

Άσκηση 11

Μέτρηση του μαγνητικού πεδίου ενός σωληνοειδούς

11.1. Σκοπός

Στην άσκηση αυτή θα μετρηθεί το μαγνητικό πεδίο ενός σωληνοειδούς (κυλινδρικού πηνίου), με τη βοήθεια ενός δοκιμαστικού πηνίου, η χρήση του οποίου στηρίζεται στον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, και ενός βαλλιστικού γαλβανόμετρου.

11.2. Γενικά

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.

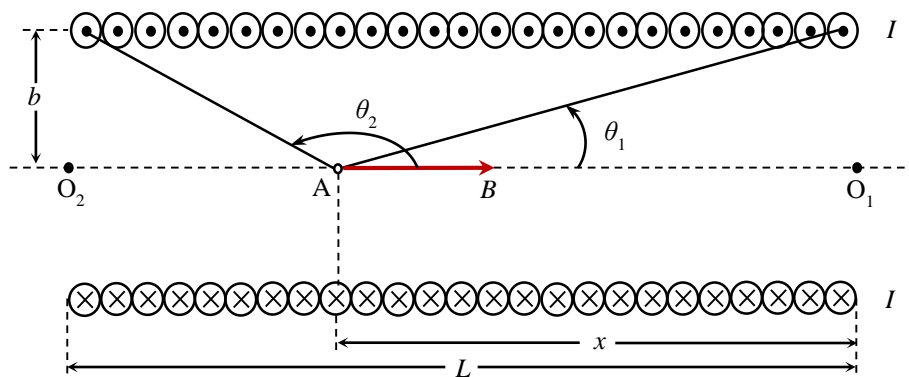
Στο σύστημα μονάδων SI η μονάδα μέτρησης του B είναι το Tesla:

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

Ένα Tesla είναι ίσο με 10^4 Gauss, όπου το Gauss είναι η αντίστοιχη μονάδα στο σύστημα CGS.

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.. Θεωρούμε επίσης ότι οι περιελίξεις είναι αρκετά πυκνές, έτσι ώστε το σωληνοειδές να είναι ισοδύναμο με μια επαλληλία $n \cdot L$ δακτυλίων ρεύματος, ακτίνας b .



Σχήμα 11.1. Σχηματική διάταξη για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου B στο σημείο A του άξονα ενός σωληνοειδούς.

Τότε, το μαγνητικό πεδίο 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 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m η **μαγνητική διαπερατότητα του κενού**.

Η τιμή του B γίνεται μέγιστη (B_{\max}) στο μέσο 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 \mathbf{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 \mathbf{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 τον 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

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

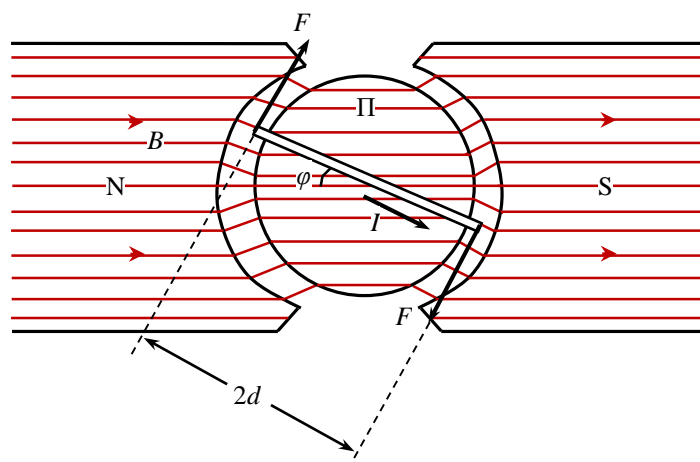
Στην πράξη, η μεταβολή της ροής μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, αν το πηνίο περιστραφεί κατά γωνία $\pi/2$, έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο B να είναι τελικά παράλληλο προς την επιφάνεια διατομής του, ή αν απομακρύνουμε το πηνίο σε έναν χώρο όπου $B = 0$ ή, τέλος, αν μηδενιστεί το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

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.

Ακολουθως θα δούμε πώς μπορεί να μετρηθεί το φορτίο στο κύκλωμα του δοκιμαστικού πηνίου, χρησιμοποιώντας έναν κλασικό μετρητή ρεύματος, κατά προτίμηση ευαίσθητο, καθώς στην άσκηση τα μετρούμενα φορτία είναι πολύ μικρά..

