



ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι

Αναλογικά Ηλεκτρονικά Κυκλώματα

Δίοδοι

Ακαδημαϊκό Έτος: 2026 -- 2027

Τάξη: Γ' Δοκίμων (Μάχιμοι/Μηχανικοί)

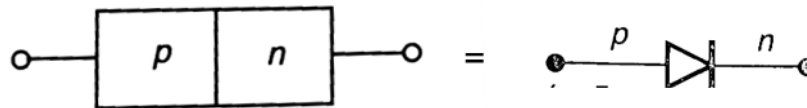
Α. Τσιγκόπουλος, Καθηγητής

Α. Στασινάκης, Επίκουρος Καθηγητής

Γ. Σοβατζίδη, PhD ΕΠΣ

Επαφή p-n

- Η δίοδος ημιαγωγού αποτελεί ένα από τα βασικότερα ηλεκτρονικά στοιχεία.
- Η λειτουργία της βασίζεται στην **επαφή p-n**, η οποία σχηματίζεται όταν μία περιοχή ημιαγωγού τύπου p έρθει σε επαφή με μία περιοχή ημιαγωγού τύπου n.



Ημιαγωγοί

- Οι ημιαγωγοί είναι υλικά των οποίων η ηλεκτρική αγωγιμότητα βρίσκεται μεταξύ της αγωγιμότητας των αγωγών και εκείνης των μονωτών ανάλογα με την θερμοκρασία.
- Το υλικό που χρησιμοποιείται συχνότερα στην κατασκευή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων είναι το **πυρίτιο** (Si).
- Κάθε άτομο πυριτίου διαθέτει τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στιβάδα.
- Στον κρύσταλλο του πυριτίου, κάθε άτομο συνδέεται με τέσσερα γειτονικά άτομα μέσω **ομοιοπολικών δεσμών**, σχηματίζοντας μία σταθερή *κρυσταλλική δομή*.

Ημιαγωγοί

- **Οπή** ονομάζεται η απουσία ενός ηλεκτρονίου από έναν ομοιοπολικό δεσμό και συμπεριφέρεται ως φορέας θετικού ηλεκτρικού φορτίου.
- Σε έναν καθαρό ημιαγωγό, ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ίσος με τον αριθμό των οπών:

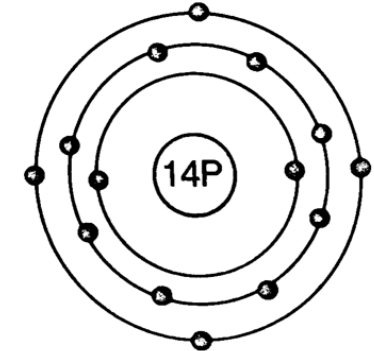
$$n = p = n_i$$

n : η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων

p : η συγκέντρωση των οπών

n_i : η ενδογενής συγκέντρωση φορέων του ημιαγωγού

- Ένας καθαρός ημιαγωγός ονομάζεται **ενδογενής ημιαγωγός** (*intrinsic semiconductor*).

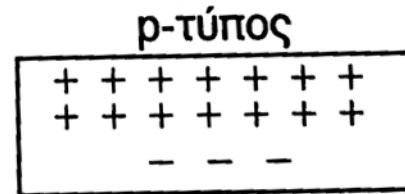
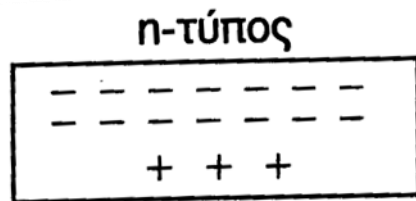


2-8-4

Άτομο Πυριτίου

Προσμίξεις

- **Νόθευση ή εμπλουτισμός:** προσθήκη μικρών ποσοτήτων ξένων ατόμων στον κρύσταλλο, για αύξηση και έλεγχο αγωγιμότητας.
- Τα άτομα που προστίθενται ονομάζονται **προσμίξεις**.
- Χαρακτηριστικά παραδείγματα, ημιαγωγός τύπου n ή τύπου p.



Προσμίξεις

Ημιαγωγός τύπου n (negative)

- Σχηματίζεται με την προσθήκη ατόμων που διαθέτουν πέντε ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στιβάδα, π.χ., φώσφορος, αρσενικό.
- Ονομάζονται **δότες**, επειδή προσφέρουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στον ημιαγωγό.
- Τα ηλεκτρόνια αποτελούν τους **φορείς πλειονότητας**.
- Οι οπές αποτελούν τους **φορείς μειονότητας**.
- Ο ημιαγωγός τύπου n είναι συνολικά ηλεκτρικά ουδέτερος.

Προσμίξεις

Ημιαγωγός τύπου p (positive)

- Σχηματίζεται με την προσθήκη ατόμων που διαθέτουν τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στιβάδα, π.χ., το βόριο.
- Ονομάζονται **αποδέκτες**, καθώς μπορούν να δεχτούν ηλεκτρόνια από γειτονικό δεσμό.
- Οι οπές αποτελούν τους **φορείς πλειονότητας**.
- Τα ηλεκτρόνια αποτελούν τους **φορείς μειονότητας**.
- Ο ημιαγωγός τύπου p είναι συνολικά ηλεκτρικά ουδέτερος.

Εσωτερικό Ηλεκτρικό Πεδίο

- Τα ακίνητα θετικά ιόντα στην πλευρά n και τα ακίνητα αρνητικά ιόντα στην πλευρά p δημιουργούν ένα **εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο**.
- **Δυναμικό κατωφλίου (V_γ):**

$$V_\gamma = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

N_A : η συγκέντρωση των προσμίξεων αποδεκτών,

N_D : η συγκέντρωση των προσμίξεων δοτών,

n_i : η ενδογενής συγκέντρωση φορέων,

V_T : η θερμική τάση.

Εσωτερικό Ηλεκτρικό Πεδίο

- Θερμική τάση

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

όπου k είναι η σταθερά του Boltzmann

T η απόλυτη θερμοκρασία και q το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

Σε θερμοκρασία δωματίου, περίπου 300 K, ισχύει:

$$V_T \approx 25.9 \text{ mV}$$

Επίδραση Εξωτερικής Τάσης

Ορθή πόλωση: η επαφή είναι ορθά πολωμένη όταν η περιοχή p συνδέεται με τον θετικό πόλο της πηγής και η περιοχή n με τον αρνητικό πόλο.

Ανάστροφη πόλωση: η επαφή είναι ανάστροφα πολωμένη, όταν η περιοχή p συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της πηγής και η περιοχή n με τον θετικό πόλο.

Ιδανική και Πραγματική Δίοδος

Δίοδος: μη γραμμικό ηλεκτρονικό στοιχείο δύο ακροδεκτών, το οποίο παρουσιάζει πολύ μικρή αντίσταση κατά την ορθή πόλωση και πολύ μεγάλη αντίσταση κατά την ανάστροφη πόλωση.

Οι δύο ακροδέκτες της διόδου ονομάζονται:

- **άνοδος** (A), η οποία αντιστοιχεί στην περιοχή τύπου p,
- **κάθοδος** (K), η οποία αντιστοιχεί στην περιοχή τύπου n.
- Ως θετική τάση της διόδου (v_D) ορίζεται η τάση της ανόδου ως προς την κάθοδο:

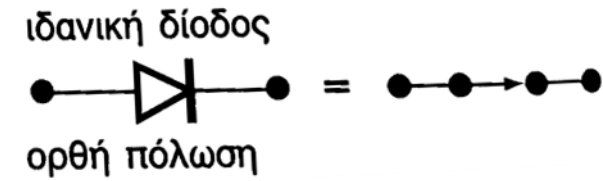
$$v_D = v_A - v_K$$

Ιδανική και Πραγματική Δίοδος

Η ασύμμετρη συμπεριφορά της διόδου επιτρέπει τη χρήση της σε εφαρμογές, όπως:

- η μετατροπή εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή,
- ο περιορισμός ή η μετατόπιση της στάθμης ενός σήματος,
- η σταθεροποίηση τάσης,
- η προστασία κυκλωμάτων από λανθασμένη πολικότητα ή υπερτάσεις,
- η παραγωγή φωτός.

