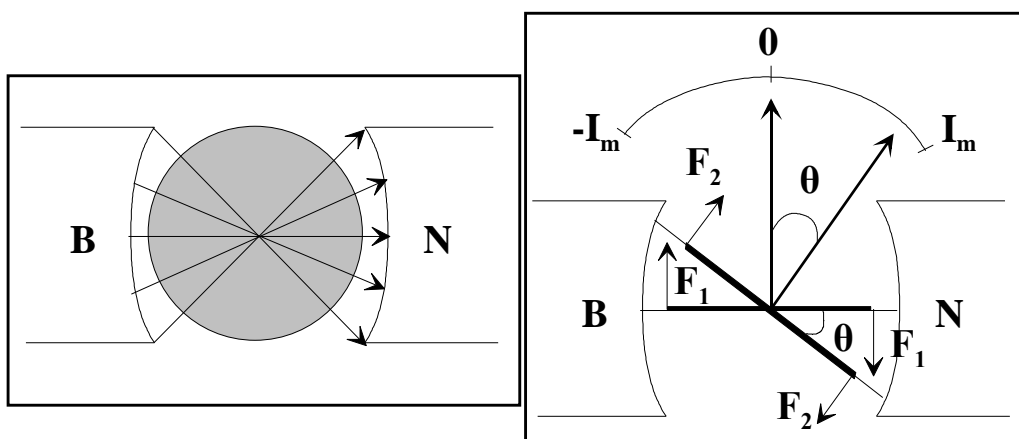


Κεφάλαιο 3^ο

Όργανο στρεπτού πηνίου

3.1 Βασική αρχή λειτουργίας του οργάνου

Το όργανο στρεπτού πηνίου είναι ίσως το πιο διαδεδομένο από τα κλασσικά αναλογικά όργανα. Η λειτουργία του βασίζεται στην κίνηση ενός πηνίου που διαρρέεται από ρεύμα μέσα σε ένα σταθερό ακτινικό μαγνητικό πεδίο λόγω δυνάμεων Laplace. Τα πλεονεκτήματα του οργάνου στρεπτού πηνίου είναι η μεγάλη ευαισθησία και ακρίβεια, η απλή κατασκευή και η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος, ενώ το βασικό του μειονέκτημα είναι η αδυναμία του να μετρήσει εναλλασσόμενα μεγέθη. Ας δούμε τώρα αναλυτικότερα την λειτουργία του οργάνου:



Σχήμα 3.1 Βασική αρχή λειτουργίας του οργάνου στρεπτού πηνίου

Το βασικό μέρος του οργάνου είναι ένα πηνίο με N σπείρες στο οποίο είναι στερεωμένος ο δείκτης και το οποίο μπορεί να περιστρέφεται μέσα σε ένα ακτινικό μαγνητικό πεδίο. Το ακτινικό μαγνητικό πεδίο δημιουργείται με την εισαγωγή ενός κυλίνδρου μαλακού σιδήρου σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο ανάμεσα στους πόλους ενός πεταλοειδούς μαγνήτη (Σχήμα 3.1 αριστερά). Η ύπαρξη του μαλακού σιδήρου προκαλεί κάμψη των δυναμικών γραμμών οι οποίες τείνουν να διέλθουν μέσα από το μαλακό σίδηρο και δημιουργούν το ακτινικό πεδίο. Η επιλογή του ακτινικού πεδίου προέρχεται από την ανάγκη πλήρους γραμμικότητας του οργάνου καθώς, όπως θα δούμε παρακάτω, το πηνίο όπως στρίβει θα είναι συνεχώς παράλληλο σε μαγνητικές γραμμές με αποτέλεσμα η ροπή κίνησης να είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τη θέση του πηνίου. Επιπλέον, η ύπαρξη του μαλακού σιδήρου ενισχύει το μαγνητικό πεδίο άρα βελτιώνει και την ευαισθησία του οργάνου.

Ας εξετάσουμε στο σημείο αυτό την κίνηση του πηνίου μέσα σε ακτινικό μαγνητικό πεδίο έντασης B . Στο σχήμα 3.1 δεξιά φαίνεται μία εγκάρσια τομή του

