίνει το κύκλωμα του Παραδείγματος 2.17.



Άρα, η απομάκρυνση δύο διόδων από τη διάταξη της γέφυρας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της στάθμης dc σε

$$V_{dc} = 0,636(5 \text{ V}) = 3.18 \text{ V}$$

δηλαδή στην τιμή που δίνει ένας ημιανορθωτής με την ίδια είσοδο. Όμως, η τιμή PIV που καθορίστηκε στο Σχ. 2.59 είναι ίση με τη μέγιστη τάση στα άκρα της αντίστασης  $R$ , η οποία είναι 5 V ή μισή από αυτή που απαιτείται για έναν ημιανορθωτή με την ίδια είσοδο.

## 2.8 ΨΑΛΙΔΙΣΤΕΣ

Η προηγούμενη ενότητα για την ανόρθωση καθιστά σαφές ότι οι διόδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αλλάξουν την εμφάνιση μίας κυματομορφής. Αυτή η ενότητα για τους ψαλιδιστές και η επόμενη για τους περιοριστές θα επεκταθούν στις δυνατότητες μορφοποίησης σημάτων των διόδων.

*Οι ψαλιδιστές (clippers) είναι κυκλώματα τα οποία χρησιμοποιούν διόδους για να περιορίσουν (να “ψαλιδίσουν”) ένα τμήμα του σήματος εισόδου διατηρώντας αναλλοίωτο το υπόλοιπο τμήμα του.*

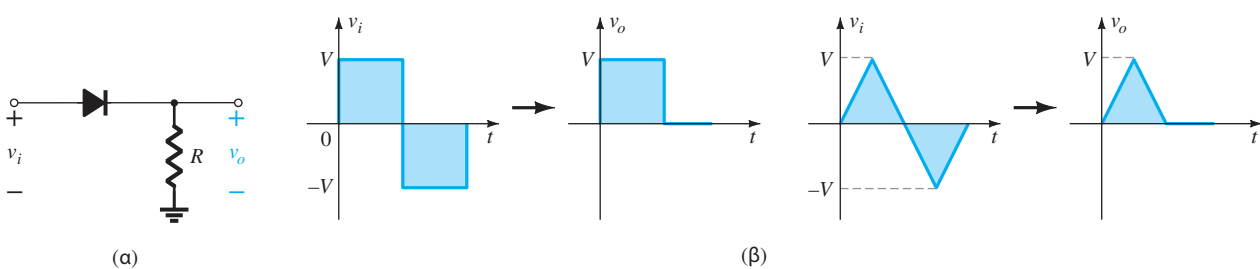
Ο ημιανορθωτής της Ενότητας 2.6 είναι ένα παράδειγμα της απλούστερης μορφής ενός ψαλιδιστή διόδου που αποτελείται από μία διόδο και μία αντίσταση. Ανάλογα με τη συνδεσμολογία της διόδου, “κόβεται” το θετικό ή το αρνητικό τμήμα του εφαρμοζόμενου σήματος.

Υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες ψαλιδιστών: *σε σειρά* και *παράλληλα*. Η συνδεσμολογία σειράς είναι αυτή στην οποία η διόδος είναι συνδεδεμένη σε σειρά με το φορτίο ενώ η παράλληλη διάταξη είναι αυτή στην οποία η διόδος είναι συνδεδεμένη παράλληλα με το φορτίο.

### Συνδεσμολογία Σειράς

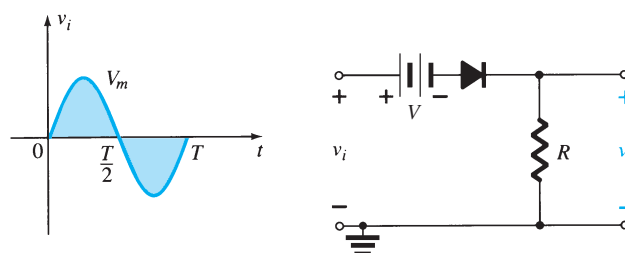
Η απόκριση της συνδεσμολογίας σειράς του Σχ. 2.68α σε κάποιες κυματομορφές φαίνεται στο Σχ. 2.68β. Παρά το γεγονός ότι αρχικά παρουσιάστηκε ως ημιανορθωτής (για ημιτονοειδείς κυματομορφές) δεν υπάρχει περιορισμός για τον τύπο των σημάτων που μπορούν να εφαρμοστούν σε έναν ψαλιδιστή.

Η προσθήκη μίας πηγής τροφοδοσίας dc στο κύκλωμα, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.69, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ανάλυση της συνδεσμολογίας του περιοριστή σειράς. Η απόκριση δεν είναι τόσο εμφανής επειδή η πηγή τροφοδοσίας μπορεί να λειτουργήσει υπέρ ή κατά της πηγής του κυκλώματος αλλά και επειδή μπορεί να συνδεθεί μεταξύ της πηγής του κυκλώματος και της εξόδου ή στον παράλληλο κλάδο με την έξοδο.



ΣΧΗΜΑ 2.68

Ψαλιδιστής σειράς.



ΣΧΗΜΑ 2.69

Ψαλιδιστής σειράς με πηγή τροφοδοσίας dc.

Δεν υπάρχει κάποιος γενικός κανόνας προσέγγισης για την ανάλυση κυκλωμάτων σαν αυτό του Σχ. 2.69, αλλά υπάρχουν κάποια βήματα που μπορούν να κατευθύνουν την ανάλυση.

Τα βήματα αυτά είναι τα εξής:

**1. Εντοπίστε με πολύ προσοχή τα σημεία που ορίζουν την έξοδο του κυκλώματος.**

Στο Σχ. 2.69 τα σημεία αυτά είναι τα άκρα της αντίστασης  $R$ . Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να αποτελούν τα άκρα ενός συνδυασμού εξαρτημάτων.

