

## **Πειραματική Αξιολόγηση Συστήματος Ενεργητικής Ακύρωσης Θορύβου για Χαμηλόσυχνες Ακουστικές Διαταραχές**

Δημήτριος Μυλωνάς<sup>1,\*</sup>, Χρήστος Γιακόπουλος<sup>1</sup>, Ιωάννης Αντωνιάδης<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ,

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15772, Ζωγράφου

\*dimimy1579@mail.ntua.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει την πειραματική αξιολόγηση ενός τοπικού συστήματος Ενεργητικού Ελέγχου Θορύβου που προορίζεται να εγκατασταθεί στο προσκέφαλο της θέσης του επιβάτη σε μέσα μεταφοράς. Η πειραματική αξιολόγηση, η οποία περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της μείωσης της ακουστικής πίεσης κατά την ενεργοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε σε μια κλειστή καμπίνα χρησιμοποιώντας ακουστικές διαταραχές από το εσωτερικό ενός σκάφους αναψυχής. Το εν λόγω σύστημα που αποτελείται από 2 woofers, 4 μικρόφωνα καθώς και ένα σύστημα head tracking κατάφερε να μειώσει το πλάτος των αρμονικών που σχετίζονται με τη λειτουργία των μηχανών και των ηλεκτρογεννητριών του σκάφους περισσότερο από 10 dB. Επιπλέον, η συνολική ηχοστάθμη παρουσίασε σημαντική μείωση στα αυτιά του επιβάτη. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η ύπαρξη επιβάτη δεν επηρεάζει την απόδοση του συστήματος, όταν η μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού γίνεται χωρίς καθημένο επιβάτη.

### **Experimental Evaluation of an Active Noise Cancellation System for Low Frequency Acoustic Disturbances**

#### **ABSTRACT**

This paper presents the experimental evaluation of a local Active Noise Control system intended to be installed at the headrest of the passenger's seat in vehicles. The experimental evaluation, which includes the determination of acoustic pressure attenuation during system activation, was carried out in an enclosure using acoustic disturbances from a yacht interior. This system consisting of 2 woofers, 4 microphones and a head tracking system managed to reduce the amplitude of harmonics associated with the engines and generators of the yacht by more than 10 dB. In addition, the SPL was reduced significantly at the passenger ears. Finally, it was found that the presence of a passenger does not affect the performance of the system when modelling the secondary path without a seated passenger.

## Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια πολλά μοντέλα εμπορικών ακουστικών (headsets) εφοδιάζονται με συστήματα ενεργητικής ακύρωσης θορύβου (ΣΕΑΘ), αποτέλεσμα της ενεργής επιστημονικής έρευνας που έγινε στον συγκεκριμένο τομέα την τελευταία δεκαετία. Σήμερα, η έρευνα πάνω στα ΣΕΑΘ έχει μετατοπιστεί στην εφαρμογή τους σε καμπίνες οχημάτων και κυρίως σε αυτοκίνητα και αεροσκάφη. Τα συστήματα αυτά εστιάζουν είτε στον τοπικό έλεγχο (local ANC) του θορύβου γύρω από τα αυτιά του επιβάτη [1], είτε στο συνολικό έλεγχο (global ANC) του ακουστικού πεδίου της καμπίνας [2]. Με τη σειρά τους τα τοπικά ΣΕΑΘ, διαχωρίζονται σε αυτά που προσαρμόζονται στο προσκέφαλο της θέσης του επιβάτη και εστιάζουν στη συγκεκριμένη θέση και σε αυτά που βασίζονται σε διεσπαρμένα ηχεία και μικρόφωνα μέσα στο χώρο, τα οποία έχουν σκοπό να δημιουργήσουν ζώνες ησυχίας σε όλες τις θέσεις. Τα συστήματα που ανήκουν στη πρώτη κατηγορία ονομάζονται ενεργά προσκέφαλα (active headrests) και αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση για την αύξηση της ακουστικής άνεσης των επιβατών σε μέσα μεταφοράς, χωρίς την εισαγωγή της πιθανής ενόχλησης που προκαλούν τα ακουστικά.

