

# Βασικά Στοιχεία Αναλογικών Ηλεκτρονικών

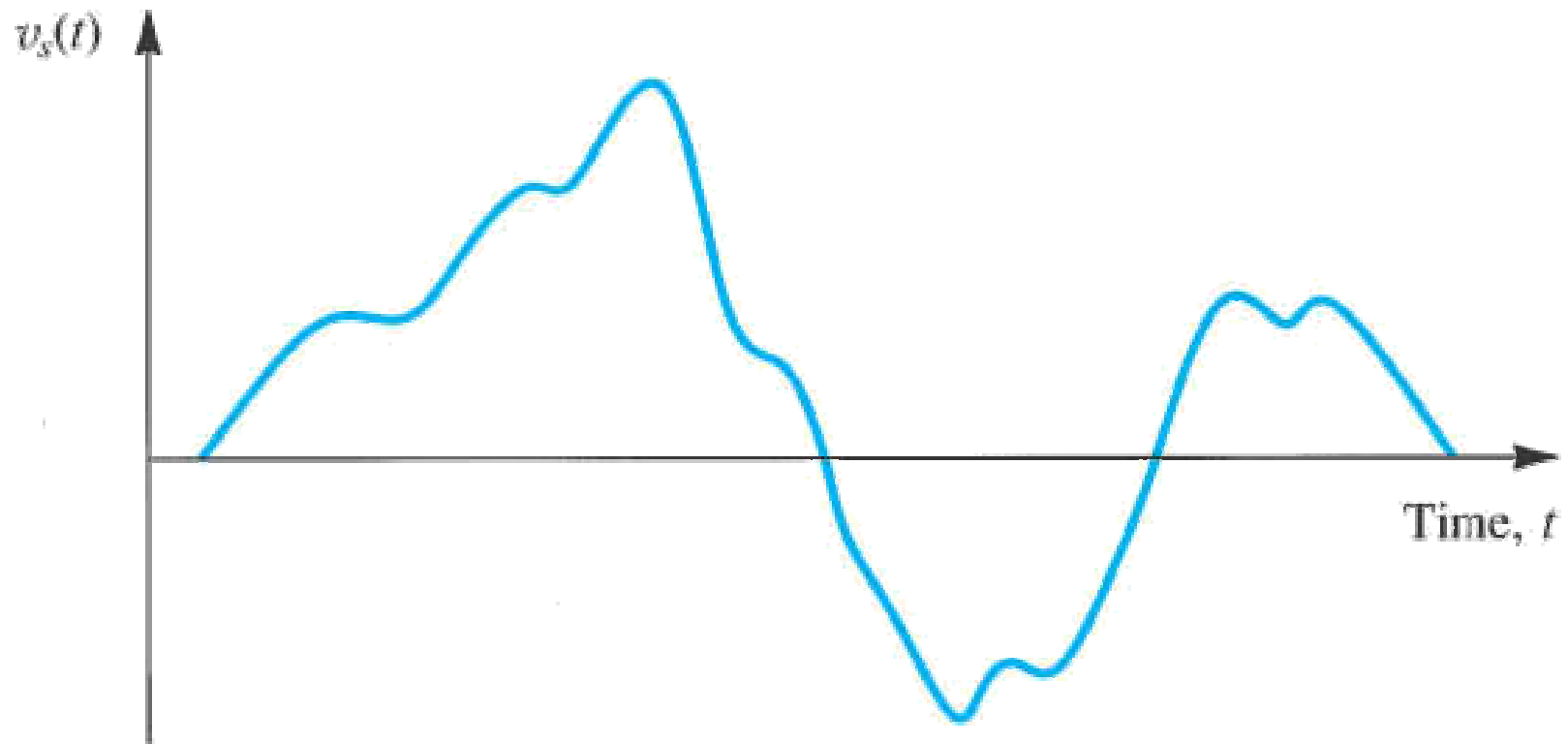
**ΗΥ231 – Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική**

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



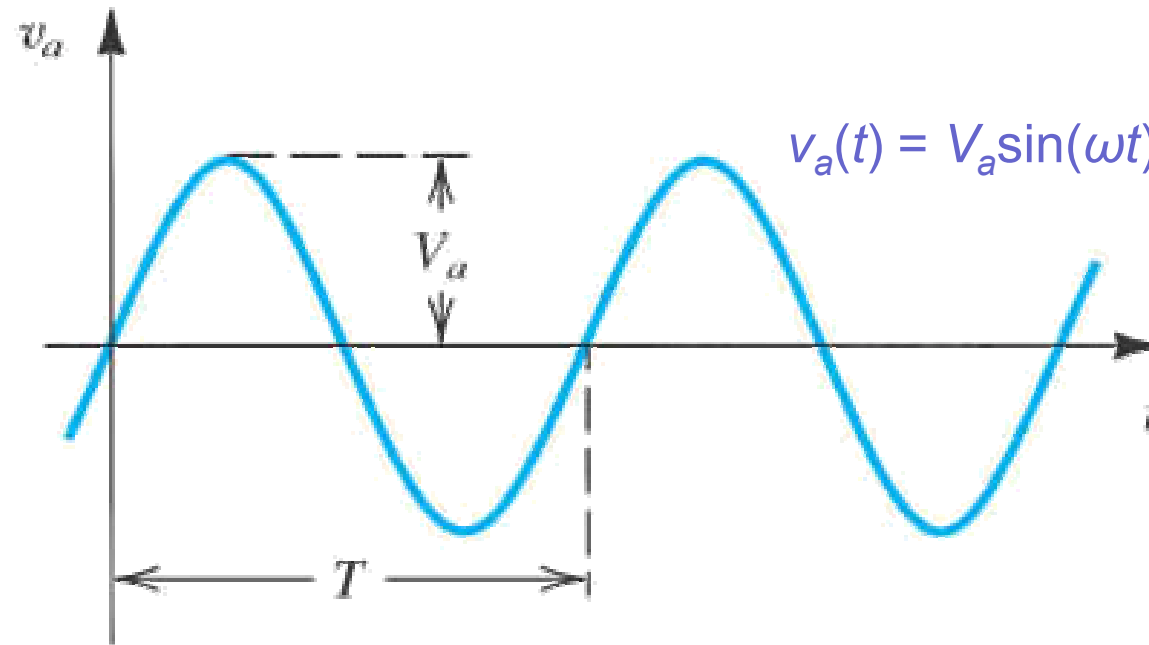
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

