



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Μηχανικών Υπολογιστών
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

(Σπινθηριστές)

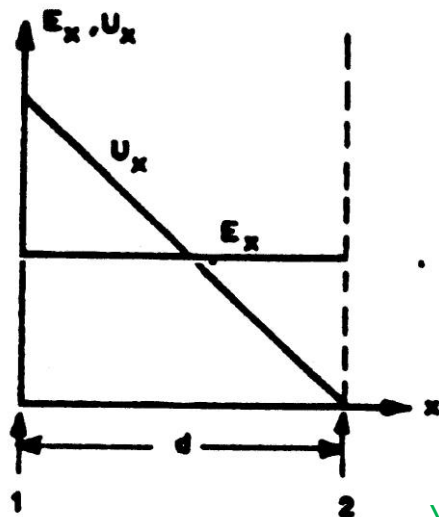
Σπινθηριστές

- Μία διάταξη δύο ηλεκτροδίων σε ένα μονωτικό υλικό ονομάζεται «σπινθηριστής»
- Οι σπινθηριστές εμφανίζονται:
 - Από μόνοι τους (π.χ. μεταλλικά τμήματα ηλεκτρικών μηχανών και συσκευών, ευρισκόμενα υπό τάση)
 - Κατασκευάζονται από εμάς και χρησιμοποιούνται:
 - Για διεξαγωγή έρευνας και δοκιμών επί της διηλεκτρικής αντοχής διαφόρων μονωτικών υλικών
 - Ως διατάξεις προστασίας των ηλεκτρικών μηχανών και συσκευών έναντι υπερτάσεων
 - Προς διεξαγωγή μετρήσεων υψηλών τάσεων, κ.λπ.

Είδη σπινθηριστών

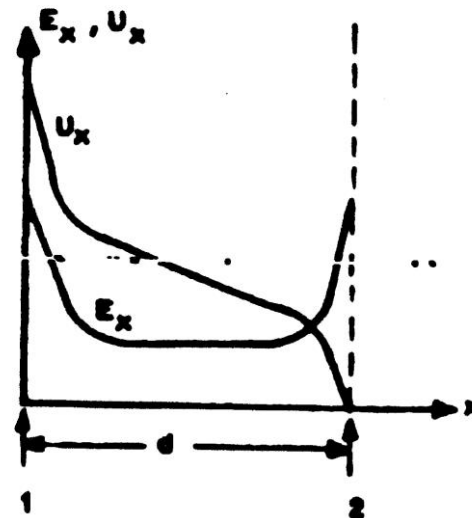
Ομογενούς ηλεκτροστατικού πεδίου

- Η πεδιακή ένταση έχει σταθερή τιμή κατά μήκος του άξονα συμμετρίας
- Το δυναμικό μεταβάλλεται γραμμικά (στον ίδιο άξονα)



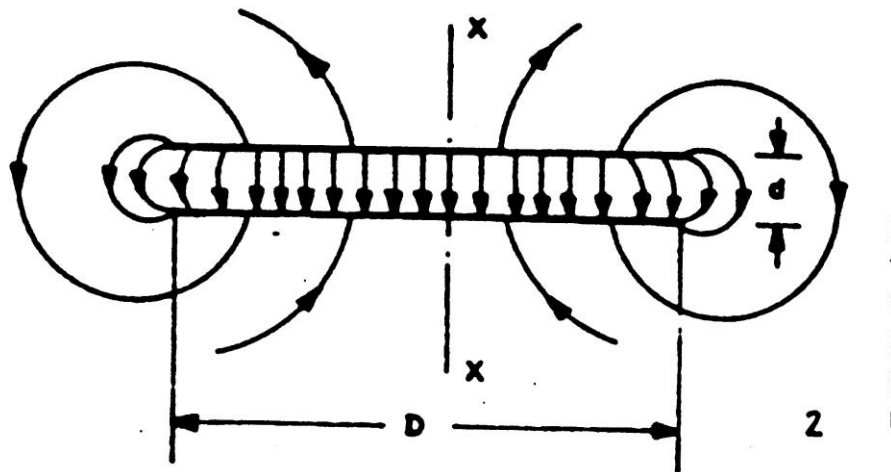
Ανομοιογενούς ηλεκτροστατικού πεδίου

- Οι καμπύλες προέρχονται από σπινθηριστή με ηλεκτρόδια που έχουν μικρή ακτίνα καμπυλότητας, στα οποία συνεπώς η πεδιακή ένταση είναι μέγιστη
- Στο μέσο του διακένου έχουμε το ελάχιστο της πεδιακής έντασης

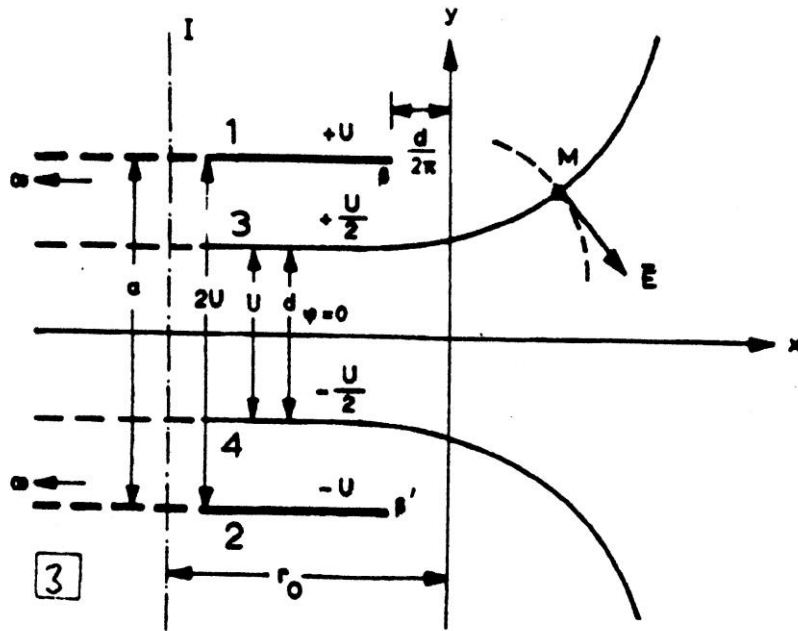


Σπινθηριστής επιπέδων πλακών

- Δύο επίπεδα ηλεκτρόδια, παράλληλα μεταξύ τους και απείρου εκτάσεως
- Δεν είναι πρακτικά εφικτός
- Στην πράξη έχουμε πλάκες πεπερασμένης εκτάσεως
- Ομοιογενές πεδίο στην κεντρική περιοχή των πλακών



