

Band pass

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

1. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η συμπεριφορά της συμμετρικής φόρτισης (*band-pass*) μπορεί να γίνει κατανοητή με τη χρησιμοποίηση κάποιων βασικών κανόνων που στηρίζονται στη λειτουργία των ακουστικών συσκευών μεταφοράς ήχου στις χαμηλές συχνότητες. Αυτοί οι κανόνες είναι:

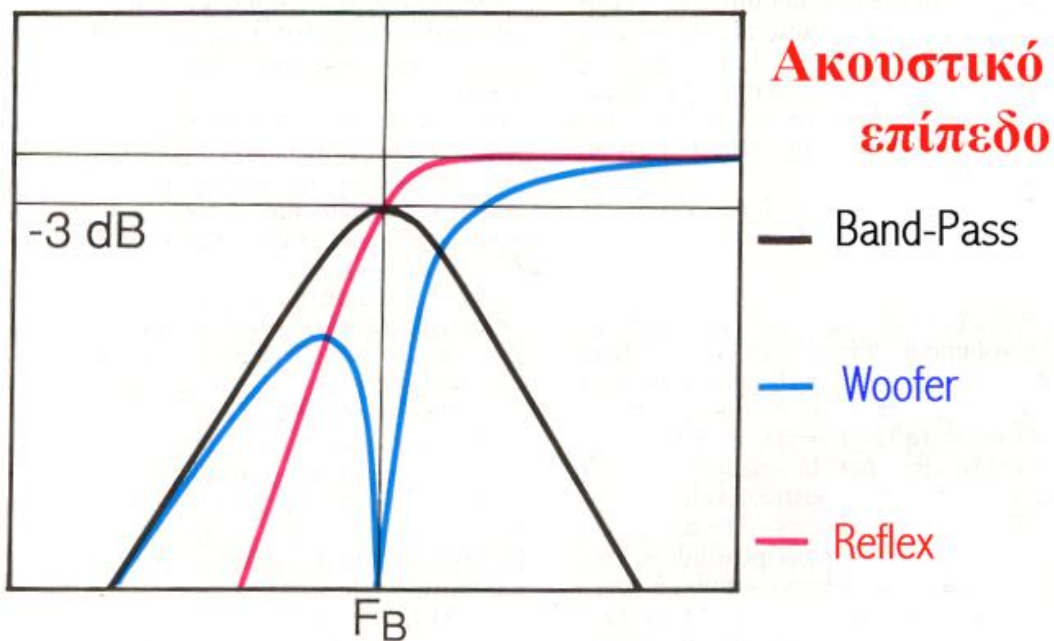
- Ένα μεγάφωνο μπορεί να είναι ανόμοιο σ' ένα φίλτρο διάβασης υψηλών συχνοτήτων 2ης τάξης και καθορίζεται από τη συχνότητα συντονισμού στον αέρα F_s και από τον συνολικό συντελεστή ποιότητας Q_{ts} ο οποίος εκφράζει και την τάση για ταλάντωση. Σε σχέση με την F_s , η απόκριση βρίσκεται σε στάθμη ίσης με $20 \cdot \log_{10}(Q_{ts})$. Κάτω από την F_s αρχίζει μια πτώση με ρυθμό 12 db/oct .
- Η κίνηση της ανάρτησης στον αέρα που απομονώνει την μπροστινή ιδανική ακτινοβολία, έχει σαν αποτέλεσμα την μετατροπή της σε σκληρή. Είναι γνωστό ότι το μηχανικό ισοδύναμο του αέρα στο κλειστό κουτί, προστίθεται στη σκληρότητα των αναρτήσεων της μεμβράνης. Μιλάμε πάντα για φίλτρο διάβασης υψηλών 2ης τάξης. Εδώ όμως έχουμε την συχνότητα συντονισμού $F_c > F_s$ και τον συντελεστή ποιότητας του κουτιού $Q_{tc} > Q_{ts}$. Το πόσο και πως αυξάνονται αυτές οι τιμές εξαρτάται από το "πηλίκιο απώλειας" A_c το οποίο ισούται με το κλάσμα V_{AS}/V_{BC} . Όπου V_{BC} είναι ο όγκος του κλειστού κουτιού. Η κατασκευή σε κλειστό κουτί έχει επίσης το πλεονέκτημα του καλύτερου ελέγχου των απομακρύνσεων και κάτω από την F_c .
- Η εκπομπή ενός συντονισμένου όγκου που διεγείρεται από το εσωτερικό, έχει συμπεριφορά όμοια με αυτή ενός φίλτρου 4ης τάξης (δηλαδή καθορίζεται από το άθροισμα μιας υψηλής και μιας χαμηλής διέλευσης 2ης τάξης). Αυτό χαρακτηρίζεται από μια συχνότητα συντονισμού F_o και από δύο συντελεστές ποιότητας " Q " και " q " οι οποίοι συνδέονται με το πλάτος της μπάντας και με τη συνολική της κυμάτωση "*ripple*" (της απόκρισης) στη μπάντα που διέρχεται. Σαν "μπάντα διέλευσης" θα πρέπει να προτιμούμε αυτή που βρίσκεται μεταξύ δύο οριακών συχνοτήτων (χαμηλή F_L και υψηλή F_H) τοποθετημένες σε στάθμη $20 \cdot \text{Log}_{10}(q)$. Για συμμετρία πρέπει να ισχύει $F_L \cdot F_H = F_o^2$.

