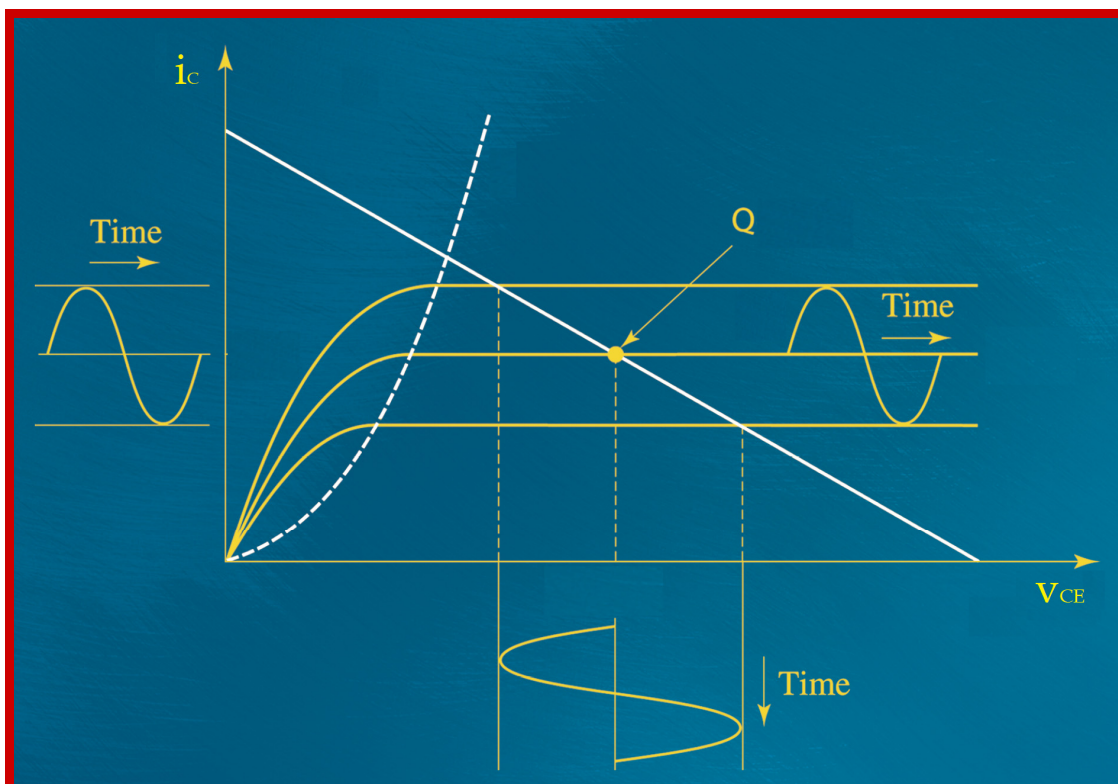


# ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

## ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ



Λ. Μπισδούνης, Καθηγητής  
Χ. Κωνσταντέλλος-Κοντογούρης, Εργαστηριακός συνεργάτης



ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Πάτρα 2020

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:</b> Εισαγωγή και βασικές έννοιες.....	3
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:</b> Παλμογράφος.....	12
Εισαγωγική εργαστηριακή άσκηση.....	18
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:</b> Ανορθωτικές διατάξεις – Τροφοδοτικά.....	21
Εργαστηριακή άσκηση 1: Ανορθωτική διάταξη γέφυρας.....	33
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:</b> Ενισχυτές ασθενών σημάτων.....	38
Εργαστηριακή άσκηση 2: Ενισχυτής με σύζευξη μέσω πυκνωτή.....	53
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:</b> Διαφορικός ενισχυτής.....	60
Εργαστηριακή άσκηση 3: Διαφορικός ενισχυτής.....	64
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:</b> Τελεστικός ενισχυτής.....	68
Εργαστηριακή άσκηση 4: Τελεστικός ενισχυτής.....	76
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>82</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### Εισαγωγή και βασικές έννοιες

#### Γενικά

**Ηλεκτρικό φορτίο (q)** ονομάζεται η ποσότητα των φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος που περιέχει ένα υλικό. Το ηλεκτρικό φορτίο εμφανίζεται ως θετικό ή αρνητικό. Στοιχειώδες αρνητικό φορτίο είναι το ηλεκτρόνιο και στοιχειώδες θετικό φορτίο είναι η σπή (η απουσία ενός ηλεκτρονίου από ένα άτομο).

**Ηλεκτρικό Ρεύμα** ονομάζεται η προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων.

**Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος** ονομάζεται η ποσότητα των ηλεκτρικών φορτίων που διέρχονται από την κάθετη τομή ενός αγωγού στη μονάδα του χρόνου.

$$I = \frac{q}{t} \quad \left( \frac{Cb}{s} \right) \text{ ή } (A)$$

Θεμελιώδης μονάδα του ηλεκτρικού ρεύματος είναι το **Ampere (A)**.

**Ηλεκτρική Τάση** ονομάζεται το έργο που παράγεται ή καταναλώνεται κατά την μετακίνηση ενός φορτίου **q** από ένα σημείο A σε ένα άλλο σημείο B μέσα στο χώρο του ηλεκτρικού πεδίου, προς το φορτίο **q**. Δηλαδή:

$$V = \frac{E}{q} \quad (V)$$

όπου **E** είναι το ηλεκτρικό καταναλισκόμενο έργο κατά τη μετακίνηση του ηλεκτρικού φορτίου **q**. Θεμελιώδης μονάδα της ηλεκτρικής τάσης είναι το Volt (V), δηλαδή η τάση μεταξύ δύο σημείων A και B είναι ένα Volt (1V), όταν η ενέργεια που απαιτείται για να μετακινηθεί ένα φορτίο του ενός Coulomb (1Cb) από το σημείο A στο σημείο B είναι ένα Joule (1J).

Η **Ηλεκτρική Τάση** προκαλεί την ροή των ηλεκτρικών φορτίων σ' ένα κύκλωμα, δηλαδή δημιουργεί το ηλεκτρικό ρεύμα. Άρα, η τάση είναι η αιτία και το ρεύμα το αποτέλεσμα

**Ηλεκτρική Ισχύς** ονομάζεται το γινόμενο της εφαρμοζόμενης τάσης **U** επί το ρεύμα **I** που οφείλεται σε αυτή. Δηλαδή:

$$P = V \cdot I$$

Θεμελιώδης μονάδα της ηλεκτρικής ισχύος είναι το **Watt (W)**.

Η **Ηλεκτρική Ενέργεια** ισούται με την **Ισχύ** μιας συσκευής επί το χρόνο λειτουργίας της συσκευής αυτής. Δηλαδή:

$$E = P \cdot t$$

Θεμελιώδης μονάδα της **ηλεκτρικής ενέργειας** είναι το **Watt-second (W·s)** ή **Joule (J)**.

**Πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος** ονομάζεται η ποσότητα του ρεύματος που διαρρέει έναν αγωγό ανά μονάδα επιφάνειας του. Δηλαδή:

$$J = \frac{I}{S}$$

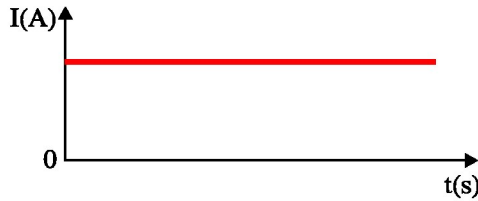
Θεμελιώδης μονάδα της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος είναι το  $\left( \frac{A}{mm^2} \right)$

Ως μονάδα επιφάνειας χρησιμοποιείται το **mm<sup>2</sup>** και όχι το **m<sup>2</sup>**, γιατί οι διατομές των αγωγών είναι μικρές (σε **mm**). Όταν αυξάνεται η πυκνότητα του ρεύματος σε έναν αγωγό, αυξάνεται και η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον αγωγό (λόγω του φαινομένου **Joule**), με κίνδυνο να καταστραφεί αυτός ή τα γειτονικά του εξαρτήματα. Για την ασφαλή λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών και διατάξεων υπάρχει για κάθε υλικό η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος σε κάθε αγωγό ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες.

**Μορφές ηλεκτρικού ρεύματος**

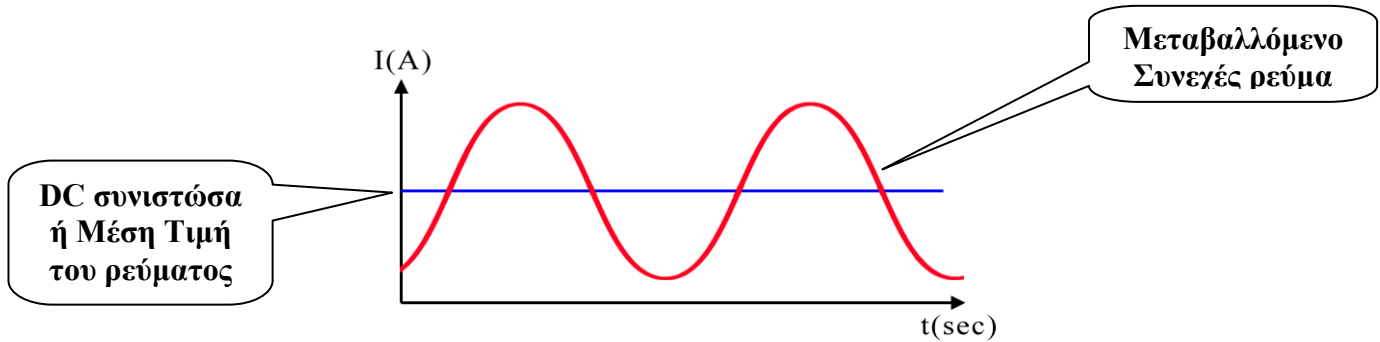
**Συνεχές Ρεύμα** ονομάζεται το ρεύμα που η φορά ροής του παραμένει σταθερή στο χρόνο.

Πηγές συνεχούς ρεύματος είναι οι μπαταρίες, οι γεννήτριες παραγωγής συνεχούς ρεύματος, τα τροφοδοτικά (μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές) και τα διάφορα ηλεκτρικά στοιχεία. Αν το Συνεχές Ρεύμα έχει σταθερό Μέτρο κατά την διάρκεια του χρόνου τότε ονομάζεται **Σταθερό Συνεχές ρεύμα** (σχήμα 1.1)



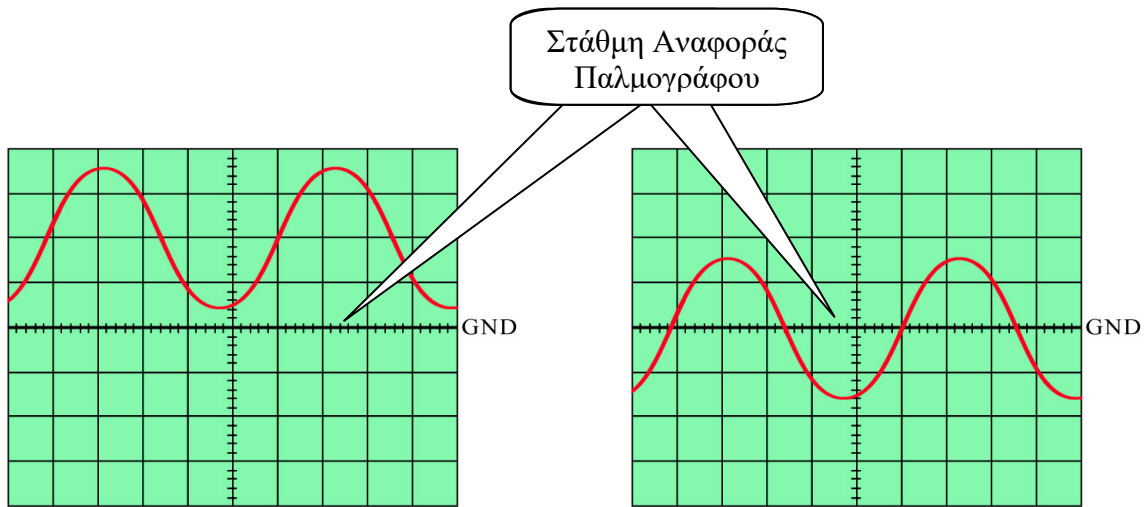
Σχήμα 1.1. Σταθερό Συνεχές ρεύμα.

Αν το Μέτρο του Συνεχούς Ρεύματος μεταβάλλετε κατά την διάρκεια του χρόνου τότε ονομάζεται **Μεταβαλλόμενο Συνεχές ρεύμα** (σχήμα 1.2)



Σχήμα 1.2 – Μεταβαλλόμενο Συνεχές ρεύμα.

Το **Μεταβαλλόμενο Συνεχές ρεύμα διερχόμενο** μέσα από ένα παθητικό στοιχείο (αντίσταση) δημιουργεί στα άκρα του Μεταβαλλόμενη Συνεχή Τάση την οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε μόνο με τον παλμογράφο έχοντας επιλέξει DC σύζευξη (σχήμα 1.3α). Αν επιλέξουμε στον παλμογράφο AC σύζευξη τότε θα χάσουμε (δεν θα δούμε) την DC συνιστώσα της τάσης αλλά θα δούμε μόνο την περιβάλλουσα μορφή αυτής (σχήμα 1.3β)



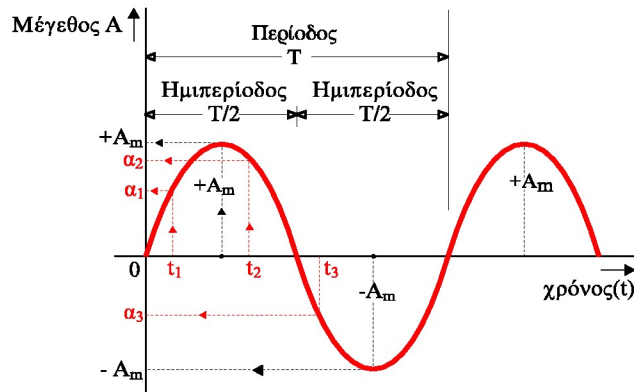
Σχήμα 1.3α – DC σύζευξη

Σχήμα 1.3β – AC σύζευξη

**Γραφική Παράσταση της Κυματομορφής ενός Ηλεκτρικού Μεγέθους** ονομάζεται η Γραφική Απεικόνιση του Πλάτους (Έντασης) του Ηλεκτρικού Μεγέθους συναρτήσει του χρόνου.

Μια Γραφική Παράσταση θεωρείται ικανοποιητική (επαρκής) εφόσον είναι εμπλουτισμένη με τιμές ώστε να μπορεί κάποιος να αντλήσει απ’ αυτήν πληροφορίες όχι μόνο για την μορφή της αλλά και για τις διάφορες τιμές που παίρνει το Ηλεκτρικό Μέγεθος κατά την διάρκεια του χρόνου.

Το μέγεθος **A** που φαίνεται στη γραφική παράσταση του παρακάτω σχήματος 1.4. και του οποίου οι στιγμιαίες τιμές ακολουθούν μια καμπύλη γραμμή παρόμοια με την καμπύλη μεταβολής του **ημίτονου** μιας γωνίας, χαρακτηρίζεται ως **εναλλασσόμενο** ή **ημιτονικό** μέγεθος.



Σχήμα 1.4 – Γραφική παράσταση εναλλασσόμενου μεγέθους.

Από τη μελέτη της καμπύλης αυτής παρατηρούμε ότι η τιμή του εναλλασσόμενου μεγέθους αυξάνεται από το μηδέν σε μια μέγιστη τιμή  $+A_m$ , η οποία ονομάζεται και πλάτος ( $V_{max}$  ή  $V_{peak}$ ), και μετά ελαττώνεται μέχρι μηδενισμού.

Στη συνέχεια, η τιμή του εναλλασσόμενου μεγέθους αυξάνεται πάλι αλλά με αντίθετη φορά τώρα μέχρι να λάβει μια αντίθετη ίση μέγιστη τιμή με το  $+A_m$ , την  $-A_m$ , και ελαττώνεται ξανά μέχρι να μηδενιστεί για να συνεχίσει της μεταβολές του από την αρχή.

Ο τρόπος αυτός των όμοιων εναλλαγών ή κύκλων επαναλαμβάνεται σε ίσα χρονικά διαστήματα.

Ο σταθερός χρόνος μέσα στον οποίο το εναλλασσόμενο μέγεθος συμπληρώνει μια πλήρη εναλλαγή ή κύκλο ονομάζεται περίοδος  $T$ .

Οι τιμές του εναλλασσόμενου μεγέθους προς την μία κατεύθυνση θεωρούνται θετικές ενώ προς την αντίθετη κατεύθυνση αρνητικές.

Σε διαφορετικές χρονικές στιγμές π.χ  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  παρατηρούμε πως οι τιμές του εναλλασσόμενου μεγέθους είναι διαφορετικές μεταξύ τους  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  αντίστοιχα. Η καθεμιά από τις τιμές αυτές αποκαλείται στιγμιαία και υπολογίζεται από τη θεμελιώδη εξίσωση των εναλλασσόμενων μεγεθών:

$$a = A_m \eta \mu \varphi$$

όπου:  $A_m$  = η μέγιστη τιμή του εναλλασσόμενου μεγέθους που λαμβάνεται, όταν  $\eta \mu \omega t = 1$ .

$\varphi$  = η γωνία φάσης του εναλλασσόμενου μεγέθους, η οποία αυξάνεται συνεχώς με τον χρόνο και δίνεται από τη σχέση:  $\varphi = \omega t$ .

Ο σταθερός ρυθμός μεταβολής της φάσης ανά δευτερόλεπτο ονομάζεται **κυκλική συχνότητα**  $\omega$  του εναλλασσόμενου μεγέθους και είναι:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f \quad \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

Όπως προαναφέραμε το εναλλασσόμενο μέγεθος διατηρεί τη μια από τις δύο κατευθύνσεις του στον μισό χρόνο της περιόδου, δηλαδή στο χρόνο μιας **ημιπεριόδου** ( $T/2$ ), ενώ στην αμέσως επόμενη **ημιπερίοδο** ( $T/2$ ) το μέγεθος έχει την αντίθετη φορά.

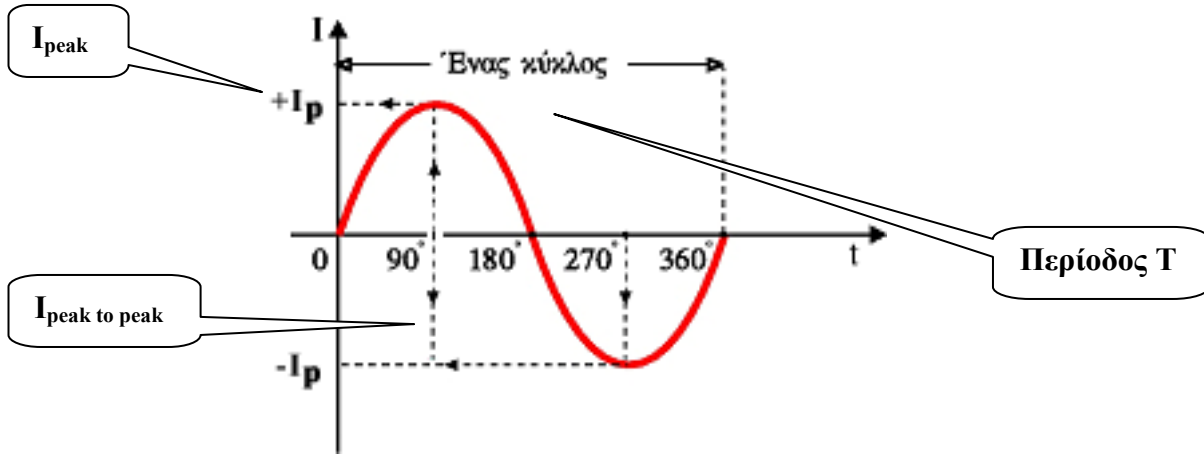
**Ο σταθερός αριθμός των πλήρων εναλλαγών σε ένα δευτερόλεπτο ονομάζεται συχνότητα (f)** του εναλλασσόμενου μεγέθους.

Η συχνότητα ενός εναλλασσόμενου μεγέθους και η περίοδος αυτού είναι μεγέθη αντίστροφα μεταξύ τους και συνδέονται με τη σχέση:

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Hz})$$

**Εναλλασσόμενο Ημιτονοειδές Ρεύμα** είναι το ρεύμα που ακολουθεί τη μορφή μεταβολής του ημίτονου, δηλαδή χωρίς σταθερό Μέτρο και Πολικότητα (σχήμα 1.5).

Δηλαδή την μια ημιπερίοδο το ρεύμα ρέει στο κύκλωμα κατά την μία κατεύθυνση (φορά, πολικότητα) και την άλλη ημιπερίοδο το ρεύμα ρέει στο κύκλωμα κατά την αντίθετη κατεύθυνση (φορά, πολικότητα).



Σχήμα 1.5 – Εναλλασσόμενο Ημιτονοειδές Ρεύμα

Για παράδειγμα τέτοιας μορφής ρεύμα μπορεί να προκύψει σε ένα κύκλωμα αν εφαρμόσουμε σε αυτό την τάση που παράγει η Δ.Ε.Η. (η οποία έχει συχνότητα  $f=50\text{Hz}$ ). Η περίοδος της εναλλασσόμενης τάσης της Δ.Ε.Η. (άρα και του ρεύματος) είναι:

$$T = \frac{1}{f} \Leftrightarrow T = \frac{1}{50} \Leftrightarrow T = 0.02 \text{ sec}$$

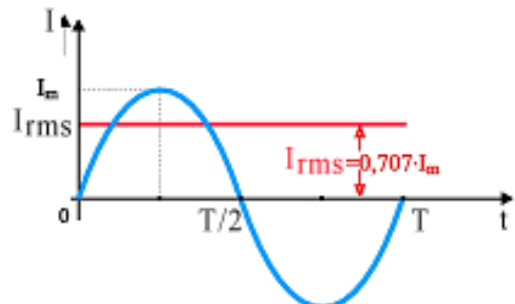
Από τα προηγούμενα φαίνεται πως δεν είναι εύκολο να μετρηθεί άμεσα η μέγιστη ή η στιγμιαία τιμή ενός εναλλασσόμενου μεγέθους, γι' αυτό πολλές φορές χρησιμοποιείται η έννοια της ενεργής τιμής του.

Επιπλέον τα απλά εργαστηριακά όργανα ηλεκτρικών μετρήσεων (βολτόμετρο, αμπερόμετρο) όταν χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος δείχνουν την ενεργό τιμή της τάσης και της έντασης και όχι την μέγιστη ή την στιγμιαία τιμή. Έτσι αν πρόκειται για εναλλασσόμενο ρεύμα ορίζουμε την ενεργή τιμή της έντασης του ρεύματος, ενώ αν πρόκειται για εναλλασσόμενη τάση ορίζουμε την ενεργή τιμή αυτής.

Ορίζουμε ως ενεργό τιμή της έντασης του εναλλασσόμενου ρεύματος ( $I_{rms}$ ) την ένταση ενός ισοδύναμου συνεχούς ρεύματος, το οποίο αν διέρρηε την ίδια ωμική αντίσταση με το εναλλασσόμενο ρεύμα θα απέδιδε πάνω της ποσό θερμότητας ίσο με αυτό που της προκαλεί το εναλλασσόμενο ρεύμα στο ίδιο χρονικό διάστημα. (σχήμα 1.6)

Η **ενεργός τιμή** του εναλλασσόμενου ρεύματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow I_{rms} = 0.707 \cdot I_m$$



Σχήμα 1.6

Δηλαδή, η ενεργός τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι περίπου το 70,7% της μέγιστης τιμής αυτού ( $I_m$ ).

Αντίστοιχα ορίζουμε ως ενεργό τιμή της εναλλασσόμενης τάσης την ισοδύναμη συνεχή τάση που αν εφαρμοσθεί σε ίδια ωμική αντίσταση δημιουργεί συνεχές ρεύμα σ' αυτή ίδιας τιμής με την ενεργό τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος, όταν αυτό διαρρέει την αντίσταση αυτή.

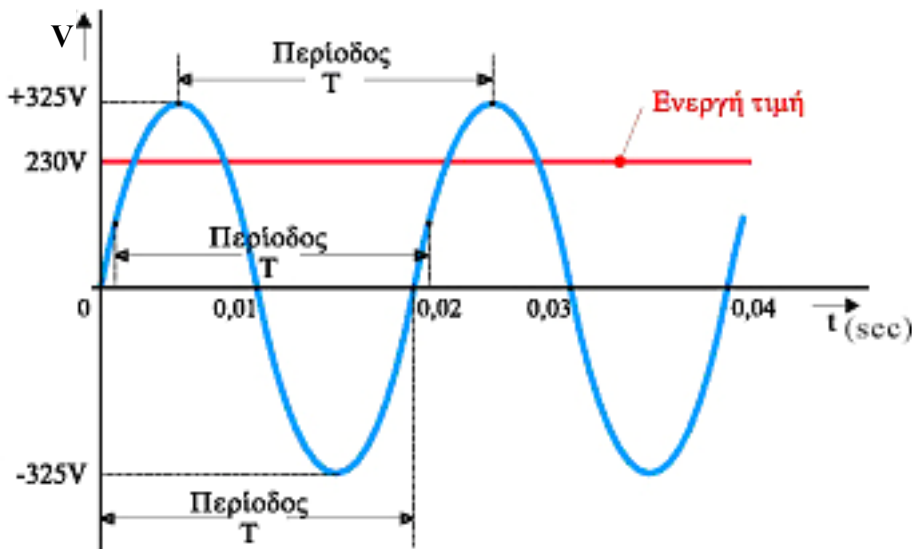
Η ενεργός τιμή της εναλλασσόμενης τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow V_{\text{rms}} = 0.707 \cdot V_m$$

όπου:  $V_m$  = η μέγιστη τιμή (πλάτος) της εναλλασσόμενης τάσης.

Δηλαδή, η ενεργός τιμή της εναλλασσόμενης τάσης είναι περίπου το 70,7% της μέγιστης τιμής αυτής.

Σε αντίθεση με τα απλά εργαστηριακά όργανα ηλεκτρικών μετρήσεων (βολτόμετρο, αμπερόμετρο) που όταν χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος δείχνουν την ενεργό τιμή της τάσης και της έντασης, ο παλμογράφος απεικονίζει όλη την κυματομορφή και έτσι μπορούμε να μετρήσουμε μ' αυτόν το πλάτος και την περίοδο της εναλλασσόμενης κυματομορφής.



Σχήμα 1.7 – Κυματομορφή Τάσης Μονοφασικού Δικτύου οικιακής χρήσης της Δ.Ε.Η.

Αν παρατηρήσουμε στην οθόνη του παλμογράφου την κυματομορφή της εναλλασσόμενης τάσης του μονοφασικού δικτύου της Δ.Ε.Η. (σχήμα 1.7), βλέπουμε πως η περιοδική μεταβολή της τάσης από την αρχική μηδενική τιμή της αυξάνεται μέχρι περίπου στα 325V και κατόπιν μειώνεται μέχρι να μηδενισθεί σε χρόνο της τάξης του 0,01 δευτερολέπτου (10msec). Από το σημείο αυτό αυξάνεται πάλι προς την αντίθετη φορά μέχρι περίπου τα - 325V και κατόπιν μειώνεται μέχρι να μηδενισθεί, σε χρόνο πάλι της τάξης του 0,01 δευτερολέπτου. Ο χρόνος αυτός αναφέρεται στην ημιπερίοδο της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου της Δ.Ε.Η..

Ο χρόνος μιας πλήρους μεταβολής δηλαδή η περίοδος (T) της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου, είναι το άθροισμα των δύο παραπάνω χρόνων. Δηλαδή:

$$T=0,01+0,01=0,02 \text{ sec} \quad T = \frac{1}{f} \Leftrightarrow T = \frac{1}{50} \Leftrightarrow T = 0.02 \text{ sec} = 20\text{msec}$$

Η ενεργός τιμή της τάσης θα είναι:  $V_{\text{rms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow V_{\text{rms}} = 0.707 \cdot 325 = 230\text{V}$

Δηλαδή η τάση που θα μετρήσουμε με ένα βολτόμετρο τοποθετημένο σε μια μονοφασική πρίζα (ενεργός τάση,  $V_{\text{rms}}$ ) είναι 230V.

### Αντίσταση

Αντίσταση ονομάζεται η δυσκολία που παρουσιάζει ένα υλικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτό. Θεμελιώδης μονάδα της ηλεκτρικής αντίστασης είναι το Ohm ( $\Omega$ ). Η αντίσταση ενός υλικού εξαρτάται από τη χημική του σύσταση και τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά. Η χημική σύσταση του υλικού καθορίζει την ειδική του αντίσταση η οποία διεθνώς συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα  $\rho$ .  $\Omega$ s

μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης έχει επικρατήσει το  $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

Η Αντίσταση λοιπόν ενός αγωγού είναι ανάλογη της χημικής σύστασης του αγωγού (ειδική αντίσταση  $\rho$ ), του μήκους του αγωγού ( $l$ ) και αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του αγωγού ( $S$ ).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

Τα υλικά που χαρακτηρίζονται ως Αγωγοί έχουν πολύ μικρή αντίσταση σε σχέση με τα υλικά που χαρακτηρίζονται ως Μονωτές.

Ημιαγωγοί ονομάζονται τα υλικά τα οποία κάτω από ορισμένες συνθήκες συμπεριφέρονται σαν αγωγοί και κάτω από άλλες συνθήκες συμπεριφέρονται σαν μονωτές.

Διηλεκτρικά ονομάζονται όλα τα μη μέταλλα.

Αγωγιμότητα είναι το αντίστροφο της Αντίστασης και μετριέται σε S ή mho,  $G = \frac{1}{R}$

Οι Αγωγοί έχουν μεγάλη Αγωγιμότητα σε σχέση με τους Μονωτές.

Υλικά		Ειδική αντίσταση $\rho$ στους 20°C ( $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ )	Ειδική αγωγιμότητα $\kappa$ στους 20°C ( $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ )
Υλικά αγωγών	Χαλκός	0.0177	56.5
	Αλουμίνιο	0.028	35.3
Υλικά αντιστάσεων	Μαγγανίνη	0.44	2.33
	Χρωμονικελίνη	1	1
	Γραφίτης	40	0.025

Πίνακας 1.1 – Ειδική Αντίσταση και Ειδική Αγωγιμότητα ηλεκτροτεχνικών υλικών

## Νόμος του Ohm

Η ένταση του ρεύματος ( $I$ ) που διαρρέει ένα κύκλωμα είναι ανάλογη με την εφαρμοζόμενη τάση ( $V$ ) και αντιστρόφως ανάλογη με την αντίσταση ( $R$ ) που παρουσιάζει αυτό. Δηλαδή:

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{ή} \quad V = I \cdot R \quad \text{ή} \quad R = \frac{V}{I}$$

Πρέπει να τονίσουμε ότι δεν μπορούμε να μετρήσουμε με ένα Ωμόμετρο μια αντίσταση πάνω σε ένα κύκλωμα όταν αυτό βρίσκεται υπό τάση, γιατί τα ωμόμετρα έχουν δική τους εσωτερική πηγή τάσης η οποία θα έρθει σε σύγκρουση με τις τάσεις του κυκλώματος με αποτέλεσμα να έχουμε λανθασμένη ένδειξη στο Ωμόμετρο ή να προκαλέσουμε και ζημιά.

Ακόμα και αν το κύκλωμα στο οποίο είναι συνδεδεμένη η αντίσταση δεν βρίσκεται υπό τάση, πάλι δεν μπορούμε να μετρήσουμε απευθείας την αντίσταση με το Ωμόμετρο γιατί στην ουσία αυτό που θα μετρήσουμε (η ένδειξη που θα δείξει το Ωμόμετρο) θα είναι η αντίσταση παράλληλα με όλα τα άλλα στοιχεία του κυκλώματος που είναι συνδεδεμένα με αυτή, άρα θα έχουμε ψευδή μέτρηση.

Ο σωστός τρόπος είναι να απομονώσουμε την προς μέτρηση αντίσταση από το υπόλοιπο κύκλωμα (τουλάχιστον το ένα άκρο της) και τότε να την μετρήσουμε με το Ωμόμετρο.

Αν δεν μπορούμε να το κάνουμε αυτό τότε καταφεύγουμε σε έναν από τους δύο παρακάτω τρόπους:

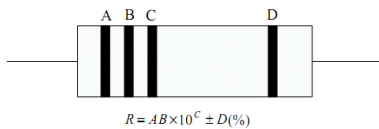
1. Με ένα Βολτόμετρο μετράμε την πτώση τάσης στα όρια της (όταν το κύκλωμα βρίσκεται υπό τάση), με ένα Αμπερόμετρο το ρεύμα που την διαρρέει και κάνοντας χρήση του νόμου του Ohm βρίσκουμε την αντίσταση της.



2. Βρίσκουμε την τιμή της αντίστασης όχι με Ωμόμετρο αλλά χρησιμοποιώντας τον διεθνή χρωματικό κώδικα (παρατηρώντας τα χρώματα στον κορμό της αντίστασης).

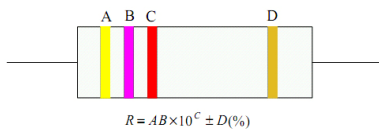
ΧΡΩΜΑ	A, B, C	D	ΑΝΟΧΗ
ΜΑΥΡΟ	0	ΑΣΗΜΙ	10%
ΚΑΦΕ	1	ΧΡΥΣΟ	5%
ΚΟΚΚΙΝΟ	2	ΚΟΚΚΙΝΟ	2%
ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ	3	ΚΑΦΕ	1%
ΚΙΤΡΙΝΟ	4		
ΠΡΑΣΙΝΟ	5		
ΜΠΛΕ	6		
ΜΩΒ	7		
ΣΤΑΧΤΙ	8		
ΛΕΥΚΟ	9		

Διεθνής χρωματικός κώδικας



$$R = A B \times 10^C \pm D (\%)$$

Αν πρόκειται για αντίσταση με τέσσερα χρώματα τότε τα δύο πρώτα είναι καθαροί αριθμοί, το τρίτο χρώμα είναι ο συντελεστής πολλαπλασιασμού και το πέμπτο χρώμα είναι η ανοχή της επί της εκατό. Αν πρόκειται για αντίσταση με πέντε χρώματα τότε τα τρία πρώτα είναι καθαροί αριθμοί, το τέταρτο χρώμα είναι ο συντελεστής πολλαπλασιασμού και το πέμπτο χρώμα είναι η ανοχή της επί της εκατό.



**Παράδειγμα:** η διπλανή αντίσταση είναι  
 $R = \text{κίτρινο} - \text{μωβ} \times 10^{\text{κόκκινο}} \pm \text{χρυσό} (\%) = 47 \times 10^2 \pm 5 (\%) \Omega$   
 άρα  $R = 4700\Omega = 4.7\text{K}\Omega$

Τέλος να αναφέρουμε ότι ο νόμος του Ohm εφαρμόζεται σε ηλεκτρικά ωμικά στοιχεία που στα άκρα τους εφαρμόζεται συνεχής τάση. Αν στα άκρα τους εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση τότε ο νόμος του Ohm μπορεί να εφαρμοστεί εάν οι αναφερόμενες τιμές της τάσης και του ρεύματος είναι οι ενεργές τιμές.

Στην περίπτωση όμως που τα ηλεκτρικά στοιχεία περιλαμβάνουν πηνία και πυκνωτές, η συμπεριφορά των εναλλασσόμενων τάσεων που εφαρμόζονται τα άκρα τους και των εναλλασσόμενων ρευμάτων που τα διαρρέουν είναι πολύπλοκη, γι' αυτό θα αρκεστούμε στο ότι ο νόμος του Ohm ισχύει ή για ενεργές ή για στιγμιαίες ή για μέγιστες τιμές των εναλλασσόμενων μεγεθών.

### Ενέργεια

Όλες οι ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές βασίζονται στο ηλεκτρικό ρεύμα. Ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα από τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τα διάφορα ηλεκτροτεχνικά υλικά είναι ότι το ρεύμα θερμαίνει τους αγωγούς και τις αντιστάσεις όταν διέρχεται μέσα από αυτές. Η παραγόμενη θερμότητα άλλες φορές είναι επιθυμητή (ηλεκτρικές θερμάστρες, ηλεκτρικά μαγειρεία, ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες κ.λπ.), γιατί σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική, ενώ άλλες φορές είναι ανεπιθύμητη. Η ανεπιθύμητη θερμότητα είναι δυνατόν να προκαλέσει βλάβη στις ηλεκτρικές συσκευές, ή στις μονώσεις των αγωγών ή καταστροφή των αντιστάσεων.

Ο Joule μελέτησε τα θερμικά αποτελέσματα του ηλεκτρικού ρεύματος και απέδειξε ότι η ποσότητα της θερμότητας που παράγεται σε ένα σώμα είναι ανάλογη της αντίστασης του σώματος, ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος που διαρρέει το σώμα αυτό και ανάλογη του χρόνου που διέρχεται το ρεύμα από το σώμα αυτό. Δηλαδή:

$$E = R \cdot I^2 \cdot t \quad (\text{Joule})$$

όπου:  $R$  = αντίσταση σώματος σε  $\Omega$ ,  $I$  = ρεύμα σταθερής τιμής σε A και  $t$  = χρόνος διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος σε sec. Η μονάδα Ενέργειας είναι το Joule.

Πολλές Ηλεκτρικές Συσκευές ή Ηλεκτρονικές Διατάξεις μετατρέπουν την Ηλεκτρική Ενέργεια σε ενέργεια άλλης μορφής, π.χ.:

- Θερμότητα (Ηλεκτρική κουζίνα, ηλεκτρικός θερμοσίφωνας) κ.λπ.
- Μηχανικό έργο κίνησης (ηλεκτρικοί κινητήρες, ηλεκτρομαγνήτες) κ.λπ..
- Ενέργεια χημικών αντιδράσεων (φόρτιση μπαταριών, επιμεταλλώσεις) κ.λπ..

Όσο περισσότερο χρόνο λειτουργεί μια συσκευή, τόσο περισσότερη ενέργεια μετατρέπει.

### Ισχύς

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ποσότητα της ενέργειας που αποδίδεται ανά δευτερόλεπτο, δηλαδή η **Ισχύς**,

$$P = \frac{E}{t}$$

Θεμελιώδης μονάδα της ισχύος είναι το **Watt (W)**

Από τον ορισμό της τάσης λαμβάνουμε ότι:  $V = \frac{E}{q} \Rightarrow E = V \cdot q$

Ακόμα ισχύει:  $I = \frac{q}{t} \Leftrightarrow t = \frac{q}{I}$

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις παίρνουμε:  $P = \frac{E}{t} = \frac{q \cdot V}{\frac{q}{I}} = V \cdot I$

και επειδή ισχύει ο νόμος του Ohm  $I = \frac{V}{R}$  ή  $V = I \cdot R$  ή  $R = \frac{V}{I}$  έχουμε:

$$P = V \cdot I = \frac{V^2}{R} = I^2 \cdot R \quad (\text{Watt})$$

### Βαθμός απόδοσης

Κατά τη διάρκεια μετατροπής μιας μορφής ενέργειας σε μια άλλη μορφή ενέργειας μέσω μιας συσκευής η μίας ηλεκτρονικής διάταξης, δεν είναι δυνατόν να έχουμε μετατροπή ολόκληρης της παρεχόμενης ποσότητας ενέργειας στην επιθυμητή μορφή ενέργειας εξόδου.

Αυτό συμβαίνει, γιατί στη διαδικασία μετατροπής ένα μέρος της ενέργειας αυτής μετατρέπεται σε άλλη ή άλλες μη επιθυμητές μορφές, π.χ. κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική, από έναν ηλεκτρικό κινητήρα, παίρνουμε ένα μεγάλο μέρος κινητικής ενέργειας στον άξονα του κινητήρα σαν ωφέλιμη ενέργεια, ενώ ένα μικρό μέρος της παρεχόμενης από εμάς ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα. Η θερμότητα που αναπτύσσεται εξαρτάται από την ηλεκτρική αντίσταση των αγωγών και τις τριβές. Η ενέργεια αυτή δεν χρησιμοποιείται και αποτελεί τις απώλειες. Δηλαδή:

**Παρεχόμενη Ενέργεια = Ωφέλιμη Ενέργεια Εξόδου + Ενέργεια Απωλειών**

Επειδή η σχέση αυτή είναι ανεξάρτητη από το χρόνο, μπορούμε να την εκφράσουμε και ως προς την Ισχύ:

**Παρεχόμενη Ισχύς = Ωφέλιμη Ισχύς Εξόδου + Ισχύς Απωλειών**

Ο λόγος Ωφέλιμη Ισχύς Εξόδου προς Παρεχόμενη Ισχύς καλείται Βαθμός Απόδοσης της συσκευής ή της ηλεκτρονικής διάταξης και συμβολίζεται με το γράμμα  $\eta$ .

$$n = \frac{E_{\omega\phi\acute{\epsilon}\lambda\iota\mu\eta}}{E_{\pi\alpha\rho\epsilon\chi\acute{o}\mu\epsilon\nu\eta}} = \frac{P_{\omega\phi\acute{\epsilon}\lambda\iota\mu\eta}}{P_{\pi\alpha\rho\epsilon\chi\acute{o}\mu\epsilon\nu\eta}} \quad \text{ή} \quad n = \frac{P_{\omega\phi\acute{\epsilon}\lambda\iota\mu\eta}}{P_{\omega\phi\acute{\epsilon}\lambda\iota\mu\eta} + P_{\alpha\pi\omega\lambda\epsilon\iota\acute{o}\nu}} < 1$$

Ο βαθμός απόδοσης είναι πάντοτε μικρότερος της μονάδας, γιατί πάντα υπάρχουν απώλειες στις μετατροπές της ενέργειας από μία μορφή σε άλλη.

$$\text{Εκφράζεται συνήθως \%}. \text{ Δηλαδή: } n\% = \frac{P_{\omega\phi\acute{\epsilon}\lambda\iota\mu\eta}}{P_{\pi\alpha\rho\epsilon\chi\acute{o}\mu\epsilon\nu\eta}} \cdot 100$$

Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από την ποιότητα κατασκευής μιας συσκευής ή από τον σχεδιασμό της ηλεκτρονικής διάταξης και τη μορφή της ενέργειας που μετατρέπει αυτή.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται ενδεικτικά βαθμοί απόδοσης ορισμένων ηλεκτρικών συσκευών ευρείας χρήσης.

α/α	Ηλεκτρική συσκευή	Βαθμός απόδοσης
1	Μετασχηματιστής ισχύος	0,95 - 0,99
2	Τριφασικοί κινητήρες	0,80
3	Ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες	0,85
4	Φωτοβολταϊκά στοιχεία	0,18
5	Λαμπτήρες πυράκτωσης	0,03

Πίνακας 1.2 – Βαθμοί απόδοσης ηλεκτρικών συσκευών.

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα Πολλαπλάσια και Υποπολλαπλάσια Μονάδων καθώς και ο συμβολισμός τους.

Πολλαπλάσια - Υποπολλαπλάσια Μονάδων	Συμβολισμός
1 Πικο = $10^{-12}$	p
1 Νανο = $10^{-9}$	n
1 Μικρο = $10^{-6}$	μ
1 Μιλι = $10^{-3}$	m
1 Κιλο = $10^3$	K
1 Μεγα = $10^6$	M
1 Γιγα = $10^9$	G
1 Τερα = $10^{12}$	T

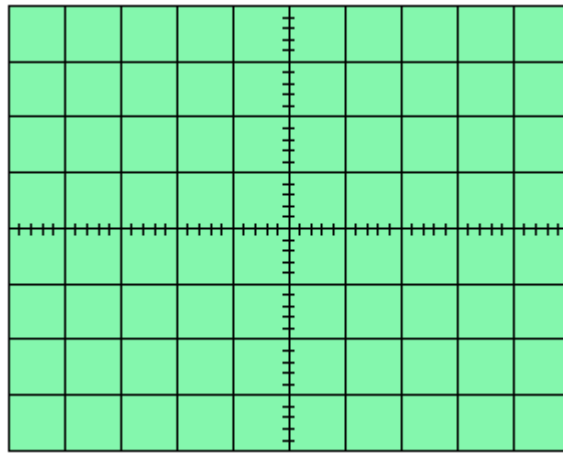
Πίνακας 1.3 – Πολλαπλάσια και υποπολλαπλάσια μονάδων και συμβολισμός τους

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΣ

Ο παλμογράφος είναι το πλέον χρήσιμο όργανο στα χέρια κάθε σύγχρονου ηλεκτρονικού. Η λειτουργία του βασίζεται κατά κύριο λόγο στον καθοδικό σωλήνα (C.R.T.), στην οθόνη του οποίου θα απεικονιστεί η κυματομορφή του σήματος που θέλουμε να μελετήσουμε.

