2.2.9. Πώς ορίζεται η ένταση ομογενούς μαγνητικού πεδίου.

ΣΤΟΧΟΣ της παραγράφου 2.2.9 έως 2.2.13: Να γνωρίζουν όλοι ότι **α)** πως ορίζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου (Tesla), **β)** την σχέση της έντασης του μαγνητικού πεδίου ενός ευθύγραμμου αγωγού, **γ)** να βρίσκουν την συνολική ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο (δηλαδή, τον τρόπο εργασίας σύνθεσης διανυσμάτων) και **δ)** την δύναμη μεταξύ παράλληλων ρευμάτων.

Ο ορισμός του μέτρου της έντασης του μαγνητικού πεδίου προκύπτει από την σχέση του νόμου του Laplace.

$$F_L = B \cdot I \cdot l \Rightarrow B = \frac{F_L}{I \cdot l}$$

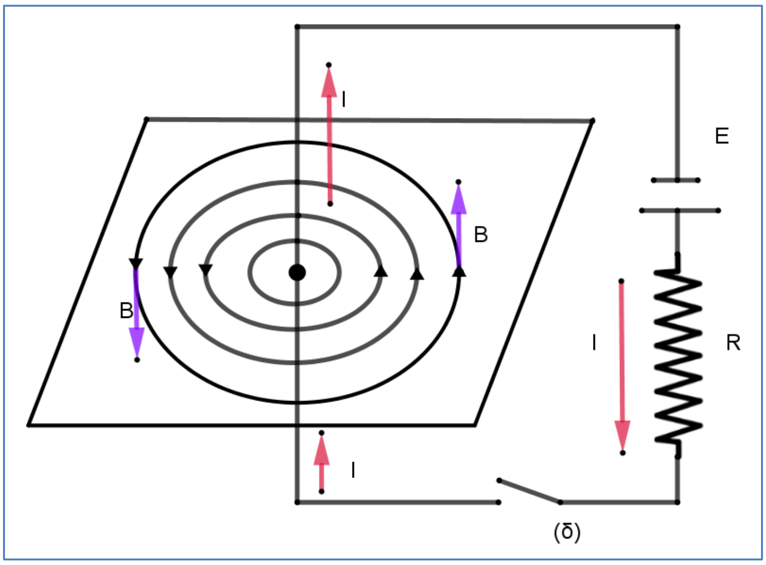
Άρα το μέτρο της έντασης ενός μαγνητικού πεδίου είναι ίσο με το πηλίκο της δύναμης Laplace που ασκείται σε ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό προς το γινόμενο της έντασης I του ρεύματος επί το μήκος l του αγωγού που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο όταν ο αγωγός τοποθετηθεί κάθετα στις δυναμικές γραμμές.

Η μονάδα μέτρησης ονομάζεται Tesla προς τιμή του Κροάτη φυσικού και εφευρέτη Nicola Tesla και συμβολίζεται με T.

$$T = \frac{N}{A \cdot m}$$

Επομένως ένα Tesla είναι η ένταση ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου το οποίο ασκεί δύναμη 1N σε ευθύγραμμο αγωγό που έχει μήκος l=1m όταν διαρρέεται από ρεύμα έντασης 1 A και βρίσκεται μέσα στο πεδίο τέμνοντας κάθετα τις δυναμικές του γραμμές.

2.2.10. Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου αγωγού.

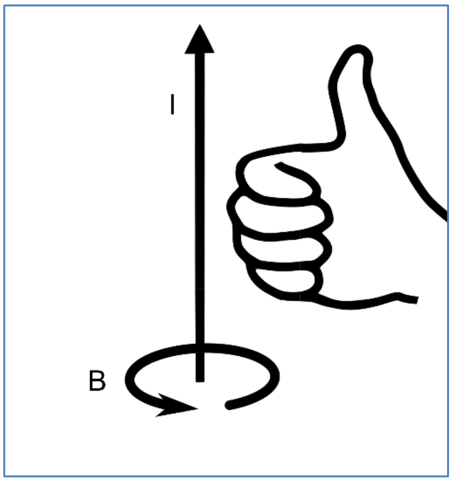


Έστω ένας ευθύγραμμος αγωγός με πολύ μεγάλο μήκος (άπειρο μήκος) που διαρρέεται από ρεύμα έντασης $I=\dfrac{E}{R}$.

Γύρω από τον ρευματοφόρο αγωγό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο που έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

✦ Οι δυναμικές του γραμμές είναι ομόκεντροι κύκλοι που έχουν το κέντρο τους πάνω στον αγωγό.

✦ Το επίπεδό τους είναι κάθετο στον ρευματοφόρο αγωγό.



✦ Η φορά των δυναμικών γραμμών βρίσκεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού (εμπειρικός κανόνας του Maxwell). Δηλαδή βάζουμε την παλάμη του δεξιού χεριού παράλληλα με τον αγωγό έτσι ώστε ο αντίχειρας να δείχνει την φορά του ρεύματος οπότε τα υπόλοιπα δάκτυλα καθώς κλείνουν γύρω από τον αγωγό δείχνουν την φορά των δυναμικών γραμμών.