Επίδραση Εξωτερικής Τάσης



Ορθή πόλωση

Η τάση της ανόδου είναι μεγαλύτερη από την τάση της καθόδου:

$$v_D > 0$$

Η ιδανική δίοδος άγει και συμπεριφέρεται ως κλειστός διακόπτης ή ως βραχυκύκλωμα. Η τάση στα άκρα της είναι μηδενική:

$$v_D = 0$$

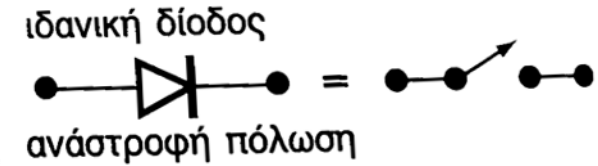
Το ρεύμα μπορεί να λάβει θετική τιμή:

$$i_D > 0$$

Η αντίσταση της ιδανικής διόδου στην κατάσταση αγωγής είναι μηδενική:

$$R_{D,ON} = 0$$

Επίδραση Εξωτερικής Τάσης



Ανάστροφη πόλωση

Η τάση της ανόδου είναι μικρότερη από την τάση της καθόδου

$$v_D < 0$$

Η ιδανική δίοδος δεν άγει και συμπεριφέρεται ως ανοικτός διακόπτης

$$i_D = 0$$

Η αντίστασή της στην κατάσταση αποκοπής θεωρείται άπειρη:

$$R_{D,OFF} \rightarrow \infty$$

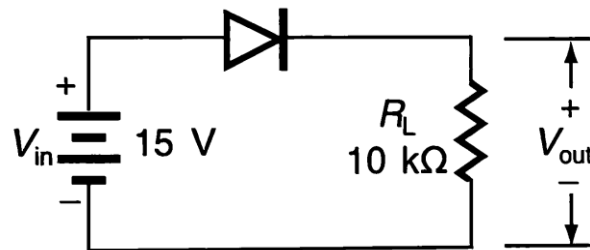
Ανάλυση κυκλώματος με ιδανική δίοδο

1. Υποθέτουμε ότι η δίοδος βρίσκεται σε αγωγή ή σε αποκοπή.
2. Αν βρίσκεται σε αγωγή, την αντικαθιστούμε με βραχυκύκλωμα.
3. Αν βρίσκεται σε αποκοπή, την αντικαθιστούμε με ανοικτό κύκλωμα.
4. Υπολογίζουμε τις τάσεις και τα ρεύματα του κυκλώματος.
5. Ελέγχουμε αν τα αποτελέσματα συμφωνούν με την αρχική υπόθεση.

Ιδανική Δίοδος

Παράδειγμα

Για το παρακάτω κύκλωμα, να υπολογίσετε την τάση εξόδου και το ρεύμα, χρησιμοποιώντας το μοντέλο της ιδανικής διόδου.



Λύση

Η διόδος είναι πολωμένη ορθά, επομένως μπορεί να θεωρηθεί ως κλειστός διακόπτης, και επομένως ισχύει: $V_{out} = V_{in} = 15V$.

Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm, προκύπτει ότι $I = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{15V}{10K\Omega} = 1,5mA$

Πραγματική δίοδος

Στο απλοποιημένο μοντέλο σταθερής πτώσης τάσης, η δίοδος αρχίζει να άγει όταν η τάση (v_D) φτάσει μία χαρακτηριστική τιμή (V_γ), η οποία ονομάζεται **τάση κατωφλίου** ή **τάση έναυσης**.

Τυπικές προσεγγιστικές τιμές είναι:

$$V_\gamma \approx 0.7 \text{ V για δίοδο πυριτίου}$$

$$V_\gamma \approx 0.3 \text{ V για δίοδο γερμανίου}$$

Οι τιμές εξαρτώνται από το ρεύμα, τη θερμοκρασία, το υλικό και την κατασκευή της διόδου.

Πραγματική δίοδος

Κατάσταση αγωγής

Η δίοδος είναι ορθά πολωμένη και άγει. Στο μοντέλο σταθερής πτώσης τάσης θεωρούμε:

$$v_D = V_\gamma$$

Μία πραγματική δίοδος πυριτίου σε αγωγή, μπορεί να αντικατασταθεί προσεγγιστικά από μία πηγή τάσης 0.7 V, με τον θετικό πόλο της προς την άνοδο.

Πραγματική δίοδος

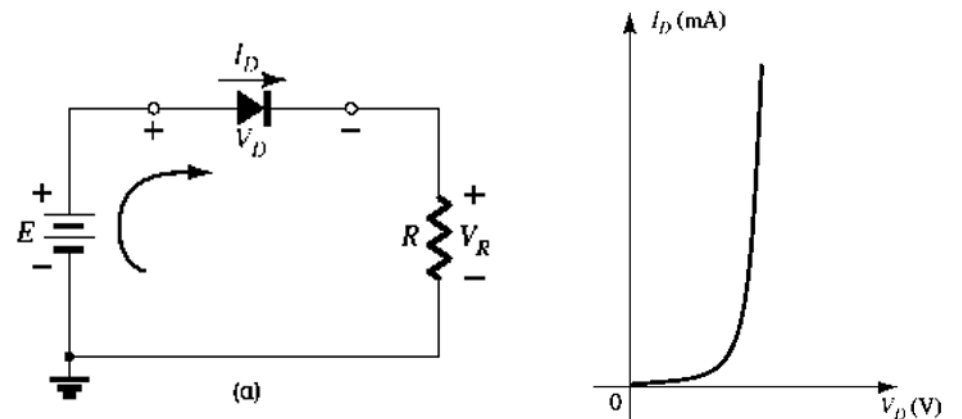
Κατάσταση αποκοπής

Η δίοδος θεωρείται ότι δεν άγει και αντικαθίσταται από ανοικτό κύκλωμα

$$v_D < V_\gamma, i_D \approx 0$$

Χαρακτηριστική I--V

- Η σχέση μεταξύ της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα μιας διόδου και του ρεύματος που τη διαρρέει, περιγράφεται από τη **χαρακτηριστική τάσης--ρεύματος**, γνωστή ως **χαρακτηριστική I--V**.
- Η χαρακτηριστική I--V χωρίζεται σε τρεις βασικές περιοχές λειτουργίας:
 - την περιοχή ορθής πόλωσης,
 - την περιοχή ανάστροφης πόλωσης,
 - την περιοχή κατάρρευσης.



Συνδεσμολογία διόδου σε σειρά: (αριστερά) κύκλωμα, (δεξιά) χαρακτηριστική.

Χαρακτηριστική I--V

- Η χαρακτηριστική I--V μιας πραγματικής διόδου περιγράφεται προσεγγιστικά από την εξίσωση Shockley:

$$i_D = I_S \left(\frac{e^{v_D}}{e^{nV_T}} - 1 \right)$$

i_D : το ρεύμα της διόδου

v_D : η τάση της ανόδου ως προς την κάθοδο

I_S : το ανάστροφο ρεύμα κόρου

n : ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου

V_T : η θερμική τάση

Η εξίσωση Shockley περιγράφει τη λειτουργία της διόδου στην περιοχή ορθής πόλωσης και πριν από την ανάστροφη διάσπαση.

Χαρακτηριστική I--V

Η θερμική τάση δίνεται από τη σχέση:

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

όπου k είναι η σταθερά του Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία και q το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο.

Χαρακτηριστική I--V

Ορθής Πόλωση

Ισχύει:

$$v_D > 0$$

Για θετικές τάσεις αρκετά μεγαλύτερες από τη θερμική τάση, ο όρος -1 στην εξίσωση Shockley μπορεί να παραλειφθεί. Επομένως:

$$i_D \approx I_S \left(\frac{e^{v_D}}{e^{nV_T}} \right)$$

Στις διόδους πυριτίου, το ρεύμα ξεκινάει να γίνεται σημαντικό συνήθως για τάσεις $v_D \approx 0.6--0.7 \text{ V}$.

Η περιοχή στην οποία το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται έντονα ονομάζεται **περιοχή γόνατος** της χαρακτηριστικής.

Χαρακτηριστική I--V

Ανάστροφης Πόλωση

Ισχύει:

$$v_D < 0$$

Για αρνητική τάση με μέτρο αρκετά μεγαλύτερο από τη θερμική τάση, ο εκθετικός όρος της εξίσωσης Shockley γίνεται σχεδόν μηδενικός:

$$\frac{e^{v_D}}{e^{nV_T}} \approx 0$$

Επομένως, $i_D \approx -I_S$ και ονομάζεται **ρεύμα διαρροής**.

Χαρακτηριστική I--V

Αν η ανάστροφη τάση αυξηθεί αρκετά, φτάνει σε μία κρίσιμη τιμή που ονομάζεται **τάση διάσπασης** (V_{BR})

Η διάσπαση αρχίζει όταν:

$$v_D < -V_{BR}$$

Η ανάστροφη διάσπαση μπορεί να προκληθεί από δύο βασικούς μηχανισμούς:

- τη **διάσπαση Zener**
- τη **διάσπαση χιονοστιβάδας**

Χαρακτηριστική I -- V

- Η χαρακτηριστική I -- V αποτελεί το πληρέστερο μοντέλο της στατικής συμπεριφοράς μιας διόδου.
- Τα απλούστερα μοντέλα, όπως η ιδανική δίοδος και το μοντέλο σταθερής πτώσης τάσης, προκύπτουν από κατάλληλες προσεγγίσεις αυτής της χαρακτηριστικής.

