

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Α' ΤΕΥΧΟΣ

Δρ. Ιωάννης Π. Μακρής



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΧΑΝΙΑ 2005

1^η ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

1. Σκοπός της άσκησης

Η άσκηση συνίσταται από μεθόδους ελέγχου ενός ενισχυτικού κυκλώματος ακουστικών συχνοτήτων απαραίτητες για τη διαπίστωση της απόδοσής του και των χαρακτηριστικών λειτουργίας του, στοιχεία που ένας ηλεκτρονικός είναι απαραίτητο να γνωρίζει για τέτοιες διατάξεις που δεν αποτελούν μια απλή συνδεσμολογία.

Συγκεκριμένα, με την παρούσα άσκηση επιδιώκονται: α) η μέτρηση της ισχύος εξόδου, β) η μέτρηση απόκρισης συχνότητας του ακουστικού κυκλώματος, γ) ο έλεγχος της παραμόρφωσης με τη μελέτη τετραγωνικού σήματος εισόδου και δ) η μέτρηση της στάθμης θορύβου.

Οι σπουδαστές ενθαρρύνονται να εντρυφήσουν στα θέματα αυτά ανατρέχοντας σε σχετική βιβλιογραφία.

2. Συνοπτική θεωρία

Η ισχύς αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό λειτουργίας κάθε ενισχυτή και συνδέεται άμεσα με την ενίσχυση που δύναται να παρέχει και μετριέται σε Watt. Ο ορισμός της ισχύος είναι το γινόμενο της τάσης που υπάρχει στα άκρα μιας αντίστασης φόρτου R_L , επί το ρεύμα που τη διαρρέει: $P=V \cdot I$. Συνδυάζοντας τη

σχέση αυτή με το νόμο του Ohm καταλήγουμε στην έκφραση: $P = \frac{V^2}{R_L}$.

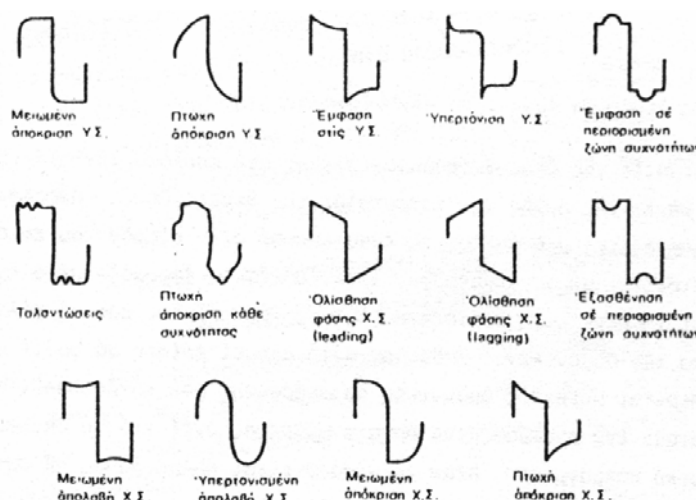
Συνεπώς, η ισχύς εξόδου ενός ενισχυτή καθορίζεται παρατηρώντας την τάση εξόδου στα άκρα ονομαστικού φορτίου με ωμική (dc) αντίσταση συνήθως 8Ω. Όμως η μέγιστη ισχύς εξόδου ενός κυκλώματος ακουστικού ενισχυτή εξαρτάται από μεταβολές του φόρτου (ευαισθησία φόρτου). Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι το όριο μέγιστης ισχύος ενός ενισχυτή είναι άμεσα συνδεδεμένο με μια ορισμένη τιμή παραμόρφωσης του σήματος εισόδου η οποία δεν επιτρέπεται να ξεπερνιέται σε όλο το ακουστικό εύρος συχνοτήτων (20 Hz μέχρι 20 kHz) και για τις διάφορες ισχείς λειτουργίας (π.χ., από 2W έως 100W) του ενισχυτή.

Η ισχύς εξόδου ενός ενισχυτή εξαρτάται σημαντικά από τη συχνότητα του σήματος εισόδου. Το χαρακτηριστικό αυτό καλείται απόκριση συχνότητας του ενισχυτή και έχει άμεση επίπτωση στην παραμόρφωση του σήματος και συνεπαγόμενα στη μέγιστη ισχύ εξόδου του ενισχυτή. Η απόκριση συχνότητας ενός ακουστικού ενισχυτικού κυκλώματος μετριέται μεταβάλλοντας το σήμα εισόδου κατά συχνότητα (αλλά όχι κατά πλάτος) σε όλη την περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας του κυκλώματος και παρέχεται η σχετική ισχύς εξόδου (σε dB) σε όλο το ακουστικό εύρος συχνοτήτων (20 Hz μέχρι 20 kHz) αναφερόμενοι στην ισχύ εξόδου σε είσοδο 1kHz (καμπύλη απόκρισης).

Συνοψίζοντας τα παραπάνω η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (F.C.C., Federal Commission for Communications) θέσπισε προϋποθέσεις απαραίτητες για τη μέτρηση της ισχύος των ενισχυτών οι οποίες υιοθετήθηκαν σχεδόν από όλες τις υπόλοιπες χώρες και εφαρμόζονται από όλους τους κατασκευαστές παγκόσμια. Οι προϋποθέσεις αυτές θα πρέπει να αναφέρονται λεπτομερώς όπου παρέχεται η ισχύς εξόδου ενός ενισχυτή και είναι οι εξής:

1. Η ισχύς μετριέται και με τα δυο κανάλια οδηγούμενα ταυτόχρονα.
2. Πάντοτε αναφέρεται η τιμή της αντίστασης φόρτου στην οποία γίνεται η μέτρηση.
3. Μαζί με την τιμή της ισχύος θα πρέπει να αναφέρεται το ποσοστό παραμόρφωσης που παρατηρήθηκε. Η παραμόρφωση δεν πρέπει να ξεπερνά το ποσοστό αυτό σε καμία τιμή της ισχύος λειτουργίας από τα 0,2 W έως τη μέγιστη για όλες τις συχνότητες από 20Hz έως 20kHz.
4. Το όριο μέγιστης ισχύος που δίδεται θα πρέπει να είναι η ελάχιστη τιμή από 20Hz έως 20kHz.
5. Πριν από κάθε μέτρηση ο ενισχυτής θα πρέπει να είναι σε λειτουργία επί μισή ώρα στο 1/3 της ισχύος του για συχνότητα εισόδου 1kHz, γιατί;

Ο έλεγχος της παραμόρφωσης που ενδεχομένως προκαλεί μία ενισχυτική διάταξη με παλμογράφο είναι εφικτός και περισσότερο αποτελεσματικός με τετραγωνικές κυματομορφές στην είσοδο λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε περιττές αρμονικές, γιατί: Η ιδέα είναι ότι μελετάται η διαφοροποίηση της εξόδου του ενισχυτή από την κυματομορφή εισόδου (που επίσης δύναται να παρατηρείται στον παλμογράφο). Αν υπάρχει μεταβολή στην κυματομορφή εξόδου, η φύση της μεταβολής συχνά θα αποκαλύπτει την αιτία της παραμόρφωσης (βλ. Σχήμα 1). Συνήθως παρατηρείται μεταβολή της απόκρισης του ενισχυτή στις υψηλές συχνότητες, δηλαδή στις ανώτερες περιττές αρμονικές του τετραγωνικού σήματος.



Σχήμα 1: Ανάλυση και επεξήγηση παραμορφώσεων τετραγωνικού σήματος

Αν η βαθμίδα κατακόρυφης απόκλισης του παλμογράφου είναι αρκετά ευαίσθητη (μετρήσιμη απόκλιση της τάξης του 1mV), ο παλμογράφος δύναται να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο και τη μέτρηση της στάθμης θορύβου μιας ενισχυτικής διάταξης. Η μέθοδος συνίσταται στη μέτρηση της εξόδου του ενισχυτή με τους ρυθμιστές έντασης ή απολαβής (αν υπάρχουν) στο μέγιστο αλλά χωρίς σήμα στην είσοδο. Είναι πιθανό η ένδειξη θορύβου να οφείλεται σε θόρυβο από τους αγωγούς-οδηγούς. Για τη διαπίστωση της περίπτωσης αυτής οι αγωγοί αποσυνδέονται από το υπό έλεγχο κύκλωμα, αλλά όχι από τον παλμογράφο. Εάν είναι πιθανή η παρουσία θορύβου στην έξοδο του ενισχυτή από τη συχνότητα της γραμμής παροχής ισχύος ή άλλη πηγή, ρυθμίστε τη σάρωση του παλμογράφου στη συχνότητα του δικτύου. Αν τότε εμφανιστεί ένα στάσιμο δείγμα σήματος, αυτό θα οφείλεται σε θόρυβο από το δίκτυο τροφοδοσίας. Στην περίπτωση που ο θόρυβος δεν παράγεται από τη συχνότητα του δικτύου, τότε εναλλακτικά θα είναι δυνατό να αποδοθεί είτε σε ταλάντωση του κυκλώματος, είτε σε τυχαίο θόρυβο. Για τη διάκριση των ενδεχομένων αυτών βραχυκυκλώνουμε τους ακροδέκτες εισόδου του ενισχυτή. Αν η στάθμη θορύβου παραμένει, τότε προφανώς θα οφείλεται σε ταλάντωση του ενισχυτικού κυκλώματος.