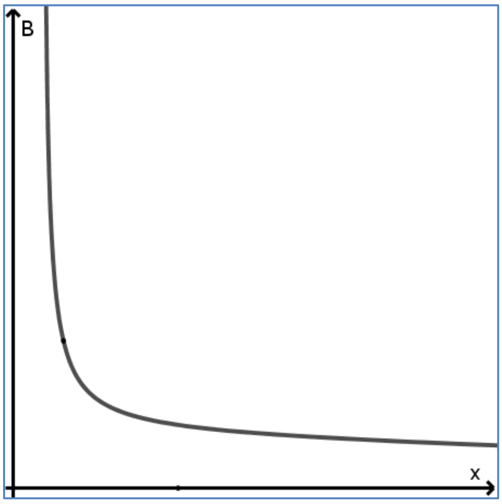
✦ Η μαγνητική επαγωγή B σε ένα τυχαίο σημείο του μαγνητικού πεδίου του ευθύγραμμου αγωγού θα είναι **πάντα εφαπτόμενη των δυναμικών γραμμών** και θα έχει φορά ίδια με την φορά των δυναμικών γραμμών.

✦ Το **μέτρο** της μαγνητικής επαγωγής θα δίνεται από την σχέση $B=K_{\mu}\dfrac{2I}{r}$

όπου K_μ = μαγνητική σταθερά $=10^{-7}$ N/A^2

I = ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό

r = απόσταση κάθε σημείου από το κέντρο του αγωγού



Η γραφική παράσταση της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με το x είναι ισοσκελής υπερβολή.

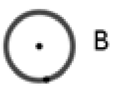
$$B = K_\mu \frac{2I}{x} = \frac{\Sigma TA\Theta}{x}$$

2.2.11. Πώς εργαζόμασθε για να βρούμε την συνολική ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο.

✦ **Βήμα 1ο**: Σχεδιάζουμε την ένταση του κάθε πεδίου στο συγκεκριμένο σημείο με την βοήθεια του κανόνα του δεξιού χεριού όταν έχουμε ευθύγραμμο αγωγό.

✦ **Βήμα 2ο**: Η συνολική ένταση $B_{ολ}$ είναι η διανυσματική πρόσθεση όλων των εντάσεων, δηλαδή $\vec{B}_{ολ} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$.

Πρέπει να γνωρίζω:



προς τα έξω

προς τα μέσα

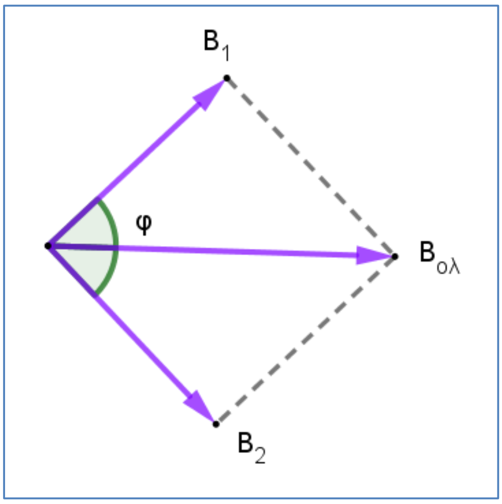
✦ **Βήμα 3ο**: Αν οι εντάσεις είναι στον ίδιο άξονα εκλέγουμε θετική φορά και καταργούμε τα διανύσματα. Όποιο διάνυσμα ταυτίζεται με την θετική φορά είναι θετικό, όποιο όχι είναι αρνητικό.

Ενώ οι εντάσεις σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία φ, τότε: $\vec{B}_{ολ} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ και το μέτρο της συνολικής έντασης δίνεται από την σχέση:

$$B_{ολ} = \sqrt{B_1^{\ 2} + B_2^{\ 2} + 2B_1B_2συνφ}$$

όπου φ = γωνία μεταξύ των δύο εντάσεων που συνθέτουμε.

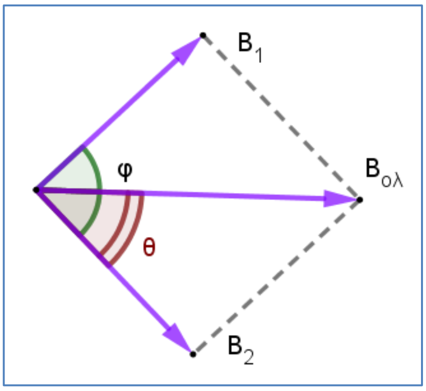
Η πιο πάνω σχέση μας δίνει το μέτρο της συνολικής έντασης.



Εκτός από το μέτρο θέλουμε και την διεύθυνση, δηλαδή την γωνία που σχηματίζει ή με την ένταση $\vec{B}_1$ ή με την ένταση $\vec{B}_2$.

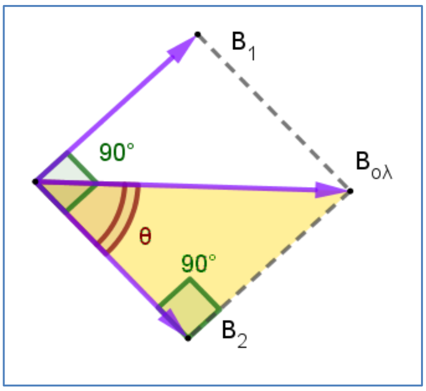
⇨ **Εύρεση της θ**:

1. Αν οι εντάσεις $\vec{B}_1$ και $\vec{B}_2$ είναι ίσες, τότε το παραλληλόγραμμο είναι και ρόμβος και η διαγώνιος $\vec{B}_{ολ}$ θα διχοτομεί την γωνία, δηλαδή $θ = \frac{φ}{2}$.

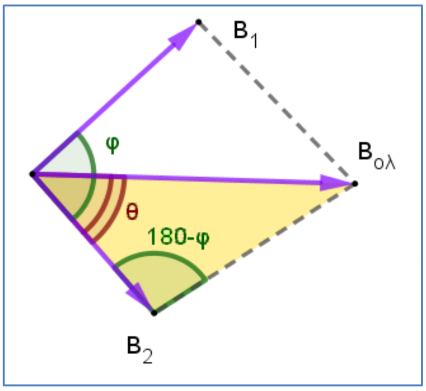


2. Αν η γωνία φ = 90° τότε $B_{ολ} = \sqrt{B_1^{\ 2} + B_2^{\ 2}}$ και η θ βρίσκεται από $συνθ = \frac{B_2}{B_{ολ}}$ ή $ημθ = \frac{B_1}{B_{ολ}}$ ή $εφθ = \frac{B_1}{B_2}$.