Σπινθηριστής επιπέδων πλακών



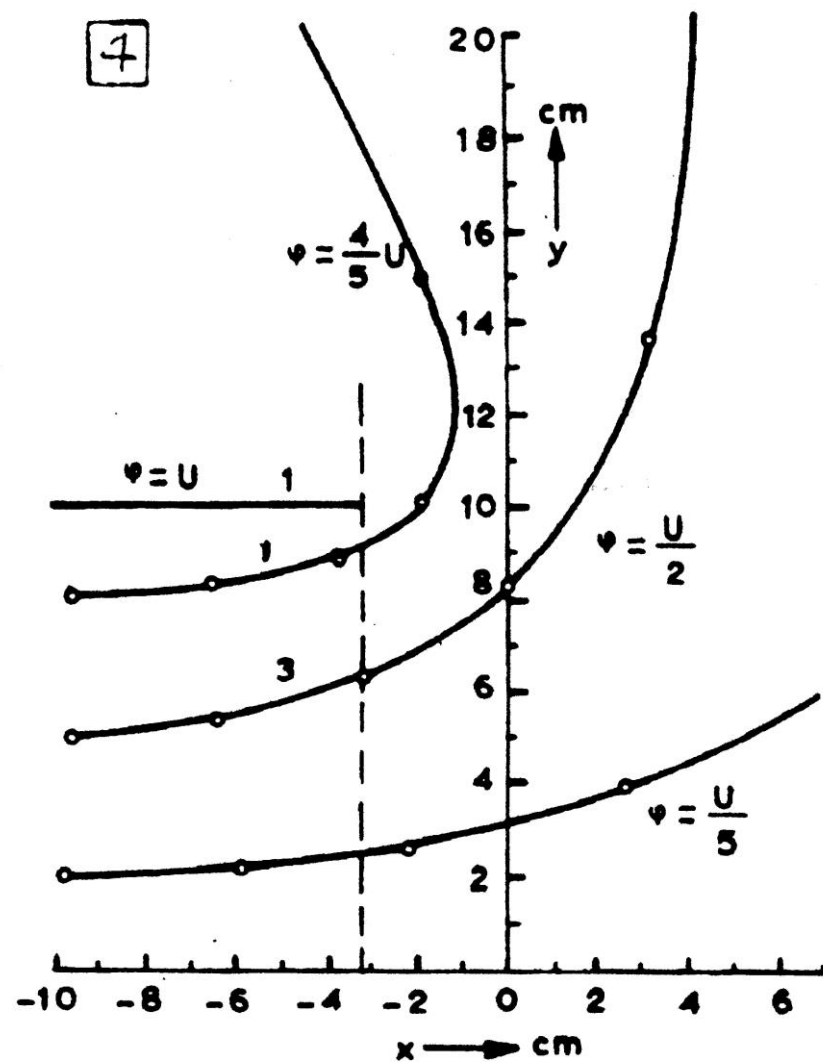
Δύο επίπεδες μεταλλικές
πλάκες, παράλληλες μεταξύ
τους, μηδενικού πάχους και
ημιαπείρου εκτάσεως
(ευθύγραμμη ακμή ββ')

Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος

$$x = \frac{y - \frac{\alpha\phi}{2U}}{\tan \frac{\pi\phi}{U}} + \frac{\alpha}{2\pi} \ln \left(\frac{\frac{2\pi y}{\alpha} - \frac{\pi\phi}{U}}{\sin \frac{\pi\phi}{U}} \right)$$

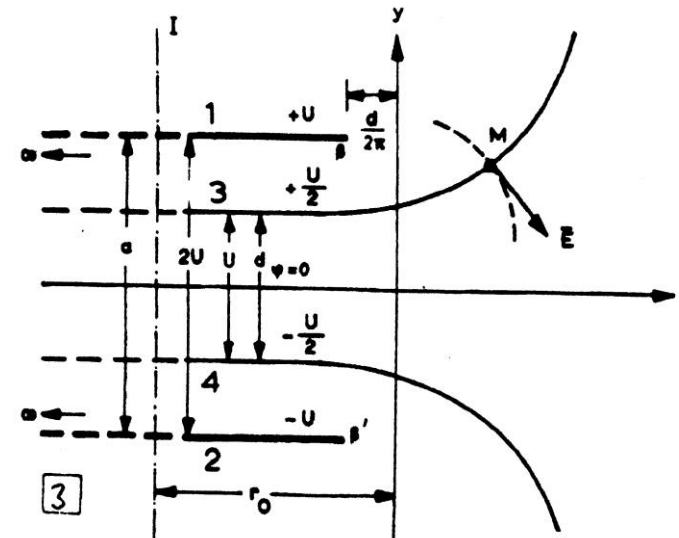
Εξίσωση ισοδυναμικής επιφάνειας

Ισοδυναμικές καμπύλες ηλεκτροστατικού πεδίου επίπεδων πλακών, ημιαπείρου εκτάσεως ($\alpha=20\text{cm}$)



Μέγιστη πεδιακή ένταση συναρτήσει του δυναμικού μιας ισοδυναμικής επιφάνειας

ϕ/U	$E_{\max}/E_0$
1,0	∞
0,9	2,23
0,8	1,70
0,7	1,24
0,6	1,05
0,5	1,00

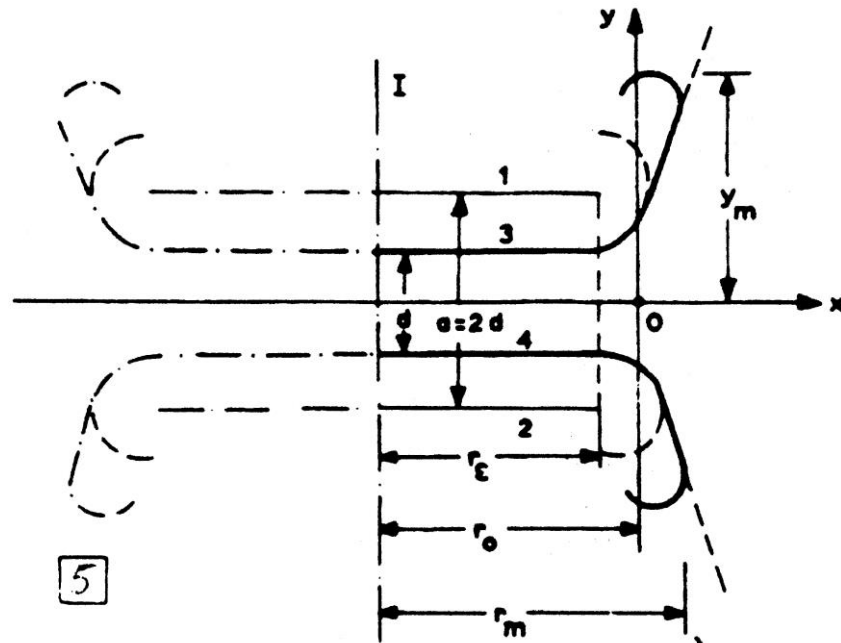


Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος

$$y = \pm \frac{d}{\pi} \left(e^{\frac{\pi x}{d}} + \frac{\pi}{2} \right)$$

Παραμετρική εξίσωση νέων ηλεκτροδίων (Δεν εμφανίζουν ένταση μεγαλύτερη από E_0)

