

## Σχεδιασμός και Βασικές αρχές των τροφοδοτικών

Τα γραμμικά τροφοδοτικά χαμηλής τάσης χρησιμοποιούνται σήμερα σε ένα πλήθος εφαρμογών, αφού συναντώνται στις περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές. Η θεωρητική και πρακτική ανάλυσή τους, θα αποτελέσει ένα βασικό οδηγό για την επιλογή, τον σχεδιασμό, καθώς και την αξιολόγηση ενός τροφοδοτικού.

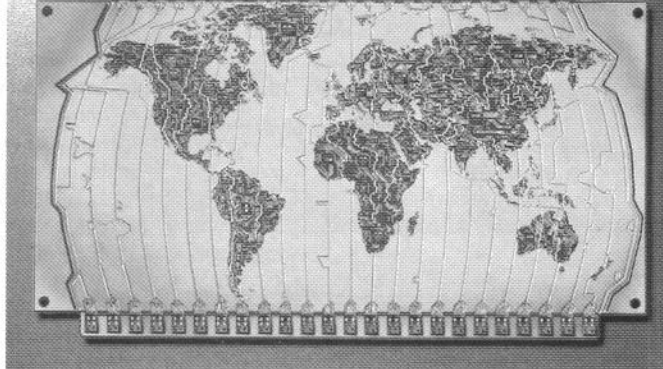
Κατά την τροφοδότηση μια ηλεκτρονικής συσκευής από το δίκτυο της ΔΕΗ, τις περισσότερες φορές παρεμβάλλεται ένα τροφοδοτικό χαμηλής ισχύος, αφού οι περισσότερες συσκευές λειτουργούν με συνεχές ρεύμα, ενώ η τάση λειτουργίας τους είναι αρκετά μικρότερη από τα 220V που παρέχει το δίκτυο. Για την κατασκευή των ανωτέρων τροφοδοτικών απαραίτητη είναι η γνώση της αρχής λειτουργίας τους, η οποία ακολουθεί τα εξής βασικά στάδια:

- Υποβιβασμός της τάσης.
- Ανόρθωση.
- Φιλτράρισμα.
- Σταθεροποίηση.

Τα τελευταία στάδια δεν είναι απαραίτητα, εξαρτάται από τις απαιτήσεις της συσκευής που θα τροφοδοτηθεί.

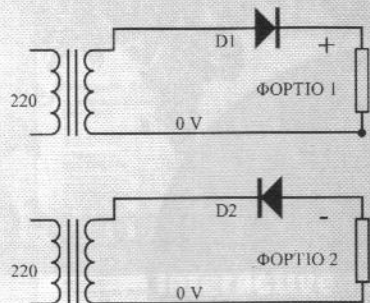
### Υποβιβασμός της τάσης.

Η μείωση της τάσης από τα 220V του δικτύου σε μια επιθυμητή χαμηλή τιμή (π.χ. 10 V), είναι η πρώτη διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή ενός τροφοδοτικού. Η διαδικασία αυτή προηγείται των υπολοίπων, αφενός για μεγαλύτερη ασφάλεια, αφετέρου γιατί μια μικρή τάση είναι σαφώς πιο εύκολη στον χειρισμό της. Στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, αυτό επιτυγχάνεται με ένα απλό μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής είναι το εξάρτημα εκείνο που μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου, σε εναλλασσόμενη τάση της επιλογής του χρήστη. Αποτελείται από δύο τουλάχιστον πηνία τοποθετημένα σε ένα σιδηροπυρήνα. Το πηνίο στο οποίο συνδέεται το δίκτυο λέγεται πρωτεύον, ενώ το άλλο δευτερεύον ή δευτερεύοντα, αν υπάρχουν περισ-

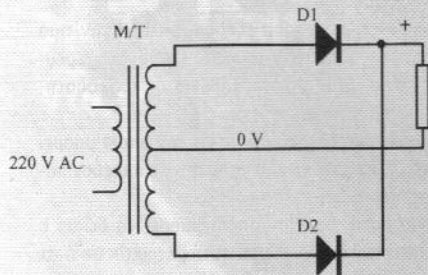


σότερα από ένα. Χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη:

- Την ονομαστική τάση εισόδου, δηλαδή την τιμή της τάσης με την οποία πρέπει να τροφοδοτηθεί ο μετασχηματιστής.
- Την ονομαστική τάση εξόδου, δηλαδή την τιμή της τάσης που παράγεται στο (κάθε) δευτερεύον πηνίο, όταν ο μετασχηματιστής τροφοδοτηθεί.
- Την μέγιστη ένταση ρεύματος την οποία μπορεί να δώσει ο μετασχηματιστής στο δευτερεύον πηνίο.
- Την μέγιστη ισχύ την οποία μπορεί να δώσει ο μετασχηματιστής. Η τιμή αυτή μετριέται σε Watt ( $1\text{Watt}=1\text{V} \times 1\text{A}$ ) και εξαρτάται κύρια από τον όγκο του σιδηροπυρήνα και την ποιότητά του.
- Κάθε μετασχηματιστής είναι κατασκευασμένος

**Σχήμα 1**

➤ Η απλή ανόρθωση για θετική (α) και αρνητική (β) τάση.

**Σχήμα 2**

➤ Η διπλή ανόρθωση με μετασχηματιστή διπλού δευτερεύοντος.

για μία συχνότητα λειτουργίας. Επειδή στην Ελλάδα έχουμε μόνο ένα δίκτυο με συχνότητα 50 Hz, η συχνότητα αυτή δεν αναφέρεται. Ένας μετασχηματιστής όμως μελετημένος για 50 Hz δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δίκτυο με άλλη συχνότητα. Αν γίνει κάτι τέτοιο, τα αποτελέσματα θα είναι από απόκλιση στις τιμές εξόδου, μέχρι καταστροφή.

Έτσι στους μικρούς μετασχηματιστές οι οποίοι και μας ενδιαφέρουν περισσότερο, χρησιμοποιούνται μόνο τα τρία πρώτα μεγέθη δηλαδή η τάση εισόδου, η τάση εξόδου και το μέγιστο ρεύμα (π.χ. 220/12V-1A, 220/2 × 15V-0,5A).

Ένας άλλος τρόπος υποβιβασμού της τάσης είναι με αντίσταση. Όμως αυτός ο τρόπος δεν ενδείκνυται, αφού είναι γνωστό ότι με την αντίσταση θα έχουμε μεγάλη κατανάλωση ισχύος και άρα μεγαλύτερες θερμικές απώλειες, ακόμα και σε μικρά ρεύματα.