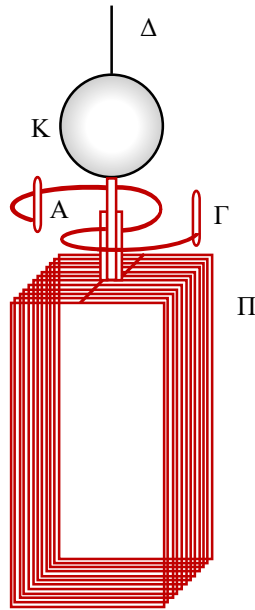
11.2.4. Αρχή λειτουργίας του γαλβανομέτρου

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



Σχ. 11.2. Αρχή λειτουργίας του γαλβανομέτρου.

Στο Σχ. 11.2, ένα πηνίο με n περιελίξεις βρίσκεται στο διάκενο μεταξύ των πόλων N και S ενός μόνιμου ισχυρού μαγνήτη και του κυλινδρικού του πυρήνα Π , σχηματίζοντας ένα πλαίσιο γύρω από τον πυρήνα. Στο Σχ. 11.3 ο μαγνήτης αφαιρέθηκε σκόπιμα, προκειμένου να φαίνεται καλύτερα ο τρόπος ανάρτησης του πλαισίου. Το πηνίο αυτό είναι αναρτημένο από νήμα (Δ), έτσι ώστε να μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του κυλινδρικού πυρήνα (Σχ. 11.2). Οι προσαγωγοί ρεύματος, A και Γ , είναι σπειροειδή ελατήρια και εξασφαλίζουν, μαζί με την ανάρτηση Δ , την επιστροφή του πηνίου στη θέση ισορροπίας όταν το πηνίο δεν διαρρέεται από ρεύμα.



Σχήμα 11.3. Κατοπτρικό γαλβανόμετρο (Π: πηνίο, Α και Γ: προσαγωγοί ρεύματος, Δ: νήμα ανάρτησης, Κ: κάτοπτρο).

Το μαγνητικό πεδίο B στο διάκενο μεταξύ των πόλων (N, S) και του κυλινδρικού πυρήνα (Π) είναι πρακτικά ακτινικό. 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 B και η μαγνητική ροή Φ μέσα από το πηνίο είναι (από την Εξ. 11.8)

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

Όταν το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα I , η δύναμη Laplace, F , στις κάθετες πλευρές μήκους ℓ είναι

$$\Phi = nIB\ell \quad (11.13)$$

και η ηλεκτρομαγνητική ροπή

$$N_{\eta\lambda} = nIB\ell \cdot 2d = nIBA = GI \quad (11.14)$$

όπου $A = \ell \cdot 2d$ είναι η επιφάνεια διατομής του πηνίου. Το μέγεθος $G = nBA$ είναι μια σταθερά του οργάνου και ονομάζεται **δυναμική σταθερά του γαλβανομέτρου**.

Όταν το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα I , θα ισορροπήσει σε μια γωνία περιστροφής φ , τέτοια ώστε η μηχανική ροπή επαναφοράς του πηνίου $N_{\mu\eta\chi} = D\varphi$, όπου D η σταθερά στρέψης του νήματος ανάρτησης του πηνίου, να εξισορροπείται από την ηλεκτρομαγνητική ροπή $N_{\eta\lambda}$:

$$D\varphi = N_{\mu\eta\chi} = N_{\eta\lambda} = nIBA = GI \quad (11.15)$$

Με τη μέτρηση, λοιπόν, της γωνίας περιστροφής φ είναι δυνατόν να βρεθεί το ρεύμα I που διαρρέει το πηνίο του γαλβανομέτρου, αφού D και G είναι σταθερές του οργάνου. Μέσω μέτρησης του ρεύματος I με το γαλβανόμετρο, μπορεί να μετρηθεί και μια μικρή τάση, E . Έτσι, αν το γαλβανόμετρο συνδεθεί με μια πηγή μικρής τάσης, της οποίας η εσωτερική αντίσταση είναι R_{π} , τότε, με βάση τον νόμο του Ohm, η ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $E = I(R_{\pi} + R)$, όπου R είναι η αντίσταση του πηνίου, την οποία η κατασκευάστρια εταιρεία συνήθως δηλώνει.

