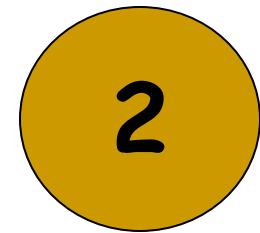


Παραμόρφωση στους Ενισχυτές

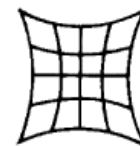


Ηλεκτρονική
Γ' Τάξη / Β' εξάμηνο
Επίκ. Καθηγήτρια Ε. Καραγιάννη

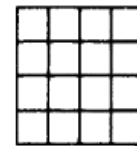


Παραμόρφωση

- (electronics) Οποιαδήποτε μη επιθυμητή αλλαγή στην κυματομορφή ενός σήματος το οποίο περνάει μέσα από ένα κύκλωμα ή άλλο μέσο μεταφοράς.
- (engineering) Ο βαθμός αποτυχίας ενός συστήματος να αναπαραγάγει με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του σήματος εισόδου, στην έξοδο.
- (engineering acoustics) Οποιαδήποτε μη επιθυμητή αλλαγή στην κυματομορφή ενός κύματος ήχου.
- (optics) Ένας τύπος απόκλισης όπου υπάρχει διακύμανση στη μεγέθυνση διαφορετικών σημείων (συναρτήσει της απόστασης από τον άξονα ενός οπτικού συστήματος) έτσι ώστε οι εικόνες δεν είναι γεωμετρικά ίδιες με τα αντικείμενά τους.



Incursion distortion



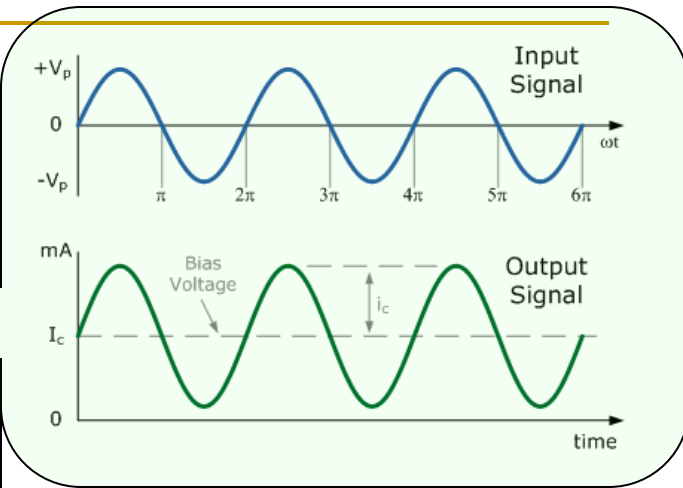
Barrel distortion



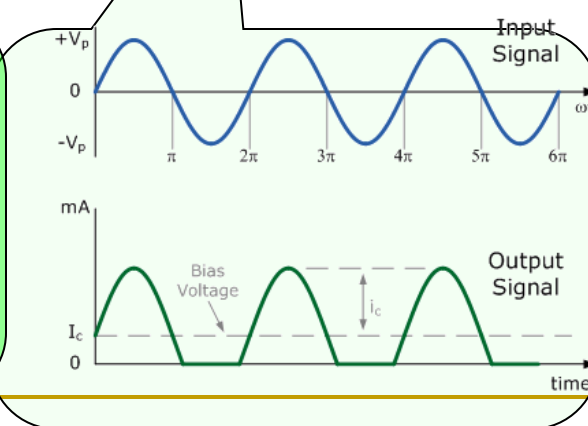
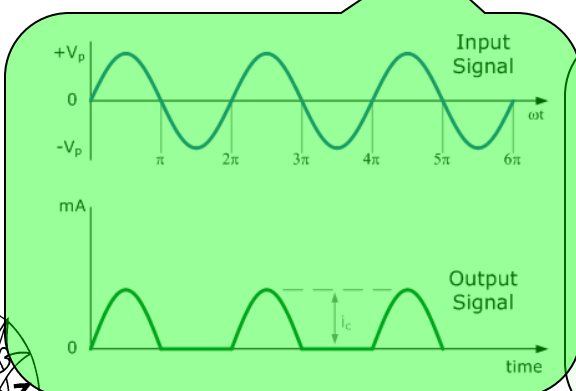
Εισαγωγή

- Η εφαρμογή ενός ημιτονοειδούς σήματος στην είσοδο ενός ιδανικού ενισχυτή τάξης A θα έχει ως αποτέλεσμα ένα ημιτονοειδές σήμα εξόδου.

Τάξη	A	B	C	AB
Κύκλος Λειτουργίας	360°	180°	Less than 90°	180 to 360°
Θέση σημείου Q	Στη μέση της γραμμής φορτίου	Πάνω στον άξονα x	Κάτω από τον άξονα x	Ανάμεσα στον άξονα x και στο μέσο της γραμμής φορτίου
Συνολική Αποδοτικότητα	Φτωχή, 25 έως 30%	Καλύτερη, 70 έως 80%	Υψηλότερη από 80%	Καλύτερη από της τάξης A αλλά μικρότερη από της τάξης B 50 έως 70%
Παραμόρφωση σήματος	Καμία αν πολωθεί σωστά	Πάνω στον άξονα x (Crossover Point)	Μεγάλη	Μικρή



Γενικά, η κυματομορφή εξόδου δεν είναι ακριβής αναπαράσταση της κυματομορφής του σήματος εισόδου, επειδή μπορεί να εμφανιστούν παραμορφώσεις πολλών τύπων είτε λόγω της μη γραμμικότητας στα χαρακτηριστικά των BJT ή FET ή λόγω της επίδρασης του υπόλοιπου κυκλώματος.