Αν $B_1 = B_2$ τότε η θ=45°.



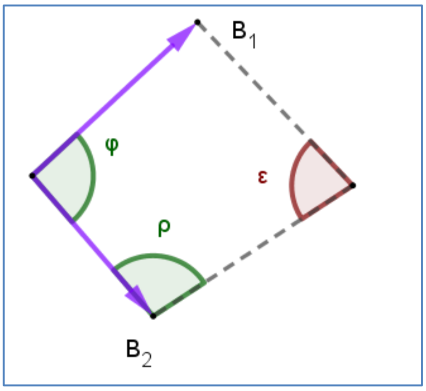
3. Αν $B_1 \neq B_2$ τότε εφαρμόζουμε νόμο των ημιτόνων.



α) Γραμμοσκιάζουμε το τρίγωνο στο οποίο θέλουμε να βρούμε την θ.

β) $\varphi + \rho = 180^o$

$\rho + \varepsilon = 180^o$

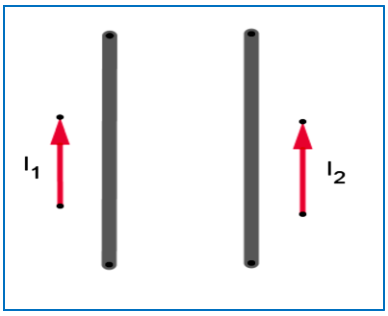


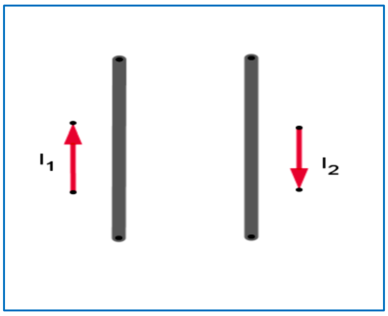
γ) Εφαρμόζουμε νόμο των ημιτόνων:

$$\frac{\text{πλευρά}}{\text{ημίτονο\_απέναντι\_γωνίας}}$$, δηλαδή

$$\frac{B_1}{\eta\mu\theta} = \frac{B_{o\lambda}}{\eta\mu(180-\varphi)} \Rightarrow \eta\mu\theta = \frac{B_1\eta\mu(180-\varphi)}{B_{o\lambda}}$$

Παράδειγμα 2.2.4





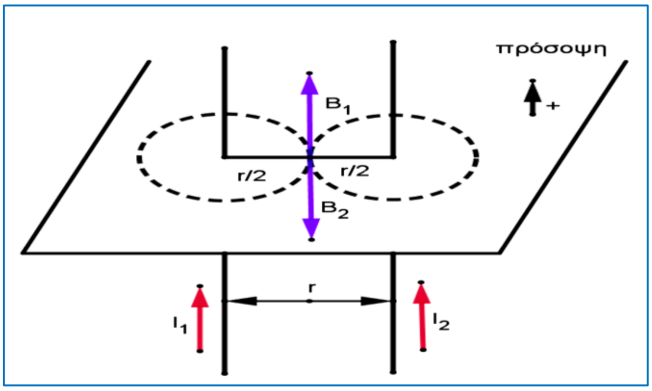
Δύο παράλληλοι ευθύγραμμη αγωγοί άπειρου μήκους διαρρέονται από ρεύματα $I_1 = 10A$ και $I_2 = 20A$, όπως στο σχήμα. Εάν η απόσταση μεταξύ των αγωγών $r = 2 \cdot 10^{-2} m$, να βρείτε την ένταση του μαγνητικού πεδίου:

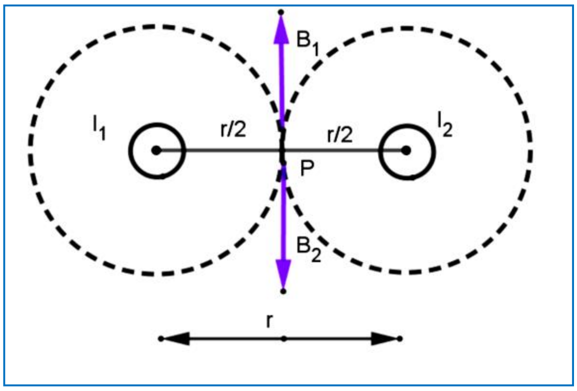
1. Στο μέσο της μεταξύ τους απόστασης.

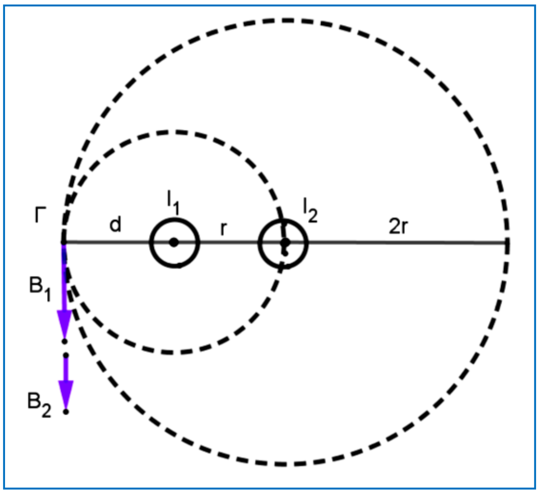
2. Σε απόσταση $d = 2 \cdot 10^{-2} m$ αριστερότερα του πρώτου αγωγού.

