

## Ασκήσεις και Εργαστήριο 10: Τελεστικοί Ενισχυτές

9 - 10 Μαΐου 2011 (βδομάδα 11)

**Διάβασμα:** Διαβάστε το κεφάλαιο 8, "Τελεστικοί Ενισχυτές", από το 2ο τόμο του βιβλίου, δίνοντας την παρακάτω έμφαση σε κάθε θέμα:

- Ιδανικοί Ενισχυτές - §8.1, σελ. 2-5: κατανόηση των απλών εννοιών που παρουσιάζονται.
- Ο Τελεστικός Ενισχυτής (Op-Amp), σελ. 5-7: εμπορικά κυκλώματα που προσεγγίζουν πολύ καλά το εξής απλό ιδανικό μοντέλο: μηδενικό ρεύμα εισόδου (δηλ. άπειρη αντίσταση εισόδου), και εξαιρετικά μεγάλο κέρδος τάσης (συντελεστής ενίσχυσης), που μεταφράζεται σε σχεδόν ίσες τάσεις των δύο εισόδων (αναστρέφουσα και μη αναστρέφουσα) οποτεδήποτε καταφέρνουμε (μέσω αρνητικής ανάδρασης --βλ. παρακάτω) η τάση εξόδου να είναι ανάμεσα (και όχι στις) δύο ακραίες της τιμές --τάση θετικής και τάση αρνητικής τροφοδοσίας.
- Ο αναστρέφων ενισχυτής, σελ. 7-14: πολύ βασικό, πρώτο παράδειγμα κυκλωμάτων κλειστού βρόχου με τελεστικό ενισχυτή, με χρήση αρνητικής ανάδρασης (feedback): πολύ καλή μελέτη (στην ανάλυση της σελίδας 8, χρησιμοποιήστε εξ αρχής την παραπάνω απλοποιητική παρατήρηση, ότι δηλαδή το πολύ μεγάλο κέρδος και η αρνητική ανάδραση φέρνουν την αναστρέφουσα είσοδο σε τάση σχεδόν ίση με την τάση της μη αναστρέφουσας εισόδου, δηλαδή 0 Volts).
- Στη συζήτηση περί ανάδρασης (feedback) (σελ. 11), στο μάθημα, προσθέσαμε το εξής που το βιβλίο παραλείπει. Εάν η τάση εξόδου του opAmp άλλαζε *απότομα* όποτε άλλαζε η (διαφορική) τάση εισόδου, τότε τα κυκλώματα με αρνητική ανάδραση που παρουσιάζει αυτό το κεφάλαιο θα ήταν απλώς ταλαντωτές. Όμως, επειδή η τάση εξόδου αλλάζει **ομαλά**, με πεπερασμένη παράγωγο (περιορισμένο slew rate - σελ. 69-71), και επειδή η "κάθεμά" από τις ενδιάμεσες τάσεις που αυτή παίρνει επιστρέφει τάχιστα στην (αναστρέφουσα) είσοδο μέσω της ανάδρασης, συγκρίνεται με την τάση της άλλης εισόδου, και καθορίζει "άμεσα" αν η έξοδος πρέπει να συνεχίσει να αλλάζει προς την ίδια κατεύθυνση προς την οποία άλλαζε, ή αντίθετα να σταματήσει να αλλάζει, γι' αυτό η έξοδος τελικά θα "βρεί" το νέο σημείο ισορροπίας της, εκεί που οι τάσεις των δύο εισόδων είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους, και θα σταθεροποιηθεί στην τάση αυτή, χωρίς ταλαντώσεις. Επίσης, παρατηρήσαμε ότι χρησιμοποιούμε πάντα **αρνητική** ανάδραση, αφού η θετική θα προκαλούσε λειτουργία τύπου flip-flop, δηλαδή η έξοδος θα πήγαινε και θα "κολλούσε" στη μία ή στην άλλη τάση τροφοδοσίας.
- Αθροιστής (σελ. 14-15): πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή, απλή στην κατανόησή της αλλά πολύ βασική ιδέα (η καρδιά των "audio mixers", ή των συστημάτων τηλεφωνικών τηλεδιασκέψεων).
- Ο μη αναστρέφων ενισχυτής (σελ. 15-16): απλή παραλλαγή του αναστρέφοντα ενισχυτή, εύκολη στην κατανόηση αλλά και πολύ βασική ιδέα.
- Ακόλουθος τάσης (σελ. 17): απλή εφαρμογή του μη αναστρέφοντα ενισχυτή.
- Εγκυκλοπαιδική, γρήγορη ανάγνωση του διαφορικού ενισχυτή και συναφών εφαρμογών - παραδειγμάτων, σελίδες 18-28. Το κύριο ενδιαφέρον είναι η ιδέα της απόρριψης θορύβου κοινού σήματος (common mode noise rejection), σελ. 21, μέσω της ανίχνευσης και ενίσχυσης του διαφορικού σήματος.
- Πρακτικές οδηγίες σχεδίασης κυκλωμάτων με τελεστικούς ενισχυτές, σελ. 29-33: διαβάστε τα προσεκτικά.

