

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

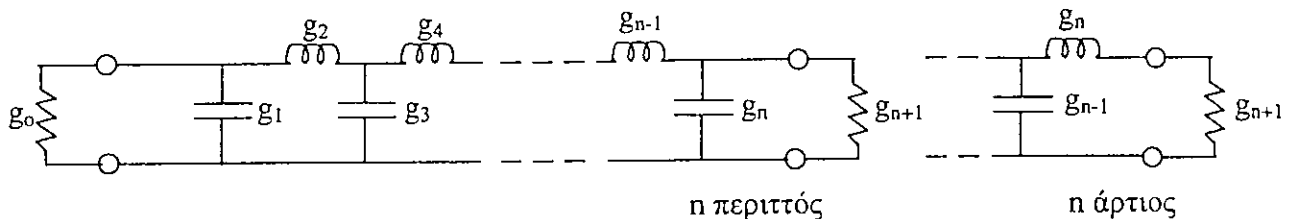
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

1<sup>η</sup> Εργαστηριακή άσκηση

Σχεδίαση Μικροκυματικών Βαθυπερατών Φίλτρων

Ο συνδυασμός των πυκνωτών και των πηνίων στο Σχήμα 1 αποτελεί ένα βαθυπερατό φίλτρο, αφού όπως θα μπορούσε κανείς να παρατηρήσει στις υψηλές συχνότητες οι πυκνωτές συμπεριφέρονται ως βραχυκυκλώματα ενώ τα πηνία ως ανοικτοκυκλώματα.



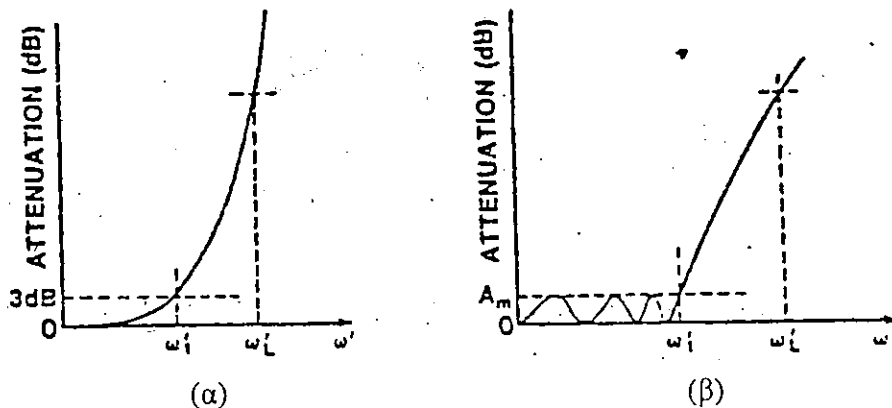
Σχήμα 1. Συνδεσμολογία βαθυπερατών φίλτρων.

Το πρόβλημα λοιπόν που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε είναι η κατάλληλη επιλογή των τιμών των στοιχείων ώστε να ικανοποιούνται κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές που μας έχουν δοθεί.

Υπάρχουν βέβαια πάρα πολλές διαφορετικές λύσεις, εμείς όμως θα επικεντρωθούμε στις δύο επικρατέστερες οι οποίες είναι:

α) Maximally flat (Butterworth) απόκριση όπως φαίνεται στο Σχήμα 2α που ακολουθεί και

β) Equal-ripple (Chebyshev) απόκριση όπως φαίνεται στο Σχήμα 2β. Στο σχήμα αυτό  $A_m$  είναι η επικρατέστερη εξασθένηση στην ζώνη διέλευσης.



Σχήμα 2.α) Απόκριση maximally-flat, β) απόκριση equal-ripple.

