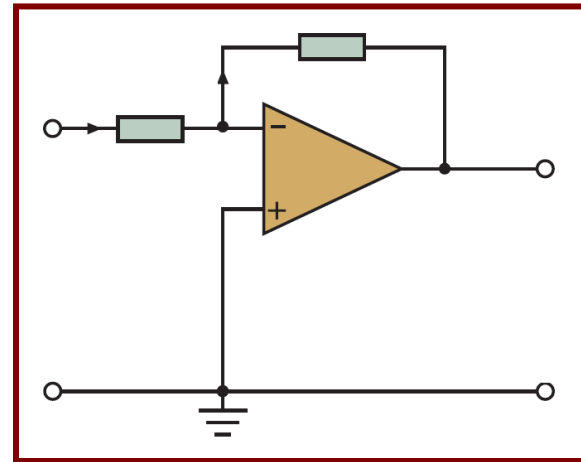


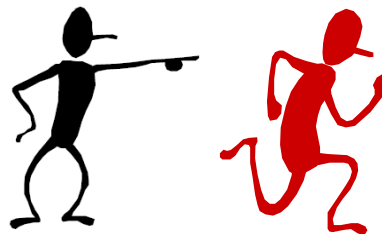
# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ & ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Λάμπρος Μπισδούνης  
Καθηγητής



4<sup>η</sup> ενότητα

ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ  
ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ



# Περιεχόμενα 4<sup>ης</sup> ενότητας

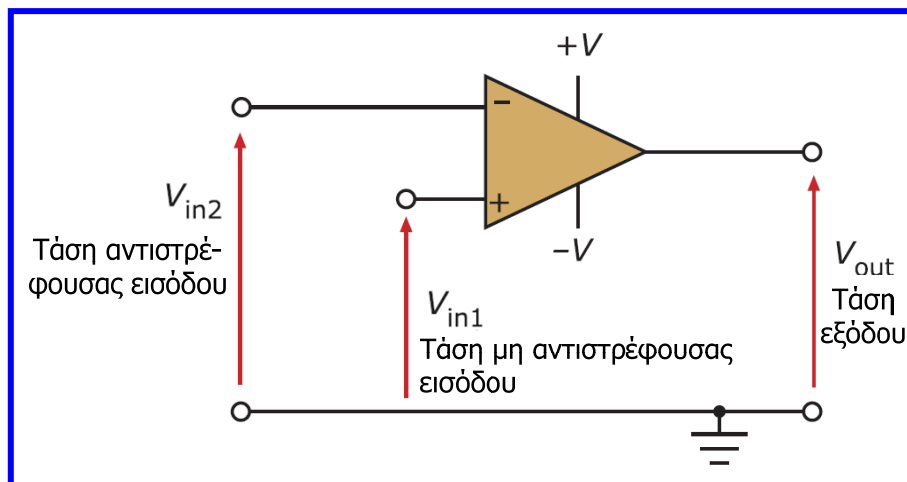
- Οι τεχνικές παθητικών κυκλωμάτων δε μπορούν να ικανοποιήσουν όλες τις απαιτήσεις που υπάρχουν και ρύθμιση σημάτων και προσαρμογή, οπότε στην πράξη συνδυάζονται με **τεχνικές ενεργητικών κυκλωμάτων**.
- Η ενότητα περιγράφει αρχικά την εκτέλεση λειτουργιών **προσαρμογής (διασύνδεσης)** και **ρύθμισης σήματος** με **ενεργητικά κυκλώματα**.
- Εισαγωγή στα ενεργητικά κυκλώματα – Τελεστικός ενισχυτής.
- Ρύθμιση σήματος και διασύνδεση με κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών: ενισχυτές αντιστροφής και μη αντιστροφής, ενισχυτής άθροισης, ακολουθητής τάσης, ενισχυτές διαφοράς και οργανολογίας, ενισχυτές ολοκλήρωσης και διαφόρισης, μετατροπείς ρεύματος σε τάση και τάσης σε ρεύμα, συγκριτής τάσεων.
- Κυκλώματα για ψηφιακά συστήματα μέτρησης: αναλογικοί διακόπτες και πολυπλέκτες, κυκλώματα δειγματοληψίας και συγκράτησης, μετατροπείς A/D και D/A.
- Μετατροπέας D/A ισοζυγισμένων αντιστάσεων, μετατροπείς κλίμακας R-2R λειτουργίας τάσης και ρεύματος.
- Μετατροπέας A/D κλιμακωτής ανόδου, παράλληλος μετατροπέας A/D, μετατροπέας A/D διαδοχικών προσεγγίσεων, μετατροπέας A/D ολοκλήρωσης.
- Συμπεράσματα και ασκήσεις.

# Εισαγωγή στα ενεργητικά κυκλώματα

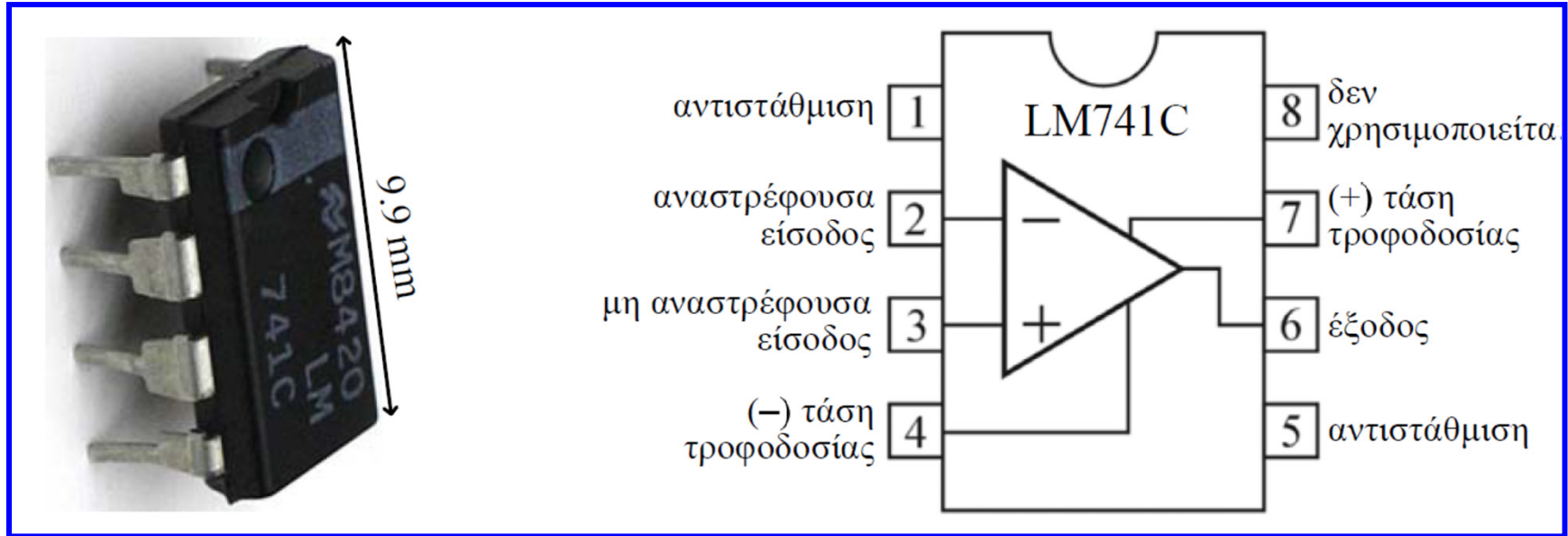
- Τα ενεργητικά κυκλώματα αποτελούνται από **ενεργητικά στοιχεία** (όπως **δίοδοι**, **τρανζίστορ** και **ολοκληρωμένα κυκλώματα**) τα οποία μπορούν να **ελέγχουν τάσεις** και **ρεύματα**, επομένως μπορούν να αλλάξουν το μέγεθος τάσεων ή ρευμάτων ή να εκτελούν λειτουργία διακόπτη στα κυκλώματα.
- Με την αλματώδη πρόοδο της ηλεκτρονικής, ο σχεδιασμός με βάση διακριτά στοιχεία παραχώρησε τη θέση του στο σχεδιασμό με βάση **ολοκληρωμένα κυκλώματα** με τα οποία απλοποιούνται οι τεχνικές επεξεργασίας και ρύθμισης σημάτων και ταυτόχρονα βελτιώνεται η αξιοπιστία τους.
- Έτσι προβλήματα ρύθμισης ή επεξεργασίας σήματος επιλύονται με μικρότερο μέγεθος κατασκευής και κόστος και με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.
- **Ενισχυτής (amplifier)**: ηλεκτρονικό στοιχείο που αποτελείται από ενεργητικά και παθητικά στοιχεία, έχει τροφοδοσία ξεχωριστή από το σήμα εισόδου του και ενισχύει ένα σήμα τάσης ή ρεύματος χωρίς να αλλάζει βασικά χαρακτηριστικά του.
- **Τελεστικός ενισχυτής (operational amplifier, op-amp)**: ειδικός τύπος ενισχυτή, κατασκευασμένος σε ολοκληρωμένο κύκλωμα, που έχει τη δυνατότητα εκτέλεσης μαθηματικών λειτουργιών σημάτων και αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο των περισσότερων ενεργητικών κυκλωμάτων διασύνδεσης και ρύθμισης σήματος.

# Τελεστικός ενισχυτής (ΤΕ)

- Ο ΤΕ διαθέτει πέντε ακροδέκτες: δύο εισόδους, μία έξοδο και δύο τροφοδοσίες.
- Ο ΤΕ διαθέτει **διαφορική είσοδο** με **μη αντιστρέφουσα είσοδο  $V_{in1}$  (+)** και **αντιστρέφουσα είσοδο  $V_{in2}$  (-)**. Η έξοδος είναι σε φάση (ίδιο πρόσημο) με την μη αντιστρέφουσα είσοδο και σε διαφορά φάσης  $180^\circ$  (αντίθετο πρόσημο) με την αντιστρέφουσα είσοδο.
- Ο ΤΕ είναι ένας ενισχυτής τάσης πολλαπλών βαθμίδων απευθείας σύζευξης που είναι κατασκευασμένος για να ανιχνεύει τη διαφορά των σημάτων τάσης που εφαρμόζονται στους ακροδέκτες εισόδου ( $V_{in1} - V_{in2}$ ), να πολλαπλασιάζει τη διαφορά αυτή με  $A_o$  (**απολαβή ή ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου**) και να προκαλεί την εμφάνιση του αποτελέσματος  $A_o \cdot (V_{in1} - V_{in2})$  στον **ακροδέκτη εξόδου**.
- Η **απολαβή ανοικτού βρόχου  $A_o$**  του ΤΕ είναι **πολύ υψηλή** ( $\sim 50.000$ ), η **αντίσταση εισόδου** είναι **πολύ υψηλή** ( $\sim 1\text{M}\Omega$ ) και η **αντίσταση εξόδου χαμηλή** ( $\sim 100\ \Omega$ ).



# Τελεστικός ενισχυτής (ΤΕ)



- Οι ακροδέκτες 2 και 3 είναι η αναστρέφουσα και μη αναστρέφουσα είσοδος του ΤΕ.
- Ο ΤΕ τροφοδοτείται με συμμετρική συνεχή τάση (τυπικής τιμής  $\pm 15V$ , ακροδέκτες 4, 7).
- Λόγω κατασκευαστικής ασυμμετρίας εμφανίζεται μεταξύ των δύο εισόδων παρασιτική διαφορά δυναμικού, η οποία προστίθεται στο σήμα εισόδου, με αποτέλεσμα για μηδενικό σήμα εισόδου να εμφανίζεται σήμα μικρού πλάτους (μερικών mV) στην έξοδο.
- Για να μηδενιστεί το σφάλμα, είναι απαραίτητη η εισαγωγή μιας αντισταθμιστικής τάσης (offset voltage), μέσω μιας μεταβλητής αντίστασης (nulling potentiometer) στους ακροδέκτες 1 και 5, έτσι ώστε για σήμα εισόδου 0 να λαμβάνεται σήμα εξόδου 0.

# Ιδανικός τελεστικός ενισχυτής (ΙΤΕ)

- Στον ΙΤΕ, η **απολαβή τάσης ανοικτού βρόχου** θεωρείται ότι έχει **άπειρη τιμή**, αλλά ο ΙΤΕ δεν χρησιμοποιείται χωρίς ανατροφοδότηση, οπότε στις εφαρμογές του η ενίσχυση εξαρτάται από το κύκλωμα ανατροφοδότησης.
- Στον ΙΤΕ, η διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες εισόδου είναι μηδενική, οπότε οι τάσεις στους ακροδέκτες εισόδου είναι ίσες.

$$(V_{in1} - V_{in2}) = \frac{1}{A_o} \cdot V_{out} \quad A_o = \infty \Rightarrow V_{in1} - V_{in2} = 0 \Rightarrow V_{in1} = V_{in2}$$

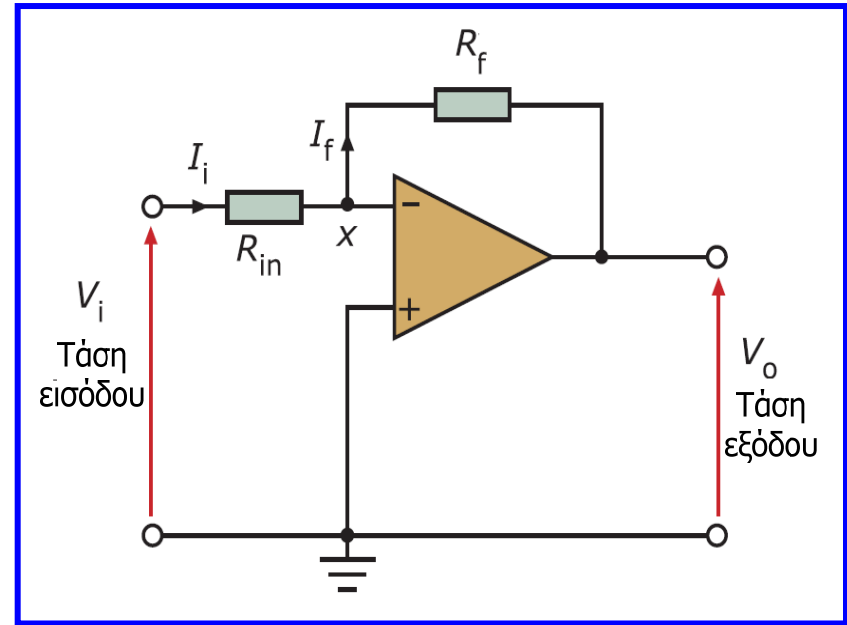
Ιδιότητα  
αντιγραφής  
τάσεων  
στον ΙΤΕ

- Ο ΙΤΕ δεν «τραβάει» ρεύμα από τις εισόδους του ( $I_1 = I_2 = 0$ ), δηλ. ο ΙΤΕ δεν φορτώνει τα κυκλώματα προς τα οποία συνδέεται, συνεπώς η **αντίσταση εισόδου** θεωρείται **άπειρη**.
- Η **αντίσταση εξόδου** του ΙΤΕ θεωρείται **μηδενική**, οπότε η τάση εξόδου δεν επηρεάζεται από το φορτίο στο οποίο συνδέεται.
- Οι αισθητήρες και τα κυκλώματα μέτρησης χρησιμοποιούν ΤΕ με διαφορετικούς τρόπους. Οι ΤΕ σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία δομούν κυκλώματα ρύθμισης σημάτων που εκτελούν διάφορες λειτουργίες.

# Ενισχυτής αντιστροφής

- Το ρεύμα στις εισόδους του ΙΤΕ είναι μηδενικό:

$$I_{in} = I_f \Rightarrow \frac{V_i - V_x}{R_{in}} = \frac{V_x - V_o}{R_f} \Rightarrow$$
$$\frac{V_i}{R_{in}} + \frac{V_o}{R_f} = \left( \frac{1}{R_{in}} + \frac{1}{R_f} \right) V_x$$



- Λόγω της ιδιότητας αντιγραφής τάσεων του ΙΤΕ, η αντιστρέφουσα είσοδος ( $V_x$ ) συμπεριφέρεται ως **εικονική γη (virtual earth)**:

$$V_x = 0 \Rightarrow V_o = -\frac{R_f}{R_{in}} \cdot V_i \Rightarrow A = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_{in}}$$

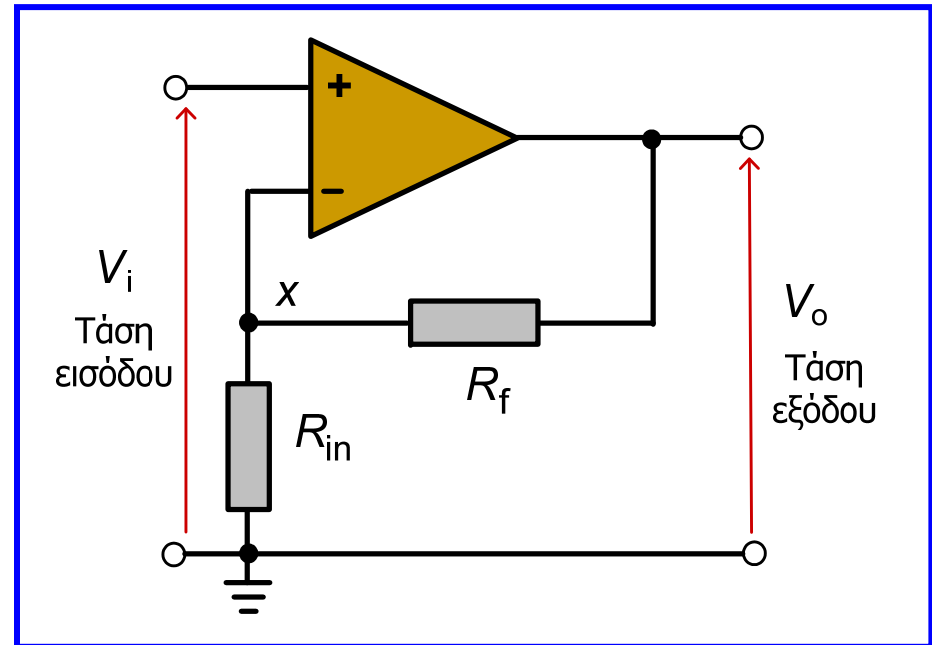
Απολαβή  
ενισχυτή  
αντιστροφής

- Το κύκλωμα δηλαδή αντιστρέφει το σήμα εισόδου και το ενισχύει ή το υποβαθμίζει ανάλογα με το λόγο των αντιστάσεων ανατροφοδότησης και εισόδου.

# Ενισχυτής μη αντιστροφής

- Από το διαιρέτη τάσης που δημιουργείται στο κύκλωμα ανατροφοδότησης:

$$V_x = \frac{R_{in}}{R_f + R_{in}} \cdot V_o \quad V_x = V_i \Rightarrow$$
$$V_i = \frac{R_{in}}{R_f + R_{in}} \cdot V_o \Rightarrow$$
$$V_o = \frac{R_f + R_{in}}{R_{in}} \cdot V_i \Rightarrow$$
$$A = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_{in}}$$



Η τιμή της τάσης εξόδου είναι διπλάσια με την τιμή της τάσης εισόδου όταν η αντίσταση ανατροφοδότησης είναι όμοια με την αντίσταση εισόδου.

Απολαβή ενισχυτή μη αντιστροφής



# Ενισχυτής άθροισης

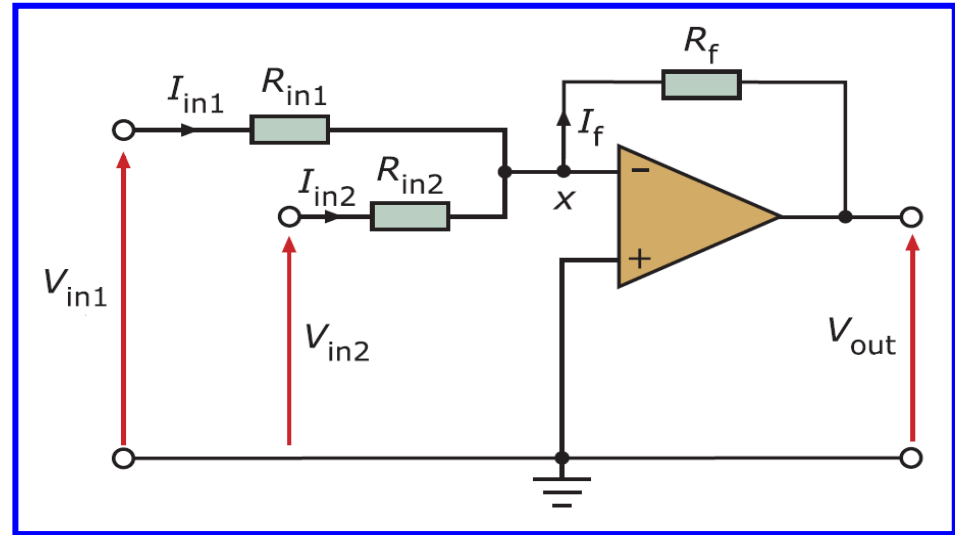
- Είναι ενισχυτής αντιστροφής με περισσότερες από μία εισόδους.

- Εάν  $R_{in1} = R_{in2} = R_f$  :

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

- Εάν  $R_{in1} = R_{in2} = 2 \cdot R_f$  προκύπτει στην έξοδο το αντίθετο του μέσου όρου των σημάτων εισόδου.

- Με προσθήκη πιο πολλών αντιστάσεων στον κόμβο άθροισης υπολογίζεται το άθροισμα πιο πολλών τάσεων.



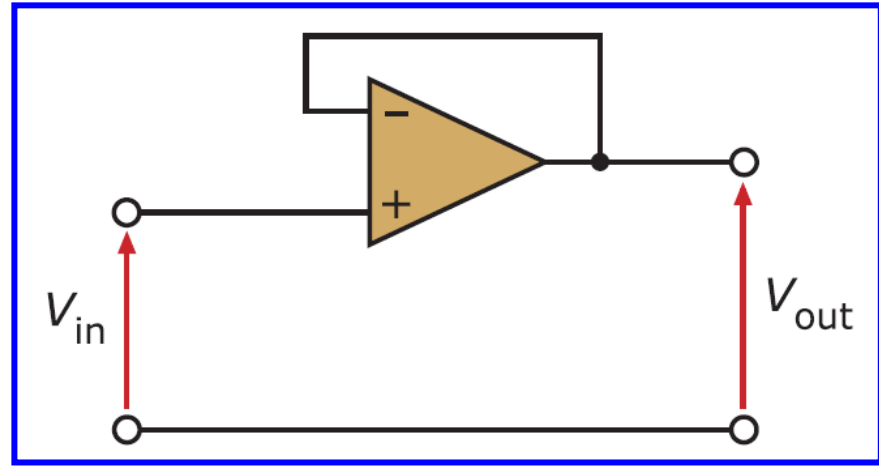
$$V_{out} = -R_f \cdot \left( \frac{V_{in1}}{R_{in1}} + \frac{V_{in2}}{R_{in2}} \right)$$

Προκύπτει εύκολα από τον ενισχυτή αντιστροφής με εφαρμογή της αρχής επαλληλίας

**Παράδειγμα χρήσης:** εάν εφαρμόσουμε ως εισόδους σε ενισχυτή άθροισης δύο σήματα αντίθετων φάσεων, τότε το αποτέλεσμα (έξοδος του ενισχυτή) θα είναι ένα σήμα ανεστραμμένο ως προς το σήμα εισόδου με το μεγαλύτερο πλάτος, του οποίου το πλάτος θα είναι ίσο με τη διαφορά των πλατών των δύο σημάτων.

# Ακολουθητής τάσης ή απομονωτής

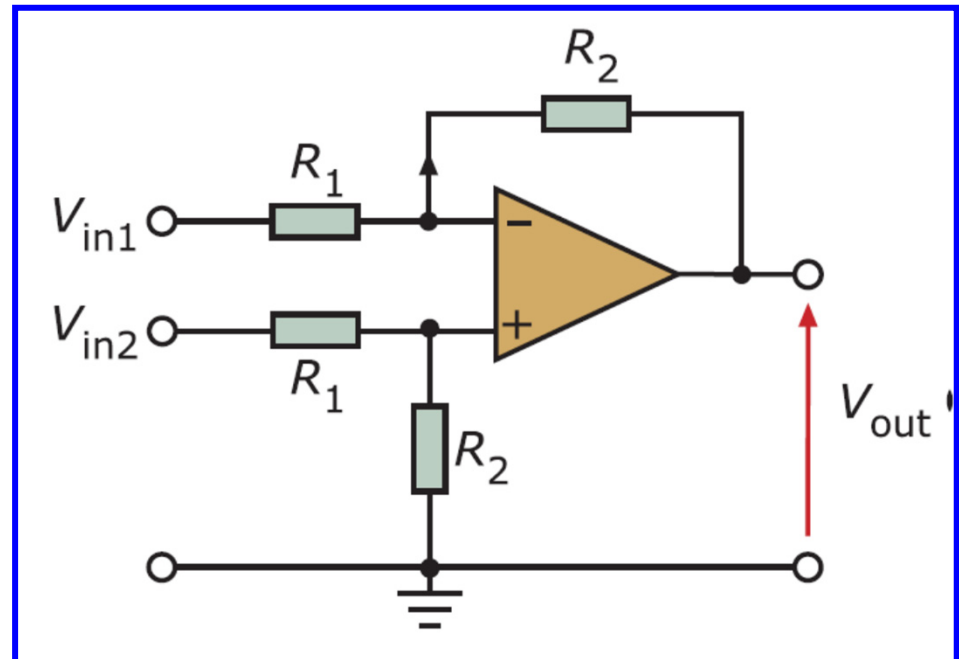
- Ο ακολουθητής τάσης χρησιμεύει στις περιπτώσεις όπου δεν πρέπει να τεθεί φορτίο στον αισθητήρα.
- Ο ΤΕ είναι κατάλληλος για την εφαρμογή αυτή επειδή έχει υψηλή αντίσταση εισόδου και μικρή αντίσταση εξόδου.



- Η **απολαβή** του κυκλώματος είναι **μοναδιαία**, που σημαίνει ότι η **τάση εξόδου** είναι **ίση** με την **τάση εισόδου**.
- Η αντίσταση εισόδου είναι πολύ μεγάλη, οπότε δεν επηρεάζει την τάση εξόδου του κυκλώματος στο οποίο συνδέεται (π.χ. αισθητήρας), ενώ η αντίσταση εξόδου είναι πολύ μικρή (δηλ. ο απομονωτής δεν επηρεάζεται από το φορτίο που του συνδέεται) και η τάση εξόδου ακολουθεί την τάση εισόδου .
- Συνεπώς, ο ακολουθητής τάσης είναι χρήσιμος απομονωτής.

# Ενισχυτής διαφοράς

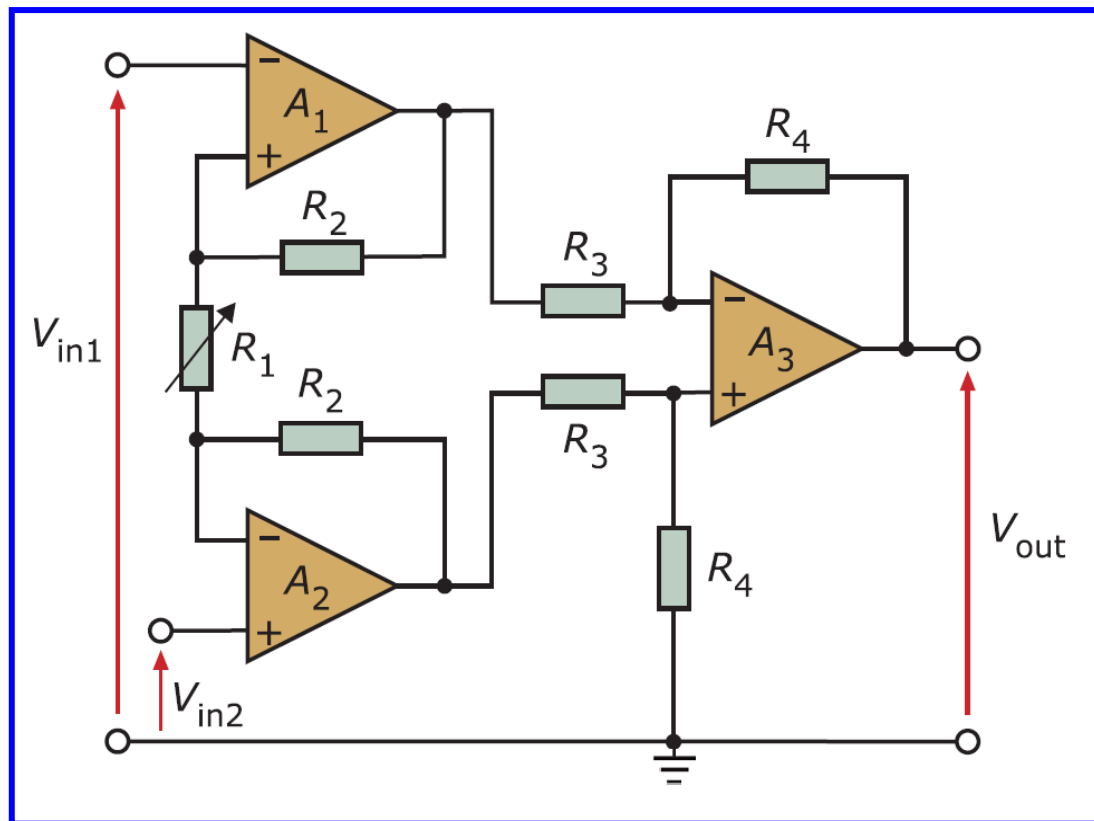
- Χρησιμοποιείται για να ενισχύει τη διαφορά δύο σημάτων, όπως είναι αυτά που παράγει στα δύο άκρα εξόδου της μία γέφυρα Wheatstone και απορρίπτει τα σήματα ίδιας πολικότητας (που αφορούν συνήθως θόρυβο).
- Λόγω των αντιστάσεων που συνδέονται στην είσοδο, η τελική αντίσταση εισόδου έχει μικρότερη τιμή από άλλες περιπτώσεις με αποτέλεσμα ο ενισχυτής να «τραβάει» περισσότερο ρεύμα.
- Για να αντισταθμιστεί αυτό το γεγονός, κατασκευάστηκε ο ενισχυτής οργανολογίας (instrumentation amplifier) ή ενισχυτής οργάνων μέτρησης



$$V_{out} = \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot (V_{in2} - V_{in1})$$

# Ενισχυτής οργανολογίας

- Οι δύο πρώτοι ΤΕ λειτουργούν ως ενισχυτές μη αντιστροφής και παρέχουν ένα σύστημα πολύ υψηλής αντίστασης εισόδου, ώστε να υποδέχονται κάθε σήμα εισόδου και να μην επηρεάζουν την έξοδο των αισθητήρων.
- Στη συνέχεια τα σήματα διαβιβάζονται στον τρίτο ΤΕ (ενισχυτής διαφοράς), ο οποίος εκτελεί τη λειτουργία της αφαίρεσης και της επιπλέον ενίσχυσης.
- Μέσω της μεταβλητής αντίστασης  $R_1$ , παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης της ενίσχυσης διαφοράς και της απολαβής απόρριψης σημάτων ίδιας πολικότητας.



$$V_{out} = \left( 1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{R_4}{R_3} \cdot (V_{in2} - V_{in1})$$

# Ενισχυτής οργανολογίας

- Επειδή τα παρεχόμενα σήματα από τους αισθητήρες συχνά συνοδεύονται από ανεπιθύμητα σήματα παρεμβολών ή θόρυβο, είναι απαραίτητο οι ενισχυτές οργανολογίας να έχουν υψηλή απολαβή απόρριψης σημάτων ίδιας πολικότητας (κοινού τρόπου – common mode).
- Για παράδειγμα, τα σήματα που δημιουργούνται από την ηλεκτρική δραστηριότητα της καρδιάς έχουν πλάτος μικρότερο από 50  $\mu\text{V}$ , ενώ συνοδεύονται από σήματα παρεμβολών που ξεπερνούν τα 100 mV, οπότε χρησιμοποιούμε ενισχυτή οργανολογίας για να αναδείξουμε τα χρήσιμα σήματα μικρού πλάτους.

$E_i$ : σήμα εξόδου αισθητήρα που συνδέεται και στις δύο εισόδους του ενισχυτή

$E_{cm}$ : πηγή θορύβου ή παρεμβολής (θεωρούμε ότι επιδρά εξίσου στο ωφέλιμο σήμα)

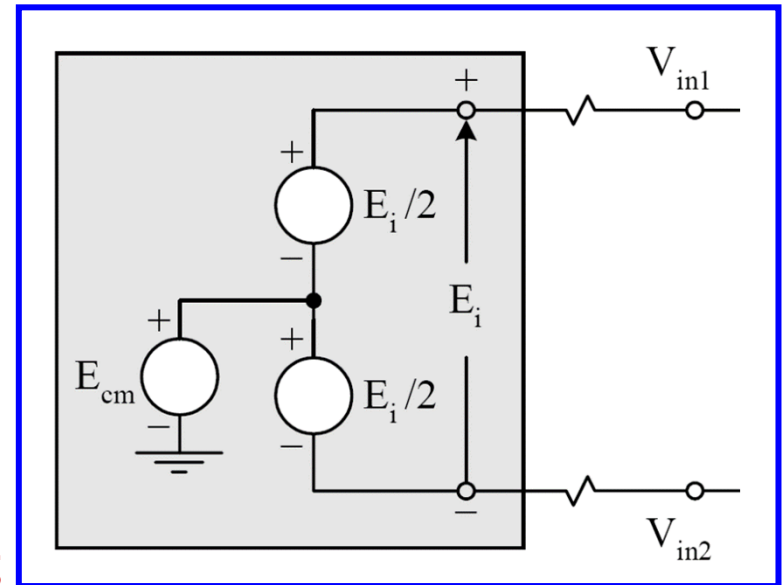
$$V_{out} \sim V_{in2} - V_{in1}$$
$$V_{in1} = E_{cm} + \frac{E_i}{2}$$
$$V_{in2} = E_{cm} - \frac{E_i}{2}$$

Απόρριψη σήματος  
κοινού τρόπου ή  
κοινού σήματος

$$V_{out} \sim -E_i$$

$$A_{cm} = \frac{V_{out}}{E_{cm}}$$

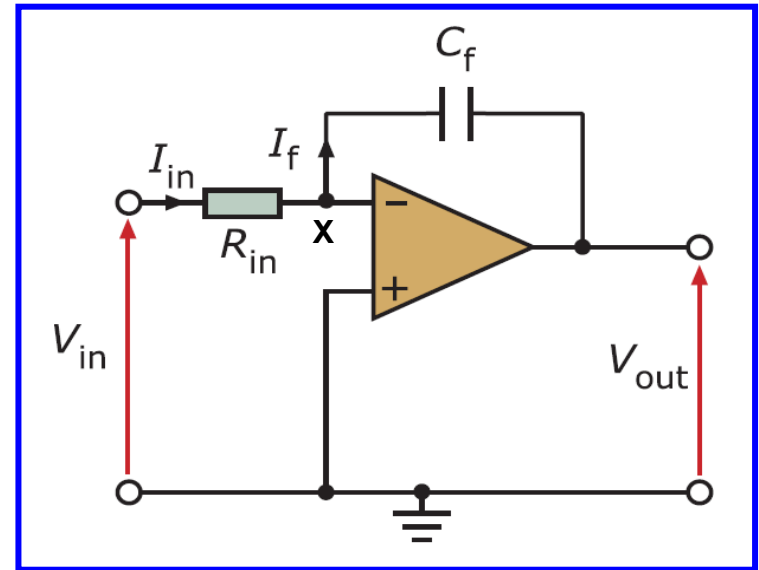
Μικρή αλλά μη μηδενική απολαβή απόρριψης κοινού σήματος στους πραγματικούς ενισχυτές οργανολογίας



# Ενισχυτής ολοκλήρωσης ή ολοκληρωτής

Στην είσοδο του ΙΤΕ το ρεύμα είναι μηδενικό:

$$I_{in} = I_f \Rightarrow$$
$$\frac{V_{in} - V_x}{R_{in}} = C_f \frac{dV_{Cf}}{dt} \Rightarrow$$
$$\frac{V_{in} - V_x}{R_{in}} = C_f \frac{d(V_x - V_{out})}{dt} \Rightarrow$$
$$\frac{V_{in}}{R_{in}} = -C_f \frac{dV_{out}}{dt} \Rightarrow V_{out} = -\frac{1}{R_{in} C_f} \int V_{in} dt$$



Το κύκλωμα εκτελεί την πράξη της ολοκλήρωσης της τάσης εισόδου.

Εάν στον ενισχυτή ολοκλήρωσης τεθεί σταθερή τάση εισόδου ( $V_{in}$ ), τότε:

$$V_{out} = -\frac{V_{in} \cdot t}{R_{in} \cdot C_f} = -\frac{I_{in} \cdot t}{C_f}$$

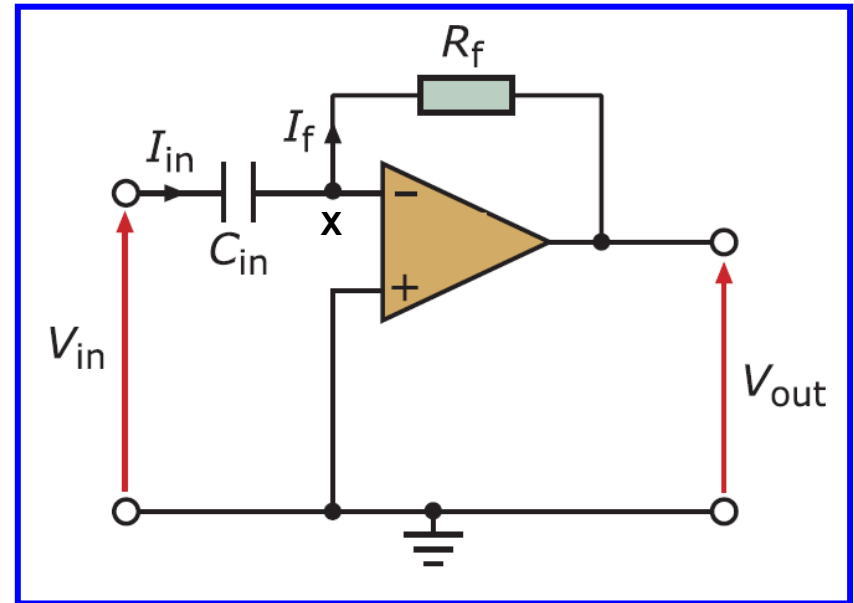
Επομένως, μία σταθερή τάση στην είσοδο παράγει μία τάση που μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο (με σταθερή κλίση), σαν την τάση που χρησιμοποιούν παλμογράφοι και σχεδιογράφοι ΧΥ για να απεικονίζουν σήματα ως προς το χρόνο.

# Ενισχυτής διαφόρισης ή διαφοριστής

- Είναι κύκλωμα παρόμοιο με τον ενισχυτή διαφόρισης, με τη διαφορά ότι αλλάζουν οι θέσεις αντίστασης και πυκνωτή.

$$I_{in} = I_f \Rightarrow C_{in} \frac{d(V_{in} - V_x)}{dt} = \frac{V_x - V_{out}}{R_f} \Rightarrow C_{in} \frac{dV_{in}}{dt} = -\frac{V_{out}}{R_f} \Rightarrow V_{out} = -R_f \cdot C_{in} \cdot \frac{dV_{in}}{dt}$$

- Το κύκλωμα υπολογίζει το ρυθμό μεταβολής της τάσης εισόδου, εκτελεί δηλαδή την πράξη της διαφόρισης.
- Εάν τεθεί σταθερή τάση εισόδου, τότε η τάση εξόδου μηδενίζεται.
- Εάν η τάση εισόδου αυξάνεται με σταθερό ρυθμό (δηλ. είναι γραμμική συνάρτηση του χρόνου  $V_{in} = a \cdot t$ ) τότε η έξοδος λαμβάνει μία σταθερή τιμή.

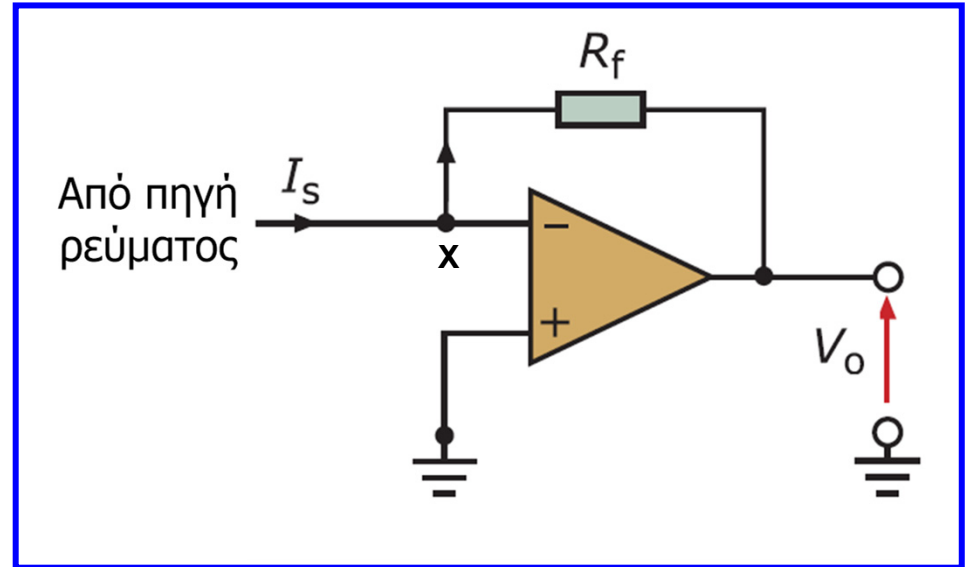


$$V_{out} = -R_f \cdot C_{in} \cdot \frac{d(a \cdot t)}{dt} = -R_f \cdot C_{in} \cdot a \Rightarrow V_{out} = -\frac{R_f \cdot C_{in} \cdot V_{in}}{t}$$

Το κύκλωμα διαφοριστή χρησιμοποιείται συχνά σε λειτουργίες ελέγχου.

# Μετατροπέας ρεύματος σε τάση

- Μερικά συστήματα μέτρησης παράγουν σήματα εξόδου στα οποία η **μεταβολή του ρεύματος είναι ανάλογη της μεταβολής της μετρούμενης παραμέτρου.**
- **Παράδειγμα** αποτελούν τα συστήματα μέτρησης που περιλαμβάνουν φωτοδιόδους, οι οποίες παράγουν ρεύμα ανάλογο της φωτεινής έντασης που προσπίπτει σε αυτές.
- Στον μετατροπέα ρεύματος σε τάση, **όλο το παρεχόμενο ρεύμα από την πηγή ρεύματος περνά μέσα από την αντίσταση ανατροφοδότησης** αφού η αντιστρέφουσα είσοδος συμπεριφέρεται ως εικονική γη λόγω της ιδιότητας αντιγραφής τάσεων του τελεστικού ενισχυτή.

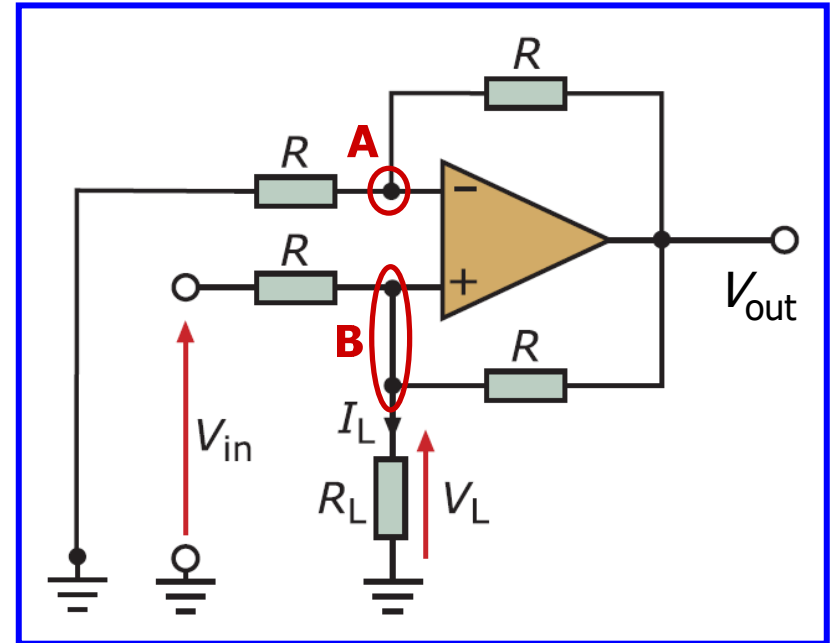


$$I_s = I_f = \frac{V_x - V_{out}}{R_f} = -\frac{V_{out}}{R_f} \Rightarrow$$
$$V_{out} = -I_s \cdot R_f$$



# Μετατροπές τάσης σε ρεύμα

- Η μετατροπή σήματος τάσης σε ρεύμα είναι πολύ χρήσιμη σε συστήματα μέτρησης βιομηχανικού ελέγχου.
- Κατά τη μετάδοση ενός σήματος με τη μορφή ρεύματος σε μεγάλες αποστάσεις, η πτώση τάσης στα καλώδια μεταφοράς δεν επηρεάζει τη μεταδιδόμενη πληροφορία, ενώ η επίδραση του θορύβου είναι μειωμένη σε σχέση με ένα σήμα τάσης.
- Επιπλέον γίνεται δυνατή η ανίχνευση ανοιχτοκυκλώματος στα καλώδια μεταφοράς.
- Ο μετατροπέας υλοποιείται εάν με τη βοήθεια τελεστικού ενισχυτή δημιουργήσουμε ελεγχόμενη πηγή ρεύματος, η οποία παρέχει ρεύμα που είναι ανεξάρτητο από την αντίσταση φορτίου ( $R_L$ ) που συνδέεται στα άκρα της και στην ουσία καθορίζεται από την τάση εισόδου.



$$\frac{0 - V_A}{R} = \frac{V_A - V_{out}}{R} \Rightarrow V_A = \frac{V_{out}}{2} \quad (1)$$

$$I_L = \frac{V_{out} - V_B}{R} + \frac{V_{in} - V_B}{R}$$

(1)

$$\Rightarrow_{V_A = V_B} I_L = \frac{V_{in}}{R}$$

# Συγκριτής τάσεων

- Όταν ένας **ΤΕ** λειτουργεί με **ανοικτό βρόχο** (χωρίς ανατροφοδότηση), τότε λόγω της σχέσης  $V_{out} = A_o \cdot (V_{in1} - V_{in2})$  και της πολύ υψηλής ενίσχυσης, η έξοδος του ενισχυτή οδηγείται σε κατάσταση θετικού ή αρνητικού κόρου (δηλ. σε θετική ή αρνητική τιμή λίγο μικρότερη από την τάση τροφοδοσίας), ανάλογα με τον αν η διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες εισόδου είναι θετική ή αρνητική.
- Επομένως, οι δύο καταστάσεις εξόδου του ΤΕ δίνουν πληροφορία για τη σύγκριση των τάσεων στους δύο ακροδέκτες εισόδου, με αποτέλεσμα ο ΤΕ να λειτουργεί ως συγκριτής τάσης (voltage comparator).
- Έχοντας απολαβή (ενίσχυση) ανοικτού βρόχου πολύ υψηλή, ακόμη και μία πολύ μικρή διαφορά (δέκατα του mV) είναι αρκετή να οδηγήσει την έξοδο σε κατάσταση κόρου.
- Συνήθως επιδιώκουμε σύγκριση μεταξύ μίας τάσης μεταβλητού μεγέθους και μίας τάσης σταθερού μεγέθους.
- Οπότε σε έναν συγκριτή τάσης, εάν γειώσουμε τον έναν ακροδέκτη, τότε η σύγκριση του δυναμικού του άλλου ακροδέκτη γίνεται ως προς το 0.

# Συγκριτής τάσεων

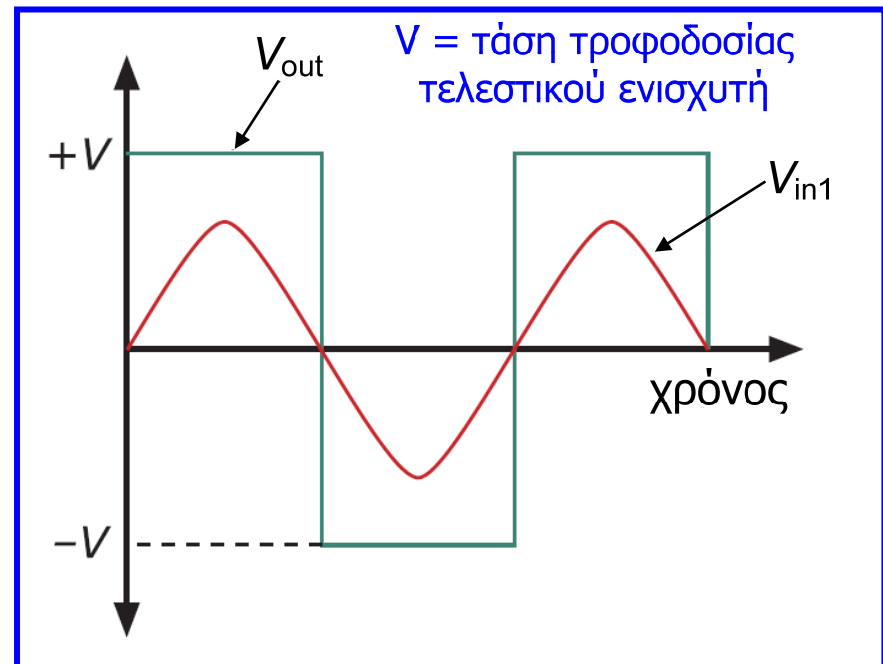
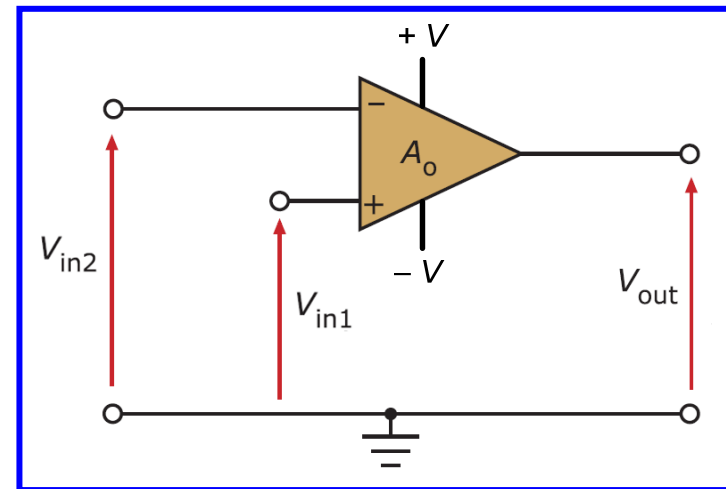
$$V_{out} = A_o \cdot (V_{in1} - V_{in2})$$

$$V_{in1} < V_{in2} \Rightarrow V_{out} < 0$$

$$V_{in1} > V_{in2} \Rightarrow V_{out} > 0$$

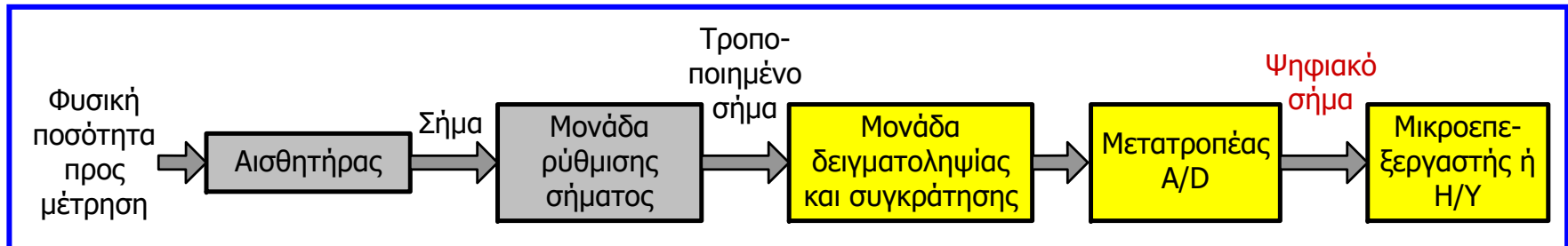
$$V_{in1} = V_{in2} \Rightarrow V_{out} = 0$$

Εάν εφαρμοστεί ένα ημιτονικό σήμα στην είσοδο  $V_{in1}$  και η είσοδος  $V_{in2}$  γειωθεί, τότε η τάση εξόδου θα αλλάζει κάθε φορά που το ημιτονικό σήμα περνάει από την τιμή 0, οπότε η κυματομορφή της τάσης εξόδου θα είναι τετραγωνικό σήμα.



# Κυκλώματα για ψηφιακά συστήματα μέτρησης

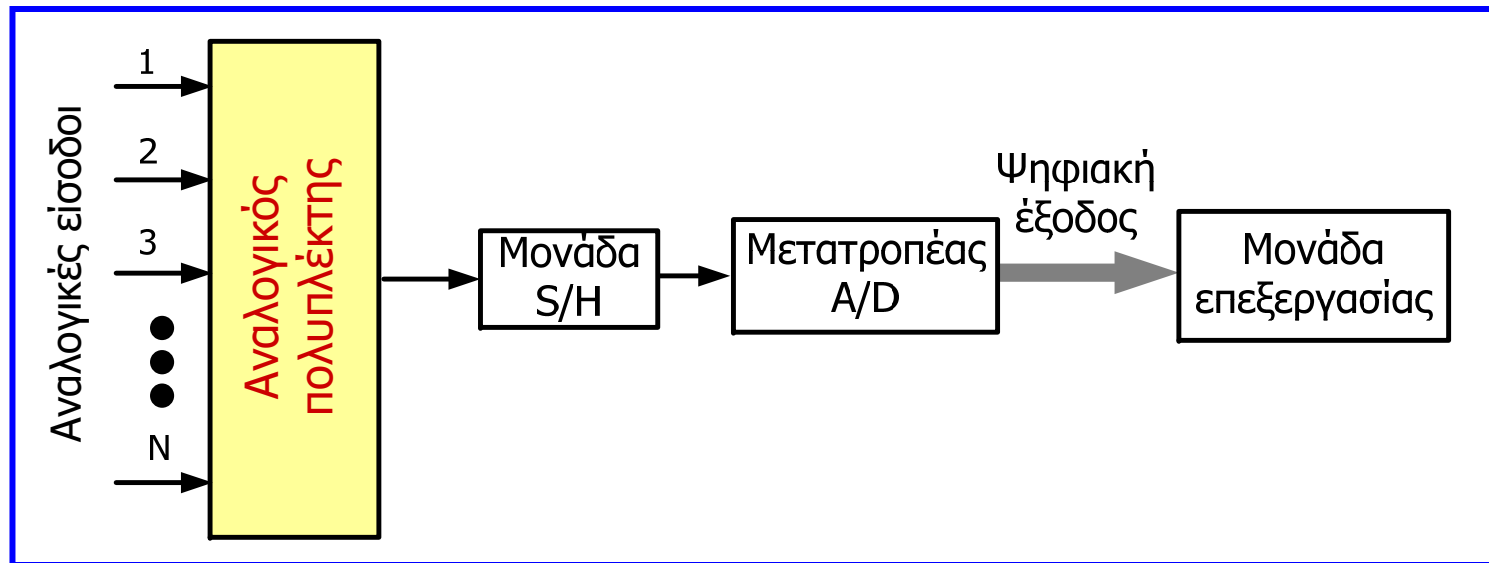
- Όπως αναφέρθηκε στην **ενότητα 2**, το μεγαλύτερο μέρος των συστημάτων μέτρησης σήμερα βασίζεται σε ψηφιακά ηλεκτρονικά (μικροεπεξεργαστές, μικροελεγκτές, Η/Υ).
- Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η δομή ενός απλού (αναλογικού) συστήματος μέτρησης που περιλαμβάνει αισθητήρα, μονάδα ρύθμισης σήματος και μονάδα απεικόνισης ή/και καταγραφής, να έχει εξελιχθεί στη δομή ενός **ψηφιακού συστήματος μέτρησης**.
- Ένα ψηφιακό σύστημα μέτρησης αντί για μια απλή μονάδα απεικόνισης ή καταγραφής, περιλαμβάνει τις μονάδες εκείνες που του δίνουν τη δυνατότητα σύνδεσης με κάποιο ψηφιακό σύστημα επεξεργασίας.



- Επέκταση ενός ψηφιακού συστήματος μέτρησης, αποτελούν τα **συστήματα συλλογής και επεξεργασίας** δεδομένων μετρήσεων, που συνήθως αφορούν τη συλλογή και την επεξεργασία σημάτων εισόδου από περισσότερους του ενός αισθητήρες.
- Στη συνέχεια, αναλύεται η λειτουργία κυκλωμάτων που υποστηρίζουν τα ψηφιακά συστήματα μέτρησης και τα συστήματα συλλογής: **αναλογικοί διακόπτες & πολυπλέκτες, κυκλώματα δειγματοληψίας & συγκράτησης (sample & hold), μετατροπείς A/D και D/A.**

# Αναλογικοί διακόπτες και πολυπλέκτες

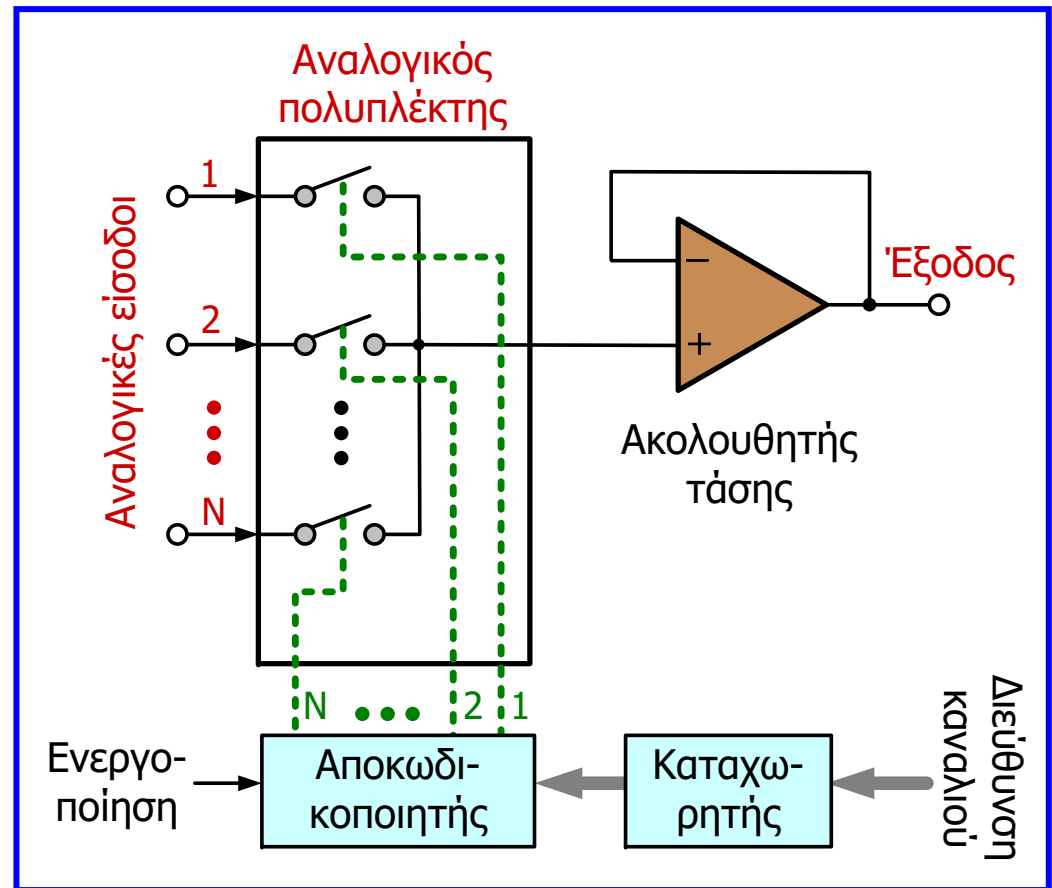
- Η **συλλογή μετρήσεων από πολλαπλούς αισθητήρες** σε συστήματα συλλογής δεδομένων και η οδήγησή τους προς την είσοδο ενός συστήματος μετατροπής τους σε ψηφιακή μορφή και στη συνέχεια η μετάδοσή τους προς την κοινή μονάδα επεξεργασίας, γίνεται εφικτή με την **τεχνική της πολυπλεξίας**.



- Ένας **αναλογικός πολυπλέκτης** αποτελείται από **ηλεκτρονικά ελεγχόμενους αναλογικούς διακόπτες**, έναν για κάθε αναλογική είσοδο.
- Ένας μόνο διακόπτης είναι κλειστός σε κάθε χρονική στιγμή και επομένως μόνο μία από τις εισόδους συνδέεται με την έξοδο του κυκλώματος.

# Αναλογικοί διακόπτες και πολυπλέκτες

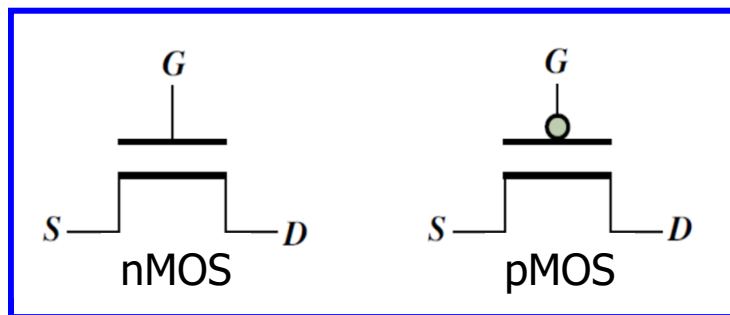
- Η επιλογή του κλειστού διακόπτη (άρα και της εισόδου που συνδέεται στην έξοδο) διενεργείται μέσω μιας ψηφιακής λέξης (διεύθυνση **καναλιού**) με την οποία τροφοδοτείται (από καταχωρητή της μονάδας επεξεργασίας) ένας αποκωδικοποιητής.
- Στον αποκωδικοποιητή διενεργείται αποκωδικοποίηση της διεύθυνσης σε  $N$  εξόδους (σήματα ελέγχου διακοπών), από τις οποίες μόνο μία είναι σε κατάσταση διέγερσης (σε υψηλή στάθμη τάσης), με αποτέλεσμα το κλείσιμο του αντίστοιχου διακόπτη.
- Η **είσοδος ενεργοποίησης του αποκωδικοποιητή** χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό της λειτουργίας του πολυπλέκτη με τις υπόλοιπες μονάδες του συστήματος μέτρησης.



Συνήθως, στις βιομηχανικές εφαρμογές συμμετέχουν αναλογικοί πολυπλέκτες σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος που περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες μονάδες τους.

# Αναλογικοί διακόπτες και πολυπλέκτες

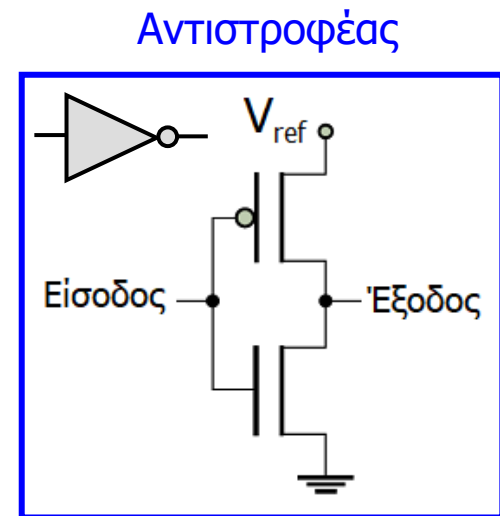
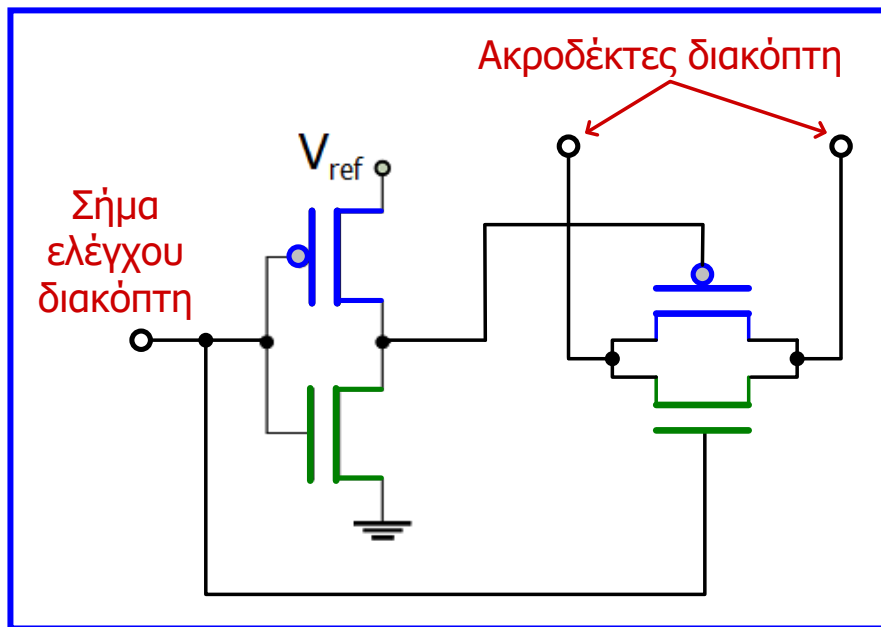
- Ο **ακολουθητής τάσης** που συνδέεται στην έξοδο του πολυπλέκτη εξασφαλίζει την ελαχιστοποίηση της ροής ρεύματος μέσω των διακοπών (λόγω της πολύ μεγάλης αντίστασης εισόδου του τελεστικού ενισχυτή), ελαχιστοποιώντας έτσι την πτώση τάσης στην ισοδύναμη αντίσταση των διακοπών.
- Οι αναλογικοί διακόπτες του πολυπλέκτη, μπορούν να υλοποιηθούν με τρανζίστορ MOSFET τύπου  $n$  και τύπου  $p$ .
- Το τρανζίστορ  $n$ MOS συμπεριφέρεται ως κλειστός διακόπτης, όταν στον ακροδέκτη της πύλης του ( $G$ ) εφαρμόζεται υψηλή στάθμη τάσης (ψηφιακή τιμή 1), ενώ όταν εφαρμόζεται χαμηλή στάθμη τάσης (ψηφιακή τιμή 0) συμπεριφέρεται ως ανοιχτός διακόπτης. Το τρανζίστορ  $p$ MOS λειτουργεί αντίθετα.



- Συνδέοντας **παράλληλα ένα τρανζίστορ  $n$ MOS και ένα τρανζίστορ  $p$ MOS υλοποιούμε έναν διακόπτη** με μειωμένη αντίσταση αγωγής (λόγω της παράλληλης σύνδεσης), αλλά και με σταθερή αντίσταση αγωγής σε σχέση με την τάση πηγής ( $S$ ) – υποδοχής ( $D$ ).

# Αναλογικοί διακόπτες και πολυπλέκτες

- Στον διακόπτη που προκύπτει από την παράλληλη σύνδεση των δύο τρανζίστορ, η πύλη (G) του τρανζίστορ pMOS τροφοδοτείται με σήμα ελέγχου διαφορετικής στάθμης τάσης (ψηφιακή τιμή) από την πύλη (G) του nMOS.
- Έτσι, όταν το σήμα ελέγχου είναι σε κατάσταση διέγερσης (ψηφιακή τιμή 1), λειτουργούν ως κλειστοί διακόπτες και τα 2 τρανζίστορ και ο διακόπτης είναι κλειστός, ενώ όταν το σήμα ελέγχου δεν είναι σε κατάσταση διέγερσης (0), ο διακόπτης είναι ανοικτός.
- Με συνδυασμένη χρήση ενός τρανζίστορ nMOS και ενός τρανζίστορ pMOS, υλοποιείται εύκολα ένας **αντιστροφέας**, ο οποίος για είσοδο υψηλή τιμή στάθμης  $V_{ref}$  (ψηφιακή τιμή 1), παράγει στην έξοδο χαμηλή στάθμη τάσης (ψηφιακή τιμή 0) και αντιστρόφως.

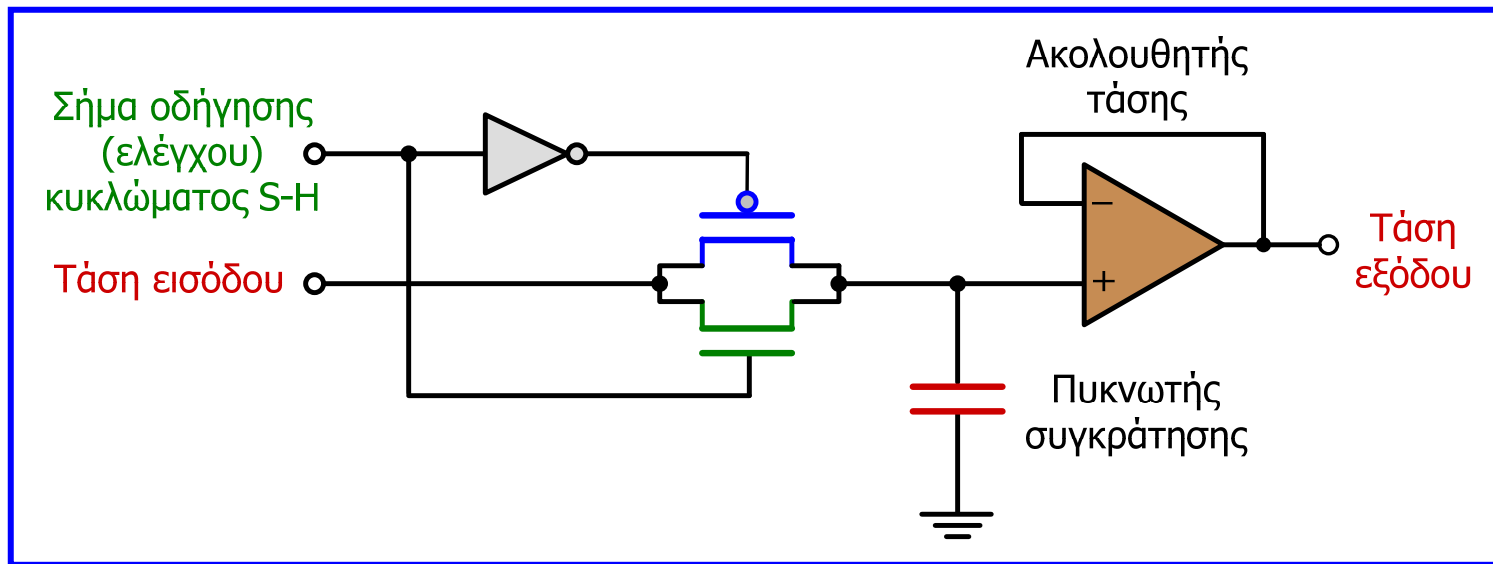




# Κυκλώματα δειγματοληψίας και συγκράτησης

- Για να ψηφιοποιηθεί ένα αναλογικό σήμα θα πρέπει να ληφθούν δείγματά του ανά σταθερά χρονικά διαστήματα. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως **δειγματοληψία (sampling)**.
- Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στη λήψη δύο διαδοχικών δειγμάτων αναφέρεται ως **περίοδος δειγματοληψίας** και ο αριθμός των δειγμάτων που λαμβάνονται στη μονάδα του χρόνου είναι η **συχνότητα δειγματοληψίας**, η οποία θεωρητικά θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από τη μέγιστη συχνότητα που εμφανίζει το σήμα (**θεώρημα Nyquist-Shannon**), έτσι ώστε να μην αλλοιώνεται η πληροφορία του σήματος.
- Για τη σωστή λειτουργία του μετατροπέα A/D ενός ψηφιακού συστήματος μέτρησης, απαιτείται η διατήρηση της τάσης εισόδου του μετατροπέα σε σταθερό επίπεδο για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η μετατροπή της σε ψηφιακή μορφή. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως **συγκράτηση (hold)**.
- Η δειγματοληψία και η συγκράτηση ενός αναλογικού σήματος τάσης επιτελείται από ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που αναφέρεται ως **κύκλωμα δειγματοληψίας και συγκράτησης (sample and hold circuit)**.
- Πρακτικά, η **περίοδος δειγματοληψίας** εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που απαιτεί ο μετατροπέας A/D για τη μετατροπή ενός δείγματος τάσης, από τις καθυστερήσεις του αναλογικού πολυπλέκτη και του κυκλώματος συγκράτησης και δειγματοληψίας, καθώς και από το χρόνο επεξεργασίας και αποθήκευσης στη μονάδα επεξεργασίας του συστήματος μέτρησης.

# Κυκλώματα δειγματοληψίας και συγκράτησης

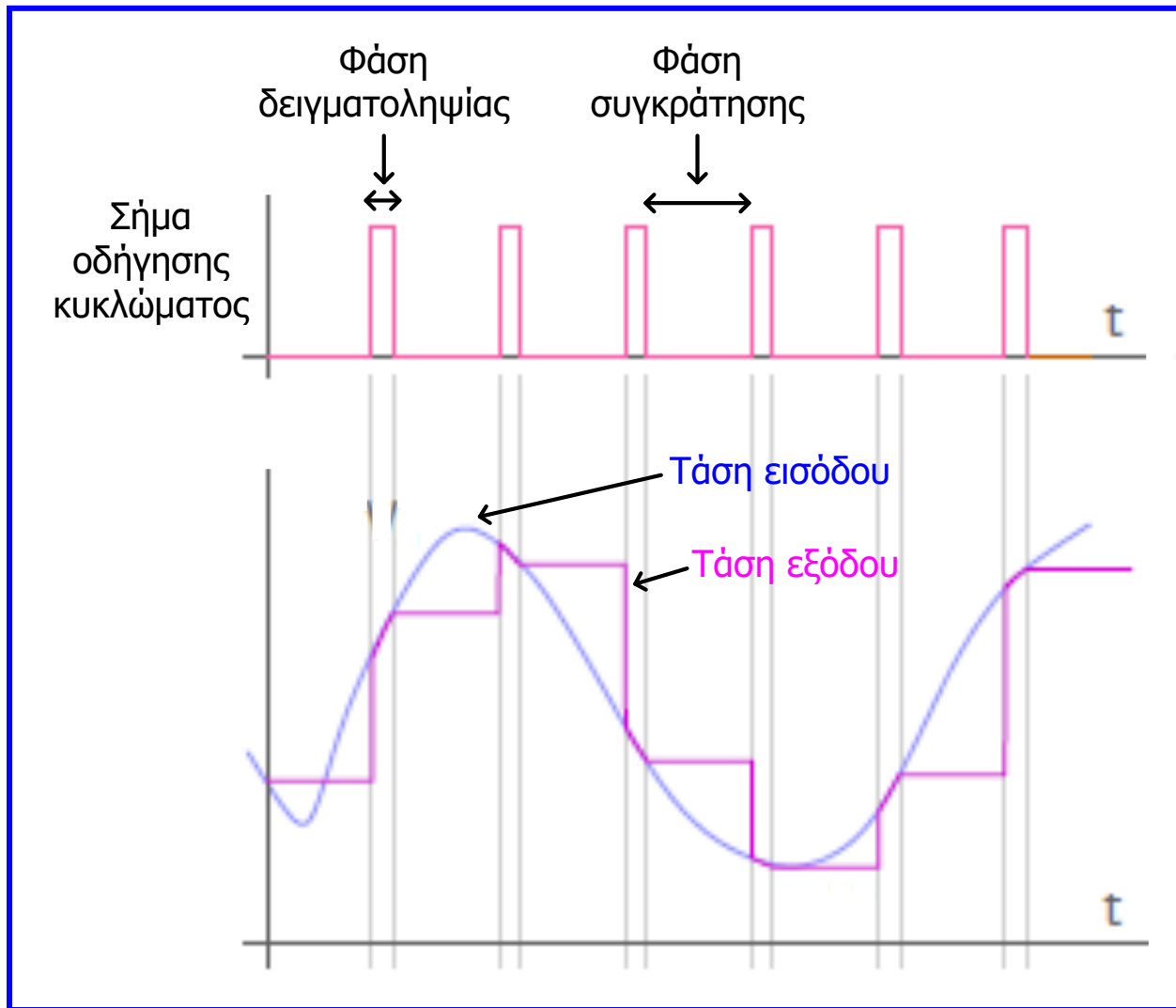


- Ένα κύκλωμα δειγματοληψίας και συγκράτησης αποτελείται από έναν **αναλογικό διακόπτη**, έναν πυκνωτή (**πυκνωτής συγκράτησης**) και έναν **ακολουθητή τάσης**.
- Όταν το σήμα οδήγησης τίθεται σε υψηλή στάθμη τάσης, ο διακόπτης είναι κλειστός και η τάση στα άκρα του πυκνωτή γίνεται ίση με την τάση εισόδου του κυκλώματος.
- Λόγω της παρουσίας του ακολουθητή τάσης, η τάση εξόδου του κυκλώματος γίνεται ίση με την τάση εισόδου.
- Αυτή η κατάσταση λειτουργίας του κυκλώματος αποτελεί τη **φάση δειγματοληψίας** και κατά τη διάρκειά της η τάση εξόδου ακολουθεί την τάση εισόδου.

# Κυκλώματα δειγματοληψίας και συγκράτησης

- Όταν το σήμα οδήγησης τίθεται σε χαμηλή στάθμη τάσης, ο διακόπτης είναι ανοικτός και ο πυκνωτής διατηρεί στα άκρα του την τελευταία τιμή της τάσης εισόδου, την οποία είχε κατά τη διάρκεια της φάσης δειγματοληψίας.
- Λόγω της παρουσίας του ακολουθητή τάσης, η τάση εξόδου του κυκλώματος είναι επίσης ίση με την ίδια τιμή.
- Αυτή η κατάσταση λειτουργίας του κυκλώματος αποτελεί τη **φάση συγκράτησης** και κατά τη διάρκειά της, η τάση εξόδου του κυκλώματος παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από τις μεταβολές της τάσης εισόδου.
- Η υψηλή αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή, συντελεί στο να μην εκφορτίζεται ο πυκνωτής κατά τη διάρκεια της φάσης συγκράτησης.
- Εναλλακτικά, μπορεί να συνδεθεί **ένας ακόμη ακολουθητής τάσης** πριν τον αναλογικό διακόπτη, έτσι ώστε να εξασφαλίζονται συνθήκες απομόνωσης του κυκλώματος, αλλά και για την επιτάχυνση της φόρτισης του πυκνωτή λόγω της χαμηλής αντίστασης εξόδου του τελεστικού ενισχυτή (οδηγώντας έτσι σε μείωση του χρόνου συλλογής δείγματος).
- Τα κυκλώματα δειγματοληψίας και συγκράτησης διατίθενται σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος.

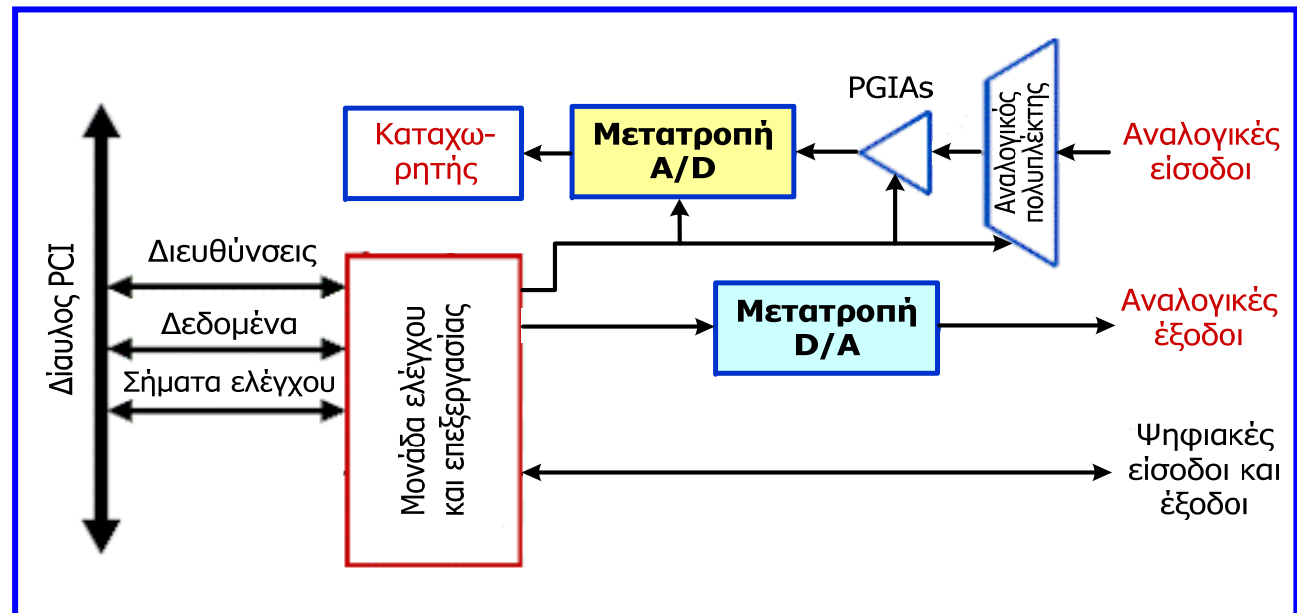
# Κυκλώματα δειγματοληψίας και συγκράτησης



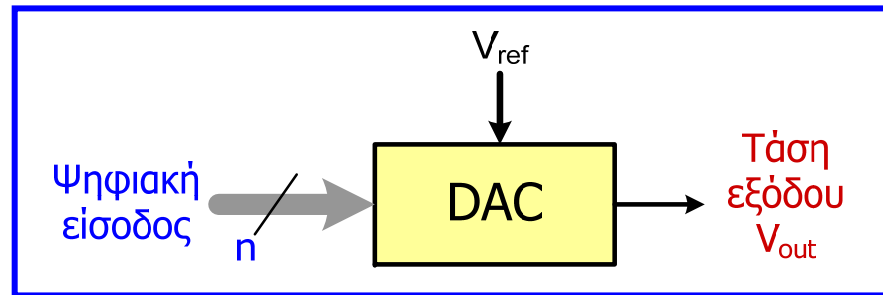
# Μετατροπείς D/A και A/D

- Όπως αναφέρθηκε στην **ενότητα 2**, οι **μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (analog-to-digital converters, A/D converters, ADCs)** αποτελούν βασική μονάδα των ψηφιακών συστημάτων μέτρησης και των συστημάτων συλλογής δεδομένων μετρήσεων.
- Χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της ψηφιακής παράστασης της επιθυμητής στιγμιαίας τιμής ενός αναλογικού σήματος εισόδου.
- Οι **μετατροπείς ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (digital-to-analog converters, D/A converters, DACs)** χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή μιας ψηφιακής τιμής εισόδου σε αναλογική τάση εξόδου. Η έξοδος των DACs χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ψηφιακά συστήματα μέτρησης για τον έλεγχο συστημάτων και διεργασιών.

Απλοποιημένο  
διάγραμμα  
κάρτας DAQ



# Μετατροπείας D/A



- Για ψηφιακή είσοδο με  $n$  δυαδικά ψηφία  $b_1 b_2 \dots b_n$  ( $b_1$ : MSB,  $b_n$ : LSB):

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left( \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \dots + \frac{b_n}{2^n} \right)$$

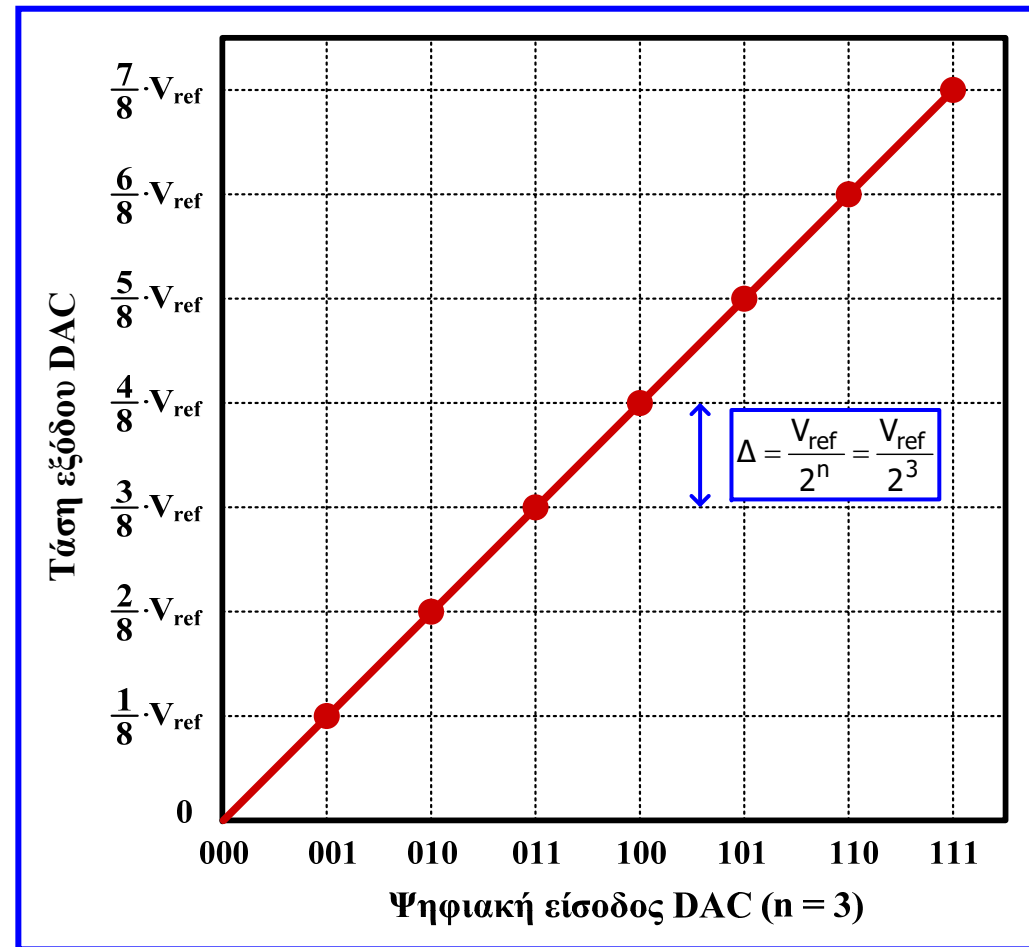
όπου  $V_{ref}$  είναι η **τάση αναφοράς του μετατροπέα** (σταθερή για κάθε μετατροπέα).

- **Παράδειγμα:** Για  $n = 3$ , όταν η ψηφιακή είσοδος είναι 000, τότε η τάση εξόδου είναι 0 και αλλάζει σε  $V_{ref} / 2^3$ , όταν η ψηφιακή είσοδος αυξηθεί σε 001. Η τάση εξόδου του μετατροπέα διατηρείται σε αυτή την τιμή μέχρι η ψηφιακή είσοδος να φτάσει στην τιμή 010, οπότε η τάση εξόδου γίνεται  $2 \cdot V_{ref} / 2^3$ . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η ψηφιακή είσοδος να λάβει τη μέγιστη τιμή της (111) και η τάση εξόδου να γίνει  $7 \cdot V_{ref} / 2^3$  που είναι και η **μέγιστη τάση εξόδου του μετατροπέα**.
- Το πλήθος των διαφορετικών τιμών (συνδυασμών) της ψηφιακής εισόδου είναι  $2^n$  και για κάθε τιμή από αυτές παράγεται διαφορετική τάση εξόδου.

# Μετατροπείας D/A

- Η μεταβολή της τάσης εξόδου, η οποία προκαλείται όταν η ψηφιακή είσοδος αλλάζει μεταξύ δύο γειτονικών τιμών (συνδυασμών) είναι η **διακριτική ικανότητα** του DAC, η οποία αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του DAC και έχει ως εξής:  $\Delta = V_{\text{ref}} / 2^n$ .
- Άλλο βασικό χαρακτηριστικό του DAC είναι η **ανάλυση**, δηλαδή το **πλήθος ( $2^n$ ) των διαφορετικών ψηφιακών συνδυασμών εισόδου** που χρησιμοποιούνται για την παράσταση μιας τιμής της τάσης εισόδου, το οποίο προφανώς καθορίζεται από τον **αριθμό των ψηφίων εισόδου** του μετατροπέα. Όσο περισσότερα ψηφία εισόδου του DAC, τόσο μεγαλύτερη η ανάλυση και τελικά η ακρίβεια μετατροπής.

Χαρακτηριστική μεταφοράς (ή καμπύλη ρύθμισης) ιδανικού DAC

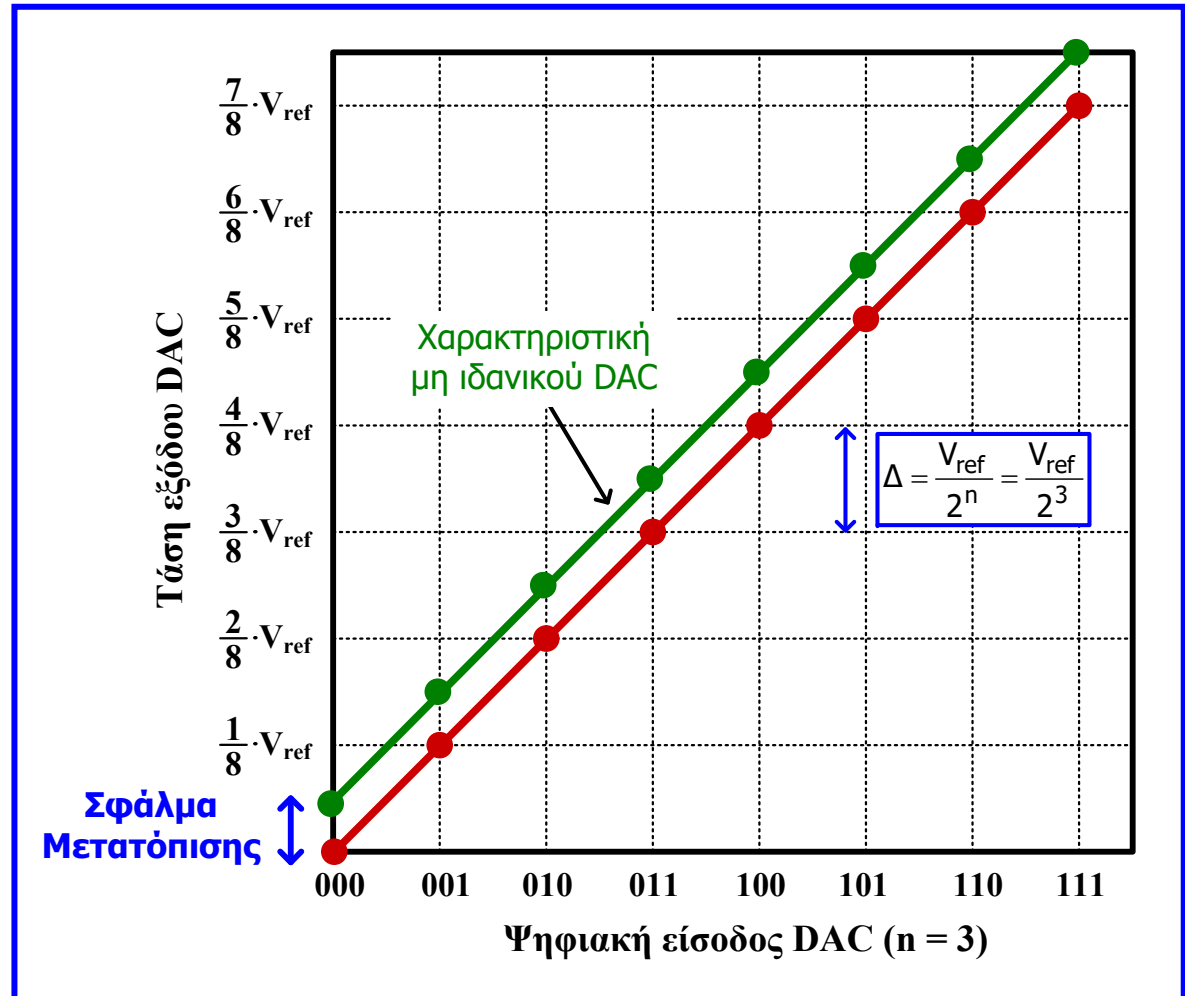


# Μετατροπείας D/A

**Σφάλμα μετατόπισης** είναι η απόκλιση της παραγόμενης τάσης εξόδου του μη ιδανικού DAC σε σχέση με τον ιδανικό DAC, για κάθε ψηφιακή είσοδο.

Δίνεται σε  $V$  και συνήθως εντοπίζεται για μηδενική ψηφιακή είσοδο και αναφέρεται ως **σφάλμα μηδενός**.

Στο **παράδειγμα** του διπλανού σχήματος ισούται με  $\Delta/2$ .



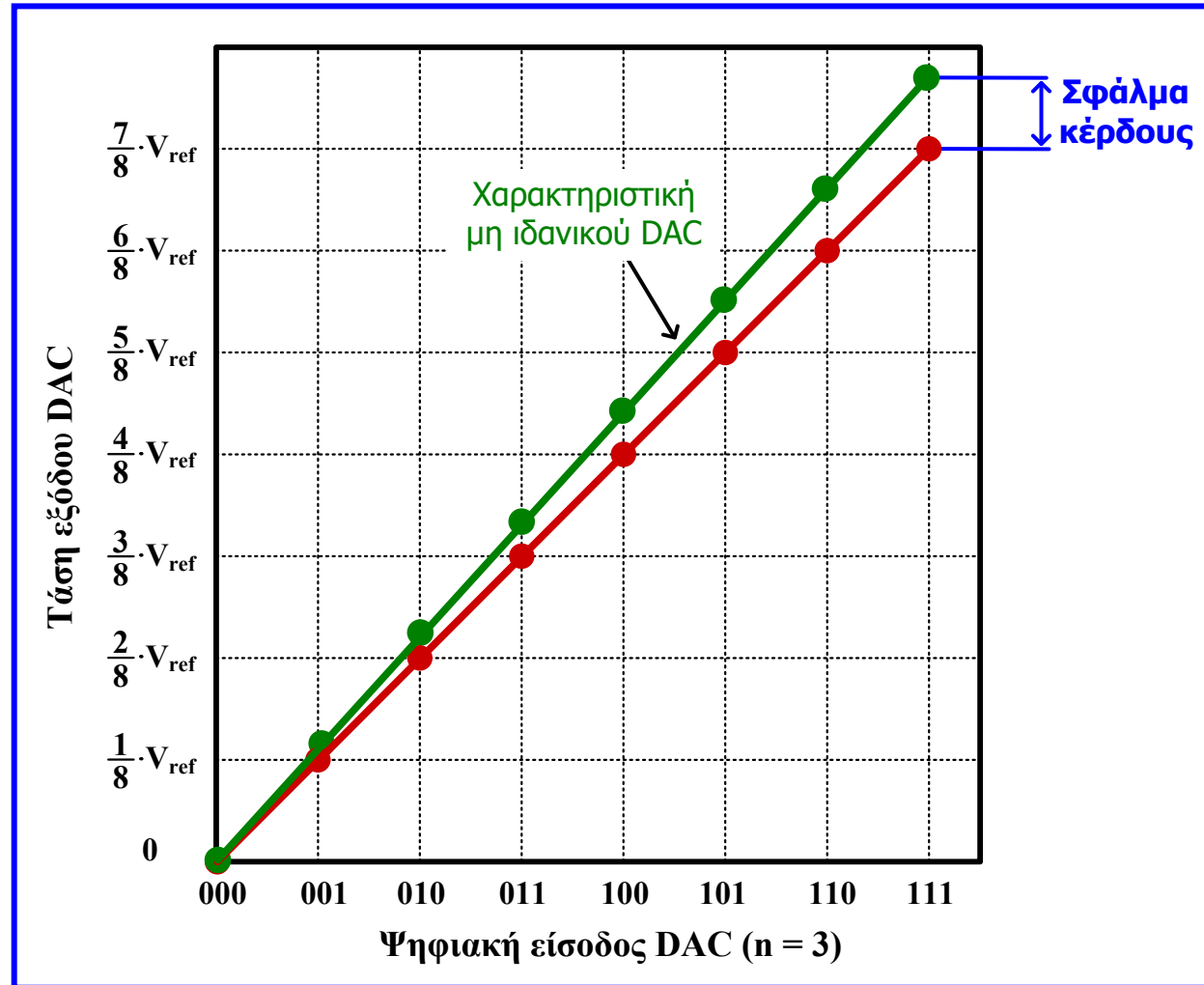


# Μετατροπείας D/A

**Σφάλμα κέρδους:** αφορά τη διαφορά κλίσης μεταξύ της χαρακτηριστικής μεταφοράς του πραγματικού (μη ιδανικού) DAC και της χαρακτηριστικής μεταφοράς του ιδανικού μετατροπέα του DAC.

Εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό της μέγιστης τιμής της τάσης εξόδου του μετατροπέα ( $V_{\text{ref}} - \Delta$ ).

Στο παράδειγμα του διπλανού σχήματος είναι περίπου 10%.

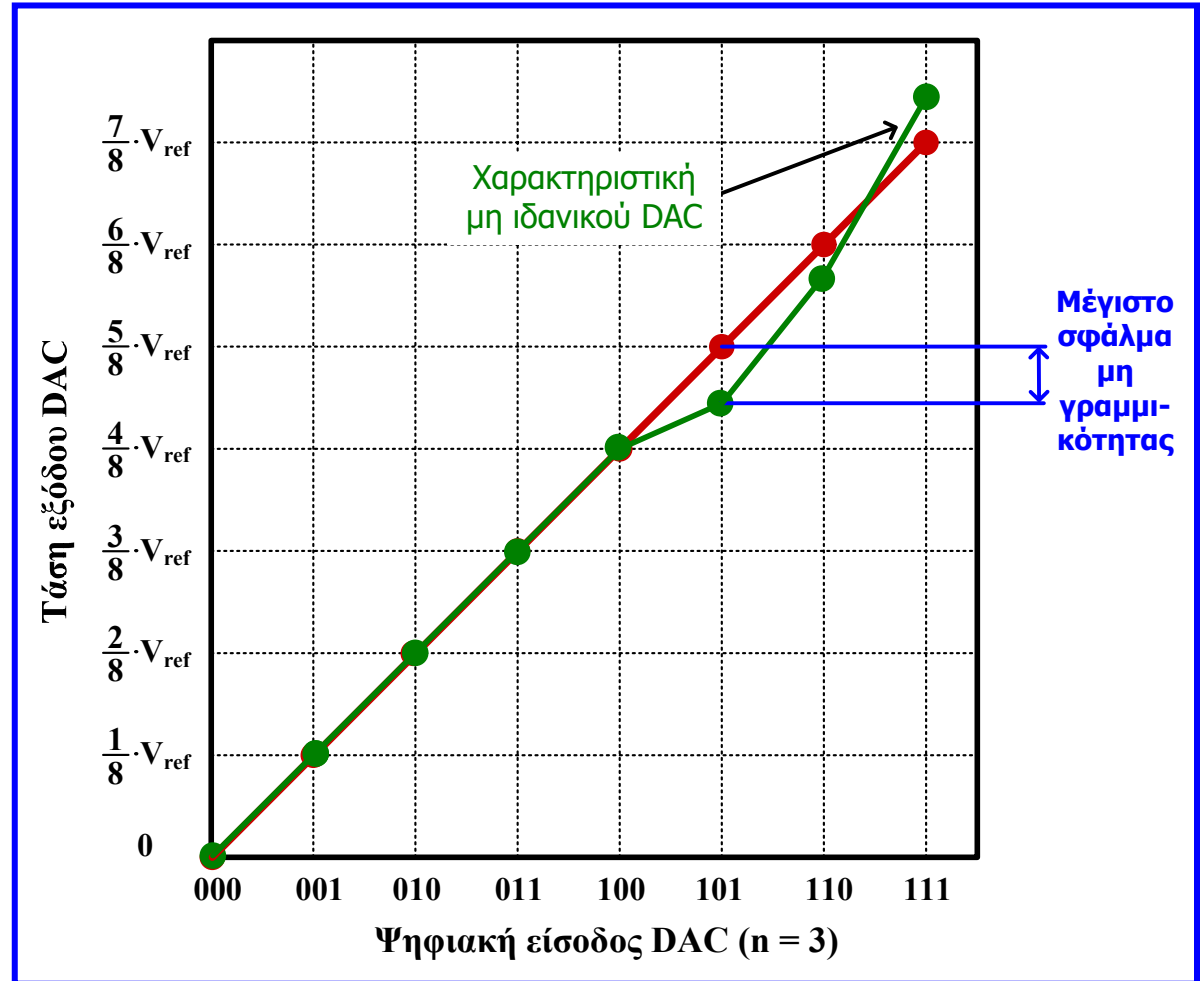


# Μετατροπείας D/A

**Σφάλμα μη γραμμικότητας** είναι η διαφορά εύρους μεταξύ των τιμών της τάσης εξόδου για την ίδια ψηφιακή είσοδο του πραγματικού (μη ιδανικού) DAC και του ιδανικού DAC.

Εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό της μέγιστης τιμής της τάσης εξόδου του μετατροπέα ( $V_{\text{ref}} - \Delta$ ).

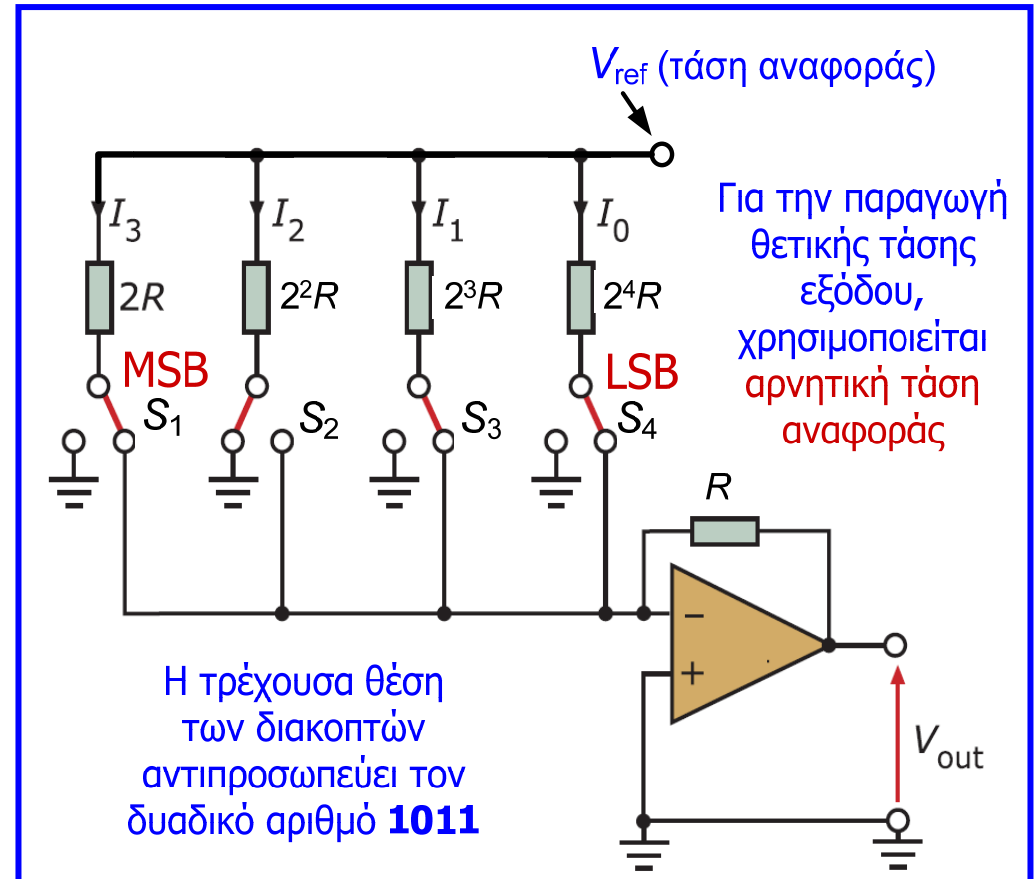
Στο παράδειγμα του διπλανού σχήματος το μέγιστο σφάλμα μη γραμμικότητας είναι περίπου 8%.



# Μετατροπές D/A ισοζυγισμένων αντιστάσεων

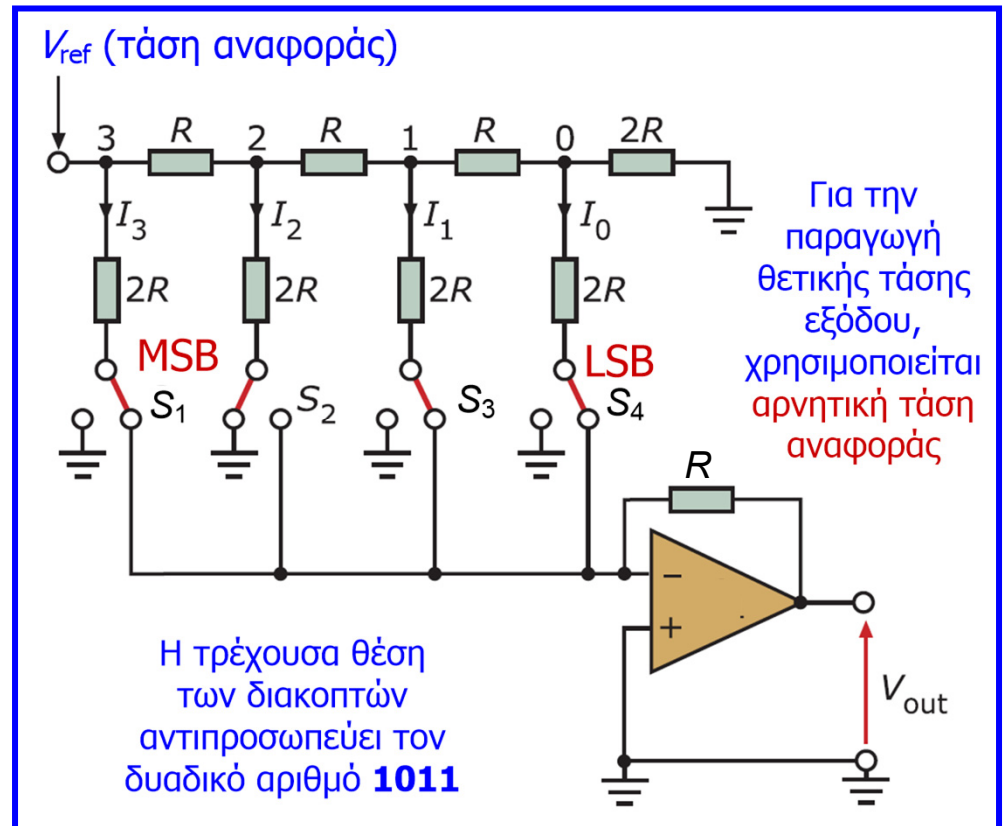
- Για την υλοποίηση ενός DAC ισοζυγισμένων αντιστάσεων (weighted resistors), για  $n$  ψηφία εισόδου, απαιτούνται  $n$  αντιστάσεις με τιμές  $R_i = 2^i \cdot R$ , όπου  $1 \leq i \leq n$ ,  $n$  διακόπτες και ένας μετατροπέας ρεύματος σε τάση (όπου  $n$  είναι το πλήθος των ψηφίων της εισόδου).
- Τα ψηφία της ψηφιακής εισόδου χρησιμοποιούνται ως σήματα ελέγχου των διακοπών.
- Όταν ένα ψηφίο της εξόδου έχει λογική τιμή 1, ο αντίστοιχος διακόπτης είναι κλειστός, ενώ όταν έχει λογική τιμή 0, ο διακόπτης είναι ανοικτός.
- Αθροίζοντας τα ρεύματα που καταλήγουν στην είσοδο του μετατροπέα ρεύματος σε τάση και εφαρμόζοντας τη σχέση  $V_{out} = -I_{in} \cdot R$  που διέπει τη λειτουργία του μετατροπέα, προκύπτει ότι για είσοδο  $b_1 b_2 \dots b_n$  ( $b_1$ : MSB,  $b_n$ : LSB), η τάση εξόδου του DAC είναι:

$$V_{out} = -V_{ref} \cdot \left( \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \frac{b_4}{2^4} \right)$$



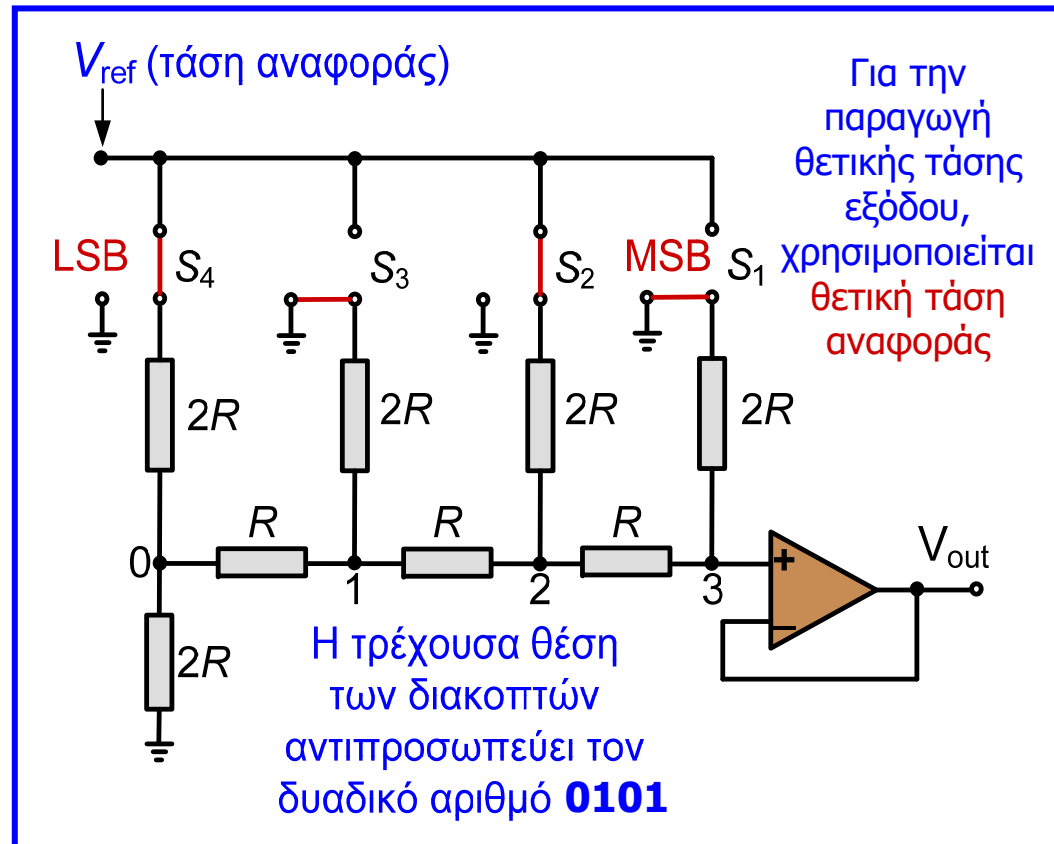
# Μετατροπέας D/A κλίμακας R-2R λειτουργίας ρεύματος

- Ο μετατροπέας D/A κλίμακας R-2R λειτουργίας ρεύματος (current mode) αποτελείται από ένα κλιμακωτό δίκτυωμα (ladder network) αντιστάσεων τύπου R-2R, η διακόπτες και ένα μετατροπέα ρεύματος σε τάση (όπου n είναι το πλήθος των ψηφίων της εισόδου).
- Το κύκλωμα αναφέρεται ως «current mode», επειδή στην έξοδο του δικτυώματος προκύπτει ρεύμα ανάλογο της ψηφιακής εισόδου (όπως και στον προηγούμενο μετατροπέα).
- Εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff στους κόμβους 0, 1 και 2, ώστε να υπολογίσουμε τις τάσεις στους κόμβους 0, 1, 2 και στη συνέχεια τα ρεύματα στους κάθετους κλάδους του δικτυώματος.
- Η τάση στην είσοδο του μετατροπέα ρεύματος σε τάση είναι 0 ( $V_+ = V_-$ ).
- Η τάση στον κόμβο 3 είναι  $V_{ref}$  και μετακινούμενοι προς τα δεξιά, οι τάσεις στους κόμβους 2, 1 και 0 είναι διαδοχικά το μισό της τάσης κάθε προηγούμενου κόμβου, με αποτέλεσμα να προκύπτει η αναμενόμενη σχέση για την  $V_{out}$ . (βλέπε άσκηση 14)

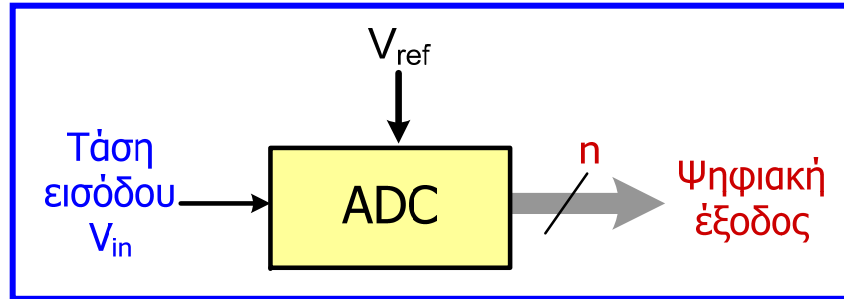


# Μετατροπέας D/A κλίμακας R-2R λειτουργίας τάσης

- Ο μετατροπέας D/A κλίμακας R-2R λειτουργίας τάσης (voltage mode) αποτελείται από ένα κλιμακωτό δικτύωμα (ladder network) αντιστάσεων τύπου R-2R, η διακόπτες και έναν ακολουθητή τάσης (όπου η είναι το πλήθος των ψηφίων της εισόδου).
- Το κύκλωμα αναφέρεται ως «voltage mode», επειδή στην έξοδο του δικτυώματος προκύπτει τάση ανάλογη της ψηφιακής εισόδου.
- Μεταξύ του κόμβου 3 και της εξόδου του κυκλώματος, συνδέεται ο ακολουθητής τάσης, στον οποίο ισχύει ότι  $V_{out} = V_3$ .
- Για να προσδιορίσουμε την  $V_{out}$  του μετατροπέα αρκεί να προσδιορίσουμε την τάση του κόμβου 3.
- Για να επιτευχθεί αυτό, εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff στους κόμβους 0, 1, 2, 3, και συνδυάζουμε τις σχέσεις που προκύπτουν (βλέπε άσκηση 15).
- Μετά τα παραπάνω, επιβεβαιώνεται η αναμενόμενη σχέση για την τάση εξόδου του μετατροπέα.



# Μετατροπέας A/D



- Οι μετατροπείς A/D συγκρίνουν την τάση εισόδου τους με τη μέγιστη δυνατή τάση εισόδου και η ψηφιακή λέξη που παράγεται στην έξοδό τους εκφράζει το ποσοστό της τιμής της τάσης εισόδου ως προς την μέγιστη τάση εισόδου.
- Η τάση εισόδου του ADC ( $V_{in}$ ) αντιστοιχίζεται σε μια ψηφιακή έξοδο με  $n$  δυαδικά ψηφία  $b_1 b_2 \dots b_n$  ( $b_1$ : MSB,  $b_n$ : LSB), σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \dots + \frac{b_n}{2^n} = \frac{V_{in}}{V_{ref}}$$

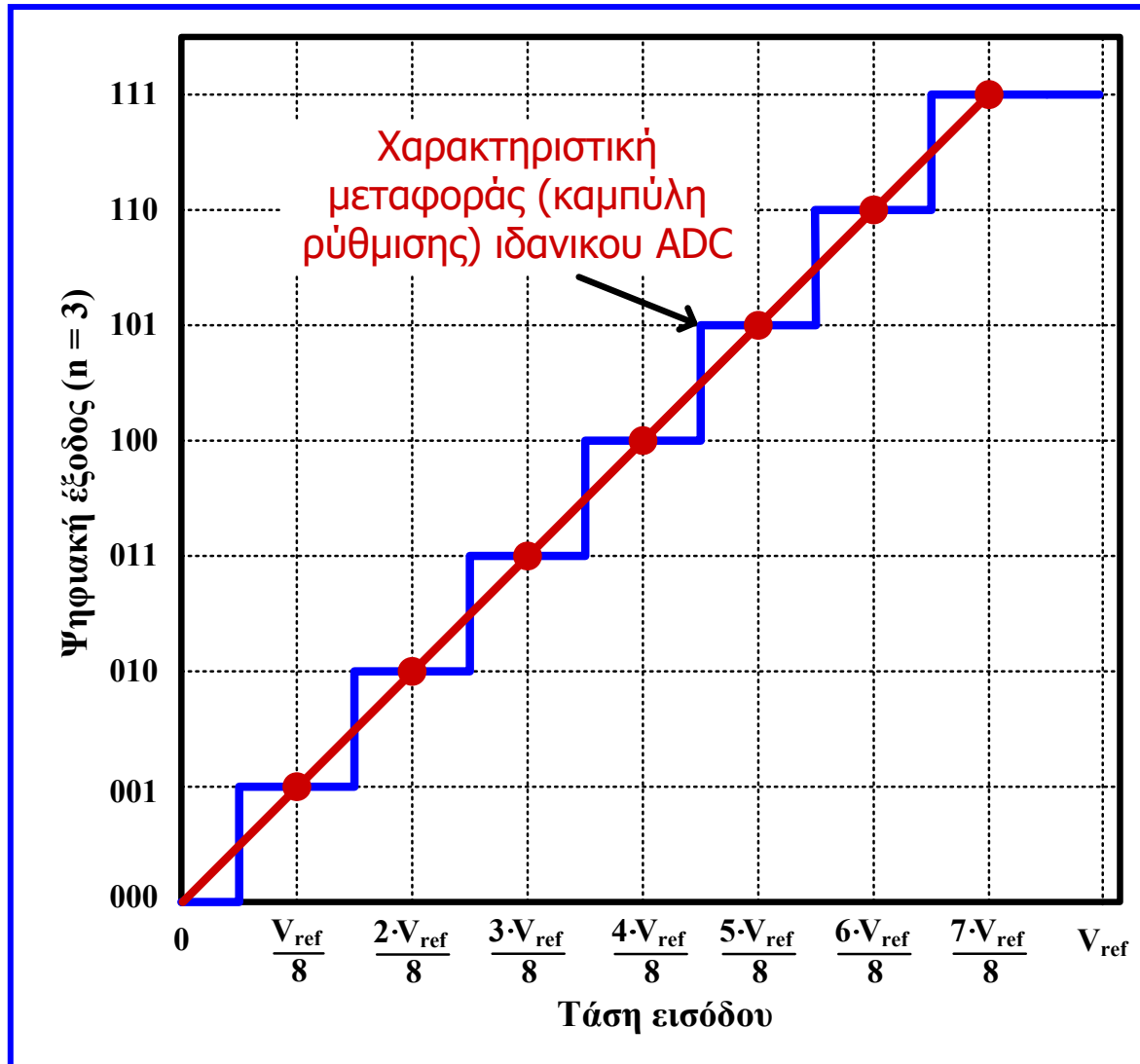
όπου  $V_{ref}$  είναι η μέγιστη τάση εισόδου που μπορεί να μετατραπεί από τον ADC.

- **Παράδειγμα:** Για  $n = 3$ , όταν  $V_{in} = 0$ , η ψηφιακή έξοδος είναι 000. Η έξοδος του ADC παραμένει σε αυτή την τιμή μέχρι  $V_{in} = V_{ref} / 2^3$ , οπότε σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η τιμή της ψηφιακής εξόδου γίνεται 001 και διατηρείται σ' αυτή την τιμή μέχρι  $V_{in} = 2 \cdot V_{ref} / 2^3$ , οπότε η έξοδος γίνεται 010. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι  $V_{in} = 7 \cdot V_{ref} / 2^3$ , οπότε η έξοδος γίνεται 111.

# Μετατροπέας A/D

- Το πλήθος των διαφορετικών τιμών (συνδυασμών) της ψηφιακής εξόδου είναι  $2^n$  και κάθε συνδυασμός αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο (στάθμη) τάσης, το οποίο αποδίδεται σε ένα εύρος τιμών της τάσης εισόδου (**κβαντισμός**).
- Η ελάχιστη τιμή της τάσης που μπορεί να προκαλέσει μεταβολή στην τιμή της ψηφιακής εξόδου μεταξύ δύο γειτονικών συνδυασμών, αναφέρεται ως **διακριτική ικανότητα ή βήμα διακριτότητας** του ADC:  $\Delta = V_{ref} / 2^n$ .
- Η **μέγιστη τάση που μπορεί να μετατραπεί (εύρος τάσης εισόδου ή περιοχή μέτρησης ή FSI, full-scale input)** είναι η  $V_{ref}$ , αφού για παράδειγμα όταν  $n = 3$ , το εύρος τάσης εισόδου από  $7 \cdot V_{ref} / 2^3$  έως  $8 \cdot V_{ref} / 2^3 = V_{ref}$  αντιστοιχίζεται στο συνδυασμό 111.
- **Ανάλυση** είναι το **πλήθος των διαφορετικών ψηφιακών συνδυασμών εξόδου ( $2^n$ )** που χρησιμοποιούνται για την παράσταση της τάσης εισόδου και καθορίζεται από τον **αριθμό των ψηφίων εξόδου** του μετατροπέα.
- **Σφάλμα κβαντισμού**: διαφορά της τάσης εισόδου και της τιμής τάσης που αποδίδει σε αυτή ο ψηφιακός συνδυασμός εισόδου. Οφείλεται στο ότι κάθε τάση εισόδου προσεγγίζεται με ένα επίπεδο (στάθμη) τάσης που αντιστοιχεί σε έναν ψηφιακό συνδυασμό εξόδου.
- Κάθε τιμή ενός σήματος τάσης αντιστοιχίζεται στο πιο κοντινό επίπεδο τάσης και αφού η απόσταση 2 γειτονικών επιπέδων είναι το βήμα διακριτότητας ( $\Delta$ ), το **μέγιστο σφάλμα κβαντισμού (ΜΣΚ) ισούται με  $\Delta / 2$**  (με εξαίρεση το μέγιστο επίπεδο τάσης όπου  $\text{ΜΣΚ} = \Delta$ ).
- **Παράδειγμα**: εάν  $V_{ref} = 3.2 \text{ V}$  και  $n = 3$ , τότε  $\Delta = 3.2 / 8 = 0.4 \text{ V}$  και  $\text{ΜΣΚ} = 0.2 \text{ V}$ .

# Μετατροπέας A/D



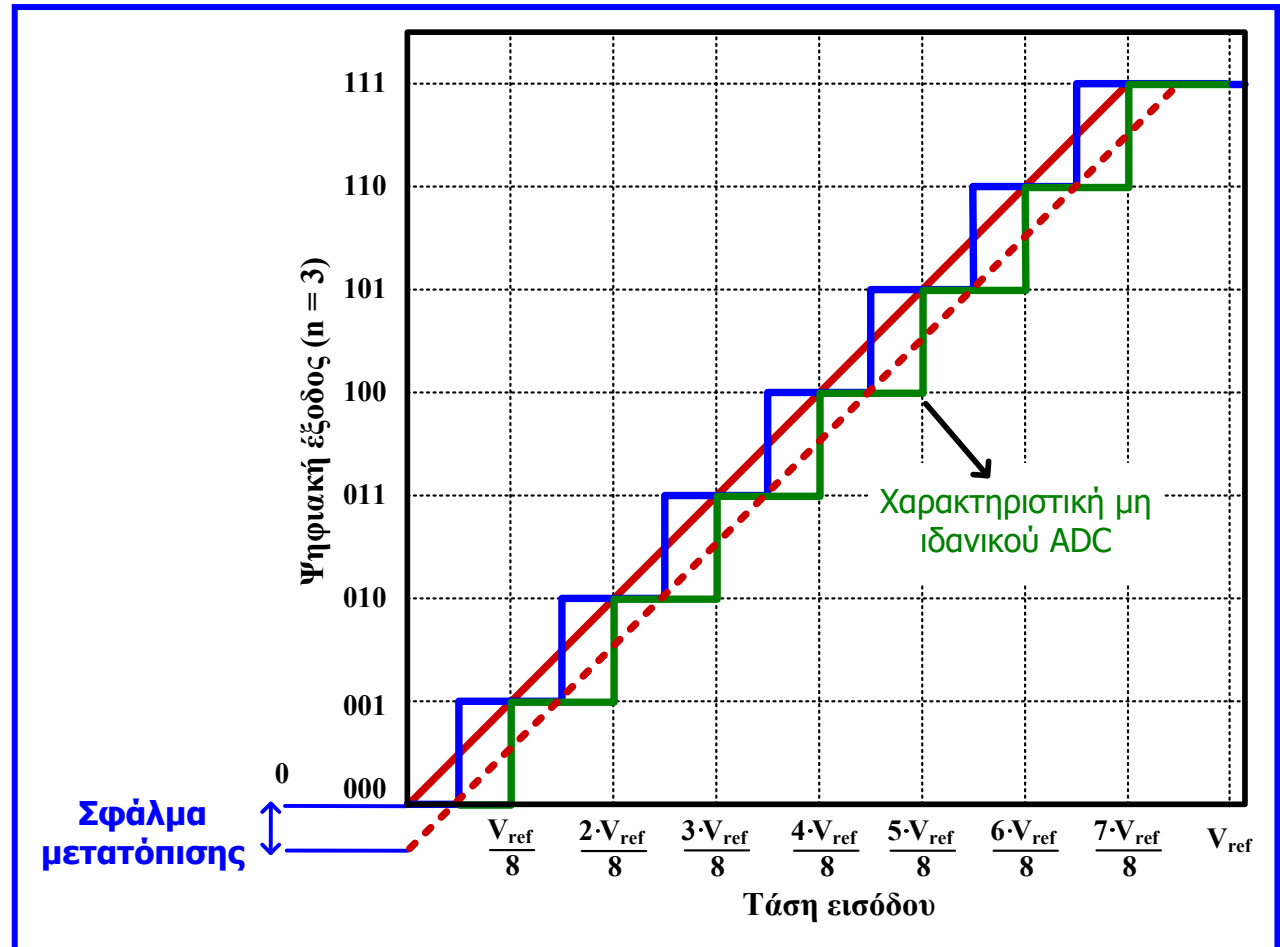


# Μετατροπέας A/D

**Σφάλμα μετατόπισης** είναι η απόκλιση της παραγόμενης ψηφιακής τιμής του πραγματικού ADC σε σχέση με τον ιδανικό ADC για κάθε τιμή της τάσης εισόδου.

Δίνεται σε LSB (όπου 1 LSB αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών συνδυασμών) και συνήθως εντοπίζεται για μηδενική τάση εισόδου και αναφέρεται ως **σφάλμα μηδενός** ή **σφάλμα πόλωσης**.

Μπορεί να εκφραστεί και σε μονάδες τάσης, αφού 1 LSB αντιστοιχεί σε τάση  $\Delta$ .



Στο παράδειγμα του παραπάνω σχήματος το σφάλμα μετατόπισης ισούται με 0.5 LSB.

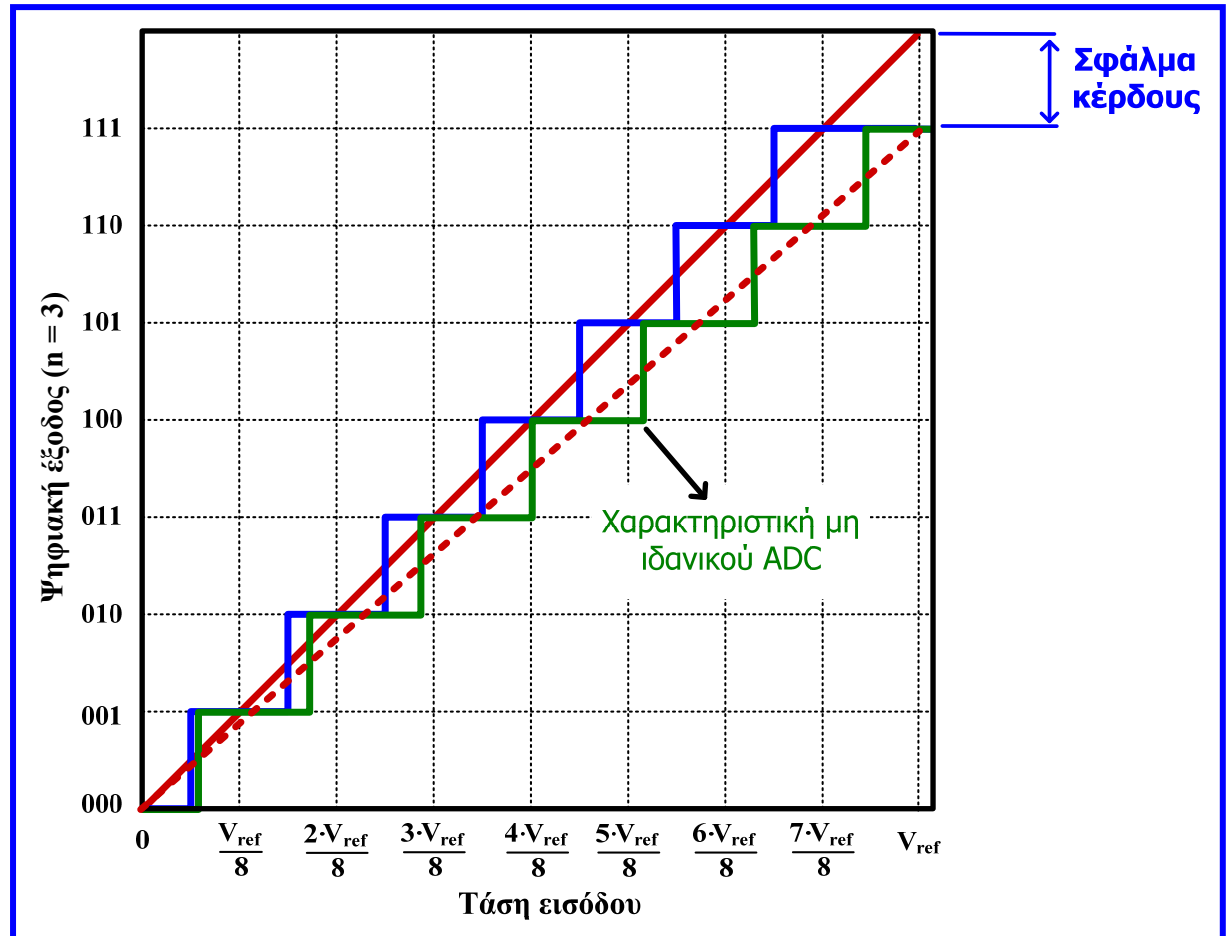
# Μετατροπέας A/D

**Σφάλμα κέρδους:** αφορά την απόκλιση της χαρακτηριστικής μεταφοράς του πραγματικού ADC από τα επίπεδα (στάθμες) της τάσης εισόδου του ιδανικού ADC.

Εκφράζεται σε LSB και συνήθως εντοπίζεται για τη μέγιστη δυνατή τάση εισόδου.

Μπορεί να εκφραστεί και σε μονάδες τάσης, αφού 1 LSB αντιστοιχεί σε τάση  $\Delta$ .

Στο παράδειγμα του διπλανού σχήματος ισούται με 1 LSB.

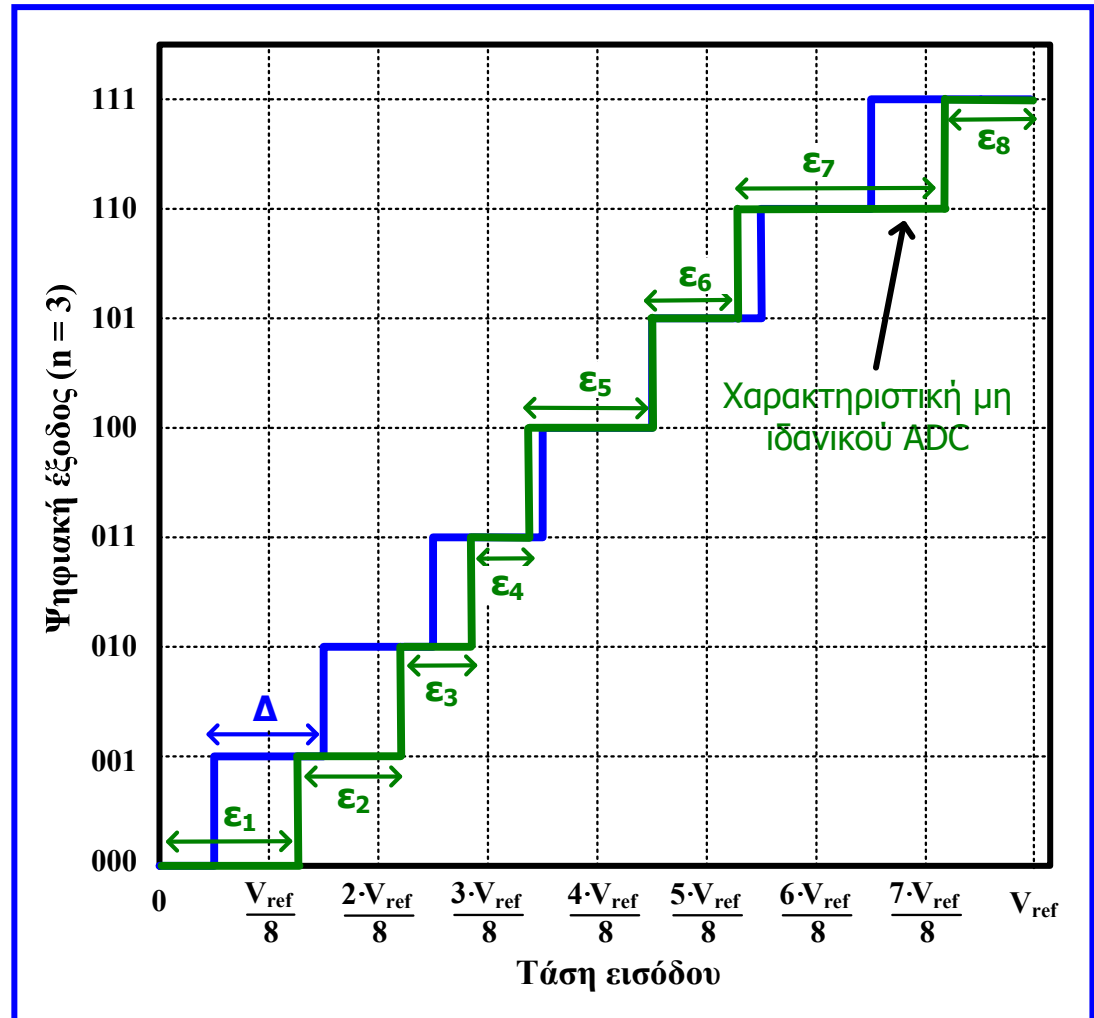


Επισημαίνεται ότι, στους DAC και ADC, τα σφάλματα μετατόπισης και κέρδους μπορούν να αντισταθμιστούν (απαλειφθούν) με την προσθήκη κατάλληλων κυκλωμάτων.

# Μετατροπέας A/D

**Σφάλμα μη γραμμικότητας** είναι η διαφορά εύρους τιμών της τάσης εισόδου που αντιστοιχούν στην ίδια ψηφιακή έξοδο του πραγματικού DAC και του ιδανικού DAC.

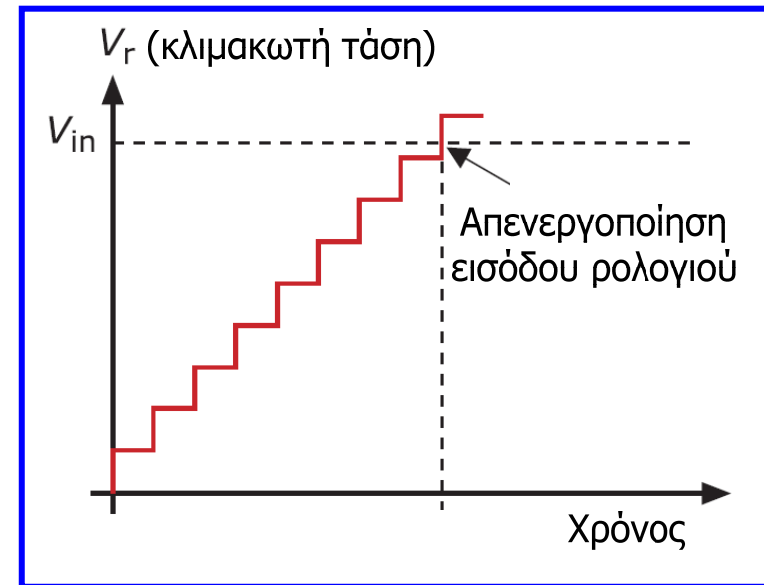
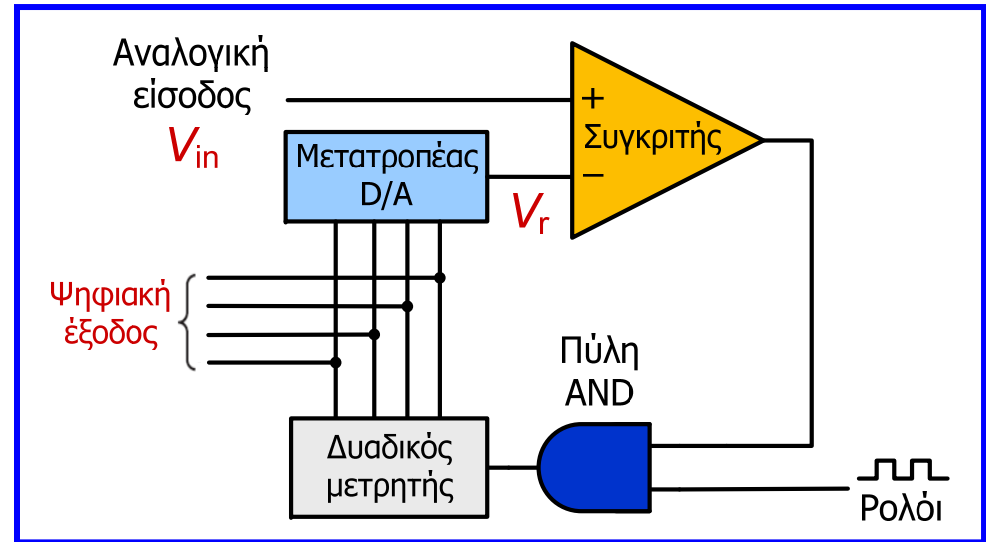
Το εύρος τιμών τάσης εισόδου στον ιδανικό DAC ισούται με  $\Delta$  για κάθε ψηφιακή έξοδο, συνεπώς το σφάλμα μη γραμμικότητας για κάθε ψηφιακή έξοδο υπολογίζεται ως η **διαφορά  $|\Delta - \epsilon_i|$** , η οποία μπορεί να εκφραστεί σε V ή σε LSB, λαμβάνοντας υπόψη ότι 1 LSB αντιστοιχεί σε τάση  $\Delta$ .



Στο **παράδειγμα** του παραπάνω σχήματος το **μέγιστο** σφάλμα μη γραμμικότητας είναι  $|\Delta - \epsilon_7|$  ή περίπου 1 LSB.

# Μετατροπείας A/D κλιμακωτής ανόδου

- Τα κύρια εξαρτήματα του **ADC κλιμακωτής ανόδου** είναι ένας **συγκριτής τάσεων**, ένας **δυναμικός μετρητής** κι ένας **DAC**.
- Ο συγκριτής είναι δομημένος έτσι ώστε εάν  $V_{in} > V_r$  η έξοδος του να τροφοδοτεί την πύλη AND με **1**, ενώ αν  $V_{in} \leq V_r$  με λογικό **0**.
- Οι τιμές του αναλογικού σήματος που παράγονται από τον DAC συγκρίνονται με την τιμή της αναλογικής εισόδου και αν είναι μικρότερες, στον επόμενο παλμό του σήματος ρολογιού, η έξοδος του μετρητή αυξάνεται κατά **1**.
- Η διαδικασία αυτή σταματά μέσω της πύλης AND όταν η τιμή του αναλογικού σήματος που παράγεται από τον DAC γίνει μεγαλύτερη από εκείνη της αναλογικής εισόδου, οπότε προκύπτει η αντίστοιχη ψηφιακή έξοδος.

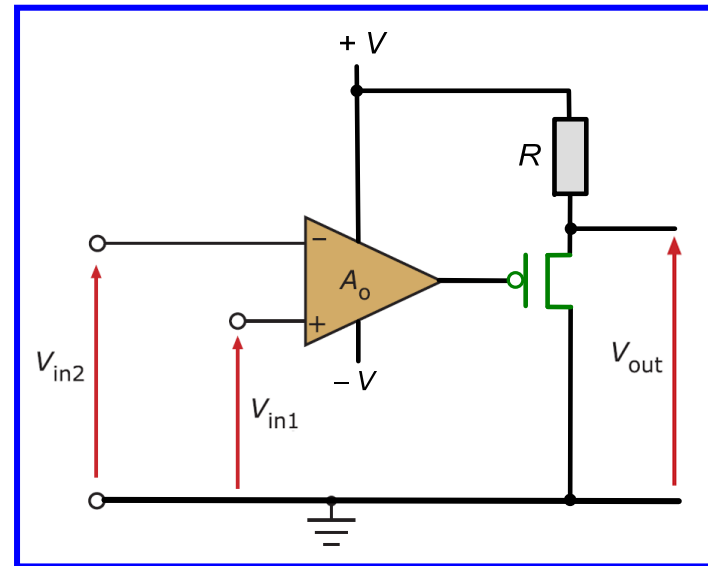
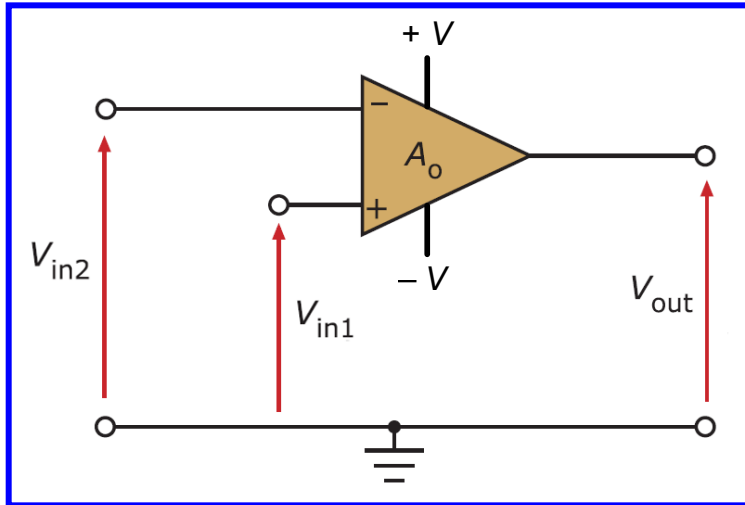


# Μετατροπείας A/D κλιμακωτής ανόδου

- Ας υποθέσουμε για **παράδειγμα**, ότι θέτουμε τάση  $0.7\text{ V}$  στην αναλογική είσοδο του ADC και ότι το βήμα διακριτότητας του DAC είναι  $0.25\text{ V}$  (δηλαδή, η διαφορά τάσης μεταξύ δύο διαδοχικών ψηφιακών συνδυασμών εισόδου του είναι  $0.25\text{ V}$ ).
- Αρχικά η έξοδος του μετρητή είναι  $0000$ , στην έξοδο του συγκριτή προκύπτει λογικό 1 που ενεργοποιεί την πύλη AND και ο πρώτος παλμός ρολογιού φθάνει στο μετρητή, του οποίου η έξοδος γίνεται  $0001$ .
- Το  $0001$  είναι η νέα ψηφιακή λέξη που τροφοδοτεί τον DAC και μετατρέπεται σε τάση  $0.25\text{ V}$ , η οποία τροφοδοτεί την αντιστρέφουσα είσοδο του συγκριτή.
- Επειδή  $0.7\text{ V} > 0.25\text{ V}$  το λογικό 1 παραμένει στην έξοδο του συγκριτή, οπότε στον επόμενο παλμό ρολογιού η έξοδος του μετρητή αυξάνεται κατά 1 και γίνεται  $0010$ .
- Η ψηφιακή ποσότητα  $0010$  μετατρέπεται μέσω του DAC σε τάση  $0.5\text{ V}$ , η οποία συγκρίνεται πάλι με την τάση εισόδου και επειδή  $0.7\text{ V} > 0.5\text{ V}$  η έξοδος του συγκριτή παραμένει 1 και η έξοδος του μετρητή γίνεται  $0011$ .
- Το  $0011$  μετατρέπεται από τον DAC σε τάση  $0.75\text{ V} > 0.7\text{ V}$ , η έξοδος του συγκριτή γίνεται 0, η πύλη AND απενεργοποιείται (δηλαδή, η έξοδός της γίνεται 0) και ο μετρητής σταματά να λειτουργεί αφού δε δέχεται πλέον παλμό σήματος ρολογιού.
- Η τελευταία έξοδος του μετρητή ( $0011$ ) είναι η ψηφιακή μετατροπή της τάσης  $0.7\text{ V}$ .
- **Βασικό μειονέκτημα** του **ADC κλιμακωτής ανόδου** είναι ότι δεν έχει σταθερό χρόνο μετατροπής, αλλά ο χρόνος αυτός εξαρτάται από την τιμή της τάσης εισόδου.

# Μετατροπέας A/D κλιμακωτής ανόδου

- Στον συγκριτή που υλοποιήσαμε στην παρούσα ενότητα και περιλαμβάνει έναν τελεστικό ενισχυτή (TE) που λειτουργεί με ανοικτό βρόχο (χωρίς ανατροφοδότηση), ισχύει ότι όταν  $V_{in1} < V_{in2}$  τότε  $V_{out} = -V$ , όταν  $V_{in1} > V_{in2}$  τότε  $V_{out} = V$  και όταν  $V_{in1} = V_{in2}$  τότε  $V_{out} = 0$ .
- Η προσαρμογή του συγκριτή αυτού, ώστε να λειτουργεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ADC (δηλαδή  $V_{out} = 0$ , όταν  $V_{in1} \leq V_{in2}$  και  $V_{out} = V$  ή λογική τιμή 1 όταν  $V_{in1} > V_{in2}$ ), επιτυγχάνεται με την προσθήκη ενός διακόπτη (τρανζίστορ pMOS) στην έξοδο του TE, ο οποίος συνδέεται με μια αντίσταση οδήγησης σε υψηλή στάθμη (pull-up resistor).
- Όταν η τάση στην πύλη του τρανζίστορ είναι μικρότερη ή ίση του 0, ο διακόπτης είναι κλειστός και η τάση εξόδου μηδενίζεται, ενώ όταν η τάση στην πύλη του τρανζίστορ είναι θετική, η τάση εξόδου οδηγείται στην υψηλή στάθμη  $V$  (λογική τιμή 1).

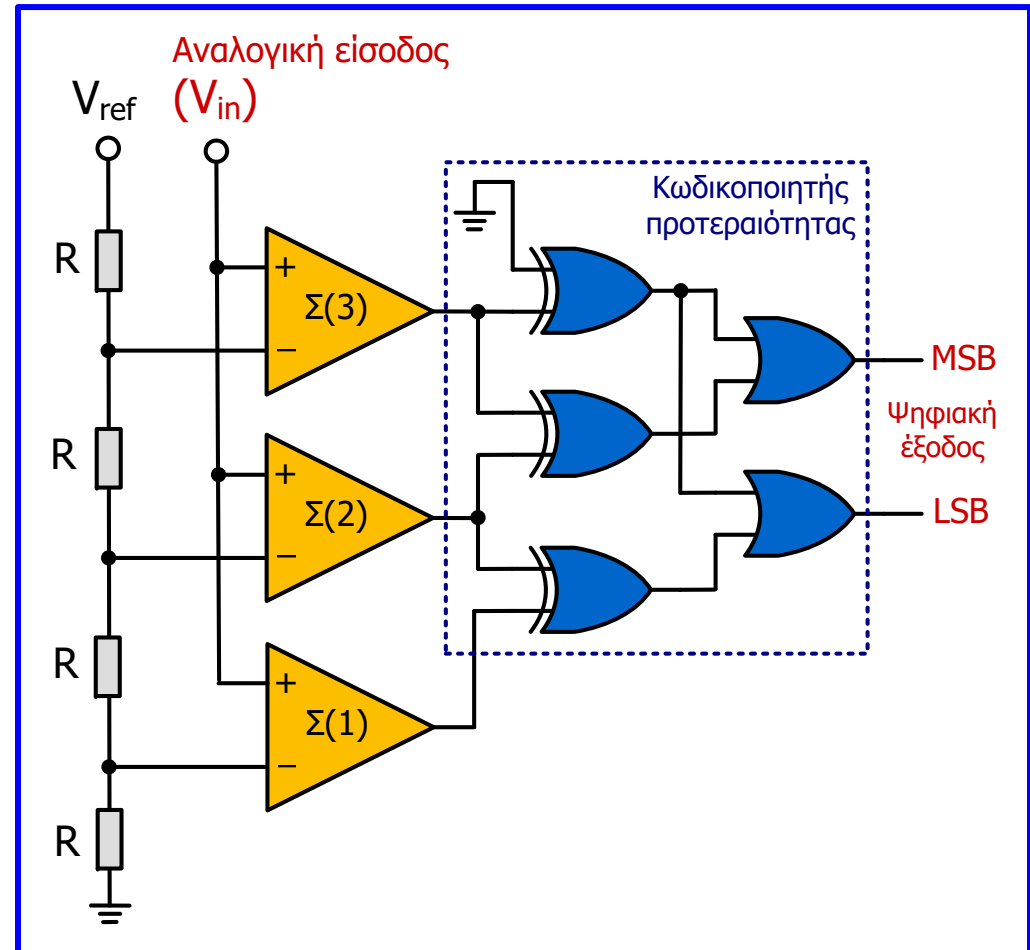


# Παράλληλος μετατροπέας A/D

- Ο μετατροπέας A/D παράλληλης μετατροπής υλοποιείται με  $2^n - 1$  συγκριτές (n: πλήθος ψηφίων της εξόδου του ADC).
- Σε κάθε συγκριτή συγκρίνεται η τάση της αναλογικής εισόδου με μια τάση που προκύπτει από την τάση αναφοράς  $V_{ref}$  μέσω ενός δικτυώματος διαιρετών τάσης που αποτελείται από  $2^n$  ίσες αντιστάσεις.
- Η τάση αυτή είναι σε κάθε συγκριτή μικρότερη κατά  $\Delta = V_{ref} / 2^n$  από εκείνη του επόμενου συγκριτή.
- Η έξοδος κάθε συγκριτή είναι 1 όταν η τάση εισόδου είναι μεγαλύτερη από την τάση της άλλης εισόδου του συγκριτή, διαφορετικά είναι 0.
- Έτσι, στις εξόδους των συγκριτών σχηματίζεται μια ψηφιακή λέξη με  $2^n - 1$  ψηφία.
- Η ψηφιακή έξοδος του ADC προκύπτει από ψηφιακό κύκλωμα (κωδικοποιητής προτεραιότητας), του οποίου η έξοδος αντιστοιχεί στην είσοδο με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα, όταν αυτή έχει λογική τιμή 1.

# Παράλληλος μετατροπέας A/D

- Ο συγκριτής  $\Sigma(2^n - 1)$  έχει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα και ο  $\Sigma(1)$  έχει τη μικρότερη προτεραιότητα.
- Για παράδειγμα ( $n = 2$ ), όταν η έξοδος του συγκριτή  $\Sigma(3)$  είναι 1, τότε η έξοδος του κωδικοποιητή είναι 11, ανεξάρτητα από τις τιμές των εξόδων των υπόλοιπων συγκριτών, όταν η έξοδος του  $\Sigma(2)$  είναι 1 και η έξοδος του  $\Sigma(3)$  είναι 0, τότε η έξοδος του κωδικοποιητή είναι 10, ανεξάρτητα από την τιμή εξόδου του συγκριτή  $\Sigma(1)$  κ.ο.κ.
- Τα πλεονεκτήματα του παράλληλου ADC είναι ο **σταθερός χρόνος μετατροπής** (ανεξάρτητος από την τιμή της αναλογικής τάσης εισόδου) και η **υψηλή ταχύτητα μετατροπής** και το βασικό μειονέκτημά του οι **υψηλές απαιτήσεις σε υλικό** (π.χ. για  $n = 8$ , απαιτούνται 255 συγκριτές).

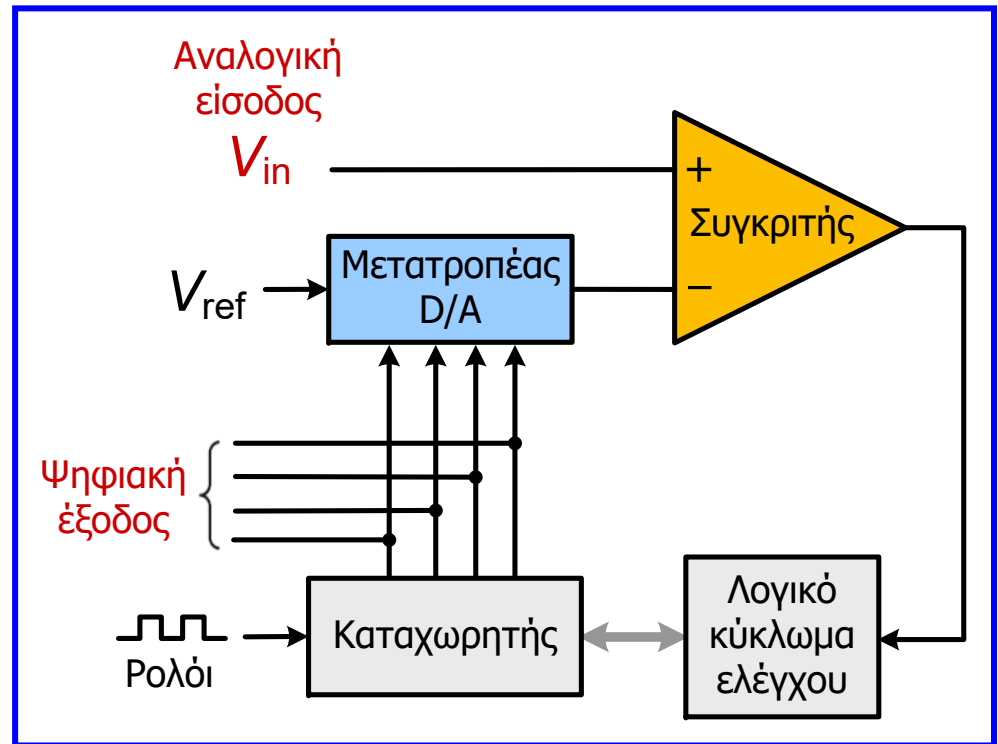


Παράδειγμα λειτουργίας του κυκλώματος στην [Άσκηση 18](#)



# Μετατροπές A/D διαδοχικών προσεγγίσεων

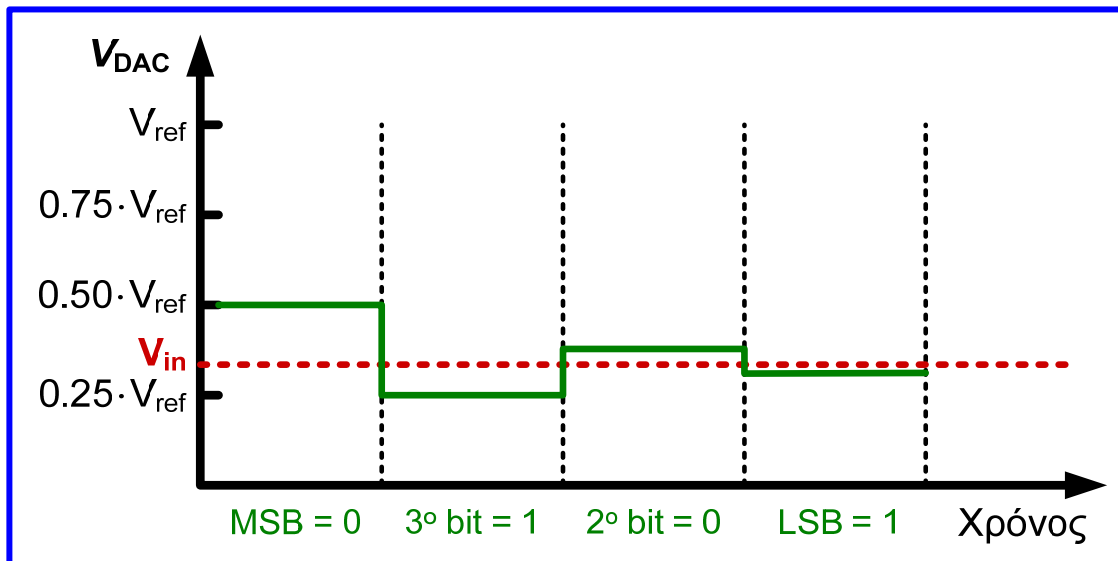
- Στον **ADC διαδοχικών προσεγγίσεων** συμμετέχει συγκριτής που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση της τάσης αναλογικής εισόδου με την τάση εξόδου ενός DAC, η είσοδος του οποίου είναι αποθηκευμένη σε καταχωρητή.
- Υποθέτοντας ότι  $n = 4$ , αρχικά στον καταχωρητή αποθηκεύεται η τιμή 1000, οπότε η έξοδος του DAC γίνεται  $V_{ref} / 2$  (όπως προκύπτει από την χαρακτηριστική μεταφοράς).
- Εάν  $V_{in} > V_{ref} / 2$ , η έξοδος του συγκριτή είναι 1 και το λογικό κύκλωμα ελέγχου διατηρεί το MSB του καταχωρητή σε τιμή 1, διαφορετικά το μηδενίζει.
- Στη συνέχεια, τίθεται τιμή 1 στο επόμενο ψηφίο του περιεχομένου του καταχωρητή και επαναλαμβάνεται η προαναφερόμενη διαδικασία.
- Η μετατροπή ολοκληρώνεται όταν η διαδικασία εφαρμοστεί σε όλα τα ψηφία του περιεχομένου του καταχωρητή.



# Μετατροπές A/D διαδοχικών προσεγγίσεων

**Παράδειγμα:** έστω ότι η προς μετατροπή τάση εισόδου έχει τιμή  $0.33 \cdot V_{ref}$ .

- Όπως προαναφέρθηκε, αρχικά η τιμή του περιεχομένου του καταχωρητή είναι 1000 και επειδή  $V_{in} < V_{ref} / 2$ , το MSB του περιεχομένου μηδενίζεται μετά την πρώτη σύγκριση.
- Στη συνέχεια, τίθεται στον καταχωρητή η τιμή 0100 και επειδή  $V_{in} > V_{ref} / 4$ , το 3<sup>ο</sup> ψηφίο διατηρείται σε τιμή 1.
- Ακολούθως, η τιμή του καταχωρητή γίνεται 0110 και επειδή  $V_{in} < 6 \cdot V_{ref} / 16 (= 0.375 \cdot V_{ref})$  το 2<sup>ο</sup> ψηφίο μηδενίζεται.
- Αφού αποθηκευτεί στον καταχωρητή η τιμή 0101, επειδή  $V_{in} > 5 \cdot V_{ref} / 16 (= 0.3125 \cdot V_{ref})$ , το LSB διατηρείται σε τιμή 1 και η ψηφιακή έξοδος του μετατροπέα είναι 0101.



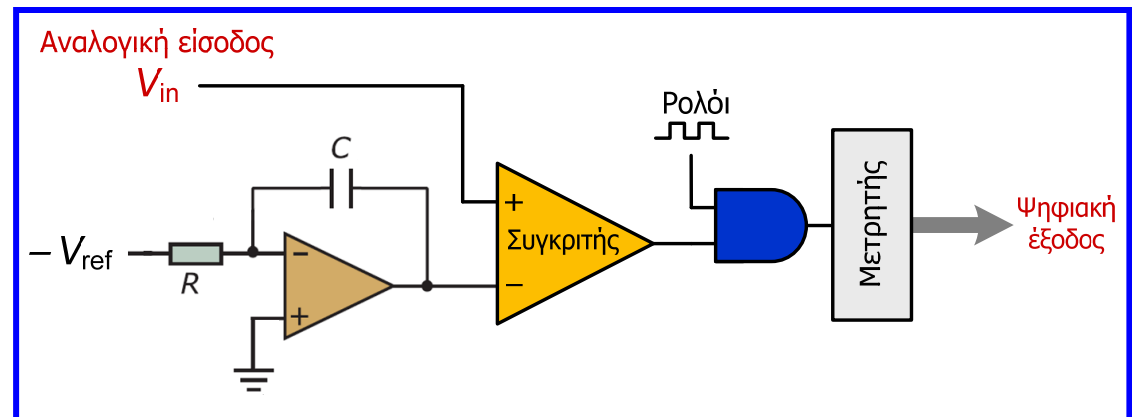
Ο **χρόνος μετατροπής** του ADC διαδοχικών προσεγγίσεων είναι σταθερός, αλλά αυξημένος, λόγω των πολλών συγκρίσεων, καθεμία από τις οποίες για να πραγματοποιηθεί θα πρέπει να έχει ολοκληρωθεί η προηγούμενη.

# Μετατροπέας A/D ολοκλήρωσης

- Ο **ADC ολοκλήρωσης** αποτελείται από ολοκληρωτή, συγκριτή, πύλη AND και μετρητή.
- Στο συγκριτή εκτελείται σύγκριση της αναλογικής τάσης εισόδου ( $V_{in}$ ) με το ολοκλήρωμα τάσης αναφοράς ( $V_{ref}$ ) και όταν η έξοδος του συγκριτή είναι 1 (δηλαδή, όταν το ολοκλήρωμα της  $V_{ref}$  είναι μικρότερο από την  $V_{in}$ ) οι παλμοί του σήματος ρολογιού τροφοδοτούν τον μετρητή (μέσω της πύλης AND) και η έξοδος του αυξάνεται.
- Λόγω του ότι η  $V_{ref}$  είναι σταθερή, το ολοκλήρωμά της ως προς το χρόνο είναι γραμμική συνάρτηση του χρόνου και όταν αυτό γίνει ίσο με την  $V_{in}$ , η έξοδος του συγκριτή γίνεται 0 και ο μετρητής σταματά να λαμβάνει παλμούς του σήματος ρολογιού.
- Η έξοδος του μετρητή όταν διακόπτεται η μέτρηση είναι αντίστοιχη με την  $V_{in}$  και αποτελεί την ψηφιακή έξοδο του ADC.
- Ο ADC ολοκλήρωσης παρέχει **υψηλή διακριτική ικανότητα** και ο **χρόνος μετατροπής του δεν είναι σταθερός**, αφού εξαρτάται από την αναλογική τάση εισόδου.

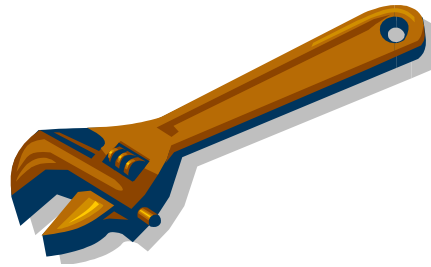
$$-\frac{(-V_{ref})}{R \cdot C} \cdot t = V_{in} \Rightarrow$$
$$t = \frac{V_{in} \cdot R \cdot C}{V_{ref}}$$

$$\text{Ψηφιακή έξοδος} = t / T_{CLK}$$



# Συμπεράσματα

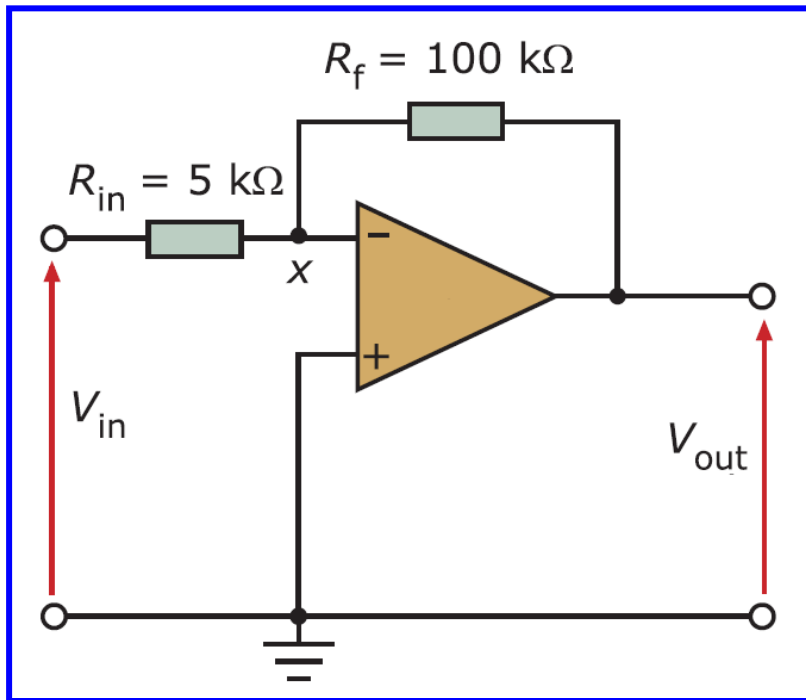
- Στην ενότητα αυτή εξετάστηκαν διάφοροι τρόποι ρύθμισης σήματος καθώς και τεχνικές προσαρμογής (διασύνδεσης) με τη χρήση τελεστικών ενισχυτών που αποτελούν βασικά ολοκληρωμένα ενεργητικά κυκλώματα.
- Οι αισθητήρες και τα κυκλώματα μέτρησης χρησιμοποιούν τελεστικούς ενισχυτές με διάφορους τρόπους, οι οποίοι σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία δομούν διαφορετικού τύπου κυκλώματα ρύθμισης σημάτων.
- Με τη χρήση τελεστικών ενισχυτών απλοποιούνται οι τεχνικές ρύθμισης σημάτων, βελτιώνεται η αξιοπιστία τους και υλοποιούνται σε μικρότερο μέγεθος και με χαμηλότερο κόστος.
- Από τις διαθέσιμες συνδεσμολογίες και τεχνικές ρύθμισης σημάτων μελετήθηκαν οι βασικότερες: ενισχυτές αντιστροφής και μη αντιστροφής, ενισχυτής άθροισης, ακολουθητής τάσης, ενισχυτές διαφοράς και οργανολογίας, ενισχυτές ολοκλήρωσης και διαφορίσης, μετατροπείς ρεύματος σε τάση και τάσης σε ρεύμα, συγκριτής τάσεων.
- Λόγω του ότι το μεγαλύτερο μέρος των συστημάτων μέτρησης σήμερα βασίζεται σε ψηφιακά ηλεκτρονικά (μικροεπεξεργαστές, μικροελεγκτές, Η/Υ), μελετήθηκαν κυκλώματα όπως όπως αναλογικοί διακόπτες και πολυπλέκτες, κυκλώματα δειγματοληψίας και συγκράτησης και διάφοροι τύποι μετατροπέων A/D και D/A, που χρησιμοποιούνται ευρέως στα ψηφιακά συστήματα μέτρησης και στα συστήματα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων μετρήσεων.



## Ασκήσεις 4<sup>ης</sup> ενότητας

# Άσκηση 1<sup>η</sup>

Για τον ενισχυτή αντιστροφής που περιλαμβάνει ΙΤΕ του σχήματος, εάν η τάση εισόδου είναι 50 mV, να υπολογίσετε την απολαβή του ενισχυτή και την τάση εξόδου.



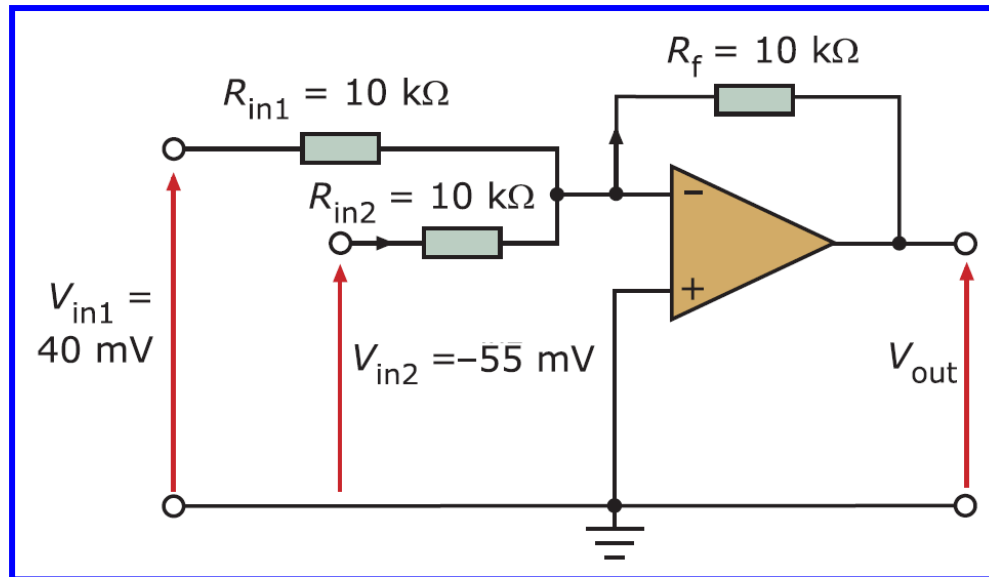
Το ρεύμα στις εισόδους του ΙΤΕ είναι 0:

$$I_{in} = I_f \Rightarrow \frac{V_{in} - V_x}{R_{in}} = \frac{V_x - V_{out}}{R_f} \Rightarrow$$
$$\frac{V_{in}}{R_{in}} + \frac{V_{out}}{R_f} = \left( \frac{1}{R_{in}} + \frac{1}{R_f} \right) V_x$$

$$V_+ = 0 = V_x \Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_{in}} \Rightarrow A = -\frac{R_f}{R_{in}} = -20, \quad V_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}} V_{in} = -1V$$

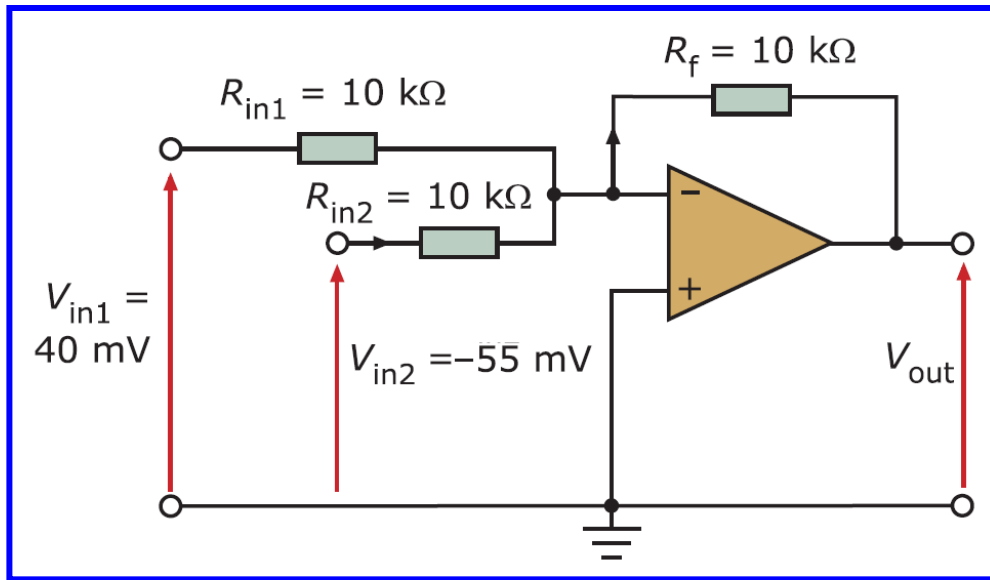
## Άσκηση 2<sup>η</sup>

Για τον ενισχυτή άθροισης του σχήματος που περιλαμβάνει ΙΤΕ, εάν τα σήματα εισόδου είναι 40 mV και -55 mV, να υπολογίσετε την τάση εξόδου.



Σε κυκλώματα στα οποία υπάρχουν περισσότερα από ένα σήματα εισόδου, το σήμα εξόδου μπορεί να προκύψει από το άθροισμα των επιμέρους σημάτων εξόδου που προκύπτουν εάν κάθε φορά λάβουμε υπόψη μόνο ένα σήμα εισόδου και θεωρήσουμε τα υπόλοιπα μηδενικά (**αρχή επαλληλίας**). Οι πηγές τάσης με μηδενική τιμή λαμβάνονται ως βραχυκυκλώματα, ενώ οι πηγές ρεύματος με μηδενική τιμή λαμβάνονται ως ανοικτά κυκλώματα.

## Άσκηση 2<sup>η</sup>



Εάν μηδενίσουμε την  $V_{in2}$ , παρατηρούμε ότι το κύκλωμα γίνεται ένας ενισχυτής αντιστροφής σαν αυτόν που αναλύθηκε στην προηγούμενη άσκηση (αφού στα άκρα της  $R_{in2}$  η τάση είναι 0). Το ίδιο ισχύει αν μηδενίσουμε την  $V_{in1}$ .

Επομένως, σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας:

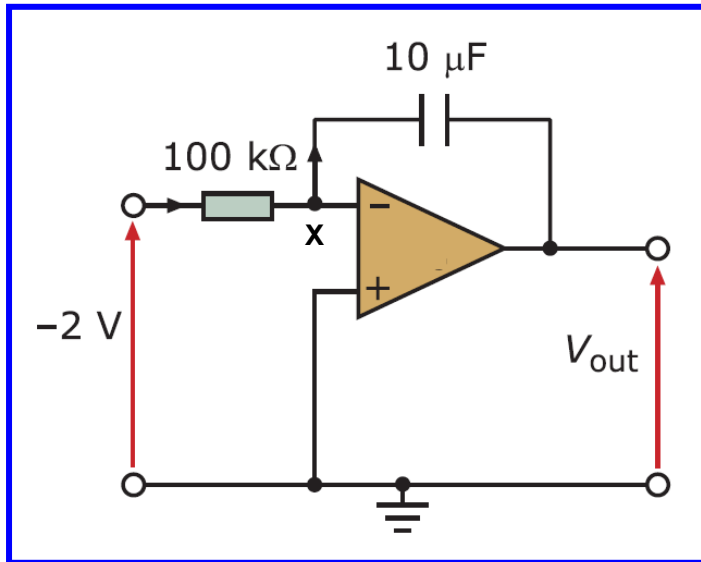
$$V_{out} = \left( -R_f \cdot \frac{V_{in1}}{R_{in1}} \right) + \left( -R_f \cdot \frac{V_{in2}}{R_{in2}} \right) = -R_f \cdot \left( \frac{V_{in1}}{R_{in1}} + \frac{V_{in2}}{R_{in2}} \right)$$

και επειδή  $R_{in1} = R_{in2} = R_f$ :  $V_{out} = -(V_{in1} + V_{in2}) = 15 \text{ mV}$



# Άσκηση 3<sup>η</sup>

Για τον ολοκληρωτή του σχήματος που περιλαμβάνει ΙΤΕ, η τάση στα άκρα της εισόδου είναι  $-2\text{ V}$ . Να υπολογίσετε την τάση εξόδου του ολοκληρωτή για κάθε δευτερόλεπτο μετά την εφαρμογή της τάσης εισόδου έως το τέλος χρονικού διαστήματος 6 δευτερολέπτων και να σχεδιάσετε την γραφική παράσταση της τάσης εξόδου ως προς το χρόνο για το παραπάνω διάστημα συγκρίνοντάς τη με την εφαρμοζόμενη τάση εισόδου.



$$I_{in} = I_{C_f} \Rightarrow$$
$$\frac{V_{in} - V_x}{R_{in}} = C_f \frac{dV_{C_f}}{dt} \Rightarrow$$
$$\frac{V_{in} - V_x}{R_{in}} = C_f \frac{d(V_x - V_{out})}{dt} \Rightarrow$$
$$\frac{V_{in}}{R_{in}} = -C_f \frac{dV_{out}}{dt} \Rightarrow V_{out} = -\frac{1}{R_{in} C_f} \int V_{in} dt$$

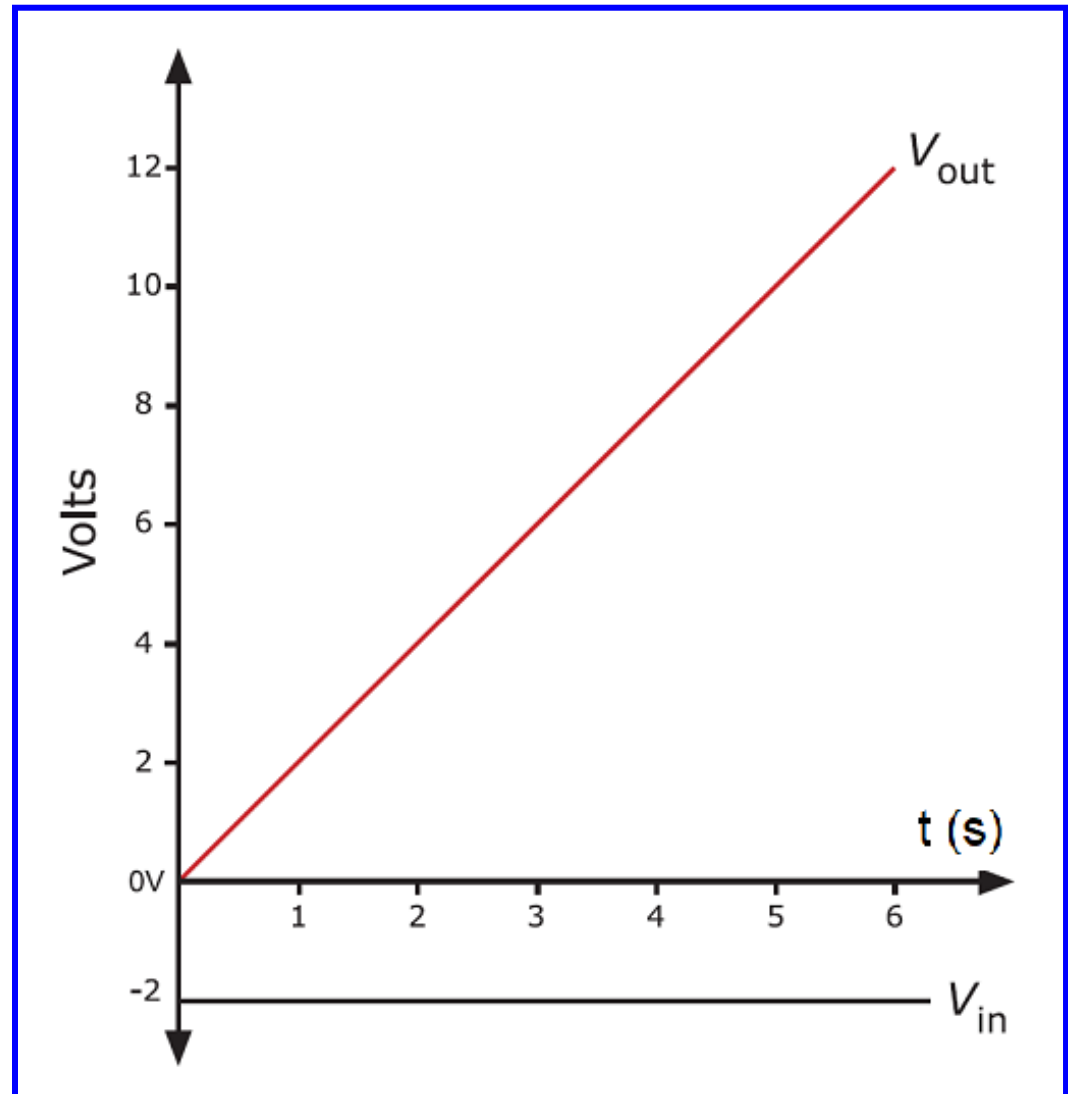
Αφού η τάση εισόδου είναι σταθερή:

$$V_{out} = -\frac{V_{in} \cdot t}{R_{in} \cdot C_f}$$

Επομένως, η σταθερή τάση στην είσοδο παράγει μία τάση εξόδου που μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο (με σταθερή κλίση).

# Άσκηση 3<sup>η</sup>

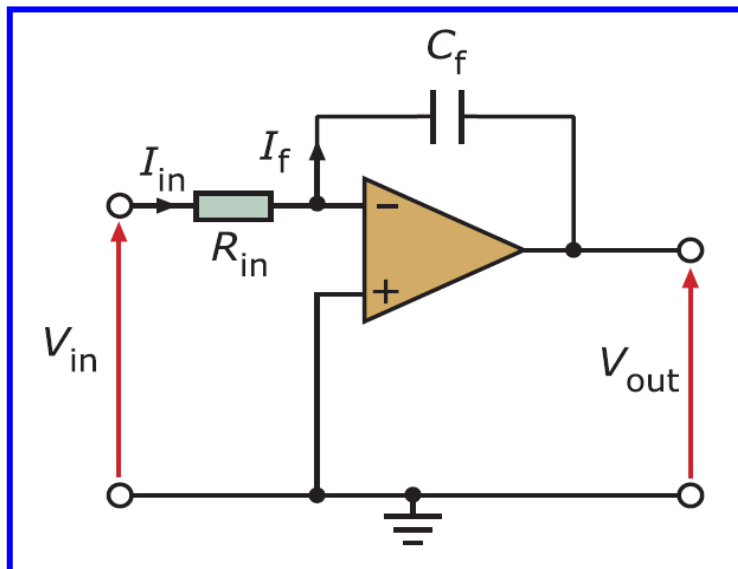
$$V_{\text{out}} = -\frac{V_{\text{in}} \cdot t}{R_{\text{in}} \cdot C_f} =$$
$$\left( \frac{2 \cdot t}{100 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \right) \text{Volts} \Rightarrow$$
$$V_{\text{out}} = (2 \cdot t) \text{ Volts}$$



# Άσκηση 4<sup>η</sup>

Να σχεδιαστεί με χρήση τελεστικού ενισχυτή μία πηγή τάσης που να μεταβάλλεται γραμμικά ως προς το χρόνο (μορφή ράμπας) με κλίση 10 V/ms. Εκτός από τον τελεστικό ενισχυτή είναι διαθέσιμη μία αντίσταση 1 kΩ και ένας πυκνωτής 1 μF.

Όταν εφαρμόσουμε σε έναν ολοκληρωτή σταθερή τάση στην είσοδο, παράγει μία τάση εξόδου που μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο με σταθερή κλίση. Με τα διαθέσιμα παθητικά στοιχεία και τον ΤΕ σχεδιάζουμε τον ολοκληρωτή του παρακάτω σχήματος και αυτό που μένει είναι να καθορίσουμε την σταθερή τάση εισόδου που πρέπει να εφαρμοστεί στον ολοκληρωτή ώστε να πετύχουμε στην τάση εξόδου την επιθυμητή κλίση.



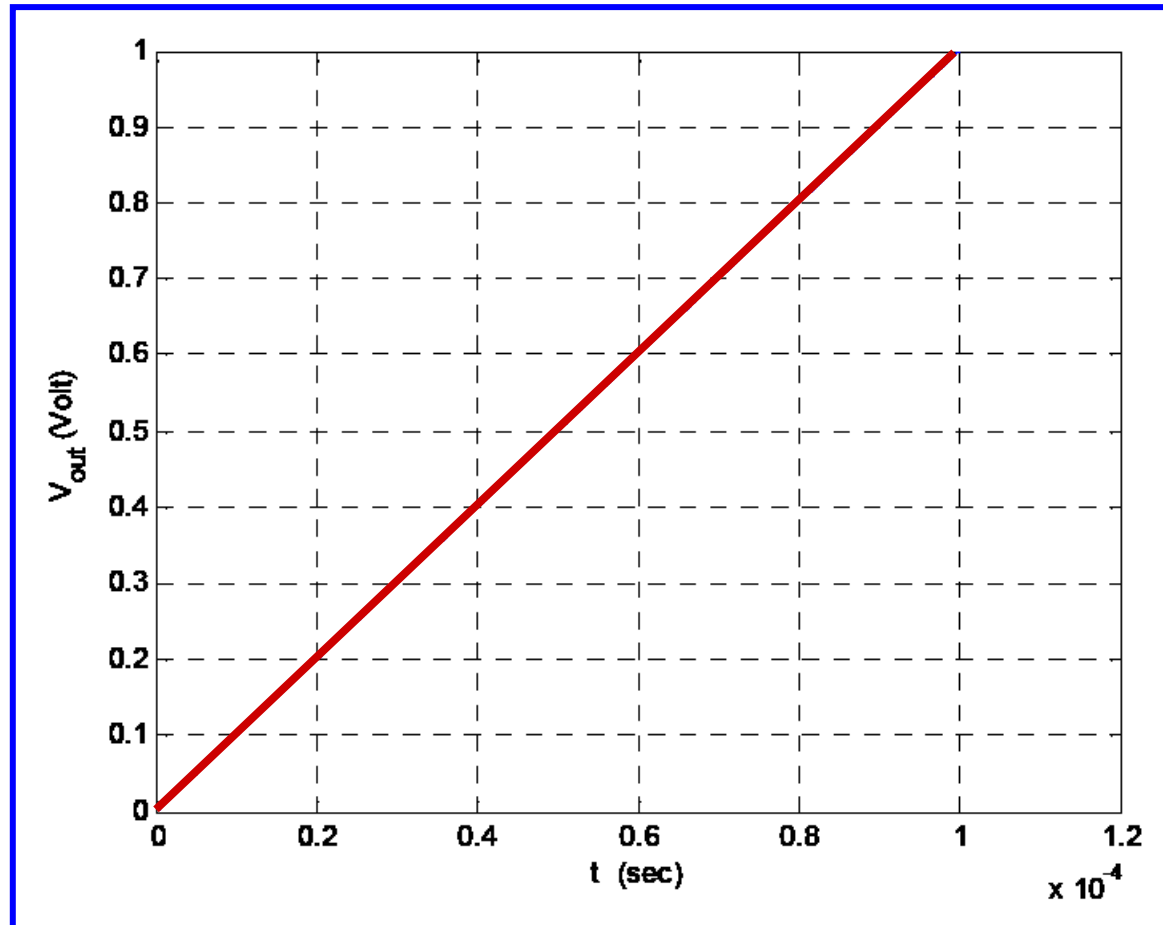
Κλίση τάσης εξόδου

$$V_{out} = -\frac{V_{in} \cdot t}{R_{in} \cdot C_f} \Rightarrow -\frac{V_{in}}{R_{in} \cdot C_f} = \frac{10}{10^{-3}} \Rightarrow$$
$$V_{in} = -\frac{10}{10^{-3}} \cdot R_{in} \cdot C_f \Rightarrow V_{in} = -10 \text{ Volts}$$

$$V_{out} = 10.000 \cdot t$$

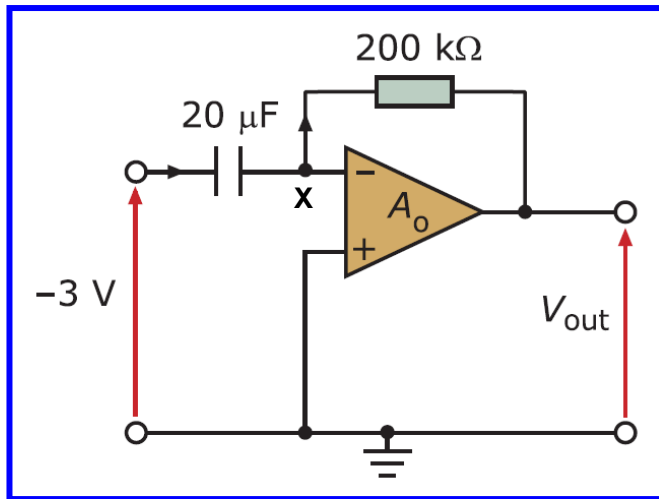
# Άσκηση 4<sup>η</sup>

$$V_{\text{out}} = 10.000 \cdot t$$



# Άσκηση 5<sup>η</sup>

Για τον διαφοριστή του σχήματος που περιλαμβάνει ΙΤΕ, η τάση στα άκρα της εισόδου μεταβάλλεται γραμμικά κατά  $-2\text{ V}$  κάθε δευτερόλεπτο για χρονικό διάστημα 6 δευτερολέπτων. Να υπολογίσετε την τάση εξόδου του διαφοριστή σε κάθε δευτερόλεπτο μετά την εφαρμογή της τάσης εισόδου έως το τέλος χρονικού διαστήματος 6 δευτερολέπτων και να σχεδιάσετε την γραφική παράσταση της τάσης εξόδου ως προς το χρόνο για το παραπάνω διάστημα συγκρίνοντάς τη με την εφαρμοζόμενη τάση εισόδου.



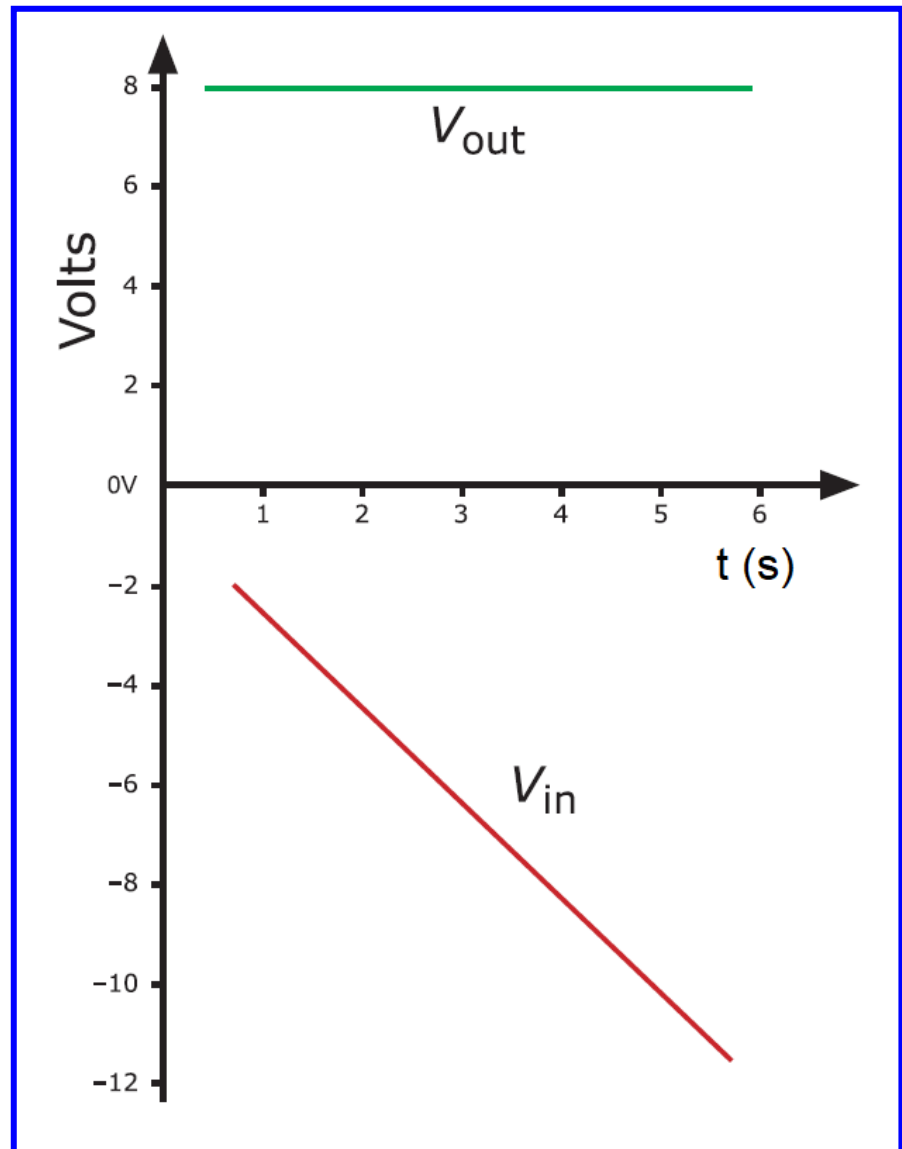
Αφού η τάση εισόδου μεταβάλλεται γραμμικά (δηλ. είναι γραμμική συνάρτηση του χρόνου  $V_{in} = a \cdot t$  με  $a = -2$ ) τότε η έξοδος λαμβάνει σταθερή τιμή.

$$I_{in} = I_f \Rightarrow C_{in} \frac{d(V_{in} - V_x)}{dt} = \frac{V_x - V_{out}}{R_f} \Rightarrow C_{in} \frac{dV_{in}}{dt} = -\frac{V_{out}}{R_f} \Rightarrow V_{out} = -R_f \cdot C_{in} \cdot \frac{dV_{in}}{dt}$$

$$V_{out} = -R_f \cdot C_{in} \cdot \frac{d(a \cdot t)}{dt} = -R_f \cdot C_{in} \cdot a \Rightarrow V_{out} = -\frac{R_f \cdot C_{in} \cdot V_{in}}{t}$$

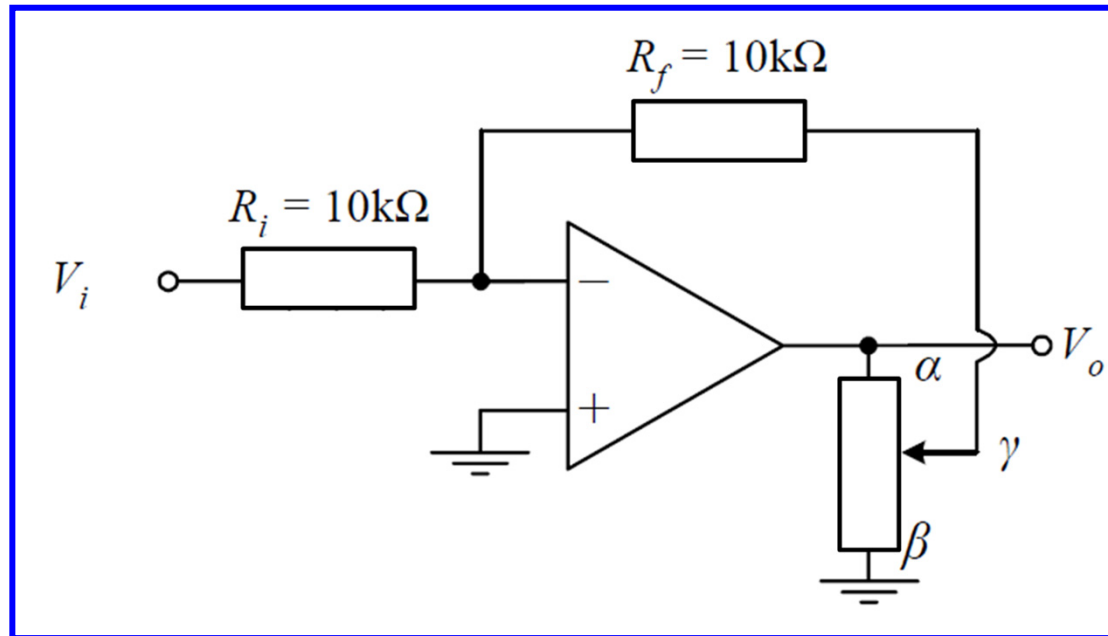
# Άσκηση 5<sup>η</sup>

$$\begin{aligned} V_{\text{out}} &= -R_{\text{in}} \cdot C_f \cdot a = \\ &= -200 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot (-2) \text{ Volts} \\ &\Rightarrow V_{\text{out}} = 8 \text{ Volts} \end{aligned}$$



# Άσκηση 6<sup>η</sup>

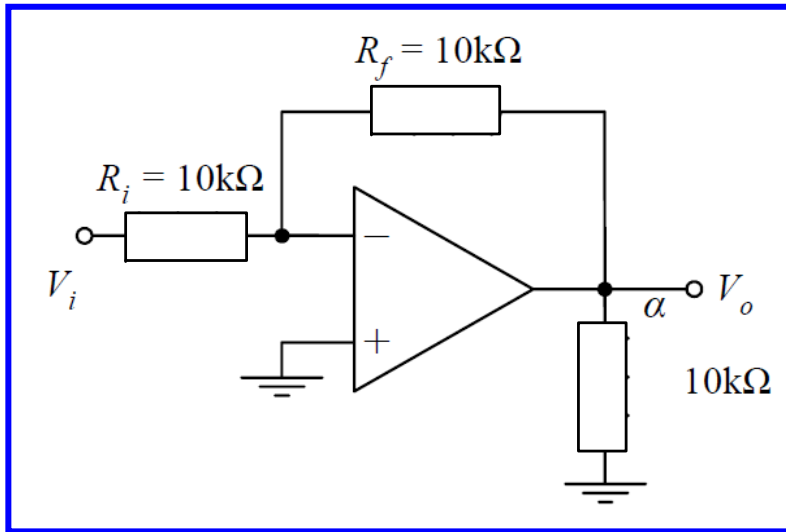
Να υπολογίσετε την απολαβή του ενισχυτή του σχήματος που περιλαμβάνει ΙΤΕ, στις περιπτώσεις όπου η κινητή επαφή του ποτενσιόμετρου βρίσκεται στο σημείο α, στο σημείο β και στο μέσο της απόστασης α-β. Δίνεται ότι η συνολική αντίσταση του ποτενσιόμετρου είναι 10 kΩ.



Ανάλογα με τη θέση της κινητής επαφής του ποτενσιόμετρου σχεδιάζουμε τα αντίστοιχα ισοδύναμα κυκλώματα του ενισχυτή.

# Άσκηση 6<sup>η</sup>

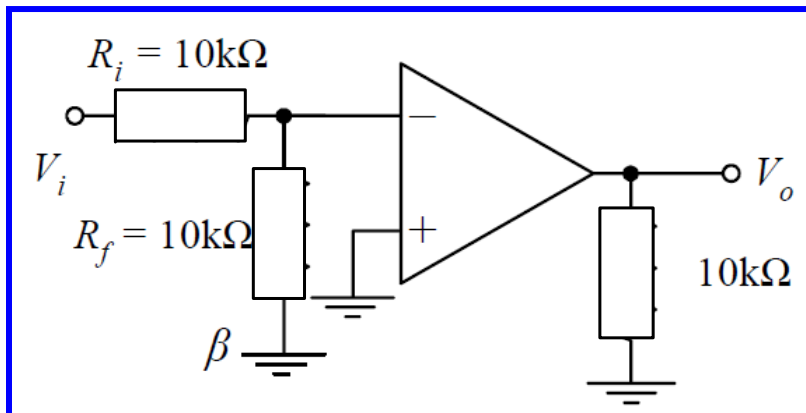
Κινητή επαφή στο σημείο α



Πρόκειται για τοπολογία ενισχυτή αντιστροφής, επομένως:

$$A = -\frac{R_f}{R_i} = -1$$

Κινητή επαφή στο σημείο β



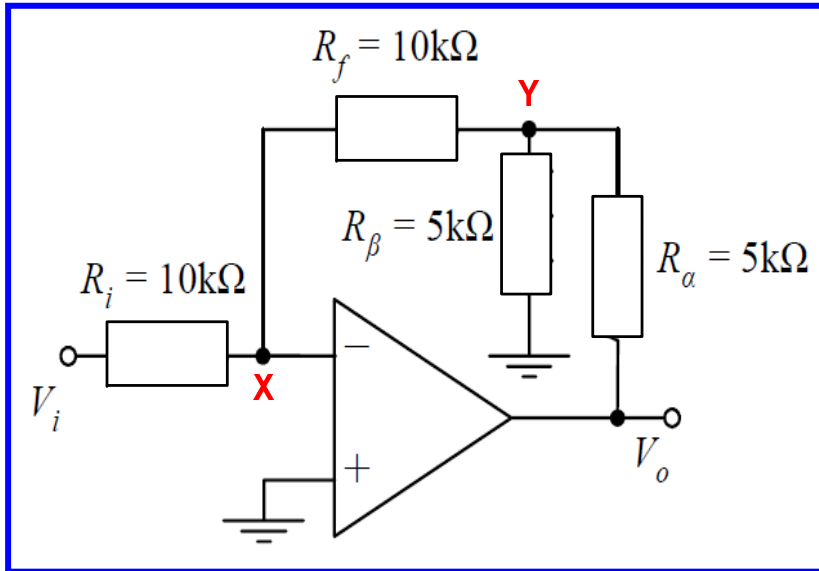
Ο τελεστικός ενισχυτής λειτουργεί χωρίς ανατροφοδότηση (με ανοικτό βρόχο), επομένως η απολαβή του τείνει στο άπειρο.

Σημειώνεται, ότι αν και η αντίσταση  $R_f$  δεν επηρεάζει την απολαβή θα μπορούσε να παραληφθεί αφού η τάση στα άκρα της είναι 0, λόγω του ότι η αντιστρέφουσα είσοδος του ΙΤΕ λειτουργεί ως εικονική γη.



# Άσκηση 6<sup>η</sup>

Κινητή επαφή στο μέσο της αβ



Κόμβος X:

$$\left( \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_f} \right) \cdot V_x = \frac{V_i}{R_i} + \frac{V_y}{R_f} \quad V_x = V_+ = 0 \Rightarrow$$

$$V_y = -\frac{R_f}{R_i} \cdot V_i \quad (1)$$

Για την επίλυση σύνθετων κυκλωμάτων με ΙΤΕ, εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff σε κάθε κόμβο του κυκλώματος εκτός των κόμβων εισόδου και εξόδου ως εξής: το άθροισμα των αγωγιμοτήτων (δηλ. των αντίστροφων αντιστάσεων ή εμπεδήσεων) που ξεκινούν από τον κόμβο εφαρμογής πολ/σμένο με την τάση του κόμβου εφαρμογής ισούται με το άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών με τις τάσεις των κόμβων στους οποίους καταλήγουν.

Κόμβος Y:

$$\left( \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_\beta} + \frac{1}{R_\alpha} \right) \cdot V_y = \frac{V_x}{R_f} + \frac{0}{R_\beta} + \frac{V_o}{R_\alpha} \quad V_x = V_+ = 0 \Rightarrow$$

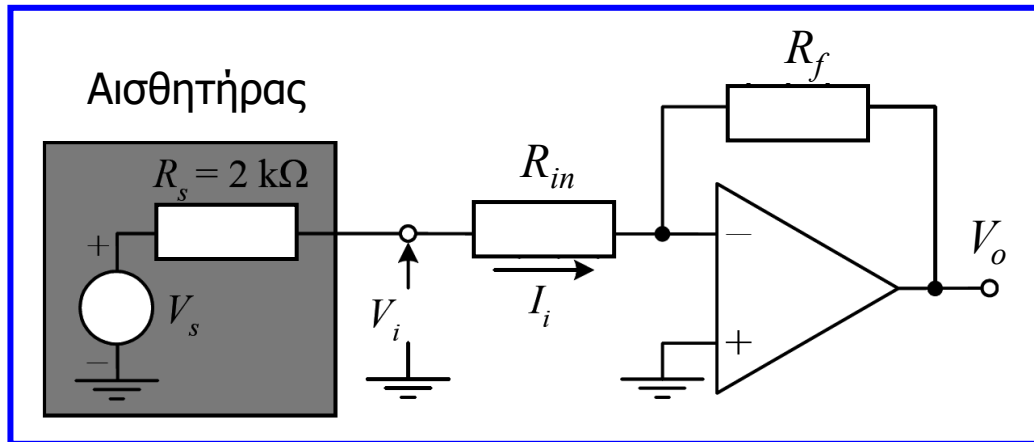
$$-\left( \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_\beta} + \frac{1}{R_\alpha} \right) \cdot \frac{R_f}{R_i} \cdot V_i = \frac{V_o}{R_\alpha} \Rightarrow$$

$$A = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{1}{R_i} \cdot \left( R_f + R_\alpha + \frac{R_f \cdot R_\alpha}{R_\beta} \right) \Rightarrow A = -2.5$$

# Άσκηση 7η

Ένας ενισχυτής αντιστροφής (με ΙΤΕ) καλείται να ενισχύσει 50 φορές το σήμα που παράγει ένας ενεργός αισθητήρας. Ο αισθητήρας μπορεί να παρασταθεί από ένα ισοδύναμο κύκλωμα το οποίο αποτελείται από μία πηγή τάσης 100 mV σε σειρά με μία αντίσταση 2 kΩ. Η πηγή (αισθητήρας) μπορεί να αποδώσει μέγιστο ρεύμα 10 μΑ. Ζητείται να επιλεγούν οι τιμές της αντίστασης εισόδου  $R_{in}$  και ανατροφοδότησης  $R_f$  του ενισχυτή, οι οποίες εξασφαλίζουν την επιθυμητή ενίσχυση.

Με βάση την εκφώνηση της άσκησης σχεδιάζουμε το παρακάτω κύκλωμα.

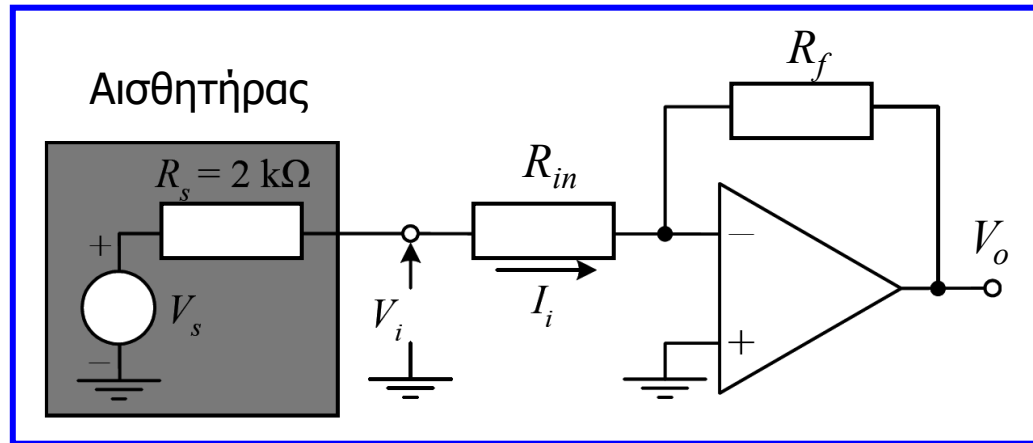


Προκειμένου το ρεύμα εισόδου του ενισχυτή να είναι μικρότερο από το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να αποδώσει ο αισθητήρας, πρέπει:

$$I_i = \frac{V_s}{R_s + R_{in}} \Rightarrow$$
$$R_{in} \geq \frac{V_s}{I_{i-\max}} - R_s \geq 8 \text{ k}\Omega$$

Επομένως, η αντίσταση εισόδου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 8 kΩ, ώστε να μην υπερφορτώνεται ο αισθητήρας. Επιλέγουμε λοιπόν:  $R_{in} = 10 \text{ k}\Omega$ .

# Άσκηση 7<sup>η</sup>

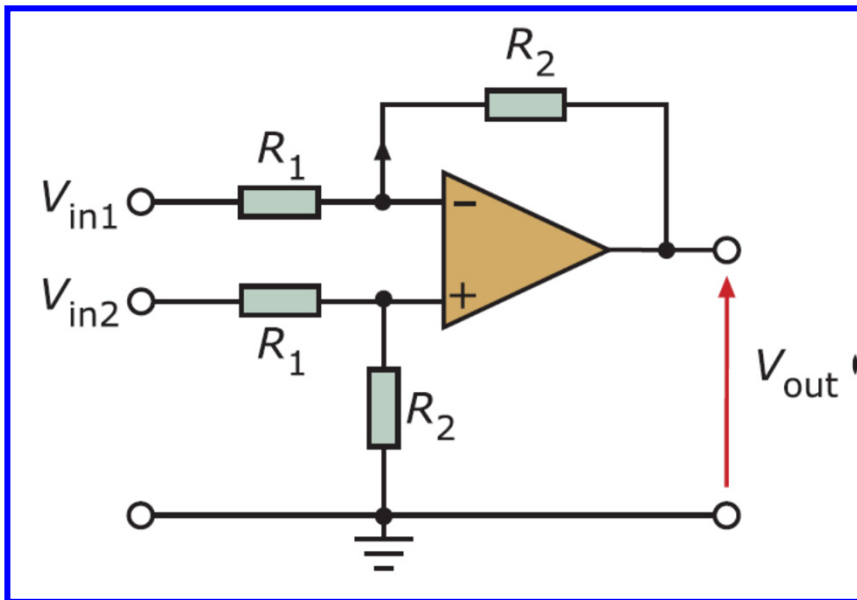


Από τη σχέση που μας δίνει την απολαβή (ενίσχυση) του ενισχυτή αντιστροφής μπορούμε πλέον εύκολα να υπολογίσουμε την τιμή της αντίστασης ανατροφοδότησης, αφού βέβαια λάβουμε υπόψη στο κύκλωμα και την αντίσταση της πηγής που προστίθεται στην αντίσταση εισόδου του ενισχυτή.

$$A = -50 = -\frac{R_f}{(R_{in} + R_s)} \Rightarrow R_f = 600 \text{ k}\Omega$$

# Άσκηση 8<sup>η</sup>

Να προσδιοριστεί η τάση εξόδου στον ενισχυτή διαφοράς τάσεων του σχήματος. Θεωρίστε τον τελεστικό ενισχυτή ιδανικό.



Κόμβος + :

$$\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot V_+ = \frac{V_{in2}}{R_1} + \frac{0}{R_2} V_y$$

Επιλύουμε το κύκλωμα με τη μέθοδο που ακολουθήθηκε στην 6<sup>η</sup> άσκηση:

Κόμβος - :

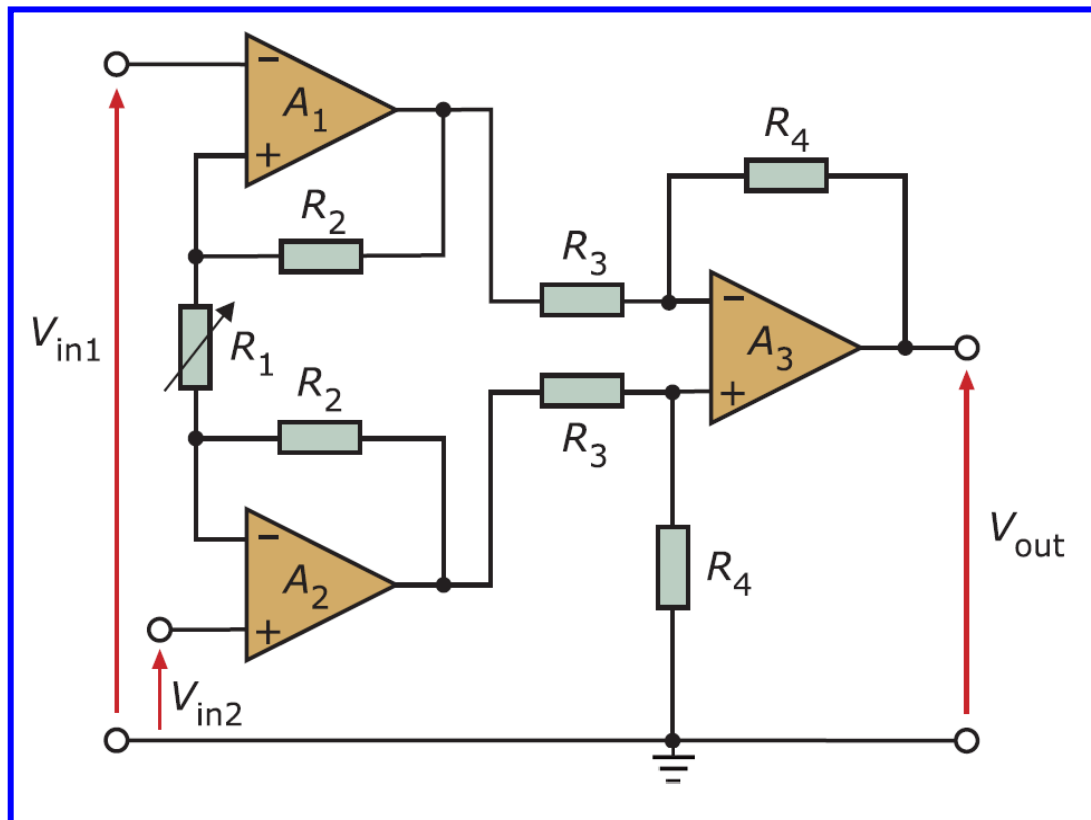
$$\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot V_- = \frac{V_{in1}}{R_1} + \frac{V_{out}}{R_2}$$

Ιδιότητα αντιγραφής τάσεων εισόδου ΙΤΕ:

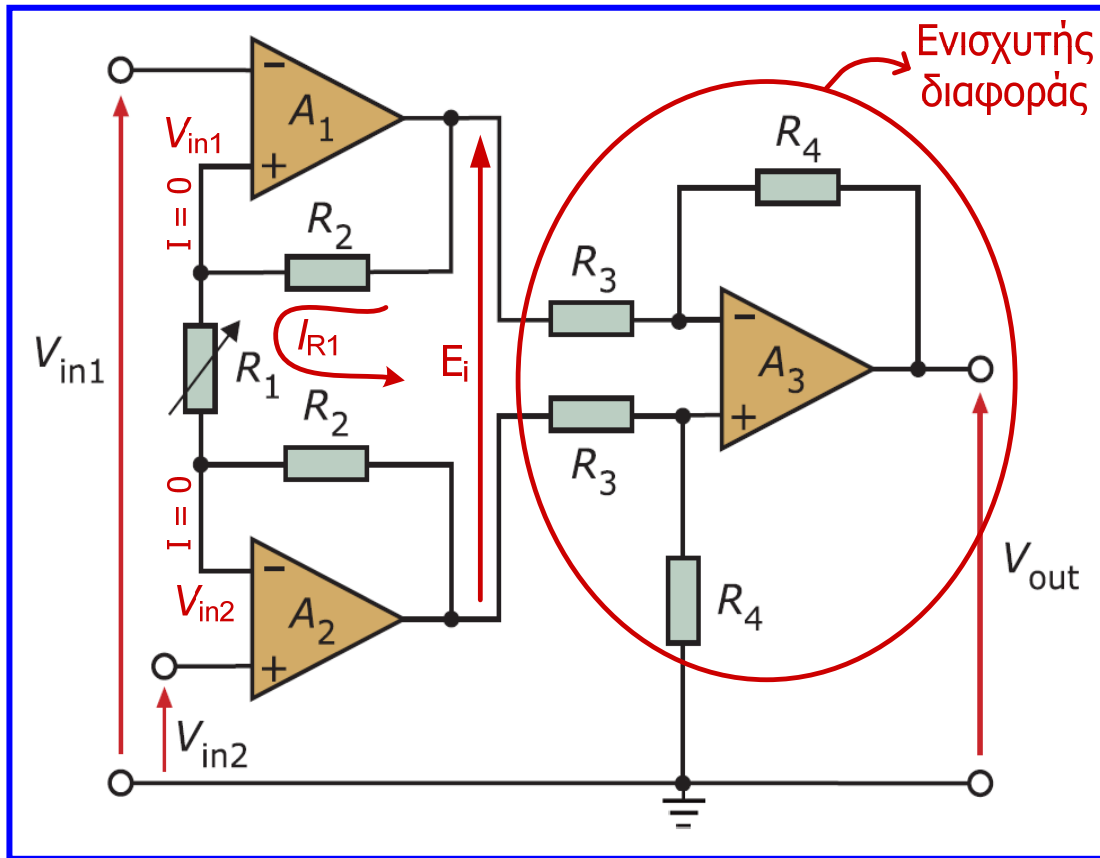
$$V_- = V_+ \Rightarrow V_{out} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_{in2} - V_{in1})$$

# Άσκηση 9<sup>η</sup>

Να προσδιοριστεί η τάση εξόδου του ενισχυτή οργανολογίας που δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Θεωρείστε ιδανικούς τους ΤΕ που περιλαμβάνονται και δεδομένη την σχέση που δίνει την τάση εξόδου ενός ενισχυτή διαφοράς τάσεων, που προέκυψε στην προηγούμενη άσκηση.



# Άσκηση 9<sup>η</sup>



Αρχικά εντοπίζουμε την τοπολογία ενισχυτή διαφοράς στο τμήμα εξόδου, επομένως:

$$V_o = \frac{R_4}{R_3} \cdot (V_{A2} - V_{A1}) = -\frac{R_4}{R_3} \cdot E_i \quad (1)$$

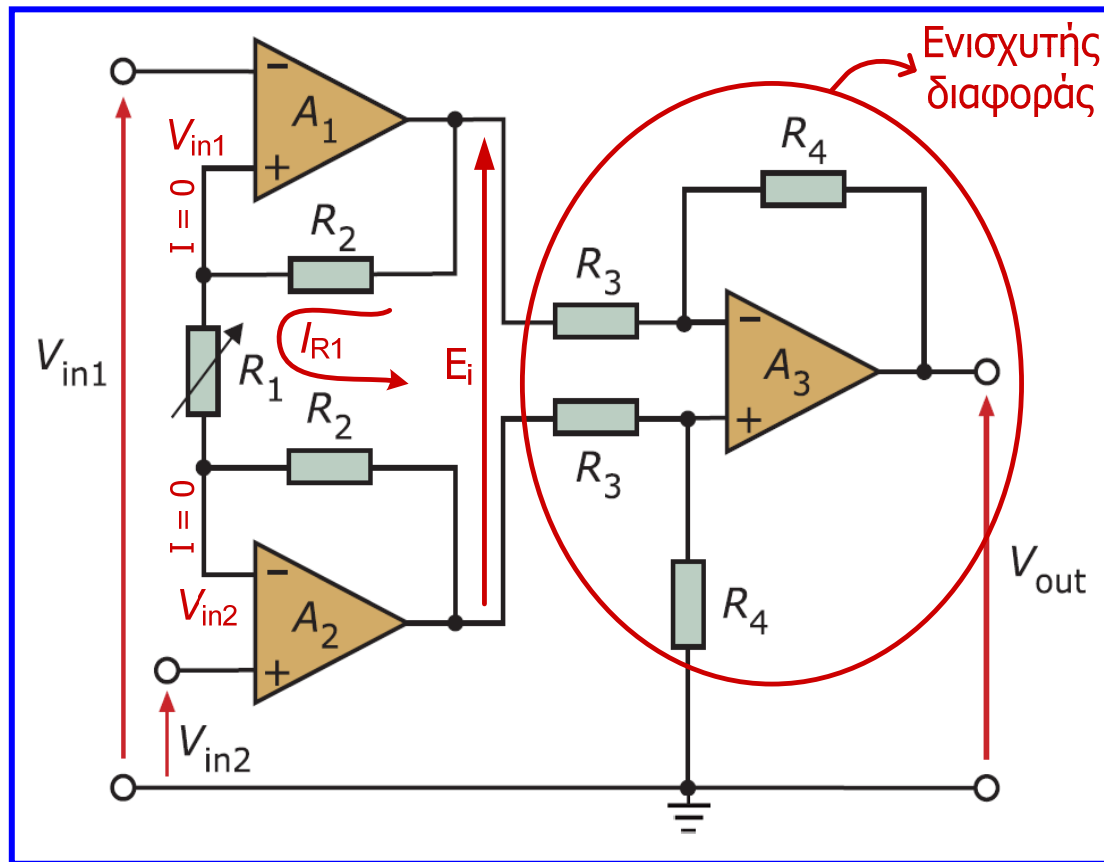
Οι τάσεις εισόδου, «αντιγράφονται» στις εισόδους αντιστροφής των ΙΤΕ του τμήματος εισόδου, επομένως:

$$I_{R1} = \frac{V_{in1} - V_{in2}}{R_1} \quad (2)$$

Επειδή τα ρεύματα στις εισόδους των ΙΤΕ είναι μηδενικά το  $I_{R1}$  διέρχεται και από τις αντιστάσεις  $R_2$ .

$$E_i = I_{R1} \cdot (R_1 + 2 \cdot R_2) \stackrel{(2)}{=} (V_{in1} - V_{in2}) \cdot \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \quad (3)$$

# Άσκηση 9<sup>η</sup>

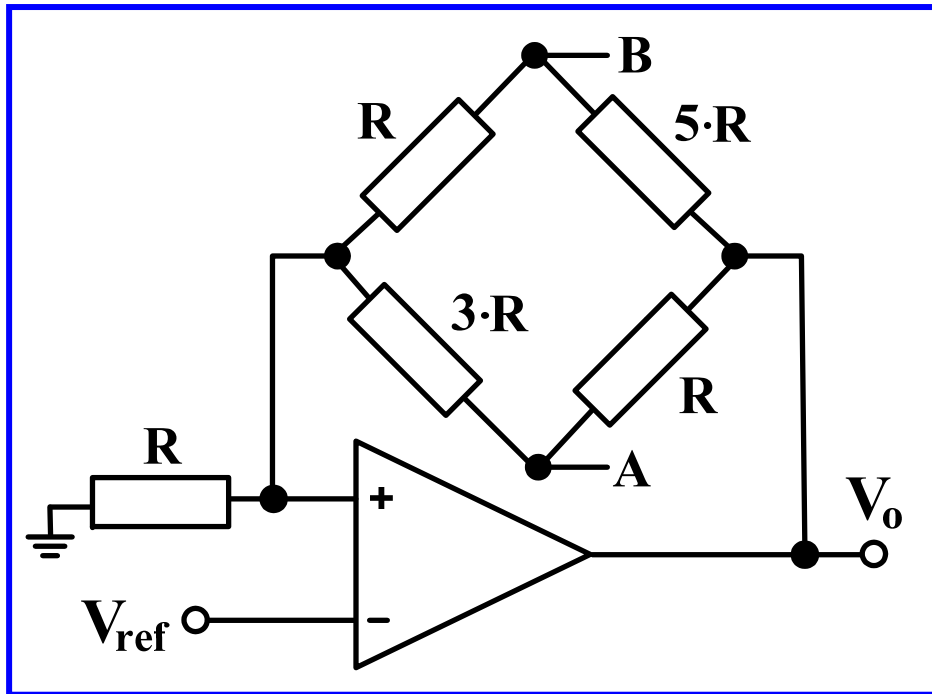


Από τις σχέσεις (1) και (3) καταλήγουμε στην τελική σχέση για την τάση εξόδου του ενισχυτή οργανολογίας:

$$V_{out} = \left(1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{R_3}{R_4} \cdot (V_{in2} - V_{in1})$$

# Άσκηση 10<sup>η</sup>

Στην ανίχνευση της μεταβολής της αντίστασης ενός παθητικού αισθητήρα χρησιμοποιείται η γέφυρα Wheatstone (βλέπε 3<sup>η</sup> ενότητα). Συνήθως, η γέφυρα συνδυάζεται με τελεστικούς ενισχυτές με χρήση διαφόρων τοπολογιών σύνδεσης. Στην τοπολογία που ακολουθεί να υπολογιστεί η τάση εξόδου του κυκλώματος ( $V_o$ ) και η τάση εξόδου της γέφυρας ( $V_{AB}$ ).  
Δίνεται ότι:  $V_{ref} = 50 \text{ mV}$ .



Για τον υπολογισμό της  $V_o$  χρησιμοποιούμε τη μέθοδο ανάλυσης των κόμβων, δηλαδή εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff στον κόμβο της μη αναστρέφουσας εισόδου του Τ.Ε. Θα πρέπει να εξισώσουμε το άθροισμα των αντίστροφων αντιστάσεων που ξεκινούν από τον κόμβο αυτό, πολλαπλασιασμένο με την τάση του, με το άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών με τις τάσεις των κόμβων στους οποίους καταλήγουν.



# Άσκηση 10<sup>η</sup>

Έτσι στην είσοδο (+) του τελεστικού ενισχυτή, έχουμε:

$$\left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R + 5 \cdot R} + \frac{1}{3 \cdot R + R} \right) \cdot V_+ = \frac{1}{R} \cdot 0 + \frac{1}{R + 5 \cdot R} \cdot V_o + \frac{1}{3 \cdot R + R} \cdot V_o \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \left( 1 + \frac{1}{6} + \frac{1}{4} \right) \cdot V_+ = \frac{1}{6} \cdot V_o + \frac{1}{4} \cdot V_o \Rightarrow \frac{17}{12} \cdot V_+ = \frac{5}{12} \cdot V_o \Rightarrow V_o = \frac{17}{5} \cdot V_+ \Rightarrow V_o = 3.4 \cdot V_+$$

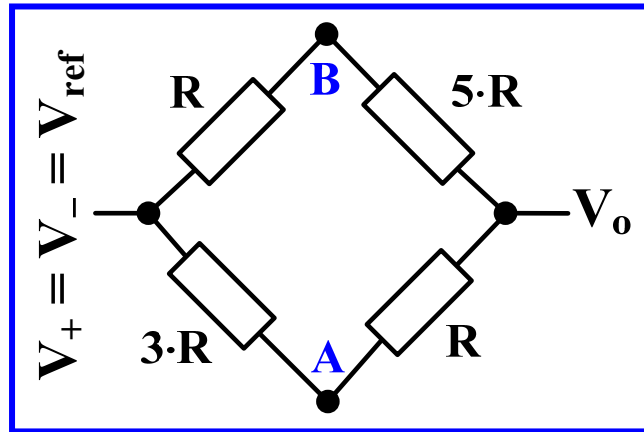
Προσέξτε τη σειριακή σύνδεση των δύο αντιστάσεων R και 5·R, καθώς και των δύο αντιστάσεων 3·R και R. Λόγω της ιδιότητας αντιγραφής των τάσεων στους ακροδέκτες του τελεστικού ενισχυτή ( $V_+ = V_- = V_{ref}$ ), προκύπτει ότι:

$$V_o = 3.4 \cdot V_+ \Rightarrow V_o = 3.4 \cdot V_- \Rightarrow V_o = 3.4 \cdot V_{ref} = 3.4 \cdot 50\text{mV} = 170\text{mV}$$

Εναλλακτικά, θα μπορούσαμε να απλοποιήσουμε το κύκλωμα της γέφυρας και να προκύψει η ισοδύναμη της αντίσταση, με αποτέλεσμα το κύκλωμα που προκύπτει να αποτελεί έναν ενισχυτή μη αντιστροφής.

Για να υπολογίσουμε την τάση  $V_{AB}$  υπολογίζουμε χωριστά τις τάσεις  $V_A$  και  $V_B$  από τους διαιρέτες τάσης που σχηματίζουν οι αντιστάσεις 3·R, R και R, 5·R, αντίστοιχα.

# Άσκηση 10η



$$V_A - V_o = \frac{R}{R + 3 \cdot R} \cdot (V_{ref} - V_o) \Rightarrow V_A - V_o = \frac{1}{4} \cdot (V_{ref} - V_o) \Rightarrow V_A = \frac{1}{4} \cdot V_{ref} - \frac{1}{4} \cdot V_o + V_o \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_A = \frac{1}{4} \cdot V_{ref} + \frac{3}{4} \cdot V_o \Rightarrow V_A = \frac{1}{4} \cdot V_{ref} + \frac{3 \cdot 3.4}{4} \cdot V_{ref} \Rightarrow V_A = \frac{11.2}{4} \cdot V_{ref} \Rightarrow V_A = 2.8 \cdot V_{ref}$$

$$V_B - V_o = \frac{5 \cdot R}{5 \cdot R + R} \cdot (V_{ref} - V_o) \Rightarrow V_B - V_o = \frac{5}{6} \cdot (V_{ref} - V_o) \Rightarrow V_B = \frac{5}{6} \cdot V_{ref} - \frac{5}{6} \cdot V_o + V_o \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_B = \frac{5}{6} \cdot V_{ref} + \frac{1}{6} \cdot V_o \Rightarrow V_B = \frac{5}{6} \cdot V_{ref} + \frac{3.4}{6} \cdot V_{ref} \Rightarrow V_B = \frac{8.4}{6} \cdot V_{ref} \Rightarrow V_B = 1.4 \cdot V_{ref}$$

$$V_{AB} = V_A - V_B = 2.8 \cdot V_{ref} - 1.4 \cdot V_{ref} = 1.4 \cdot V_{ref} = 1.4 \cdot 50mV = 70mV$$

# Άσκηση 11<sup>η</sup>

Στο κύκλωμα του σχήματος που περιλαμβάνει ΙΤΕ, προσδιορίστε με βάση την αρχή της επαλληλίας την τάση εξόδου.

Ακολουθώντας την αρχή της επαλληλίας, όταν  $V_2 = 0$ ,  $E = 0$  το κύκλωμα λειτουργεί ως ενισχυτής αρνητικής ενίσχυσης:

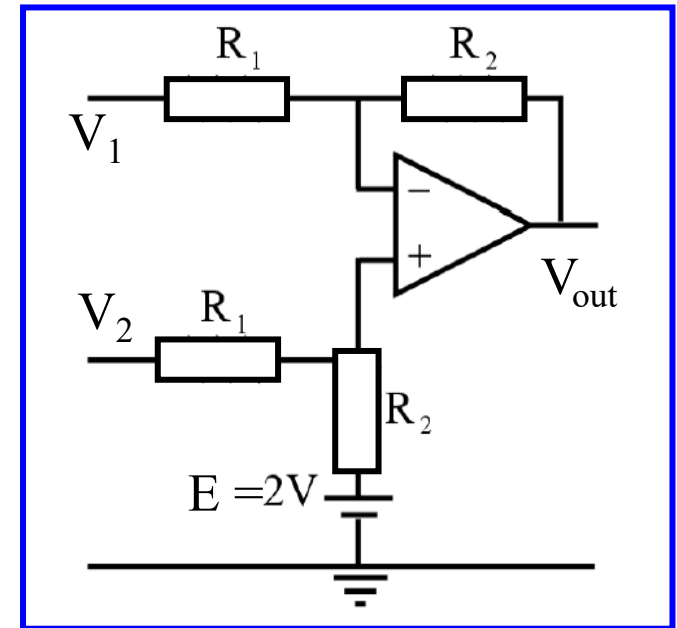
$$V_{\text{out}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_1$$

Όταν  $V_1 = 0$ ,  $E = 0$  εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff στους δύο εσωτερικούς κόμβους:

$$\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot V_- = \frac{1}{R_2} \cdot V_{\text{out}}$$
$$\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot V_+ = \frac{1}{R_1} \cdot V_2$$

$V_+ = V_-$

$$V_{\text{out}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_2$$



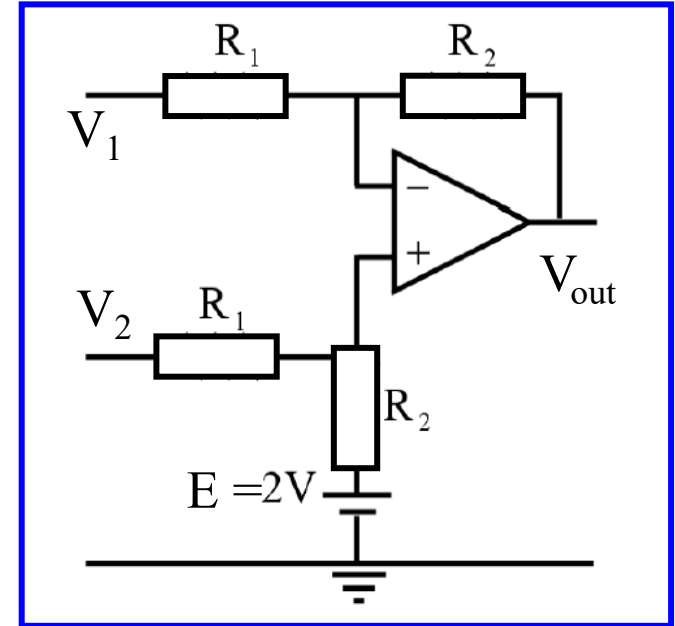
# Άσκηση 11<sup>η</sup>

Όταν  $V_1 = 0$ ,  $V_2 = 0$  εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff στους δύο εσωτερικούς κόμβους:

$$\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot V_- = \frac{1}{R_2} \cdot V_{\text{out}}$$
$$\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot V_+ = \frac{1}{R_2} \cdot E$$

$V_+ = V_-$

$$V_{\text{out}} = E$$

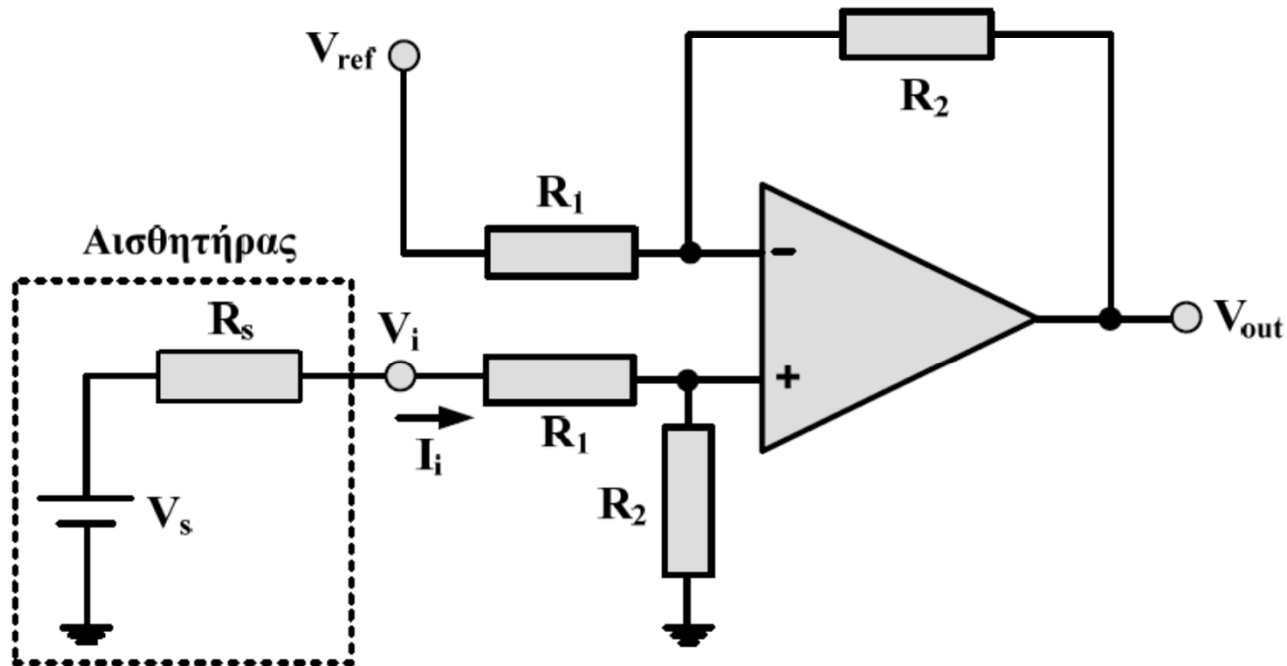


Προσθέτοντας τις τρεις επιμέρους τάσεις εξόδου καταλήγουμε στην παρακάτω έκφραση:

$$V_{\text{out}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1) + E \Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1) + 2V$$

# Άσκηση 12<sup>η</sup>

Το σήμα εξόδου ( $V_{out}$ ) του ενισχυτή διαφοράς του κυκλώματος που περιλαμβάνεται στο ακόλουθο σχήμα θα πρέπει να είναι διπλάσιο από το σήμα ( $V_i$ ) που παράγει ένας αισθητήρας, ο οποίος αποδίδει μέγιστο ρεύμα  $20 \mu\text{A}$  και παριστάνεται από ισοδύναμο κύκλωμα το οποίο αποτελείται από μία πηγή σταθερής τάσης  $V_s = 150 \text{ mV}$  σε σειρά με μία αντίσταση  $R_s = 2 \text{ k}\Omega$ . Δίνεται ότι  $V_{ref} = 12.5 \text{ mV}$  και ότι ο τελεστικός ενισχυτής που περιλαμβάνεται στον ενισχυτή διαφοράς είναι ιδανικός. Να προσδιορίσετε τις τιμές των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$  του ενισχυτή διαφοράς.



# Άσκηση 12η

Προκειμένου, το ρεύμα εισόδου του ενισχυτή διαφοράς να είναι μικρότερο από το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να αποδώσει ο αισθητήρας (και έτσι να προστατέψουμε τον αισθητήρα από υπερφόρτωση) θα πρέπει:

$$I_i \leq \frac{V_s}{R_s + R_1 + R_2} \Rightarrow R_1 + R_2 \geq \frac{V_s}{I_i} - R_s \Rightarrow R_1 + R_2 \geq \frac{150 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-6}} - 2 \cdot 10^3 \Rightarrow R_1 + R_2 \geq 5.5 \text{ k}\Omega .$$

Στην παραπάνω σχέση ελήφθη υπόψη ότι το ρεύμα εισόδου στον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή είναι μηδενικό, λόγω της άπειρης αντίστασης εισόδου που παρουσιάζει.

Επιλέγουμε λοιπόν (για σιγουριά) τη χρήση αντιστάσεων τέτοιων ώστε  $R_1 + R_2 = 6 \text{ k}\Omega$  και τότε το ρεύμα εισόδου του ενισχυτή διαφοράς θα είναι:

$$I_i = \frac{V_s}{R_s + R_1 + R_2} = \frac{150 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^3 + 6 \cdot 10^3} \text{ A} = 18.75 \mu\text{A}$$

Η πρώτη εκ των δύο τάσεων εισόδου του ενισχυτή διαφοράς, έχει ως εξής:

$$V_i = V_s - I_i R_s = (150 \cdot 10^{-3} - 18.75 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^3) \text{ V} = 112.5 \text{ mV}$$

Με βάση το δεδομένο ότι η τάση εξόδου του ενισχυτή διαφοράς θα πρέπει να είναι διπλάσια από την τάση που παράγεται από τον αισθητήρα, έχουμε:  $V_{\text{out}} = 2 \cdot V_i = 2 \cdot 112.5 \text{ mV} = 225 \text{ mV}$ .

# Άσκηση 12η

Η τάση εξόδου του ενισχυτή διαφοράς δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{\text{out}} = \frac{R_2}{R_1}(V_{\text{in2}} - V_{\text{in1}}) \Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{R_2}{R_1}(V_i - V_{\text{ref}}) \Rightarrow 225 = \frac{R_2}{R_1}(112.5 - 12.5) \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 2.25.$$

Καταλήγουμε λοιπόν ότι για τον προσδιορισμό των τιμών των δύο αντιστάσεων του ενισχυτή διαφοράς, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις:

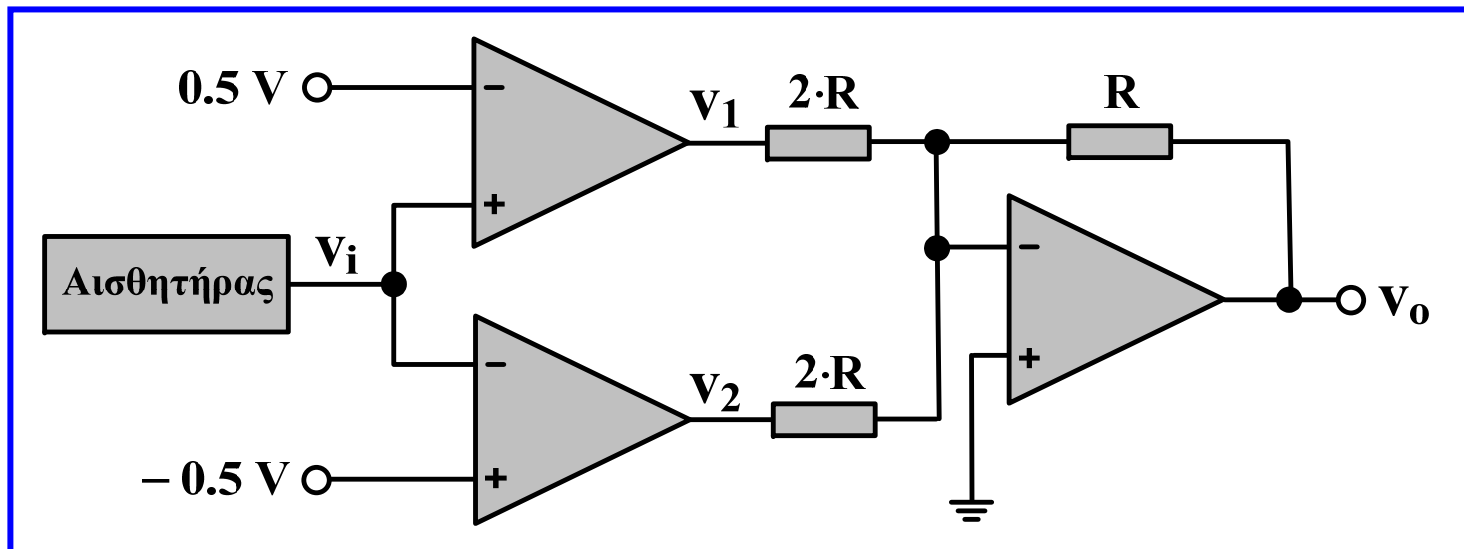
$$R_1 + R_2 = 6 \text{ k}\Omega \quad \text{και} \quad R_2 / R_1 = 2.25.$$

Λύνοντας την μία από τις δύο εξισώσεις ως προς τη μία αντίσταση και αντικαθιστώντας το αποτέλεσμα στην άλλη εξίσωση, καταλήγουμε εύκολα στις παρακάτω τιμές αντιστάσεων:

$$R_1 = 1.85 \text{ k}\Omega \quad \text{και} \quad R_2 = 4.15 \text{ k}\Omega.$$

# Άσκηση 13η

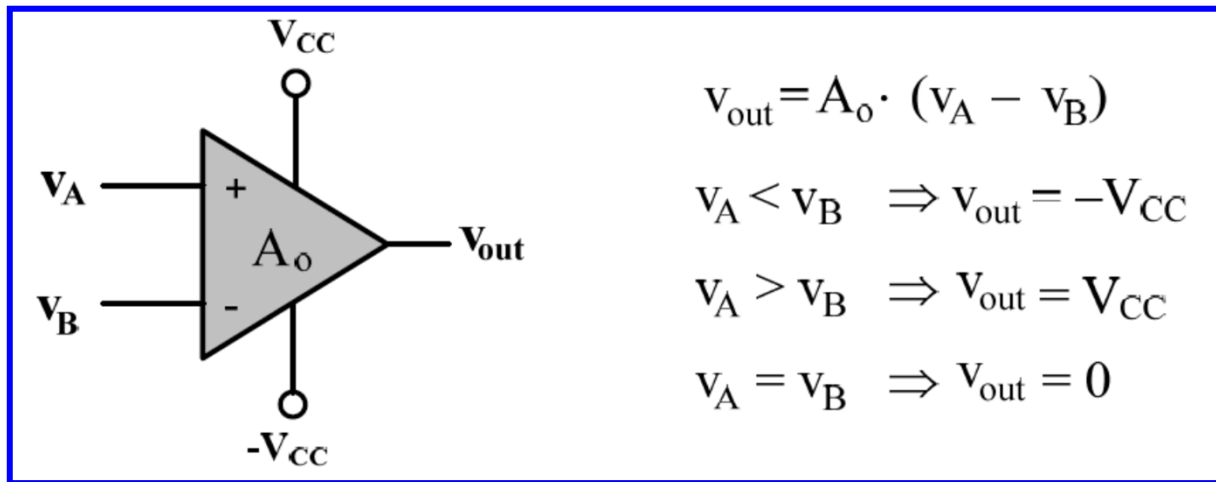
Η έξοδος ενός αισθητήρα που είναι ημιτονικό σήμα τάσης ( $v_i$ ) με πλάτος 1 V και συχνότητα 250 Hz, εισάγεται στο κύκλωμα του παρακάτω σχήματος, στο οποίο συμμετέχουν δύο συγκριτές και ένας αντιστρέφων αθροιστής. Στο ίδιο κύκλωμα εισάγονται δύο σταθερές τάσεις αναφοράς 0.5 V και  $-0.5$  V. Στους τελεστικούς ενισχυτές του κυκλώματος, οι οποίοι είναι ιδανικοί, εφαρμόζονται τάσεις τροφοδοσίας 3 V και  $-3$  V. Να σχεδιάσετε στους ίδιους άξονες τις κυματομορφές του σήματος εξόδου του αισθητήρα ( $v_i$ ), της τάσης εξόδου ( $v_o$ ) του κυκλώματος, καθώς και των δύο τάσεων αναφοράς, για χρονικό διάστημα μιας περιόδου του σήματος εξόδου του αισθητήρα. Παρατηρώντας την κυματομορφή της τάσης εξόδου ( $v_o$ ) του κυκλώματος, σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές που θα σχεδιάσετε, περιγράψτε σύντομα τη λειτουργία του.





# Άσκηση 13η

Όταν ένας τελεστικός ενισχυτής λειτουργεί με ανοικτό βρόχο (χωρίς ανατροφοδότηση), όπως οι δύο τελεστικοί ενισχυτές στην είσοδο του κυκλώματος, τότε λόγω της πολύ υψηλής ενίσχυσης που εμφανίζει, η έξοδος του ενισχυτή θα οδηγηθεί σε κατάσταση θετικού ή αρνητικού κόρου, δηλαδή σε θετική ή αρνητική τιμή λίγο μικρότερη από την τάση τροφοδοσίας (ιδανικά ίση με την τάση τροφοδοσίας του), ανάλογα με τον αν η διαφορά των τάσεων που εφαρμόζονται στους ακροδέκτες εισόδου είναι θετική ή αρνητική. Επομένως, οι δύο καταστάσεις εξόδου του τελεστικού ενισχυτή δίνουν πληροφορία για τη σύγκριση των τάσεων στους δύο ακροδέκτες εισόδου.



# Άσκηση 13η

Σύμφωνα με την προαναφερόμενη λειτουργία ενός συγκριτή, μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές των τάσεων  $v_1$  και  $v_2$ , ανάλογα με τη σχέση της τάσης εισόδου  $v_i$  και των τάσεων αναφοράς  $0.5\text{ V}$  και  $-0.5\text{ V}$ , αντίστοιχα, στο χρονικό διάστημα μιας περιόδου του σήματος εισόδου. Η τιμή της τάσης  $v_1$  είναι  $-3\text{ V}$  στα διαστήματα όπου η τάση  $v_i$  είναι μικρότερη από  $0.5\text{ V}$  και  $3\text{ V}$  στα διαστήματα όπου η τάση  $v_i$  είναι μεγαλύτερη από  $0.5\text{ V}$ .

Παρομοίως, η τιμή της τάσης  $v_2$  είναι  $-3\text{ V}$  στα διαστήματα όπου η τάση  $v_i$  είναι μεγαλύτερη από  $-0.5\text{ V}$  και  $3\text{ V}$  στα διαστήματα όπου η τάση  $v_i$  είναι μικρότερη από  $-0.5\text{ V}$ .

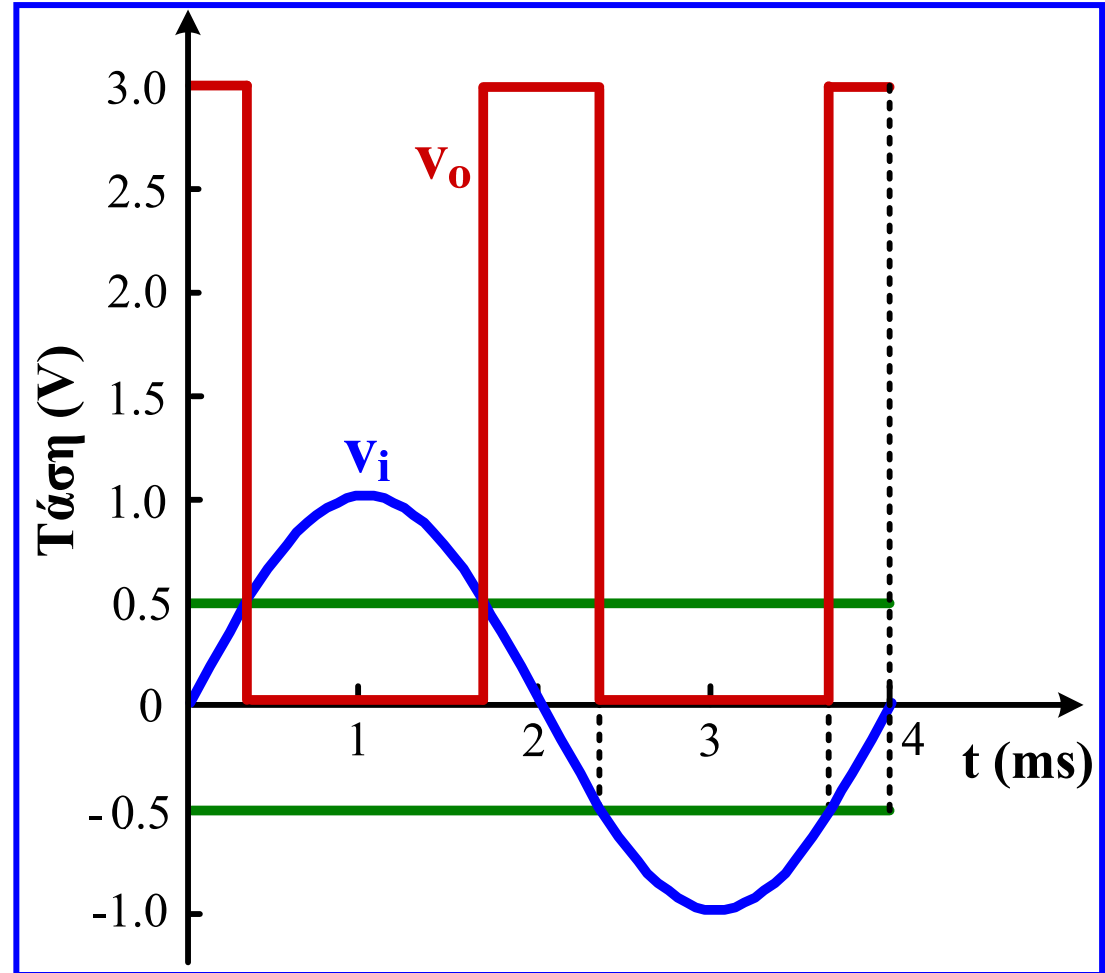
Για τον αντιστρέφοντα αθροιστή, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$v_o = -\left(\frac{R}{2 \cdot R} \cdot v_1 + \frac{R}{2 \cdot R} \cdot v_2\right) \Rightarrow v_o = -\frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2)$$

# Άσκηση 13η

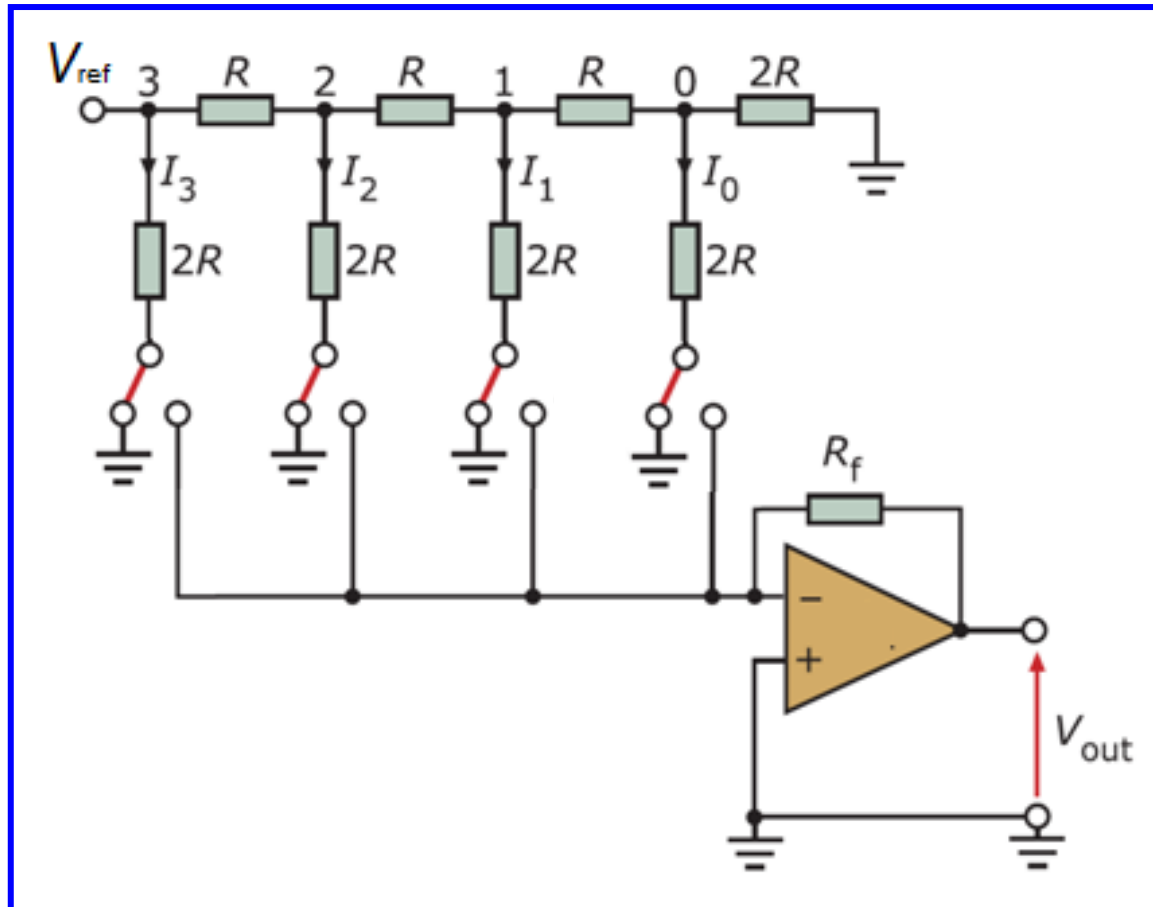
Με βάση τα προηγούμενα, προκύπτει η κυματομορφή της τάσης εξόδου. Η τάση εισόδου  $v_i$  έχει πλάτος 1 V και περίοδο  $T = 1 / f = 1 / 250 \text{ Hz} = 4 \text{ ms}$ .

Παρατηρώντας την κυματομορφή της  $v_o$ , σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές, συμπεραίνουμε ότι το κύκλωμα ανιχνεύει τις περιπτώσεις όπου η τάση εισόδου  $v_i$  λαμβάνει τιμές μεταξύ των δύο τάσεων αναφοράς, αφού τότε η τάση εξόδου του κυκλώματος λαμβάνει τιμή ίση με την τάση τροφοδοσίας 3 V των τελεστικών ενισχυτών, ενώ διαφορετικά είναι μηδενική.



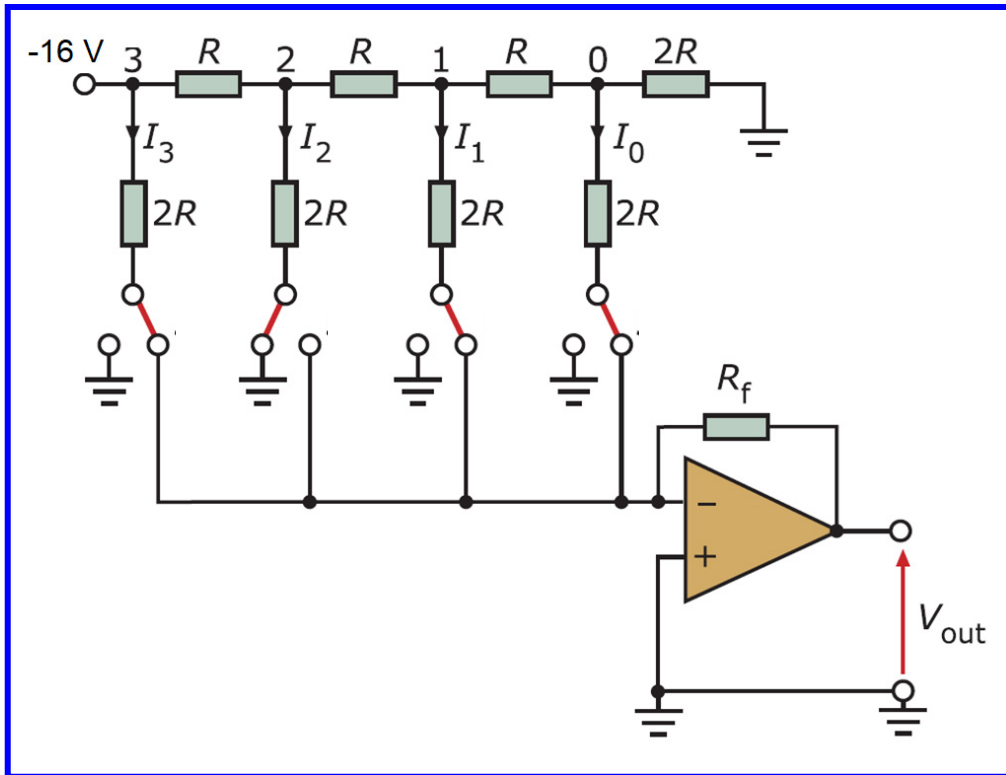
# Άσκηση 14<sup>η</sup>

Για το μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC) του σχήματος δίνεται  $R = R_f = 1 \text{ k}\Omega$  και τάση αναφοράς ( $V_{\text{ref}}$ ) – 16 Volts. Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου που παράγεται από την ψηφιακή είσοδο 1011.



# Άσκηση 14<sup>η</sup>

Στο κύκλωμα του DAC σημειώνουμε τις θέσεις των διακοπών που αντιστοιχούν στη ψηφιακή είσοδο που δίνεται (1011).

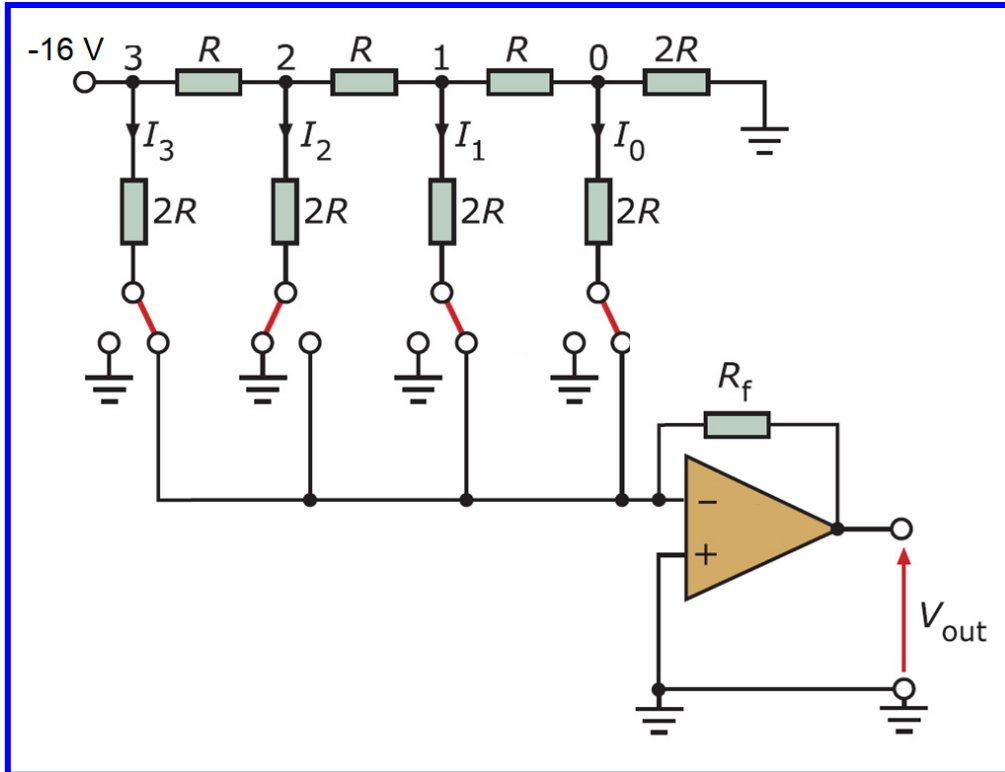


Εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff στους κόμβους 0, 1 και 2, ώστε να υπολογίσουμε τις τάσεις στους κόμβους 0, 1, 2 και στη συνέχεια τα ρεύματα στους κόμβους 0, 1, 2, 3 του DAC. Η τάση στην είσοδο (-) του ΙΤΕ είναι 0, αφού είναι ίση με την τάση στην είσοδο (+). Συνεπώς, για οποιαδήποτε θέση των διακοπών, η τάση στο κάτω άκρο τους είναι μηδενική.

$$\left( \frac{1}{R} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{2R} \right) \cdot V_0 = \frac{1}{R} \cdot V_1$$
$$\Rightarrow V_0 = V_1/2 \quad (1)$$

$$\left( \frac{1}{R} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{R} \right) \cdot V_1 = \frac{1}{R} \cdot V_2 + \frac{1}{R} \cdot V_0$$
$$\stackrel{(1)}{\Rightarrow} V_1 = V_2/2 \quad (2)$$

# Άσκηση 14<sup>η</sup>



$$\left( \frac{1}{R} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{R} \right) \cdot V_2 = \frac{1}{R} \cdot V_3 + \frac{1}{R} \cdot V_1$$
$$\stackrel{(2)}{\Rightarrow} V_2 = V_3/2$$

Η τάση στον κόμβο 3 είναι ίση με την τάση αναφοράς ( $-16\text{ V}$ ) και μετακινούμενοι προς τα δεξιά, οι τάσεις στους κόμβους 2, 1 και 0 είναι διαδοχικά το μισό κάθε προηγούμενου κόμβου. Τα ρεύματα στους κόμβους 0, 1, 2, 3, είναι:

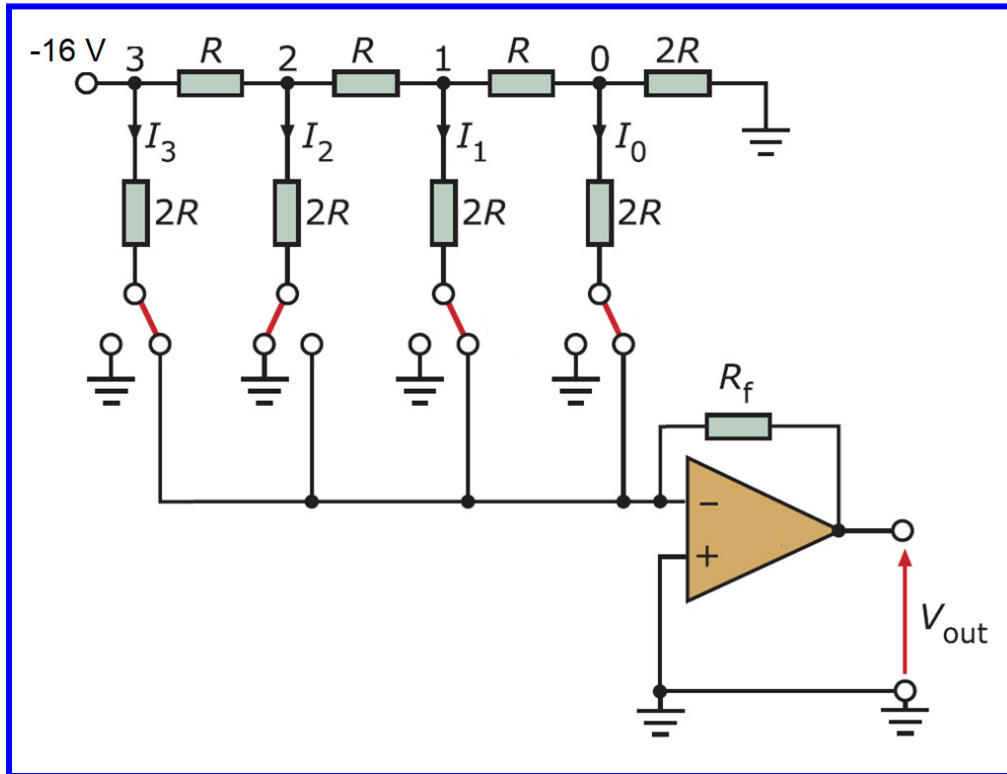
$$I_3 = V_3/2R = V_{ref}/2R = -8\text{ mA}$$

$$I_2 = V_2/2R = V_{ref}/4R = -4\text{ mA}$$

$$I_1 = V_1/2R = V_{ref}/8R = -2\text{ mA}$$

$$I_0 = V_0/2R = V_{ref}/16R = -1\text{ mA}$$

# Άσκηση 14<sup>η</sup>



Ωστόσο, επειδή η ψηφιακή είσοδος είναι 1011 ο διακόπτης S<sub>2</sub> είναι ανοικτός με αποτέλεσμα το ρεύμα I<sub>2</sub> να ρέει προς τη γείωση. Οπότε το συνολικό ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση ανατροφοδότησης είναι:

$$I_f = I_3 + I_2 + I_1 + I_0 = -(8 + 0 + 2 + 1)\text{mA}$$

$$\Rightarrow I_f = -11\text{mA} = \frac{11}{16} \cdot \frac{V_{\text{ref}}}{R}$$

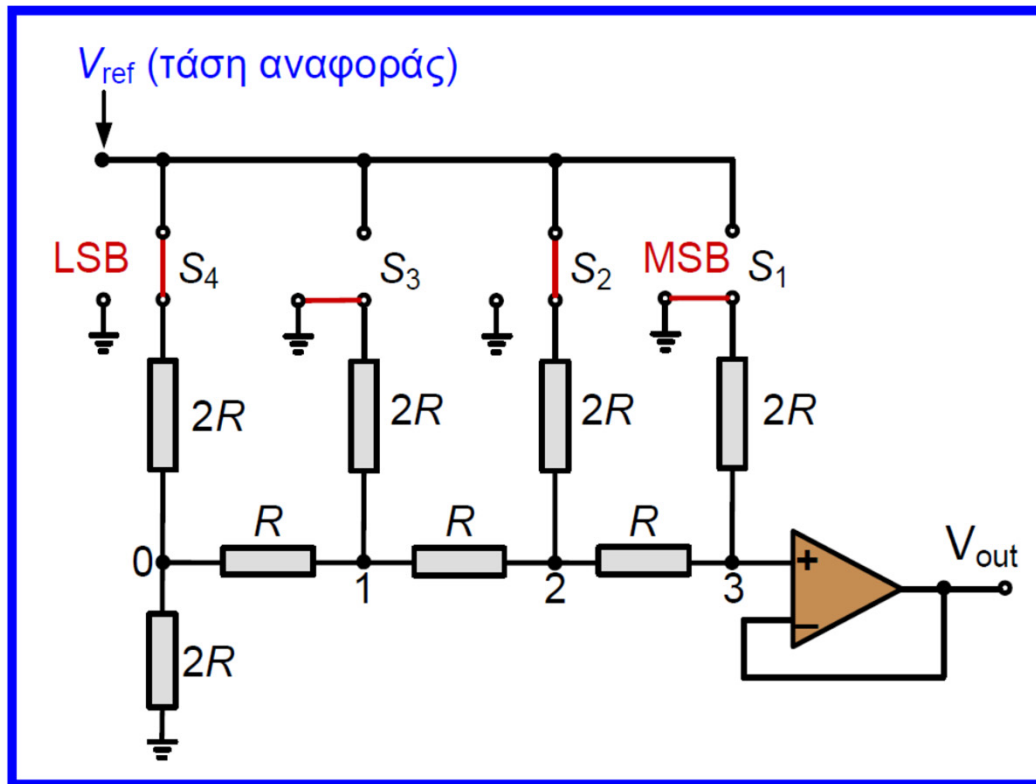
Η τάση εξόδου στον μετατροπέα ρεύματος σε τάση είναι:

$$V_{\text{out}} = -I_f \cdot R_f = 11\text{V} = -\frac{11}{16} \cdot V_{\text{ref}}$$

**Βήμα διακριτότητας** του DAC:  $V_{\text{ref}} / 2^n = 16 / 16 = 1\text{V}$ . Η ψηφιακή είσοδος 0000 (0) αντιστοιχεί σε αναλογική έξοδο 0 Volt και η ψηφιακή είσοδος 1111 (15) αντιστοιχεί σε αναλογική έξοδο 15 Volts, επομένως ο συγκεκριμένος DAC **μπορεί να μετατρέψει ψηφιακή είσοδο (1111) σε αναλογική έξοδο έως 15 Volts**. Στη λύση της άσκησης διαπιστώσαμε ορθά ότι η ψηφιακή είσοδος 1011 (11) αντιστοιχεί σε αναλογική έξοδο 11 Volts.

# Άσκηση 15<sup>η</sup>

Η εισαγωγή, στο κύκλωμα μετατροπέα D/A του παρακάτω σχήματος, της ψηφιακής λέξης 0101, θέτει τους αντίστοιχους διακόπτες στις καταστάσεις που υποδεικνύονται. Ο τελεστικός ενισχυτής που περιλαμβάνεται στο κύκλωμα είναι ιδανικός και η τάση αναφοράς του κυκλώματος είναι  $V_{ref} = 5\text{ V}$ . Να προσδιορίσετε αναλυτικά την τάση εξόδου ( $V_{out}$ ) του μετατροπέα και να επιβεβαιώσετε το αποτέλεσμα της ανάλυσής σας, σύμφωνα με τις σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία ενός μετατροπέα D/A.





# Άσκηση 15<sup>η</sup>

Μεταξύ του κόμβου 3 και της εξόδου του κυκλώματος, συνδέεται ένας ακολουθητής τάσης, στον οποίο προκύπτει εύκολα ότι  $V_{out} = V_3$ , αφού στον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή ισχύει ότι  $V_- = V_+$  και στον εν λόγω κύκλωμα ισχύει  $V_3 = V_+$  και  $V_{out} = V_-$ . Για να υπολογίσουμε λοιπόν την τάση εξόδου ( $V_{out}$ ) του κυκλώματος αρκεί να υπολογίσουμε την τάση του κόμβου 3 ( $V_3$ ).

Για να επιτευχθεί αυτό, εφαρμόζουμε τη μέθοδο ανάλυσης των κόμβων 0, 1, 2 και 3 του κυκλώματος, δηλαδή εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff στους κόμβους αυτούς, εξισώνοντας το άθροισμα των αγωγιμοτήτων (δηλαδή των αντίστροφων αντιστάσεων) που ξεκινούν από τους κόμβους αυτούς, πολλαπλασιασμένο με την τάση τους, με το άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών με τις τάσεις των κόμβων στους οποίους καταλήγουν.

Κόμβος 0:

$$\left( \frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{R} \right) \cdot V_0 = \frac{5}{2 \cdot R} + \frac{V_1}{R} \Rightarrow 2 \cdot V_0 = V_1 + 2.5 \Rightarrow V_0 = 0.5 \cdot V_1 + 1.25. \quad (1)$$

Κόμβος 1:

$$\left( \frac{1}{R} + \frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{R} \right) \cdot V_1 = \frac{V_0}{R} + \frac{V_2}{R} \Rightarrow 2.5 \cdot V_1 = V_0 + V_2 \Rightarrow V_1 = 0.4 \cdot V_0 + 0.4 \cdot V_2. \quad (2)$$

# Άσκηση 15<sup>η</sup>

Κόμβος 2:

$$\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2 \cdot R} + \frac{1}{R}\right) \cdot V_2 = \frac{V_1}{R} + \frac{5}{2 \cdot R} + \frac{V_3}{R} \Rightarrow 2.5 \cdot V_2 = V_1 + 2.5 + V_3 \Rightarrow V_2 = 0.4 \cdot V_1 + 0.4 \cdot V_3 + 1. \quad (3)$$

Κόμβος 3:

$$\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2 \cdot R}\right) \cdot V_3 = \frac{V_2}{R} \Rightarrow 1.5 \cdot V_3 = V_2 \Rightarrow V_3 = \frac{2}{3} \cdot V_2. \quad (4)$$

Μετά από κατάλληλο χειρισμό των παραπάνω σχέσεων, καταλήγουμε στον υπολογισμό της τάσης του κόμβου 3 ( $V_3$ ), η οποία είναι ίση με την τάση εξόδου ( $V_{out}$ ) του κυκλώματος.

$$(2) \stackrel{(1)}{\Rightarrow} V_1 = 0.4 \cdot (0.5 \cdot V_1 + 1.25) + 0.4 \cdot V_2 \Rightarrow 0.8 \cdot V_1 = 0.4 \cdot V_2 + 0.5 \Rightarrow V_1 = 0.5 \cdot V_2 + 0.625. \quad (5)$$

$$(3) \stackrel{(5)}{\Rightarrow} V_2 = 0.4 \cdot (0.5 \cdot V_2 + 0.625) + 0.4 \cdot V_3 + 1 \Rightarrow 0.8 \cdot V_2 = 0.4 \cdot V_3 + 1.25 \Rightarrow V_2 = 0.5 \cdot V_3 + 1.5625. \quad (6)$$

$$(4) \stackrel{(6)}{\Rightarrow} V_3 = \frac{2}{3} \cdot (0.5 \cdot V_3 + 1.5625) \Rightarrow 3 \cdot V_3 = V_3 + 3.125 \Rightarrow V_3 = 1.5625 \text{ V} \Rightarrow V_{out} = 1.5625 \text{ V}.$$

Για κάθε μετατροπέα D/A ισχύει ότι:

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left( \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \frac{b_4}{2^4} \right)$$

# Άσκηση 15<sup>η</sup>

Για ψηφιακή είσοδο  $b_1 b_2 b_3 b_4 = 0101$ , η τάση εξόδου του μετατροπέα, έχει ως εξής:

$$V_{\text{out}} = 5 \cdot \left( \frac{0}{2} + \frac{1}{2^2} + \frac{0}{2^3} + \frac{1}{2^4} \right) \Rightarrow V_{\text{out}} = 5 \cdot (0.25 + 0.0625) \Rightarrow V_{\text{out}} = 1.5625 \text{ V} .$$

Το βήμα διακριτότητας ( $\Delta$ ) του DAC, υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta = \frac{V_{\text{ref}}}{2^n} = \frac{5 \text{ V}}{2^4} = \frac{5}{16} \text{ V} = 0.3125 \text{ V} .$$

Για να επιβεβαιώσουμε την ορθότητα του αποτελέσματος του προηγούμενου αποτελέσματος ( $V_{\text{out}} = 1.5625 \text{ V}$ ), το διαιρούμε με το βήμα διακριτότητας που υπολογίσαμε και προκύπτει ο αριθμός 5. Ο συνδυασμός εισόδου 0101 αντιστοιχεί στον αριθμό 5, γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθότητα της τιμής της τάσης εξόδου που προσδιορίστηκε.

# Άσκηση 16

---

Δίνεται μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) κλιμακωτής ανόδου με 5 bits εξόδου. Η απόλυτη τιμή της τάσης αναφοράς του μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC) που περιλαμβάνεται στον ADC είναι 4 Volts. Ποιο είναι το βήμα διακριτότητας και ποιο το εύρος μετατροπής (περιοχή μέτρησης) του ADC;

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να μετατραπεί από τον ADC είναι  $V_{\text{ref}} = 4 \text{ V}$ , δηλαδή το εύρος μετατροπής ή περιοχή μέτρησης του ADC είναι από 0 έως 4 V.

Το βήμα διακριτότητας του DAC είναι:  $V_{\text{ref}} / 2^n = 4 / 32 = 0.125 \text{ Volts}$  (δηλαδή η διαφορά τάσης μεταξύ δύο διαδοχικών ψηφιακών συνδυασμών).

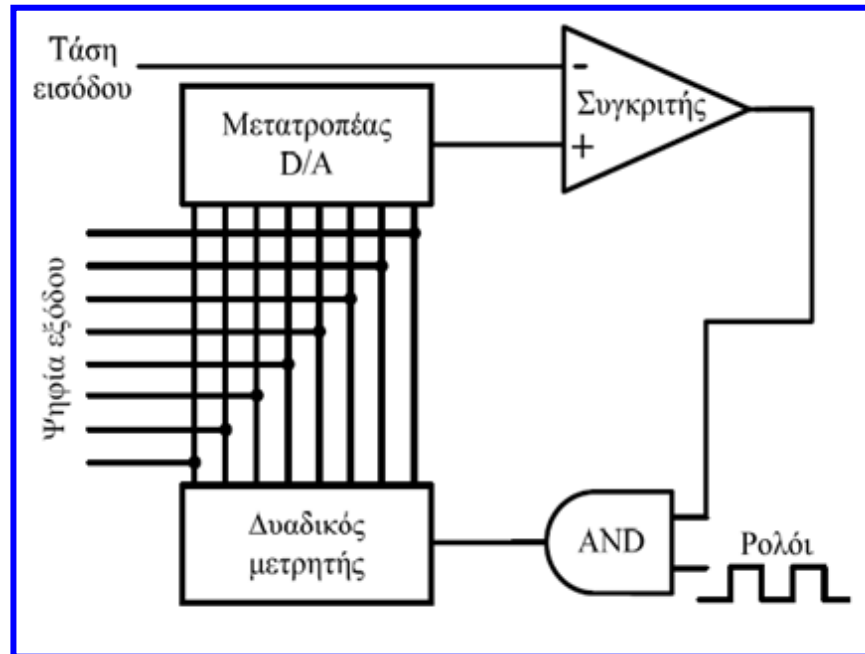
# Άσκηση 17

Ο παρακάτω μετατροπέας A/D κλιμακωτής ανόδου έχει εύρος μετατροπής από 0 έως 7.68 V.

Να υπολογιστεί η διακριτική ικανότητα (ή βήμα διακριτότητας) του μετατροπέα.

Εάν τεθεί στο μετατροπέα τάση εισόδου ίση με 5.76 V, να προσδιοριστεί η ψηφιακή λέξη που θα εμφανιστεί στην έξοδο του.

Εάν η διάρκεια ενός παλμού του σήματος ρολογιού είναι 0.25  $\mu\text{sec}$ , να υπολογιστεί ο χρόνος που απαιτείται για τη μετατροπή της προαναφερόμενης τάσης εισόδου. Κατά την έναρξη της λειτουργίας του μετατροπέος οι έξοδοι του μετρητή είναι μηδενικές.



# Άσκηση 17

Για έναν μετατροπέα A/D με  $n$  δυαδικά ψηφία εξόδου, η ψηφιακή έξοδος μπορεί να λάβει  $2^n$  διαφορετικές τιμές, συνεπώς εάν το εύρος μετατροπής είναι  $V_{\text{ref}} = 7.68 \text{ V}$ , θα προκύπτει διαφορετική τιμή εξόδου όταν οι τάσεις εισόδου διαφέρουν τουλάχιστον κατά  $V_{\text{ref}} / 2^n$ . Η τιμή αυτή αποτελεί και το βήμα διακριτότητας του μετατροπέα, το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{V_{\text{ref}}}{2^n} = \frac{7.68 \text{ V}}{2^8} = \frac{7.68}{256} \text{ V} = 0.03 \text{ V} = 30 \text{ mV}$$

Αφού οι τάσεις εισόδου που αντιστοιχούν σε διαδοχικούς συνδυασμούς των ψηφίων εξόδου διαφέρουν κατά  $0.03 \text{ V}$ , εάν διαιρέσουμε την τάση εισόδου των  $5.76 \text{ V}$  με το βήμα διακριτότητας, θα προκύψει η δεκαδική μορφή της ψηφιακής εξόδου, δηλαδή:  $5.76 / 0.03 = 192$ , η οποία σε δυαδική μορφή είναι η λέξη: 11000000.

Αφού κατά την έναρξη λειτουργίας του μετατροπέα οι έξοδοι του μετρητή είναι μηδενικές, αρχικά η ψηφιακή έξοδος αποτελείται από 8 μηδενικά. Μετά από κάθε παλμό του σήματος ρολογιού αυξάνεται κατά ένα με αποτέλεσμα για την μετατροπή του ερωτήματος ( $\beta$ ) να απαιτούνται 192 παλμοί του σήματος ρολογιού. Έτσι ο χρόνος μετατροπής την περίπτωση αυτή είναι:  $192 \cdot 0.25 \text{ } \mu\text{sec} = 48 \text{ } \mu\text{sec}$ .

# Άσκηση 18

Στον παράλληλο μετατροπέα δύο ψηφίων του διπλανού σχήματος, εφαρμόζεται τάση αναφοράς 5 V.

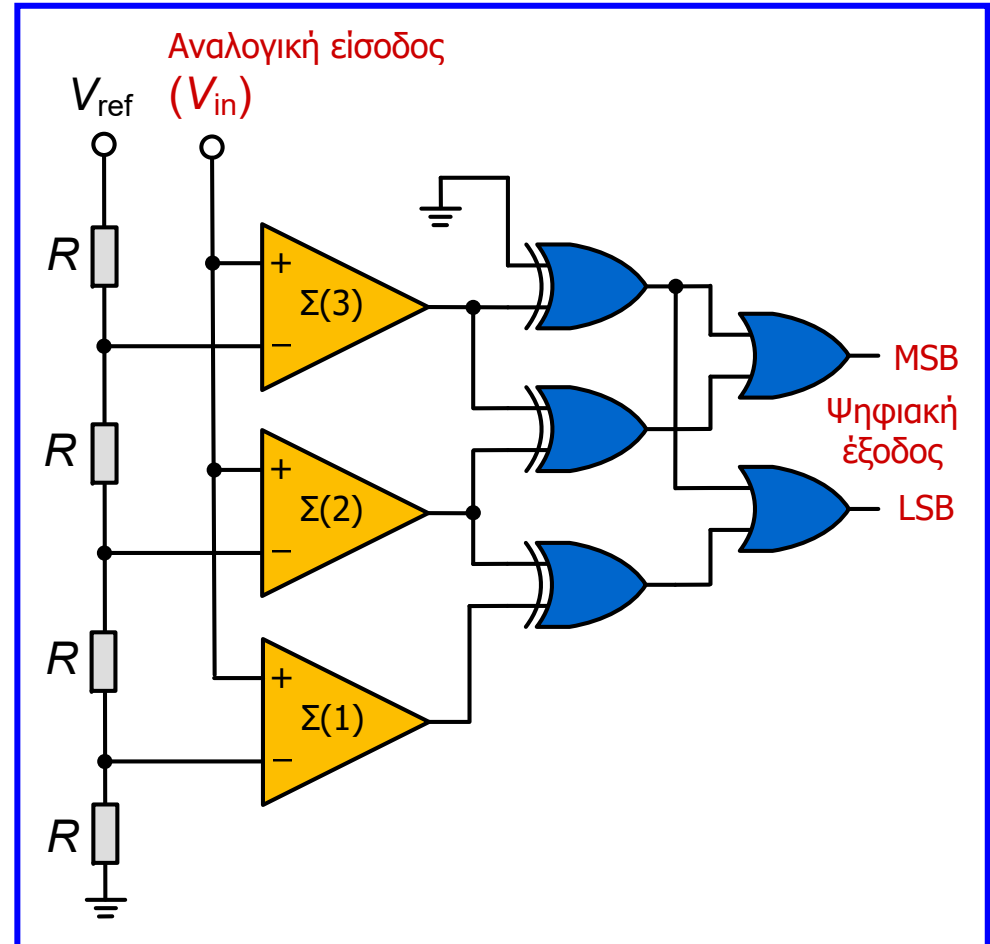
Να προσδιοριστεί η ψηφιακή έξοδος του για τις περιπτώσεις όπου η τιμή της αναλογικής τάσης εισόδου ανήκει στα ακόλουθα διαστήματα τιμών:

[0, 1.25 V]

[1.25 V, 2.5 V]

[2.5 V, 3.75 V]

[3.75 V, 5 V].



# Άσκηση 18

- Τάσεις αντιστρέφουσων εισόδων συγκριτών:

$$V_{-\Sigma(3)} = (3 \cdot R / 4 \cdot R) \cdot V_{\text{ref}} = 0.75 \cdot V_{\text{ref}} = 3.75 \text{ V}$$

$$V_{-\Sigma(2)} = (2 \cdot R / 4 \cdot R) \cdot V_{\text{ref}} = 0.5 \cdot V_{\text{ref}} = 2.5 \text{ V}$$

$$V_{-\Sigma(1)} = (R / 4 \cdot R) \cdot V_{\text{ref}} = 0.25 \cdot V_{\text{ref}} = 1.25 \text{ V}$$

- Τάσεις εξόδου συγκριτών:

$$V_{\text{in}} \in [0, 1.25 \text{ V}] \Rightarrow (A, B, C) = (0, 0, 0)$$

$$V_{\text{in}} \in [1.25 \text{ V}, 2.5 \text{ V}] \Rightarrow (A, B, C) = (0, 0, 1)$$

$$V_{\text{in}} \in [2.5 \text{ V}, 3.75 \text{ V}] \Rightarrow (A, B, C) = (0, 1, 1)$$

$$V_{\text{in}} \in [3.75 \text{ V}, 5 \text{ V}] \Rightarrow (A, B, C) = (1, 1, 1)$$

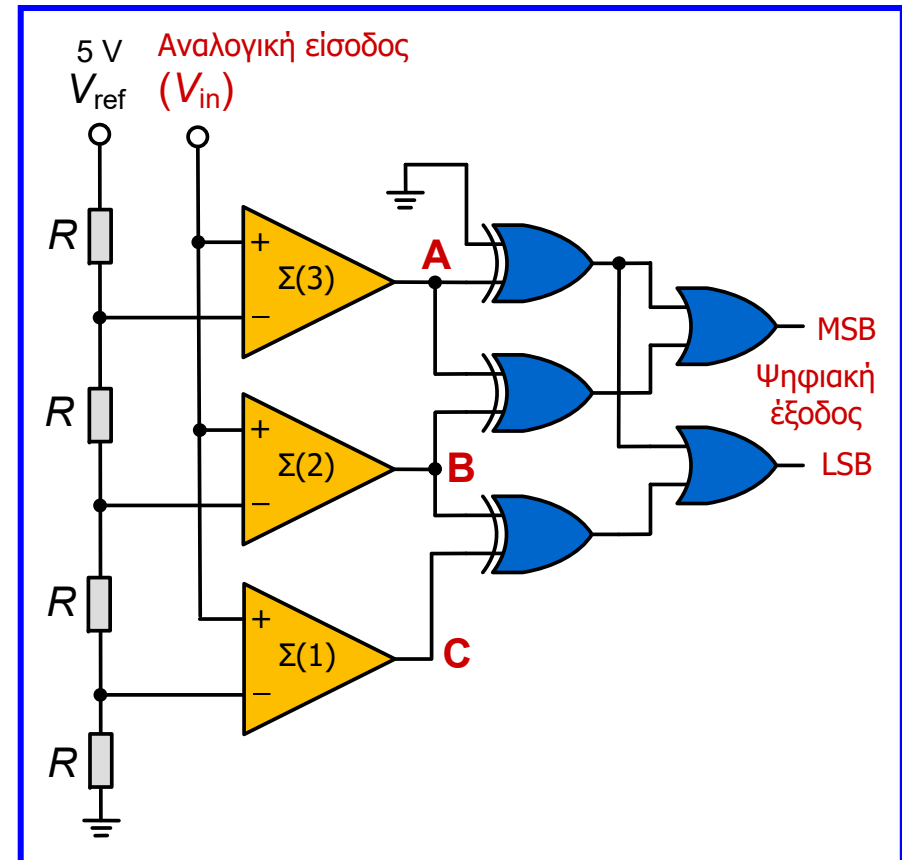
- Ψηφιακή έξοδος:

$$(A, B, C) = (0, 0, 0) \Rightarrow \text{Ψηφ. έξοδος} = 00$$

$$(A, B, C) = (0, 0, 1) \Rightarrow \text{Ψηφ. έξοδος} = 01$$

$$(A, B, C) = (0, 1, 1) \Rightarrow \text{Ψηφ. έξοδος} = 10$$

$$(A, B, C) = (1, 1, 1) \Rightarrow \text{Ψηφ. έξοδος} = 11$$



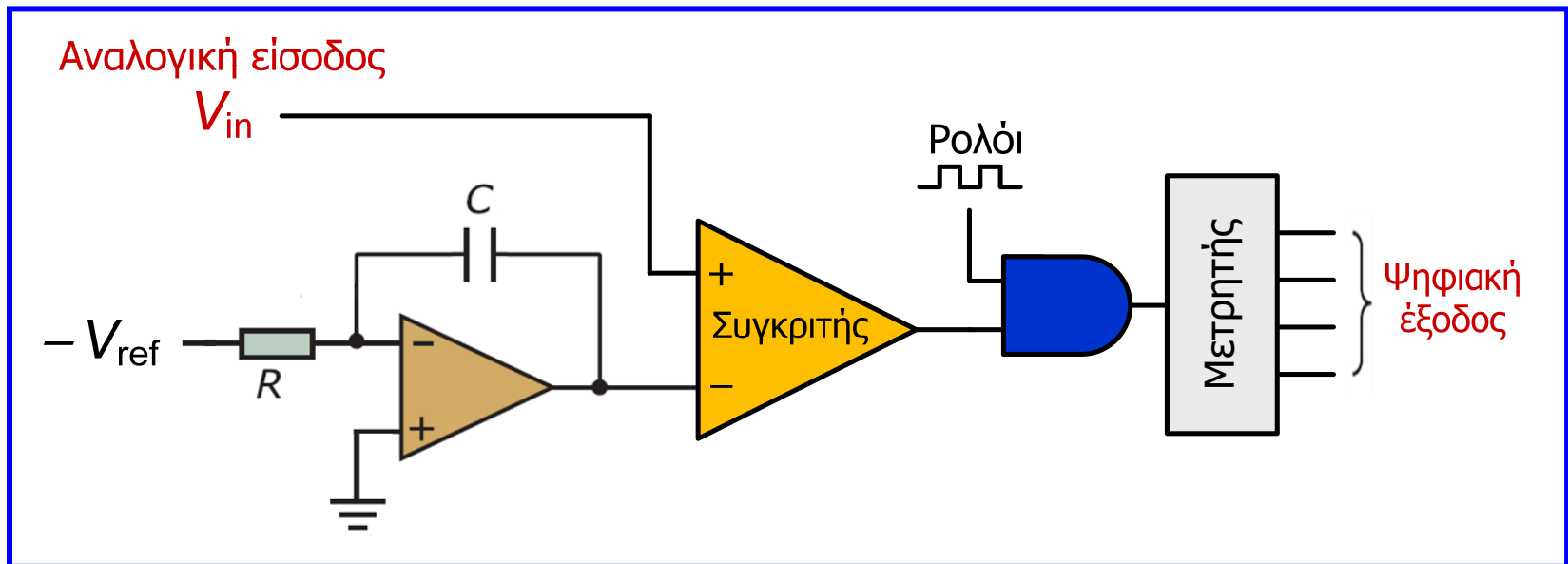
Επισημαίνεται ότι, η έξοδος μιας λογικής πύλης XOR ισούται με 1, όταν σε αυτή εφαρμόζονται είσοδοι με διαφορετική τιμή. Διαφορετικά, η έξοδος της πύλης είναι 0.



# Άσκηση 19

Στον ADC ολοκλήρωσης του παρακάτω σχήματος, η τάση αναφοράς είναι 4 V, η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι 0.1  $\mu\text{F}$  και η τιμή της αντίστασης είναι 10 k $\Omega$ .

Εάν η τιμή της αναλογικής εισόδου είναι 2.5 V και η συχνότητα του σήματος ρολογιού είναι 16 kHz, να προσδιοριστεί η ψηφιακή έξοδος του ADC.



# Άσκηση 19

Στο συγκριτή εκτελείται σύγκριση της αναλογικής τάσης εισόδου ( $V_{in}$ ) με το ολοκλήρωμα της τάσης αναφοράς ( $V_{ref}$ ) ως προς το χρόνο και όταν το ολοκλήρωμα της  $V_{ref}$  είναι μικρότερο από την  $V_{in}$ , η έξοδος του είναι 1.

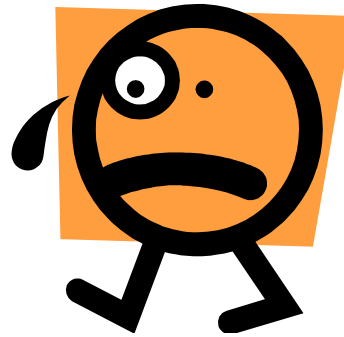
Οι παλμοί του σήματος ρολογιού τροφοδοτούν τον μετρητή (μέσω της πύλης AND) και η έξοδος του μετρητή (που αποτελείται από 4 ψηφία) αυξάνεται.

Όταν το ολοκλήρωμά της  $V_{ref}$  ως προς το χρόνο γίνει ίσο με την  $V_{in}$ , η έξοδος του συγκριτή γίνεται 0 και σταματά η μέτρηση αφού ο μετρητής δε λαμβάνει παλμούς του σήματος ρολογιού:

$$-\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int (-V_{ref}) dt = V_{in} \Rightarrow \frac{V_{ref}}{R \cdot C} \cdot t = V_{in} \Rightarrow t = \frac{V_{in} \cdot R \cdot C}{V_{ref}} \Rightarrow$$
$$t = \frac{2.5 \text{ V} \cdot 10 \cdot 10^3 \Omega \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} \text{ F}}{4 \text{ V}} \Rightarrow t = 0.625 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 0.625 \text{ ms}$$

$$f_{CLK} = 16 \text{ kHz} \Rightarrow T_{CLK} = 0.0625 \text{ ms}$$
$$t / T_{CLK} = 0.625 \text{ ms} / 0.0625 \text{ ms} = 10$$

και λόγω του ότι ο μετρητής διαθέτει 4 εξόδους η **ψηφιακή έξοδος του ADC** είναι: **1010** (δηλαδή ο αριθμός 10 στο δυαδικό σύστημα)



Τέλος 4<sup>ης</sup> ενότητας