

**ΤΕΙ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ**

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ – ΕΠΟΠΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ – ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

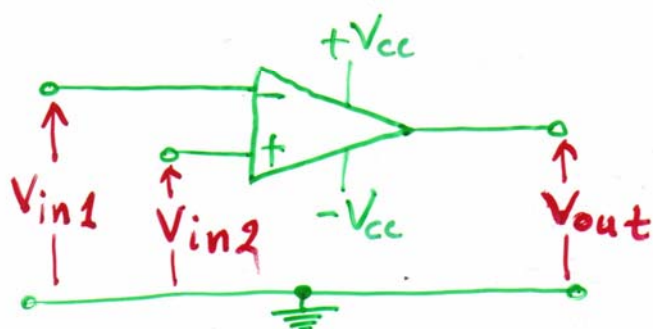
Χ. ΤΣΩΝΟΣ

ΛΑΜΙΑ 2013

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

Τελεστικός Ενισχυτής (TE) είναι ένας ειδικός τύπος ενισχυτή, που αυξάνει ένα σήμα τάσης ή ρεύματος χωρίς να αλλάζει τα βασικά χαρακτηριστικά του.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα που αποτελεί τον TE είναι κατασκευασμένο από ενεργητικά και παθητικά στοιχεία (τρανζίστορ, αντιστάσεις) και έχει τροφοδοσία ισχύος ξεχωριστή από το σήμα πάνω στο οποίο επενεργεί.



Σχηματική συμβολική παράσταση TE (συγκριτής)

V_{in1} : αντιστρέφουσα είσοδος
 V_{in2} : μη αντιστρέφουσα είσοδος
 A_o : απολαβή
 $+V_{cc}$ → τροφοδοσία TE
 $-V_{cc}$

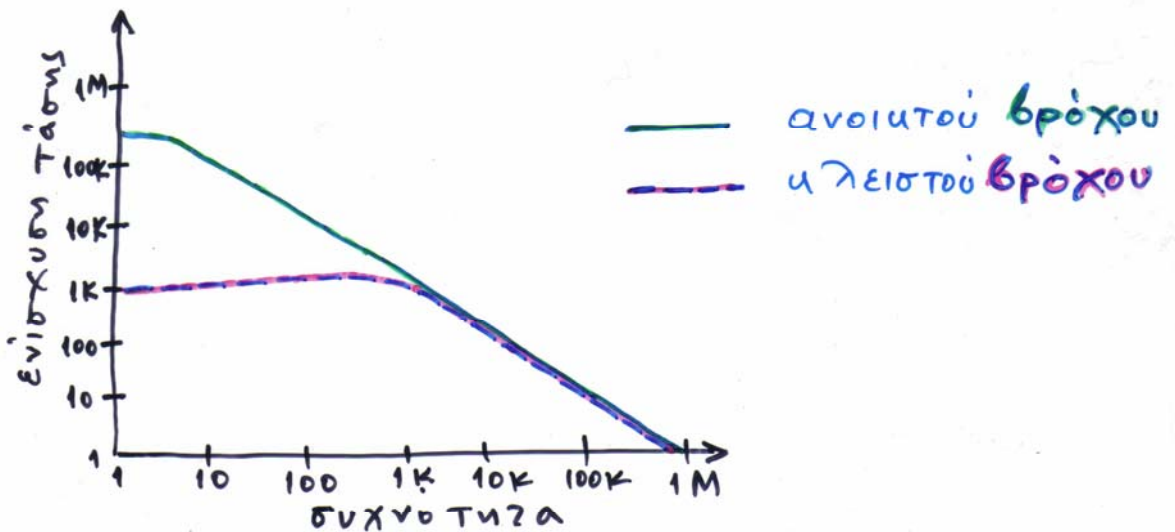
Γενική εξίσωση για την τάση εξόδου

$$V_{out} = A_o(V_{in2} - V_{in1})$$

Ιδανικός TE	Z εισόδου : άπειρη Z εξόδου : μηδενική
Πραγματικός TE	Z εισόδου ~ 1 MΩ Z εξόδου ~ 100 Ω

Τελεστικός ενισχυτής (Operation amplifier)

- εξαρτημένη πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση ή ρεύμα
- η αντίσταση εισόδου είναι αυτή που εμφανίζεται ανάμεσα στις δύο εισόδους
- υφέσιμος $V_{o,max} = V_{cc}$
- το μοντέλο του ιδανικού ΤΕ περιγράφει με ικανοποιητική ακρίβεια τον πραγματικό ΤΕ στις χαμηλές συχνότητες
- ο ΤΕ είναι από κατασκευής ένα ασταθές κυκλωματικό στοιχείο (πεπερασμένη είσοδος \rightarrow πολύ μεγάλη έξοδος)
- για να καταστεί ο ΤΕ ευσταθής εφαρμόζεται η τεχνική της ανάδρασης (feedback)
- η ανάδραση διακρίνεται σε θετική και αρνητική (πιο συνηθισμένη)
- κέρδος ανοικτού βρόχου: απολαβή του ΤΕ χωρίς ανάδραση
- κέρδος κλειστού βρόχου: απολαβή του ΤΕ με ανάδραση



- Στις χαμηλές συχνότητες η ενίσχυση είναι πολύ υψηλή (200000 για ΗΑ741)

Συχνότητα αποκοπής: είναι η συχνότητα όπου η ενίσχυση τάσης έχει μειωθεί στο 0,707 της τιμής που είχε στις χαμηλές συχνότητες

Συχνότητα μοναδιαίας ενίσχυσης: είναι η συχνότητα όπου η ενίσχυση είναι μονάδα
π.χ.

αν η ενίσχυση είναι 10000 σε συχνότητα 250 Hz, τότε η συχνότητα μοναδιαίας ενίσχυσης είναι $10000 \times 250 = 2,5 \text{ MHz}$

Ρυθμός μεταβολής εφόδου: SR
(slew rate)

αν $v_o = V_m \sin \omega t$ η τάση εισόδου σε έναν ΤΕ, τότε ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής είναι:

$$\left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} = \omega \cdot V_m$$

για να μην υπάρχει παραμόρφωση του σήματος θα πρέπει:

$$\omega \cdot V_m \leq SR \Rightarrow \boxed{V_m \leq \frac{SR}{\omega}}$$

τυπικές τιμές SR: $0,1 \text{ V}/\mu\text{s} \leq SR \leq 10 \text{ V}/\mu\text{s}$

- Επίσης είναι: $\boxed{SR = \frac{I}{C}}$

όπου I είναι το μέγιστο ρεύμα με το οποίο ο ΤΕ μπορεί να εφοδιάσει τον εσωτερικό του πυκνωτή χωρητικότητας C .

Ο πυκνωτής C δεν επιτρέπει στον ΤΕ ζαλαντώσεις στις υψηλές συχνότητες,

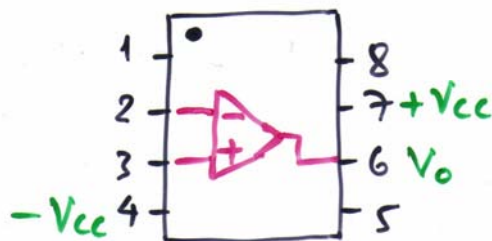
$I = 15 \mu\text{A}$, $C = 30 \text{ pF} \Rightarrow SR = 0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$
για τον $\mu\text{A}741$

Εύρος Ζώνης πλήρους ισχύος: f_m
(full power bandwidth)

είναι η μέγιστη συχνότητα, f_m , που μπορεί να αναπτυχθεί ένα πλήρους πλάτους σήμα. Αν αυτό είναι V_m τότε επειδή: $\omega \cdot V_m \leq SR$ θα είναι

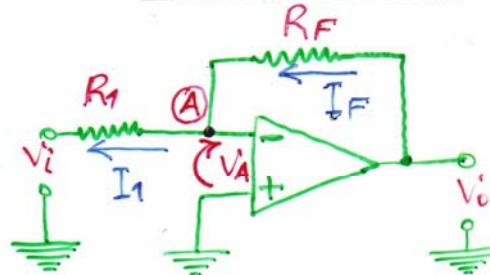
$$f_m \leq \frac{SR}{2\pi V_m}$$

Εφαρμογή: Αν ένας ΤΕ έχει $SR = 1V/\mu s$ ποιο είναι το μέγιστο πλάτος υψιτονοειδούς σήματος που μπορεί να αναπτυχθεί χωρίς παραμόρφωση σε συχνότητα $40kHz$. Αν αυτός ο ΤΕ πρέπει να αποδίδει σήμα με $V_{max} = 10V$, ποιο είναι το εύρος Ζώνης πλήρους ισχύος.



ΤΕ σε ολοκληρωμένη μορφή

ενισχυτής αναστροφής



ο ΤΕ θεωρείται ιδανικός $\Rightarrow A_o = \infty, I_i = 0$

επειδή $A_o = \infty$ και η V_o είναι πεπερασμένη, η διαφορική τάση $V_A = 0$ και ο κόμβος A ονομάζεται *συμβατική γη*

Στον κόμβο A θα είναι :

$$I_1 = I_F \Rightarrow V_i / R_1 = -V_o / R_F$$

Άρα η απολαβή τάσης θα είναι :

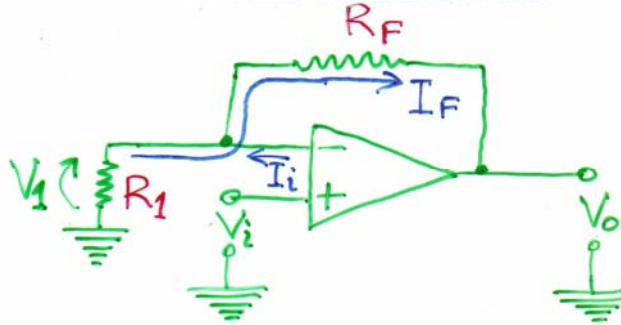
$$A = -R_F / R_1$$

Σημείωση . Επειδή ο κόμβος A βρίσκεται σε δυναμικό γης η αντίσταση εισόδου θα είναι $R_i = R_1$

Εφαρμογή 1. Να σχεδιαστεί ένας ΤΕ αναστροφής που να έχει απολαβή τάσης -50 και αντίσταση εισόδου $100 \text{ K}\Omega$.

Εφαρμογή 2. Αν η αντίσταση εισόδου ενός ΤΕ αναστροφής είναι $5 \text{ K}\Omega$, η αντίσταση ανάδρασης (R_F) $100 \text{ K}\Omega$ και τάση εισόδου 50 mV , να υπολογιστεί η τάση εξόδου.

ενισχυτής μη αναστροφής



Επειδή το ρεύμα $I_i \approx 0$ τα ρεύματα μέσα από τις αντιστάσεις R_1 και R_F είναι ίσα. Έτσι θα είναι

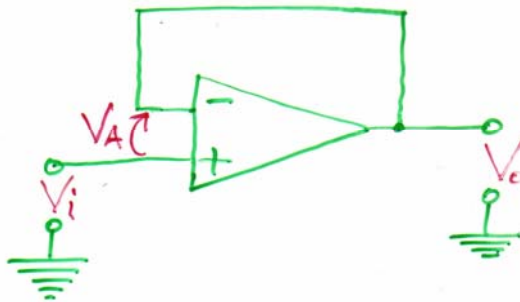
$$(V_o - V_i) / R_F = V_i / R_1$$

και επειδή (κατά την έννοια της συμβατικής γης) $V_i = V_i$ η απολαβή τάσης προκύπτει

$$A = 1 + R_F / R_1$$

Εφαρμογή 3. Να σχεδιαστεί ένας ΤΕ μη αναστροφής που δίνει τάση εξόδου 1V για τάση εισόδου 10 mV.

ακόλουθος τάσης



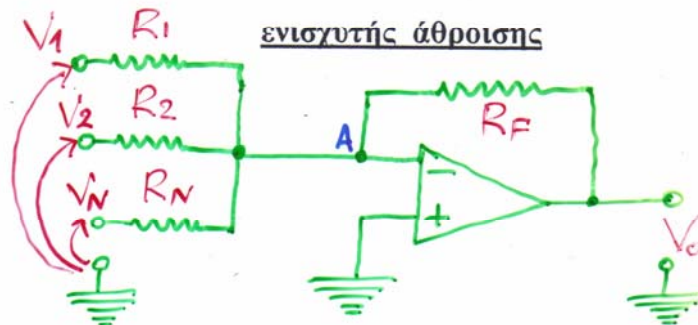
Ο ακόλουθος τάσης έχει απολαβή ίση με 1, μικρή αντίσταση εξόδου και μεγάλη αντίσταση εισόδου.

Είναι $V_i + V_A = V_o$ και επειδή $V_A = 0$ θα είναι

$$V_i = V_o$$

άρα $A = 1$

Ο ακόλουθος τάσης χρησιμοποιείται και ως ενδιάμεση μονάδα (buffer) για την ζεύξη φορτίου μικρής σύνθετης αντίστασης και πηγής με μεγάλη σύνθετη αντίσταση.



Ο ενισχυτής άθροισης δίνει τάση εξόδου που είναι ανάλογη με το άθροισμα τάσεων εισόδου. Πρόκειται για ένα ΤΕ αναστροφής με πολλαπλές εισόδους που συνδέονται μέσω αντιστάσεων εισόδου στον κόμβο αθροίσματος Α.

Η τάση εξόδου θα είναι (θεωρ. υπέρθεσης)

$$V_o = -(R_F / R_1)V_1 - (R_F / R_2)V_2 - \dots - (R_F / R_N)V_N$$

Αν είναι $R_1 = R_2 = \dots = R_N \equiv R$ τότε

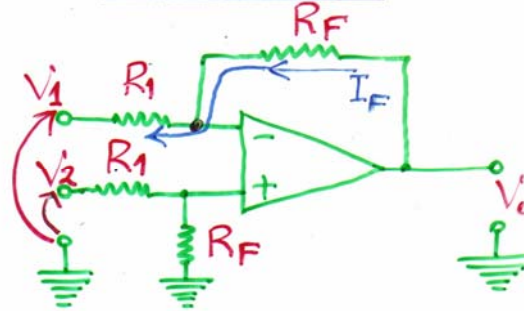
$$V_o = -(V_1 + V_2 + \dots + V_N) \cdot R_F / R$$

και αν $R = R_F$ τότε : $V_o = -(V_1 + V_2 + \dots + V_N)$

Εφαρμογή 4. Ενισχυτής άθροισης με δύο εισόδους αντιστάσεων 10 ΚΩ η καθεμία και αντίστασης ανάδρασης $R_F = 10$ ΚΩ, δέχεται σήματα εισόδου 40 mV και -55 mV. Να υπολογιστεί η τάση εξόδου.

Εφαρμογή 5. Να σχεδιαστεί ενισχυτής αθροίσματος που να δίνει έξοδο που είναι ανάλογη με το άθροισμα των τριών τάσεων εισόδου. Οι τάσεις εισόδου είναι $V_1 = 10$ V, $V_2 = 100$ V, $V_3 = 200$ V. Ο ενισχυτής έρχεται σε κορεσμό στα 10 V.

