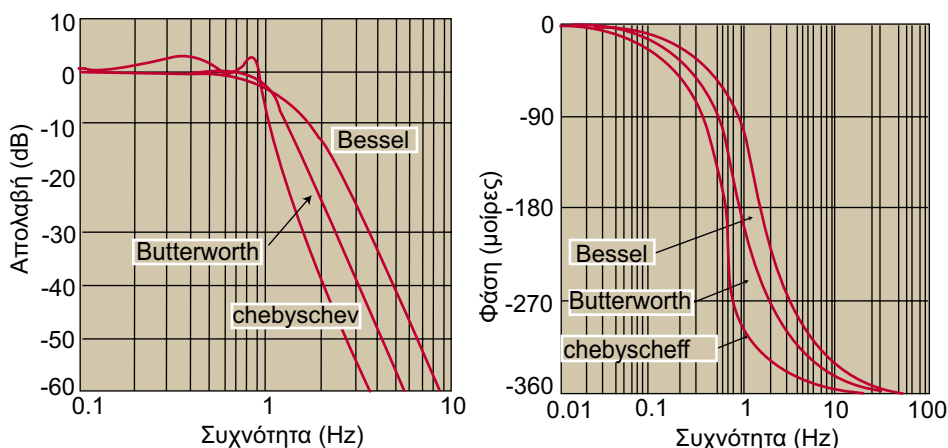


20.4.19 Τελεστικός ενισχυτής σε διάταξη ενεργού φίλτρου

Στο πεδίο των ενεργών κυκλωμάτων με χρήση τελεστικών ενισχυτών συναντάμε κυκλώματα ενεργών φίλτρων για τη βελτίωση του σήματος (signal conditioning) των αισθητήρων. Τα συνήθη φίλτρα που χρησιμοποιούνται είναι τύπου:

- Butterworth
- Chebyshev
- Bessel

Στο Σχήμα 20.62 απεικονίζεται συγκριτικά η καμπύλη απολαβής για κάθε έναν τύπο από τα παραπάνω φίλτρα, στο οποίο διακρίνουμε ότι τη βέλτιστη απόδοση δίχως φαινόμενο κυματισμού και ως προς το επίπεδο εξασθένησης στη μεταβατική ζώνη παρουσιάζει το φίλτρο τύπου Butterworth.



Σχήμα 20.62: Συγκριτικό διάγραμμα απόκρισης α) απολαβής και β) φάσης για φίλτρο Bessel, Butterworth και Chebyshev.

Για την αποφυγή φαινομένων αναδίπλωσης συχνοτήτων (alias) κατά τη δειγματοληψία ενός αναλογικού σήματος, χρησιμοποιούμε ως καταδιαβατό ή χαμηλοπερατό φίλτρο, το φίλτρο τύπου απόκρισης Butterworth. Σε σχέση με άλλους τύπους φίλτρων ο τύπος απόκρισης Butterworth παρουσιάζει στη περιοχή διέλευσης συχνοτήτων ομοιόμορφη απόκριση, σύμφωνα με την πιο κάτω συνάρτηση μεταφοράς:

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}}$$

όπου,

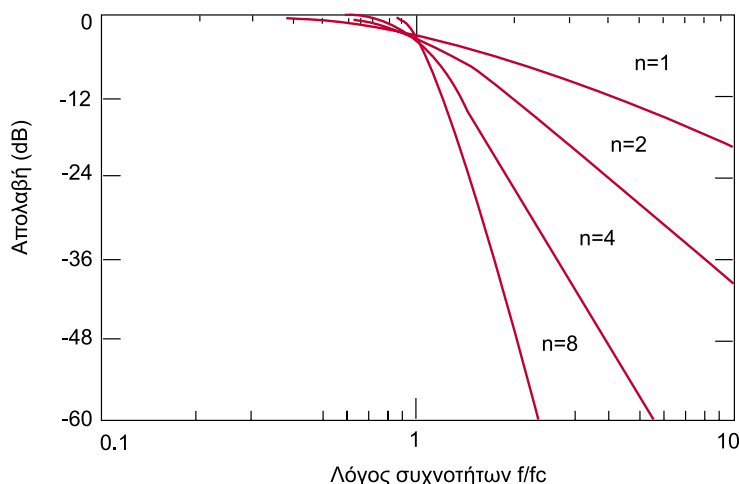
- n : η τάξη του φίλτρου (1,2,3 ...), και
- ω_0 : η συχνότητα αποκοπής (-3db).