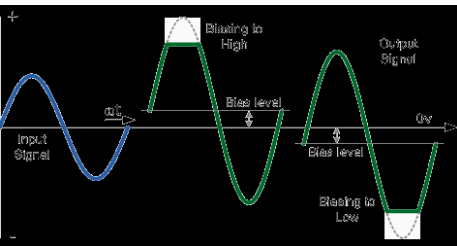
Είδη Παραμορφώσεων

Πλάτους

Το πλάτος εξόδου δεν είναι γραμμική συνάρτηση του πλάτους εισόδου

οφείλεται σε

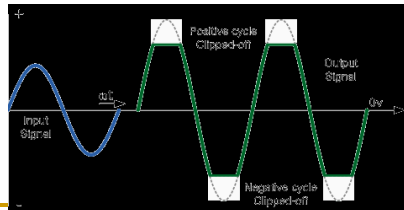
(α) Σφάλμα στην πόλωση



(β) Overdriving στην είσοδο του ενισχυτή

παρουσιάζεται

clipping

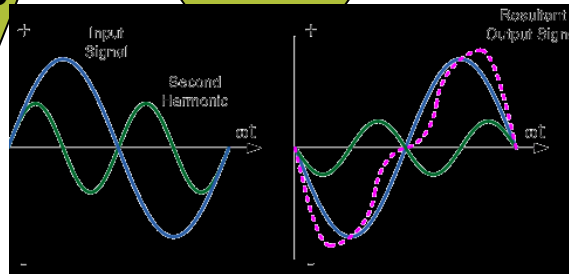


Συχνότητας

Το επίπεδο ενίσχυσης μεταβάλλεται με τη συχνότητα

οφείλεται σε

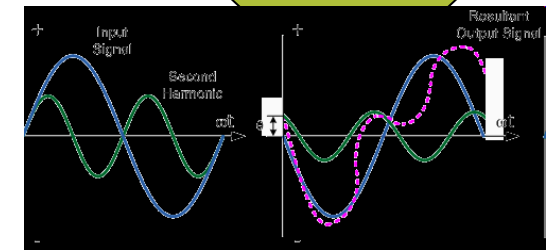
αρμονικές



Φάσης

οφείλεται σε

καθυστέρηση



Τη σύγχρονη εισαγωγή δύο ή περισσότερων ημιτονοειδών σημάτων τα οποία στην έξοδο του μη γραμμικού ενισχυτή εμφανίζονται με αρμονικές. Η συμβολή των αρμονικών προκαλεί νέες συχνότητες διαφοράς ή αθροίσματος και αυτές οι νέες συχνότητες αποτελούν την παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης

προκύπτει από

Ενδοδιαμόρφωσης



Ορισμοί Παραμορφώσεων Distortion

Η έξοδος διαφέρει από την έξοδο που περιμέναμε αν το κύκλωμα ήταν ιδανικό.

Οι ενισχυτές πρέπει να είναι γραμμικοί (για την ακρίβεια, να λειτουργούν στη γραμμική περιοχή). Αυτό σημαίνει ότι η έξοδος πρέπει να είναι ανάλογη της εισόδου. Μόνο ελάχιστα κυκλώματα ικανοποιούν αυτή τη συνθήκη.

Ο Θόρυβος και ο Βόμβος (Hum) δεν μπορούν να θεωρηθούν είδη παραμορφώσεων. Βόμβος μπορεί να εμφανιστεί αν το DC σήμα τροφοδοσίας περιέχει και AC σήμα ή λόγω αποτυχίας Κοινής γείωσης. Εξάλλου, τυχαίες κινήσεις ηλεκτρονίων τα οποία θερμαίνονται, μπορεί να ενισχυθούν και αυτό εμφανίζει θόρυβο στην έξοδο.

Παραμόρφωση

Μη-Γραμμικότητας

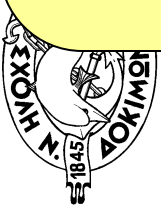
Τα περισσότερα transistor δεν είναι γραμμικά. Διπλασιάζοντας την είσοδο, δεν διπλασιάζεται η έξοδος. Το φαινόμενο βελτιώνεται με χρήση αρνητικής ανάδρασης

Limmiting

Συμβαίνει όταν το σήμα εξόδου πρέπει (λόγω ενίσχυσης) να υπερβεί την τάση τροφοδοσίας. Η παραμόρφωση αυτή εμφανίζεται σε μεγάλα σήματα.

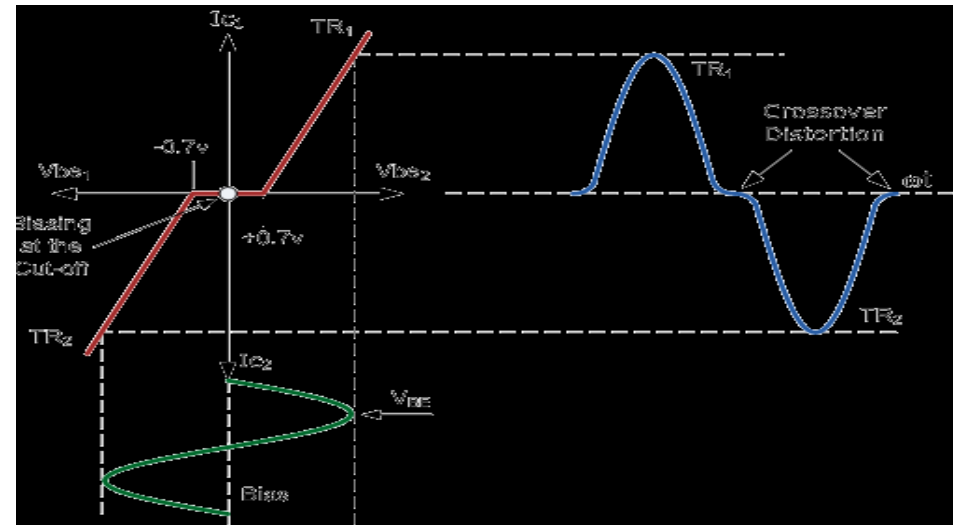
Crossover Distortion

Συμβαίνει όταν το σήμα εξόδου διασχίζει (cross) το επίπεδο μηδενικής τάσης. Εμφανίζεται σε μικρά σήματα.



Παραμόρφωση Crossover

Συμβαίνει όταν το σήμα εξόδου διασχίζει (cross) το επίπεδο μηδενικής τάσης. Εμφανίζεται σε μικρά σήματα.



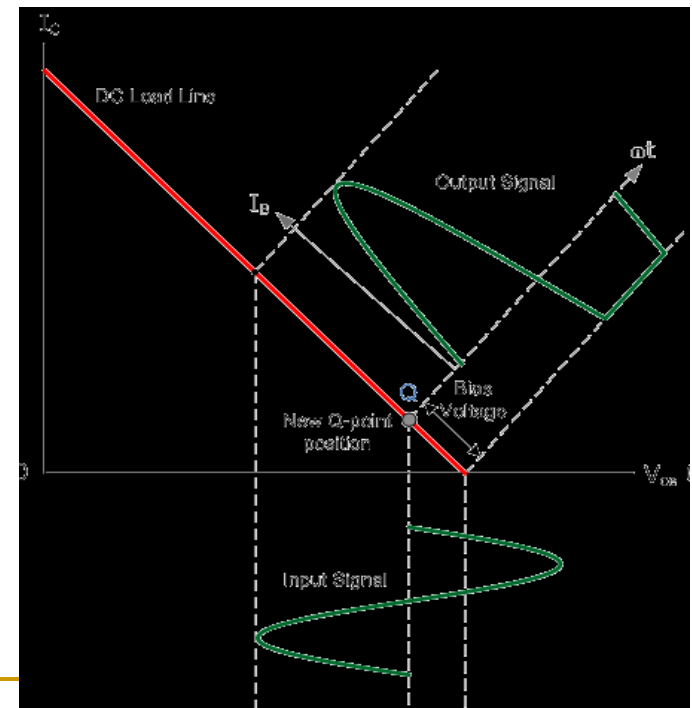
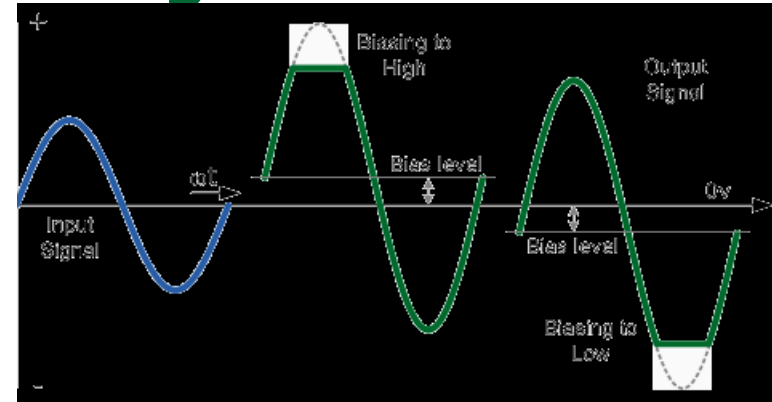
Ενισχυτές τάξης A: δεν έχουν Crossover Distortion γιατί πολώνονται στο κέντρο της γραμμής φορτίου.

