

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ – ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ 2

3.1 Νόμος Ρευμάτων του Kirchhoff

1ος Κανόνας του Kirchhoff (Νόμος Ρευμάτων): «Το αριθμητικό άθροισμα των ρευμάτων που φθάνουν σε ένα κόμβο, είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων που φεύγουν από αυτόν».

Παράδειγμα:

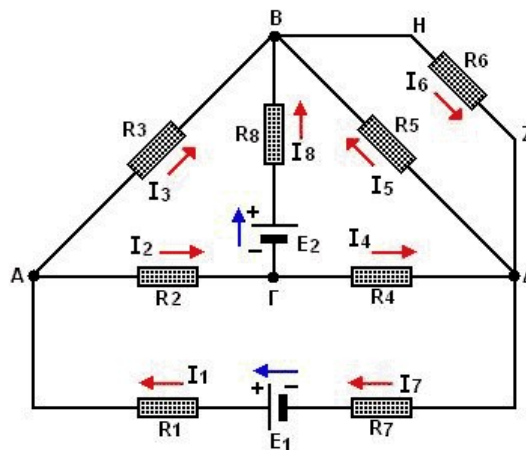
Στο παρακάτω κύκλωμα έχουμε τους κόμβους Α, Β, Γ, Δ. Με τις φορές των ρευμάτων όπως φαίνονται στο σχήμα, αν εφαρμόσουμε τον 1ο Κανόνα του Kirchhoff σε κάθε κόμβο έχουμε:

Για τον κόμβο Α : $I_1 = I_2 + I_3$

Για τον κόμβο Β : $I_3 + I_5 + I_8 = I_6$

Για τον κόμβο Γ : $I_2 = I_4 + I_8$

Για τον κόμβο Δ : $I_4 + I_6 = I_5$



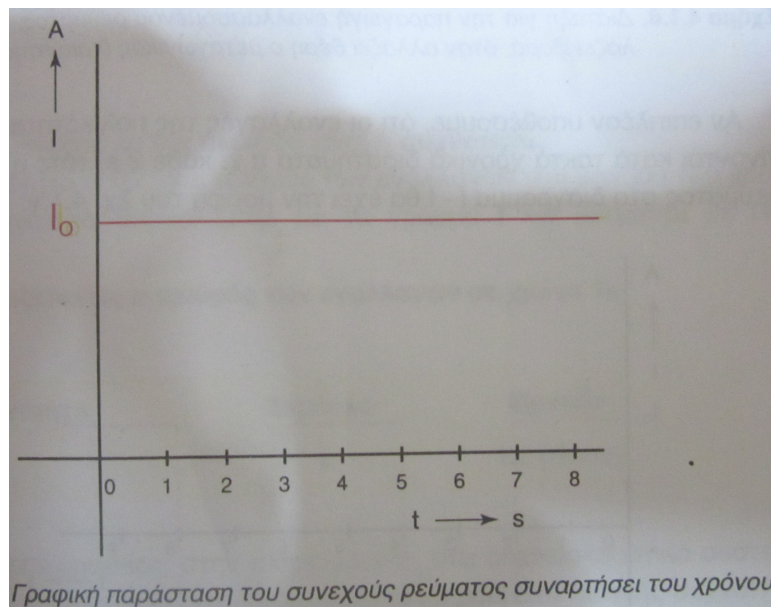
Σχήμα 3.1.1

3.2 Συνεχές και Εναλλασσόμενο Ρεύμα

Μέχρι τώρα αναφερθήκαμε κυρίως σε κυκλώματα τα οποία τα διαρρέει ρεύμα σταθερής έντασης και οι διαφορές δυναμικού μεταξύ δυο σημείων του κυκλώματος δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο. Τέτοια κυκλώματα ονομάζονται **DC Circuits** (από τις λέξεις Direct Current Circuits (Κυκλώματα Συνεχούς Ρεύματος)) και το **συνεχές ρεύμα** που τα διαρρέει λέγεται **ρεύμα DC**.

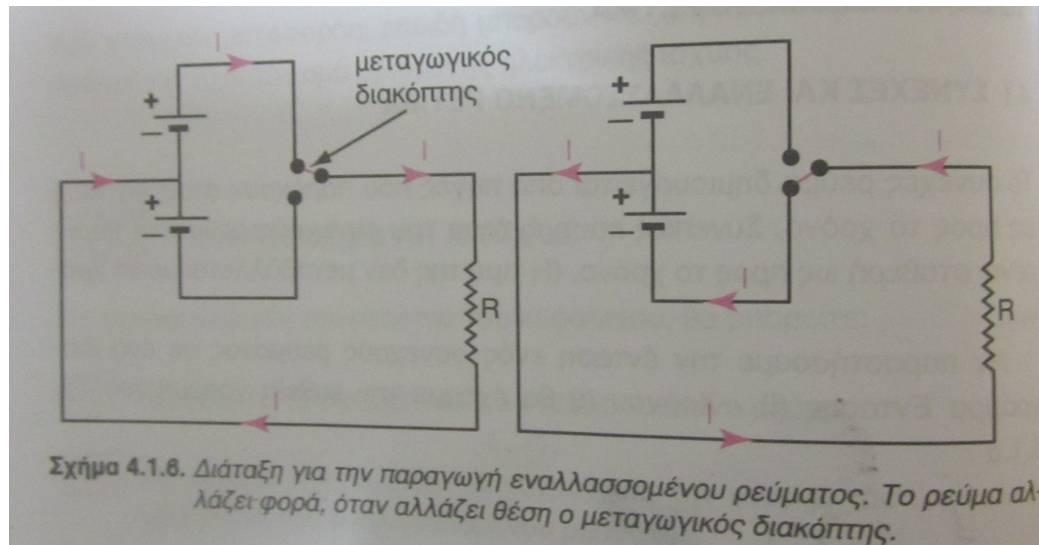
Τα κυκλώματα τα οποία τα διαπερνούν ρεύματα που μεταβάλλονται με τον χρόνο με κάποιο συγκεκριμένο τρόπο και οι διαφορές δυναμικού μεταξύ δυο σημείων του κυκλώματος αλλάζουν χρονικά, ονομάζονται **AC Circuits** (Alternating Current Circuits (Κυκλώματα Εναλλασσόμενου Ρεύματος)) και τα **εναλλασσόμενα ρεύματα** ονομάζονται ρεύματα **AC**. Τόσο στα κυκλώματα DC όσο και στα κυκλώματα AC ισχύουν οι Νόμοι του Kirchhoff και ο νόμος του Ohm.