Βασικό χαρακτηριστικό των ενεργών προσκεφάλων που συνήθως αποτελούνται από δυο ηχεία και δυο μικρόφωνα, είναι ο ελεγκτής που παράγει το ακυρωτικό ακουστικό σήμα. Ένα σημείο αναφοράς όσο αφορά τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται σε αυτούς τους ελεγκτές, είναι ο πολυκαναλικός αλγόριθμος FxLMS [3], που έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές ερευνητικές εργασίες, λόγω της αποδοτικότητας και της χαμηλής υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Σε αυτόν τον αλγόριθμο συνήθως ενσωματώνονται τεχνικές υπολογισμού της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη [4], επειδή η τοποθέτηση μικροφώνων στα εν λόγω σημεία δεν είναι εφικτή χωροταξικά. Βασικό μειονέκτημα της πλειοψηφίας αυτών των τεχνικών είναι η αύξηση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας που δυσχεραίνει την υλοποίηση σε πραγματικό χρόνο, καθώς και ο υπολογισμός των ηλεκτροακουστικών συστημάτων που συμμετέχουν στην εκτίμηση της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη. Τα συστήματα αυτά που στη βιβλιογραφία αναφέρονται σαν δευτερογενή μονοπάτια (secondary paths), μεταβάλλονται από διάφορους παράγοντες, όπως η ύπαρξη επιβάτη ή ακόμα και η θερμοκρασία του αέρα με αποτέλεσμα να μειώνεται η ακρίβεια υπολογισμού της ακουστικής πίεσης και συνεπώς η απόδοση του ΣΕΑΘ.

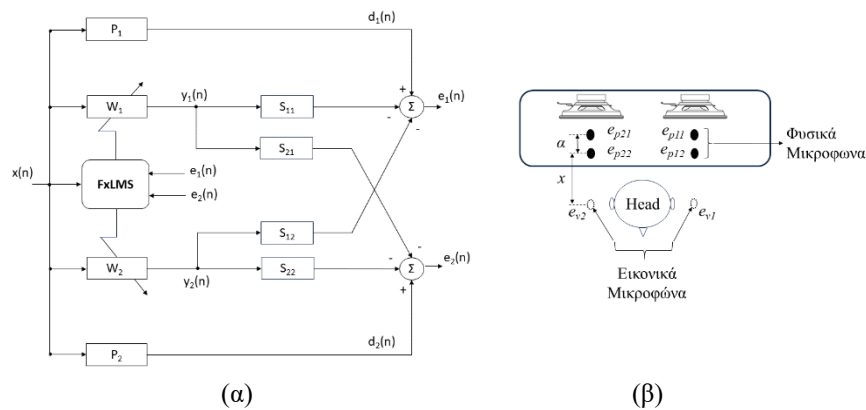
Σε αυτή την εργασία παρουσιάζουμε ένα ενεργό προσκέφαλο που χρησιμοποιεί μια υπολογιστικά αποδοτική τεχνική για την εκτίμηση της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη. Επιπλέον εξετάζουμε για πρώτη φορά την επίδραση της ύπαρξης επιβάτη στην μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού και στην απόδοση του ΣΕΑΘ, όσο αφορά στην μείωση της ακουστικής πίεσης γύρω από το προσκέφαλο. Τέλος, οι ακουστικές διαταραχές που χρησιμοποιούνται για την πειραματική αξιολόγηση του εν λόγω συστήματος προέρχονται από την καμπίνα ενός σκάφους αναψυχής, διότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου συστήματος ταιριάζουν περισσότερο σε μια τέτοια εφαρμογή. Έτσι αξιολογείται η εφαρμογή τοπικών ΣΕΑΘ σε πλωτά μέσα, ένα πεδίο στο οποίο δεν υπάρχουν πολλές βιβλιογραφικές αναφορές παρόλο που η χωροταξία των μέσων αυτών ενδείκνυται για την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων.

### 1. Μέθοδος

Οι βασικές τεχνικές πάνω στις οποίες βασίζεται το προτεινόμενο σύστημα τοπικού ελέγχου θορύβου είναι: α) ο πολυκαναλικός αλγόριθμος FxLMS για την εξαγωγή των συντελεστών του προσαρμοστικού FIR φίλτρου που υλοποιεί τον υπολογισμό του ακυρωτικού ακουστικού σήματος, β) η γραμμική παρέκταση για την εκτίμηση της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη, γ) ο αλγόριθμος υπολογισμού της απόστασης του κεφαλιού του επιβάτη από το προσκέφαλο με τη βοήθεια ενός αισθητήρα υπερήχων. Στις παρακάτω παραγράφους δίνονται λεπτομέρειες για την υλοποίηση των εν λόγω τεχνικών.

