

Ιατρικά Ηλεκτρονικά

Δρ. Π. Ασβεστάς

Τμήμα Μηχανικών Βιοϊατρικής Τεχνολογίας Τ.Ε

Χρήσιμοι Σύνδεσμοι

- Σημειώσεις μαθήματος:
<http://medisp.bme.teiath.gr/eclass/courses/TIO127/>
<https://eclass.teiath.gr/courses/TIO101/>
- E-mail:
pasv@teiath.gr

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

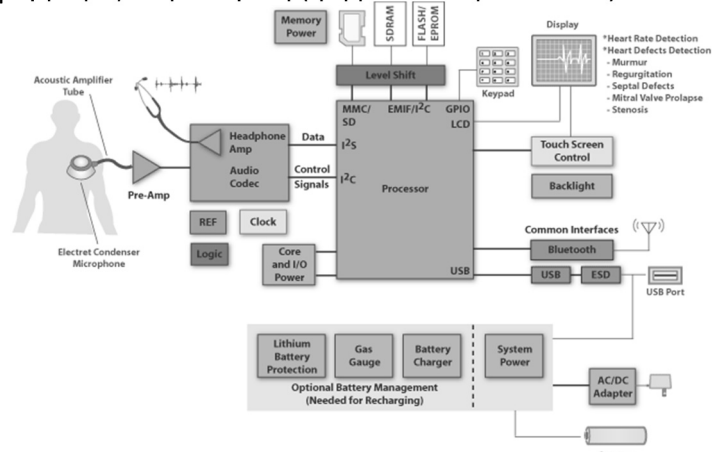
- Τελεστικοί Ενισχυτές
- Βασικά Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών (αναστρέφων, μη αναστρέφων ενισχυτής, αθροιστής)
- Κυκλώματα Ειδικού Σκοπού (ενισχυτής διαφορών, ενισχυτής οργανολογίας, ενισχυτής διαντίστασης, ενισχυτής απομόνωσης)
- Ενεργά Φίλτρα (σχεδίαση και υλοποίηση βαθυπερατών, υψιπερατών φίλτρων)
- Αναλογοψηφιακή Μετατροπή
- Ταλαντωτές
- Θυρίστορ
- Πολυφασική ανόρθωση

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Ο **τελεστικός ενισχυτής (Τ.Ε.) (operational amplifier - opamp)** είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα ηλεκτρονικά στοιχεία και συναντάται σχεδόν σε όλες τις ιατρικές συσκευές και ιατρικά μηχανήματα
- Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν:
 - Ενίσχυση σημάτων
 - Φιλτράρισμα για αποκοπή εξωτερικού ηλεκτρονικού θορύβου (π.χ. θόρυβος ηλεκτρικού δικτύου)
 - Κυκλώματα ταλάντωσης
 - Σταθεροποίηση τάσης
 - Ανόρθωση χαμηλών σημάτων
 - Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και αντίστροφα

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Εφαρμογές στην ιατρική (ψηφιακό στηθοσκόπιο)



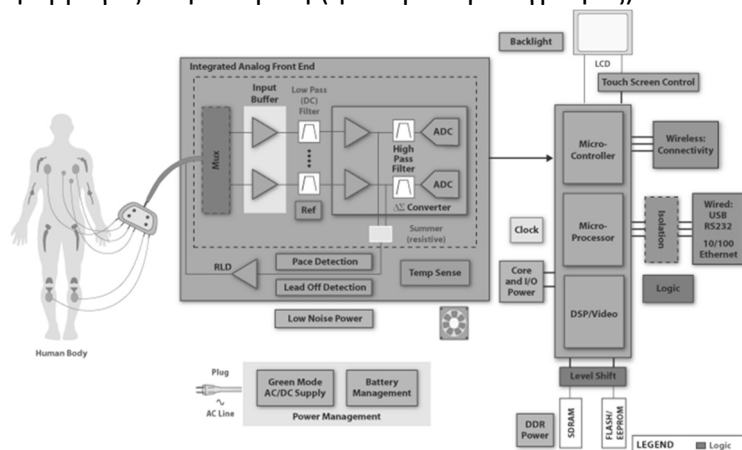
Πηγή: Texas Instruments (http://www.ti.com/lscs/ti/apps/healthtech/end_equipment.page)

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

5

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Εφαρμογές στην ιατρική (ηλεκτροκαρδιογράφος)



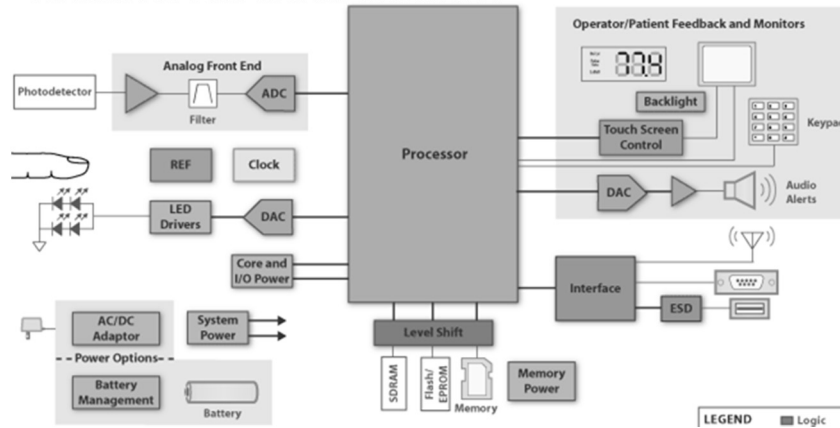
Πηγή: Texas Instruments (http://www.ti.com/lscs/ti/apps/healthtech/end_equipment.page)

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

6

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Εφαρμογές στην ιατρική (οξύμετρο)



