

Κεφάλαιο 4

ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ - ΠΥΚΝΩΤΕΣ

Ενότητα 4.1

Το ηλεκτρικό πεδίο

“Διδακτικοί στόχοι”

Με τη μελέτη της ενότητας αυτής οι μαθητές θα είναι σε θέση:

- *Να ορίζουν το ηλεκτροστατικό πεδίο.*
- *Να ορίζουν την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και τη μονάδα μέτρησής της.*
- *Να περιγράφουν τη μορφή των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών σε απλές περιπτώσεις ηλεκτρικών πεδίων.*
- *Να αναφέρουν τις ιδιότητες των δυναμικών γραμμών.*
- *Να περιγράφουν το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής επίδρασης (επαγωγής).*
- *Να ορίζουν το δυναμικό και τη διαφορά δυναμικού.*
- *Να αναφέρουν τη μονάδα μέτρησης του δυναμικού και της διαφοράς δυναμικού.*
- *Να αναφέρουν τη σχέση διαφοράς δυναμικού και έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.*

4.1.1. Εισαγωγή

Στο μάθημα της Φυσικής έχουμε μάθει για το πεδίο βαρύτητας. Είναι ο χώρος γύρω από τη Γη, όπου ασκείται ελκτική δύναμη από τη Γη σε κάθε υλικό σώμα, που θα βρεθεί σε αυτόν.

Στο Κεφάλαιο 3 γνωρίσαμε και το μαγνητικό πεδίο, ως το χώρο γύρω από τους μαγνήτες (και τους ηλεκτρομαγνήτες), όπου ασκούνται δυνάμεις σε κάθε αντικείμενο που μπορεί να μαγνητιστεί.

Στο Κεφάλαιο 1 έχει αναφερθεί ακόμη, ότι ένα σώμα ηλεκτρικά φορτισμένο ασκεί έλξη ή άπωση σε κάθε άλλο ηλεκτρικό φορτίο που υπάρχει στο γύρω χώρο του (Νόμος του Κουλόμπ).

Μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί ότι τα ηλεκτρικά φορτία δημιουργούν στο γύρω χώρο τους ένα πεδίο, ανάλογο με το πεδίο βαρύτητας και το μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό ονομάζεται **ηλεκτρικό πεδίο**.

□ **Ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται ο χώρος, όπου ασκούνται ηλεκτρικές δυνάμεις σε κάθε ηλεκτρικό φορτίο, που υπάρχει σε αυτόν.**

Όταν το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από ακίνητα ηλεκτρικά φορτία, ονομάζεται **ηλεκτροστατικό πεδίο**. Αν το πεδίο δημιουργείται από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία, ονομάζεται **μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο**. Στο ηλεκτροστατικό πεδίο οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα ηλεκτρικό φορτίο, τοποθετημένο μέσα στο πεδίο είναι σταθερές ως προς το χρόνο. Στο μεταβαλλόμενο, οι δυνάμεις μεταβάλλονται με το χρόνο.

Στο κεφάλαιο αυτό με τον όρο ηλεκτρικό πεδίο θα εννοούμε το ηλεκτροστατικό πεδίο.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, όπως γνωρίσαμε στο Κεφάλαιο 3, τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία (δηλαδή το ηλεκτρικό ρεύμα) δημιουργούν γύρω τους, εκτός από ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο.

4.1.2. Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

Για να περιγράψει κανείς το ηλεκτρικό πεδίο πρέπει σε **κάθε σημείο** του να μπορεί να υπολογίζει τη **δύναμη** - κατά μέτρο, διεύθυνση και φορά - που θα ασκηθεί σε ένα **ηλεκτρικό φορτίο**, το οποίο θα βρεθεί στο συγκεκριμένο σημείο του πεδίου.

Η πειραματική έρευνα για το ηλεκτρικό πεδίο έδειξε τα εξής:

Αν σε ένα σημείο του πεδίου τοποθετηθεί ένα σφαιρίδιο⁽¹⁾ φορτισμένο με θετικό ηλεκτρικό φορτίο $+q$, τότε σε αυτό ασκείται ορισμένη δύναμη \vec{F} . Αν επαναληφθεί το πείραμα τοποθετώντας στο ίδιο σημείο σφαιρίδιο με διπλάσιο θετικό φορτίο $+2q$, η ασκούμενη δύναμη θα είναι διπλάσια $2\vec{F}$ (θα έχει διπλάσιο μέτρο και ίδια διεύθυνση και φορά). Συμπεραίνουμε ότι το μέτρο της δύναμης είναι ανάλογο του φορτίου.

Με άλλα λόγια, ο λόγος F / q είναι σταθερός για το συγκεκριμένο σημείο του πεδίου. Διαφορετικές τιμές αυτού του λόγου, χαρακτηρίζουν **κάθε σημείο** του πεδίου.

Μπορεί επομένως ο λόγος F / q να αποτελέσει το χαρακτηριστικό φυσικό μέγεθος του πεδίου, το οποίο ονομάζουμε **ένταση** του ηλεκτρικού πεδίου.

□ Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο του, είναι ο σταθερός λόγος της δύναμης F , που ασκείται σε φορτίο q τοποθετημένο στο παραπάνω σημείο, προς το φορτίο.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (4.1.1)$$

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι διανυσματικό μέγεθος, όπως και η δύναμη. Μέτρο της είναι το πηλίκο F / q και έχει διεύθυνση και φορά ίδια με την διεύθυνση και φορά της δύναμης \vec{F} .

⁽¹⁾ Σημείωση: Θεωρείται ότι το φορτίο του σφαιριδίου είναι αρκετά μικρό, ώστε να μην αλλοιώνει τη μορφή του αρχικού πεδίου. Τέτοια φορτισμένα σώματα τα οποία έχουν πολύ μικρές διαστάσεις, ώστε να μπορούν να θεωρηθούν ως σημεία, ονομάζονται **σημειακά φορτία**, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 1.

Μονάδα της έντασης στο S.I. είναι το $1 \text{ N} / \text{C}$ (Νιούτον ανά Κουλόμπ).

Η μονάδα αυτή, όπως θα δούμε στη συνέχεια, είναι ισοδύναμη με τη μονάδα $1 \text{ V} / \text{m}$ (βόλτ ανά μέτρο), η οποία και χρησιμοποιείται περισσότερο.

$$1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

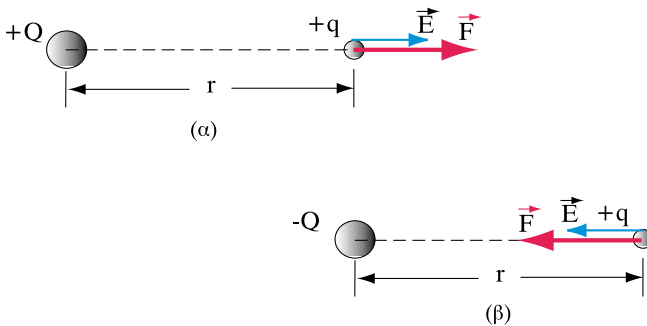
Πρέπει να σημειωθεί ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ανεξάρτητη από το είδος του φορτίου q στη σχέση ορισμού της (4.1.1). Αν στη θέση του θετικού φορτίου $+q$, τοποθετηθεί αρνητικό φορτίο $-q$, η δύναμη που ασκείται στο φορτίο είναι αντίθετης φοράς (σύμφωνα με το νόμο του Κουλόμπ). Το πηλίκο $(-\mathbf{F}) / (-q)$ έχει την ίδια τιμή με το πηλίκο \mathbf{F} / q . Επομένως δεν αλλάζει η φορά της έντασης.

Αν είναι γνωστή η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο του, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η δύναμη που ασκείται σε οποιοδήποτε σημειακό φορτίο q , που τοποθετείται στο σημείο αυτό, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \tag{4.1.2}$$

> Παράδειγμα 1

Η πιο απλή περίπτωση ηλεκτρικού πεδίου είναι το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από ένα ακίνητο σημειακό φορτίο Q .



Σχήμα 4.1.1: Δύναμη που ασκείται σε σημειακό φορτίο $+q$ ευρισκόμενο σε απόσταση r από ηλεκτρικό φορτίο $+Q$ και $-Q$ αντίστοιχα.

Στο Σχ.4.1.1. παρουσιάζεται το πεδίο γύρω από ένα θετικό φορτίο + Q. Αν σε απόσταση r από το φορτίο τοποθετηθεί ένα σημειακό θετικό φορτίο +q, σύμφωνα με το νόμο του Κουλόμπ, θα ασκηθεί σε αυτό απωστική δύναμη:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \times \frac{qQ}{r^2}$$

Όπου:

F η ασκούμενη δύναμη σε N

r η απόσταση του φορτίου q από το Q σε m

q, Q τα φορτία σε C

ϵ η **διηλεκτρική σταθερά** του υλικού, μέσα στο οποίο βρίσκονται τα φορτία.

Για το **κενό** η διηλεκτρική σταθερά έχει την τιμή:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 10^9} \times \frac{C^2}{Nm}$$

Για τα άλλα μονωτικά υλικά η διηλεκτρική σταθερά δίνεται από τη σχέση: $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ όπου ϵ_r η **σχετική διηλεκτρική σταθερά**, η οποία είναι “καθαρός αριθμός” και δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διηλεκτρική σταθερά του υλικού από τη διηλεκτρική σταθερά του κενού.

Για τον **ατμοσφαιρικό αέρα** λαμβάνεται κατά προσέγγιση $\epsilon_r = 1$, θεωρείται δηλαδή ότι η διηλεκτρική σταθερά του αέρα είναι ίδια με του κενού.

Σύμφωνα με τον ορισμό της έντασης:

$$E = \frac{F}{q}$$

$$E = \frac{\frac{qQ}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2}}{q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2}$$

Η τελευταία σχέση μας δίνει την ένταση του πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου που απέχει απόσταση r από το σημειακό φορτίο +Q.

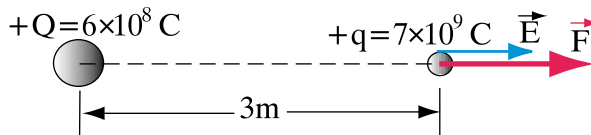
Εύκολα αποδεικνύεται ότι αν στη θέση του φορτίου $+Q$ τοποθετηθεί φορτίο $-Q$ η φορά της έντασης είναι αντίθετη (Σχ.4.1.1.).

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, έχουμε για το πεδίο γύρω από ένα σημειακό φορτίο τα εξής:

- Η διεύθυνση της έντασης \vec{E} σε ένα σημείο του πεδίου, καθώς και της δύναμης \vec{F} είναι η ευθεία που ενώνει το φορτίο Q με το σημείο.
- Η φορά της έντασης \vec{E} και της δύναμης \vec{F} είναι από το φορτίο Q προς το σημείο, αν το φορτίο είναι θετικά φορτισμένο και αντίθετη, αν το φορτίο Q είναι αρνητικό.
- Το μέτρο της έντασης E μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης r του σημείου από το φορτίο.
- Τα σημεία του χώρου που βρίσκονται σε ομόκεντρες σφαιρικές επιφάνειες με κέντρο το φορτίο Q έχουν ένταση \vec{E} με το ίδιο μέτρο και φορά, διαφορετική όμως διεύθυνση.

Αριθμητική εφαρμογή:

Αν $Q = +6 \times 10^8 \text{ C}$, $r = 3 \text{ m}$ και $q = +7 \times 10^9 \text{ C}$ να βρεθούν η ένταση E του πεδίου και η δύναμη F που ασκείται στο φορτίο q (στο χώρο του πεδίου υπάρχει αέρας, $\epsilon_r = 1$)



Λύση:

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2} = \frac{6 \times 10^{-8} \text{ C}}{4\pi \times \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2} \times 3^2 \text{ m}^2} = 60 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

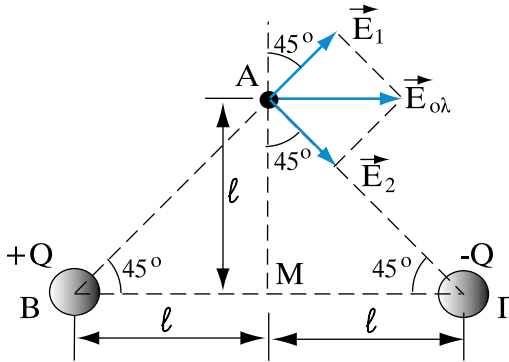
Η δύναμη που ασκείται στο φορτίο q δίνεται από τη σχέση:

$$F = q \cdot E$$

$$F = 60 \frac{\text{N}}{\text{C}} \times 7 \times 10^{-8} \text{C} = 4,2 \times 10^{-6} \text{N}$$

➤ Παράδειγμα 2:

Δύο σφαίρες που μπορούν να θεωρηθούν ως σημειακά φορτία $+Q$ και $-Q$ είναι τοποθετημένες όπως στο σχήμα. Ζητείται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο A που βρίσκεται πάνω στη μεσοκάθετο του διαστήματος 2ℓ (απόσταση των δύο φορτίων) και απέχει απόσταση ℓ από το μέσον του.



Σχήμα 4.1.2: Η $E_{ολ}$ είναι η συνισταμένη των διανυσμάτων E_1 και E_2

Απάντηση:

Το φορτίο $+Q$ δημιουργεί στο σημείο A ένταση E_1 το μέτρο της οποίας δίνεται από τον τύπο:

$$E_1 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 (AB)^2}$$

Όπου $(AB)^2 = l^2 + l^2 = 2l^2$ από το ισοσκελές ορθογώνιο τρίγωνο MAB (Πυθαγόρειο θεώρημα). Η φορά της έντασης είναι από το φορτίο +Q προς το σημείο A.

Το φορτίο -Q στο σημείο A δημιουργεί ένταση E_2 , το μέτρο της οποίας δίνεται από τον τύπο:

$$E_2 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0(AG)^2}$$

Όπου $(AG)^2 = l^2 + l^2 = 2l^2$ από το ισοσκελές ορθογώνιο τρίγωνο MAB. Η φορά της έντασης είναι από το σημείο A προς το φορτίο - Q .

Η ολική ένταση $\vec{E}_{ολ}$ προκύπτει από τη διανυσματική πρόσθεση των δύο εντάσεων \vec{E}_1 και \vec{E}_2 , για την οποία ισχύει ο κανόνας του παραλληλογράμου (βλέπε και Κεφάλαιο 5)

Για την περίπτωση του σχήματος όπου τα διανύσματα E_1 και E_2 είναι κάθετα μεταξύ τους η $E_{ολ}$ μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$E_{ολ} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

Αντικαθιστούμε τις τιμές των E_1 και E_2 από τις προηγούμενες σχέσεις και έχουμε:

$$E_{ολ} = \sqrt{\left(\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 2l^2}\right)^2 + \left(\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 2l^2}\right)^2} = \frac{Q\sqrt{2}}{8\pi\epsilon_0 l^2}$$

Αριθμητική εφαρμογή:

Για $Q = 8 \times 10^{-8} \text{ C}$

$l = 2 \text{ m}$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \times \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$$

Η τιμή της έντασης $E_{ολ}$ είναι:

$$E_{ολ} = \frac{8 \times 10^{-8} \times \sqrt{2}}{8\pi \times \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \times 2^2} \frac{N}{C}$$

$$E_{ολ} = 10\sqrt{2} \frac{N}{C} = 14,1 \frac{N}{C}$$

4.1.3 Ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές

Στην προηγούμενη παράγραφο (4.1.2) ορίστηκε η ένταση E ως το χαρακτηριστικό φυσικό μέγεθος του ηλεκτρικού πεδίου. Γνωρίζοντας την ένταση σε κάθε σημείο του πεδίου μπορούμε να απαντήσουμε σε ερωτήματα σχετικά με τη συμπεριφορά ηλεκτρικών φορτίων που θα βρεθούν στο χώρο του πεδίου.

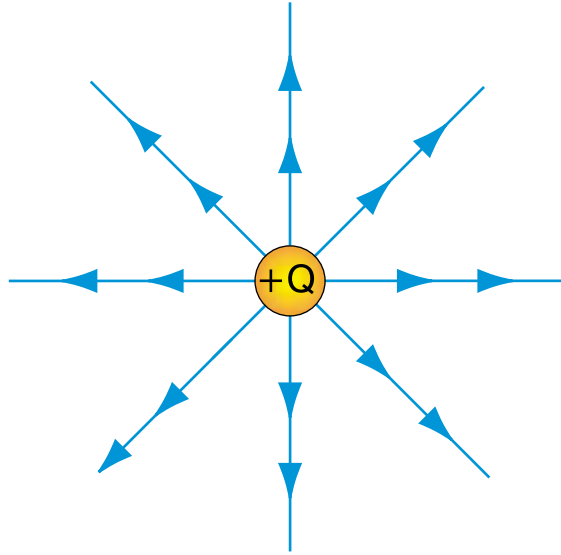
Επειδή η ένταση E του πεδίου μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο, για να έχουμε μια εποπτική εικόνα των εντάσεων που επικρατούν στα διάφορα σημεία, χρειαζόμαστε κάποιο χάρτη του πεδίου. Θα μπορούσαμε να ορίσουμε ένα σύστημα συντεταγμένων και μια κλίμακα και να σημειώσουμε π.χ. σε κάθε τετραγωνικό εκατοστό του χάρτη, την ένταση του πεδίου κατά μέτρο, διεύθυνση και φορά.

