

Βασίλης Τσούνης

# Φυσική Γ' Λυκείου

## Ηλεκτρομαγνητισμός -2

Νόμοι Biot-Savart και Ampere,  
Δύναμη Lorentz, Αυτεπαγωγή

### Ομάδες Προσανατολισμού

Θετικών Σπουδών/ Σπουδών Υγείας

- Θεωρία - Παρατηρήσεις - Επεξηγήσεις
- Βοηθητικά και ειδικά θέματα
- Μεθοδολογία ασκήσεων
- Λυμένα προβλήματα-Εφαρμογές
- Ερωτήσεις κλειστού τύπου-Ερωτήσεις κατανόησης
- Ασκήσεις και προβλήματα- Κριτήρια αξιολόγησης

Θεσσαλονίκη 2022

ISBN 978-960-456-594-8

© Copyright, Οκτώβριος 2022, Εκδόσεις Ζήτη, Βασίλης Τσουνής

---

*Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.*

---

Διεύθυνση Συγγραφέα:

Βασίλης Τσουνής: Γρηγορίου Λαμπράκη 2, ΤΚ 30132, Αγρίνιο

Τηλέφωνα: 2641058109 και 6946448496

[http:// www.btsounis.gr](http://www.btsounis.gr)

email: [mail@btsounis.gr](mailto:mail@btsounis.gr) και [basilis.tsounis1@gmail.com](mailto:basilis.tsounis1@gmail.com)

**Φωτοστοιχειοθεσία**

**Εκτύπωση**

**Βιβλιοδεσία**

**Π. ΖΗΤΗ & Σια Ι.Κ.Ε.**

18<sup>ο</sup> χλμ Θεσσαλονίκης - Περαιάς

Τ.Θ. 4171 • Περαιά Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19

Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: [info@ziti.gr](mailto:info@ziti.gr)



**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:**

Αρμενοπούλου 27 - 546 35 Θεσσαλονίκη • Τηλ.: 2310-203.720 • Fax 2310-211.305

e-mail: [sales@ziti.gr](mailto:sales@ziti.gr)

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ:**

Χαρλάου Τρικούπη 22 - Τ.Κ. 106 79, Αθήνα • Τηλ.-Fax: 210-3816.650

e-mail: [athina@ziti.gr](mailto:athina@ziti.gr)

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ:** [www.ziti.gr](http://www.ziti.gr)

## Πρόλογος

Το βιβλίο αυτό έρχεται ως συνέχεια στο βιβλίο μου «Φυσική Γ΄ Λυκείου -Ηλεκτρομαγνητισμός» των εκδόσεων Ζήτη, για να καλύψει τις ανάγκες των μαθητών και καθηγητών μετά την τροποποίηση του προγράμματος σπουδών από το σχολικό έτος 2022-23 και την εισαγωγή πρόσθετης ύλης στον Ηλεκτρομαγνητισμό.

Όπως και το αρχικό βιβλίο του Ηλεκτρομαγνητισμού απευθύνεται:

- στον απαιτητικό καθηγητή που ως δάσκαλος προσπαθεί και αγωνιά για καλύτερη και σφαιρική προετοιμασία των μαθητών του,
- στους φιλόδοξους και απαιτητικούς μαθητές, που αναζητούν όλο το εύρος των φαινομένων και επιδιώκουν στέρεες βάσεις για τις μετέπειτα πανεπιστημιακές σπουδές τους.

Το παρόν βιβλίο χωρίζεται σε τρεις ενότητες

A. Μαγνητικό πεδίο: Νόμοι των Biot-Savart και Ampere.

B. Αλληλεπίδραση κινουμένου φορτισμένου σωματιδίου με μαγνητικό πεδίο ( δύναμη Lorentz)

Γ. Αυτεπαγωγή.

Σε κάθε ενότητα υπάρχουν:

- αναλυτική θεωρία,
- μεθοδολογία επίλυσης ασκήσεων και πλήθος εφαρμογών με αναλυτικά λυμένα προβλήματα,
- βοηθητικά θέματα κατανόησης της θεωρίας και επίλυσης προβλημάτων,
- ερωτήσεις πολλαπλής εφαρμογής,
- ερωτήσεις κατανόησης με τη μορφή του 2ου θέματος των εξετάσεων,
- ασκήσεις και προβλήματα πλήρως ομαδοποιημένα με όλες της δυνατές υποδιαιρέσεις της ύλης που εξετάζουν,
- κριτήρια αξιολόγησης,
- απαντήσεις των ερωτήσεων και προβλημάτων.

