



**Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Μηχανικών Υπολογιστών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο**

Διαλέξεις Ηλεκτρικές Μετρήσεις

Διδάσκουσα: Άννα Τασολάμπρου

Εισαγωγή στο μάθημα των Ηλεκτρικών Μετρήσεων

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- 1.1 Περιεχόμενο μαθήματος.
- 1.2 Ηλεκτρικά όργανα
- 1.3 Χαρακτηριστικά αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων
- 1.4 Κατασκευαστικά μέρη αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων
- 1.5 Σύμβολα οργάνων.

Εισαγωγή στο μάθημα των Ηλεκτρικών Μετρήσεων

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- 1.1 Περιεχόμενο μαθήματος.
- 1.2 Ηλεκτρικά όργανα
- 1.3 Χαρακτηριστικά αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων
- 1.4 Κατασκευαστικά μέρη αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων
- 1.5 Σύμβολα οργάνων.

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- **Περιεχόμενο μαθήματος.**

Στο μάθημα αυτό αρχικά γίνεται εισαγωγή στα **είδη σφαλμάτων** που επηρεάζουν τις μετρήσεις και ανάλυση της διαδικασίας εύρεσης συστηματικών σφαλμάτων σχετικών με υπολογισμούς. Στη συνέχεια εξετάζονται τα **βασικά αναλογικά όργανα ηλεκτρικών μετρήσεων** (όργανα στρεπτού πηνίου, ηλεκτροδυναμικά όργανα, όργανα διασταυρούμενων πηνίων, επαγωγικά όργανα, όργανα κινητού σιδήρου, όργανα κινητού μαγνήτη κλπ), η χρήση τους και η επέκταση της κλίμακας τους, αλλά και ο παλμογράφος και όργανα μέτρησης άλλων φυσικών μεγεθών. Μετά αναπτύσσονται οι **τεχνικές μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών** όπως τάση, ρεύμα, ωμική αντίσταση, αυτεπαγωγή, χωρητικότητα, ισχύ και ενέργεια. Τέλος γίνεται εισαγωγή στα τριφασικά συστήματα και τη διαχείριση των αντιστοιχών ηλεκτρικών μεγεθών.

Εισαγωγή στο μάθημα των Ηλεκτρικών Μετρήσεων

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- 1.1 Περιεχόμενο μαθήματος.
- **1.2 Ηλεκτρικά όργανα**
- 1.3 Χαρακτηριστικά αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων
- 1.4 Κατασκευαστικά μέρη αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων
- 1.5 Σύμβολα οργάνων.

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- **Ηλεκτρικά όργανα**

Θα ασχοληθούμε κυρίως με αναλογικά όργανα που εμπεριέχουν περιστρεφόμενο δείκτη αλλά και με τη γέφυρα Wheatstone και τον παλμογράφο. Τα όργανα αυτά μπορούν να διακριθούν σε διάφορες κατηγορίες με βάση κάποια από τα χαρακτηριστικά τους. Ο απλούστερος τρόπος διάκρισης είναι είτε με βάση την **αρχή λειτουργία τους** ή σε σχέση με τον **τρόπο με τον οποίο παρουσιάζουν τα αποτελέσματα**.

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- **Ηλεκτρικά όργανα**

Θα ασχοληθούμε κυρίως με αναλογικά όργανα που εμπεριέχουν περιστρεφόμενο δείκτη αλλά και με τη γέφυρα Wheatstone και τον παλμογράφο. Τα όργανα αυτά μπορούν να διακριθούν σε διάφορες κατηγορίες με βάση κάποια από τα χαρακτηριστικά τους. Ο απλούστερος τρόπος διάκρισης είναι είτε με βάση την **αρχή λειτουργία τους** ή σε σχέση με τον **τρόπο με τον οποίο παρουσιάζουν τα αποτελέσματα**.

