



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ



Αντικεραυνική προστασία γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας



Κεραυνικά πλήγματα σε γραμμές μεταφοράς

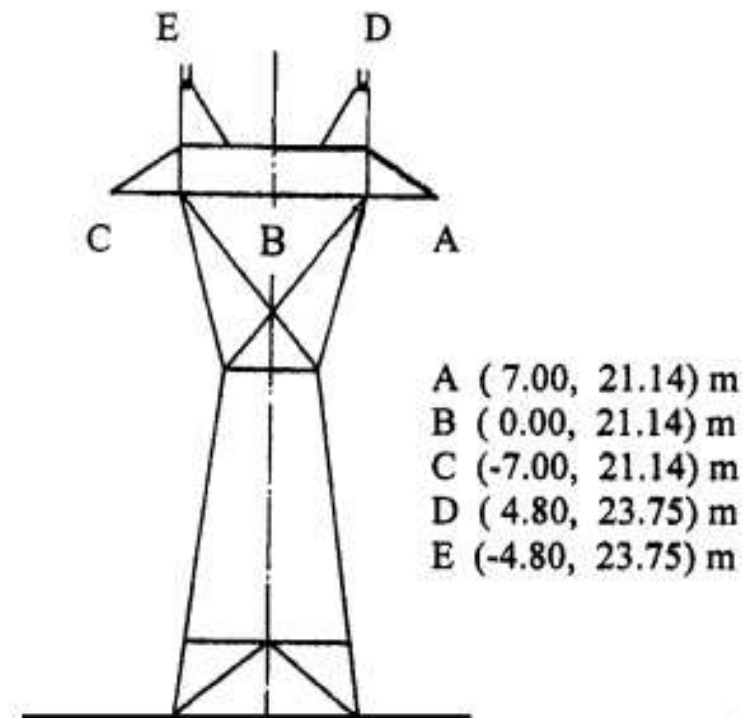
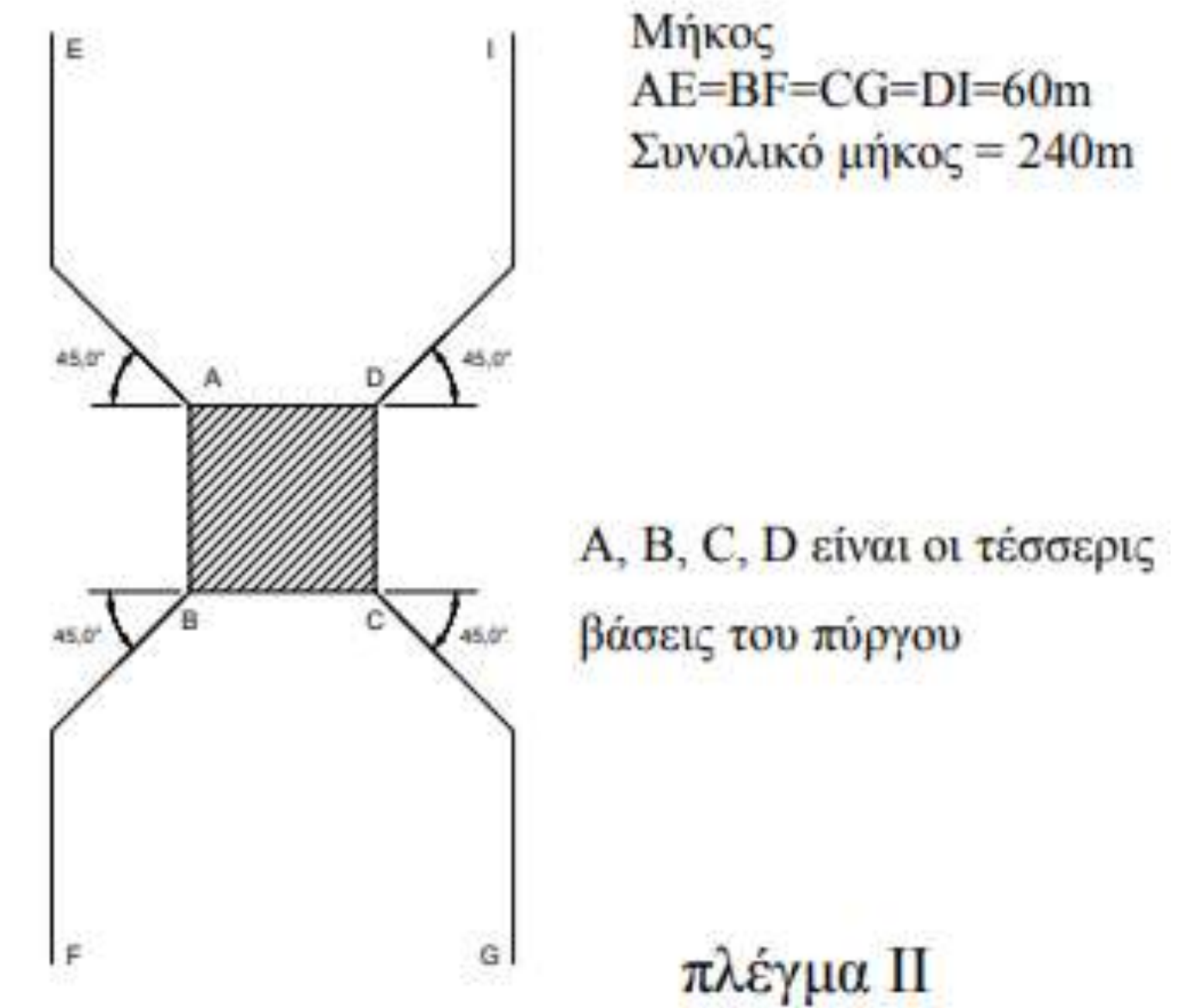
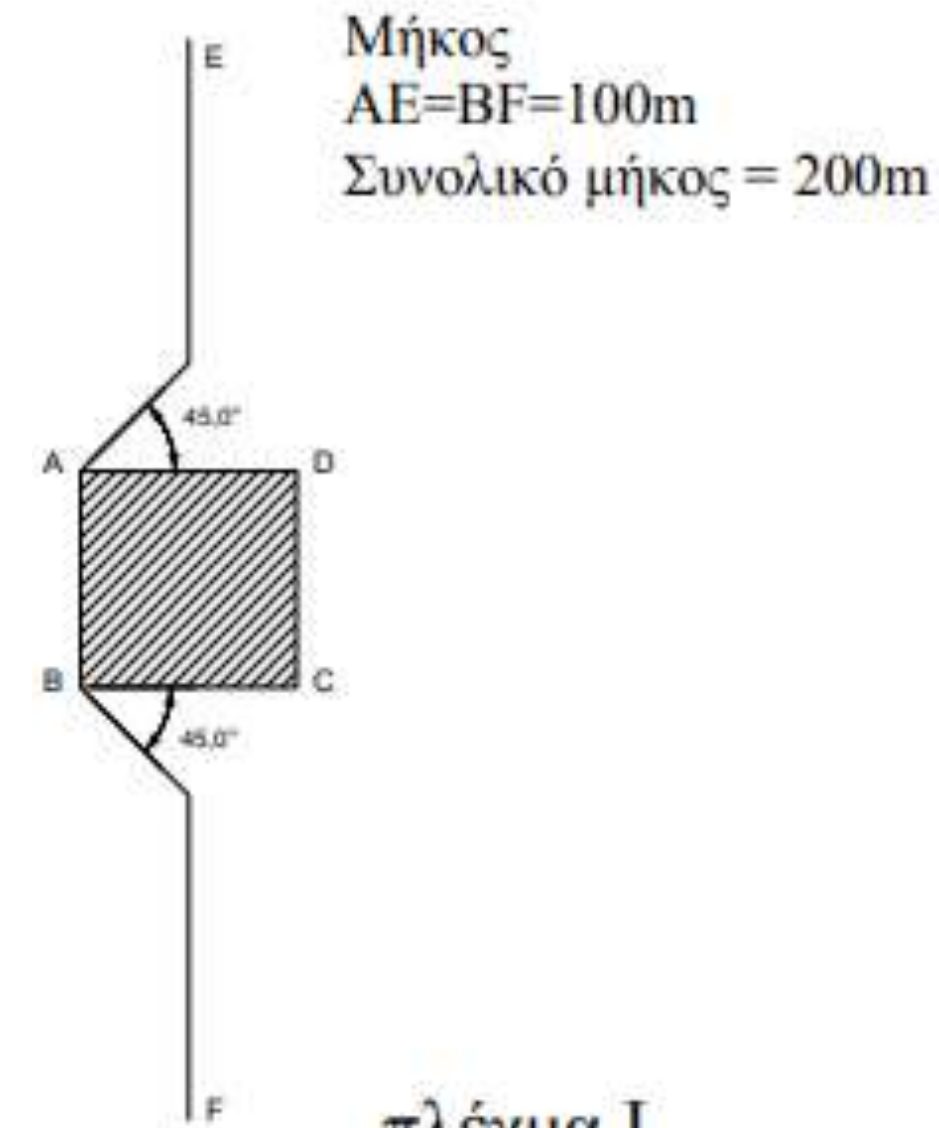
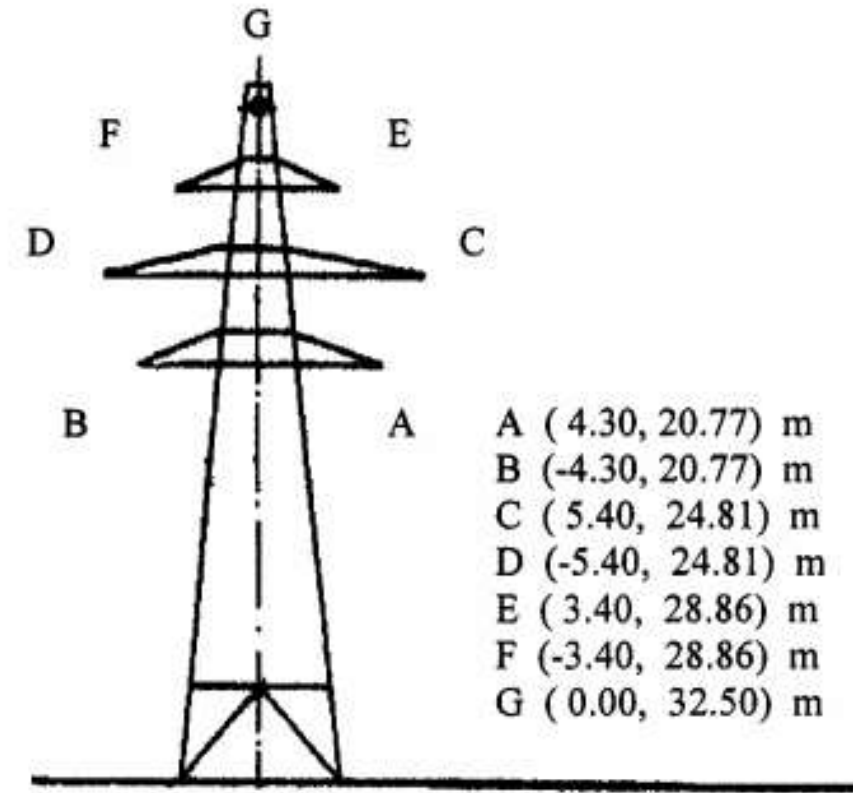
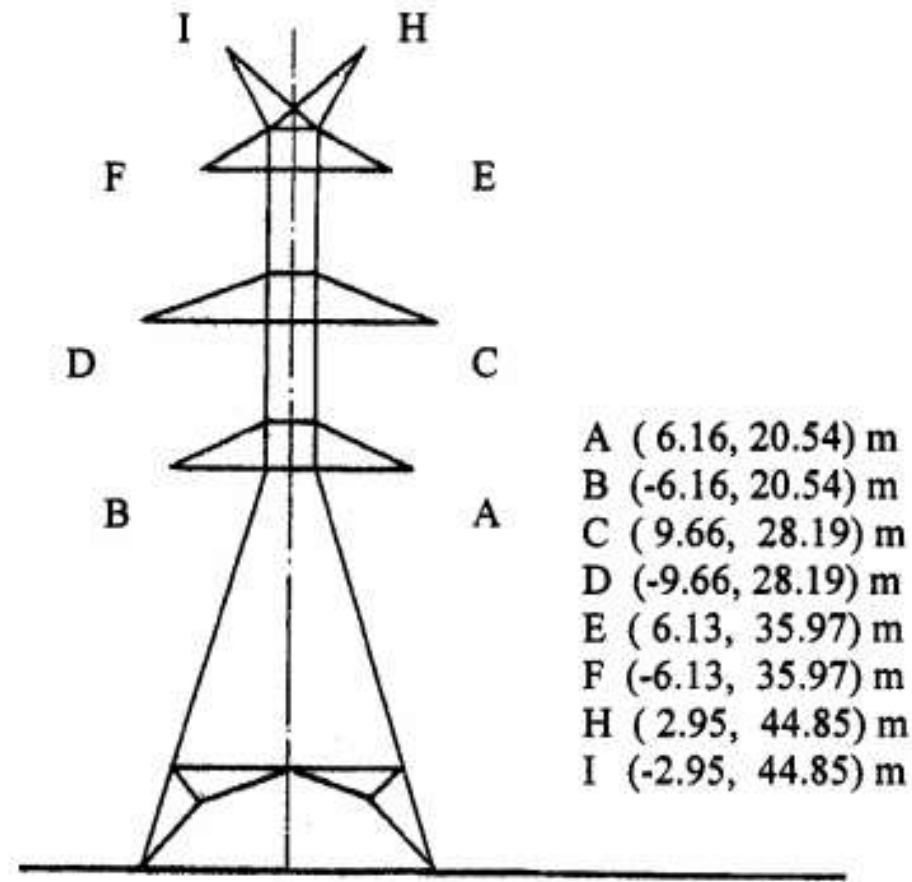
Υπάρχουν τρεις βασικοί μηχανισμοί με τους οποίους ένας κεραυνός μπορεί να δημιουργήσει υπέρταση σε μια γραμμή μεταφοράς που είναι οι εξής:

- από πλήγμα σε αγωγό φάσης
- από πλήγμα σε αγωγό προστασίας
- εξ επαγωγής, εξαιτίας κεραυνού που πλήττει το έδαφος κοντά στη γραμμή



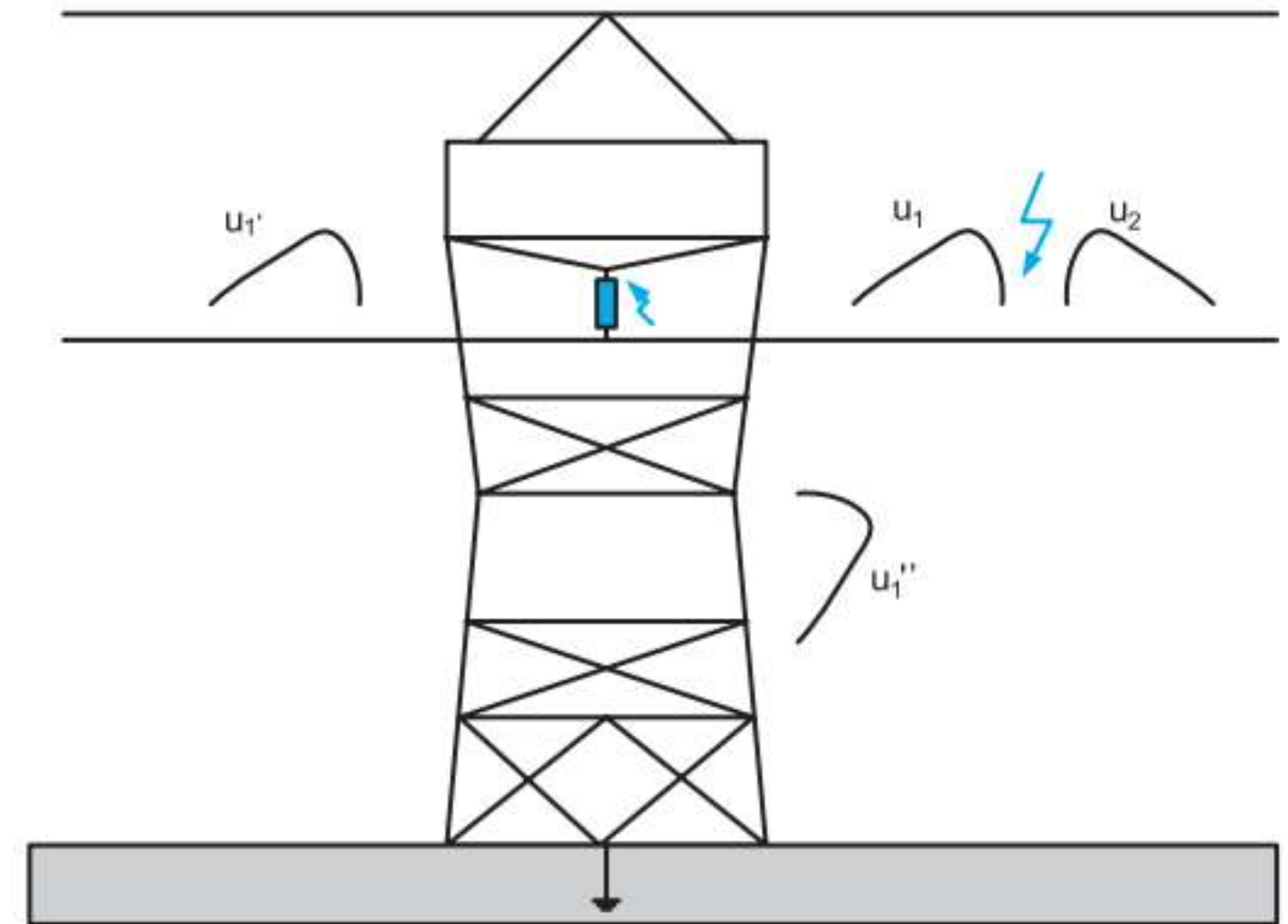


Κεραυνικά πλήγματα σε γραμμές μεταφοράς



Άμεσο κεραυνικό πλήγμα επί του αγωγού φάσης

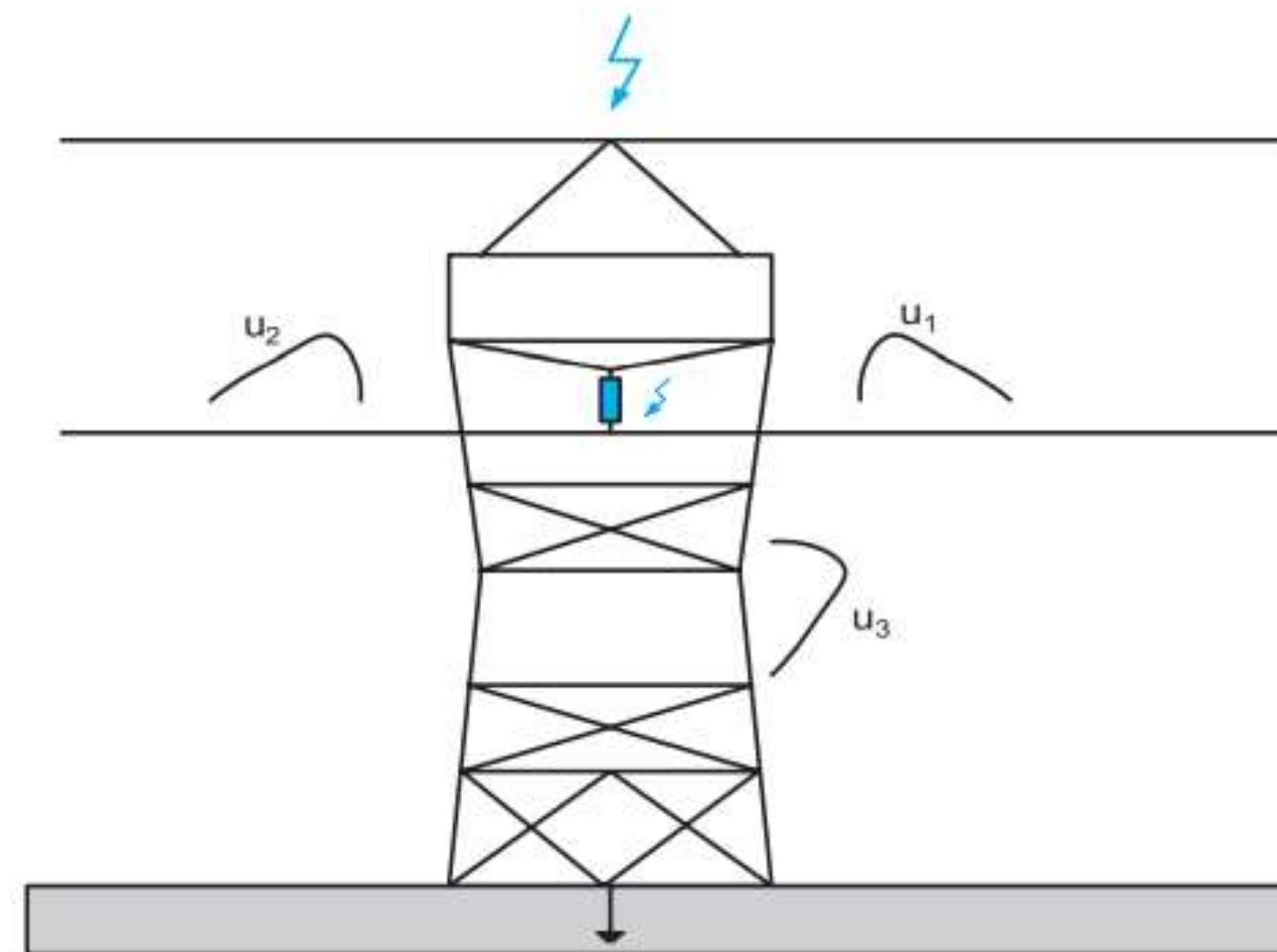
- Εάν ο κεραυνός επιπέσει στο μέσο μιας γραμμής, τότε το συνολικό ρεύμα $i(t)$ του κεραυνού διαμοιράζεται σε δύο ίσα μέρη, δημιουργώντας αντίστοιχα κύματα τάσης $Z \cdot (i(t) / 2)$
- Το κύμα που θα συνεχίσει την πορεία του μετά τον πρώτο πυλώνα θα είναι ένα πλήρες κύμα, εάν δεν έχουμε διάσπαση της μόνωσης, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα έχουμε ένα αποκομμένο κύμα.



Ανάστροφη διάσπαση

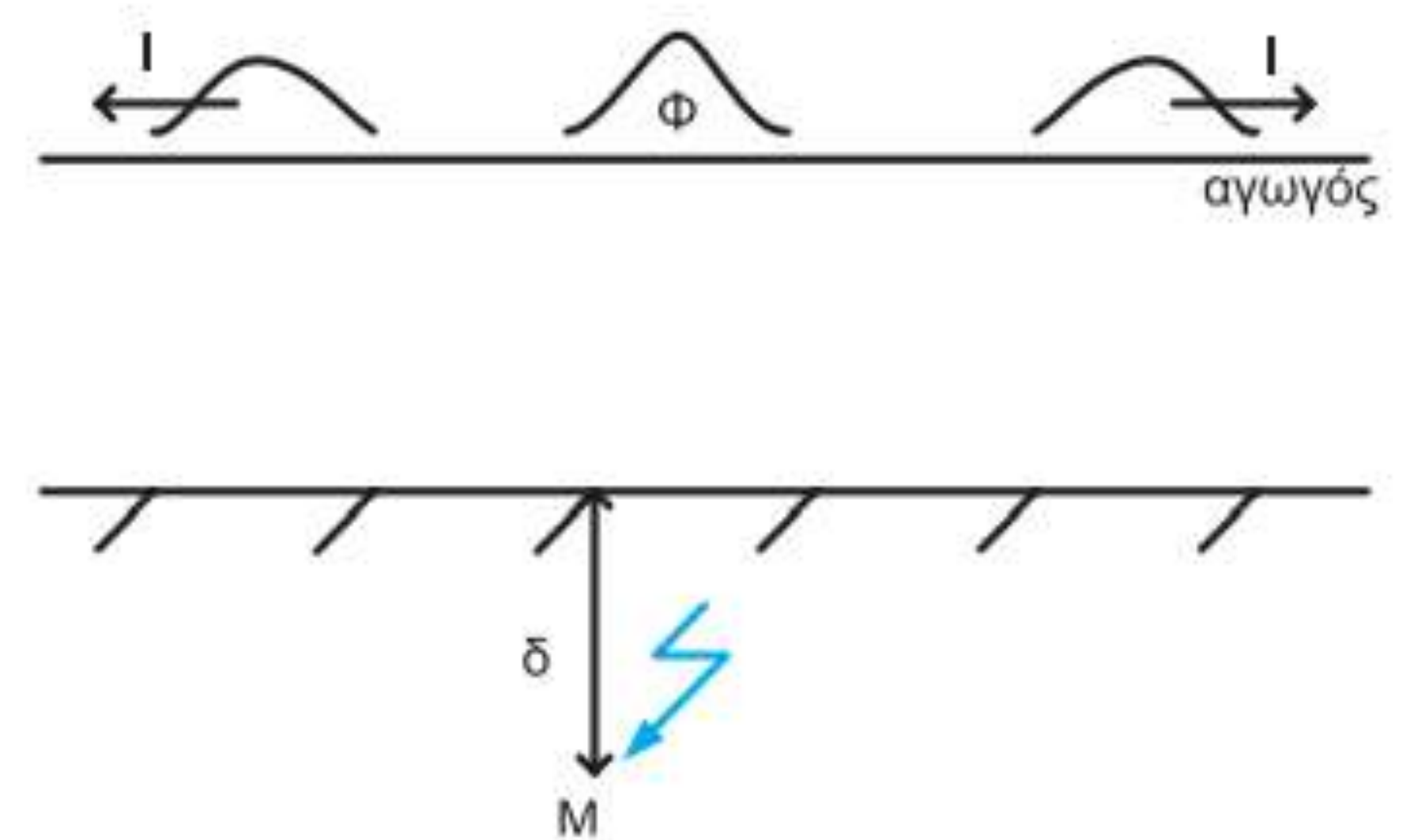
- Υπάρχουν δύο ενδεχόμενα δημιουργίας ανάστροφης διάσπασης:
(α) είτε εάν προσβληθεί απ' ευθείας ένας πυλώνας ή ένας αγωγός προστασίας από κεραυνό, οπότε ανυψώνεται το δυναμικό του πυλώνα, **(β)** είτε εάν, αφού προσβληθεί μια φάση από κεραυνό και διασπασθεί η μόνωση της, ανυψωθεί το δυναμικό του πυλώνα, οπότε, ενδεχομένως, σημειώνεται ανάστροφη διάσπαση μεταξύ πυλώνα και μιας υγιούς, μέχρι τότε φάσης.
- Και στις δύο περιπτώσεις η ροή του ρεύματος προς τη γη μέσω της μεταλλικής κατασκευής του πυλώνα προκαλεί μία ανύψωση του δυναμικού των ανωτέρων μεταλλικών μερών του πυλώνα.
- Η σχετική τάση, που εμφανίζεται κατά μήκος της αλύσου του μονωτήρα, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την εμπέδηση του πυλώνα και του συστήματος γείωσης.

$$u(t) = k \cdot \left[R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \right]$$



Επαγόμενο κεραυνικό πλήγμα