Οι αναλυτικές απαντήσεις είναι ανηρητημένες στην ιστοσελίδα μου

**[www.btsounis.gr](http://www.btsounis.gr)**

Αν το βιβλίο βοηθήσει τους μαθητές και καθηγητές που προσπαθούν και επιμένουν, θα είναι μια στοιχειώδης δικαίωση της προσπάθειας συγγραφής του.

Σεπτέμβριος 2022

Βασίλης Τσούνης

Φυσικός

## Περιεχόμενα

### **A. Μαγνητικό πεδίο: Νόμοι των Biot-Savart και Ampere** \_\_\_\_\_ 7-52

1.1 Νόμος των Biot και Savart .....	9
1.2 Βασικές Εφαρμογές του νόμου των Biot-Savart .....	10
1.2-1 Το μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού .....	10
1.2-2 Το μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού .....	13
1.3 Νόμος Ampere.....	16
1.4 Βασικές Εφαρμογές του νόμου Ampere.....	18
1.4-1 Το μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου αγωγού.....	18
1.4-2 Το μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς .....	19
1.5 Μεθοδολογία -Βοηθητικά και ειδικά θέματα-Εφαρμογές .....	22
1.5-1 Το μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου αγωγού στη διεύθυνσή του .....	22
1.5-2 Το μαγνητικό πεδίο κυκλικού τόξου στο κέντρο του .....	23
1.5-3 Το μαγνητικό πεδίο στοιχειώδους τμήματος αλλά και όλου του ευθύγραμμου αγωγού.....	24
1.5-4 Το μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμων αγωγών και κυκλικού τόξου .....	25
1.5-5 Το μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμων αγωγών και κυκλικών τόξων .....	26
1.5-6 Το μαγνητικό πεδίο συστήματος ευθύγραμμων αγωγών .....	27
1.5-7 Επιβεβαίωση του νόμου Ampere .....	29
1.5-8 Υπολογισμός κυκλοφορίας μαγνητικού πεδίου σε τυχαία γραμμή.....	30
1.5-9 Υπολογισμός κυκλοφορίας μαγνητικού πεδίου συστήματος αγωγών .....	31
1.5-10 Το μαγνητικό πεδίο κυλινδρικού ρευματοφόρου αγωγού.....	33
<i>Δραστηριότητες – Εξάσκηση</i> .....	35
<i>Κριτήριο Αξιολόγησης</i> .....	49

### **B. Αλληλεπίδραση κινούμενου φορτισμένου σωματιδίου**

#### **με μαγνητικό πεδίο** \_\_\_\_\_ **53-132**

2.1 Δύναμη μαγνητικού πεδίου σε κινούμενο φορτίο -Δύναμη Lorentz.....	55
2.2 Κίνηση φορτισμένου σωματιδίου σε μαγνητικό πεδίο .....	56
2.3 Το έργο της δύναμη Lorentz.....	62
2.4 Επιλογές ταχυτήτων .....	62
2.5 Φασματογράφος μάζας .....	63
2.6 Γενική Μεθοδολογία- Εφαρμογές – Βοηθητικά θέματα.....	64
2.6-α Βασική μεθοδολογία .....	64
2.6-β Η ταχύτητα εισόδου του φορτίου σχηματίζει γωνία με το όριο του πεδίου .....	65
2.6-γ Βοηθητικές σχέσεις για την ακτίνα της κυκλικής κίνησης .....	66
2.6-δ Απόκτηση ταχύτητας εισόδου από τάση V .....	66