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- **Ηλεκτρικά όργανα: Αρχή λειτουργίας**

Ηλεκτρομαγνητικά. Σε αυτά η κίνηση της βελόνας βασίζεται σε ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις όπως οι δυνάμεις από μαγνητικό πεδίο σε αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα. Χωρίζονται ανάλογα με την κατασκευή τους σε: στρεπτού πηνίου, ηλεκτροδυναμικά, διασταυρούμενων πηνίων, κινητού σιδήρου, κινητού μαγνήτη και επαγωγικά.

Ηλεκτροστατικά. Σε αυτά η κίνηση της βελόνας βασίζεται σε ηλεκτροστατικές δυνάμεις όπως η δύναμη που ασκείται με μεταλλική πλάκα μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο. Κύριο χαρακτηριστικό τους ότι μετρούν είναι απ' ευθείας τάση.

Θερμικά. Σε αυτά η κίνηση της βελόνας βασίζεται σε θερμικά φαινόμενα όπως η διαστολή των υλικών. Διακρίνονται σε θερμαινόμενου νήματος, διμεταλλικού στοιχείου και θερμοζεύγους.

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- **Ηλεκτρικά όργανα: Τρόπος παρουσίασης αποτελεσμάτων**

Ενδεικτικά όργανα. Σε αυτά το αποτέλεσμα εμφανίζεται σαν μία ένδειξη (δηλαδή μία τιμή) και αποτελούν την βασική κατηγορία οργάνων

Καταγραφικά όργανα. Σε αυτά παρουσιάζεται η μεταβολή της ένδειξης με το χρόνο. Το βασικό μέρος τους είναι ένα ενδεικτικό όργανο και η δυνατότητα καταγραφής της χρονικής μεταβολής δίνεται από ωρολογιακό μηχανισμό κίνησης και μία γραφίδα.

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- **Ηλεκτρικά όργανα: Τρόπος παρουσίασης αποτελεσμάτων**

Αθροιστικά όργανα. Σε αυτά παρουσιάζεται το συνολικό αποτέλεσμα μέσα σε κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (π.χ. μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας). Το βασικό μέρος τους είναι ένα ενδεικτικό όργανο, στη βελόνα του οποίου δίδεται η δυνατότητα περιστροφής 360, με το συνολικό αποτέλεσμα να είναι ανάλογο του αριθμού περιστροφών της βελόνας.

Παλμογράφο. Αποτελεί μία ιδιαίτερη κατηγορία καθώς δίνει ταυτόχρονα την δυνατότητα μέτρησης ενός μεγέθους αλλά και της χρονικής μεταβολής του.

Εισαγωγή στο μάθημα των Ηλεκτρικών Μετρήσεων

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- 1.1 Περιεχόμενο μαθήματος.
- 1.2 Ηλεκτρικά όργανα
- **1.3 Χαρακτηριστικά αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων**
- 1.4 Κατασκευαστικά μέρη αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων
- 1.5 Σύμβολα οργάνων.

Κεφάλαιο 1 : Χαρακτηριστικά αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων

- **Σφάλματα μετρήσεων:** σε διάφορους παράγοντες και μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά μία μέτρηση

Απόλυτο σφάλμα

$$\Delta X = X_{\text{ενδ}} - X_{\text{πραγ}}$$

Σχετικό σφάλμα

$$\Delta x / x_{\text{πραγ}} \quad \Delta x / x_{\text{ενδ}}$$

$$X_{\text{ενδ}} \approx X_{\text{πραγ}}$$

Παράδειγμα...

Κεφάλαιο 1 : Χαρακτηριστικά αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων

- α) Περιοχή μέτρησης οργάνου.
- β) Εσωτερική αντίσταση του οργάνου (r_0).
- γ) Ευαισθησία οργάνου.
- δ) Υπερφόρτιση οργάνου.
- ε) Offset οργάνου.
- ζ) Διακριτική ικανότητα οργάνου.
- η) Μέγιστο σφάλμα οργάνου.
- θ) Κλάση οργάνου.