Απάντηση

Τους αγωγούς μπορούμε να τους σχεδιάσουμε με πρόσοψη ή με κάτοψη. Δηλαδή:







1. $\vec{B}_{(P)} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 \rightarrow B_{(P)} = B_1 - B_2$ (1)

Όπου $B_1 = k_\mu \dfrac{2I_1}{r/2} = k_\mu \dfrac{4I_1}{r}$ (2)

$B_2 = k_\mu \dfrac{2I_2}{r/2} = k_\mu \dfrac{4I_2}{r}$ (3)

Από (1), (2), (3) έχουμε: $B_{(P)} = k_\mu \dfrac{4I_1}{r} - k_\mu \dfrac{4I_2}{r} = \dfrac{4}{r} k_\mu (I_1 - I_2) \Rightarrow$

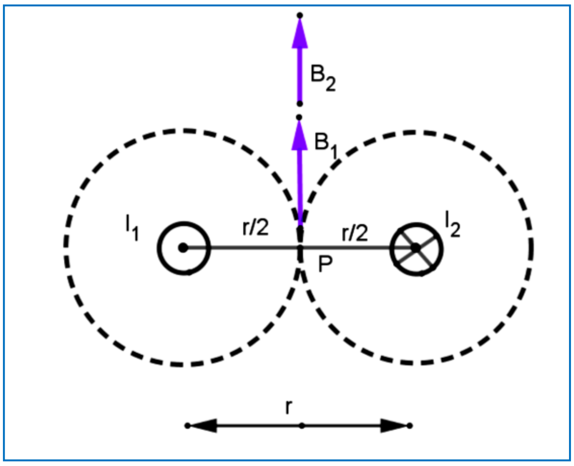
$$\Rightarrow B_{(P)} = \frac{4 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-2}}(10 - 20) \Rightarrow B_{(P)} = -2 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \Rightarrow B_{(P)} = -2 \cdot 10^{-4}\,T$$

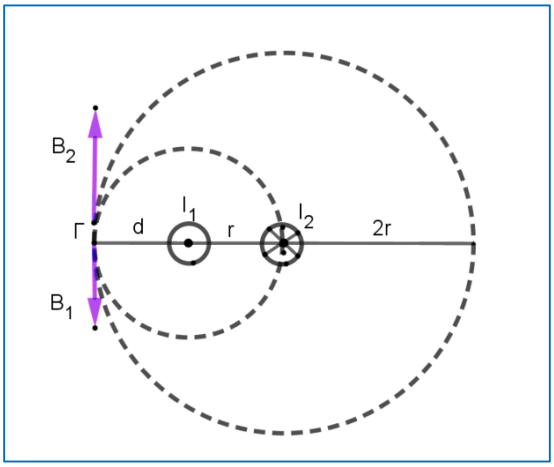
Σημαίνει ότι $B_{(P)}$ έχει αντίθετη φορά από την θετική.

$\vec{B}_{(\Gamma)} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 \Rightarrow B_{(\Gamma)} = B_1 + B_2 \Rightarrow$

$$B_{(\Gamma)} = k_\mu \frac{2I_1}{d} + k_\mu \frac{2I_2}{2d} \Rightarrow B_{(\Gamma)} = \frac{2k_\mu}{d}(I_1 + \frac{I_2}{2}) \Rightarrow$$

$$B_{(\Gamma)}=\frac{2\cdot 10^{-7}}{2\cdot 10^{-2}}(10+\frac{20}{2})=10^{-5}\cdot 20\Rightarrow B_{(\Gamma)}=2\cdot 10^{-4}T$$





2. $$\vec{B}_{(P)}=\vec{B}_1+\vec{B}_2\Rightarrow B_{(P)}=k_\mu\frac{2I_1}{r/2}+k_\mu\frac{2I_2}{r/2}\Rightarrow$$

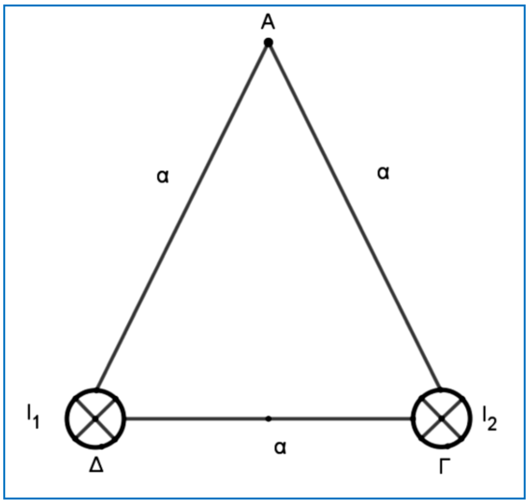
$$B_{(P)}=k_\mu\frac{4I_1}{r}+k_\mu\frac{4I_2}{r}\Rightarrow B_{(P)}=\frac{4k_\mu}{r}(I_1+I_2)$$

$$\Rightarrow B_{(P)}=\frac{4\cdot 10^{-7}}{2\cdot 10^{-2}}(10+20)\Rightarrow B_{(P)}=2\cdot 10^{-5}\cdot 30\rightarrow B_{(P)}=6\cdot 10^{-4}T$$