### Η ανόρθωση

Το βασικότερο στάδιο της κατασκευής ενός τροφοδοτικού είναι αυτό της ανόρθωσης, κατά το οποίο το εναλλασσόμενο ρεύμα της εισόδου μετατρέπεται σε συνεχές. Η ανόρθωση επιτυγχάνεται με διόδους ανόρθωσης. Οι διόδοι γενικά είναι εξαρτήματα κατασκευασμένα από ημιαγώγιμο υλικό, που επιτρέπουν τη διέλευση μόνο της θετικής ή της αρνητικής φοράς του ρεύματος, ανάλογα με την πόλωση τους. Μια άλλη χαρακτηριστική ιδιό-

τητα των διόδων, είναι ότι διατηρούν σταθερή την τάση στα άκρα τους, ανεξάρτητα από το υπόλοιπο κύκλωμα. Η τιμή της τάσης εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό που είναι κατασκευασμένη η διάδος. Έτσι η διάδος πυριτίου (Si) αναπτύσσει διαφορά δυναμικού 0,7V, ενώ η διάδος γερμανίου (Ge) 0,2V. Οι διόδοι ανόρθωσης, δεν είναι τίποτα περισσότερο από διόδους, που είναι κατασκευασμένες ειδικά για αυτή τη διαδικασία. Αν λοιπόν συνδέσουμε μια διάοδο στην έξοδο ενός μετασχηματιστή (**Σχ1α**), τότε αυτή θα διαρρέεται από ρεύμα μόνο κατά μία ημιπερίοδο του εναλλασσόμενου ρεύματος. Το φορτίο μας λοιπόν (συσκευή) θα τροφοδοτείται με ρεύμα μίας κατεύθυνσης. Είναι προφανές ότι αν η διάδος συνδεθεί αντίστροφα, τότε το ρεύμα θα είναι αντίθετης φοράς δηλαδή θα έχουμε αντίστροφη πολικότητα (**Σχ1β**). Τα δύο αυτά κυκλώματα, ονομάζονται κυκλώματα απλής ανόρθωσης. Η ανόρθωση λέγεται απλή, γιατί εκμεταλλεύεται μόνο τη μία ημιπερίοδο του διαθέσιμου ρεύματος, αφού το υπόλοιπο σήμα δεν διέρχεται από τη διάοδο, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται προβλήματα τόσο στην απόδοση, όσο και στη σταθερότητα της λειτουργίας της συσκευής.

Τα κυκλώματα που εκμεταλλεύονται και τις δύο ημιπεριόδους του εναλλασσόμενου ρεύματος ονομάζονται κυκλώματα διπλής ανόρθωσης. Υπάρχουν δύο τεχνικές για να επιτύχουμε διπλή ανόρθωση και άρα και δύο κυκλώματα.

Η πρώτη τεχνική βασίζεται στον μετασχηματιστή με διπλό δευτερεύον τύλιγμα και απεικονίζεται στο **Σχ 2**. Η λειτουργία της είναι αρκετά απλή: Οι δύο δίοδοι του κυκλώματος είναι συνδεδεμένες με αντίστροφη πολικότητα. Έτσι η θετική ημιπερίοδος του ρεύματος που διέρχεται από την μία δίοδο, απορρίπτεται από την άλλη, ενώ για την αρνητική συμβαίνει το αντίστροφο. Πάντως και στις δύο περιπτώσεις το ρεύμα διέρχεται με την ίδια φορά από την αντίσταση φορτίου (συσκευή).

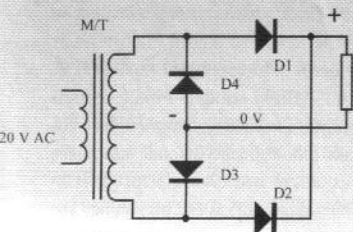
Η δεύτερη τεχνική χρησιμοποιεί μετασχηματιστή με ένα πνίο και γέφυρα ανόρθωσης (ή 4 ξεχωριστές διόδους συνδεδεμένες σε διάταξη γέφυρας). Ας σχολιάσουμε τη λειτουργία σύμφωνα με το **Σχ 3**. Έστω ότι κάποια χρονική στιγμή ο επάνω αγωγός του μετασχηματιστή είναι θετικότερος του κάτω. Το ρεύμα λοιπόν περνά από την D1, στη συνέχεια μέσα από τη συσκευή και συμπληρώνει την πορεία του μέσα από την D3 στον άλλο αγωγό. Στην άλλη ημιπερίοδο το ρεύμα περνά με τον ίδιο τρόπο από τις D4 και D2. Και στις δύο ημιπερίοδους λοιπόν το ρεύμα μέσα από τη συσκευή έχει την ίδια φορά. Οι διαφορές μεταξύ των δύο τεχνικών επικεντρώνονται στον τύπο του μετασχηματιστή, στον αριθμό των δίοδων και κυρίως στο ότι στη γέφυρα έχουμε διπλάσια πτώση τάσης και άρα μεγαλύτερη απώλεια ισχύος, αφού σε κάθε ημιπερίοδο διαρρέονται από ρεύμα δύο δίοδοι, αντί για την μία του πρώτου κυκλώματος. Κριτήριο για την επιλογή του κυκλώματος και των δίοδων, απο-

τελεί το μέγιστο ρεύμα και η μέγιστη τάση λειτουργίας της συσκευής. Μια άλλη τεχνική, είναι αυτή του **Σχ.4**, που στη ουσία είναι συνδυασμός των δύο τεχνικών που αναπτύξαμε παραπάνω. Σε ένα μετασχηματιστή με διπλό δευτερεύον πνίο, γειώνουμε (-) τη μεσαία λήψη και συνδέουμε μια γέφυρα. Το κύκλωμα δεν είναι παρά μια διπλή ανόρθωση ανάλογη με αυτή του σχήματος 2, μόνο που σε κάθε πνίο χρησιμοποιούμε 2 διόδους, έτσι ώστε να πάρουμε και τη θετική και την αρνητική τάση. Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιείται σε συμμετρικές τροφοδοσίες (π.χ. + και - 15V).

### Το φίλτράρισμα

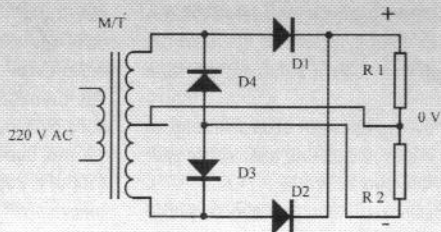
Η έξοδος από την ανόρθωση, ακόμα και τη διπλή, παρότι θεωρείται DC, συνήθως συνοδεύεται από όμως μεγάλες μεταβολές τάσης, κάτι που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ανεπιθύμητο. Συγκεκριμένα η τάση μεταβάλλεται από 0 μέχρι τη μέγιστη τιμή και ξαναπέφτει στο 0 με ημιτονικό ρυθμό, αφού η αρνητική ημιπερίοδος έχει απορριφθεί από τα κυκλώματα ανόρθωσης. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα φιλτράρουμε την έξοδο της ανόρθωσης, δηλαδή αποθηκεύουμε ενέργεια όσο η τάση ανεβαίνει, προκειμένου να τη χρησιμοποιήσουμε όταν η τάση θα πέφτει. Βασικό εξάρτημα αποθήκευσης ενέργειας είναι ο πυκνωτής. Στην ουσία εκμεταλλευόμαστε το φαινόμενο της φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή. Συνδέοντας τον πυκνωτή στην έξοδο του

**Σχήμα 3**



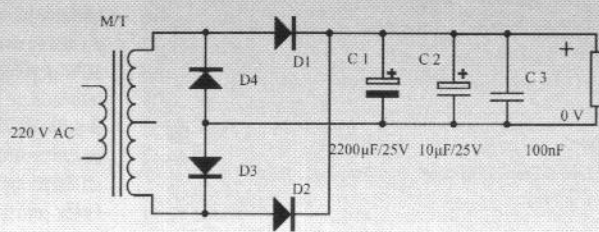
➊ Η διπλή ανόρθωση με γέφυρα.

