

**Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο**

**ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ**



## 8.1 Εισαγωγή

Όλες σχεδόν οι σύγχρονες ηλεκτρονικές συσκευές εργάζονται τροφοδοτούμενες με συνεχή τάση (dc). Η τροφοδοσία αυτή επιτυγχάνεται παίρνοντας την εναλλασσόμενη (ac) τάση του δικτύου 220 V/50 Hz και συνήθως υποβιβάζοντά την τη μετατρέπουμε σε dc. Οι διατάξεις που επιτελούν αυτή τη λειτουργία ονομάζονται **τροφοδοτικές διατάξεις** ή απλώς **τροφοδοτικά**.

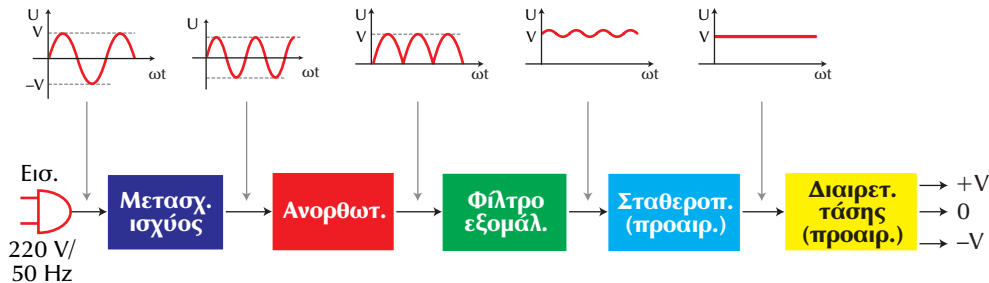
Ορισμένοι μετατροπείς, όπως οι φωτοπολλαπλασιαστές και οι ανιχνευτές ιονισμού, χρειάζονται dc τάσεις τροφοδοσίας από εκατοντάδες έως χιλιάδες βολτ (kV), αλλά πολύ μικρά ρεύματα, συνήθως μικρότερα του mA (μιλιαμπέρ). Άλλες διατάξεις, όπως π.χ. τα τρανζίστορ και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα (IC), εργάζονται συνήθως με τάσεις τροφοδοσίας από 3 έως 30 V και ρεύματα από μερικά mA έως αρκετά A (αμπέρ).

Η σταθερότητα της τάσης τροφοδοσίας, που τροφοδοτεί την ηλεκτρονική συσκευή, παίζει συχνά σημαντικό ρόλο, γιατί καθορίζει και τη σταθερότητα λειτουργίας της συσκευής.

Σήμερα υπάρχουν διάφοροι **τύποι τροφοδοτικών**. Ορισμένοι από αυτούς βασίζονται στο κλασσικό σχήμα ανόρθωσης συνδυασμένης με φίλτρα εξομάλυνσης. Ανάπτυξη αυτού του σχήματος γίνεται με τη χρήση ειδικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων τροφοδοσίας. Επίσης, σε διάφορες εφαρμογές χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα παλμοτροφοδοτικά. Τέλος, όταν οι απαιτούμενες ισχείς δεν είναι μεγάλες, χρησιμοποιούνται τόσο μετατροπείς DC/DC όσο και μετατροπείς AC/DC. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι για την επίτευξη σταθερής τάσης εξόδου dc, είναι σήμερα σε χρήση διάφοροι σταθεροποιητές. Τα παραπάνω θέματα θα μας απασχολήσουν στις ενότητες που ακολουθούν.

## 8.2 Βασικές βαθμίδες ενός τροφοδοτικού

Το Σχ.8.1 δείχνει το δομικό διάγραμμα ενός συνήθους τροφοδοτικού και τις διάφορες βαθμίδες που χρειάζονται για τη μετατροπή της ac τάσης σε dc. Το σχήμα δείχνει και τις διάφορες κυματομορφές κάθε βαθμίδας.



**Σχήμα 8.1.** Δομικό διάγραμμα τροφοδοτικού μετατροπής ac τάσης σε dc

Η πρώτη βαθμίδα είναι ένας **μετασχηματιστής ισχύος** που μετατρέπει το πλάτος της διαθέσιμης τάσης εισόδου ac, π.χ. τα 220 V του δικτύου, στην επιθυμητή ac τάση (με υποβιβασμό ή ανύψωση). Η δεύτερη βαθμίδα είναι ένας **ανορθωτής** ο οποίος μετατρέπει το ac σήμα της ήδη τροποποιημένης τάσης εισόδου σε συρμό ανορθωμένων παλμών τάσης ή **παλμοτάση dc**. Στη συνέχεια η dc παλμοτάση μετατρέπεται πλήρως σε dc από ένα **φίλτρο εξομάλυνσης**. Η επόμενη βαθμίδα είναι ο **σταθεροποιητής** τάσης, ο οποίος βελτιώνει τη dc τάση εξόδου, δηλαδή υποβιβάζει την **κυμάτωση**. Τέλος, αρκετές ηλεκτρονικές διατάξεις τροφοδοσίας έχουν και ένα **διαιρέτη τάσης** που δίνει διάφορες στάθμες dc τάσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται στα διάφορα τμήματα των τροφοδοτούμενων συσκευών.

### 8.2.1 Ποιοτικά Χαρακτηριστικά μιας Τάσης Τροφοδοσίας

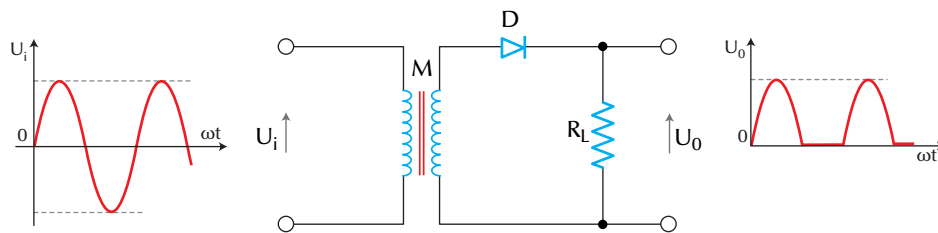
Για να είναι ιδανική η dc τάση που παράγεται από ένα τροφοδοτικό πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Σταθερή dc στάθμη ανεξάρτητη από τις απαιτούμενες μεταβολές του ρεύματος του φόρτου, δηλ. καλή ρύθμιση και χαμηλή αντίσταση εξόδου.
2. Σταθερή χρονικά τιμή ανεξάρτητη από τυχόν μεταβολές της θερμοκρασίας, της τάσης ac του δικτύου, της ηλικίας των στοιχείων του, κτλ. (καλή σταθερότητα).
3. Να μην ενέχει τάση θορύβου ή άλλη ac συνιστώσα στη συχνότητα κυμάτωσης (γενικά, μικρή κυμάτωση).

Εξάλλου, ο όγκος του τροφοδοτικού πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερος και η απόδοσή του όσο το δυνατό μεγαλύτερη.

### 8.3 Ημιανόρθωση

Η απλούστερη δυνατή διαδικασία που μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή dc τάσης από ac είσοδο είναι η **ημιανόρθωση**. Το τυπικό βασικό κύκλωμα της ημιανόρθωσης εικονίζεται στο Σχ.8.2.



Σχήμα 8.2. Κύκλωμα ημιανόρθωσης

Η ανάλυση της λειτουργίας του κυκλώματος αυτού έχει ως εξής:

Το δευτερεύον του μετασχηματιστή  $M$  δίνει εναλλασσόμενη τάση, 50 Hz κατάλληλης τιμής πλάτους ώστε τελικά να παράγεται η επιθυμητή dc τάση. Κατά τη θετική ημιπερίοδο, η τάση του δευτερεύοντος κάνει την άνοδο της διόδου  $D$  πιο θετική από την κάθοδο κι έτσι η διάδος άγει. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο, η τάση του δευτερεύοντος είναι τέτοια ώστε η άνοδος της διόδου να είναι αρνητική ως προς την κάθοδο και η διάδος δεν άγει (θεωρούμε αμελητέο το ανάστροφο ρεύμα). Άρα, το ρεύμα που κυκλοφορεί μέσω της διόδου και της αντίστασης φόρτου  $R_L$  κυκλοφορεί κατά τη μία μόνο φορά και συνεπώς είναι dc ρεύμα (με τη γενική έννοια του όρου), μολονότι δεν είναι σταθερά συνεχές αλλά παλμόρευμα. Το παλμόρευμα αυτό αναπτύσσει στα άκρα της  $R_L$  μια dc παλμοτάση (ημιανορθωμένη), όπως δείχνει το Σχ.8.2. Επειδή σε κάθε αρνητική ημιπερίοδο, που διαρκεί επί χρόνο 10 ms ( $T=1/f=1/50=20$  ms), δεν κυκλοφορεί ρεύμα, η ισχύς που αναπτύσσεται στο φόρτο είναι αρκετά μικρή.

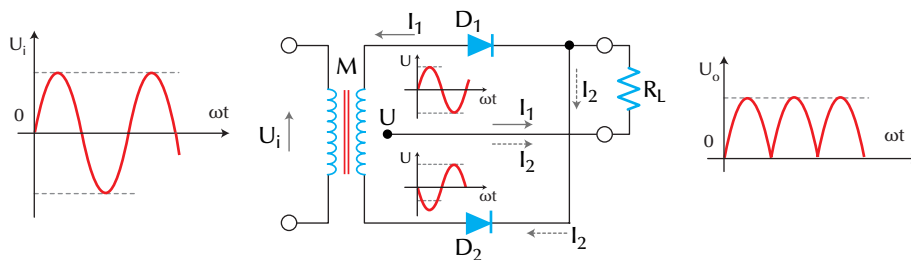
Η ενεργός αντίσταση ορθής φοράς της ανορθώτριας διόδου,  $r_f$ , δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από το στιγμιαίο ρεύμα της διόδου  $I_D$ , κατά τη σχέση  $r_f \approx 25/I_D$  (το  $r_f$  σε  $\Omega$  αν το  $I_D$  σε mA). Έτσι, μπορούμε να υπολογίζουμε τη στιγμιαία ισχύ απωλειών του ημιανορθωτή από τον τύπο

$$P_{\alpha, D} = I_D^2 r_f \approx 25 I_D \quad (8.3.1)$$

Τα κύρια πλεονεκτήματα του ημιανορθωτή είναι το χαμηλό κόστος και η απλότητα της κατασκευής του και τα μειονεκτήματά του το μεγάλο μέγεθος μετασχηματιστή, οι αυστηρές απαιτήσεις φιλτραρίσματος, το χαμηλό ρεύμα εξόδου και η πενιχρή δυνατότητα ρύθμισης της τάσης εξόδου.

## 8.4 Πλήρης ανόρθωση

Το κύκλωμα του Σχ.8.3 δείχνει τον πλήρη ανορθωτή. Είναι συνήθως το κύκλωμα που χρησιμοποιείται πιο πολύ από τα κυκλώματα των ανορθωτών. Ο μετασχηματιστής  $M$  έχει μεσαία λήψη και η προσθήκη μιας επιπλέον διόδου επιτρέπει να αναπτύσσεται (ανορθωμένη) τάση στο φόρτο και κατά τις δύο ημιπεριόδους του σήματος εισόδου. Λόγω της μεσαίας λήψης οι εισοδοί στις δύο διόδους έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης  $180^\circ$ .



Σχήμα 8.3. Κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης

Κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου, η διάδος  $D_1$  άγει κι έτσι από το φόρτο διέρχεται το δικό της ρεύμα  $I_1$ . Κατά την αρνητική ημιπερίοδο άγει η διάδος  $D_2$  και από το φόρτο περνάει το ρεύμα  $I_2$ . Το ολικό ρεύμα του φόρτου  $I_L$  είναι το άθροισμα  $I_1 + I_2$  των δύο ρευμάτων.

