



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Ηλεκτρονικά Ισχύος II

Ενότητα 1: Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή
(DC-DC Converters)

Δρ.-Μηχ. Εμμανουήλ Τατάκης, Καθηγητής
Πολυτεχνική Σχολή

Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών

Σκοποί ενότητας

- Παρουσίαση και επεξήγηση βασικών τοπολογιών των μετατροπέων συνεχούς τάσης σε συνεχή



Περιεχόμενα ενότητας

- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή με τρανζίστορ ισχύος (Buck, Boost, Buck/Boost).
- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή με θυρίστορ (Chopper)
- Ρύθμιση στροφών μηχανής συνεχούς ρεύματος με χρήση των ανωτέρω τοπολογιών



Διάλεξη 7η

Μετατροπέας ΣΤ-ΣΤ με θυρίστορ (Chopper) – Μέρος 1ο



ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ II

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΕΧΗ ΤΑΣΗ

(DC-DC Converters)

**Ο ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΤ-ΣΤ
ΜΕ ΘΥΡΙΣΤΟΡ
(CHOPPER)**

Μέρος 1^ο

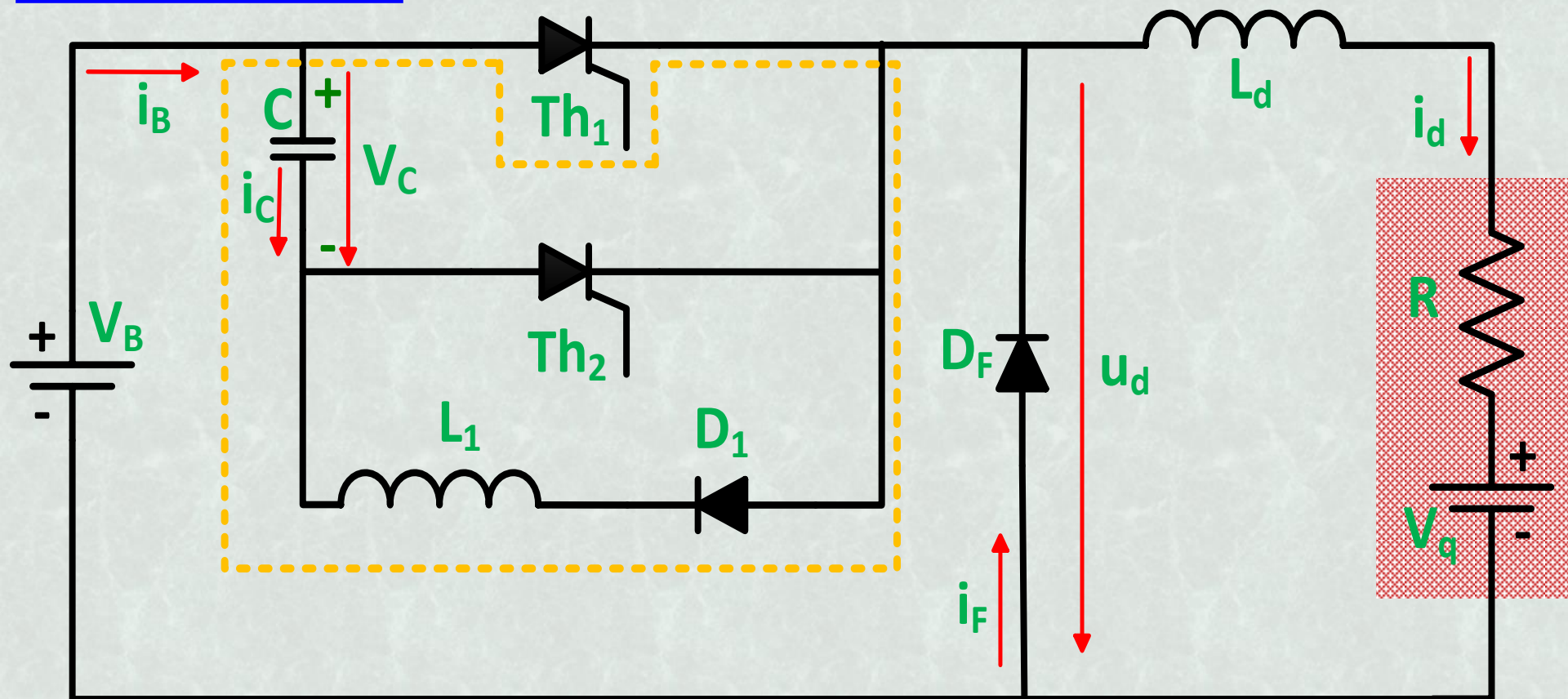


ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗΣ ΣΒΕΣΗΣ (Η ΑΥΤΟΟΔΗΓΟΥΜΕΝΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ)

- ❑ Είναι μεταγενέστερη κατηγορία μετατροπέων σε σχέση με τους μετατροπείς φυσικής σβέσης (ξένης οδήγησης).
- ❑ Η λειτουργία τους στηρίζεται στη φόρτιση και στην εκφόρτιση πυκνωτών που χρησιμοποιούνται για τη σβέση των Thyristors και καλούνται πυκνωτές σβέσης ή πυκνωτές μετάβασης.
- ❑ Δυνατότητες των μετατροπέων εξαναγκασμένης σβέσης:
 - Αμφίδρομη ροή ενέργειας
 - Μετατροπή τάσης, συχνότητας, αριθμού και σειράς φάσεων
- ❑ Ενδεικτικοί μετατροπείς αυτής της κατηγορίας:
 - **Chopper** (*αναλύεται στην παρούσα διάλεξη*)
 - Μονοφασικός Αντιστροφέας με Thyristor
 - Τριφασικός Αντιστροφέας με Thyristor



ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ Σ.Τ.-Σ.Τ. ΜΕ THYRISTOR (CHOPPER)



Κυκλωματικό διάγραμμα

Το Chopper είναι ένας μετατροπέας Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή Τάση (Σ.Τ.-Σ.Τ.), υποβιβασμού τάσης (BUCK), στον οποίο το κύριο ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο είναι το Thyristors.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

$\beta = \frac{t_B}{T_S}$: Σχετική διάρκεια παλμού (λόγος κατάτμησης)

t_B : Διάρκεια αγωγής του Th

T_S : Περίοδος παλμού

Th_1 : Κύριο Thyristor

Th_2 : Βοηθητικό Thyristor σβέσης

C : Πυκνωτής σβέσης

L_1 : Πηνίο επαναφόρτισης του πυκνωτή σβέσης

D_1 : Δίοδος επαναφόρτισης του πυκνωτή σβέσης

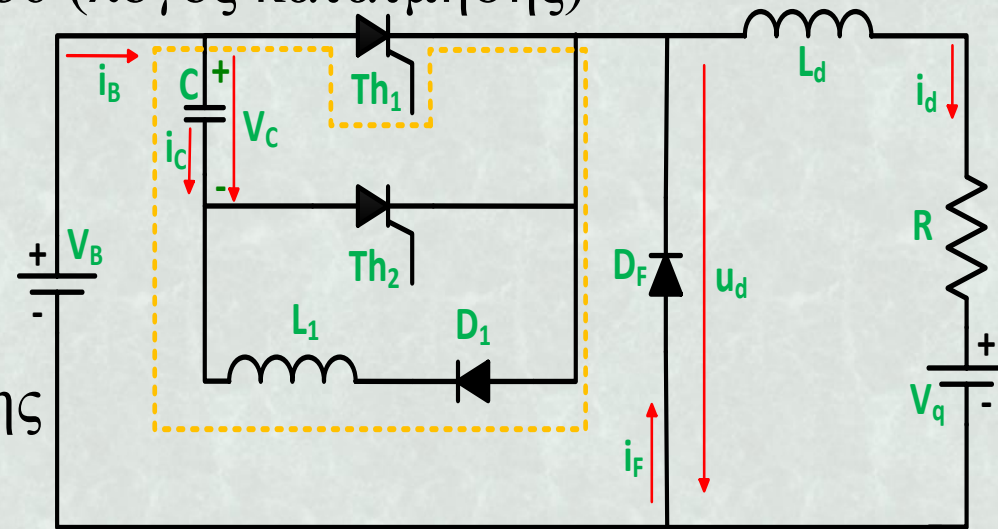
D_F : Δίοδος ελεύθερης διέλευσης

L_d : Πηνίο Εξομάλυνσης

V_B : Τάση εισόδου (τάση μπαταρίας)

R : Ωμική αντίσταση (φορτίο)

V_q : Συνεχής τάση καταναλωτή (πχ. Μηχανή Σ.Ρ.)