Πρακτική κατασκευή επίπεδων ηλεκτροδίων με στογγυλευμένη περιφέρεια



Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος

Ηλεκτρόδιο Rogowski

Πρακτικά:

Μέγιστη ακτίνα ηλεκτροδίου (r_m)

$$r_m = r_o + 0,8d \approx 2,8d$$

$$r_e = r_o - \frac{d}{\pi} \approx 1,841d$$

Το τμήμα πλακών ακτίνας r_e μπορεί να κατασκευασθεί ως επίπεδο

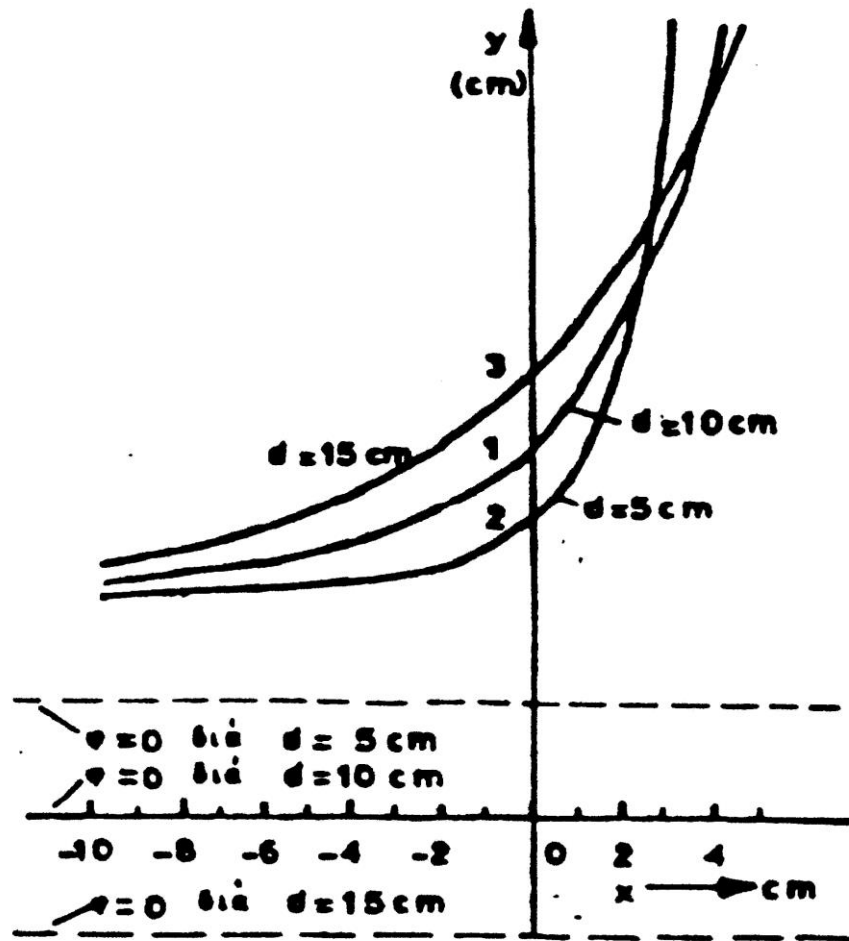
Σπινθηριστές πλακών

με στρογγυλεμένη περιφέρεια κατά Rogowski

- Εμφανίζουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα
 - Η κατασκευή τους είναι επίπονη
 - Η κατατομή των ηλεκτροδίων ισχύει για ένα ορισμένο διάκενο του σπινθηριστή
- Μπορούν να χρησιμοποιούνται όμως για μικρότερα διάκενα από αυτά που έχουν κατασκευασθεί
- Σε πολλές περιπτώσεις αρκεί όπως η περιφέρεια των ηλεκτροδίων στρογγυλευθεί κατά τόξο (ή ημιπεριφέρεια) κύκλου, με διάμετρο ίση προς το (μέγιστο προβλεπόμενο) διάκενο d του σπινθηριστή, το δε διάκενό του μπορεί να είναι μεταβλητό

Κατασκευές κατά Rogowski

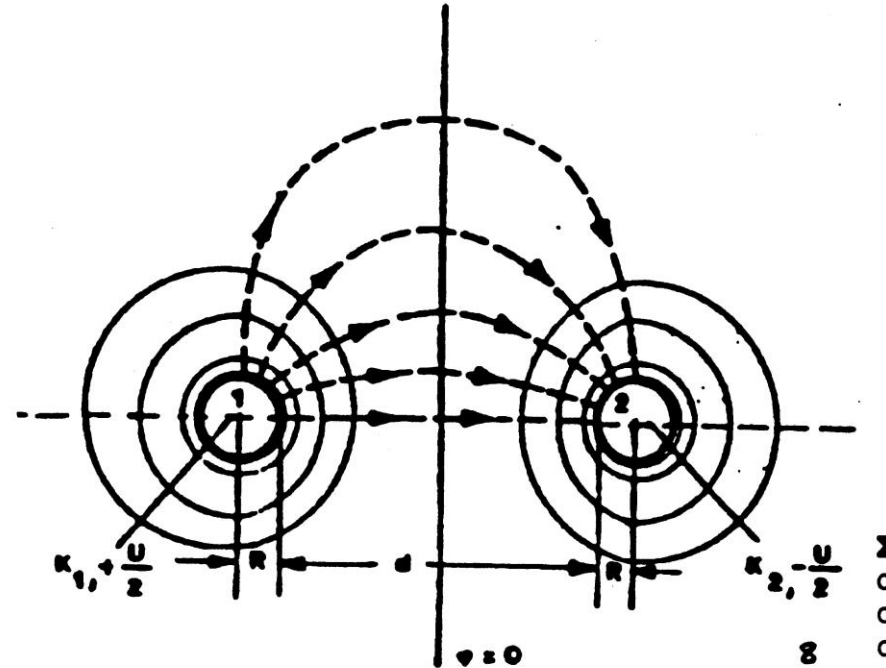
1. $U=300\text{kV}$, $d=10\text{cm}$
2. $U=150\text{kV}$, $d=5\text{cm}$
3. $U=450\text{kV}$, $d=15\text{cm}$