**Σχήμα 4**

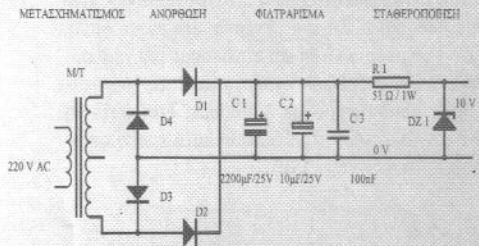


➊ Διπλή ανόρθωση για παραγωγή θετικής και αρνητικής συμμετρικής τάσης.

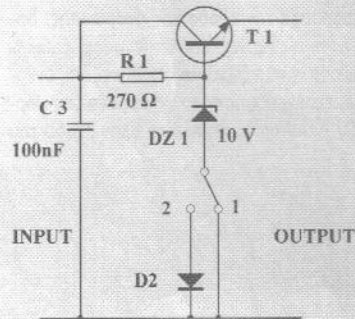
**Σχήμα 5**



➊ Πλήρες μη σταθεροποιημένο τροφοδοτικό.

**Σχήμα 6**

➊ Η σταθεροποίηση με zener.

**Σχήμα 7**

➋ Σταθεροποίηση με zener και δυνατότητα μεγαλύτερου ρεύματος.

κυκλώματος, η έξοδος πλέον εξαρτάται αποκλειστικά από την τάση στα άκρα του. Όσο η τάση εισόδου αυξάνεται ο πυκνωτής αποθηκεύει ενέργεια, δηλαδή φορτίζεται και η έξοδος ακολουθεί τη γνωστή καμπύλη φόρτισής του. Όταν τώρα η τάση εισόδου μειώνεται, ο φορτιστής εκφορτίζεται. Η φόρτιση του πυκνωτή πρέπει να επιτυγχάνεται όσο το ρεύμα αυξάνει. Έτσι η χρήση πυκνωτή με πολύ μεγάλη χωρητικότητα δεν είναι η κατάλληλη, αφού πριν προλάβει να φορτιστεί ο πυκνωτής το ρεύμα θα έχει αρχίσει να μειώνεται. Αν ο πυκνωτής είναι μικρός, για τις απαιτήσεις της συσκευής, τότε θα φορτίζεται και θα ξαναφορτίζεται αρκετά, δημιουργώντας μεγάλες μεταβολές στην τάση (κυμάτωση ή ripple).

Ένα άλλο πρόβλημα παρουσιάζεται όταν η συσκευή για τη λειτουργία της χρειάζεται δεδομένο ρεύμα π.χ. 1Α. και ο μετασχηματιστής μπορεί να δώσει π.χ. 1,2 Α. Τότε το διαθέσιμο επιπλέον ρεύμα που θα πρέπει να αποθηκεύσει ο πυκνωτής σε μορφή ενέργειας δεν θα είναι αρκετό, με αποτέλεσμα η συσκευή να μη λειτουργεί σωστά. Πρέπει λοιπόν ο μετασχηματιστής να έχει μεγαλύτερη ικανότητα σε ρεύμα, πρακτικά τουλάχιστον 50% μεγαλύτερη από το ρεύμα που χρειάζεται η συσκευή.

Η επιλογή λοιπόν του πυκνωτή εξαρτάται από τη συχνότητα του σήματος εισόδου, αλλά και το ρεύμα λειτουργίας της συσκευής. Εκτός από τη θεωρητική λύση που απαιτεί μαθη-

ματικούς υπολογισμούς, υπάρχει και αντίστοιχη απλή και πρακτική λύση, η οποία επιτυγχάνεται σε δύο στάδια:

- Αν το τροφοδοτικό δεν έχει σταθεροποίηση, ο πυκνωτής πρέπει να έχει χωρητικότητα 2.000μF, για κάθε 1Α που απαιτεί η συσκευή. Αν έχει σταθεροποίηση τότε αρκούν 1.000μF ανά 1Α.
- Συνδέουμε τον κατάλληλο πυκνωτή στο κύκλωμα και ελέγχουμε με πολύμετρο την AC τάση στον πυκνωτή. Αν η AC τάση είναι πάνω από το 10% της DC, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερο πυκνωτή.

Εκτός όμως από την ομαλοποίηση της τάσης, υπάρχει και το πρόβλημα των παρασιτικών σημάτων που επικαθονται στο κύριο σήμα και μεταδίδονται μαζί του. Παρότι ο πυκνωτής που χρησιμοποιούμε έχει συνήθως μεγάλη χωρητικότητα και τα παράσιτα θα έπρεπε να απορροφώνται, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει γιατί πρακτικά οι μεγάλοι πυκνωτές έχουν μια σχετική «αδράνεια» στη συμπεριφορά τους. Γι αυτό και παράλληλα συνδέουμε μικρότερο ή μικρότερους πυκνωτές (της τάξης των 100nF), που έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε αυτό τον τομέα. Η απόλυτα σωστή λύση πάντως θέλει εκτός από τον ηλεκτρολυτικό πυκνωτή, έναν τανταλίου (1 - 10μF) και δύο - τρεις κεραμικούς ή άλλου τύπου (3x100nF). Επίσης θέλει πάνω στη συσκευή διάσπαρτους μικρούς πυκνωτές (100nF), κυρίως κοντά στα ολοκληρωμένα. Η επιλογή είναι θέμα σχεδιασμού της συσκευής. Στο

**σχήμα 5** απεικονίζεται ένα μη σταθεροποιημένο τροφοδοτικό DC τάσης, μαζί με τους απαραίτητους πυκνωτές για την αποφυγή των παρασίτων. Η τάση των πυκνωτών πρέπει φυσικά να είναι μεγαλύτερη από την τάση στην οποία θα λειτουργούν, κατά τουλάχιστον 15%, δεν χρειάζεται όμως και να το παρακάνουμε, ειδικά στους ηλεκτρολυτικούς ή τους τανταλίου που είναι και σχετικά ακριβότεροι. Σε τάση 20V για παράδειγμα, δε χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε πυκνωτές 63V, τόσο οι 40άρηδες όσο και οι 25άρηδες είναι απόλυτα κατάλληλοι.