ενισχυτής διαφοράς

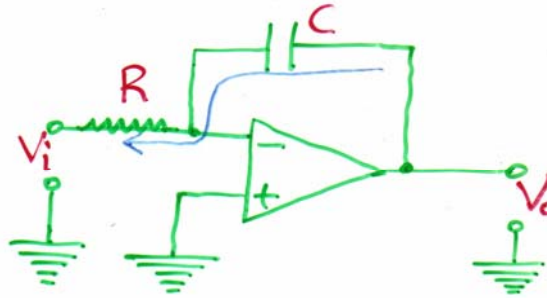


Ο ενισχυτής διαφοράς δίνει τάση εξόδου που είναι ανάλογη με την διαφορά των σημάτων αναστροφής και μη αναστροφής. Εφαρμόζοντας το θεωρ. υπέρθεσης εξάγεται ότι

$$V_o = V_{o1} + V_{o2} = (V_2 - V_1) \cdot R_F / R_1$$

Εφαρμογή 6. Στο παραπάνω κύκλωμα αν οι τάσεις εισόδου είναι $V_1=200 \text{ mV}$, $V_2=800 \text{ mV}$ ναδειχθεί ότι η τάση εξόδου είναι ίση με την διαφορά τους.

ενισχυτής ολοκλήρωσης



Ο ενισχυτής ολοκλήρωσης έχει την ικανότητα να εκτελεί την μαθηματική πράξη της ολοκλήρωσης, να αθροίζει δηλαδή τις τιμές της τάσης εισόδου για ένα χρονικό διάστημα t .

Η μαθηματική σχέση που ορίζει την λειτουργία του κυκλώματος είναι

$$V_o = - (1/RC) \cdot \int V_i dt$$

η οποία μπορεί να γραφεί

$$\Delta V_o = - V_i \Delta t / RC$$

και αν τεθεί σταθερή τάση εισόδου V_i τότε

$$V_o = - V_i t / RC$$

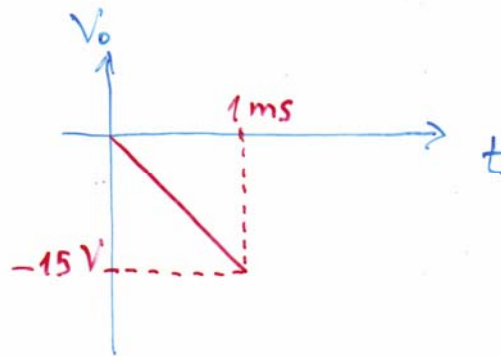
Σημειώνεται ότι το ρεύμα εισόδου είναι : $I_i = V_i / R$

άρα οι μεταβολές στην τάση εξόδου είναι ανάλογες με το I_i .

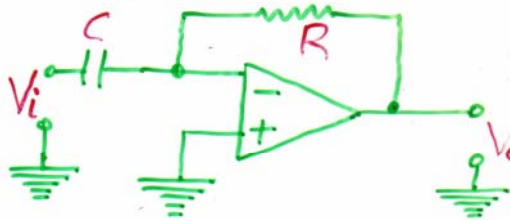
Αν υποθέσουμε ότι στην είσοδο έχουμε μια ημιτονοειδή συνάρτηση, στην έξοδο θα γίνει μια συνημιτονοειδής συνάρτηση. Έτσι το κύκλωμα ολοκλήρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύκλωμα μετατόπισης φάσης κατά 90° .

Εφαρμογή 7. Θεωρείστε κύκλωμα ολοκληρωτή στο οποίο η αντίσταση εισόδου είναι $100\text{ K}\Omega$, ο πυκνωτής ανάδρασης είναι $10\text{ }\mu\text{F}$ και η είσοδος είναι μια συνάρτηση βήματος -2 V . Να γίνει η γραφική παράσταση $V_o - t$ για τα πρώτα 6 sec .

Εφαρμογή 8. Να σχεδιαστεί κύκλωμα ολοκληρωτή που να δίνει στην έξοδό του μια τάση σε μορφή ράμπας (παρακάτω σχήμα) όταν η είσοδός του είναι μια συνάρτηση βήματος $1,5\text{ V}$.



ενισχυτής διαφόρισης



Το κύκλωμα διαφόρισης είναι συμπληρωματικό του κυκλώματος ολοκλήρωσης. Παράγει έξοδο που είναι ανάλογη με την ταχύτητα μεταβολής της εισόδου (την παράγωγο της ως προς το χρόνο).

Η εξίσωση που ορίζει το κύκλωμα διαφόρισης είναι

$$V_o = - (RC) \cdot dV_i / dt$$

η οποία μπορεί να γραφεί προσεγγιστικά ως

$$V_o = - (RC) \cdot \Delta V_i / \Delta t$$

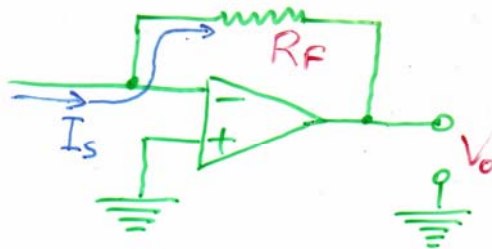
Αν στο κύκλωμα τεθεί σταθερή τάση εισόδου η τάση εξόδου θα είναι μηδέν.

Αν η τάση εισόδου αυξάνει με σταθερό ρυθμό, είναι δηλαδή μια συνάρτηση ράμπας, τότε η έξοδος θα παραμένει σε μια σταθερή τιμή

$$V_o = - (RC) \cdot V_i / t$$

Εφαρμογή 9. Θεωρείστε κύκλωμα διαφοριστή με αντίσταση ανάδρασης 200 KΩ, πυκνωτή εισόδου 20 μF, και με τάση εισόδου να αυξάνει σταθερά κατά -2 V ανά sec για 6 sec. Να γίνει η γραφική παράσταση $V_o - t$.

μετατροπέας ρεύματος σε τάση



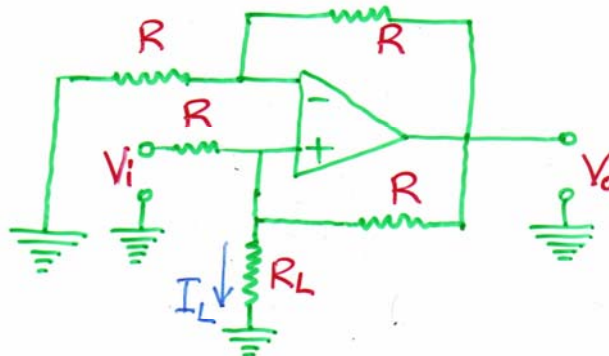
Μερικά συστήματα μέτρησης παράγουν σήματα εξόδου στα οποία η μεταβολή του ρεύματος είναι ανάλογη της μεταβολής της μετρούμενης ποσότητας (π.χ. φωτοδίοδος).

Στο παραπάνω κύκλωμα το παρεχόμενο ρεύμα περνά μέσα από την αντίσταση ανάδρασης και η αναστρέφουσα είσοδος τίθεται σε εν δυνάμει γείωση.

Η τάση εξόδου είναι :

$$V_o = I_s R_F$$

μετατροπέας τάσης σε ρεύμα

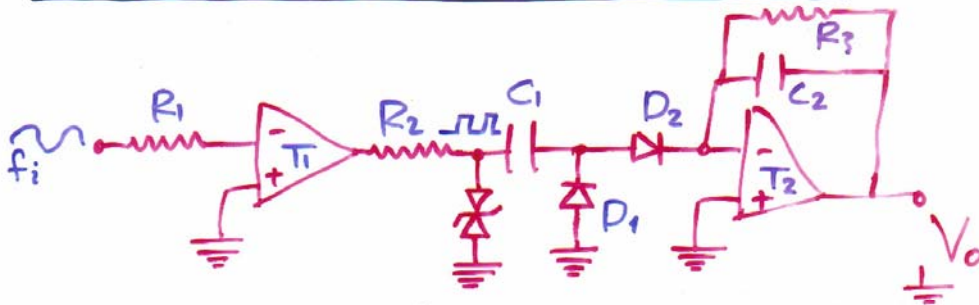


Ο μετατροπέας τάσης σε ρεύμα χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να έχουμε μια ελεγχόμενη παροχή ρεύματος, δηλαδή ανεξάρτητη από την αντίσταση φορτίου.

Το ρεύμα φορτίου είναι :

$$I_L = V_i / R$$

Μετατροπή συχνότητας σε τάση



$$\underline{V_0 \approx 2 f_i C_1 R_3 V_{zener}}$$

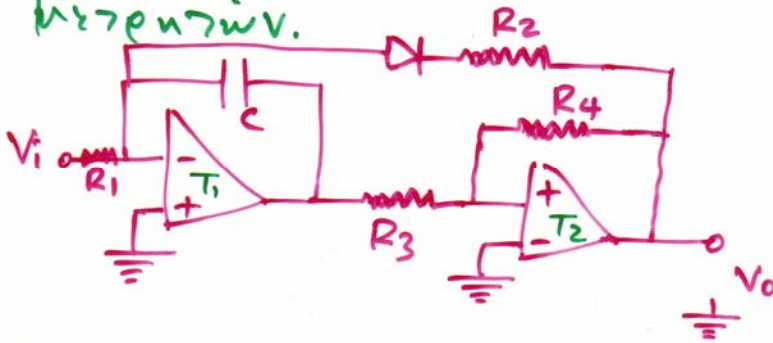
A₁: συγχρητής (T₁)

A₂: ολουκληρωτής (T₂)

- Ο A₁ παράγει τετραγωνικό σήμα
- Η είσοδος του A₁ ευθυθείται ως προς το πλάτος από τις δύο Zener
- Όταν η είσοδος του A₁ είναι υψηλή, ο C₂ φορτίζεται μέσω του C₁ και της D₂
- Όταν η είσοδος του A₁ είναι χαμηλή, ο C₁ εμφορτίζεται μέσω της D₁
- Συνεπώς ο C₂ φορτίζεται και εμφορτίζεται μέσω της R₃ με ενθρό που καθορίζεται από τη συχνότητα του τετραγωνικού σήματος

Μετατροπή τάσης σε συχνότητα

Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιείται συχνά στην είσοδο των ενδείκτων των ψηφιακών μετρητών.

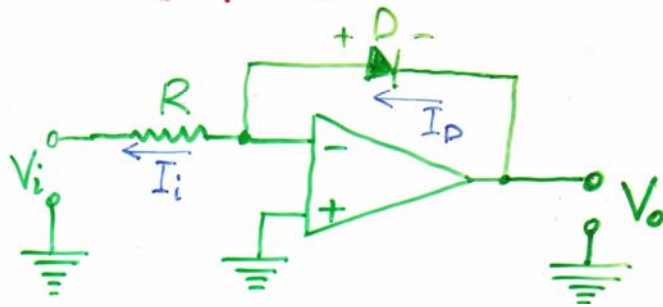


T₁: ολοκληρωτής

T₂: συχνομετρητής

$$f \approx \frac{R_4}{\left[R_3 (V_{OH} - V_{OL}) C R_1 \right]}$$

Λογαριθμικός ενισχυτής



Το ρεύμα στη διόδο είναι !

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right)$$

σε θερμοκρασία δωμάτιου η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$I_D \approx I_s e^{39V_D}$$

Είναι : $I_i = I_D \Rightarrow \frac{V_i}{R} = I_s e^{39V_D}$

$$\Rightarrow \ln \frac{V_i}{R} = \ln I_s + 39V_D \quad (*)$$

Επειδή στους ανωδευτές εισόδου υπάρχει συμβατική γη : $V_o = -V_D$

$$(*) \Rightarrow V_o = (-26 \text{ mV}) \cdot \left(\ln \frac{V_i}{R} - \ln I_s \right)$$

→ Η επίδραση του όρου $\ln I_{ES}$ μπορεί να ελαττωθεί αν η διόδος αντιπαρασταθεί με τρανζίστορ σε συνδεολογία κοινής βάσης.

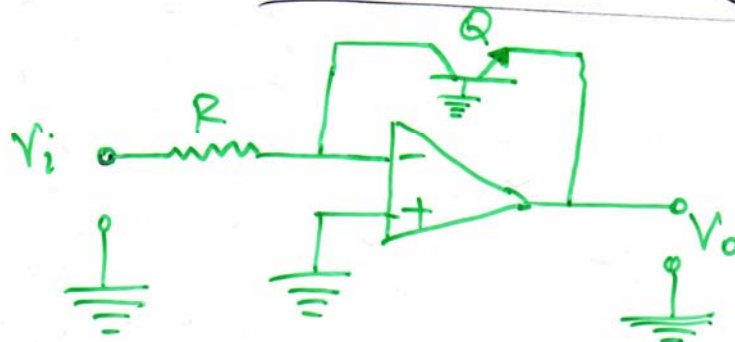
→ Το τρανζίστορ εμφανίζει λογαριθμική σχέση μεταξύ του ρεύματος συλλέκτη και ως βάσης - εκπομπών V_{BE} είναι :

$$V_{BE} = (26 \text{ mV}) \cdot \left(\ln \frac{V_i}{R} - \ln I_{ES} \right)$$

I_{ES} : ανάστροφο ρεύμα κορμού

Έτσι : $(V_o = -V_{BE}) \Rightarrow$

$$\begin{aligned} V_o &= (-26 \text{ mV}) \cdot \left(\ln \frac{V_i}{R} - \ln I_{ES} \right) \\ &= \underline{\underline{(-60 \text{ mV}) \cdot \left(\log \frac{V_i}{R} - \log I_{ES} \right)}} \end{aligned}$$

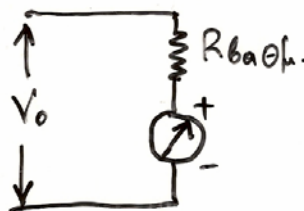


Αναδοχικά όργανα με παθητικά στοιχεία.

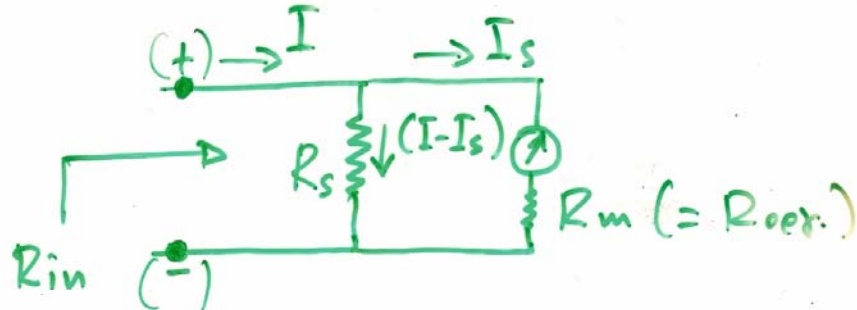
Το σύστημα ενδείξης των αναδοχικών οργάνων κίτρου, είναι ένας μηχανικός κόνιχου μαγνήτη με αινούμενο πυνίο (στρεφόμενο πυνίο) που δίνει απόδοση της βέλος ανάδοχη με τη μέση τιμή (dc) του σήματος που διέρχεται από το σύστημα κίτρου.

Χαρακτηριστικά μέγιστη των οργάνων στρεπτού πυνίου είναι η εσωτερική αντίσταση R_m (ή R_{oef}) και το μέγιστο εύμα I_{max} που χρειάζεται για απόδοση της βέλος σε όλη την κλίμακα.

Εφαρμογή: Έστω όργανο στρεπτού πυνίου με $R_{oef} = 2\text{ k}\Omega$ και $I_{max} = 50\text{ }\mu\text{A}$. Ποιά είναι η τιμή της $R_{βαθ}$ ώστε να μετράει τάση στην περιοχή 0-10 Volts DC.



