



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές

Ενότητα 3: Διακοπτικές απώλειες και κυκλώματα προστασίας
ημιαγωγικών στοιχείων

Δρ.-Μηχ. Εμμανουήλ Τατάκης, Καθηγητής

Πολυτεχνική Σχολή

Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας

Υπολογιστών

Σκοποί ενότητας

- Κατανόηση των αποτελεσμάτων των διακοπτικών απωλειών
- Κατανόηση των διαφόρων τοπολογιών για προστασία ή ομαλή έναυση σβέση των ημιαγωγικών στοιχείων των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος



Περιεχόμενα ενότητας

- Υπολογισμός διακοπτικών απωλειών
- Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας στοιχείου
- Σύγκριση γραμμικών και διακοπτικών τροφοδοτικών
- Παθητικά και ενεργά κυκλώματα υποβοήθησης έναυσης σβέσης





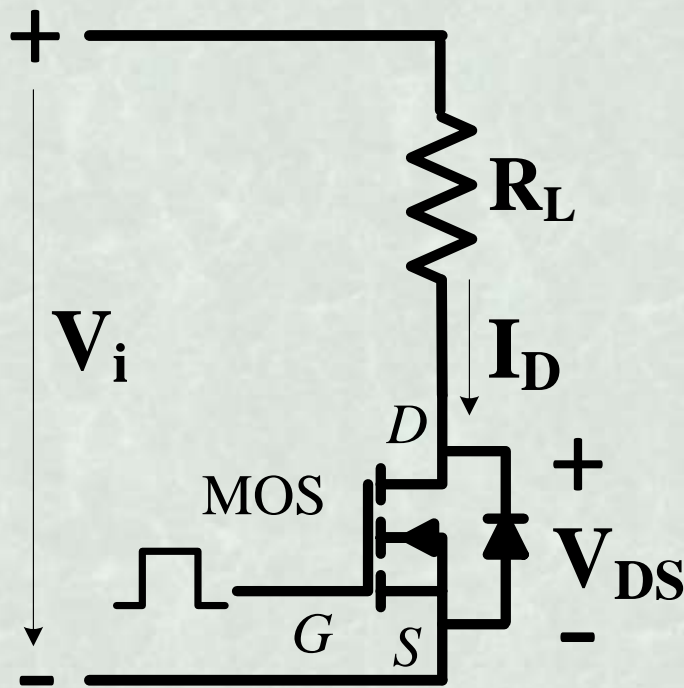
Διακοπτικές απώλειες, υπερτάσεις,
ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και
σύγκριση τροφοδοτικών ΣΤ-ΣΤ

Διακοπτικές απώλειες

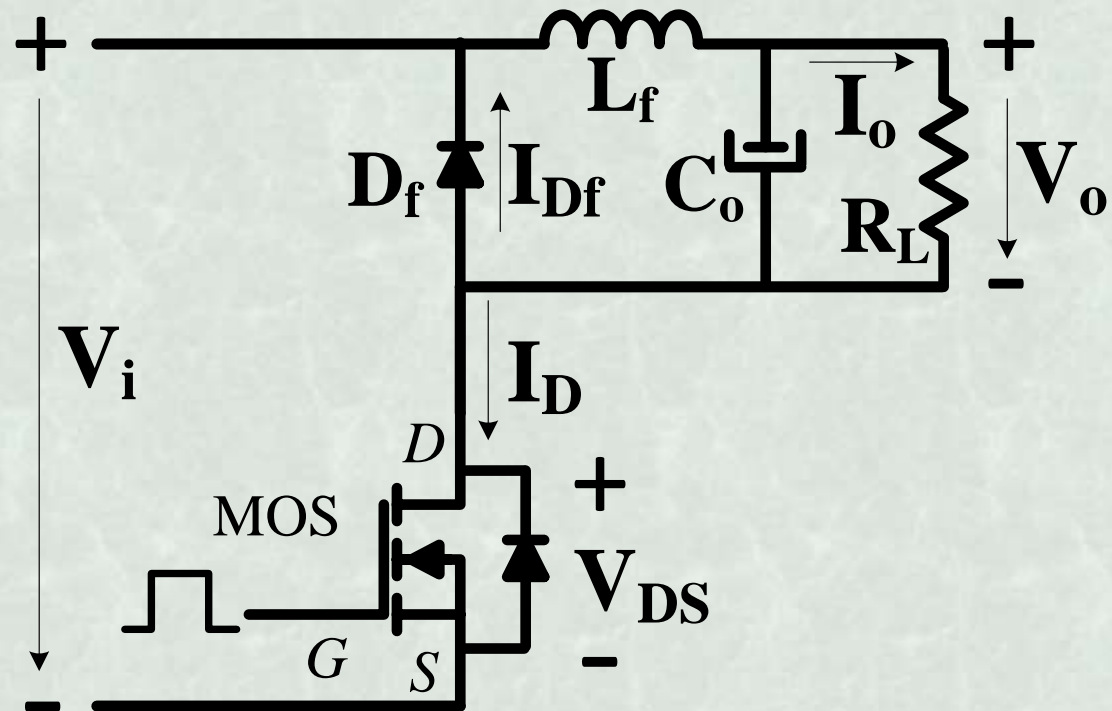
- Είναι οι απώλειες που εμφανίζονται κατά την έναυση και τη σβέση ενός ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος.
- Ανάλυση σε δύο κυκλώματα:

❖ Κύκλωμα με ωμικό φορτίο.

❖ Μετατροπέας ΣΤ σε ΣΤ.



Κύκλωμα με ωμικό φορτίο

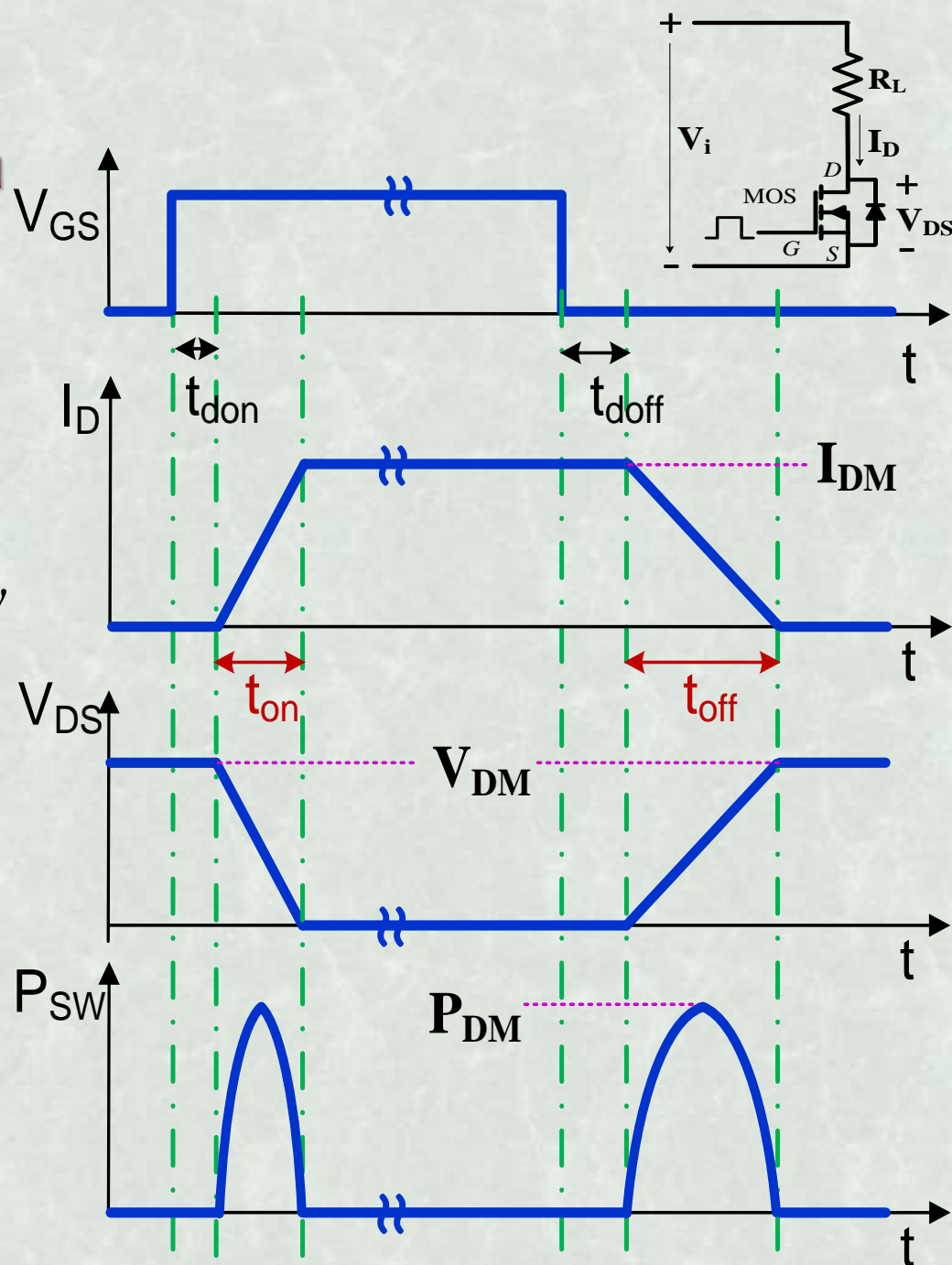


Μετατροπέας ΣΤ σε ΣΤ

Διακοπτικές απώλειες

Κύκλωμα με ωμικό φορτίο - έναυση

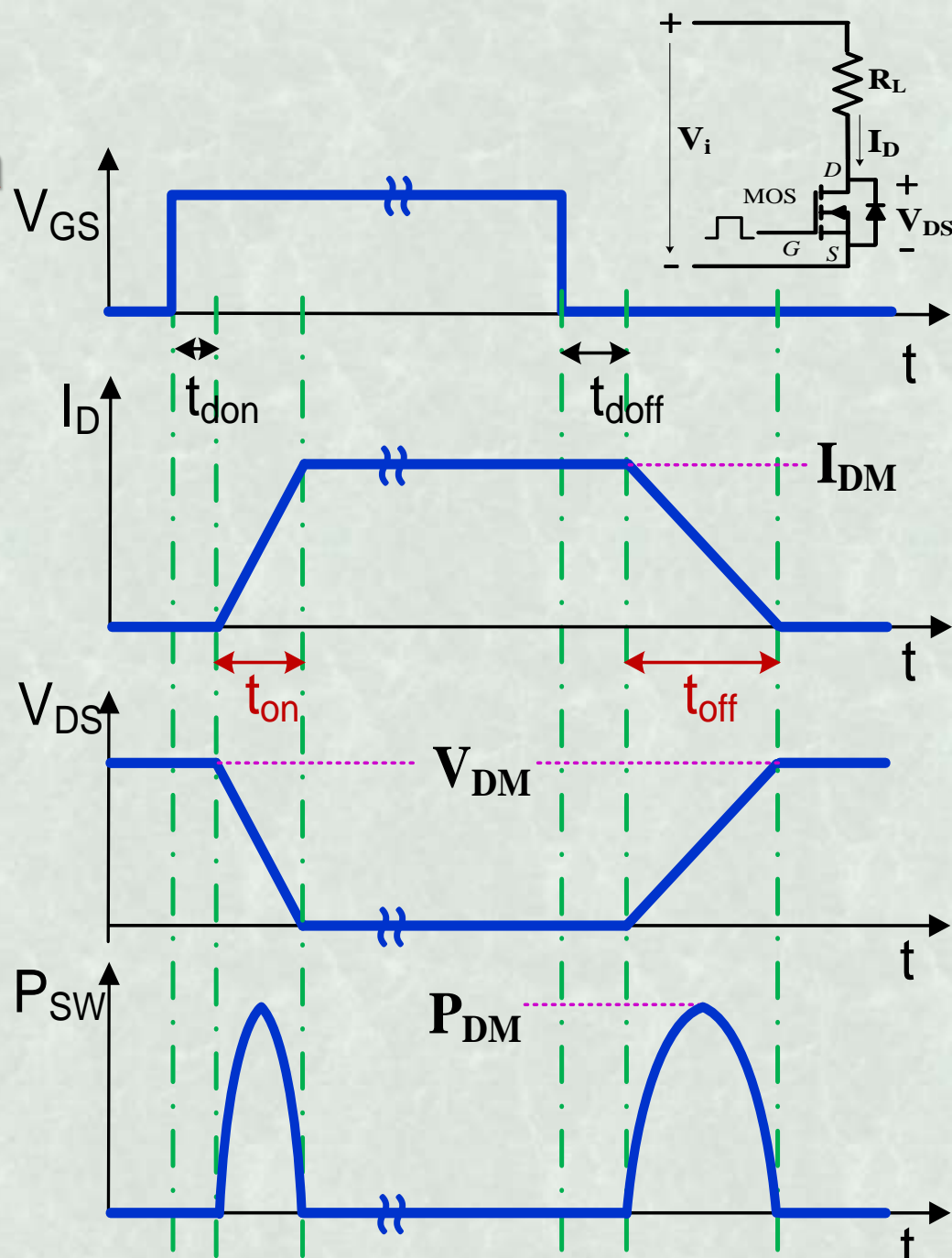
- Αρχικά, ο ημιαγωγικός διακόπτης MOS είναι σε κατάσταση αποκοπής, οπότε δεν διαρρέεται από ρεύμα.
- Εφαρμόζεται ένας παλμός στο ηλεκτρόδιο ελέγχου του και τον οδηγεί σε κατάσταση αγωγής.
- Στην αρχή, υπάρχει ένας χρόνος καθυστέρησης t_{don} στην απόκριση του τρανσίστορ.
- Μετά, το ρεύμα που ρέει μέσα από το τρανσίστορ αρχίζει να αυξάνεται απότομα, από το μηδέν μέχρι να φθάσει σε κάποια τιμή I_{DM} .



Διακοπτικές απώλειες

Κύκλωμα με ωμικό φορτίο - έναυση

- Ταυτόχρονα (*γιατί;*), η τάση στα άκρα του διακόπτη αρχίζει να μειώνεται, μέχρι να φθάσει σε μία τιμή ίση, περίπου, με το μηδέν, ή ακριβέστερα στην τάση αγωγής του διακόπτη.
- Η ταυτόχρονη ύπαρξη ρεύματος που διαρρέει τον ημιαγωγικό διακόπτη και τάσης στα άκρα αυτού:
 - ↳ έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας στον ημιαγωγικό διακόπτη, που εξαρτάται από το χρόνο έναυσης t_{on} .



Διακοπτικές απώλειες

Κύκλωμα με ωμικό φορτίο - έναυση

Υπολογισμός διακοπτικών απωλειών κατά την έναυση:

- Προσέγγιση των κυματομορφών τάσης και ρεύματος, κατά την έναυση, με γραμμικές συναρτήσεις

$$p(t) = u_{DS}(t) \cdot i_D(t), \text{ όπου: } i_D(t) = \frac{I_{DM}}{t_{on}} \cdot t \text{ και } u_{DS}(t) = -\frac{V_{DM}}{t_{on}} \cdot t + V_{DM}$$

$$\text{Συνεπώς: } p(t) = \left(-\frac{V_{DM}}{t_{on}} \cdot t + V_{DM} \right) \cdot \left(\frac{I_{DM}}{t_{on}} \cdot t \right) = -\frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{t_{on}^2} \cdot t^2 + \frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{t_{on}} \cdot t$$

$$\text{Άρα: } P_{SWon} = \frac{1}{T_S} \cdot \int_0^{t_{on}} p(t) \cdot dt = f_S \cdot \int_0^{t_{on}} \left[-\frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{t_{on}^2} \cdot t^2 + \frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{t_{on}} \cdot t \right] \cdot dt$$

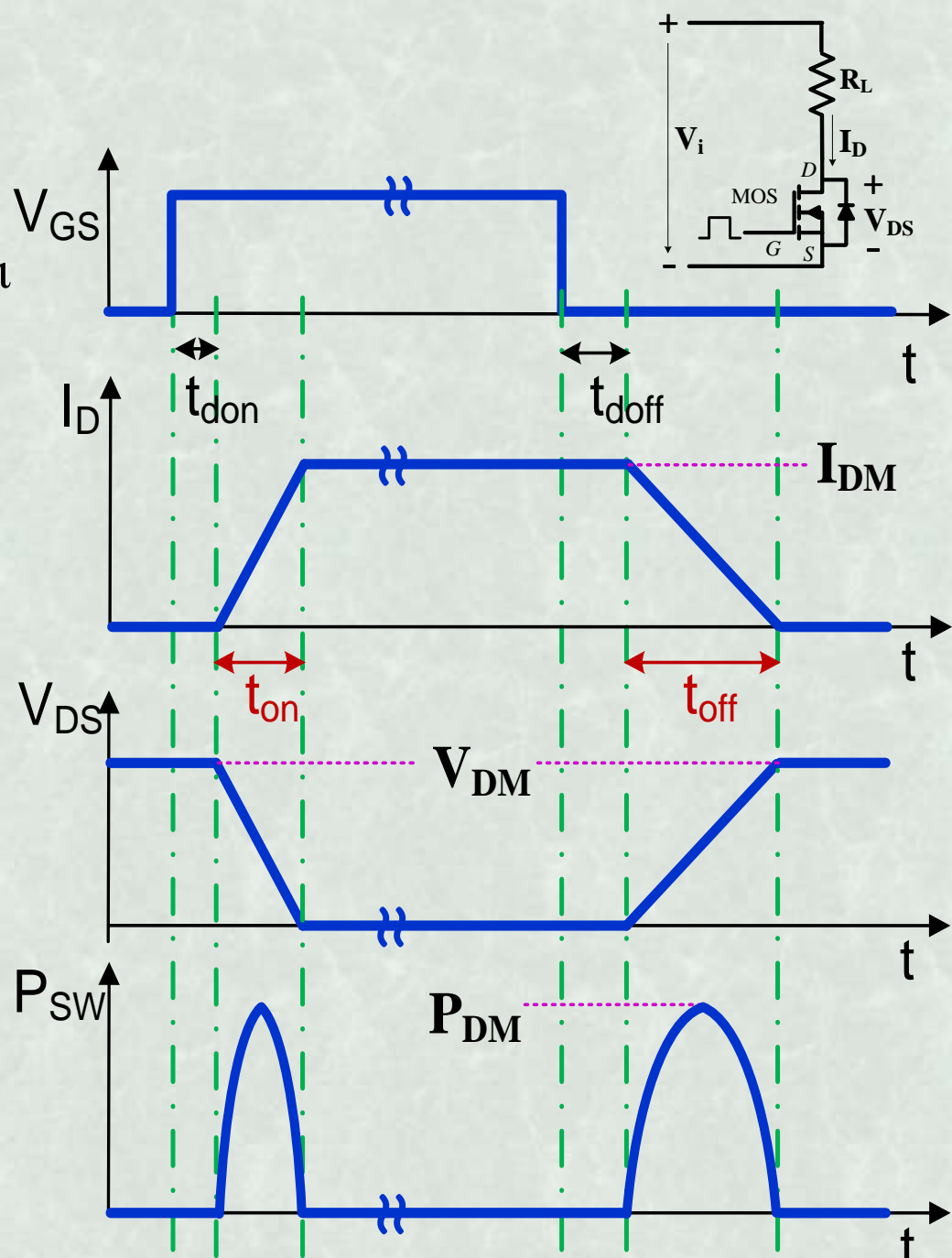
$$\text{Συνεπώς: } \boxed{P_{SWon} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{6} \cdot t_{on} \cdot f_S} \text{ και } P_{DMon} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{4}$$



Διακοπτικές απώλειες

Κύκλωμα με ωμικό φορτίο - σβέση

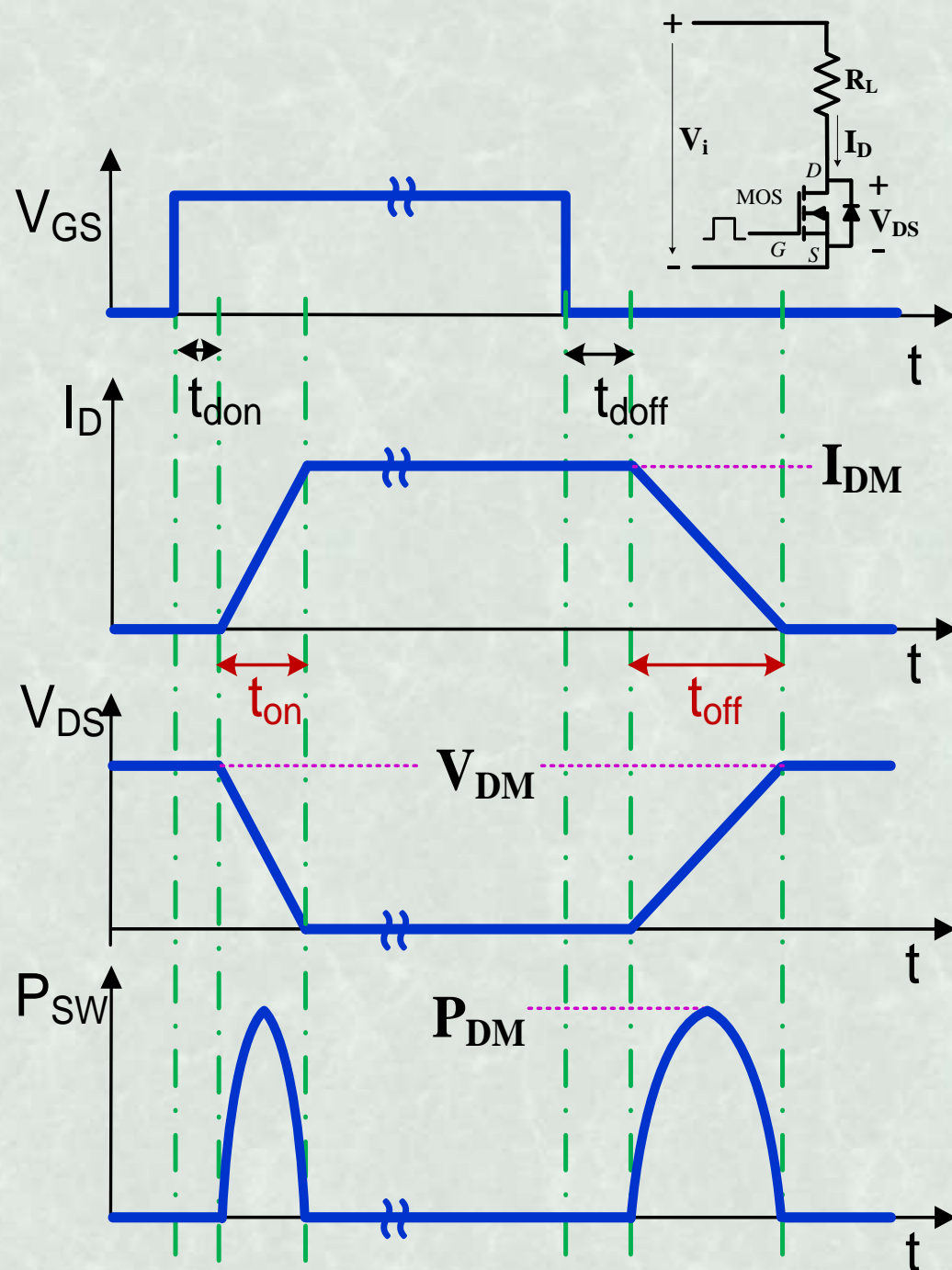
- Το τρανζίστορ MOS παραμένει σε κατάσταση αγωγής, ως τη χρονική στιγμή που ο παλμός στο ηλεκτρόδιο ελέγχου διακόπτεται, για να οδηγηθεί σε κατάσταση αποκοπής.
- Αρχικά, υπάρχει ένας χρόνος καθυστέρησης t_{doff} στην απόκριση του τρανζίστορ.
- Μετά, το ρεύμα που ρέει μέσα από το τρανζίστορ αρχίζει να μειώνεται απότομα, από την τιμή I_{DM} μέχρι να φθάσει στο μηδέν.



Διακοπτικές απώλειες

Κύκλωμα με ωμικό φορτίο - σβέση

- Ταυτόχρονα (**γιατί;**), η τάση στα άκρα του διακόπτη αρχίζει να αυξάνεται, έως ότου φθάσει σε μία τιμή ίση με V_{DM} .
- Η ταυτόχρονη ύπαρξη ρεύματος που διαρρέει τον ημιαγωγικό διακόπτη και τάσης στα άκρα αυτού:
 - ↳ έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας στον ημιαγωγικό διακόπτη, που εξαρτάται από το χρόνο σβέσης t_{off} .