### Σταθεροποίηση

Η σταθεροποίηση είναι ένα στάδιο που παρεμβάλλεται μεταξύ της εξόδου της ανόρθωσης και της συσκευής. Σκοπός της είναι να διατηρεί την τάση εξόδου σε μία συγκεκριμένη σταθερή τιμή και να περιορίζει ακόμα και τις ελάχιστες αποκλίσεις. Είναι προφανές ότι για να υπάρχουν περιθώρια σταθεροποίησης, η τάση εισόδου στο σταθεροποιητή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή τάση εξόδου. Υπάρχει μάλιστα μια ελάχιστη τιμή, η οποία λέγεται drop out Voltage. Αντιλαμβάνεται κανείς ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά εισόδου-εξόδου τόσο μεγαλύτερα περιθώρια σταθεροποίησης υπάρχουν. Από την άλλη όμως αυτό οδηγεί και σε μεγαλύτερες απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες εμφανίζονται ως θερμότητα πάνω στο σταθεροποιητή.

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση του κυκλώματος του σταθεροποιητή, θα εξετάσουμε τους παράγοντες που επηρεάζουν τη μη σταθεροποιημένη τάση εξόδου και καθιστούν απαραίτητη τη χρήση του.

**Μετασχηματιστής:** Η τάση στην έξοδο του εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας του, δηλαδή από τη ΔΕΗ. Διακυμάνσεις στο δίκτυο συνεπώς προκαλούν ανάλογες διακυμάνσεις στην τάση εξόδου του. Για παράδειγμα, πτώση της τάσης του δικτύου στα 200V περίπου σημαίνει πτώση από τα π.χ. 12 σε 10,9V. Επίσης η τάση στην έξοδο του μετασχηματιστή επηρεάζεται (πτωτικά) από το φορτίο, τόσο γιατί αλλάζει ο συντελεστής απόδοσής του, όσο και γιατί υπάρχει πτώση τάσης λόγω της ωμικής αντίστασης του πηνίου.

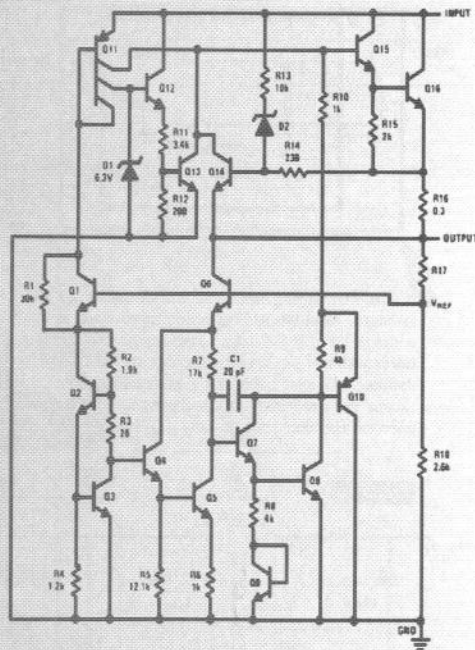
**Ανόρθωση:** Στο στάδιο αυτό υπάρχει μια ελάχιστη πτώση τάσης ανάλογα με το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα π.χ. επιπλέον πτώση 0.1V σε αύξηση ρεύματος 1A.

**Φίλτρο:** Ακόμα και το καλύτερο σχεδιασμένο φίλτρο δεν μπορεί να μηδενίσει την κυμάτωση.

**Ακροδέκτες:** Η ωμική αντίσταση των αγωγών σύνδεσης ή του τυπωμένου, προκαλεί μια μεταβαλλόμενη πτώση τάσης στην έξοδο ανάλογα με το ρεύμα.

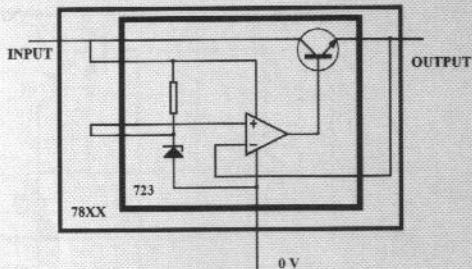
Όπως είναι λογικό κάθε κύκλωμα σταθεροποίησης, ανάλογα με τον σχεδιασμό του, είναι σε θέση να μειώσει έναν ή περισσότερους από τους παραπάνω παράγοντες.

**Σχήμα 9**



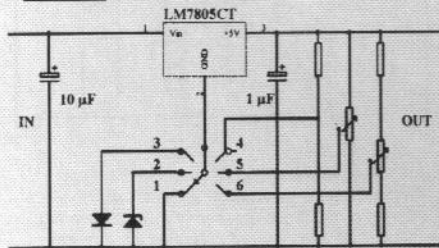
☞ Το εσωτερικό των 78XX. Παρατηρήστε την πηγή τάσης αναφοράς με τη Zener αριστερά, και τη διαίρεση τάσης, που τροφοδοτεί τη μία είσοδο του ενισχυτή (τρανζίστορ). Η αντίσταση πάνω από την έξοδο είναι για sense περιορισμού ρεύματος (εσωτερική προστασία)

Σχήμα 8



Η αρχή λειτουργίας σταθεροποιητή με τελεστικό ενισχυτή. Αν συμπεριλάβουμε όλα το κύκλωμα σε 1 ολοκληρωμένο (εξωτερικό πλαίσιο), τότε έχουμε ένα σταθεροποιητή με 3 ποδαράκια, σαν το 78XX. Αν πάλι αφήσουμε κάποιες συνδέσεις (εσωτερικό πλαίσιο), τότε έχουμε ένα σταθεροποιητή με περισσότερα ποδαράκια αλλά πιο ευέλικτο (σαν το 723).

Σχήμα 10



Η λειτουργία του 7805 και παραλλαγές.

## 1. Σταθεροποίηση με δίοδο Zener.

Η σταθεροποίηση της τάσης εξόδου επιτυγχάνεται συνδέοντας στην έξοδο του κυκλώματος μια δίοδο Zener, η οποία έχει την ιδιότητα να διατηρεί μια σχετικά σταθερή τάση στα άκρα της, όταν πολώνεται ανάστροφα, εφόσον βέβαια η τάση τροφοδοσίας είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική της τιμή. Στο Σχ. 6 φαίνεται μια τυπική συνδεσμολογία σταθεροποίησης με δίοδο Zener.

