

Άσκηση 11

Μέτρηση του μαγνητικού πεδίου ενός σωληνοειδούς

11.1. Σκοπός

Στην άσκηση αυτή θα μετρηθεί το μαγνητικό πεδίο ενός σωληνοειδούς (κυλινδρικού πηνίου). Θα χρησιμοποιηθεί ένα δοκιμαστικό πηνίο, η χρήση του οποίου στηρίζεται στον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, και ένα βαλλιστικό γαλβανόμετρο.

11.2. Εισαγωγή

11.2.1. Το μαγνητικό πεδίο

Για την περιγραφή του μαγνητικού πεδίου στον χώρο χρησιμοποιούμε το διάνυσμα $\mathbf{B}(x,y,z)$ που ονομάζεται μαγνητικό πεδίο ή μαγνητική επαγωγή. Ως εξίσωση ορισμού της μαγνητικής επαγωγής μπορούμε να θεωρήσουμε τη σχέση που περιγράφει τη δύναμη Lorentz που ασκείται πάνω σε ένα κινούμενο φορτίο

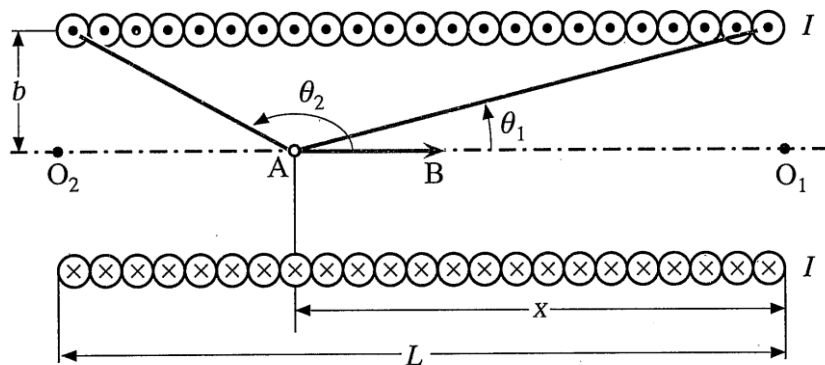
$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (11.1)$$

όπου \mathbf{F} η δύναμη, q το ηλεκτρικό φορτίο, \mathbf{E} το ηλεκτρικό πεδίο και \mathbf{v} η ταχύτητα του φορτίου. Στο σύστημα μονάδων S.I. η μονάδα μέτρησης του \mathbf{B} είναι το Tesla, που είναι ίσο με 10^4 Gauss, όπου το Gauss είναι η αντίστοιχη μονάδα στο σύστημα CGS.

$$1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Tesla}$$

11.2.2. Το μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς

Θεωρούμε σωληνοειδές μήκους L , ακτίνας b , με n περιελίξεις ανά μονάδα μήκους, που διαρρέεται από ρεύμα I , όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.1.



Σχήμα 11.1 Σχηματική διάταξη για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου \mathbf{B} στο σημείο A στον άξονα σωληνοειδούς

Θεωρούμε επίσης ότι οι περιελίξεις είναι αρκετά πυκνές, έτσι ώστε το σωληνοειδές να είναι ισοδύναμο με μια επαλληλία nL δακτυλίων ρεύματος, ακτίνας b .

Τότε το μαγνητικό πεδίο \mathbf{B} , πάνω στον άξονα του πηνίου, είναι παράλληλο προς τον άξονα

και δίνεται στο σημείο A του σχήματος από τη σχέση

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (11.2)$$

όπου

$$\cos \theta_1 = \frac{x}{\sqrt{b^2 + x^2}}, \quad \cos \theta_2 = -\frac{L-x}{\sqrt{b^2 + (L-x)^2}} \quad (11.3)$$

και η σταθερά $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Η τιμή του B γίνεται μέγιστη (B_{max}) στο μέσον του σωληνοειδούς ($x_{max} = L - x_{max}$)

$$B_{max} = \mu_0 n I \frac{L}{\sqrt{4b^2 + L^2}} \quad (11.4)$$

Αν $L \gg b$, τότε

$$B_{max} = \mu_0 n I \quad (11.5)$$

ενώ στο δεξί άκρο του πηνίου, $x = 0$ (και πάντα πάνω στον άξονα του πηνίου), έχουμε

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2} \quad (11.6)$$

Για σημεία εκτός του σωληνοειδούς και πάνω στην προέκταση του άξονά του, οι αλγεβρικές παραστάσεις για τα $\cos \theta_1$ και $\cos \theta_2$ γίνονται

$$\cos \theta_1 = -\frac{x}{\sqrt{b^2 + x^2}}, \quad \cos \theta_2 = -\frac{L+x}{\sqrt{b^2 + (L+x)^2}} \quad (11.7)$$

όπου x είναι η απόσταση του σημείου από το άκρο O_1 του πηνίου ($x > 0$ πάντοτε).