Ενισχυτές τάξης B: έχουν μεγάλα ποσά Crossover Distortion γιατί πολώνονται στο σημείο αποκοπής.

Ενισχυτές τάξης AB: έχουν μικρά ποσά Crossover Distortion αν το επίπεδο πόλωσης είναι πολύ χαμηλά.

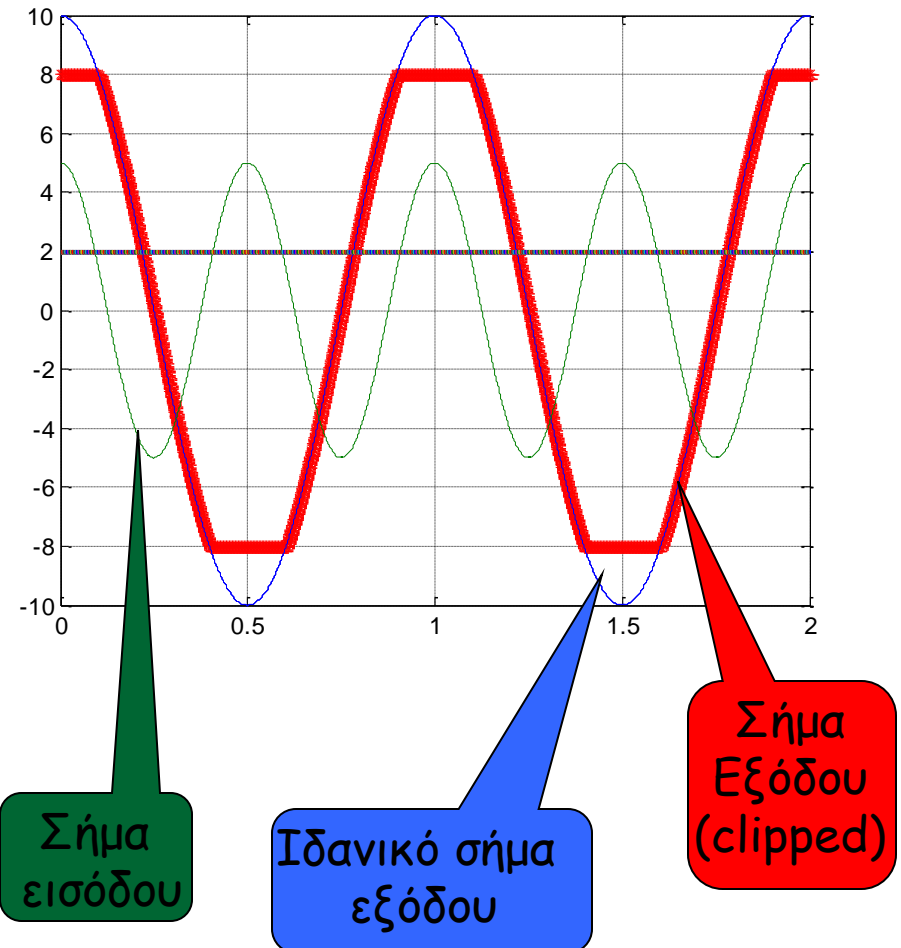
Παραμόρφωση Πλάτους

- Αν η επιλογή του σημείου πόλωσης Q είναι σωστή, τότε η κυματομορφή εξόδου θα είναι ίδια με την κυματομορφή εισόδου, απλά θα είναι ενισχυμένη.
- Αν το επίπεδο πόλωσης είναι ανεπαρκές τότε στην κυματομορφή εξόδου το αρνητικό μέρος θα «κοπεί» - cut-off. Όταν το δυναμικό πόλωσης είναι πάρα πολύ μικρό τότε κατά την αρνητική ημιπερίοδο το τρανζίστορ δεν θα άγει πλήρως και επομένως η έξοδος θα τεθεί από το δυναμικό τροφοδοσίας.
- Αν το επίπεδο πόλωσης είναι υψηλό τότε θα «κοπεί» το θετικό κομμάτι της κυματομορφής εξόδου. Όταν το δυναμικό πόλωσης είναι πάρα πολύ μεγάλο τότε η θετική ημιπερίοδος της κυματομορφής φέρνει το τρανζίστορ στον κορεσμό και η έξοδος πέφτει σχεδόν στο μηδέν.