Ας υποθέσουμε ότι επιθυμούμε να τροφοδοτήσουμε μια συσκευή με τάση λειτουργίας 10V, με ρεύμα που η μέγιστη τιμή του είναι 0,1A. Έστω επίσης ότι χρησιμοποιούμε μετασχηματιστή με ένα πηνίο, ο οποίος δίνει στην έξοδο του ημιτονική τάση ονομαστικής τιμής, ίσης με 12V. Άρα η τιμή κορυφής του εναλλασσόμενου είναι:  $\sqrt{2} \times 12V = 16,8V$ . Μετά τη γέφυρα η τάση μειώνεται λόγω των διόδων με πώση τάσης σε κάθε δίοδο 0,7V. Άρα η τάση στη έξοδο της γέφυρας θα είναι  $16,8 - (2 \times 0,7V) = 15,4V$ .

Εφόσον επιθυμούμε η τάση εξόδου του συνολικού κυκλώματος μας να είναι 10V, πρέπει η πώση τάσης στην ωμική αντίσταση να είναι  $15,4 - 10 = 5,4V$ . Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση φορτίου που θα χρησιμοποιήσουμε σύμφωνα με τον νόμο Ohm. Άρα η αντίσταση θα είναι:  $R = V/I = 5,4V/0,1A = 54\Omega$  και η ισχύς που καταναλώνει:  $P = V \times I = 5,4V \times 0,1A = 0,54W$ . Σε πραγματική κατάσταση πρέπει να χρησιμοποιηθεί λίγο μικρότερη τιμή αντίστασης, με περίπου διπλάσια

τιμή σε ισχύ δηλαδή 51 (ή 47) $\Omega$  /1W. Όταν δεν έχουμε φορτίο, το ρεύμα θα περνά μέσα από τη δίοδο και είναι όσο το ρεύμα μέσα από την αντίσταση, δηλαδή  $5,4 V/51(\text{ή } 47)\Omega = 106(\text{ή } 115)mA$ . Αυτό σημαίνει ότι η δίοδος πρέπει να αναπτύσσει τάση 10V και πρέπει να αντέχει σε ρεύμα τουλάχιστον 150mA, ή να έχει ισχύ  $10V \times 0,15A = 1,5W$ . Η μεγάλη ισχύς την οποία καταναλώνει η Zener είναι και το βασικό μειονέκτημα αυτού του κυκλώματος. Γι αυτό και στις περισσότερες περιπτώσεις, που τοποθετείται δίοδος Zener, χρησιμοποιείται το κύκλωμα του Σχ. 7, το οποίο επιτρέπει μεγαλύτερο ρεύμα χρησιμοποιώντας μικρότερης ισχύος Zener που οδηγεί το τρανζίστορ. Τα πράγματα είναι τώρα πολύ πιο απλά. Χρησιμοποιώντας μια μικρή Zener 0,5W και εφόσον η τάση λειτουργίας της συσκευής παραμένει 10V, πρακτικά σημαίνει ότι μπορούμε σίγουρα να έχουμε ρεύμα Zener 25mA. Τοποθετώντας τώρα στο κύκλωμα ένα τυπικό τρανζίστορ με συντελεστή ενίσχυσης 100 μπορούμε άνετα να πάρουμε ρεύμα 2,5A. Λειτουργικά να αναφέρουμε ότι η δίοδος zener κρατάει σταθερή την τάση βάσης του τρανζίστορ, οπότε η τάση στον εκπομπό είναι σταθερή. Σταθερή μεν, αλλά με ένα πρόβλημα: Είναι μειωμένη κατά 0,6 - 1V λόγω της πτώσης τάσης επάνω στη δίοδο του τρανζίστορ. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό με την προσθήκη μιας διόδου, σε σειρά με τη zener αλλά με ορθή πόλωση (η κάθοδος στο (-)). Αυτό θα ανεβάσει



την τάση της βάσης κατά μία τάση ορθής πόλωσης (δηλ. στα 10.6 - 11V) κάτι που θα αντισταθμίσει την πτώση τάσης στην επαφή βάσης εκπομπού. (Μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε μικρή διόδος π.χ. 1N4148, 1N4001 κλπ).

## 2. Σταθεροποίηση με ολοκληρωμένο.

Η εμφάνιση των ολοκληρωμένων στον χώρο των ηλεκτρονικών συσκευών συνοδεύτηκε με αλλαγή πλεύσης και στον χώρο των τροφοδοτικών, αφού οι συσκευές που χρησιμοποιούν ολοκληρωμένα για την σταθεροποίησή τους, απαιτούν ειδικά κυκλώματα με διακριτά εξαρτήματα, τα οποία ήταν δυνατό να κατασκευασθούν μόνο με ολοκληρωμένα. Στο **σχήμα 8** διακρίνεται ένας σταθεροποιητής με ολοκληρωμένο. Στην (+) είσοδο του τελεστικού ενισχυτή συνδέουμε μια Zener, η οποία εξασφαλίζει την τάση αναφοράς του τελεστικού. Στην (-) είσοδο εισέρχεται ένα δείγμα της τάσης εξόδου, με τη γνωστή μέθοδο της ανάδρασης. Αν η τάση εξόδου είναι μικρότερη από την τάση Zener, τότε ο ενισχυτής αυξάνει την έξοδό του, οδηγεί περισσότερο το τρανζίστορ και η τάση εξόδου του σταθεροποιείται αυξάνεται μέχρι οι δύο είσοδοι του ενισχυτή να έχουν την ίδια τιμή. Το αντίστροφο γίνεται όταν η τάση εξόδου είναι μικρότερη.

Απ' αυτό το βασικό κύκλωμα λειτουργίας, που μπορεί να υλοποιηθεί με διακριτά εξαρτήματα, προκύπτουν δύο μεγάλες κατηγορίες ολοκληρωμένων σταθεροποιητών. Η πρώτη, χρησιμοποιεί όλα τα ε-

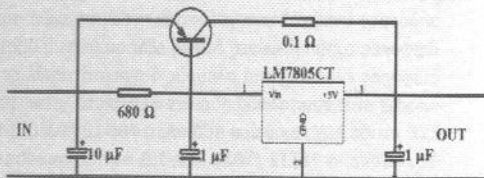
ξαρτήματα μέσα σε ένα ολοκληρωμένο και συνδέει την - είσοδο με τον εκπομπού του τρανζίστορ. Έτσι προκύπτει ένας ολοκληρωμένος - σταθεροποιητής που έχει 3 ακροδέκτες : την είσοδο, τη γείωση (GND) και την έξοδο. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων σταθεροποιητών είναι η σειρά 78XX, όπου XX η συγκεκριμένη (fixed) τάση εξόδου.