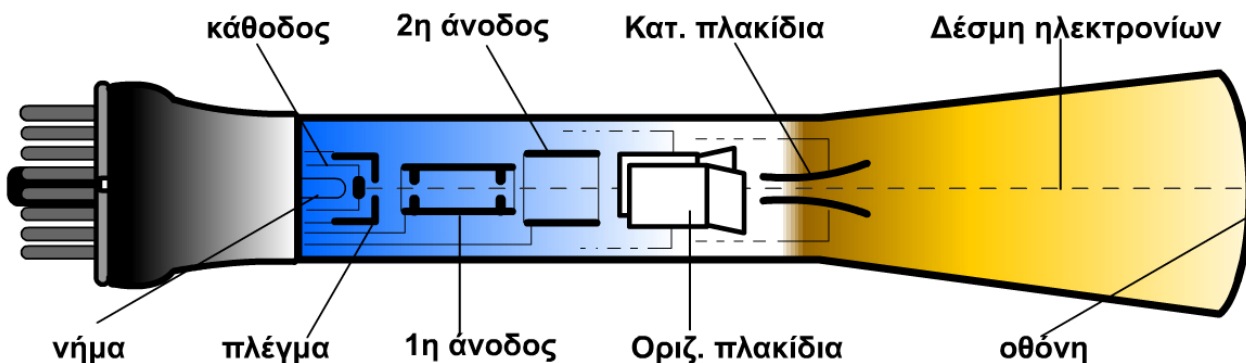
Οι κυματομορφές που βλέπουμε στην οθόνη σχηματίζονται από ένα κινούμενο πάνω σε αυτή φωτεινό στίγμα. Η τροχιά του στίγματος αυτού είναι η συνισταμένη δύο κινήσεων, μίας στον κατακόρυφο άξονα και μίας στον οριζόντιο.

Η κατακόρυφη συνιστώσα οφείλεται στο πλάτος (τάση) της προς παρατήρηση κυματομορφής ενώ η οριζόντια σε μία εσωτερική πριονωτή τάση που παράγει ο παλμογράφος (κύκλωμα οριζόντιας σάρωσης). Η οθόνη του παλμογράφου είναι χωρισμένη σε υποδιαιρέσεις για να μπορούμε να κάνουμε μετρήσεις. Ο οριζόντιος άξονας (X) αντιστοιχεί στο χρόνο (περίοδο) και ο κατακόρυφος (Y) στην τάση.



Θα εξηγήσουμε περιληπτικά τα διάφορα μέρη της συσκευής αναφέροντας ταυτόχρονα και τα βασικά κουμπιά που έχουν όλοι οι κοινοί παλμογράφοι.

Ο καθοδικός σωλήνας (C.R.T.) είναι μία λυχνία Braun ηλεκτροστατικής απόκλισης. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.1 αποτελείται από ένα ηλεκτρονικό πυροβόλο (κάθοδος – πλέγμα - 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> άνοδος) που παράγει εστιάζει και επιταχύνει ηλεκτρόνια, τα οποία βομβαρδίζουν τη φθορίζουσα οθόνη και παράγεται έτσι το φωτεινό στίγμα.



Σχήμα 2.1

Τα κουμπιά φωτεινότητας (INTENSITY) και εστίασης (FOCUS) που υπάρχουν στην πρόσοψη του παλμογράφου επενεργούν στο ηλεκτρονικό πυροβόλο και ρυθμίζουν την φωτεινότητα και την εστίαση της φωτεινής κηλίδας. Θα πρέπει να τα ρυθμίζουμε κατάλληλα ώστε η κηλίδα να είναι όσο το δυνατό μικρότερη και η φωτεινότητα να μην προκαλεί φωτοστέφανο.

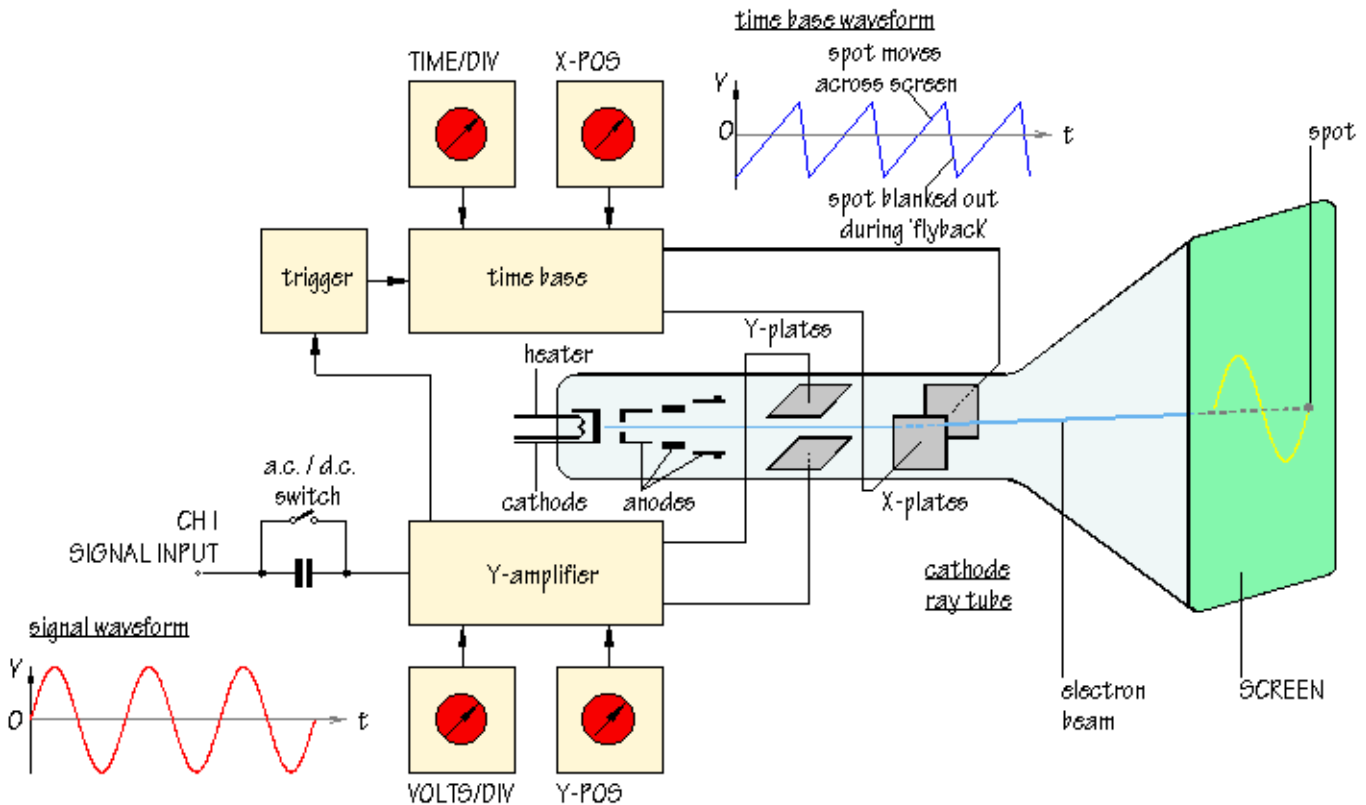
Μετά το ηλεκτρονικό πυροβόλο υπάρχουν οι πλάκες απόκλισης οι οποίες κινούν κατάλληλα την δέσμη των ηλεκτρονίων προκειμένου να διαγράψει στην οθόνη το ίχνος της κυματομορφής του προς μέτρηση σήματος.

Εάν για παράδειγμα εφαρμόσουμε μία τάση (π.χ. DC) στα πλακίδια X\_plates (οριζόντιας απόκλισης) του σχήματος 2.2, τότε η φωτεινή κηλίδα θα κινηθεί στον οριζόντιο άξονα. Εάν η τάση εφαρμοστεί στα πλακίδια Y\_plates (κατακόρυφης απόκλισης) η κηλίδα θα κινηθεί στον κατακόρυφο άξονα. Εάν συγχρόνως εφαρμόσουμε τάση και στα δύο ζευγάρια των πλακιδίων μπορούμε να έχουμε οποιαδήποτε κίνηση επάνω στην οθόνη. Στην τεχνική αυτή βασίζεται ο σχηματισμός της κυματομορφής του προς μέτρηση σήματος.

Στον παλμογράφο εφαρμόζεται στα πλακίδια κατακόρυφης απόκλισης (άξονας Y) μέσω ενισχυτών ή υποβιβασμών το προς παρατήρηση σήμα (διότι το πλάτος του μπορεί να είναι πολύ μικρό ή πολύ μεγάλο και να θέλει αντίστοιχα ενίσχυση ή εξασθένηση). Η απόκλιση λοιπόν στον κατακόρυφο άξονα της οθόνης θα είναι ανάλογη του πλάτους του προς μέτρηση σήματος, λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά και την θέση του μεταγωγού **VOLT/DIVISION** (με τον οποίο επιλέγουμε τον βαθμό ενίσχυσης ή υποβιβασμού του σήματος εισόδου) έτσι ώστε να έχουμε άμεση αντιστοιχία μήκους στην οθόνη του παλμογράφου, με τάση, (αρκεί να πολλαπλασιάσουμε την ένδειξη του μεταγωγού επί τα κουτάκια του κατακόρυφου άξονα που αντιστοιχούν στο πλάτος του σήματος).

Μέχρι στιγμής έχουμε εφαρμόσει σήμα μόνο στις οριζόντιες πλάκες (Y\_plates) κάθετης απόκλισης οπότε θα βλέπουμε μόνο μία γραμμή στον κατακόρυφο άξονα Y. Προκειμένου να ανοίξει η κυματομορφή και προς τον άξονα X ώστε να την δούμε ολοκληρωμένη (να έχουμε δηλαδή οπτική παρατήρηση του πλάτους της κατά την διάρκεια του χρόνου), θα πρέπει να τροφοδοτηθούν κατάλληλα και τα πλακίδια οριζόντιας απόκλισης.

Για τον λόγο αυτό στα πλακίδια οριζόντιας απόκλισης (X\_plates - άξονας X) εφαρμόζεται εσωτερικά μία πριονωτή τάση που παράγει ο ίδιος ο παλμογράφος. Η τάση αυτή κινεί περιοδικά και ισοταχώς το στίγμα από αριστερά προς τα δεξιά στην οθόνη και κατόπιν πάρα πολύ γρήγορα από δεξιά προς τα αριστερά για να το επαναφέρει στην αρχή.



Σχήμα 2.2

Η συχνότητα της περιοδικής αυτής τάσης ρυθμίζεται με τον επιλογέα χρόνου σάρωσης (**TIME/DIVISION**) ο οποίος μας επιτρέπει να έχουμε άμεση αναλογία μήκους στην οθόνη (στον οριζόντιο άξονα X), με χρόνο.

Είναι φανερό ότι αν η περίοδος της εσωτερικής πριονωτής τάσης είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την

περίοδο της προς παρατήρηση κυματομορφής θα δούμε αντίστοιχα στην οθόνη περισσότερα μήκη κύματος μέρος αυτών. Προκειμένου τώρα να υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ του δικού μας προς μέτρηση σήματος και της εσωτερικής πριονωτής τάσης του παλμογράφου, ώστε να βλέπουμε σταθερή την κυματομορφή στην οθόνη χωρίς να "...κυλάει", υπάρχει στον παλμογράφο το κύκλωμα σκανδαλισμού (**TRIGGER**).

Το κύκλωμα αυτό (όταν ο επιλογέας είναι στην θέση **INTERNAL TRIGGER**) κάνει δειγματοληψία από το προς παρατήρηση σήμα και συγχρονίζει, κάνει trigger, την γεννήτρια πριονωτής τάσης του παλμογράφου. Όταν το σήμα μας είναι ασθενές ή πολύπλοκης μορφής και δυσκολεύει τον παλμογράφο να κάνει συγχρονισμό, υπάρχει η δυνατότητα και εξωτερικού συγχρονισμού (βάζοντας δείγμα του σήματος μας στην κατάλληλη είσοδο **EXT. TRIGGER** του παλμογράφου). Ο μεταγωγός **σκανδαλισμού (trigger)** τοποθετείται τώρα στη θέση **EXT. TRIGGER**.

Όλοι οι παλμογράφοι έχουν στην πρόσοψη τους δύο κουμπιά **κάθετης και οριζόντιας θέσης (HORIZONTAL και VERTICAL POSITION)**, μέσω των οποίων δίνεται μία εσωτερική **DC** τάση στα αντίστοιχα πλακίδια απόκλισης, μετακινώντας έτσι την κυματομορφή στην οθόνη και φέρνοντας την στην επιθυμητή θέση για να κάνουμε μετρήσεις.

Οι σύγχρονοι παλμογράφοι είναι τουλάχιστον δύο καναλιών (δύο εισόδων) για να έχουμε την δυνατότητα παρατήρησης στην οθόνη ταυτόχρονα δύο κυματομορφών. Στους παλμογράφους αυτούς υπάρχουν δύο ανεξάρτητες μονάδες κατακόρυφης ενίσχυσης και μία κοινή γεννήτρια σάρωσης. Με τους κατάλληλους επιλογείς μπορούμε να ενεργοποιήσουμε και τα δύο κανάλια ή το κάθε ένα μόνο του. Επίσης με κατάλληλη επιλογή μπορούμε να απενεργοποιήσουμε την γεννήτρια σάρωσης και να δουλέψουμε ανεξάρτητα τις δύο εισόδους μόνο για γραμμική μετατόπιση στον άξονα **X** ή στον **Y** (για παράδειγμα στα σχήματα Lissajous).

Το προς παρατήρηση σήμα εφαρμόζεται στον παλμογράφο μέσω ενός κατάλληλου καλωδίου (**probe**) το οποίο συνδέεται στην είσοδο του κάθε καναλιού. Υπάρχουν διαφόρων τύπων **probe** πού μπορούν να μεταφέρουν το σήμα μας χωρίς εξασθένηση στην είσοδο του παλμογράφου, ή να το υποβιβάσουν (1:1 ή 1:10).

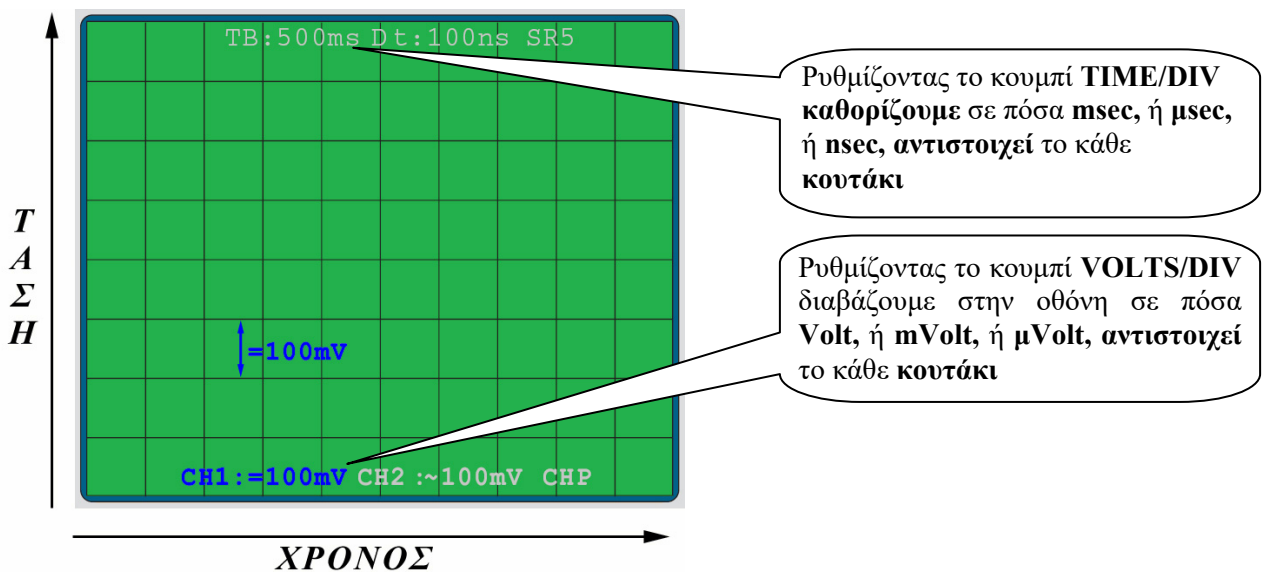
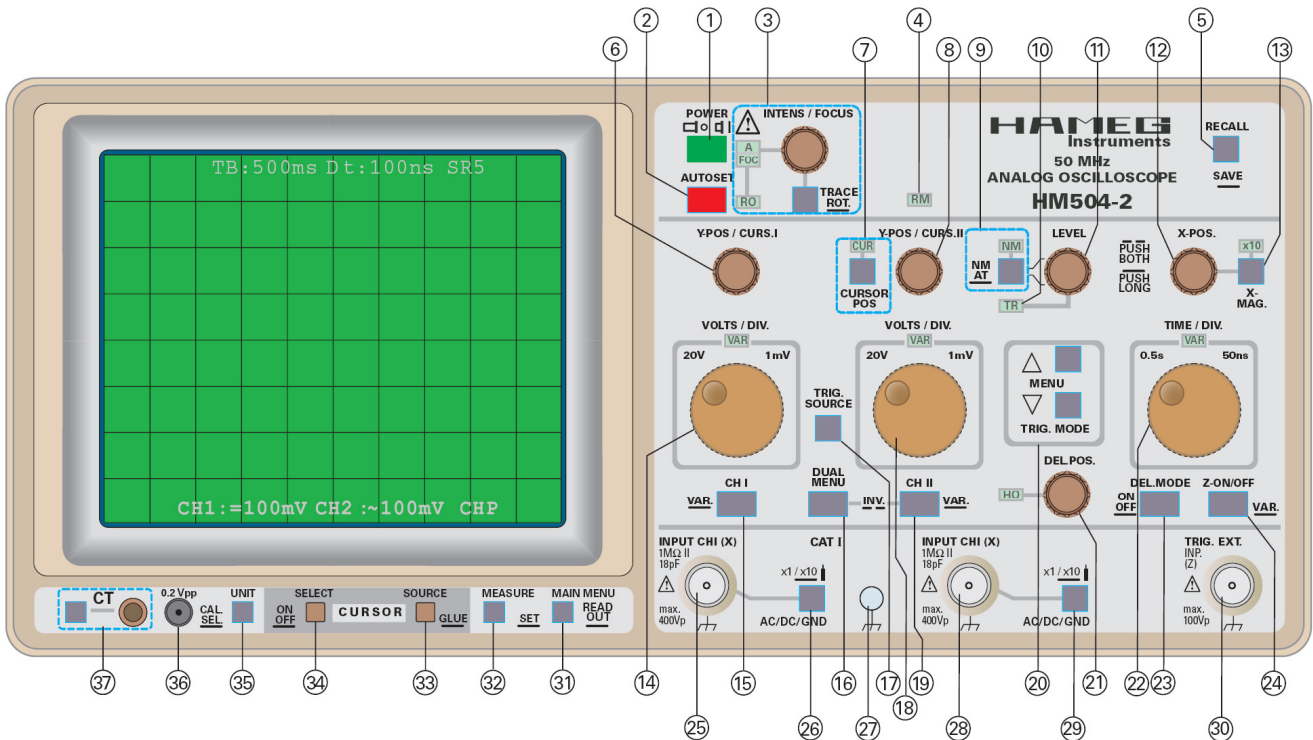
Η αντίσταση εισόδου των κοινών παλμογράφων είναι περίπου **1MΩ** και χωρητικότητας περίπου **30 με 35pF** ως προς τη **γείωση (GND)**. Εάν χρησιμοποιήσουμε **probe** υποβιβασμού τα μεγέθη αυτά μεταβάλλονται αντίστοιχα σε **10MΩ, 11pF** και **100MΩ, 5pF** περίπου.

Να τονίσουμε εδώ ότι λόγω της μεγάλης αντίστασης εισόδου του, ο παλμογράφος είναι όργανο παρατήρησης μίας κυματομορφής τάσεως ανάμεσα σε δύο σημεία, δεν επηρεάζει ούτε αλλοιώνει την προς μέτρηση κυματομορφή, όπου και αν έχουμε ρυθμίσει τα κουμπιά του.

Το προς μέτρηση σήμα μόλις μπει στον παλμογράφο και πριν φθάσει στους ενισχυτές κατακόρυφης απόκλισης περνά από ένα διακόπτη τριών θέσεων, **DC – GND - AC**. Εάν ο διακόπτης είναι στη θέση **DC**, το σήμα συνεχίζει ανέπαφο προς το εσωτερικό του παλμογράφου (στους ενισχυτές κατακόρυφης απόκλισης) κουβαλώντας μαζί του τυχόν συνεχή συνιστώσα που μπορεί να έχει. Στην θέση **AC** παρεμβάλλεται ένας **πυκνωτής** ανάμεσα στην είσοδο του παλμογράφου και στους ενισχυτές κατακόρυφης απόκλισης, ο οποίος κόβει την τυχόν συνεχή συνιστώσα που μπορεί να έχει το προς μέτρηση σήμα. Αυτή η επιλογή εξυπηρετεί μερικές φορές που δεν μας ενδιαφέρει να παρατηρήσουμε την συνεχή συνιστώσα του σήματος ή η συνεχής συνιστώσα του σήματος είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με την εναλλασσόμενη συνιστώσα που μπορεί να θέλουμε να παρατηρήσουμε, και μας δυσκολεύει. Τέλος η θέση **GND (ground)** δεν μας γειώνει το σήμα, αλλά απλά δεν το προωθεί προς το εσωτερικό του παλμογράφου. Αυτό το κάνουμε κατά την διάρκεια των μετρήσεων προκειμένου να ρυθμίσουμε στον κατακόρυφο άξονα του παλμογράφου την θέση της οπτικής δέσμης που θα αντιστοιχεί στο σημείο αναφοράς ή τάση αναφοράς (**ground**).

Τέλος να αναφέρουμε ότι στην πρόσοψη των παλμογράφων, ανάλογα με τον τύπο και το μοντέλο, υπάρχουν και διάφορα άλλα κουμπιά για ειδικές χρήσεις που κατά περίπτωση αναγνωρίζουμε συμβουλευόμενοι το εγχειρίδιο του κατασκευαστή. Οι παλμογράφοι του εργαστηρίου μας μπορούν να απεικονίσουν κυματομορφές με συχνότητα έως 50 MHz.

Ο παλμογράφος του εργαστηρίου μας είναι ο **HAMEG HM504-2** του οποίου η πρόσοψη εικονίζεται στην παρακάτω φωτογραφία.

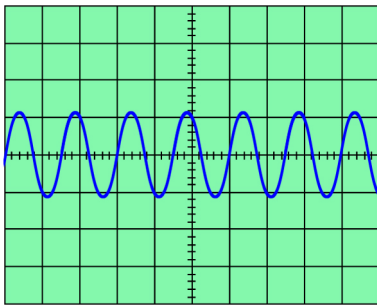


Η οθόνη του παλμογράφου **HAMEG HM504-2**

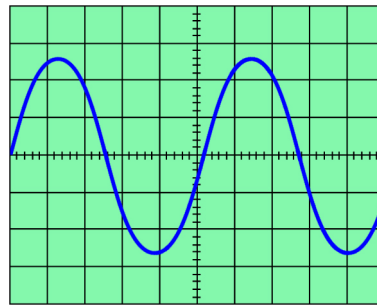
Προκειμένου τώρα να προχωρήσουμε σε μετρήσεις με τον παλμογράφο του εργαστηρίου (**HAMEG HM504-2**) θα αναφέρουμε γενικά τη διαδικασία προετοιμασίας του.

1. Ανάβουμε τον παλμογράφο με το κουμπί **POWER** (πλήκτρο 1).
2. Πατάμε το πλήκτρο **AUTOSET** (πλήκτρο 2).
3. Με το κουμπί 3 ρυθμίζουμε την εστίαση (**FOCUS**) της οπτικής ακτίνας ώστε η γραμμή να γίνει όσο το δυνατό λεπτότερη.
4. Εισάγουμε το προς μέτρηση σήμα στην είσοδο του παλμογράφου.
5. Αν είμαστε εξοικειωμένοι με την χρήση του παλμογράφου κάνουμε τις ρυθμίσεις που απαιτούνται για να έχουμε σωστή απεικόνιση της κυματομορφής στην οθόνη.
6. Αν δεν είμαστε εξοικειωμένοι ώστε να κάνουμε τις απαιτούμενες ρυθμίσεις ξαναπατάμε το πλήκτρο **AUTOSET** (πλήκτρο 2).  
Ο τρόπος αυτός δεν είναι πάντα ο ενδεδειγμένος γιατί δεν αποδίδει τις καλύτερες ρυθμίσεις.

Μετά το πάτημα του πλήκτρου **AUTOSET** ο παλμογράφος προβαίνει σε αυτόματες ρυθμίσεις και μας εμφανίζει στην οθόνη την κυματομορφή του σήματος εισόδου. Επειδή αυτές οι αυτόματες ρυθμίσεις δεν είναι οι καλύτερες, καλό είναι να ρυθμίσουμε τους επιλογής **VOLT/DIV** (πλήκτρο **14 – 18**) και **TIME/DIV** (πλήκτρο **22**) ώστε να βελτιώσουμε την απεικονιζόμενη κυματομορφή (σχήμα 2.3).



**Μη ικανοποιητική απεικόνιση ενός  
περιοδικού σήματος**



**Ορθή απεικόνιση ενός  
περιοδικού σήματος**

Σχήμα 2.3 – Παράδειγμα απεικόνισης στην οθόνη του παλμογράφου της κυματομορφής ενός περιοδικού σήματος.

## ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ

### α) Μέτρηση DC τάσης

Για να μετρήσουμε μία συνεχή τάση βάζουμε τον επιλογέα DC-GND-AC στη θέση DC.

Με τα κουμπιά Vertical και Horizontal Position κεντράρουμε την φωτεινή δέσμη στο μέσο του πλέγματος της οθόνης (ρυθμίζουμε δηλαδή την στάθμη αναφοράς).

Ρυθμίζοντας κατάλληλα τον επιλογέα VOLT/DIV και εφαρμόζοντας στην είσοδο του παλμογράφου την προς μέτρηση τάση, βλέπουμε στην οθόνη μία οριζόντια γραμμή που αντιστοιχεί σε αυτή.

Μετράμε την απόσταση σε κουτάκια από την στάθμη αναφοράς (που ορίσαμε προηγουμένως) κατά τον κατακόρυφο άξονα και πολλαπλασιάζοντας την επί την ένδειξη του επιλογέα VOLT/DIV βρίσκουμε την τιμή της τάσης.

### β) Μέτρηση εναλλασσόμενης τάσης

Βάζουμε τον επιλογέα εισόδου DC-GND-AC στη θέση AC.

Κεντράρουμε πάλι την φωτεινή δέσμη στο κέντρο του πλέγματος, όπως προηγουμένως.

Εφαρμόζουμε την προς μέτρηση τάση και με συνδυασμό των επιλογέων VOLT/DIV, TIME/DIV και TRIG. MODE προσπαθούμε να δούμε την κυματομορφή μας σταματημένη (να μην κυλάει δεξιά-αριστερά) με ικανό πλάτος και τουλάχιστον ένα μήκος κύματος.

Κατόπιν πολλαπλασιάζοντας τις μετρήσεις μας σε κουτάκια στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα επί τις αντίστοιχες ενδείξεις των επιλογέων TIME/DIV και VOLT/DIV έχουμε την περίοδο και το πλάτος της προς μέτρηση τάσης.

### γ) Μέτρηση μεταβαλλόμενης τάσης με συνεχή συνιστώσα

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι μεταβαλλόμενες τάσεις δεν μεταβάλλονται εκατέρωθεν του μηδενός, αλλά εκατέρωθεν μίας συνεχούς τάσης που ονομάζεται DC συνιστώσα της μεταβαλλόμενης τάσης. Προκειμένου να παρατηρήσουμε στον παλμογράφο την κυματομορφή μιας τέτοιας τάσης θα πρέπει να θέσουμε τον επιλογέα εισόδου DC-GND-AC στη θέση DC για να δούμε ταυτόχρονα την DC συνιστώσα και τη μεταβαλλόμενη συνιστώσα (περιβάλλουσα). Εάν θέσουμε τον επιλογέα στη θέση AC τότε ο πυκνωτής που παρεμβάλλεται θα μας αποκρύψει την DC συνιστώσα και θα δούμε μόνο μεταβαλλόμενη συνιστώσα.



**δ) Μέτρηση πτώσης τάσης στα άκρα αντιστάσεων**

Θα μπορούσαμε με τον παλμογράφο να παρατηρήσουμε την πτώση τάσης σε μια αντίσταση βάζοντας κατευθείαν το probe του παλμογράφου στα άκρα της. Ο τρόπος όμως αυτός δεν είναι πάντα ενδεδειγμένος διότι υπάρχει σοβαρός κίνδυνος να προκαλέσουμε βραχυκύκλωμα μέσω της γείωσης του probe (αν το ένα άκρο της αντίστασης δεν είναι γειωμένο).

Ο καλύτερος τρόπος είναι να μετρήσουμε ξεχωριστά την τάση κάθε άκρου της αντίστασης (κάνοντας χρήση των 2 καναλιών του παλμογράφου) ως προς τη στάθμη αναφοράς (ή γείωση) του κυκλώματος και κατόπιν να υπολογίσουμε τη διαφορά τους που θα είναι η ζητούμενη τάση.

Η διαφορά τους θα προκύψει κάνοντας αναστροφή (INVERSE) στο κανάλι II και μετά πρόσθεση του (ADD) του με το κανάλι I. Έτσι θα έχουμε στην οθόνη το CH I – CH II που είναι και η ζητούμενη πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης.

**ε) Μέτρηση ρευμάτων**

Με τον παλμογράφο μπορούμε να μετρήσουμε ρεύματα μόνο έμμεσα. Δηλαδή μετράμε όπως προαναφέραμε πριν την πτώση τάσης στα άκρα μιας γνωστής αντίστασης, και με τον νόμο του Ohm υπολογίζουμε κατόπιν το ρεύμα (η κυματομορφή του οποίου θα είναι ταυτόσημη με την κυματομορφή της τάσης γιατί η αντίσταση είναι γραμμικό εξάρτημα).

**στ) Μέτρηση συχνότητας**

Με τον παλμογράφο μπορούμε να μετρήσουμε την συχνότητα ενός περιοδικού σήματος. Μετράμε την περίοδο της κυματομορφής του περιοδικού σήματος με τον τρόπο που αναφέραμε στην περίπτωση β) και υπολογίζουμε κατόπιν την συχνότητα με το γνωστό τύπο  $f=1/T$ .

**ζ) Μέτρηση της διαφοράς φάσης δύο ημιτονικών σημάτων**

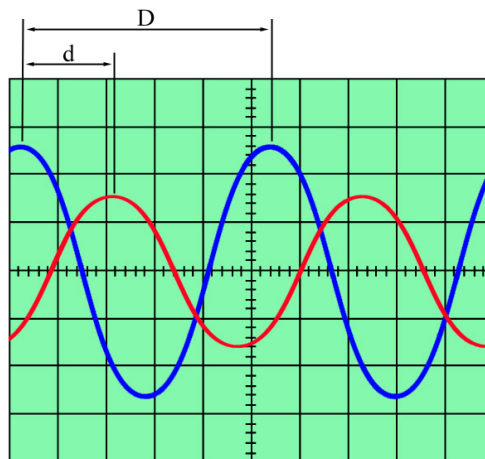
Με τον παλμογράφο μπορούμε να βρούμε την διαφορά φάσης μόνο μεταξύ δύο ημιτονικών σημάτων με την ίδια συχνότητα

Παρατηρούμε ταυτόχρονα τις δύο κυματομορφές στην οθόνη (τη μία στο ένα κανάλι και την άλλη στο άλλο).

Αν θέλουμε για μεγαλύτερη ευκολία στην μέτρηση μπορούμε να ρυθμίσουμε τους επιλογείς VOLT/DIV ώστε να έχουν οι δύο κυματομορφές το ίδιο περίπου πλάτος και με τα κουμπιά POSITION τις κεντράρουμε στο πλέγμα της οθόνης.

Η οριζόντια απόσταση D μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών της ίδιας κυματομορφής αντιστοιχεί σε γωνία  $360^\circ$  (μια περίοδο T). Αν d είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ της κορυφής της μιας κυματομορφής και της αμέσως επόμενης κορυφής της άλλης κυματομορφής, τότε η διαφορά φάσεως μεταξύ των δύο κυματομορφών θα δίνεται από τη σχέση

$$\varphi^\circ = \frac{d}{D} \cdot 360$$



ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ =  $360(d/D)$

# ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

## ΣΤΟΧΟΙ

- η εμπέδωση της σωστής χρήσης των εργαστηριακών οργάνων
- η κατανόηση των ηλεκτρικών μεγεθών
  - συνιστώσα τάσεως
  - πλάτος τάσεως
  - τάση από κορυφή σε κορυφή
  - ενεργός τιμή τάσεως
  - συχνότητα και περίοδος μιας κυματομορφής
- η ευχέρεια στη σχεδίαση μιας κυματομορφής σε σωστά βαθμονομημένους άξονες τάσεως και χρόνου

## ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ (AC)

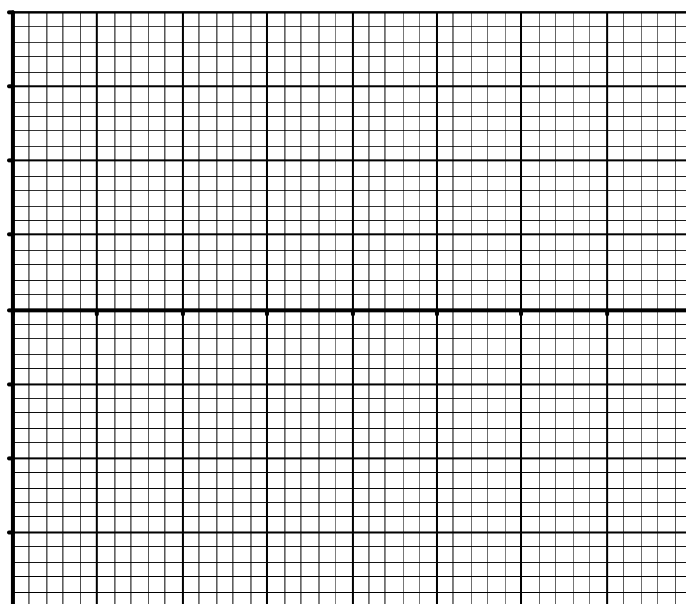
1. Συνδέστε τον παλμογράφο με την έξοδο της γεννήτριας παραγωγής ημιτονικών συναρτήσεων και επιλέξτε μια ημιτονοειδή κυματομορφή με συχνότητα  $f$  και τάση  $V_{pp}$  ταυτόσημη με τον αριθμό του εργαστηριακού σας πάγκου. (πχ ο πάγκος Νο3 θα επιλέξει  $f=3\text{KHZ}$  και  $V_{pp}=3\text{Volt}$ ).

Συχνότητα $f = \dots\dots\dots \text{KHZ}$	$V_{pp} = \dots\dots\dots \text{Volt}$
--	--

2. Παρατηρώντας με τον παλμογράφο την κυματομορφή στην έξοδο της γεννήτριας να υπολογίσετε τα μεγέθη:

$T_{(\text{msec})} = \dots\dots\dots$	$V_{\text{rms}} = \dots\dots\dots$	$V_o = \dots\dots\dots$	$V_{\text{dc}} = \dots\dots\dots$
---------------------------------------	------------------------------------	-------------------------	-----------------------------------

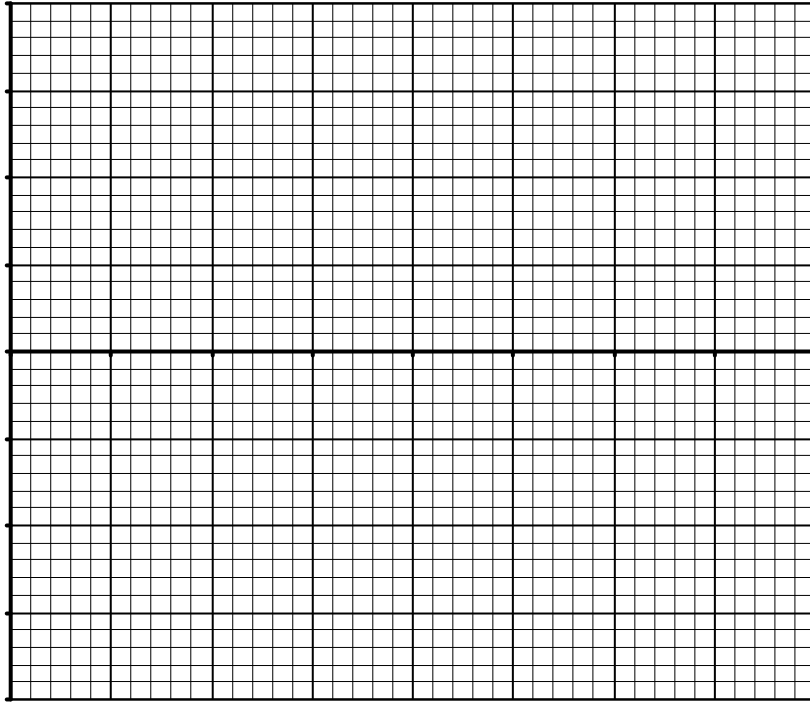
3. Να σχεδιάσετε (με σωστά βαθμολογημένους άξονες) την κυματομορφή της τάσης που επιλέξατε από την γεννήτρια και να δείξετε πάνω σ' αυτή ποια είναι τα μεγέθη:  
Περίοδος  $T$ ,  $V_{pp}$ ,  $V_{\text{rms}}$ ,  $V_o$ ,  $V_{\text{dc}}$



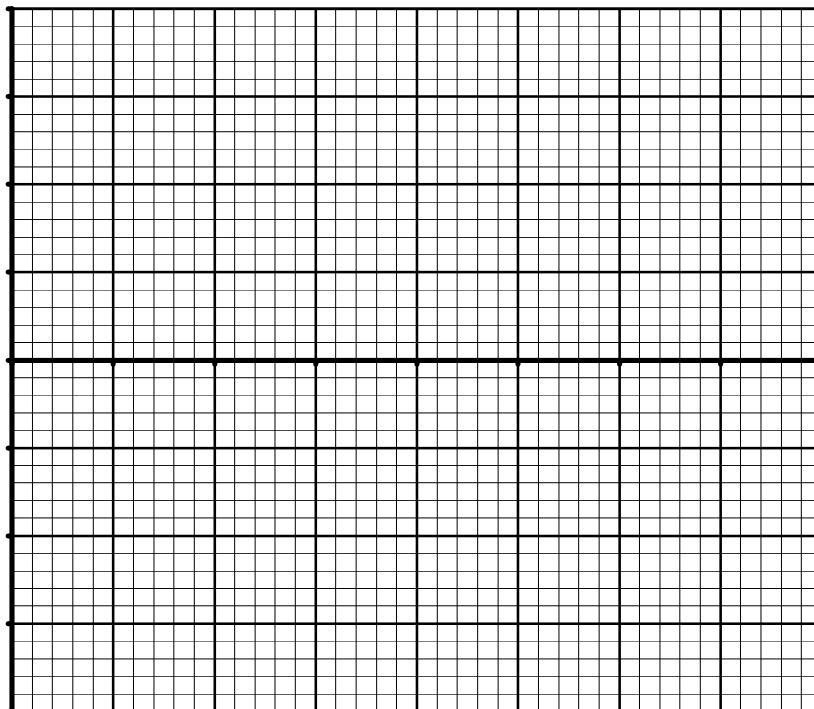
**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΥΝΕΧΕΣ (DC) με βολτόμετρο και παλμογράφο**

4. Συνδέσετε την τροφοδοτική διάταξη του πάγκου (TRIO PR-601A) με ένα βολτόμετρο και ρυθμίστε την να δίνει τάση θετική τάση τιμής ίδιας (σε **volt**) με τον αριθμό του εργαστηριακού σας πάγκου.

Μετρήσατε την παραπάνω τάση με τον παλμογράφο (επιλέγοντας **DC** σύζευξη) και σχεδιάστε την στο διάγραμμα που ακολουθεί (με σωστά βαθμολογημένους άξονες).



5. Επαναλάβετε το παραπάνω βήμα για αρνητική τιμή τάσεως.

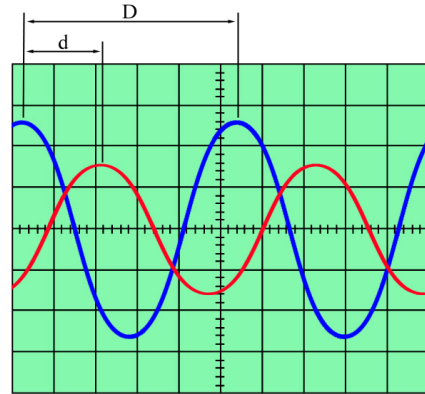


## ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΦΑΣΗΣ

Η **οριζόντια απόσταση D** μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών της ίδιας κυματομορφής αντιστοιχεί σε γωνία  $360^\circ$  (μια περίοδο  $T$ ). Αν **d** είναι η **οριζόντια απόσταση** μεταξύ της κορυφής της μιας κυματομορφής και της αμέσως επόμενης κορυφής της άλλης κυματομορφής, τότε η **διαφορά φάσεως** μεταξύ των δύο κυματομορφών θα δίνεται από τη σχέση

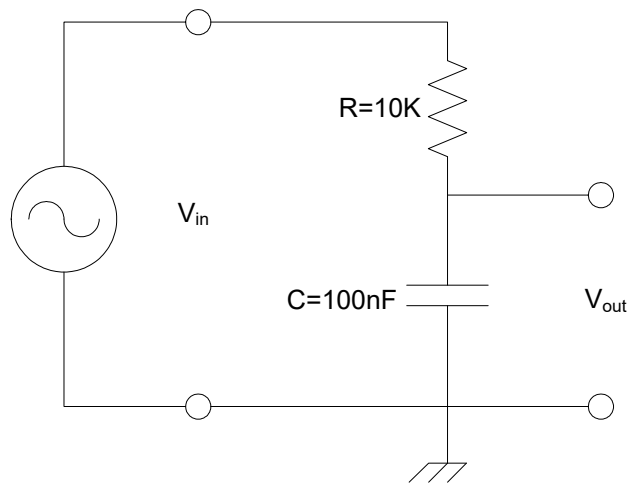
$$\varphi^\circ = \frac{d}{D} \cdot 360$$

**Σημείωση:** το **d** και **D** το δεν έχουν μονάδες



ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ =  $360(d/D)$

Κάνοντας χρήση της πλακέτας «ΚΥΚΛΩΜΑ RC» υλοποιήστε το παρακάτω κύκλωμα.



Δώστε από την γεννήτρια ημιτονικό σήμα πλάτους  $V_{in}=5V$  και συχνότητας  $f=100Hz$  και  $1KHz$ . Για κάθε περίπτωση χρησιμοποιώντας και τα δύο κανάλια του παλμογράφου μετρήστε την διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης εισόδου  $V_{in}$  και της τάσης εξόδου  $V_{out}$ .

	$V_{in}$ (πλάτος)	$V_{out}$ (πλάτος)	<b>d</b>	<b>D</b>	$\Delta\varphi$ ( $^\circ$ )	<b>T</b> <sub>(msec)</sub>
<b>f<sub>1</sub>=100Hz</b>						
<b>f<sub>2</sub>=1KHz</b>						

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

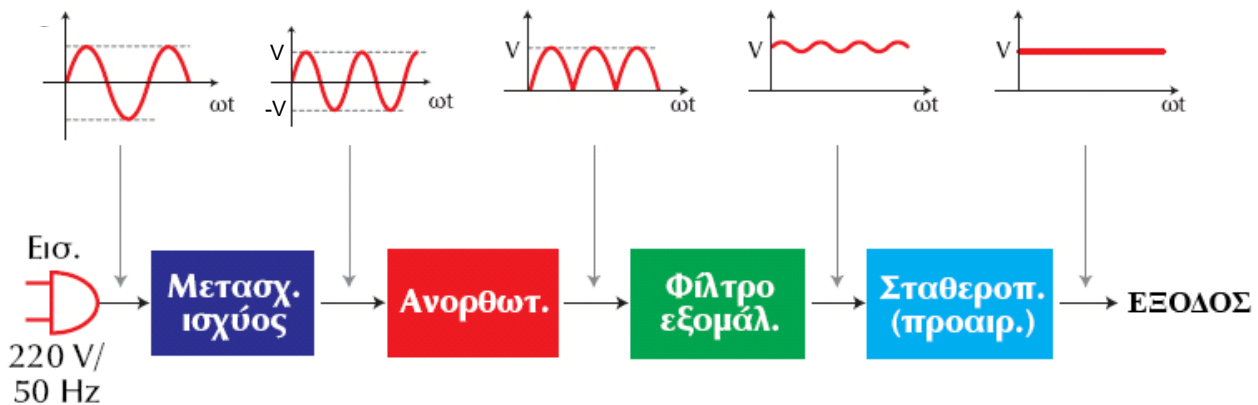
### Ανορθωτικές διατάξεις - Τροφοδοτικά

#### Γενικά

Σήμερα η ηλεκτρική ενέργεια συνήθως για λόγους πρακτικούς και οικονομικούς προσφέρεται από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) με τη μορφή εναλλασσόμενης τάσης (230 Volts AC). Για να τροφοδοτήσουμε μια σειρά από ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις (ενισχυτές, ταλαντωτές, συγκριτές, τηλεόραση, υπολογιστές και άλλα) που περιέχουν παθητικά στοιχεία (αντιστάσεις, πυκνωτές, τρανζίστορ) χρειαζόμαστε ηλεκτρική ενέργεια με την μορφή μιας συνεχούς τάσης. Στις περισσότερες φορές μάλιστα χρειάζεται η συνεχής αυτή τάση να έχει και σταθερή τιμή.

Οι διατάξεις που μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή λέγονται **Ανορθωτικές Διατάξεις** ή απλά **Τροφοδοτικά**.

