

Κεφάλαιο 5. Ημιαγωγικές διατάξεις – Δίοδοι

Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και επεξηγούνται οι βασικές αρχές της Φυσικής πάνω στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία των ημιαγωγικών διατάξεων και επαφών. Αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας των διόδων καθώς και η χρησιμότητά τους στη σχεδίαση και την υλοποίηση κυκλωμάτων στην ηλεκτρονική Φυσική. Διαχωρίζεται η θεωρητική (ιδανική) από την πραγματική λειτουργία τους και αναλύεται η μη γραμμική φύση της συμπεριφοράς τους. Παρουσιάζονται και προτείνονται προς υλοποίηση κυκλώματα που χρησιμοποιούν είτε απλές διόδους, π.χ. κυκλώματα ανόρθωσης τάσης είτε διόδους *zener*, π.χ. κυκλώματα σταθεροποίησης τάσης, ενώ παρουσιάζονται τρόποι προσομοίωσης σε υπολογιστή, της λειτουργίας των κυκλωμάτων και σύγκρισης των θεωρητικά αναμενόμενων αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις αλλά και την πραγματική κυκλωματική υλοποίηση. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται οι εργαστηριακές ασκήσεις που αφορούν στην πειραματική υλοποίηση, μελέτη και κατανόηση των σύνθετων κυκλωμάτων με διόδους, τα οποία μελετώνται θεωρητικά με τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται.

Προαπαιτούμενη γνώση

Ημιαγωγοί, Δίοδοι, Χαρακτηριστική Διόδου, Δίοδοι *Zener*, Ανορθωτικές Διατάξεις.

5.1. Εισαγωγή – Τι είναι διάοδος;

Η διάοδος αποτελεί το βασικότερο μη γραμμικό ημιαγωγικό ηλεκτρικό στοιχείο δύο ακροδεκτών και στην ιδανική της μορφή, αποτελεί το στοιχείο εκείνο που εμφανίζει μηδενική αντίσταση στη διέλευση του ρεύματος κατά μία συγκεκριμένη φορά και άπειρη αντίσταση κατά την αντίθετη (Grob, 1997; Gates & Chartrand, 2000; McWhorter & Evans, 2004; Τόμπρας, 2005; Boylestad, 2006; Malvino & Bates, 2006; Τόμπρας, 2006; Boylestad & Nashelsky, 2008; Θεοδωρίδης κ.ά., 2009; Φωτόπουλος, 2009; Μάργαρης, 2010; Boylestad & Nashelsky, 2012; Alexander & Sadiku, 2013; Basis, 2013; Edminister, 2013; Malvino & Bates, 2013; Χαριτάντης, 2013; Καραγιάννη κ.ά., 2014; Τόμπρας κ.ά., 2014; Χαριτάντης, 2014).

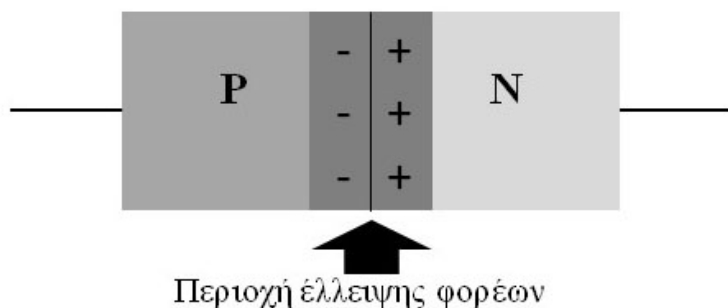
Ως προς τον τρόπο κατασκευής και λειτουργίας, η διάοδος είναι μια επαφή $p-n$ η οποία υλοποιείται με την επαφή δύο εξωγενών ημιαγωγών αντίθετου τύπου, δηλαδή τύπου p και τύπου n . Με το σχηματισμό της επαφής $p-n$, η διαφορά των συγκεντρώσεων των φορέων ίδιου τύπου σε καθεμιά από τις δύο περιοχές του κρυστάλλου οδηγεί στην έναρξη της διάχυσης των φορέων πλειονότητας της μιας περιοχής προς την περιοχή του αντίθετου τύπου ημιαγωγού, ώστε να υπάρξει αποκατάσταση ομοιόμορφης κατανομής σε όλο τον κρύσταλλο. Ο συνδυασμός της έγχυσης των φορέων και της εμφάνισης ακίνητων αρνητικών ιόντων στην περιοχή ημιαγωγού p καθώς και θετικών ιόντων στην περιοχή ημιαγωγού n , διαμορφώνει μια κατάσταση ισορροπίας η οποία οδηγεί στη διακοπή της έγχυσης πριν να υπάρξει ομοιομορφία σε όλο τον κρύσταλλο (Τόμπρας, 2006).

Έτσι, γύρω από την επαφή $p-n$ εμφανίζεται μια νέα περιοχή που καταλαμβάνει μέρος των περιοχών που μέχρι τώρα καταλάμβαναν οι ημιαγωγοί p και n και ονομάζεται «περιοχή έλλειψης φορέων». Αποτέλεσμα αυτού είναι οι περιοχές p και n να παραμένουν αντίθετα φορτισμένες ενώ ανάμεσά τους να έχει δημιουργηθεί η περιοχή έλλειψης φορέων που δεν επιτρέπει τη ροή φορέων του ρεύματος από τη μία περιοχή στην άλλη, αν δεν της δοθεί τόση ενέργεια όση χρειάζεται για να κινηθεί πάνω από την περιοχή έλλειψης φορέων. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η ενέργεια αυτή θα πρέπει να δοθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να βοηθήσει τους φορείς του ρεύματος να ξεπεράσουν το εμπόδιο της περιοχής έλλειψης φορέων και όχι να αυξήσουν το μέγεθος της περιοχής αυτής άρα και τη δυσκολία «διάβάσής» της (Τόμπρας, 2006).

Πιο συγκεκριμένα, αν εφαρμόσουμε στα άκρα της επαφής $p-n$ διαφορά δυναμικού τέτοια ώστε να αυξηθεί το αρνητικό φορτίο στον ημιαγωγό n της επαφής $p-n$ και το θετικό φορτίο στην επαφή p , τότε, θα είναι εφικτό, όταν η συγκέντρωση φορέων ξεπεράσει έναν συγκεκριμένο αριθμό να υπερνικηθεί το εμπόδιο της περιοχής έλλειψης φορέων και να παρατηρηθεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Τότε λέμε ότι η επαφή $p-n$, δηλαδή η διάοδος, είναι «ορθά πολωμένη». Αντίθετα, αν η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα της επαφής $p-n$ έχει αντίθετη φορά με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω και προκαλέσει διεύρυνση της περιοχής έλλειψης φορέων, τότε πλέον δεν μπορεί να υπάρξει ροή φορέων, άρα και ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου της

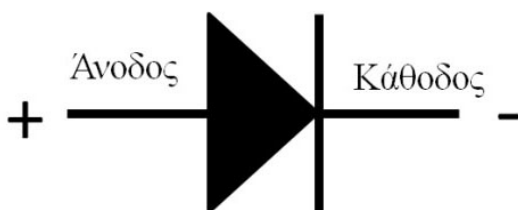
επαφής. Στην περίπτωση αυτή, λέμε ότι η επαφή p - n , δηλαδή η διόδος, είναι «ανάστροφα πολωμένη». Επομένως, με την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού συγκεκριμένης πολικότητας, περίπτωση ορθής πόλωσης, παρατηρούμε ροή ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ κατά την αντίθετη πολικότητα, περίπτωση ανάστροφης πόλωσης, αυτό δεν μπορεί να συμβεί (Τόμπρας, 2006).