Τα τρία ηλεκτρόδια συμπίπτουν στο κέντρο τους, συνεπώς μετατοπίζεται η γραμμή $\phi=0$

Σπινθηριστής σφαιρών

- Οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι κλειστές επιφάνειες που περικλείουν την μία σφαίρα
- Ισοδυναμική επιφάνεια του μηδενικού δυναμικού είναι το κάθετο επίπεδο στο μέσο της απόστασης των κέντρων τους
- Οι άλλες ισοδυναμικές εμφανίζονται πεπλατισμένες (με αυξημένη ακτίνα καμπυλότητας) στην περιοχή των σημείων τομής τους με τον άξονα των κέντρων τους
- Για πολύ μικρό d ($< R$) το πεδίο καθίσταται περίπου ομογενές
- Γι' αυτό και εξαιτίας της απλής κατασκευής τους χρησιμοποιούνται ευρέως

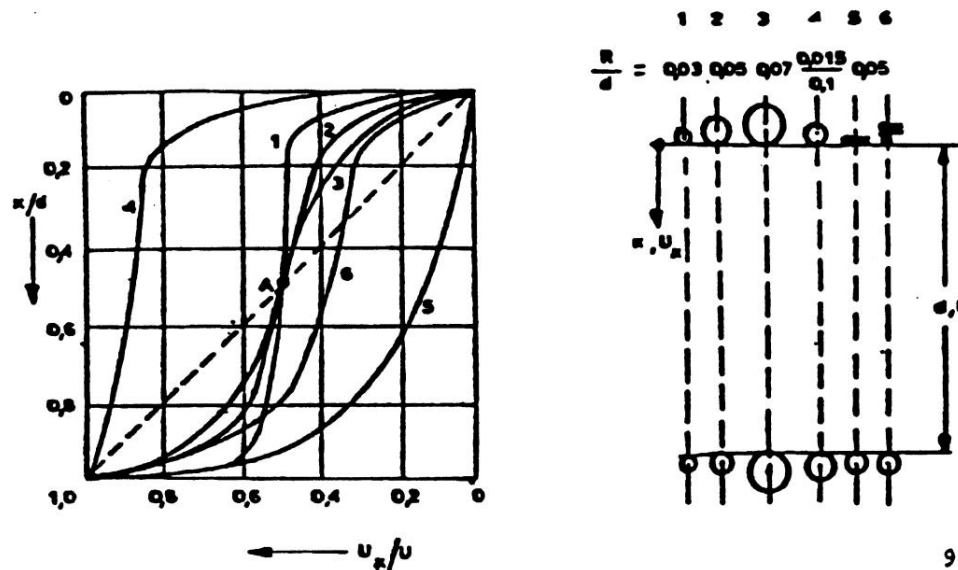


Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος

Ηλεκτροστατικό πεδίο σπινθηριστή σφαιρών της ίδιας ακτίνας, που βρίσκονται υπό δυναμικό $\pm U/2$

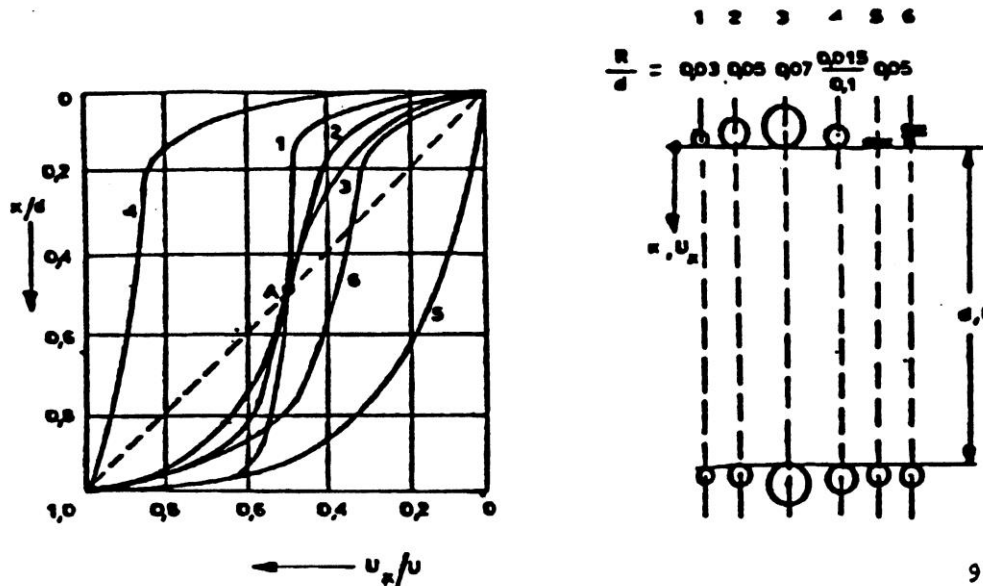
Κατανομή της τάσεως κατά μήκος του άξονα συμμετρίας διαφόρων σπινθηριστών σφαιρών

- Παρατηρούμε ότι η κατανομή της επιβαλλόμενης είναι τόσο περισσότερο ανομοιόμορφη όσο ο λόγος R/d είναι μικρότερος
- Αν οι καμπύλες έχουν ίδια ακτίνα τότε έχουμε συμμετρική κατανομή της τάσης
- Αν οι δύο σφαίρες έχουν διαφορετικές ακτίνες τότε η κατανομή της τάσεως γίνεται ανομοιομορφότερη προς την πλευρά της μικρότερης σφαίρας



Κατανομή της τάσεως κατά μήκος του άξονα συμμετρίας διαφόρων σπινθηριστών σφαιρών

- Παρατηρούμε ότι η κατανομή της επιβαλλόμενης είναι τόσο περισσότερο ανομοιόμορφη όσο ο λόγος R/d είναι μικρότερος
- Εάν ο σπινθηριστής συνιστάται από μία σφαίρα και ένα αγώγιμο επίπεδο τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχουμε σπινθηριστή δύο ίσων σφαιρών διακένου όμως $2d$
- Εάν η μία σφαίρα είναι προσγειωμένη τότε η κατανομή στη γειωμένη σφαίρα καθίσταται ομοιομορφότερη και προφανώς στην άλλη ανομοιομορφότερο