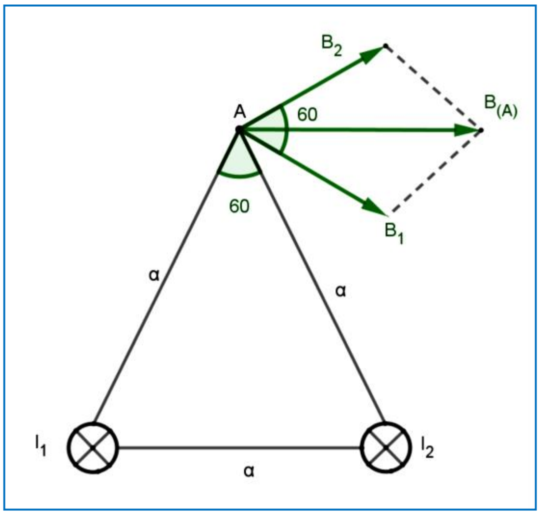
$$B_{(\Gamma)}=B_2-B_1=k_\mu\frac{2I_2}{2r}-k_\mu\frac{2I_1}{r}\Rightarrow B_{(\Gamma)}=\frac{2k_\mu}{r}(\frac{I_2}{2}-I_1)=\frac{2\cdot 10^{-7}}{2\cdot 10^{-2}}(10-10)=0$$

Παράδειγμα 2.2.5

Δίνεται ένα ισόπλευρο τρίγωνο πλευράς $\alpha = \sqrt{3}\text{m}$, όπως στο σχήμα. Στις κορυφές Γ και Δ, υπάρχουν δύο κατακόρυφοι αγωγοί που διαρρέονται από ρεύματα αντίστοιχα $I_1 = 2A$ και $I_2 = 2A$, όπως το σχήμα.
Να βρείτε την ένταση του μαγνητικού πεδίου στην κορυφή Α.



Απάντηση



$I_1 = I_2 = 2A$

$B_1 = k_\mu \dfrac{2I_1}{\alpha}$ και $B_2 = k_\mu \dfrac{2I_2}{\alpha}$.

$B_1 = B_2 = B$

$\vec{B}_{(A)} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$.

Το μέτρο της Β δίνεται από τη σχέση:

$$B_{(A)} = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2\sigma\upsilon\nu 60^\circ} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B_{(A)} = \sqrt{B^2 + B^2 + 2B^2\frac{1}{2}} \Rightarrow B_{(A)} = \sqrt{3B^2} \Rightarrow B_{(A)} = B\sqrt{3}$$

$$\Rightarrow B_{(A)} = k_\mu \frac{2I}{\alpha}\sqrt{3} = 10^{-7}\frac{2\cdot 2}{\sqrt{3}}\sqrt{3} \Rightarrow B_{(A)} = 4\cdot 10^{-7}\text{T}$$

Επειδή $B_1 = B_2$ το παραλληλόγραμμο είναι και ρόμβος άρα η διαγώνιος διχοτομεί την γωνία, άρα: $\theta = 30^\circ$.

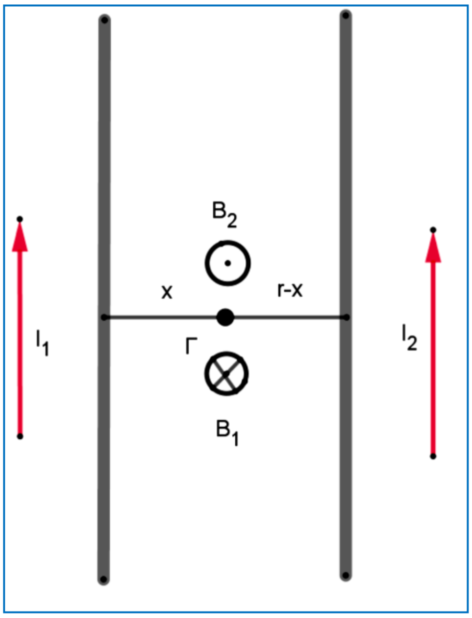
Παράδειγμα 2.2.6

Δύο ρευματοφόροι αγωγοί είναι κατακόρυφοι και διαρρέονται από ρεύματα έντασης I_1 και $I_2 = 2I_1$ και απέχουν απόσταση $r = 2m$. Η φορά του ρεύματος I_1 , δίνεται από το σχήμα. Να βρείτε:

1. Την φορά του ρεύματος I_2 ώστε η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο ανάμεσα από τους αγωγούς να είναι μηδέν.

2. Πόσο απέχει το σημείο, όπου η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μηδέν από τον αγωγό I_1 .

Απάντηση

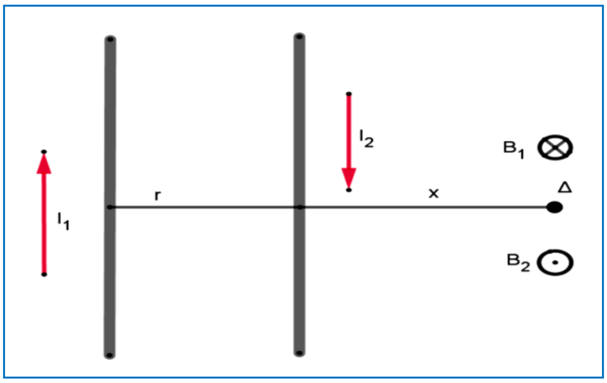


1. Έστω ότι το ρεύμα I_2 είναι ομόρροπο του I_1 . Παρατηρούμε ότι οι εντάσεις B_1 και B_2 στο σημείο Γ είναι αντίθετες. Άρα η φορά του ρεύματος I_2 είναι σωστή.