Η δεύτερη χρησιμοποιεί τα ίδια εξαρτήματα, αφήνει όμως διαθέσιμες συνδέσεις σε ανάλογα ποδαράκια. Έτσι, για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να δώσει το δείγμα του όχι από το σημείο εξόδου του σταθεροποιητή αλλά από σημείο πιο κοντά στην τροφοδοτούμενη συσκευή, με αποτέλεσμα να επιτύχει καλύτερη αντιστάθμιση τάσης, αφού στον υπολογισμό εισέρχεται και η πτώση τάσης των καλωδίων σύνδεσης. Το ολοκληρωμένο δηλαδή κρατάει σταθερά π.χ. 5 V στις μπόρνες ενός εργαστηριακού τροφοδοτικού και όχι στο ποδαράκι της εξόδου του. Τυπικός αντιπρόσωπος αυτής της κατηγορίας είναι το LM723, το οποίο έχει ενσωματωμένες και πρόσθετες δυνατότητες, όπως περιορισμό ρεύματος.

## Οι σταθεροποιητές 78XX.

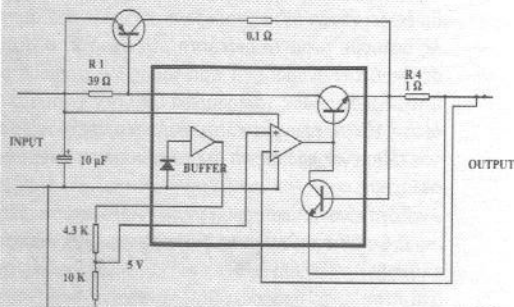
Οι σταθεροποιητές 78XX που είναι κατασκευασμένοι για θετικές τάσεις, όπως και τα αδέρφια τους 79XX που χρησιμοποιούνται για τις αρνητικές, είναι οι πλέον δημοφιλείς. Όπως γίνεται αντιληπτό οι δύο αυτές σειρές σταθεροποιητών διαφέρουν μεταξύ τους στα ποδαράκια σύνδεσης. Οι 78XX χα-

**Σχήμα 11**



☛ Μεγαλύτερο ρεύμα από το 7805, με τη χρήση εξωτερικού PNP τρανζίστορ.

**Σχήμα 12**



☛ Πλήρης σταθεροποιητής με το LM723, το οποίο εμφανίζεται σε block διάγραμμα.

ρακτηρίζονται από το ελάχιστο κόστος τους, ενώ είναι σε θέση να προσφέρουν απλότητα στην κατασκευή. Έχουν ενσωματωμένη προστασία και υπάρχουν σε διάφορες τυποποιημένες τάσεις εξόδου (π.χ. 5, 12, 15, 18, 24), καθώς και σε διάφορες εκδόσεις από πλευράς δυνατότητας σε ρεύμα. Το νούμερο XX αντιπροσωπεύει την τάση εξόδου του ενισχυτή, έτσι, ο 78L12 (σε κέλυφος T092) έχει έξοδο 12V και ρεύμα 100mA, ο 78M12 (T0202) 12V/0,5A, ο 7812 (T0220) 12V/1A και ο 78K12 (T03) 12V/1,5 A. Η drop out τάση είναι 2,5V και εδώ θα πρέπει να προσέξετε τις παρατηρήσεις που αναπτύσσονται σε θέματα απαγωγής θερμότητας που περιγράφονται στην ενότητα 9. Αν όμως δεν έχετε περιθώρια drop out μπορείτε να αναζητήσετε κάποιο low drop out σταθεροποιητή (0,2-1V) π.χ. από τη σειρά LM29XX (προσοχή, εδώ το XX δεν αντιπροσωπεύει την τάση εξόδου). Στο **Σχ.9** απεικονίζεται η εσωτερική δομή ενός 78XX. Ας δούμε όμως την ευελιξία αυτών των σταθεροποιητών. Το **Σχ.10** δίνεται ένα τυπικό κύκλωμα σταθεροποιητή με 7805 και έστω ότι ο διακόπτης είναι στη θέση 1. Το ολοκληρωμένο θα λειτουργήσει όπως περιγράφηκε νωρίτερα και θα δώσει έξοδο 5V.

Ας βάλουμε τώρα το διακόπτη στη θέση 2. Ο σταθεροποιητής θα κρατήσει σταθερή την ονομαστική τιμή τάσης 5V, ανάμεσα στα ποδαράκια εξόδου και GND. Εφόσον όμως το ποδαράκι GND δεν είναι στα 0V, αλλά στην τάση zener (έστω 10V) η πραγματική τιμή της τάσης εξόδου θα είναι  $5 + 10 = 15$  V. Αυτός είναι ένας τρόπος να μετατρέψουμε τη fixed τάση του σταθεροποιητή σε άλλη τιμή.

Ανάλογο είναι η περίπτωση με τον διακόπτη στη θέση 3. Εδώ η αύξηση θα είναι 0,6 - 1V επιπλέον της ονομαστικής τιμής του σταθεροποιητή ανάλογα με τη δίοδο.

Στη θέση 4, το ποδαράκι GND έρχεται σε ένα διαιρέτη τάσης. Αν αλλάξουμε το λόγο των αντιστάσεων του διαιρέτη, θα αλλάξει και η τάση εξόδου. Σε σχέση με τη zener, η λύση αυτή πλεονεκτεί στο ότι μπορούμε να επιτύχουμε οποιαδήποτε τιμή και να μη βασιζόμαστε στην τυποποίηση των τιμών zener. Με τον διακόπτη στη θέση 5, το ποδαράκι GND το φέρνουμε στο δρομέα ενός

ποτενσιόμετρου. Η λύση είναι παρόμοια με την προηγούμενη, επιτρέπει όμως ρύθμιση ανά πάσα στιγμή, οπότε προτείνεται για ρυθμιζόμενα τροφοδοτικά. Αν θέλουμε να μην υπάρχει μεγάλη μεταβολή (π.χ. να ρυθμίζει από 10 μέχρι 11V), αρκεί να προσθέσουμε δύο αντιστάσεις (διακόπτης στη θέση 6). Η τάση στο πάνω και κάτω άκρο του ποτενσιόμετρου να δίνουν την περιοχική κάλυψη.

Σε όλες τις προηγούμενες "τροποποιήσεις" θα παρατηρήσατε ότι είχαμε αύξηση της τάσης εξόδου. Για να έχουμε μείωση (π.χ. έξοδο 3.6V) θα πρέπει το ποδαράκι GND να βρεθεί σε τάση  $3,6 - 5 = -1,4$  V. Αν θέλουμε κάτι τέτοιο θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα τροφοδοτικό αρνητικής τάσης, κάτι όμως που είναι αντιοικονομικό. Γι αυτό καταφεύγουμε σε ένα "αδελφό" ολοκληρωμένο το LM317, το οποίο είναι fixed αλλά με τάση εξόδου μόλις 1,7V. Μπορούμε λοιπόν στις τυποποιημένες τιμές τάσης εξόδου να χρησιμοποιούμε τα 78XX και στις υπόλοιπες το 317, αυξάνοντάς του την έξοδο με τους τρόπους που περιγράφηκαν παραπάνω στο 78XX.