Ακρεόκωττα DC



Για κέρσηση ευχάρων κερδόμενων από το I_{max} , του οργάνου στερητούπνυτ αυ, συνδέεται παράλληλο το όργανο κ αντίσταση R_s .

$$\text{Είναι: } I_s \cdot R_m = (I - I_s) R_s \Rightarrow$$

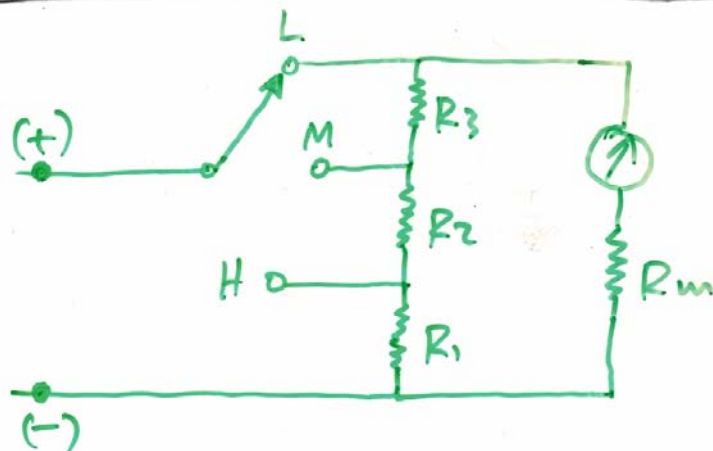
$$\Rightarrow R_s = \frac{I_s \cdot R_m}{I - I_s}$$

Η αντίσταση εισόδου είναι:

$$R_{in} = R_s // R_m$$

Εφαρμογή: Να σχεδιαστεί ακρεόκωττα dc (παδουριών στοιχείων) που να κερταει ευχα στην κερλοχή 0-10mA. Δίνεται ότι το κέρητο κέρηα στερητούπνυτ είναι $I_{max} = 50 \mu A$ κ κ $R_m = 22 k\Omega$. Ποια είναι κ R_{in} του ακρεόκωττα;

Ακέραια DC πολλαίων περιοχών



Η παραπάνω διάταξη χρησιμοποιεί κοινό διακόπτη "διακοπής πριονωμένης" για την αλλαγή των περιοχών κίτρου. Έτσι εμφανίζεται ο κοινός να επάσει υπερβολικό εύρος ήσα από το σύστημα κίτρου όταν αλλάζουμε περιοχή κίτρου.

$$\text{Είναι: } R_1 + R_2 + R_3 = \frac{I_s \cdot R_m}{I_L - I_s} \quad \checkmark$$

$$R_1 + R_2 = \frac{I_s (R_3 + R_m)}{I_M - I_s} \quad \checkmark$$

$$R_1 = \frac{I_s (R_2 + R_3 + R_m)}{I_H - I_s} \quad \checkmark$$

όπου I_L , I_M , I_H είναι οι ζητιές εφ-
λατος κίτρου, μεσαίας και μεγάλης
περιοχής αντίστοιχα. —

Λύνοντας τις παραπάνω σχέσεις ως προς R_1, R_2, R_3 προκύπτει:

$$R_1 = \frac{I_L \cdot I_s R_m}{I_H (I_L - I_s)} \quad \checkmark$$

$$R_2 = \frac{(F+1) \cdot (I_H - I_m) I_s R_m}{I_m \cdot I_H} \quad \checkmark$$

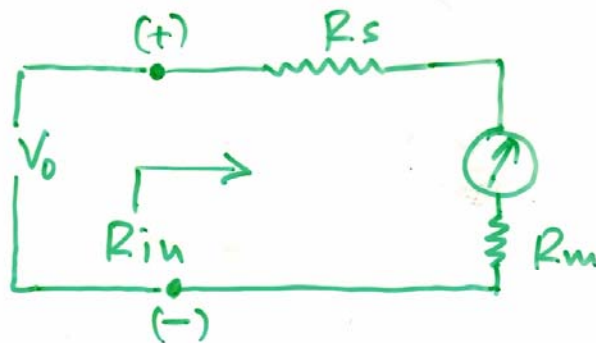
$$R_3 = \frac{F(I_m R_m) - I_s R_m (F+1)}{I_m} \quad \checkmark$$

όπου:

$$F = \frac{I_s}{I_L - I_s}$$

Εφαρμογή: Να σχεδιαστεί απηγε-
οδόμετρο για κλίμακες 0-1mA, 0-5mA,
και 0-25mA. Το σύστημα κλίμακας
είναι όργανο σταθερού πηνίου με
 $I_{max} = 50 \mu A$ ($I_{max} \equiv I_s$) και $R_m = 2k\Omega$
($R_m \equiv R_{oer}$).

Βολτόμετρο DC



Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή Ohm ανά Volt ενός βολτόμετρου DC ονομάζεται ευαισθησία S.

$$S = \frac{1}{I_s} \quad (\checkmark)$$

όπου $I_s (= I_{max})$ είναι το ρεύμα για πλήρη κλίμακα του οργάνου στρεπτού ληνίου.

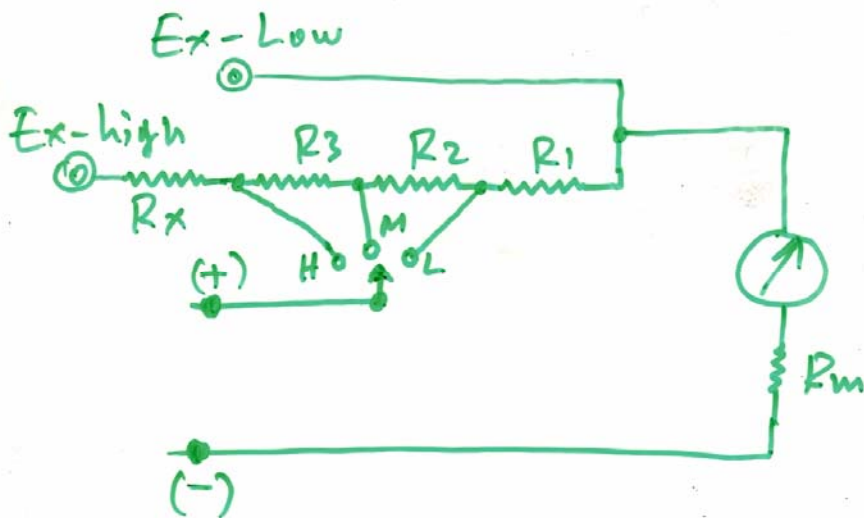
Είναι:

$$R_{in} = \frac{V_0}{I_s} \quad (\checkmark) \quad (V_0 = V_{max})$$

$$R_s = R_{in} - R_m \quad (\checkmark)$$

Εφαρμογή: Να σχεδιάσει βολτόμετρο DC που να μετράει τάση από 0 - 20 V DC. Για το όργανο στρεπτού ληνίου είναι $I_{max} = 50 \mu A$ και $R_m = 2k\Omega$.

Βολτόμετρα DC πολλαπλών περιοχών



Εφαρμογή: Να σχεδιαστεί ένα βολτόμετρο dc που να έχει σε μια περιοχή εφαιρτικά κινetics τάσης, μια περιοχή από 0-2,5V, 0-10V, 0-50V, και μια περιοχή εφαιρτικά βγάνης τάσης από 0 έως 1000V. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος κινetics οργάνου αυτού πρέπει είναι $I_{max} = 50 \mu A$ ($I_{max} > I_s$) και $R_m = 2 k\Omega$ ($R_m = R_{ext}$).

Λύση

— Η τάση για πλήρη απόκλιση της περιοχής για εφαιρτικά κινetics τάση V_{xL} είναι:

$$V_{xL} = I_s \cdot R_m = 50 \mu A \cdot 2 k\Omega = 100 mV$$

— μικρή νεροχύτη (L)

$$R_{in,L} = \frac{V_L}{I_s} = \underline{\underline{50 \text{ K}\Omega}}$$

$$R_1 = R_{in,L} - R_m = 50 \text{ K}\Omega - 2 \text{ K}\Omega = \underline{\underline{48 \text{ K}\Omega}}$$

— μεσαία νεροχύτη (M)

$$R_{in,M} = \frac{V_M}{I_s} = \underline{\underline{200 \text{ K}\Omega}}$$

$$R_2 = R_{in,M} - (R_1 + R_m) = \underline{\underline{150 \text{ K}\Omega}}$$

— μεγάλη νεροχύτη (H)

$$R_{in,H} = \frac{V_H}{I_s} = \underline{\underline{1 \text{ M}\Omega}}$$

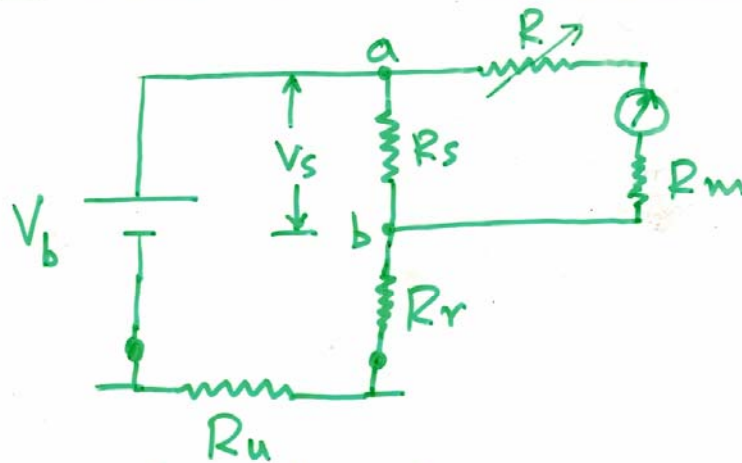
$$R_3 = R_{in,H} - (R_1 + R_2 + R_m) = \underline{\underline{800 \text{ K}\Omega}}$$

— εξαιρετικά μεγάλη νεροχύτη (XH)

$$R_{in,XH} = \frac{V_{XH}}{I_s} = \underline{\underline{20 \text{ M}\Omega}}$$

$$R_x = R_{in,XH} - (R_1 + R_2 + R_3 + R_m) = \underline{\underline{19 \text{ M}\Omega}}$$

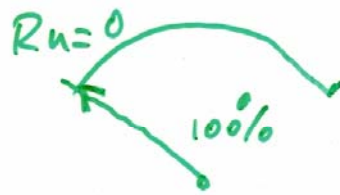
Ωλιόμετρα και μετρήσεις βολτομέτρων



- Το σύστημα κίτρου και αντιστάση R αποτελούν ένα βολτομέτρο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση των πρώτων τάσεων μεταξύ των σημείων a και b .
 - Το κίτρου ως ανύψωση της βελόνας του βολτομέτρου καθορίζεται από την τάση V_s , μεταξύ των άκρων στα άκρα της R_s .
- $\left\{ \begin{array}{l} \text{Μεγάλη } R_u \text{ παράγει μικρή } V_s \\ \text{Μικρή } R_u \text{ παράγει μεγάλη } V_s \end{array} \right.$
- Έτσι η κλίμακα του βολτομέτρου μπορεί να βαθμολογηθεί σε Ohms αντί Volts.

- Αν $R_u = \infty$ τότε $V_s = 0 \Rightarrow$
 \Rightarrow απόδοση 0%

- Αν $R_u = 0$ τότε $V_s = \text{βιγίωση}$
(ζάση για
πλήρη υλίβαση)
 \Rightarrow απόδοση 100%



Αν $0 < R_u < \infty$ τότε ισχύει:

$$\text{απόδοση } D = \frac{R_o}{R_u + R_o} \quad (*)$$

$$\text{όπου } R_o = R_v + [R_s // (R + R_m)]$$

$$(*) \Rightarrow R_u = \frac{R_o(1-D)}{D}$$

Εφαρμογή:

Να βαθμολογήσει υαλίhana ενός ω-
μήτηρου, ματηγορίας βοληήτηρου, έτσι
ώστε να δειχθεί τις τιμές της R_u
που αντιστοιχούν 1 π.κ., $\frac{7}{8}$ π.κ.,
 $\frac{3}{4}$ π.κ., $\frac{5}{8}$ π.κ., $\frac{1}{2}$ π.κ., $\frac{3}{8}$ π.κ.,
 $\frac{1}{4}$ π.κ., $\frac{1}{8}$ π.κ., και 0 π.κ.
(π.κ. = αριθμη
υαλίhana.)

Λύση

Από την σχέση: $R_u = \frac{R_0(1-D)}{D}$
προκύπτει

D	% D	R_u
1	100	0
$\frac{7}{8}$	87,5	$0,143 \times R_0$
$\frac{3}{4}$	75	$0,33 \times R_0$
$\frac{5}{8}$	62,5	$0,6 \times R_0$
$\frac{1}{2}$	50	R_0
$\frac{3}{8}$	37,5	$1,66 \times R_0$
$\frac{1}{4}$	25	$3 \times R_0$
$\frac{1}{8}$	12,5	$7 \times R_0$
0	0	∞

Περιορισμοί οργάνων κίνησης με παθητικά στοιχεία

- Επίδραση του φορτίου στο βολτόμετρο σε κυκλώματα μεγάλης αντίστασης
- Επίδραση του φορτίου στο αμπερόμετρο σε κυκλώματα μικρής αντίστασης
- Κλίμακες αντίστασης και γραμμικές
- Η μικρότερη περιοχή dc τάσης περιορίζεται από τις τιμές I_{max} και $R_{εσ}$ του μηχανισμού κίνησης
- Η περιοχή της μικρότερης ac τάσης περιορίζεται από την ορθή πτώση τάσης στα άκρα της ανορθωτικής διόδου

Ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών

Ηλεκτρονικό Βολτόμετρο

Να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση και ο αναλυτικός υπολογισμός των στοιχείων του κυκλώματος ενός ηλεκτρονικού βολτόμετρου DC με τελεστικό ενισχυτή (741), το οποίο μετράει τάσεις στις κλίμακες 20 mV , 200 mV , 2 V και 20 V . Η αντίσταση εισόδου του ηλεκτρονικού βολτομετρου είναι $10\text{ M}\Omega$. Το όργανο στρεπτού πηνίου έχει εσωτερική αντίσταση $100\ \Omega$ και χαρακτηρίζεται από μέγιστο ρεύμα διέγερσης $50\ \mu\text{A}$ και μέγιστη τάση διέγερσης 100 mV .

Ηλεκτρονικό αμπερόμετρο

Το όργανο στρεπτού πηνίου του κυκλώματος ενός ηλεκτρονικού αμπερομέτρου DC με τελεστικό ενισχυτή (741) χαρακτηρίζεται από, μέγιστο ρεύμα διέγερσης $100\ \mu\text{A}$, μηδενική εσωτερική αντίσταση, και μέγιστη τάση διέγερσης 100 mV . Να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση και ο αναλυτικός υπολογισμός των στοιχείων του κυκλώματος του παραπάνω ηλεκτρονικού αμπερομέτρου DC, το οποίο να μετράει ένταση ρεύματος στις κλίμακες 2 A , 200 mA , 20 mA , 2 mA και $200\ \mu\text{A}$.

