

6. Να περιγραφεί το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από έναν ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό πολύ μεγάλου μήκους.

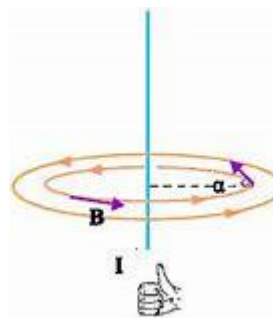
Θεωρούμε ευθύγραμμο αγωγό που τον διαρρέει ρεύμα έντασης I και μελετούμε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί γύρω του σε μικρές αποστάσεις από αυτόν (έτσι ώστε να θεωρείται ότι αυτός έχει άπειρο μήκος).

Οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές γύρω του είναι ομόκεντροι κύκλοι κάθετοι στο επίπεδο του αγωγού, με κέντρα τα σημεία του αγωγού και φορά που συμπίπτει με αυτήν της έντασης B .

Η ένταση B του μαγνητικού πεδίου γύρω από ευθύγραμμο αγωγό έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

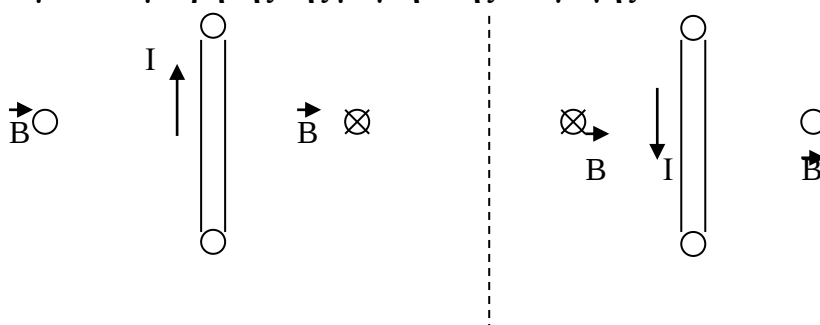
- **διεύθυνση** εφαπτόμενη σε κάθε σημείο των κυκλικών γραμμών (δηλαδή κάθετη στην ακτίνα κάθε κυκλικής γραμμής, αν ο αγωγός είναι στο επίπεδο της σελίδας τότε το B είναι κάθετο σε αυτήν ενώ αν ο αγωγός είναι κάθετος στη σελίδα τότε το B είναι στο επίπεδο της σελίδας),
- **φορά** που βρίσκεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπου ο αντίχειρας δείχνει τη φορά του ρεύματος στον αγωγό και τα υπόλοιπα δάκτυλα τότε θα δείχνουν τη φορά της έντασης B γύρω του (όταν το B έχει φορά από τον αναγνώστη προς τη σελίδα χρησιμοποιούμε το σύμβολο $\otimes$, ενώ από τη σελίδα προς τον αναγνώστη το σύμβολο $\odot$).
- **μέτρο** που δίνεται από την σχέση:

$$B = k_{\mu} \frac{2 I}{r}$$



Όπου r η απόσταση του σημείου που εξετάζουμε από τον αγωγό και k_{μ} η σταθερά του μαγνητισμού που έχει τιμή $k_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2$.

Στο S. I. μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής είναι το 1 Tesla (T).

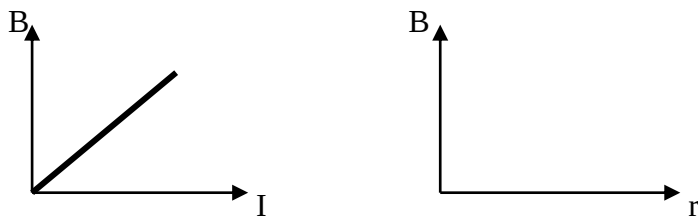


***Παρατηρήσεις:** α) η σταθερά K_{μ} του μαγνητισμού συνδέεται με τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού με τη σχέση:

$$K_{\mu} = \mu_0 / 4\pi$$

όπου $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m/A}$, η **μαγνητική διαπερατότητα του κενού**.

β) η τιμή της έντασης B του μαγνητικού πεδίου γύρω από ευθύγραμμο αγωγό μεταβάλλεται ανάλογα της έντασης του ρεύματος που τον διαρρέει (για συγκεκριμένη απόσταση r) και αντιστρόφως ανάλογα της απόστασης από τον αγωγό (για ρεύμα σταθερής έντασης) όπως δείχνουν και οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις:



γ) η σχέση της έντασης του μαγνητικού πεδίου μπορεί να γραφεί και σε συνάρτηση με τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού ως εξής:

$$B = \mu_0 I / 2 \pi r$$

δ) η παραπάνω σχέση αποδεικνύεται με χρήση του νόμου Biot- Savart ή και του νόμου Ampere:

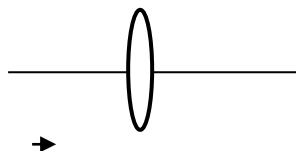
$$\sum B \Delta l \sin \theta = \mu_0 I \epsilon \gamma \kappa \quad \text{ή} \quad B 2\pi r = \mu_0 I \quad \text{ή} \quad B = \mu_0 I / 2 \pi r$$

ε) όταν στο χώρο υπάρχουν δύο ή περισσότεροι ρευματοφόροι αγωγοί, για να βρίσκουμε την ένταση του συνολικού μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο του χώρου προσδιορίζουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο σημείο εκείνο ξεχωριστά από κάθε αγωγό και στη συνέχεια βρίσκουμε τη **συνισταμένη ένταση με διανυσματικό άθροισμα**, δηλαδή:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$$

7. Να περιγραφεί το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί γύρω του ένας κυκλικός ρευματοφόρος αγωγός.

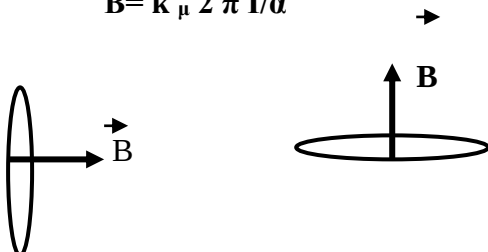
Θεωρούμε έναν κυκλικό αγωγό ο οποίος βρίσκεται στον αέρα ή στο κενό, έχει ακτίνα a και διαρρέεται από ρεύμα έντασης I . Τότε ο αγωγός δημιουργεί μαγνητικό πεδίο του οποίου **οι δυναμικές γραμμές είναι κυκλικές κοντά στον αγωγό αλλά όσο απομακρύνονται από αυτόν η ακτίνα καμπυλότητάς τους μεγαλώνει και στο κέντρο του η δυναμική γραμμή είναι ευθεία που συμπίπτει με τον άξονά του.**



Η μαγνητική επαγωγή B στο κέντρο του κυκλικού αγωγού έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο του αγωγού,
- φορά που βρίσκεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπου τα δάκτυλα καθώς κλείνουν δείχνουν τη φορά της έντασης του ρεύματος που τον διαρρέει και τότε ο αντίχειρας δείχνει τη φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του,
- μέτρο που δίνεται από τη σχέση:

$$B = k_\mu 2 \pi I / a$$



***Παρατηρήσεις:** α) το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής μπορεί να βρεθεί και σε συνάρτηση με τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού από τη σχέση:

$$B = \mu \cdot I / 2a$$

β) όταν στο χώρο υπάρχουν περισσότεροι του ενός κυκλικοί αγωγοί ή και ευθύγραμμος αγωγός τότε προσδιορίζουμε το μέτρο και την κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου από κάθε αγωγό ξεχωριστά και στη συνέχεια βρίσκουμε **διανυσματικά τη συνισταμένη ένταση**:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots$$

Αν είναι ομόρροπες τότε: $B = B_1 + B_2$, αν είναι αντίρροπες τότε: $B = B_1 - B_2$ και όταν προκύψουν με κάθετες διευθύνσεις, τότε: $B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$.

γ) αν αντί ενός κυκλικού αγωγού έχουμε ένα κυκλικό πλαίσιο που αποτελείται από N όμοιους κυκλικούς αγωγούς που διαρρέονται από ίδιο ρεύμα I, τότε η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του πλαισίου θα δίνεται από τη σχέση:

$$B = (K \mu 2 \pi I / a) N$$

δ) η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο κυκλικού αγωγού εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει και από την ακτίνα του.

ε) η παραπάνω σχέση μπορεί να αποδειχτεί με χρήση του νόμου Biot- Savart:

$$B = \Delta B_1 + \Delta B_2 + \Delta B_3 + \dots = \mu_0 I (\Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots) \text{ ή } \mu 90^\circ / 4\pi a^2 \quad \text{ή}$$

$$B = \mu_0 I 2\pi a / 4\pi a^2 \quad \text{ή} \quad B = \mu \cdot I / 2a$$

8. Τι είναι το σωληνοειδές (πηνίο); Να περιγραφεί το μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου σωληνοειδούς.

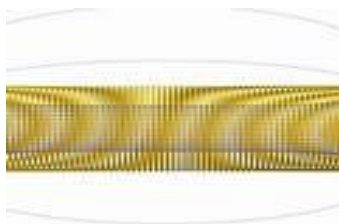
Το σωληνοειδές είναι ένα σύνολο από παράλληλους όμοιους κυκλικούς αγωγούς που έχει τη μορφή ενός σωλήνα με διάμετρο πολύ μικρή σε σχέση με το μήκος του.

Κατασκευάζεται αν τυλίξουμε ένα σύρμα γύρω από μονωτικό κύλινδρο, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό **σπείρες** που φροντίζουμε να ισαπέχουν.

Το μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου πηνίου εμφανίζει πολλές ομοιότητες με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί γύρω του ένας ραβδόμορφος μαγνήτης. Δηλαδή:

α) οι δυναμικές γραμμές είναι κλειστές, εξέρχονται από το ένα άκρο του και εισέρχονται από το άλλο,

β) στο εσωτερικό του πηνίου το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές, δηλαδή με δυναμικές γραμμές παράλληλες και ισαπέχουσες.

