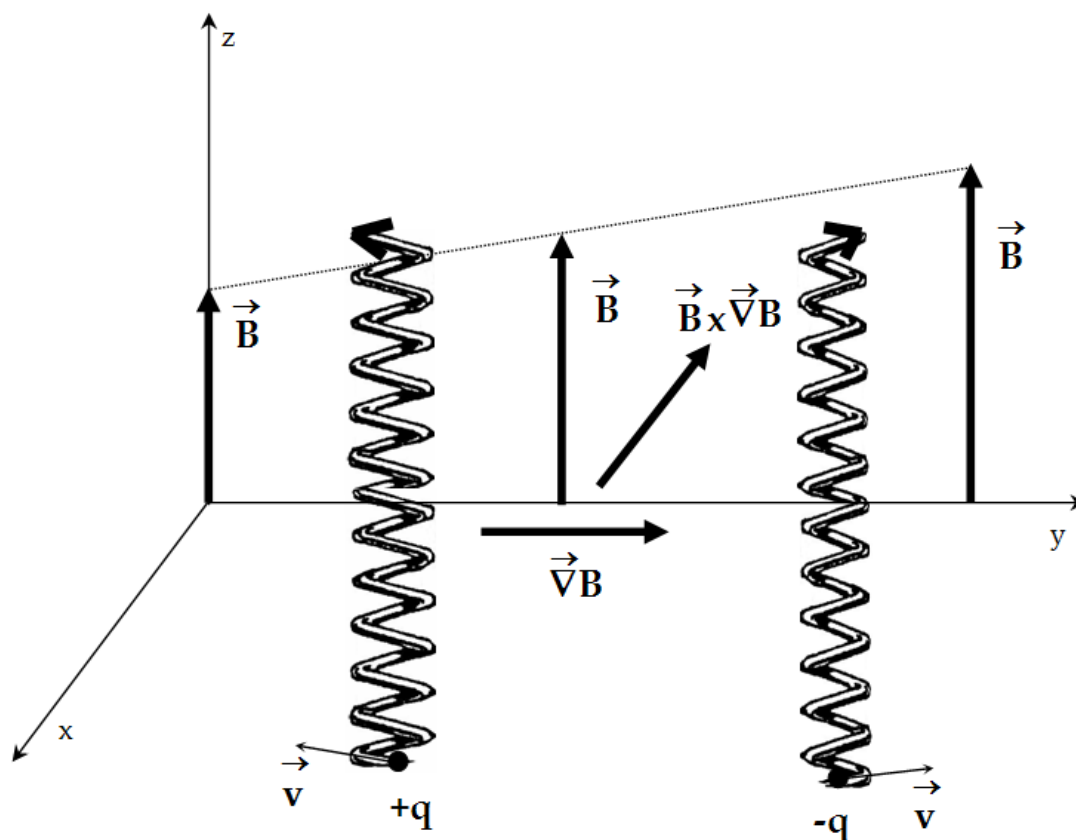




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ  
«Καΐσαρ Δ. Αλεξόπουλος»  
<http://physlab.phys.uoa.gr>

## Βασικό Εργαστήριο Φυσικής IV



ΑΘΗΝΑ 2020

Για την προετοιμασία των Ασκήσεων και συγγραφή του αντιστοίχου Φυλλαδίου εργάστηκαν τα εξής μέλη ΔΕΠ, ΕΔΙΠ και ΕΤΕΠ (με αλφαβητική σειρά): Γ. Βούλγαρης, Χρ. Γεωργάκη, Ν. Μαμαλούγκος, Στρ. Χατζηκωντής

Διευθυντής Εργαστηρίου Φυσικής:  
Αναπληρωτής Καθηγητής Έκτορας Νισταζάκης  
τηλ. 210 727 6710

Συντονιστής Εργ.Φ4: Αναπληρωτής Καθηγητής Έκτορας Νισταζάκης  
e-mail: enistaz@phys.uoa.gr, αρ.τηλ. 210 727 6710

Δικτυακός τόπος Εργαστηρίου Φυσικής: <http://physlab.phys.uoa.gr> και Εργαστηρίου Φυσικής IV: <https://eclass.uoa.gr/courses/PHYS201>

Σχεδιασμός, κατασκευή, διαχείριση δικτυακού τόπου, επιμέλεια παρόντος φυλλαδίου και cd διδακτικού υλικού Εργαστηρίου Φυσικής: Νεκτάριος Μαμαλούγκος

## Περιεχόμενα

Κανονισμός λειτουργίας Εργαστηρίου Φυσικής .....	4
Ασφάλεια στο Εργαστήριο Φυσικής .....	8
Άσκηση Δ1. Μέτρηση του λόγου $e/me$ .....	11
Άσκηση Δ2. Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.....	17
Άσκηση Δ3. Μελέτη κυκλώματος RLC. Μιγαδική παράσταση αρμονικών μεγεθών.....	23
Άσκηση Δ4. Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο .....	33
Άσκηση Δ5. Χαρακτηριστικές καμπύλες μετασχηματιστή.....	42
Άσκηση Δ6. Χαρακτηριστική καμπύλη γεννήτριας συνεχούς τάσεως.....	53
Άσκηση Δ7. Φασματοσκοπία .....	56
Άσκηση Δ8. Μελέτη μαγνητικού πεδίου πηνίου, Νόμος Biot-Savart.....	63

# Κανονισμός Λειτουργίας Εργαστηρίου Φυσικής

## Α. Γενικοί Κανόνες

**ΕΓΓΡΑΦΗ και ΤΜΗΜΑΤΑ:** Οι φοιτητές/τριες εγγράφονται στο εργαστήριο σε ομάδες των δύο φοιτητών. Τρεις έως πέντε ομάδες συγκροτούν τμήμα το οποίο ασκείται συγκεκριμένη ημέρα και ώρα υπό την επίβλεψη ενός διδάσκοντα.

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:** Ο Επιβλέπων ενημερώνει τους φοιτητές/τριες για το όνομά του, το γραφείο του, τηλέφωνο, email, καθώς και ώρες στις οποίες θα μπορούσαν να έλθουν σε επαφή μαζί του για τυχόν απορίες.

**ΣΕΙΡΑ ΑΣΚΗΣΕΩΝ:** Κάθε φοιτητής/τρια εκτελεί αριθμό ασκήσεων, χωρισμένων σε κύκλους, ανάλογα με το Εργαστήριο, συνήθως κυκλικά. Οι φοιτητές/τριες πληροφορούνται κατά την εγγραφή την πρώτη άσκηση και τη σειρά διαδοχής των ασκήσεων. Ειδικά για το (νέο) Εργαστήριο Φ1 υπάρχει ιδιαίτερη διαδοχή των πρώτων εργαστηριακών ασκήσεων (βλέπε Ειδικό Κανόνες).

**ΠΡΟΣΕΛΕΥΣΗ:** Οι φοιτητές/τριες προσέρχονται στην θέση τους ως την επίσημη ώρα έναρξης, η οποία είναι «και τέταρτο» ή «παρά τέταρτο» ανάλογα με την ώρα έναρξης του Τμήματός τους. Για παράδειγμα το Τμήμα 10:00-12:30 ξεκινά στις **10:15** και το 11:30-14:00 στις **11:45 ακριβώς**. Αν η καθυστέρηση υπερβαίνει το όριο αυτό **δεν επιτρέπεται να ασκηθούν και χρεώνονται με απουσία**.

**ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ:** Ο φοιτητής/τρια όταν προσέρχεται, θα πρέπει να είναι **προετοιμασμένος** για την Άσκηση που θα εκτελέσει, με βάση το κείμενο του Φυλλαδίου και σχετικές αναφορές. Ο Διδάσκων, με προφορική ή γραπτή εξέταση, αξιολογεί την μελέτη του φοιτητή στην άσκηση που πρόκειται να κάνει.

Αν φοιτητής/τρια δεν έχει προετοιμασθεί για την άσκηση που θα εκτελέσει, λαμβάνει μηδενικό βαθμό προφορικής εξέτασης.

**ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΑΣΚΗΣΗΣ:** Το εργαστήριο διαρκεί 2 ½ ώρες και οι φοιτητές/τριες αξιοποιούν όλο τον χρόνο τους. Όταν έχουν ολοκληρώσει τις μετρήσεις τους, αρχίζουν τους υπολογισμούς, την επεξεργασία των μετρήσεων κλπ.

Για την εκτέλεση της εργαστηριακής ασκήσεως ο φοιτητής/τρια πρέπει να: **α.** Εκτελεί την άσκηση σύμφωνα με τις οδηγίες του φυλλαδίου και του διδάσκοντα καταχωρώντας τις μετρήσεις σε κατάλληλα φύλλα εργασίας. **β.** Απευθύνεται στον διδάσκοντα για κάθε απορία.

Μετά το πέρας της άσκησης οι φοιτητές/τριες ο Επιβλέπων υπογράφει τις μετρήσεις και πριν αποχωρήσουν τακτοποιούν την πειραματική διάταξη.

**ΓΡΑΠΤΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:** Ακριβώς μία εβδομάδα μετά την εκτέλεση της άσκησης κάθε φοιτητής/τρια παραδίδει την γραπτή εργασία του. Κάθε φοιτητής/τρια υποβάλλει πρωτότυπη, διαφορετική εργασία, για την οποία ισχύουν τα ακόλουθα (η σειρά ενδεικτική, αλλά τα σημεία υποχρεωτικά):

Γράφεται σε φύλλα χαρτιού A4 τα οποία συρράπτονται στο Εξώφυλλο Εργαστηρίου εκτός και δοθούν ειδικά φύλλα από το Εργαστήριο.

Οι γραφικές παραστάσεις πρέπει να είναι σε χιλιοστομετρικό χαρτί (μιλιμετρέ) ή σε ημιλογαριθμικό χαρτί (ανάλογα με το εύρος τιμών), να είναι φτιαγμένες με το χέρι εκτός από τις Ασκήσεις που εκτελούνται στο Εργαστήριο με την χρήση υπολογιστή.

Στην αρχή της Εργασίας σας γίνεται συνοπτική καταγραφή των φυσικών εννοιών, φαινομένων και μεγεθών οι οποίες χρησιμοποιούνται στην άσκηση.

Ακολουθεί σύντομη και περιεκτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης και πειραματικής διαδικασίας με τα σχετικά σχήματα.

Οι πίνακες των δεδομένων, η επεξεργασία των μετρήσεων, οι απαραίτητες γραφικές παραστάσεις και τα τελικά αποτελέσματα με τις κατάλληλες μονάδες τους.

Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Οι απαντήσεις στις ερωτήσεις του φυλλαδίου.

Στο τέλος επισυνάπτονται οι σελίδες με τις υπογεγραμμένες από τον Επιβλέποντα πειραματικές μετρήσεις.

**ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ:** Οι φοιτητές/τριες βαθμολογούνται σε κάθε άσκηση. Ο βαθμός άσκησης προκύπτει από τον προφορικό βαθμό (δραστηριότητα στη άσκηση, γνώσεις κλπ., με βάρος 50%) και από την γραπτή εργασία (με βάρος 50%). Από τους βαθμούς των ασκήσεων κάθε κύκλου προκύπτει βαθμός κύκλου. Ο βαθμός ΔΕΝ είναι ακέραιος, αλλά έχει την μορφή #.#.

Ο τελικός βαθμός του εργαστηρίου προκύπτει από τους βαθμούς των δύο (2) κύκλων και είναι ακέραιος.

Αν φοιτητής/τρια δεν παραδώσει εγκαίρως την γραπτή εργασία, λαμβάνει μηδενικό βαθμό στην άσκηση (προφορικό & γραπτό).

Αν φοιτητής/τρια δεν παραδώσει περισσότερες από δύο γραπτές εργασίες στον κύκλο, **επαναλαμβάνει το εργαστήριο σε επόμενο ακαδημαϊκό έτος.**

Αν φοιτητής/τρια λάβει στο εργαστήριο βαθμό κάτω από την βάση (< 5), **επαναλαμβάνει το εργαστήριο σε επόμενο ακαδημαϊκό έτος.**

**ΑΠΟΥΣΙΑ:** Αν φοιτητής/τρια δεν προσέλθει σε άσκηση χρεώνεται με απουσία. Μία (1) μόνο απουσία αναπληρώνεται από τον φοιτητή/τρια μετά την ολοκλήρωση του συνόλου των Εργαστηριακών Ασκήσεων στην **Συμπληρωματική Εργαστηριακή Άσκηση**, σε ημέρα και ώρα που καθορίζεται από το Συντονιστή του αντίστοιχου Εργαστηρίου. Αν ο φοιτητής/τρια χρεωθεί περισσότερες από μία απουσίες (ανεξάρτητα από ποιο κύκλο τις έχασε), **επαναλαμβάνει όλο το εργαστήριο σε επόμενο ακαδημαϊκό έτος.**

**ΑΝΑΦΟΡΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ:** Σε περίπτωση μη καλής λειτουργίας των οργάνων και/ή για κάθε άλλο πρόβλημα οι φοιτητές/τριες απευθύνονται **άμεσα** στον διδάσκοντα, ο οποίος, ή επιλύει το πρόβλημα, ή καλεί τα μέλη ΕΤΕΠ (Ηλεκτρονικοί Μηχανικοί στο Παρασκευαστήριο).

**ΠΡΟΣΟΧΗ!** Δεν επιτρέπεται το κάπνισμα και τα τρόφιμα κλπ. στις αίθουσες και στους διαδρόμους των Εργαστηρίων.

---

## B. Ειδικό Κανόνες

### Εργαστήριο Φυσικής I

- Ειδικό εισαγωγικό Εργαστήριο 1<sup>ου</sup> εξαμήνου
- Τέσσερις δίωρες Εισαγωγικές Διαλέξεις στο Αμφιθέατρο Αρίσταρχος
- Μία εισαγωγική άσκηση εφαρμογής της θεωρίας σφαλμάτων από τις Διαλέξεις (A1).
- Δύο βασικές εργαστηριακές ασκήσεις για το τρόπο διεξαγωγής της πειραματικής μέτρησης και τα λογισμικά εργαλεία για την λήψη και την επεξεργασία των μετρήσεων (A2 και A3)
- Γραπτή δίωρη εξέταση σε όλη την παραπάνω ύλη και βαθμός 1<sup>ου</sup> κύκλου
- Τρεις ασκήσεις (A4, A5 και A6) σε κυκλική σειρά που σχετίζονται: (α) με χρήση νέων τεχνολογιών στις μετρήσεις (αισθητήρες, διεπαφές, Η/Υ και κατάλληλο λογισμικό), (β) βασική εξοικείωση με θέματα ηλεκτρισμού, κυκλωμάτων και αντίστοιχης οργανολογίας και (γ) μέτρηση διαστάσεων αντικειμένων, όγκου αυτών, μάζας και προσδιορισμό πυκνοτήτων, με χρήση

παχυμέτρων και μικρομέτρων, καταλλήλων ζυγών μάζας και άνωσης σωμάτων, με υπολογισμό συνθέτων σχετικών σφαλμάτων με την μέθοδο της διάδοσης σφάλματος

- Ασκούνται δύο φοιτητές ανά διάταξη.
- Η διάρκεια κάθε άσκησης είναι 2.5h.

### **Εργαστήριο Φυσικής II**

- Θεματικό περιεχόμενο κυρίως η Μηχανική και η Θερμοδυναμική.
- Δύο κύκλοι των τεσσάρων ασκήσεων έκαστος.
- Ασκούνται δύο φοιτητές ανά διάταξη.
- Η διάρκεια κάθε άσκησης είναι 2.5h.

### **Εργαστήριο Φυσικής III**

- Θεματικό περιεχόμενο η Θερμοδυναμική και κυρίως η Κυματική-Οπτική.
- Δύο κύκλοι των τεσσάρων ασκήσεων έκαστος.
- Ασκούνται δύο φοιτητές ανά διάταξη.
- Η διάρκεια κάθε άσκησης είναι 2.5h.

### **Εργαστήριο Φυσικής IV**

- Θεματικό περιεχόμενο ο Ηλεκτρομαγνητισμός και η Σύγχρονη Φυσική.
- Δύο κύκλοι των τεσσάρων ασκήσεων έκαστος.
- Ασκούνται δύο φοιτητές ανά διάταξη.
- Η διάρκεια κάθε άσκησης είναι 2h.

### **Εργαστήριο Φυσικής Τμήματος Γεωλογίας**

- Μία εισαγωγική άσκηση εφαρμογής της θεωρίας σφαλμάτων.
- Δύο κύκλοι των τριών ασκήσεων έκαστος.
- Ασκούνται δύο φοιτητές ανά διάταξη.
- Η διάρκεια κάθε άσκησης είναι 2h.

### **Εργαστήριο Φυσικής Τμήματος Βιολογίας**

- Μία εισαγωγική άσκηση εφαρμογής της θεωρίας σφαλμάτων.
- Δύο κύκλοι των τριών ασκήσεων έκαστος.
- Ασκούνται δύο φοιτητές ανά διάταξη.
- Η διάρκεια κάθε άσκησης είναι 1.5h.

## **Άλλες Πληροφορίες για το Εργαστήριο Φυσικής**

Το Εργαστήριο Φυσικής βρίσκεται στο Ισόγειο της Δυτικής πτέρυγας του Κτηρίου IV, δεξιά των εισερχομένων στην κυρία είσοδο του Τμήματος Φυσικής.

Το Εργαστήριο Φυσικής είναι το μεγαλύτερο εκπαιδευτικό εργαστήριο του Πανεπιστημίου Αθηνών και μία από τις μεγαλύτερες εκπαιδευτικές μονάδες της χώρας. Υπάγεται διοικητικώς στο Τμήμα Φυσικής, το οποίο εκλέγει τον Διευθυντή και τον Αναπληρωτή Διευθυντή του Εργαστηρίου Φυσικής και το στελεχώνει με διδακτικό, διοικητικό και τεχνικό προσωπικό.

Το Εργαστήριο Φυσικής σήμερα εκπαιδεύει κάθε ακαδημαϊκό έτος συνολικά πάνω από 800 φοιτητές (Α, Β, Γ και Δ εξάμηνο του Τμήματος Φυσικής, καθώς και στο Α εξάμηνο των Τμημάτων Βιολογίας και Γεωλογίας). Στην εκπαιδευτική αυτή διαδικασία εμπλέκονται μέλη ΔΕΠ του Τμήματος Φυσικής, μεταπτυχιακοί φοιτητές, μεταδιδακτορικοί ερευνητές και το προσωπικό του Εργαστηρίου.

Στο Εργαστήριο Φυσικής υπάγεται το Μηχανουργείο του Τμήματος, στο οποίο πραγματοποιούνται κατασκευές, απαραίτητες τόσο για την λειτουργία του Εργαστηρίου, όσο και για διάφορες ερευνητικές δραστηριότητες του Τμήματος.

Το Εργαστήριο Φυσικής δίνει επίσης την δυνατότητα εκπόνησης διπλωματικών εργασιών (Ειδικό Θέμα), κυρίως στην Εκπαίδευση, με θέματα που αφορούν στην Διδακτική της Φυσικής και ιδιαιτέρως στον ρόλο της εργαστηριακής εκπαίδευσης. Άλλωστε στους τομείς αυτούς εκπονούνται και ερευνητικά έργα με τα προαναφερθέντα θεματικά περιεχόμενα.

## Ασφάλεια στο Εργαστήριο Φυσικής

Σε κάθε Εργαστηριακό χώρο ισχύουν μερικοί απλοί και αποτελεσματικοί κανόνες που σκοπό έχουν την αποφυγή ατυχημάτων ή τις φθορές εξοπλισμού και την παροχή βοήθειας σε περίπτωση ανάγκης.

Επισημαίνουμε ότι οι κύριοι κίνδυνοι στο Βασικό Εργαστήριο ΦΥΣΙΚΗΣ I, II, III και IV, πηγάζουν από την **φωτιά, τον ηλεκτρισμό** και την **χρήση ειδικών υλικών**. Σε κάθε περίπτωση οι Επιβλέποντες και το προσωπικό του Εργαστηρίου θα σας βοηθήσουν όπου χρειαστεί.

Η δομή των χώρων του Εργαστηρίου είναι απλή· υπάρχουν δύο έξοδοι στα αντίστοιχα δύο άκρα του διαδρόμου του εργαστηρίου. **Αν χρειασθεί να γίνει εκκένωση των χώρων κινούμαστε αντίστοιχα προς την κατάλληλη ασφαλή έξοδο.**

### Ασθένεια - ατύχημα

Είναι δυνατόν κάποιος από εσάς να αρρωστήσει και να αισθανθεί άσχημα ή ακόμα και να πάθει ένα μικρό ατύχημα κλπ.. Ανάλογα με την περίπτωση η βοήθεια από τον Επιβλέποντα, η μεταφορά στο Ιατρείο της Πανεπιστημιούπολης (Τηλ. **210 7277873**) ή η κλήση ασθενοφόρου στο 166 (**διευκρινίζοντας που ακριβώς ευρίσκεται το άτομο**), είναι κάτι που πρέπει να σταθμιστεί άμεσα και ανάλογα.

Η συνδρομή του ίδιου του ασθενούς με πληροφόρηση, ειδοποίηση οικείου προσώπου αν χρειαστεί ή πληροφόρηση από φίλου/ης είναι επίσης ουσιαστική για την γρηγορότερη ανακούφιση του.

Επίσης, έξω από το Γραφείο των Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Εργαστηρίου (Παρασκευαστήριο) υπάρχει ένα μικρό φαρμακείο εξοπλισμένο με τα βασικά για την παροχή πρώτων βοηθειών.

<http://www.redcross.gr>

### Ηλεκτρισμός

Στα κυκλώματα των ασκήσεων του Εργαστηρίου χρησιμοποιούνται χαμηλές τάσεις. Παρόλο που ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας είναι σαφώς μικρότερος του αντίστοιχου που έχουμε στο σπίτι μας, είναι απαραίτητη η προσοχή μας ιδίως στην σύνδεση οργάνων στο δίκτυο. Ποτέ δεν βάζουμε στη πρίζα ένα κύκλωμα πριν ο Επιβλέπων το ελέγξει. **Ποτέ δεν βάζουμε στη πρίζα ένα κύκλωμα πριν ο Επιβλέπων το ελέγξει!**

**Σε περίπτωση ηλεκτροπληξίας θα πρέπει πρώτα να αποκόπτεται το ρεύμα από τους ασφαλειοδιακόπτες** που είναι κατανοημένοι κοντά στις παροχές· αν αυτό δεν είναι εφικτό, τότε **πρέπει να απομακρύνεται το άτομο με κατάλληλο μονωτικό υλικό (π.χ. ένα στεγνό ρούχο)**. Ο χρόνος εδώ είναι βασικό στοιχείο. Άμεσα θα πρέπει να γίνει κλήση για ασθενοφόρο στο 166 περιγράφοντας το τι έχει συμβεί και **που ακριβώς ευρίσκεται το άτομο**. Η επαγγελματική γνώση τεχνητής αναπνοής μπορεί σε κάποια σοβαρή περίπτωση να σώσει ζωή.

[http://www.electronics-lab.com/articles/files/electric\\_shock.pdf](http://www.electronics-lab.com/articles/files/electric_shock.pdf)

### Ραδιενέργεια

**Χρήση ραδιενεργών πηγών:** Η χρήση των ειδικών στην εκπαίδευση ραδιενεργών πηγών γίνεται με τις κατάλληλες οδηγίες του Διδάσκοντα. Θα τις χρησιμοποιήσετε στο Εργαστήριο Φυσικής II και αργότερα στο Εργαστήριο της Πυρηνικής Φυσικής. Στα Εργαστήρια Φυσικής ο φοιτητής πρέπει να υπογράψει σε κατάλληλο φύλλο την παραλαβή και μετά την χρήση, αντίστοιχα για την επιστροφή της πηγής στο Παρασκευαστήριο.

Οι πηγές αυτές είναι ασφαλείς. Ωστόσο δεν πρέπει να τις χειριζόμαστε χωρίς λόγο, να κοιτάζουμε από κοντά την έξοδο των σωματιδίων ή να τις τοποθετούμε έτσι ώστε τα σωματίδια να



κατευθύνονται σε μάς ή στους συμφοιτητές μας. **Ποτέ** δεν τις κρατούμε με τα δάχτυλα στο «**παράθυρο**» της πηγής. Σε περίπτωση που δείτε ότι το ειδικό προστατευτικό παράθυρο είναι χαλαγμένο ή σπασμένο να το αναφέρετε αμέσως στον Επιβλέποντα. Ασειρότητες με τις ραδιενεργές πηγές συνεπάγεται άμεση διαγραφή από το Εργαστήριο.

<http://www.eeae.gr>

## Ακτινοβολίες Laser

**Χρήση συσκευών παραγωγής Laser:** Οι συσκευές παραγωγής ακτινών Laser χρησιμοποιούνται στα νέα Εργαστήρια Φυσικής II, III και IV. **Απαγορεύεται** να κατευθύνουμε την δέσμη τους στα μάτια μας είτε στα μάτια κάποιου συνάδελφου. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται ώστε να μη συμβεί αυτό και από ισχυρή ανάκλαση της δέσμης από ιδιαίτερα στιλπνή επιφάνεια ή καθρέπτη. Ο Επιβλέπων θα σας δώσει οδηγίες για την ασφαλή χρήση του laser του πειράματός σας.

[http://www.osha.gov/SLTC/etools/eyeandface/ppe/laser\\_safety.html](http://www.osha.gov/SLTC/etools/eyeandface/ppe/laser_safety.html)

## Υλικά

**Χρήση υγρού άζωτου:** Το υγρό άζωτο (LN<sub>2</sub>) βρίσκεται (σε ατμοσφαιρική πίεση) σε θερμοκρασία -196°C!! Διατηρείται και μεταφέρεται μέσα σε ειδικά θερμομονωτικά δοχεία (δοχεία Dewar – παρόμοια με τα γνωστά μας "θερμός"). **Κατά την διαδικασία ενός πειράματος με υγρό άζωτο ακολουθείτε τις οδηγίες του Επιβλέποντα αποφεύγοντας απότομες κινήσεις που θα οδηγούσαν στο να χυθεί ποσότητα LN<sub>2</sub> πάνω σας.** Η δράση του αν πέσει μεγάλη ποσότητα πάνω σας είναι σαν να έχετε πάθει ένα έγκαυμα. Στα ρούχα επιφέρει μερική καταστροφή. Αν από ατύχημα πάθετε έγκαυμα θα πρέπει να ειδοποιηθεί το 166 (**διευκρινίζοντας που ακριβώς βρίσκεται το άτομο**) Ασθενοφόρο για την παροχή επαγγελματικής και υπεύθυνης βοήθειας.

<http://www.matheson-trigas.com/msds/00202589.pdf>

## Πυρκαγιά

Να θυμάστε ότι για να έχουμε φωτιά, χρειάζεται να συνυπάρχουν 3 προϋποθέσεις **(α) το κατάλληλο εύφλεκτο υλικό (β) το οξυγόνο και (γ) η υψηλή θερμοκρασία.** Όταν έστω και ένας από τους παραπάνω 3 παράγοντες δεν υπάρχει τότε δεν έχουμε φωτιά. Ειδικά πρέπει να προσέχουμε τα εύφλεκτα υλικά (π.χ. οινόπνευμα). Φυσικά οι δύο πρώτοι παράγοντες πάντα υπάρχουν, άρα ο τρίτος είναι ο κύριος κίνδυνος ώστε να εκδηλωθεί φωτιά στο εργαστήριο.

Αν απομακρύνουμε έναν από τους τρεις αυτούς παράγοντες τότε η φωτιά θα σβήσει. Στο χώρο του Εργαστηρίου, λόγω της ύπαρξης ηλεκτρικού ρεύματος, απομακρύνουμε το οξυγόνο από την φωτιά με την χρήση των ειδικών πυροσβεστήρων. Υπάρχουν πολλοί πυροσβεστήρες κατάλληλου τύπου (CO<sub>2</sub>) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με παρουσία ηλεκτρικού ρεύματος.

**Να θυμάστε ότι το πυροσβεστικό υλικό για να έχει αποτελεσματικότητα θα πρέπει να κατευθύνεται στη βάση της φωτιάς** (όπου γίνεται η καύση του υλικού) και ότι ο χρόνος εκροής από ένα πυροσβεστήρα είναι ~30- 40 δευτερόλεπτα **μόνο!**

Ακόμη μία καλά βρεγμένη (προσοχή να μην χρησιμοποιείται τίποτα το βρεγμένο αν η φωτιά είναι συνδυασμένη με υπό τάση συσκευή) πετσέτα ή ρούχο αποτελούν έναν απλό και αποτελεσματικό τρόπο κατάσβεσης πυρκαγιάς σε αρχικό στάδιο.

Να θυμάστε επίσης ότι **ο χρόνος** είναι ουσιαστικό στοιχείο της αντιμετώπισης μιας πυρκαγιάς. Οι πυροσβέστες, για να τονίσουν το θέμα της άμεσης αντίδρασης σε περίπτωση φωτιάς, αναφέρουνε μισοσοβάρια – μισοαστεία ότι «το πρώτο λεπτό η φωτιά σβήνει με ...ένα ποτήρι νερό, το 5' με πυροσβεστήρα και μετά από 15-20 λεπτά μόνο με παρέμβασή τους!». Προφανώς άμεση πρέπει να είναι, εφόσον απαιτείται, και η κλήση της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας στο 199, προσδιορίζοντας με ακρίβεια τόπο και ειδικές συνθήκες / υλικά στο χώρο της φωτιάς.

<http://www.fireservice.gr>

## Σεισμός

Ισχύουν οι γενικές οδηγίες του Οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας προς τον πληθυσμό. Την ώρα του σεισμού καλυφθείτε αμέσως κάτω από μία εργαστηριακή έδρα (πάγκο) και απομακρυνθείτε από τζαμαρίες και βαριές οργανοθήκες. Μη τρέξετε προς την έξοδο. Μετά το πέρας του σεισμού, αν χρειάζεται, εξέρχεστε χωρίς πανικό από το κτίριο και αν υπάρχει ανάγκη βοήθειας προς άλλα άτομα, προσπαθείτε να την προσφέρετε στο μέτρο του δυνατού. Καλέστε ασθενοφόρο, εφόσον απαιτείται. Καταφύγετε στην συνέχεια σε ανοικτό ασφαλή χώρο, είτε προς την πλευρά του Κοιμητηρίου Ζωγράφου, είτε προς το ανοικτό μέρος της Φιλοσοφικής Σχολής, είτε προς τον ανοικτό χώρο σταθμεύσεως της Σχολής Θετικών Επιστημών.

<http://www.oasp.gr/defaultflash.htm>

## Ιοί - Γρίπη

Οδηγίες σχετικά με την κοινή γρίπη:

[http://www.keel.org.gr/keelpno/2009/id994/afisa\\_mv.pdf](http://www.keel.org.gr/keelpno/2009/id994/afisa_mv.pdf)

ΠΡΟΣΟΧΗ: Προστατεύστε τον εαυτό σας και τους γύρω σας από την γρίπη. Μη διασπείρετε τα μικρόβια: Καλύψτε το στόμα και την μύτη σας με χαρτομάντιλο, όταν βήχετε ή φταρνίζετε. Πετάξτε αμέσως το χαρτομάντιλο στο καλάθι των απορριμμάτων. Αν δεν έχετε χαρτομάντιλο; Φταρνιστείτε στον αγκώνα σας και όχι στα χέρια σας. Πλύνετε τα χέρια σας με σαπούνι και νερό ή χρησιμοποιήστε αλκοολούχο αντισηπτικό διάλυμα. Μην αγγίζετε τα μάτια, την μύτη και το στόμα σας.

Υπουργείο Υγείας & Κοινωνικής Αλληλεγγύης, Κέντρο Ελέγχου & Πρόληψης Νοσημάτων (ΚΕ.ΕΛ.Π.ΝΟ.) <http://www.keel.org.gr>

Πληροφορίες για την νέα γρίπη Α (H1N1) στον ιστοχώρο του Πανεπιστημίου Αθηνών: <http://www.uoa.gr/h1n1/> και στην τηλεφωνική γραμμή: 210-3689797

## Ιός του Δυτικού Νείλου

Πληροφορίες κλπ. Για την λοίμωξη από τον ιό του Δυτικού Νείλου: Τι είναι, πώς μεταδίδεται, ποια τα συμπτώματα, ποια η θεραπεία, πώς αποφεύγεται η μόλυνση, στην διεύθυνση:

<http://news.in.gr/files/1/2010/WNV.pdf>

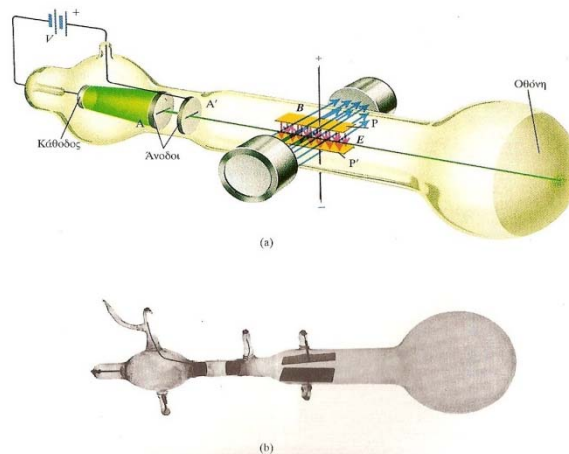
# Άσκηση Δ1. Μέτρηση του λόγου $e/m_e$

## Σκοπός της άσκησης

Σκοπός αυτής της άσκησης είναι να μετρήσουμε το λόγο  $e/m$ , όπου  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $m$  η μάζα του, βασιζόμενοι στην επίδραση ομογενούς μαγνητικού πεδίου σε δέσμη κινουμένων ηλεκτρονίων κάθετα στο μαγνητικό αυτό πεδίο.