Η dc τάση εξόδου του πλήρους ανορθωτή είναι ίση με το πλάτος της τάσης που αναπτύσσεται σε κάθε μισό του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Για να επιτύχουμε τάση κορυφής της εξόδου ίση με  $V_{op}$ , θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μετασχηματιστή με μεσαία λήψη που έχει τάση εξόδου (rms τιμή)

$$V_M = \frac{2V_{op}}{\sqrt{2}} + 1 \text{ Volt} \quad (8.4.1)$$

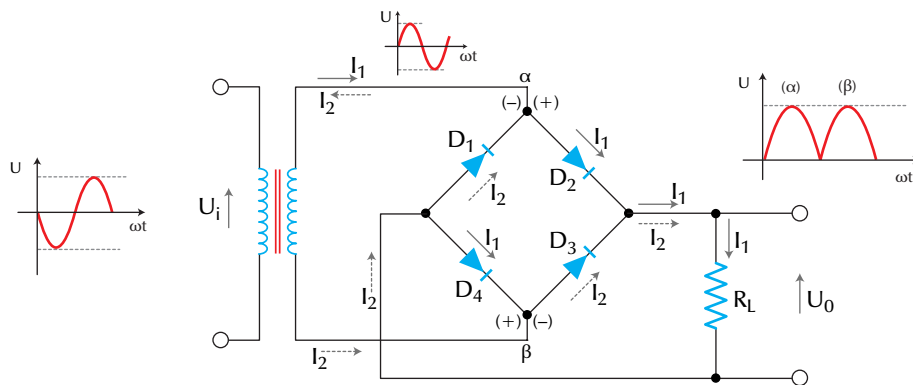
Το επιπλέον 1 V προστίθεται για να ληφθεί υπόψη η πτώση τάσης των ανορθωτριών διόδων.

Με το κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης αναπτύσσεται καλύτερη (πυκνότερη) μορφή παλμών dc τάσης, η οποία χρειάζεται **πιο εύκολο φιλτράρισμα** για να γίνει κανονική dc τάση, αλλά το κύκλωμα έχει **μεγαλύτερο κόστος**. Πράγματι, η **συχνότητα κυμάτωσης**, όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο, είναι **διπλάσιας συχνότητας** από ό,τι στην ημιανόρθωση κι έτσι το φιλτράρισμα είναι πιο εύκολο. Σημειώνουμε επίσης, ότι ο **μετασχηματιστής έχει μικρότερο μέγεθος** από εκείνον της ημιανόρθωσης.

## 8.5 Ανόρθωση με γέφυρα

Ο ανορθωτής με γέφυρα μοιάζει σε αρκετά σημεία με τον πλήρη ανορθωτή που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα. Ως προς τη συχνότητα κυμάτωσης και την απόδοση, τα δυο κυκλώματα είναι όμοια και διαφέρουν ως προς τον αριθμό των διόδων και το επίπεδο της τάσης εξόδου.

Το Σχ.8.4 δείχνει έναν τυπικό ανορθωτή με γέφυρα. Η γέφυρα είναι συνδεδεμένη στα άκρα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και η τάση που φτάνει στο φόρτο οφείλεται σε όλη την τάση του δευτερεύοντος, εφόσον δεν υπάρχει μεσαία λήψη.



Σχήμα 8.4. Κύκλωμα ανόρθωσης με γέφυρα

Η λειτουργία του ανορθωτή αυτού έχει ως εξής:

Όταν η τάση στο σημείο α είναι θετική, δηλ. κατά το πρώτο μισό (1η ημιπερίοδος) του σήματος εισόδου, άγουν οι δύο διόδους  $D_2$  και  $D_4$ , αφού οι άνοδοί τους είναι θετικές, και το ρεύμα  $I_1$  ακολουθεί το δρόμο που δείχνει

το σχήμα, δηλ. μέσω της διόδου  $D_2$ , του φόρτου  $R_L$ , της διόδου  $D_4$  του σημείου  $\beta$  και τέλος του σημείου  $\alpha$ . Η τάση εξόδου έχει τότε τη μορφή της κυματομορφής που δείχνει το σχήμα.

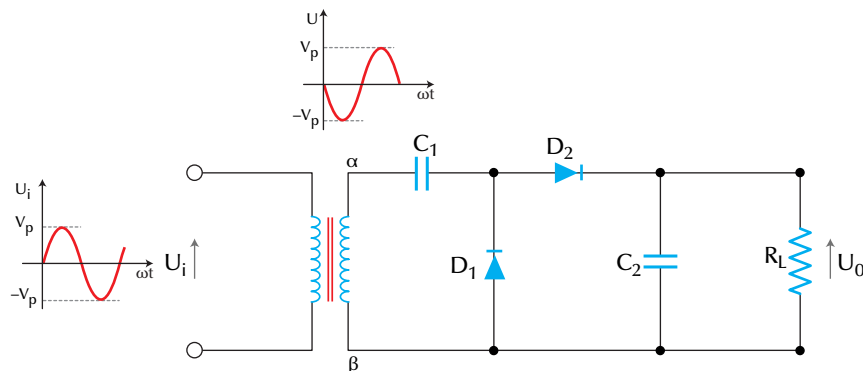
Κατά το δεύτερο μισό (2η ημιπερίοδος) του σήματος εισόδου, όπως αυτό αναπτύσσεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, το σημείο  $\alpha$  γίνεται αρνητικό και άγουν οι διόδους  $D_1$  και  $D_3$ , αφού οι άνοδοί τους είναι τώρα πιο θετικές από τις αντίστοιχες καθόδους. Το ρεύμα  $I_2$  ακολουθεί το δρόμο από το σημείο  $\beta$  μέσω της διόδου  $D_3$ , του φόρτου  $R_L$ , της διόδου  $D_1$ , του σημείου  $\alpha$  και, τέλος, του σημείου  $\beta$ . Τα ρεύματα  $I_1$  και  $I_2$  έχουν την ίδια φορά καθώς διέρχονται από το φόρτο  $R_L$ . Η τάση εξόδου έχει τη μορφή που αντιστοιχεί στον παλμό “β” της κυματομορφής που δείχνει το σχήμα.

Το κύριο πλεονέκτημα της ανόρθωσης με γέφυρα είναι ότι **χρησιμοποιεί ολόκληρη την τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή**, ενώ ταυτόχρονα έχουμε **πλήρη ανόρθωση**. Το μειονέκτημά της είναι ότι χρησιμοποιούμε **τέσσερις αντί δύο διόδους**, άρα αυξάνεται το κόστος και η πολυπλοκότητα.

## 8.6 Διπλασιαστής τάσης

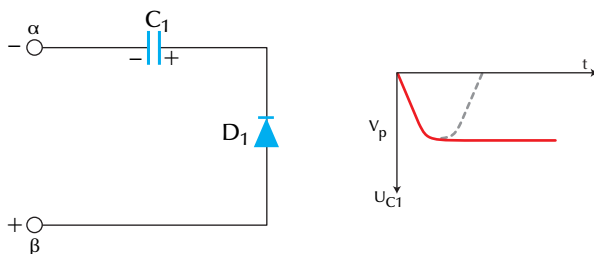
Συχνά, στις ηλεκτρονικές διατάξεις μας συμφέρει να παράγουμε μια ανορθωμένη dc τάση ξεκινώντας από μια όσο το δυνατό χαμηλότερη ac τάση. Ένα απλό κύκλωμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί γι’ αυτό το σκοπό είναι ο διπλασιαστής τάσης.

□ Ο **διπλασιαστής τάσης** είναι ένα κύκλωμα ανόρθωσης που έχει συνδεσμοποιηθεί, ώστε η τάση εξόδου του να είναι διπλάσια του πλάτους της ac τάσης εισόδου του, Σχ.8.5.



Σχήμα 8.5. Κύκλωμα διπλασιαστή τάσης

Θα αναλύσουμε τη λειτουργία του κυκλώματος ξεκινώντας αρχικά από τη συμπεριφορά της διόδου  $D_1$  και του πυκνωτή  $C_1$ , όπως αυτή εικονίζεται στο βοηθητικό Σχ.8.6. Ας υποθέσουμε, ότι στην αρχή, η τάση εισόδου έχει την πολικότητα που δείχνει το σχήμα. Τότε η διόδος θα είναι αγώγιμη κι έτσι ο πυκνωτής θα φορτίζεται μέχρι μια τάση ίση με την τάση κορυφής του σήματος εισόδου. Η φόρτιση αυτή είναι ταχύτατη, επειδή η αντίσταση ορθής φοράς  $r_f$  της διόδου είναι πολύ μικρή (άρα θα έχουμε μικρή σταθερά χρόνου  $r_f C_1$ ).

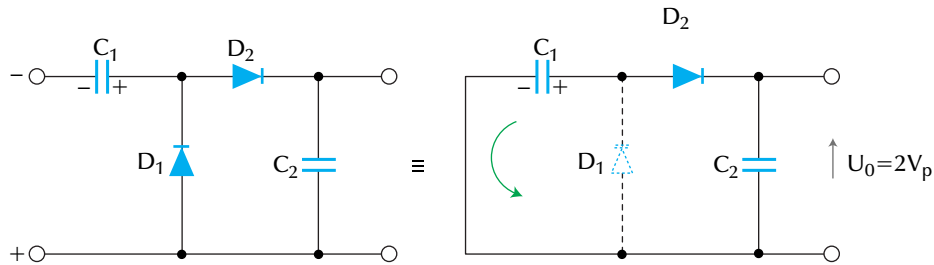


**Σχήμα 8.6.** Φόρτιση του πυκνωτή  $C_1$  μέσω της  $D_1$  και τάση του πυκνωτή

Μόλις ο πυκνωτής φορτιστεί η διόδος  $D_1$  πολώνεται πλέον ανάστροφα, αφού η κάθοδό της γίνεται πλέον πιο θετική από την άνοδο, καθώς η είσοδος αρχίζει τώρα να ελαττώνεται και οδηγείται προς το μηδέν. Παρόλα αυτά ο πυκνωτής δεν μπορεί να εκφορτιστεί, καθώς η διόδος  $D_1$  είναι ανάστροφα πολωμένη και το ανάστροφο ρεύμα θεωρείται αμελητέο. Επομένως, η τάση στα άκρα του  $C_1$  θα διατηρείται σταθερή σε μια τιμή ίση με την τιμή κορυφής της τάσης εισόδου. Η πολικότητα αυτή της τάσης καθιστά αγώγιμη τη διόδο  $D_2$  κι έτσι η τάση αυτή μεταφέρεται στο φόρτο  $R_L$ .

Όταν η είσοδος αλλάξει πολικότητα, η κατάσταση αλλάζει και ενεργοποιείται ο πυκνωτής  $C_2$ , ενώ η διόδος  $D_1$  παραμένει μη αγώγιμη, όπως δείχνει στο Σχ.8.7. Ο πυκνωτής  $C_2$  “βλέπει” δύο πηγές τάσης, που είναι η τάση ac εισόδου και η τάση του πυκνωτή  $C_1$ . Οι δυο αυτές πηγές είναι σε σειρά κι έτσι ο πυκνωτής  $C_2$  φορτίζεται μέσω της διόδου  $D_2$  (που παραμένει αγώγιμη), από τη –θετική πλέον– τάση εισόδου ac συν τη σταθερή τάση που έχει αποκτήσει ο πυκνωτής  $C_1$ . Άρα, τελικά ο πυκνωτής  $C_2$  θα φορτίζεται στο διπλάσιο της τιμής της τάσης εισόδου και μεταφέρει αυτή την τάση απ’ ευθείας στο φόρτο  $R_L$ .





