

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

(2018-2019)

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

ΑΣΚΗΣΗ 28-ΤΟΜΟΣ II

ΜΕΛΕΤΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΗΧΗΤΙΚΟ ΣΩΛΗΝΑ

Ονοματεπώνυμο : Χρήστος Τσούφης

A.M. : 03117176

Ομάδα : Δ7

Αριθμός Καταλόγου: 361

Ομάδα με : Ιάσων Χατζηθεοδώρου, Θεόδωρο Χατζηγεωργίου

Διεξαγωγή άσκησης : 11/4/2019

Υπεύθυνος εργαστηρίου : Δημήτρης Μεταξάς

Σκοπός

Στόχος της άσκησης αυτής είναι η μελέτη των ακουστικών κυμάτων σε ηχητικό σωλήνα. Παρακάτω γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της θεωρίας για τα στάσιμα κύματα, τους κανονικούς τρόπους ταλάντωσης και την ανάκλαση όταν αλλάζουν μέσο διάδοσης. Επίσης, αναφέρονται ενδεικτικά οι πειραματικές διαδικασίες. Τέλος, γίνεται η διεξαγωγή των συμπερασμάτων και ο σχολιασμός.

Θεωρία

Ακουστικά κύματα που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις παράγονται από την ταλάντωση γύρω από τη θέση ισορροπίας στερεών αντικειμένων που βρίσκονται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Τα κύματα αυτά προκαλούν μικρές κινήσεις των μορίων του αέρα με συχνότητα ίση με εκείνη της ηχητικής πηγής. Τα κύματα αυτά είναι διαμήκη. Οι κινήσεις αυτές επηρεάζουν την πυκνότητα και την πίεση του αέρα και έτσι δημιουργούνται πυκνώματα (πυκνότητα και πίεση μεγαλύτερες από τη μέση τιμή) και αραιώματα (πυκνότητα και πίεση μικρότερες από τη μέση τιμή). Έτσι, παράγονται είτε επίπεδα ακουστικά κύματα (διαστάσεις πηγής μεγαλύτερες από μήκος κύματος) είτε σφαιρικά ακουστικά κύματα (διαστάσεις πηγής μικρότερες από μήκος κύματος).

Στάσιμα ακουστικά κύματα

Τα στάσιμα ακουστικά κύματα δημιουργούνται από την υπέρθεση δύο κυμάτων y_1 και y_2 που συνυπάρχουν στον ίδιο χώρο και διαδίδονται προς αντίθετες κατευθύνσεις, έχουν ίσο μήκος κύματος, λ , και ίσο, ή περίπου ίσο, πλάτος ταλάντωσης, y_0 . Τέτοιες συνθήκες δημιουργούνται όταν το επίπεδο ακουστικό κύμα προσπίπτει κάθετα πάνω στην επίπεδη επιφάνεια ενός στερεού.

$Y = y_1 + y_2 = 2y_0 \sin(kx) \cos(\omega t + a)$, όπου $k = 2\pi/\lambda$ ο κυματικός αριθμός, $\omega = 2\pi f$ η κυκλική συχνότητα και a η αρχική φάση ταλάντωσης των μορίων στο σημείο $x = 0$, όπου βρίσκεται ο ανακλαστήρας.

$u = \lambda \times f$, όπου u η ταχύτητα διάδοσης του ήχου

Οι θέσεις όπου η μετατόπιση των μορίων του αέρα είναι πάντα μηδενική ονομάζονται δεσμοί μετατόπισης, ενώ οι θέσεις στις οποίες η μετατόπιση είναι μέγιστη ονομάζονται κοιλίες μετατόπισης. Όπως αναμένεται οι κοιλίες της μετατόπισης αντιστοιχούν σε δεσμούς της πίεσης και αντιστρόφως.

