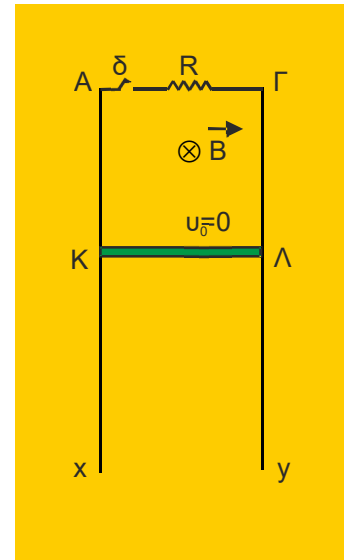


Το κλείσιμο του διακόπτη μετά την εκκίνηση του αγωγού

Οι κατακόρυφοι αγωγοί Αχ και Γγ του σχήματος έχουν πολύ μεγάλο μήκος, ασήμαντη αντίσταση και τα άκρα τους Α και Γ συνδέονται μέσω ανοικτού διακόπτη δ με σύρμα αντίστασης $R = 40\Omega$. Επάνω στο επίπεδο των δύο αγωγών είναι τοποθετημένος κάθετα προς τη διεύθυνση τους άλλος ευθύγραμμος αγωγός ΚΛ μήκους $\ell = 0,5\text{m}$, ο οποίος μπορεί να ολισθαίνει σε συνεχή επαφή με αυτούς χωρίς τριβές. Η μάζα του αγωγού ΚΛ είναι

$m = 0,01\text{kg}$ και η αντίσταση του ασήμαντη. Το σύστημα των τριών αγωγών βρίσκεται μέσα σε οριζόντιο ομογενές μαγνητικό πεδίο, του οποίου η μαγνητική επαγωγή (ένταση) $B = 1\text{T}$ είναι κάθετη στο επίπεδο των αγωγών. Την χρονική στιγμή $t_0 = 0$ αφήνουμε τον αγωγό ΚΛ να κινηθεί και τη στιγμή t_1 που έχει μετατοπιστεί κατά $\Delta y = 5\text{m}$ κλείνουμε απότομα τον διακόπτη. Να θεωρήσετε γνωστή τη σχέση, που δίνει την Η.Ε.Δ. από επαγωγή στα άκρα του αγωγού $\mathcal{E}_{\text{επ}} = B \cdot v \cdot \ell$, όπου v το μέτρο της ταχύτητάς του και ότι το μέτρο της επιτάχυνσης βαρύτητας είναι $g = 10\text{m/s}^2$.



α. Κάποιος ισχυρίζεται ότι από τη στιγμή $t_0 = 0$ έως τη στιγμή t_1 δεν εμφανίζεται Η.Ε.Δ. από επαγωγή στα άκρα του αγωγού ΚΛ. Να εξηγήσετε αν συμφωνείτε ή διαφωνείτε με τον ισχυρισμό αυτό.

β. Να υπολογίσετε την απόλυτη τιμή της έντασης του ρεύματος τη στιγμή t_1 και να δικαιολογήσετε τη φορά του στο κύκλωμα.

γ. Κάποιος ισχυρίζεται ότι αφού από τη στιγμή t_1 και μετά θα εμφανιστεί στον αγωγό δύναμη Laplace με κατεύθυνση προς τα πάνω, ο αγωγός θα αρχίσει να επιβραδύνεται. Να εξηγήσετε αν συμφωνείτε ή διαφωνείτε με τον ισχυρισμό αυτό.

δ. Κάποια στιγμή t_2 ο αγωγός ΚΛ αποκτά σταθερή (οριακή ταχύτητα). Να εξηγήσετε γιατί θα συμβεί αυτό και να περιγράψετε τις ενεργειακές μετατροπές που λαμβάνουν χώρα κατά την κίνηση του αγωγού από τη στιγμή $t_0 = 0$ και μετά.

ε. Να κάνετε ποιοτικό διάγραμμα:

- i. της απόλυτης τιμής της Η.Ε.Δ. από επαγωγή στα άκρα του αγωγού
- ii. της απόλυτης τιμής της έντασης του ρεύματος στο κύκλωμα

Λύση:

α. Καθώς ο αγωγός μετατοπίζεται, μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από το επίπεδο κίνησής του, εφόσον μεταβάλλεται το εμβαδόν επιφάνειας που σαρώνει ο αγωγός κατά την κίνησή του. Έτσι σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής θα εμφανιστεί Η.Ε.Δ. από επαγωγή στα άκρα του. Εναλλακτικά, οι δυνάμεις Lorentz που θα ασκηθούν στα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού, θα τα ωθήσουν σε ένα από τα άκρα του, οπότε θα εμφανιστεί Η.Ε.Δ. από επαγωγή. Τα παραπάνω

ισχύουν ανεξάρτητα από το αν το κύκλωμα στο οποίο συμμετέχει ο αγωγός είναι ανοικτό ή κλειστό. Ο ισχυρισμός είναι λανθασμένος.