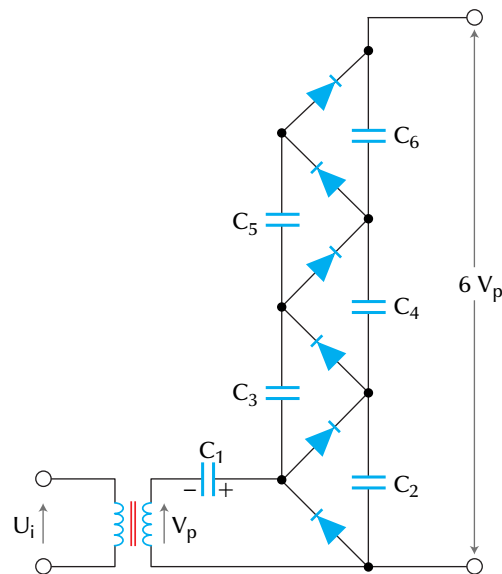
Σχήμα 8.7. Φόρτιση του πυκνωτή  $C_2$

Η τάση στα άκρα του πυκνωτή  $C_2$  είναι διπλάσια της τάσης εισόδου με την προϋπόθεση, ότι το ρεύμα μέσα από το φόρτο  $R_L$  είναι πολύ μικρό. Αν το ρεύμα αυτό είναι πολύ μεγάλο, δηλ η αντίσταση  $R_L$  μικρή, ο πυκνωτής  $C_2$  θα εκφορτίζεται ταχύτατα μέσω αυτής και η τάση στα άκρα του δε προλαβαίνει να μένει στην αναμενόμενη στάθμη διπλασιασμού. Γι' αυτό το λόγο για να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα με κανονικό φόρτο, οι πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  επιλέγονται μεγάλοι. Τυπικές τιμές των πυκνωτών αυτών είναι της τάξης των 100  $\mu\text{F}$  ή ακόμα μεγαλύτεροι.

### 8.6.1 Πολλαπλασιαστής Τάσης

Το Σχ.8.8 δείχνει το κύκλωμα ενός **πολλαπλασιαστή τάσης**, για την περίπτωση 6-πλασιασμού τάσης. Το κύκλωμα αυτό μπορεί να επεκταθεί ώστε να δίνει οποιαδήποτε πολλαπλάσιο της τάσης εισόδου. Η σύγκριση του κυκλώματος αυτού με το κύκλωμα διπλασιασμού τάσης δείχνει, ότι συγκροτείται από μια ακολουθία κυκλωμάτων διπλασιασμού σε σειρά.

Όταν εφαρμόζεται η ac τάση εισόδου φορτίζονται βαθμιαία οι πυκνωτές  $C_2, C_4, C_6$  μέχρις ότου ο καθένας τους να δημιουργήσει διαφορά δυναμικού  $2V_p$  οπότε, επειδή έχουμε σύνδεση των αντίστοιχων διπλασιαστών σε σειρά, η τελική έξοδος θα είναι  $6V_p$ . Τέλος, οι πυκνωτές  $C_1, C_3, C_5$  λειτουργούν σαν πυκνωτές ac σύζευξης, μεταφέροντας την ac είσοδο στους ανορθωτές  $D_2, D_4, D_6$ , ώστε οι πυκνωτές  $C_2, C_4$  και  $C_6$  να βρίσκονται σε επαφή με το φόρτο.



**Σχήμα 8.8.** Πολλαπλασιαστής τάσης (6-πλασιαστής)

Τα κυκλώματα διπλασιασμού και πολλαπλασιασμού τάσης επιδέχονται ρεύματα φόρτου σχετικά μικρής τιμής και χρησιμοποιούνται κυρίως σε συσκευές όπως λυχνίες καθοδικών ακτίνων (CRT), φωτοπολλαπλασιαστές και λυχνίες ιονισμού Geiger-Muller.

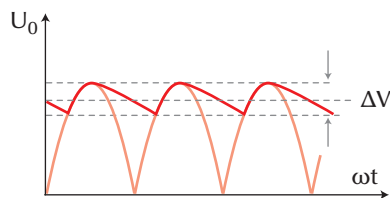
Σε μεγάλους φόρτους, η κυμάτωσή τους και η ρύθμιση ως προς το φόρτο είναι πολύ φτωχή για δυο λόγους. Πρώτον, οι πυκνωτές αποθήκευσης αποτελούνται από έναν αριθμό πυκνωτών σε σειρά, με αποτέλεσμα η ενεργός τιμή τους να μικραίνει. Δεύτερον, χρειάζονται αρκετοί κύκλοι ac για να επαναφορτίζονται όλοι οι πυκνωτές αυτοί σε μια πολλαπλάσια τάση, σε αντίθεση με τον πλήρη ανορθωτή, όπου οι πυκνωτές αποθήκευσης επαναφορτίζονται δυο φορές σε κάθε ac κύκλο.

Κύκλωμα	Τάση Εισόδου (rms)	Τάση ac Εξόδου χωρίςφόρτο	Τάση Εξόδου με φόρτο	Ανάστροφη Τάση ανορθωτή	Ρεύμα Ανορθωτή
Ημιανορθωτής	V	$\sqrt{2}$	V	$2\sqrt{2}$ V	I
Πλήρης Ανορθωτής	V+V	$\sqrt{2}$	1.2V	$2\sqrt{2}$ V	I / 2
Ανορθωτής με γέφυρα	V	$\sqrt{2}$	1.2V	$\sqrt{2}$ V	I / 2
2-πλασιαστής Τάσης	V	$2\sqrt{2}$ V	2V	$2\sqrt{2}$ V	I

**Πίνακας Π.8.1.** Συγκριτικά χαρακτηριστικά ανορθωτών

## 8.7 Εξομάλυνση και φίλτρα

Η διαδικασία με την οποία απαλείφουμε μερικώς ή ολικώς την παραπάνω ac συνιστώσα από την ανορθωμένη κυματομορφή και συνεπώς ομαλοποιούμε ή εξομαλύνουμε την κυματομορφή ώστε να πλησιάζει όσο γίνεται περισσότερο προς μια σταθερή dc έξοδο, ονομάζεται **εξομάλυνση**. Στο Σχ.8.9 απεικονίζεται μια πλήρως ανορθωμένη κυματομορφή τάσης μαζί με μια αντίστοιχη μερικώς εξομαλυμένη (παχιά γραμμή) και μια τελείως εξομαλυμένη dc τάση (διακεκομμένη γραμμή).



**Σχήμα 8.9.** Τυπική ανορθωμένη κυματομορφή (α), μερικά εξομαλυμένη (β), και πλήρως εξομαλυμένη (γ)

Στη γενική περίπτωση η εξομάλυνση δε θα είναι πλήρης, με αποτέλεσμα η τελική τάση  $v_o$  να εμφανίζει περιοδική διακύμανση, όπως δείχνει το σχήμα. Το εύρος  $V_{ac} = \Delta V$  αυτής της διακύμανσης ονομάζεται **κυμάτωση** και αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό μιας τροφοδοτικής διάταξης. Συχνά η κυμάτωση εκφράζεται και σε ποσοστιαία μορφή, δηλ. από το συντελεστή:

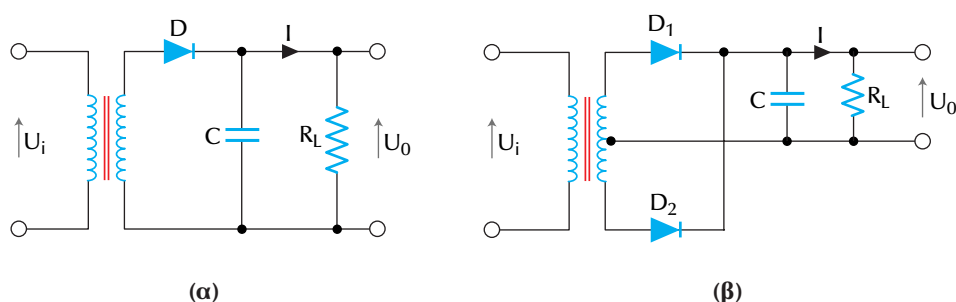
$$r = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} \quad (8.7.1)$$

### 8.7.1 Εξομάλυνση με Πυκνωτή

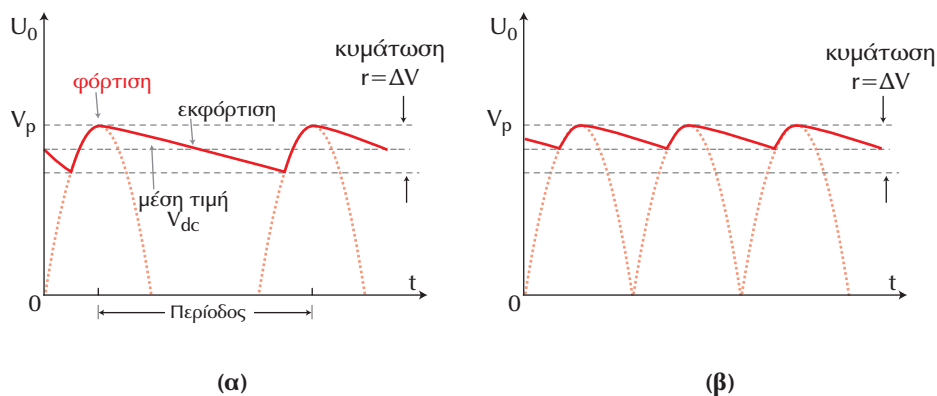
Για να **εξομαλύνουμε** τις ανορθωμένες κυματομορφές και να τις μετατρέψουμε σε σταθερή dc τάση εξόδου, χρησιμοποιούμε ένα πυκνωτή C μεγάλης χωρητικότητας, συνδεδεμένο παράλληλα προς το φόρτο μετά τον ανορθωτή. Η τιμή του πυκνωτή αυτού, για τη συχνότητα του δικτύου (50 Hz), κυμαίνεται από 100 έως 30000  $\mu\text{F}$  και εξαρτάται από το ρεύμα φόρτου και από το βαθμό εξομάλυνσης που επιθυμούμε.

Το Σχ.8.10 δείχνει τα κυκλώματα της απλής και της διπλής ανόρθω-

σης εφοδιασμένα με τον πυκνωτή εξομάλυνσης, το δε Σχ.8.11 εικονίζει τις κυματομορφές εξόδου των κυκλωμάτων αυτών. Οι εξομαλυνμένες κυματομορφές είναι αυτές που αντιστοιχούν στις τάσεις φόρτισης και εκφόρτισης του σχήματος. Η τάση εξόδου με εξομάλυνση είναι η συνεχής γραμμή, ενώ η ανορθωμένη έξοδος είναι η διακεκομμένη γραμμή η μέση dc τιμή αποδίδεται από την διακεκομμένη (κομματιασμένη) γραμμή.



**Σχήμα 8.10.** Κυκλώματα απλής (α) και διπλής ανόρθωσης (β) με φίλτρο πυκνωτή εξομάλυνσης



**Σχήμα 8.11.** Κυματομορφές εξόδου ανορθωτών με φίλτρο πυκνωτή. Περιπτώσεις ημιανόρθωσης (α), πλήρους ανόρθωσης (β)

Η λειτουργία της εξομάλυνσης πραγματοποιείται με τον εξής τρόπο: Κατά το τελευταίο μέρος του πρώτου μισού κάθε παλμού ανορθωμένης τάσης εξόδου ο πυκνωτής φορτίζεται και η τάση του αυξάνεται μέχρι την τάση κορυφής  $V_p$ . Κατά το υπόλοιπο μέρος του κύκλου της ανορθωμένης εξόδου, ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω του φόρτου  $R_L$ . Συνεπώς, τον περισσότερο χρόνο κάθε κύκλου απλώς παρέχει το φορτίο κορυφής

στον πυκνωτή κάθε φορά που κλείνει ο κύκλος φόρτισης-εκφόρτισης. Αν το ρεύμα διαμέσου του φόρτου ήταν μηδέν, ο πυκνωτής θα διατηρείτο σταθερά φορτισμένος στην τάση κορυφής  $V$  του σήματος εισόδου.

Η ύπαρξη του ρεύματος φόρτου έχει σαν αποτέλεσμα να εκφορτίζεται –έστω και ελάχιστα– ο πυκνωτής κατά  $r = \Delta V$  για κάθε κύκλο του σήματος εισόδου. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία μιας περιοδικά ανώμαλης  $dc$  κυματομορφής της τάσης εξόδου που εμφανίζεται προσεγγιστικά σαν *τριγωνική κυματομορφή*.