Περιγραφή της αρχής λειτουργίας του Βατομέτρου Feedback EW 604

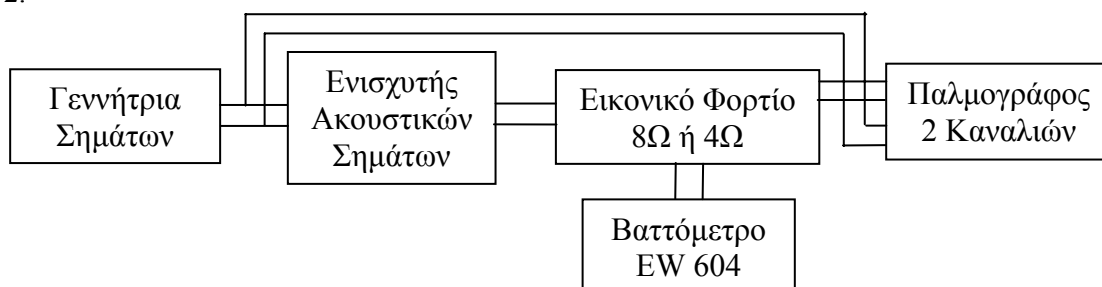
1. Τροφοδοσία: Διακόπτης συνοδευόμενος από πράσινο ενδείκτη (Led).
2. Επιλογέας Ρεύματος: Βηματικός επιλογέας οκτώ θέσεων.
3. Επιλογέας Τάσης Βηματικός επιλογέας οκτώ θέσεων.
4. Ακροδέκτες μετρήσεων: Τέσσερις κόκκινες θήκες (μπόρνες). Δύο για σύνδεση τροφοδοσίας και δύο για σύνδεση με φορτίο.
5. Αναλογική ένδειξη κινητού πηνίου με καθρέπτη μειώσεως σφάλματος παράλλαξης βαθμονομημένη σε Watts (W).
6. Zero: Κομβίο για τη ρύθμιση του μηδενισμού του οργάνου.
7. x2: Πιεστικός διακόπτης αύξησης ευαισθησίας οργάνου.
8. REV: Πιεστικός διακόπτης για αναστροφή της απόκλισης.

Οι κλίμακες τάσης και ρεύματος πρέπει να επιλεγούν ώστε να ταιριάζουν με το ρεύμα και την τάση που επικρατούν στο προς μέτρηση κύκλωμα. Αυτό επιτυγχάνεται με προοδευτική αύξηση της ευαισθησίας κάθε ένα βηματικού επιλογέα κλίμακας τάσης και ρεύματος ώσπου ο αντίστοιχος ενδείκτης (Led) να ανάψει. Κατόπιν ο εκάστοτε επιλογέας επιστρέφεται στην αμέσως προηγούμενη θέση.

Επισημαίνεται ότι για τη μέτρηση της ισχύος εξόδου του υπό έλεγχο ενισχυτή, η έξοδος αυτού θα πρέπει να συνδεθεί στους ακροδέκτες με την ένδειξη «Load» (φορτίο), και το οποιοδήποτε φορτίο του να συνδέεται στην ένδειξη «Supply» (τροφοδοσία), γιατί:

3. Πειραματική διαδικασία

α) Αναγνωρίστε την οργανολογία της άσκησης και πραγματοποιήστε τη συνδεσμολογία που αποδίδεται στο Σχήμα 2.



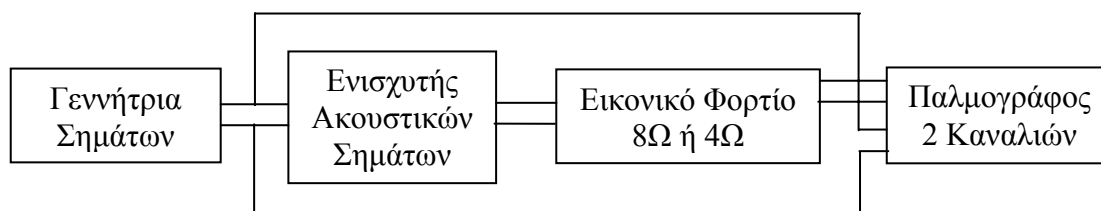
Σχήμα 2: Σχηματικό διάγραμμα διάταξης για τη μελέτη της απόκρισης συχνότητας του ενισχυτή.

β) Τοποθετείστε το ρυθμιστικό κομβίο «tone» στη μέση και ρυθμίστε τον επιλογέα «volume» σε τέτοια θέση ώστε το κύκλωμα του ενισχυτή να τροφοδοτείται με περίπου 0.2A ρεύμα για συχνότητα ημιτονικής εισόδου 1kHz επιδιώκοντας το πλάτος της κυματομορφής εξόδου να μη ψαλιδίζεται. Διατηρείστε την έξοδο της γεννήτριας στην τάση αυτή σε όλη τη διάρκεια του ελέγχου.

γ) Μεταβάλλοντας τη συχνότητα της γεννήτριας με μικρό βήμα στις χαμηλές και στις υψηλές ακουστικές συχνότητες (π.χ. 50Hz και 500Hz αντίστοιχα) πάρτε κατάλληλο αριθμό μετρήσεων για τη μελέτη της απόκρισης του ενισχυτή στο φασματικό εύρος 30Hz έως 20kHz.

δ) Επαναλάβετε τα βήματα α) έως και γ) για αντίσταση φόρτου 4Ω.

ε) Πραγματοποιήστε τη συνδεσμολογία που αποδίδεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Σχηματικό διάγραμμα διάταξης για τον έλεγχο παραμόρφωσης και στάθμης θορύβου στην έξοδο ενισχυτή.

στ) Τροφοδοτήστε την είσοδο του ενισχυτή με τετραγωνικό σήμα και ελέγξτε την κυματομορφή εξόδου για πιθανότητα παραμόρφωσης. Καταγράψτε τις παρατηρήσεις σας.

ζ) Σε εφαρμογή των όσων ελέγχθηκαν στη συνοπτική θεωρία διαπιστώστε την ύπαρξη και το είδος του θορύβου στην έξοδο ενισχυτή και μετρήστε τη στάθμη του (peak to peak).

4. Επεξεργασία

- i) Αποδώστε σε πίνακες τα αποτελέσματα των μετρήσεών σας με τα σφάλματα που τα επιβαρύνουν.
- ii) Αποδώστε τις καμπύλες απόκρισης συχνότητας του ενισχυτή για αντιστάσεις φόρτου 8Ω και 4Ω αντίστοιχα. Ερμηνεύστε τις διαφοροποιήσεις.
- iii) Εντοπίστε το φασματικό εύρος λειτουργίας του ενισχυτή (πτώση 3dB αναφορικά με την ισχύ εξόδου σε σήμα εισόδου 1kHz) σε κάθε περίπτωση.
- iv) Προσπαθήστε να διακρίνετε στις καμπύλες απόκρισης τον παράγοντα εύρους ζώνης ισχύος (περιοχή συχνοτήτων όπου το κύκλωμα ενίσχυσης παρέχει πλήρη ισχύ εξόδου).
- v) Αναφέρετε τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων και μετρήσεών σας για την ύπαρξη παραμόρφωσης και τη στάθμη θορύβου στην έξοδο του ενισχυτή. Ποιες οι διαπιστώσεις σας;
- vi) Απαντήστε στα «γιατί;» που εμφανίζονται στο κείμενο της άσκησης.
- vii) Σύνοψη και συμπεράσματα.

Βιβλιογραφία

- Εργαστηριακές Ασκήσεις και Κατασκευές Ηλεκτρονικής, Δ. Μαυράκης, 1982, Αθήνα.
- Ηλεκτρακουστική, Γ. Παπανικολάου, 1985, University Studio Press.
- Ηλεκτρονικά Όργανα και Μετρήσεις, Σ. Πακτίτης, 1989, Εκδόσεις Ίων.
- Ηλεκτρονικές Κατασκευές, Δ. Ρήγας, 2000, Εκδόσεις Τζιόλα.

2^η ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

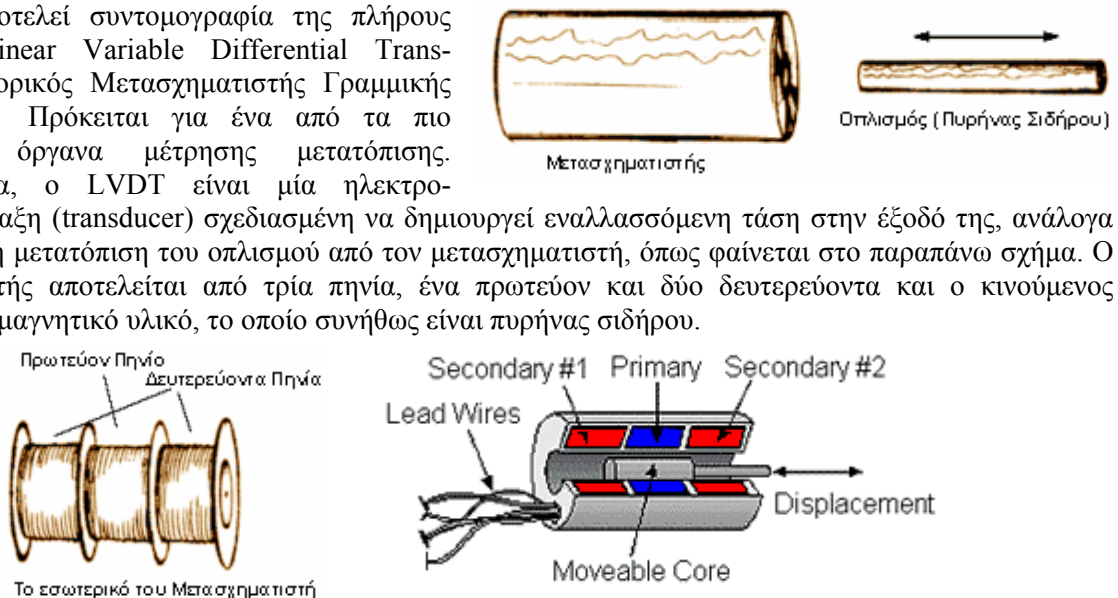
ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

1. Σκοπός της άσκησης

Στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση μελετάται η συμπεριφορά του αισθητήρα Linear Variable Differential Transformer (Διαφορικός Μετασχηματιστής Γραμμικής Μεταβολής, LVDT). Σκοπός της άσκησης είναι η βαθμονόμηση του αισθητήρα με τη συνδρομή αναλογικού μικρομέτρου ακριβείας. Επίσης εξετάζονται διαφορετικές συνδεσμολογίες και επιχειρείται ο καθορισμός της γραμμικής περιοχής λειτουργίας του.

