



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Βασική Θεωρία και παραδείγματα

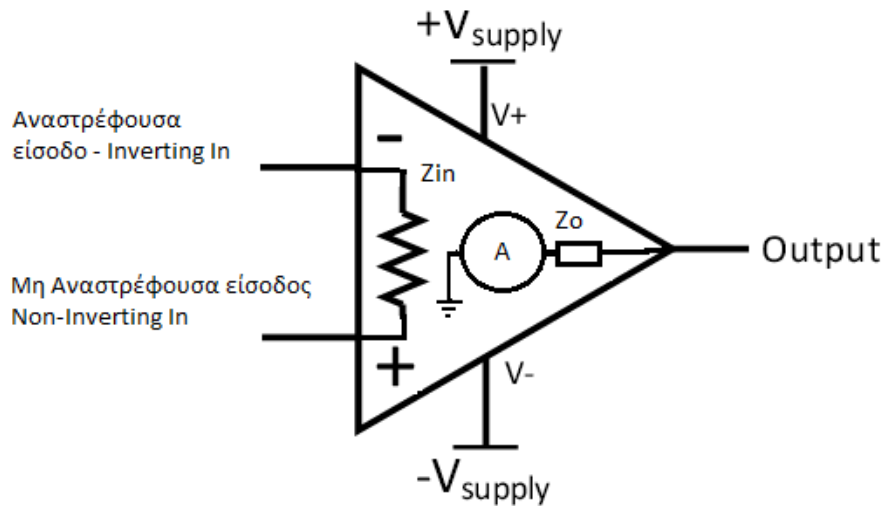
1. ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

Ο τελεστικός ενισχυτής βασίζεται στο διαφορικό ενισχυτή και η λέξη τελεστικός έχει ρίζα από την λέξη τελώ - εκτελώ πράξεις. Όλες οι γνωστές μαθηματικές πράξεις μπορούν να εκτελεστούν με το τελεστικό ενισχυτή για αυτό αποτελεί τον θεμέλιο λίθο του αναλογικού υπολογιστή.

Ο τελεστικός ενισχυτής έχει δυο εισόδους την αναστρέφουσα είσοδο (inverting input) και την μη αναστρέφουσα είσοδο (non-inverting input) ανάλογα αν έχουμε αναστροφή ή συμφασικά σήματα στην έξοδο αντίστοιχά. Μια έξοδο και δυο ακίδες για την τροφοδοσία του ολοκληρωμένου +/-15V DC, επιπλέον ακίδες για αντιστάθμιση (Null Offset). Μεταξύ των δυο εισόδων το ρεύμα που πρακτικά μπορεί να κυκλοφορήσει είναι μηδέν ή εξαιρετικά μικρό και επομένως η εσωτερική αντίσταση της διαφορικής εισόδου είναι εξαιρετικά μεγάλη (Z_{IN} , Input Impedance). Αν μια από τις εισόδους π.χ. η μη αναστρέφουσα είσοδο N-INV γειωθεί τότε η άλλη είσοδος αποκτά το δυναμικό της γείωσης χωρίς να είναι άμεσα συνδεδεμένη. Στην περίπτωση αυτή η αναστρέφουσα είσοδο γίνεται ένα σημείο συμβατικής γείωσης (Virtual Ground) του ενισχυτή. Γενικά πάντοτε η τάση της μιας εισόδου ακολουθεί και είναι ίση με την τάση της άλλης εισόδου, δηλαδή $V_- = V_+$. Η αντίσταση εξόδου θέλουμε να έχει χαμηλή τιμή και επιτυγχάνεται με ανάλογα εσωτερικά transistors. Ένας αριθμός που χαρακτηρίζει τον τελεστικό ενισχυτή και αποτελεί μέτρο για την αξία του είναι ο Λόγος Απορρίψεως Κοινού Σήματος (CMRR Common Mode Rejection Ratio) και δίδεται από την σχέση:

$$CMRR = \frac{A_D}{A_C}$$

Είναι ο λόγος της διαφορικής απολαβής τάσης προς την απολαβή για σήματα κοινής φοράς.



Σχήμα 1: Ισοδύναμο τελεστικού ενισχυτή.