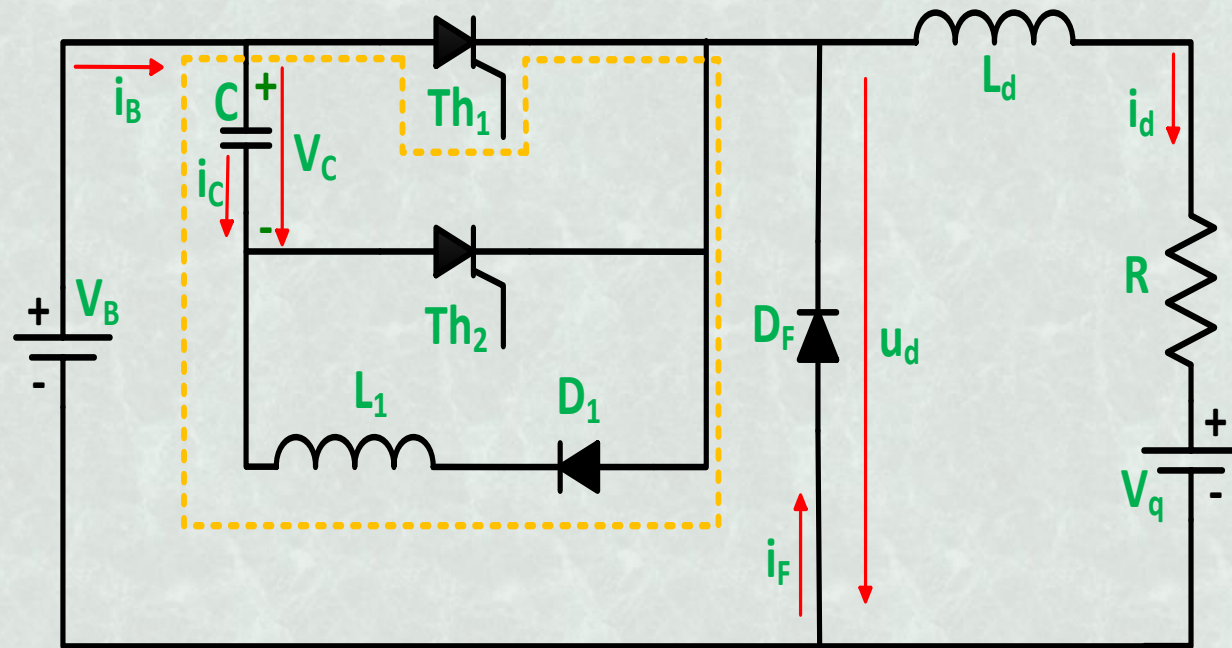
*Κυκλωματικό
διάγραμμα του
Chopper*



ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ CHOPPER

□ Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας

□ Τα στοιχεία του κυκλώματος θεωρούνται ιδανικά.



Κυκλωματικό διάγραμμα του Chopper

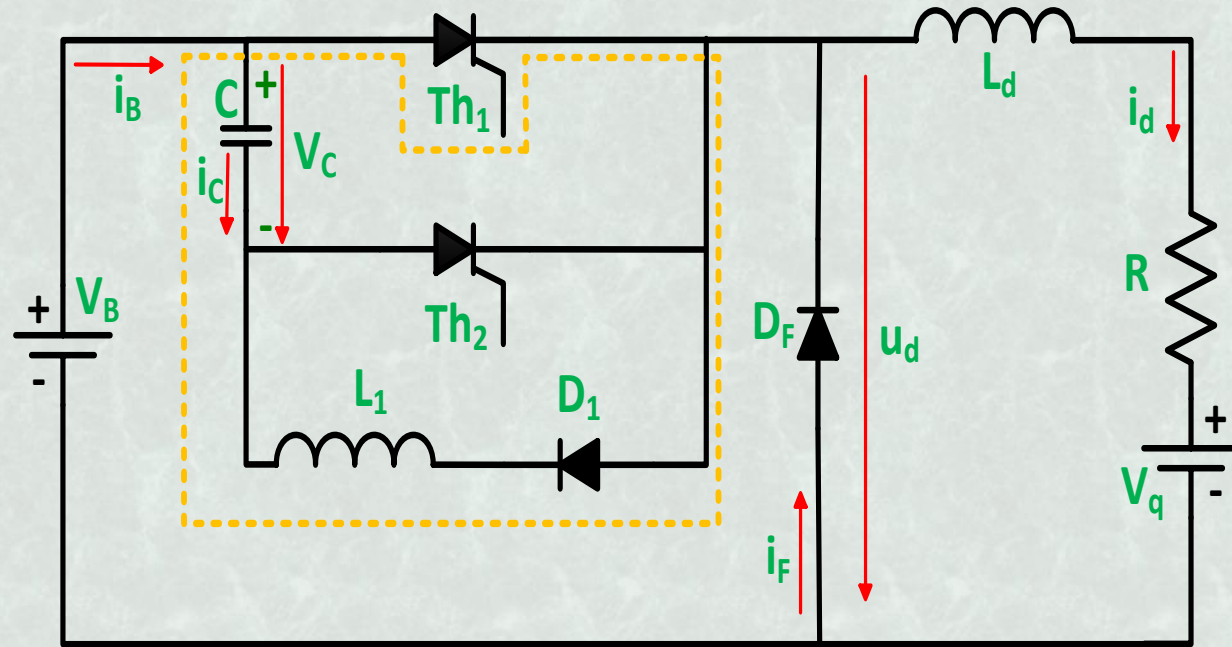
Δηλαδή:

- Μηδενική πτώση τάσης στα Thyristor Th_1 , Th_2 και στις διόδους D_1 και D_F .
- Τα L_1 , L_d και C είναι ιδανικά (*τι σημαίνει;*)

Επίσης, το L_d είναι πολύ μεγάλο, **ώστε το ρεύμα εξόδου I_d να θεωρείται χρονικά σταθερό** => λειτουργία σε CCM.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ CHOPPER

Πως μπορεί να επιτευχθεί, στην πράξη, η αρχική φόρτιση του πυκνωτή σβέσης;



Κυκλωματικό διάγραμμα του Chopper

Αρχικές Συνθήκες (πριν δώσουμε παλμό στο $Th1$!):

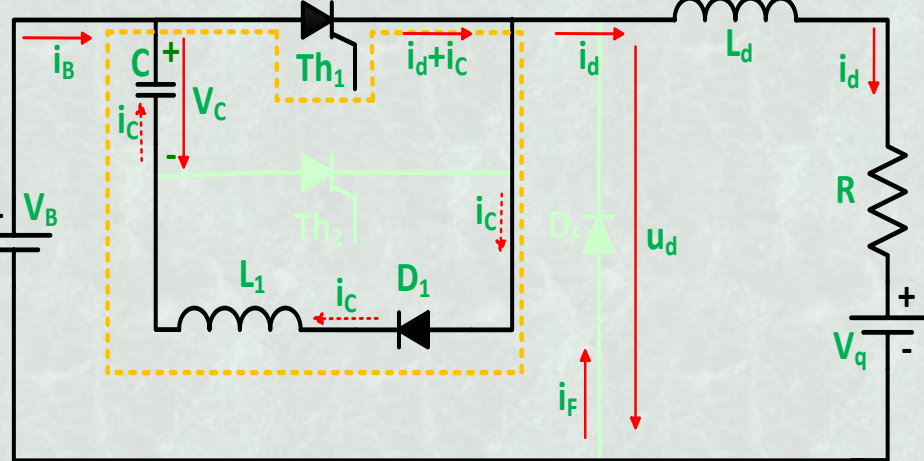
- Ο πυκνωτής C φορτισμένος με τάση $V_C = V_B$
- Η D_F άγει, δηλαδή: $i_F = I_d$, $u_d = 0$, $i_B = 0$
- **Υπάρχει, οπωσδήποτε φορτίο στην έξοδο**

Η παλμοδότηση του κυκλώματος είναι η ακόλουθη:

- Κάθε $t = k \cdot T_s$ ανάβει το Th_1 και
- Κάθε $t = k \cdot T_s + t_B$ ανάβει το Th_2 για $k=0,1,2,\dots$