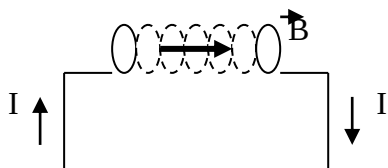


Ενδιαφέρον εμφανίζει η μελέτη του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πηνίου, δηλαδή του ομογενούς, έτσι η ένταση του πεδίου εκεί έχει:

- διεύθυνση παράλληλη στον άξονα του σωληνοειδούς (ή κάθετη στο επίπεδό του),
- φορά που βρίσκεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπου τα δάκτυλα καθώς τυλίγουν το πηνίο δείχνουν τη φορά της έντασης του ρεύματος που το διαρρέει και τότε ο αντίχειρας θα δείχνει τη φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του,
- μέτρο που δίνεται από τη σχέση:

$$B = 4 \pi k_{\mu} I N / l$$

όπου N ο αριθμός των σπειρών του πηνίου και l το μήκος του πηνίου.



***Παρατηρήσεις:** α) το πηλίκο $N/l = n$ παριστάνει τον **αριθμό σπειρών ανά μονάδα μήκους** και έτσι το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής στο εσωτερικό του πηνίου μπορεί να γραφεί:

$$B = 4 \pi k_{\mu} I n$$

β) με τη βοήθεια της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$B = \mu_0 I N / l = \mu_0 I n$$

γ) να μη συγχέεται το μήκος του πηνίου l με το μήκος του σύρματος L που απαρτίζει το πηνίο, το οποίο μπορεί να βρεθεί από την:

$$L = N (2 \pi a)$$

όπου a η ακτίνα του κάθε κυκλικού αγωγού του πηνίου και N ο αριθμός των σπειρών του.

δ) όταν στο εσωτερικό του πηνίου εισάγουμε ράβδο από ορισμένο υλικό, τότε παρατηρείται αλλοίωση του ομογενούς μαγνητικού πεδίου και μαγνήτιση του εισαχθέντος υλικού.

-Αν με B_0 συμβολίσουμε την ένταση του ομογενούς μαγνητικού πεδίου όταν στο εσωτερικό του πηνίου υπάρχει αέρας ή κενό και με B την αντίστοιχη ένταση με την παρουσία υλικού, τότε ορίζουμε ως **μαγνητική διαπερατότητα μ του υλικού** το μονόμετρο φυσικό μέγεθος που δίνεται από το πηλίκο:

$$\mu = B / B_0$$

η μαγνητική διαπερατότητα είναι καθαρός αριθμός (δεν έχει μονάδα μέτρησης) και ανάλογα με τις τιμές που παίρνει τα υλικά διακρίνονται σε:

- **διαμαγνητικά, όταν $0 < \mu < 1$** όπως είναι π. χ. ο άνθρακας, ο χαλκός δηλαδή υλικά που εξασθενούν με την παρουσία τους το μαγνητικό πεδίο,
- **παραμαγνητικά, όταν $\mu > 1$** όπως είναι π.χ. το αργίλιο, το χρώμιο δηλαδή υλικά που ενισχύουν λίγο με την παρουσία τους το μαγνητικό πεδίο,
- **σιδηρομαγνητικά, όταν $\mu \gg 1$** όπως είναι ο σίδηρος, το κοβάλτιο, το νικέλιο δηλαδή υλικά που με την παρουσία τους ενισχύουν κατά πολύ το μαγνητικό πεδίο και που μετατρέπονται σε μόνιμους μαγνήτες, εκτός αν η θερμοκρασία τους ξεπεράσει μια χαρακτηριστική τιμή (θερμοκρασία Curie) οπότε και χάνουν τις μαγνητικές τους ιδιότητες.

ε) η παραπάνω σχέση μπορεί να υπολογιστεί και με εφαρμογή του νόμου Ampere:

$$\sum B \Delta l \text{ συν } \theta = \mu_0 I_{\epsilon \gamma \kappa} \quad \text{ή} \quad B l = \mu_0 I_{\epsilon \gamma \kappa} \quad \text{ή} \quad B l = \mu_0 N I \quad \text{ή} \\ B = \mu_0 I N / l = \mu_0 I n$$

9. Τι γνωρίζετε για τη δύναμη που ασκεί το μαγνητικό πεδίο σε φορτισμένο σωματίδιο;

Έστω φορτισμένο σωματίδιο q κινείται με ταχύτητα υ μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης B. Στη περιοχή κίνησης του φορτίου δεν υπάρχει ούτε ηλεκτρικό ούτε βαρυτικό πεδίο.

Είναι γνωστό ότι **το μαγνητικό πεδίο ασκεί δύναμη σε κάθε κινούμενο φορτίο ή ηλεκτρικό ρεύμα που βρίσκεται μέσα σ' αυτό.**

ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ

Πειραματικά αποδεικνύονται τα εξής:

- Η μαγνητική δύναμη(που λέγεται και **δύναμη Lorentz**) είναι ανάλογη του φορτίου q και της ταχύτητας v του σωματιδίου. Ένα ακίνητο φορτίο δεν δέχεται δύναμη(**αν $v=0$ τότε $F_L=0$**).
- Το μέτρο και η κατεύθυνση της δύναμης εξαρτώνται από το διάνυσμα της ταχύτητας του φορτίου, καθώς και από το μέτρο και την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.
- Όταν το φορτισμένο σωματίδιο κινείται παράλληλα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου, δεν ασκείται σ' αυτό δύναμη(**όταν $v \parallel B$ τότε $F_L=0$**).
- Όταν το φορτισμένο σωματίδιο κινείται με ταχύτητα **κάθετη** στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου, τότε η μαγνητική δύναμη γίνεται **μέγιστη**.
- Η δύναμη Lorentz έχει διεύθυνση πάντοτε κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν τα διανύσματα v και B , δηλαδή είναι κάθετη και στην ταχύτητα v του φορτίου και στην ένταση B του μαγνητικού πεδίου.
- Η δύναμη Lorentz που ασκείται σε θετικό φορτίο έχει αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν που ασκείται σε αρνητικό φορτίο

Σύμφωνα με τα παραπάνω η μαγνητική δύναμη έχει:

A) **μέτρο** που προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_L = B v \sin \theta$$

όπου θ η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των v και B .

B) **Διεύθυνση** κάθετη στο επίπεδο που ορίζεται από τα διανύσματα $\vec{v}$ και $\vec{B}$,

Γ) **Φορά** που καθορίζεται από τον **κανόνα των τριών δαχτύλων του δεξιού χεριού**, σύμφωνα με τον οποίο ο αντίχειρας, ο δείκτης και ο μέσος σχηματίζουν ένα τρισσορθογώνιο σύστημα. Τοποθετούμε τον **αντίχειρα** στην κατεύθυνση κίνησης του **θετικού φορτίου(φορά της ταχύτητας)** και στην αντίθετη αν το φορτίο είναι αρνητικό. Τοποθετούμε τον **δείκτη** στην κατεύθυνση του πεδίου(**φορά του B**) και τότε ο **μέσος** δείχνει την κατεύθυνση της δύναμης(**φορά της F_L**).

***Παρατηρήσεις:** α) όταν $\theta = 90^\circ$ τότε έχουμε μέγιστη δύναμη $F_L = B|v|q$

β) η μαγνητική δύναμη είναι διαρκώς κάθετη στην ταχύτητα του σωματιδίου και γι' αυτό το έργο που παράγει πάνω στο σωματίδιο είναι μηδέν. Έτσι το μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να μεταβάλλει την κινητική ενέργεια κινούμενου φορτίου(ούτε το μέτρο της ταχύτητάς του), αλλά μπορεί μόνο να το εκτρέπει, αλλάζοντας την κατεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας και της ορμής του.

10. Να μελετηθεί η κίνηση φορτισμένου σωματιδίου που εισέρχεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα παράλληλη στις δυναμικές γραμμές του.

Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο κινείται παράλληλα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου, δηλαδή είναι $\theta = 0^\circ$ άρα $\sin \theta = 0$ άρα $F_L = 0$ τότε δεν δέχεται δύναμη οπότε η κίνησή του είναι **ευθύγραμμη ομαλή**.

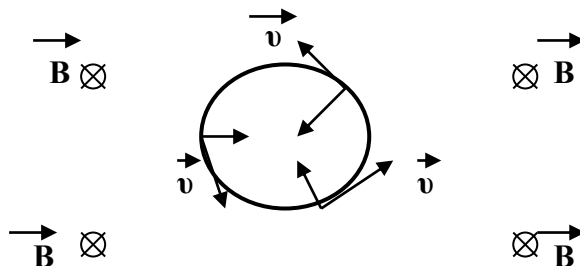
Αν το φορτίο αρχικά είχε τοποθετηθεί ακίνητο μέσα στο πεδίο, τότε θα εξακολουθεί να παραμένει ακίνητο αφού δεν δέχεται καμία επίδραση.

11. Να μελετηθεί η κίνηση φορτισμένου σωματιδίου που εισέρχεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα κάθετη στις δυναμικές γραμμές του.

θεωρούμε ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο q που εισέρχεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με το διάνυσμα της ταχύτητας v να σχηματίζει ορθή γωνία με το πεδίο B . Τότε του ασκείται μαγνητική δύναμη που είναι πάντοτε κάθετη στην ταχύτητα v , της οποίας το μέτρο παραμένει σταθερό αλλά μεταβάλλεται διαρκώς η κατεύθυνσή της. Δηλαδή το σωματίδιο κινείται υπό την επίδραση δύναμης σταθερού μέτρου

$F_L = B v q$, η οποία είναι διαρκώς κάθετη στην ταχύτητά του.

Η μαγνητική δύναμη Lorentz «παίζει» το ρόλο **κεντρομόλου δύναμης**, η οποία αναγκάζει το σωματίδιο να εκτελεί **ομαλή κυκλική κίνηση** (αφού $v = \text{σταθερή}$).