Σύμφωνα με το σχήμα 1 όπου:

Z_{IN} εσωτερική αντίσταση της διαφορικής εισόδου

Z_o αντίσταση εξόδου του ενισχυτή

A απολαβή τάσεως στην γραμμική περιοχή λειτουργίας του τελεστικού ενισχυτή

Από το ιδανικό τελεστικό ενισχυτή ζητούνται οι ακόλουθες θεωρητικές επιδόσεις:

1. Απολαβή τάσεως διαφορικής εισόδου να είναι άπειρη $A=\infty$
2. Αντίσταση εισόδου Z_{IN} άπειρη, $Z_{IN}=\infty$
3. Αντίσταση εξόδου Z_o μηδενική, $Z_o=0$
4. Λόγος Απορρίψεως Κοινού Σήματος άπειρος, $CMRR=\infty$

Παράμετρος	Ιδανικός Τ.Ε.	Τυπικοί Τ.Ε.	LM741
Απολαβή A	∞	$10^5 - 10^9$	200.000
Αντίσταση Εισόδου	∞	10^6 B.J.T. ¹ $10^9 - 10^{12}$ F.E.T.	2MΩ
Αντίσταση Εξόδου	0	10...1000Ω	75Ω
Λόγος Απορρίψεως Κοινού Σήματος CMRR	∞	130db	95db

¹ BJT, LM741 2 10^6 Ω, FET TL081 10^{12} Ω

Ο πιο διαδεδομένος τελεστικός ενισχυτής που αποτελεί αναφορά σε διεθνή επίπεδο είναι ο LM741, εφευρέθηκε το 1968 και κυκλοφορεί συνεχώς στην αγορά. Στο σχήμα 2 έχουμε την διάταξη ακροδεκτών του.



Σχήμα 2. Διάταξη ακροδεκτών τελεστικού ενισχυτή LM741.

Παράδειγμα

Σε ένα τελεστικό ενισχυτή έχουμε στην αναστρέφουσα είσοδο $V_1=1,0\text{VDC}=0,05\text{VAC}$ και στην μη-αναστρέφουσα είσοδο $V_2=1.0\text{VDC}$ στην έξοδο μετρήσαμε την εξής τάση $V_o=0,01\text{VDC}+22\text{VAC}$ να υπολογισθεί ο λόγος απόρριψης κοινού θορύβου $\text{CMRR}=A_D/A_C$

Όπου A_D διαφορικό κέρδος $A_D = 0,01/1,00=10^{-2}$

A_C κοινό κέρδος $A_C=22/0,05=440$

$\text{CMRR} = 440/10^{-2}=44000$ έκφραση σε db $\text{CMRR}=20\log 44000= 92,8\text{db}$

2. Συνδεσμολογία Αναστρέφων ενισχυτή

Στο κύκλωμα μεταξύ της εξόδου και της αναστρέφουσας εισόδου έχουμε την αντίσταση ανάδρασης που επιστρέφει σήμα της εξόδου προς την είσοδο με διαφορά φάσης 180° δηλ. με αρνητική ανάδραση. Εάν εφαρμόσουμε +dc στην έξοδο έχουμε -dc ενώ στα εναλλασσόμενα σήματα έχουμε διαφορά φάσης 180° . Για την μελέτη του αναστρέφων ενισχυτή έχουμε:

$$V_{in-} = V_{in+}, i_s=0 \text{ διότι } Z_{in}=\infty$$

Όπου: V_{in-} , V_{in+} οι τάσεις στην αναστρέφουσα και μη αναστρέφουσα εισόδου αντίστοιχα

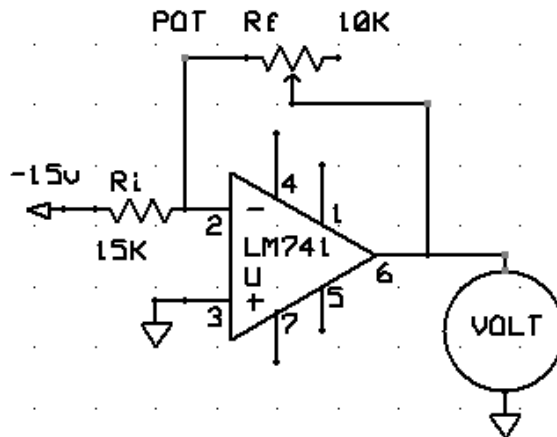
Και i_s ρεύμα μεταξύ των δυο εισόδων.