- Η ακτινοβολία ενός συστήματος *reflex* είναι το διανυσματικό άθροισμα της ακτινοβολίας (κατά μέτρο και φάση) ενός μεγαφώνου μονταρισμένου στο κουτί και αυτής της συντονισμένης οπής που ενεργοποιείται από την μπροστινή ακτινοβολία του μεγαφώνου. Κοντά στη συχνότητα συντονισμού, όπου $F_B = F_0$, το διάφραγμα του μεγαφώνου βλέπει μια μεγάλη "μηχανική σύνθετη αντίσταση" η οποία εμποδίζει την κίνησή του. Έτσι η απομάκρυνση του κώνου μειώνεται ικανοποιητικά.

Ο αέρας για να κινηθεί φροντίζει πρώτα τον συντονισμό της οπής *reflex*. Εκτός από την F_B η οπή *reflex* προσθέτει επιπλέον ακουστικότητα στο μεγάφωνο έχοντας σαν αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής στάθμης.

Οι διάφορες "ευθυγραμμίσεις" επιτυγχάνονται με το να διαλέξουμε ανάλογα την συχνότητα συντονισμού F_B (δηλαδή το $h = \frac{F_B}{F_S}$) και τον όγκο της κατασκευής (ή διαφορετικά, το πηλίκο της απώλειας AR που ισούται με V_{AS}/V_{BR}). Δυστυχώς κάτω από την F_B η διαφορά φάσης μεταξύ της ακτινοβολίας του μεγαφώνου και της καθορισμένης οπής *reflex* καθορίζει μία αντίστροφη μείωση των ακουστικών πιέσεων και αποδίδει πολύ απότομη την κλίση αποκοπής με ρυθμό 24 db/oct.

Έχουμε δηλαδή συμπεριφορά υψηλής διέλευσης 4ης τάξης. Επίσης η μηχανική σύνθετη αντίσταση που φαίνεται από το διάφραγμα (για συχνότητες μικρότερες από την F_B) μειώνεται περισσότερο και στην περίπτωση του κλειστού κουτιού, έχουμε το εξής παράδοξο. Η απομάκρυνση, μεγαλώνει απότομα με την μείωση της συχνότητας και την μείωση της στάθμης της απόκρισης κάτω από την F_B .



σχ.1

Οι μοναδικές συνιστώσες, η σύνθεση απόκρισης ενός ιδανικού συστήματος *reflex* (χωρίς απώλειες), η ευθυγράμμιση $Q=0,7$ (*Butterworth* $h=1$) και ο συντονισμός

της οπής *reflex* φαίνονται στο σχ.1. Παρατηρούμε από το σχήμα ότι κάτω από την *FB* η απόκριση του συστήματος *reflex* γίνεται αμέσως χειρότερη από αυτή της οπής συντονισμού και επίσης χειρότερη από αυτή ενός κλειστού κουτιού με συχνότητα συντονισμού *FC* και συντελεστή ποιότητας $QTC=0,707$.

Αν ενδιαφερόμαστε για την ζώνη *audio*, αυτή που τυπικά αναπαράγεται από τα *subwoofers*, μπορεί να επιθυμούμε την οπή συντονισμού σ' ένα σύστημα *reflex* έτσι ώστε η απόκρισή της στις πολύ χαμηλές συχνότητες να έχει μια συμπεριφορά υψηλής διάβασης 2ης τάξης, αντί της 4ης (όπως για την ανάρτηση του αέρα), επιτυγχάνοντας έτσι μια απομάκρυνση του μεγαφώνου στον συντονισμό, πολύ μειωμένη.