11.2.3. Μέτρηση μαγνητικού πεδίου με δοκιμαστικό πηνίο

Η χρήση δοκιμαστικού πηνίου για τη μέτρηση ενός μαγνητικού πεδίου B στηρίζεται στον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (νόμος του Faraday). Αν ένα δοκιμαστικό (μετρητικό) πηνίο διατομής A , με συνολικό αριθμό περιελίξεων N βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο B με την επιφάνεια διατομής του κάθετη στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, η μαγνητική ροή Φ που διέρχεται από κάθε σπείρα είναι

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = BA \quad (11.8)$$

Η τελευταία ισότητα (όπως και οι επόμενες σχέσεις) ισχύει για μαγνητικό πεδίο που είναι ομογενές σε όλη την επιφάνεια της διατομής A . Αν η μαγνητική αυτή ροή μεταβάλλεται με τον χρόνο με ρυθμό $d\Phi/dt$, τότε η ηλεκτρεγερτική δύναμη (τάση) στους ακροδέκτες του δοκιμαστικού πηνίου είναι

$$\mathcal{E}(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt} \quad (11.9)$$

Αν R είναι η συνολική αντίσταση στο κλειστό κύκλωμα του δοκιμαστικού πηνίου, τότε η εξάρτηση του ρεύματος I στο κύκλωμα αυτό από το χρόνο δίνεται από τη σχέση

$$I(t) = \frac{\mathcal{E}(t)}{R} = - \frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{NA}{R} \frac{dB}{dt} \quad (11.10)$$

Αν η μεταβολή της ροής Φ , από την αρχική της τιμή BA στην τελική της τιμή 0 απαιτεί χρόνο τ , τότε το συνολικό φορτίο Q που τελικά θα κυκλοφορήσει στο κλειστό κύκλωμα του δοκιμαστικού πηνίου θα είναι

$$Q = \int_0^\tau I(t) dt = - \frac{NA}{R} \int_0^\tau \frac{dB}{dt} dt = - \frac{NA}{R} \int_B^0 dB = \frac{NA}{R} B \quad (11.11)$$

Στην πράξη, η μεταβολή της ροής $\Delta\Phi$ μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Για παράδειγμα, αν το πηνίο περιστραφεί κατά γωνία $\pi/2$, έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο B να είναι τελικά παράλληλο προς την επιφάνεια διατομής του, ή αν απομακρύνουμε το πηνίο σε ένα χώρο όπου $B = 0$, ή τέλος, που είναι και ο βολικότερος τρόπος, αν μηδενιστεί το ρεύμα I του σωληνοειδούς, δίχως να περιστρεφεί ή να μετακινηθεί το δοκιμαστικό πηνίο από τη θέση του.

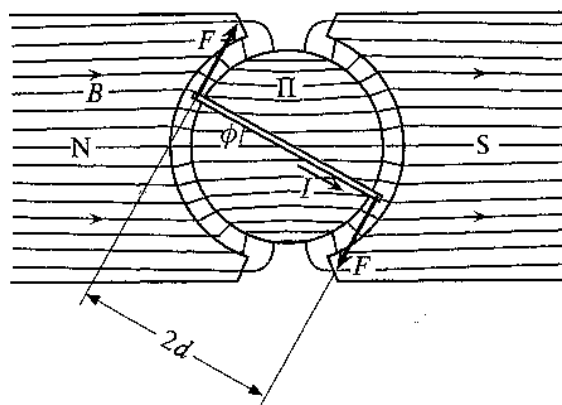
Η Εξ. (11.11) επιτρέπει τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, B , από τη μέτρηση του φορτίου, Q . Θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι η τιμή του φορτίου δεν εξαρτάται από την ταχύτητα μεταβολής της ροής, Φ , αλλά μόνο από την αρχική και τελική της τιμή, μια ιδιότητα που καθιστά τη μέτρηση σχετικά άνετη.

Στην παράγραφο που ακολουθεί θα δούμε πώς μπορεί να μετρηθεί το φορτίο στο κύκλωμα του δοκιμαστικού πηνίου, χρησιμοποιώντας έναν κλασσικό μετρητή ρεύματος, κατά προτίμηση ευαίσθητου, καθώς στην Άσκηση τα μετρούμενα φορτία είναι πολύ μικρά.