Από το κύκλωμα προκύπτουν οι σχέσεις: $i_i=i_s+i_f$ άρα $i_i=i_f$ και $V_s=V_{in+}=0$

$$i_i = \frac{V_{in} - V_s}{R_1} \cong \frac{V_{in}}{R_1}$$

$$i_f = \frac{V_s - V_{out}}{R_f} = -\frac{V_{out}}{R_f}$$

Και επομένως $\frac{V_{in}}{R_i} = -\frac{V_{out}}{R_f}$ και $V_{out} = -\frac{R_f}{R_i}V_{in}$



Σχήμα 3. Κύκλωμα αναστρέφων ενισχυτή.

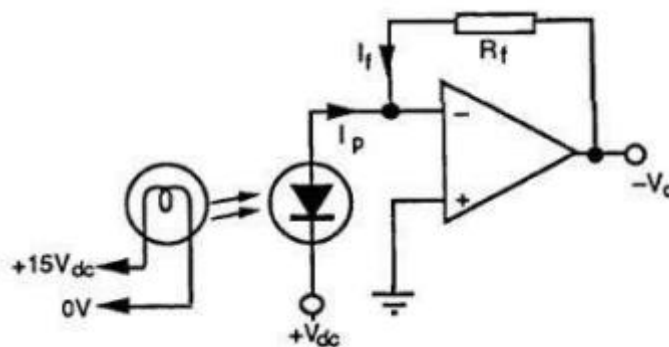
Παράδειγμα

Στο κύκλωμα του σχήματος 3 εφαρμόζουμε τάση εισόδου -15V και μετρήσαμε την τάση εξόδου 2,683Volt να υπολογισθεί η αντίσταση του ποτενσιόμετρου ανάδρασης R_f .

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_i}V_{in}, R_f = (2,683V/15V)15K = 2,683K\Omega$$

Παράδειγμα

Στο παρακάτω κύκλωμα αναστρέφων ενισχυτή έχουμε συνδέσει μια φωτοδίοδο όταν αυτή διαρρέεται από 1μΑ και η αντίσταση ανάδρασης είναι 1MΩ υπολογίστε την τάση εξόδου.



Σχήμα4. Αναστρέφων ενισχυτής με φωτοδίοδο.

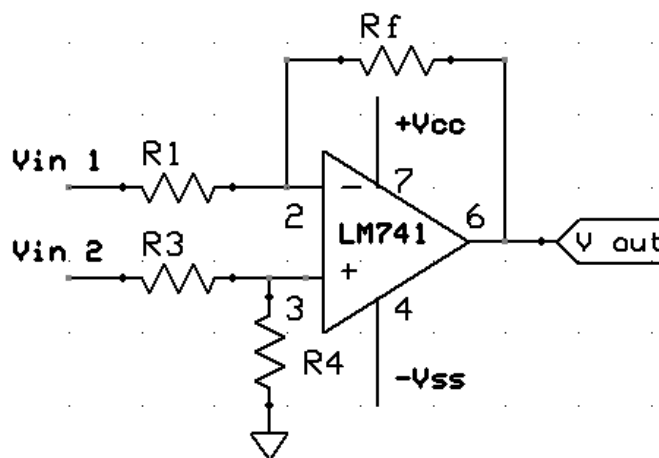
Με βάση την θεωρία του τελεστικού ενισχυτή το ρεύμα που διαρρέει την φωτοδίοδο ισούται με το ρεύμα πάνω στην αντίσταση ανάδρασης $V_o = i \cdot R = -1V$.