2. Συνοπτική θεωρία

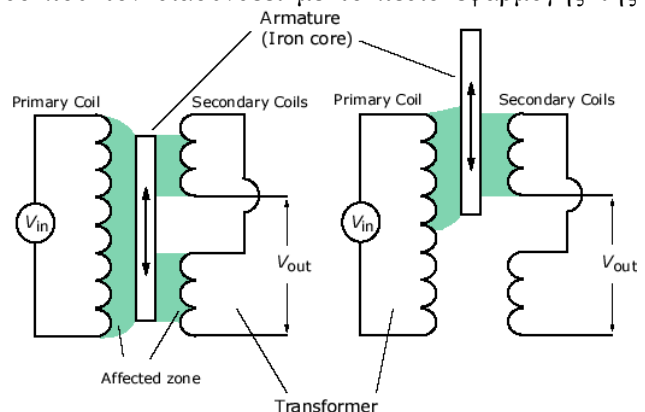
Ο LVDT αποτελεί συντομογραφία της πλήρους ονομασίας Linear Variable Differential Transformer (Διαφορικός Μετασχηματιστής Γραμμικής Μεταβολής). Πρόκειται για ένα από τα πιο διαδεδομένα όργανα μέτρησης μετατόπισης. Αναλυτικότερα, ο LVDT είναι μία ηλεκτρομηχανική διάταξη (transducer) σχεδιασμένη να δημιουργεί εναλλασσόμενη τάση στην έξοδό της, ανάλογα με την σχετική μετατόπιση του οπλισμού από τον μετασχηματιστή, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Ο μετασχηματιστής αποτελείται από τρία πηνία, ένα πρωτεύον και δύο δευτερεύοντα και ο κινούμενος οπλισμός από μαγνητικό υλικό, το οποίο συνήθως είναι πυρήνας σιδήρου.



Αρχή λειτουργίας του LVDT

Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μεταβολή της αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ του πρωτεύοντος πηνίου και καθενός από τα δύο δευτερεύοντα πηνία, όταν ο πυρήνας κινείται κατά μήκος στο εσωτερικό του. Ο πυρήνας οδηγείται από μια μη-σιδηρομαγνητική ράβδο που τον διασυνδέει με το πεδίο εφαρμογής της κίνησης.

Καθώς ο οπλισμός κινείται μέσα στον μετασχηματιστή, επιδρά σε ένα συγκεκριμένο αριθμό σπειρωμάτων των πηνίων με αποτέλεσμα να παράγουν μία μοναδική τάση εξόδου. Το πρωτεύον πηνίο τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση οπότε στη στην κεντρική (συμμετρική) θέση του οπλισμού οι τάσεις που επάγονται σε κάθε δευτερεύον πηνίο είναι ίσες και αλληλο-αναιρούνται. Όταν ο πυρήνας αποκλίνει από εκείνη τη θέση, η μία από τις δύο δευτερεύουσες τάσεις αυξάνει και η άλλη μειώνεται κατά την ίδια ποσότητα.



Η εξίσωση που περιγράφει την αναλογία της τάσης εξόδου με τον αριθμό των σπειρωμάτων είναι:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_{out}}{N_{in}}, \text{ όπου } V_{out} \text{ η τάση εξόδου, } V_{in} \text{ η τάση εισόδου, } N_{out} \text{ ο αριθμός των σπειρωμάτων των}$$

δευτερευόντων πηνίων και N_{in} ο αριθμός των σπειρωμάτων του πρωτεύοντος πηνίου.

Η συνδεσμολογία του παραπάνω σχήματος είναι η πιο διαδεδομένη για LVDT-διατάξεις και ονομάζεται **ανοιχτή συνδεσμολογία**. Ο αριθμός των σπειρωμάτων των πηνίων είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος σε όλο το μήκος του μετασχηματιστή με αποτέλεσμα η τάση εξόδου να είναι ανάλογη με τη γραμμική μετατόπιση του οπλισμού, καθώς αυτός κινείται μέσα στον μετασχηματιστή. Έτσι η εξίσωση για την μετατόπιση είναι:

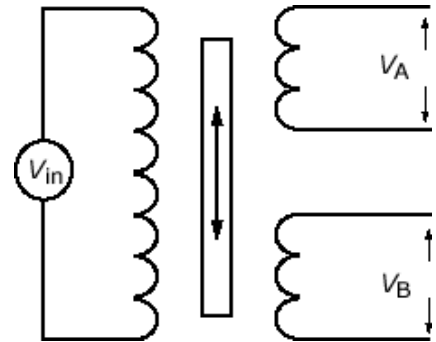
$$D = M \cdot V_{out}$$

όπου D η μετατόπιση του οπλισμού σε σχέση με τον μετασχηματιστή και M η ευαισθησία του LVDT.

Μια επίσης αρκετά διαδεδομένη συνδεσμολογία είναι αυτή του **αυτοσταθμιζόμενου LVDT**, ο οποίος χρησιμοποιεί ξεχωριστά τις τάσεις από τα δευτερεύοντα πηνία (V_A , V_B) με αποτέλεσμα η μετατόπιση να δίδεται από τη σχέση:

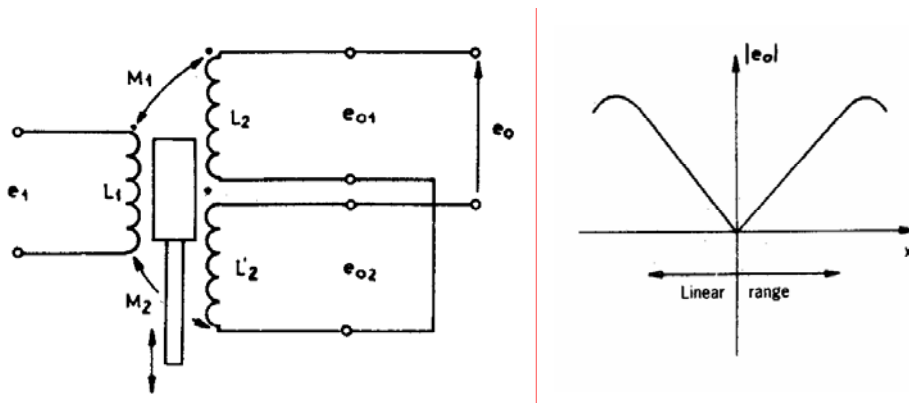
$$D = M \cdot \frac{V_A - V_B}{V_A + V_B}$$

Η συνδεσμολογία αυτή επιτυγχάνει υψηλή αναισθησία στις μεταβολές του ρεύματος διέγερσης και της συχνότητας και στις αλλαγές θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και των πηνίων.

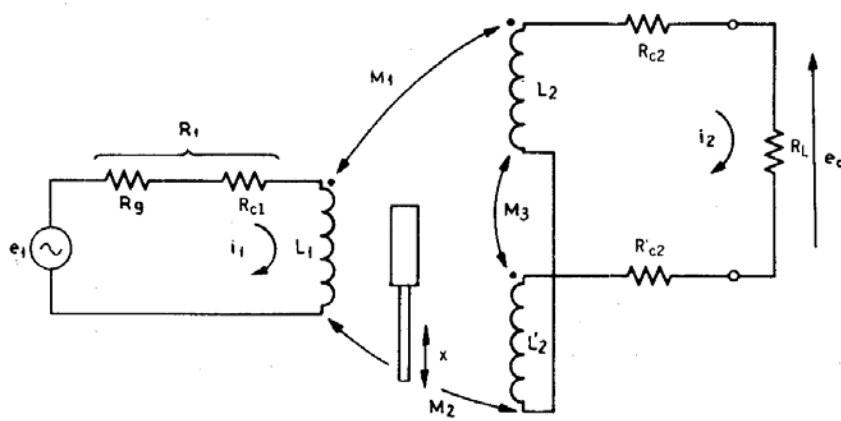


Ηλεκτρικό ισοδύναμο του LVDT

Το ηλεκτρικό ισοδύναμο του LVDT φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Αν θεωρήσουμε μη αμελητέες τις εσωτερικές αντιστάσεις των πηνίων, της πηγής και του φορτίου, τότε το κύκλωμα γίνεται:



Αν η ολική αντίσταση στο δευτερεύον κύκλωμα οριστεί ως R_2 , είναι:

$$R_2 = R_{C2} + R'_{C2} + R_L \quad (1)$$

Η εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff στο πρωτεύον κύκλωμα παρέχει τη σχέση:

$$E_1 = I_1(R_1 + sL_1) + I_2(-M_1s + M_2s) \quad (2)$$

και στο δευτερεύον:

$$0 = I_1(-sM_1 + sM_2) + I_2(R_2 + sL_2 + sL'_2 - sM_3) \quad (3)$$

Ο συνδυασμός των εξισώσεων (1) και (2) δίδει:

$$I_2 = \frac{s(M_2 - M_1)E_1}{s^2[L_1(L_2 + L'_2 - 2M_3) - (M_2 - M_1)^2] + s[R_2L_1 + R_1(L_2 + L'_2 - 2M_3)] + R_1R_2} \quad (4)$$

Η έξοδος της τάσης είναι τότε:

$$E_0 = I_2R_L \quad (5)$$

Στην κεντρική θέση, $M_1=M_2$, και σύμφωνα με την (4) και την (5), $E_0=0$, όπως προαναφέρθηκε. Για τις άλλες θέσεις του πυρήνα, L_1 , L_2 , L'_2 , M_3 και M_2-M_1 εμφανίζουν την ακόλουθη προσεγγιστική συμπεριφορά: ο M_3 μεταβάλλεται αργά καθώς ο πυρήνας αποκλίνει από το x_0 , το M_2-M_1 παρουσιάζει γρήγορη γραμμική μεταβολή για μετατοπίσεις αριστερά και δεξιά του x_0 , το $L_2+L'_2$ είναι σχεδόν σταθερό, και το L_1 μεταβάλλεται αργά όταν ο πυρήνας αποκλίνει από το x_0 .