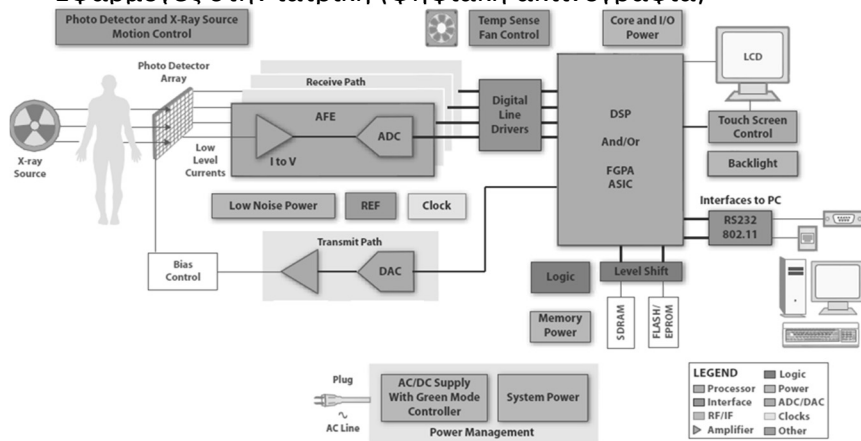
Πηγή: Texas Instruments (http://www.ti.com/lscs/ti/apps/healthtech/end_equipment.page)

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

7

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Εφαρμογές στην ιατρική (ψηφιακή ακτινογραφία)



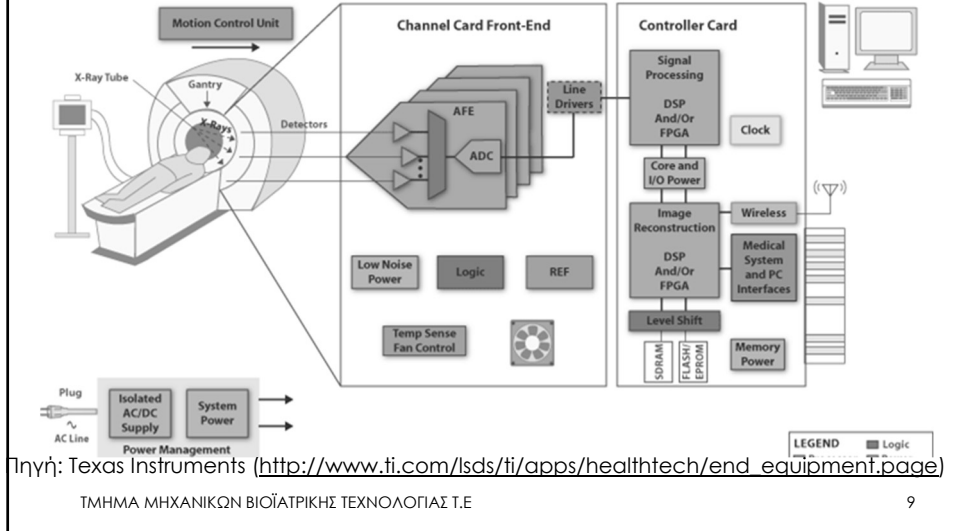
Πηγή: Texas Instruments (http://www.ti.com/lscs/ti/apps/healthtech/end_equipment.page)

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

8

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Εφαρμογές στην ιατρική (αξονικός τομογράφος)



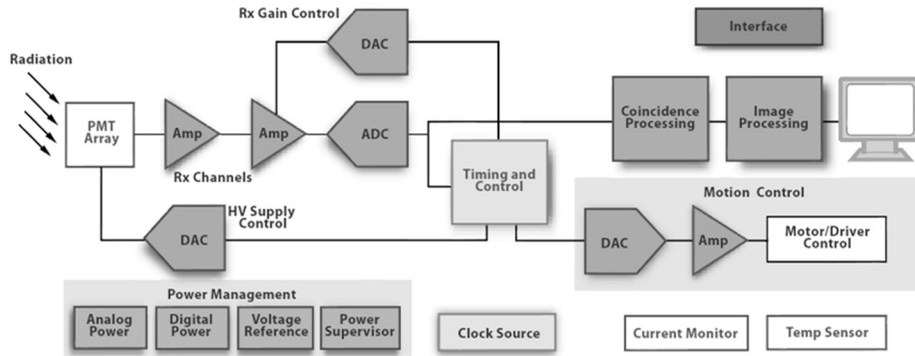
ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Εφαρμογές στην ιατρική (μαγνητικός τομογράφος)



ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Εφαρμογές στην ιατρική (σύστημα PET)



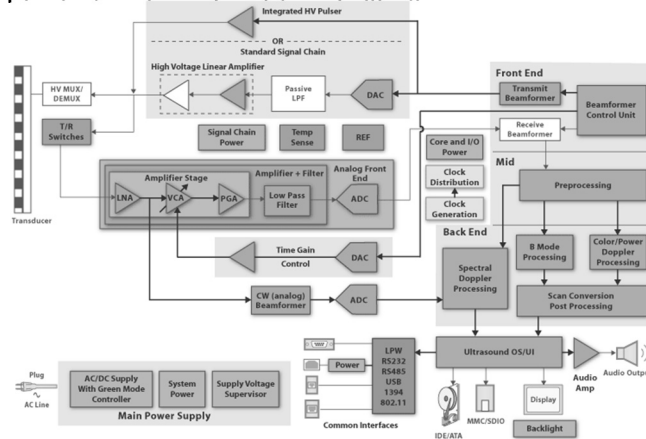
Πηγή: Texas Instruments (http://www.ti.com/lscs/ti/apps/healthtech/end_equipment.page)

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

11

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Εφαρμογές στην ιατρική (υπέρηχος)



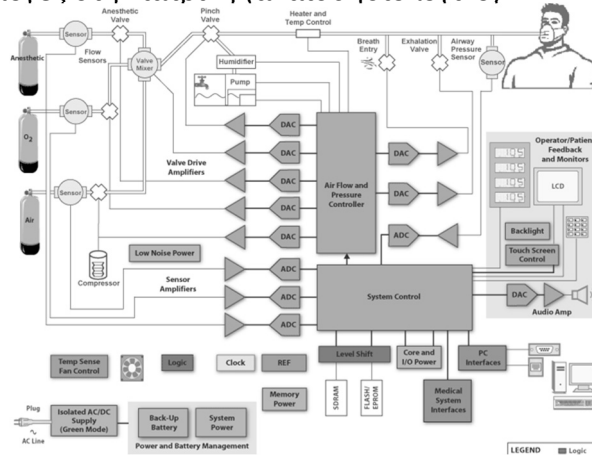
Πηγή: Texas Instruments (http://www.ti.com/lscs/ti/apps/healthtech/end_equipment.page)