2. $B_\Gamma = 0 \Rightarrow B_1 = B_2 \Rightarrow$

$$k_\mu \frac{2I_1}{x} = k_\mu \frac{2I_2}{r-x} \Rightarrow \frac{I_1}{x} = \frac{2I_1}{r-x} \Rightarrow \frac{1}{x} = \frac{2}{r-x} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r - x = 2x \Rightarrow r = 3x \Rightarrow x = \frac{r}{3} \Rightarrow x = \frac{2}{3}m$$



Εάν θέλαμε η $B_{ολ} = 0$, σε ένα σημείο εκτός της περιοχής που περιέχεται μεταξύ των ρευμάτων τότε:

$B_\Delta = 0 \Rightarrow B_1 = B_2 \Rightarrow$

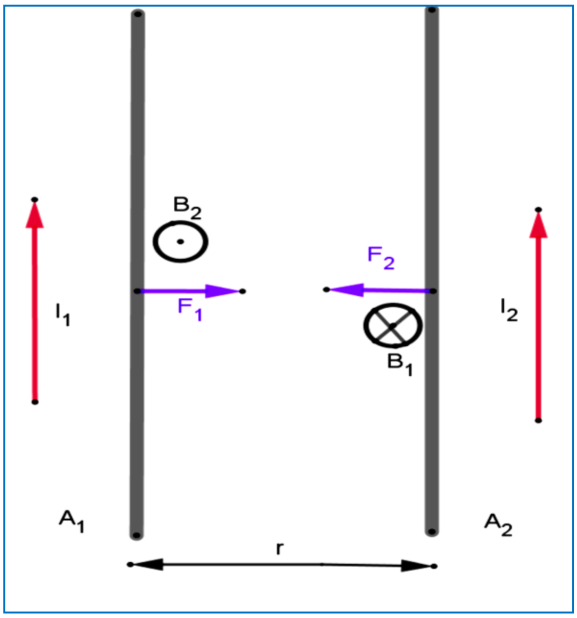
$$k_\mu \frac{2I_1}{r+x} = k_\mu \frac{2I_2}{x} \Rightarrow \frac{I_1}{r+x} = \frac{2I_1}{x} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x = 2(r+x) \Rightarrow x = 2r + 2x \Rightarrow -x = 2r \Rightarrow x = -2r$$

Άρα σημαίνει ότι το Δ είναι αριστερά του I_2 και απέχει απόσταση $2r$ από τον αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα I_2 .

2.2.12. Πώς βρίσκουμε την δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ παράλληλων ρευματοφόρων αγωγών

Έστω ότι έχουμε δύο παράλληλους αγωγούς τους οποίους διαβιβάζουμε παράλληλα και ομόρροπα ρεύματα με εντάσεις I_1 και I_2 , όπως το σχήμα και απέχουν μεταξύ τους απόσταση r . Ο αγωγός A_1 επειδή διαρρέεται από ρεύμα I_1 , δημιουργεί μαγνητικό πεδίο γύρω του. Μέσα σε αυτό το μαγνητικό πεδίο βρίσκεται και ο αγωγός A_2 .

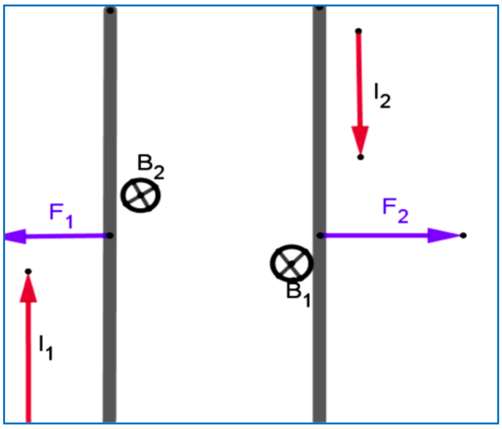


Η $\vec{B}_1$ είναι η μαγνητική επαγωγή του πεδίου που δημιουργεί ο αγωγός A_1 στο μέσο του αγωγού A_2 και θα έχει μέτρο που δίνεται από τη σχέση: $B_1 = k_\mu \frac{2I_1}{r}$.

Επειδή ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα I_2 και βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο αγωγός A_1 θα δέχεται δύναμη Laplace F_2 που έχει μέτρο:

$$F_2 = B_1 I_2 l \Rightarrow F_2 = k_\mu \frac{2I_1 I_2}{r} l$$

Με τον ίδιο τρόπο ο αγωγός A_2 δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στον αγωγό A_1 με ένταση $B_2 = k_\mu \frac{2I_2}{r}$



Επομένως ο αγωγός A_1 θα δέχεται την F_1 με μέτρο: $F_1 = B_2 I_1 l \Rightarrow \boxed{F_1 = k_\mu \frac{2I_1I_2}{r} l}$

Οι δυνάμεις F_1 και F_2 έχουν τη μορφή δράσης – αντίδρασης.

Εάν τώρα τα ρεύματα είχαν αντίθετη φορά τότε η δύναμη F_2 θα είχε φορά προς τα δεξιά ενώ

η δύναμη F_1 θα είχε φορά προς τα αριστερά. Το μέτρο τους ξανά θα είναι:

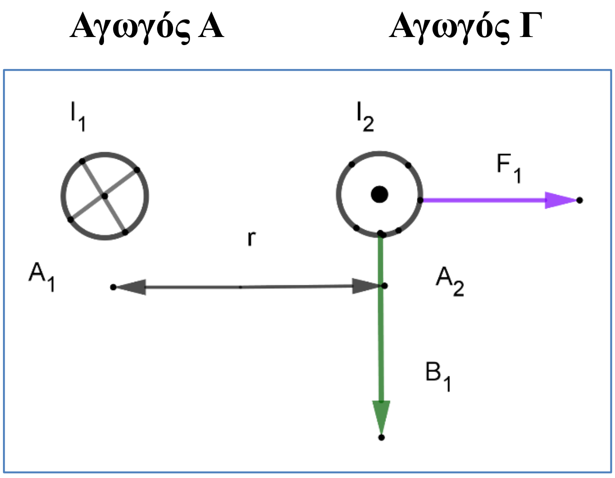
$$\boxed{F_1 = F_2 = k_\mu \frac{2I_1I_2}{r} l}$$

Από τις φορές των ρευμάτων μπορούμε να βγάλουμε έναν κανόνα.