Για να απομονώσουμε και να εξουδετερώσουμε την απευθείας ακτινοβολία ενός συστήματος *reflex*, το πετυχαίνουμε είτε τοποθετώντας την εμπρός όψη του μεγαφώνου σ' έναν αγωγό που ξεφορτίζεται έξω από την περιοχή της ακτινοβολίας που δεν επιθυμούμε, είτε με το να αναγκάσουμε την ακτινοβολία να σβήσει στην ελλειπή ευθεία μιας ερμητικά κλεισμένης κατασκευής.

Είναι φανερό πως συνήθως προτιμάται ο δεύτερος τρόπος, αρκεί να προσέξουμε τις μεταβολές που μεταφέρονται από τον κλειστό όγκο στις παραμέτρους του μεγαφώνου. Ο κλειστός όγκος εξ' άλλου σκληραίνει την κατασκευή και επίσης μειώνει την απομάκρυνση του μεγαφώνου (μικρότερη παραμόρφωση).

Με αυτή την προσέγγιση θα ήταν δυνατό, με σημαντική ευκολία να εξάγουμε μαθηματικές σχέσεις σχετικά με την απόκριση συχνότητας και την παραμόρφωση.

Θα ήταν αρκετό να θεωρήσουμε ένα σύστημα *reflex* στο οποίο όλες οι παράμετροι *Thiele-Small* του μεγαφώνου είναι οι αυτές της κλειστής κατασκευής και στην οποία η απόκριση θα είναι απομονωμένη από το ακουστικό συστατικό της μοναδικής οπής συντονισμού, εξαιρώντας την απευθείας ακτινοβολία του μεγαφώνου. Τα αποτελέσματα στα οποία καταλήγουν γνωστοί συγγραφείς του είδους όπως οι *Fincham*, *Augris* και *Santens* αναφέρονται στα συγγράμματά τους.

Προχωρώντας λίγο παραπέρα μπορούμε να προσθέσουμε πως για να απομονώσουμε το μέγαφωνο, μπορούμε να το πετύχουμε με την χρήση μιας 2ης συντονισμένης κοιλότητας. Θα φτιάχναμε έτσι ένα διπλό *reflex*. Προφανώς αν επιλέξουμε την ίδια συχνότητα συντονισμού και για τα δύο *reflex* θα έχουμε την ολοκληρωτική εξουδετέρωση του ήχου (σκεφτόμενοι την διαφορά φάσης της εκπομπής των δύο όψεων του διαφράγματος).

Με ανάλογα κριτήρια επαύξησης των αποκρίσεων των δύο *reflex* μπορούμε να έχουμε αποδόσεις με πολύ ενδιαφέρον από πλευράς ελέγχου της παραμόρφωσης του διαφράγματος κατά την ταλάντωση.

Η εταιρεία *Bose* έχει επιφέρει πολύ καλά αποτελέσματα σε πολλά μοντέλα της. Το σύστημα *acousti-mass* περιλαμβάνει δύο θαλάμους συντονισμένους σε διαφορετικές συχνότητες οι οποίοι χωρίζονται από την μεμβράνη του μεγαφώνου, ενώ στο σύστημα *wave cannon* οι συντονισμένοι θάλαμοι έχουν σχέση συχνοτήτων 1:3 και συμπίπτουν με τον μεγάλο συντονισμό του σωλήνα. Το μήκος του συστήματος είναι περίπου 4 μέτρα και περιλαμβάνει και ηλεκτρονική ισοστάθμιση.

2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Είναι φανερό πως το σπουδαιότερο πλεονέκτημα ενός συστήματος *band-pass* σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα της απευθείας ακτινοβολίας, είναι ο περιορισμός της απόκρισης των μεγάλων αρμονικών εξαιτίας της παραμόρφωσης. Θεωρώντας όμως ότι ψάχνουμε μόνο ένα πλάτος μπάντας μεγαλύτερο από μια οκτάβα, βλέπουμε πως η ζώνη λειτουργίας δεν προστατεύεται καλά από τους κύριους συντελεστές της παραμόρφωσης λόγω της 2ης και 3ης αρμονικής.

Μας συμφέρει να φιλτράρουμε τις διαταραχές του κώνου και των άλλων θορύβων οι οποίοι παραμένουν εγκλωβισμένοι στον όγκο συντονισμού. Σε αυτή την περίπτωση μια επιπλέον βοήθεια μπορούμε να έχουμε από ένα παθητικό *reflex* ή από μια οπή *reflex* τοποθετημένα έτσι ώστε να μην συλλαμβάνουν την απευθείας εκπομπή του μεγαφώνου.