Τα χαρακτηριστικά της ομαλής κυκλικής κίνησης που εκτελεί είναι τα ακόλουθα:

1. Ακτίνα κυκλικής τροχιάς R

Εξισώνουμε το μέτρο της μαγνητικής δύναμης με το μέτρο της κεντρομόλου δύναμης, δηλαδή:

$$F_L = F_{\text{κεντρ}} \longrightarrow B v q = m v^2 / R \longrightarrow R = m v / B q$$

Άρα η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του σωματιδίου είναι:

- α) **ανάλογη του μέτρου της ταχύτητας v του σωματιδίου,**
- β) **αντιστρόφως ανάλογη της έντασης B του μαγνητικού πεδίου.**

2. Περίοδος κυκλικής κίνησης T

Από τη σχέση της γραμμικής ταχύτητας στην ομαλή κυκλική κίνηση

$$v = 2\pi R / T$$

αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση της ακτίνας, προκύπτει ότι:

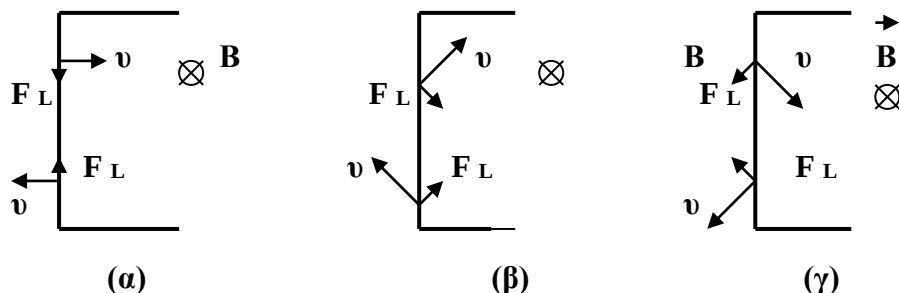
$$v = (2\pi / T) m v / B q \longrightarrow T = 2\pi m / B q$$

Άρα η περίοδος της κυκλικής κίνησης είναι ανεξάρτητη από το μέτρο της ταχύτητας v του σωματιδίου και από την ακτίνα R της κυκλικής τροχιάς.

Έτσι δύο ίδια φορτισμένα σωματίδια που εισέρχονται στο ίδιο ομογενές μαγνητικό πεδίο με διαφορετικές ταχύτητες, θα έχουν διαφορετικές ακτίνες κυκλικής τροχιάς αλλά ίσες περιόδους.

**Παρατηρήσεις: α) αν το μαγνητικό πεδίο περιορίζεται σε μια περιοχή τότε το φορτισμένο σωματίδιο θα διαγράψει κυκλικό τόξο.*

Το κέντρο της κυκλικής τροχιάς στην οποία ανήκει το διαγραφόμενο τόξο, βρίσκεται συνεχώς πάνω στον φορέα της δύναμης Lorentz. Είναι το σημείο τομής των φορέων της F_L στα σημεία εισόδου και εξόδου από το πεδίο.



στο σχήμα (α) η μαγνητική δύναμη βρίσκεται πάνω στο διαχωριστικό όριο του πεδίου, άρα και το κέντρο K της τροχιάς βρίσκεται πάνω στο διαχωριστικό όριο του πεδίου. Το τόξο που διαγράφεται είναι σχήματος ημικυκλίου με μήκος $S = \pi R$ ή $S = \pi m v / B q$. Το φορτίο παραμένει στο πεδίο για χρόνο $t = T/2$.

στο σχήμα (β) το κέντρο K της τροχιάς βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο και πάνω στο φορέα της F_L που ασκείται στο σωματίδιο κατά την είσοδό του στο πεδίο. Η επίκεντρη γωνία που αντιστοιχεί στο διαγραφόμενο τόξο είναι $2\pi - 2\phi$ και το μήκος του τόξου είναι: $S = R(2\pi - 2\phi)$, ενώ ο χρόνος παραμονής του φορτίου στο πεδίο θα είναι: $t/T = (2\pi - 2\phi) / 2\pi$ ή $t = T(2\pi - 2\phi)/2\pi$

στο σχήμα (γ) το κέντρο K της τροχιάς βρίσκεται έξω από το μαγνητικό πεδίο και πάνω στο φορέα της F_L που ασκείται στο σωματίδιο κατά την είσοδό του στο πεδίο. Η επίκεντρη γωνία που αντιστοιχεί στο διαγραφόμενο μέσα στο πεδίο τόξο είναι 2ϕ και το μήκος του τόξου είναι: $S = R 2\phi$, ενώ ο χρόνος παραμονής στο πεδίο θα είναι: $t/T = 2\phi/2\pi$ ή $t = T 2\phi/2\pi$

β) παρατηρούμε ότι για να βρεθεί ο χρόνος κίνησης του φορτίου στο πεδίο, βρίσκουμε την αντίστοιχη επίκεντρη γωνία ϕ και επειδή ισχύει ότι η κίνηση είναι ομαλή γωνία και χρόνος είναι μεγέθη ανάλογα, άρα γράφουμε:

$$t/T = \phi/2\pi \quad \text{ή} \quad t = T(\phi/2\pi)$$

και τότε το μήκος τόξου που διαγράφεται μπορεί να υπολογιστεί:

$$S = R \phi \quad \text{ή} \quad S = v t$$

γ) όταν το μαγνητικό πεδίο έχει κάθετη τομή *τετράγωνο ή παραλληλόγραμμο*, τότε αφού προσδιοριστεί το κέντρο της τροχιάς του σωματιδίου μέσα σ' αυτό (όπως αναφέρθηκε παραπάνω), στη συνέχεια υπολογίζουμε την ακτίνα της τροχιάς σε συνάρτηση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πεδίου.

δ) Κατά την κίνηση σωματιδίου κάθετα προς τις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου το μέτρο της ταχύτητάς του v δεν μεταβάλλεται, μεταβάλλεται όμως η διεύθυνση της ταχύτητάς του. Άρα η **κινητική ενέργεια του σωματιδίου**, ως μονόμετρο μέγεθος, **δεν μεταβάλλεται** ($\Delta K = 0$) αλλά μεταβάλλεται η ορμή του p , ως διανυσματικό μέγεθος.

Για τη μεταβολή της ορμής θα ισχύει:

$$\vec{\Delta p} = \vec{p}_{τελ} - \vec{p}_{αρχ} \quad \longrightarrow \quad \vec{\Delta p} = \vec{p}_{τελ} + (-\vec{p}_{αρχ})$$

και το μέτρο της μεταβολής της ορμής θα είναι:

$$\Delta p = \sqrt{p_{\alpha\rho\chi}^2 + p_{\tau\epsilon\lambda}^2 + 2 p_{\alpha\rho\chi} p_{\tau\epsilon\lambda} \cos(\pi - \varphi)}$$

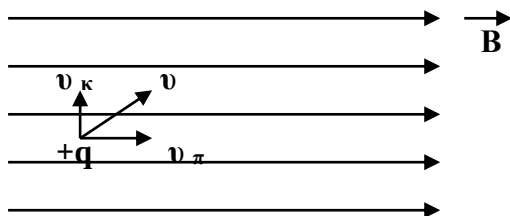
όπου φ η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων της αρχικής και τελικής ορμής του σωματιδίου.

Προσοχή: το μέτρο της ορμής δεν μεταβάλλεται ($p_{\alpha\rho\chi} = p_{\tau\epsilon\lambda}$). Άρα η μεταβολή του μέτρου της ορμής είναι μηδέν.

12. Να μελετηθεί η κίνηση φορτισμένου σωματιδίου που εισέρχεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα που σχηματίζει τυχαία γωνία με τις δυναμικές γραμμές.

Έστω ένα φορτισμένο σωματίδιο που εισέρχεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με το διάνυσμα της ταχύτητάς του να σχηματίζει τυχαία γωνία θ ($0 < \theta < 90^\circ$) με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου.

Τότε αναλύουμε την ταχύτητα σε δύο συνιστώσες, μία κάθετη (v_κ) και μία παράλληλη (v_π) στις δυναμικές γραμμές του πεδίου.



λόγω της συνιστώσας v_π η κίνηση του σωματιδίου θα είναι ευθύγραμμη ομαλή (αφού είναι παράλληλη στις γραμμές και έτσι δεν ασκείται δύναμη στη διεύθυνση αυτή) και συνεπώς στον άξονα χ θα ισχύουν οι εξισώσεις:

$$v_\pi = \text{σταθερή} \quad \text{και} \quad \chi = v_\pi t = v \sin \theta t$$

λόγω της συνιστώσας v_κ η κίνηση του σωματιδίου θα είναι ομαλή κυκλική με χαρακτηριστικά:

$$R = m v_\kappa / q B = m v \eta \mu \theta / q B \quad \text{και} \quad T = 2 \pi m / q B$$

Η σύνθεση των δύο παραπάνω κινήσεων (ανεξάρτητες μεταξύ τους) μας δίνει κίνηση όπου το σωματίδιο διαγράφει **ελικοειδή τροχιά**.

Η ελικοειδής κίνηση έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

α) Περίοδος: $T = 2 \pi m / B q$

β) Βήμα της έλικας: είναι η σταθερή απόσταση που διανύει το σωματίδιο κατά τη διεύθυνση του άξονα χ σε χρόνο μίας περιόδου, δηλαδή:

$$\beta = v_\pi T \longrightarrow \beta = v \sin \theta (2 \pi m / B q)$$

γ) Μήκος τροχιάς: στην ελικοειδή κίνηση το μέτρο της ταχύτητας είναι σταθερό, άρα θα ισχύει κάθε στιγμή:

$$s = v t$$

δ) Αριθμός σπειρών: αν το φορτίο σε χρόνο t έχει μετατοπιστεί κατά L κατά την οριζόντια διεύθυνση θα έχει διαγράψει N σπείρες. Κάθε σπείρα διαγράφεται σε χρόνο T , άρα ο αριθμός σπειρών υπολογίζεται:

$$N = t/T$$

Θα ισχύει ακόμα ότι:

$$N = L/\beta$$

***Παρατήρηση:** Όταν η ταχύτητα του φορτισμένου σωματιδίου σχηματίζει γωνία φ με τις δυναμικές γραμμές δύο πεδίων, ενός ομογενούς ηλεκτρικού και ενός ομογενούς μαγνητικού και οι δυναμικές γραμμές των πεδίων είναι παράλληλες μεταξύ τους, τότε:

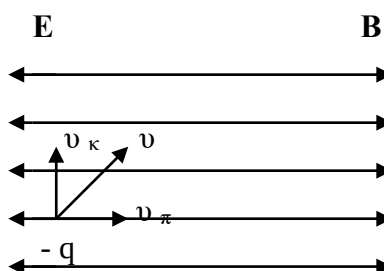
Αναλύουμε την ταχύτητά του σε δύο συνιστώσες την v_{π} (παράλληλη στις γραμμές) και την v_{κ} (κάθετη στις γραμμές) και το σωματίδιο δέχεται δύο δυνάμεις:

α) μία δύναμη από το ηλεκτρικό πεδίο $F_E = E q$ λόγω της οποίας εκτελεί ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση με επιτάχυνση

$a = E q/m$ και με εξισώσεις:

$$v_x = v_{\pi} + a t \longrightarrow v_x = v \sin \varphi + (E q/m) t$$

$$x = v_{\pi} t + \frac{1}{2} a t^2 \longrightarrow x = v \sin \varphi t + \frac{1}{2} (E q/m) t^2$$



β) μία δύναμη από το μαγνητικό πεδίο $F_L = B v_{\kappa} q$ με διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο που ορίζεται από την ταχύτητα v_{κ} και τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, εξαιτίας της οποίας εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση σε επίπεδο που είναι κάθετο στη συνιστώσα v_{π} της ταχύτητας.