Στατική Αντίσταση

- Η χαρακτηριστική της διόδου είναι μη γραμμική, η αντίστασή της δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας.
- Η **στατική αντίσταση** ή **DC αντίσταση** της διόδου σε ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας Q ορίζεται ως:

$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$

Δυναμική Αντίσταση

- Όταν στη δίοδο εφαρμόζεται μία μικρή μεταβολή τάσης γύρω από ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας, χρησιμοποιείται η **δυναμική αντίσταση** ή **αντίσταση μικρού σήματος**. Η δυναμική αντίσταση ορίζεται ως:

$$r_d = \left. \frac{dv_D}{di_D} \right|_Q$$

- Είναι το αντίστροφο της κλίσης της χαρακτηριστικής I-V στο σημείο λειτουργίας Q.
- Από την εξίσωση Shockley και για λειτουργία στην περιοχή ορθής πόλωσης προκύπτει:

$$r_d \approx \frac{nV_T}{I_D}$$

Στατική - Δυναμική Αντίσταση

- Η στατική αντίσταση (R_D) και η δυναμική αντίσταση (r_d) είναι διαφορετικά μεγέθη.
- Η στατική αντίσταση αφορά τον λόγο της συνολικής τάσης προς το συνολικό ρεύμα.
- Η δυναμική αντίσταση αφορά μικρές μεταβολές γύρω από ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας.

Δίοδος Zener

- Ειδικά κατασκευασμένη δίοδος ημιαγωγού, σχεδιασμένη ώστε να λειτουργεί με ασφάλεια στην περιοχή της ανάστροφης διάσπασης
- Η βασική της εφαρμογή είναι η διατήρηση μιας σχεδόν σταθερής τάσης στα άκρα ενός φορτίου.
- Σε αντίθεση με μία κοινή δίοδο, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στην περιοχή ορθής πόλωσης, η δίοδος Zener χρησιμοποιείται συνήθως σε **ανάστροφη πόλωση**:
 - η κάθοδος συνδέεται προς το υψηλότερο δυναμικό.
 - η άνοδος συνδέεται προς το χαμηλότερο δυναμικό.
- Η **τάση Zener** (V_Z) είναι η ανάστροφη τάση στην οποία η δίοδος εισέρχεται στην περιοχή διάσπασης και αρχίζει να άγει σημαντικό ανάστροφο ρεύμα.

Δίοδος Zener

Φαινόμενο Zener

- Σε επαφές με ισχυρή νόθευση, η περιοχή απογύμνωσης είναι πολύ λεπτή.
- Όταν εφαρμοστεί ανάστροφη τάση, δημιουργείται ένα πολύ ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, που επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να διαπεράσουν το ενεργειακό φράγμα μέσω κβαντικού φαινομένου.
- Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται **φαινόμενο Zener** και κυριαρχεί συνήθως σε διόδους με τάση διάσπασης μικρότερη περίπου από 5 V.

Δίοδος Zener

Διάσπαση Χιονοστιβάδας

- Σε επαφές με μικρότερη νόθευση, η περιοχή απογύμνωσης είναι πλατύτερη.
- Οι φορείς που κινούνται μέσα στην περιοχή αυτή επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο και αποκτούν αρκετή ενέργεια, ώστε να απελευθερώσουν νέους φορείς μέσω κρούσεων.
- Οι νέοι φορείς επιταχύνονται με τη σειρά τους και προκαλούν επιπλέον κρούσεις, δημιουργώντας μία διαδικασία πολλαπλασιασμού φορέων, η οποία ονομάζεται **διάσπαση χιονοστιβάδας**.

Δίοδος Zener

Χαρακτηριστική I--V

- Κατά την ορθή πόλωση, η δίοδος Zener συμπεριφέρεται σαν μία κοινή δίοδος πυριτίου. Δηλαδή, ξεκινάει να άγει σημαντικό ρεύμα όταν η τάση ορθής πόλωσης γίνει περίπου:

$$V_F \approx 0.7 V$$

- Κατά την ανάστροφη πόλωση και για τάσεις μικρότερες κατά μέτρο από την τάση Zener, το ρεύμα παραμένει πολύ μικρό:

$$I_Z \approx 0, |V_D| < V_Z$$

Δίοδος Zener

Χαρακτηριστική I--V

Όταν η ανάστροφη τάση φτάσει την τιμή V_Z , το ανάστροφο ρεύμα αυξάνεται απότομα, ενώ η τάση στα άκρα της διόδου μεταβάλλεται ελάχιστα:

$$|V_D| \approx V_Z$$

Η περιοχή αυτή ονομάζεται **περιοχή σταθεροποίησης** ή **περιοχή Zener**.

Δίοδος Zener

Βασικά Χαρακτηριστικά Μεγέθη

- **Ονομαστική τάση Zener (V_Z):** η τάση στα άκρα της διόδου στην περιοχή διάσπασης, μετρημένη για συγκεκριμένο ρεύμα δοκιμής.
- **Ρεύμα δοκιμής (I_{ZT}):** το ρεύμα στο οποίο ο κατασκευαστής καθορίζει την ονομαστική τάση V_Z .
- **Ρεύμα γόνατος (I_{ZK}):** το ελάχιστο περίπου ρεύμα που απαιτείται ώστε η διόδος να βρίσκεται ικανοποιητικά μέσα στην περιοχή σταθεροποίησης.

Δίοδος Zener

Βασικά Χαρακτηριστικά Μεγέθη

- **Μέγιστο ρεύμα ($I_{Z,max}$):** το μεγαλύτερο επιτρεπόμενο ρεύμα Zener, χωρίς υπέρβαση της μέγιστης ισχύος.
- **Μέγιστη ισχύς ($P_{Z,max}$):** η μέγιστη ισχύς, που μπορεί να καταναλώσει με ασφάλεια η δίοδος.
- **Δυναμική αντίσταση (r_Z):** η μικρή αντίσταση, που παρουσιάζει η δίοδος στην περιοχή διάσπασης.

Δίοδος Zener

Βασικά Χαρακτηριστικά Μεγέθη

Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του ρεύματος μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$I_{Z,max} \approx \frac{P_{Z,max}}{V_Z}$$

Ιδανικό Μοντέλο Zener

- Θεωρούμε ότι η δίοδος Zener, όταν λειτουργεί στην περιοχή ανάστροφης διάσπασης, διατηρεί απόλυτα σταθερή τάση:

$$V_D = -V_Z$$

- Η τάση εξόδου ενός κυκλώματος που σταθεροποιείται από ιδανική δίοδο Zener είναι:

$$V_{out} \approx V_Z$$

Πραγματικό Μοντέλο Zener

- Στην πραγματική δίοδο Zener, η τάση δεν παραμένει απολύτως σταθερή όταν μεταβάλλεται το ρεύμα.
- Η μικρή κλίση της χαρακτηριστικής στην περιοχή διάσπασης περιγράφεται μέσω της δυναμικής αντίστασης:

$$r_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z}$$

- Γύρω από το σημείο δοκιμής (V_{ZT}, I_{ZT}), η τάση μπορεί να προσεγγιστεί ως εξής:

$$V_Z \approx V_{ZT} + r_Z (I_Z - I_{ZT})$$

Επίδραση Θερμοκρασίας

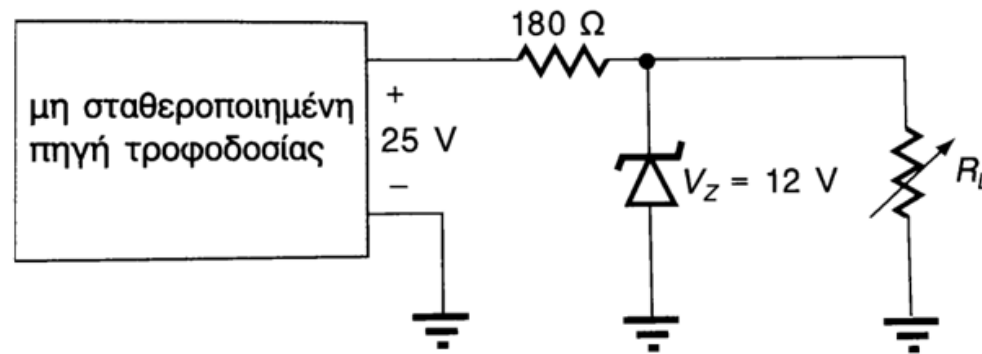
- Η τάση Zener μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Η μεταβολή αυτή περιγράφεται μέσω του **θερμοκρασιακού συντελεστή** της διόδου.
- Οι δίοδοι με χαμηλή τάση Zener παρουσιάζουν συνήθως αρνητικό θερμοκρασιακό συντελεστή.
- Οι δίοδοι με υψηλότερη τάση διάσπασης παρουσιάζουν συνήθως θετικό θερμοκρασιακό συντελεστή.
- Οι δίοδοι με τάση περίπου 5.1 έως 5.6 V παρουσιάζουν συχνά πολύ μικρό συνολικό θερμοκρασιακό συντελεστή.