Ηλεκτρονικό ωμόμετρο

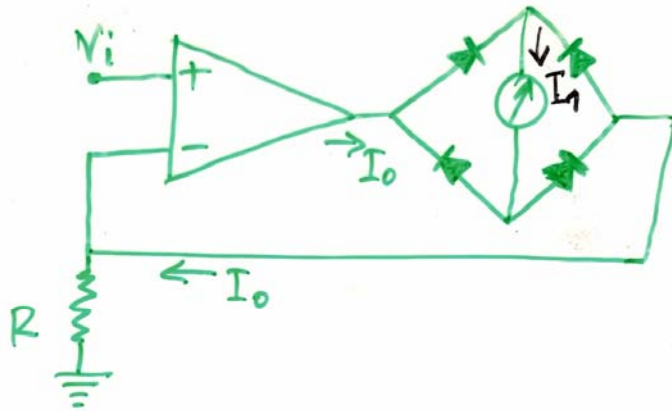
Το όργανο στρεπτού πηνίου ενός ηλεκτρονικού ωμόμετρου, με τελεστικό ενισχυτή 741, έχει μηδενική εσωτερική αντίσταση και χαρακτηρίζεται από μέγιστο ρεύμα διέγερσης 1 mA και μέγιστη τάση διέγερσης 1 V . Να γίνει η σχεδίαση και ο αναλυτικός υπολογισμός των στοιχείων του κυκλώματος του ηλεκτρονικού ωμόμετρου, το οποίο μετράει αντιστάσεις στις κλίμακες $0,1\text{ K}\Omega$, $1\text{ K}\Omega$, $10\text{ K}\Omega$ και $100\text{ K}\Omega$.

Βοηθήματα AC

Για να μετρηθεί γάση ή εύλα AC, χρησιμοποιούνται ειδικές διατάξεις στις οποίες η γάση εισόδου είναι ανάδοχη της γάσης V_p , $V_p - P$, V_{rms} .

Μέτρηση γάσης AC με ανόρθωση

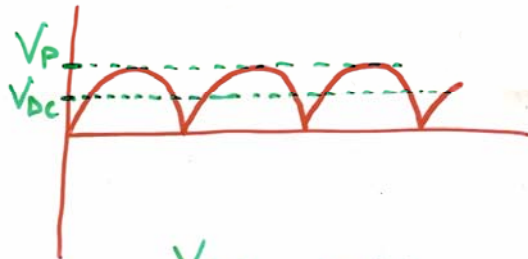
- Η βασική ιδέα σε αυτά τα όργανα είναι μια γέφυρα ανόρθωσης η οποία μετατρέπει το εναλλασσόμενο εύλα σε συνεχές, το οποίο με την σειρά του διεγείρει το όργανο ένδειξης (συνεχές αμνίο).
- Το όργανο ένδειξης δεχεται την συνεχή σιωτώσα του πλήρως ανορθωμένου εύλατος το οποίο είναι ανάδοχο της γάσης εισόδου V_i .



$$I_0 = \frac{V_i}{R}$$

Μετά την ανόρθωση το όργανο
 ένδειξης δείχνει (λόγω της αδρά-
 νειάς του, $f > 15 \text{ Hz}$) μόνο την μέση
 τιμή I_1 :

$$I_1 = \frac{\overline{V_i}}{R} = \frac{V_{DC}}{R} = \frac{\frac{2V_P}{\pi}}{R}$$



$$\underline{V_{DC} = \frac{2}{\pi} V_P}$$

Με κατάλληλη μετατροπή υδίκαιας
στο όργανο ένδειξης, το όργανο μπο-
ρεί να χρησιμοποιηθεί για να δείχνει
των τάση V_p , V_{p-p} , V_{rms} ($= \frac{V_p}{\sqrt{2}}$)
(ημιτονοειδή σήμα)

- Για να δείχνει το V_p καταδεικνύει
η υδίκαια πρέπει να αναπτυχθεί κα-
τά τον παράγοντα $\frac{\pi}{2} = \underline{\underline{1,57}}$
- Για να δείχνει το V_{p-p} η υδίκαια
πρέπει να αναπτυχθεί κα-
τά τον παράγοντα $\pi = \underline{\underline{3,14}}$
- Για να δείχνει το V_{rms} η
υδίκαια πρέπει να αναπτυχθεί
κατά τον παράγοντα $\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = \underline{\underline{1,11}}$

Εφαρμογή: Αν ένα βολτόμετρο AC με ανόρθωση, έχει όργανο ένδειξης που διαχειρίζεται από $I_{max} = 100 \mu A$ και πρέπει να βαθμολογηθεί από 0-5 Vrms. Τότε η αλίκαυά του πρέπει να αναπτυχθεί κατά 1,11 ένσηδη

$$V_{DC} = \overline{V_i} = \frac{2}{\pi} V_p = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} V_{rms} \Rightarrow$$

$$V_{rms} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} V_{DC} = \underline{\underline{1,11 V_{DC}}}$$

και ένσηδη $I_x = V_{DC}/R$ $\Rightarrow I_x = \frac{2}{\pi} \frac{V_p}{R} \Rightarrow R = \frac{\pi I_x}{2 V_p}$

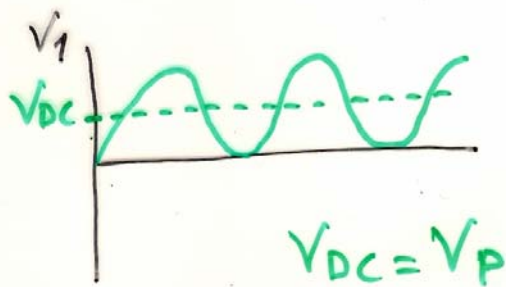
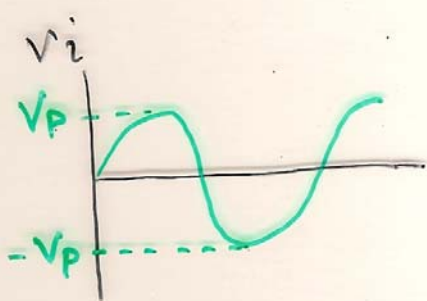
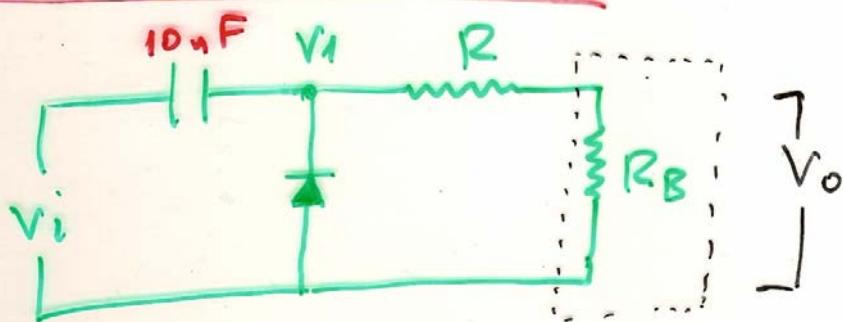
$$\Rightarrow R = \left(\frac{\pi I_x}{2 \sqrt{2} V_{rms}} \right)^{-1} = \left(\frac{3,14 \cdot 100 \mu A}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 5 V} \right)^{-1} = \underline{\underline{22,5 k\Omega}}$$

Εφαρμογή: Όργανο στερεού πυκνίου δίσκου με πλήρως ανορθωμένο εύρος υψιτονοειδής τάσης $I_p = 1 A$.

Τι ζήκη εύρους θα δείξει το όργανο και γιατί;

Η προτεινόμενη διάταξη λειτουργεί ως γά-
 σης AC δεν μπορεί να λειτουργήσει σε νο-
 ριά υψηλές συχνότητες γιατί οι διόδους
 παρουσιάζουν υψηλές χωρητικότητες και
 οι ΤΕ δεν αντέχει να μετασχηματιστεί.
 ($f < 1 \text{ MHz}$)

Βολτοκέρτα RF



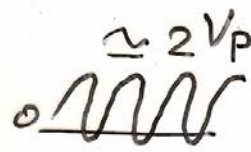
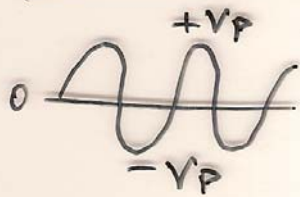
Αν επιθυμεί $\frac{R_B}{R+R_B} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ τότε η

τάση που δίνεται με την V_{rms}

$$V_o = \frac{R_B}{R+R_B} \cdot \bar{V}_1 = \frac{R_B}{R+R_B} V_{DC} = \frac{R_B}{R+R_B} \cdot V_p$$

$$\Rightarrow V_o = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = V_{rms}$$

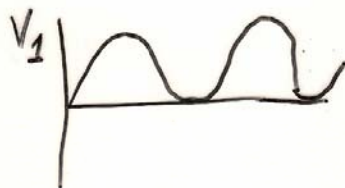
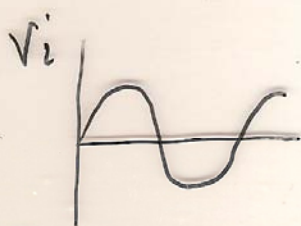
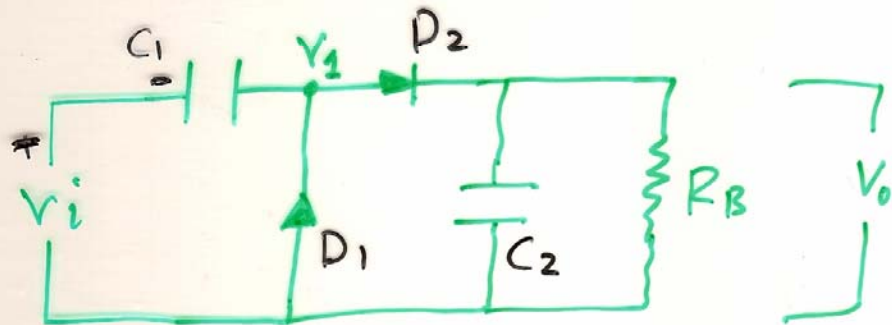
* Κύκλωμα αναρρίχησης



- Στην πρώτη αρνητική ημικύκλιδο της τάσης εισόδου, η διόδος άγει και φορτίζει τον πυκνωτή στο πλάτος της τάσης εισόδου V_p .
- Λίγο μετά τη αρνητική κορυφή η διόδος αποκλείεται. Επειδή η σταθερά χρόνου επιλέγεται μεγάλη ($C R_L$), ο πυκνωτής ελάχιστα εκφορτίζεται στις διαδοχικές αρνητικές κορυφές.
- Έτσι η έξοδος είναι ένα ημιτονοειδές σήμα μεταβολισκίνο πλάτος πάνω κατά V_p .

Εφαρμογή: επιθυμούμε να μετρήσουμε την ενεργό τιμή τάσης ενός σήματος RF και διαθέτουμε βολτόμετρο DC με αντίσταση εισόδου $R_B = 20 \text{ M}\Omega$. Να σχεδιάσει το κατάλληλο κύκλωμα αναρρίχησης τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος. Γραφική παράσταση.

Με μικρή μετατόπιση της προηγούμενης διάταξης προκύπτει η παρακάτω διάταξη που δίνει στην έξοδο της μια συσκευή των τάσεων V_p-p του σήματος εισόδου.



* Διηλεκτρική τάση

- Κατά την διάρκεια της αρνητικής ημικυκλίου της εισόδου: D_1 προωκεί τη ροή και D_2 αναστέλλει. Ο C_1 φορτίζεται στο πλάτος της τάσης εισόδου V_p .
- Κατά την διάρκεια της θετικής ημικυκλίου της εισόδου: D_2 προωκεί τη ροή, D_1 αναστέλλει.
- Επειδή η πηγή και ο C_1 είναι σε σειρά, ο C_2 ζει να φορτιστεί στην τάση $V_p + V_p = 2V_p$.
- Έτσι μετά από μερικούς κύκλους η τάση στα άκρα του C_2 γίνεται $2V_p$.

Βολτόμετρα πραγματικής ενεργού τιμής

Τα βολτόμετρα αυτά δίνουν την ενεργό τιμή της ηλεκτρικής τάσης, ανεξάρτητα από την υφαστοθεορψή τους.

Η συνεχής συνιστώσα μιας υφιστοι-
κής τάσης μετά από πλήρη απόρθη-
ση είναι η οτι είναι:

$$V_{DC} = \frac{2}{\pi} V_P \quad (1)$$

η ενεργός τιμή της τάσης είναι:

$$V_{rms} = \frac{V_P}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

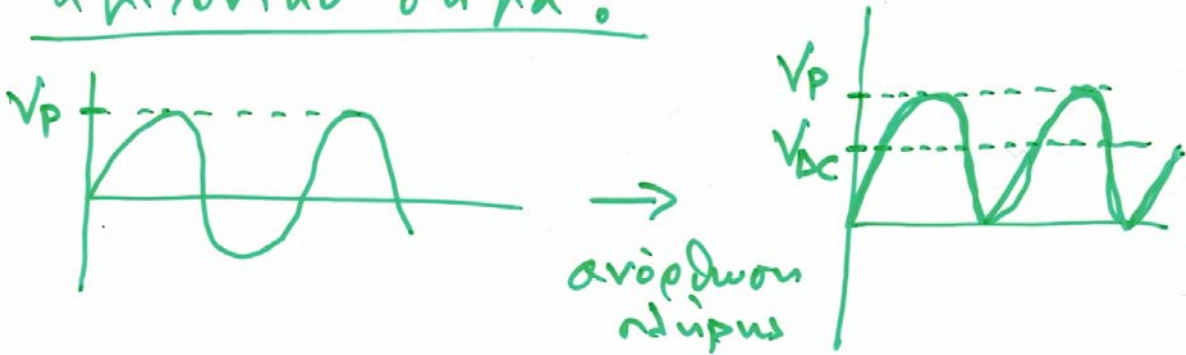
Από τις (1) και (2) προκύπτει ότι:

$$V_{rms} = \frac{V_P / \sqrt{2}}{2V_P / \pi} = \underbrace{1,11}_{\substack{\text{παράγοντας} \\ \text{ανάπτυξης}}} V_{DC}$$

— έτσι αν η υφιστοία του οργάνου
κίτησης πολλαπλασιαστεί (αυανυ-
χθεί) με τον παράγοντα 1,11 θα
μας δώσει την V_{rms}

— Ο παράγοντας ανάπτυξης (A.F.) ορι-
ζεται ως: $V_{rms} = (A.F.) \cdot V_{DC}$

η ημιτονοειδής σήμα :

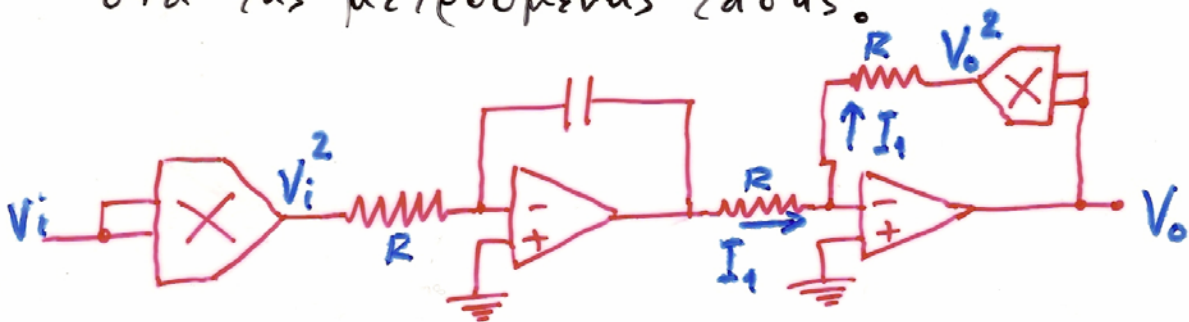


$$\left. \begin{aligned} V_{DC} &= \frac{2}{\pi} V_P \\ V_{RMS} &= \frac{V_P}{\sqrt{2}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow (A.F.) = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

Σήμα	V_{DC}	V_{RMS}	A.F.
	$\frac{2}{\pi} V_P$	$\frac{V_P}{\sqrt{2}}$	1,11
	V_P	V_P	1
	$\frac{V_P}{2}$	$\frac{V_P}{3}$	0,67

- Επειδή η προηγούμενη διαδικασία απαιτεί για κάθε κυματομορφή, ξεχωριστά βαθμονομημένο όργανο, δύσκολα ακολουθείται στην πράξη.