οργάνου όπου το πηνίο εμφανίζεται με έντονη γραμμή. Αρχικά το πηνίο είναι οριζόντιο (θέση μηδέν του οργάνου) και έστω ότι κάποια χρονική στιγμή το πηνίο αρχίζει να διαρρέεται από συνεχές ρεύμα I το οποίο προχωρά από δεξιά προς τα μέσα και επιστρέφει από αριστερά. Τα δύο τμήματα του πηνίου μήκους L που είναι κάθετα στο χαρτί είναι κάθετα στις μαγνητικές γραμμές και ασκείται σε κάθε ένα από αυτά δύναμη Laplace: $F_1 = NBIL$ όπου N ο αριθμός των σπειρών. Η φορά της δύναμης θα είναι αντίθετη για τα δύο τμήματα (λόγω της αντίθετης φοράς του ρεύματος), βρίσκεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού και φαίνεται στο σχήμα για το ρεύμα που υποθέσαμε. Αντίθετα, τα τμήματα του πηνίου μήκους ℓ που είναι παράλληλα στο χαρτί, είναι παράλληλα και στο μαγνητικό πεδίο, άρα δεν ασκούνται σε αυτά δυνάμεις Laplace. Επομένως βλέπουμε ότι στο πηνίο ασκούνται δύο δυνάμεις ίσες σε μέτρο αλλά αντίθετης φοράς οι οποίες τείνουν να περιστρέψουν το πηνίο προς τα δεξιά λόγω της συνεπαγόμενης ροπής η οποία δίνεται από την σχέση: $M = F_1 d = F_1 \ell$ όπου d είναι η κάθετη μεταξύ των δυνάμεων απόσταση που σε ακτινικό μαγνητικό πεδίο είναι ίση με την μία διάσταση του πηνίου. Τελικά, η κίνηση του πηνίου θα οδηγείται από ροπή:

$$M = F_1 \ell = NBIL\ell = NBIS = C_1 I \quad (3.1)$$

όπου S είναι το εμβαδόν του πηνίου και C_1 σταθερά που εξαρτάται από τα στοιχεία του πηνίου.

Ας υποθέσουμε ότι λόγω της ροπής που δίνεται από την σχέση 3.1, το πηνίο έχει στρίψει κατά γωνία θ (Σχήμα 3.1 δεξιά) και ας δούμε τι θα συμβεί στην νέα θέση του πηνίου. Λόγω του ακτινικού μαγνητικού πεδίου, το πηνίο θα είναι παράλληλο σε μαγνητική γραμμή άρα και σε αυτή τη θέση θα ασκείται σε αυτό ροπή που θα δίνεται από τη σχέση 3.1. Δηλαδή η ροπή θα είναι σταθερή, ανεξάρτητη από τη θέση του πηνίου και ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο.

Μέχρι τώρα περιγράψαμε την ροπή που κινεί το πηνίο. Πως όμως θα σταματήσει το πηνίο σε κάποια θέση ώστε ο δείκτης να μας δώσει ένδειξη; Το όργανο έχει διάταξη ανασταλτική που σχηματίζεται από σύστημα σπειροειδών ελατηρίων, τα επανατακτικά ελατήρια. Τα ελατήρια αυτά ασκούν μία ροπή αντίθετη στην ροπή κίνησης η οποία είναι ανάλογη της γωνίας στροφής του πηνίου:

$$M_{ελ} = C_2 \theta \quad (3.2)$$

Σαν αποτέλεσμα, έχουμε την ισορροπία του πηνίου και του δείκτη σε μία θέση όπου οι δύο ροπές είναι ίσες:

$$M = M_{ελ} \Rightarrow C_1 I = C_2 \theta \Rightarrow \theta = \frac{C_1}{C_2} I = KI \quad (3.3)$$

Δηλαδή, η γωνία θ που στρίβει ο δείκτης του οργάνου είναι απ' ευθείας ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο, με το συντελεστή αναλογίας K (άρα και την ευαισθησία του οργάνου) σταθερό και εξαρτώμενο από την κατασκευή του οργάνου. Έχουμε επομένως ένα όργανο με γραμμική κλίμακα, στο οποίο αν αλλάξει η φορά του ρεύματος ο δείκτης κινείται προς αντίθετη κατεύθυνση, άρα το μηδέν του οργάνου είναι στο κέντρο της κλίμακας. Όταν σταματήσει η εφαρμογή του ρεύματος I , ο δείκτης επιστρέφει στο μηδέν λόγω των επανατακτικών ελατηρίων.

Ας εξετάσουμε τώρα τι θα συμβεί αν το πηνίο του οργάνου στρεπτού πηνίου διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Γενικά, όταν θέλουμε να βρούμε το αποτέλεσμα ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μεγέθους πρέπει να υπολογίσουμε την μέση του τιμή μέσα σε μία περίοδο. Για την περίπτωση της κίνησης του πηνίου μέσα στο μαγνητικό πεδίο, πρέπει να υπολογίσουμε την μέση τιμή της ροπής που ασκείται στο πηνίο, άρα της μέσης τιμής του ρεύματος, η οποία υπολογίζεται σε:

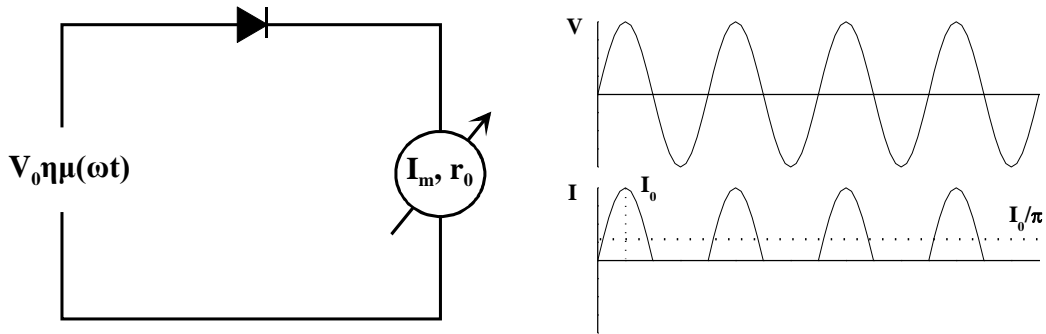
$$\begin{aligned} \bar{M} \propto \bar{I} &= \frac{1}{T} \int_0^T I dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_0 \eta \mu(\omega t) d(\omega t) = \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \eta \mu(\omega t) d(\omega t) = \\ &= \frac{I_0}{2\pi} \left(-\cos(\omega t) \Big|_0^{2\pi} \right) = \frac{I_0}{\pi} (-\cos 2\pi + \cos 0) = 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Βλέπουμε επομένως ότι η μέση τιμή του ρεύματος στο εναλλασσόμενο άρα και της ροπής είναι μηδέν, άρα ο δείκτης του οργάνου δεν κινείται όταν το όργανο συνδεθεί σε εναλλασσόμενο. Για την περίπτωση αυτή, η λύση δίνεται από μία ανορθωτική διάταξη όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο.

3.2 Χρήση του οργάνου στο εναλλασσόμενο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα όργανα στρεπτού πηνίου λειτουργούν μόνο στο συνεχές. Προκειμένου να λειτουργήσουν στο εναλλασσόμενο είναι απαραίτητος ο συνδυασμός τους με ανορθωτικές διατάξεις. Στην περίπτωση αυτή, η απαίτηση είναι να υπάρξει απλώς μία μέση τιμή ρεύματος διάφορη του μηδενός (έτσι ώστε η μέση τιμή της ροπής να είναι επίσης διάφορη του μηδενός) χωρίς την ανάγκη ομαλοποίησης της εξόδου.

Στην απλούστερη περίπτωση, η απλή ανόρθωση του σχήματος 3.2 για εναλλασσόμενο $V_0\eta\mu(\omega t)$ είναι αρκετή ώστε η τιμή του ρεύματος να μην έχει



Σχήμα 3.2 Απλή ανόρθωση εναλλασσομένου

αρνητικές τιμές (η δίοδος άγει μόνο προς την μια διεύθυνση). Σαν αποτέλεσμα, η μέση τιμή του ρεύματος από μηδέν (στο μη ανορθωμένο) να γίνει I_0/π όπως θα αποδείξουμε παρακάτω:

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{1}{T} \int_0^T I dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_0 \eta\mu(\omega t) d(\omega t) = \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \eta\mu(\omega t) d(\omega t) = \\ &= \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{\pi} \eta\mu(\omega t) d(\omega t) = \frac{I_0}{2\pi} (-\sigma\upsilon\nu(\omega t) \Big|_0^{\pi}) = \frac{I_0}{2\pi} (-\sigma\upsilon\nu\pi + \sigma\upsilon\nu 0) = \frac{I_0}{\pi} \end{aligned} \quad (3.5)$$

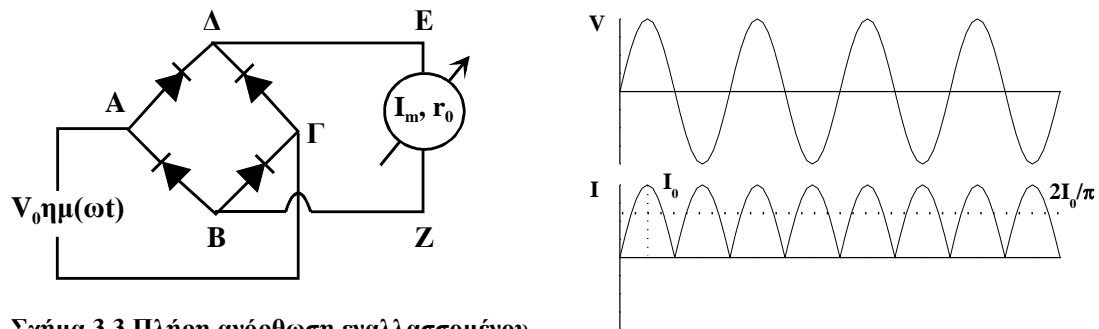
Βλέπουμε επομένως ότι το όργανο στρεπτού πηνίου θα δείξει ένδειξη I_0/π . Ο λόγος της ενεργού τιμής του ρεύματος προς την μέση τιμή του ρεύματος ορίζει τον συντελεστή μορφής ο οποίος για την μονή ανόρθωση έχει τιμή: $\frac{I_{ev}}{\bar{I}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 2.22$.

Ουσιαστικά, η τιμή αυτή είναι ο παράγοντας με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την κλίμακα του οργάνου στρεπτού πηνίου που συνδυάζεται με ανορθωτική διάταξη απλής ανόρθωσης ώστε το όργανο να βαθμολογηθεί σε ενεργό τιμή εναλλασσομένου.

Στην περίπτωση της πλήρους ανόρθωσης (Σχήμα 3.3), το ρεύμα έχει θετική τιμή και για τις δύο ημιπεριόδους (το ρεύμα διαρρέει το όργανο στην διεύθυνση $E \rightarrow Z$ για τη θετική αλλά και την αρνητική φορά του ρεύματος), οπότε η μέση τιμή του είναι μεγαλύτερη και υπολογίζεται σε:

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{1}{T} \int_0^T I dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_0 \eta\mu(\omega t) d(\omega t) = \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \eta\mu(\omega t) d(\omega t) = \\ &= 2 \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{\pi} \eta\mu(\omega t) d(\omega t) = \frac{I_0}{\pi} (-\sigma\upsilon\nu(\omega t) \Big|_0^{\pi}) = \frac{I_0}{\pi} (-\sigma\upsilon\nu\pi + \sigma\upsilon\nu 0) = \frac{2I_0}{\pi} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Βλέπουμε επομένως ότι το όργανο στρεπτού πηνίου σε αυτή την περίπτωση θα δείξει



Σχήμα 3.3 Πλήρη ανόρθωση εναλλασσομένου

ένδειξη $2I_0/\pi$ ενώ ο συντελεστής μορφής έχει τιμή: $I_{ev}/I = \pi/2\sqrt{2} = 1.11$.

Επομένως το όργανο στρεπτού πηνίου μπορεί να μετρήσει εναλλασσόμενες ποσότητες όταν συνδυαστεί με ανορθωτική διάταξη, με τη βαθμολόγηση του οργάνου να εξαρτάται από τον τύπο της ανόρθωσης. Φυσικά, το νέο όργανο δεν διαθέτει την ευαισθησία και την ακρίβεια του απλού οργάνου κατά τις μετρήσεις του στο συνεχές. Επίσης, ένα σημείο που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την χρήση του οργάνου στρεπτού πηνίου με ανορθωτική διάταξη είναι η απαίτηση το εναλλασσόμενο να έχει μόνο μία συχνότητα, διαφορετικά το σφάλμα της μέτρησης είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Για να γίνει αυτό κατανοητό, ας εξετάσουμε την περίπτωση που θέλουμε να μετρήσουμε το ρεύμα που διαρρέει αντίσταση R αν εφαρμόσουμε σε αυτήν τάση $V=V_{10}\sin(\omega_1 t)+V_{20}\sin(\omega_2 t)$. Αν χρησιμοποιούμε όργανο στρεπτού πηνίου σε συνδυασμό με ανορθωτική διάταξη απλής ανόρθωσης, σύμφωνα με τα παραπάνω, η ενεργός τιμή του ρεύματος θα βρεθεί:

$$I_{ev\delta} = \frac{1}{2.22} \left(\frac{V_{10}}{R\sqrt{2}} + \frac{V_{20}}{R\sqrt{2}} \right) \Rightarrow I_{ev} = \left(\frac{V_{10}}{R\sqrt{2}} + \frac{V_{20}}{R\sqrt{2}} \right) = I_{1ev} + I_{2ev} \quad (3.7)$$

Όμως, σε εναλλασσόμενο ρεύμα με δύο συνιστώσες συχνότητας, η ενεργός τιμή του ολικού ρεύματος δίνεται από:

$$I_{ev} = \sqrt{I_{1ev}^2 + I_{2ev}^2} \quad (3.8)$$

Από τις εξισώσεις 3.7 και 3.8 Βλέπουμε ότι η τιμή που θα δώσει το όργανο θα διαφέρει σημαντικά από την σωστή με το σχετικό σφάλμα να δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{(I_{1ev} + I_{2ev}) - \sqrt{I_{1ev}^2 + I_{2ev}^2}}{I_{1ev} + I_{2ev}} \quad (3.9)$$