Εφαρμογές Διόδου Zener

- Η δίοδος Zener πρέπει πάντοτε να χρησιμοποιείται με κατάλληλο στοιχείο περιορισμού του ρεύματος.
- Η απευθείας σύνδεσή της σε μία πηγή τάσης χωρίς αντίσταση σειράς μπορεί να προκαλέσει πολύ μεγάλο ρεύμα και άμεση καταστροφή της.

Παράδειγμα

Στο παρακάτω κύκλωμα, χρησιμοποιώντας το ιδανικό μοντέλο της διόδου Zener, να υπολογίσετε τα ρεύματα I_S , I_L , I_Z όταν η αντίσταση είναι $R_L = 200\Omega$.



Παράδειγμα

Η τάση εισόδου είναι 25V. Στην ιδανική περίπτωση έχουμε:

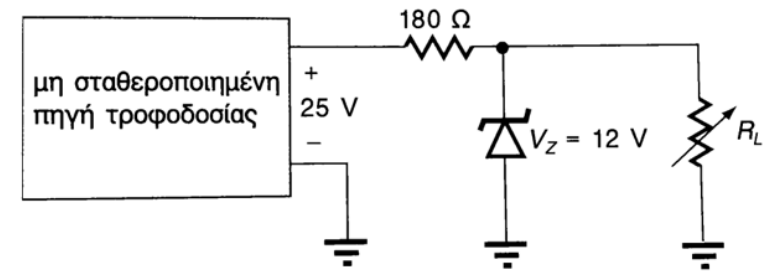
$$V_{out} = V_Z = 12V$$

Για τον υπολογισμό των ρευμάτων:

$$I_S = \frac{V_{in} - V_{out}}{R_S} = \frac{25V - 12V}{180\Omega} = 72,2mA$$

$$I_L = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{12V}{120\Omega} = 60mA$$

$$I_Z = I_S - I_L = 72.2mA - 60mA = 12.2mA$$



Δίοδος LED

- Η **δίοδος φωτοεκπομπής**, γνωστή ως LED - *Light Emitting Diode* είναι μία δίοδος ημιαγωγού που εκπέμπει φως όταν διαρρέεται από ρεύμα κατά την ορθή πόλωση.
- Διαθέτει δύο ακροδέκτες:
 - την **άνοδο** (A), η οποία συνδέεται προς το υψηλότερο δυναμικό,
 - την **κάθοδο** (K), η οποία συνδέεται προς το χαμηλότερο δυναμικό.
- Η LED είναι στοιχείο που ελέγχεται κυρίως από το ρεύμα.
- Η ασφαλής λειτουργία της απαιτεί πάντοτε κατάλληλο περιορισμό του ρεύματος, είτε με αντίσταση σειράς είτε με ειδικό ηλεκτρονικό κύκλωμα οδήγησης.

Δίοδος LED

- Όταν η LED πολωθεί ορθά και το ρεύμα της αποκτήσει κατάλληλη τιμή, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε φωτεινή ενέργεια.
- Η εκπομπή φωτός από μία LED βασίζεται στο φαινόμενο της **ηλεκτροφωταύγειας**. Όταν η επαφή p-n πολωθεί ορθά:
 - ηλεκτρόνια από την περιοχή n κινούνται προς την περιοχή p,
 - οπές από την περιοχή p κινούνται προς την περιοχή n,
 - ηλεκτρόνια και οπές επανασυνδέονται κοντά στην επαφή.

Δίοδος LED

Η ενέργεια του φωτονίου δίνεται από τον τύπο:

$$E_{ph} = hf$$

E_{ph} : η ενέργεια του φωτονίου, h είναι η σταθερά Planck, f είναι η συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτός.

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός και λ το μήκος κύματος

Δίοδος LED

Χαρακτηριστική I--V

- Η χαρακτηριστική I--V μιας LED έχει παρόμοια μορφή με εκείνη μιας κοινής διόδου.
- Κατά την ορθή πόλωση, το ρεύμα παραμένει μικρό για χαμηλές τάσεις και στη συνέχεια αυξάνεται απότομα.
- Η σχέση τάσης και ρεύματος περιγράφεται προσεγγιστικά από την εξίσωση Shockley:

$$I_F = I_S \left(e^{\frac{V_F}{nV_T}} - 1 \right)$$

όπου V_F και I_F είναι αντίστοιχα η τάση και το ρεύμα ορθής πόλωσης της LED.

Δίοδος LED

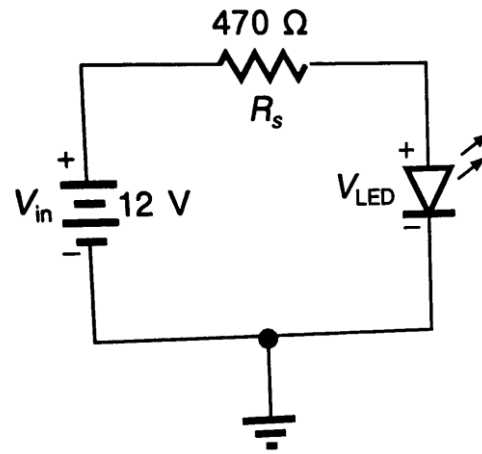
Χαρακτηριστική I--V

- Η φωτεινότητα μιας LED εξαρτάται κυρίως από το ρεύμα που τη διαρρέει.
- Μέσα στην κανονική περιοχή λειτουργίας, η φωτεινή ένταση αυξάνεται, συνήθως, καθώς αυξάνεται το ρεύμα.
- Η τάση ορθής πόλωσης V_F δεν είναι μία απόλυτα σταθερή τάση λειτουργίας, αλλά η τάση που εμφανίζεται στα άκρα της LED για συγκεκριμένο ρεύμα και θερμοκρασία.

Ειδικές Δίοδοι - LED

Παράδειγμα

Να υπολογιστεί το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο LED στο παρακάτω κύκλωμα:



Λύση

Το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση R_s είναι ίσο με :

$$I = \frac{V_s}{R_s} = \frac{V_{in} - V_{LED}}{R_s} = \frac{12V - 2V}{470\Omega} = 21,3\text{mA}$$

Συνδεσμολογία LED

Σε σειρά

Όταν πολλές LED συνδέονται σε σειρά, διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα. Η συνολική τάση ορθής πόλωσης είναι το άθροισμα των επιμέρους τάσεων:

$$V_{F,total} = V_{F1} + V_{F2} + \cdots + V_{FN}$$

Η αντίσταση περιορισμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_s = \frac{V_s - \sum_{k=1}^N V_{Fk}}{I_F}$$

Συνδεσμολογία LED

Σε σειρά

Για να είναι δυνατή η λειτουργία του κυκλώματος, η τάση τροφοδοσίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των τάσεων ορθής πόλωσης:

$$V_S > \sum_{k=1}^N V_{Fk}$$

Η σύνδεση σε σειρά εξασφαλίζει ότι όλες οι LED διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα.

Συνδεσμολογία LED

Παράλληλη σύνδεση

- Η απευθείας παράλληλη σύνδεση πολλών LED σε μία κοινή αντίσταση δεν συνιστάται.
- Μικρές διαφορές στην τάση ορθής πόλωσης μπορεί να προκαλέσουν άνιση κατανομή του ρεύματος.
- Η καταλληλότερη απλή συνδεσμολογία είναι η χρήση ξεχωριστής αντίστασης περιορισμού για κάθε παράλληλο κλάδο.