Σπινθηριστής σφαιρών

Έχω σπινθηριστή σφαιρών με δύο σφαίρες που έχουν άνισες ακτίνες. Τι συμβαίνει ανάλογα με ποια σφαίρα γειώνω;

- Η προσγείωση της μικρότερης οδηγεί σε ομοιομορφότερη κατανομή της τάσεως σε ολόκληρο το διάκενο
- Η προσγείωση της μεγαλύτερης οδηγεί σε ανομοιομορφότερη κατανομή της τάσεως σε ολόκληρο το διάκενο

Σπινθηριστής σφαιρών

$$E_{max} = f_1 \cdot \frac{U}{d}$$

Η μέγιστη πεδιακή ένταση βρίσκεται επί των σφαιρών (στην ευθεία που ενώνει τα κέντρα τους)

$$E_{max} = f_2 \cdot \frac{U}{d}$$

Κατακόρυφη διάταξη σφαιρών (Ασυμετρία δυναμικών σε σχέση με το δυναμικό της γης)

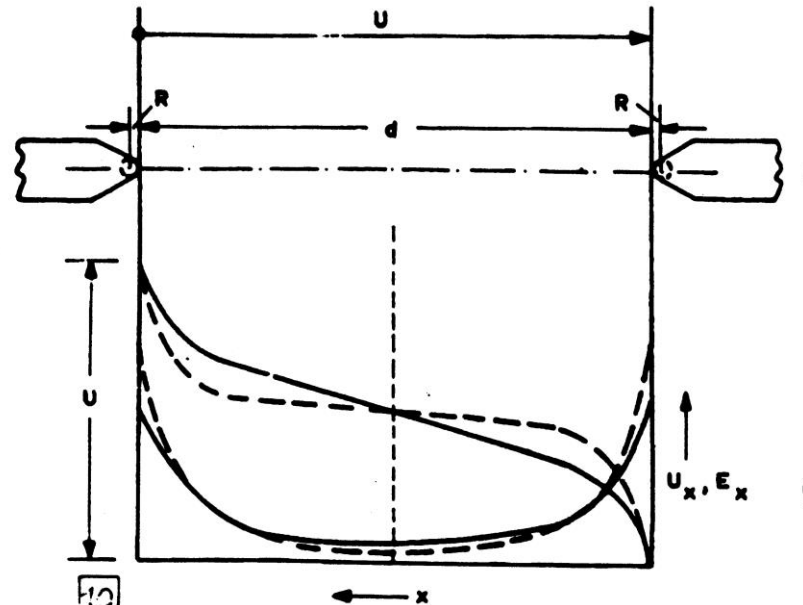
d/R	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	5	10	100	1000
f ₁	1,000	1,034	1,068	1,102	1,173	1,359	3,151	5,586	50,51	500,5
f ₂	1,000	1,034	1,068	1,106	1,199	1,517				

$$C = \frac{d\pi\epsilon}{f_1 - 1}$$

Χωρητικότητα διατάξεως δύο σφαιρών

Σπινθηριστής ακίδων

- R η ακτίνα καμπυλότητας στην κορυφή της ακίδας
- $R \ll d$ (d το διάκενο)
- Σε απόσταση από τα ηλεκτρόδια το πεδίο μπορεί να θεωρηθεί σαν να προέρχεται από σημειακά ηλεκτρικά φορτία, ευρισκόμενα στο κέντρο σφαιρικών επιφανειών ακτίνας R
- Η ύπαρξη των ράβδων (κύρια μέρη) των ακίδων συνεπάγεται παραμόρφωση του πεδίου
- Δηλαδή η μέγιστη πεδιακή ένταση είναι μικρότερη από τον αντίστοιχο σπινθηριστή σφαιρών

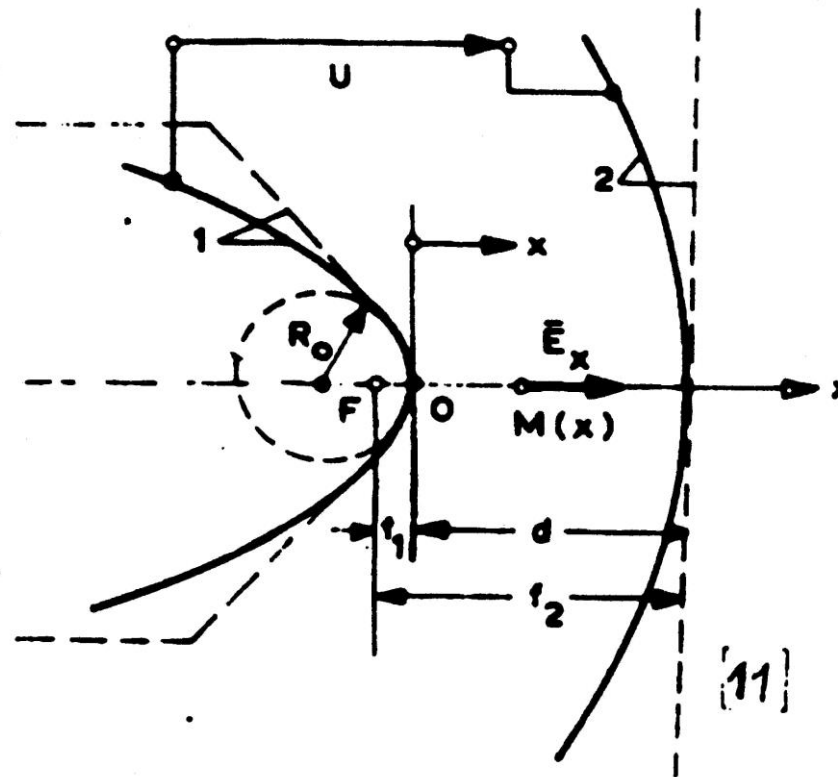


Υψηλές Τάσεις, Γ. Νικολόπουλος

- _____ σπινθηριστής ακίδων
- - - - - σπινθηριστής σφαιρών

Υπολογισμός πεδιακής έντασης κατά μήκος σπινθηριστή ακίδας- πλάκας

- Υπολογισμός πεδιακής έντασης σπινθηριστή ακίδας-ακίδας
- Λόγω συμμετρίας παίρνω μόνο την μία ακίδα
- Το ηλεκτροστατικό πεδίο του σπινθηριστή ακίδας-πλάκα είναι το μισό του σπινθηριστή ακίδας-ακίδας
- Τα ηλεκτρόδια αντικαθίστανται με παραβολοειδή εκ περιστροφής
- f_1, f_2 οι δύο εστιακές αποστάσεις



Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος

Υπολογισμός πεδιακής έντασης κατά μήκος σπινθηριστή ακίδας- πλάκας

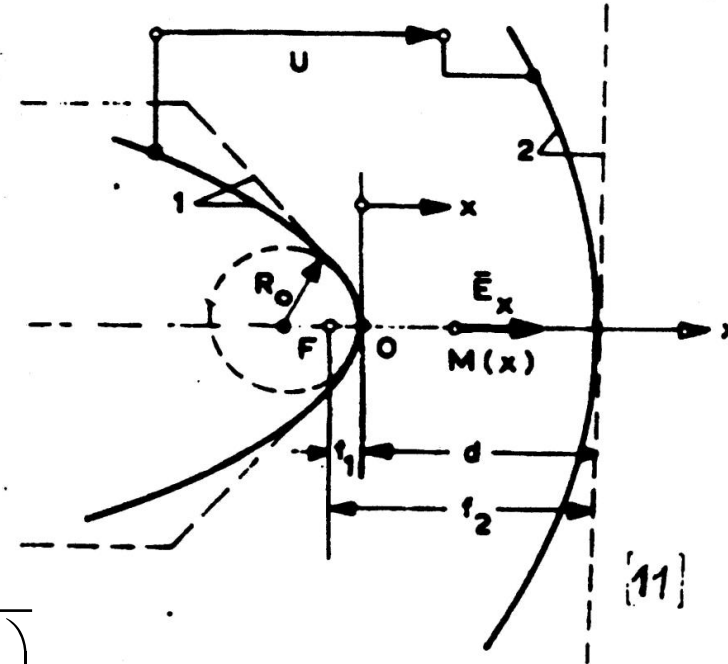
- f_1, f_2 οι δύο εστιακές αποστάσεις
- R_o η ακτίνα καμπυλότητας της πραγματικής ακίδας

$$E_x = \frac{U}{\left((f_1 + x) \ln \frac{f_2}{f_1} \right)}$$

Θέτοντας: $f_2 - f_1 = d, f_1 = R_o$ και $f_2 = f_1 + d = R_o + d$

$$E_x = \frac{U}{\left((R_o + x) \ln \frac{R_o + d}{R_o} \right)} \approx \frac{U}{\left((R_o + x) \ln \frac{d}{R_o} \right)}$$

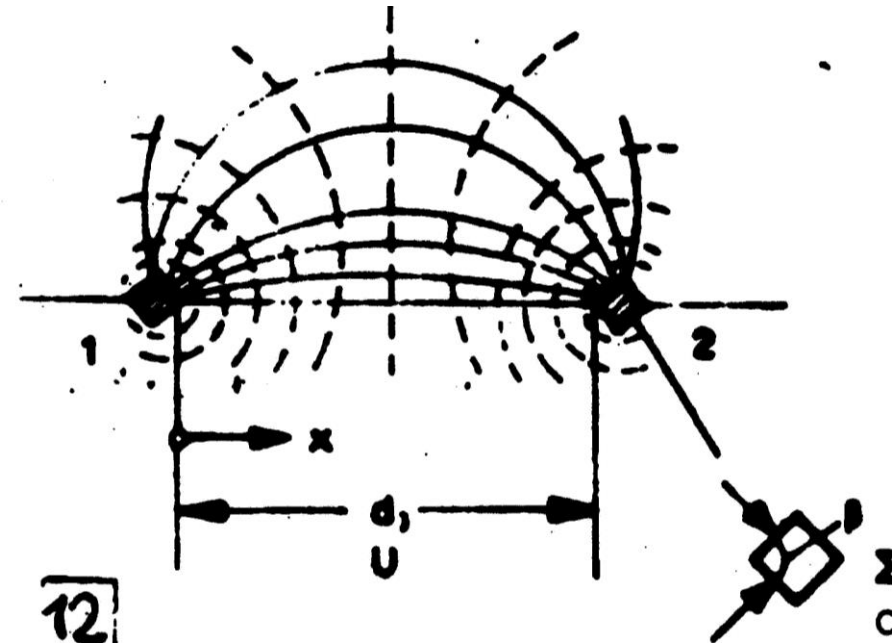
$$E_{max} = E_x(x=0) = \frac{U}{R_o \ln \frac{d}{R_o}}$$



Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος

Σπινθηριστής αιχμών

- Είναι κυλινδρικές διατάξεις
- Θεωρητικά έχουν κατά τη μία διάσταση άπειρο μήκος και σταθερή κατατομή σε επίπεδα κάθετα προς αυτή τη διάσταση
- Πρακτικά έχουν πεπερασμένο μήκος (γεγονός που δημιουργεί ανομοιομορφίες και αυξημένες τιμές στα άκρα)
- Δεν συνηθίζονται σε ερευνητική εργασία ή ως διατάξεις προστασίας
- Αφθονούν σε πρακτικές κατασκευές, π.χ. Κυψέλες διακοπών, σε διατάξεις ζυγών κ.α., επειδή χρησιμοποιούνται μεταλλικά υλικά με ορθογώνια εγκάρσια διατομή (π.χ. Δύο παρόμοιες μεταλλικές ράβδοι που βρίσκονται ή μια κοντά στην άλλη και τελούν υπό τάση)