Στάσιμα κύματα σε ηχητικούς σωλήνες

Με την διέγερση και διάδοση των κυμάτων μέσα σε σωλήνες, τα πλευρικά τοιχώματα των οποίων λειτουργούν ως κυματοδηγός αποτρέποντας τη διάδοση του ήχου προς όλες τις κατευθύνσεις, παράγονται επίπεδα ακουστικά κύματα και έτσι, ο ήχος οδηγείται προς μία μόνο κατεύθυνση και δεν διαχέεται όπως στους ανοικτούς χώρους, οπότε μπορεί να διαδοθεί σε μεγάλες αποστάσεις, ανεξάρτητα από το αν ο άξονας του σωλήνα καμπυλώνεται. Για τη διάδοση επίπεδων ακουστικών κυμάτων στους σωλήνες, αρκεί η διάμετρος του σωλήνα να είναι πολύ μικρότερη από το μήκος, λ , του ηχητικού κύματος. Για τη διέγερση των ακουστικών κυμάτων στους σωλήνες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μικρό megafono, η διάμετρος του οποίου να είναι όση και η διάμετρος του σωλήνα. Αν το μήκος του σωλήνα είναι πεπερασμένο και το άλλο άκρο του είναι π.χ. κλειστό με μια επίπεδη επιφάνεια, θα δημιουργηθούν μέσα στο σωλήνα στάσιμα κύματα.

Η στήλη του αέρα μέσα στο σωλήνα, όπως και ένα στερεό σώμα, μπορεί να ταλαντώνεται κατά μήκος με ένα πλήθος N Κανονικών Τρόπων Ταλάντωσης (ΚΤΤ), που εξαρτώνται από τις οριακές συνθήκες που επικρατούν στα άκρα του σωλήνα. Εδώ εξετάζονται τρεις βασικοί τύποι ηχητικών σωλήνων: (α) σωλήνα ανοικτό και στα δύο άκρα, (β) σωλήνα κλειστό μόνο κατά το ένα άκρο και (γ) σωλήνα κλειστό και στα δύο άκρα.

Αναλυτικά:

- a) Σε σωλήνα ανοικτό και στα δύο άκρα, τα δύο άκρα θα έχουν κοιλίες μετατόπισης. $\lambda_n = \frac{2La}{n}$
- b) Σε σωλήνα με ανοικτό το ένα άκρο και κλειστό το άλλο, στο ανοικτό έχει κοιλία και στο κλειστό δεσμό. $\lambda_n = \frac{4La}{n}$
- c) Σε σωλήνα κλειστό και στα δύο άκρα, τα δύο άκρα θα έχουν δεσμούς. $\lambda_n = \frac{2L}{n}$

Φαινόμενα συντονισμού στον ηχητικό σωλήνα

Συντονισμός καλείται η έντονη αντίδραση του ταλαντωτή σε κάποια συχνότητα διέγερσης. Εν προκειμένω, ταλαντωτής είναι η στήλη του αέρα μέσα στον ηχητικό σωλήνα και η διέγερση γίνεται με την μεμβράνη του μεγάφωνου στο αριστερό άκρο του σωλήνα. Στο συντονισμό οι βασικές παράμετροι του ήχου (μετατόπιση, πίεση) μεγιστοποιούνται και αυξάνονται Q φορές, όπου Q είναι ο συντελεστής ποιότητας του ταλαντωτή.

Μέθοδος

Στην άσκηση αυτή μελετάται η δημιουργία στάσιμων ηχητικών κυμάτων μέσα σε σωλήνα κλειστό και στα δύο άκρα, καθώς και σε σωλήνα με το ένα άκρο κλειστό και το άλλο ανοικτό. Τα ηχητικά κύματα διεγείρονται μέσα στον ηχητικό σωλήνα με τη βοήθεια ενός μεγάφωνου που συνδέεται στο ένα άκρο του σωλήνα.