**2. Προσπαθήστε να “δείτε” τη συνολική απόκριση παρατηρώντας την “πίεση” που ασκείται από την κάθε πηγή τάσης και την επίδραση που θα έχει αυτή στη συμβατική φορά ρεύματος μέσα από τη διάοδο.**

Στο Σχ. 2.69, για παράδειγμα, κάθε θετική τάση της πηγής τροφοδοσίας θα προσπαθήσει να φέρει τη διάοδο σε αγωγιμότητα δημιουργώντας ένα ρεύμα μέσα από τη διάοδο ίδιας φοράς με τη φορά του βέλους στο σύμβολο της διόδου. Όμως, η πηγή τάσης  $V$  θα εναντιωθεί σε αυτή την εφαρμοζόμενη τάση και θα προσπαθήσει να κρατήσει τη διάοδο στην κατάσταση “off”. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε τάση τροφοδοσίας μεγαλύτερη από  $V$  volt θα φέρει τη διάοδο σε αγωγιμότητα και θα δημιουργήσει ένα ρεύμα μέσω της αντίστασης φορτίου. Μην ξεχνάτε ότι έχουμε να κάνουμε με μία ιδανική διάοδο προς το παρόν και συνεπώς η τάση αγωγιμότητας της διόδου είναι  $0$  V. Σε γενικές γραμμές, λοιπόν, για το Σχ. 2.69 μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η διάδος θα άγει για οποιαδήποτε τάση  $v_i$  μεγαλύτερη από  $V$  volt και θα είναι σε κατάσταση “off” για οποιαδήποτε μικρότερη τάση. Για την κατάσταση “off”, η έξοδος θα είναι  $0$  V εξαιτίας της έλλειψης ρεύματος και για την κατάσταση “on” θα είναι  $v_o = v_i - V$ , όπως καθορίζεται από το νόμο τάσης του Kirchhoff. Έτσι, τελικά καθορίστηκε μία λύση χωρίς τη χρήση υπολογισμών, μελετώντας απλά τα στοιχεία του κυκλώματος και τον τρόπο που αλληλεπιδρούν. Φυσικά, κάποια κυκλώματα θα είναι πιο σύνθετα και γι’ αυτό συνιστάται και η εφαρμογή των ακόλουθων βημάτων.

**3. Καθορίστε την εφαρμοζόμενη τάση (μεταβατική τάση, transition voltage) που θα προκύψει σε μία μεταβολή της κατάστασης της διόδου από “off” σε “on”.**

Αυτό το βήμα θα βοηθήσει στον καθορισμό μίας περιοχής της εφαρμοζόμενης τάσης όταν η διάδος άγει και όταν δεν άγει. Στη χαρακτηριστική μίας ιδανικής διόδου αυτό θα συμβεί όταν  $V_D = 0$  V και  $I_D = 0$  mA. Για το προσεγγιστικό ισοδύναμο θα καθοριστεί βρίσκοντας την εφαρμοζόμενη τάση όταν η πτώση τάσης στα άκρα της διόδου είναι  $0,7$  V (για το πυρίτιο) και  $I_D = 0$  mA.

Αυτό ακριβώς εφαρμόσαμε στο κύκλωμα του Σχ. 2.69, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.70. Προσέξτε την αντικατάσταση της διόδου με το ισοδύναμο βραχυκυκλώματος και το γεγονός ότι η τάση στα άκρα της αντίστασης είναι  $0$  V επειδή το ρεύμα διόδου είναι  $0$  mA. Το αποτέλεσμα είναι  $v_i - V = 0$  και συνεπώς

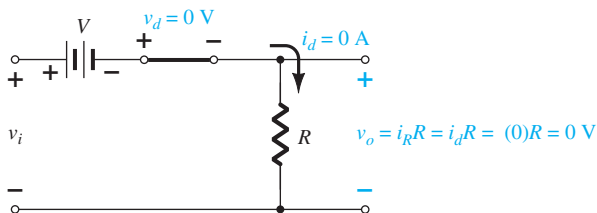
$$v_i = V \quad (2.14)$$

είναι η μεταβατική τάση.

Αυτό μας επιτρέπει να χαράξουμε μία ευθεία γραμμή πάνω στην ημιτονοειδή τάση τροφοδοσίας, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.71, για να ορίσουμε τις περιοχές στις οποίες η διάδος είναι “on” και “off”.

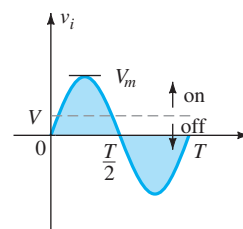
Για την περιοχή “on”, όπως δείχνει το Σχ. 2.72, η διάδος αντικαθιστάται από το ισοδύναμο βραχυκυκλώματος και η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση

$$v_o = v_i - V \quad (2.15)$$



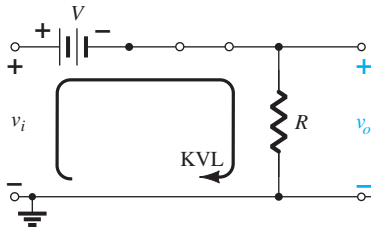
ΣΧΗΜΑ 2.70

Καθορισμός της μεταβατικής στάθμης για το κύκλωμα του Σχ. 2.69.



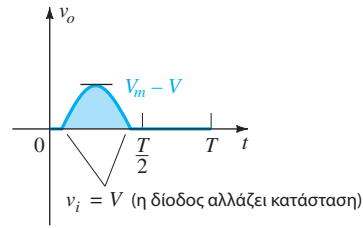
ΣΧΗΜΑ 2.71

Χρήση της μεταβατικής τάσης για τον ορισμό των περιοχών “on” και “off”.



ΣΧΗΜΑ 2.72

Καθορισμός της  $v_o$  με τη δίοδο στην κατάσταση “on”.



ΣΧΗΜΑ 2.73

Σχεδίαση της κυματομορφής της  $v_o$  χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που πήραμε για τη  $v_o$  πάνω και κάτω από τη μεταβατική στάθμη.

Για την περιοχή “off”, η δίοδος είναι ανοικτό κύκλωμα, άρα  $I_D = 0$  mA και η έξοδος είναι

$$v_o = 0 \text{ V}$$

4. Συνήθως είναι πολύ χρήσιμο να σχεδιάζουμε την κυματομορφή εξόδου ακριβώς κάτω από την εφαρμοζόμενη τάση χρησιμοποιώντας τις ίδιες κλίμακες στον οριζόντιο και στον κατακόρυφο άξονα.

Χρησιμοποιώντας αυτή την τελευταία πληροφορία, μπορούμε να καθορίσουμε τη στάθμη των 0-V στο διάγραμμα του Σχ. 2.73 για την περιοχή που θέλουμε. Για την κατάσταση “on”, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η Εξ. (2.15) για να βρούμε την τάση εξόδου όταν η εφαρμοζόμενη τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή της:

$$v_{o\text{peak}} = V_m - V$$

και η τιμή αυτή μπορεί να προστεθεί στο διάγραμμα του Σχ. 2.73. Στη συνέχεια, απλά συμπληρώνουμε το τμήμα που λείπει στην καμπύλη εξόδου.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.18

Προσδιορίστε την κυματομορφή εξόδου για την ημιτονοειδή είσοδο του Σχ. 2.74.