Ένας άλλος τρόπος, για να σχηματίσουμε την εικόνα του πεδίου, είναι να σχεδιάσουμε τις **δυναμικές γραμμές** του ηλεκτρικού πεδίου, όπως κάναμε με τις μαγνητικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου (Κεφάλαιο 3).

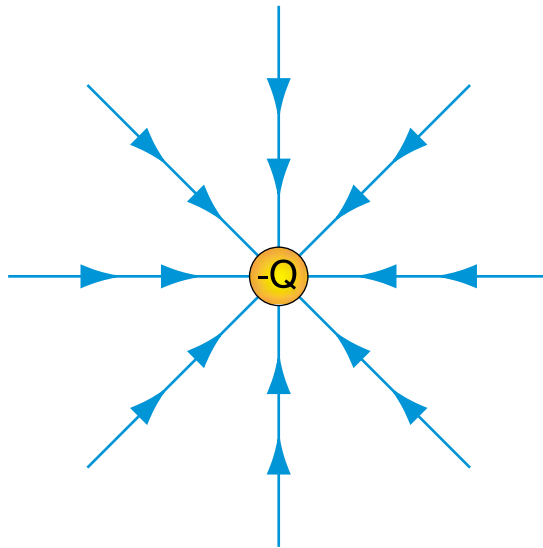
Ας υποθέσουμε ότι τοποθετούμε μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο ένα σημειακό ηλεκτρικό φορτίο q (αρκετά μικρό ώστε να μην αλλοιώνει το πεδίο) και του επιτρέπουμε να κινηθεί πολύ αργά, έτσι ώστε κάθε χρονική στιγμή η διεύθυνση και η φορά της *κίνησης* του να συμπίπτει με τη διεύθυνση και φορά της *δύναμης* που ασκεί το πεδίο σε αυτό. Με αυτή την προϋπόθεση, καθώς η δύναμη μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο, το φορτίο θα διαγράψει μια τροχιά. Η εφαπτομένη σε κάθε σημείο αυτής της τροχιάς δίνει τη διεύθυνση της δύναμης, άρα και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, αφού η δύναμη και η ένταση είναι συγγραμμικά διανύσματα.

Αν σχηματιστούν αρκετές τέτοιες τροχιές που ξεκινούν από διαφορετικά σημεία του πεδίου θα έχουμε τις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Ο συνολικός αριθμός των δυναμικών γραμμών, που απεικονίζονται, είναι ανάλογος της

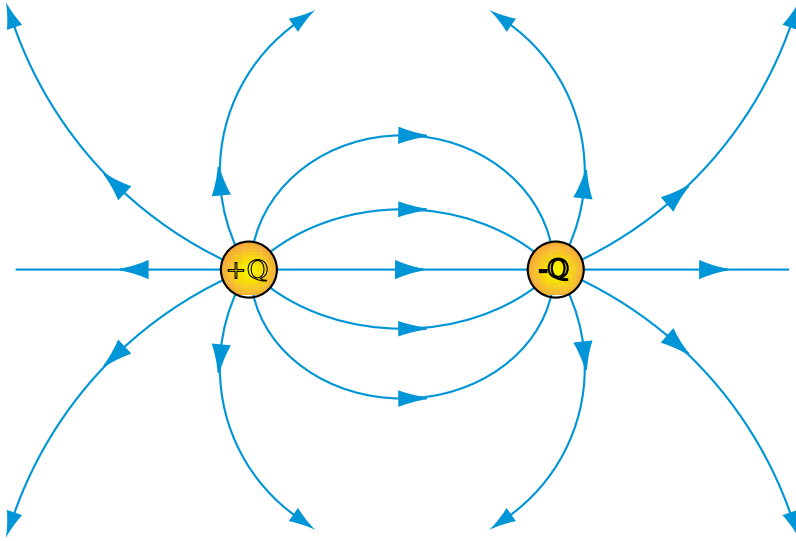
ποσότητας των ηλεκτρικών φορτίων του πεδίου. Στα Σχ.4.1.3 έως 4.1.7. απεικονίζονται οι δυναμικές γραμμές μερικών απλών ηλεκτρικών πεδίων.



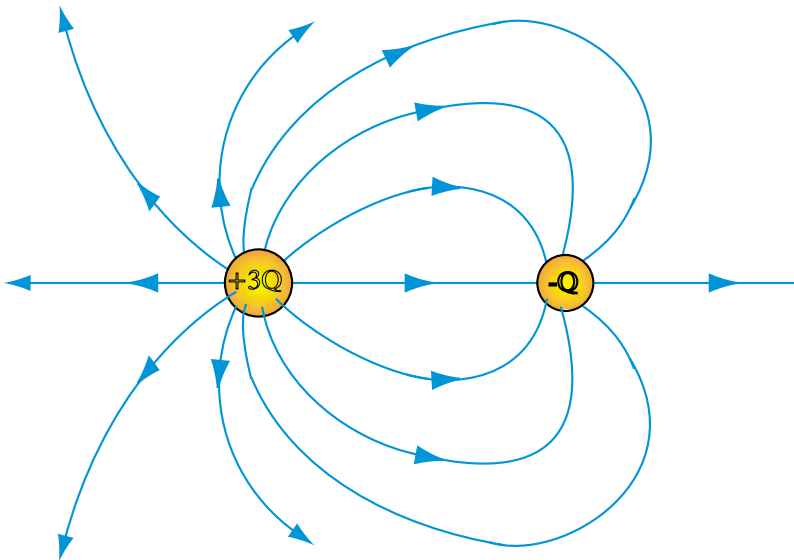
Σχήμα 4.1.3: Δυναμικές γραμμές του πεδίου γύρω από μια θετικά φορτισμένη σφαίρα



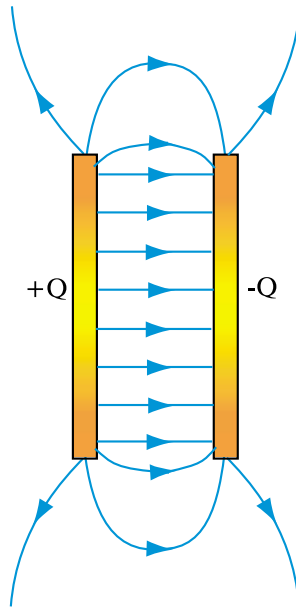
Σχήμα 4.1.4: Δυναμικές γραμμές του πεδίου γύρω από μια αρνητικά φορτισμένη σφαίρα



Σχήμα 4.1.5: Δυναμικές γραμμές του πεδίου, που σχηματίζεται από δύο σφαίρες ετερόνυμα φορτισμένες με φορτία $+Q$ και $-Q$



Σχήμα 4.1.6: Δυναμικές γραμμές του πεδίου, που σχηματίζεται από δύο σφαίρες ετερόνυμα φορτισμένες, με άνισα φορτία $+3Q$ και $-Q$



Σχήμα 4.1.7: Δυναμικές γραμμές ανάμεσα σε δύο πλάκες φορτισμένες με ίσα και αντίθετα ηλεκτρικά φορτία

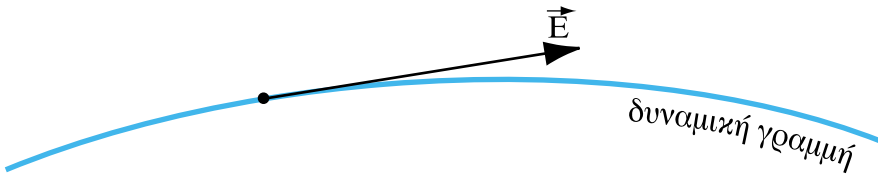
Οι δυναμικές γραμμές μας δίνουν πληροφορίες τόσο για τη **διεύθυνση** και τη **φορά** της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και για το **μέτρο** της.

Στα σημεία, όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παίρνει υψηλές τιμές (π.χ. κοντά στις σφαίρες στα σχήματα 4.1.3 έως 4.1.6), οι δυναμικές γραμμές είναι πιο **πυκνές**. Αν θεωρήσουμε μια μικρή επιφάνεια κάθετη στις δυναμικές γραμμές, η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών δίνεται από το λόγο του αριθμού των δυναμικών γραμμών που διέρχονται από την επιφάνεια, προς το εμβαδόν της επιφάνειας. Όσο περισσότερες γραμμές τέμνουν την επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη η πυκνότητα των γραμμών και τόσο μεγαλύτερη η ένταση του πεδίου.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω έχουμε τις εξής ιδιότητες για τις δυναμικές γραμμές:

- Σε κάθε σημείο της δυναμικής γραμμής το διάνυσμα της έντασης \vec{E} του ηλεκτρικού πεδίου, που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό, εφάπτεται της δυναμικής γραμμής. (Σχ. 4.1.8)

- Η φορά των δυναμικών γραμμών συμπίπτει με τη φορά της έντασης \vec{E} .
- Η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών είναι ανάλογη προς το μέτρο της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου.
- Οι δυναμικές γραμμές ξεκινούν από θετικά ηλεκτρικά φορτία και καταλήγουν σε αρνητικά.
- Οι δυναμικές γραμμές δεν τέμνονται.⁽²⁾



Σχήμα 4.1.8: Το διάνυσμα της έντασης E εφάπτεται της δυναμικής γραμμής

4.1.4 Το ομογενές ηλεκτρικό πεδίο.

Μεταξύ των ετερόνυμων φορτισμένων πλακών του Σχ.4.1.9, αν εξαιρεθούν τα άκρα των πλακών, οι δυναμικές γραμμές είναι ευθείες παράλληλες και σε κανονικές αποστάσεις μεταξύ τους. Η πυκνότητα δηλαδή των δυναμικών γραμμών είναι **σταθερή**, άρα και η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου.

□ Το πεδίο που έχει σταθερή ένταση \vec{E} σε όλα τα σημεία του ονομάζεται ομογενές (ή ομοιόμορφο).

4.1.5 Το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό των αγωγών.

Στο εσωτερικό των αγωγίμων σωμάτων δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Η ένταση δηλαδή του ηλεκτρικού πεδίου είναι μηδενική.

Αυτό συμβαίνει επειδή τα αγωγήμα σώματα διαθέτουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία μπορούν να μετακινηθούν από άτομο σε άτομο μέσα στη μάζα τους. Αν η ένταση E του πεδίου στο εσωτερικό τους είχε κάποια τιμή, τότε στα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια θα ασκούσαν δυνάμεις με αποτέλεσμα να **κινηθούν**. Αλλά στο ηλεκτροστατικό πεδίο δεν υπάρχει κίνηση ηλεκτρικών φορτίων. Θεωρείται ότι η όποια κίνηση ηλεκτρικών φορτίων έχει συντελεστεί και το πεδίο έχει σταθεροποιηθεί.

⁽²⁾ Σημείωση: Η ιδιότητα αυτή απορρέει από την πρώτη. Αν υπήρχε σημείο τομής, στο σημείο αυτό θα αντιστοιχούσαν δύο τιμές έντασης του πεδίου, αφού υπάρχουν δύο εφαπτόμενες, μία για κάθε γραμμή.

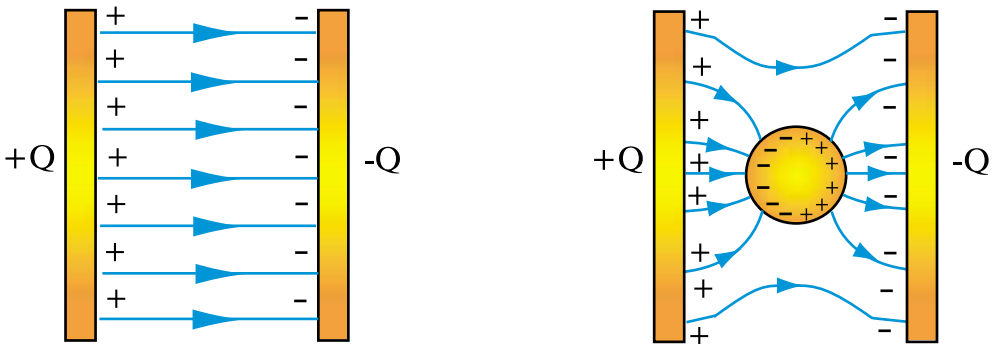
Όταν λοιπόν ένα ουδέτερο αγώγιμο σώμα φορτίζεται ηλεκτρικά (προστίθενται ή αφαιρούνται από αυτό ηλεκτρόνια), τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, τα αρνητικά ή θετικά φορτία να συσσωρευτούν και να κατανομηθούν **στην εξωτερική επιφάνεια του αγώγιμου σώματος**.

Το διάνυσμα της έντασης E στο ηλεκτροστατικό πεδίο είναι πάντοτε **κάθετο στην επιφάνεια των αγωγών**. Αυτό απορρέει επίσης από την ακινησία των φορτίων. Αν η ένταση δεν ήταν κάθετη στην επιφάνεια των αγωγών, θα μπορούσε να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, μία κάθετη και μία εφαπτόμενη στην επιφάνεια. Υπό την επίδραση της επιφανειακής συνιστώσας της έντασης θα υπήρχε κίνηση των φορτίων στην επιφάνεια των αγωγών, πράγμα που δε συμβαίνει αφού τα φορτία θεωρούνται ακίνητα.

Συμπερασματικά, το ηλεκτρικό πεδίο υφίσταται μόνο στο **μονωτικό χώρο που περιβάλλει** τα αγώγιμα σώματα και εξαφανίζεται στο εσωτερικό τους. Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου αρχίζουν και τελειώνουν στην επιφάνεια των αγωγών, την οποία συναντούν κάθετα.

4.1.6 Ηλεκτροστατική επίδραση

Αν ένα αγώγιμο σώμα που είναι ηλεκτρικά ουδέτερο βρεθεί μέσα σε ένα ηλεκτροστατικό πεδίο, στην επιφάνειά του σχηματίζονται θετικά και αρνητικά φορτία (Σχ.4.1.9).



Σχήμα 4.1.9: Στην επιφάνειά της μεταλλικής σφαίρας, που εισάγεται στο πεδίο που σχηματίζεται μεταξύ των δύο πλακών (ομογενές πεδίο), εμφανίζονται θετικά και αρνητικά φορτία

Το θετικό φορτίο της σφαίρας είναι ίσο και αντίθετο με το αρνητικό φορτίο.

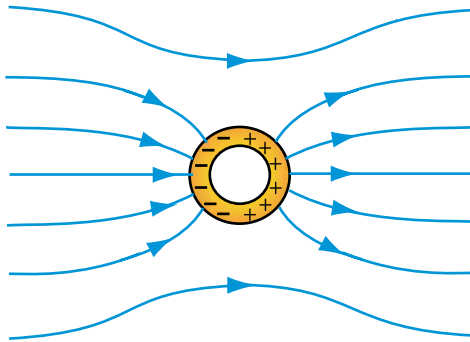
Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ηλεκτροστατική επίδραση** ή ηλεκτρο-στατική επαγωγή.

Στο εσωτερικό της φορτισμένης σφαίρας δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο.

Παρατηρούμε ακόμη ότι η είσοδος της μεταλλικής σφαίρας στο πεδίο, αλλοίωσε τις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Οι δυναμικές γραμμές εμφανίζονται καμπυλωμένες, σαν να έλκονται από τη σφαίρα.

Κοντά στη σφαίρα το πεδίο ενισχύθηκε (πύκνωσαν οι δυναμικές γραμμές) και εξαλείφθηκε στο εσωτερικό της σφαίρας.

Αν η σφαίρα είναι κοίλη (Σχ.4.1.10), στο κενό που σχηματίζεται στο εσωτερικό της δεν υπάρχει επίσης ηλεκτρικό πεδίο.



Σχήμα 4.1.10: Στο εσωτερικό της κοίλης αγωγικής σφαίρας δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο

Την ιδιότητα αυτή εκμεταλλευόμαστε για να δημιουργήσουμε χώρους απαλλαγμένους από την επίδραση εξωτερικών ηλεκτρικών πεδίων, π.χ. για να προστατέψουμε ευαίσθητα όργανα μετρήσεων, τα οποία μπορούν να επηρεαστούν από ηλεκτρικά πεδία.

Στις περιπτώσεις αυτές περιβάλλουμε τα όργανα με μεταλλικά φύλλα ή με πλέγματα που σχηματίζουν κλωβό (κλουβί) γύρω από αυτά. Ο κλωβός αυτός ονομάζεται και κλωβός Faraday. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η **ηλεκτρική θωράκιση** της ευαίσθητης συσκευής.

4.1.7 Δυναμικό και διαφορά δυναμικού.

Στα προηγούμενα γνωρίσαμε την ένταση \vec{E} του ηλεκτρικού πεδίου, ως ένα διανυσματικό μέγεθος που παίρνει διάφορες τιμές για κάθε σημείο του πεδίου. Γνωρίζοντας την ένταση σε ένα σημείο του πεδίου μπορούμε να απαντήσουμε στο ερώτημα, ποια δύναμη θα ασκηθεί σε ένα φορτίο που θα τοποθετηθεί υποθετικά στο σημείο αυτό.