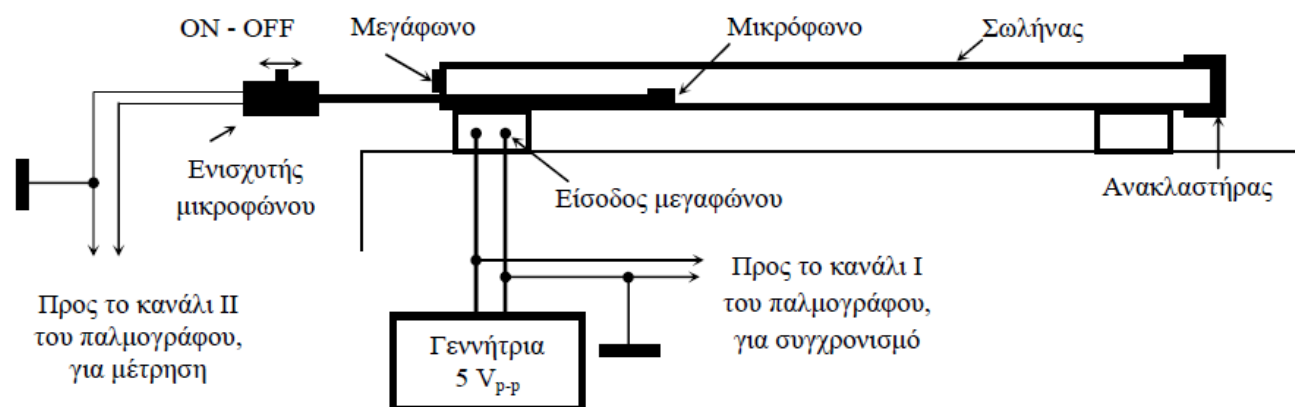
Με τη βοήθεια ενός μικροφώνου, που μπορεί να μετακινείται στο εσωτερικό του σωλήνα και παράγει ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της ακουστικής πίεσης, μπορεί να μελετηθεί η συμπεριφορά των κυμάτων που διαδίδονται μέσα στο σωλήνα.

Το ηλεκτρικό σήμα του μικροφώνου, αφού ενισχυθεί κατάλληλα με τη βοήθεια ενός ενισχυτή, διοχετεύεται στο ένα κανάλι ενός παλμογράφου, το άλλο κανάλι του οποίου είναι συνδεδεμένο στην έξοδο μίας γεννήτριας παλμών που διεγείρει και το μεγάφωνο. Έτσι στην οθόνη του παλμογράφου παρατηρείται το σήμα του μικροφώνου σε σχέση με το σήμα που διεγείρει το μεγάφωνο, το οποίο χρησιμεύει ως σήμα αναφοράς. Το σήμα αναφοράς χρησιμεύει και για το συγχρονισμό του παλμογράφου.

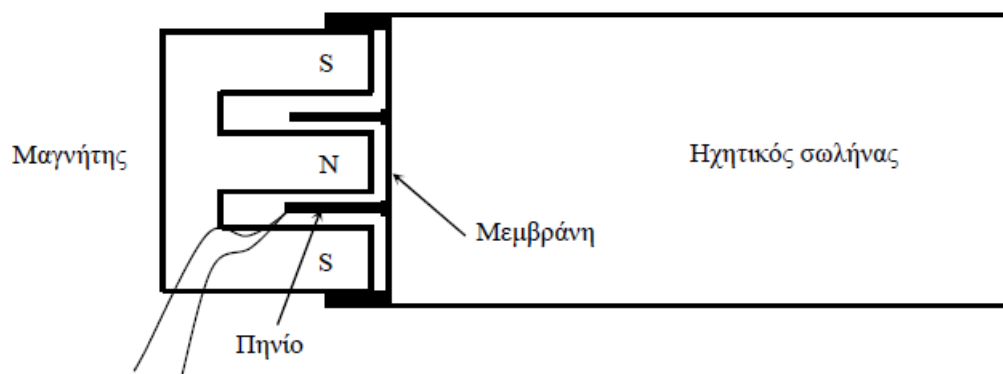
Μετρώντας την ένταση του σήματος του μικροφώνου πολύ κοντά στο μεγάφωνο (που αποτελεί κοιλία πίεσης και δεσμό μετατόπισης), μπορούν να προσδιορισθούν οι συχνότητες συντονισμού του σωλήνα, οι συχνότητες δηλαδή εκείνες για τις οποίες η απόκριση του μικροφώνου εμφανίζει μέγιστα. Μετακινώντας το μικρόφωνο κατά μήκος του σωλήνα, μπορούν να ανιχνευθούν οι κοιλίες και οι δεσμοί της πίεσης των στάσιμων κυμάτων που δημιουργούνται μέσα στο σωλήνα, για σωλήνα κλειστό κατά το ένα ή και κατά τα δύο άκρα. Τροφοδοτώντας, στη συνέχεια, το μεγάφωνο με ορθογώνιους παλμούς και παρατηρώντας στην οθόνη του παλμογράφου τους διαδιδόμενους και ανακλόμενους κρουστικούς ηχητικούς παλμούς, μετράται η ταχύτητα του ήχου με τη μέθοδο radar, όπως περιγράφεται στην «Εκτέλεση».