Πρέπει επίσης να μοντάρουμε στην συντονισμένη κοιλότητα, την μαγνητική πλευρά του μεγαφώνου έτσι ώστε οι μη επιθυμητοί θόρυβοι να μετατρέπονται κατά ένα μέρος, αφού πρώτα ανακλαστούν. Αυτή η παραπάνω τεχνική είναι σημαντική γιατί έτσι διατηρούμε (χωρίς να αλλάξουμε την πολικότητα του σήματος) την σχέση φάσης, μεταξύ ηλεκτρικής τάσης και ηχητικής πίεσης σε συχνότητες μεγαλύτερες από τη συχνότητα συντονισμού.

Μια άλλη τεχνική είναι η χρησιμοποίηση ενός ζεύγους μεγαφώνων σε διάταξη *push-pull* αποδίδοντας έτσι λιγότερο από την 2η αρμονική.

Αφού ελαττώσουμε τους θορύβους του μεγαφώνου, χρειάζεται να μην μεταδώσουμε νέους όπως για παράδειγμα, τις ανωμαλίες μιας κακοσχεδιασμένης οπής συντονισμού *reflex* ή ακόμη την χρήση ενός παθητικού ακτινοβολητή με επιφάνεια που δεν επαρκεί.

Πρέπει να πούμε ότι η συχνότητα συντονισμού αυτών των συστημάτων είναι περίπου διπλή σε σχέση με τα αντίστοιχα *reflex* (όπου η συχνότητα ισούται με αυτήν της συχνότητας αποκοπής $-3db$ και η ακουστική πίεση εξαρτάται αποκλειστικά από τον όγκο του αέρα που η οπή *reflex* είναι ικανή να δημιουργήσει ταλάντωση). Για να υπάρχει η σωστή ταχύτητα του αέρα στην οπή *reflex* ή παρόμοια να μετατοπίζεται σωστά η μεμβράνη του παθητικού ακτινοβολητή, χρειάζεται η οπή να έχει μεγάλες διαστάσεις.

Μπορούμε να θεωρήσουμε ικανοποιητική μια διατομή της οπής ίση με $0,25*SD$ (δηλαδή κυκλικός αγωγός με ελάχιστη διάμετρο $0,50*D$) ενώ για τον παθητικό ακτινοβολητή μια ελάχιστη διατομή ίση με αυτή της επιφάνειας SD του μεγαφώνου κρίνεται επίσης ικανοποιητική. Ευτυχώς οι σχετικά υψηλές συχνότητες συντονισμού δεν θα μας αναγκάσουν σε χρήση κατασκευών με τεράστιες διαστάσεις. Αντίθετα, μετά από κάποια δοκιμαστικά βλέπουμε ότι οι διαστάσεις ενός συστήματος *band-pass* (αν και αποτελείται από δύο διαφορετικούς όγκους), είναι συνήθως μικρότερες από αντίστοιχες σχεδιάσεις των ίδιων συχνοτήτων.

Ο λόγος είναι ότι το σύστημα *band-pass* έχει μειωμένες απώλειες στον συνδυασμό *woofer-box* καθώς επίσης του δίνεται η δυνατότητα να αυξήσει το πλάτος της μπάντας και την απόδοση μεταφοράς. Εξάλλου είναι κατανοητό ότι όσο πιο

ειδικευμένα αναγκάζεται να παράγει ένα σύστημα μια στενή μπάντα γύρω από την συχνότητα συντονισμού, τόσο πιο δυνατά είναι ικανό να την παράγει.

Σχετικά με ένα σύστημα *reflex* με την ίδια συχνότητα αποκοπής $-3db$ έχουμε μια κλίση μισή από αυτή της αποκοπής υψηλής διάβασης και επομένως έχουμε μια πτώση των χαμηλότερων συχνοτήτων περισσότερο ομαλή.

Επιπλέον η παραμόρφωση του κώνου στην πραγματική ζώνη λειτουργίας (πάνω από τα $-3db$), είναι μικρότερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα συστήματα *reflex* η συχνότητα συντονισμού (σημείο ελάχιστης παραμόρφωσης), ορίζει το μικρότερο όριο χρήσιμης λειτουργίας, ενώ στη σχεδίαση *band-pass* ο συντονισμός συμπίπτει με το κέντρο της μπάντας έχοντας μια άλλη τουλάχιστον μισή οκτάβα χρήσιμης λειτουργίας μικρότερη.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι ένα σύστημα *band-pass* υπερέχει κατά πολύ από ισοδύναμα συστήματα, δίνοντας ταυτόχρονα περισσότερο χρόνο στη διάρκεια των αλλοιώσεων των αρχικών παραδοχών του χρησιμοποιούμενου μεγαφώνου και αυτό γιατί η σχεδίαση αυτή στηρίζεται κυρίως στις σταθερές παραμέτρους του μεγαφώνου όπως οι *FS*, *RE*, *SD* και *MMS* ενώ για παράδειγμα η σχεδίαση ενός *reflex* στηρίζεται στην πιο ευμετάβλητη παράμετρο του μεγαφώνου, αυτή του όγκου *VAS*.