Διακοπτικές απώλειες

Κύκλωμα με ωμικό φορτίο - σβέση

Υπολογισμός διακοπτικών απωλειών κατά τη σβέση:

- Προσέγγιση των κυματομορφών τάσης και ρεύματος, κατά τη σβέση, με γραμμικές συναρτήσεις

$$p(t) = u_{DS}(t) \cdot i_D(t), \text{ όπου: } i_D(t) = -\frac{I_{DM}}{t_{off}} \cdot t + I_{DM} \text{ και } u_{DS}(t) = \frac{V_{DM}}{t_{off}} \cdot t$$

$$\text{Άρα: } P_{SWoff} = \frac{1}{T_S} \cdot \int_0^{t_{off}} p(t) \cdot dt = f_S \cdot \int_0^{t_{off}} \left[-\frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{t_{off}^2} \cdot t^2 + \frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{t_{off}} \cdot t \right] \cdot dt$$

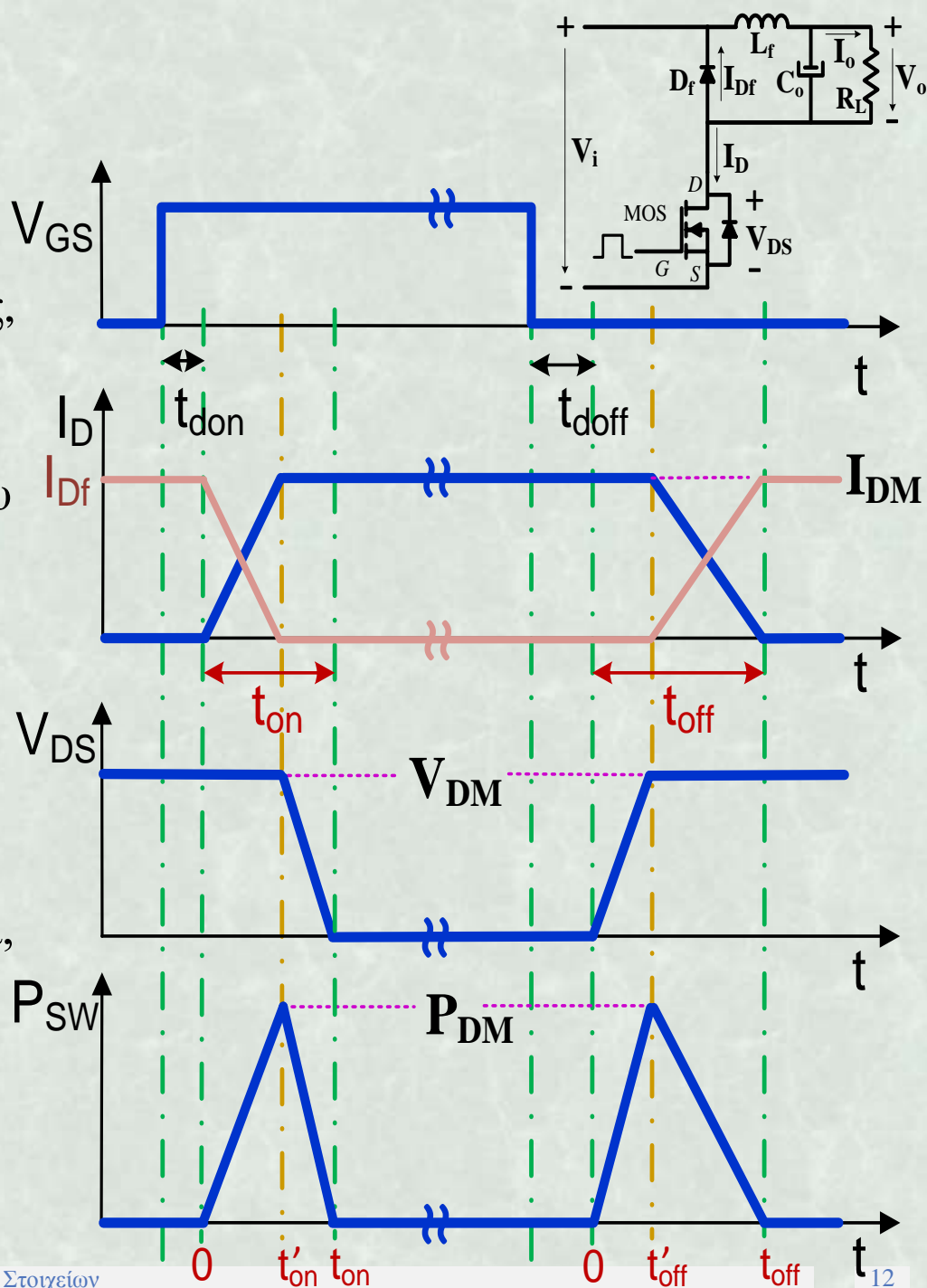
$$\text{ΣΥΝΕΠΩΣ: } \boxed{P_{SWoff} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{6} \cdot t_{off} \cdot f_S} \text{ και } P_{DMoff} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{4}$$



Διακοπτικές απώλειες

Μετατροπέας DC/DC - έναυση

- Αρχικά, ο ημιαγωγικός διακόπτης MOS είναι σε κατάσταση αποκοπής, οπότε δεν διαρρέεται από ρεύμα.
- Στο τρανζίστορ εφαρμόζεται ένας παλμός στο ηλεκτρόδιο ελέγχου του και οδηγείται σε κατάσταση αγωγής.
- Στην αρχή, υπάρχει ένας χρόνος καθυστέρησης t_{don} στην απόκριση του τρανζίστορ.
- Μετά, το ρεύμα που ρέει μέσα από το τρανζίστορ αρχίζει να αυξάνεται, από το μηδέν μέχρι να φθάσει σε κάποια τιμή I_{DM} , ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το ρεύμα i_{Df} , που διαρρέει τη δίοδο D_f , έως ότου μηδενισθεί.

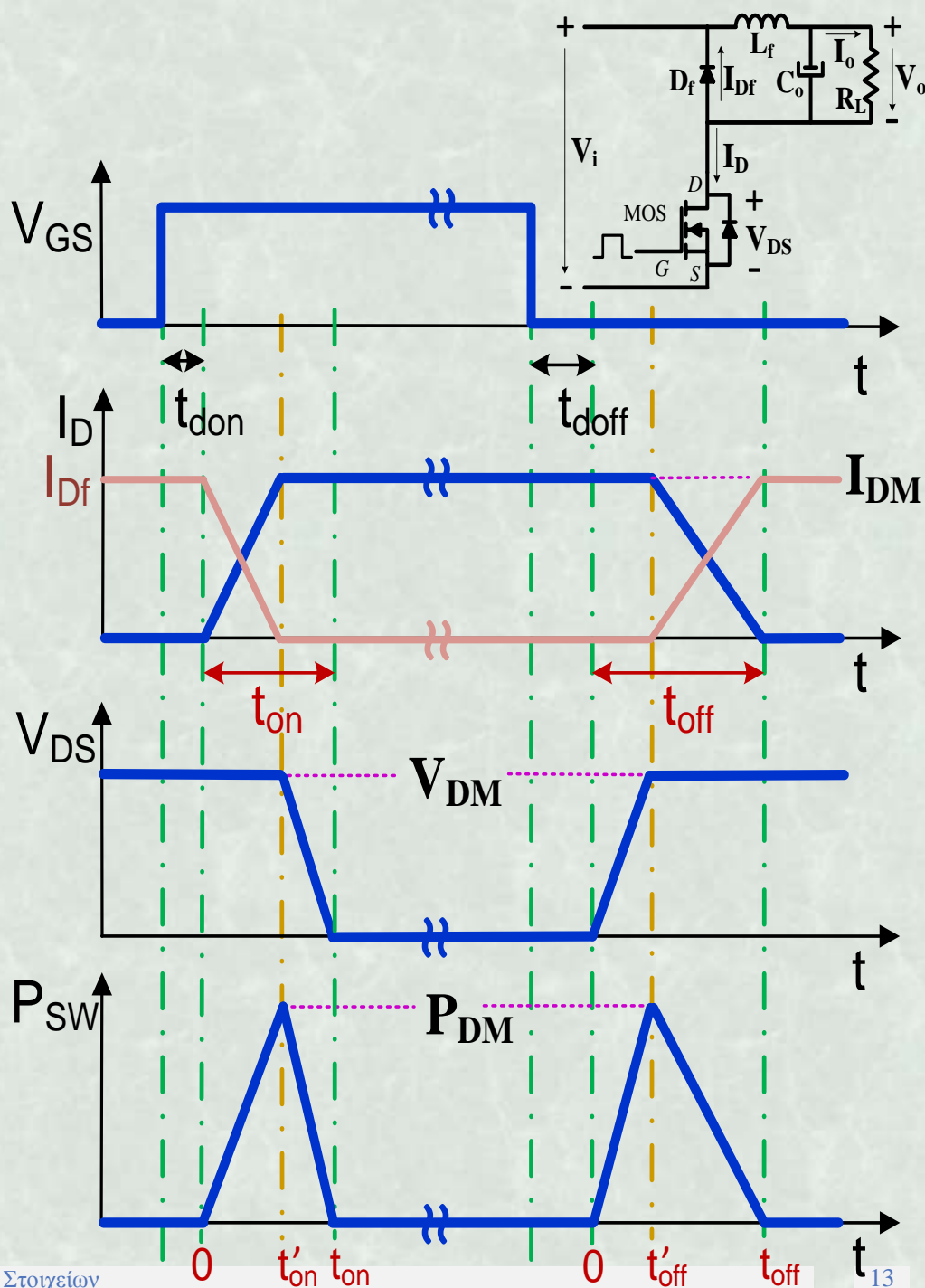


Διακοπτικές απώλειες

Μετατροπέας DC/DC - έναυση

- Όταν το ρεύμα της διόδου D_f μηδενισθεί, η διάδος ανακτά τη δυνατότητα αποκοπής.
- Η τάση στα άκρα της διόδου D_f αυξάνεται και η τάση στα άκρα του διακόπτη αρχίζει να μειώνεται, μέχρι να φθάσει σε μία τιμή ίση, με το μηδέν, ή ακριβέστερα στην τάση αγωγής του διακόπτη.
- Η ταυτόχρονη ύπαρξη ρεύματος που διαρρέει τον ημιαγωγικό διακόπτη και τάσης στα άκρα αυτού:

↪ έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας στο τρανζίστορ, που εξαρτάται από το χρόνο έναυσης t_{on} .



Διακοπτικές απώλειες

Μετατροπέας DC/DC - έναυση

Υπολογισμός διακοπτικών απωλειών κατά την έναυση:

- Προσέγγιση των κυματομορφών τάσης και ρεύματος, κατά την έναυση, με γραμμικές συναρτήσεις

$$p(t) = u_{DS}(t) \cdot i_D(t), \text{ όπου: } i_D(t) = \frac{I_{DM}}{t'_{on}} \cdot t \text{ και } u_{DS}(t) = V_{DM} \text{ για } 0 \leq t \leq t'_{on} \text{ και}$$

$$i_D(t) = I_{DM} \text{ και } u_{DS}(t) = -\frac{V_{DM}}{(t_{on} - t'_{on})} \cdot (t - t'_{on}) + V_{DM} \text{ για } t'_{on} \leq t \leq t_{on}$$

$$\text{Άρα: } P_{SWon} = \frac{1}{T_S} \cdot \int_0^{t_{on}} p(t) \cdot dt =$$

$$= f_S \cdot \left[\int_0^{t'_{on}} \left(\frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{t'_{on}} \cdot t \cdot dt \right) + \int_{t'_{on}}^{t_{on}} \left(\left(-\frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{(t_{on} - t'_{on})} \cdot (t - t'_{on}) + V_{DM} \cdot I_{DM} \right) \cdot dt \right) \right]$$

$$\text{ΣΥΝΕΠΩΣ: } \boxed{P_{SWon} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{2} \cdot t_{on} \cdot f_S} \text{ και } P_{DMon} = V_{DM} \cdot I_{DM}$$

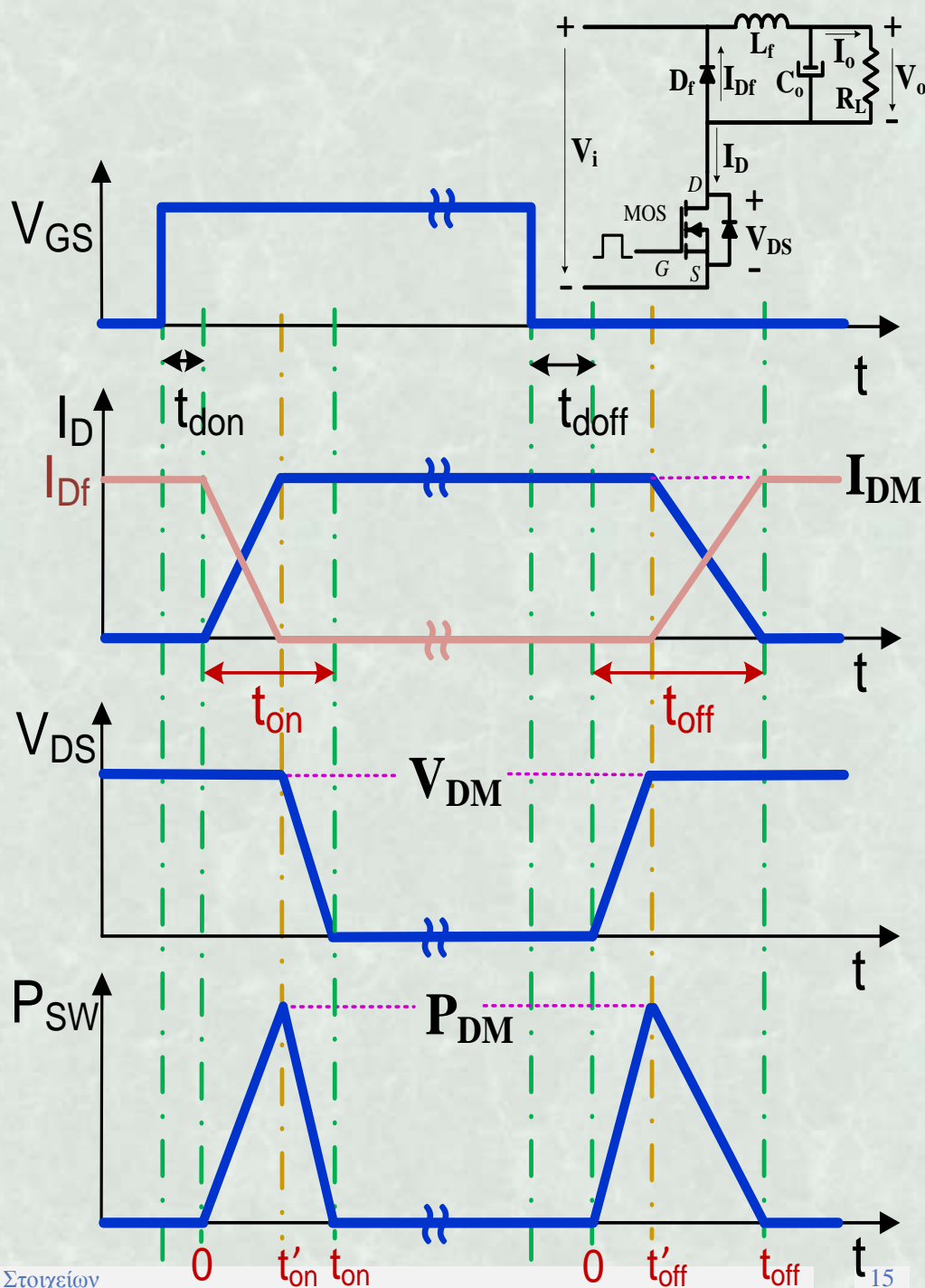
- Υπολογισμός απωλειών και από το εμβαδόν του τριγώνου.



Διακοπτικές απώλειες

Μετατροπέας DC/DC - σβέση

- Το τρανζίστορ MOS παραμένει σε κατάσταση αγωγής, ως τη χρονική στιγμή που ο παλμός στο ηλεκτρόδιο ελέγχου διακόπτεται, για να οδηγηθεί σε κατάσταση αποκοπής.
- Αρχικά, υπάρχει ένας χρόνος καθυστέρησης t_{doff} στην απόκριση του τρανζίστορ.
- Μετά, η τάση στα άκρα του τρανζίστορ αρχίζει να αυξάνεται, έως ότου γίνει λίγο μεγαλύτερη από την τάση τροφοδοσίας $V_i = V_{\text{DM}}$, οπότε η δίοδος D_f μπαίνει σε αγωγή και η τάση στα άκρα του τρανζίστορ σταθεροποιείται στην τιμή V_{DM} .



Διακοπτικές απώλειες

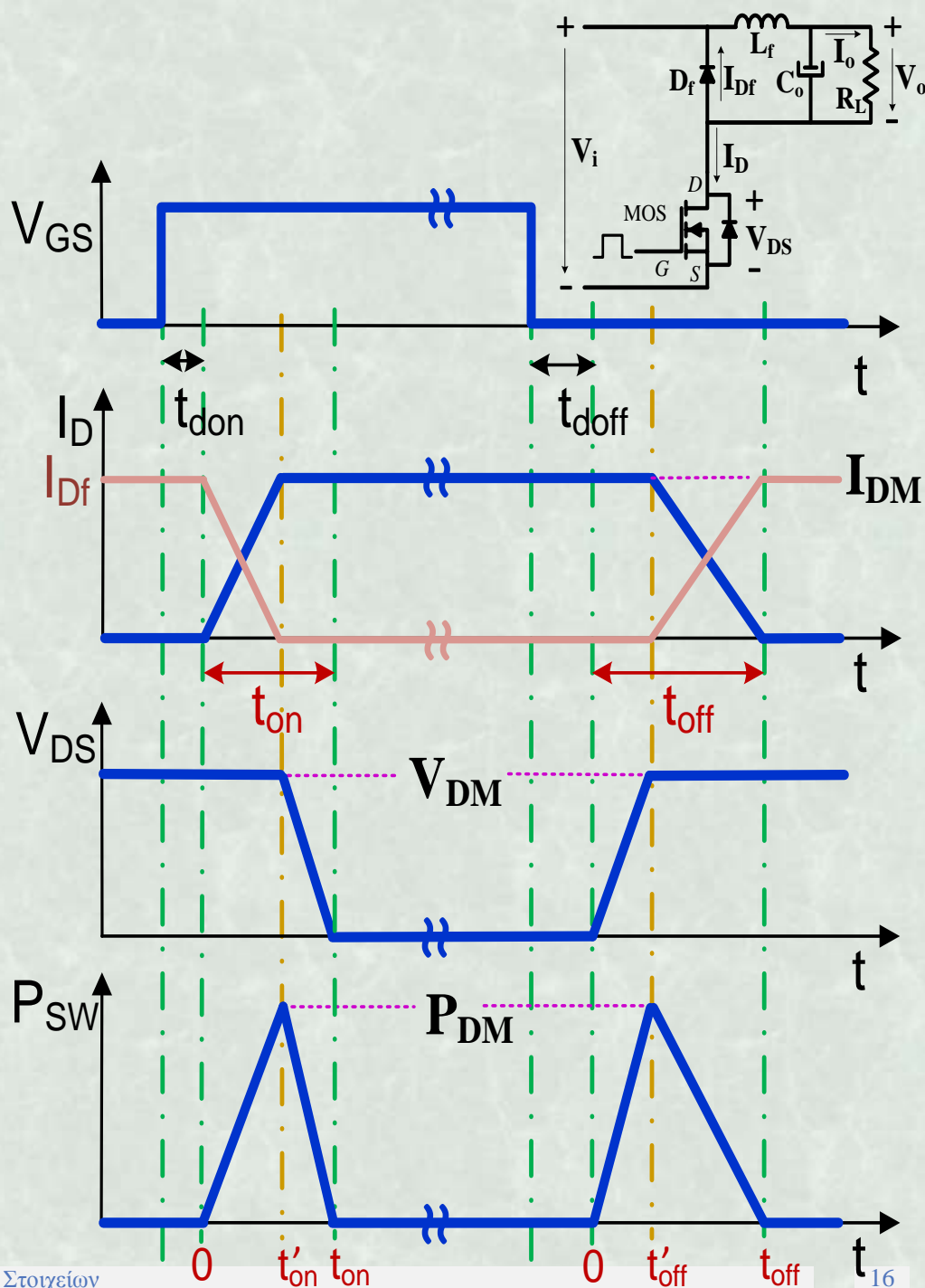
Μετατροπέας DC/DC - σβέση

- Στη συνέχεια το ρεύμα της διόδου αυξάνεται, έως ότου φθάσει την τιμή I_{DM} , ενώ το ρεύμα του τρανζίστορ MOS μειώνεται, έως ότου μηδενισθεί.

↳ Το άθροισμα των δύο αυτών ρευμάτων παραμένει σχεδόν σταθερό (γιατί;).

- Η ταυτόχρονη ύπαρξη ρεύματος που διαρρέει τον ημιαγωγικό διακόπτη και τάσης στα άκρα αυτού:

↳ έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας στον ημιαγωγικό διακόπτη, που εξαρτάται από το χρόνο σβέσης t_{off} .



Διακοπτικές απώλειες

Μετατροπέας DC/DC - σβέση

Υπολογισμός διακοπτικών απωλειών κατά την έναυση:

- Προσέγγιση των κυματομορφών τάσης και ρεύματος, κατά την έναυση, με γραμμικές συναρτήσεις

$$p(t) = u_{DS}(t) \cdot i_D(t), \text{ με: } i_D(t) = I_{DM} \text{ και } u_{DS}(t) = \frac{V_{DM}}{t'_{off}} \cdot t \text{ για } 0 \leq t \leq t'_{off} \text{ και}$$

$$i_D(t) = -\frac{I_{DM}}{(t_{off} - t'_{off})} \cdot (t - t'_{off}) + I_{DM} \text{ και } u_{DS}(t) = V_{DM} \text{ για } t'_{off} \leq t \leq t_{off}$$

$$\text{Άρα: } P_{SWoff} = \frac{1}{T_S} \cdot \int_0^{t_{off}} p(t) \cdot dt =$$

$$= f_S \cdot \left[\int_0^{t'_{off}} \left(\frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{t'_{off}} \cdot t \cdot dt \right) + \int_{t'_{off}}^{t_{off}} \left(\left(-\frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{(t_{off} - t'_{off})} \cdot (t - t'_{off}) + V_{DM} \cdot I_{DM} \right) \cdot dt \right) \right]$$

$$\text{ΣΥΝΕΠΩΣ: } P_{SWoff} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{2} \cdot t_{off} \cdot f_S \text{ και } P_{DMoff} = V_{DM} \cdot I_{DM}$$

- Υπολογισμός απωλειών και από το εμβαδόν του τριγώνου, 17





Διακοπτικές απώλειες
υπερτάσεις και υπερρεύματα

Διακοπτικές απώλειες

Μετατροπέας DC/DC - Υπερρέματα και Υπερτάσεις

Στην έναυση του τρανζίστορ

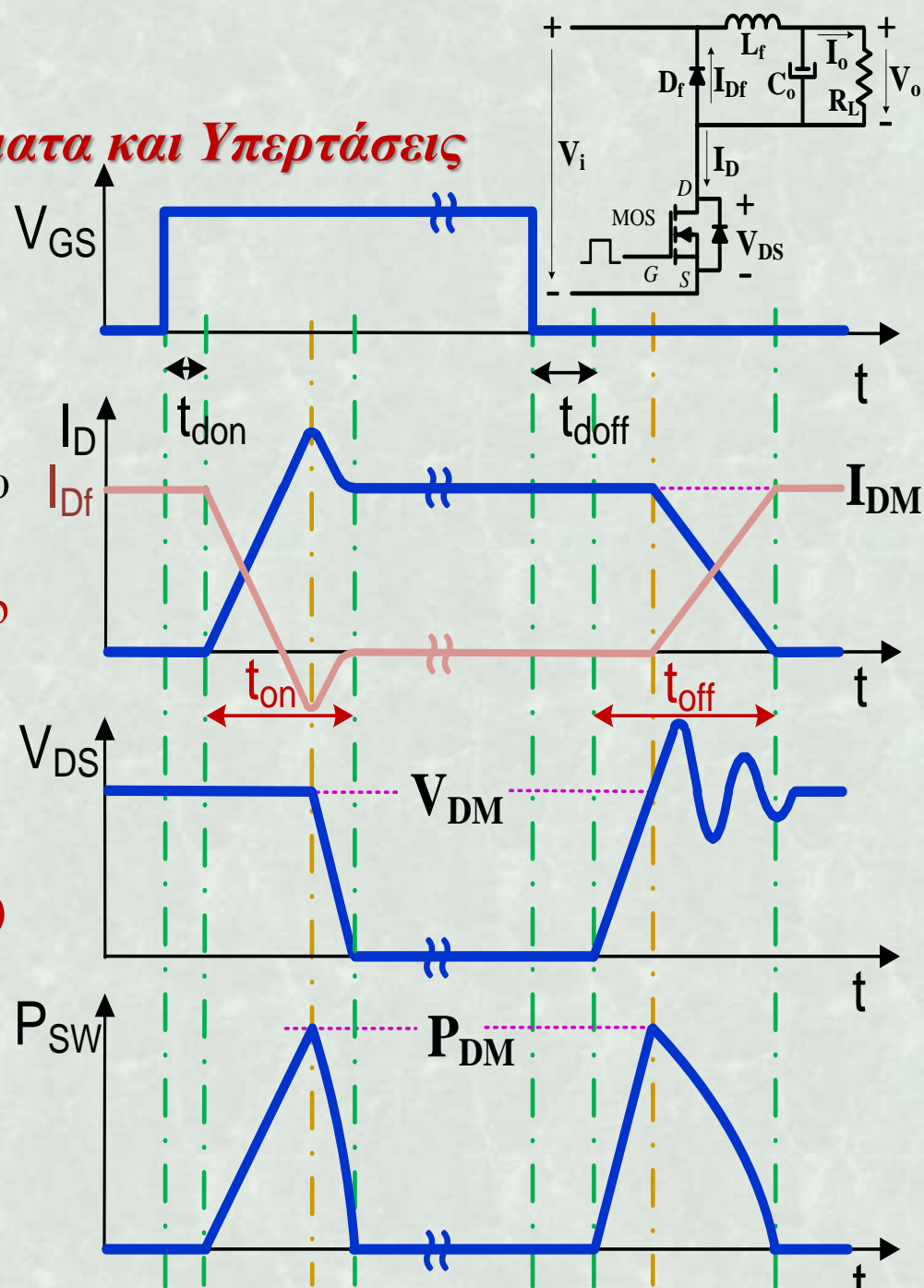
➤ Κατά τη σβέση της διόδου D_f εμφανίζεται το φαινόμενο της αναστροφής ανάκτησης (*reverse recovery*), οπότε το ρεύμα της διόδου γίνεται αρνητικό:

⇒ συνεπώς το ρεύμα του τρανζίστορ ξεπερνά την τιμή I_{DM} , αφού το άθροισμα των ρευμάτων διόδου και τρανζίστορ πρέπει να είναι σχεδόν σταθερό

⇒ αυτό έχει ως αποτέλεσμα (πιθανή) αύξηση του χρόνου έναυσης, καθώς και αύξηση του I_{DM}

⇒ άρα έχουμε αύξηση των διακοπτικών απωλειών έναυσης.

⇒ Προσεγγιστικές κυματομορφές.



Διακοπτικές απώλειες

Μετατροπέας DC/DC - Υπερρέματα και Υπερτάσεις

Στη σβέση του τρανσίστορ

➤ Λόγω των παρασιτικών επαγωγών των καλωδιώσεων σύνδεσης και της αρνητικής κλίσης του ρεύματος, που διαρρέει το τρανσίστορ, εμφανίζεται, πάνω στο τρανσίστορ, μια **υπέρταση**.