Στο Σχήμα 5.1 έχει σχεδιαστεί η μορφή μιας επαφής p - n στην οποία έχει πλέον αποκατασταθεί ισορροπία και έχει δημιουργηθεί η περιοχή έλλειψης φορέων καθώς και οι δύο περιοχές με p και n , αντίστοιχα, γύρω από αυτήν.



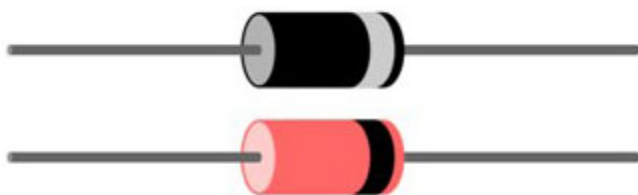
Σχήμα 5.1: Επαφή p - n .

Επομένως, με βάση τα παραπάνω, η επαφή p - n αποτελεί μια διόδo, η οποία επιτρέπει τη ροή του ρεύματος προς τη μια κατεύθυνση, κατά την ορθή πόλωση, ενώ προς την αντίθετη, κατά την ανάστροφη πόλωση, την απαγορεύει.



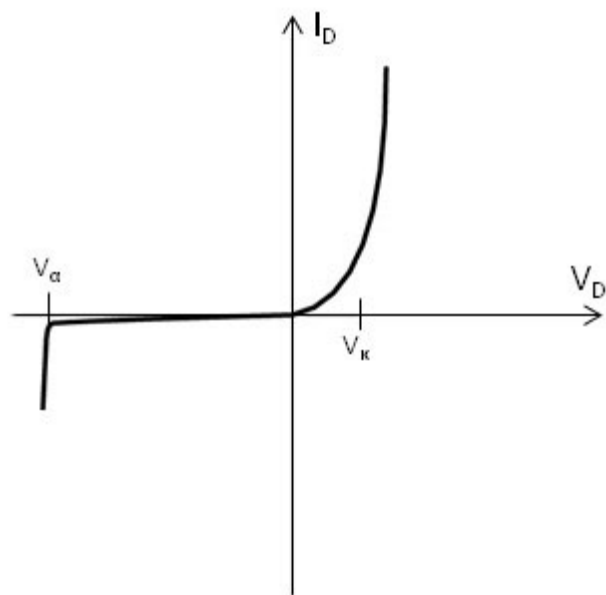
Σχήμα 5.2: Συμβολισμός διόδου σε ηλεκτρονικό κύκλωμα.

Όταν σχεδιάζεται ένα κύκλωμα το οποίο περιέχει διόδους, αυτές συμβολίζονται με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Ο συμβολισμός αυτός ουσιαστικά αντιστοιχεί στην κατεύθυνση κατά την οποία επιτρέπει τη ροή του ρεύματος η διόδος (ορθή πόλωση) και είναι αυτή που προσδιορίζεται από την κατεύθυνση του βέλους που περιλαμβάνεται στον συμβολισμό της. Η πραγματική, εμπορική, μορφή των διόδων είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Πραγματική μορφή διόδων όπως αγοράζονται στο εμπόριο.

Στην αρχή του κεφαλαίου αναφέρθηκε ότι η διόδος αποτελεί ένα μη γραμμικό ηλεκτρονικό στοιχείο. Ο λόγος που αναφέρεται ως «μη γραμμικό» έχει να κάνει με τη σχέση τάσης στα άκρα, V_D , και ρεύματος, I_D , που διαρρέει τη διόδο (Τόμπρας, 2006). Πιο συγκεκριμένα, η χαρακτηριστική τάσης-έντασης που περιγράφει τη λειτουργία της διόδου έχει σχεδιαστεί στο διάγραμμα του Σχήματος 5.4.



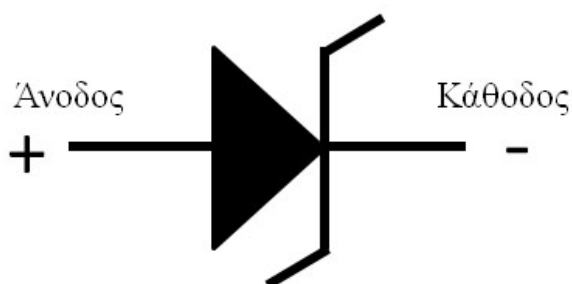
Σχήμα 5.4: Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος διόδου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4, όταν η τάση έχει θετική τιμή, η διόδος είναι ορθά πολωμένη. Για πολύ μικρές τιμές της τάσης η διόδος δεν άγει. Όταν όμως η διαφορά δυναμικού στα άκρα της ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή, V_K , τότε η ορθά πολωμένη διόδος ξεκινάει να άγει. Μάλιστα, ακόμα και για ελάχιστη αύξηση της τάσης στα άκρα της διόδου, παρατηρείται πολύ μεγάλη αύξηση του ρεύματος που τη διαρρέει. Η τιμή V_K ονομάζεται τάση κατωφλίου (threshold) και ουσιαστικά αποτελεί την ελάχιστη τάση που απαιτείται να εφαρμοστεί στα άκρα της επαφής p-n για να ξεπεραστεί το εμπόδιο της περιοχής έλλειψης φορέων και να ξεκινήσει η ροή ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου της διόδου (Grob, 1997; Gates & Chartrand, 2000; McWhorter & Evans, 2004; Τόμπρας, 2005; Boylestad, 2006; Malvino & Bates, 2006; Τόμπρας, 2006; Boylestad & Nashelsky, 2008; Θεοδωρίδης κ.ά., 2009; Φωτόπουλος, 2009; Μάργαρης, 2010; Boylestad & Nashelsky, 2012; Alexander & Sadiku, 2013; Basis, 2013; Edminister, 2013; Malvino & Bates, 2013; Χαριτάντης, 2013; Καραγιάννη κ.ά., 2014; Τόμπρας κ.ά., 2014; Χαριτάντης, 2014).

Αντίθετα, όταν η τάση στο Σχήμα 5.4 λαμβάνει αρνητικές τιμές, δηλαδή βρισκόμαστε στην περιοχή ανάστροφης πόλωσης, τότε, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δεν είναι δυνατό να έχουμε ροή ρεύματος για μικρές τάσεις ανάστροφης πόλωσης μέσω της διόδου λόγω της διεύρυνσης της περιοχής έλλειψης φορέων. Όμως, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, αν η τιμή της ανάστροφης τάσης αυξηθεί τόσο ώστε να ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή, V_a , τότε ξεπερνιέται το εμπόδιο της περιοχής έλλειψης φορέων και παρατηρείται ροή ρεύματος. Η συγκεκριμένη τάση ανάστροφης πόλωσης, V_a , ονομάζεται «τάση κατάρρευσης» της διόδου και η τιμή της είναι πολύ μεγαλύτερη, κατά απόλυτη τιμή, από αυτή της τάσης κατωφλίου στην περίπτωση της ορθής πόλωσης (Grob, 1997; Gates & Chartrand, 2000; McWhorter & Evans, 2004; Τόμπρας, 2005; Boylestad, 2006; Malvino & Bates, 2006; Τόμπρας, 2006; Boylestad & Nashelsky, 2008; Θεοδωρίδης κ.ά., 2009; Φωτόπουλος, 2009; Μάργαρης, 2010; Boylestad & Nashelsky, 2012; Alexander & Sadiku, 2013; Basis, 2013; Edminister, 2013; Malvino & Bates, 2013; Χαριτάντης, 2013; Καραγιάννη κ.ά., 2014; Τόμπρας κ.ά., 2014; Χαριτάντης, 2014).