β. Τη στιγμή t_1 ο αγωγός έχει ταχύτητα μέτρου v_1 . Από εφαρμογή του Θ.Μ.Κ.Ε. για την μετατόπιση Δy του αγωγού έχουμε

$$K_{\text{τελ}} - K_{\text{αρχ}} = W_{\text{mg}} \rightarrow \frac{1}{2} m \cdot v_1^2 = m \cdot g \cdot \Delta y \rightarrow v_1 = 10 \text{ m/s}$$

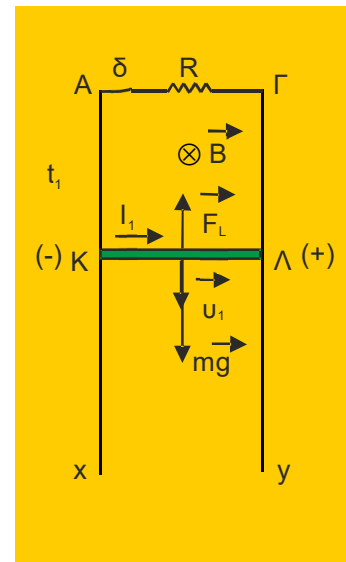
Κλείνοντας τον διακόπτη, θα κυκλοφορήσει ρεύμα στο κύκλωμα και η απόλυτη τιμή της έντασής του θα είναι

$$|I_1| = \frac{|E_{\text{επ}}|}{R} \rightarrow |I_1| = \frac{B \cdot v_1 \cdot \ell}{R} \rightarrow |I_1| = 0,125 \text{ A}$$

Τη στιγμή t_1 ο αγωγός ΚΛ θα δεχτεί δύναμη Laplace $\vec{F}_L$, η φορά της οποίας θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να τείνει να αναιρέσει την αιτία κυκλοφορίας του ρεύματος στο κύκλωμα, που είναι η προς τα κάτω κίνηση του αγωγού (κανόνας Lenz). Επομένως η φορά της δύναμης Laplace θα είναι προς τα πάνω και με τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού προκύπτει ότι η φορά του ρεύματος στον αγωγό θα είναι από το Κ στο Λ.

γ. Θεωρώντας θετική φορά την προς τα κάτω έχουμε για τη στιγμή t_1 :

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{F} &= m \cdot \vec{a} \rightarrow m \cdot g - F_L = m \cdot \alpha \rightarrow m \cdot g - B \cdot |I_1| \cdot \ell = m \cdot \alpha \rightarrow \\ &\rightarrow \alpha = 0,0375 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \end{aligned}$$



γεγονός που σημαίνει ότι ο αγωγός επιταχύνεται, απλά με μικρότερη επιτάχυνση από ότι στο διάστημα $t_0 - t_1$, όπου επιταχυνόταν με την επιτάχυνση της βαρύτητας. Έτσι ο ισχυρισμός είναι λανθασμένος.

δ. Είναι

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{F} &= m \cdot \vec{a} \rightarrow m \cdot g - F_L = m \cdot \alpha \rightarrow m \cdot g - B \cdot |I| \cdot \ell = m \cdot \alpha \rightarrow \\ &\rightarrow m \cdot g - B \cdot \frac{B \cdot v \cdot \ell}{R} \cdot \ell = m \cdot \alpha \rightarrow \alpha = g - \frac{B^2 \cdot v \cdot \ell^2}{m \cdot R} \quad (1) \end{aligned}$$

Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι καθώς το μέτρο της ταχύτητας αυξάνεται, το μέτρο της επιτάχυνσης μειώνεται, γεγονός που σημαίνει ότι ο αγωγός ΚΛ επιταχύνεται με μειούμενο ρυθμό. Κάποια στιγμή η επιτάχυνση θα μηδενιστεί, οπότε από εκεί και μετά ο αγωγός θα κινείται με σταθερή (οριακή ταχύτητα).

Θέτοντας στη σχέση (1) όπου $\alpha = 0$ προκύπτει για το μέτρο της οριακής ταχύτητας $v_{\text{op}} = 16 \text{ m/s}$.

Από τη στιγμή $t_0 = 0$ μέχρι τη στιγμή t_1 ο αγωγός ΚΛ πέφτει με την επίδραση του βάρους του. Έτσι η μείωση της βαρυτικής του δυναμικής ενέργειας οδηγεί σε ισόποση αύξηση της κινητικής του ενέργειας. Η μηχανική ενέργεια του αγωγού διατηρείται.

Από τη στιγμή t_1 μέχρι τη στιγμή t_2 ο αγωγός κινείται με την επίδραση του βάρους του και της δύναμης Laplace, το μέτρο της οποίας είναι μικρότερο του βάρους. Έτσι η περαιτέρω μείωση της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας του αγωγού, οδηγεί σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του έργου της δύναμης Laplace και σε αύξηση της κινητικής του ενέργειας. Η μηχανική ενέργεια του αγωγού μειώνεται, καθώς ένα μέρος της μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο κύκλωμα.

Από τη στιγμή t_2 και έπειτα, ο αγωγός κινείται με σταθερή ταχύτητα και επομένως η μείωση της βαρυτικής δυναμικής του ενέργειάς οδηγεί σε ισόποση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μηχανική ενέργεια του αγωγού μειώνεται, καθώς ένα μέρος της μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο κύκλωμα.