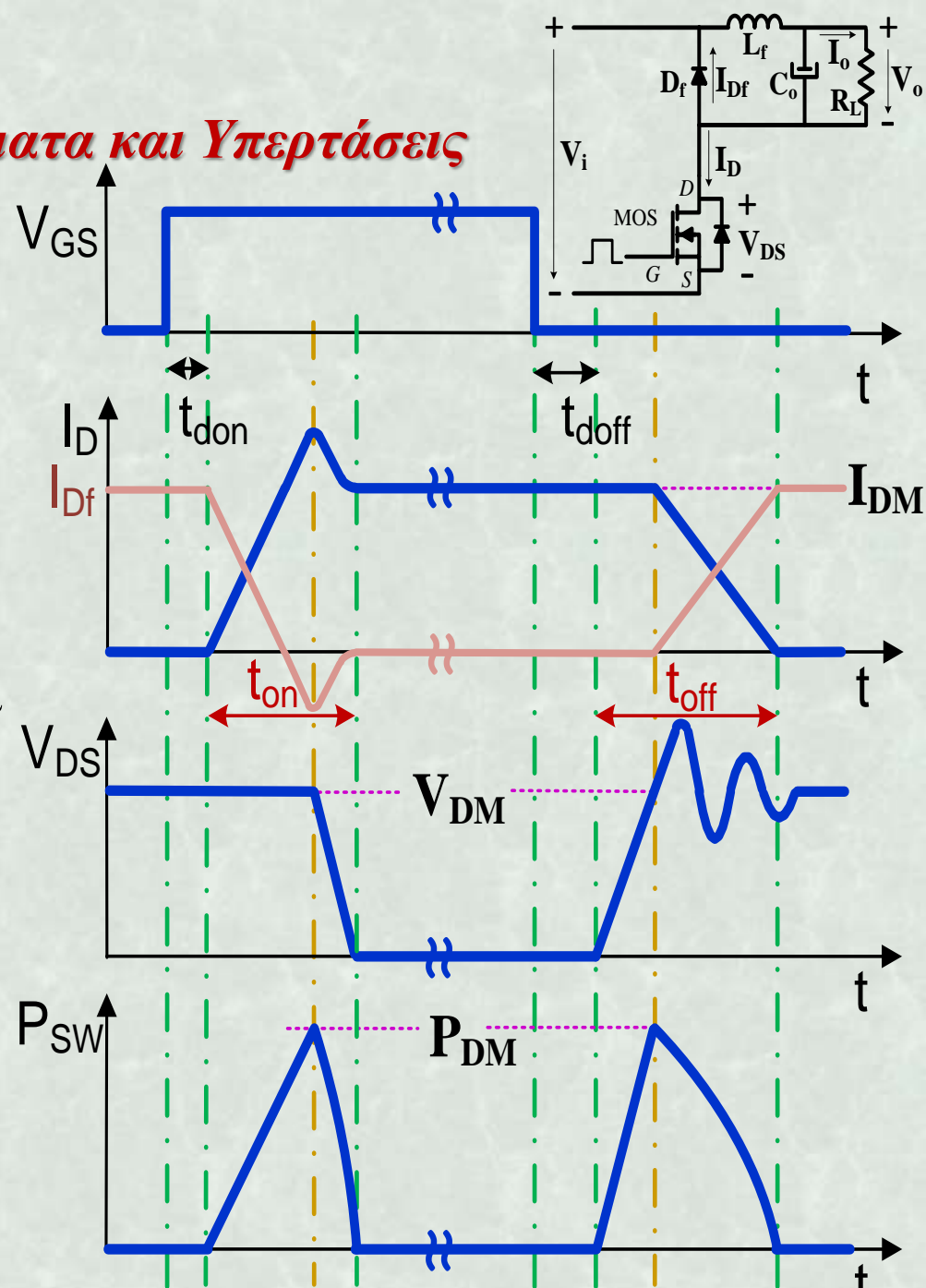
➤ Επίσης, οι παρασιτικές επαγωγές με την παρασιτική χωρητικότητα εξόδου C_{DS} του τρανσίστορ δημιουργούν ένα κύκλωμα ταλάντωσης:

⇒ συνεπώς πάνω στο τρανσίστορ εμφανίζεται μια **υψίσυχη ταλάντωση** (της τάξης των MHz)

⇒ άρα έχουμε αύξηση των διακοπτικών απωλειών σβέσης

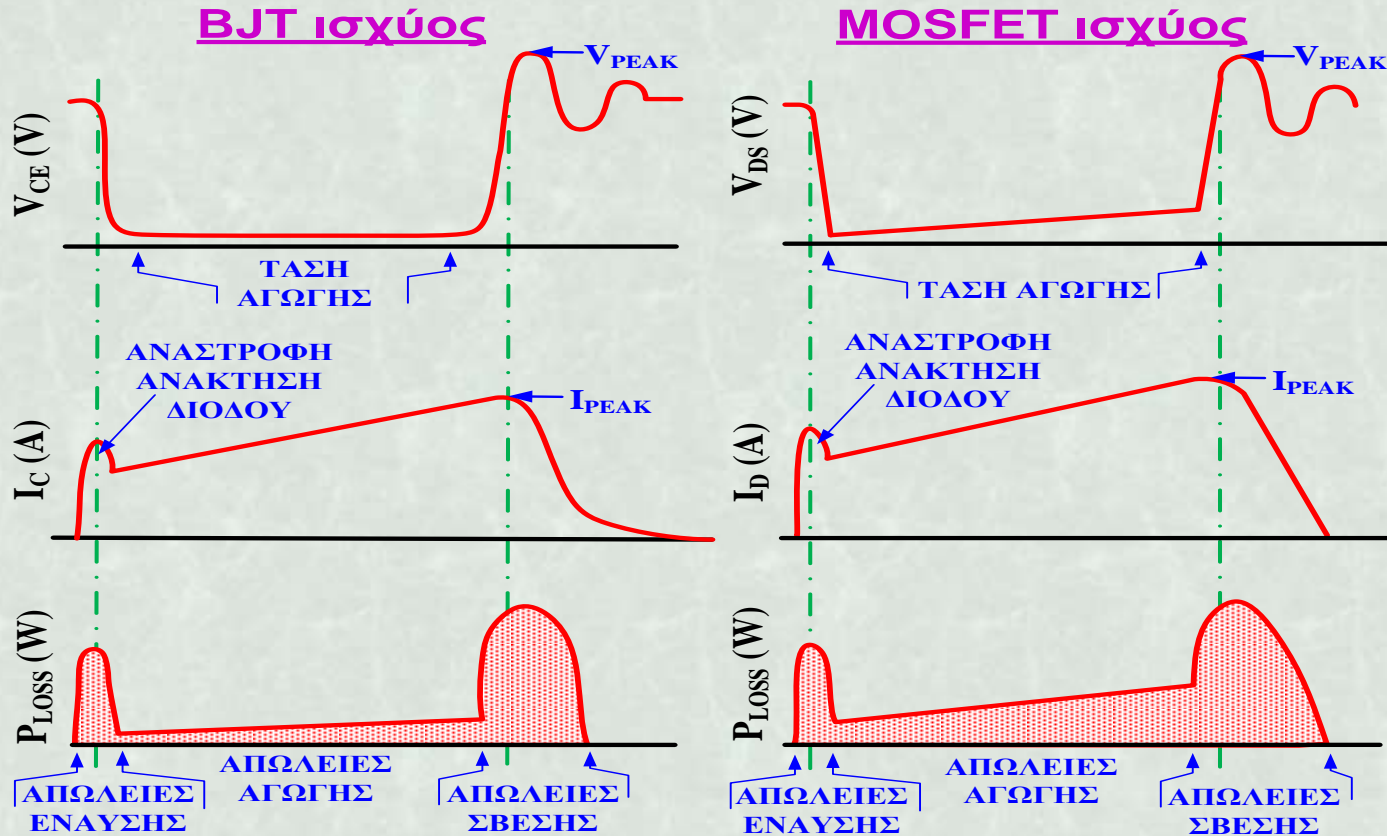
⇒ και επηρεασμό του κυκλώματος παλμοδότησης, λόγω της C_{DG} .

⇒ Προσεγγιστικές κυματομορφές.



Διακοπτικές απώλειες - Σύνοψη

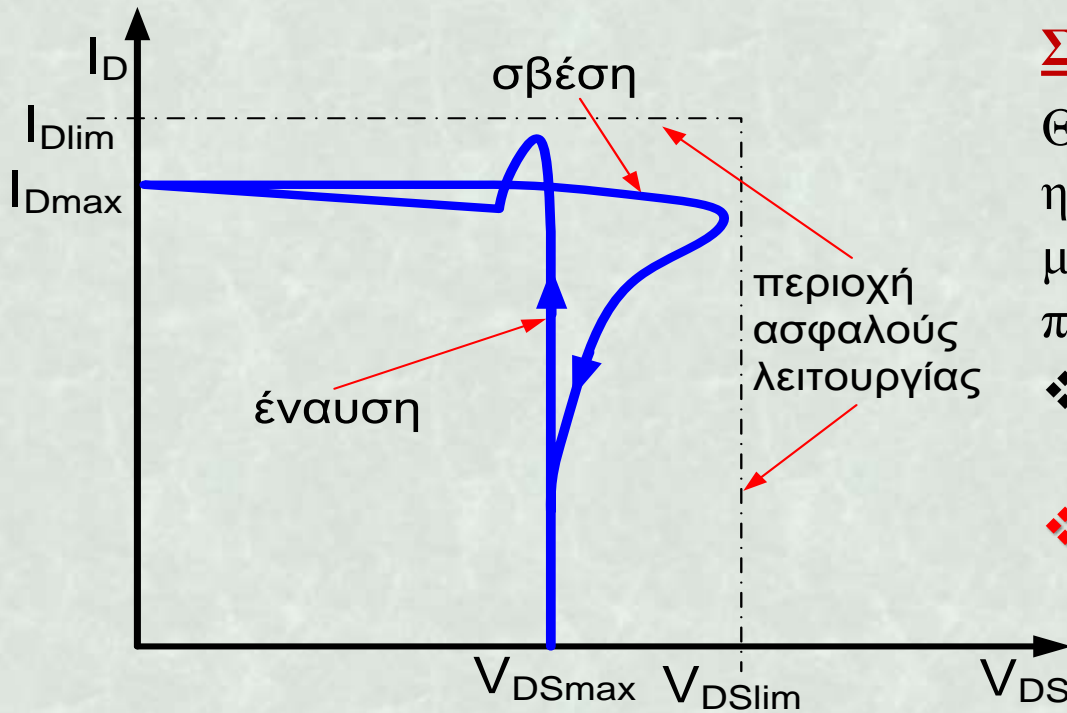
Μετατροπέας DC/DC - Υπερρέματα και Υπερτάσεις



Τάση,
ρεύμα και
απώλειες
σε
BJT
και
MOSFET
ισχύος

- Οι διακοπτικές απώλειες, δηλαδή ο μέσος όρος της τιμής των απωλειών ισχύος, κατά την έναυση και σβέση του ημιαγωγικού διακόπτη:
 - ❖ είναι ανάλογες της συχνότητας λειτουργίας
 - ❖ περιορίζουν το ανώτατο όριο στο οποίο μπορεί να φθάσει η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα.

Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (SOA)



ΣΤΙΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ V-I

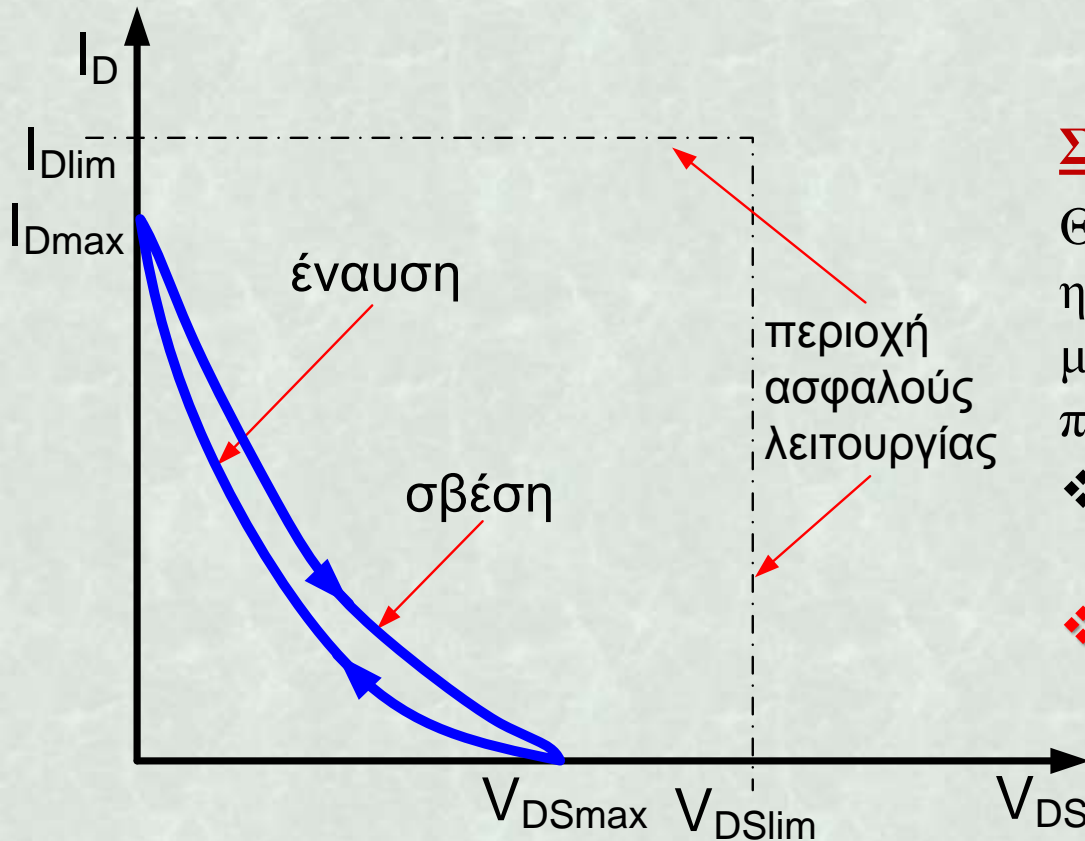
Θέσεις λειτουργίας ενός ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου σε ένα μετατροπέα ΣΤ-ΣΤ, ελεγχόμενο από παλμούς PWM:

- ❖ σύμφωνα με τις τυπικές κυματομορφές έναυσης και σβέσης
- ❖ **χωρίς κύκλωμα προστασίας (Snubber).**

- ❑ Μια μεγάλη τάση και ένα μεγάλο ρεύμα εμφανίζονται ταυτόχρονα στο ημιαγωγικό στοιχείο (σημείο καμπής των καμπυλών).
- ❑ Θα πρέπει το ημιαγωγικό στοιχείο να έχει την ικανότητα αντοχής σ' αυτήν τη δυσμενή κατάσταση.
- ❑ Σε κάθε ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος ορίζεται μία **περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (Safe Operating Area, SOA)**:
 - ⇒ οι διαδοχικές θέσεις λειτουργίας του ημιαγωγικού διακόπτη θα πρέπει να βρίσκονται μέσα σ' αυτήν την περιοχή.



Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (SOA)



ΣΤΙΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ V-I

Θέσεις λειτουργίας ενός ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου σε ένα μετατροπέα ΣΤ-ΣΤ, ελεγχόμενο από παλμούς PWM:

- ❖ σύμφωνα με τις τυπικές κυματομορφές ένναυσης και σβέσης
- ❖ με κύκλωμα προστασίας (Snubber).

- Με χρήση βοηθητικών κυκλωμάτων προστασίας (Snubbers) καθυστερείται η άνοδος του ρεύματος (ένναυση) ή η άνοδος της τάσης (σβέση) με αποτέλεσμα:
 - ⇒ οι διαδοχικές θέσεις λειτουργίας του ημιαγωγικού διακόπτη να βρίσκονται μέσα στην περιοχή ασφαλούς λειτουργίας.



Τεχνικές περιορισμού υπερρευματών και υπερτάσεων

- ❑ Περιορισμός των υπερτάσεων χρησιμοποιώντας κάποιους σχεδιαστικούς συμβιβασμούς.
- ❑ Με χρήση βοηθητικών κυκλωμάτων προστασίας (Snubbers), που τοποθετούνται σε σειρά ή/και παράλληλα με τον ημιαγωγικό διακόπτη:
 - ☞ Οι απώλειες ισχύος μεταφέρονται από τον ημιαγωγικό διακόπτη στο κύκλωμα προστασίας, με αποτέλεσμα:
 - ↳ αν δεν διαστασιοποιηθούν σωστά, πιθανόν να μην υπάρχει ελάττωση στις συνολικές απώλειες ισχύος του κυκλώματος, οπότε ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα μειώνεται.
 - ☞ Επειδή τα βοηθητικά κυκλώματα προστασίας παρουσιάζουν βέλτιστη συμπεριφορά για τις τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών για τις οποίες έχουν επιλεγεί, αν οι συνθήκες λειτουργίας μεταβληθούν επιδεινώνεται η λειτουργία του μετατροπέα.



Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές



Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή

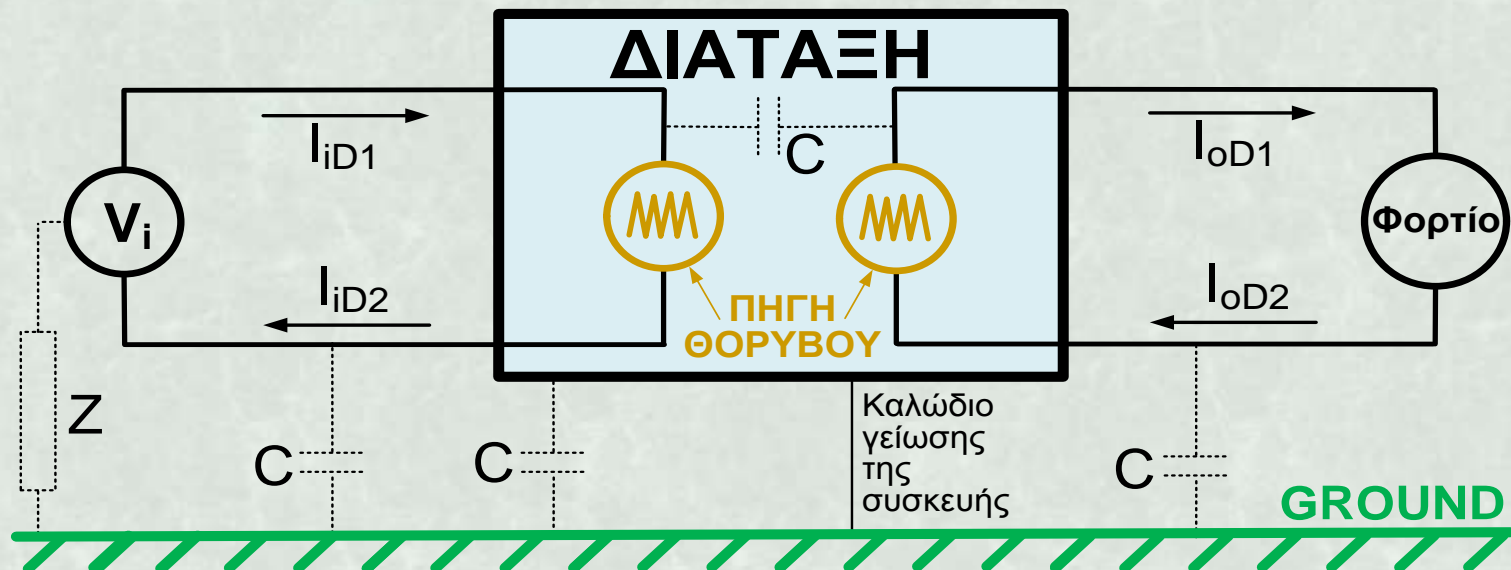
- ❑ Ως ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (*Electromagnetic Interference, EMI*) ορίζεται οποιαδήποτε ηλεκτρομαγνητική διατάραξη ή σήμα που μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργία σε ένα κύκλωμα:
 - ❖ δημιουργείται από ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα κάθε διάταξη που μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα να καθίσταται πιθανή πηγή παρενόχλησης.
- ❑ Στους διακοπτικούς μετατροπείς ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος που παράγεται είναι αποτέλεσμα της διακοπτικής λειτουργίας (απότομες μεταβολές τάσεων και ρευμάτων) σε υψηλές συχνότητες.
- ❑ Ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος μεταδίδεται:
 - είτε μέσω ακτινοβολίας
 - είτε μέσω των αγωγών
- ❑ Ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος που μεταφέρεται μέσω των αγωγών χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, κοινώς γνωστές ως:
 - διαφορικός θόρυβος (*Differential Mode Noise*)
 - κοινός θόρυβος (*Common Mode Noise*)



Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή

Διαφορικός θόρυβος (*Differential Mode Noise*)

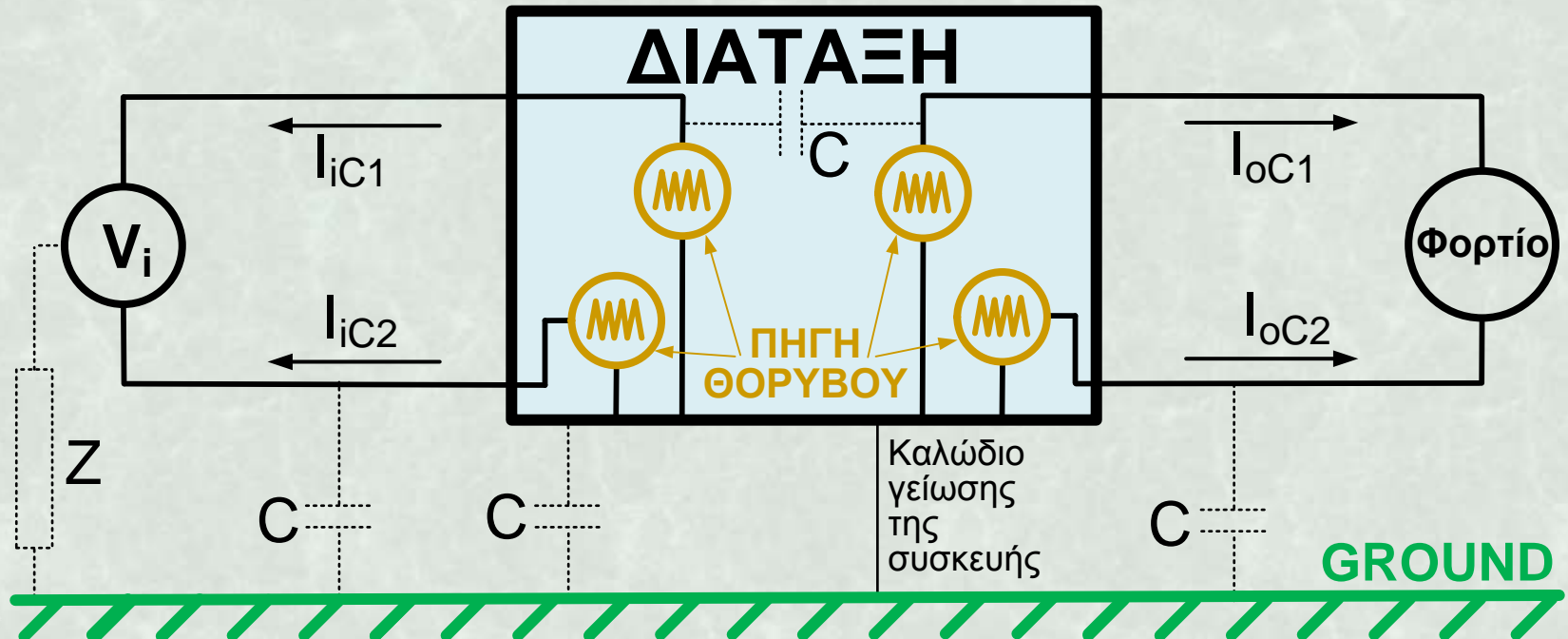
- Είναι ένα ρεύμα που κυκλοφορεί μέσω των γραμμών σύνδεσης (τροφοδοσίας ή φορτίου) ενός μετατροπέα.
- ❖ Η διάδοση του διαφορικού θορύβου γίνεται μέσω της γραμμής εισόδου προς την πηγή τροφοδοσίας και μέσω του κυκλώματος εξόδου προς το φορτίο του μετατροπέα ισχύος.
- ❖ Επιπλέον, ως αγωγοί μετάδοσης του διαφορικού θορύβου μπορούν να θεωρηθούν και οι παρασιτικές χωρητικότητες ανάμεσα στα διάφορα στοιχεία του κυκλώματος, όπως επίσης και αυτές που υπάρχουν μεταξύ του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ενός μετασχηματιστή.



Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή

Κοινός θόρυβος (Differential Mode Noise)

- Είναι ένα ρεύμα που ρέει μεταξύ των γραμμών τροφοδοσίας ή/και των γραμμών σύνδεσης του φορτίου και της γείωσης αναφοράς (ground).
- ❖ Η διάδοση του κοινού θορύβου γίνεται μέσω των παρασιτικών πυκνωτών των ημιαγωγικών ή των παθητικών στοιχείων ή/και τυχαίων παρασιτικών πυκνωτών.
- ❖ Αυτοί οι τυχαίοι πυκνωτές σχηματίζονται μεταξύ των ποικίλων στοιχείων του κυκλώματος και μεταξύ στοιχείων και εδάφους (γείωσης - ground).



Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή

Ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος, τόσο ο διαφορικός όσο και ο κοινός, πρέπει να περιορίζεται ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες επιδράσεις στη λειτουργία άλλων συσκευών ή ακόμα και του ιδίου του μετατροπέα.

Λύσεις για την αντιμετώπιση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής

- ❑ Ο πιο αποδοτικός τρόπος, από πλευράς κόστους, είναι να αντιμετωπίζεται η γενεσιουργός αιτία του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου.
- ❑ Χρήση εξωτερικών κυκλωμάτων προστασίας από μεταβατικές καταστάσεις (*snubbers*), τα οποία μπορούν να βοηθήσουν στην ελάττωση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, αφού περιορίζουν τις απότομες μεταβολές ρεύματος και τάσης:
 - *τα κυκλώματα αυτά πρέπει να συνδεθούν, χωρικά, όσο γίνεται πιο κοντά στο διακοπτικό στοιχείο.*
- ❑ Χρησιμοποίηση της τεχνικής των μετατροπέων συντονισμού:
 - ακόμα και σ' αυτούς τους μετατροπείς, οι διαστάσεις των αγωγών σύνδεσης θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν με κατάλληλη χωρική τοποθέτηση των διαφόρων στοιχείων.



Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή

Λύσεις για την αντιμετώπιση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής

- ❑ Ελαχιστοποίηση της δικτυωμένης περιοχής που περικλείεται από ένα βρόχο ρεύματος:
 - *όλοι οι βρόχοι ρεύματος που διαρρέονται από παλμικά ρεύματα θα πρέπει να υλοποιηθούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν όσο το δυνατό μικρότερη επιφάνεια.*
- ❑ Όλοι οι αγωγοί μεταφοράς ρεύματος θα πρέπει να βρίσκονται πολύ κοντά στον αγωγό επιστροφής.
- ❑ Για να μειωθούν οι τυχαίες χωρητικότητες, οι δρόμοι αγωγής θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν και να κρατηθούν όσο πιο μακριά γίνεται από το έδαφος (γείωση), με κατάλληλο σχεδιασμό.
- ❑ Χρησιμοποίηση ειδικών φίλτρων.
- ❑ Ο θόρυβος που προέρχεται από ακτινοβολία καταστέλλεται αποτελεσματικά με χρήση μεταλλικών περιβλημάτων.
- ❑ **ΠΡΟΣΟΧΗ**: Υπάρχουν διεθνή πρότυπα και κανονισμοί διαφόρων οργανισμών (CISPR, IEC, VDE κλπ) που καθορίζουν τα μέγιστα όρια ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.



Σύγκριση τροφοδοτικών συνεχούς τάσης



Σύγκριση γραμμικών και διακοπτικών τροφοδοτικών

Μειονεκτήματα των Γραμμικών Τροφοδοτικών

- 👉 Ο χαμηλός βαθμός απόδοσης.
- 👉 Ο όγκος και το βάρος του χρησιμοποιούμενου μετασχηματιστή.
- 👉 Το κόστος του μετασχηματιστή, σε συνδυασμό με το κόστος του ψυκτικού.
- 👉 Γενικά, τα γραμμικά τροφοδοτικά είναι οικονομικά ασύμφορα για ισχείς μεγαλύτερες από 15W-20W περίπου.
- 👉 Όταν η μεταβολή της τάσης εισόδου είναι μικρή ή όταν δεν υπάρχουν προβλήματα στη συγκράτηση της τάσης εξόδου (*Hold-Up time*), η απόδοση των γραμμικών τροφοδοτικών μπορεί να φθάσει το 50%:
 - ☞ όμως στα περισσότερα εξ αυτών οι τυπικές τιμές απόδοσης είναι της τάξης του 30%.



Σύγκριση γραμμικών και διακοπτικών τροφοδοτικών

Πλεονεκτήματα των Γραμμικών Τροφοδοτικών

- 👍 Η απλότητα του κυκλώματος, με αποτέλεσμα η χρήση τους, για μικρές ισχείς (μικρότερες των 15W-20W), να είναι οικονομικά συμφέρουσα.
- 👍 Η μη εμφάνιση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, επειδή δεν παρουσιάζουν διακοπτικά φαινόμενα (ο ημιαγωγικός διακόπτης λειτουργεί στη γραμμική περιοχή).
- 👍 Η πολύ καλή δυναμική απόκριση (*γιατί*);).
- 👍 Η εξαιρετικά χαμηλή κυμάτωση της τάσης εξόδου.
- 👍 Η υψηλή απόρριψη εισόδου.
- 👍 Το μεγάλο εύρος ζώνης.