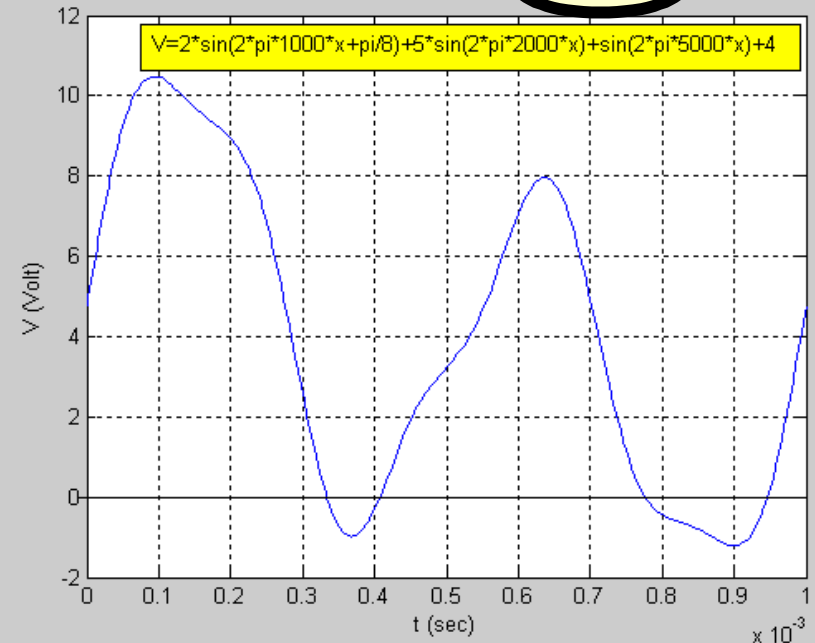
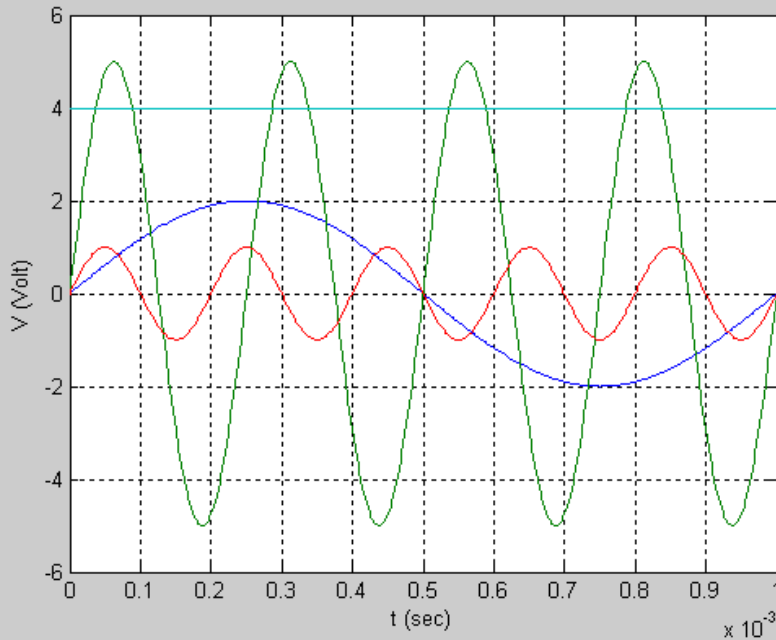
Παραμόρφωση Πλάτους (συνέχεια)

- ο Ακόμη και με το σωστό σημείο πόλωσης, η έξοδος μπορεί να παραμορφωθεί λόγω του ότι απαιτείται η ενίσχυση πολύ μεγάλου σήματος εισόδου. Το σήμα εξόδου "κουτσορευτεί" (clipped) και κατά τη θετική και κατά την αρνητική ημιπερίοδο και δεν μοιάζει πλέον με ημιτονική κυματομορφή. Αυτού του τύπου η παραμόρφωση πλάτους ονομάζεται **Clipping** και είναι το αποτέλεσμα της «υπέρ-οδήγησης» - «Over-driving» της εισόδου του ενισχυτή.



Όλα τα σήματα είναι άθροισμα ημιτονικών σημάτων!

Υπενθύμιση!



Τέσσερα διαφορετικά σήματα συναρτήσεως του χρόνου, (απόκριση χρόνου) στο ίδιο διάγραμμα. Η σύνθεση αυτών των σημάτων δημιουργεί το σήμα του διπλανού σχήματος.

$$V_1 = 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot t)$$

$$V_3 = \sin(2 \cdot \pi \cdot 5000 \cdot t)$$

$$V_2 = 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 4000 \cdot t)$$

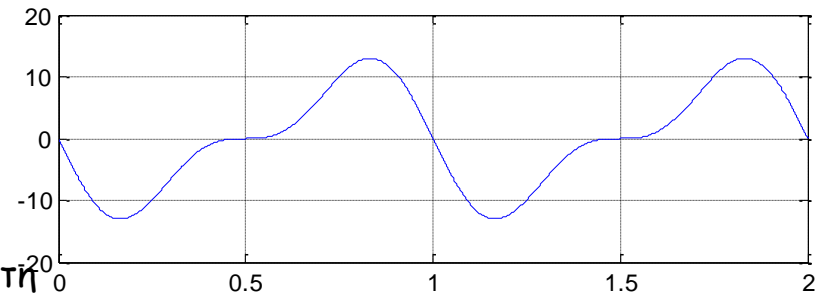
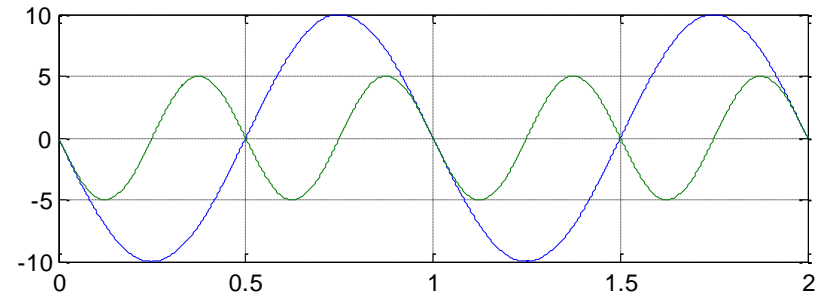
$$V_4 = 4$$



Παραμόρφωση Συχνότητας

Το σήμα εισόδου συνήθως αποτελείται από τη θεμελιώδη συχνότητα και αρμονικές που προστίθενται στη θεμελιώδη. Συνήθως το πλάτος των αρμονικών είναι μικρό κλάσμα την θεμελιώδους και αυτές δεν επιδρούν στην έξοδο. Αν όμως το πλάτος είναι μεγαλύτερο της θεμελιώδους τότε συμβαίνει παραμόρφωση.

Στο σχήμα παρατηρούμε το σήμα εισόδου να αποτελείται από τη θεμελιώδη συχνότητα και τη δεύτερη αρμονική (η δεύτερη αρμονική είναι ένα σήμα διπλάσιας συχνότητας από τη θεμελιώδη συχνότητα του σήματος εισόδου). Η 3^η αρμονική είναι ένα σήμα 3πλάσιας συχνότητας από τη θεμελιώδη, η 4^η τετραπλάσιας κ.ο.κ. Η συχνότητα της αρμονικής του σχήματος είναι διπλάσια της θεμελιώδους. Σε όλα τα κυκλώματα ενισχυτών συμβαίνει παραμόρφωση συχνότητας λόγω αρμονικών επειδή περιέχουν στοιχεία άεργου ισχύος (reactive elements) όπως χωρητικά και επαγωγικά στοιχεία.