Το **συνεχές ρεύμα** δημιουργείται από πηγές που παρέχουν σταθερή τάση ως προς το χρόνο. Συνεπώς και η ένταση του συνεχούς ρεύματος παραμένει σταθερή (η τιμή της δε μεταβάλλεται) ως προς το χρόνο. Αν παραστήσουμε την ένταση ενός συνεχούς ρεύματος σε ένα διάγραμμα Έντασης (I) – Χρόνου (t) θα έχουμε την ευθεία γραμμή του σχήματος 3.2.1:



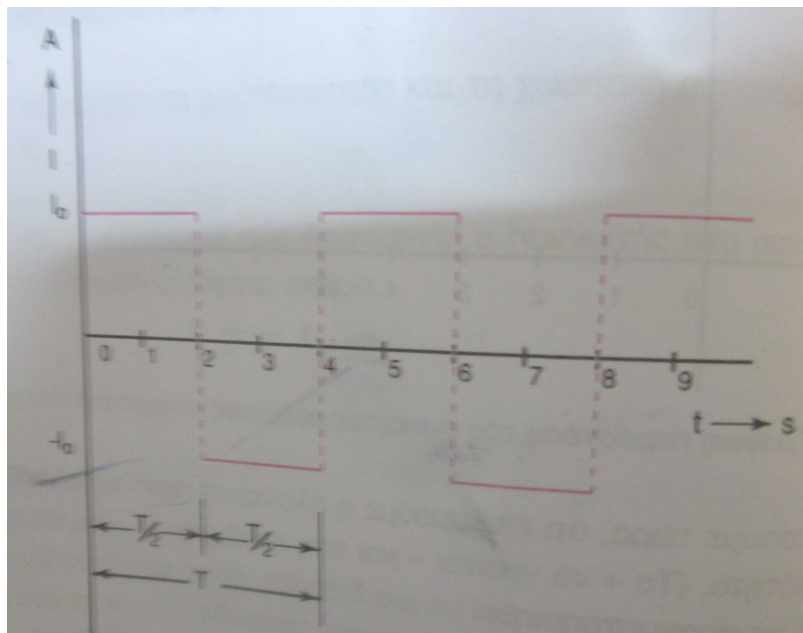
Σχήμα 3.2.1

Ας υποθέσουμε τώρα, ότι επιθυμούμε η ηλεκτρική πηγή να αλλάζει συνεχώς πολικότητα. (Το + να γίνεται – και στη συνέχεια το – να γίνεται +). Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια διάταξη, όπως αυτή του παρακάτω σχήματος, όπου δύο όμοιες πηγές (ηλεκτρικά στοιχεία) τροφοδοτούν με ρεύμα μια **αντίσταση** μέσω ενός **μεταγωγικού διακόπτη** (διακόπτη δύο θέσεων – Σχήμα 3.2.2).



Σχήμα 3.2.2

Αν επιπλέον υποθέσουμε ότι οι εναλλαγές της πολικότητας της πηγής γίνονται κατά τα τακτά χρονικά διαστήματα π.χ. κάθε 2 s, τότε η ένταση του ρεύματος στο διάγραμμα $I-t$ θα έχει τη μορφή του σχήματος 3.2.3:

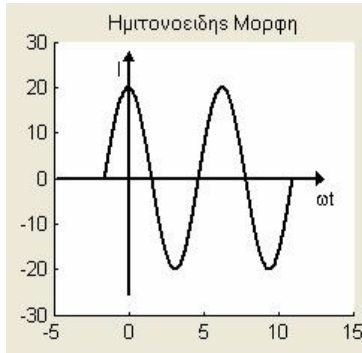


Σχήμα 3.2.3

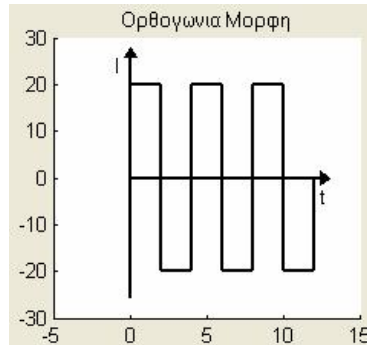
Το ρεύμα που δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο, όταν δηλαδή μεταβάλλεται η φορά κίνησης των ηλεκτρονίων, ονομάζεται **εναλλασσόμενο**. Αν η εναλλαγή γίνεται κατά

τακτά χρονικά διαστήματα ονομάζεται και **περιοδικό**. Οι σπουδαιότερες μορφές εναλλασσόμενου ρεύματος εμφανίζονται στα παρακάτω σχήματα :

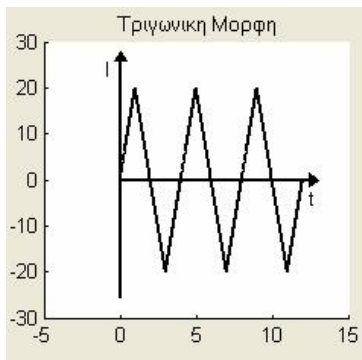
Ημιτονοειδής μορφή:



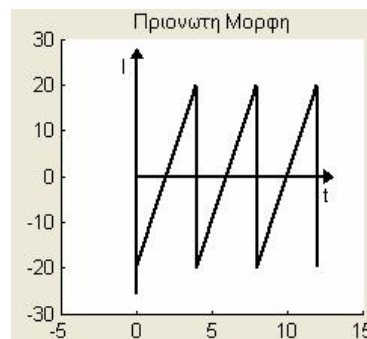
Ορθογώνια μορφή:



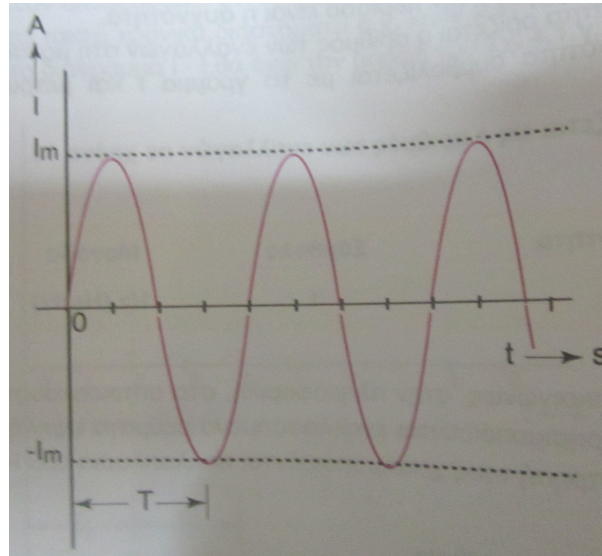
Τριγωνική μορφή:



Πριονωτή μορφή:



Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, σημασία έχουν μόνο τα **ημιτονοειδή** μεγέθη. Το **εναλλασσόμενο ημιτονοειδές ρεύμα** παράγεται από τις ηλεκτρογεννήτριες. Ονομάζεται ημιτονοειδές επειδή η μορφή της καμπύλης του ρεύματος στο διάγραμμα I-t ακολουθεί τη μαθηματική συνάρτηση του ημιτόνου ($y = \eta\mu x$), όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2.4:



Σχήμα 3.2.4: Γραφική παράσταση εναλλασσομένου ημιτονοειδούς ρεύματος

Ο χρόνος μιας πλήρους εναλλαγής, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να μετατραπεί το ρεύμα από θετικό σε αρνητικό και στη συνέχεια σε θετικό της ίδιας τιμής, ονομάζεται **περίοδος**. Η περίοδος συμβολίζεται με το γράμμα **T** και μετριέται σε **s**.