Η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του είναι $R = m v_{\kappa} / q B \longrightarrow R = m v \eta \mu \varphi / q B$ και η περίοδος της είναι $T = 2 \pi m / q B$.

γ) Η σύνθεση των δύο παραπάνω κινήσεων είναι μια *ελικοειδής κίνηση μεταβλητού (αυξανόμενου βήματος)*.

****Παρατήρηση:** Αν το σωματίδιο εκτοξευθεί κάθετα στις δυναμικές γραμμές των δύο πεδίων τότε έχουμε και πάλι ελικοειδή κίνηση μεταβλητού βήματος.

Το βήμα της πρώτης έλικας βρίσκεται από τη σχέση:

$$\beta_1 = \frac{1}{2} a T^2 \longrightarrow \beta_1 = \frac{1}{2} (E q/m) (2 \pi m / q B)^2$$

ενώ της δεύτερης έλικας από τη σχέση:

$$\beta_2 + \beta_1 = \frac{1}{2} a (2T)^2 \longrightarrow \beta_2 = \frac{1}{2} a (2T)^2 - \frac{1}{2} a T^2 \longrightarrow \beta_2 = \frac{3}{2} a T^2$$

$$\longrightarrow \beta_2 = \frac{3}{2} (E q/m) (2 \pi m / q B)^2$$

τελικά το βήμα της νιοστής έλικας θα δίνεται από τη σχέση:

$$\beta_v = [(2v-1)/2] (E q/m) (2 \pi m / q B)^2$$

13. Ποια δύναμη ονομάζεται Laplace και τι χαρακτηριστικά έχει;

Ας θεωρήσουμε έναν ρευματοφόρο αγωγό που βρίσκεται εντός του ομογενούς μαγνητικού πεδίου ενός μαγνήτη. Τότε πειραματικά φαίνεται ότι ο αγωγός δέχεται δύναμη από το μαγνητικό αυτό πεδίο.

Δύναμη Laplace είναι η δύναμη που ασκεί ένα μαγνητικό πεδίο σε ρευματοφόρο αγωγό που βρίσκεται μέσα σε αυτό.

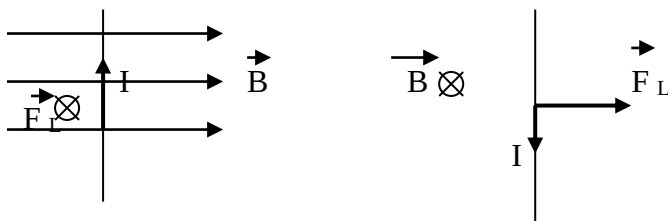
Θεωρούμε ευθύγραμμο αγωγό μήκους L , ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα έντασης I , βρίσκεται εντός ομογενούς μαγνητικού πεδίου έντασης B και το επίπεδό του σχηματίζει με τις δυναμικές γραμμές γωνία φ . Τότε δέχεται από το πεδίο δύναμη Laplace η οποία έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- **διεύθυνση** κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν ο αγωγός και η ένταση του μαγνητικού πεδίου (δηλαδή κάθετη και στον αγωγό και στην ένταση B του πεδίου),
- **φορά** που βρίσκεται με τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού, όπου τεντώνουμε τον αντίχειρα, τον δείκτη και τον μέσο έτσι ώστε να σχηματίζουν τρισορθογώνιο σύστημα αξόνων. Ο αντίχειρας δείχνει τη φορά του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό, ο δείκτης δείχνει τη φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου και τότε ο μέσος θα δείχνει τη φορά της δύναμης Laplace που του ασκείται από το πεδίο.
- **Σημείο εφαρμογής** το μέσο του ευθύγραμμου αγωγού,
- **Μέτρο** που δίνεται από τη σχέση:

$$F_L = B I L \sin \varphi$$

***Σημείωση:** όταν $\varphi = 0^\circ$ ή $\varphi = 180^\circ$ δηλαδή ο αγωγός είναι παράλληλος στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές τότε $F_L = 0$, ενώ όταν $\varphi = 90^\circ$ δηλαδή ο αγωγός είναι κάθετος στις γραμμές του πεδίου τότε δέχεται τη **μέγιστη τιμή δύναμης**:

$$F_L = B I L$$



14. Πως ορίζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου και τι είναι σύμφωνα με τον ορισμό η μονάδα της 1 Tesla;

Αν θεωρήσουμε ευθύγραμμο αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα και βρίσκεται εντός ομογενούς μαγνητικού πεδίου με το επίπεδό του κάθετο στις γραμμές, τότε λύνοντας ως προς B τη σχέση ορισμού της δύναμης Laplace έχουμε ότι:

$$B = F_L / I L$$

που αποτελεί τη σχέση ορισμού της μαγνητικής επαγωγής, η οποία όπως φαίνεται **εκφράζει τη δύναμη που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό τοποθετημένο κάθετα στις μαγνητικές γραμμές ανά μονάδα έντασης ηλεκτρικού ρεύματος και ανά μονάδα μήκους του αγωγού.** Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό:

1 Tesla είναι η ένταση εκείνου του μαγνητικού πεδίου εντός του οποίου αν φέρουμε ευθύγραμμο αγωγό μήκους 1 m, που διαρρέεται από ρεύμα έντασης 1 A και είναι τοποθετημένος κάθετα στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές του, τότε η δύναμη που θα δεχτεί είναι 1 N.

$$[\text{Tesla}] = [\text{N} / \text{A m}]$$

***Σημείωση:** Στη περίπτωση που δύο ρευματοφόροι αγωγοί είναι παράλληλοι σε απόσταση r μεταξύ τους, τότε ο ένας αγωγός βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο άλλος. Έτσι ο αγωγός 1 μέσω του μαγνητικού του πεδίου ασκεί στον αγωγό 2 δύναμη Laplace. Σύμφωνα όμως με τον νόμο δράσης –αντίδρασης και ο αγωγός 2 μέσω του πεδίου του ασκεί στον αγωγό 1 μία ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς δύναμη Laplace. Πράγματι θα έχουμε:

$$F_{1,2} = F_{2,1} = k_{\mu} 2 I_1 I_2 L / r \quad \text{με} \quad \vec{F}_{1,2} = - \vec{F}_{2,1}$$

Όπου I_1, I_2 οι εντάσεις των ρευμάτων που διαρρέουν τους δύο αγωγούς και L το μήκος του κάθε αγωγού στο οποίο ασκείται η δύναμη.

Μπορούμε τότε να λέμε ότι όταν δύο παράλληλοι ρευματοφόροι αγωγοί διαρρέονται από ρεύματα που έχουν την ίδια φορά, έλκονται, ενώ, όταν διαρρέονται από ρεύματα που έχουν αντίθετη φορά, απωθούνται.

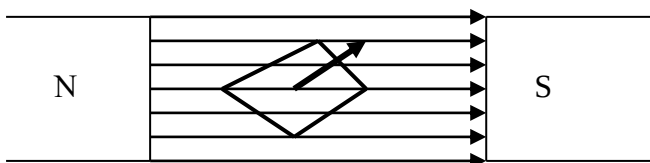
Με τη βοήθεια της δύναμης αυτής μπορούμε να ορίσουμε τη μονάδα της έντασης ηλεκτρικού ρεύματος αν στην παραπάνω εξίσωση βάλουμε $k_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2$, $I = 1 \text{ A}$, $L = 1 \text{ m}$ και $r = 1 \text{ m}$ και υπολογίσουμε ότι: $F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$.

Τότε για την μονάδα της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος προκύπτει ο εξής ορισμός:

1 A είναι η ένταση του σταθερού ρεύματος που όταν διαρρέει δύο ευθύγραμμους παράλληλους αγωγούς απείρου μήκους, οι οποίοι βρίσκονται στο κενό και σε απόσταση $r = 1 \text{ m}$ ο ένας από τον άλλο, τότε σε τμήμα μήκους $L = 1 \text{ m}$ ο ένας ασκεί στον άλλο δύναμη μέτρου $F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$.

15. Τι ορίζουμε ως μαγνητική ροή;

Θεωρούμε μια επίπεδη επιφάνεια ορισμένου σχήματος η οποία βρίσκεται εντός ομογενούς μαγνητικού πεδίου.



Η επιφάνεια του σχήματος έχει κατάλληλο προσανατολισμό ο οποίος δηλώνεται με ένα διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια αυτή και το οποίο σχηματίζει τυχαία γωνία φ με τις μαγνητικές γραμμές.

Μαγνητική ροή Φ ορίζουμε το μονόμετρο φυσικό μέγεθος που ισούται με το γινόμενο του μέτρου της έντασης του μαγνητικού πεδίου B , εντός του οποίου βρίσκεται η επιφάνεια, επί το εμβαδόν S της επιφάνειας και επί το συνημίτονο της γωνίας θ που σχηματίζει το κάθετο διάνυσμα της επιφάνειας με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου, δηλαδή:

$$\Phi = B S \sin \theta$$

Μονάδα της μαγνητικής ροής είναι το **1 Weber (W b)** το οποίο ισούται με:

$$[1 \text{ Weber}] = [1 \text{ T m}^2]$$

Η μαγνητική ροή εκφράζει τον αριθμό των δυναμικών γραμμών του πεδίου που διέρχονται μέσα από την επιφάνεια αυτή.

Από τον ορισμό της ροής φαίνεται ότι:

- Αν $\theta = 0^\circ$ δηλαδή η επιφάνεια είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές, τότε η μαγνητική ροή είναι μέγιστη:
 $\Phi = B S$
- Αν $\theta = 90^\circ$ δηλαδή η επιφάνεια είναι παράλληλη στις γραμμές, τότε $\Phi = 0$ (δεν διέρχονται γραμμές μέσα από την επιφάνεια),
- Αν $0^\circ < \theta < 90^\circ$ τότε η μαγνητική ροή είναι θετική ($\Phi > 0$),
- Αν $90^\circ < \theta < 180^\circ$ τότε η μαγνητική ροή είναι αρνητική ($\Phi < 0$).