3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

Οι επιστήμονες που ασχολήθηκαν στο παρελθόν με τις μαθηματικές σχέσεις της σχεδίασης *band-pass*, θεωρούν την συμμετρία σαν βασική προϋπόθεση για ξεκίνημα.

Αυτό σημαίνει ότι η συχνότητα συντονισμού του μεγαφώνου σε κλειστό κουτί είναι τοποθετημένη ισοδύναμα με την συχνότητα συντονισμού του κουτιού *reflex* η οποία με τη σειρά της συμπίπτει με την συχνότητα συντονισμού της *band-pass* ($F_C = F_B = F_O$). Με αυτόν τον τρόπο ο υπολογισμός *band-pass* με το χέρι, γίνεται πιο εύκολος αλλά τα τελικά αποτελέσματα θα συνέφερε να γίνουν με υπολογιστή.

Ο *Fincham* και δύο γάλλοι εξέδωσαν δύο διαφορετικές σχέσεις που συνδέονται με τις κύριες παραμέτρους. Αυτές είναι:

1. $q/QTS = (F_H - F_L) / F_S = (F_C / F_S) * SQR(\Omega)$
2. $\Omega = AR / (1 + AC)$
 $AR = V_{AS} / V_{BR}$
 $AC = V_{AS} / V_{BC}$

όπου V_{BR} και V_{BC} είναι οι όγκοι των κουτιών *reflex* και κλειστού αντίστοιχα. Από αυτές προκύπτουν οι:

3. $F_H - F_L = F_C * SQR(\Omega) = q * F_S / QTS$
4. $\Omega = (q / QTS)^2 = (F_H - F_L)^2 / F_C^2$

Γνωρίζοντας ακόμη τους τύπους για κλειστό κουτί χωρίς υλικό απόσβεσης, γράφουμε:

$$5. \quad F_C/F_S=Q_{TC}/Q_{TS}=SQR(1+AC)$$

Το πρώτο συμπέρασμα που βγαίνει, είναι πως για να έχουμε μία μπάντα διάβασης θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα μεγάφωνο με χαμηλό Q_{TS} και για να έχουμε καλές αποδόσεις χρειαζόμαστε καλά μεγάφωνα. Καλό θα είναι η συχνότητα συντονισμού του να μην είναι πολύ χαμηλή!

Αυτά σημαίνουν, διάφραγμα ελαφρύ και ανάρτηση σκληρή. Ακόμη και αν ο συντελεστής ποιότητας του *band-pass* είναι ελεύθερα επιλεγμένος από μας, δεν είναι δυνατόν να υπερβούμε κάποια τιμή, τη στιγμή που η αύξησή του χειροτερεύει σιγά-σιγά το "ripple" της απόκρισης στη μπάντα και στα περάσματα.

Επίσης η τιμή του Q_{TC} εκλέγεται από μας έχοντας κατά νου ότι μια αύξηση μεγαλύτερη από το επιτρεπτό προκαλεί χειροτέρευση της απόκρισης στα περάσματα. Προτείνεται σαν τιμή για τα q και Q_{TC} μικρότερη από $0,90$.

Από την σχέση {5.} έχουμε $F_B=F_O=F_C=F_S*Q_{TC}/Q_{TS}$ και σαν αποτέλεσμα προκύπτουν οι εξής:

$$6. \quad AC=(Q_{TC}/Q_{TS})^2-1=(F_C/F_S)^2-1$$

$$7. \quad AR=(q/Q_{TS})^2$$

Από τις σχέσεις {2.}{6.}{7.} μπορούμε να υπολογίσουμε τους όγκους V_{BC} και V_{BR} . Αν θυμηθούμε ότι για συμμετρία πρέπει να ισχύει $F_H*F_L=F_O^2$ με ορισμένες μαθηματικές πράξεις καταλήγουμε στις σχέσεις των οριακών συχνοτήτων F_L και F_H :

$$8. \quad F_H/F_L=(SQR(\Omega)+SQR(\Omega+4))^2/4$$

$$9. \quad F_H=F_C*SQR(F_H/F_L)$$

$$10. \quad F_L=F_C/SQR(F_H/F_L)$$

Με σχετική ευκολία υπολογίζουμε την ονομαστική ευαισθησία του μεγαφώνου:

$$11. \quad \text{dB SPL}=-20*\text{LOG}_{10}(\Omega)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις αρκεί ένα κομπιουτεράκι τσέπης για να υπολογίσουμε τα κύρια χαρακτηριστικά μιας σχεδίασης *band-pass* χωρίς απώλειες.