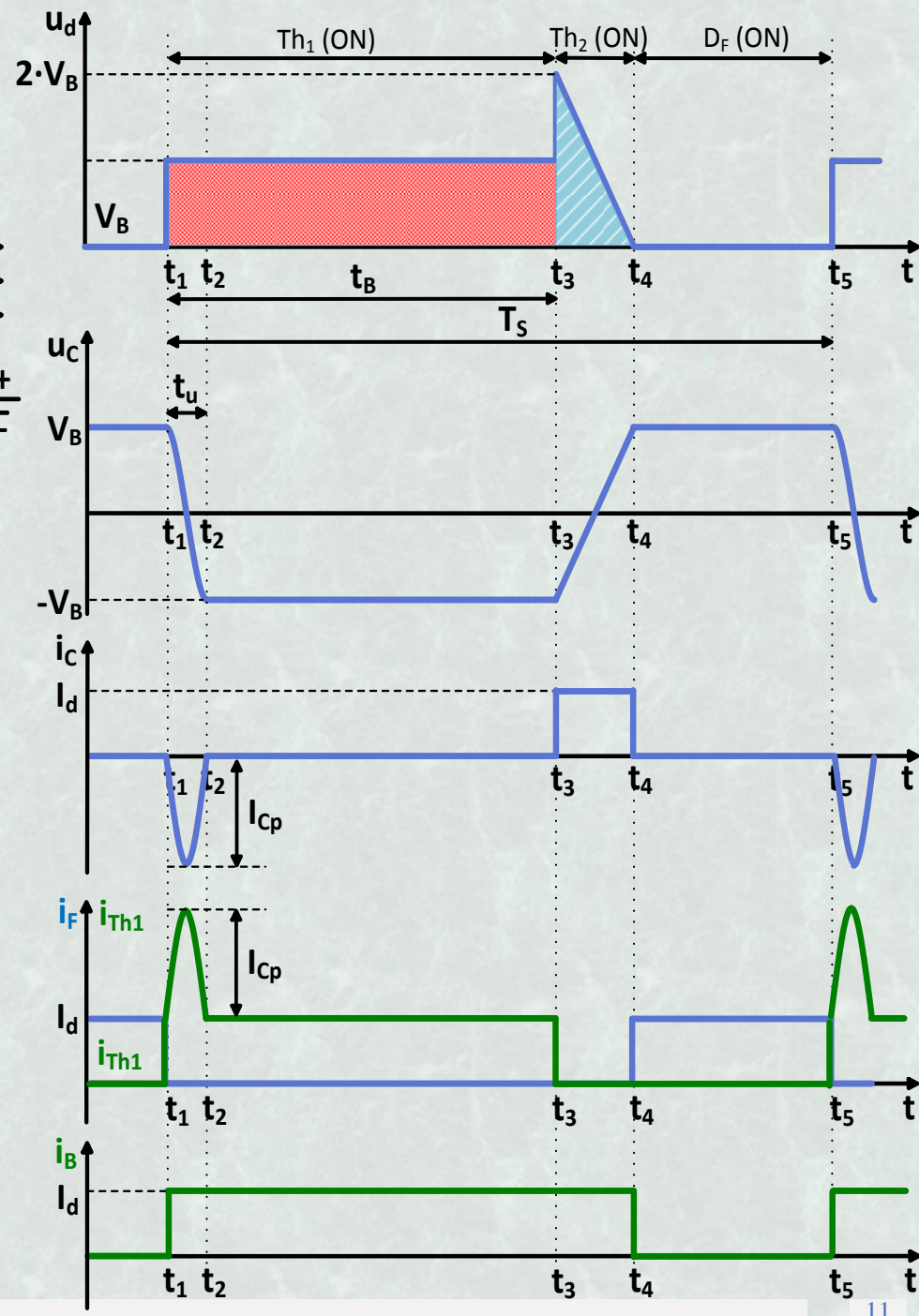


Διάστημα $t_1 \leq t \leq t_3$



Διάστημα αγωγής Th1

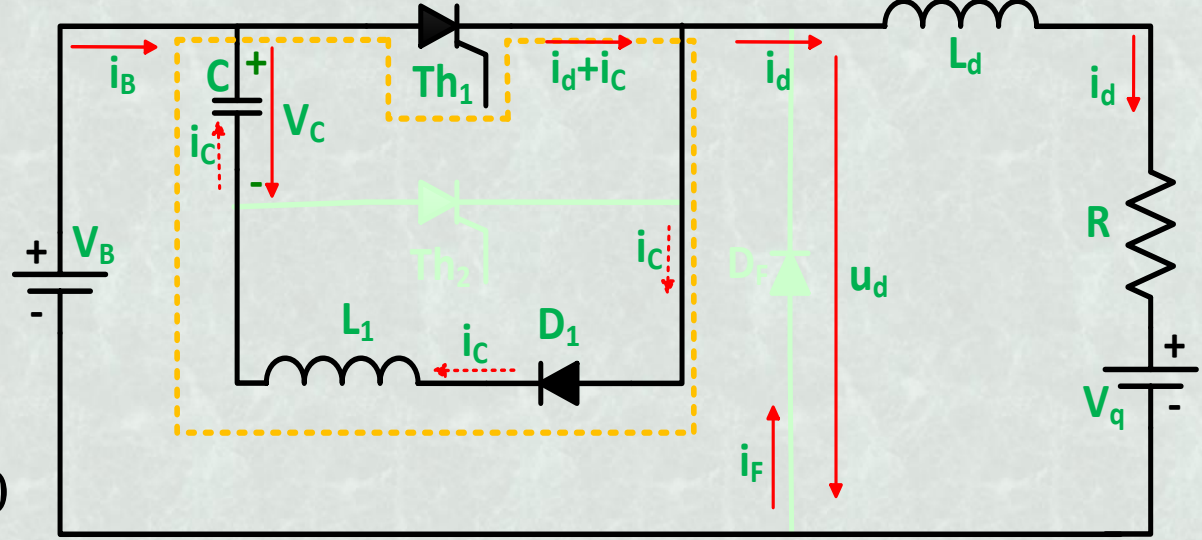
- Στο $t=t_1$, ανάβει το Th_1 , οπότε $u_d=V_B$ & $i_B=I_d$.
- Η D_F πολώνεται ανάστροφα και δεν άγει ($i_F=0$).
- Ο πυκνωτής C εκφορτίζεται, μέσω των στοιχείων Th_1 , L_1 και D_1 και στη συνέχεια φορτίζεται με αντίθετη πολικότητα (διάστημα t_u).



Διάστημα $t_1 \leq t \leq t_3$

Δηλαδή έχουμε ένα κύκλωμα ελεύθερης ταλάντωσης L_1 - C :

$$\frac{d^2 Q_C(t)}{dt^2} - \frac{1}{L_1 \cdot C} \cdot Q_C(t) = 0$$



Διάστημα αγωγής Th1

Άρα για το διάστημα $t_1 \leq t \leq t_2$ ($t_2 - t_1 = t_u = \pi/\omega$) έχουμε:

☐ Φορτίο πυκνωτή: $Q_C(t) = C \cdot V_B \cdot \cos \omega t$, όπου: $\omega = 1/\sqrt{L_1 \cdot C}$

☐ Ρεύμα πυκνωτή: $i_c(t) = \frac{dQ_C(t)}{dt} = -\omega \cdot C \cdot V_B \cdot \sin \omega t$

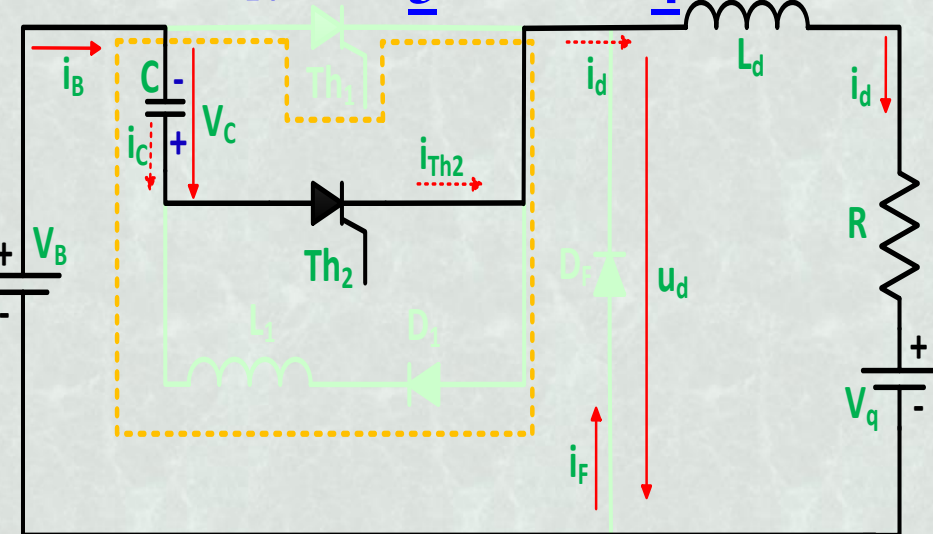
☐ Συνεπώς: $I_{Cp} = \omega \cdot C \cdot V_B = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C}} \cdot C \cdot V_B = \frac{V_B}{\sqrt{L_1/C}} = \frac{V_B}{Z_{char}}$

Από $t_2 \leq t \leq t_3$ (δηλαδή ως ότου τεθεί σε αποκοπή το Th_1 , $t_3 - t_1 = t_B$):

$i_c(t) = 0$, $Q_C(t) = -C \cdot V_B$, $U_C(t) = -V_B$, και $i_{Th1}(t) = I_d$ **ΓΙΑΤΙ;**