***Σημείωση:** α) 1 Weber είναι η μαγνητική ροή που περνά από επιφάνεια εμβαδού 1 m^2 όταν αυτή τοποθετηθεί εντός ομογενούς μαγνητικού πεδίου έντασης μέτρου 1 Tesla.

β) η μαγνητική ροή που περνά από επιφάνεια μπορεί να μεταβληθεί: i) με μεταβολή της έντασης του μαγνητικού πεδίου, ii) με μεταβολή του εμβαδού της επιφάνειας και iii) με μεταβολή του προσανατολισμού της επιφάνειας (περιστροφή της εντός του μαγνητικού πεδίου).

Η μεταβολή της ροής υπολογίζεται γενικά:

$$\Delta \Phi = \Phi_{\text{τελική}} - \Phi_{\text{αρχική}}$$

16. Διατυπώστε το νόμο Gauss για τον μαγνητισμό.

Οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι πάντοτε κλειστές, δεν έχουν αρχή και τέλος. Συνέπεια αυτής της ιδιότητας είναι ότι για κάθε κλειστή επιφάνεια μέσα στο μαγνητικό πεδίο ο αριθμός των δυναμικών γραμμών που εισέρχονται είναι πάντα ίσος με τον αριθμό των γραμμών που εξέρχονται. Άρα η μαγνητική ροή που διέρχεται από μια οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια είναι μηδέν.

« Η μαγνητική ροή που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια είναι πάντοτε μηδενική»

$$\Phi_B = 0$$

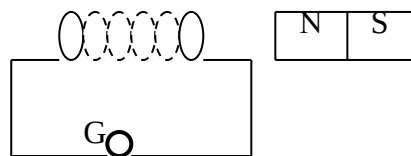
Το φυσικό περιεχόμενο του νόμου είναι ότι δεν υπάρχουν σημειακές πηγές μαγνητικού πεδίου (σε αντίθεση με το ηλεκτρικό), δηλαδή δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα (δύο μαγνητικοί πόλοι είναι αδύνατον να απομονωθούν). Αυτό τελικά σημαίνει ότι άλλες πηγές μαγνητικού πεδίου εκτός από τα ρεύματα δεν υπάρχουν.

Όλα τα μαγνητικά φαινόμενα προέρχονται από ηλεκτρικά ρεύματα (φορτία σε κίνηση).

17. Τι είναι το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής; Να διατυπώσετε το νόμο του Faraday.

Το ηλεκτρικό ρεύμα καθώς και κάθε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο δημιουργούν γύρω τους μαγνητικό πεδίο. Ο Faraday έδειξε ότι μπορεί να συμβεί και το αντίθετο, δηλαδή από το μαγνητικό πεδίο να δημιουργηθεί ηλεκτρικό ρεύμα.

Θεωρούμε το σωληνοειδές του διπλανού σχήματος στα άκρα του οποίου συνδέεται γαλβανόμετρο (όργανο μέτρησης ρευμάτων μικρής έντασης) και σε μικρή απόσταση από αυτό μετακινούμε ραβδόμορφο μαγνήτη.



Όταν για παράδειγμα πλησιάζουμε τον βόρειο πόλο του μαγνήτη τότε παρατηρούμε ένδειξη στο γαλβανόμετρο όσο διαρκεί η κίνησή του, δηλαδή το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα. Το ίδιο παρατηρείται και όταν απομακρύνουμε τον μαγνήτη από το πηνίο, όπου όμως τότε το ρεύμα στο πηνίο έχει αντίθετη φορά.

Όταν ο μαγνήτης είναι ακίνητος ως προς το πηνίο τότε το γαλβανόμετρο δεν έχει ένδειξη.

Όταν λοιπόν ο μαγνήτης κινείται ως προς το πηνίο τότε αυτό διαρρέεται από ρεύμα που ως γνωστόν η αιτία δημιουργίας του είναι η εμφάνιση ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Η. Ε. Δ) στα άκρα του, που ονομάζεται Η. Ε. Δ από επαγωγή.

Με την κίνηση του μαγνήτη μεταβάλλεται ο αριθμός των δυναμικών γραμμών που διέρχονται μέσα από τις σπείρες του πηνίου. Όταν ο μαγνήτης πλησιάζει ο αριθμός των γραμμών αυξάνεται άρα αυξάνεται η μαγνητική ροή, ενώ όταν απομακρύνεται ο αριθμός των γραμμών μειώνεται άρα μειώνεται η μαγνητική ροή μέσα από το πηνίο.

Άρα η εμφάνιση της Η. Ε. Δ από επαγωγή οφείλεται σε μεταβολή της μαγνητικής ροής στο πηνίο.

Όταν ο μαγνήτης είναι ακίνητος η ροή δεν μεταβάλλεται και Η. Ε. Δ δεν εμφανίζεται.

Ο Faraday μελετώντας το παραπάνω φαινόμενο κατέληξε στο **νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής**, δηλαδή:

«κάθε φορά που συμβαίνει μεταβολή στη μαγνητική ροή που διέρχεται μέσα από ένα αγωγίμο πλαίσιο ή πηνίο, τότε δημιουργείται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή η οποία θα δίνεται από τη σχέση:

$$E_{\varepsilon\pi} = - N(\Delta \Phi / \Delta t)$$

Όπου N ο αριθμός των σπειρών του πλαισίου ή του πηνίου και $(\Delta \Phi / \Delta t)$ ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής μέσα από το πλαίσιο ή το πηνίο.»

***Παρατηρήσεις:** α) η Η. Ε. Δ από επαγωγή είναι ανάλογη του ρυθμού με τον οποίο μεταβάλλεται η μαγνητική ροή μέσα από το πηνίο, δηλαδή όσο γρηγορότερα μετακινείται ο μαγνήτης ως προς το πηνίο τόσο μεγαλύτερη είναι η επαγωγική τάση που αναπτύσσεται σε αυτό.

β) το αρνητικό πρόσημο στο νόμο της επαγωγής ερμηνεύεται με τον **κανόνα του Lenz** και σχετίζεται με την πολικότητα της επαγωγικής τάσης.

γ) το φαινόμενο της επαγωγής εμφανίζεται και στη περίπτωση που κινείται το πηνίο ως προς τον μαγνήτη και όχι το αντίθετο, αρκεί δηλαδή να υπάρχει **σχετική κίνηση** μεταξύ τους.

δ) η **εμφάνιση επαγωγικής τάσης, ενεργειακά, είναι η μετατροπή μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των μαγνητικών δυνάμεων.**

ε) επαγωγικό ρεύμα εμφανίζεται μόνο όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, ενώ αν υπάρχει ανοικτός διακόπτης τότε $I_{\varepsilon\pi} = 0$.

στ) σε κλειστό πλαίσιο αντίστασης R, το επαγωγικό ρεύμα που το διαρρέει βρίσκεται από το νόμο του Ohm, δηλαδή:

$$I_{\varepsilon\pi} = E_{\varepsilon\pi} / R \quad \text{ή} \quad I_{\varepsilon\pi} = -(\Delta \Phi / \Delta t) N / R$$

ζ) όταν υπάρχει επαγωγικό ρεύμα τότε από κάθε διατομή του αγωγίμου πλαισίου διέρχεται φορτίο Q (επαγωγικό φορτίο) το οποίο υπολογίζεται από:

$$Q = I \Delta t \quad \text{ή} \quad Q_{\varepsilon\pi} = -(\Delta \Phi / R) N$$

που ονομάζεται **νόμος του Neumann** και δείχνει ότι το φορτίο από επαγωγή είναι **ανεξάρτητο από το χρόνο που διαρκεί η μεταβολή της μαγνητικής ροής.**

η) στις ασκήσεις οι σχέσεις για την επαγωγική τάση, το επαγωγικό ρεύμα και το επαγωγικό φορτίο θα χρησιμοποιούνται κατά απόλυτη τιμή (δηλαδή χωρίς το αρνητικό πρόσημο) όταν πρόκειται για τον υπολογισμό τους.

Το αρνητικό πρόσημο θα λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο στη περίπτωση που χρειάζεται να κάνουμε γραφικές παραστάσεις των μεγεθών αυτών σε συνάρτηση με τον χρόνο.

θ) όταν ο ρυθμός μεταβολής της ροής είναι σταθερός τότε η Η. Ε. Δ από επαγωγή είναι σταθερή, ενώ αν το $\Delta \Phi / \Delta t$ είναι στιγμιαίο τότε με τον νόμο του Faraday υπολογίζουμε την στιγμιαία επαγωγική τάση.

18.Πως ερμηνεύεται το αρνητικό πρόσημο στο νόμο του Faraday με τη βοήθεια του κανόνα του Lenz;

Ο Lenz διατύπωσε έναν κανόνα με τη βοήθεια του οποίου είναι δυνατή η εύρεση της φοράς του ρεύματος που διαρρέει ένα κλειστό κύκλωμα στο οποίο εκδηλώνεται το φαινόμενο της επαγωγής. Σύμφωνα με αυτόν:

«το επαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια φορά ώστε το αποτέλεσμά του να αντιστέκεται στη μεταβολή που προκαλεί το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και τη μεταβολή της μαγνητικής ροής».

Ο κανόνας διατυπώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εκφράζει **την αρχή διατήρησης της ενέργειας** στα επαγωγικά φαινόμενα.

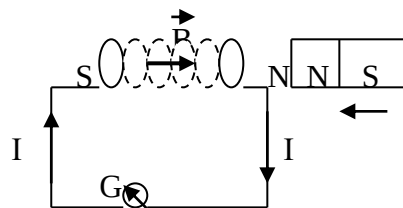
Έστω το παράδειγμα του πηνίου που είναι συνδεδεμένο με γαλβανόμετρο και του μαγνήτη, τον οποίο πλησιάζουμε στο πηνίο αυτό.

Κατά το πλησίασμα του μαγνήτη έχουμε τα εξής φαινόμενα:

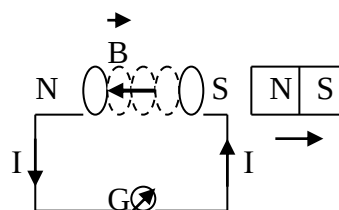
- Αύξηση της μαγνητικής ροής μέσα από τις σπείρες του πηνίου,
- Ανάπτυξη επαγωγικής τάσης($\mathcal{E}_{\pi}$), λόγω μεταβολής της ροής,
- Το πηνίο διαρρέεται από επαγωγικό ρεύμα, αφού αποτελεί τμήμα κλειστού κυκλώματος,
- Το πηνίο δημιουργεί στο εσωτερικό του ομογενές μαγνητικό πεδίο, λόγω της ύπαρξης του I_{π} .