**Λύση:**

**Βήμα 1:** Η έξοδος και πάλι βρίσκεται στα άκρα της αντίστασης  $R$ .

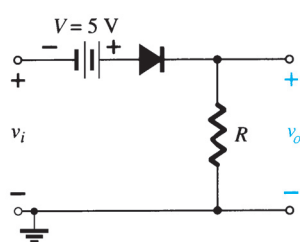
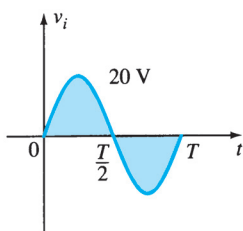
**Βήμα 2:** Η θετική περιοχή της  $v_i$  μαζί με την πηγή τάσης dc φέρνουν τη δίοδο σε αγωγιμότητα. Έτσι, για όλη την περιοχή θετικών τιμών της  $v_i$  μπορούμε με σιγουριά να υποθέσουμε ότι η δίοδος βρίσκεται στην κατάσταση “on”. Μόλις η τροφοδοσία γίνει αρνητική, θα πρέπει να ξεπεράσει την πηγή τάσης dc των 5 V για να φέρει τη δίοδο στην κατάσταση “off”. Έτσι, έχει σχηματιστεί η γενική εικόνα για τη συμπεριφορά του κυκλώματος.

**Βήμα 3:** Στο Σχ. 2.75 βλέπουμε πλέον το μεταβατικό μοντέλο και διαπιστώνουμε ότι η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη γίνεται όταν

$$v_i + 5 \text{ V} = 0 \text{ V}$$

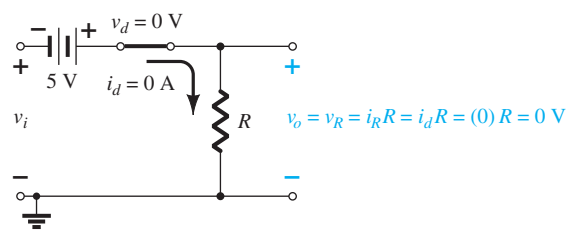
ή

$$v_i = -5 \text{ V}$$



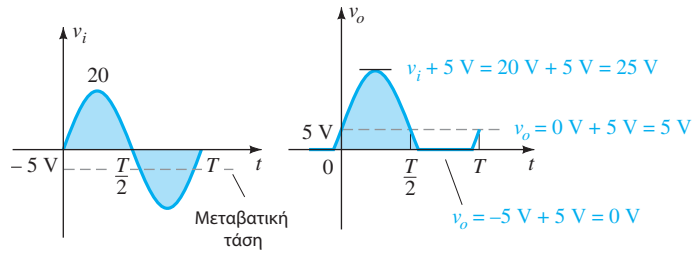
ΣΧΗΜΑ 2.74

Ο ψαλιδιστής σειράς για το Παράδειγμα 2.18.



ΣΧΗΜΑ 2.75

Καθορισμός της μεταβατικής στάθμης για τον ψαλιδιστή του Σχ. 2.74.



ΣΧΗΜΑ 2.76

Σχεδίαση της  $v_o$  για το Παράδειγμα 2.18.

**Βήμα 4:** Στο Σχ. 2.76 έχει σχεδιαστεί μία ευθεία οριζόντια γραμμή πάνω στην κυματομορφή εισόδου στο επίπεδο της μεταβατικής στάθμης. Για τάσεις μικρότερες από  $-5\text{ V}$  η διόδος είναι ανοικτό κύκλωμα και η έξοδος είναι  $0\text{ V}$ , όπως φαίνεται και στην κυματομορφή της  $v_o$ . Χρησιμοποιώντας το Σχ. 2.76 βλέπουμε ότι κατά την αγωγιμότητα της διόδου και της δημιουργίας ρεύματος στο κύκλωμα, η τάση εξόδου θα είναι, σύμφωνα με το νόμο τάσης του Kirchhoff, η εξής:

$$v_o = v_i + 5\text{ V}$$

Η ανάλυση των κυκλωμάτων ψαλιδιστών με είσοδο τετραγωνικής μορφής είναι πιο εύκολη από τις ημιτονοειδείς εισόδους επειδή πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν μόνο δύο επίπεδα τάσης. Με άλλα λόγια, το κύκλωμα μπορεί να αναλυθεί σαν να είχε δύο εισόδους dc και η έξοδος να σχεδιαστεί στο κατάλληλο χρονικό διάστημα. Αυτό όπως θα το δούμε στην πράξη στο επόμενο παράδειγμα.

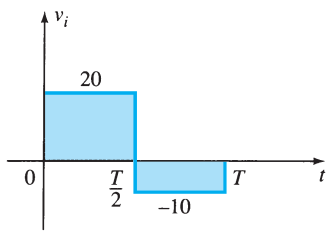
**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.19**

Βρείτε την τάση εξόδου του κυκλώματος του Παραδείγματος 2.18 αν το σήμα εισόδου είναι η κυματομορφή του Σχ. 2.77.

**Λύση:**

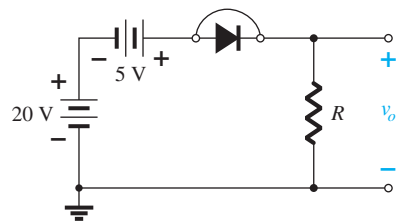
Για  $v_i = 20\text{ V}$  ( $0 \rightarrow T/2$ ) προκύπτει το κύκλωμα του Σχ. 2.78. Η διόδος άγει και θεωρείται βραχυκύκλωμα και η τάση εξόδου είναι  $v_o = 20\text{ V} + 5\text{ V} = 25\text{ V}$ . Για  $v_i = -10\text{ V}$ , έχουμε το κύκλωμα του Σχ. 2.79 με τη διόδο σε κατάσταση “off” και  $v_o = i_R R = (0)R = 0\text{ V}$ . Η τελική μορφή της τάσης εξόδου εμφανίζεται στο Σχ. 2.80.

Προσέξτε στο Παράδειγμα 2.19 ότι ο ψαλιδιστής όχι μόνο έκοψε  $5\text{ V}$  από το συνολικό εύρος τάσης αλλά ανύψωσε και τη στάθμη dc του σήματος κατά  $5\text{ V}$ .



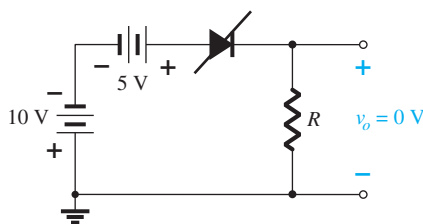
ΣΧΗΜΑ 2.77

Σήμα εισόδου για το Παράδειγμα 2.19.