Όργανα που μετρούν την V_{rms} ανεξάρτητα από το είδος της κυματομορφής, βασίζονται λειτουργία τους στην αναλογική επεξεργασία της μετρούμενης τάσης:



- η V_i με τη βοήθεια ενός πολ/στη δίνει V_i^2 και στη συνέχεια ολοκληρώνεται σε χρόνο $\tau \gg T$: περίοδος της V_i .

- η ανάλυση στον δεύτερο ΤΕ δίνει:

$$\left[\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} V_i^2 dt \right] / R = V_0^2 / R$$

$$\Rightarrow V_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} V_i^2 dt}$$

όπως εφ' ορισμού: $V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} V_i^2 dt}$

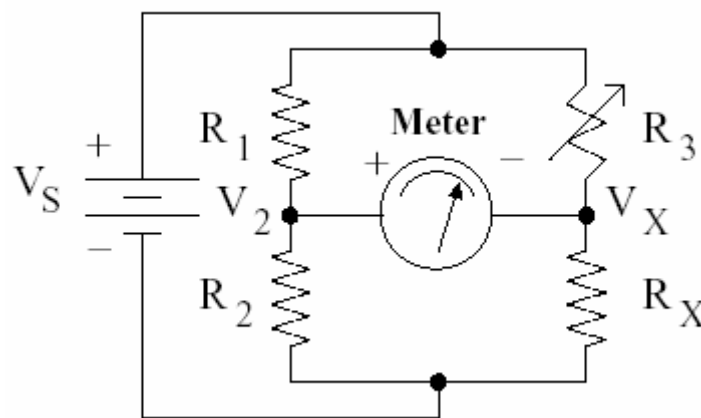
$$\Rightarrow \underline{\underline{V_0 = V_{rms}}}$$

ΓΕΦΥΡΕΣ DC

Γέφυρα Wheatstone

Μετράει αντιστάσεις με ακρίβεια 0,1% στην περιοχή 1Ω –1ΜΩ.

Οι αντιστάσεις R_1 , R_2 είναι γνωστές και σταθερές, η αντίσταση R_3 είναι μεταβαλλόμενη και η R_x είναι η άγνωστη αντίσταση που θέλουμε να μετρήσουμε.



Μεταβάλλουμε την R_3 ώστε να πετύχουμε ισορροπία της γέφυρας (ένδειξη γαλβανόμετρου "0"). Τότε θα είναι :

$$I_1 = I_2 \quad , \quad I_3 = I_x \quad \text{και} \quad V_2 = V_x$$

οπότε προκύπτει η παρακάτω συνθήκη ισορροπίας :

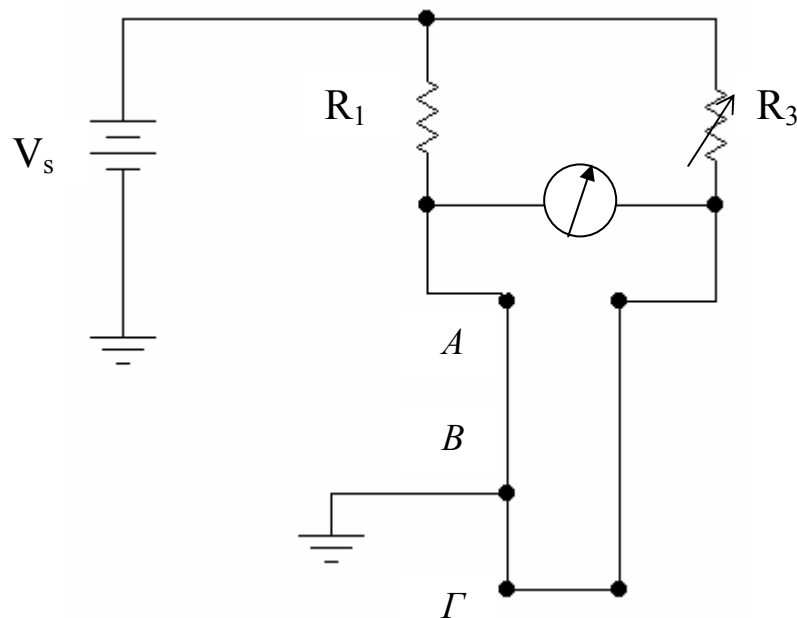
$$R_1 R_x = R_2 R_3$$

από την οποία υπολογίζεται η άγνωστη αντίσταση R_x .

Εφαρμογή της γέφυρας Wheatstone

Μέθοδος Murray : Καθορισμός θέσης σφάλματος σε καλώδια

Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση βραχυκυκλώματος B ενός καλωδίου από το ένα άκρο του A. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η αγωγήμη σύνδεση του άλλου άκρου του Γ με ένα άλλο καλώδιο όμοιο με το αρχικό.



Αν $ΑΓ = L$ και $ΒΓ = x$, τότε όταν η γέφυρα ισορροπεί θα είναι :

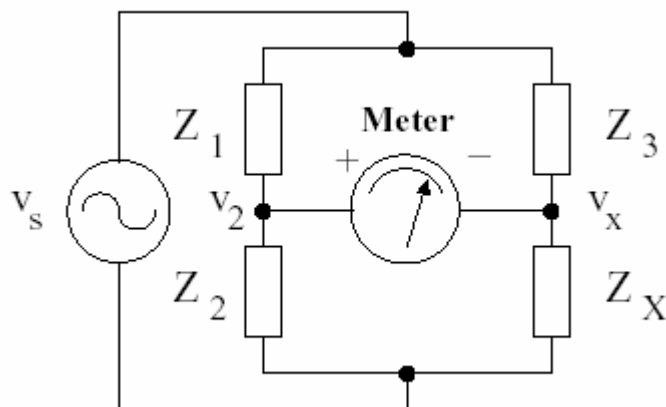
$$\frac{R_1}{L-x} = \frac{R_3}{L+x} \Rightarrow x = L \frac{R_3 - R_1}{R_3 + R_1}$$

ΓΕΦΥΡΕΣ AC

Η γενική μορφή των γεφυρών AC είναι ίδια με τη γέφυρα Wheatstone με τις παρακάτω διαφορές :

- οι αντιστάσεις έχουν αντικατασταθεί με σύνθετες αντιστάσεις
- η συνεχής πηγή τάσης έχει αντικατασταθεί με εναλλασσόμενη πηγή
- το γαλβανόμετρο έχει αντικατασταθεί με αντίστοιχο όργανο AC μέτρησης

Οι γέφυρες AC χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση όχι μόνο αντίστασης αλλά και χωρητικότητας, αυτεπαγωγής και συχνότητας ημιτονικών σημάτων.



Όταν η γέφυρα ισορροπεί ισχύει η παρακάτω συνθήκη :

$$Z_1 Z_X = Z_2 Z_3$$

Θεωρώντας ότι οι σύνθετες αντιστάσεις έχουν τη μορφή :

$$Z_i = R_i + j X_i$$

τότε από την αρχική συνθήκη ισορροπίας της γέφυρας (ισότητα των πραγματικών και φανταστικών μερών της) εξάγονται οι παρακάτω δύο σχέσεις :

$$R_1 R_x - X_1 X_x = R_2 R_3 - X_2 X_3 \quad (*)$$

και

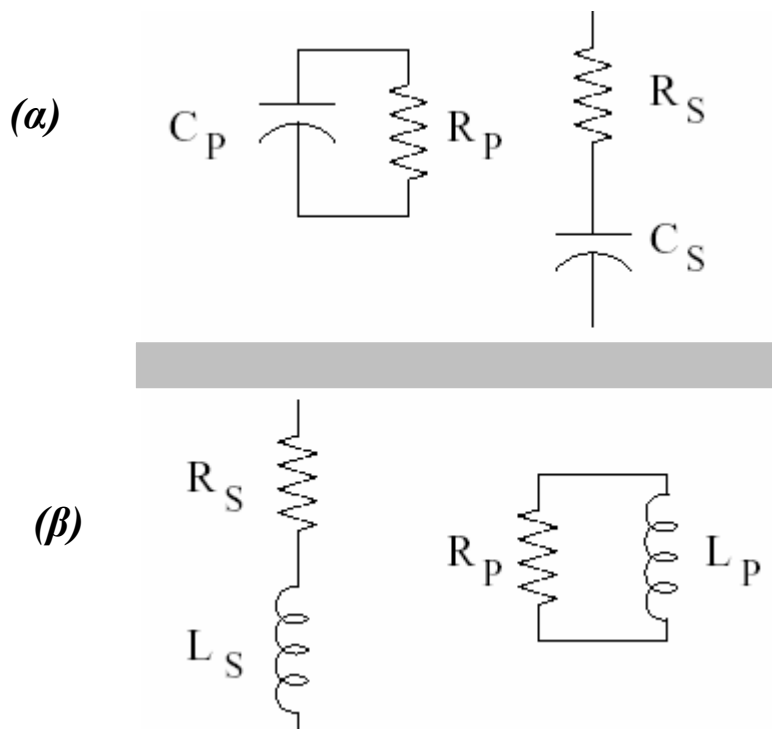
$$R_1 X_x + R_x X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2 \quad (**)$$

Οι παραπάνω σχέσεις εφαρμόζονται σε κάθε τύπο γέφυρας AC για την εξαγωγή των σχέσεων ισορροπίας της.

Οι πραγματικοί πυκνωτές δεν χαρακτηρίζονται μόνο από χωρητικότητα, αλλά και από κάποια αντίσταση που συνδέεται με απώλειες ενέργειας. Ένας πυκνωτής μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα μιας χωρητικότητας C_p συνδεδεμένης παράλληλα με μια αντίσταση R_p .

Επίσης τα πραγματικά πηνία δεν χαρακτηρίζονται μόνο από αυτεπαγωγή, αλλά και από κάποια αντίσταση που συνδέεται με απώλειες ενέργειας. Ένα πηνίο μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα μιας αυτεπαγωγής L_s συνδεδεμένης σε σειρά με μια αντίσταση R_s .

Για την αναπαράσταση πραγματικών πυκνωτών και πηγίων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι αντίστροφοι τύποι ισοδύναμων κυκλωμάτων, όπως φαίνεται παρακάτω.



Οι τιμές των R και C για τους δύο τύπους ισοδύναμων κυκλωμάτων (α) , συνδέονται με τις παρακάτω σχέσεις :

$$R_S = R_P \frac{D^2}{1 + D^2}$$

και

$$C_S = C_P(1 + D^2)$$

όπου D ο συντελεστής απωλειών (dissipation factor) :

$$D = \frac{X_P}{R_P} = \frac{1}{\omega R_P C_P} = \frac{R_S}{X_S} = \omega C_S R_S$$

Ο συντελεστής απωλειών, D , είναι ανάλογος των απωλειών ενέργειας μέσα στον πυκνωτή για κάθε περίοδο του AC σήματος.

Ένας καλός (σχεδόν ιδανικός) πυκνωτής έχει πολύ μικρή τιμή D , $D \ll 1$.

Οι τιμές των R και L για τους δύο τύπους ισοδύναμων κυκλωμάτων (β), συνδέονται με τις παρακάτω σχέσεις :

$$R_P = R_S(1 + Q^2)$$

και

$$L_P = L_S(1 + \frac{1}{Q^2})$$

όπου Q ο συντελεστής αποθήκευσης ή ποιότητας (quality factor) :

$$Q = \frac{X_S}{R_S} = \frac{\omega L_S}{R_S} = \frac{R_P}{X_P} = \frac{R_P}{\omega L_P}$$

Ο συντελεστής ποιότητας, Q , είναι ανάλογος της αποθηκευμένης ενέργειας μέσα στο πηνίο για κάθε περίοδο του AC σήματος.

Ένα καλό (σχεδόν ιδανικό) πηνίο έχει πολύ μεγάλη τιμή Q , $Q \gg 1$.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι :

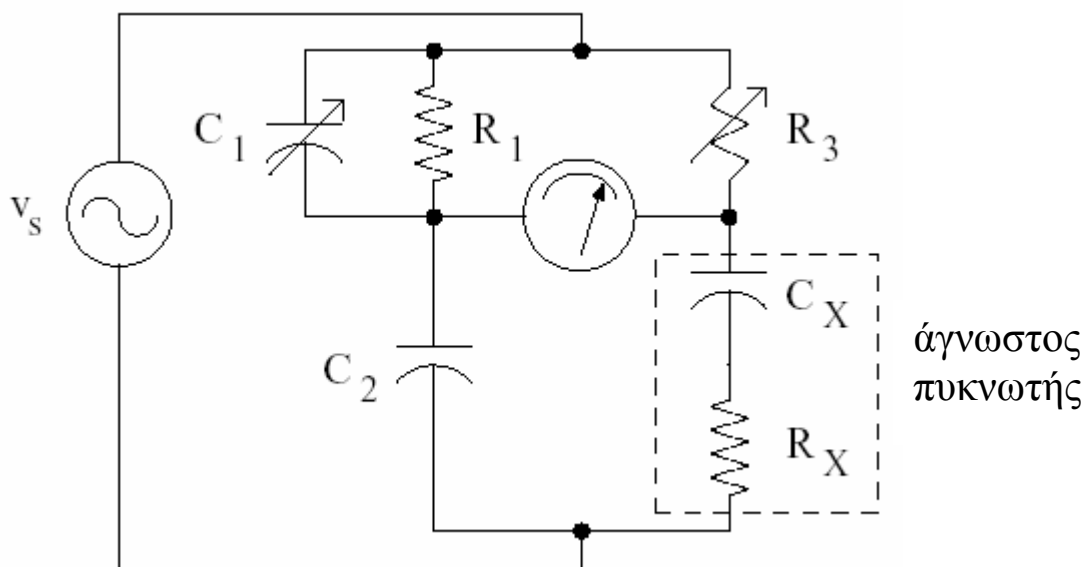
$$Q = \frac{1}{D}$$

Για τους πυκνωτές και τα πηνία, η ιδανική τους συμπεριφορά και για τους δύο τύπους ισοδύναμων κυκλωμάτων, απαιτεί πολύ μικρή τιμή R_s και πολύ μεγάλη τιμή R_p .

Συνηθισμένοι τύποι γεφυρών AC

Γέφυρα Schering

Η γέφυρα Schering χρησιμοποιείται για να μετράει χωρητικότητα και συντελεστή απωλειών D πυκνωτών, καθώς επίσης και αντιστάσεις καλωδίων και ηλεκτρονικών διατάξεων.



Όταν η γέφυρα ισορροπεί, τότε με εφαρμογή των σχέσεων (*) και (**), προκύπτει :

$$R_X = R_1 \frac{C_1}{C_2}$$

και

$$C_X = C_2 \frac{R_1}{R_3}$$

Παρατηρείται ότι οι τιμές των στοιχείων σειράς R_x και C_x του ισοδύναμου κυκλώματος του άγνωστου πυκνωτή, δεν εξαρτώνται από τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου σήματος.

