



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές

Ενότητα 2: Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος και
Τροφοδοτικά Συνεχούς Τάσης – Γραμμικά Τροφοδοτικά

Δρ.-Μηχ. Εμμανουήλ Τατάκης, Καθηγητής

Πολυτεχνική Σχολή

Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών

Σκοποί ενότητας

- Ταξινόμηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος
- Ανάλυση τροφοδοτικών συνεχούς τάσης
- Παρουσίαση λειτουργίας γραμμικών τροφοδοτικών και παλμοτροφοδοτικών



Περιεχόμενα ενότητας

- Κατηγορίες ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και εφαρμογές
- Τροφοδοτικά συνεχούς τάσης
- Σύγκριση γραμμικών τροφοδοτικών και παλμοτροφοδοτικών





Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος για βιομηχανικές εφαρμογές

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος

- Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος από μία μορφή σε μία άλλη, χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος.
- Τα στοιχεία αυτά ελέγχονται από αναλογικά ή ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα χαμηλής ισχύος.
- Με τους μετατροπείς αυτούς μπορούμε να ρυθμίσουμε και να ελέγξουμε τη ροή ενέργειας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων.



ΕΙΣΑΓΩΓΗ – Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος

Πλεονεκτήματα των ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος, σε σχέση με τις παλαιότερα χρησιμοποιούμενες ηλεκτρομηχανικές διατάξεις ή τις γραμμικά ελεγχόμενες ηλεκτρονικές διατάξεις:

- Μικρότερος όγκος, βάρος και κόστος αγοράς για αντίστοιχες τιμές ισχύος.
- Λιγότερες απώλειες ισχύος, με συνέπεια τον υψηλό συντελεστή απόδοσης, που μπορεί να ξεπερνά το 90%.
- Λόγω έλλειψης κινητών μερών, οι μετατροπείς αυτοί έχουν ελάχιστες ανάγκες συντήρησης, δεν απαιτούν ισχυρές βάσεις στήριξης και είναι σχεδόν αθόρυβοι στη λειτουργία τους.
- Λόγω του ηλεκτρονικού ελέγχου προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτερη απόκριση στη ρύθμιση των μεγεθών εξόδου (τάση, ρεύμα, ροπή, στροφές κλπ).



Βασικό μειονέκτημα των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος είναι:

- η δημιουργία ανώτερων αρμονικών, τόσο στην πλευρά της τροφοδοσίας τους (είσοδος), όσο και στην πλευρά του φορτίου (έξοδος). Οι αρμονικές αυτές έχουν ως αποτέλεσμα:
 - ↳ την παρενόχληση της λειτουργίας γειτονικών ηλεκτρικών συσκευών
(Electromagnetic Interference ή EMI)
 - ↳ την αύξηση της αέργου ισχύος
 - ↳ την αύξηση των απωλειών.



Ταξινόμηση Ηλεκτρονικών Μετατροπέων Ισχύος

Ταξινόμηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος με βάση τη μορφή της μετατρεπόμενης και ανταλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας:

1. Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση ή Ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (***AC-AC Converters or AC Regulators***).
2. Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή τάση ή Ανορθωτές (***AC-DC Converters or Rectifiers***).
3. Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση ή Ρυθμιστές συνεχούς τάσης (***DC-DC Converters or DC Regulators***).
4. Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση ή Αντιστροφείς (***DC-AC Converters or Inverters***).



Ταξινόμηση Ηλεκτρονικών Μετατροπέων Ισχύος

Ταξινόμηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος με βάση τη λειτουργία τους:

1. Ελεγχόμενοι από φάση μετατροπείς και κυκλομετατροπείς (*Phase-controlled Converters and Cycloconverters*).
2. Μετατροπείς συνεχούς ή εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση (*DC-AC or AC-AC Converters*):
 - ❑ Αντιστροφείς τροφοδοτούμενοι από πηγή τάσης (*Voltage-Fed Inverters*)
 - ❑ Αντιστροφείς τροφοδοτούμενοι από πηγή ρεύματος (*Current-Fed Inverters*)
3. Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση (*DC-DC Converters*).



Ταξινόμηση Ηλεκτρονικών Μετατροπέων Ισχύος

Ταξινόμηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος δίνοντας έμφαση στα ηλεκτροκινητήρια συστήματα:

1. Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή τάση ή Ανορθωτές (*AC-DC Converters or Rectifiers*).
2. Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση (*AC-AC Converters*):
 - ❑ Μετατροπείς Ε.Τ. σε Ε.Τ. σταθερής συχνότητας εξόδου
 - ❑ Μετατροπείς Ε.Τ. σε Ε.Τ. μεταβλητής συχνότητας εξόδου
 - ❖ Αντιστροφείς τροφοδοτούμενοι από πηγή τάσης (*AC-DC-AC Converters for Voltage-Fed Inverters*)
 - ❖ Αντιστροφείς τροφοδοτούμενοι από πηγή ρεύματος (*AC-DC-AC Converters for Current-Fed Inverters*)
 - ❖ Ειδικές οικογένειες μετατροπέων
3. Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση (*DC-DC Converters*).



Ταξινόμηση Ηλεκτρονικών Μετατροπέων Ισχύος

Ταξινόμηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος με βάση τον τρόπο μετάβασης (σβέσης) των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος:

1. Μετατροπείς φυσικής μετάβασης - σβέσης (*Natural Commutated Converters*).
2. Μετατροπείς εξαναγκασμένης μετάβασης - σβέσης (*Force Commutated Converters*).
3. Μετατροπείς συντονισμού (*Resonant Converters*).

Η κατηγοριοποίηση αυτή βασίζεται, κυρίως, στον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται η σβέση του στοιχείου, αφού αυτή είναι, γενικά, δυσκολότερη και μάλιστα για ορισμένα στοιχεία, όπως οι δίοδοι (ως μη ελεγχόμενο στοιχείο) και τα θυρίστορ (στοιχείο του οποίου η σβέση δεν ελέγχεται από την πύλη), αδύνατη.



Εφαρμογές Ηλεκτρονικών Μετατροπών Ισχύος

1. Τροφοδοτικά Συνεχούς Τάσης

- ❑ Απαραίτητα για την τροφοδοσία των εσωτερικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων των περισσότερων αναλογικών και ψηφιακών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα. Απαιτούνται:
 - συνεχής και σταθεροποιημένη τάση εξόδου
 - ηλεκτρική απομόνωση
 - δυνατότητα πολλαπλών και ανεξάρτητων εξόδων (στις περισσότερες περιπτώσεις).

- ❑ Χρήση διακοπτικών μετατροπών συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση, που ελέγχονται με την τεχνική της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών. Αποτέλεσμα:
 - μείωση του κόστους
 - μείωση του όγκου και του βάρους
 - αύξηση της απόδοσης των συστημάτων αυτών.



Εφαρμογές Ηλεκτρονικών Μετατροπών Ισχύος

2. Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα

Στα ηλεκτροκινητήρια συστήματα ρυθμιζόμενων στροφών απαιτείται ακριβής και συνεχής έλεγχος των στροφών, της ροπής ή της θέσης, συνοδευόμενος από ευστάθεια, καλή μεταβατική συμπεριφορά και υψηλή απόδοση.

□ Ηλεκτροκίνηση στη βιομηχανία

- ❖ Σε μηχανές συνεχούς ρεύματος η ρύθμιση της τάσης τυμπάνου ή/και της τάσης διέγερσης, για τον έλεγχο της ταχύτητας ή/και της ροπής, επιτυγχάνεται με ανορθωτικές διατάξεις με θυρίστορ ή με chopper.
- ❖ Σε ασύγχρονες μηχανές η ρύθμιση της ενεργού τιμής και της συχνότητας της τάσης του στάτη, για ρύθμιση των στροφών και διατήρηση των μαγνητικών χαρακτηριστικών, επιτυγχάνεται με αντιστροφείς τάσης ή ρεύματος.
- ❖ Σε ασύγχρονες μηχανές με δακτυλιοφόρο δρομέα επιτυγχάνεται έλεγχος της ολίσθησης μέσω ηλεκτρονικού μετατροπέα, ο οποίος συνδέεται μεταξύ του τυλίγματος του δρομέα και της πηγής τροφοδοσίας.



Εφαρμογές Ηλεκτρονικών Μετατροπών Ισχύος

2. Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα (συνέχεια)

□ Ηλεκτροκίνηση στα μέσα μεταφοράς

- ❖ Στα μέσα μεταφοράς (ηλεκτρικά τραίνα, αστικές συγκοινωνίες, ηλεκτρικά αυτοκίνητα κλπ) οποιοσδήποτε τύπος κινητήρα και να χρησιμοποιηθεί (συνεχούς ρεύματος, ασύγχρονος ή σύγχρονος), με τη χρήση των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος επιτυγχάνεται, επίσης, μεγιστοποίηση της ροπής κατά την εκκίνηση και **ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση**.