Σχετικό μέγεθος με την περίοδο είναι η **συχνότητα**. Ως συχνότητα ορίζεται ο αριθμός των εναλλαγών στη μονάδα του χρόνου. Η συχνότητα συμβολίζεται με το γράμμα **f** και μετριέται σε **Hz** (Hertz).

Συνήθως χρησιμοποιούνται πολλαπλάσια του Hz:

$$1 \text{ kHz} = 1000 \text{ Hz} = 10^3 \text{ Hz}$$

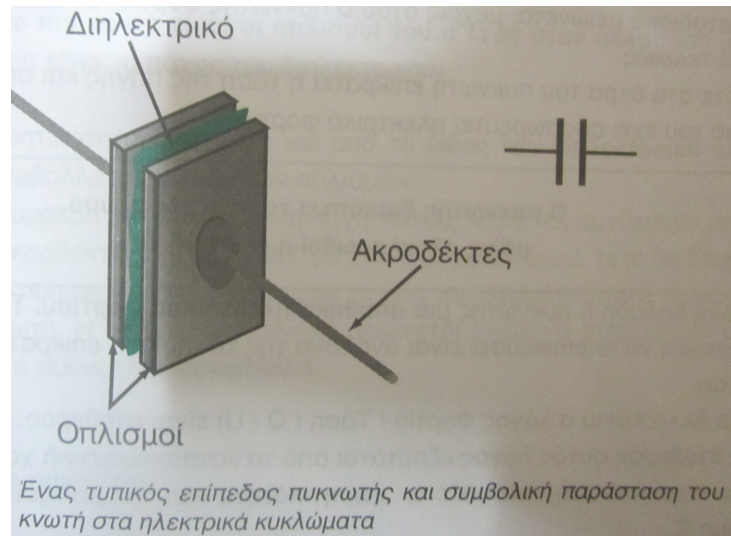
$$1 \text{ MHz} = 1000000 \text{ Hz} = 10^6 \text{ Hz}$$

Μεταξύ της περιόδου **T** και της συχνότητας **f** ισχύουν οι σχέσεις:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{και} \quad f = \frac{1}{T}$$

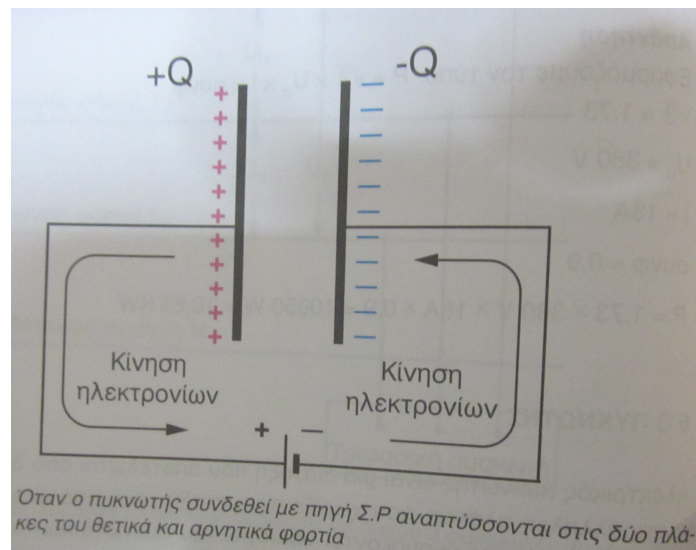
3.3α Ο Πυκνωτής

Ο ηλεκτρικός **πυκνωτής** είναι μια διάταξη που αποτελείται από δύο αγωγικές παράλληλες πλάκες που ονομάζονται **οπλισμοί** του πυκνωτή και χωρίζονται μεταξύ τους από ένα μονωτικό υλικό που ονομάζεται **διηλεκτρικό** υλικό του πυκνωτή. Μια τέτοια διάταξη και το σύμβολό της στα ηλεκτρικά κυκλώματα φαίνεται στο σχήμα 3.3.1:



Σχήμα 3.3.1: Τυπικός επίπεδος πυκνωτής και κυκλωματικό σύμβολο πυκνωτή

Αν συνδεθούν τα άκρα του πυκνωτή με μια πηγή συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.) θα παρατηρηθεί στην αρχή μια ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Ηλεκτρόνια από τον αρνητικό πόλο της πηγής κατευθύνονται στη μια πλάκα του πυκνωτή και ηλεκτρόνια από την άλλη πλάκα του πυκνωτή κατευθύνονται στο θετικό πόλο της πηγής. Συσσωρεύονται δηλαδή θετικά φορτία στη μία πλάκα και αρνητικά φορτία στην άλλη πλάκα:



Σχήμα 3.3.2: Σύνδεση πυκνωτή σε πηγή συνεχούς ρεύματος

Η ροή αυτή των φορτίων σταδιακά μειώνεται μέχρις ότου ο πυκνωτής φορτιστεί, οπότε διακόπτεται τελείως. Τότε στα άκρα του πυκνωτή επικρατεί η τάση της πηγής και σε κάθε οπλισμό του έχει συσσωρευτεί ηλεκτρικό φορτίο Q .

Άρα: Ο πυκνωτής διακόπτει το συνεχές ρεύμα, μόλις ολοκληρωθεί η φόρτισή του. Λειτουργεί έτσι ο πυκνωτής ως μια αποθήκη ηλεκτρικού φορτίου. Το φορτίο που αποθηκεύεται είναι ανάλογο της τάσης που επικρατεί στα άκρα του. Δηλαδή ο λόγος Φορτίο/Τάση (Q/U) είναι σταθερός. Ο λόγος αυτός εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του πυκνωτή, ονομάζεται **χωρητικότητα** και συμβολίζεται με το γράμμα **C**:

$$C = Q/U$$

Μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το **F** (Farad). Στην πράξη χρησιμοποιούνται τα υποπολλαπλάσια του F:

$$1 \text{ mf} = 1/1000 \text{ F} = 10^{-3} \text{ F}$$

$$1 \text{ } \mu\text{F} = 1/1000000 \text{ F} = 10^{-6} \text{ F}$$

$$1 \text{ nF} = 1/1000000000 \text{ F} = 10^{-9} \text{ F}$$

$$1 \text{ pF} = 1/1000000000000 \text{ F} = 10^{-12} \text{ F}$$

Βασικό χαρακτηριστικό κάθε πυκνωτή είναι η ιδιότητά του να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο, επομένως ηλεκτρική ενέργεια. Όταν ένας πυκνωτής είναι φορτισμένος, οι οπλισμοί του έχουν ηλεκτρικά φορτία κατά μέτρο ίσα και αντίθετα. Λόγω της δυνατότητάς τους να αποθηκεύουν ηλεκτρικό φορτίο και να το αποδίδουν κατόπιν αποφορτιζόμενοι σε ένα κύκλωμα, οι πυκνωτές αποτελούν βασικά στοιχεία κάθε σύγχρονου ηλεκτρονικού κυκλώματος. Μερικές χρήσεις τους είναι σε κυκλώματα εξομάλυνσης τάσης, σε φίλτρα συχνοτήτων, στη διαμόρφωση της συχνότητας εκπομπής ραδιοφωνικών πομπών, στις τηλεφωνικές συσκευές κ.α. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε διάφορους τύπους πυκνωτών:



Σχήμα 3.3.3: Διάφοροι τύποι πυκνωτών

Ο πυκνωτής στο εναλλασσόμενο ρεύμα

Ο πυκνωτής συμπεριφέρεται διαφορετικά στο εναλλασσόμενο ρεύμα από ότι στο συνεχές ρεύμα. Με την εναλλαγή της πολικότητας της τάσης της πηγής σε κάθε περίοδο, ο πυκνωτής φορτίζεται και εκφορτίζεται. Έτσι, υπάρχει πάντα ηλεκτρικό ρεύμα στο κύκλωμα (κίνηση ηλεκτρονίων από και προς τους οπλισμούς του πυκνωτή και την πηγή), παρόλο που δεν μετακινούνται ηλεκτρικά φορτία διαμέσου του διηλεκτρικού του πυκνωτή από τον έναν οπλισμό στον άλλο.

