

ΗΛΕΚΤΡΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

ΗΧΗΤΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ – ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Γιάννης Μουρτζόπουλος

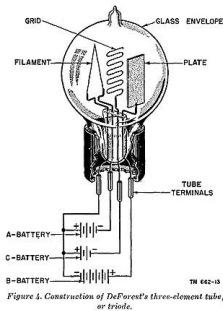


ΟΜΑΔΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΗΧΟΥ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

[**www.wcl.ece.upatras.gr/audiogroup/**](http://www.wcl.ece.upatras.gr/audiogroup/)

εισαγωγή

ενισχυτές - ιστορικά



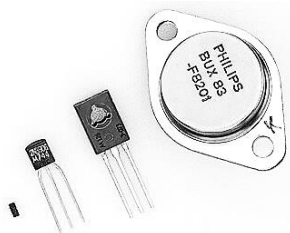
τριοδική λυχνία
John Fleming (1904)



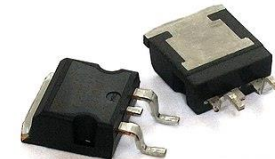
πρωτότυπο ενισχυτή
Lee De Forest (1914)



ημιαγωγοί στερεάς κατάστασης
«κρυσταλλοτρίοδοι»



Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής
Bipolar Junction Transistor (BJT)
Bell Labs (1947)



Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου
Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
(MOSFET), Bell Labs (1959)

ΤΥΠΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

επαγγελματικοί



με προενισχυτή-μίκτη –
(mixer amp)

οικιακοί



ολοκληρωμένος
(integrated amp)



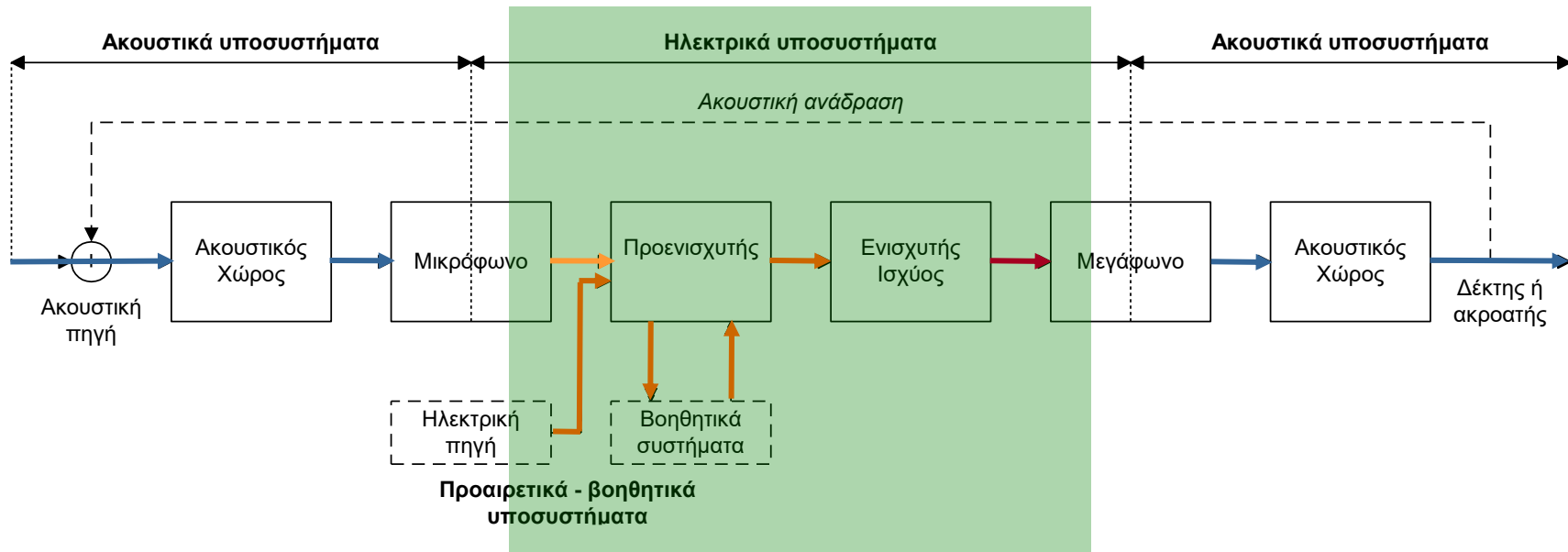
ισχύος (power amp)



ισχύος (power amp)

ηλεκτρικές στάθμες σήματος

ηλεκτρικές στάθμες στο ηχητικό σύστημα



—————> **μικροφωνικό σήμα** (mic ή και phono)
-80dBm έως -20dBm (77,5V σε 600Ω)

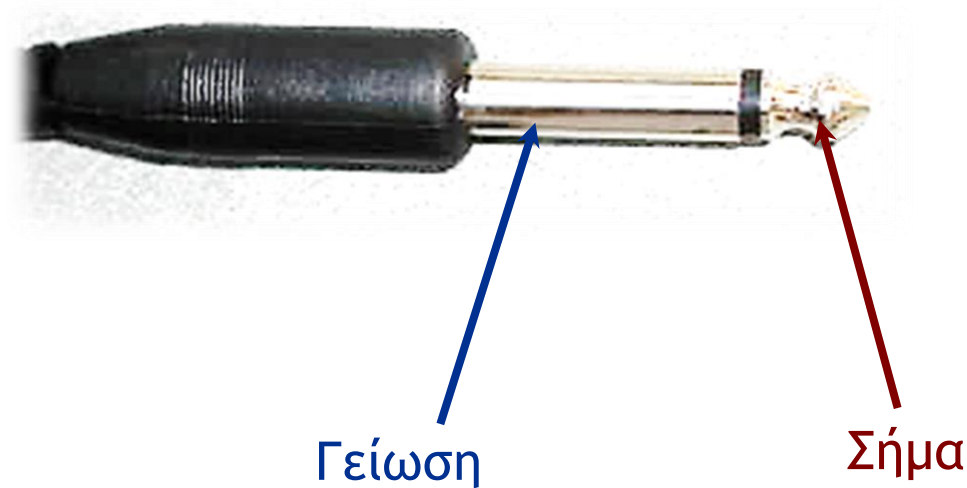
—————> **σήμα στάθμης γραμμής** (line)
-20dBm έως +30dBm (24,5V σε 600Ω)

—————> **σήμα στάθμης ισχύος** (power)
+30dBm έως ...

τύποι διασυνδετικών (στάθμη σήματος γραμμής)

Unbalanced (μη-ισορροπημένη διασύνδεση)

- Κατάλληλο για μικρά μήκη καλωδίων
- Μπορεί να εισέλθει θόρυβος
- Μετάφορα μονοφωνικών σημάτων



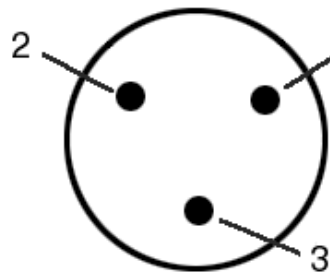
Τύποι διασυνδετικών (στάθμη σήματος γραμμής)

Balanced (ισορροπημένη διασύνδεση)

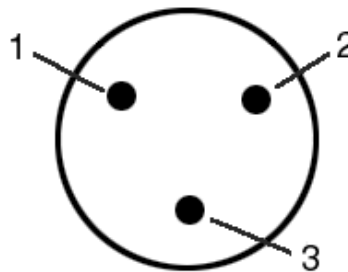
Θηλυκό
(είσοδος)



Αρσενικό
(έξοδος)



*XLR3 Female
(on Cable)*



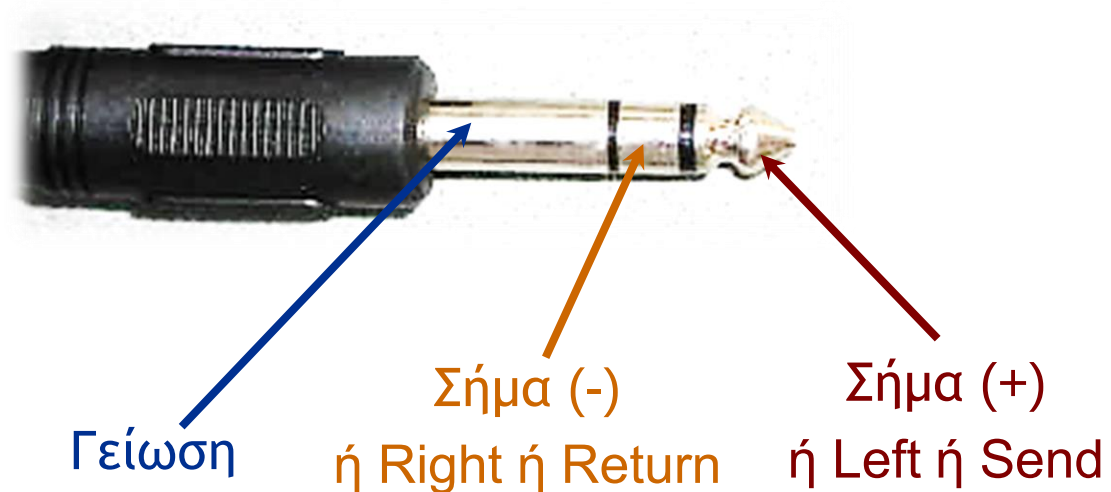
*XLR3 Male
(on Cable)*

Pin	Λειτουργία
1	Γείωση
2	Σήμα (+)
3	Σήμα (-)

τύποι διασυνδετικών (στάθμη σήματος γραμμής)

Balanced (ισορροπημένη διασύνδεση)

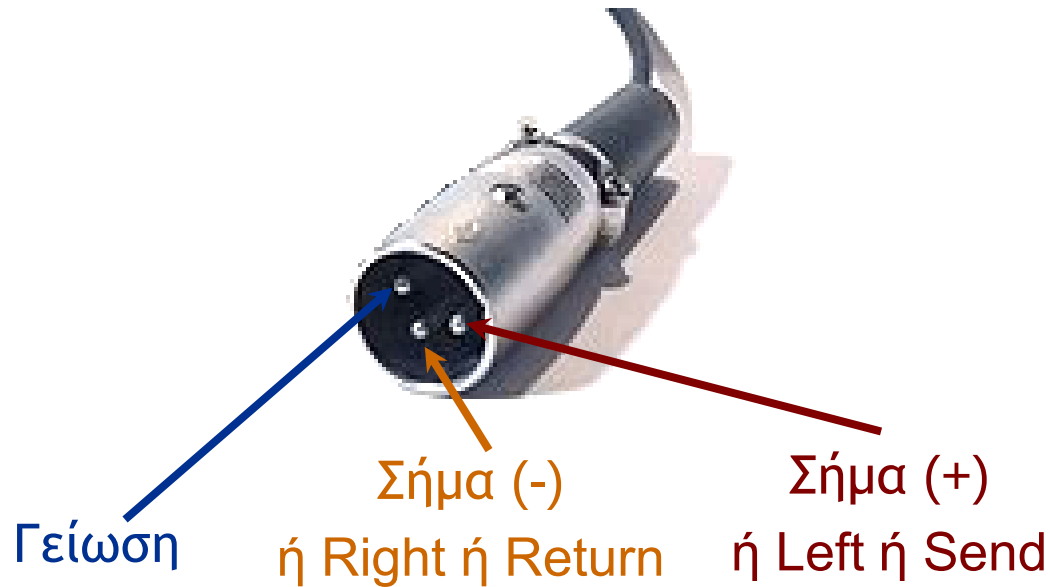
- Κατάλληλο για μεγάλα μήκη καλωδίων
- Απόρριψη θορύβου
- Μεταφορά στερεοφωνικών σημάτων
- Διασύνδεση εξωτερικών επεξεργαστών



τύποι διασυνδετικών (στάθμη σήματος γραμμής)

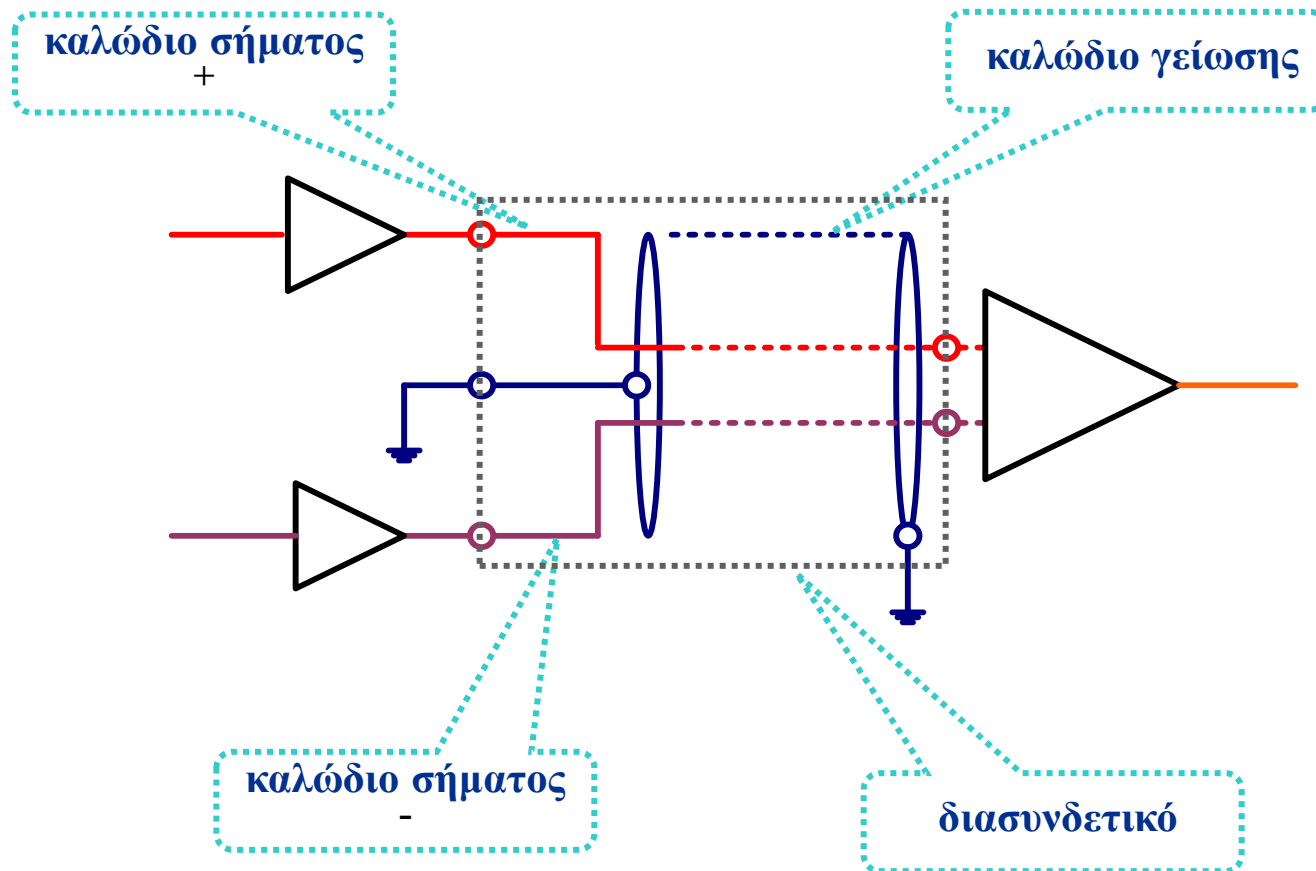
Balanced (ισορροπημένη διασύνδεση)

- Κατάλληλο για μεγάλα μήκη καλωδίων
- Απόρριψη θορύβου
- Μεταφορά στερεοφωνικών σημάτων
- Διασύνδεση εξωτερικών επεξεργαστών



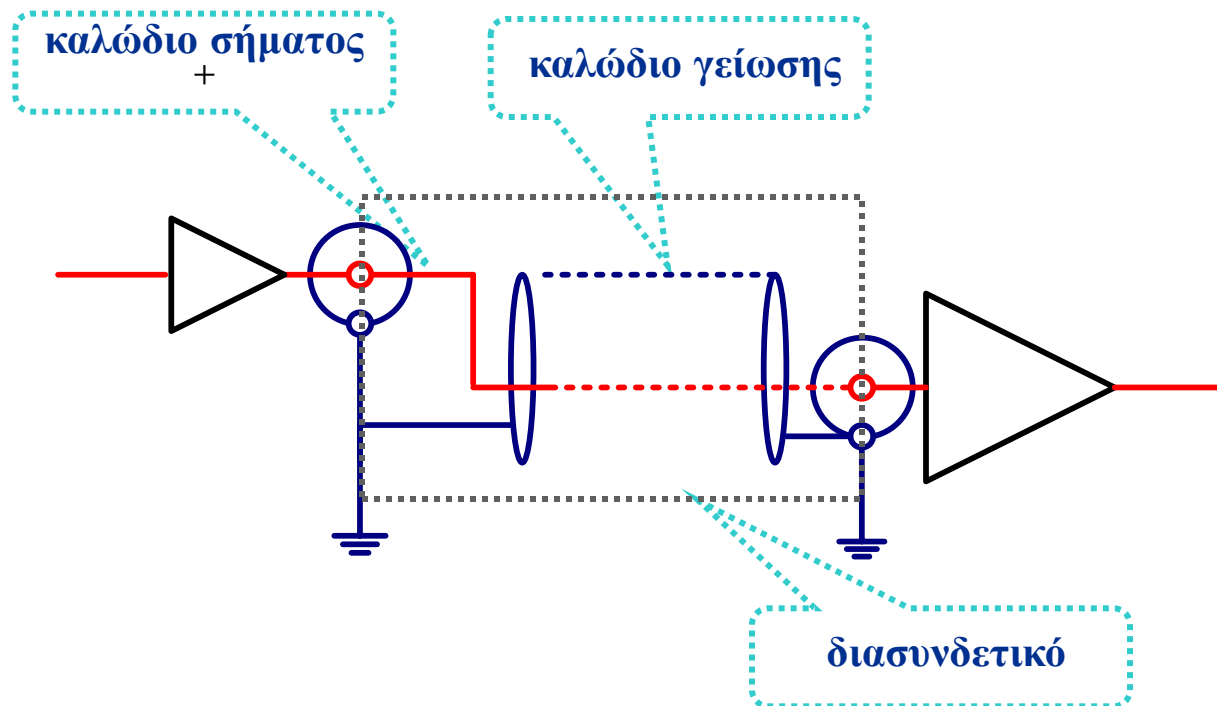
τύποι διασυνδετικών (στάθμη σήματος γραμμής)

Σύνδεση **Balanced**

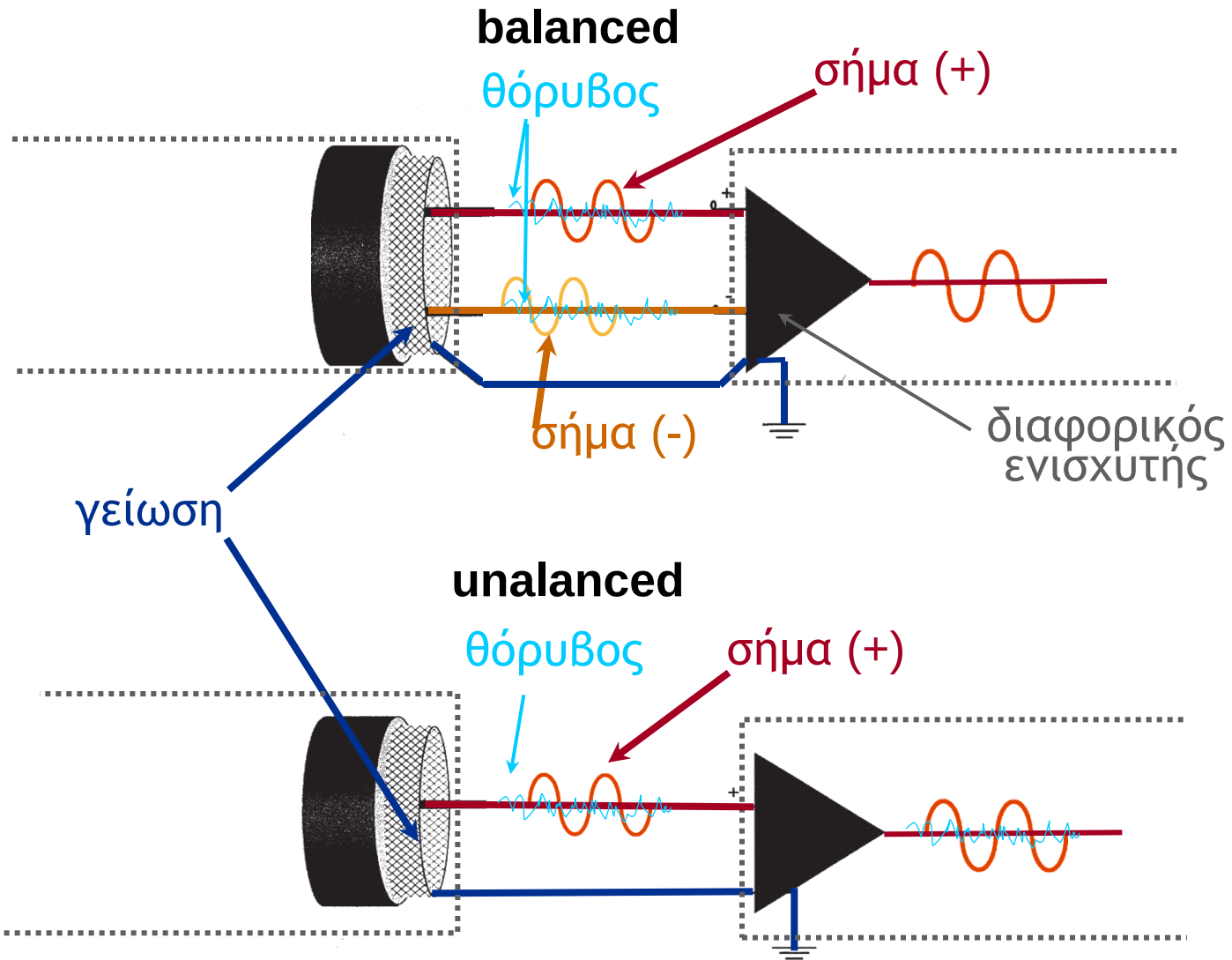


τύποι διασυνδετικών (στάθμη σήματος γραμμής)

Σύνδεση Unbalanced



τύποι διασυνδετικών (στάθμη σήματος γραμμής)



τύποι διασυνδετικών (στάθμη σήματος γραμμής)



TRS (jack)



RCA

τύποι διασυνδετικών (στάθμη σήματος γραμμής)

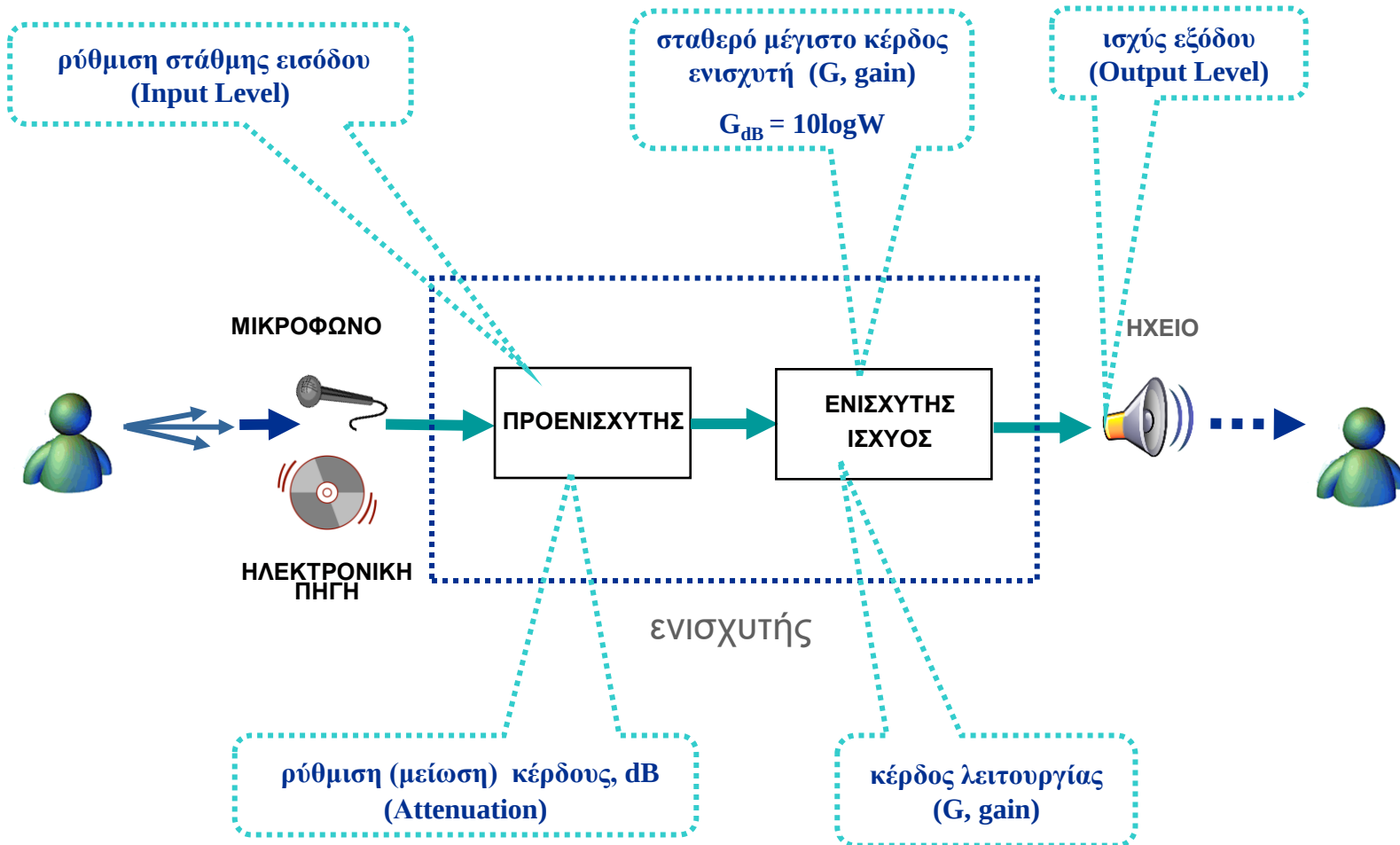


XLR

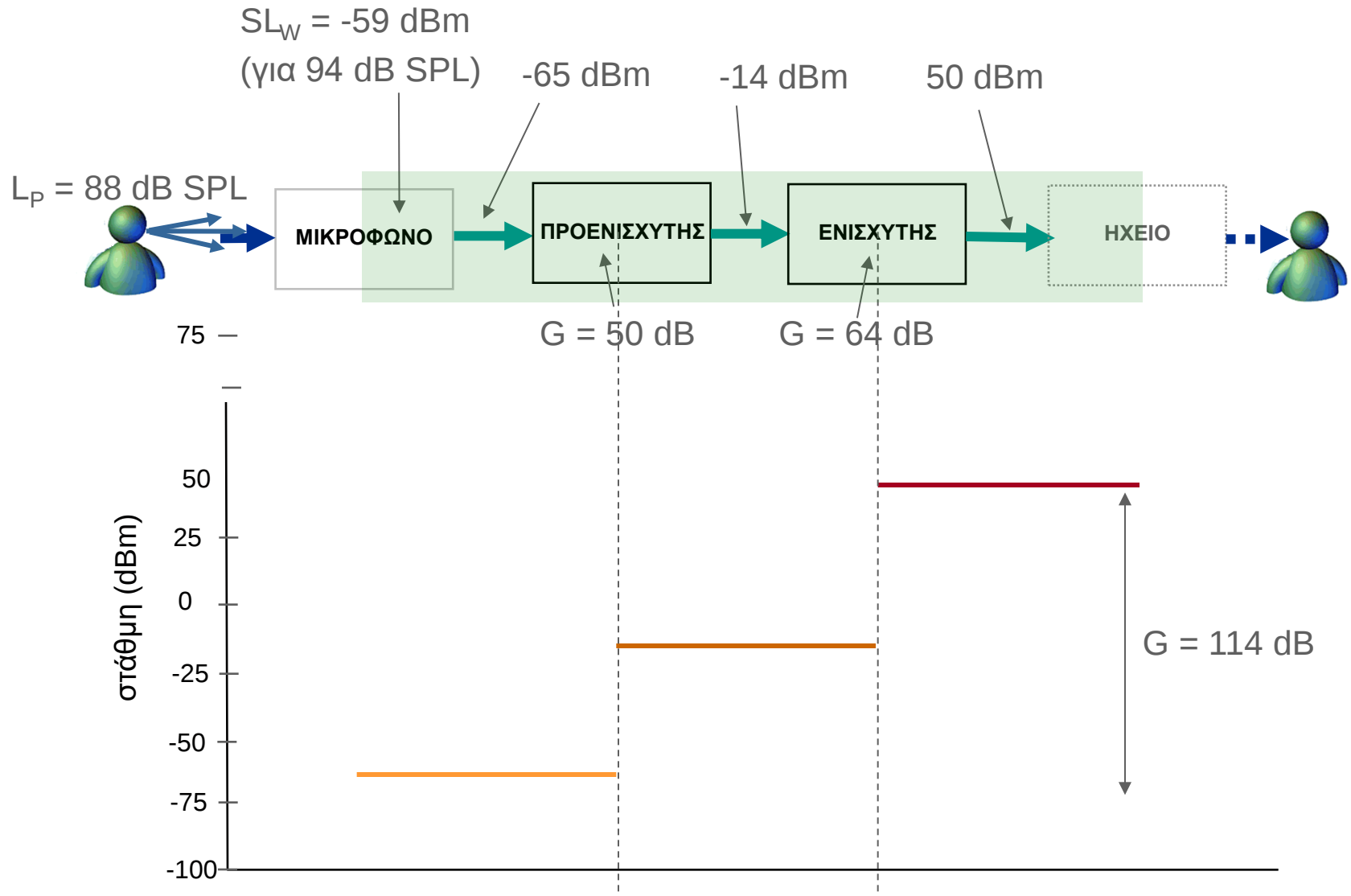


speakon

στάδια ενίσχυσης



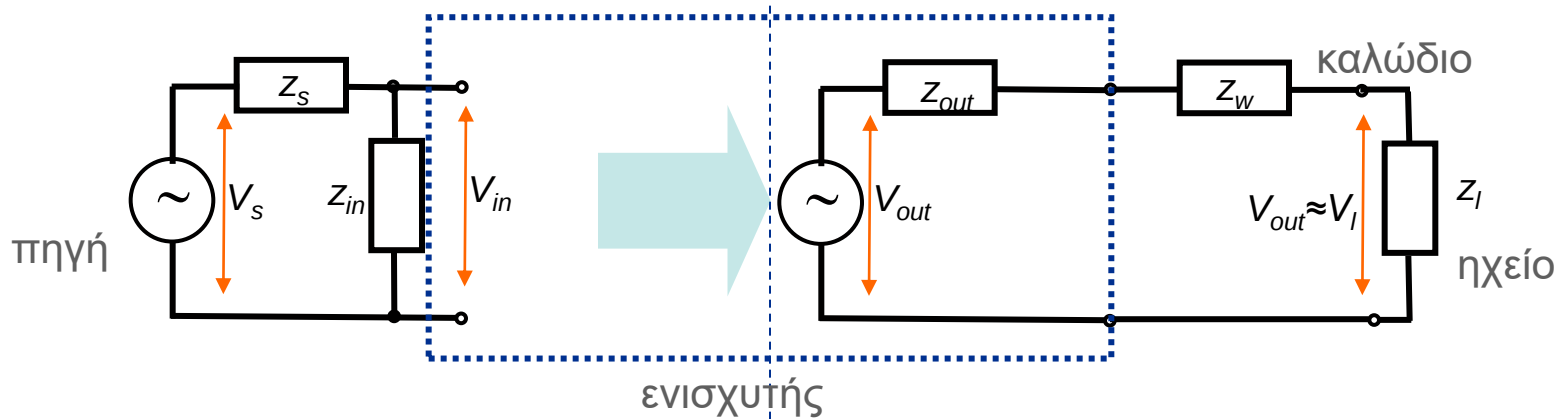
στάθμες ενίσχυσης



ηλεκτρικό κέρδος

$$V_{in} = V_s \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_s} \quad W_{in} = \frac{V_{in}^2}{Z_{in}} \quad V_l = V_{out} \frac{Z_l}{Z_l + \cancel{Z_{out}} + \cancel{Z_w}} \approx V_{out} \quad W_{out} = \frac{V_{out}^2}{Z_l}$$

$$(W_{in})_{dBm} = 10 \log \frac{W_{in}}{W_{ref}} \quad (W_{out})_{dBm} = 10 \log \frac{W_{out}}{W_{ref}} \quad W_{ref} = 10^{-3} \text{ Watt}$$