11.2.4. Αρχή λειτουργίας του γαλβανόμετρου

Το γαλβανόμετρο είναι ένα ευαίσθητο όργανο για τη μέτρηση κυρίως μικρών ρευμάτων, όπως και μικρών τάσεων, ωστόσο σε ειδική εφαρμογή (βαλλιστική εφαρμογή), με το όργανο αυτό μπορούν να μετρηθούν και μικρά ηλεκτρικά φορτία. Η αρχή λειτουργίας του γαλβανόμετρου φαίνεται στα Σχ. 11.2 και 11.3.

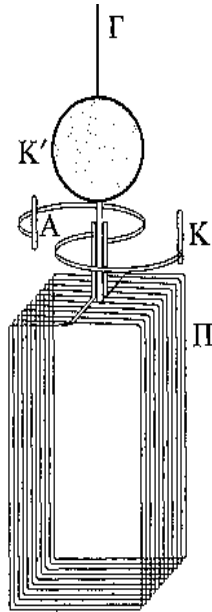
Στο Σχ. 11.2 ένα πηνίο με n περιελίξεις βρίσκεται στο διάκενο μεταξύ των πόλων N και S ενός μόνιμου ισχυρού μαγνήτη, αλλά και του κυλινδρικού του πυρήνα Π , σχηματίζοντας ένα πλαίσιο γύρω από τον πυρήνα.



Σχήμα 11.2

Στο Σχ. 11.3 ο μαγνήτης σκόπιμα αφαιρέθηκε, προκειμένου να φαίνεται καλύτερα ο τρόπος ανάρτησης του πλαισίου με τις n περιελίξεις.

Το πηνίο αυτό είναι ανηρτημένο από νήμα Γ (Σχ. 11.3), έτσι ώστε να μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του κυλινδρικού πυρήνα Π (Σχ. 11.2). Οι προσαγωγοί ρεύματος A και K είναι σπειροειδή ελατήρια και εξασφαλίζουν, μαζί με την ανάρτηση Γ , την επιστροφή του πηνίου στη θέση ισορροπίας, όταν το πηνίο δε διαρρέεται από ρεύμα.



Σχήμα 11.3. Κατοπτρικό γαλβανόμετρο. Π : πηνίο, A και K : προσαγωγοί ρεύματος, K' : κάτοπτρο, Γ : νήμα ανάρτησης.

Το μαγνητικό πεδίο \mathbf{B} στο διάκενο μεταξύ των πόλων (N , S) και του κυλινδρικού πυρήνα Π είναι πρακτικά ακτινικό (Σχ. 11.2). Το πηνίο, στο Σχ. 11.2, έχει μία μόνο ορθογώνια περιέλιξη πλάτους $2d$ και μήκους ℓ . Για μικρές σχετικά γωνίες περιστροφής φ ($\sin\varphi \approx \varphi$), οι κάθετες πλευρές μήκους ℓ , κινούνται σε ένα πρακτικά σταθερό χωρικά μαγνητικό πεδίο \mathbf{B} και η μαγνητική ροή Φ μέσα από το πηνίο Π είναι

$$\Phi = B2d\ell \sin\varphi \approx 2Bd\varphi\ell \quad (11.12)$$

Όταν το πηνίο Π διαρρέεται από ρεύμα I , η δύναμη Laplace, \mathbf{F} , στις κάθετες πλευρές μήκους ℓ είναι

$$\mathbf{F} = nI\mathbf{B}\ell \quad (11.13)$$

και η ηλεκτρομαγνητική ροπή

$$N_{\eta\lambda} = nI\mathbf{B}\ell \cdot 2d = nI\mathbf{B}A = G\mathbf{I} \quad (11.14)$$

όπου $A = 2d\ell$ είναι το εμβαδόν της η επιφάνειας διατομής του πηνίου. Το μέγεθος $G = nBA$ είναι μια σταθερά του οργάνου και ονομάζεται **δυναμική σταθερά του γαλβανόμετρου**.