Στο γράφημα του Σχήματος 20.63 απεικονίζεται η απόκριση πλάτους για φίλτρο τύπου Butterworth 1^{ης}, 2^{ης}, 4^{ης} και 8^{ης} τάξης.

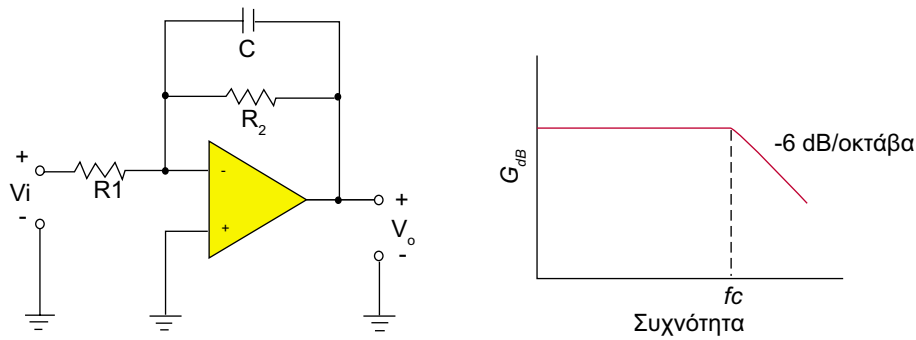
Ένα τυπικό κύκλωμα ενεργού φίλτρου απεικονίζεται στη σχεδίαση του Σχήματος 20.64.

Όπως εξετάσαμε στην αρχή του κεφαλαίου, η ενίσχυση σε έναν τελεστικό αναστρέφοντα ενισχυτή καθορίζεται από τον λόγο των σταθερών αντιστάσεων που φέρει στην κυκλωματική του διάταξη:

$$A_0 = -\frac{R_2}{R_1}$$



Σχήμα 20.63: Καμπύλη απόκρισης ενεργού φίλτρου Butterworth 1^{ης}, 2^{ης}, 4^{ης} και 8^{ης} τάξης.



Σχήμα 20.64: Ενεργό φίλτρο 1ης τάξης με τελεστικό ενισχυτή.

Το πρόσημο δηλώνει την αναστροφή του σήματος.

Όταν οι αντιστάσεις που φέρει ο ενισχυτής δεν αποτελούν καθαρά ωμικά στοιχεία αλλά χωρητικές ή επαγωγικές σύνθετες αντιστάσεις, τότε ισχύει:

$$A = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

Με εφαρμογή της παραπάνω θεώρησης στο κύκλωμα του ενεργού φίλτρου του Σχήματος 20.64, η αντίσταση εξόδου Z_2 ισούται με την σύνθετη αντίσταση του δικτυώματος R_2 και C .

$$Z_2 = \frac{R_2}{1 + j2\pi fCR_2}$$

Εφόσον η αντίσταση εισόδου του κυκλώματος Z_{in} ισούται με την τιμή της αντίστασης R_1 , το κέρδος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$A = -\frac{1}{R_1} \frac{R_2}{1 + j2\pi fCR_2} = A_0 \frac{1}{1 + j2\pi fCR_2} = \frac{V_o}{V_i}$$

οπότε,

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{1 + j2\pi fCR_2}$$

Λαμβάνοντας την απόλυτη τιμή του λόγου και σύμφωνα με τη θεώρηση, ότι στη συχνότητα αποκοπής f_c το σήμα παρουσιάζει μείωση ισχύος κατά 3dB καταλήγουμε:

$$\left| \frac{A}{A_0} \right| = \left| \frac{1}{1 + j2\pi fCR_2} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi fCR_2)^2}}$$