Έστω ότι αρχικά πλησιάζουμε τον βόρειο πόλο του μαγνήτη στο πηνίο. Τότε σύμφωνα με τον Lenz απέναντι στο βόρειο πόλο του μαγνήτη το πηνίο θα εμφανίσει κι αυτό βόρειο πόλο, έτσι ώστε να απωθήσει τον μαγνήτη και να εμποδίσει την αύξηση της ροής μέσα από τις σπείρες του. Έτσι η μηχανική ενέργεια που θα δαπανήσουμε θα μετατραπεί σε ηλεκτρική αφού αναπτύσσεται ηλεκτρικό ρεύμα στο κύκλωμα.

Το $B_{\pi\eta\nu\iota\omicron\upsilon}$ προκύπτει αντίρροπο του $B_{\mu\alpha\gamma\eta\eta\tau\eta}$ και με τον κανόνα του δεξιού χεριού βρίσκουμε τη φορά του I_{π} , αφού γνωρίζουμε τη φορά του $B_{\pi\eta\nu\iota\omicron\upsilon}$.



Στη περίπτωση που απομακρύνουμε τον βόρειο πόλο του μαγνήτη, τότε απέναντί του το πηνίο θα εμφανίσει νότιο πόλο έτσι ώστε να αναπτυχθούν ελκτικές δυνάμεις που εμποδίζουν την απομάκρυνση του μαγνήτη και έτσι να διατηρείται και πάλι η ενέργεια. Τότε το $B_{\pi\eta\nu\iota\omicron\upsilon}$ προκύπτει ομόρροπο του $B_{\mu\alpha\gamma\eta\eta\tau\eta}$ και με τον κανόνα του δεξιού χεριού υπολογίζουμε τη φορά του I_{π} που διαρρέει το πηνίο.



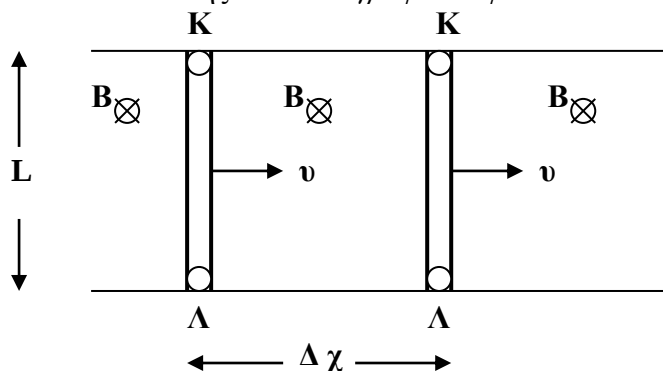
***Παρατηρήσεις:** α)όταν πλησιάσουμε τον νότιο πόλο του μαγνήτη τότε απέναντί του το πηνίο εμφανίζει νότιο πόλο ώστε να τον απωθεί, ενώ όταν απομακρύνουμε τον νότιο πόλο του μαγνήτη απέναντί του το πηνίο εμφανίζει βόρειο πόλο ώστε να τον έλκει.
β)αν δεν ίσχυε ο κανόνας του Lenz και το πηνίο δεν αντιδρούσε στη κίνηση του μαγνήτη τότε σε κάθε περίπτωση θα είχαμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο πηνίο και παραγωγή μηχανικής ενέργειας του μαγνήτη, δηλαδή παραγωγή ενέργειας χωρίς καμία δαπάνη κάτι που όμως παραβιάζει τη διατήρηση ενέργειας που διέπει όλα τα φυσικά φαινόμενα.

Συνεπώς η ενέργεια που ξοδεύουμε για την κίνηση του μαγνήτη γίνεται ηλεκτρική ενέργεια στο πηνίο.

γ) προσοχή στην ενεργειακή διαφορά μεταξύ της επαγωγικής Η Ε Δ και της Η Ε Δ από μπαταρία. Στην **μπαταρία** έχουμε μετατροπή της **χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική**, ενώ στην περίπτωση της **επαγωγικής Η Ε Δ** έχουμε μετατροπή της **μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική**.

19. Πως αποδεικνύεται η σχέση προσδιορισμού της Η Ε Δ από επαγωγή στη μεταφορική κίνηση της ράβδου σε Ο. Μ. Π με τη χρήση του νόμου του Faraday;

Έστω η ράβδος Κ Λ μήκους L, που κινείται παράλληλα με τον εαυτό της με ταχύτητα υ, μέσα σε Ο. Μ. Π έντασης B και **διαγράφει επιφάνεια** κάθετη στις δυναμικές γραμμές.



Σε χρονικό διάστημα Δ t η ράβδος έχει μετατοπιστεί κατά Δ χ σαρώνοντας επιφάνεια εμβαδού Δ S μέσα από την οποία μεταβάλλεται η μαγνητική ροή. Η ταχύτητα της ράβδου είναι:

$$v = \Delta \chi / \Delta t$$

και η Η. Ε. Δ από επαγωγή στ' άκρα της θα μπορεί να υπολογιστεί με το νόμο του Faraday ως εξής:

$$\begin{aligned} E_{\text{ΕΠ}} &= \Delta \Phi / \Delta t \longrightarrow E_{\text{ΕΠ}} = B \Delta S / \Delta t \longrightarrow E_{\text{ΕΠ}} = B (\Delta \chi / \Delta t) L \\ &\longrightarrow E_{\text{ΕΠ}} = B v L \end{aligned}$$

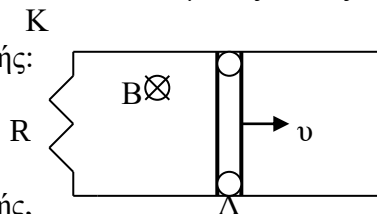
Και έτσι η κινούμενη ράβδος συμπεριφέρεται σαν ηλεκτρική πηγή με χαρακτηριστικά στοιχεία: α) Η Ε Δ την $E_{\text{ΕΠ}}$ και β) εσωτερική αντίσταση ίση με την αντίστασή της.

20. Πως εφαρμόζεται ο κανόνας του Lenz και η αρχή διατήρησης της ενέργειας στην περίπτωση μεταφορικής κίνησης αγωγού σε Ο. Μ. Π;

Έστω ο αγωγός του σχήματος που κινείται με σταθερή ταχύτητα υ, κάθετη στις δυναμικές γραμμές Ο. Μ. Π, χωρίς τριβές και αποτελεί τμήμα κλειστού κυκλώματος καθώς στ' άκρα του συνδέεται αντιστάτης αντίστασης R.

Τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά σειρά είναι τα εξής:

- κίνηση του αγωγού Κ Λ,
- μεταβολή της μαγνητικής ροής,
- εμφάνιση Η Ε Δ από επαγωγή,
- το κλειστό κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα επαγωγής,
- αναπτύσσεται δύναμη Laplace στον ρευματοφόρο αγωγό Κ Λ.



Λόγω του κανόνα του Lenz πρέπει η φορά της δύναμης Laplace (τελικό αποτέλεσμα) να είναι αντίθετη της φοράς κίνησης του αγωγού Κ Λ (αρχικό αίτιο).

Με χρήση των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού υπολογίζουμε τη φορά του επαγωγικού ρεύματος, αφού γνωρίζουμε την κατεύθυνση των $\mathbf{B}$ και $\mathbf{F}_L$, άρα γνωρίζουμε και την πολικότητα της επαγωγικής Η Ε Δ και έτσι δημιουργείται (+) πόλος στο Κ και (-) πόλος στο Λ.

Λόγω της κατεύθυνσής της η δύναμη Laplace δαπανά έργο και το μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια.

Άρα για την κίνηση του αγωγού με σταθερή ταχύτητα απαιτείται η ύπαρξη εξωτερικής δύναμης, τέτοιας ώστε:

$$F = F_L = B I L$$

1. **Η εξωτερική δύναμη F που ασκούμε στη ράβδο παράγει έργο που είναι:**

$$W = F \Delta x = F v \Delta t$$

2. **επειδή η ταχύτητα είναι σταθερή, το έργο γράφεται:**

$$W = F_L v \Delta t = B I L v \Delta t = E_{\text{ΕΠ}} I \Delta t = W_{\eta\lambda}$$

3. **αν το κύκλωμα έχει μόνο αντιστάσεις, τότε όλη η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα, σύμφωνα με το φαινόμενο Joule.**

$$Q = I^2 R \Delta t = (B^2 v^2 L^2 / R) \Delta t \quad \text{ενώ στο ίδιο διάστημα:}$$

$$W = F \Delta x = B I L v \Delta t = B (B v L / R) L v \Delta t = (B^2 v^2 L^2 / R) \Delta t$$

$$\text{Άρα προκύπτει ότι: } Q = W$$

Δηλαδή το φαινόμενο της επαγωγής είναι μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

***Παρατήρηση:** αν δεν ίσχυε ο κανόνας Lenz τότε η δύναμη Laplace, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης εξωτερικής δύναμης, θα ήταν ομόρροπη της κίνησης με αποτέλεσμα να αυξάνει συνέχεια η κινητική ενέργεια της ράβδου. Έτσι θα είχαμε παραγωγή μηχανικής και ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς δαπάνη καμιάς άλλης μορφής ενέργειας, πράγμα άτοπο γιατί έτσι θα παραβιαζόταν η αρχή διατήρησης της ενέργειας (παραγωγή ενέργειας απ' το μηδέν).

21. Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων στη μεταφορική κίνηση αγωγού μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο.