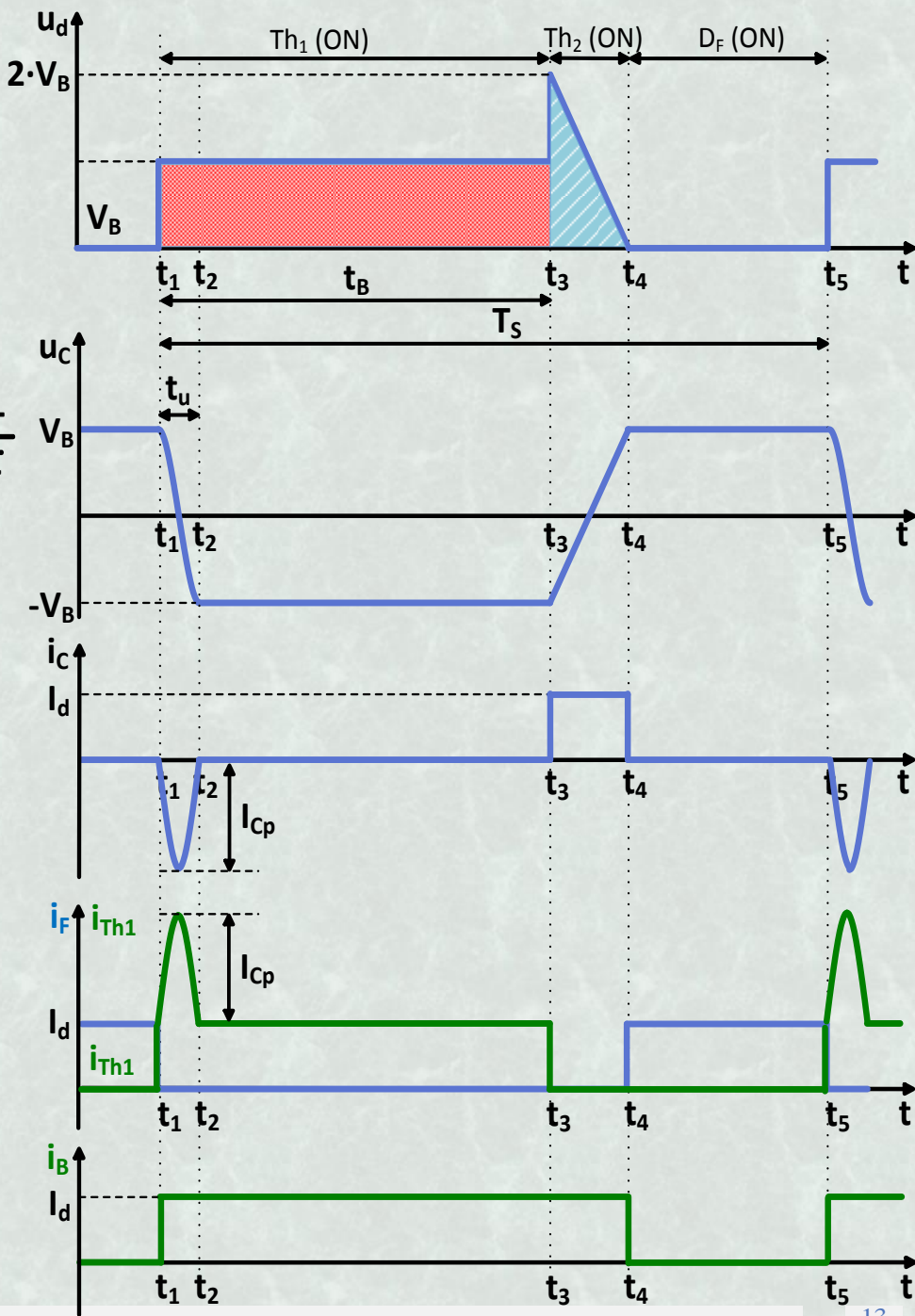
Διάστημα $t_3 \leq t \leq t_4$



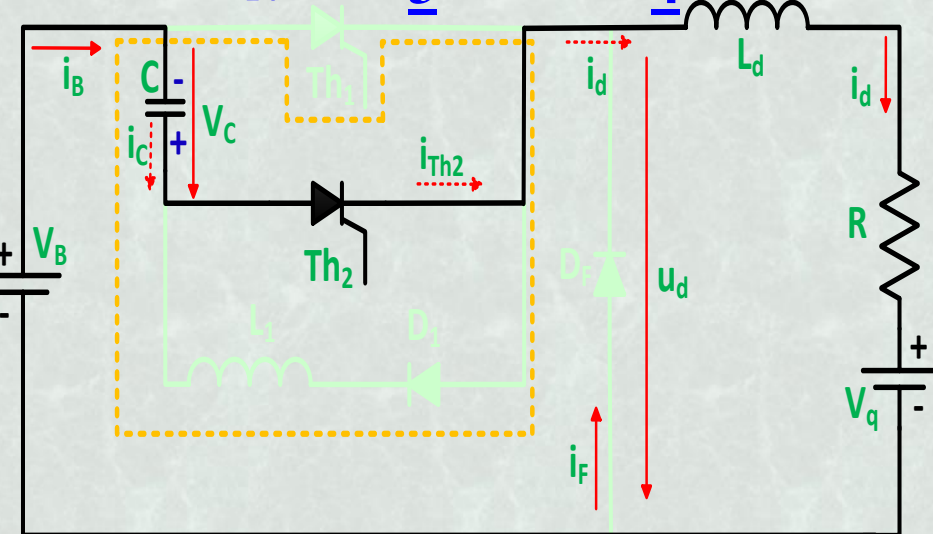
Διάστημα αγωγής Th2

- ❑ **Τη χρονική στιγμή $t=t_3$ ανάβει το Th_2 , οπότε σβήνει το Th_1 και $u_d=2 \cdot V_B$ & $i_B=i_d$.**
- ❑ Η τάση του πυκνωτή σβέσης εφαρμόζεται στα άκρα του Th_1 , με αποτέλεσμα να το σβήσει αμέσως ($i_{Th1}=0$).
- ❑ **Πρέπει πάντα $t_3-t_1=t_B \geq \pi/\omega$.**

Γιατί;