Για να αναλύσουμε την σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου και της θέσης του πυρήνα, είναι χρήσιμο να θεωρούμε πρώτα την επίδραση της αντίστασης φορτίου R_L . Αν δεν υπάρχει φορτίο συνδεδεμένο στο δευτερεύον, η τάση εξόδου ελαττώνεται σε:

$$E_0 = \frac{s(M_1 - M_2)E_1}{sL_1 + R_1} \quad (6)$$

Υπό τις συνθήκες αυτές το πρωτεύον ρεύμα είναι:

$$I_1 \approx \frac{E_1}{sL_1 + R_1} \quad (7)$$

Έτσι το I_1 είναι σχεδόν σταθερό ανεξάρτητα της θέσης του πυρήνα. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (6) και (7), προκύπτει:

$$E_0 = (M_2 - M_1)sI_1 \quad (8)$$

η οποία δείχνει ότι το E_0 είναι ανάλογο του M_2-M_1 , και επομένως της θέσης του πυρήνα, και 90° εκτός φάσης αναφορικά με το πρωτεύον ρεύμα. Επίσης, από την (6) συμπεραίνουμε ότι ο λόγος E_0/E_1 έχει μια υψηλόσυχνη απόκριση αναφορικά με την συχνότητα διέγερσης. Δηλαδή, η ευαισθησία αυξάνει με τη συχνότητα διέγερσης. Όταν η τιμή της είναι R_1/L_1 , η ευαισθησία είναι $\sim 70\%$ (-3dB) αυτής που χαρακτηρίζει τον αισθητήρα σε συχνότητες διέγερσης 10 φορές υψηλότερες.

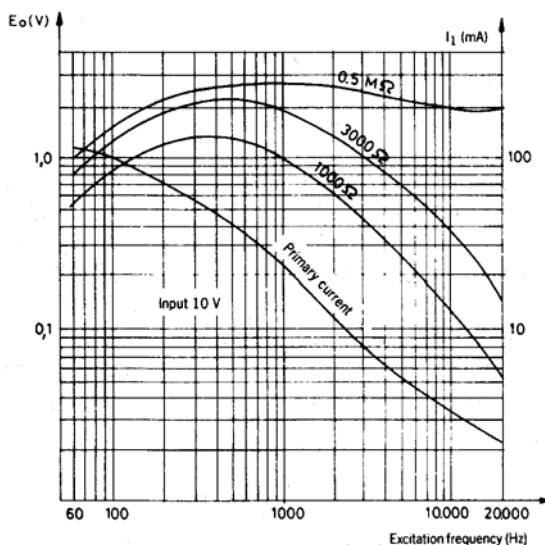
Αν υπάρχει φορτίο συνδεδεμένο στο δευτερεύον κύκλωμα, δεχόμαστε ότι το $L_2+L'_2-2M_3$ παραμένει σταθερό και ανεξάρτητο από τη θέση του πυρήνα και το ορίζουμε $\sim 2L_2$ και αν επιπλέον θεωρήσουμε ότι $2L_2L_1 \gg (M_2 - M_1)^2$, τότε η τάση εξόδου εκφράζεται:

$$E_0 = \frac{s(M_1 - M_2)R_L E_1}{s^2 2L_1L_2 + s(R_2L_1 + 2R_1L_2) + R_1R_2} \quad (9)$$

Παρατηρούμε ότι η ευαισθησία αυξάνεται όταν η αντίσταση φορτίου αυξάνει. Επίσης, αυξάνεται αρχικά όταν και η συχνότητα διέγερσης αυξάνει, αλλά μετά από μία δεδομένη συχνότητα αρχίζει και μειώνεται. Το παρακάτω σχήμα αποδίδει αυτή τη συμπεριφορά για ένα LVDT.

Από την τελευταία εξίσωση μπορούμε ακόμη να συμπεράνουμε ότι υπάρχει μια μετατόπιση φάσης μεταξύ της πρωτεύουσας και των δευτερευόντων τάσεων, η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα διέγερσης. Αυτή η μετατόπιση φάσης είναι μηδενική στη συχνότητα:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{R_1R_2}{2L_1L_2} \right)^{1/2} \quad (10)$$



η οποία είναι η συχνότητα όπου η ευαισθησία αρχίζει να μειώνεται. Αν το πρωτεύον πηνίο διεγείρεται στη συχνότητα f_n , τότε η τάση εξόδου δεν εξαρτάται από τη συχνότητα διέγερσης και είναι:

$$E_0 = \frac{(M_1 - M_2)R_L}{R_2L_1 + 2L_2R_1} E_1 \quad (11)$$

Συνεπώς, η τάση εξόδου είναι ανάλογη της διαφοράς της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ του πρωτεύοντος και καθενός από τα δευτερεύοντα πηνία. Αν η διαφορά στην αμοιβαία σύζευξη είναι ανάλογη της θέσης του πυρήνα, τότε και η τάση εξόδου θα είναι επίσης ανάλογη. Παρατηρούμε ότι έστω και αν η διάταξη παράγει μια μεταβολή στην αμοιβαία εμπέδηση σαν αποτέλεσμα μετατόπισης, το σήμα εξόδου είναι στην πραγματικότητα μια τάση διαμορφωμένη κατά πλάτος.

Η ιδανική συμπεριφορά που μόλις περιγράφηκε επηρεάζεται από διαφόρους περιοριστικούς παράγοντες

στην πραγματική λειτουργία. Σαν πρώτος δύναται να αναφερθεί ότι στην κεντρική θέση των πραγματικών διατάξεων, η τάση εξόδου δεν είναι μηδέν αλλά έχει μια ελάχιστη τιμή. Αυτό οφείλεται στην παρουσία *παρασιτικής χωρητικότητας* ανάμεσα στο πρωτεύον και τα δευτερεύοντα πηνία, η οποία δεν εξαρτάται από την θέση του πυρήνα και επίσης στην έλλειψη συμμετρίας των πηνίων και των μαγνητικών κυκλωμάτων. Αυτό το σφάλμα είναι συνήθως μικρότερο από 1% της πλήρους κλίμακας εξόδου.

Ένας άλλος παράγοντας είναι η παρουσία αρμονικών συνιστωσών στην τάση εξόδου, ιδιαίτερα στη μηδενική θέση. Η πιο σημαντική αρμονική είναι η τρίτη, η οποία προκαλείται από μαγνητικό κορεσμό των υλικών. Αυτή η παραμόρφωση μπορεί εύκολα να μειωθεί με φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων στην τάση εξόδου.

Η θερμοκρασία είναι μια άλλη πιθανή πηγή παρεμβολής λόγω της επίδρασής της στην ηλεκτρική αντίσταση του πρωτεύοντος πηνίου. Μια αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης η οποία μειώνει το πρωτεύον ρεύμα και την τάση εξόδου, αν η διέγερση ήταν μια σταθερή τάση. Αυτό υποδηλώνει ότι είναι καλύτερο να διεγείρεται με σταθερό ρεύμα από μια σταθερή τάση. Αν η τάση διέγερσης είναι αρκετά υψηλή, τότε η εμπέδηση του L_1 επικρατεί αυτής του R_1 , και οι επιδράσεις της θερμοκρασίας είναι μικρότερες. Οι θερμικές μετατοπίσεις μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$V_T = V_{25}[1 + a(T - 25) + \beta(T - 25)^2] \quad (12)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$, a είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τη συχνότητα και β είναι επίσης μια σταθερά.

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των LVDT

Πλεονεκτήματα:

- ✓ Σχετικά μικρό κόστος, λόγω της μεγάλης διάδοσής του.
- ✓ Συμπαγής και σθεναρή κατασκευή, με μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας.
- ✓ Μηδενικές τριβές. Ο οπλισμός δεν έρχεται σε επαφή με τα πηνία του μετασχηματιστή, με αποτέλεσμα να έχει πολύ μεγάλο χρόνο ζωής. Ένας μέσος χρόνος ζωής LVDT είναι 288 χρόνια.
- ✓ Υπάρχει ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ του πρωτεύοντος και των δευτερευόντων πηνίων, το οποίο επιτρέπει διαφορετικές τάσεις αναφοράς και σημεία γείωσης. Αυτό είναι πολύ σημαντικό πλεονέκτημα για να αποφεύγονται βρόχοι γείωσης. Επίσης προσφέρουν ηλεκτρική μόνωση μεταξύ του πυρήνα (αισθητήρα) και του ηλεκτρικού κυκλώματος, καθώς η σύζευξη μεταξύ τους είναι μαγνητική.
- ✓ Υψηλή επαναληψιμότητα (ειδικά για τη μηδενική θέση) λόγω της συμμετρίας του και ευαισθησία κατεύθυνσης.
- ✓ Υψηλή γραμμικότητα.
- ✓ Υψηλή ευαισθησία, αν και εξαρτάται από τη συχνότητα διέγερσης.
- ✓ Ευρεία δυναμική απόκριση.
- ✓ Ισχυρό σήμα εξόδου, σε σχέση με τα σήματα θορύβου και μικρή σύνθετη αντίσταση.
- ✓ Αμελητέα τιμή υστέρησης.

- ✓ Μικρός χρόνος απόκρισης που περιορίζεται μόνο από την αδράνεια του πυρήνα και τον χρόνο ανταπόκρισης των ενισχυτών.
- ✓ Σε περίπτωση υπέρβασης των ορίων μετατόπισης του LVDT, δεν επέρχεται μόνιμη βλάβη.

Μειονεκτήματα:

- ✓ Ο πυρήνας θα πρέπει να έρχεται σε επαφή, άμεσα ή έμμεσα, με την μετρούμενη επιφάνεια, γεγονός που πολλές φορές δεν είναι δυνατόν ή επιθυμητό.
- ✓ Δυναμικές μετρήσεις περιορίζονται στο μέγιστο του 1/10 της συχνότητας συντονισμού του LVDT.