Ο συντελεστής απωλειών, D , του άγνωστου πυκνωτή όπως προκύπτει από τις προηγούμενες σχέσεις ισούται :

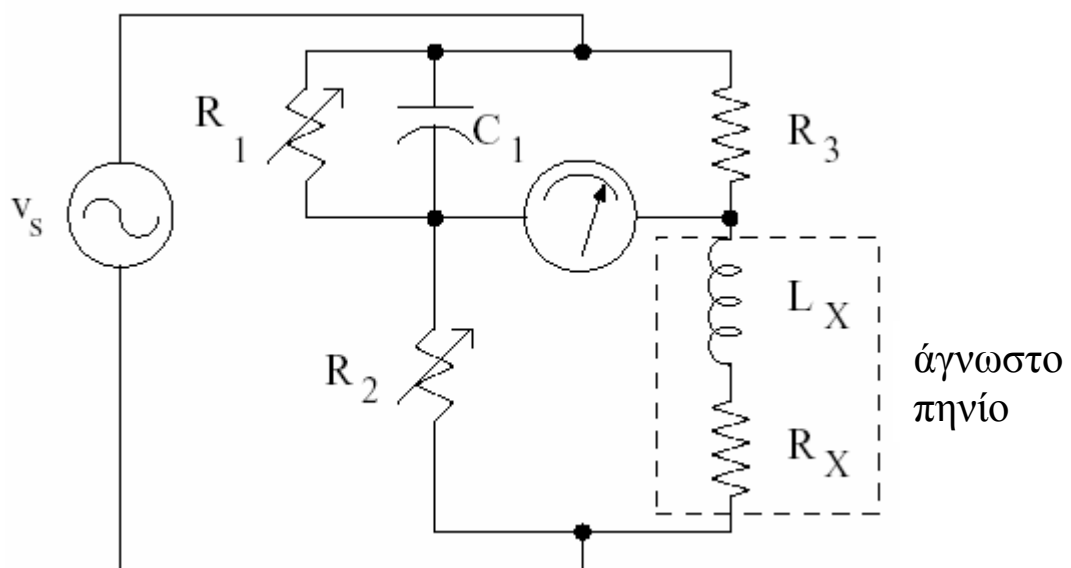
$$D = \frac{R_s}{X_s} = \frac{R_x}{\frac{1}{\omega C_x}} = \omega R_x C_x = \frac{\omega C_1 R_1^2}{R_3}$$

Περιοχή συχνοτήτων μέτρησης : 0,5 – 250 MHz

Περιοχή μέτρησης χωρητικότητας : 1μF – 100pF

Γέφυρα Maxwell

Η γέφυρα Maxwell χρησιμοποιείται για τη μέτρηση αυτεπαγωγής πηνίων καθώς επίσης και για τη μέτρηση του συντελεστή ποιότητας Q , όταν το Q παίρνει τιμές στην περιοχή $1 < Q < 10$.



Όταν η γέφυρα ισορροπεί, τότε με εφαρμογή των σχέσεων (*) και (**), προκύπτει :

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

και

$$L_x = C_1 R_2 R_3$$

Παρατηρείται επίσης ότι οι τιμές των στοιχείων σειράς R_x και L_x του ισοδύναμου κυκλώματος του άγνωστου πηνίου, δεν εξαρτώνται από τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου σήματος.

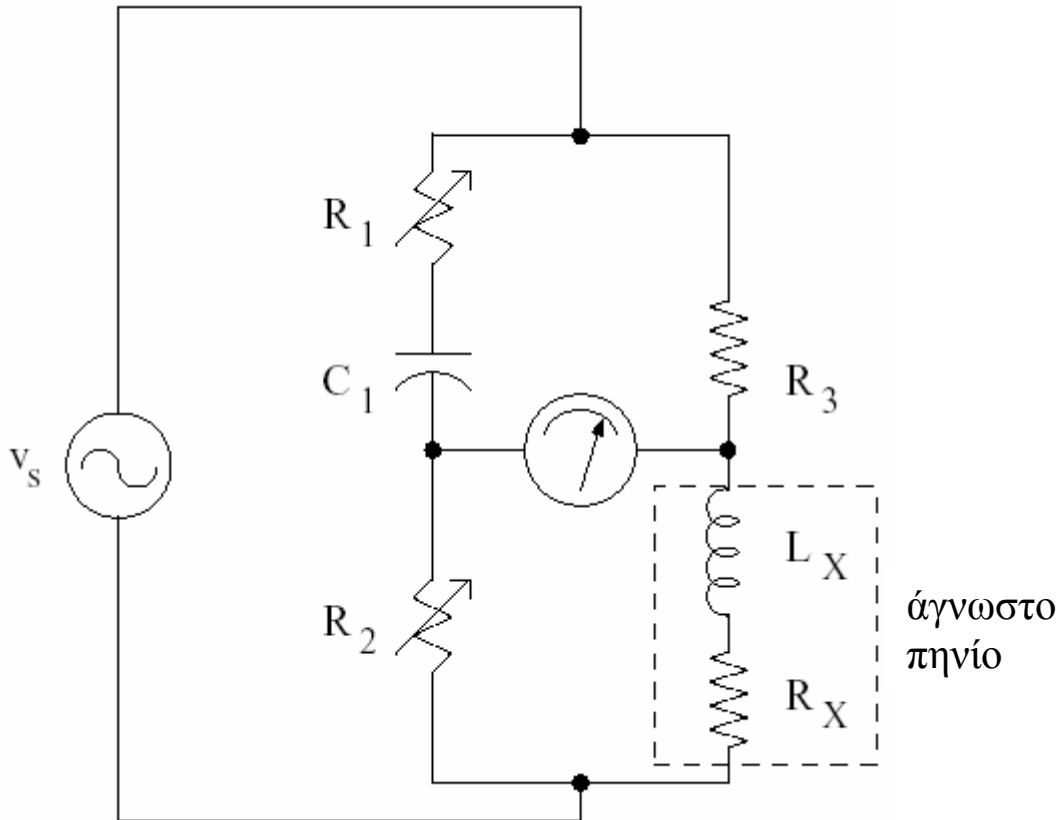
Ο συντελεστής ποιότητας, Q , του άγνωστου πηνίου όπως προκύπτει από τις προηγούμενες σχέσεις, ισούται με :

$$Q = \frac{X_s}{R_s} = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega R_1 C_1$$

Περιοχή μέτρησης αυτεπαγωγής : 1μH – 1000H

Γέφυρα Hay

Η γέφυρα Hay είναι κατάλληλη για τη μέτρηση αυτεπαγωγής πηνίων με μεγάλο συντελεστή ποιότητας Q , $Q > 10$.



Όταν η γέφυρα ισορροπεί, τότε με εφαρμογή των σχέσεων (*) και (**), προκύπτει :

$$R_X = \frac{(\omega C_1)^2 R_1 R_2 R_3}{1 + (\omega R_1 C_1)^2}$$

και

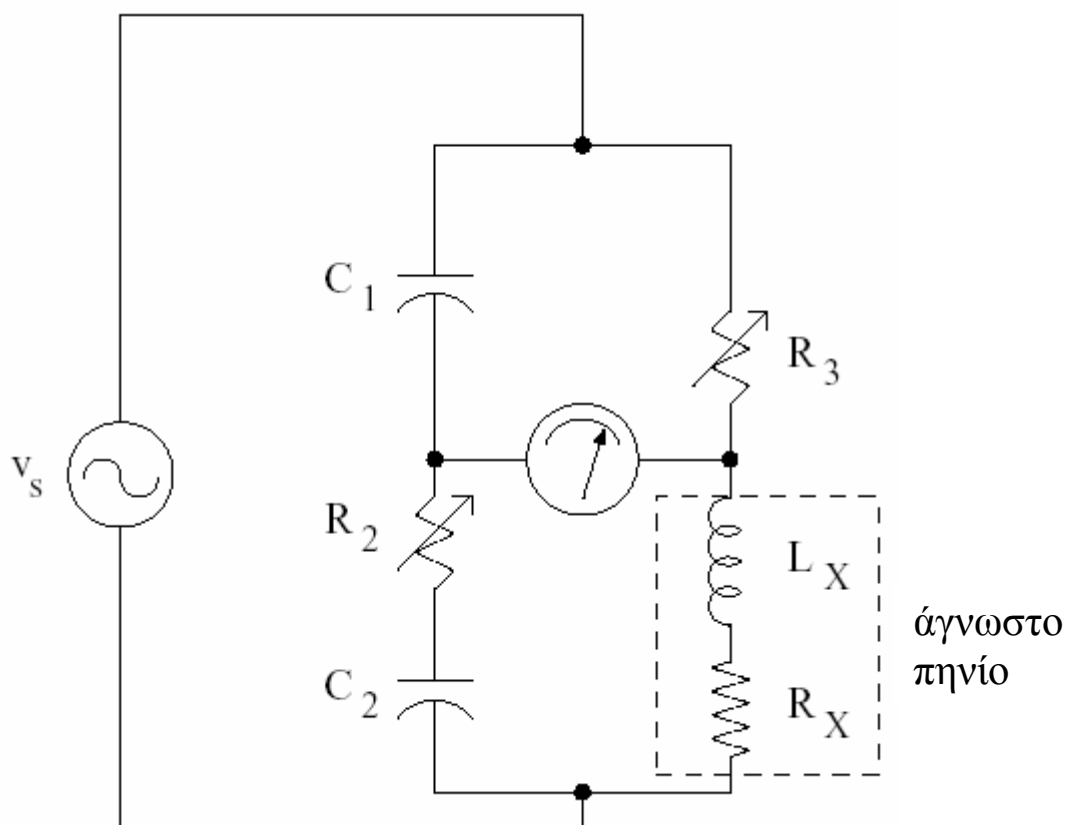
$$L_X = \frac{C_1 R_2 R_3}{1 + (\omega R_1 C_1)^2}$$

Για $(\omega R_1 C_1)^2 \ll 1$ από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι :

$$L_X = C_1 R_2 R_3$$

Γέφυρα Owen

Η γέφυρα Owen είναι κατάλληλη για τη μέτρηση αυτεπαγωγών σε ευρεία περιοχή τιμών.



Όταν η γέφυρα ισορροπεί, τότε με εφαρμογή των σχέσεων (*) και (**), προκύπτει :

$$L_X = C_1 R_2 R_3$$

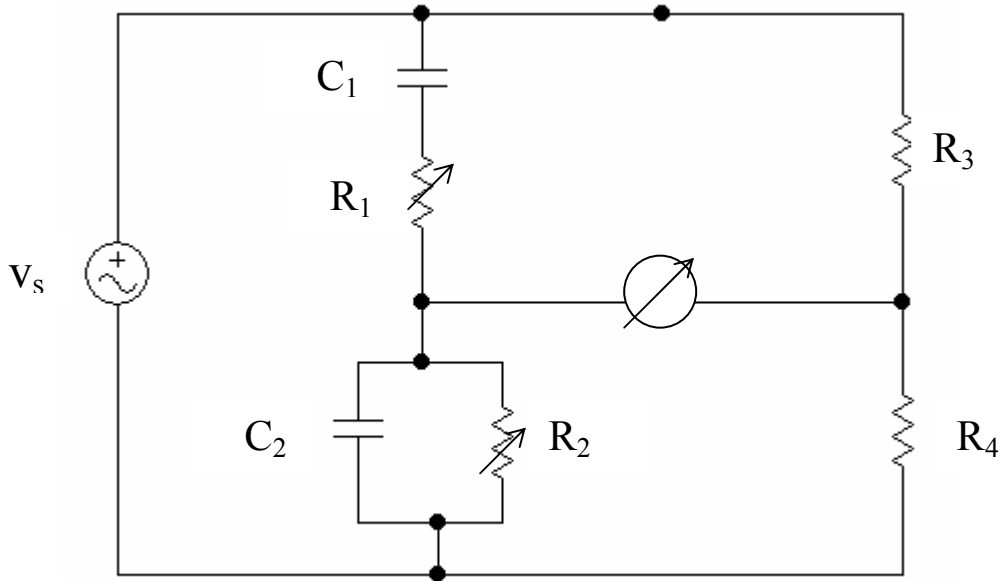
και

$$R_X = R_2 \frac{C_1}{C_2}$$

Παρατηρείται επίσης ότι οι τιμές των στοιχείων σειράς R_X και L_X του ισοδύναμου κυκλώματος του άγνωστου πηνίου, δεν εξαρτώνται από τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου σήματος.

Γέφυρα Wien

Η γέφυρα Wien χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της συχνότητας ημιτονικών σημάτων. Επίσης χρησιμοποιείται σε φίλτρα αποκοπής στενής ζώνης, σε γεννήτριες χαμηλών συχνοτήτων και σε αναλυτές αρμονικών παραμορφώσεων.



Όταν η γέφυρα ισορροπεί, τότε με εφαρμογή των σχέσεων (*) και (**), προκύπτει :

$$\frac{R_3}{R_4} - \left(\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} \right) = 0$$

και

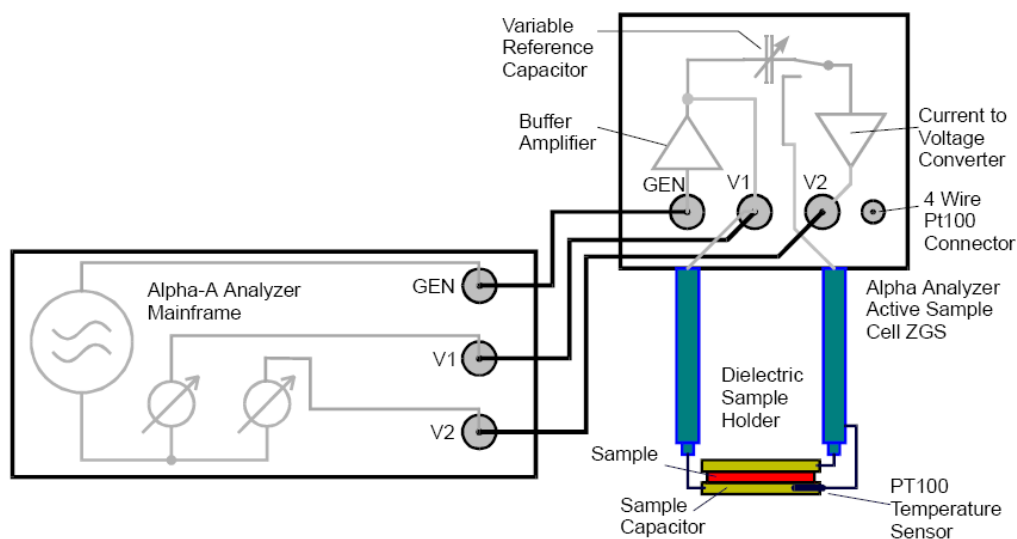
$$\omega C_2 R_1 R_4 - \frac{R_4}{C_1 R_2} = 0$$

Από τη τελευταία σχέση προκύπτει ότι η συχνότητα f είναι :