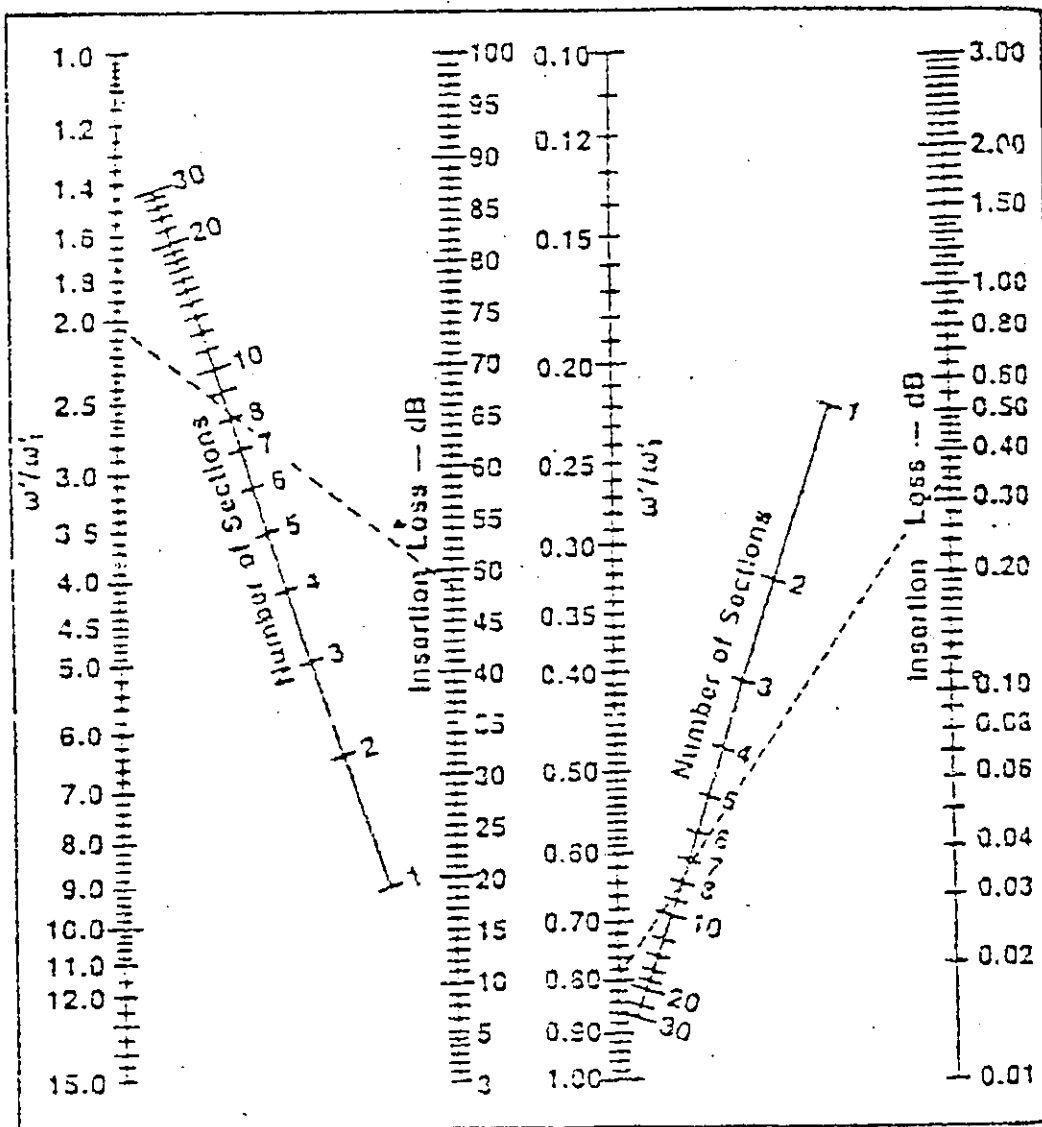
### Απόκριση Butterworth (Maximally flat)

Σε ένα Butterworth low-pass (βαθυπερατό) πρότυπο το ζητούμενο είναι η καμπύλη της εξασθένησης στη ζώνη διέλευσης να είναι όσο το δυνατό πιο επίπεδη και ταυτόχρονα να αυξάνεται μονότονα καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Η τιμή της εξασθένησης σε decibels για μια τέτοια απόκριση δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Εξασθένηση (Insertion loss)} I_L = 10 \cdot \log(1 + \omega^{2n})$$

όπου  $n$  είναι ο βαθμός του φίλτρου, δηλαδή ο αριθμός των στοιχείων που χρειάζονται για να πετύχουμε τη συγκεκριμένη απόκριση.