Στο παρακάτω σχήμα 3.1 δίνεται μια σχηματική απεικόνιση των επιμέρους βαθμίδων από τις οποίες αποτελείται ένα τροφοδοτικό.



Σχήμα 3.1 – Γενικό διάγραμμα τροφοδοτικής διάταξης

1) Ο **Μετασχηματιστής** μεταφέρει από το εναλλασσόμενο δίκτυο της ΔΕΗ την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια παρέχοντας απομόνωση από αυτό. Ταυτόχρονα παρέχει την κατάλληλη εναλλασσόμενη τάση στο δευτερεύον του ώστε στην έξοδο της τροφοδοτικής διάταξης να έχουμε την επιθυμητή DC Τάση.

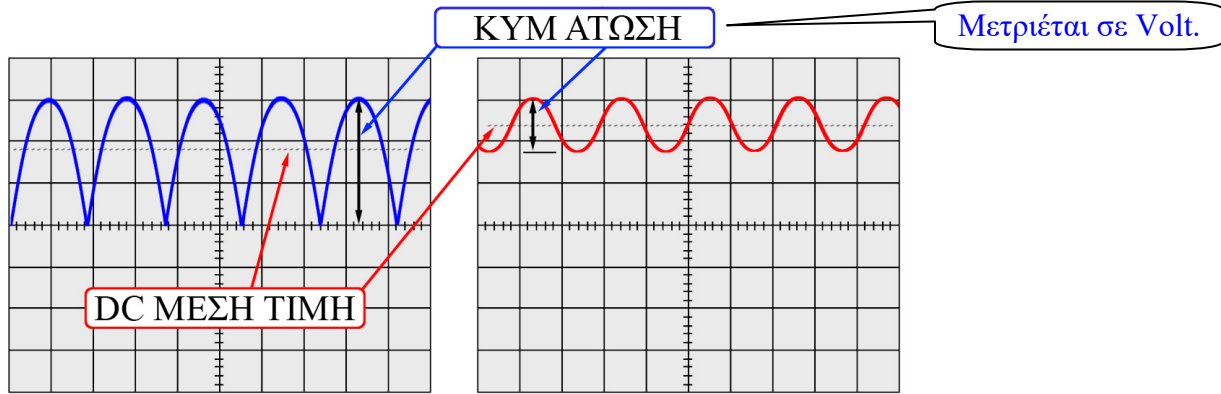
Απομόνωση μεταξύ δύο ηλεκτρικών διατάξεων είναι η μη ύπαρξη ηλεκτρικού δρόμου ανάμεσα τους (άπειρη αντίσταση). Αυτό είναι κάτι πολύ απαραίτητο στις τροφοδοτικές διατάξεις γιατί αυξάνει την ασφάλεια των χρηστών της ηλεκτρονικής συσκευής που τροφοδοτεί η διάταξη.

2) Το **κύκλωμα Ανόρθωσης** εμπεριέχει διόδους και μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση που εμφανίζεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή σε τάση μιας πολικότητας. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας χρήση της βασικής ιδιότητας των διόδων να επιτρέπουν την διέλευση του ρεύματος μόνο κατά την μία πολικότητα.

3) **Φίλτρο**

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 3.1 η συνεχής τάση στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης δεν έχει σταθερή τιμή. Παρουσιάζει μια διακύμανση (κυμάτωση) γύρω από μια συγκεκριμένη τιμή (τη μέση τιμή της τάσης εξόδου).

Κυμάτωση ονομάζεται η περιοδική διακύμανση που εμφανίζει η τάση εξόδου (η μεταβολή της τάσης εξόδου από κορυφή σε κορυφή - peak to peak)



Δηλαδή η συνεχής (αλλά μεταβαλλόμενη) τάση στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης ουσιαστικά αναλύεται σε ένα αριθμό από εναλλασσόμενες συνιστώσες (ανάλυση κατά Fourier) και από την DC μέση τιμή της. Επειδή όμως τα περισσότερα ηλεκτρονικά κυκλώματα χρειάζονται για την τροφοδοσία τους μια σταθερή DC τάση όμοια με αυτή που παράγει μια μπαταρία, η τυχόν εμφάνιση AC συνιστωσών στην έξοδο της τροφοδοτικής διάταξης δημιουργεί πρακτικά προβλήματα (π.χ σε έναν ενισχυτή ήχου θα έχει σαν αποτέλεσμα να ακουστεί στα μεγάφωνα ένας βόμβος που θα οφείλεται στην κυμάτωση της DC τάσης τροφοδοσίας).

Για να περιορίσουμε λοιπόν τις AC συνιστώσες της ανορθωτικής διάταξης (ώστε να μείνει όσο το δυνατόν μόνο η DC μέση τιμή), βάζουμε στην έξοδο της ειδικά κυκλώματα που ονομάζονται **φίλτρα** και έχουν σαν στόχο την ελάττωση των AC συνιστωσών. Η λειτουργία τους αυτή λέγεται φιλτράρισμα ή εξομάλυνση (βλέπε σχήμα 3.1). Τα φίλτρα υλοποιούνται κυρίως με παθητικά στοιχεία (πυκνωτές και πηνία).

#### 4) Σταθεροποιητής ( Regulator)

Παρά την τοποθέτηση των φίλτρων εξομάλυνσης (για τον περιορισμό των AC συνιστωσών), η συνεχής τάση στην έξοδο τους (των φίλτρων) δεν είναι ακόμα απολύτως σταθερή. Έχει μια μικρή κυμάτωση. Επιπλέον η DC Μέση τιμή της τάσης εξόδου δεν είναι σταθερή. Εξαρτάται και από την αντίσταση που παρουσιάζει το φορτίο (η συσκευή που τροφοδοτεί το τροφοδοτικό μας). Για κάποιες συσκευές αυτό μπορεί να μην δημιουργεί προβλήματα οπότε μπορούμε να πούμε ότι το τροφοδοτικό με το φίλτρο που του έχουμε βάλει είναι ικανοποιητικό για την δουλειά που το θέλουμε. Για πολλές όμως άλλες εφαρμογές (ηλεκτρονικά κυκλώματα ακριβείας, ψηφιακά κυκλώματα, διάφορες συσκευές), οι μεταβολές των τάσεων τροφοδοσίας δεν είναι ανεκτές, δημιουργούν προβλήματα. Σε αυτές λοιπόν τις περιπτώσεις απαιτείται στην έξοδο του φίλτρου να τοποθετηθούν **διατάξεις σταθεροποίησης τάσης**, οι λεγόμενοι **σταθεροποιητές**. Ο ρόλος των σταθεροποιητών είναι να βγάλουν στην έξοδο τους μια απολύτως σταθερή τάση ανεξαρτήτως της τιμής του φορτίου (μέσα στα όρια των δυνατοτήτων του τροφοδοτικού).

Τα Τροφοδοτικά που περιέχουν και Σταθεροποιητή Τάσης ονομάζονται Σταθεροποιημένα τροφοδοτικά και είναι πιο δαπανηρά από τα απλά τροφοδοτικά που έχουν μόνο φίλτρο εξομάλυνσης. Ένα συνηθισμένο σταθεροποιημένο τροφοδοτικό έχει προδιαγραφές κυμάτωσης και σταθεροποίησης τάσης με τιμές μικρότερες από 100 mV.

Πριν μερικά χρόνια τα κυκλώματα σταθεροποίησης τάσης αποτελούνταν από διακριτά εξαρτήματα όπως δίοδοι zener, transistor. Σήμερα όμως στην εποχή της μικροηλεκτρονικής υπάρχει μεγάλη ποικιλία φθηνών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που επιτυγχάνουν καλύτερη σταθεροποίηση με λιγότερο κόστος.

Τα πέντε παραπάνω τμήματα απαρτίζουν μια σύγχρονη τροφοδοτική διάταξη κλασικού τύπου, γιατί υπάρχει και η κατηγορία των παλμοτροφοδοτικών η οποία όμως δεν θα συζητηθεί σε αυτή την ενότητα.

Τα **βασικότερα χαρακτηριστικά** ενός τροφοδοτικού είναι:

Η **DC τάση εξόδου** του τροφοδοτικού (χωρίς φορτίο στην έξοδο)

Το **Μέγιστο Ρεύμα Εξόδου**

Η **κυμάτωση** της τάσης εξόδου **σε Volt** ή σε ποσοστιαία τιμή.

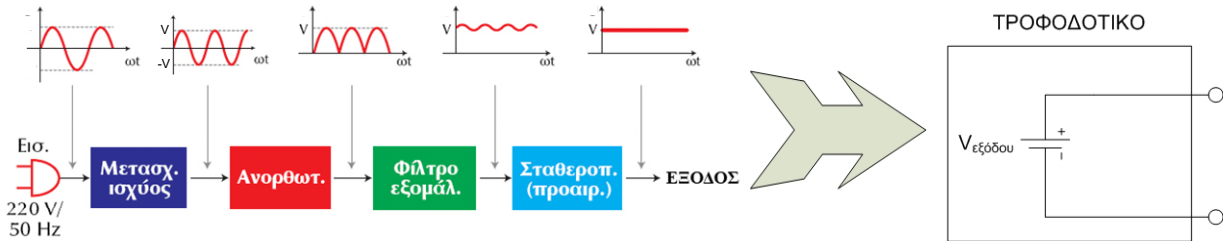
Η **κυμάτωση** σε ποσοστιαία τιμή δίνεται από την σχέση:

$$r = \frac{\text{Κυμάτωση } (\Delta V)}{\text{Μέση τιμή (DC) τάσης εξόδου}}$$

Η **εσωτερική αντίσταση** της Τροφοδοτικής Διάταξης  $R_{εσ} = \frac{\Delta V_{εξόδου}}{\Delta I_{εξόδου}}$

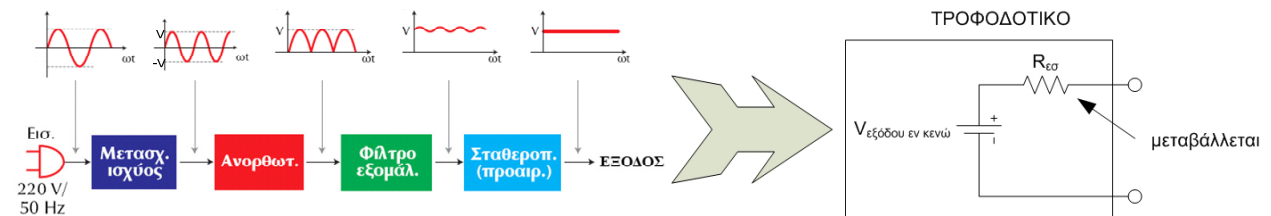
Εδώ πρέπει να διακρίνουμε δυο περιπτώσεις:

**A.** Για Τροφοδοτική Διάταξη που περιέχει και Σταθεροποιητή, η Εσωτερική της Αντίσταση  $R_{εσ}$  είναι περίπου ίση με  $0\Omega$  (για ρεύμα εξόδου μικρότερο ή ίσο του Μέγιστου ρεύματος εξόδου). Σ' αυτή την περίπτωση η όλη Τροφοδοτική Διάταξη ισοδυναμεί με μια ιδανική πηγή τάσης (σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2

**B.** Για Τροφοδοτική Διάταξη που περιέχει μόνο Φίλτρο (χωρίς Σταθεροποιητή), η Εσωτερική της Αντίσταση  $R_{εσ}$  δεν είναι σταθερή αλλά Μεταβάλλεται. Η όλη Τροφοδοτική Διάταξη ισοδυναμεί τώρα με το παρακάτω ισοδύναμο (σχήμα 3.3).



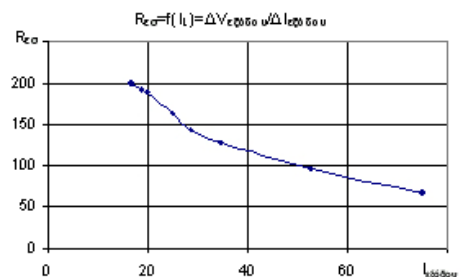
Σχήμα 3.3

Η εσωτερική αντίσταση της Τροφοδοτικής Διάταξης  $\sigma'$  αυτή την περίπτωση μεταβάλλεται συναρτήσει του ρεύματος εξόδου και δίνεται από την σχέση

$$R_{εσ} = \frac{\Delta V_{εξόδου}}{\Delta I_{εξόδου}} \text{ σε } \Omega$$

Η Ικανότητα του τροφοδοτικού να κρατά σταθερή την τάση εξόδου ανεξάρτητα από τις μεταβολές του φορτίου εξόδου  $R_L$  ονομάζεται Σταθεροποίηση φορτίου και δίνεται από την σχέση:

$$\text{Σταθεροποίηση Φορτίου} = \frac{\text{Μεταβολή της DC τάσης Εξόδου}}{\text{DC τάση Εξόδου χωρίς Φορτίο } R_L}$$



Όσο μικρότερη Σταθεροποίηση φορτίου έχει ένα τροφοδοτικό, τόσο καλύτερο είναι.

Τέλος να αναφέρουμε ότι οι σύγχρονες τροφοδοτικές διατάξεις (που περιέχουν σταθεροποιητή) περιλαμβάνουν και αυτόματη λειτουργία περιορισμού του ρεύματος εξόδου σε περίπτωση βραχυκυκλώματος (ηλεκτρονική ασφάλεια).

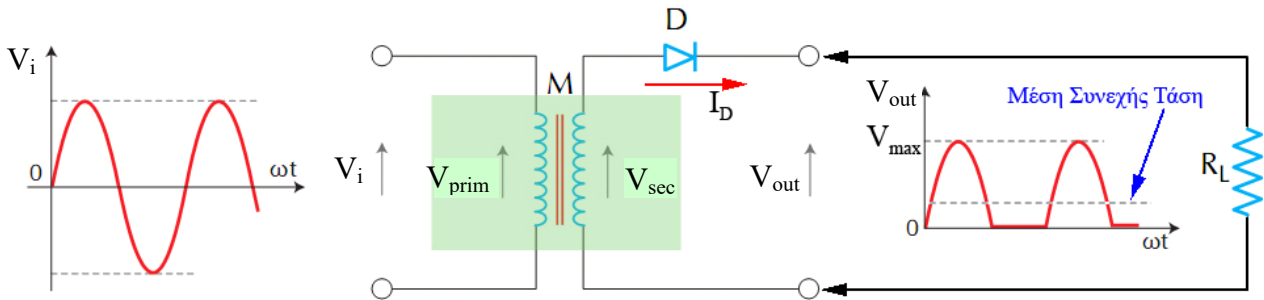
## ΤΥΠΟΙ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Οι βασικοί τύποι ανορθωτικών διατάξεων είναι τρεις:

- **Ανορθωτική Διάταξη Μισού Κύματος** (με μια διόδο) που κάνει απλή ανόρθωση (ημιανόρθωση)
- **Ανορθωτική Διάταξη Πλήρους Κύματος** (με δυο διόδους) που χρησιμοποιεί μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και κάνει διπλή (ή πλήρη) ανόρθωση.
- **Ανορθωτική Διάταξη Γέφυρας** (με τέσσερις διόδους) που κάνει διπλή (ή πλήρη) ανόρθωση.

### ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΙΣΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ (ΑΠΛΗ ΑΝΟΡΘΩΣΗ)

Το βασικό κύκλωμα της **απλής ανόρθωσης** (ή ημιανόρθωσης) φαίνεται στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 3.4

Η ημιανόρθωση είναι η απλούστερη ανορθωτική διάταξη (μια διόδος) με την οποία μπορούμε να παράγουμε **DC** τάση από **AC** είσοδο. Η λειτουργία της είναι η εξής:

Στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση πλάτους  $V_i$  και στο δευτερεύον τύλιγμα του επάγεται τάση  $V_{sec}$ . Συνήθως η εφαρμοζόμενη εναλλασσόμενη τάση εισόδου προέρχεται από το δίκτυο της ΔΕΗ οπότε το πλάτος της είναι  $V_i = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 230 \cdot \sqrt{2}$  και η συχνότητα της είναι  $f = 50\text{Hz}$ . Για τον μετασχηματιστή ξέρουμε ότι ο λόγος των τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του είναι ίσος με τον λόγο των σπειρών του, δηλαδή:

$$\frac{V_{prim}}{V_{sec}} = \frac{N_1}{N_2}, \text{ όπου } N_1, N_2 \text{ είναι ο αριθμός σπειρών του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, αντίστοιχα.}$$

Η εκλογή τώρα του κατάλληλου μετασχηματιστή για μία τροφοδοτική διάταξη γίνεται με δυο βασικά κριτήρια:

- Η τάση εξόδου στο δευτερεύον του μετασχηματιστή να είναι τέτοια ώστε στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης να έχουμε την επιθυμητή DC τάση εξόδου
- Η ισχύς του μετασχηματιστή να είναι λίγο μεγαλύτερη από την μέγιστη ισχύ εξόδου της τροφοδοτικής διάταξης, η οποία είναι

$$P_{\text{εξόδου max}} = V_{\text{DC εξόδου}} \cdot I_{\text{DC εξόδου max}}$$

Κατά την εμφάνιση τώρα της θετικής ημιπεριόδου της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, η άνοδος της διόδου  $D$  γίνεται πιο θετική από την κάθοδο της και έτσι η διόδος πολώνεται ορθά και άγει. Σαν αποτέλεσμα της αγωγής της διόδου είναι η διέλευση ηλεκτρικών φορτίων (ρεύματος) από το δευτερεύον του μετασχηματιστή μέσω της διόδου  $D$  προς το φορτίο  $R_L$  και η εμφάνιση τάσης στα όρια του (του φορτίου).

Κατά την εμφάνιση της αρνητικής ημιπεριόδου της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, η άνοδος της διόδου γίνεται αρνητική ως προς την κάθοδο της και έτσι η διόδος πολώνεται ανάστροφα και δεν άγει (θεωρούμε αμελητέο το ανάστροφο ρεύμα). Άρα δεν θα υπάρχει διέλευση ηλεκτρικών φορτίων (ρεύματος) από το δευτερεύον του μετασχηματιστή και έτσι η τάση στα όρια του φορτίου  $R_L$  θα είναι  $0V$ . Ουσιαστικά δηλαδή εκμεταλλευόμαστε την βασική ιδιότητα της διόδου που είναι ότι επιτρέπει την διέλευση του ρεύματος από μέσα της μόνο κατά την μία κατεύθυνση (όταν η άνοδος της γίνεται πιο θετική από την κάθοδο – βλέπε χαρακτηριστική καμπύλη αγωγής της διόδου). Έτσι μετατρέπουμε την



εμφανιζόμενη εναλλασσόμενη τάση στο δευτερεύων του μετασχηματιστή σε τάση μίας πολικότητας (DC μεταβαλλόμενη - σχήμα 1.4).

Η Μέση Συνεχής Τάση (ή DC τάση) στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης θα είναι:

$$V_{DC (Μέση)} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_0^{\pi} V_{\max} \sin\omega t d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} V_{\max} \sin\omega t d(\omega t) \right\} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_0^{\pi} V_{\max} \sin\omega t d(\omega t) + 0 \right\} \Rightarrow$$

$$V_{DC (Μέση)} = \frac{1}{2\pi} \left\{ -V_{\max} \cos\omega t \Big|_0^{\pi} \right\} = \frac{1}{2\pi} \left\{ -V_{\max} \cos(\pi) + V_{\max} \cos(0) \right\} = \frac{1}{2\pi} (V_{\max} + V_{\max}) = \frac{V_{\max}}{\pi}$$

άρα 
$$V_{DC (Μέση)} = \frac{V_{\max}}{\pi} = \frac{V_{sec \max} \cdot 0.7}{\pi}$$

κατά το ίδιο σκεπτικό η ενεργός τάση εξόδου θα είναι:

$$V_{rms (εξόδου)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left\{ \int_0^{\pi} (V_{\max} \sin\omega t)^2 d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} (V_{\max} \sin\omega t)^2 d(\omega t) \right\}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left\{ \int_0^{\pi} (V_{\max} \sin\omega t)^2 d(\omega t) + 0 \right\}} \Rightarrow$$

$$V_{rms (εξόδου)} = \sqrt{\frac{1}{4} V_{\max}^2} = \frac{V_{\max}}{2} \Rightarrow$$

$$V_{rms (εξόδου)} = \frac{V_{\max}}{2} = \frac{V_{sec \max} \cdot 0.7}{2}$$

Τέλος ένα άλλο χρήσιμο στοιχείο σε μια ανορθωτική διάταξη είναι η ενεργός αντίσταση ορθής φοράς της ανορθώτριας διόδου που χαρακτηρίζεται ως  $r_f$ . Ουσιαστικά είναι η αντίσταση που παρουσιάζει η δίοδος κατά την αγωγή. Για μια ιδανική δίοδο αυτή η αντίσταση είναι ίση με 0Ω (τέλεια αγωγή). Για μια όμως πραγματική δίοδο η ενεργός αντίσταση ορθής φοράς δεν είναι ούτε 0Ω ούτε σταθερή, αλλά εξαρτάται από το στιγμιαίο ρεύμα  $I_D$  της διόδου. Η τιμή της ενεργού αντίστασης ορθής φοράς της διόδου μας πληροφορεί για το ποσό της θερμότητας (ισχύς) που αναπτύσσεται πάνω στη δίοδο κατά την διάρκεια της αγωγής.

Αν θεωρήσουμε μια προσεγγιστική μέση τιμή της  $r_f$  τότε η ισχύς απωλειών της διόδου θα είναι

προσεγγιστικά: 
$$P_{a,D} \approx \frac{V_D^2}{r_f} = \frac{0.7^2}{r_f} = \frac{0.5}{r_f}$$

Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι για να επιλέξουμε την κατάλληλη δίοδο για μια ανορθωτική διάταξη πρέπει να γνωρίζουμε τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

- Μέγιστη τιμή του ρεύματος της διόδου  $I_D$
- Μέγιστη τιμή της ανάστροφης τάσης της διόδου  $V_D$
- Μέγιστη τιμή της εκλυόμενης ισχύος πάνω στην δίοδο

Γνωρίζοντας της παραπάνω ποσότητες ανατρέχουμε στα Data Sheet (φυλλάδια τεχνικών χαρακτηριστικών) των κατασκευαστριών εταιρειών και επιλέγουμε την κατάλληλη δίοδο.

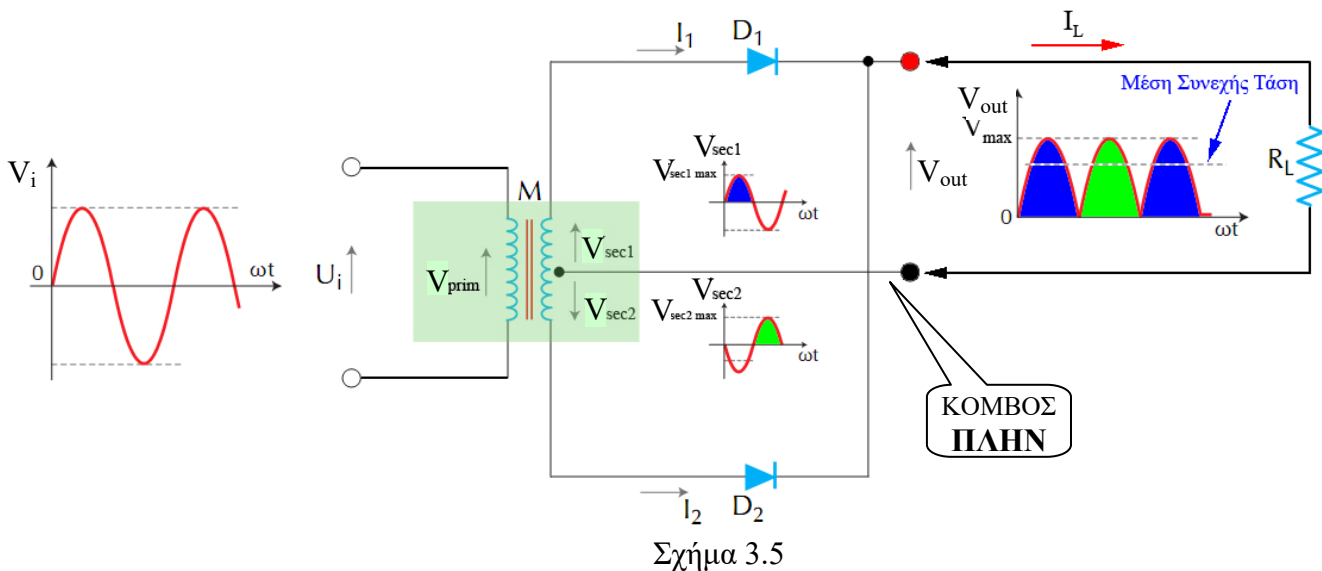
Συνοψίζοντας τα κύρια πλεονεκτήματα της ημianορθωτικής διάταξης είναι το χαμηλό κόστος και η απλότητα της κατασκευής. Στα μειονεκτήματα είναι η σχετικά μικρή τιμή της DC τάσης εξόδου και η μεγάλη κυμάτωση αυτής, που στην πλειοψηφία των περιπτώσεων απαιτεί καλό φίλτράρισμα (ποιο δαπανηρό φίλτρο).

## ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΛΗΡΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

### Α. Ανόρθωση με διόδους και μετασχηματιστή με μεσαία λήψη (Διπλή Ανόρθωση)

Όπως προαναφέραμε ένα από τα μειονεκτήματα της ημιανόρθωσης είναι η σχετικά μικρή τιμή της DC τάσης εξόδου. Γι αυτό σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούμε ανορθωτική διάταξη όχι ημιανόρθωσης αλλά **πλήρους ανόρθωσης**. Η πλήρης ανόρθωση μπορεί να υλοποιηθεί με δύο βασικά κυκλώματα. Η χρησιμοποιώντας μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και δυο διόδους, ή χρησιμοποιώντας απλό μετασχηματιστή και ανορθωτική διάταξη γέφυρας (τέσσερις διόδους).

Το κύκλωμα του σχήματος 3.5 κάνει πλήρη ανόρθωση χρησιμοποιώντας μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και δυο διόδους. Η χρήση μετασχηματιστή **M** με δύο όμοια δευτερεύοντα ( $U_{sec1}=U_{sec2}$ ) και η προσθήκη μιας επιπλέον διόδου (σε σχέση με την απλή ανόρθωση) επιτρέπει την διέλευση ρεύματος προς το φορτίο και κατά τις δύο ημιπεριόδους του σήματος εισόδου. Λόγω δηλαδή της μεσαίας λήψης οι εισοδοί στις δύο διόδους έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης  $180^\circ$  (ως προς τον κόμβο του **πλην**). Έτσι κατά την μια ημιπερίοδο το ρεύμα προς το φορτίο  $R_L$  διέρχεται μέσω του ενός δευτερεύοντος και της διόδου **D1** ενώ κατά την άλλη ημιπερίοδο το ρεύμα διέρχεται μέσω του άλλου δευτερεύοντος και της διόδου **D2**. Δηλαδή το ολικό ρεύμα του φορτίου  $I_L$  είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο ρευμάτων  $I_1$  και  $I_2$ .



Η **Μέση Συνεχής Τάση** (ή DC τάση) στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης Διπλής Ανόρθωσης θα είναι:

$$V_{DC (Μέση)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{\max} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \left\{ -V_{\max} \cos \omega t \Big|_0^{\pi} \right\} = \frac{1}{\pi} \left\{ -V_{\max} \cos(\pi) + V_{\max} \cos(0) \right\} = \frac{2V_{\max}}{\pi}$$

άρα 
$$V_{DC (Μέση)} = \frac{2V_{\max}}{\pi} = \frac{2(V_{sec1 \max} - 0.7)}{\pi}$$

η **rms** τάση εξόδου θα είναι:

$$V_{rms (εξόδου)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_{\max} \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{V_{\max}^2}{2}} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{rms (εξόδου)} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{sec \max} - 0.7}{\sqrt{2}}$$

Συνοψίζοντας τα κύρια πλεονεκτήματα της Διπλής Ανόρθωσης είναι η ικανοποιητική τιμή της DC τάσης εξόδου και η σχετικά καλή Απόδοση. Η συχνότητα κυμάτωσης είναι διπλάσια απ' ότι στην απλή ανόρθωση και έτσι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων «βολεύομαστε» με ένα μέτριο φίλτρο. Στα

μειονεκτήματα είναι το μεγαλύτερο κόστος που απαιτείται για τον μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και η διπλάσια ανάστροφη τάση που πρέπει να αντέχουν οι δύο δίοδοι (σε σχέση με την απλή ανόρθωση).

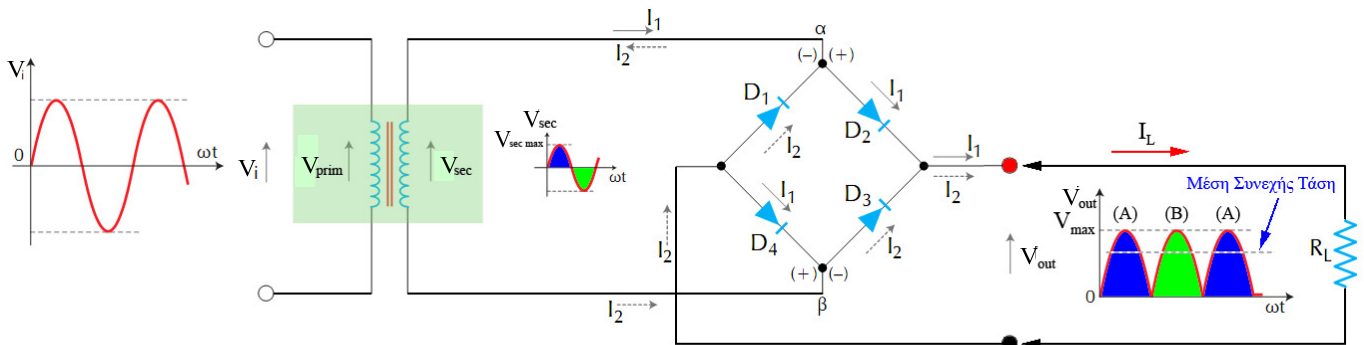
**B. Ανόρθωση με Γέφυρα**

Η Ανορθωτική Διάταξη Γέφυρας (σχήμα 3.6) μοιάζει σε αρκετά σημεία με την Διπλή Ανόρθωση που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα. Έχει την ίδια συχνότητα κυμάτωσης με αυτή και την ίδια DC τάση εξόδου. Τα δυο κυκλώματα διαφέρουν ως προς τον αριθμό των διόδων (τέσσερις για ανορθωτική διάταξη γέφυρας και δυο για την διπλή ανόρθωση). Επιπλέον μια ακόμα βασική διαφορά τους είναι ότι για την ανορθωτική διάταξη γέφυρας χρησιμοποιούμε **απλό μετασχηματιστή (N1/N2)** ενώ για την διπλή ανόρθωση χρησιμοποιούμε **μετασχηματιστή με μεσαία λήψη (N1/2xN2)**.

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.6 τα δύο άκρα της γέφυρας είναι συνδεδεμένα στα άκρα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή ενώ από τα άλλα δυο άκρα της παίρνουμε την DC τάση εξόδου. Η λειτουργία της έχει ως εξής:

Όταν η τάση στο κόμβο **α** είναι θετική ως προς τον κόμβο **β**, δηλαδή κατά την πρώτη ημιπερίοδο του σήματος εισόδου, άγουν οι δίοδοι **D<sub>2</sub>** και **D<sub>4</sub>**, αφού οι άνοδοι τους είναι θετικά πολωμένες ως προς την κάθοδο τους και το ρεύμα **I<sub>1</sub>** ακολουθεί το δρόμο που δείχνεται στο σχήμα 3.6 (δηλαδή από το δευτερεύον του μετασχηματιστή μέσω του κόμβου **α**, της διόδου **D<sub>2</sub>**, του φορτίου **R<sub>L</sub>**, της διόδου **D<sub>4</sub>** και τέλος του κόμβου **β**, ξαναγυρνά στον μετασχηματιστή). Η κυματομορφή της τάσης εξόδου κατά αυτή την διαδρομή του ρεύματος απεικονίζεται στο σχήμα 3.6 σαν **(A)** – μπλε χρώμα.

Κατά την δεύτερη ημιπερίοδο του σήματος εισόδου, όπως αυτό αναπτύσσεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, ο κόμβος **α** γίνεται αρνητικός ως προς τον κόμβο **β** οπότε άγουν τώρα οι δίοδοι **D<sub>1</sub>** και **D<sub>3</sub>**, αφού οι άνοδοί τους είναι τώρα πιο θετικές από τις αντίστοιχες καθόδους. Το ρεύμα **I<sub>2</sub>** ακολουθεί το δρόμο από το δευτερεύον του μετασχηματιστή στον κόμβο **β**, μέσω της διόδου **D<sub>3</sub>** στο φορτίο **R<sub>L</sub>**, και στη συνέχεια μέσω της διόδου **D<sub>1</sub>** και του κόμβου **α** επιστρέφει στο μετασχηματιστή. Η κυματομορφή της τάσης εξόδου κατά αυτή την διαδρομή του ρεύματος απεικονίζεται στο σχήμα 3.6 σαν **(B)** – πράσινο χρώμα. Το ολικό ρεύμα εξόδου **I<sub>L</sub>** είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο ρευμάτων **I<sub>1</sub>** και **I<sub>2</sub>**.



Σχήμα 3.6

Η **Μέση Συνεχής Τάση** (ή DC τάση) στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης Γέφυρας θα είναι (όπως και στην διπλή ανόρθωση):

$$V_{DC (Μέση)} = \frac{2V_{max}}{\pi} = \frac{2(U_{sec\ max} - 1.4)}{\pi}$$

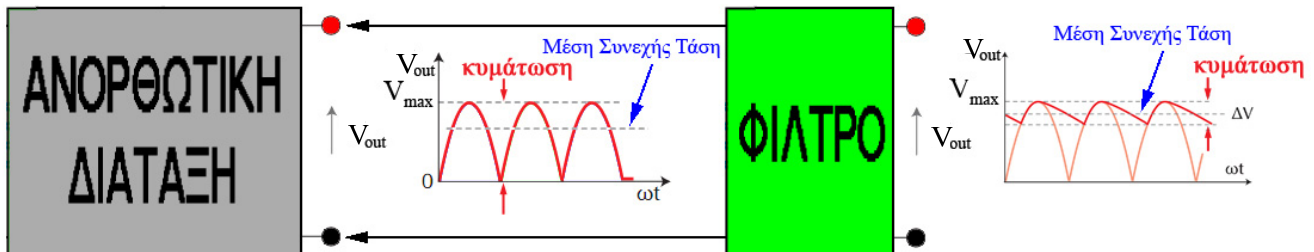
και

$$V_{rms (εξόδου)} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{U_{sec\ max} - 1.4}{\sqrt{2}}$$

Το κύριο πλεονέκτημα της ανόρθωσης με γέφυρα είναι ότι έχουμε πλήρη ανόρθωση χρησιμοποιώντας απλό μετασχηματιστή. Το μειονέκτημα της (ασήμαντο μειονέκτημα) είναι ότι χρησιμοποιούμε τέσσερις διόδους αντί για δυο και αυξάνεται λίγο το κόστος και η πολυπλοκότητα του κυκλώματος.

## ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΚΑΙ ΦΙΛΤΡΑ

Όπως προαναφέραμε φιλτράρισμα ή εξομάλυνση ονομάζεται η διαδικασία που έχει σαν στόχο να περιορίσει τις AC συνιστώσες που προκύπτουν από την Ανορθωτική Διάταξη ώστε να μείνει όσο το δυνατόν μόνο η DC Μέση τιμή της τάσης. Για να το πετύχουμε αυτό βάζουμε στην έξοδο της Ανορθωτικής Διάταξης (βλέπε σχήμα 3.7) ειδικά κυκλώματα που ονομάζονται φίλτρα και υλοποιούνται κυρίως με παθητικά στοιχεία (πυκνωτές και πηνία).



Σχήμα 3.7

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.7 στη γενική περίπτωση η εξομάλυνση δε είναι πλήρης με αποτέλεσμα η τελική τάση  $V_{out}$  να εμφανίζει μια μικρή περιοδική διακύμανση που όπως έχουμε πει ονομάζεται **κυμάτωση**. Το εύρος  $\Delta V$  της κυμάτωσης (σε Volt) αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό μιας τροφοδοτικής διάταξης.

Συχνά η κυμάτωση εκφράζεται και σε ποσοστιαία μορφή, δηλαδή από το συντελεστή:

$$r = \frac{\text{Κυμάτωση } (\Delta V)}{\text{Μέση τιμή (DC) τάσης εξόδου}}$$

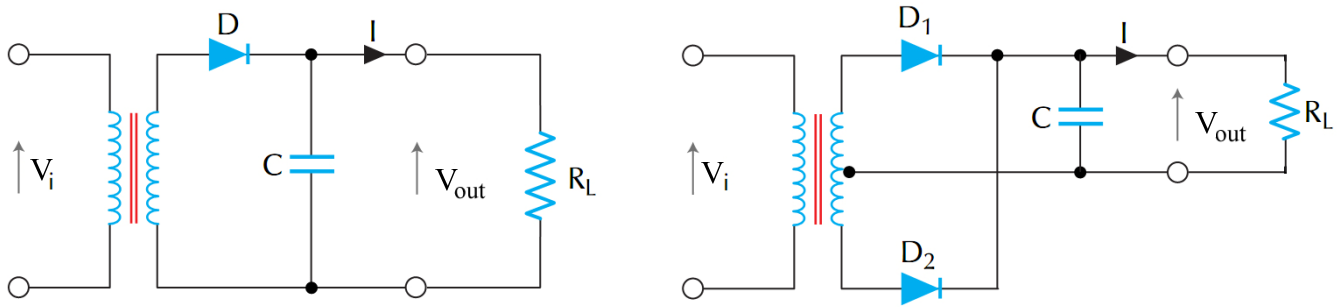
Υπάρχουν διάφοροι τύποι φίλτρων. Οι πιο γνωστοί είναι:

- Φίλτρο με πυκνωτή (R - C)
- Φίλτρο με επαγωγικής εισόδου (L - C)
- Φίλτρο τύπου  $\Pi$  ( $C_1 = C_2$ )
- Φίλτρο τύπου  $\Pi$  ( $C_1 > C_2$ )

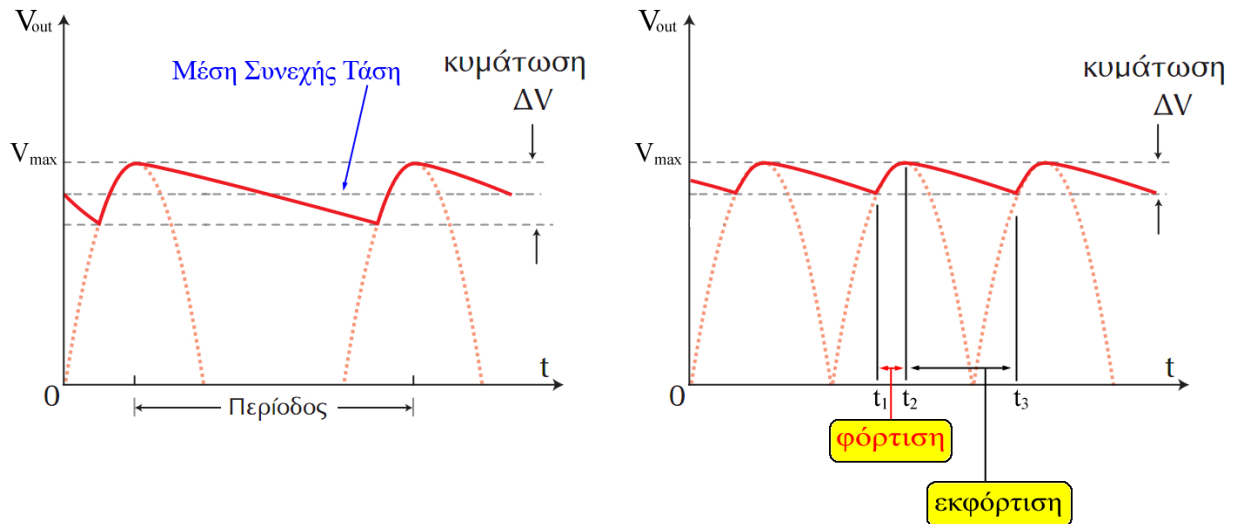
### A. Φίλτρο τύπου Πυκνωτή (R - C)

Για να περιορίσουμε τις AC συνιστώσες που προκύπτουν από την **Ανορθωτική Διάταξη** (ώστε να μείνει όσο το δυνατόν μόνο η μέση τιμή (DC) της τάσης) χρησιμοποιούμε ένα πυκνωτή C μεγάλης χωρητικότητας. Τον πυκνωτή τοποθετούμε στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης παράλληλα με το φορτίο. Η τιμή του πυκνωτή αυτού για τη συχνότητα του δικτύου (50Hz), κυμαίνεται από 100 έως 10000 $\mu\text{F}$  και εξαρτάται από το ρεύμα φορτίου και από το βαθμό εξομάλυνσης που επιθυμούμε.

Το σχήμα 3.8 δείχνει τα κυκλώματα της απλής και της διπλής ανόρθωσης εφοδιασμένα με τον πυκνωτή εξομάλυνσης, ενώ το σχήμα 3.9 απεικονίζει τις κυματομορφές εξόδου των κυκλωμάτων αυτών. Η τάση εξόδου με εξομάλυνση είναι η συνεχής γραμμή, ενώ η ανορθωμένη έξοδος είναι η διακεκομμένη γραμμή. Επειδή η διπλή ανόρθωση μοιάζει πολύ με την ανόρθωση τύπου γέφυρας, η κυματομορφή της τάσης εξόδου για ανόρθωση τύπου γέφυρας με φίλτρο πυκνωτή, είναι ίδια με την κυματομορφή για διπλή ανόρθωση.



Σχήμα 3.8



Σχήμα 3.9

Η λειτουργία του φίλτρου πυκνωτή είναι η εξής: Όταν η ανορθωμένη τάση αυξάνεται ο πυκνωτής φορτίζεται από την ανορθωτική διάταξη μέχρι την τάση κορυφής  $V_{max}$ . Το χρονικό αυτό διάστημα αντιστοιχεί από  $t_1$  έως  $t_2$  στο σχήμα 3.9. Στην συνέχεια που η ανορθωμένη τάση αρχίζει να ελαττώνεται, η διάταξη της ανορθωτικής διάταξης που πριν κατά την φόρτιση ήταν σε αγωγή, τώρα αποκόπτεται. Αυτό συμβαίνει γιατί η τάση στα άκρα του πυκνωτή μειώνεται με βραδύτερο ρυθμό (λόγω της αντίστασης φορτίου  $R_L$  που εκφορτίζει τον πυκνωτή) απ’ ότι η ανορθωμένη τάση, οπότε η διάταξη αναστρέφεται. Το χρονικό αυτό διάστημα αντιστοιχεί από  $t_2$  έως  $t_3$  στο σχήμα 3.9.

Δηλαδή κατά το χρονικό διάστημα  $t_1$  έως  $t_2$  ο πυκνωτής φορτίζεται από την ανορθωτική διάταξη και η τάση του αυξάνεται μέχρι την τάση κορυφής  $V_{max}$ . Κατά το επόμενο χρονικό διάστημα  $t_2$  έως  $t_3$  ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω του φορτίου  $R_L$ . Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς.

Συνέπεια των παραπάνω είναι ότι η διάταξη (διόδους) της ανορθωτικής διάταξης άγει (άγουν) μόνο όταν φορτίζεται ο πυκνωτής (από  $t_1$  έως  $t_2$ ) και τροφοδοτούν το υπόλοιπο κύκλωμα (φίλτρο→φορτίο) με «παλμούς» ρεύματος. Το χρονικό διάστημα από  $t_1$  έως  $t_2$  ονομάζεται **χρόνος αγωγής της διόδου**.

$$\text{Χρόνος αγωγής της διόδου} = t_2 - t_1$$

Κατά τον χρονικό διάστημα αγωγής της διόδου η πηγή εναλλασσομένου ρεύματος δίνει ρεύμα και στο κύκλωμα (φίλτρο, φορτίο) ενώ στο υπόλοιπο χρονικό διάστημα (από  $t_2$  έως  $t_3$ ) το φορτίο  $R_L$  διαρρέεται μόνο από το ρεύμα εκφόρτισης του πυκνωτή.

Αυτονόητο είναι ότι αν δεν υπάρχει φορτίο  $R_L$  τότε ο πυκνωτής δεν θα εκφορτίζεται και έτσι η τάση εξόδου θα είναι απολύτως συνεχής και ίση με  $V_{max}$ . Αυτή η περίπτωση όμως δεν έχει πρακτική αξία γιατί αν δεν υπάρχει φορτίο τότε τι το θέλουμε το τροφοδοτικό.

Η ύπαρξη λοιπόν του ρεύματος φορτίου έχει σαν αποτέλεσμα να εκφορτίζεται ο πυκνωτής κατά  $\Delta V$  για κάθε κύκλο του σήματος εισόδου. Άρα η τιμή της κυμάτωσης εξαρτάται από το μέγεθος του πυκνωτή και

την αντίσταση του φορτίου. Έτσι για να πετύχουμε χαμηλές τιμές κυμάτωσης θα πρέπει να τοποθετήσουμε ηλεκτρολυτικό πυκνωτή μεγάλης τιμής .