2.6-1 Υπολογισμός της ακτίνας από την γεωμετρία του σχήματος.....	68
2.6-2 Τα όρια της ορμής για ημικυκλική κίνηση.....	70
2.6-3 Η ταχύτητα καθορίζει το σημείο εξόδου από το μαγνητικό πεδίο .....	72
2.6-4 Μελέτη της κίνησης φορτίου και μετά την έξοδο από το μαγνητικό πεδίο ....	74
2.6-5 Επιτάχυνση φορτίου από τάση $V$ και κίνηση σε μαγνητικό πεδίο.....	75
2.6-6 Είσοδος με γωνία της ταχύτητας του φορτίου με το όριο του μαγνητικού πεδίου.....	77
2.6.7 Είσοδος με γωνία και η μέγιστη ορμή για έξοδο από την πλευρά εισόδου .....	79
2.6-8 Ελικοειδής κίνηση με σταθερό βήμα .....	81
2.6-9 Ελικοειδής κίνηση με μεταβλητό βήμα.....	82
2.6-10 Εφαρμογή στο φασματογράφο μάζας Bainbridge.....	84
2.6-11 Επιτάχυνση από τάση και εκτροπή από μαγνητικό πεδίο .....	86
<i>Εξάσκηση – Δραστηριότητες</i> .....	88
<i>Κριτήρια Αξιολόγησης</i> .....	124

## **Γ. Αυτεπαγωγή** \_\_\_\_\_ **133-166**

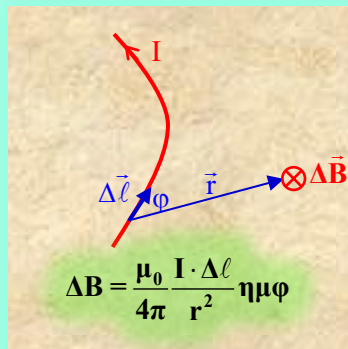
3.1 Η αυτεπαγωγή στο πηνίο .....	135
3.2 Ενέργεια μαγνητικού πεδίου του πηνίου.....	137
3.3 Η αποκατάσταση του ρεύματος σε κύκλωμα αντιστάτη-πηνίου .....	137
3.4 Η διακοπή του ρεύματος σε κύκλωμα αντιστάτη-πηνίου .....	138
3.5 Μεθοδολογία -Βοηθητικά και ειδικά θέματα-Εφαρμογές .....	140
3.5.1 Ειδικό θέμα- Αυτεπαγωγή και μαγνητική ροή στο πηνίο .....	140
3.5.2 Εφαρμογή-Αποκατάσταση ρεύματος σε κύκλωμα αντιστάτη-πηνίου .....	141
3.5-3 Εφαρμογή-Διακοπή ρεύματος σε κύκλωμα αντιστάτη-πηνίου.....	143
3.5-4 Μεταφορά αγωγού με κύκλωμα αντιστάτη-πηνίου .....	145
<i>Δραστηριότητες – Εξάσκηση</i> .....	147
<i>Κριτήριο Αξιολόγησης</i> .....	163

## **Δ. Απαντήσεις** \_\_\_\_\_ **167-174**

## Α. Μαγνητικό Πεδίο - Νόμοι Biot και Savart - Ampere

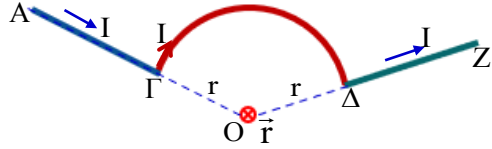
Οι **Jean-Baptiste Biot** (1774 - 1862) και **Félix Savart** (1791 -1841) Γάλλοι Φυσικοί διατύπωσαν τον βασικό νόμο του ηλεκτρομαγνητισμού –που φέρει το όνομά τους– και περιγράφει το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από ένα σταθερό ηλεκτρικό ρεύμα.

### Νόμος των Biot-Savart



**1.5-4 Εφαρμογή.** Το μαγνητικό πεδίο συστήματος ρευματοφόρων ευθύγραμμων αγωγών και κυκλικού τόξου

Ο ρευματοφόρος αγωγός ΑΓΔΖ διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I=5A$  και αποτελείται από ένα κυκλικό τμήμα ακτίνας  $r=0,5m$  και μήκους  $s=1,2m$  και από άλλα δύο ευθύγραμμα τμήματα ΑΓ και ΔΖ αγνώστου μήκους που έχουν ακτινικές διευθύνσεις (...οι φορείς των διέρχονται από κέντρο Ο του κυκλικού τόξου). Να υπολογισθεί το μαγνητικό πεδίο στο κέντρο Ο του κυκλικού τόξου.



**Απάντηση.**

✚ Μαγνητικό πεδίο των αγωγών ΑΓ και ΔΖ.