Μπορούμε να θεωρήσουμε δεδομένο ότι ο συντελεστής $[\Omega]$, είναι απευθείας ανάλογος με το πλάτος της μπάντας και αντιστρόφως ανάλογος με την κορυφή της ευαισθησίας στη συχνότητα συντονισμού.

Οι τιμές που μπορεί να έχει το $[\Omega]$ κυμαίνονται μεταξύ του μηδέν (όγκος κλειστός, άπειρα μικρός) και του AR (κουτί κλειστό, άπειρα μεγάλο).

Επειδή από τις σχέσεις {2.} προκύπτει ότι:

$$12. \quad \Omega = (V_{BC} \cdot V_{AS}) / (V_{BR} \cdot (V_{AS} + V_{BC}))$$

Για κλειστούς όγκους όχι πολύ μεγάλους (FC πολύ μεγαλύτερο από το FS) το $[\Omega]$ δείχνει με προσέγγιση και το κλάσμα μεταξύ των όγκων των δύο κουτιών.

Οι τιμές που παίρνει συνήθως είναι μεταξύ $0,30$ και $3,00$ ενώ πιο συχνά η τιμή του είναι ίση με $1,00$. Έχουμε πει ήδη ότι για τον περιορισμό της απαραίτητης συμμετρίας είναι αναγκαία η σύμπτωση μεταξύ της FC του κλειστού κουτιού και FB του κουτιού *reflex*. Επισημαίνοντας επίσης την ατέλεια της ερμητικότητας των κουτιών είναι αναγκαία η ελάττωση του παρασιτικού συντονισμού της κοιλότητας με ανάλογη ποσότητα υλικού απόσβεσης τοποθετημένης με ανάλογα κριτήρια που απαιτούνται για τα κουτιά *reflex*.

Είναι φανερό ότι η απώλεια που εισάγει η απόσβεση, ελαττώνει την αποτελεσματικότητα και αυξάνει την απομάκρυνση του μεγαφώνου (σε κουτί ιδανικό, στο συντονισμό η απομάκρυνση θα είναι μηδενική).

Αν έχετε ήδη ασχοληθεί με σχεδιασμούς ηχείων θα έχετε διαπιστώσει ότι στα κλειστά κουτιά, για να πετύχουμε (παρουσία υλικού απόσβεσης), τους ακριβείς στόχους, είτε ελαττώνουμε τα FC , QTC είτε αυξάνουμε τον VBC .

Παρόμοια, στα κουτιά *reflex*, μπορούμε να θεωρήσουμε την φανταστική ανάρτηση του όγκου που οφείλεται στην απόσβεση πάνω στα τοιχώματα, έχοντας έτσι την αντίστοιχη μείωση του συντελεστή κατασκευής QB , δείκτης για την αποτελεσματικότητα του συντονισμού.

Έτσι καμιά φορά, έχοντας τοποθετήσει υπερβολική ακουστική απόσβεση, προκαλούμε ένα πνίξιμο του ήχου που βγαίνει από την κοιλότητα συντονισμού. Σημειώστε ότι η καμπύλη απομάκρυνσης (συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης του QB), είναι η ίδια με αυτή ενός συστήματος *reflex* ενός όγκου VBR όπου στις παραμέτρους του μεγαφώνου έχουν μεταφερθεί οι διορθώσεις που εισάγονται από την συναρμολόγηση του κλειστού κουτιού ενός όγκου VBC .

Για επίτευξη της καμπύλης της απόκρισης συχνότητας, πρέπει να αποκλείσουμε από τον υπολογισμό στο κουτί *reflex* την συνιστώσα της κατευθείαν ακτινοβολίας.

4. ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ

Η στάθμη αναφοράς της απόκρισης συχνότητας, είναι συνήθως η θεωρητική η οποία υπολογίζεται ξεκινώντας από τις παραμέτρους του μεγαφώνου:

$$13. \quad \text{dB SPL}_w = 88.49 + 20 \cdot \text{LOG}_{10}(\text{BL} \cdot \text{SD} / (\text{RE} \cdot \text{MMS}))$$