1. **Εάν τα ρεύματα που διαρρέουν τους αγωγούς είναι ομόρροπα οι αγωγοί έλκονται.**
2. **Εάν τα ρεύματα που διαρρέουν τους αγωγούς είναι αντίρροπα ο αγωγοί απωθούνται.**

2.2.13. Πώς εργαζόμαστε για να βρούμε τη δύναμη που δέχεται ένας ρευματοφόρος αγωγός από το μαγνητικό πεδίο ενός άλλου ρευματοφόρου αγωγού.

Έστω ότι έχουμε τον αγωγό Α και Γ που διαρρέονται από ομόρροπα ρεύματα I_1 και I_2 αντίστοιχα και θέλουμε να βρούμε τη δύναμη που δέχεται ο αγωγός Γ. Τότε εργαζόμαστε ως εξής:



Βήμα 1ο: Σχεδιάζουμε την φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου του αγωγού Α πάνω στον αγωγό Γ και την υπολογίζουμε.

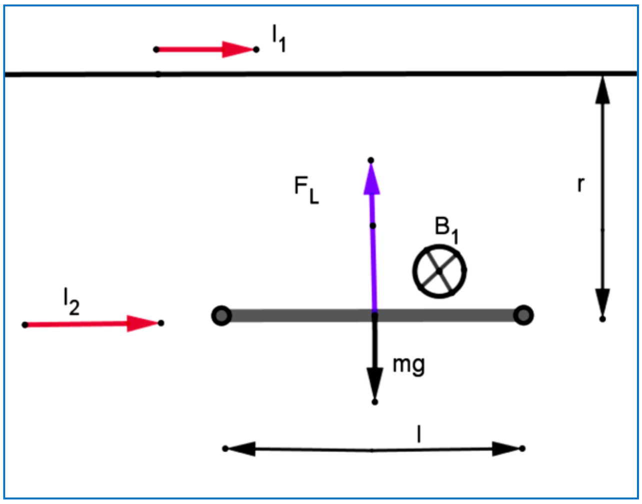
$B_1 = k_\mu \dfrac{2I_1}{r}$, όπου B_1 : είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ο ευθύγραμμος αγωγός Α.

Βήμα 2ο: Επειδή ο αγωγός Γ βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο με ένταση B_1 θα δέχεται δύναμη Laplace , επειδή διαρρέεται από ρεύμα έντασης I_1 . Η φορά της F_1 βρίσκεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού και το μέτρο από τη σχέση:

$F_1 = B_1 I_2 l \Rightarrow F_1 = k_\mu \dfrac{2I_1 I_2}{r} l$, Άρα: $\boxed{F_1 = 2k_\mu \dfrac{I_1 I_2}{r} l}$

Παράδειγμα 2.2.7

Ένας οριζόντιος ευθύγραμμος αγωγός μεγάλου μήκους είναι ακίνητος και διαρρέεται από ρεύμα $I_1 = 200A$ κάτω από τον αγωγό αυτόν σε απόσταση $r = 2 \cdot 10^{-2} m$, στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο βρίσκεται δεύτερος οριζόντιος αγωγός μήκους $l = 1m$ και μάζας $m = 16 \cdot 10^{-3} kg$.



Να βρείτε την ένταση του ρεύματος I_2 που πρέπει να διαβιβάσουμε στο δεύτερο αγωγό ώστε να ισορροπεί. Δίνεται $k_\mu = 10^{-7} N / A^2$.

Απάντηση

Ο αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα I_1 δημιουργεί μαγνητικό πεδίο έντασης B_1 που έχει μέτρο: $B_1 = k_\mu \frac{2I_1}{r}$. Ο αγωγός μήκους l λόγω του ότι βρίσκεται μέσα στο B_1 και του ότι διαρρέεται από ρεύμα I_2 θα δέχεται την F_1 που έχει μέτρο:

$$F_L = B_1 I_2 l \Rightarrow F_L = k_\mu \frac{2I_1 I_2}{r} l \Rightarrow F_L = 2k_\mu \frac{I_1 I_2}{r} l \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_L = 2 \cdot 10^{-7} \frac{2 \cdot 10^2 I_2}{2 \cdot 10^{-2}} \cdot 1 \Rightarrow F_L = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{10^{-2}} I_2 \Rightarrow F_L = 2 \cdot 10^{-3} I_2 \ (1)$$

Επειδή ο αγωγός ισορροπεί πρέπει:

$$\Sigma F = 0 \Rightarrow F_L = mg \overset{(1)}{\Rightarrow} 2 \cdot 10^{-3} I_2 = mg \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_2 = \frac{mg}{2 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow I_2 = \frac{16 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{2 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow I_2 = 80A$$

Παράδειγμα 2.2.8

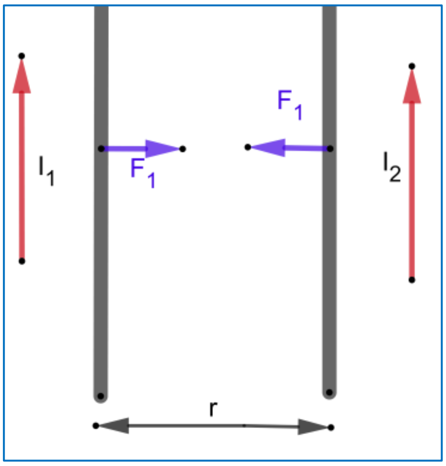
Δύο παράλληλοι αγωγοί διαρρέονται από ρεύματα έντασης $I_1 = 20A$ και $I_2 = 60A$