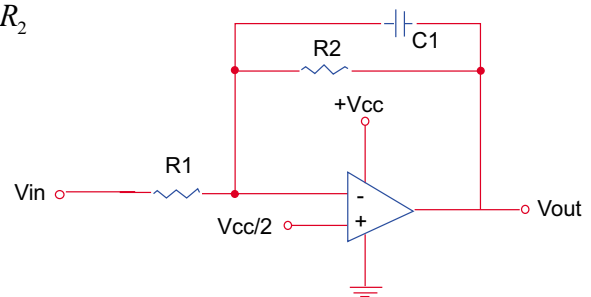
$$\left| \frac{0,707A_0}{A_0} \right| = 0,707 = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi fCR_2)^2}} \Rightarrow$$

$$f = \frac{1}{2\pi CR_2}$$

Σε ένα φίλτρο Butterworth χαμηλών συχνοτήτων η απολαβή ή το κέρδος, δίνεται από τη σχέση:

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}}}$$

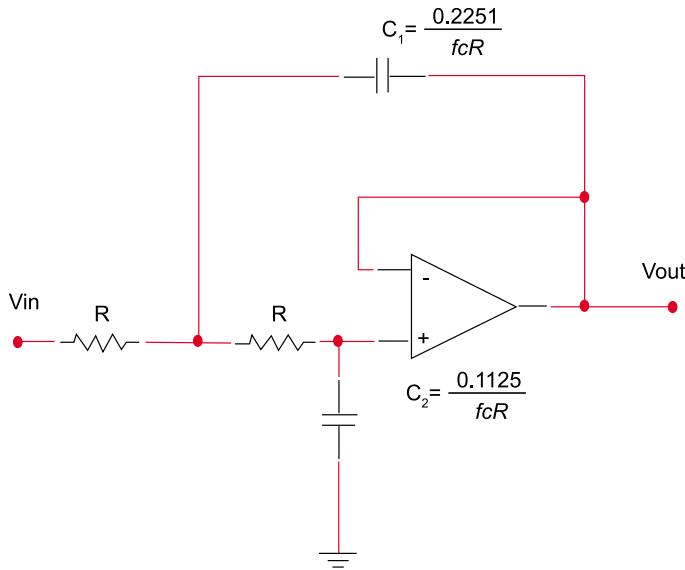
Στο κύκλωμα του Σχήματος 20.65 απεικονίζεται η συνδεσμολογία ενός φίλτρου απόκρισης Butterworth 1ης τάξης με αναστρέφοντα τελεστικό με χρήση μονοπολικής τροφοδοσίας.



Σχήμα 20.65: Φίλτρο απόκρισης Butterworth 1ης τάξης με αναστρέφοντα τελεστικό ενισχυτή μονοπολικής τροφοδοσίας.



Ένα τυπικό κύκλωμα φίλτρου απόκρισης Butterworth 2^{ης} τάξης τοπολογίας Sallen Key με τελεστικό ενισχυτή απεικονίζεται με το διάγραμμα του Σχήματος 20.66.



Σχήμα 20.66
Κύκλωμα φίλτρου απόκρισης Butterworth 2^{ης} τάξης.

Παράδειγμα 20.9

Να υπολογίσετε σε μονάδες dB / δεκάδα την εξασθένηση ενός φίλτρου Butterworth που φέρει απόσβεση 8 dB / οκτάβα.

Λύση

$$\frac{dB}{\text{δεκάδα}} = N \cdot 3,33 \frac{dB}{\text{οκτάβες}} = 8 \cdot 3,33 \text{ dB} / \text{οκτάβα} = 26,64 \text{ dB} / \text{δεκάδα}$$

Παράδειγμα 20.10

Χαμηλοπερατό φίλτρο 8^{ης} τάξης Butterworth έχει συχνότητα αποκοπής 2,2 KHz. Να υπολογίσετε την απόσβεση για τη συχνότητα των 8 KHz.