Αποδεικνύεται ότι για την περίπτωση της απλής ανόρθωσης του σχήματος 3.8, η κυμάτωση  $r$  δίνεται από τις σχέσεις:

$$r = \frac{\Delta V}{\text{Μέση τιμή της τάσης εξόδου}} = \frac{I_L \cdot T}{C} = \frac{I_L}{C \cdot f}$$

όπου  $T$  και  $f$  είναι η περίοδος και η συχνότητα της  $AC$  τάσης εισόδου. Το  $I_L$  παριστάνει τη μέση  $DC$  τιμή του ρεύματος φορτίου η οποία είναι ίση με:

$$I_L \cong \frac{\text{Μέση τιμή της τάσης εξόδου}}{R_L}$$

Η  $DC$  μέση τιμή της τάσης εξόδου θα είναι:  $V_{DC} \cong V_{max} - \frac{I_L}{2 \cdot C \cdot f}$

και η κυμάτωση:  $r = \frac{\Delta V}{\text{Μέση τιμή της τάσης εξόδου}} = \frac{1}{2\sqrt{3}R_L C f}$

Όπως βλέπουμε και από το σχήμα 3.9 η περίοδος της κυματομορφής της τάσης εξόδου για την πλήρη ανόρθωση είναι διπλάσια απ’ ότι στην απλή ανόρθωση. Έτσι για την πλήρη ανόρθωση η περίοδος της κυματομορφής της τάσης εξόδου είναι  $T=1/2f$  και επομένως η κυμάτωση στην πλήρη ανόρθωση θα δίνε-

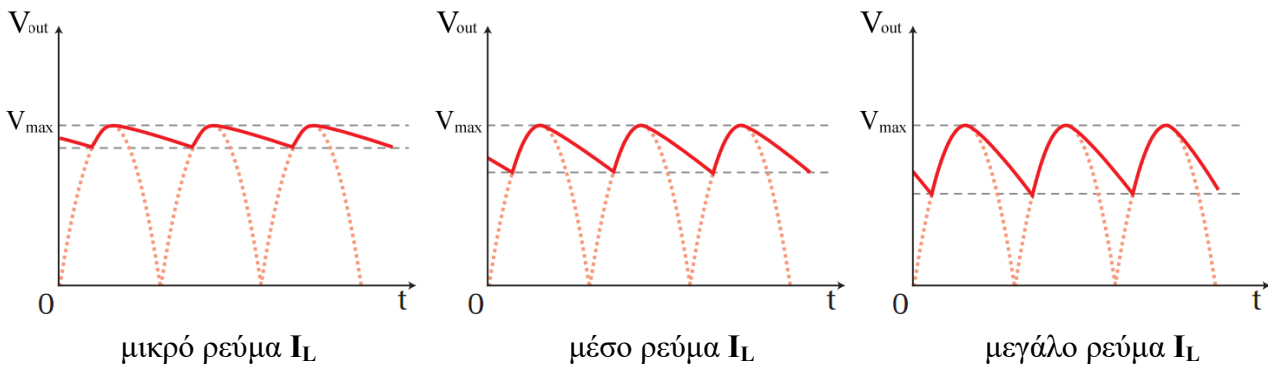
ται από τη σχέση:  $r = \frac{1}{4\sqrt{3}R_L C f}$

και η τάση εξόδου:  $V_{DC} \cong V_{max} - \frac{I_L}{4 \cdot C \cdot f}$

Συμπερασματικά να πούμε ότι οι διατάξεις πλήρης ανόρθωσης έχουν μικρότερη κυμάτωση απ’ ότι οι διατάξεις απλής ανόρθωσης (σχήμα 3.9) για αυτό και προτιμούνται. Όσον αφορά τον πυκνωτή να θυμίσουμε ότι οι πυκνωτές από 100 έως 30000 $\mu F$  είναι ηλεκτρολυτικού τύπου, δηλαδή έχουν πολικότητα + και -. Επιπλέον η αναγραφόμενη συνεχής τάση λειτουργίας του πρέπει να είναι **αρκετά μεγαλύτερη** από την μέγιστη τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Αυτό γιατί απορροφά μεγάλους παλμούς ρεύματος κατά τον χρόνο φόρτισης που μπορεί να είναι μερικά αμπερ. Έτσι αν τοποθετηθεί μικρός πυκνωτής είναι πιθανό να υπερθερμανθεί και να εκραγεί

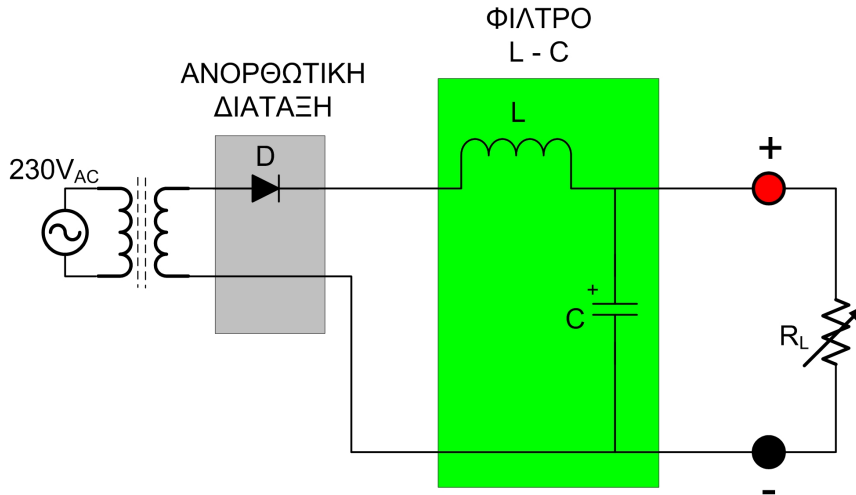
### B. Φίλτρο L-C

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο η κυμάτωση μιας ανορθωτικής διάταξης με φίλτρο πυκνωτή εξαρτάται από το ρεύμα φορτίου  $I_L$ . Δηλαδή αν μεγαλώσει το ρεύμα που τραβάει το φορτίο εκφορτίζεται πιο γρήγορα ο πυκνωτής και μεγαλώνει η κυμάτωση (σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10

Για να μειώσουμε το παραπάνω φαινόμενο κάνουμε χρήση του φίλτρου εξομάλυνσης με Πηνίο και Πυκνωτή (σχήμα 3.11). Το πηνίο L που ονομάζεται και τσοκ λειτουργεί σαν δεξαμενή ρεύματος και ουσιαστικά αντιτίθεται σε κάθε «γρήγορη..» μεταβολή του ρεύματος φορτίου. Δηλαδή κατά κάποιο τρόπο το πηνίο L « αποθηκεύει » ρεύμα μέσα του και το ξανά αποδίδει όταν το ρεύμα φορτίου τείνει να μειωθεί (κάτι ανάλογο με τον πυκνωτή που λειτουργεί σαν δεξαμενή τάσης). Έτσι το ρεύμα φορτίου (το διερχόμενο μέσω του πηνίου) τείνει να διατηρηθεί σταθερό.



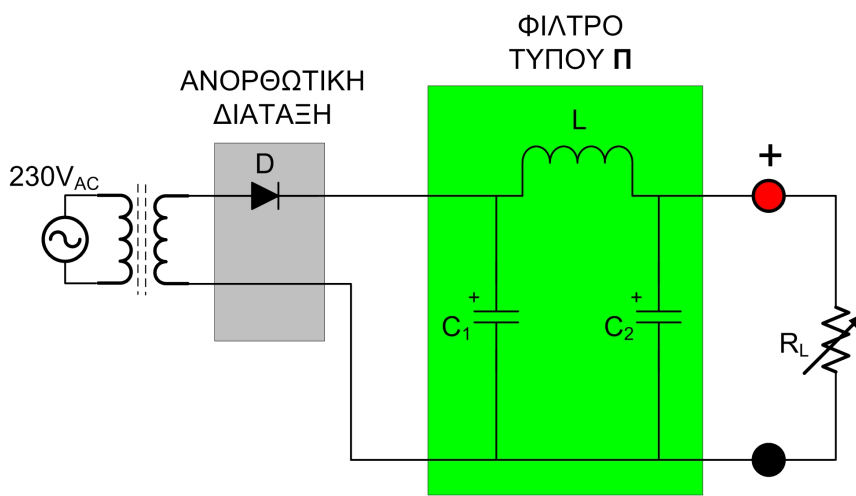
Σχήμα 3.11

Η χρησιμότητα του πηνίου L φαίνεται και αν υπολογίσουμε την επαγωγική αντίσταση του  $X_L$  στη συχνότητα κυμάτωσης. Για πλήρη ανόρθωση στην οποία η συχνότητα της κυμάτωσης είναι  $f=2 \cdot 50=100\text{Hz}$ , έχουμε για ένα πηνίο των 30H:  $X_L = 2 \pi f L = 2\pi 100 \cdot 30 \approx 30\text{K}\Omega$

Συγκριτικά με αυτή την τιμή η ωμική (DC) αντίσταση του πηνίου που είναι της τάξης μερικών 10-δων  $\Omega$ , είναι πολύ μικρή. Άρα το πηνίο L θα παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση στις AC συνιστώσες του ρεύματος (δηλαδή στην κυμάτωση) και πολύ μικρή αντίσταση για το ωφέλιμο DC ρεύμα, με αποτέλεσμα η κυμάτωση  $r$  να είναι πολύ μικρότερη.

### Γ. Φίλτρο τύπου Π

Το φίλτρο τύπου Π χρησιμοποιεί δυο χωρητικότητες  $C_1$ ,  $C_2$  και μια αυτεπαγωγή L όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12

Ο πρώτος πυκνωτής  $C_1$  δρα ως φίλτρο πυκνωτή, κατά τον τρόπο που αναλύσαμε στην προηγούμενη παράγραφο **A**. Το πηνίο  $L$  όπως προαναφέραμε στην παράγραφο **B** αντιτίθεται σε κάθε μεταβολή του ρεύματος του και επειδή το ρεύμα φορτίου διέρχεται μέσω του πηνίου τείνει να το διατηρεί σταθερό.

Με την προσθήκη τώρα και του δεύτερου πυκνωτή  $C_2$ , η έξοδος του φίλτρου φιλτράρεται ακόμα περισσότερο με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται η κυμάτωση. Ουσιαστικά δηλαδή ο πυκνωτής  $C_1$  δρα ως φίλτρο πυκνωτή και το δίκτυο  $L - C_2$  λειτουργεί σαν φίλτρο τύπου **L-C**. Τυπικές τιμές των στοιχείων ενός φίλτρου τύπου **Π** είναι:  $C_1 = C_2 = 200\mu\text{F}$  και  $L = 1$  έως  $30\text{H}$ .

Αποδεικνύεται ότι η κυμάτωση για το εξεταζόμενο φίλτρο εξομάλυνσης δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{5700}{C_1 C_2 L R_L},$$

όπου οι χωρητικότητες  $C_1, C_2$  εκφράζονται σε  $\mu\text{F}$ , η αυτεπαγωγή  $L$  σε  $\text{H}$  και η αντίσταση φορτίου  $R_L$  σε  $\Omega$ .



# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 1

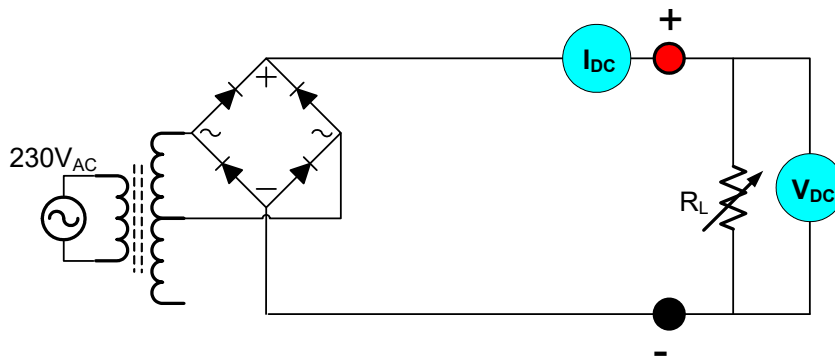
## ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΕΦΥΡΑΣ

### ΣΤΟΧΟΙ

- η κατανόηση της τρόπου λειτουργίας των διόδων σε μια **Ανορθωτική Διάταξη Γέφυρας**
- η κατανόηση της επίδρασης των διαφόρων τύπων φίλτρων σε μια **Ανορθωτική Διάταξη**, όσον αφορά την κυμάτωση και την απόδοση.
- η κατανόηση της **εσωτερικής αντίστασης** (αντίστασης εξόδου  $r = \frac{\Delta V_{DC}}{\Delta I_{DC}}$ ) σε μια ανορθωτική διάταξη.
- η κατανόηση της **επιλογής** του **κατάλληλου φίλτρου** προκειμένου να κατασκευάσουμε ένα τροφοδοτικό συνεχούς τάσεως, όταν είναι **καθορισμένη** η **τάση εξόδου** του ( $V_{DC \text{ out}}$ ), η **αντίσταση φορτίου**  $R_L$  και η **επιτρεπτή ΚΥΜΑΤΩΣΗ**.

### ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

**Βήμα 1.** Υλοποιήστε κύκλωμα με ανορθωτική διάταξη γέφυρας (σχήμα E1.1) και βάλτε την αντίσταση φορτίου  $R_L$  στην μέγιστη τιμή της.



Σχήμα E1.1 – Κύκλωμα ΑΝΟΡΘΩΣΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Μετρήστε με βολτόμετρο την τάση μεταξύ του ενός άκρου και της μεσαίας λήψης του μετασχηματιστή:

$$V_{rms}(V) \text{ μεταξύ του ενός άκρου και της μεσαίας λήψης του μετασχηματιστή} = \dots\dots\dots$$

$$V_{sec}(V) \text{ μεταξύ του ενός άκρου και της μεσαίας λήψης του μετασχηματιστή} = \sqrt{2} V_{rms} = \dots\dots\dots$$

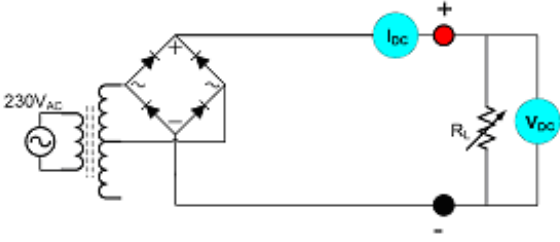
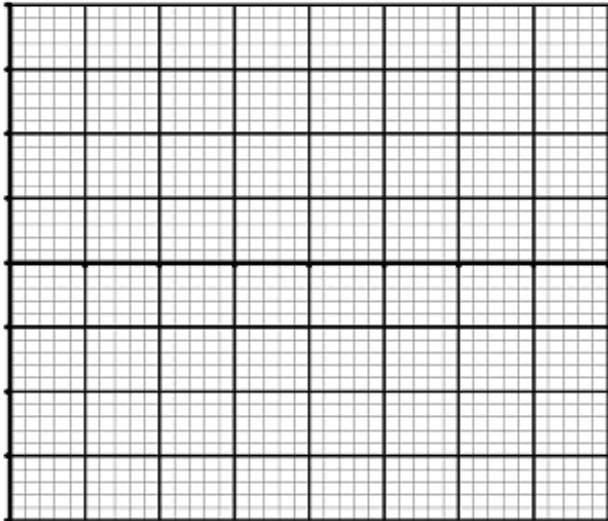
**Βήμα 2-3** Τοποθετείστε στο κύκλωμα ΑΝΟΡΘΩΣΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ τους παρακάτω τύπους φίλτρων και μετρήστε με βολτόμετρο και αμπερόμετρο την τάση  $V_{DC}$  και ένταση  $I_{DC}$  στα άκρα της **Αντίστασης Φορτίου**  $R_L$ , όταν αυτή βρίσκεται στην **Μέγιστη** και **Ελάχιστη** τιμή της. Μετρήστε ακόμα με τον παλμογράφο την **Κυμάτωση**  $\Delta V$  (από κορυφή σε κορυφή) της τάσης εξόδου.

- Χωρίς Φίλτρο (σχήμα E1.2)
- Με Φίλτρο ΠΥΚΝΩΤΗ (RC) (σχήμα E1.3)
- Με Φίλτρο τύπου Π ( $C_1 > C_2$ ) (σχήμα E1.4)

Με τις μετρήσεις που θα πάρετε να συμπληρώσετε και τον πίνακα E1.1.

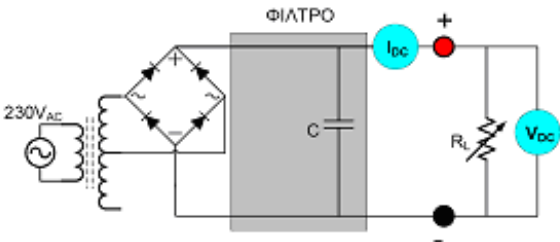
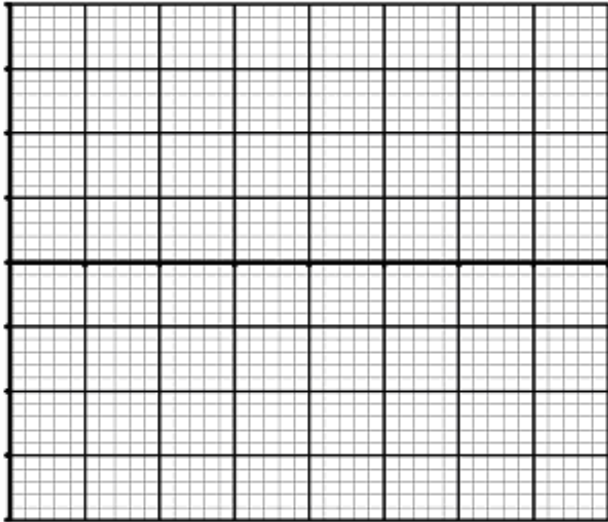
Επιπλέον, μόνο για την **μέγιστη αντίσταση φορτίου**, παρατηρείστε με τον παλμογράφο (επιλέγοντας **DC σύζευξη**) την κυματομορφή της τάσης εξόδου για κάθε τύπο φίλτρου και **σχεδιάστε την καθαρά** στα παρακάτω διαγράμματα βαθμονομώντας σωστά (και με μονάδες) τους άξονες τους. Στα ίδια διαγράμματα να σχεδιάσετε με **διακεκομμένη γραμμή** και την πλήρη ημιτονοειδή μορφή της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.

Χωρίς Φίλτρο	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (mA)	$\Delta V$ (V)
$R_{L,max}$			
$R_{L,min}$			

**Σχήμα E1.2 - ΑΝΟΡΘΩΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ χωρίς Φίλτρο**

Φίλτρο R - C	$V_{DC}$ (V)	$I_{DC}$ (mA)	$\Delta V$ (V)
$R_{L,max}$			
$R_{L,min}$			

**Σχήμα E1.3 - ΑΝΟΡΘΩΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ με Φίλτρο ΠΥΚΝΩΤΗ (RC)**

Στον παρακάτω τύπο φίλτρου **αρχικά παρατηρείστε με τον παλμογράφο (επιλέγοντας DC σύζευξη)** την κυματομορφή της τάσης εξόδου και **σχεδιάστε την καθαρά** στο παρακάτω διάγραμμα. Στην συνέχεια, επειδή η κυμάτωση στην έξοδο είναι πολύ μικρή και δεν μπορεί να παρατηρηθεί με τον παλμογράφο έχοντας τον σε **DC σύζευξη**, γυρίστε τον σε **AC σύζευξη**, **μεγεθύνετε** την εικονιζόμενη κυματομορφή και σχεδιάστε την στο διπλανό παράθυρο (μεγεθυσμένη).

<b>Φίλτρο Π</b> $C_1=1000\mu\text{f}, C_2=22\mu\text{f}$	$V_{\text{DC}} \text{ (V)}$	$I_{\text{DC}} \text{ (mA)}$	$\Delta V \text{ (V)}$
$R_{\text{L,max}}$			
$R_{\text{L,min}}$			

Μεγένθυση									
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Σχήμα Ε 1.4- ΑΝΟΡΘΩΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ με Φίλτρο τύπου Π ( $C_1 > C_2$ )

ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	ΤΥΠΟΣ ΦΙΛΤΡΟΥ	$I_{\text{DC}}$ (mA)	$V_{\text{DC}}$ (Volt)	ΚΥΜΑΤΩΣΗ $\Delta V \text{ (Volt)}$ ( Τάση Peak-Peak )
<b>ΜΕΓΙΣΤΗ</b>	ΧΩΡΙΣ ΦΙΛΤΡΟ			
	ΦΙΛΤΡΟ RC			
	ΦΙΛΤΡΟ Π ( $C_1 > C_2$ )			
<b>ΕΛΑΧΙΣΤΗ</b>	ΧΩΡΙΣ ΦΙΛΤΡΟ			
	ΦΙΛΤΡΟ RC			
	ΦΙΛΤΡΟ Π ( $C_1 > C_2$ )			

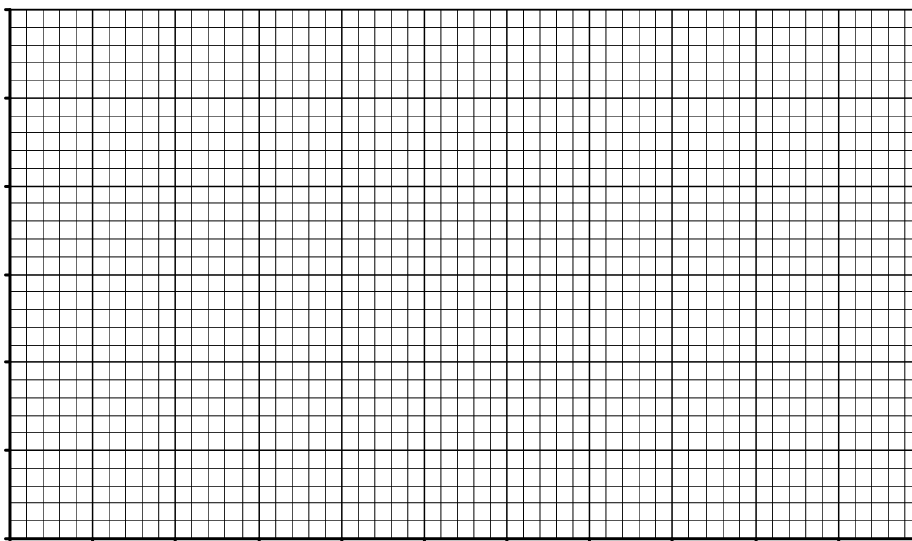
Πίνακας Ε1.1

**Βήμα 4.** Συνδεσμολογήστε κύκλωμα ΑΝΟΡΘΩΣΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ με Φίλτρο τύπου Π ( $C_1 > C_2$ ) και μεταβάλετε την αντίσταση φορτίου  $R_L$  από  $R_{\text{max}}$  έως  $R_{\text{min}}$  (σε 8 διαστήματα). Για κάθε τιμή της  $R_L$  μετρείστε το  $V_{\text{DC}}$  και  $I_{\text{DC}}$  με βάση τα οποία θα χαράξετε την ομαλή καμπύλη  $V_{\text{DC}}=f(I_{\text{DC}})$ . Από την κλίση αυτής της ομαλής καμπύλης για τα διάφορα  $I_{\text{DC}}$ , να υπολογίσετε την **εσωτερική αντίσταση (αντίσταση εξόδου)** της διάταξης. Με τις μετρήσεις σας και τους υπολογισμούς συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα Ε1.2.

Διάφορες τιμές της $R_L$ , από $R_{max}$ έως $R_{min}$	$V_{DC}$	$I_{DC}$	$\Delta V_{DC}$	$\Delta I_{DC}$	$r = \frac{\Delta V_{DC}}{\Delta I_{DC}}$
$R_{ελάχιστη}$			X	X	X
$R_{ελάχιστη} +$					
$R_{ελάχιστη} ++$					
$R_{ελάχιστη} +++$					
$R_{μέση}$					
$R_{μέση} +$					
$R_{μέση} ++$					
$R_{μέση} +++$					
$R_{μέγιστη}$					

Πίνακας E1.2

Χαράξτε την ομαλή καμπύλη  $V_{DC}=f(I_{DC})$  στο διάγραμμα E1.5.



Διάγραμμα E1.5 -  $V_{DC}=f(I_{DC})$

**Βήμα 5.** Συνδεσμολογήστε κύκλωμα **ΑΝΟΡΘΩΣΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ** με Φίλτρο τύπου **Π** ( $C_1 = C_2$ ) και μετρείστε το ρεύμα  $I_{DC}$  και την πτώση τάσης  $V_L$  στα όρια του πηνίου για να υπολογίσετε την **Ωμική του Αντίσταση** (χρησιμοποιώντας τον νόμο του **Ohm**):

$$R_{\pi\eta\nu\iota\omicron 1} = \dots = \dots$$

Διακόψτε την παροχή ενέργειας από το κύκλωμα (τα 230V) και απομονώστε τα όρια του πηνίου από την υπόλοιπη διάταξη. Ξαναμετρήστε την αντίσταση του με **Ωμόμετρο** αυτή την φορά:

$$R_{\pi\eta\nu\iota\omicron 2} = \dots$$

Από τις δυο παραπάνω μετρήσεις καταλήξτε ποια είναι η πραγματική **Ωμική Αντίσταση** του Πηνίου,

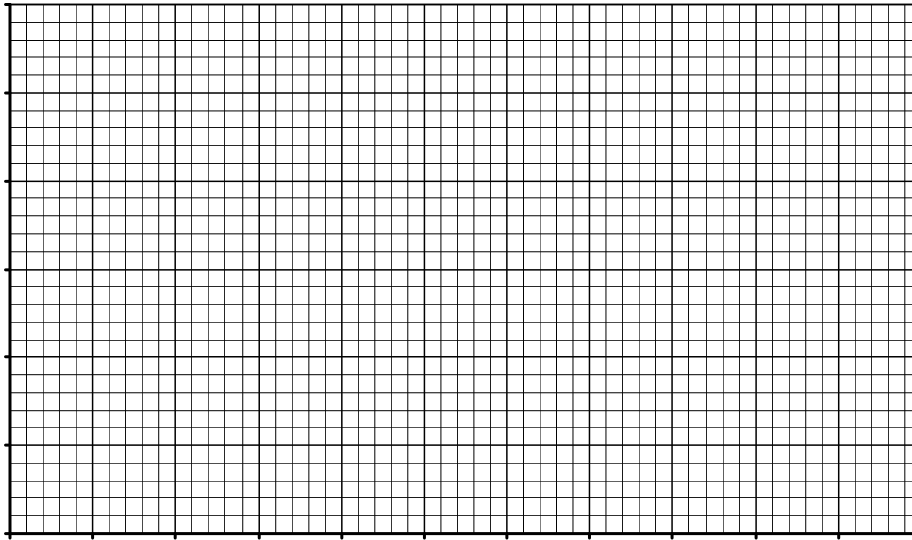
$$R_{\pi\eta\nu\iota\omicron} = \dots$$

Υπολογίστε την **αντίσταση αγωγής** της **κάθε διόδου** για ρεύμα  $I_{DC} = \dots$  (που αντιστοιχεί στην αντίσταση φορτίου  $R_{μέση}$  από τον πίνακα E2.2).

$$R_d = \dots = \dots$$

**Βήμα 6.**

- α).** Ξανασχεδιάστε στο διάγραμμα E1.6 την καμπύλη  $V_{DC} = f(I_{DC})$  του **Βήματος 4**. Πάνω στο διάγραμμα E1.6 τοποθετήστε τα αντίστοιχα ζεύγη τιμών  $V_{DC}$ , και  $(I_{DC})$  για τα άλλα φίλτρα (από τον πίνακα E1.1) και χαράξτε και για αυτά τις καμπύλες  $V_{DC} = f(I_{DC})$ .



Διάγραμμα E1.6 –  $V_{DC} = f(I_{DC})$  για όλους τους τύπου φίλτρων

- β).** Για την **Ανορθωτική Διάταξη Γέφυρας** συγκρίνετε την **Κυμάτωση**, **Απόδοση** και **Εσωτερική Αντίσταση** για τους διάφορους τύπους φίλτρων του πίνακα E1.1 και καταλήξτε σε συμπεράσματα ως προς το κάθε φίλτρο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Ενισχυτές Ασθενών Σημάτων

Στον χώρο της ηλεκτρονικής οι ενισχυτές είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες διατάξεις με τις οποίες μπορούμε να **ενισχύσουμε ένα σήμα με σχετικά μικρό πλάτος** (πχ. το σήμα από ένα αισθητήρα, από ένα μικρόφωνο) και να **δημιουργούμε ένα πιστό ενισχυμένο αντίγραφο** του προκειμένου να διεγείρουμε μια επόμενη διάταξη (πχ. ένα άλλον ενισχυτή, ένα ηχείο, έναν ηλεκτρονόμο (relay κ.ά.)

**Ενισχυτικές διατάξεις** ονομάζονται οι ηλεκτρονικές διατάξεις που **σκοπός τους είναι η ενίσχυση της τάσης ενός σήματος ή του ρεύματος ή και των δύο**.

Είναι προφανές ότι **για να λειτουργήσει μια ενισχυτική διάταξη** (που περιέχει παθητικά στοιχεία (αντιστάσεις, πυκνωτές, τρανζίστορ) **χρειάζεται πάντα και ενέργεια**, η οποία παρέχεται από τροφοδοτικές διατάξεις με τη μορφή **συνεχούς τάσης τροφοδοσίας**.

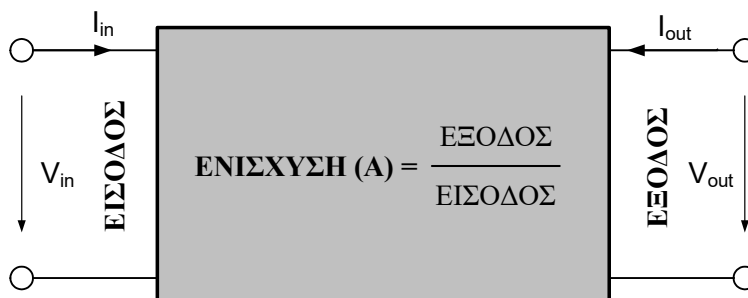
Δεν πρέπει να γίνεται σύγχυση ανάμεσα στη **συνεχή τάση τροφοδοσίας** που χρειάζεται μια ενισχυτική διάταξη και στο **σήμα εισόδου** της. Δηλαδή ξεκαθαρίζουμε ότι:

- Οι τροφοδοτικές διατάξεις παρέχουν **συνεχή τάση** (ενέργεια) στις διάφορες ηλεκτρονικές διατάξεις προκειμένου αυτές να επιτελέσουν το έργο τους.
- Το **σήμα εισόδου** μιας ηλεκτρονικής διάταξης δεν πρέπει να συγχέεται με την τάση τροφοδοσίας (ενέργεια) που χρειάζεται η ηλεκτρονική διάταξη για να λειτουργήσει. Το σήμα εισόδου είναι το προς επεξεργασία σήμα, το οποίο θα δώσουμε στην είσοδο μιας ηλεκτρονικής διάταξης για να το επεξεργαστεί και να το αποδώσει στην έξοδο της επεξεργασμένο.

Για παράδειγμα, σε ένα φορητό ραδιόφωνο, η **ενέργεια** για να λειτουργήσει η ηλεκτρονική διάταξη (ραδιόφωνο) **παρέχεται από τις μπαταρίες** (ή το φορητό τροφοδοτικό). **Σήμα εισόδου** είναι το ασθενές εναλλασσόμενο σήμα που δίνει στην έξοδο της η κεραία λήψης αυτού. **Σήμα εξόδου** είναι το ηχητικό κύμα που ακούμε από το ραδιόφωνο (ηλεκτρικό σήμα στην έξοδο του ενισχυτή του ραδιοφώνου που οδηγείται στο μεγάφωνο του για να το μετατρέψει σε ηχητικό κύμα).

Από θεωρητικής πλευράς, μία ενισχυτική διάταξη μπορεί να θεωρηθεί ως ένα δίθυρο κύκλωμα (σχήμα 4.1) το οποίο περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα ενισχυτικά στοιχεία (τρανζίστορ) και διαθέτει δυο ακροδέκτες εισόδου και δυο ακροδέκτες εξόδου. Για λόγους απλότητας παραλείπουμε να συμπεριλάβουμε στο δίθυρο κύκλωμα τη συνεχή τάση τροφοδοσίας που απαιτείται.

Ο **λόγος του σήματος εξόδου προς το σήμα εισόδου** αναφέρεται ως **ενίσχυση** (amplification) ή **κέρδος** (gain) της ενισχυτικής διάταξης και ουσιαστικά δηλώνει πόσες φορές εμφανίζεται ενισχυμένο το σήμα εισόδου στην έξοδο του ενισχυτή.



Σχήμα 4.1 – Ενισχυτική Διάταξη

Σε μία ενισχυτική διάταξη μπορούμε να ορίσουμε τρία διαφορετικά είδη ενίσχυσης.

Ενίσχυση τάσης: 
$$A_v = \frac{\text{ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ}}{\text{ΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ}} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Ενίσχυση ρεύματος: 
$$A_i = \frac{\text{ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ}}{\text{ΡΕΥΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ}} = \frac{I_{out}}{I_{in}}$$

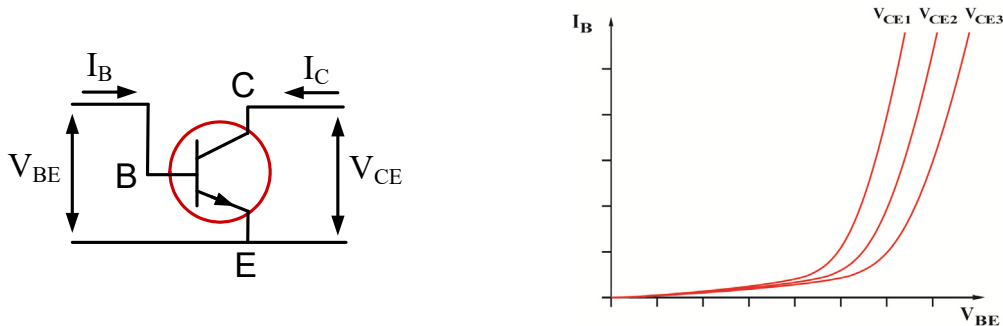
Ενίσχυση ισχύος: 
$$A_p = A_v \times A_i$$

Οι ενισχυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες.

- A. Σε ενισχυτές ασθενών σημάτων που γενικά αναφέρονται και σαν προενισχυτές καθώς είναι σχεδιασμένοι να ενισχύουν ασθενή σήματα προερχόμενα από μικρόφωνα, αισθητήρες ή άλλες διατάξεις που δίνουν μικρού μεγέθους σήματα εξόδου
- B. Σε ενισχυτές ισχυρών σημάτων που αναφέρονται σαν ενισχυτές ρεύματος ή ενισχυτές ισχύος. Συνήθως έχουν μικρό κέρδος αλλά και μικρή αντίσταση εξόδου, άρα μπορούν να δεχθούν στην έξοδο τους μικρή αντίσταση φορτίου (π.χ. ένα μεγάφωνο). Χρησιμοποιούνται κυρίως ως τελικό στάδιο σε άλλες ενισχυτικές διατάξεις.

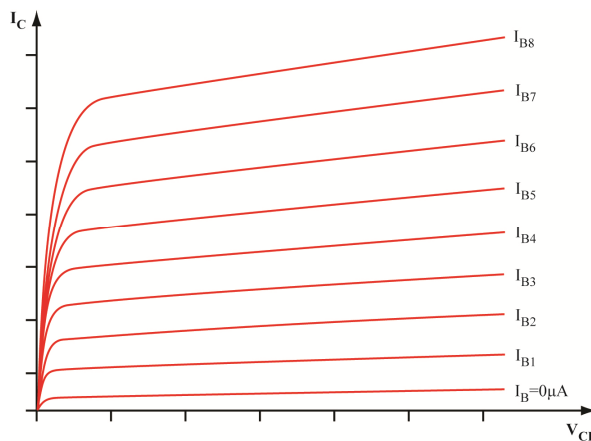
Η συμπεριφορά μίας ενισχυτικής βαθμίδας απεικονίζεται με γραφικό τρόπο μέσω των χαρακτηριστικών καμπυλών εισόδου και εξόδου της. Γενικά χαρακτηριστική ονομάζουμε την γραφική απεικόνιση της σχέσεως ανάμεσα σε δυο ή τρεις ποσότητες (π.χ. ρεύμα και τάση).

Οι χαρακτηριστικές εισόδου μιας απλής ενισχυτικής βαθμίδας με ένα τρανζίστορ BJT σε σύνδεση κοινού εκπομπού (σχήμα 4.2), αποτελούν τη γραφική παράσταση της σχέσης ανάμεσα στο ρεύμα βάσης  $I_B$  και την τάση βάσης - εκπομπού  $V_{BE}$ , με παράμετρο την τάση συλλέκτη - εκπομπού  $V_{CE}$ .



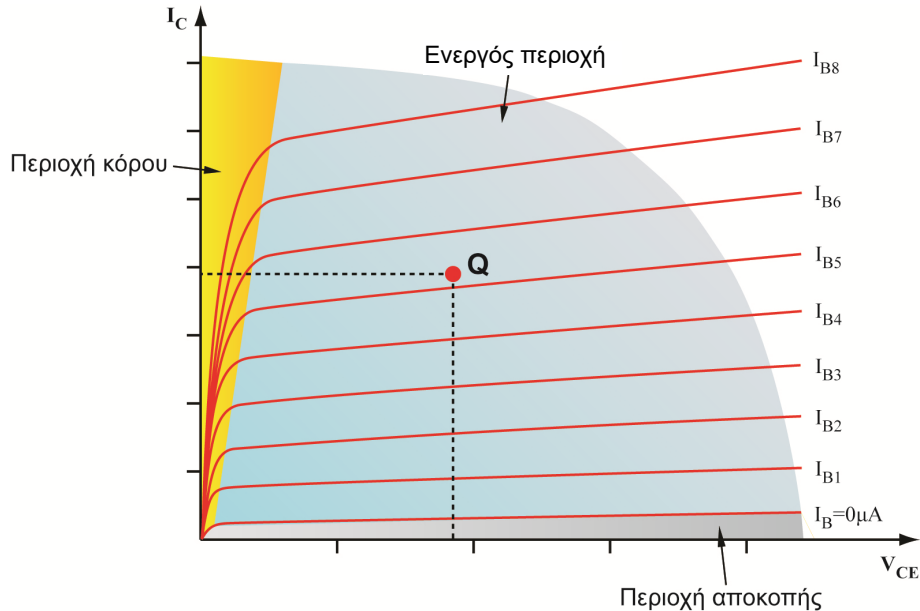
Σχήμα 4.2 – Χαρακτηριστικές εισόδου τρανζίστορ BJT σε σύνδεση κοινού εκπομπού

Οι χαρακτηριστικές εξόδου της ίδιας ενισχυτικής βαθμίδας (σχήμα 4.3), αποτελούν τη γραφική παράσταση της σχέσης ανάμεσα στο ρεύμα συλλέκτη  $I_C$  και την τάση συλλέκτη - εκπομπού  $V_{CE}$ , με παράμετρο το ρεύμα βάσης  $I_B$ .



Σχήμα 4.3 – Χαρακτηριστικές εξόδου τρανζίστορ BJT σε σύνδεση κοινού εκπομπού

- **Στατική λειτουργία** ή **λειτουργία στο συνεχές** μιας απλής ενισχυτικής βαθμίδας ονομάζεται η λειτουργία της μόνο με συνεχή τάση τροφοδοσίας (**DC**), χωρίς δηλαδή σήμα εισόδου.
- **Σημείο λειτουργίας (ή ηρεμίας) Q** μιας απλής ενισχυτικής βαθμίδας ονομάζεται το σημείο των χαρακτηριστικών εξόδου που προσδιορίζεται από το ρεύμα ηρεμίας  $I_B$  (ρεύμα βάσης) του τρανζίστορ και καθορίζει το ζεύγος τιμών  $I_C$  (ρεύμα συλλέκτη) και τάσης  $V_{CE}$  (τάση συλλέκτη - εκπομπού) της βαθμίδας κατά την στατική λειτουργία.



Σχήμα 4.4 – Οι περιοχές λειτουργίας μιας ενισχυτικής βαθμίδας κοινού εκπομπού με τρανζίστορ BJT και το σημείο ηρεμίας Q

Η **πόλωση** μιας απλής ενισχυτικής βαθμίδας αναφέρεται πάντα στη λειτουργία της στο συνεχές ρεύμα (στατική λειτουργία) και αφορά τον τρόπο με τον οποίο πολώνονται οι επαφές του τρανζίστορ. Ουσιαστικά, πόλωση είναι ο καθορισμός (μέσω παθητικών ή ενεργών στοιχείων) του ρεύματος εισόδου ενός τρανζίστορ κατά την στατική λειτουργία του.

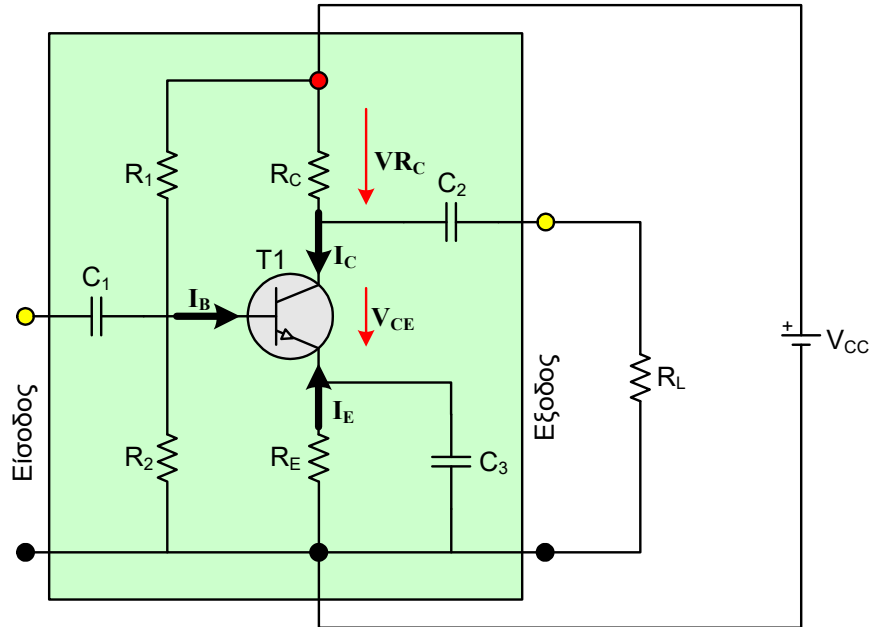
Για τον σωστό καθορισμό της πόλωσης φροντίζει ο σχεδιαστής της βαθμίδας. Θυμίζουμε επίσης ότι **τρεις είναι οι περιοχές** στις οποίες μπορεί να λειτουργήσει μια βαθμίδα (Σχήμα 4.4): **περιοχή κόρου**, **ενεργός περιοχή** και **περιοχή αποκοπής**.

Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα μια συνηθισμένη ενισχυτική βαθμίδα σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού όπως στο παρακάτω σχήμα 4.5. Πρώτα θα διενεργήσουμε την μελέτη της βαθμίδας κατά την **στατική λειτουργία**. Πριν περάσουμε όμως στον υπολογισμό του σημείου λειτουργίας ή ηρεμίας του τρανζίστορ και στη χάραξη της **ευθείας φόρτου** στο συνεχές, αναφέρουμε μερικά βασικά σημεία για την εν λόγω βαθμίδα:.

- Μια βαθμίδα κοινού εκπομπού μας δίνει και ενίσχυση τάσης  $A_v$  και ενίσχυση ρεύματος  $A_i$ . **Συνήθως όμως αξιοποιούμε** την μία της ιδιότητα και την χρησιμοποιούμε σαν **ενισχυτή τάσης**.
- Για να εκμεταλλευτούμε μια βαθμίδα κοινού εκπομπού ως ενισχυτή τάσης πρέπει αυτή να λειτουργεί στην **ενεργό περιοχή** και το **σημείο λειτουργίας Q** είναι επιθυμητό να βρίσκεται περίπου στο **μέσον της ευθείας φόρτου στο συνεχές**, της οποίας τη χάραξη θα δούμε στη συνέχεια.
- Κατά την σχεδίαση της βαθμίδας η αντίσταση συλλέκτη  $R_C$  συνήθως επιλέγεται να είναι **παρόμοια με την αντίσταση φορτίου** που θα τοποθετήσουμε στην έξοδο της βαθμίδας.
- Οι αντιστάσεις εκπομπού και συλλέκτη συμμετέχουν στον καθορισμό του ρεύματος συλλέκτη και της τάσης συλλέκτη-εκπομπού. Το ρεύμα εκπομπού είναι περίπου ίσο με αυτό του συλλέκτη αφού το ρεύμα βάσης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.



- Σε καμία περίπτωση η ενίσχυση τάσης μιας βαθμίδας δεν μπορεί να υπερβεί το  $\beta$  του τρανζίστορ, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 100 και 300 (για τρανζίστορ ασθενών σημάτων).
- Οι αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$  που ονομάζονται αντιστάσεις πολώσης, επιλέγονται έτσι ώστε στην στατική λειτουργία (μόνο με DC τροφοδοτική τάση και χωρίς σήμα στην είσοδο) να προκαλέσουν το κατάλληλο ρεύμα  $I_B$  ώστε να ορίσουν το σημείο λειτουργίας  $Q$  στις χαρακτηριστικές εξόδου περίπου στο μέσον της ευθείας φόρτου στο συνεχές (ενεργός περιοχή).