Όταν το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα I , θα ισορροπήσει σε μια γωνία περιστροφής φ , τέτοια ώστε η μηχανική ροπή επαναφοράς που ασκείται στο πηνίο Π , δηλαδή η $N_{\mu\eta\chi} = D\varphi$, όπου D η κατευθύνουσα ροπή του νήματος ανάρτησης του πηνίου και των προσαγωγών, να εξισορροπείται από την ηλεκτρομαγνητική ροπή

$$D\varphi = N_{\mu\eta\chi} = N_{\eta\lambda} = nI\mathbf{B}A = G\mathbf{I} \quad (11.15)$$

Με τη μέτρηση, λοιπόν, της γωνίας περιστροφής φ είναι δυνατόν να βρεθεί το ρεύμα I που διαρρέει το πηνίο του γαλβανόμετρου, αφού D και G είναι σταθερές του οργάνου.

Μέσω μέτρησης του ρεύματος I , με το γαλβανόμετρο μπορεί να μετρηθεί κα μία μικρή τάση E . Έτσι, αν το γαλβανόμετρο συνδεθεί με μία πηγή μικρής τάσης, της οποίας η εσωτερική αντίσταση είναι R_{π} , τότε η ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής, με βάση τον νόμο του Ohm, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$E = I(R_{\pi} + R)$$

όπου R είναι η αντίσταση του πηνίου Π , την οποία η κατασκευάστρια εταιρεία συνήθως τη δηλώνει.

Για πιο άνετη και ακριβή μέτρηση της γωνίας περιστροφής του πηνίου φ , το γαλβανόμετρο είναι συνήθως εξοπλισμένο με κάτοπτρο K' , που είναι στερεά συνδεδεμένο με το νήμα ανάρτησης Γ (Σχ. 11.3) και περιστρέφεται μαζί με το πηνίο Π (κατοπτρικό γαλβανόμετρο).

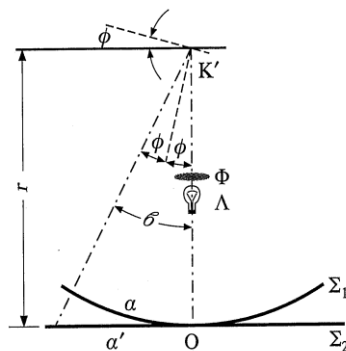
Περιστροφή του πηνίου κατά γωνία φ προκαλεί, λοιπόν, περιστροφή του κατόπτρου κατά την ίδια γωνία. Μια προσπίπτουσα δέσμη φωτός ανακλάται τότε κατά γωνία $\beta = 2\varphi$ (Σχ. 11.4). Η αντίστοιχη μετατόπιση της φωτεινής κηλίδας σε μια κυκλική κλίμακα ακτίνας r , στο κέντρο της οποίας βρίσκεται το κάτοπτρο του γαλβανόμετρου είναι (Σ1, Σχ. 11.4)

$$\alpha = r\delta = 2r\varphi \quad (11.16)$$

όπου τα β και φ μετριοούνται σε ακτίνια.

Σε μια επίπεδη κλίμακα (Σ2, 11.4) η μετατόπιση της φωτεινής κηλίδας είναι

$$\alpha' = r \tan \delta = r \tan 2\varphi \quad (11.17)$$



Ανάγνωση της περιστροφής του βαλλιστικού γαλβανόμετρου. Το νήμα του λαμπτήρα Λ απεικονίζεται μέσω του φακού Φ και του κατόπτρου K' στην κλίμακα Σ_1 ή Σ_2

Σχήμα 11.4

Για μικρές γωνίες, φ , μπορούμε να αντικαταστήσουμε το α με το α' , που μετράται πιο άνετα. Το σχετικό σφάλμα ($\sim 1\%$, για $\beta \approx \pi/18 = 10^\circ$) αυξάνει με τη γωνία β .

Η κίνηση του πηνίου Π του γαλβανόμετρου από την αρχική θέση ισορροπίας ($I = 0$), στη νέα θέση ισορροπίας ($I \neq 0$), είναι αρκετά σύνθετη και περιγράφεται από τη διαφορική εξίσωση ταλάντωσης με απόσβεση. Η απόσβεση της κίνησης του πηνίου Π είναι μηχανική

(λόγω των τριβών ανάρτησης και της αντίστασης του αέρα στην κίνηση του πηνίου) και ηλεκτροδυναμική. Η περιστροφή του πηνίου μέσα σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο προκαλεί την εμφάνιση μιας ηλεκτρεγερτικής δύναμης εξ επαγωγής, στους ακροδέκτες του πηνίου, και όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, ενός ρεύματος εξ επαγωγής στο κύκλωμα του πηνίου, που «αντιτίθεται» στην κίνηση του πηνίου (κανόνας Lenz).