Η τάση κατωφλίου καθώς και η τάση κατάρρευσης εξαρτώνται από τον τρόπο αλλά και τα υλικά κατασκευής της κάθε διόδου. Έτσι, για την περίπτωση διόδων πυριτίου και γερμανίου η τάση κατωφλίου κυμαίνεται μεταξύ 0.5 Volts – 0.7 Volts, ενώ η τάση κατάρρευσης, ανάλογα με τη σχεδίαση και κατασκευή

της κάθε διόδου μπορεί να πάρει τιμές από 75Voltsέως και πολύ μεγαλύτερες. Γενικά, οι απλές διόδους είναι κατασκευασμένες για να λειτουργούν μόνο προς τη μία κατεύθυνση ροής ρεύματος, αυτή της ορθής πόλωσης. Για τον λόγο αυτό η τάση κατάρρευσης λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές με στόχο να μην μπορεί να υλοποιηθεί στην πράξη στα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Όμως, υπάρχουν συγκεκριμένοι τύποι διόδων, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελέσει χαρακτηριστικό τους, μια χαμηλή σχετικά, συγκεκριμένη τάση κατάρρευσης ανάστροφης πόλωσης από την οποία και μετά, το ρεύμα διέρχεται από τη δίοδο. Οι διόδους αυτές, ονομάζονται «διόδους Zener» και το χαρακτηριστικό τους το οποίο τις διαφοροποιεί από τις απλές διόδους, που παρουσιάστηκαν παραπάνω, είναι ότι επιτρέπουν τη διέλευση του ρεύματος και κατά την αντίθετη φορά, όταν η αναστροφή τάση που εφαρμόζεται επάνω τους, ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τάση κατάρρευσης η οποία στην περίπτωση αυτή, ονομάζεται «τάση Zener», (Grob, 1997; Gates & Chartrand, 2000; McWhorter & Evans, 2004; Τόμπρας, 2005; Boylestad, 2006; Malvino & Bates, 2006; Τόμπρας, 2006; Boylestad & Nashelsky, 2008; Θεοδορίδης κ.ά., 2009; Φωτόπουλος, 2009; Μάργαρης, 2010; Boylestad & Nashelsky, 2012; Alexander & Sadiku, 2013; Basis, 2013; Edminister, 2013; Malvino & Bates, 2013; Χαριτάντης, 2013; Καραγιάννη κ.ά., 2014; Τόμπρας κ.ά., 2014; Χαριτάντης, 2014). Ο τρόπος με τον οποίο συμβολίζεται μία δίοδος Zener μέσα σε ένα κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 5.5.

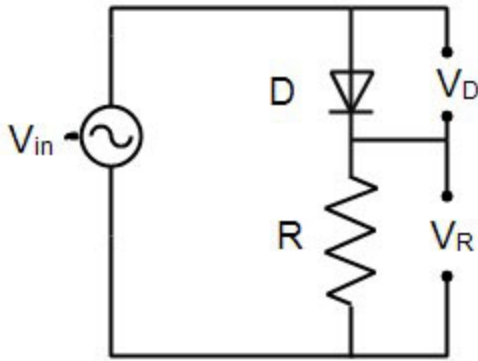


Σχήμα 5.5: Συμβολισμός διόδου Zener σε ηλεκτρονικό κύκλωμα.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συμπεριφορά των διόδων Zener κατά την ορθή πόλωση είναι ακριβώς η ίδια με αυτή των απλών διόδων, π.χ. πυριτίου, γερμανίου, όπως περιγράφεται παραπάνω. Δηλαδή ουσιαστικά, δεν άγουν μέχρι η τάση να προσεγγίσει την τάση κατωφλίου τους και από εκεί και μετά, άγουν, ακολουθώντας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των απλών διόδων. Αντίστοιχα, το διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η χαρακτηριστική τάσης στα άκρα της διόδου -ρεύμα που τη διαρρέει- έχει ακριβώς τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά με τη χαρακτηριστική της απλής διόδου του Σχήματος 5.4, με τη μόνη διαφορά ότι η τάση κατάρρευσης της απλής διόδου έχει αντικατασταθεί από την τάση Zener και η τιμή της είναι σχετικά μικρή (σε σχέση με την τάση κατάρρευσης της απλής διόδου) και συγκρίσιμη με αυτή της τάσης κατωφλίου. Η τάση Zener αποτελεί κατασκευαστικό χαρακτηριστικό των συγκεκριμένων διόδων και βάση του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού μεγέθους, μπορεί κάποιος να τις προμηθευτεί από το εμπόριο, π.χ. Zenertάσης 9.1 Volts, σημαίνει ότι αφορά δίοδο Zener με τάση Zenerίση με 9.1 Volts, (McWhorter & Evans, 2004; Τόμπρας, 2005; Malvino & Bates, 2006; Τόμπρας, 2006; Malvino & Bates, 2013; Καραγιάννη κ.ά., 2014; Τόμπρας κ.ά., 2014).

5.2. Χαρακτηριστική διόδου σε παλμογράφο

Η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος που έχει σχεδιαστεί στο Σχήμα 5.4 μπορεί, ποιοτικά, να ληφθεί στην οθόνη του παλμογράφου. Αναφέρεται η λέξη «ποιοτικά» γιατί ο παλμογράφος δεν μπορεί να μετρήσει απευθείας ρεύμα. Έτσι, αυτό που μπορεί να γίνει, είναι να μετρηθεί η τάση στα άκρα μίας, γνωστής τιμής, ωμικής αντίστασης, R , η οποία θα βρίσκεται σε σειρά με τη δίοδο και επομένως στη συνέχεια να εμφανιστεί στην οθόνη του παλμογράφου η χαρακτηριστική τάσης στα άκρα της αντίστασης – τάσης στα άκρα της διόδου, η οποία όμως, μέσω του νόμου του Ohm θα μπορεί να αποδώσει τη χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος στη δίοδο, (Τόμπρας, 2005; Τόμπρας, 2006; Τόμπρας κ.ά., 2014). Το κύκλωμα μέσω του οποίου μπορεί να ληφθεί η χαρακτηριστική της διόδου, σε παλμογράφο, είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



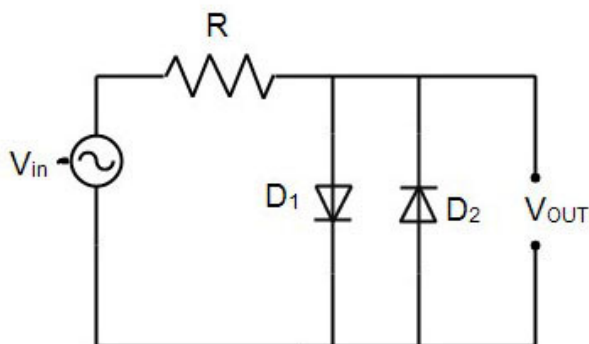
Σχήμα 5.6: Κύκλωμα για τη λήψη της χαρακτηριστικής της διόδου, D , στον παλμογράφο.