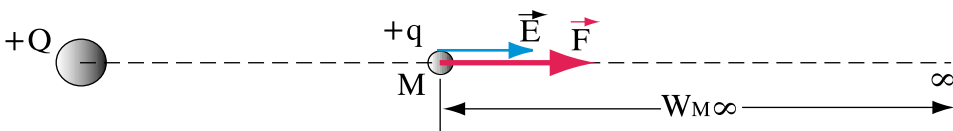
Στην παράγραφο αυτή θα ασχοληθούμε με ένα άλλο φυσικό μέγεθος που χαρακτηρίζει επίσης **κάθε σημείο** ενός ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο ονομάζεται **δυναμικό**. Το δυναμικό σχετίζεται με τη διαφορά δυναμικού, δηλαδή την ηλεκτρική τάση που είδαμε στην ενότητα 1.3. Σε αντίθεση με την ένταση που είναι διανυσματικό μέγεθος, το δυναμικό είναι μονόμετρο (βαθμωτό) μέγεθος, μετριέται δηλαδή με έναν αριθμό.

Το δυναμικό έχει σχέση με την **ενέργεια** και το **έργο**. Μας βοηθά να απαντήσουμε στο ερώτημα, **πόσο έργο** θα απαιτηθεί για να μετακινηθεί ένα φορτίο από ένα σημείο του πεδίου σε ένα άλλο.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σημειακό φορτίο $+Q$ (Σχήμα 4.1.11). Σ' ένα σημείο M του πεδίου του, τοποθετείται ένα μικρό θετικό ηλεκτρικό φορτίο $+q$, τόσο μικρό ώστε να θεωρείται ότι δεν αλλοιώνει τη μορφή του πεδίου.

Σύμφωνα με όσα γνωρίζουμε, στο φορτίο $+q$ θα ασκηθεί μια απωστική δύναμη $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$. Αν υποθέσουμε ακόμη ότι το φορτίο $+q$ μπορεί να κινείται ελεύθερα, τότε, υπό την επίδραση της δύναμης F το φορτίο θα κινηθεί **μέχρι να βγει έξω από το πεδίο**. Θεωρητικά αυτό θα συμβεί, όταν φθάσει στο άπειρο, πρακτικά, όταν απομακρυνθεί αρκετά, ώστε η ασκούμενη δύναμη F να είναι αμελητέα.

Κατά τα γνωστά, η κίνηση κατά τη διεύθυνση της δύναμης F από το σημείο M μέχρι το άπειρο, σημαίνει παραγωγή έργου από το πεδίο, το οποίο συμβολίζουμε με $W_{M\infty}$



Σχήμα 4.1.11: Η κίνηση του φορτίου από το σημείο M μέχρι το ∞ παράγει έργο $W_{M\infty}$

Αν διπλασιαστεί το φορτίο $+q$ και γίνει $+2q$, θα διπλασιαστεί και η δύναμη F (αφού είναι ανάλογη του φορτίου σύμφωνα με τη σχέση $F=q \cdot E$). Επομένως θα διπλασιαστεί και το έργο που παράγεται από το πεδίο και θα γίνει $2 \cdot W_{M\infty}$

Με άλλα λόγια, ο λόγος $W_{M\infty} / +q$ είναι ένα χαρακτηριστικό μέγεθος για κάθε σημείο M του πεδίου, ανεξάρτητο από την τιμή του φορτίου q . Το μέγεθος αυτό ονομάζεται **δυναμικό**.

□ **Δυναμικό U του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο του ονομάζεται ο σταθερός λόγος του έργου (W) που παράγεται από το πεδίο κατά την κίνηση ενός φορτίου $+q$ από το θεωρούμενο σημείο ως το άπειρο, δια του φορτίου $+q$.**

$$U = \frac{W}{+q} \quad (4.1.3)$$

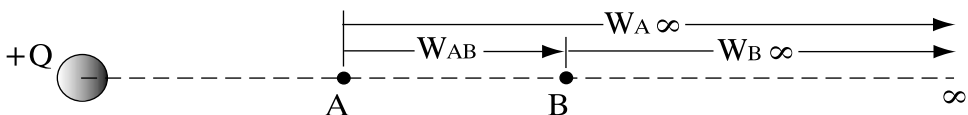
Το δυναμικό, όπως και το έργο, είναι μονόμετρο (βαθμωτό) μέγεθος. Είναι θετικό ή αρνητικό ανάλογα με το αν η κίνηση του φορτίου $+q$ γίνεται προς τη φορά του διανύσματος της έντασης E ή αντίθετα προς αυτήν.

Αν στη σχέση W/q θέσουμε για το έργο W την μονάδα 1J (Joule) και για το φορτίο τη μονάδα 1C (Coulomb), ορίζεται η μονάδα του δυναμικού 1V (Volt)

$$1V = \frac{1J}{1C}$$

Διαφορά δυναμικού

Αν μετακινηθεί ένα ηλεκτρικό φορτίο $+q$ από ένα σημείο A , που έχει δυναμικό U_A σε ένα άλλο σημείο B δυναμικού U_B τότε το έργο που θα παραχθεί W_{AB} μπορεί να υπολογιστεί ως εξής: (Σχ.4.1.12)



Σχήμα4.1.12: Διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων A και B του πεδίου

Αν $W_{A\infty}$ είναι το έργο που παράγεται για να βγει το φορτίο $+q$ από το πεδίο (να πάει στο άπειρο) ξεκινώντας από το σημείο A και $W_{B\infty}$ το αντίστοιχο έργο από το σημείο B, η διαφορά των δύο έργων $W_{A\infty} - W_{B\infty}$ μας δίνει το έργο W_{AB} .

Αν διαιρέσουμε τα έργα με το φορτίο $+q$

$$\begin{aligned} W_{AB} &= W_{A\infty} - W_{B\infty} \\ \Rightarrow \frac{W_{AB}}{+q} &= \frac{W_{A\infty}}{+q} - \frac{W_{B\infty}}{+q} \\ \Rightarrow \frac{W_{AB}}{+q} &= U_A - U_B \end{aligned}$$

□ Διαφορά δυναμικού $U_{AB} = U_A - U_B$ μεταξύ δύο σημείων A και B του ηλεκτρικού πεδίου είναι ο λόγος του έργου W_{AB} που παράγεται από το πεδίο κατά τη μετακίνηση ενός θετικού φορτίου $+q$ από το σημείο A στο σημείο B, δια του φορτίου.

$$U_{AB} = U_A - U_B = \frac{W_{AB}}{+q}$$

Αν $U_A > U_B$ η τιμή του έργου W_{AB} είναι **θετική**, δηλαδή η δύναμη \vec{F} που ασκεί το πεδίο στο φορτίο $+q$ μετακινεί το φορτίο από το σημείο A στο B. Η μετακίνηση επομένως γίνεται προς την κατεύθυνση του διανύσματος \vec{E} .

Αν $U_A < U_B$ η τιμή του έργου W_{AB} είναι **αρνητική**. Πρέπει δηλαδή να υπερνικηθεί η δύναμη \vec{F} , να προσδοθεί εξωτερικά ενέργεια στο φορτίο $+q$ προκειμένου να μετακινηθεί από το σημείο A στο σημείο B. Η μετακίνηση γίνεται αντίθετα προς την κατεύθυνση του διανύσματος \vec{E} .

Συμπερασματικά:

- Το δυναμικό μειώνεται κατά τη φορά της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (κατά τη φορά των δυναμικών γραμμών).
- Κάθε θετικό φορτίο το οποίο μπορεί να κινηθεί ελεύθερα μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο, κινείται από το υψηλότερο προς τα χαμηλότερα δυναμικό. Προς την αντίθετη κατεύθυνση κινούνται τα αρνητικά φορτία.

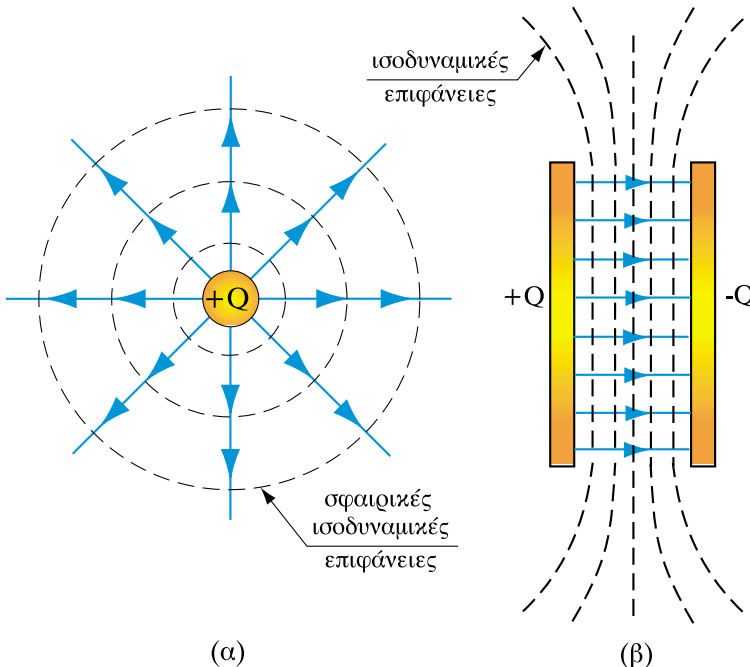
- Το έργο που παράγεται κατά την κίνηση ηλεκτρικού φορτίου q από το σημείο A προς το σημείο B , μεταξύ των οποίων επικρατεί διαφορά δυναμικού $U_A - U_B$ δίνεται από τη σχέση:

$$W_{AB} = q \cdot (U_A - U_B)$$

- Τα σημεία ενός πεδίου που έχουν το ίδιο δυναμικό σχηματίζουν **ισοδυναμικές επιφάνειες**. Οι ισοδυναμικές επιφάνειες τέμνουν **κάθιστα** τις δυναμικές γραμμές του πεδίου.

Οι επιφάνειες των αγωγίμων σωμάτων που βρίσκονται στο ηλεκτρικό πεδίο είναι ισοδυναμικές επιφάνειες, γιατί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, όπως έχει αναφερθεί (παραγρ.4.1.5), συναντά κάθετα την επιφάνειά τους.

Στις πρακτικές εφαρμογές δεν χρησιμοποιούνται οι απόλυτες τιμές του δυναμικού, αλλά οι **διαφορές δυναμικού**. Όπως στη χαρτογραφία, ορίζεται αυθαίρετα ότι η στάθμη της θάλασσας έχει υψόμετρο 0 (μηδέν), έτσι και στις ηλεκτρολογικές εφαρμογές ορίζεται το δυναμικό της γης ως 0 (μηδέν). Αν ένα σημείο ή ένας αγωγός έχει δυναμικό μεγαλύτερο από αυτό της γης, τότε το δυναμικό του είναι θετικό. Αν έχει μικρότερο, το δυναμικό του είναι αρνητικό.



Σχήμα 4.1.13: Ισοδυναμικές επιφάνειες γύρω από σημειακό φορτίο και μεταξύ επίπεδων πλακών ετερόνυμα φορτισμένων

4.1.8 Σχέση μεταξύ διαφοράς δυναμικού και έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

Επισημάνθηκαν ήδη στις προηγούμενες παραγράφους ορισμένες πλευρές της σχέσης ανάμεσα στο δυναμικό και στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου:

- Το διάνυσμα της έντασης E είναι κάθετο στις ισοδυναμικές επιφάνειες.
- Το δυναμικό μειώνεται κατά μήκος των δυναμικών γραμμών ακολουθώντας τη φορά της έντασης.

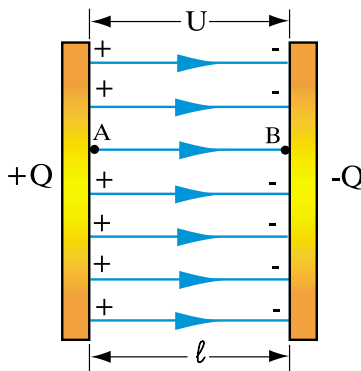
Προχωρώντας περισσότερο, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή της έντασης σε ένα σημείο του πεδίου, αν γνωρίζουμε πώς μεταβάλλεται το δυναμικό στη περιοχή του σημείου.

Θα δείξουμε αυτή τη σχέση έντασης και διαφοράς δυναμικού με το απλό παράδειγμα του **ομογενούς** ηλεκτρικού πεδίου.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε δύο επίπεδες παράλληλες μεταλλικές πλάκες που έχουν ίσα και αντίθετα ηλεκτρικά φορτία και βρίσκονται σε απόσταση l (Σχ.4.1.14). Εφ' όσον η απόσταση l είναι μικρή σε σχέση με το εμβαδόν των πλακών, μπορεί να θεωρηθεί, με μεγάλη προσέγγιση, ότι το πεδίο που σχηματίζεται μεταξύ των πλακών είναι ομογενές.

Η ένταση \vec{E} δηλαδή είναι σταθερή σε όλα τα σημεία του πεδίου. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των πλακών είναι U .

Ας υποθέσουμε ότι τοποθετούμε ένα φορτίο $+q$ στο σημείο A που είναι η αρχή μιας δυναμικής γραμμής, που ξεκινά από την μία πλάκα και καταλήγει στο σημείο B της άλλης πλάκας.



Σχήμα 4.1.14: Σχέση έντασης και διαφοράς δυναμικού σε ομογενές πεδίο

Στο φορτίο $+q$ ενεργεί η σταθερή δύναμη $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ η οποία το μετακινεί κατά το διάστημα $AB = \ell$, και παράγει έργο: $W_{AB} = \vec{F} \cdot \vec{\ell} = q \cdot \vec{E} \cdot \ell$

Η τελευταία σχέση γράφεται:

$$\frac{W_{AB}}{q} = \vec{E} \cdot \ell$$

Παρατηρούμε ότι ο λόγος W_{AB} / q είναι η διαφορά δυναμικού U μεταξύ των πλακών.

Επομένως έχουμε:

$$U = E \cdot \ell, \text{ ή}$$

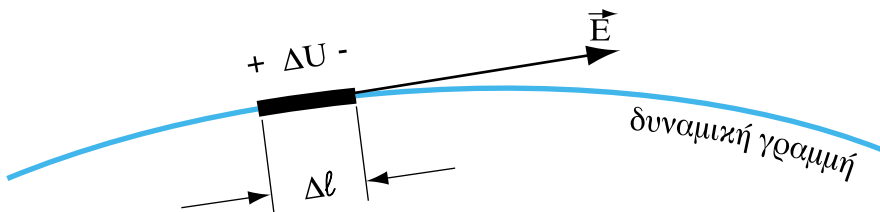
$$E = \frac{U}{\ell} \quad (4.1.4)$$

Ο λόγος U / ℓ εκφράζει τη μεταβολή του δυναμικού μεταξύ των σημείων A και B της δυναμικής γραμμής που απέχουν απόσταση ℓ .

Γενικεύοντας την παραπάνω σχέση μπορούμε να ορίσουμε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ως

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta \ell}$$

όπου ΔU είναι η στοιχειώδης διαφορά δυναμικού που συμβαίνει κατά μήκος του στοιχειώδους τμήματος $\Delta \ell$ πάνω στη δυναμική γραμμή.



Σχήμα 4.1.15: Σχέση έντασης και διαφοράς δυναμικού

Όσο πιο απότομη είναι η μεταβολή του δυναμικού, (μεγάλο ΔU σε μικρό διάστημα Δl), τόσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της έντασης E .

Αν θέσουμε στον παραπάνω τύπο $\Delta U = 1V$ και $\Delta l = 1m$, προκύπτει για την ένταση E η μονάδα V/m . Η μονάδα αυτή όπως αναφέρθηκε (παράγραφος 4.1.2) είναι ισοδύναμη με τη μονάδα $1 N/C$.

Ανακεφαλαίωση:

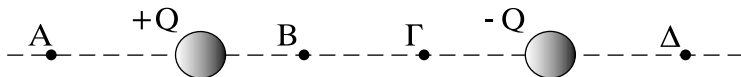
- Ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται ο χώρος, όπου ασκούνται δυνάμεις σε κάθε ηλεκτρικό φορτίο που τοποθετείται σε αυτόν.
- Χαρακτηριστικό μέγεθος του ηλεκτρικού πεδίου είναι η έντασή του \vec{E} . Σε κάθε σημείο του πεδίου η ένταση ορίζεται ως ο σταθερός λόγος της δύναμης \vec{F} που ασκείται σε σημειακό φορτίο q τοποθετημένο στο σημείο, δια του φορτίου και μετριέται σε N/C ή V/m .
- Το ηλεκτρικό πεδίο περιγράφεται με **δυναμικές ηλεκτρικές γραμμές**. Οι δυναμικές γραμμές ξεκινούν από τα θετικά φορτία και καταλήγουν στα αρνητικά. Σε κάθε σημείο της δυναμικής γραμμής το διάνυσμα της έντασης E , που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό, **εφάπτεται** της δυναμικής γραμμής. Η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών είναι ανάλογη προς το μέτρο της έντασης E του πεδίου.
- **Ομογενές** ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται το πεδίο του οποίου η ένταση E είναι σταθερή κατά μέτρο, διεύθυνση και φορά.
- Στο εσωτερικό των αγωγίμων σωμάτων δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο.
- Σε κάθε σημείο ενός ηλεκτρικού πεδίου αντιστοιχεί μια τιμή του δυναμικού, που μετριέται σε V (βολτ).
- Η διαφορά δυναμικού μεταξύ 2 σημείων ενός πεδίου ισούται με το σταθερό λόγο του έργου που παράγεται κατά τη μετακίνηση ενός φορτίου από το ένα σημείο στο άλλο, δια του φορτίου.
- Τα σημεία ενός πεδίου που έχουν το ίδιο δυναμικό σχηματίζουν **ισοδυναμικές επιφάνειες**.