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

12

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

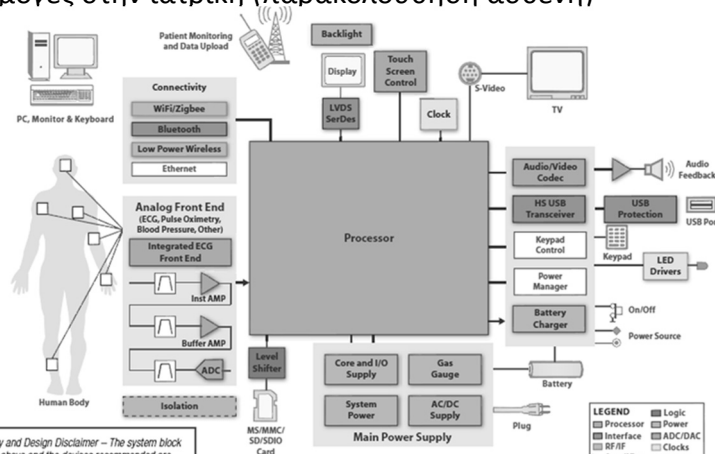
- Εφαρμογές στην ιατρική (αναισθησιολογικό)



Πηγή: Texas Instruments (http://www.ti.com/lscs/ti/apps/healthtech/end_equipment.page)

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Εφαρμογές στην ιατρική (παρακολούθηση ασθενή)



Πηγή: Texas Instruments (http://www.ti.com/lscs/ti/apps/healthtech/end_equipment.page)

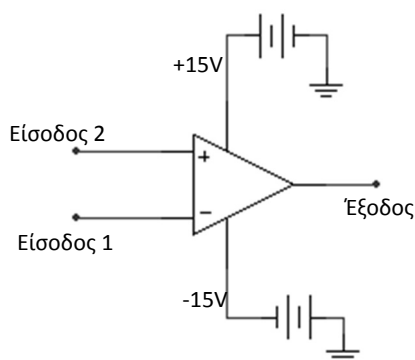
ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Ένας **τελεστικός ενισχυτής (Τ.Ε.) (operational amplifier - opamp)** είναι ένα στοιχείο δύο εισόδων και μίας εξόδου, το οποίο ενισχύει τη διαφορά των σημάτων που εφαρμόζονται στις εισόδους του.
- Επιπλέον, περιλαμβάνει δύο ακροδέκτες dc τροφοδοσίας
- Η τροφοδοσία μπορεί να είναι διπλή και συνήθως συμμετρική (π.χ. $\pm 15V$) (**dual supply**) ή μονή (π.χ. $+5V$) (**single supply**)
- Σε κάθε περίπτωση η τάση εξόδου δεν μπορεί να ξεπεράσει τις τάσεις τροφοδοσίας και συνήθως είναι περίπου **1V μικρότερη από αυτές**
- Εντούτοις, υπάρχουν Τ.Ε. στους οποίους η τάση εξόδου μπορεί να φθάσει τις τάσεις τροφοδοσία, δηλαδή όπως λέγεται η έξοδος είναι από **γραμμή σε γραμμή (rail to rail)**

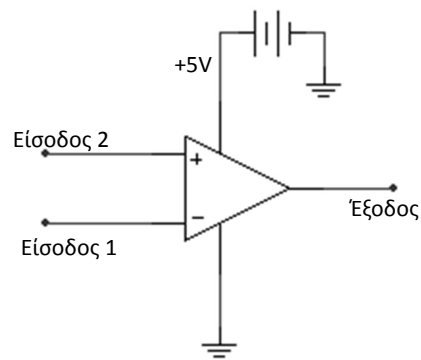
• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 15

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ



Τ.Ε. με διπλή συμμετρική dc τροφοδοσία.
Η τάση εξόδου είναι στο διάστημα $[-15V, +15V]$ περίπου



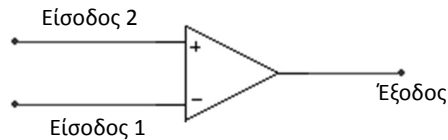
Τ.Ε. με μονή dc τροφοδοσία (single supply).
Η τάση εξόδου είναι στο διάστημα $[0V, +5V]$ περίπου

• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

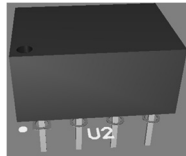
• 16

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

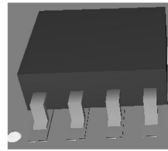
- Πολλές φορές, οι ακροδέκτες dc τροφοδοσίας παραλείπονται και σχεδιάζονται μόνο οι ακροδέκτες εισόδου και εξόδου



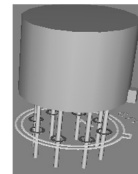
- Οι τελεστικοί ενισχυτές είναι ολοκληρωμένα κυκλώματα (IC) τα οποία είναι διαθέσιμα σε διάφορες συσκευασίες.



DIP



SOIC



TO-5

• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 17

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Οι συσκευασίες DIP και TO-5 είναι τύπου **through-hole**, ενώ η συσκευασία SOIC είναι τύπου **επιφανειακής στήριξης (SMD)**



Through-hole

SMD

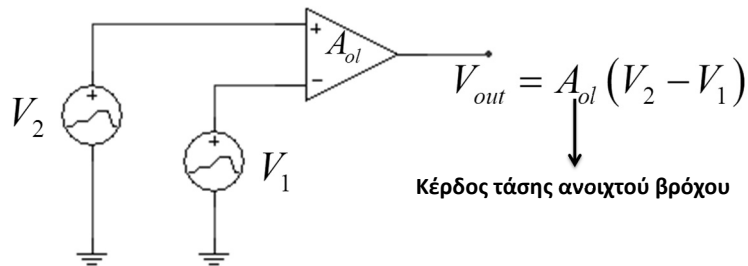
Through-hole

• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 18

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Ένας Τ.Ε. ενισχύει τη διαφορά των δύο σημάτων που εμφανίζονται στις εισόδους του
- Η ενίσχυση γίνεται με **κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου (open loop gain), A_{ol}** , το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό του Τ.Ε.



• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 19

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Καθώς εκ κατασκευής το **κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου¹, A_{ol}** , είναι πολύ μεγάλο (ξεπερνάει συνήθως το 10^5 και μπορεί να φτάσει στο 10^6 ή και παραπάνω)² και συνυπολογίζοντας το γεγονός ότι η τάση εξόδου δεν υπερβαίνει τις τάσεις τροφοδοσίας, προκύπτει ότι για σχεδόν οποιοσδήποτε τάσεις εισόδου, η τάση εξόδου θα είναι περίπου ίση με τη θετική ή την αρνητική τάση τροφοδοσίας. (Αντίστοιχα, εάν η τροφοδοσία είναι μονή η τάση εξόδου θα είναι μεταξύ 0V και της τάσης τροφοδοσίας)

¹Πολλές φορές το κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου αναφέρεται και ως κέρδος τάσης μεγάλου σήματος (Large Signal Voltage Gain)

²Ορισμένες φορές το κέρδος εκφράζεται και σε V/mV. Για παράδειγμα, κέρδος 200.000 μπορεί να γραφτεί ως 200V/mV.

• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 20

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Για παράδειγμα, έστω ένας Τ.Ε. με κέρδος ανοιχτού βρόχου $A_{ol} = 10^5$, και με διπλή συμμετρική τροφοδοσία $\pm 15V$. Τότε, η διαφορά των δύο εισόδων πρέπει να γίνει μικρότερη από $100\mu V$ για να προκύψει στην έξοδο τάση διαφορετική από $\pm 15V$.

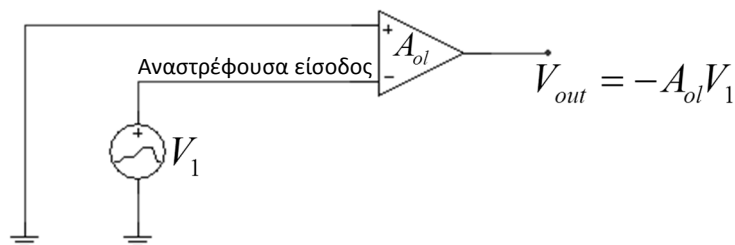
V_2 (V)	V_1 (V)	$V_2 - V_1$ (V)	$A_{ol}(V_2 - V_1)$ (V)	V_{out} (V)
2	1	1	10^5	+15
1	2	-1	-10^5	-15
0,2	0,1	0,1	10^4	+15
0,1	0,2	-0,1	-10^4	-15
0,02	0,01	0,01	10^3	+15
0,01	0,02	-0,01	-10^3	-15
0,002	0,001	0,001	10^2	+15
0,001	0,002	-0,001	-10^2	-15
0,0002	0,0001	0,0001	10	10
0,0001	0,0002	-0,0001	-10	-10

• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 21

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

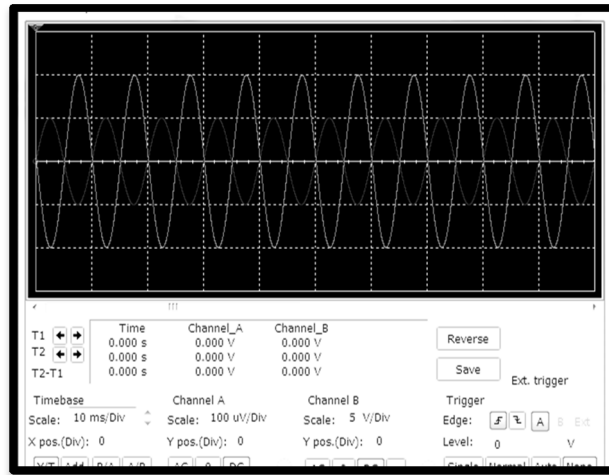
- Εάν η είσοδος 2 είναι μηδέν ($V_2 = 0V$), τότε η τάση εξόδου θα έχει αντίθετο πρόσημο από την είσοδο 1. Για τον λόγο αυτόν η είσοδος 1 ονομάζεται **αναστρέφουσα είσοδος (inverting input)**.
- Ο αντίστοιχος ακροδέκτης έχει την ένδειξη – στο σχηματικό σύμβολο



• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 22

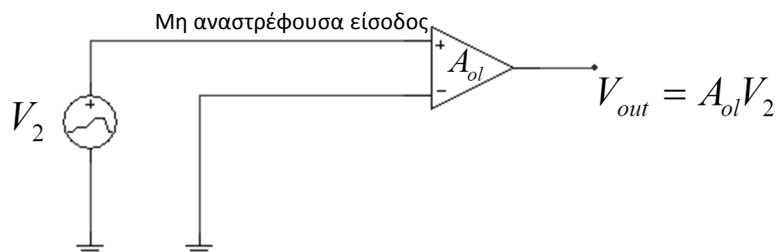
ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ



Εφαρμογή τάσης στη μη αναστρέφουσα είσοδο (κόκκινο χρώμα). Η τάση εξόδου (πράσινο χρώμα) παρουσιάζει διαφορά φάσης 180°.