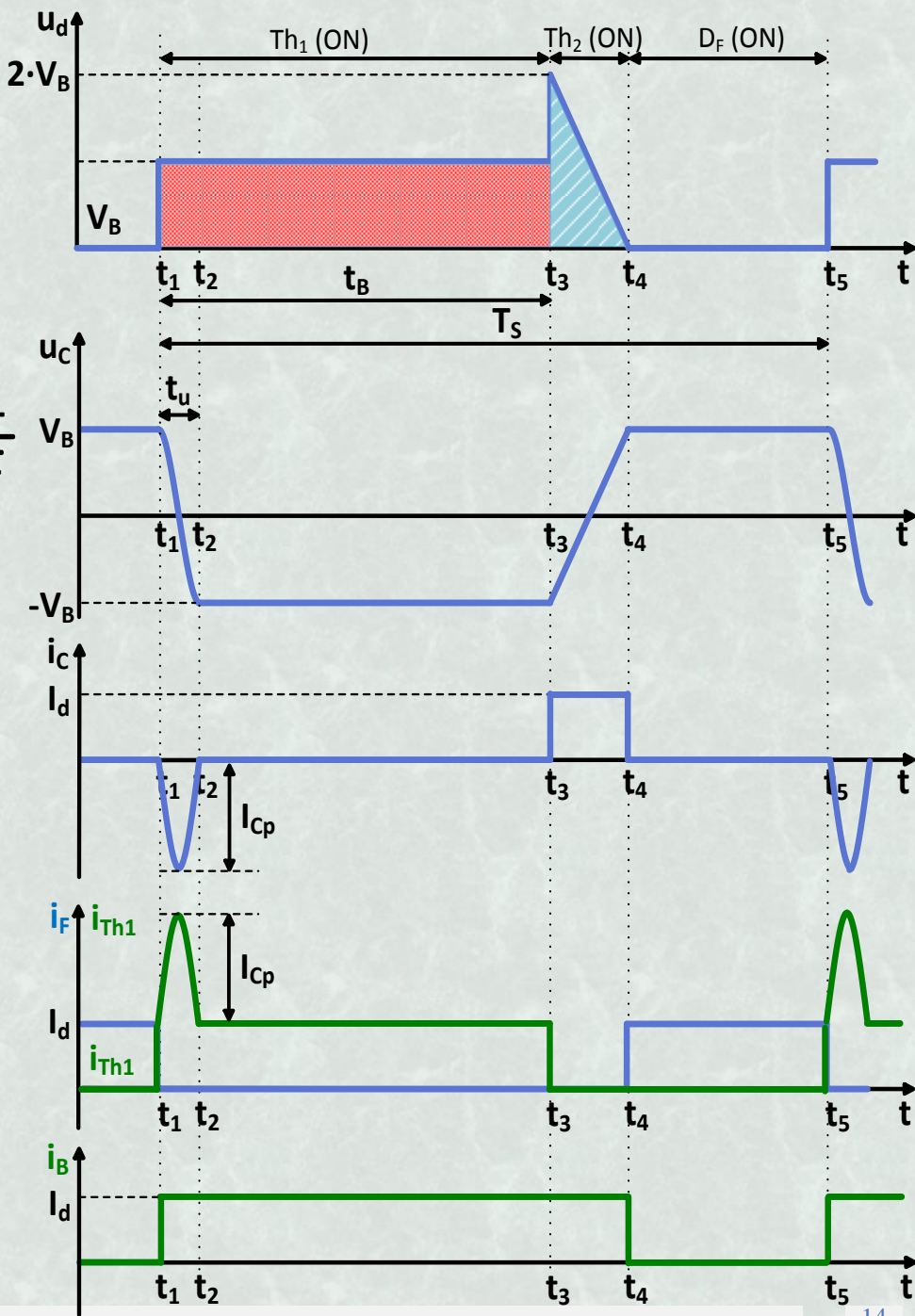


Διάστημα $t_3 \leq t \leq t_4$



Διάστημα αγωγής Th2

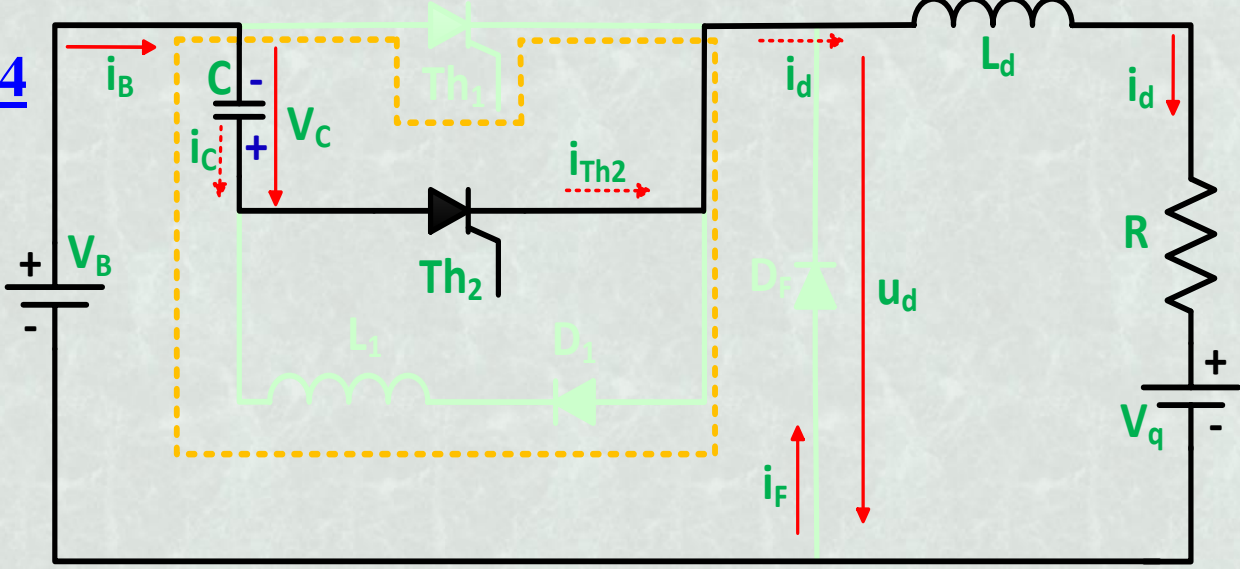
- Η D_F παραμένει ανάστροφα πολωμένη και δεν άγει ($i_F=0$).
- Ο πυκνωτής C εκφορτίζεται, γραμμικά (*γιατί;*) μέσω των στοιχείων V_B , Th_2 , L_d και του φορτίου και μετά φορτίζεται με αντίθετη πολικότητα (διάστημα $2 \cdot t_d$), ως $u_d(t_4)=0$ (*γιατί;*).



Διάστημα $t_3 \leq t \leq t_4$

Τη χρονική στιγμή t_4 η τάση $u_d(t)$ γίνεται μηδέν και τείνει να γίνει αρνητική.

Οπότε, θα αρχίσει να άγει η διάοδος D_F .



Διάστημα αγωγής Th2

Άρα για το διάστημα $t_3 \leq t \leq t_4$ ($t_4 - t_3 = 2 \cdot t_d$) έχουμε:

❑ Φορτίο πυκνωτή: $Q_C(t) = -C \cdot V_B + I_d \cdot (t - t_3)$

❑ Ρεύμα πυκνωτή: $i_C(t) = I_d$

Τη χρονική στιγμή t_4 $Q_C(t_4) = C \cdot V_B$. Συνεπώς: $t_4 - t_3 = 2 \cdot t_d = \frac{2 \cdot C \cdot V_B}{I_d}$

ΠΡΟΣΟΧΗ

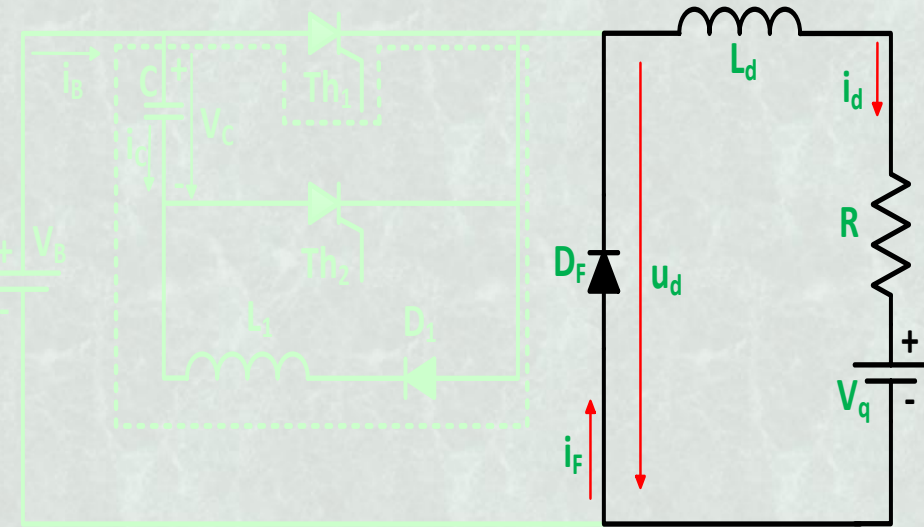
Τα θυρίστορ αποκτούν **ικανότητα θετικής αποκοπής** μετά από χρόνο **t_F (χρόνος ανάστροφης ανάκτησης)**.

Επομένως, θα πρέπει η τάση του Th_1 να παραμένει αρνητική για χρόνο μεγαλύτερο από t_F . Συνεπώς:

$$t_F \leq t_d = \frac{C \cdot V_B}{I_d}$$

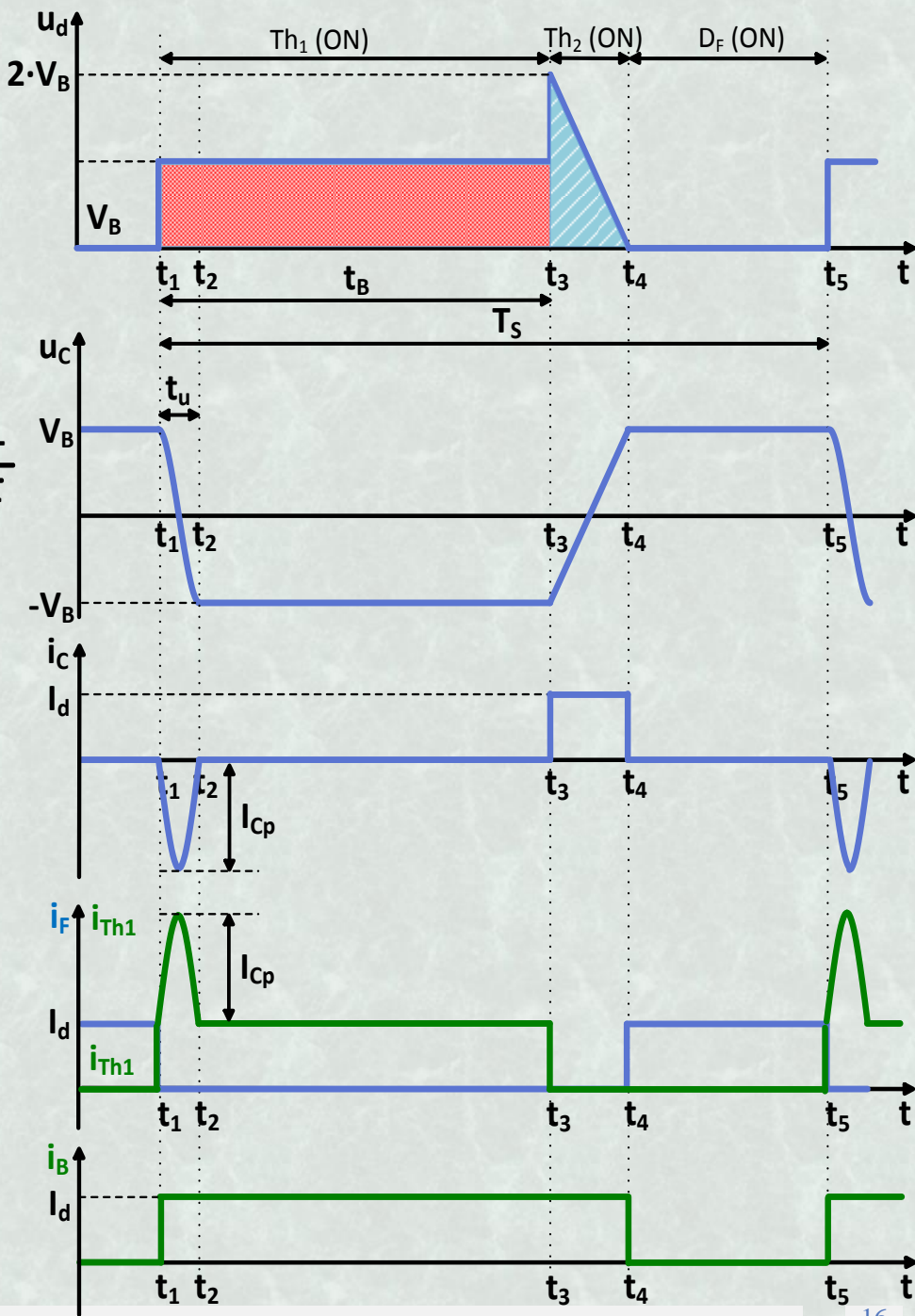


Διάστημα $t_4 \leq t \leq t_5$

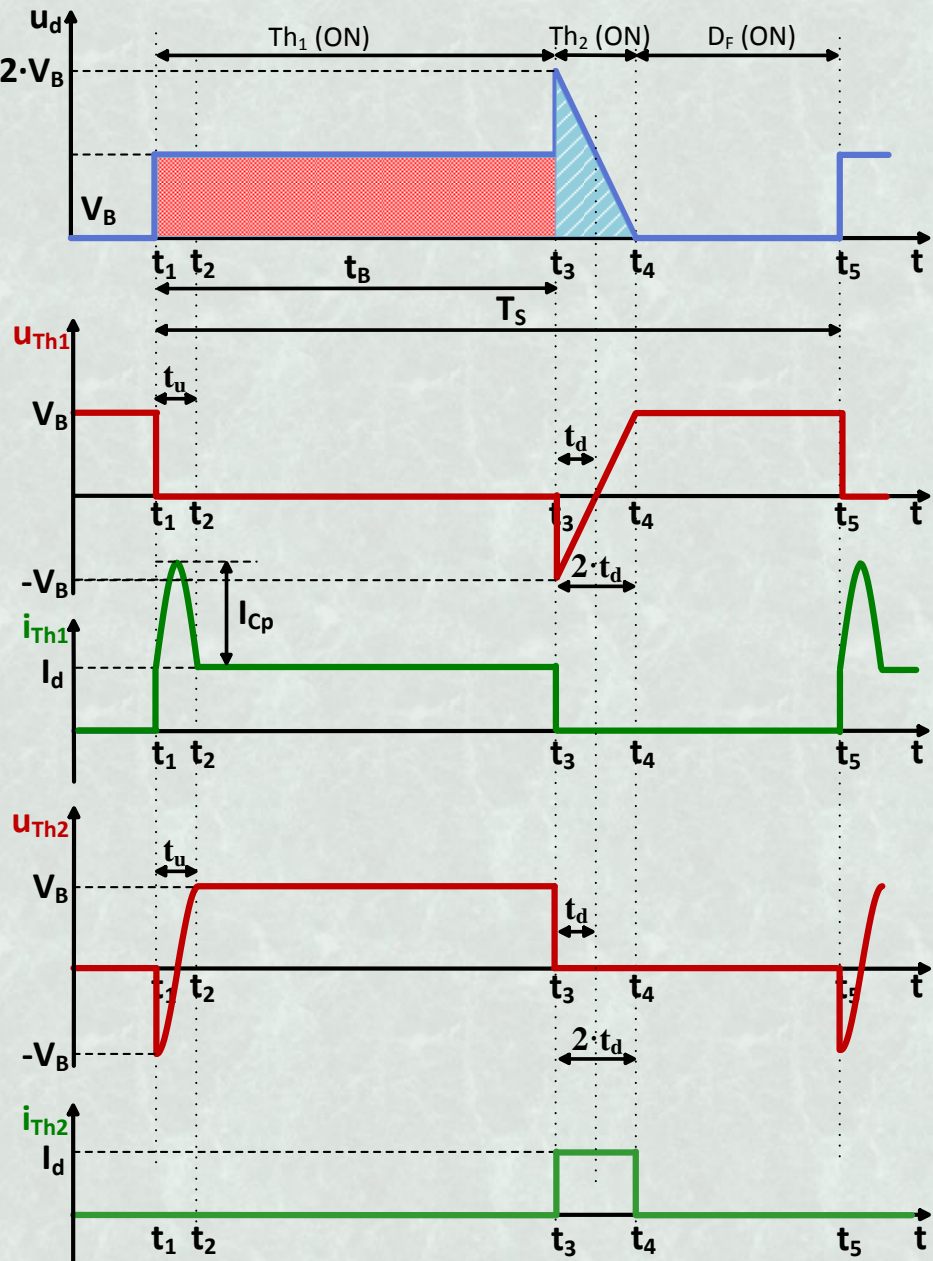
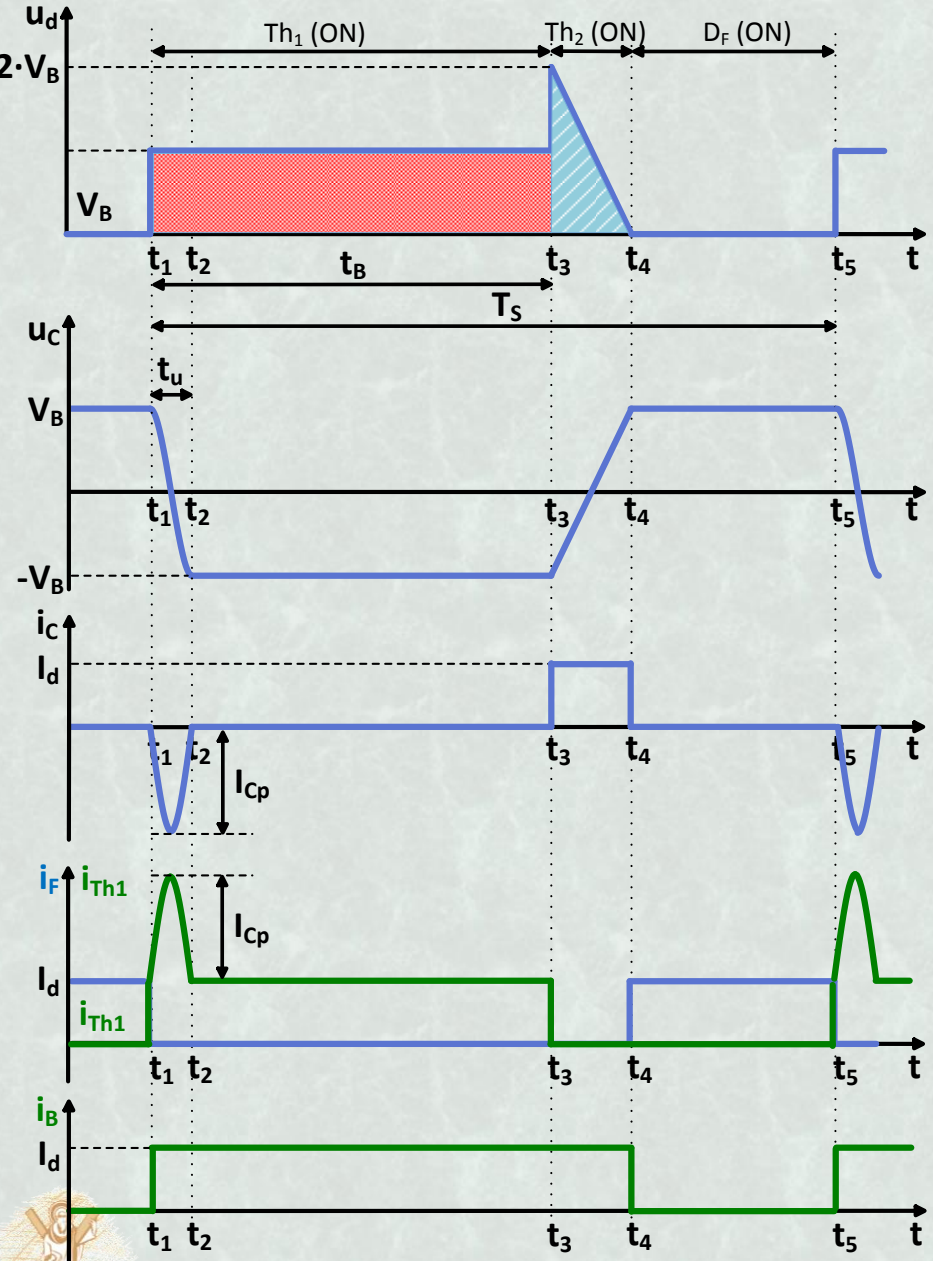