Αποδεικνύεται, ότι για την περίπτωση της απλής ανόρθωσης, Σχ.8.10, η κυμάτωση  $r$  δίνεται από τις σχέσεις:

$$r = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{I \cdot T}{C} = \frac{I}{C \cdot f} \quad (8.7.2)$$

όπου,  $V_{ac}$  και  $V_{dc}$  η  $ac$  και  $dc$  συνιστώσα αντίστοιχα της τάσης εξόδου, ενώ το  $I$  παριστάνει τη μέση  $dc$  τιμή του ρεύματος φόρτου ίση με:

$$I \cong \frac{V_{dc}}{R_L} \quad (8.7.3)$$

το  $T$  είναι η περίοδος και  $f$  η συχνότητα της  $ac$  τάσης εισόδου.

Η μέση  $dc$  τιμή της τάσης εξόδου είναι:

$$V_{dc} \cong V_p - \frac{I}{2Cf} \quad (8.7.4)$$

Για τον απλό ανορθωτή η κυμάτωση δίνεται από τις σχέσεις

$$r = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{1}{2\sqrt{3} R_L C f} \quad (8.7.5)$$

Για την πλήρη ανόρθωση η περίοδος της τριγωνικής εξόδου της κυμάτωσης είναι  $T=1/2f$ . Επομένως, η κυμάτωση στην *πλήρη ανόρθωση* δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{1}{4\sqrt{3} R C f} \quad (8.7.6)$$

και η τάση εξόδο του από τη σχέση

$$V_{dc} \cong V_p - \frac{I}{4Cf} \quad (8.7.7)$$

Όπως φαίνεται στο Σχ.8.11, η κυμάτωση στη διπλή ανόρθωση είναι **διπλάσιας συχνότητας** ως προς την απλή ανόρθωση. Αυτός είναι ένας ακόμα λόγος που προτιμάμε τη διπλή ανόρθωση.

### ⇒ Παράδειγμα 8-1

Ένα τροφοδοτικό χρησιμοποιεί πλήρη ανόρθωση που δίνει dc ρεύμα 150 mA και dc τάση 20 V με κυμάτωση όχι μεγαλύτερη από 1%. Υπολογίστε την αντίσταση φόρτου και τον πυκνωτή εξομάλυνσης.

### Λύση

Κατά την Εξ.(8.7.3), η αντίσταση φόρτου θα είναι:

$$R_L = \frac{20V}{0.15A} = 133 \Omega$$

Τέλος, από την Εξ.(8.7.5), βρίσκουμε:

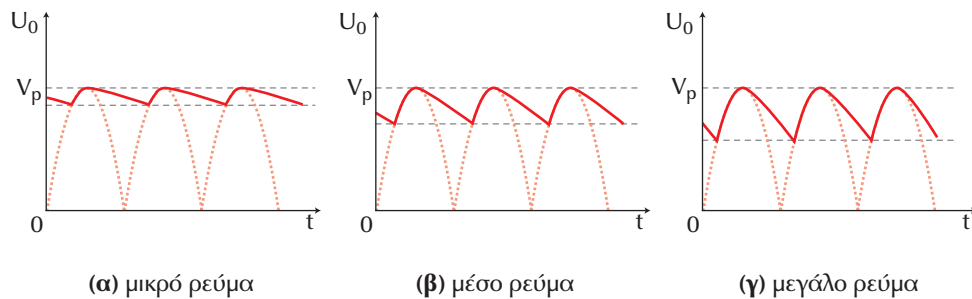
$$C = \frac{1}{4\sqrt{3}R_Lrf} = \frac{1}{4\sqrt{3} \times 133 \times 0.01 \times 50} = 2.2 \times 10^{-3} F \cong 2200 \mu F$$

## 8.7.2 Εξομάλυνση με Φίλτρο LC

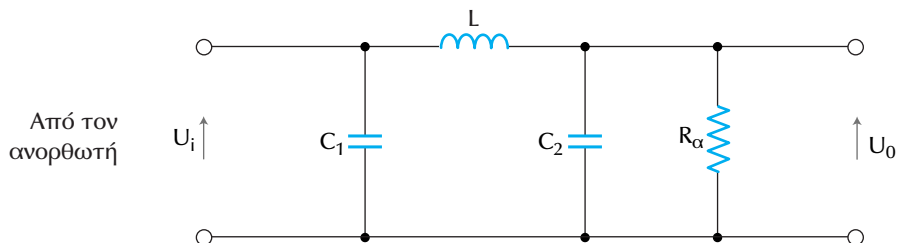
Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, η έξοδος του ανορθωτή με φίλτρο πυκνωτή έχει μια ορισμένη κυμάτωση που, όπως δείχνουν οι Εξ.(8.7.4) ή (8.7.6), είναι ανάλογη του ρεύματος  $I$  του φόρτου. Με άλλα λόγια, αν μεγαλώσει το ρεύμα που τραβάει ο φόρτος, μεγαλώνει και η κυμάτωση. Αυτή η εξάρτηση απεικονίζεται στο Σχ.8.12. Η εκφόρτιση του πυκνωτή είναι η κύρια αιτία αυτού του προβλήματος.

Για να εξουδετερώσουμε το παραπάνω μειονέκτημα κάνουμε χρήση του φίλτρου εξομάλυνσης του Σχ.8.13, το οποίο χρησιμοποιεί δύο χωρητικότητες  $C_1$  και  $C_2$  και μια αυτεπαγωγή  $L$  όπως δείχνει το σχήμα. Το **πηνίο  $L$**  (τσोक) αντιτίθεται σε κάθε μεταβολή του ρεύματός του και επειδή το ρεύμα φόρτου διέρχεται μέσω του πηνίου τείνει να το διατηρεί σταθερό.

Ο πρώτος πυκνωτής,  $C_1$ , δρα ως φίλτρο πυκνωτή, κατά τον τρόπο που είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Με την προσθήκη του δεύτερου πυκνωτή  $C_2$  η έξοδος του φίλτρου φιλτράρεται ακόμα περισσότερο και γίνεται *σχεδόν τελείως απαλλαγμένη από κυμάτωση*. Τυπικές τιμές των στοιχείων του κυκλώματος είναι:  $C_1 = C_2 = 200 \mu\text{F}$  και  $L = 1$  έως  $30 \text{ H}$ .



**Σχήμα 8.12.** Μεταβολή της κυμάτωσης σε συνάρτηση με το ρεύμα φόρτου



**Σχήμα 8.13.** Φίλτρο εξομάλυνσης LC για βελτίωση της κυμάτωσης

Η χρησιμότητα του πηνίου φαίνεται και αν υπολογίσουμε την επαγωγική αντίστασή του,  $X_L$ , στη συχνότητα κυμάτωσης. Για πλήρη ανόρθωση, στην οποία η συχνότητα της κυμάτωσης είναι  $f = 2 \times 50 = 100 \text{ Hz}$  και για πηνίο  $30 \text{ H}$ , έχουμε:

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 100 \times 30 \approx 19 \text{ k}\Omega$$

Συγκριτικά, με αυτή την τιμή η ωμική (dc) αντίσταση του πηνίου, που είναι της τάξης μερικών 10-δων  $\Omega$ , είναι πολύ μικρή. Άρα, για συγκρίσιμα ρεύματα dc η dc πτώση τάσης στο πηνίο θα είναι πολύ μικρότερη από την ac πτώση τάσης, οπότε η εναπομένουσα ac τάση εξόδου  $V_{ac}$  θα είναι

πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη  $V_{dc}$ . Συνεπώς, σύμφωνα με την Εξ.(8.7.1), η κυμάτωση  $r$  είναι πολύ χαμηλή.

Τέλος, στην έξοδο του φίλτρου LC υπάρχει μια αντίσταση που ονομάζεται **αντίσταση αφαίμαξης**,  $R_a$ , και χρησιμεύει για να εκφορτίζονται γρήγορα οι πυκνωτές μέσω αυτής, και όχι μέσω του χειριστή, όταν «κοπεί» η τάση του δικτύου. Το ρεύμα αφαίμαξης είναι συνήθως 10% του ολικού ρεύματος του φόρτου.

Αποδεικνύεται ότι η κυμάτωση για το εξεταζόμενο φίλτρο εξομάλυνσης, που είναι –τύπου Π– δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{5700}{C_1 C_2 L R_L} \quad (8.7.8)$$

όπου, οι χωρητικότητες  $C_1$  και  $C_2$  εκφράζονται σε  $\mu F$ , η αυτεπαγωγή σε  $H$  και η αντίσταση σε  $\Omega$ .

### ⇒ Παράδειγμα 8-2

Ένα τροφοδοτικό χρησιμοποιεί πλήρη ανορθωτή που δίνει ρεύμα 100 mA και dc τάση 12 V. Η κυμάτωση της εξόδου θέλουμε να είναι 0.1%. Υπολογίστε το κατάλληλο φίλτρο εξομάλυνσης τύπου Π.

### Λύση

Ο φόρτος είναι,

$$R_L = \frac{V_{dc}}{I_L} = \frac{12}{100 \times 10^{-3}} = 120 \Omega$$

Αν δεχθούμε, ότι για συμμετρία,  $C_1 = C_2 = C$ , μετά από επίλυση της Εξ.(8.7.8) έχουμε:

$$C \cong \frac{75.5}{\sqrt{r L R_L}} \quad (8.7.9)$$

Αν δεχθούμε για το  $L$  μια συνήθη τιμή εμπορίου  $L=20 H$ , υπολογίζουμε τον  $C$

$$C = \frac{75.5}{\sqrt{0.001 \times 20 \times 120}} \cong 49 \mu F$$

Χρησιμοποιούμε ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές τανταλίου των 100  $\mu F$ .



## 8.8 Σταθεροποίηση τάσης

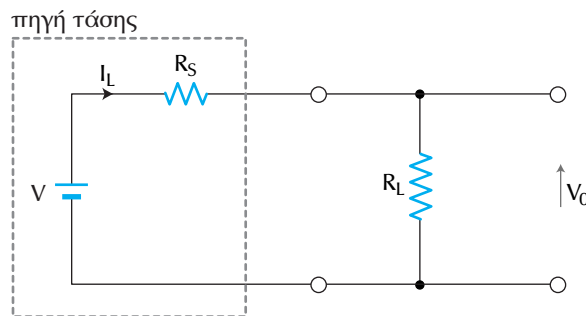
Όπως είδαμε, το φίλτρο εξομάλυνσης δίνει βελτιωμένη dc τάση εξόδου, αλλά κατά κανόνα οι μεταβολές του φόρτου έχουν σημαντική επίδραση σε αυτή την τάση εξόδου. Για να βελτιώσουμε ακόμα παραπέρα τη συμπεριφορά ενός τροφοδοτικού και να καταστήσουμε την τάση εξόδου του όσο το δυνατό πιο ανεπηρέαστη από τυχόν μεταβολές του φόρτου, χρησιμοποιούμε ειδικό κύκλωμα που λέγεται **κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης**. Πατρακάτω, θα δούμε το πιο απλό κύκλωμα σταθεροποίησης, που είναι ο σταθεροποιητής με δίοδο Zener και στη συνέχεια πιο σύνθετα κυκλώματα. Προηγουμένως όμως, θα εξετάσουμε τις γενικές αρχές που διέπουν τη διαδικασία της σταθεροποίησης.

### 8.8.1 Αρχές Λειτουργίας της Σταθεροποίησης

Οποιαδήποτε πηγή τροφοδοσίας μπορεί να παρασταθεί με το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin, Σχ.8.14, με φόρτο  $R_L$  συνδεδεμένο στην έξοδό του. Η τάση  $V_o$  στα άκρα του φόρτου είναι:

$$V_o = V - I_L R_s \quad (8.8.1)$$

όπου  $V$  είναι η τάση εξόδου του φίλτρου εξομάλυνσης και  $R_s$  είναι η εσωτερική αντίσταση της πηγής τροφοδοσίας.