#### 1.1 Πολυκαναλικός FxLMS 2 εισόδων-2 εξόδων

Το ενεργό προσκέφαλο βασίζεται στον αλγόριθμο FxLMS 2 εισόδων-2 εξόδων, με 1 σήμα αναφοράς (Σχήμα 1.1α). Τα δύο σήματα σφάλματος  $e_1(n)$  και  $e_2(n)$  χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών δυο προσαρμοστικών φίλτρων  $w_1(n)$  και  $w_2(n)$ , όπου με bold γράμματα συμβολίζονται τα διανύσματα. Έπειτα υπολογίζονται τα ακυρωτικά σήματα  $y_1(n)$  και  $y_2(n)$  για κάθε χρονική στιγμή  $n$ .



Σχήμα 1.1: (α) Μπλοκ διάγραμμα αλγορίθμου FxLMS 2 εισόδων-2 εξόδων, (β) Τεχνική υπολογισμού της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη, με γραμμική παρέκταση.

Καθένα από τα δυο σήματα χρησιμοποιείται για την οδήγηση των δύο πηγών εξόδου (δευτερογενείς πηγές). Η εξίσωση υπολογισμού των συντελεστών των προσαρμοστικών φίλτρων (Εξίσωση (1.1)) περιλαμβάνει ακόμα το σήμα αναφοράς  $x(n)$  φιλτραρισμένο από τα μοντέλα των δευτερογενών μονοπατιών  $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ . Τα μοντέλα αυτά, τα οποία υπολογίζονται σε μια προγενέστερη φάση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο LMS, αντιστοιχούν στα ηλεκτρακουστικά συστήματα που ξεκινούν από την πηγή εξόδου και καταλήγουν είτε στο μικρόφωνο που βρίσκεται μπροστά της, είτε στο μικρόφωνο που βρίσκεται μπροστά στη γειτονική πηγή. Έτσι προκύπτουν τέσσερα δευτερογενή μονοπάτια. Κατά συνέπεια η εξίσωση υπολογισμού των συντελεστών των φίλτρων είναι:

$$w_k(n+1) = w_k(n) - \mu(x'_{1k}(n)e_1(n) + x'_{2k}(n)e_2(n)), k = 1,2 \quad (1.1)$$

Στην Εξίσωση (1.1) με  $x'_{1k}$  και  $x'_{2k}$  συμβολίζεται το σήμα αναφοράς φιλτραρισμένο από τα δευτερογενή μονοπάτια που αντιστοιχούν στην πρώτη και την δεύτερη πηγή εξόδου αντίστοιχα. Επιπλέον, ο αριθμός των φίλτρων είναι  $k$ , όσες και οι δευτερογενείς πηγές, ενώ με  $\mu$  συμβολίζεται η παράμετρος που καθορίζει το ρυθμό σύγκλισης (step size). Τέλος, το ακυρωτικό σήμα για κάθε δευτερογενή πηγή, προκύπτει από την Εξίσωση (1.2):

$$y_k(n) = x^T(n) * w_k(n) \quad (1.2)$$

Είναι γνωστό ότι ο εν λόγω αλγόριθμος πετυχαίνει τη μεγαλύτερη μείωση της ακουστικής πίεσης σε κοντινή απόσταση από τα μικρόφωνα σφάλματος. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται η τεχνική γραμμικής παρέκτασης (Σχήμα 1.1β), η οποία μεγεθύνει τη ζώνη ησυχίας και τη μετακινεί κοντά στα αυτιά του επιβάτη.

### 1.2 Γραμμική παρέκταση της ακουστικής πίεσης

Προκειμένου να επιτευχθεί ο υπολογισμός της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη χρησιμοποιείται η τεχνική της γραμμικής παρέκτασης [6], η οποία είναι μια αξιόπιστη μέθοδος για χαμηλόσυχνες ακουστικές διαταραχές, όπου το μήκος κύματος είναι αρκετά μεγαλύτερο από τις αποστάσεις  $a$  και  $x$  (Σχήμα 1.1β). Με  $a$  συμβολίζεται η απόσταση ανάμεσα στα δυο φυσικά μικρόφωνα που χρησιμοποιούνται για την γραμμική παρέκταση και με  $x$  συμβολίζεται η απόσταση ανάμεσα στο δεύτερο μικρόφωνο του κάθε ζεύγους και το αντίστοιχο εικονικό μικρόφωνο. Η θέση των εικονικών μικροφώνων, ιδανικά πρέπει να ταυτίζεται με τη θέση των αυτιών του επιβάτη. Έτσι η ακουστική πίεση στα σημεία των εικονικών μικροφώνων υπολογίζεται από την Εξίσωση 1.3:

$$e_{vk}(n) = \frac{e_{pk2}(n) - e_{pk1}(n)}{a} x + e_{pk2}(n), k = 1,2 \quad (1.3)$$

Όπου  $e_{vk}$  είναι οι εκτιμώμενες ακουστικές πιέσεις στα αυτιά του επιβάτη και  $e_{pk1}$  και  $e_{pk2}$  είναι οι ακουστικές πιέσεις που καταγράφουν τα φυσικά μικρόφωνα που χρησιμοποιούνται στο σύστημα ενεργητικού προσκέφαλου.