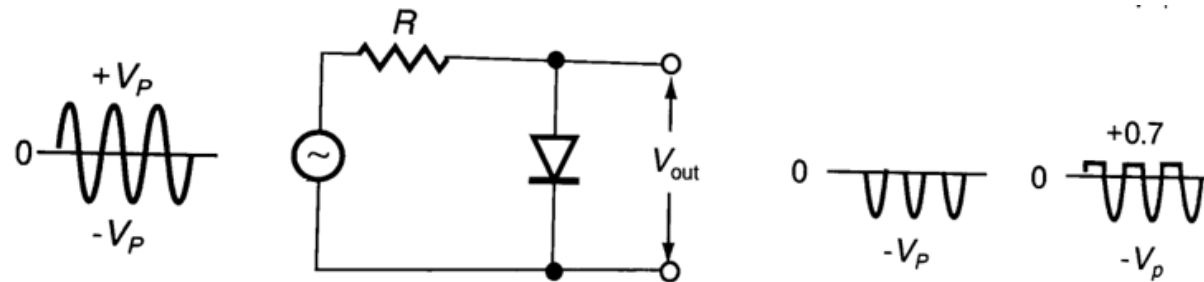
Ψαλιδιστές

- Οι **ψαλιδιστές** ή **περιοριστές** (*clippers* ή *limiters*) είναι κυκλώματα που περιορίζουν την τάση ενός σήματος όταν αυτή υπερβεί μία προκαθορισμένη στάθμη.
- Σύμφωνα με τον ορισμό, ο ψαλιδιστής είναι ένα μη γραμμικό κύκλωμα που χρησιμοποιεί μία ή περισσότερες διόδους για να περιορίσει το θετικό, το αρνητικό ή και τα δύο τμήματα ενός σήματος, χωρίς να μεταβάλλει σημαντικά το υπόλοιπο σήμα.

Ψαλιδιστές

Ορίζουμε ως:

- **Θετικός ψαλιδιστής:** το κύκλωμα που περιορίζει το θετικό τμήμα του σήματος.
- **Αρνητικός ψαλιδιστής:** το κύκλωμα που περιορίζει το αρνητικό τμήμα.



Θετικός Ψαλιδιστής

Ψαλιδιστές

Βασική Αρχή Λειτουργίας

Η λειτουργία ενός ψαλιδιστή καθορίζεται από την κατάσταση της διόδου:

- όταν η διόδος βρίσκεται σε **αποκοπή**, αντικαθίσταται από ανοικτό κύκλωμα,
- όταν η διόδος βρίσκεται σε **αγωγή**, αντικαθίσταται από βραχυκύκλωμα στο ιδανικό μοντέλο ή από μία σταθερή πτώση τάσης V_γ στο πρακτικό μοντέλο.

Για μία διόδο πυριτίου χρησιμοποιείται συνήθως η προσέγγιση:

$$V_\gamma \approx 0.7 \text{ V}$$

Ψαλιδιστές

- **Ψαλιδιστής σειράς :** η δίοδος συνδέεται σε σειρά με το φορτίο. Ανάλογα με τη φορά της, επιτρέπει τη μεταφορά μόνο του θετικού ή μόνο του αρνητικού τμήματος του σήματος προς την έξοδο.
- **Παράλληλος θετικός ψαλιδιστής:** η δίοδος συνδέεται παράλληλα με την έξοδο. Μία αντίσταση R συνδέεται μεταξύ της πηγής και της εξόδου, ώστε να περιορίζει το ρεύμα όταν η δίοδος άγει.
- **Παράλληλος αρνητικός ψαλιδιστής:** σχηματίζεται αν αντιστραφεί η φορά της διόδου, με την άνοδο συνδεδεμένη στη γείωση και την κάθοδο στην έξοδο.

Ψαλιδιστές

- Πολωμένος θετικός ψαλιδιστής
 - Πολωμένος θετικός ψαλιδιστής
 - Πολωμένος αρνητικός ψαλιδιστής
 - Διπλός ψαλιδιστής
 - Ψαλιδιστής με διόδους Zener
-
- Ένας πραγματικός ψαλιδιστής δεν δημιουργεί απόλυτα επίπεδη αποκοπή. Η δυναμική αντίσταση της διόδου, η μεταβολή της τάσης ορθής πόλωσης και η αντίσταση του φορτίου προκαλούν μικρές αποκλίσεις από την ιδανική κυματομορφή.

Κυκλώματα Προστασίας

- Οι δίοδοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την προστασία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων από λανθασμένη πολικότητα, υπερτάσεις, ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και παροδικές τάσεις που δημιουργούνται από επαγωγικά φορτία.
- Η επιλογή της κατάλληλης διόδου εξαρτάται από τη μέγιστη τάση, το ρεύμα, την ισχύ, την ταχύτητα απόκρισης και τη διάρκεια της διαταραχής.
- Η διόδος πρέπει να αντέχει τόσο το *μέγιστο ρεύμα* του φορτίου κατά την κανονική λειτουργία όσο και τη *μέγιστη ανάστροφη* τάση που εμφανίζεται κατά τη λανθασμένη σύνδεση της πηγής.

Κυκλώματα Προστασίας

Περιορισμός τάσης εισόδου με διόδους

- Οι είσοδοι αναλογικών και ψηφιακών κυκλωμάτων πρέπει να λειτουργούν μέσα σε συγκεκριμένα όρια τάσης.
- Η εφαρμογή τάσης μεγαλύτερης από την τάση τροφοδοσίας ή μικρότερης από τη γείωση μπορεί να προκαλέσει βλάβη.
- Μία απλή διάταξη προστασίας χρησιμοποιεί δύο διόδους και μία αντίσταση σειράς:
 - η άνω δίοδος συνδέεται μεταξύ της εισόδου και της θετικής τροφοδοσίας VCC,
 - η κάτω δίοδος συνδέεται μεταξύ της γείωσης και της εισόδου,
 - η αντίσταση R περιορίζει το ρεύμα των διόδων.

Κυκλώματα Προστασίας

Προστασία από υπέρταση με δίοδο Zener

- Μία δίοδος Zener μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον περιορισμό μιας τάσης σε προκαθορισμένη στάθμη.
- Συνδέεται ανάστροφα και παράλληλα με το προστατευόμενο φορτίο, ενώ μία αντίσταση τοποθετείται σε σειρά με την πηγή.

Κυκλώματα Προστασίας

Προστασία από υπέρταση με δίοδο Zener

- Όταν η τάση εισόδου είναι μικρότερη από την τάση Zener, η δίοδος βρίσκεται σε αποκοπή, δηλαδή $I_Z \approx 0$
- Όταν η τάση τείνει να ξεπεράσει την τάση Zener, η δίοδος εισέρχεται στην περιοχή διάσπασης και περιορίζει την έξοδο περίπου στην τιμή $V_{out} \approx V_Z$

Κυκλώματα Προστασίας

Προστασία από υπέρταση με δίοδο Zener

Το ρεύμα της αντίστασης είναι:

$$I_R = \frac{V_{in} - V_Z}{R}$$

Διαχωρίζεται στο ρεύμα του φορτίου και το ρεύμα της διόδου:

$$I_R = I_L + I_Z$$

Η ισχύς που καταναλώνεται στη δίοδο είναι:

$$P_Z = V_Z I_Z$$

και πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$P_Z \leq P_{Z,max}$$

Κυκλώματα Προστασίας

Δίοδος καταστολής μεταβατικών υπερτάσεων

- Για την προστασία από σύντομους παλμούς μεγάλης τάσης χρησιμοποιούνται ειδικές δίοδοι που ονομάζονται δίοδοι καταστολής μεταβατικών υπερτάσεων ή δίοδοι TVS - Transient Voltage Suppression.
- Η δίοδος TVS συνδέεται παράλληλα με το προστατευόμενο κύκλωμα. Κατά την κανονική λειτουργία βρίσκεται σε αποκοπή και παρουσιάζει πολύ μικρό ρεύμα διαρροής.
- Όταν εμφανιστεί ένας παλμός υπέρτασης, η TVS εισέρχεται πολύ γρήγορα στην περιοχή διάσπασης και εκτρέπει το ρεύμα μακριά από το προστατευόμενο κύκλωμα. Η τάση περιορίζεται στην τάση σύσφιξης V_C .

Κυκλώματα Προστασίας

Δίοδος καταστολής μεταβατικών υπερτάσεων

Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας διόδου TVS είναι:

- μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας V_{RWM}
- τάση διάσπασης V_{BR}
- τάση σύσφιξης V_C
- μέγιστο παλμικό ρεύμα I_{PP}
- μέγιστη παλμική ισχύς P_{PP}

Κυκλώματα Προστασίας

Δίοδος καταστολής μεταβατικών υπερτάσεων

Η στιγμιαία ισχύς κατά τη διάρκεια του παλμού δίνεται από τη σχέση:

$$P_{PP} \approx V_C I_{PP}$$

Οι μονόδρομες TVS χρησιμοποιούνται κυρίως σε γραμμές συνεχούς τάσης, ενώ οι αμφίδρομες TVS μπορούν να περιορίζουν παλμούς και προς τις δύο πολικότητες και χρησιμοποιούνται συχνά σε γραμμές εναλλασσόμενων ή διπολικών σημάτων.