Χρήση γραμμικών τροφοδοτικών

Σε επιλεγμένες εφαρμογές:

- ☞ Εργαστηριακά τροφοδοτικά.
- ☞ Ρυθμιστές τάσης για ενισχυτές δεδομένων χαμηλής στάθμης και λογικές κάρτες.
- ☞ Τροφοδοτικά για μικρά ηλεκτρονικά ή ηλεκτρικά όργανα μέτρησης.
- ☞ Τροφοδοτικά για δορυφορικά συστήματα και συστήματα αεροπλάνων.
- ☞ Τροφοδοτικά για στρατιωτικές εφαρμογές.
- ☞ Τροφοδοτικά για διάφορα ψηφιακά και αναλογικά συστήματα.
- ☞ Για την καλύτερη σταθεροποίηση της τάσης των μη ελεγχόμενων πολλαπλών εξόδων ενός διακοπτικού τροφοδοτικού.



Σύγκριση γραμμικών και διακοπτικών τροφοδοτικών

Προβλήματα των διακοπτικών τροφοδοτικών που ελέγχονται με την τεχνική της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (*PWM DC-DC Converters*):

- ☞ Οι **διακοπτικές απώλειες**, που εμφανίζονται τόσο κατά την έναυση όσο και κατά τη σβέση των ημιαγωγικών στοιχείων και οι οποίες αυξάνονται γραμμικά με αύξηση της διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας.
- ☞ Η **υπέρταση**, που εμφανίζεται στα άκρα του ημιαγωγικού διακόπτη κατά τη σβέση του και η οποία μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του.
- ☞ Η **ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή** (*electromagnetic interference, EMI*), που παράγεται λόγω των μεγάλων μεταβολών της τάσης και του ρεύματος κατά την αλλαγή κατάστασης των ημιαγωγικών διακοπών, δημιουργεί προβλήματα στη λειτουργία της ίδιας αλλά και άλλων συσκευών.



Σύγκριση γραμμικών και διακοπτικών τροφοδοτικών

Πλεονεκτήματα των διακοπτικών τροφοδοτικών που ελέγχονται με την τεχνική της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (*PWM DC-DC Converters*):

- ☞ Τα ημιαγωγικά στοιχεία (τρανσίστορ ισχύος, δίοδοι) λειτουργούν ως διακόπτες, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μία σημαντική μείωση των απωλειών ισχύος.
- ☞ Ένα ημιαγωγικό στοιχείο που λειτουργεί ως διακόπτης μπορεί να αντέχει μεγαλύτερες ισχείς, απ' ό,τι ένα ημιαγωγικό στοιχείο που λειτουργεί στη γραμμική περιοχή.
- ☞ Ο βαθμός απόδοσης των τροφοδοτικών αυτών κυμαίνεται από 70-90% και είναι σημαντικά υψηλότερος από το βαθμό απόδοσης των γραμμικών τροφοδοτικών.



Σύγκριση γραμμικών και διακοπτικών τροφοδοτικών

Πλεονεκτήματα των διακοπτικών τροφοδοτικών που ελέγχονται με την τεχνική της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (*PWM DC-DC Converters*):

- ☞ Εφόσον απαιτείται ηλεκτρική απομόνωση ή/και πολλαπλές τάσεις στην έξοδο:
 - μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μετασχηματιστής (με περισσότερα του ενός τυλίγματα στο δευτερεύον) για υψηλές διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας
 - το μέγεθος και το βάρος του μετασχηματιστή αυτού είναι **σημαντικά μικρότερο** σε σχέση με το μέγεθος και το βάρος των μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται στα γραμμικά τροφοδοτικά
 - ως υλικό πυρήνα χρησιμοποιούνται οι φερρίτες.



Σύγκριση MOSFET ισχύος με BJT ισχύος

- ☞ Οι χρόνοι μετάβασης του MOSFET ισχύος είναι πολύ μικρότεροι από αυτούς του BJT ισχύος, με αποτέλεσμα οι διακοπτικές απώλειες να μειώνονται σημαντικά.
- ☞ Το MOSFET ισχύος ελέγχεται από τάση, ενώ το BJT ισχύος από ρεύμα, με αποτέλεσμα το κύκλωμα ελέγχου να είναι απλούστερο, πιο αξιόπιστο και να έχει πολύ λιγότερες απώλειες.
- ☞ Το MOSFET ισχύος δεν εμφανίζει προβλήματα “θερμικής κατάρρευσης” (*thermal runaway effect*), ούτε το φαινόμενο της “δεύτερης κατάρρευσης” (*second effect*).
- ☞ Η αντίσταση αγωγής του MOSFET ισχύος είναι υψηλότερη από αυτήν του BJT ισχύος, με αποτέλεσμα η απώλειες αγωγής να είναι μεγαλύτερες.
- ☞ Ο παραλληλισμός των MOSFET ισχύος είναι ευκολότερος (λόγω θετικού θερμοκρασιακού συντελεστή), αρκεί να τηρηθούν ορισμένοι πρακτικοί κατασκευαστικοί κανόνες.



Διακοπτική συχνότητα λειτουργίας

- ☞ Η αντικατάσταση των BJT ισχύος από τα MOSFET ισχύος οδήγησε σε σημαντική αύξηση της διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας, με άμεσο αποτέλεσμα:
 - ↳ *την εντυπωσιακή μείωση του όγκου, του βάρους και του κόστους,*
 - ↳ *τη βελτίωση των επιδόσεων,*
 - ↳ *την αύξηση της απόδοσης των διακοπτικών τροφοδοτικών.*
- ☞ Σε εφαρμογές χαμηλής και μέσης ισχύος (από μερικές δεκάδες W μέχρι 1kW) και για διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας 30-300kHz, η επιλογή της συχνότητας λειτουργίας εξαρτάται από το ημιαγωγικό στοιχείο και την ισχύ του μετατροπέα:
 - Σ' αυτές τις περιοχές συχνοτήτων οι μετατροπείς ΣΤ-ΣΤ τύπου PWM θεωρούνται κατάλληλοι ως προς το βάρος, τον όγκο, την απόδοση, την αξιοπιστία αλλά και το κόστος.
- ☞ Σε σχέση με ένα γραμμικό τροφοδοτικό της ίδιας ισχύος, το συνολικό μέγεθος ενός διακοπτικού τροφοδοτικού, που λειτουργεί στα 100kHz, είναι περίπου οκτώ φορές μικρότερο.



Σύγκριση γραμμικών και διακοπτικών τροφοδοτικών - παραδείγματα

Παράμετρος	Γραμμικό Τροφοδοτικό	Διακοπτικό Τροφοδοτικό
Τάση εισόδου	230 vac	230 vac
Τάση εξόδου	12 vdc	12 vdc
Ισχύς εξόδου	8 W	8 W
Αρ. τεμαχίων	18	18
Απόδοση	50%	80%
Όγκος	240 cm ³	70 cm ³
Βάρος (χωρίς περίβλημα)	426 gr	36 gr
Κόστος	1.35·X	1.0·X

Παράμετρος	Γραμμικό Τροφοδοτικό	Διακοπτικό Τροφοδοτικό
Τάση εισόδου	230 vac	230 vac
Τάση εξόδου	12 vdc	12 vdc
Ισχύς εξόδου	15 W	15 W
Αρ. τεμαχίων	12	19
Απόδοση	67%	80%
Όγκος	440 cm ³	100 cm ³
Βάρος (χωρίς περίβλημα)	840 gr	52 gr
Κόστος	1.1·X	1.0·X

Σύγκριση γραμμικών και διακοπτικών τροφοδοτικών ισχύος 8W και 15W



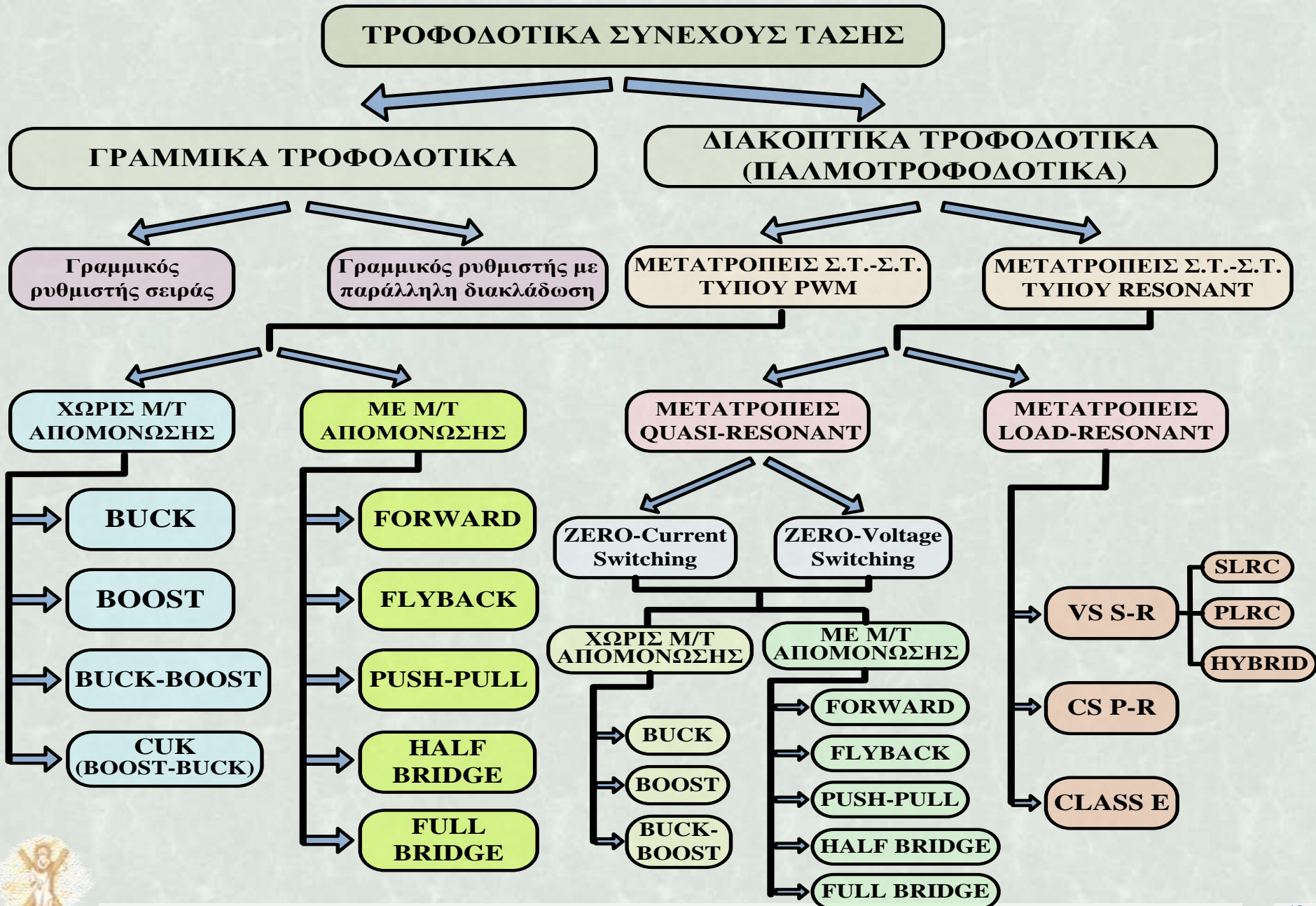
Σύγκριση γραμμικών και διακοπτικών τροφοδοτικών - παραδείγματα

Παράμετρος	Γραμμικό Τροφοδοτικό	Διακοπτικό Τροφοδοτικό
απόδοση	30%	75%
όγκος / W	~ 32 cm ³ / W	~ 8 cm ³ / W
βάρος / W	~ 45 gr / W	~ 11 gr / W
συντελεστής ρύθμισης για μεταβολές της τάσης εισόδου και του φορτίου	0.1%	0.1%
κυμάτωση τάσης εξόδου v_{p-p}	5 mV	50 mV
θόρυβος v_{p-p}	-	50-200 mV
μεταβατική απόκριση	20 μ s	1 ms
χρόνος συγκράτησης της τάσης εξόδου	1-2 ms	20-30 ms

Σύγκριση ενός γραμμικού τροφοδοτικού και ενός διακοπτικού τροφοδοτικού, που λειτουργεί με διακοπτική συχνότητα 20kHz



Κατηγοριοποίηση τροφοδοτικών Σ.Τ.





Κυκλώματα προστασίας των
ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος
(Snubbers)

Εισαγωγή



Κυκλώματα Προστασίας - Εισαγωγή

- ❑ Είναι βοηθητικά κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την προστασία των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος από:
 - Υπερτάσεις
 - Υπερρεύματα
 - Υπερθέρμανση

- ❑ Δεν αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της βασικής τοπολογίας ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος:
 - είναι μία προσθήκη, συχνά απαραίτητη, για την καταστολή των ηλεκτρικών καταπονήσεων, που υφίστανται τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος του μετατροπέα, με σκοπό:
 - ☞ Την προστασία των ημιαγωγικών στοιχείων.
 - ☞ Την αύξηση της αξιοπιστίας της όλης διάταξης.

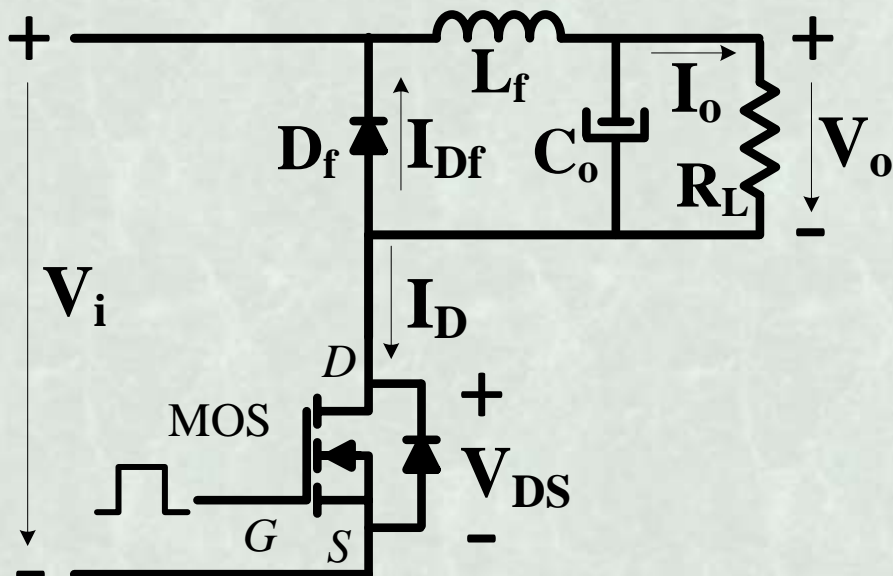


Κυκλώματα Προστασίας - Εισαγωγή

- ❑ Η προσθήκη των κυκλωμάτων αυτών δημιουργεί **πρόσθετα προβλήματα**, όπως:
 - Επιπλέον απώλειες (όχι πάντα)
 - Περιορισμούς στη λειτουργία της διάταξης
 - Αύξηση κόστους κ.ά.
- ❑ Υπάρχουν τρία είδη κυκλωμάτων προστασίας ενός ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος, ανάλογα με το φαινόμενο που καταστέλλουν:
 - κυκλώματα προστασίας κατά την έναυση
 - κυκλώματα προστασίας κατά τη σβέση
 - κυκλώματα μείωσης της καταπόνησης από υπερτάσεις
- ❑ Η ανάλυση και ο σχεδιασμός των κυκλωμάτων αυτών στηρίζεται, σε μεγάλο βαθμό και στις πειραματικές μετρήσεις



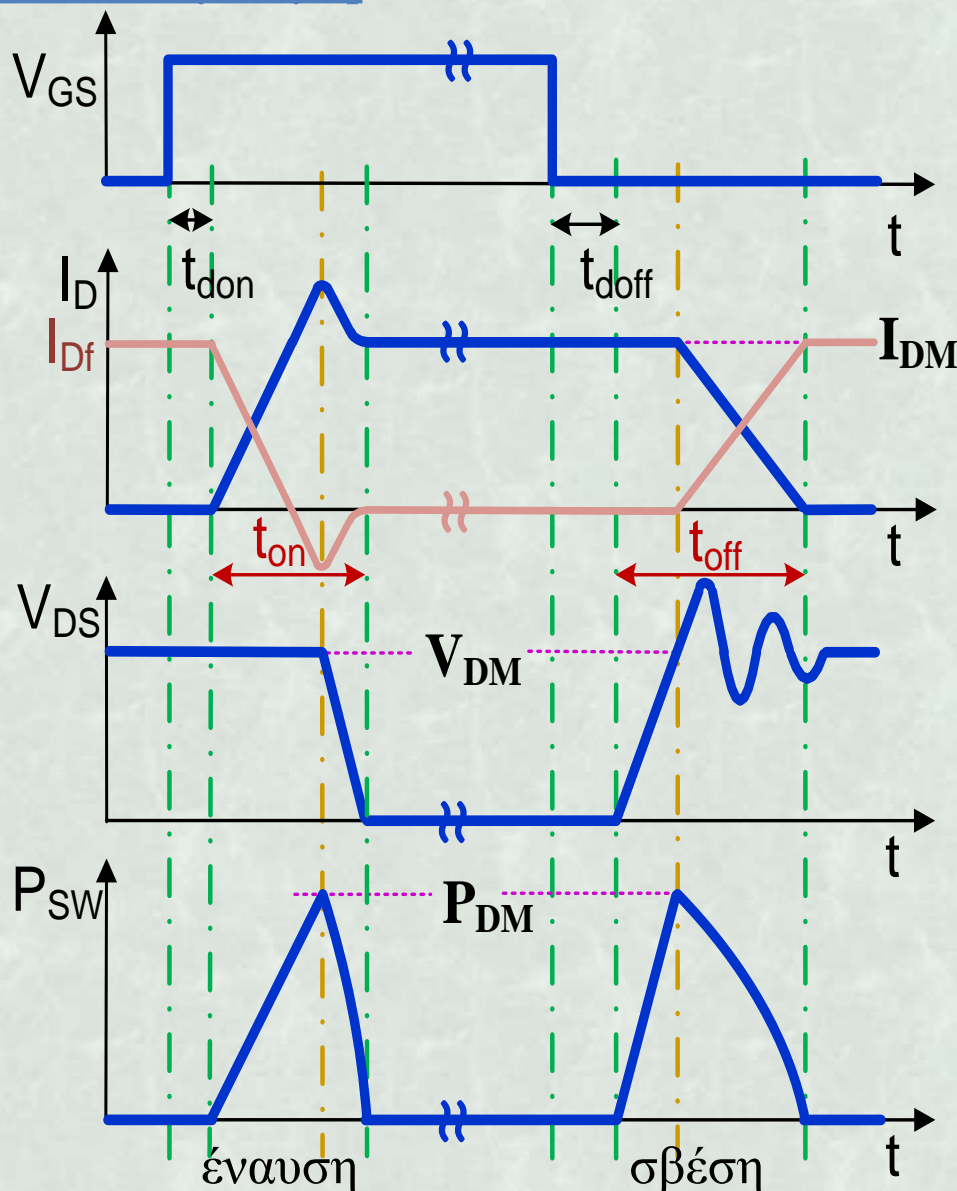
Κυκλώματα Προστασίας - Εισαγωγή



➤ Κατά την έναυση και τη σβέση ενός ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος εμφανίζονται απώλειες (**διακοπτικές απώλειες**):

➤ Επίσης, εμφανίζονται υπερτάσεις (λόγω παρασιτικών στοιχείων στην τοπολογία) και υπερρεύματα (λόγω ανάστροφης ανάκτησης της διόδου)

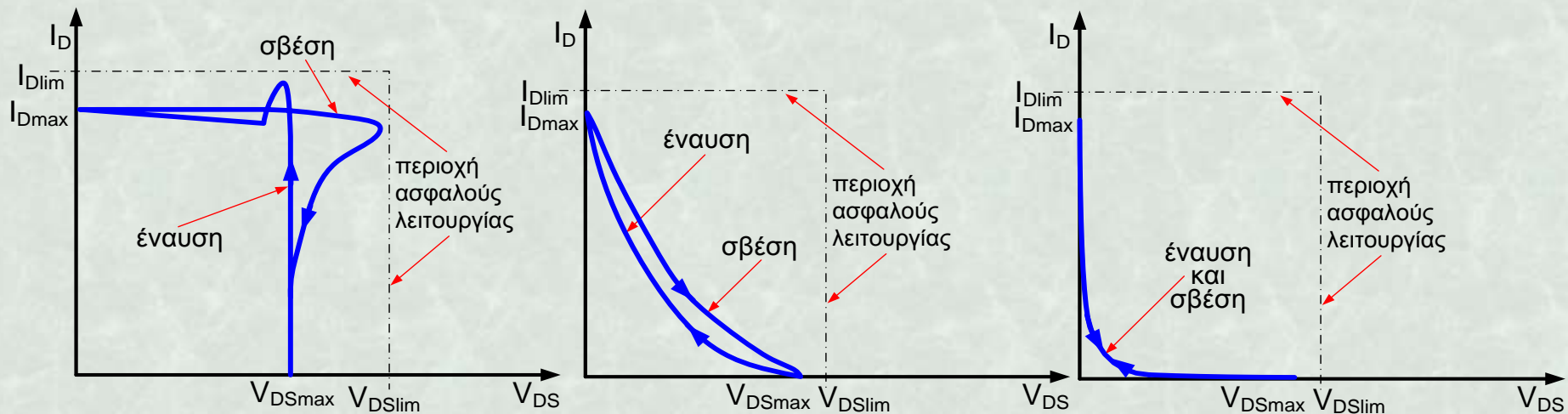
➡ **Αύξηση διακοπτικών απωλειών.**



Προσεγγιστικές κυματομορφές

Κυκλώματα Προστασίας - Εισαγωγή

Θέσεις λειτουργίας ενός ημιαγωγικού διακόπτη, στις στατικές χαρακτηριστικές του transistor, κατά την έναυση και τη σβέση του, σ' ένα μετατροπέα ΣΤ-ΣΤ.



Χωρίς κύκλωμα προστασίας (snubber) από μεταβατικές καταστάσεις.

Με κύκλωμα προστασίας (snubber) από μεταβατικές καταστάσεις.

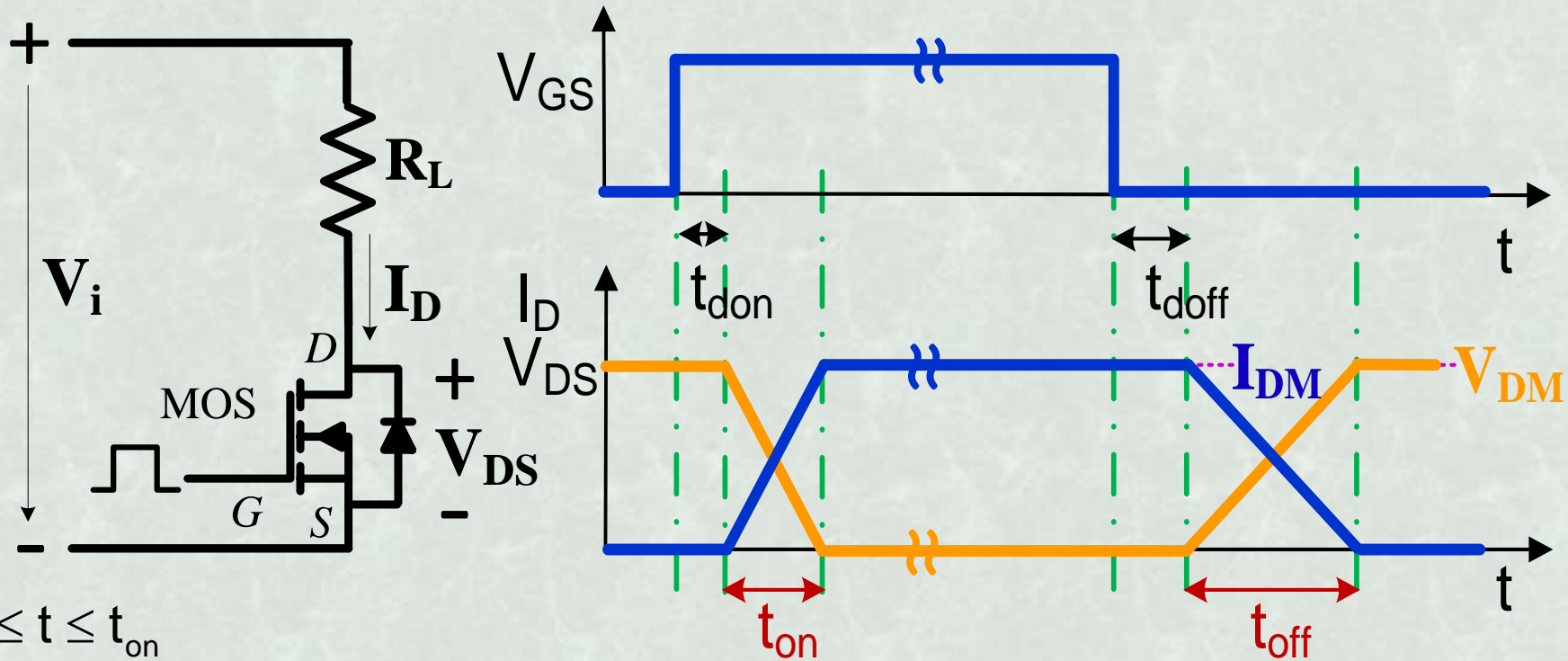
Με μετάβαση κατά το μηδενισμό του ρεύματος και της τάσης

- Με χρήση βοηθητικών κυκλωμάτων προστασίας (Snubbers) καθυστερείται η άνοδος του ρεύματος (έναυση) ή η άνοδος της τάσης (σβέση) με αποτέλεσμα:
 - ⇒ οι διαδοχικές θέσεις λειτουργίας του ημιαγωγικού διακόπτη να βρίσκονται μέσα στην περιοχή ασφαλούς λειτουργίας.