Κεφάλαιο 1 : Χαρακτηριστικά αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων

- **α) Περιοχή μέτρησης οργάνου.** Το χαρακτηριστικό αυτό προσδιορίζει την περιοχή μετρούμενων τιμών και πολλές φορές αναφέρεται και ως Μέγιστη ένδειξη (ΜΕ). Η περιοχή μέτρησης του οργάνου καθορίζεται από διάφορους παράγοντες όπως η βασική αρχή λειτουργίας του, η συνδεσμολογία του, πρόσθετα εξαρτήματα (π.χ. επέκταση κλίμακας) κ.α.. Παραδείγματα περιοχής μέτρησης είναι: βολτόμετρο 0-200 V, αμπερόμετρο 0-1 A κλπ.
- **β) Εσωτερική αντίσταση του οργάνου (r_0).** Ως εσωτερική αντίσταση ενός οργάνου ορίζεται η αντίσταση που παρουσιάζει στους ακροδέκτες του και που οφείλεται στις συνδέσεις αλλά και στα εσωτερικά του τμήματα (π.χ. πηνίο). Η τιμή της εσωτερικής αντίστασης βασίζεται στη δομή του οργάνου και η επίδραση της στις μετρήσεις εξαρτάται από την χρήση.

Κεφάλαιο 1 : Χαρακτηριστικά αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων

- γ) **Ευαισθησία οργάνου.** Ως ευαισθησία οργάνου ορίζεται η μεταβολή της απόκρισης Δy ως προς την μεταβολή της διέγερσης Δx δηλαδή x/y . Σε όργανα όπου η απόκριση είναι γραμμική (η έξοδος y εξαρτάται από την είσοδο x μέσω συνάρτησης $y=ax+\beta$), η ευαισθησία είναι σταθερή για όλη την περιοχή μέτρησης και δίνεται από το a . Αντίστοιχα, αν η απόκριση δεν είναι γραμμική (η έξοδος y εξαρτάται από την είσοδο x μέσω συνάρτησης f , $y=f(x)$), η ευαισθησία ορίζεται ως η παράγωγος του f ως προς x .

Κεφάλαιο 1 : Χαρακτηριστικά αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων

- **δ) Υπερφόρτιση** οργάνου. Ως υπερφόρτιση οργάνου ορίζεται ο επί τοις εκατό λόγος της μέγιστης ανεκτής τιμής προς την μέγιστη μετρούμενη τιμή. Δηλαδή η υπερφόρτιση μας δίνει πόσο περισσότερο αντέχει το όργανο σε σχέση με την μέγιστη του ένδειξη. Σαν παράδειγμα, υπερφόρτιση 150% ενός αμπερομέτρου με μέγιστη ένδειξη 1 A σημαίνει ότι το όργανο αντέχει ρεύμα έως και 1.5 A.
- **ε) Offset** οργάνου. Ως offset οργάνου ορίζεται η μόνιμη απόκλιση κατά σταθερή ποσότητα από την πραγματική τιμή. Ουσιαστικά δηλαδή για όργανο με θεωρητική γραμμική απόκριση $y=ax$, η πραγματική απόκριση μπορεί να είναι $y=ax+b$ όπου το b είναι το offset, το οποίο θα πρέπει να αφαιρείται από την ένδειξη.
- **ζ) Διακριτική ικανότητα οργάνου.** Ως διακριτική ικανότητα οργάνου ορίζεται η μικρότερη μεταβολή που γίνεται αντιληπτή με το όργανο (π.χ. σε ένα υποδεκάμετρο η διακριτική ικανότητα είναι 1 mm). Η διακριτική ικανότητα ενός οργάνου μπορεί να μας δώσει το απόλυτο σφάλμα μιας μέτρησης αν αυτό δεν δίνεται αναλυτικά με
- κάποιο άλλο τρόπο.