Πίνακας Συμβόλων και Μονάδων

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου	E	$1 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
Δυναμικό	U	1V

Ερωτήσεις:

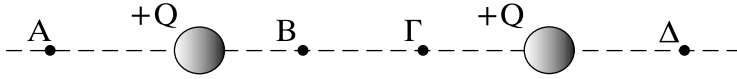
1. Πώς μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα ηλεκτρικό πεδίο; Να αναφέρετε περιπτώσεις ηλεκτροστατικών πεδίων.
2. Ποια σχέση συνδέει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο του πεδίου και τη δύναμη που ασκείται σε ένα φορτίο που τοποθετείται στο σημείο αυτό;
3. Να προσδιορίσετε τη διεύθυνση και τη φορά της έντασης του πεδίου που δημιουργείται γύρω από ένα σημειακό αρνητικό φορτίο.
4. Είναι σωστή η πρόταση: Το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται, όσο πλησιάζουμε ένα θετικό σημειακό φορτίο και μειώνεται, όσο πλησιάζουμε ένα αρνητικό σημειακό φορτίο;
5. Να κάνετε ένα σκαρίφημα των δυναμικών γραμμών ενός ηλεκτρικού πεδίου που σχηματίζεται μεταξύ δύο ίσων και αντίθετων σημειακών φορτίων.
6. Στο σχήμα παριστάνονται δύο ίσα και αντίθετα σημειακά ηλεκτρικά φορτία $+Q$ και $-Q$ και η ευθεία που τα ενώνει.



Να σημειώσετε τη διεύθυνση και τη φορά της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα σημεία A, B, Γ, Δ.

Υπάρχουν σημεία πάνω στην ευθεία, στα οποία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μηδέν;

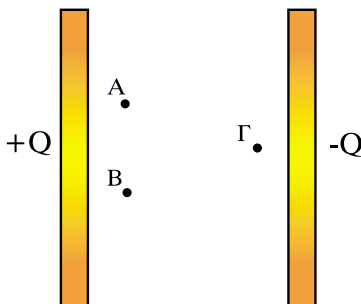
7. Στο σχήμα παριστάνονται δύο όμοια σημειακά ηλεκτρικά φορτία $+Q$ και $+Q$ και η ευθεία που τα ενώνει.



Να σημειώσετε την διεύθυνση και τη φορά της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα σημεία A, B, Γ, Δ.

Υπάρχουν σημεία πάνω στην ευθεία, στα οποία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μηδέν;

8. Τι θα συμβεί σ' ένα μικρό θετικό ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο μπορεί να κινηθεί ελεύθερα, αν το αφήσουμε μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο; Τι θα συμβεί αντίστοιχα, σε ένα μικρό αρνητικό φορτίο;
9. Τι ονομάζεται διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων ενός πεδίου;
10. Ποια η διαφορά δυναμικού U_{AB} μεταξύ δύο σημείων A και B, όπου το A έχει δυναμικό $U_A = +12V$ και το B $U_B = -8V$;
11. Με ποιες μονάδες μετριοούνται: η ηλεκτρική τάση, το δυναμικό, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, η διαφορά δυναμικού, το παραγόμενο έργο κατά τη μετακίνηση ενός φορτίου από ένα σημείο του πεδίου σε ένα άλλο σημείο.
12. Πώς μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα χώρο, όπου να μην είναι δυνατόν να εγκατασταθεί σ' αυτόν ηλεκτρικό πεδίο;
13. Τα σημεία A, B, Γ βρίσκονται μέσα σε ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, που σχηματίζεται από 2 πλάκες φορτισμένες με φορτία $+Q$ και $-Q$. Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές;



- Στα σημεία A και B η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου έχει την ίδια τιμή.
- Στα σημεία A και Γ η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου έχει διαφορετική τιμή.
- Τα σημεία A και B έχουν το ίδιο δυναμικό.
- Τα σημεία A και Γ έχουν διαφορετικό δυναμικό.

14. Σημειώσετε το σωστό ή λάθος στις παρακάτω προτάσεις:

- Οι ισοδυναμικές επιφάνειες τέμνουν πάντα κάθετα τις δυναμικές γραμμές.
- Η επιφάνεια των αγωγίμων σωμάτων είναι ισοδυναμική επιφάνεια.
- Οι ισοδυναμικές επιφάνειες γύρω από σημειακά ηλεκτρικά φορτία είναι ομόκεντρες σφαίρες.

15. Να αναφέρετε ηλεκτρικά πεδία στα οποία οι δυναμικές γραμμές είναι ευθείες γραμμές.

16. Τι θα συμβεί στην ένταση ενός ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου (όπως αυτό που σχηματίζεται μεταξύ δύο ετερόνυμα φορτισμένων πλακών), αν αυξηθεί η τάση (διαφορά δυναμικού) που εφαρμόζεται μεταξύ των πλακών;

17. Σε τι αναφέρεται ο τύπος $E=V/l$;

18. Να εξηγήσετε γιατί ισχύει η σχέση μεταξύ των μονάδων:

$$1\text{N} \cdot \text{m} = 1\text{C} \cdot \text{V}$$

Ασκήσεις

1. Σε ένα σημείο βρίσκεται ηλεκτρικό φορτίο $Q = +10\text{mC}$. Ποια είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση 60 cm από το φορτίο; Σε ποια απόσταση η ένταση διπλασιάζεται;

(Απ. α) $2,5 \times 10^8 \text{ N/C}$ β) 42,4 cm)

2. Στα άκρα ευθύγραμμου τμήματος AB μήκους 50cm βρίσκονται δύο ηλεκτρικά φορτία $+Q$ και $+3Q$. Σε ποιο σημείο του ευθύγραμμου τμήματος AB η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ίση με μηδέν;

(Απ. Σε απόσταση 18,4 cm από το μικρό φορτίο)

3. Μεταξύ δύο σημείων ηλεκτρικού πεδίου υπάρχει διαφορά δυναμικού $U = 12\text{V}$. Πόσο ηλεκτρικό φορτίο πρέπει να μετακινηθεί από το ένα σημείο στο άλλο για να παραχθεί έργο ίσο με 60 Joule;

(Απ. 0,2C)

4. Μεταξύ δύο παράλληλων πλακών, που απέχουν μεταξύ τους απόσταση 1cm, επικρατεί τάση $V = 5000\text{V}$. Ποια είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των πλακών;

Πόσο έργο πρέπει να δαπανήσουμε για να μεταφέρουμε ένα θετικό φορτίο $q = 5\text{mC}$ από την αρνητικά φορτισμένη πλάκα στη θετικά φορτισμένη πλάκα;

(Απ. α) $5 \times 10^5 \text{ V/m}$ β) 25 J)

Ενότητα 4.2

Πυκνωτές

“Διδακτικοί στόχοι”

Με τη μελέτη της ενότητας αυτής οι μαθητές θα είναι σε θέση:

- *Να ορίζουν τη χωρητικότητα ενός πυκνωτή και τη μονάδα μέτρησής της.*
- *Να περιγράφουν τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η χωρητικότητα ενός πυκνωτή.*
- *Να αναφέρουν τους τρόπους σύνδεσης πυκνωτών και να υπολογίζουν την ολική ή ισοδύναμη χωρητικότητά τους.*
- *Να περιγράφουν τους διάφορους τύπους πυκνωτών, που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές.*
- *Να γνωρίζουν τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ενός πυκνωτή και να υπολογίζουν τη σταθερά χρόνου του σχετικού κυκλώματος.*

4.2.1. Εισαγωγή

Οι πυκνωτές είναι εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται πολύ στα ηλεκτρικά κυκλώματα των ηλεκτρονικών συσκευών (κυκλώματα μετάδοσης και επεξεργασίας σημάτων, κυκλώματα σταθεροποίησης τάσης κτλ.). Χρησιμοποιούνται επίσης στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις ισχύος (εκκίνηση μονοφασικών κινητήρων, διόρθωση συντελεστή ισχύος κτλ.).

Γενικά με τους πυκνωτές επιδιώκεται, είτε η μεταβολή (διαμόρφωση) της τάσης ή της έντασης του ρεύματος σε διάφορα ηλεκτρικά κυκλώματα, είτε η πρόσκαιρη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στα ηλεκτρικά κυκλώματα, ώστε να επιτυγχάνονται τα συγκεκριμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους.

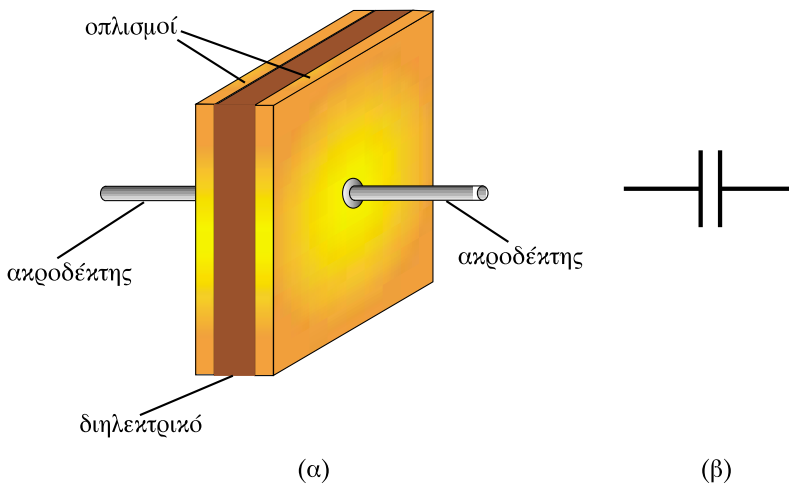
Κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη, με διαστάσεις που κυμαίνονται από κλάσματα του μm (10^{-6} m) στα ολοκληρωμένα κυκλώματα, μέχρι μερικά m (μέτρα) στα δίκτυα των εγκαταστάσεων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

4.2.2 Χωρητικότητα πυκνωτή

Ένας πυκνωτής αποτελείται από δύο αγώγιμα σώματα τοποθετημένα το ένα κοντά στο άλλο, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται μονωτικό υλικό.

Τα αγώγιμα σώματα ονομάζονται **οπλισμοί** του πυκνωτή και το μονωτικό υλικό **διηλεκτρικό** του πυκνωτή.

Η πιο απλή μορφή πυκνωτή είναι ο πυκνωτής του οποίου οι οπλισμοί είναι δύο επίπεδες παράλληλες μεταλλικές πλάκες, που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, μεταξύ των οποίων υπάρχει μονωτικό υλικό. Ο πυκνωτής αυτού του τύπου ονομάζεται επίπεδος πυκνωτής. (Σχ. 4.2.1).

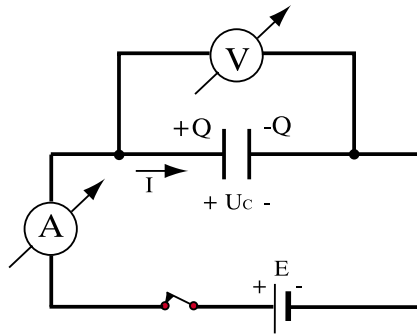


Σχήμα 4.2.1: (α) Επίπεδος πυκνωτής (β) Συμβολική παράσταση πυκνωτή στα ηλεκτρικά κυκλώματα

Στα ηλεκτρικά κυκλώματα ο πυκνωτής συμβολίζεται με δύο παράλληλες γραμμές ίσου μήκους και πάχους. (Σχ.4.2.1). Χαρακτηριστικό μέγεθος του πυκνωτή είναι η **χωρητικότητά** του. Αναφέρεται στην ιδιότητα του πυκνωτή να συγκρατεί **ηλεκτρικά φορτία** στους οπλισμούς του, όταν συνδέεται με μια ηλεκτρική πηγή.

Για να κατανοήσουμε την έννοια της χωρητικότητας εκτελούμε το εξής απλό πείραμα:

Συνδέουμε τους δύο ακροδέκτες ενός πυκνωτή στα άκρα μιας πηγής συνεχούς ρεύματος, π.χ. μιας μπαταρίας (Σχ. 4.2.2)



Σχήμα 4.2.2: Φόρτιση πυκνωτή με μια πηγή συνεχούς ρεύματος

Με ένα βολτόμετρο μετράμε συνεχώς την τάση U_C που επικρατεί ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή και με ένα αμπερόμετρο το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα.

Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός η ένδειξη των δύο οργάνων είναι μηδέν. Με το κλείσιμο του διακόπτη παρατηρούμε ότι για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα το αμπερόμετρο δείχνει ότι το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα, το οποίο γρήγορα μηδενίζεται. Συγχρόνως το βολτόμετρο δείχνει τάση η οποία μετά τον μηδενισμό του ρεύματος είναι ίση με την τάση (ηλεκτρεγερτική δύναμη) της πηγής, $U_C = E$.

Το φαινόμενο ερμηνεύεται ως εξής:

Η πηγή ενεργώντας ως «αντλία» ηλεκτρονίων, αφαιρεί ηλεκτρόνια από τον ένα οπλισμό του πυκνωτή και προσθέτει ηλεκτρόνια στον άλλο οπλισμό. Αποτέλεσμα: ο ένας οπλισμός αποκτά **θετικό ηλεκτρικό φορτίο $+Q$** και ο άλλος οπλισμός **αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο $-Q$**

Αν αποσυνδέσουμε την πηγή από το κύκλωμα, ή απλά αν ανοίξουμε το διακόπτη του κυκλώματος, παρατηρούμε ότι στα άκρα του πυκνωτή **παραμένει η τάση $U_C = E$** (E η ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής). Αυτό σημαίνει ότι **παραμένουν τα φορτία $+Q$ και $-Q$ στους δύο οπλισμούς του πυκνωτή**. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **φόρτιση** του πυκνωτή. Με ειδικά όργανα (ηλεκτροσκόπια) είναι δυνατόν να μετρηθούν τα φορτία στους οπλισμούς του πυκνωτή. Ο πυκνωτής, δηλαδή, είναι μια διάταξη αποθήκευσης ηλεκτρικών φορτίων.

Το ερώτημα είναι: Πόσο ηλεκτρικό φορτίο μπορεί να αποθηκευτεί σε έναν πυκνωτή;

Αν επαναλάβουμε το προηγούμενο πείραμα, αντικαθιστώντας την πηγή με μια άλλη που έχει διπλάσια ηλεκτρεγερτική δύναμη ($2E$), τότε στα άκρα του πυκνωτή το βολτόμετρο θα δείξει διπλάσια τάση $U_c = 2E$. Αν μετρηθεί η ποσότητα των φορτίων $+Q$ και $-Q$ στους οπλισμούς του πυκνωτή, θα παρατηρήσουμε ότι είναι διπλάσια: $+2Q$ και $-2Q$.

Γενικά, η ποσότητα του φορτίου που συσσωρεύεται στους οπλισμούς του πυκνωτή προκύπτει ότι είναι ανάλογη της τάσης που επικρατεί μεταξύ των οπλισμών του:

$$Q = C \cdot U_c$$

όπου ο συντελεστής αναλογίας C , εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πυκνωτή με τον οποίο εκτελείται το πείραμα.

Δείχνει, με άλλα λόγια, πόσο ηλεκτρικό φορτίο Q “χωράει” στους οπλισμούς του πυκνωτή για μια συγκεκριμένη τάση U_c . Γι’ αυτό ονομάζεται **χωρητικότητα** του πυκνωτή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω:

□ **Χωρητικότητα ενός πυκνωτή είναι ο σταθερός λόγος του φορτίου Q που είναι αποθηκευμένο στον πυκνωτή δια της τάσης που εφαρμόζεται μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή**

$$C = \frac{Q}{U_c} \quad (4.2.1)$$

Επομένως η χωρητικότητα έχει μια τιμή σταθερή για κάθε πυκνωτή, ανεξάρτητη από την τάση και το φορτίο.

Μονάδα της χωρητικότητας είναι το **F (Farad)**

Ισχύει σύμφωνα με τον τύπο 4.2.1:

$$1F = \frac{1C}{1V}$$

Επειδή η μονάδα F είναι πάρα πολύ μεγάλη, στην πράξη χρησιμοποιούνται τα υποπολλαπλάσια της:

$$1mF = 1/1000 F = 10^{-3}F$$

$$1\mu\text{F} = 1/1000000\text{F} = 10^{-6}\text{F}$$

$$1\text{nF} = 1/1000000000\text{F} = 10^{-9}\text{F}$$

$$1\text{pF} = 1/1000000000000\text{F} = 10^{-12}\text{F}$$

4.2.3 Διηλεκτρική πόλωση

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε έναν επίπεδο πυκνωτή (Σχ. 4.2.3) μεταξύ των οπλισμών του οποίου υπάρχει αέρας.

Συνδέουμε τον πυκνωτή με τα άκρα μιας ηλεκτρικής πηγής Σ.Ρ., οπότε στα άκρα του εμφανίζεται τάση U .