# Σήματα



Ένα αυθαίρετο σήμα τάσης  $v_s(t)$

# Φάσμα συχνοτήτων των σημάτων

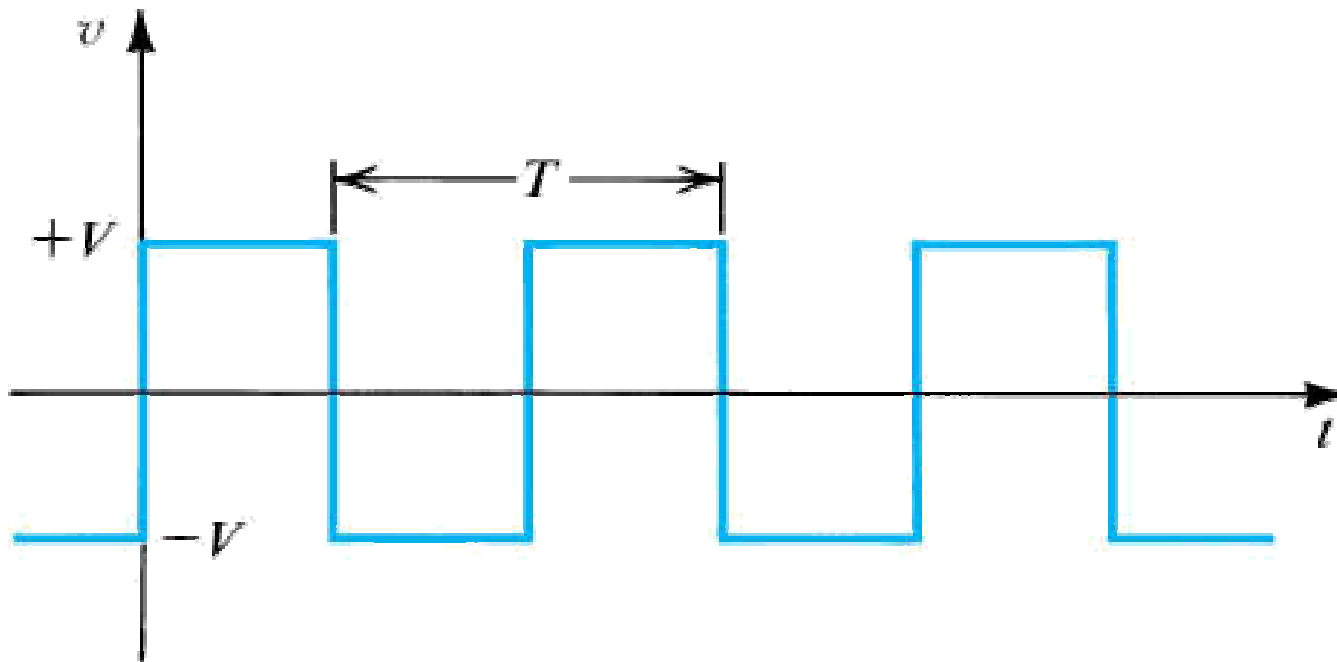


Ημιτονοειδές σήμα τάσης πλάτους  $V_a$  και συχνότητας  $f = 1/T$  Hz

Γωνιακή συχνότητα :  $\omega = 2\pi f$  rad/s

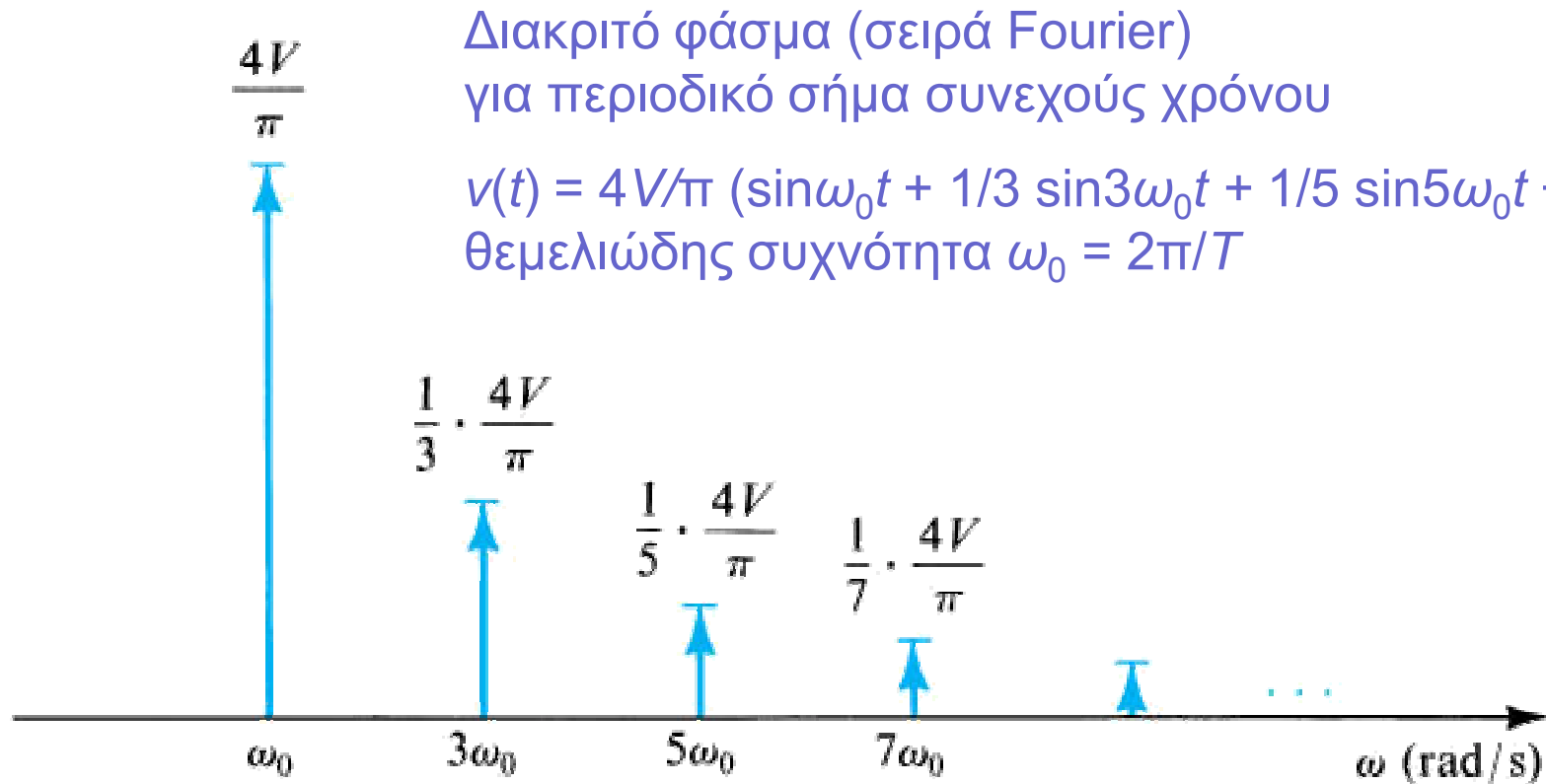
Μέση τετραγωνική τιμή (rms) :  $V_a/\sqrt{2}$

# Φάσμα συχνοτήτων των σημάτων



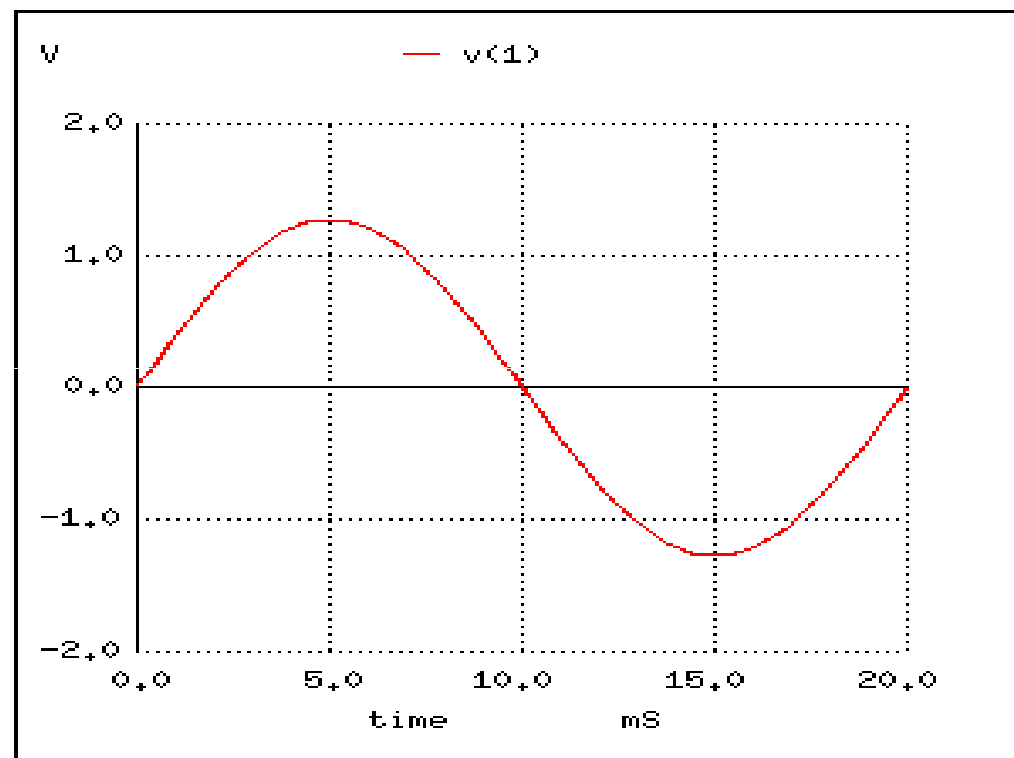
Περιοδική τετραγωνική κυματομορφή πλάτους  $V$

# Φάσμα συχνοτήτων των σημάτων



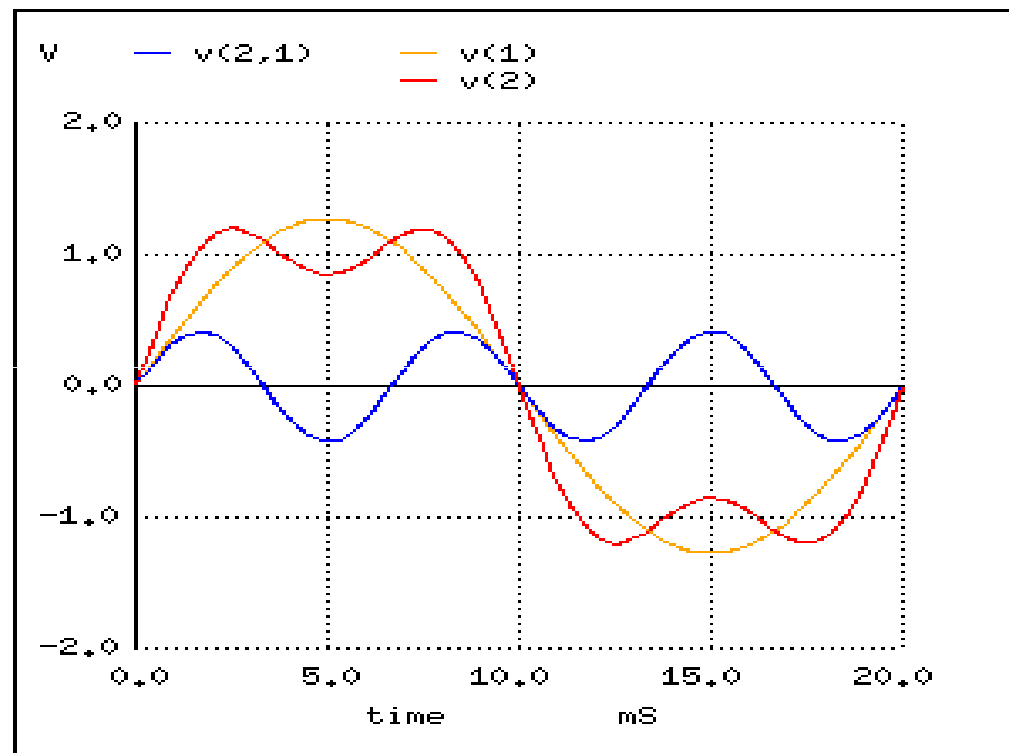
Φάσμα συχνοτήτων περιοδικής τετραγωνικής κυματομορφής

# Φάσμα συχνοτήτων των σημάτων



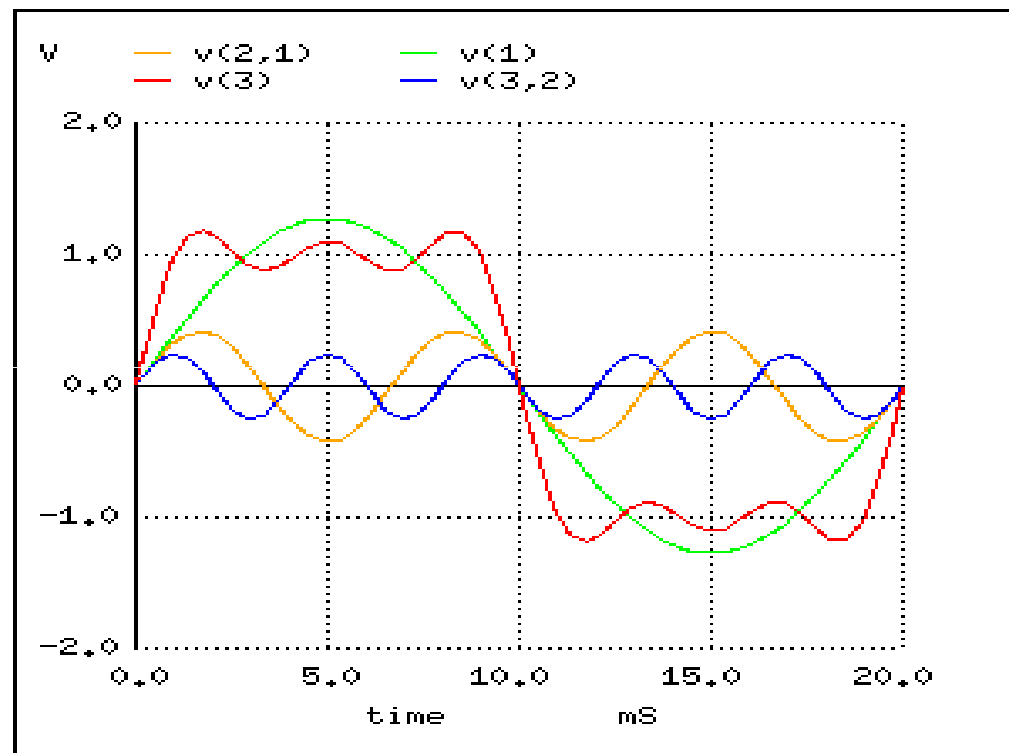
1<sup>η</sup> αρμονική

# Φάσμα συχνοτήτων των σημάτων



3<sup>η</sup> αρμονική

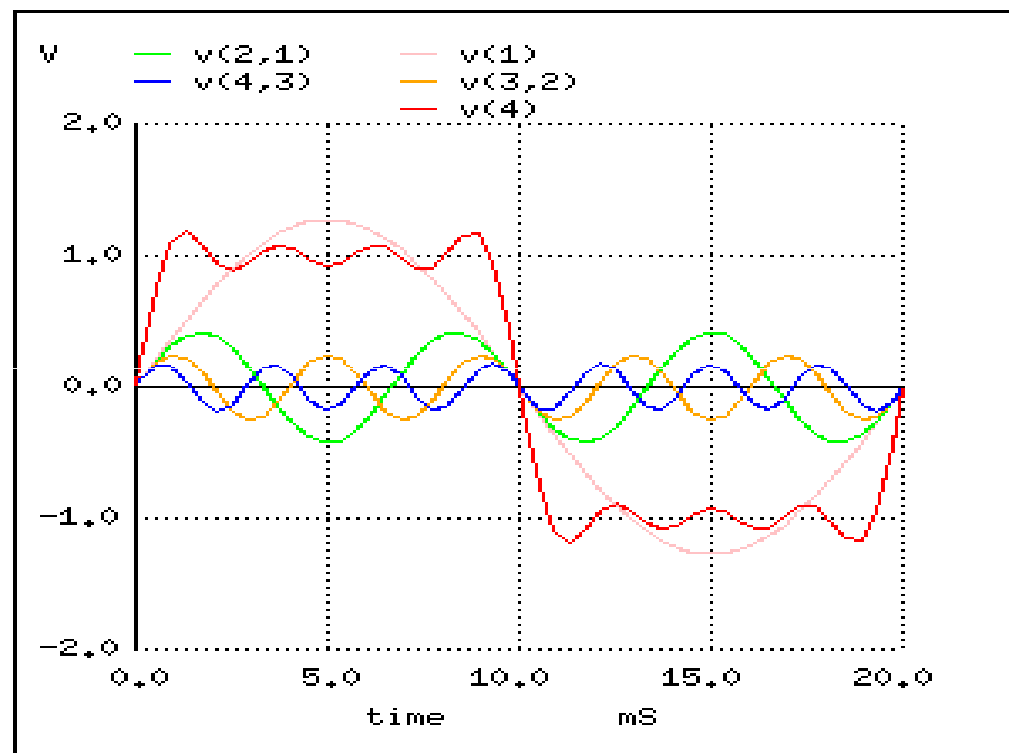
# Φάσμα συχνοτήτων των σημάτων



5<sup>η</sup> αρμονική

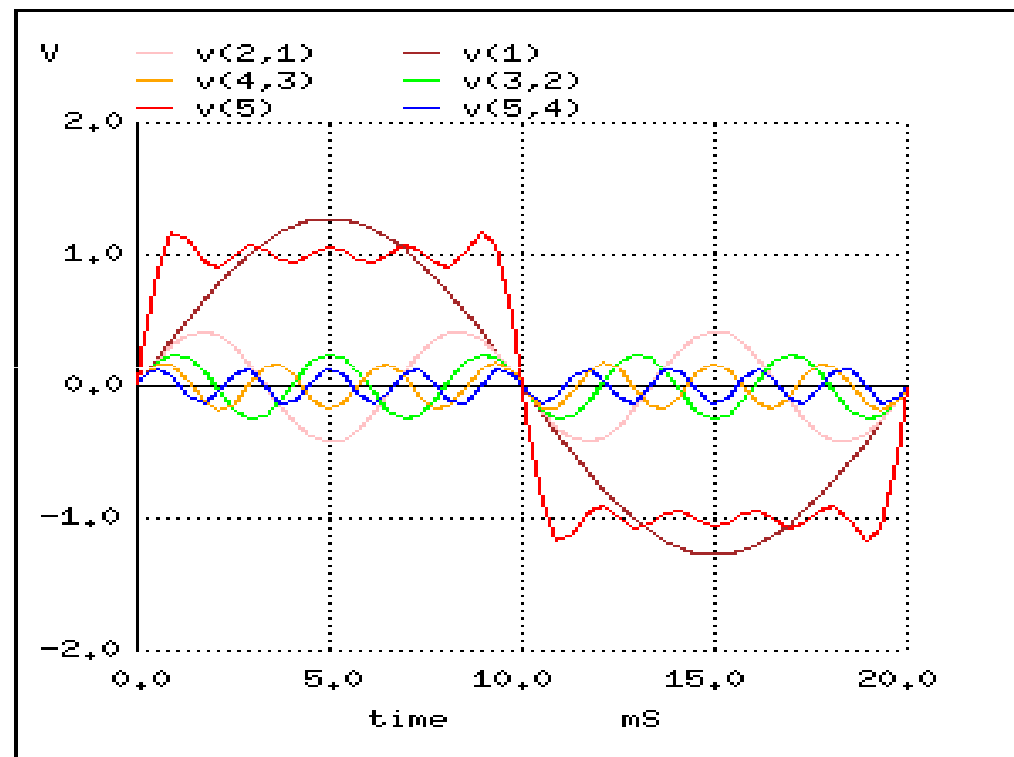


# Φάσμα συχνοτήτων των σημάτων



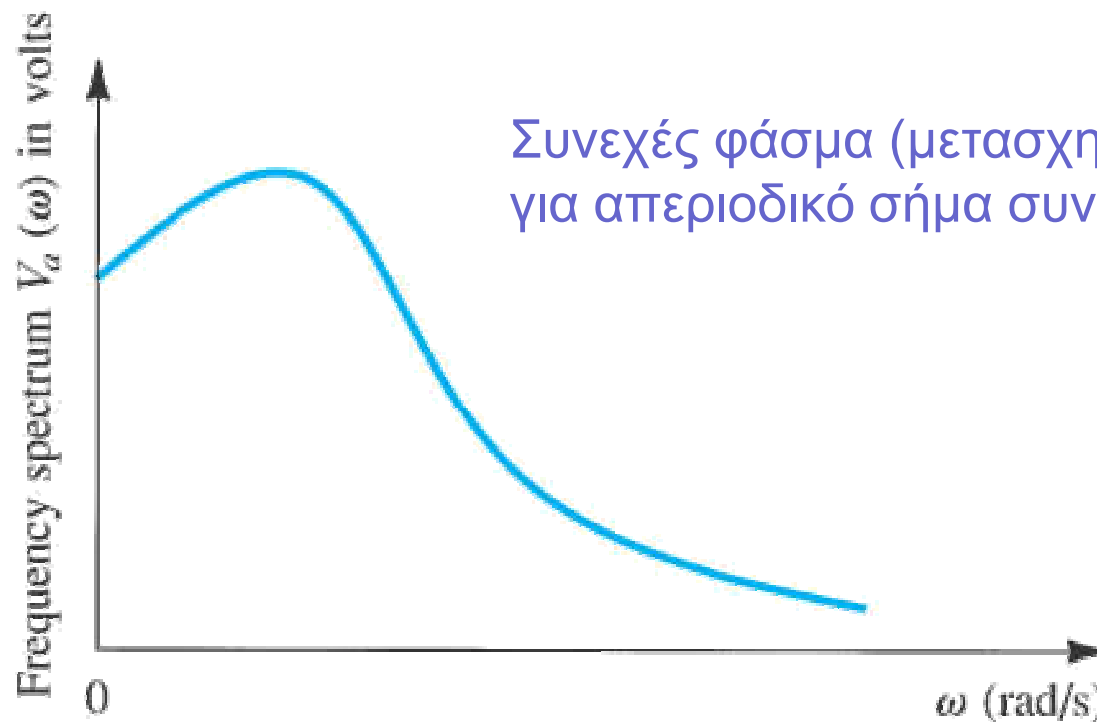
7<sup>η</sup> αρμονική

# Φάσμα συχνοτήτων των σημάτων



9<sup>η</sup> αρμονική

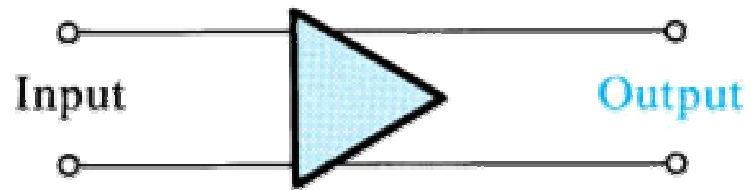
# Φάσμα συχνοτήτων των σημάτων



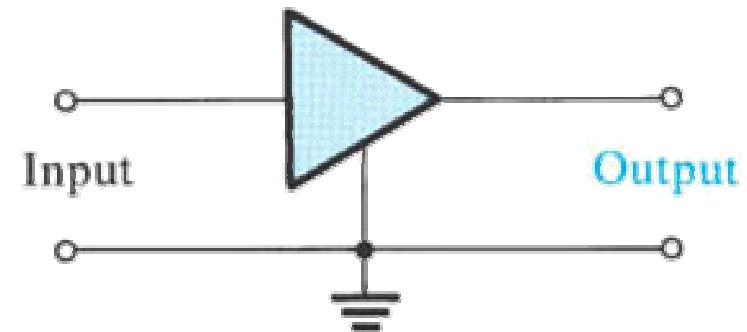
Συνεχές φάσμα (μετασχηματισμός Fourier)  
για απεριοδικό σήμα συνεχούς χρόνου

Φάσμα συχνοτήτων αυθαίρετης κυματομορφής

# Ενισχυτές



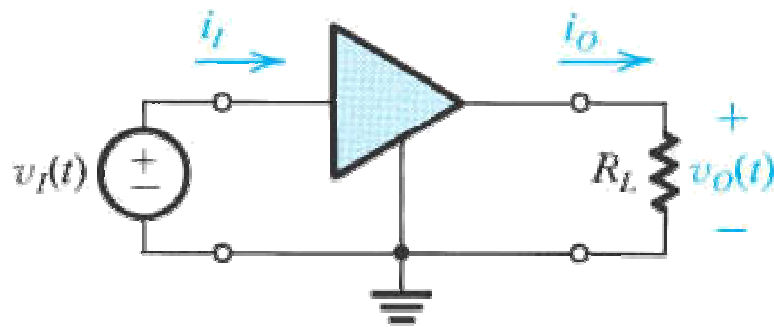
Κυκλωματικό σύμβολο ενισχυτή



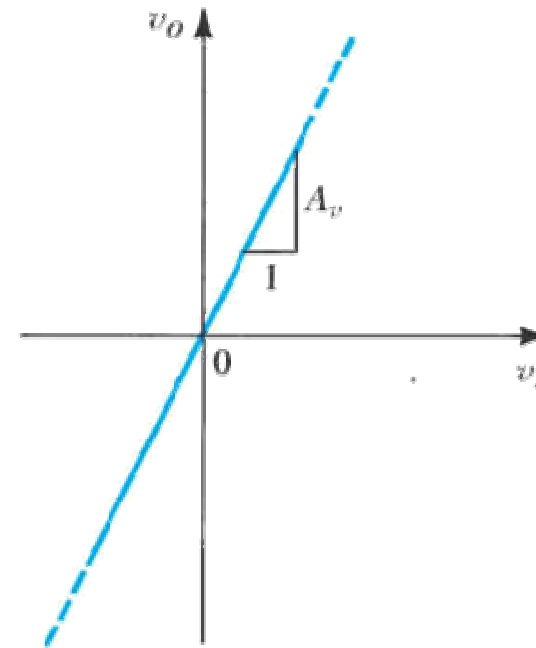
Ενισχυτής με κοινό ακροδέκτη (γη) μεταξύ εισόδου και εξόδου

Γραμμικός ενισχυτής τάσης :  $v_o(t) = A_v v_i(t)$   
 $A_v$  : κέρδος (gain) τάσης ενισχυτή

# ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ



Ενισχυτής τάσης συνδεδεμένος σε αντίσταση φορτίου  $R_L$  (π.χ. τυπική αντίσταση ηχείων  $R_L = 4\Omega$  ή  $8\Omega$  ή  $16\Omega$ )



Χαρακτηριστική μεταφοράς γραμμικού ενισχυτή με κέρδος τάσης  $A_v$

# Κέρδος ενισχυτή

Κέρδος τάσης:  $A_v = v_o / v_i$   
σε decibel (dB):  $20\log|A_v|$

Κέρδος ρεύματος:  $A_i = i_o / i_i$   
σε decibel (dB):  $20\log|A_i|$

Κέρδος ισχύος:  $A_p = \text{ισχύς φορτίου} / \text{ισχύς εισόδου}$   
 $A_p = P_L / P_I = v_o i_o / v_i i_i = A_v A_i$   
σε decibel (dB):  $10\log A_p$

# Κέρδος ενισχυτή

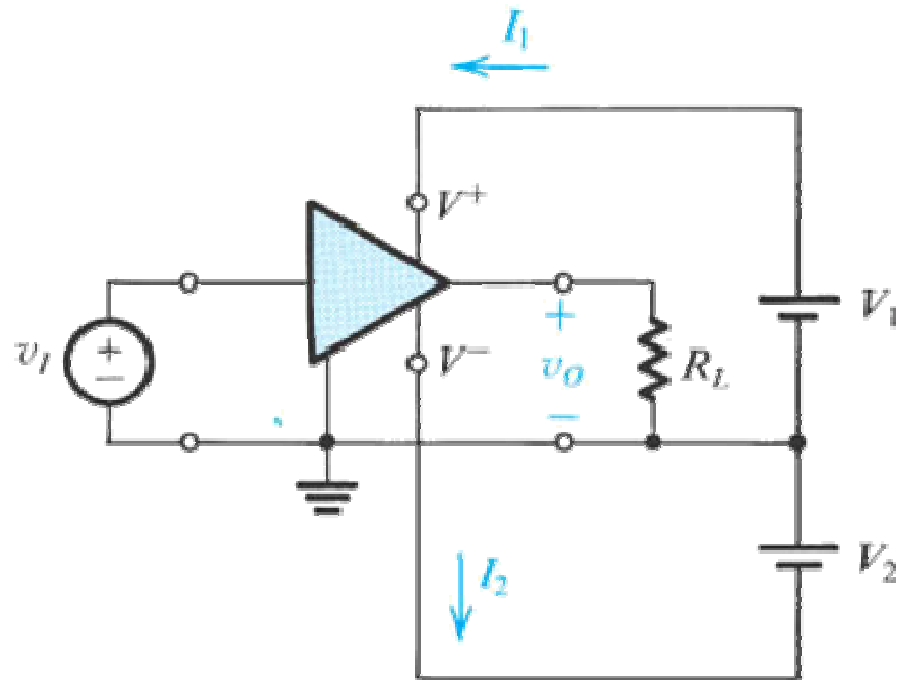
Το κέρδος τάσης ή το κέρδος ρεύματος μπορεί να είναι αρνητικό ( $A_v < 0$  ή  $A_i < 0$ ) λόγω διαφοράς φάσης  $180^\circ$  μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου

Εξασθένηση (ή απόσβεση) έχουμε όταν  $|A_v| < 1$  ή  $|A_i| < 1$

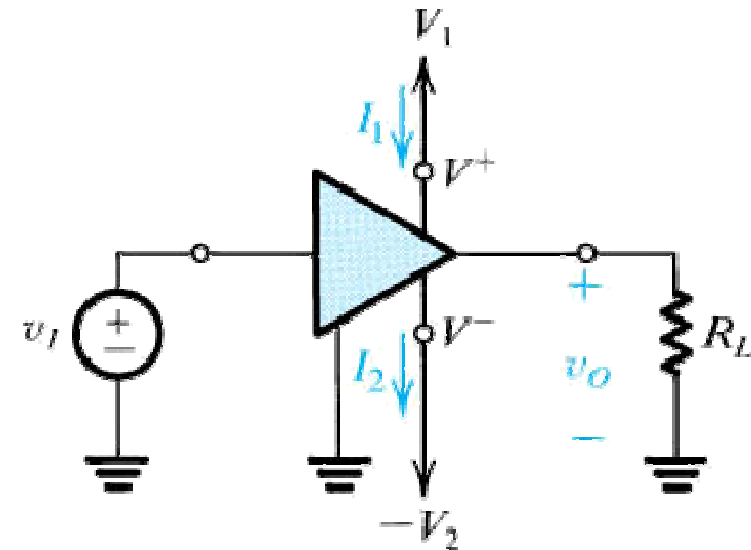
$\Rightarrow$  όταν κέρδος σε dB είναι  $> 0$  έχουμε ενίσχυση και όταν είναι  $< 0$  έχουμε απόσβεση

# Τροφοδοσία ενισχυτή

Απαιτείται τροφοδοσία για την παροχή κέρδους ισχύος στο φορτίο



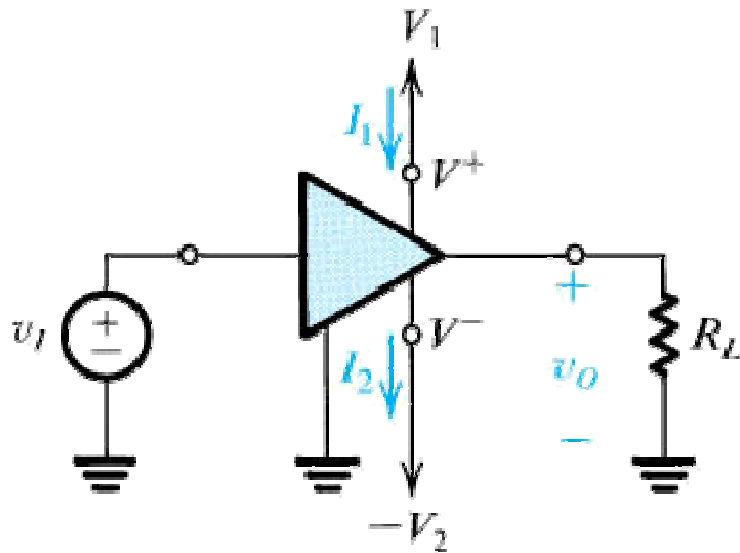
Ενισχυτής με δύο τροφοδοσίες συνεχούς (dc) αντίθετης πολικότητας



Απλοποιημένο σχήμα



# Τροφοδοσία ενισχυτή

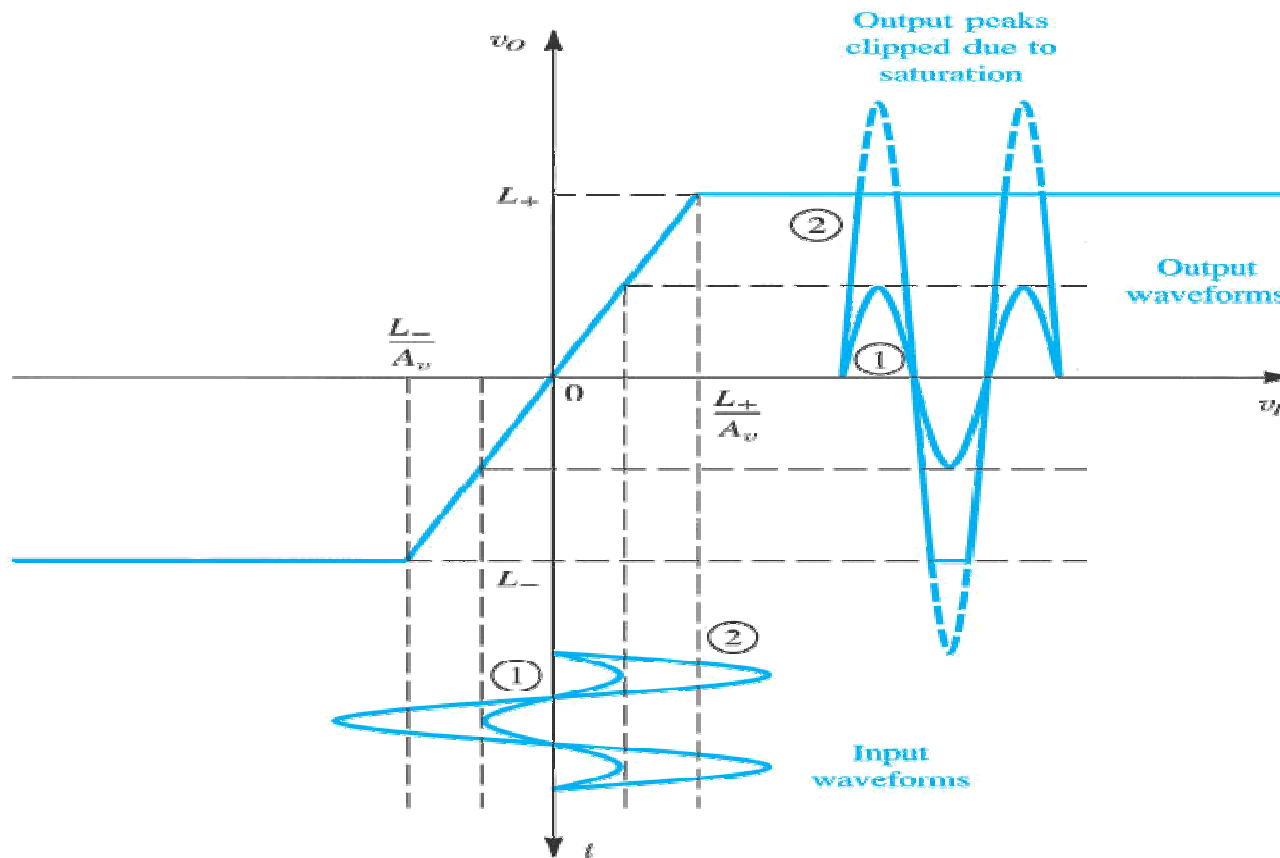


- Ισχύς τροφοδοσίας:  
 $P_{dc} = V_1 I_1 + V_2 I_2$
- Ισχύς σήματος εισόδου:  
 $P_i = v_i i_i$  (συνήθως  $\ll P_{dc}$ )
- Ισχύς που καταναλώνεται στον ενισχυτή:  $P_{diss}$
- Ισχύς φορτίου:  
 $P_L = P_{dc} + P_i - P_{diss}$   
 $\approx P_{dc} - P_{diss}$
- Αποδοτικότητα ενισχυτή:  
 $\eta = (P_L / P_{dc}) \times 100$

# Παράδειγμα

Ενισχυτής με τροφοδοσίες  $V_1 = +10V$ ,  $V_2 = -10V$  και ημιτονοειδές σήμα εισόδου πλάτους  $V_a = 1V$ , παρέχει ημιτονοειδές σήμα εξόδου πλάτους  $V_a = 9V$  πάνω σε φορτίο  $R_L = 1k\Omega$ . Τα ρεύματα που αντλούνται από τις τροφοδοσίες είναι  $I_1 = I_2 = 9.5mA$ , ενώ το ρεύμα εισόδου είναι ημιτονοειδές με πλάτος  $I_a = 0.1mA$ . Να βρεθούν το κέρδος τάσης  $A_v$ , το ρεύμα εξόδου (φορτίου)  $i_o$ , το κέρδος ρεύματος  $A_i$ , η ισχύς εισόδου  $P_i$ , η ισχύς εξόδου  $P_o$ , το κέρδος ισχύος  $A_p$ , η ισχύς τροφοδοσίας  $P_{dc}$ , η ισχύς κατανάλωσης  $P_{diss}$ , και η αποδοτικότητα του ενισχυτή  $\eta\%$ .

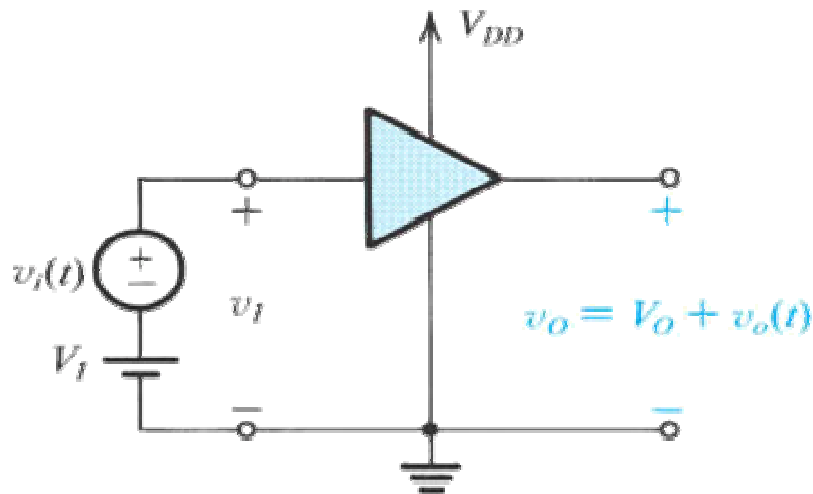
# Κορεσμός ενισχυτή



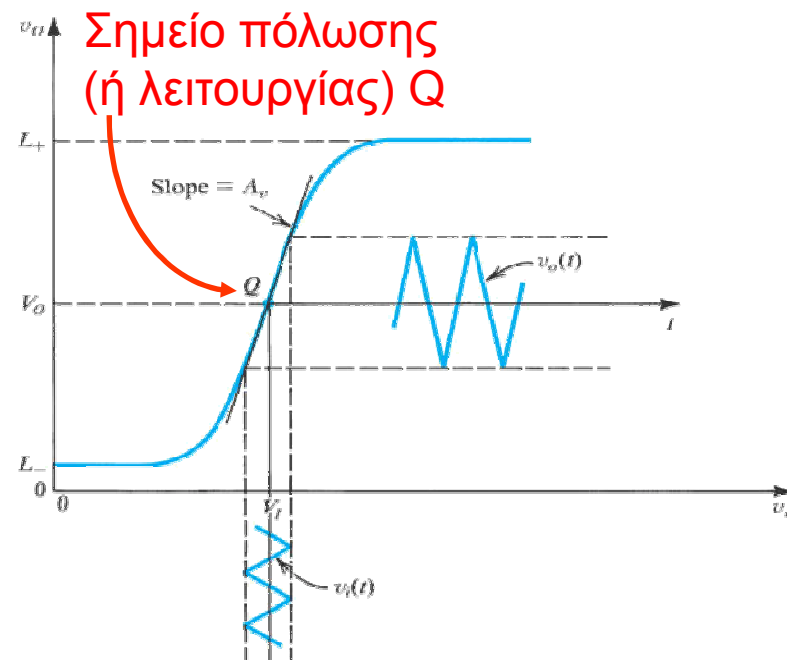
Οι τάσεις κορεσμού εξόδου  $L_+$  και  $L_-$  είναι ίσες ή μικρότερες (κατ' απόλυτη τιμή) από τις τάσεις τροφοδοσίας  $V_1$  και  $V_2$

# Πόλωση ενισχυτή

Απαραίτητη σε ενισχυτές που λειτουργούν με μία τροφοδοσία  $V_{DD}$  (όπως οι ενισχυτές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων)



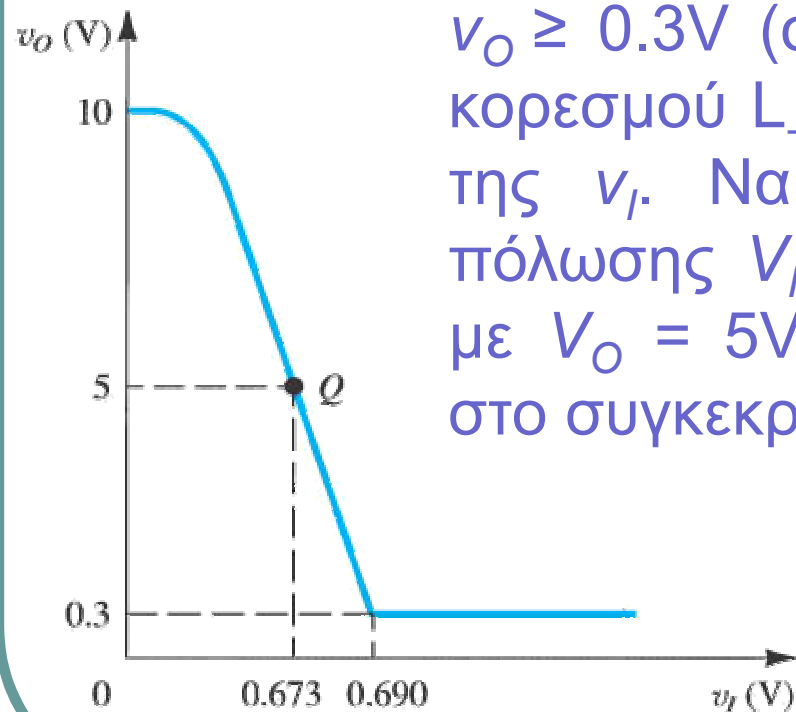
Τάση πόλωσης (dc) εισόδου:  $V_I$   
Ασθενές σήμα εισόδου:  $v_i(t)$   
Συνολικό σήμα εισόδου:  
 $v_I(t) = V_I + v_i(t)$



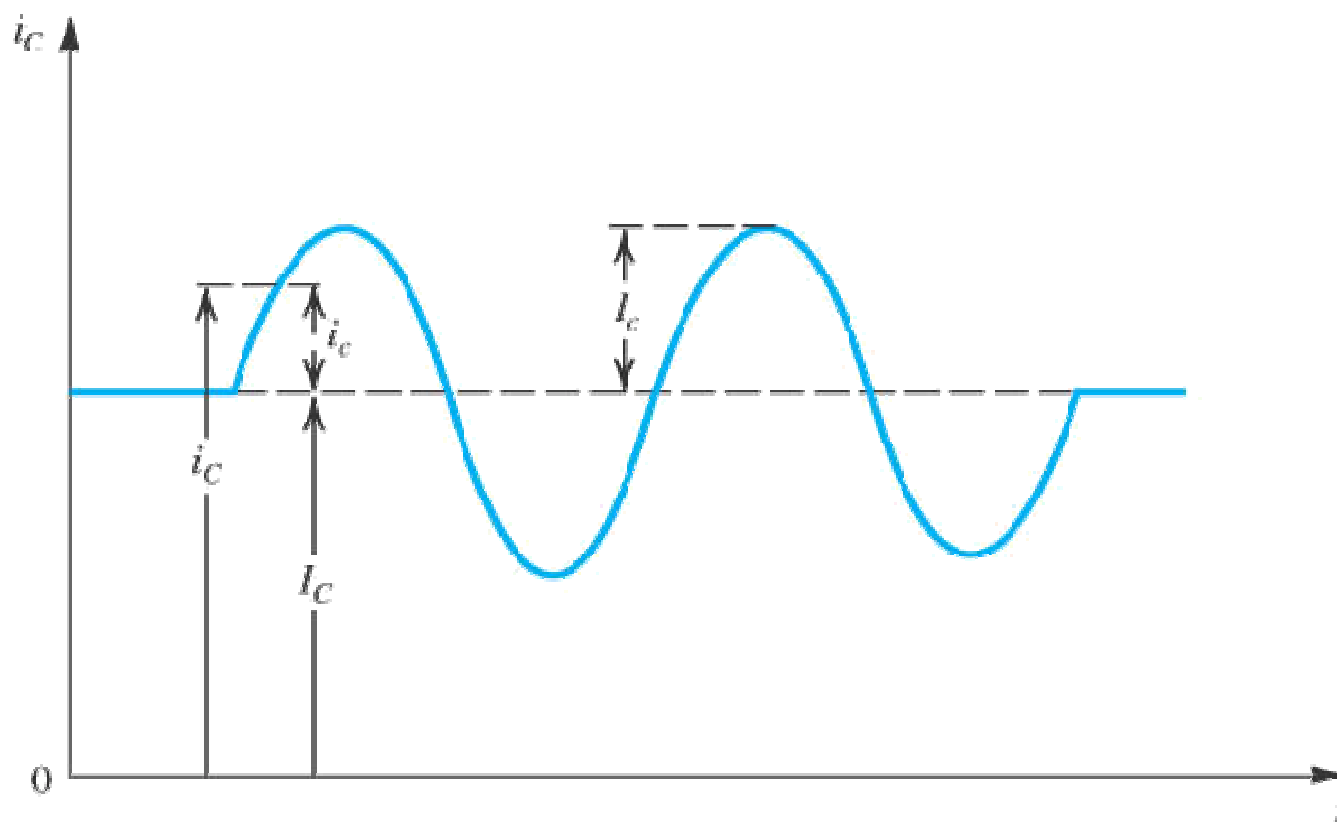
Συνολικό σήμα εξόδου:  
 $v_O(t) = V_O + v_o(t) = V_O + A_v v_i(t)$   
όπου  $A_v = dv_O / dv_I @Q$

# Παράδειγμα

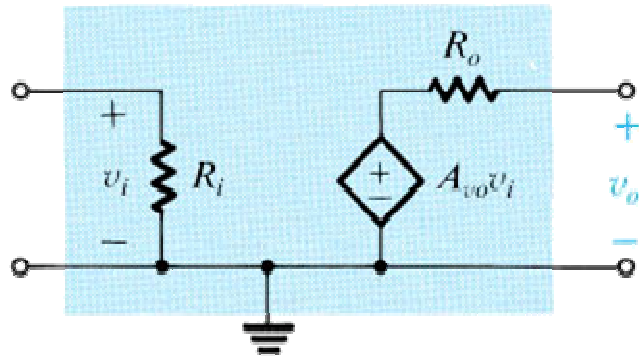
Ενισχυτής έχει χαρακτηριστική μεταφοράς  $v_o = 10 - 10^{-11}e^{40v_i}$  για  $v_i \geq 0V$ , και μέχρι  $v_o \geq 0.3V$  (σχήμα). Να βρεθούν οι τάσεις κορεσμού  $L_-$  και  $L_+$  και οι αντίστοιχες τιμές της  $v_i$ . Να βρεθεί επίσης η dc τάση πόλωσης  $V_i$  που δίνει σημείο λειτουργίας με  $V_o = 5V$ , καθώς και το κέρδος τάσης στο συγκεκριμένο σημείο.



# Συμβάσεις συμβολισμών



# Κυκλωματικά μοντέλα ενισχυτών

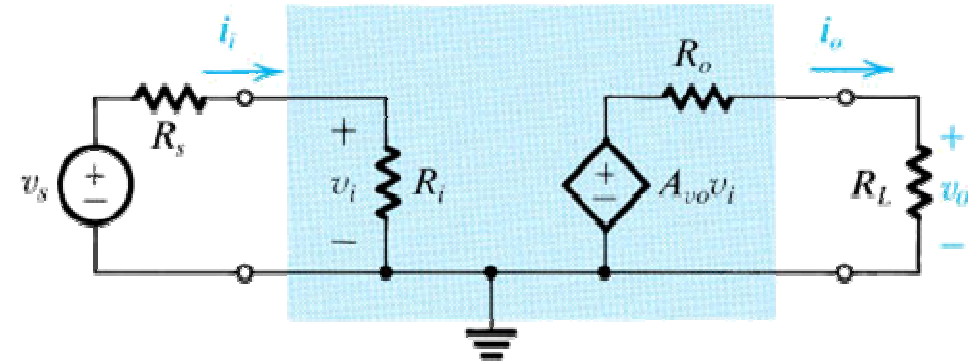


Κυκλωματικό μοντέλο ενισχυτή τάσης

$R_i$  : αντίσταση εισόδου

$R_o$  : αντίσταση εξόδου

$A_{vo}$  : κέρδος τάσης ανοικτού κυκλώματος (χωρίς φορτίο)



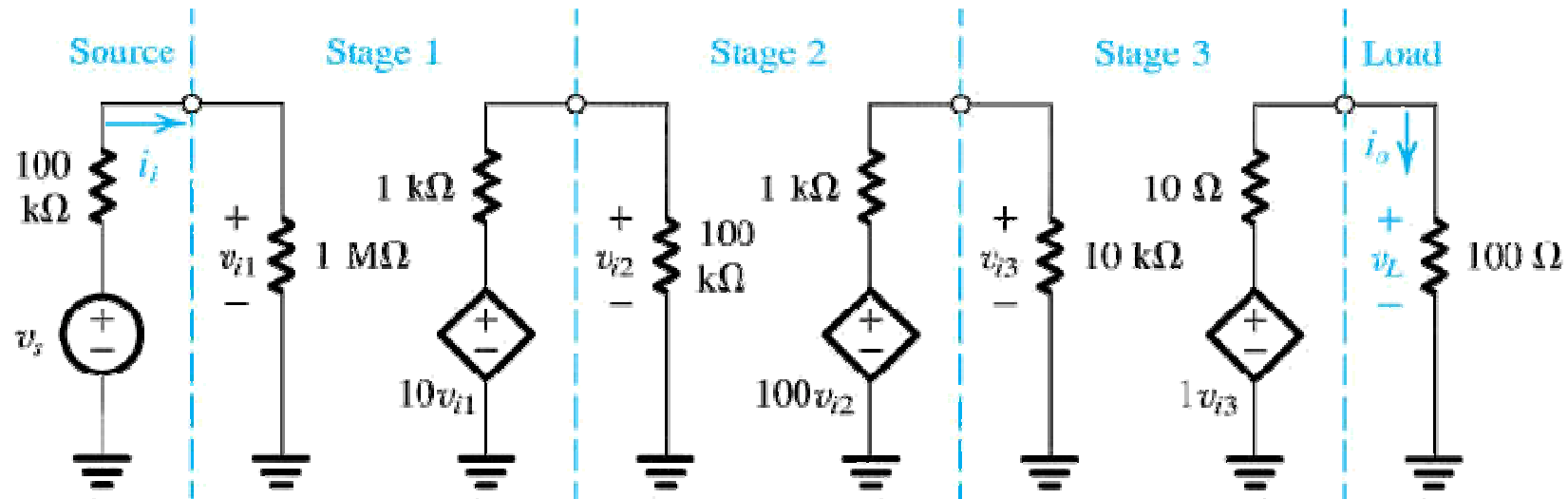
Ενισχυτής τάσης με πηγή σήματος (εσωτ. αντίστασης  $R_s$ ) και φορτίο  $R_L$

Συνολικό κέρδος τάσης:

$$\frac{v_o}{v_s} = A_{vo} \frac{v_o}{A_{vo} v_i} \frac{v_i}{v_s} = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o} \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

Για να μην υπάρξει απώλεια κέρδους από τη σύνδεση του ενισχυτή με την πηγή σήματος και το φορτίο θα πρέπει  $R_i \gg R_s$  και  $R_o \ll R_L$

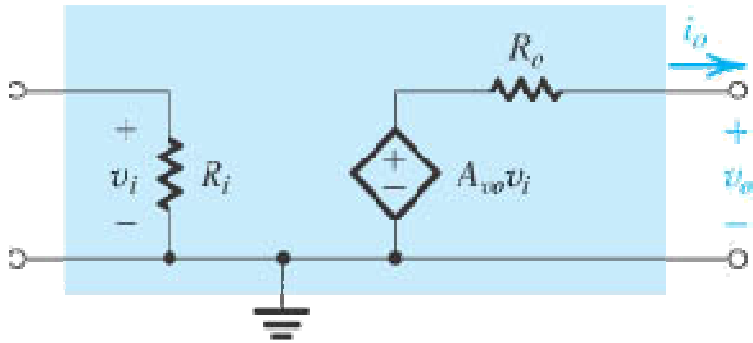
# Παράδειγμα



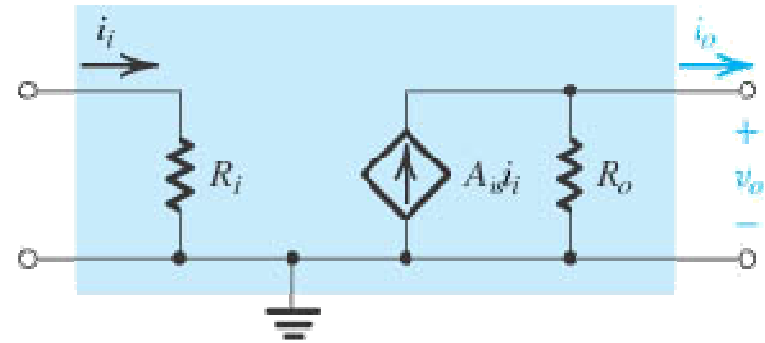
Ενισχυτής τριών σταδίων. Το πρώτο στάδιο (στάδιο εισόδου) έχει υψηλή αντίσταση εισόδου ( $1\text{M}\Omega$ ). Το δεύτερο στάδιο έχει μεγάλο κέρδος (100). Το τρίτο στάδιο (στάδιο εξόδου) έχει μικρή αντίσταση εξόδου ( $10\Omega$ ). Να υπολογιστεί το συνολικό κέρδος τάσης, το κέρδος ρεύματος και το κέρδος ισχύος.



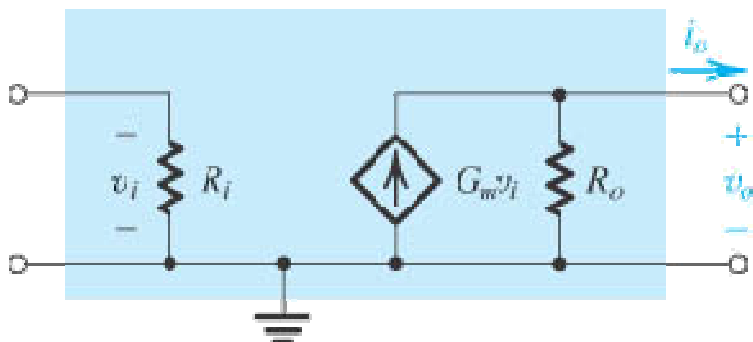
# Τύποι ενισχυτών



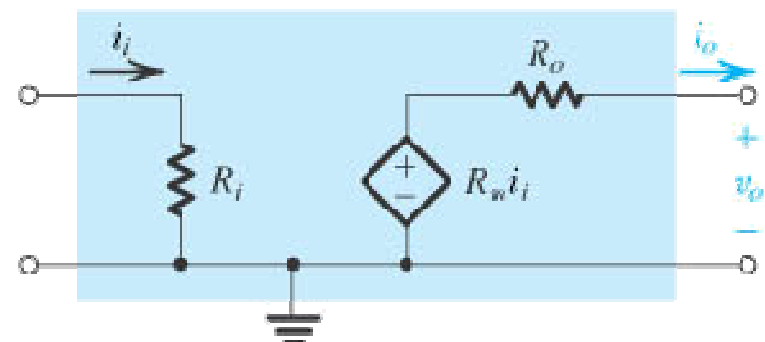
Ενισχυτής τάσης



Ενισχυτής ρεύματος



Ενισχυτής διαγωγιμότητας  
(trans-conductance)



Ενισχυτής διαντίστασης  
(trans-resistance)

# Τύποι ενισχυτών

## Ενισχυτής τάσης

Κέρδος τάσης ανοικτού κυκλώματος:  $A_{vo} = v_o / v_i$  για  $i_o = 0$

Επιθυμητά χαρακτηριστικά:  $R_i \gg (\rightarrow \infty)$ ,  $R_o \ll (\rightarrow 0)$

## Ενισχυτής ρεύματος

Κέρδος ρεύματος βραχυκύκλωσης:  $A_{is} = i_o / i_i$  για  $v_o = 0$

Επιθυμητά χαρακτηριστικά:  $R_i \ll (\rightarrow 0)$ ,  $R_o \gg (\rightarrow \infty)$

## Ενισχυτής διαγωγιμότητας

Διαγωγιμότητα βραχυκύκλωσης:  $G_m = i_o / v_i$  για  $v_o = 0$

Επιθυμητά χαρακτηριστικά:  $R_i \gg (\rightarrow \infty)$ ,  $R_o \gg (\rightarrow \infty)$

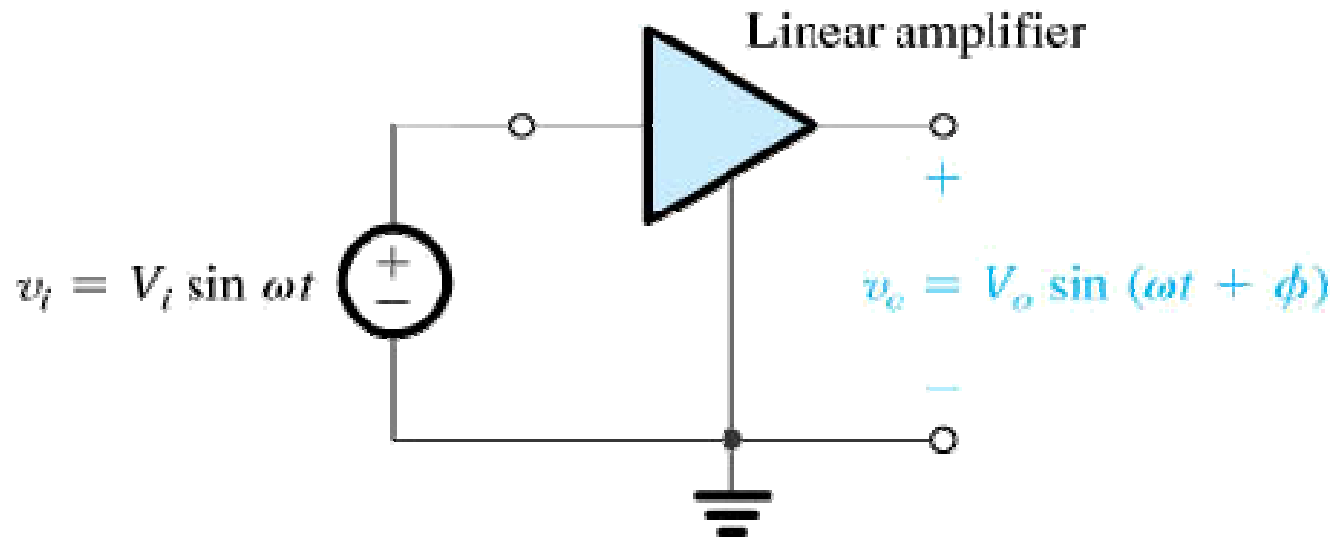
## Ενισχυτής διαντίστασης

Διαντίσταση ανοικτού κυκλώματος:  $R_m = v_o / i_i$  για  $i_o = 0$

Επιθυμητά χαρακτηριστικά:  $R_i \ll (\rightarrow 0)$ ,  $R_o \ll (\rightarrow 0)$

Σχέσεις μεταξύ παραμέτρων κέρδους:  $A_{vo} = A_{is}(R_o/R_i) = G_m R_o = R_m/R_i$

# Απόκριση συχνότητας ενισχυτή

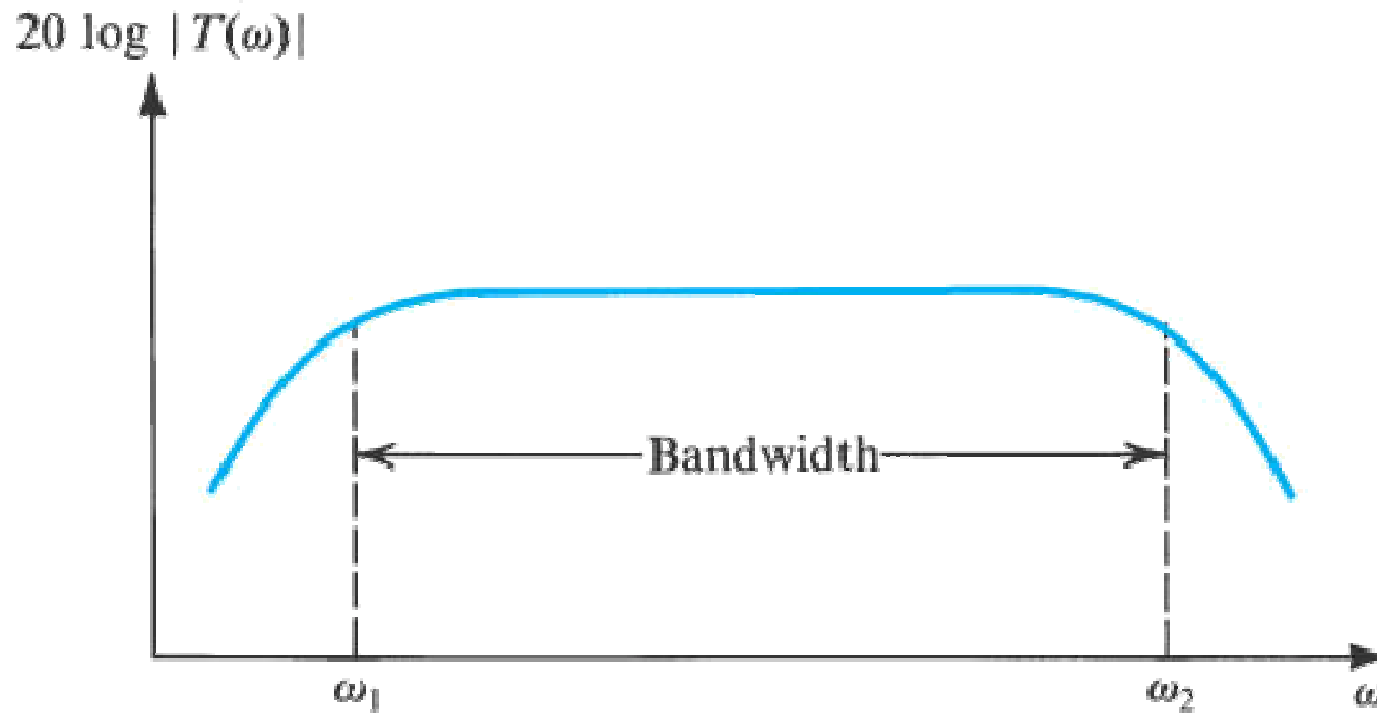


Πραγματικά μοντέλα γραμμικών ενισχυτών που περιλαμβάνουν στοιχεία χωρητικότητας  $C$  (κυρίως) και επαγωγής  $L$ , παρουσιάζουν διαφορετικό κέρδος  $v_o / v_i$  αλλά και μετατόπιση φάσης  $\phi$  σε σήματα διαφορετικών συχνοτήτων  $\omega$ .

# Απόκριση συχνότητας ενισχυτή

- Ημιτονοειδές σήμα σε μιγαδική έκφραση:  $v_i(j\omega) = V_i e^{j\omega t}$
- Σύνθετη (μιγαδική) αντίσταση χωρητικότητας:  $1 / j\omega C$   
Σύνθετη (μιγαδική) αντίσταση επαγωγής:  $j\omega L$
- Συνάρτηση μεταφοράς: κέρδος  $T(\omega) = v_o(j\omega) / v_i(j\omega)$  σε μιγαδικό ημιτονοειδές, ως συνάρτηση της συχνότητας  $\omega$
- Η  $T(\omega)$  είναι μιγαδική συνάρτηση με πολική έκφραση:  
$$T(\omega) = |T(\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$$
- Σήμα εξόδου:  $v_o = \text{Im}[ |T(\omega)| e^{j\varphi(\omega)} V_i e^{j\omega t} ]$   
$$= \text{Im}[ |T(\omega)| V_i e^{j(\omega t + \varphi(\omega))} ] = |T(\omega)| V_i \sin(\omega t + \varphi(\omega))$$
- Απόκριση πλάτους ενισχυτή (σε dB):  $20 \log |T(\omega)|$   
Απόκριση φάσης ενισχυτή:  $\varphi(\omega)$   
(διαγράμματα Bode)

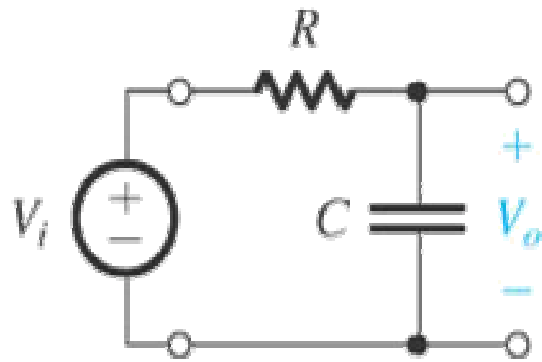
# Εύρος ζώνης ενισχυτή



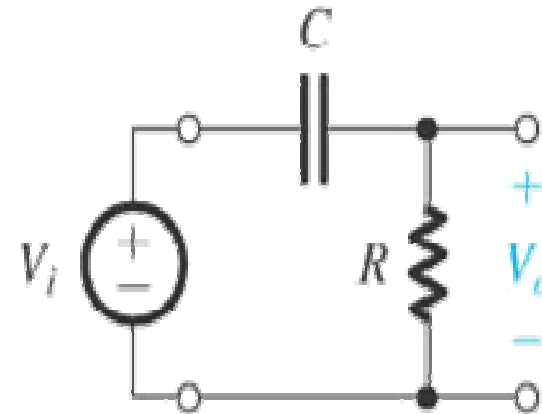
Περιοχή συχνοτήτων  $[\omega_1, \omega_2]$  όπου η απόκριση πλάτους  $20 \log |T(\omega)|$  της συνάρτησης μεταφοράς του ενισχυτή είναι σχεδόν σταθερή (με μέγιστη διακύμανση 3dB)

# Δίκτυα μιας σταθεράς χρόνου

- Δίκτυα μιας σταθεράς χρόνου  $\tau$  (single-time-constant ή STC): δίκτυα που αποτελούνται από - ή μπορούν να αναχθούν σε - μια αντίσταση και ένα στοιχείο χωρητικότητας ή επαγωγής
- Δίκτυο STC βαθυπερατού τύπου:  $T(\omega) = K / (1 + j(\omega/\omega_0))$ ,  $\omega_0 = 1/\tau$
- Δίκτυο STC υψιπερατού τύπου:  $T(\omega) = K / (1 - j(\omega_0/\omega))$ ,  $\omega_0 = 1/\tau$

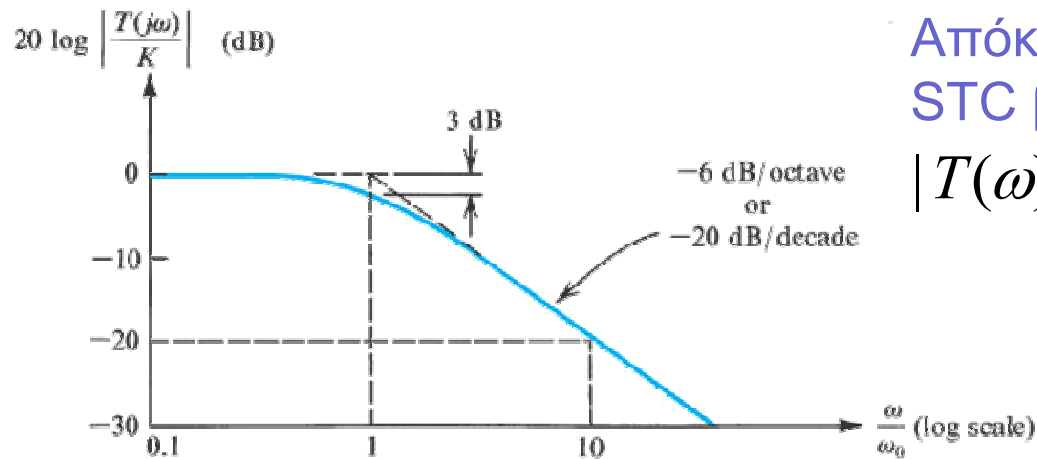


Παράδειγμα δικτύου STC  
βαθυπερατού τύπου



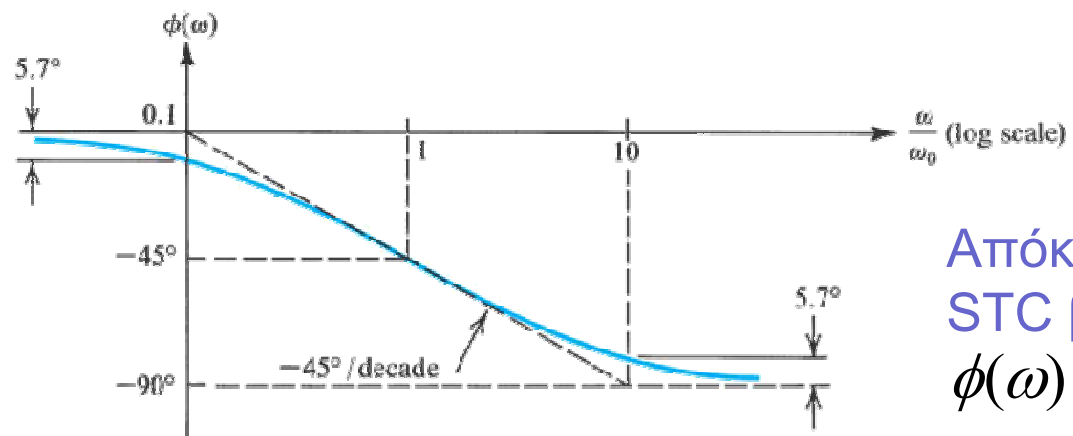
Παράδειγμα δικτύου STC  
υψιπερατού τύπου

# Δίκτυα μιας σταθεράς χρόνου



Απόκριση πλάτους δικτύου  
STC βαθυπερατού τύπου

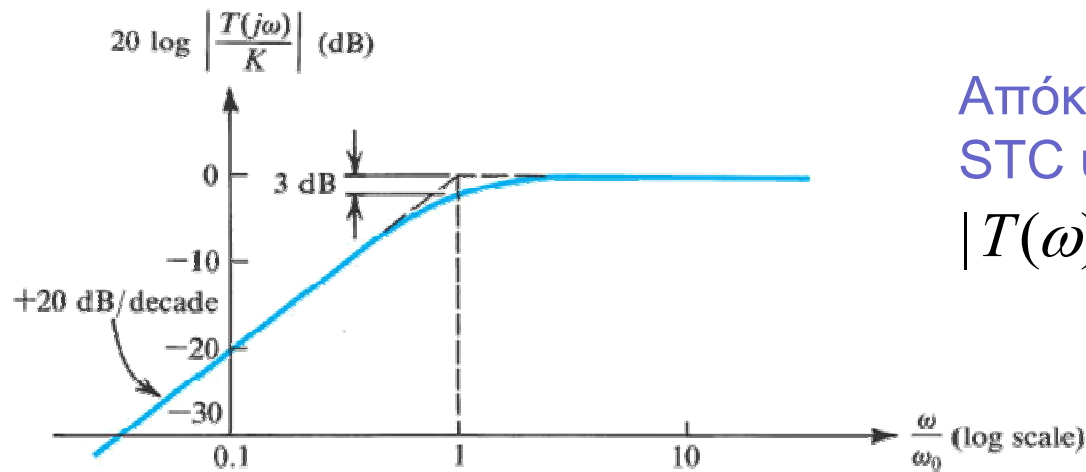
$$|T(\omega)| = |K| / \sqrt{1 + (\omega / \omega_0)^2}$$



Απόκριση φάσης δικτύου  
STC βαθυπερατού τύπου

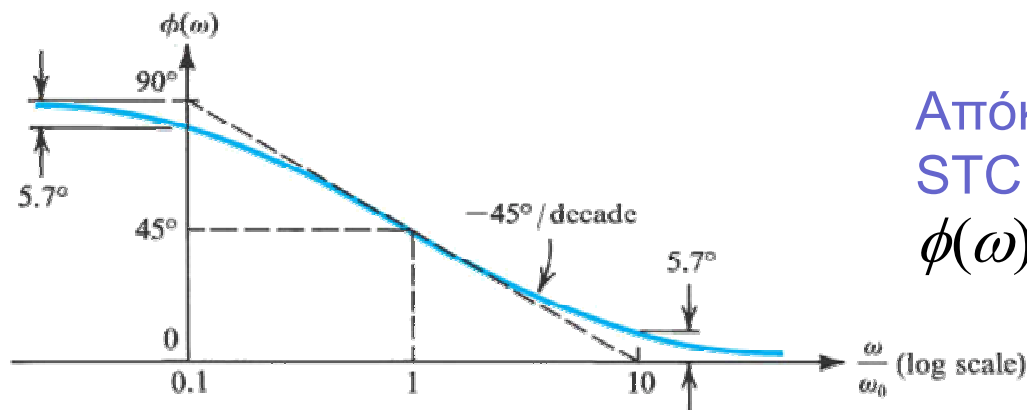
$$\phi(\omega) = -\tan^{-1}(\omega / \omega_0)$$

# Δίκτυα μιας σταθεράς χρόνου



Απόκριση πλάτους δικτύου  
STC υπιπερατού τύπου

$$|T(\omega)| = |K| / \sqrt{1 + (\omega_0 / \omega)^2}$$

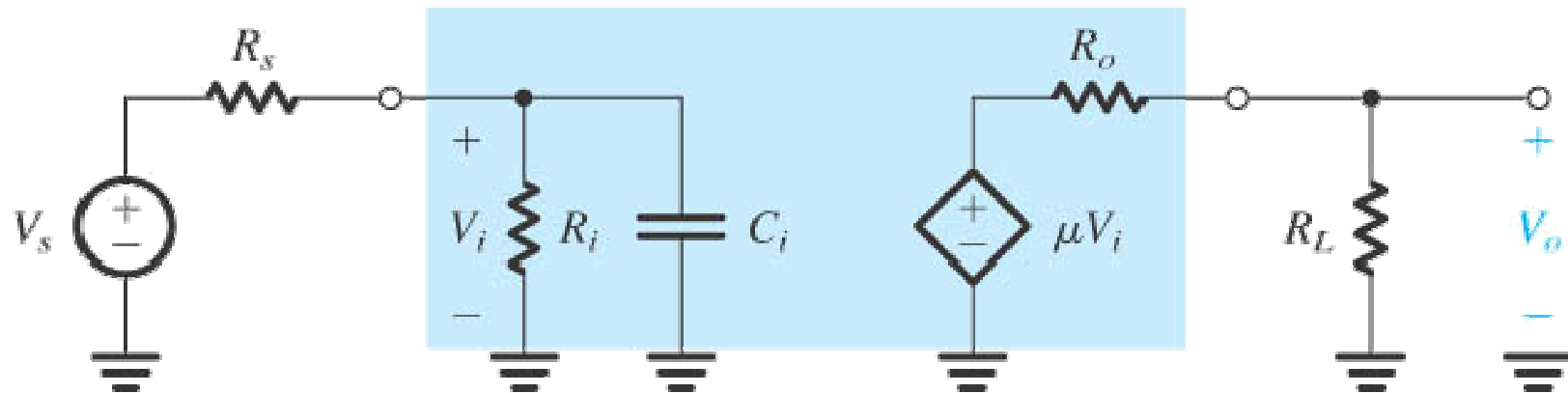


Απόκριση φάσης δικτύου  
STC υπιπερατού τύπου

$$\phi(\omega) = \tan^{-1}(\omega_0 / \omega)$$

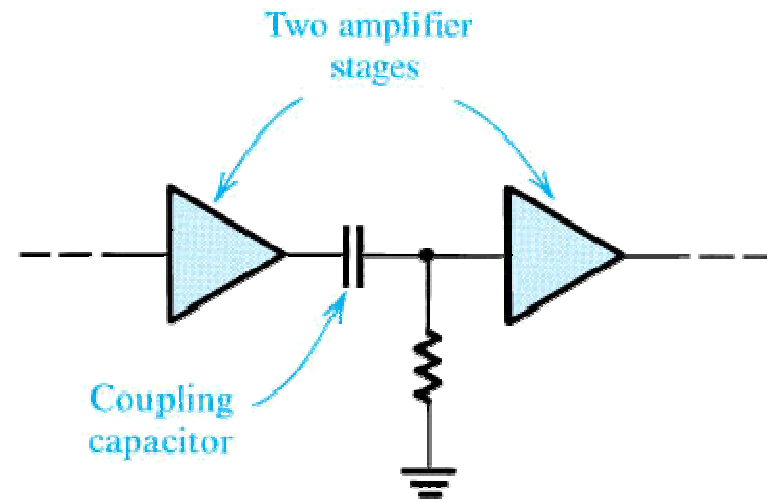
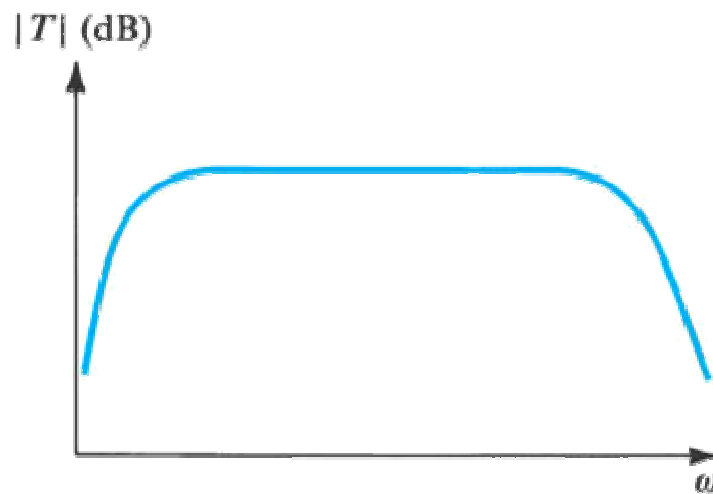


# Παράδειγμα



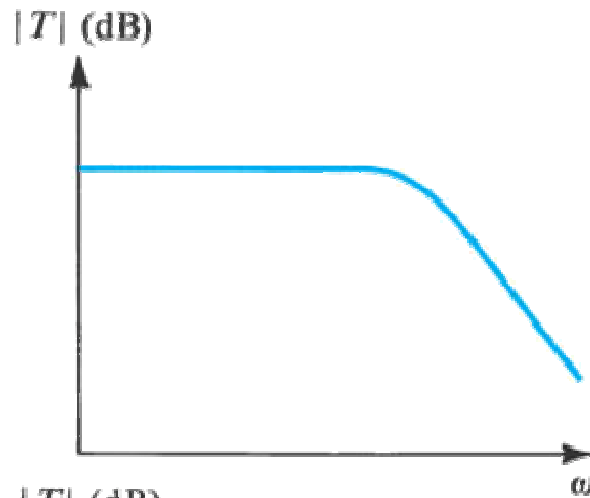
Ενισχυτής τάσης με χωρητικότητα εισόδου  $C_i$ . Να εκφραστεί το κέρδος τάσης  $v_o / v_s$  ως συνάρτηση της συχνότητας  $\omega$ , να δοθούν τα διαγράμματα Bode πλάτους/φάσης, και να βρεθεί η συχνότητα  $\omega_0$  (μείωσης κέρδους κατά 3dB). Αν το κέρδος dc (για  $\omega = 0$ ) είναι 40dB, να βρεθεί η συχνότητα 0dB (μοναδιαίου κέρδους). Να βρεθεί επίσης η έξοδος για ημιτονοειδείς εισόδους μοναδιαίου πλάτους και συχνοτήτων  $\omega_0/10000$ ,  $\omega_0/10$ ,  $\omega_0$ ,  $100\omega_0$ .

# Τυπικές αποκρίσεις συχνότητας

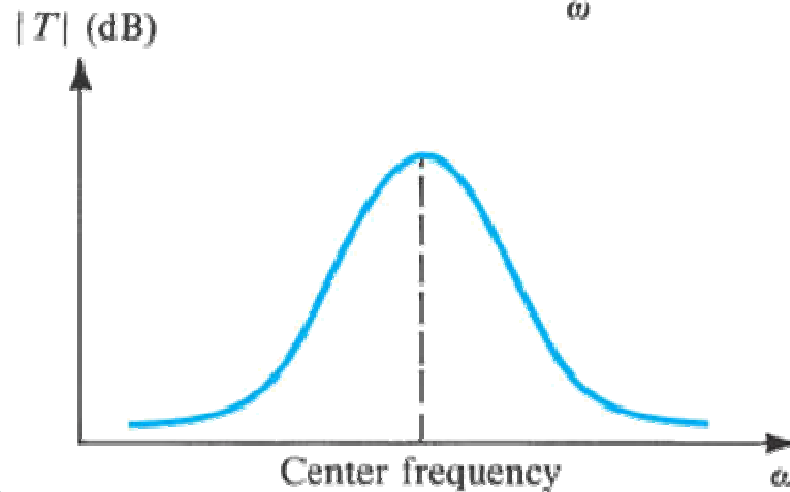


Ενισχυτής πολλών σταδίων χωρητικής σύζευξης ή ενισχυτής ac. Ταυτόχρονα βαθυπερατού τύπου (λόγω εσωτερικών χωρητικοτήτων) και υψιπερατού τύπου (λόγω χωρητικότητας σειράς μεταξύ σταδίων). Τυπική απόκριση ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων σε υλοποίηση διακριτών στοιχείων.

# Τυπικές αποκρίσεις συχνότητας



Ενισχυτής απευθείας σύζευξης  
ή ενισχυτής dc (βαθυπερατού τύπου).  
Τυπική απόκριση ακουστικού ενισχυτή  
σε ολοκληρωμένο κύκλωμα.



Συντονισμένος ενισχυτής.  
Τυπική απόκριση ενισχυτή  
επικοινωνιακού δέκτη (π.χ.  
ραδιοφωνικού/τηλεοπτικού).