$$s_1 = -10 \sin(2\pi t)$$

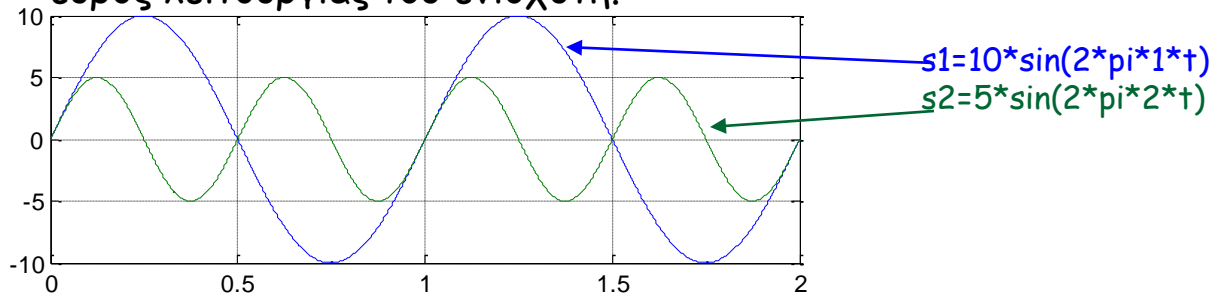
$$s_2 = -5 \sin(4\pi t)$$

$$s_{out} = s_1 + s_2$$

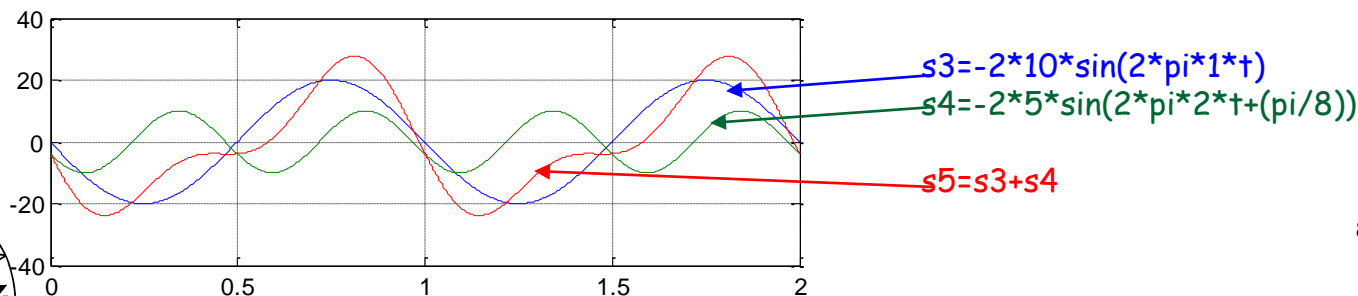


Παραμόρφωση φάσης ή καθυστέρησης

- Σε έναν μη γραμμικό ενισχυτή το σήμα εξόδου έχει χρονική καθυστέρηση σε σχέση με το σήμα εισόδου. Ας θυμηθούμε ότι σε ένα απλό RC κύκλωμα αν η συχνότητα του σήματος εισόδου είναι ίση με τη συχνότητα αποκοπής τότε τα σήματα εισόδου και εξόδου έχουν διαφορά φάσης 45° ή χρονική καθυστέρηση $T/8$.
- Αν ορίσουμε τη διαφορά φάσης μεταξύ εισόδου και εξόδου μηδενική για τη θεμελιώδη συχνότητα, τότε η προκύπτουσα καθυστέρηση φάσης θα είναι η διαφορά μεταξύ της αρμονικής και της θεμελιώδους. Αυτή η χρονική καθυστέρηση εξαρτάται από την κατασκευή του ενισχυτή και θα αυξάνεται προοδευτικά με τη συχνότητα μέσα στο εύρος λειτουργίας του ενισχυτή.



Το σήμα εισόδου αποτελείται από τη θεμελιώδη συχνότητα 1 Hz, πλάτους 10 Volt και τη δεύτερη αρμονική 2Hz πλάτους 5 Volt.

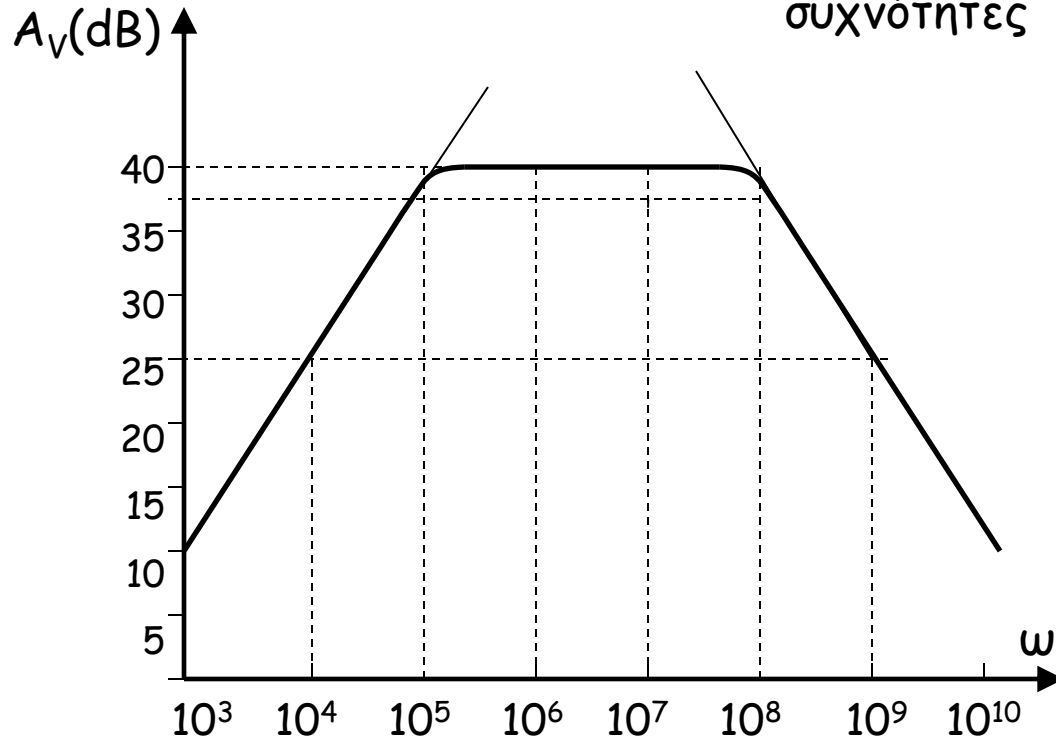


Στη έξοδο του ενισχυτή, η είσοδος αναστρέφεται και ενισχύεται επί 2. Θεωρούμε ότι για τη θεμελιώδη δεν έχουμε καθυστέρηση φάσης, ενώ η δεύτερη αρμονική έχει καθυστέρηση 22.5°



Παραμόρφωση συχνότητας

Διαφορετική ενίσχυση για διαφορετικές
συχνότητες



$$V_i(t) = 10 \sin 10^3 t + 10 \sin 10^7 t$$

$$V_o(t) = 10\sqrt{10} \sin(10^3 t + \phi) + 1000 \sin 10^7 t$$

Παραμόρφωση φάσης

- Εμφανίζεται με την παραμόρφωση συχνότητας
- Ένας ενισχυτής προκαλεί διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις σε σήματα διαφορετικών συχνοτήτων