Η χαρακτηριστική που ενδιαφέρει να λάβουμε, σύμφωνα με την καμπύλη που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5.4, θα πρέπει στον οριζόντιο άξονα του παλμογράφου να απεικονιστεί η τάση στα άκρα της διόδου και στον οριζόντιο το ρεύμα που την διαρρέει. Όμως, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο παλμογράφος μπορεί να μετρά μόνο τάση και όχι ρεύμα. Επομένως θα πρέπει να μπορεί να μετρηθεί και να απεικονιστεί μία τάση μέσω της οποίας θα υπολογίζεται το ρεύμα που διαρρέει τη diode. Έτσι, στο κύκλωμα του Σχήματος 5.6 το ρεύμα που διαρρέει την diode, I_D , θα είναι ίσο με το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση I_R , σύμφωνα με τον 1^ο κανόνα του Kirchhoff. Επίσης, από τον νόμο του Ohm, γνωρίζουμε ότι το ρεύμα που θα διαρρέει την αντίσταση, R , θα είναι ανάλογο της τάσης στα άκρα της αντίστασης, V_R . Άρα για τη λήψη της χαρακτηριστικής, συνδέουμε το 1ο κανάλι του παλμογράφου, Channel1, στα άκρα της διόδου για να μετρήσει το V_D και το 2ο κανάλι του παλμογράφου, Channel2, στα άκρα της αντίστασης, R , για να μετρήσει το V_R και θέτουμε τον παλμογράφο σε λειτουργία X-Y, δηλαδή να απεικονίζει και στον οριζόντιο άξονα και στον κατακόρυφο, τάση, (Τόμπρας, 2005; Τόμπρας, 2006; Τόμπρας κ.ά., 2014).

5.3. Μελέτη κυκλωμάτων με διόδους

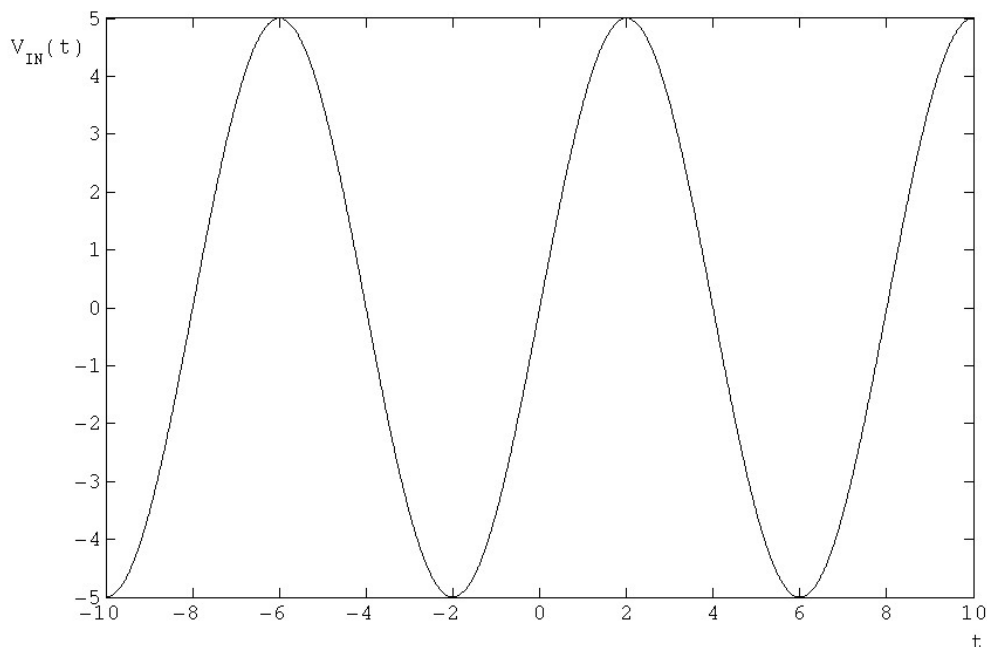
5.3.1. Κύκλωμα 1ο

Ας θεωρήσουμε το κύκλωμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7 και περιλαμβάνει δύο διόδους, D_1 και D_2 , που έχουν συνδεθεί παράλληλα μεταξύ τους και είναι τοποθετημένες με αντίθετη φορά η μία σε σχέση με την άλλη καθώς και μία ωμική αντίσταση R . Το κύκλωμα τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη πηγή τάσης.



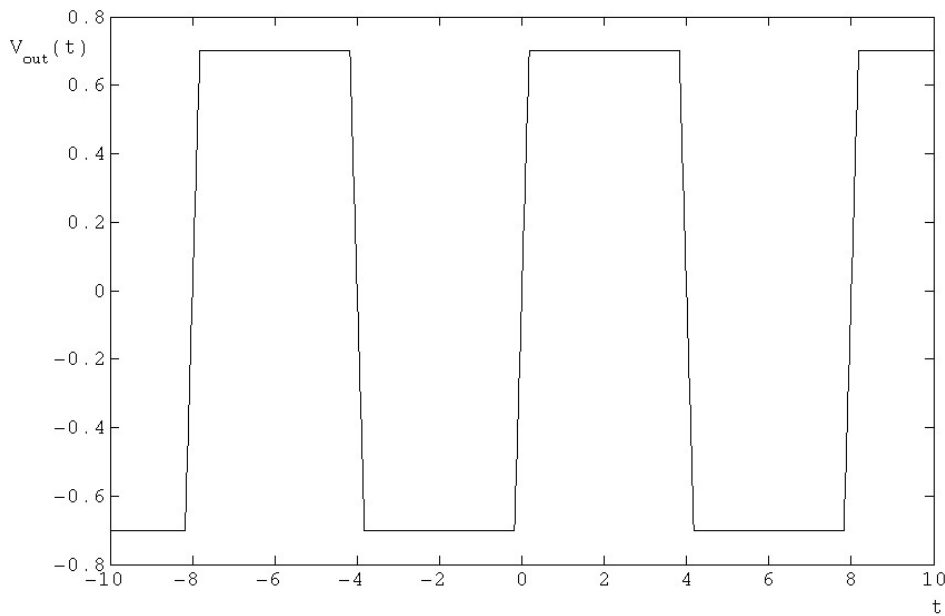
Σχήμα 5.7: 1^ο κύκλωμα με παράλληλη συνδεσμολογία διόδων.