Κυκλώματα Προστασίας

Προστασία από επαγωγικά φορτία

- Πηνία ηλεκτρονόμων, ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες και κινητήρες αποθηκεύουν ενέργεια στο μαγνητικό τους πεδίο.
- Για την προστασία του κυκλώματος συνδέεται μία δίοδος ελεύθερης διέλευσης, γνωστή ως flyback diode, παράλληλα με το πηνίο.
- Κατά την κανονική λειτουργία, η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν άγει. Η κάθοδός της συνδέεται προς τον θετικό πόλο της τροφοδοσίας και η άνοδός της προς την πλευρά του διακόπτη.

Κυκλώματα Προστασίας

Επιλογή διόδου προστασίας επαγωγικού φορτίου

Η δίοδος ελεύθερης διέλευσης πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε:

- το επιτρεπόμενο ορθό ρεύμα της να είναι τουλάχιστον ίσο με το αρχικό ρεύμα του πηνίου,
- η επιτρεπόμενη ανάστροφη τάση της να είναι μεγαλύτερη από την τάση τροφοδοσίας,
- να μπορεί να απορροφήσει την ενέργεια που απελευθερώνει το πηνίο,
- η ταχύτητα απόκρισής της να είναι κατάλληλη για τη συχνότητα μεταγωγής.

Κυκλώματα Προστασίας

Κύκλωμα	Κίνδυνος	Λειτουργία
Δίοδος σειράς	Αντίστροφη πολικότητα	Διακόπτει τη ροή ρεύματος όταν η πηγή συνδεθεί αντίστροφα.
Παράλληλη δίοδος και ασφάλεια	Αντίστροφη πολικότητα	Δημιουργεί ρεύμα σφάλματος και προκαλεί το άνοιγμα της ασφάλειας.
Δίοδοι προς τις γραμμές τροφοδοσίας	Υπέρταση ή αρνητική τάση εισόδου	Περιορίζουν την είσοδο κοντά στις τάσεις των γραμμών τροφοδοσίας.
Δίοδος Zener	Παρατεταμένη ή σχετικά αργή υπέρταση	Περιορίζει την τάση περίπου στην τιμή V_Z .
Δίοδος TVS	Σύντομοι παλμοί μεγάλης τάσης	Εκτρέπει γρήγορα το παλμικό ρεύμα και περιορίζει την τάση στην τιμή V_C .
Δίοδος ελεύθερης διέλευσης	Υπέρταση από επαγωγικό φορτίο	Παρέχει διαδρομή στο ρεύμα του πηνίου μετά τη διακοπή της τροφοδοσίας.

Σύγκριση βασικών κυκλωμάτων προστασίας με διόδους.

Ανορθωτές

- Οι ανορθωτές είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα που μετατρέπουν μία εναλλασσόμενη τάση σε τάση σταθερής πολικότητας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **ανόρθωση**.
- Η τάση στην έξοδο ενός ανορθωτή δεν είναι αρχικά απολύτως σταθερή. Αποτελεί μία μεταβαλλόμενη συνεχή τάση, η οποία μπορεί στη συνέχεια να εξομαλυνθεί με τη χρήση πυκνωτών και να σταθεροποιηθεί με κατάλληλο κύκλωμα ρύθμισης τάσης.

Ανορθωτές

Ένα τυπικό τροφοδοτικό περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

1. μετασχηματισμό και ηλεκτρική απομόνωση της τάσης,
2. ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης,
3. εξομάλυνση της τάσης,
4. σταθεροποίηση της τάσης εξόδου.

Ανορθωτές

Οι βασικότερες ανορθωτικές διατάξεις είναι:

- ο ανορθωτής μισού κύματος ή ημιανορθωτής,
- ο ανορθωτής πλήρους κύματος με μεσαία λήψη,
- ο ανορθωτής πλήρους κύματος με γέφυρα Graetz.

Ανορθωτές

Ημιανόρθωση

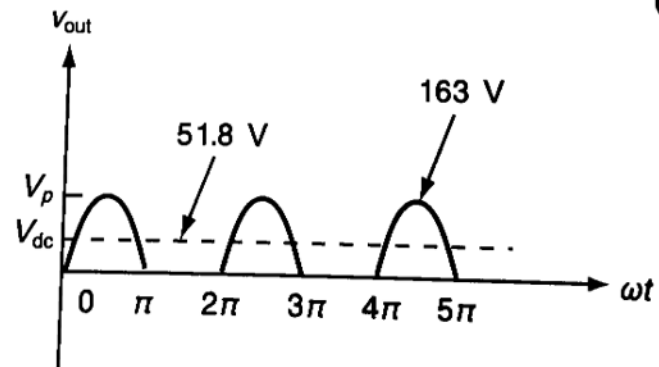
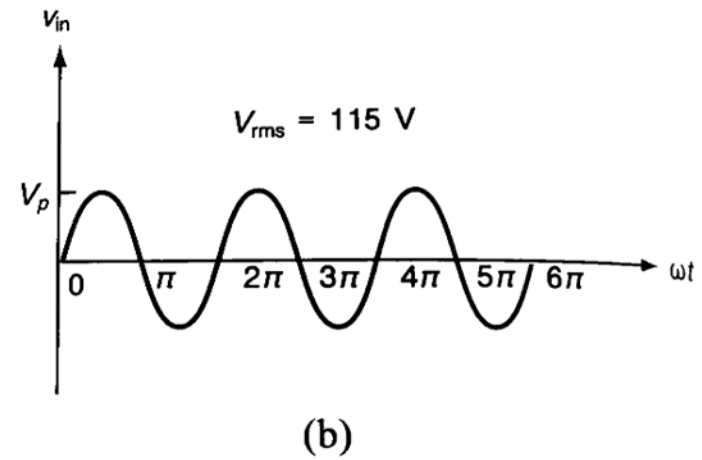
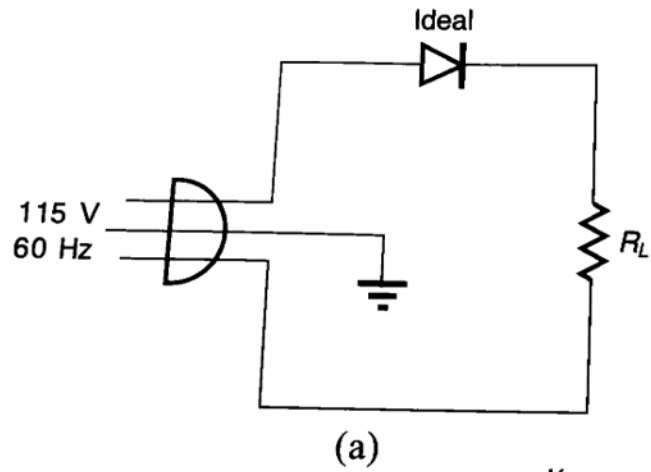
Ο ημιανορθωτής αποτελεί την απλούστερη ανορθωτική διάταξη. Αποτελείται από μία δίοδο συνδεδεμένη σε σειρά με το φορτίο.

Έστω η ημιτονοειδής τάση εισόδου:

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

Όπου V_m είναι η μέγιστη τιμή της τάσης εισόδου

Ανορθωτές



Κύκλωμα Ημιανόρθωσης

Ανορθωτές

Ημιανόρθωση

Κατά τη θετική ημιπερίοδο:

$$v_s(t) > 0$$

η δίοδος πολώνεται ορθά και άγει. Για ιδανική δίοδο, η τάση στο φορτίο είναι:

$$v_o(t) = v_s(t)$$

Το ρεύμα του φορτίου είναι:

$$i_L(t) = \frac{v_o(t)}{R_L}$$

Ανορθωτές

Ημιανόρθωση

Κατά την αρνητική ημιπερίοδο:

$$v_s(t) < 0$$

η δίοδος πολώνεται ανάστροφα και βρίσκεται σε αποκοπή:

$$i_L(t) = 0 \text{ και } v_o(t) = 0$$

Για ιδανική δίοδο, η τάση εξόδου περιγράφεται από τη σχέση:

$$v_o(t) = \begin{cases} V_m \sin(\omega t), 0 \leq \omega t \leq \pi \\ 0, \pi < \omega t < 2\pi \end{cases}$$

Ανορθωτές

Ημιανόρθωση

Η μέση τιμή της εξόδου υπολογίζεται σε μία πλήρη περίοδο T ως εξής:

$$V_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\theta) d\theta$$

Όπου $\theta = \omega t$

Ανορθωτές

Ημιανόρθωση

Για τον ημιανορθωτή ισχύει:

$$V_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m \sin \theta \, d\theta$$