Το κέντρο Ο είναι πάνω στον φορέα τόσο του αγωγού ΑΓ όσο και του αγωγού ΔΖ και σύμφωνα με το βοηθητικό θέμα 1.5-1 οι ρευματοφόροι αυτοί αγωγοί δεν δημιουργούν μαγνητικό πεδίο στο σημείο Ο...(αποδείξτε το!).

✚ Ο ρευματοφόρος αγωγός – κυκλικό τόξο ΑΓ σύμφωνα με το βοηθητικό θέμα 1.5-2 δημιουργεί στο κέντρο του Ο μαγνητικό πεδίο ... (αποδείξτε το!)

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} s \xrightarrow{s.I} B = 10^{-7} \cdot \frac{5}{0,5^2} \cdot 1,2 \Rightarrow B = 24 \cdot 10^{-7} T \text{ με διεύθυνση κάθετη}$$

στο επίπεδο του κύκλου και φορά προς τα «μέσα» (από τον αναγνώστη προς τη σελίδα).

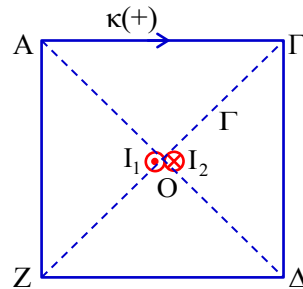
✚ Προφανώς το μαγνητικό πεδίο του όλου του αγωγού ΑΓΔΖ είναι αυτό του κυκλικού τόξου ΓΔ,  $B = 24 \cdot 10^{-7} T$

Η κυκλοφορία του μαγνητικού πεδίου στο τμήμα ΔΖΗ,  $K_{\Delta ZH} = \sum B \Delta \ell \sin \varphi$  υπολογίζεται έμμεσα από την σχέση  $K_{ολ}(\kappa) = \sum B \Delta \ell \sin \varphi = 0 \Rightarrow$

$$K_{HA} + K_{ΑΓΔ} + K_{\Delta ZH} = 0 \xrightarrow{2,4} 0 + \frac{\mu_0}{4\pi} 2I\varphi + K_{\Delta ZH} = 0 \Rightarrow K_{\Delta ZH} = -\frac{\mu_0}{4\pi} 2I\varphi$$

### 1.5-9 Υπολογισμός κυκλοφορίας μαγνητικού πεδίου συστήματος αγωγών ...

Έστω δύο μονωτικοί αγωγοί απείρου μήκους είναι με μονωτικό τρόπο σε επαφή και διαρρέονται από αντίρροπα ρεύματα  $I_1=2A$  και  $I_2=3A$ . Θεωρούμε κλειστή γραμμή ( $\kappa$ ) σε σχήμα τετραγώνου ΑΓΔΖ με το επίπεδό του κάθετο στους αγωγούς, με το κέντρο του Ο (σημείο τομής των διαγωνίων του) πάνω στους αγωγούς και με προσανατολισμό αυτόν της ωρολογιακής φοράς. Να υπολογισθεί η κυκλοφορία του μαγνητικού πεδίου των αγωγών  $\sum B \Delta \ell \sin \varphi$ ,



- α. σε ολόκληρη την κλειστή γραμμή ( $\kappa$ ) του τετραγώνου,
- β. σε πλευρά του τετραγώνου.

#### Απάντηση.

α. Σύμφωνα με τον νόμο του Ampere για κλειστή γραμμή ( $\kappa$ )=ΑΓΔΖΑ στο εσωτερικό της οποίας υπάρχουν οι δύο ρευματοφόροι αγωγοί για την κυκλοφορία του μαγνητικού πεδίου ισχύει

$$K_{ολ} = \sum B \Delta \ell \sin \varphi = \mu_0 I_{ολ,εσ} \xrightarrow{I_{ολ,εσ} = I_2 - I_1} K_{ολ} = \sum B \Delta \ell \sin \varphi = \mu_0 (I_2 - I_1) \Rightarrow$$

$$K_{ολ} = \sum B \Delta \ell \sin \varphi = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Nm}{A} (3-2)A \Rightarrow$$

$$K_{ολ} = \sum B \Delta \ell \sin \varphi = 4\pi \cdot 10^{-7} Nm$$

β. Για υπολογισθεί η κυκλοφορία του μαγνητικού πεδίου του αγωγού  $\sum B \Delta \ell \sin \varphi$ , σε πλευρά του τετραγώνου έστω την ΑΓ θεωρούμε τον περιγεγραμμένο κύκλο (Ο,  $\alpha$ ) στο τετράγωνο ... και ο οποίος ταυτίζεται με τις δυναμικές γραμμές των πεδίων των δύο αγωγών στη θέση αυτή.