Λύση

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^{2n}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{8000}{2200}\right)^{2 \cdot 8}}} = 33 \cdot 10^{-6}$$

Εκφράζοντας την απόσβεση σε μονάδες decibel έχουμε:

$$A = 20 \cdot \log A = 20 \cdot \log 33 \cdot 10^{-6} = -89,6 \text{ dB}$$

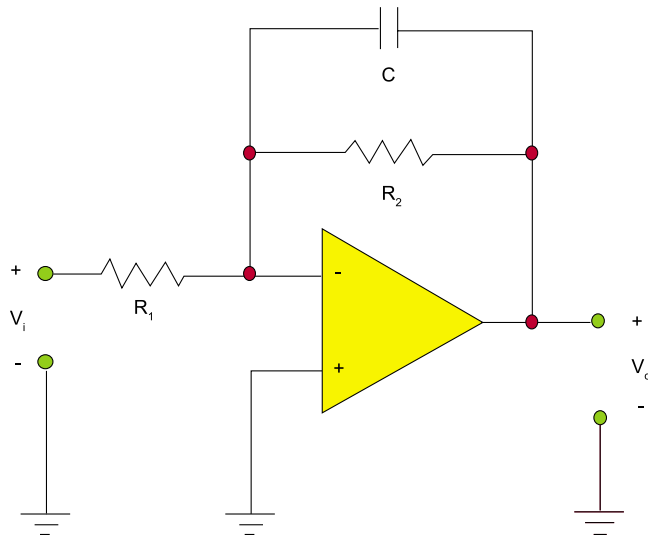
Παράδειγμα 20.11

Να υπολογίσετε την τιμή της αντίστασης R₂ και του πυκνωτή C για το πιο κάτω χαμηλοπερατό φίλτρο, το οποίο θα πρέπει να έχει αντίσταση εισόδου R_i = 22KΩ και συχνότητα αποκοπής f_c = 100 KHz.

Λύση

Εφόσον η αντίσταση εισόδου του φίλτρου είναι 22KΩ, θα πρέπει και η αντίσταση R₂ να έχει την ίδια τιμή για να φέρει το κύκλωμα σταθερή απόσβεση. Συνεπώς R₁ = R₂ = 22KΩ. Οπότε, με συχνότητα αποκοπής του φίλτρου f_c = 100 KHz υπολογίζουμε τη χωρητικότητα:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C} \Rightarrow 100 \text{ kHz} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 22000 \cdot C} \Rightarrow C = \frac{1}{22 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 10^3} = 72,4 \text{ pf}$$



Παράδειγμα 20.12

Να υπολογίσετε για συχνότητα αποκοπής $f_c = 1,5 \text{ KHz}$ ενός φίλτρου 6^{ης} τάξης, τύπου α) Butterworth β) Chebyshev και γ) Bessel την απόσβεση που παρουσιάζει για σήμα εισόδου 2,2 KHz σε μονάδες decibel.

Λύση

Φίλτρο Butterworth 6^{ης} τάξης

Από τη σχέση $A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}}}$ υπολογίζουμε την απόσβεση:

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2200}{1500}\right)^{2 \cdot 6}}} = 0,1$$

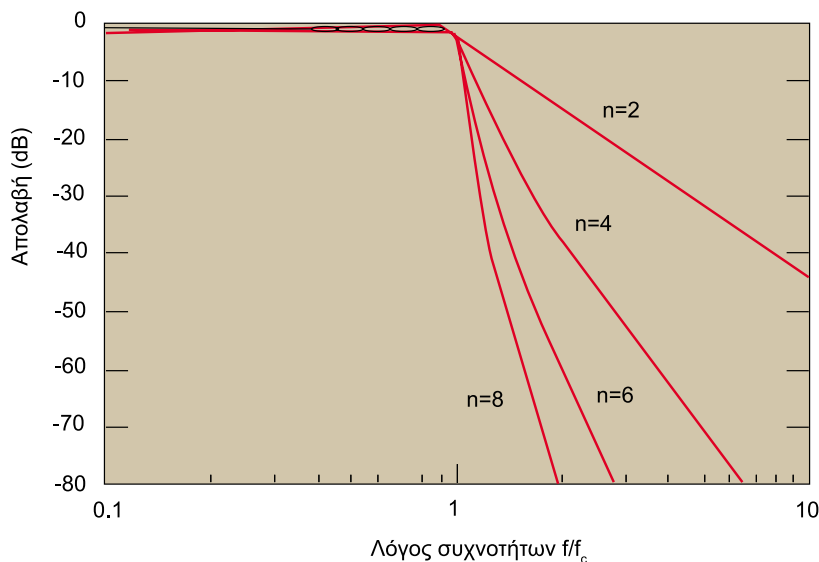
Συνεπώς:

$$A = 20 \log A = 20 \log 0,1 = -20 \text{ dB}$$

Φίλτρο Chebyshev 6^{ης} τάξης

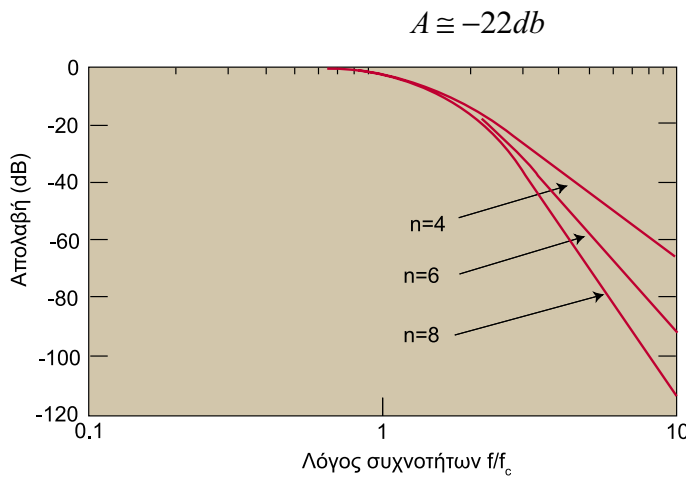
Υπολογίζοντας γραφικά από το διάγραμμα απόκρισης φίλτρου Chebyshev για $n = 6$ βρίσκουμε:

$$A \cong -61 \text{ dB}$$



Φίλτρο Bessel 6^{ης} τάξης

Υπολογίζοντας γραφικά από το διάγραμμα απόκρισης του φίλτρου Bessel n = 6 βρίσκουμε:



qr.tziola.gr/EQ3RR

Παράδειγμα 20.13

Να υπολογίσετε το πλάτος του σήματος εξόδου για συχνότητα $f = 15$ KHz ενός φίλτρου Butterworth 2^{ης} τάξης με συχνότητα αποκοπής $f_c = 2$ KHz, όταν για την περίπτωση που θέσουμε σήμα εισόδου $f = 6$ KHz λαμβάνουμε στην έξοδο του φίλτρου σήμα πλάτους 100 mV.

Λύση

Για τη συχνότητα αποκοπής $f_c = 2$ KHz, το κέρδος του φίλτρου είναι:

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_1}{f_0}\right)^{2 \cdot n}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{6000}{2000}\right)^{2 \cdot 2}}} = 0,11$$

Με δεδομένο το πλάτος εξόδου του σήματος για τη συχνότητα $f = 6$ KHz μπορούμε να υπολογίσουμε το πλάτος εισόδου:

$$A_0 = \frac{V_o}{V_i} \Rightarrow V_i = \frac{V_o}{A_0} = \frac{0,10}{0,11} = 909 mV$$

Το πλάτος του σήματος 909 mV αντιστοιχεί με το πλάτος του σήματος εισόδου της συχνότητας των 15 KHz. Το κέρδος του φίλτρου για τη συχνότητα $f = 15$ KHz είναι:

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_2}{f_0}\right)^{2 \cdot n}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{15000}{2000}\right)^{2 \cdot 2}}} = 0,0177$$

Οπότε το πλάτος του σήματος εξόδου για τη συχνότητα $f = 15$ KHz είναι:

$$A_0 = \frac{V_o}{V_i} \Rightarrow V_o = A_0 \cdot V_i = 0,0177 \cdot 909 = 16 mV$$

Εργαστηριακές Εφαρμογές

1. Μελέτη χαρακτηριστικών διαφορικού ενισχυτή στο συνεχές
2. Μελέτη χαρακτηριστικών διαφορικού ενισχυτή στο εναλλασσόμενο
3. Μελέτη αναστρέφοντα τελεστικού ενισχυτή
4. Μελέτη τελεστικού ενισχυτής διαφοράς
5. Μελέτη μη αναστρέφοντα τελεστικού ενισχυτή
6. Μελέτη μη αναστρέφοντα τελεστικού ενισχυτή με πραγματικό σήμα



QR 20.10: Εργαστηριακή Εφαρμογή

qr.tziola.gr/k6BkE