ε. Από τη στιγμή $t_0 = 0$ μέχρι τη στιγμή t_1 ο αγωγός ΚΛ πέφτει με την επίδραση του βάρους του και το μέτρο της ταχύτητάς του είναι $v = g \cdot t$. Έτσι η απόλυτη τιμή της Η.Ε.Δ. από επαγωγή στα άκρα του θα είναι

$$|E_{\varepsilon\pi}| = B \cdot v \cdot \ell \rightarrow |E_{\varepsilon\pi}| = B \cdot g \cdot t \cdot \ell$$

δηλαδή θα έχει σταθερό ρυθμό αύξησης, ενώ η ένταση του ρεύματος στο κύκλωμα θα είναι ίση με μηδέν.

Από τη στιγμή t_1 μέχρι τη στιγμή t_2 ο αγωγός ΚΛ επιταχύνεται με μειούμενο ρυθμό. Έτσι η απόλυτη τιμή της Η.Ε.Δ. από επαγωγή στα άκρα του θα αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό, με αρχική τιμή $B \cdot g \cdot t_1 \cdot \ell$ και τελική τιμή $B \cdot v_{op} \cdot \ell$. Όμοια η

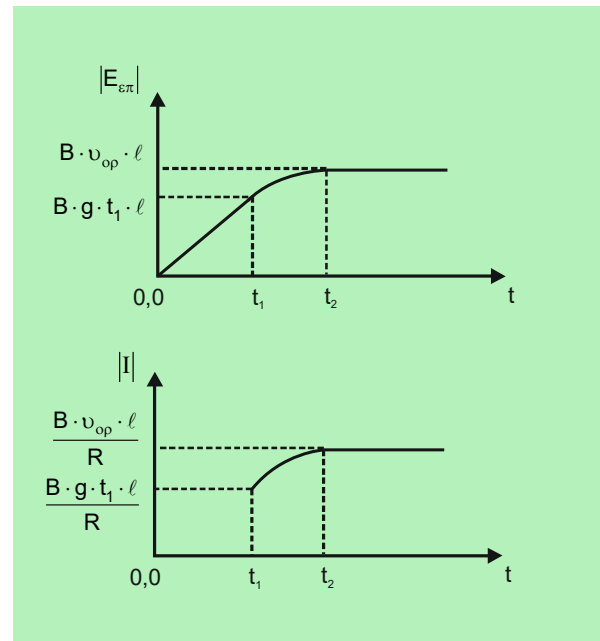
απόλυτη τιμή της έντασης του ρεύματος θα αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό με αρχική τιμή

$$\frac{B \cdot g \cdot t_1 \cdot \ell}{R} \text{ και τελική τιμή } \frac{B \cdot v_{op} \cdot \ell}{R}.$$

Από τη στιγμή t_2 και μετά ο αγωγός ΚΛ κινείται με σταθερή ταχύτητα. Έτσι η απόλυτη τιμή της Η.Ε.Δ. από επαγωγή στα άκρα του θα είναι σταθερή και ίση με

$$|E_{\varepsilon\pi}| = B \cdot v_{op} \cdot \ell \text{ και η απόλυτη τιμή της έντασης του ρεύματος θα είναι επίσης σταθερή και ίση με } |I| = \frac{|E_{\varepsilon\pi}|}{R} \rightarrow |I| = \frac{B \cdot v_{op} \cdot \ell}{R}.$$

Με βάση τα παραπάνω, τα ζητούμενα διαγράμματα θα είναι τα εξής:



Σχόλιο: Αν επιλέγαμε να κλείσουμε το διακόπτη τη στιγμή που η ταχύτητα του αγωγού είχε μέτρο ίσο με v_{op} , ο αγωγός θα εκτελούσε μετά τη στιγμή t_1 ευθύγραμμη ομαλή κίνηση αφού με το κλείσιμο του διακόπτη θα ήταν $\Sigma \vec{F} = 0$.

Αν πάλι επιλέγαμε να κλείσουμε το διακόπτη κάποια στιγμή που η ταχύτητα του αγωγού είχε μέτρο μεγαλύτερο από v_{op} , η αρχική τιμή της δύναμης Laplace θα ήταν μεγαλύτερη του βάρους του αγωγού, οπότε ο αγωγός μετά τη στιγμή t_1 θα επιβραδυνόταν με μειούμενο ρυθμό, το μέτρο της δύναμης Laplace θα μειωνόταν και κάποια στιγμή θα γινόταν $\Sigma \vec{F} = 0$ και ο αγωγός θα αποκτούσε πάλι σταθερή ταχύτητα. Στο διάστημα της επιβραδυνόμενης κίνησης θα μειωνόταν τόσο η βαρυτική δυναμική ενέργεια του αγωγού, όσο και η κινητική του ενέργεια και θα παραγόταν ηλεκτρική ενέργεια στο κύκλωμα.

Υλικό Φυσικής-Χημείας

Γιατί το να μοιράζεσαι πράγματα, είναι καλό για όλους...

Επιμέλεια:

Παπάζογλου Αποστόλης