Ο πυκνωτής παρουσιάζει **χωρητική αντίσταση** στο εναλλασσόμενο ρεύμα, που εκφράζει τη δυσκολία στη διέλευση του ρεύματος, συμβολίζεται με X_c και μετριέται σε Ω , όπως και η ωμική αντίσταση R . Ισχύει η σχέση:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

όπου: X_c = η χωρητική αντίσταση του πυκνωτή (σε Ω),

$\pi = 3,14$

f = η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος σε Hz

C = η χωρητικότητα του πυκνωτή σε F

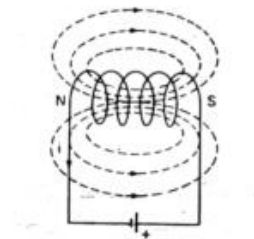
Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η χωρητική αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη συχνότητα του ρεύματος, δηλαδή: όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα του ρεύματος τόσο μικρότερη είναι η χωρητική αντίσταση και αντίστροφα.

3.3β Το πηνίο

Το **πηνίο** είναι ένα από τα κύρια εξαρτήματα των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Πρόκειται για ένα συρμάτινο *τύλιγμα* που έχει την ιδιότητα να αναπτύσσει μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του όταν διαρρέεται από ρεύμα (σχήμα 3.3.4β). Το πηνίο συμβολίζεται με το γράμμα **L** και το σύμβολό του στα κυκλώματα δίνεται στο σχήμα 3.3.4α.



(α) Κυκλωματικό σύμβολο του πηνίου



(β) Μαγνητικό πεδίο πηνίου, διαρρεόμενου από ηλεκτρικό ρεύμα

Σχήμα 3.3.4

Το πηνίο μπορεί να είναι κενό εσωτερικά ή να περιέχει κάποιον πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό. Χαρακτηριστικό μέγεθος του πηνίου είναι ο **συντελεστής αυτεπαγωγής** που συμβολίζεται με **L** και μετριέται σε **Henry (H)**.

Το πηνίο χρησιμοποιείται στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές του ηλεκτρομαγνητισμού εκμεταλλευόμενο την ιδιότητα του να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μαγνητική και το αντίθετο. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιείται στις ηλεκτρικές γεννήτριες, στους ηλεκτροκινητήρες, στους μετασχηματιστές, στα εξαρτήματα ρελέ, σε ηλεκτρομαγνήτες και ακόμα σε χρονοκυκλώματα, σε φίλτρα και σε ταλαντωτές.

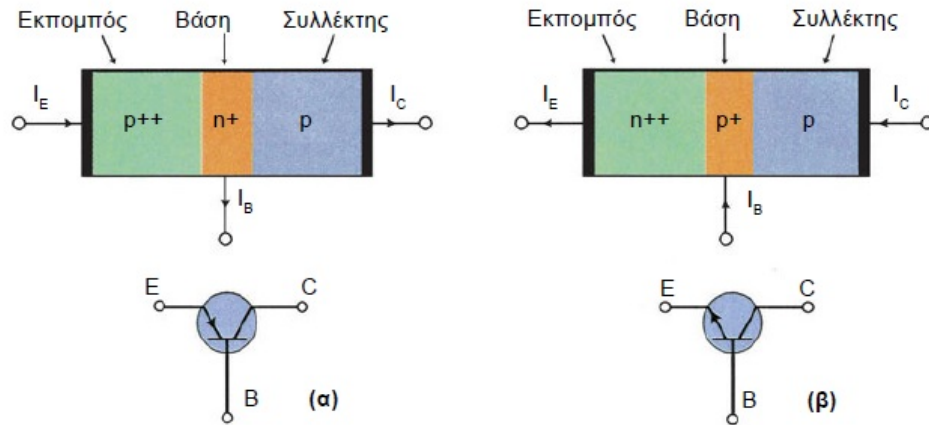
Το πηνίο στο εναλλασσόμενο ρεύμα

Στα κυκλώματα συνεχούς ρεύματος, το πηνίο ισοδυναμεί με βραχυκύκλωμα, δηλαδή δεν έχει αντίσταση. Αντίθετα, στο εναλλασσόμενο ρεύμα παρουσιάζει κάποια αντίσταση, που σχετίζεται με τη συχνότητα f . Πιο συγκεκριμένα, το πηνίο παρουσιάζει αντίσταση που ονομάζεται **επαγωγική αντίσταση (Z_L ή X_L)**, και είναι ίση με: $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$. Ο παραπάνω τύπος δείχνει ότι η τιμή της επαγωγικής αντίστασης αυξάνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα του ρεύματος.

3.4 Το τρανζίστορ

Δομή του τρανζίστορ

Το **τρανζίστορ** είναι ένας κρύσταλλος με τρεις περιοχές εμπλουτισμένες με προσμίξεις. Ανάλογα με τον τρόπο εμπλουτισμού, τα τρανζίστορ διακρίνονται σε δύο τύπους, το PNP και το NPN (σχ. 3.4.1α και β αντίστοιχα), όπου η σειρά των γραμμάτων εκφράζει τον τύπο του ημιαγωγού κάθε περιοχής. Οι τρεις περιοχές ενός τρανζίστορ ονομάζονται, ανάλογα με τη λειτουργία τους, **εκπομπός (emitter-E)**, **βάση (base-B)** και **συλλέκτης (collector-C)**. Ο εκπομπός είναι μια έντονα εμπλουτισμένη περιοχή, στο σχ. 3.4.1 αυτό τονίζεται με δύο $++$. Προορισμός του είναι να εκπέμπει φορτία προς τη βάση. Η βάση είναι μια περιοχή λιγότερο εμπλουτισμένη, στο σχ. 3.4.1 αυτό τονίζεται με ένα $+$, και είναι πολύ λεπτή. Το λεπτό πάχος της βάσης επιτρέπει στα περισσότερα φορτία, τα οποία εκπέμπονται από τον εκπομπό, να φθάνουν στο συλλέκτη όπου και συλλέγονται.