Επιλέγοντας κατάλληλα την ωμική αντίσταση στο κλειστό κύκλωμα του γαλβανόμετρου, μπορούμε να έχουμε μία από τις εξής τρεις περιπτώσεις απόσβεσης και κίνησης του πηνίου:

(α) *Μικρή απόσβεση*. Το πηνίο εκτελεί αρμονική ταλάντωση με απόσβεση γύρω από τη θέση ισορροπίας.

(β) *Κρίσιμη απόσβεση*. Το πηνίο κινείται στη νέα θέση ισορροπίας ακολουθώντας εκθετική συνάρτηση, τύπου $te^{-t/\tau}$, με σταθερά χρόνου τ_0 , χωρίς ταλάντωση και στον ελάχιστο χρόνο.

(β) *Υπερκρίσιμη απόσβεση*. Και εδώ το πηνίο κινείται προς τη νέα θέση ισορροπίας χωρίς ταλάντωση, ωστόσο η κίνηση αυτή γίνεται πολύ αργά.

Κατά κανόνα, όλοι οι αναλογικοί μετρητές ρεύματος, όπως και το γαλβανόμετρο, είναι ρυθμισμένοι στην κρίσιμη απόσβεση, ώστε η μετατόπιση του δείκτη στη νέα θέση ισορροπίας να γίνεται χωρίς ταλάντωση και στον ελάχιστο χρόνο.

11.2.5. Το γαλβανόμετρο σε βαλλιστική λειτουργία

Εκτός από μετρήσεις μικρών ρευμάτων και τάσεων, το γαλβανόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μετρήσεις ηλεκτρικού φορτίου

$$Q = \int_0^{\tau} Idt \quad (11.18)$$

με την προϋπόθεση ότι ο χρόνος διέλευσης του ρεύματος μέσα από το όργανο είναι πολύ μικρότερος από τη σταθερά χρόνου κίνησης του πηνίου του γαλβανόμετρου, τ_0 .

Η σύντομη διέλευση του ρεύματος προκαλεί μια αρχική σύντομη ηλεκτρομηχανική ώθηση του πηνίου, που αφήνεται μετά να εκτελέσει, ανάλογα με την απόσβεση που έχει, περιοδική ή μη κίνηση. Όταν η απόσβεση είναι κρίσιμη, η κίνηση είναι μη περιοδική. Ο δείκτης του οργάνου εκτρέπεται κατά μία μέγιστη τιμή και στη συνέχεια επιστρέφει και πάλι στη θέση ισορροπίας.

Σε κάθε περίπτωση μπορεί ναδειχθεί ότι η μέγιστη γωνία εκτροπής $\varphi_{\mu\epsilon\gamma}$ του πηνίου (και επομένως, η μέγιστη απόκλιση $\alpha'_{\mu\epsilon\gamma}$ της φωτεινής κηλίδας στην επίπεδη κλίμακα), είναι ανάλογη του ολικού ηλεκτρικού φορτίου Q (της αρχικής ώθησης, γενικά) δηλαδή του ολικού φορτίου που πέρασε από το πηνίο Π , συνεπώς

$$Q = E_{\beta} \alpha'_{\mu\epsilon\gamma} \quad (11.19)$$

Αυτή είναι η βαλλιστική λειτουργία του οργάνου, όταν δηλαδή το μετρούμενο μέγεθος δεν είναι η νέα θέση ισορροπίας, αλλά η *μέγιστη βαλλιστική εκτροπή του δείκτη*.

Στη σχέση (11.19), η σταθερά αναλογίας E_{β} είναι η σταθερά του οργάνου ή η *βαλλιστική ευαισθησία του γαλβανόμετρου*.

11.3. Μέθοδος

Σήμερα η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου γίνεται με μαγνητόμετρα, στα οποία αξιοποιείται το φαινόμενο Hall. Τα όργανα αυτά είναι δυσεύρετα και ακριβά, γεγονός που αναγκάζει τους ερευνητές να καταφεύγουν σε εναλλακτικές μεθόδους μέτρησης του μαγνητικού πεδίου, μία

από τις οποίες είναι αυτή που χρησιμοποιείται στην Άσκηση αυτή.

Η μέθοδος που ακολουθείται για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου B στηρίζεται στο νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Ένα μικρό δοκιμαστικό (μετρητικό) πηνίο βρίσκεται στη θέση A (Σχ. 11.1), με την επιφάνεια διατομής του κάθετα στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου B . Το δοκιμαστικό πηνίο είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένο με ένα γαλβανόμετρο, που αξιοποιείται σε βαλλιστική λειτουργία.