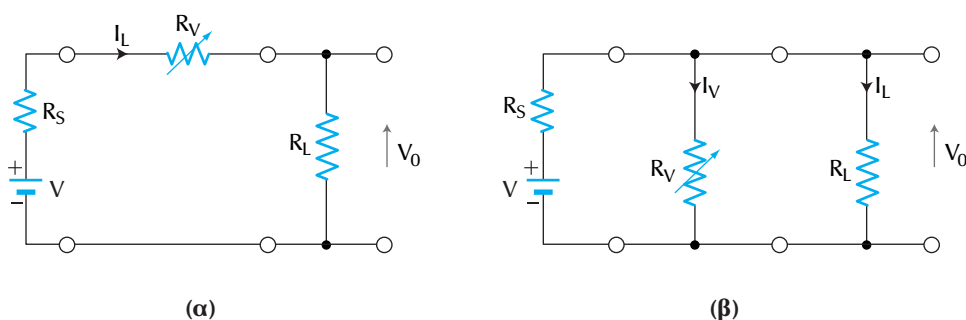


**Σχήμα 8.14.** Πηγή τροφοδοσίας με ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin

Αν για οποιαδήποτε αιτία (π.χ. αλλαγή της τάσης του δικτύου) αλλάξει η τάση εξόδου  $V$  του φίλτρου εξομάλυνσης, θα μεταβληθεί το ρεύμα  $I_L$  και επομένως, σύμφωνα με την Εξ.(8.8.1) θα αλλάξει η τάση εξόδου  $V_o$ . Αλλά και αν μεταβληθεί ο φόρτος  $R_L$ , θα μεταβληθεί πάλι το ρεύμα  $I_L$ , άρα

και η  $V_o$ , και η επίδραση στην τάση  $V_o$  εξαρτάται από τη σχετική τιμή των  $R_L$  και  $R_s$ . Συνεπώς, για να διατηρούμε σταθερή την τάση  $V_o$  στα άκρα του φόρτου είναι απαραίτητο να αντισταθμίζουμε τις παραπάνω μεταβολές της τάσης ή του ρεύματος ή και των δύο ταυτόχρονα.

Ένας τρόπος για να σταθεροποιήσουμε –σύμφωνα με τα πιο πάνω– την τάση  $V_o$  είναι να εισάγουμε μια μεταβλητή αντίσταση  $R_v$  σε σειρά με το φόρτο  $R_L$ , όπως δείχνει το Σχ.8.15. Τότε η τάση εξόδου θα είναι:



**Σχήμα 8.15.** Αρχή λειτουργίας της σταθεροποίησης τάσης: σειράς (α), παράλληλη (β)

$$V_o = V - I_L (R_s + R_v) \quad (8.8.2)$$

Η αντίσταση  $R_v$  πρέπει να μεταβάλλεται αυτόματα, ώστε να αντισταθμίζει τις μεταβολές της  $V$  και του  $I_L$ . Υπάρχουν διάφορα κυκλώματα σταθεροποίησης που μπορούν να μεταβάλλουν αυτόματα την ενεργό αντίσταση  $R_v$  του στοιχείου σειράς, έτσι ώστε να ρυθμίζουν σταθεροποιητικά την τάση εξόδου συγκρίνοντάς την με μια σταθερή τάση αναφοράς.

Όταν το ενεργό στοιχείο είναι σε σειρά με το φόρτο η σταθεροποίηση λέγεται **σταθεροποίηση σειράς**, Σχ.8.15α, και ελέγχεται από την Εξ.(8.8.2). Το κόστος της σταθεροποίησης σειράς είναι πολύ χαμηλό και γι' αυτό χρησιμοποιείται αρκετά συχνά.

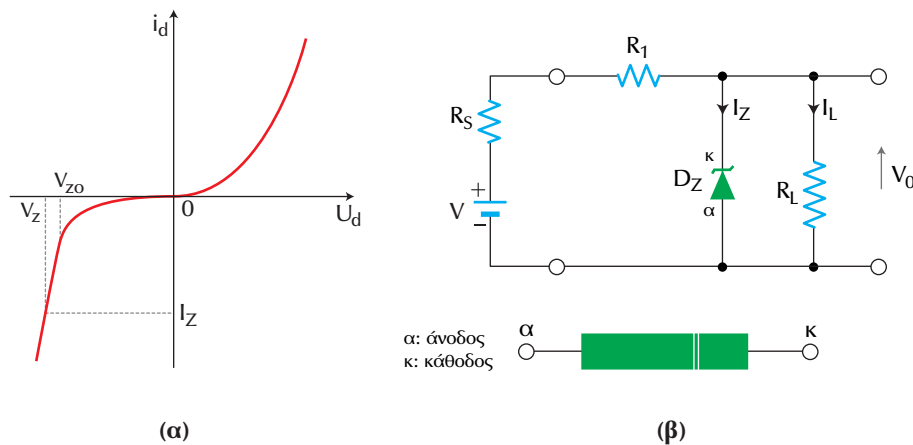
Ένας άλλος τρόπος σταθεροποίησης είναι η **παράλληλη σταθεροποίηση**, Σχ.8.15 β. Αποδεικνύεται ότι, σ' αυτή την περίπτωση η τάση εξόδου  $V_o$  του κυκλώματος είναι:

$$V_o = V - I_L \left( 1 + \frac{R_v}{R_L} \right) \quad (8.8.3)$$

### 8.8.2 Απλή Σταθεροποίηση με Δίοδο Zener

Στα Ηλεκτρονικά του προηγούμενου έτους είδαμε την ιδιότητα της ανάστροφης θλάσης της χαρακτηριστικής μιας διόδου Zener. Οι διόδοι Zener ή χιονοστιβάδας πρέπει να έχουν υψηλή στάθμη πρόσμιξης αν θέλουμε να έχουμε χαμηλές τάσεις θλάσης ή κατάρρευσης.

Το Σχ.8.16α δείχνει τη χαρακτηριστική της διόδου Zener, και το Σχ.8.16β δείχνει έναν παράλληλο σταθεροποιητή χαμηλής ισχύος που χρησιμοποιεί μια Zener για ενεργό αντίσταση  $R_v$ .



**Σχήμα 8.16.** Χαρακτηριστική  $v-i$  της Zener (α) και κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης με Zener (β)

Εφόσον η τάση Zener  $r_z = V_z / I_z$  παραμένει σχεδόν σταθερή, για μεγάλη περιοχή ρεύματος, η ισοδύναμη ενεργός αντίσταση  $R_v = V_0 / I_z$  θα μεταβάλλεται ώστε να αντισταθμίζει τις μεταβολές της τάσης εξόδου του φίλτρου εξομάλυνσης,  $V$ , ή του ρεύματος φόρτου  $I_L$ .

Το παρόν κύκλωμα με δίοδο Zener δεν είναι τέλειος σταθεροποιητής, όπως δείχνει το Σχ.8.16α, αφού η τάση της,  $V_z$ , αυξάνει ελαφρά όταν αυξάνει το ρεύμα της  $I_z$  (η χαρακτηριστική δεν είναι τελείως κατακόρυφη). Με βάση το νόμο του Ohm, το ολικό ρεύμα  $I$ , δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{V - V_0}{R} \cong \frac{V - V_z}{R} \quad (8.8.4)$$

όπου,  $R = R_s + R_L$ . Συνεπώς, για δεδομένη τάση εισόδου  $V$ , το ρεύμα  $I$ , θα είναι σταθερό. Σύμφωνα όμως με το νόμο των ρευμάτων του Kirchhoff το ρεύμα αυτό θα είναι:

$$I = I_z + I_L \quad (8.8.5)$$

Από τη σχέση αυτή φαίνεται, ότι αν αυξηθεί το ρεύμα φόρτου  $I_L$  το ρεύμα της Zener  $I_z$  ελαττώνεται. Θα πρέπει λοιπόν, με το μέγιστο ρεύμα φόρτου να περνάει ένα ρεύμα από τη Zener τέτοιο ώστε αυτή να εργάζεται αριστερά από το «γόνατο»  $V_{ZO}$  της χαρακτηριστικής.

Εξάλλου, όταν δεν υπάρχει φόρτος στα άκρα εξόδου του σταθεροποιητή, όλο το ρεύμα του σταθεροποιητή θα περνά μέσα από τη Zener. Κατά συνέπεια, η αντίστοιχη ισχύς απωλειών της Zener (που είναι τότε μέγιστη) θα είναι:

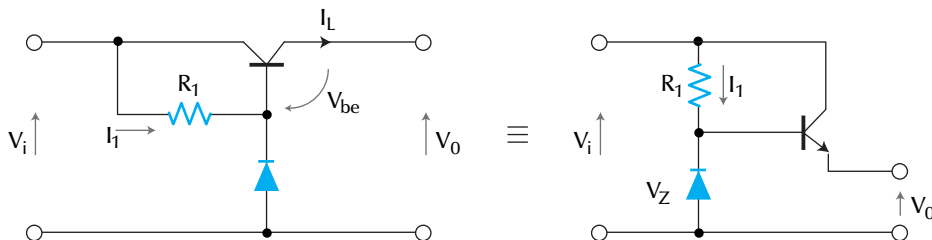
$$P_{z, \max} \cong V_z I_z = V_z I \quad (8.8.6)$$

(Θεωρούμε αμελητέα τη δυναμική αντίσταση της Zener,  $r_z = \Delta V_z / \Delta I_z$ ).

Η εκλογή της Zener, εκτός από την κατάλληλη τιμή της τάσης  $V_z = V_o$  πρέπει να βασίζεται και στην παραπάνω **μέγιστη ισχύ απωλειών**. Οι συνήθεις ισχύς απωλειών των μικρών Zener είναι της τάξης των 400 mW, αλλά υπάρχουν και Zener μεγάλης ισχύος που φτάνουν μέχρι τα 10 W. Όπως όμως θα δούμε στη συνέχεια, αποφεύγουμε συνήθως τις Zener μεγάλης ισχύος για σταθεροποίηση.

### 8.8.3 Σταθεροποίηση με Μεγάλο Ρεύμα Φόρτου

Τις περισσότερες φορές στην πράξη, το ρεύμα φόρτου χρειάζεται να είναι μεγάλο. Θα πρέπει λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε Zener μεγάλης ισχύος. Αντί όμως, να υιοθετήσουμε αυτή τη λύση, που το κόστος της είναι μεγάλο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια Zener μικρής ισχύος κι ένα τρανζίστορ σε συνδεσμολογία ακόλουθου τάσης (CC), Σχ. 8.17, γεγονός που θα δώσει ρεύμα εξόδου αυξημένο κατά το συντελεστή  $h_{FE}$ .



Σχήμα 8.17. Σταθεροποίηση με Zener και με τρανζίστορ (CC)

Το τρανζίστορ εκλέγεται, ώστε η λειτουργία του να βρίσκεται μέσα στα όρια των απωλειών ισχύος του. Η δίοδος Zener επιλέγεται για την επιθυμητή τάση εξόδου  $V_o$ , με βάση τη σχέση:

$$V_o = V_z - V_{be} \quad (\text{με } V_{be} \cong 0.7 \text{ V}) \quad (8.8.7)$$

### ⇒ Παράδειγμα 8-3

Θα υπολογίσουμε ένα σταθεροποιητή τάσης της μορφής του Σχ.8.17, με  $V_o = 7.5 \text{ V}$ ,  $I_L = 30 \text{ mA}$  και τάση εισόδου  $V_i = 17.5 \text{ V}$ , που προέρχεται από την έξοδο του φίλτρου εξομάλυνσης.

### Λύση

Από την Εξ.(8.8.7), έχουμε:

$$V_z = V_o + V_{be} = 7.5 + 0.7 = 8.2 \text{ V}$$

Επομένως, η Zener θα πρέπει να είναι των 8.2 V. Διαλέγουμε δοκιμαστικά ένα τρανζίστορ τύπου BFY50 με τα εξής χαρακτηριστικά:  $V_{C, \max} = 35 \text{ V}$ ,  $P_{C, \max} = 800 \text{ mW}$  και  $h_{FE} = 30$ .