Σχήμα 3.4.1 Δομή και κυκλωματικό σύμβολο ενός τρανζίστορ (α) PNP και (β) ενός NPN

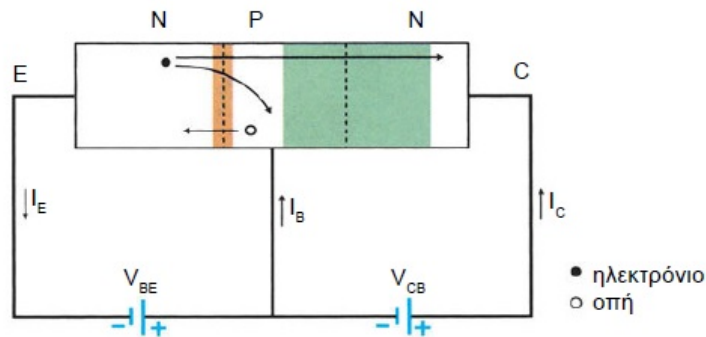
Σε κάθε τρανζίστορ σχηματοποιούνται **δύο διόδους**, μια μεταξύ βάσης και εκπομπού και μια μεταξύ βάσης και συλλέκτη. Γι' αυτό το λόγο ένα τρανζίστορ μοιάζει σαν να αποτελείται από δύο διόδους συνδεδεμένες σε αντίθετη φορά. Επειδή στη συνέχεια θα χρειασθεί να γίνει αρκετές φορές αναφορά σε αυτές τις διόδους, από εδώ και πέρα θα αποκαλούνται για λόγους συντομίας: **δίοδος ή επαφή εκπομπού** (η πρώτη) και **δίοδος ή επαφή συλλέκτη** (η δεύτερη).

Το κυκλωματικό σύμβολο ενός τρανζίστορ PNP και ενός NPN δίδονται στο σχ. 3.4.1α και β αντίστοιχα. Το βέλος βρίσκεται πάντα στον εκπομπό και δείχνει τη συμβατική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Η φορά του βέλους δείχνει επίσης τον N-τύπου ημιαγωγό. Έτσι, στο σχ. 3.4.1α (PNP) το βέλος δείχνει προς τη βάση, η οποία είναι N-τύπου, ενώ στο σχ. 3.4.1β (NPN) το βέλος δείχνει προς τον εκπομπό, ο οποίος είναι πάλι N-τύπου.

Αρχή λειτουργίας του τρανζίστορ

Η λειτουργία ενός τρανζίστορ, στην απλουστευμένη προσέγγιση της, βασίζεται στην εκπομπή φορέων από τον εκπομπό και τη συλλογή τους από το συλλέκτη. Για να γίνει αυτό καλύτερα κατανοητό, θα εξετάσουμε ένα τρανζίστορ τύπου NPN (σχ. 3.4.2), όπου θα χρησιμοποιήσουμε τη συμβατική φορά των ρευμάτων. Αρχικά θεωρούμε ότι η δίοδος εκπομπού είναι ορθά πολωμένη. Όταν η τάση βάσης-εκπομπού (V_{BE}) είναι μικρότερη από 0,7 V (για τρανζίστορ πυριτίου) δεν διέρχεται πρακτικά ρεύμα από τη βάση προς τον εκπομπό. Αν η τάση βάσης-εκπομπού ξεπεράσει τα 0,7 V θα υπάρξει αισθητή ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων από τον εκπομπό προς τη βάση και ελεύθερων οπών από τη

βάση προς τον εκπομπό. Η βάση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα ημιαγωγού τύπου-p, το οποίο είναι λιγότερο εμπλουτισμένο από ότι ο εκπομπός. Εξ' άλλου η επαφή του συλλέκτη, όπως φαίνεται στο σχ. 3.4.2, είναι ανάστροφα πολωμένη και περιορίζει σημαντικά το εύρος της βάσης. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού των ηλεκτρονίων τα οποία δε θα παραμείνουν στο χώρο της βάσης, αλλά θα εισέλθουν στο χώρο της επαφής του συλλέκτη. Το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή φορτίου χώρου του συλλέκτη έχει τέτοια φορά, ώστε να ωθεί τα ηλεκτρόνια τα οποία έχουν εισέλθει προς τον συλλέκτη. Στη συνέχεια αυτά τα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την επαφή του συλλέκτη και δίδουν το ρεύμα συλλέκτη (I_C).



Σχήμα 3.4.2. Πόλωση του τρανζίστορ και ροή των ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία παραμένουν στο χώρο της βάσης, μαζί με τις ελεύθερες οπές, οι οποίες εισέρχονται στην περιοχή του εκπομπού, δίνουν το **ρεύμα βάσης (I_B)**. Επειδή το ρεύμα αυτό προκύπτει από αλληλεξουδετέρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων με ελεύθερες οπές, ονομάζεται και **ρεύμα επανασύνδεσης** στα τρανζίστορ **διπολικά** (bipolar ή **BJT**). Στα περισσότερα τρανζίστορ, περισσότερο από το 95% των φορτίων, που εκπέμπονται από τον εκπομπό, φθάνουν στο συλλέκτη και λιγότερο από το 5% παραμένουν στη βάση και συμβάλλουν στο ρεύμα της βάσης.

Για τη λειτουργία των τρανζίστορ ο αναγνώστης πρέπει να θυμάται τα εξής:

1. Σε κανονική λειτουργία η επαφή εκπομπού είναι πάντα ορθά πολωμένη και η επαφή συλλέκτη είναι ανάστροφα πολωμένη. Υπάρχουν κάποιες ειδικές περιπτώσεις, όπου η επαφή συλλέκτη είναι ορθά πολωμένη.
2. Το ρεύμα συλλέκτη είναι περίπου ίσο με το ρεύμα του εκπομπού
3. Το ρεύμα βάσης είναι πολύ μικρό.

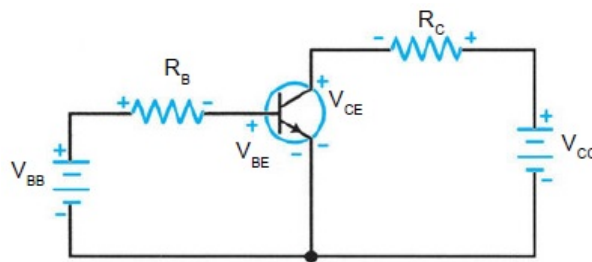
Θεωρώντας το τρανζίστορ ως κόμβο διαπιστώνουμε, από το νόμο Ρευμάτων του Kirchhoff, ότι το ρεύμα εκπομπού είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων βάσης και συλλέκτη: $I_E = I_B + I_C$

Το ποσοστό των ελεύθερων φορέων του εκπομπού, το οποίο φτάνει στο συλλέκτη και δίνει το ρεύμα συλλέκτη εκφράζεται από το συντελεστή α_{DC} , ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο του ρεύματος του συλλέκτη προς το ρεύμα του εκπομπού: $\alpha_{DC} = I_C / I_E$