Το φορτίο που αποθηκεύεται στους οπλισμούς του πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$Q = C \cdot U$$

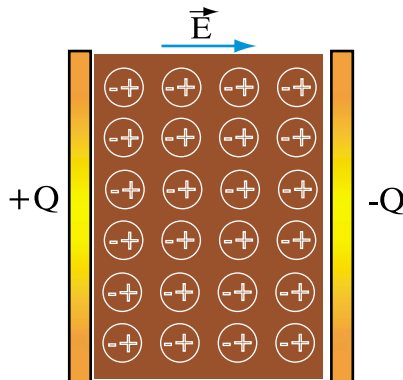
όπου C η χωρητικότητα του πυκνωτή, και U η τάση που εφαρμόζεται μεταξύ των οπλισμών του.

Εισάγουμε τώρα στο διάκενο του πυκνωτή ένα μονωτικό υλικό, και επαναλαμβάνουμε το πείραμα. Στους οπλισμούς του πυκνωτή εφαρμόζεται η ίδια τάση U όπως προηγουμένως. Αν μετρήσουμε όμως τα **φορτία** $+Q$ και $-Q$ που συσσωρεύτηκαν στους οπλισμούς του πυκνωτή, παρατηρούμε ότι είναι **μεγαλύτερα**.

Η εισαγωγή του μονωτικού υλικού στον πυκνωτή, που ονομάζεται και διηλεκτρικό υλικό, αύξησε την ικανότητα του πυκνωτή να «συγκρατεί» φορτία στους οπλισμούς του.

Με άλλα λόγια αυξήθηκε η χωρητικότητα του πυκνωτή από C σε C' . Αντίστοιχα τα φορτία έγιναν: $Q' = C' \cdot U$

Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως **διηλεκτρική πόλωση** (ή πόλωση του διηλεκτρικού) και είναι ανάλογο με την ηλεκτροστατική επίδραση (παραγρ. 4.1.6) που συμβαίνει στα αγωγικά υλικά που τοποθετούνται σε ηλεκτρικό πεδίο, με τη διαφορά ότι στα μονωτικά υλικά δεν υπάρχουν σχεδόν καθόλου ελεύθερα ηλεκτρόνια για να μετακινηθούν. Οι μετατοπίσεις ηλεκτρικών φορτίων πραγματοποιούνται σε επίπεδο μορίων. Κάθε μόριο δηλαδή μετατρέπεται σε ηλεκτρικό δίπολο. Το μισό τμήμα του αποκτά θετικό φορτίο και το άλλο μισό αρνητικό φορτίο (Σχ.4.2.3.).



Σχήμα 4.2.3: Υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τα μόρια του μονωτικού υλικού φορτίζονται με ίσα και ετερόνυμα ηλεκτρικά φορτία (αρνητικά προς την πλευρά της θετικά φορτισμένης πλάκας και θετικά προς την πλευρά της αρνητικά φορτισμένης πλάκας)

Αποτέλεσμα της πόλωσης του διηλεκτρικού είναι οι οπλισμοί του πυκνωτή να «χωρούν» περισσότερα φορτία $+Q$ και $-Q$. Το επιπλέον μέρος των φορτίων συγκρατείται από την έλξη των ετερόνυμων φορτίων του διηλεκτρικού που βρίσκονται σε επαφή με τους οπλισμούς (Σχ.4.2.3.).

4.2.4 Διηλεκτρική σταθερά

Αν επαναληφθεί το πείραμα της προηγούμενης παραγράφου, με διάφορους πυκνωτές εισάγοντας το ίδιο μονωτικό υλικό στο διάκενο των οπλισμών τους, παρατηρούμε ότι η χωρητικότητά τους αυξάνεται κατά τον ίδιο συντελεστή: $C' = \epsilon_r \cdot C$

Με άλλα λόγια ο λόγος της νέας χωρητικότητας C' του πυκνωτή προς την χωρητικότητα του ίδιου πυκνωτή χωρίς το διηλεκτρικό έχει σταθερή τιμή:

$$\epsilon_r = \frac{C'}{C}$$

Η ϵ_r είναι η **σχετική διηλεκτρική σταθερά** του συγκεκριμένου μονωτικού υλικού που γνωρίσαμε στην παράγραφο 4.1.2. και δείχνει πόσο αυξάνεται η χωρητικότητα ενός πυκνωτή με διηλεκτρικό το υλικό αυτό, σε σχέση με την χωρητικότητα του ίδιου πυκνωτή με διηλεκτρικό τον αέρα.

Η ϵ_r είναι αδιάστατο μέγεθος ("καθαρός αριθμός"). Στον πίνακα 4.2.1 δίνονται οι τιμές της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r μερικών υλικών που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές.

Υπενθυμίζεται ότι η **διηλεκτρική σταθερά ϵ** δίνεται από τη σχέση $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$ όπου ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού (και κατά προσέγγιση του αέρα) και έχει διαστάσεις F/m (Φαράντ/μέτρο). Η τιμή της είναι:

$$\epsilon_0 = 8,85 \frac{\text{pF}}{\text{m}} \left(= \frac{1}{36\pi \times 10^9} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2} \right)$$

Πίνακας 4.2.1 Τιμές της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r ορισμένων υλικών

Υλικό	ϵ_r
κενό	1
Αέρας	1,0006
μονωτικό λάδι	2 έως 2,8
χαρτί	3,5 έως 8
μίκα	5 έως 8
κεραμικό υλικό	10 ως 10000
πορσελάνη	3 ως 6
teflon	2
πολυστυρένιο	2,5
οξείδιο του αλουμινίου	7
οξείδιο του τανταλίου	25

4.2.5 Χωρητικότητα επίπεδου πυκνωτή - Διηλεκτρική αντοχή

Είδαμε ότι η χωρητικότητα του πυκνωτή εξαρτάται από το διηλεκτρικό υλικό που υπάρχει ανάμεσα στους οπλισμούς του. Προφανώς εξαρτάται και από τις διαστάσεις του πυκνωτή (Σχ.4.2.4).

Αν εκτελέσουμε πειράματα με διάφορους επίπεδους πυκνωτές και μεταβάλουμε:

- το εμβαδόν της επιφάνειας των οπλισμών S
- τη μεταξύ τους απόσταση d

- το διηλεκτρικό του πυκνωτή (που χαρακτηρίζεται από τη διηλεκτρική του σταθερά ϵ),
αποδεικνύεται ότι ισχύει ο τύπος:

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (4.2.2)$$

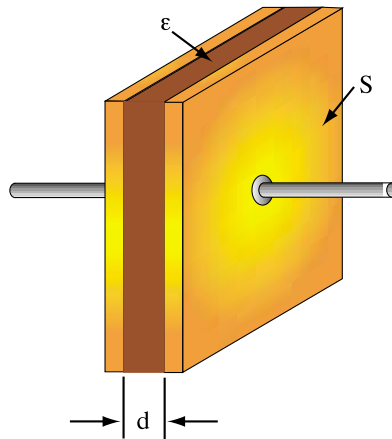
όπου:

C η χωρητικότητα του πυκνωτή σε F

ϵ η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού σε F/m

S το εμβαδόν των οπλισμών σε m^2

d η απόσταση μεταξύ των οπλισμών σε m



Σχήμα 4.2.4: Επίπεδος πυκνωτής

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η χωρητικότητα του επίπεδου πυκνωτή αυξάνεται, όταν **αυξηθεί** η επιφάνεια των οπλισμών του.

Αυξάνεται επίσης, όταν **μειωθεί** η απόσταση μεταξύ των οπλισμών, δηλαδή, όταν οι οπλισμοί πλησιάσουν ο ένας τον άλλο.

Σημειώνεται ότι ο τύπος για τον επίπεδο πυκνωτή ισχύει με την προϋπόθεση ότι η απόσταση d μεταξύ των οπλισμών είναι πολύ μικρή συγκριτικά με την επιφάνεια S των οπλισμών, οπότε και το ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή θεωρείται ομογενές (παράγραφος 4.1.4).

Η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου είναι σταθερή σε κάθε σημείο του χώρου μεταξύ των οπλισμών (Σχ. 4.2.5).

Το μέτρο της έντασης δίνεται από τη σχέση:

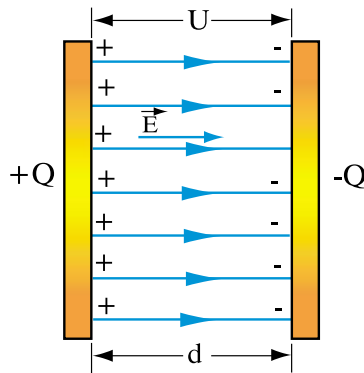
$$E = \frac{U}{d} \quad (4.2.3)$$

όπου:

E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε V/m

U η τάση που επικρατεί μεταξύ των οπλισμών σε V

d η απόσταση των οπλισμών σε m



Σχήμα 4.2.5: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου έχει τη σταθερή τιμή $E = U/d$ σε κάθε σημείο του χώρου μεταξύ των οπλισμών του επίπεδου πυκνωτή (ομογενές πεδίο)

Σύμφωνα με τον τύπο (4.2.2) προκειμένου να κατασκευαστούν πυκνωτές με μεγάλη χωρητικότητα, γίνεται προσπάθεια ώστε το πάχος d του μονωτικού υλικού να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Όταν όμως μικρύνει πολύ η απόσταση d , λόγω της παραπάνω σχέσης (4.2.3), αυξάνεται επίσης και η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου για δεδομένη τάση U .

Ακόμη και αν η τάση U δεν ξεπερνά μερικά V , αν το πάχος d του διηλεκτρικού είναι της τάξης του μικρόμετρου (μm), όπως συμβαίνει σε ορισμένους τύπους πυκνωτών, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να πάρει πολύ μεγάλες τιμές.

Αν η ένταση E φθάσει ορισμένη μεγάλη τιμή, χαρακτηριστική για κάθε μονωτικό υλικό, προκαλείται **διάσπαση του διηλεκτρικού**. Δημιουργείται δηλαδή ηλεκτρικός σπινθήρας (ηλεκτρική εκκένωση) μεταξύ των οπλισμών με αποτέλεσμα την καταστροφή του. Το φαινόμενο είναι παρόμοιο με τον κεραυνό που διασπά τον μονωτικό αέρα της ατμόσφαιρας.

Η **μέγιστη τιμή** της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, την οποία αντέχει το διηλεκτρικό υλικό χωρίς να διασπασθεί, ονομάζεται **αντοχή του διηλεκτρικού** ή **διηλεκτρική αντοχή**.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2.2 Διηλεκτρική αντοχή ορισμένων μονωτικών υλικών

ΥΛΙΚΟ	Διηλεκτρική αντοχή σε kV/mm $\left(1 \frac{\text{kV}}{\text{mm}} = 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}\right)$
κενό	άπειρη
αέρας	0,8
χαρτί	14
μίκα	160
πορσελάνη	4
γυαλί pyrex	13
βακελίτης	12
πολυαιθυλένιο	50
teflon	60

➤ Παράδειγμα 1

Ένας επίπεδος πυκνωτής αέρος έχει οπλισμούς με επιφάνεια $S = 0,4 \text{ m}^2$ και απόσταση μεταξύ των οπλισμών $d = 0,5 \text{ mm}$

- Να βρεθεί η χωρητικότητα του πυκνωτή.
- Να βρεθεί η χωρητικότητα του πυκνωτή, αν μεταξύ των οπλισμών του τοποθετηθεί χαρτί σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r = 3,5$.
- Να βρεθεί η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις (α) και (β), όταν μεταξύ των οπλισμών εφαρμόζεται τάση $U = 250 \text{ V}$.

Απάντηση:

α) Εφαρμόζουμε τον τύπο

$$C = \epsilon \times \frac{S}{d}$$

Για τον αέρα έχουμε $\epsilon_a \approx \epsilon_0$

$$\epsilon_a = \epsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m} = 0,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$S = 0,4 \text{ m}^2$$

$$d = 0,5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$C = \frac{8,854 \times 10^{-12} \times 0,4}{0,5 \times 10^{-3}} \text{ F} = 7 \times 10^{-9} \text{ F} = 7 \text{ nF}$$

β) Αν μεταξύ των οπλισμών τοποθετηθεί χαρτί σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r = 3,5$ η χωρητικότητα C' βρίσκεται από τη σχέση:

$$C' = \epsilon_r \cdot C = 3,5 \cdot 7 \text{ nF} = 24,5 \text{ nF}$$

(Η χωρητικότητα C' μπορεί επίσης να υπολογιστεί και με εφαρμογή του τύπου $C = \epsilon \cdot S / d$ όπου $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$).

γ) Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις εφόσον εφαρμόζεται η ίδια τάση U και το διηλεκτρικό έχει το ίδιο πάχος d :

$$E = U / d \text{ όπου: } U = 250 \text{ V και } d = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$E = \frac{250 \text{ V}}{0,5 \times 10^{-3} \text{ m}} = 500000 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 500 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 0,5 \frac{\text{KV}}{\text{mm}}$$

➤ Παράδειγμα 2

α) Πόσο ηλεκτρικό φορτίο είναι αποθηκευμένο σε έναν πυκνωτή χωρητικότητας $C = 2 \mu \text{ F}$, όταν στα άκρα του εφαρμόζεται τάση $U = 12 \text{ V}$;

β) Πόσο ηλεκτρικό φορτίο θα αποθηκευτεί αν η τάση αυξηθεί σε $U' = 240 \text{ V}$;

Απάντηση:

$$\alpha) Q = C \cdot U$$

$$Q = 2 \mu\text{F} \times 12\text{V} = 24 \mu\text{C}$$

$$\beta) Q' = C \cdot U'$$

$$Q' = 2 \mu\text{F} \times 240\text{V} = 480 \mu\text{C} = 0,48 \text{mC}$$

➤ Παράδειγμα 3

Πόση τάση μπορεί να εφαρμοστεί σε έναν επίπεδο πυκνωτή χωρίς να διασπαστεί το διηλεκτρικό του υλικό, αν οι οπλισμοί του απέχουν μεταξύ τους 0,2mm και το διηλεκτρικό είναι αέρας διηλεκτρικής αντοχής 0,8kV/mm;

Απάντηση:

Η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 0,8 kV/mm.

Αυτή είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E.

Από τον τύπο $E = U / d$,

έχουμε $U = E \cdot d$

$$U = 0,8 \frac{\text{KV}}{\text{mm}} \times 0,2\text{mm} = 0,16\text{KV} = 160\text{V}$$

4.2.6 Συνδεσμολογία πυκνωτών

Πολλές φορές στο ίδιο ηλεκτρικό κύκλωμα συνδέονται 2 ή περισσότεροι πυκνωτές.

Στις περιπτώσεις αυτές για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών μεγεθών του κυκλώματος (ηλεκτρικού φορτίου, τάσης, έντασης ρεύματος, ισχύος) υπολογίζεται η **ισοδύναμη** ή **ολική χωρητικότητα** των πυκνωτών $C_{\text{ολ}}$.

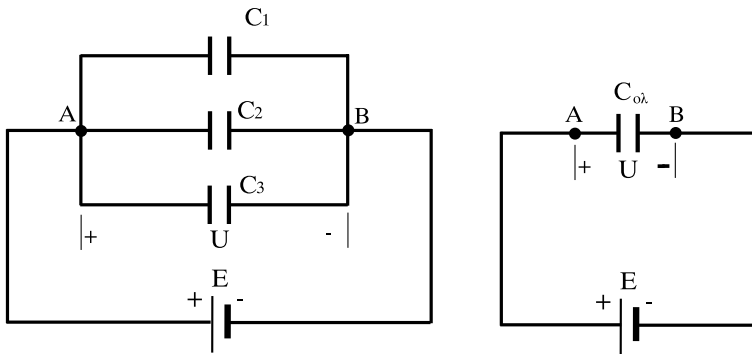
Η ολική χωρητικότητα $C_{\text{ολ}}$ είναι η χωρητικότητα ενός υποθετικού πυκνωτή, ο οποίος μπορεί να τοποθετηθεί στη θέση των πυκνωτών χωρίς να μεταβάλει τις συνθήκες λειτουργίας των ηλεκτρικών πηγών που τροφοδοτούν το κύκλωμα.