1. **Όταν ο αγωγός είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές και η ταχύτητα v του αγωγού κάθετη στο διάνυσμα $\mathbf{B}$ και παράλληλη στον αγωγό, δεν δημιουργείται επαγωγικό φαινόμενο, γιατί οι δυνάμεις Lorentz που ασκούνται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού δημιουργούν συσσώρευση φορτίου στα πλευρικά τοιχώματα του αγωγού και όχι στ' άκρα του.**
2. **Όταν ο αγωγός είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές και η ταχύτητα v του αγωγού παράλληλη στο διάνυσμα $\mathbf{B}$ και κάθετη στον αγωγό, δεν δημιουργείται επαγωγικό φαινόμενο, γιατί τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού δεν δέχονται δυνάμεις Lorentz.**
3. **Όταν ο αγωγός είναι παράλληλος στις δυναμικές γραμμές και η ταχύτητα v του αγωγού κάθετη στο διάνυσμα $\mathbf{B}$ και κάθετη στον αγωγό, δεν δημιουργείται επαγωγικό φαινόμενο, γιατί οι δυνάμεις Lorentz που δέχονται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού δημιουργούν συσσώρευση φορτίου στα πλευρικά τοιχώματα και όχι στ' άκρα του.**

Δηλαδή για να αναπτύσσεται Η Ε Δ από επαγωγή στ' άκρα του αγωγού, πρέπει ο αγωγός να σαρώνει τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου κατά τη κίνησή του.

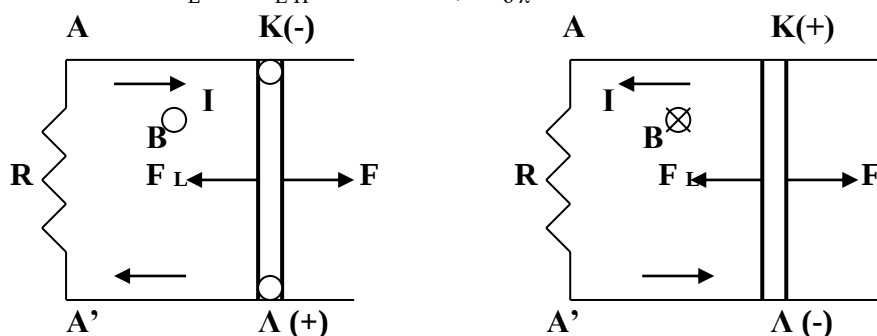
ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ

- Σε κάθε άσκηση επαγωγής σημειώνουμε αρχικά την πολικότητα της Η Ε Δ από επαγωγή, με τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού.
- Σε όλα τα προβλήματα ο κινούμενος αγωγός θα δέχεται δύναμη Laplace $F_L = B I L$, εφόσον είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές του Ο. Μ. Π.
- Αν στο κύκλωμα η μόνη Η Ε Δ είναι η επαγωγική (δεν υπάρχει άλλη Η Ε Δ εκτός αγωγού), το κύκλωμα διαρρέεται από επαγωγικό ρεύμα $I_{ΕΠ}$, που υπολογίζεται απ' το νόμο του Ohm:

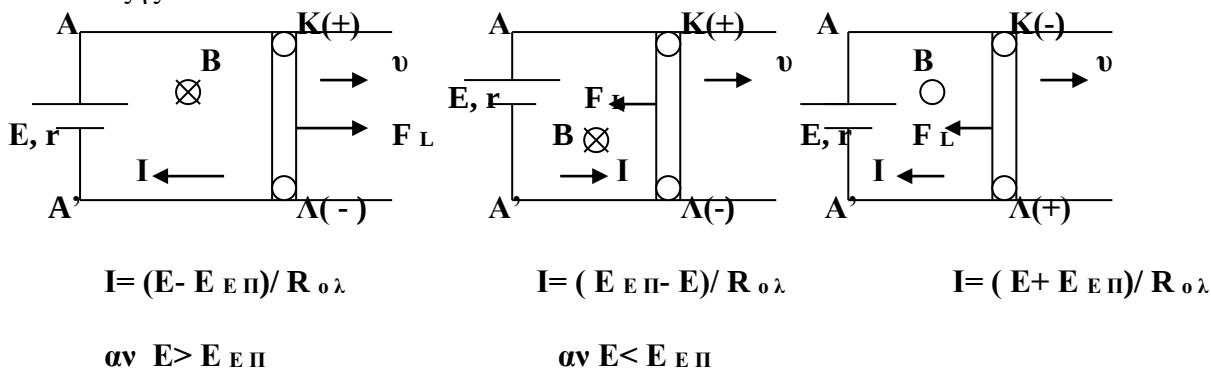
$$I_{ΕΠ} = E_{ΕΠ} / R_{ολ} = B v L / R_{ολ}$$

Στη περίπτωση αυτή λόγω του κανόνα του Lenz πρέπει η φορά της δύναμης Laplace να είναι αντίθετη της φοράς κίνησης του αγωγού, ανεξάρτητα από τη φορά του μαγνητικού πεδίου, **και τότε:**

$$F_L = B I_{ΕΠ} L = B^2 v L^2 / R_{ολ}$$



- Αν στο κύκλωμα υπάρχει και πηγή (E, r) εκτός της $E_{ΕΠ}$, το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα I που δεν χαρακτηρίζεται επαγωγικό. Στη περίπτωση αυτή υπολογίζεται ως εξής:



Όταν δύο πηγές είναι συνδεδεμένες κατά αντίθεση, υπερισχύει το ρεύμα της μεγαλύτερης Η Ε Δ.

Στις παραπάνω περιπτώσεις η φορά της δύναμης Laplace βρίσκεται με τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού και μπορεί να είναι ομόρροπη είτε αντίρροπη της κίνησης του αγωγού.

- Όταν ο αγωγός εκτελεί μεταφορική κίνηση σε κατακόρυφο επίπεδο τότε εργαζόμαστε ανάλογα αλλά επιπλέον σχεδιάζουμε το βάρος $m g$ του αγωγού που είναι μια σταθερή εξωτερική δύναμη που ασκείται σ' αυτόν.
- Όταν η κίνηση του αγωγού γίνεται κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου τότε κατασκευάζουμε δύο σχήματα. Στο ένα σχήμα, που είναι μία πλάγια όψη, παριστάνουμε το ηλεκτρικό κύκλωμα. Στο άλλο σχήμα, που είναι μία κάθετη τομή, σχεδιάζουμε τις δυνάμεις και προσδιορίζουμε την πολικότητα της επαγωγικής Η Ε Δ. Η δύναμη Laplace είναι πάντα κάθετη στην ένταση B. Αφού σχεδιάσουμε την F_L ,

την αναλύουμε(αν χρειάζεται) στις συνιστώσες της. Για τον προσδιορισμό της επαγωγικής Η Ε Δ χρησιμοποιούμε τη συνιστώσα (B_{κ}) της έντασης του μαγνητικού πεδίου που είναι κάθετη στη ταχύτητά του και έτσι γράφουμε:

$$E_{\text{ΕΠ}} = B_{\kappa} v L$$

Αφού προσδιορίσουμε την πολικότητα, βρίσκουμε τη φορά του ρεύματος I που διαρρέει τον αγωγό.

- Όταν ζητείται η οριακή(σταθερή) ταχύτητα($v_{\text{ορ}}$) του αγωγού τότε αυτή αποκτάται όταν γίνει: $\Sigma F = 0$
- Όταν ζητείται η θερμότητα Joule που αναπτύσσεται στο κύκλωμα τότε αυτή υπολογίζεται: α) από τη σχέση $Q = I^2 R t$, όταν $I =$ σταθερό και β) με αρχή διατήρησης της ενέργειας αν $I \neq$ σταθερό.
- Όταν ζητείται το διερχόμενο ηλεκτρικό φορτίο από μία διατομή του αγωγού, τότε αυτό υπολογίζεται: α) από τη σχέση $q = I t$ εφόσον η ένταση του ρεύματος είναι σταθερή και β) από το εμβαδόν που περικλείεται στο διάγραμμα $I = f(t)$ (αν είναι ευθεία το εμβαδόν υπολογίζεται εύκολα γεωμετρικά).
- Όταν ζητούνται ρυθμοί μετατροπής ενέργειας(Ισχύς) από μία μορφή σε άλλη, τότε:
 1. Ρυθμός παροχής ενέργειας από πηγή με Η Ε Δ Ε:

$$P_{\text{πηγ}} = E I$$
 2. Ρυθμός παραγωγής θερμότητας σε αντιστάσεις(θερμική ισχύς):

$$P_R = I^2 R$$
 3. Ρυθμός παροχής ενέργειας από εξωτερική δύναμη:

$$P_F = \Delta W_F / \Delta t = F v$$
 4. Ρυθμός μεταβολής κινητικής ενέργειας:

$$\Delta K / \Delta t = W_{\Sigma F} / \Delta t = \pm \Sigma F \Delta x / \Delta t \rightarrow \Delta K / \Delta t = \pm \Sigma F v$$
 (όπου + αν η ΣF έχει τη κατεύθυνση της κίνησης και - αν είναι αντίθετη της κίνησης)
 5. Ρυθμός μεταβολής δυναμικής ενέργειας βαρύτητας:

$$\Delta U / \Delta t = - W_{\beta \alpha \rho} / \Delta t = -(\pm m g \Delta \psi) / \Delta t \rightarrow \Delta U / \Delta t = \pm m g v$$
 (όπου + αν το σώμα κινείται στην κατεύθυνση του βάρους και - αν το σώμα κινείται αντίθετα από το βάρος του).

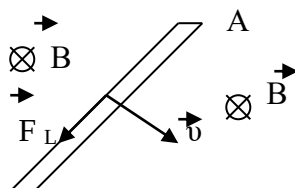
Όλοι οι παραπάνω ρυθμοί μεταβολής ενέργειας είναι στιγμιαίοι.

22. Πως υπολογίζεται η επαγωγική Η Ε Δ που αναπτύσσεται στ' άκρα αγωγού που περιστρέφεται γύρω από άξονα που περνάει από το άκρο του και είναι παράλληλος στις δυναμικές γραμμές του πεδίου;

Έστω ευθύγραμμος αγωγός μήκους L που στρέφεται γύρω από άξονα που περνά από το ένα άκρο του O , και είναι παράλληλος με τις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου έντασης B , με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω . Το επίπεδο περιστροφής του αγωγού είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές του πεδίου.

Στα ηλεκτρόνια του αγωγού ασκείται δύναμη Lorentz που τα ωθεί στο άκρο του O (από χρήση κανόνα τριών δακτύλων δεξιού χεριού).

Άρα στ' άκρα του αγωγού θα εμφανιστεί Η Ε Δ από επαγωγή, η οποία υπολογίζεται



ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ

απ' το νόμο του Faraday.

—O

Σε χρόνο Δt ο αγωγός έχει στραφεί κατά γωνία $\Delta \theta$, σαρώνοντας επιφάνεια ΔA .