Με τη βοήθεια του νομογράμματος του Σχήματος 3 που ακολουθεί μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το βαθμό του φίλτρου που χρειαζόμαστε. Το νομόγραμμα αυτό μας δίνει πληροφορίες για την εξασθένηση σε σχέση με το βαθμό του φίλτρου.



Σχήμα 3. Νομόγραμμα για την maximally flat απόκριση.

Στις περισσότερες περιπτώσεις ως  $\omega'$  ορίζεται η συχνότητα για την οποία η εξασθένηση παίρνει την τιμή 3 dB κι άρα στο Σχήμα 3 το αριστερό τμήμα αντιπροσωπεύει την περιοχή αποκοπής ( $\omega'/\omega'_1 \geq 1$ ), ενώ το δεξί τη ζώνη διέλευσης ( $\omega'/\omega'_1 \leq 1$ ). Για παράδειγμα για  $\omega'/\omega'_1 = 2$  και  $n=8$  έχουμε εξασθένηση περίπου 48 dB ενώ για  $\omega'/\omega'_1 = 0.8$  η εξασθένηση είναι περίπου 0.35 dB.

Για ένα Butterworth low-pass πρότυπο οι τιμές των  $g_k$  όπως φαίνονται στο Σχήμα 1 μπορούν να υπολογισθούν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$g_0=1$$

$$g_k = 2 \cdot \sin \left[ \frac{(2k-1)\pi}{2n} \right] \text{ με } k=1,2,\dots,n$$

$$g_{n+1}=1 \text{ για όλα τα } n.$$

Στον πίνακα 1 που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων  $g_n$  για  $n=1$  έως 10.

VALUE OF n	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$	$\epsilon_7$	$\epsilon_8$	$\epsilon_9$	$\epsilon_{10}$	$\epsilon_{11}$
1	2.000	1.000									
2	1.414	1.414	1.000								
3	1.000	2.000	1.000	1.000							
4	0.7654	1.848	1.848	0.7654	1.000						
5	0.6180	1.618	2.000	1.618	0.6180	1.000					
6	0.5176	1.414	1.932	1.932	1.414	0.5176	1.000				
7	0.4450	1.247	1.802	2.000	1.802	1.247	0.4450	1.000			
8	0.3902	1.111	1.663	1.962	1.962	1.663	1.111	0.3902	1.000		
9	0.3473	1.000	1.532	1.879	2.000	1.879	1.532	1.000	0.3473	1.000	
10	0.3129	0.9080	1.414	1.782	1.975	1.975	1.782	1.414	0.9080	0.3129	1.000

Πίνακας 1. Οι τιμές των παραμέτρων  $g_n$  για  $n=1$  έως 10.

### Απόκριση Chebyshev

Στην απόκριση Chebyshev τα πράγματα είναι λίγο διαφορετικά. Στην περίπτωση αυτή η τιμή της εξασθένησης παραμένει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο  $A_m$  έως μια συγκεκριμένη συχνότητα  $\omega'_1$  και κατόπιν αυξάνεται μονότονα με την αύξηση της συχνότητας. Η εξασθένηση σε decibels στη ζώνη διέλευσης δίνεται από τη σχέση:

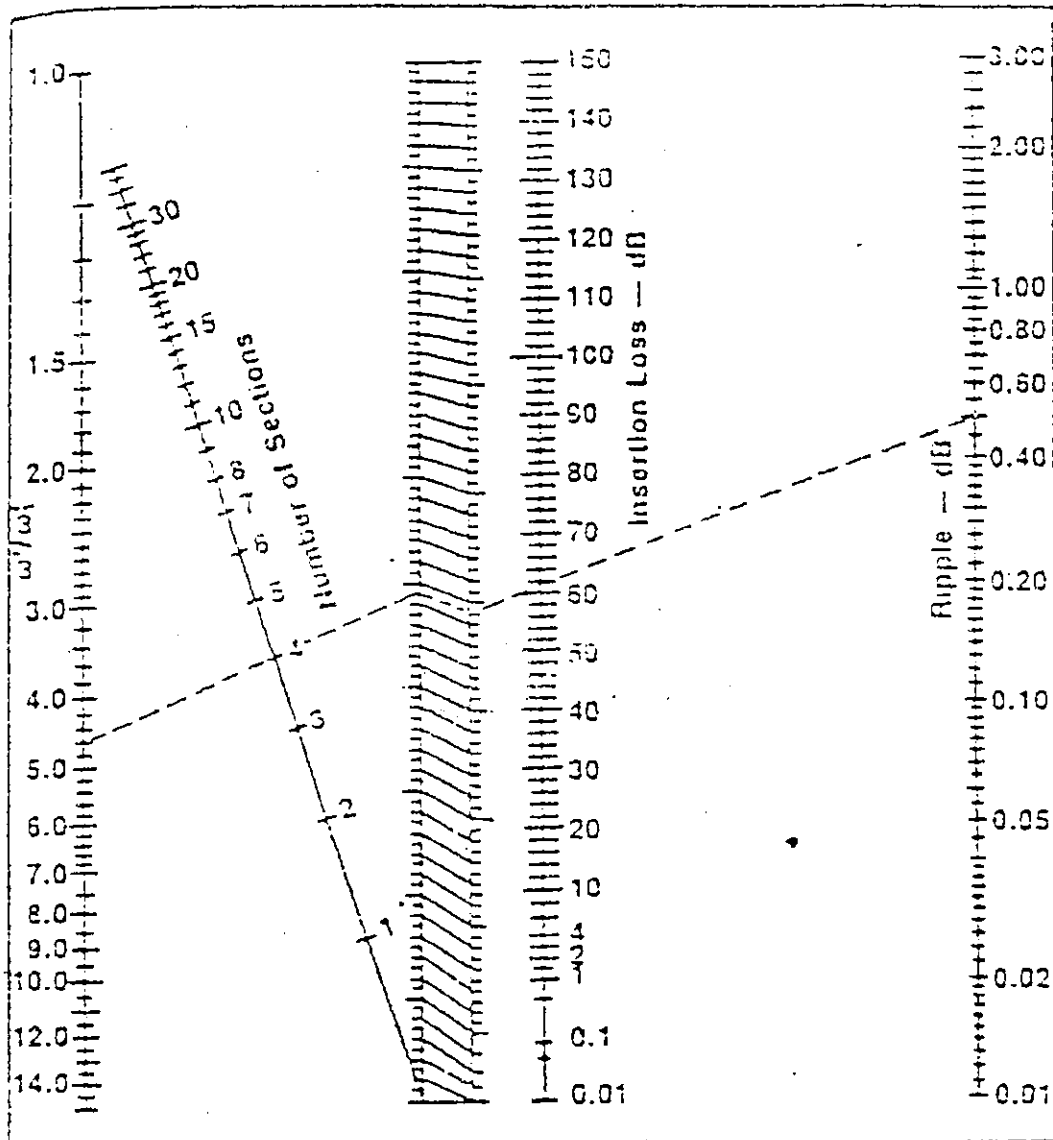
$$A = 10 \cdot \log \left[ 1 + \left( 10^{A_m/10} - 1 \right) \cdot \cos^2 \left( n \cdot \cos^{-1} \omega' \right) \right]$$

ενώ στη ζώνη αποκοπής από τη σχέση:

$$A = 10 \cdot \log \left[ 1 + \left( 10^{A_m/10} - 1 \right) \cdot \cosh^2 \left( n \cdot \cosh^{-1} \omega' \right) \right]$$

όπου  $n$  είναι και πάλι ο βαθμός του φίλτρου,  $A_m$  είναι το εύρος της κυμάτωσης σε dB και  $\omega'_1$  είναι το εύρος ζώνης για το οποίο η εξασθένηση έχει τιμή μικρότερη από  $A_m$ .