Πειραματική διάταξη

- Μία γεννήτρια παλμών για την τροφοδοσία του μεγάφωνου.
- Ένα μεγάφωνο για την παραγωγή ακουστικών κυμάτων στον ηχητικό σωλήνα.
- Έναν ηχητικό σωλήνα κατασκευασμένο από πλεξιγκλάς, μήκους 90 cm και εσωτερικής διαμέτρου 3,2 cm, στο ένα άκρο του οποίου βρίσκεται το μεγάφωνο, ενώ το άλλο μπορεί να είναι ανοικτό ή να κλείνει με τη βοήθεια ενός επίπεδου ανακλαστήρα.
- Ένα μικρόφωνο για την ανίχνευση του ήχου που διαδίδεται μέσα στο σωλήνα.
- Έναν ενισχυτή του σήματος του μικροφώνου, που τίθεται σε λειτουργία μέσω ενός διακόπτη, ο οποίος βρίσκεται πάνω στο κάλυμμά του.
- Έναν παλμογράφο 2 καναλιών.



Στο αριστερό άκρο του σωλήνα βρίσκεται η πηγή του ήχου, το μεγάφωνο, ενώ στο δεξί άκρο βρίσκεται ο ανακλαστήρας, ο οποίος μπορεί να αφαιρεθεί. Ο συντελεστής ανάκλασης της μεμβράνης του μεγαφώνου είναι σχεδόν όσος και του ανακλαστήρα. Έτσι, όταν το μεγάφωνο δεν τροφοδοτείται, η μεμβράνη του συμπεριφέρεται ως ανακλαστήρας, ενώ όταν τροφοδοτείται από τη γεννήτρια, εκτελεί καθορισμένη κίνηση του τύπου $y_1(t) = y_0 \sin(\omega t)$. Όμως, επειδή το πλάτος ταλάντωσης της μεμβράνης είναι πολύ μικρό, ενώ το μήκος κύματος των ηχητικών κυμάτων είναι της τάξης του 1 m, για τα ανακλώμενα κύματα που προσπίπτουν στην επιφάνειά της η μεμβράνη συμπεριφέρεται σαν ακίνητος ανακλαστήρας. Συνεπώς, το αριστερό άκρο του σωλήνα είναι μονίμως κλειστό με τη μεμβράνη του μεγαφώνου. Όταν και το δεξί άκρο του σωλήνα είναι κλειστό με τον ανακλαστήρα, ο σωλήνας της πειραματικής διάταξης αποτελεί σωλήνα με κλειστά και τα δύο άκρα του. Όταν ο ανακλαστήρας αφαιρείται, το ένα άκρο του σωλήνα είναι κλειστό (το κλείνει η μεμβράνη του μεγαφώνου) ενώ το άλλο είναι ανοικτό. Επίσης ότι η μεμβράνη είναι ακλόνητη, δηλαδή η κίνησή της δεν επηρεάζεται από τα ακουστικά φαινόμενα που διαδραματίζονται μέσα στο σωλήνα.



Εκτέλεση

Πειράματα με ημιτονικά σήματα

1. $\sqrt{}$
2. Η κρουστική απόκριση μεγιστοποιείται στις παρακάτω συχνότητες (με ανακλαστήρα):

f₁	198 ± 5 Hz
f₂	390 ± 5 Hz
f₃	580 ± 5 Hz
f₄	770 ± 5 Hz

Παρατήρηση: Οι τιμές αποτελούν άρτια πολλαπλάσια της αρχικής συχνότητας 50 Hz

3. Πλάτος σήματος μικροφώνου (με ανακλαστήρα):

x (cm)	f = f₂
0	300
5	300
10	250
15	150
20	75
25	-30
30	-120
35	-200
40	-260
45	-300
50	-275
55	-225
60	-150
65	-50
70	50
75	150
80	210
85	290
90	300