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Εάν η είσοδος 1 είναι μηδέν ($V_1 = 0V$), τότε η τάση εξόδου θα έχει το ίδιο πρόσημο με την είσοδο 2. Για τον λόγο αυτόν, η είσοδος 2 ονομάζεται **μη αναστρέφουσα είσοδος (non-inverting input)**.
- Ο αντίστοιχο ακροδέκτης έχει την ένδειξη + στο σχηματικό σύμβολο



ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Οι κατασκευαστές Τ.Ε. συνήθως δεν παρέχουν απευθείας τιμή για το κέρδος κοινού σήματος, αλλά το συγκρίνουν με το κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου, μέσω του **λόγου απόρριψης κοινού σήματος – Common Mode Rejection Ratio (CMRR)**:

$$CMRR = \frac{A_{ol}}{A_{cm}}$$

$$CMRR_{db} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{ol}}{A_{cm}} \right)$$

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Παράδειγμα

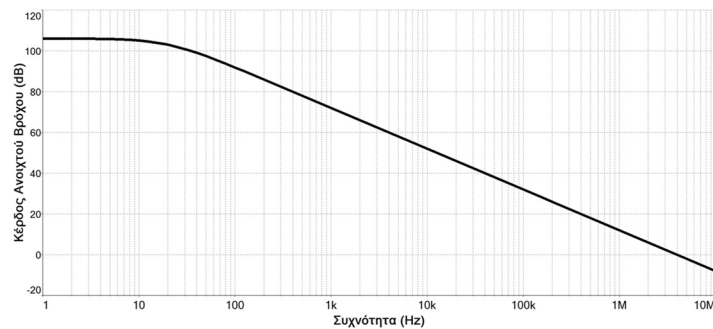
Ένας τελεστικός ενισχυτής έχει κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου 200.000 και λόγος απόρριψης κοινού σήματος 100dB. Να υπολογιστεί το κέρδος κοινού σήματος.

Λύση

$$CMRR = 100dB \Rightarrow 20 \log_{10} \frac{A_{ol}}{A_{cm}} = 100 \Rightarrow \log_{10} \frac{A_{ol}}{A_{cm}} = 5 \Rightarrow \frac{A_{ol}}{A_{cm}} = 10^5 \Rightarrow A_{cm} = 2$$

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Όπως αναφέρθηκε, το κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου, A_{ol} , έχει πολύ μεγάλη τιμή.
- Όμως το κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας. Συγκεκριμένα, καθώς αυξάνει η συχνότητα ελαττώνεται η τιμή του.

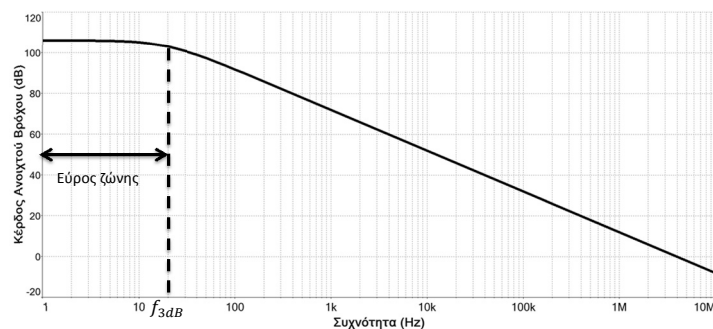


• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 29

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Στο διάγραμμα που δείχνει το σχήμα, το κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου του τελεστικού είναι 106dB (200.000) μέχρι τη συχνότητα $f_{3dB} = 20$ Hz περίπου, όπου το κέρδος έχει πέσει κατά 3dB, δηλαδή έχει γίνει 103dB.
- Το εύρος συχνοτήτων από 0 έως f_{3dB} ονομάζεται **εύρος ζώνης (bandwidth)** του ενισχυτή.

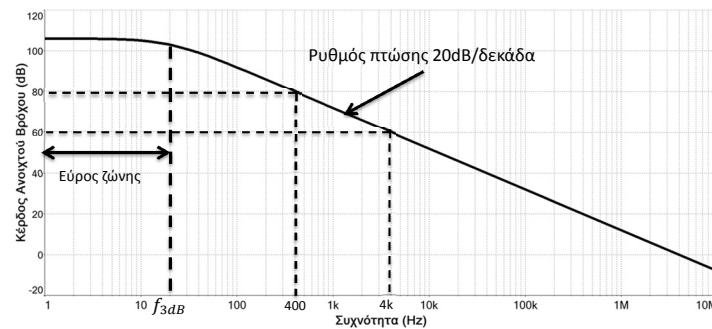


• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 30

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Μετ τη f_{3dB} , το κέρδος μειώνεται με ρυθμό 20dB/δεκάδα, το οποίο σημαίνει ότι κάθε φορά που η συχνότητα αυξάνει κατά 10 το κέρδος μειώνεται κατά 20dB.
- Για παράδειγμα, το κέρδος στα 400Hz είναι 80dB και πέφτει στα 60dB στα 4kHz

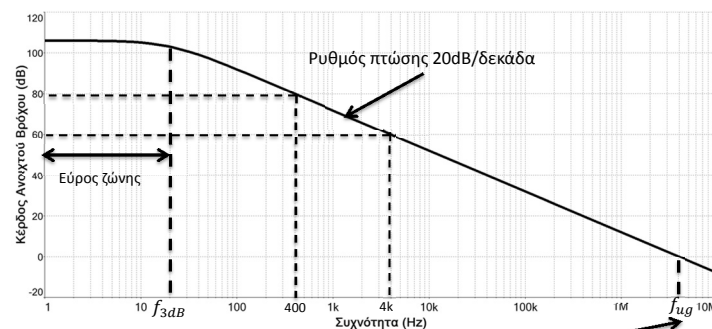


• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 31

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Το κέρδος γίνεται 0dB, δηλαδή 1, στη συχνότητα $f_{ug} = 4MHz$
- Η συχνότητα f_{ug} ονομάζεται **συχνότητα μοναδιαίου κέρδους (unity gain frequency)** ή **γινόμενο κέρδους εύρους ζώνης (gain bandwidth product)**.



• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

Συχνότητα μοναδιαίου κέρδους

• 32

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

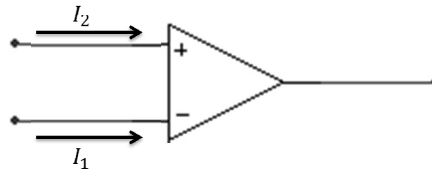
- Το γινόμενο κέρδους εύρους ζώνης είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος ενός Τ.Ε.
- **Παραμένει πάντοτε σταθερό**
- Στο προηγούμενο παράδειγμα το γινόμενο κέρδους εύρους ζώνης ισούται με 4MHz. Ο Τ.Ε. έχει κέρδος 200.000 και εύρος ζώνης 20Hz και άρα $200.000 \times 20\text{Hz} = 4\text{MHz}$
- Εάν με κάποιο τρόπο το κέρδος τάσης του Τ.Ε. μειωνόταν και γινόταν 100, τότε το εύρος ζώνης θα ήταν 40kHz έτσι ώστε $100 \times 40\text{kHz} = 4\text{MHz}$

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Ένα άλλο χαρακτηριστικό ενός Τ.Ε. είναι ότι το ρεύμα στον κάθε ακροδέκτη εισόδου είναι πολύ μικρό (της τάξης μερικών nA= 10^{-9}A ή pA= 10^{-12}A)
- Ισοδύναμα το γεγονός αυτό σημαίνει ότι **η αντίσταση εισόδου ενός Τ.Ε. είναι πολύ μεγάλη.**
- Ο χαρακτηρισμός των ρευμάτων στις εισόδους ενός Τ.Ε. γίνεται με χρήση των ακόλουθων παραμέτρων:
 - **ρεύμα πόλωσης εισόδου (input bias current)**
 - **ρεύμα εκτροπής εισόδου (input offset current)**

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Το **ρεύμα πόλωσης εισόδου (input bias current)**, $I_B = \frac{I_1 + I_2}{2}$, είναι ο μέσος όρος των ρευμάτων στις εισόδους του Τ.Ε. και αποτελεί ένα μέτρο του μεγέθους των ρευμάτων
- Το **ρεύμα εκτροπής εισόδου (input offset current)**, $I_{OS} = |I_1 - I_2|$, είναι η απόλυτη τιμή της διαφοράς των ρευμάτων στις εισόδους του Τ.Ε. και αποτελεί ένα μέτρο της ασυμμετρίας των ρευμάτων. Το ρεύμα αυτό πρέπει να έχει πολύ μικρή τιμή ειδικά σε ενισχυτές με μεγάλο κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου και μεγάλη αντίσταση εισόδου

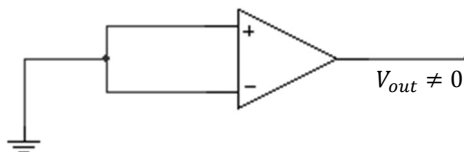


• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 35

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Στο κύκλωμα του σχήματος, οι δύο είσοδοι έχουν συνδεθεί μεταξύ τους και έχουν τάση μηδέν.
- Σε μία τέτοια περίπτωση θα αναμενόταν η τάση εξόδου να είναι μηδενική
- Όμως η τάση εξόδου θα είναι μη μηδενική και συνήθως τείνει σε μία από τις δύο τάσης τροφοδοσίας περίπου, ειδικά εάν ο Τ.Ε. έχει πολύ μεγάλο κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου
- Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εκ κατασκευής μεταξύ των δύο εισόδων ενός Τ.Ε. υπάρχει μία διαφορά δυναμικού, η οποία ονομάζεται **τάση εκτροπής εισόδου (input offset voltage)**.



• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 36

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

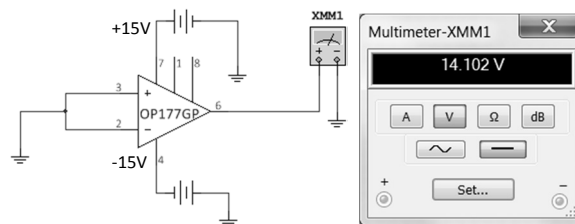
- Η τάση εκτροπής εισόδου (input offset voltage), V_{os} , είναι μερικά mV ($10^{-3}V$) ή μV ($10^{-6}V$) χωρίς να είναι γνωστή η πολικότητά της.
- Συνήθως, η τάση αυτή θεωρείται ως διαφορά δυναμικού ανάμεσα στη μη αναστρέφουσα και στην αναστρέφουσα είσοδο, δηλαδή όταν είναι θετική (αρνητική) το δυναμικό στη μη αναστρέφουσα είσοδο είναι μεγαλύτερο (μικρότερο) από το δυναμικό στην αναστρέφουσα είσοδο
- Η ύπαρξη της τάσης αυτής σε συνδυασμό με το πολύ μεγάλο κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου ενός Τ.Ε. οδηγεί την τάση εξόδου σε μία από τις ακραίες τιμές

• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 37

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Για παράδειγμα, ο Τ.Ε. OP177G έχει κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου $A_{ol} = 6.000.000$, τάση εκτροπής εισόδου $V_{os} = 20\mu V$ και συνδέεται όπως φαίνεται στο σχήμα.
- Εάν ο Τ.Ε. λάβει διπλή συμμετρική τροφοδοσία $\pm 15V$, τότε η τάση εξόδου θεωρητικά είναι $A_{ol} \times V_{os} = 120V$ και καθώς δεν μπορεί να ξεπεραστεί η τάση τροφοδοσίας, η τάση εξόδου θα είναι τελικά κοντά στα $+15V$
- Αντίστοιχα, εάν η τάση εκτροπής εισόδου ήταν αρνητική, η τάση εξόδου θα προσέγγιζε τα $-15V$

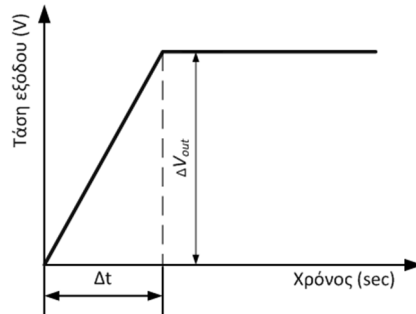


• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 38

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό ενός Τ.Ε. είναι ο **ρυθμός ανταπόκρισης (slew rate)**, ο οποίος καθορίζει πόσο γρήγορα η τάση εξόδου μπορεί να αλλάξει τιμή.
- Στην ουσία ο ρυθμός ανταπόκρισης αποτελεί μέτρο της “επιτάχυνσης” ενός Τ.Ε.