Κεφάλαιο 1 : Χαρακτηριστικά αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων

- **η) Μέγιστο σφάλμα οργάνου.** Συνήθως σε ένα όργανο, το απόλυτο σφάλμα δεν παραμένει σταθερό σε όλη την περιοχή μετρήσεων αλλά μεταβάλλεται με τρόπο που εξαρτάται κυρίως από την κατασκευή του οργάνου. Το μεγαλύτερο από όλα τα αντίστοιχα απόλυτα σφάλματα ονομάζεται μέγιστο απόλυτο σφάλμα (ΜΑΣ) οργάνου. Επειδή όμως το ΜΑΣ είναι το μεγαλύτερο από όλα τα απόλυτα σφάλματα, μπορεί να θεωρηθεί σαν το απόλυτο σφάλμα του οργάνου καθώς καλύπτει όλες τις περιοχές μέτρησης. Αντίστοιχα ορίζεται και το μέγιστο σχετικό σφάλμα της μέτρησης.

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- θ) Κλάση οργάνου. Η κλάση G ενός οργάνου ορίζεται από την σχέση:

$$G = 100 \frac{ΜΑΣ}{ΜΕ}$$

όπου **ΜΑΣ** είναι το μέγιστο απόλυτο σφάλμα του οργάνου και **ΜΕ** είναι η μέγιστη ένδειξη. Δηλαδή η κλάση του οργάνου μας δίνει το επί τοις εκατό σφάλμα στη μέγιστη ένδειξη κατά την μέτρηση με το όργανο.

-έστω βολτόμετρο με κλάση 2 και μέγιστη ένδειξη 100 V.

Το μέγιστο απόλυτο σφάλμα του οργάνου υπολογίζεται σε ΜΑΣ?

Αντίστοιχα αν η μέτρηση μας είναι 50 V, το μέγιστο σχετικό σφάλμα?

$$\Delta x / x_{\text{πραγ}}$$

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- **Κατασκευαστικά μέρη αναλογικών ηλεκτρικών οργάνων**

α) Έδραση.






β) Ανασταλτική διάταξη.

γ) Διάταξη απόσβεσης.

δ) Δείκτης.

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- Σύμβολα οργάνων.

Σύμβολο	Σημασία
~	Όργανο για εναλλασσόμενο
=	Όργανο για συνεχές
★	Τάση δοκιμής οργάνου 500 V
	Όργανο στρεπτού πηνίου
	Όργανο διασταυρούμενων πηνίων
	Όργανο κινητού μαγνήτη
2	Κλάση οργάνου 2
	Τοποθέτηση οργάνου σε 60°
	Τοποθέτηση οργάνου σε όρθια θέση

Κεφάλαιο 2 : Σφάλματα

- Σε κάθε μέτρηση που πραγματοποιείται, ένας βασικός παράγοντας που καθορίζει το αποτέλεσμα είναι η απόκλιση της τιμής που μετράμε ή υπολογίζουμε σε σχέση από την πραγματική τιμή.

Είδη σφαλμάτων

- α) τα περιβαλλοντικά σφάλματα / σφάλματα παρατήρησης.
- β) τα τυχαία σφάλματα.
- γ) τα συστηματικά σφάλματα.

Κεφάλαιο 2 : Σφάλματα

Κεφάλαιο 2 : Σφάλματα

α) αν θέλουμε να μετρήσουμε μέγεθος x , πραγματοποιούμε n μετρήσεις και βρίσκουμε την μέση τιμή των μετρήσεων που ορίζεται ως:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}$$