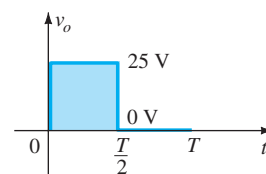
ΣΧΗΜΑ 2.78

Η  $v_o$  για  $v_i = +20\text{V}$ .



ΣΧΗΜΑ 2.79

Η  $v_o$  για  $v_i = -10\text{V}$ .

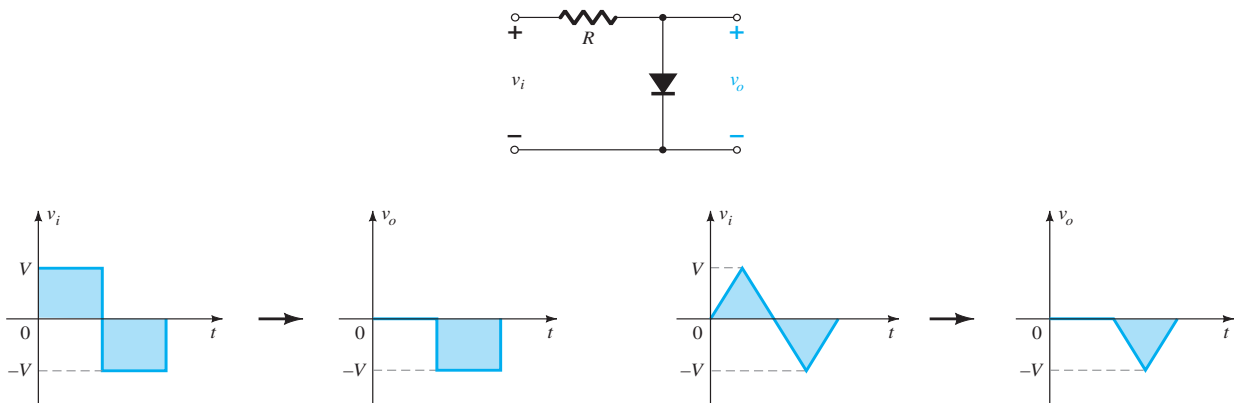


ΣΧΗΜΑ 2.80

Σχεδίαση της  $v_o$  για το Παράδειγμα 2.19.

## Παράλληλη Συνδεσμολογία

Το κύκλωμα του Σχ. 2.81 είναι η πιο απλή παράλληλη συνδεσμολογία ψαλιδιστή με την έξοδο που δίνει για τις ίδιες εισόδους με αυτές του Σχ. 2.68. Η ανάλυση των παράλληλων συνδεσμολογιών που ακολουθεί μοιάζει πολύ με αυτή που εφαρμόζεται στις αντίστοιχες σειρές όπως θα διαπιστώσετε στο παράδειγμα που ακολουθεί.



ΣΧΗΜΑ 2.81

Η απόκριση της εξόδου ενός παράλληλου ψαλιδιστή.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.20

Προσδιορίστε τη  $v_o$  για το κύκλωμα του Σχ. 2.82.

**Λύση:**

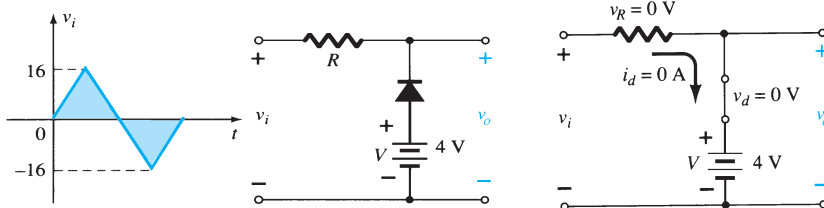
**Βήμα 1:** Σε αυτό το παράδειγμα η έξοδος ορίζεται από το συνδυασμό σε σειρά της πηγής τάσης dc 4-V και της διόδου και όχι στα άκρα της αντίστασης  $R$ .

**Βήμα 2:** Η πολικότητα της πηγής τάσης dc και η φορά της διόδου υποδηλώνουν ότι η διάοδος άγει για ένα σημαντικό τμήμα της αρνητικής περιοχής του σήματος εισόδου. Πράγματι, είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσετε ότι αφού η έξοδος λαμβάνεται στα άκρα του συνδυασμού σειράς, όταν η διάοδος λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα η τάση εξόδου θα “πέφτει” στην πηγή τάσης dc με αποτέλεσμα η τάση εξόδου να είναι σταθερή στα 4 V. Πιο απλά, όταν η διάοδος άγει η τάση στην έξοδο θα είναι 4 V. Όταν η διάοδος είναι ανοικτό κύκλωμα, το ρεύμα στο συνδυασμό σειράς θα είναι 0 mA και η πτώση τάσης στα άκρα της διόδου θα είναι 0 V με αποτέλεσμα η τάση εξόδου να είναι  $v_o = v_i$ .

**Βήμα 3:** Η μεταβατική στάθμη της τάσης εισόδου μπορεί να προσδιοριστεί από το Σχ. 2.83 αντικαθιστώντας τη διάοδο με βραχυκύκλωμα και θεωρώντας ότι το ρεύμα διόδου κατά τη στιγμή της μετάβασης είναι 0 mA. Το αποτέλεσμα είναι να γίνεται μεταβολή της κατάστασης όταν  $v_i = 4$  V.

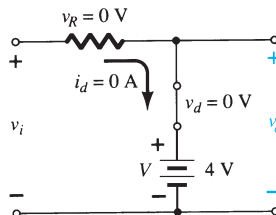
**Βήμα 4:** Στο Σχ. 2.84 η μεταβατική στάθμη έχει σχεδιαστεί μαζί με την  $v_o = 4$  V όταν η διάοδος άγει. Για  $v_i \geq 4$  V,  $v_o = v_i$  και η κυματομορφή εισόδου απλά αναπαράγεται στο διάγραμμα εξόδου.

Για να εξετάσουμε τις συνέπειες της τάσης αγωγιμότητας μίας διόδου πυριτίου στην απόκριση της εξόδου, στο επόμενο παράδειγμα θα χρησιμοποιήσουμε αντί της ιδανικής διόδου μία διάοδο πυριτίου.



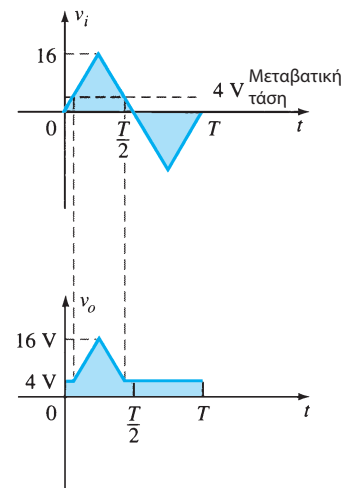
ΣΧΗΜΑ 2.82

Παράδειγμα 2.20.