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

Η εργαστηριακή διάταξη – Novocontrol Alpha Analyzer

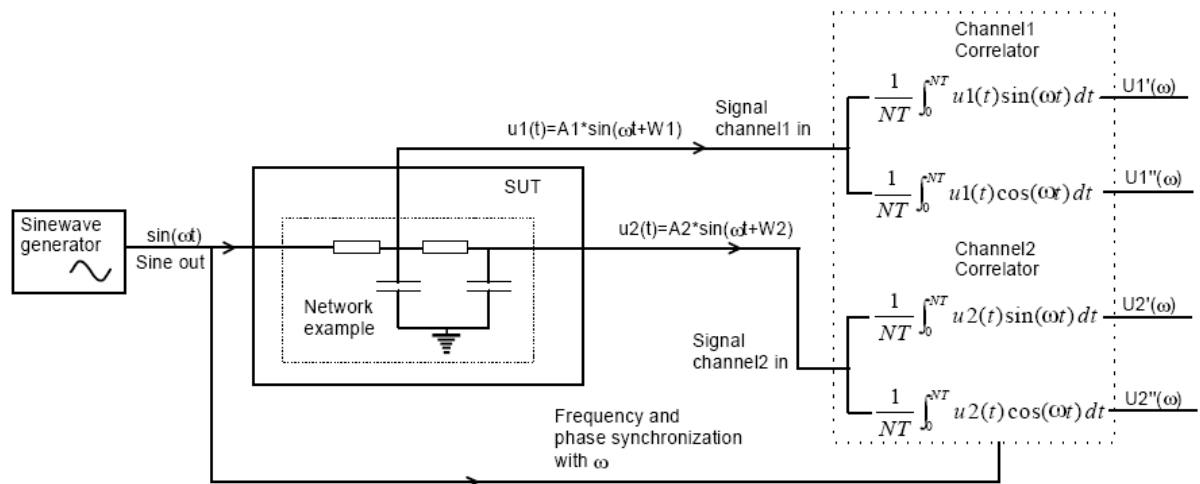
Ο Alpha Analyzer της Novocontrol μετράει (πραγματικό και φανταστικό μέρος) της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς, της μιγαδικής ειδικής αγωγιμότητας και της μιγαδικής αντίστασης υλικών και διατάξεων, σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων με μεγάλη ακρίβεια. Ο Alpha Analyzer είναι μια σύνθετη διάταξη ηλεκτρονικών μετρήσεων, όπου αποτελείται από την κύρια μονάδα (Alpha analyzer mainframe) και αρκετές επιπλέον μονάδες που μπορούν να διασυνδεθούν στην κύρια μονάδα (test interfaces), όπως το ενεργό κελί μέτρησης των υλικών (active sample cell ZGS). Η κύρια μονάδα του Alpha Analyzer περιέχει έναν αναλυτή απόκρισης συχνότητας (frequency response analyzer) με μια γεννήτρια αρμονικών σημάτων και μια γεννήτρια συνεχούς τάσης (dc-bias) και επιπλέον δύο κανάλια εισόδου ac τάσης. Κάθε κανάλι μετράει το πλάτος και τη γωνία φάσης ενός αρμονικού σήματος τάσης που εφαρμόζεται στην κάθε είσοδο.



Διάγραμμα ροής μιας ηλεκτρικής μέτρησης υλικού με τον Alpha Analyzer συνδεδεμένο με το ενεργό κελί μέτρησης ZGS.

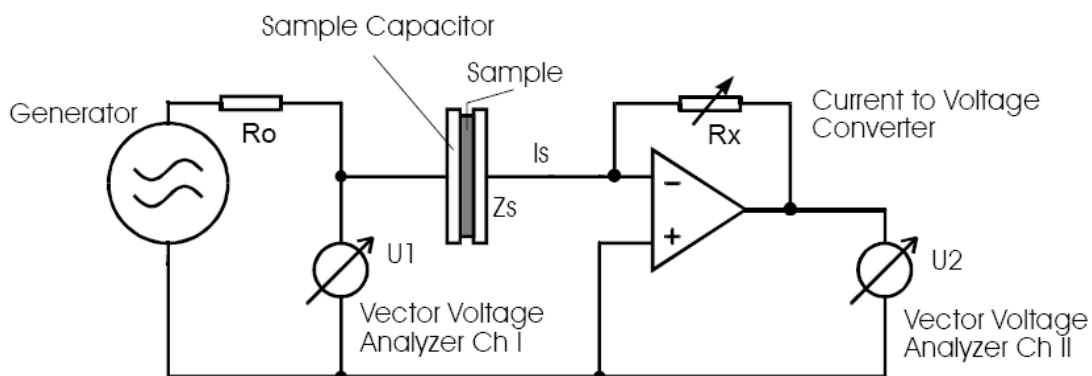
Η σύνδεση του Alpha Analyzer με το ενεργό κελί μέτρησης ZGS επιτρέπει μετρήσεις στις περιοχές: συχνοτήτων $3 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^7$ Hz, αντιστάσεων $10^{-2} - 10^{14}$ Ω, χωρητικοτήτων 1 fF – 1 F, εφαιπτομένης απωλειών $10^{-5} - 10^4$, με εναλλασσόμενη τάση $100 \mu\text{V} - 3 V_{\text{rms}}$ και συνεχή τάση (- 40) – (+40 V) στα 70 mA.

Η αρχή μέτρησης του Alpha Analyzer βασίζεται στην εφαρμογή μιας γνωστής ac τάσης στο υλικό – διάταξη και στη μέτρηση του ρεύματος απόκρισης. Συγκεκριμένα μετριέται το πλάτος του ρεύματος και η γωνία φάσης του ως προς την τάση διέγερσης. Στη συνέχεια, θεωρώντας απόκριση, από το νόμο του Ohm υπολογίζεται η μιγαδική αντίσταση Z^* , η μιγαδική ειδική αγωγιμότητα σ^* , η μιγαδική διηλεκτρική σταθερά ϵ^* κ.αλ.



Διάγραμμα αναλυτή απόκρισης συχνότητας σε σύστημα SUT που αποτελείται από ένα δίκτυο RC.

Η μέτρηση της ac τάσης διέγερσης μετριέται άμεσα από το πρώτο κανάλι (Ch I) του Alpha αναλυτή απόκρισης συχνότητας. Για τη μέτρηση του ρεύματος απόκρισης χρησιμοποιείται επιπρόσθετα ένας μετατροπέας ρεύματος σε τάση, που μετατρέπει το ρεύμα που διαρρέει το υλικό σε τάση η οποία μετριέται από το δεύτερο κανάλι Alpha αναλυτή απόκρισης συχνότητας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Αρχή μέτρησης της αντίστασης ενός υλικού (sample).

Στο παραπάνω σχήμα η αντίσταση R_0 περιορίζει την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το υλικό στην περίπτωση που αυτό χαρακτηρίζεται από χαμηλή αντίσταση. Το ρεύμα I_S που διαρρέει το υλικό εισέρχεται στον μετατροπέα ρεύματος σε τάση. Ο Alpha Analyzer επιλέγει τέτοια τιμή αντίστασης ανάδρασης R_X , έτσι ώστε η U_2 να είναι στην κατάλληλη περιοχή μέτρησης τάσης του δεύτερου καναλιού (Ch II). Στην περίπτωση ιδανικών στοιχείων ισχύει

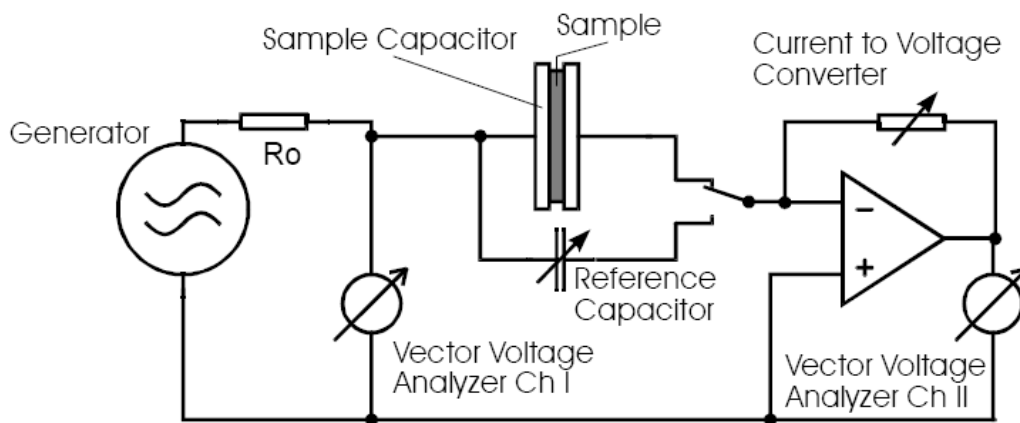
$$I_S = -\frac{U_2}{R_X}$$

και για ιδανική συμπεριφορά του μετατροπέα ρεύματος σε τάση, θα είναι

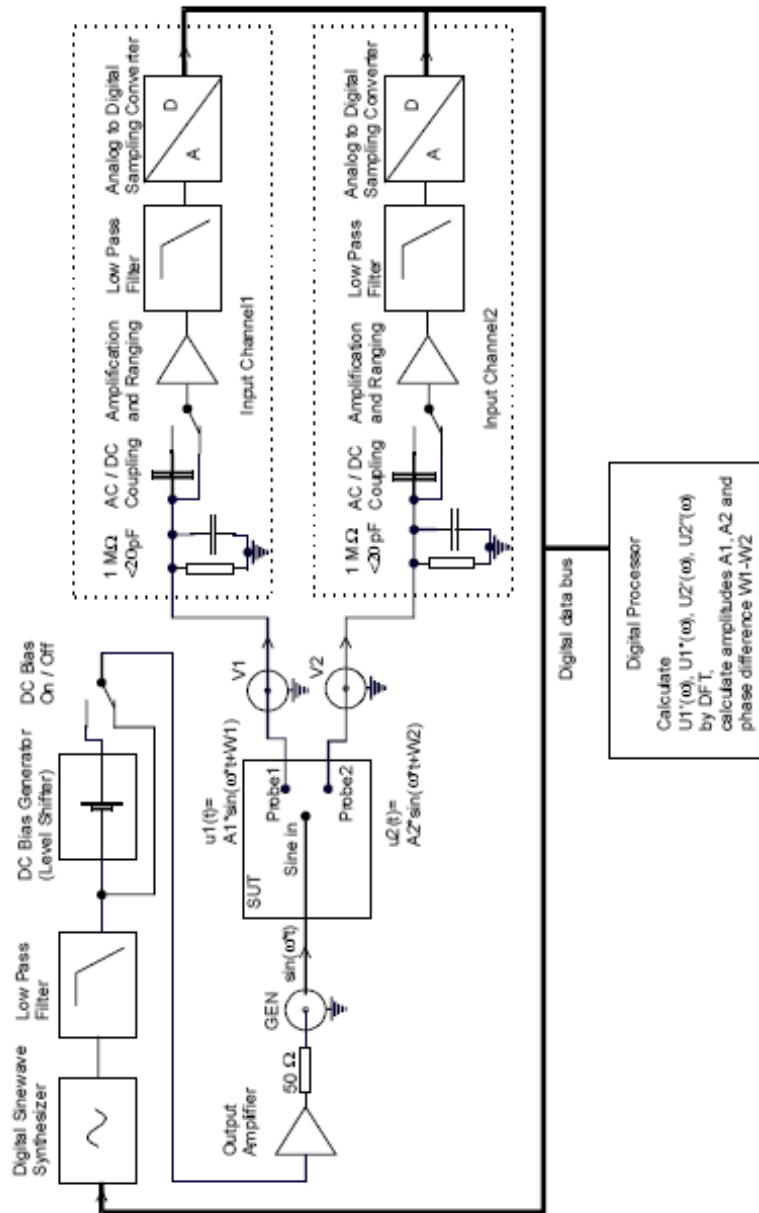
$$Z_S = \frac{U_1}{I_S} = -\frac{U_1}{U_2} R_X$$

Στην παραπάνω διάταξη μπορούν να μετρηθούν πολύ χαμηλά ρεύματα I_S , έως fA, και συνεπώς η μέτρηση πολύ υψηλών αντιστάσεων είναι εφικτή με καλή ακρίβεια έως και στα 10 MHz.

Μετά από τη μέτρηση του υλικού (σε κάθε συχνότητα), πραγματοποιείται και μέτρηση ενός πυκνωτή αναφοράς (reference capacitor), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτή η δεύτερη μέτρηση χρησιμοποιείται για να γίνει κάποιο είδος βαθμονόμησης (calibration) στο μετατροπέα ρεύματος σε τάση. Η τεχνική αυτή βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων, επειδή όλα τα γραμμικά συστηματικά σφάλματα του μετατροπέα ρεύματος σε τάση και των καναλιών ανάλυσης απόκρισης της συχνότητας, ακυρώνονται.



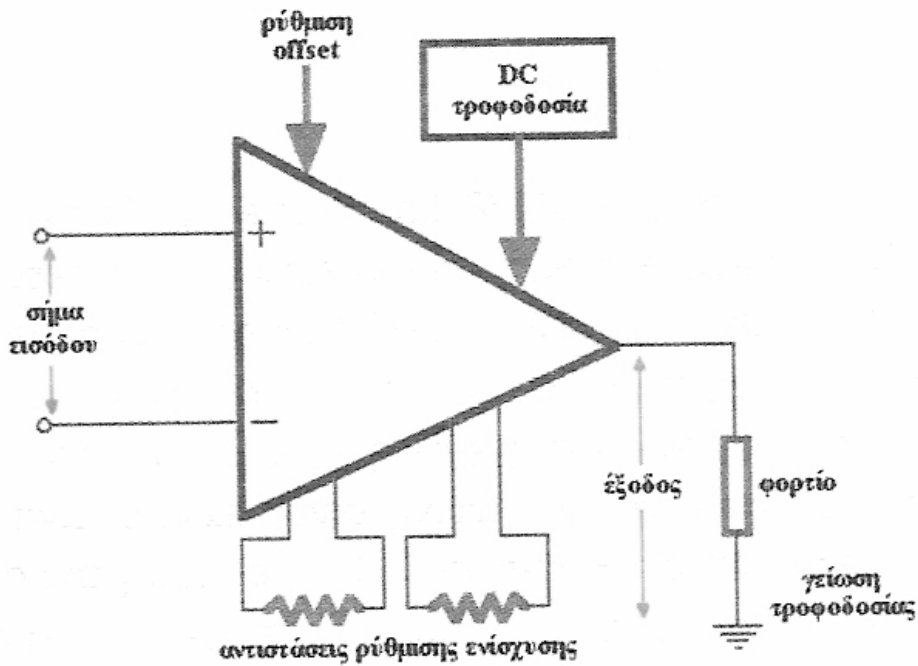
Μέτρηση γνωστού πυκνωτή αναφοράς



Κύριο διάγραμμα ροής του Alpha αναλυτή απόκρισης συχνότητας

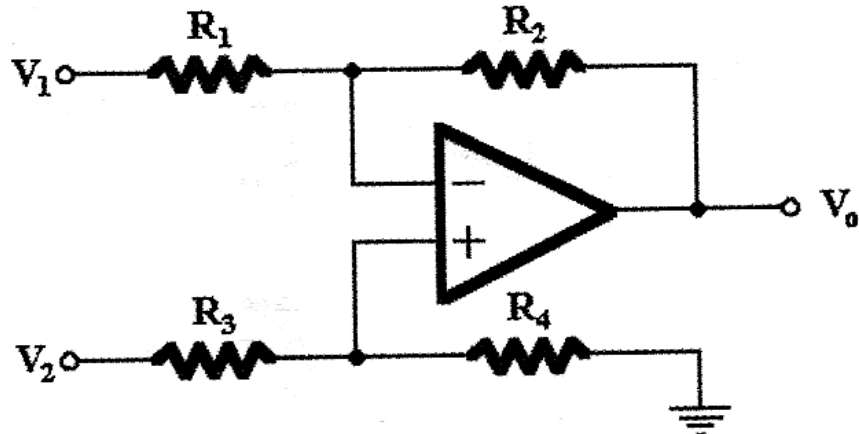
ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι ενισχυτές οργάνων (Instrumentation Amplifier) είναι διαφορικοί ενισχυτές που αποτελούνται από τελεστικούς ενισχυτές (T.E.). Έχουν πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου και παρουσιάζουν επίσης πολύ μεγάλο λόγο απόρριψης κοινού τρόπου τροφοδοσίας (CMRR).