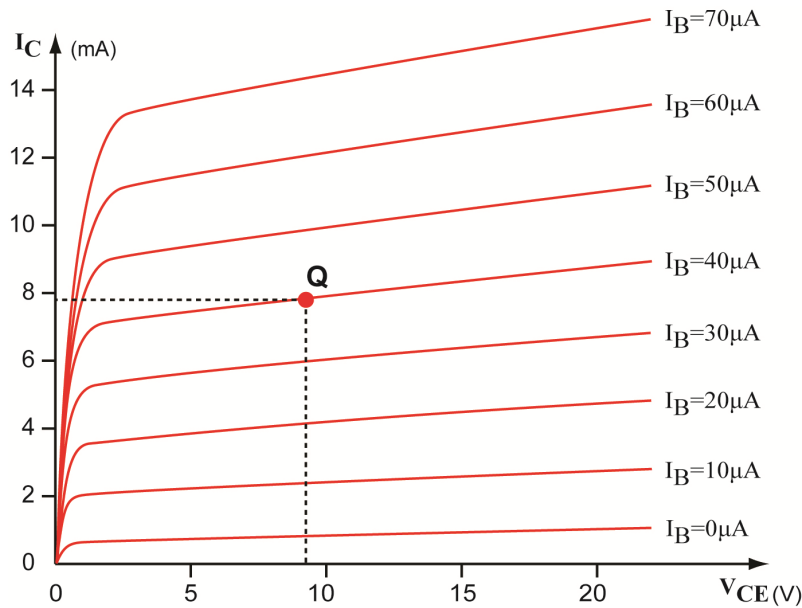
Σχήμα 4.5 – Ενισχυτής κοινού εκπομπού

Για να χαράξουμε την ευθεία φόρτου στο συνεχές και να προσδιορίσουμε το σημείο λειτουργίας  $Q$  της ενισχυτικής βαθμίδας του σχήματος 4.5 εφαρμόζουμε σε αυτή μόνο τάση τροφοδοσίας, χωρίς σήμα στην είσοδο. Στο συνεχές ρεύμα όλοι οι πυκνωτές της βαθμίδας λειτουργούν ως ανοικτά κυκλώματα αφού παρουσιάζουν άπειρη χωρητική αντίσταση, συνεπώς μπορούμε να τους αγνοήσουμε.

Ο προσδιορισμός του σημείου λειτουργίας προϋποθέτει τον προσδιορισμό του ρεύματος συλλέκτη  $I_C$  και της τάσης συλλέκτη-εκπομπού  $V_{CE}$  σε στατική λειτουργία.

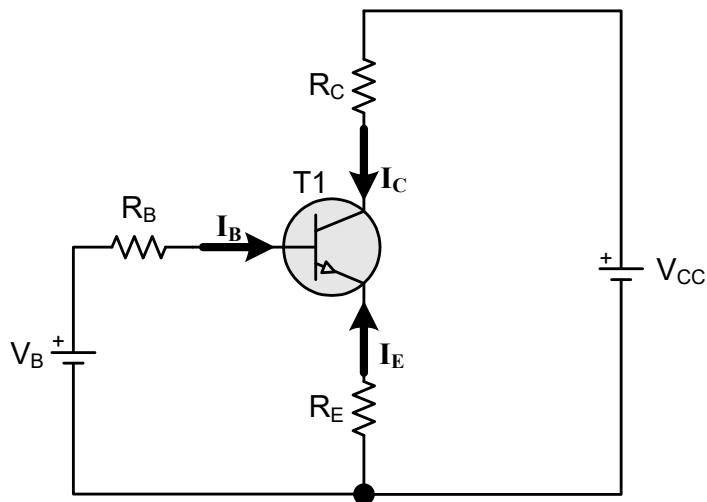
Σε ένα πραγματικό κύκλωμα μπορούμε να μετρήσουμε το ρεύμα  $I_C$  με ένα αμπερόμετρο συνεχούς αφού διακόψουμε τον κόμβο σύνδεσης της αντίστασης  $R_C$  με τον συλλέκτη του τρανζίστορ. Επειδή όμως η διακοπή της σύνδεσης δεν είναι πάντα εφικτή, μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα αυτό εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm στην αντίσταση  $R_C$ . Μετρώντας με ένα βολτόμετρο συνεχούς την τάση  $V_{RC}$  υπολογίζουμε το  $I_C$  από την σχέση  $I_C = V_{RC} / R_C$ . Τέλος, η τάση  $V_{CE}$  μπορεί να μετρηθεί επίσης με ένα βολτόμετρο συνεχούς το οποίο θα πρέπει να συνδεθεί μεταξύ του συλλέκτη και του εκπομπού του τρανζίστορ.

Εάν για παράδειγμα μετρήσουμε με ένα βολτόμετρο συνεχούς στο κύκλωμα του σχήματος 4.5,  $V_{CE} = 9.1$  V και  $V_{RC} = 9.48$  V ενώ  $R_C = 1.2$  k $\Omega$  τότε από το νόμο του Ohm στην αντίσταση  $R_C$  προκύπτει ότι  $I_C = 7.9$  mA, οπότε το σημείο λειτουργίας έχει ως εξής:  $Q$  (7.9 mA, 9.1 V) και μπορεί να σημειωθεί στις χαρακτηριστικές εξόδου του τρανζίστορ όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6 – Σημείο λειτουργίας Q της ενισχυτικής βαθμίδας κοινού εκπομπού

Οι συντεταγμένες του σημείου λειτουργίας μπορούν να προσδιοριστούν και με αμιγώς υπολογιστικό τρόπο με χρήση των κανόνων του Kirchhoff. Πριν όμως εφαρμόσουμε τον 2<sup>ο</sup> κανόνα του Kirchhoff στους βρόχους του κυκλώματος, μπορούμε να απλοποιήσουμε το κύκλωμα του σχήματος 6.5 προσδιορίζοντας το ισοδύναμό του σύμφωνα με το θεώρημα Thevenin (σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7 – Ισοδύναμο κατά Thevenin της ενισχυτικής διάταξης κοινού εκπομπού στο συνεχές (στατική λειτουργία). Οι πυκνωτές λειτουργούν ως ανοικτά κυκλώματα, γι' αυτό και αγνοούνται.

Στο παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin της ενισχυτικής διάταξης για την στατική λειτουργία ισχύουν τα παρακάτω:

$$R_B = R_1 // R_2, \quad V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}.$$

Εφαρμόζουμε τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στους βρόχους εισόδου και εξόδου του ενισχυτή προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις. Κατά την εφαρμογή θεωρούμε αμελητέα την επίδραση του ρεύματος βάσης, συνεπώς  $I_E = - (I_C + I_B) = - I_C$ .

$$\text{Βρόχος εισόδου:} \quad V_B = I_B R_B + V_{BE} + I_C R_E \quad (4.1)$$

$$\text{Βρόχος εξόδου:} \quad V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} + I_C R_E \quad (4.2)$$

Επίσης είναι γνωστό ότι για ένα BJT τρανζίστορ στην ενεργό περιοχή ισχύει κατά προσέγγιση:

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad (4.3)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.1) και (4.3) και λύνοντας ως προς  $I_B$  προκύπτει:

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B + \beta R_E} \quad (4.4)$$

Χρησιμοποιώντας τώρα τη σχέση (4.3) προκύπτει:  $I_C = \beta \left( \frac{V_B - V_{BE}}{R_B + \beta R_E} \right)$  (4.5)

Τέλος, από τη σχέση (4.2) προκύπτει:  $V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$  (4.6)

Επομένως με χρήση των σχέσεων (4.5) και (4.6) μπορούμε να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες του σημείου λειτουργίας του τρανζίστορ.

Εάν για παράδειγμα για την ενισχυτική βαθμίδα του σχήματος 4.5 η τάση τροφοδοσίας είναι  $V_{CC} = 20V$ ,  $R_1 = 56 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 8.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 1.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 200 \Omega$ ,  $\beta = 200$  και  $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ , τότε με βάση την παραπάνω ανάλυση έχουμε τα εξής:

$$R_B = R_1 // R_2 = 7.15 \text{ k}\Omega, \quad V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} = 2.55 \text{ V}$$

$$I_C = \beta \left( \frac{V_B - V_{BE}}{R_B + \beta R_E} \right) \Rightarrow I_C = 7.85 \text{ mA}, \quad V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \Rightarrow V_{CE} = 9 \text{ V}$$

Βλέπουμε ότι οι τιμές  $V_{CE}$  και  $I_C$  που προκύπτουν είναι αρκετά κοντά σε αυτές που μετρήθηκαν πειραματικά.

**Ευθεία Φόρτου** (ή **γραμμή φορτίου**) ονομάζεται ο **γεωμετρικός τόπος** (κατά προσέγγιση ευθεία) πάνω στις χαρακτηριστικές εξόδου μιας απλής ενισχυτικής βαθμίδας στον οποίο **μπορεί να κινείται το σημείο λειτουργίας ή ηρεμίας Q** της ενισχυτικής βαθμίδας.

Για να χαράξουμε την **ευθεία φόρτου** της ενισχυτικής βαθμίδας (θεωρώντας την ευθεία) εφαρμόζουμε τον **2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο εξόδου** της βαθμίδας κατά τη στατική λειτουργία (δηλαδή γράφουμε τη σχέση (4.2) που αναφέρθηκε παραπάνω):

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} + I_C R_E \Rightarrow I_C = -\frac{1}{R_C + R_E} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \quad (4.7)$$

Η γραφική παράσταση που προκύπτει από την παραπάνω σχέση αποτελεί την **ευθεία φόρτου** της βαθμίδας. Τα δύο ακραία σημεία **A** και **B** στα οποία η ευθεία φόρτου τέμνει τις χαρακτηριστικές εξόδου υπολογίζονται από την παραπάνω σχέση για τις δύο ακραίες συνθήκες ως εξής:

$$V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = 14.2 \text{ mA}, \quad I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 20 \text{ V}$$

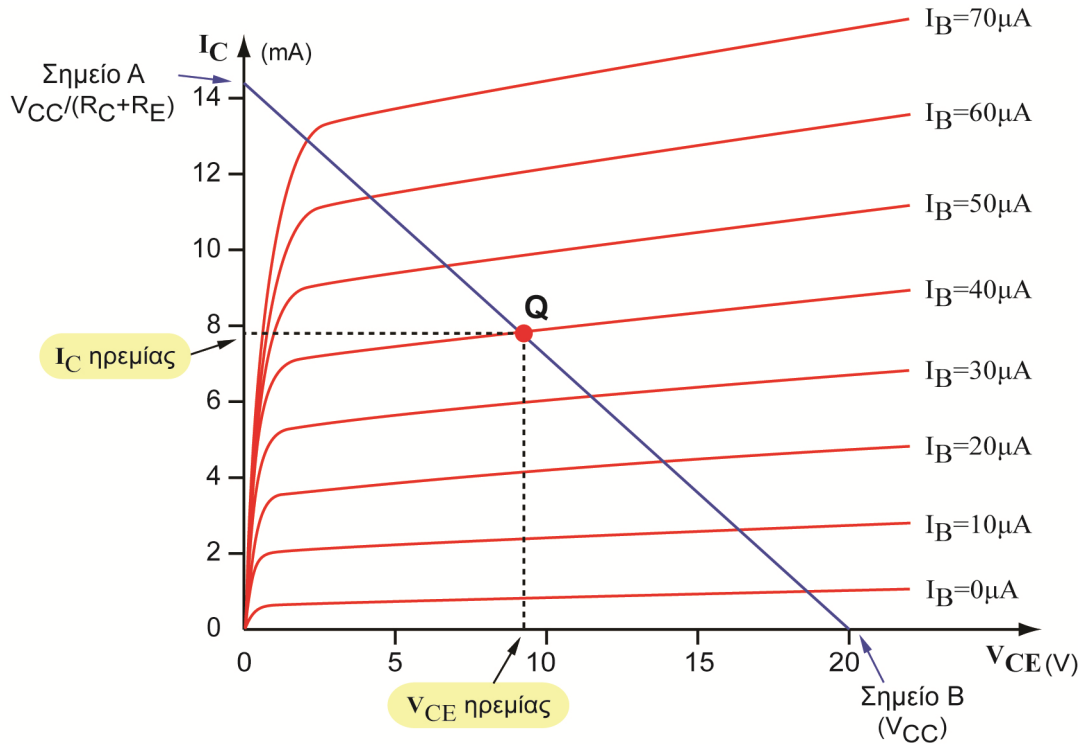
**Σημείο A.** Το σημείο **A** προσδιορίζεται για την ακραία συνθήκη του **κορεσμού** όπου η τάση  $V_{CE}$  είναι (θεωρητικά) **0 Volt**. Άρα από την σχέση (4.7) έχουμε:

$$\text{για } V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = 14.2 \text{ mA}$$

**Σημείο B.** Το σημείο **B** προσδιορίζεται για την ακραία συνθήκη της **αποκοπής** όπου το ρεύμα  $I_C$  είναι (θεωρητικά) **0 A**. Πάλι από την σχέση (4.7) έχουμε:

για  $I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 20\text{ V}$

Τοποθετούμε τα σημεία **A** και **B** στις χαρακτηριστικές εξόδου (σχήμα 6.8) και χαράσσουμε την **ευθεία φόρτου** για το συνεχές.



Σχήμα 4.8 – Ευθεία φόρτου του ενισχυτή στο συνεχές (στατική λειτουργία)

Από τη σχέση (4.7) είναι προφανές ότι η κλίση της ευθείας φόρτου στο συνεχές (την ονομάζουμε **DC ευθεία φόρτου**) ισούται με:

$$\text{κλίση της DC ευθείας φόρτου} = -\frac{1}{R_C + R_E}$$

Χαράσσοντας λοιπόν την ευθεία φόρτου μιας βαθμίδας πάνω στις χαρακτηριστικές εξόδου του τρανζίστορ κατά την στατική λειτουργία της (**DC ευθεία φόρτου**) και τοποθετώντας πάνω της το σημείο λειτουργίας Q, πληροφορούμαστε σχετικά με την περιοχή λειτουργίας του τρανζίστορ.

Για να προσδιορίσουμε το σημείο ηρεμίας Q πάνω στην **DC ευθεία φόρτου** που χαράξαμε, χρειάζεται να γνωρίζουμε ένα από τα παρακάτω:

- **το ρεύμα ηρεμίας της βάσης του τρανζίστορ**  
Εάν είναι γνωστό το ρεύμα ηρεμίας της βάσης του τρανζίστορ (πχ.  $I_B = 40\mu\text{A}$ ) τότε το σημείο τομής της **DC ευθείας φόρτου** με την αντίστοιχη καμπύλη  $I_B$  ορίζουν το σημείο ηρεμίας Q
- **ή τις δυο συντεταγμένες  $I_C$  και  $V_{CE}$  όπου:**
  - $I_C \approx I_E$  είναι το ρεύμα ηρεμίας που διαρρέει το τρανζίστορ σε στατική λειτουργία
  - $V_{CE}$  είναι η αναπτυσσόμενη τάση μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού σε στατική λειτουργία

Τι θα συμβεί τώρα στον ενισχυτή του σχήματος 4.5 αν εκτός από τάση τροφοδοσίας  $V_{CC}$  θέσουμε και εναλλασσόμενο σήμα στην είσοδο του; Τότε πρόκειται για **λειτουργία του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο** ή αλλιώς **δυναμική λειτουργία** του ενισχυτή.

Τι θα συμβεί τώρα στον ενισχυτή μας αν εκτός από τροφοδοτική τάση  $V_{CC}$  βάλουμε και εναλλασσόμενο σήμα στην είσοδο του; Κατ' αρχήν να πούμε ότι **ορίζουμε και ονομάζουμε** αυτή την λειτουργία μιας βαθμίδας σαν **Δυναμική Λειτουργία**.

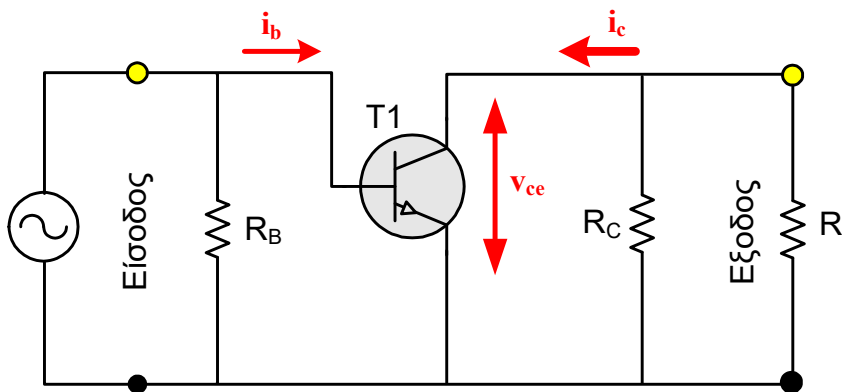
**Δυναμική Λειτουργία** μιας ενισχυτικής βαθμίδας ονομάζουμε την **ταυτόχρονη λειτουργία** αυτής με **DC τροφοδοτική τάση** (ενέργεια από το τροφοδοτικό) και **σήμα εισόδου**.

Κατά τη στατική λειτουργία οι τιμές ηρεμίας ρευμάτων και τάσεων υπολογίστηκαν με τη μέθοδο της πόλωσης. Οι τιμές αυτές δεν επηρεάζουν την ανάλυση λειτουργίας του ισοδύναμου κυκλώματος μικρού σήματος.

Για τον υπολογισμό των μεταβολών των τάσεων και των ρευμάτων (σε σχέση με το σημείο ηρεμίας **Q**) που προκαλούνται από την εφαρμογή μικρού (ασθενούς) σήματος στην είσοδο του ενισχυτή, χρησιμοποιούμε το ισοδύναμο κύκλωμα μικρού σήματος.

Για τη δημιουργία του ισοδύναμου κυκλώματος μικρού σήματος, οι πηγές σταθερής τάσης και οι πυκνωτές αντιμετωπίζονται ως βραχυκυκλώματα (σχήμα 4.9). Στη δυναμική λειτουργία επειδή η χωρητικότητα των πυκνωτών επιλέγεται ώστε να είναι σχετικά μεγάλη για την μικρότερη συχνότητα του σήματος εισόδου που χρησιμοποιείται, οι πυκνωτές λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα αφού παρουσιάζουν μικρή χωρητική αντίσταση.

Υπενθυμίζεται ότι με κεφαλαία γράμματα και δείκτες (π.χ. **I<sub>C</sub>**) συμβολίζονται οι τιμές ηρεμίας, με μικρά γράμματα και δείκτες οι τιμές των μεταβολών μικρού σήματος (π.χ. **i<sub>c</sub>**), ενώ με μικρά γράμματα και κεφαλαίους δείκτες οι ολικές στιγμιαίες τιμές (π.χ. **i<sub>C</sub>**). Οι στιγμιαίες τιμές ρευμάτων και τάσεων ισούνται με το άθροισμα των τιμών ηρεμίας και των μεταβολών μικρού σήματος.



Σχήμα 4.9 – Ισοδύναμο κύκλωμα μικρού σήματος του ενισχυτή

Για να χαράξουμε την ευθεία φόρτου (γραμμή φορτίου) στο εναλλασσόμενο (δυναμική λειτουργία), εφαρμόζουμε το 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στο βρόχο εξόδου του ισοδύναμου κυκλώματος του σχήματος 4.9.

$$v_{ce} = -i_c (R_C // R_L) = -i_c R'_L \Rightarrow v_{CE} - V_{CE} = -(i_C - I_C) R'_L \Rightarrow$$

$$i_C = -\frac{1}{R'_L} v_{CE} + \frac{V_{CE}}{R'_L} + I_C \quad (4.8)$$

Η γραφική παράσταση της σχέσης (4.8) αποτελεί την **ευθεία φόρτου στο εναλλασσόμενο**, πάνω στην οποία κινείται το σημείο λειτουργίας του ενισχυτή κατά τη δυναμική του λειτουργία.

Τα δύο ακραία σημεία της ευθείας φόρτου στο εναλλασσόμενο (σχήμα 4.10) υπολογίζονται από την παραπάνω σχέση ως εξής:

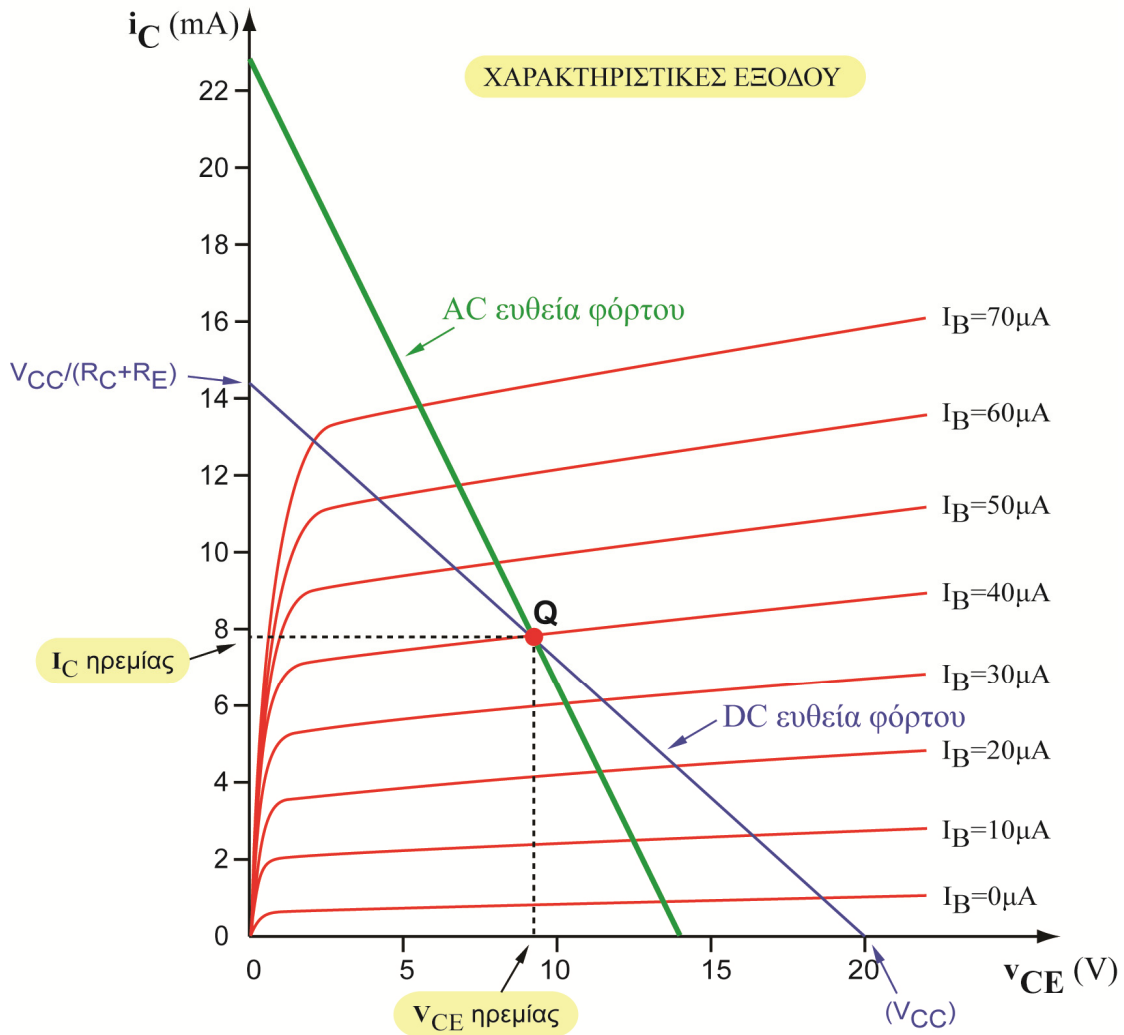
$$\text{για } i_C = 0 \Rightarrow v_{CE} = V_{CE} + I_C R'_L = 13.7 \text{ V}$$

$$\text{για } v_{CE} = 0 \Rightarrow i_C = I_C + \frac{V_{CE}}{R'_L} = 22.85 \text{ mA}$$

Στον παραπάνω υπολογισμό θεωρήσαμε αντίσταση φορτίου ίση με την αντίσταση συλλέκτη.

Από τη σχέση (4.8) προκύπτει ότι η κλίση της ευθείας φόρτου στο εναλλασσόμενο (**AC ευθεία φόρτου**) ισούται με:

$$\text{κλίση της AC ευθείας φόρτου} = -\frac{1}{R_C // R_L} = -\frac{1}{R'_L}$$



Σχήμα 4.10 – Ευθείες φόρτου του ενισχυτή στο συνεχές (στατική λειτουργία) και στο εναλλασσόμενο (δυναμική λειτουργία)

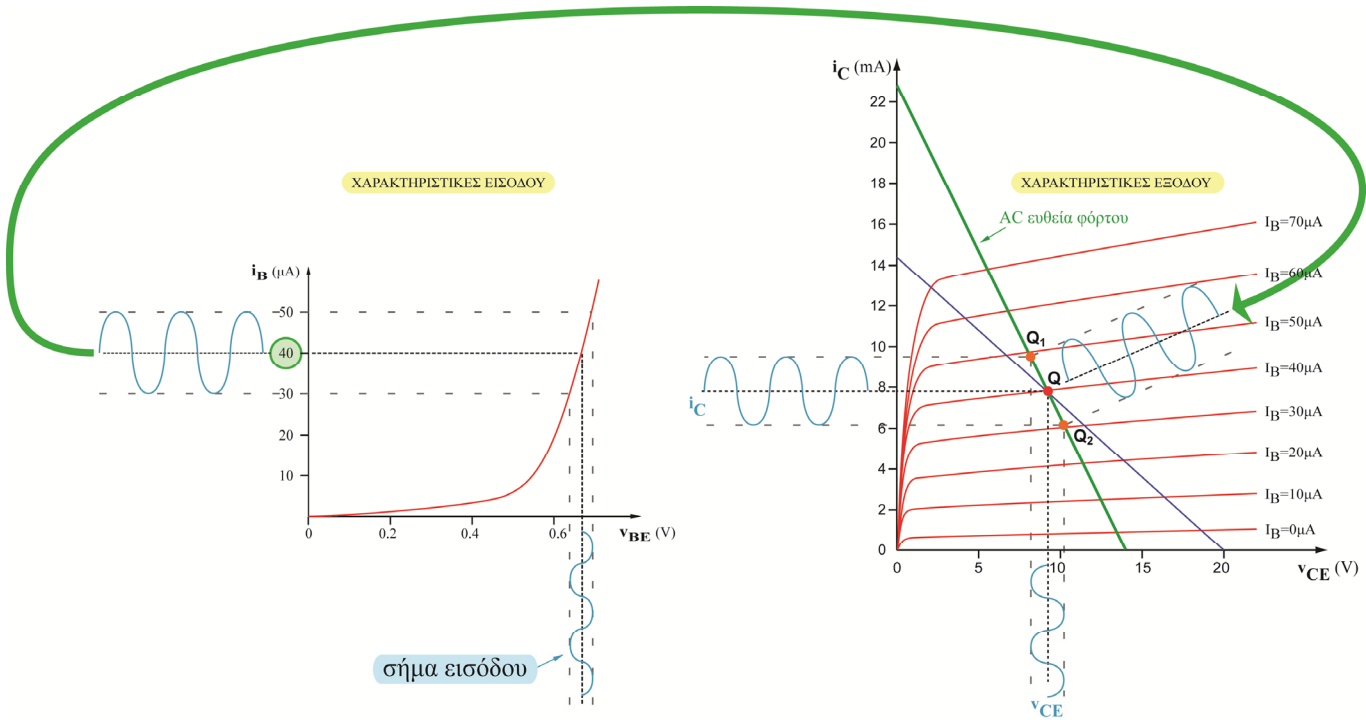
Ας δούμε και με γραφικό τρόπο μέσα από τις **χαρακτηριστικές εισόδου** και **εξόδου** τι συμβαίνει στην βαθμίδα μας όταν εφαρμόσουμε εναλλασσόμενο σήμα στην είσοδο της. Δηλαδή κατά την **Δυναμική Λειτουργία**.

Πριν εφαρμόσουμε το εναλλασσόμενο σήμα στην είσοδο, οι **αντιστάσεις πολώσεως  $R_1$  και  $R_2$**  δημιουργούν μια τάση  $V_{BE}$ . Έτσι από τις **χαρακτηριστικές εισόδου** του τρανζίστορ προκύπτει ένα ρεύμα  $I_B$  το οποίο στις **χαρακτηριστικές εξόδου** καθορίζει το **ρεύμα ηρεμίας  $I_C$**  και την **τάση ηρεμίας  $V_{CE}$** , που συνιστούν το σημείο ηρεμίας **Q** του τρανζίστορ.

Στο δικό μας παράδειγμα από την **τάση πολώσεως  $V_{BE}$**  που δημιουργούν οι αντιστάσεις  **$R_1$  και  $R_2$** , **προκύπτει** ρεύμα ηρεμίας  **$I_B = 40 \mu$ A**.

Με την εφαρμογή του εναλλασσόμενου σήματος στην είσοδο του ενισχυτή, η τάση βάσης-εκπομπού μεταβάλλεται εκατέρωθεν της οριζόμενης από τις αντιστάσεις  **$R_1$  και  $R_2$**  τάσης πόλωσης  $V_{BE}$ . Έτσι μεταβάλλεται και το προκύπτον ρεύμα βάσης, το οποίο με τη σειρά του μεταβάλλει το ρεύμα συλλέκτη και την τάση συλλέκτη-εκπομπού, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.11.

Κατά τη δυναμική λειτουργία το σημείο λειτουργίας  $Q$  μετακινείται πάνω στην  $AC$  ευθεία φόρτου (γύρω από το αρχικό σημείο ηρεμίας) ανάλογα με το εφαρμοζόμενο σήμα εισόδου. Στο παράδειγμα το σημείο λειτουργίας μετακινείται από τη θέση  $Q_1$  έως τη θέση  $Q_2$ .



Σχήμα 4.11 – Δυναμική λειτουργία του ενισχυτή

Τι θα συμβεί όμως αν στην είσοδο της βαθμίδας βάλουμε σήμα με πλάτος μεγαλύτερο από το προβλεπόμενο από το σχεδιαστή της βαθμίδας; Το αποτέλεσμα θα είναι **μεγαλύτερη μεταβολή** του ρεύματος βάσης το οποίο με την σειρά του θα μετακινήσει το σημείο λειτουργίας  $Q$  του ενισχυτή **έξω από τα όρια της ενεργού περιοχής** με συνέπεια να προκύπτει παραμόρφωση του σήματος εξόδου (ρεύμα συλλέκτη επί  $R_C$ ), όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12.

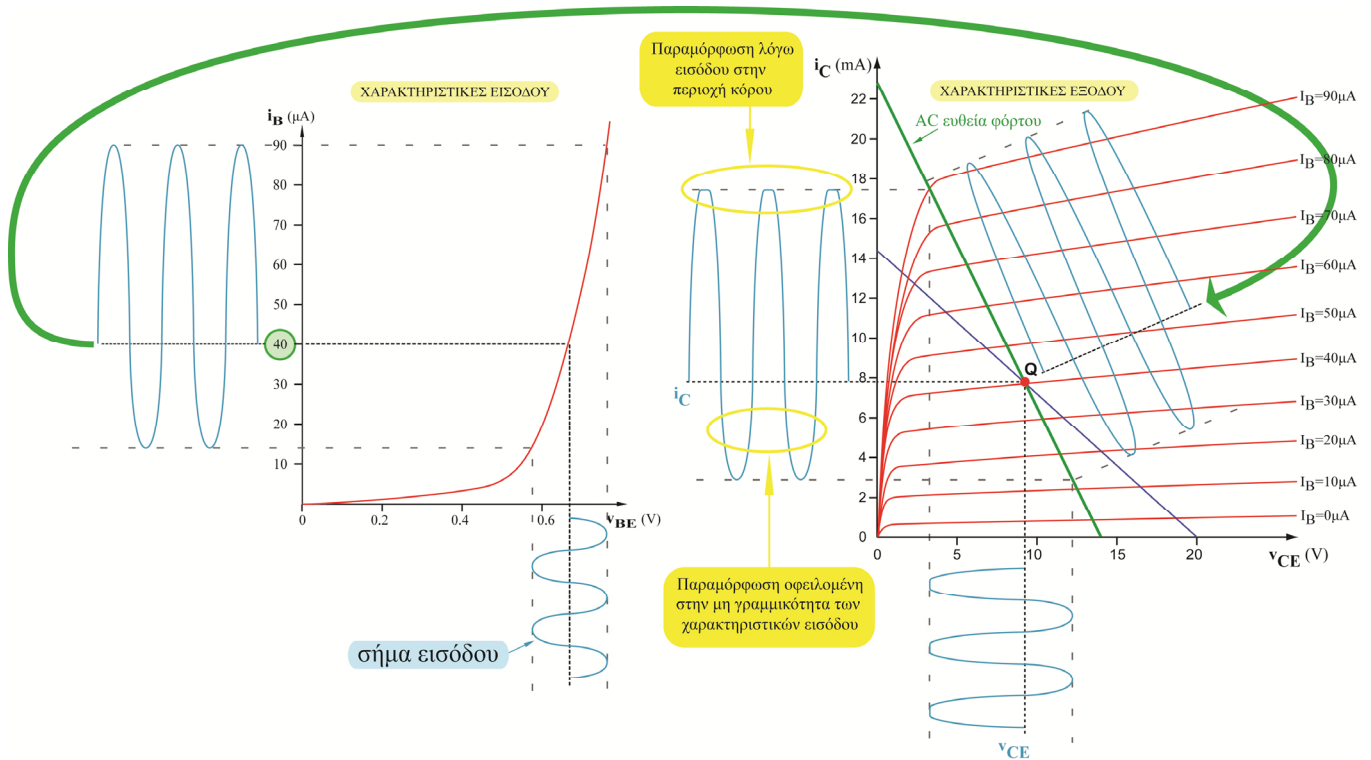
Η περίπτωση αυτή ονομάζεται **υπεροδήγηση** και πρέπει να αποφεύγεται διότι εκτός από την παραμόρφωση του σήματος εξόδου μπορεί να οδηγήσει και σε καταστροφή του τρανζίστορ.

Επανερχόμαστε τώρα στο κύκλωμα της ενισχυτικής διάταξης (σχήμα 4.13).

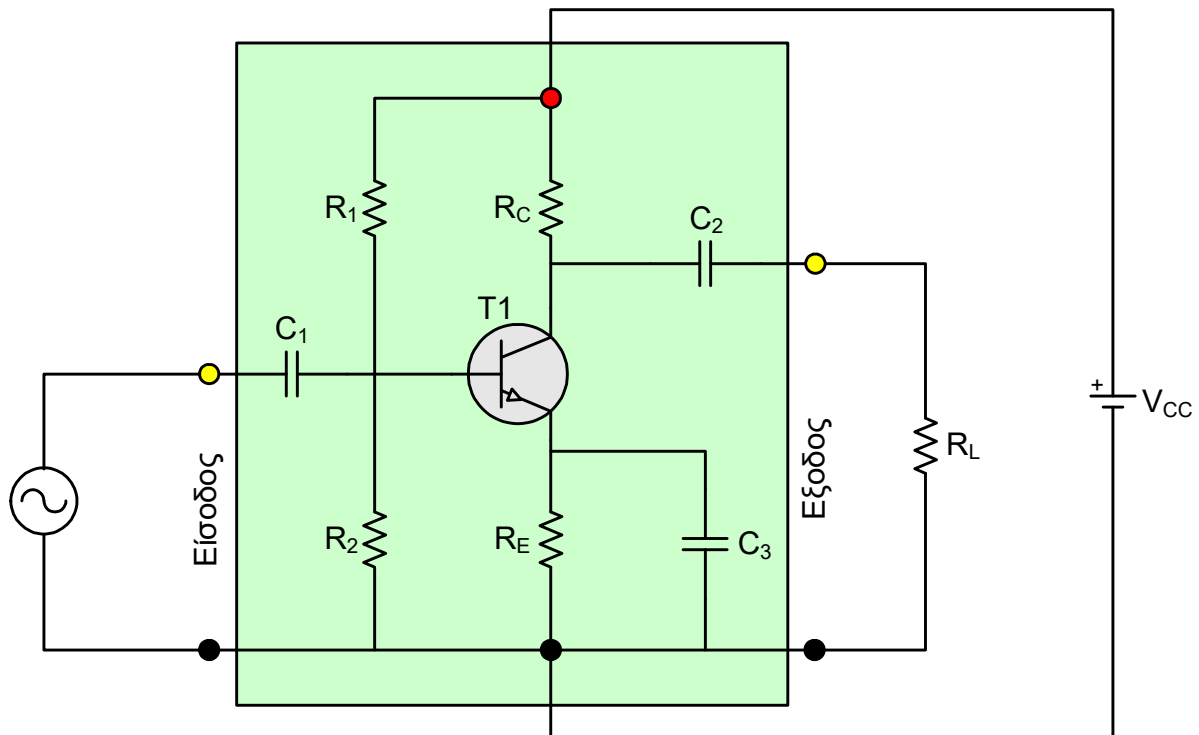
- **Σύζευξη** δύο σημείων, ονομάζουμε τη μεταφορά του σήματος από το ένα σημείο στο άλλο (π.χ. από την έξοδο της μιας βαθμίδας όπως αυτή του σχήματος 4.13 στο φορτίο, ή από την έξοδο της μιας βαθμίδας στην είσοδο μιας άλλης).
- **Πυκνωτής σύζευξης** ονομάζεται ο πυκνωτής που μεταφέρει το εναλλασσόμενο σήμα από ένα σημείο μιας ηλεκτρονικής διάταξης σε ένα άλλο σημείο της ίδιας ή άλλης ηλεκτρονικής διάταξης.

Η τιμή ενός πυκνωτή σύζευξης επιλέγεται έτσι ώστε να είναι σχετικά μεγάλη για την μικρότερη συχνότητα του σήματος εισόδου που χρησιμοποιείται με στόχο να παρουσιάζει μικρή χωρητική αντίσταση σε σχέση με την αντίσταση εισόδου του σημείου όπου μεταφέρεται το σήμα.

Στη διάταξη του σχήματος 4.13, οι πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  είναι πυκνωτές σύζευξης. Ο  $C_1$  μεταφέρει το σήμα από την είσοδο στην βάση του τρανζίστορ και ο πυκνωτής  $C_2$  μεταφέρει το σήμα από την έξοδο της βαθμίδας στο φορτίο  $R_L$ .



Σχήμα 4.12 – Υπεροδήγηση του ενισχυτή



Σχήμα 4.13 – Ενισχυτική διάταξη με πυκνωτές σύζευξης και απόζευξης

- **Πυκνωτής απόζευξης** (ή αποζευκτικός πυκνωτής) ονομάζεται ο πυκνωτής που συνδέεται **πάντα μεταξύ της γείωσης** (στάθμη αναφοράς του σήματος) και **ενός κόμβου** μιας ηλεκτρονικής διάταξης με σκοπό να μην αφήσει να αναπτυχθούν πάνω στον κόμβο σύνδεσης του εναλλασσόμενες (AC) συνιστώσες.

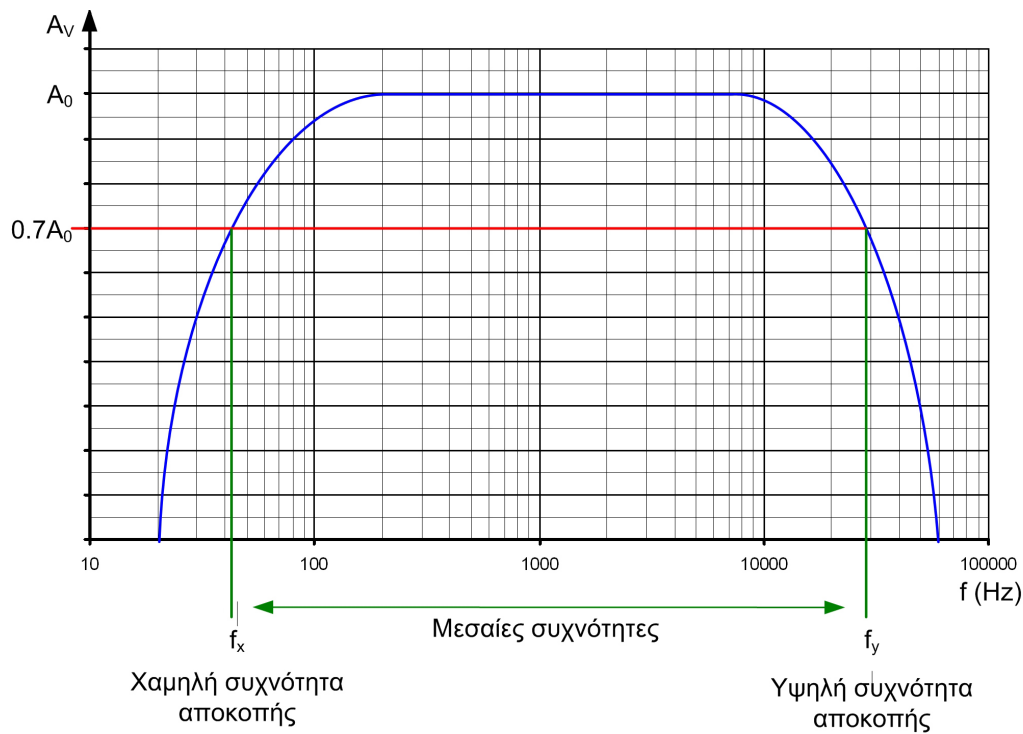


Η χωρητικότητα του πυκνωτή αυτού επιλέγεται έτσι ώστε η χωρητική του αντίσταση  $X_C$  να είναι πολύ μικρή ώστε να λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα για την μικρότερη αναμενόμενη AC συνιστώσα και να προκαλεί απόζευξη στο κόμβο που συνδέεται. Στη διάταξη του σχήματος 4.13, ο πυκνωτής  $C_3$  χρησιμοποιείται σαν πυκνωτής απόζευξης ώστε να μην επιτρέπει την ανάπτυξη συνιστωσών AC στα άκρα της αντίστασης  $R_E$ .

- Η **πιστότητα** (fidelity) μιας ενισχυτικής βαθμίδας περιγράφει το κατά πόσον το σήμα εξόδου είναι ένα μεγενθυμένο πιστό αντίγραφο του σήματος εισόδου. Λόγω του ότι τα τρανζίστορ είναι μη γραμμικά εξαρτήματα, αποκλείεται να έχουμε πιστότητα 100%.

Ένα άλλο σπουδαίο χαρακτηριστικό μιας ενισχυτικής διάταξης είναι η **μεταβολή της ενίσχυσης τάσης**  $A_v$  συνάρτηση της συχνότητας του σήματος εισόδου. Η ενίσχυση τάσης μειώνεται στις χαμηλές συχνότητες λόγω του ότι η χωρητική αντίσταση των πυκνωτών σύζευξης και απόζευξης αυξάνεται όσο μειώνεται η συχνότητα του σήματος εισόδου. Επίσης, η ενίσχυση τάσης μειώνεται και στις υψηλές συχνότητες, λόγω της επίδρασης των εσωτερικών παρασιτικών χωρητικοτήτων των τρανζίστορ.

- **Καμπύλη απόκρισης** ή **απόκριση συχνότητας μέτρου** ενός ενισχυτή ονομάζουμε την γραφική απεικόνιση της ενίσχυσης τάσης  $A_v$  συναρτήσει της συχνότητας.



Σχήμα 4.14 – Απόκριση συχνότητας μέτρου ενισχυτή με χωρητική σύζευξη

- **Συχνότητες αποκοπής** ενός ενισχυτή είναι οι συχνότητες για τις οποίες η ενίσχυση τάσης μειώνεται κατά  $1/\sqrt{2}$  της μέγιστης ενίσχυσης που εμφανίζεται στις λεγόμενες μεσαίες συχνότητες.
- Η διαφορά των συχνοτήτων  $f_y$  και  $f_x$  ονομάζεται εύρος ζώνης συχνοτήτων (**W**) του ενισχυτή και στην ουσία μας πληροφορεί για την περιοχή των συχνοτήτων στην οποία η ενίσχυση είναι περίπου σταθερή (δεν μειώνεται περισσότερο από  $1/\sqrt{2}$  της μέγιστης τιμής της).

Σημειώνουμε επίσης ότι σε μια απλή βαθμίδα ενισχυτή κοινού εκπομπού, η διαφορά φάσης ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο της είναι  $180^\circ$  στις μεσαίες συχνότητες. Στις χαμηλές και στις υψηλές συχνότητες η διαφορά φάσης μεταβάλετε.