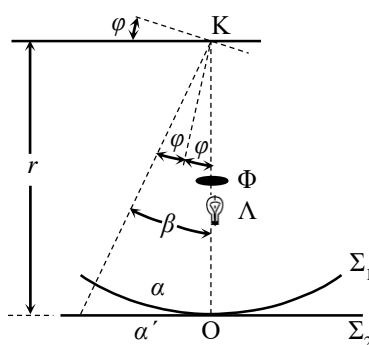
Για πιο άνετη και ακριβή μέτρηση της γωνίας περιστροφής του πηνίου φ , το γαλβανόμετρο είναι συνήθως εξοπλισμένο με κάτοπτρο Κ, που είναι στερεά συνδεδεμένο με το νήμα ανάρτησης Δ (Σχ. 11.3) και περιστρέφεται μαζί με το πηνίο Π (κατοπτρικό γαλβανόμετρο). Περιστροφή του πηνίου κατά γωνία φ προκαλεί περιστροφή 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 γαλβανομέτρου (Σ1, Σχ. 11.4), είναι

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

όπου τα β και φ μετριοούνται σε ακτίνια. Σε μια επίπεδη κλίμακα (Σ2, Σχ. 11.4) η μετατόπιση της φωτεινής κηλίδας είναι

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

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



Σχήμα 11.4. Ανάγνωση της γωνίας περιστροφής, φ , κατοπτρικού γαλβανομέτρου. Το νήμα του λαμπτήρα (Λ) απεικονίζεται μέσω του φακού (Φ) και του κατόπτρου (Κ) στην κλίμακα Σ_1 ή Σ_2 . Για μηδενική γωνία περιστροφής ($\varphi = 0$) η φωτεινή κηλίδα βρίσκεται στη θέση Ο.

Η κίνηση του πηνίου του γαλβανομέτρου από την αρχική θέση ισορροπίας ($I = 0$, $\varphi = 0$) στη νέα θέση ισορροπίας ($I \neq 0$, $\varphi \neq 0$), είναι αρκετά σύνθετη και περιγράφεται από τη διαφορική εξίσωση ταλάντωσης με απόσβεση. Η απόσβεση 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 γαλβανομέτρου, 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.
- (γ) *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 για μετρήσεις ηλεκτρικού φορτίου

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

με την προϋπόθεση ότι ο χρόνος διέλευσης του ρεύματος μέσα από το όργανο είναι πολύ μικρότερος από τη σταθερά χρόνου κίνησης του πηνίου του γαλβανομέτρου, 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 μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια επιστρέφει ξανά στη θέση ισορροπίας.

Σε κάθε περίπτωση, μπορεί ναδειχθεί ότι η μέγιστη γωνία εκτροπής $\varphi_{\mu\epsilon\gamma}$ του πηνίου (επομένως και 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**. Η σταθερά αναλογίας E_{β} είναι η σταθερά του οργάνου ή η **βαλλιστική ευαισθησία του γαλβανομέτρου**.

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 παρούσα άσκηση.

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, 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 πηνίου-γαλβανομέτρου, που έχει συνολική αντίσταση R . Στην περίπτωση αυτή, το ολικό ηλεκτρικό φορτίο που θα κυκλοφορήσει στο κύκλωμα δοκιμαστικού πηνίου-γαλβανομέτρου μπορεί να υπολογιστεί από την Εξ. (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, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί από την Εξ. (11.20). Στη μέθοδο αυτή, όταν το ρεύμα στο σωληνοειδές μηδενίζεται, η φωτεινή κηλίδα εκτρέπεται κατά μια ορισμένη μέγιστη τιμή. Το ολικό φορτίο που συνδέεται με αυτήν την εκτροπή δίνεται από την Εξ. (11.19):

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

όπου E_β είναι η σταθερά του γαλβανομέτρου για σταθερή ωμική αντίσταση $R = R_\pi + R_\gamma$ στο κύκλωμα δοκιμαστικού πηνίου-γαλβανομέτρου, η οποία δίνεται.

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 της 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, δεν 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 μια 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

Η πειραματική διάταξη (Σχ. 11.5) περιλαμβάνει:

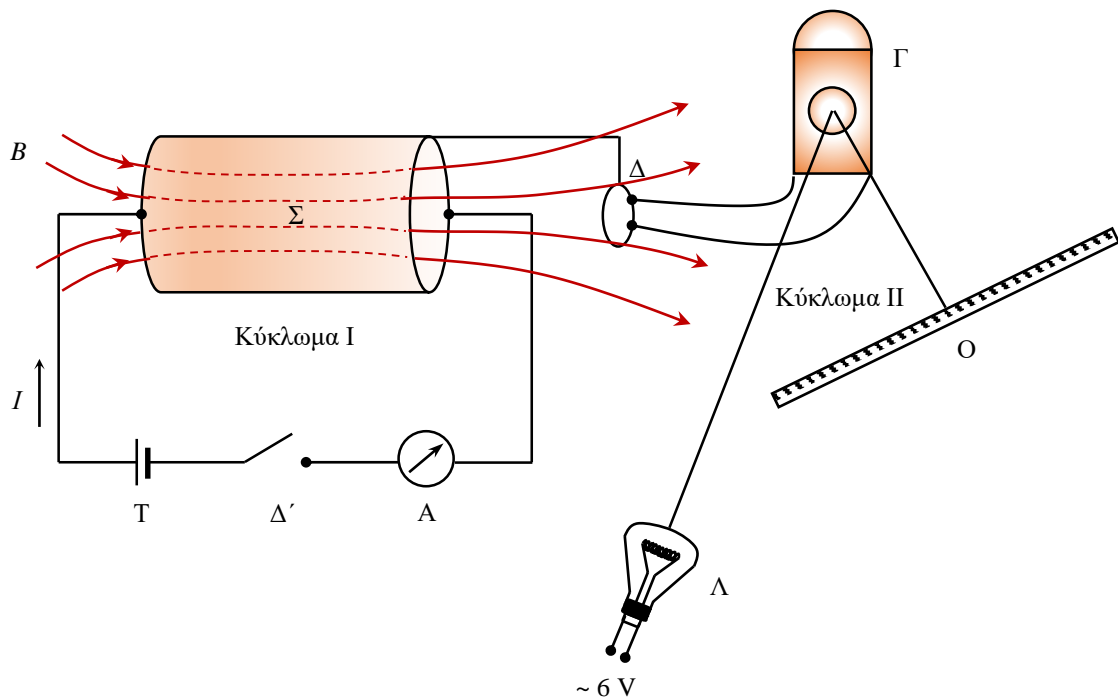
Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου που θα μετρηθεί (Κύκλωμα I), το οποίο αποτελείται από:

- Τροφοδοτικό συνεχούς τάσης (T).

- Αμπερόμετρο για τη μέτρηση της έντασης του ρεύματος, I , στο κύκλωμα (Α).
- Μεγάλο κυλινδρικό πηνίο (σωληνοειδές Σ) για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου που θα μετρηθεί. Το σωληνοειδές έχει μήκος $L = 0,30 \text{ m}$, ακτίνα διατομής $b = 0,06 \text{ m}$ και συνολικό αριθμό σπειρών $N = 300$ ($n = 300/0,3 = 1000$).

Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου (Κύκλωμα ΙΙ), αποτελούμενο από:

- Δοκιμαστικό πηνίο (Δ), αναρτημένο στο επάνω μέρος του σωληνοειδούς, το οποίο μπορεί να μετακινηθεί κατά μήκος στον άξονα του σωληνοειδούς. Έχει εσωτερική ακτίνα διατομής $0,75 \text{ cm}$, συνολικό αριθμό σπειρών $N = 1500$, ενώ η ενεργός τιμή του γινομένου NA στην Εξ. (11.9) είναι $0,265 \text{ m}^2$.
- Ένα γαλβανόμετρο (Γ), η πηγή φωτός του οποίου τροφοδοτείται με 12 V από το ίδιο το τροφοδοτικό της συνεχούς τάσης
- Μια διάταξη για την ανάγνωση της μέγιστης απόκλισης $\alpha'_{\text{μεγ}}$ της φωτεινής κηλίδας του γαλβανομέτρου, που αποτελείται από έναν λαμπτήρα (Λ) και μια οθόνη (O) με επίπεδη κλίμακα (βλ. Σχ. 11.4 και Σχ. 11.5).



Σχήμα 11.5. Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης (Σ : σωληνοειδές, T: τροφοδοτικό ισχύος, Δ' : διακόπτης, A: αμπερόμετρο, Δ : δοκιμαστικό πηνίο, Γ : γαλβανόμετρο, Λ : λαμπτήρας, O: οθόνη).

Βιβλιογραφία

1. E. M. Purcell, *Ηλεκτρισμός και Μαγνητισμός (Μαθήματα Φυσικής Berkeley, Τόμος 2)*, (Αθήνα, 1995), Κεφ. 6 και 7.
2. H. J. Pain, *Φυσική των ταλαντώσεων και των κυμάτων* (Αθήνα, 1991), 1.12.
3. ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής, Τόμος Ι* (Αθήνα, 2010), σ. 153-166.

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 μέσο 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 με το δοκιμαστικό πηνίο στην ίδια θέση, 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, 4 εκτός και από 2 σε κάθε άκρο). Καταχωρήστε τα αποτελέσματα 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 Εξ. (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. Για τις μετρήσεις που κάνατε στα βήματα 2-4 βρείτε 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.