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίστηκε και η ολική ή ισοδύναμη αντίσταση πολλών αντιστάσεων που συνδέονται στο ίδιο κύκλωμα. (Κεφάλαιο 2)

Οι πυκνωτές μπορούν να συνδεθούν σ' ένα κύκλωμα με τις εξής συνδεσμολογίες:

- α) Παράλληλη συνδεσμολογία
- β) Συνδεσμολογία σειράς
- γ) Μικτή συνδεσμολογία

α) Παράλληλη συνδεσμολογία



Σχήμα 4.2.6 Παράλληλη σύνδεση πυκνωτών

Αν συνδεθούν σε μια πηγή παράλληλα 3 πυκνωτές χωρητικότητας C_1, C_2, C_3 θα έχουν στα άκρα τους την ίδια τάση U . Το φορτίο που θα αποθηκευτεί σε κάθε πυκνωτή είναι:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= C_1 U \\
 Q_2 &= C_2 U \\
 Q_3 &= C_3 U
 \end{aligned}
 \tag{4.2.4}$$

Ο ισοδύναμος πυκνωτής, ο οποίος μπορεί να αντικαταστήσει τους τρεις πυκνωτές θα πρέπει να αποθηκεύει το σύνολο των τριών φορτίων:

$$Q_{ολ} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Η χωρητικότητα αυτού του ισοδύναμου πυκνωτή (ισοδύναμη ή ολική χωρητικότητα) δίνεται από τη σχέση:

$$C_{ολ} = \frac{Q_{ολ}}{U} \Rightarrow$$

$$C_{ολ} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{U} \Rightarrow$$

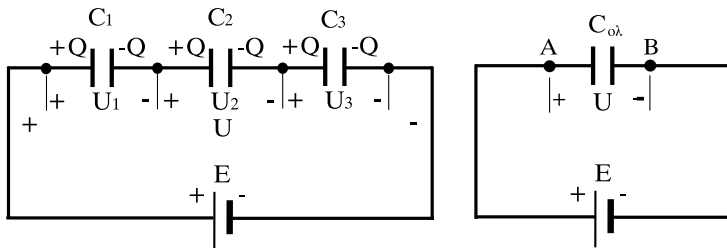
$$C_{ολ} = \frac{Q_1}{U} + \frac{Q_2}{U} + \frac{Q_3}{U}$$

Αντικαθιστώντας τα ίσα από τις σχέσεις (4.2.4) προκύπτει:

$$C_{ολ} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (4.2.5)$$

□ Κατά την παράλληλη σύνδεση πυκνωτών η ισοδύναμη (ολική) χωρητικότητα ισούται με το άθροισμα των χωρητικοτήτων των πυκνωτών που συνδέονται παράλληλα.

β) Συνδεσμολογία σειράς



Σχήμα 4.2.7: Σύνδεση πυκνωτών σε σειρά

Αν συνδεθούν 3 πυκνωτές σε σειρά και τροφοδοτηθούν από μία πηγή συνεχούς ρεύματος, δημιουργείται μετακίνηση ηλεκτρονίων (ροή ρεύματος) μέχρι να αποκατασταθεί ηλεκτρικό φορτίο \$+Q\$ στον ένα οπλισμό του πρώτου πυκνωτή, που συνδέεται με τον θετικό πόλο της πηγής και ηλεκτρικό φορτίο \$-Q\$ στον οπλισμό του τελευταίου πυκνωτή, που συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της πηγής.

Λόγω της ηλεκτροστατικής επίδρασης και της αρχής διατήρησης των φορτίων (σε κάθε θετικό φορτίο που δημιουργείται αντιστοιχεί ίσο κατ' απόλυτη τιμή αρνητικό φορτίο), ο απέναντι οπλισμός του πρώτου πυκνωτή θα φορτιστεί με φορτίο $-Q$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο συνδεδεμένος αγωγίμα οπλισμός του δεύτερου πυκνωτή να φορτιστεί με ετερόνυμο φορτίο $+Q$, κ.ο.κ. (Σχ. 4.2.7).

Τελικά κάθε συνδεδεμένος σε σειρά πυκνωτής θα έχει στους αντίστοιχους οπλισμούς του, **το ίδιο φορτίο**.

Η τάση στα άκρα κάθε πυκνωτή υπολογίζεται από τον τύπο της χωρητικότητας $C = Q/U$. Έχουμε λοιπόν:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{Q}{U_1} \\ C_2 &= \frac{Q}{U_2} \\ C_3 &= \frac{Q}{U_3} \end{aligned} \quad (4.2.6)$$

Ο ισοδύναμος πυκνωτής που αντικαθιστά τους τρεις πυκνωτές πρέπει να έχει στα άκρα του την τάση της πηγής U και φορτίο Q στους οπλισμούς του.

Η χωρητικότητά του θα δίνεται από τη σχέση:

$$C_{ολ} = \frac{Q}{U}$$

Επειδή $U = U_1 + U_2 + U_3$, έχουμε:

$$C_{ολ} = \frac{Q}{U_1 + U_2 + U_3} \quad \text{και λόγω των σχέσεων (4.2.6)}$$

$$C_{ολ} = \frac{Q}{\frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}} = \frac{Q}{Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

και τελικά:

$$\frac{1}{C_{ολ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (4.2.7)$$

□ Στη συνδεσμολογία σειράς το αντίστροφο της ισοδύναμης (ολικής) χωρητικότητας ισούται με το άθροισμα των αντίστροφων χωρητικοτήτων των πυκνωτών που συνδέονται σε σειρά.

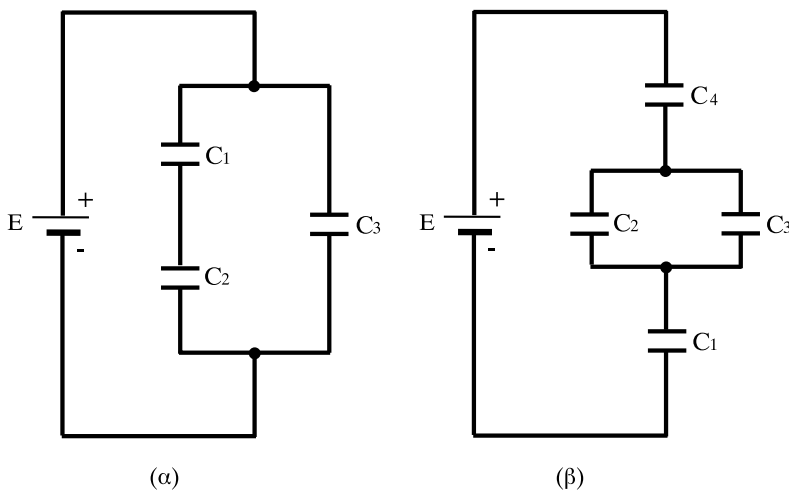
Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η ολική χωρητικότητα πυκνωτών συνδεδεμένων σε σειρά είναι **μικρότερη** από την χωρητικότητα καθενός από τους συνδεόμενους πυκνωτές.

Για δύο πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά ισχύει:

$$\frac{1}{C_{ολ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{C_{ολ}} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 \times C_2} \quad \text{και τελικά:} \quad C_{ολ} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

γ) Μικτή συνδεσμολογία πυκνωτών

Στη μικτή συνδεσμολογία συνυπάρχουν στο κύκλωμα κλάδοι πυκνωτών συνδεδεμένοι σε σειρά και κλάδοι πυκνωτών συνδεδεμένοι μεταξύ τους παράλληλα.



Σχήμα 4.2.8: Μικτή συνδεσμολογία πυκνωτών

Στο σχήμα 4.2.8, (α) και (β), φαίνονται δύο περιπτώσεις τέτοιων συνδεσμολογιών.

Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης χωρητικότητας $C_{ολ}$, χρησιμοποιούμε τις ιδιότητες των δύο συνδεσμολογιών (παράλληλης και σειράς).

Για παράδειγμα στη συνδεσμολογία (α) υπολογίζουμε πρώτα την ισοδύναμη χωρητικότητα των πυκνωτών C_1 και C_2 , που συνδέονται σε σειρά:

$$C_{1,2} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

και στη συνέχεια την ισοδύναμη χωρητικότητα των πυκνωτών $C_{1,2}$ και C_3 , που συνδέονται παράλληλα.

Η ολική χωρητικότητα θα είναι:

$$C_{ολ} = C_{1,2} + C_3$$

$$\Rightarrow C_{ολ} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} + C_3$$

Εργαζόμενοι με τον ίδιο τρόπο υπολογίζουμε την ισοδύναμη χωρητικότητα για τη συνδεσμολογία (β) του σχήματος και έχουμε τελικά:

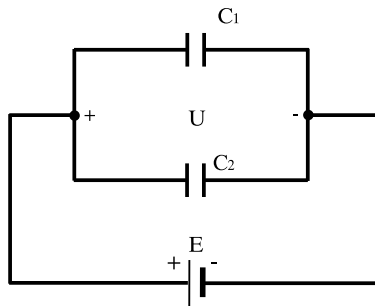
$$\frac{1}{C_{ολ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_3} + \frac{1}{C_4}$$

> Παράδειγμα 1

Δύο πυκνωτές χωρητικότητας $C_1 = 3\mu\text{F}$ και $C_2 = 5\mu\text{F}$ συνδέονται παράλληλα. Η πολική τάση της πηγής είναι 24V.

Να βρεθούν:

- α) Η ισοδύναμη χωρητικότητα των 2 πυκνωτών.
- β) Το ηλεκτρικό φορτίο στους οπλισμούς κάθε πυκνωτή.



Απάντηση:

α) Η ισοδύναμη χωρητικότητα των πυκνωτών δίνεται από τη σχέση:

$$C_{ολ} = C_1 + C_2$$

$$C_{ολ} = 3\mu\text{F} + 5\mu\text{F} = 8\mu\text{F}$$

β) Το φορτίο κάθε πυκνωτή υπολογίζεται από τις σχέσεις (όπου $U = 24\text{V}$):

$$Q_1 = C_1 \cdot U = 3\mu\text{F} \times 24\text{V} = 72\mu\text{C}$$

$$Q_2 = C_2 U = 5\mu\text{F} \times 24\text{V} = 120\mu\text{C}$$

➤ Παράδειγμα 2

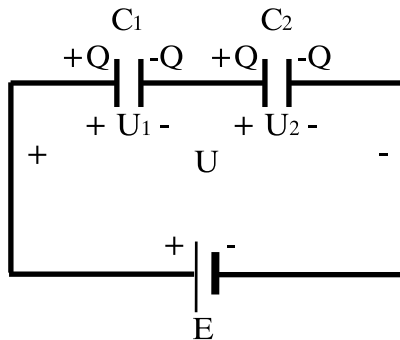
Δύο πυκνωτές $C_1 = 2\mu\text{F}$ και $C_2 = 3\mu\text{F}$ συνδέονται σε σειρά στα άκρα πηγής τάσης 240V .

Να ευρεθούν:

α) Η ισοδύναμη χωρητικότητα των 2 πυκνωτών

β) Το φορτίο στα άκρα κάθε πυκνωτή

γ) Η τάση στα άκρα κάθε πυκνωτή



Απάντηση:

α) Η ισοδύναμη χωρητικότητα δίνεται από τη σχέση:

$$C_{ολ} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\Rightarrow C_{ολ} = \frac{2 \times 3}{2 + 3} \mu\text{F} = 1,2\mu\text{F}$$

β) Σε κάθε πυκνωτή υπάρχει το ίδιο φορτίο Q που είναι και το φορτίο της συστοιχίας των 2 πυκνωτών

Επομένως:

$$Q = C_{ολ} \cdot U$$

$$Q = 1,2\mu\text{F} \times 240\text{V} = 288\mu\text{C}$$

γ) Η τάση στα άκρα κάθε πυκνωτή δίνεται από τις σχέσεις:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{288\mu\text{C}}{2\mu\text{F}} = 144\text{V}$$

$$U_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{288\mu\text{C}}{3\mu\text{F}} = 96\text{V}$$

(Όπως αναμενόταν, $U_1 + U_2 = 144\text{V} + 96\text{V} = 240\text{V} = U$)

4.2.7 Τύποι και είδη πυκνωτών

Οι πυκνωτές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Σταθεροί πυκνωτές
- Μεταβλητοί πυκνωτές

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι πυκνωτές που έχουν σταθερή χωρητικότητα. Στη δεύτερη οι πυκνωτές, στους οποίους μπορούμε να ρυθμίσουμε την τιμή της χωρητικότητας τους μέσα σε κάποια όρια (περιοχή) τιμών.

4.2.7.1 Σταθεροί πυκνωτές

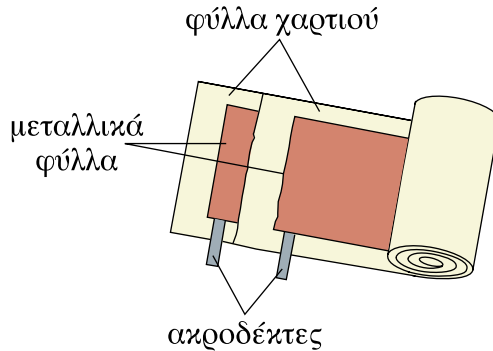
Κατασκευάζονται σε διάφορους τύπους ανάλογα με το υλικό του διηλεκτρικού τους και τον τρόπο κατασκευής τους. Κατά την κατασκευή τους επιδιώκεται η μεγαλύτερη δυνατή χωρητικότητα με τις μικρότερες δυνατές διαστάσεις. Τα κυριότερα είδη είναι:

α) Πυκνωτές χαρτιού και πυκνωτές με πλαστικά φύλλα.

Οι πυκνωτές αυτοί κατασκευάζονται από λεπτά μεταλλικά φύλλα (π.χ. από αλουμίνιο), τα οποία αποτελούν τους οπλισμούς του πυκνωτή. Μεταξύ τους παρεμβάλλεται ως διηλεκτρικό υλικό, χαρτί εμποτισμένο με παραφίνη.

Τα μεταλλικά φύλλα με το χαρτί τυλίγονται στη συνέχεια σχηματίζοντας ρολό, για να μειωθεί ο όγκος του πυκνωτή (Σχ. 4.2.9).

Το όλο συγκρότημα τοποθετείται σε μεταλλική θήκη και στεγανοποιείται με μονωτικό υλικό (ορυκτέλαια, ρητίνες), που χύνεται σε υγρή κατάσταση κατά τη φάση κατασκευής του πυκνωτή και στη συνέχεια στερεοποιείται.



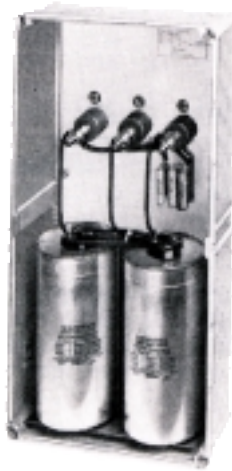
Σχήμα 4.2.9: Πυκνωτής με μεταλλικά φύλλα τυλιγμένα σε ρολό μεταξύ των οποίων υπάρχει χαρτί ως διηλεκτρικό

Αντί για χαρτί χρησιμοποιούνται και πλαστικά φύλλα από διάφορες οργανικές ενώσεις (πολυστερίνη, πολυανθρακικά, πολυπροπυλένιο, κ.α.).

Παραλλαγή των παραπάνω τύπων πυκνωτών είναι οι πυκνωτές μεταλλικών φύλλων. Αποτελούνται από φύλλα χαρτιού ή πλαστικού υλικού (τύπος ΜΡ ή ΜΚ), πάνω στα οποία έχει τοποθετηθεί με διαδικασία ατμοποίησης ένα πολύ λεπτό στρώμα μετάλλου.

Στη περίπτωση κατά την οποία δημιουργηθεί ηλεκτρικός σπινθήρας μεταξύ των οπλισμών μέσω του διηλεκτρικού, τότε λόγω της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται, καίγονται (ενώνονται με το οξυγόνο) τα μόρια του μετάλλου του οπλισμού στη περιοχή του σπινθήρα, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πια αγωγική σύνδεση μεταξύ των οπλισμών και να σταματά το φαινόμενο. Ο πυκνωτής δηλαδή μεταλλικών φύλλων έχει το πλεονέκτημα να αυτοεπουλώνεται σε περίπτωση διάσπασης του διηλεκτρικού του.

Οι πυκνωτές χαρτιού και πλαστικών φύλλων εγκαθίστανται κυρίως σε δίκτυα χαμηλής συχνότητας (π.χ. για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος).



Σχήμα 4.2.10: Πυκνωτές ισχύος με πλαστικά φύλλα

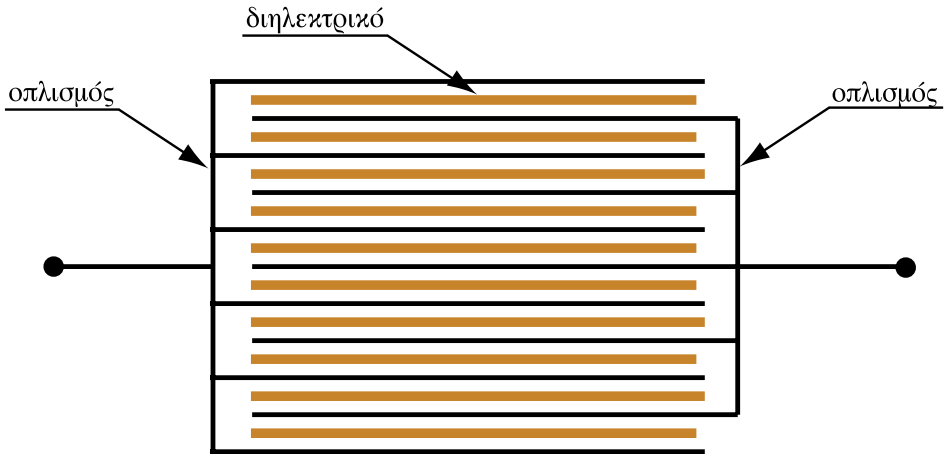
β) Πυκνωτές μίκας και κεραμικοί πυκνωτές

Οι πυκνωτές μίκας χρησιμοποιούν ως διηλεκτρικό υλικό τη μίκα (κοινή ονομασία του μαρμαρυγία, ορυκτού σε μορφή λεπτών σκληρών φύλλων).