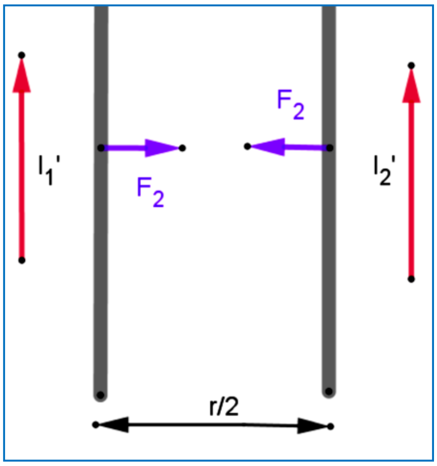
Τα ρεύματα είναι ομόρροπα και η απόσταση μεταξύ των αγωγών είναι $r = 4\cdot10^{-2}m$

Η δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο αγωγών είναι $F_1 = 2{,}5N$. Εάν οι δύο αγωγοί διαρρέονται από ομόρροπα ρεύματα εντάσεων $I_1' = 10A$ και $I_2' = 20A$ η δε απόσταση τους γίνει το μισό της προηγούμενης.

Να βρείτε την καινούργια δύναμη F_2 που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο αγωγών.

Απάντηση





$$F_1 = 2k_\mu \frac{I_1 I_2 l}{r} \qquad (1)$$

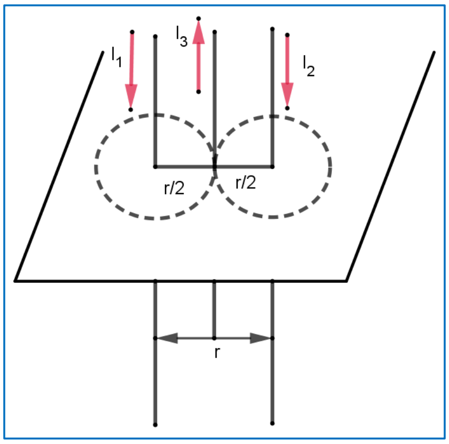
$$F_2 = 2k_\mu \frac{I_1' I_2' l}{r/2} = 4k_\mu \frac{I_1' I_2'}{r} l \qquad (2)$$

Διαιρούμε κατά μέλη: $\frac{F_1}{F_2} = \frac{\frac{2k_\mu I_1 I_2 l}{r}}{\frac{4k_\mu I_1' I_2' l}{r}} \Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = 3 \Rightarrow F_2 = 3F_1 \Rightarrow$

$\Rightarrow F_2 = 3\cdot 2{,}5 \Rightarrow F_2 = 7{,}5N$

Παράδειγμα 2.2.9

Δύο παράλληλοι ρευματοφόροι αγωγοί διαρρέονται από ομόρροπα ρεύματα εντάσεων $I_1 = 60A$ και $I_2 = 20A$ και απέχουν μεταξύ τους απόσταση $r = 0,2m$. Να βρείτε τη δύναμη που δέχεται ένας τρίτος αγωγός σε μήκος $l = 1m$ που βρίσκεται στο μέσο της απόστασης και διαρρέεται από αντίρροπο ρεύμα εντάσεως $I_3 = 40A$, σε σχέση με τα ρεύματα των άλλων δύο αγωγών.



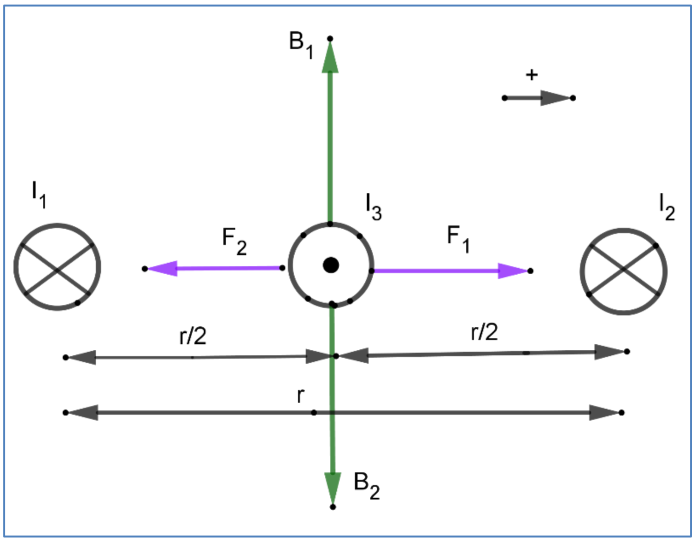
Απάντηση

$$F_1 = 2k_\mu \frac{I_1 I_3 l}{r/2} = 4k_\mu \frac{I_1 I_3 l}{r}$$

$$F_2 = 2k_\mu \frac{I_2 I_3 l}{r/2} = 4k_\mu \frac{I_2 I_3 l}{r}$$

$$\Sigma\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \Rightarrow$$

$$\Sigma F = F_1 - F_2 = 4k_\mu \frac{I_1 I_3 l}{r} - 4k_\mu \frac{I_2 I_3 l}{r} \Rightarrow$$



$$\Sigma F = \frac{4k_\mu l}{r}(I_1 I_3 - I_2 I_3) = \frac{4k_\mu l}{r} I_3 (I_1 - I_2) = \frac{4 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-1}} 40(60 - 20)$$

$$\Rightarrow \Sigma F = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 40 \cdot 40 = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 10^2 \Rightarrow \Sigma F = 32 \cdot 10^{-4} N$$