Επομένως:

$$V_{DC} = \frac{V_m}{\pi}$$

όπου:

$$V_{DC} \approx 0.318V_m$$

Ανορθωτές

Ημιανόρθωση

Η μέση τιμή του ρεύματος στο φορτίο είναι:

$$I_{DC} = \frac{V_{DC}}{R_L} = \frac{V_m}{\pi R_L}$$

Ανορθωτές

Ημιανόρθωση

Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου είναι:

$$V_{o,RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m^2 \sin^2 \theta d\theta}$$

Επομένως:

$$V_{o,RMS} = \frac{V_m}{2}, I_{o,RMS} = \frac{V_m}{2R_L}$$

Ανορθωτές

Ημιανόρθωση - Πραγματική Δίοδος

Αν χρησιμοποιηθεί το μοντέλο σταθερής πτώσης τάσης, η δίοδος άγει μόνο όταν:

$$v_s(t) > V_\gamma$$

Η μέγιστη τάση εξόδου είναι περίπου:

Για $V_m \gg V_\gamma$ η μέση τάση προσεγγίζεται ως εξής:

$$V_{DC} \approx \frac{V_m - V_\gamma}{\pi}$$

Ανορθωτές

Ημιανόρθωση

Κατά την αρνητική ημιπερίοδο, η δίοδος βρίσκεται σε αποκοπή και πρέπει να αντέξει την ανάστροφη τάση της πηγής.

Η μέγιστη ανάστροφη τάση που εμφανίζεται στα άκρα της είναι:

$$V_{PIV} = V_m$$

όπου PIV είναι η **μέγιστη ανάστροφη τάση** από τον όρο *Peak Inverse Voltage*

Ανορθωτές

Ημιανόρθωση

Ο **συντελεστής κυμάτωσης** εκφράζει το μέγεθος της AC συνιστώσας σε σχέση με τη DC συνιστώσα:

$$r = \sqrt{\left(\frac{V_{RMS}}{V_{DC}}\right)^2 - 1}$$

Για ημιανορθωτή:

$$r = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - 1} \approx 1.21$$

Η σχετικά μεγάλη τιμή δείχνει ότι η έξοδος παρουσιάζει έντονη κυμάτωση.

Η μέγιστη θεωρητική απόδοση ανόρθωσης ενός ημιανορθωτή είναι $\eta_{\max} \approx 40.6\%$

Ανορθωτές

Ημιανόρθωση

Η συχνότητα της παλλόμενης τάσης εξόδου ενός ημιανορθωτή είναι ίση με τη συχνότητα της εισόδου:

$$f_{\text{out}} = f_{\text{in}}$$

Ανορθωτές

Πλήρης Ανόρθωση

- Στην πλήρη ανόρθωση χρησιμοποιούνται και οι δύο ημιπερίοδοι της εναλλασσόμενης τάσης.
- Μπορεί να κατασκευαστεί με δύο διόδους και έναν μετασχηματιστή που διαθέτει μεσαία λήψη στο δευτερεύον τύλιγμα.
- Η μεσαία λήψη χρησιμοποιείται ως κοινό σημείο του φορτίου. Τα δύο άκρα του δευτερεύοντος παρέχουν τάσεις ίσου πλάτους και αντίθετης φάσης ως προς τη μεσαία λήψη:

$$v_{s1}(t) = V_m \sin(\omega t)$$

Ανορθωτές

Πλήρης Ανόρθωση

Για ιδανικές διόδους ισχύει:

$$v_o(t) = |V_m \sin(\omega t)|$$

Ανορθωτές

Πλήρης Ανόρθωση

Η μέση τιμή της πλήρως ανορθωμένης τάσης είναι

$$V_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |V_m \sin \theta| d\theta$$

Λόγω συμμετρίας:

$$V_{DC} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \theta d\theta$$

Επομένως,

$$V_{DC} = \frac{2V_m}{\pi}, V_{DC} \approx 0.637V_m$$

Ανορθωτές

Πλήρης Ανόρθωση

Μέση τιμή ρεύματος

$$I_{DC} = \frac{2V_m}{\pi R_L}$$

Ενεργός τιμή

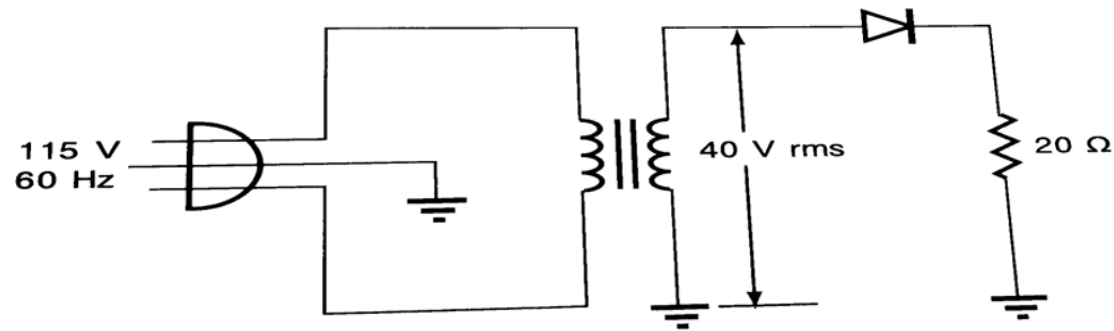
$$V_{O,RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

Μέγιστη Ανάστροφη Τάση

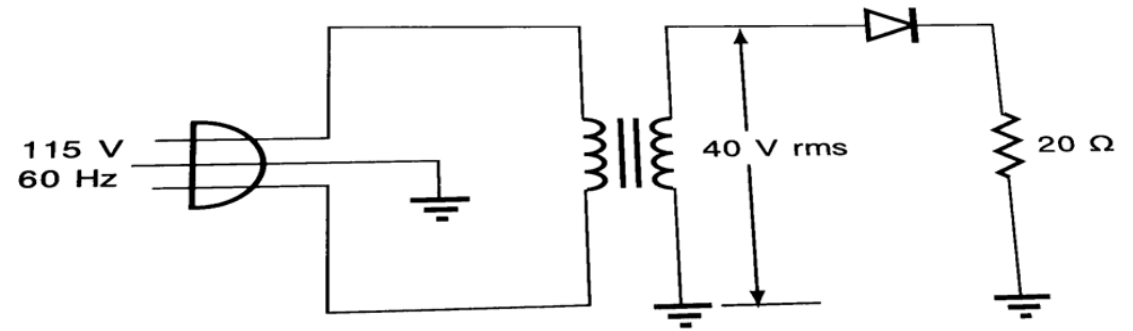
$$V_{PIV} = 2V_m$$

Παράδειγμα

Ποια είναι η dc στα άκρα της αντίστασης φορτίου του κυκλώματος;
Ποια είναι η κορυφή της αντίστροφης τάσης που εφαρμόζεται στη
δίοδο; Πόσο είναι το dc ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο;



Παράδειγμα



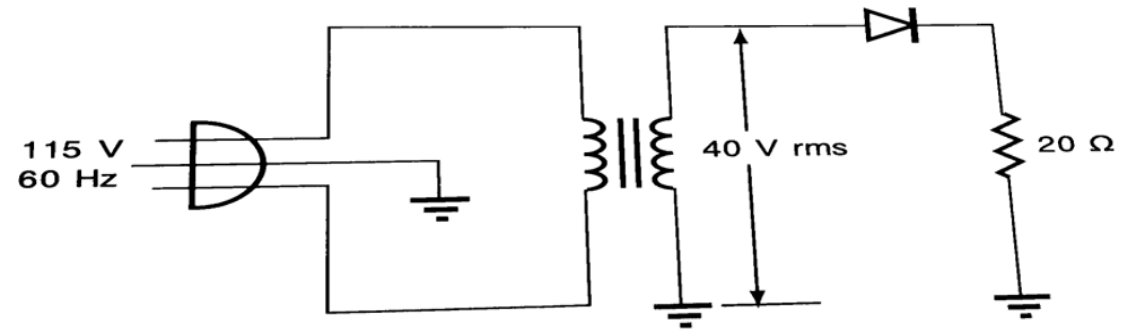
Αφού η τάση του δευτερεύοντος είναι 40V RMS, το πλάτος του είναι:

$$V_{peak} = \frac{V_{rms}}{0,707} = \frac{40V}{0,707} = 56,6V$$

Η τάση στο φορτίο είναι ένας ημιανορθωμένο ημίτονο με πλάτος:

$$V_{out} = V_{peak} = 56,6V$$

Παράδειγμα



Η dc τάση στο φορτίο είναι:

$$V_{dc} = 0,318V_{out} = 0,318(56,6V) = 18V$$

Η κορυφή της αντίστροφης τάσης είναι:

$$PIV = V_{peak} = 56,5V$$

Ανορθωτές

Γέφυρα Graetz

- Η γέφυρα Graetz είναι μία διάταξη πλήρους ανόρθωσης που χρησιμοποιεί τέσσερις διόδους.
- Το βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτεί μετασχηματιστή με μεσαία λήψη.
- Σε κάθε ημικύκλιο άγουν δύο διαγώνια τοποθετημένες δίοδοι, ενώ οι άλλες δύο βρίσκονται σε αποκοπή.