Οι κεραμικοί πυκνωτές χρησιμοποιούν ως διηλεκτρικό υλικό λεπτούς δίσκους από κεραμικό υλικό.

Για να μειωθεί ο όγκος των πυκνωτών αυτών και να αυξηθεί η χωρητικότητά τους ακολουθείται η εξής μέθοδος:

Οι οπλισμοί διαμοιράζονται σε πολλές μεταλλικές πλάκες που τοποθετούνται η μία πάνω στην άλλη. Μεταξύ τους παρεμβάλλεται το διηλεκτρικό υλικό. Οι μονές πλάκες συνδέονται αγωγή μεταξύ τους, από το ένα άκρο τους, και σχηματίζουν τον ένα οπλισμό του πυκνωτή, ενώ οι ζυγές πλάκες συνδέονται μεταξύ τους από το αντίθετο άκρο τους και σχηματίζουν τον άλλο οπλισμό του πυκνωτή (Σχ. 4.2.11).



Σχήμα 4.2.11: Πυκνωτής με οπλισμούς αποτελούμενος από πολλές μεταλλικές πλάκες (Σχηματική παράσταση)

Οι κεραμικοί πυκνωτές και οι πυκνωτές μίκας κατασκευάζονται συνήθως σε μικρές διαστάσεις και τοποθετούνται σε ηλεκτρονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα και σε κυκλώματα υψηλής συχνότητας.



Σχήμα 4.2.12: Πυκνωτής μίκας - κεραμικός πυκνωτής

γ) Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές

Στην κλασική του μορφή ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής αποτελείται από ένα μεταλλικό δοχείο γεμάτο με διάλυμα ηλεκτρολύτη. Ο ένας ακροδέκτης του πυκνωτή συνδέεται με το μεταλλικό δοχείο. Ο άλλος ακροδέκτης συνδέεται με

λεπτά μεταλλικά φύλλα τα οποία είναι εμβαπτισμένα στο διάλυμα. Το διηλεκτρικό υλικό του πυκνωτή αποτελείται από ένα πολύ λεπτό στρώμα οξειδίου του αλουμινίου (πάχους μερικών μm) το οποίο σχηματίζεται στην επιφάνεια του αλουμινίου. Λόγω του πολύ μικρού πάχους του διηλεκτρικού οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές έχουν μεγάλη χωρητικότητα σε σχέση με τις διαστάσεις τους.

Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές ξηρού τύπου, όπου στη θέση του ηλεκτρολύτη υπάρχει χαρτί εμποτισμένο με τον ηλεκτρολύτη, το οποίο παρεμβάλλεται ανάμεσα στα μεταλλικά φύλλα.

Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές έχουν **πολικότητα**. Ο ακροδέκτης που συνδέεται με τα μεταλλικά φύλλα είναι ο θετικός (+) πόλος και ο ακροδέκτης που συνδέεται με το δοχείο και τον ηλεκτρολύτη ο αρνητικός πόλος (-). Όταν συνδέεται ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής σε ηλεκτρικό κύκλωμα, ο θετικός πόλος πρέπει να συνδεθεί στον θετικό πόλο της πηγής και ο αρνητικός στον αρνητικό πόλο της πηγής. Σε αντίθετη περίπτωση δημιουργούνται χημικές αντιδράσεις που καταστρέφουν το λεπτό στρώμα του διηλεκτρικού και ο πυκνωτής βραχυκυκλώνεται.

Κατά συνέπεια ο πολωμένος ηλεκτρολυτικός πυκνωτής **δεν πρέπει να συνδέεται σε εναλλασσόμενη τάση**, εκτός αν ληφθεί μέριμνα, ώστε ο θετικός πόλος να βρίσκεται πάντα σε υψηλότερο δυναμικό απ' ό,τι ο αρνητικός.

Κατασκευάζονται όμως και ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές **χωρίς πολικότητα**. Στους πυκνωτές αυτούς ο ηλεκτρολύτης παρεμβάλλεται ανάμεσα σε δύο όμοια μεταλλικά φύλλα στα οποία συνδέονται οι ακροδέκτες του πυκνωτή. Καθώς εναλλάσσεται η πολικότητα της πηγής, το διηλεκτρικό στρώμα του οξειδίου του μετάλλου σχηματίζεται πότε στο ένα και πότε στο άλλο φύλλο. Οι ακροδέκτες δηλαδή του πυκνωτή εναλλάσσουν την πολικότητά τους, ακολουθώντας τις εναλλαγές της πολικότητας της πηγής.

Εκτός από τους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές αλουμινίου υπάρχουν και οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές τανταλίου, στους οποίους τα μεταλλικά φύλλα είναι από ταντάλιο. Οι πυκνωτές αυτοί έχουν πιο σταθερή χωρητικότητα και καταλαμβάνουν μικρότερο χώρο από τους αντίστοιχους πυκνωτές αλουμινίου, έχουν όμως μεγαλύτερο κόστος.



Σχήμα 4.2.13: Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές

4.2.7.2 Μεταβλητοί πυκνωτές

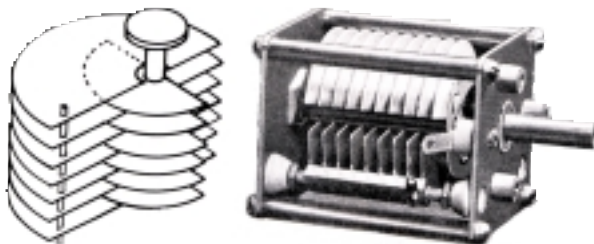
Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- α) Μεταβλητοί πυκνωτές αέρος
- β) Πυκνωτές τρίμερ (trimmer)

Οι μεταβλητοί πυκνωτές αέρος αποτελούνται από κινητά και ακίνητα μεταλλικά ελάσματα και έχουν ως διηλεκτρικό τον αέρα. Η χωρητικότητά τους μεταβάλλεται ανάλογα με το τμήμα της επιφάνειας των κινητών ελασμάτων, που εισέρχονται στα κενά διαστήματα των σταθερών μεταλλικών ελασμάτων. (Σχ. 4.2.14)

Οι πυκνωτές τρίμερ αποτελούνται από μικρούς κεραμικούς δίσκους με μεταλλική επίστρωση, οι οποίοι μπορούν να στρέφονται έτσι, ώστε να επικαλύπτονται μερικά, ανάλογα με τη γωνία στροφής. Η γωνία ρυθμίζεται με ένα κατσαβίδι ή χειροστρόφαλο.

Έχουν μικρή χωρητικότητα και χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα.



Σχήμα 4.2.14: Μεταβλητός πυκνωτής αέρος

4.2.8 Χαρακτηριστικά μεγέθη πυκνωτών

- **Η ονομαστική χωρητικότητα** η οποία αναγράφεται επάνω στον πυκνωτή συνήθως σε μF ή pF . Οι πυκνωτές διατίθενται στο εμπόριο σε ορισμένες τιμές χωρητικότητας, είναι δηλαδή τυποποιημένοι. Σε πυκνωτές μικρών διαστάσεων που τοποθετούνται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα, η χωρητικότητα δεν αναγράφεται αριθμητικά αλλά χρησιμοποιείται κώδικας χρωμάτων και γραμμών, όπως στις ωμικές αντιστάσεις.
- **Η ανοχή %**. Αναφέρεται στη μέγιστη επί τοις εκατό απόκλιση της πραγματικής τιμής της χωρητικότητας του πυκνωτή σε σχέση με την αναγραφόμενη ονομαστική τιμή. Είναι δείκτης ποιότητας του πυκνωτή. Κυμαίνεται από $\pm 1\%$ έως και $\pm 50\%$, ανάλογα με την ποιοτική κατηγορία του πυκνωτή.
- **Η ονομαστική τάση λειτουργίας**. Είναι η τάση σε V ή kV που μπορεί να εφαρμόζεται συνεχώς στον πυκνωτή χωρίς κίνδυνο καταστροφής του. Μπορεί να αναφέρεται ξεχωριστά σε συνεχή (DC) και σε εναλλασσόμενη τάση (AC).
- **Τα θερμοκρασιακά όρια λειτουργίας του πυκνωτή** (π.χ. -40°C έως $+85^\circ\text{C}$) ή η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία λειτουργίας του.
- **Η ωμική αντίσταση** που παρουσιάζει ο πυκνωτής, αν συνδεθεί σε συνεχή τάση. Ο ιδανικός πυκνωτής θεωρείται ως τέλειος μονωτής. Στην πραγματικότητα υπάρχει πάντα ένα πολύ μικρό ωμικό ρεύμα το οποίο περνά μέσα από το διηλεκτρικό του πυκνωτή. Η ωμική αντίσταση των πυκνωτών κυμαίνεται συνήθως μεταξύ μερικών $\text{M}\Omega$ και μερικών χιλιάδων $\text{M}\Omega$ ανάλογα με τον τύπο του πυκνωτή. Τη μικρότερη ωμική αντίσταση έχουν οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές.
- **Ο συντελεστής απωλειών (εφδ του πυκνωτή)**. Αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα του ρεύματος στην οποία λειτουργεί ο πυκνωτής (π.χ. 50 Hz, 1MHz) και αποτελεί μέτρο των απωλειών ενέργειας του πυκνωτή με τη μορφή θερμότητας (απώλειες Joule). Όσο πιο μικρός είναι ο συντελεστής απωλειών, τόσο μικρότερες είναι οι απώλειες Joule στον πυκνωτή.

Στον πίνακα 4.2.3 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά μεγέθη των κυριότερων τύπων πυκνωτών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2.3. Τυπικά χαρακτηριστικά συνηθισμένων σταθερών πυκνωτών

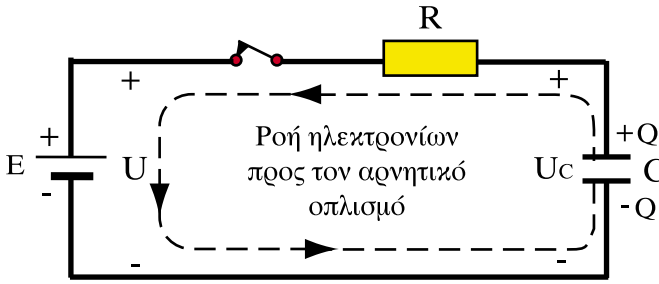
Είδος	Περιοχή χωρητικότητας	Ανώτατη τιμή της τάσης ονομαστικής λειτουργίας σε V	Ανώτατη τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας, °C	Ανοχή, %	Ανώτατη τιμή αντίστασης μόνωσης, MΩ
Μίκας	1 pF-0.1 μF	50000	150	+0.25 έως +5	> 100 000
Επάργυρης μίκας	1 pF-0.1 μF	75000	125	+1 έως +20	1000
Χαρτιού	500 pF-50 μF	100000	125	+10 έως +20	100
Πολυστυρένιου	500 pF-10 μF	1000	85	+0.5	10000
Πολυανθρακικού	0.001-1 μF	600	140	+1	10000
Πολυεστέρος	5000 pF-10 μF	600	125	+10	10000
Κεραμικού					
Μικρής ϵ_T	1 pF-0.0001 μF	6000	125	+5 έως +20	1000
Μεγάλης ϵ_T	100 pF-2.2 μF	100	85	+100 έως -20	100
Γυαλιού	10 pF-0.15 μF	6000	125	+1 έως +20	>100000
Κενού	1-5000 μF	60000	85	+5	>100000
Αποθ/σης ενέργειας	0.5-250 μF	50000	100	+10 έως +20	100
Ηλεκτρολυτικοί:					
Αλουμινίου	1 μF-1 F	700	85	+ 100 έως -20	<1
Τανταλίου	0.001-1000 μF	100	125	+5 έως +20	>1

Πηγή: “ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ”, Kaufman-Seidman, Εκδόσεις Τζιόλα, 1992

4.2.8 Φόρτιση και εκφόρτιση πυκνωτή -Σταθερά χρόνου

Στην παράγραφο 4.2.1 αναφερθήκαμε στη **φόρτιση** και την **εκφόρτιση** του πυκνωτή. Εδώ θα εξετάσουμε πιο αναλυτικά αυτά τα φαινόμενα και θα δούμε πώς μπορεί να υπολογιστεί **ο χρόνος** που απαιτείται για τη φόρτιση και την εκφόρτιση ενός πυκνωτή.

Στο σχ. 4.2.15 φαίνεται ένα κύκλωμα στο οποίο έχουν σημειωθεί η συνολική αντίσταση R του κυκλώματος, ένας πυκνωτής χωρητικότητας C μια πηγή συνεχούς ρεύματος ηλεκτρεγερτικής δύναμης E και ένας διακόπτης.



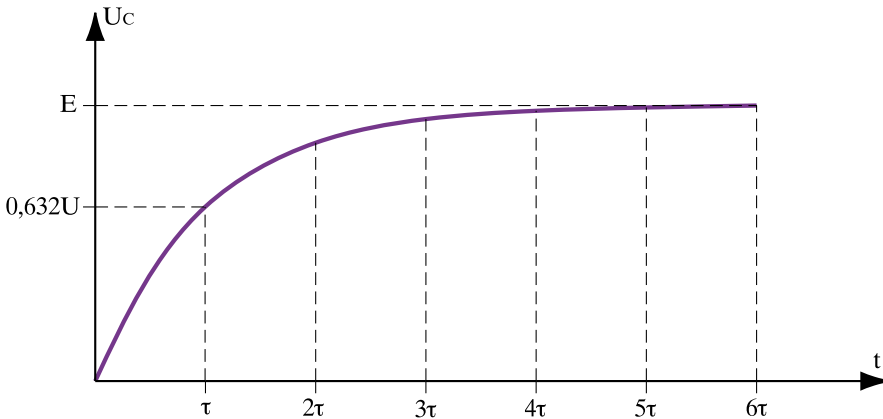
Σχήμα 4.2.15: Σχηματική διάταξη φόρτισης πυκνωτή

Με το κλείσιμο του διακόπτη η πηγή ωθεί τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του κυκλώματος, τα οποία κινούνται από τον ένα οπλισμό του πυκνωτή στον άλλο, μέσω της πηγής. Συσσωρεύονται έτσι αρνητικά και θετικά φορτία (ίσα κατ' απόλυτον τιμή) στους δυο οπλισμούς του πυκνωτή.

Μόλις αποτεθούν τα πρώτα ηλεκτρόνια στον αρνητικό οπλισμό, τα επόμενα ηλεκτρόνια έχουν να αντιμετωπίσουν την απωστική δύναμη που ασκούν τα συγκεντρωμένα ηλεκτρόνια στον οπλισμό. Μειώνεται επομένως ο ρυθμός ροής των ηλεκτρονίων με την πάροδο του χρόνου.

Παράλληλα, λόγω της απόθεσης των φορτίων η τάση μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή $U_c = Q / C$ αυξάνεται, αλλά με όλο και πιο αργό ρυθμό, γιατί εξακολουθούν μεν να προστίθενται φορτία στον οπλισμό, αλλά όλο και λιγότερα κάθε φορά.

Στο σχήμα 4.2.16 παρουσιάζεται η τάση U_c ως προς το χρόνο t .



Σχήμα 4.2.16: Διάγραμμα της τάσης U_C ως προς το χρόνο. Ο άξονας του χρόνου έχει βαθμολογηθεί σε σταθερές χρόνου τ

Το πόσο γρήγορα θα φορτιστεί ο πυκνωτής εξαρτάται από δύο παράγοντες:

- από τα εμπόδια που συναντούν τα ηλεκτρόνια στο δρόμο τους, δηλαδή την συνολική αντίσταση R του κυκλώματος.
- από το μέγιστο αριθμό ηλεκτρονίων (ηλεκτρικών φορτίων) που μπορεί να αποθηκεύσει ο οπλισμός, δηλαδή τη χωρητικότητα C του πυκνωτή.

Το μέγεθος που συνδυάζει αυτούς τους παράγοντες (R και C) ονομάζεται **σταθερά χρόνου τ** και μετριέται σε s :

$$\tau = R \cdot C$$

Μονάδα s (δευτερόλεπτο)⁽³⁾

Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά χρόνου του κυκλώματος, τόσο πιο αργή είναι η φόρτιση του πυκνωτή.

⁽³⁾ Σημείωση: Το ότι το γινόμενο RC έχει διαστάσεις χρόνου t αποδεικνύεται εύκολα αν θέσουμε:

$$R = U / I \text{ (νόμος του Ohm) και}$$

$$C = Q / U \text{ (ορισμός χωρητικότητας)}$$

$$\text{Οπότε: } R \cdot C = (U / I) \cdot (Q / U) = Q / I$$

$$\text{Αλλά: } Q / I = t \text{ (ορισμός της έντασης του ρεύματος)}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμη κι αν δεν υπάρχει αντιστάτης R στο κύκλωμα, υπάρχει η πολύ μικρή αντίσταση των αγωγών, επομένως μπορεί να υπολογιστεί πάντοτε κάποια σταθερά χρόνου τ .