- Εγκυκλοπαιδική, γρήγορη ανάγνωση της §8.3 "Ενεργά Φίλτρα", σελ. 33-41: αρκεί να καταλάβετε τη βασική ιδέα, ότι δηλαδή οι δύο αντιστάσεις που ρυθμίζουν το κέρδος ενός ενισχυτή, δεν είναι ανάγκη να είναι πάντα και μόνο ωμικές αντιστάσεις, αλλά μπορούν να είναι και σύνθετες αντιστάσεις (εμπεδησεις), π.χ. συγκροτήματα αντίστασης-πυκνωτή (ή ακόμα και με πηνία), οπότε το κέρδος του ενισχυτή που προκύπτει αλλάζει με τη συχνότητα του ενισχυόμενου σήματος, οπότε προκύπτουν διάφορα ενδιαφέροντα φίλτρα συχνοτήτων (π.χ. όπως αυτά που ρυθμίζουν τα "μπάσα" και τα "πρίμα" στους οικιακούς στερεοφωνικούς ενισχυτές).
- Ολοκληρωτές, Διαφοριστές - §8.4, σελ. 42-47: προσεκτική κατανόηση της βασικής ιδέας.
- Εγκυκλοπαιδική, γρήγορη ανάγνωση περί Αναλογικών Υπολογιστών - §8.5, σελ. 48-56.
- Όρια και Περιορισμοί των Τελεστικών Ενισχυτών - §8.6, σελ. 56-80: γρήγορη μεν ανάγνωση, αλλά με κατανόηση των περιορισμών αυτών, που έχουν προφανώς πολύ μεγάλη σημασία στην πράξη.

**Ασκήσεις:** Λύστε και παραδώστε σε χαρτί την Τετάρτη 11 Μαΐου 2011 τις ασκήσεις 8.7, 8.8 (σελ. 84) και 8.24 (σελ. 88) του βιβλίου.

### Πείραμα 10.1: Μη Αναστρέφων Ενισχυτής

Στο εργαστήριο θα σας δοθεί ο τελεστικός ενισχυτής **LM358**, του οποίου τα φύλλα δεδομένων βρείτε στην ιστοσελίδα <http://www.national.com/ds/LM/LM158.pdf> - διαβάστε προσεκτικά ιδιαίτερα τη σελίδα 8, και προσέξτε ιδίως ότι: (α) πρέπει να είστε πολύ προσεκτικοί στη σωστή πολικότητα των τάσεων τροφοδοσίας: αναστροφή τους προκαλεί την άμεση καταστροφή (κάψιμο) του chip· (β) **καμία τάση εισόδου** δεν επιτρέπεται να είναι ποτέ αρνητική, κάτω από -0.3 Volt --γι' αυτό, (1) να προσέχετε πολύ το πλάτος και το DC offset της παλμογεννήτριας όταν την χρησιμοποιείτε σαν τάση εισόδου, και (2) να συνδέετε μιά δίοδο περιορισμού-συγκράτησης (clamp diode - σελ. 151-157 βιβλίου) από τη γείωση προς την έξοδο της παλμογεννήτριας (που άγει από τη γείωση προς την παλμογεννήτρια, δηλαδή όποτε η παλμογεννήτρια παίρνει αρνητικές τάσεις).

