

Άσκηση 10

Μελέτη της χωρητικότητας πυκνωτή και μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς υλικών

10.1. Σκοπός

Σκοπός της άσκησης είναι ο προσδιορισμός της χωρητικότητας ενός πυκνωτή και η μελέτη της εξάρτησής της από τα γεωμετρικά στοιχεία του πυκνωτή και από το υλικό που παρεμβάλλεται μεταξύ των οπλισμών του.

10.2. Εισαγωγή

Πυκνωτής είναι σύστημα δύο αγωγών ικανό να συσσωρεύει ηλεκτρικό φορτίο.

Στην επιστημονική έρευνα και Τεχνολογία χρησιμοποιούνται πολλών ειδών πυκνωτές, όπως πυκνωτές κενού, συσσώρευσης μεγάλου ηλεκτρικού φορτίου, υψηλής τάσης κ.λ.π.

Συνήθως μεταξύ των δύο αγωγών παρεμβάλλεται μονωτικό υλικό με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας του πυκνωτή.

Αν μεταξύ δύο αρχικά αφόρτιστων αγωγών εφαρμόσουμε μια διαφορά δυναμικού ή τάση, U , τότε στις επιφάνειές τους θα αναπτυχθεί καθαρό (πλεόνασμα) θετικού και αρνητικού φορτίου $+Q$ και $-Q$. Το φορτίο αυτό είναι ανάλογο προς την εφαρμοσμένη τάση U :

$$Q = CU \quad (10.1)$$

Στη σχέση (10.1) ο συντελεστής αναλογίας C , μεταξύ Q και U , ονομάζεται χωρητικότητα του πυκνωτή

Η χωρητικότητα είναι μέγεθος χαρακτηριστικό του πυκνωτή, που εκφράζει την ικανότητά του να αποθηκεύει φορτία. Η τιμή της εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία και από το υλικό που βρίσκεται μεταξύ των αγωγών.

Στην περίπτωση που ο πυκνωτής είναι επίπεδος, δηλαδή οι αγωγοί (οπλισμοί) είναι δύο λεπτές και παράλληλα τοποθετημένες πολύ κοντά πλάκες, στο κενό, η χωρητικότητά του δίνεται από τον τύπο:

$$C = \epsilon_0 S/d \quad (10.2)$$

όπου S είναι το εμβαδόν των μεταλλικών πλακών, d η απόσταση μεταξύ των δύο οπλισμών και ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού.

Στο σύστημα μονάδων S.I, όπου μονάδα φορτίου είναι το Coulomb (C) και τάσης το Volt, (V), η μονάδα χωρητικότητας είναι το Farad (F, $F = C/V$). Η τιμή της σταθεράς ϵ_0 είναι $8,85 \times 10^{-12}$ F/m ή 8,85 pF/m.

Όταν οι οπλισμοί του πυκνωτή δεν είναι πολύ κοντά, το ηλεκτρικό πεδίο στα άκρα του, διαφοροποιείται αισθητά από το ομογενές πεδίο που υπάρχει στο εσωτερικό του. Στην περίπτωση που ο πυκνωτής έχει οπλισμούς παράλληλες κυκλικές πλάκες ακτίνας R , στην σχέση (10.2) εμφανίζεται ο διορθωτικός παράγοντας f :

$$C = \epsilon_0(S/d)f \quad (10.3)$$

ο οποίος εξαρτάται από τον λόγο d/R . Στον παρακάτω πίνακα δίνονται μερικές τιμές του παράγοντα f για διάφορους λόγους d/R :

d/R	f
0,2	1,286
0,1	1,167
0,05	1,094
0,02	1,042
0,01	1,023

Ένα μονωτικό υλικό μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή αυξάνει τη χωρητικότητά του. Έτσι, αν C_0 είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή στο κενό και C με μονωτικό υλικό, ο λόγος

$$\varepsilon_r = C/C_0 \quad (10.4)$$

ονομάζεται **σχετική διηλεκτρική σταθερά** του υλικού και χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο. Η ε_r είναι αδιάστατο μέγεθος και είναι 1 στο κενό, περίπου 1 στον αέρα, αλλά στο νερό είναι περίπου 81!