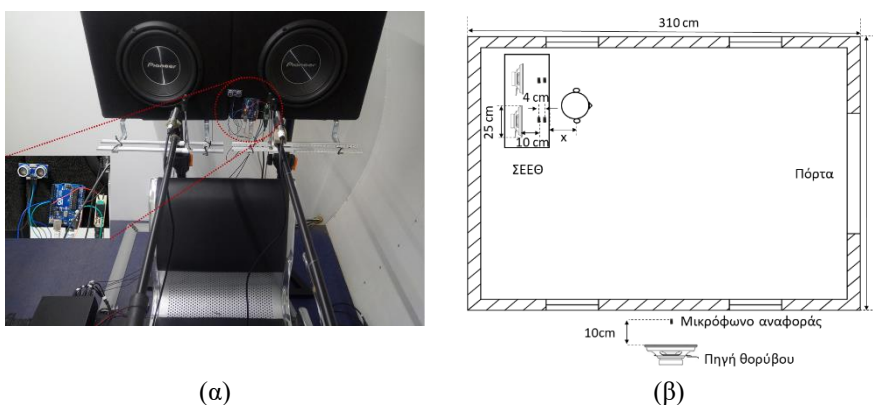
### 1.3 Υπολογισμός της απόστασης κεφαλιού-προσκέφαλου

Προκειμένου να υπολογιστεί η απόσταση  $x$  ανάμεσα στα ηχεία του τοπικού ΣΕΑΘ και του κεφαλιού του επιβάτη, η οποία εισάγεται στην Εξίσωση (1.3), χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας απόστασης HC-SR04, που συνδέθηκε σε ένα

Arduino Uno (Σχήμα (2.2<sup>α</sup>)). Έπειτα δημιουργήθηκε ένας παλμός PWM που το Duty Cycle άλλαξε ανάλογα με την έξοδο του αισθητήρα. Έτσι οι διάφορες τιμές Duty Cycle αντιστοιχίστηκαν σε τρεις προκαθορισμένες αποστάσεις 5 cm, 10 cm και 15 cm, οι οποίες εισάγονται σε πραγματικό χρόνο στην Εξίσωση (1.3) ανανεώνοντας έτσι τις τιμές  $e_1$  και  $e_2$ . Με αυτόν τον τρόπο η κίνηση του επιβάτη επιφέρει μετακίνηση της ζώνης ησυχίας (Head Tracking) [7].

## 2. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από 2 woofers (Pioneer TS-A250S4) τα οποία χρησιμοποιούνται για την εξουδετέρωση χαμηλόσυχνων ακουστικών διαταραχών, 4 μικρόφωνα σφάλματος (Shure MX 183) που συμμετέχουν στην εκτίμηση της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη (Σχήμα (2.1β)), καθώς και ένα μικρόφωνο αναφοράς που βρίσκονταν τοποθετημένο 10 cm μακριά από την πηγή του θορύβου. Ακόμα η ανάπτυξη του αλγορίθμου ελέγχου έγινε στο FPGA ενός επεξεργαστή CRIO-9030, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Labview. Η απόσταση  $\alpha$  ανάμεσα στα μικρόφωνα σφάλματος κάθε ζεύγους ήταν 4 cm, ενώ η απόσταση του πρώτου μικροφώνου από το διάφραγμα των ηχείων ήταν 10 cm. Τέλος η απόσταση ανάμεσα στα δύο ζεύγη μικροφώνων ήταν 25 cm (Σχήμα 2.2β). Σαν πηγή θορύβου χρησιμοποιήθηκε ένα woofer το οποίο τοποθετήθηκε 3 m μακριά από το ΣΕΑΘ, ακριβώς έξω από την κλειστή καμπίνα που βρίσκεται εγκατεστημένο το εν λόγω σύστημα. Σαν ακουστικές διαταραχές χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά σήματα που καταγράφηκαν σε μια καμπίνα σκάφους αναψυχής, ώστε να υπάρχει μια κατά το δυνατό πιο πιστή αναπαραγωγή των πραγματικών ακουστικών συνθηκών. Τέλος, τα φάσματα συχνοτήτων πριν και μετά τη λειτουργία του ΣΕΑΘ μετρήθηκαν στα 10 cm από την επιφάνεια των woofers, χρησιμοποιώντας δύο μετρητικά μικρόφωνα και μια κάρτα καταγραφής ακουστικών σημάτων.