Το ρεύμα βάσης του είναι:

$$I_b = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{I_L}{h_{FE}} = \frac{30}{30} = 1 \text{ mA}$$

Η τάση συλλέκτη που θα αναπτύσσεται στο τρανζίστορ είναι:

$$V_c = V_i - V_o = 17.5 - 7.5 = 10 \text{ V}$$

Η αντίσταση  $R_1$  θα είναι:

$$R_1 \cong \frac{V_c}{I_1}$$

όπου εκλέγουμε το  $I_1 = 10 I_b$  (για να μην επηρεάζεται το εξωτερικό ρεύμα  $I_L$  από τις μεταβολές του ρεύματος  $I_b$ ). Επομένως,

$$R_1 = \frac{10}{10} = 1 \text{ k}\Omega$$

Η ισχύς απωλειών του τρανζίστορ θα είναι:

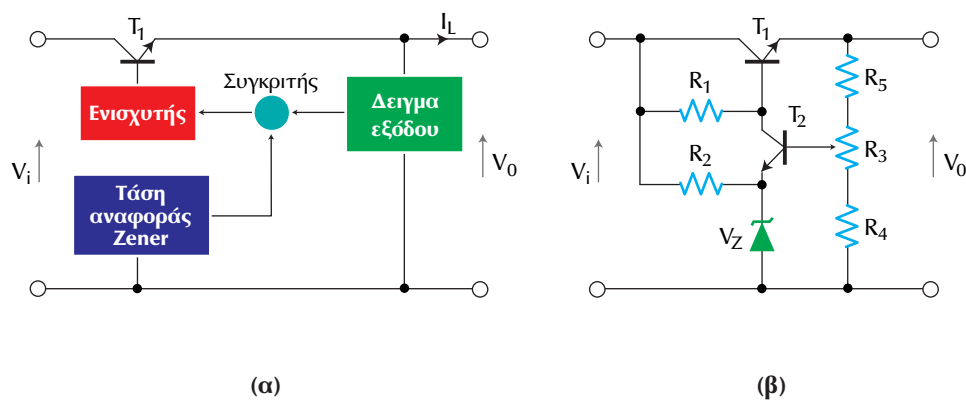
$$P_c = V_c I_L = 10 \times 30 = 300 \text{ mW}.$$

Από τα χαρακτηριστικά του κατασκευαστή μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι τα παραπάνω στοιχεία λειτουργίας είναι μέσα στα όρια λειτουργίας του τρανζίστορ. Άρα η δοκιμαστική επιλογή του τρανζίστορ BFY50 αποδεικνύεται επιτυχής.

#### 8.8.4 Βελτίωση της Σταθεροποίησης με Ανασύζευξη

Η σταθεροποίηση της τάσης εξόδου ενός τροφοδοτικού μπορεί να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο εάν στο προηγούμενο κύκλωμα χρησιμοποιήσουμε έναν ενισχυτή, που θα συγκρίνει την **τάση αναφοράς** που δίνει μια **Zener** με ένα κλάσμα (δείγμα) της τάσης εξόδου.

Το δείγμα αυτό ανατροφοδοτείται προς την είσοδο του ενισχυτή, αφού υποστεί σύγκριση προς την τάση της Zener, Σχ.8.18α. Στο πρακτικό κύκλωμα, Σχ.8.18β, το κύκλωμα λήψης του δείγματος είναι ένας **διαίρετης τάσης**, ενώ η **τάση αναφοράς** είναι απ' ευθείας η **τάση Zener**. Το τρανζίστορ  $T_2$  είναι το στοιχείο ενίσχυσης, ενώ το τρανζίστορ  $T_1$  είναι συνδεσμολογημένο ως ακόλουθος τάσης (CC).



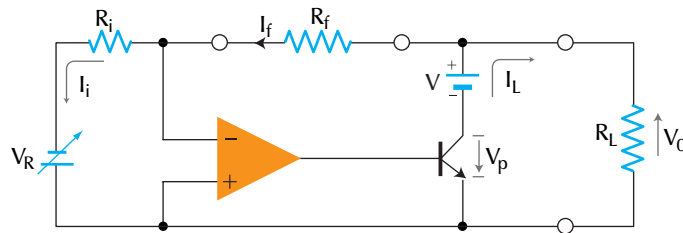
**Σχήμα 8.18.** Κύκλωμα σταθεροποίησης με ανασύζευξη:  
Αρχή λειτουργίας (α), πρακτική μορφή (β)

Επειδή το ρεύμα της Zener είναι σχεδόν αναξάρτητο από το ρεύμα του φόρτου, η σταθεροποίηση του κυκλώματος αυτού είναι πολύ καλή.

### 8.9 Σταθεροποίηση τάσης με TE

Τα σύγχρονα τροφοδοτικά χρησιμοποιούν τελεστικούς ενισχυτές (TE) ώστε να επιτυγχάνουν σταθεροποίηση με τη βοήθεια ανασύζευξης. Η

σταθεροποίησης με τον τρόπο αυτόν είναι πολύ διαδεδομένη, επειδή δίνει σταθεροποιημένη τάση μεγάλης ακρίβειας. Το κύκλωμα του Σχ.8.19 δείχνει το τυπικό κύκλωμα της σταθεροποίησης τάσης με TE. Η ανασύζευξη γίνεται μέσω της  $R_f$ .



Σχήμα 8.19. Σταθεροποίηση τάσης με TE

Επειδή ο TE δε δίνει υψηλά ρεύματα εξόδου, συμπληρώνουμε το κύκλωμα με ένα τρανζίστορ ισχύος  $r_{hp}$ , όπως δείχνει το σχήμα. Το τρανζίστορ ισχύος αυτό έχει τη δυνατότητα να δώσει το επιθυμητό ρεύμα φόρτου  $I_L$  συνδεδεμένο με την τάση  $V$  που θέλουμε να σταθεροποιήσουμε. Το τρανζίστορ αυτό συμπεριφέρεται σα μια μεγάλη αντίσταση  $R_v$  όμοια με εκείνη του Σχ.8.15 β.

Αποδεικνύεται, με βάση την ανάλυση των TE, (Κεφ. 4), ότι η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_0 = - \left( \frac{R_f}{R_i} \right) V_R \quad (8.9.1)$$

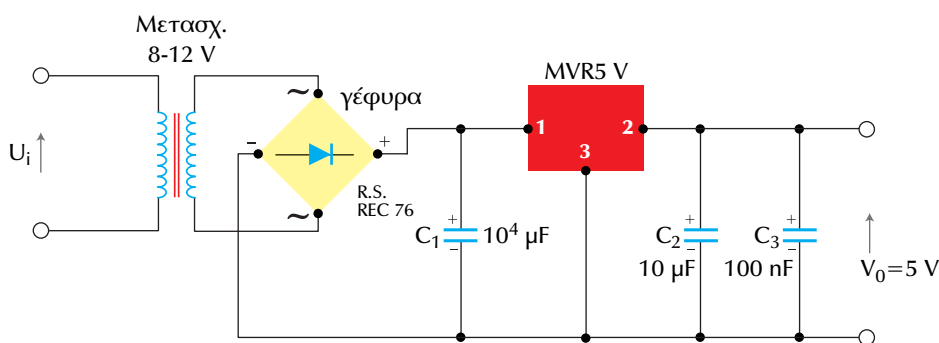
Συνεπώς, η στάθμη σταθεροποιημένης τάσης εξόδου  $V_0$  μπορεί να ρυθμίζεται κατά βούληση μέσω της  $R_f$  ή της  $R_i$

## 8.10 Σταθεροποίηση με ολοκληρωμένο κύκλωμα

Γενικά, τα δύο βασικά μέρη ενός εξελιγμένου σταθεροποιητή είναι το στοιχείο που δίνει την **τάση αναφοράς** και ο ελεγχόμενος **ενισχυτής τάσης**. Τα μέρη αυτά μπορούν εύκολα να συνδυαστούν μέσα σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα με αποτέλεσμα να έχουμε **πάρα πολύ καλή σταθεροποίηση και μικρό όγκο**.

Στο εμπόριο υπάρχουν σταθεροποιητές τάσης με ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) για πολλές εφαρμογές και δίνουν σταθεροποίηση από 0.01 έως 1%. Συνήθως, το ολοκληρωμένο περιέχει έναν ενισχυτή ρύθμισης και μια δίοδο Zener στο ίδιο ολοκληρωμένο. Συχνά το τρανζίστορ δεν περιέχεται μέσα στο ολοκληρωμένο κύκλωμα για να μη δημιουργούνται μεγάλες αλλαγές της τάσης  $V$  και του ρεύματος  $I_L$  λόγω θερμοκρασίας. Οι αλλαγές αυτές θα είχαν σαν αποτέλεσμα μεγάλο σφάλμα σταθεροποίησης.

Πολλά ολοκληρωμένα κυκλώματα σταθεροποίησης έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένες σταθερές **τάσεις εξόδου**, π.χ. 5 V για λογικά κυκλώματα ή 15 V για τελεστικούς ενισχυτές. Το Σχ.8.20 δείχνει ένα τέτοιο κύκλωμα, το MVR5V, για σταθεροποίηση της τάσης εξόδου του στα 5 V dc. Το μέγιστο δυνατό ρεύμα φόρτου είναι 600 mA και το ποσοστό σταθεροποίησης,  $S = (\Delta V_i / \Delta V_o) \times 100$ , είναι 1%.



**Σχήμα 8.20.** Ολοκληρωμένο κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης στα 5 V dc

Οι πυκνωτές απόζευξης  $C_2$  και  $C_3$  χρησιμοποιούνται για να έχει το κύκλωμα χαμηλή σύνθετη αντίσταση εξόδου σ' όλες τις συχνότητες. Σημειώστε, ότι η σύνθετη αντίσταση εξόδου όλων των σταθεροποιητών αυξάνει στις υψηλές συχνότητες, ενώ η ενίσχυση του ρυθμιστικού ενισχυτή (σφάλματος) ελαττώνεται. Ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής  $C_2$  έχει χαμηλή αντίσταση στη μέση περιοχή των υψηλών συχνοτήτων, ενώ ο πυκνωτής  $C_3$  (πολυστερίνης ή κεραμικός) δρα στις υψηλές συχνότητες ώστε να ελαττώνει την αντίσταση εξόδου στην περιοχή αυτή.

Με το MVR5V πρέπει να χρησιμοποιήσουμε εξωτερικό απαγωγέα θερμότητας αν θέλουμε να το αξιοποιήσουμε στην περιοχή του μέγιστου ρεύματος των 600 mA που έχει τη δυνατότητα να δώσει. Αν το ρεύμα



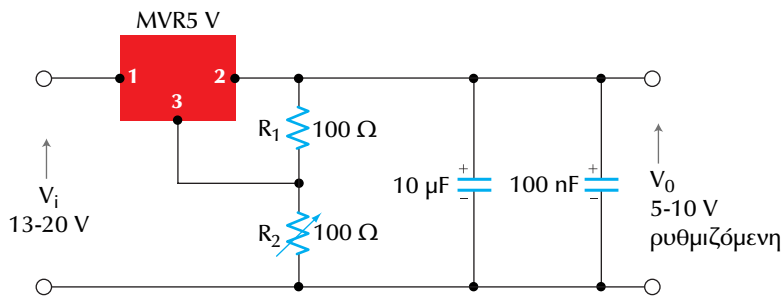
του φόρτου είναι κάτω από 100 mA ο πυκνωτής  $C_1$  μπορεί να γίνει 1000  $\mu\text{F}$ · ο μετασχηματιστής μπορεί να γίνει ο κλασσικός μετασχηματιστής των 6.3 V και δε χρειάζεται απαγωγέα θερμότητας.

Αν θέλουμε τάση εξόδου 12 V θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) MVR12V. Η τάση εισόδου πρέπει να είναι τουλάχιστον 14.5 V. Το MVR15V δίνει τάση εξόδου 15 V με τάση εισόδου τουλάχιστον 17.5 V. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση εισόδου για το MVR12V και MVR15V είναι 27 V και για το MVR5V είναι 20 V.