Ας θεωρήσουμε ότι η τάση εισόδου είναι μια κυματομορφή ημιτονοειδούς μορφής με πλάτος $V_{in,0} = 5$ Volts και ότι η τάση κατωφλίου του των διόδων D_1 και D_2 είναι $V_{D1} = V_{D2} = 0.7$ Volts. Όταν συνδέσουμε την είσοδο στο κύκλωμα, όταν η τάση είναι στη θετική ημιπερίοδο και μικρότερη την V_{D1} , τότε η διάδος D_1 είναι ορθά πολωμένη αλλά δεν άγει ενώ η D_2 είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν άγει, επίσης. Άρα το κύκλωμα δεν θα διαρρέεται από ρεύμα και έτσι για την τάση εξόδου του θα ισχύει: $V_{out} = V_{in}$. Όταν η τάση εισόδου ξεπεράσει τα $V_{D1} = 0.7$ Volts κατά τη θετική ημιπερίοδο, τότε η D_1 θα αρχίσει να άγει και επομένως θα διατηρεί σταθερά στα άκρα της τάση ίση με V_{D1} , ενώ η D_2 θα παραμένει ανάστροφα πολωμένη, άρα δεν θα άγει και επομένως θα έχει στα άκρα της την ίδια τάση με την D_1 . Άρα η τάση εξόδου θα είναι: $V_{out} = V_{D1} = 0.7$ Volts και στα άκρα της αντίστασης R θα μετράται διαφορά δυναμικού ίση με: $V_R = V_{in} - V_{D1}$. Άρα, στην περίπτωση αυτή η τάση στα άκρα της αντίστασης R θα είναι ίση με 4.3 Volts.

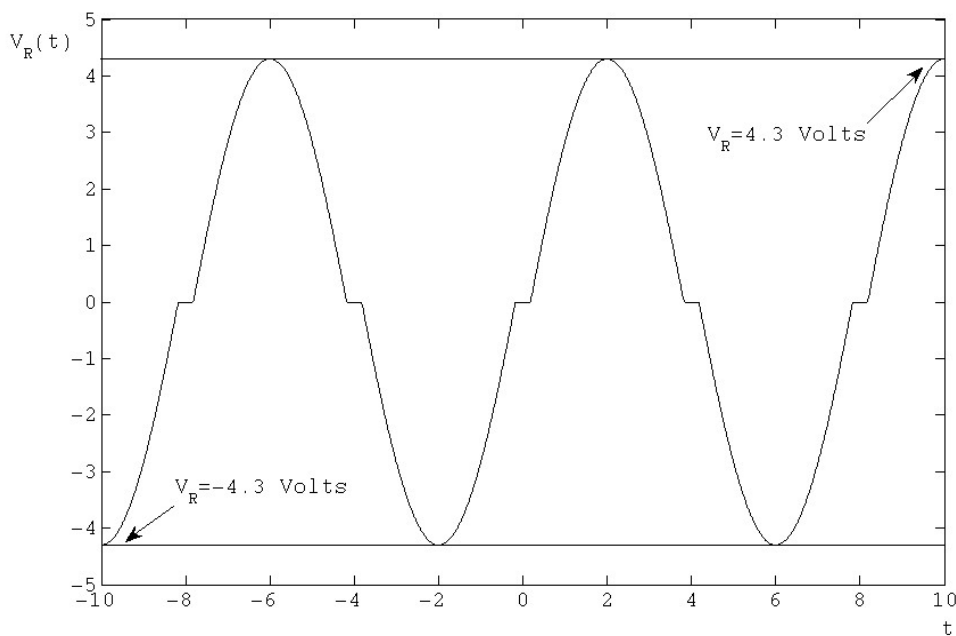


Σχήμα 5.8: Κυματομορφή εισόδου, $V_{in}(t)$, του κυκλώματος του Σχήματος 5.7.

Στην αρνητική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου θα παρατηρούμε την ίδια συμπεριφορά σε σχέση με τη θετική ημιπερίοδο αλλά τώρα θα άγει η διάδος D_2 , για τάσεις μεγαλύτερες, κατά απόλυτη τιμή, από 0.7 Volts, ενώ η διάδος D_1 δεν θα άγει σε καμία χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της αρνητικής ημιπεριόδου. Επομένως αν η κυματομορφή του σήματος εισόδου, V_{in} , είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 5.8, τότε η κυματομορφή του σήματος εξόδου, V_{out} , που θα λαμβάνεται στα άκρα των δύο παράλληλα συνδεδεμένων διόδων όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7, θα είναι αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.9. Αντίστοιχα, η κυματομορφή που θα λαμβάνεται στα άκρα της αντίστασης R θα είναι αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10 και είναι φανερό ότι αθροιζόμενη με την τάση εξόδου, V_{out} , αποδίδουν τη συνολική τάση εισόδου, όπως ήταν απόλυτα αναμενόμενο.



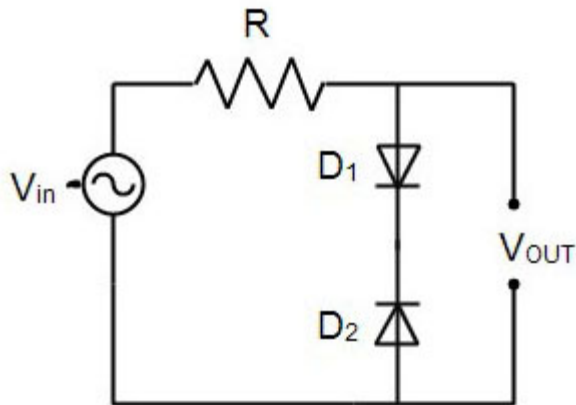
Σχήμα 5.9: Κυματομορφή εξόδου, $V_{out}(t)$, του κυκλώματος του Σχήματος 5.7.



Σχήμα 5.10: Κυματομορφή της τάσης $V_R(t)$, που λαμβάνεται στα άκρα της αντίστασης R του κυκλώματος του Σχήματος 5.7.

5.3.2. Κύκλωμα 2ο

Ας θεωρήσουμε το κύκλωμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11 και περιλαμβάνει δύο διόδους, D_1 και D_2 , που έχουν συνδεθεί σε σειρά μεταξύ τους και είναι τοποθετημένες με αντίθετη φορά η μία σε σχέση με την άλλη, καθώς και μία ωμική αντίσταση R . Το κύκλωμα έχει ως είσοδο, V_{in} , μια εναλλασσόμενη πηγή τάσης, ενώ η έξοδός του, V_{out} , λαμβάνεται στα άκρα των δύο σε σειρά συνδεδεμένων διόδων.



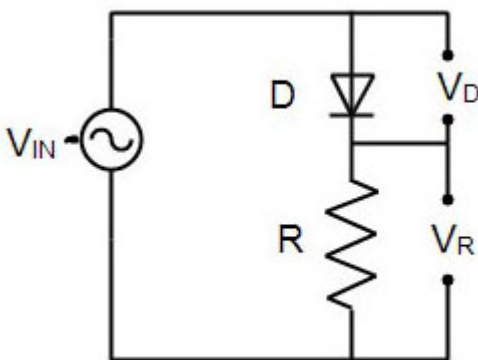
Σχήμα 5.11: 2^ο κύκλωμα με διόδους συνδεδεμένες σε σειρά.

Στο κύκλωμα αυτό παρατηρούμε ότι ανεξάρτητα από το πλάτος του σήματος της τάσης εισόδου δεν μπορεί να υπάρξει ροή ρεύματος διαμέσου των διόδων. Επομένως, στο κύκλωμα αυτό είναι σαν να υπάρχει ένας ανοιχτός διακόπτης εκεί που έχουν τοποθετηθεί οι δύο διόδοι σε σειρά. Άρα, η τάση εξόδου θα είναι μονίμως ίση με την τάση εισόδου, δηλαδή θα ισχύει: $V_{out}=V_{in}$. Επίσης, η διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίστασης θα είναι μονίμως μηδέν, δεδομένου ότι στο κύκλωμα δεν παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Θα ισχύει δηλαδή: $V_R=0$ Volts.

