

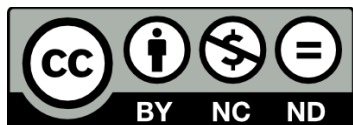


ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ III

ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΑ ΣΗΕ

Λαμπρίδης Δημήτρης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



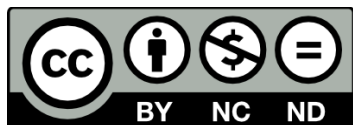
Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ Ι



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη

ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

1. Γενικά πάνω στα μεταβατικά φαινόμενα
2. Κατάταξη των μεταβατικών φαινομένων
 - i. Πολύ γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα
 - ii. Γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα
 - iii. Αργά μεταβατικά φαινόμενα
3. Κυματικά φαινόμενα
 - i. Εισαγωγή
 - ii. Τυποποίηση κρουστικού κύματος
 - iii. Εξίσωση κύματος σε ομοιογενή ΓΜΧΑ
 - iv. Φυσική ερμηνεία της λύσης



1. ΓΕΝΙΚΑ

Ηλεκτρικά Μεταβατικά Φαινόμενα (ΜΦ):

Όταν αλλάζουν ξαφνικά τα ηλεκτρικά κυκλώματα, τότε

- **Αλλάζουν ρεύματα, τάσεις (σε χρόνους $\ll T$)**
- **Μεγάλες καταπονήσεις από υπερρεύματα - υπερτάσεις**
- **Τοπικές βλάβες**
- **Αποσύνδεση γεννητριών – σταθμών παραγωγής**
- **Συνολική κατάρρευση διασυνδεδεμένου δικτύου
(Black Out)**



Η εκτίμηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε ένα ΣΗΕ κατά τη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου είναι απαραίτητη για τον ικανοποιητικό προσδιορισμό:

- **των συσκευών ελέγχου**
- **της μόνωσης**
- **της προστασίας του δικτύου**



2. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΜΦ

i. Πολύ γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα (< 5 ms)

Κυματικά φαινόμενα

Πολύ γρήγορη απόσβεση, λόγω των απωλειών των ΓΜ

Προκαλούνται από:

- ατμοσφαιρικές εκκενώσεις
- διακοπτικά φαινόμενα



Βασικοί λόγοι για τους οποίους είναι απαραίτητη η κατανόηση των κυματικών φαινομένων είναι:

- **ο προσδιορισμός της μόνωσης των συνιστωσών του δικτύου, και**
- **ο προσδιορισμός της μορφής των κρουστικών τάσεων, με τις οποίες γίνονται οι δοκιμές των διαφόρων συσκευών του ΣΗΕ**

Τα κυματικά φαινόμενα οδηγούν στη διάσπαση της μόνωσης των συσκευών

Η καταστροφή της μόνωσης ισοδυναμεί με βραχυκύκλωμα



ii. Γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα ($10 \div 1000 \text{ ms}$)

Βραχυκυκλώματα

Έχουν γρήγορη απόσβεση, που προσδιορίζεται από την υπομεταβατική χρονική σταθερά της ΣΓ

$$(T_d'' = 20 \div 50 \text{ ms})$$

Οι 10 πρώτοι κύκλοι των ρευμάτων βραχυκύκλωσης είναι σημαντικοί στην πράξη

Βραχυκυκλώματα προκαλούνται από:

- Απότομες αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου
- Διάσπαση της μόνωσης, λόγω κυματικού φαινομένου



- Η χειρότερη περίπτωση βραχυκυκλώματος:
Προσδιορίζει την ικανότητα διακοπής των διακοπών ισχύος
- Το μέγεθος και η διεύθυνση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης:
Προσδιορίζουν το σύστημα ηλεκτρονόμων προστασίας που θα ανιχνεύσει το σφάλμα και θα ενεργοποιήσει χειρισμούς
- Τα βραχυκυκλώματα οδηγούν σε μηχανικές ταλαντώσεις των δρομέων των σύγχρονων γεννητριών (ΣΓ)



iii. Αργά μεταβατικά φαινόμενα (1 s ÷ 1 – 20 min)

Ευστάθεια μεταβατικής κατάστασης

Αργή απόσβεση, λόγω της μεγάλης ροπής αδράνειας των δρομέων των ΣΓ

Μικρά δίκτυα (~ MW) \Rightarrow 3 ÷ 4 κύκλοι ταλάντωσης / sec

Μεγάλα δίκτυα (~ GW) \Rightarrow 3 ÷ 4 κύκλοι ταλάντωσης / min



$U \downarrow, P_e \downarrow, P_{sh} = ct \Rightarrow$ επιτάχυνση δρομέα ΣΓ

- Ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις (ηλεκτρομηχανικά ΜΦ)
- Οδηγούν σε μερική η ακόμα και σε ολική κατάρρευση του διασυνδεδεμένου ΣΗΕ



3. ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

i. Εισαγωγή

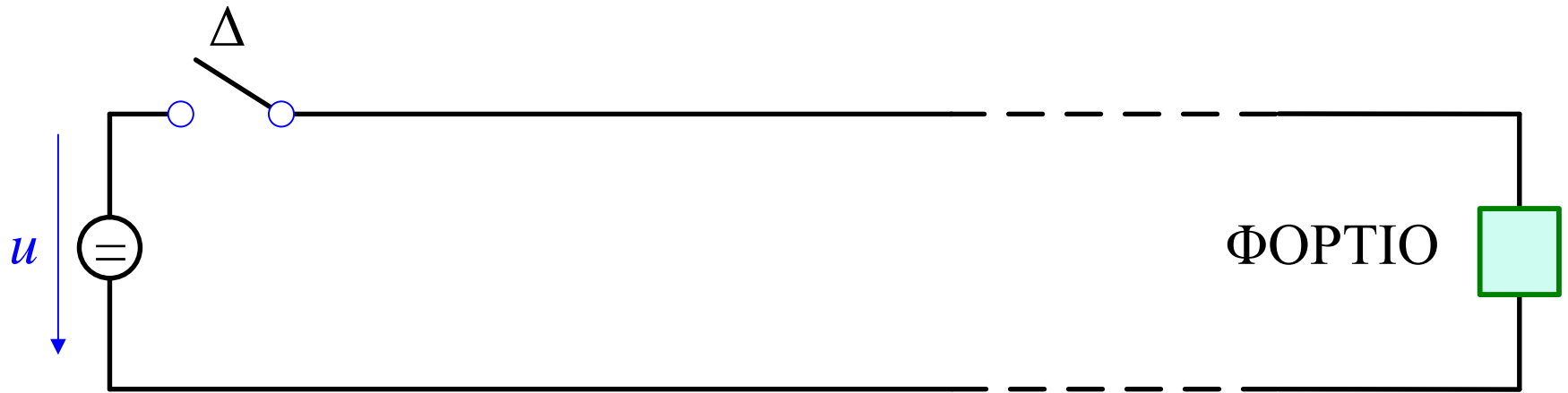
Μέγιστη Ταχύτητα Διάδοσης ΗΜ Κύματος σε ΓΜ

$$v_{\max} = c = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$$

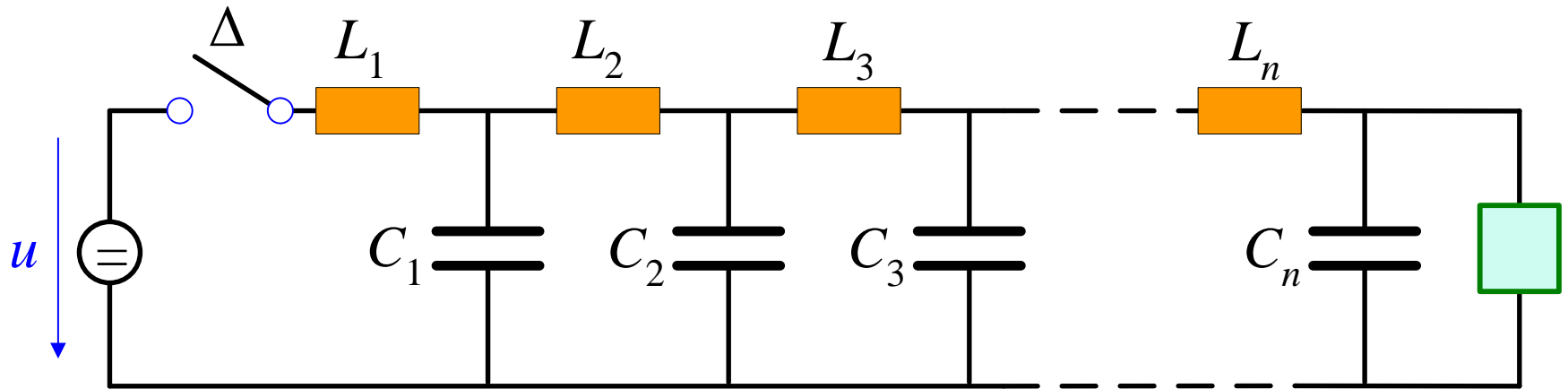
Χρόνος Όδευσης τ (Transit Time)

$$\tau = \frac{\ell}{v}$$





α)



β)

Σχ.2.1: α) Ομοιογενής ΓΜ δυο αγωγών

β) Αναπαράσταση της ΓΜ με συγκεντρωμένες παραμέτρους



Μια διαταραχή ταξιδεύει, σε μια ΓΜ μήκους ℓ ,
με πεπερασμένη ταχύτητα v



Μια διαταραχή που επιβάλλεται σε ένα σημείο x_1 της ΓΜ
γίνεται αισθητή σε ένα άλλο σημείο x_2 της ΓΜ μετά από
πεπερασμένο χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο όδευσης
 τ_{12} του κύματος μεταξύ των δυο σημείων

$$\tau_{12} = (x_2 - x_1) / v$$

- **Χρήση κυματικών εξισώσεων ΓΜ**
- **Ρεύμα, τάση: όχι συνεχείς πάνω στη ΓΜ**

Υπερτάσεις:

Μόνωση συσκευών

Προστασία συσκευών

Μορφή τυλιγμάτων ΜΣ ισχύος



- 3 αγωγοί φάσεων
- 1 τουλάχιστον αγωγός γης – προστασίας
- μεταβλητές αντιστάσεις λόγω φαινομένου κορώννα
- μεταβλητές αντιστάσεις λόγω επιδερμικού φαινομένου
- εισαγωγή αντιδράσεων από την επίδραση του εδάφους