3. Τηλεπικοινωνιακές και Διαστημικές Εφαρμογές

Σε αυτό το πεδίο εφαρμογών χρησιμοποιούνται, ευρέως, διαφόρων τύπων ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος, σε ισχείς από μερικά W ως και μερικές εκατοντάδες kW, για την υλοποίηση:

- ❖ φορτιστών συσσωρευτών,
- ❖ απλών διακοπτικών σταθεροποιημένων τροφοδοτικών,
- ❖ παροχών αδιάλειπτης τροφοδοσίας.



Εφαρμογές Ηλεκτρονικών Μετατροπών Ισχύος

4. Συστήματα Παραγωγής και Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

- Οι ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος έχουν εφαρμογή:
 - ❖ στα συστήματα μεταφοράς με συνεχές ρεύμα
 - ❖ στην αντιστάθμιση αέργου ισχύος
 - ❖ στα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς εναλλασσόμενης τάσης (Flexible AC Transmission Systems - FACTS)
 - ❖ στα ενεργά φίλτρα για βελτίωση της ποιότητας ισχύος.

- Στους κλασσικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος χρησιμοποιούνται:
 - ❖ για τον έλεγχο της διέγερσης των Σύγχρονων Γεννητριών
 - ❖ για τον έλεγχο της κίνησης ιμάντων για τη μεταφορά καυσίμου



Εφαρμογές Ηλεκτρονικών Μετατροπών Ισχύος

5. Ήπιες (ανανεώσιμες) μορφές ενέργειας (ΑΠΕ)

Στα συστήματα διασύνδεσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), κυρίως φωτοβολταϊκών συστοιχιών και ανεμογεννητριών, με το δίκτυο χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος για τη μετατροπή και σταθεροποίηση της τάσης, η οποία μεταβάλλεται αρκετά λόγω μεταβολής του ηλιακού ή του αιολικού δυναμικού.

6. Οικιακές ηλεκτρικές συσκευές και εργαλεία

Βασικός σκοπός της χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος σε οικιακές εφαρμογές είναι:

- η εξοικονόμηση ενέργειας,
- το μειωμένο λειτουργικό κόστος
- η μεγαλύτερη άνεση και ασφάλεια.



Εφαρμογές Ηλεκτρονικών Μετατροπέων Ισχύος

7. Συστήματα αδιάλειπτης παροχής (UPS)

Στα συστήματα αυτά (Uninterruptable Power Supplies – UPS) οι ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος χρησιμοποιούνται:

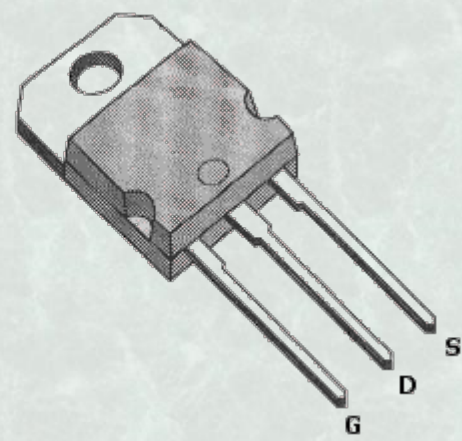
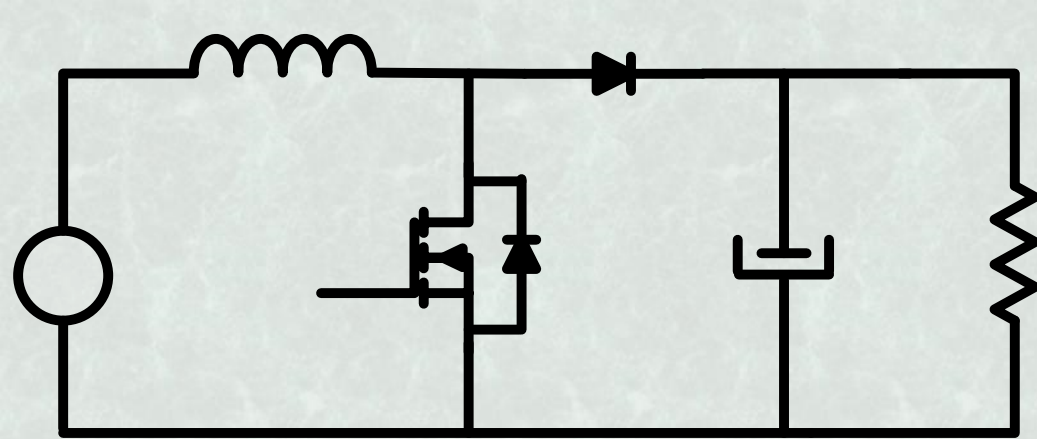
- τόσο για τη φόρτιση των συσσωρευτών,
- όσο και για τη μετατροπή της συνεχούς τάσης, που παρέχουν οι συσσωρευτές, σε εναλλασσόμενη τάση και τον έλεγχο της ενεργού τιμής και της συχνότητας αυτής.

8. Ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές

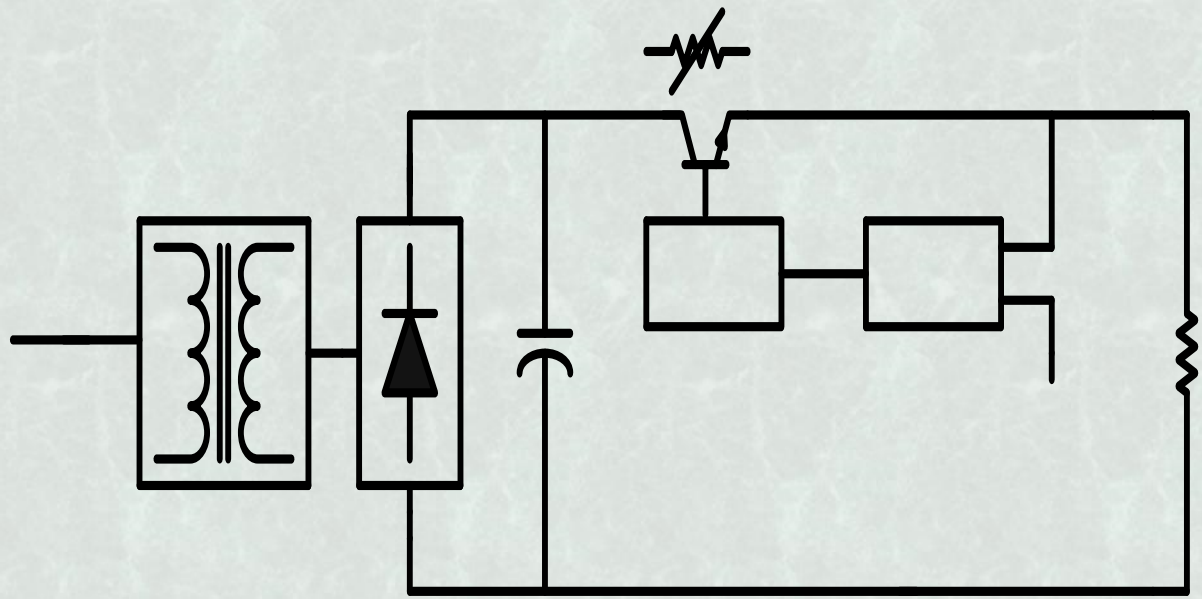
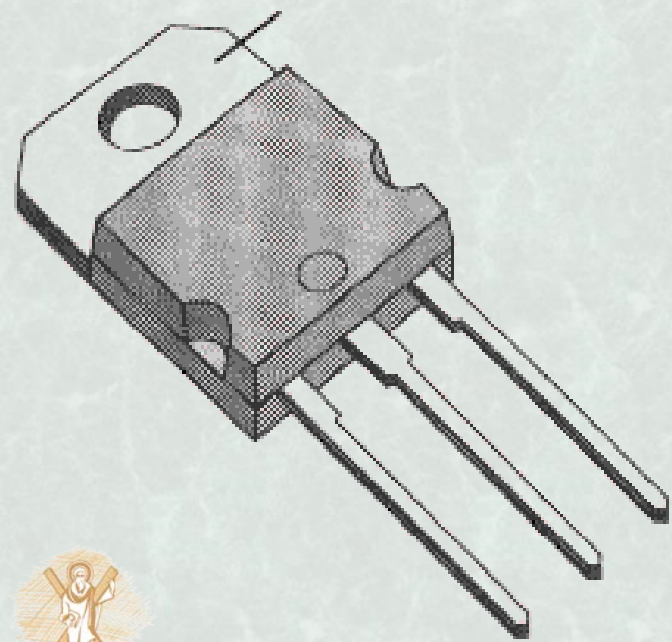
Οι ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος χρησιμοποιούνται:

- στην ηλεκτρόλυση, όπου απαιτείται κατάλληλη χαμηλή συνεχής τάση και υψηλά ρεύματα,
- στις συγκολλήσεις,
- στον γαλβανισμό και στις επιμεταλλώσεις,
- στην τήξη ή τη θερμική σκλήρυνση μετάλλων με επαγωγική θέρμανση





ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ



ΕΙΣΑΓΩΓΗ – Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή Τάση

- Εξετάζονται διάφοροι **Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή Τάση** (*DC-DC Converters*):
 - ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος, οι οποίες περιέχουν πάντα έναν τουλάχιστον ελεγχόμενο ημιαγωγικό διακόπτη
 - μετατρέπεται η συνεχής τάση εισόδου σε συνεχή τάση διαφορετικής τιμής στην έξοδό τους.
- Συνήθως αποκαλούνται και με τον όρο **Τροφοδοτικά Συνεχούς Τάσης** (*DC Power Supplies*), αφού η συνήθης εφαρμογή τους είναι η τροφοδοσία των εσωτερικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων των αναλογικών και ψηφιακών συστημάτων.
- Άλλες εφαρμογές αυτών των μετατροπέων είναι η φόρτιση συσσωρευτών, η χρήση τους σε συστήματα διόρθωσης του συντελεστή ισχύος και ο έλεγχος μηχανών Συνεχούς Ρεύματος.