Καλά με την τάση, είδαμε ότι μπορούμε να κάνουμε σχεδόν ό,τι θέλουμε. Τι γίνεται όμως με το ρεύμα; Μπορούμε με κάποια προσθήκη να ξεπεράσουμε τα όρια του ολοκληρωμένου ή πρέπει να αναζητήσουμε κάτι άλλο; Η απάντηση είναι ότι υπάρχουν αρκετοί τρόποι να συνδέσουμε ένα εξωτερικό τρανζίστορ, το οποίο οδηγούμενο από το 78XX να μας δώσει το επιπλέον ρεύμα. Μια τέτοια λύση με 7805 δίνεται στο **Σχ. 11** και η λειτουργία έχει ως εξής:

Αρχικά το εξωτερικό τρανζίστορ είναι σε αποκοπή. Το 7805 εμφανίζει στην έξοδό του τα 5V. Η συσκευή (φορτίο) αρχίζει να τραβάει ρεύμα, δημιουργώντας μια πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση R, η οποία παρατηρήστε ότι είναι συνδεδεμένη παράλληλα στην επαφή βάσης-εκπομπού του εξωτερικού τρανζίστορ. Όταν το ρεύμα αποκτήσει κατάλληλη τιμή που η πτώση τάσης στην R να είναι 0,6-1V (εξαρτάται από το τρανζίστορ), τότε αυτό αρχίζει να άγει παρέχοντας στο φορτίο το επιπλέον ρεύμα. Αν συμβεί να "ανοίξει" περισσότερο από ό,τι χρειάζεται, τότε το 7805 θα δει την αύξηση της τάσης στην έξοδο και θα περιορίσει το ρεύμα του, δηλαδή θα μειώσει το ρεύμα που διέρχεται από την



R και άρα την οδήγηση του τρανζίστορ, επαναφέροντας την έξοδο στα 5V. Με την αντίσταση ρυθμίζουμε ουσιαστικά την κατώτερη στάθμη ρεύματος, στην οποία αρχίζει να άγει το εξωτερικό τρανζίστορ. Για παράδειγμα, ένα ρεύμα της τάξης των 50-200 mA από το 7805 είναι ικανοποιητικό για να εξασφαλίσει σταθερή λειτουργία. Αν το εξωτερικό τρανζίστορ έχει συντελεστή ενίσχυσης 50, τότε με τα 100 mA θα μπορούμε να πάρουμε μέχρι 5A περίπου. Για να έχουμε τα 0,6 - 1 V (με 100mA) πρέπει η R να είναι 600 - 1000 Ω. Τοποθετούμε λοιπόν μια αντίσταση οποιασδήποτε τιμής σε αυτή την περιοχή (έστω 680 Ω), που σημαίνει ότι το τρανζίστορ θα ανοίγει με ρεύμα από 90 μέχρι 140 mA περίπου, κάτι το οποίο είναι αποδεκτό.

Στο κύκλωμα επίσης μπορούμε προσθέτοντας ένα - δύο ακόμα τρανζίστορ να έχουμε και περιορισμό στην τιμή του ρεύματος. Τέτοια κυκλώματα υπάρχουν στα σχετικά application notes.

### Ο σταθεροποιητής 723

Πρόκειται για ένα παλιό ολοκληρωμένο, που έχει όμως αποδείξει με τα χρόνια την αξιοπιστία του, σε βαθμό που σήμερα να κατασκευάζεται και σε σύγχρονα κελύφη με στρατιωτικές προδιαγραφές. Είναι ένας σταθεροποιητής με μεγάλη ευελιξία που επιτρέπει το σχεδιασμό τροφοδοτικών με έξοδο από 0 μέχρι 35V, αν και σε πολυπλοκότερα κυκλώματα μπορεί να φτάσει και τα 70 V. Μπορεί να δώσει ρεύμα μέχρι 100 mA και έχει δυνατότητα για περιορισμό ρεύματος. Το ολοκληρωμένο περιλαμβάνει πηγή τάσης αναφοράς, διαφορικό ενισχυτή, τρανζίστορ εξόδου, τρανζίστορ sense για τον περιορισμό ρεύματος κλπ. Στο **Σχ.12** δίνεται ένα τυπικό κύκλωμα σταθεροποιητή 5V, όπου το 723 εμφανίζεται σε block διάγραμμα. Ένα μέρος 5V από την τάση αναφοράς (7,15 V) συνδέεται στην (+) είσοδο του ενισχυτή, ο οποίος οδηγεί το ενσωματωμένο τρανζίστορ, έτσι ώστε η τάση εξόδου, που ανατροφοδοτείται στην (-) είσοδο εξωτερικά, να γίνει 5V. Παρατηρήστε ότι η λήψη της εξόδου δεν γίνεται στο συλλέκτη του τρανζίστορ εξόδου, αλλά στο πιο κοντινό προς το φορτίο σημείο. Έτσι η τάση εξόδου μένει ανεπηρέαστη από την πτώση τάσης στα κα-

λώδια μέχρι το τελικό σημείο εξόδου. Αυτό είναι κάτι που στα 78XX θυσιάστηκε υπέρ της απλούστευσης σε 3 pin. Η R1 έχει υπολογιστεί ώστε να άγει το εξωτερικό τρανζίστορ σε ρεύμα μικρότερο των 100mA (έστω 20mA), με τον τρόπο που περιγράψαμε για το 7805.

Όσον αφορά την τάση εξόδου, είναι φανερό ότι ο χρήστης μπορεί να την αλλάξει, είτε μεταβάλλοντας το δείγμα από την τάση αναφοράς (μέχρι τα 7V), είτε παίρνοντας το δείγμα όχι κατευθείαν από την έξοδο, αλλά με διαιρέση τάσης. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιήσει δύο ίδιες αντιστάσεις από την έξοδο στο "0", θα πάρει τη μισή τάση για ανατροφοδότηση, οπότε το ολοκληρωμένο θα ισορροπήσει στη διπλάσια, δηλαδή στο περιγραφόμενο κύκλωμα η τάση εξόδου θα είναι 10V ώστε στην (-) είσοδο του ενισχυτή να υπάρχουν τα 5V που θα αντισταθμίζουν τα 5V της πηγής αναφοράς.

Η R4 χρησιμοποιείται για τον περιορισμό ρεύματος. Αν για παράδειγμα είναι 1 Ω, τότε στα περίπου 0,6 - 0,7A θα εμφανιστεί στα άκρα της μια τάση, ικανή να κάνει το εσωτερικό τρανζίστορ sense να άγει. Αυτό, ερχόμενο σε αγωγιμότητα περιορίζει την οδήγηση του τρανζίστορ εξόδου. ώστε τελικά το ρεύμα να μην αυξηθεί περισσότερο.