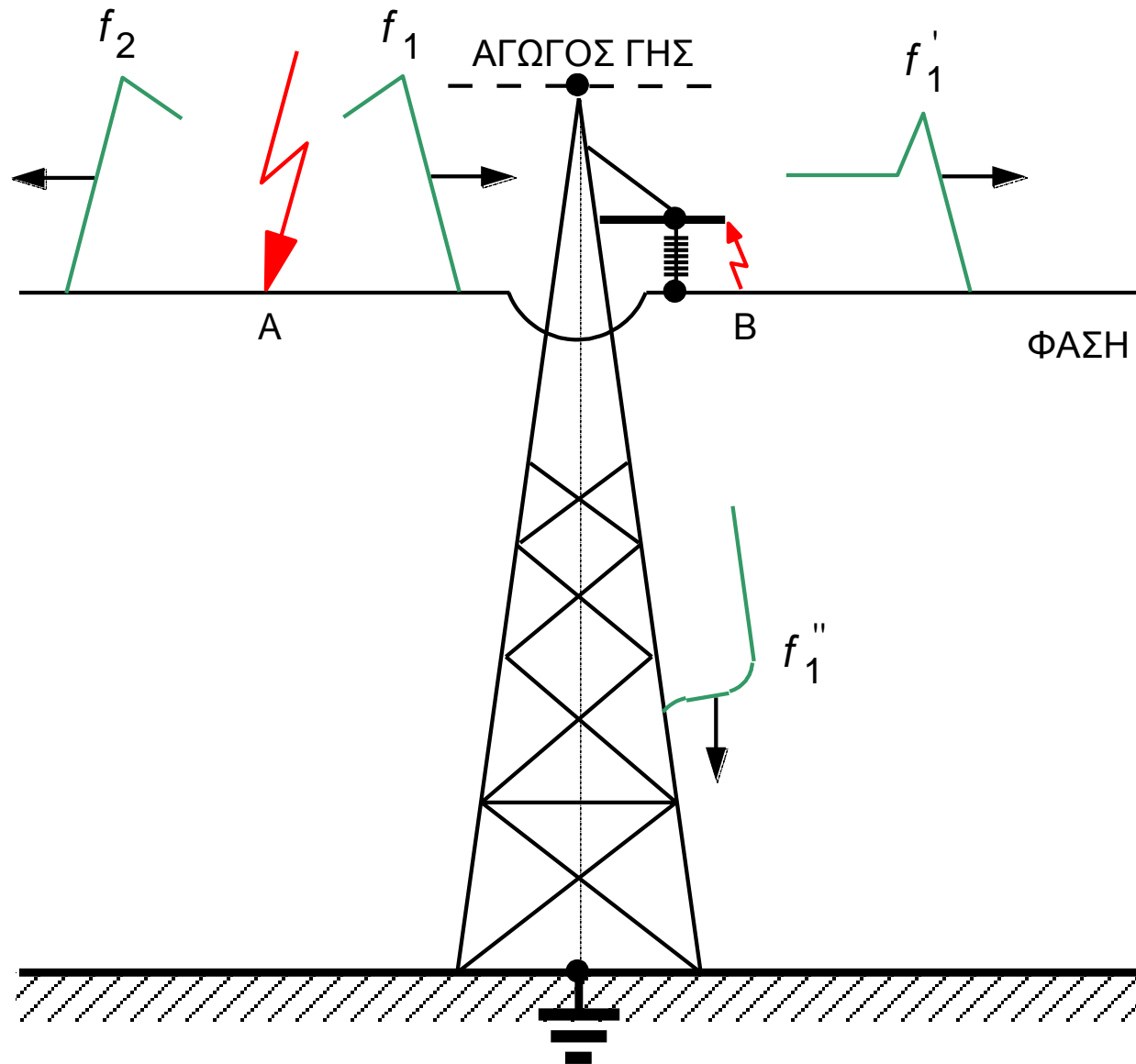
Ανάλυση δύσκολη



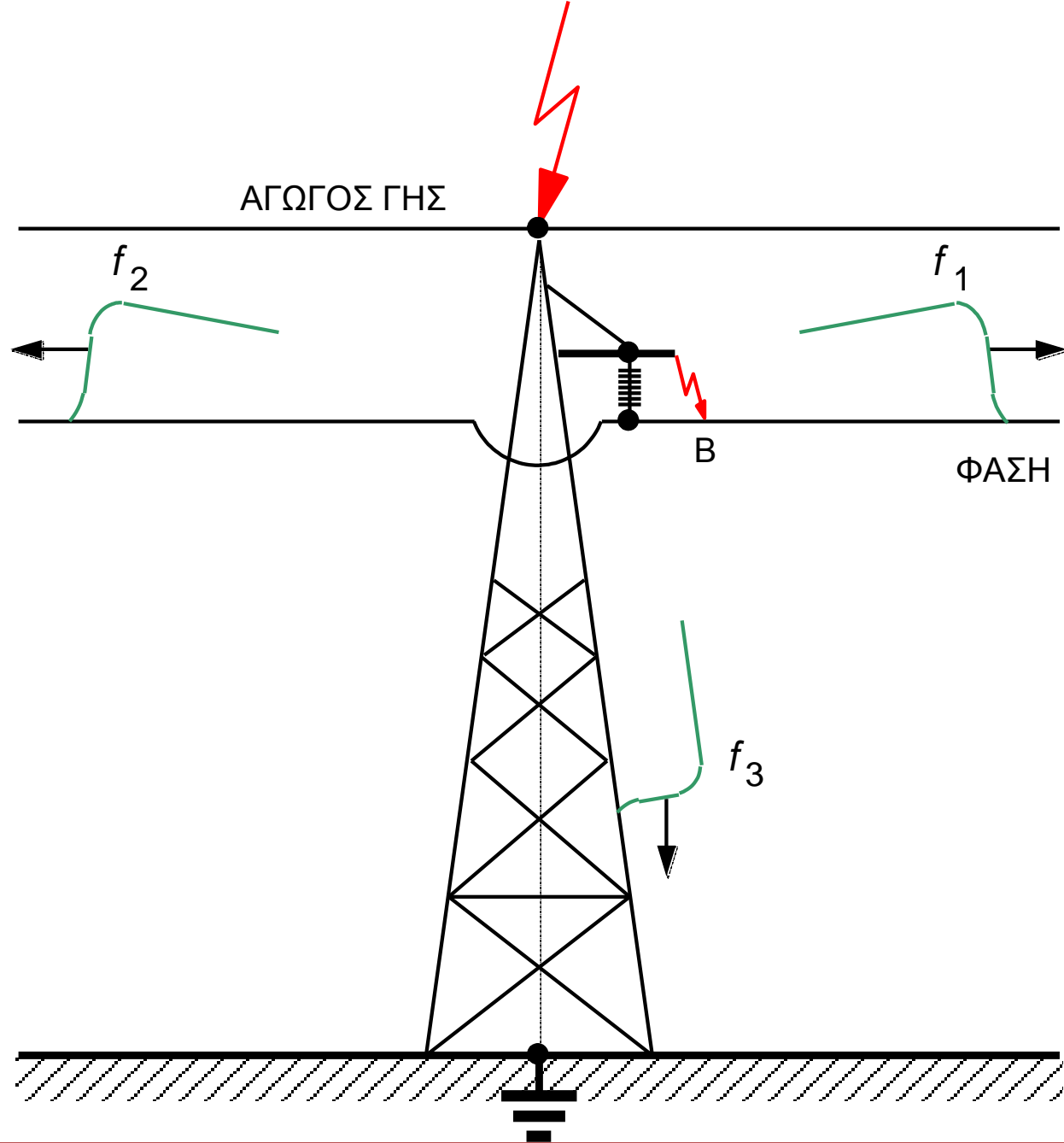
- Ομοιογενείς γραμμές 2 αγωγών, χωρίς απώλειες
- Απαισιόδοξα αποτελέσματα, δηλαδή βρισκόμαστε στην ασφαλή πλευρά



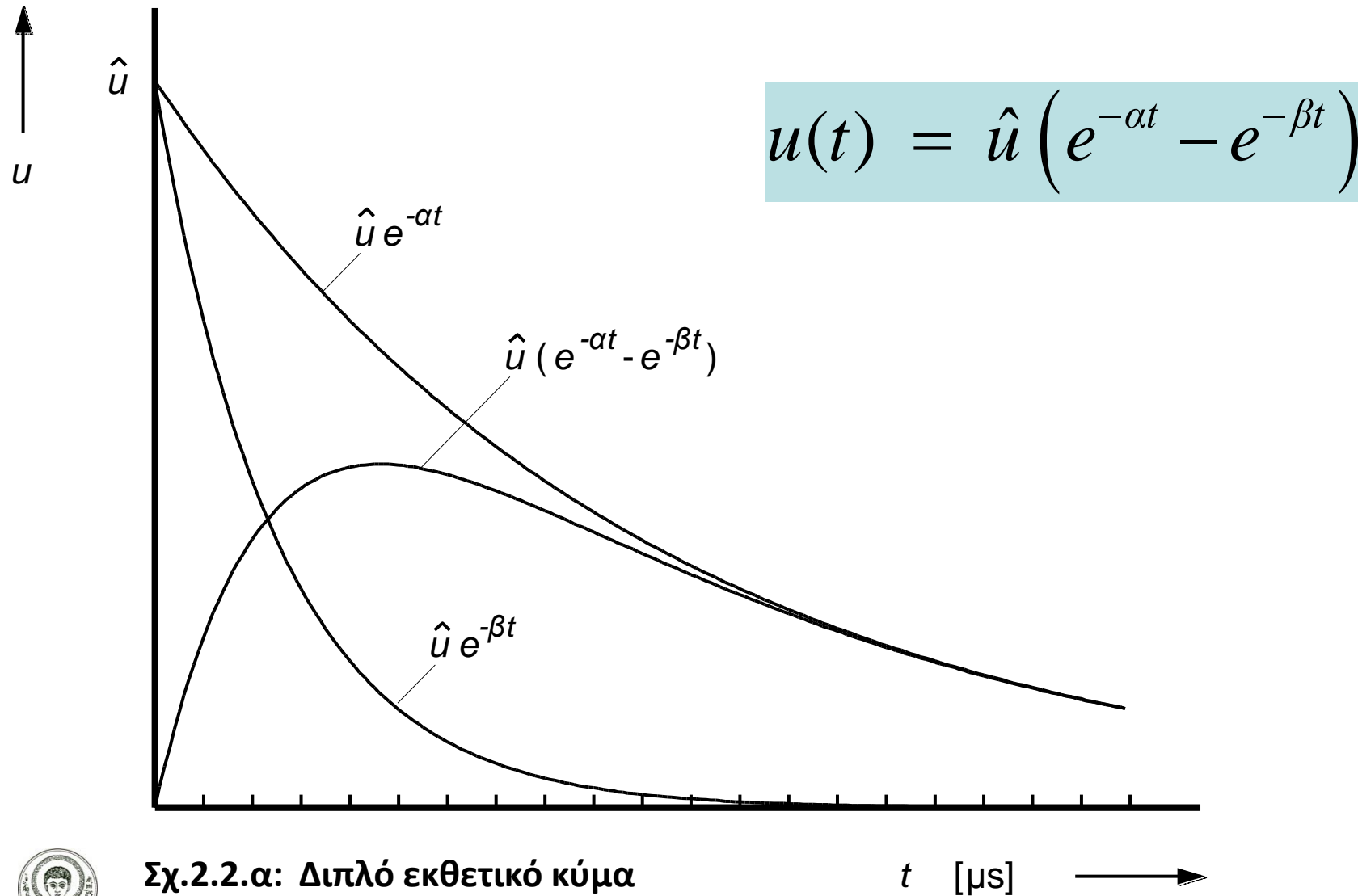
Σχ.2.3.α: Σχηματική παράσταση πτώσης κεραυνού σε ΓΜ:
 Ο κεραυνός πέφτει στο σημείο A του αγωγού μίας φάσης.
 Το κύμα f_1 οδεύει προς τον πυλώνα και δημιουργεί υπερπήδηση του μονωτήρα ανάρτησης στο σημείο B.
 Μετά την υπερπήδηση, το κύμα συνεχίζει να οδεύει στον αγωγό, με άλλη όμως μορφή f_1' .
 Μέρος του ρεύματος f_1'' οδεύει μέσω του πυλώνα προς τη γη.



Σχ.2.3.β: Σχηματική παράσταση πτώσης κεραυνού σε ΓΜ: Ο κεραυνός πέφτει στον αγωγό γης (προστασίας) και δημιουργεί υπερπήδηση του μονωτήρα ανάρτησης στο σημείο Β. Μετά την υπερπήδηση, δύο κύματα f_1 και f_2 οδεύουν εκατέρωθεν του αγωγού φάσης, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος f_3 οδεύει μέσω του πυλώνα προς τη γη.



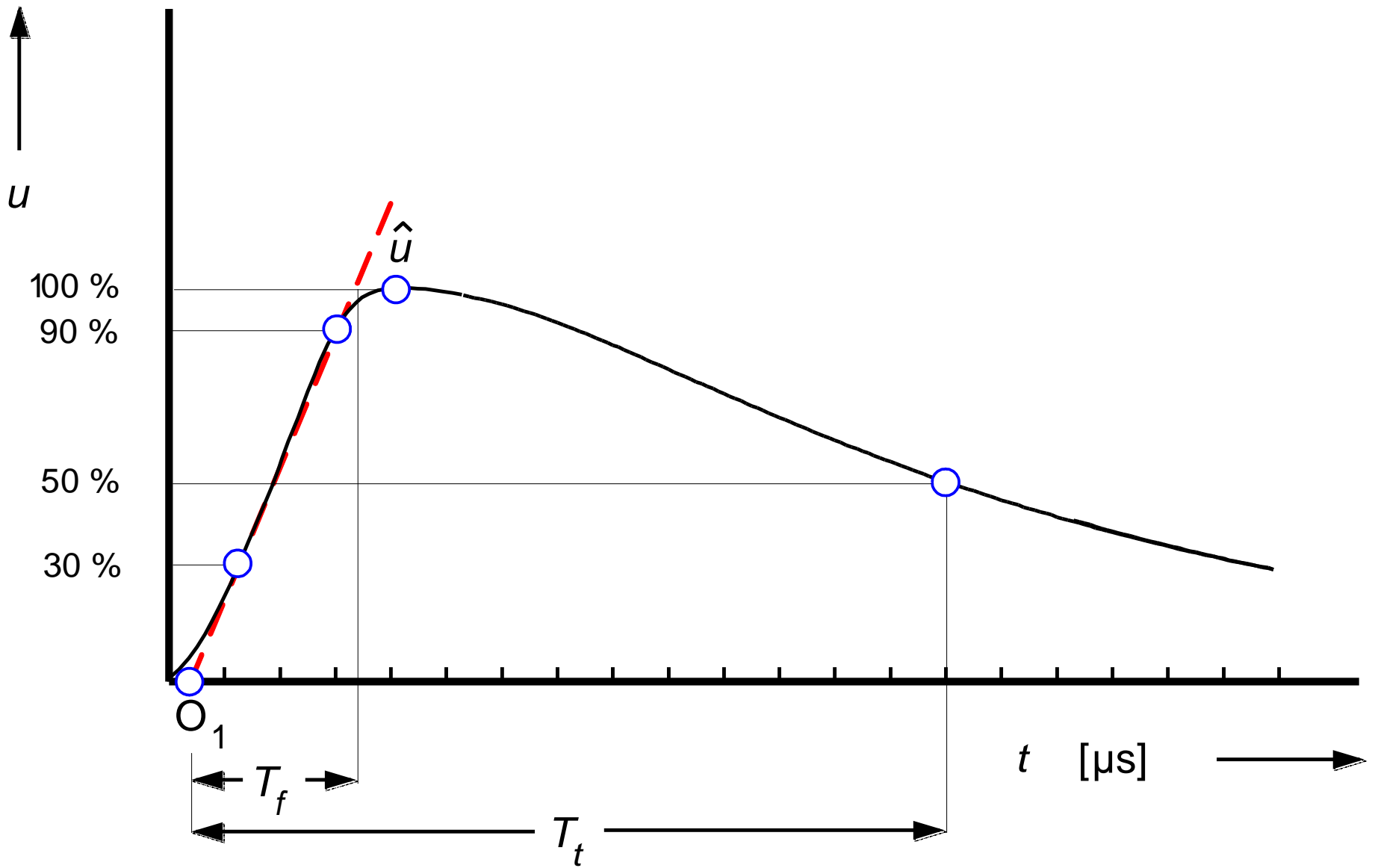
ii. Η τυποποίηση του κρουστικού κύματος



Σχ.2.2.α: Διπλό εκθετικό κύμα

t [μs] \longrightarrow





Σχ.2.2.β: Τυποποιημένο κρουστικό κύμα



Χρόνος μετώπου (*front time*) T_f : Ο χρόνος μεταξύ των σημείων με 30% και 90% του μεγίστου της τάσης του κύματος, πολλαπλασιασμένος με 1,67

Χρόνος ημισείας τιμής (*time to half-value*) T_t : Ο χρόνος μεταξύ των σημείων της υποθετικής αρχής των αξόνων O_1 και του σημείου με 50% της τάσης στην ουρά του κύματος



Ένα τυποποιημένο κρουστικό κύμα χαρακτηρίζεται από τρεις αριθμούς, π.χ. το κύμα 300 kV 1,2 × 50 έχει

- Μέγιστο του κύματος = 300 kV
- Χρόνο μετώπου $T_f = 1,2 \mu\text{s}$
- Χρόνο ημίσειας τιμής $T_t = 50 \mu\text{s}$

Οι δύο τελευταίοι αριθμοί χαρακτηρίζουν τη **μορφή** του κύματος και δίνονται πάντα σε μs

Κρουστικές τάσεις και κρουστικά ρεύματα δοκιμών περιγράφονται στο πρότυπο **IEC 60060-1 High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements**



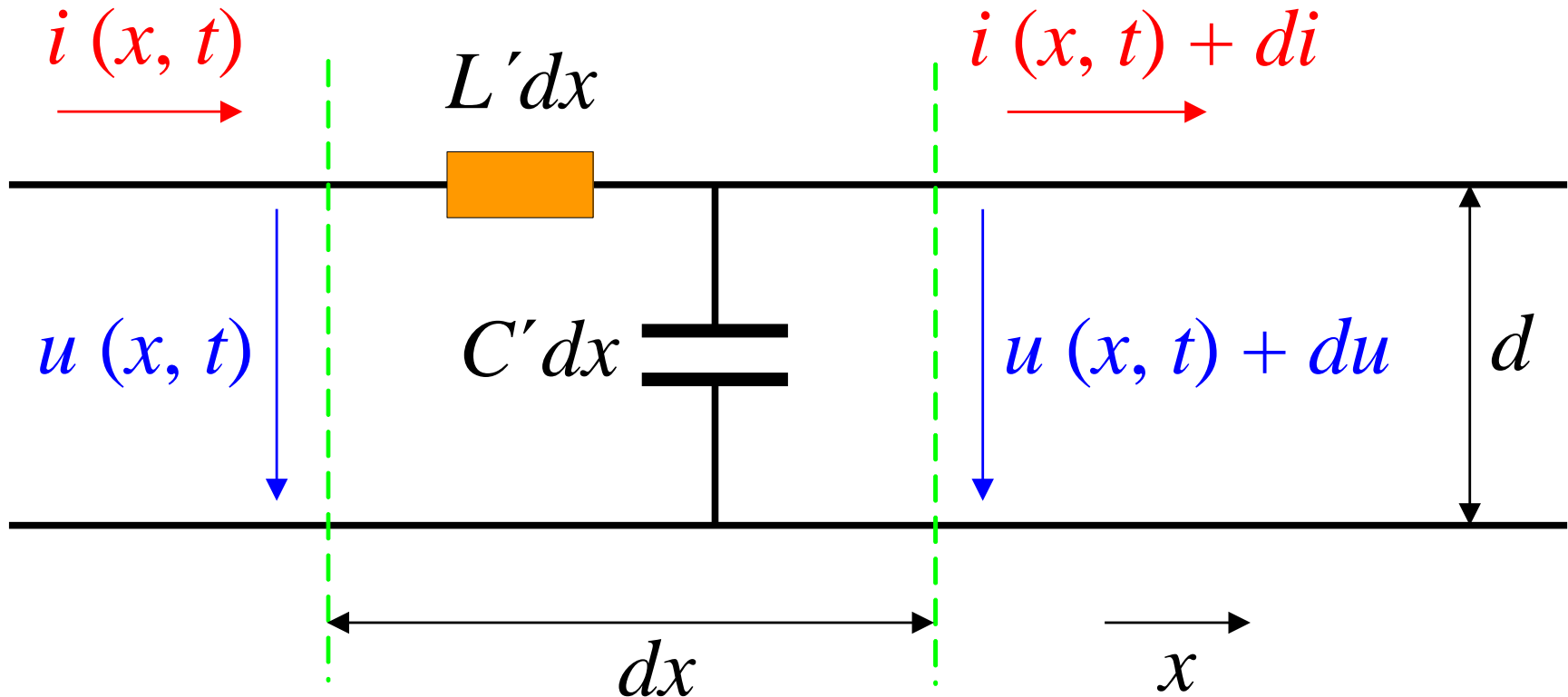
Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, κρουστικά κύματα με χρόνο μετώπου μέχρι **20 μ s** χαρακτηρίζονται ως **κύματα κεραυνών** (lightning impulses), ενώ αυτά που έχουν μεγαλύτερο χρόνο μετώπου χαρακτηρίζονται ως **κύματα χειρισμών** (switching impulses)

Οι πιο συνηθισμένες μορφές κρουστικών κυμάτων τάσης δοκιμών των διαφόρων συνιστωσών των ΣΗΕ είναι σύμφωνα με το ίδιο πρότυπο τα κύματα με μορφή

- **1,2 × 50** (standard lightning impulse)
- **250 × 2500** (standard switching impulse)



iii. η εξίσωση του κύματος σε ομοιογενή ΓΜΧΑ



Σχ.2.4: Στοιχείο, μήκους dx , ομοιογενούς ΓΜ δύο αγωγών χωρίς απώλειες



εξίσωση κύματος

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} &= \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \end{aligned} \right\}$$

v : η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο μέσο που περιβάλλει τη γραμμή

$$v = \sqrt{\frac{1}{L'C'}} \quad \begin{aligned} &\sim 300 \text{ m}/\mu\text{s} \text{ σε Εναέριες Γραμμές Μεταφοράς} \\ &\sim 170 \text{ m}/\mu\text{s} \text{ σε Μονωμένα Καλώδια} \end{aligned}$$