5.4. Πειραματικό μέρος

5.4.1. Κύκλωμα 1^ο

Να υλοποιηθεί το κύκλωμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.12 και περιλαμβάνει μία δίοδο, D , που έχει συνδεθεί σε σειρά με μία ωμική αντίσταση $R=1\text{ K}\Omega$. Το κύκλωμα δέχεται ως είσοδο, V_{IN} , μια εναλλασσόμενη πηγή τάσης, ενώ η διαφορά δυναμικού στα άκρα της διόδου συμβολίζεται με V_D , και στα άκρα της ωμικής αντίστασης με V_R .



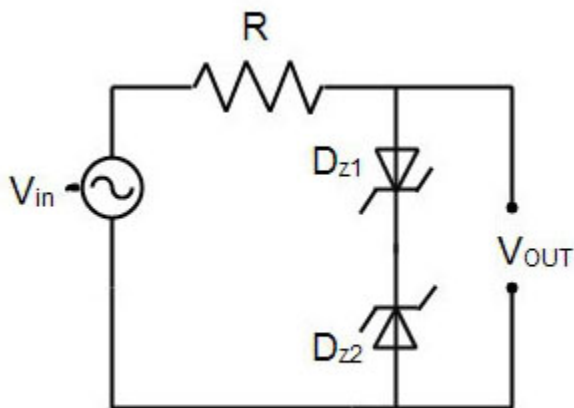
Σχήμα 5.12: 1^ο κύκλωμα για υλοποίηση στο Εργαστήριο.

Στην είσοδο του κυκλώματος του Σχήματος 5.12, V_{IN} να εφαρμοστεί ημιτονικό σήμα πλάτους 5 Volts και συχνότητας 1KHz.

- i) Να υπολογιστεί θεωρητικά η κυματομορφή στα άκρα της διόδου, V_D . Στη συνέχεια, με χρήση του παλμογράφου να απεικονιστεί η κυματομορφή στα άκρα της διόδου και να γίνει σύγκριση με την αναμενόμενη μορφή που έχει υπολογιστεί θεωρητικά.
- ii) Να υπολογιστεί θεωρητικά η κυματομορφή στα άκρα της ωμικής αντίστασης, V_R . Τι θα συμβεί αν αντικατασταθεί η αντίσταση R με μία άλλη με τιμή $100\ \Omega$;
- iii) Να απεικονιστεί στον παλμογράφο η κυματομορφή τάσης στα άκρα της αντίστασης. Τι παρατηρείτε σχετικά με τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.
- iv) Να απεικονιστεί στον παλμογράφο η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος της διόδου, με τη διαδικασία που περιγράφηκε στη θεωρία. Τι παρατηρείτε; Έχει διαφορές από τη μορφή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4; Γιατί; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.
- v) Να αντικατασταθεί η απλή διόδος του κυκλώματος με μία διόδο Zener με τάση Zener 3.3 Volts . Υπολογίστε και σχεδιάστε θεωρητικά τη νέα χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος. Στη συνέχεια, με τη χρήση του παλμογράφου, με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στο θεωρητικό κομμάτι της άσκησης, απεικονίστε τη χαρακτηριστική στην οθόνη του. Τι παρατηρείτε σχετικά με το θεωρητικά αναμενόμενο αποτέλεσμα; Δικαιολογήστε την απάντησή σας και σε σχέση με το βήμα (iv) της παρούσας άσκησης.

5.4.2. Κύκλωμα 2^ο

Να υλοποιηθεί το κύκλωμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.13 και περιλαμβάνει δύο διόδους Zener, D_{z1} και D_{z2} , με ίση μεταξύ τους τάση Zener, $V_z = 3.3\text{ Volts}$, συνδεδεμένες σε σειρά μεταξύ τους, καθώς και με μία ωμική αντίσταση $R = 1\text{ K}\Omega$. Το κύκλωμα δέχεται ως είσοδο, V_{in} , μια εναλλασσόμενη πηγή τάσης, ενώ η διαφορά δυναμικού στα άκρα της ωμικής αντίστασης συμβολίζεται με V_R . Η έξοδος του κυκλώματος λαμβάνεται στα άκρα των διόδων Zener.



Σχήμα 5.13: 2^ο κύκλωμα για υλοποίηση στο Εργαστήριο.

Στην είσοδο του κυκλώματος του Σχήματος 5.13, V_{in} , να εφαρμοστεί ημιτονικό σήμα πλάτους 6 Volts και συχνότητας 1 KHz .

- i) Να υπολογιστεί θεωρητικά η κυματομορφή στα άκρα των διόδων Zener, V_{out} . Στη συνέχεια, με χρήση του παλμογράφου να απεικονιστεί η κυματομορφή στα άκρα των διόδων Zener και να γίνει σύγκριση με την αναμενόμενη μορφή που έχει υπολογιστεί θεωρητικά. Τι παρατηρείτε; Δικαιολογήστε τις διαφορές που τυχόν υπάρχουν μεταξύ της θεωρητικά αναμενόμενης τιμής και της μετρούμενης στον παλμογράφο.
- ii) Να υπολογιστεί θεωρητικά η κυματομορφή στα άκρα της ωμικής αντίστασης, V_R . Τι θα συμβεί αν αντικατασταθεί η αντίσταση R με μία άλλη με τιμή $100\ \Omega$;

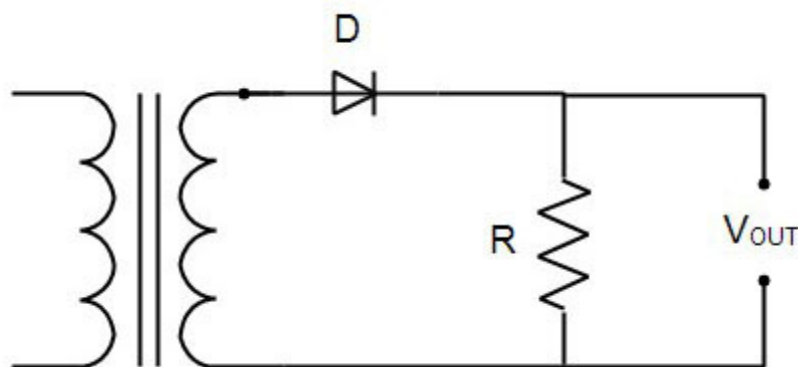
- iii) Να απεικονιστεί στον παλμογράφο η κυματομορφή τάσης στα άκρα της αντίστασης. Τι παρατηρείτε σχετικά με τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή που υπολογίσατε στο ερώτημα (ii); Δικαιολογήστε την απάντησή σας.
- iv) Να αντικατασταθεί η δίοδος Zener, D_{z1} , του κυκλώματος με μία απλή δίοδο. Υπολογίστε και σχεδιάστε θεωρητικά και απεικονίστε μέσω του παλμογράφου όλα τα παραπάνω ερωτήματα της παρούσας άσκησης από το (i) έως το (iii). Δικαιολογήστε τις απαντήσεις σας όπου υπάρχουν αποκλίσεις σε σχέση με τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές.