Θεωρούμε τώρα την κλειστή γραμμή  $\kappa' = ΑΓΗΑ$  (ΑΓ η πλευρά του τετραγώνου και ΑΗΓ μέρος του περιγεγραμμένου κύκλου) με τον προσανατολισμό του σχήματος.

Για τη κλειστή αυτή γραμμή  $\kappa'$  η κυκλοφορία του μαγνητικού πεδίου είναι

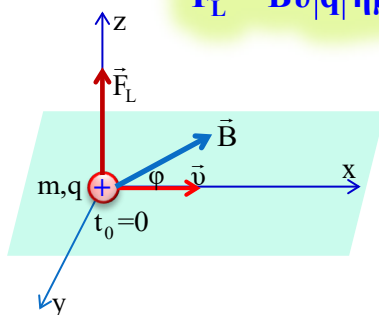
$$K_{(ΑΓΗΑ)} = 0 \Rightarrow K_{ΑΓ} + K_{ΓΗΑ} = 0 \Rightarrow K_{ΑΓ} + \sum B_{ολ} \Delta \ell \sin \varphi = 0 \Rightarrow$$



## B. Αλληλεπίδραση κινουμένου φορτισμένου σωματιδίου με μαγνητικό πεδίο

Δύναμη Lorentz

$$F_L = Bv|q|\eta\mu\varphi$$



- ✚ Αν  $v=0$ ,  $F_L = 0$ , ακινησία,  $x = 0$
- ✚ Αν  $\vec{v} \parallel \vec{B}$ ,  $F_L = 0$ , ευθύγραμμη ομαλή κίνηση,  $x = vt$
- ✚ Αν  $\vec{v} \perp \vec{B}$ ,  $F_L = Bv|q|$ , ομαλή κυκλική κίνηση,  $R = \frac{mv}{|q|B}$ ,  $T = \frac{2\pi m}{|q|B}$
- ✚ Αν  $\angle(\vec{v}, \vec{B}) = \varphi$  με  $\varphi \neq 0^\circ$  ή  $\varphi \neq 180^\circ$  ή  $\varphi \neq 90^\circ$ ,  $F_L = Bv|q|\eta\mu\varphi$ , ελικοειδής κίνηση με  $R = \frac{mv\eta\mu\varphi}{|q|B}$ ,  $T = \frac{2\pi m}{|q|B}$ ,  $\beta = v\sigma\upsilon\nu\varphi \frac{2\pi m}{|q|B}$

## 2.6 Γενική Μεθοδολογία – Εφαρμογές – Βοηθητικά Θέματα

### 2.6-α Βασική μεθοδολογία

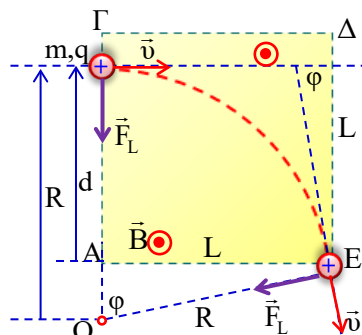
Στη πιο συνηθισμένη περίπτωση, που είναι η βολή ενός φορτισμένου σωματιδίου γίνεται με ταχύτητα κάθετη στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου, σε γενικές γραμμές εργαζόμαστε ως εξής:

Σχεδιάζουμε το βασικό σχήμα στο οποίο φαίνονται,

- η κατεύθυνση και τα όρια του μαγνητικού πεδίου,
- το φορτίο (και το είδος του ... θετικό ή αρνητικό) στην αρχική θέση εισόδου (ή βολής) στο μαγνητικό πεδίο,
- η δύναμη Lorentz που ασκείται στο φορτίο,
- η κυκλική τροχιά του φορτίου και το κέντρο αυτής.

Ας τα δούμε αυτά στο διπλανό σχήμα, που έχουμε ένα οριζόντιο ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $\vec{B}$  και μια κατακόρυφη τομή του δίνει τα όρια του πεδίου, που είναι τετράγωνο ΑΓΔΕ πλευράς L.

Ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο (m,q) εισέρχεται με ταχύτητα  $\vec{v}$  κάθετη στις δυναμικές γραμμές του πεδίου, αλλά και κάθετη στην μια πλευρά ΑΓ του τετραγώνου που ορίζει τα όρια του πεδίου. Το φορτίο έστω ότι εξέρχεται από την κορυφή Ε του τετραγώνου στην άλλη πλευρά από αυτή της εισόδου.



Αρχικά προσδιορίζουμε το κέντρο Ο της κυκλικής τροχιάς, από το σημείο τομής των διευθύνσεων των δυνάμεων Lorentz που σχεδιάζουμε σε δύο σημεία της τροχιάς, συνήθως στη είσοδο και έξοδο του φορτίου στο μαγνητικό πεδίο.

(πιο αναλυτικά δείτε την εφαρμογή 2.6-1 αλλά και τις 2.6-2 έως και 2.6-4)

**Βασικές εξισώσεις** που χρησιμοποιούμε,

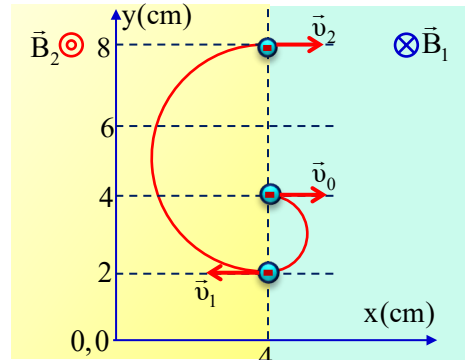
✚ Η δύναμη Lorentz  $F_L = Bv|q|$ , η ακτίνα  $R = \frac{mv}{|q|B}$  και η περίοδος  $T = \frac{2\pi m}{|q|B}$  της

κυκλικής τροχιάς,

✚ Σχέσεις από την γεωμετρία του σχήματος ... όπως από το ορθογώνιο τρίγωνο AEO,  $(OA)^2 + (AE)^2 = (OE)^2 \Rightarrow (R - d)^2 + L^2 = R^2$

Συνήθως αξιοποιείται η **γωνία εκτροπής φ** που σχηματίζεται **από τις κατευθύνσεις της τελικής και αρχικής ταχύτητας** και που στο σχήμα ισούται και με την γωνία

**A.4** Στο σχήμα φαίνεται η κατακόρυφη τομή δύο διαδοχικών οριζόντιων ομογενών μαγνητικών πεδίων— που είναι δύο διαδοχικά ορθογώνια— με εντάσεις  $\vec{B}_1$  και  $\vec{B}_2$  με φορά όπως φαίνεται στο σχήμα.

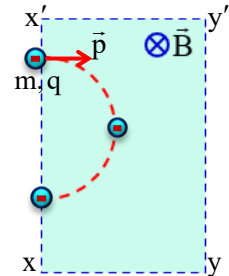


Επίσης στο σχήμα φαίνεται ένα σύστημα ορθογωνίων  $(x, y)$  για την περιγραφή της θέσης του ενός αρνητικά φορτισμένου σωματιδίου που βάλλεται με ταχύτητα  $\vec{v}_0$  από την θέση  $(4,4)$  προς το μαγνητικό πεδίο έντασης  $\vec{B}_1$  κάθετη στις δυναμικές γραμμές και στο όριο του πεδίου. Το φορτισμένο αυτό σωματίδιο διαγράφει τις κυκλικές τροχιές του σχήματος από τις οποίες συμπεραίνουμε τις σχέσεις,

- α.** για τις ταχύτητες  $v_2 = 3v_0$
- β.** για τις εντάσεις  $B_2 = 3B_1$
- γ.** για τους χρόνους κίνησης  $t_2$  και  $t_1$  στα πεδία με εντάσεις  $\vec{B}_2$  και  $\vec{B}_1$ ,  $t_2 = 3t_1$
- δ.** για τις δυνάμεις Lorentz στα πεδία με εντάσεις  $\vec{B}_2$  και  $\vec{B}_1$ ,  $F_{L2} = 3F_{L1}$

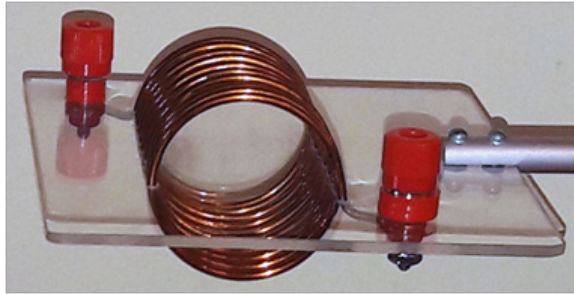
**A.5** (Να γράψετε στο τετράδιό σας το γράμμα της κάθε πρότασης και δίπλα σε κάθε γράμμα τη λέξη Σωστό, αν η πρόταση είναι σωστή ή τη λέξη Λάθος αν η πρόταση είναι λανθασμένη).