4. Η κρουστική απόκριση μεγιστοποιείται στις παρακάτω συχνότητες (χωρίς ανακλαστήρα):

f₁	97 ± 5 Hz
f₂	290 ± 5 Hz
f₃	475 ± 5 Hz
f₄	665 ± 5 Hz

Παρατήρηση: Οι τιμές αποτελούν περιττά πολλαπλάσια της αρχικής συχνότητας 50 Hz

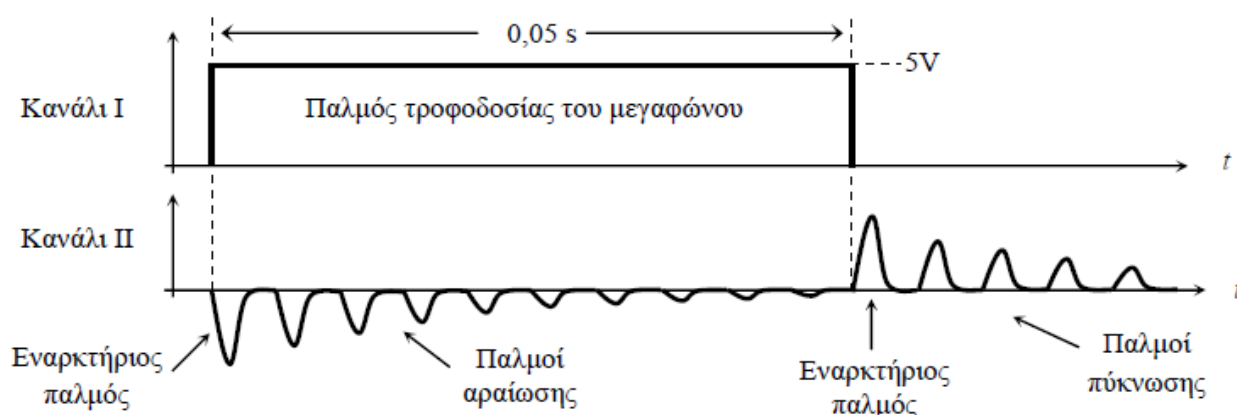
Πλάτος σήματος μικροφώνου (χωρίς ανακλαστήρα):

x (cm)	f =f ₂
0	175
5	175
10	160
15	140
20	100
25	60
30	20
35	-28
40	-64
45	-100
50	-140
55	-160
60	-175
65	-175
70	-150
75	-125
80	-100
85	-50
90	-10

- Με τον ανακλαστήρα αλλάζει 2 φορές η φάση, ενώ χωρίς τον ανακλαστήρα αλλάζει μια φορά (λόγω του μεγάλου συντελεστή ανάκλασης).
- Οι μετρήσεις έγιναν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 18°C.

Πειράματα με κρουστικούς ηχητικούς παλμούς – Μέτρηση της ταχύτητας του ήχου με τη μέθοδο radar

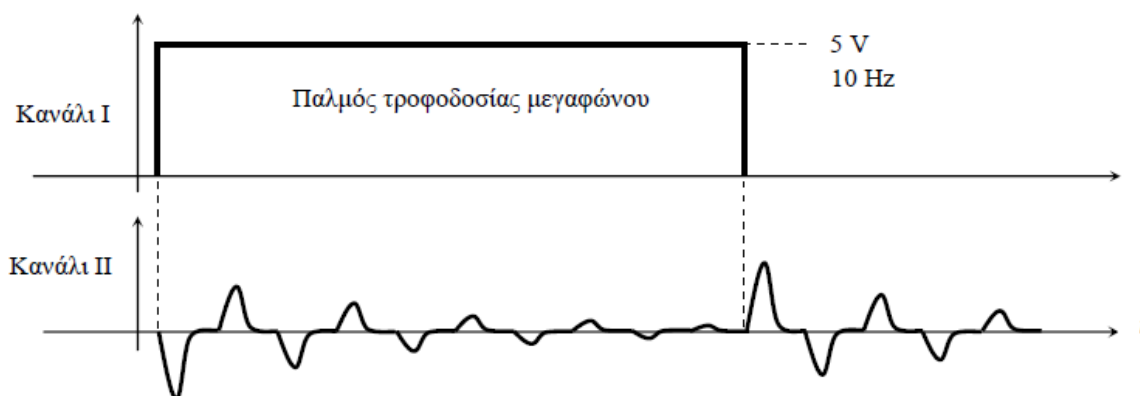
- Με τον ανακλαστήρα προκύπτει:



Στην άνοδο του παλμού, όταν δηλαδή η τάση της γεννήτριας γίνεται απότομα 5 V, το μαγνητικό πεδίο του πηνίου έλκει τη μεμβράνη του μεγαφώνου και αυτή μετατοπίζεται προς τα αριστερά. Από τη στιγμή αυτή στο σωλήνα αρχίζει να διαδίδεται ένας κρουστικός παλμός αραιώσης. Στον παλμό αυτό το μικρόφωνο ανταποκρίνεται με έναν στενό (π.χ. αρνητικό) παλμό τάσης. Ύστερα από 0,05 s, όταν η τάση της γεννήτριας από 5 V απότομα μηδενιστεί, η μεμβράνη απότομα μετακινείται προς τα δεξιά και επιστρέφει στην αρχική της θέση. Από τη στιγμή αυτή στο σωλήνα αρχίζει να διαδίδεται ο κρουστικός παλμός πύκνωσης. Στον παλμό αυτό, το μικρόφωνο ανταποκρίνεται με έναν στενό (θετικό) παλμό τάσης. Ο πρώτος παλμός του μικροφώνου θα ονομαστεί εναρκτήριο, διότι δημιουργείται σχεδόν ακαριαία λόγω μικρής απόστασης (1 cm) του μικροφώνου από το μεγάφωνο. Ο δεύτερος παλμός παράγεται από τον εναρκτήριο παλμό που ταξίδεψε στο σωλήνα από τη μεμβράνη ως τον ανακλαστήρα και, μετά από ανάκλαση στο άλλο άκρο, επέστρεψε στην περιοχή του μικροφώνου, δημιουργώντας έτσι την πρώτη ηχώ. Η πρώτη ηχώ θα ανακλαστεί από τη μεμβράνη του μεγαφώνου και θα αρχίσει και πάλι να ταξιδεύει προς τον ανακλαστήρα, όπου θα ανακλαστεί για δεύτερη φορά, δημιουργώντας τη δεύτερη ηχώ κ.ο.κ. Έτσι, οι διαδοχικές ανακλάσεις του αρχικού κρουστικού παλμού από τον ανακλαστήρα και τη μεμβράνη θα δημιουργήσουν στην έξοδο του μικροφώνου μια σειρά ηλεκτρικών παλμών, το ύψος των οποίων, λόγω απωλειών, μειώνεται εκθετικά. Διακρίνεται με βεβαιότητα ακόμη και ο παλμός που αντιστοιχεί στη δέκατη ηχώ.

Η εικόνα των παλμών που βλέπει κανείς στο κανάλι του μικροφώνου μπορεί να αξιοποιηθεί για τη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου με τη μέθοδο radar. Στη μέθοδο αυτή μετράται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο κρουστικός παλμός διανύει την απόσταση «μπρος-πίσω», καθώς αυτό ταξιδεύει στο σωλήνα. Για να μετρηθεί ο χρόνος αυτός στην οθόνη του παλμογράφου με ικανοποιητική ακρίβεια, είναι προτιμότερο να μετρηθεί ο χρόνος π.χ. 10 διαδρομών και όχι μίας.

2. Προκύπτουν 9 ± 1 μέγιστα από ανάκλαση.
3. Αφαιρώντας τον ανακλαστήρα προκύπτει:



Επεξεργασία των μετρήσεων

Α)

1. Οι θεωρητικές τιμές που προκύπτουν από την ανάλυση των ΚΤΤ και η ταχύτητα του ήχου διορθωμένη στη θερμοκρασία του πειράματος, ικανοποιούνται από τους εξής τύπους:

$$\text{Άκρο με ανακλαστήρα: } f_n = \frac{u\theta}{\left(\frac{2L}{n}\right)}$$

$$\text{Άκρο χωρίς ανακλαστήρα: } f_n = \frac{u\theta}{\left(\frac{4La}{n}\right)}$$