$$\begin{aligned}
 rel.A &= \frac{\left(\frac{j \cdot f}{f_o}\right)^2}{\left[\frac{f^4}{f_o^4} - f^2 \cdot \frac{(2+aT)}{f_o^2}\right] + 1 + j \cdot \left[\frac{f}{f_o \cdot Q_{tc}} - \frac{f^3}{f_o^3 \cdot Q_{tc}}\right]} \\
 rel.B &= \frac{-\left(\frac{f}{f_c}\right)^2}{\left[\frac{f^4}{f_c^2 \cdot f_B^2} - f^2 \cdot \left(\frac{1}{f_c^2} + \frac{(1+aT)}{f_B^2}\right) + 1\right] + j \cdot \left[\frac{f}{f_c \cdot Q_{tc}} - \frac{f^3}{f_c^3 \cdot Q_{tc}}\right]} \\
 rel.C &= \frac{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2}{\sqrt{\left[\left\{\frac{f^4}{f_c^2 \cdot f_B^2} - f^2 \cdot \frac{1}{f_c^2} + \frac{(1+aT)}{f_B^2} + 1\right\}^2 + \left\{\frac{f}{f_c \cdot Q_{tc}} - \frac{f^3}{f_c^3 \cdot Q_{tc}}\right\}^2\right]}} \\
 rel.D &= \frac{\left(\frac{f}{f_s}\right)^2 \cdot \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}{\sqrt{\left[\left\{\frac{f^4}{f_s^2 \cdot f_B^2} - f^2 \cdot \left(\frac{1}{f_s^2} + \frac{(1+aT)}{f_B^2} + \frac{1}{f_s \cdot f_B \cdot Q_B \cdot Q_{ts}}\right) + 1\right\}^2 + \left\{\frac{f}{f_s \cdot Q_{ts}} + \frac{f}{f_B \cdot Q_B} - \frac{f^3}{f_s \cdot f_B^2 \cdot Q_{ts}} - \frac{f^3}{f_s^2 \cdot f_B \cdot Q_B}\right\}^2\right]}} \\
 rel.E &= \frac{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2}{\sqrt{\left[\left\{\frac{f^4}{f_c^2 \cdot f_B^2} - f^2 \cdot \left(\frac{1}{f_c^2} + \frac{(1+aT)}{f_B^2} + \frac{1}{f_c \cdot f_B \cdot Q_B \cdot Q_{tc}}\right) + 1\right\}^2 + \left\{\frac{f}{f_c \cdot Q_{tc}} + \frac{f}{f_B \cdot Q_B} - \frac{f^3}{f_c \cdot f_B^2 \cdot Q_{tc}} - \frac{f^3}{f_c^2 \cdot f_B \cdot Q_B}\right\}^2\right]}}
 \end{aligned}$$

Για την πορεία με τη συχνότητα οι *Augris* και *Santens* δείχνουν τον "τρόπο" της απόκρισης συχνότητας μιας σχεδίασης *band-pass* η οποία δίνεται από την σχέση της μεταφοράς ενός φίλτρου συντονισμού 4ης τάξης συμπεριλαμβανομένης της συχνότητας συντονισμού $F_O=F_B=F_C$.

Απ' αυτό 2 μηδενικά υπάρχουν στην αρχή και τέσσερις πόλοι συμπίπτουν στην F_O . Σε συνδυασμό με μερικούς τύπους που δείχτηκαν από τον *Fincham* καταλήγομε στην σχέση {A}. Αυτή δείχνει την μεταβολή της συνολικής ευαισθησίας στη συχνότητα συντονισμού (στάθμη $1/\Omega$ και F_O στη σχέση {11.}) και ερμηνεύει καλλίτερα τη σχέση που βγαίνει από τους δύο παραπάνω συγγραφείς μπορώντας έτσι να προβλέψομε τη συμπεριφορά της F_B ως προς την F_C κάτι που φαίνεται στη σχέση {B}. Το μέτρο αυτής της έκφρασης ισοδυναμεί με το πηλίκο μεταξύ του μέτρου του αριθμητή και του μέτρου του παρονομαστή στη σχέση {C}.

Την χρησιμότητα αυτής της σχέσης κατανοεί κάποιος αν γράψει την ανάλογη πραγματική σχέση της φόρτισης *bass-reflex* στην έκδοση του *R.Small* που βοηθά να ιχνοθετήσομε στο διάγραμμα των καμπυλών *reflex* με τη χρήση H/Y . Αυτές οι καμπύλες έχουν συμπεριφορά διάβασης υψηλών 4ης τάξης (4 μηδενικά στην αρχή και τέσσερις πόλοι).