**Ανατροφοδότηση** (ανασύζευξη, ανάδραση) σε μια ενισχυτική διάταξη είναι η μεταφορά ενός μέρους (ποσοστού) του σήματος εξόδου στην είσοδο της. Η ανατροφοδότηση στα κυκλώματα των ενισχυτών, γίνεται μέσω αφαίρεσης (δηλαδή, αρνητικής ανατροφοδότησης) τάσης ή ρεύματος εξόδου, από την τάση

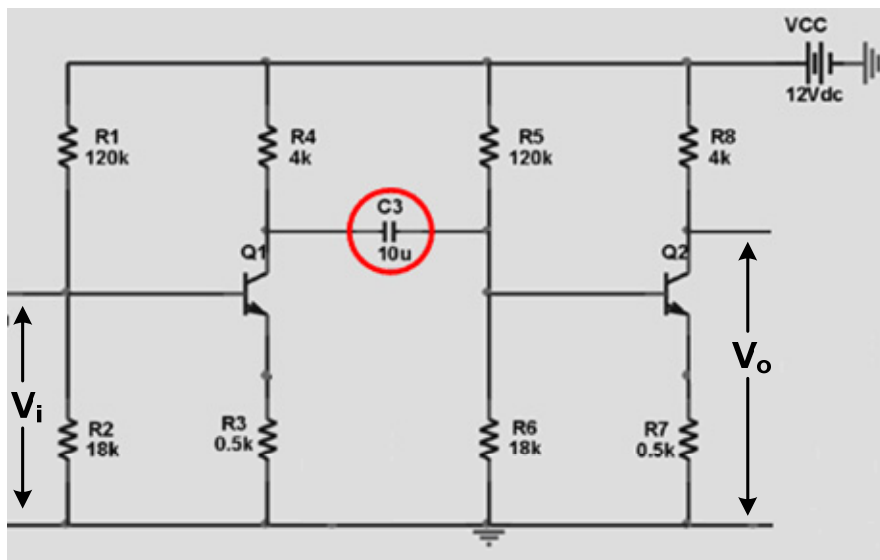
ή το ρεύμα εισόδου. Για παράδειγμα, στον ενισχυτή του Σχήματος 4.13, εάν αποσυνδέσουμε τον πυκνωτή απόζευξης  $C_3$ , τότε δημιουργείται αρνητική ανατροφοδότηση αφού αφαιρείται από την τάση εισόδου του ενισχυτή, η τάση της αντίστασης  $R_E$ , η οποία είναι ανάλογη του ρεύματος εξόδου του ενισχυτή. Δηλαδή, για τη δημιουργία ανατροφοδότησης χρησιμοποιείται το ρεύμα εξόδου.

Η αρνητική ανατροφοδότηση παρέχει στους ενισχυτές: σταθεροποίηση της ενίσχυσης τους, αύξηση του εύρους ζώνης συχνοτήτων (δηλαδή, μείωση της χαμηλής συχνότητας αποκοπής και αύξηση της υψηλής συχνότητας αποκοπής), δυνατότητα τροποποίησης των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου και μείωση της παραμόρφωσης και του θορύβου στο σήμα εξόδου. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί η μείωση της ενίσχυσης.

Όταν είναι επιθυμητό να πετύχουμε υψηλές ενισχύσεις, οδηγούμε την έξοδο μίας βαθμίδας ενισχυτή στην είσοδο μιας δεύτερης βαθμίδας κ.ο.κ. δημιουργώντας ένα σύνθετο ενισχυτή που αποτελείται από διαδοχικές βαθμίδες. Οι ενισχύσεις τάσης και ρεύματος ενός ενισχυτή με διαδοχικές βαθμίδες, προκύπτουν από το γινόμενο των ενισχύσεων των επιμέρους βαθμίδων.

Η σύζευξη ενισχυτικών βαθμίδων για τη δημιουργία ενός ενισχυτή πολλών βαθμίδων μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους: μέσω πυκνωτή σύζευξης (capacitor coupled ή RC-coupled amplifiers), με απευθείας σύζευξη (DC, direct coupling) των βαθμίδων και μέσω μετασχηματιστή (επαγωγική σύζευξη).

Στη σύζευξη βαθμίδων μέσω πυκνωτή (Σχήμα 4.15), οι επιμέρους βαθμίδες είναι απομονωμένες μεταξύ τους όσον αφορά τη λειτουργία τους το συνεχές, επομένως η πόλωση της μίας βαθμίδας δεν επηρεάζεται από τις άλλες. Συνεπώς, οι βαθμίδες μπορεί να είναι ίδιες μεταξύ τους και έτσι σχεδιάζοντας τη μια από αυτές αποφεύγουμε τον σχεδιασμό των υπολοίπων. Χαρακτηριστικά της μεθόδου αυτής είναι η απλότητα του σχεδιασμού, ο επηρεασμός της απόκρισης συχνότητας των ενισχυτών από την παρουσία του πυκνωτή σύζευξης και η μη αποφυγή των αντιστάσεων πόλωσης για κάθε τρανζίστορ.

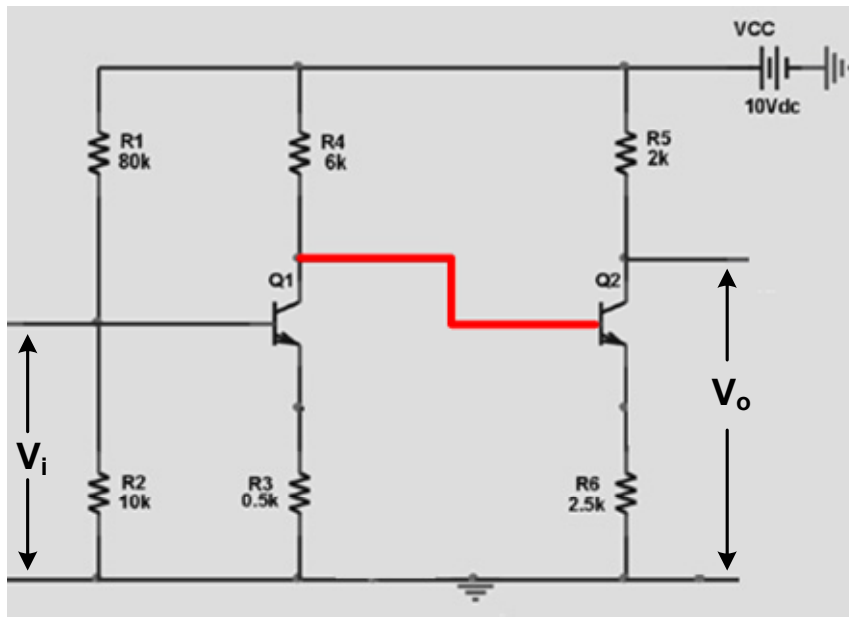


Σχήμα 4.15 – Ενισχυτής δύο βαθμίδων με χωρητική σύζευξη

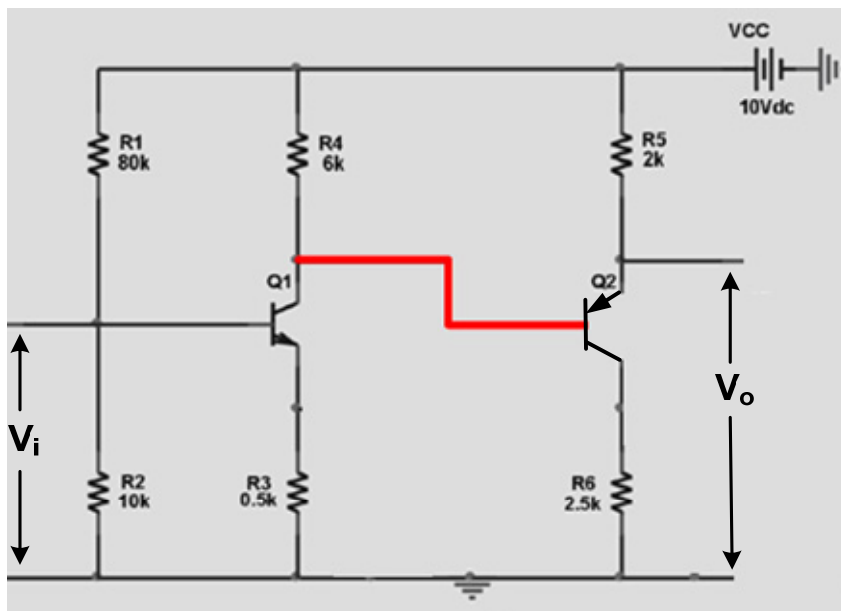
Εναλλακτική μέθοδο δημιουργίας ενισχυτών πολλών βαθμίδων αποτελεί η άμεση σύζευξη, η οποία βασίζεται στη δομή, όπου η πόλωση του τρανζίστορ της βαθμίδας που έπεται, επιτυγχάνεται χωρίς αντιστάσεις, αλλά μέσω του τρανζίστορ της βαθμίδας που προηγείται. Οι ενισχυτές άμεσης σύζευξης παρουσιάζουν ένα βασικό μειονέκτημα, που αναφέρεται ως ολίσθηση του σημείου λειτουργίας. Εάν για οποιονδήποτε λόγο (π.χ. μεταβολή της θερμοκρασίας, μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας, αλλαγές στα στοιχεία του κυκλώματος), μεταβληθούν τα συνεχή δυναμικά της βαθμίδας που προηγείται, τότε λόγω της άμεσης σύζευξης, η μεταβολή αυτή επιδρά στο σημείο λειτουργίας της βαθμίδας που έπεται, γεγονός

που δε συμβαίνει στην περίπτωση της χωρητικής σύζευξης. Έτσι, μία ενδεχόμενη σημαντική μεταβολή στα συνεχή δυναμικά της βαθμίδας που προηγείται, μπορεί να θέσει το τρανζίστορ της βαθμίδας που έπεται εκτός ενεργού περιοχής, που σημαίνει ότι αυτό δε θα λειτουργεί ως ενισχυτική βαθμίδα, με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του σήματος εξόδου.

Στον ενισχυτή του Σχήματος 4.16(α), το συνεχές δυναμικό του συλλέκτη του δεύτερου τρανζίστορ είναι κατά  $V_{CB}$  μεγαλύτερο από το δυναμικό του συλλέκτη του πρώτου τρανζίστορ. Η αύξηση αυτή θέτει περιορισμό στον αριθμό των βαθμίδων που μπορούν να συζευχθούν, λόγω περιορισμού των περιθωρίων τάσεων πόλωσης, αλλά το πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί με χρήση συμπληρωματικών pnp-ppn τρανζίστορ (Σχήμα 4.16(β)).



(α)



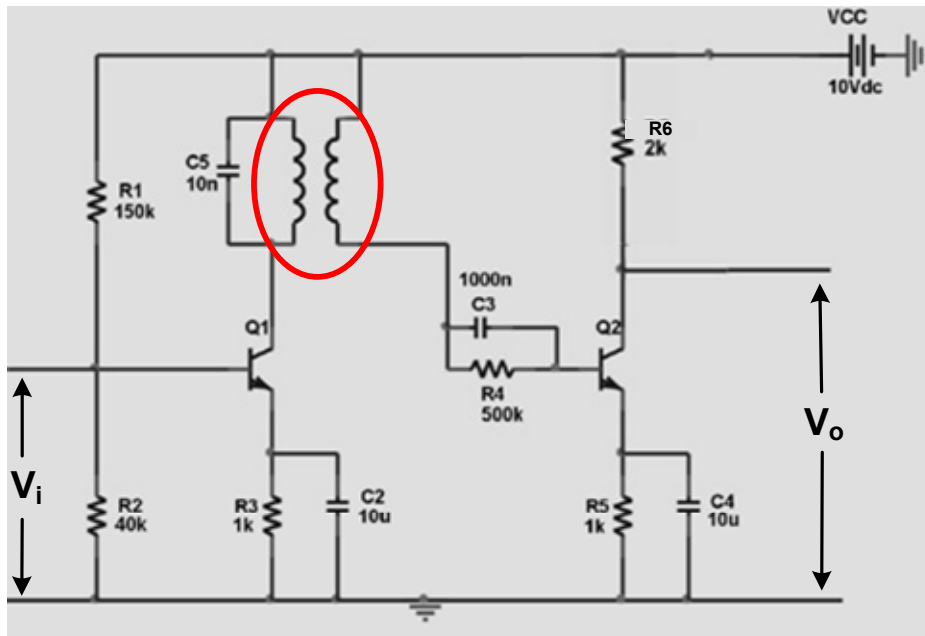
(β)

Σχήμα 4.16 – Ενισχυτές δύο βαθμίδων με άμεση σύζευξη

Στον ενισχυτή του Σχήματος 4.16(β), οι τιμές των αντιστάσεων επιλέγονται έτσι ώστε το δυναμικό συλλέκτη του τρανζίστορ Q1 να είναι μικρότερο από το δυναμικό εκπομπού του τρανζίστορ Q2. Επειδή όμως η βάση του τρανζίστορ Q2 συνδέεται απευθείας με το συλλέκτη του τρανζίστορ Q1 επιτυγχάνεται

αρνητική τάση  $V_{BE}$  στο τρανζίστορ Q2, που σημαίνει ορθή πόλωση της επαφής βάσης-εκπομπού, αφού το τρανζίστορ είναι τύπου pnp. Υπενθυμίζεται ότι η ορθή πόλωση της επαφής αυτής αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία ενός τρανζίστορ ως ενισχυτική βαθμίδα.

Τέλος, η σύζευξη ενισχυτικών βαθμίδων μπορεί να επιτευχθεί μέσω μετασχηματιστών (Σχήμα 4.17). Ο μετασχηματιστής δημιουργεί σύζευξη του εναλλασσόμενου σήματος εξόδου της πρώτης βαθμίδας προς την είσοδο της επόμενης βαθμίδας, ενώ υπάρχει απομόνωση των βαθμίδων ως προς το συνεχές. Δεν καταναλώνεται ισχύς συνεχούς στον μετασχηματιστή, με αποτέλεσμα την αύξηση απόδοσης ισχύος της βαθμίδας. Επιπροσθέτως, η ικανότητα του μετασχηματιστή να δημιουργεί ενίσχυση, συνεισφέρει στην αύξηση της ενίσχυσης του ενισχυτή.



Σχήμα 4.17 – Ενισχυτής δύο βαθμίδων με επαγωγική σύζευξη

Στην Εργαστηριακή Άσκηση 2 που ακολουθεί, θα μελετήσουμε διεξοδικά έναν ενισχυτή δύο βαθμίδων με χωρητική σύζευξη.

# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 2

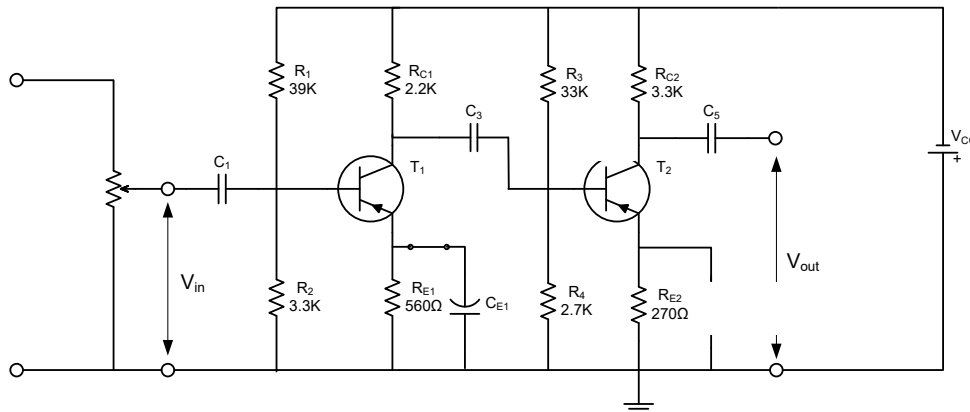
## ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΜΕ ΣΥΖΕΥΞΗ ΜΕΣΩ ΠΥΚΝΩΤΗ

### ΣΤΟΧΟΙ

- η κατανόηση της αρχής λειτουργίας ενός ενισχυτή δύο βαθμίδων με σύζευξη R-C
- η εύρεση της περιοχής λειτουργίας του ενισχυτή (χάραξη ευθείας φόρτου – καθορισμός σημείου λειτουργίας)
- η χάραξη της καμπύλης απόκρισης του ενισχυτή
- η μελέτη της επίδρασης του αποζευκτικού πυκνωτή (παράλληλα με την αντίσταση Εκπομπού  $R_E$ ) στα χαρακτηριστικά του ενισχυτή

### ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

**Βήμα 1.** Για την υλοποίηση της άσκησης θα χρησιμοποιήσουμε έναν ενισχυτή ασθενών σημάτων δύο βαθμίδων με σύζευξη μέσω πυκνωτή. Υλοποιήστε το κύκλωμα του σχήματος E2.1 και δώστε τροφοδοτική τάση  $V_{CC}=6V$  (προσέξτε την πολικότητα).



Σχήμα E2.1

Χωρίς σήμα στην είσοδο του ενισχυτή μετρήστε με βολτόμετρο τις παρακάτω συνεχείς τάσεις (πίνακας E2.1).

Τρανζίστορ $T_1$		Τρανζίστορ $T_2$	
$V_{B1E1}$		$V_{B2E2}$	
$V_{C1E1}$		$V_{C1E2}$	
$V_{RC1}$		$V_{RC2}$	
$R_{C1}$		$R_{C2}$	

Πίνακας E2.1

Για να βρείτε την Περιοχή Λειτουργίας κάθε βαθμίδας του ενισχυτή θα πρέπει να χαράξετε την Ευθεία Φόρτου και να προσδιορίσετε τα Σημεία Λειτουργίας (σημεία  $Q_1$  και  $Q_2$  αντίστοιχα). Υπολογίστε λοιπόν τα  $I_{C1 \max}$  και  $I_{C2 \max}$ :

$I_{C1 \max} = \dots = \dots$

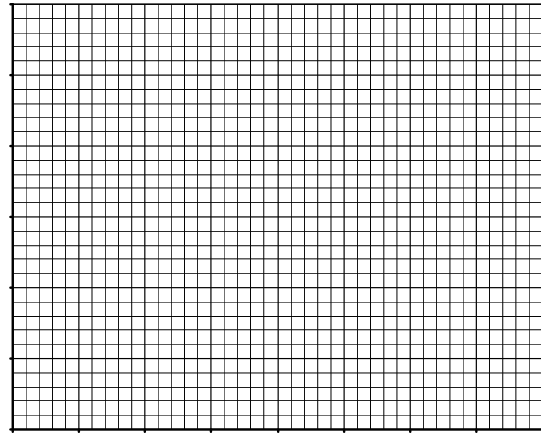
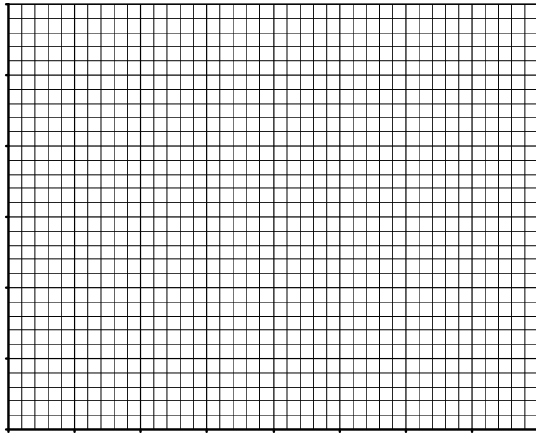
$I_{C2 \max} = \dots = \dots$

καθώς και τα  $I_{C1 \text{ ηρεμίας}}$  και  $I_{C2 \text{ ηρεμίας}}$ :

$I_{C1 \text{ ηρεμίας}} = \dots\dots\dots = \dots\dots$

$I_{C2 \text{ ηρεμίας}} = \dots\dots\dots = \dots\dots$

Στα παρακάτω διαγράμματα E2.1 και E2.2 χαράξτε της **Ευθείες Φόρτου** και τοποθετείστε σε αυτές τα **Σημεία Λειτουργίας**  $Q_1$  και  $Q_2$  αντίστοιχα.



**Ευθεία Φόρτου - Σημείο Λειτουργίας  $Q_1$**   
**Τρανζίστορ  $T_1$**   
 Διάγραμμα E2.1

**Ευθεία Φόρτου - Σημείο Λειτουργίας  $Q_2$**   
**Τρανζίστορ  $T_2$**   
 Διάγραμμα E2.2

Από τα διαγράμματα E2.1 κι E2.2 συμπεραίνουμε ότι η **Περιοχή Λειτουργίας** για τις βαθμίδες του ενισχυτή μας είναι:

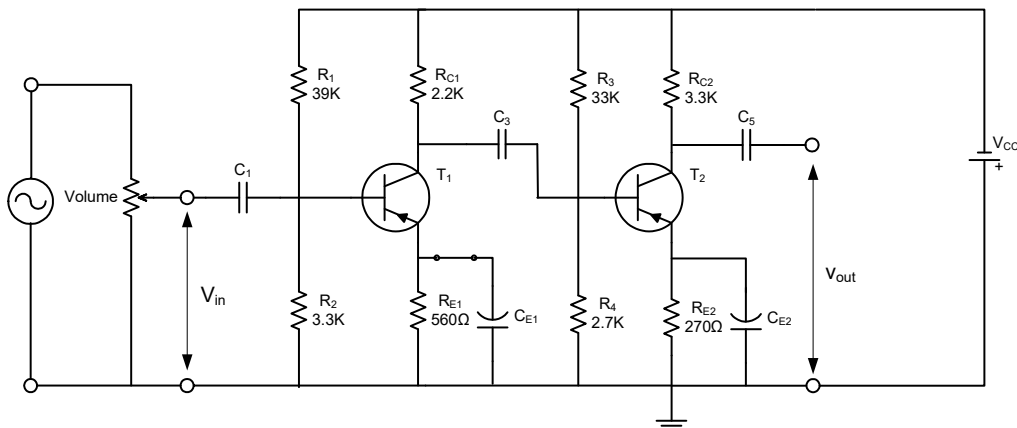
**Περιοχή Λειτουργίας ( $T_1$ ):** .....

**Περιοχή Λειτουργίας ( $T_2$ ):** .....

**Βήμα 2.** Με την βοήθεια του παλμογράφου ρυθμίστε την γεννήτρια συχνοτήτων να βγάξει στην έξοδο της **εναλλασσόμενο ημιτονικό σήμα** συχνότητας 800Hz και πλάτους 20mV. Στόχος μας είναι να προχωρήσουμε στη λήψη μετρήσεων για την χάραξη της **καμπύλης απόκρισης** του ενισχυτή για δύο περιπτώσεις: **χωρίς** και **με αρνητική ανατροφοδότηση**.

**Βήμα 3.** Με τον **αποζευκτικό πυκνωτή  $C_{E1}$  συνδεδεμένο** (σχήμα E2.2) προχωρήστε στην λήψη μετρήσεων για την χάραξη της **καμπύλης απόκρισης** του ενισχυτή **χωρίς αρνητική ανατροφοδότηση**.

**Χωρίς να πειράζετε τη γεννήτρια** ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο **Volume** (σχήμα E2.2) ώστε το πλάτος της τάσης εξόδου του ενισχυτή χωρίς παραμόρφωση να είναι περίπου 1Volt. Η συχνότητα 800Hz ανήκει στις **μεσαίες συχνότητες** της καμπύλης απόκρισης του ενισχυτή.



Σχήμα E2.2

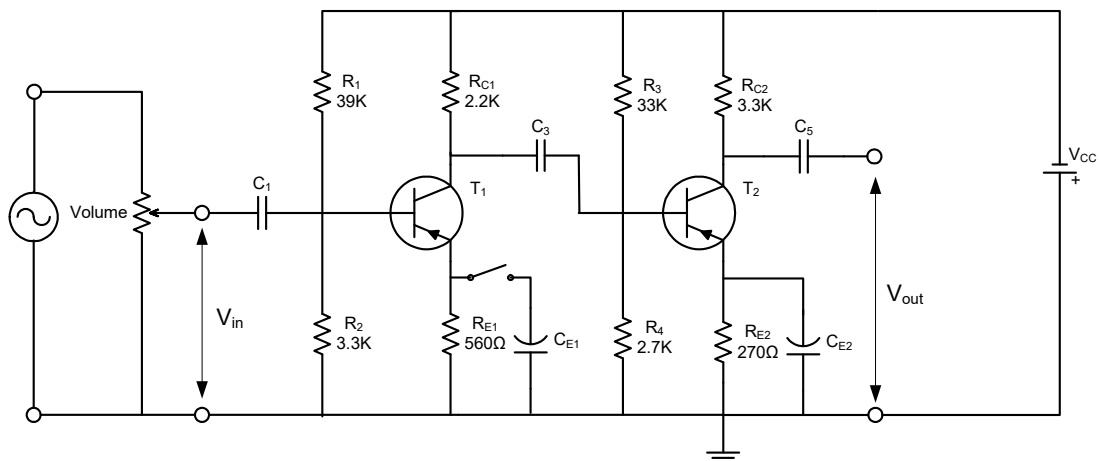
Μετρήστε το πλάτος εισόδου  $V_{in}$  στην είσοδο του ενισχυτή (σχήμα E2.2) και καταχωρείστε το στον πίνακα E2.2. Στην συνέχεια διατηρώντας το πλάτος εισόδου  $V_{in}$  σταθερό, μεταβάλλετε **μόνο** τη συχνότητα της γεννήτριας από 100Hz έως 30KHz και μετρήστε το πλάτος της τάσης εξόδου  $V_{out}$  του ενισχυτή για κάθε εφαρμοζόμενη συχνότητα στην είσοδο του (πίνακας E2.2). Υπολογίστε την ενίσχυση  $A$  του ενισχυτή (για κάθε συχνότητα) και **χαράξτε** σε **ημιλογαριθμικό χαρτί** (διάγραμμα E2.2α) την **καμπύλη απόκρισης** του (χωρίς αρνητική ανατροφοδότηση).

Χωρίς ανατροφοδότηση		
Για $f = 800\text{Hz}$ , $V_{in} = \dots\dots\dots \text{mV}$		
$V_{out} = \dots\dots\dots \text{V}$		
Συχνότητα (Hz)	$V_{out}$ (V)	A
100		
200		
400		
600		
800		
2000		
5000		
8000		
12000		
15000		
20000		
25000		
30000		

Με ανατροφοδότηση		
Για $f = 800\text{Hz}$ , $V_{in} = \dots\dots\dots \text{mV}$		
$V_{out} = \dots\dots\dots \text{V}$		
Συχνότητα (Hz)	$V_{out}$ (V)	$A_f$
80		
200		
400		
600		
800		
2000		
5000		
8000		
12000		
15000		
20000		
25000		
30000		
35000		
40000		

Πίνακας E2.2

**Βήμα 4.** Τώρα θα αποσυνδέσετε τον αποζευκτικό πυκνωτή  $C_{E1}$  (σχήμα E2.3) ώστε ο ενισχυτής μας να αποκτήσει **αρνητική ανατροφοδότηση**.

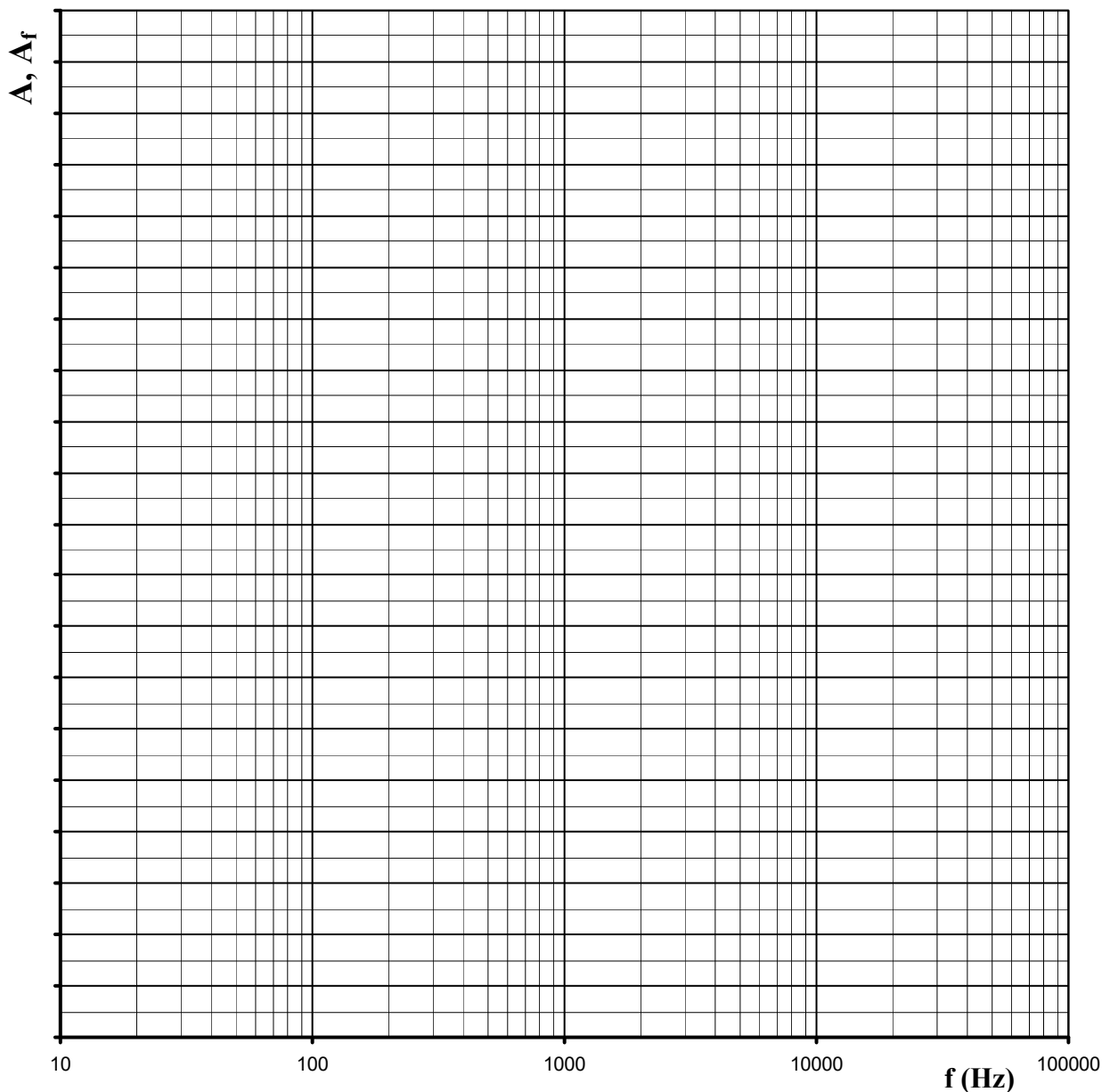


Σχήμα E2.3

Ρυθμίστε την γεννήτρια συχνοτήτων ώστε στην έξοδό της να λαμβάνετε **εναλλασσόμενο ημιτονικό σήμα** συχνότητας **800Hz** και πλάτους **20mV**. Ρυθμίστε στην συνέχεια το ποτενσιόμετρο **Volume** (σχήμα E3.3) ώστε το πλάτος  $V_{out}$  στην έξοδό του ενισχυτή να είναι περίπου **1Volt** (χωρίς παραμόρφωση). Η συχνότητα **800Hz** ανήκει στις **μεσαίες συχνότητες** της καμπύλης απόκρισης του ενισχυτή. Μετρήστε το πλάτος εισόδου  $V_{in}$  στην είσοδο του ενισχυτή (σχήμα E2.3) και καταχωρείστε το στην αντίστοιχη στήλη του πίνακα E2.2.

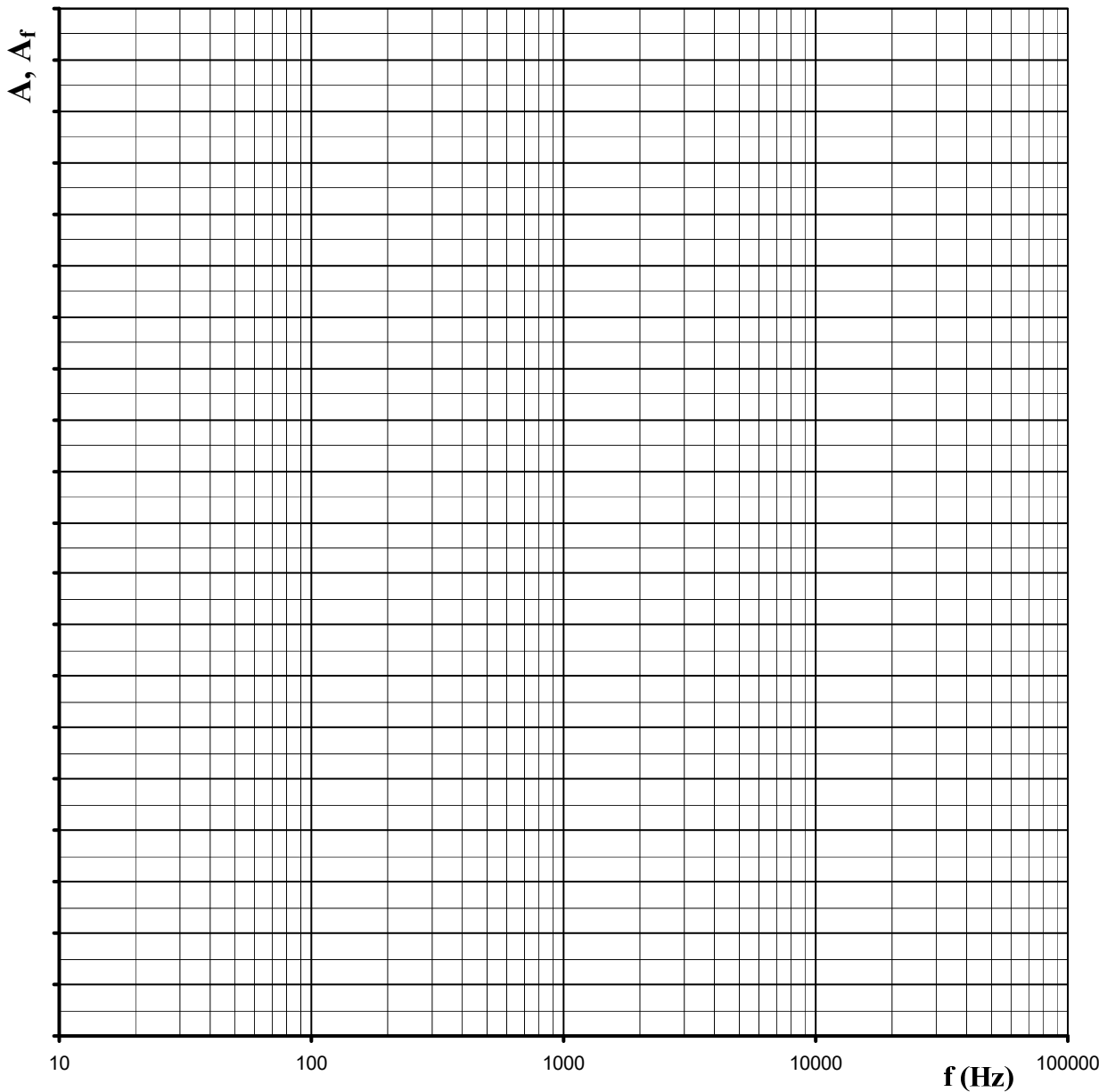
Στη συνέχεια διατηρώντας το πλάτος εισόδου  $V_{in}$  σταθερό, μεταβάλλετε **μόνο** την συχνότητα της **γεννήτριας** από **80Hz** έως **40KHz** και μετρήστε το πλάτος της τάσης εξόδου  $V_{out}$  του ενισχυτή για κάθε εφαρμοζόμενη συχνότητα στην είσοδο του (πίνακας E2.2).

Υπολογίστε την νέα ενίσχυση  $A_f$  του ενισχυτή (για κάθε συχνότητα) και **χαράξτε** στο ίδιο **ημιλογαριθμικό χαρτί** (διάγραμμα E2.3β) την **καμπύλη απόκρισης** του (με αρνητική ανατροφοδότηση).



Διάγραμμα E2.3α - Καμπύλες Αποκρίσεως χωρίς Αρνητική Ανατροφοδότηση





Διάγραμμα E2.3β - Καμπύλες Αποκρίσεως με Αρνητική Ανατροφοδότηση

**Βήμα 5.** Σημειώστε πάνω στις **καμπύλες απόκρισης** (διαγράμματα E2.3α και E2.3β) τις **Συχνότητες Αποκοπής**  $f_x$  και  $f_y$  (συχνότητες στις οποίες η **ενίσχυση πέφτει** στο  $1/\sqrt{2}$  της ενίσχυσης που έχει ο ενισχυτής στις **μεσαίες** συχνότητες). Οι συχνότητες αποκοπής  $f_x$ ,  $f_y$  και  $f'_x$ ,  $f'_y$  για τις δύο περιπτώσεις (**χωρίς και με αρνητική ανατροφοδότηση**) είναι:

**Χωρίς ανατροφοδότηση**  $f_x = \dots\dots$   
 $f_y = \dots\dots$

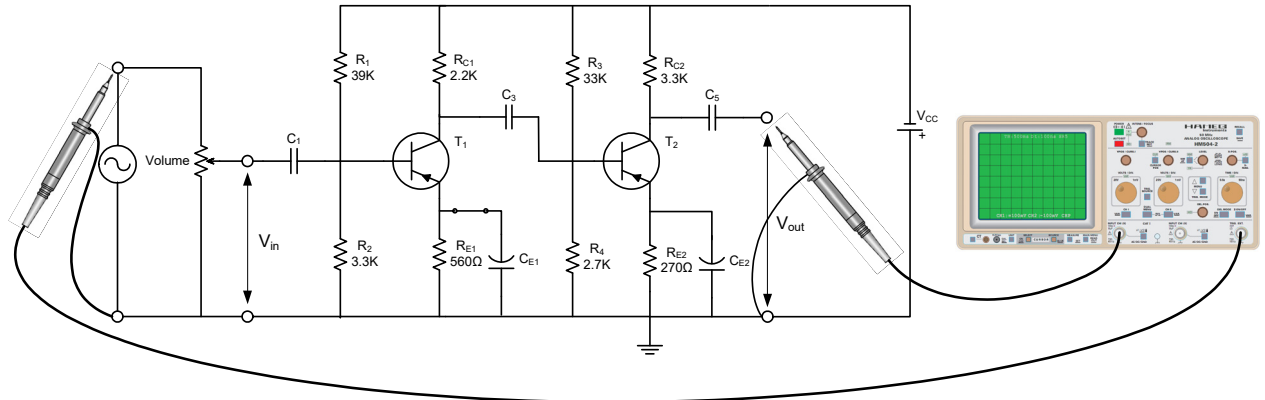
**Με αρνητική Ανατροφοδότηση**  $f'_x = \dots\dots$   
 $f'_y = \dots\dots$

Με **αναφορά στην θεωρία** για τις δύο περιπτώσεις (**χωρίς και με αρνητική ανατροφοδότηση**), τι παρατηρείτε από τα διαγράμματα E2.3α και E2.3β όσον αφορά την ενίσχυση και το εύρος ζώνης συχνοτήτων του ενισχυτή. Είναι αναμενόμενο το διάγραμμα που σχεδιάσατε;

**Βήμα 6.** Υλοποιήστε ξανά το κύκλωμα του ενισχυτή χωρίς ανατροφοδότηση (σχήμα E2.2).

Ρυθμίστε τη γεννήτρια συχνοτήτων έτσι ώστε στην έξοδό της να λαμβάνουμε **εναλλασσόμενο ημιτονικό σήμα** συχνότητας 800Hz και πλάτους 20mV. Ρυθμίστε στη συνέχεια το ποτενσιόμετρο **Volume** (σχήμα E2.4) ώστε το πλάτος  $V_{out}$  στην έξοδό του ενισχυτή να είναι περίπου 1Volt (χωρίς παραμόρφωση). Η συχνότητα 800Hz όπως είδαμε και από το διάγραμμα E2.3α ανήκει στις **μεσαίες συχνότητες** της καμπύλης απόκρισης του ενισχυτή.

Διατηρώντας το πλάτος εξόδου της γεννήτριας σταθερό μεταβάλλετε **μόνο** την συχνότητα της από 100Hz έως 20KHz. Χρησιμοποιώντας και τα δυο κανάλια του παλμογράφου μετρήστε την **διαφορά φάσης** ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του ενισχυτή (σχήμα E2.4).



Σχήμα E2.4

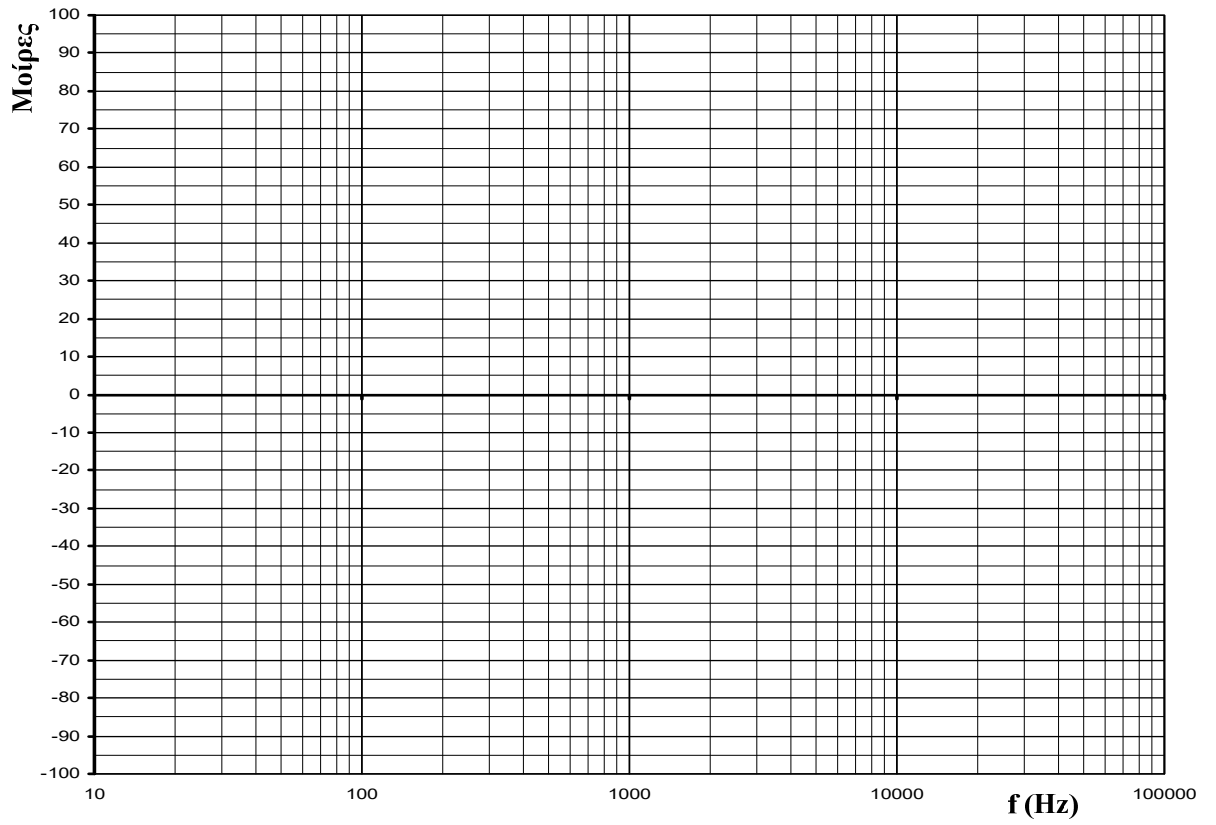
Θα πάρετε μετρήσεις για τρεις χαμηλές, τρεις μεσαίες και τρεις υψηλές συχνότητες (πίνακας E2.3). Οι χαμηλές και οι υψηλές συχνότητες που θα επιλέξετε θα εμπεριέχουν τις συχνότητες αποκοπής.

Συχνότητα	d	D	Διαφορά Φάσης (°)	Προηγείται η . . .
100				
200				
400				
2000				
4000				
6000				
12000				
15000				
20000				

Πίνακας E2.3

Στη συνέχεια χαράξτε στο παρακάτω διάγραμμα E2.4 την καμπύλη της διαφοράς φάσης ως συνάρτηση της συχνότητας:

Τι παρατηρείτε από το διάγραμμα E2.4; (με βάση και αυτά που ξέρετε από τη θεωρία για την διαφορά φάσης που εμφανίζει η βαθμίδα κοινού εκπομπού).



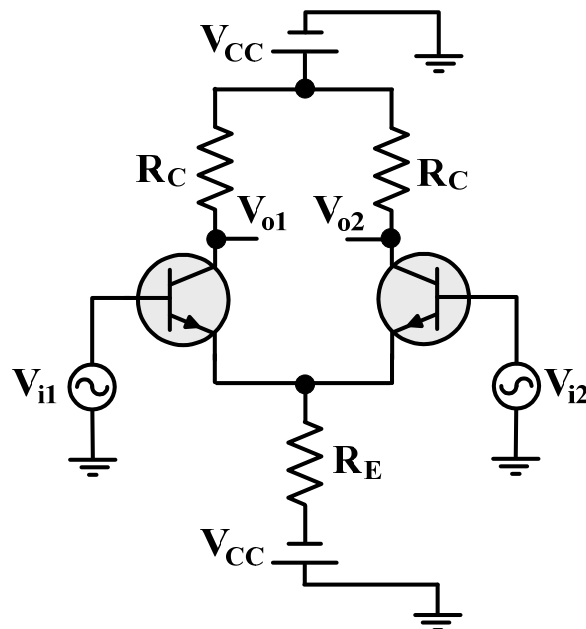
Διάγραμμα E2.4 - Διαφορά φάσης ως συνάρτηση της Συχνότητας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Διαφορικός ενισχυτής

Ο **διαφορικός ενισχυτής** (differential amplifier) είναι από τα πλέον διαδεδομένα και χρήσιμα κυκλώματα στις ενισχυτικές διατάξεις. Είναι βασικό δομικό στοιχείο του τελεστικού ενισχυτή με τον οποίο θα ασχοληθούμε στο επόμενο κεφάλαιο, ο οποίος είναι ο πλέον διαδεδομένος τύπος ενισχυτή που συναντούμε σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος. Πιο συγκεκριμένα, ο διαφορικός ενισχυτής αποτελεί την πρώτη βαθμίδα ενός τελεστικού ενισχυτή και παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση εισόδου και δυνατότητα απόρριψης ανεπιθύμητων σημάτων (θορύβου), όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται το βασικό κύκλωμα ενός διαφορικού ενισχυτή. Ο ενισχυτής αυτός αποτελείται από δύο όμοιες βαθμίδες κοινού εκπομπού, με κοινή αντίσταση εκπομπών, διπλή συμμετρική τροφοδοσία συνεχούς τάσης, δύο εισόδους και δυνατότητα λήψης δύο εξόδων. Τα δύο τρανζίστορ θα πρέπει να διαθέτουν όμοια χαρακτηριστικά, οι δύο αντιστάσεις συλλέκτη θα πρέπει να είναι ίσες και η κοινή αντίσταση των εκπομπών θα πρέπει να έχει μεγάλη τιμή. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο εισοδοί ή μόνο η μία.