Ένα αρνητικά φορτισμένο σωματίδιο  $(m, q < 0)$  εισέρχεται με ορμή  $\vec{p}$  κάθετη στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου αλλά και κάθετη στο ευθύγραμμο όριο αυτού του πεδίου. Το σωματίδιο αυτό αφού διαγράψει ημικύκλιο εξέρχεται του ημικυκλίου σε χρόνο  $t_0$ .



- α.** Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι  $B = \frac{\pi m}{|q| t_0}$ .
- β.** Η ακτίνα του ημικυκλίου είναι  $R = \frac{p t_0}{\pi m}$ .
- γ.** Η δύναμη Lorentz που δέχεται το σωματίδιο είναι  $F_L = \frac{p \pi}{t_0}$ .
- δ.** Το μέτρο της μεταβολής της ορμής  $\Delta p = F_L t_0$ .
- ε.** Η μεταβολή της κινητικής ενέργειας είναι  $\Delta K = F_L \cdot p t_0$ .

## Γ. Αυτεπαγωγή



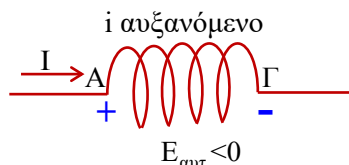
Σωληνοειδή πηνία σε σχολικό εργαστήριο.

την μορφή  $E_{\text{αυτ}} = -L \frac{di}{dt}$ , όπου  $\frac{di}{dt}$  ο στιγμιαίος ρυθμός μεταβολής της έντασης ρεύματος.

- ✚ Η ΗΕΔ -αυτεπαγωγής δεδομένου πηνίου είναι **ανάλογη** του ρυθμού μεταβολής της έντασης ρεύματος.
- ✚ Σύμφωνα με τον κανόνα Lenz έχει τέτοια **πολικότητα ώστε να «αντιτίθεται» στην μεταβολή της έντασης ρεύματος.**

Στο πηνίο του σχήματος, αν η ένταση ρεύματος που διέρχεται από αυτό αυξάνεται, έχουμε φαινόμενο αυτεπαγωγής με το πηνίο

να ισοδυναμεί με πηγή και η  $E_{\text{αυτ}} = -L \frac{di}{dt}$  να έχει πολικότητα με **θετικό πόλο στο Α (+) και αρνητικό πόλο στο Γ (-)**.

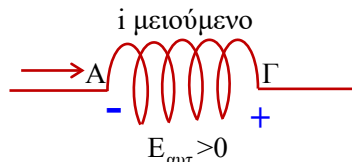


Έχει, δηλαδή, τέτοια πολικότητα ώστε να «θέλει» να δώσει ρεύμα με αντίθετη φορά με το υπάρχον, ώστε συνολικά το ρεύμα να μην αυξηθεί.

Παρά την αντίθεση της  $E_{\text{αυτ}}$  το ρεύμα θα αυξηθεί και θα πάρει την τιμή που θα έπαιρνε και χωρίς την ανωτέρω αντίθεση, αλλά με **χρονική καθυστέρηση**.

Στη ανωτέρω περίπτωση η αλγεβρική τιμή της  $E_{\text{αυτ}}$  είναι αρνητική  $E_{\text{αυτ}} < 0$ .

Αντίθετα αν το ρεύμα στο πηνίο του σχήματος μειώνεται, το πηνίο «θέλει» να μην μειωθεί και η δημιουργούμενη  $E_{\text{αυτ}} = -L \frac{dI}{dt}$  τείνει να δώσει ρεύμα ομόρροπο με το υπάρχον, έτσι έχει πολικότητα με **θετικό πόλο στο Γ (+) και αρνητικό πόλο στο Α (-)**.



Στη ανωτέρω περίπτωση η αλγεβρική τιμή της  $E_{\text{αυτ}}$  είναι θετική  $E_{\text{αυτ}} > 0$ .