Διακοπτικές απώλειες σε τοπολογία με ωμικό φορτίο

Γραμμική μεταβολή



Για: $0 \leq t \leq t_{on}$

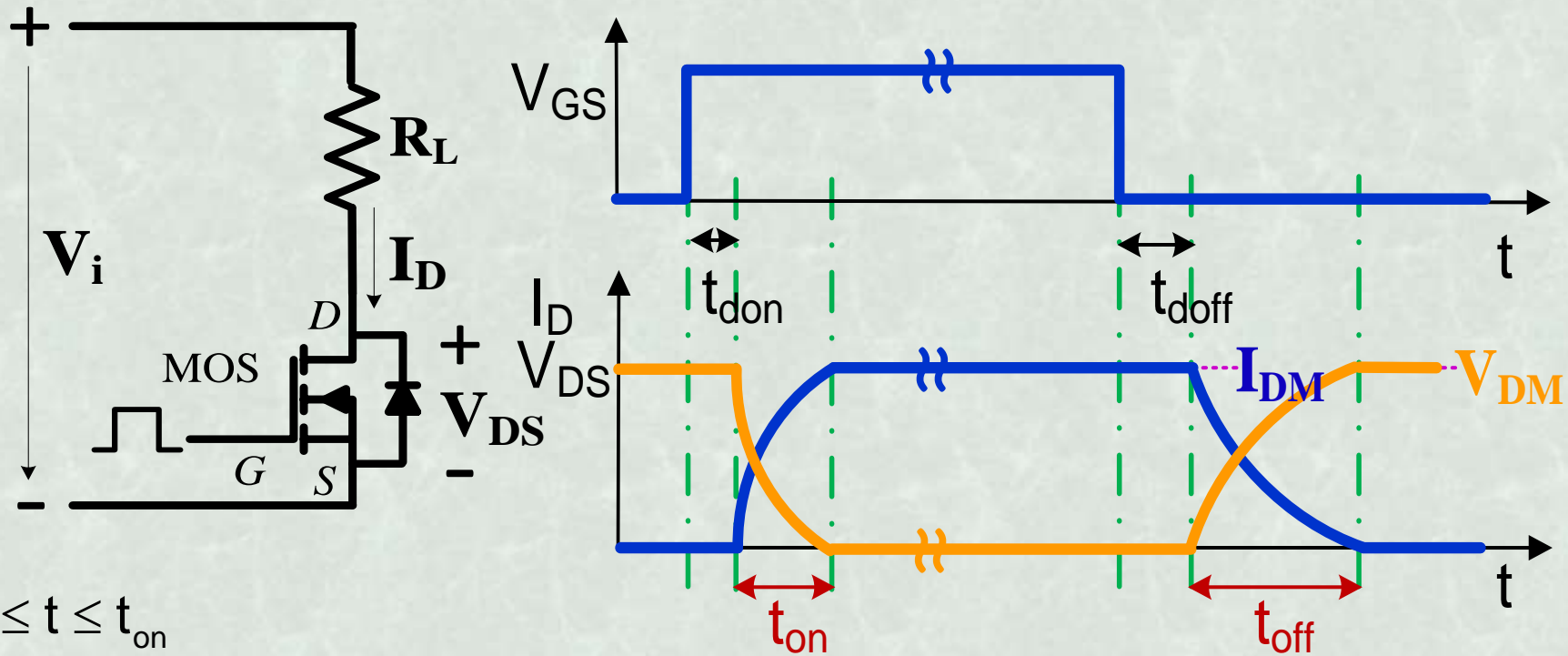
$$u_{DS}(t) = V_{DM} \cdot \left[1 - \frac{t}{t_{on}} \right], \quad i_D(t) = I_{DM} \cdot \frac{t}{t_{on}}, \quad p(t) = u_{DS}(t) \cdot i_D(t) = V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot \left[1 - \frac{t}{t_{on}} \right] \cdot \frac{t}{t_{on}}$$

$$\text{Άρα: } W_{on} = \int_0^{t_{on}} p(t) \cdot dt = \boxed{\frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{6} \cdot t_{on}} \quad \text{Όμοια: } W_{off} = \int_0^{t_{off}} p(t) \cdot dt = \boxed{\frac{V_{DM} \cdot I_{DM}}{6} \cdot t_{off}}$$



Διακοπτικές απώλειες σε τοπολογία με ωμικό φορτίο

Εκθετική μεταβολή



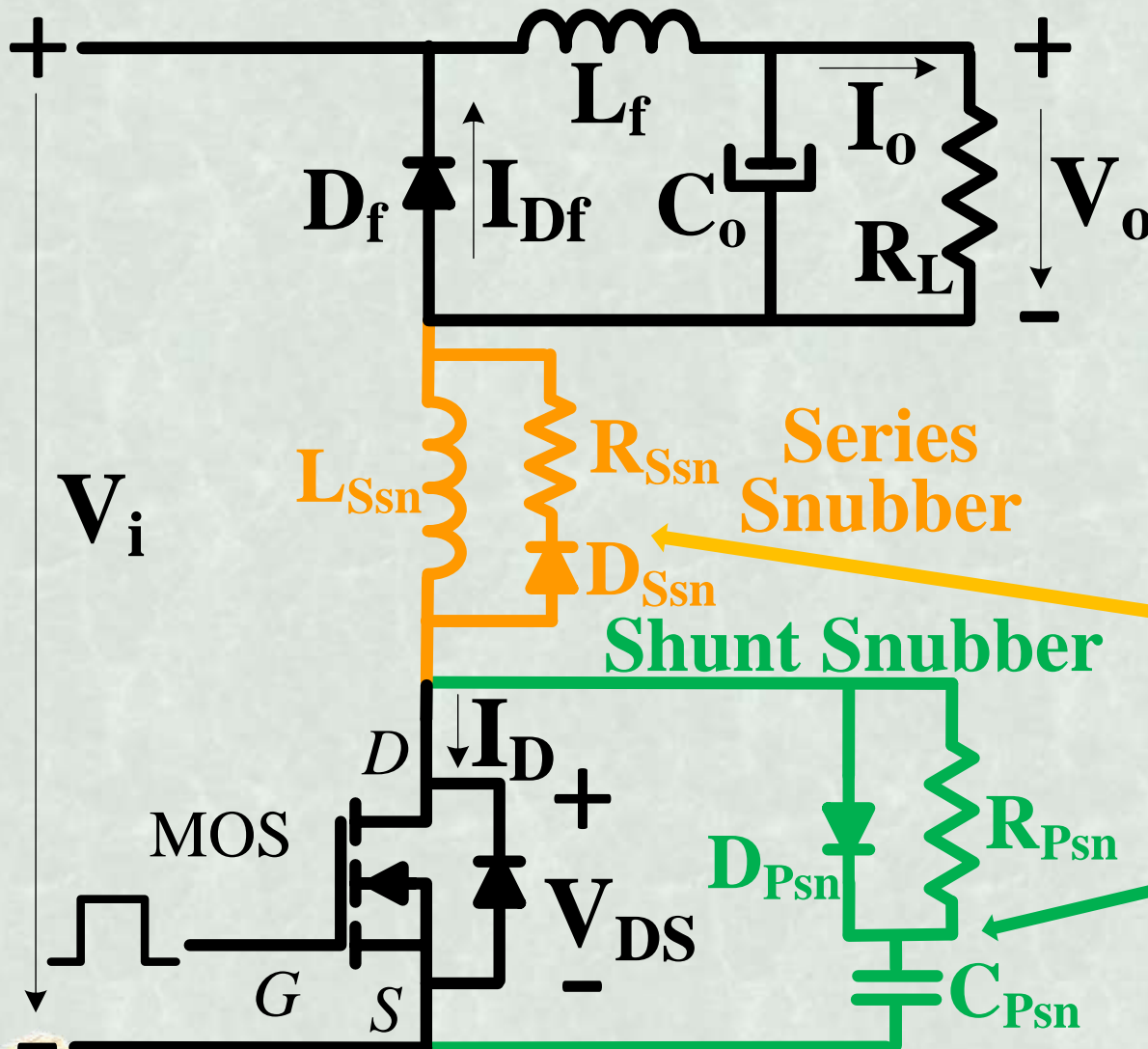
Για: $0 \leq t \leq t_{on}$

$$u_{DS}(t) = V_{DM} \cdot e^{\left(\frac{-t}{T_{on}}\right)}, i_D(t) = I_{DM} \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{T_{on}}\right)}\right], p(t) = V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{T_{on}}\right)}\right] \cdot e^{\left(\frac{-t}{T_{on}}\right)}$$

$$\text{Άρα: } W_{on} = \int_0^{t_{on}} p(t) \cdot dt = \boxed{\frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot T_{on}}{2}} \quad \text{Όμοια: } W_{off} = \int_0^{t_{off}} p(t) \cdot dt = \boxed{\frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot T_{off}}{2}}$$



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

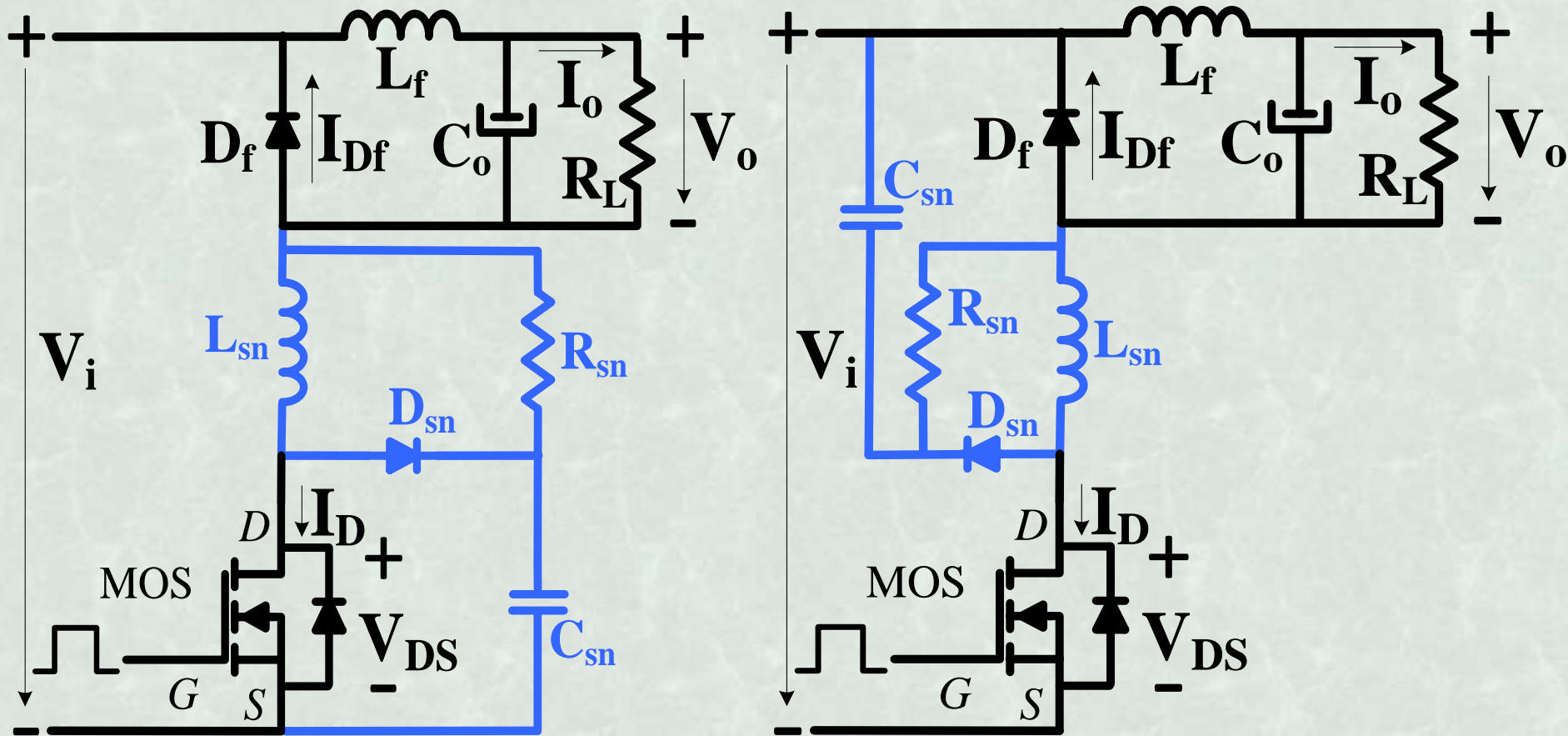


Με τα κυκλώματα αυτά περιορίζονται οι απώλειες κατά την έναυση και τη σβέση ενός ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος.

ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΑΥΣΗΣ

ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗ ΤΗΣ ΣΒΕΣΗΣ

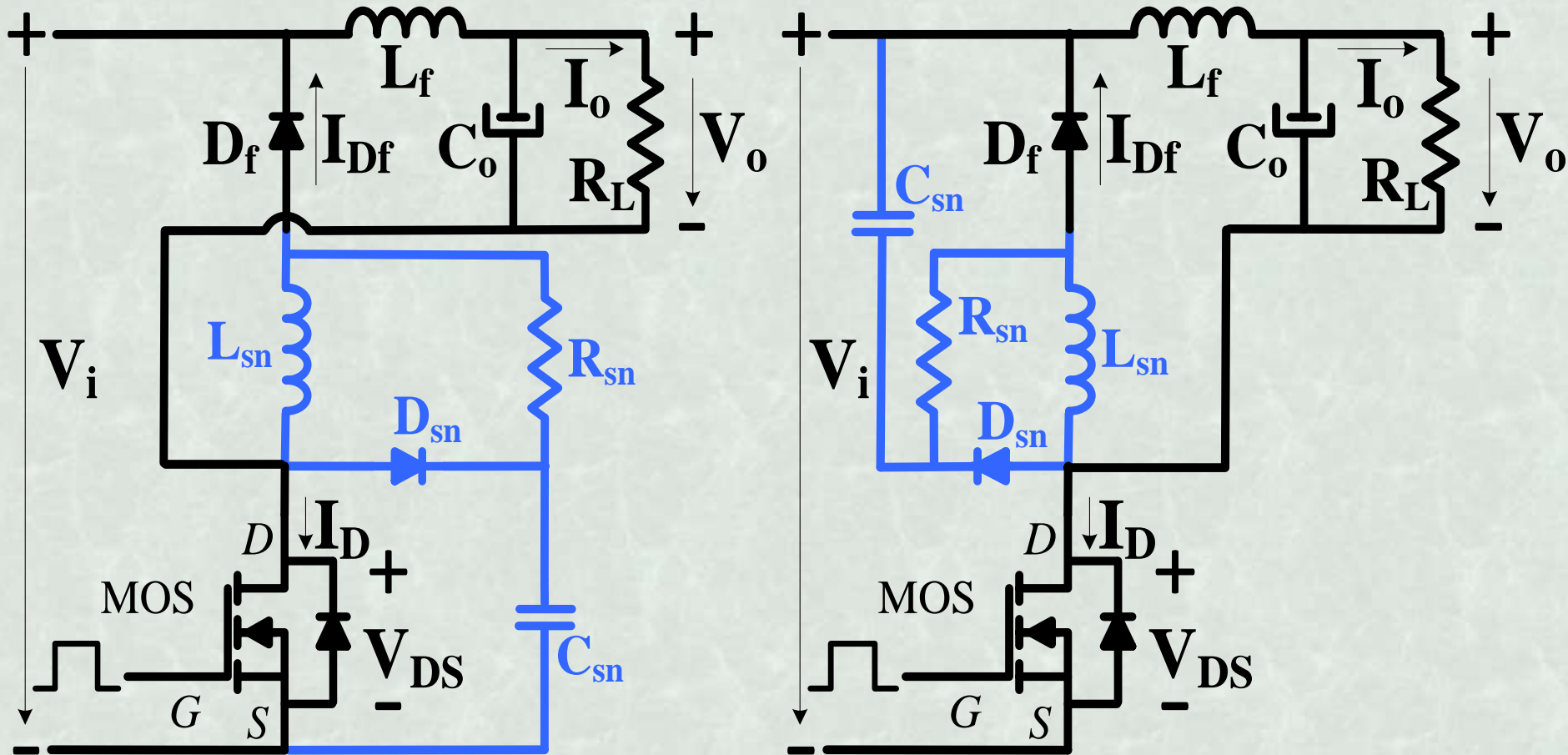
Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)



Σύνθεση των δύο κυκλωμάτων υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

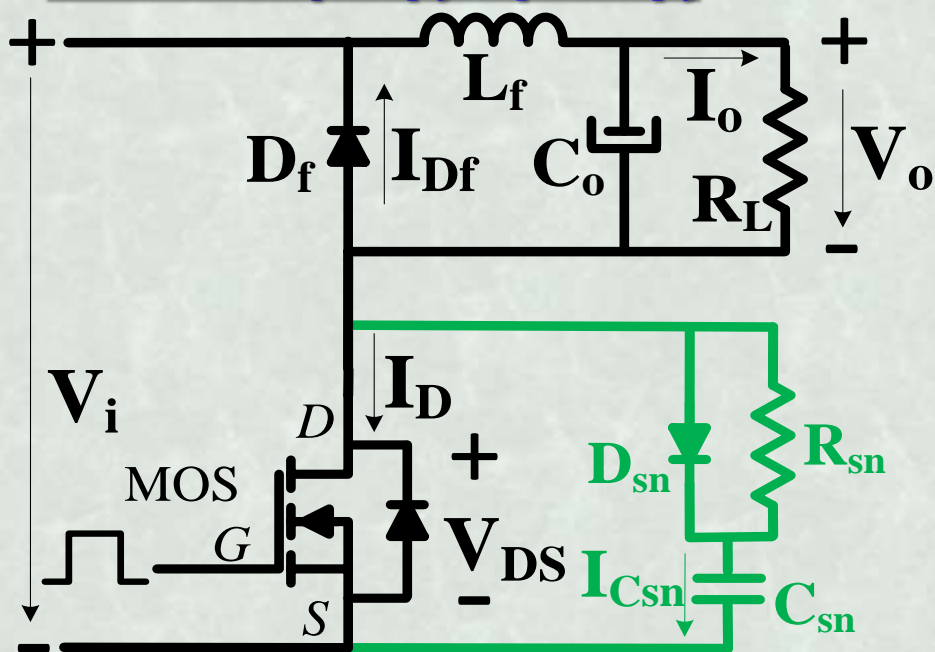


Σύνθεση των δύο κυκλωμάτων υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της σβέσης

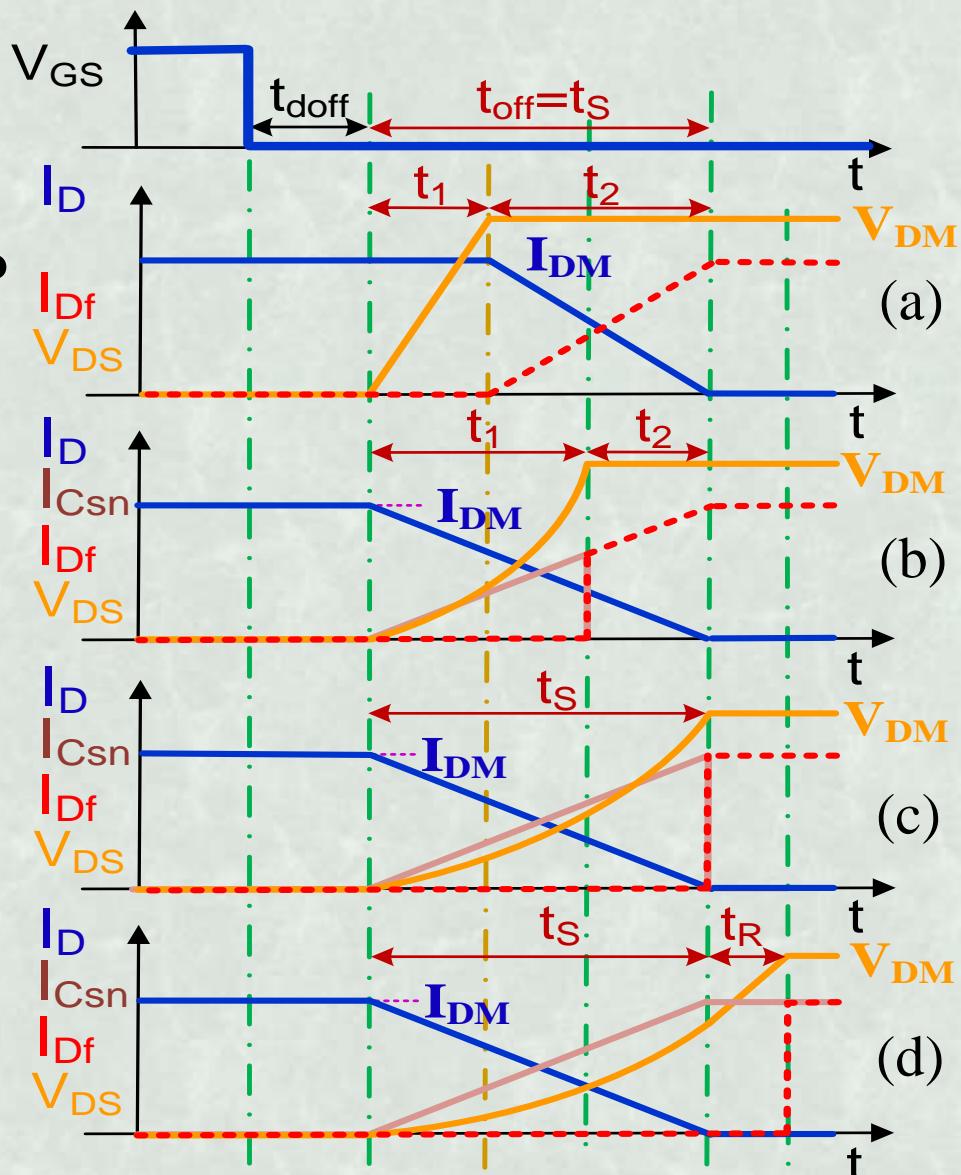



Η συμπεριφορά εξαρτάται από την τιμή του C_{sn} . Ορίζεται:

Κυματομορφές

- a. Χωρίς Snubber
- b. $C_{sn} < C_{sn,N}$
- c. $C_{sn} = C_{sn,N}$
- d. $C_{sn} > C_{sn,N}$

$$C_{sn,N} = \frac{I_{DM} \cdot t_{off}}{2 \cdot V_{DM}}$$

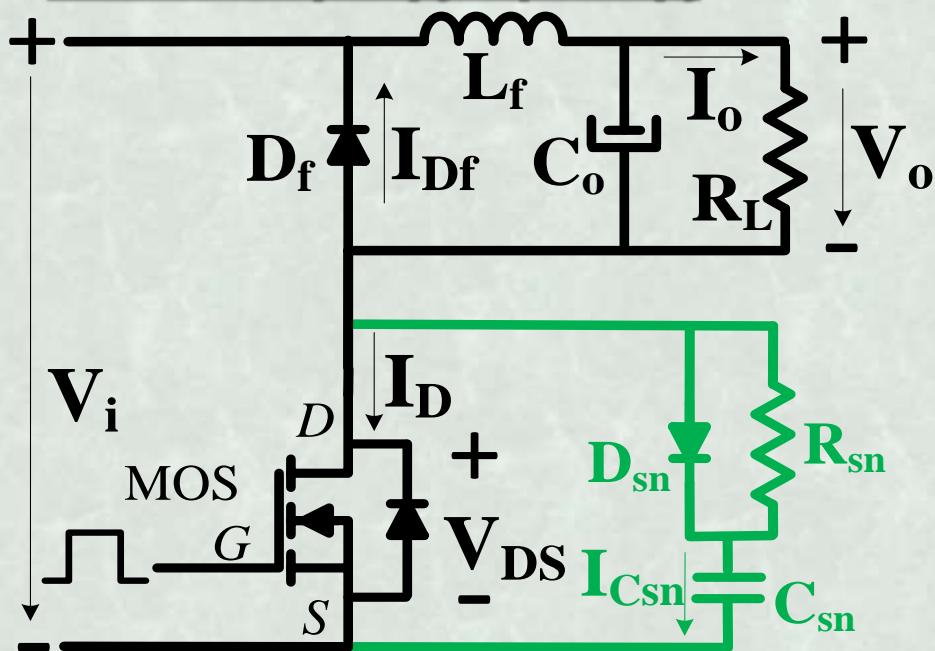




Κυκλώματα υποβοήθησης της
έντασης και της σβέσης των
ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος
(Snubbers)

Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της σβέσης

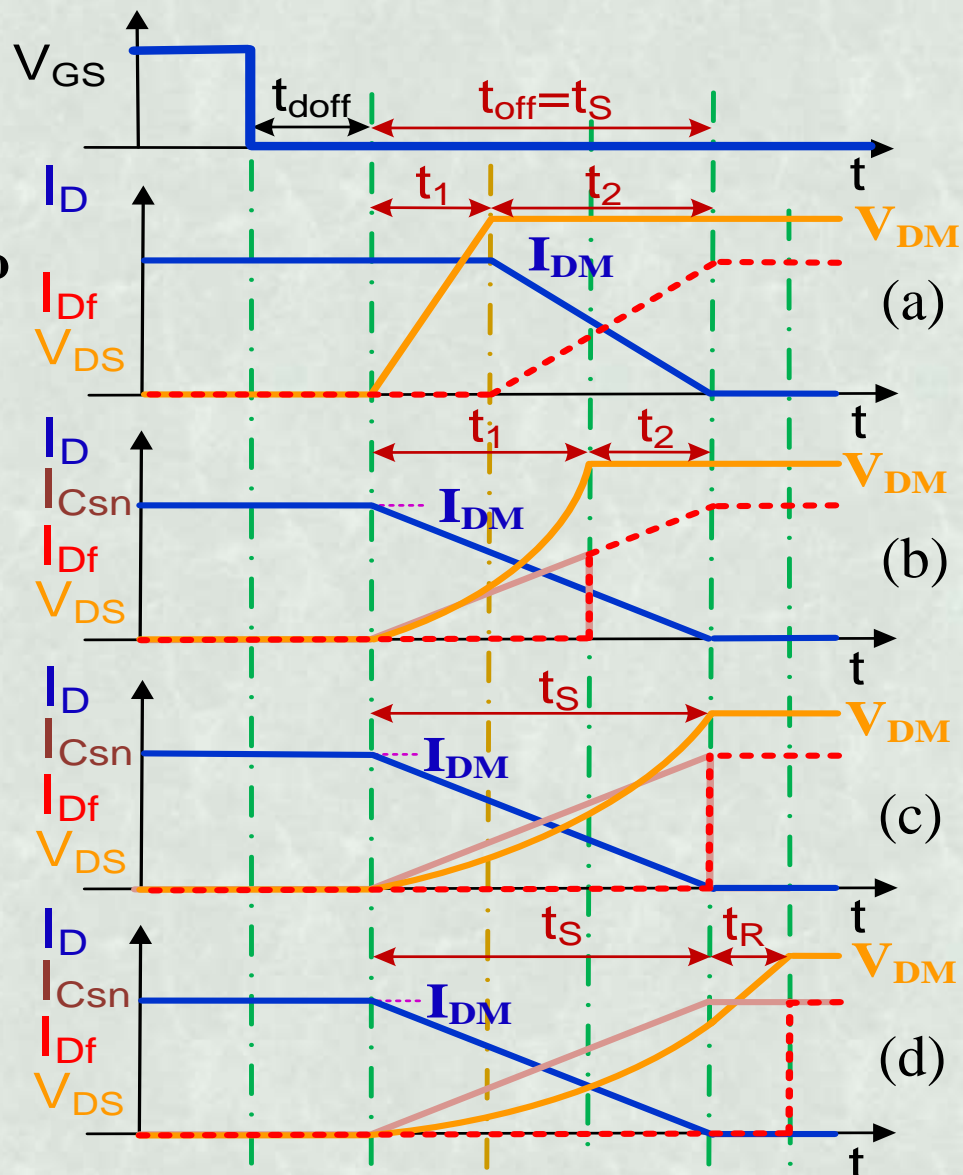


Η συμπεριφορά εξαρτάται από την τιμή του C_{sn} .
Ορίζεται:

$$C_{sn,N} = \frac{I_{DM} \cdot t_{off}}{2 \cdot V_{DM}}$$

Κυματομορφές

- Χωρίς Snubber
- $C_{sn} < C_{sn,N}$
- $C_{sn} = C_{sn,N}$
- $C_{sn} > C_{sn,N}$



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της σβέσης (shunt snubber)

- ❑ Όλα τα στοιχεία θεωρούνται ιδανικά.
- ❑ Θεωρούμε ότι το ρεύμα στο τρανζίστορ μειώνεται γραμμικά.