Το ρεύμα στο κύκλωμα του σωληνοειδούς μηδενίζεται (διακόπτεται με διακόπτη) και μαζί, βέβαια, μηδενίζεται και το μαγνητικό πεδίο. Σε ανοιχτό κύκλωμα αυτό θα προκαλέσει εμφάνιση σύντομου παλμού τάσης, αλλά όταν το κύκλωμα του δοκιμαστικού πηνίου είναι κλειστό, για παράδειγμα με το γαλβανόμετρο, ο μηδενισμός του μαγνητικού πεδίου θα επάγει έναν σύντομο παλμό ρεύματος στο κύκλωμα του πηνίου-γαλβανομέτρου, που έχει συνολική αντίσταση R . Στην περίπτωση αυτή το ολικό ηλεκτρικό φορτίο που θα κυκλοφορήσει στο κύκλωμα του δοκιμαστικού πηνίου-γαλβανομέτρου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (11.11),

$$Q = \frac{NA}{R} B \quad (11.20)$$

όπου N είναι ο συνολικός αριθμός περιελίξεων (σπειρών), A το εμβαδόν της διατομής του δοκιμαστικού πηνίου και R είναι η ωμική αντίσταση στο κύκλωμα δοκιμαστικού πηνίου-γαλβανομέτρου.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι αν το γαλβανόμετρο αξιοποιηθεί σε βαλλιστική λειτουργία, από τη σχέση (11.20), το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί.

Στη μέθοδο αυτή, όταν το ρεύμα στο σωληνοειδές μηδενίζεται, η φωτεινή κηλίδα εκτρέπεται κατά μία ορισμένη μέγιστη τιμή. Το ολικό φορτίο που συνδέεται με αυτήν την εκτροπή δίνεται από τη σχέση (11.19)

$$Q = E_{\beta} \alpha'_{\mu\epsilon\gamma} \quad (11.21)$$

όπου E_{β} είναι η σταθερά του γαλβανομέτρου και $R = R_{\pi} + R_{\gamma}$ είναι η συνολική ωμική αντίσταση στο κύκλωμα δοκιμαστικού πηνίου-γαλβανομέτρου, η οποία δίνεται και είναι γνωστή.

Το μαγνητικό πεδίο που θα μετρηθεί είναι το μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς σε διάφορες θέσεις πάνω στον άξονα του σωληνοειδούς και στην προέκταση του άξονα έξω από το σωληνοειδές. Η θεωρητική τιμή του μαγνητικού πεδίου δίνεται από τις Εξ. (11.2), (11.3) και (11.7).

Σημείωση. Η επιλογή που έγινε για τη μεγιστοποίηση του γινομένου NA , με παράλληλη ελαχιστοποίηση των διαστάσεων του δοκιμαστικού πηνίου, ιδιαίτερα της διάστασης παράλληλης προς τον άξονα του σωληνοειδούς, επέβαλε την περιέλιξη περισσότερων από μίας στρώσεων σπειρών στο δοκιμαστικό πηνίο, τη μία στρώση πάνω στην άλλη. Τότε όμως η μαγνητική ροή Φ μέσα από το δοκιμαστικό πηνίο, για ομογενές μαγνητικό πεδίο B κάθετο στην επιφάνεια διατομής του, δε δίνεται από τη σχέση