β) υπολογίζουμε την μέση απόκλιση D ορίζεται ως:

$$D = \frac{\sum_{j=1}^n |x_j - \bar{x}|}{n}$$

γ) υπολογίζουμε το πιθανό σφάλμα E της μέσης τιμής

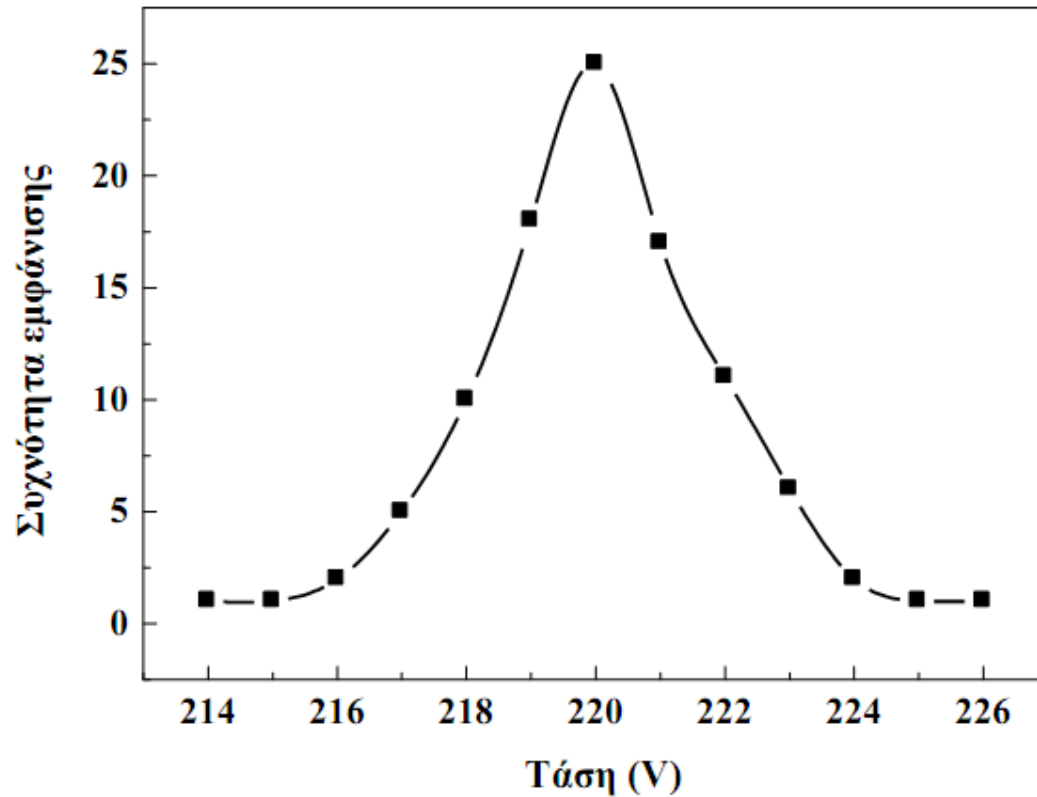
$$E = \frac{D}{\sqrt{n}} 0.845$$

Κεφάλαιο 1 : Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά οργάνων

- Ας δούμε ένα απλό παράδειγμα εφαρμογής των παραπάνω: έστω ότι θέλουμε να μετρήσουμε την τάση στο δίκτυο της ΔΕΗ. Πραγματοποιούμε δέκα μετρήσεις που δίνουν 218V, 222V, 220V, 215V, 226V, 228V, 214V, 225 V, 215 V και 227 V.
- μέση τιμή των μετρήσεων ?
- η μέση απόκλιση ?
- το πιθανό σφάλμα στη μέση τιμή ?