Ρεύμα στο τρανζίστορ

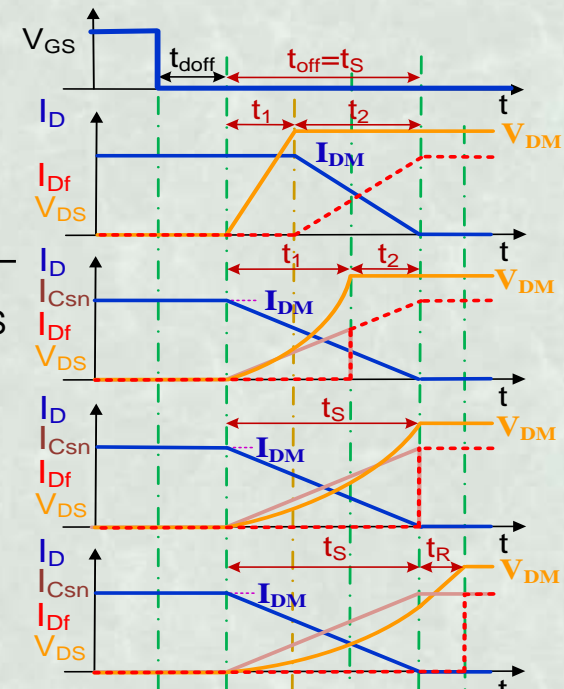
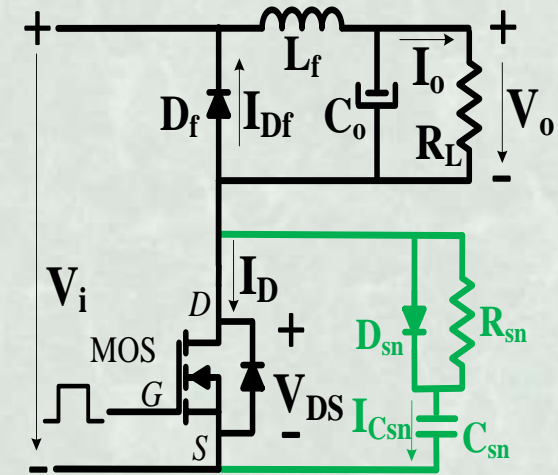
MOSFET, για $0 \leq t \leq t_S$: $i_D(t) = I_{DM} \cdot \left[1 - \frac{t}{t_S} \right]$

Τάση στον πυκνωτή C_{sn} , για $0 \leq t \leq t_1$ ή $0 \leq t \leq t_S$:

$$u_{C_{sn}}(t) = \frac{1}{C_{sn}} \cdot \int_0^t [I_{DM} - i_D(t)] \cdot dt = \frac{I_{DM}}{C_{sn}} \cdot \int_0^t \frac{t}{t_S} \cdot dt = \frac{I_{DM} \cdot t^2}{2 \cdot C_{sn} \cdot t_S}$$

Ορίζεται ως τιμή βάσης $C_{sn,N}$ για τον πυκνωτή C_{sn} , η τιμή εκείνη για την οποία: $u_{C_{sn}}(t) = V_{DM}$ όταν $t = t_S$

Επομένως: $C_{sn,N} = \frac{I_{DM} \cdot t_S}{2 \cdot V_{DM}}$



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της σβέσης (shunt snubber)

Περίπτωση $C_{sn} < C_{sn,N}$

Υπολογισμός του χρονικού διαστήματος t_1 :

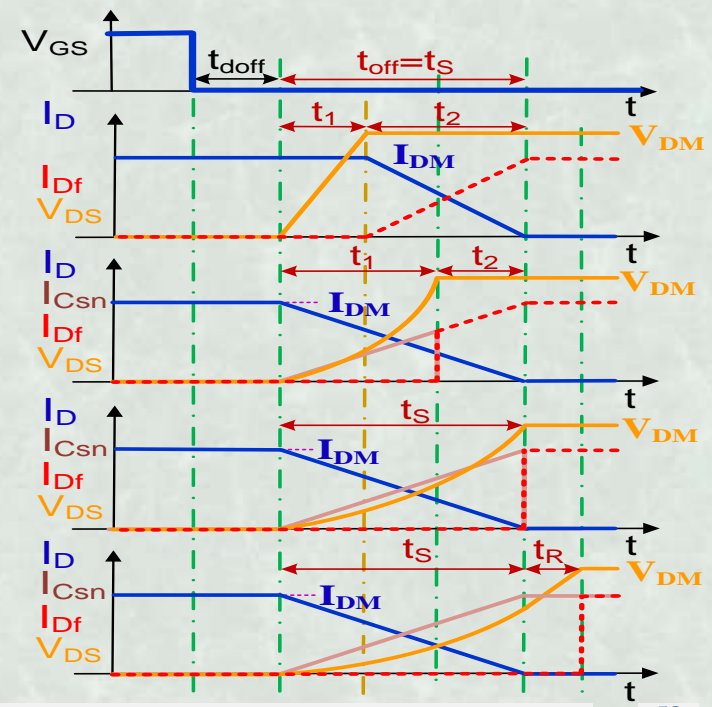
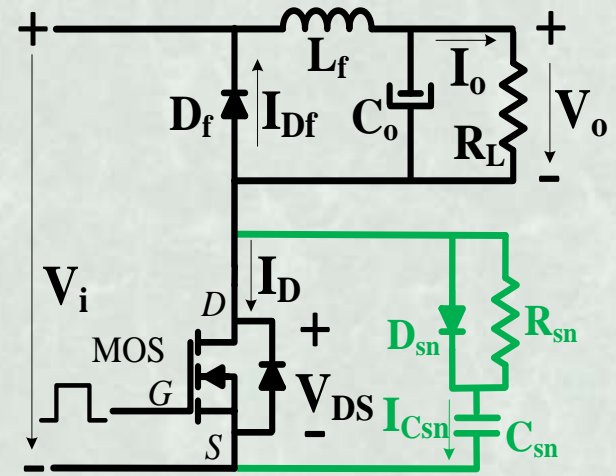
$$V_{DM} = \frac{I_{DM} \cdot t_1^2}{2 \cdot C_{sn} \cdot t_s} \Rightarrow t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot C_{sn} \cdot V_{DM} \cdot t_s}{I_{DM}}} = \sqrt{\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}}} \cdot t_s$$

Ενέργεια W_1 που χάνεται στο τρανζίστορ MOS στο διάστημα $0 \leq t \leq t_1$:

$$W_1 = \int_0^{t_1} p(t) \cdot dt = \int_0^{t_1} u_{DS}(t) \cdot i_D(t) \cdot dt$$

$$\Rightarrow W_1 = \frac{I_{DM}^2}{2 \cdot C_{sn}} \cdot \left[\frac{t_1^3}{3 \cdot t_s} - \frac{t_1^4}{4 \cdot t_s^2} \right]$$

$$\Rightarrow W_1 = V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_s \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{t_1}{t_s} - \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{t_1}{t_s} \right)^2 \right]$$



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της σβέσης (shunt snubber)

Περίπτωση $C_{sn} < C_{sn,N}$

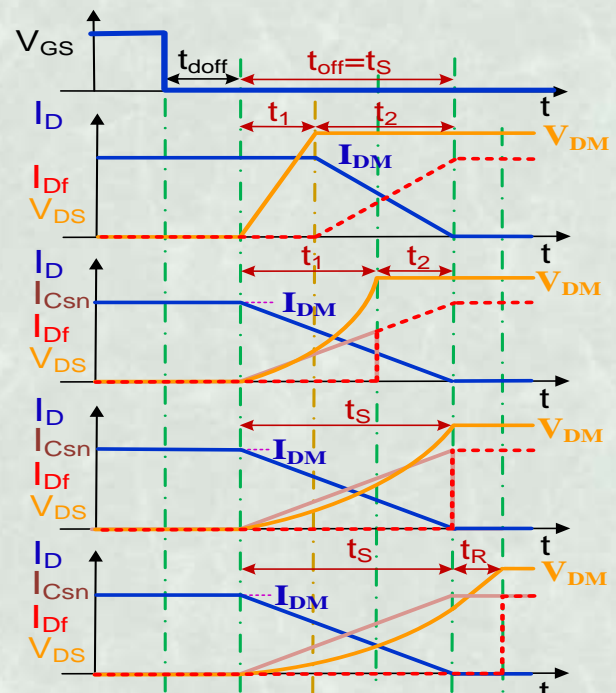
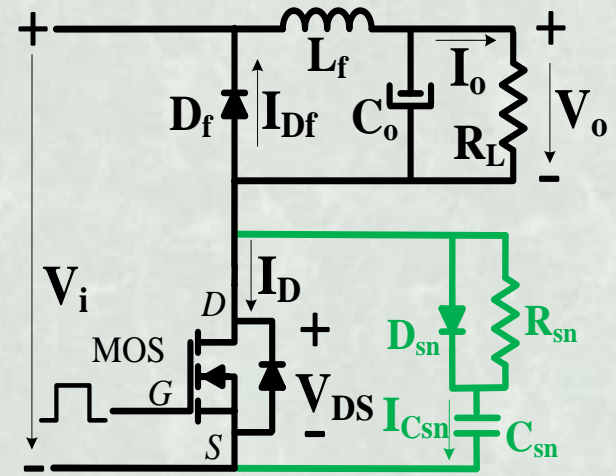
Ενέργεια W_2 που χάνεται στο τρανζίστορ MOS στο διάστημα $t_1 \leq t \leq t_s$:

$$W_2 = \int_{t_1}^{t_s} u_{DS}(t) \cdot i_D(t) \cdot dt = \int_{t_1}^{t_s} V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot \left[1 - \frac{t}{t_s} \right] \cdot dt$$

$$\Rightarrow W_2 = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_s}{2} \cdot \left[1 - \frac{t_1}{t_s} \cdot \left(2 - \frac{t_1}{t_s} \right) \right]$$

Συνολική ενέργεια W_{Tr} που χάνεται στο τρανζίστορ MOS κατά τη σβέση:

$$W_{Tr} = W_1 + W_2 = V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_s \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{t_1}{t_s} - \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{t_1}{t_s} \right)^2 \right] + \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_s}{2} \cdot \left[1 - \frac{t_1}{t_s} \cdot \left(2 - \frac{t_1}{t_s} \right) \right]$$



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της σβέσης (shunt snubber)

Περίπτωση $C_{sn} < C_{sn,N}$

Συνεπώς, η ενέργεια που χάνεται στο τρανζίστορ MOS κατά τη σβέση είναι:

$$W_{Tr} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_s}{2} \cdot \left[1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{t_1}{t_s} - \frac{2}{4} \cdot \left(\frac{t_1}{t_s} \right)^2 - 2 \cdot \frac{t_1}{t_s} + \left(\frac{t_1}{t_s} \right)^2 \right]$$

$$\Rightarrow W_{Tr} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_s}{2} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{t_1}{t_s} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_1}{t_s} \right)^2 \right] \text{ και θεωρώντας: } \frac{t_1}{t_s} = \sqrt{\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}}}$$

έχουμε:

$$W_{Tr} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_s}{2} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \sqrt{\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{sn}}{C_{sn,N}} \right]$$

Η ενέργεια στον πυκνωτή C_{sn} είναι:

$$W_{sn} = \frac{C_{sn} \cdot V_{DM}^2}{2} \Rightarrow W_{sn} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_s}{2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{C_{sn}}{C_{sn,N}} \right]$$



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της σβέσης (shunt snubber)

Περίπτωση $C_{sn} < C_{sn,N}$

Άρα, η συνολική ενέργεια που χάνεται W_T , με την παρουσία του snubber, είναι:

$$W_T = W_{Tr} + W_{sn} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_S}{2} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \sqrt{\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}} + \frac{C_{sn}}{C_{sn,N}}} \right]$$

Η ελάχιστη τιμή της συνολικής ενέργειας που χάνεται W_{Tmin} , με την παρουσία του snubber, επιτυγχάνεται για:

$$\frac{\partial W_T}{\partial \left(\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}} \right)} = 0 \Rightarrow -\frac{4}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}}}} + 1 = 0 \Rightarrow \frac{C_{sn}}{C_{sn,N}} = \frac{4}{9}$$

Συνεπώς:

$$W_{Tmin} = \frac{5}{9} \cdot \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_S}{2} \text{ και } W_{Tr@min} = \frac{1}{3} \cdot \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_S}{2}, W_{sn@min} = \frac{2}{9} \cdot \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_S}{2}$$

Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της σβέσης (shunt snubber)

Περίπτωση $C_{sn} > C_{sn,N}$

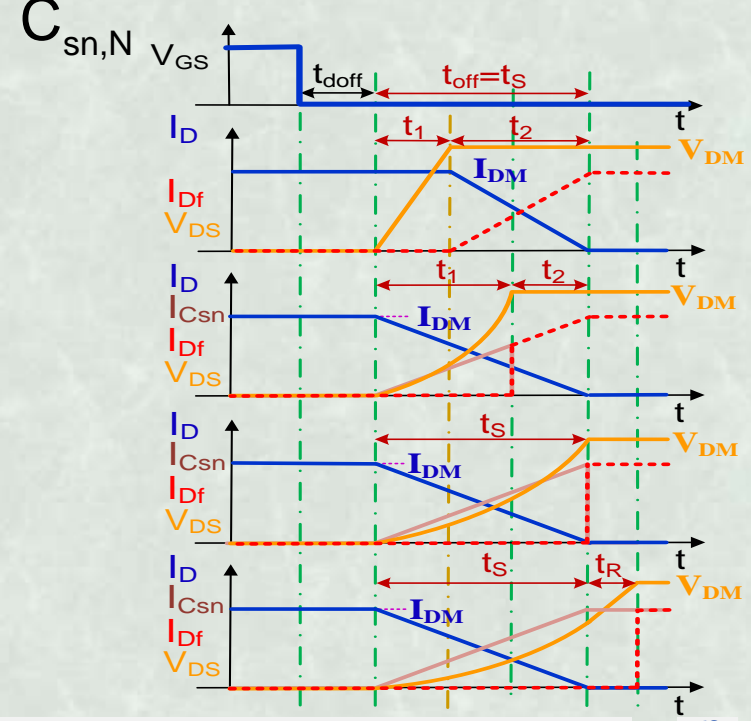
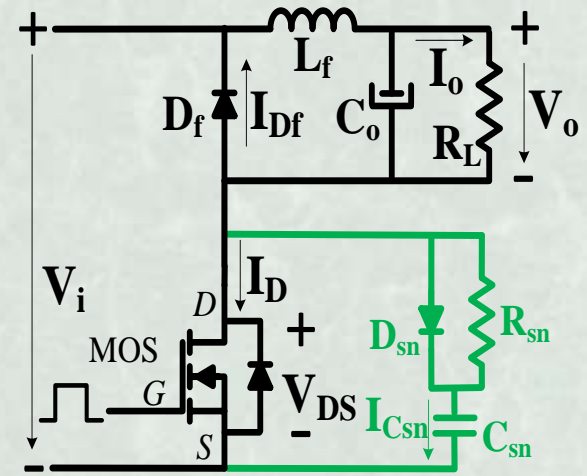
Τάση στο τρανσίστορ MOS για $t=t_S$:

$$u_{Tr}(t_S) = u_{Csn}(t_S) = \frac{I_{DM} \cdot t_S^2}{2 \cdot C_{sn} \cdot t_S} = \frac{I_{DM} \cdot t_S}{2 \cdot C_{sn}} = V_{DM} \cdot \frac{1}{\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}}}$$

Για $t \geq t_S$ το ρεύμα που ρέει μέσα από τον πυκνωτή C_{sn} είναι σταθερό, οπότε η τάση στα άκρα του αυξάνεται γραμμικά:

$$u_{Tr}(t) = u_{Csn}(t) = \frac{I_{DM}}{C_{sn}} \cdot t + u_{Csn}(t_S)$$

$$= V_{DM} \cdot \frac{1}{\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}}} \cdot \frac{2 \cdot t}{t_S} + V_{DM} \cdot \frac{1}{\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}}}$$



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της σβέσης (shunt snubber)

Περίπτωση $C_{sn} > C_{sn,N}$

Συνεπώς:

$$u_{Tr}(t) = u_{Csn}(t) = V_{DM} \cdot \frac{1}{\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}}} \cdot \left[\frac{2 \cdot t}{t_s} + 1 \right]$$

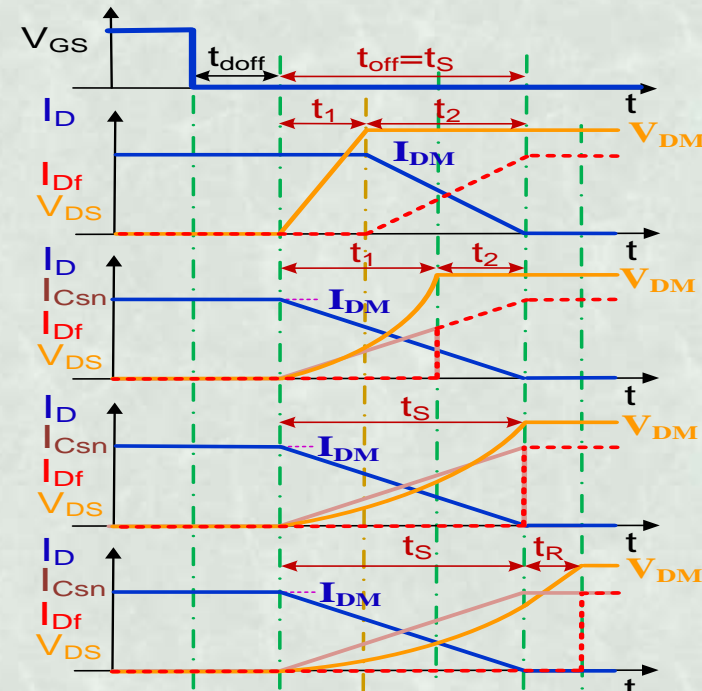
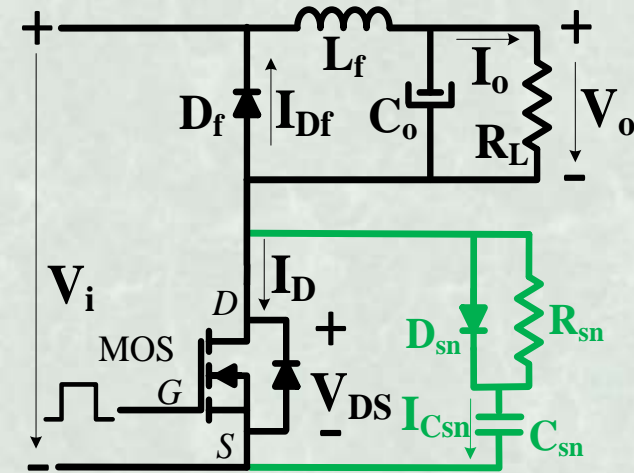
Υπολογισμός του χρονικού διαστήματος t_R :

$$u_{Csn}(t_R) = V_{DM} \Rightarrow V_{DM} \cdot \frac{1}{\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}}} \cdot \left[\frac{2 \cdot t_R}{t_s} + 1 \right] = V_{DM}$$

$$\Rightarrow t_R = \left(\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}} - 1 \right) \cdot \frac{t_s}{2}$$

Συνολικός χρόνος σβέσης t_C :

$$t_C = t_s + t_R = \left(\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}} + 1 \right) \cdot \frac{t_s}{2}$$



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της σβέσης (shunt snubber)

Περίπτωση $C_{sn} > C_{sn,N}$

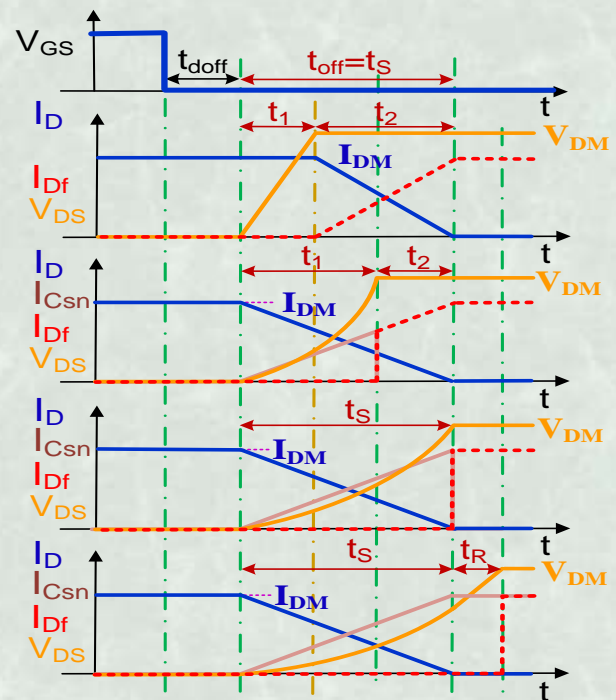
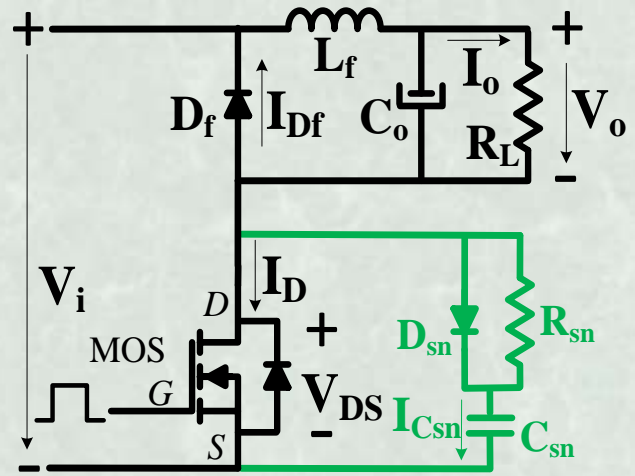
Η ενέργεια W_{Tr} που χάνεται στο τρανζίστορ MOS κατά τη σβέση είναι:

$$W_{Tr} = \int_0^{t_s} \frac{I_{DM} \cdot t^2}{2 \cdot C_{sn} \cdot t_s} \cdot I_{DM} \cdot \left[1 - \frac{t}{t_s} \right] \cdot dt = \frac{I_{DM}^2 \cdot t_s^2}{24 \cdot C_{sn}}$$

$$\Rightarrow W_{Tr} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_s}{2} \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}}}$$

Η ενέργεια στον πυκνωτή C_{sn} είναι: $W_{sn} = \frac{C_{sn} \cdot V_{DM}^2}{2}$

$$\Rightarrow W_{sn} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_s}{2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{C_{sn}}{C_{sn,N}} \right]$$



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της σβέσης (shunt snubber)

Περίπτωση $C_{sn} > C_{sn,N}$

Άρα, η συνολική ενέργεια που χάνεται W_T , με την παρουσία του snubber, είναι:

$$W_T = W_{Tr} + W_{sn} = \frac{V_{DM} \cdot I_{DM} \cdot t_s}{2} \cdot \left[\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{\left(C_{sn}/C_{sn,N}\right)} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{sn}}{C_{sn,N}} \right]$$

Η ελάχιστη τιμή της συνολικής ενέργειας που χάνεται W_{Tmin} , με την παρουσία του snubber, επιτυγχάνεται για:

$$\frac{\partial W_T}{\partial \left(\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}} \right)} = 0 \Rightarrow -\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{C_{sn}}{C_{sn,N}}} \right)^2} + \frac{1}{2} = 0 \Rightarrow \frac{C_{sn}}{C_{sn,N}} = \frac{\sqrt{3}}{3}$$

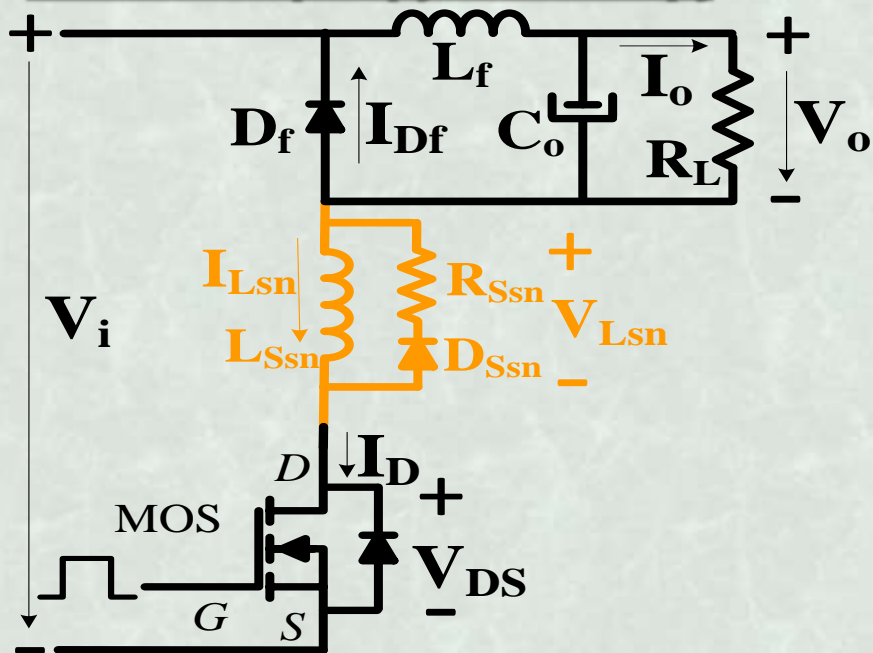
ΑΔΥΝΑΤΟ
αφού:
 $C_{sn} > C_{sn,N}$

Προσοχή: Για την ορθή λειτουργία του κυκλώματος θα πρέπει, κατά τη διάρκεια της έναυσης, ο πυκνωτής C_{sn} να εκφορτισθεί πλήρως.