Το Σχ.8.21 δείχνει μια παραλλαγή του κυκλώματος του Σχ.8.20 με την οποία μπορούμε να έχουμε ρυθμιζόμενη σταθεροποιημένη τάση εξόδου. Το κύκλωμα χρησιμοποιεί το MVR5V, αλλά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και άλλα IC ώστε να έχουμε μεγαλύτερη περιοχή ρύθμισης της τάσης εξόδου. Ο σταθεροποιητής MVR5V διατηρεί σταθερή τάση 5 V στα άκρα της αντίστασης  $R_1$  και μέσω του διαιρέτη τάσης  $R_1$  και  $R_2$ , η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times 5 \text{ V} \quad (8.10.1)$$

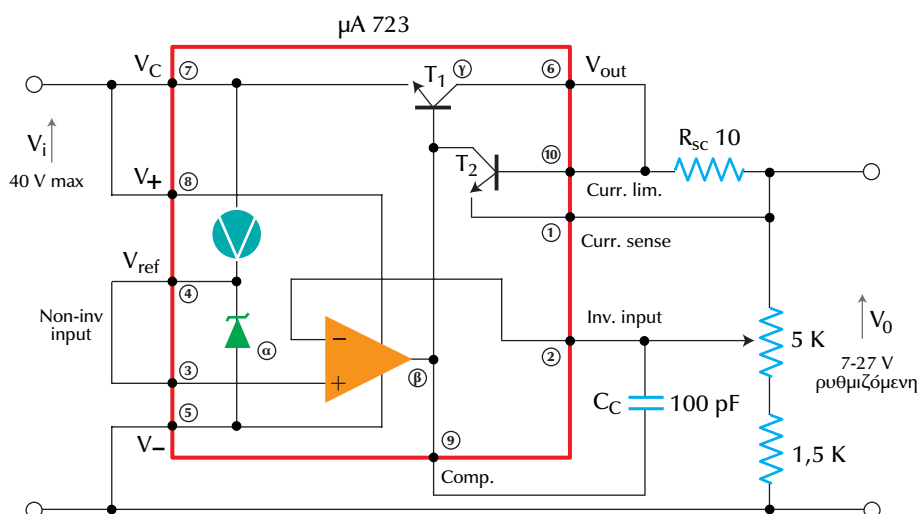
Άρα, με μεταβολή της αντίστασης του ποτενσιόμετρου  $R_2$ , μπορούμε να ρυθμίζουμε κατά βούληση τη σταθεροποιημένη τάση εξόδου  $V_0$ .



**Σχήμα 8.21.** Κύκλωμα ρυθμιζόμενης σταθεροποίησης τάσης εξόδου με το IC MVR5V

Το Σχ.8.22 δείχνει ένα βασικό IC κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης, το  $\mu\text{A723}$  (ή το L123), που δίνει στην έξοδό του ρυθμιζόμενη τάση εξόδου από 7 V έως 27 V. Το  $\mu\text{A723}$  έχει τα εξής συστατικά μέρη:

1. Μια *δίοδο Zener αναφοράς*. Η δίοδος αυτή τροφοδοτείται από μια πηγή σταθερού ρεύματος. Η δίοδος περιλαμβάνεται σ' ένα ενισχυτή με ανασύζευξη που χρησιμεύει για να υποβιβάζει την αντίσταση εξόδου.
2. Έναν *ενισχυτή σφάλματος*. Τόσο η αναστρέφουσα είσοδος όσο και η μη αναστρέφουσα έχουν δικούς τους εξωτερικούς ακροδέκτες. Ο πυκνωτής αντιστάθμισης  $C_C$  υποβιβάζει την ενίσχυση στις υψηλές συχνότητες για να αποφύγουμε την αστάθεια στις συχνότητες αυτές.



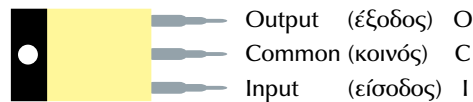
**Σχήμα 8.22.** Σταθεροποιητής ρυθμιζόμενης τάσης 7-27 V με το IC  $\mu A 723$  (L123)

3. Έναν *ενισχυτή ακόλουθου τάσης μέσης ισχύος*, με το  $T_1$ . Το τρανζίστορ αυτό περιορίζει την ισχύ απωλειών του ρυθμιστή, που αντιστοιχεί στο μέγιστο (600 mA) στην περίπτωση αυτή. Αυτό το όριο όμως μπορεί να αυξηθεί αν χρησιμοποιήσουμε εξωτερική αντίσταση.
4. Ένα *τρανζίστορ,  $T_2$ , περιορισμού ρεύματος*. Το τρανζίστορ αυτό «διακρίνει» τη διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίστασης  $R_{sc}$  και αρχίζει να άγει όταν αυτή φθάσει τα 0.6 V. Καθώς άγει το  $T_2$ , βραχυκυκλώνει την επαφή βάσης-εκπομπού του ακόλουθου τάσης και τον κάνει αδρανή κόβοντας την τάση τροφοδοσίας του.

Μια άλλη κατηγορία μονολιθικών IC κυκλωμάτων είναι οι **σειρές 78XX και 79XX** οι οποίες δίνουν στην έξοδό τους σταθεροποιημένη τάση. Η μεν πρώτη σειρά, 78XX, δίνει στην έξοδό της σταθεροποιημένες θετικές τάσεις, η δε δεύτερη, η σειρά 79XX, δίνει αρνητική σταθεροποιημένη τάση.

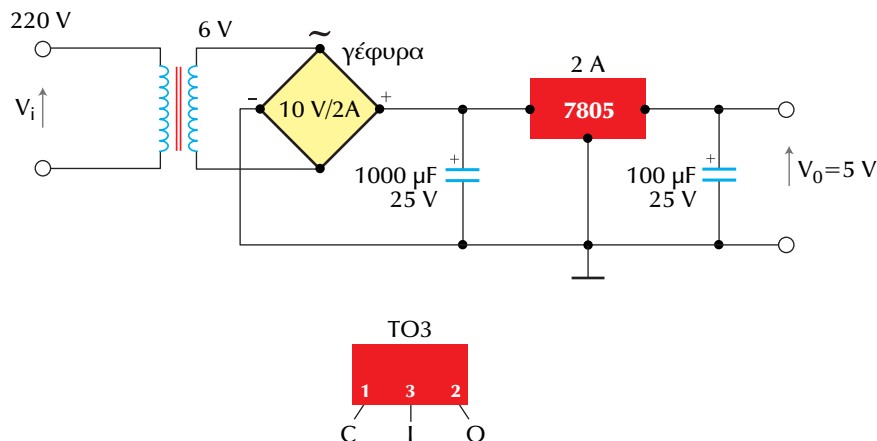
Τα ολοκληρωμένα αυτά κυκλώματα έχουν τρεις ακροδέκτες, που είναι ο ακροδέκτης της εισόδου, της εξόδου και ο κοινός. Οι μονάδες αυτές μπορούν να συνδεθούν σ' ένα κύκλωμα χωρίς να χρειάζεται να συνδέσουμε εξωτερικά άλλα επιπρόσθετα υλικά εκτός από τους πυκνωτές εισόδου-εξόδου για το φιλτράρισμα της τάσης εξόδου του ανορθωτή.

Το Σχ.8.23 δείχνει τη μορφή του ολοκληρωμένου κυκλώματος σε βάση ΚC. Οι δυο επόμενοι αριθμοί του κώδικα δείχνουν τη σταθεροποιημένη τάση εξόδου, π.χ. το 7805 σημαίνει ότι το IC δίνει στην έξοδό του σταθεροποιημένη τάση +5 V, ενώ το 7905 δίνει -5 V. Ομοίως, το 7812 δίνει +12 V, ενώ το 7915 δίνει -15 V.



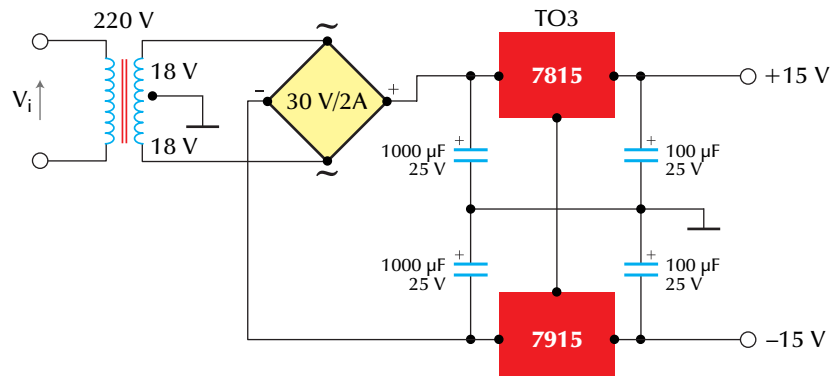
**Σχήμα 8.23.** IC σταθεροποίηση τάσης των σειρών 78XX και 79XX

Το Σχ.8.24 είναι το πλήρες κύκλωμα ενός τροφοδοτικού +5 V για τροφοδοσία ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



**Σχήμα 8.24.** Τροφοδοτικό σταθεροποιημένης τάσης +5V

Το Σχ.8.25 δείχνει το πλήρες κύκλωμα ενός τροφοδοτικού  $\pm 15$  V για τροφοδοσία γραμμικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



Σχήμα 8.25. Τροφοδοτικό σταθεροποιημένης τάσης  $\pm 15\text{V}$

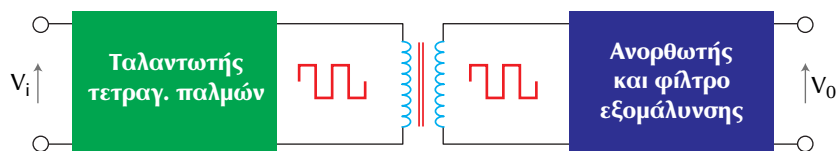
## 8.11 Μετατροπές DC/DC

Μερικές φορές επιθυμούμε να μετατρέψουμε μια στάθμη dc τάσης σε μια άλλη στάθμη πάλι dc. Π.χ. αν έχουμε ένα σύστημα που έχει θετική τάση τροφοδοσίας  $+5\text{V}$ , μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα **μετατροπέα DC/DC** και να μετατρέψουμε αυτά τα  $+5\text{V}$  σε μια τάση εξόδου  $+15\text{V}$ . Με αυτό τον τρόπο θα έχουμε διαθέσιμες δύο τάσεις τροφοδοσίας για την ηλεκτρονική συσκευή, δηλ.  $+5$  και  $+15\text{V}$ .

Οι μετατροπείς DC/DC έχουν μεγάλη απόδοση. Αυτό οφείλεται στο ό,τι, σε αυτούς, τα τρανζίστορ εργάζονται ως διακόπτες (on-off), οπότε η ισχύς απωλειών υποβιβάζεται σημαντικά. Η τυπική απόδοση των μετατροπέων αυτών κυμαίνεται από 65 έως 85%. Μια μεγάλη κατηγορία μετατροπέων DC/DC συνήθως ονομάζονται και **παλμοτροφοδοτικά** (βλέπε παρακάτω).

### 8.11.1 Μετατροπείς DC/DC χωρίς σταθεροποίηση

Σ' ένα τυπικό μετατροπέα DC/DC χωρίς σταθεροποίηση, η dc τάση εισόδου εφαρμόζεται σ' ένα ταλαντωτή τετραγωνικών παλμών. Η τάση κορυφής-προς-κορυφή του τετραγωνικού παλμού είναι ανάλογη της τάσης εισόδου. Ο τετραγωνικός αυτός παλμός χρησιμοποιείται για να οδηγήσει το πρωτεύον ενός μετασχηματιστή, όπως εικονίζεται στο Σχ.8.26.