Το νομόγραμμα του Σχήματος 4 που ακολουθεί όπως και στην προηγούμενη περίπτωση (φίλτρα Butterworth) μας βοηθά να υπολογίσουμε το βαθμό του φίλτρου που χρειαζόμαστε. Για παράδειγμα με κυμάτωση 0.5 dB για  $\omega'/\omega'_1 = 4.6$  η εξασθένηση ενός φίλτρου 4<sup>ου</sup> βαθμού είναι περίπου 61 dB.



Σχήμα 4. Νομόγραμμα για την equal ripple απόκριση.

Οι τιμές των στοιχείων για απόκριση Chebyshev μπορούν να υπολογιστούν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$g_0 = 1,$$

$$g_1 = \frac{4 \cdot a_1}{\gamma},$$

$$g_k = \frac{4 \cdot a_{k-1} \cdot a_k}{b_{k-1} \cdot g_{k-1}} \text{ με } k=2,3,\dots,n$$

και  $g_{n+1} = 1$  όπου  $n$  περιττός,

ή  $g_{n+1} = \coth^2(\beta/4)$  όπου  $n$  άρτιος

όπου 
$$a_k = \sin \frac{(2k-1)\pi}{2n},$$

$$b_k = \gamma^2 + \sin^2 \frac{k\pi}{n},$$

$$\beta = \ln \left( \coth \frac{A_m}{17.37} \right),$$

$$\text{και } \gamma = \sinh \frac{\beta}{2n}$$

Στον Πίνακα 2 που ακολουθεί μπορούμε εύκολα να βρούμε τις τιμές των  $g_k$  για  $n=1$  έως 10 και για διάφορες τιμές κυμάτωσης (ripple). Στις περισσότερες περιπτώσεις η τιμή της κυμάτωσης κυμαίνεται μεταξύ 0.01 dB (δηλαδή VSWR=1:1.1) και 0.2 dB (δηλαδή VSWR=1:1.54).

Έχοντας υπολογίσει τις τιμές  $g_k$  μπορούμε στη συνέχεια να βρούμε τις τιμές των στοιχείων χρησιμοποιώντας τους παρακάτω μετασχηματισμούς:

$$L_k = g_k \cdot \left( \frac{Z_0}{\omega_{LP}} \right),$$

$$C_k = g_k \cdot \left( \frac{1}{\omega_{LP} \cdot Z_0} \right)$$

όπου  $\omega_{LP}$  είναι το απαιτούμενο εύρος ζώνης.