Και επίσης, $u_\theta = 331,8 + 0,606 \times \theta$ με $\theta = 18 \pm 0,1$ °C, προκύπτει ότι η θεωρητική τιμή της ταχύτητας του ήχου είναι:

$$u_0 = 331,8 + 0,606 \times 18 = 342,7 \pm 0,1 \frac{m}{sec}$$

$$\text{Ακόμη, } L_a = L + 0,63 \times R, \text{ οπότε } L_a = 90\text{cm} + 0,63 \times \frac{32\text{ cm}}{2} = 91 \pm 0,1\text{cm} = 0,91 \pm 0,001\text{ m}$$

$$\text{Για το σφάλμα μέτρησης συχνοτήτων: } \varepsilon = f_n \times 1\% + 4\text{ Hz}$$

Συχνότητες	Άκρο με ανακλαστήρα		Άκρο χωρίς ανακλαστήρα	
	Πειραματική μέτρηση	Θεωρητική μέτρηση	Πειραματική μέτρηση	Θεωρητική μέτρηση
f₁	198 ± 5,9	190,4 ± 0,1	97 ± 5	94,1 ± 0,4
f₂	390 ± 7,9	380,8 ± 0,2	290 ± 6,9	282,3 ± 1,2
f₃	580 ± 9,8	571,2 ± 0,3	475 ± 8,8	470,5 ± 2
f₄	770 ± 11,7	761,6 ± 0,4	665 ± 10,7	658,7 ± 2,8

Παρατήρηση: Οι συχνότητες συντονισμού των πειραματικών μετρήσεων έχουν κάποια απόκλιση σε σχέση με τις θεωρητικές τους τιμές. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι ο συντελεστής ανάκλασης πίεσης δεν είναι ακριβώς ίσος με +1 στην περίπτωση με άκρο με ανακλαστήρα και -1 στην περίπτωση χωρίς. Επίσης, οι πειραματικές συχνότητες είναι, κατά κανόνα, μεγαλύτερες από τις θεωρητικές.

2. Υπολογισμός των κανονικοποιημένων πλατών Ψ_i από την σχέση $\Psi_i = \frac{Y_i}{Y_1}$.

x (cm)	Y (mV)	Ψ
0	300	1
5	300	1
10	250	0,83
15	150	0,5
20	75	0,25
25	-30	-0,1
30	-120	-0,4
35	-200	-0,67
40	-260	-0,87
45	-300	-1
50	-275	-0,92
55	-225	-0,75
60	-150	-0,5
65	-50	-0,17
70	50	0,17
75	150	0,5
80	210	0,7
85	290	0,97
90	300	1

3. Υπολογισμός των κανονικοποιημένων πλατών Ψ_i από την σχέση $\Psi_i = \frac{Y_i}{Y_1}$.

x (cm)	Y (mV)	Ψ
0	175	1
5	175	1
10	160	0,91
15	140	0,8
20	100	0,57
25	60	0,34
30	20	0,11
35	-28	-0,16
40	-64	-0,37
45	-100	-0,57
50	-140	-0,8
55	-160	-0,91
60	-175	-1
65	-175	-1
70	-150	-0,86
75	-125	-0,71
80	-100	-0,57
85	-50	-0,29
90	-10	-0,06

4. Επιλέγοντας την γραφική παράσταση για τον 2° ΚΚΤ με το άκρο με ανακλαστήρα, το ακουστικό μήκος του σωλήνα συμπίπτει με το γεωμετρικό και το μήκος κύματος συμπίπτει με το μήκος του σωλήνα και επομένως, μειώνονται τα σφάλματα και προκύπτει μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η θεωρητική τιμή της ταχύτητας είναι (από προηγούμενο ερωτ.): $u_0 = 342,7 \pm 0,1 \frac{m}{sec}$.

Η πειραματική τιμή της ταχύτητας είναι: $\lambda_2 = \frac{2L}{n} = \frac{2 \times (0,9 \pm 0,001)}{2} = 0,9 \pm 0,001 \text{ m}$

$u_{πειρ} = \lambda_2 \times f_2 = (0,9 \pm 0,001) \times (390 \pm 7,9) \Rightarrow u_{πειρ} = 351 \pm 7 \frac{m}{sec}$.

Παρατήρηση: Η πειραματική και η θεωρητική τιμή έχουν κάποια απόκλιση λόγω των σφαλμάτων που έγιναν κατά τον υπολογισμό τους.