Συνεπώς πρέπει: $\delta \cdot T_{SW} \geq 4 \cdot C_{sn} \cdot R_{sn}$

Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της έναυσης

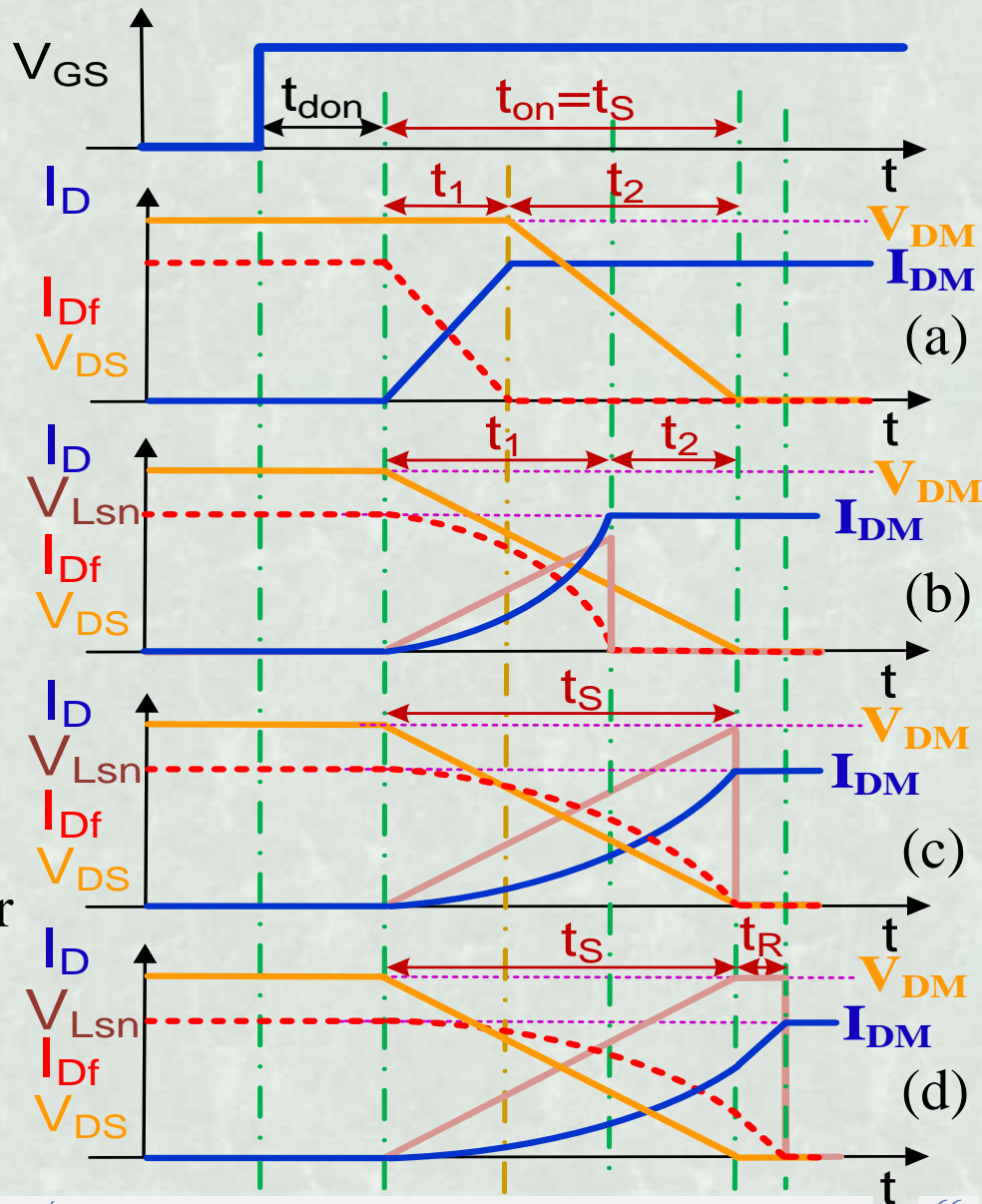


Η συμπεριφορά εξαρτάται από την τιμή του L_{sn} . Ορίζεται:

$$L_{sn,N} = \frac{V_{DM} \cdot t_{off}}{2 \cdot I_{DM}}$$

Κυματομορφές

- Χωρίς Snubber
- $L_{sn} < L_{sn,N}$
- $L_{sn} = L_{sn,N}$
- $L_{sn} > L_{sn,N}$



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

Ανάλυση της έναυσης (series snubber)

- ❑ Όλα τα στοιχεία θεωρούνται ιδανικά.
- ❑ Θεωρούμε ότι η τάση στο τρανζίστορ μειώνεται γραμμικά.

Τάση στο τρανζίστορ

MOSFET, για $0 \leq t \leq t_s$:
$$u_{DS}(t) = V_{DM} \cdot \left[1 - \frac{t}{t_s} \right]$$

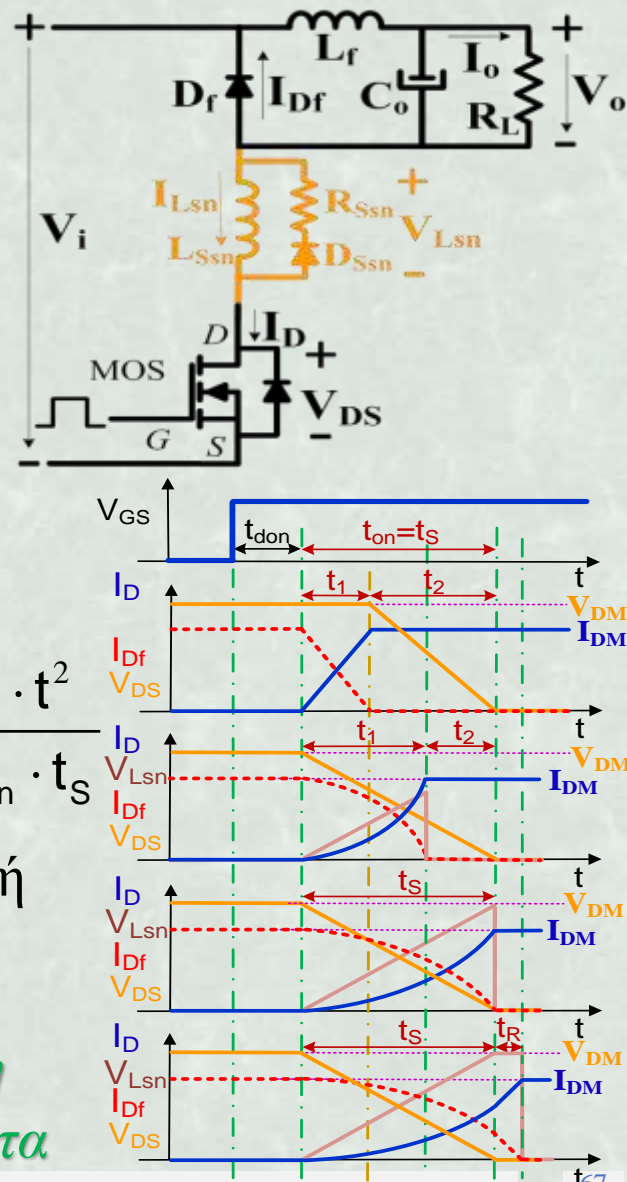
Ρεύμα στον πηνίο L_{sn} , για $0 \leq t \leq t_1$ ή $0 \leq t \leq t_s$:

$$i_{Lsn}(t) = \frac{1}{L_{sn}} \cdot \int_0^t [V_{DM} - u_{DS}(t)] \cdot dt = \frac{V_{DM}}{L_{sn}} \cdot \int_0^t \frac{t}{t_s} \cdot dt = \frac{V_{DM} \cdot t^2}{2 \cdot L_{sn} \cdot t_s}$$

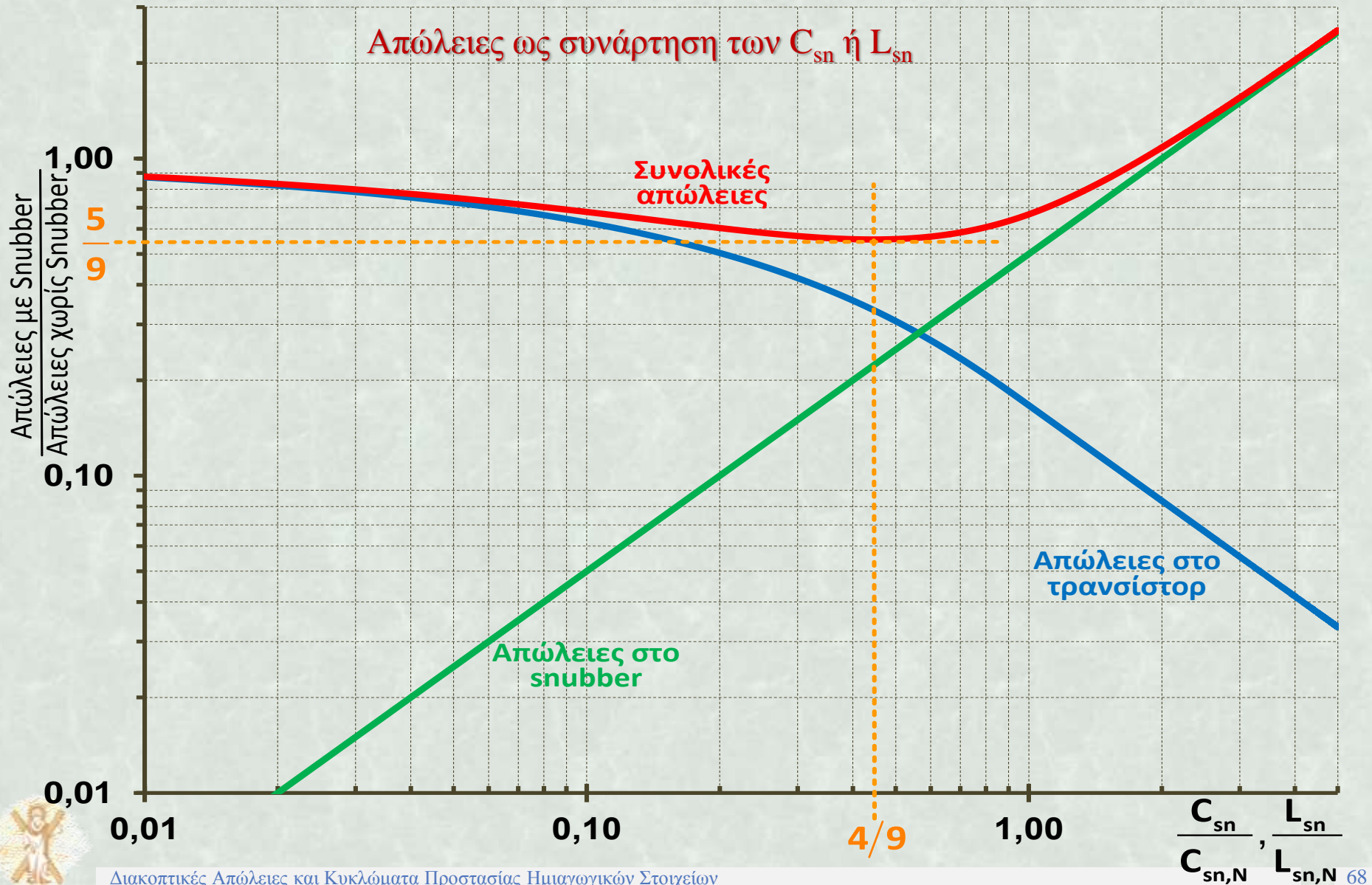
Ορίζεται ως τιμή βάσης $L_{sn,N}$ για το πηνίο L_{sn} , η τιμή εκείνη για την οποία: $i_{Lsn}(t) = I_{DM}$ όταν $t = t_s$


Επομένως:
$$L_{sn,N} = \frac{V_{DM} \cdot t_s}{2 \cdot I_{DM}}$$

*Παρόμοια ανάλυση
Δυναδικά αποτελέσματα*



Παθητικά κυκλώματα υποβοήθησης της έναυσης και της σβέσης (Snubbers)

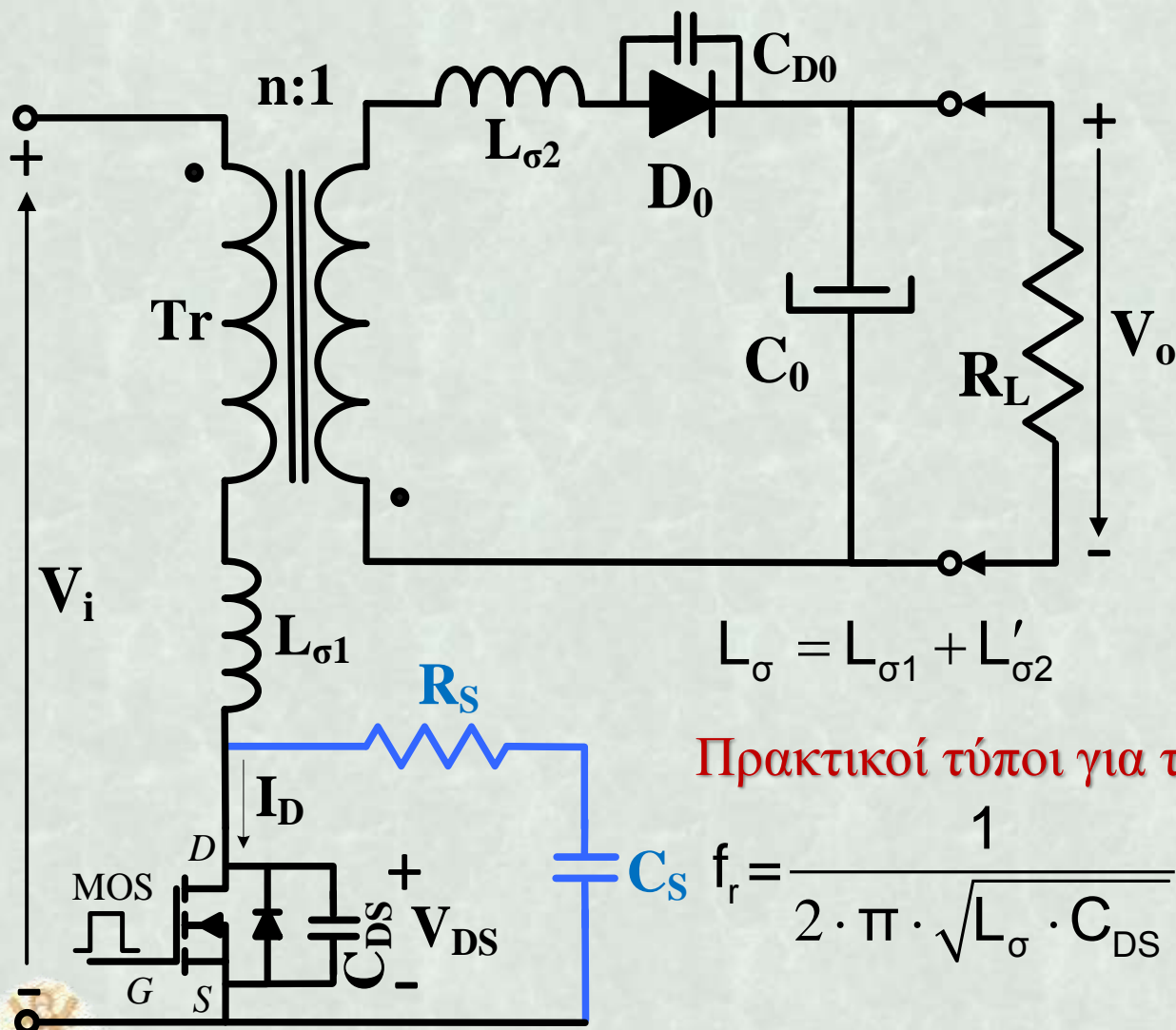




Παθητικά και ενεργητικά
κυκλώματα προστασίας από
υπερτάσεις
(Snubbers)

Παθητικά κυκλώματα προστασίας από υπερτάσεις

Προστασία από υπερτάσεις με παράλληλο κλάδο απόσβεσης RC



$$L_{\sigma} = L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2}$$

- Η υπέρταση στο MOS δημιουργείται λόγω του κυκλώματος ταλάντωσης $L_{\sigma}-C_{DS}$.
- Απαιτείται πλήρης εκφόρτιση του πυκνωτή C_S πριν την επόμενη σβέση του MOS (γίνεται κατά την έναυση του).

Πρακτικοί τύποι για την εκτίμηση των R_S και C_S

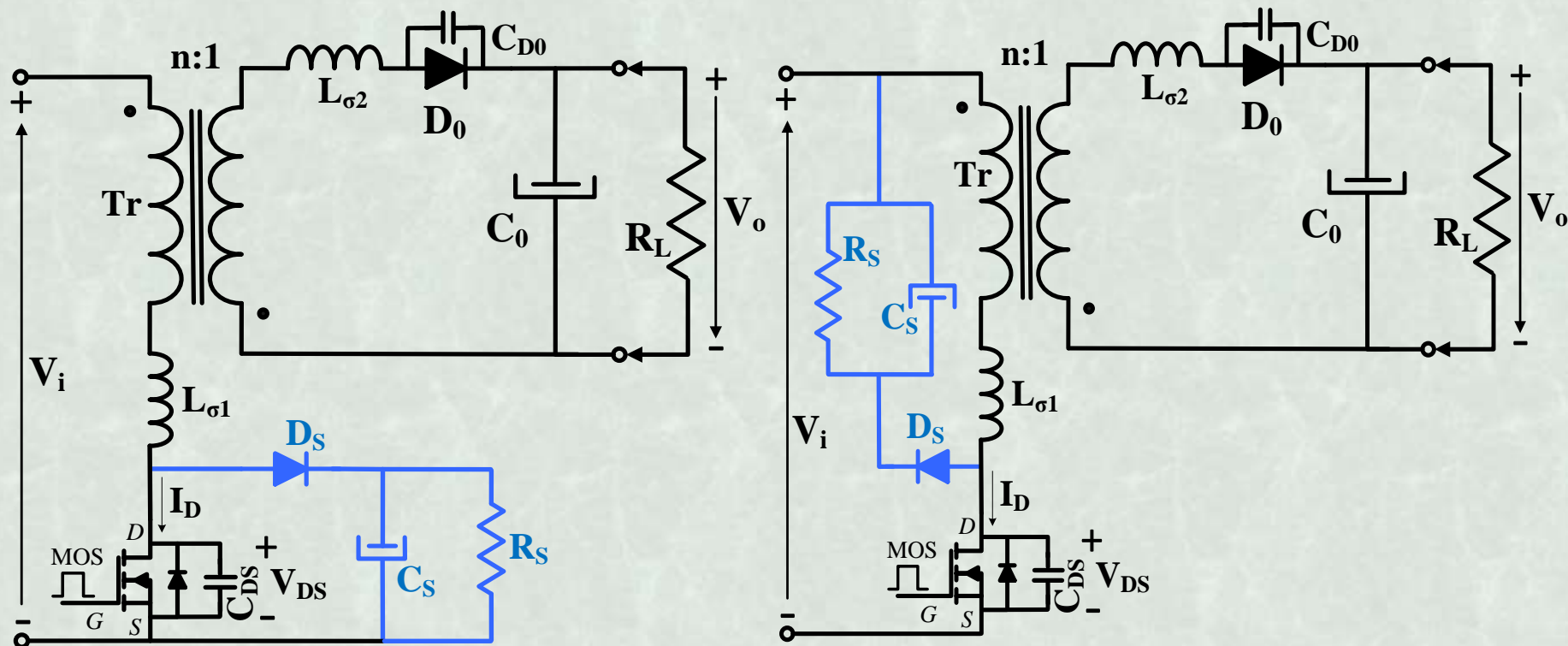
$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{\sigma} \cdot C_{DS}}}$$

$$R_S = 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot L_{\sigma}$$

$$C_S = 5 / (2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot R_S)$$

Παθητικά κυκλώματα προστασίας από υπερτάσεις

Προστασία από υπερτάσεις με κύκλωμα απόσβεσης RCD

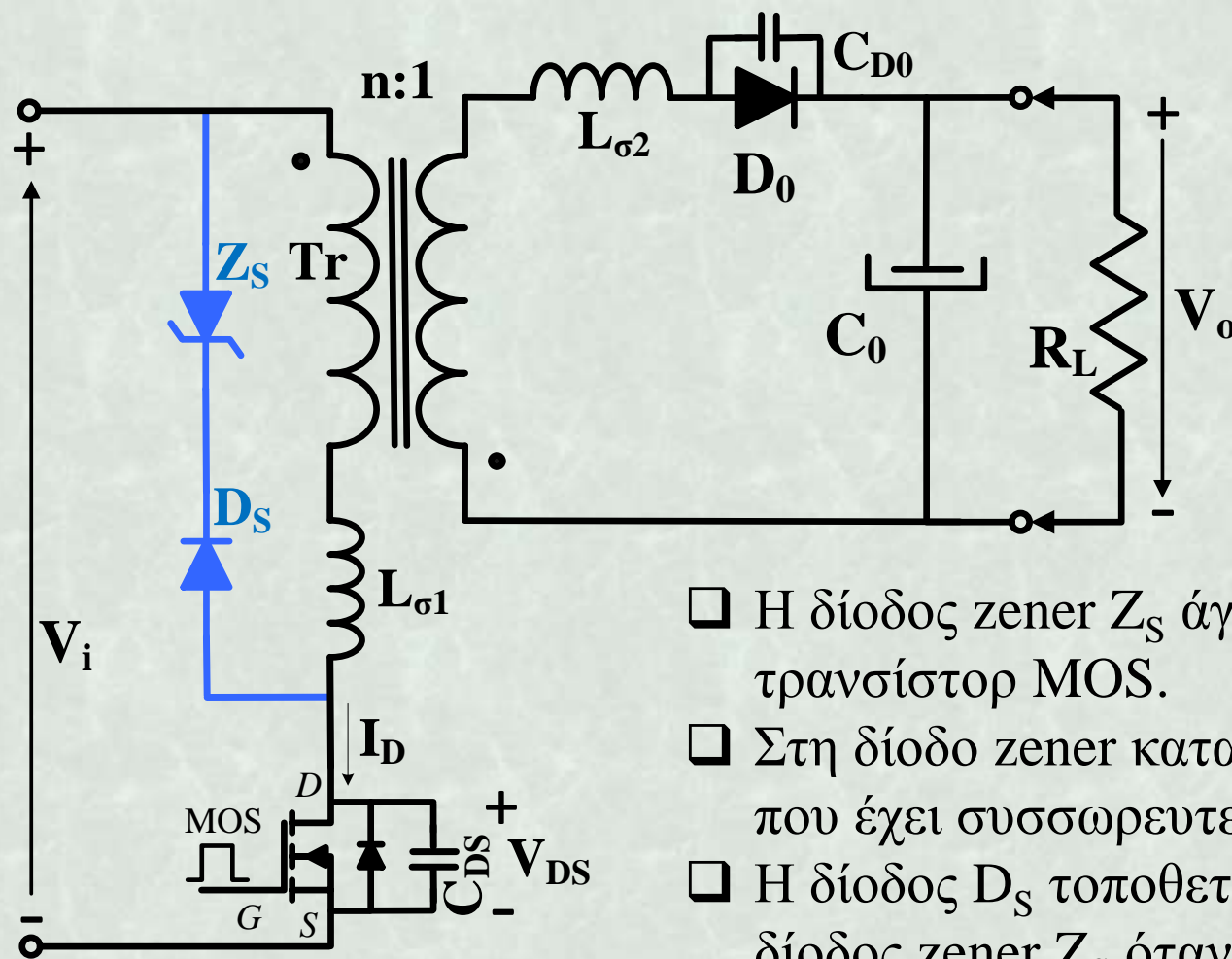


- ❑ Ο πυκνωτής C_S είναι ηλεκτρολυτικός και δρα από τη στιγμή που θα εμφανισθεί η υπέρταση.
- ❑ Απαιτείται κατάλληλος υπολογισμός, ώστε η ενέργεια που αποθηκεύεται στον πυκνωτή C_S , να αποδίδεται στην αντίσταση R_S , όταν το MOS βρίσκεται σε αγωγή.



Παθητικά κυκλώματα προστασίας από υπερτάσεις

Προστασία από υπερτάσεις με χρήση διόδου zener



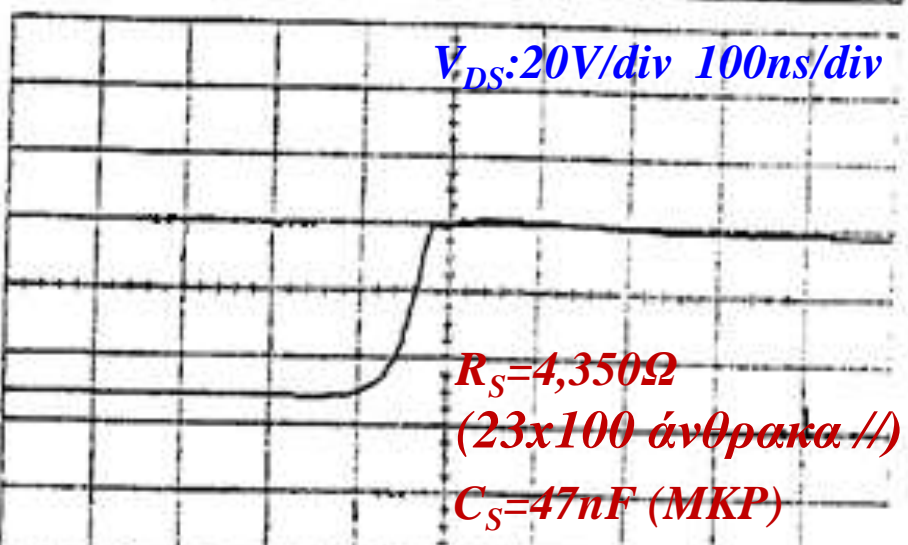
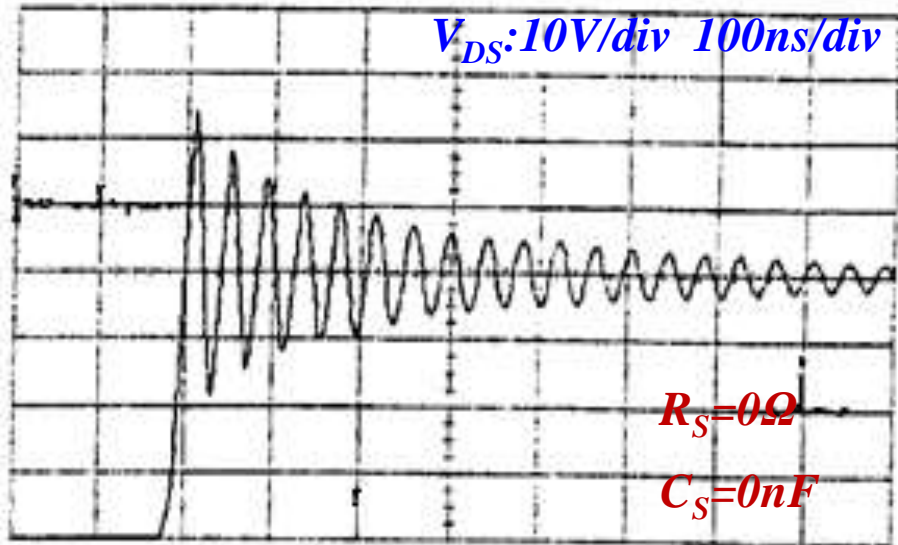
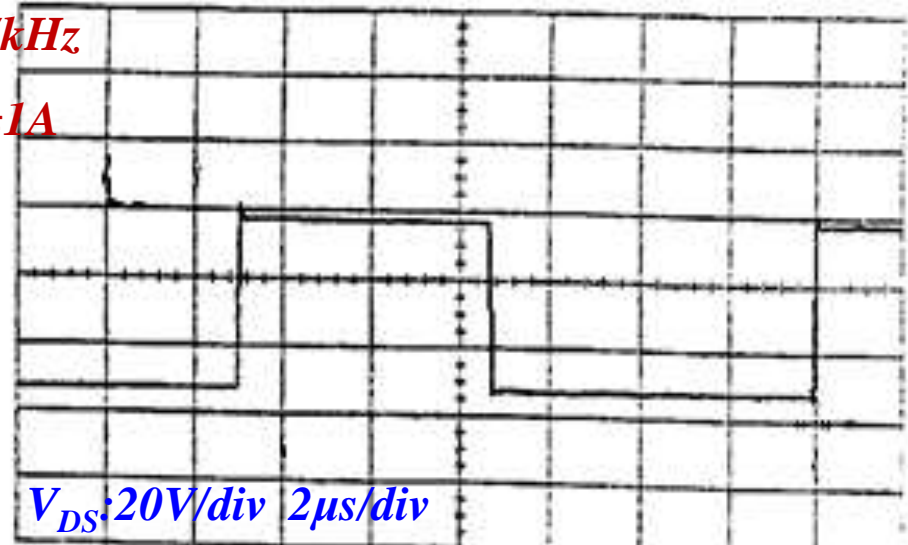
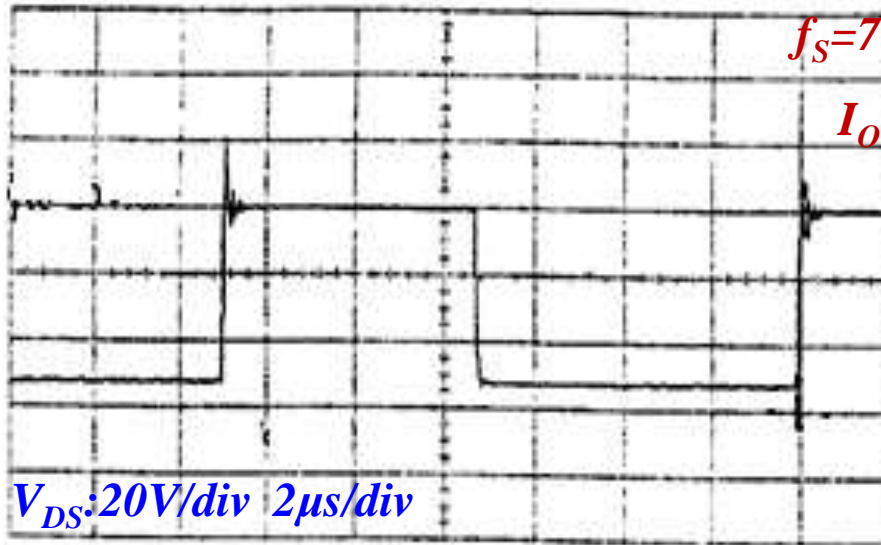
- Η δίοδος zener Z_S άγει όταν σβήνει το τρανζίστορ MOS.
- Στη δίοδο zener καταναλίσκεται η ενέργεια που έχει συσσωρευτεί στο πηνίο σκέδασης.
- Η δίοδος D_S τοποθετείται για να μην άγει η δίοδος zener Z_S όταν δίνουμε παλμό έναυσης στο τρανζίστορ MOS.