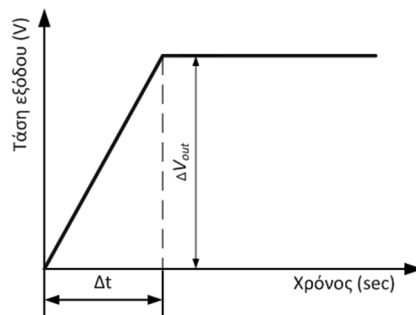
• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε.

• 39

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Συγκεκριμένα εάν για μία μεταβολή ΔV_{out} της τάσης εξόδου απαιτείται χρόνος Δt , τότε ο ρυθμός ανταπόκρισης, SR , μετριέται σε **V/ μ sec** και ορίζεται ως εξής:

$$SR = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t}$$



• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε.

• 40

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Ο ρυθμός ανταπόκρισης καθορίζει μεταξύ των άλλων τη μέγιστη συχνότητα που μπορεί να έχει ένα σήμα εισόδου ώστε η έξοδος να μην είναι παραμορφωμένη
- Συγκεκριμένα, εάν ένας Τ.Ε. έχει ρυθμό ανταπόκρισης SR και διακύμανση τάσης εξόδου, $V_{o,pp}$, τότε η μέγιστη συχνότητα, f_{SLR} , για να μην υπάρξει παραμόρφωση του σήματος εξόδου είναι:

$$f_{SLR} = \frac{SR}{\pi V_{o,pp}}$$

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Παράδειγμα

Ο Τ.Ε. OP177GP έχει ρυθμό ανταπόκρισης $0,3V/\mu s$. Εάν ο Τ.Ε. χρησιμοποιηθεί σε κύκλωμα ώστε η τάση εξόδου του να μεταβάλλεται μεταξύ $-4V$ και $+4V$ να υπολογιστεί η μέγιστη συχνότητα του σήματος εισόδου για να προκύψει στην έξοδο απαραμόρφωτο σήμα.

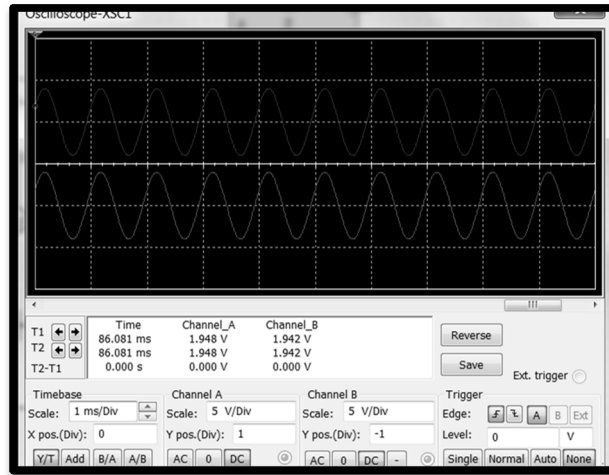
Λύση

Η συνολική διακύμανση της τάσης εξόδου είναι $V_{o,pp} = 4V - (-4V) = 8V$.

Η ζητούμενη συχνότητα είναι:

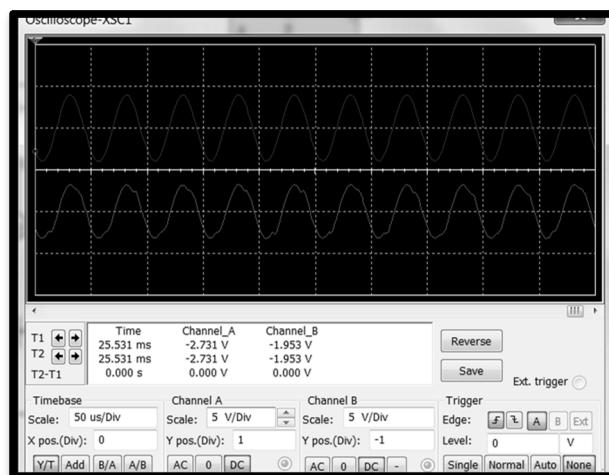
$$f_{SLR} = \frac{SR}{\pi V_{o,pp}} = \frac{0,3V/\mu s}{3,14(8V)} = 11,9kHz$$

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ



Η τάση εισόδου (κόκκινη καμπύλη) έχει συχνότητα μικρότερη από f_{SLR} . Η τάση εξόδου (πράσινη καμπύλη) δεν παρουσιάζει παραμόρφωση

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ



Η τάση εισόδου (κόκκινη καμπύλη) έχει συχνότητα μεγαλύτερη από f_{SLR} . Η τάση εξόδου (πράσινη καμπύλη) παρουσιάζει παραμόρφωση

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Βασικές παράμετροι Τ.Ε.

Παράμετρος	Αγγλική ορολογία	Σύμβολο	Μονάδες
Κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου ή Κέρδος τάσης μεγάλου σήματος	Open loop voltage gain or Large signal voltage gain	A_{ol} ή A_{vo}	V/mv
Λόγος απόρριψης κοινού σήματος	Common-mode rejection ratio	$CMRR$	dB
Τάση εκτροπής εισόδου	Input offset voltage	V_{OS}	mV ή μ V
Ρεύμα εκτροπής εισόδου	Input offset current	I_{OS}	nA ή pA
Ρεύμα πόλωσης εισόδου	Input bias current	I_B	nA ή pA

• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 45

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Βασικές παράμετροι Τ.Ε.