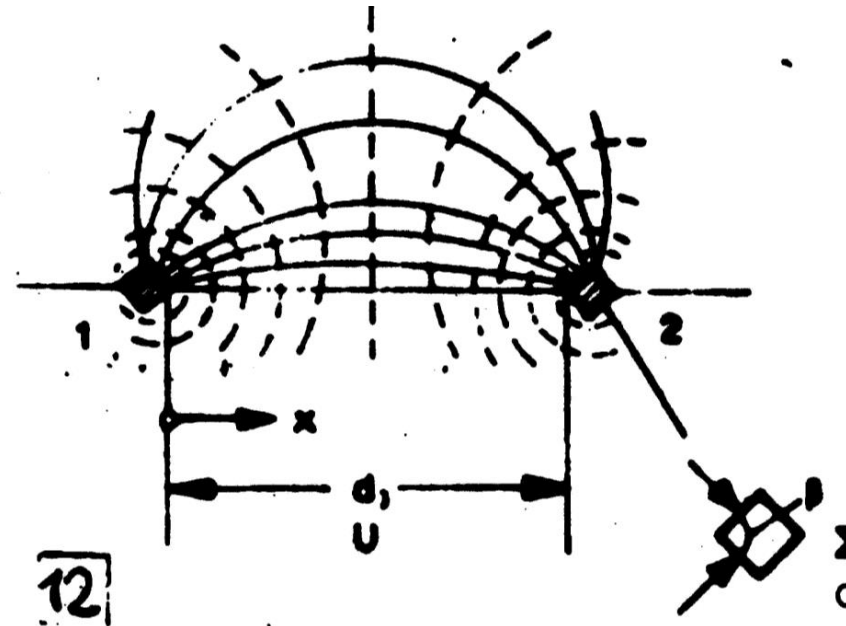


Υψηλές Τάσεις, Π. Νικολόπουλος

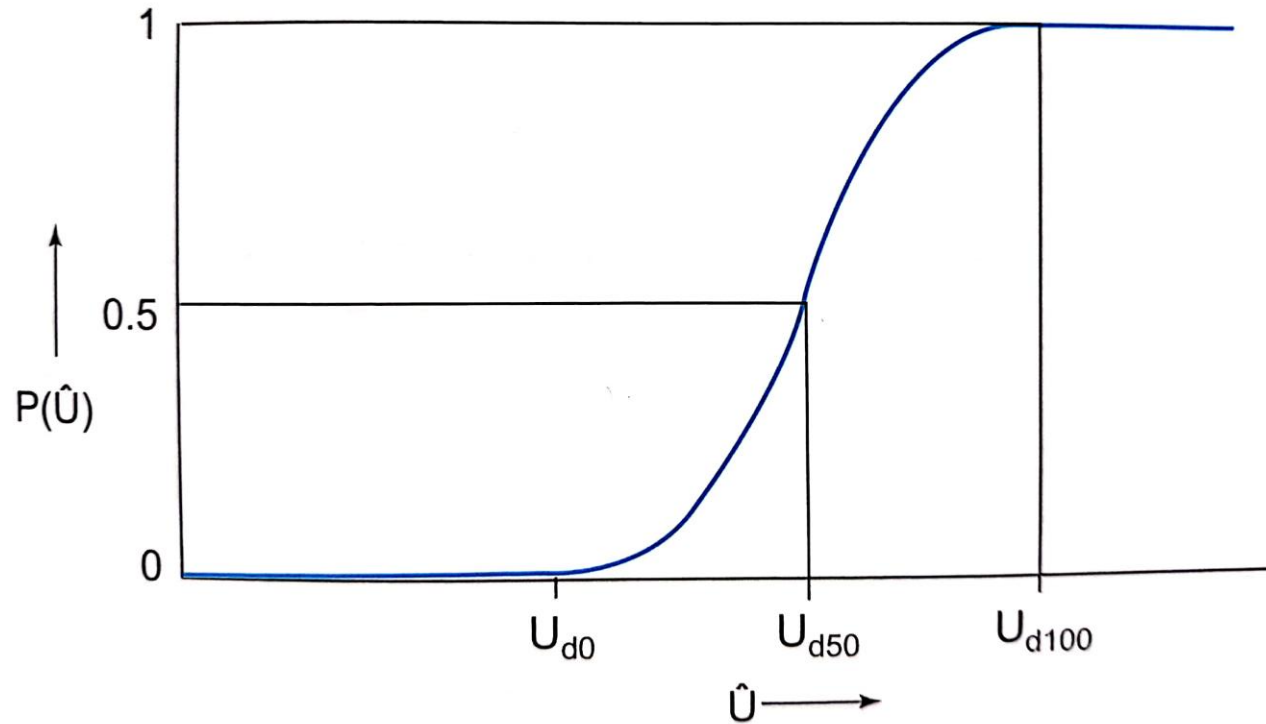
Σπινθηριστής αιχμών - Προσεγγιστικός τύπος

B (°)	0	45	90
K ₁	0,500	0,428	0,333
k ₂	0,450	0,532	0,565

$$E_x = \frac{U}{d} \cdot \left(\frac{d}{x} \right)^{k_1} \cdot k_2$$



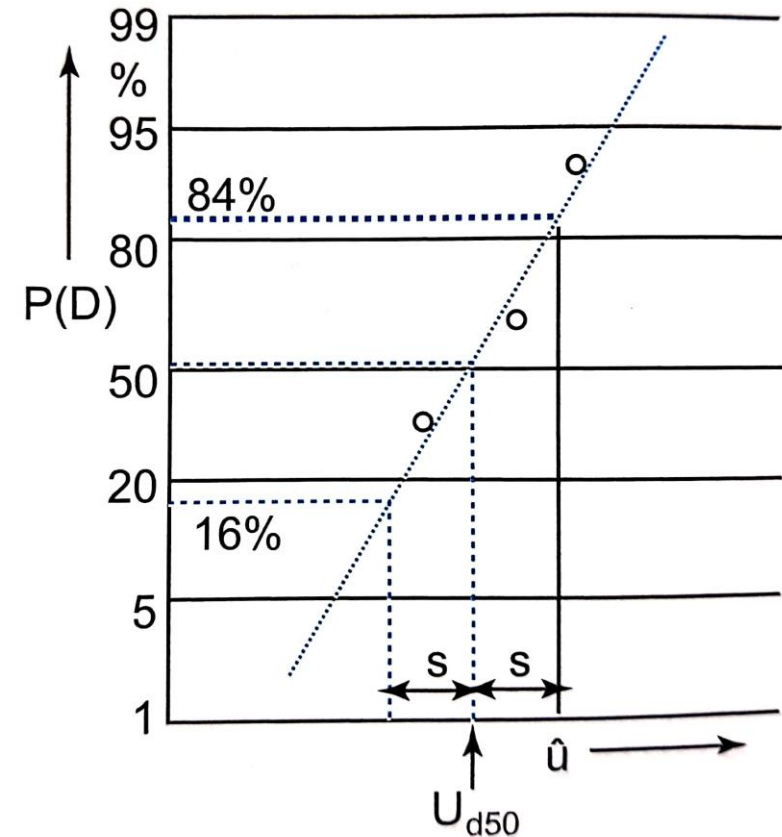
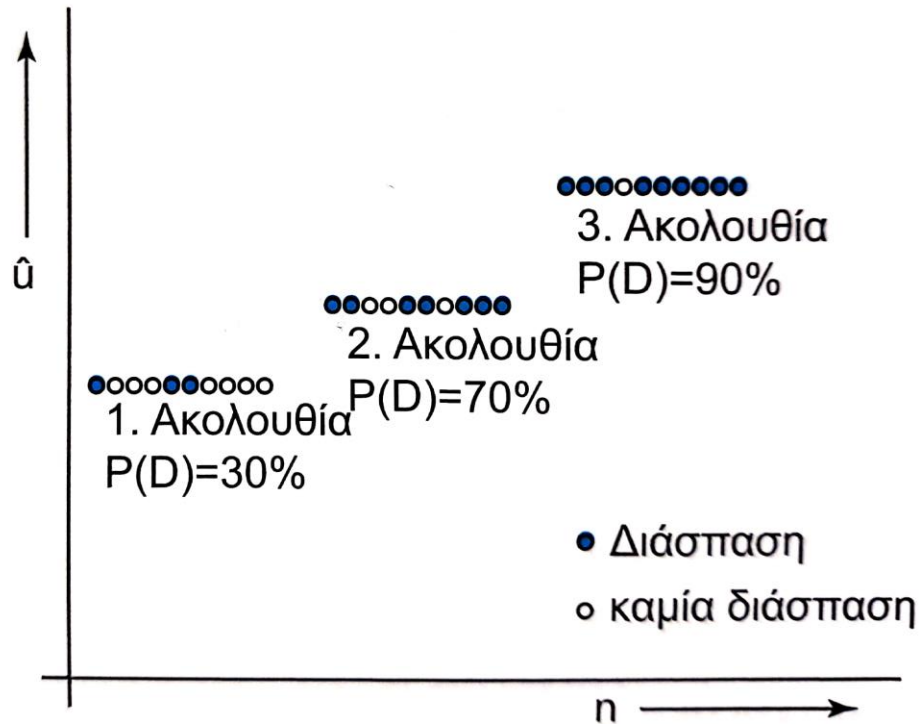
Συνάρτηση κατανομής της κρουστικής τάσης διάσπασης σφαιρικού διακένου