$$V_i(t) = 10 \sin 10^5 t + 10 \sin 10^6 t$$

$$V_o(t) = 10 \cdot 10^{1.85} \sin(10^5 t - \frac{\pi}{4}) + 1000 \sin 10^6 t$$



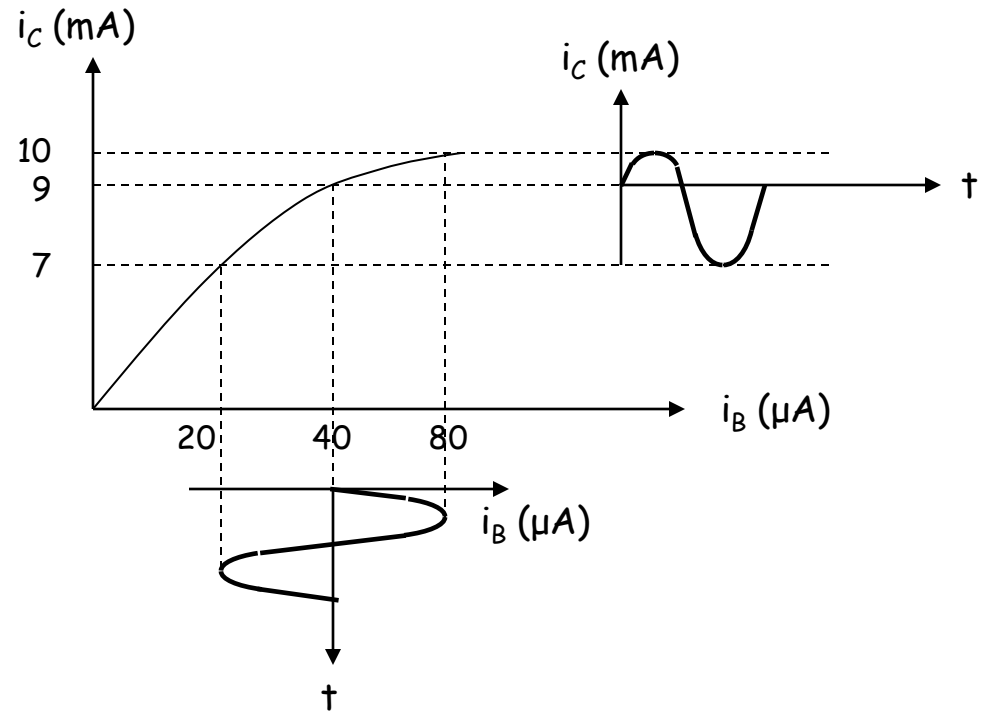
Intermodulation Distortion

- Ορισμός 1: Ενδοδιαμόρφωση (IMD - Intermodulation) είναι μια μορφή παρεμβολής που προκύπτει από την εισαγωγή του συνδυασμού δύο ή περισσότερων σημάτων διαφορετικών συχνοτήτων σε ένα μη γραμμικό σύστημα. Για παράδειγμα, αν δύο δυνατά σήματα (88 και 100 μεγακύκλων) εισέρχονται σε ένα σύστημα με άεργα στοιχεία (π.χ. υδρορροή ή οξειδωμένος φράκτης), θα ακούσουμε μία παρεμβολή στα 12 MHz!
- Ορισμός 2: Παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης είναι η ανεπιθύμητη διαμόρφωση πλάτους σημάτων τα οποία περιέχουν διαφορετικές συχνότητες μέσα από ένα σύστημα με μη-γραμμικότητες. Η ενδοδιαμόρφωση μεταξύ των σημάτων διαφορετικών συχνοτήτων θα δημιουργήσει επιπλέον σήματα τα οποία δεν είναι σε αρμονικές συχνότητες των επιμέρους σημάτων (ακέραια πολλαπλάσια των αρχικών συχνοτήτων). Τα σήματα αυτά θα έχουν συχνότητα που θα προκύπτει από το άθροισμα και τη διαφορά των αρχικών συχνοτήτων καθώς και τα πολλαπλάσια του αθροίσματος και της διαφοράς.
- Ορισμός 3: **Παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης** (intermodulation distortion). Προκύπτει από τη σύγχρονη εισαγωγή δύο ή περισσότερων ημιτονοειδών σημάτων τα οποία στην έξοδο του μη γραμμικού ενισχυτή εμφανίζονται με αρμονικές. Η συμβολή των αρμονικών προκαλεί νέες συχνότητες διαφοράς ή αθροίσματος και αυτές οι νέες συχνότητες αποτελούν την παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης.



Πού οφείλεται η παραμόρφωση μη-γραμμικότητας?

- Η παραμόρφωση πλάτους οφείλεται στη μη γραμμική σχέση μεταξύ σήματος εισόδου και σήματος εξόδου.
- Η παραμόρφωση μη-γραμμικότητας είναι αποτέλεσμα της παραγωγής νέων συχνοτήτων στην έξοδο $V_o(t)$ οι οποίες δεν υπάρχουν στο σήμα εισόδου $V_i(t)$.
- Οι νέες αυτές συχνότητες ή αρμονικές είναι αποτέλεσμα ύπαρξης μιας μη γραμμικής δυναμικής καμπύλης για το ενεργό στοιχείο.
- Για ένα transistor, η γραφική παράσταση του i_c συναρτήσει του i_B είναι μη γραμμική, ειδικότερα στην περιοχή κόρου



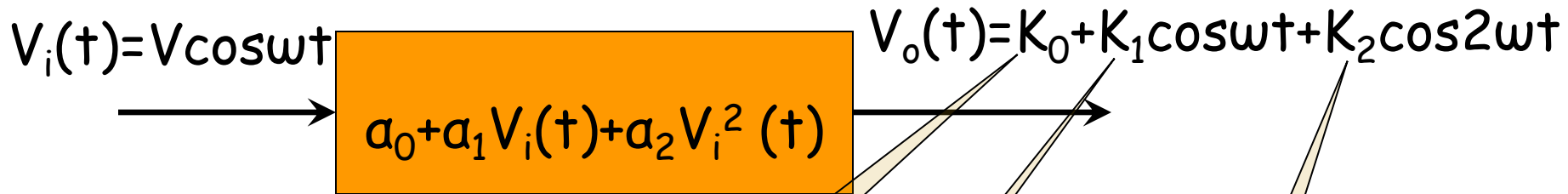
$$i_B = 20 \sin \omega t (\mu A)$$



Μη γραμμικά συστήματα

Σε αυτά οφείλονται τα περισσότερα είδη παραμορφώσεων!!!

Έστω ένα μη γραμμικό σύστημα νόμου τετραγώνου (square law device).



$$V_o(t) = a_0 + a_1 V_i(t) + a_2 V_i^2(t) = a_0 + a_1 V \cos(\omega t) + a_2 V^2 \cos^2 \omega t$$

$$V_o(t) = a_0 + a_1 V \cos \omega t + \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} \alpha_2 V^2$$

$$V_o(t) = \left(a_0 + \frac{\alpha_2 V^2}{2} \right) + \alpha_1 V \cos \omega t + \left(\frac{\alpha_2 V^2}{2} \right) \cos 2\omega t$$



Παραμόρφωση μη-γραμμικότητας

Η παραμόρφωση που προκαλεί ένα μη-γραμμικό σύστημα!

Το σήμα εξόδου $V_0(t)$ δεν είναι ημίτονο αλλά ένα σήμα το οποίο μπορεί να αναλυθεί σε ημίτονα:

$V_1(t)$ και $V_2(t)$ αν προσθέσουμε και μία DC συνιστώσα V_3 .