ΣΧΗΜΑ 2.83

Καθορισμός της μεταβατικής στάθμης για το Παράδειγμα 2.20.



ΣΧΗΜΑ 2.84

Σχεδίαση της  $v_o$  για το Παράδειγμα 2.20.

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.21**

Επανάλαβετε το Παράδειγμα 2.20 χρησιμοποιώντας μία δίοδο πυριτίου με  $V_K = 0,7 \text{ V}$ .

**Λύση:**

Η μεταβατική τάση μπορεί να προσδιοριστεί αφού προηγουμένως εφαρμόσουμε τη συνθήκη  $i_d = 0 \text{ A}$  για  $v_d = V_D = 0,7 \text{ V}$  και πάρουμε το κύκλωμα του Σχ. 2.85. Εφαρμόζοντας το νόμο τάσης του Kirchhoff στο βρόχο της εξόδου κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, έχουμε

$$v_i + V_K - V = 0$$

και

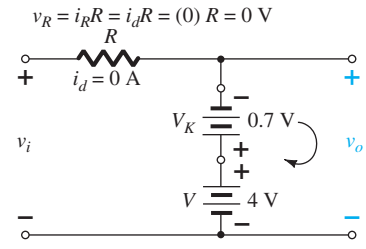
$$v_i = V - V_K = 4 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 3,3 \text{ V}$$

Για τάσεις εισόδου μεγαλύτερες από 3,3 V, η δίοδος θα είναι ανοικτό κύκλωμα και συνεπώς  $v_o = v_i$ . Για τάσεις εισόδου μικρότερες από 3,3 V, η δίοδος είναι βραχυκύκλωμα και προκύπτει το κύκλωμα του Σχ. 2.86 στο οποίο ισχύει

$$v_o = 4 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 3,3 \text{ V}$$

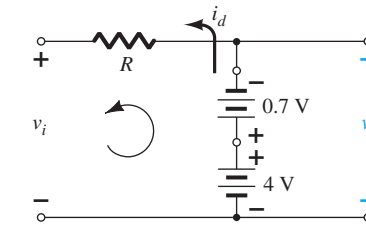
Η κυματομορφή εξόδου είναι αυτή που φαίνεται στο Σχ. 2.87. Προσέξτε ότι η μόνη επίδραση της  $V_K$  ήταν η πτώση της μεταβατικής στάθμης από 4 V στα 3,3 V.

Χωρίς αμφιβολία ο συνυπολογισμός των συνεπειών της  $V_K$  θα περιπλέκει σε κάποιο βαθμό την ανάλυση, αλλά αν η ανάλυση γίνει κατανοητή με την ιδανική δίοδο, η λειτουργία με τη  $V_K$  δε θα είναι δύσκολη.



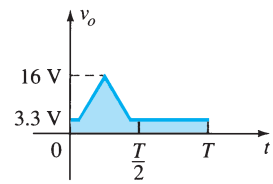
**ΣΧΗΜΑ 2.85**

Καθορισμός της μεταβατικής στάθμης για το κύκλωμα του Σχ. 2.82.



**ΣΧΗΜΑ 2.86**

Καθορισμός της  $v_o$  για τη δίοδο του Σχ. 2.82 στην κατάσταση “on”.



**ΣΧΗΜΑ 2.87**

Σχεδίαση της  $v_o$  για το Παράδειγμα 2.21.

**Περίληψη**

Στο Σχ. 2.88 παρουσιάζονται διάφοροι ψαλιδιστές παράλληλοι και σειρές με την αντίστοιχη έξοδο για ημιτονοειδή είσοδο. Προσέξτε ιδιαίτερα την απόκριση εξόδου της τελευταίας συνδεσμολογίας η οποία κόβει μέρος και από το θετικό και από το αρνητικό τμήμα του σήματος εισόδου, όπως καθορίζεται από το μέγεθος των πηγών τάσης dc.

**2.9 ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΤΩΝ**

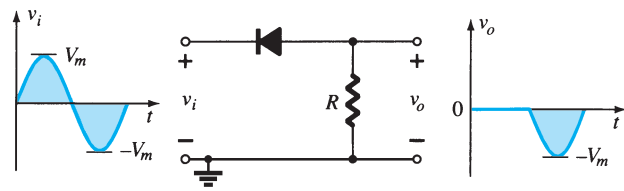
Στην προηγούμενη ενότητα εξετάσαμε μερικά κυκλώματα διόδων που “κόβουν” μέρος του τμήματος εισόδου χωρίς να αλλάζουν το υπόλοιπο τμήμα της κυματομορφής. Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε κάποιες άλλες συνδεσμολογίες διόδων οι οποίες μετατοπίζουν το σήμα εισόδου σε διαφορετική στάθμη.

*Ένα κύκλωμα περιοριστών (clamper) αποτελείται από μία δίοδο, μία αντίσταση και έναν πυκνωτή και μετατοπίζει μία κυματομορφή σε διαφορετική στάθμη dc χωρίς να αλλάζει τη μορφή του εφαρμοζόμενου σήματος.*

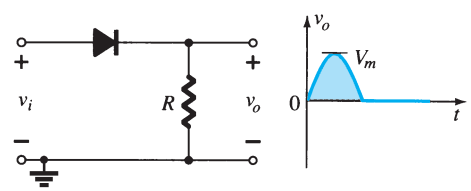
Η προσθήκη μίας πηγής τάσης dc στη βασική μορφή του κυκλώματος μπορεί να οδηγήσει στην επίτευξη μεγαλύτερων μετατοπίσεων. Η αντίσταση και ο πυκνωτής που επιλέγονται για το κύκλωμα πρέπει να είναι τέτοιας τιμής ώστε η σταθερά χρόνου, που ορίζεται από τη σχέση  $\tau = RC$ , να είναι αρκετά μεγάλη και ο πυκνωτής πρακτικά να μην εκφορτίζεται κατά το χρονικό διάστημα που η δίοδος δεν άγει. Στην ανάλυση που θα κάνουμε υποθέτουμε ότι ο πυκνωτής φορτίζεται ή εκφορτίζεται πλήρως σε πέντε σταθερές χρόνου.