Εάν σε ένα τρανζίστορ αυξηθεί η τάση της διόδου εκπομπού του θα αυξηθεί το ρεύμα βάσης I_B και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος συλλέκτη I_C . Πειραματικά διαπιστώνεται, ότι υπάρχει σχέση (αναλογία) μεταξύ ρεύματος βάσης και ρεύματος συλλέκτη. Γι' αυτό το λόγο υπάρχει δυνατότητα ελέγχου του ρεύματος συλλέκτη μέσω του ρεύματος βάσης. Επειδή το ρεύμα βάσης είναι μικρό ενώ το ρεύμα του συλλέκτη μεγάλο, ορίζεται ένας συντελεστής ο οποίος ονομάζεται DC απολαβή ρεύματος β_{DC} , ως το πηλίκο του ρεύματος συλλέκτη προς το ρεύμα βάσης: $\beta_{DC} = I_C / I_B$

Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού – Κύκλωμα ενισχυτή με τρανζίστορ

Στο σχήμα 3.4.3 παρουσιάζεται *συνδεσμολογία κοινού εκπομπού* (common emitter, CE). Σε αυτό το κύκλωμα υπάρχει η πηγή V_{BB} για τροφοδοσία του βρόχου της διόδου βάσης και η πηγή V_{CC} για τροφοδοσία του βρόχου της διόδου συλλέκτη. Η πηγή V_{BB} πρέπει να πολώνει ορθά τη διόδο εκπομπού και η V_{CC} τη διόδο συλλέκτη. Οι αντιστάσεις R_B και R_C χρησιμεύουν για τον περιορισμό των ρευμάτων σε κάθε βρόχο. Μεταξύ των ακροδεκτών εμφανίζονται οι τάσεις βάσης-εκπομπού V_{BE} και συλλέκτη-εκπομπού V_{CE} .

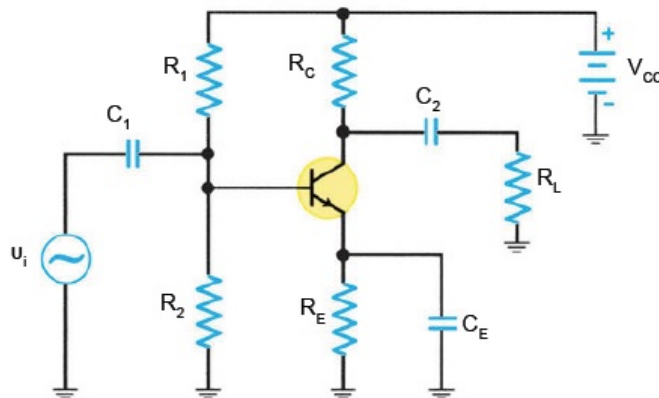


Σχήμα 3.4.3 Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού (CE)

Το κύκλωμα ενός ενισχυτή με κοινό εκπομπό παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4.4. Το κύκλωμα αποτελεί έναν ενισχυτή σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού διότι, σε ότι αφορά τη ροή σήματος και τους βρόχους εναλλασσομένου, το ηλεκτρόδιο του εκπομπού είναι κοινό, μέσω της άμεσης ή έμμεσης (με πυκνωτή) σύνδεσης του στη γη. Για να γίνει

εύκολα κατανοητή η λειτουργία του ενισχυτή θεωρούμε, ότι η σύνθετη αντίσταση των πυκνωτών είναι πολύ μικρή, δηλαδή ότι συμπεριφέρονται ως βραχυκύκλωμα για το εναλλασσόμενο και ως ανοικτό κύκλωμα για το συνεχές. Θεωρούμε επίσης, ότι η πηγή εισαγωγής εναλλασσόμενης τάσης (γεννήτρια σήματος) έχει μηδενική εσωτερική αντίσταση.

Το σήμα V_i εφαρμόζεται μεταξύ βάσης του τρανζίστορ και γης. Η σύνδεση γίνεται μέσω του πυκνωτή C_1 . Η παρεμβολή του πυκνωτή είναι απαραίτητη για να μην αλλοιωθεί η συνεχής συνιστώσα της τάσης (V_B) της βάσης. Ο εκπομπός «γειώνεται» για το εναλλασσόμενο σήμα μέσω του C_E και έτσι επιτυγχάνεται η συνδεσμολογία C_E για το εναλλασσόμενο. Η εναλλασσόμενη συνιστώσα της τάσης συλλέκτη μεταφέρεται ακέραια στην αντίσταση φόρτου χωρίς να υπάρξει αλλοίωση του σημείου λειτουργίας Q του συλλέκτη από την παρουσία της R_L . Οι πυκνωτές C_1 και C_2 ονομάζονται πυκνωτές σύζευξης, διότι μέσω αυτών γίνεται η σύζευξη μεταξύ γεννήτριας σήματος και ενισχυτή καθώς και ενισχυτή και φόρτου. Ο πυκνωτής C_E , επειδή γειώνει τον εκπομπό για το εναλλασσόμενο, ονομάζεται πυκνωτής απόζευξης ή διαρροής.



Σχήμα 3.4.4 Ενισχυτής με τρανζίστορ σε συνδεσμολογία CE

Σε έναν ενισχυτή ενδιαφέρει άμεσα η σχέση μεταξύ τάσης εξόδου και τάσης εισόδου. Γι' αυτό το λόγο ορίζεται μια απολαβή (κέρδος) τάσης του ενισχυτή A_v , ως πηλίκο της AC τάσης εξόδου (v_L), που μετριέται στα άκρα του φορτίου R_L προς την AC τάση εισόδου (v_i): $A_v = v_L / v_i$

3.5 Ενισχυτές – Τελεστικός Ενισχυτής

Γενικά περί ενισχυτών

Ο **ενισχυτής** (amplifier) είναι μια από τις σημαντικότερες βαθμίδες ή δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα αναλογικά ηλεκτρονικά. Στην απλούστερη μορφή έχει στην είσοδο δύο ακροδέκτες, στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται η τάση (σήμα) εισόδου. Έχει, επίσης, στην έξοδο δύο ακροδέκτες, στα άκρα των οποίων λαμβάνεται η τάση (σήμα) εξόδου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο ενισχυτής αντιμετωπίζεται σαν ένα **μαύρο κουτί** (black box), το οποίο περιγράφεται από ένα περιορισμένο σύνολο παραμέτρων. Μια από αυτές είναι η εξάρτηση του σήματος εξόδου από το σήμα εισόδου. Στην απλούστερη περίπτωση θεωρούμε ότι η σχέση μεταξύ τους είναι γραμμική, δηλαδή ότι το σήμα εξόδου είναι ανάλογο του σήματος εισόδου.