Κατασκευάστε στο εργαστήριο το κύκλωμα του σχήματος 8.8 (σελ. 15) του βιβλίου (μη αναστρέφων ενισχυτής): το ίδιο κύκλωμα φαίνεται και στο επάνω σχήμα της σελίδας 11 του παραπάνω φύλλου δεδομένων. Η πηγή σας να είναι η παλμογεννήτρια σε ρύθμιση ημιτονοειδούς σήματος, αλλά με **θετικό DC offset** ούτως ώστε η είσοδος ποτέ να μη γίνεται αρνητική· δεν χρειάζεται αντίσταση R εν σειρά με την πηγή, αλλά συνδέστε μιά δίοδο προστασίας από τη γή, όπως είπαμε παραπάνω. Φτιάξτε τις αντιστάσεις  $R_F$  και  $R_S$  μέσω του ποτενσιόμετρου 2.2 k $\Omega$  του εργαστηρίου 2.1: η μία άκρη του ποτενσιόμετρου θα είναι στην έξοδο, η άλλη στη γή, και η μεσαία λήψη στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού --έτσι το άθροισμα  $R_F + R_S$  θα είναι πάντα σταθερό και ίσο με 2.2 k $\Omega$ , ενώ η κάθε μιά από τις  $R_F$  και  $R_S$  θα μεταβάλλεται μεταξύ 0 και 2.2 k $\Omega$ . Συνδέστε το κανάλι 1 του παλμογράφου στην είσοδο σήματος του ενισχυτή σας (έξοδο της παλμογεννήτριας), και το κανάλι 2 στην έξοδο του ενισχυτή σας.

Ξεκινήστε με ένα ημιτονοειδές σήμα εισόδου με μικρό πλάτος, πάνω σε ένα DC-offset που του εξασφαλίζει πάντα θετικές τιμές. Παρατηρήστε την κυματομορφή εξόδου σε σχέση με την κυματομορφή εισόδου. Στρίψτε το ποτενσιόμετρο και δείτε πώς αλλάζει το κέρδος του ενισχυτή. Πάνω από ποιά τάση εξόδου ψαλιδίζει ο ενισχυτής σας; Αν αλλάξετε την τάση τροφοδοσίας πώς αλλάζει η τάση ψαλιδισμού; Αλλάξτε λίγο και προσεκτικά το DC-offset της πηγής, προσέχοντας η είσοδος να είναι πάντα θετική· τι παρατηρείτε για την έξοδο; Αλλάξτε λίγο και προσεκτικά το πλάτος της πηγής, προσέχοντας η είσοδος να είναι πάντα θετική· τι παρατηρείτε για την έξοδο; Αυξήστε τη συχνότητα της πηγής, και δείτε πώς επηρεάζεται το κέρδος του ενισχυτή. Αλλάζει

κάποτε το σχήμα της εξόδου από ημιτονοειδές σε τριγωνικό; Πότε; Εξετάστε αν αυτό σχετίζεται με το όριο του μέγιστου slew rate (μέγιστος ρυθμός αλλαγής τάσης εξόδου) του τελεστικού, και δείτε αν το όριο που μετράτε συμβαδίζει με ότι δείχνει το σχήμα πάνω αριστερά στη σελ. 7 του φύλλου δεδομένων. Εξηγήστε όλα όσα βλέπετε και μετράτε στο βοηθό του εργαστηρίου.