Απλοί Ψαλιδοστές Σειράς (Ιδανικοί Δίοδοι)

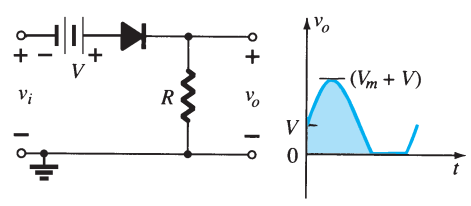
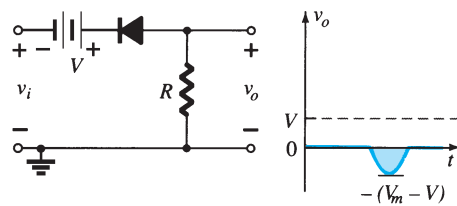
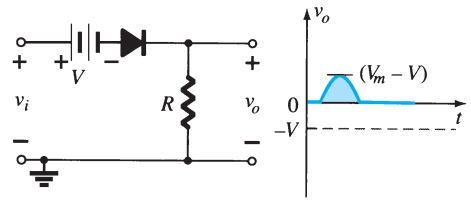
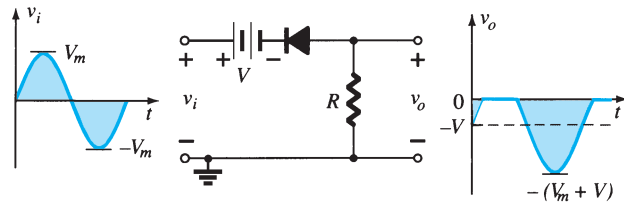
ΘΕΤΙΚΟΣ



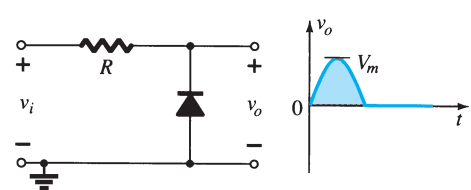
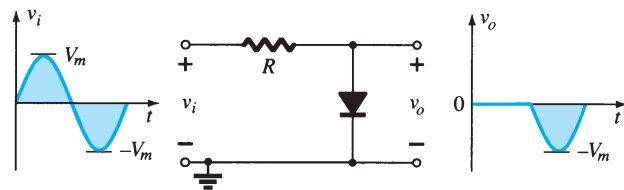
ΑΡΝΗΤΙΚΟΣ



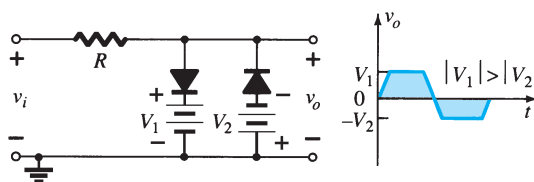
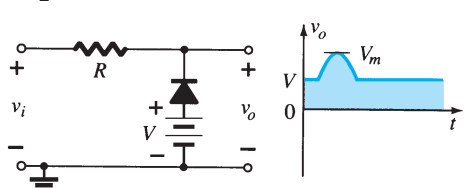
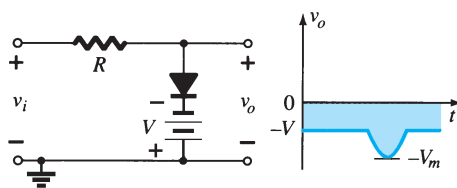
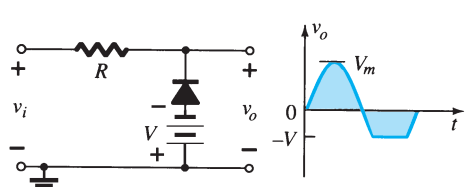
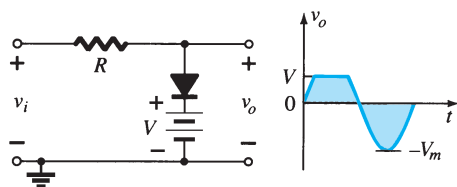
Ψαλιδοστές Σειράς με Πόλωση (Ιδανικοί Δίοδοι)



Απλοί Παράλληλοι Ψαλιδοστές (Ιδανικοί Δίοδοι)



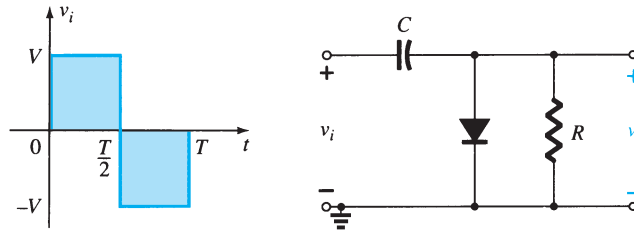
Παράλληλοι Ψαλιδοστές με Πόλωση (Ιδανικοί Δίοδοι)



ΣΧΗΜΑ 2.88

Κυκλώματα ψαλιδοστών.

Το πιο απλό κύκλωμα περιοριστών είναι αυτό που φαίνεται στο Σχ. 2.89. Είναι σημαντικό να προσέξετε ότι ο πυκνωτής συνδέεται απευθείας μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου ενώ η αντίσταση και η διάοδος συνδέονται παράλληλα με το σήμα εξόδου.



ΣΧΗΜΑ 2.89

Κύκλωμα περιοριστή dc (clammer).

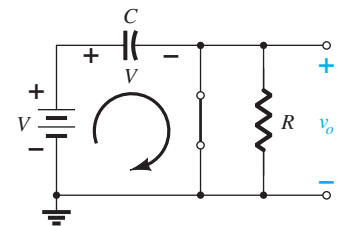
Τα κυκλώματα περιοριστών έχουν ένα πυκνωτή συνδεδεμένο απευθείας από την είσοδο στην έξοδο και μία αντίσταση παράλληλα με το σήμα εξόδου. Η διάοδος είναι και αυτή συνδεδεμένη παράλληλα με το σήμα εξόδου και μπορεί να είναι ή να μην είναι συνδεδεμένη σε σειρά με μία πηγή τάσης dc.

Υπάρχει μία σειρά βημάτων η οποία μπορεί να κάνει την ανάλυση πιο απλή. Αυτή δεν είναι η μοναδική προσέγγιση για την εξέταση κυκλωμάτων περιοριστών αλλά αποτελεί μία σημαντική βοήθεια σε ενδεχόμενη εμφάνιση προβλημάτων.

**Βήμα 1:** Ξεκινήστε την ανάλυση εξετάζοντας την απόκριση του τμήματος του σήματος εισόδου που θα πολώσει ορθά τη διάοδο.

**Βήμα 2:** Κατά το χρονικό διάστημα που η διάοδος άγει, υποθέστε ότι ο πυκνωτής θα φορτιστεί στιγμιαία σε μία τιμή τάσης που καθορίζεται από το κύκλωμα που τον περιβάλλει.