3. Διαφορικός ενισχυτής

Ο διαφορικός ενισχυτής μας δίνει την αφαίρεση των σημάτων μεταξύ των δυο εισόδων. Η συνδεσμολογία είναι εξαιρετικά διαδεδομένη στον χώρο των μετρήσεων, σε συνεργασία με μια γέφυρα Wheatstone δέχεται την τάση της βρίσκει την διαφορά αλλά και πολλαπλασιασμό αυτής (ενίσχυση). Με αυτό τον τρόπο με αισθητήρια που παράγουν πολύ χαμηλή έξοδο τάξεως mV ή μV μπορούμε να τα μετράμε με κοινά πολύμετρα. Για το υπολογισμό της τάσης εξόδου του ενισχυτή ισχύ όταν :

$R_1=R_3$, $R_f=R_4$, (Συμμετρικός διαφορικός ενισχυτής)

Τότε η τάση εξόδου είναι ίση με: $V_{out} = -\frac{R_f}{R_1}(V_{in1} - V_{in2})$

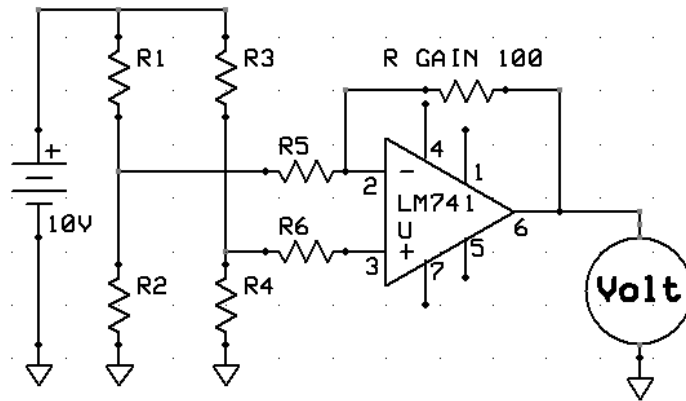


Σχήμα 5: Διαφορικός ενισχυτής.

Η τάση εξόδου είναι ανάλογη της διαφοράς τάσεως της διαφορικής εισόδου άρα πρέπει να έχει μηδενική απολαβή κοινού σήματος ή $CMRR = \infty$. Για το λόγο αυτό επιλέγουμε τελεστικούς ενισχυτές με υψηλότερο Λόγω Απορρίψεως Κοινού Σήματος, όπως για παράδειγμα OP-07 με $CMRR = 106\text{db min}$.

Παράδειγμα

Υπολογίστε την τάση του βολτομέτρου στο παρακάτω κύκλωμα όταν $R_{1,2,3} = 1\text{K}$, $R_4 = 1,02\text{K}$, $R_{5,6} = 100\text{K}$ και απολαβή 100. Επίσης σε ποια συνδεσμολογία είναι οι αντιστάσεις $R_{1,2,3,4}$ και ποια η συνδεσμολογία του τελεστικού ενισχυτή.

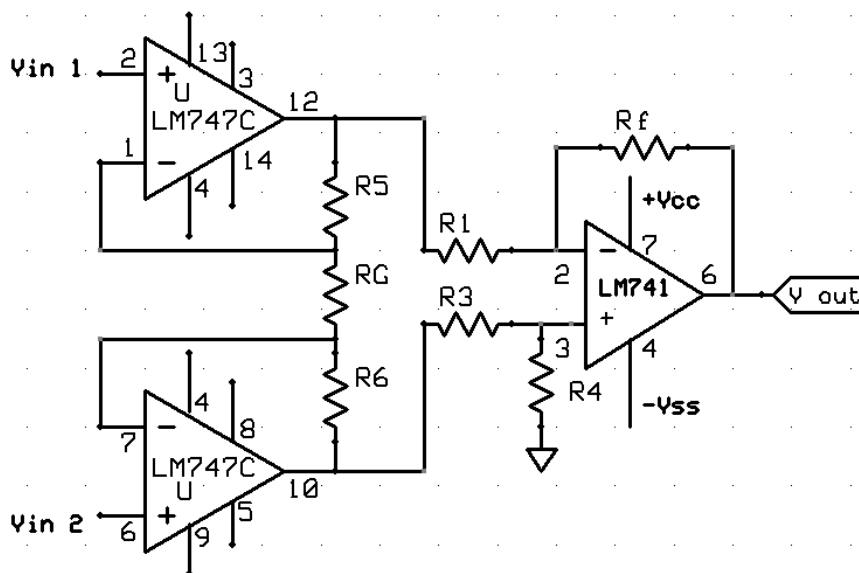


Σχήμα 6. Διαφορικός ενισχυτής με είσοδο γέφυρα Wheatstone.