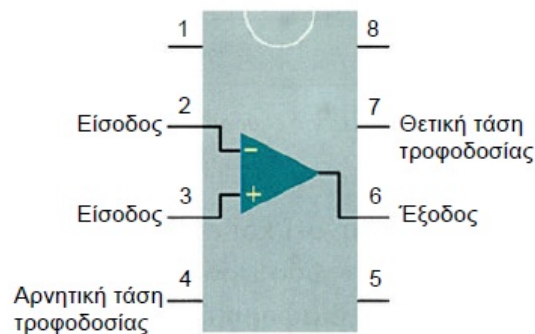
Μια άλλη αντιμετώπιση των ενισχυτών βασίζεται στον τρόπο απόκρισης τους σε σήματα τα οποία αντιστοιχούν σε συνεχείς ή εναλλασσόμενες τάσεις. Όντως, κάποιοι ενισχυτές αποκρίνονται με διαφορετικό τρόπο όταν στην είσοδο τους εφαρμοστεί μια συνεχής ή μια εναλλασσόμενη τάση. Κάποιοι άλλοι ενισχυτές αποκρίνονται διαφορετικά σε διαφορετικές συχνότητες της εναλλασσόμενης τάσης η οποία εφαρμόζεται στην είσοδό τους. Από το σύνολο των παραμέτρων ενός ενισχυτή, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η απολαβή τάσης ή ρεύματος, η σύνθετη αντίσταση εισόδου, η σύνθετη αντίσταση εξόδου και η απόκριση συχνότητας. Η **απολαβή** ή **κέρδος τάσης** ορίζεται ως το πηλίκο της τάσης εξόδου v_o προς την τάση εισόδου v_i : $A_v = v_o / v_i$. Η τάση εισόδου μπορεί να είναι απλή (μία τάση) ή διαφορική (διαφορά δύο τάσεων).

Η **σύνθετη αντίσταση εισόδου**, ή απλώς αντίσταση εισόδου, είναι η αντίσταση την οποία παρουσιάζει στην είσοδό του ο ενισχυτής. Η σύνθετη αντίσταση εξόδου, ή απλώς αντίσταση εξόδου, είναι η αντίσταση την οποία εκδηλώνει στην έξοδό του ο ενισχυτής όταν συνδέεται με μια αντίσταση φόρτου ή επόμενη βαθμίδα. Η **σύνθετη αντίσταση εξόδου** επηρεάζει τη δυνατότητα διοχέτευσης ρεύματος στο κύκλωμα εξόδου. Η **απόκριση συχνότητας** περιγράφει την απολαβή τάσης του ενισχυτή συναρτήσει της συχνότητας του σήματος εισόδου.

Τελεστικός Ενισχυτής (TE)

Ένας σημαντικός αριθμός ενισχυτικών κυκλωμάτων βασίζονται σε μια από τις βασικότερες μονάδες των σύγχρονων ηλεκτρονικών. Η μονάδα αυτή ονομάζεται **τελεστικός ενισχυτής** (operational amplifier ή, συντομευμένα, **op-amp**). Το «τελεστικός» (operational) πηγάζει από το γεγονός ότι αυτός ο ενισχυτής, αρχικά χρησιμοποιούνταν στους αναλογικούς υπολογιστές για να εκτελεί μαθηματικές πράξεις, όπως πρόσθεση, αφαίρεση, ολοκλήρωση, παραγωγή, κ.α.

Ο τελεστικός ενισχυτής έχει δύο εισόδους και μία έξοδο. Απαιτούνται επίσης δύο επιπλέον ακροδέκτες για την τροφοδοσία του. Η τροφοδοσία ενός τελεστικού ενισχυτή μπορεί να γίνει είτε με τη βοήθεια μιας μόνο πηγής τάσης είτε με τη βοήθεια δύο πηγών, οπότε οι τάσεις οι οποίες τροφοδοτούν τους αντίστοιχους ακροδέκτες θα είναι συμμετρικές ως προς τη «γη» του κυκλώματος. Επιπλέον, μπορεί να υπάρχουν και άλλοι ακροδέκτες οι οποίοι να επιτρέπουν την προσπέλαση στο εσωτερικό κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή. Έτσι στην ελάχιστη μορφή του ένας τελεστικός απαιτεί πέντε ακροδέκτες και τοποθετείται σε ένα κέλυφος οκτώ ακροδεκτών, οι οποίοι είναι διατεταγμένοι σε δύο σειρές (Dual In Line, DIL8), κατά την κάτοψη που φαίνεται στο σχ. 3.5.1. Στα ηλεκτρονικά διαγράμματα, για να αποφευχθεί η πολυπλοκότητα τους, συνήθως δεν παρουσιάζονται όλες οι παραπάνω λεπτομέρειες όπως οι ακροδέκτες τροφοδοσίας και το κέλυφος στο οποίο είναι τοποθετημένος ένας τελεστικός ενισχυτής.



Σχήμα 3.5.1 Κυκλωματικό σύμβολο τελεστικού ενισχυτή, τοποθετημένο στο κέλυφος (package) αυτού

Ο τελεστικός ενισχυτής ενισχύει και επεξεργάζεται τη διαφορά των σημάτων που εφαρμόζεται στις δύο εισόδους και γι' αυτό το λόγο λέμε ότι ο τελεστικός ενισχυτής έχει **διαφορική είσοδο**. Επειδή ο τελεστικός ενισχυτής επεξεργάζεται τη διαφορά των

σημάτων των εισόδων πρέπει ο χρήστης να γνωρίζει ποια είσοδος αντιστοιχεί στον αφαιρέτη και ποια στον αφαιρετέο, δηλαδή ποιο σήμα αφαιρείται από ποιο. Γι' αυτό το λόγο οι είσοδοι ξεχωρίζουν μεταξύ τους με τα σημεία (+), που συμβολίζει τη λεγόμενη **μη-αναστρέφουσα είσοδο** (non-inverting input, NI) και (-), που συμβολίζει τη λεγόμενη **αναστρέφουσα είσοδο** (inverting input, I). Επειδή οι όροι μη-αναστρέφουσα και αναστρέφουσα είσοδος μπορεί να προκαλούν σύγχυση, ως προς το όνομά τους, θα δοθεί αμέσως παρακάτω εκτενέστερη επεξήγηση τους.

Αν η μη-αναστρέφουσα είσοδος είναι πιο θετική από την αναστρέφουσα τότε η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή είναι θετική. Αν η αναστρέφουσα είσοδος είναι πιο θετική από την μη-αναστρέφουσα τότε η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή είναι αρνητική. Χρησιμοποιώντας το σύμβολο $V(+)$ για την τάση που εφαρμόζεται στη μη-αναστρέφουσα είσοδο και το $V(-)$ για την τάση που εφαρμόζεται στην αναστρέφουσα είσοδο, τα παραπάνω συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

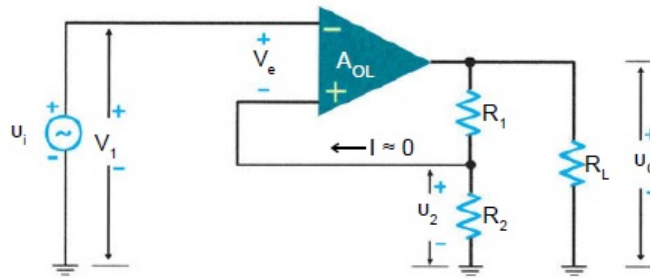
Διαφορά τάσεων εισόδου	Πολικότητα τάσης εξόδου
$V_{(+)} > V_{(-)}$	$V_o > 0$
$V_{(-)} > V_{(+)}$	$V_o < 0$

Η απολαβή τάσης Αν ενός πραγματικού τελεστικού ενισχυτή είναι *διαφορική* απολαβή τάσης. Έτσι, το σήμα εξόδου θα είναι ανάλογο της διαφοράς των σημάτων εισόδου, δηλαδή: $V_o = A_v \cdot (V_+ - V_-)$, όπου οι δείκτες (+) και (-) αναφέρονται στη μη αναστρέφουσα και την αναστρέφουσα είσοδο, αντίστοιχα.