Προστασία από υπερτάσεις με παράλληλο κλάδο απόσβεσης RC

Χωρίς κύκλωμα προστασίας RC

Με κύκλωμα προστασίας RC

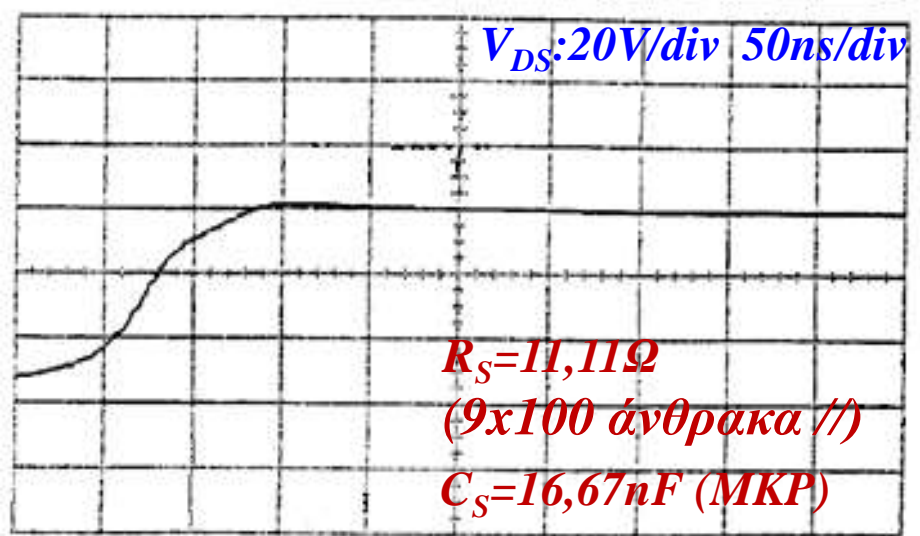
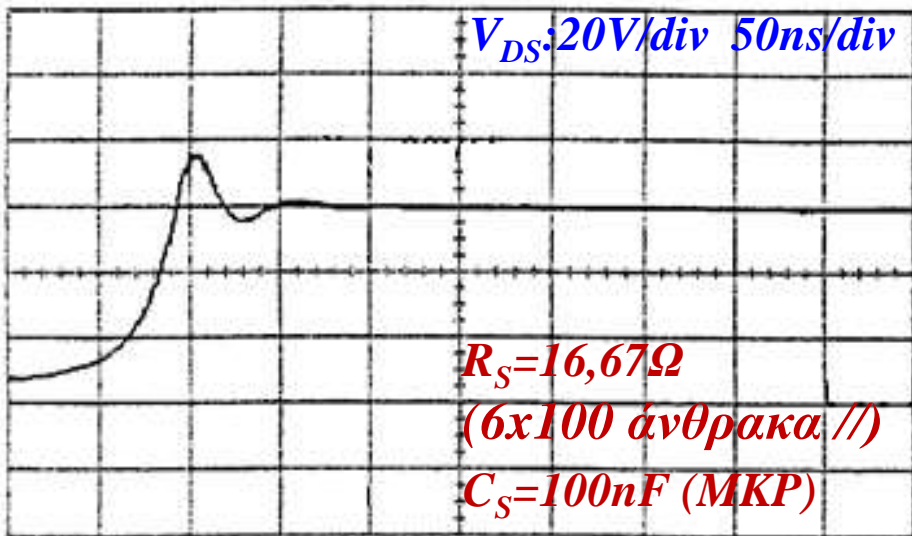
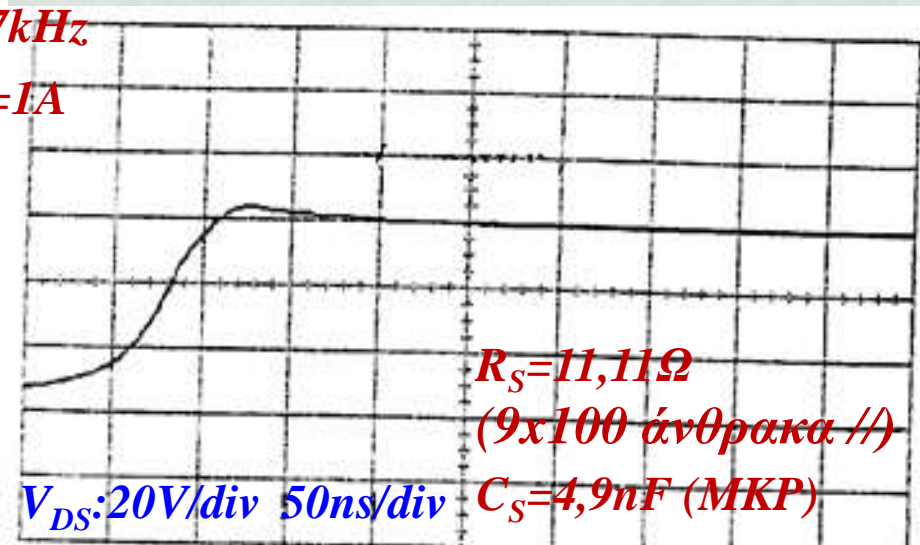
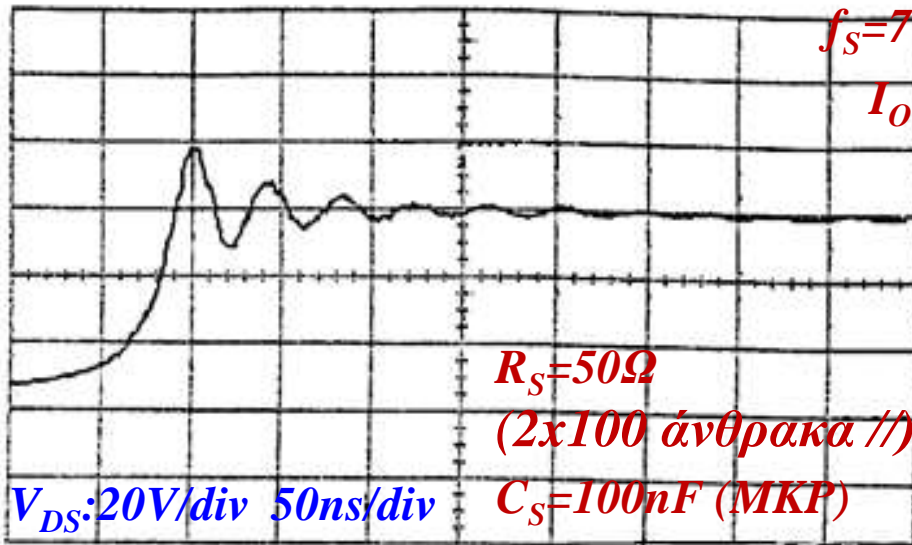


Πειραματική μελέτη του παράλληλου κλάδου απόσβεσης RC

Προστασία από υπερτάσεις με παράλληλο κλάδο απόσβεσης RC

Επίδραση αντίστασης R_S

Επίδραση πυκνωτή C_S

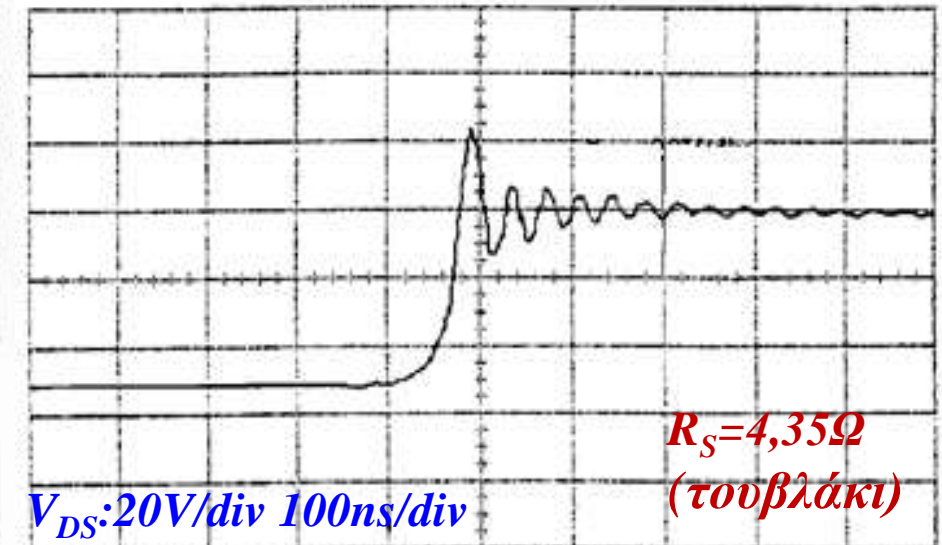
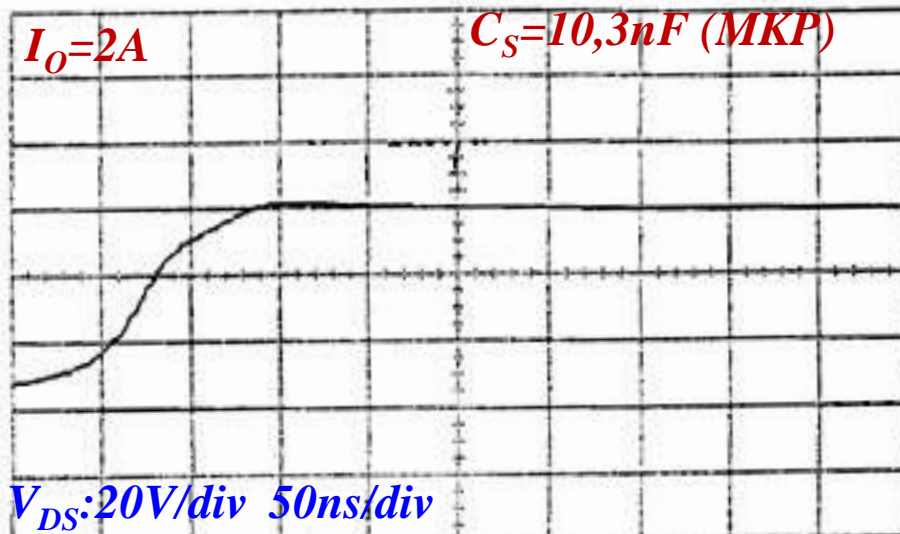
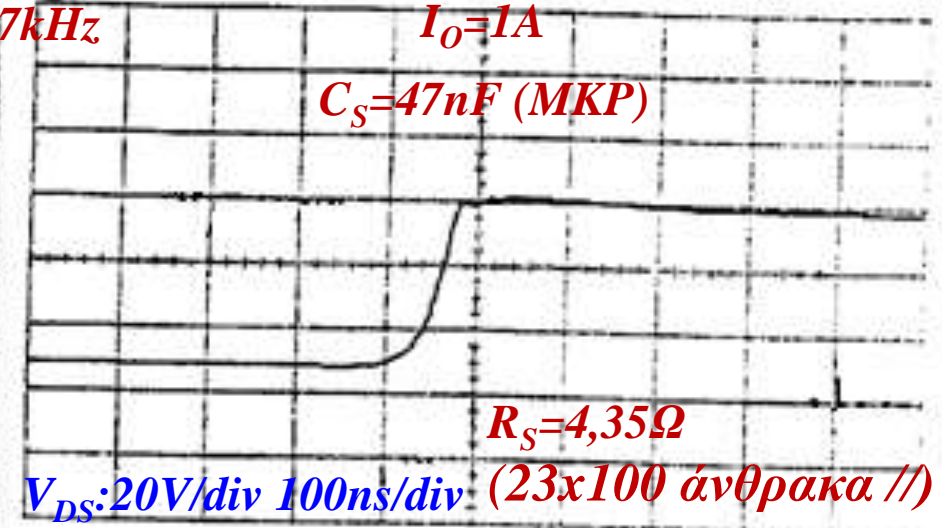
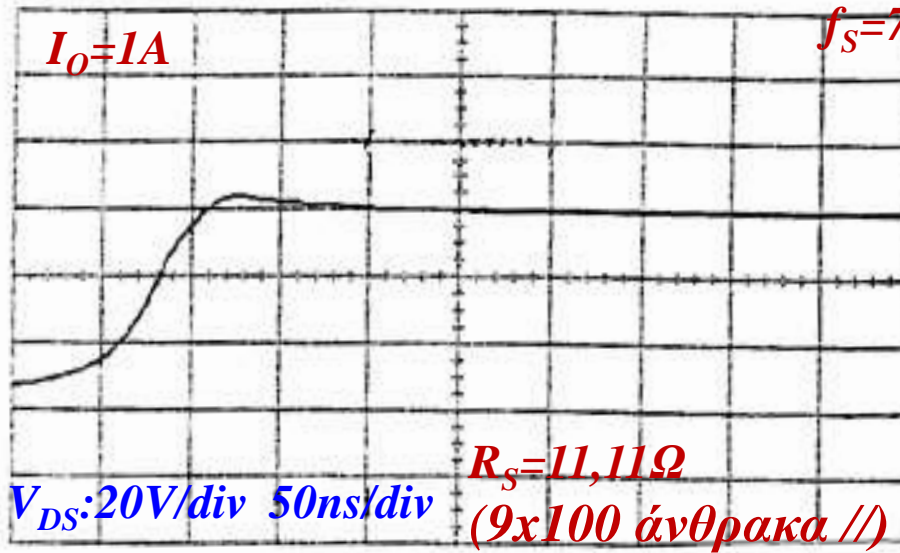


Πειραματική μελέτη του παράλληλου κλάδου απόσβεσης RC

Προστασία από υπερτάσεις με παράλληλο κλάδο απόσβεσης RC

Επίδραση ρεύματος εξόδου I_O

Επίδραση ποιότητας αντίστασης R_S



Πειραματική μελέτη του παράλληλου κλάδου απόσβεσης RC

Πλεονεκτήματα:

- 👍 Καταστολή των υπερτάσεων και απόσβεση των ταλαντώσεων:
 - ☞ προκαλούνται από τις παρασιτικές επαγωγές των στοιχείων και των γραμμών σύνδεσης, τις παρασιτικών χωρητικότητες των στοιχείων και το μεγάλο ρυθμό μεταβολής του ρεύματος και της τάσης
 - ☞ μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφή του στοιχείου.
- 👍 Αξιόπιστη λειτουργία του ημιαγωγικού στοιχείου, εντός των ορίων της περιοχής ασφαλούς λειτουργίας (SOA).
- 👍 Μείωση των απωλειών μετάβασης του ημιαγωγικού στοιχείου (μεταφέρονται στο κύκλωμα προστασίας), με αποτέλεσμα την ευκολότερη ψύξη του.
- 👍 Μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, λόγω μείωσης του ρυθμού μεταβολής των τάσεων και των ρευμάτων.



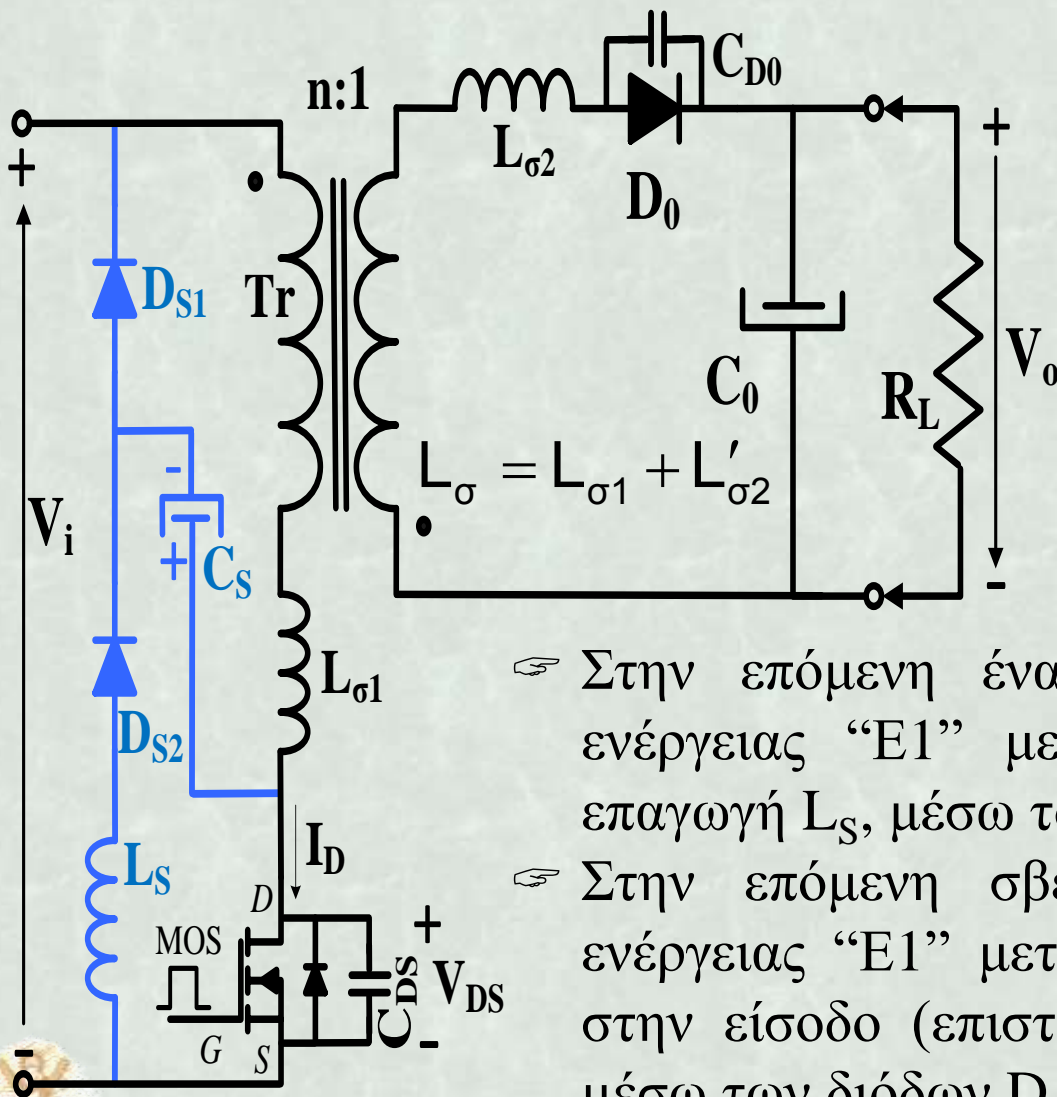
Μειονεκτήματα:

- ❏ Πολυπλοκότητα στη μελέτη και εξάρτηση των τιμών των στοιχείων του κυκλώματος προστασίας από την τοπολογία, τις συνθήκες λειτουργίας, κ.ά.
- ❏ Περιορισμός των ορίων λειτουργίας του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος.
- ❏ Εξάρτηση της λειτουργίας από την ποιότητα των χρησιμοποιούμενων παθητικών στοιχείων και αύξηση του όγκου και του κόστους της διάταξης.
- ❏ Αύξηση των χρόνων μετάβασης του ημιαγωγικού στοιχείου.
- ❏ Απαίτηση για καλή απαγωγή θερμότητας που παράγεται στις αντιστάσεις του κυκλώματος προστασίας.
- ❏ Πιθανότητα μείωσης του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα, όταν αυτός λειτουργεί σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας απ' αυτές για τις οποίες έχει υπολογιστεί το κύκλωμα προστασίας.
- ❏ Αποτελεσματικότητα μόνο όταν έχει προσεχθεί αρκετά η χωροταξική τοποθέτηση των στοιχείων των κυκλωμάτων ισχύος και προστασίας.



Παθητικά κυκλώματα προστασίας από υπερτάσεις χωρίς απώλειες

Προστασία από υπερτάσεις με ανάκτηση της ενέργειας σκέδασης



☞ Όταν το MOS άγει, ποσότητα ενέργειας “E1” συσσωρεύεται στη σκέδαση $L_{\sigma 1}$.

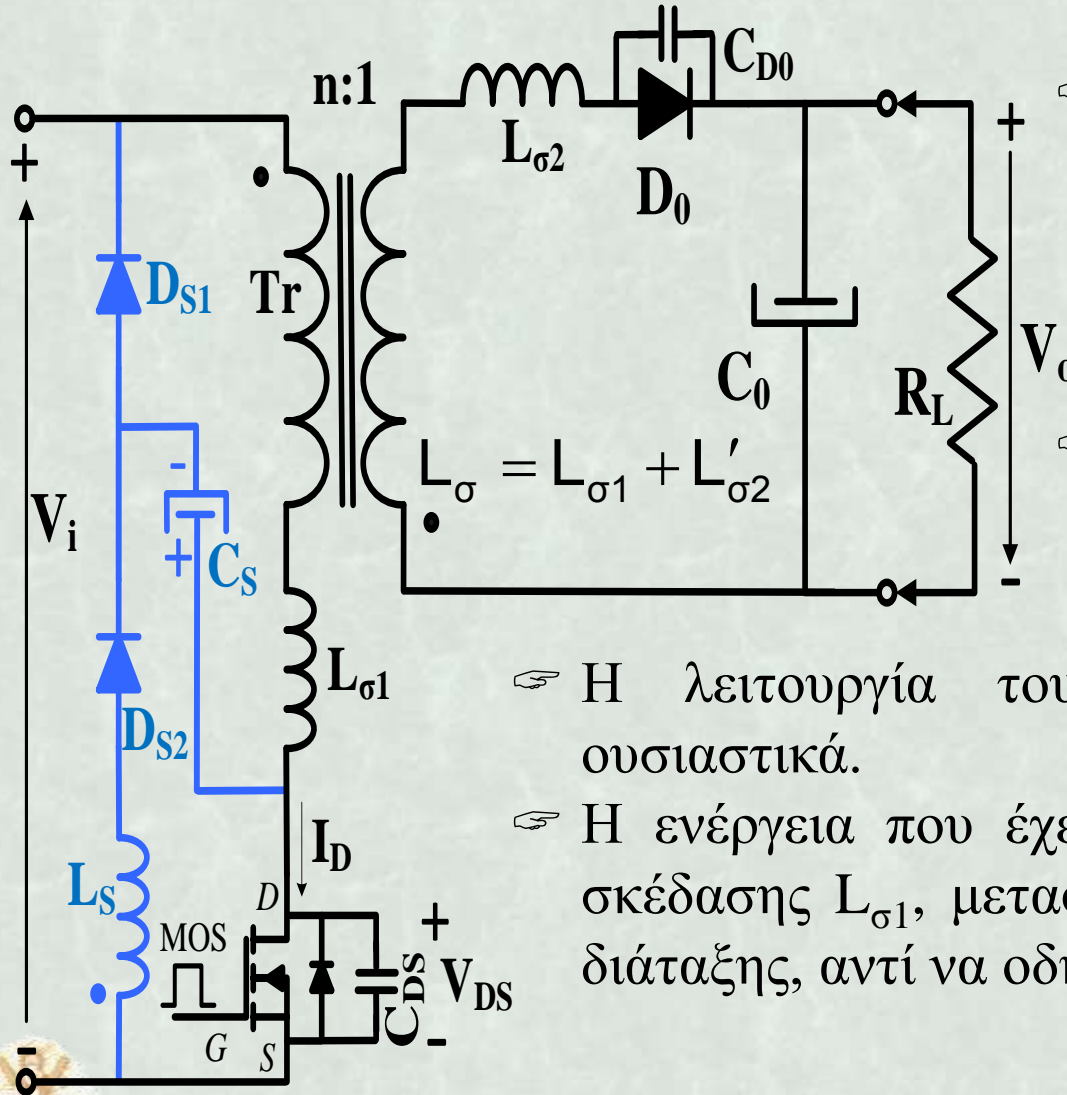
☞ Όταν το MOS σταματήσει να άγει, η ποσότητα ενέργειας “E1” μεταφέρεται στον πυκνωτή C_S , μέσω της διόδου D_{S1} και του M/T.

☞ Στην επόμενη έναυση του MOS, η ποσότητα ενέργειας “E1” μεταφέρεται, από τον C_S στην επαγωγή L_S , μέσω του MOS και της διόδου D_{S2} .

☞ Στην επόμενη σβέση του MOS, η ποσότητα ενέργειας “E1” μεταφέρεται από την επαγωγή L_S στην είσοδο (επιστροφή ενέργειας στην παροχή), μέσω των διόδων D_{S1} και D_{S2} .

Παθητικά κυκλώματα προστασίας από υπερτάσεις χωρίς απώλειες

Προστασία από υπερτάσεις με ανάκτηση της ενέργειας σκέδασης



Όταν δεν υπάρχει δυνατότητα επιστροφής ενέργειας στην παροχή, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ένα εναλλακτικό κύκλωμα.

Η επαγωγή L_S , αντικαθίσταται από τύλιγμα, που τοποθετείται στο M/T.

Η λειτουργία του κυκλώματος δεν αλλάζει ουσιαστικά.

Η ενέργεια που έχει συσσωρευτεί στην επαγωγή σκέδασης $L_{\sigma 1}$, μεταφέρεται τελικά στην έξοδο της διάταξης, αντί να οδηγηθεί προς την είσοδο.

Τέλος Ενότητας



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

Τα σχήματα είναι δημιουργημένα από το Δρ. Μηχ. Εμμανουήλ Τατάκη στα πλαίσια του έργου *Ανοιχτά Μαθήματα*.

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Εμμανουήλ Τατάκης 2014. Εμμανουήλ Τατάκης. «Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές. Περιγραφή Ημιαγωγικών Στοιχείων». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.upatras.gr/courses/EE894/>.



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.



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.