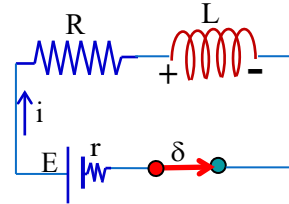
**Γενικά το πηνίο «αντιδρά» μέσω της  $E_{\text{αυτ}}$  σε κάθε μεταβολή της έντασης ρεύματος καθυστερώντας χρονικά την ανωτέρω μεταβολή.**

Αυτεπαγωγή έχουμε σε κάθε κύκλωμα που μεταβάλλεται η ένταση ρεύματος, αλλά τα αποτελέσματα είναι αισθητά κυρίως σε κυκλώματα που έχουν πηνίο.

Η αυτεπαγωγή έχει την ιδιότητα της αντίδρασης στη μεταβολές του ρεύματος και είναι αντίστοιχη με την **αδράνεια** των σωμάτων στις μεταβολές της ταχύτητας αυτών. Μέτρο της αδράνειας των σωμάτων είναι η αδρανειακή τους μάζα, ενώ μετρο αδράνειας των κυκλωμάτων είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής αυτών.

### 3.5-2 Εφαρμογή – Αποκατάσταση ρεύματος σε κύκλωμα αντιστάτη - πηνίου

Μια πηγή συνεχούς τάσης  $E=20V$ ,  $r=1\Omega$  τροφοδοτεί μέσω διακόπτη  $\delta$  αντιστάτη  $R=3\Omega$  και πηνίο με  $L=0,01H$  που είναι σε σειρά. Κάποια στιγμή  $t_0=0$  κλείνουμε το διακόπτη  $\delta$  και αρχίζει η αποκατάσταση του ρεύματος στο κύκλωμα.



- α. Να βρεθεί η εξίσωση της απόλυτης τιμής της  $E_{\text{αυτ}}$  σε συνάρτηση με την ένταση ρεύματος και να γίνει σε βαθμολογημένους άξονες η αντίστοιχη γραφική παράσταση.

Όταν η πηγή αποδίδει στο κύκλωμα ενέργεια με ισχύ  $P_{\eta\lambda}=20W$ , να υπολογισθούν:

- β. ο ρυθμός μεταβολής της έντασης ρεύματος,
- γ. το ποσοστό % της ενέργειας μαγνητικού πεδίου που έχει αποθηκευτεί στο πηνίο σε σχέση με την μέγιστη ενέργεια που αποθηκεύεται στο πηνίο,
- δ. ο ρυθμός με τον οποίο αποθηκεύεται ενέργεια στο πηνίο.

#### Απάντηση:

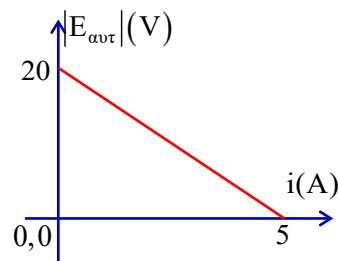
α. Σε μια ενδιάμεση στιγμή πριν την αποκατάσταση του ρεύματος γράφουμε τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff  $E-i(R+r)-|E_{\text{αυτ}}|=0 \xrightarrow{\text{S.I}} |E_{\text{αυτ}}|=20-4i$  (S.I) (1).

Τη χρονική στιγμή  $t_0=0$  που μόλις κλείνουμε τον διακόπτη το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται από μηδενική τιμή  $i=0$  και από την (1) προκύπτει  $|E_{\text{αυτ}}|=E=20V$ .

Μόλις η ένταση ρεύματος **σταθεροποιηθεί** δεν υπάρχει πλέον αυτεπαγωγή  $E_{\text{αυτ}}=0$  και από την (1) προκύπτει η τελική τιμή της έντασης ρεύματος

$$E - I_0(R + r) - 0 = 0 \Rightarrow I_0 = \frac{E}{R+r} \text{ ή } I_0 = 5A.$$

Η γραφική παράσταση της (1) αποδίδεται στο διπλανό διάγραμμα.



**Σχόλιο:** Στην περίπτωση αυτή που η αυτεπαγωγή **αντιτίθεται στην αύξηση της έντασης ρεύματος** η **αλγεβρική τιμή της ΗΕΔ αυτεπαγωγής θεωρείται αρνητική  $E_{\text{αυτ}} < 0$ .**