VALUE OF n	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$	$\epsilon_6$	$\epsilon_7$	$\epsilon_8$	$\epsilon_9$	$\epsilon_{10}$	$\epsilon_{11}$
0.01 db ripple											
1	0.0960	1.0000									
2	0.4488	0.4077	1.1007								
3	0.6291	0.9702	0.6291	1.0000							
4	0.7136	1.2003	1.3212	0.6476	1.1007						
5	0.7583	1.3049	1.5773	1.3049	0.7583	1.0000					
6	0.7813	1.3600	1.6896	1.5350	1.4970	0.7098	1.1007				
7	0.7969	1.3924	1.7481	1.6331	1.7481	1.3924	0.7969	1.0000			
8	0.8072	1.4130	1.7824	1.6833	1.8529	1.6193	1.5554	0.7333	1.1007		
9	0.8144	1.4270	1.8043	1.7125	1.9057	1.7125	1.8043	1.4270	0.8144	1.0000	
10	0.8196	1.4369	1.8192	1.7311	1.9362	1.7311	1.9055	1.6527	1.5817	0.7446	1.1007
0.1 db ripple											
1	0.3052	1.0000									
2	0.8430	0.6220	1.3554								
3	1.0315	1.1474	1.0315	1.0000							
4	1.1088	1.3061	1.7703	0.8180	1.3554						
5	1.1468	1.3712	1.9750	1.3712	1.1468	1.0000					
6	1.1681	1.4039	2.0562	1.5170	1.9029	0.8618	1.3554				
7	1.1811	1.4228	2.0966	1.5733	2.0966	1.4228	1.1811	1.0000			
8	1.1897	1.4346	2.1199	1.6010	2.1699	1.5640	1.9444	0.8778	1.3554		
9	1.1956	1.4425	2.1345	1.6167	2.2053	1.6167	2.1345	1.4425	1.1956	1.0000	
10	1.1999	1.4481	2.1444	1.6265	2.2253	1.6418	2.2046	1.5821	1.9628	0.8853	1.3554
0.2 db ripple											
1	0.4342	1.0000									
2	1.0378	0.6745	1.5386								
3	1.2275	1.1525	1.2275	1.0000							
4	1.3028	1.2844	1.9761	0.8468	1.5386						
5	1.3394	1.3370	2.1660	1.3370	1.3394	1.0000					
6	1.3598	1.3632	2.2394	1.4555	2.0974	0.8838	1.5386				
7	1.3722	1.3781	2.2756	1.5001	2.2756	1.3722	1.3722	1.0000			
8	1.3804	1.3875	2.2963	1.5217	2.3413	1.4925	2.1349	0.8972	1.5386		
9	1.3860	1.3938	2.3093	1.5340	2.3728	1.5340	2.3093	1.3938	1.3860	1.0000	
10	1.3901	1.3983	2.3181	1.5417	2.3904	1.5536	2.3720	1.5066	2.1514	0.9034	1.5386
0.5 db ripple											
1	0.6986	1.0000									
2	1.4029	0.7071	1.9841								
3	1.5963	1.0967	1.5963	1.0000							
4	1.6703	1.1926	2.3661	0.8419	1.9841						
5	1.7058	1.2296	2.5408	1.2296	1.7058	1.0000					
6	1.7254	1.2479	2.6064	1.3137	2.4758	0.8696	1.9841				
7	1.7372	1.2583	2.6381	1.3444	2.6381	1.2583	1.7372	1.0000			
8	1.7451	1.2647	2.6564	1.3590	2.6964	1.3389	2.5093	0.8796	1.9841		
9	1.7504	1.2690	2.6678	1.3673	2.7239	1.3673	2.6678	1.2690	1.7504	1.0000	
10	1.7543	1.2721	2.6754	1.3725	2.7392	1.3806	2.7231	1.3485	2.5239	0.8842	1.9841

Πίνακας 2. Οι τιμές των παραμέτρων  $g_n$  για  $n=1$  έως 10.

### Ζητούμενα

Να σχεδιασθεί βαθυπερατό φίλτρο τύπου Chebyshev με χαρακτηριστικά που ορίζονται για κάθε φοιτητή ως εξής: Επιλέγετε τα χαρακτηριστικά από τον Πίνακα 3 που αντιστοιχούν στο Νο. που είναι ίδιο με το τελευταίο ψηφίο του αριθμού μητρώου σας.

No.	Ripple (dB)	Εύρος ζώνης διέλευσης (GHz)	Εξασθένηση (dB) σε συγκεκριμένη συχνότητα (GHz)	
0.	0.01	1	25	1.3
1	0.01	2	30	2.8
2	0.01	3	35	4.5
3	0.1	1	25	1.3
4	0.1	2	30	2.8
5	0.1	3	35	4.5
6	0.2	1	45	1.3
7	0.2	2	50	2.8
8	0.5	3	55	4.5
9	0.5	4	60	6

Πίνακας 3.

Να πραγματοποιηθεί εξομοίωση με τη βοήθεια του προγράμματος HP-ADS 1.5, και να παρουσιασθούν οι συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης του φίλτρου τόσο σε μεγάλο εύρος ζώνης, ώστε να φαίνεται η εξασθένηση στη ζώνη αποκοπής, όσο και σε μικρότερο εύρος ζώνης, ώστε να φαίνεται καθαρά το ripple της απόκρισης.