ΓΕΝΙΚΑ – Τροφοδοτικά Τάσης

- ❑ Τα τροφοδοτικά (*Power Supplies*), συνεχούς ή εναλλασσόμενης τάσης, είναι από τα πιο σημαντικά τμήματα οποιασδήποτε ηλεκτρικής ή ηλεκτρονικής συσκευής ή συστήματος:
 - παρέχουν την ισχύ που θα ενεργοποιήσει όλα τα ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά κυκλώματα.
- ❑ Πρέπει να είναι ικανά να παρέχουν μία ρυθμιζόμενη ισχύ για μία δεδομένη τάση εξόδου:
 - ακόμα και αν η τάση εισόδου ή/και το ρεύμα εξόδου μεταβάλλονται σε ένα ευρύ φάσμα
 - ή ακόμα και αν μεταβάλλεται η θερμοκρασία λειτουργίας.
- ❑ Η ισχύς μπορεί να κυμαίνεται από κλάσματα του Watt ως μερικές χιλιάδες Watts και η τάση εξόδου μπορεί να είναι, συνεχής ή εναλλασσόμενη, από μερικά Volts ως μερικές χιλιάδες Volts.
 - στην περίπτωση δε εναλλασσόμενης τάσης εξόδου η συχνότητά της μπορεί να είναι από μερικά Hz ως μερικές χιλιάδες Hz.



ΓΕΝΙΚΑ – Τροφοδοτικά Τάσης

- ❑ Υπάρχουν **τρεις συντελεστές**, οι οποίοι εκφράζουν την ποιότητα ενός τροφοδοτικού για μεταβολές της τάσης εισόδου, του φορτίου και της θερμοκρασίας:
 - Ο συντελεστής ρύθμισης για μεταβολές της τάσης εισόδου (*Line Regulation*)
 - Ο συντελεστής ρύθμισης για μεταβολές του ρεύματος εξόδου (*Load Regulation*)
 - Ο συντελεστής θερμοκρασίας (*Temperature Coefficient*)

1. Συντελεστής ρύθμισης για μεταβολές της τάσης εισόδου (*Line Regulation*)

$$\text{Line Regulation (\%)} = \frac{[\Delta V_o / \Delta V_i]}{V_o} \times 100$$

ΔV_o = μεταβολή της τάσης εξόδου

ΔV_i = μεταβολή της τάσης εισόδου

V_o = ονομαστική τάση εξόδου



ΓΕΝΙΚΑ – Τροφοδοτικά Τάσης

2. Συντελεστής ρύθμισης για μεταβολές του ρεύματος εξόδου (*Load Regulation*)

$$\text{Load Regulation (\%)} = \frac{[V_{o,nl} - V_{o,fl}]}{V_o} \times 100$$

$V_{o,nl}$ = τάση εξόδου χωρίς φορτίο

$V_{o,fl}$ = τάση εξόδου με ονομαστικό φορτίο

V_o = ονομαστική τάση εξόδου

3. Συντελεστής θερμοκρασίας (*Temperature Coefficient*)

$$\text{Temperature Coefficient (\%)} = \pm \frac{[V_{o@T_{max}} - V_{o@T_{min}}]}{V_o \cdot [T_{max} - T_{min}]} \times 100$$

$V_{o@T_{max}}$ = τάση εξόδου για τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας T_{max}

$V_{o@T_{min}}$ = τάση εξόδου για την ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας T_{min}

V_o = ονομαστική τάση εξόδου

T_{max} = μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας

T_{min} = ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας



ΓΕΝΙΚΑ – Τροφοδοτικά Τάσης

- ❑ Το μεγαλύτερο τμήμα των ηλεκτρικών ή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, που υπάρχουν σε μία συσκευή ή ένα σύστημα, λειτουργεί με συνεχή τάση.
- ❑ Κάποια από τα κυκλώματα είναι πιθανό να λειτουργούν σε διαφορετικές συνεχείς τάσεις από κάποια άλλα:
 - μ' αποτέλεσμα για διάφορες συσκευές να απαιτούνται περισσότερες από μία συνεχείς τάσεις για τη λειτουργία τους.



ΓΕΝΙΚΑ – Τροφοδοτικά Συνεχούς Τάσης

- ❑ Στα **Τροφοδοτικά Συνεχούς Τάσης** (*DC Power Supplies ή DC Regulators*) χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές για τον έλεγχο του/των ενεργών ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος και τη διαχείριση της ισχύος, καθώς και τη μετατροπή της από μία μορφή σε μία άλλη.
- ❑ Ανάλογα με την κυκλωματική τους διάταξη, τη λειτουργία των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος και τη μέθοδο ελέγχου τους, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:
 - Τα γραμμικά τροφοδοτικά (*Linear Power Supplies ή DC Regulators*)
 - Τα διακοπτικά τροφοδοτικά ή παλμοτροφοδοτικά (*Switch-Mode Power Supplies, S.M.P.S*)



1. Γραμμικά τροφοδοτικά (*Linear Power Supplies ή DC Regulators*)

- ❑ Το χρησιμοποιούμενο ημιαγωγικό στοιχείο λειτουργεί στην **ενεργό (γραμμική) περιοχή**, δηλαδή συμπεριφέρεται ως ρυθμιζόμενη αντίσταση:
 - Η πτώση τάσης που εμφανίζεται στα άκρα του καθορίζει την τιμή της τάσης στην έξοδο του τροφοδοτικού.
- ❑ Τα γραμμικά τροφοδοτικά διακρίνονται σε δύο τύπους:
 - **τους Ρυθμιστές Σειράς (*Series Regulators*)**
 - **τους Ρυθμιστές Παράλληλης Διακλάδωσης (*Shunt Regulators*)**
- ❑ Η απόδοση των γραμμικών τροφοδοτικών είναι σχετικά χαμηλή και κυμαίνεται από 30%-60%, ανάλογα με την ισχύ.



2. Τα διακοπτικά τροφοδοτικά ή παλμοτροφοδοτικά (*Switch-Mode Power Supplies, S.M.P.S*)

- ❑ Το χρησιμοποιούμενο ημιαγωγικό στοιχείο του μετατροπέα λειτουργεί ως **διακόπτης**, δηλαδή είτε σε κατάσταση αγωγής είτε σε κατάσταση αποκοπής:
 - το ποσοστό του χρόνου αγωγής του (ή του χρόνου αποκοπής του), στη διάρκεια μιας περιόδου λειτουργίας, καθορίζει την τιμή της τάσης στην έξοδο του τροφοδοτικού.
- ❑ Τα διακοπτικά τροφοδοτικά διακρίνονται σε δύο τύπους:
 - **τα διακοπτικά τροφοδοτικά Τετραγωνικής Κυματομορφής (*Square Wave*) ή ελεγχόμενα με την τεχνική της Διαμόρφωσης του Εύρους των Παλμών (*Pulse Width Modulation, PWM*)**
 - **τα διακοπτικά τροφοδοτικά τύπου Συντονισμού (*Resonant Mode*) ή ελεγχόμενα με την τεχνική της Διαμόρφωσης της Συχνότητας των Παλμών (*Pulse Frequency Modulation, PFM*)**
- ❑ Η απόδοση των διακοπτικών τροφοδοτικών είναι σχετικά υψηλή και κυμαίνεται από 75% ως και 95%, ανάλογα με την ισχύ.