Αρχικά υπολογίζουμε την τάση που παράγει η γέφυρα Wheatstone που αποτελείτε από τις αντιστάσεις R1,2,3,4 $V_A=5V$, $V_B=5,0495V$ και η διαφορά τους που ενισχύει ο τελεστικός είναι $0,0495V$ και επί την ενίσχυση $100 = 4,95V$.

4. Οργανικός ενισχυτής

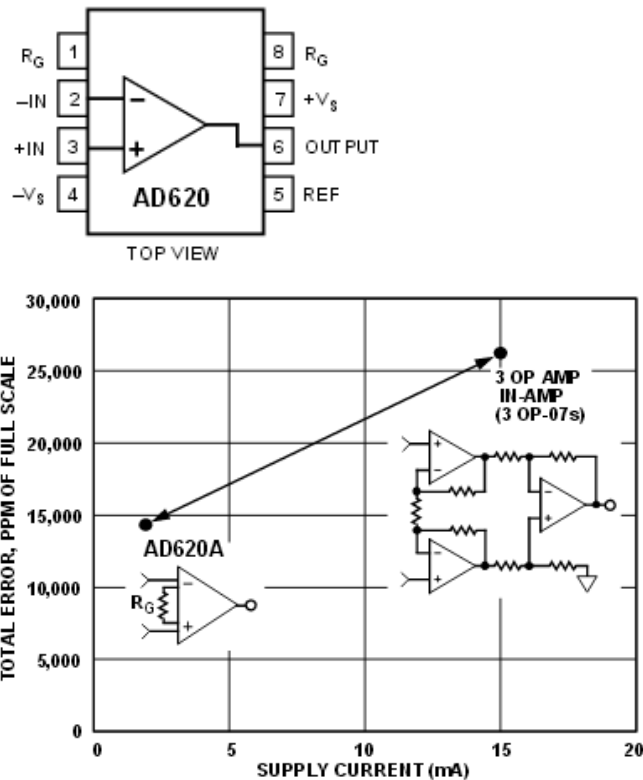
Μια βελτιωμένη έκδοση του διαφορικού ενισχυτή είναι ο οργανικός ενισχυτής. Οι δυο πρώτοι τελεστικοί λειτουργούν ως ακολουθητές τάσεως με πολύ υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου. Και διαβιβάζουν τα σήματα αυτά στο διαφορικό ενισχυτή όπως περιγράψαμε πιο πάνω.



Σχήμα 7: Οργανικός ενισχυτής βασισμένος σε τρεις τελεστικούς ενισχυτές.

Με την χρήση τριών τελεστικών ενισχυτών βελτιώνονται οι επιδόσεις του διαφορικού ενισχυτή, αυξάνετε η πολυπλοκότητα και το σφάλμα που εισάγουν οι τελεστικοί. Οι κατασκευαστές τελεστικών ενισχυτών παρέχουν στην αγορά

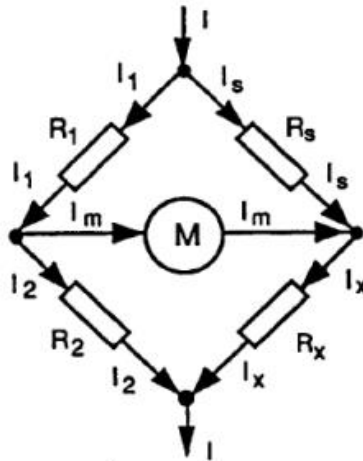
ολοκληρωμένα που συνδυάζουν όλα τα κυκλώματα με χαμηλότερη κατανάλωση, μικρότερο σφάλμα, όπως το AD620 Analog Devices.



Σχήμα 8: Οργανικός ενισχυτής AD620, σύγκριση με τρεις τελεστικούς OP-07.