Περνώντας κατευθείαν στην έκφραση του μέτρου, έχουμε τη σχέση {D}. Μάλιστα οι σχέσεις {D} και {E} έχουν ίδιους παρονομαστές για $QB \rightarrow$ άπειρο και:

$$\begin{aligned} 14. \quad & FC=FS \\ & QTC=QTS \\ & \Omega=AR \end{aligned}$$

Οι δύο πρώτες τοποθετήσεις αντιστοιχούν, στη θεωρία που λαμβάνει υπ' όψη και τις μεταβολές που εισάγονται από τον τελικό κλειστό όγκο επί των παραμέτρων του μεγαφώνου. Φαίνεται αμέσως (σχέσεις {2.}, {5.}) ότι για μια φόρτιση *band-pass*, όπου ο κλειστός όγκος VBC γίνεται πάντα πιο μεγάλος, το AC τείνει στο 0. Αυτό έχει σαν συνέπεια, το FC να τείνει στην FS , το QTC να τείνει στο QTS (σχέση {5.}) και το $[\Omega]$ να τείνει στο AR (σχέση {2.}).

Η αντικατάσταση του AR με το $[\Omega]$ προκύπτει με το να δεχθούμε στη 2η εξίσωση της σχέσης {2.} (σε σχέση με το AR) την αντικατάσταση του αριθμητή VAS με τον ισοδύναμο όγκο ενδοτικότητας του συστήματος ταλάντωσης τοποθετημένο στο κουτί. Αυτό το μέγεθος το ονομάζουμε VAC . Ο όγκος VAC είναι αντιστρόφως ανάλογος στην συνολική ενδοτικότητα των αναρτήσεων. Σ' αυτή την περίπτωση προστίθενται οι ενδοτικότητες του συνόλου των αναρτήσεων της μεμβράνης και του όγκου του αέρα στο κλειστό κουτί.

Αποτέλεσμα, $1/VAC=(1/VAS+ 1/VBC)$. Αυτό σημαίνει:

$$15. \quad VAC=(VAS+VBC)/(VAS*VBC)$$

και αντικαθιστώντας το VAC στο VAS με μη επαρκή διάβαση, το AR μετατρέπεται ακριβώς σε $[\Omega]$.

Η τελευταία διαπίστωση οφείλεται στο ότι η ανάλυση του *R.Small* είναι καλλίτερη από αυτή των *Fincham*, *Augris* και *Santens*.

Ο *Small* δέχεται ακόμη και τις αναπόφευκτες απώλειες που παρουσιάζονται στο σύστημα και εκφράζονται από το QB . Μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τις σχέσεις του *Small* και στη σχεδίαση *band-pass*. Έχουμε έτσι την δυνατότητα να διαλέξουμε δύο όγκους για σχεδίαση *band-pass* συντονισμένους σε διαφορετικές συχνότητες συντονισμού φτιάχνοντας έτσι ένα σύστημα "σχεδόν συμμετρικό".

Δεχόμενοι τις απώλειες που οφείλονται στις σχισμές του κουτιού (μαζί με τον QL), λόγω του υλικού απόσβεσης QA και λόγω της τριβής του σωλήνα *reflex* QP , έχουμε:

$$16. \quad 1/QB=1/QL+1/QA+1/QP$$

Στην πραγματικότητα ο *Small* λαμβάνει υπ' όψη μόνο τις απώλειες εξαιτίας των σχισμών και στον τύπο του ο όρος QB αντικαθίσταται από το QL . Αυτή η παραδοχή

αν εφαρμοστεί ακόμη και στα πιο ερμητικά κουτιά, το Q_L σπάνια υπερβαίνει την τιμή 10 ενώ το Q_A παίρνει τιμές πολύ μεγαλύτερες από 10. Αν ο αγωγός συντονισμού έχει επιφάνεια ελεύθερη χωρίς εμπόδια στην κίνηση του αέρα τότε το Q_P παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 50.

Για να πάρουμε τη σχέση που μας ενδιαφέρει αρκεί να αφήσουμε αναλλοίωτο τον παρονομαστή της σχέσης {Δ.} η οποία χρησιμοποιείται στη περιοχή reflex και να περιορίσουμε στον αριθμητή τον παράγοντα $(F/F_B)^2$ αφήνοντας μόνο $(F/F_C)^2$ που ήδη έχει πάρει τη θέση του $(F/F_S)^2$.

Επομένως η σχέση που εμείς ψάχνουμε, έχει τον αριθμητή της {Γ.} και τον παρονομαστή της {Δ.} με την ταυτόχρονη αντικατάσταση της σχέσης {13.}.

Έτσι έχουμε τη σχέση {E.}.

Σ' αυτή τη σχέση παρατηρούμε ότι η σχετική στάθμη του "αληθινού" *band-pass* ($F_O=F_C=F_B$), μειώνεται σε $-20 \cdot \text{LOG}_{10}(\Omega+1/(Q_B \cdot Q_{TC}))$.

Αυτή η σχέση αντικαθιστά την {11.} η οποία αγνοεί τις απώλειες.