5.4.3. Κύκλωμα 3^ο

Να υλοποιηθεί το κύκλωμα απλής ανόρθωσης (ημιανόρθωσης) τάσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.14 και περιλαμβάνει μία δίοδο, D , και μια αντίσταση $R = 1\text{ K}\Omega$. Το κύκλωμα δέχεται ως είσοδο, V_{in} , μια εναλλασσόμενη πηγή τάσης η οποία προέρχεται από το δευτερεύον ενός μετασχηματιστή, ενώ η διαφορά δυναμικού στα άκρα της ωμικής αντίστασης, συμβολίζεται με V_R και αποτελεί την έξοδο του κυκλώματος απλής ανόρθωσης.

Στην είσοδο του κυκλώματος του Σχήματος 5.14, V_{in} , να εφαρμοστεί ημιτονικό σήμα πλάτους 4 Volts και συχνότητας 500 Hz.

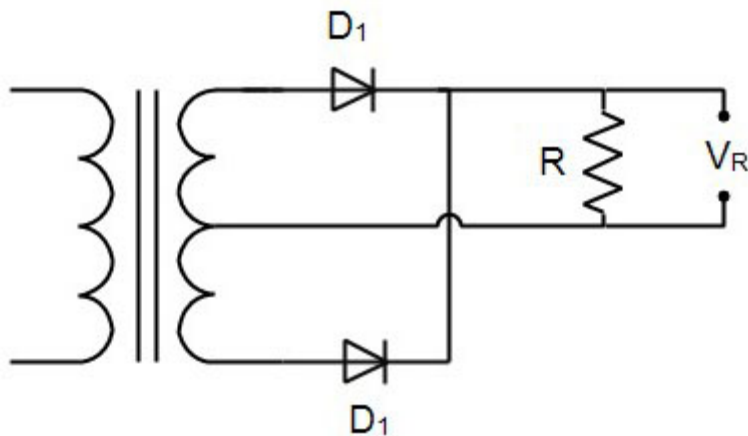
- i) Να υπολογιστεί αναλυτικά η μορφή του σήματος εξόδου που λαμβάνεται στα άκρα της αντίστασης R .
- ii) Να συνδεθεί το ένα από τα δύο κανάλια του παλμογράφου στην είσοδο του κυκλώματος (δηλαδή στο δευτερεύον του μετασχηματιστή) και το άλλο στην έξοδο του κυκλώματος ημιανόρθωσης, δηλαδή στα άκρα της αντίστασης. Να απεικονιστούν οι κυματομορφές εισόδου και εξόδου ταυτόχρονα στην οθόνη του παλμογράφου. Παρατηρείτε διαφορές σε σχέση με το αναμενόμενο θεωρητικό αποτέλεσμα που υπολογίσατε στο ερώτημα (i) του πειράματος αυτού; Δικαιολογήστε τις όποιες διαφορές παρατηρείτε.
- iii) Τι θα συμβεί αν τοποθετηθεί η δίοδος με αντίστροφη φορά; Δικαιολογήστε την απάντησή σας και δείτε στον παλμογράφο τι ακριβώς συμβαίνει.
- iv) Τι θα συνέβαινε αν χρησιμοποιούσαμε αντί για την απλή δίοδο μία δίοδο Zener με τάση Zener ίση με 3.3 Volts; Υπολογίστε θεωρητικά το αποτέλεσμα και στη συνέχεια δείτε το και στην οθόνη του παλμογράφου. Δικαιολογήστε τις διαφορές ανάμεσα στα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα και σε αυτά που παρατηρείτε στον παλμογράφο.
- v) Τι θα συνέβαινε αν χρησιμοποιούσαμε αντί για την απλή δίοδο μία δίοδο Zener με τάση Zener ίση με 5.1 Volts; Υπολογίστε θεωρητικά το αποτέλεσμα και στη συνέχεια δείτε το και στην οθόνη του παλμογράφου. Δικαιολογήστε τις διαφορές ανάμεσα στα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα και σε αυτά που παρατηρείτε στον παλμογράφο.



Σχήμα 5.14: Κύκλωμα απλής ανόρθωσης.

5.4.4. Κύκλωμα 4^ο

Να υλοποιηθεί το κύκλωμα διπλής ανόρθωσης τάσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.15 και περιλαμβάνει δύο διόδους, D_1 και D_2 , και μια αντίσταση $R = 1\text{ K}\Omega$. Το κύκλωμα δέχεται ως είσοδο, εναλλασσόμενη, συμμετρική, πηγή τάσης η οποία προέρχεται από έναν μετασχηματιστή με μεσαία λήψη, ενώ η διαφορά δυναμικού στα άκρα της ωμικής αντίστασης συμβολίζεται με V_R και αποτελεί την έξοδο του κυκλώματος διπλής ανόρθωσης, με μετασχηματιστή με μεσαία λήψη.



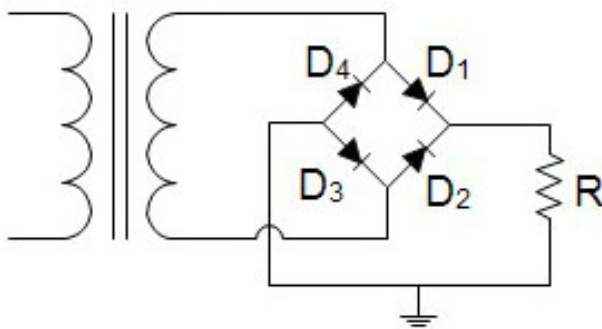
Σχήμα 5.15: Κύκλωμα διπλής ανόρθωσης με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης.

Στην είσοδο του κυκλώματος του Σχήματος 5.15, V_{in} , να εφαρμοστεί συμμετρική εναλλασσόμενη τάση πλάτους 10 Volts και συχνότητας 60 Hz.

- Να υπολογιστεί θεωρητικά και να σχεδιαστεί η μορφή της τάσης V_1 , καθώς και της V_2 στο ίδιο διάγραμμα και να σχολιαστεί η μορφή τους.
- Να υπολογιστεί θεωρητικά η μορφή της τάσης στα άκρα της αντίστασης R και να συγκριθεί με τις τάσεις V_1 και V_2 .
- Να συνδεθεί ο παλμογράφος στα άκρα της αντίστασης R και να παρατηρηθεί η κυματομορφή τάσης στα άκρα της. Τι παρατηρείτε σε σχέση με τη θεωρητική μελέτη του ερωτήματος (ii) της παρούσας άσκησης; Υπάρχει διαφορά μεταξύ του αναμενόμενου θεωρητικού αποτελέσματος και αυτού που περιγράφεται στην οθόνη του παλμογράφου; Δικαιολογήστε τις όποιες αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.
- Να εξηγηθεί συνοπτικά η λειτουργία του κυκλώματος με βάση τη μορφή των κυματομορφών V_1 , V_2 και V_R .

5.4.5. Κύκλωμα 5^ο

Να υλοποιηθεί το κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης τάσης με γέφυρα διόδων, που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.16 και περιλαμβάνει τέσσερις διόδους, $D_1 - D_4$, και μια αντίσταση $R = 1\text{ K}\Omega$. Η συνδεσμολογία των τεσσάρων διόδων όπως περιγράφονται στο Σχήμα 5.16, ονομάζεται «συνδεσμολογία γέφυρας διόδων» και επιτυγχάνει πλήρη ανόρθωση του εναλλασσόμενου σήματος. Το κύκλωμα δέχεται ως είσοδο, V_{in} , μια εναλλασσόμενη τάση η οποία προέρχεται από το πρωτεύον ενός μετασχηματιστή, ενώ η διαφορά δυναμικού στα άκρα της ωμικής αντίστασης, R , συμβολίζεται με V_R και αποτελεί την έξοδο του κυκλώματος πλήρους ανόρθωσης με γέφυρα διόδων.