Άρα, στο σήμα εξόδου υπάρχουν αρμονικές συχνότητες δηλαδή πέραν του ενισχυμένου σήματος

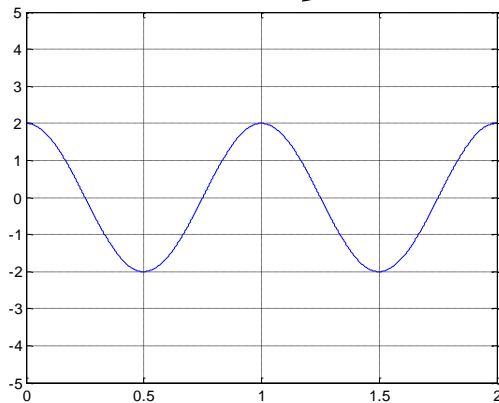
$V_1(t)$ υπάρχει και η δεύτερη αρμονική με πλάτος K_2 .

Επομένως, την παραμόρφωση μη γραμμικότητας μπορούμε να την καλούμε και **αρμονική παραμόρφωση**.

$$V_1(t) = K_0 = 2V$$

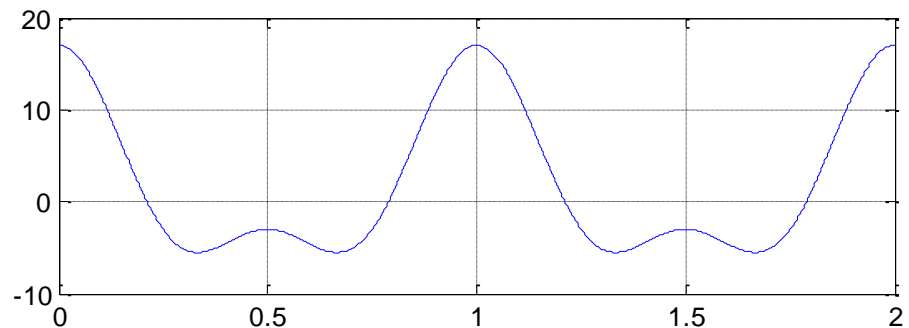
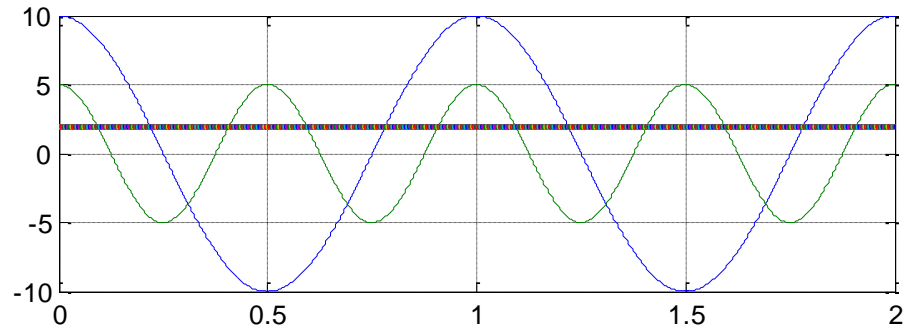
$$V_2(t) = K_1 \cdot \cos(\omega t) \cong 10 \cdot \cos(\pi \cdot 1 \cdot t) \text{ V}$$

$$V_3(t) = K_2 \cdot \cos(2\omega t) \cong 5 \cdot \cos(\pi \cdot 2 \cdot t) \text{ V}$$



$$V_i(t) = V \cdot \cos(\omega \cdot t) = 2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot t) \text{ V}$$

Σήμα εισόδου



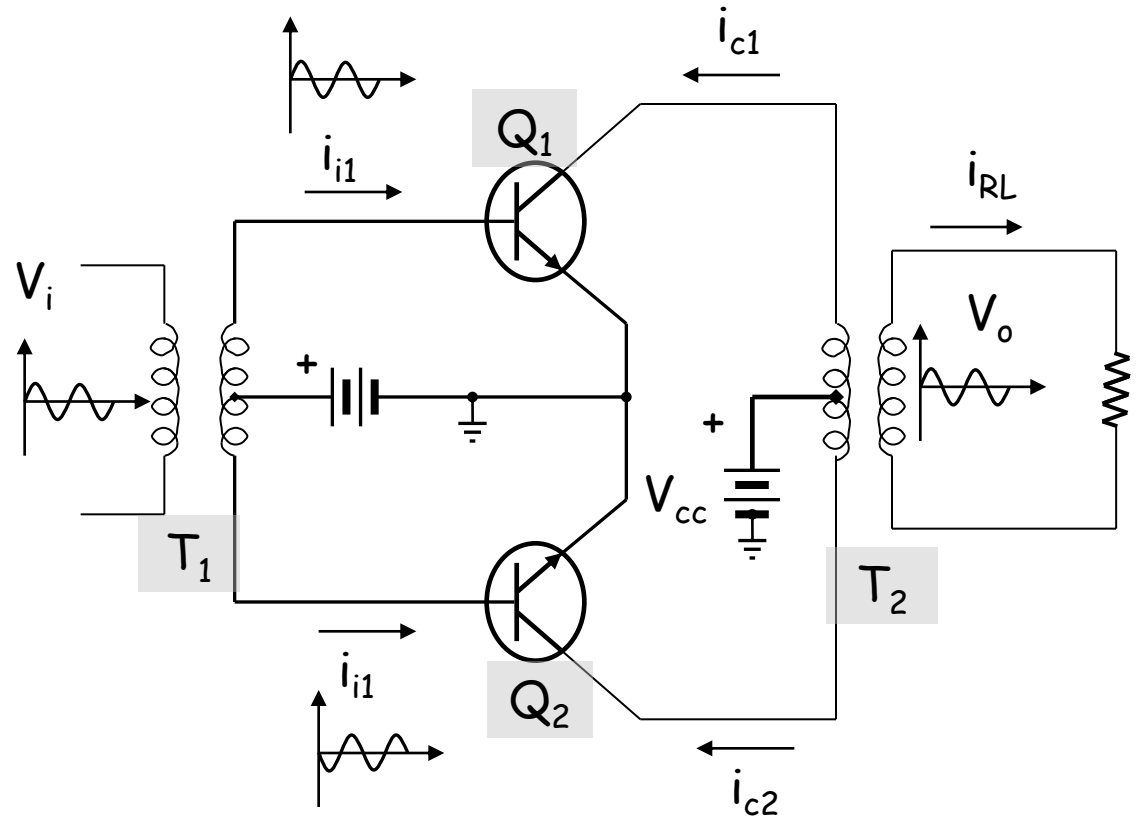
$$V_0(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t) = K_0 + K_1 \cos(\omega t) + K_2 \cos(2\omega t)$$

Σήμα εξόδου



Πώς διορθώνεται η αρμονική παραμόρφωση?