Διάγραμμα λειτουργίας βασικού ενισχυτή μετρήσεων

Ενισχυτής μέτρησης με ένα τελεστικό ενισχυτή



Ενισχυτής μέτρησης με έναν Τ.Ε.

Για ιδανικό Τ.Ε. η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot V_2$$

ο λόγος απόρριψης κοινού τρόπου είναι

$$\text{CMRR} = \frac{A_d}{A_{cm}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_1 R_4 + R_2 R_3 + 2R_2 R_4}{R_1 R_4 - R_2 R_3}$$

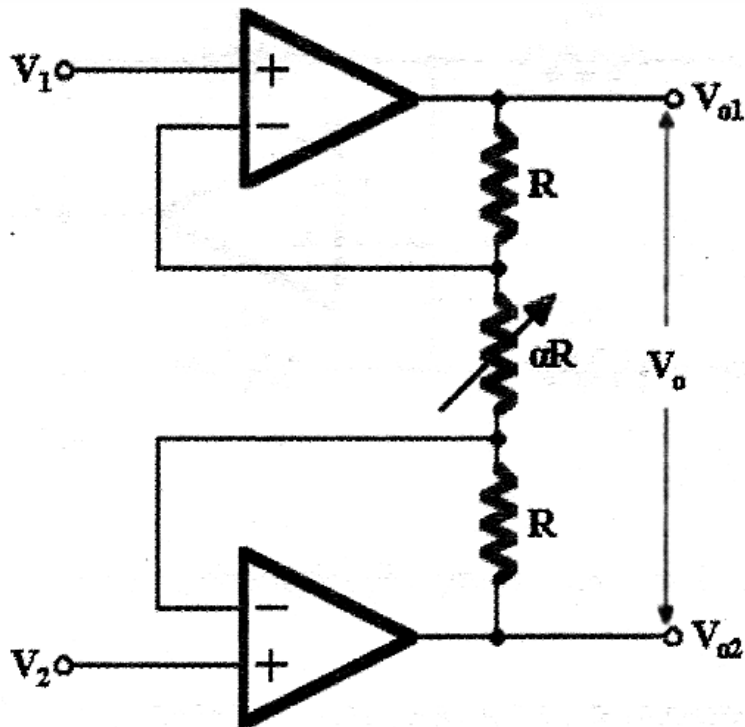
Για ενίσχυση της διαφοράς των σημάτων και όχι των σημάτων κοινού τρόπου, πρέπει $A_{cm}=0$, οπότε

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} = k$$

Παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση εισόδου και δεν είναι εύκολη η ρύθμιση ενίσχυσής του επειδή πρέπει να ταιριάζουν οι λόγοι των αντιστάσεων. Για ενισχυτή με ένα Τ.Ε. είναι $\text{CMRR} \approx 10^4$.

Ενισχυτής μέτρησης με δύο τελεστικούς ενισχυτές

Η ανάλυση ενισχυτή μέτρησης με δύο τελεστικούς ενισχυτές (ή και με τρεις, όπως θα δούμε παρακάτω) παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, γιατί ένας τέτοιος ενισχυτής μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα και γρήγορα χρησιμοποιώντας φθηνά διακριτά στοιχεία.



Ενισχυτής μέτρησης με δύο Τ.Ε.

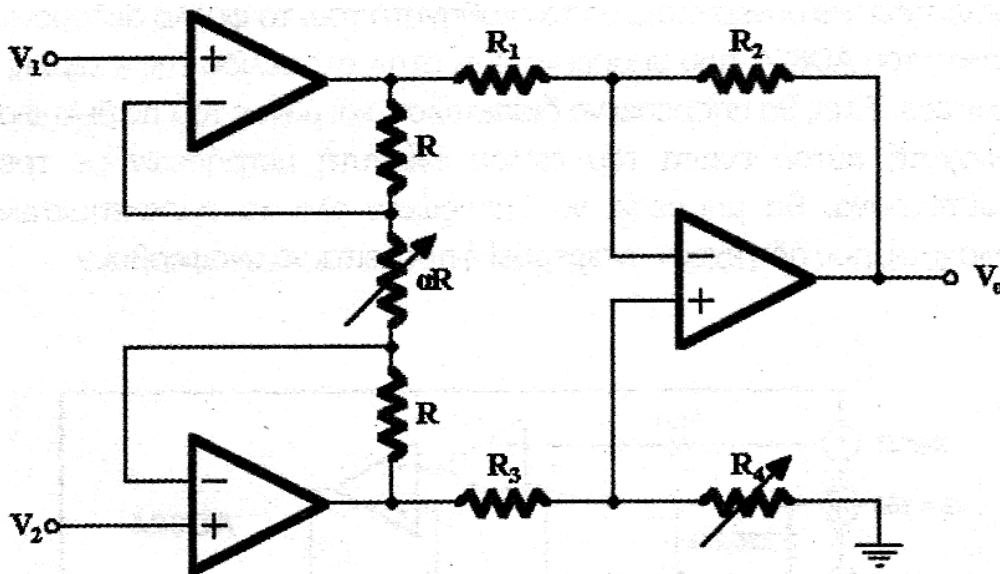
Με την ρυθμιστική αντίσταση αR , ρυθμίζεται η τιμή της ενίσχυσης. Όταν $V_1 > V_2$ η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση

$$V_o = (V_1 - V_2) \cdot \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)$$

Σημαντικό μειονέκτημα του ενισχυτή με δύο Τ.Ε. είναι ότι παρουσιάζει διαφορική έξοδο.

Ενισχυτής μέτρησης με τρεις τελεστικούς ενισχυτές

Το πρόβλημα της διαφορικής εξόδου του ενισχυτή μέτρησης με δύο Τ.Ε. αντιμετωπίζεται από τον ενισχυτή μέτρησης με τρεις Τ.Ε., που φαίνεται στο σχήμα (κάτω). Αυτός είναι ένας από τους πιο χρήσιμους και ακριβείς ενισχυτές, που υπάρχουν σήμερα. Υπάρχει τουλάχιστον ένας σε κάθε σύστημα συλλογής δεδομένων. Αποτελείται από τρεις Τ.Ε. και επτά αντιστάσεις. Στην ουσία είναι ένας ενισχυτής μέτρησης με δύο Τ.Ε. συνδεδεμένος με ενισχυτή μέτρησης με ένα Τ.Ε.



Ενισχυτής μέτρησης με τρεις Τ.Ε.

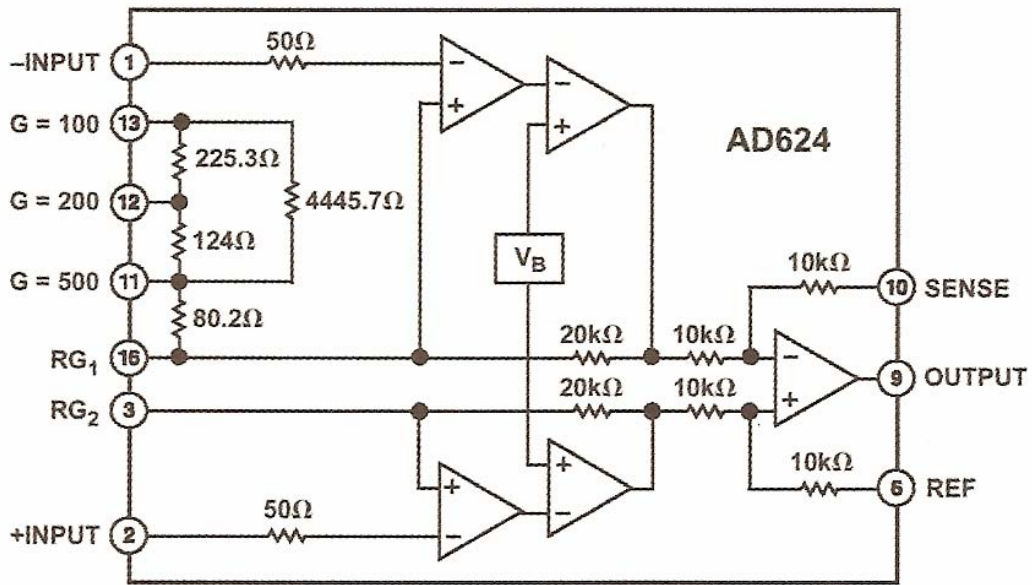
Η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση

$$V_o = k \cdot (V_1 - V_2) \cdot \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)$$

Για το ταίριασμα των αντιστάσεων της δεύτερης βαθμίδας, ρυθμίζεται εξωτερικά η αντίσταση R_4 .

Μονολιθικός ενισχυτής μέτρησης

Οι τεχνικές μονολιθικής ολοκλήρωσης επιτρέπουν τη μείωση του κόστους παραγωγής διαφόρων κυκλωμάτων. Ένας από τους πρώτους μονολιθικούς ενισχυτές μετρήσεων ήταν ο AD 520 της εταιρίας Analog Devices. Αυτός έχει αντικατασταθεί από βελτιωμένους ενισχυτές, όπως ο AMP-01 της εταιρίας Precision Monolithics, οι AD524 και AD624 της Analog Devices και ο LM363 της National Semiconductors.

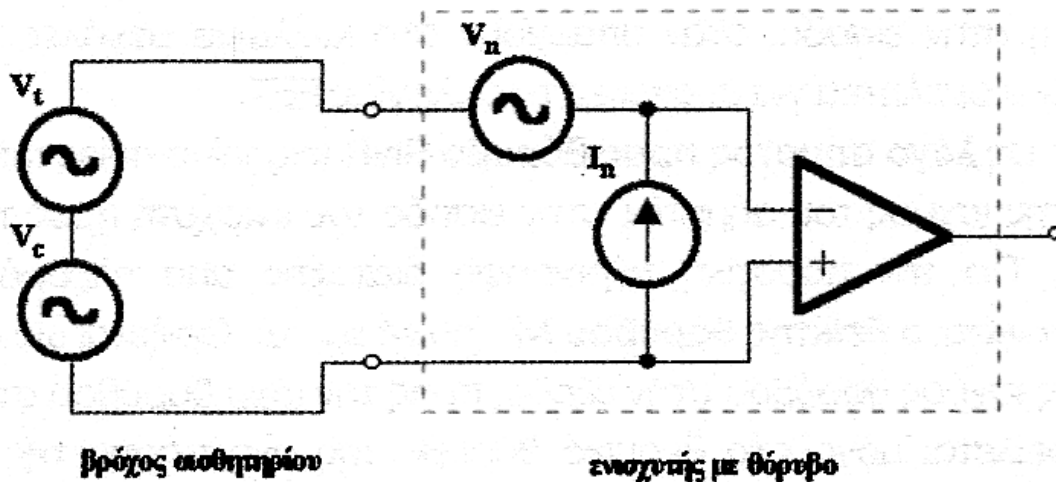


Εσωτερικό διάγραμμα λειτουργίας του AD 624 ενισχυτή μετρήσεων

ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

Η εφαρμογή ενισχυτή σε σύστημα διευθέτησης σήματος αισθητήρα απαιτεί την επίτευξη χαμηλού θορύβου, ειδικά στην περίπτωση ενίσχυσης σημάτων πολύ χαμηλής στάθμης. Ως θόρυβο μπορούμε να ορίσουμε την ενέργεια, η οποία, όταν προστίθεται σε κάποιο σήμα, **αλλοιώνει το πληροφοριακό περιεχόμενό του**. Η ποσότητα του θορύβου της εισόδου δεν πρέπει να υπερβαίνει κάποιο συγκεκριμένο πλάτος, το οποίο καθορίζεται από την ελάχιστη τιμή του πλάτους του σήματος εισόδου. Τα στοιχεία, που είναι υπεύθυνα για την παραγωγή του θορύβου, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Στοιχεία, που παρεμβάλλουν θόρυβο στον ενισχυτή, αλλά ανήκουν στο κύκλωμα του αισθητήρα.
- Στοιχεία ή μέρη εσωτερικά του ίδιου του ενισχυτή, τα οποία λειτουργούν ως πηγές θορύβου με αναφορά προς την εισοδό του, όπως φαίνεται στο σχήμα



Πηγές θορύβου σε ενισχυτή

Στο σχήμα (πάνω) V_t είναι ο θερμικός θόρυβος, V_c ο θόρυβος επαφής, I_n το ρεύμα θορύβου ενισχυτή και V_n η τάση θορύβου ενισχυτή. Ο τυχαίος θόρυβος απεικονίζεται σα γεννήτρια τάσης.

Πολύ σημαντική κατηγορία θορύβου, που παρουσιάζεται σε όλα τα στοιχεία, που περιέχουν αντίσταση, είναι ο **θερμικός θόρυβος**. Ο θερμικός θόρυβος (thermal noise) V_t ορίζεται ως η ενεργός τιμή της τάσης, που αναπτύσσεται στα άκρα της κάθε αντίστασης, λόγω τυχαίας κίνησης των ηλεκτρονίων στην αντίσταση αυτή στην απόλυτη θερμοκρασία και περιγράφεται από τη σχέση

$$V_t = \sqrt{4kTR_s} \quad (\text{Volt/} \sqrt{\text{Hz}})$$

Για να μειωθεί ο θερμικός θόρυβος πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως επίσης και η αντίσταση R_s της πηγής.

Δείκτης θορύβου (noise figure, NF)

Ο δείκτης θορύβου ορίζεται ο λόγος της συνολικής ισχύος θορύβου στην έξοδο, προς την ισχύ θορύβου στην έξοδο η οποία οφείλεται μόνο στο θερμικό θόρυβο της αντίστασης της πηγής του σήματος. Εκφράζεται σε decibels και είναι μηδέν όταν η ενισχυτική διάταξη είναι απαλλαγμένη από θόρυβο. Δίνεται από τη σχέση

$$NF = 10 \log \frac{N_{po}}{G_p N_{pi}}$$

όπου N_{po} η ολική ισχύς θορύβου στην έξοδο, N_{pi} η ισχύς θορύβου στην είσοδο, η οποία οφείλεται στην αντίσταση της πηγής του σήματος και G_p η ενίσχυση ισχύος του σήματος. Θέτοντας $G_p = S_{po}/S_{pi}$, όπου S_{pi} και S_{po} η ισχύς του σήματος στην είσοδο και έξοδο αντίστοιχα, βρίσκουμε

$$NF = 10 \log \frac{S_{pi} / N_{pi}}{S_{po} / N_{po}}$$

Άρα, ο δείκτης θορύβου δίνει σε dB το πηλίκο του λόγου σήματος προς θόρυβο στην είσοδο δια του λόγου σήματος προς θόρυβο στην έξοδο του ενισχυτή.