## Ιστορική αναδρομή

Η μέτρηση του λόγου  $e/m_e$  δηλαδή του λόγου του φορτίου του ηλεκτρονίου προς τη μάζα του έγινε για πρώτη φορά το 1897 από τον Βρετανό φυσικό J.J. Thomson, (1856-1940), στο εργαστήριο Cavendish του Πανεπιστημίου του Cambridge. Ήθελε να διερευνήσει αν οι καθοδικές ακτίνες (Lenard, Νόμπελ Φυσικής 1905), που εκείνη την εποχή ήταν «πνοκέφαλος» για τους επιστήμονες, έφεραν φορτίο. Η ιδέα του ήταν να τους επιτρέψει να περάσουν μέσα από ένα σωλήνα, όπου είχε δημιουργήσει κενό. Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου θα ξεκαθάριζε τα πράγματα, διότι αν αυτές ήταν φορτισμένες τότε θα εκτρέπονταν από τη πορεία τους. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε η λυχνία, το σχηματικό διάγραμμα και η φωτογραφία της οποίας, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ.1. α) Σχηματική παράσταση της συσκευής Thomson.  
β) Φωτογραφία της συσκευής που χρησιμοποίησε ο Thomson.

Το συμπέρασμα των πρώτων πειραμάτων οδήγησε τον Thomson στην άποψη ότι οι καθοδικές ακτίνες είναι «αρνητικός ηλεκτρισμός φερόμενος από υλικά σωματίδια». Αλλά, συνέχισε, «τί είναι αυτά τα σωματίδια;» Για να διευκρινίσει περισσότερο αυτά τα θέματα, πραγματοποίησε επιπλέον πειράματα, κατά τα οποία οι καθοδικές ακτίνες διέρχονταν από λυχνία κενού και με εφαρμογή μαγνητικού πεδίου αυτές εκτρέπονταν από τη πορεία τους, πράγμα που γινόταν αντιληπτό από το ίχνος στο φωτοευαίσθητο απέναντι τοίχωμα της λυχνίας. Με το πείραμα αυτό μπόρεσε να υπολογίσει το λόγο  $e/m$  και να διατυπώσει την άποψη ότι οι καθοδικές ακτίνες είναι φορτισμένα σωματίδια, που αυτός ονόμασε «corpuscles» (από το λατινικό corpus=σώμα). Το άτομο δεν θεωρείται πια αδιαίρετο.

Το πιο σημαντικό αποτέλεσμα ήταν ότι βρήκε μια και μοναδική τιμή για το λόγο  $e/m$ , τιμή που δεν επηρεαζόταν ούτε από το υλικό της καθόδου, το αέριο του σωλήνα ή άλλες συνθήκες του πειράματος. Αυτό έδειξε ότι τα σωματίδια της δέσμης, που τώρα ονομάζουμε ηλεκτρόνια, είναι κοινό συστατικό της ύλης. Έτσι στον Thomson αποδίδεται η ανακάλυψη του πρώτου υποατομικού σωματιδίου, του ηλεκτρονίου.

Δεκαπέντε χρόνια αργότερα ο Millikan κατόρθωσε να μετρήσει με ακρίβεια το φορτίο του ηλεκτρονίου. Η τιμή αυτή μαζί με τη τιμή του λόγου  $e/m$  κάνει δυνατό το προσδιορισμό της μάζας του ηλεκτρονίου.



Ο J.J.Thomson στο εργαστήριό του στο Cavendish του Cambridge

### Πειραματική διάταξη

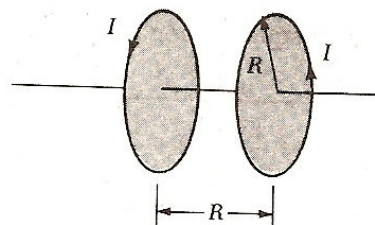
Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ειδική λυχνία σφαιρικού σχήματος που περιέχει αέριο σε χαμηλή πίεση. Ηλεκτρονικό τηλεβόλο που βρίσκεται μέσα σε αυτή εκπέμπει και επιταχύνει ηλεκτρόνια. Η λυχνία αυτή βρίσκεται στηριγμένη μεταξύ πηνίων Helmholtz. Τα πηνία Helmholtz είναι δύο πηνία που απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με την ακτίνα τους. Όταν τα πηνία διαρρέονται από ομόρροπα ρεύματα, στο χώρο μεταξύ τους αποδεικνύεται ότι υπάρχει ομογενές μαγνητικό πεδίο. Συνεπώς η λυχνία βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο. Όταν η δέσμη των ηλεκτρονίων εισέλθει στο χώρο αυτό με μια ταχύτητα  $v$ , η τροχιά τους καμπυλώνεται και διαγράφει κύκλο. Συγχρόνως, τα ηλεκτρόνια της δέσμης, συγκρούονται με τα μόρια του αερίου της λυχνίας, οπότε τα μόρια του αερίου εκπέμπουν φως (διεγειρόμενα από τη σύγκρουση και στη συνέχεια αποδιεγειρόμενα) κι έτσι η τροχιά των ηλεκτρονίων γίνεται ορατή.

Στο πειραματικό μέρος, τροφοδοτούμε τα πηνία με ρεύμα οπότε δημιουργείται ομογενές μαγνητικό πεδίο στο χώρο που βρίσκεται η λυχνία. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από το τηλεβόλο, επιταχύνονται με μια δεδομένη τάση και καθώς εισέρχονται κάθετα στο μαγνητικό πεδίο διαγράφουν, , καμπύλη τροχιά της οποίας την ακτίνα μετρούμε. Το μαγνητικό πεδίο  $B$  παίρνει διάφορες τιμές, ρυθμιζόμενο με διάφορες τιμές του ρεύματος  $I$  που διαρρέει τα πηνία, Η ακτίνα της τροχιάς των ηλεκτρονίων μεταβάλλεται ανάλογα με της τιμές του  $B$ . Χαράσσουμε ευθείες  $B = f(r^{-1})$  για διάφορες τιμές υψηλής τάσης του ηλεκτρονικού τηλεβόλου. Από τις κλίσεις τους και βάσει της παρακάτω αναπτυσσόμενης θεωρίας, υπολογίζουμε το λόγο  $e/m_e$ .

### Θεωρητικό Μέρος

#### Πηνία Helmholtz - Ομογενές μαγνητικό πεδίο

Αν έχουμε δύο κυκλικά πηνία, ακτίνας  $R$  το καθένα και κάθετα στον κοινό άξονά τους, με κέντρα που απέχουν επίσης απόσταση  $R$ , και που διαρρέονται από σταθερό ρεύμα  $I$  της ίδιας φοράς και για τα δύο πηνία, τότε το μαγνητικό πεδίο στο μέσον της απόστασης και πρακτικά κατά μήκος του άξονά τους είναι ομογενές.



Αυτή η ιδιαίτερη διάταξη ονομάζεται «πηνία Helmholtz» και χρησιμοποιείται ευρέως στο εργαστήριο για τη παραγωγή ομογενούς μαγνητικού πεδίου σε περιορισμένο χώρο.

Το μαγνητικό πεδίο στον άξονά τους και σε απόσταση  $x$  από το κέντρο του πρώτου είναι:

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2} \left( \frac{1}{(R^2 + x^2)^{3/2}} + \frac{1}{(2R^2 + x^2 - 2Rx)^{3/2}} \right)$$

Αναλύοντας τη παρένθεση κατά Taylor (αναφορά) γύρω στο σημείο  $x = 0$ , καταλήγουμε ότι:

$$B = \frac{0.715 \mu_0 I}{R}$$

και αν έχουμε  $N$  σπείρες ανά πηνίο, τότε έχουμε:

$$B = \frac{0.715 \mu_0 I N}{R} \quad (2)$$

Προσοχή: Η (2) ισχύει όταν το «εύρος» των  $N$  σπειρών είναι μικρό σε σχέση με το  $R$  ώστε πρακτικά οι  $N$  σπείρες να αποτελούν κυκλικό αγωγό.

### Μελέτη κίνησης ηλεκτρονίων σε ομογενές μαγνητικό πεδίο.

#### Υπολογισμός του πηλίκου $\frac{e}{m_e}$

Όπως υπολογίσαμε, το μαγνητικό πεδίο κατά μήκος του άξονα συμμετρίας δύο κυκλικών πηνίων Helmholtz που διαρρέονται από ομόρροπα ρεύματα είναι πρακτικά ομογενές και δίνεται από τη σχέση:

$$B = 0.715 \frac{\mu_0 N I}{R} \quad (3)$$

όπου  $N$  το πλήθος των σπειρών  $R$  η ακτίνα των πηνίων  $I$  το ρεύμα που τα διαρρέει.

Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται θερμιοτικά από τη κάθοδο επιταχύνονται από την ανοδική τάση  $V$ . Η κινητική τους ενέργεια θα δίνεται από την σχέση:

$$eV = \frac{1}{2} m_e v^2 \quad (4)$$

Τα ηλεκτρόνια που εισέρχονται με ταχύτητα  $v$  σε μαγνητικό πεδίο έντασης  $\mathbf{B}$  και υφίστανται δύναμη κατά Laplace ίση με

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Αν η  $\mathbf{v}$  είναι κάθετη στο  $\mathbf{B}$ , όπως στην περίπτωση μας, τότε τα ηλεκτρόνια θα εκτελέσουν κυκλική τροχιά και θα ισχύει:

$$evB = \frac{mv^2}{R} \quad (5)$$

Από τις (3) και (4) έχουμε:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2V}{B^2 R^2} \quad (6)$$

Η (6) δίνει  $B^2 = \frac{2Vm_e}{er^2}$  και  $B = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{2Vm_e}{e}}$

$$\text{Αλλά } \mathbf{B} = \mathbf{B}_{\pi\eta\nu} + \mathbf{B}_{\gamma\eta\varsigma}. \text{ Αν } \mathbf{B}_{\pi\eta\nu} \parallel \mathbf{B}_{\gamma\eta\varsigma}, \mathbf{B}_{\pi\eta\nu} + \mathbf{B}_{\gamma\eta\varsigma} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{2Vm_e}{e}} \Rightarrow \mathbf{B}_{\pi\eta\nu} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{2Vm_e}{e}} - \mathbf{B}_{\gamma\eta\varsigma} \quad (7)$$

$$\text{Καλούμε το μέγεθος: } \kappa = \sqrt{\frac{2Vm_e}{e}}$$

$$\text{Η (7) γίνεται: } \mathbf{B}_{\pi\eta\nu} = \frac{1}{r} \kappa - \mathbf{B}_{\gamma\eta\varsigma}, \quad (7')$$

σχέση που παριστάνει ευθεία κλίση  $\kappa$  και τεταγμένη επί την αρχή  $\mathbf{B}_{\gamma\eta\varsigma}$ .

Άρα υπολογίζουμε τη κλίση  $\kappa$  και αφού  $\kappa = \sqrt{\frac{2Vm_e}{e}}$  τότε:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2V}{\kappa^2} \quad (8)$$

Τελικά το πηλίκο  $\frac{e}{m_e}$  υπολογίζεται αν γνωρίζουμε το  $V$  (ανοδική τάση) και υπολογίσουμε το  $\kappa$  (κλίση της ευθείας που παριστάνεται με τη (7')).

### Σχετικιστική μεταβολή της μάζας

Αν τα ηλεκτρόνια κινούνται με μεγάλες ταχύτητες η μάζα μεταβάλεται λόγω της σχετικότητας και

$$\text{ισούται τελικά με: } m_e = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$\text{Η μάζα } m_e \text{ υπολογίζεται με την σχέση (8): } m_e = \frac{\kappa^2 \cdot e}{2V}$$

$$\text{και η ταχύτητα } v \text{ υπολογίζεται από την σχέση με (4) } \rightarrow v = \sqrt{\frac{2eV_i}{m_e}}$$

$$\text{και τελικά υπολογίζουμε το } \gamma = 1 / \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (9)$$

### Πειραματική διαδικασία

Η σχέση  $B = 0.715 \frac{\mu_0 NI}{R}$  γράφεται  $B=A \cdot I$ , όπου  $A=0.715 \frac{\mu_0 N}{R}$  ( $N$  το πλήθος των σπειρών  $R$  η ακτίνα των πηνίων  $I$  το ρεύμα που τα διαρρέει).

Υπολογίζουμε το  $A$  άπαξ.

1. Για τέσσερις διαφορετικές τιμές της ανοδικής τάσης, 150V, 200V, 250V, 300V, μετρούμε τις ακτίνες των κυκλικών τροχιών των ηλεκτρονίων μέσα στη λυχνία και καταρτίζουμε 4 πίνακες

σαν τον παρακάτω για κάθε τιμή της ανοδικής τάσης. Οι τιμές των ρευμάτων μπορεί να είναι από 0.90 A έως 2 A, (προσαρμόστε τις ανάλογα αν βλέπετε κύκλο ή όχι).

150V				200V			
$I \pm \delta I$ (A)	$B_{\pi} \pm \delta B_{\pi}$ (Tesla)	$r \pm \delta r$ (mm)	$r^{-1} \pm \delta r^{-1}$ (mm <sup>-1</sup> )	$I \pm \delta I$ (A)	$B_{\pi} \pm \delta B_{\pi}$ (Tesla)	$r \pm \delta r$ (mm)	$r^{-1} \pm \delta r^{-1}$ (mm <sup>-1</sup> )
250V				300V			
$I \pm \delta I$ (A)	$B_{\pi} \pm \delta B_{\pi}$ (Tesla)	$r \pm \delta r$ (mm)	$r^{-1} \pm \delta r^{-1}$ (mm <sup>-1</sup> )	$I \pm \delta I$ (A)	$B_{\pi} \pm \delta B_{\pi}$ (Tesla)	$r \pm \delta r$ (mm)	$r^{-1} \pm \delta r^{-1}$ (mm <sup>-1</sup> )

2. Σχεδιάζουμε τα σημεία των 4 ομάδων μέτρησης  $B = f(r^{-1})$  σε κοινό διάγραμμα. Σχεδιάζουμε τις σχετικές ευθείες (με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων). Από τις κλίσεις  $k$  των ευθειών  $B = f(r^{-1})$  για κάθε  $V$  υπολογίζουμε, βάσει της (8), το λόγο  $\frac{e}{m_e}$ .

Συγκρίνουμε με την θεωρητική τιμή και σχολιάζουμε. Γνωρίζουμε ότι η θεωρητική τιμή του λόγου είναι  $1.75 \cdot 10^{11} \text{C/kg}$ . Αυτή είναι η πιο ακριβής τιμή του λόγου που διαθέτουμε από το 1900 (Πανεπ. Φυσική Hugh Young).

3. Από τους λόγους  $e/m_e$  που υπολογίσαμε, και το φορτίο του ηλεκτρονίου, υπολογίζουμε και βάζουμε σε πίνακα την μάζα του ηλεκτρονίου  $m_e$  και υπολογίζουμε τη ταχύτητα των ηλεκτρονίων που εξέρχονται από την άνοδο, για κάθε τιμή της ανοδικής τάσης από την σχέση (4) οπότε τελικά έχουμε:

$$v = \sqrt{\frac{2eV_i}{m_e}}$$

4. Σχολιάζουμε αν έχουμε σχετικιστική κίνηση των ηλεκτρονίων και αν οι διαφορετικές τιμές μάζας οφείλονται σε σχετικιστική κίνηση.
5. Υπολογίστε την διαφορά δυναμικού η οποία χρειάζεται ώστε τα ηλεκτρόνια να κινούνται με ταχύτητα  $0.5 \cdot c$ .

### Παρατηρήσεις

Το πείραμα πρέπει να διεξαχθεί σε επαρκώς σκοτεινό περιβάλλον. **Προσοχή:** Έχει συμβεί κάποιες φορές να αρχίσει η λήψη μετρήσεων για ανοδική τάση μεγαλύτερη των 150 V, (π.χ. 170 V), διότι στα 150 δεν φαίνεται καθαρά η δέσμη.

**Παράλλαξη:** Κατά τη μέτρηση πρέπει να προσέξουμε ώστε το μάτι μας να βλέπει «κάθετα» στο χάρακα και τη δέσμη (και το είδωλο σε καθρέφτη αν υπάρχει στην διάταξη).

### Προαπαιτούμενες γνώσεις

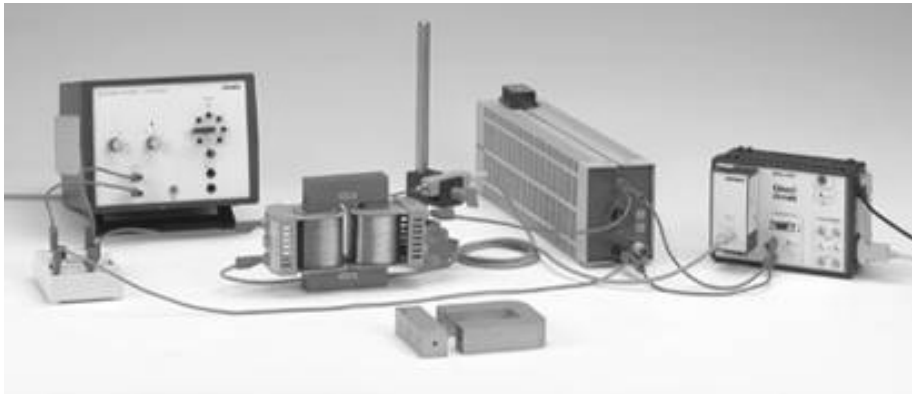
- Κίνηση φορτισμένου σωματιδίου σε μαγνητικό πεδίο- Δυνάμεις Laplace
- Έργο εξαγωγής
- Ιονισμός αερίου



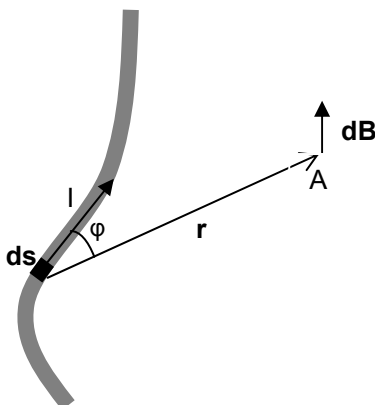
# Άσκηση Δ2. Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού

## Σκοπός της άσκησης

Σε αυτή την άσκηση μελετάμε την *μαγνήτιση της ύλης*. Μετρούμε, μελετάμε και υπολογίζουμε την μαγνήτιση σιδηρομαγνητικού υλικού.



Εικόνα 1: Πειραματική διάταξη της μέτρησης της μαγνήτισης σιδήρου



Σχήμα 1: Ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από έναν αγωγό

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από έναν αγωγό, κατά μέτρο και διεύθυνση σε κάθε σημείο του χώρου A, υπολογίζεται με τον νόμο *Biot-Savart* αθροίζοντας τα διανύσματα των στοιχειωδών μαγνητικών πεδίων **dB** που παράγονται στο σημείο A από στοιχειώδη τμήματα του αγωγού, **ds**, τα οποία απέχουν r από το σημείο A, σχηματίζουν γωνία φ με το διάνυσμα r και διαρρέονται από ρεύμα I, σχήμα 1.

$$dB = \frac{\mu_0 I ds \times r}{4\pi r^2}$$

Γενικά η ένταση είναι ανάλογος του ρεύματος I, το οποίο διαρρέει τον αγωγό.

Για την μελέτη της μαγνήτισης της ύλης, υπολογίζουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ένα πηνίο με δακτυλοειδή σπλισμό (Εικόνα 1). Η ένταση αυτή εξαρτάται από τον αριθμό των σπειρών του πηνίου, από το είδος του σπλισμού, από το μέσο μήκος του σπλισμού και βεβαίως από το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο. Πει-

ραματικά, η ένταση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να μετρηθεί με ένα ανιχνευτή μαγνητικού πεδίου που στηρίζεται στο *φαινόμενο Hall*<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Όταν εφαρμοσθεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα ελασματοειδές κομμάτι μετάλλου ή ημιαγωγού που παρεμβάλλεται σε μαγνητικό πεδίο, έτσι ώστε το ρεύμα να είναι κάθετο στο μαγνητικό πεδίο, στα άκρα του ελάσματος, τα οποία είναι κάθετα στο ρεύμα και στο μαγνητικό πεδίο, αναπτύσσεται μία διαφορά δυναμικού. Αυτή η διαφορά δυναμικού εξαρτάται από το είδος και την πυκνότητα των φορέων του ρεύματος, το ρεύμα και το μαγνητικό πεδίο

## Θεωρητικό Μέρος

### Μαγνήτιση της ύλης - Μαγνητίζον πεδίο στο εσωτερικό πηνίου

Το διανυσματικό μέγεθος της *μαγνήτισης*  $M$  περιγράφει την μαγνητική κατάσταση των υλικών και την διαδικασία μετάδοσης των ιδιοτήτων του 'μαγνήτη' σε μεταλλικά ή μαγνητικά σώματα. Η μαγνήτιση μπορεί να γίνει μέσω άμεσης επαφής του υλικού με τον πόλο ενός μαγνήτη, εξ επαγωγής, και διά μηχανικών παραμορφώσεων. Στην περίπτωση λοιπόν όπου σιδηρομαγνητικό υλικό τοποθετηθεί ή βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο, θα αρχίσει να συμπεριφέρεται ως μαγνήτης, θα εμφανίζει δηλαδή μαγνητική ροή. Η μαγνήτιση αυτή της ράβδου οφείλεται στον προσανατολισμό των στοιχειωδών μαγνητών που την συναποτελούν. Η ένταση της μαγνήτισης είναι μέγεθος διανυσματικό, έχει μέτρο ανάλογο με τη συνισταμένη της μαγνητικής ροπής ανά μονάδα όγκου του υλικού και έχει φορά ίδια με εκείνη της μαγνητικής ροπής.

Όταν πηνίο διαρρέεται από ρεύμα δημιουργείται μαγνητικό πεδίο  $B_0$  συμμετρικό με τον άξονα συμμετρίας του. Αν στο εσωτερικό του πηνίου εισαχθεί σιδηρομαγνητικό υλικό προκαλείται μια επιπλέον συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου  $B_M$ , που περιγράφεται από το διάνυσμα της μαγνήτισης και είναι ίση με  $B_M = \mu_0 M$ . Το συνιστάμενο πεδίο  $B$  στην περιοχή θα ισούται με:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mu_0 \mathbf{M}$$

Η σταθερά  $\mu_0$  ονομάζεται *διαπερατότητα του κενού* και η τιμή της είναι  $4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$ .

Ορίζουμε ένα νέο διανυσματικό μέγεθος, που καλείται *μαγνητίζον πεδίο*  $H$ , και ορίζεται έτσι ώστε:

$$\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H} \Rightarrow \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (1)$$

Οι μονάδες των μεγεθών  $H$  και  $M$  είναι  $A/m$ .

Προφανώς, στην περίπτωση που το μαγνητίζον πεδίο προκαλείται από ρεύμα που διαρρέει ένα δακτυλιοειδές πηνίο και του οποίου στο εσωτερικό υπάρχει κενό υλικό, η μαγνήτιση  $M$  στην παραπάνω σχέση μηδενίζεται.

Γνωρίζουμε ότι, η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του δακτυλιοειδούς πηνίου υπολογίζεται από την σχέση

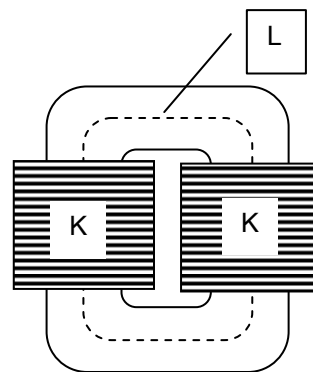
$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \cdot N \cdot I \rightarrow \mathbf{B} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{L}$$

όπου  $N$  ο αριθμός των σπειρών του δακτυλιοειδούς πηνίου και  $L$  το μέσον μήκος του (διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 2), όπου  $N=2 \cdot K$  και  $K$  ο αριθμός των σπειρών κάθε πηνίου. Αντίστοιχα το μαγνητίζον πεδίο  $H$  στο εσωτερικό του δακτυλιοειδούς πηνίου οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στο ρεύμα  $I$  που διαρρέει το πηνίο και ισούται με:

$$\mathbf{H} = \frac{N \mathbf{I}}{L} \quad (2)$$

Παραπάνω δηλώθηκε ότι τα μεγέθη  $H$  και  $M$  έχουν τις ίδιες μονάδες μέτρησης. Αυτό μας οδηγεί στην αναζήτηση της μεταξύ τους συσχέτισης. Το μέτρο του μαγνητίζοντος πεδίου είναι ανάλογο με το μέτρο της μαγνήτισης, για τα παραμαγνητικά και διαμαγνητικά υλικά, μέσω ενός απλού αριθμητικού συντελεστή  $\chi$  που ονομάζεται *μαγνητική επιδεκτικότητα*.

$$M = \chi H$$



Σχήμα 2. Δακτυλιοειδής σπλι-σμός με πηνία

Η φορά του  $M$  ως προς το  $H$  εξαρτάται από την τιμή που λαμβάνει η μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi$ . Στα παραμαγνητικά και σιδηρομαγνητικά υλικά η  $\chi$  είναι θετική ενώ στα διαμαγνητικά υλικά η  $\chi$  λαμβάνει αρνητικές τιμές.

Από την σχέση (1) θα έχουμε τελικά για τα μέτρα:

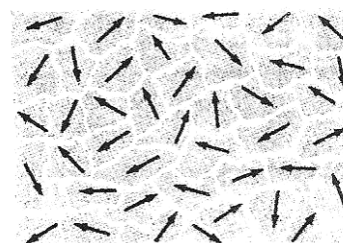
$$B = \mu_0 (H + M) \Rightarrow B = \mu_0 (H + \chi H) \Rightarrow B = \mu_0 (1 + \chi)H$$

και οδηγούμαστε στον ορισμό της σταθεράς  $\mu$  η οποία καλείται (απόλυτη) διαπερατότητα του υλικού και ισούται με:

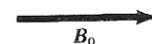
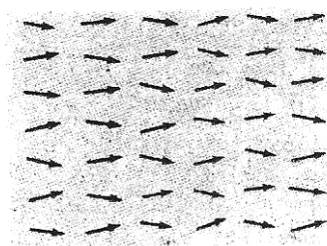
$$\mu = \mu_0 (1 + \chi)$$

Η τιμή της διαπερατότητας  $\mu$  δεν περιγράφει χαρακτηριστικά ένα υλικό αλλά εξαρτάται από την πρότερη κατάσταση του υλικού και τον τρόπο επεξεργασίας του.

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά οφείλουμε να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί στην χρήση της σχέσης  $M=\chi H$  διότι η μαγνήτιση των σιδηρομαγνητικών υλικών, όπως ο σίδηρος, το νικέλιο και το κοβάλτιο, δεν καθορίζεται μόνο από το παρόν πεδίο αλλά και από την μαγνητική τους ιστορία. **Συνεπώς στο διαγράμματα μαγνήτισης  $B=\mu H$ , το  $\mu$  είναι ο λόγος των συντεταγμένων  $B/H$  και όχι η κλίση, διότι η συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών  $B$  και  $H$  δεν είναι γραμμική.**



(a)



### Καμπύλη μαγνήτισης σιδήρου

Θεωρούμε ότι στον σίδηρο υπάρχουν δίπολα των οποίων οι μαγνητικές ροπές ευθυγραμμίζονται μόνο μέσα σε σχετικά μικρά τμήματα του υλικού, στις λεγόμενες περιοχές Weiss, που έχουν μόνιμη μαγνήτιση (Σχήμα 3). Κάθε περιοχή Weiss περιλαμβάνει δισεκατομμύρια δίπολα όλα ευθυγραμμισμένα, μόνο που οι περιοχές Weiss έχουν τυχαίους προσανατολισμούς μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα η συνολική μαγνήτιση του υλικού είναι μηδέν.

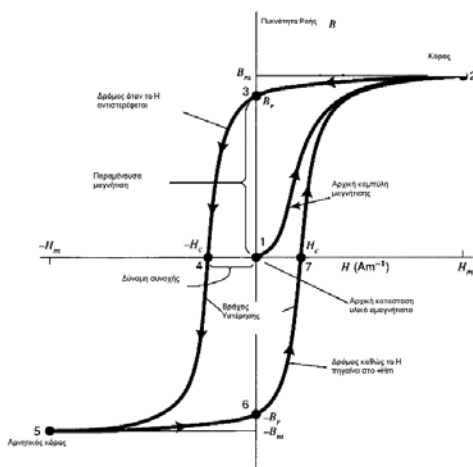
Σχήμα 3 Μαγνήτιση διπόλων λόγω εξωτερικού πεδίου  $B_0$  (περιοχές Weiss)

Προκειμένου να πετύχουμε την μόνιμη μαγνήτιση σιδηρού αντικειμένου, τυλίγουμε ένα σύρμα γύρω από αυτό και διαρρέουμε με ρεύμα το σύρμα. Μέσω αυτής της διαδικασίας δημιουργείται το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Καθώς αυξάνουμε την ένταση του ρεύματος, αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο και η μαγνήτιση. Τελικά, φτάνουμε στο 'σημείο κορεσμού' όπου όλα τα δίπολα του σιδήρου έχουν ευθυγραμμιστεί και περαιτέρω αύξηση της έντασης του ρεύματος δεν επηρεάζει καθόλου την μαγνήτιση. Με άλλα λόγια αυξάνοντας το μαγνητικό πεδίο,  $H$ , αυξάνεται και η μαγνήτιση αλλά η αύξηση δεν είναι γραμμική και τελικά φτάνει σε μία μέγιστη τιμή, την μαγνήτιση κόρου, που αντιστοιχεί στον μέγιστο βαθμό προσανατολισμού των μαγνητικών περιοχών Weiss (ο οποίος εξαρτάται αντιστρόφως από την θερμοκρασία). Αυτό είναι προφανές στο διάγραμμα  $M = f(H)$  όπου μετά το σημείο κόρου, το  $M$  παραμένει σταθερό όσο και αν αυξάνεται το  $H$ . Οσοίσο στο διάγραμμα  $B = f(H)$ , μετά το σημείο κόρου το  $B$  αλλάζει ολίγον με την αύξηση του  $H$ · αυτή οφείλεται στην συνεισφορά του ρεύματος (του μαγνητικού πεδίου) στην τιμή του  $B$ .

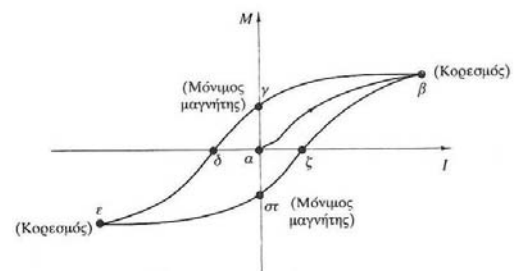
Η καμπύλη  $M = f(H)$ , μαγνητίζοντας αρχικά μη μαγνητισμένο μαγνητικό υλικό, ονομάζεται αρχική ή παρθενική καμπύλη. Μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιοχές στην καμπύλη την πρώτη περιοχή με μεγάλη κλίση και είναι η περιοχή της εύκολης ή μαλακής μαγνήτισης και η δεύτερη περιοχή με μικρή κλίση της είναι η περιοχή σκληρής μαγνήτισης, η οποία και καταλήγει στον κορεσμό.

Μετά τον κορεσμό, εάν αρχίσουμε να μειώνουμε το ρεύμα και συνεπώς το μαγνητικό πεδίο  $H$ , δεν επιστρέφουμε μέσω της αρχικής διαδρομής στο σημείο της μηδενικής μαγνήτισης  $M=0$ . Ακόμα και αν μηδενιστεί εντελώς το ρεύμα στο υλικό παραμένει κάποια μαγνήτιση, η καλουμένη *υστέρηση* ή *παραμένουσα μαγνήτιση* (σχήμα 4, σημεία 3 και 6 αντίστοιχα). Αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση των μαγνητικών περιοχών με αποτέλεσμα την μερική διατήρηση του προσανατολισμού τους.

Για να εξαφανιστεί αυτή η μαγνήτιση πρέπει να διαρρέυσει ρεύμα το σύρμα, που περικυκλώνει το υλικό, αλλά αντίθετης φοράς. Η τιμή του μαγνητικού πεδίου  $H$ , για την οποία μηδενίζεται η μαγνήτιση, ονομάζεται *δύναμη συνοχής* (σχήμα 4, σημεία 4 και 7). Αυξάνοντας την τιμή του  $I$  φτάνουμε στον κορεσμό αλλά με αντίθετη φορά. Αν αρχίσουμε να αυξάνουμε πάλι το  $I$ , η  $M$  θα επιστρέψει στο μηδέν, αυξάνει (με αντίθετο πρόσημο) και τελικά καταλήγει πάλι στο σημείο κορεσμού. Η διαδρομή που περιγράψαμε καλείται χαρακτηριστικός *βρόχος υστέρησης* (Σχήμα 5). Το όνομα προκύπτει από την καθυστέρηση της μεταβολής της μαγνήτισης έναντι της μεταβολής της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Παρατηρούμε ότι ο βρόχος δεν περνά από την αρχική καμπύλη μαγνήτισης, διότι η μαγνήτιση του υλικού δεν εξαρτάται μόνο από το μαγνητικό πεδίο αλλά και από την προϊστορία του υλικού.



Σχήμα 4. Καμπύλη μαγνήτισης



Σχήμα 5. Σημείο κορεσμού στην καμπύλη μαγνήτισης

Οι βρόχοι υστέρησης σχεδιάζονται επίσης ως γραφήματα του  $B$  ως προς  $H$ . Ο βρόχος υστέρησης μας παρέχει και την πληροφορία ότι, η επιφάνεια που περικλείεται από τον βρόχο είναι ανάλογη προς το έργο που καταναλώνεται όταν το υλικό υποβάλλεται σε έναν πλήρη κύκλο υστέρησης και το οποίο χάνεται ως θερμότητα. Η απώλεια αυτή είναι ανάλογος του χρόνου του κύκλου υστέρησης και συνεπώς, σε κυκλικές μεταβολές όπως π.χ. αυτές οι οποίες προκαλούνται από εναλλασσόμενα ρεύματα, εξαρτάται από την συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος.

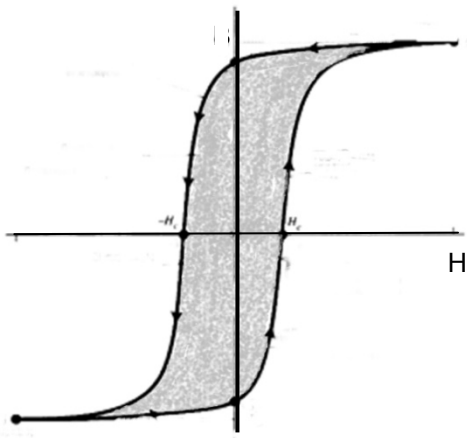
Η απώλεια αυτή υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα

$$w = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}$$

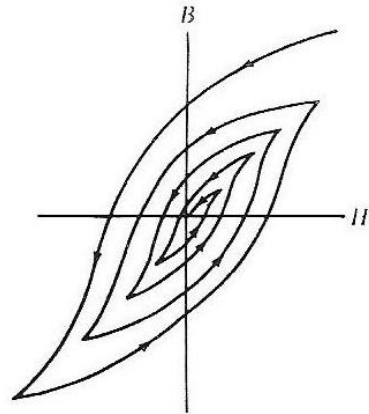
και αντιστοιχεί στο εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη υστέρησης (σχήμα 6). Το ολοκλήρωμα έχει μονάδες ενέργειας ανά μονάδα όγκου ( $J/m^3$ ). Η ενέργεια που δαπανάται στο υλικό παρέχεται από την πηγή του εξωτερικού πεδίου, δηλαδή την ΗΕΔ του δακτυλιοειδούς πηνίου. Για να απομαγνητίσουμε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό πρέπει να το υποβάλλουμε σε διαδοχικούς βρόχους υστέρησης, μειώνοντας συνεχώς το εφαρμοζόμενο πεδίο (Σχήμα 7).

Ο βρόχος υστέρησης των «σκληρών» σιδηρομαγνητικών υλικών είναι αρκετά ευρύς, συνεπώς περιγράφει μεγάλη δύναμη συνοχής ή υστέρηση και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών, π.χ. μόνιμοι μαγνήτες σε κινητήρες, σε μεγάφωνα κλπ. Ο βρόχος υστέρησης των «μαλακών» σιδηρομαγνητικών υλικών είναι σημαντικά στενός, συνεπώς περιγράφει μικρή ή σχεδόν δύναμη συνοχής μαγνήτιση ή υστέρηση και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή οπλισμού ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων, π.χ. ηλεκτρομαγνήτες των ηλεκτρονόμων, ηλεκτρομαγνή-

τες γερανών, κλπ. Η απομαγνήτιση των μαλακών μαγνητών είναι εύκολη ενώ των σκληρών μαγνητών δύσκολη.



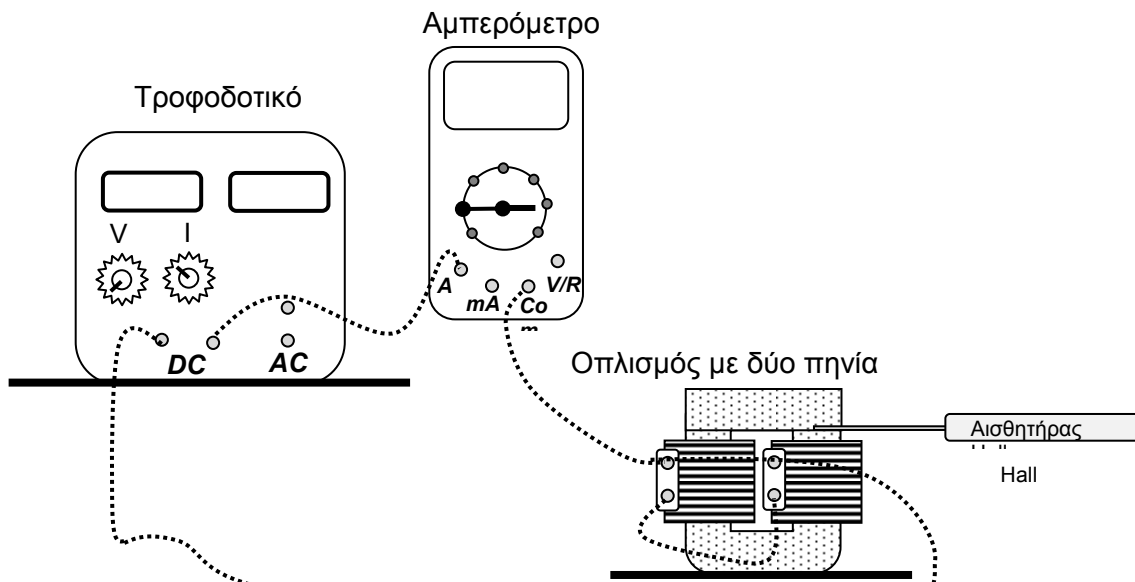
Σχήμα 6. Ενέργεια που καταναλώνεται σε έναν πλήρη κύκλο υστέρησης



Σχήμα 7. Καμπύλες απομαγνήτισης

### Πειραματική διαδικασία

1. Αναγνωρίζουμε τα μέρη της άσκησης και πραγματοποιούμε το κύκλωμα που θα χρησιμοποιήσουμε. Το κύκλωμα περιλαμβάνει τροφοδοτικό, αμπερόμετρο, πηνία και, αρχικά, τον συμπαγή οπλισμό (σχήμα 8). Πραγματοποιούμε το κύκλωμα. **Πριν προχωρήσουμε, ο/η επιβλέπων/ουσα ελέγχει το κύκλωμα. Προσοχή:** Κατά την άσκηση το ρεύμα στο κύκλωμα δεν πρέπει να υπερβεί τα 2A.



Σχήμα 8.

2. Την ένταση του μαγνητικού πεδίου την μετρούμε με μαγνητόμετρο που στηρίζεται στο φαινόμενο Hall. Αναγνωρίζουμε τον αισθητήρα Hall και εξοικειωνόμαστε με την συσκευή μετρώντας το μαγνητικό πεδίο της Γης. **Στις επόμενες μετρήσεις πρέπει να έχουμε υπ' όψη το μαγνητικό πεδίο της γης και να το ελαχιστοποιήσουμε (αν χρειάζεται).**

3. Τοποθετούμε με προσοχή το αισθητήρα Hall ανάμεσα στον οπλισμό και τον πυρήνα, έτσι ώστε η λευκή πλευρά του ελάσματος του αισθητήρα να είναι προς τα πάνω.

4. Για να απομαγνητίσουμε τους σιδερένιους πυρήνες συνδέουμε τα καλώδια των πηνίων, και συνδέουμε ανάστροφα τα καλώδια τροφοδοσίας στους ακροδέκτες του τροφοδοτικού. Τροφοδοτούμε με μικρό ρεύμα και μετά το μηδενίζουμε. Επαναλαμβάνουμε πολλές φορές, μέχρις ότου, μηδενίζοντας το ρεύμα, μετράμε μία πολύ μικρή ένταση παραμέσουσας μαγνήτησης.

Μικρή απόκλιση είναι αναπόφευκτη αφού δεν είναι δυνατόν να την απομαγνητίσουμε εντελώς στις συνθήκες της πειραματικής διάταξης.

5. Ξανασυνδέουμε τα καλώδια όπως στο σχήμα 8. Βεβαιωνόμαστε ότι ο ρυθμιστής ρεύματος του τροφοδοτικού είναι στο μηδέν, ο ρυθμιστής τάσεως στα 15 V και ανάβουμε το τροφοδοτικό της συνεχούς τάσεως.

Αυξάνοντας ή ελαττώνοντας σταδιακά το ρεύμα από τον ρυθμιστή του ρεύματος του τροφοδοτικού, ρυθμίζουμε το ρεύμα και μετρούμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου, B, με το μαγνητόμετρο καταχωρώντας τις μετρήσεις σε πίνακα.

Το ρεύμα μεταβάλλεται με βήματα των 0.2A **ΠΕΡΙΠΟΥ**· αν ξεπεράσουμε την επιθυμητή τιμή ΔΕΝ διορθώνουμε ρυθμίζοντας το ρεύμα αλλά γράφουμε την τιμή που μας δείχνει το αμπερόμετρο.

- Από α) 0 έως +2.0A, β) από +2.0A έως 0, αντιστρέφουμε τα καλώδια στους πόλους του τροφοδοτικού, και, γ) από 0 έως -2.0A, δ) από -2.0 A έως 0.0 A, αντιστρέφουμε τα καλώδια στους πόλους του τροφοδοτικού και τελικά από ε) 0 έως 2.0 A.

6. Επαναλαμβάνουμε τα παραπάνω με τον ελασματοειδή πυρήνα, ακλουθώντας την εξής σειρά μεταβολής του ρεύματος:

- Από α) 0 έως +1.5 A, β) από +1.5A έως 0, αντιστρέφουμε τα καλώδια στους πόλους του τροφοδοτικού, και, γ) από 0 έως -1.5A, δ) από -1.5 A έως 0.0 A, αντιστρέφουμε τα καλώδια στους πόλους του τροφοδοτικού και τελικά από ε) 0 έως 1.5 A.

8. Για τον συμπαγή πυρήνα:

- Υπολογίζουμε την τιμή του μαγνητίζοντος πεδίου H για κάθε τιμή του ρεύματος και σχεδιάζουμε το  $B = f(H)$ . Προσοχή στη χρήση των μονάδων.
- Σημειώνουμε την παραμένουσα μαγνήτιση και την δύναμη.
- Υπολογίζουμε την μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  σε διαφορετικές τιμές του H και γράφουμε την καμπύλη του  $\mu$  σαν συνάρτηση του H
- Από το εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη του βρόχου υστέρησης υπολογίζουμε την πυκνότητα ενέργεια που καταναλώνεται για έναν πλήρη κύκλο μαγνήτισης του υλικού.

9. Επαναλαμβάνουμε το βήμα 8 για τον ελασματοειδή πυρήνα.

10. Σύγκριση και συμπεράσματα από τις μετρήσεις σας.

## Αναφορές

R.A. Serway Physics, Τόμος II, Ηλεκτρομαγνητισμός, 3rd edition, 1990, απόδοση Λ.Κ. Ρεσβάνη.

David J.Griffiths, Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική, Τόμος I, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1999

# Άσκηση Δ3. Μελέτη κυκλώματος RLC. Μιγαδική παράσταση αρμονικών μεγεθών

## Θεωρητικό Μέρος

### 1. Γενικά

Αρμονικώς μεταβαλλόμενα μεγέθη είναι δυνατόν να τα παρασταθούν με την βοήθεια μιγαδικών αριθμών. Το δικαίωμα να κάνουμε αυτή την "αυθαιρεσία" μας το δίνει ο γνωστός τύπος του EULER:  $\cos\theta + j\sin\theta = e^{j\theta}$

Η απεικόνιση αυτή διευκολύνει πάρα πολύ την διαφορίση, την ολοκλήρωση και την επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Πράγματι:

Έστω  $V = V_o \sin\omega t$ . Αν θεωρήσουμε τη  $V$  συνιστώσα του μιγαδικού:  $\bar{V} = V_o e^{j\omega t}$ ,

$$\text{η παράγωγος στον χρόνο δίνει: } \frac{d\bar{V}}{dt} = V_o j\omega e^{j\omega t} = j\omega \bar{V} \quad (1)$$

$$\text{και η ολοκλήρωση δίνει: } \int \bar{V} dt = \int V_o e^{j\omega t} dt = \frac{V_o}{j\omega} \int de^{j\omega t} = \frac{\bar{V}}{j\omega} \quad (2)$$

Βεβαίως όλα τα μεγέθη της φυσικής είναι πραγματικά μεγέθη. Σύμφωνα λοιπόν με αυτή την θεώρηση τα αρμονικά μεγέθη είναι οι συνιστώσες - πραγματικό μέρος (Re) ή φανταστικό μέρος, (Im) μίας μιγαδικής συναρτήσεως. Έτσι μετά την εκτέλεση των αναγκαίων πράξεων, στο αποτέλεσμα, το πραγματικό μέρος του μιγαδικού, ή το φανταστικό μέρος αυτού ή ακόμη το μέτρο και το όρισμά του, είναι κάποιο πραγματικό φυσικό μέγεθος.

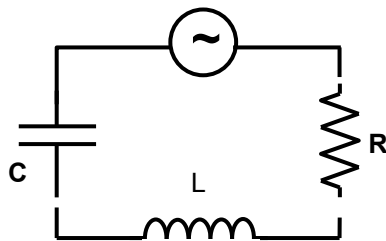
### 2. Κύκλωμα RLC

Το κύκλωμα αντίστασης, πηνίου και πυκνωτή σε σειρά (Σχ.1) τροφοδοτείται από πηγή εναλλασσόμενης τάσεως  $v_s$ . Κάθε χρονική στιγμή το άθροισμα των πτώσεων τάσης στα άκρα κάθε στοιχείου του κυκλώματος είναι ίσο προς την εφαρμοζόμενη τάση:

$$V_R + V_L + V_C = V_S \Rightarrow IR + L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int Idt = V_S \quad (3)$$

$$\text{Έτσι εάν: } \bar{V}_S = V_o e^{j\omega t} \quad (4)$$

τότε γενικά το ρεύμα θα είναι:



Σχ. 1

$$\bar{I} = I_o e^{j(\omega t + \delta)} \quad (5)$$

και σύμφωνα με τις (1) και (2):

$$\bar{I}R + j\omega L \bar{I} + \frac{\bar{I}}{j\omega C} = \bar{V}_S \quad (6)$$

$$\Rightarrow \left( R + j\omega L - \frac{j}{\omega C} \right) \cdot \bar{I} = \bar{V}_s \quad (7)$$

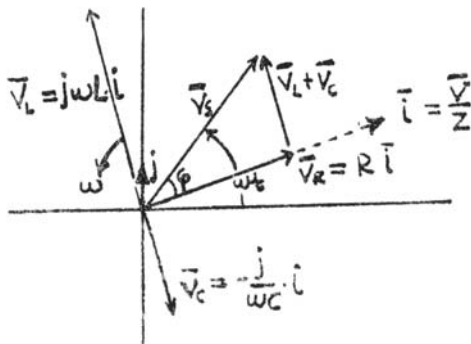
$$\text{Η ποσότητα: } \bar{Z} = R + j \cdot \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = Z e^{j\phi} \quad (8)$$

$$\text{είναι η μιγαδική εμπέδηση με μέτρο: } Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (9)$$

$$\text{και όρισμα την διαφορά φάσεως ρεύματος - τάσης: } \phi = \tan^{-1} \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} \quad (10)$$

Αν λοιπόν γνωρίζουμε την μιγαδική εμπέδηση  $\bar{Z}$ , τότε μπορούμε άμεσα να βρούμε το ρεύμα για δεδομένη εναλλασσόμενη τάση  $V_s$ .

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}_s}{\bar{Z}} = \frac{V_o e^{j\omega t}}{Z e^{j\phi}} = \frac{V_o}{Z} e^{j(\omega t - \phi)} \quad (11)$$



Σχήμα 2. Ανυσματική παράσταση των τάσεων και του ρεύματος του κυκλώματος RLC στο μιγαδικό επίπεδο.

Η  $x$  συνιστώσα του μιγαδικού "ανύσματος"  $\bar{I}$  παριστάνει το πραγματικό ρεύμα:

$$I = \frac{V_o}{Z} \cos(\omega t - \phi) \quad (12)$$

Τα ανύσματα των τάσεων  $\bar{V}_s, \bar{V}_L, \bar{V}_C, \bar{V}_R$  και του ρεύματος  $\bar{I}$  στρέφονται στο μιγαδικό επίπεδο με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ . Αυτά τα περιστρεφόμενα ανύσματα ονομάζονται *φάσορες* (φάσωρ, φάσορος, phasors).

### 3. Συντονισμός

Το κύκλωμα γενικώς βρίσκεται σε συντονισμό όταν το ρεύμα  $i$  και η τάση  $V$  είναι συμφασικά.

Η συχνότητα συντονισμού  $\omega_0$  ευρίσκεται από την σχέση (10), όταν  $\phi=0$ , δηλαδή:

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (13)$$

Δεν πρέπει να γίνεται σύγχυση ανάμεσα στην συχνότητα συντονισμού ενός κυκλώματος  $\omega_0$  και την ιδιοσυχνότητά του δηλαδή, την συχνότητα με την οποία το κύκλωμα θα ταλαντώνεται αν διεγερθεί και αφεθεί ελεύθερο. Η συχνότητα ταλάντωσης του κυκλώματος είναι τότε:

$$\omega_{\text{ταλ}} = \left[ \frac{1}{LC} - \left( \frac{R}{2L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

### 4. Μέση ισχύς <P>

Η (στιγμιαία) ισχύς σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα είναι  $P = VI$ . Έτσι εάν  $V = V_o \cos \omega t$  και επίσης:



$$I = \frac{V_o}{Z} \cos(\omega t - \varphi) = I_o \cos(\omega t - \varphi)$$

τότε θα είναι:

$$P = V_o I_o \cos \omega t \cos (\omega t - \varphi) \quad (15)$$

Είναι προφανές ότι η ισχύς μπορεί να έχει θετικό ή αρνητικό πρόσημο και τούτο εξαρτάται από την χρονική στιγμή και την διαφορά φάσης  $\varphi$ . Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι κατά χρονικά διαστήματα η ενέργεια από τα πεδία (ηλεκτρικό ή/και μαγνητικό) επιστρέφει στην πηγή (αρνητική ισχύς).

Είναι λοιπόν λογικό να ενδιαφερόμαστε για την χρονικώς μέση ισχύ  $\langle P \rangle$  που προσάγεται προς μία εμπέδηση  $Z$  με διαφορά φάσης  $\varphi$  σε χρόνο μίας περιόδου  $T = \frac{2\pi}{\omega}$

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T V I dt \quad (16)$$

Όμως τα  $V$  και  $I$  ως πραγματικά μέρη μιγαδικών απεικονίσεων  $\bar{V}$  και  $\bar{I}$  δίδονται από τις σχέσεις:  $V = \frac{1}{2}(\bar{V} + \bar{V}^*)$  και  $I = \frac{1}{2}(\bar{I} + \bar{I}^*)$ , όπου με αστερίσκο σημειώνονται οι συζυγείς μιγαδικοί των  $\bar{V}$  και  $\bar{I}$ .

Έτσι εάν:  $\bar{V} = V_o e^{j\omega t}$  και  $\bar{I} = I_o e^{j(\omega t - \varphi)}$  θα έχουμε:  $\bar{V}^* = V_o e^{-j\omega t}$  και  $\bar{I}^* = I_o e^{-j(\omega t - \varphi)}$ , άρα:

$$\begin{aligned} \langle P \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T V \cdot I dt = \frac{1}{4T} \int_0^T (\bar{V} + \bar{V}^*)(\bar{I} + \bar{I}^*) dt = \frac{1}{4T} \int_0^T (\bar{V}\bar{I} + \bar{V}\bar{I}^* + \bar{V}^*\bar{I} + \bar{V}^*\bar{I}^*) dt \Rightarrow \\ \langle P \rangle &= \frac{V_o I_o}{4T} \int_0^T (e^{2j\omega t} e^{-j\varphi} + e^{j\varphi} + e^{-j\varphi} + e^{-2j\omega t} e^{j\varphi}) dt \end{aligned}$$

Ο πρώτος και ο τελευταίος όρος στο ολοκλήρωμα μηδενίζονται εντός μιας περιόδου και έτσι:

$$\langle P \rangle = \frac{V_o I_o}{4T} (e^{j\varphi} + e^{-j\varphi}) = \frac{V_o I_o}{2} \cos \varphi \quad (17)$$

$$\text{διότι ισχύει: } \cos \varphi = \frac{e^{j\varphi} + e^{-j\varphi}}{2},$$

$$\text{ή τελικά: } \langle P \rangle = \frac{V_o I_o}{2} \frac{R}{Z} \quad (18)$$

Πράγματι από το Σχ.2 αν λάβουμε τα μέτρα των μιγαδικών θα έχουμε:

$$\cos \varphi = \frac{|\bar{V}_R|}{|\bar{V}_S|} = \frac{|R| \cdot |\bar{I}|}{|Z| \cdot |\bar{I}|} = \frac{R}{Z} \quad (19)$$

ή τελικά, επειδή  $I_o = \frac{V_o}{Z}$ , θα είναι:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} R I_o^2 \quad (20)$$

Η ποσότητα **cosφ** καλείται *παράγων ισχύος* (power factor) του κυκλώματος και είναι πάντα θετικός (ιδιότητα της συνάρτησης του συνημίτονου).

Η μέση χρονική τιμή των εναλλασσόμενων ρευμάτων και τάσεων είναι προφανώς μηδέν. Έτσι είναι χρήσιμο να ορίσουμε την μέση τετραγωνική τιμή αυτών σε χρονικό διάστημα μιας περιόδου:

$$\langle I^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T I_o^2 \cos^2(\omega t - \phi) dt = \frac{1}{2} I_o^2 \quad (21)$$

$$\langle V^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_o^2 \cos^2 \omega t dt = \frac{1}{2} V_o^2 \quad (22)$$

και έτσι:

$$\langle P \rangle = (1/2) R I_o^2 = R \langle I^2 \rangle \quad (23)$$

Ως γνωστόν είναι σύνηθες, επειδή τα όργανα μέτρησης αναφέρονται σε ενεργές τιμές (Root - Mean - Square), να εκφράσουμε τις μέσες τετραγωνικές τιμές συναρτήσει των ενεργών τιμών. Δηλαδή:

$$V_e^2 = \langle V^2 \rangle \Rightarrow V_e = \frac{V_o}{\sqrt{2}} \quad (24)$$

$$I_e^2 = \langle I^2 \rangle \Rightarrow I_e = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \quad (25)$$

και τελικά:

$$\langle P \rangle = R \langle I^2 \rangle = R \cdot I_e^2 \quad (26)$$

## 5. Συντελεστής ποιότητας Q (quality factor)

Η στιγμιαία ισχύς που παρέχεται από την πηγή στο κύκλωμα RLC είναι:

$$P = V \cdot I = \left( RI + L \frac{dI}{dt} + \frac{Q}{C} \right) \cdot I = RI^2 + L \frac{dI}{dt} \cdot I + \frac{Q}{C} \cdot I \quad (27)$$

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Παρεχομένη} \\ \text{Ισχύς} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Θερμική} \\ \text{Ισχύς} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Ρυθμός αύξ. ενεργ.} \\ \text{Μαγνητικού Πεδίου} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Ρυθμός αύξ. ενεργ.} \\ \text{Ηλεκτρικού Πεδίου} \end{array} \right] \cdot E$$

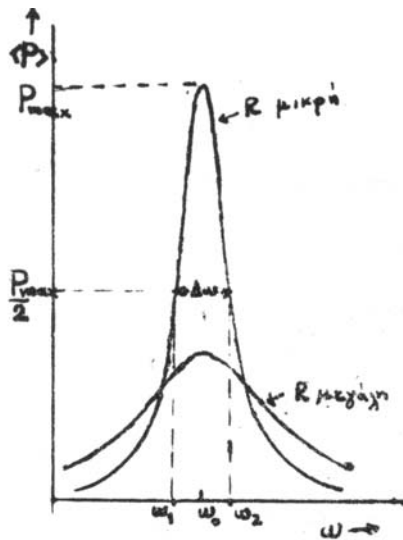
τσι η ποιότητα ενός κυκλώματος, δηλαδή ποιο ποσοστό της προσφερόμενης ισχύος μετασχηματίζεται σε θερμότητα (απώλειες Joule) και πιο αποταμιεύεται σε ενέργεια Ηλεκτρικού ή Μαγνητικού πεδίου, εξαρτάται και μόνον από τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος.

Προκειμένου να χαρακτηριστεί η ικανότητα ενός κυκλώματος RLC να αποταμιεύει ενέργεια ορίζουμε τον συντελεστή ποιότητας του κυκλώματος σαν:

$$Q = 2\pi \frac{\text{Μέση αποταμιευμένη ενέργεια ανά περίοδο στον συντονισμό}}{\text{Απορροφώμενη ενέργεια ανά περίοδο στον συντονισμό}} \text{ ή}$$

$$Q = 2\pi \frac{\frac{1}{T_o} \int_0^{T_o} L \frac{dI}{dt} Idt}{\frac{1}{2} RI_o^2} = \frac{2\pi}{T_o} \cdot \frac{\int_0^{T_o} LI dI}{\frac{1}{2} RI_o^2} = \omega_o \frac{\frac{1}{2} LI_o^2}{\frac{1}{2} RI_o^2} \text{ και τελικά, } Q = \frac{\omega_o L}{R}$$

## 6. Συμπεριφορά του κυκλώματος RLC – Εύρος ζώνης



Στο διπλανό σχήμα έχει αποδοθεί η μέση ισχύς  $\langle P \rangle$  σαν συνάρτηση της κυκλικής συχνότητας  $\omega$ . **Εύρος Ζώνης** (Band-Width) είναι η διαφορά  $\omega_2 - \omega_1$ , όπου  $\omega_2$  και  $\omega_1$  είναι οι δύο συχνότητες ημι-ισχύος.

Ισχύει:  $\langle P \rangle = RI_e^2$ , για κάθε συχνότητα  $\omega$  (ο δείκτης  $e$  δηλώνει ενεργές τιμές) όπου:

$$I_e = \frac{V_e}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (28)$$

Ειδικά στον συντονισμό, όπου η εμπέδηση  $Z=R$ , έχουμε

$$I_{e,\max} = \frac{V_e}{R}, \text{ οπότε } P_{\max} = RI_{e,\max}^2 = \frac{V_e^2}{R}$$

Η ισχύς όμως στις συχνότητες  $\omega_1, \omega_2$  είναι η μισή της μέ-

γιστης συνεπώς:

$$P_{ez} = RI_e^2 = \frac{RV_e^2}{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} = \frac{P_{\max}}{2} = \frac{V_e^2}{2R}$$

Από αυτή την τελευταία σχέση προκύπτει:

$$R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2 = 2R^2 \Rightarrow \omega L - \frac{1}{\omega C} = \pm R$$

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

**A.**

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = -R \Rightarrow \frac{1}{\omega C} > \omega L$$

Επειδή η χωρητική αντίσταση υπερτερεί της επαγωγικής, το κύκλωμα έχει: Χωρητική Συμπεριφορά

$$LC\omega^2 + RC\omega - 1 = 0 \quad (29)$$

$$\omega_1 = \frac{-RC + \sqrt{R^2C^2 + 4LC}}{2LC} \quad (31)$$

**B.**

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = +R \Rightarrow \omega L > \frac{1}{\omega C}$$

Επειδή η επαγωγική αντίσταση τώρα υπερτερεί της χωρητικής, το κύκλωμα έχει: Επαγωγική Συμπεριφορά

$$LC\omega^2 - RC\omega - 1 = 0 \quad (30)$$

$$\omega_2 = \frac{RC + \sqrt{R^2C^2 + 4LC}}{2LC} \quad (32)$$

Τότε:  $\omega_2 - \omega_1 = \frac{2RC}{2LC} = \frac{R}{L}$  (33), επειδή δε,  $Q = \frac{\omega_0 L}{R} \Rightarrow Q(\omega_2 - \omega_1) = \omega_0$

Τέλος ισχύει:  $\omega_1 \cdot \omega_2 = \omega_0^2$

## Πειραματική Διαδικασία

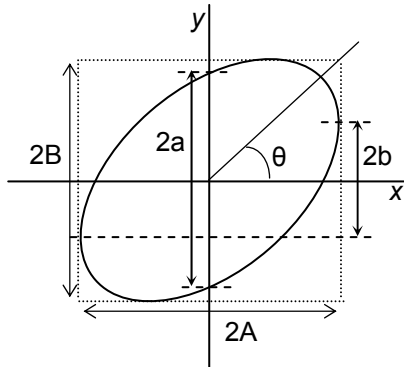
### 1. Εύρεση διαφοράς φάσεως

#### A. Σύνθεση ή επαλληλία καθέτων ταλαντώσεων

Έστω ότι έχουμε τις ταλαντώσεις, κατά τον άξονα X:  $x = A \sin \omega t$  (34)

Και κατά τον άξονα Y:  $y = B \sin(\omega t + \phi)$  (35)

Αν απαλείψουμε από αυτές τις σχέσεις τον χρόνο τότε θα καταλήξουμε στην σχέση:



(38)

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - \frac{2xy}{AB} \cos \phi = \sin^2 \phi \quad (36)$$

Αυτή είναι η εξίσωση ελλείψεως που έχει στραφεί ως προς τους κύριους άξονες της κατά γωνία  $\theta$  όπου

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2AB \cos \phi}{A^2 - B^2} \quad (37)$$

Η έλλειψη αυτή είναι εγγεγραμμένη σε ορθογώνιο πλευρών  $2A$  και  $2B$ .

Εάν στην εξίσωση της ελλείψεως θέσουμε  $x = 0$  θα έχουμε:

$$y_{(x=0)} = B \sin \phi \equiv a$$

την απόσταση δηλαδή όπου η έλλειψη τέμνει τον άξονα y την ονομάζουμε:

$$a = B \sin \phi (= y_{(x=0)}) \quad (39)$$

Εάν πάλι στην εξίσωση της ελλείψεως θέσουμε  $x = x_{\max}$  δηλαδή  $x = A$  τότε

$$y_{(x=\max)} = B \cos \phi \equiv b \quad (40)$$

την απόσταση δηλαδή από τον άξονα x όπου η έλλειψη εφάπτεται σε παράλληλη προς τον άξονα y την ονομάζουμε:

$$b = B \cos \phi (= y_{(x=\max)}) \quad (41)$$

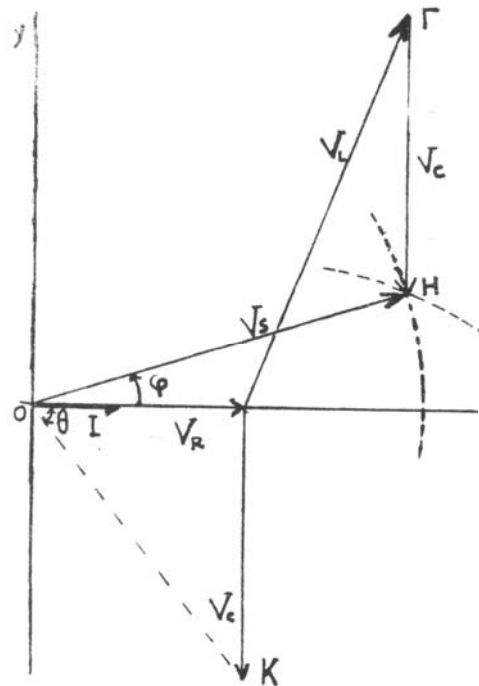
Από τις σχέσεις (40) και (41) έχουμε τελικά:

$$\tan \phi = \frac{a}{b} \quad (42)$$

#### B. Ανυσματικό Διάγραμμα τάσεων

Ας σχεδιάσουμε το ανυσματικό διάγραμμα των τάσεων σε ένα (πραγματικό) κύκλωμα LRC, όπου το πηνίο έχει και ωμική αντίσταση  $R_L$ .

Εάν στον x άξονα τοποθετήσουμε το ρεύμα  $I$  τότε η τάση  $V_R$  θα είναι συμφασική προς αυτό. Η τάση  $V_C$  θα είναι κάθετη προς την  $V_R$  και θα διευθύνεται προς τον αρνητικό y άξονα, ενώ η τάση  $V_L$  θα διευθύνεται προς τον θετικό y άξονα όχι όμως παράλληλως προς αυτόν λόγω του ότι το πηνίο δεν είναι ιδανικό. Το άθροισμα των επί μέρους τάσεων θα είναι βεβαίως η τάση της πηγής  $V_S$ . Ωστε το τετράπλευρο OΓHK είναι κατασκευάσιμο, ως εξής:



Από την αρχή **O** λαμβάνουμε τμήμα ευθείας ίσον με  $V_R$  (υπό κάποια κλίμακα) Στο άκρο της  $V_R$  φέρουμε κάθετο (παράλληλο προς τον αρνητικό  $y$ - άξονα) ίσον με  $V_C$  (σημείο **K**). Έπειτα χαράσσουμε τους κύκλους (**O**,  $V_S$ ) και (**K**,  $V_L$ ) οι οποίοι τέμνονται στο **H**.

(Η εύρεση περαιτέρω του σημείου **Γ** είναι εύκολη).

Ο τύπος του συνημίτονου στο τρίγωνο **OHK** δίνει

$$V_L^2 = V_S^2 + (V_R^2 + V_C^2) - 2V_C \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \cos(\varphi + \theta) \quad (43)$$

και από το ορθογώνιο τρίγωνο πλευρών  $V_R, V_C$

$$\cos \theta = \frac{V_R}{\sqrt{V_R^2 + V_C^2}} \quad (44)$$

Από αυτές τις σχέσεις, λύνοντας ως προς συνημίτονο και αντιστρέφοντας τις συναρτήσεις έχουμε:

$$\phi = \cos^{-1} \left\{ \frac{V_S^2 + V_R^2 + V_C^2 - V_L^2}{2V_S \sqrt{V_R^2 + V_C^2}} \right\} - \cos^{-1} \left\{ \frac{V_R}{\sqrt{V_R^2 + V_C^2}} \right\} \quad (45)$$

Η τελευταία σχέση μας δίνει την δυνατότητα να υπολογίσουμε την διαφορά φάσεως  $\phi$  εάν μετρήσουμε τις τάσεις  $V_S, V_R, V_C, V_L$  με ένα βολτόμετρο.

## 2. Μετρήσεις

### I) Εξοικείωση και μετρήσεις με τον παλμογράφο και την γεννήτρια (Βλέπε και παράρτημα Γ1)

α) Ελέγξτε την βαθμονόμηση του παλμογράφου με την βοήθεια τάσεων ελέγχου και τετραγωνικού παλμού.

β) Μετρήστε με την βοήθεια του παλμογράφου την τάση πρότυπης πηγής συνεχούς ρεύματος.

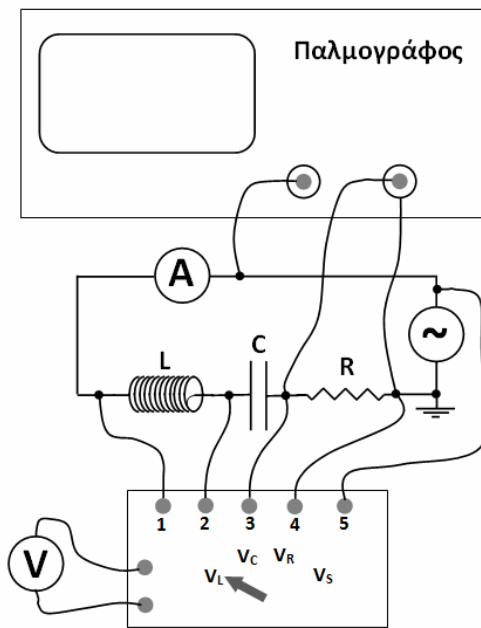
γ) Δώστε από την γεννήτρια ημιτονικό, τετραγωνικό και τριγωνικό παλμό τυχούσας συχνότητας και στάθμης ενίσχυσης (AMPL). Παρατηρήστε τους παλμούς στον παλμογράφο και υπολογίστε για κάθε έναν την συχνότητά του. Συγκρίνατε την συχνότητα που υπολογίσατε με αυτήν που δίνει η γεννήτρια.

δ) Στην περίπτωση του τετραγωνικού παρατηρήστε και δικαιολογήστε την μορφή της εικόνας στον παλμογράφο όταν παρεμβληθεί ένας πυκνωτής.

### II) Μελέτη Κυκλώματος RLC με την βοήθεια παλμογράφου

1) Πραγματοποιήστε το κύκλωμα του σχήματος, προσέχοντας να συνδέσετε τις γειώσεις των δύο καναλιών του παλμογράφου και της γεννήτριας μαζί.

2) Διαλέξτε τα μέρη του κυκλώματος σας ( $R, L, C$ ) και υπολογίστε που περιμένετε να έχετε συντονισμό. Στην συνέχεια συνδέστε την συνδεσμολογία σύμφωνα με το σχήμα Ρυθμίστε τους εξασθενητές και την βάση του χρόνου. Παρατηρήστε τις κυματομορφές στο κάθε κανάλι του παλμογράφου. Δείτε την ένδειξη του βολτομέτρου και συγκρίνετε την με αυτήν που δείχνει ο παλμογράφος. Τι παρατηρείτε; Κάντε το ίδιο και εξηγήστε με την ένδειξη του αμπερομέτρου. Θέστε τον παλμογράφο στην λειτουργία X-Y και ρυθμίστε πάλι τους εξασθενητές ώστε να έχετε μια καλή εικόνα στην οθόνη.



Ο μεταγωγός συνδέει το βολτόμετρο κάθε φορά (ανάλογα με την θέση του) με τα άκρα της πηγής ή με της αντίστασης ή με του πηνίου ή με του πυκνωτή.

**να της ελλείψεως στον παλμογράφο και να συγκριθούν οι τιμές αυτές με εκείνες των άλλων μετρήσεων.**

Τα αποτελέσματα και οι μετρήσεις να καταχωρηθούν σε πίνακα.

4) Περιγράψτε τι παρατηρείτε για την έλλειψη κατά την διάρκεια του πειράματος. Προσπαθήστε να περιγράψετε ποιοτικά τι συμβαίνει ακόμα και αν δεν αλλάζει η διαφορά φάσης παρά μόνο το πλάτος στο ένα κανάλι του παλμογράφου χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα που μας δίνουν τις καμπύλες Lissajous για τα διάφορα πλάτη και συχνότητες.

5) Υπολογίστε την εμπέδηση  $Z$ , την ωμική αντίσταση του πηνίου, την διαφορά φάσης  $\varphi$ , την μέση ισχύ  $\langle P \rangle$  και την κυκλική συχνότητα  $\omega$  για κάθε τιμή της συχνότητας  $f$ . Δώστε τα αποτελέσματα σε πίνακα με στήλες:  $f$ ,  $\omega$ ,  $V$ ,  $I$ ,  $Z$ ,  $\varphi$ ,  $\langle P \rangle$ . Κατασκευάστε τις γραφικές παραστάσεις  $I = f(\omega)$ ,  $\varphi = f(\omega)$ ,  $Z = f(\omega)$ ,  $\langle P \rangle = f(\omega)$  και σχολιάστε την μορφή τους.

6) Από  $\langle P \rangle = f(\omega)$  υπολογίστε το Εύρος Ζώνης (Bandwidth) και μετά υπολογίστε τον συντελεστή ποιότητας  $Q$ . Υπολογίστε την ολική αντίστασή του  $R_{ολ}$  και την αντίσταση του πηνίου  $R_L$ . Ακόμη υπολογίστε την χωρητικότητα  $C$  και την αυτεπαγωγή  $L$ .

3) Μεταβάλλοντας την συχνότητα της γεννήτριας συχνοτήτων βρείτε τον συντονισμό και σημειώστε τις τάσεις  $V_S$  (πηγής),  $V_R$  (αντίστασης),  $V_C$  (πυκνωτή) και  $V_L$  (πηνίου) και το ρεύμα του κυκλώματος  $I_{συντ}$ .

Έχοντας την γεννήτρια σε τάση  $V_S$  και ξεκινώντας από μία τιμή της συχνότητας μετρήστε την ένταση από το αμπερόμετρο και τα μεγέθη 2α και 2β. Διατηρώντας την τάση  $V_S$  σταθερή καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων μετρήστε για (οκτώ) διαφορετικές συχνότητες πριν το συντονισμό και για (οκτώ) διαφορετικές συχνότητες μετά συντονισμό τις τάσεις  $V_S$ ,  $V_R$ ,  $V_C$ ,  $V_L$  και το ρεύμα  $I$ . Υπολογίστε την διαφορά φάσης  $\varphi$ , για κάθε συχνότητα  $\omega$ . Ομοίως υπολογίστε την εμπέδηση  $Z$  και την (μέση) ισχύ  $P$ .

**Επίσης για (δύο) μετρήσεις πριν και για (δύο) μετρήσεις μετά τον συντονισμό να ευρεθεί η διαφορά φάσης από την εικόνα**

## Παράρτημα: Περιληπτική περιγραφή και τρόπος χρήσης του παλμογράφου

Ο παλμογράφος είναι ένα όργανο μετρήσεων το οποίο εμφανίζει στην οθόνη του την μεταβολή της τάσης συναρτήσει του χρόνου. Η οθόνη του παλμογράφου αποτελείται από μία λυχνία καθοδικών ακτινών (CRT) με κάθοδο παραγωγής ηλεκτρονίων, με ηλεκτρονικούς φανούς για την εστίαση της δέσμης, πλακίδια οριζόντιας και κατακόρυφης απόκλισης και άλλα βοηθητικά ηλεκτρόδια. Ο παλμογράφος διαθέτει επίσης ηλεκτρονικές μονάδες απαραίτητες για την χρήση του. Παρακάτω περιγράφονται οι κύριες από αυτές τις ηλεκτρονικές μονάδες (και με τυπικά χαρακτηριστικά).

α) **Περιοχή συχνοτήτων (BANDWIDTH):** Αυτή αναφέρεται στους δυο ενισχυτές εισόδου κατακόρυφης ενίσχυσης. Ο κάθε ενισχυτής δεν ενισχύει εξ' ίσου όλες τις συχνότητες του σήματος εισόδου, δηλαδή η απολαβή εξαρτάται και από την συχνότητα του σήματος ή των αρμονικών του έτσι ώστε οι ενισχυτές έχουν χαμηλότερη ενίσχυση στις πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές συχνότητες. Οι συχνότητες στις οποίες η απολαβή του σήματος πέφτει κατά 0,707 (3db) αποτελούν τα όρια της περιοχής συχνοτήτων. Οι συνήθεις παλμογράφοι έχουν περιοχή συχνοτήτων 10Hz – 10MHz. (ΣΗΜΕΙΩΣΗ: η περιοχή συχνοτήτων δεν έχει καμία σχέση με το *bandwidth* που αναφέρεται στην θεωρία)

β) **Ευαισθησία (SENSITIVITY):** Ύψιστη σημασία για την επιλογή ενός παλμογράφου έχει η ευαισθησία των κατακόρυφων ενισχυτών εισόδου. Για έναν παλμογράφο 20MHz πολύ καλή θεωρείται διεθνώς η ευαισθησία των 2 mV/cm. Αυτό σημαίνει ότι εάν εφαρμόσουμε στην είσοδο του παλμογράφου ένα ημιτονικό σήμα 20MHz με πλάτος 2mV θα πρέπει να έχει πλάτος 1cm στην οθόνη του παλμογράφου.

γ) **Σύζευξη εισόδου (INPUT COUPLING):** Συνήθως ο παλμογράφος έχει στην είσοδο κάθε ενισχυτή του έναν διακόπτη τριών θέσεων DC, AC και GROUND. Στην θέση DC μπορούμε να εφαρμόσουμε σήματα που έχουν μόνο συνεχή τάση ή σήματα μικτά με εναλλασσόμενη και συνεχή συνιστώσα τάσης. Στην θέση αυτή το σήμα εφαρμόζεται απ' ευθείας στην είσοδο του ενισχυτή. Στην θέση AC παρεμβάλλεται στην είσοδο του ενισχυτή ένας πυκνωτής και έτσι δεν επιτρέπεται τις συνεχείς τάσεις ή συνιστώσες να περάσουν. Στην θέση GROUND η είσοδος του παλμογράφου γειώνεται (απομονώνοντας συγχρόνως το σήμα).

δ) **Τρόποι παρουσιάσεως σημάτων (DISPLAY MODES):** Οι συνήθεις παλμογράφοι είναι παλμογράφοι δυο καναλιών (DUAL TRACES) δηλαδή παλμογράφοι που μπορούν να δεχτούν δυο σήματα. Έτσι υπάρχουν δυο κανάλια (CH1, CH2) κάθε ένα με έναν ενισχυτή. Το DISPLAY MODE αναφέρεται στις δυνατότητες παρουσιάσεως των σημάτων εισόδου του παλμογράφου. Στο ALTERNATE MODE η σάρωση της οθόνης από τα σήματα των δύο καναλιών εμφανίζονται εναλλακτικώς στην οθόνη, αλλά λόγω της αδράνειας των ματιών μας βλέπουμε και τα δυο κανάλια ταυτόχρονα. Στο CHOP MODE (CHOP) τα σήματα από τα δυο κανάλια εμφανίζονται ταυτόχρονα μέσω ενός συστήματος εναλλαγής της σάρωσης από το ένα κανάλι στο άλλο κατά την διάρκεια κάθε σάρωσης. Έτσι για σήματα με πολύ μεγάλη συχνότητα προτιμάται η επιλογή ALT. Τέλος στο X-Y MODE (X-Y) ο παλμογράφος συνθέτει τα δυο σήματα θέτοντας το CH1 στον άξονα Y και το CH2 στον άξονα X.

ε) **Βάση Χρόνου (TIME BASE):** Όταν ο παλμογράφος δεν λειτουργεί σε X-Y MODE (αυτή είναι και η συνήθης λειτουργία) τότε ο άξονας X είναι άξονας χρόνων· η βαθμονόμηση του επιτυγχάνεται με έναν περιστροφικό διακόπτη (τυπικές τιμές 0,5μs/cm – 0,2s/cm).

στ) **Σκανδαλισμός (TRIGGERING):** Ο σκανδαλισμός είναι, διαδικασία η οποία αρχίζει την λειτουργία της γεννήτριας βάσεως χρόνου έτσι, ώστε η οριζόντια απόκλιση της δέσμης να σαρώνει την οθόνη σε πλήρη συγχρονισμό με το σήμα εισόδου. Έτσι το σήμα παραμένει σταθερό και συνεχές. Συνήθως έχουμε δύο τύπους σκανδαλισμού, έναν αυτόματο (AUTO) (με συγχρονισμό με την είσοδο A ή B) και έναν εξωτερικό (EXTERNAL). Στην άσκηση θα χρησιμοποιηθεί μόνο ο αυτόματος.

ζ) **Έλεγχος διακριτών τμημάτων (CTC):** Ο διακόπτης αυτός χρησιμοποιείται, για έλεγχο αντιστάσεων, πυκνωτών, ολοκληρωμένων κυκλωμάτων κτλ. Ο διακόπτης πρέπει να βρίσκεται PANTA στη θέση OFF γιατί αλλιώς δημιουργεί παραπλανητικές εικόνες στον παλμογράφο.

η) Τα κυριότερα κουμπιά, πλήκτρα και διακόπτες (και σε συνδυασμό) ενός παλμογράφου είναι:

INTENSITY	Ρυθμίζει την ένταση της δέσμης
FOCUS	Ρυθμίζει την εστίαση της δέσμης.
TIME BASE	Διακόπτης βαθμονόμησης της βάσεως χρόνου
TIME BASE VARIABLE	Μικρορυθμίζει τη βάση χρόνου. Για την άσκηση θα πρέπει να είναι στραμμένος στη θέση cal.
SWEEP MAGNIFIER	Μεγεθύνει την σάρωση κατά n φορές
LEVEL	Ρυθμιστής στάθμης σκανδαλισμού. Περιστρέφεται αργά έως ότου αρχίσει η σάρωση.
AUTO/NORM	Ρυθμίζει τον τρόπο σκανδαλισμού. Θα πρέπει να βρίσκεται στην θέση AUTO
INT / EXT	Επιλέγει την πηγή από την οποία γίνεται ο σκανδαλισμός. Θα πρέπει να είναι στην θέση INT
CH I /CH II	Επιλέγει ως πηγή εσωτερικού σκανδαλισμού την είσοδο CH1 ή το CH2
SWP/ X-Y	Θέτει τον παλμογράφο σε λειτουργία X-Y (Mode).
HORIZONTAL POSITION	Ρυθμίζει την οριζόντια θέση της δέσμης.
CH I	Είσοδος σήματος του πρώτου καναλιού
CH II	Είσοδος σήματος του δευτέρου καναλιού
TRACE ROTATE	Ρυθμίζει το ίχνος της σάρωσης ώστε να είναι οριζόντιο.
CHI / CII ATTENUATOR	Επιλέγουν την ευαισθησία των κατακόρυφων ενισχυτών εισόδου για κάθε ένα από τα δυο κανάλια
DUAL / CH I	Στην θέση DUAL εμφανίζει και τα δύο σήματα στην οθόνη. Στην θέση CH1 εμφανίζει μόνο το σήμα του πρώτου καναλιού.
ALTERNATE / CHOP	Επιλέγει μέθοδο εμφάνισης των δυο σημάτων



## Άσκηση Δ4. Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

### Σκοπός της άσκησης

Όπως είναι γνωστό, τα φωτόνια (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) έχουν κυματικές ιδιότητες, είναι δηλαδή κύματα τα οποία συμβάλουν με τα γνωστά, από την κυματική, αποτελέσματα της συμβολής και περίθλασης. Επίσης όμως παρουσιάζουν ιδιότητες οι οποίες εξηγούνται μόνο αν θεωρήσουμε ότι τα φωτόνια είναι διακριτά σωματίδια· κλασικό παράδειγμα είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Ήδη από την αρχαιότητα, οι Έλληνες φιλόσοφοι θεωρούσαν ότι το φως αποτελείται από σωματίδια τα οποία εκπέμπονται από την «πηγή», παραγόμενα ή ανακλώμενα σε αυτή και φτάνοντας στο μάτι, τα παρατηρούμε. Ο Isaac Newton (τέλη του 17ου αι.), στηριζόμενος στην σωματιδιακή ιδιότητα τους φωτός, απέδειξε τους νόμους της ανάκλασης και διάθλασης. Την ίδια εποχή ο Christian Huygens και στις αρχές του 19ου αιώνα ο Tomas Young ανέτρεψαν αυτήν την εικόνα αποδεικνύοντας με τα φαινόμενα συμβολής και περίθλασης ότι το φως είναι κύμα. Στα μέσα δε του 19ου αιώνα ο James Clerk Maxwell απέδειξε ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Αρχές του 20ου αιώνα ο Max Planck, για να εξηγήσει την 'Ακτινοβολία του Μέλανος Σώματος' (Black Body Radiation) θεώρησε ότι τα μόρια απορροφούν και εκπέμπουν ενέργεια σε πολλαπλάσια μίας διακριτής ποσότητας ενέργειας, εισήγαγε την έννοια της κβαντισμένης ενέργειας, το quantum. Ο Albert Einstein, στηριζόμενος στην κβάντωση της ενέργειας την οποία διατύπωσε ο Planck, θεώρησε ότι το φως αποτελείται από σωματίδια, τα φωτόνια, και όρισε ότι η ενέργεια του φωτονίου δίνεται από την σχέση:

$$E = h \cdot f \quad (1)$$

όπου  $f$  είναι η συχνότητα του φωτονίου και  $h$  μία σταθερά, η σταθερά του Planck, η οποία ισούται με:  $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ . Η θεώρηση αυτή ενισχύθηκε με το φαινόμενο το οποίο περιγράφει την εκπομπή ηλεκτρονίων από την ύλη όταν προσπίπτει πάνω τους φως, το 'φωτοηλεκτρικό φαινόμενο', το οποίο εξηγείται όταν θεωρήσουμε ότι το φως είναι σωματίδιο. Παρατηρείται δε για συχνότητες των φωτονίων στο ορατό και στο υπεριώδες.

### Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο παρατηρείται ως εξής:

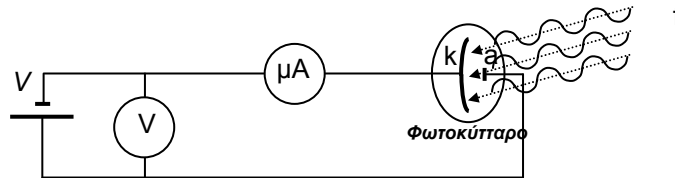
Για να 'φύγει' ένα ηλεκτρόνιο από την ύλη πρέπει να έχει ενέργεια τουλάχιστον μεγαλύτερη από μία ελάχιστη ενέργεια,  $E_k$ , η οποία ονομάζεται έργο εξαγωγής και η οποία απαιτείται ώστε το ηλεκτρόνιο να υπερνικήσει το ηλεκτρικό πεδίο το οποίο αναπτύσσεται όταν η ύλη φορτίζεται θετικά όταν αυτό το ηλεκτρόνιο φύγει από αυτήν και την αφήσει θετικά φορτισμένη, με δυναμικό  $V_0$ . Ισχύει:

$$E_k \equiv e \cdot V_0 \quad (2)$$

όπου  $e$  είναι το φορτίου του ηλεκτρονίου. Αυτή η ελάχιστη ενέργεια είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό (μόριο/άτομο του υλικού) και εξαρτάται από την θερμοκρασία του.

Αυτή η ενέργεια μπορεί να δοθεί στα ηλεκτρόνια, θερμαίνοντας την ύλη, θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων (thermionic electron emission), προσβάλλοντας την επιφάνεια ης ύλης με ηλεκτρόνια, δευτερεύουσα εκπομπή ηλεκτρονίων (secondary electron emission), φωτίζοντας την με φωτόνια με οπτικά μήκη κύματος ή υπεριώδη, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (photoelectric electron emission), κλπ. Στην περίπτωση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, τα ηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται τα ονομάζουμε φωτοηλεκτρόνια (ωστόσο δεν πρέπει να ξεχνούμε ότι είναι ηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται όταν απορροφήσουν ενέργεια από φως).

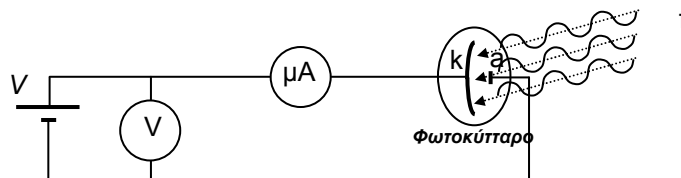
Για να μελετήσουμε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιούμε το φωτοκύτταρο. Αποτελείται από υάλινο σωλήνα (ή από χαλαζία, αν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε υπεριώδη ακτινοβολία) μέσα στον οποίον έχουμε δύο ηλεκτρόδια, εκ των οποίων το ένα φωτίζεται και ονομάζεται φωτοκάθοδος, το άλλο δε ονομάζεται άνοδος. Στον σωλήνα έχουμε κενό. Αν το υλικό βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία, φωτίσουμε την φωτοκάθοδο και εφαρμόσουμε διαφορά δυναμικού μεταξύ φωτοκαθόδου  $k$  και ανόδου  $a$ , έτσι ώστε η φωτοκάθοδος να είναι αρνητικότερη της ανόδου (ορθή πόλωση, σχήμα 1), τα φωτοηλεκτρόνια θα 'φύγουν' από την φωτοκάθοδο και θα κινηθούν προς την άνοδο προκαλώντας ένα ρεύμα  $I$ .



Σχήμα 1. Ορθή πόλωση φωτοκύτταρου

Αυτό συμβαίνει γιατί, όταν φωτόνια, με την κατάλληλη ενέργεια (συχνότητα) προσπέσουν στην επιφάνεια της φωτοκαθόδου του φωτοκύτταρου και δώσουν ενέργεια σε αριθμό ηλεκτρονίων της φωτοκαθόδου και τα οποία εκπέμπονται από αυτήν. Με την κατάλληλη διαφορά δυναμικού τα ηλεκτρόνια αυτά συλλέγονται· το ρεύμα το οποίο θα διαρρέει το κύκλωμα γενικά εξαρτάται από την ένταση του φωτός, το υλικό της επιφάνειας της φωτοκαθόδου  $k$  (και από άλλους παράγοντες).

Αν εφαρμόσουμε στο φωτοκύτταρο αντίστροφη πόλωση, δηλαδή διαφορά δυναμικού μεταξύ φωτοκαθόδου  $k$  και ανόδου  $a$ , έτσι ώστε η φωτοκάθοδος να είναι θετικότερη της ανόδου (σχήμα 2), φωτοηλεκτρόνια θα 'φεύγουν' από την φωτοκάθοδο και κινούνται προς την άνοδο προκαλώντας ένα πολύ μικρό ρεύμα  $I$  έως ότου εφαρμόσουμε μία συγκεκριμένη οριακή διαφορά δυναμικού· για κάθε τιμή της τάσεως μεγαλύτερη από την οριακή διαφορά δυναμικού, θα έχουμε μηδενικό ρεύμα. Πειραματικά παρατηρούμε ότι η αυτή η διαφορά δυναμικού είναι σταθερά και εξαρτάται μόνο από το υλικό της φωτοκαθόδου.



Σχήμα 2. Αντίστροφη πόλωση φωτοκύτταρου

## Εξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

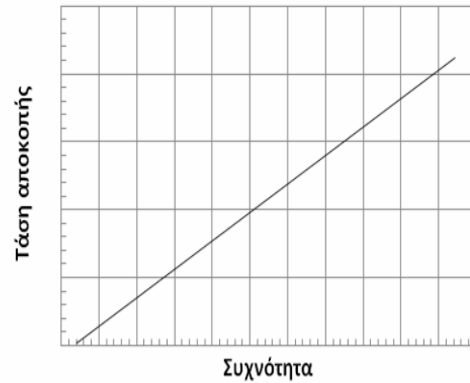
Σύμφωνα με την κυματική θεωρία του φωτός, φως οποιασδήποτε συχνότητας (ενέργειας) και αρκούντως ισχυρό θα προκαλούσε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή εκπομπή ηλεκτρονίων από την φωτοκάθοδο. Αυτό όμως δεν παρατηρείται. Ηλεκτρόνια εκπέμπονται από την φωτοκάθοδο με φωτόνια τα οποία έχουν μία ελάχιστη οριακή συχνότητα ή μεγαλύτερη. Επίσης αν εφαρμόσουμε στο φωτοκύτταρο μία αντίστροφη διαφορά δυναμικού (αντίστροφη πόλωση) όπως αναφέραμε πιο πάνω, ώστε να εμποδίσουμε την ροή των ηλεκτρονίων στο κύκλωμα και να μηδενιστεί το ρεύμα, η τάση αυτή δεν θα ήταν σταθερή αλλά θα εξαρτάτο από την ένταση της φωτεινής ροής.

Τα παραπάνω εξηγούνται απλά με την θεώρηση της σωματιδιακής φύσης του φωτός. Μόνο φωτόνια τα οποία έχουν ενέργεια  $E \equiv h \cdot \nu \geq E_k$  συγκρουόμενα με ηλεκτρόνια του υλικού δίνουν αρκετή ενέργεια ώστε να 'φύγει' από την φωτοκάθοδο και να κινηθεί με ταχύτητα  $v$ , η οποία υπολογίζεται από την σχέση:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = E - E_k \quad (3)$$

Αν  $E < E_k$  το ηλεκτρόνιο δεν θα απορροφήσει την ενέργεια και δεν θα 'φύγει' από την φωτοκάθοδο. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη η ένταση του φωτός, δηλαδή όσο μεγαλύτερη η ροή των φωτονίων, τόσο ισχυρότερο θα είναι και το ρεύμα  $I$  (με ορθή πόλωση, Σχ.1) το οποίο διαρρέει το κύκλωμα (περισσότερα φωτόνια, συνεπώς περισσότερα φωτοηλεκτρόνια), αρκεί  $E > E_k$ .

Αν τώρα εφαρμόσουμε αντίστροφη πόλωση (σχήμα 2), και φωτίσουμε την φωτοκάθοδο,  $k$ , με φωτόνια ενέργειας  $E > E_k$ , θα παρατηρήσουμε ότι με μία συγκεκριμένη διαφορά δυναμικού  $V_{sv}$ , το ρεύμα μηδενίζεται, δηλαδή τα ηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται από την φωτοκάθοδο με ταχύτητα  $v$  και ενέργεια  $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = E - E_k$ , δεν φτάνουν στην άνοδο γιατί έχουν ενέργεια μικρότερη ή ίση από αυτή που απαιτείται και η οποία ισούται με  $e \cdot V_{sv}$ . Αυτή η διαφορά δυναμικού ονομάζεται 'δυναμικό αποκοπής' (stopping voltage) και εξαρτάται από την συχνότητα  $\nu$  των φωτονίων (σχήμα 3).

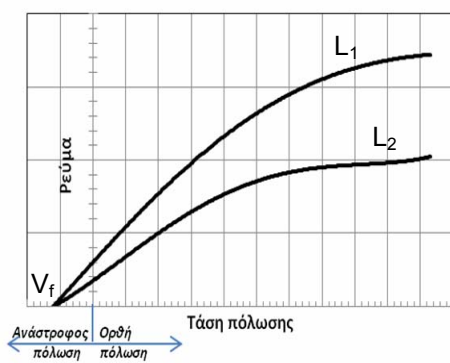


Σχήμα 3. Τάση αποκοπής  $V_{sv}$  σε συνάρτηση την συχνότητας των προσπιπτόντων φωτονίων

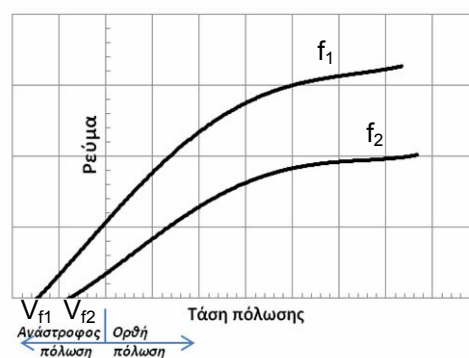
Προφανώς, αν η τάση  $V$  γίνει μεγαλύτερη, δηλαδή  $V > V_{sv}$ , το ρεύμα θα παραμείνει μηδέν, ανεξάρτητα από την ένταση της φωτεινής ροής.

Αν μετρήσουμε το ρεύμα σε συνάρτηση της τάσης, με φωτεινή δέσμη διαφορετικής έντασης  $L$  (φωτεινής ροής) αλλά της ίδιας συχνότητας θα παρατηρήσουμε ότι για την ίδια τάση πόλωσης το ρεύμα είναι ανάλογο της φωτεινής έντασης, σχήμα 4. Ωστόσο παρατηρούμε ότι οι καμπύλες  $I = f(V)$  έχουν την ίδια τάση αποκοπής· αυτό αναμένεται διότι όπως είδαμε παραπάνω, η τάση αποκοπής εξαρτάται μόνο από την συχνότητα της φωτεινής ακτινοβολίας (και του υλικού της φωτοκαθόδου). Επίσης παρατηρούμε ότι οι καμπύλες φτάνουν σε κόρο και το ρεύμα σταθεροποιείται σε τιμή ανάλογο της φωτεινής ροής· αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά από κάποια τάση όλα τα φωτοηλεκτρόνια συλλέγονται στην άνοδο και συνεπώς το ρεύμα σταθεροποιείται και μπορεί να μεταβληθεί αν μεταβάλουμε την φωτεινή ροή (τον αριθμό των φωτονίων).

Αν μετρήσουμε το ρεύμα σε συνάρτηση της τάσης, με φωτεινή δέσμη με φωτόνια διαφορετικής συχνότητας αλλά της ίδιας έντασης  $L$  (φωτεινής ροής) θα παρατηρήσουμε ότι για την ίδια τάση πόλωσης το ρεύμα είναι ανάλογο της φωτεινής έντασης, σχήμα 5. Ωστόσο παρατηρούμε ότι οι καμπύλες  $I = f(V)$  έχουν διαφορετική τάση αποκοπής· αυτό αναμένεται διότι όπως είδαμε πα-



Σχήμα 4. Το ρεύμα του φωτοκύτταρου σε συνάρτηση της τάσης πόλωσης για δύο φωτεινές δέσμες ίδιας συχνότητας  $f$  αλλά διαφορετικής έντασης,  $L_1$  και  $L_2$ , με  $L_1 > L_2$



Σχήμα 5. Το ρεύμα του φωτοκύτταρου σε συνάρτηση της τάσης πόλωσης για δύο φωτεινές δέσμες διαφορετικής συχνότητας  $f_1$  και  $f_2$ , με  $f_1 > f_2$

ραπάνω, η τάση αποκοπής εξαρτάται από την συχνότητα της φωτεινής ακτινοβολίας (και του υλικού της φωτοκαθόδου), συνεπώς αν έχουμε διαφορετικές συχνότητες θα έχουμε και διαφορετική τάση αποκοπής. Επίσης παρατηρούμε ότι οι καμπύλες φτάνουν σε κόρο και το ρεύμα

σταθεροποιείται σε τιμή ανάλογο της συχνότητας· αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά από κάποια τάση όλα τα φωτοηλεκτρόνια συλλέγονται στην άνοδο και συνεπώς το ρεύμα σταθεροποιείται και μπορεί να μεταβληθεί αν μεταβάλουμε την φωτεινή ροή (τον αριθμό των φωτονίων).

### Εφαρμογές του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο βασίζονται πολλές εφαρμογές μεταξύ των οποίων:

- Το φωτοκύτταρο το οποίο χρησιμοποιείται στα φωτόμετρα, φωτοδιακόπτες κλπ.
- Η φωτοαντίσταση (φωτοαγωγομότητα) και φωτοδίοδος, στα οποία στηρίζονται οι αισθητήρες των φωτογραφικών μηχανών, φωτοανιχνευτές κλπ.
- Η φωτοβολταϊκή πηγή ρεύματος με την οποία παράγεται ηλεκτρική ισχύς από την φωτεινή ισχύ
- Ο φωτοπολλαπλασιαστής, με τον οποίο ανιχνεύουμε ελάχιστα φωτόνια και χρησιμοποιούνται ευρέως στην έρευνα, στην ιατρική, στα κιάλια νυκτός κλπ.

### Πειραματική διαδικασία

Από τις εξισώσεις (1) και (3) έχουμε:

$$h \cdot f = e \cdot V_{sv} + E_k \Rightarrow V_{sv} = \frac{h}{e} \cdot f - \frac{E_k}{e} \quad (4)$$

Υπολογίζουμε το δυναμικό αποκοπής για διάφορες συχνότητες των φωτονίων και σχεδιάζουμε την συνάρτηση  $V_{sv} = f(f)$ , σχήμα 3, η οποία όπως φαίνεται από την εξίσωση 4 πρέπει να είναι ευθεία. Από την κλίση αυτής της ευθείας υπολογίζουμε την σταθερά του Planck,  $h$ .

Η ευθεία τέμνει τον άξονα των συχνοτήτων στην συχνότητα  $f_0$ . Τότε το  $V_{sv}$  ισούται εξ ορισμού με μηδέν και η εξίσωση (4) γίνεται:

$$V_{sv} = 0 = \frac{h}{e} \cdot f_0 - \frac{E_k}{e} \Rightarrow f_0 = \frac{E_k}{h} \quad (5)$$

Η συχνότητα  $f_0$  είναι η οριακή συχνότητα για να έχουμε φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, χαρακτηρίζει το υλικό της φωτοκαθόδου και εξαρτάται και από την θερμοκρασία· αν η συχνότητα των φωτονίων είναι μεγαλύτερη από την  $f_0$  θα παρατηρήσουμε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, αν είναι μικρότερη, όχι.

Στην άσκηση αυτή θα σχεδιάσουμε, παρατηρήσουμε, μελετήσουμε και υπολογίσουμε τα παρακάτω:

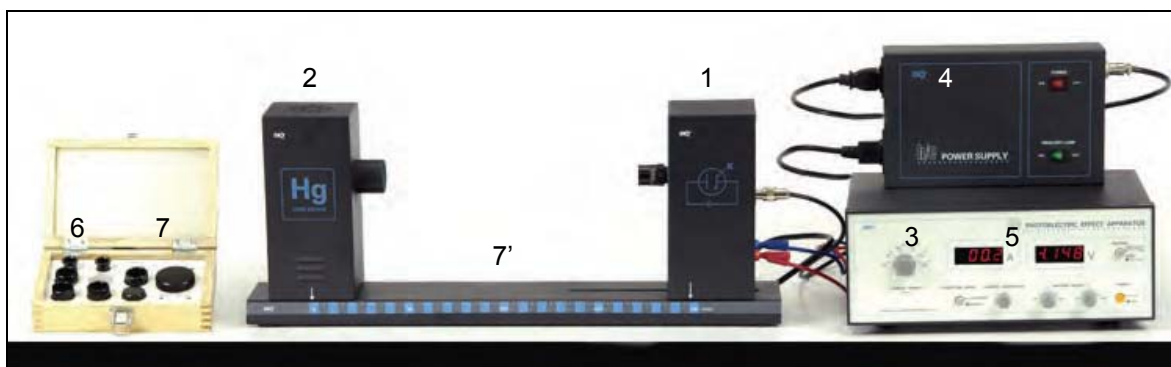
- την συνάρτηση  $V_{sv} = \frac{h}{e} \cdot f - \frac{E_k}{e}$
- την επίδραση της έντασης του φωτός  $L$  (της φωτεινής ροής)
- την  $f_0$
- την σταθερά του Planck,  $h$
- σχεδιάζοντας την  $I=f(V)$  για σταθερό  $f$  αλλά διαφορετικές φωτεινές εντάσεις  $L$ , θα μελετήσουμε την σχέση  $I$ ,  $V$  και  $L$  και θα υπολογίσουμε το δυναμικό  $V_f$  στο οποίο το ρεύμα μηδενίζεται. Σχολιάζουμε.
- σχεδιάζοντας την  $I=f(V)$  για σταθερή φωτεινή ένταση  $L$  αλλά διαφορετικές συχνότητες  $f$ , θα μελετήσουμε την σχέση  $I$ ,  $V$  και  $f$  και θα υπολογίσουμε τα δυναμικά  $V_f$  στα οποία το ρεύμα μηδενίζεται. Σχολιάζουμε.
- Συγκρίνουμε την  $V_f$ ,  $V_L$  και  $V_0$ , την οποίαν υπολογίζουμε από την εξίσωση (2)
- από την τελευταία σχέση υπολογίζουμε την  $f_0$  και την συγκρίνουμε με αυτή που προσδιορίσαμε στην αρχή. Σχολιάζουμε.

## Πειραματική διαδικασία

Στην άσκηση αυτή, χρησιμοποιούμε δύο διαφορετικές συσκευές, σχήμα 6, συσκευή της PASCO (χρήση από την ομάδα Δ6Α), και σχήμα 7, συσκευή της PHYWE (χρήση από την ομάδα Δ6Β), των οποίων όμως η αρχή λειτουργίας είναι πανομοιότυπη.

Ουσιαστικά αποτελούνται από ένα φωτοκύτταρο (1), μία πηγή φωτός (2), ενισχυτή ρεύματος (3), τροφοδοτικά (4) και σχετικά βολτόμετρα και αμπερόμετρα (5). Η συχνότητα επιλέγεται με σειρά οπτικών φίλτρων (6) και η ένταση του φωτός (φωτεινή ροή) ρυθμίζεται με κατάλληλα διαφράγματα (7) και/ή αλλάζοντας την απόσταση μεταξύ πηγής και φωτοκυττάρου (7').

### Δ5Α: Χρήση συσκευής PASCO



Σχήμα 6. Διάταξη μελέτης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου με συσκευή της PASCO

#### A. Μέτρηση σταθερά Planck και προσδιορισμός οριακής συχνότητας

1. Καλύπτουμε το παράθυρο της πηγής και της φωτοδιόδου με τα κατάλληλα καλύμματα.
2. Κλείνουμε τον διακόπτη στο τροφοδοτικό και στον ενισχυτή και ανάβουμε την λάμπα υδραργύρου με τον σχετικό διακόπτη. **Αναμένοντας 20 min ώστε να αποκατασταθεί θερμική ισορροπία στην λάμπα** προχωρούμε στα 3 και 4.
3. Στον ενισχυτή, ρυθμίζουμε τον διακόπτη τάσης **'VOLTAGE'** στην επιλογή **[-2 — 0 V]**, και στον περιστροφικό διακόπτη περιοχής ρεύματος **'CURRENT RANGES'** στην επιλογή **[10<sup>-13</sup>]**.
4. Ρυθμίζουμε στον μηδέν τον ενισχυτή ρεύματος ακολουθώντας της εξής διαδικασία:
  - Αποσυνδέουμε τα καλώδια που είναι συνδεδεμένα στις υποδοχές [A], [K] και [▼] (γείωση) από το πίσω μέρος του ενισχυτή.
  - Πιέζουμε τον διακόπτη [PHOTOTUBE SIGNAL] στην θέση [CALIBRATION].
  - Ρυθμίζουμε με τον περιστροφικό διακόπτη [CURRENT CALIBRATION] έως ότου το ρεύμα στο αμπερόμετρο του ενισχυτή δείξει μηδέν.
  - Πιέζουμε τον διακόπτη [PHOTOTUBE SIGNAL] στην θέση [Measure].
  - Συνδέουμε τα καλώδια στις σχετικές υποδοχές [A], [K] και [▼] (γείωση) από το πίσω μέρος του ενισχυτή.
5. Έχοντας το κάλυμμα της πηγής στο παράθυρο της πηγής, αφαιρούμε το κάλυμμα από το παράθυρο της φωτοδιόδου και τοποθετούμε το διάφραγμα με διάμετρο 4mm και το φίλτρο των 365 nm στο ίδιο παράθυρο.
6. Εφ' όσον έχουν περάσει 20min από το άναμα της λυχνίας, αφαιρούμε το κάλυμμα από το παράθυρο της πηγής. Θα παρατηρήσουμε στο αμπερόμετρο το ρεύμα το οποίο διαρρέει την φωτοδιόδο, επειδή φωτίζεται από την πηγή δια μέσου του φίλτρου των 365 nm.

7. Περιστρέφουμε τον διακόπτη [VOLTAGE ADJUST] έως ότου μηδενιστεί το ρεύμα το οποίο παρατηρούμε με το αμπερόμετρο και διαβάζουμε το δυναμικό αποκοπής στο βολτόμετρο.
8. Καταγράφουμε το δυναμικό αποκοπής  $V_{SV}$  και το μήκος κύματος  $\lambda$  του φίλτρου σε πίνακα.
9. **Καλύπτουμε το παράθυρο της πηγής** και επαναλαμβάνουμε τα 5, 6, 7 και 8 για άλλα τρία μήκη κύματος
10. **Καλύπτουμε το παράθυρο της πηγής** και επαναλαμβάνουμε τα 5, 6, 7, 8 και 9 για άλλα δύο διαφράγματα.
11. Υπολογίζουμε τις σχετικές συχνότητες των φίλτρων τα οποία έχουμε χρησιμοποιήσει και σχεδιάζουμε την συνάρτηση Δυναμικό αποκοπής ( $V_{SV}$ ) = f (  $f$  ) για κάθε διάφραγμα σε κοινό διάγραμμα, (η ταχύτητα του φωτός είναι  $c = 2.998 \times 10^8$  m/s).
12. Υπολογίζουμε τις κλίσεις  $k$ , για κάθε διάφραγμα, και από αυτές την σταθερά του Planck, (το φορτίο ηλεκτρονίου είναι  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  C), μαζί με τα σφάλματα της.
13. Από τον τύπο  $\left| \frac{k - k_0}{k_0} \right| \cdot 100$  , υπολογίζουμε την επί τοις εκατό διαφορά από την θεωρητική τιμή,  $h_0 = 6.626 \times 10^{-34}$  J s.

## **B. Μελέτη χαρακτηριστικών καμπύλων με σταθερή συχνότητα και διαφορετικές εντάσεις**

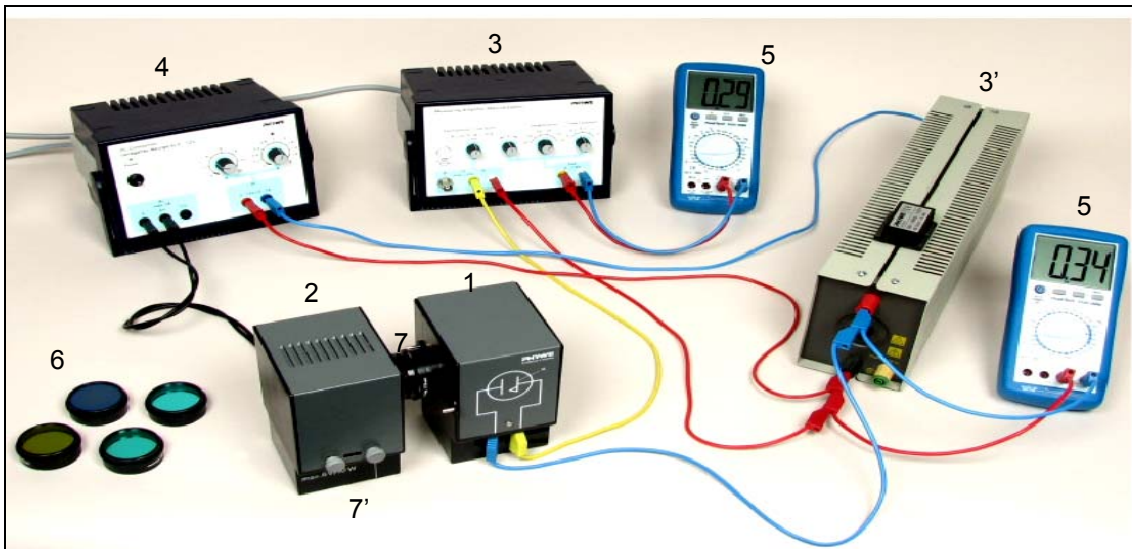
1. Καλύπτουμε το παράθυρο της πηγής και της φωτοδιόδου με τα κατάλληλα καλύμματα.
2. Στον ενισχυτή, ρυθμίζουμε τον διακόπτη τάσης 'VOLTAGE' στην επιλογή [-2 — +30 V], και στον περιστροφικό διακόπτη περιοχής ρεύματος 'CURRENT RANGES' στην επιλογή [ $10^{-11}$ ].
4. Επαναλαμβάνουμε το A.4, αν χρειάζεται.
5. **Έχοντας το κάλυμμα της πηγής στο παράθυρο της πηγής**, αφαιρούμε το κάλυμμα από το παράθυρο της φωτοδιόδου και τοποθετούμε το διάφραγμα με διάμετρο 2mm και το φίλτρο των 436 nm στο ίδιο παράθυρο.
6. Περιστρέφουμε τον διακόπτη [VOLTAGE ADJUST] έως ότου μηδενιστεί το ρεύμα το οποίο παρατηρούμε με το αμπερόμετρο και διαβάζουμε την τάση στο βολτόμετρο.
7. Αλλάζοντας την τάση  $V$  με βήμα περίπου 1V, μετράμε το ρεύμα  $I$  για μερικές τιμές και καταγράφουμε τα αποτελέσματα σε πίνακα.
8. **Καλύπτουμε το παράθυρο της πηγής** και επαναλαμβάνουμε τα 5, 6 και 8 για άλλα δύο διαφράγματα.
9. Σχεδιάζουμε τις τρεις συναρτήσεις  $I = f(V)$  σε κοινό διάγραμμα και σχολιάζουμε.

## **Γ. Μελέτη χαρακτηριστικών καμπύλων με διαφορετικές συχνότητες**

1. Καλύπτουμε το παράθυρο της πηγής και της φωτοδιόδου με τα κατάλληλα καλύμματα.
2. Στον ενισχυτή, ρυθμίζουμε τον διακόπτη τάσης 'VOLTAGE' στην επιλογή [-2 — +30 V], και στον περιστροφικό διακόπτη περιοχής ρεύματος 'CURRENT RANGES' στην επιλογή [ $10^{-11}$ ].
4. Επαναλαμβάνουμε το A.4, αν χρειάζεται.
5. **Έχοντας το κάλυμμα της πηγής στο παράθυρο της πηγής**, αφαιρούμε το κάλυμμα από το παράθυρο της φωτοδιόδου και τοποθετούμε το διάφραγμα με διάμετρο 4mm και το φίλτρο των 436 nm στο ίδιο παράθυρο.
6. Περιστρέφουμε τον διακόπτη [VOLTAGE ADJUST] έως ότου μηδενιστεί το ρεύμα το οποίο παρατηρούμε με το αμπερόμετρο και διαβάζουμε την τάση στο βολτόμετρο.
7. Αλλάζοντας την τάση  $V$  με βήμα περίπου 1V, μετράμε το ρεύμα  $I$  για μερικές τιμές και καταγράφουμε τα αποτελέσματα σε πίνακα.

8. Καλύπτουμε το παράθυρο της πηγής και επαναλαμβάνουμε τα 5, 6 και 8 για άλλα δύο άλλα μήκη κύματος (546 nm και 577 nm).
9. Σχεδιάζουμε τις τρεις συναρτήσεις  $I = f(V)$  σε κοινό διάγραμμα και σχολιάζουμε.
10. Σβήνουμε την λυχνία και μετά το τροφοδοτικό.

### Δ5B. Χρήση συσκευής PHYWE



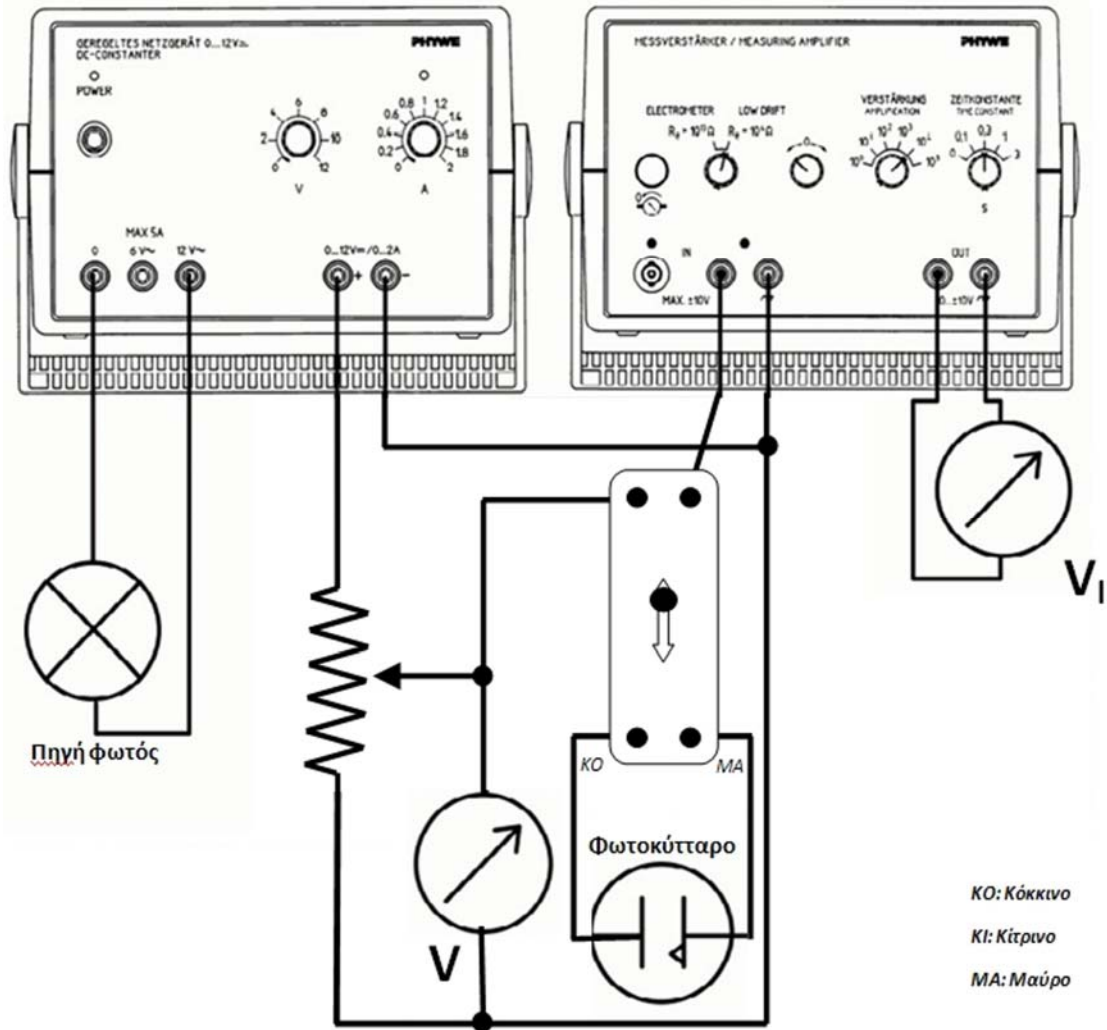
Σχήμα 6. Διάταξη μελέτης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου με συσκευή της PHYWE

#### Α. Μέτρηση σταθερά Planck και προσδιορισμός οριακής συχνότητας

Παρατηρούμε κατ αρχήν ότι η έξοδος του ενισχυτή ρεύματος είναι ένα βολτόμετρο· το ρεύμα  $I$  το οποίο διαρρέει την φωτοδίοδο σε Ampere (A), ισούται με την ένδειξη αυτού του βολτόμετρου του ενισχυτή,  $V_I$  (σε Volt), διαιρεμένη με τον συντελεστή ενίσχυσης  $10^n$  και με την εσωτερική αντίσταση του ενισχυτή, η οποία είναι  $10\,000\ \Omega$ . Έτσι, με ενίσχυση  $[10^4]$ , αν  $V_I = 1V$ , το ρεύμα  $I$  ισούται με:  $I = 1V / 10^4 / 10000\ \Omega = 1 \times 10^{-8} A \equiv 10nA$

1. Καλύπτουμε το παράθυρο της φωτοδίοδου με το συρταρωτό κάλυμμα.
2. Κλείνουμε τον διακόπτη στο τροφοδοτικό και στον ενισχυτή (σχήμα 7)..
3. Στον ενισχυτή, επιλέγουμε με τον πρώτο περιστροφικό διακόπτη την θέση [LOW DRIFT], με τον τρίτο περιστροφικό διακόπτη την ενίσχυση  $[10^4]$  και με τον τέταρτο περιστροφικό διακόπτη την σταθερά χρόνου  $[0.3\ s]$ .
4. Ρυθμίζουμε στον μηδέν τον ενισχυτή ρεύματος ακολουθώντας της εξής διαδικασία:
  - Αποσυνδέουμε το καλώδιο που είναι συνδεδεμένο στην υποδοχή [IN].
  - Ρυθμίζουμε με τον δεύτερο (από αριστερά) περιστροφικό διακόπτη  $[\leftarrow 0 \rightarrow]$  ωστόσο στο βολτόμετρο του ενισχυτή, η τάση  $V_I$ , η οποία είναι ανάλογος του ρεύματος το οποίο διαρρέει την φωτοδίοδο, δείξει μηδέν.
  - Συνδέουμε το καλώδιο στην σχετική υποδοχή [IN].
5. Στο τροφοδοτικό, ρυθμίζουμε την τάση του ποτενσιόμετρου με τον αριστερό περιστροφικό διακόπτη στα  $[3\ V]$  και τον αριστερό περιστροφικό διακόπτη στα  $[1\ A]$ . Θέτουμε τον διακόπτη πώλωσης στην θέση [ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΣ ΠΟΛΩΣΗ].

6. Τοποθετούμε το φίλτρο των 365 nm στο παράθυρο της φωτοδιόδου και τοποθετούμε την πηγή απέναντι από την φωτοδιόδο και στην θέση 1, όπως στην εικόνα. Ανοίγουμε πλήρως το διάφραγμα της φωτοδιόδου.
7. Θα παρατηρήσουμε στο βολτόμετρο του ενισχυτή, η τάση  $V_I$ , η οποία είναι ανάλογος του ρεύματος το οποίο διαρρέει την φωτοδιόδο, είναι διάφορος του μηδενός επειδή φωτίζεται από την πηγή δια μέσου του φίλτρου των 365 nm. Ρυθμίζουμε το ποτενσιόμετρο έως ότου μηδενιστεί το ρεύμα (δηλαδή η τάση  $V_I$ ) το οποίο παρατηρούμε με το βολτόμετρο του ενισχυτή και διαβάζουμε το δυναμικό αποκοπής  $V_{SV}$  στο βολτόμετρο του φωτοκυττάρου.
8. Καταγράφουμε το δυναμικό αποκοπής  $V_{SV}$  και το μήκος κύματος  $\lambda$  του φίλτρου σε πίνακα.
9. Επαναλαμβάνουμε τα 6, 7 και 8 για άλλα τρία μήκη κύματος
10. Επαναλαμβάνουμε τα 6, 7, 8 και 9 για άλλες δύο εντάσεις φωτός (αποστάσεις πηγής-φωτοδιόδου)
11. Υπολογίζουμε τις σχετικές συχνότητες των φίλτρων τα οποία έχουμε χρησιμοποιήσει και σχεδιάζουμε την συνάρτηση Δυναμικό αποκοπής ( $V_{SV}$ ) =  $f(f)$  για κάθε διάφραγμα σε κοινό διάγραμμα, (η ταχύτητα του φωτός είναι  $c = 2.998 \times 10^8$  m/s).
12. Υπολογίζουμε τις κλίσεις  $k$ , για κάθε διάφραγμα, και από αυτές την σταθερά του Planck, (το φορτίο ηλεκτρονίου είναι  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  C), μαζί με τα σφάλματα της.



Σχήμα 7. Κύκλωμα διάταξη μελέτης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου με συσκευή της PHYWE



13. Από τον τύπο  $\left| \frac{h\nu - \phi_0}{h\nu_0} \right| \cdot 100$ , υπολογίζουμε την επί τοις εκατό διαφορά από την θεωρητική τιμή,  $h_0 = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$ .

### **B. Μελέτη χαρακτηριστικών καμπύλων με σταθερή συχνότητα και διαφορετικές εντάσεις**

1. Καλύπτουμε το παράθυρο της φωτοδιόδου με το συρταρωτό κάλυμμα.
2. Επαναλαμβάνουμε τα Α.2...5, αν χρειάζεται.
3. Θέτουμε τον διακόπτη πόλωσης στην θέση [ΟΡΘΗ ΠΟΛΩΣΗ].
4. Τοποθετούμε το φίλτρο των 365 nm στο παράθυρο της φωτοδιόδου και τοποθετούμε την πηγή απέναντι από την φωτοδίοδο και στην θέση 1, όπως στην εικόνα. Ανοίγουμε πλήρως το διάφραγμα της φωτοδιόδου.
5. Θα παρατηρήσουμε στο βολτόμετρο του ενισχυτή, η τάση  $V_1$ , η οποία είναι ανάλογος του ρεύματος  $I$  το οποίο διαρρέει την φωτοδίοδο, είναι διάφορος του μηδενός επειδή φωτίζεται από την πηγή δια μέσου του φίλτρου των 365 nm. Ρυθμίζοντας το ποτενσιόμετρο παίρνουμε μετρήσεις του ρεύματος  $I$  σαν συνάρτηση της τάσεως  $V$  στο βολτόμετρο του φωτοκυτάρου με βήματα 0.2 V περίπου.
6. Επαναλαμβάνουμε τα 4 και 5 για άλλες δύο εντάσεις φωτός (αποστάσεις πηγής-φωτοδιόδου).
7. Λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες τάσεις αποκοπής, σχεδιάζουμε τις συναρτήσεις  $I = f(V)$  για κάθε ένταση, σε κοινό διάγραμμα (βλ. σχήμα 4) και σχολιάζουμε.

### **Γ. Μελέτη χαρακτηριστικών καμπύλων με διαφορετικές συχνότητες**

1. Καλύπτουμε το παράθυρο της φωτοδιόδου με το συρταρωτό κάλυμμα.
2. Επαναλαμβάνουμε τα Α.2...5, αν χρειάζεται.
3. Θέτουμε τον διακόπτη πόλωσης στην θέση [ΟΡΘΗ ΠΟΛΩΣΗ].
4. Τοποθετούμε το φίλτρο των 365 nm στο παράθυρο της φωτοδιόδου και τοποθετούμε την πηγή απέναντι από την φωτοδίοδο και στην θέση 2, όπως στην εικόνα. Ανοίγουμε πλήρως το διάφραγμα της φωτοδιόδου.
5. Θα παρατηρήσουμε στο βολτόμετρο του ενισχυτή, η τάση  $V_1$ , η οποία είναι ανάλογος του ρεύματος το οποίο διαρρέει την φωτοδίοδο, είναι διάφορος του μηδενός επειδή φωτίζεται από την πηγή δια μέσου του φίλτρου των 365 nm. Ρυθμίζοντας το ποτενσιόμετρο παίρνουμε μετρήσεις του ρεύματος  $I$  σαν συνάρτηση της τάσεως  $V$  στο βολτόμετρο του φωτοκυτάρου με βήματα 0.2 V περίπου.
6. Επαναλαμβάνουμε τα 4 και 5 για άλλα δύο μήκη κύματος.
7. Λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες τάσεις αποκοπής, σχεδιάζουμε τις συναρτήσεις  $I = f(V)$  για κάθε μήκος κύματος, σε κοινό διάγραμμα (βλ. σχήμα 5) και σχολιάζουμε.

## Άσκηση Δ5. Χαρακτηριστικές καμπύλες μετασχηματιστή

Απαραίτητες γνώσεις: Serway Ηλεκτρομαγνητισμός Κεφ. 31.  
Κ. Αλεξόπουλος Ηλεκτρισμός §119.

### Θεωρητικό Μέρος

#### 1. Αμοιβαία επαγωγή

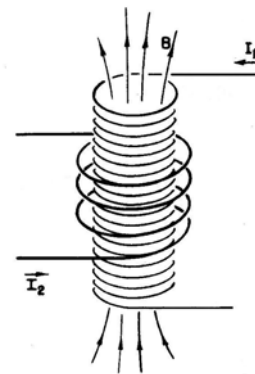
Θεωρούμε δύο πηνία, μήκους  $l_1$  με κοινό άξονα, όπως στο Σχήμα 1. Το πρώτο πηνίο διαρρέεται από ρεύμα. Όλη η μαγνητική ροή η οποία παράγεται λόγω του ρεύματος διαρρέει το πηνίο 2.

Αν το ρεύμα  $I_1$  μεταβάλλεται με ρυθμό  $\frac{dI_1}{dt}$ , τότε η μεταβολή της

μαγνητικής ροής είναι:  $\frac{d\Phi}{dt} = \mu_0 \frac{N_1}{l_1} \cdot \frac{dI_1}{dt}$

Αντίστοιχα στο πηνίο 2 επάγεται τάση (ηλεκτρεγερτική δύναμη,

ΗΕΔ):  $E_2 = -\mu_0 \frac{N_2 N_1}{l_1} \cdot \frac{dI_1}{dt}$ .



Σχήμα 1

Αν μέσα από τα πηνία υπάρχει πυρήνας από κάποιο υλικό με διαπερατότητα  $\mu$ , υπολογίζουμε την ΗΕΔ με τον ίδιο τρόπο, πολλαπλασιάζοντας τον τελευταίο τύπο με  $\mu$ .

Στο παράδειγμα του σχήματος υποθέσαμε ότι όλη η παραγόμενη, από το πρώτο πηνίο, μαγνητική ροή περνά από το διάκενο του δεύτερου πηνίου. Στη πράξη αυτό δεν συμβαίνει πάντοτε αλλά λόγω γεωμετρίας ή λόγω σκέδασης των μαγνητικών γραμμών η σύζευξη είναι μικρότερη από 100%.

Την επαγόμενη ΗΕΔ μπορούμε να την εκφράσουμε:

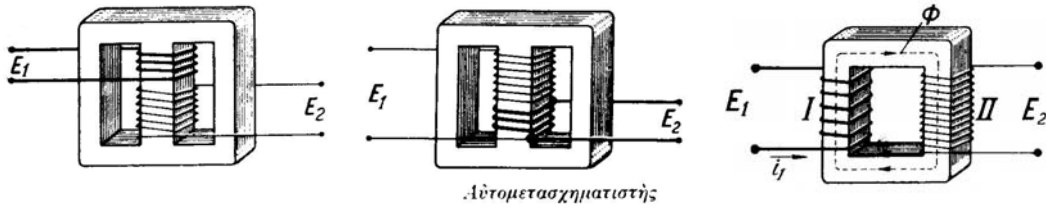
$$E_2 = -L_m \frac{dI_1}{dt}$$

Ο συντελεστής  $L_m$  ονομάζεται συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δύο πηνίων, την γεωμετρία και τις μαγνητικές ιδιότητες του πυρήνα.

Το φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής χρησιμοποιείται στην λειτουργία του **μετασχηματιστή**. Αν εφαρμόσουμε μία **εναλλασσόμενη τάση** στο πρώτο πηνίο, στα άκρα του δεύτερου πηνίου επάγεται μία διαφορετική τάση.

#### 2. Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή

Ο μετασχηματιστής αποτελείται από δύο πηνία και ένα πυρήνα από μαλακό σίδηρο ή φερίτη. Το πηνίο που συνδέεται με την εναλλασσόμενη πηγή ονομάζεται πρωτεύον, το πηνίο που συνδέεται προς τον καταναλωτή ονομάζεται δευτερεύον. Χαρακτηριστικές κατασκευές μετασχηματιστών βλέπουμε στο σχήμα 2.



Σχ. 2 Διάφορες διατάξεις πηνίων μετασχηματιστή

Στο πρωτεύον εφαρμόζουμε εναλλασσόμενη τάση<sup>2</sup>  $V_1 = V_{01} \sqrt{2} \sin(\omega t)$ . Το πρωτεύον διαρρέεται από ρεύμα το οποίο δημιουργεί μαγνητική ροή που μεταβάλλεται με ρυθμό:

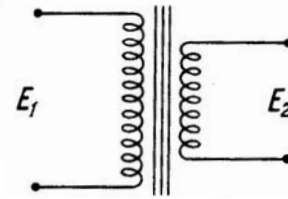
$$\frac{d\Phi}{dt} = \mu \frac{N_1}{l_1} \cdot \frac{dI_1}{dt} \quad (1)$$

Στην ιδανική περίπτωση θεωρούμε ότι όλη η παραγόμενη μαγνητική ροή παραμένει μέσα στον πυρήνα και διαπερνά το δευτερεύον. Λόγω της μεταβαλλόμενης μαγνητικής

ροής επάγονται οι ΗΕΔ  $E_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$  (2) στο πρωτεύον

και  $E_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$  (3) στο δευτερεύον.

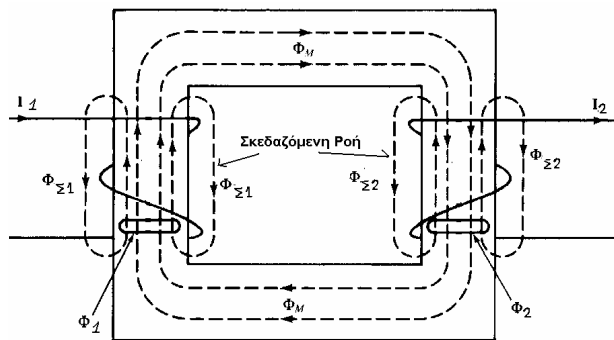
Ο λόγος  $n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$  (4) ονομάζεται λόγος μετασχηματισμού.



Σχ. 3 Σύμβολο του μετασχηματιστή

Αν το  $n$  είναι μεγαλύτερο από τη μονάδα έχουμε **ανύψωση** τάσης στο δευτερεύον και αν είναι **μικρότερο** υποβιβασμό. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν συνήθως την σχέση  $V_1/V_2 = n$ , η οποία όμως ισχύει μόνο κατά προσέγγιση, εξαιτίας των ωμικών αντιστάσεων και των απωλειών του μετασχηματιστή.

Επίσης η τάση  $E_2$  στο δευτερεύον, από την (3), έχει διαφορά φάσης  $180^\circ$  με την τάση  $V_1$  που εφαρμόζουμε στο πρωτεύον.



Σχ. 4. Μαγνητική Ροή μέσα στον μετασχηματιστή

Μέχρι στιγμής έχουμε υποθέσει ότι η όλη μαγνητική ροή που παράγεται από το πρωτεύον περνά μέσα από το δευτερεύον. Στην πράξη, όπως αναφέραμε, αυτό δεν συμβαίνει, λόγω της **σκέδασης των μαγνητικών γραμμών**.

Σκεδαζόμενη ροή είναι αυτή που κλείνει την διαδρομή της χωρίς να περάσει από το άλλο πηνίο (Σχ. 4,  $\Phi_{\Sigma 1}$  και  $\Phi_{\Sigma 2}$ ). Δηλαδή από την παραγόμενη ροή το μεγαλύτερο ποσοστό περνά μέσα από τον πυρήνα και στο άλλο πηνίο και «ενώνει» το πρωτεύον με το δευτερεύον.

Ένα μικρό ποσοστό σκεδάζεται και δημιουργεί απώλειες. Η σκέδαση συμπεριφέρεται σαν επαγωγή και στρέφει την φάση ανάμεσα στην τάση και το ρεύμα. Για αυτό, στο κύκλωμα του μετασχηματιστή την παριστάνουμε σαν **επαγωγή σκέδασης**.

<sup>2</sup> Στους παρακάτω υπολογισμούς χρησιμοποιούμε τις ενεργές τιμές των εναλλασσόμενων μεγεθών και όπου χρειάζεται το πλάτος, πολλαπλασιάζουμε επί  $\sqrt{2}$ .

## 2.1 Δευτερεύον πηνίο ανοικτό ή «λειτουργία εν κενώ»

Όταν το δευτερεύον είναι ανοικτό, στο πρωτεύον αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ επα-

$$\text{γωγής: } E_1 = - \frac{d\Phi}{dt} N_1 \quad (1)$$

και η τάση στο κύκλωμα γίνεται  $V_1 + E_1 = 0$  (2).

Η επαγόμενη ΗΕΔ έχει διαφορά φάσης  $180^\circ$  με την εφαρμοζόμενη τάση  $V_1$ , σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz. Η τάση αυτή ονομάζεται *αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη*. Αντίστοιχα το ρεύμα που περνά από το πρωτεύον είναι  $I_1 = 0$ .

Υπολογισμός μαγνητικής ροής: Από τις (1) και (2) έχω:

$$V_{1,\varepsilon} \sqrt{2} \sin(\omega t) - \frac{d\Phi}{dt} N_1 = 0 \Rightarrow \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{V_{1,\varepsilon} \sqrt{2}}{N_1} \sin(\omega t) \Rightarrow \Phi = - \frac{V_{1,\varepsilon} \sqrt{2}}{\omega N_1} \cos(\omega t) \quad (3)$$

Στην πραγματικότητα υπάρχουν απώλειες ισχύος στον πυρήνα, και έτσι το πρωτεύον διαρρέεται από μικρό ρεύμα που ονομάζεται ρεύμα διέγερσης.

## 2.2. Ρεύμα διέγερσης

Το ρεύμα διέγερσης χωρίζεται σε δύο συνιστώσες: στο ρεύμα μαγνήτισης  $I_M$  και στο ρεύμα απωλειών  $I_A$  (Σχ. 5). Το ρεύμα μαγνήτισης δημιουργεί την μαγνήτιση του πυρήνα και επειδή έχει διαφορά φάσης  $90^\circ$  με την τάση, δεν καταναλώνει ισχύ (ονομάζεται *αβατική* συνιστώσα). Οι απώλειες στον πυρήνα οφείλονται στα δημιουργούμενα *δυναρεύματα* ή *ρεύματα Foucault*<sup>3</sup> και στη *μαγνητική υστέρηση* του πυρήνα. (βλ. άσκηση 6).

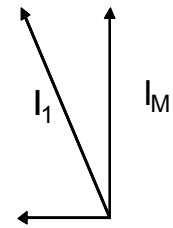
Τελικά από τα ρεύματα αυτά έχουμε παραγωγή θερμότητας στον πυρήνα (η συνιστώσα  $I_A$  ονομάζεται *βατική*).

Στη μέτρηση με το δευτερεύον ανοικτό προσδιορίζουμε τις δύο συνιστώσες του ρεύματος διέγερσης.

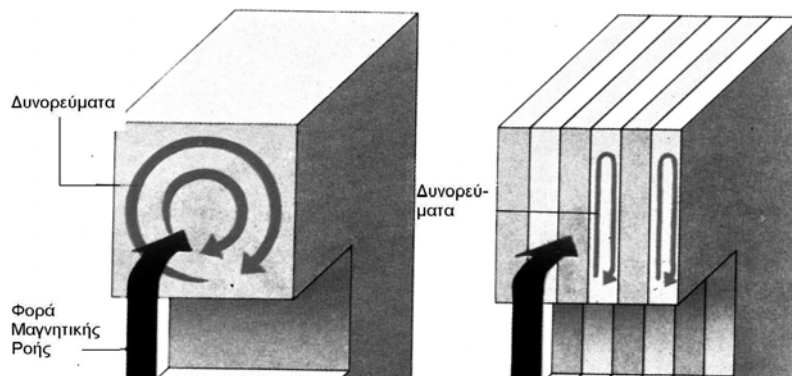
$$P_A = I_1 V_1 \cos \theta \Rightarrow \cos \theta = \frac{P_A}{I_1 V_1}$$

$$I_A = I_1 \cos \theta \quad (1)$$

$$I_M = I_1 \sin \theta \quad (2)$$



Σχ.5.



Σχ. 6 Ρεύματα Foucault στον πυρήνα μετασχηματιστή.

<sup>3</sup> Τα ρεύματα Foucault δημιουργούνται στο εσωτερικό του πυρήνα όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διαπερνά τον πυρήνα (ή γενικά, έναν αγωγό). Η φορά τους είναι τέτοια ώστε να εμποδίζουν την μεταβολή της μαγνητικής ροής. Εξ αιτίας της ωμικής αντίστασης του πυρήνα, παράγεται θερμότητα στον πυρήνα.

Ο πυρήνας κατασκευάζεται από σιδερένια ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους με σκοπό να περιορίζονται τα ρεύματα Foucault. Συνήθως χρησιμοποιούνται ειδικά κράματα σιδήρου που παρουσιάζουν μικρή υστέρηση και μικρή ειδική αγωγιμότητα. Επίσης χρησιμοποιούνται πυρήνες από φερίτη που έχουν μεγάλη ειδική αντίσταση και καλή απόδοση σε υψηλές συχνότητες. Οι απώλειες εξαρτώνται από την ποιότητα του σιδήρου (υστέρηση) και κυρίως τον αριθμό και την ποιότητα των ενώσεων των ελασμάτων (δημιουργούνται ασυνέχειες) που σχηματίζουν τον πυρήνα.

Οι απώλειες λόγω ρευμάτων Foucault και μαγνητικής υστέρησης, εξαρτώνται από το πλάτος του μαγνητικού πεδίου μέσα στον πυρήνα, το οποίο με την σειρά του, εξαρτάται από την μαγνητική ροή που κυκλοφορεί στον πυρήνα. Όμως από την 1.2.1 (3) προκύπτει ότι αν η τάση και η συχνότητα του δικτύου είναι σταθερές, τότε και το πλάτος της μαγνητικής ροής είναι σταθερό. Άρα οι απώλειες αυτές είναι σταθερές και ανεξάρτητες από το ρεύμα, για σταθερές συνθήκες λειτουργίας του μετασχηματιστή.

### 2.3 Λειτουργία υπό φορτίο

Αν στο δευτερεύον συνδέσουμε καταναλωτή με ωμική αντίσταση  $R_L$  τότε διαρρέεται από ρεύμα  $I_2$ , το οποίο δημιουργεί στο πυρήνα μαγνητική ροή  $\Phi'$ . Η φορά της ροής αυτής είναι πάντοτε αντίθετη προς τη φορά της  $\Phi$  και στο πρωτεύον επάγεται ΗΕΔ:

$$E_1 = - \frac{d(\Phi - \Phi')}{dt} \quad (1)$$

Όμως το άθροισμα  $V_1 + E_1$  είναι διαφορετικό από το μηδέν, άρα το δευτερεύον θα διαρρέεται από ρεύμα  $I_1$  που αποκαθιστά την ροή στην αρχική της τιμή.

Το σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η μαγνητική ροή όπως υπολογίστηκε στο 1.2.1 εξαρτάται μόνον από την τάση  $V_1$  (η συχνότητα του δικτύου είναι σταθερή και ίση με **50 Hz**).

Για να υπολογίσω τη σχέση ανάμεσα στα ρεύματα θεωρώ ότι η ισχύς που καταναλώνεται στο δευτερεύον είναι ίση με την ισχύ που καταναλώνεται στο πρωτεύον (ιδανικός μετασχηματιστής).

Εδώ τα  $I$  και  $V$  είναι οι ενεργές τιμές.

$$N_1 = N_2 \Rightarrow I_1 V_1 = I_2 V_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (2)$$

Δηλαδή ο λόγος των ρευμάτων είναι αντίστροφος προς τον λόγο των τάσεων. Επίσης μπορούμε να αποδείξουμε εύκολα ότι αν ο καταναλωτής περιέχει χωρητική ή επαγωγική εμπέδηση και το ρεύμα στο δευτερεύον στρέφεται κατά γωνία  $\phi$ , το ρεύμα στο πρωτεύον στρέφεται κατά την ίδια γωνία.

$$\phi_1 = \phi_2$$

Στον πραγματικό μετασχηματιστή, η σκέδαση της μαγνητικής ροής εμφανίζεται σαν αυτεπαγωγή και στρέφει την φάση.

Αν η εμπέδηση του καταναλωτή είναι  $Z_L$  από το πρωτεύον φαίνεται σαν  $n^2 Z_L$ . Δηλαδή:

$$Z_L' = n^2 Z_L$$

Δηλαδή ο μετασχηματιστής μετασχηματίζει και την εμπέδηση. Έτσι προκύπτει μια άλλη χρήση του μετασχηματιστή, να προσαρμόζει την εμπέδηση σε γραμμές μεταφοράς, κυκλώματα υψηλών συχνοτήτων κ.α.

### 2.4 Απώλειες ισχύος με μεγάλα ρεύματα

Έχουμε ήδη μιλήσει για τις απώλειες στον πυρήνα, οι οποίες όμως δεν εξαρτώνται από το ρεύμα. Οι απώλειες που εξαρτώνται από την ένταση του ρεύματος οφείλονται στις παρακάτω αιτίες:

- Οι ωμικές απώλειες στους αγωγούς των πηνίων ( $I^2R$ ).
- Η σκεδαζόμενη μαγνητική ροή. Επειδή τα πηνία έχουν σημαντικό όγκο, μέρος της σκεδαζόμενης ροής περνά μέσα από την μάζα των πηνίων και δημιουργεί ρεύματα Foucault, που ελαττώνουν την τάση στα πηνία.

Τα παραπάνω φαινόμενα γίνονται σημαντικά αν το ρεύμα είναι μεγάλο. Στη περίπτωση αυτή, οι απώλειες στον πυρήνα θεωρούνται μικρές και μπορούμε να τις αγνοήσουμε.

Στις μετρήσεις υπό φορτίο υπολογίζουμε το **συντελεστή απόδοσης** σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

$$a = \frac{P_2}{P_1} \quad (3)$$

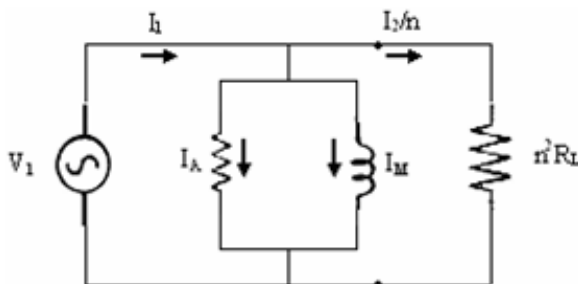
Από το διάγραμμα του συντελεστή απόδοσης (σχ.10), ξεχωρίζουμε μια περιοχή που ο συντελεστής είναι κατά προσέγγιση σταθερός ενώ πέφτει σημαντικά για μεγάλη τιμή του ρεύματος.

### 3. Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή

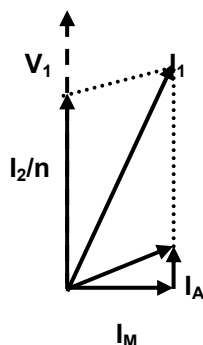
Τα κυκλώματα του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι ηλεκτρικά ανεξάρτητα μεταξύ τους δηλαδή οι αγωγοί δεν συνδέονται μεταξύ τους. Η σύνδεση γίνεται μαγνητικά δηλαδή με τη σύζευξη της μαγνητικής ροής που περνά από τα δύο πηνία.

Για να μπορέσουμε χρησιμοποιήσουμε τους κανόνες των κυκλωμάτων για να μελετήσουμε το κύκλωμα του μετασχηματιστή, φτιάχνουμε ένα ισοδύναμο κύκλωμα.

Στην περίπτωση μετασχηματιστή με λόγο σπειρών 1:1, μπορώ να θεωρήσω ότι ενώνω τα άκρα των περιελίξεων και ο μεσαίος κλάδος παριστάνει το ρεύμα απωλειών και ρεύμα μαγνήτισης του πυρήνα (Σχ.7).



Σχ.7. Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή με λόγο  $n$



Σχ.8 Στροφή φάσης για μικρά ρεύματα

Στα παραδείγματα παρακάτω θεωρούμε ότι το φορτίο στο δευτερεύον είναι ωμική αντίσταση και δεν στρέφει τη φάση.

Αν ο μετασχηματιστής έχει λόγο  $n$  τότε μπορώ να τον αντικαταστήσω με ένα μετασχηματιστή 1:1 ο οποίος έχει την ίδια μάζα αγωγού περιέλιξης και το ίδιο μέγεθος πηνίου. Η τάση στο δευτερεύον θα γίνει ίση με  $nE_2$ . Για να έχω την ίδια ισχύ στο δευτερεύον θα αντικαταστήσω το  $I_2$  με το  $I_2' = I_2/n$  και αντίστοιχα η  $R_2' = n^2R_2$  και  $Z_2' = n^2Z_2$ . Οι ισοδύναμες τιμές που γράψαμε, αναφέρονται ως προς το πρωτεύον. Από τα μεγέθη του πρωτεύοντος, μπορούμε να υπολογίσουμε τιμές που αναφέρονται στο δευτερεύον.

Στη συνέχεια μπορούμε να προσθέσουμε τις αντιστάσεις και αυτεπαγωγές που αντιστοιχούν στον πραγματικό μετασχηματιστή, κάνοντας τις αντίστοιχες μετατροπές.

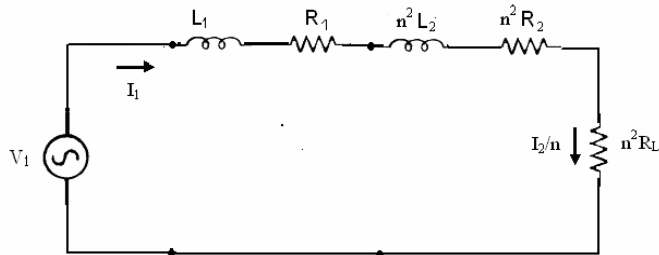
Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το διάγραμμα για να υπολογίσουμε το ρεύμα στο πρωτεύον. Φτιάχνουμε το διάγραμμα των διανυσμάτων του ρεύματος στον κόμβο Α. Κάνουμε τους υπολογισμούς για τα πλάτη και τις διαφορές φάσης.

### 3.1. Μικρό ρεύμα δευτερεύοντος

Αν το ρεύμα  $I_2$  είναι μικρό, το διάγραμμα έχει την μορφή (Σχ.8). Θεωρούμε ότι η πτώση τάσης λόγω της αντίστασης των πηνίων είναι αμελητέα. Το ρεύμα μαγνήτισης στρέφεται το διάνυσμα  $I_1$  κατά γωνία  $\phi$ . Άρα ο συντελεστής ισχύος γίνεται μικρότερος από τη μονάδα ( $\cos\phi < 1$ ).

### 3.2. Μεγάλο ρεύμα δευτερεύοντος

Όταν το ρεύμα στο δευτερεύον είναι μεγάλο θεωρούμε, ότι το ρεύμα μαγνήτισης είναι μικρό και παραλείπουμε τον εσωτερικό κλάδο του κυκλώματος. Όμως η σκέδαση των δυναμικών γραμμών συμπεριφέρεται σαν εμπέδηση  $L_A$ .



Σχ. 9. Ισοδύναμο κύκλωμα για μεγάλα ρεύματα

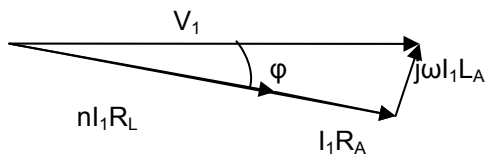
Το αποτέλεσμα είναι να στρέφεται το διάνυσμα της τάσης κατά γωνία  $\phi$  και αντίστοιχα να ελαττώνεται ο συντελεστής ισχύος. Επίσης γίνονται σημαντικές οι απώλειες λόγω των ωμικών αντιστάσεων των πηνίων. Η αντίσταση  $R_A$  είναι η συνολική αντίσταση των πηνίων. Εδώ θεωρούμε ότι το  $I_2/n$  είναι ίσο κατά προσέγγιση με το  $I_1$ .

$R_A = R_1 + n^2 R_2$                       Ισοδύναμη Ωμική Αντίσταση

$L_A = L_1 + n^2 L_2$                     Ισοδύναμη Αυτεπαγωγή Σκέδασης

$R_1, R_2$                                     Ωμική αντίσταση πρωτεύοντος & δευτερεύοντος

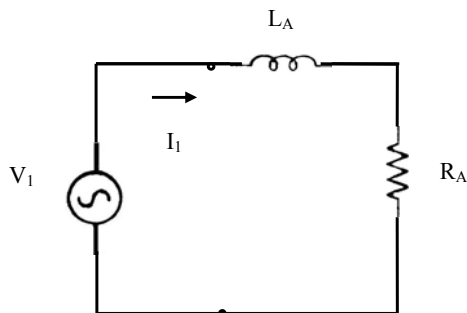
Η αντίσταση απωλειών  $R_A$ , είναι ίση με την αντίσταση του πρωτεύοντος  $R_1$  συν την ισοδύναμη αντίσταση  $n^2 R_2$  του δευτερεύοντος.



Στο (Σχ. 10) βλέπουμε τη στροφή της φάσης που προκαλείται από την σκέδαση των μαγνητικών γραμμών και κατά συνέπεια την ελάττωση του συντελεστή ισχύος.

Σχ.10. Στροφή φάσης που προκαλείται από την σκέδαση

### 3.3. Δευτερεύον βραχυκυκλωμένο



Σχ.10. Στροφή φάσης που προκαλείται από την σκέδαση

Για μετασχηματιστή με λόγο  $n$  κάνουμε την αντικατάσταση της παραγράφου 1. Θεωρώ ότι το ρεύμα μαγνήτισης είναι μικρό σε σχέση με το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Επίσης ισχύει όπως στο προηγούμενο ότι  $I_1 = I_2/n$ . Έτσι το ισοδύναμο κύκλωμα γίνεται όπως το (Σχ.11).

Στο πρωτεύον αναπτύσσεται τάση:  $V_1 = I_1 (R_A + jL_A)$

Η εμπέδηση (σύνθετη αντίσταση):  $Z = R_A + jL_A$

$R_A = R_1 + n^2 R_2$ : Συνολική Ωμική αντίσταση

$R_1, R_2$ : Ωμική πρωτεύοντος και δευτερεύοντος

$L_A = L_1 + n^2 L_2$ : Η αυτεπαγωγή που οφείλεται στη ροή που σκεδάζεται (διαφεύγει)

Η ισχύς που καταναλώνεται στην περίπτωση αυτή οφείλεται αποκλειστικά στις απώλειες ισχύος. Από τις μετρήσεις με το πηνίο βραχυκυκλωμένο μπορούμε να υπολογίσουμε την εμπέδηση του μετασχηματιστή, τις αντιστάσεις απωλειών και την αυτεπαγωγή σκέδασης.

$$|Z| = \frac{V_1}{I_1} = \frac{V_1}{I_2 / n}$$

Αν η ισχύς που καταναλίσκεται είναι  $P_A$  τότε:

$$R_A = \frac{P_A}{I_1^2} = \frac{P_A}{I_2^2 / n^2} \quad \text{και} \quad L_A = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{|Z|^2 - R_A^2}$$

Μας ενδιαφέρουν οι ποσότητες αυτές κυρίως για το ρεύμα κανονικής λειτουργίας δηλαδή το ρεύμα που αντιστοιχεί στην βέλτιστη λειτουργία, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Οι απώλειες που οφείλονται στην σκέδαση των μαγνητικών γραμμών εξαρτώνται από το ρεύμα που διαρρέει τα πηνία και όχι από την τάση.

(Το ρεύμα κανονικής λειτουργίας το γράφει ο μετασχηματιστής ή πιο σωστά το υπολογίζουμε από το διάγραμμα του συντελεστή απόδοσης. Είναι η τιμή που ο συντελεστής απόδοσης είναι μέγιστος.)

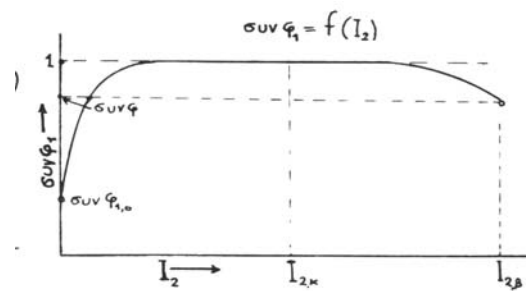
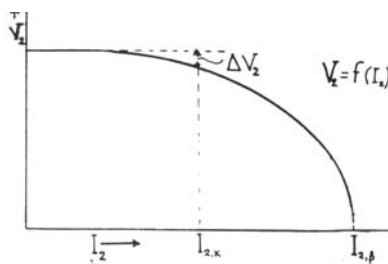
Επίσης στη συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα που θα περάσει αν βραχυκυκλωθεί το δευτερεύον σε κανονική τάση λειτουργίας. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του συστήματος προστασίας του μετασχηματιστή.

### 3.4. Χαρακτηριστικές καμπύλες

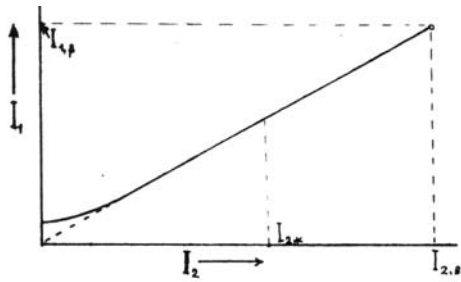
Στα σχήματα 12α, 12β, 12γ φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του μετασχηματιστή, με την προϋπόθεση ότι η  $V_1$  διατηρείται σταθερή.

Το **ρεύμα βραχυκύκλωσης**  $I_{2\beta}$  προκύπτει από την παράγραφο 2.1.3 και αν πάρουμε τα μέτρα των μιγαδικών αριθμών:

$$I_{2\beta} = \frac{V_1}{n} \cdot \frac{1}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L_\sigma^2}} \quad \text{και επίσης έχουμε: } I_{1\beta} = \frac{I_{2\beta}}{n}$$







Σχ.12γ.  $I_1=f(I_2)$

Η σχέση  $I_1 = f(I_2)$  έχει γραμμική συμπεριφορά για μεγάλα ρεύματα, ενώ για μικρά ρεύματα αποκλίνει από την γραμμικότητα και καταλήγει για  $I_2 = 0$  στο ρεύμα  $I_{1,0} \text{ συν} \phi_{1,0}$  το οποίο είναι το ισοδύναμο ρεύμα απωλειών του πυρήνα  $I_\pi$ .

**1.3.5. Χαρακτηριστικές απωλειών και απόδοσης**

Οι απώλειες ισχύος  $P_x$  στα χαλκίνα πηνία είναι:

$$P_x = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = \left\{ \frac{R_1}{n^2} + R_2 \right\} I_2^2 = R I_2^2$$

Οι απώλειες  $P_\pi$  στον πυρήνα είναι πρακτικά ανεξάρτητες από το ρεύμα δευτερεύοντος  $I_2$ . Καθορίζονται από την βατική συνιστώσα  $I_\pi$  του ρεύματος  $I_{1,0}$  εν κενώ για το οποίο οι ωμικές απώλειες  $P_x$  είναι πολύ μικρότερες του  $P_\pi$ .

Η απόδοση του μετασχηματιστή είναι:  $a = \frac{P_2}{P_1}$

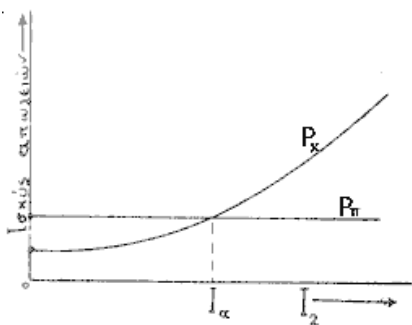
$$\alpha = \frac{I_2 V_2 \text{ συν} \phi_2}{I_1 V_1 \text{ συν} \phi_1} = \frac{I_2 V_2 \text{ συν} \phi_2}{I_2 V_2 \text{ συν} \phi_2 + P_\pi + R I_2^2} = \frac{V_2 \text{ συν} \phi_2}{V_2 \text{ συν} \phi_2 + \frac{P_\pi}{I_2} + R I_2}$$

Το  $\text{συν} \phi_2$  είναι ο συντελεστής απόδοσης του φορτίου. Για ωμικό φορτίο είναι μονάδα. Για ορισμένο  $\text{συν} \phi_2$  και  $V_2$  σταθερή, η απόδοση  $\alpha$  γίνεται μέγιστη (όπως εύκολα αποδεικνύεται) για

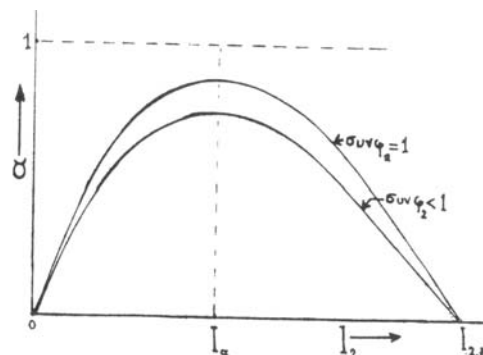
ρεύμα  $I_2 = I_\alpha$  ( $I_\alpha = I_{\alpha \text{ \acute{a}ριστο}}$ ), στο οποίο  $\frac{P_\pi}{I_2} + R I_2 = \text{min}$ , δηλαδή για:  $P_\pi = R I_\alpha^2 = P_x$ , όπου  $P_x$  και

$P_\pi$ , είναι η ισχύς που χάνεται στο χαλκό και τον πυρήνα αντίστοιχα.

Στον κατασκευαστικό υπολογισμό του μετασχηματιστή, οι διάμετροι των συρμάτων, η διατομή του πυρήνα και το υλικό του, διαλέγονται έτσι ώστε το ρεύμα  $I_\alpha$  να είναι κοντά στο ρεύμα κανονικής λειτουργίας  $I_{2,κ}$  στο οποίο η απόδοση είναι σχεδόν σταθερή: Η απόδοση του μετασχηματιστή γίνεται μέγιστη για ένα "άριστο" ρεύμα του δευτερεύοντος  $I_\alpha$ , για το οποίο οι απώλειες χαλκού εξισώνονται με τις απώλειες στον πυρήνα.



Σχ.13α. Οι απώλειες στον χαλκό  $P_x$  και στον πυρήνα  $P_\pi$

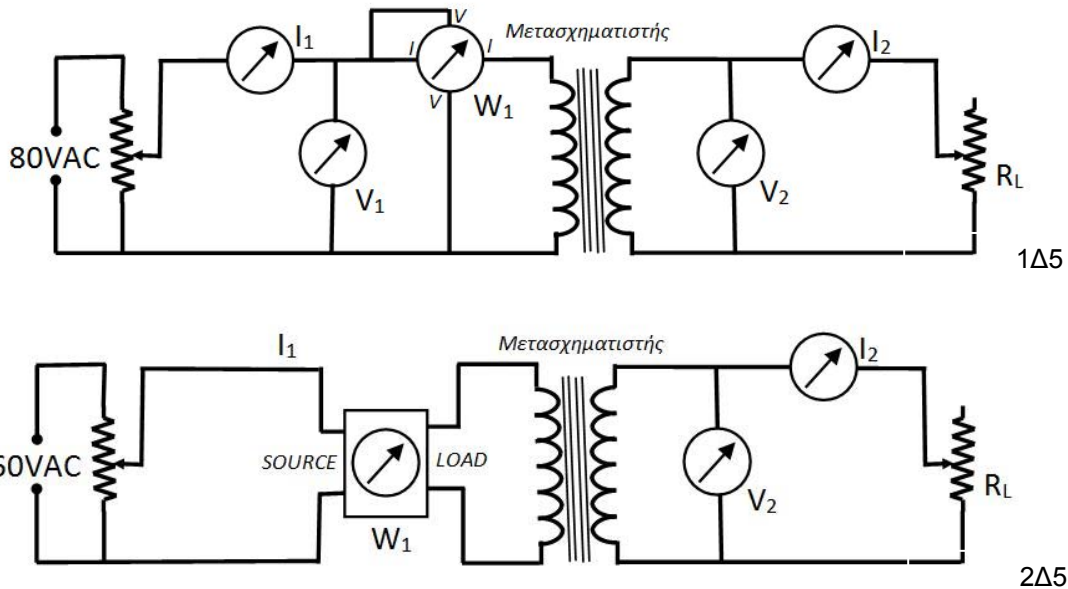


Σχ.13β. Ο συντελεστής αποδόσεως του μετασχηματιστή

## Πειραματική διαδικασία

1. Πραγματοποιούμε το κύκλωμα

Το βασικό κύκλωμα για τις μετρήσεις των μεγεθών  $I, V, P$  από όπου προκύπτουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του μετασχηματιστή φαίνεται στο Σχ. 14



Σχ. 14. Βασικό κύκλωμα μελέτης του μετασχηματιστή

Η πηγή τροφοδότησης είναι μεταβλητός μετασχηματιστής (variatic) ή ρυθμιστική αντίσταση, σε ποτενσιομετρική σύνδεση.

Το βολτόμετρο  $V_1$ , το αμπερόμετρο  $A_1$  και το βατόμετρο  $W$  μετρούν αντίστοιχα την τάση  $V_1$ , το ρεύμα  $I_1$  και την ισχύ  $P_1$  στο πρωτεύον κύκλωμα. Στο δευτερεύον κύκλωμα ο ωμικός καταναλωτής είναι μεταβλητός, και το βολτόμετρο  $V_2$  και το αμπερόμετρο  $A_2$  μετρούν ομοίως την τάση  $V_2$  και το ρεύμα  $I_2$ .

**ΠΡΟΣΟΧΗ!** Η τιμή της  $V_1$  θα πρέπει να καθοριστεί στα (60-70) V και να διατηρηθεί σε όλη την διάρκεια των μετρήσεων σταθερή.

2. Μέτρηση 'εν κενώ'. Με το κύκλωμα του δευτερεύοντος ανοικτό, μετρούμε τις τιμές των  $V_1, I_{1,0}, P_{1,0}, V_{2,0}$ . Υπολογίζουμε τα παρακάτω μεγέθη.

Με το δευτερεύον κύκλωμα ανοικτό ( $I_2 = 0$ ), προκύπτουν τα μεγέθη:  $n, P_{\pi}, \cos\phi_{1,0}, I_{\pi}, I_m$ . Πραγματικά έχουμε:

- Επειδή  $V_{2,0} = \frac{V_1}{n}$  ο λόγος μετασχηματισμού είναι:  $n = \frac{V_1}{V_{2,0}}$

- Η ισχύς  $N_{1,0}$  στην ουσία είναι ίση με τις απώλειες πυρήνα:  $P_{\pi} = P_{1,0}$

- Ο συντελεστής ισχύος είναι:  $\cos\phi_{1,0} = \frac{P_{1,0}}{I_{1,0} \cdot V_1}$

- Η βατική συνιστώσα του  $\bar{I}_{1,0}, \bar{I}_1 \rightarrow \bar{I}_0 = \bar{I}_{1,0}$  (Σχ. 5)  $I_{\pi} = I_{1,0} \cos\phi_{1,0}$

- Η αβατική συνιστώσα δίνει το ρεύμα μαγνήτισης:  $I_m = I_{1,0} \cdot \sin\phi_{1,0}$

- Υπολογίζουμε τα παραπάνω μεγέθη και ζωγραφίζουμε το ρεύμα διέγερσης ως διάνυσμα.

### 3. Μέτρηση με ‘φορτίο’.

Κλείνοντας το κύκλωμα του δευτερεύοντος, μεταβάλλουμε την αντίσταση φόρτου  $R_L$ , καθορίζοντας έτσι τις τιμές του ρεύματος δευτερεύοντος μεταξύ 0 και 10A, (10 τιμές), διατηρώντας την τάση του πρωτεύοντος σταθερή. Για κάθε τιμή του ρεύματος δευτερεύοντος λαμβάνουμε τις τιμές  $I_1, P_1, I_2, V_2, V_1$ =σταθ.

(Η οδηγία αυτή ισχύει μόνον για την συσκευή της 1Δ5. Συνεχίζουμε στην περιοχή ρευμάτων δευτερεύοντος από 10A έως 25A (7 έως 8 τιμές) μετρώντας πάλι τα μεγέθη  $I_1, P_1, I_2, V_2, V_1$ =σταθ.)

Υπολογίζουμε τα παρακάτω μεγέθη και:

- μετρήσεις να καταχωρηθούν σε πίνακες των  $V_1$  = σταθερό,  $I_1, P_1, V_2, I_2$ .
- Χαράζουμε τις καμπύλες  $I_1 = f(I_2), V_2 = f(I_2), \text{ συνφ}_1 = f(I_2)$  και  $\alpha = f(I_2)$ . Δικαιολογήστε σύντομα τη μορφή των καμπυλών.
- Από την καμπύλη  $\alpha = f(I_2)$  υπολογίζουμε το ρεύμα κανονικής λειτουργίας του μετασχηματιστή. Είναι το ρεύμα στο οποίο ο συντελεστής απόδοσης γίνεται μέγιστος.
- Προφανώς δεν επιτρέπεται να αυξηθεί το ρεύμα  $I_2$  μέχρι της τιμής  $I_{2,\beta}$ . Για μικρό χρονικό διάστημα (1,2 λεπτά) μπορούμε να έχουμε  $I_2 \approx 2I_{2,k}$  χωρίς να καταστραφεί ο μετασχηματιστής.

### 4. Μέτρηση με βραχυκυκλωμένο δευτερεύον.

Ελαττώνουμε την τάση πρωτεύοντος στο χαμηλότερο σημείο, κατόπιν συνδέουμε απ’ ευθείας το αμπερόμετρο του δευτερεύοντος, στα άκρα του δευτερεύοντος, και ρυθμίζουμε την τάση έτσι ώστε το ρεύμα στο δευτερεύον, να γίνει ίσο με το ρεύμα κανονικής λειτουργίας του μετασχηματιστή. Μετρούμε τώρα, τα  $I_1 (=I_{1,k}), V_1, N_1, I_2, V_2 \approx 0$  (Γιατί το  $V_2$  δεν είναι ακριβώς 0;). Σαν **ρεύμα κανονικής λειτουργίας χρησιμοποιούμε στην 1Δ5 τα 10 A και στην 2Δ5 τα 1,35 A**. Συγκρίνουμε με την τιμή που υπολογίσατε στο ερώτημα 2.2 iii.