Αν μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή παρεμβάλει υλικό με σχετική διηλεκτρική σταθερά ε_r , η χωρητικότητά του αυξάνει ε_r φορές

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 (S/d) = \varepsilon_r C_0 \quad (10.5)$$

όπου το μέγεθος ε_r ονομάζεται **διηλεκτρική σταθερά του υλικού**

10.2.1. Η πόλωση των μη αγώγιμων υλικών

Τα μη αγώγιμα υλικά, πολώνονται όταν βρεθούν μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο.

Μέτρο της Πόλωσης, P , είναι η ηλεκτρική διπολική ροπή που αναπτύσσεται ανά μονάδα όγκου του υλικού. Στα περισσότερα διηλεκτρικά υλικά η σχέση μεταξύ της πόλωσης, P , και του ηλεκτρικού πεδίου που επικρατεί στο υλικό είναι γραμμική, δηλαδή:

$$P = \chi_e E \quad (10.6)$$

όπου χ_e είναι η **ηλεκτρική επιδεκτικότητα** του υλικού και εκφράζει την ανά μονάδα όγκου πολωσιμότητά του (διπολική ροπή που αναπτύσσεται σε μονάδα όγκου από μονάδα ηλεκτρικού πεδίου).

Το πηλίκιο $\chi_e/\varepsilon_0 = \chi_r$ ονομάζεται **σχετική ηλεκτρική επιδεκτικότητα** και ισχύει:

$$\varepsilon_r - 1 = \chi_r \quad (10.7)$$

10.3. Μέθοδος

Στην Άσκηση θα μελετηθούν πειραματικά οι σχέσεις (10.1), (10.2) και (10.4), με τη μέθοδο φόρτισης-εκφόρτωσης πυκνωτή. Για τον σκοπό αυτό θα διεξαχθούν τα ακόλουθα πειράματα:

- Μελέτη της μεταβολής του ηλεκτρικού φορτίου του πυκνωτή ως συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στους οπλισμούς του.
- Μελέτη της εξάρτησης της χωρητικότητας ενός πυκνωτή από την απόσταση μεταξύ των οπλισμών του.
- Προσδιορισμός της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς υλικών.

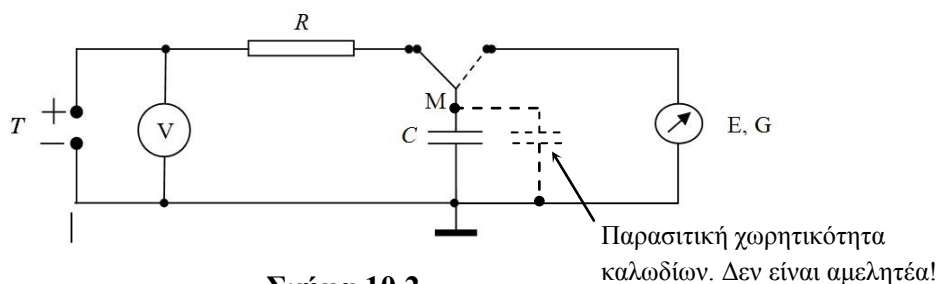
Κάθε μέτρηση περιλαμβάνει δύο φάσεις:

(α) Τη φόρτιση του πυκνωτή από μια πηγή συνεχούς τάσης (τροφοδοτικό), μέσω μιας ωμικής αντίστασης προστασίας 100 MΩ.

(β) Τη μέτρηση του φορτίου του πυκνωτή με ειδικό «μετρητή» φορτίου.

10.4. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί φαίνεται στο Σχ.10.2.