- Καθώς ο οδηγός οχετός του κεραυνού κατέρχεται προς το έδαφος, κοντά σε μια γραμμή, φορτίο Φ , με πρόσημο αντίθετο από αυτό του οχετού, συσσωρεύεται στην περιοχή της γραμμής που πρόσκειται στον οχετό.
- Εάν ο οχετός δεν πλήξει τη γραμμή, αλλά ένα σημείο M του εδάφους σε απόσταση δ από τον άξονα xx' της γραμμής, τότε με την απότομη εξουδετέρωση του φορτίου που θα συμβεί, θα πάψει να υπάρχει ο λόγος συσσώρευσης του φορτίου Φ και αυτό θα διαχυθεί με τη μορφή δύο αντίθετων κυμάτων ρεύματος I προς τις απομακρυσμένες περιοχές της γραμμής από όπου είχε προηγούμενα προέλθει.
- Κάθε ένα από τα ρεύματα πολλαπλασιαζόμενο με την κυματική αντίσταση της γραμμής, δίνει μία τάση $V=Z \cdot I$.
- Επειδή το επαγόμενο φορτίο Φ είναι πάντοτε σημαντικά μικρότερο από το φορτίο του κεραυνού, η επαγόμενη υπέρταση δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να προκαλέσει πρόβλημα στη γραμμή.



Ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο



Ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο



- Η ηλεκτρογεωμετρική μέθοδος για τον καθορισμό της θέσης των αγωγών προστασίας βασίζεται στην έννοια της **απόστασης διάσπασης** (striking distance) και διατυπώθηκε από τον Whitehead.
- Η μέθοδος στηρίζεται στο γεγονός πως η θέση που θα πλήξει ο κεραυνός αποφασίζεται μόνο την στιγμή που η κεφαλή του κατερχόμενου οχετού πλησιάζει την γη σε απόσταση διάσπασης.
- Ως απόστασης διάσπασης ορίζεται το μήκος διακένου που διασπάται υπό την τάση (ως προς γη) της κεφαλής του οχετού.
- Επειδή αυτή η τάση εξαρτάται από το φορτίο του οχετού, είναι προφανές ότι η απόσταση διασπάσεως είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο του κεραυνού.



Ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο

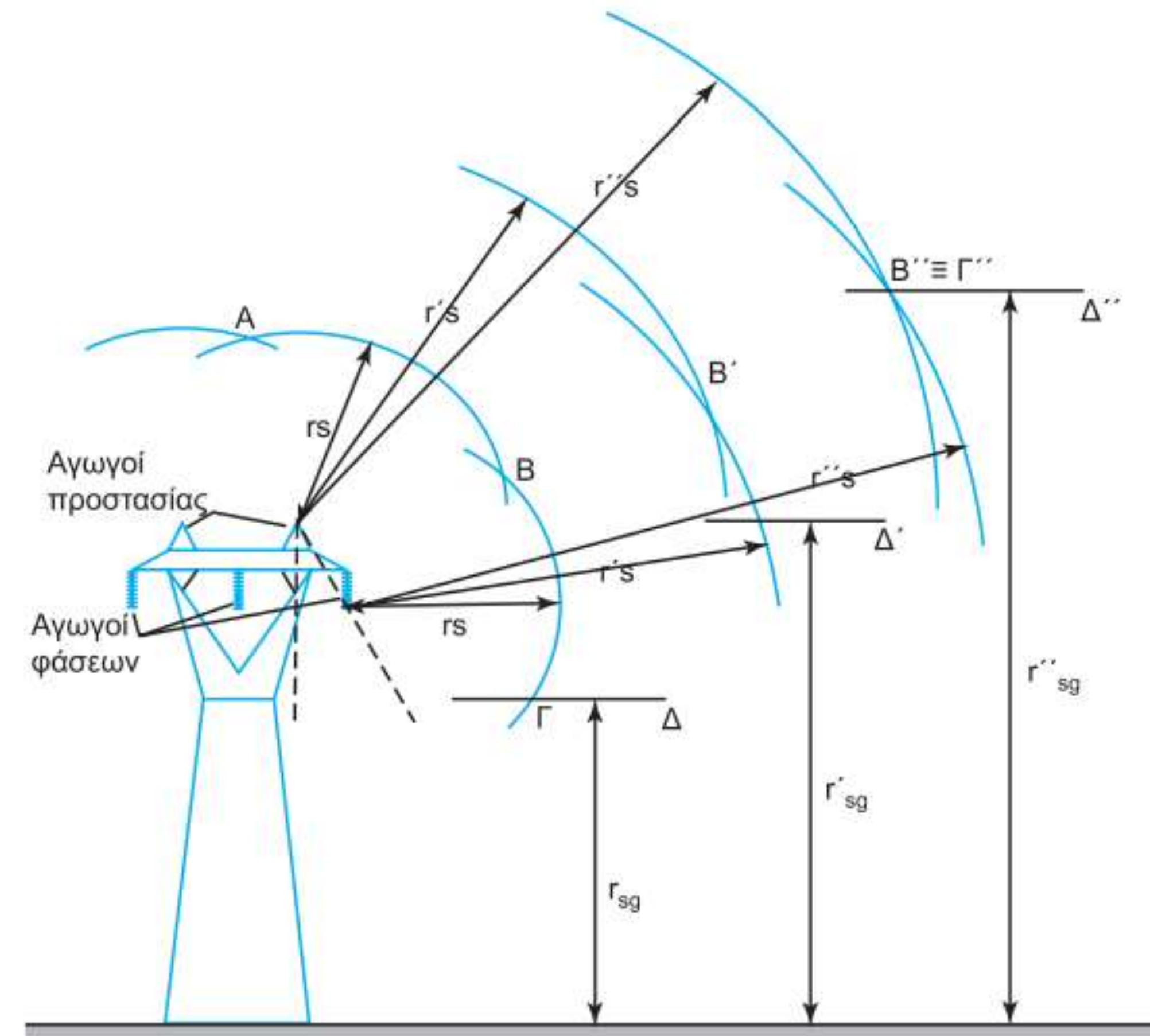


- Επειδή το φορτίο του κεραυνού συνδέεται άμεσα με το ρεύμα του I_0 , έχουν διατυπωθεί από διάφορους ερευνητές σχέσεις της μορφής: $r_s = a \cdot I_0^\beta$, όπου a και b σταθερές εξαρτώμενες από το σημείο κατάληξης του οχετού.
- Αν και υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία πολλές εκδοχές του ηλεκτρογεωμετρικού μοντέλου όπου η κάθε μία από αυτές χρησιμοποιεί διαφορετικές τιμές για τις σταθερές a και b , όλες λαμβάνουν υπόψη τους τις ακόλουθες τρεις παραδοχές:
 - ✓ οι οχετοί πλησιάζουν κάθετα τη γη
 - ✓ ο οδηγός οχετός αναπτύσσεται ανεπηρέαστος από την παρουσία γειωμένων αντικειμένων έως ότου φτάσει σε απόσταση ανάμεσα στην κεφαλή του και στο γειωμένο αντικείμενο και
 - ✓ η απόσταση r_s σχετίζεται με το ρεύμα I_0 του κεραυνού

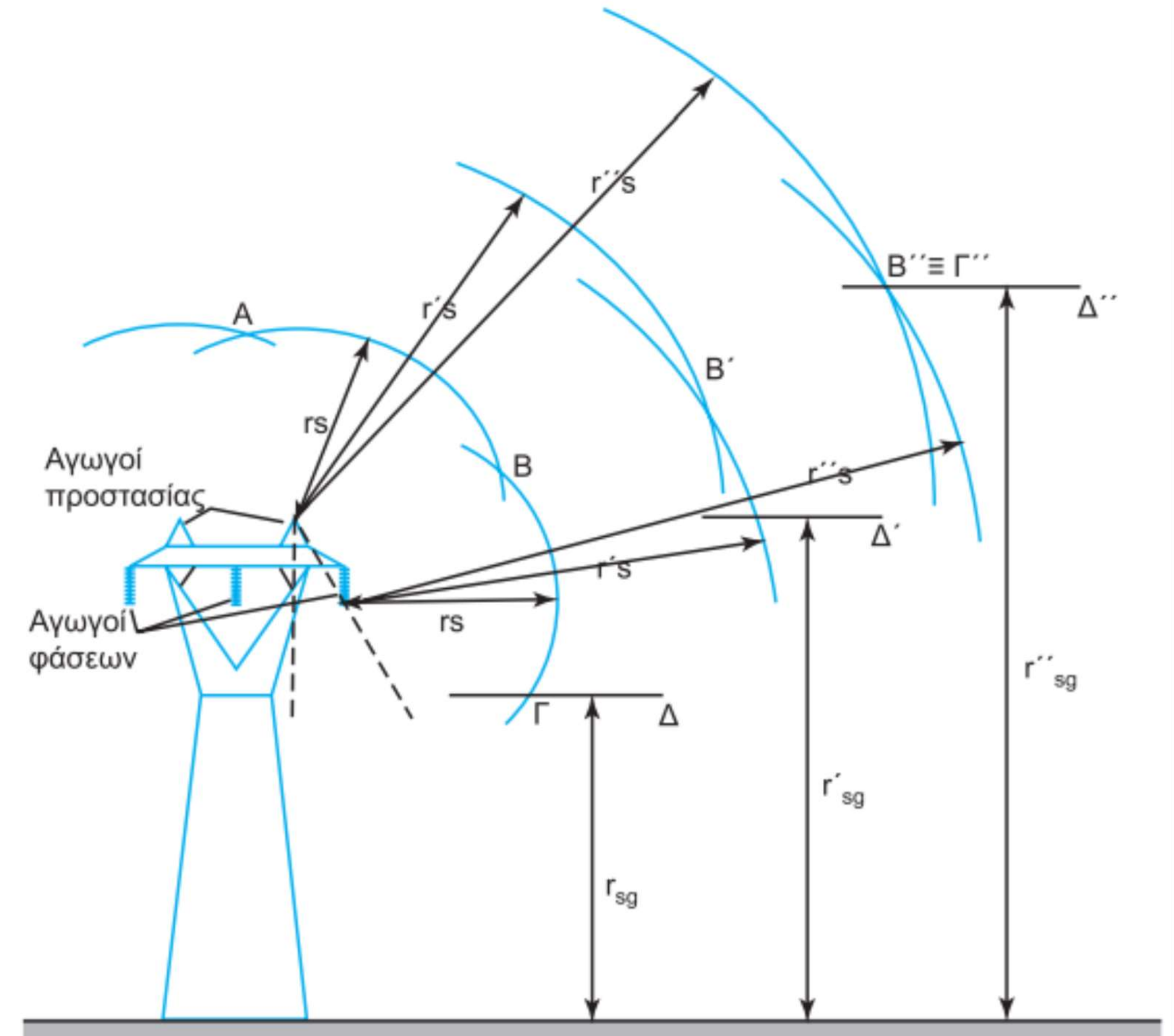
Μοντέλο	Απόσταση διάσπασης από γη	Απόσταση διάσπασης από αγωγούς
Armstrong, Whitehead (1968)	$r_{sg} = 0,9r_s$	$r_s = 6,7 I_0^{0,8}$
Brown, Whitehead (1973)	$r_{sg} = 0,9r_s$	$r_s = 7,1 I_0^{0,75}$
Gilman, Whitehead (1973)	$r_{sg} = r_s$	$r_s = 6 I_0^{0,8}$
Love (1973)	$r_{sg} = r_s$	$r_s = 10 I_0^{0,65}$
Whitehead (1974)	$r_{sg} = r_s$	$r_s = 8,5 I_0^{0,67}$
IEEE WG (1985)	$r_{sg} = r_s$	$r_s = 8 I_0^{0,65}$

- Σχηματίζοντας το περίγραμμα της απόστασης διάσπασης (r_s) γύρω από τους αγωγούς προστασίας, αγωγούς φάσεων και γης, διαγράφοντας κύκλους με κέντρο τους αγωγούς και ακτίνα ίση με την απόσταση διασπάσεως r_s , γίνεται φανερό πως μόνο ένας κεραυνός του οποίου η κεφαλή διαπερνά το τόξο ΒΓ θα πλήξει τον αγωγό φάσης, ενώ αν διαπεράσει το τόξο ΑΒ θα πλήξει τον αγωγό προστασίας και αν διαπεράσει τη γραμμή ΓΔ θα πλήξει το έδαφος.
- Η απόσταση διασπάσεως προς γη (r_{sg}), η οποία οριοθετεί τη γραμμή ΓΔ, λαμβάνεται, γενικά, διαφορετική από την απόσταση διασπάσεως προς τους αγωγούς φάσεων και προστασίας (r_s).
- Οι δυο αποστάσεις r_{sg} και r_s συνδέονται με την σχέση

$$\frac{r_s}{r_{sg}} = \frac{1}{k_{sg}}$$



Όσο το r_s αυξάνει, πράγμα που συμβαίνει όταν το φορτίο του κερανού αυξάνει, το εκτεθειμένο περίγραμμα του τόξου ΒΓ, για ορισμένη θέση του αγωγού προστασίας, μικραίνει και πέραν από ορισμένη τιμή του r_s , που συμβαίνει για κερανοί με φορτίο μεγαλύτερης ορισμένης τιμής, το ΒΓ μηδενίζεται.