Σχήμα 5.16: Κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης τάσης με γέφυρα διόδων.

Στην είσοδο του κυκλώματος του Σχήματος 5.16, V_{in} , να εφαρμοστεί ημιτονικό σήμα πλάτους 5 Volts και συχνότητας 1 KHz.

- i) Να υπολογιστεί αναλυτικά η μορφή του σήματος εισόδου, V_{in} , και η μορφή του σήματος εξόδου, V_R , του κυκλώματος πλήρους ανόρθωσης που φαίνεται στο Σχήμα 5.16.
- ii) Να συνδεθεί ο παλμογράφος στα άκρα της αντίστασης R και να απεικονιστεί η κυματομορφή της τάσης εξόδου, V_R . Συμπίπτει το αποτέλεσμα αυτό με εκείνο που υπολογίσατε αναλυτικά στα πλαίσια του ερωτήματος (i) της παρούσας άσκησης;
- iii) Μπορούμε να δούμε συγχρόνως και την τάση εισόδου, V_I , και την τάση εξόδου του κυκλώματος πλήρους ανόρθωσης, V_R , στην οθόνη του παλμογράφου; Δικαιολογήστε αναλυτικά την απάντησή σας.
- iv) Ποιες σημαντικές διαφορές ως προς την έξοδο στην αντίσταση R παρουσιάζει το κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης τάσης, που φαίνεται στο Σχήμα 5.16, με αυτό της διπλής ανόρθωσης που φαίνεται στο Σχήμα 5.15;
- v) Ποιες σημαντικές διαφορές ως προς την έξοδο στην αντίσταση R παρουσιάζει το κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης τάσης, που φαίνεται στο Σχήμα 5.16, με αυτό της απλής ανόρθωσης που φαίνεται στο Σχήμα 5.14;
- vi) Να τοποθετηθεί παράλληλα στην αντίσταση, R , πυκνωτής χωρητικότητας, 100 μF . Ποιο είναι το ποιοτικό αποτέλεσμα που αναμένεται να επιφέρει η προσθήκη του πυκνωτή; Συνδέστε στον παλμογράφο την έξοδο του κυκλώματος για να επιβεβαιώσετε ή όχι, το αποτέλεσμα που αναμένετε θεωρητικά. Τι αλλαγή παρατηρείται στην κυματομορφή και πώς ονομάζεται η διαδικασία αυτή;
- vii) Αντικαταστήστε τον πυκνωτή με άλλον, μεγαλύτερης χωρητικότητας. Τι περιμένετε να δείτε στην έξοδο σε σχέση με το προηγούμενο ερώτημα; Τι παρατηρείτε όταν συνδέετε τον παλμογράφο;

Βιβλιογραφία – Αναφορές

- Alexander, C.K. & Sadiku, M.N.O. (2013). Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Κυκλώματα. Εκδ. ΤΖΙΟΛΑ, 4^η έκδοση.
- Basis, P. (2013). *Introduction to Electronics: A Basic Approach*. Prentice Hall, 1st edition.
- Boylestad, R.L. & Nashelsky, L. (2012). *Ηλεκτρονικές Διατάξεις και Θεωρία Κυκλωμάτων*. Εκδ. ΤΖΙΟΛΑ, 10^η Έκδοση.
- Boylestad, R.L. & Nashelsky, L. (2008). *Electronic Devices and Circuit Theory*. Pearson, 10th edition.
- Boylestad, R.L. (2006). *Introductory Circuit Analysis*. Prentice Hall.
- Cathey, J.J. (2002). *Electronic Devices and Circuits, Schaum's outlines*. McGraw-Hill Education, 2th Edition.
- Gates, E. & Chartrand, L. (2000). *Introduction to Electronics*. Delmar Cengage Learning, 4th Edition.
- Grob, B. (1997). *Basic Electronics*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 8th Edition.
- Θεοδωρίδης, Γ., Κοσμάτοπουλος, Κ., Λαόπουλος, Θ., Νικολαΐδης, Σ., Παπαθανασίου, Κ. & Σίσκος, Σ. (2009). *Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρονικής*. Θεσσαλονίκη: Εκδ. Σύγχρονη Παιδεία.
- Καραγιάννη, Ε.Α., Σκλαβούνου, Μ.Σ., Τσιγκόπουλος, Α.Δ. & Φαφαλιός, Μ.Η. (2014). *Ασκήσεις Εργαστηρίου Ηλεκτρονικής 3ου Έτους*. Πειραιάς: Σχολή Ναυτικών Δοκίμων.
- Malvino, A. & Bates, D.J. (2013). *Ηλεκτρονική: Αρχές και Εφαρμογές*. Εκδ. ΤΖΙΟΛΑ, 7^η έκδοση.
- Malvino, A. & Bates, D.J. (2006). *Electronic Principles*. McGraw Hill Higher Education, 7th Edition.
- Μάργαρης, Ν.Ι., Σαραφίδου, Σ.Χ. & Δάιος, Α.Δ. (2010). *Ανάλυση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων Φροντιστηριακές Ασκήσεις*. Εκδ. ΤΖΙΟΛΑ.
- Μάργαρης, Ν.Ι. (2010). *Ανάλυση Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων*. Εκδ. ΤΖΙΟΛΑ.
- McWhorter, G. & Evans, A.J. (2004). *Basic Electronics*. Master Publishing, Inc.
- Nahvi, M. & Edminister, J. (2013). *Electric Circuits, Schaum's outlines*. McGraw-Hill Education, 6th edition.
- Τόμπρας, Γ.Σ., Νισταζάκης, Ε.Ε., Λάτσας, Γ.Π. & Κωνσταντόπουλος, Π. (2014). *Εργαστήριο Ηλεκτρονικής Φυσικής για το «Εργαστήριο Κορμού Ι» του Τμήματος Φυσικής*. ΕΚΠΑ.
- Τόμπρας, Γ.Σ., Νισταζάκης, Ε.Ε., Λάτσας, Γ.Π. & Κωνσταντόπουλος, Π. (2014). *Εργαστήριο Ηλεκτρονικής Φυσικής για το «Εργαστήριο Κορμού ΙΙ» του Τμήματος Φυσικής*. ΕΚΠΑ.
- Τόμπρας, Γ.Σ. (2006). *Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική*. Εκδόσεις Δίαυλος.
- Τόμπρας, Γ.Σ. (2005). *Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρονικής Φυσικής*. Έκδοση Πανεπιστημίου Αθηνών.
- Φωτόπουλος, Σ.Δ. (2009). *Συνοπτική Θεωρία Κυκλωμάτων*. Εκδ. Inspiration s.a.
- Χαριτάντης, Γ. (2014). *Ηλεκτρικά Κυκλώματα*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΑΡΑΚΥΝΘΟΣ.
- Χαριτάντης, Γ. (2013). *Ηλεκτρονικά, Γραμμικά Κυκλώματα Συνεχούς Χρόνου*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΑΡΑΚΥΝΘΟΣ.