



# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ III

## ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΑ ΣΗΕ

Λαμπρίδης Δημήτρης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



# 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.



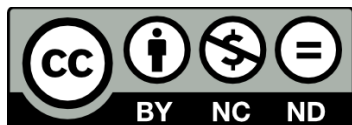
# Χρηματοδότηση

- 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.





# ΖΕΥΞΕΙΣ, ΑΠΟΖΕΥΞΕΙΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ III



# Περιεχόμενα ενότητας

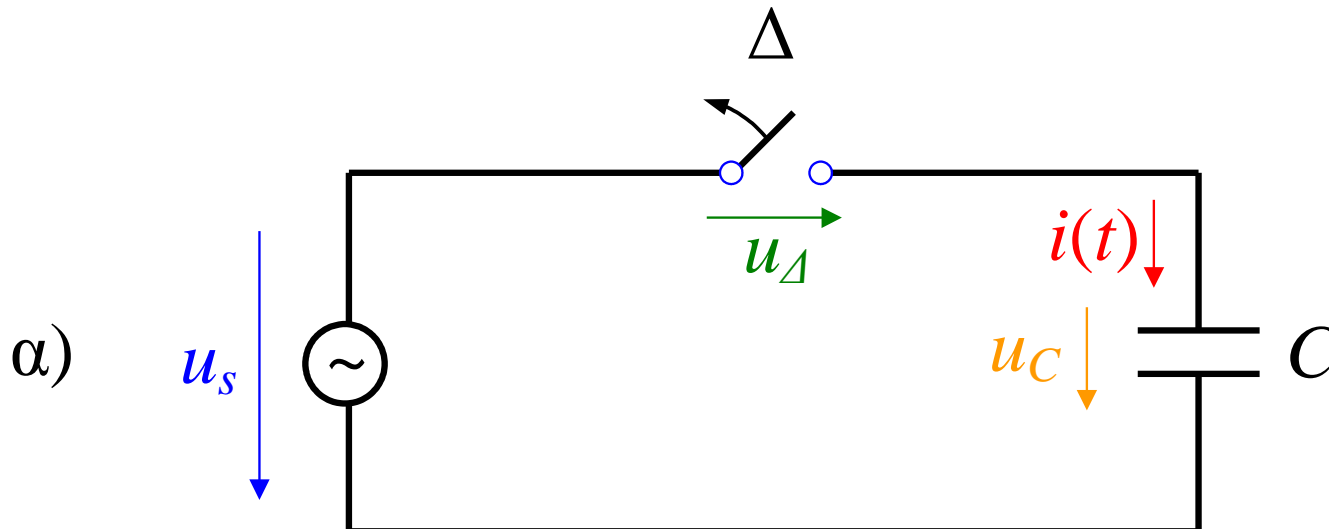
## ΖΕΥΞΕΙΣ, ΑΠΟΖΕΥΞΕΙΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΙΙΙ

3. Αποζεύξεις μονοφασικών φορτίων χωρίς μεταβατικές συχνότητες
4. Αποζεύξεις μονοφασικών φορτίων με μεταβατικές συχνότητες



### 3. Αποζεύξεις μονοφασικών φορτίων χωρίς μεταβατικές συχνότητες (συν.)

## ΑΠΟΖΕΥΞΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ C



Σχ.3.11: Απόζευξη χωρητικού φορτίου:  
α) ισοδύναμο κύκλωμα



Χωρητικό φορτίο  $C$  – (η τάση ακολουθεί το ρεύμα)

Συνδέεται με πηγή AC τάσης  $u_s = \sqrt{2} U \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$

Διαρρέεται από ρεύμα

$$i = C \frac{du_s}{dt} = C \sqrt{2} U \omega \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2} UC \omega \sin \omega t$$

Τάση διακόπτη  $u_{\Delta}(t) = u_s(t) - u_C(t)$

Ο διακόπτης  $\Delta$  ανοίγει – κατά τη χρονική στιγμή  $t_0$  οι επαφές του έχουν απομακρυνθεί αρκετά



Για  $0 < t < t_0$ :  $i(t) = \sqrt{2}UC\omega \sin \omega t$

Τάση διακόπτη  $u_{\Delta}(t) = u_s(t) - u_C(t) = 0$

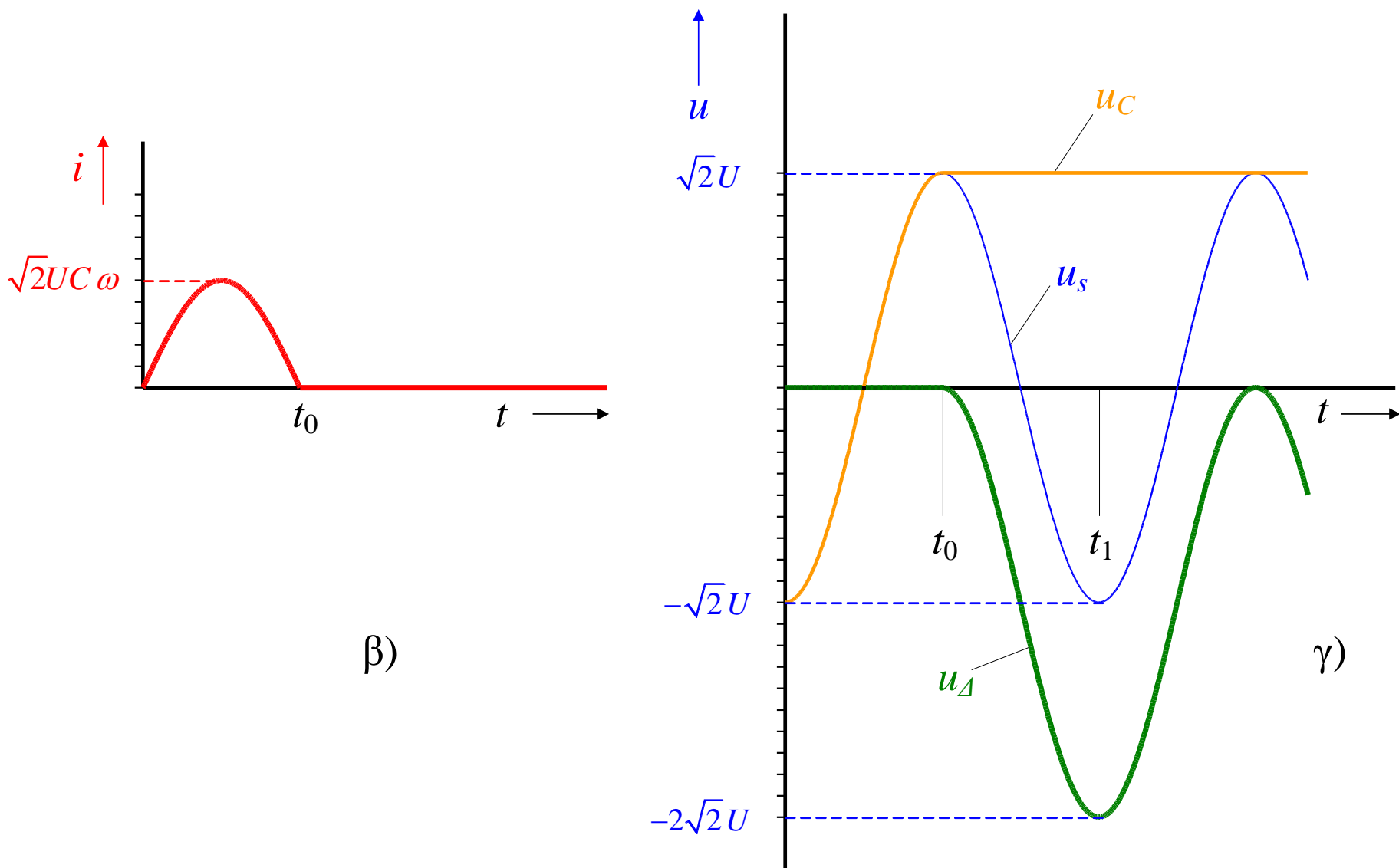
Για  $t = t_0$ :  $i(t_0) = 0$   $u_C(t_0) = u_s(t_0) = \sqrt{2}U$

Τάση διακόπτη  $u_{\Delta}(t_0) = u_s(t_0) - u_C(t_0) = 0$

$$\left. \frac{du_{\Delta}}{dt} \right|_{t=t_0} = \left. \frac{du_s}{dt} \right|_{t=t_0} - \left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=t_0} = 0 - 0 = 0$$







**Σχ.3.11: Απόζευξη χωρητικού φορτίου:**  
**β) ρεύμα σαν συνάρτηση του χρόνου, και**  
**γ) τάση πηγής  $u_s$ , πυκνωτή  $u_C$  και διακόπτη  $u_\Delta$  σαν συνάρτηση του χρόνου**



$$\text{Για } t > t_0: \quad i(t) = 0 \quad u_C(t) = u_C(t_0) = \sqrt{2}U$$

Τάση διακόπτη

$$u_{\Delta}(t) = u_s(t) - u_C(t) = \sqrt{2}U \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - \sqrt{2}U$$

$$\text{Με μέγιστη τιμή } \hat{u}_{\Delta} = -2\sqrt{2}U \quad \text{ή} \quad |\hat{u}_{\Delta}| = 2\sqrt{2}U$$



Επειδή  $|\hat{u}_{\Delta}| = 2\sqrt{2}U = 2\hat{u}_s$

**η απόζευξη χωρητικού φορτίου είναι δυσμενής**

Η απόζευξη χωρητικού φορτίου έχει ιδιαίτερη σημασία, γιατί στην πράξη τη συναντάμε σε

- Εγκαταστάσεις αντιστάθμισης καταναλωτών (για τη ρύθμιση του συντελεστή ισχύος)
- Υποσταθμούς



Σε αντίθεση με τις αποζεύξεις ωμικού και επαγωγικού φορτίου, παρατηρούμε δυο διαφοροποιήσεις:

- Μετά την απόζευξη χωρητικού φορτίου και οι δυο πόλοι του διακόπτη φέρουν τάση ως προς τη γη
- Μετά την απόζευξη χωρητικού φορτίου η μέγιστη τάση του διακόπτη είναι διπλάσια της ονομαστικής τάσης του κυκλώματος



Αν ο διακόπτης **δεν αντέξει** τη μέγιστη τάση

$$\hat{u}_{\Delta} = -2\sqrt{2}U = -2\hat{u}_s$$

και **διασπαστεί** κατά τη χρονική στιγμή  $t_1$  όταν η τάση του δικτύου έχει τιμή  $u_s = -\hat{u}_s \Rightarrow$

**Ζεύξη πυκνωτή-πηγής με αντίθετη τάση**

Τα απόλυτα μέγιστα της τάσης του πυκνωτή θα είναι

για  $t > t_1$ :

$$|u_{C \max}| = |u_s| + |u_s - u_C(t_0)| = |-\hat{u}_s| + |-\hat{u}_s - \hat{u}_s| = 3\hat{u}_s$$



⇒ Η ΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΥΚΝΩΤΗ ΘΑ ΑΛΛΑΞΕΙ ΑΠΟ

$$\hat{u}_s \quad \text{ΣΕ} \quad -3\hat{u}_s$$

Η τάση του διακόπτη μετά τη διάσπαση θα είναι

$$u_{\Delta}(t) = u_s(t) - u_C(t) = \hat{u}_s \sin \omega t + 3\hat{u}_s$$

Με μέγιστη τιμή

$$\hat{u}_{\Delta} = 4\hat{u}_s$$

μια ημιπερίοδο μετά τη χρονική στιγμή  $t_1$



Αν ο διακόπτης **δεν αντέξει** τη μέγιστη τάση

$$\hat{u}_{\Delta} = 4\hat{u}_s$$

Και **διασπαστεί πάλι** κατά τη χρονική στιγμή  $t_2$  όταν η τάση του δικτύου έχει τιμή  $u_s = \hat{u}_s \Rightarrow$

**Ζεύξη πυκνωτή-πηγής με αντίθετη τάση**

Τα απόλυτα μέγιστα της τάσης του πυκνωτή θα είναι

για  $t > t_2$ :

$$|u_{C \max}| = |u_s| + |u_s - u_C(t_1)| = |\hat{u}_s| + |\hat{u}_s + 3\hat{u}_s| = 5\hat{u}_s$$



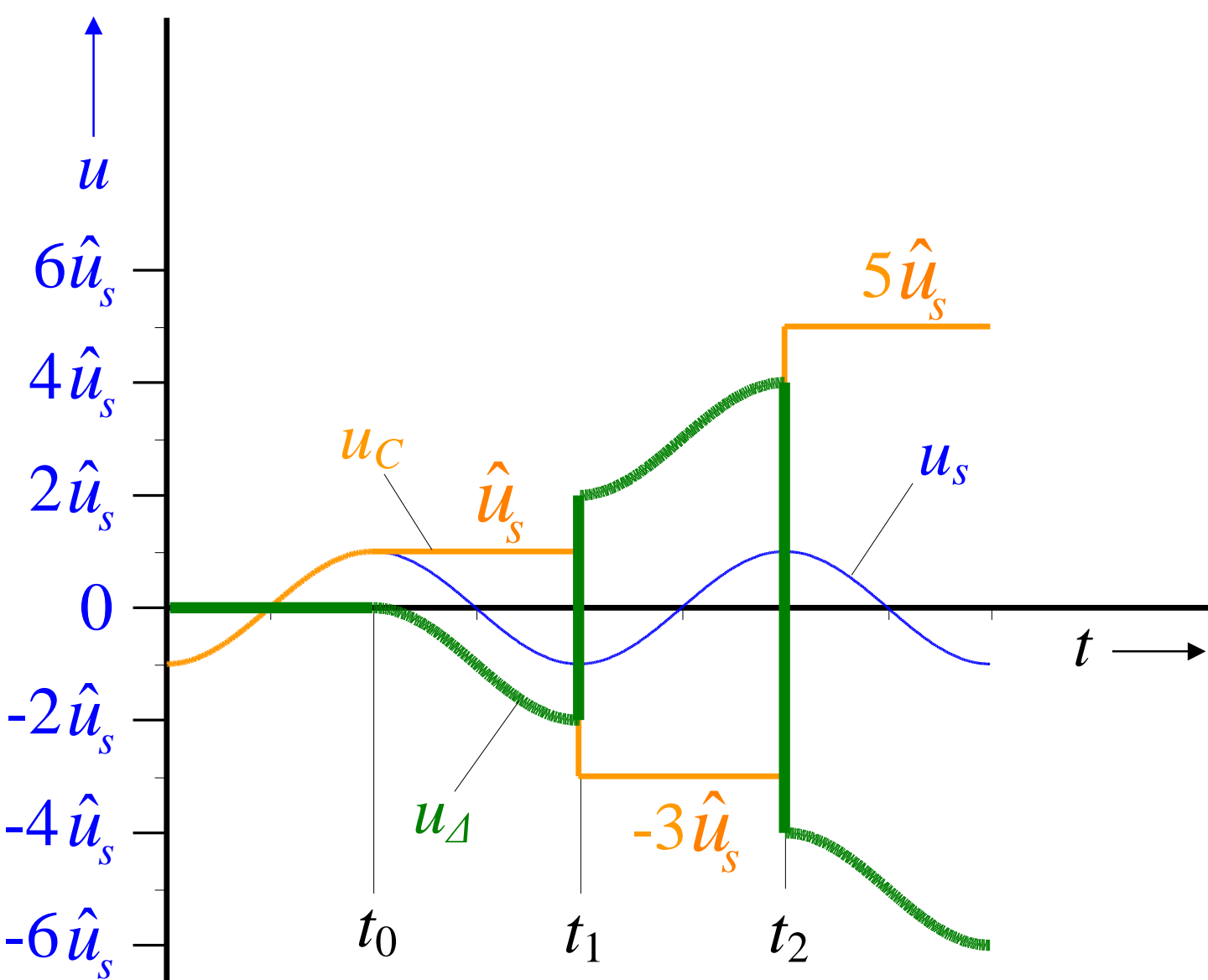
⇒ Η ΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΥΚΝΩΤΗ ΘΑ ΑΛΛΑΞΕΙ ΑΠΟ

$$-3\hat{u}_s \quad \text{ΣΕ} \quad 5\hat{u}_s$$

Η τάση του πυκνωτή θα αυξάνει συνεχώς, αν οι διασπάσεις συμβαίνουν στα μέγιστα της τάσης του διακόπτη







Σχ.3.12: Τάσεις σαν συνάρτηση του χρόνου, όταν κατά την απόζευξη του χωρητικού φορτίου του Σχ.3.11, ο διακόπτης δεν αντέξει την επανερχόμενη τάση και διασπαστεί



$$u_C: \hat{u}_s \rightarrow -3\hat{u}_s \rightarrow 5\hat{u}_s \rightarrow -7\hat{u}_s \rightarrow 9\hat{u}_s \Rightarrow$$

**Η μόνωση του πυκνωτή ή του δικτύου δεν θα αντέξει την υψηλή αυτή τάση**

Στην περίπτωση που ο πυκνωτής καταστραφεί πρώτος, το αποτέλεσμα είναι συνήθως η **έκρηξη του κιβωτίου του** και η **βραχυκύκλωση** του δικτύου

Η έκρηξη οφείλεται στη συσσωρευμένη στον πυκνωτή ηλεκτρική ενέργεια ( $0,5 C U^2$ ) που ελευθερώνεται ακαριαία



**Επειδή η υπέρταση η οποία δημιουργείται είναι μεγάλη, η απόζευξη χωρητικού φορτίου χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή**



**όταν πρόκειται να τοποθετηθεί διακόπτης σε σημείο του δικτύου για τον έλεγχο χωρητικού φορτίου, ο διακόπτης πρέπει να προδιαγραφεί κατάλληλα**



## 4. Αποζεύξεις μονοφασικών φορτίων με μεταβατικές συχνότητες

### ΓΕΝΙΚΑ

Αποζεύξεις μεμονωμένων φορτίων  $R, L, C$



Συμπεράσματα χρήσιμα για την κατανόηση των φαινομένων  
Συνήθως υπάρχουν πρόσθετες επιδράσεις επαγωγικών και χωρητικών φορτίων, οι οποίες οδηγούν σε **ταλαντώσεις με μεταβατικές συχνότητες** διαφορετικές από τη συχνότητα του δικτύου



Η εφαρμογή στην πράξη περιπτώσεων απόζευξης μεμονωμένων φορτίων (δηλαδή χωρίς μεταβατικές ταλαντώσεις) είναι **περιορισμένη**



Οι μεταβατικές ταλαντώσεις είναι μια, δυο ή και περισσότερες, ανάλογα με

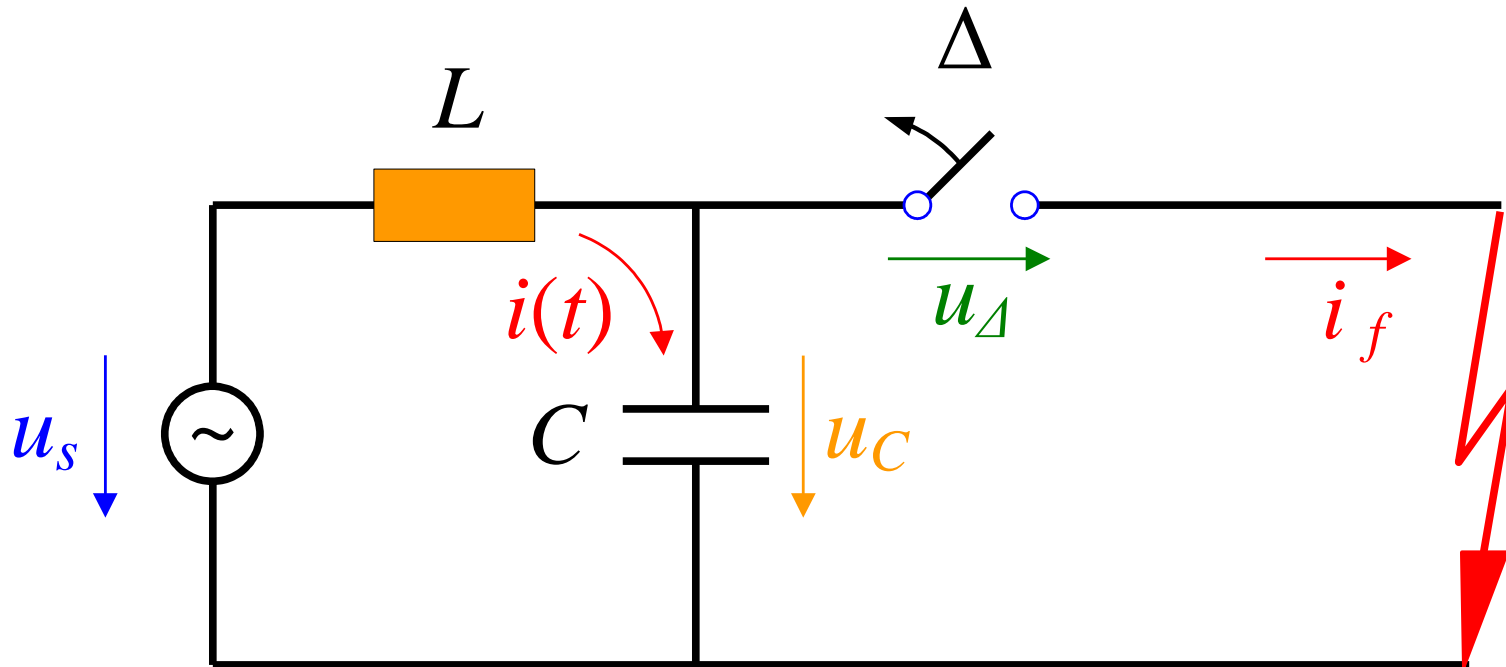
- την **τοπολογία** του κυκλώματος
- τη **θέση του σφάλματος** και
- τη **θέση του διακόπτη**

Οι ιδιοσυχνότητες των ταλαντώσεων αυτών είναι αρκετά μεγάλες (1 - 100 kHz)

Παραδοχή: ο διακόπτης που προστατεύει το κύκλωμα είναι ιδανικός



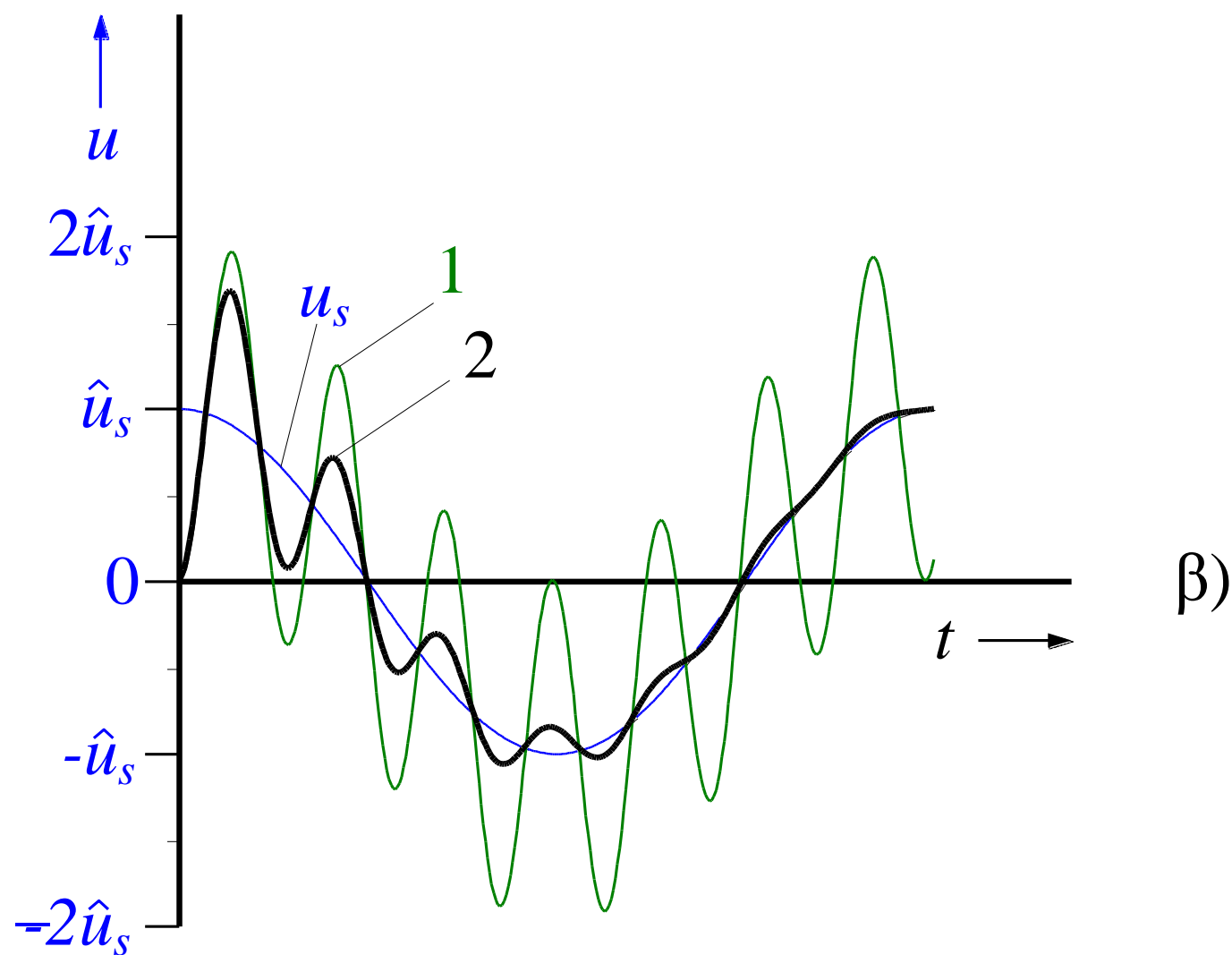
# ΣΦΑΛΜΑ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ



α)

Σχ.3.13: Απόζευξη σφάλματος το οποίο συμβαίνει στην αρχή γραμμής μεταφοράς (απόζευξη με μία μεταβατική συχνότητα):  
α) Ισοδύναμο κύκλωμα





β)

Σχ.3.13: β) Τάσεις πηγής  $u_s$ , διακόπτη  $u_D$  και πυκνωτή  $u_C$ , σαν συνάρτηση του χρόνου. Η καμπύλη 1 είναι η τάση του διακόπτη  $u_D$  χωρίς απόσβεση και η καμπύλη 2 είναι η τάση του διακόπτη με απόσβεση. Η τάση του πυκνωτή  $u_C$ , λόγω του σφάλματος, είναι ίση με την τάση του διακόπτη



Τάση πηγής  $u_s = \hat{u}_s \cos \omega t$

Επαγωγικό κύκλωμα λόγω του σφάλματος, δηλαδή όταν  $i_f = 0$  τότε

$$|u_s| = \hat{u}_s$$

## ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ:

1. Οι αποσβέσεις αμελούνται ( $R \rightarrow 0$ )
2. Η αυτεπαγωγή  $L$  αντιστοιχίζεται στο σύνολο των αυτεπαγωγών που περιορίζουν το ρεύμα μέχρι το σημείο του σφάλματος





3. Η χωρητικότητα  $C$  αντιστοιχίζεται στη φυσική χωρητικότητα του κυκλώματος που βρίσκεται δίπλα στο διακόπτη, και αποτελείται από τη χωρητικότητα (ως προς γη)