Έτσι από το νόμο της επαγωγής θα έχουμε:

$$\mathcal{E} = \Delta \Phi / \Delta t = B \Delta A / \Delta t$$

Ο αγωγός στη διάρκεια μιας περιόδου T σαρώνει την επιφάνεια του κυκλικού δίσκου με κέντρο το O και ακτίνα L , ίση με πL^2 . Άρα:

$$\Delta A / \Delta t = \pi L^2 / T \quad \left| \begin{array}{l} \text{---} \rightarrow \\ T = 2\pi / \omega \end{array} \right. \quad \Delta A / \Delta t = \frac{1}{2} L^2 \omega$$

και επιστρέφοντας στο νόμο επαγωγής, καταλήγουμε ότι:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} B \omega L^2$$

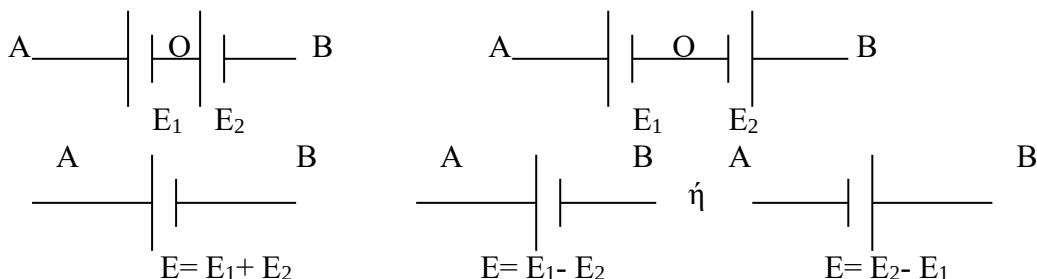
Η τελευταία σχέση δίνει τη **στιγμιαία Η Ε Δ από επαγωγή**, αν ω είναι η στιγμιαία γωνιακή ταχύτητα του αγωγού.

Αν η γωνιακή ταχύτητα του αγωγού είναι σταθερή τότε και η επαγωγική Η Ε Δ που αναπτύσσεται είναι σταθερή.

Η πολικότητα της επαγωγικής Η Ε Δ βρίσκεται με εφαρμογή του κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού.

Σημείωση!! Η παραπάνω σχέση ισχύει **μόνο** αν ο άξονας περιστροφής περνά από το άκρο του αγωγού.

***Παρατήρηση:** Αν ο άξονας περιστροφής **δεν** περνά από το άκρο του αγωγού, η παραπάνω σχέση εφαρμόζεται μεταξύ του κάθε άκρου του αγωγού και του άξονα περιστροφής. Η ολική επαγωγική Η Ε Δ βρίσκεται λαμβάνοντας υπόψη μας τις πολικότητες των επιμέρους Η Ε Δ.



23. Πως υπολογίζεται η Η Ε Δ από επαγωγή που εμφανίζεται σε δίσκο ο οποίος περιστρέφεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο γύρω από άξονα που περνάει από το κέντρο του και είναι παράλληλος στις δυναμικές γραμμές του πεδίου;

Δίσκος ακτίνας r περιστρέφεται μέσα σε $O. M. \Pi$ με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από άξονα που περνά από το κέντρο του και είναι παράλληλος στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Το επίπεδο του δίσκου είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές του πεδίου.

ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ

Στο τμήμα του δίσκου μεταξύ κέντρου και περιφέρειας (εμβαδού A) διέρχεται μαγνητική ροή:

$$\Phi = B A$$

όπου το εμβαδόν του κυκλικού τομέα είναι:

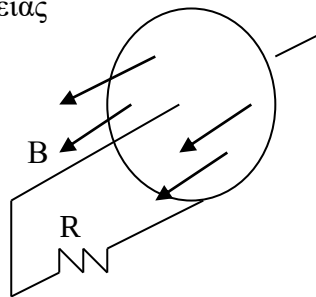
$$A = \frac{1}{2} r^2 \theta$$

σε χρονικό διάστημα Δt ο δίσκος έχει στραφεί κατά γωνία $\Delta \theta$ και η μεταβολή της ροής μέσα από το δίσκο θα είναι:

$$\Delta \Phi = \frac{1}{2} B r^2 \Delta \theta \quad \text{ή}$$

$$\Delta \Phi = \frac{1}{2} B r^2 \omega \Delta t \quad \text{και τότε η Η Ε Δ που επάγεται θα έχει μέτρο:}$$

$$E_{ΕΠ} = \Delta \Phi / \Delta t \longrightarrow E_{ΕΠ} = \frac{1}{2} B \omega r^2$$



24. Πότε μία τάση λέγεται αρμονικά εναλλασσόμενη; Ποια είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη μιας εναλλασσόμενης τάσης; Περιγράψτε τη διαδικασία παραγωγής της εναλλασσόμενης τάσης.

Έστω ορθογώνιο πλαίσιο N σπειρών και εμβαδού A , το οποίο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από άξονα κάθετο στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου έντασης B .

Για την περιστροφή του πλαισίου δαπανάται μηχανική ενέργεια που, εκτός από τις απώλειες, μετατρέπεται λόγω του φαινομένου της επαγωγής σε ηλεκτρική, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας Η Ε Δ από επαγωγή στ' άκρα του πλαισίου.

Τη στιγμή $t=0$ το επίπεδο του πλαισίου είναι **κάθετο** στις δυναμικές γραμμές του πεδίου και η **μαγνητική ροή** που περνά μέσα από αυτό είναι **μέγιστη**: $\Phi = B A$

Σε τυχαία χρονική στιγμή t το πλαίσιο θα έχει στραφεί κατά γωνία $\theta = \omega t$, άρα η μαγνητική ροή που διέρχεται από **κάθε** σπείρα του θα είναι:

$$\Phi = B A \sin \theta \quad \text{ή} \quad \Phi = B A \sin \omega t$$

και απ' το νόμο του Faraday η Η Ε Δ από επαγωγή που αναπτύσσεται είναι:

$$E_{ΕΠ} = -N \Delta \Phi / \Delta t \longrightarrow E_{ΕΠ} = N B A \omega \eta \mu \omega t$$

Αν το πλαίσιο δεν εμφανίζει εσωτερική αντίσταση τότε η Η Ε Δ είναι ίση με τη πολική τάση στ' άκρα του πλαισίου και τότε η προηγούμενη τάση μπορεί να γραφεί και με τη μορφή:

$$V = V_0 \eta \mu \omega t$$

Η τάση αυτή ονομάζεται **αρμονικά εναλλασσόμενη τάση** που η τιμή και η πολικότητά της μεταβάλλονται περιοδικά με το χρόνο.

Στη παραπάνω σχέση υπάρχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

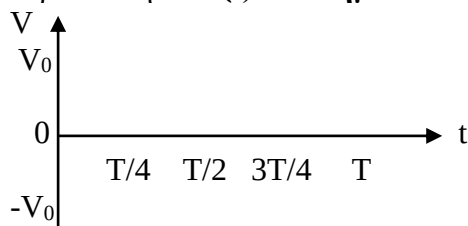
1. **Πλάτος** $V_0 = N B A \omega$: η μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης τάσης,
2. **Περίοδος** T (σε s): ο χρόνος που απαιτείται για μια πλήρη εναλλαγή των τιμών της τάσης (μία πλήρη περιστροφή του πλαισίου),

3. **Συχνότητα f (σε Hz):** ο αριθμός των πλήρων εναλλαγών της τάσης σε χρόνο 1s,
4. **Γωνιακή συχνότητα ω (σε rad/ s):** ο αριθμός των πλήρων εναλλαγών της τάσης σε χρόνο 2π s (ίση με τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου)
 $\omega = 2\pi f = 2\pi / T$
5. **Φάση $\phi = \omega t$ (σε rad):** η γωνία της οποίας το ημίτονο καθορίζει τη στιγμιαία τάση V .

Η πηγή εναλλασσόμενης τάσης συμβολίζεται ως εξής:



και η γραφική παράσταση $V = f(t)$ είναι ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή:

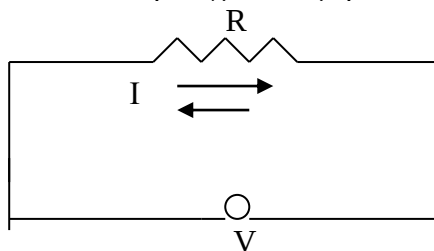


25. Ποιο ρεύμα ονομάζεται αρμονικά εναλλασσόμενο;

Στα άκρα αντιστάτη αντίστασης R εφαρμόζουμε εναλλασσόμενη τάση της μορφής $V = V_0 \eta \mu \omega t$. Στο εσωτερικό του αγωγού δημιουργείται χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο που αναγκάζει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια σε ταλάντωση συχνότητας ω . Έτσι η αντίσταση διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα I , του οποίου η στιγμιαία τιμή υπολογίζεται απ' το νόμο Ohm:

$$I = V/R = V_0 \eta \mu \omega t / R$$

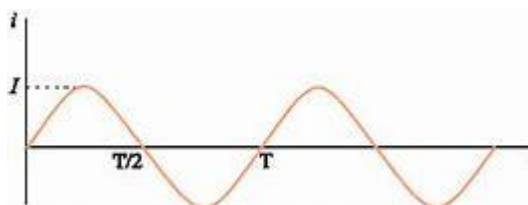
$$I = I_0 \eta \mu \omega t$$



Όπου $I_0 = V_0 / R$ η μέγιστη τιμή (πλάτος) της έντασης του ρεύματος.

Το ρεύμα του οποίου η ένταση περιγράφεται απ' τη παραπάνω εξίσωση ονομάζεται **αρμονικά εναλλασσόμενο** του οποίου η φορά και η τιμή της έντασης μεταβάλλονται **περιοδικά με το χρόνο**.

Η γραφική παράσταση της σχέσης $I = f(t)$ είναι:



***Παρατήρηση:** Από τις παραπάνω εξισώσεις διαπιστώνουμε ότι τα μεγέθη V και I έχουν κάθε χρονική στιγμή την ίδια φάση ωt . Αυτό σημαίνει ότι παίρνουν τις αντίστοιχες τιμές τους ταυτόχρονα. Δύο τέτοια μεγέθη χαρακτηρίζονται ως **συμφασικά** ή ότι βρίσκονται **σε φάση**.