Κατασκευή των LVDT

Οι LVDT κατασκευάζονται τυλίγοντας το πρωτεύον διαμήκους του κέντρου του πυρήνα και μετά τα δευτερεύοντα σε συμμετρικές θέσεις δεξιά και αριστερά του κέντρου. Τα τρία πηνία καλύπτονται από ένα αδιάβροχο στρώμα κι έτσι μπορούν να δουλέψουν σε περιβάλλον με υψηλή υγρασία. Για να λύσουμε το πρόβλημα ενός περιορισμένου γραμμικού εύρους σε μόνο το 30% του συνολικού μήκους, χρησιμοποιούνται διάφορες διαρρυθμίσεις που αποδίδουν έναν λόγο εύρους-μήκους τάξης 0.8.

Ο πυρήνας είναι ένα κράμα Fe-Ni, πολυστρωματικός κατά μήκος, έτσι ώστε να μειώνει τα ρεύματα αυτεπαγωγής. Η ράβδος που οδηγεί τον πυρήνα πρέπει να είναι μη-μαγνητική. Όλη η διάταξη μπορεί να εσωκλειστεί από μαγνητικό κάλυμμα κι έτσι δε το επηρεάζουν τα εξωτερικά πεδία.

Το εύρος των μετρήσεων κυμαίνεται μεταξύ $\pm 100\mu\text{m}$ έως $\pm 25\text{cm}$. Το τυπικό εύρος των τάσεων διέγερσης είναι από $1V_{\text{rms}}$ έως $24V_{\text{rms}}$, με συχνότητες από 50Hz έως 20kHz. Η ευαισθησία κυμαίνεται από 0.1V/cm έως 40mV/ μm για κάθε Volt διέγερσης. Αναλύσεις του 0.1 μm είναι εφικτές.

Μερικοί τύποι LVDT ολοκληρώνουν το ηλεκτρικό κύκλωμα, κάνοντάς τα ικανά να τροφοδοτηθούν με μία dc τάση. Περιλαμβάνουν τον ταλαντωτή, τον ενισχυτή και τον αποδιαμορφωτή και δίνουν μία dc τάση εξόδου. Αυτές οι διατάξεις λέγονται DCLVDT.

Υπάρχουν επίσης τύποι ειδικοί για περιστροφικές μετατοπίσεις (RVDT). Το γραμμικό τους εύρος είναι περίπου $\pm 20^\circ$ και η ευαισθησία είναι της τάξης των 10mV/ $^\circ$, αλλά γενικά παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές όταν συγκριθούν με γραμμικούς τύπους. Ο πίνακας που ακολουθεί κάνει μια συνοπτική παρουσίαση μιας γραμμικής μονάδας όπου φαίνονται οι τυπικές προδιαγραφές των LVDT.

Τάση Εισόδου	$1V_{\text{rms}}$ έως $24V_{\text{rms}}$ με συχνότητα 50 έως 20.000 Hz
Εύρος Μετατόπισης	Από $\pm 100\mu\text{m}$ μέχρι $\pm 250\text{mm}$
Ευαισθησία	Η ευαισθησία συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.6 με 30mV ανά 25 μm με τάση εισόδου 3-6 V_{rms} . Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα, τόσο μεγαλύτερη και η ευαισθησία
Μη-Γραμμικότητα	0,5% επί της συνολικής κλίμακας

Εφαρμογές των LVDT

Αν και τα LVDT είναι αισθητήρια μετατόπισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση και άλλων ποσοτήτων, μετατρέποντας την μετατόπιση στην επιθυμητή ποσότητα με κατάλληλες διατάξεις. Ακολουθούν ενδεικτικά παραδείγματα:

⇒ Μετατόπιση:

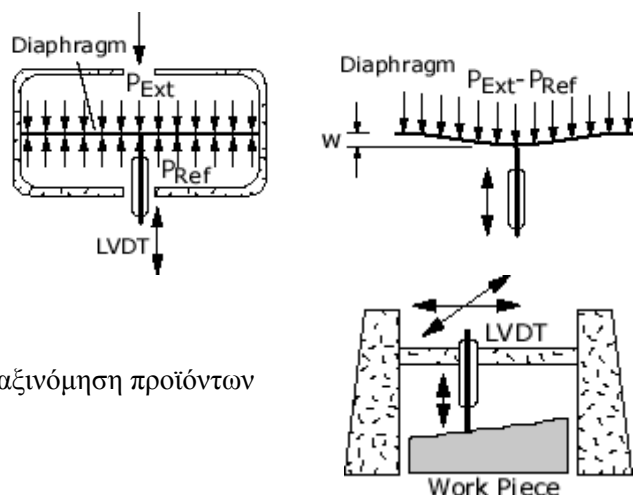
Επιμηκυνσιόμετρα, μετατροπείς θερμότητας, έλεγχος βαλβίδας με περιστρεφόμενο δίσκο, έλεγχος σερβομηχανικής βαλβίδας.

⇒ Παρεκτροπή ακτινών, χορδών ή κρίκων:

Όργανα μέτρησης φορτίου, διατάξεις μέτρησης δύναμης, διατάξεις μέτρησης πίεσης.

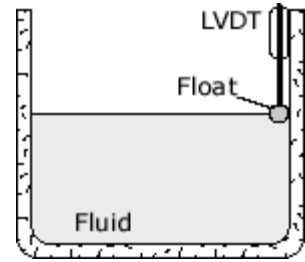
⇒ Αποκλίσεις πάχους προϊόντων:

Διατάξεις μέτρησης πάχους, μέτρηση κατατομής, ταξινόμηση προϊόντων ανάλογα το μέγεθος.



⇒ Στάθμη υγρών

Οι LVDT με ενσφράγιστα πηνία μπορούν να εφαρμοστούν σε όργανα float-based. Το φλοτέρ οδηγεί τη ράβδο και η κίνησή του ανιχνεύεται από μια διαφορά στην τάση μεταξύ των δύο δευτερευόντων. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διατάξεις μέτρησης στάθμης και ροής υγρών και ανίχνευση θέσης υδραυλικών κυλίνδρων.



⇒ Ταχύτητα και Επιτάχυνση

Έλεγχος αναρτήσεων αυτοκινήτων.

3. Πειραματική διαδικασία και Επεξεργασία

Εφαρμόστε τάση εισόδου $10 V_{p-p}$ στα 5KHz. Χρησιμοποιώντας ανοιχτή συνδεσμολογία ακολουθήστε τα παρακάτω βήματα:

- 1) Μετρήστε την συνολική μετατόπιση που μπορεί να μετρήσει η συνδεσμολογία.
- 2) Βρείτε τη μετατόπιση από την αρχική θέση του μικρομέτρου, στην οποία η τάση εξόδου γίνεται ελάχιστη.
- 3) Μετρήστε την τάση εξόδου που οφείλεται στην παρασιτική χωρητικότητα.
- 4) Μετρήστε την τάση εξόδου ανά 1mm σε όλο το διατιθέμενο εύρος μετατοπίσεων.
- 5) Σχεδιάστε την γραφική παράσταση της απόλυτης τιμής της τάσης εξόδου, συναρτήσει της απόστασης, θέτοντας τη τιμή μετατόπισης 0, στη θέση όπου η τάση εξόδου γίνεται ελάχιστη.
- 6) Εντοπίστε την περιοχή γραμμικής λειτουργίας.
- 7) Υπολογίστε την ευαισθησία M στην περιοχή αυτή.

Χρησιμοποιώντας την συνδεσμολογία αυτοσταθμιζόμενου LVDT ακολουθήστε τα παρακάτω βήματα:

- 1) Βρείτε την μετατόπιση από την αρχική θέση του μικρομέτρου, στην οποία οι τάσεις εξόδου των δύο δευτερευόντων πηνίων (V_A , V_B) γίνονται ίσες.
- 2) Μετρήστε τις V_A , V_B ανά 1mm μετατόπιση.
- 3) Σχεδιάστε την γραφική παράσταση της του λόγου $\frac{V_A - V_B}{V_A + V_B}$ συναρτήσει της απόστασης, θέτοντας τη τιμή μετατόπισης 0 στη θέση όπου οι V_A , V_B γίνεται ίσες.
- 4) Στο ίδιο διάγραμμα, σχεδιάστε την γραφική παράσταση των V_A , V_B .
- 5) Εντοπίστε την περιοχή γραμμικής λειτουργίας σε κάθε μία από τις γραφικές παραστάσεις.
- 6) Υπολογίστε την ευαισθησία M για κάθε μία από τις 3 γραφικές παραστάσεις.
- 7) Τι διαφορές παρατηρείτε στις δύο συνδεσμολογίες. Σε τι είδους εφαρμογές πλεονεκτεί η κάθε μία από αυτές;

Βιβλιογραφία

- Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου, P. Elgar, Εκδόσεις. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2000.
- Μικροαισθητήρες: Αρχές και Εφαρμογές, J. Gardner, Εκδόσεις. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2000.
- Experimental Methods for Engineers, J. Holman, McGraw-Hill, New York, 2001.
- Sensors and Signal Conditioning, J.G. Webster, John Wiley & Sons, New York, 1991.

3^η ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΤΕΡΕΟΦΩΝΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ (SFM)

1. Σκοπός της άσκησης

Η άσκηση συνίσταται στη μελέτη ενός πομπού στερεοφωνικού σήματος με διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Modulation). Η «διαμόρφωση» καθώς και η αντίστροφη λειτουργία της «αποδιαμόρφωσης» αποτελούν βασικές μη γραμμικές ηλεκτρονικές λειτουργίες που παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον καθώς μέσω αυτών επιτυγχάνεται η μετάδοση πληροφορίας σε διάφορα είδη επικοινωνίας π.χ. τηλεφωνία, ραδιοφωνία, τηλεόραση.

Οι σπουδαστές ενθαρρύνονται να εντρυφήσουν στο θέμα ανατρέχοντας σε σχετική βιβλιογραφία.

2. Συνοπτική θεωρία

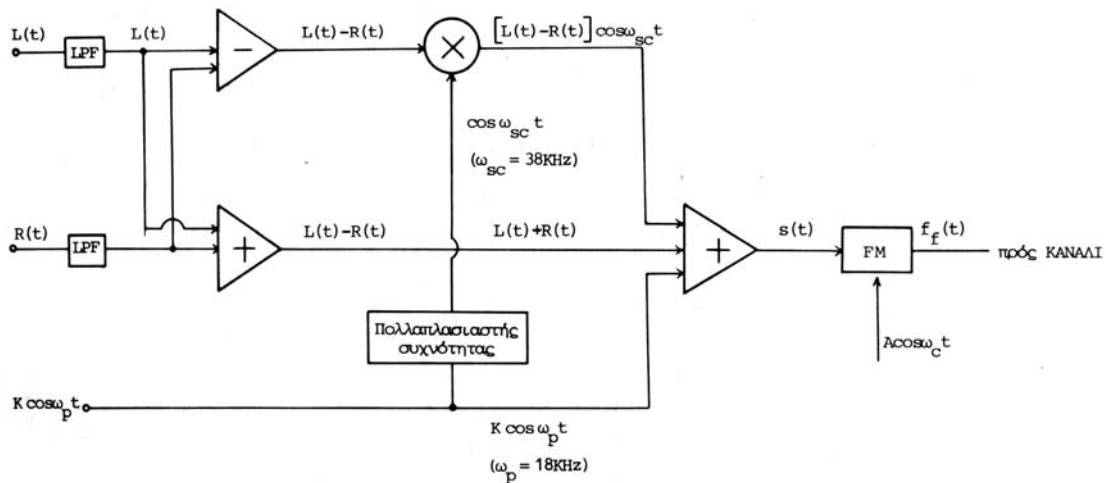
Ας υποθέσουμε ότι ηχογραφείτε μία ορχήστρα κλασσικής μουσικής. Για το σκοπό αυτό χωρίζετε (νοητικά) την ορχήστρα σε δύο μέρη και τοποθετείτε δύο μικρόφωνα, ένα στο αριστερό μέρος και ένα στο δεξί μέρος. Τα δύο σήματα πληροφορίας που λαμβάνετε από τα μικρόφωνα, συμβολίζονται αντίστοιχα $L(t)$ και $R(t)$. Η επιδίωξη είναι να μεταδοθούν τα δύο αυτά σήματα ταυτόχρονα από ένα σταθμό FM και κατά την αποδιαμόρφωσή τους στο δέκτη να διαχωριστούν και πάλι ώστε να καταλήξουν σε δύο διαφορετικά ηχεία (ήχος stereo). Διεθνώς ορίστηκαν οι ακόλουθοι κανόνες: (i) οι σταθμοί (πομποί) FM πρέπει να έχουν το ίδιο πλάτος ζώνης, ήτοι $\sim 180\text{kHz}$ και (ii) το σύστημα να είναι τέτοιο που οι δέκτες FM τόσο οι μονοφωνικοί όσο και οι στερεοφωνικοί να δύνανται να αναπαράγουν τη μουσική.

Πομπός SFM

Τα δύο σήματα $L(t)$ και $R(t)$ περιορίζονται αρχικά σε πλάτος ζώνης 15kHz . Στη συνέχεια δημιουργείται το άθροισμα και η διαφορά τους (βλ. Σχήμα 1). Η διαφορά $L(t)-R(t)$ πολλαπλασιάζεται με έναν υποφορέα $\cos(\omega_{sc}t)$ όπου $\omega_{sc}=38\text{kHz}$ (διαμόρφωση AM διπλής πλευρικής ζώνης χωρίς φορέα, DSSC). Στο επόμενο στάδιο παράγεται το σήμα πληροφορίας $s(t)$ που έχει τη μορφή:

$$s(t) = [L(t)+R(t)] + [L(t)-R(t)] \cdot \cos(\omega_{sc}t) + k \cdot \cos(\omega_p t)$$

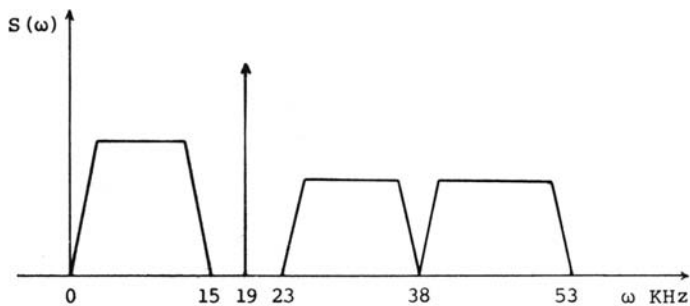
όπου το σήμα $k \cdot \cos(\omega_p t)$ ονομάζεται πιλότος (pilot) και $\omega_p=19\text{kHz}$. Χρειάζεται ένας άλλος ταλαντωτής για τη δημιουργία του πιλότου αλλά συνήθως ο ίδιος ταλαντωτής χρησιμοποιείται για τα σήματα $\cos\omega_p t$ και $\cos\omega_{sc}t$ μαζί με ένα πολλαπλασιαστή συχνότητας (αφού $38=2 \times 19$).



Σχήμα 1: Σχηματικό διάγραμμα πομπού στερεοφωνικού FM (SFM).

Το σήμα $s(t)$ εισάγεται στο διαμορφωτή FM και φεύγει για το κανάλι ως: $m_f(t) = A \cdot \cos[\omega_c t + k_f g(t)]$,

όπου: $g(t) = \int s(t) \cdot dt$. Σημειώνεται ότι η φασματική πυκνότητα ενέργειας, $S(\omega)$, έχει περίπου τη μορφή που αποδίδεται στο Σχήμα 2. Επισημαίνεται ότι ο μετασχηματισμός Fourier, $M_f(\omega)$, του διαμορφωμένου σήματος $m_f(t)$ έχει εύρος ζώνης όχι μεγαλύτερο από 180kHz, γιατί:

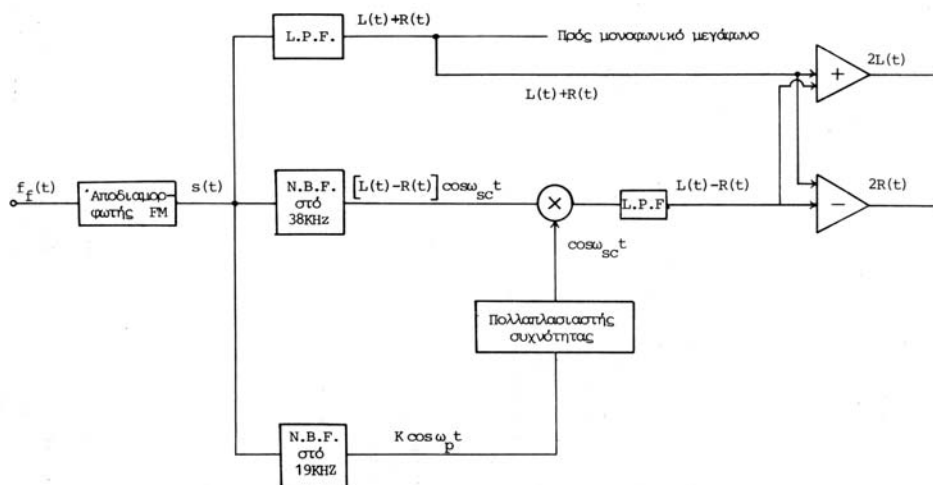


Σχήμα 2: Φασματική πυκνότητα ενέργειας συνάρτησης της συχνότητας του σήματος SFM.

Δέκτης SFM

Στο στερεοφωνικό δέκτη, η αποδιαμόρφωση είναι το πρωταρχικό στάδιο το οποίο παρέχει το σήμα $s(t)$. Στη συνέχεια, το $s(t)$ εφαρμόζεται στην είσοδο τριών φίλτρων

ενός LPF και δύο NBF (βλ. Σχήμα 3). Για την περίπτωση μονοφωνικού δέκτη, υπάρχει μόνο το φίλτρο LPF από το οποίο εξάγεται το σήμα $L(t)+R(t)$ που αποτελεί μία ικανοποιητική μονοφωνική απόδοση της μουσικής. Την ίδια λειτουργία επιτελεί το LPF στο στερεοφωνικό δέκτη δημιουργώντας τό σήμα $L(t)+R(t)$.



Σχήμα 3: Σχηματικό διάγραμμα δέκτη στερεοφωνικού FM (SFM).

Το ένα NBF φίλτρο στα 38kHz παράγει το σήμα $[L(t) - R(t)] \cdot \cos(\omega_{sc} t)$ και το δεύτερο στα 19kHz το σήμα-

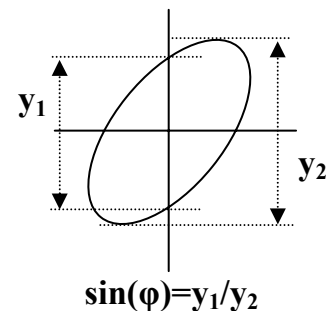
πιλότος: $k \cdot \cos(\omega_p t)$. Ακολουθώντας, ο πιλότος διπλασιάζεται σε συχνότητα (γίνεται δηλαδή $\cos \omega_{sc} t$) και χρησιμοποιείται για τον πολλαπλασιασμό με το σήμα $[L(t) - R(t)] \cdot \cos(\omega_{sc} t)$. Μετά τον πολλαπλασιασμό το σήμα περνάει από ένα LPF οπότε η έξοδός του θα είναι $L(t) - R(t)$. Όπου απαιτείται παρεμβάλλονται και ενισχυτές. Η τελευταία πράξη είναι να προσθέσουμε και να αφαιρέσουμε τα σήματα $L(t) + R(t)$ και $L(t) - R(t)$. Η πρόσθεση παρέχει το σήμα $2L(t)$ που οδηγείται στο αριστερό π.χ. ηχείο και η αφαίρεση το $2R(t)$ που οδηγείται στο δεξιό.

Προέμφαση και Αποέμφαση

Η ενέργεια που αντιστοιχεί στο φάσμα των πολύ υψηλών συχνοτήτων ενός σύνθετου ήχου είναι αρκετά μικρή, επομένως και η έξοδος στο σύστημα αποδιαμόρφωσης του δέκτη FM θα είναι μικρή. Αποδεικνύεται ότι στη λήψη η στάθμη του θορύβου στην έξοδο του αποδιαμορφωτή είναι ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας, δηλαδή ουσιαστικά συγκεντρώνεται στις υψηλές συχνότητες. Ο θόρυβος αυτός περιορίζεται, αν τοποθετηθεί μετά το σύστημα αποδιαμόρφωσης του δέκτη ένα φίλτρο που να υποβιβάζει (αποέμφαση) την περιοχή αυξημένου θορύβου. Με το φίλτρο όμως αυτό υποβιβάζεται και η περιοχή υψηλών συχνοτήτων του ακουστικού σήματος. Έτσι για να αναιρεθεί η εξασθένηση αυτή, χρησιμοποιείται στον πομπό ένα φίλτρο με ακριβώς αντίστροφη συνάρτηση μεταφοράς από το φίλτρο στο δέκτη, που προενισχύει (προέμφαση) την περιοχή υψηλών συχνοτήτων του ακουστικού σήματος, σε σχέση με τις μέσες και κατώτερες συχνότητες.

3. Πειραματική διαδικασία

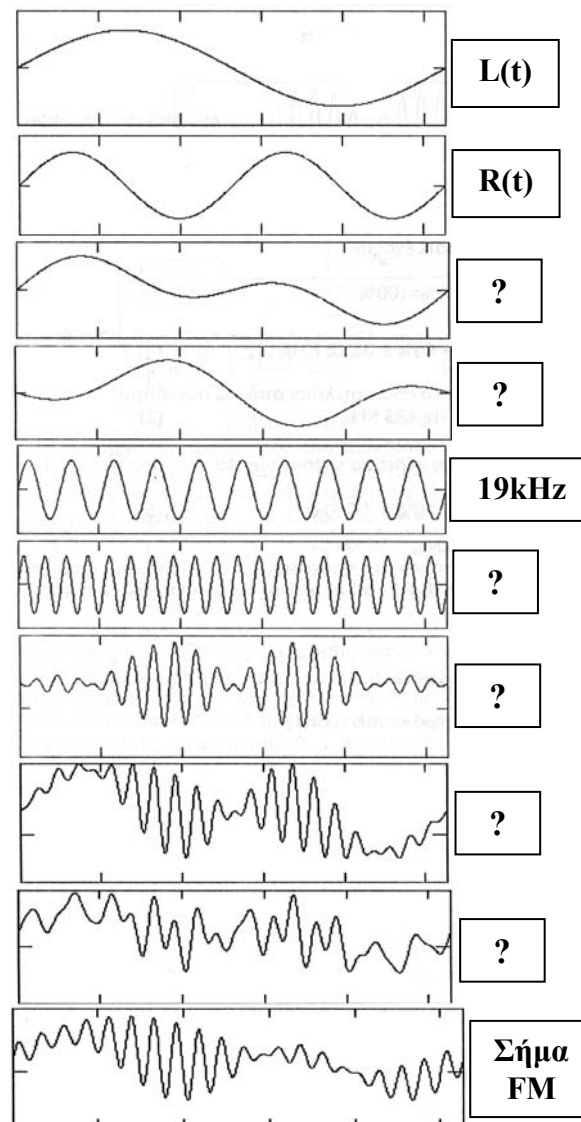
- α) Αναγνωρίστε την οργάνολογία της άσκησης και πραγματοποιήστε τη συνδεσμολογία της.
- β) Συνδέστε την έξοδο **Composite Output** και την έξοδο **19kHz Output** στον παλμογράφο διπλής δέσμης. Θέστε το βηματικό διακόπτη **Function Switch** στη θέση **External Modulation** και τον διακόπτη **Pilot Modulation** στη θέση **On**.
- γ) Θέστε τον παλμογράφο στην κατάσταση X-Y. Για 5 διαφορετικές θέσεις του ποτενσιόμετρου **Scope Phase** (στην πίσω πλευρά του προσομοιωτή πομπού FM) προσδιορίστε από την αντίστοιχη εικόνα Lissajous (έλλειψη, γιατί;) τη διαφορά φάσης των δύο σημάτων και το λόγο των συχνοτήτων.
- δ) Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο **Scope Phase** ώστε η εικόνα Lissajous να είναι ευθεία (γιατί;)
- ε) Θέστε το βηματικό διακόπτη **Function Switch** στη θέση **L-R**, τον διακόπτη **Pilot Modulation** στη θέση **On** και τον διακόπτη **Composite Level** στη θέση **Max**. Στην κατάσταση αυτή θα ελέγξετε τη διαφορά φάσης μεταξύ πιλότου και υποφορέα.
- στ) Αποτυπώστε στο τετράδιό σας την εικόνα Lissajous που εμφανίζεται στην οθόνη του παλμογράφου. Μετρήστε το λόγο των συχνοτήτων των σημάτων. Γιατί βρήκατε αυτή την τιμή;
- ζ) Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο **Mod Phase** (στην πίσω πλευρά του προσομοιωτή πομπού FM) ώστε η εικόνα Lissajous να προσομοιάζει το μαθηματικό σύμβολο του απείρου: ∞ (γιατί;)
- η) Συνδέστε την έξοδο της γεννήτριας συχνοτήτων στο αριστερό κανάλι L στην αριστερή άκρη της πρόσωσης του προσομοιωτή πομπού FM. Θέστε το βηματικό διακόπτη **Function Switch** στη θέση **External Modulation**, τον διακόπτη **Pilot Modulation** στη θέση **Off** και τον διακόπτη **Composite Level** στη θέση **Max**.
- θ) Για διάφορες ακουστικές συχνότητες από τη γεννήτρια παρατηρείστε την έξοδο του προσομοιωτή, **Composite Output**, στον παλμογράφο και μελετήστε τη δράση της διαδικασίας προέμφασης.



4. Επεξεργασία

- i) Αποδώστε σε πίνακα τα αποτελέσματα των μετρήσεών σας με τα σφάλματα που τα επιβαρύνουν.
- ii) Αποτυπώστε την εικόνα Lissajous του βήματος στ) της πειραματικής διαδικασίας.
- iii) Απαντήστε στα «γιατί;» που εμφανίζονται στο κείμενο της άσκησης.
- iv) Αναζητήστε πληροφορίες για τις διαδικασίες της προέμφασης και της αποέμφασης. Περιλάβετε στην αναφορά σας μια σύντομη περιγραφή.
- v) Σύνοψη και συμπεράσματα.

- vi) Απαντήστε και εξηγήστε στην αναφορά σας ποιο σήμα αναπαριστά κάθε κυματομορφή που συμβολίζεται με «?». Επισημαίνεται ότι όλα τα σήματα που παρατίθενται εμφανίζονται στα διάφορα στάδια λειτουργίας ενός πομπού SFM.



Βιβλιογραφία

- Εργαστηριακές Ασκήσεις και Κατασκευές Ηλεκτρονικής, Δ. Μαυράκης, 1982, Αθήνα.
- Θεωρία Μετάδοσης Πληροφοριών, Τόμος Ι, Ν. Σ. Τζάννης, 1979, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα, 2^η Έκδοση, H. Taub & D. L. Schilling, Εκδόσεις Τζιόλα.
- Ηλεκτρονικές Κατασκευές, Δ. Ρήγας, 2000, Εκδόσεις Τζιόλα.
- Ηλεκτρονικά Συστήματα Μετρήσεων, T. T. Lang, 2000, Εκδόσεις Τζιόλα.

4^η ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

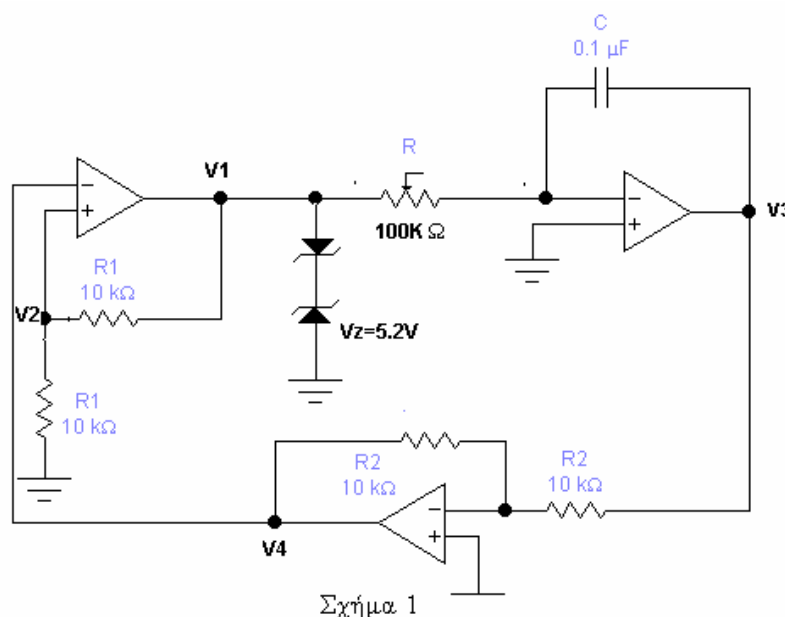
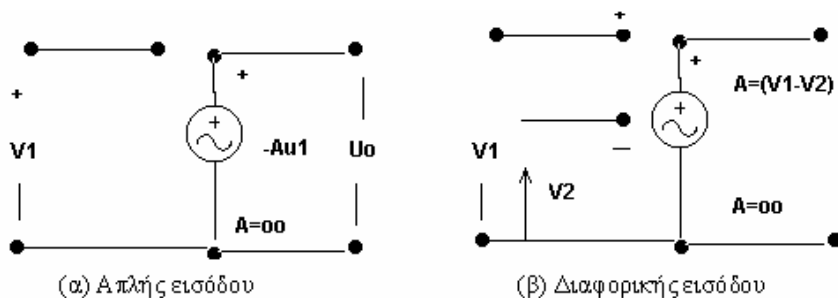
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΡΙΓΩΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ

1. Σκοπός της άσκησης

Γενικός σκοπός της εργαστηριακής άσκησης είναι η εξοικείωση των σπουδαστών με εργαστηριακά όργανα όπως: παλμογράφος, πολύμετρο, γεννήτρια σήματος, τροφοδοτικό κλπ. (τα οποία ουσιαστικά αποτελούν τα εργαλεία ενός ηλεκτρονικού) και η εφαρμογή τους στη λήψη μετρήσεων. Ειδικότερος σκοπός της άσκησης είναι να γνωρίσουν και να κατανοήσουν οι σπουδαστές τον τελεστικό ενισχυτή μέσα από τις βασικές συνδεσμολογίες του που αποτελούν πάρα πολύ συχνά μέρη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων όπως και την πολύ χρήσιμη συνδεσμολογία του transistor ως διακόπτη. Επίσης, σε αυτή την άσκηση οι σπουδαστές θα έχουν την δυνατότητα να δομήσουν και να συναρμολογήσουν αυτόνομα ένα ηλεκτρονικό σύστημα παραγωγής σημάτων.

2. Συνοπτική θεωρία

(α) Ιδανικός τελεστικός ενισχυτής: Ορίζουμε ως ιδανικό τελεστικό ενισχυτή ένα ενισχυτή τάσης συνεχούς σύζευξης, ο οποίος έχει άπειρη εμπέδηση εισόδου, μηδενική εμπέδηση εξόδου και άπειρη απόλαβη (ενίσχυση) τάσης. Η ενίσχυση τάσης για την περίπτωση τελεστικού ενισχυτή απλής εισόδου είναι αρνητική, ενώ για διαφορικό τελεστικό ενισχυτή το πρόσημο της τάσης εξόδου εξαρτάται από το πρόσημο της διαφοράς των σημάτων εισόδου. Ο τελεστικός ενισχυτής, σε συνδυασμό με κατάλληλα παθητικά ή/και ενεργά στοιχεία στην είσοδο και στο κύκλωμα ανατροφοδότησής του, παρέχει την δυνατότητα τέλεσης πράξεων με τάσεις όπως π.χ. η άθροιση τάσεων, η ολοκλήρωση τάσεων κλπ. Με βάση τον ορισμό του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή δίδεται παρακάτω το ισοδύναμό του:



(β) Ανάλυση του κυκλώματος της άσκησης: Το παραπάνω κύκλωμα αποτελείται από τρεις βασικές συνδεσμολογίες τελεστικών ενισχυτών: (i) το πρώτο κύκλωμα είναι μία συνδεσμολογία μη γραμμικού ενισχυτή. Αυτός λειτουργεί εκτός γραμμικής λειτουργίας και σε κατάσταση κόρου. Ο κόρος μπορεί να είναι θετικός ή αρνητικός, ανάλογα με την V_{in} . Στην κατάσταση κόρου η έξοδος τείνει να αποκτήσει περίπου την τάση τροφοδοσίας. (ii) Ο δεύτερος τελεστικός ενισχυτής είναι σε συνδεσμολογία ολοκληρωτή. (Ποια η σχέση που δίδει την έξοδο ενός κυκλώματος ολοκληρωτή;) Με βάση το Σχήμα 1 και τη σχέση που δίδει την έξοδο του κυκλώματος τελεστικού ενισχυτή σε συνδεσμολογία ολοκληρωτή προκύπτουν:

$$V_3(t) = -\frac{1}{C} \int_0^t \frac{V}{R} \cdot dt + V_3(0) \Rightarrow V_3(t) = -\frac{V_1}{RC} \cdot t + V_3(0), \text{ όπου } 0 < t < \frac{T}{2}$$

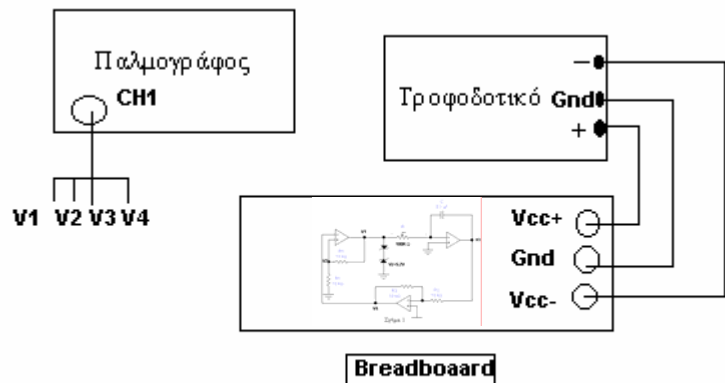
$$V_3\left(\frac{T}{2}\right) = -\frac{T \cdot V_1}{2RC} + V_3(0) \Rightarrow V_3\left(\frac{T}{2}\right) = -V_3(0) = -\frac{V_Z + V_d}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T = [V_3(0) - V_3\left(\frac{T}{2}\right)] \cdot \frac{2RC}{V_1} \Rightarrow T = \left[\frac{V_Z + V_d}{2} + \frac{V_Z + V_d}{2} \right] \cdot \frac{2RC}{V_Z + V_d} \Rightarrow T = 2RC$$

(iii) Η τελευταία συνδεσμολογία αποτελεί έναν τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία αναστροφέα. (Ποια η σχέση εισόδου εξόδου ενός τελεστικού ενισχυτή σε συνδεσμολογία αναστροφέα; Ποια η απολαβή του στην συγκεκριμένη εφαρμογή; Με ποιο τρόπο αυτή γίνεται να μεταβληθεί;)

3. Οργανολογία

Τα εργαστηριακά όργανα που απαρτίζουν την άσκηση είναι αυτά που φαίνονται στο διπλανό σχηματικό διάγραμμα. Επίσης, απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται τα όργανα με το κύκλωμα της άσκησης το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 2: Ηλεκτρονικά στοιχεία: (α) Αντιστάσεις: $4 \times 10k\Omega$, (β) Ποτενσιόμετρο $100k\Omega$, (γ) 3 LM741, (δ) Πυκνωτής $0.1\mu F$, (ε) 2 δίοδοι Zener. **Όργανα μέτρησης:** (α) Παλμογράφος, (β) Τροφοδοτικό.

4. Πειραματική διαδικασία

α) Αναγνωρίστε τα όργανα της άσκησης.

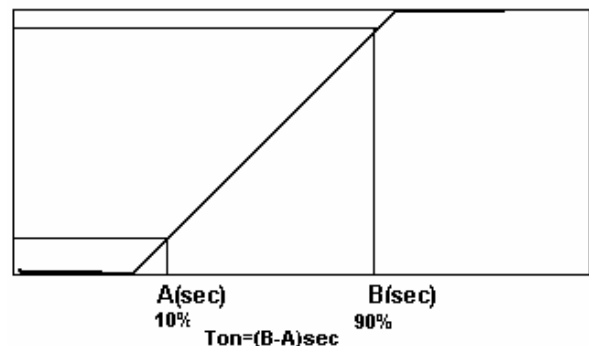
β) Να κατασκευάσετε με προσοχή το κύκλωμα του Σχήματος 1 και να το τροφοδοτήσετε όπως δείχνει το Σχήμα 2. Στο παράρτημα του φυλλαδίου των ασκήσεων μπορείτε να βρείτε λεπτομέρειες σχετικά με το πως μπορείτε να συνδέσετε τον τελεστικό ενισχυτή LM741 στην άσκηση.

γ) Για μια οποιαδήποτε τιμή της R πάρτε κατάλληλες μετρήσεις (10 τουλάχιστον) για χρονικό εύρος μιας περιόδου στις σημεία V_1 , V_2 , V_3 και V_4 .

δ) Μετρήστε την περίοδο T.

ε) Μετρήστε τη μέγιστη και την ελάχιστη συχνότητα λειτουργίας του κυκλώματος.

στ) Φέρτε την κυματομορφή στον παλμογράφο σε κατάλληλη μορφή και μετρήστε το χρόνο ανόδου από το 10% έως 90% του τετραγωνικού παλμού, (βλ. διπλανό σχήμα):



5. Επεξεργασία

- i) Αποτυπώστε τις κυματομορφές μαζί με τα σφάλματα που προκύπτουν από το βήμα γ) της πειραματικής διαδικασίας. Φτιάξτε ένα πίνακα που θα εμπεριέχονται οι σχετικές μετρήσεις μαζί με τα σφάλματα τους.

- ii) Καταγράψτε την τιμή της περιόδου σε sec. Επαληθεύστε το αποτέλεσμα που βρήκατε με αυτό που προκύπτει εάν εφαρμόσουμε την σχέση της περιόδου.
- iii) Καταγράψτε την τιμή του χρόνου ανόδου σε sec μαζί με το σφάλμα του ($t_a \pm \delta t_a$).
- iv) Καταγράψτε το εύρος λειτουργίας (συχνότητες) του κυκλώματος.
- v) Αναγνωρίστε από ποιες βασικές συνδεσμολογίες τελεστικών ενισχυτών αποτελείται η άσκηση και εξηγήστε συνοπτικά τη λειτουργία τους. Ποιος ο ρόλος των δύο διόδων Zener στο κύκλωμα;
- vi) Εξηγήστε γιατί ο τελεστικός μη γραμμικός ενισχυτής δεν επηρεάζεται από την έξοδο του αναστροφέα.
- vii) Απαντήστε στις «ερωτήσεις» της άσκησης.
- viii) Σύνοψη και συμπεράσματα.

Βιβλιογραφία

- Ηλεκτρονικά: «Αναλογικά και ψηφιακά κυκλώματα», Θ. Α. Δελληγιάννη (Βιβλιοθήκη Π.Κ.).
- Op-Amp Handbook (Third Edition), Frederick W. Hughes (Βιβλιοθήκη Π.Κ.).
- Introduction to Operational Amplifiers. Theory & Applications, 2^η Έκδοση, John V. Wait, Lawrence P. Huelsman & Granino A. Korn (Βιβλιοθήκη Π.Κ.).

Ηλεκτρονικές διευθύνσεις για πληροφορίες πάνω σε τεχνικά θέματα:

<http://www.ti.com>

<http://www.philips.com>

<http://www.national.com/pf/LM/LM741.html>