**Με την κανονική τιμή της τάσεως πρωτεύοντος  $V_1$ , δεν επιτρέπεται να βραχυκυκλωθεί το δευτερεύον. Στα σύρματα αναπτύσσεται υπερβολική θερμότητα Joule και μεγάλες δυνάμεις Laplace και ο μετασχηματιστής κινδυνεύει να καταστραφεί από τήξη ή παραμόρφωση των πηνίων.** Για τον λόγο αυτό στο πρωτεύον εφαρμόζουμε μία μικρή τάση  $V_{1\delta,\beta}$  τέτοιας τιμής ώστε να προκαλεί στο πρωτεύον, ρεύμα  $I_{1\delta,\beta}$  ίσο με το ρεύμα πρωτεύοντος  $I_{1,k}$  **κανονικής λειτουργίας**, ενώ βεβαίως το δευτερεύον είναι βραχυκυκλωμένο. Η τάση  $V_{1\delta,\beta}$  ονομάζεται **δοκιμαστική τάση βραχυκύκλωσης**. Η συνθήκη  $I_1=I_{1\delta,\beta}$  εξασφαλίζει ότι έχουμε τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης του μετασχηματιστή.

Υπολογίζουμε τα παρακάτω μεγέθη.

Από αυτήν την μέτρηση έχουμε τα μεγέθη:  $V_{1\delta,\beta}, I_{1\delta,\beta} = I_k, N_{1\delta,\beta}, I_{2\delta,\beta}$ . Το βατόμετρο μετράει:  $P_{1\delta,\beta} = P_\pi + P_x$ . Συνεπώς:

• Απώλειες χαλκού (ωμικές):  $P_x = P_{1\delta,\beta} - P_\pi$

• Ολική εσωτερική αντίσταση:  $R = \frac{P_x}{I_{1\delta,\beta}^2} = \frac{P_x}{I_{2\delta,\beta}^2 / n}$

• Ολική εσωτερική εμπέδηση:  $|Z| = \frac{V_{1\delta,\beta}}{I_{2\delta,\beta} / n} = \frac{V_{1\delta,\beta}}{I_{1,\delta\beta}}$

• Ολική αυτεπαγωγή σκέδασης:  $L_6 = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{|Z|^2 - R^2}$  (f η συχνότητα)

- Από τα παραπάνω σχεδιάζουμε το διάνυσμα της εμπέδησης. Συγκρίνουμε τη γωνία με την γωνία που υπολογίζουμε από τον συντελεστή απόδοσης.

- Πραγματικό ρεύμα βραχυκύκλωσης: 
$$I_{2,\beta} = \frac{nV_1}{|Z|} = \frac{V_1}{V_{1\delta,\beta}} I_{2\delta,\beta}$$
  - Ωμική πτώση τάσης: 
$$\Delta V_R = RI_{2\delta,\beta} / n = RI_{1\delta,\beta}$$
  - Επαγωγική πτώση τάσης: 
$$\Delta V_\Sigma = \omega L_\sigma I_{2\delta,\beta} / n = 2\pi n L_\sigma I_{1\delta,\beta}$$
  - Ολική πτώση τάσης: 
$$\Delta V_2 = \sqrt{(\Delta V_R)^2 + (\Delta V_\Sigma)^2} = V_{1,\delta\beta}$$
  
Εξετάστε αν ισχύει ακριβώς η τελευταία σχέση.
5. Καταγράφουμε τα αποτελέσματα σε πίνακα.

## Ερωτήσεις

1. Αναφέρατε μερικές εφαρμογές των μετασχηματιστών στη διανομή ηλεκτρισμού, σε ηλεκτρικές συσκευές και σε ηλεκτρονικές συσκευές.
2. Το πρωτεύον και το δευτερεύον τυλίγονται κατά την ίδια ή την αντίθετη φορά. Τι συμβαίνει με το ρεύμα στις δύο περιπτώσεις; (Σχεδιάστε ένα απλοποιημένο σχήμα όπου να καταδεικνύεται η φορά των ρευμάτων).
3. Σχεδιάστε έναν μετασχηματιστή και θεωρήστε ότι στο πρωτεύον του η τάση αυξάνεται στιγμιαία από 0 σε V. Χρησιμοποιώντας τους κανόνες της επαγωγής βρείτε την φορά των E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>.
4. Αποδείξτε τον τύπο του μετασχηματισμού με εμπέδηση.
5. Σε ένα απλό σχήμα σχεδιάστε την μορφή και τη φορά των ρευμάτων Foucault σε σχέση με τη μαγνήτιση του πυρήνα.
6. Γιατί η απόδοση του μετασχηματιστή είναι μικρή στα μικρά και στα μεγάλα ρεύματα λειτουργίας;

# Άσκηση Δ6. Χαρακτηριστική καμπύλη γεννήτριας συνεχούς τάσεως

## Θεωρητικό Μέρος

Εφαρμογή του φαινομένου της επαγωγής είναι η γεννήτριας και οι κινητήρες εναλλασσόμενης και συνεχούς τάσης.

### 1. Γεννήτριες

Οι γεννήτριες είναι ηλεκτρικές μηχανές οι οποίες καταναλίσκουν μηχανική ενέργεια και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική.

Οι γεννήτριες αποτελούνται από ένα περιστρεφόμενο τμήμα τον **ρότορα** και ένα ακίνητο τμήμα τον **στάτορα**. Ο ρότορας είναι ένα πλαίσιο που περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  ενώ του εξασκούμε ροπή  $M$ . Ο στάτορας αποτελείται από έναν μαγνήτη μέσα στο μαγνητικό πεδίο του οποίου περιστρέφεται στο πλαίσιο. Λόγω επαγωγής στα άκρα του πλαισίου εμφανίζεται τάση  $V$ . Το πλαίσιο καταλήγει σε δύο **ψήκτες**<sup>ο</sup> στις οποίες μπορεί να συνδεθεί ένα κύκλωμα. Εάν το κύκλωμα είναι κλειστό τότε σε αυτό θα εμφανιστεί ρεύμα έντασης  $I$ .

Ο **συντελεστής απόδοσης**  $\alpha$  της γεννήτριας θα είναι ίσος με το πηλίκο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την καταναλισκόμενη μηχανική ισχύ. Έτσι θα είναι:  $\alpha = \frac{VI}{M\omega}$

Οι τιμές του  $\alpha$  κυμαίνονται μεταξύ 0,60 και 0,97.

### 2. Ηλεκτροκινητήρες

Οι ηλεκτροκινητήρες είναι μηχανές που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και αποτελούνται από τα ίδια στοιχεία με αυτά της γεννήτριας.

Ο ρότορας του κινητήρα τροφοδοτείται στις ψήκτες του με μία τάση  $V_\psi$  και αρχίζει να περιστρέφεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο του στάτορα. Τότε σύμφωνα με τον νόμο της επαγωγής αναπτύσσεται στο πλαίσιο τάση αντίθετης φοράς η οποία καλείται αντιηλεκτρεγερτική δύναμη  $V_{αντ}$ .

Το ρεύμα επομένως που διαρρέει τον ρότορα θα είναι ίσο με:  $I_{ρωτ} = \frac{V_\psi - V_{αντ}}{R}$

όπου  $R$  η αντίσταση του κυκλώματος του ρότορα. Επομένως όταν αυξάνεται η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα  $\omega$  αυξάνεται η  $V_{αντ}$  και το ρεύμα του ρότορα ελαττώνεται. Κατά την εκκίνηση του κινητήρα ( $\omega = 0$ ) το ρεύμα γίνεται μέγιστο (ρεύμα εκκινήσεως).

Στους μεγάλους κινητήρες το ισχυρό ρεύμα εκκίνησης μπορεί να καταστρέψει τον κινητήρα. Γι' αυτό και προστίθεται σε σειρά με τον ρότορα η **αντίσταση εκκίνησης** η οποία τίθεται εκτός κυκλώματος όταν ο κινητήρας αρχίσει να περιστρέφεται γρήγορα. Ο συντελεστής απόδοσης του κινητήρα θα είναι ίσος με το πηλίκο της παραγόμενης μηχανικής ισχύος προς την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ. Για να βρούμε την παραγόμενη μηχανική ισχύ εργαζόμαστε ως εξής: Θα είναι από την (1)

$$I_{ρωτ} R_{ρωτ} = V_\psi - V_{αντ} \Leftrightarrow I_{ρωτ}^2 R_{ρωτ} = V_\psi I_{ρωτ} - V_{αντ} I_{ρωτ}$$

---

<sup>ο</sup> από το ψήγμα

Η  $I_{\rho\omega T}^2 R_{\rho\omega T}$  είναι η ολική ισχύς που δίνουμε στο πλαίσιο και η  $V_{\psi} I_{\rho\omega T}$  είναι η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς οπότε και η  $V_{\alpha\nu T} I_{\rho\omega T}$  είναι η παραγόμενη μηχανική ισχύς.

### 3. Γεννήτρια συνεχούς τάσης

Σε μια γεννήτρια παραγωγής συνεχούς τάσης ο δακτύλιος στον οποίο καταλήγουν τα άκρα του πλαισίου είναι χωρισμένος με μονωτικό υλικό σε δύο μονωμένους μεταξύ τους τομείς  $T_1$  και  $T_2$  στους οποίους εφάπτονται οι ακίνητες ψήκτρες από άνθρακα  $\Psi_1$  και  $\Psi_2$ . Εάν υποθέσουμε ότι σε κάποια χρονική στιγμή από την περιστροφή του πλαισίου επάγεται θετική τάση στην  $\Psi_1$  και αρνητική στην  $\Psi_2$  τότε όταν το πλαίσιο στραφεί κατά  $180^\circ$ , ο  $T_1$  θα εφάπτεται στην  $\Psi_2$  η οποία κατά αυτόν τον τρόπο διατηρεί την πολικότητά της όπως και η  $\Psi_1$ . Η παραγόμενη τάση είναι ίδιας πολικότητας αλλά κυμαινόμενη (π.χ. θετική).

Στη πράξη για να εξομαλυνθεί η τάση χρησιμοποιούνται πολλά πλαίσια.

Το μαγνητικό πεδίου του στάτορα παράγεται συνήθως από ηλεκτρομαγνήτη τροφοδοτούμενο με ρεύμα με διάφορους τρόπους (**διέγερση**). Στην άσκηση αυτή η διέγερση της γεννήτριας γίνεται από ιδιαίτερη πηγή και επομένως η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ανεξάρτητη από την γωνιακή ταυτότητα του πλαισίου.

Η παραγόμενη τάση σύμφωνα με τον νόμο της επαγωγής είναι:

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(BnS\cos\omega t)}{dt} \Leftrightarrow V = nBS\omega \sin\omega t = V_o \sin\omega t$$

όπου  $n$  ο αριθμός των σπειρών του πλαισίου.

### 4. Μεταβολές της τάσης κατά την φόρτιση - Χαρακτηριστική καμπύλη γεννήτριας

Η τάση που βρήκαμε παραπάνω είναι η παρεχόμενη τάση της γεννήτριας όταν λειτουργεί εν κενώ δηλαδή όταν δεν καταναλίσκεται σε εξωτερικό κύκλωμα η παραγόμενη ισχύς ( $i = 0$ ). Όταν όμως η γεννήτρια λειτουργεί υπό φορτίο η τάση θα είναι μικρότερη, λόγω της εσωτερικής αντίστασης του πηνίου του ρότορα και της σκέδασης των μαγνητικών γραμμών. Όσο αυξάνεται το καταναλισκόμενο ρεύμα τόσο ελαττώνεται η τάση. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος προκύπτει όταν βραχυκυκλωθούν τα άκρα του πλαισίου (**ρεύμα βραχυκύκλωσης**) οπότε μηδενίζεται η τάση.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης στις γεννήτριες βιομηχανίας δεν επιτρέπεται να μετράται από ευθείας για να μην υπερθερμαίνονται οι αγωγοί.

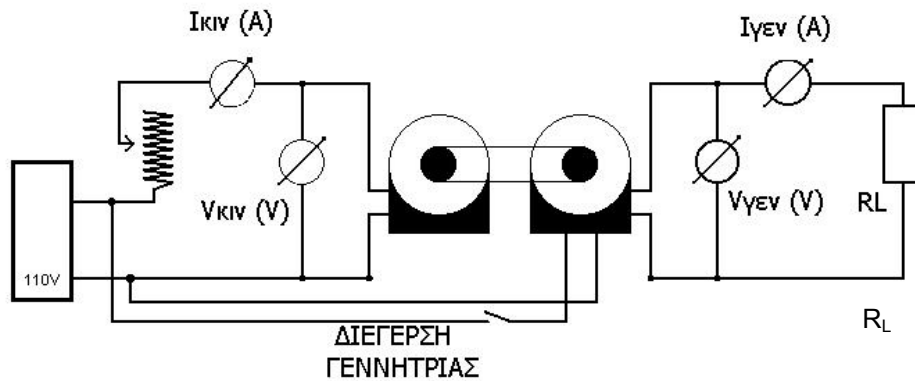
### 5. Συντελεστής απόδοσης ζεύγους

Το ζεύγους "κινητήρας - γεννήτρια" καταναλίσκει ισχύ  $N_k$  και παράγει την ισχύ  $N_r$  στην γεννήτρια. Ο συντελεστής απόδοσης του ζεύγους θα είναι:

$$\alpha = \frac{N_r}{N_k}$$

## Πειραματική Διαδικασία

1. Πραγματοποιούμε το κύκλωμα της άσκησης.



2. Με ανοικτό το κύκλωμα της γεννήτριας ( $I_{\Gamma} = 0$ ) μετρούμε την τάση γεννήτριας  $V_{\Gamma,0}$ , συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$ . Αποδίδουμε γραφικώς την σχέση  $V_{\Gamma,0} = f(\omega)$ .

3. Διατηρώντας τις στροφές της γεννήτριας σταθερές ( $\omega = \text{σταθ.}$ ) αυξάνουμε το ρεύμα  $I_{\Gamma}$  της γεννήτριας από μηδέν έως την μέγιστη τιμή και καταγράφουμε τις τιμές των  $I_{\kappa\iota\nu}$ ,  $V_{\kappa\iota\nu}$ ,  $I_{\Gamma\text{EN}}$ ,  $V_{\Gamma\text{EN}}$ . Αποδίδουμε γραφικώς τις σχέσεις.

$$V_{\kappa\iota\nu} = f(I_{\kappa\iota\nu}) \text{ και } V_{\Gamma\text{EN}} = f(I_{\Gamma\text{EN}})$$

4. Επαναλαμβάνουμε τις μετρήσεις και για τρεις τιμές της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$  και σχεδιάζουμε πάλι τις γραφικές παραστάσεις

$$V_{\kappa\iota\nu} = f(I_{\kappa\iota\nu}) \text{ και } V_{\Gamma\text{EN}} = f(I_{\Gamma\text{EN}})$$

5. Σχεδιάζουμε τέλος την γραφική παράσταση του συντελεστή απόδοσης της γεννήτριας, συναρτήσει του ρεύματος αυτής, (της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$ , διατηρούμενης σταθερής).

$$\alpha = \frac{N_{\Gamma\text{EN}}}{N_{\kappa\iota\nu}} \quad \alpha = f(I_{\Gamma})$$

**Σημείωση:** Οι καμπύλες  $V_{\kappa\iota\nu} = f(I_{\kappa\iota\nu})$  για τα διαφορετικά  $\omega$  να γίνουν στο ίδιο διάγραμμα, ομοίως και οι καμπύλες  $V_{\Gamma\text{EN}} = f(I_{\Gamma\text{EN}})$ .

### Ερωτήσεις

1. Σε ένα κινητήρα συμφέρει να δημιουργείται μεγάλη αντιηλεκτρεγερτική δύναμη;
2. Ποια ροπή  $M$  πρέπει να εξασκείται σε γεννήτρια συνεχούς τάσης κατά την λειτουργία της εν κενώ;
3. Εξηγήστε την μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης  $V_{\gamma\text{EN}} = f(I)$ .
4. Εξηγήστε την εμφάνιση μεγίστου στην καμπύλη του συντελεστή απόδοσης.
5. Εξηγήστε τους τρόπους διέγερσης μιας γεννήτριας (αυτοδιέγερσης)

## Άσκηση Δ7. Φασματοσκοπία

**ΠΡΟΣΟΧΗ:** Τα τροφοδοτικά υψηλής τάσης τα οποία χρησιμοποιούνται σε αυτό το πείραμα έχουν επαφές με μια διαφορά δυναμικού 5000 V. Υπάρχει συνεπώς κίνδυνος ηλεκτροπληξίας εάν ο χρήστης αγγίξει αυτές τις επαφές. Να είστε προσεκτικοί ώστε, κατά τη τοποθέτηση των φασματικών σωλήνων, η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος να έχει διακοπή.

### Σκοπός της άσκησης

Σε αυτό το πείραμα, θα εξασκηθούμε στην χρήση φασματοσκοπίου και φασματογράφου, μελετώντας γνωστά και άγνωστα φάσματα, θα υπολογιστούν οι τέσσερις πρώτες γραμμές της σειράς του Balmer του υδρογόνου και θα συγκριθούν τα αποτελέσματά με τις προβλέψεις του μοντέλου του Bohr. Και οι δύο όργανα τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε είναι φασματοσκόπια φράγματος.

Προαπαιτούμενες γνώσεις: Συμβολή, περίθλαση και φάσματα. Μοντέλο του Bohr του ατόμου

### Μέρος πρώτο: Φασματοσκόπιο φράγματος

Τα βασικά μέρη του φασματοσκοπίου φράγματος<sup>4</sup>, που θα χρησιμοποιήσουμε, φαίνονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Φασματοσκόπιο: 1. Κατευθυντήρας, 2. Διόπτρα, 3. Σχισμή (ρυθμιζόμενη), 4. Προσοφθάλμιος (με σταυρόνημα), 5. Ρύθμιση ευκρινούς παρατήρησης, 6. Τράπεζα, 7. Βάση πρίσματος, 8. Γωνιόμετρο με βερνιέρο (ένας σε κάθε πλευρά), 9. Σύστημα μικρομετρικής ρύθμισης γωνιακής θέσης διόπτρας

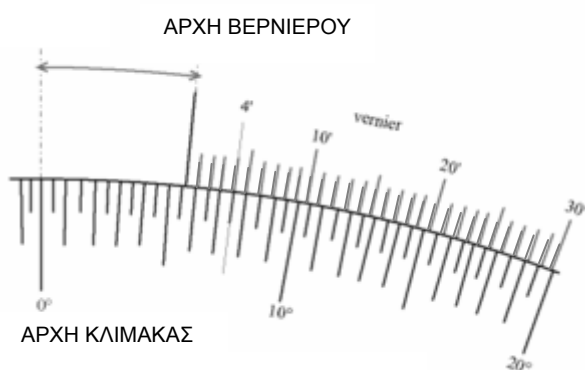
<sup>4</sup> Το πρώτο μέρος της άσκησης είναι προσαρμογή σχετικής άσκησης από την 'TASS, The Amateur Sky Survey' (<http://www.tass-survey.org/classes/manual273/diffract.html>) και του εγχειριδίου χρήσης του φασματοσκοπίου ΑΤΑΣ



Το σύστημα μικρομετρικής ρύθμισης γωνιακής θέσης διόπτρας αποτελείται από έναν ατέρμονα κοχλία και μία βιδωτή πέδη. Όταν κινούμε την διόπτρα σε μεγάλες γωνίες **η πέδη πρέπει να είναι ελεύθερη**. Όταν θέλουμε να πάρουμε μέτρηση, εφαρμόζουμε την πέδη και με τον ατέρμονα κοχλία κινούμε την διόπτρα έως ότου το σταυρόνημα της βρεθεί στο κέντρο της φωτεινής ταινίας την οποία παρατηρούμε με την διόπτρα και η οποία οφείλεται στην σχισμή στην είσοδο του κατευθυντήρα.

Η σχισμή του κατευθυντήρα θα πρέπει να είναι αρκετά ευρεία μεν, ώστε να επιτρέπει μία επαρκή ποσότητα φωτός να περάσει μέσα από το φασματοσκόπιο, όσο το δυνατόν στενότερη δε, ώστε να επιτρέπει ακριβή μέτρηση με το σταυρόνημα.

Για να μετρήσουμε την γωνία, χρησιμοποιούμε μία κλίμακα γωνιών με βερνιέρο. Το φασματοσκόπιο έχει στη βάση του μια κυκλική κλίμακα βαθμονομημένη σε μοίρες, με υποδιαιρέσεις μισής μοίρας (30'). Η κλίμακα βερνιέρου, παράλληλα στην κύρια κλίμακα, έχει 60 γραμμές. Κάθε κύρια γραμμή του βερνιέρου αντιστοιχεί 1/30 της μισής υποδιαίρεσης της κυκλικής κλίμακας, δηλαδή σε 1'. κάθε δευτερεύουσα γραμμή του βερνιέρου αντιστοιχεί 1/60 της μισής υποδιαίρεσης της κυκλικής κλίμακας, δηλαδή σε 0.5', το οποίο ορίζει και την ακρίβεια των μετρήσεων.



Σχήμα 2. Γωνιομετρικός βερνιέρος ακρίβειας 0.5'

(με ακρίβεια 0.5') τα οποία πρέπει να προσθέσουμε στην θέση του "0" της κλίμακας του βερνιέρου ώστε τελικά να προσδιορίσουμε την γωνιακή θέση της διόπτρας.

Στο παράδειγμα μας (σχήμα 2):

- το "0" της κλίμακα του βερνιέρου βρίσκεται μεταξύ των υποδιαίρεσεων 5.5° και 6.0°
- συμπίπτει η 4 κύρια υποδιαίρεση του βερνιέρου (ή η 8, αν μετρήσουμε και της βοηθητικές υποδιαίρεσεις), δηλαδή  $4 \cdot 1' \approx 8 \cdot 0.5' = 4.0'$
- Τελικά η γωνία είναι:  $5.5^\circ + 4' \approx 5^\circ 30' + 4' = 5^\circ 34' \approx 5.57^\circ$

Στο σχήμα 2 φαίνεται η χρήση του βερνιέρου. Η διαδικασία μέτρησης της γωνίας έχει ως εξής:

Παρατηρούμε που βρίσκεται το "0" της κλίμακα του βερνιέρου σχετικά με την κύρια κυκλική κλίμακα, παίρνοντας υπ' όψην και τις υποδιαιρέσεις της μισής μοίρας· έτσι προσδιορίζουμε την γωνία στην πλησιέστερη μισή μοίρα.

Παρατηρούμε ποια από τις υποδιαίρεσεις της κλίμακας του βερνιέρου συμπίπτει (είναι ευθυγραμμισμένη) με υποδιαίρεση της κυκλικής κλίμακας. Αυτή η υποδιαίρεση της κλίμακας του βερνιέρου προσδιορίζει τα πρώτα λεπτά της μοίρας

## Στοιχεία από την θεωρία

Το φασματοσκόπιο φράγματος είναι ένα πολύ ακριβές όργανο μέτρησης, και εξακολουθεί να είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διάταξη για τη μέτρηση των μηκών κύματος των φασματικών γραμμών.

Εάν παράλληλη δέσμη φωτός μήκους κύματος  $\lambda$  προσπέσει κάθετα σε φράγμα, το φως λόγω περίθλασης και συμβολής στις γραμμές του φράγματος, θα σχηματίσει δέσμες με μέγιστο κάθε διαδομένης δέσμης σε γωνίες  $\theta$  ως προς την διεύθυνση της αρχικής δέσμης. Ισχύει η σχέση:

$$d \cdot \sin\theta = \frac{\lambda}{n} \quad \text{όπου } n = 1, 2, 3 \dots$$

και  $d$  η απόσταση των σχισμών του φράγματος και  $n$  η τάξη των διαδομένων δεσμών. Τα μέγιστα δεν έχουν την ίδια ένταση αλλά όσο μεγαλώνουν οι τάξεις η ένταση μικραίνει.

Αν το αρχική δέσμη έχει πολλά μήκη κύματος, τα παραπάνω ισχύουν για κάθε μήκος κύματος και τελικά τα μήκη κύματος αναλύονται σε φάσματα· τότε το  $n$  εκφράζει την **τάξη του φάσματος**. Τα άτομα εκπέμποντας φως, δίνουν γραμμικά φάσματα, χαρακτηριστικά κάθε ατόμου.

Η γωνία  $\theta$  μετρείται με το γωνιόμετρο του φασματοσκοπίου. Γνωρίζοντας δε την απόσταση των σχισμών, για κάθε τάξη του φάσματος, υπολογίζουμε από τον παραπάνω τύπο το αντίστοιχο μήκος κύματος. Συνήθως εργαζόμαστε σε μία τάξη.

Ιστορικά, το φασματομέτρο φράγματος ήταν σε χρήση παρατηρώντας τα γραμμικά φάσματα των ατόμων πολύ πριν γίνει κατανοητός ο μηχανισμός εκπομπής φωτός από τα άτομα. Το 1885, ο Balmer βρήκε μια απλή μαθηματική έκφραση που περιγράφει μερικά από τα μήκη κύματος των φασματικών γραμμών που παρατηρούνται στο φάσμα του υδρογόνου. Ωστόσο, δεν υπήρξε καμία εξήγηση για την εκπομπή των συγκεκριμένων μηκών κύματος μέχρι την έλευση του μοντέλου του Bohr το 1913.

Τα μήκη κύματος της σειράς Balmer μπορεί να δοθεί με ακρίβεια από τον απλό τύπο:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right), \text{ όπου } m = 3, 4, 5 \dots$$

όπου το  $R$  ονομάζεται σταθερά Rydberg και έχει την τιμή:

$$R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

## Πειραματική διαδικασία

1. Πριν χρησιμοποιήσουμε το φασματοσκόπιο πρέπει να ελέγξουμε και να ρυθμίσουμε, αν χρειάζεται, τον κατευθυντήρα και την διόπτρα ώστε να έχουμε παράλληλες ακτίνες και η σχισμή του κατευθυντήρα να φαίνεται ευκρινώς μέσα από την διόπτρα. Ακολουθώντας ρυθμίζουμε την εστίαση του προσοφθάλμιου φακού ώστε και το σταυρόνημα να φαίνεται ευκρινώς.

2. Τοποθετούμε το φράγμα περίθλασης στην τράπεζα του φασματοσκοπίου, φροντίζοντας η επιφάνεια του να είναι κάθετη στην αρχική δέσμη.

3. Τοποθετούμε μπροστά στην σχισμή του κατευθυντήρα πηγή φωτός υδραργύρου. Κινούμε περιστρέφοντας την διόπτρα δεξιά και αριστερά από την αρχική θέση της· παρατηρούμε μέσω της διόπτρας δύο σειρές φασμάτων, μία σειρά στην αριστερή πλευρά και μία στην δεξιά, ενώ κάθε σειρά αποτελείται από μερικά φάσματα, ανάλογα με την τάξη του φράγματος. Οι φασματικές γραμμές πρέπει να είναι στο ίδιο ύψος στις δύο πλευρές. Αν δεν είναι, θα πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα το φασματοσκόπιο.

Μερικά κοινά προβλήματα ή παγίδες:

- Αδέσποτο φως κάνει εύκολα αόρατες τις αμυδρές φασματικές γραμμές. Βεβαιωθείτε ότι τα φώτα είναι χαμηλωμένα, η πόρτα της αίθουσας σχεδόν κλειστή, και τα παράθυρα σκιασμένα.
- Είναι πολύ δύσκολο να δούμε μερικές από τις γραμμές που περιγράφονται παρακάτω (ειδικά οι βιολετί γραμμές του υδρογόνου και οι μπλε-ιώδεις γραμμές του υδραργύρου).
- Ενίοτε η ποιότητα των φασματικών γραμμών εξαρτάται από την 'ηλικία' του φωτοβολούντος σωλήνα.

4. Κινώντας την διόπτρα δεξιά-αριστερά και χρησιμοποιώντας το μικρομετρικό σύστημα ρύθμισης της γωνιακής θέσης της διόπτρας, φέρνουμε το σταυρόνημα στο κέντρο των φασματικών γραμμών. Μετρούμε στο φάσμα της πρώτης τάξης, και με την βοήθεια του βερνιέρου, τις γωνίες των μεγίστων για τις δύο κίτρινες, μία πράσινη, μία μπλε-ιώδη και μία ιώδη γραμμή του φάσματος του υδραργύρου. Μετρούμε τις γωνίες των μεγίστων και στις δύο πλευρές του κεντρικού μεγίστου. Καταγράψτε τα δεδομένα στον πίνακα δεδομένων. Χρησιμοποιήστε αυτά τα δεδομένα

για τον υπολογισμό της απόστασης  $d$  των γραμμών του φράγματος (με το σφάλμα του) και συγκρίνετε με τα στοιχεία του φράγματος.

Σημείωση: Συνήθως, η μωβ γραμμή είναι πολύ αμυδρή για να παρατηρηθεί. Μερικές φορές υπάρχει μια θολή πράσινη γραμμή σε αυτό το φάσμα. Αγνοήστε την. Εάν δεν μπορείτε να διακρίνετε δύο κίτρινες γραμμές, η σχισμή είναι πιθανώς πάρα πολύ ευρεία. Μικρύνετε την σχισμή.

Φάσμα υδραργύρου						
Χρώμα	Μήκος κύματος (nm)	$\theta_{\text{αριστερά}}$	$\theta_{\text{δεξιά}}$	$\sin(\theta_{\text{αριστερά}})$	$\sin(\theta_{\text{δεξιά}})$	$d$ (m)
Ιώδες	4047					
Μπλε-ιώδες	4358					
Πράσινο	5461					
Κίτρινο (1)	5770					
Κίτρινο (2)	5790					
Μέση τιμή $d = ( \quad \pm \quad )$						

5. Αντικαταστήστε την πηγή του υδραργύρου με πηγή υδρογόνου. Στο φάσμα του υδρογόνου θα παρατηρήσετε μία κόκκινη, μία μπλε-πράσινη, μία μπλε-ιώδη, και μια μωβ γραμμή. (Συχνά η μωβ γραμμή είναι πολύ σκοτεινή και δεν μπορούμε να την παρατηρήσουμε εύκολα).

6. Κινώντας την διόπτρα δεξιά-αριστερά και με το μικρομετρικό σύστημα ρύθμισης της γωνιακής θέσης της διόπτρας, φέρνουμε το σταυρόνημα στο κέντρο των φασματικών γραμμών. Μετρούμε στο φάσμα της πρώτης τάξης, και με την βοήθεια του βερνιέρου, τις γωνίες των μεγίστων των γραμμών του φάσματος του υδρογόνου. Μετρούμε τις γωνίες των μεγίστων και στις δύο πλευρές του κεντρικού μέγιστου. Καταγράψτε τα δεδομένα στον πίνακα δεδομένων.

7. Χρησιμοποιώντας το  $d$  το οποίο υπολογίσαμε στο ερώτημα 4, υπολογίζουμε τα αντίστοιχα μήκη κύματος και συγκρίνουμε με την βιβλιογραφία (Ιώδες: 410.2 nm, Μπλε-ιώδες: 434.0 nm, Μπλε-πράσινο: 486.1 nm, Κόκκινο: 656.3 nm).

Φάσμα υδρογόνου (πρώτη τάξη)					
Χρώμα	$\theta_{\text{αριστερά}}$	$\theta_{\text{δεξιά}}$	$\sin(\theta_{\text{αριστερά}})$	$\sin(\theta_{\text{δεξιά}})$	Μήκος κύματος (nm)
Ιώδες					
Μπλε-ιώδες					
Μπλε-Πράσινο					
Κόκκινη					

8. Χρησιμοποιήστε αυτά τα δεδομένα για τον υπολογισμό της σταθεράς Rydberg (με το σφάλμα της) και συγκρίνετε με την βιβλιογραφία.

Υπολογισμός σειράς Balmer του υδρογόνου και σταθεράς Rydberg			
Χρώμα	Μήκος κύματος (nm)	$m$	$R$
Ιώδες		6	
Μπλε-ιώδες		5	
Μπλε-Πράσινο		4	
Κόκκινη		3	
Μέση τιμή $R = ( \quad \pm \quad )$			

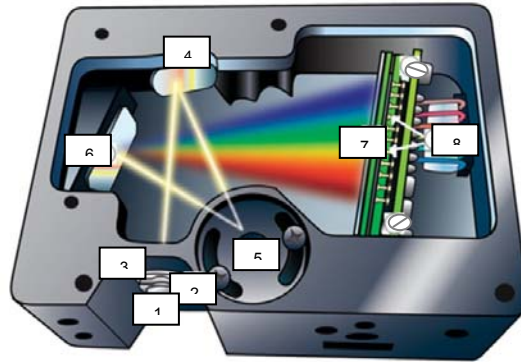
## Μέρος δεύτερο: Φασματοσκοπία με φασματογράφο φράγματος

Το φασματοσκόπιο αποτελείται από το φασματόμετρο και τον υπολογιστή με το αντίστοιχο λογισμικό για την λειτουργία του φασματόμετρου και την απεικόνιση και καταγραφή των φασμάτων. Το φασματόμετρο είναι το SPECTRA-1 (Visible Light Spectrometer) της KVANT (εικόνα 1) με εύρος μέτρησης μήκους κύματος από 360nm έως 800nm.

Το φως από την πηγή οδηγείται μέσω ενός εύκαμπτου καλωδίου οπτικών ινών στη είσοδο του φασματόμετρου, όπου και αναλύεται σε μήκη κύματος και ανιχνεύεται με CCD και καταγράφεται σε υπολογιστή μέσω σύνδεσης USB (βλ. εικόνα 2).



Εικόνα 1: Το Φασματόμετρο SPECTRA-1 της KVANT



Εικόνα 2: Αρχή λειτουργίας του φασματόμετρου SPECTRA-1 της KVANT (Φωτογραφία του εσωτερικού του φασματόμετρου USB4000 της Ocean Optics)· τα μέρη του φασματόμετρου περιγράφονται στον πίνακα 1.