- του ΜΣ του υποσταθμού,
- των μονωτήρων,
- των ΜΣ έντασης, και
- του ίδιου του διακόπτη (λόγω του σφάλματος ο  $\Delta I$  είναι γειωμένος από τον ένα πόλο)

4. Η τάση του τόξου αμελείται ( $u_C(0) = 0$ )



Μετά την απόζευξη: **Κύκλωμα σειράς L-C**

Φυσική συχνότητα ταλάντωσης  $\omega_e = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

**ΔΕ** ( $t > 0$ )

$$\left. \begin{array}{l} u_s = L \frac{di}{dt} + u_C \\ i = C \frac{du_C}{dt} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{d^2 u_C}{dt^2} + \omega_e^2 u_C = \omega_e^2 \hat{u}_s \cos \omega t$$



**ΑΣ**  $u_C(0) = 0 \rightarrow$  λόγω του σφάλματος, ο πυκνωτής δεν διαρρέεται από ρεύμα έχει δε τάση  $u_C(0) = 0$  λόγω της 4ης παραδοχής

$\dot{u}_C(0) = \frac{i(0)}{C} = 0 \rightarrow$  όταν  $t=0$  είναι  $i_f=0$ , άρα και  $i=0$  λόγω της ύπαρξης της  $L$

## Λύση

$$u_C(t) = \frac{\hat{u}_s}{\lambda} (\cos \omega t - \cos \omega_e t) \quad \lambda = 1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}$$



## Συνιστώσα στάσιμης κατάστασης

$$u_{C_s}(t) = \frac{\hat{u}_s}{\lambda} \cos \omega t$$

## Συνιστώσα μεταβατικής κατάστασης

$$u_{C_t}(t) = \frac{\hat{u}_s}{\lambda} \cos \omega_e t$$



## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

➤ Λόγω του σφάλματος, για  $t > 0$  είναι  $u_{\Delta}(t) = u_C(t)$

➤ Σχεδόν πάντα  $\omega_e \gg \omega \Rightarrow \omega^2 / \omega_e^2 \cong 0 \Rightarrow \lambda \cong 1$

οπότε  $u_{\Delta}(t) = u_C(t) \cong \hat{u}_s (\cos \omega t - \cos \omega_e t)$

Μέγιστη τιμή τάσης  $\hat{u}_{\Delta} = 2\hat{u}_s$

για  $\omega_e t = \pi \Rightarrow t = \frac{\pi}{\omega_e} = \pi \sqrt{LC}$



Παράγωγος και μέγιστη τιμή

$$\frac{du_{\Delta}}{dt} = \hat{u}_s (-\omega \sin \omega t + \omega_e \sin \omega_e t) \Rightarrow \left| \frac{du_{\Delta}}{dt} \right|_{t=\frac{\pi}{2\omega_e}} \cong \hat{u}_s \omega_e$$

Δηλαδή η ταχύτητα ανόδου της επανερχόμενης τάσης είναι ανάλογη της  $\omega_e$

Επειδή οι τάσεις και οι παράγωγοι των τάσεων του διακόπτη είναι μεγάλες, υπάρχει **κίνδυνος διάσπασης του διακόπτη**



Στην πράξη οι αντιστάσεις του κυκλώματος δημιουργούν **απόσβεση** στη μεταβατική συνιστώσα της τάσης