Η διάταξη αποτελείται από:

- Πυκνωτή παράλληλων οπλισμών με μεταβλητή απόσταση μεταξύ τους, με κυκλικές πλάκες διαμέτρου 20 cm (στο Σχ. 20.2 συμβολίζεται ως C)
- Τροφοδοτικό συνεχούς τάσης 0-200 V (συμβολίζεται ως T)
- Βολτόμετρο (συμβολίζεται ως V), ενσωματωμένο στο τροφοδοτικό συνεχούς τάσης
- Όργανο μέτρησης φορτίου (συμβολίζεται ως E, G)
- Προστατευτική αντίσταση 100 MΩ (συμβολίζεται ως R)
- Μεταγωγό (συμβολίζεται ως M)

Βιβλιογραφία

1. *Μαθήματα Φυσικής Berkeley*, τόμος 2: *Ηλεκτρισμός-Μαγνητισμός*. (Αθήνα, 1978), Κεφ. 3, 7.
2. *M. Alonso και Finn, Θεμελιώδης Πανεπιστημιακή Φυσική*, τόμος 2, μέρος 2: *Ηλεκτρομαγνητισμός*. (Αθήνα, 1981), Κεφ. 16.
3. *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής*, Τόμος I, ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, Εκδόσεις Συμμετρία (Αθήνα, 2010).

10.5. Εκτέλεση

10.5.1. Μέτρηση της χωρητικότητας του πυκνωτή

1. Αναγνωρίστε τα όργανα και τη λειτουργία τους. Συνδέστε τα ακολουθώντας το Σχ. 10.2.
2. Ρυθμίστε το διάκενο στον πυκνωτή 2 mm.
3. Ρυθμίστε την τάση στην πηγή στα 25 V ($U = 25$ V).
4. Γυρίστε τον μεταγωγό (M) στη θέση “φόρτισης” (σύνδεση με την πηγή τάσης) και στη συνέχεια ελευθερώστε τον. Μέσω ενός ελατηρίου, ο μεταγωγός αυτομάτως θα μετακινηθεί στη θέση “εκφόρτισης”, όπου γίνεται σύνδεση του πυκνωτή με τον μετρητή φορτίου E, G . Καταγράψτε στον Πίνακα I την τιμή της τάσης U και του φορτίου Q . Σημειώνουμε ότι στη μέτρηση αυτή η τιμή του Q περιλαμβάνει και το φορτίο της παρασιτικής χωρητικότητας, που πρέπει τελικά να αφαιρεθεί.
5. Για να μετρηθεί το παρασιτικό φορτίο, αποσυνδέστε τον πυκνωτή C από το κύκλωμα και επαναλάβετε τη μέτρηση του φορτίου. Το φορτίο Q' που θα μετρήσετε έτσι, θα αντιστοιχεί στο παρασιτικό φορτίο των καλωδίων συνδεσμολογίας, που δεν είναι αμελητέο. Συμπληρώστε τις τιμές U, Q , και Q' στον Πίνακα I. Η διαφορά $Q_{\pi} = Q - Q'$ θα μας δώσει το φορτίο Q_{π} που συσσωρεύτηκε στον πυκνωτή C .
6. Επαναλάβετε το βήμα 4, καλύπτοντας την περιοχή 50-200 V με βήμα 25 V. Καταγράψτε τα αποτελέσματα στον Πίνακα I.
7. Αποσυνδέστε τον πυκνωτή C από το κύκλωμα προκειμένου να μετρηθεί το παρασιτικό φορτίο και επαναλάβετε το βήμα 5, καλύπτοντας την περιοχή 50-200 V με βήμα 25 V. Καταγράψτε τα αποτελέσματα στον Πίνακα I.

Πίνακας I

U (V)	$Q = Q_{\pi} + Q'$ (C)	Q' (C)	$Q_{\pi} = Q - Q'$ (C)

10.5.2. Εξάρτηση της χωρητικότητας του πυκνωτή από το διάκενο μεταξύ των οπλισμών

Μεταβάλλετε την απόσταση μεταξύ των οπλισμών από 0,5 ως 3 mm, αυξάνοντάς την κατά 0,5 mm κάθε φορά. Στις μετρήσεις αυτές, φορτίζετε τον πυκνωτή με την ίδια τάση (π.χ. 145V) και μετράτε τα φορτία, Q και Q' , όπως προηγουμένως. Καταγράψτε τα αποτελέσματα στον Πίνακα II.