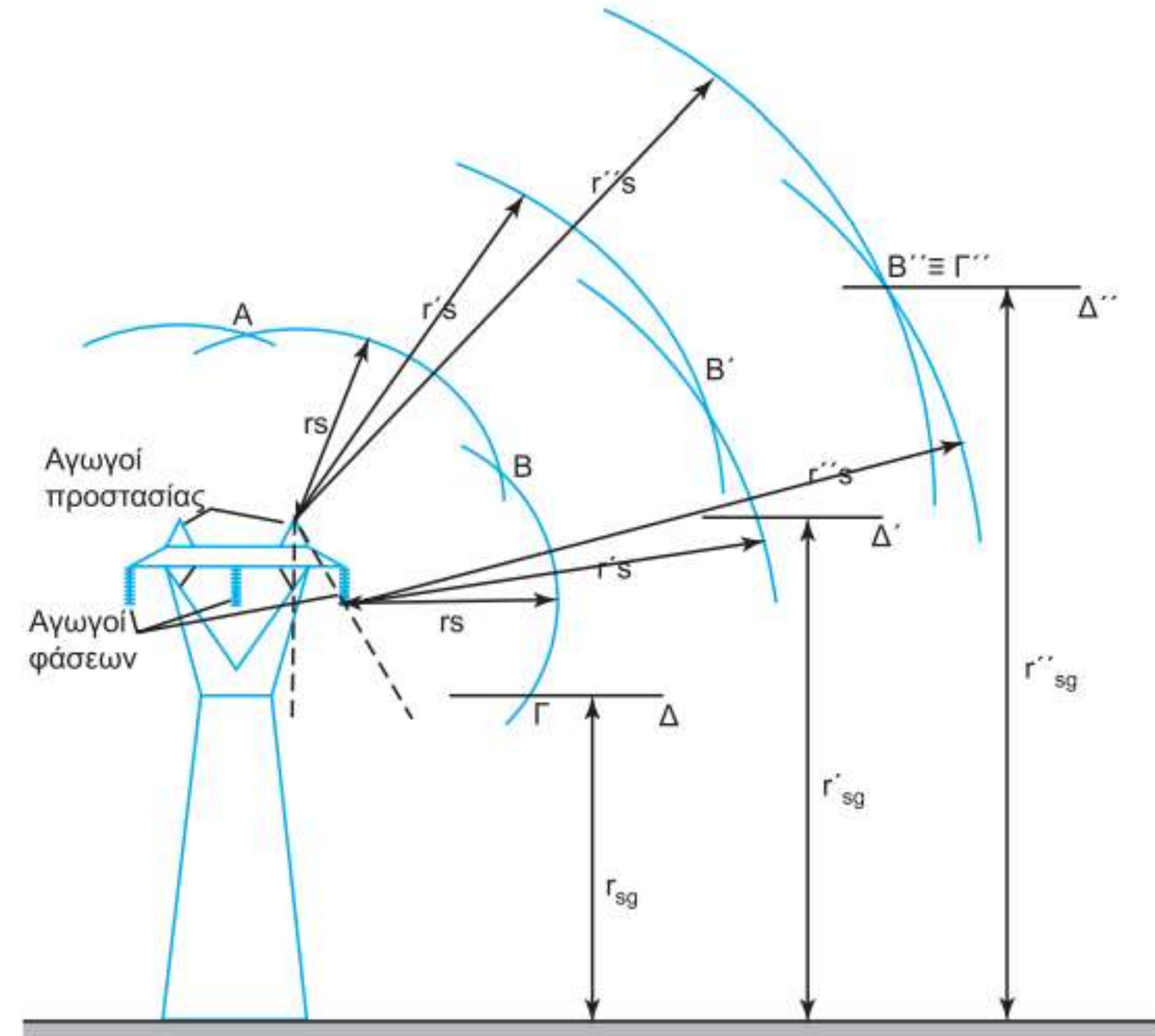
Κεραυνοί με I_0 μεγαλύτερο από την τιμή για την οποία το μήκος του τόξου ΒΓ (βλ. Σχήμα, τα σημεία Β'' και Γ'' ταυτίζονται) μηδενίζεται, δεν μπορούν, κατά την πιο πάνω θεωρία, να πλήξουν τους αγωγούς των φάσεων.

Κεραυνοί εξ άλλου, με $I_0=I_c$ τέτοιοι ώστε:

$$\frac{1}{2} \cdot I_c \cdot Z < U_\alpha$$

όπου U_α η τάση μονώσεως της γραμμής και Z η κυματική της αντίσταση, είναι ακίνδυνοι για τη γραμμή, έστω και αν πλήξουν τον αγωγό μιας φάσης.

Η απόσταση διασπάσεως r_{sc} που αντιστοιχεί στο κρίσιμο ρεύμα I_c καλείται κρίσιμη. Βραχυκυκλώματα από κεραυνούς που οφείλονται σε ατελή θωράκιση μπορούν, λοιπόν, να συμβούν σε μια γραμμή, μόνο για τιμές του κεραυνικού ρεύματος μεταξύ δυο ορίων, του κρίσιμου ρεύματος και του ρεύματος για το οποίο το μήκος του τόξου ΒΓ μηδενίζεται.





Ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο



Για να υπολογιστεί το κρίσιμο ρεύμα I_c πρέπει να γνωρίζουμε:

- τη διηλεκτρική αντοχή μόνωσης της γραμμής μεταφοράς U_a σε ατμοσφαιρικές υπερτάσεις
- την κυματική αντίσταση Z του πληγέντος αγωγού

Για να μην συμβεί διάσπαση της μόνωσης της γραμμής μεταφοράς πρέπει:

$$U < U_a \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot Z \cdot I < U_a$$
$$I_c = \frac{2 \cdot U_a}{Z}$$

(U : μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης όταν σε μία γραμμή μεταφοράς πέσει κεραυνός ρεύματος I)

Οι αγωγοί γης θα πρέπει να προστατεύουν τη γραμμή για όλα τα κεραυνικά ρεύματα με τιμές μεγαλύτερες από I_c .



Ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο



Από το προηγούμενο Σχήμα φαίνεται εποπτικά ότι η μέγιστη γωνία, που πρέπει να σχηματίζει ο αγωγός προστασίας με τη φάση για την πρόληψη άμεσων πληγμάτων μειώνεται, όσο αυξάνει το ύψος του πύργου.

Ανάμεσα στο εκτεθειμένο τόξο θ και τα υπόλοιπα στοιχεία υφίστανται οι παρακάτω σχέσεις:

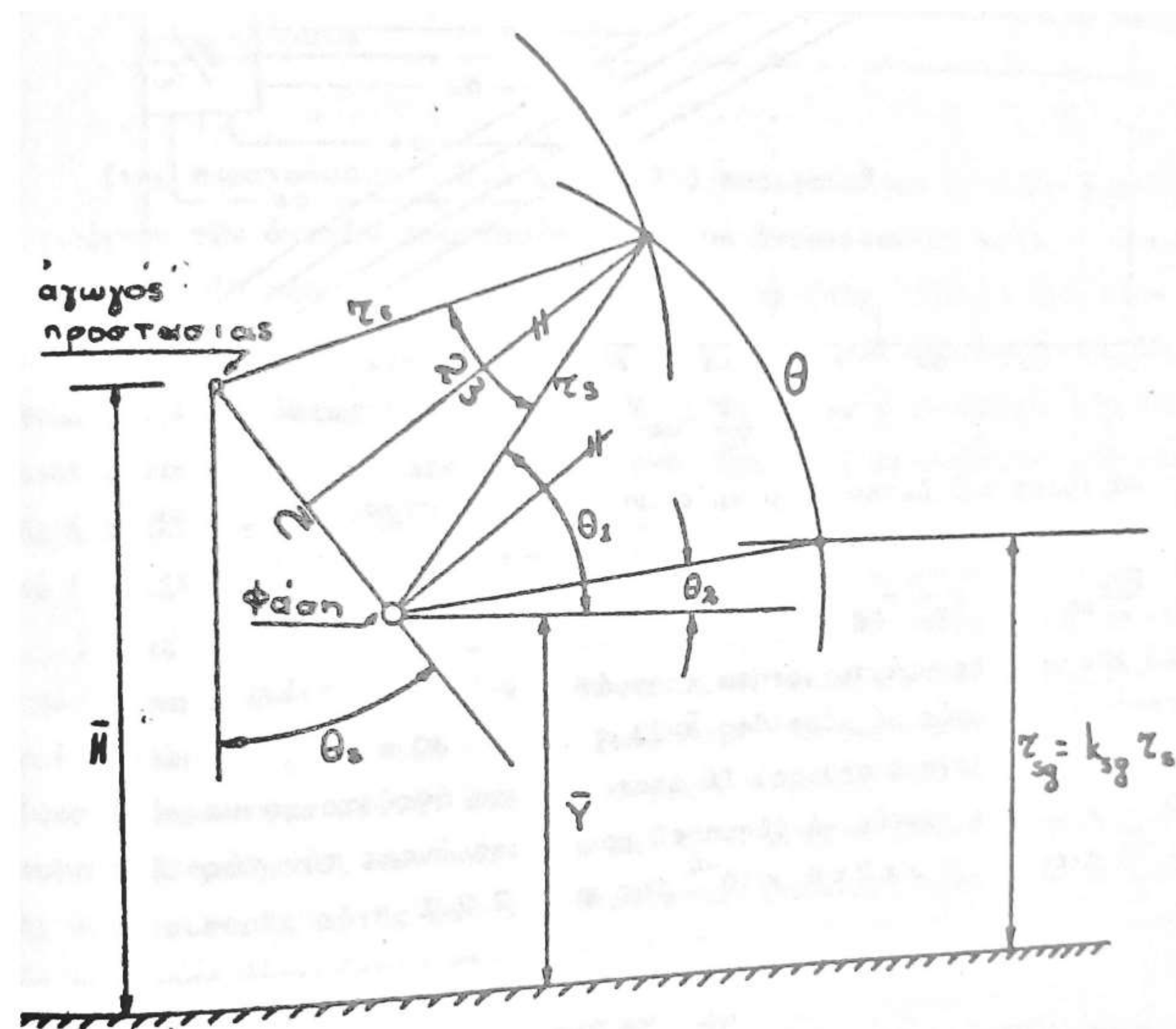
$$\theta = \theta_1 - \theta_2$$

$$\theta_1 = \theta_s + \beta = \theta_s + \arcsin \frac{C}{2r_s}$$

$$\theta_2 = \arcsin \frac{r_{sg} - y}{r_s}$$

με αντικατάσταση

$$\theta = \theta_s + \arcsin \frac{C}{2r_s} - \arcsin \frac{r_{sg} - y}{r_s}$$



H μέσο ύψος αγωγού προστασίας, **y** μέσο ύψος αγωγού φάσης, **C** μέση απόσταση ανάμεσα σε έναν αγωγό προστασίας και τη φάση που προστατεύει