Κεφάλαιο 2 : Σφάλματα

- χρήση κατανομών



Σχήμα 2.1

Κεφάλαιο 2 : Σφάλματα

- **Συστηματικά Σφάλματα**
 - σφάλματα των οργάνων κατά την μέτρηση
 - σφάλματα κατά τους υπολογισμούς

Κεφάλαιο 2 : Σφάλματα

- **Συστηματικά Σφάλματα**

Στην περίπτωση που απαιτείται η γνώση ενός μεγέθους X το οποίο μπορεί να μετρηθεί απ' ευθείας με ένα όργανο, το απόλυτο ΔX και το σχετικό σφάλμα $\Delta X/X$ της μέτρησης βρίσκεται απλά με την χρήση της κλάσης G και της μέγιστης ένδειξης ME του οργάνου

$$\Delta X = (G \times ME) / 100 \text{ και } \Delta X / X = (G \times ME) / (100 \times X_{\text{ενδ}}).$$

Κεφάλαιο 2 : Σφάλματα

-Σφάλμα αθροίσματος

$$\Delta S = S_{\varepsilon} - S_{\alpha} = (A_{\varepsilon} + B_{\varepsilon}) - (A_{\alpha} + B_{\alpha}) = (A_{\varepsilon} - A_{\alpha}) + (B_{\varepsilon} - B_{\alpha}) = \Delta A + \Delta B$$
$$\frac{\Delta S}{S_{\varepsilon}} = \frac{\Delta A + \Delta B}{A_{\varepsilon} + B_{\varepsilon}}$$

-Σφάλμα πολλαπλασιασμού

$$\Delta S = S_{\varepsilon} - S_{\alpha} = A_{\varepsilon} B_{\varepsilon} - A_{\alpha} B_{\alpha} = A_{\varepsilon} B_{\varepsilon} - (A_{\varepsilon} - \Delta A)(B_{\varepsilon} - \Delta B) =$$
$$= A_{\varepsilon} \Delta B + B_{\varepsilon} \Delta A - \Delta A \Delta B \approx B_{\varepsilon} \Delta A + A_{\varepsilon} \Delta B$$

$$\frac{\Delta S}{S_{\varepsilon}} = \frac{B_{\varepsilon} \Delta A + A_{\varepsilon} \Delta B}{A_{\varepsilon} B_{\varepsilon}} = \frac{\Delta A}{A_{\varepsilon}} + \frac{\Delta B}{B_{\varepsilon}}$$

Κεφάλαιο 2 : Σφάλματα

-Γενικός τύπος

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n = \sum_{j=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_j} dx_j$$

$$|\Delta y| = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \Delta x_n \right| = \sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial y}{\partial x_j} \Delta x_j \right|$$

$$\left| \frac{\Delta y}{y} \right| = \frac{1}{|y|} \sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial y}{\partial x_j} \Delta x_j \right|$$

Κεφάλαιο 2 : Σφάλματα

Ας δούμε ένα ρεαλιστικό παράδειγμα Ισχύς

$$P = V \cdot I \quad \text{αν εφαρμόσουμε την γενική σχέση} \quad |\Delta P| = \left| \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I} \Delta I \right|$$

$$\Delta P = I \cdot \Delta V + V \Delta I \Leftrightarrow \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta I}{I}$$

$$\Delta X = (G \times ME) / 100 \quad \text{και} \quad \Delta X / X = (G \times ME) / (100 \times X_{\text{ενδ}}).$$

Έστω ότι μετράμε με βολτόμετρο $ME=400 \text{ V}$, $G=2$ & Αμπερόμετρο $ME=3 \text{ A}$, $G=2$

Αν $V=200\text{V}$ & $I=2 \text{ A}$ Να βρεθεί το μέγιστο και το σχετικό σφάλμα

$$\left. \begin{aligned} \Delta V &= \frac{G_v \cdot ME_v}{100} = \frac{2 \cdot 400}{100} = 8\text{V} \\ \Delta I &= \frac{G_I \cdot ME_I}{100} = \frac{2 \cdot 3}{100} = 0.06\text{A} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta P = 2\text{A} \cdot 8\text{V} + 200\text{V} \cdot 0.06\text{A} = 28\text{W}$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{28}{400} = 0.07 \quad \text{ή} \quad 7\%$$

Κεφάλαιο 3 : Όργανο στρεπτού πηνίου

Κεφάλαιο 3 : Όργανο στρεπτού πηνίου

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.