**Σχήμα 8.26.** Δομικό διάγραμμα ενός μετατροπέα DC/DC χωρίς σταθεροποίηση

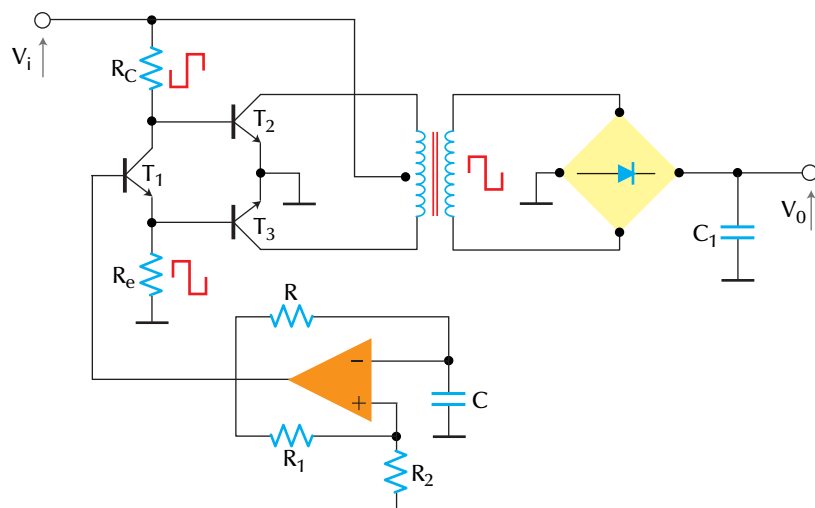
Όσο πιο υψηλή είναι η συχνότητα του ταλαντωτή, τόσο πιο μικρός είναι ο μετασχηματιστής καθώς και τα στοιχεία του φίλτρου εξομάλυνσης. Αν όμως, η συχνότητα αυτή είναι πολύ υψηλή, είναι πολύ δύσκολο να έχουμε παλμούς με απότομα μέτωπα (δηλ. με μικρούς χρόνους ανόδου και πτώσης των παλμών). Συνήθως, η καταλληλότερη συχνότητα των τετραγωνικών παλμών του ταλαντωτή είναι μεταξύ 10 και 100 kHz.

Ένας συνηθισμένος μετατροπέας DC/DC είναι αυτός που μετατρέπει τάση +5 V σε +15 V. Η τάση +5 V είναι η τάση τροφοδοσίας των ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, ενώ η τάση +15 V είναι η τάση τροφοδοσίας πολλών γραμμικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και των IC με TE. Γι' αυτή την περίπτωση υπάρχει στο εμπόριο οικονομικός μετατροπέας DC/DC μικρής ισχύος που μετατρέπει την dc τάση των +5 V στην dc τάση των +15 V.

Υπάρχουν πολύ τρόποι για να σχεδιάσουμε ένα μετατροπέα DC/DC. Η σχεδίαση αυτή εξαρτάται από το αν θα χρησιμοποιήσουμε διπολικό τρανζίστορ (BJT) ή FET ισχύος, από τη συχνότητα του ταλαντωτή και από το αν ο μετασχηματιστής είναι ανύψωσης ή υποβιβασμού.

Το Σχ.8.27 δείχνει το κύκλωμα ενός μετατροπέα DC/DC που χρησιμοποιεί BJT ισχύος. Η λειτουργία του κυκλώματος έχει ως εξής: Ο ταλαντωτής τετραγωνικών παλμών παράγει παλμούς των οποίων η συχνότητα καθορίζεται από τα στοιχεία R και C. Η συχνότητά του ταλαντωτή είναι στην περιοχή των kHz, με τυπική τιμή 20 kHz.

Οι τετραγωνικοί παλμοί του ταλαντωτή εφαρμόζονται σε ένα διαχωριστή φάσης,  $T_1$ , είναι ένα κύκλωμα το οποίο δημιουργεί δύο τετραγωνικούς παλμούς με διαφορά φάσης  $180^\circ$ . Το ζεύγος αυτών των τετραγωνικών παλμών είναι είσοδος σε ένα ενισχυτή push-pull τάξης B στο οποίο διεγείρουν τα τρανζίστορ  $T_2$  και  $T_3$ . Το τρανζίστορ  $T_2$  άγει κατά τη διάρκεια του μισού κύκλου και το  $T_3$  κατά τη διάρκεια του άλλου ενός μισού κύκλου. Το ρεύμα του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή είναι τετραγωνικός παλμός. Ο παλμός αυτός επάγει τετραγωνικό παλμό στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, όπως αναφέραμε προηγουμένως.



**Σχήμα 8.27.** Μετατροπέας DC/DC χωρίς σταθεροποίηση

Η τάση αυτή εισέρχεται σε έναν ανορθωτή γέφυρας, όπου και ανορθώνεται και στη συνέχεια φιλτράρεται. Έτσι, στην έξοδο παίρνουμε μια dc τάση διαφορετικής στάθμης από την dc τάση εισόδου.

Στο εμπόριο υπάρχουν ποικίλοι μετατροπείς DC/DC χωρίς σταθεροποίηση από διάφορες εταιρίες με απόδοση από 65 έως και 85 %. Π.χ. υπάρχουν φτηνοί μετατροπείς DC/DC για μετατροπή +5 V σε +12 V με ρεύμα 375 mA, +5 σε +9 V με ρεύμα 200 mA, +12 σε  $\pm 15$  V με ρεύμα 250 mA, κ.ά. Όλοι αυτοί οι μετατροπείς χρειάζονται μια σταθερή τάση εισόδου επειδή δεν περιλαμβάνουν σταθεροποίηση τάσης. Επίσης, αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούν συχνότητα ταλάντωσης από 10 έως 100 kHz. Λόγω της συχνότητας αυτής περιέχουν θωράκιση κατά των ραδιοσυχνοτήτων (RFI). Μερικοί από τους μετατροπείς αυτούς έχουν χρόνο ζωής 200 000 ώρες.

### 8.11.2 Παλμοτροφοδοτικά

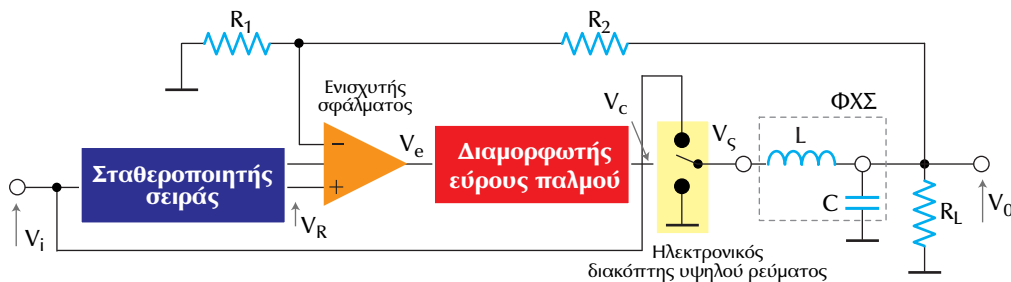
Τα παλμοτροφοδοτικά υπάγονται στη γενική κατηγορία των μετατροπέων DC/DC, επειδή μετατρέπουν μια dc τάση εισόδου σε μια άλλη dc τάση εξόδου, είτε υποβιβασμένη είτε ανυψωμένη. Επιπλέον όμως, τα παλμοτροφοδοτικά περιέχουν και σύστημα σταθεροποίησης της τάσης. Το σύστημα αυτό έχει ένα διαμορφωτή πλάτους παλμών που ελέγχει το χρόνο on-off ενός τρανζίστορ. Αλλάζοντας το χρόνο εργασίας των παλ-

μών αυτών, τα παλμοτροφοδοτικά μπορούν να διατηρούν την τάση εξόδου σταθερή.

Το Σχ.8.28 απεικονίζει το **δομικό διάγραμμα** ενός **παλμοτροφοδοτικού**. Όπως βλέπουμε αποτελείται από ένα ενισχυτή συγκριτή, μια πηγή τάσης αναφοράς,  $V_R$ , ένα διαμορφωτή εύρους παλμού, έναν ηλεκτρονικό διακόπτη μεγάλου ρεύματος και ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων (ΦΧΣ).

Η λειτουργία του κυκλώματος αυτού έχει ως εξής:

Ο ενισχυτής σφάλματος του κυκλώματος συγκρίνει κλάσμα της τάσης αναφοράς  $V_R$  με τη ρυθμιζόμενη τάση εξόδου  $V_o$ . Η τάση αναφοράς  $V_R$  προέρχεται από ένα σταθεροποιητή σειράς μικρού ρεύματος. Επειδή ο σταθεροποιητής αυτός χρησιμοποιεί μικρό ρεύμα, καταναλώνει μικρή εσωτερική ισχύ και παρέχει μια ακριβή τάση αναφοράς. Η έξοδος του ενισχυτή του διαμορφωτή,  $V_c$ , χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του ηλεκτρονικού διακόπτη υψηλού ρεύματος. Αυτή η τάση ελέγχου,  $V_c$ , είναι κυματομορφή τετραγωνικών παλμών με περίοδο  $T$ .



**Σχήμα 8.28.** Βασική δομή ενός παλμοτροφοδοτικού

Ο ηλεκτρονικός διακόπτης υψηλού ρεύματος παρέχει κατ' εναλλαγή είτε μη σταθεροποιημένη τάση  $V_i$  είτε μηδενική τάση, δημιουργώντας έτσι τετραγωνικό παλμό με περίοδο  $T$ . Η τάση  $V_s$  διέρχεται από το ΦΧΣ το οποίο φιλτράρει την τάση αυτή, υπό τον όρο η  $\sqrt{LC}$  να είναι πολύ μεγαλύτερη από την  $T/2\pi$ . Τελικά, η τιμή της  $V_R$  σταθεροποιείται στη μέση τιμή της  $V_s$ .

Αποδεικνύεται, ότι η σταθεροποιημένη τάση εξόδου  $V_o$  δίνεται από τη σχέση:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_R \quad (8.11.1)$$

Η σταθεροποιημένη αυτή τάση εξαρτάται από την ακριβή τιμή της τάσης αναφοράς  $V_R$ , από το λόγο των αντιστάσεων  $R_2/R_1$  και από το πόσο καλό φίλτράρισμα γίνεται.

Για να λειτουργεί σωστά το παλμοτροφοδοτικό, θα πρέπει να ισχύει  $V_i > V_R$ .

#### ⇒ Παράδειγμα 8-4

Να υπολογισθούν οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  του παλμοτροφοδοτικού του Σχ.8.28, αν θέλουμε η τάση εξόδου του να είναι 12 V, με τάση αναφοράς 5 V.

#### Λύση

Χρησιμοποιούμε την Εξ.(8.11.1) και τη λύνουμε ως προς το λόγο  $R_2/R_1$ , οπότε έχουμε

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_0}{V_R} - 1 = \frac{12}{5} - 1 = 1.4$$

Εφόσον γνωρίζουμε το λόγο των αντιστάσεων, υπολογίζουμε ελεύθερα τις αντιστάσεις. Αν δεχθούμε π.χ. την  $R_1 = 4.7 \text{ k}\Omega$ , από την παραπάνω σχέση υπολογίζουμε την  $R_2 = 1.4R_1 \approx 6.6 \text{ k}\Omega$  (6.8 kΩ, σειρά E12).

#### ΑΣΚΗΣΕΙΣ

- 8-1.** Ένα τροφοδοτικό χρησιμοποιεί πλήρη ανόρθωση που δίνει στο φόρτο ρεύμα 100 mA και τάση 12 V. Υπολογίστε το φόρτο  $R_L$  και τον πυκνωτή εξομάλυνσης C.
- 8-2.** Να υπολογισθεί σταθεροποιητής τάσης για να δίνει τάση εξόδου 5 V, και ρεύμα  $I_L = 20 \text{ mA}$  όταν η τάση εισόδου είναι 10 V.
- 8-3.** Σχεδιάστε τροφοδοτικό που δίνει τάση εξόδου -18 V χρησιμοποιώντας το κατάλληλο IC.
- 8-4.** Σχεδιάστε τροφοδοτικό που δίνει στην έξοδό του +18 V χρησιμοποιώντας το κατάλληλο IC.
- 8-5.** Υπολογίστε τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  ενός παλμοτροφοδοτικού με τάση αναφοράς 7 V και τάση εξόδου 22 V.