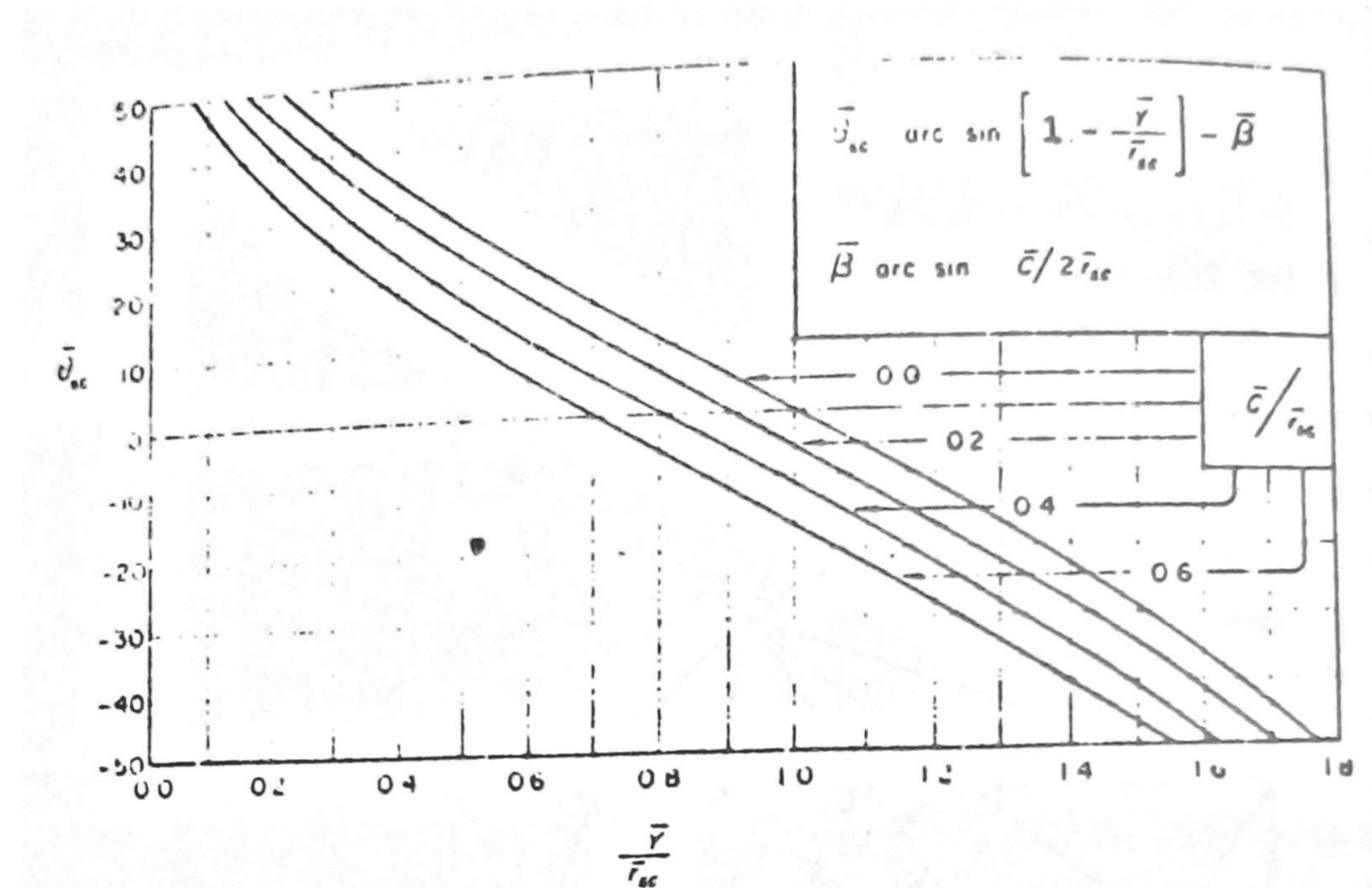
Η γραμμή είναι τέλεια προστατευμένη για $\theta=0$, που συμβαίνει για ένα r_s κρίσιμο (r_{sc}). Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$\theta_{sc} = \arcsin \frac{r_{sg} - y}{r_{sc}} - \arcsin \frac{C}{2r_{sc}}$$

Υποθέτοντας: $r_s = r_{sg}$

$$\text{έχουμε: } \theta_{sc} = \arcsin \left(1 - \frac{y}{r_{sc}} - \arcsin \frac{C}{2r_{sc}} \right)$$

Με βάση την τελευταία σχέση χαράσσονται οι καμπύλες του Σχήματος που δίνουν την κρίσιμη γωνία θ_{sc} συναρτήσει του λόγου του μέσου ύψους y του αγωγού φάσης προς την κρίσιμη απόσταση διάσπασης r_{sc} , που αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο ρεύμα κεραυνού.



$y=25m, C=15m, r_{sc}=100m \rightarrow y/r_{sc}=0.25$ και $C/r_{sc}=0.07$ για τα οποία $\theta_{sc}=46$.

Για ασθενέστερο ρεύμα με $r_{sc}=50m \rightarrow y/r_{sc}=0.4$ και $C/r_{sc}=0.3$ για τα οποία $\theta=28$

**Ανύψωση δυναμικού στο μέσο
ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων**



Ανύψωση δυναμικού στο μέσο ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων



- Το διαδιδόμενο κύμα πάνω σε μία γραμμή, που χτυπήθηκε από κεραυνό είναι $u(t)=(Zi(t))/2$.
- Σε ένα σημείο της γραμμής η κυματομορφή της τάσης θα είναι $u(t)$, έως ότου τα ανακλώμενα κύματα από τους γειτονικούς πυλώνες υπερτεθούν και αλλάξουν αυτήν την κυματομορφή.

Ανακλώμενα κύματα μπορούν να εμφανισθούν είτε μετά από τη διάσπαση της μόνωσης κατά μήκος της αλυσού ενός μονωτήρα στην περίπτωση απευθείας κεραυνικού πλήγματος σε αγωγό φάσης είτε κατά τη διοχέτευση του ρεύματος του κεραυνού προς γη μέσω του πυλώνα στην περίπτωση πτώσης κεραυνού σε αγωγό προστασίας.

- Θεωρούμε ότι ένας κεραυνό προσβάλλει μια γραμμή μεταφοράς στο μέσο ενός ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων.
- Εάν L είναι το άνοιγμα μεταξύ διαδοχικών πυλώνων, τότε ο χρόνο, που θα χρειασθεί το κύμα να φθάσει έως τον πυλώνα και να επανέλθει στο μέσο του ανοίγματος, θα είναι:

$$\tau(\mu s) = \frac{L(m)}{300}$$



Ανύψωση δυναμικού στο μέσο ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων



Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

(α) Εάν ο χρόνος αυτός είναι μεγαλύτερος από την διάρκεια μετώπου T_μ του κύματος ($\tau \geq T_\mu$) τότε το **εξ ανακλάσεως επιστρέφον κύμα στο μέσο του ανοίγματος υπερτίθεται στην ουρά του προσπίπτοντος κύματος** και συνεπώς η μέγιστη τιμή της τάσης, που αναπτύσσεται στο σημείο θα είναι:

$$U_{max} = \frac{1}{2} Z \cdot I_{max}$$

(β) Εάν είναι $\tau < T_\mu$, τότε το **εξ ανακλάσεως κύμα συμβάλλει αρνητικά με την κορυφή του προσπίπτοντος κύματος** με συνέπεια η μέγιστη τάση στο μέσον του ανοίγματος να είναι μικρότερη:

$$U_{max} = \frac{1}{2} Z \cdot I_{max} \cdot \frac{\tau}{T_\mu}$$



Ανύψωση δυναμικού στο μέσο ανοίγματος μεταξύ δύο πυλώνων



Με βάση τα παραπάνω, οι δυσμενέστερες καταστάσεις δημιουργούνται όταν:

$$\tau \geq T_{\mu} \rightarrow \frac{L/m}{300} \geq \frac{T_{\mu}}{\mu s}$$

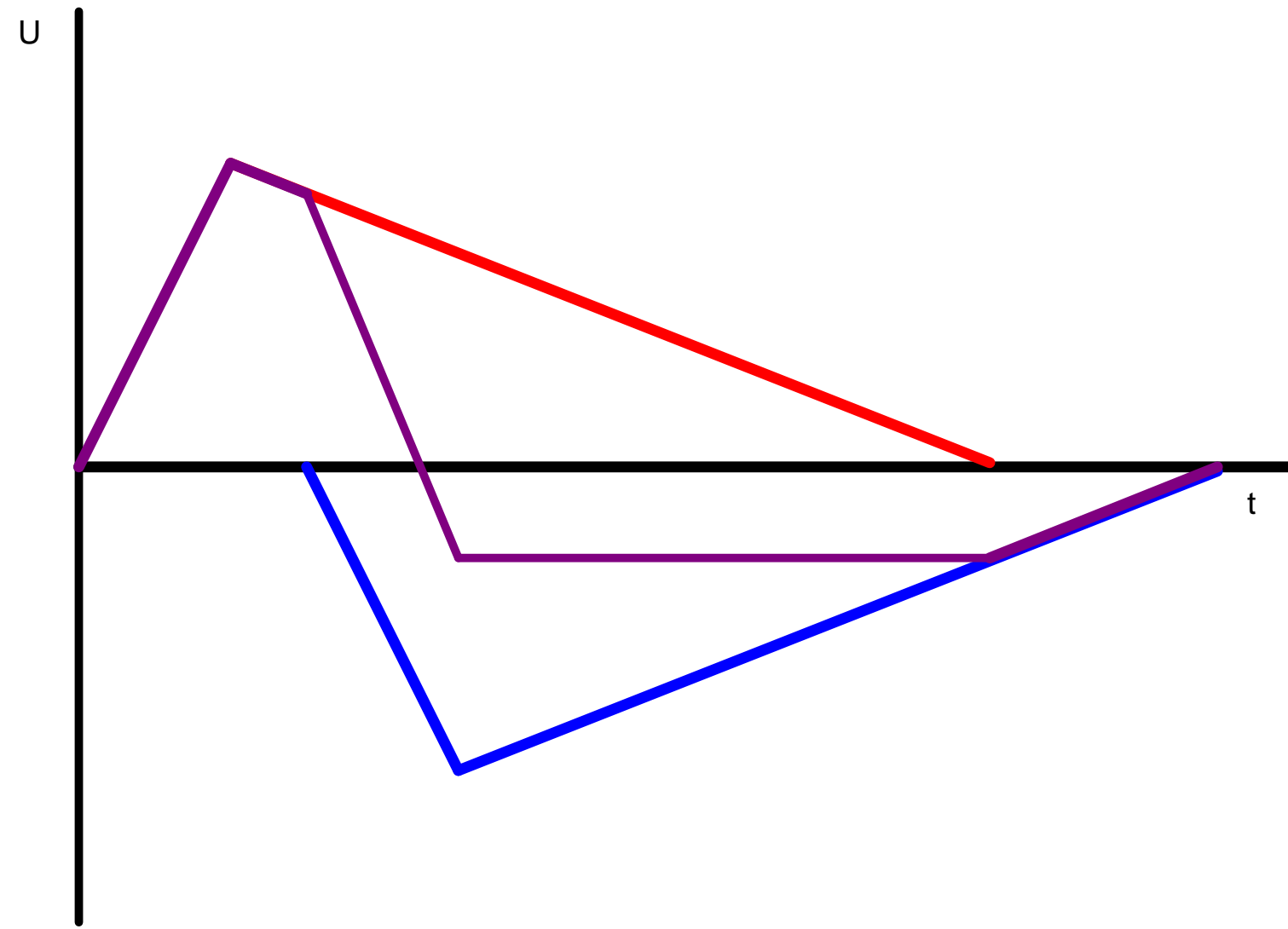
όταν δηλαδή είτε το άνοιγμα μεταξύ γειτονικών πυλώνων είναι μεγάλο ή ο χρόνος μετώπου (αδύνατον να τον επηρεάσουμε) του επιπίπτοντος κύματος είναι μικρός.

Παράδειγμα: Θεωρούμε $I_{max}=30kA$ και χρόνο μετώπου $3\mu s$ σε μία γραμμή $Z=350\Omega$.

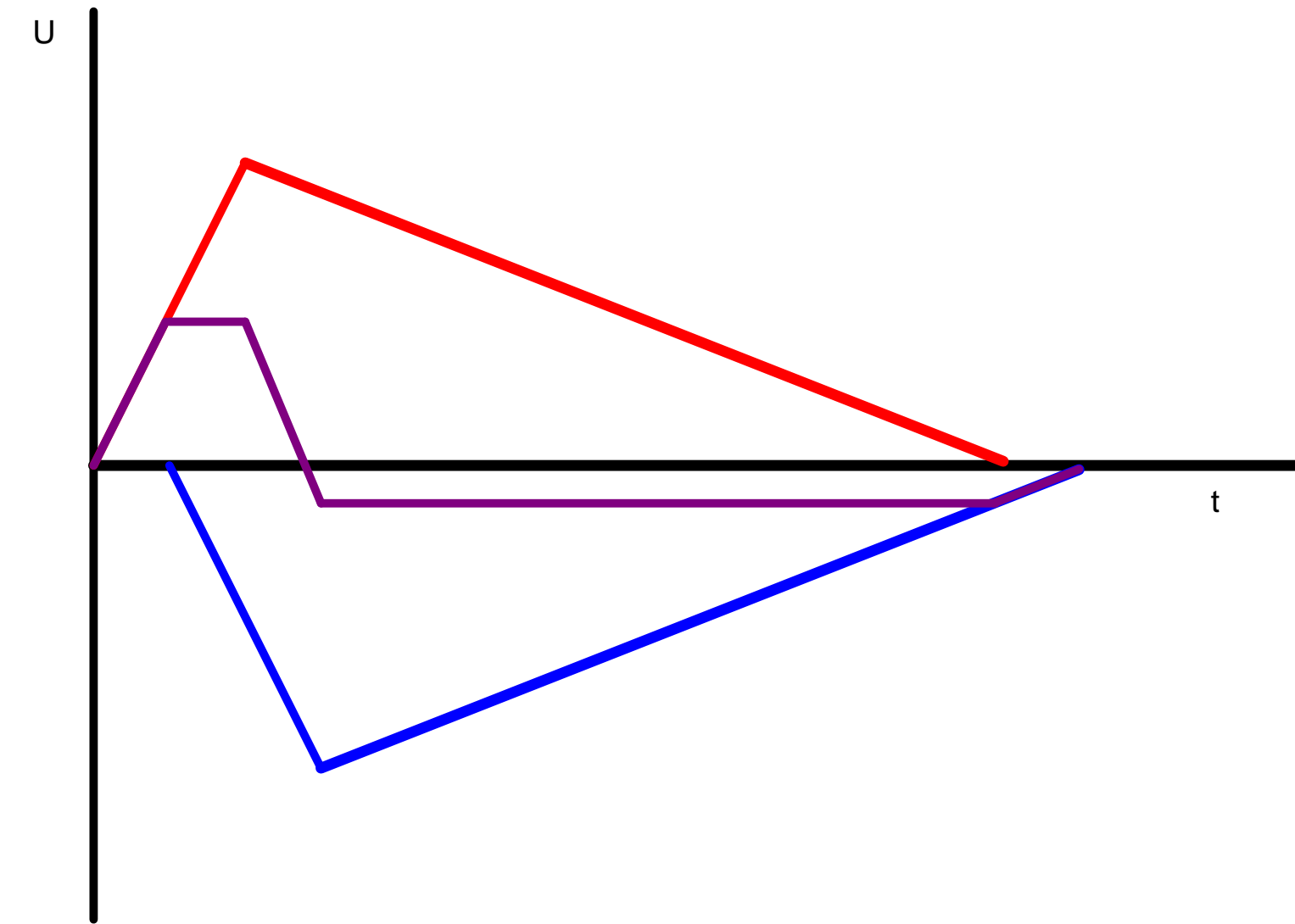
Τότε:

- Για μήκος ανοίγματος $L=450m \rightarrow \tau=1.5\mu s < T_{\mu}$, οπότε $U_{max}=2625kV$
- Για μήκος ανοίγματος $L=900m \rightarrow \tau=3\mu s = T_{\mu}$, οπότε $U_{max}=5250kV$

$$\tau > T_{\mu}$$



$$\tau < T_{\mu}$$



Επιδιώκουμε:

- μεγάλο χρόνο μετώπου (δεν μπορούμε να τον επηρεάσουμε)
- μικρό άνοιγμα μεταξύ των πυλώνων

Εκτίμηση κεραυνικών σφαλμάτων γραμμών μεταφοράς

Απευθείας κεραυνοπληξία αγωγού φάσης

Τα σφάλματα λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας N_{SF} υπολογίζονται σύμφωνα με την τεχνική που βασίζεται στο ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο.

Τα N_{SF} σχετίζονται με το ελάχιστο ρεύμα I_{min} , το οποίο απαιτείται για να προκληθεί διάσπαση της μόνωσης, και υπολογίζονται από την σχέση:

$$N_{SF} = \frac{2 \cdot N_g \cdot L}{10} \cdot \int_{I_{min}}^{I_{max}} D_C \cdot f(I) \cdot dI$$

όπου

N_g είναι η πυκνότητα των κεραυνών ανά έτος και km^2

L είναι το μήκος της γραμμής σε km ,

$f(I)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας της πιθανότητας του ρεύματος ίση με:

$$f(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}}$$

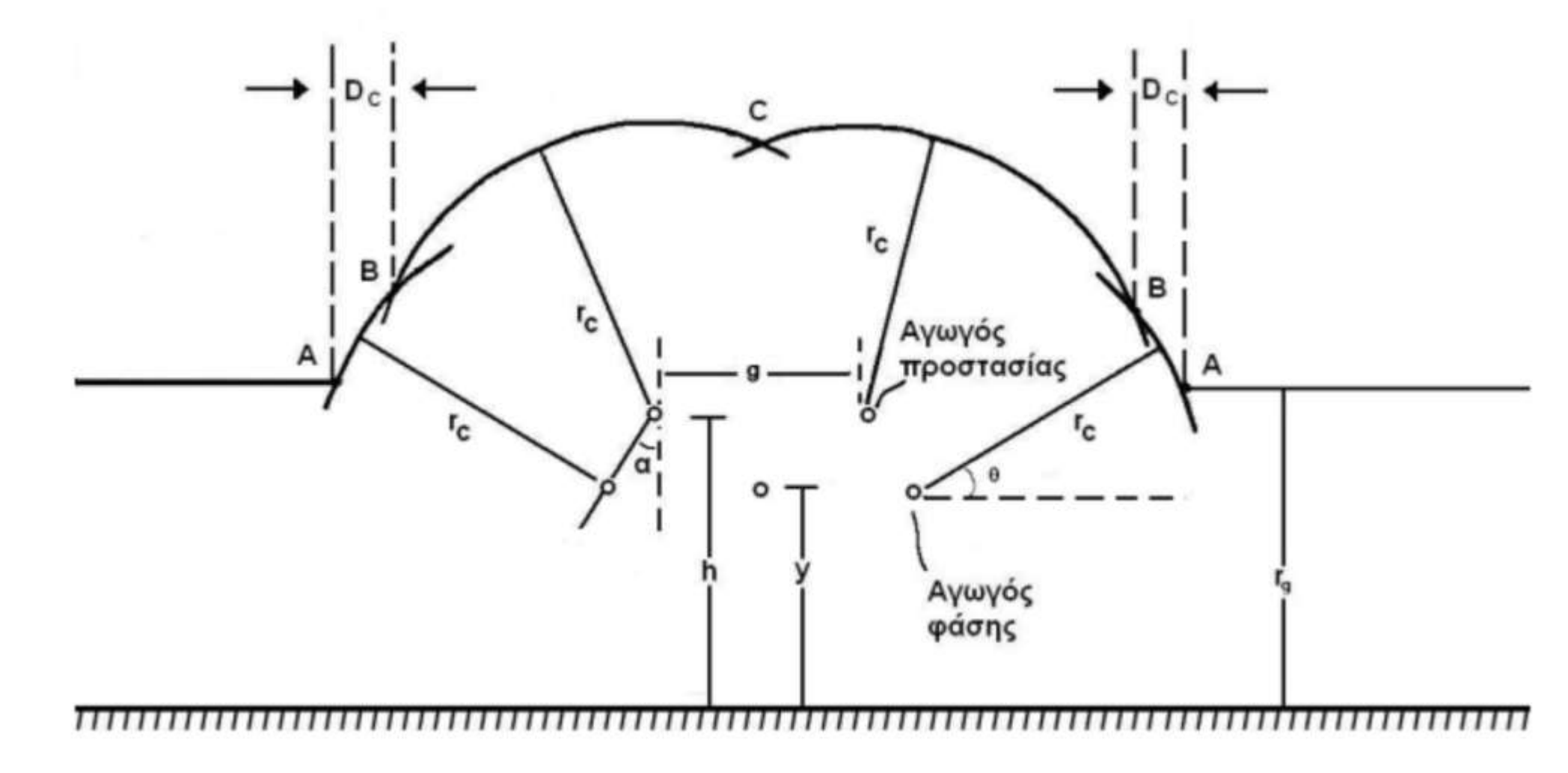
I είναι το κεραυνικό ρεύμα σε kA ,

I_{max} είναι το μέγιστο κεραυνικό ρεύμα σε kA ,

I_{min} είναι το ελάχιστο ρεύμα ίσο με: $2U_a / Z$,

U_a είναι το επίπεδο μόνωσης της γραμμής μεταφοράς σε kV ,

Z είναι η κυματική σύνθετη αντίσταση του αγωγού σε Ω



Απευθείας κεραυνοπληξία αγωγού φάσης

Η κυματική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$Z = 60 \sqrt{\ln \frac{4h_c}{d} \cdot \ln \frac{4h_c}{D}}$$

h_c είναι το ύψος του αγωγού φάσης σε m,

d είναι η ισοδύναμη διάμετρος του αγωγού φάσης χωρίς το φαινόμενο corona,

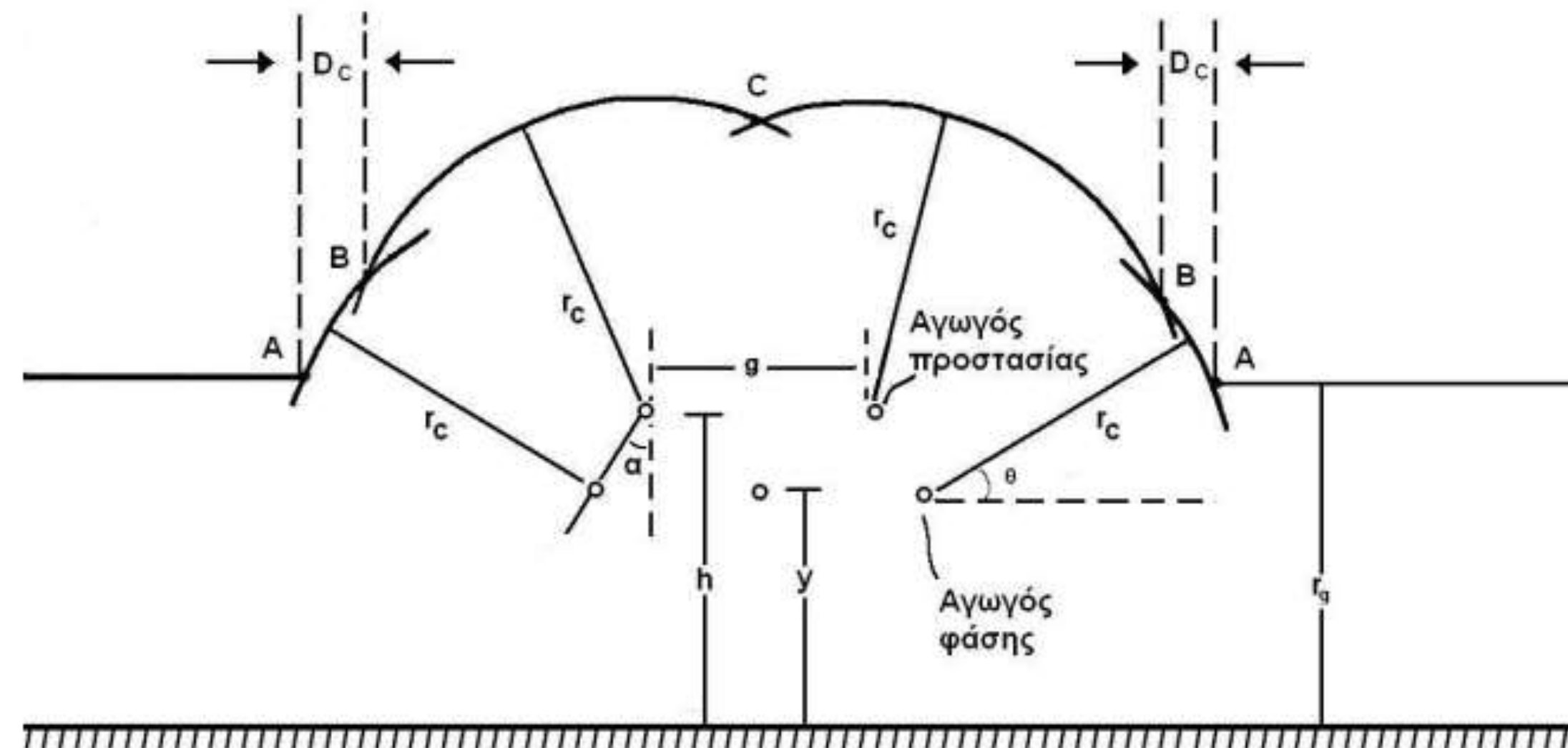
D είναι η ισοδύναμη διάμετρος του αγωγού φάσης με το φαινόμενο corona,

D_c είναι η απόσταση έκθεσης των αγωγών λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας:

$$D_c = r_c [\cos\theta - \cos(\alpha + \beta)]$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{r_g - h_c}{r_c} \right]$$

$$\beta = \sin^{-1} [(a^2 + (h_{sw} - h_c)^2)^{0,5} / 2r_c]$$



όπου:

r_g ισούται με 0,552 r_c για γραμμές μεταφοράς των 400 kV και με 0,915,

r_c για γραμμές μεταφοράς των 150 kV,

h_{sw} είναι το ύψος των αγωγών προστασίας.



Εκτίμηση κεραυνικών σφαλμάτων γραμμών μεταφοράς



Ανάστροφη διάσπαση

Τα σφάλματα λόγω ανάστροφης διάσπασης NBF υπολογίζονται για μια γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης από την εξίσωση:

$$N_{BF} = 0,004T^{1.25}(g + 4h_{sw}^{1.09}) \int_0^{\infty} P(\delta) d\delta$$

όπου, g είναι η οριζόντια απόσταση σε m ανάμεσα στους αγωγούς προστασίας

$P(\delta)$ είναι η συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων της τυχαίας μεταβλητής δ , η οποία αποτελεί συνάρτηση των δύο τυχαίων μεταβλητών I_{peak} και di/dt όπως φαίνεται στην ακόλουθη σχέση:

$$\delta \left(I_{peak}, \frac{di}{dt} \right) = R \cdot \frac{I_{peak}}{2} - aU_a + L \frac{di}{dt}$$

με δ μεγαλύτερο του μηδενός, όταν υπάρχει ανάστροφη διάσπαση,

R είναι η αντίσταση γείωσης πύργου σε Ω ,

L είναι η συνολική ισοδύναμη αυτεπαγωγή του συστήματος (αυτεπαγωγή πύργου και συστήματος γείωσης) σε μH ,

a είναι μία σταθερά ίση με 0.85,

di/dt είναι μία τυχαία μεταβλητή, που δεικνύει την κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος σε $kA/\mu s$

I_{peak} είναι μία τυχαία μεταβλητή, που δεικνύει τη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος σε kA .



Εκτίμηση κεραυνικών σφαλμάτων γραμμών μεταφοράς



Συνολικά κεραυνικά σφάλματα

Τα συνολικά κεραυνικά σφάλματα N_T μιας γραμμής μεταφοράς δίνονται από το άθροισμα των σφαλμάτων λόγω απευθείας κεραυνοπληξίας N_{SF} και των σφαλμάτων λόγω ανάστροφης διάσπασης N_{BF} δηλαδή:

$$N_T = N_{SF} + N_{BF}$$

Βιβλιογραφία



Βιβλιογραφία



- Π.Ν. Νικολόπουλος, «Υψηλές Τάσεις», Τόμος Α, Έκδοση 2^η, Αθήνα 1994
- Ι.Α. Σταθόπουλος, «Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1989
- Χ. Μαινεμενλής, «Μόνωση Ηλεκτρικών Δικτύων Υψηλής Τάσης», Εκδόσεις Παν. Πατρών, Πάτρα 2008
- Ε. Λεκατσάς, «Θέματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας», ΔΕΗ, Αθήνα 1985
- Λ. Οικονόμου, Γ. Φώτης, Χ. Χριστοδούλου, «Υψηλές Τάσεις», Εκδόσεις Τζιόλα, 3^η Έκδοση, 2021