### Χαρακτηριστικά

Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το πώς αξιολογείται ένα τροφοδοτικό, έτσι ώστε να μπορούμε να ξεχωρίσουμε την ποιότητα και την οικονομία, από την υπερβολή ή να γνωρίζουμε πότε μια τροποποίηση έδωσε καλύτερα ή χειρότερα αποτελέσματα. Τα σημαντικότερα λοιπόν χαρακτηριστικά είναι:

- **Load regulation:** Αναφέρεται στο πόσο μεταβάλλεται η τάση εξόδου σε μια συγκεκριμένη αλλαγή στο ρεύμα. Στο 7805 για παράδειγμα, είναι max 50mV για μεταβολή ρεύματος από 5mA σε 1A.
- **Line regulation:** Αναφέρεται στο πόσο μεταβάλλεται η τάση εξόδου, όταν με σταθερό ρεύμα μεταβληθεί η τάση εισόδου. Στο 7805 για παράδειγμα είναι 3mV, (max 50) για μεταβολή στην τάση εισόδου 7-25V σε σταθερό ρεύμα 500mA.

• **Ripple rejection:** Αναφέρεται στην ικανότητα του σταθεροποιητή να απορρίπτει την κυμάτωση. Δίνεται σε dB, που αντιπροσωπεύουν το λόγο  $\Delta V_{in} / \Delta V_{out}$  σε συγκεκριμένη συχνότητα και ρεύμα. Στα ολοκληρωμένα είναι πάνω από 70dB.

• **Output noise:** Ο θόρυβος στην έξοδο. Στο 7805 είναι 40μV.

### Προβλήματα.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στα τροφοδοτικά είναι η θερμότητα, η οποία εκλύεται από .....παντού.

Πρώτα - πρώτα από την ανόρθωση. Κάθε δίοδος προκαλεί μια πτώση τάσης  $V_D$  της τάξης του 0,6 - 1V. Αυτό σημαίνει ότι καταναλώνει μια ισχύ σε μορφή θερμότητας. Σε μικρά φορτία βέβαια είναι ασήμαντη, ας δούμε όμως τι ισχύει στα 10A με ανόρθωση γέφυρας. Σε κάθε ημiperίοδο υπάρχει μια κατανάλωση ισχύος  $P = V \times I = 2 \times V_D \times I = 2 \times 1V \times 10A = 20W!$ . Αυτό σημαίνει ότι η γέφυρα χρειάζεται ψύξη.

Στο σταθεροποιητή τα πράγματα είναι παρόμοια, αν και πολλοί τα παραβλέπουν, βασίζόμενοι στη μέγιστη δυνατότητα για ρεύμα του ολοκληρωμένου ή του εξωτερικού τρανζίστορ. Λένε για παράδειγμα ότι αφού το 7805 μπορεί να δώσει 1A και το φορτίο τραβάει 0,1A, αντέχει. Λάθος!

Η ισχύς που καταναλώνεται δεν εξαρτάται μόνο από το ρεύμα, εξαρτάται και από τη διαφορά τάσεων εισόδου εξόδου. Αν δηλαδή η τάση εισόδου είναι μικρή πχ 8V, τότε η κατανάλωση είναι:  $P = \Delta V \times 0,1 = (8-5)V \times 0,1A = 0,3W$ . Στην περίπτωση αυτή δεν χρειάζεται ψύξη. Αντίθετα αν η τάση εισόδου είναι μεγάλη πχ 30V τότε η καταναλισκόμενη ισχύς είναι:  $P = \Delta V \times I = (30-5)V \times 0,1A = 2,5W$ . Σε αυτή την περίπτωση η ψύξη είναι απαραίτητη.

Τι είναι όμως αυτό που θα κάνει τον σχεδιαστή να χρησιμοποιήσει ψύξη ή όχι, και πόση;

Υπάρχει ένα μέγεθος που λέγεται Thermal Resistance (TR) και εκφράζει το πόσο θα αυξηθεί η θερμοκρασία στο εξάρτημα, για κάθε Watt ισχύος που αυτό καταναλώνει.

Υπάρχει επίσης και η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του εξαρτήματος, που χωρίς να προβληματιστούμε με πίνακες και συνθήκες, ας δεχτούμε ότι είναι περίπου 100 βαθμοί.

Για παράδειγμα στο 7805 και συγκεκριμένα στο κέλυφος TO220 αναγράφεται TR 50. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία ανεβαίνει κατά 50°C, για κάθε Watt που καταναλώνεται από το εξάρτημα. Στην περίπτωση λοιπόν των 0,3W θα έχουμε μια αύξηση  $50 \times 0,3 = 15^\circ C$ , δηλαδή σε συνθήκες δωματίου η τελική θερμοκρασία θα είναι περίπου  $25 + 15 = 40^\circ C$ . Αυτή είναι μικρότερη από τους 100°C, που ορίσαμε ως μέγιστο, άρα το 7805 δε χρειάζεται ψύξη. Στην περίπτωση όμως των 2,5W οι αντίστοιχες πράξεις θα δώσουν αύξηση 125°C και τελική θερμοκρασία 150°C! Το συγκεκριμένο 7805 είναι παρελθόν. Τι μπορούμε να κάνουμε σε αυτή την περίπτωση; Να το τοποθετήσουμε σε μια ψύκτρα με ικανότητα TR 10 [ή 20], έτσι ώστε τα 2,5W να δώσουν άνοδο περίπου 25°C ή 50°C και το 7805 να λειτουργεί τελικά στους 50°C ή 75°C (<100).

Αν λοιπόν θέλετε να γλιτώσετε ή να περιορίσετε την ψύκτρα, χρησιμοποιήστε όσο το δυνατόν μικρότερη τάση εισόδου, χωρίς βέβαια να πέσετε κάτω από την ελάχιστη τάση εισόδου που δίνει ο κατασκευαστής (τάση εξόδου + drop out).

Τα ίδια σε γενικές γραμμές ισχύουν και για τα τρανζίστορ ισχύος που θα τοποθετηθούν εξωτερικά για αύξηση του ρεύματος. Όπως είναι γνωστό τα τρανζίστορ ισχύος υπάρχουν σε πολλά κελύφη. Από αυτά τη μεγαλύτερη ικανότητα για απομάκρυνση θερμότητας έχει το γνωστό TO3. Είναι όμως και το πιο δύσκολο στην τοποθέτηση, αφού απαιτεί 4 τρύπες στην ψύκτρα, μονωτικά κλπ. Μπορείτε λοιπόν να βρείτε κάποιο άλλο τρανζίστορ σε κέλυφος TO220 (γνωστό) ή σε SOT93 (στην ίδια μορφή με το 220, αλλά μεγαλύτερο), που θα σας εξυπηρετήσει περισσότερο στην τοποθέτηση, χωρίς σημαντική υποχώρηση στα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, αντί για 2N2955 (TO3 - 15A - 115W) μπορείτε να χρησιμοποιήσετε TIP2955 (SOT93 - 15A - 90W) ή BD744 (TO220 - 15A - 90W). 