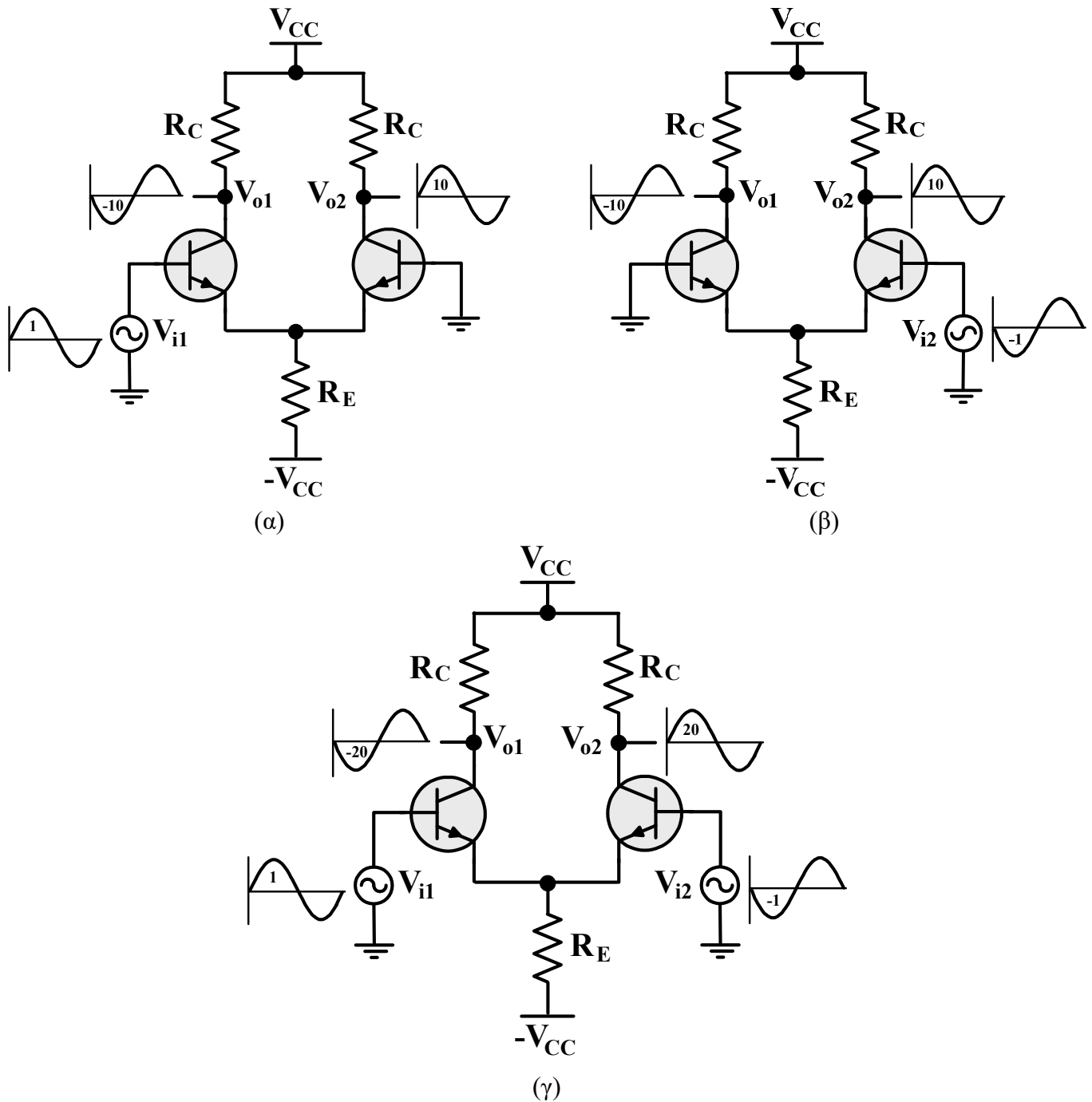


Σχήμα 5.1 – Κύκλωμα διαφορικού ενισχυτή

Όταν δεν εφαρμόζονται σήματα στις εισόδους, το κύκλωμα ισορροπεί. Τα ρεύματα και τα δυναμικά των συλλεκτών είναι ίσα, δηλαδή η τάση μεταξύ των δύο κόμβων εξόδου (**διαφορική τάση εξόδου**) είναι μηδενική. Πιθανή μεταβολή στην τάση τροφοδοσίας ή στη θερμοκρασία, επηρεάζει με τον ίδιο τρόπο τα δύο τρανζίστορ με αποτέλεσμα η μεταβολή ρεύματος σε αυτά να είναι ίδια και η διαφορική τάση εξόδου να παραμένει μηδενική.

Εάν εφαρμόσουμε ημιτονικό σήμα τάσης στη μία είσοδο του ενισχυτή και γειώσουμε την άλλη (Σχήμα 5.2(α)), τότε το σήμα της πρώτης εισόδου εμφανίζεται ενισχυμένο και ανεστραμμένο στο συλλέκτη του πρώτου τρανζίστορ ( $V_{o1}$ ), αφού πρόκειται για μία ενισχυτική βαθμίδα κοινού εκπομπού. Στο παράδειγμα του Σχήματος 5.2 έχουμε θεωρήσει ότι η ενίσχυση τάσης της κάθε βαθμίδας κοινού εκπομπού ισούται με 10. Το σήμα της πρώτης εισόδου προκαλεί συμμασική μεταβολή του ρεύματος εκπομπού ( $I_{e1}$ ) του πρώτου τρανζίστορ, η οποία με τη σειρά της προκαλεί ίση και ανεστραμμένη μεταβολή του ρεύματος εκπομπού του δεύτερου τρανζίστορ ( $I_{e2} = -I_{e1}$ ). Συνέπεια του μηχανισμού αυτού είναι η εμφάνιση σήματος στο συλλέκτη του δεύτερου τρανζίστορ ίδιου μεγέθους και αντίθετης φάσης με εκείνο του συλλέκτη του πρώτου τρανζίστορ ( $V_{o2} = -V_{o1}$ ), όπως μπορείτε να παρατηρήσετε στο Σχήμα 5.2(α).

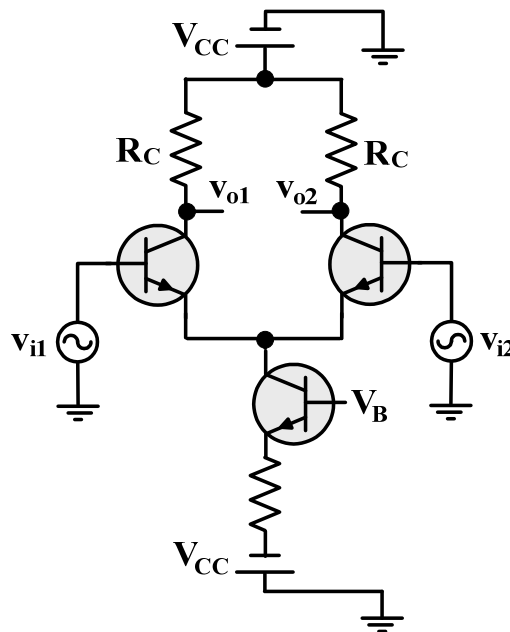
Παρόμοια διεργασία συμβαίνει εάν εφαρμόσουμε σήμα μόνο στη δεύτερη είσοδο και μάλιστα με αντίθετη φάση απ’ ότι στην προηγούμενη περίπτωση ( $V_{i2} = -V_{i1}$ ). Τα σήματα που προκύπτουν στους συλλέκτες είναι όμοια με την προηγούμενη περίπτωση (Σχήμα 5.2(β)). Εάν θεωρήσουμε ότι τα δύο **διαφορικά σήματα εισόδου** ( $V_{i2} = -V_{i1}$ ) εφαρμόζονται ταυτόχρονα στις εισόδους του ενισχυτή, σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, οι τάσεις συλλεκτών θα ισούνται με το άθροισμα των τάσεων συλλεκτών που υπήρχαν όταν καθένα από τα σήματα εφαρμοζόταν μόνο του. Έτσι, τα σήματα στους συλλέκτες των τρανζίστορ γίνονται διπλάσια (Σχήμα 5.2(γ)). Στην περίπτωση εφαρμογής σημάτων εισόδου κοινού τρόπου (δηλαδή,  $V_{i2} = V_{i1}$ ), η ίδια ανάλυση καταλήγει ιδανικά σε μη εμφάνιση σήματος εξόδου ανάμεσα στους συλλέκτες, και η λειτουργία αυτή του διαφορικού ενισχυτή αναφέρεται ως **απόρριψη κοινού σήματος**.



Σχήμα 5.2 – Ανάλυση λειτουργίας διαφορικού ενισχυτή

Όταν ο διαφορικός ενισχυτής υλοποιείται σε ολοκληρωμένο κύκλωμα, η μεγάλη αντίσταση εκπομπού ( $R_E$ ), η οποία χρησιμεύει στη διατήρηση σταθερού συνολικού ρεύματος στους εκπομπούς, μπορεί για λόγους οικονομίας, να αντικατασταθεί από ένα τρανζίστορ, πολωμένο έτσι ώστε να λειτουργεί ως πηγή

σταθερού ρεύματος (current regulator), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3. Η συνηθέστερη συνδεσμολογία για την πόλωσή του είναι αυτή του «καθρέπτη ρεύματος» (current mirror). Ο τρόπος πόλωσης, δηλαδή η διάταξη που παράγει την τάση  $V_B$ , δεν υποδεικνύεται, καθώς ξεφεύγει από τους στόχους της παρουσίασης του βασικού κυκλώματος του διαφορικού ενισχυτή.



Σχήμα 5.3 – Κύκλωμα διαφορικού ενισχυτή με χρήση τρανζίστορ ως πηγής σταθερού ρεύματος

Εάν  $V_{i1}$  και  $V_{i2}$  είναι τα σήματα εισόδου του διαφορικού ενισχυτή και  $V_{o1}$  και  $V_{o2}$  είναι τα αντίστοιχα σήματα εξόδου, τα οποία είναι ανάλογα με τη διαφορά των σημάτων εισόδου, τότε ορίζουμε τις **διαφορικές ενισχύσεις με απλή έξοδο** ως εξής:

$$A_{v1} = -\frac{V_{o1}}{V_{i1} - V_{i2}} \quad \text{και} \quad A_{v2} = \frac{V_{o2}}{V_{i1} - V_{i2}}.$$

Σε ένα ιδανικό διαφορικό ενισχυτή, αυτές οι δύο ενισχύσεις είναι ίσες. Επίσης, ορίζουμε τη **διαφορική ενίσχυση με διαφορική έξοδο**, ως εξής:

$$A_d = \frac{V_{o2} - V_{o1}}{V_{i1} - V_{i2}} = A_{v2} + A_{v1}.$$

Σε ένα ιδανικό διαφορικό ενισχυτή, η διαφορική ενίσχυση με διαφορική έξοδο είναι διπλάσια από τη διαφορική ενίσχυση με απλή έξοδο. Η **ενίσχυση κοινού σήματος του διαφορικού ενισχυτή με απλή έξοδο** ορίζεται ως εξής:

$$A_{CM} = \frac{V_{o1}}{V_i} = \frac{V_{o2}}{V_i}, \quad \text{όπου } V_{i1} = V_{i2} = V_i.$$

Σε ένα διαφορικό ενισχυτή, ο λόγος της διαφορικής ενίσχυσης τάσης με απλή έξοδο προς την ενίσχυση κοινού σήματος με απλή έξοδο, αναφέρεται **λόγος απόρριψης κοινού σήματος (Common Mode Rejection Ratio CMRR)**, δηλαδή:

$$CMRR = \left| \frac{A_{v1}}{A_{CM}} \right| = \left| \frac{A_{v2}}{A_{CM}} \right| \quad \text{και σε dB } (CMRR)_{dB} = 20 \cdot \log(CMRR).$$

Όπως προαναφέρθηκε, στην ιδανική (θεωρητική) περίπτωση, οποιαδήποτε κοινή μεταβολή στις τάσεις εισόδου του διαφορικού ενισχυτή δεν προκαλεί μεταβολή στην έξοδο (απόρριψη σημάτων κοινού τρόπου), συνεπώς η **ενίσχυση κοινού σήματος με διαφορική έξοδο είναι μηδενική** και ο **λόγος απόρριψης κοινού σήματος όταν αναφερόμαστε σε διαφορική έξοδο είναι άπειρος**. Ωστόσο, στους

πραγματικούς διαφορικούς ενισχυτές, η ενίσχυση κοινού σήματος με διαφορική έξοδο δεν είναι μηδενική με αποτέλεσμα ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος όταν αναφερόμαστε σε διαφορική έξοδο, να είναι πεπερασμένος. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος τόσο υψηλότερη είναι και η ποιότητα του τελεστικού ενισχυτή, αφού ο διαφορικός ενισχυτής ενισχύει το επιθυμητό σήμα και απορρίπτει το κοινό σήμα που είναι ανεπιθύμητο.

Αποδεικνύεται ότι στο διαφορικό ενισχυτή που εξετάζουμε, οι διαφορικές ενισχύσεις είναι:

$$A_{v1} = A_{v2} = \frac{h_{fe} \cdot R_C}{2 \cdot R_B} \quad \text{και} \quad A_d = \frac{h_{fe} \cdot R_C}{R_B}.$$

Για την ενίσχυση κοινού σήματος, αποδεικνύεται ότι ισχύει:

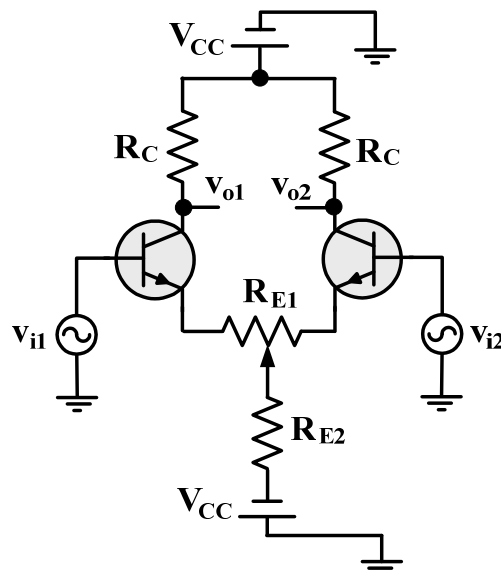
$$A_{CM} = -\frac{R_C}{2 \cdot R_E}.$$

Στις παραπάνω σχέσεις,  $h_{fe}$  είναι το κέρδος των τρανζίστορ και  $R_B$  είναι η αντίσταση εισόδου (βάσης) τους. Συνεπώς, για το λόγο απόρριψης κοινού σήματος, προκύπτει ότι:

$$CMRR = \frac{h_{fe} \cdot R_E}{R_B}.$$

Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι για να έχουμε στους διαφορικούς ενισχυτές υψηλή ενίσχυση διαφορικού σήματος και απόρριψη του κοινού σήματος, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μεγάλες τιμές των αντιστάσεων συλλέκτη και της κοινής αντίστασης εκπομπών.

Σε ένα πραγματικό διαφορικό ενισχυτή εμφανίζεται το εξής φαινόμενο: Μεταξύ των συλλεκτών των τρανζίστορ, με γειωμένες τις δυο εισόδους, εμφανίζεται μια συνεχής τάση, η οποία αναφέρεται ως **τάση ασυμμετρίας εξόδου** (output offset voltage). Η τάση αυτή προκαλείται από το μη-απόλυτο ταίριασμα (mismatch) των δύο τρανζίστορ λόγω κατασκευαστικών διαφορών ή λόγω διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας τους. Για την εξάλειψη της τάσης ασυμμετρίας χρησιμοποιείται ένα ποτενσιόμετρο, όπως παρουσιάζεται στο κύκλωμα του Σχήματος 5.4, το οποίο ρυθμίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται **αντιστάθμιση** (δηλαδή, να εισάγεται μια νέα τάση ασυμμετρίας στο κύκλωμα, η οποία αναιρεί την ήδη υπάρχουσα).



Σχήμα 5.4 – Πρακτικό κύκλωμα διαφορικού ενισχυτή με δυνατότητα αντιστάθμισης

Τέλος, κατασκευαστικές διαφορές μεταξύ των δύο τμημάτων του διαφορικού ενισχυτή μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα να μη διατηρούνται ίσα τα ρεύματα πόλωσης των εισόδων (βάσεων) του ενισχυτή. Η διαφορά των ρευμάτων αυτών ονομάζεται **ρεύμα ασυμμετρίας εισόδου** (input offset current).

# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 3

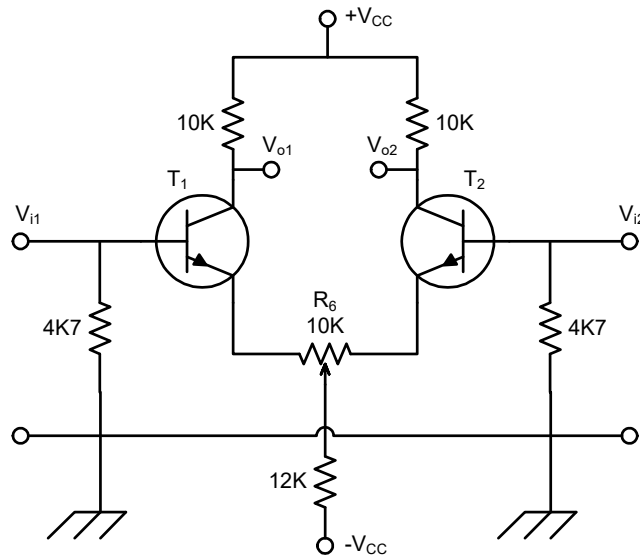
## ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

### ΣΤΟΧΟΙ

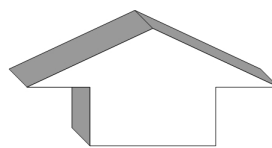
- η κατανόηση της αρχής λειτουργίας του διαφορικού ενισχυτή και μερικών βασικών χαρακτηριστικών του,
- η κατανόηση - αναγκαιότητα της διαδικασίας της αντιστάθμισης,
- η κατανόηση της διαφορικής ενίσχυσης καθώς και της ενίσχυσης κοινού σήματος σε ένα διαφορικό ενισχυτή.

### ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

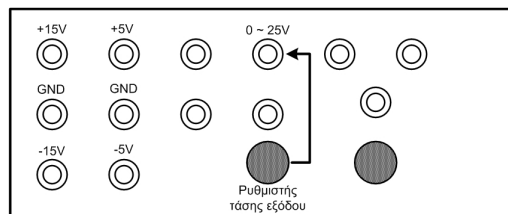
**Βήμα 1.** Για την πραγματοποίηση της άσκησης υλοποιήστε το κύκλωμα του διαφορικού ενισχυτή (σχήμα E3.1) και δώστε τροφοδοτική τάση  $\pm 15V$  (στα σημεία  $+V_{CC}$ ,  $-V_{CC}$  και  $GND$ ) από το τροφοδοτικό T1.



Σχήμα E3.1



**T1**  
ΜΑΥΡΟ ΠΛΑΚΕ  
ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ



Χωρίς σήμα στις εισόδους του ενισχυτή και θέτοντας **εκτός κυκλώματος** τη μεταβλητή αντίσταση  $R_6$  (βραχυκυκλώνοντας δηλαδή τα άκρα της), μετρήστε με βολτόμετρο την **τάση ασυμμετρίας του διαφορικού ενισχυτή**:

$$V_{\text{ασυμ. εξόδου}} = V_{C1C2} = \dots\dots\dots$$

Που οφείλετε κατά την γνώμη σας η **τάση ασυμμετρίας** του διαφορικού ενισχυτή;



Στη συνέχεια για να εξαλείψετε την **ασυμμετρία** του **διαφορικού ενισχυτή** θα κάνετε **αντιστάθμιση**. Θα αποβραχυκυκλώσετε δηλαδή τα άκρα της αντίστασης **R<sub>6</sub>** και ρυθμίζοντάς την θα προσπαθήσετε να φέρετε την **τάση ασυμμετρίας V<sub>C1C2</sub>** σε μηδενική τιμή.

Κάνοντας λοιπόν την καλύτερη ρύθμιση που μπορείτε καταφέρατε να φέρετε την **τάση ασυμμετρίας** στην τιμή:

$$V_{\text{ασυμ. εξόδου min}} = V_{C1C2 \text{ min}} = \dots\dots\dots$$

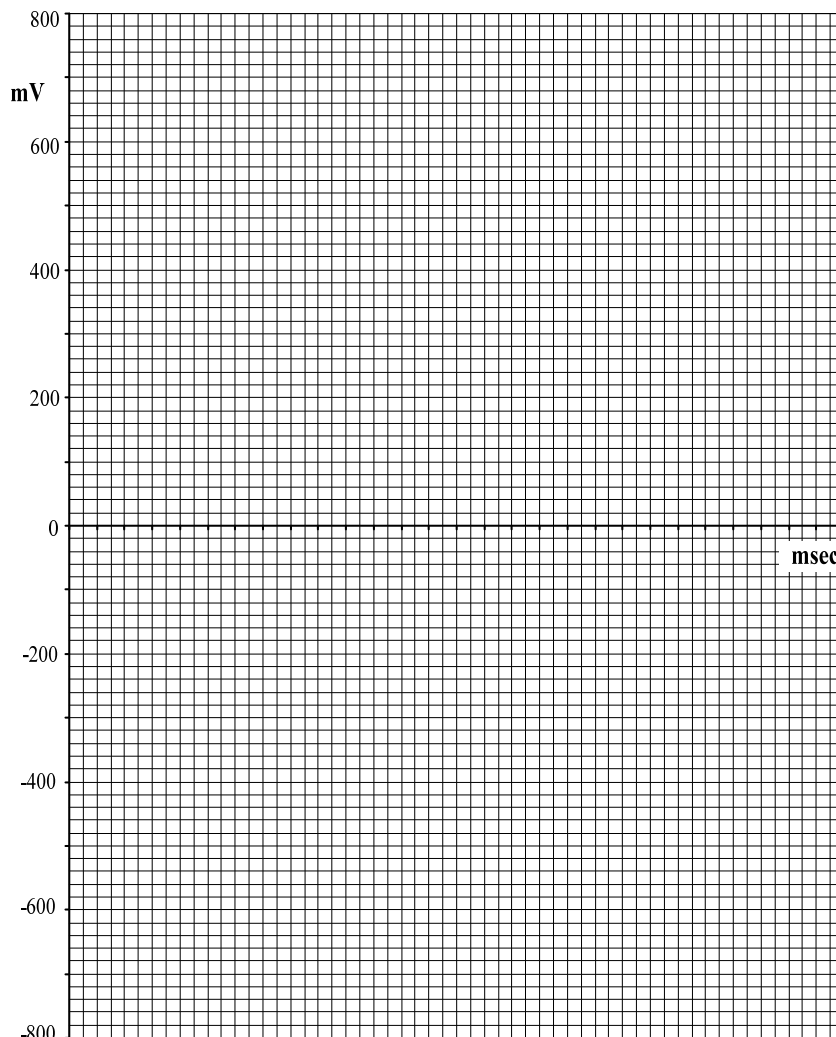
Τώρα λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι ο **διαφορικός ενισχυτής** μας είναι **συμμετρικός**.

**Βήμα 2.** Δώστε από τη γεννήτρια ημιτονικών σημάτων στην είσοδο **V<sub>i1</sub>** του **διαφορικού ενισχυτή**, **εναλλασσόμενο ημιτονικό σήμα** συχνότητας **800Hz** και πλάτους **200mV**. Με τον παλμογράφο μετρήστε τα παρακάτω μεγέθη (πίνακας E3.1) και παρατηρήστε τη **διαφορά φάσης** ανάμεσα στην **είσοδο V<sub>i1</sub>** και τις δύο **εξόδους V<sub>o1</sub>, V<sub>o2</sub>**:

	Είσοδος V <sub>i1</sub> (V)	Έξοδος V <sub>o1</sub> (V)	Διαφορά φάσης V <sub>i1</sub> με V <sub>o1</sub>	Έξοδος V <sub>o2</sub> (V)	Διαφορά φάσης V <sub>i1</sub> με V <sub>o2</sub>
800Hz					

Πίνακας E3.1

Στο παρακάτω διάγραμμα E3.1 σχεδιάστε τις κυματομορφές που παρατηρήσατε με τον παλμογράφο, με **μολύβι** την κυματομορφή της **εισόδου (V<sub>i1</sub>)**, με **μπλε στυλό** την κυματομορφή της **εξόδου (V<sub>o1</sub>)** και με **κόκκινο στυλό** την κυματομορφή της **εξόδου (V<sub>o2</sub>)**.



Διάγραμμα E3.1

Παρατηρώντας το διάγραμμα Ε3.1 για ποια έξοδο είναι αναστρέφουσα η είσοδος  $V_{i1}$ ;

Μετρήστε επιπλέον με **AC ψηφιακό βολτόμετρο** τις τάσεις  $V_{i1}$ ,  $V_{o1}$ ,  $V_{o2}$ ,  $V_{C1C2}$  και συμπληρώστε τον πίνακα Ε3.2:

$V_{i1}$	$V_{o1}$	$V_{o2}$	$V_{C1C2}$

Πίνακας Ε3.2

**Γιατί τα μετρούμενα** με ψηφιακό βολτόμετρο **μεγέθη** του πίνακα Ε6.2 **διαφέρουν από τα αντίστοιχα** μετρούμενα με παλμογράφο μεγέθη του πίνακα Ε3.1;

Με τις μετρήσεις του παραπάνω πίνακα Ε3.2 υπολογίστε τις ενισχύσεις  $A_{V1}$ ,  $A_{V2}$  και  $A_d$ :

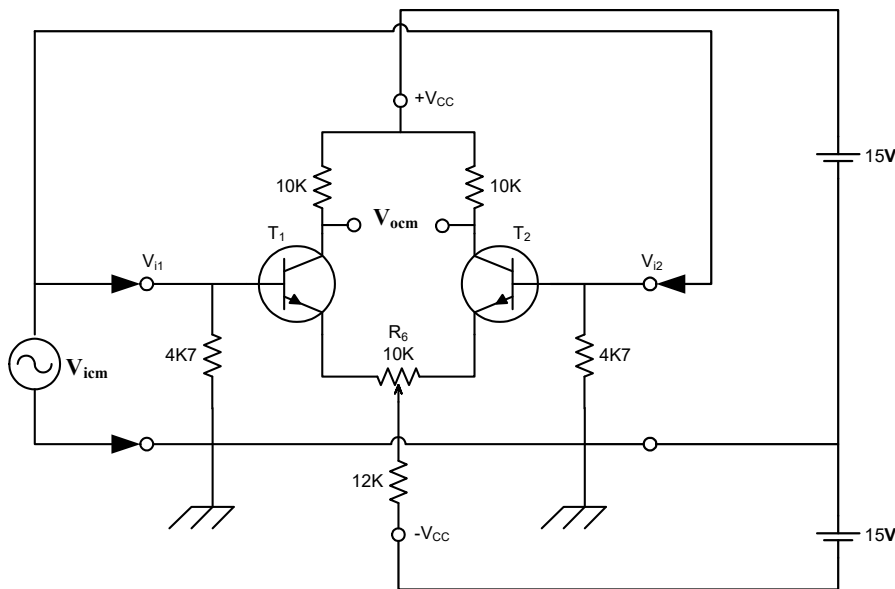
$A_{V1} =$

$A_{V2} =$

$A_d =$

Σχολιάστε τις παραπάνω υπολογισθείσες ενισχύσεις με βάση αυτά που ξέρετε από την θεωρία για ένα συμμετρικό διαφορικό ενισχυτή.

**Βήμα 3** Για να βρείτε την **ένισχυση κοινού σήματος** εφαρμόστε ταυτόχρονα και στις **δυο εισόδους** του ενισχυτή (την  $V_{i1}$  και την  $V_{i2}$ ) το ίδιο σήμα που θα το ονομάσουμε  $V_{icm}$  (σχήμα Ε3.2). Μετρήστε με **ψηφιακό βολτόμετρο** την **κοινή είσοδο**  $V_{icm}$ , καθώς και την **έξοδο**  $V_{ocm}$ .



Σχήμα Ε3.2

$V_{icm} = \dots\dots\dots$

$V_{ocm} = \dots\dots\dots$

Από τις παραπάνω μετρήσεις υπολογίστε την **ένισχυση κοινού σήματος**  $A_{CM}$  με **διαφορική έξοδο**:

$A_{CM} = \text{—————} = \dots\dots\dots$

Από τη γνωστή σχέση που μετατρέπει μια ενίσχυση σε **dB** ( $20 \cdot \log(V_{out} / V_{in})$ ) υπολογίστε κατά πόσα **dB** θα έβγαινε εξασθενημένο στην έξοδο του ενισχυτή ένα **ηλεκτρικό παράσιτο** που θα εισαγόταν ταυτόχρονα και στις δύο εισόδους του.

Ο **Λόγος Απόρριψης Κοινού Σήματος (C.M.R.R.)** με διαφορική έξοδο είναι:

$$\text{C.M.R.R.} = \frac{\dots}{\dots} = \dots$$

Υπολογίστε τον **Λόγο Απόρριψης Κοινού Σήματος (C.M.R.R.)** και σε **dB** από την σχέση  $20 \log(\text{C.M.R.R.})$ :

$$\text{C.M.R.R.}_{(dB)} = \dots = \dots$$

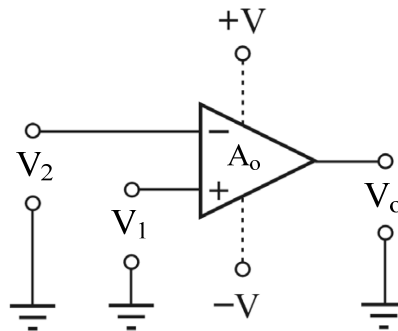
Από τα παραπάνω θα αποφανθούμε πόσος είναι ο **λόγος** (σε **dB**) της **διαφορικής ενίσχυσης** που υφίσταται το **ωφέλιμο σήμα εισόδου** σε σχέση με την **ενίσχυση** που υφίσταται ένα **σήμα θορύβου (παράσιτο)** που θα εισαγόταν και στις **δύο εισόδους** του ενισχυτή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Τελεστικός ενισχυτής

Ο τελεστικός ενισχυτής, TE (operational amplifier, op-amp) είναι ένα από τα πιο χρήσιμα αναλογικά κυκλώματα. Κατασκευάζεται ως ολοκληρωμένο κύκλωμα (integrated circuit) και αποτελείται από μερικές δεκάδες τρανζίστορ. Πρόκειται για ενισχυτή τάσης άμεσης σύζευξης με πολύ μεγάλη τιμή ενίσχυσης τάσης ( $\geq 5 \cdot 10^4$ ), πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου ( $\geq 0.5 \text{ M}\Omega$ ) και πολύ χαμηλή αντίσταση εξόδου ( $\leq 100 \Omega$ ). Η ονομασία του οφείλεται στη δυνατότητα που έχει να πραγματοποιεί (τελεί) μαθηματικές πράξεις μεταξύ σημάτων τάσης, όπως θα δούμε στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Το καθιερωμένο σύμβολο του τελεστικού ενισχυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1.

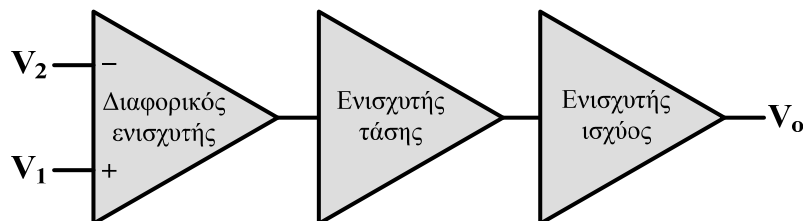


Σχήμα 6.1 – Σύμβολο του τελεστικού ενισχυτή

Ο τελεστικός ενισχυτής διαθέτει δύο εισόδους, τη μη αναστρέφουσα (+) και την αναστρέφουσα (-), μία έξοδο, καθώς και συμμετρική τροφοδοσία συνεχούς τάσης (+V, -V). Οι ονομασίες των εισόδων προκύπτουν από το γεγονός ότι εάν συνδέσουμε ένα σήμα τάσης στη μη αναστρέφουσα είσοδο (+) και γειώσουμε την αναστρέφουσα είσοδο, τότε το σήμα της εξόδου θα είναι συμφασικό με εκείνο της εισόδου, ενώ εάν συνδέσουμε ένα σήμα τάσης στην αναστρέφουσα είσοδο (-) και γειώσουμε τη μη αναστρέφουσα είσοδο, τότε το σήμα της εξόδου θα έχει διαφορά φάσης  $180^\circ$  σε σχέση με το σήμα εισόδου. Εάν θέσουμε δύο σήματα εισόδου  $V_1$  και  $V_2$ , τότε:

$$V_o = A_o \cdot (V_1 - V_2), \quad (6.1)$$

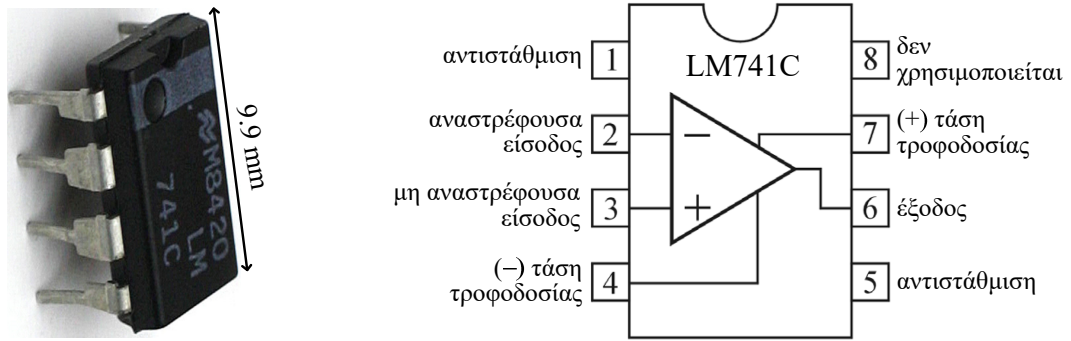
όπου  $A_o$  είναι η ενίσχυση τάσης ανοιχτού βρόχου του τελεστικού ενισχυτή, η οποία όπως προαναφέρθηκε λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές. Αυτό βέβαια δε σημαίνει ότι η τάση εξόδου του τελεστικού ενισχυτή μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλές τιμές, αφού το πλάτος της περιορίζεται από την τιμή της συμμετρικής τάσης τροφοδοσίας, την οποία δεν μπορεί να υπερβεί.



Σχήμα 6.2 – Συνοπτικό διάγραμμα τελεστικού ενισχυτή

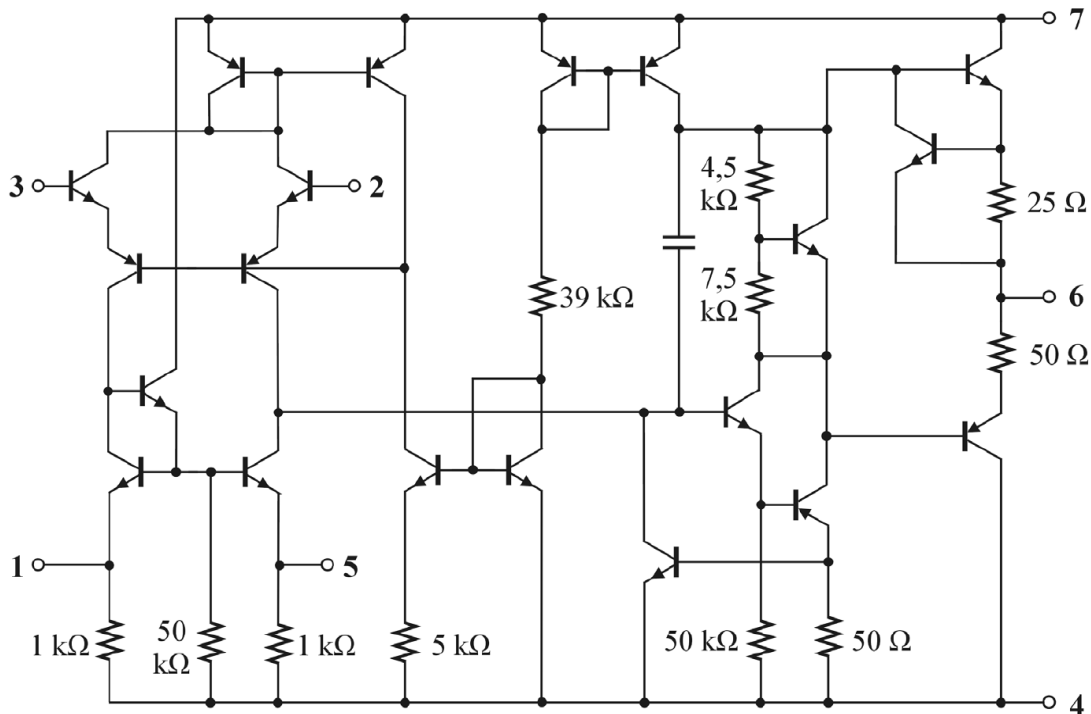
Όπως παρουσιάζεται στο συνοπτικό διάγραμμα του Σχήματος 6.2, ένας τυπικός τελεστικός ενισχυτής αποτελείται από τρεις βασικές λειτουργικές βαθμίδες. Η βαθμίδα εισόδου είναι ένας διαφορικός ενισχυτής, ο οποίος δίνει τη δυνατότητα ύπαρξης της αναστρέφουσας και της μη αναστρέφουσας εισόδου και προσφέρει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για ένα ποιοτικό τελεστικό ενισχυτή, όπως: υψηλή αντίσταση εισόδου και υψηλό λόγο απόρριψης κοινού σήματος. Η ενδιάμεση βαθμίδα ενισχυτή τάσης, προσδίδει, σε συνδυασμό με τη βαθμίδα εισόδου, την απαιτούμενη υψηλή ενίσχυση τάσης, ενώ η βαθμίδα εξόδου παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση εξόδου και προσφέρει απομόνωση του τελεστικού

ενισχυτή από την επίδραση του φορτίου, καθώς και την αναγκαία ενίσχυση ισχύος που απαιτείται για να οδηγηθεί το φορτίο.



Σχήμα 6.3 – Συσκευασία ολοκληρωμένου κυκλώματος τυπικού τελεστικού ενισχυτή (LM741C)

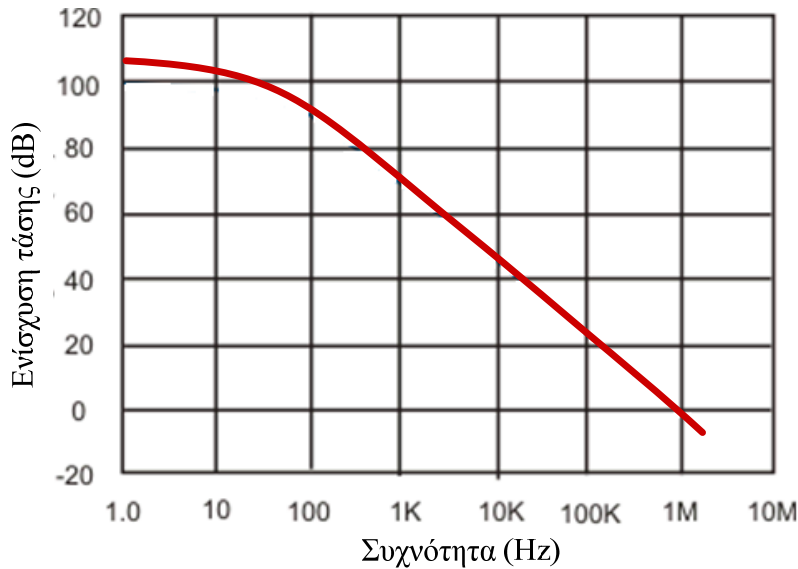
Η συσκευασία του ολοκληρωμένου κυκλώματος ενός τυπικού τελεστικού ενισχυτή (LM741C), παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3. Οι ακροδέκτες 2 και 3 αποτελούν την αναστρέφουσα και τη μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή, αντίστοιχα. Ο ενισχυτής τροφοδοτείται με συμμετρική συνεχή τάση (τυπικής τιμής  $\pm 15V$ ) στους ακροδέκτες 4 και 7, ενώ η έξοδος λαμβάνεται στον ακροδέκτη 6. Ο ακροδέκτης 8 δε χρησιμοποιείται. Λόγω κατασκευαστικής ασυμμετρίας στη διαφορική βαθμίδα εισόδου των τελεστικών ενισχυτών, εμφανίζεται μεταξύ των δύο εισόδων παρασιτική διαφορά δυναμικού, η οποία προστίθεται στο σήμα εισόδου, με αποτέλεσμα για μηδενικό σήμα εισόδου να εμφανίζεται σήμα μικρού πλάτους (μερικών mV) στην έξοδο. Για να μηδενιστεί το σφάλμα αυτό, είναι απαραίτητη η εισαγωγή μιας αντισταθμιστικής τάσης (offset voltage), μέσω μιας μεταβλητής αντίστασης (nulling potentiometer), η οποία συνδέεται μεταξύ των ακροδεκτών 1 και 5 του τελεστικού ενισχυτή και ρυθμίζεται έτσι ώστε για μηδενικό σήμα εισόδου να λαμβάνεται μηδενικό σήμα στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή.



Σχήμα 6.4 – Κυκλωματικό διάγραμμα τυπικού τελεστικού ενισχυτή (LM741C)

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται το κυκλωματικό διάγραμμα ενός τυπικού τελεστικού ενισχυτή (LM741C). Στο διαφορικό ενισχυτή εισόδου περιλαμβάνεται και το απαιτούμενο κύκλωμα αντιστάθμισης. Οι καθρέπτες ρεύματος (που συνίστανται από τρανζίστορ με συνδεδεμένες τις βάσεις τους), χρησιμοποιούνται ως πηγές σταθερού ρεύματος για την πόλωση των βασικών ενισχυτικών βαθμίδων του

τελεστικού ενισχυτή. Η ενδιάμεση βαθμίδα είναι ένας σύνθετος ενισχυτής δύο υποβαθμίδων (κοινού συλλέκτη – κοινού εκπομπού), ο οποίος προσδίδει στο κύκλωμα την απαιτούμενη υψηλή ενίσχυση τάσης. Τέλος, η βαθμίδα εξόδου είναι ένα ενισχυτής ισχύος τύπου push-pull.



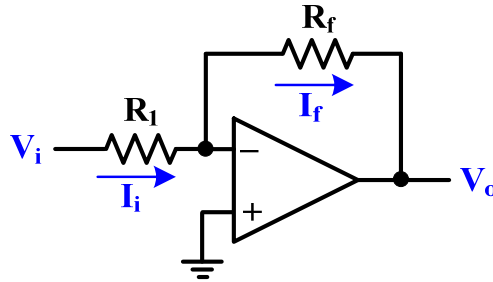
Σχήμα 6.4 – Απόκριση συχνότητας τυπικού τελεστικού ενισχυτή (LM741C)

Στους τελεστικούς ενισχυτές, η **ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου**, η οποία είναι πολύ υψηλή, μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας. Όπως γνωρίζουμε στους ενισχυτές το εύρος ζώνης **ενισχυμένων συχνοτήτων (bandwidth, BW)** ορίζεται ως η ζώνη συχνοτήτων στην οποία το κέρδος του ενισχυτή είναι μέγιστο και περιορίζεται μεταξύ δυο οριακών συχνοτήτων (συχνοτήτων αποκοπής), στις οποίες η ενίσχυση πέφτει περίπου στο 70% της μέγιστης τιμής της ή κατά 3dB. Επειδή ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένας ενισχυτής άμεσης σύζευξης, η κατώτερη συχνότητα αποκοπής είναι  $f_L = 0\text{Hz}$ . Επομένως, το εύρος ζώνης ενισχυμένων συχνοτήτων για ένα τελεστικό ενισχυτή καθορίζεται από την ανώτερη συχνότητα αποκοπής  $f_H$ . Το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.4, αφορά έναν τυπικό τελεστικό ενισχυτή (LM741C) με ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου ίση με 200.000 (ή 106dB) και με  $f_H = 10\text{Hz}$ , στην οποία η ενίσχυση τάσης πέφτει κατά 3dB. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερο εύρος ενισχυμένων συχνοτήτων, στα κυκλώματα των τελεστικών ενισχυτών, χρησιμοποιούμε αρνητική ανατροφοδότηση, όπως θα δούμε στα κυκλώματα εφαρμογών με τα οποία θα ασχοληθούμε στη συνέχεια. Στα κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών με αρνητική ανατροφοδότηση, το εύρος ενισχυμένων συχνοτήτων αυξάνεται κατά τον ίδιο παράγοντα που μειώνεται η ενίσχυση τάσης. Ένα από τα χαρακτηριστικά ποιότητας των τελεστικών ενισχυτών είναι η **συχνότητα μοναδιαίας ενίσχυσης** (δηλαδή, η συχνότητα στην οποία η ενίσχυση τάσης γίνεται 1 ή 0dB), η οποία αναφέρεται και ως **εύρος ζώνης μοναδιαίας ενίσχυσης** και για τον τυπικό τελεστικό ενισχυτή LM741C, ανέρχεται σε 1MHz, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 6.4.