Πλεονεκτήματα:

η μεγάλη ευαισθησία και ακρίβεια

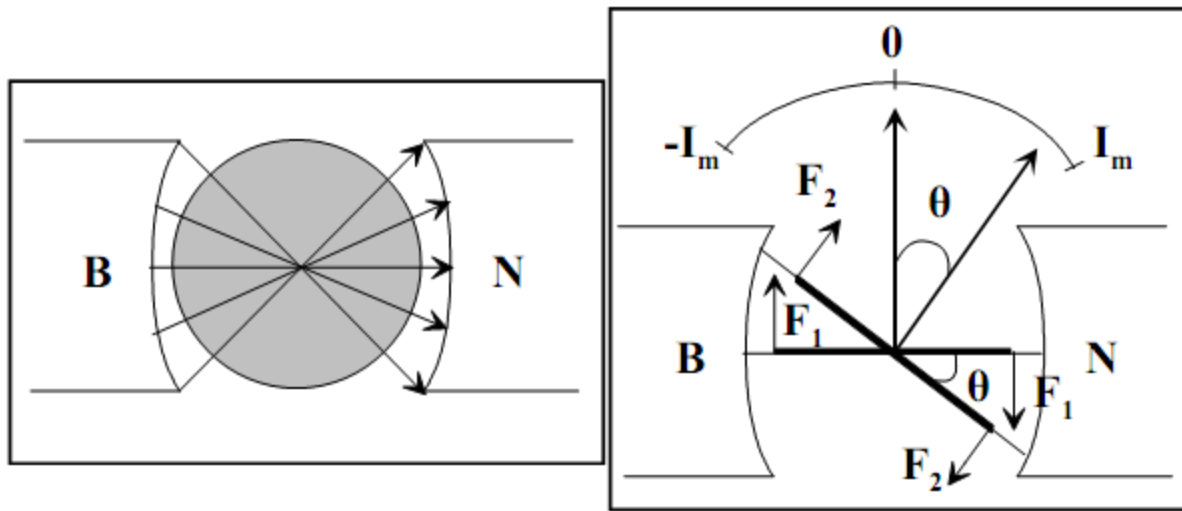
η απλή κατασκευή και η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος, ενώ

Μειονέκτημα:

αδυναμία του να μετρήσει εναλλασσόμενα μεγέθη.