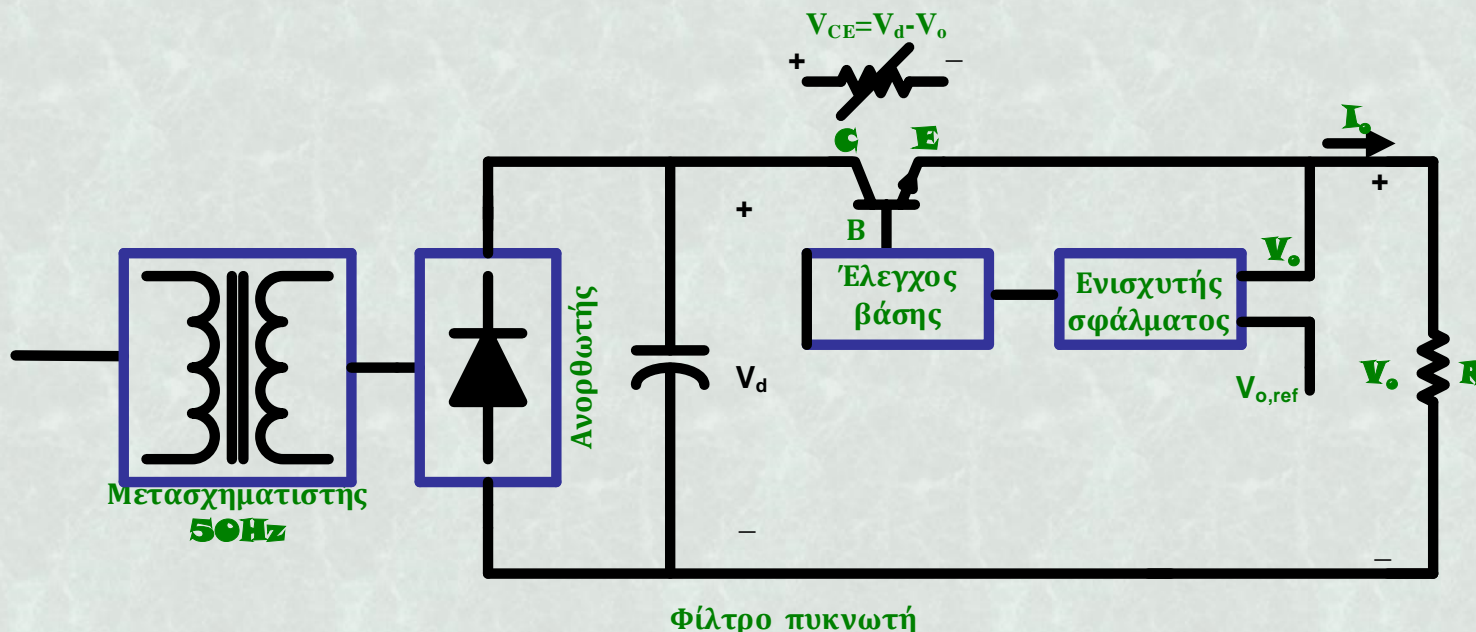
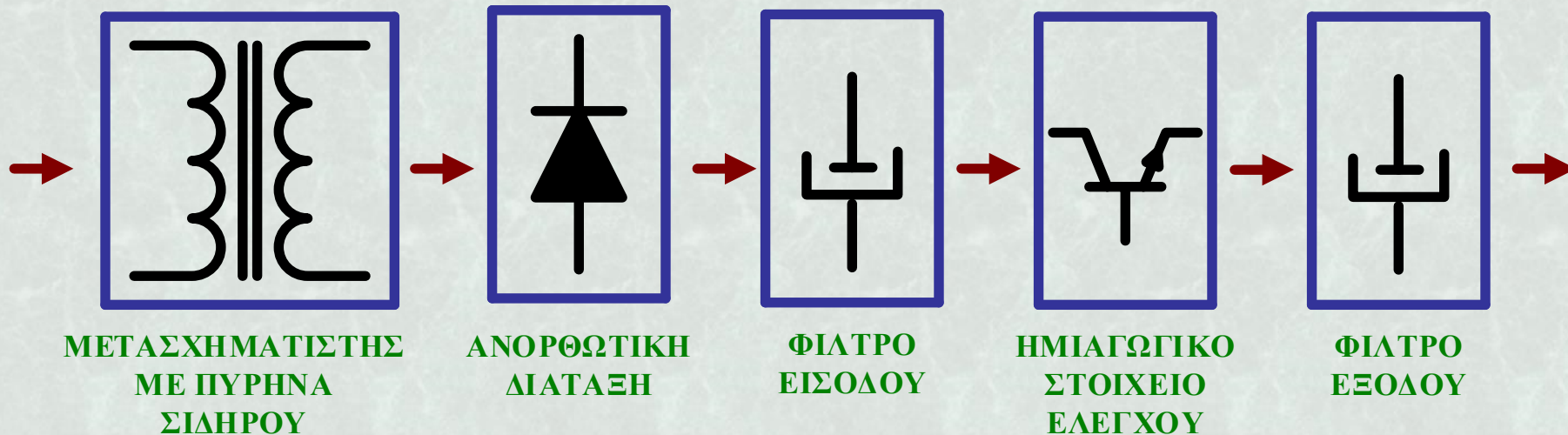
ΓΕΝΙΚΑ – Τροφοδοτικά Συνεχούς Τάσης

Οι βασικές απαιτήσεις των τροφοδοτικών, που χρησιμοποιούνται σήμερα στα περισσότερα αναλογικά και ψηφιακά συστήματα, είναι:

- ✓ η σταθεροποιημένη συνεχής τάση εξόδου
- ✓ η γαλβανική απομόνωση μεταξύ εισόδου και εξόδου
- ✓ η δυνατότητα παροχής πολλαπλών ανεξάρτητων εξόδων
- ✓ η μείωση του όγκου και του βάρους τους
- ✓ η αύξηση της απόδοσής τους
- ✓ η επίτευξη ενός όσο το δυνατό χαμηλότερου κόστους



ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ



Γενικό δομικό διάγραμμα ενός γραμμικού τροφοδοτικού

ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

- ❑ Υποβιβασμός της τάσης εισόδου και επίτευξη ηλεκτρικής απομόνωσης μεταξύ εισόδου και εξόδου:
 - χρήση ενός μετασχηματιστή με πυρήνα σιδήρου, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ του δικτύου (εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 50Hz/60Hz) και της ανορθωτικής διάταξης
 - αυτοί οι μετασχηματιστές έχουν μεγάλο μέγεθος, βάρος και κόστος, συγκρινόμενοι με τους μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων, που χρησιμοποιούνται στα διακοπτικά τροφοδοτικά.
- ❑ Μετά την ανορθωτική διάταξη υπάρχει το φίλτρο εισόδου:
 - στην ουσία είναι ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής, για εξομάλυνση της ανορθωμένης τάσης
- ❑ Ακολουθεί ένα ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο:
 - συνήθως ένα διπολικό τρανζίστορ ισχύος, επειδή παρουσιάζει, κατά την αγωγή του, χαμηλή πτώσης τάσης μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού
 - στην πλειονότητα των περιπτώσεων συνδέεται σε σειρά (*Series Regulator*) και λειτουργεί στη γραμμική (ενεργό) περιοχή.

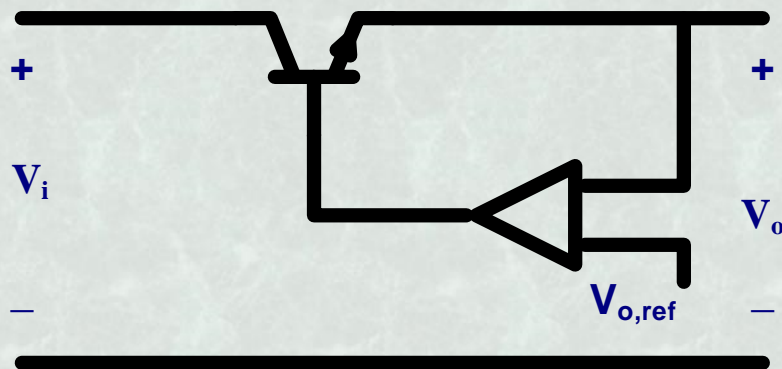


ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

- ❑ Συγκρίνοντας την πραγματική τιμή της τάσης εξόδου V_o με την επιθυμητή τιμή της τάσης εξόδου $V_{o,ref}$ δημιουργείται ένα σφάλμα:
 - ελέγχεται το ρεύμα βάσης του ημιαγωγικού στοιχείου σε συνάρτηση με τις μεταβολές της τάσης εισόδου και του φορτίου
 - συνεπώς το ημιαγωγικό στοιχείο λειτουργεί ως μία μεταβλητή αντίσταση, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου να διατηρείται σταθερή.
- ❑ Η διαφορά δυναμικού μεταξύ της τάσης εισόδου και της τάσης εξόδου εμφανίζεται στα άκρα του ημιαγωγικού στοιχείου, το οποίο διαρρέεται επίσης καθ' ολοκληρία από το ρεύμα εξόδου I_o
 - συνεπώς, οι απώλειες αγωγής ($V_{CE,on} \cdot I_o$) είναι ιδιαίτερα υψηλές
 - άρα ο συντελεστής απόδοσης αυτών των γραμμικών τροφοδοτικών κυμαίνεται στην περιοχή 30%-60%.
- ❑ Στη βαθμίδα εξόδου υπάρχει το φίλτρο εξόδου, δηλαδή ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής:
 - αναλαμβάνει να καλύψει τις απότομες μεταβολές του φορτίου
 - έτσι, βελτιώνεται η μεταβατική απόκριση του τροφοδοτικού.



ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

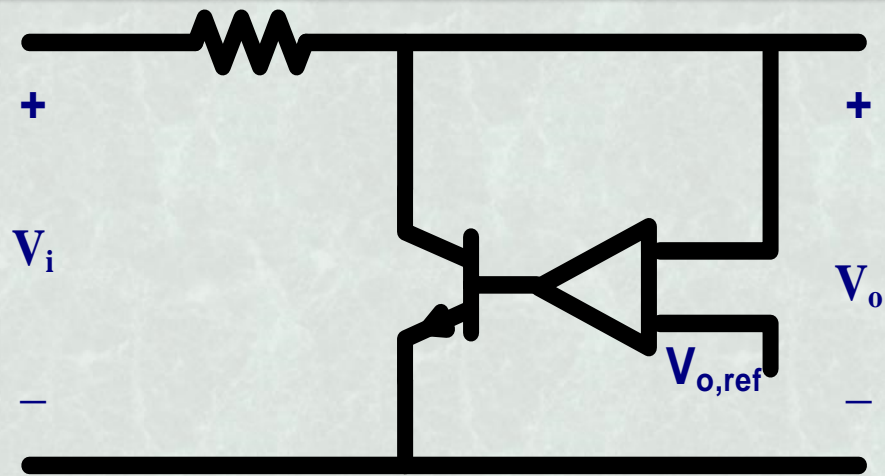


κυκλωματικό διάγραμμα ενός γραμμικού ρυθμιστή σειράς

- ☞ Το ημιαγωγικό στοιχείο θα πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά ώστε ν' αποφευχθεί το φαινόμενο της δεύτερης κατάρρευσης (*Second Breakdown*).
- ☞ Οι ρυθμιστές αυτοί είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται για **υψηλές τάσεις** και σχετικά **μεσαίες τιμές ρεύματος**.
- ☞ Λόγω των απωλειών που εμφανίζονται στην εν σειρά αντίσταση, η απόδοση του είναι εξαιρετικά χαμηλή.

☞ Το ημιαγωγικό στοιχείο θα πρέπει να αντέχει εξ ολοκλήρου την τάση εξόδου, δεν είναι όμως υποχρεωτικό να διαστασιοποιηθεί και για το πλήρες ρεύμα φορτίου.

☞ Οι ρυθμιστές αυτοί είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται για **χαμηλές τάσεις** και **υψηλά ρεύματα εξόδου**, με σχετικά σταθερό φορτίο.

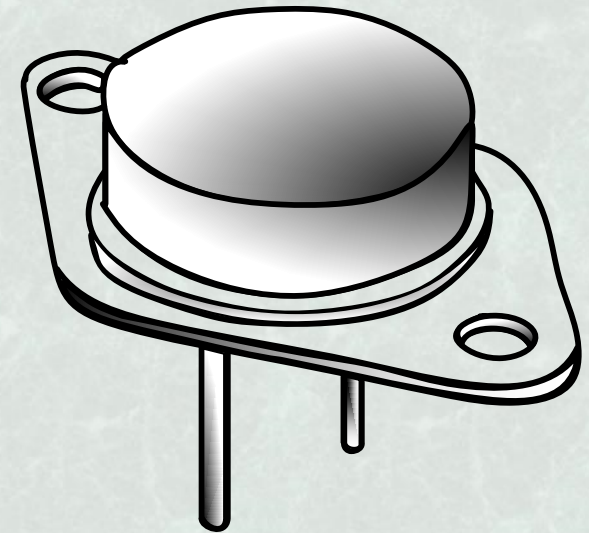
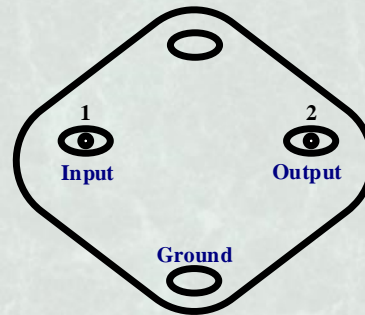
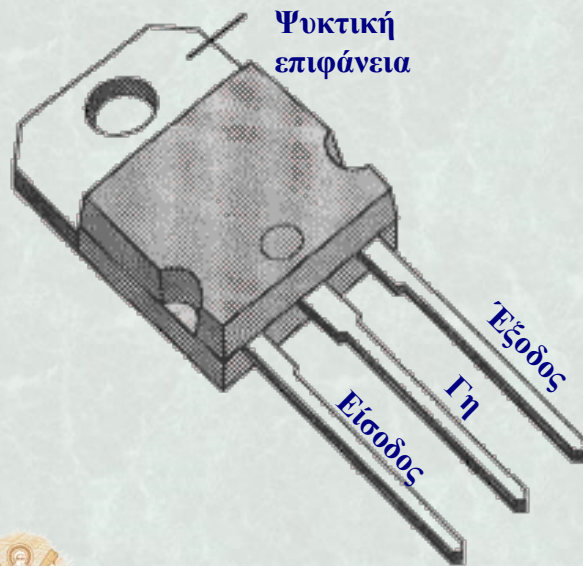


κυκλωματικό διάγραμμα ενός γραμμικού ρυθμιστή με παράλληλη διακλάδωση

ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

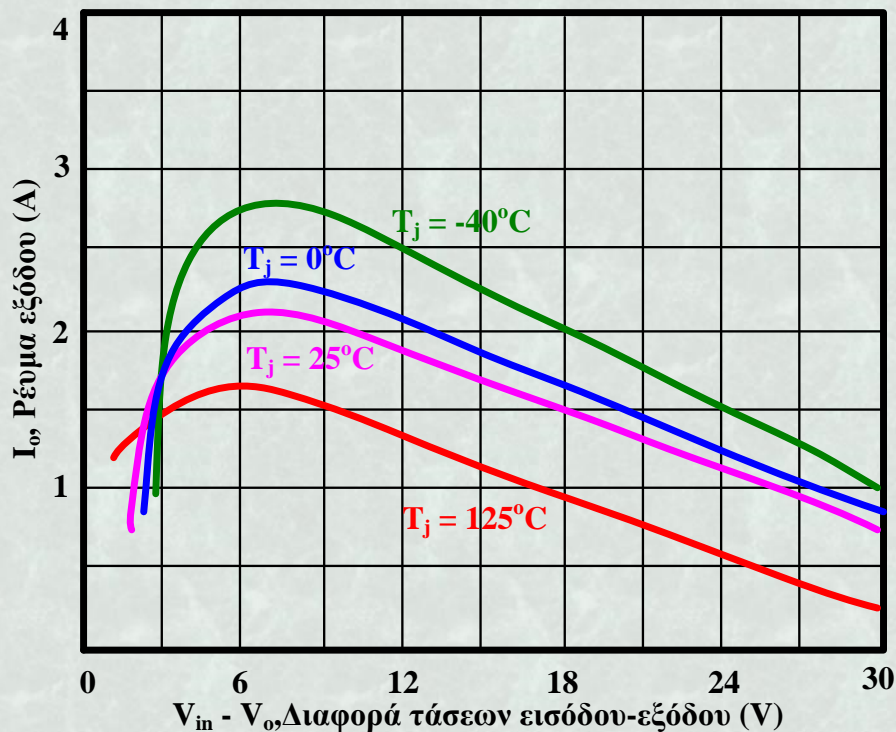
Ένας από τους ευρύτερα χρησιμοποιούμενους τύπους σταθεροποιητών με προκαθορισμένη τάση εξόδου:

- Ολοκληρωμένα **78xx** (*Three-Terminal Positive Fixed Voltage Regulators*), με προκαθορισμένη θετική τάση εξόδου
- Ολοκληρωμένα **79xx** (*Three-Terminal Negative Fixed Voltage Regulators*), με προκαθορισμένη αρνητική τάση εξόδου
- Το ρεύμα εξόδου των ολοκληρωμένων αυτών, με κατάλληλα υπολογισμένο ψυκτικό, μπορεί να ξεπεράσει το 1.5A.