## Πείραμα 10.2: Ολοκληρωτής

Κατασκευάστε στο εργαστήριο το κύκλωμα δεξιά, που είναι μία παραλλαγή του κυκλώματος ολοκληρωτή του σχήματος 8.30 (σελ. 42) του βιβλίου. Ενώ το βιβλίο υποθέτει συμμετρική θετική-αρνητική τροφοδοσία του τελεστικού, και γι' αυτό έχει τη θετική είσοδο του τελεστικού γειωμένη (δηλαδή στη μέση

τάση της τροφοδοσίας), ο δικός μας τελεστικός τροφοδοτείται μεταξύ γής και θετικής τάσης· γι' αυτό το λόγο, πολώνουμε τη θετική είσοδο του τελεστικού με ένα διαιρέτη τάσης, πάλι στη μέση τάση της περιοχής τροφοδοσίας. Σε κανονική λειτουργία (δηλαδή όσο η  $V_{out}$  δεν φτάνει στα όρια των δύο τάσεων τροφοδοσίας --γή και θετική), η αρνητική είσοδος του τελεστικού θα κρατιέται κι αυτή στη μέση τάση της περιοχής τροφοδοσίας. Πατώντας το διακόπτη S1, δίνουμε φορτία στον πυκνωτή C, κάνοντας την αριστερή του πλάκα θετικότερη από τη δεξιά· αφού ο αριστερός του κόμβος κρατιέται στη σταθερή μέση τάση, λόγω τελεστικού και ανάδρασης, ο δεξιός του κόμβος,  $V_{out}$ , θα πέφτει σε χαμηλότερες τάσεις. Αντίθετα, πατώντας το διακόπτη S2, απορροφάμε φορτία από τον πυκνωτή C, άρα κάνουμε το δεξί του κόμβο,  $V_{out}$ , να ανεβαίνει σε ψηλότερες τάσεις. Ο πυκνωτής C μπορεί να έχει πότε θετικές και πότε αρνητικές τάσεις, άρα πρέπει να μην είναι ηλεκτρολυτικός· τον θέλουμε μεγάλο, γι'α να να είναι αργό το φαινόμενο: θα προσπαθήσουμε να είναι  $C = 10 \mu\text{F}$ , και οι αντιστάσεις φόρτισης-εκφόρτισης να είναι επίσης μεγάλες --κάμποσα  $\text{M}\Omega$ .

Επαληθεύστε τα παραπάνω στο εργαστήριο: μετρήστε την  $V_{out}$  με το βολτόμετρο (πολύμετρο). Χρησιμοποιώντας και ένα χρονόμετρο, μετρήστε το ρυθμό ανόδου της  $V_{out}$  όταν πατιέται ο S2, και μετρήστε το ρυθμό καθόδου της  $V_{out}$  όταν πατιέται ο S1. Ελέξτε πώς αυτοί σχετίζονται με τις αντιστάσεις, τον C, και την τάση τροφοδοσίας. Λάβετε υπ' όψη σας ότι, με τόσο μεγάλες αντιστάσεις, δηλαδή με τόσο μικρά ρεύματα φόρτισης-εκφόρτισης, το ρεύμα πόλωσης της εισόδου παύει να είναι αμελητέο· κατά το φύλλο δεδομένων, αυτό μπορεί να είναι μέχρι  $500 \text{ nA}$  (αν και η τυπική του τιμή είναι πολύ μικρότερη). Μετρήστε αυτό το ρεύμα εισόδου, από το ρυθμό καθόδου της  $V_{out}$  όταν κανείς διακόπτης δεν πατιέται (το ρεύμα πόλωσης *εξέρχεται* από τον ακροδέκτη του τελεστικού). Το ρεύμα πόλωσης υπάρχει και όταν πατιέται ο S1 ή ο S2, άρα πρέπει να το λάβετε υπ' όψη σας στους παραπάνω υπολογισμούς. Όταν πατήστε και τον S1 και τον S2 ταυτόχρονα, τι γίνεται; Παρατηρήστε ότι το κύκλωμά σας τότε αποτελεί σύνθεση του **αθροιστή** (σχ. 8.7, σελ. 14) και του **ολοκληρωτή** (σχ. 8.30, σελ. 42).