Πίνακας II

d (mm)	Q (C)	Q' (C)	$Q_{\pi} = Q - Q'$ (C)	$C = Q_{\pi}/U$ (pF)

10.5.3. Μέτρηση της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς υλικών

Για κάθε υλικό που θα μελετηθεί, επαναλάβετε τα βήματα 4 και 5 (του μέρους 10.5.1), σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

1. Εισάγετε το διηλεκτρικό μεταξύ των οπλισμών. Μετρήστε τα φορτία, καλύπτοντας το διάστημα 50-200 V και καταγράψτε τα αποτελέσματα στον Πίνακα III (στήλες U , $Q_{\text{διηλ.}}$).
2. Εξάγετε το διηλεκτρικό από τον πυκνωτή χωρίς να μεταβληθεί η απόσταση μεταξύ των οπλισμών και για τις ίδιες τιμές της τάσης μετρήστε τα φορτία. Καταγράψτε τα αποτελέσματα στον Πίνακα III (στήλη $Q_{\text{αερ.}}$).

Πίνακας III

U (V)	$Q_{\text{διηλ.}}$ (C)	$Q_{\text{αερ.}}$ (C)	$C_{\text{διηλ.}}$ (pF)	$C_{\text{αερ.}}$ (pF)	ϵ_r

10.6. Επεξεργασία των μετρήσεων

10.6.1. Προσδιορισμός της χωρητικότητας του πυκνωτή

1. Από τα ζεύγη των τιμών Q_{π} και U του Πίνακα I, χαράξτε την καμπύλη Q_{π} ως συνάρτηση του U . Υπολογίστε την κλίση της ευθείας με τη γραφική μέθοδο και από την κλίση της ευθείας υπολογίστε τη μέση τιμή της χωρητικότητας, C , καθώς και το σφάλμα της δC . Γράψτε το αποτέλεσμα σε μορφή $C \pm \delta C$.
2. Συγκρίνετε την τιμή της C που βρήκατε με τη θεωρητική (Εξ. 10.3).
3. Σχολιάστε τη διαφορά των δύο τιμών.

10.6.2. Εξάρτηση της χωρητικότητας του πυκνωτή από την απόσταση μεταξύ των οπλισμών

1. Υπολογίστε τις τιμές της χωρητικότητας, C , για κάθε μία από τις αποστάσεις που χρησιμοποιήσατε και καταχωρήστε τις στον Πίνακα II.
2. Σχεδιάστε το διάγραμμα C συναρτήσει του $1/d$ και ελέγξτε τη γραμμικότητα της σχέσης.
3. Στο παραπάνω διάγραμμα χαράξτε και τη θεωρητική καμπύλη που προκύπτει από την Εξ. (10.3).
4. Σχολιάστε τις διαφορές μεταξύ των δύο καμπυλών.

10.6.3 Προσδιορισμός της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς υλικών

1. Από τις τιμές του Πίνακα III, υπολογίστε τις αντίστοιχες τιμές της χωρητικότητας του πυκνωτή, με διηλεκτρικό ($C_{\text{διηλ.}}$) και με αέρα ($C_{\text{αερ.}}$) μεταξύ των οπλισμών, χρησιμοποιώντας την Εξ. (10.1) και συμπληρώστε τις τον Πίνακα III.
2. Για τις τιμές της τάσης που χρησιμοποιήσατε, υπολογίστε από την Εξ. (10.4) τις τιμές της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, ϵ_r , και καταγράψτε τις στον Πίνακα III.
3. Υπολογίστε τη μέση τιμή της ϵ_r και το σφάλμα της, $\epsilon_r \pm \delta \epsilon_r$.
4. Ποιες αιτίες μπορεί να έχουν αλλοιώσει την τιμή που υπολογίσατε;