$$\Phi = BNA \quad (11.22)$$

όπου A η επιφάνεια διατομής του δοκιμαστικού πηνίου, αλλά από τη σχέση,

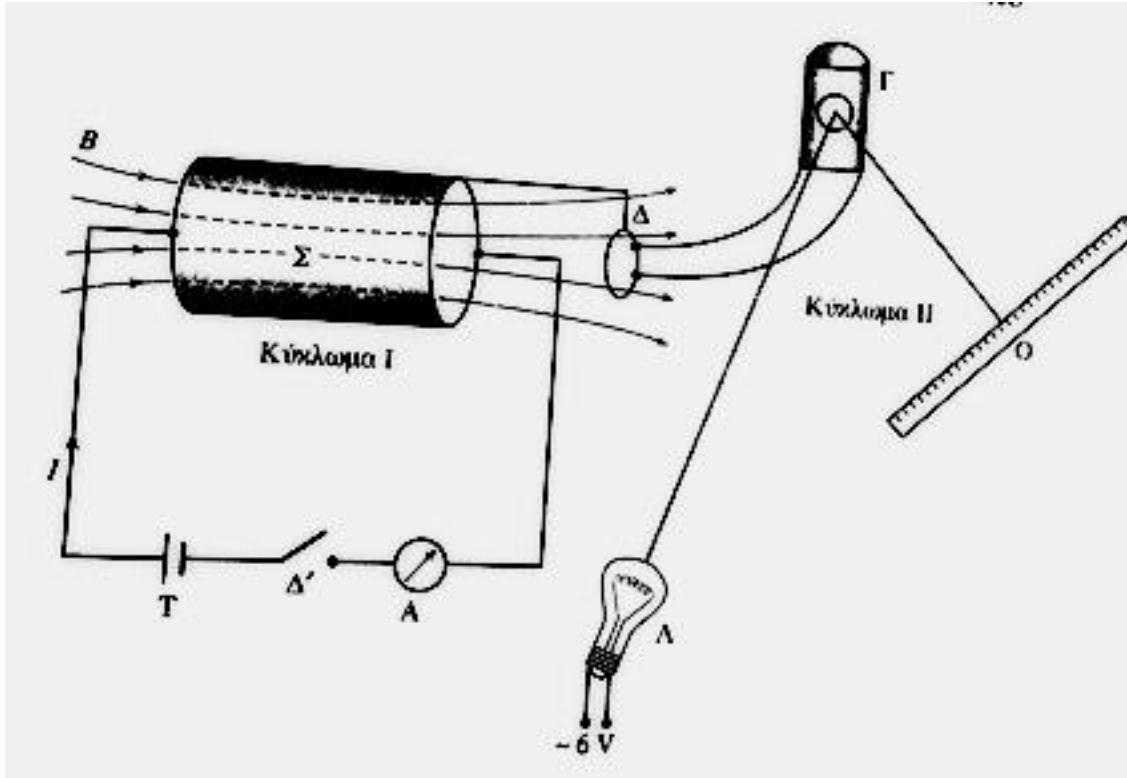
$$\Phi = B \sum_{i=1}^m N_i A_i \quad (11.23)$$

όπου N_i είναι ο αριθμός περιελίξεων της στρώσης i , A_i η επιφάνεια διατομής για τη στρώση i και m είναι ο συνολικός αριθμός των στρώσεων. Το μέγεθος

$$\sum_{i=1}^m N_i A_i$$

είναι μία σταθερά του δοκιμαστικού πηνίου (ένα είδος ενεργούς τιμής του γινομένου NA), η οποία δίνεται και είναι γνωστή. Επομένως στην Εξ. (11.9) και σε όλες τις επόμενες, το μέγεθος NA πρέπει να αντικατασταθεί στους υπολογισμούς με το παραπάνω άθροισμα δηλαδή με την ενεργό τιμή του γινομένου NA .

11.4. Πειραματική διάταξη



Σχήμα 11.5. Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης. Σ: σωληνοειδές, Τ: τροφοδοτικό ισχύος, Δ': διακόπτης, Α: αμπερόμετρο, Δ: δοκιμαστικό πηνίο, Γ: γαλβανόμετρο, Λ: λαμπτήρας, Ο: οθόνη

Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει:

- Τροφοδοτικό συνεχούς τάσης T , (Σχ. 11.5).
- Αμπερόμετρο για τη μέτρηση της έντασης του ρεύματος I στο κύκλωμα Α, (Σχ. 11.5).
- Μεγάλο κυλινδρικό πηνίο, το σωληνοειδές Σ, (Σχ. 11.5) για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου που θα μετρηθεί στον άξονά του. Το σωληνοειδές έχει μήκος $L = 0,30$ m, ακτίνα διατομής $b = 0,06$ m και συνολικό αριθμό σπειρών N ίσο με 300 ($n = 300/0,3 = 1000$).
- Δοκιμαστικό πηνίο Δ, (Σχ. 11.5), που κινείται στον άξονα του σωληνοειδούς
- Γαλβανόμετρο Γ, (Σχ. 11.5), η πηγή φωτός του οποίου τροφοδοτείται με 12 V από το ίδιο το τροφοδοτικό της συνεχούς τάσης
- Μία διάταξη για την ανάγνωση της μέγιστης απόκλισης $\alpha'_{\mu\epsilon\gamma}$ της φωτεινής κηλίδας του γαλβανομέτρου, που αποτελείται από ένα λαμπτήρα Α και μια οθόνη Ο, με επίπεδη κλίμακα (βλ. Σχ. 11.4 και Σχ. 11.5).
- Ηλεκτρικό κύκλωμα για την τροφοδοσία του σωληνοειδούς με συνεχές ρεύμα (Κύκλωμα Ι, Σχ. 11.5).