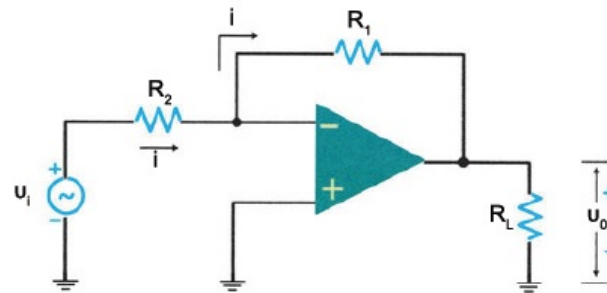
Βασικά κυκλώματα με τελεστικό ενισχυτή

Η υψηλή απολαβή τάσης, η πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου και η πολύ μικρή αντίσταση εξόδου ενός τελεστικού ενισχυτή επιτρέπουν τη σχεδίαση μεγάλης ποικιλίας κυκλωμάτων για την επιτέλεση διαφόρων ηλεκτρονικών λειτουργιών. Τα περισσότερα από τα κυκλώματα αυτά βασίζονται στην εφαρμογή αρνητικής ανασύζευξης ή ανατροφοδότησης μεταξύ εξόδου και της αναστρέφουσας εισόδου του ΤΕ. Αφού οι τελεστικοί ενισχυτές έχουν δύο εισόδους, την αναστρέφουσα και τη μη-αναστρέφουσα, ο συνδυασμός εφαρμογής σήματος εισόδου και ανατροφοδότησης του σήματος εξόδου δίνουν τη δυνατότητα σχεδίασης δυο βασικών κατηγοριών κυκλωμάτων, που είναι τα κυκλώματα με μη-αναστρέφουσα ανατροφοδότηση και κυκλώματα με αναστρέφουσα ανατροφοδότηση. Οι τυπικοί ενισχυτές οι οποίοι κατασκευάζονται με αυτόν τον τρόπο

ονομάζονται αντίστοιχα **μη-αναστρέφων ενισχυτής** (σχήμα 3.5.2) και **αναστρέφων ενισχυτής** (σχήμα 3.5.3).



Σχήμα 3.5.2 Κύκλωμα μη-αναστρέφοντος ενισχυτή $A_{ol} = \text{Απολαβή τάσης ανοικτών βρόχου (Open loop)}$



Σχήμα 3.5.3 Κύκλωμα αναστρέφοντος ενισχυτή

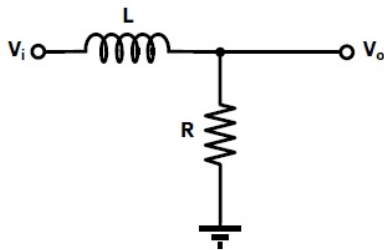
3.6 Φίλτρα

Τα **ηλεκτρικά φίλτρα** είναι κυκλώματα τα οποία μπορούν να εξασθενίσουν (να μειώσουν) το πλάτος ηλεκτρικών σημάτων σε συγκεκριμένες συχνότητες. Υπάρχουν αρκετές κατηγοριοποιήσεις φίλτρων: α) ανάλογα με τις *βαθμίδες φιλτραρίσματος*, β) ανάλογα με τον *τύπο των εξαρτημάτων* από τα οποία είναι κατασκευασμένα, και γ) ανάλογα με την *απόκρισή τους*. Ανάλογα με τις βαθμίδες φιλτραρίσματος τα διακρίνουμε σε **1^{ης} τάξης** (με 1 βαθμ. φιλτραρίσματος), **2^{ης} τάξης**, **3^{ης} τάξης** κλπ. Όσο πιο μεγάλη είναι η βαθμίδα φιλτραρίσματος τόσο πιο αποτελεσματικό είναι το φιλτράρισμα, αλλά και τόσο πιο πολύπλοκο κατασκευαστικά είναι το φίλτρο. Ανάλογα με τα εξαρτήματα τα διακρίνουμε σε **παθητικά** φίλτρα (με *παθητικά* εξαρτήματα, όπως πυκνωτές, πηνία κλπ), και σε **ενεργά** φίλτρα (με *ενεργά* εξαρτήματα, όπως τρανζίστορ ή τελεστικοί ενισχυτές). Τα παθητικά φίλτρα είναι πιο απλά κυκλώματα στην κατασκευή.

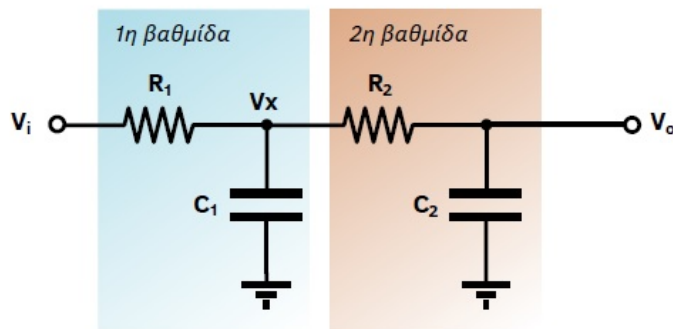
Τα ενεργά φίλτρα είναι πιο πολύπλοκα στην κατασκευή τους αλλά πολύ πιο αποτελεσματικά. Τέλος, ανάλογα με την απόκρισή τους τα διακρίνουμε σε:

- **Χαμηλοπερατά φίλτρα (Low-Pass, LP)** – επιτρέπουν τη διέλευση χαμηλών συχνοτήτων
- **Υψιπερατά φίλτρα (High-Pass, HP)** – επιτρέπουν τη διέλευση υψηλών συχνοτήτων
- **Ζωνοπερατά φίλτρα (Band-Pass, BP)** – επιτρέπουν τη διέλευση ζώνης συχνοτήτων
- **Ζωνοαπορριπτικά φίλτρα (Band-Reject, BR)** – απορρίπτουν τη διέλευση ζώνης συχνοτήτων

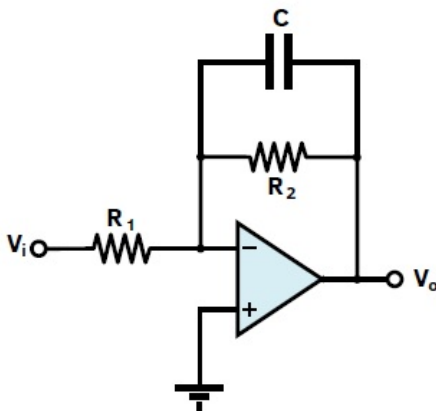
Παραδείγματα φίλτρων:



Παθητικό (R-L) φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (LP) πρώτης τάξης



Παθητικό (R-C) φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (LP) δεύτερης τάξης



Ενεργό φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (LP) πρώτης τάξης