Η λύση της εξίσωσης κύματος ικανοποιείται από **συναρτήσεις τάσης** της μορφής

$$u(x, t) = f(x \mp vt) = f_1(x - vt) + f_2(x + vt)$$

όταν ενδιαφερόμαστε για μια **συγκεκριμένη θέση** x_0 και ζητάμε τη μεταβολή της τάσης σαν συνάρτηση του χρόνου $u(x_0, t)$

ή εναλλακτικά από **συναρτήσεις τάσης** της μορφής

$$u(x, t) = f\left(t \mp \frac{x}{v}\right) = f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{v}\right)$$

όταν ενδιαφερόμαστε για μια **συγκεκριμένη χρονική στιγμή** t_0 και ζητάμε τη μεταβολή της τάσης σαν συνάρτηση της θέσης $u(x, t_0)$



Αν ορίσουμε τη **χαρακτηριστική (κυματική) αντίσταση** της

γραμμής $Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$

προκύπτουν από τις συναρτήσεις τάσης οι αντίστοιχες **συναρτήσεις έντασης**

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_0} [f_1(x - vt) - f_2(x + vt)]$$



iv. Φυσική ερμηνεία της λύσης

$$f_1(y)$$

$$y = x - v t$$

$$t = t_0$$

χωρική κατανομή $f_1(x - v t_0)$

$$x = x_0$$

τιμή $f_1(x_0 - v t_0)$

$$t_1 > t_0$$

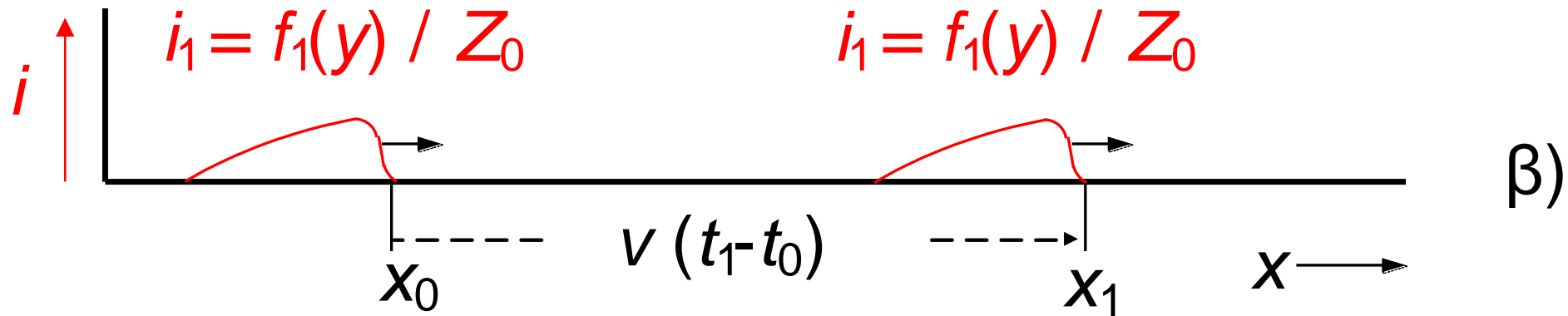
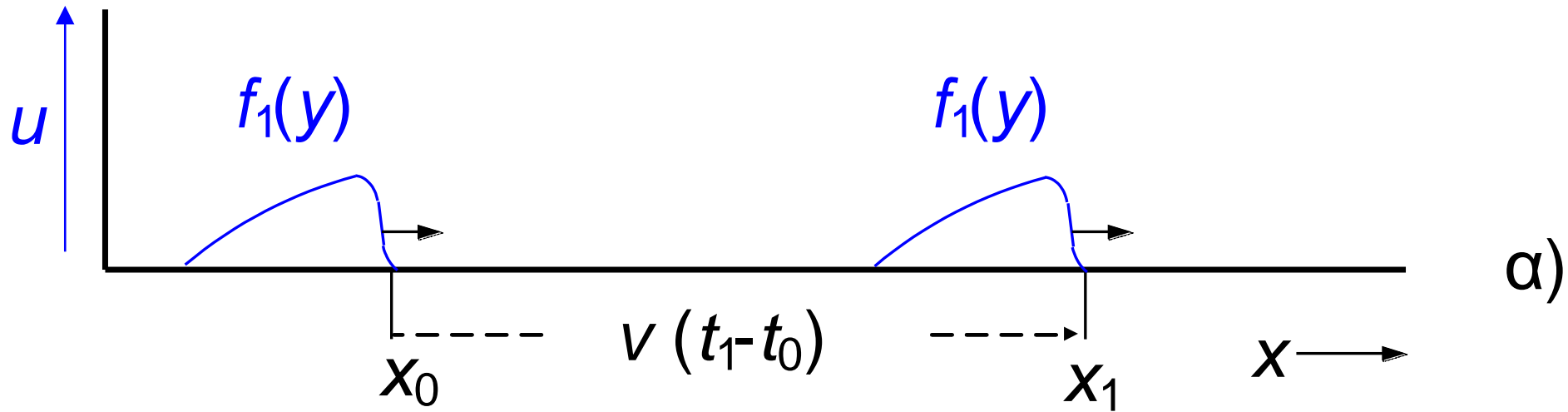
ίδια τιμή έχει στο σημείο x_1 , όταν $y = ct$, δηλ.

$$x_1 - v t_1 = x_0 - v t_0 \Rightarrow x_1 - x_0 = v (t_1 - t_0) > 0 \Rightarrow$$