Για το κύκλωμα του Σχ. 2.89, η διάοδος θα είναι ορθά πολωμένη για το θετικό τμήμα του εφαρμοζόμενου σήματος. Για το χρονικό διάστημα  $0 \rightarrow T/2$  το κύκλωμα θα έχει τη μορφή του Σχ. 2.90 και επειδή η διάοδος είναι βραχυκύκλωμα η τάση εξόδου θα είναι  $v_o = 0$  V, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.92. Στο ίδιο χρονικό διάστημα, η σταθερά χρόνου, που όπως έχουμε αναφέρει ορίζεται ως  $\tau = RC$ , είναι πολύ μικρή επειδή η αντίσταση  $R$  έχει βραχυκυκλωθεί από τη διάοδο που άγει και η μόνη αντίσταση που υπάρχει είναι η εγγενής αντίσταση (επαφές, αγωγοί) του κυκλώματος. Το αποτέλεσμα είναι ότι ο πυκνωτής θα φορτιστεί γρήγορα στην τιμή κορυφής των  $V$  volt με την πολικότητα που σημειώνεται στο Σχ. 2.90.



ΣΧΗΜΑ 2.90

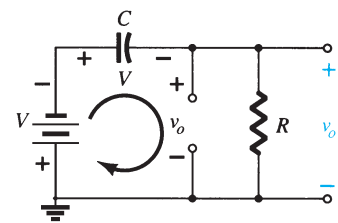
Η διάοδος άγει και ο πυκνωτής φορτίζεται σε  $V$  volt.

**Βήμα 3:** Υποθέστε ότι κατά το χρονικό διάστημα που η διάοδος δεν άγει, ο πυκνωτής παραμένει φορτισμένος στην τιμή τάσης που είχε μετά τη φόρτίσή του.

**Βήμα 4:** Σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης, να παρακολουθείτε τη θέση της  $v_o$  και την καθορισμένη πολικότητά της για να είστε σίγουροι ότι παίρνετε τις σωστές τιμές.

Στο αρνητικό τμήμα του σήματος εισόδου, το κύκλωμα θα έχει τη μορφή του Σχ. 2.91. Το εφαρμοζόμενο σήμα και η τάση του πυκνωτή πολώνουν τη διάοδο ανάστροφα, η οποία πλέον είναι ανοικτό κύκλωμα, επαναφέροντας στο κύκλωμα την αντίσταση  $R$ . Η σταθερά χρόνου που ορίζεται από το γινόμενο  $RC$  είναι πλέον αρκετά μεγάλη για να μπορεί να δώσει χρόνο εκφόρτισης  $5\tau$ , που είναι πολύ μεγαλύτερη από το χρονικό διάστημα  $T/2 \rightarrow T$ . Έτσι, μπορούμε να υποθέσουμε κατά προσέγγιση ότι ο πυκνωτής διατηρεί όλο το φορτίο του και συνεπώς και την τάση του (αφού  $V = Q/C$ ) για αυτό το χρονικό διάστημα.

Επειδή η  $v_o$  είναι παράλληλα με τη διάοδο και την αντίσταση, μπορεί να σχεδιαστεί και στην εναλλακτική θέση που φαίνεται στο Σχ. 2.91. Εφαρμόζοντας το νόμο τάσης του Kirchhoff στο βρόχο εισόδου έχουμε



ΣΧΗΜΑ 2.91

Καθορισμός της  $v_o$  όταν η διάοδος δεν άγει.



$$-V - V - v_o = 0$$

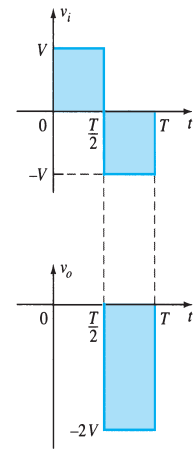
και

$$v_o = -2V$$

Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στο γεγονός ότι η πολικότητα της τάσης  $2V$  είναι αντίθετη με την πολικότητα που ορίζεται για την  $v_o$ . Η κυματομορφή εξόδου του κυκλώματος φαίνεται στο Σχ. 2.92 μαζί με το σήμα εισόδου. Το σήμα εξόδου έχει γίνει  $0\text{ V}$  για το χρονικό διάστημα  $0 \rightarrow T/2$  αλλά διατηρεί την ίδια συνολική διακύμανση ( $2V$ ) με την είσοδο για το χρονικό διάστημα  $T/2 \rightarrow T$ .

**Βήμα 5:** Ελέγξτε ότι η συνολική διακύμανση του εύρους τάσης της εξόδου είναι ίδια με την αντίστοιχη διακύμανση του σήματος εισόδου.

Αυτή η ιδιότητα ισχύει για όλα τα κυκλώματα περιοριστών και αποτελεί μία εξαιρετική μέθοδο επαλήθευσης των αποτελεσμάτων.

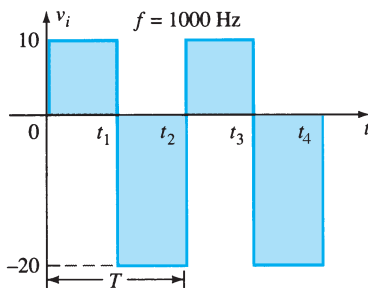


ΣΧΗΜΑ 2.92

Σχεδίαση της  $v_o$  για το κύκλωμα του Σχ. 2.91.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.22

Προσδιορίστε τη  $v_o$  για το κύκλωμα του Σχ. 2.93 και την είσοδο που δίνεται.



ΣΧΗΜΑ 2.93

Σήμα εισόδου και κύκλωμα για το Παράδειγμα 2.22

#### Λύση:

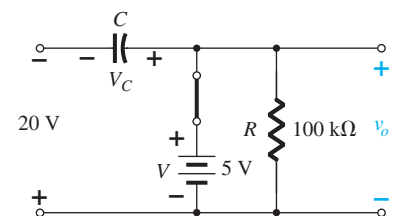
Προσέξτε ότι η συχνότητα λειτουργίας είναι  $1000\text{ Hz}$ , δηλαδή η περίοδος είναι  $1\text{ ms}$  και το χρονικό διάστημα μεταξύ των σταθμών τάσης του σήματος εισόδου είναι  $0,5\text{ ms}$ . Η ανάλυση θα ξεκινήσει για την περίοδο του σήματος εισόδου από  $t_1 \rightarrow t_2$  επειδή η διόδος άγει και συμπεριφέρεται ως βραχυκύκλωμα. Για αυτό το χρονικό διάστημα το κύκλωμα έχει τη μορφή του Σχ. 2.94. Η έξοδος λαμβάνεται στα άκρα της αντίστασης  $R$ , η οποία όμως είναι παράλληλη με την πηγή τάσης των  $5\text{ V}$  λόγω της αγωγιμότητας της διόδου. Το αποτέλεσμα είναι ότι η τάση εξόδου είναι  $v_o = 5\text{ V}$ . Εφαρμόζοντας το νόμο τάσης του Kirchhoff στο βρόχο εισόδου έχουμε