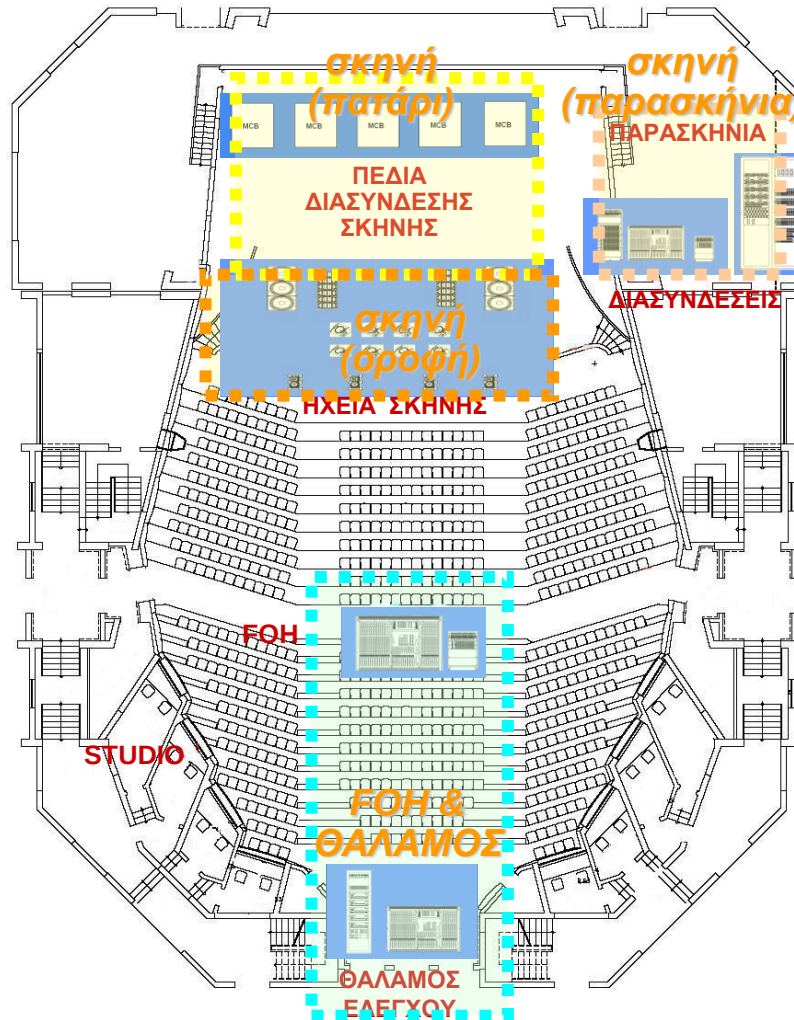


$$G = (W_{out})_{dBm} - (W_{in})_{dBm} = 10 \log \frac{W_{out}}{W_{in}} \approx 10 \log \frac{V_l^2 / Z_l}{V_{in}^2 / Z_{in}} \quad (\text{dB})$$

H/A συστήματα & εγκαταστάσεις

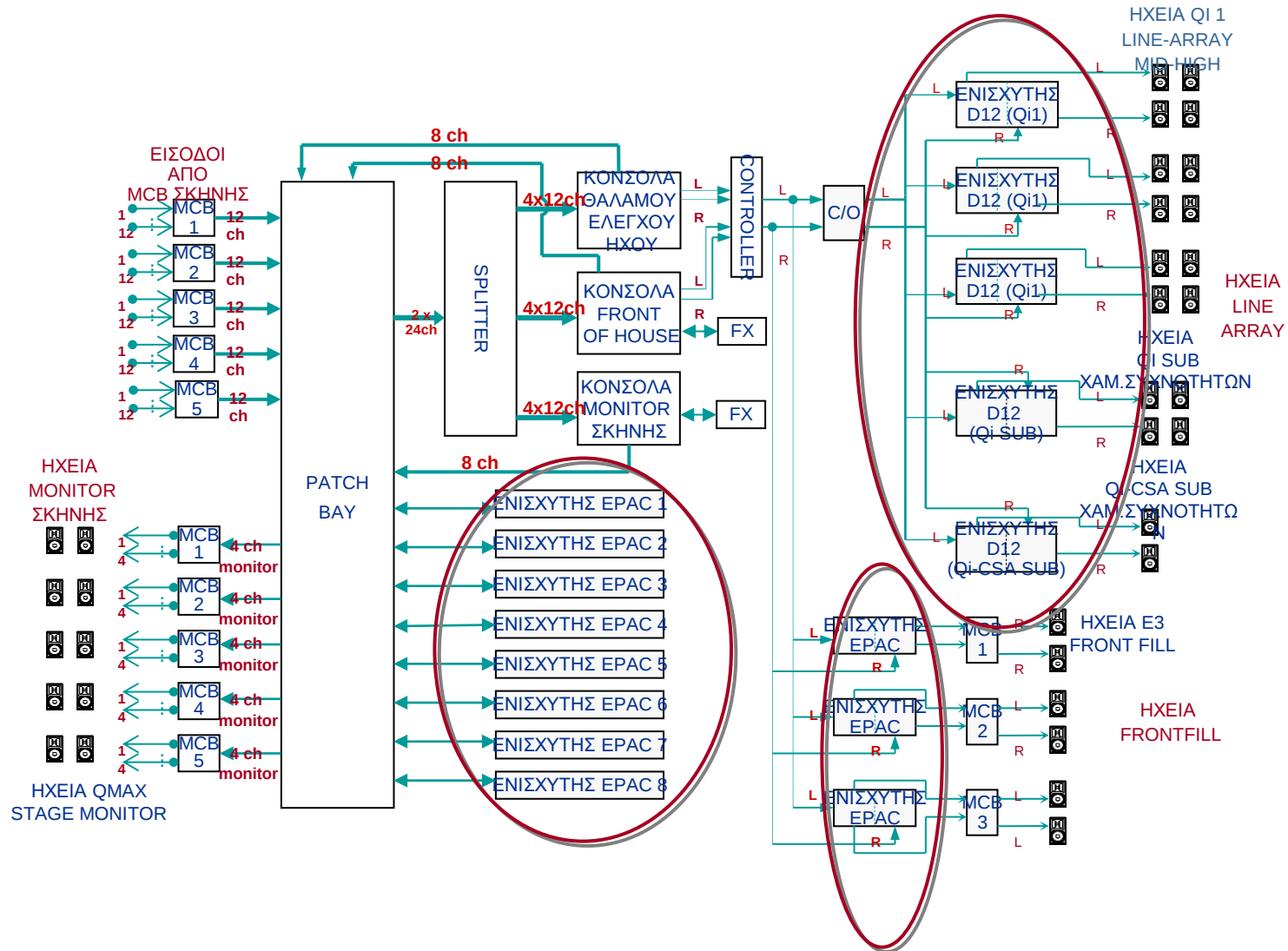
ηχητική εγκατάσταση για συνέδρια & συναυλίες

παράδειγμα: Συνεδριακό και Πολιτιστικό Κέντρο Πανεπιστημίου Πατρών



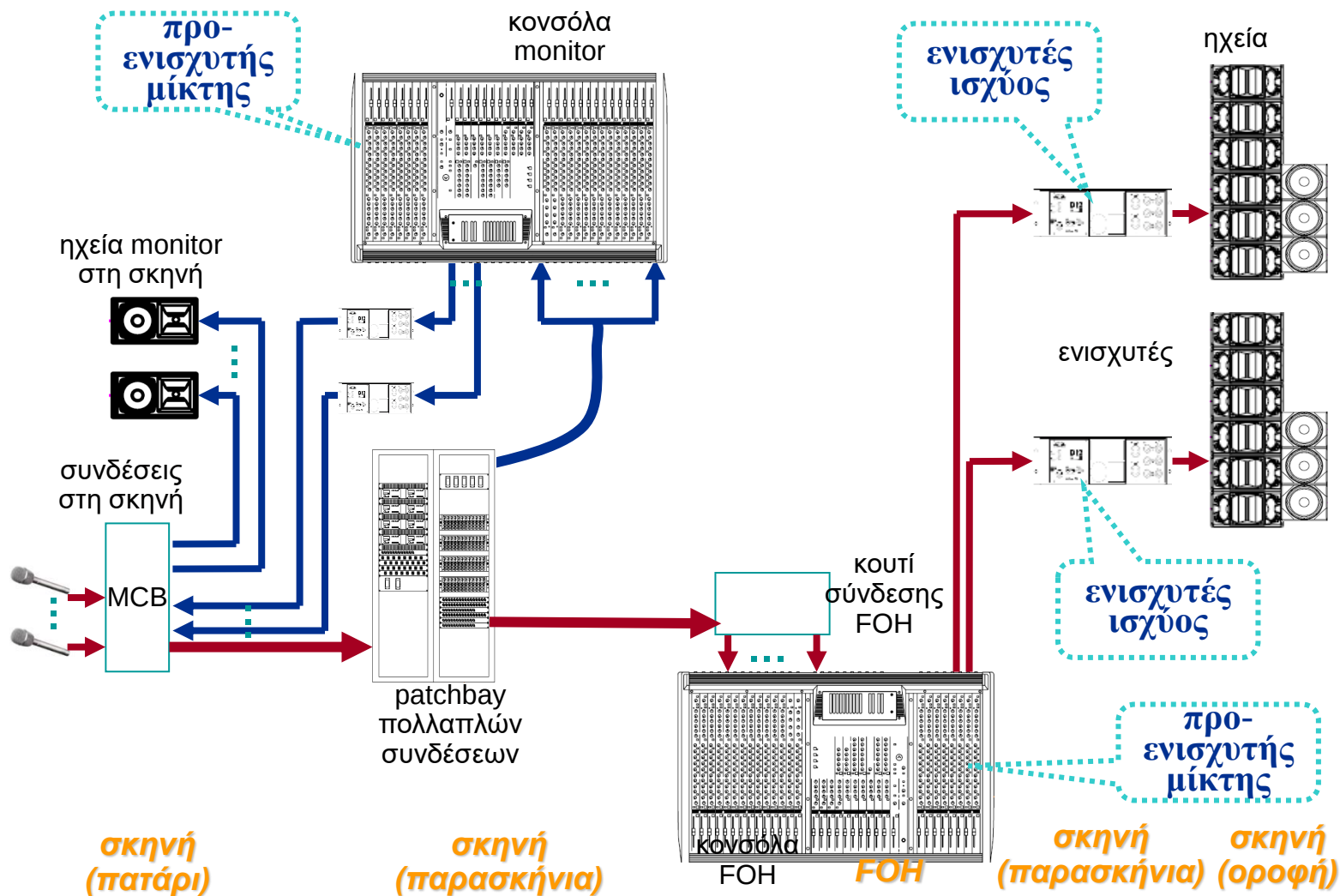
διάγραμμα ηχητικής εγκατάστασης ΣΠΚ

παράδειγμα: Συνεδριακό και Πολιτιστικό Κέντρο Πανεπιστημίου Πατρών



σύστημα για συναυλία

παράδειγμα: Συνεδριακό και Πολιτιστικό Κέντρο Πανεπιστημίου Πατρών
κονσόλες FOH και monitor και σύνδεση ηχείων monitor μέσω MCB



προενισχυτές - μίκτες

- Ενίσχυση σημάτων χαμηλής στάθμης (μικροφωνικά σήματα)
- Επιλογή ή συνδυασμός σημάτων από πολλαπλές πηγές
- Επεξεργασία σημάτων και οδήγηση υποσυστημάτων ισχύος
- οι οικιακοί προενισχυτές βασικά επιλέγουν την πηγή εισόδου
- οι επαγγελματικοί, συνδυάζουν πολλαπλές εισόδους (μίκτες)



μετρητικά όργανα



λυχνείας



οικιακός, stereo



κεραίες, RF

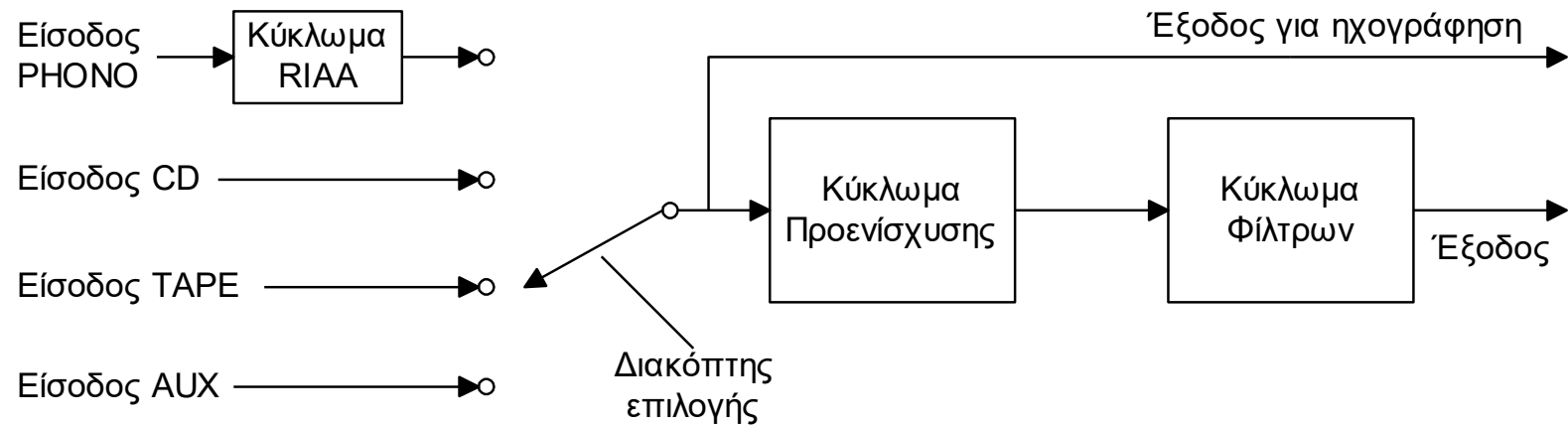


κεφαλής πικ απ
(phono)

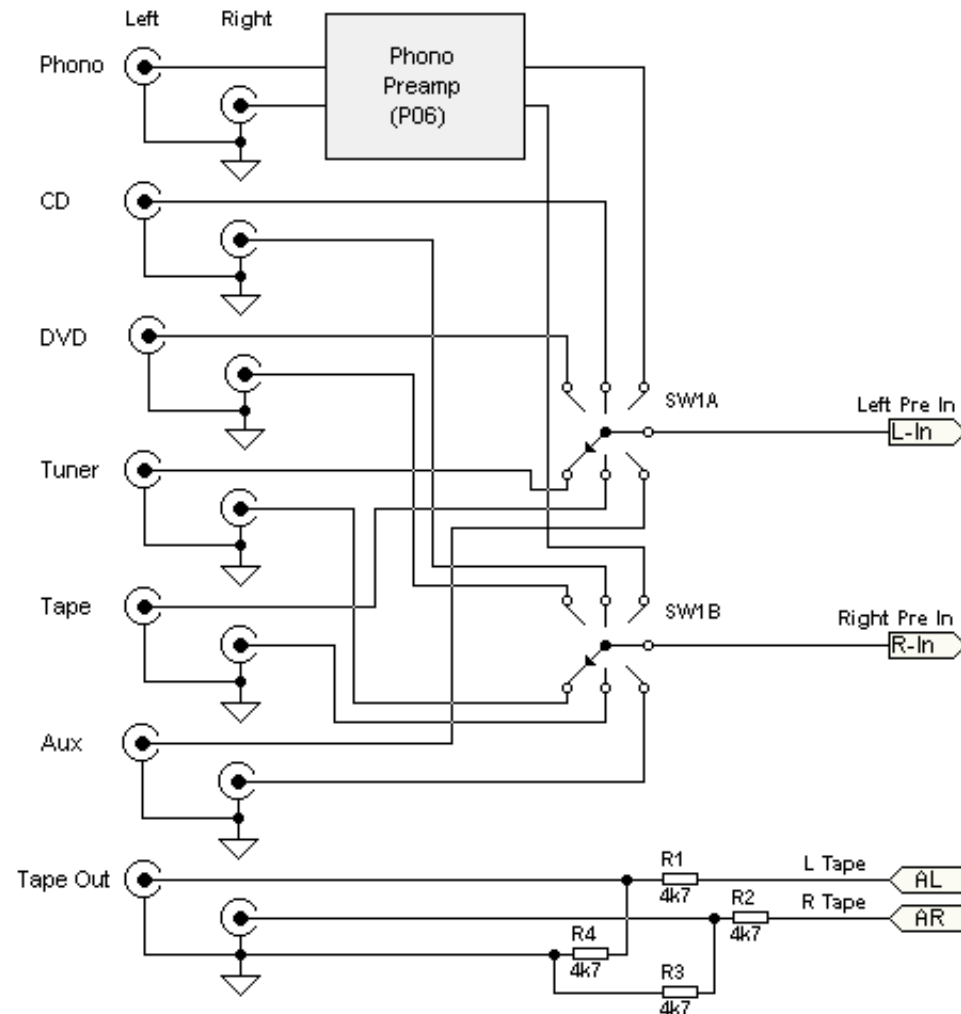


μουσικών οργάνων

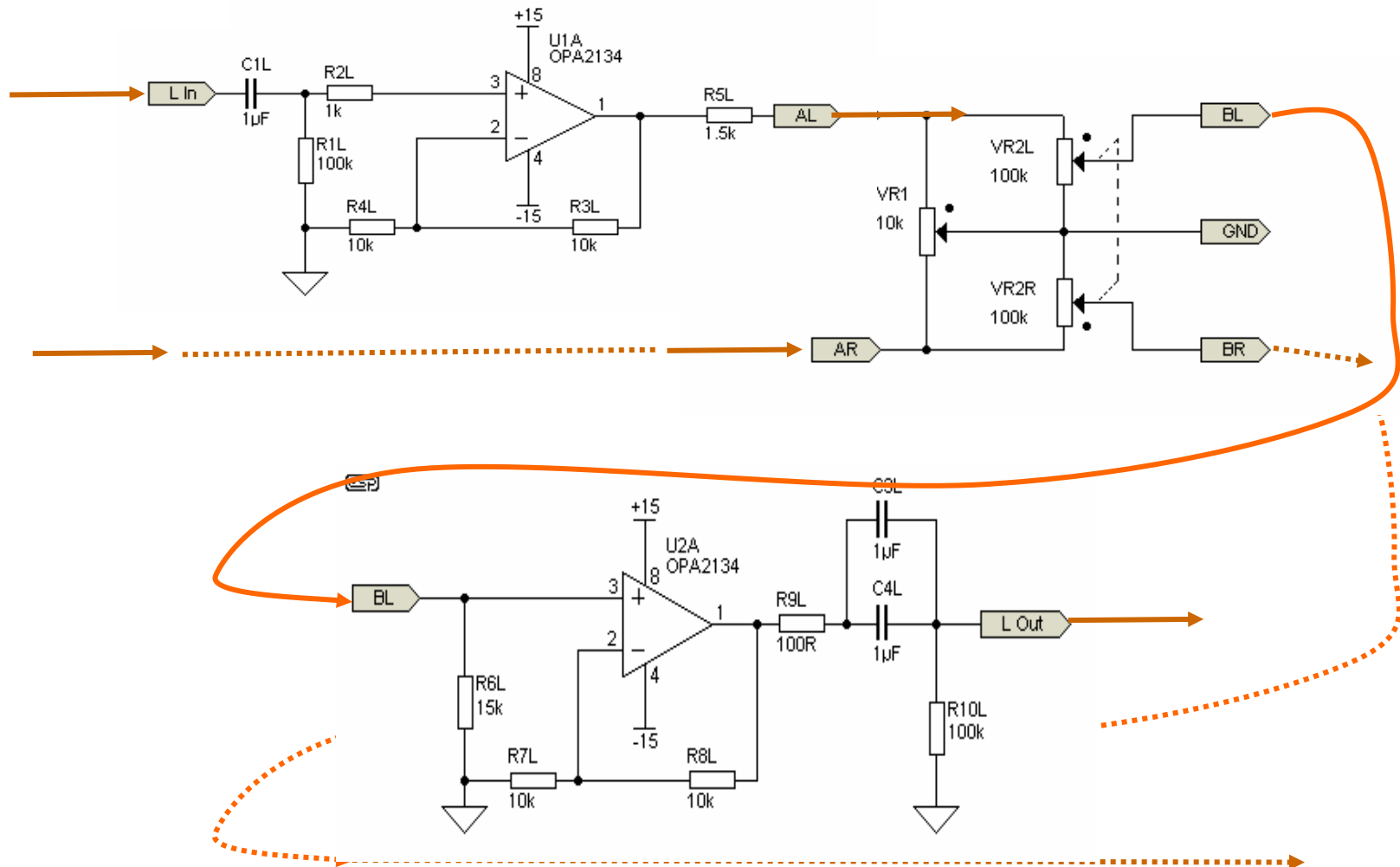
δομή οικιακού προενισχυτή



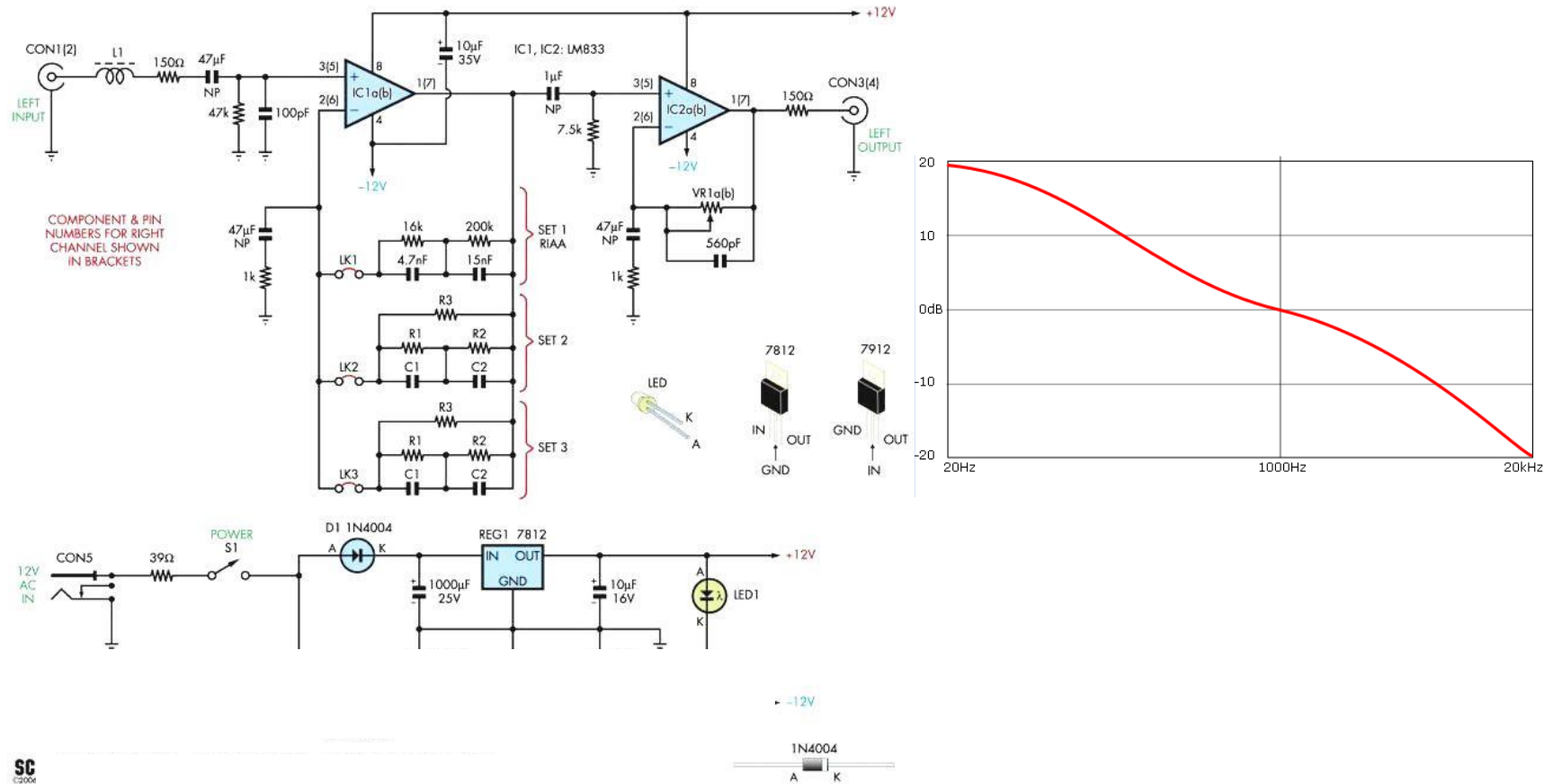
δομή οικιακού προενισχυτή



2 ΣΤΑΔΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ



ΣΤΑΔΙΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΡΗΘΟ (RIAA)

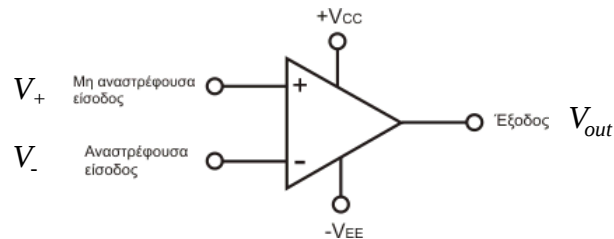


op amps = Ολοκληρωμένα κυκλώματα για έλεγχο κέρδους

- Έξοδος = κέρδος $\times$ (διαφορά) σημάτων 2 εισόδων
- Πολύ μεγάλο κέρδος τάσης ανοικτού βρόγχου, μεγάλη αντίσταση εισόδου
- Δικτύωμα ανάδρασης (κλειστός βρόγχος) για έλεγχο κέρδους / εύρους συχνοτικής απόκρισης - γραμμικοποίηση λειτουργίας
- Εφαρμογές:

ενίσχυση / αναστροφή σημάτων
 άθροιση / συνδυασμός σημάτων
 αναλογικά φίλτρα
 απομόνωση σταδίων ενίσχυσης

.....



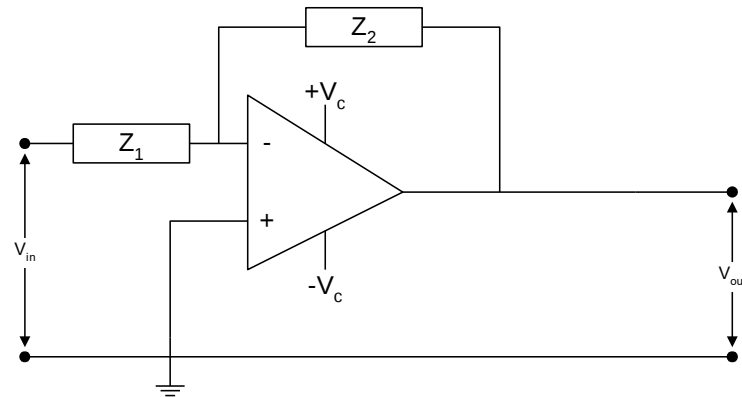
$$V_{out} = G (V_{+} - V_{-})$$

Βασικές ιδανικές τοπολογίες με ανάδραση

κέρδος

$$H(f) = V_{out} / V_{in} = -|Z_2| / |Z_1|$$

Z_1, Z_2 , συνήθως
ωμικές αντιστάσεις



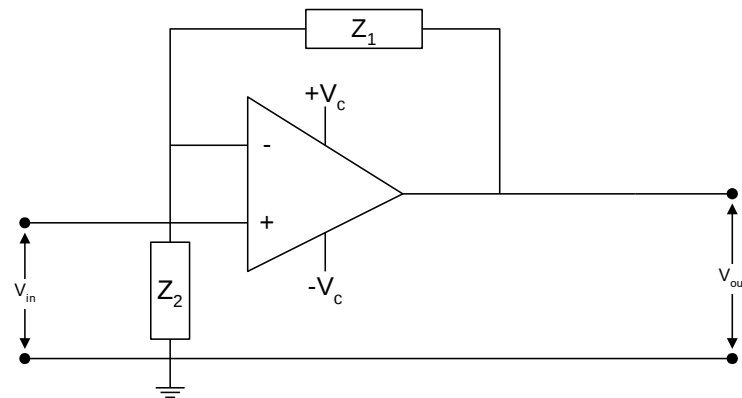
ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ (ανάστροφος - αναστρέφων)

κέρδος τάσης κλειστού βρόγχου

$$G = -R_2 / R_1$$

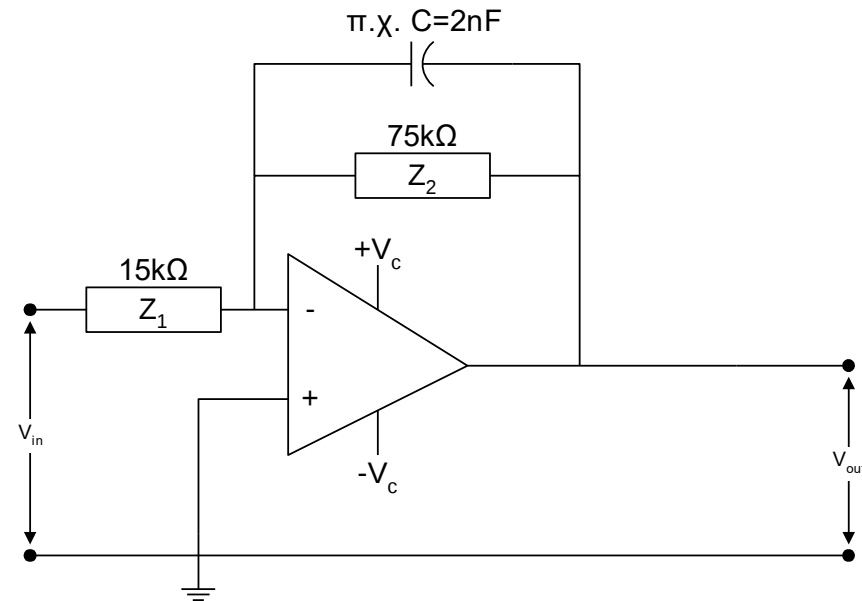
κέρδος

$$H(f) = V_{out} / V_{in} = 1 + |Z_2| / |Z_1|$$



ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΘΕΤΙΚΗΣ ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ (ορθός – μη αναστρέφων)

Βασική ιδανική τοπολογία αναλογικού φίλτρου



ΧΑΜΗΛΟΔΙΑΒΑΤΟ ΦΙΛΤΡΟ

Παράδειγμα τελεστικού για προενίσχυση ηχητικών σημάτων



INA217

SBOS247C – JUNE 2002 – REVISED NOVEMBER 2015

INA217 Low-Noise, Low-Distortion Instrumentation Amplifier Replacement for SSM2017

1 Features

- Low Noise: 1.3 nV/√Hz at 1 kHz
- Low THD+N: 0.004% at 1 kHz, G = 100
- Wide Bandwidth: 800 kHz at G = 100
- Wide Supply Range: ±4.5 V to ±18 V
- High CMR: > 100 dB
- Gain Set With External Resistor
- DIP-8 and SOL-16 Widebody Packages

2 Applications

- Professional Microphone Preamps
- Moving-coil Transducer Amplifiers
- Differential Receivers
- Bridge Transducer Amplifiers

3 Description

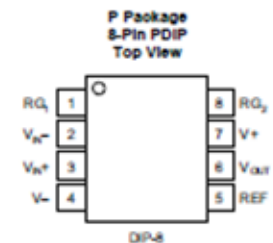
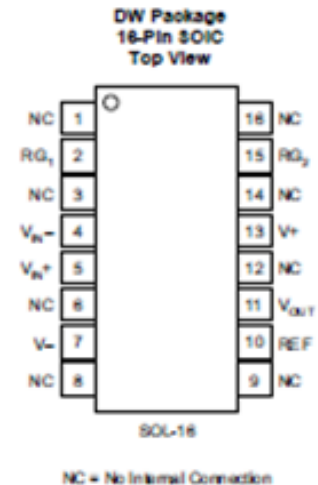
The INA217 device is a low-noise, low-distortion, monolithic instrumentation amplifier. Current-feedback circuitry allows the INA217 device to achieve wide bandwidth and excellent dynamic response over a wide range of gain. The INA217 device is ideal for low-level audio signals such as balanced low-impedance microphones. Many industrial, instrumentation, and medical applications also benefit from its low noise and wide bandwidth.

Unique distortion cancellation circuitry reduces distortion to extremely low levels, even in high gain. The INA217 device provides near-theoretical noise performance for 200-Ω source impedance. The INA217 device features differential input, low noise, and low distortion that provides superior performance in professional microphone amplifier applications.

The INA217 device features wide supply voltage, excellent output voltage swing, and high output

Παράδειγμα τελεστικού για προενίσχυση ηχητικών σημάτων

PIN		I/O	DESCRIPTION
NAME	NO.		
PDIP			
NC	1	—	No internal connection
RG1	2	I	Gain setting pin, for gains greater than one, connect an external resistor between pins 2 and 15
NC	3	—	No internal connection
VIN-	4	I	Inverting input
VIN+	5	I	Non-Inverting input
NC	6	—	No internal connection
V-	7	I	negative power supply
NC	8	—	No internal connection
NC	9	—	No internal connection
REF	10	I	Reference input
VOUT	11	O	Output
NC	12	—	No internal connection
V+	13	I	Positive power supply
NC	14	—	No internal connection
RG2	15	I	Gain setting pin, for gains greater than one, connect an external resistor between pins 2 and 15
NC	16	—	No internal connection
SOIC			
RG1	1	I	Gain setting pin, for gains greater than one, connect an external resistor between pins 1 and 8
VIN-	2	I	Inverting input
VIN+	3	I	Non-Inverting input
V-	4	I	negative power supply
REF	5	I	Reference input
VOUT	6	O	Output
V+	7	I	Positive power supply
RG2	8	I	Gain setting pin, for gains greater than one, connect an external resistor between pins 2 and 15



Παράδειγμα τελεστικού για προενίσχυση ηχητικών σημάτων

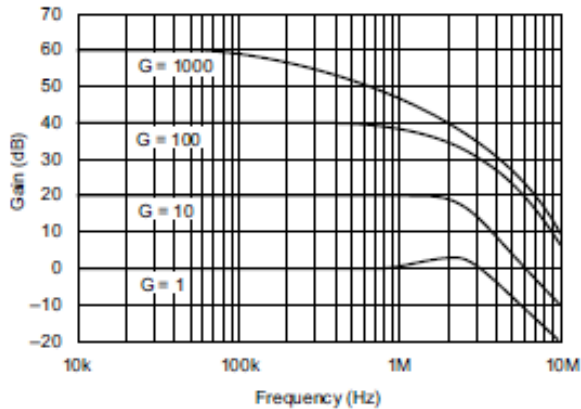


Figure 1. Gain vs Frequency

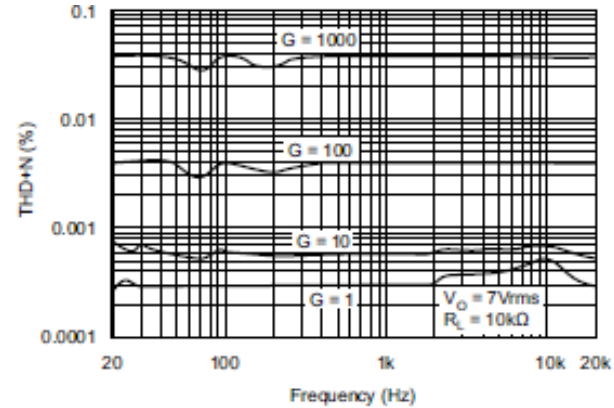


Figure 2. THD+N vs Frequency

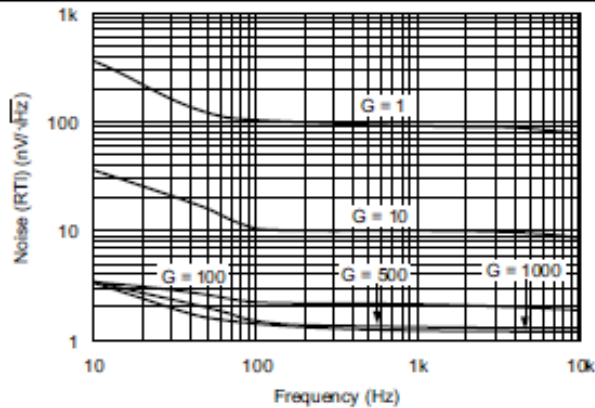


Figure 3. Noise Voltage (RTI) vs Frequency

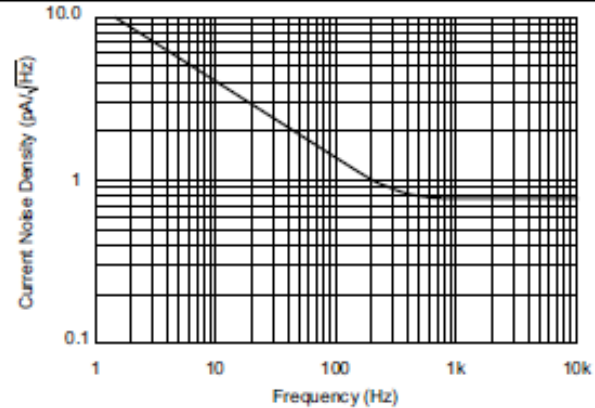
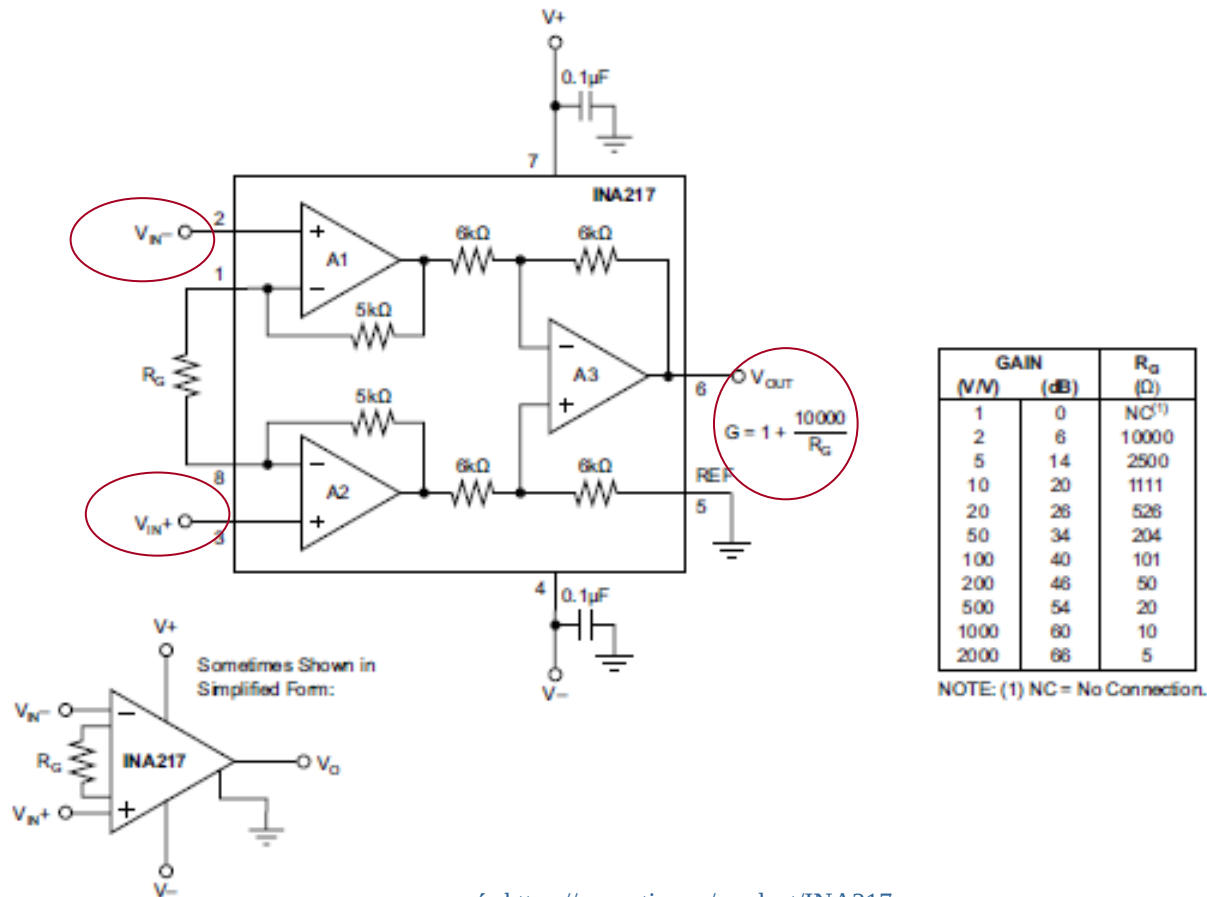


Figure 4. Current Noise Spectral Density

Παράδειγμα τελεστικού για προενίσχυση ηχητικών σημάτων

The INA217 is a classical three-amp instrumentation amplifier designed for audio applications. Featuring low noise and low distortion the INA217 is ideally suited for amplifying low level audio signals. With a wide supply voltage, wide output voltage swing, and high output current drive the INA217 is also ideally suited for processing high level audio signals. Specified from -40°C to 85°C the INA217 is well suited for industrial applications.

7.2 Functional Block Diagram



Παράδειγμα τελεστικού για προενίσχυση ηχητικών σημάτων

Figure 16 shows a typical circuit for a professional microphone input amplifier.

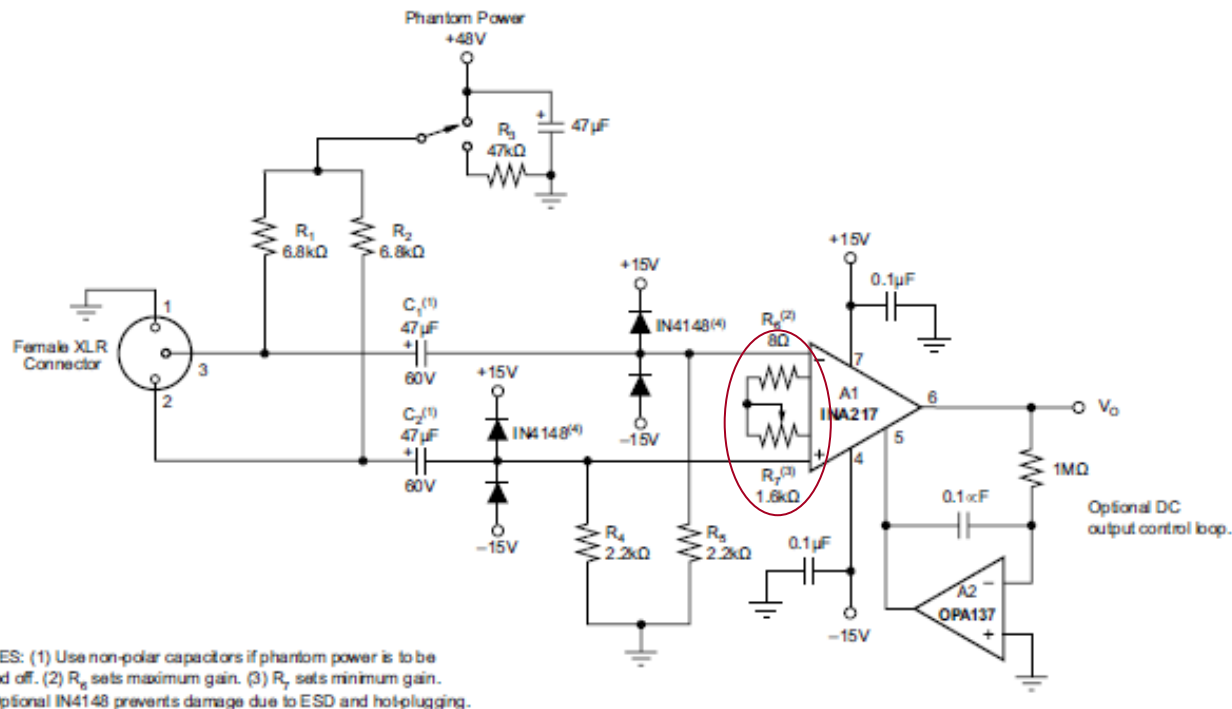


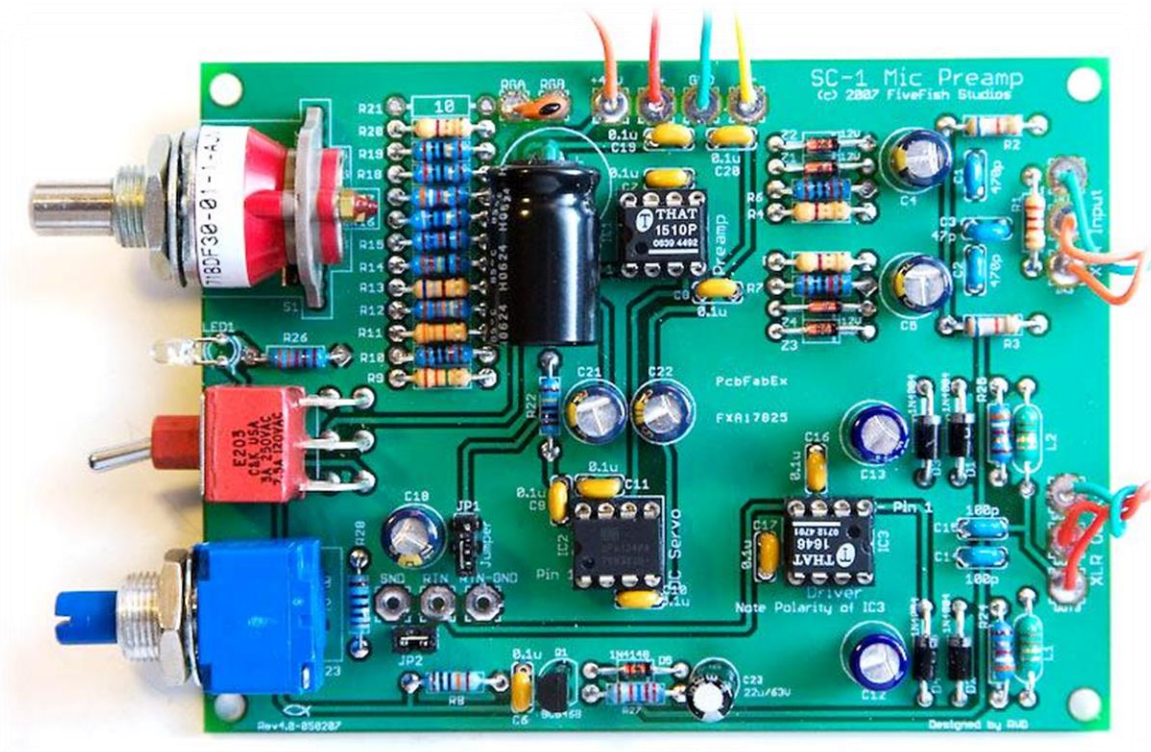
Figure 16. Phantom-Powered Microphone Preamplifier

8.2.1 Design Requirements

- 48-V, Phantom powered, remotely located microphone
- Circuitry operates from ± 15 -V power supplies
- Low distortion and noise over the audio frequency band
- Gain range from to 20 db to 60 db

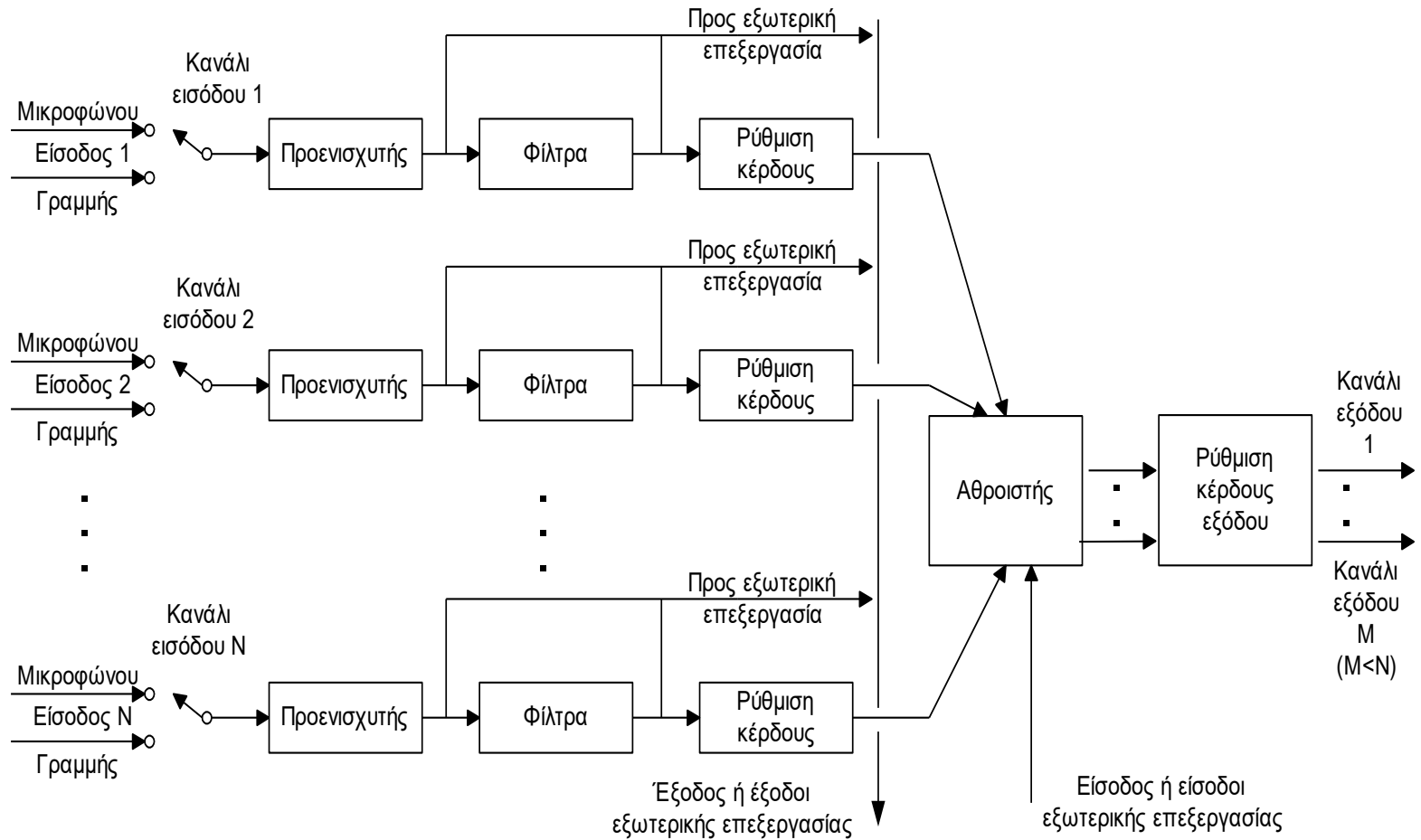
πηγή: <https://www.ti.com/product/INA217>

Παράδειγμα τελεστικού για προενίσχυση ηχητικών σημάτων



κονσόλα μίξης ήχου

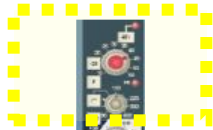
προενισχυτές (επαγγελματικοί)



κονσόλες FOH, monitor, studio



διάταξη καναλιών εισόδου (mono)



ΣΤΑΔΙΟ ΠΡΟ-ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ



επιπλέον κέρδος 20 dB

αντιστροφή φάσης

επιλογή bypass hi-pass
φίλτρου

επιλογή απευθείας
εξόδου καναλιού

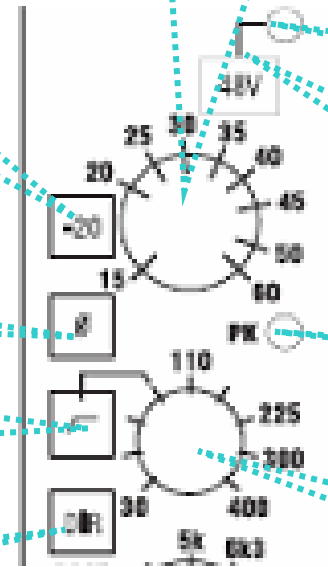
κέρδος εισόδου
από +15 dBu έως +60 dBu

ένδειξη phantom power

ενεργοποίηση phantom
power 48V

ένδειξη κέρδους > 18 dBu

συχνότητα αποκοπής hi-pass
φίλτρου 30-400 Hz



διάταξη καναλιών εισόδου (mono)



ΣΤΑΔΙΟ ΙΣΟΣΤΑΘΜΙΣΗΣ (EQ)

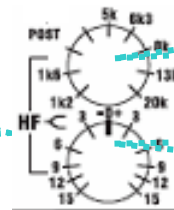
φίλτρο shelving υψηλών
συχνοτήτων 1-4 KHz

φίλτρο parametric χαμηλο-
μεσαίων συχνοτήτων 75Hz-
1,3 KHz

φίλτρο parametric χαμηλο-
μεσαίων συχνοτήτων 75Hz-
1,3 KHz

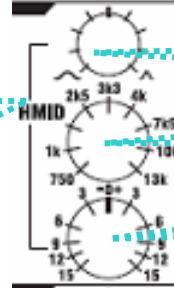
φίλτρο shelving χαμηλών
συχνοτήτων 30-500 Hz

επιλογή bypass eq
φίλτρων



επιλογή συχνότητας

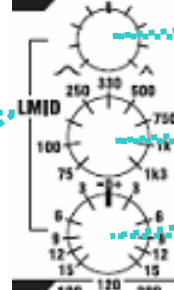
επιλογή κέρδους περιοχής
από +15dB έως -15dB



επιλογή εύρους ζώνης Q
από 0,5 έως 3

επιλογή συχνότητας

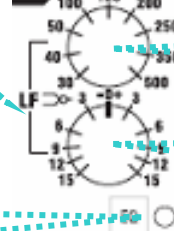
επιλογή κέρδους περιοχής
από +15dB έως -15dB



επιλογή εύρους ζώνης Q
από 0,5 έως 3

επιλογή συχνότητας

επιλογή κέρδους περιοχής
από +15dB έως -15dB

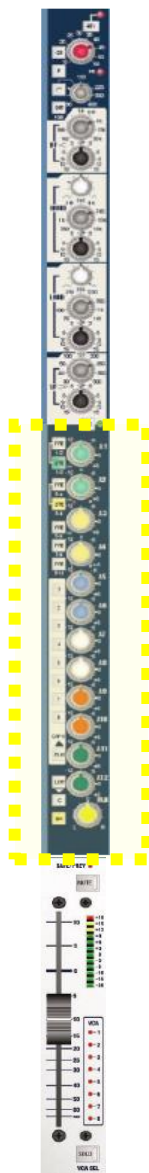


επιλογή συχνότητας

επιλογή κέρδους περιοχής
από +15dB έως -15dB

διάταξη καναλιών εισόδου (mono)

ΣΤΑΔΙΟ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ (AUX)



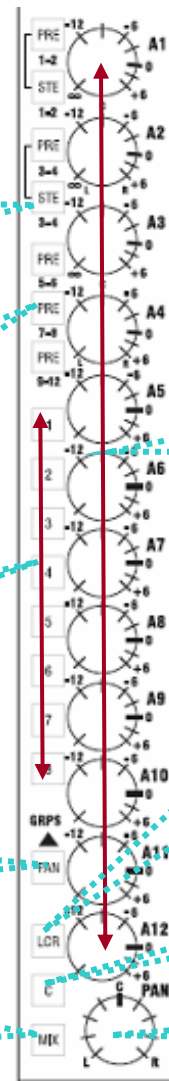
επιλογή stereo για εξόδους
A1-A4

επιλογή pre ή post fader για
ομάδες εξόδων

επιλογή δρομολόγησης σε 8
subgroups

επιλογή pan σε subgroups

επιλογή εξόδου σε stereo
buss



12 ποτενσιόμετρα κέρδους
για αποστολή είτε σε FX ή
monitor, έως +5dB

επιλογή pan και σε mono
κεντρικό buss

επιλογή εξόδου σε mono
buss

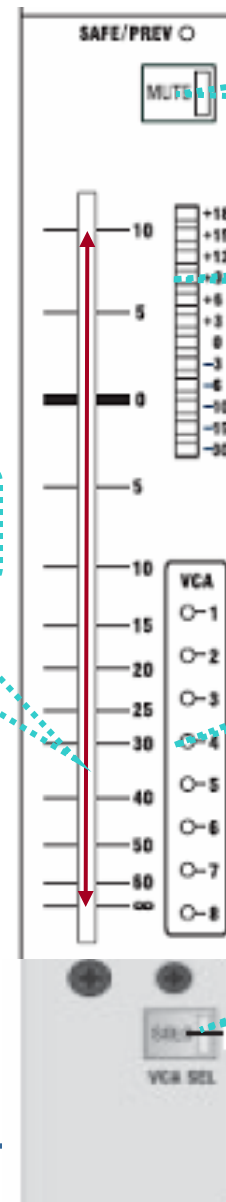
ρύθμιση pan

διάταξη καναλιών εισόδου (mono)

ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΟ ΕΞΟΔΟΥ (FADER)



ποτενσιόμετρο κέρδους από
- ∞ έως +10dB



σίγαση (mute) κάθε εξόδου

ένδειξη στάθμης σήματος

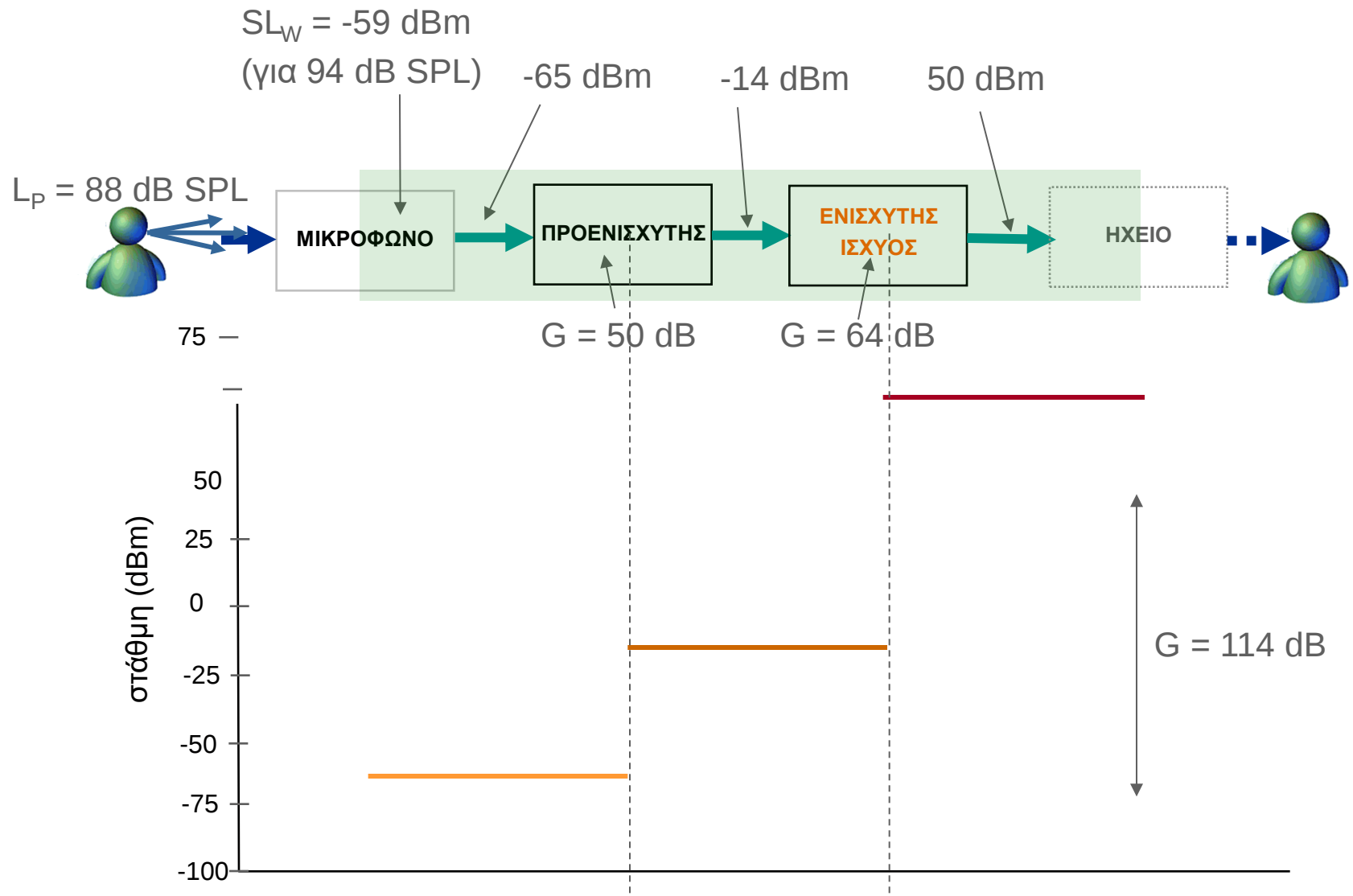
ένδειξη επιλογής ομάδας
VCA

επιλογή χρήσης solo ή
ομάδας VCA

ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ

Δείτε: διάλεξη στα Αναλογικά Ηλεκτρονικά

στάθμες ενίσχυσης



ηλεκτρικό κέρδος (ισχύος)

$$V_{in} = V_s \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_s}$$

$$W_{in} = \frac{V_{in}^2}{Z_{in}}$$

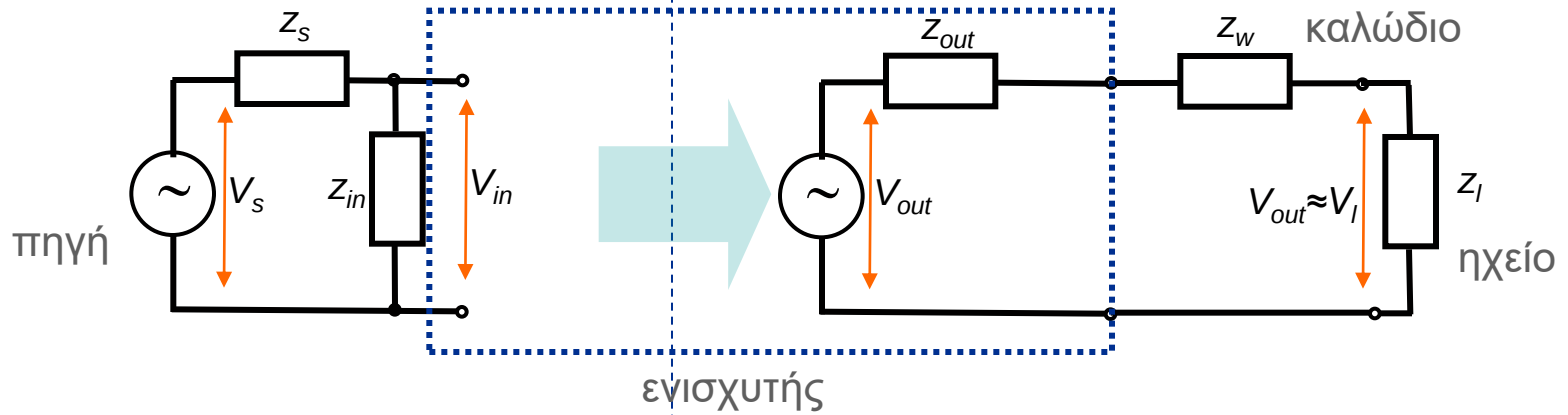
$$(W_{in})_{dBm} = 10 \log \frac{W_{in}}{W_{ref}}$$

$$W_{ref} = 10^{-3} \text{ Watt}$$

$$V_l = V_{out} \frac{Z_l}{Z_l + \cancel{Z_{out}} + \cancel{Z_w}} \approx V_{out}$$

$$W_{out} = \frac{V_{out}^2}{Z_l}$$

$$(W_{out})_{dBm} = 10 \log \frac{W_{out}}{W_{ref}}$$



$$G = (W_{out})_{dBm} - (W_{in})_{dBm} = 10 \log \frac{W_{out}}{W_{in}} \approx 10 \log \frac{V_l^2 / Z_l}{V_{in}^2 / Z_{in}} \quad (\text{dB})$$

απαίτηση για ηλεκτρική ισχύ

ηχητική στάθμη απευθείας σήματος – ανοιχτός χώρος χωρίς αντήχηση

$$L_{pd(r,\theta)} = SW + 10\log W_{HA} - 20\log r - DI(\theta) \quad \text{dB}$$

η απαιτούμενη ισχύς τροφοδοσίας προκύπτει από τα παραπάνω, π.χ.

$$W_{HA} = 10^{\frac{[L_p] + 20\log r - SW}{10}}$$

ηχητική στάθμη συνολικού σήματος – κλειστός χώρος με αντήχηση

$$L_{p(r,\theta)} = SW + 10\log W_{HA} + 10\log\left(\frac{Q(\theta)}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right) - 10\log\left(\frac{Q(\theta)}{4\pi} + \frac{4}{R}\right)$$

όμοια υπολογίζεται απαιτούμενη ισχύς τροφοδοσίας για αυτή την περίπτωση

ενδεικτικές τιμές κέρδους / αντίστασης εισόδου

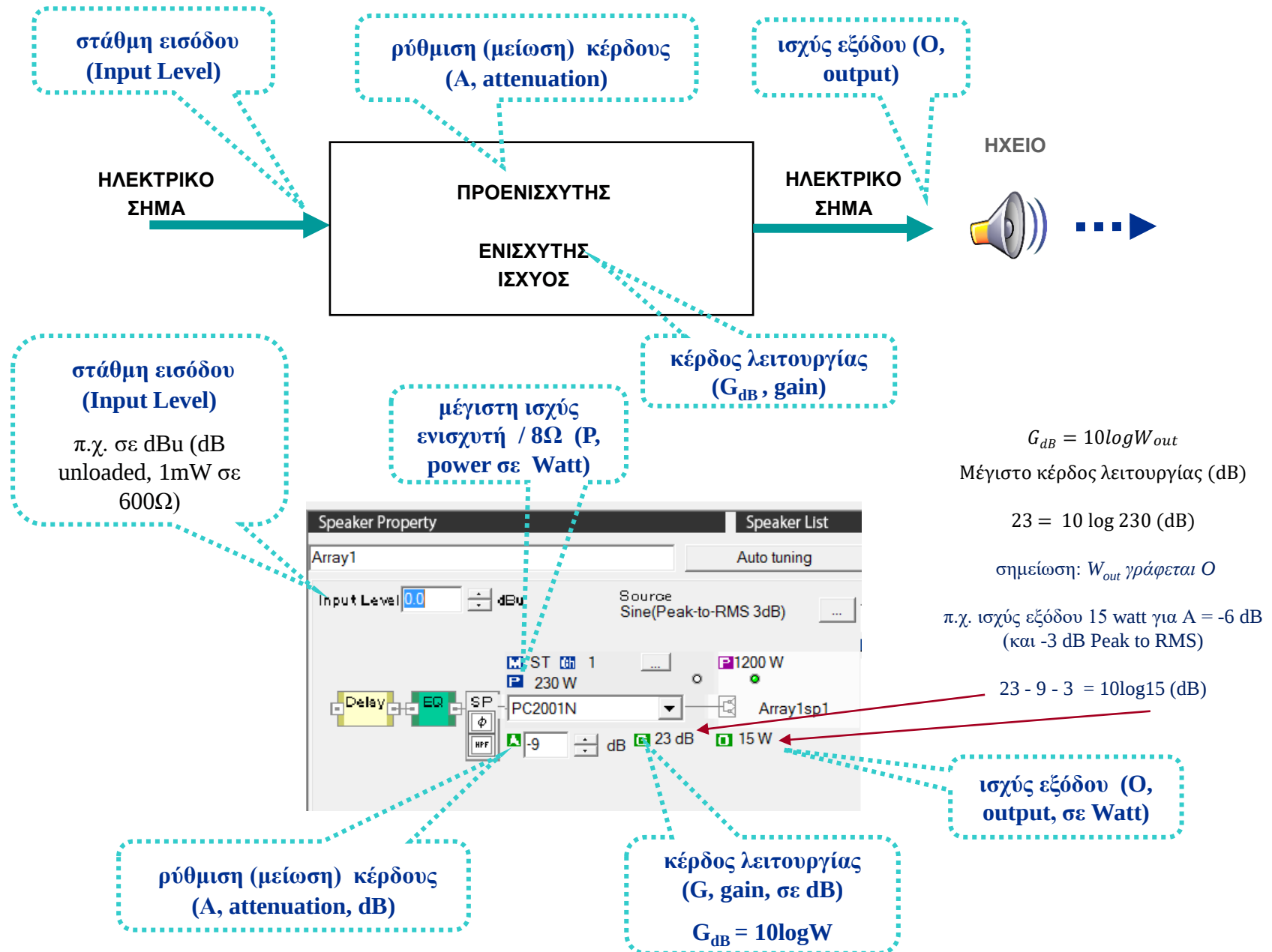
κέρδος (dB) G_{dB}	κέρδος (X) G	RMS out (volt) $V_{out} = G/\sqrt{2}$	ισχύς / 8Ω (watt) W_{out}	ισχύς / 4Ω (watt) W_{out}
24	24	12,5 (=24/√2)	19	38
30	32	25	78	156
36	65	50	312	624
40	96	75	702	1406

$$W_{out} = \frac{V_{out}^2}{Z_l}$$

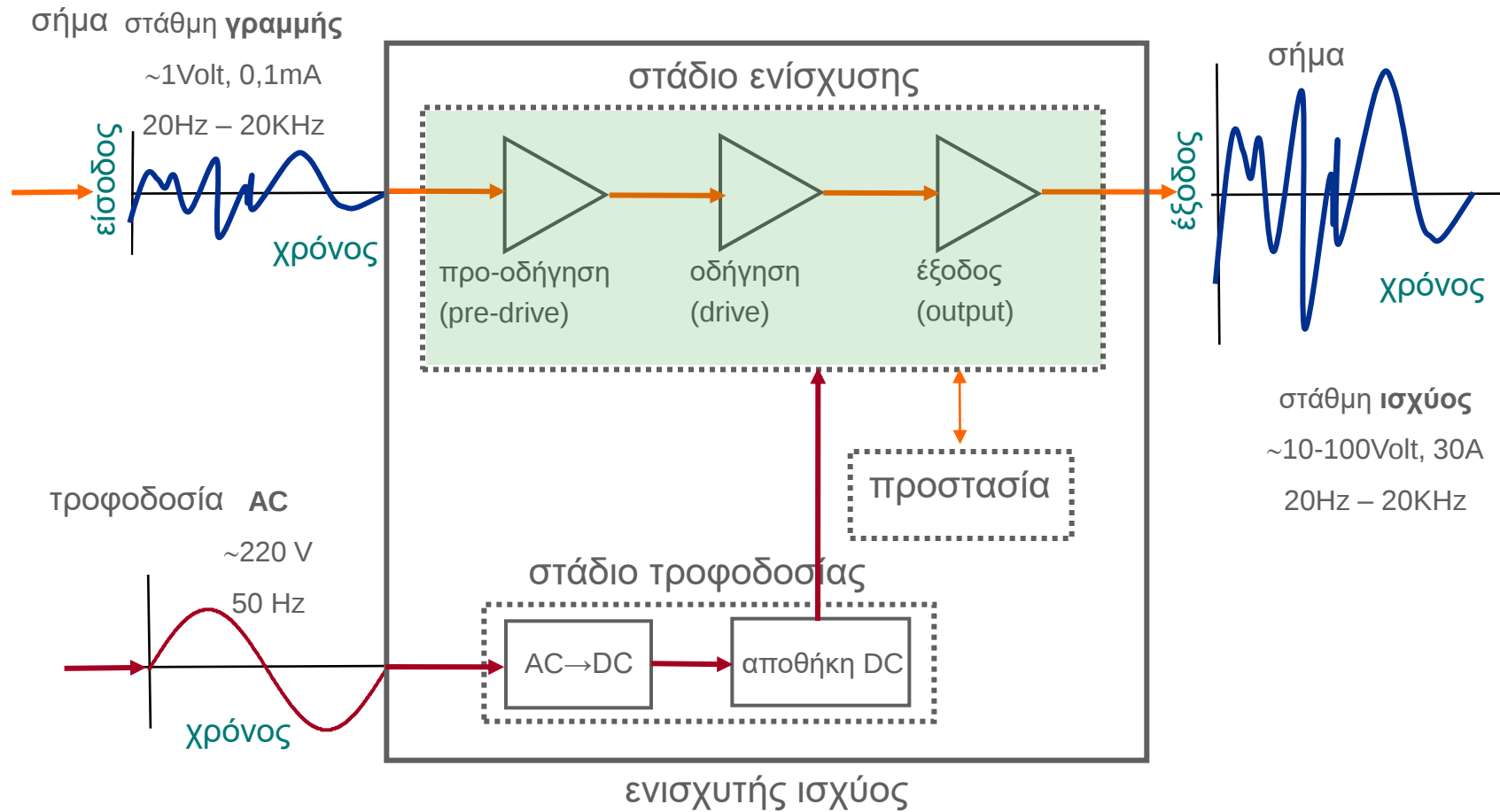
$$G_{dB} = 10 \log W_{out}$$

τύπος	$z_{in} (\Omega)$
οικιακοί, ολοκληρωμένοι	10K – 200K
high-end	600 – 2M
επαγγελματικοί	5K – 20K
παλιοί επαγγελματικοί	600

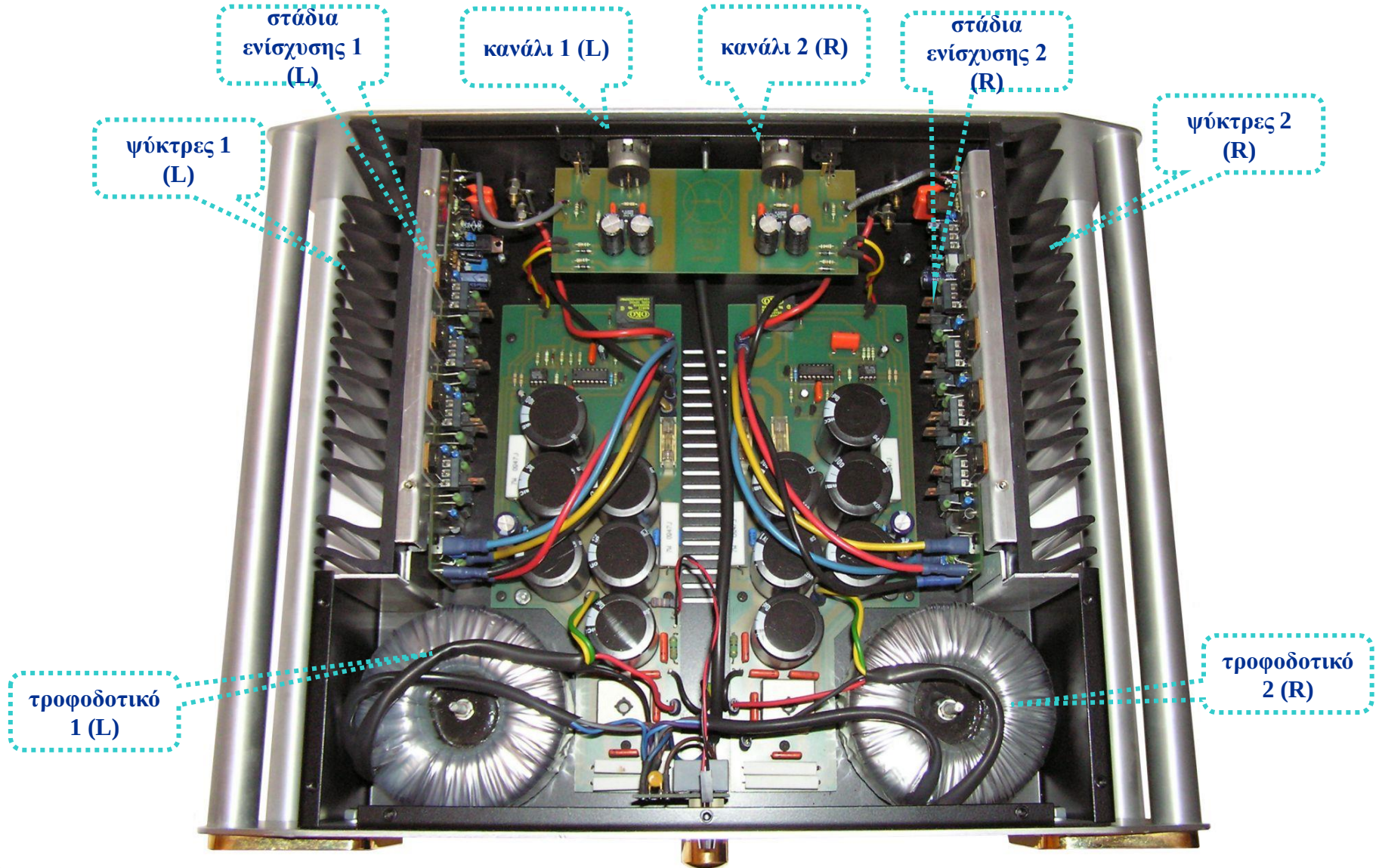
κέρδος ενίσχυσης



δομή ενισχυτή ισχύος



δομή ενισχυτής ισχύος (2-ch)

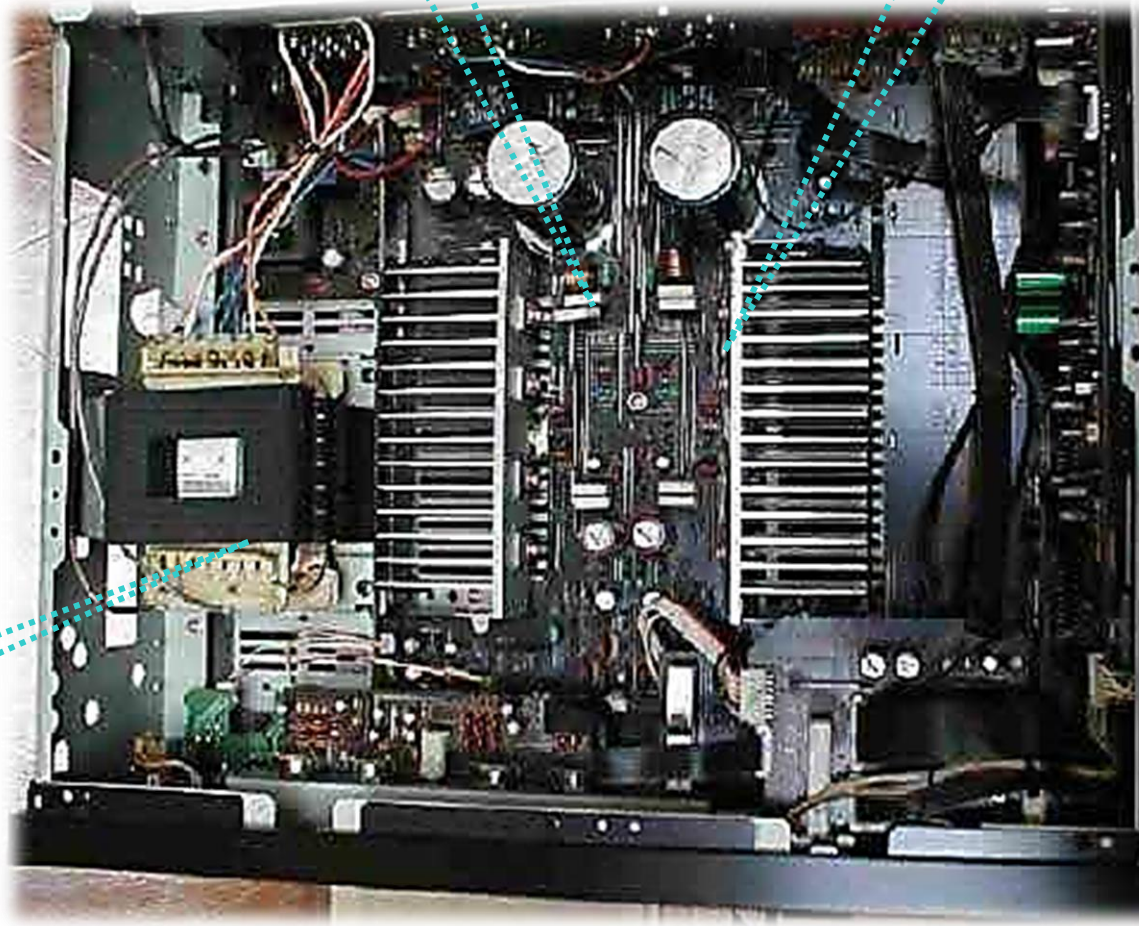


δομή ενισχυτής ισχύος (2-ch)

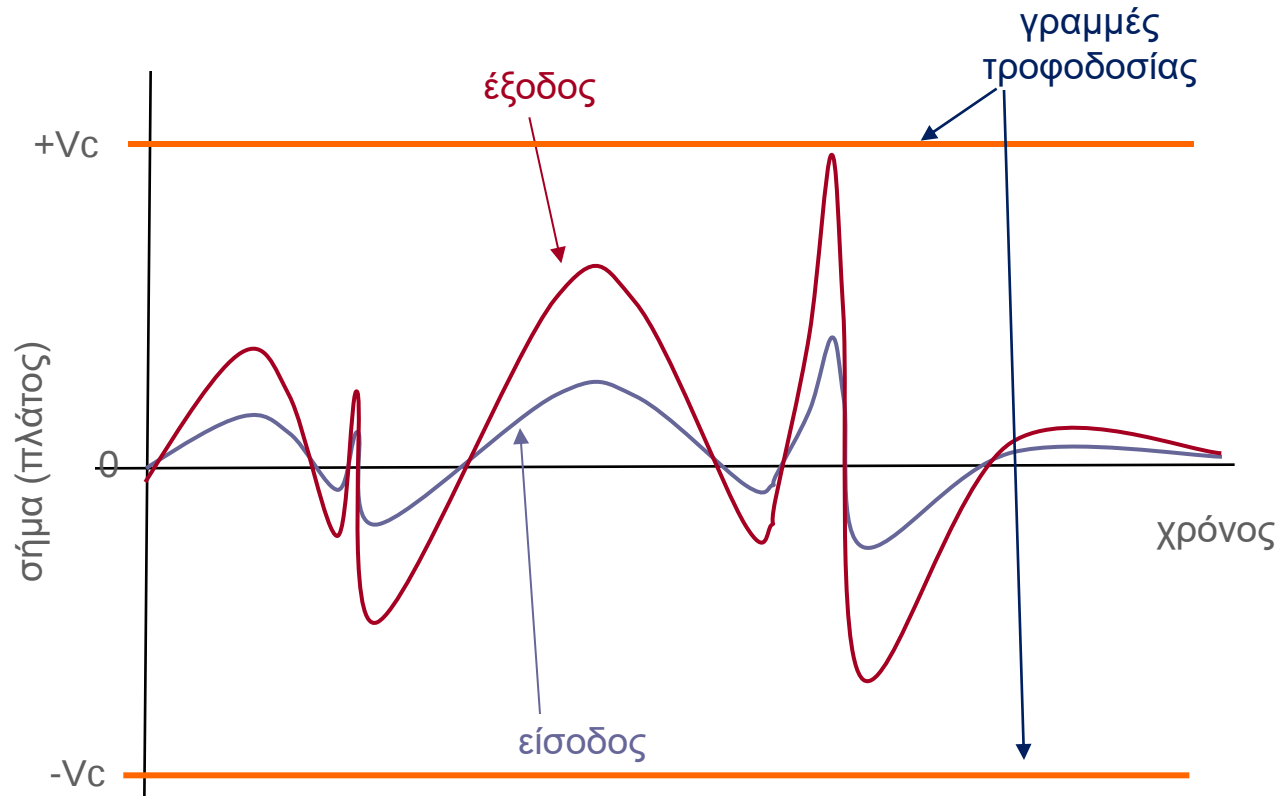
στάδια
ενίσχυσης 1
(L)

στάδια
ενίσχυσης 2
(R)

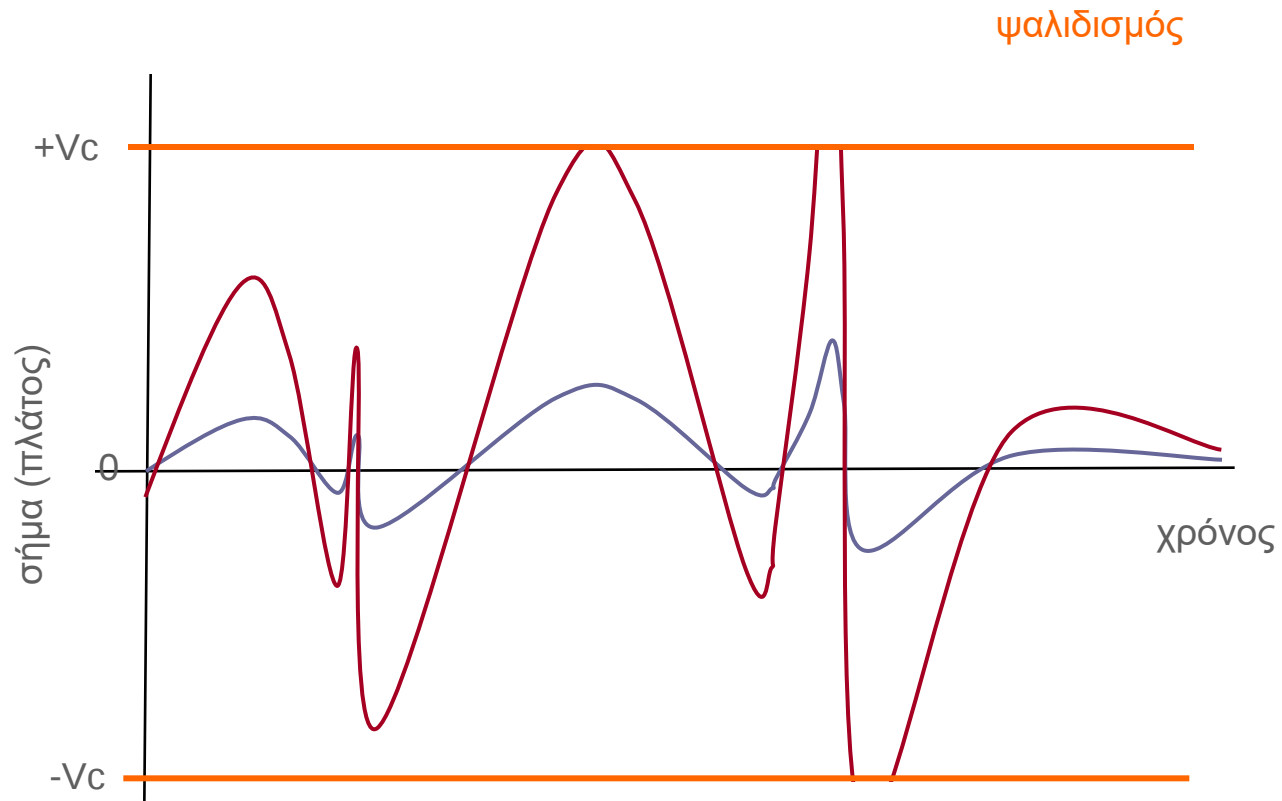
τροφοδοτικό
(L + R)



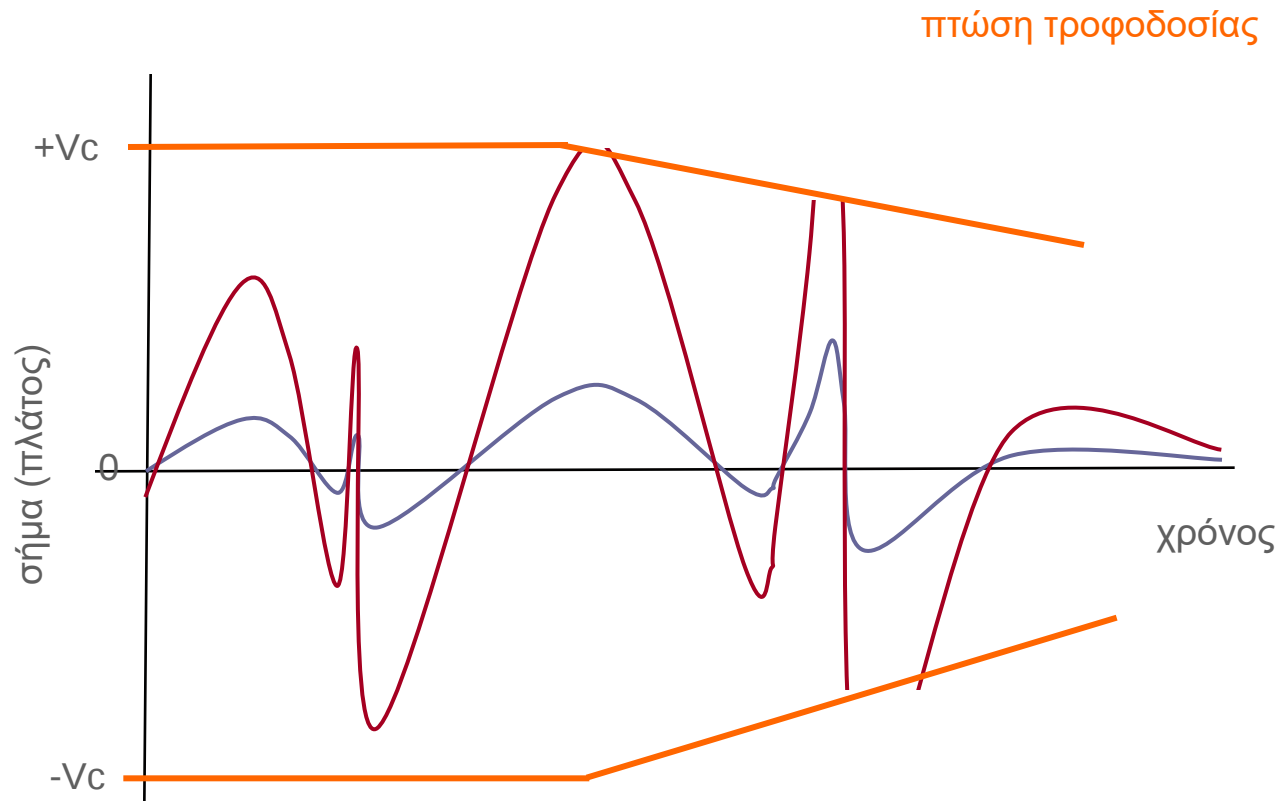
τροφοδοσία ενισχυτή ισχύος



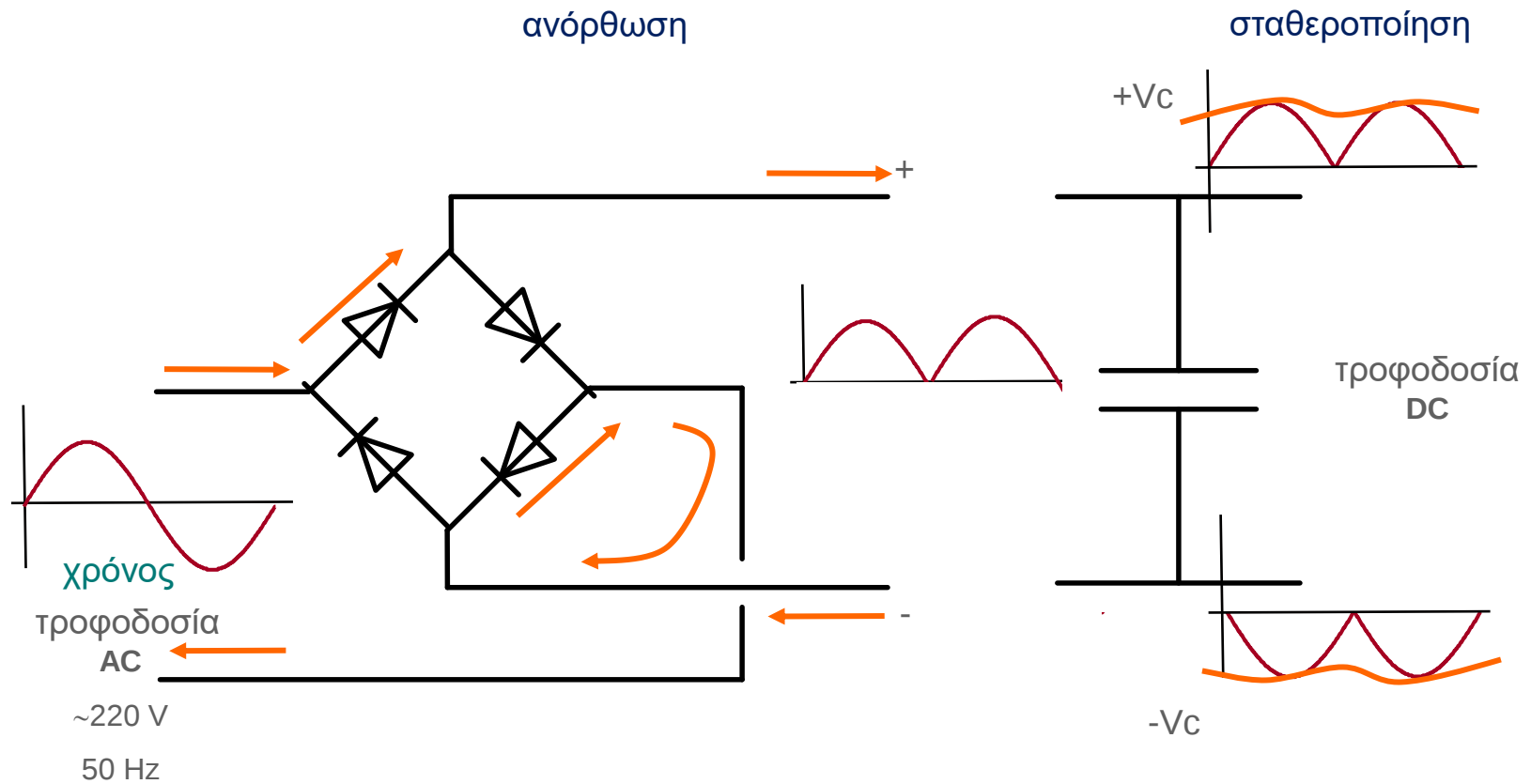
τροφοδοσία ενισχυτή ισχύος



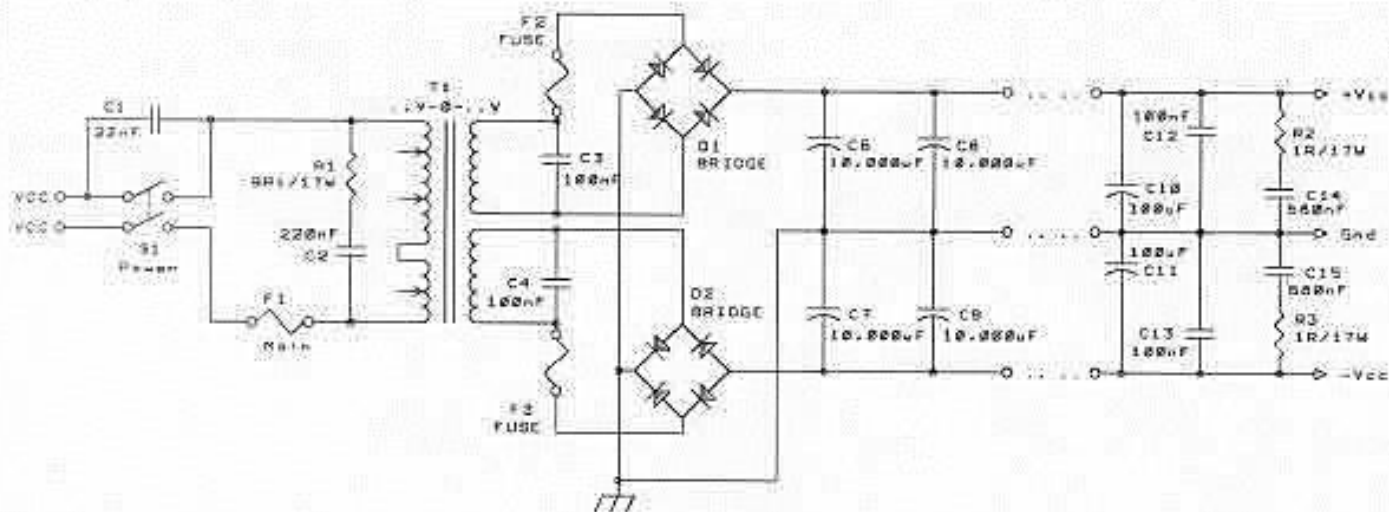
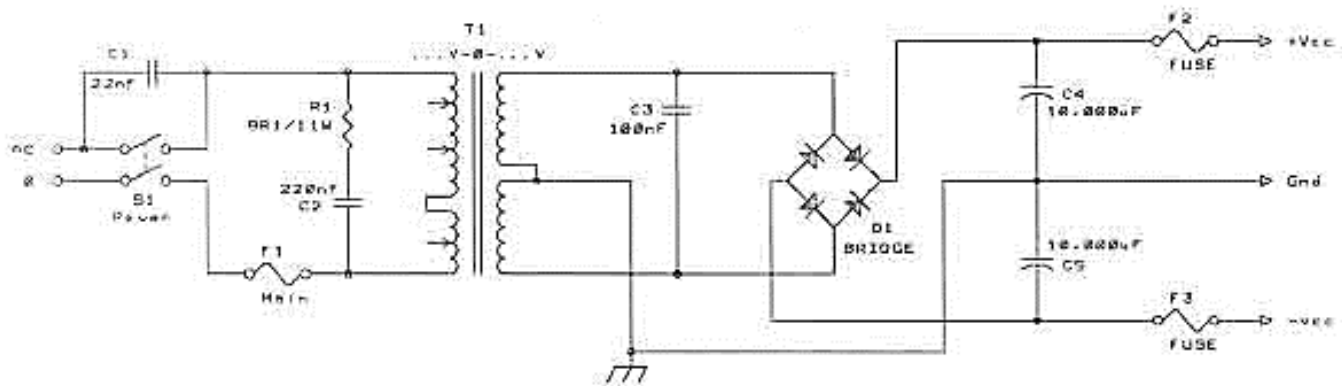
τροφοδοσία ενισχυτή ισχύος



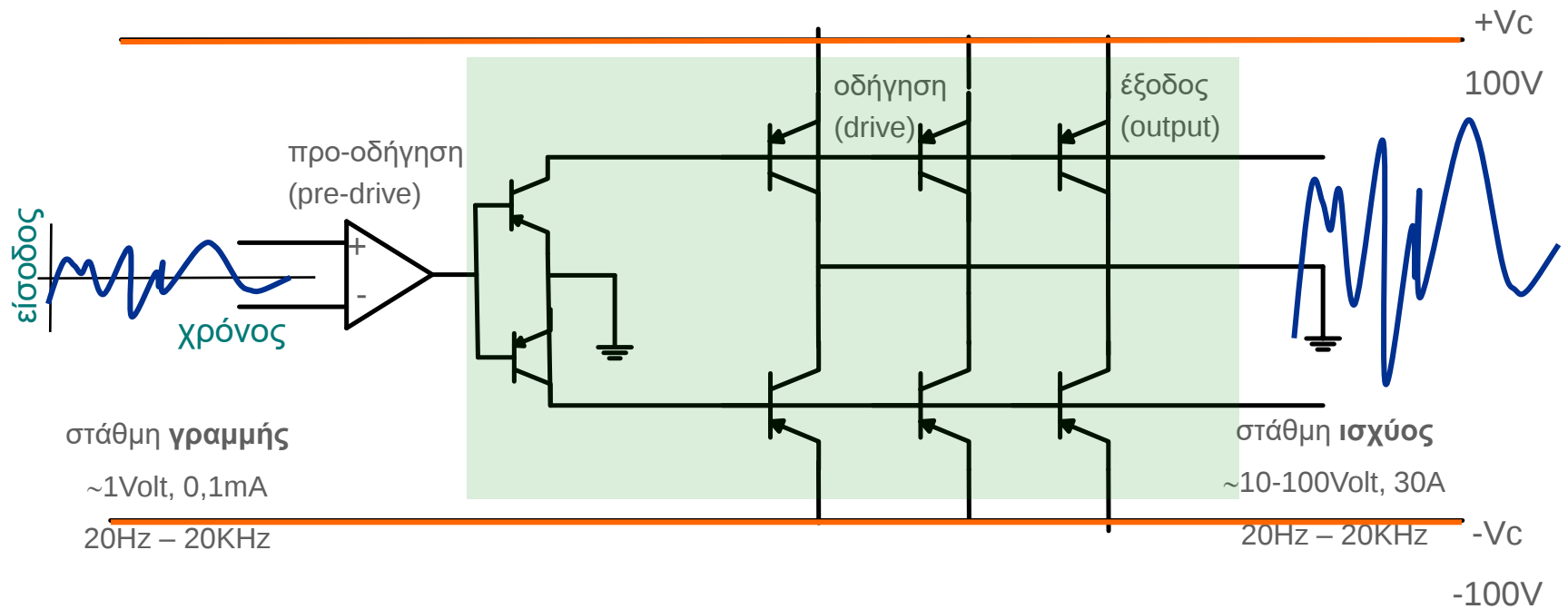
στάδιο τροφοδοσίας ενισχυτή ισχύος



στάδιο τροφοδοσίας ενισχυτή ισχύος

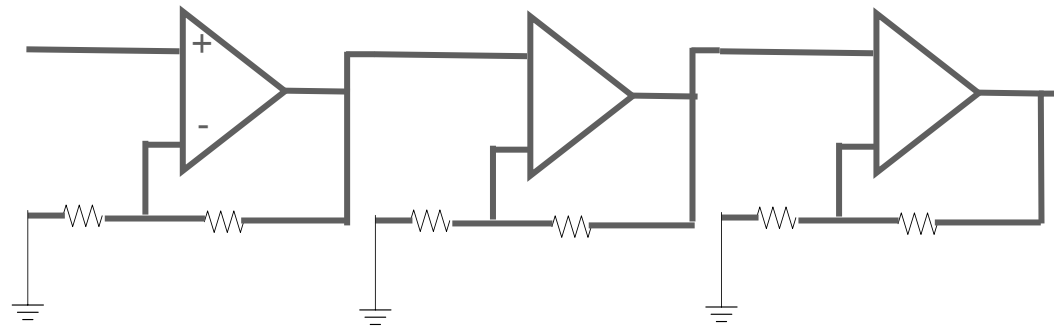


στάδια ενίσχυσης - ισχύος



στάδια ενίσχυσης - ισχύος

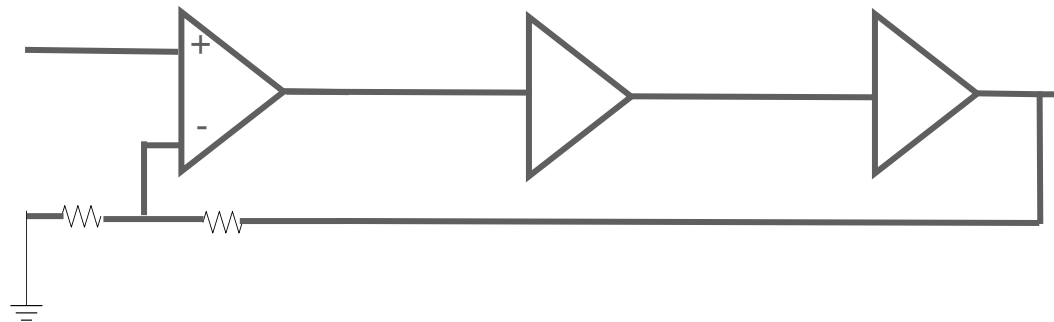
τοπική ανάδραση



είσοδος

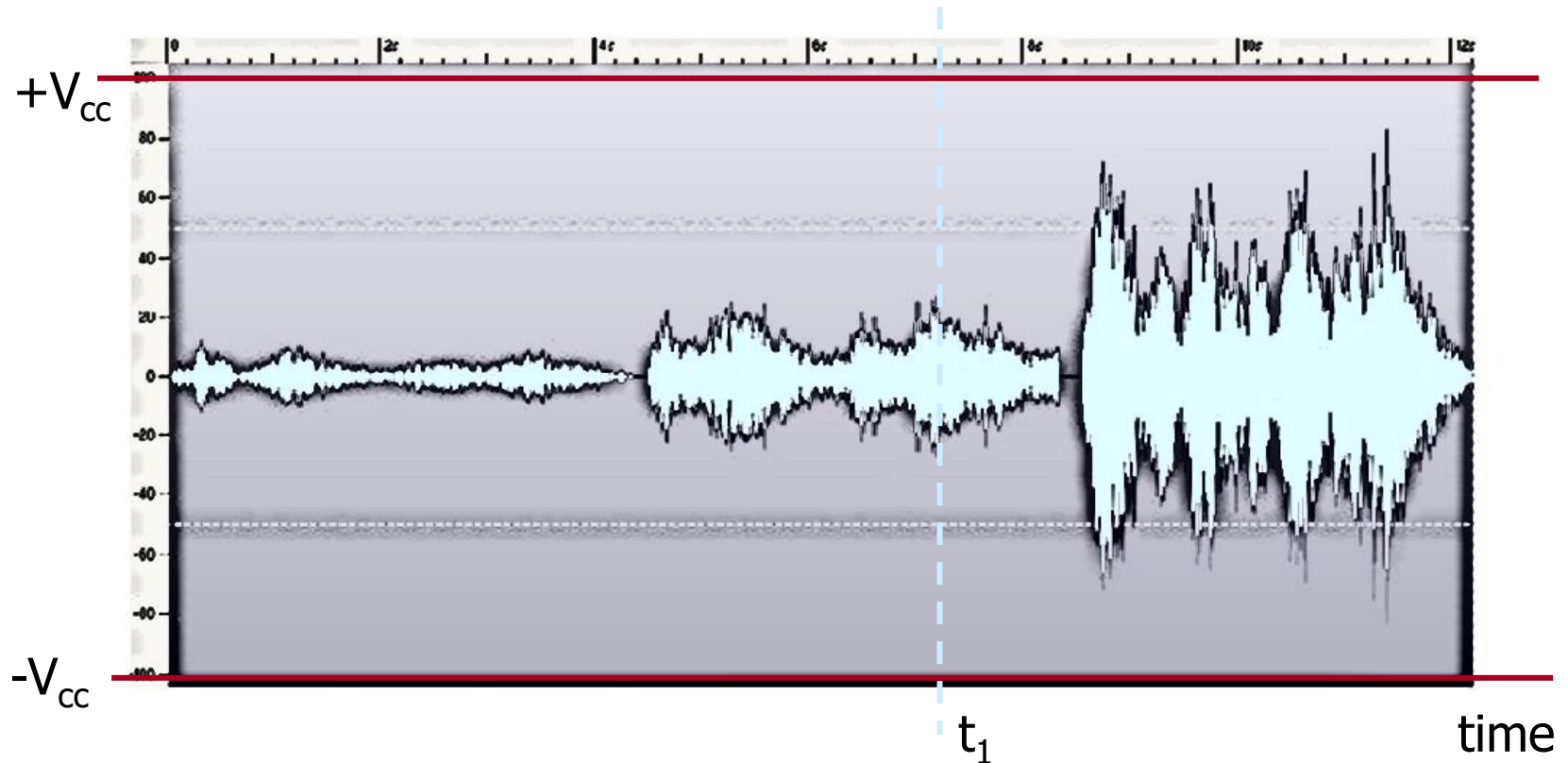
έξοδος

ολική ανάδραση



- εμφανίζονται μεγάλα σήματα και παράγεται ισχύς ($> 1 \text{ Watt}$)
- ενίσχυση τάσης και ρεύματος
- η ισχύς μεταφέρεται σε χαμηλή αντίσταση φορτίου ($|Z_{EI}| \text{ ηχείου} \approx 8 \Omega$)
- έχουν χαμηλή αντίσταση εξόδου
- απαιτείται γραμμική λειτουργία και χαμηλή THD ($< 0.1\%$)
- Η a.c. φύση και συνεχής μεταβολή πλάτους του ηχητικού σήματος, δημιουργεί απώλειες σε θερμότητα
- ...όμως, απαιτείται μεγάλη απόδοση

απώλεια στα στάδια εξόδου



έστω $V_{cc} = \pm 100 \text{ V}$ $|Z_L| = 8\Omega$

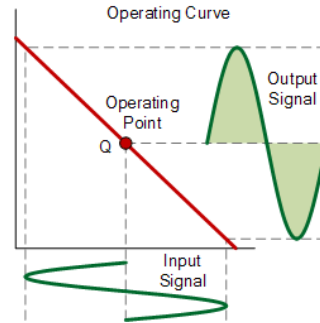
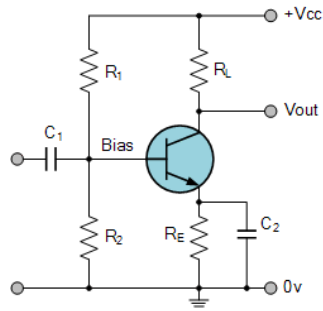
π.χ. στο t_1 , $V_{out} = 40\text{V}$, $I_{out} = 5\text{A}$ ($W_{out} = 200\text{W}$ στο φορτίο)

$$W_{out} = \frac{V_{out}^2}{Z_L}$$

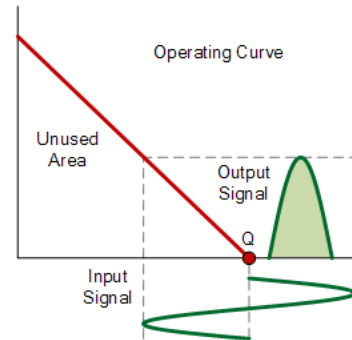
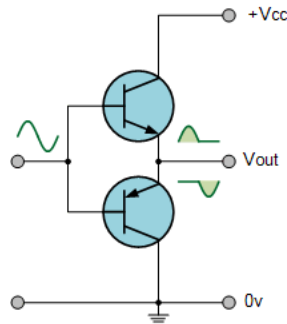
Άρα τα υπόλοιπα 60V και 5A (300W σε θερμότητα)

στάδια εξόδου (σύνοψη)

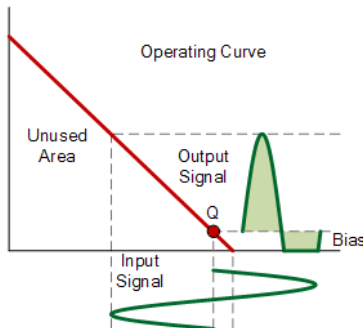
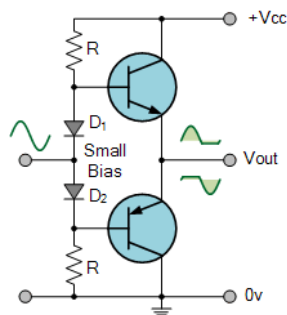
Τάξη A



Τάξη B



Τάξη AB



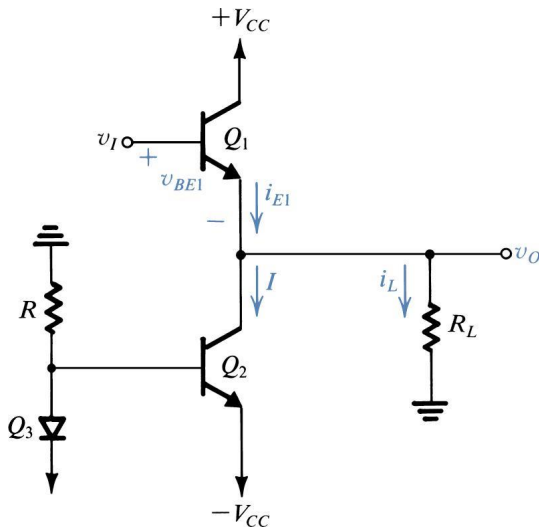
διπολικά
τρανζίστορ ισχύος



- 2-πλάσιο d.c. ρεύμα πόλωσης απαιτείται για να καλυφθούν τα συμμετρικά θετικά – αρνητικά a.c. ρεύματα για σήματα ήχου
- Ένα τρανζίστορ άγει μόνο σε μία διεύθυνση, για όλο τον κύκλο του σήματος, ακόμη και σε απουσία σήματος
- 75% τουλάχιστο της ισχύος τροφοδοσίας χάνεται σε θερμότητα
- Θεωρητικά, η μέγιστη απόδοση είναι 25%

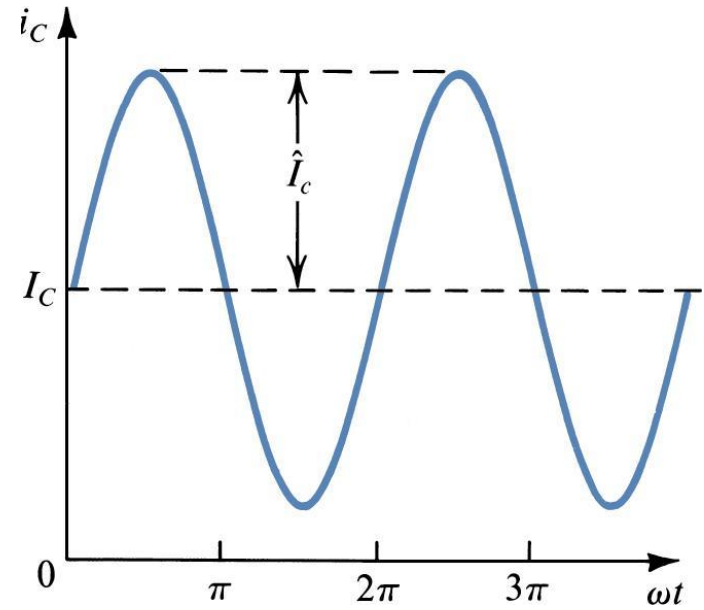
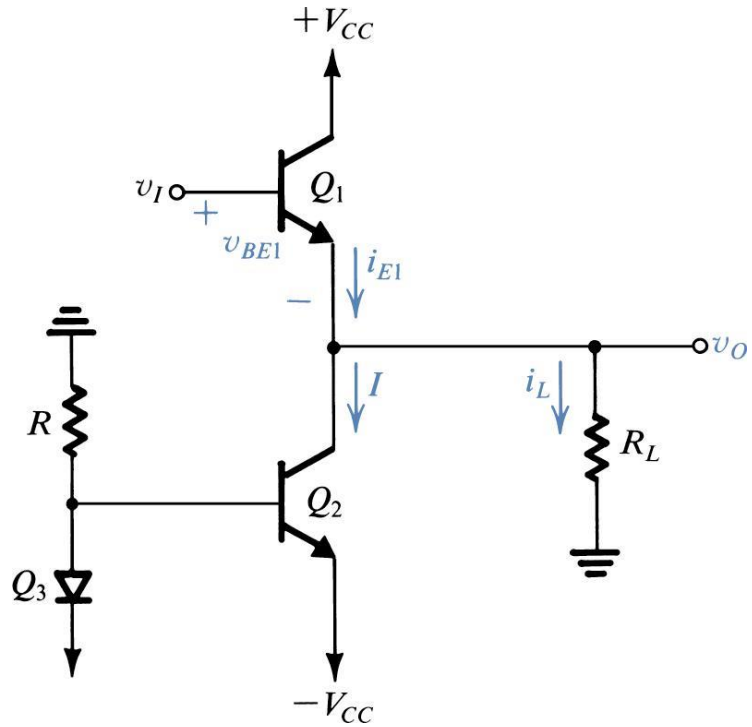
- Το στάδιο εξόδου Τάξης-A είναι ένας απλός ενισχυτής ρεύματος
- Εμφανίζει πολύ χαμηλή απόδοση
- Θεωρητική απόδοση 25%, στην πράξη περίπου 10 %
- Είναι κατάλληλο μόνο για εφαρμογές χαμηλής ισχύος
- Για παραγωγή υψηλής ισχύος απαιτούνται άλλες λύσεις

στάδιο εξόδου Τάξης-A

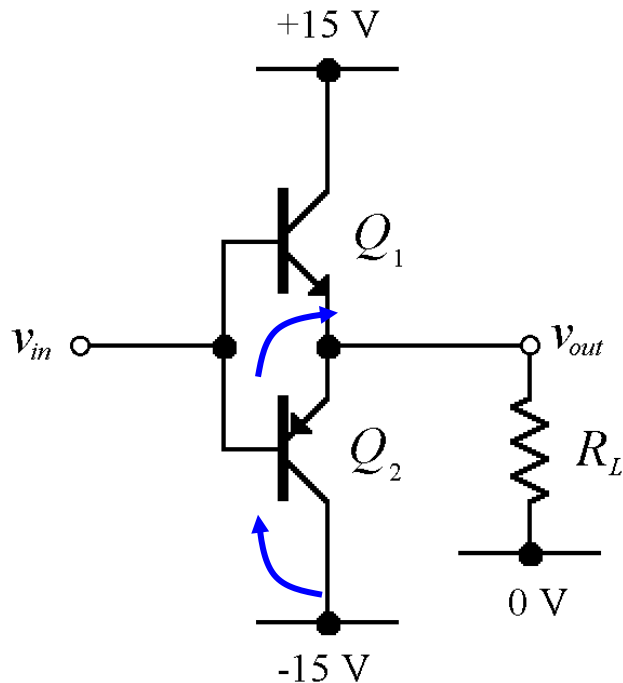


- Το τρανζίστορ άγει σε όλο τον κύκλο του σήματος
- Το Q_1 λειτουργεί σαν ακόλουθος εκπομπού με ρεύμα πόλωσης που παρέχει το Q_2
- Μέγιστη θετική τάση εξόδου εξαρτάται από την τάση κορεσμού του Q_1
- Μέγιστη αρνητική τάση εξόδου εξαρτάται είτε από τον κορεσμό του Q_2 είτε από την αποκοπή του Q_1 (εξαρτάται από R_L και I)

στάδιο εξόδου Τάξης-A

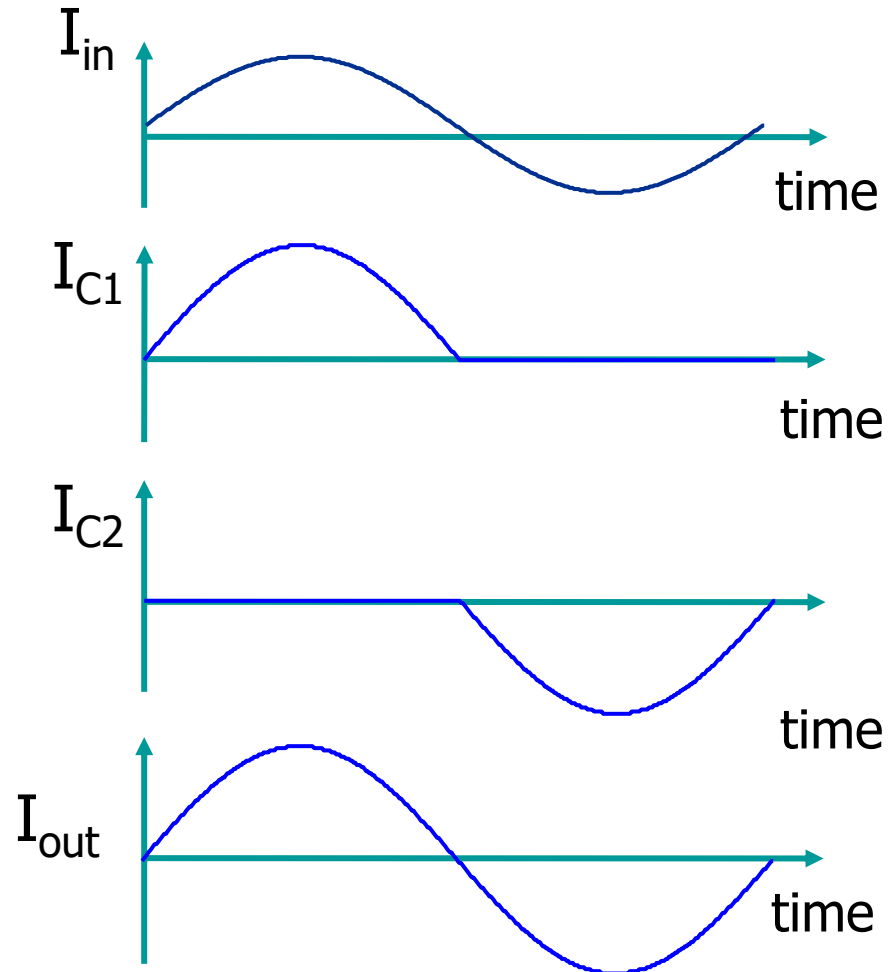
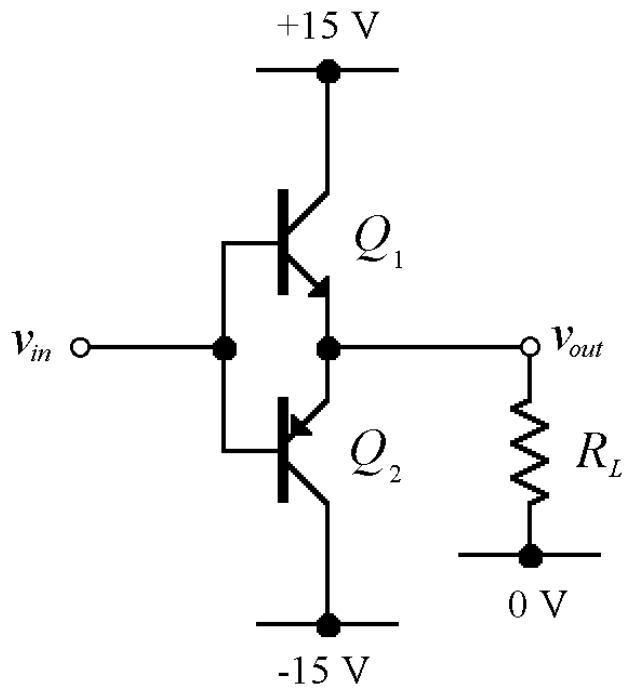


στάδιο εξόδου Τάξης-B



- Τα Q_1 και Q_2 λειτουργούν σαν μη-πολωμένοι ακόλουθοι εκπομπού:
 - το Q_1 ηρη τρανζίστορ θα στείλει ρεύμα όταν η είσοδος είναι θετική
 - το Q_2 ηρη τρανζίστορ θα τραβήξει ρεύμα όταν η είσοδος είναι αρνητική
- Άρα, γωνία αγωγής κάθε τρανζίστορ είναι 180° Τα ρεύματα συνδυάζονται στο φορτίο
- Για μηδενική είσοδο, κανένα τρανζίστορ δεν άγει
- η απώλεια ισχύος για κατάσταση ηρεμίας είναι μηδενική

ρεύματα ενισχυτή Τάξης-B

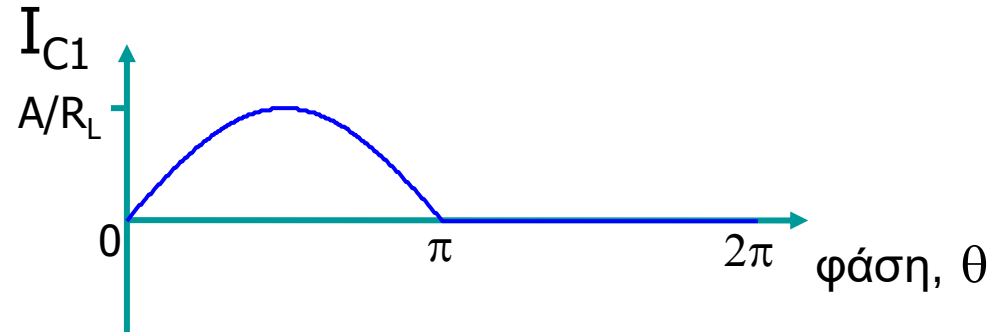
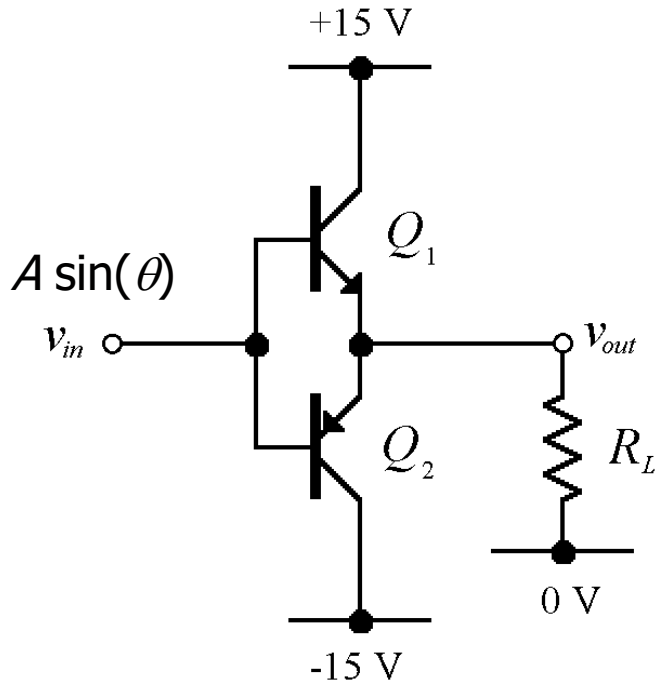


απόδοση ενισχυτή Τάξης-B

- Μέγιστη θεωρητική απόδοση Τάξης-B είναι 78.5% (πολύ μεγαλύτερη του 25% της θεωρητικής απόδοσης Τάξης-A).
- Στην πράξη η απόδοση είναι της τάξης του 40% (σε σχέση με την πραγματική 10% της Τάξης-A).
- Αντίθετα της Τάξης-A, οι απώλειες εξαρτώνται από το πλάτος του σήματος εισόδου
- Δεδομένης της χρήσης 2 τρανζίστορ εξόδου, οι απώλειες κατανέμονται αναλόγως

απόδοση ενισχυτή Τάξης-B

Μέση ισχύς από την τροφοδοσία:



$$P_{(+ve)} = V_S \overline{I_{C1}}$$

$$\overline{I_{C1}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{C1}(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{A}{R_L} \sin(\theta) d\theta = \frac{A}{\pi R_L}$$

$$\therefore P_{(+ve)} = \frac{V_S A}{\pi R_L}$$

απόδοση ενισχυτή Τάξης-B

Λόγω συμμετρίας, η ισχύς που καταναλώνεται από την +ve και -ve γραμμή τροφοδοσίας θα είναι ίση και άρα, συνολικά:

$$P_S = P_{(+ve)} + P_{(-ve)} = 2P_{(+ve)} = \frac{2V_S A}{\pi R_L}$$

Ισχύς που μεταφέρεται στο φορτίο:

$$P_L = \frac{\overline{v_{out}^2}}{R_L} = \frac{\overline{A^2 \sin^2(\omega t)}}{R_L} = \frac{A^2}{2R_L}$$

Απόδοση:

$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{A^2}{2R_L} \frac{\pi R_L}{2V_S A} = \frac{A\pi}{4V_S}$$

$$(\text{NB. } A \leq V_S \Rightarrow \eta \leq \pi / 4 = 78.5\%)$$

απώλεια σε θερμότητα ενισχυτή Τάξης-B

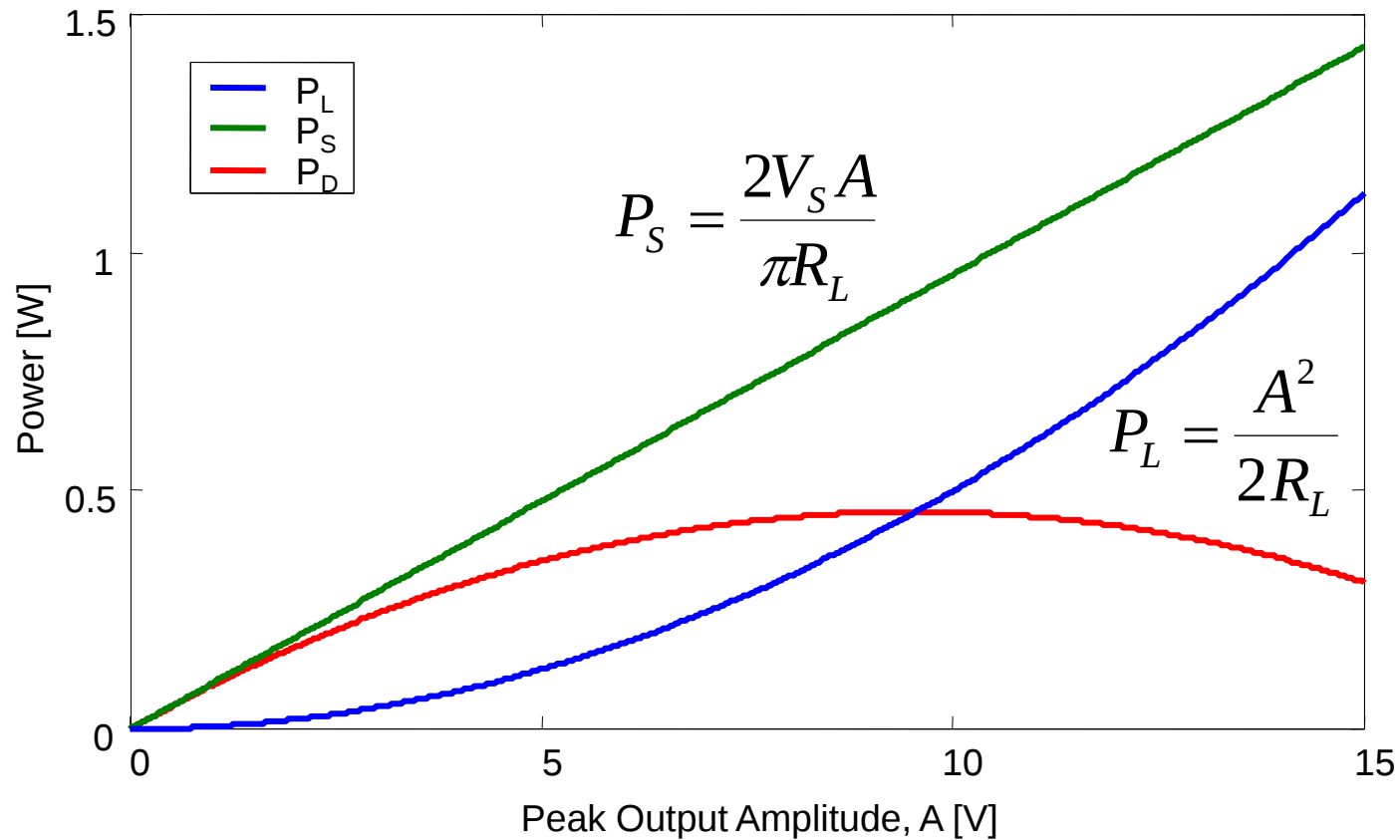
Για την επιλογή των τρανζίστορ εξόδου, θα πρέπει να υπολογισθεί και η ισχύς που χάνεται σε θερμότητα:

$$P_D = P_S - P_L = \frac{2V_S A}{\pi R_L} - \frac{A^2}{2R_L}$$

Υπολογίζεται η μέγιστη τιμή του P_D για να επιλεγούν τα τρανζίστορ και οι ψύκτρες

απώλεια σε θερμότητα ενισχυτή Τάξης-B

π.χ. για $V_S = 15\text{ V}$, $R_L = 100\Omega$



απώλεια σε θερμότητα ενισχυτή Τάξης-B

απώλεια σε θερμότητα P_D εξαρτάται από το πλάτος του σήματος A ,

$$P_D = \frac{2V_S A}{\pi R_L} - \frac{A^2}{2R_L}$$

μέγιστο για: $\frac{dP_D}{dA} = 0$

$$\Rightarrow \frac{2V_S}{\pi R_L} - \frac{A}{R_L} = 0 \quad \Rightarrow A = \frac{2V_S}{\pi}$$

$$\therefore P_{D(\max)} = \frac{4V_S^2}{\pi^2 R_L} - \frac{2V_S^2}{\pi^2 R_L} = \frac{2V_S^2}{\pi^2 R_L}$$

Σχεδιασμός για ενισχυτή Τάξης-B που θα παράγει μέχρι 25 W σε φορτίο 4Ω

$$P_L \leq 25 \Rightarrow \frac{A^2}{2R_L} \leq 25 \Rightarrow A \leq 14.1 \text{ V}$$

Τάσεις γραμμών τροφοδοσίας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες του $A_{\max}$ και έστω $V_s = 15\text{V}$

$$P_{D(\max)} = \frac{2V_s^2}{\pi^2 R_L} = 11.4 \text{ W} = 2 \times 5.7 \text{ W}$$

Καθένα από τα τρανζίστορ εξόδου θα πρέπει να μπορούν άνετα να απάγουν μέχρι 5.7 Watts. Έστω επιλέγονται τα TIP120 & TIP 125:

$$T_J - T_A = \theta_{JA} P_D \Rightarrow T_J = \theta_{JA} P_D + T_A$$

$$\therefore \theta_{JA} P_{D\max} + T_A < T_{J\max}$$

$$\Rightarrow 5.7\theta_{JA} + 25 < 150$$

$$\Rightarrow \theta_{JA} < 22^\circ \text{C/W}$$

$$\text{με } q_{JC} = 1.92^\circ \text{C/W}$$

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CA} = 1.92 + \theta_{CA}$$

$$\therefore \theta_{CA} < 20^\circ \text{C/W}$$

Άρα απαιτούνται είτε 2 ψήκτρες με θερμική αντίσταση λιγότερη από 20°C/W ,
είτε μία με λιγότερη από 10°C/W

παράδειγμα ενισχυτή Τάξης-B - ψύκτρες

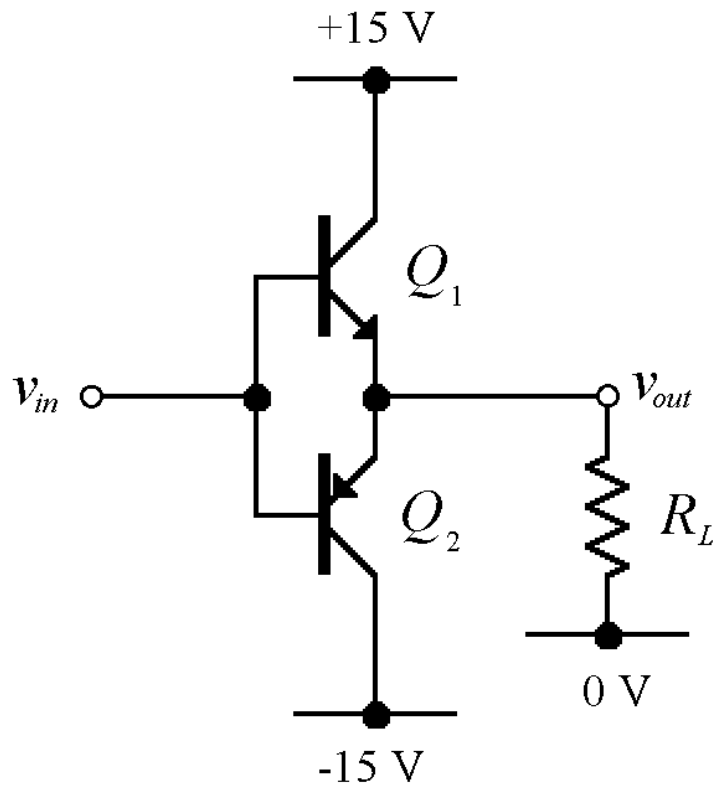


Διαστάσεις: 50mm x 50mm x 9.5mm
Συνδέεται σε 2 τρανζίστορ

Θερμική αντίσταση: 6.5°C/W

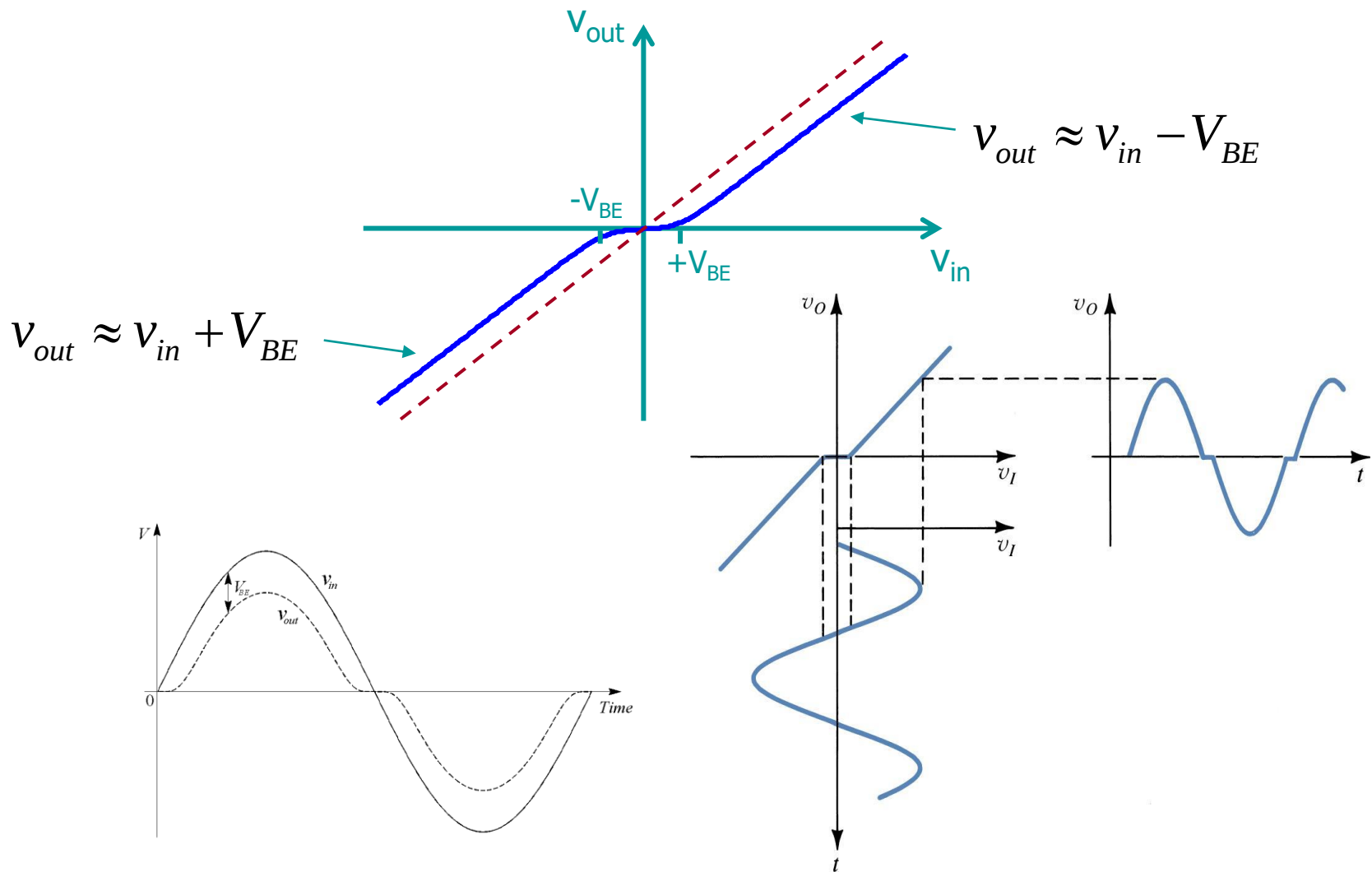
Κόστος: 1 Ευρώ (περίπου)

παραμορφώσεις διάβασης (Cross-Over) ενισχυτή Τάξης-B



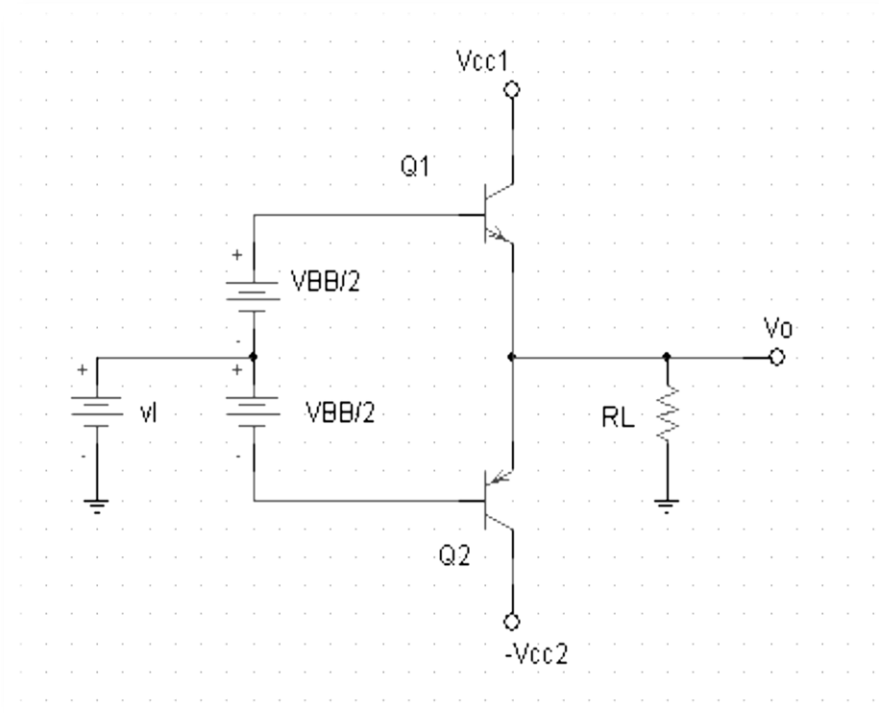
- Μία μικρή τιμή τάσης στην βάση του εκπομπού είναι απαραίτητη
- Το Q_1 στην πράξη άγει για $v_{in} > 0.7 \text{ V}$
- Το Q_2 για $v_{in} < -0.7 \text{ V}$
- Για $0.7 > v_{in} > -0.7$, η έξοδος είναι μηδενική
- Άρα, μή-γραμμική είσοδος / έξοδος

παραμορφώσεις διάβασης (Cross-Over) ενισχυτή Τάξης-B

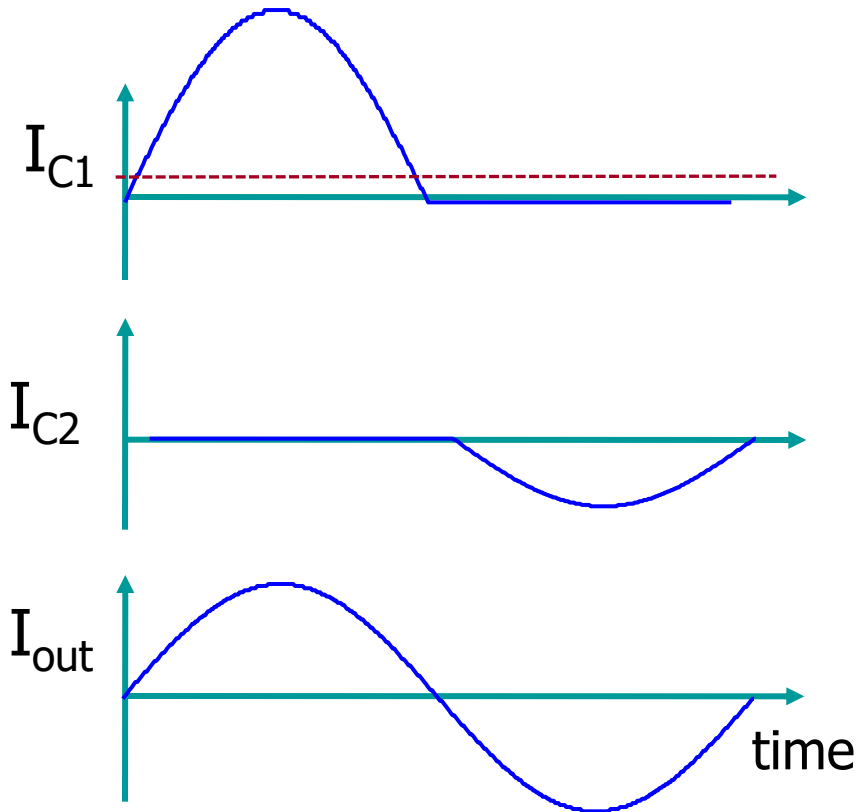


συμπεράσματα για ενισχυτές Τάξης-B

- Στάδια εξόδου Τάξης-B είναι πολύ πιο αποδοτικά από αυτά της Τάξης-A (78.5% σε σχέση με 25%)
- Χρειάζονται διπλάσιο αριθμό τρανζίστορ...
- ...και δεν λειτουργούν τελείως γραμμικά, αφού παραμορφώσεις διάβασης μπορεί να είναι μεγάλες

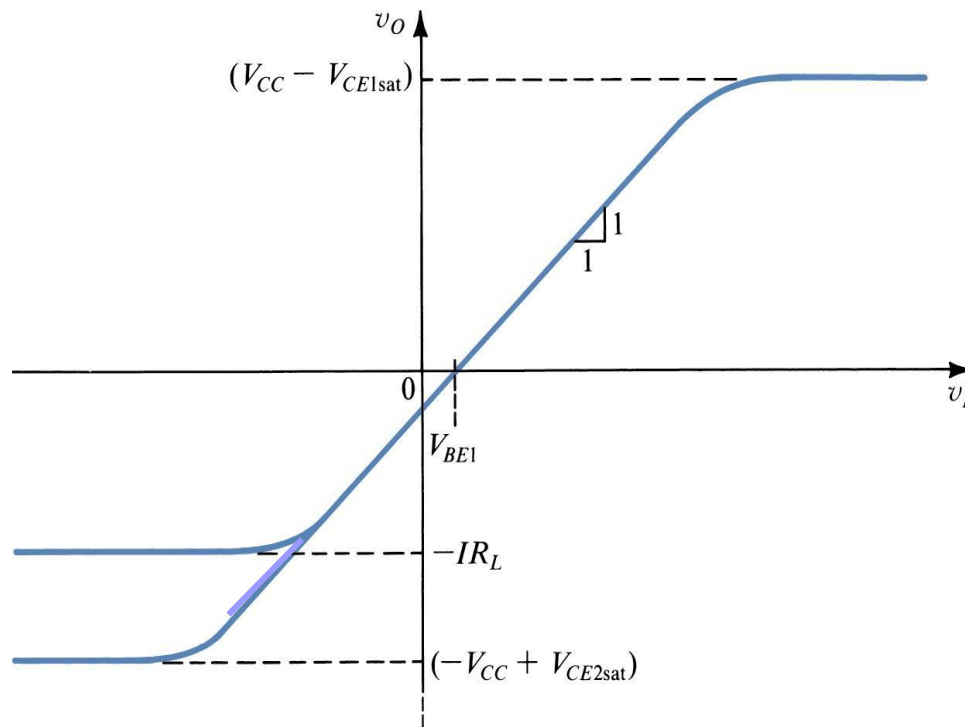


- Η παραμόρφωση cross-over μπορεί να εξαλειφθεί με πόλωση των τρανζίστορ με κάποιο μικρό μη-μηδενικό ρεύμα
- Η τάση πόλωσης V_{BB} εφαρμόζει μεταξύ του Q_1 και Q_2
- για $V_{in}=0$, $V_{out}=0$ και τάση $V_{BB}/2$ εφαρμόζει μεταξύ βάσης και εκπομπού
- Η V_{BB} επιλέγεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή τιμή ρεύματος ηρεμίας I_Q

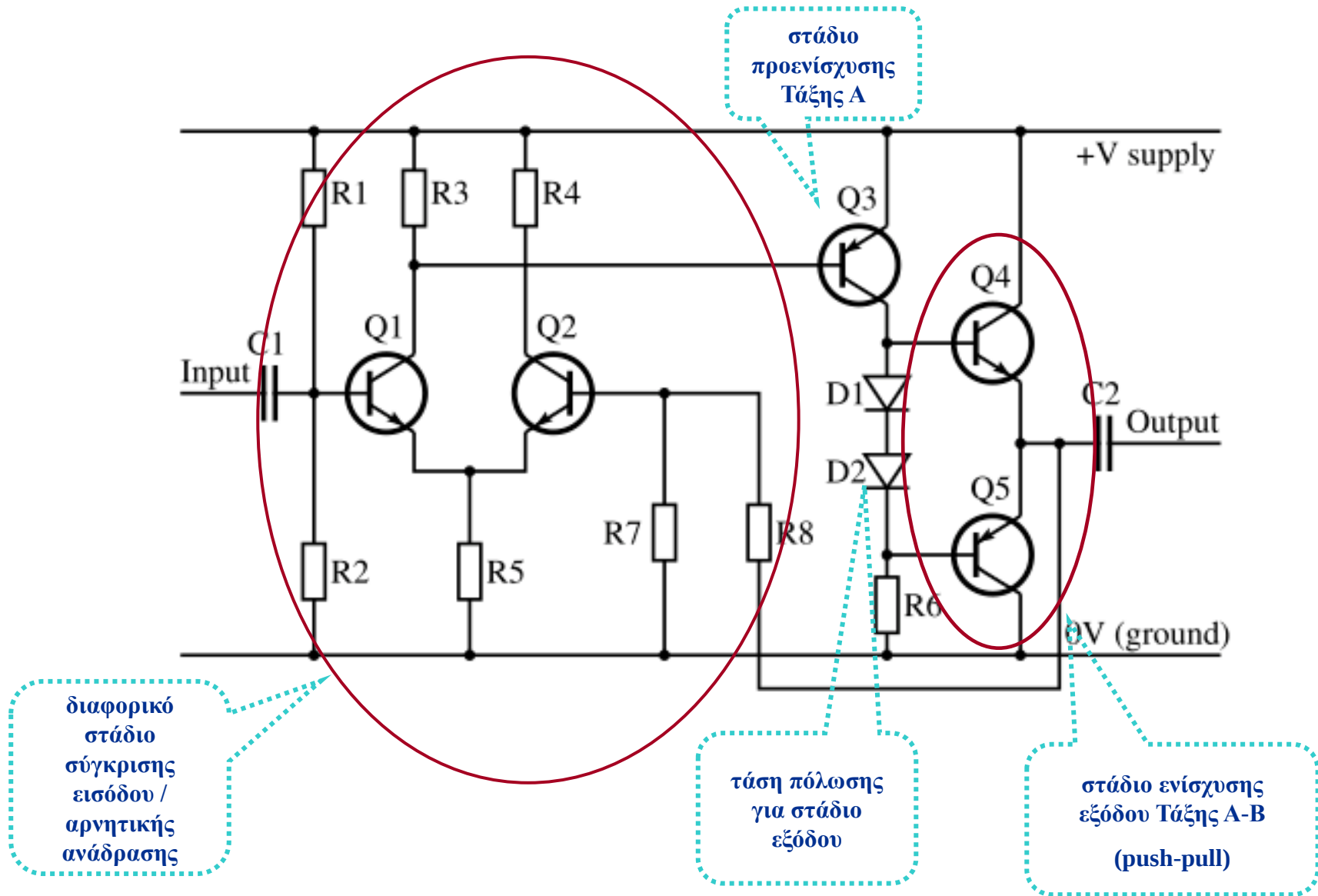


- Το ένα τρανζίστορ άγει για γωνία μεγαλύτερη των 180° (για τον θετικό κύκλο)
- Το άλλο τρανζίστορ άγει για γωνία μικρότερη των 180° (για τον αρνητικό κύκλο)
- για $V_{in} = 0$, το ρεύμα ηρεμίας I_Q προκαλεί απώλεια σε θερμότητα
- Συμβιβασμός πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων Τάξεων-A και B.

σχέση εισόδου / εξόδου ενισχυτή Τάξης Α-Β

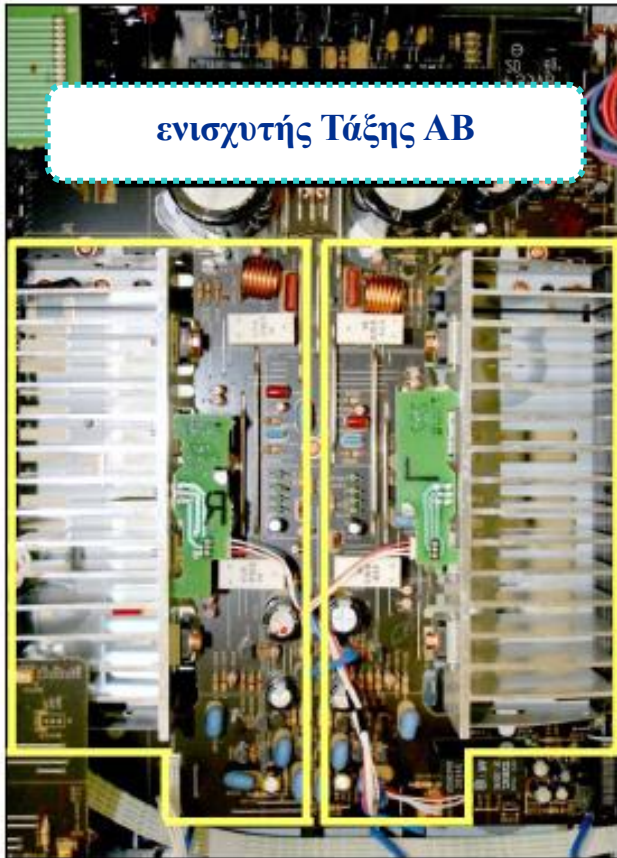


παράδειγμα ενισχυτή Τάξης A-B



ενισχυτές ισχύος Τάξης - D

ενισχυτές Τάξης -D



ενισχυτής Τάξης AB

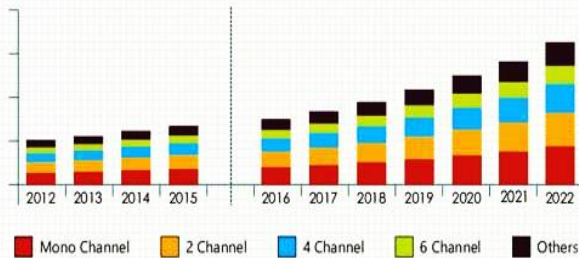
ενισχυτής Τάξης D



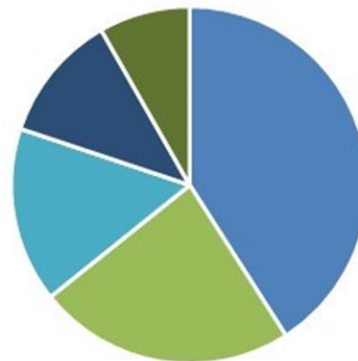
ενισχυτές Τάξης -D



GLOBAL AUDIO CLASS D AMPLIFIER MARKET SIZE, BY PRODUCT TYPE, \$M (2012 – 2022)



Audio Amplifier Market Share, By Class, 2022



- Type D
- Type AB
- Type A
- Type B
- Others

Source: www.kbvresearch.com



ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ Τάξης -D

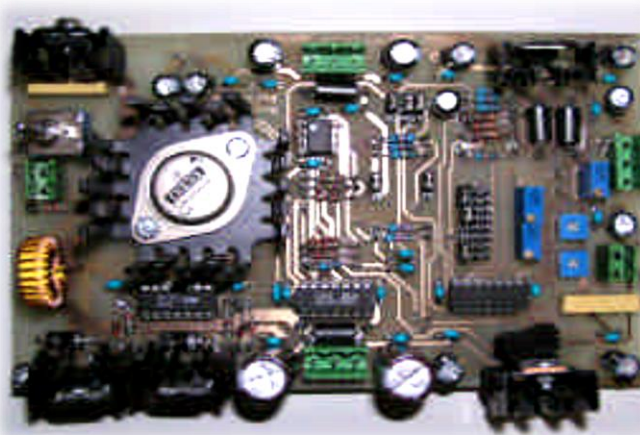
- 400 Watt , stereo



- 20 Watt , stereo

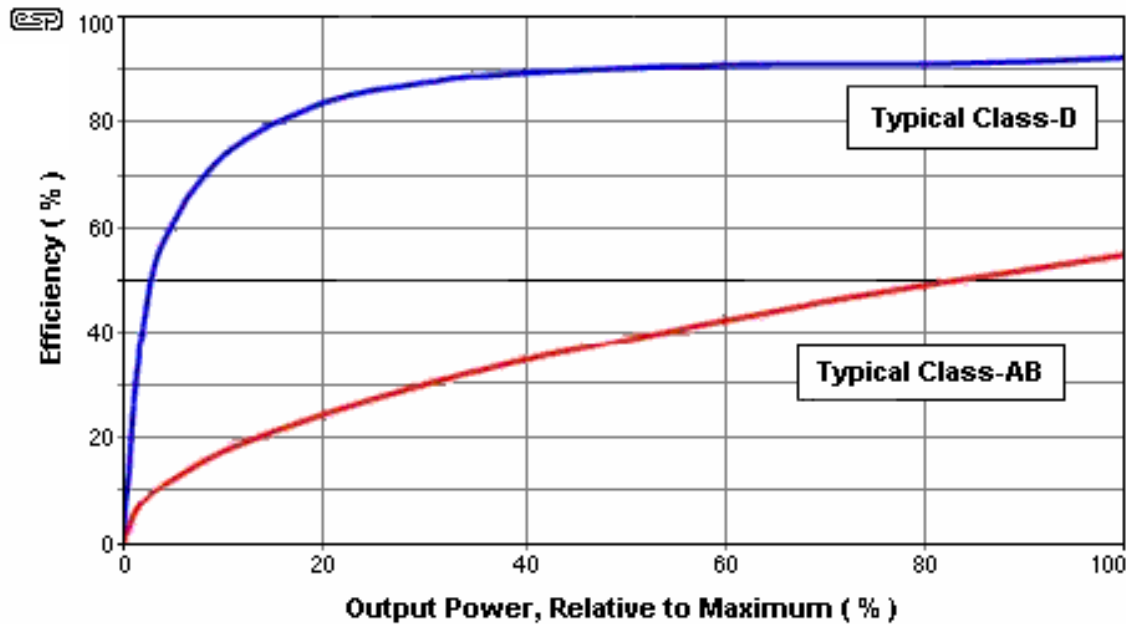


- 200 Watt , stereo



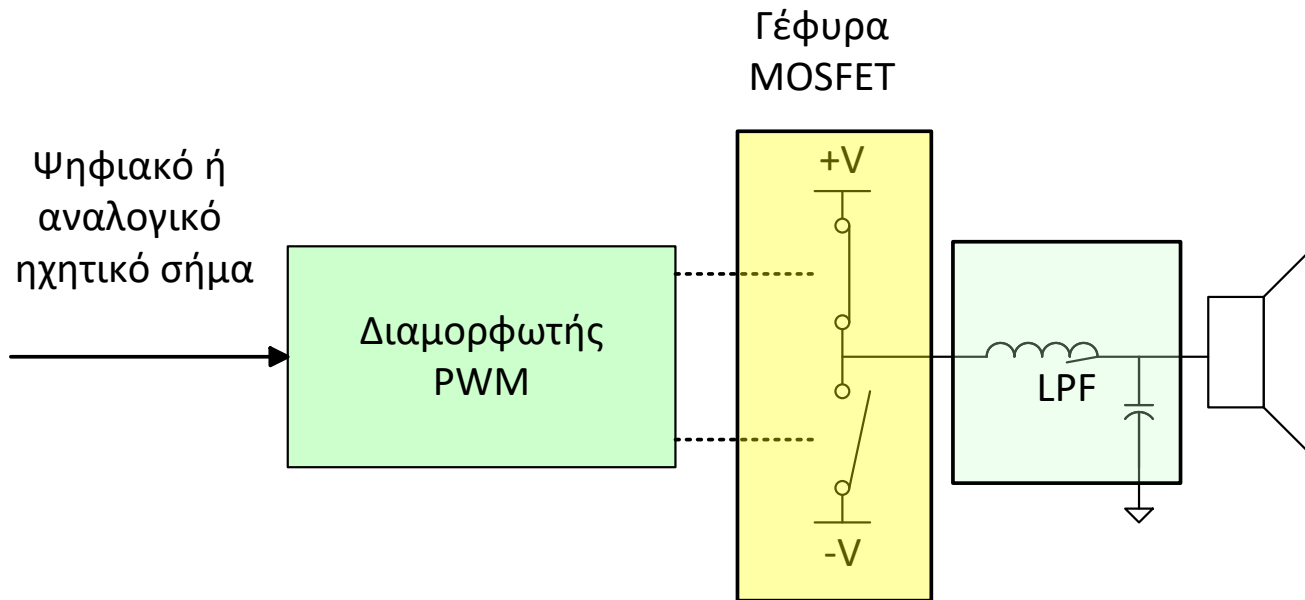
- 200 Watt , stereo





- σχεδόν ιδανική απόδοση (~ 90%)
- χαμηλές απώλειες σε θερμότητα
- εύκολη τροφοδοσία – χαμηλή κατανάλωση
- μικρό μέγεθος
- ψηλή ταχύτητα διακοπτικών στοιχείων
- αλλιώς, παραμορφώσεις ή περιορισμούς εύρους απόκρισης

δομή ενισχυτών Τάξης -D



- Διαμόρφωση ηχητικών σημάτων σε παλμικό σήμα PWM (Pulse Width Modulation)
- Διαμόρφωση PWM μέσω σύγκρισης πλάτους σήματος εισόδου με τριγωνικό σήμα διαμόρφωσης
- Ενίσχυση παλμικού σήματος PWM με βαθμίδα διακοπτικών τρανζίστορ (Γέφυρα MOSFET)
- Ισχύς τροφοδοσίας καταναλώνεται μόνο κατά τη διάρκεια του παλμού
- Αποδιαμόρφωση εξόδου σε μεγάφωνο, μέσω χαμηλοδιαβατού φίλτρου (LPF)

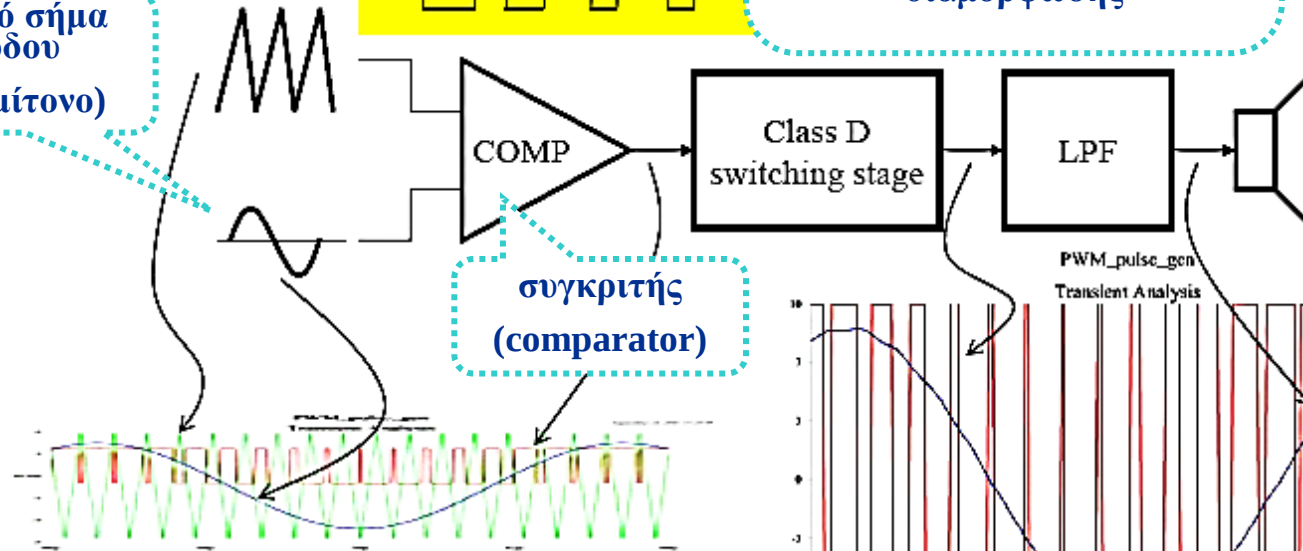
δομή ενισχυτών Τάξης -D

Τριγωνικό σήμα διαμόρφωσης
(π.χ. στα 40KHz)

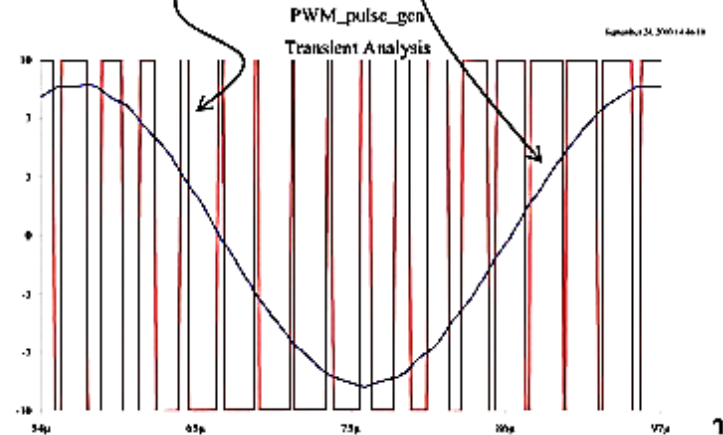
ηχητικό σήμα
εισόδου
(π.χ. ημίτονο)

Έξοδος συγκριτή
(comparator) γίνεται ενεργή
μόνο όταν το πλάτος του
σήματος εισόδου (π.χ.
ημιτόνου) είναι μεγαλύτερο
του τριγωνικού σήματος
διαμόρφωσης

συγκριτής
(comparator)

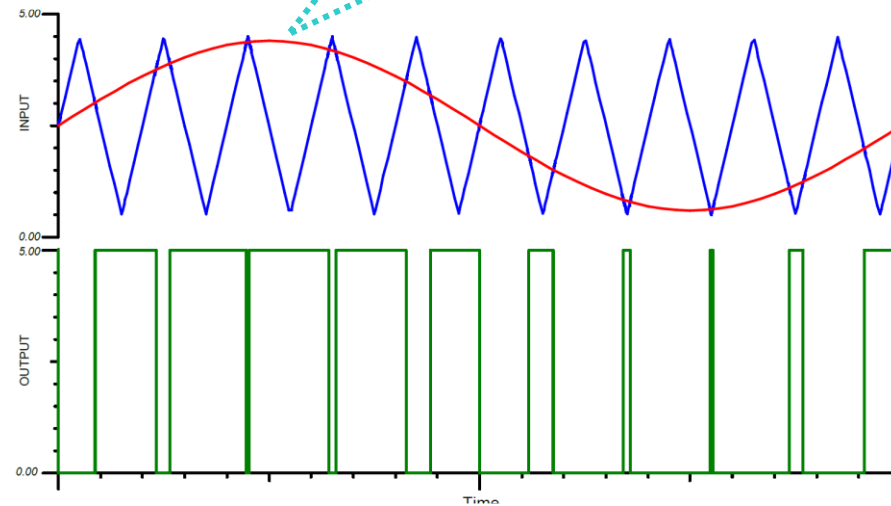
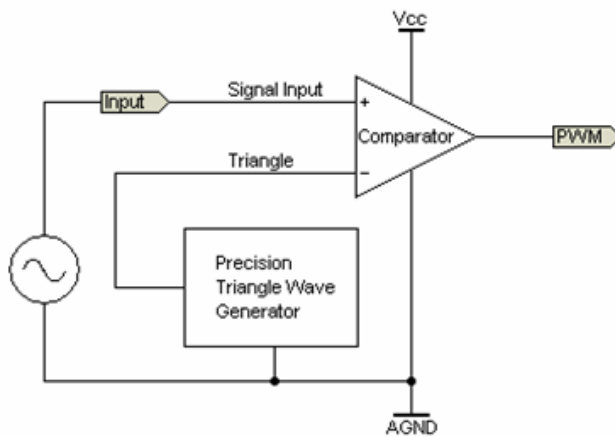


Using $f_{PWM}=400\text{kHz}$ to modulate 25kHz sinusoidal waveform

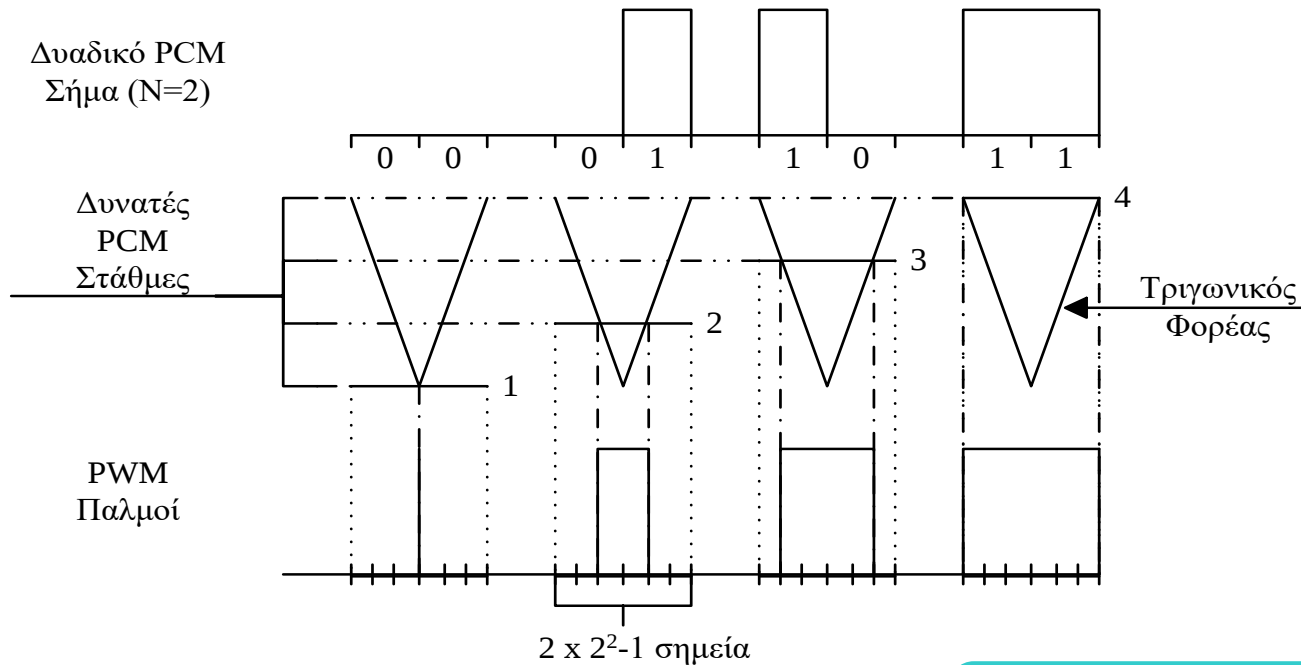


διαμόρφωση PWM για ενισχυτές Τάξης -D

Έξοδος συγκριτή (comparator) γίνεται ενεργή μόνο όταν το πλάτος του σήματος εισόδου (π.χ. ημιτόνου) είναι μεγαλύτερο του τριγωνικού σήματος διαμόρφωσης



απευθείας ψηφιακή διαμόρφωση PWM



περίοδος
δειγματοληψίας
(ρολόϊ) PWM

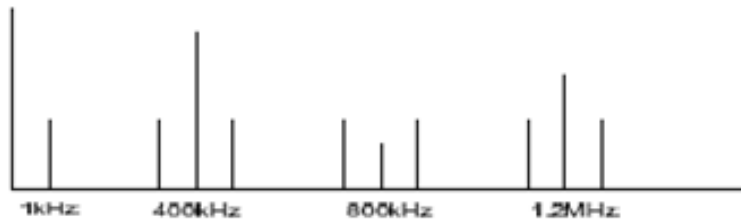
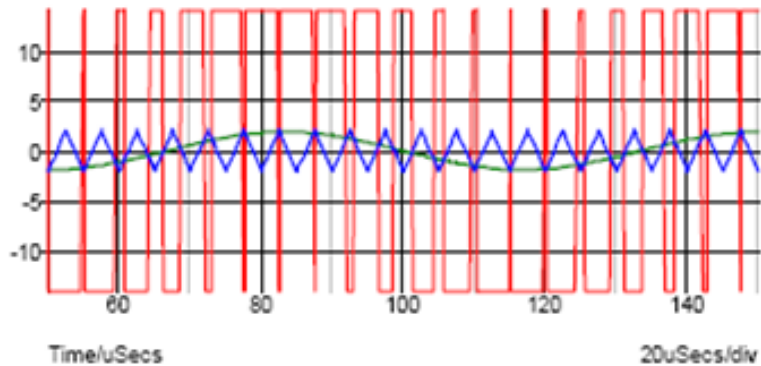
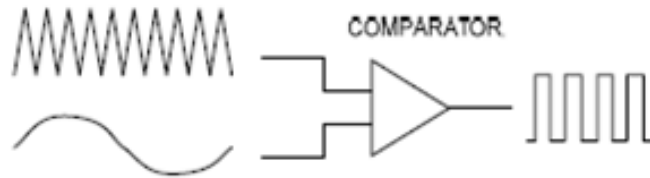
$$T_p = \frac{T_s}{2(2^N - 1)}$$

περίοδος
δειγματοληψίας
PCM

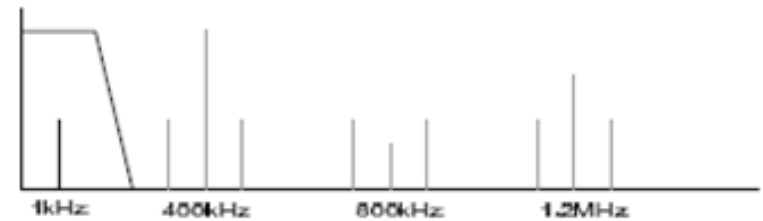
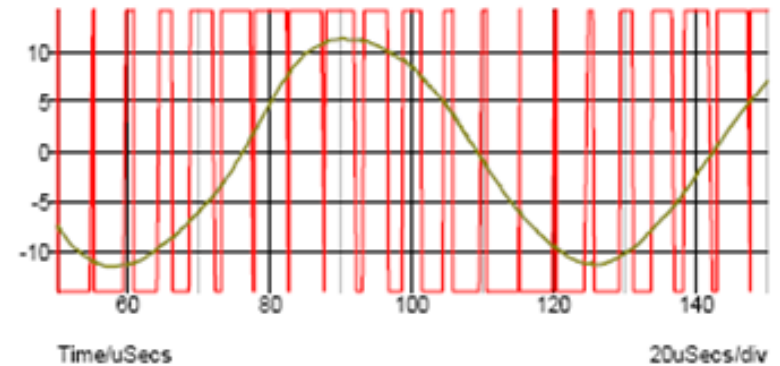
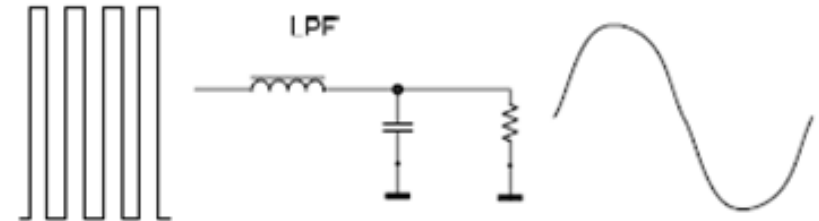
Bit κβαντισμού
δείγματος PCM

διαμόρφωση PWM και παραμορφώσεις

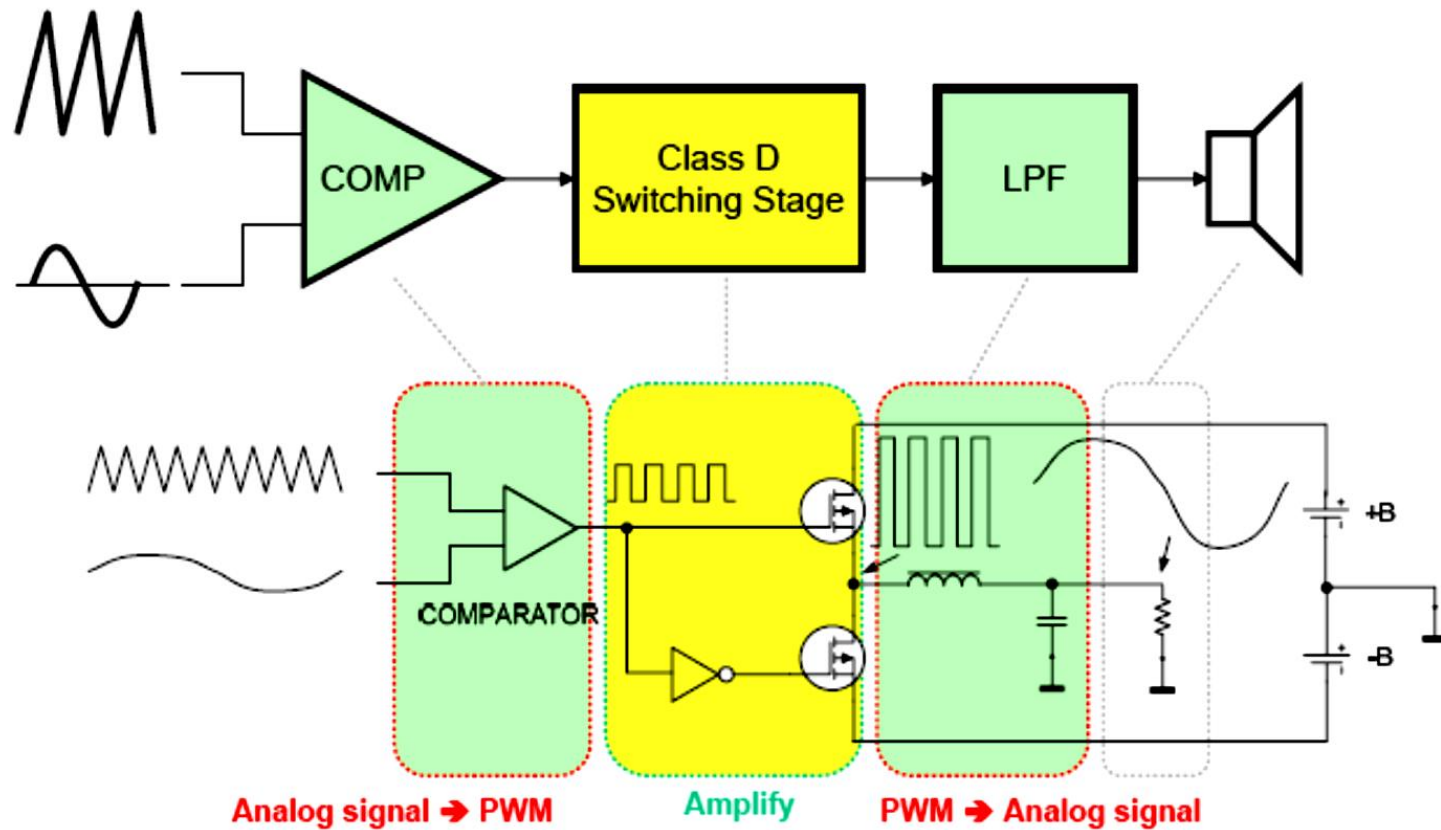
Διαμόρφωση ηχητικού σήματος εισόδου
(π.χ. ημίτονο) σε σήμα PWM



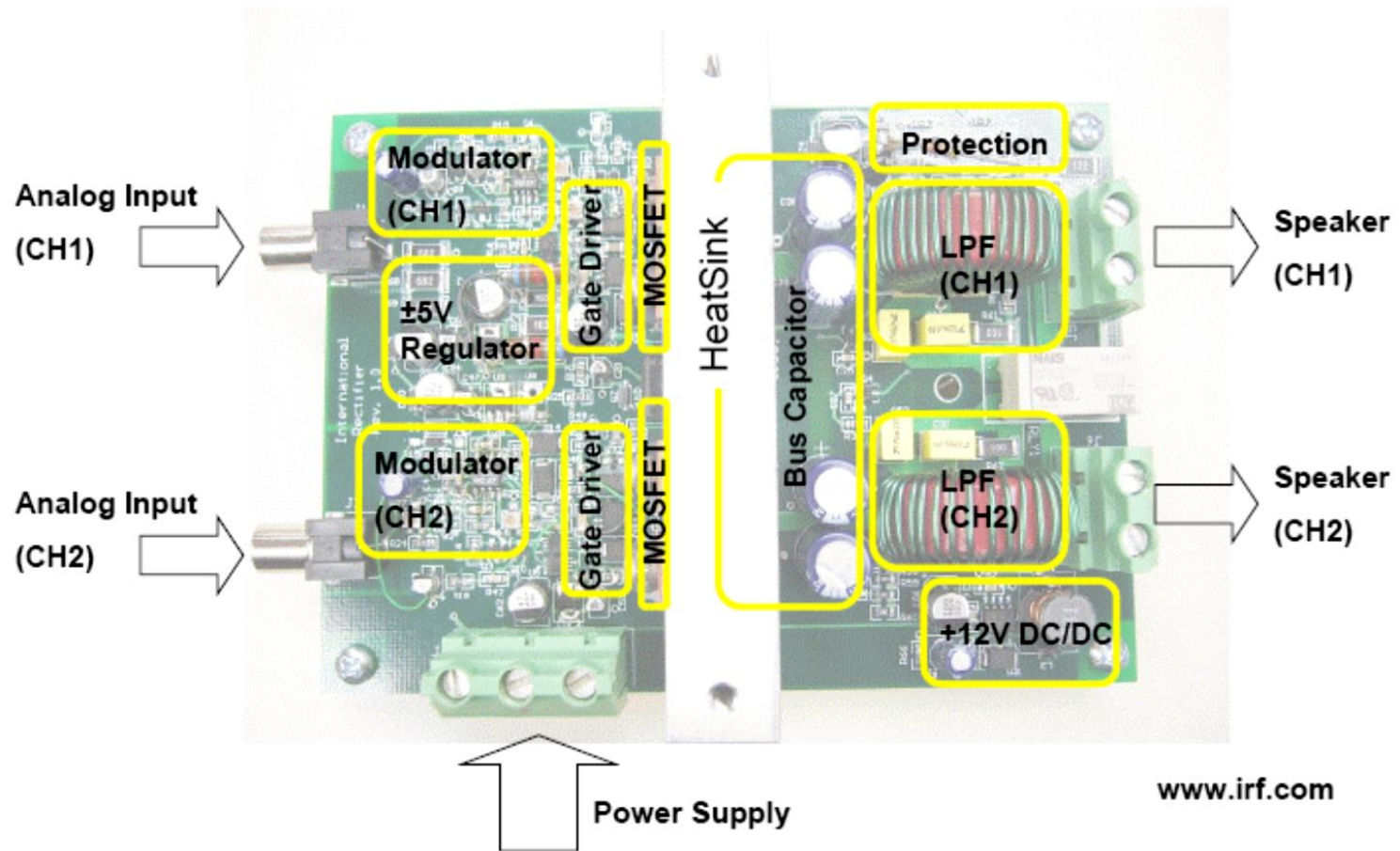
Αποδιαμόρφωση ενισχυμένου PWM
σήματος σε σήμα ενισχυμένο εξόδου
(π.χ. ημίτονο)



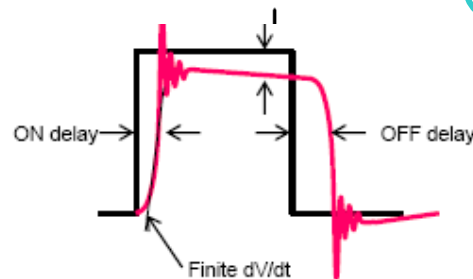
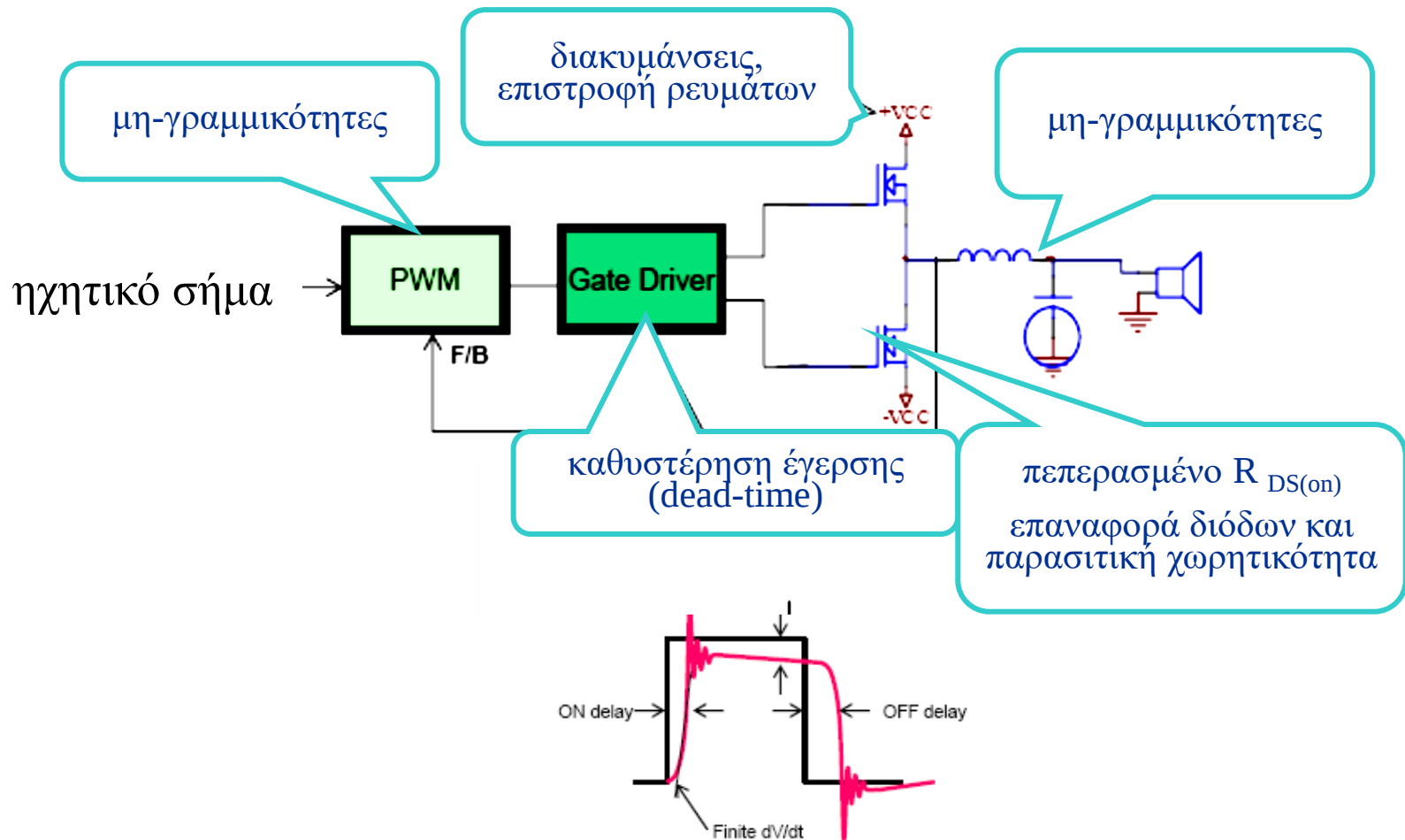
δομή ενισχυτών Τάξης -D



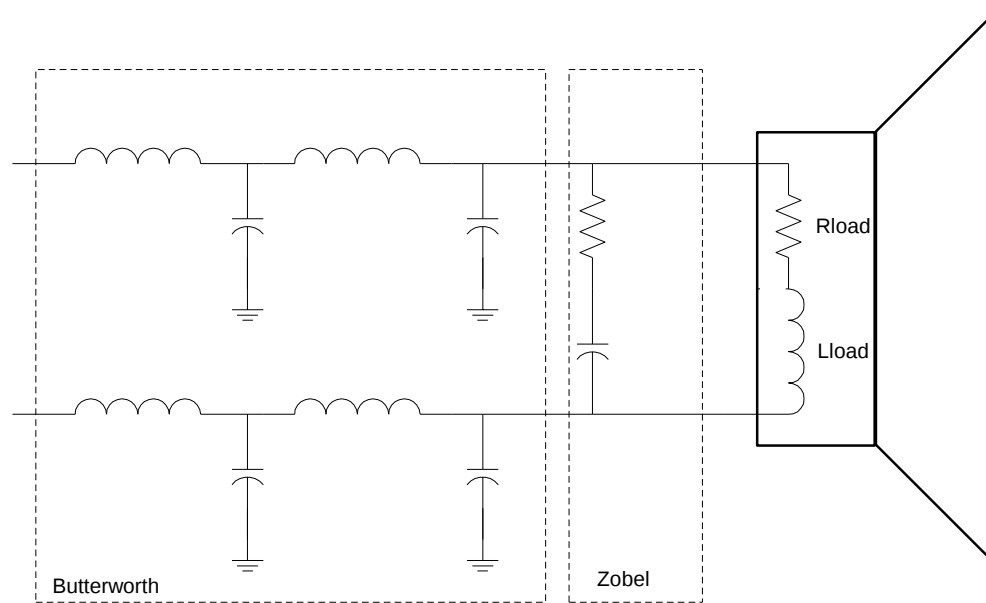
δομή ενισχυτών Τάξης -D



προβλήματα ενισχυτών τάξης D

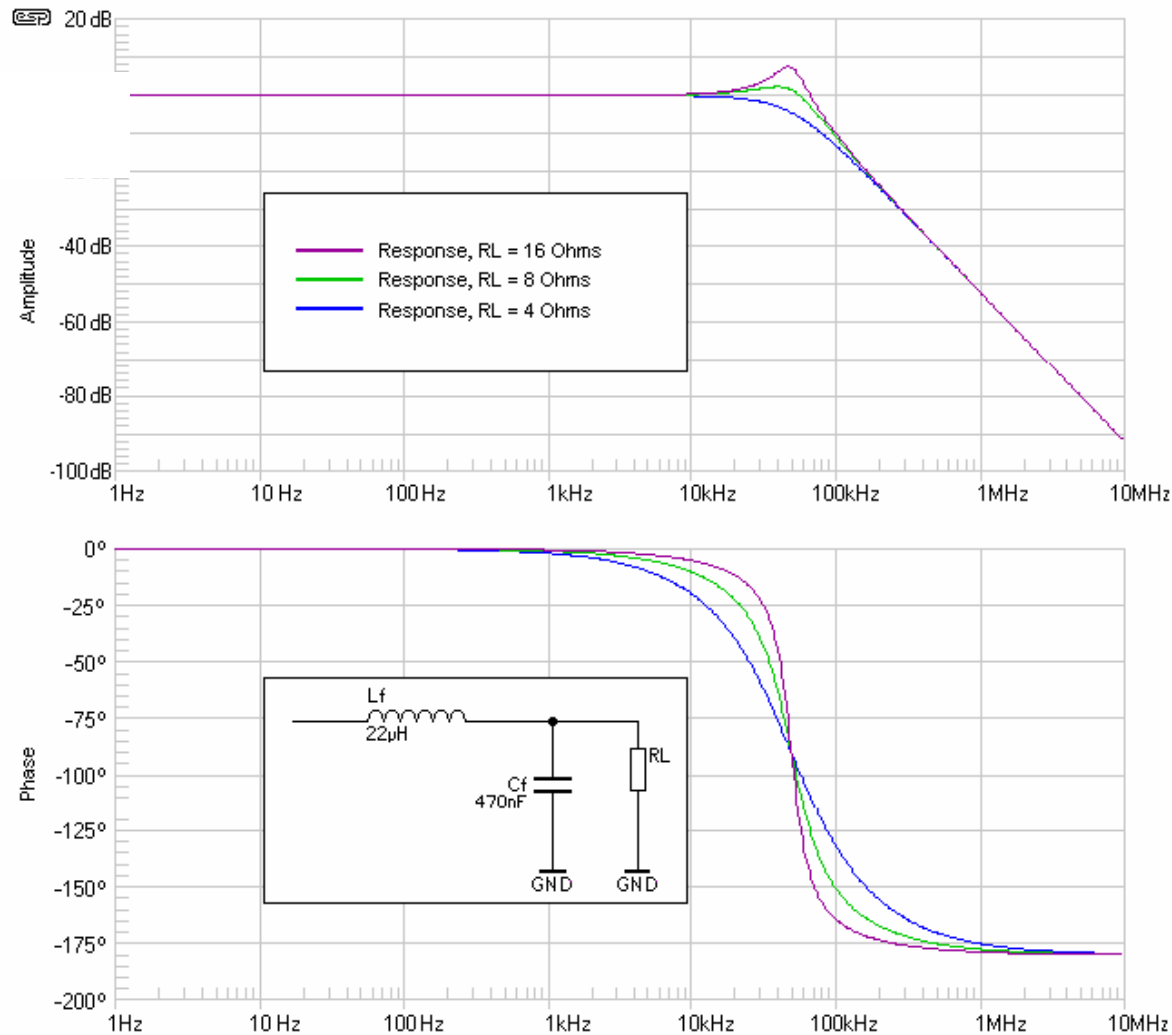


φίλτρο σταδίου εξόδου ενισχυτών Τάξης D



- Φίλτρο Butterworth, 4^{ης} τάξεως, f_{-3dB} 30KHz, -80 dB/dec
- Φίλτρο Zobel για αντιστάθμιση μεγαφώνου

φίλτρο σταδίου εξόδου ενισχυτών Τάξης D



φίλτρο σταδίου εξόδου ενισχυτών Τάξης D



παράδειγμα ενισχυτή Τάξης D (2 x 200 watt / 4 Ω)



Topology: Half Bridge

IR Devices: IR2011S, IRFB23N15D

Switching frequency: 400kHz (Adjustable)

Rated Output Power: 200W+200W / 4 ohm

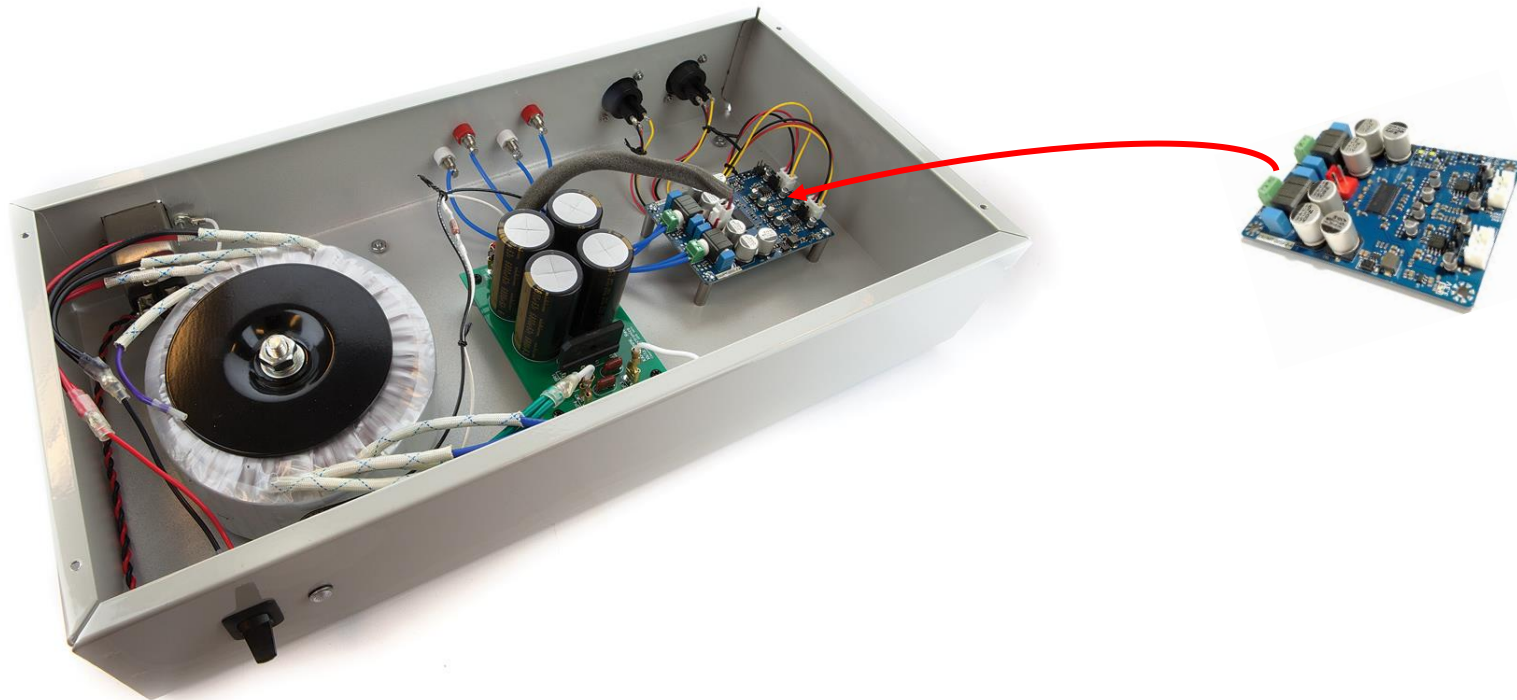
THD: 0.03% @1kHz, Half Power

Frequency Response: 5Hz to 40kHz (-3dB)

Power Supply: ~ ±50V

Size: 4.0" x 5.5"

παράδειγμα κατασκευής πλήρους ενισχυτή Τάξης D (50 Watt, 228 €)



<https://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/audiovideo/build-your-own-professionalgrade-audio-amp-on-the-sort-of-cheap>



ομάδα τεχνολογίας ήχου & ακουστικής

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

<http://www.wcl.ece.upatras.gr/AudioGroup/>