Ανορθωτές

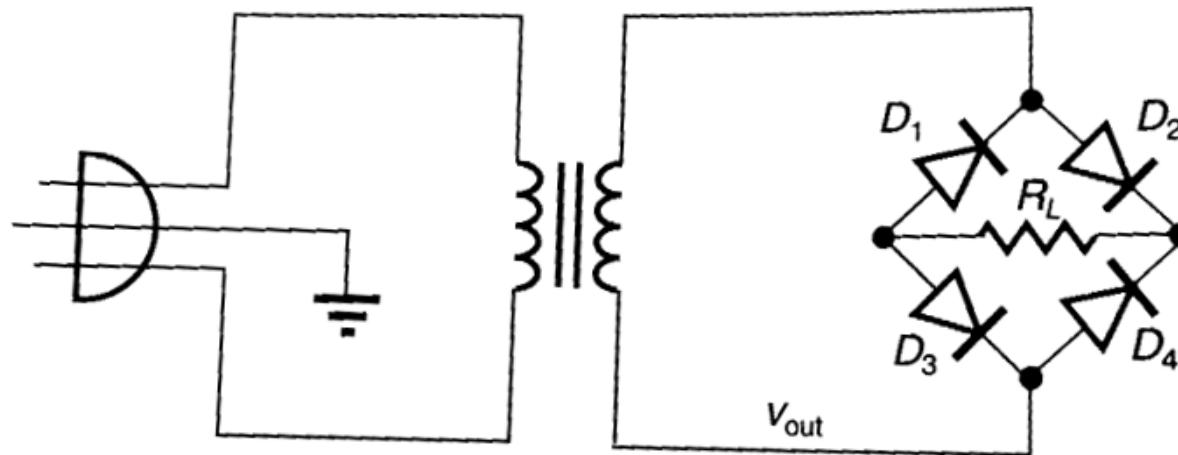
Γέφυρα Graetz

- Θετική Ημιπερίοδος : άγει το πρώτο διαγώνιο ζεύγος διόδων. Το ρεύμα ακολουθεί τη διαδρομή :

πηγή $\rightarrow D1 \rightarrow RL \rightarrow D3 \rightarrow$ πηγή

- Αρνητική ημιπερίοδος: όταν η πολικότητα της πηγής αντιστραφεί, άγει το δεύτερο διαγώνιο ζεύγος:

πηγή $\rightarrow D2 \rightarrow RL \rightarrow D4 \rightarrow$ πηγή



Παράδειγμα κυκλώματος με γέφυρα ανόρθωσης

Ανορθωτές

Γέφυρα Graetz

Για ιδανικές διόδους

- Τάση εξόδου :

$$v_o(t) = |V_m \sin(\omega t)|$$

- Μέση τιμή :

$$V_{DC} = \frac{2V_m}{\pi}$$

- Ενεργός τιμή:

$$V_{o,RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

Ανορθωτές

Γέφυρα Graetz

Η μέγιστη ανάστροφη τάση που δέχεται κάθε δίοδος είναι περίπου:

$$V_{PIV} = V_m$$

Ανορθωτές

Χαρακτηριστικό	Ημιανόρθωση	Μεσαία λήψη	Γέφυρα Graetz
Αριθμός διόδων	1	2	4
Δίοδοι σε αγωγή	1	1	2
Χρήση ημιπεριόδων	Ένα	Και τα δύο	Και τα δύο
Μέση τάση ιδανικού κυκλώματος	$\frac{V_m}{\pi}$	$\frac{2V_m}{\pi}$	$\frac{2V_m}{\pi}$
Συχνότητα κυμάτωσης	f	$2f$	$2f$
PIV ανά δίοδο	V_m	$2V_m$	V_m
Μεσαία λήψη	Δεν απαιτείται	Απαιτείται	Δεν απαιτείται
Πτώση τάσης αγώγιμων διόδων	V_γ	V_γ	$2V_\gamma$

Σύγκριση βασικών ανορθωτικών διατάξεων

Ανορθωτές

Εξομάλυνση με πυκνωτή

- Η τάση στην έξοδο ενός ανορθωτή είναι μεταβαλλόμενη και δεν είναι κατάλληλη για την άμεση τροφοδοσία πολλών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.
- Για τη μείωση της κυμάτωσης συνδέεται ένας πυκνωτής C παράλληλα με το φορτίο.
- Όταν η τάση του ανορθωτή αυξάνεται και γίνεται μεγαλύτερη από την τάση του πυκνωτή, οι δίοδοι άγουν και ο πυκνωτής φορτίζεται κοντά στη μέγιστη τάση εξόδου.
- Όταν η τάση του ανορθωτή μειωθεί, οι δίοδοι εισέρχονται σε αποκοπή. Ο πυκνωτής εκφορτίζεται σταδιακά μέσω του φορτίου και διατηρεί την τάση εξόδου μέχρι την επόμενη κορυφή.

Ανορθωτές

Εξομάλυνση με πυκνωτή

Η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης του πυκνωτή ονομάζεται **τάση κυμάτωσης κορυφής προς κορυφή**:

$$Vr(pp) = Vmax - Vmin$$

- Για ημιανόρθωση ισχύει $f_r = f$

Άρα προκύπτει:

$$Vr(pp) \approx \frac{I_L}{fC}$$

Ανορθωτές

Εξομάλυνση με πυκνωτή

- Για πλήρη ανόρθωση ισχύει $f_r = 2f$

Άρα προκύπτει:

$$V_r(pp) \approx \frac{I_L}{2fC}$$

Ανορθωτές

Εξομάλυνση με πυκνωτή

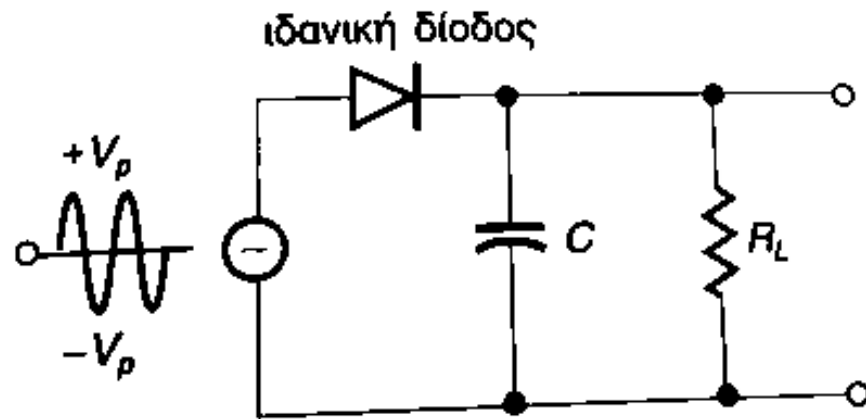
- Η μέση τάση εξόδου προσεγγίζεται:

$$V_{DC} \approx V_{o,peak} - \frac{V_{r(pp)}}{2}$$

Από τη σχέση της κυμάτωσης προκύπτει ότι:

- η αύξηση της χωρητικότητας μειώνει την κυμάτωση,
- η αύξηση της συχνότητας μειώνει την κυμάτωση,
- η αύξηση του ρεύματος φορτίου αυξάνει την κυμάτωση.

Ανορθωτές



Παράδειγμα κυκλώματος με πυκνωτή

Ανορθωτές

Επιλογή διόδων ανορθωτή

Για την επιλογή των διόδων ενός ανορθωτή πρέπει να εξετάζονται τουλάχιστον:

- το μέγιστο επιτρεπόμενο ορθό ρεύμα,
- το επαναλαμβανόμενο ρεύμα αιχμής,
- το μη επαναλαμβανόμενο κρουστικό ρεύμα κατά την εκκίνηση,
- η μέγιστη επαναλαμβανόμενη ανάστροφη τάση,
- η πτώση τάσης ορθής πόλωσης,
- η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς και θερμοκρασία,
- ο χρόνος ανάστροφης αποκατάστασης, ιδιαίτερα σε υψηλές συχνότητες.