Για την ανάλυση κυκλωμάτων με τελεστικό ενισχυτή και την κατανόηση της λειτουργίας τους, χρησιμοποιούμε τον **ιδανικό τελεστικό ενισχυτή**. Σε αυτόν θεωρείται ότι η ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου είναι άπειρη, καθώς επίσης και ανεξάρτητη της συχνότητας, με αποτέλεσμα το εύρος ζώνης ενισχυμένων συχνοτήτων και το εύρος ζώνης μοναδιαίας ενίσχυσης να θεωρείται ότι έχουν επίσης άπειρη τιμή. Η άπειρη τιμή της ενίσχυσης τάσης ανοικτού βρόχου, έχει ως αποτέλεσμα (όπως θα δούμε σε διάφορα κυκλώματα εφαρμογής του τελεστικού ενισχυτή), η ενίσχυση τάσης κυκλωμάτων με τελεστικό ενισχυτή και αρνητική ανατροφοδότηση να εξαρτάται αποκλειστικά από το κύκλωμα ανατροφοδότησης. Από την σχέση (6.1) προκύπτει εύκολα ότι:  $V_1 - V_2 = V_o / A_o$  και επειδή στον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή ισχύει ότι  $A_o = \infty$ , προκύπτει ότι η **διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες εισόδου ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή είναι μηδενική, δηλαδή η τάση της μη αναστρέφουσας εισόδου (+) ισούται με την τάση της αναστρέφουσας εισόδου (-)**. Η ιδιότητα αυτή που αναφέρεται και ως ιδιότητα αντιγραφής των τάσεων εισόδου, διευκολύνει την ανάλυση κυκλωμάτων με τελεστικό ενισχυτή.

Η αντίσταση εισόδου του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή θεωρείται άπειρη. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα στους ακροδέκτες εισόδου του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή είναι μηδενικό και συνεπώς ο τελεστικός ενισχυτής δε «φορτώνει» τα κυκλώματα στα οποία συνδέεται. Η αντίσταση εξόδου του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή θεωρείται μηδενική. Αυτό σημαίνει ότι η τάση εξόδου του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή δεν επηρεάζεται από το φορτίο προς το οποίο συνδέεται.

Μια βασική εφαρμογή του τελεστικού ενισχυτή αποτελεί ο πολλαπλασιασμός ενός σήματος τάσης με σταθερό αρνητικό αριθμό. Το κύκλωμα που εκτελεί την πράξη αυτή αναφέρεται ως **ανάστροφος ενισχυτής** (ή **ενισχυτής αρνητικής ενίσχυσης**) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.5.

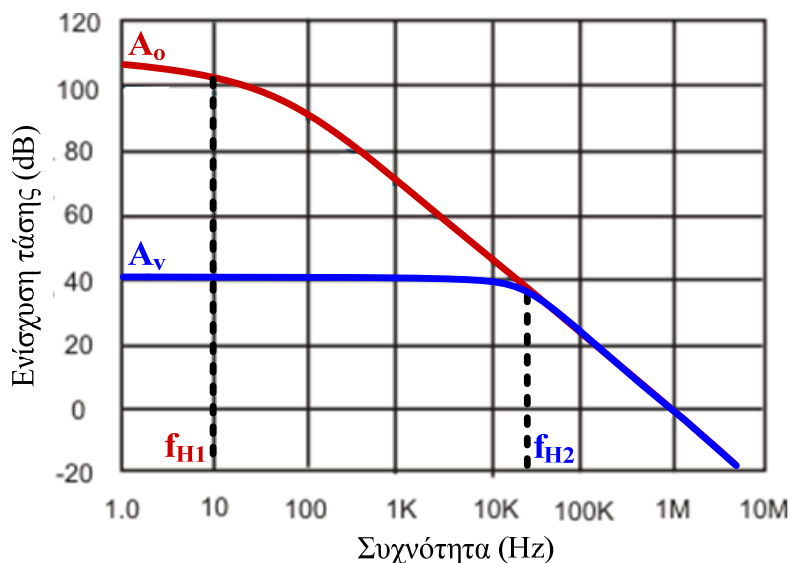


Σχήμα 6.5 – Βασικό κύκλωμα ανάστροφου ενισχυτή

Θεωρώντας ότι το κύκλωμα περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ιδιότητα αντιγραφής των τάσεων εισόδου που προαναφέρθηκε, καθώς και το ότι το ρεύμα στους ακροδέκτες εισόδου είναι μηδενικό. Οι δύο αυτές θεωρήσεις έχουν ως αποτέλεσμα η τάση στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή να είναι μηδενική ( $V_- = V_+ = 0$ ) και το ρεύμα  $I_i$  να ισούται με το ρεύμα  $I_f$ . Έτσι έχουμε:

$$I_i = I_f \Rightarrow \frac{V_i - V_-}{R_1} = \frac{V_- - V_o}{R_f} \Rightarrow \frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_o}{R_f} \Rightarrow V_o = -\frac{R_f}{R_1} \cdot V_i \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1} \Rightarrow A_v = -\frac{R_f}{R_1} \quad (6.2)$$

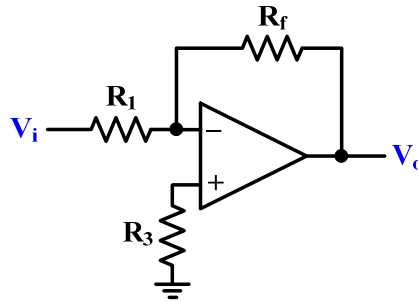
Προκύπτει λοιπόν ότι το σήμα εισόδου πολλαπλασιάζεται με τον αρνητικό αριθμό  $-R_f / R_i$  και το αποτέλεσμα της πράξης αυτής λαμβάνεται στην έξοδο του κυκλώματος. Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι τα σήματα εισόδου και εξόδου έχουν διαφορά φάσης  $180^\circ$ . Η ενίσχυση τάσης του ανάστροφου ενισχυτή ισούται με τον λόγο της αντίστασης ανατροφοδότησης προς την αντίσταση εισόδου. Είναι προφανές ότι η ενίσχυση τάσης είναι ανεξάρτητη από την ενίσχυση ανοιχτού βρόχου του ενισχυτή και καθορίζεται από το κύκλωμα ανατροφοδότησης, δηλαδή από την αντίσταση  $R_f$ .



Σχήμα 6.6 – Απόκριση συχνότητας τελεστικού ενισχυτή ανοιχτού βρόχου και ανάστροφου ενισχυτή

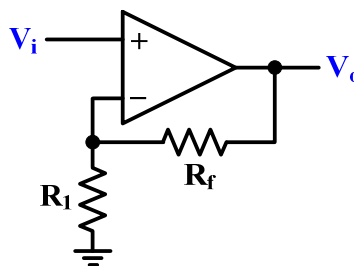
Σε κυκλώματα ανάστροφου ενισχυτή με πραγματικό τελεστικό ενισχυτή, η ενίσχυση τάσης στις υψηλές συχνότητες δεν είναι σταθερή, αλλά μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας του σήματος εισόδου. Στο Σχήμα 6.6, παρουσιάζονται η απόκριση συχνότητας ενός τελεστικού ενισχυτή ανοιχτού βρόχου, καθώς και η απόκριση συχνότητας ενός ανάστροφου ενισχυτή. Οι τυπικές τιμές για την  $A_o$  είναι της τάξης των 100.000, ενώ η  $A_v$  λαμβάνει τυπικές τιμές μεταξύ 10 και 1000, οι οποίες καθορίζονται από το κύκλωμα ανατροφοδότησης. Η ανώτερη συχνότητα αποκοπής του τελεστικού ενισχυτή ανοιχτού βρόχου ( $f_{H1}$ ) είναι μερικά Hz, ενώ η ανώτερη συχνότητα αποκοπής του ανάστροφου ενισχυτή ( $f_{H2}$ ) είναι τουλάχιστον μερικές δεκάδες kHz. Η μεγάλη πτώση της ενίσχυσης τάσης λόγω της εφαρμογής της ανατροφοδότησης δεν αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα, λόγω του ότι ενισχύσεις της τάξης των 100.000 δεν είναι χρήσιμες στα πρακτικά κυκλώματα. Ωστόσο, η εφαρμογή αρνητικής ανατροφοδότησης προσδίδει στα πρακτικά κυκλώματα όλα τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Μολονότι στον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή θεωρούμε ότι οι ακροδέκτες εισόδου δεν διαρρέονται από ρεύμα, στην πράξη υφίσταται ένα πολύ μικρό ρεύμα (της τάξης των 10 έως 100 nA), ώστε να πολώνονται ορθά τα τρανζίστορ της μονάδας εισόδου του τελεστικού ενισχυτή. Το ρεύμα αυτό μπορεί να αλλοιώσει την τάση εξόδου του ενισχυτή και για να το περιορίσουμε δραστικά ή να το εξαλείψουμε θα πρέπει να μεριμνούμε ώστε οι δύο ακροδέκτες εισόδου του τελεστικού ενισχυτή να «βλέπουν προς τη γείωση» την ίδια αντίσταση εισόδου. Έτσι, στο κύκλωμα του ανάστροφου ενισχυτή θα πρέπει, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.7, να προσθέσουμε μια αντίσταση  $R_3$  με τιμή  $R_3 = R_1 \cdot R_f / (R_1 + R_f)$ .



Σχήμα 6.7 – Κύκλωμα ανάστροφου ενισχυτή με περιορισμό επίδρασης του ρεύματος πόλωσης εισόδου

Εάν επιθυμούμε το σήμα εισόδου να πολλαπλασιάζεται με θετικό αριθμό και το αποτέλεσμα της πράξης αυτής να λαμβάνεται στην έξοδο του κυκλώματος, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το κύκλωμα του **μη ανάστροφου ενισχυτή** (ή ενισχυτή θετικής ενίσχυσης) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.8.



Σχήμα 6.8 – Κύκλωμα μη ανάστροφου ενισχυτή

Θεωρώντας ότι το κύκλωμα περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ιδιότητα αντιγραφής των τάσεων εισόδου που προαναφέρθηκε ( $V_- = V_+ = V_i$ ), καθώς και τον διαιρέτη της τάσης εξόδου που δημιουργείται από τις δύο αντιστάσεις του κυκλώματος. Έτσι έχουμε:

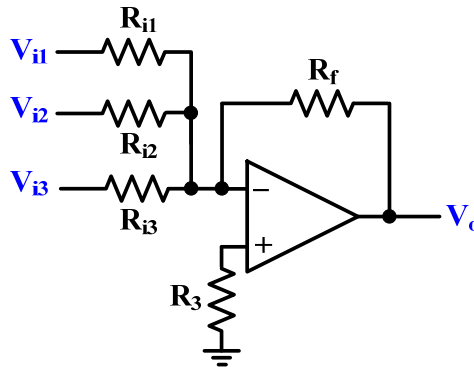
$$V_- = \frac{R_1}{R_1 + R_f} \cdot V_o \Rightarrow V_i = \frac{R_1}{R_1 + R_f} \cdot V_o \Rightarrow V_o = \frac{R_1 + R_f}{R_1} \cdot V_i \Rightarrow$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \cdot V_i \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \Rightarrow A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$



Ένα από τα χρησιμότερα κυκλώματα με τελεστικό ενισχυτή είναι ο **αθροιστής τάσεων** (Σχήμα 6.9). Πρόκειται στην ουσία για κύκλωμα ανάστροφου ενισχυτή, στην είσοδο του οποίου συνδέονται περισσότερα του ενός σήματα τάσης. Καθεμία από τις αντιστάσεις εισόδου συνδέεται στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή, χωρίς να επηρεάζει τη λειτουργία των υπόλοιπων διαδρομών εισόδου. Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, η έξοδος ενός κυκλώματος ισούται με το άθροισμα των εξόδων, όταν καθεμία από τις εισόδους εφαρμοστεί ανεξάρτητα. Κάνοντας χρήση της αρχής αυτής και με βάση τη σχέση (6.2), μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε την τάση εξόδου του κυκλώματος αθροιστή τάσεων ως εξής:

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_{i1}} \cdot V_{i1} + \frac{R_f}{R_{i2}} \cdot V_{i2} + \frac{R_f}{R_{i3}} \cdot V_{i3}\right) \Rightarrow V_o = -(A_{v1} \cdot V_{i1} + A_{v2} \cdot V_{i2} + A_{v3} \cdot V_{i3}).$$

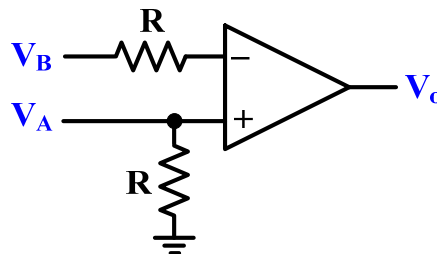


Σχήμα 6.9 – Κύκλωμα αθροιστή τάσεων

Με στόχο τον περιορισμό της επίδρασης του ρεύματος πόλωσης εισόδου, η τιμή της αντίστασης  $R_3$ , στο κύκλωμα του αθροιστή τάσεων, θα πρέπει να είναι:

$$R_3 = \frac{R_{o\lambda} \cdot R_f}{R_{o\lambda} + R_f}, \quad R_{o\lambda} = \frac{1}{\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{R_{i3}}}.$$

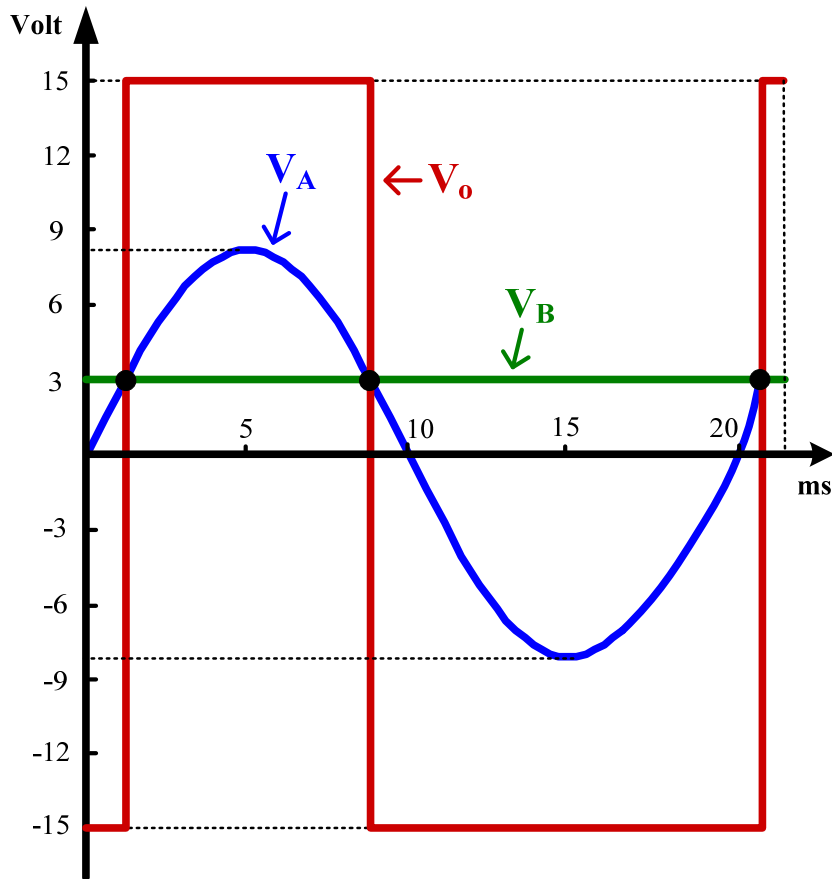
Ένα κύκλωμα που χρησιμοποιεί τελεστικό ενισχυτή με ανοιχτό βρόχο είναι το κύκλωμα του **συγκριτή τάσεων**, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.10. Όταν ένας τελεστικός ενισχυτής λειτουργεί με ανοιχτό βρόχο (δηλαδή, χωρίς ανατροφοδότηση), τότε λόγω της πολύ υψηλής ενίσχυσης που εμφανίζει και σύμφωνα με τη σχέση (6.1), η έξοδος του ενισχυτή θα οδηγηθεί σε κατάσταση θετικού ή αρνητικού κόρου (δηλαδή σε θετική ή αρνητική τιμή λίγο μικρότερη από την τάση τροφοδοσίας), ανάλογα με τον αν η διαφορά δυναμικού ( $V_A - V_B$ ) στους ακροδέκτες εισόδου είναι θετική ή αρνητική. Εάν οι τάσεις εισόδου είναι ίσες, τότε η έξοδος του ενισχυτή μηδενίζεται.



Σχήμα 6.10 – Κύκλωμα συγκριτή τάσεων

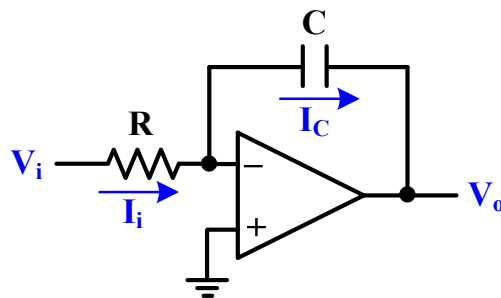
Επομένως, οι δύο καταστάσεις εξόδου του τελεστικού ενισχυτή δίνουν πληροφορία για τη σύγκριση των δυναμικών στους δύο ακροδέκτες εισόδου του, με αποτέλεσμα ο τελεστικός ενισχυτής να λειτουργεί ως συγκριτής τάσεων. Συνήθως επιδιώκουμε σύγκριση μεταξύ μίας τάσης μεταβλητού μεγέθους και μίας τάσης σταθερού μεγέθους (τάση αναφοράς). Για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου η τάση  $V_A$  είναι ημιτονικό σήμα με πλάτος 8 V και περίοδο 20 ms και η τάση  $V_B$  είναι σταθερή με τιμή 3 V, τότε σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, η τάση εξόδου του συγκριτή θα είναι ο τετραγωνικός παλμός με

πλάτος πολύ κοντά στην τάση τροφοδοσίας του τελεστικού ενισχυτή ( $\pm 15 \text{ V}$ ), που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11.



Σχήμα 6.11 – Τάσεις εισόδου και εξόδου του κυκλώματος συγκριτή

Ο τελεστικός ενισχυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση και άλλων εφαρμογών που αφορούν μαθηματικές πράξεις σημάτων, όπως η αφαίρεση σημάτων, η ολοκλήρωση σήματος, η διαφορίση σήματος κ.ά., αλλά και για την υλοποίηση εφαρμογών όπως ανόρθωση ασθενών σημάτων, μετατροπή ρεύματος σε ανάλογη τάση και αντιστρόφως. Για παράδειγμα, μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί το κύκλωμα του ολοκληρωτή τάσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.12– Κύκλωμα ολοκληρωτή τάσης

Θεωρώντας ότι ο τελεστικός ενισχυτής που περιλαμβάνεται στο κύκλωμα είναι ιδανικός και ακολουθώντας ανάλυση παρόμοια με εκείνη που ακολουθήσαμε στην περίπτωση του ανάστροφου ενισχυτή, προκύπτει εύκολα η τάση εξόδου του ολοκληρωτή, η οποία ισούται με το ολοκλήρωμα της τάσης εισόδου ως προς το χρόνο, πολλαπλασιασμένο με έναν σταθερό αρνητικό αριθμό:

$$I_i = I_C \Rightarrow \frac{V_i - V_-}{R} = C \cdot \frac{d(V_- - V_o)}{dt} \Rightarrow \frac{V_i}{R} = -C \cdot \frac{dV_o}{dt} \Rightarrow dV_o = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot V_i \cdot dt \Rightarrow V_o = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int V_i \cdot dt .$$

Εάν εναλλάξουμε τις θέσεις της αντίστασης και του πυκνωτή, προκύπτει κύκλωμα διαφοριστή τάσης,

στην έξοδο του οποίου λαμβάνουμε την παράγωγο του σήματος εισόδου, πολλαπλασιασμένη με έναν σταθερό αρνητικό αριθμό που εξαρτάται από την αντίσταση και τον πυκνωτή του κυκλώματος.

Στο πλαίσιο της τελευταίας εργαστηριακής άσκησης θα χρησιμοποιήσουμε τον τυπικό τελεστικό ενισχυτή LM741C για να υλοποιήσουμε και να μελετήσουμε τα κυκλώματα του ανάστροφου ενισχυτή τάσης, του αθροιστή τάσεων, του συγκριτή τάσεων και του ολοκληρωτή τάσης.

Στον Πίνακα 6.1 που ακολουθεί, καταγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά του τελεστικού ενισχυτή LM741C, μαζί με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή που χρησιμοποιήθηκε για την θεωρητική ανάλυση των κυκλωμάτων.

Βασικά χαρακτηριστικά	Ιδανικός τελεστικός ενισχυτής	Τελεστικός ενισχυτής LM741C
Αντίσταση εξόδου	0	75 Ω
Αντίσταση εισόδου	$\infty$	2 MΩ
Ρεύμα πόλωσης εισόδου	0	80 nA
Ενίσχυση ανοιχτού βρόχου	$\infty$	200.000 ή 106 dB
Λόγος απόρριψης κοινού σήματος	$\infty$	31.500 ή 90 dB
Εύρος ζώνης ενισχυμ. συχνοτήτων	$\infty$	10 Hz
Εύρος ζώνης μοναδιαίας ενίσχυσης	$\infty$	1 MHz

Πίνακας 6.1 – Βασικά χαρακτηριστικά τελεστικών ενισχυτών

# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 4

## ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

### ΣΤΟΧΟΙ

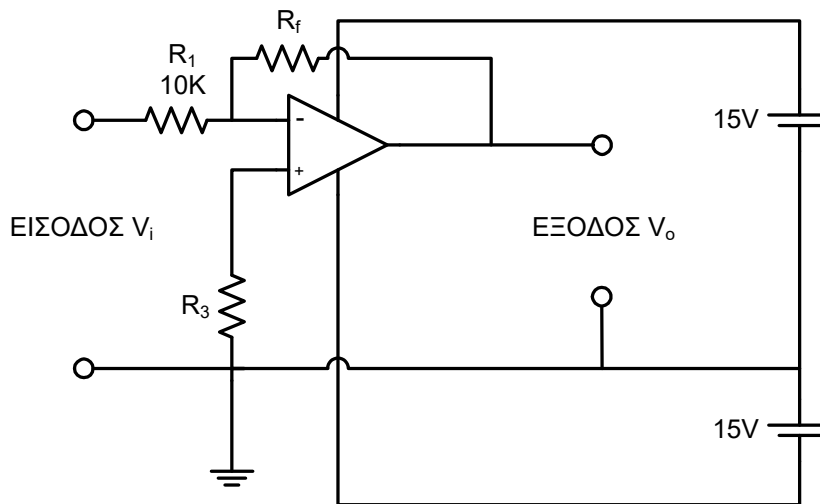
- η κατανόηση της λειτουργίας του τελεστικού ενισχυτή,
- η εξοικείωση με έναν από τους πιο διαδεδομένους τελεστικούς ενισχυτές, τον LM741C,
- η κατανόηση της λειτουργίας των βασικότερων κυκλωμάτων που χρησιμοποιούν τελεστικό ενισχυτή, όπως ο ανάστροφος ενισχυτής ή αντιστροφέας, ο αθροιστής τάσεων, ο συγκριτής τάσεων και ο ολοκληρωτής τάσης.

### ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

#### Βήμα 1. Κύκλωμα Ανάστροφου Ενισχυτή

Χρησιμοποιώντας τον **ΤΕ LM741C** υλοποιήστε κύκλωμα ανάστροφου ενισχυτή και τροφοδοτήστε το με τάση  $\pm 15V$  (σχήμα E4.1). Τοποθετήστε αντίσταση **ανάδρασης**  $R_f = 47K$  και σε σειρά με την **αρνητική είσοδο** του **ΤΕ** τοποθετήστε αντίσταση  $R_1 = 10K$ . Από την **θετική είσοδο** του **ΤΕ** μέχρι τη γείωση τοποθετήστε αντίσταση  $R_3$  την οποία θα υπολογίσετε από την σχέση

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_f}{R_1 + R_f} = \dots\dots\dots$$



Σχήμα E4.1 – Κύκλωμα ανάστροφου ενισχυτή

**Βήμα 2.** Η ενίσχυση τάσης που περιμένουμε να έχει ο ενισχυτής (η καθοριζόμενη από της αντιστάσεις  $R_f$  και  $R_1$ ) είναι:

$$A_v = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \quad (E4.1)$$

**Βήμα 3.** Δώστε στην είσοδο της ενισχυτικής διάταξης εναλλασσόμενο ημιτονικό σήμα συχνότητας  $f = 800 \text{ Hz}$  και πλάτους  $V_i = 0.5 \text{ V}$

Με τον παλμογράφο μετρήστε το πλάτος στην έξοδο του ενισχυτή:

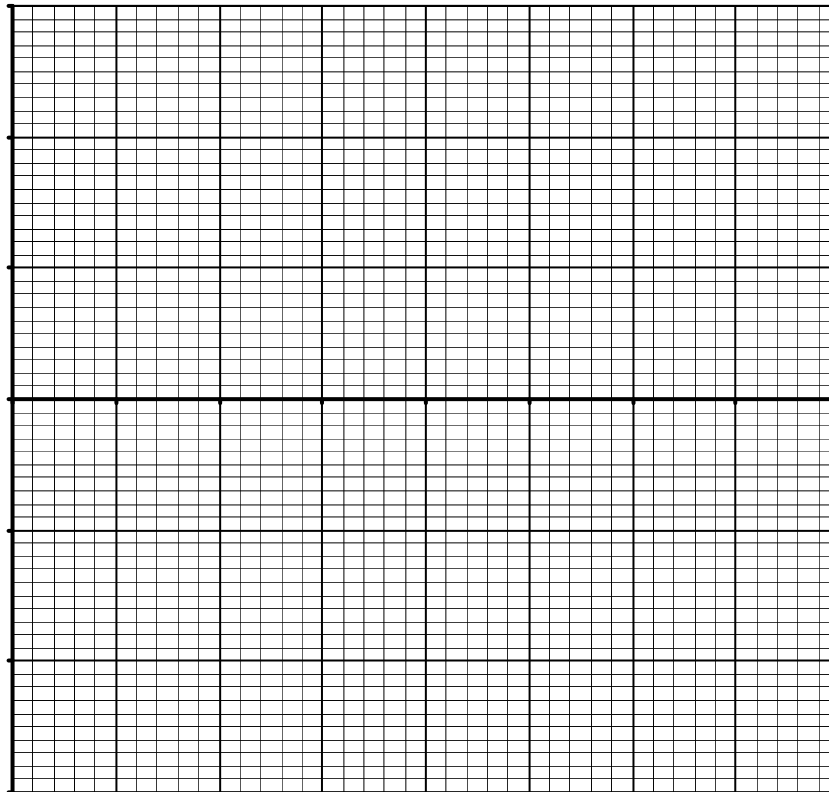
$$V_o = \dots \text{ V}$$

**Βήμα 4.** Άρα από τις μετρήσεις σας προκύπτει ότι η ενίσχυση της ενισχυτικής διάταξης είναι:

$$A_v = \text{—————} = \text{—————} = \text{.....} \quad (\text{E4.2})$$

Συγκρίνετε την ενίσχυση που υπολογίσατε χρησιμοποιώντας τη σχέση (E4.1) με την ενίσχυση που προκύπτει από τις μετρήσεις σας, δηλαδή από τη σχέση (E4.2).

**Βήμα 5.** Χρησιμοποιώντας και τα δύο κανάλια του παλμογράφου παρατηρήστε τις κυματομορφές στην είσοδο και την έξοδο της ενισχυτικής διάταξης (διάγραμμα E4.1).



Διάγραμμα E4.1

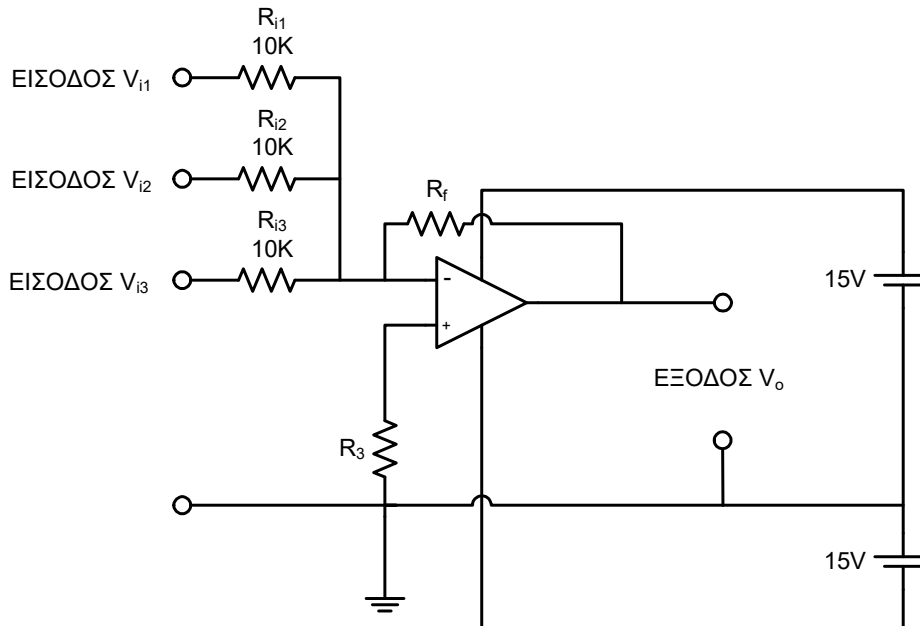
Από το παραπάνω διάγραμμα E4.1 βρείτε την διαφορά φάσης  $\varphi = \dots\dots\dots^\circ$  ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο της ενισχυτικής διάταξης.

**Βήμα 6.** Κύκλωμα Αθροιστή Τάσεων

Υλοποιήστε κύκλωμα αθροιστή τάσεων τριών εισόδων (σχήμα E4.2). Τοποθετήστε αντίσταση ανάδρασης  $R_f = 10 \text{ K}$  ενώ εν σειρά με την αρνητική είσοδο του ΤΕ τοποθετήστε τρεις αντιστάσεις  $R_{i1}, R_{i2}, R_{i3} = 10 \text{ K}$ . Από την θετική είσοδο του ΤΕ μέχρι τη γείωση τοποθετήστε αντίσταση  $R_3$  την οποία θα υπολογίσετε από την σχέση

$$R_3 = \frac{R_{ολ} \cdot R_f}{R_{ολ} + R_f} = \dots\dots\dots$$

$$\text{όπου } R_{ολ} = \frac{1}{\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{R_{i3}}} = \dots\dots\dots$$



Σχήμα E4.2 – Κύκλωμα αθροιστή τάσεων

**Βήμα 7.** Η έξοδος  $V_o$  του αθροιστή θα ισούται με το **αλγεβρικό άθροισμα των εισόδων** του επί την **ένισχυση (βαρύτητα)** που υφίσταται η κάθε είσοδος. Δηλαδή:

$$V_o = A_{v1} \cdot V_{i1} + A_{v2} \cdot V_{i2} + A_{v3} \cdot V_{i3} \quad (E4.3)$$

όπου  $A_{v1}$ ,  $A_{v2}$  και  $A_{v3}$  η επιμέρους ένισχυση της εισόδου  $V_{i1}$ , της εισόδου  $V_{i2}$  και της εισόδου  $V_{i3}$  αντίστοιχα.

Για το παραπάνω κύκλωμα E4.2 ισχύει:

$$A_{v1} = -\frac{R_f}{R_{i1}}, \quad A_{v2} = -\frac{R_f}{R_{i2}}, \quad A_{v3} = -\frac{R_f}{R_{i3}} \quad \text{άρα η σχέση (E4.3) γίνεται:}$$

$$V_o = - (V_{i1} + V_{i2} + V_{i3}) \quad (E4.4)$$

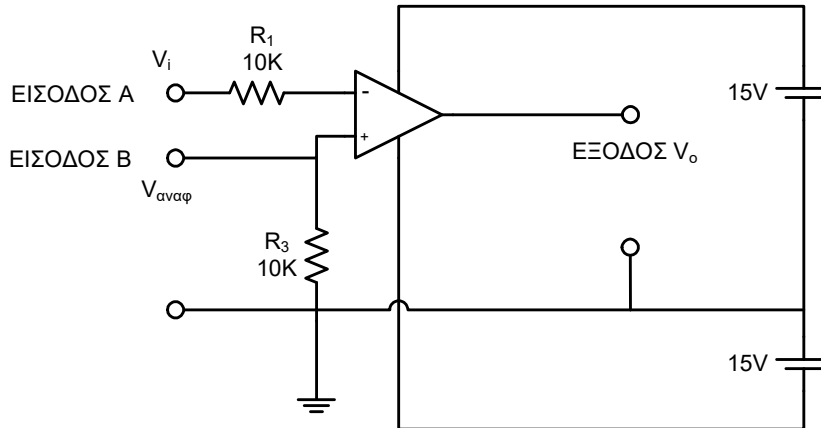
**Βήμα 8.** Εφαρμόστε στις **τρεις εισόδους** του αθροιστή τις ακόλουθες τάσεις:

$$V_{i1} = 8 \text{ Volt}, \quad V_{i2} = 6 \text{ Volt}, \quad V_{i3} = -5 \text{ Volt}$$

Μετρήστε με ηλεκτρονικό βολτόμετρο την τάση  $V_o = \dots \text{ V}$  στην έξοδο του αθροιστή και συγκρίνετέ την με αυτή που υπολογίσατε με τη σχέση (E4.4).

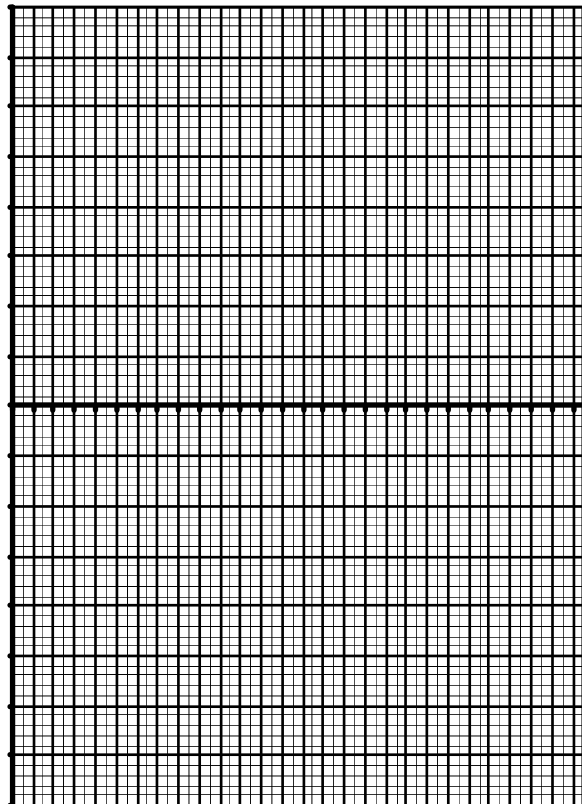
**Βήμα 9. Κύκλωμα Συγκριτή Τάσεων**

Υλοποιήστε το κύκλωμα συγκριτή (σχήμα Ε4.3).



Σχήμα Ε4.3 – Κύκλωμα συγκριτή τάσεων

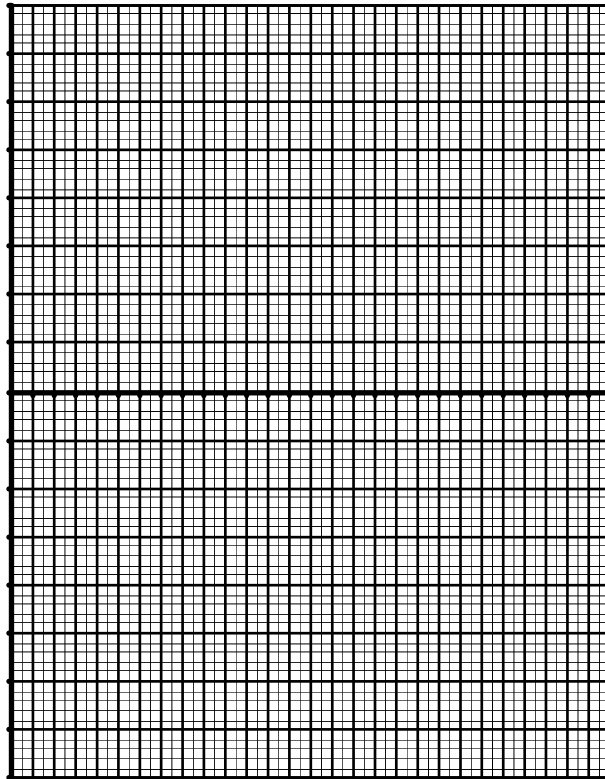
Στην **είσοδο Α** του συγκριτή βάλτε **εναλλασσόμενο ημιτονικό σήμα** συχνότητας  $f = 800\text{Hz}$  και πλάτους  $V_i = 2\text{V}$  ενώ στην **είσοδο Β** (είσοδος αναφοράς) βάλτε **DC τάση**  $V_{αναφ} = +1\text{V}$ . Με τον παλμογράφο παρατηρήστε την **κυματομορφή της τάσης εξόδου  $V_o$**  (διάγραμμα Ε4.2).



Διάγραμμα Ε4.2

Από το διάγραμμα Ε4.2. εξηγήστε την μορφή της κυματομορφής εξόδου του συγκριτή.

**Βήμα 10.** **Μεταβάλατε** την **DC τάση αναφοράς** από  $V_{αναφ} = +1\text{V}$  σε  $V_{αναφ} = -1\text{V}$  και παρατηρήστε πάλι με τον παλμογράφο την **νέα κυματομορφή της τάσης εξόδου** του συγκριτή (διάγραμμα Ε4.3).



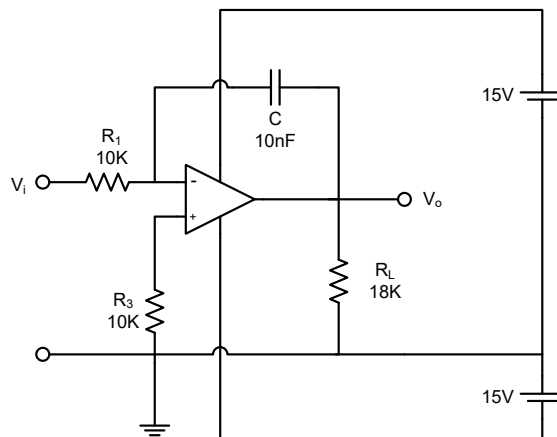
Διάγραμμα E4.3

Συγκρίνοντας το διάγραμμα E4.3 με το διάγραμμα E4.2 και **αντιπαραβάλλοντας** με αυτά που ξέρετε από την θεωρία τι παρατηρείται ότι **άλλαξε** στην κυματομορφή της τάσεως εξόδου του συγκριτή με την νέα τάση αναφοράς  $V_{αναφ} = -1V$ ;

**Βήμα 11.** Μεταβάλλετε την DC τάση αναφοράς ( $V_{αναφ}$ ) από  $-2V$  έως  $+2V$  και παρατηρήστε με τον παλμογράφο τις αλλαγές που υφίσταται η **κυματομορφή** της **τάσης εξόδου** του συγκριτή.

**Βήμα 12.** **Κύκλωμα Ολοκληρωτή Τάσης**

Υλοποιήστε κύκλωμα ολοκληρωτή (σχήμα E4.4) και δώστε στην είσοδο του σήμα **τετραγωνικής μορφής** με πλάτος  $1V$ .



Σχήμα E4.4 – Κύκλωμα ολοκληρωτή τάσης

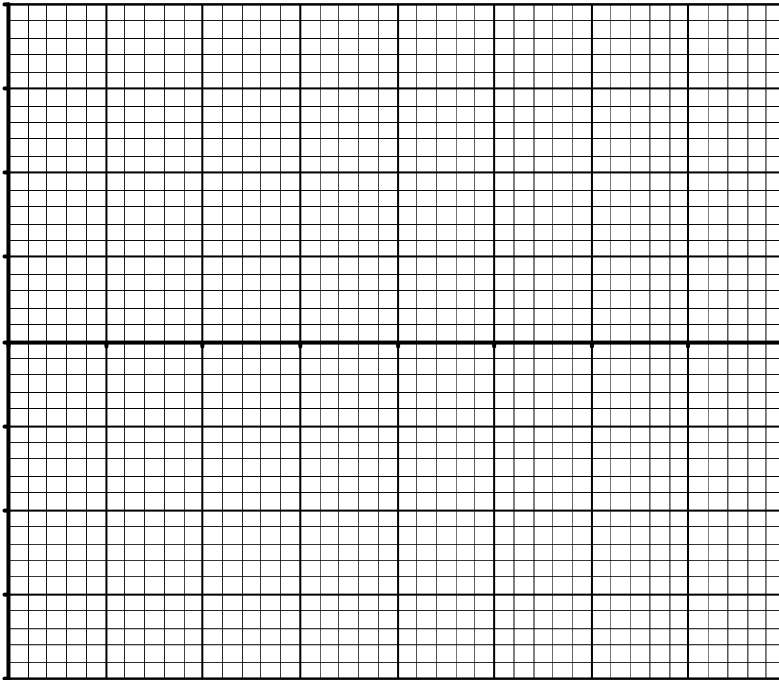
Με τον παλμογράφο παρατηρήστε την **κυματομορφή** της **τάσης εξόδου**  $V_o$  όταν η συχνότητα



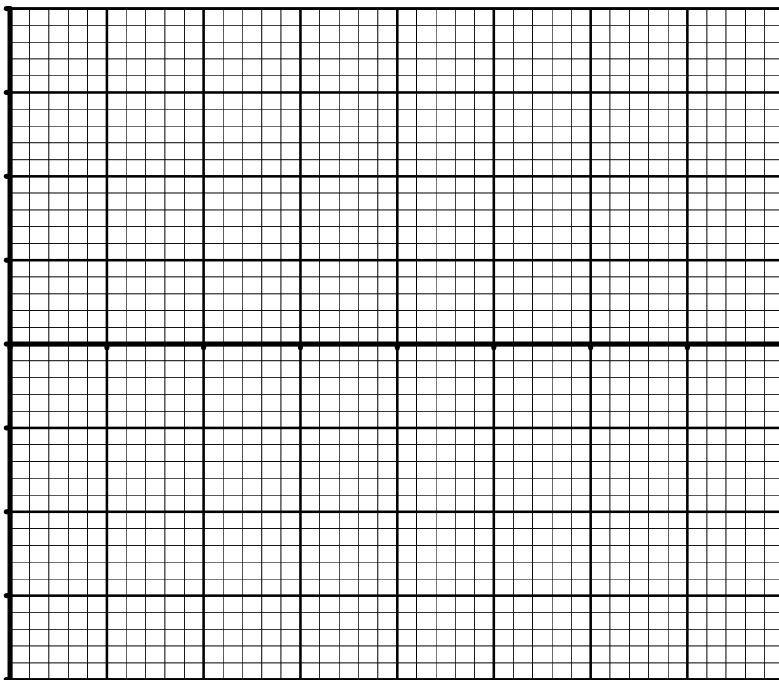
του **τετραγωνικών παλμών** είναι:

**α)  $f = 350\text{Hz}$**

**β)  $f = 3000\text{Hz}$**



**$f = 350\text{Hz}$**



**$f = 3000\text{Hz}$**

Για ποια από τις δύο συχνότητες των **τετραγωνικών παλμών** παρατηρείτε ότι έχετε καλύτερη ολοκλήρωση;

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γ. Χαριτάντη, **Ηλεκτρονικά (Γραμμικά κυκλώματα συνεχούς χρόνου)**, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Αράκυνθος, 2013.
2. R. L. Boylestad, L. Nashelsky, **Ηλεκτρονικές διατάξεις και θεωρία κυκλωμάτων**, Εκδόσεις Τζιόλα, 2012.
3. A. Sedra, K. Smith, **Μικροηλεκτρονικά κυκλώματα**, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2017.
4. R. Jaeger, T. Blalock, **Μικροηλεκτρονική**, Εκδόσεις Τζιόλα, 2018.
5. K. Smith, V. Gaudet, **Εργαστηριακές ασκήσεις βασικών ηλεκτρονικών**, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2019.
6. Γ. Τσιβίδη, **Εισαγωγικό εργαστήριο κυκλωμάτων και ηλεκτρονικής**, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2018.
7. Μ. Κιζήρογλου, **Εργαστηριακές ασκήσεις ηλεκτρονικής**, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα ([www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr)), 2015.