$$-20\text{ V} + V_C - 5\text{ V} = 0$$

και

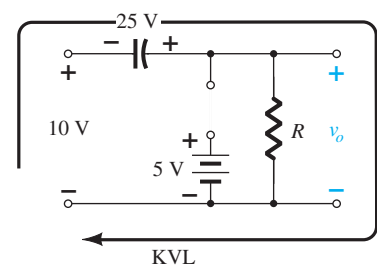
$$V_C = 25\text{ V}$$

Άρα ο πυκνωτής θα φορτιστεί μέχρι την τιμή τάσης  $25\text{ V}$ . Σε αυτή την περίπτωση η αντίσταση  $R$  δεν βραχυκυκλώνεται από τη διόδο και το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin που προκύπτει για αυτό το τμήμα του κυκλώματος και περιλαμβάνει την πηγή τάσης και την αντίσταση έχει χαρακτηριστικά  $R_{Th} = 0\ \Omega$  και  $E_{Th} = V = 5\text{ V}$ . Για τη χρονική περίοδο από  $t_2 \rightarrow t_3$  το κύκλωμα έχει τη μορφή του Σχ. 2.95.



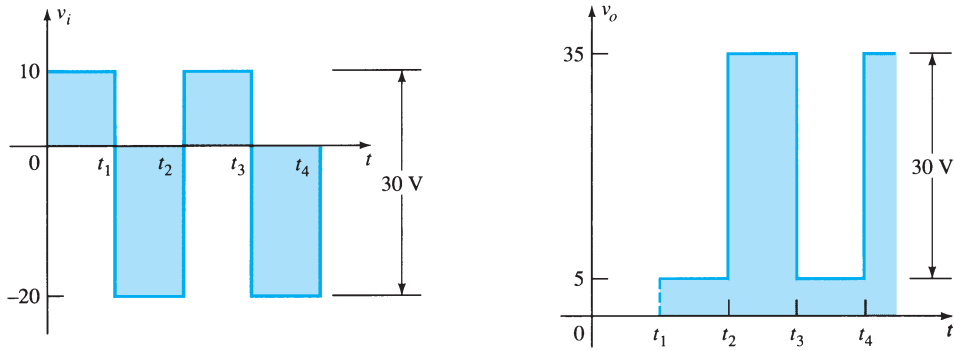
ΣΧΗΜΑ 2.94

Καθορισμός της  $v_o$  και της  $V_C$  όταν η διόδος άγει.



ΣΧΗΜΑ 2.95

Καθορισμός της  $v_o$  όταν η διόδος δεν άγει.



**ΣΧΗΜΑ 2.96**

Οι  $v_i$  και  $v_o$  για το κύκλωμα περιοριστή του Σχ. 2.93.

Η διόδος δεν άγει και είναι ανοικτό κύκλωμα εξουδετερώνοντας την πηγή τάσης των 5 V. Εφαρμόζοντας το νόμο τάσης του Kirchhoff στον εξωτερικό βρόχο του κυκλώματος έχουμε

$$+10 \text{ V} + 25 \text{ V} - v_o = 0$$

και

$$v_o = 35 \text{ V}$$

Η τιμή της σταθεράς χρόνου του κυκλώματος εκφόρτισης του Σχ. 2.95 είναι

$$\tau = RC = (100 \text{ k}\Omega)(0,1 \text{ }\mu\text{F}) = 0,01 \text{ s} = 10 \text{ ms}$$

Άρα, ο συνολικός χρόνος εκφόρτισης είναι  $5\tau = 5(10 \text{ ms}) = 50 \text{ ms}$ .

Επειδή το χρονικό διάστημα  $t_2 \rightarrow t_3$  έχει διάρκεια μόνο 0,5 ms, η υπόθεση ότι ο πυκνωτής θα διατηρεί την τάση του κατά την περίοδο εκφόρτισης μεταξύ των παλμών του σήματος εισόδου είναι σωστή. Η έξοδος του κυκλώματος μαζί με το σήμα εισόδου φαίνονται στο Σχ. 2.96. Παρατηρείστε ότι η διακύμανση του εύρους τάσης των 30 V είναι ίδια με την αντίστοιχη διακύμανση του σήματος εισόδου, όπως αναφέρεται και στο βήμα 5.

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.23**

Επαναλάβετε το Παράδειγμα 2.22 χρησιμοποιώντας μία διόδο πυριτίου με  $V_K = 0,7 \text{ V}$ .

**Λύση:**

Όταν η διόδος άγει το κύκλωμα παίρνει τη μορφή του Σχ. 2.97 και η  $v_o$  μπορεί να υπολογιστεί από το νόμο τάσης του Kirchhoff στο βρόχο εξόδου:

$$+5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} - v_o = 0$$

και

$$v_o = 5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 4,3 \text{ V}$$

Για το βρόχο εισόδου, ο νόμος τάσης του Kirchhoff δίνει

$$-20 \text{ V} + V_C + 0,7 \text{ V} - 5 \text{ V} = 0$$

και

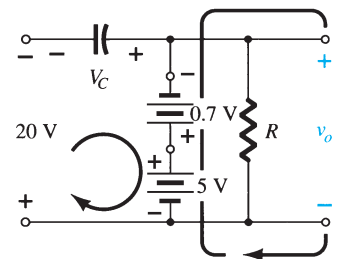
$$V_C = 25 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 24,3 \text{ V}$$

Για το χρονικό διάστημα  $t_2 \rightarrow t_3$  το κύκλωμα θα είναι αυτό που φαίνεται στο Σχ. 2.98. Προσέξτε ότι τώρα η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι διαφορετική. Εφαρμόζοντας το νόμο τάσης του Kirchhoff έχουμε

$$+10 \text{ V} + 24,3 \text{ V} - v_o = 0$$

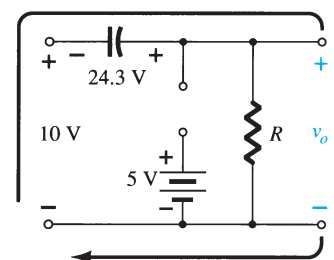
και

$$v_o = 34,3 \text{ V}$$



**ΣΧΗΜΑ 2.97**

Καθορισμός της  $v_o$  και της  $V_C$  όταν η διόδος άγει.



**ΣΧΗΜΑ 2.98**

Καθορισμός της  $v_o$  όταν η διόδος δεν άγει.