- Ο μετασχηματιστής T_2 χρησιμοποιείται για την απόδοση της ισχύος της ακουστικής συχνότητας στην έξοδο.
- Ο ενισχυτής Push-Pull λύνει το πρόβλημα παραμόρφωσης πλάτους
- Ο μετασχηματιστής T_1 έχει δευτερεύον με κεντρική λήψη.
- Τα δύο ρεύματα εισόδου των transistor Q_1 και Q_2 έχουν διαφορά φάσης 180° μεταξύ τους.
- Λόγω της αρμονικής παραμόρφωσης τα ρεύματα στους συλλέκτες μπορούν να περιγραφούν από το νόμο τετραγώνου.



Ενισχυτής Push-Pull



Πώς διορθώνεται η αρμονική παραμόρφωση? (Συνέχεια)

$$i_{i1} = I_m \sin \omega t$$

$$i_{i2} = -I_m \sin \omega t$$

Ρεύματα εισόδου των transistor

$$i_{C1} = I_0 + A i_{i1} + A_1 i_{i1}^2 + \dots$$

$$i_{C2} = I_0 + A i_{i2} + A_1 i_{i2}^2 + \dots$$

Ρεύματα εξόδου των Transistor (μη γραμμικών στοιχείων)

$$i_{C1} = I_0 + A I_m \sin \omega t + A_1 I_m^2 \sin^2 \omega t + \dots$$

$$i_{C2} = I_0 - A I_m \sin \omega t + A_1 I_m^2 \sin^2 \omega t - \dots$$

$$i_{RL} = i_{C1} - i_{C2} = 2K \sin \omega t + \dots$$

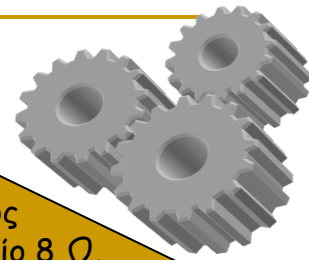
$$i_{C1} = K_0 + K \sin \omega t + K_1 \sin 2\omega t + \dots$$

$$i_{C2} = K_0 - K \sin \omega t + K_1 \sin 2\omega t - \dots$$

Δεν περιλαμβάνονται ούτε η συνεχής συνιστώσα ούτε οι άρτιες αρμονικές. Απαλείφεται ένα μεγάλο μέρος της παραμόρφωσης.



Μέτρηση ολικής αρμονικής παραμόρφωσης



Γεννήτρια ημιτονικού παλμού 400 Hz τίθεται στην είσοδο ενισχυτή ο οποίος δίνει στην έξοδο ημιτονικό σήμα 4 V RMS σε φορτίο 8 Ω. Μετρήθηκε δεύτερη αρμονική στα 0,3 V RMS και τρίτη αρμονική στα 0,5 V RMS. Οι άλλες αρμονικές αγνοούνται. Να βρεθεί το THD.

- Η ολική αρμονική παραμόρφωση (total harmonic distortion - THD) ενός σήματος είναι η μέτρηση της παρουσίας της αρμονικής παραμόρφωσης και ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των ισχύων όλων των αρμονικών προς την ισχύ της θεμελιώδους συχνότητας. Ένας ακουστικός ενισχυτής με ολική αρμονική παραμόρφωση της τάξης του 1% θεωρείται υψηλής πιστότητας και η παραμόρφωση δεν αναγνωρίζεται από το ανθρώπινο αυτί.

$$THD = \frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots}{P_1} = \frac{\sum_{i=2}^{\infty} P_i}{P_1} = \frac{P_{ολική} - P_1}{P_1}$$

$$THD = \frac{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_{\infty}^2}{V_1^2}$$

- Γενικά όμως, το ποσοστό της αρμονικής D_v είναι ο λόγος του πλάτους (τάσης) της αρμονικής v προς το πλάτος της θεμελιώδους ημιτονοειδούς.
- THD συνήθως ορίζεται ως **λόγος τάσεων** και όχι ως λόγος ισχύων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον ακόλουθο ορισμό ο οποίος προκύπτει από τον προηγούμενο ως υπόρριζη ποσότητα:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_{\infty}^2}}{V_1}$$

Harmonic	Voltage (Volt)	Power (Watt)
Fundamental	4	2
2 nd	0,3	0,01125
3 rd	0,5	0,03125
Total		0,0425

Προσοχή!
Είναι λάθος
 $THD = \frac{0,3+0,5}{4} = 20\%$
 ή
 $THD = \frac{0,01125+0,03125}{2} = 2,125\%$

Η ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο είναι $P = E^2/R = 2 \text{ Watt}$. Για να βρούμε την ολική παραμόρφωση, πρέπει να Προσθέσουμε όλες τις ισχύς και να Κάνουμε μετατροπή στο αντίστοιχο δυναμικό. Το αποτέλεσμα θα διαιρεθεί Με το δυναμικό της θεμελιώδους.

$$THD = \frac{\sqrt{0,0425 \cdot 8}}{4} = 14,6\%$$



Ασκήσεις



1. Η είσοδος σε έναν ενισχυτή είναι $v_{in}(t) = 0.1\cos(3000\pi t)$ και η αντίστοιχη έξοδος είναι $v_o(t) = 10\cos(3000\pi t) + 0.3\cos(6000\pi t) + 0.1\cos(9000\pi t)$ Να καθοριστούν οι συντελεστές παραμόρφωσης D_2 , D_3 και D_4 . Επίσης, να υπολογιστεί το ποσοστό της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης.

2. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός ενισχυτή περιγράφεται από την εξίσωση $v_o(t) = 10v_{in}(t) + 0.8v_{in}^2(t) + 0.5v_{in}^3(t)$ Για είσοδο $v_{in}(t) = 3\cos(250\pi t)$ να καθοριστούν οι συντελεστές παραμόρφωσης D_2 , D_3 και D_4 . Επίσης να υπολογιστεί το ποσοστό της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης. Υπενθύμιση: $4\cos^3(x) = 3\cos(x) + \cos(3x)$

3. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός ενισχυτή περιγράφεται από την εξίσωση $v_o(t) = v_{in}(t) + 0.2v_{in}^2(t)$ Για είσοδο $v_{in}(t) = \cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)$ να καθοριστεί η συχνότητα και το πλάτος κάθε συνιστώσας του σήματος εξόδου. Υπενθύμιση: $2\cos(x)\cos(y) = \cos(x-y) + \cos(x+y)$

4. Ένα μη γραμμικό σύστημα υπακούει το νόμο του τετραγώνου όπως φαίνεται στο σχήμα

$$V_i(t) \longrightarrow \boxed{5+10V_i(t)+0,1V_i^2(t)} \longrightarrow V_o(t)$$

Το σήμα εισόδου είναι ένα συνιμήτονο πλάτους 10 mV και περιόδου 1ms. Να βρεθεί το ποσοστό της αρμονικής παραμόρφωσης του σήματος εξόδου.