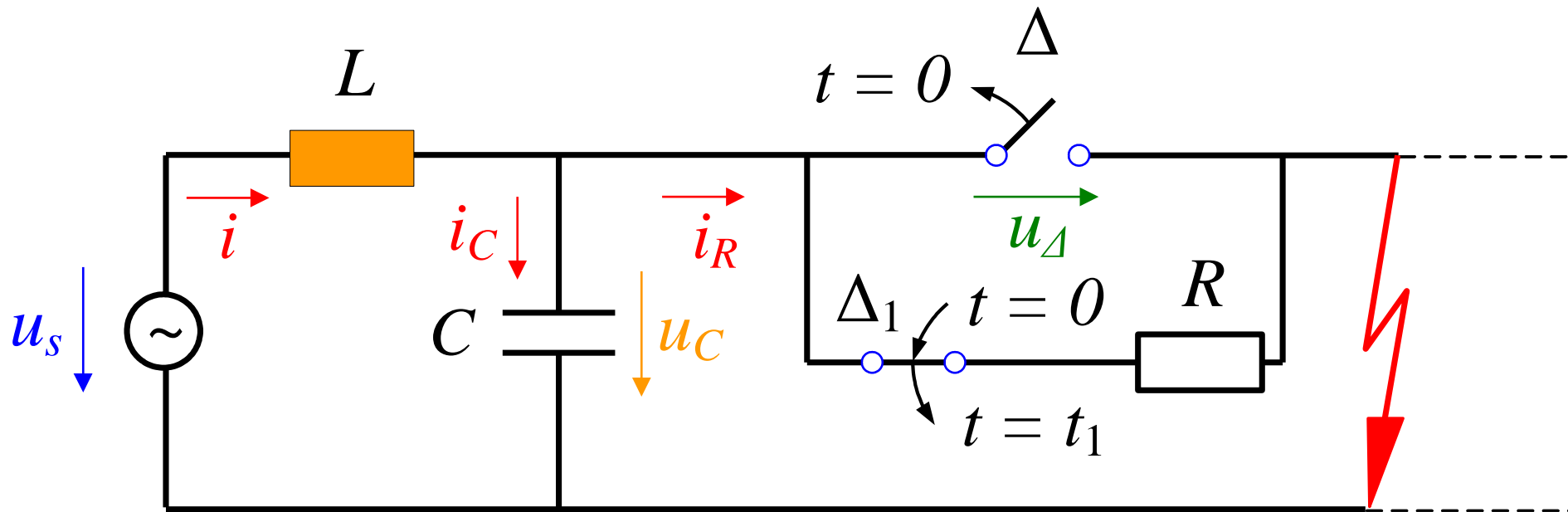
Η απόσβεση αυτή μπορεί να ενισχυθεί αν εισαγάγουμε **αντίσταση παράλληλα στον πυκνωτή C** (δηλαδή αν η **αντίσταση R** συνδεθεί **παράλληλα στο διακόπτη Δ**)

Η **απόζευξη με αντίσταση** (Resistance Switching) χρειάζεται στους περισσότερους διακόπτες ελαίου

Αντίθετα, οι διακόπτες αερίου παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερη αγωγιμότητα  $G_a$  του αερίου του διακένου και επομένως εισάγουν μεγαλύτερη αντίσταση και απόσβεση



## ΑΠΟΖΕΥΞΗ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ



Σχ.3.14: Ισοδύναμο κύκλωμα για τη μελέτη της απόζευξης σφάλματος το οποίο συμβαίνει στην αρχή γραμμής μεταφοράς, όταν χρησιμοποιείται αντίσταση  $R$  στο διακόπτη για τη απόζευξη της μεταβατικής συχνότητας (απόζευξη με αντίσταση)





$$i_C = C \frac{du_C}{dt}$$

$$i_R = \frac{u_C}{R}$$

$$i = i_C + i_R$$

$$i = C \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{R} u_C$$

$$\frac{di}{dt} = C \frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{du_C}{dt}$$



Τάση πηγής

$$u_s = \hat{u}_s \cos \omega t$$

**ΔΕ** ( $t > 0$ )

$$u_s = L \frac{di}{dt} + u_C$$

$$u_s = LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{du_C}{dt} + u_C$$



Η χαρακτηριστική εξίσωση της ομογενούς ΔΕ θα είναι

$$\xi^2 + \frac{1}{RC}\xi + \frac{1}{LC} = 0$$

με διακρίνουσα

$$D = \frac{1}{R^2 C^2} - \frac{4}{LC}$$



Υποκρίσιμη απόσβεση:  $D < 0 \Rightarrow$

$$R > \sqrt{\frac{L}{4C}}$$

Κρίσιμη απόσβεση:  $D = 0 \Rightarrow$

$$R = \sqrt{\frac{L}{4C}}$$

Υπερκρίσιμη απόσβεση:  $D > 0 \Rightarrow$

$$R < \sqrt{\frac{L}{4C}}$$



## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

- Η υπερκρίσιμη απόσβεση ελαττώνει ικανοποιητικά την επανερχόμενη τάση (ενώ η υποκρίσιμη απόσβεση περιέχει ταλαντώσεις)
- Μικρή αντίσταση  $R$  αντιστοιχεί σε **βραχυκύκλωμα**, όπως αυτό που θέλουμε να αποζεύξουμε. Επομένως η  $R$  πρέπει να είναι ταυτόχρονα μεγαλύτερη της αντίδρασης  $L\omega$ , δηλαδή

$$L\omega < R < \sqrt{\frac{L}{4C}}$$



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λαμπρίδης Δημήτρης.  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙΙ, ΖΕΥΞΕΙΣ, ΑΠΟΖΕΥΞΕΙΣ ΚΑΙ  
ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΙΙΙ». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015 Διαθέσιμο από τη  
δικτυακή διεύθυνση: [http://opencourses.auth.gr/eclass\\_courses](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

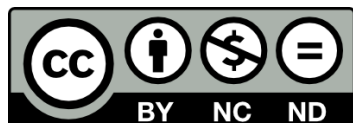
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα  
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2013-2014



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



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





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.