5. ΓΕΦΥΡΑ WHEATSTONE

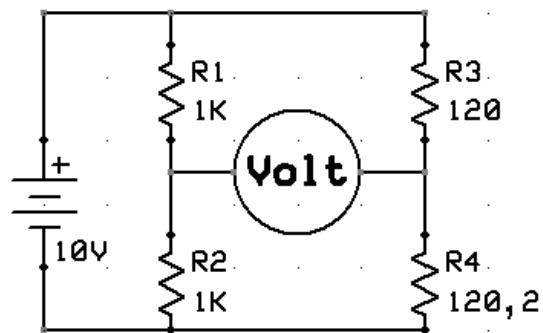
Για την ακριβή μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιείται ευρέως η **Γέφυρα Wheatstone**. Υπάρχουν δύο γνωστές αντιστάσεις, ένας μεταβλητός αντιστάτης και ένας άγνωστος αντιστάτης συνδεδεμένος σε μορφή γέφυρας όπως φαίνεται παρακάτω. Ρυθμίζοντας τη μεταβλητή αντίσταση, το ρεύμα μέσω του γαλβανόμετρου καθίσταται μηδενικό. Όταν το ρεύμα μέσω του γαλβανόμετρου καθίσταται μηδενικό, η αναλογία δύο γνωστών αντιστάσεων είναι ακριβώς ίση με την αναλογία ρυθμισμένης τιμής μεταβλητής αντίστασης και της τιμής άγνωστης αντίστασης. Αυτό ονομάζεται **κατάσταση ισορροπίας** της γέφυρας. Με αυτό τον τρόπο η τιμή της άγνωστης ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί εύκολα να μετρηθεί χρησιμοποιώντας μια γέφυρα Wheatstone.



Σχήμα 9. Γέφυρα Wheatstone.

Παράδειγμα

Υπολογίστε την τάση του ιδανικού βολτομέτρου στο παρακάτω κύκλωμα - γέφυρα Wheatstone.



Σχήμα 10. Γέφυρα Wheatstone.

ΛΥΣΗ

$$V = V_a - V_b$$

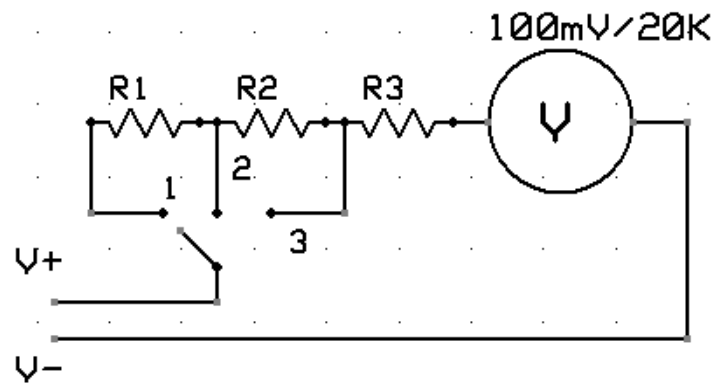
$$V_a = (R_2 \cdot 10V / (R_1 + R_2)) = 5V$$

$$V_b = (R_4 \cdot 10V / (R_4 + R_3)) \cdot 10V = 5,0041V$$

$$V = 5,00 - 5,0041 = -0.0041V$$

Επέκταση περιοχής μέτρησης αναλογικού βολτομέτρου

Ένα αναλογικό βολτόμετρο κινητού πηνίου μετράει 0-100mV με εσωτερική αντίσταση 20KΩ υπολογίστε τις αντιστάσεις R1,2,3 ώστε στην θέση 1 να μετράει 5V στην θέση 2:2V και στην θέση 3 : 1V



Σχήμα 11. Επέκταση περιοχής μέτρησης αναλογικού βολτομέτρου.

$$I = V/R = 100\text{mV}/20\text{k} = 0.005\text{mA}$$

$$R_3 = (1\text{V}/0.005) - 20\text{k} = 180\text{K}\Omega$$

$$R_2 = (2\text{V}/0.005) - 180 + 20 = 200\text{K}\Omega$$

$$R_1 = (5\text{V}/0.005) - 200 + 180 + 20 = 600\text{K}\Omega$$