B)

1. Προκύπτουν 9 ± 1 μέγιστα από ανάκλαση, επομένως:

$$\lambda = (9 \pm 1) \times [2 \times (0,9 \pm 0,001 \text{ m})] = 16,2 \pm 2 \text{ m}$$

$$f = 10 \text{ Hz} \Rightarrow T = 0,1 \text{ sec} \Rightarrow t = \frac{T}{2} = 0,05 \pm 0,005 \text{ sec}$$

$$u = \lambda \times f = \frac{\lambda}{T} = \frac{16,2 \text{ m}}{0,05 \text{ sec}} = 324 \frac{m}{sec}$$

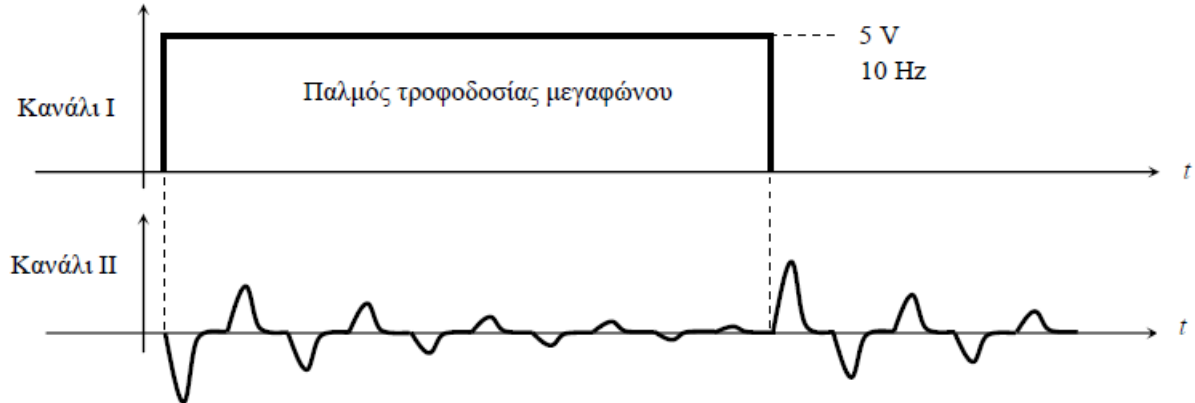
$$\text{σφάλμα: } \delta u = \sqrt{\left(\frac{\delta \lambda}{t}\right)^2 + \left(-\frac{\lambda \times \delta t}{t^2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,05}\right)^2 + \left(-\frac{16,2 \times 0,005}{0,05^2}\right)^2} = 38 \frac{m}{sec}$$

$$\text{Οπότε, } u_{πειρ-radar} = 324 \pm 38 \frac{m}{sec}$$

Επίσης, έχουν υπολογισθεί: $u_0 = 342,7 \pm 0,1 \frac{m}{sec}$, $u_{πειρ} = 351 \pm 7 \frac{m}{sec}$.

Παρατηρήσεις: Υπάρχει απόκλιση μεταξύ των ταχυτήτων στο 2^ο πείραμα και της θεωρητικής τιμής που οφείλεται στην αβεβαιότητα για τον αριθμό των μεγίστων λόγω ανάκλασης. Επίσης, λόγω της αρχής διατήρησης της ενέργειας, το πλάτος του παλμού μειώνεται εκθετικά όσο κινείται και ανακλάται μέσα στο σωλήνα.

2. Χωρίς τον ανακλαστήρα, παρατηρείται η παρακάτω εικόνα στον παλμογράφο:



Παρατηρήσεις: Ο αριθμός των μεγίστων από ανάκλαση μένει σταθερός. Το πλάτος του παλμού μειώνεται εκθετικά, όπως και στην περίπτωση με κλειστό ελεύθερο άκρο. Οι ανακλάσεις του ήχου εμφανίζονται με εναλλασσόμενο πρόσημο, διότι χωρίς ανακλαστήρα προκαλείται αλλαγή φάσης (δηλαδή όταν προσκρούει πύκνωμα πίεσης επιστρέφει αραίωμα πίεσης και αντιστρόφως). Επίσης, έξω από τον σωλήνα η πίεση είναι μηδενική και το κύμα δεν ανακλάται πλήρως.

Θεόδωρος Χατζηγεωργίου
Χρήστος Τσουφής
Ιάσωνας Χατζηθεόδωρος