Κεφάλαιο 3 : Όργανο στρεπτού πηνίου

Βασική αρχή λειτουργίας του οργάνου

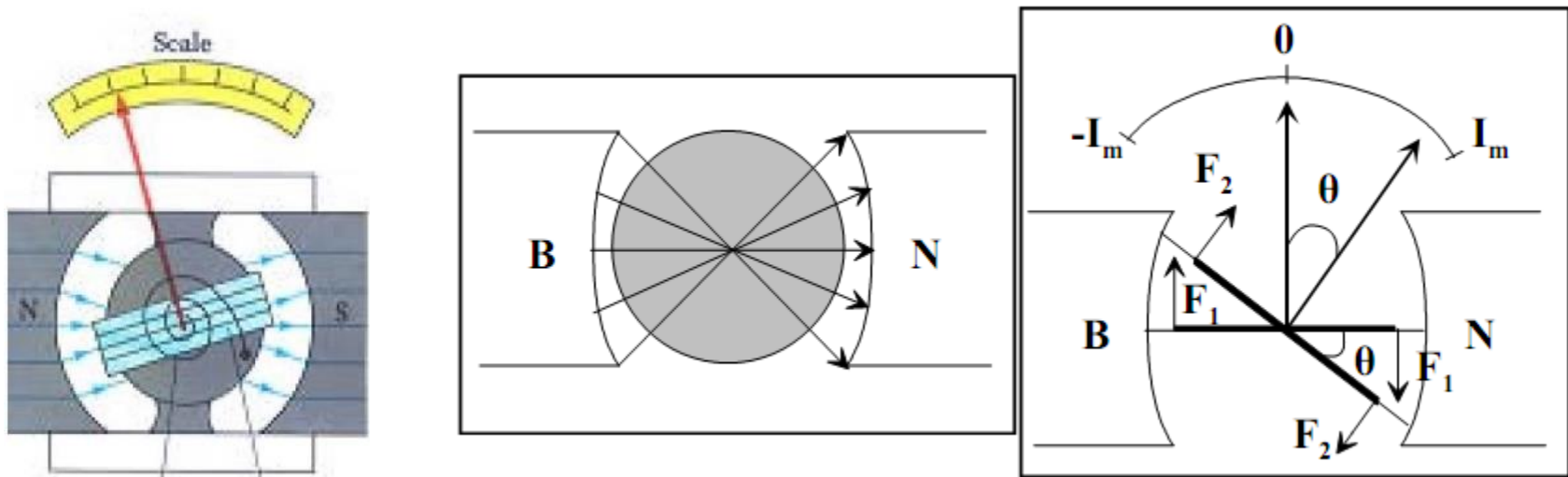


Σχήμα 3.1 Βασική αρχή λειτουργίας του οργάνου στρεπτού πηνίου

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

Κεφάλαιο 3 : Όργανο στρεπτού πηνίου

Βασική αρχή λειτουργίας του οργάνου

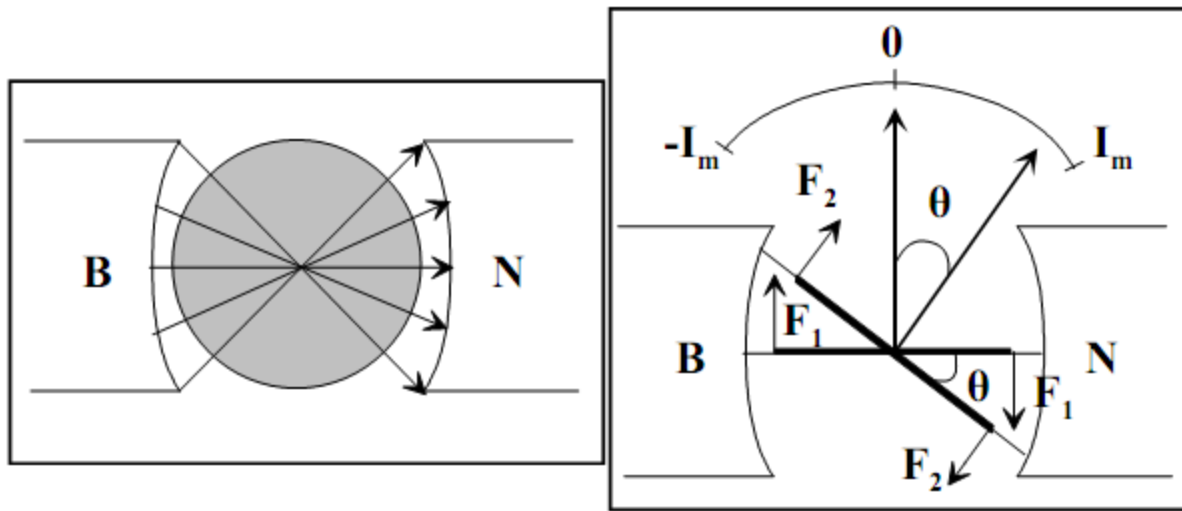


Σχήμα 3.1 Βασική αρχή λειτουργίας του οργάνου στρεπτού πηνίου

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.

Κεφάλαιο 3 : Όργανο στρεπτού πηνίου

Βασική αρχή λειτουργίας του οργάνου



Σχήμα 3.1 Βασική αρχή λειτουργίας του οργάνου στρεπτού πηνίου

Η κίνηση του πηνίου θα οδηγείται από ροπή

$$M = F_1 \ell = NBIL\ell = NBIS = C_1 I$$