το κύμα $f_1(x - v t)$ προχωρά με ταχύτητα v

το κύμα $f_2(x + v t)$ επιστρέφει με ταχύτητα v

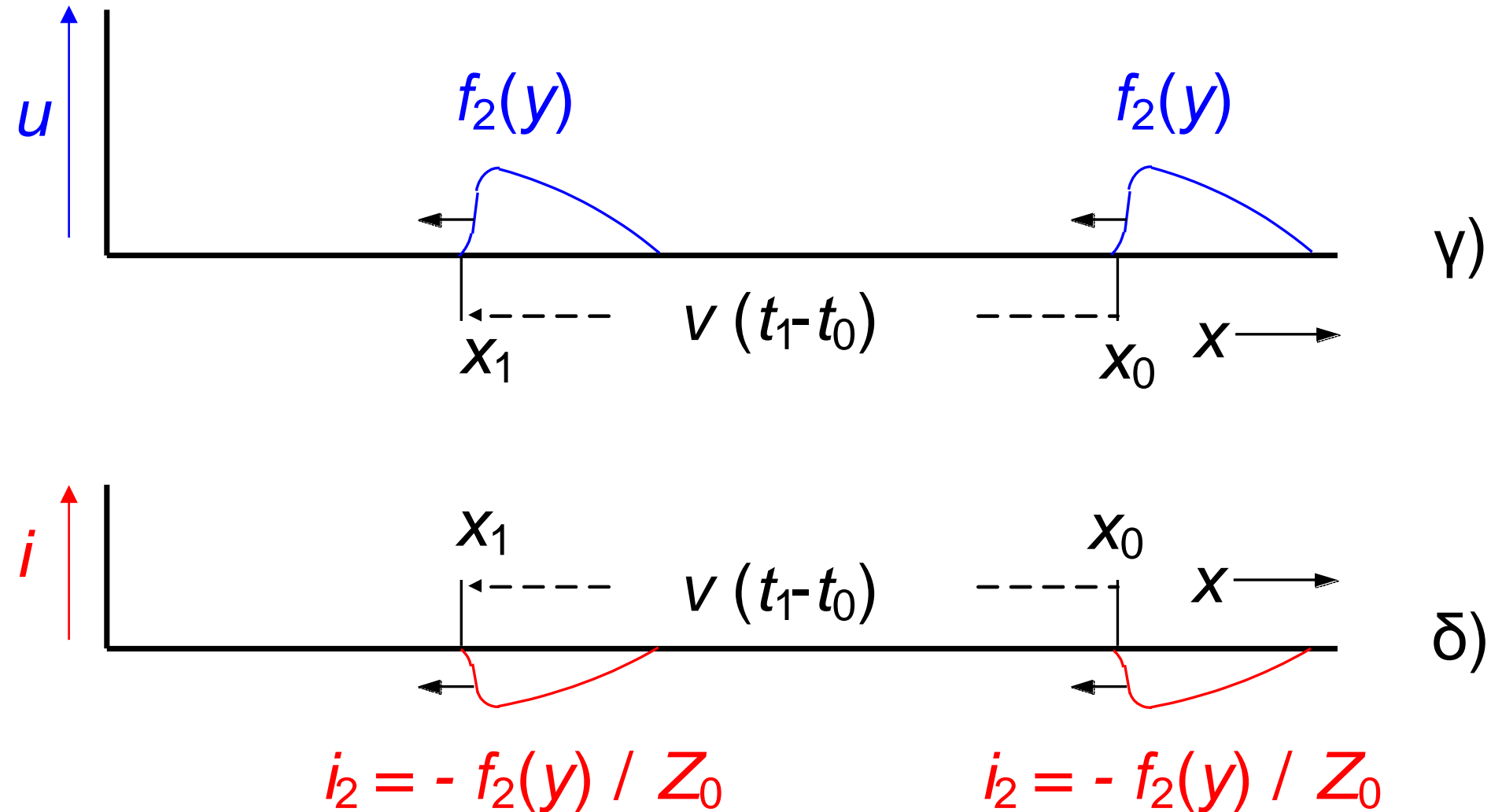




Σχ.2.5: Οδεύοντα κύματα σε ΓΜΧΑ

α) Προχωρούν κύμα τάσης β) Προχωρούν κύμα ρεύματος





Σχ.2.5: Οδεύοντα κύματα σε ΓΜΧΑ

γ) Επιστρέφον κύμα τάσης δ) Επιστρέφον κύμα ρεύματος



- Το ρεύμα του προχωρούντος κύματος έχει το ίδιο πρόσημο με το προχωρούν κύμα τάσης με το οποίο αντιστοιχίζεται, και
- το ρεύμα του επιστρέφοντος κύματος έχει **αντίθετο** πρόσημο από το επιστρέφον κύμα τάσης με το οποίο αντιστοιχίζεται.
- Η ισχύς ρέει πάντα προς την κατεύθυνση προς την οποία οδεύει το κύμα.

Ισχύς κυμάτων:

$$p_2(x, t) = - \frac{f_2^2(x, t)}{Z_0}$$

$$p_1(x, t) = \frac{f_1^2(x, t)}{Z_0}$$



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λαμπρίδης Δημήτρης.
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙΙ, ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ Ι». Έκδοση:
1.0. Θεσσαλονίκη 2015 Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
http://opencourses.auth.gr/eclass_courses.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

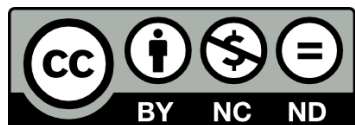
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2013-2014





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σημειώματα

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