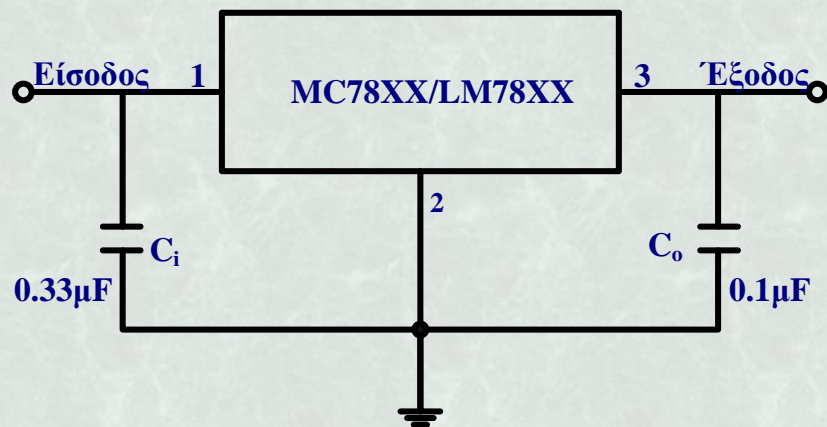
Σταθεροποιητικά τάσης 78xx

ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ



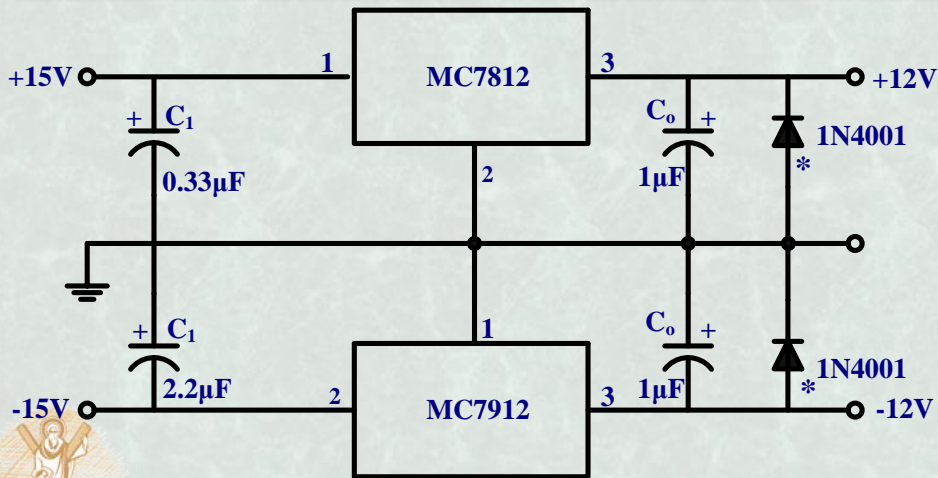
Σταθεροποιητικό τάσης 78xx

Γραφική παράσταση του μέγιστου ρεύματος εξόδου I_o ως συνάρτηση της διαφοράς μεταξύ των τάσεων εισόδου και εξόδου ($V_{in} - V_o$), για διαφορετικές θερμοκρασίες επαφής.



Τυπική συνδεσμολογία του σταθεροποιητικού τάσης 78xx

Τυπική εφαρμογή του συνδυασμού ενός 78xx και ενός 79xx για δημιουργία θετικής και αρνητικής τροφοδοσίας.

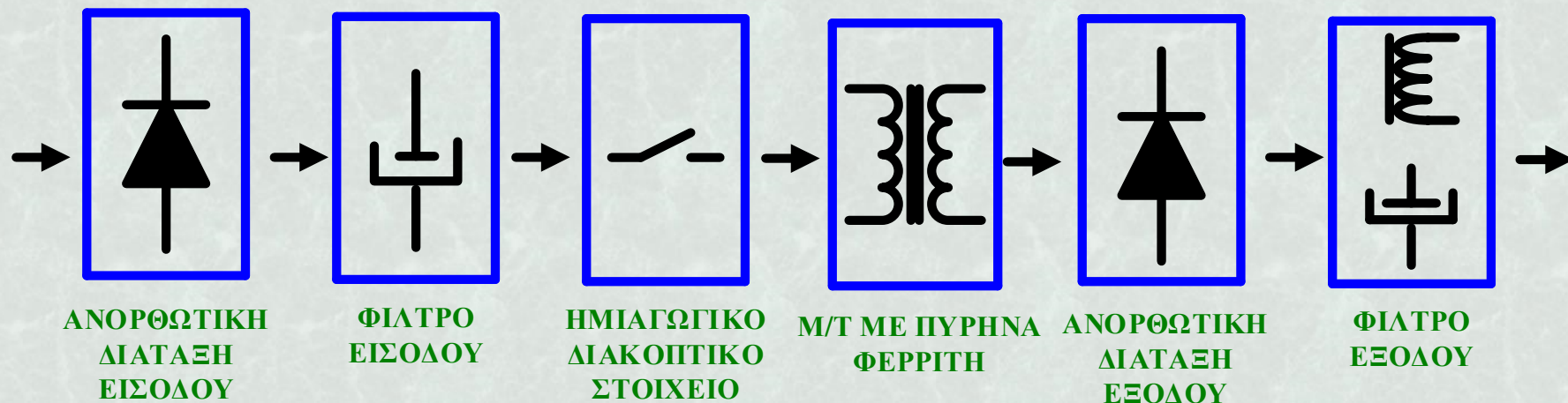


ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

- ❑ Σε αντίθεση με τα γραμμικά τροφοδοτικά, στα διακοπτικά τροφοδοτικά (*Switch-Mode Power Supplies, SMPS*), ο έλεγχος της τάσης εξόδου επιτυγχάνεται με τη χρήση **Μετατροπέων Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή Τάση** (Μετατροπείς ΣΤ-ΣΤ, *DC-DC Converters*).
- ❑ Στα κυκλώματα αυτά χρησιμοποιείται ένα τουλάχιστον ημιαγωγικό στοιχείο, το οποίο θα είναι πάντα είτε σε κατάσταση αγωγής είτε σε κατάσταση αποκοπής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα:
 - είτε το ημιαγωγικό στοιχείο διαρρέεται από υψηλά ρεύματα, έχοντας όμως μία χαμηλή πτώση τάσης στα άκρα του (την τάση αγωγής),
 - είτε αποκόπτει μία υψηλή τάση, χωρίς όμως να διαρρέεται από ρεύμα
- ❑ Οι απώλειες ισχύος είναι πολύ χαμηλότερες από αυτές ενός γραμμικού τροφοδοτικού και ο συντελεστής απόδοσης είναι αρκετά υψηλότερος:
 - κυμαίνεται μεταξύ 70% και 90%, ανεξάρτητα από την τιμή της τάσης εισόδου.



ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ



Γενικό δομικό διάγραμμα ενός διακοπτικού τροφοδοτικού

- ❑ Η εναλλασσόμενη τάση εισόδου ανορθώνεται, με τη βοήθεια μιας ανορθωτικής διάταξης, σε μία μη σταθεροποιημένη συνεχή τάση και στη συνέχεια εξομαλύνεται μέσω του φίλτρου εισόδου.
- ❑ Η συνεχής τάση, μέσω της διακοπτικής λειτουργίας ενός ή περισσότερων ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, κατατέμνεται και μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη υψηλής διακοπτικής συχνότητας (μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες kHz):
 - έτσι είναι πλέον εύκολος ο υποβιβασμός ή η ανύψωση της, με τη βοήθεια μετασχηματιστών υψηλής συχνότητας, μικρού όγκου και βάρους.



ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

- ❑ Στη βαθμίδα εξόδου η εναλλασσόμενη υψίσυχνη τάση ανορθώνεται και φιλτράρεται, ώστε να προκύψει η επιθυμητή συνεχή τάση στην έξοδο του τροφοδοτικού.
- ❑ Το κυριότερο στοιχείο ενός διακοπτικού τροφοδοτικού είναι ένας υψίσυχνος αντιστροφέας, ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Για να επιτευχθεί αυτή η μετατροπή υπάρχουν δύο τεχνικές:
 - Η τεχνική των μετατροπέων **Τετραγωνικής Κυματομορφής** (*Square Wave DC-DC Converters or Switch Mode DC-DC Converters or PWM Converters*) και ο έλεγχος που εφαρμόζεται στην περίπτωση αυτή είναι η **Διαμόρφωση του Εύρους των Παλμών** (*Pulse Width Modulation, PWM*).
 - η τεχνική των μετατροπέων **Συντονισμού** (*Resonant Mode DC-DC Converters*) και ο έλεγχος που εφαρμόζεται στην περίπτωση αυτή είναι η **Διαμόρφωση της Συχνότητας των Παλμών** (*Pulse Frequency Modulation, PFM*).



Μετατροπείς Τετραγωνικής Κυματομορφής

- ❑ Η συνεχής τάση εισόδου κατατέμνεται με μία υψηλή συχνότητα, με άμεσο αποτέλεσμα να δημιουργούνται παλμοί τετραγωνικής μορφής.
- ❑ Η τεχνική ελέγχου της **Διαμόρφωσης του Εύρους των Παλμών (Pulse Width Modulation, PWM)**, που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή, συνίσταται στο να διατηρείται σταθερή η συχνότητα έναυσης και σβέσης των ημιαγωγικών στοιχείων (συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα) και να μεταβάλλεται ο χρόνος αγωγής (άρα και ο χρόνος αποκοπής) των ημιαγωγικών στοιχείων.
- ❑ Ο **λόγος κατάτμησης (δ , Duty Cycle)**, που ισούται με το λόγο του χρόνου αγωγής προς την περίοδο λειτουργίας του μετατροπέα, καθορίζει την τιμή της τάσης εξόδου, με την προϋπόθεση να είναι σταθερή η τάση εισόδου:
 - ο λόγος κατάτμησης μπορεί να μεταβάλλεται, μέσω μιας διάταξης ελέγχου, ώστε να διατηρείται σταθερή η τάση εξόδου, ανεξάρτητα από της μεταβολές της τάσης εισόδου ή/και του φορτίου.