- U_{d50} η τάση που αντιστοιχεί σε πιθανότητα διάσπασης 50%
- U_{d0} η μέγιστη τιμή της τάσης που σίγουρα δεν προκαλεί διάσπαση
- U_{d100} η ελάχιστη τιμή της τάσης που σίγουρα προκαλεί διάσπαση

Στατιστικές μέθοδοι μέτρησης κρουστικής τάσης

Υπολογισμός της πιθανότητας διάσπασης με τη μέθοδο «δοκιμής πολλαπλών επιπέδων» (multiple level test)



Στατιστικές μέθοδοι μέτρησης κρουστικής τάσης

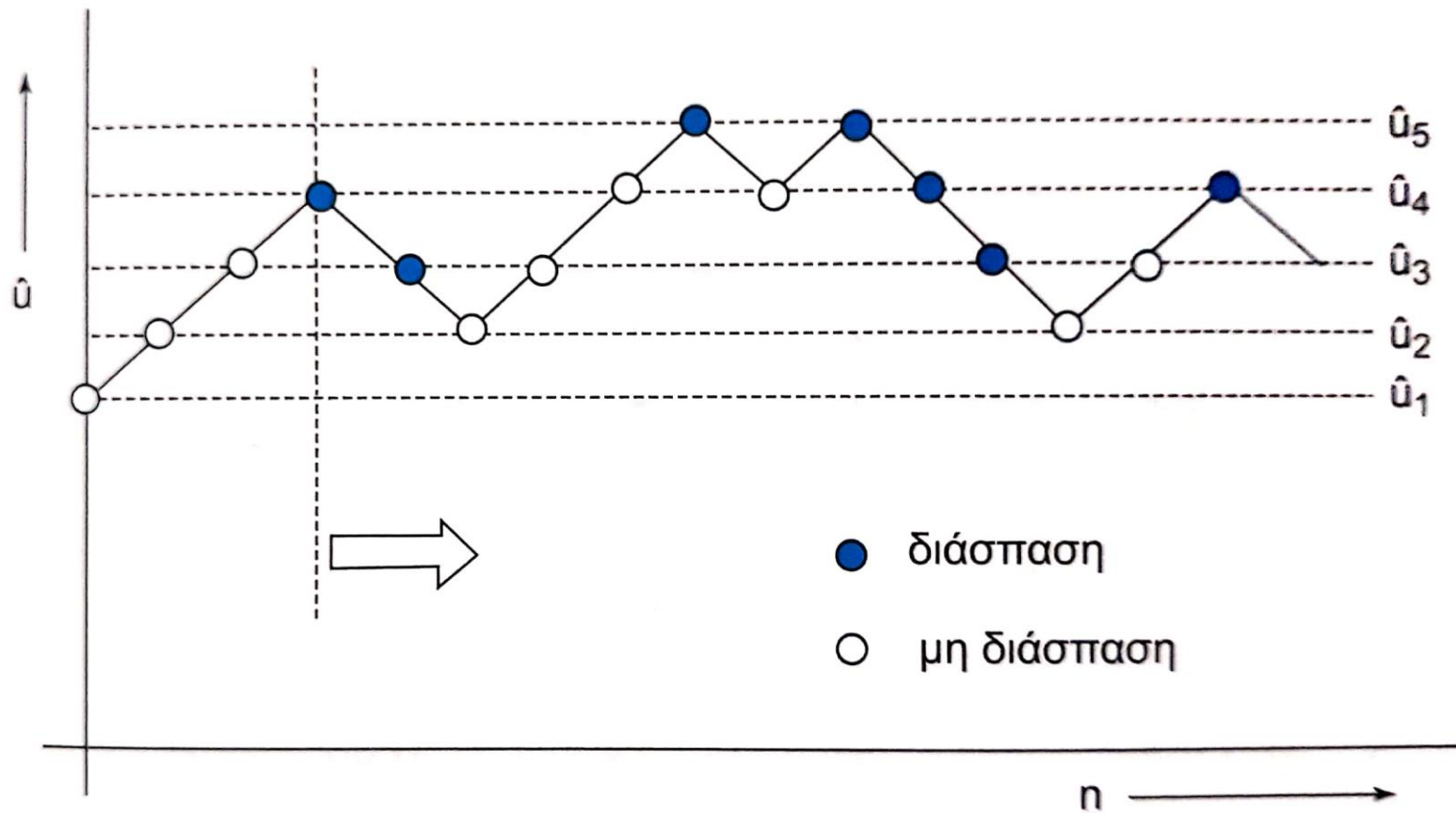
Υπολογισμός της πιθανότητας διάσπασης με τη μέθοδο «δοκιμής επιτυχούς εκφόρτισης» (successive discharge test)

$$U_{d50} = \bar{\hat{u}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \hat{u}_{di}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\hat{u}_{di} - \bar{\hat{u}}_d)^2}$$

Στατιστικές μέθοδοι μέτρησης κρουστικής τάσης

Υπολογισμός της πιθανότητας διάσπασης με τη μέθοδο «up and down»



$$U_{d50} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n n_i \hat{u}_{di}$$