**Πίνακας 1: Λειτουργικά μέρη στο φασματόμετρο**

Δείκτης	Περιγραφή
1	Είσοδος φωτός (μέσω οπτικής ίνας)
2	Σχισμή εισόδου (παραλληλόγραμμη, εύρους από 5 μm έως 200 μm)
3	Φίλτρο εισόδου
4	Κάτοπτρο κατεύθυνσης και πορείας δέσμης
5	Κατοπτρικό φράγμα περίθλασης (φράγμα χαραγμένο σε κάτοπτρο, ανάλυση < 2 nm)
6	Κάτοπτρο προβολής
7	Στοιχεία συγκέντρωσης φωτός στα εικονοστοιχεία του CCD
8	Σειρά εικονοστοιχείων (CCD με ανάλυση εικονοστοιχείου < 0.5 nm) τα οποία μετατρέπουν το οπτικό σήμα, το οποίο έχει ήδη αναλυθεί στα αντίστοιχα μήκη κύματος, σε ηλεκτρικό σήμα. Τα ηλεκτρικά αυτά σήματα μετατρέπονται σε αντίστοιχες, ανά εικονοστοιχείο, ψηφιακές τιμές οι οποίες μεταφέρονται μέσω USB στον υπολογιστή για καταγραφή και ανάλυση.

Το λογισμικό, το οποίο συνοδεύει το φασματόμετρο SPECTRA-1, επιτρέπει την λήψη των δεδομένων και την επεξεργασία τους και την γραφική παρουσίαση τους σε πραγματικό χρόνο. Η γραφική απεικόνιση φάσματος γίνεται έτσι, ώστε σε κάθε μήκος κύματος να αντιστοιχεί διαφορετικό χρώμα στην οθόνη. Τα δεδομένα μπορούν να αποθηκευθούν σαν καμπύλη και/ή σαν πίνακας.

Το λογισμικό έχεις πολλές δυνατότητες· εδώ θα περιγραφούν συνοπτικά αυτά τα οποία απαιτούνται στην συγκεκριμένη άσκηση. Πλήρεις οδηγίες βρίσκονται στην διεύθυνση: [http://users.uoa.gr/~eanason/F4/SPECTRA-1\\_Software\\_Manual.pdf](http://users.uoa.gr/~eanason/F4/SPECTRA-1_Software_Manual.pdf)

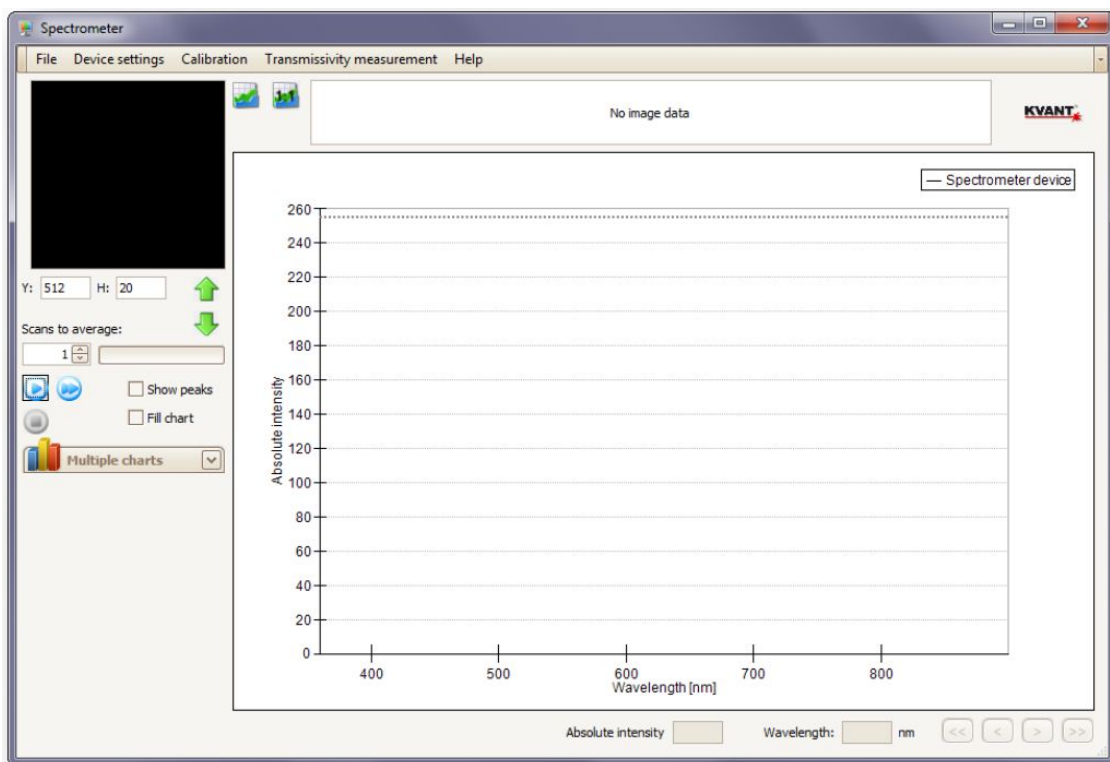
### Έναρξη λογισμικού και μετρήσεων

Στην οθόνη του υπολογιστή βρίσκουμε το εικονίδιο του λογισμικού του SPECTRA-1 (εικ.3) και το εκκινούμε με το ποντίκι, ως συνήθως.

Όταν το πρόγραμμα αρχίσει, θα εμφανιστεί το λειτουργικό παράθυρο του προγράμματος (εικόνας 4), το οποίο αποτελείται από το τμήμα της ανάλυσης του φάσματος με τους άξονες της καμπύλης, το τμήμα της προεπισκόπησης του σήματος (μαύρη εικόνα, αφού δεν έχουμε σήμα), εικονίδια για play κλπ και οι συνήθεις επιλογές των παραθυρικών λογισμικών.



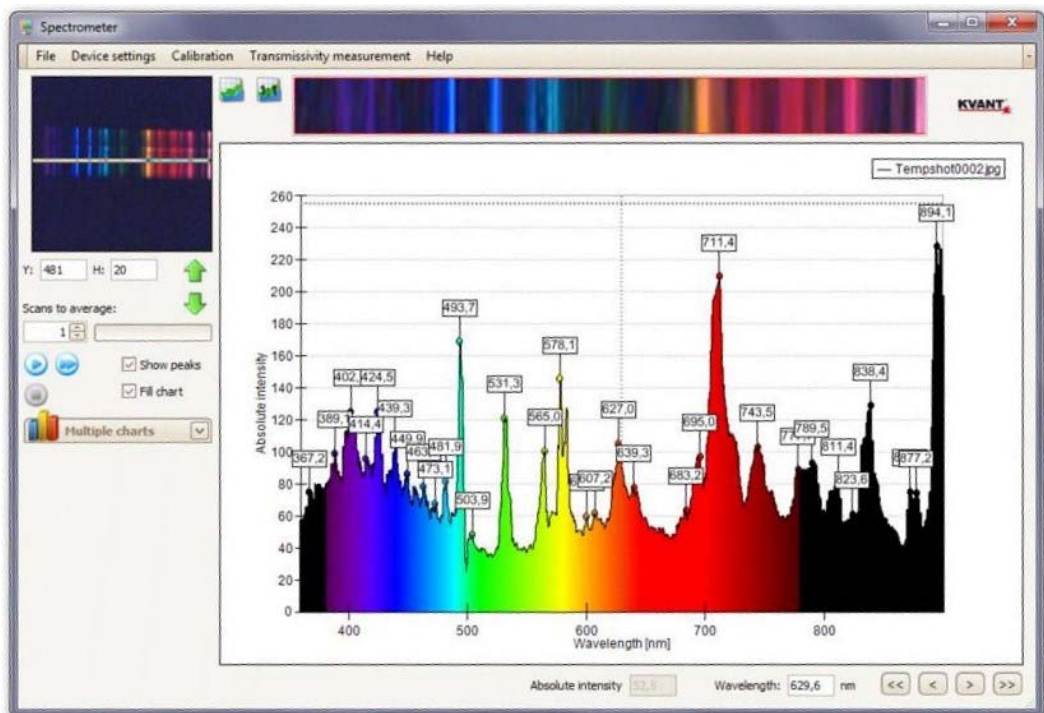
Εικόνα 3



Εικόνα 4: Το παράθυρο του λογισμικού του SPECTRA-1

Αν φωτίσουμε το ελεύθερο άκρο της οπτικής ίνας με πηγή φωτός και επιλέγουμε το play, θα αρχίσει η καταγραφή, και ανάλογα με την πηγή που έχουμε, θα λάβουμε το φάσμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 5, με το μήκος κύματος κάθε κορυφής σε πινακίδιο (αν έχουμε επιλέξει τις λειτουργίες 'Show peaks και Fill chart').

Όταν αποφασίσουμε, σταματάμε την λήψη δεδομένων επιλέγοντας με το ποντίκι το stop.



**Εικόνα 5:** Το παράθυρο του λογισμικού του SPECTRA-1, με προεπισκόπηση και καταγραφή οπτικού φάσματος

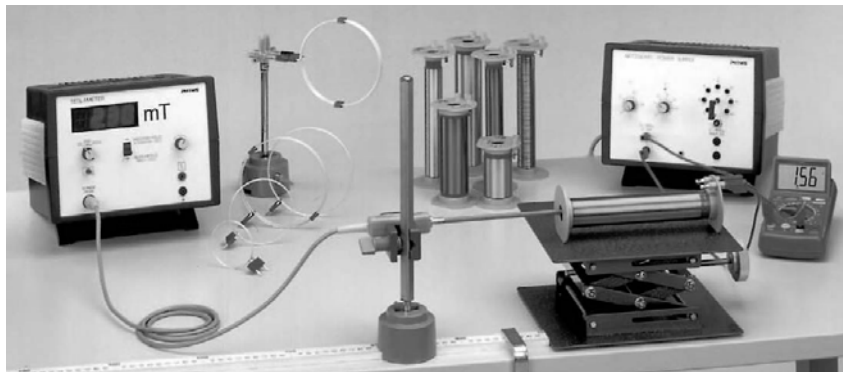
## Πειραματική διαδικασία

1. Φωτίζουμε το ελεύθερο άκρο της οπτικής ίνας με φωτεινή πηγή υδρογόνου και επιλέγουμε το play. Θα αρχίσει η καταγραφή, και θα πάρουμε το φάσμα του Η. Πατάμε το stop.
2. Καταγράφουμε τα μήκη  $\lambda_i$ , των γραμμών του υδρογόνου και εκτιμούμε το σφάλμα τους. Καταχωρούμε τις τιμές σε πίνακα και συμπληρώνουμε στον πίνακα τους ακέραιους αριθμούς  $n_i$  των σειρών Balmer του υδρογόνου.
3. Σχεδιάζουμε την συνάρτηση  $1/\lambda = f(1/n_i^2)$  και υπολογίζουμε την σταθερά του Rydberg, R.
4. Επαναλαμβάνουμε τα 1,2 και 3 με πηγή αγνώστου φωτός.
5. Συγκρίνουμε και σχολιάζουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τις δύο μεθόδους.

## Άσκηση Δ8. Μελέτη μαγνητικού πεδίου πηνίου, Νόμος Biot-Savart

### Σκοπός της άσκησης

Σε αυτή την άσκηση μελετάμε την δημιουργία μαγνητικού πεδίου σε πηνίο και τον νόμο του Ampère. Μετρούμε και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της έντασης του μαγνητικού πεδίου μεταξύ διαφόρων πηνίων. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από έναν αγωγό, κατά μέτρο και διεύθυνση σε κάθε σημείο του χώρου A, υπολογίζεται με τον νόμο Biot-Savart αθροίζοντας τα διανύσματα των στοιχειωδών μαγνητικών πεδίων που παράγονται στο σημείο A από στοιχειώδη τμήματα του αγωγού, ds, τα οποία απέχουν r από το σημείο A, σχηματίζουν γωνία φ με το διάνυσμα r και διαρρέονται από ρεύμα I. Γενικά η ένταση είναι ανάλογος του ρεύματος διαρρέει τον αγωγό. Με εφαρμογή του νόμου αυτού, υπολογίζουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ένα πηνίο. Η ένταση αυτή εξαρτάται από την διάμετρο του πηνίου R, του μήκους του και τον αριθμό των σπειρών (ειδικά από τον αριθμό των σπειρών ανά μονάδα μήκους) και είναι ανάλογος του ρεύματος που το διαρρέει. Πειραματικά, η ένταση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να μετρηθεί με ένα ανιχνευτή μαγνητικού πεδίου που στηρίζεται στο φαινόμενο Hall. Συγκεκριμένα, όταν εφαρμοσθεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα κομμάτι μετάλλου ή ημιαγωγού που παρεμβάλλεται σε μαγνητικό πεδίο, έτσι ώστε το ρεύμα να είναι κάθετο στο μαγνητικό πεδίο, στα άκρα του ελάσματος, τα οποία είναι κάθετα στο ρεύμα και στο μαγνητικό πεδίο, αναπτύσσεται μία διαφορά δυναμικού η οποία εξαρτάται από το είδος και την πυκνότητα των φορέων του ρεύματος, το ρεύμα και το μαγνητικό πεδίο.

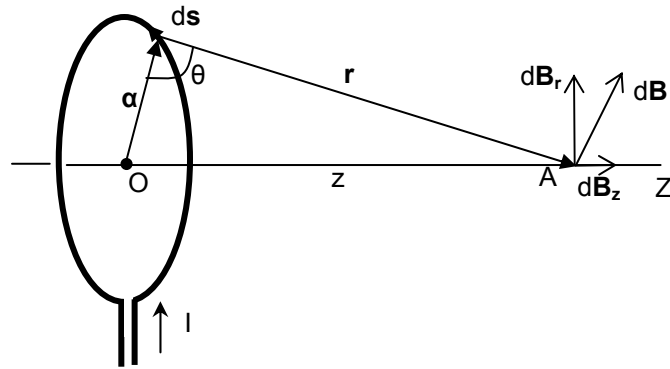


Εικόνα 1: Πειραματική διάταξη της μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου

### Μαγνητικό πεδίο βρόχων και πηνίων

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα κυκλικό αγωγό ακτίνας a, που διαρρέεται από ρεύμα I (Σχ.1). Σε ένα στοιχειώδες τμήμα του αγωγού ds, το στοιχειώδες ρεύμα dl παράγει σε σημείο A που βρίσκεται πάνω στον άξονα συμμετρίας του κυκλικού αγωγού και σε απόσταση z από το κέντρο του O, το στοιχειώδες μαγνητικό πεδίο dB. Το διάνυσμα αυτό είναι κάθετο στο διάνυσμα r (από το ds στο A) και βρίσκεται στο επίπεδο που ορίζεται από την ακτίνα a του κυκλικού αγωγού, την απόσταση z και το διάνυσμα r και το μέτρο του υπολογίζεται από τον νόμο του Biot-Savart:

$$dB = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \cdot \frac{|ds \times r|}{r^2} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \cdot \frac{ds}{z^2 + a^2} \quad (1)$$



Σχήμα 1. Απεικόνιση στοιχειώδους μαγνητικού πεδίου  $d\mathbf{B}$

Το στοιχειώδες  $d\mathbf{B}$  αναλύεται σε δύο συνιστώσες,  $d\mathbf{B}_z$  και  $d\mathbf{B}_r$ , πάνω και κάθετα στον άξονα Z αντίστοιχα. Ωστόσο, επειδή ένα συμμετρικό ως το O τμήμα του αγωγού  $ds'$ , θα παράγει ένα συμμετρικό ως προς τον άξονα Z στοιχειώδες  $d\mathbf{B}'$ , το οποίο αναλύεται πάλι σε δύο αντιστοίχως συνιστώσες,  $d\mathbf{B}_z'$  και  $d\mathbf{B}_r'$ . Ισχύει ότι  $d\mathbf{B}_r = -d\mathbf{B}_r'$ . Συνεπώς μόνο το  $d\mathbf{B}_z$  συνεισφέρει στην παραγωγή του μαγνητικού πεδίου B στο σημείο A και μάλιστα το διάνυσμα του B βρίσκεται επί του άξονος OZ και έχει φορά από το O προς το Z (Σχήμα 1).

Συνεπώς το  $d\mathbf{B}_z$  υπολογίζεται βάσει του παρακάτω ολοκληρώματος

$$d\mathbf{B}_z = \oint d\mathbf{B} \cdot \cos\theta \Rightarrow d\mathbf{B}_z = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \oint \frac{ds \cdot \cos\theta}{z^2 + \alpha^2} \quad (2)$$

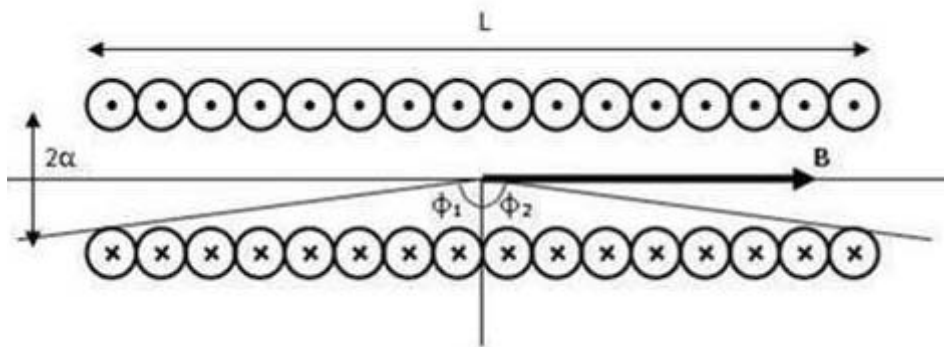
Το  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb}/(\text{A}\cdot\text{m}) = 1.2566 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}/(\text{A}\cdot\text{m})$

Αντικαθιστώντας το  $\cos\theta = \frac{\alpha}{z^2 + \alpha^2}$  έχουμε:

$$d\mathbf{B}_z = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot \alpha}{4\pi \cdot (z^2 + \alpha^2)^{3/2}} \oint ds \Rightarrow B_z = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot \alpha^2}{2 \cdot (z^2 + \alpha^2)^{3/2}} \quad (3)$$

Αν το πηνίο αποτελείται από N παράλληλους αγωγούς τότε η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο άξονα συμμετρίας του πηνίου υπολογίζεται με βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot \alpha^2 \cdot N}{2 \cdot (z^2 + \alpha^2)^{3/2}} \quad (4)$$



Σχήμα 2. Απεικόνιση της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε τομή σωληνοειδούς



Τελικά, η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του κυκλικού αγωγού,  $N$  σπειρών, (αν  $z = 0$ ) θα ισούται με:

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{2 \cdot a} \quad (5)$$

Με παρόμοιο τρόπο μπορεί να υπολογιστεί το μαγνητικό πεδίο πηνίου που διαρρέεται από ρεύμα σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου, ωστόσο οι υπολογισμοί είναι πολύπλοκοι.

Αν το πηνίο είναι σε μορφή σωληνοειδούς, με βάση την σχέση (5), υπολογίζουμε τελικά το μέτρο του  $B$  στο κέντρο του σωληνοειδούς (Σχέση 6). Η απόδειξη της παρακάτω σχέσης ζητείται να γίνει από τους φοιτητές στα πλαίσια της γραπτής άσκησης που θα παραδώσουν.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{2 \cdot L} (\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1) = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot n}{2} (\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1) \quad (6)$$

όπου  $L$  το μήκος του σωληνοειδούς,  $\varphi_1$  και  $\varphi_2$  οι γωνίες όπως φαίνονται στο σχήμα και  $n=N/L$  η πυκνότητα των βρόχων (Σχήμα 2). Αν το σωληνοειδές πηνίο είναι απείρου μήκους (ή πρακτικά, η ακτίνα  $\ll$  μήκους,  $\varphi_1 \approx -90^\circ$  και  $\varphi_2 \approx 90^\circ$ ), το  $\sin\varphi_2 = 1$  και  $\sin\varphi_1 = -1$  και, τελικά, η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του σωληνοειδούς ισούται με:

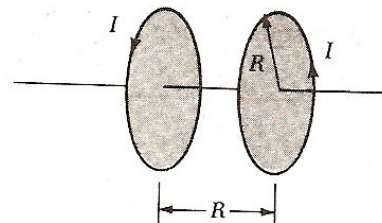
$$B = \mu_0 \cdot I \cdot n \quad (7)$$

Αντίστοιχα στο άκρο του σωληνοειδούς ( $\varphi_1 \approx 0^\circ$  και  $\varphi_2 \approx 90^\circ$ , το  $\sin\varphi_2 = 1$  και  $\sin\varphi_1 = 0$ ) η ένταση του μαγνητικού πεδίου ισούται με:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot n}{2} \quad (8)$$

### Μαγνητικό πεδίο δύο παραλλήλων λεπτών πηνίων

Αν, τώρα, έχουμε δύο κυκλικά πηνία, ακτίνας  $R$  το καθένα και κάθετα στον κοινό άξονά τους, με κέντρα που απέχουν επίσης απόσταση  $R$ , και που διαρρέονται από σταθερό ρεύμα  $I$  της ίδιας φοράς και για τα δύο πηνία, τότε το μαγνητικό πεδίο στο μέσον της απόστασης και πρακτικά κατά μήκος του άξονά τους είναι ομογενές.



Αυτή η ιδιαίτερη διάταξη ονομάζεται «**πηνία Helmholtz**» και χρησιμοποιείται ευρέως στο εργαστήριο για τη παραγωγή ομογενούς μαγνητικού πεδίου σε περιορισμένο χώρο.

Το μαγνητικό πεδίο στον άξονά τους και σε απόσταση  $x$  από το κέντρο του πρώτου είναι:

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2} \left( \frac{1}{(R^2 + x^2)^{3/2}} + \frac{1}{(2R^2 + x^2 - 2Rx)^{3/2}} \right)$$

Αναλύοντας τη παρένθεση κατά Taylor (αναφορά) γύρω στο σημείο  $x = 0$ , καταλήγουμε ότι:

$$B = \frac{0.715 \mu_0 I}{R}$$

και αν έχουμε  $N$  σπείρες ανά πηνίο, τότε έχουμε:

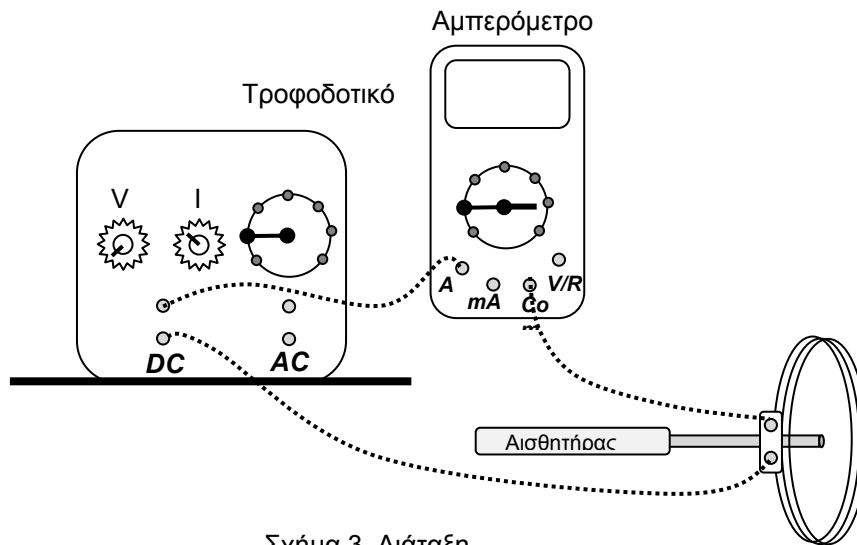
$$B = \frac{0.715 \mu_0 I N}{R} \quad (2)$$

Προσοχή: Η (2) ισχύει όταν το «εύρος» των  $N$  σπειρών είναι μικρό σε σχέση με το  $R$  ώστε πρακτικά οι  $N$  σπείρες να αποτελούν κυκλικό αγωγό.

## Πειραματική διαδικασία<sup>5</sup>

### A. Μαγνητικό πεδίο μεταλλικών βρόχων

A 1. Αναγνωρίζουμε τα μέρη της άσκησης και σχεδιάζουμε το κύκλωμα που θα χρησιμοποιήσουμε. Το κύκλωμα περιλαμβάνει τροφοδοτικό, αμπερόμετρο και μεταλλικούς βρόχους (εικ. 1).



Σχήμα 3. Διάταξη

A 2. Την ένταση του μαγνητικού πεδίου την μετρούμε με μαγνητόμετρο που στηρίζεται στο φαινόμενο Hall. Εξοικειωθείτε με την συσκευή μετρώντας το μαγνητικό πεδίο της Γης, χρησιμοποιώντας τον αξονικό αισθητήρα και τον επίπεδο αισθητήρα. Παρατηρήστε την διεύθυνση του αισθητήρα. **Στις επόμενες μετρήσεις πρέπει να έχουμε υπόψη το μαγνητικό πεδίο και να το ελαχιστοποιήσουμε (αν χρειάζεται).**

A 3. Χρησιμοποιώντας τους κυκλικούς βρόχους και τον αξονικό αισθητήρα Hall, πραγματοποιούμε το κύκλωμα (Σχήμα 3).

ΠΡΙΝ ΠΡΟΧΩΡΗΣΟΥΜΕ, Ο/Η ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ/ΟΥΣΑ ΕΛΕΓΧΕΙ ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ.

A 4. Μετρούμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου,  $B_{\pi}$ , στο κέντρο του βρόχου ακτίνας  $a = 30\text{mm}$ , συναρτήσει του ρεύματος  $I$ , από 0 έως 5A. Σχεδιάζουμε την καμπύλη  $B_{\pi} = f(I)$ . Από την καμπύλη, υπολογίζουμε το  $\mu_0$  με το σφάλμα του και το συγκρίνουμε με το της βιβλιογραφίας. Σχολιάζουμε τα αποτελέσματα.

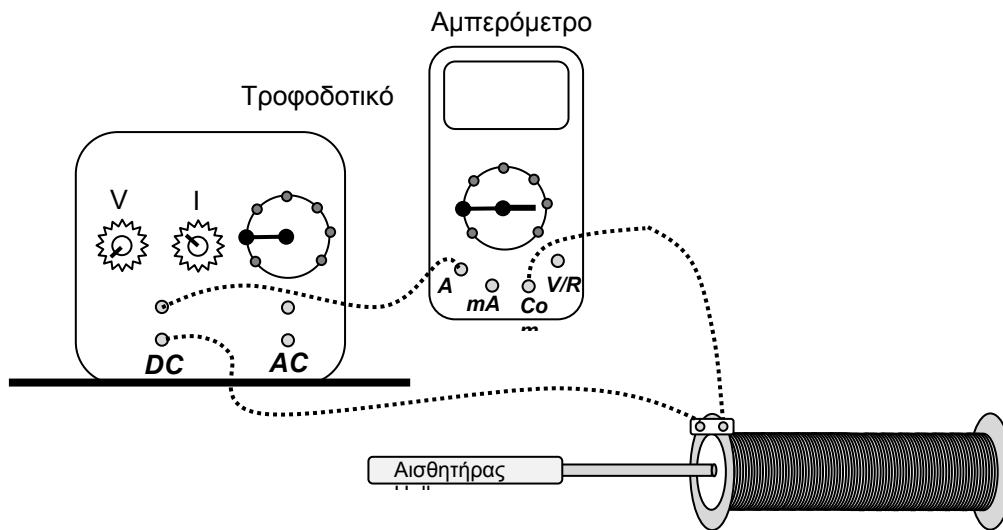
A 5. Μετρούμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου,  $B_{\pi}$ , στο κέντρο κάθε βρόχου ακτίνας  $a = 60\text{mm}$ , διοχετεύοντας ρεύμα  $I = 5\text{A}$  και σχεδιάζουμε την καμπύλη  $B_{\pi} = f(N)$ , όπου  $N$  ο αριθμός των σπειρών. Από την καμπύλη, υπολογίζουμε το  $\mu_0$  με το σφάλμα του και το συγκρίνουμε με το της βιβλιογραφίας. Σχολιάζουμε τα αποτελέσματα.

### B. Μαγνητικό πεδίο πηνίων

B 1. Χρησιμοποιώντας τα πηνία, πραγματοποιούμε το κύκλωμα (Σχήμα 4).

<sup>5</sup> Σειρά άσκησης για Δ6A: Α, Β, Γ. Για Δ6B: Γ, Α, Β

ΠΡΙΝ ΠΡΟΧΩΡΗΣΟΥΜΕ, Ο/Η ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ/ΟΥΣΑ ΕΛΕΓΧΕΙ ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ.



Σχήμα 4

B 2. Μετρούμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου,  $B_{\pi}$ , στο κέντρο κάθε πηνίου διαμέτρου  $d = 26\text{mm}$ , διοχετεύοντας ρεύμα  $I = 1.0\text{ A}$ . Σχεδιάζουμε την καμπύλη  $B_{\pi} = f(n)$ , όπου  $n$  ο λόγος  $N/L$ , όπου  $N$  ο αριθμός των σπειρών και  $L$  το μήκος του πηνίου. Από την πειραματική καμπύλη, υπολογίζουμε το  $\mu_0$  με το σφάλμα του.

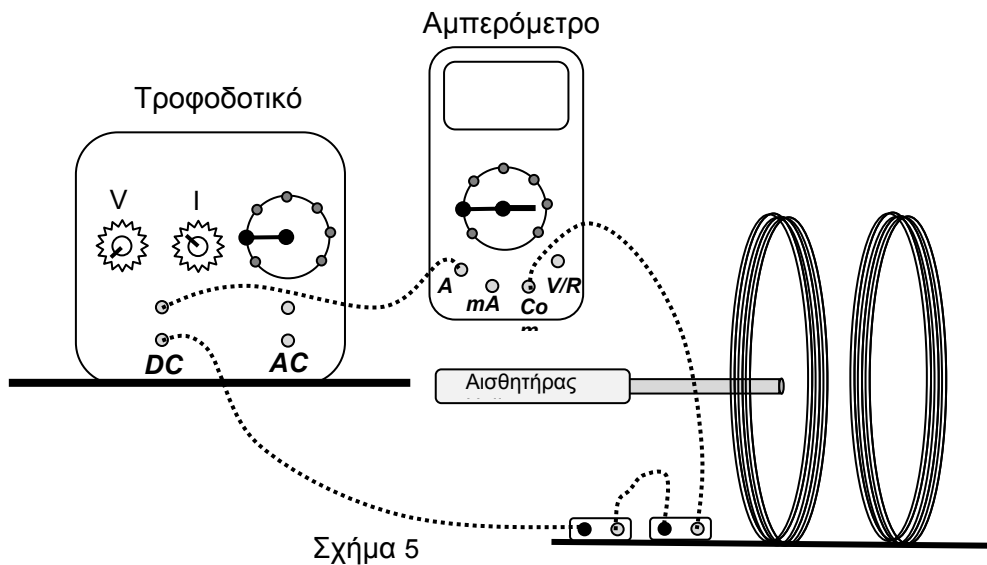
B 3. Διαλέγουμε δύο πηνία με μήκος  $L = 160\text{mm}$  και διαμέτρου  $d = 26\text{mm}$  και με διαφορετικό αριθμό βρόχων, με  $N = 300$  σπείρες και με 75 ή 150 σπείρες. Διοχετεύοντας ρεύμα  $I = 1\text{A}$ , μετρούμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου στον άξονα του πηνίου, σαν συνάρτηση της απόστασης  $x$ , από το κέντρο του πηνίου έως όπου "μηδενιστεί" το πεδίο. Υπολογίζουμε, βάση των στοιχείων του ενός πηνίου και του σχετικού τύπου, την αναμενόμενη ένταση του μαγνητικού πεδίου. Σχεδιάζουμε τις σχετικές καμπύλες,  $B=f(x)$  και σχολιάζουμε τα αποτελέσματα.

B 4. Επαναλαμβάνουμε με το πηνίο μήκους  $L = 160\text{mm}$  και διαμέτρου  $d = 33\text{mm}$  ή  $41\text{mm}$  και με αριθμό βρόχων,  $N = 300$  σπείρες. Διοχετεύοντας ρεύμα  $I = 1\text{A}$ , μετρούμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου στον άξονα του πηνίου, σαν συνάρτηση της απόστασης  $x$ , από το κέντρο του πηνίου έως όπου "μηδενιστεί" το πεδίο. Σχεδιάζουμε την σχετική καμπύλη,  $B=f(x)$  στο διάγραμμα της 4B και σχολιάζουμε τα αποτελέσματα.

### Γ. Μαγνητικό πεδίο μεταλλικών δύο παραλλήλων βρόχων (πηνία Helmholtz)

Γ 1. Χρησιμοποιώντας τα πηνία Helmholtz, πραγματοποιούμε το κύκλωμα (Σχήμα 5), συνδέοντας το πρώτο πηνίο.

ΠΡΙΝ ΠΡΟΧΩΡΗΣΟΥΜΕ, Ο/Η ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ/ΟΥΣΑ ΕΛΕΓΧΕΙ ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ.



Γ 2. Μετρούμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου,  $B_{\pi}$ , αξονικά στο κέντρο του πηνίου διοχετεύοντας ρεύμα  $I = 2.0 \text{ A}$ , για διάφορες αξονικές αποστάσεις  $x$ , ανά 5 cm κοντά στα πηνία και 10 cm μακρύτερα από απόσταση 40cm έξω από τα δύο πηνία έως 20 cm μετά το δεύτερο πηνίο. Σχεδιάζουμε την καμπύλη  $B_{\pi} = f(x)$ .

Γ 3. Συνδέουμε σειρά και το δεύτερο πηνίο. Μετρούμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου,  $B_{\pi}$ , αξονικά στα κέντρα του πηνίου διοχετεύοντας ρεύμα  $I = 2.0 \text{ A}$ , για διάφορες αποστάσεις  $x$ , ανά 5 cm κοντά στα πηνία και 10 cm μακρύτερα από απόσταση 40cm έξω από τα δύο πηνία έως 20 cm μετά το δεύτερο πηνίο. Σχεδιάζουμε την καμπύλη  $B_{\pi} = f(x)$  στο ίδιο διάγραμμα με το 11. Σχολιάζουμε τα αποτελέσματα.

### Αναφορές

- R.A. Serway Physics, Τόμος II, Ηλεκτρομαγνητισμός, 3rd edition, 1990, απόδοση Λ.Κ. Ρεσβάνη
- David J.Griffiths, Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική, Τόμος ,I Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1999