Διάστημα αγωγής D_f

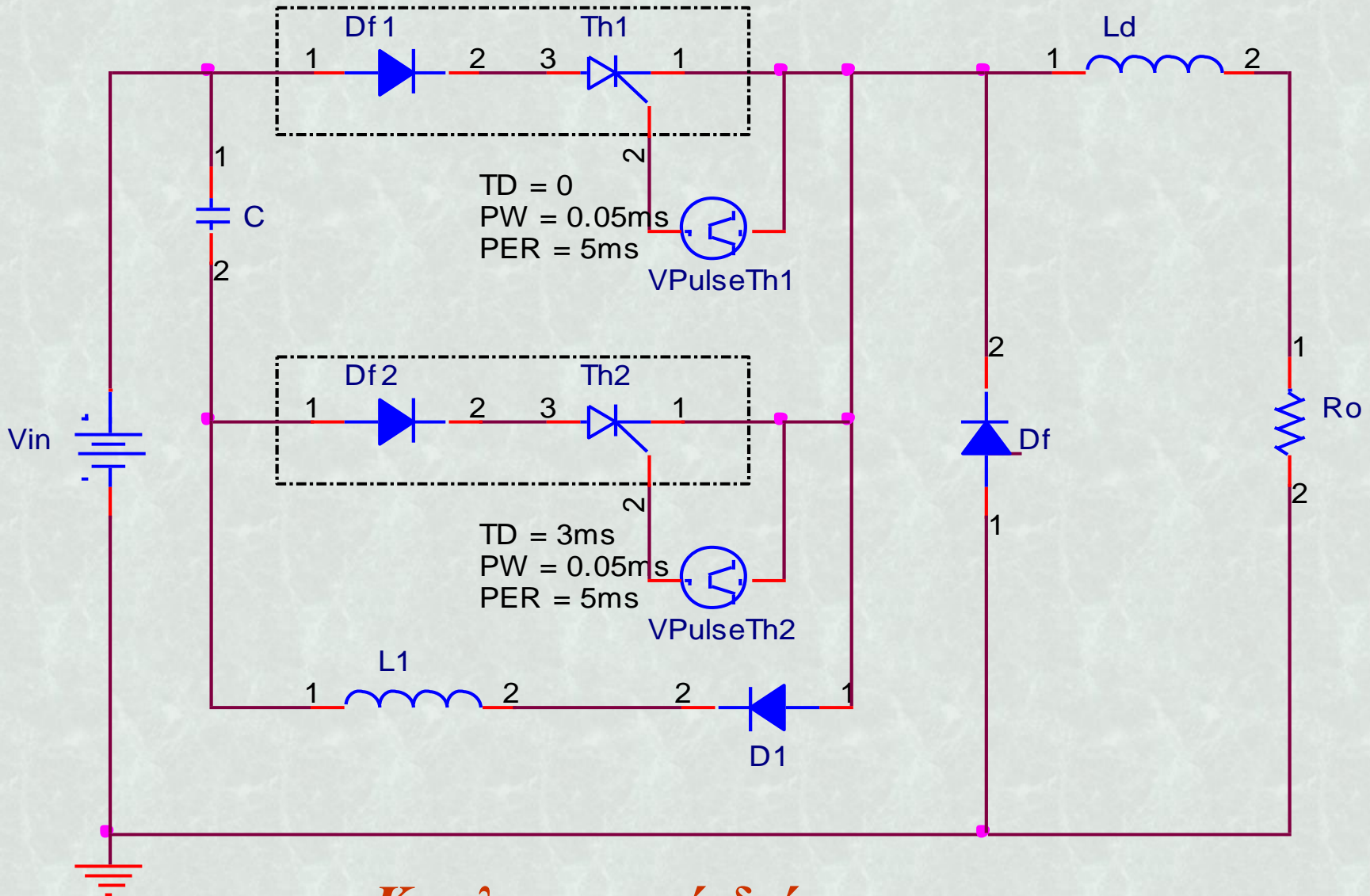
□ Η δίοδος D_F άγει και διαρρέεται από το ρεύμα εξόδου I_d , έως ότου ξαναδοθεί παλμός έναυσης στο θυρίστορ Th_1 (χρονική στιγμή t_5).



Σημαντικότερες κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων



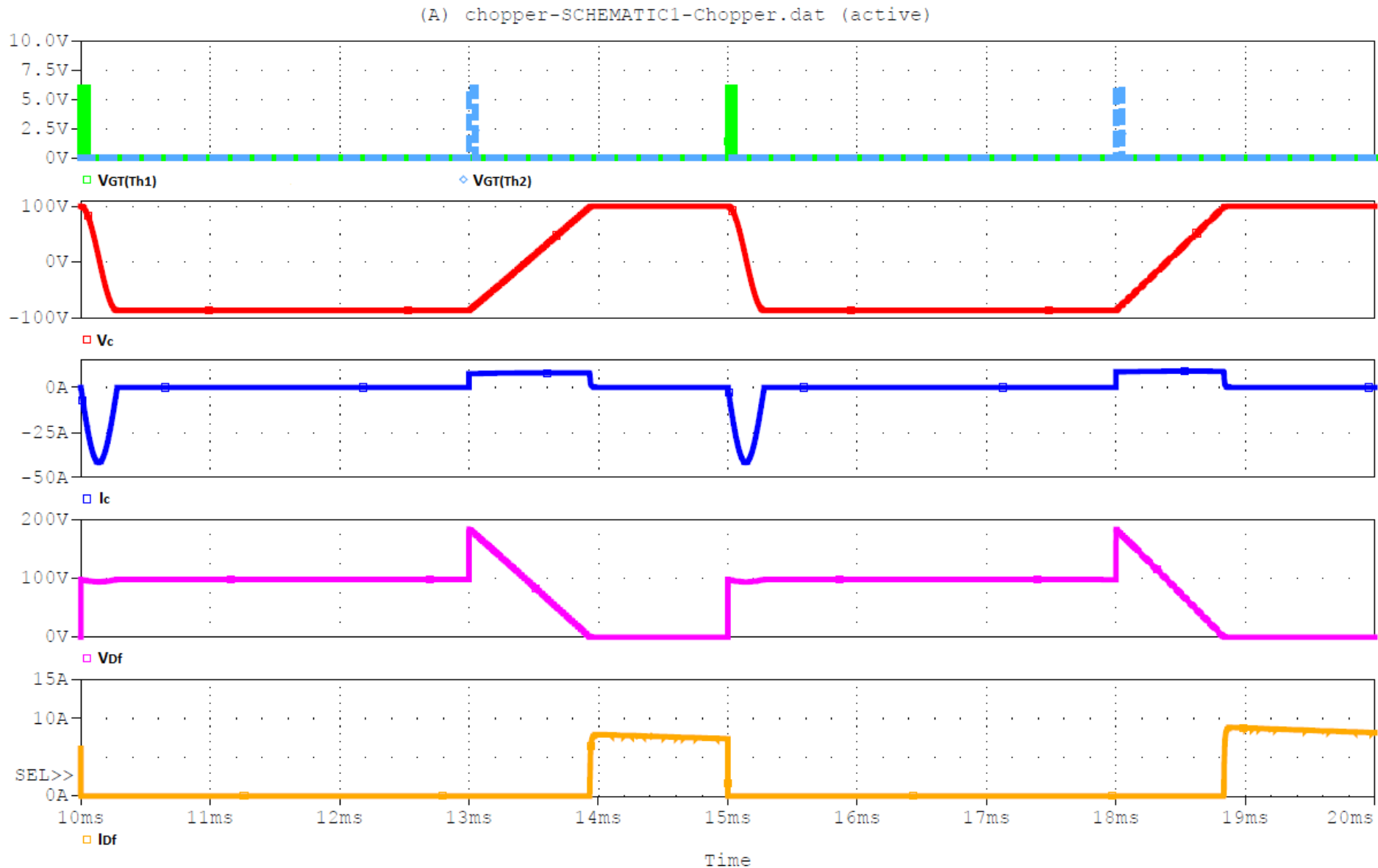
Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Pspice, του Chopper



Κυκλωματικό διάγραμμα



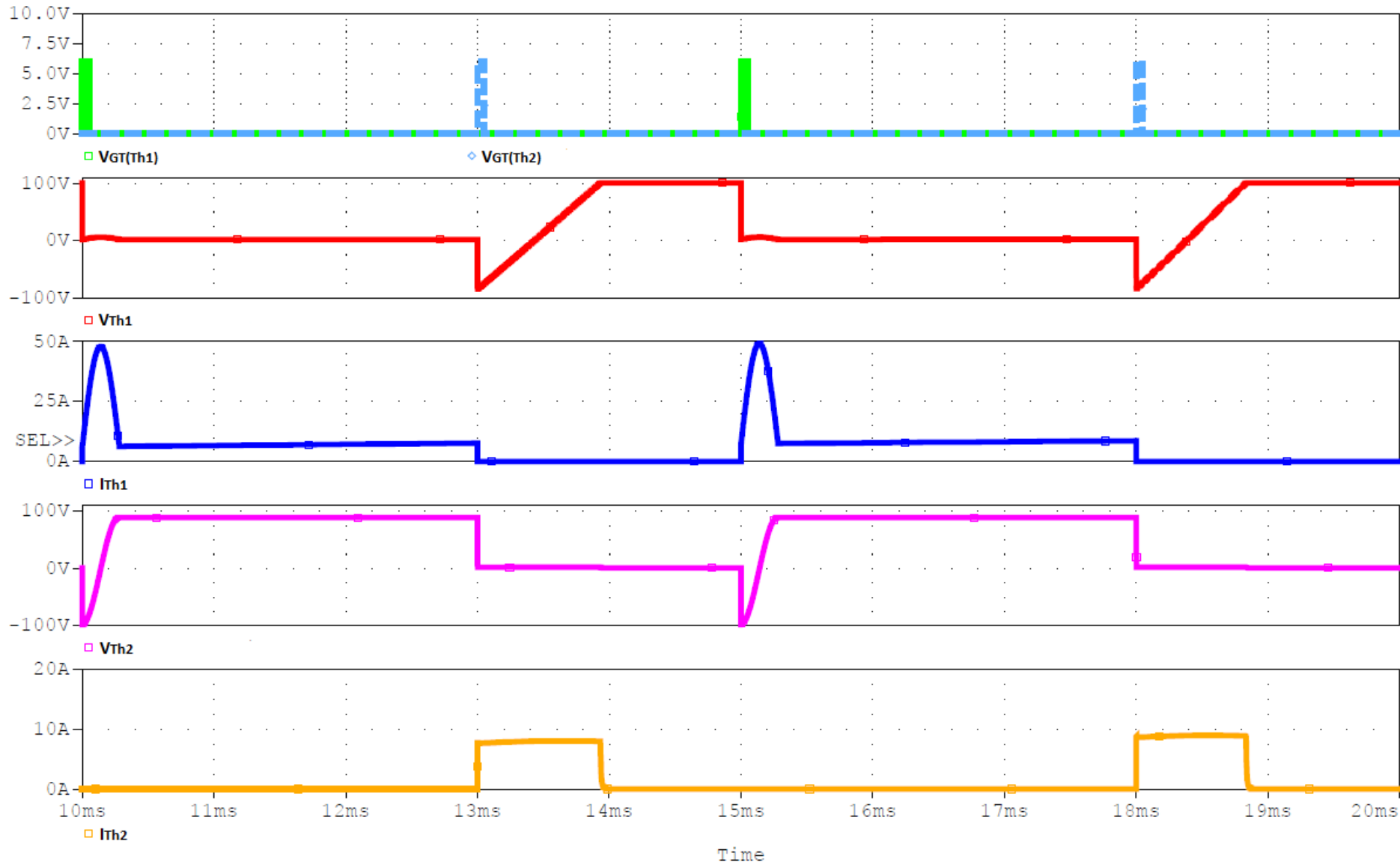
Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Pspice, του Chopper



Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων των στοιχείων

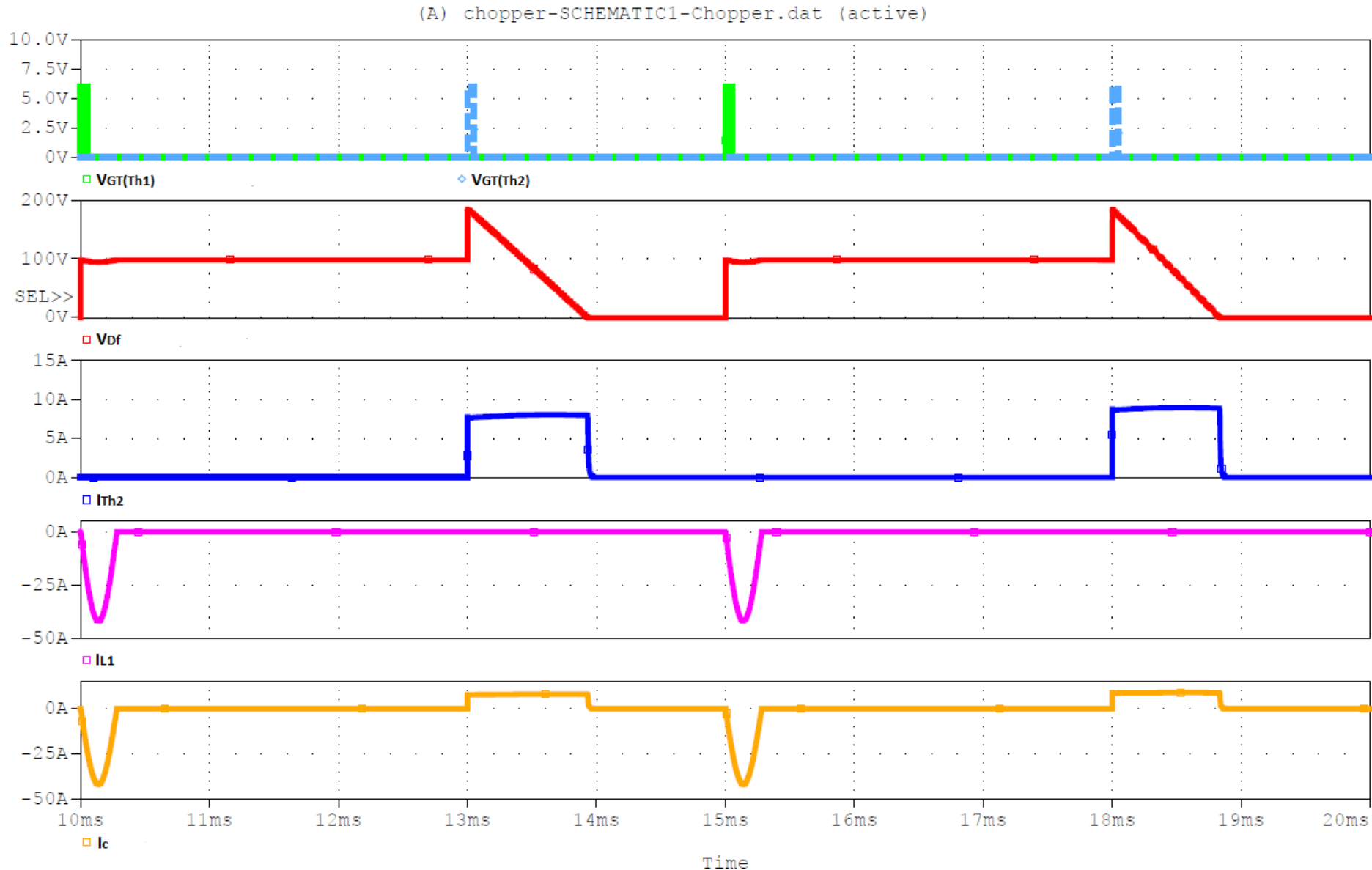
Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Pspice, του Chopper

(A) chopper-SCHEMATIC1-Chopper.dat (active)



Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων των στοιχείων

Προσομοίωση, με το πρόγραμμα Pspice, του Chopper



Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων των στοιχείων

Επιπλέον σχέσεις για το Chopper

➤ Η μέση τιμή της τάσης u_d είναι:

$$V_d = \overline{u_d(t)} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_d(t) dt = V_B \cdot \frac{t_B}{T_s} + 2 \cdot V_B \cdot \frac{t_d}{T_s} = V_B \cdot \left(\beta + \frac{2 \cdot t_d}{T_s} \right)$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{V_d}{V_B} = \beta + \frac{2 \cdot t_d}{T_s}} \quad \text{Επίσης: } V_d = R \cdot I_d + V_q$$

Αντικαθιστώντας στις παραπάνω σχέσεις $2 \cdot t_d = \frac{2 \cdot C \cdot V_B}{I_d}$ προκύπτει:

$$\beta = \frac{R \cdot I_d}{V_B} - \frac{2 \cdot C \cdot V_B}{I_d \cdot T_s} + \frac{V_q}{V_B}$$

➤ Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς το ρεύμα εξόδου, προκύπτει:

$$I_d = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\beta \cdot V_B - V_q)}{R} \cdot \left[1 + \sqrt{1 + 8 \cdot \frac{R \cdot C}{T_s} \cdot \left[\frac{V_B}{\beta \cdot V_B - V_q} \right]^2} \right]$$



Επιπλέον σχέσεις για το Chopper

- Η ενεργός τιμή του ρεύματος εισόδου είναι:

$$I_{B,rms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_B^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot I_d^2 (t_B + 2t_d)} = I_d \sqrt{\beta + \frac{2t_d}{T_s}}$$

- Η φαινομένη ισχύς εισόδου είναι:

$$P_{B,\Phi\alpha\iota\nu} = V_B \cdot I_{B,rms} = V_B \cdot I_d \cdot \sqrt{\beta + \frac{2 \cdot t_d}{T_s}}$$

- Η ενεργός ισχύς εισόδου προκύπτει:

$$P_{B,Ev} = V_B \cdot \overline{i_B(t)} = V_B \cdot I_B = V_B \cdot I_d \cdot \frac{t_B + 2t_d}{T_s} = V_B \cdot I_d \cdot \left(\beta + \frac{2 \cdot t_d}{T_s}\right) = V_d \cdot I_d$$

- Ο συντελεστής ισχύος είναι: $\lambda = \frac{P_{B,Ev}}{P_{B,\Phi\alpha\iota\nu}} = \sqrt{\beta + \frac{2 \cdot t_d}{T_s}}$

- Τέλος, επειδή συχνά έχουμε: $2t_d / T_s \ll 1$ τότε:

$$I_{B,Ev} \approx I_d \cdot \sqrt{\beta}, \quad P_{B,\Phi\alpha\iota\nu} \approx V_B \cdot I_d \cdot \sqrt{\beta}, \quad P_{B,Ev} \approx V_B \cdot I_d \cdot \beta, \quad \lambda \approx \sqrt{\beta}$$



Τέλος Διάλεξης



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την 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.



Σημειώματα



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Εμμανουήλ Τατάκης 2014. Εμμανουήλ Τατάκης. «Ηλεκτρονικά Ισχύος II. Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.upatras.gr/courses/EE898/>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 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».



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

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

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



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Οι εικόνες των διαλέξεων δημιουργήθηκαν από τους κ. Τατάκη Εμμανουήλ, Συρίγο Στυλιανό στα πλαίσια του έργου «Ανοικτά ακαδημαϊκά μαθήματα Πανεπιστημίου Πατρών» εκτός κι αν αναφέρεται διαφορετικά παρακάτω:



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.