- Ηλεκτρικό κύκλωμα για την τροφοδοσία δοκιμαστικού πηνίου-γαλβανόμετρου, (Κύκλωμα II, Σχ. 11.5).

Το δοκιμαστικό πηνίο μπορεί να μετακινηθεί κατά μήκος στον άξονα του σωληνοειδούς. Έχει εσωτερική ακτίνα διατομής 0,75 cm, συνολικό αριθμό σπειρών $N = 1500$, ενώ η ενεργός τιμή του γινομένου NA , στην Εξ. (11.9), είναι 0,265 m².

Βιβλιογραφία

1. *Μαθήματα Φυσικής Berkeley*, Τόμος II: *Ηλεκτρισμός-Μαγνητισμός.*, Κεφ. 6 και 7 (Αθήνα, 1978).
2. H.J. Pain, *Φυσική των ταλαντώσεων και των κυμάτων*. Κεφ. 1, Παράγρ. 1.12 (Αθήνα, 1990).
3. *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής*, Τόμος I, ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, Εκδόσεις Συμμετρία (Αθήνα 2010).

11.5. Εκτέλεση

1. Συνδέστε σε σειρά το τροφοδοτικό συνεχούς τάσης, το αμπερόμετρο και το σωληνοειδές (κύκλωμα I, Σχ. 11.5).
2. Τοποθετήστε το δοκιμαστικό πηνίο στο μέσον του σωληνοειδούς. Τροφοδοτήστε το σωληνοειδές (κύκλωμα I) με ρεύμα περίπου 1 A και μετρήστε την απόκλιση $\alpha_{\text{μεγ}}$ της φωτεινής κηλίδας όταν μηδενίσετε το ρεύμα στο κύκλωμα I, ανοίγοντας τον διακόπτη Δ' (Σχ. 11.5).
3. Επαναλάβετε τη μέτρηση αυτή, δηλαδή στην ίδια θέση του δοκιμαστικού πηνίου, για 4 διαφορετικές τιμές του ρεύματος I . Καταχωρήστε τα αποτελέσματα στον Πίνακα I.

Πίνακας I

I (A)	$\alpha'_{\text{μεγ}}$ (cm)	Q (C)	B (T)

4. Για σταθερή τιμή του ρεύματος, I , γύρω στα 3A, μετρήστε την απόκλιση, $\alpha'_{\text{μεγ}}$, της φωτεινής κηλίδας για διάφορες θέσεις του δοκιμαστικού πηνίου πάνω στον άξονα του σωληνοειδούς, με βήμα 5 cm. 6 τιμές εντός του σωληνοειδούς και 4 εκτός, από 2 σε κάθε άκρο. Καταχωρήστε τα αποτελέσματά σας στον Πίνακα II, όπου x είναι η απόσταση του δοκιμαστικού πηνίου από το άκρο του σωληνοειδούς.

Πίνακας II

x (cm)	$\alpha'_{\text{μεγ}}$ (cm)	Q (C)	B (T)

5. Εκτιμήστε την ακρίβεια με την οποία μετρούνται τα μεγέθη που υπεισέρχονται στις σχέσεις (11.11) και (11.19), για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου B . Εκτιμήστε επίσης την ακρίβεια μέτρησης του ρεύματος I του σωληνοειδούς, καθώς και της θέσης του δοκιμαστικού πηνίου.

11.6. Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Βρείτε για τις μετρήσεις που κάνατε στα βήματα 2-4 την εκάστοτε τιμή του μαγνητικού πεδίου και συμπληρώστε τους Πίνακες I και II. Εκτιμήστε την ακρίβεια μέτρησης του μαγνητικού πεδίου.

2. Παραστήστε γραφικά, σημειώνοντας και τα σφάλματα, την εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου B στο κέντρο του σωληνοειδούς από την τιμή του ρεύματος I , $B = B(I)$ (Πίνακας I). Επιβεβαιώνεται η γραμμική εξάρτηση; Σχολιάστε.

3. Παραστήστε γραφικά, σημειώνοντας και τα σφάλματα, την εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου B από την απόσταση, x , από το άκρο του σωληνοειδούς, $B = B(x)$ (Πίνακας II). Σχεδιάστε στο ίδιο διάγραμμα τη θεωρητική καμπύλη από τις Εξ. (11.2) και (11.3). Συγκρίνετε τα πειραματικά σημεία με τη θεωρητική καμπύλη και σχολιάστε.