Αν βαθμολογήσουμε την κλίμακα του χρόνου t σε σταθερές χρόνου τ (Σχ. 4.2.16), παίρνουμε τις εξής τιμές για το λόγο U_c / E :

Πίνακας 4.2.4

Χρόνος t σε σταθερές χρόνου τ	Λόγος $\frac{U_c}{E}$
0	0
1 τ	0,632
2 τ	0,865
3 τ	0,951
4 τ	0,981
5 τ	0.993

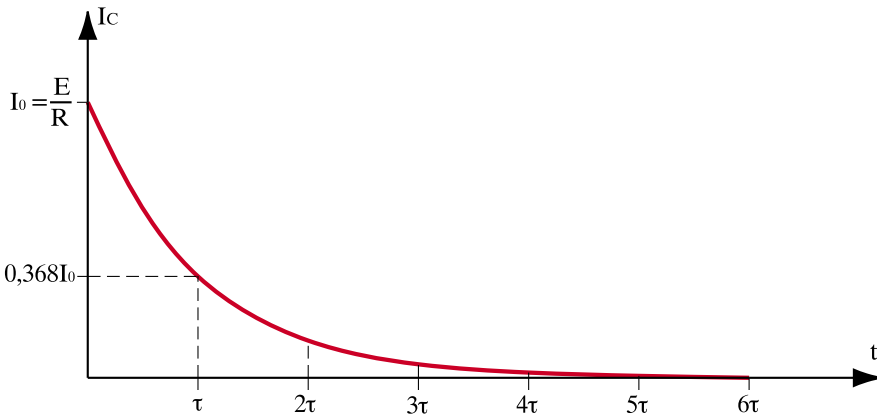
Θεωρητικά, σύμφωνα με τη μορφή της καμπύλης, η τάση U_c στα άκρα του πυκνωτή θα γίνει ίση με την ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής E σε άπειρο χρόνο. Πρακτικά αυτό θα συμβεί σε χρονικό διάστημα ίσο με 5τ .

Για το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα κατά τη φόρτιση του πυκνωτή, σύμφωνα με τον 2^ο κανόνα του Κίρχοφ έχουμε τη σχέση:

$$E = I \cdot R + U_c = 0 \text{ ή } I = \frac{E - U_c}{R}$$

Με το κλείσιμο του διακόπτη η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι

$$U_c = 0 \text{ οπότε το αρχικό ρεύμα είναι } I_0 = \frac{E}{R} \text{ (Σχ. 4.2.17).}$$



Σχήμα 4.2.17: Διάγραμμα της έντασης του ρεύματος φόρτισης του πυκνωτή ως προς το χρόνο

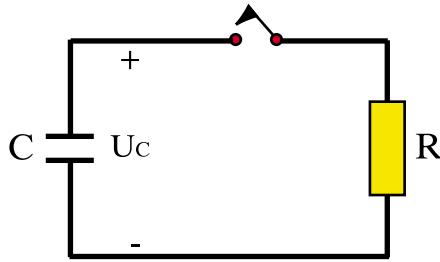
Καθώς φορτίζεται ο πυκνωτής και αυξάνεται η τάση U_c , το ρεύμα I **σταδιακά μειώνεται**. Γίνεται ίσο με μηδέν, όταν η τάση U_c γίνει ίση με την τάση της πηγής E . Θεωρητικά αυτό γίνεται σε χρόνο άπειρο, πρακτικά σε χρόνο ίσο με 5τ .

Πίνακας. 4.2.5

Χρόνος t σε σταθερές χρόνου τ	Ρεύμα I
0	$I_0 = \frac{E}{R}$
1 τ	0,368. I_0
2 τ	0,135. I_0
3 τ	0,049. I_0
4 τ	0,019. I_0
5 τ	0,007. I_0

Εκφόρτιση του πυκνωτή

Όταν οι οπλισμοί ενός φορτισμένου πυκνωτή ενωθούν μεταξύ τους με έναν αγωγό μέσω μιας αντίστασης R , τότε θα συμβεί **εκφόρτιση** του πυκνωτή (Σχ 4.2.18).



Σχήμα 4.2.18: Εκφόρτιση πυκνωτή

Με το κλείσιμο του διακόπτη το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα το οποίο δίνεται από τη σχέση:

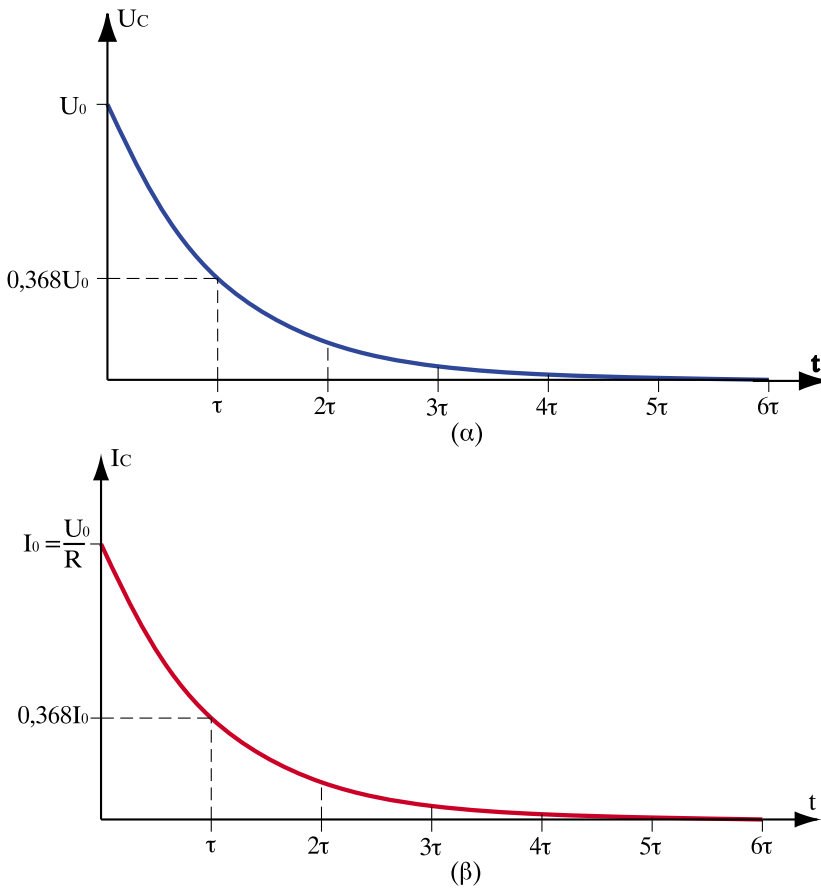
$$I = \frac{U_0}{R}, \text{ όπου } U_0 \text{ η αρχική τάση στα άκρα του πυκνωτή}$$

Με τη διόδο του ρεύματος μειώνονται σταδιακά τα ηλεκτρικά φορτία στους οπλισμούς του πυκνωτή και επομένως και η τάση U_C στα άκρα του πυκνωτή καθώς και το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα.

Στο (Σχ 4.2.19) παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης U_C στα άκρα του πυκνωτή καθώς και η μεταβολή του ρεύματος I που διαρρέει το κύκλωμα ως προς το χρόνο.

Λόγω του φαινομένου της εκφόρτισης, χρειάζεται μεγάλη προσοχή όταν χειριζόμαστε πυκνωτές.

Δεν πρέπει να αγγίξουμε ένα κύκλωμα με χωρητικότητα ακόμη και μετά το άνοιγμα του διακόπτη, γιατί υπάρχει κίνδυνος να εκφορτιστεί ο πυκνωτής μέσω του σώματός μας και να μας προκαλέσει ηλεκτροπληξία.



Σχήμα 4.2.19: Τάση και ρεύμα κατά την εκφόρτιση του πυκνωτή

Όπως και κατά τη φόρτιση, έτσι και κατά την εκφόρτιση του πυκνωτή οι καμπύλες της τάσης U_C και του ρεύματος I έχουν την ειδική μορφή του σχ. 4.2.19 και η ταχύτητα μεταβολής του φαινομένου εξαρτάται από τη σταθερά χρόνου $\tau = R \cdot C$ του κυκλώματος.

Αν στη θέση της (σταθερής) αντίστασης R τοποθετηθεί μια μεταβλητή αντίσταση (ένα ποτενσιόμετρο) τότε μπορούμε να μεταβάλουμε τη σταθερά χρόνου του κυκλώματος και μ' αυτό τον τρόπο να καθυστερήσουμε ή να επισπεύσουμε την εκφόρτιση του πυκνωτή. Η διάταξη αυτή έχει εφαρμογή στους ρυθμιζόμενους χρονοδιακόπτες, που διακόπτουν τη λειτουργία ενός κυκλώματος μετά από πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος.

Ανακεφαλαίωση

- Ένας πυκνωτής αποτελείται από δύο αγωγίμα σώματα τοποθετημένα το ένα κοντά στο άλλο, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται μονωτικό υλικό.
- Χωρητικότητα C ενός πυκνωτή ονομάζεται ο σταθερός λόγος του φορτίου Q που είναι αποθηκευμένο στον πυκνωτή, δια της τάσης U που επικρατεί στα άκρα του.
- Διηλεκτρική αντοχή ή αντοχή του διηλεκτρικού, ονομάζεται η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, την οποία αντέχει ένα μονωτικό υλικό χωρίς να διασπαστεί.
- Κατά την παράλληλη συνδεσμολογία πυκνωτών ισχύει:

$$C_{ολ} = C_1 + C_2 + C_3$$

- Κατά τη συνδεσμολογία σειράς ισχύει: $\frac{1}{C_{ολ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$
- Οι πυκνωτές διακρίνονται σε σταθερούς πυκνωτές και μεταβλητούς πυκνωτές. Οι κυριότεροι τύποι σταθερών είναι οι πυκνωτές χαρτιού, οι πυκνωτές πλαστικών φύλλων, οι πυκνωτές μίκας, οι κεραμικοί πυκνωτές και οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές. Στους μεταβλητούς πυκνωτές ανήκουν οι μεταβλητοί πυκνωτές αέρος και τα τρίμερα.
- Η χρονική διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης των πυκνωτών καθορίζεται από τη σταθερά χρόνου $\tau = R \cdot C$ του κυκλώματος.

Πίνακας Συμβόλων και Μονάδων

	Σύμβολο	Μονάδα
Χωρητικότητα	C	F (Φαράντ)
Διηλεκτρική σταθερά	$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$	F/m

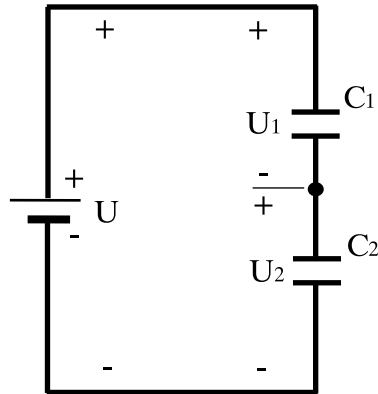
Ερωτήσεις

1. Τι εννοούμε όταν λέμε ότι ένας πυκνωτής έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από έναν άλλο;

2. Τι θα συμβεί στη χωρητικότητα ενός πυκνωτή αέρος, αν στη θέση του αέρα τοποθετήσουμε μία με σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 6$;
3. Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η χωρητικότητα ενός επίπεδου πυκνωτή;
4. Διατηρώντας συνδεδεμένο στην ηλεκτρική πηγή ένα επίπεδο πυκνωτή αέρος, διπλασιάζουμε την απόσταση των οπλισμών του. Τι θα συμβεί:
 - α) στη χωρητικότητά του;
 - β) στο φορτίο του;
 - γ) στην τάση του;
 - δ) στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο διάκενο των οπλισμών του;
5. Αποσυνδέουμε έναν επίπεδο πυκνωτή αέρος από την ηλεκτρική πηγή και διατηρώντας τον φορτισμένο, διπλασιάζουμε την απόσταση των οπλισμών του. Τι θα συμβεί:
 - α) στη χωρητικότητά του;
 - β) στο φορτίο του;
 - γ) στην τάση του;
 - δ) στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο διάκενο των οπλισμών του;
6. Ποια σχέση μας δίνει την ολική (ισοδύναμη) χωρητικότητα κατά τη σύνδεση των πυκνωτών σε σειρά και ποια κατά την παράλληλη σύνδεση;
7. Σε ποια από τις δύο συνδέσεις, σε σειρά ή παράλληλα, οι συνδεδεμένοι πυκνωτές έχουν στους οπλισμούς τους το ίδιο φορτίο και σε ποια την ίδια τάση;
8. Διαθέτουμε δύο όμοιους πυκνωτές τους οποίους συνδέουμε α) σε σειρά και β) παράλληλα. Σε ποια από τις δύο συνδέσεις (α) ή (β) η $C_{ολ}$ είναι μικρότερη;
9. Τι πρέπει να προσέχουμε κατά τη σύνδεση ενός πολωμένου ηλεκτρολυτικού πυκνωτή;
10. Να αναφέρετε τους κυριότερους τύπους σταθερών και μεταβλητών πυκνωτών.
11. Γιατί οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές έχουν μεγάλη χωρητικότητα;
12. Στο κύκλωμα εκφόρτισης ενός πυκνωτή αντικαθιστούμε την αντίσταση R με μία άλλη διπλάσιας τιμής. Πώς θα επηρεαστεί ο χρόνος εκφόρτισης του πυκνωτή;

Ασκήσεις

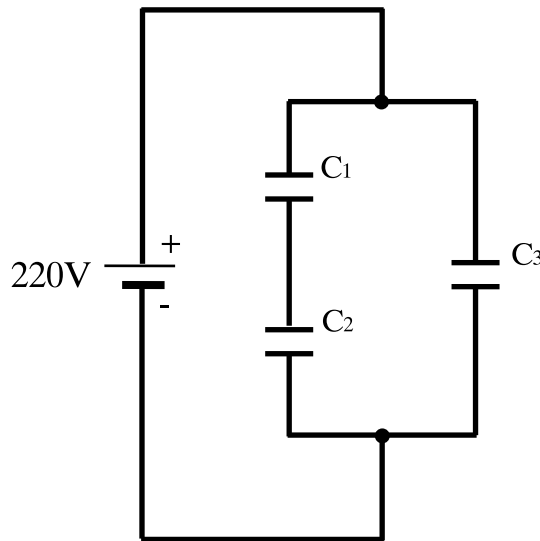
- Ένας πυκνωτής χωρητικότητας $2\mu\text{F}$ φορτίζεται με τάση 220V . Ποιο είναι το φορτίο κάθε οπλισμού του;
(Απ. $9,1\text{ mC}$)
- Πυκνωτής έχει χωρητικότητα $25\mu\text{F}$. Ποια τάση επικρατεί μεταξύ των οπλισμών του, αν το φορτίο του είναι $Q = 0,5\text{mC}$;
(Απ. 20 V)
- Ένας επίπεδος πυκνωτής έχει οπλισμούς με εμβαδόν $S = 10\text{cm}^2$. Η απόσταση μεταξύ των οπλισμών του είναι $d = 1\text{mm}$ και το διηλεκτρικό του μονωτικό λάδι σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r = 2$. Να υπολογιστεί η χωρητικότητα του πυκνωτή.
(Απ. $4,4 \times 10^{-12}\text{F} = 4,4\text{ pF}$)
- Δύο όμοιοι πυκνωτές χωρητικότητας $C = 2\mu\text{F}$ συνδέονται: α) σε σειρά και β) παράλληλα. Να υπολογιστεί η ισοδύναμη χωρητικότητά τους στις δύο περιπτώσεις.
(Απ. α) $1\mu\text{F}$, β) $4\mu\text{F}$)
- Να αποδείξετε ότι η ολική χωρητικότητα ν πυκνωτών ίσης χωρητικότητας C που συνδέονται σε σειρά, δίνεται από τη σχέση $C_{\text{ολ}} = C/\nu$.
- Τρεις πυκνωτές με χωρητικότητα $C_1 = 1\text{nF}$, $C_2 = 4\text{nF}$ και $C_3 = 5\text{nF}$ συνδέονται παράλληλα σε πηγή τάσης 200V . Να υπολογιστούν:
α) η τάση στα άκρα κάθε πυκνωτή
β) η ισοδύναμη χωρητικότητα
γ) το φορτίο κάθε πυκνωτή
(Απ. α) 200V β) 10nF γ) $Q_1 = 0,2\mu\text{C}$, $Q_2 = 0,8\mu\text{C}$, $Q_3 = 1\mu\text{C}$)
- Στη συνδεσμολογία του σχήματος $C_1 = 6\mu\text{F}$ και $C_2 = 14\mu\text{F}$. Το φορτίο στον πυκνωτή C_1 μετρήθηκε και βρέθηκε $Q_1 = 1\text{mC}$.
Να βρεθεί η τάση U στα άκρα της πηγής και οι τάσεις U_1 και U_2 στα άκρα των πυκνωτών.



(Απ. $U=238\text{V}$, $U_1=167\text{V}$, $U_2=71\text{V}$)

8. Τρεις πυκνωτές $C_1=4\mu\text{F}$, $C_2=6\mu\text{F}$ και $C_3=2\mu\text{F}$ συνδέονται όπως στο σχήμα, στα άκρα πηγής Σ.Ρ. τάσης 220V . Να βρεθούν:

- Η ισοδύναμη χωρητικότητα των 3 πυκνωτών
- Η τάση και το φορτίο κάθε πυκνωτή



(Απ. α) $4,4\mu\text{F}$ β) $U_1=132\text{V}$, $Q_1=528\mu\text{C}$, $U_2=88\text{V}$, $Q_2=528\mu\text{C}$, $U_3=220\text{V}$, $Q_3=440\mu\text{C}$)