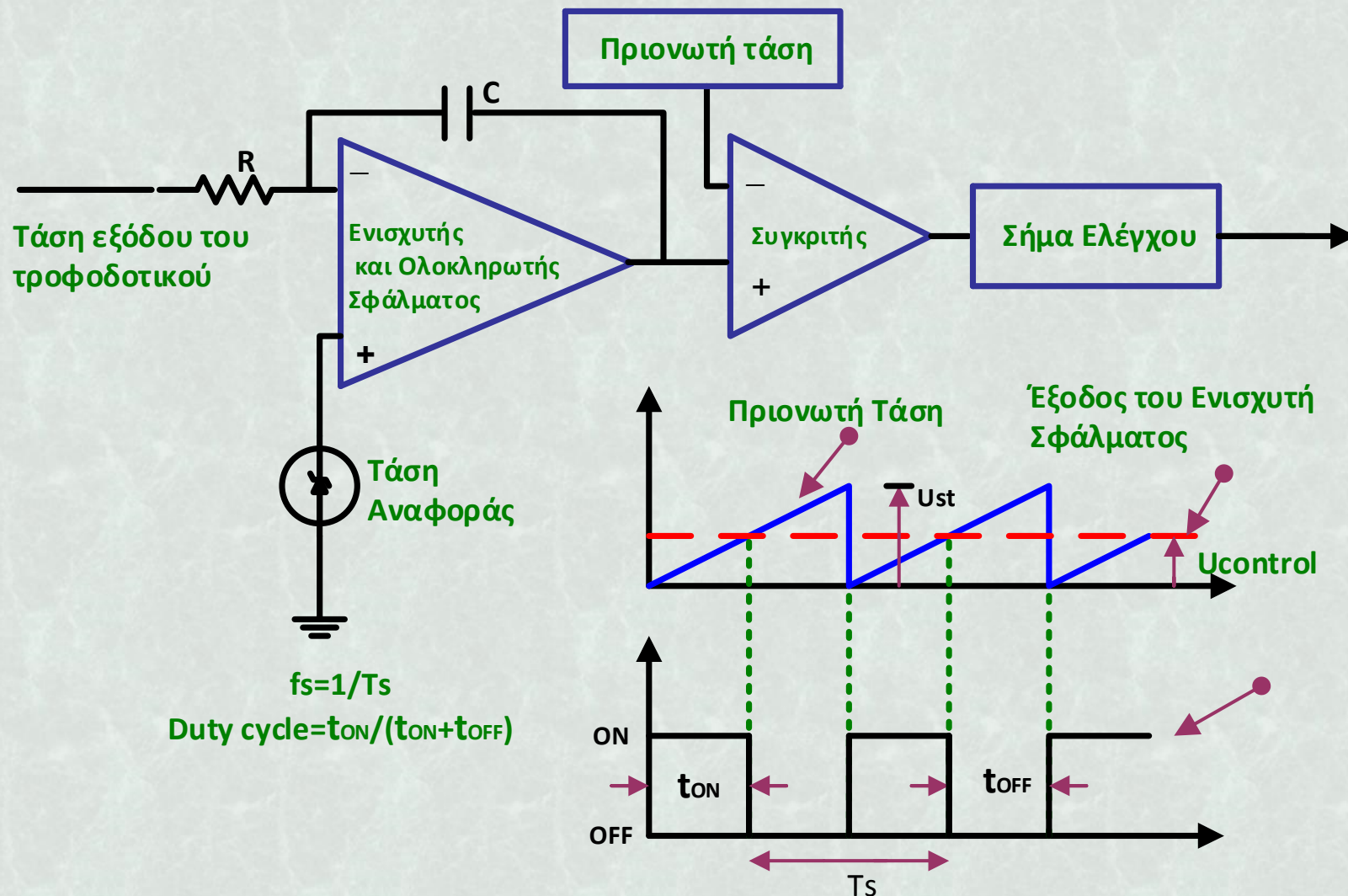
Μετατροπείς Τετραγωνικής Κυματομορφής

- ❑ Η μεταβολή αυτή του λόγου κατάτμησης επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός συγκριτή:
 - η πραγματική τιμή της τάσης εξόδου συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή της (**τάση αναφοράς**) και παράγεται ένα σφάλμα, το οποίο, διαμορφώνεται και ενισχύεται κατάλληλα
 - το σφάλμα αυτό συγκρίνεται εκ νέου με μία τάση **πριονωτής μορφής** και παράγονται παλμοί διαμορφωμένοι κατά το εύρος (παλμοί τύπου PWM), που καθορίζουν την έναυση και σβέση των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος του μετατροπέα.



ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

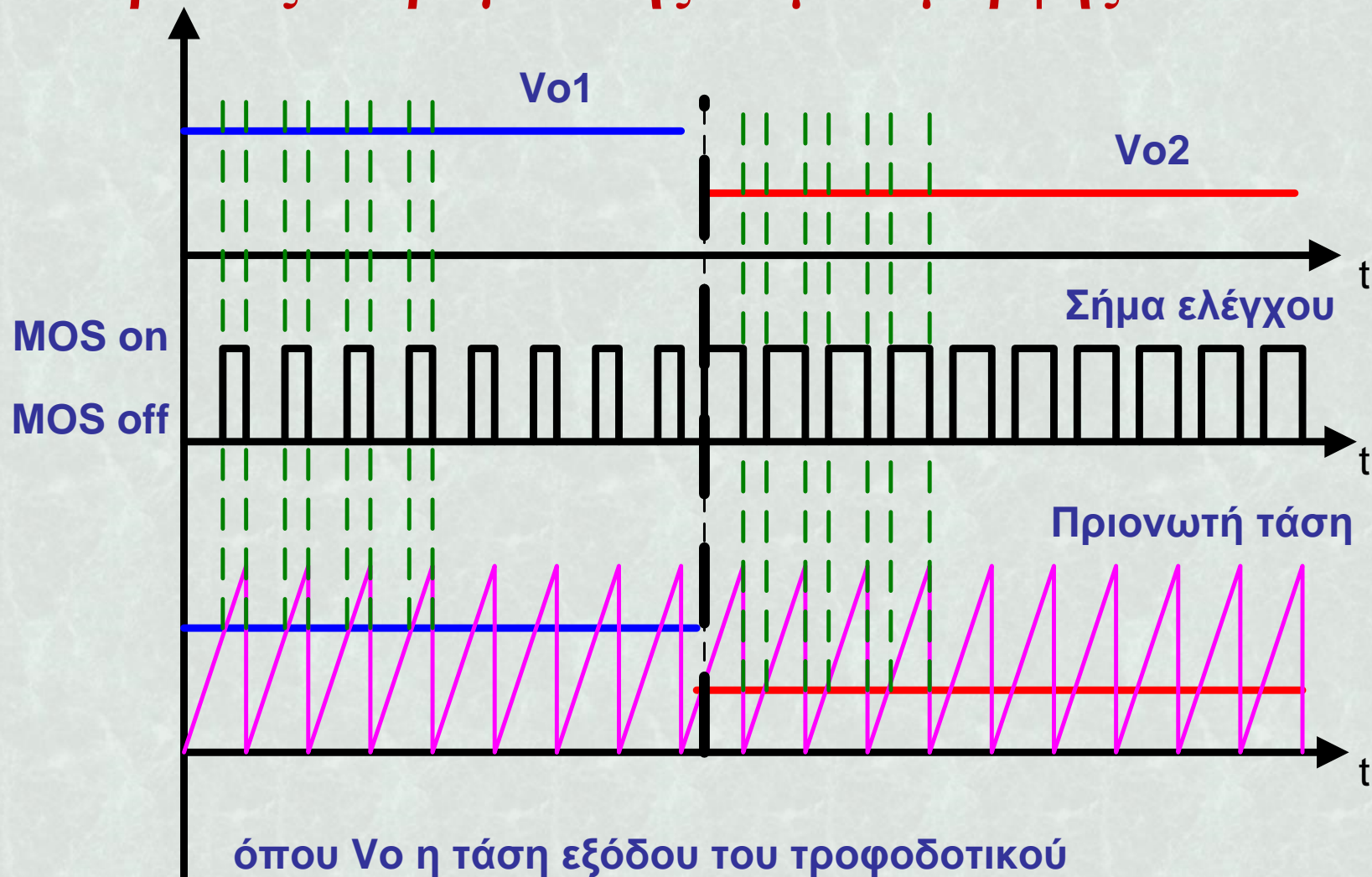
Μετατροπείς Τετραγωνικής Κυματομορφής



Απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα της τεχνικής P.W.M., καθώς και τα σήματα στην είσοδο και στην έξοδο του συγκριτή.

ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

Μετατροπείς Τετραγωνικής Κυματομορφής



Μεταβολή του χρόνου αγωγής κατά τη λειτουργία του μετατροπέα, η οποία προκαλείται από μεταβολή (μείωση) της τάσης εξόδου.

Μετατροπείς Συντονισμού

- ❑ Η συνεχής τάση εισόδου εφαρμόζεται, μέσω διακοπτικά ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, σε ένα χωρητικό-επαγωγικό κύκλωμα συντονισμού.
- ❑ Στην περίπτωση αυτή η ροή ενέργειας δεν καθορίζεται από ένα ανεξάρτητο παλμικό ρολόι, αλλά από τη συχνότητα συντονισμού του L-C κυκλώματος, που εμπεριέχεται στη διάταξη.
- ❑ Η τεχνική της **Διαμόρφωσης της Συχνότητας των Παλμών** (*Pulse Frequency Modulation, PFM*), που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή, συνίσταται στο να διατηρείται σταθερός ο χρόνος αγωγής ή αποκοπής του ημιαγωγικού στοιχείου (εξαρτάται από το είδος του μετατροπέα για το ποιός από τους δύο χρόνους κρατείται σταθερός) και να μεταβάλλεται ο χρόνος αποκοπής ή αγωγής (κατ' αντιστοιχία), άρα και η συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα, με στόχο να λαμβάνεται η επιθυμητή τιμή της τάσης στην έξοδο αυτού.



ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

- με τον όρο “**τοπολογία**” ενός διακοπτικού τροφοδοτικού ή αλλιώς “**κύκλωμα ισχύος**” αναφερόμαστε στην κυκλωματική διάταξη ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος (τρανζίστορ και διόδων), μαγνητικών στοιχείων (μετασχηματιστών ή/και επαγωγών), καθώς και πυκνωτών, που καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο η ισχύς μεταφέρεται από την είσοδο στην έξοδο.

Τοπολογίες διακοπτικών μετατροπέων Σ.Τ.-Σ.Τ. χωρίς γαλβανική απομόνωση (*Single Ended DC-DC Converters*):

- Μετατροπέας ΣΤ-ΣΤ υποβιβασμού της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου (***BUCK DC-DC Converter***)
- Μετατροπέας ΣΤ-ΣΤ ανύψωσης της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου (***BOOST DC-DC Converter***)
- Μετατροπέας ΣΤ-ΣΤ υποβιβασμού-ανύψωσης της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου (***BUCK-BOOST DC-DC Converter***)



ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ

Τοπολογίες διακοπτικών μετατροπέων Σ.Τ.-Σ.Τ. με γαλβανική απομόνωση:

- Μετατροπέας ΣΤ-ΣΤ υποβιβασμού της τάσης εξόδου σε σχέση με την ανηγμένη τάση εισόδου (*FORWARD DC-DC Converter*)
- Μετατροπέας ΣΤ-ΣΤ υποβιβασμού-ανύψωσης της τάσης εξόδου σε σχέση με την ανηγμένη τάση εισόδου (*FLYBACK DC-DC Converter*)
- Μετατροπέας ΣΤ-ΣΤ συμμετρικός (*PUSH-PULL DC-DC Converter*)
- Μετατροπέας ΣΤ-ΣΤ ημιγέφυρας (*HALF BRIDGE DC-DC Converter*)
- Μετατροπέας ΣΤ-ΣΤ πλήρους γέφυρας (*FULL BRIDGE DC-DC Converter*)



ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ - Άσκηση

Δεδομένα

Χρησιμοποιώντας το σχήμα, που αναφέρεται στο στοιχείο LM7815, σχεδιάστε γραμμικό τροφοδοτικό το οποίο τροφοδοτείται από το δίκτυο (230Vrms) και δίνει στην έξοδο του 15V και 1A.

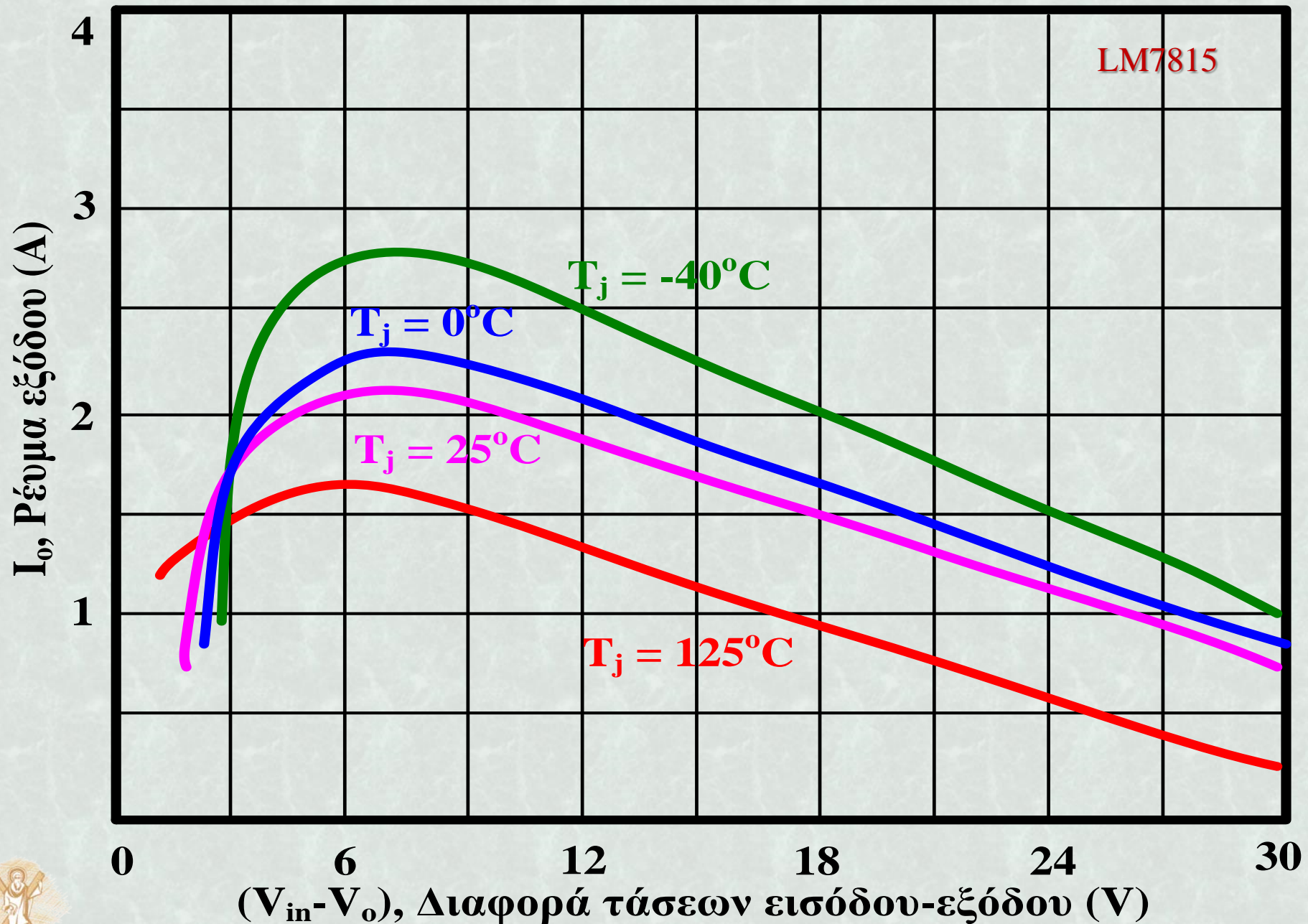
Θεωρήστε ότι, η διακύμανση της τάσης του δικτύου είναι ~15%, ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή είναι $n=230:18$ και ότι η διακύμανση της τάσης στον πυκνωτή εισόδου δεν πρέπει να ξεπερνά το 12% της μέγιστης τιμής της.

Ζητούμενα

1. Ελέγξατε την ορθή λειτουργία της διάταξης, ώστε να λειτουργεί κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες.
2. Υπολογίστε την τιμή του πυκνωτή εισόδου ούτως ώστε στις χειρότερες συνθήκες λειτουργίας να εξασφαλίζεται η μέγιστη επιτρεπτή κυμάτωση.
3. Υπολογίστε την απόδοση του τροφοδοτικού αυτού για τις χειρότερες συνθήκες λειτουργίας



ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΑ - Άσκηση



LM7815

$T_j = -40^\circ\text{C}$

$T_j = 0^\circ\text{C}$

$T_j = 25^\circ\text{C}$

$T_j = 125^\circ\text{C}$



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.