Παράμετρος	Αγγλική ορολογία	Σύμβολο	Μονάδες
Γινόμενο κέρδους εύρους ζώνης ή Συχνότητα μοναδιαίου κέρδους	Gain bandwidth product or Unity gain frequency	GBW ή BW ή f_{UG}	MHz
Ρυθμός ανταπόκρισης	Slew Rate	SR	V/ μ sec

• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 46

ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

- Πολλές φορές για τη διευκόλυνση της ανάλυσης ενός κυκλώματος με Τ.Ε. γίνονται ορισμένες παραδοχές χωρίς να θυσιάζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
- Συνεπώς δημιουργείται ένα μοντέλο Τ.Ε. το οποίο ονομάζεται ιδανικός Τ.Ε. (ideal opamp)
- Ξεκινώντας από το γεγονός ότι το κέρδος ανοιχτού βρόχου, A_{ol} , είναι πολύ μεγάλο η πρώτη παραδοχή είναι ότι **σε έναν ιδανικό Τ.Ε. το κέρδος ανοιχτού βρόχου είναι άπειρο, δηλαδή $A_{ol} = \infty$.**

• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

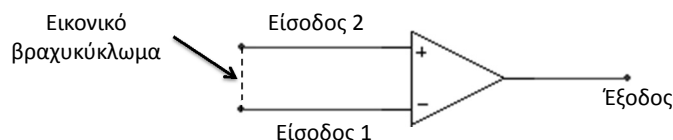
• 47

ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

- Η παραδοχή είναι του άπειρου κέρδους σημαίνει ότι η διαφορά τάσεων ανάμεσα στις δύο εισόδους πρέπει να είναι μηδενική για να προκύψει πεπερασμένη τάση εξόδου:

$$V_{out} = A_{ol}(V_2 - V_1) \Rightarrow V_2 - V_1 = \frac{V_{out}}{A_{ol}} \xrightarrow{A_{ol} \rightarrow \infty} 0 \Rightarrow V_2 = V_1$$

- Επομένως, σε έναν **ιδανικό Τ.Ε. θεωρείται ότι η τάση στους δύο ακροδέκτες εισόδου ίδια και υπάρχει ένα εικονικό βραχυκύκλωμα (virtual short-circuit) ανάμεσά τους.**

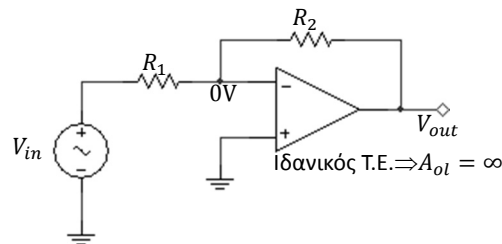


• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε

• 48

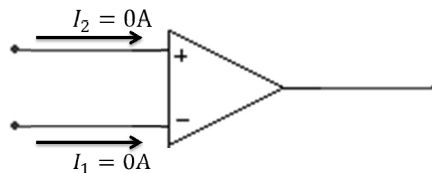
ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

- Για παράδειγμα στην ανάλυση του κυκλώματος του σχήματος, θεωρώντας ιδανικό Τ.Ε., τότε λόγω του άπειρου κέρδους ανοιχτού βρόχου, η τάση στον αναστρέφοντα και στον μη αναστρέφοντα ακροδέκτη θα είναι ίδια και ίση με 0V.



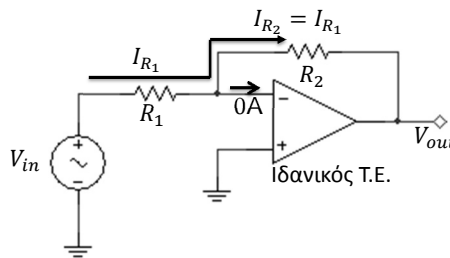
ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

- Η δεύτερη βασική παραδοχή σε έναν ιδανικό Τ.Ε. αφορά στα ρεύματα στους δύο ακροδέκτες τα οποία θεωρούνται μηδενικά, δηλαδή $I_1 = I_2 = 0A$.
- Η παραδοχή αυτή διατυπώνεται και ως εξής: **σε έναν ιδανικό Τ.Ε. η αντίσταση εισόδου είναι άπειρη.**



ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

- Για παράδειγμα στην ανάλυση του κυκλώματος του σχήματος, θεωρώντας ιδανικό Τ.Ε., τότε λόγω της άπειρης αντίστασης εισόδου, το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση R_1 , I_{R_1} , περνάει εξ ολοκλήρου στην αντίσταση R_2 , δηλαδή $I_{R_2} = I_{R_1}$

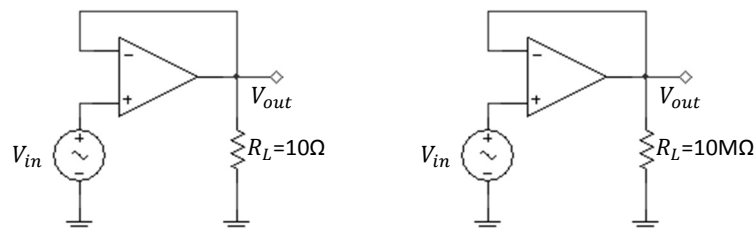


• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε.

• 51

ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

- Η τρίτη βασική παραδοχή για έναν ιδανικό Τ.Ε. είναι ότι η **τάση εξόδου είναι ανεξάρτητη από ρεύμα εξόδου, δηλαδή από το φορτίο που έχει συνδεθεί στην έξοδο.**
- Η παραδοχή αυτή διατυπώνεται και ως εξής: **σε έναν ιδανικό Τ.Ε. η αντίσταση εξόδου είναι μηδενική.**
- Για παράδειγμα, και στα δύο κυκλώματα η τάση εξόδου θα είναι ίδια ανεξάρτητα από την αντίσταση που συνδέεται στην έξοδο.



• ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Τ.Ε.

• 52

ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

- Επίσης υπάρχουν και δευτερεύουσες παραδοχές που ισχύουν σε έναν ιδανικό Τ.Ε., όπως:
 - το κέρδος κοινού σήματος είναι μηδέν, δηλαδή ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος είναι άπειρος
 - το εύρος ζώνης είναι άπειρο, δηλαδή το κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου είναι σταθερό, ανεξάρτητο από τη συχνότητα
 - ο ρυθμός ανταπόκρισης είναι άπειρος