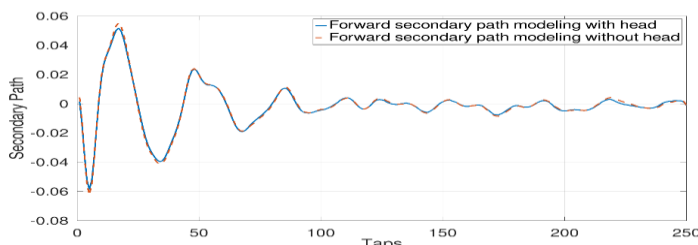
Σχήμα 2.2: (α) ΣΕΑΘ εγκατεστημένο σε κλειστή καμπίνα (σε μεγένθυση το σύστημα υπολογισμού της απόστασης του κεφαλιού από το τελευταίο μικρόφωνο), (β) Γεωμετρικές λεπτομέρειες ΣΕΑΘ και καμπίνας.

### 3. Πειραματικά αποτελέσματα

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση του προτεινόμενου ΣΕΑΘ χρησιμοποιήθηκαν δύο ακουστικές διαταραχές, οι οποίες ηχογραφήθηκαν σε καμπίνα σκάφους αναψυχής, όταν το σκάφος ήταν σταθμευμένο και λειτουργούσαν μόνο οι γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και όταν το σκάφος έπλεε χρησιμοποιώντας τις μηχανές του.

Έπειτα μετρήθηκε η ακουστική πίεση 10 cm μακριά από τα μακρινά μικρόφωνα ( $e_{p22}$ ,  $e_{p12}$ ) σε δύο σημεία τα οποία απέχουν 20 cm μεταξύ τους και αντιστοιχούν στα αυτιά του πιθανού επιβάτη. Επιπλέον προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση που έχει η ύπαρξη επιβάτη στην μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού και ακολούθως στην απόδοση του συστήματος, υπολογίστηκαν δυο δευτερογενή μονοπάτια. Το πρώτο αντιστοιχεί στην περίπτωση, όπου ένας επιβάτης κάθεται μπροστά από το ΣΕΑΘ, ενώ το δεύτερο στην περίπτωση όπου η θέση μπροστά από τον επιβάτη είναι κενή.

Στο Σχήμα (3.1) φαίνονται τα μοντέλα (FIR φίλτρα) των δευτερογενών μονοπατιών στις δύο περιπτώσεις. Ο συνολικός αριθμός των συντελεστών των φίλτρων είναι 250 και η μοντελοποίηση έγινε χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο LMS. Παρατηρούμε ότι οι διαφορές των δυο μοντέλων είναι μικρές μιας και η μοντελοποίηση έγινε με λευκό θόρυβο που περιέχει συχνότητες έως 2 kHz. Σε αυτές τις χαμηλές συχνότητες φαίνεται ότι η ύπαρξη του κεφαλιού μπροστά από τα μικρόφωνα δεν επηρεάζει τόσο το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι για την μοντελοποίηση των δευτερογενών μονοπατιών χρησιμοποιήθηκαν τα πιο απομακρυσμένα μικρόφωνα από το διάφραγμα των ηχείων, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη μας εργασία [8].

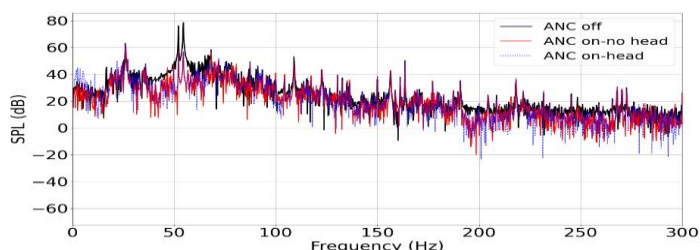


Σχήμα 3.1: Μοντέλα των δευτερογενών μονοπατιών που αντιστοιχούν στα μακρινά μικρόφωνα  $e_{p22}$  και  $e_{p12}$  με και χωρίς την ύπαρξη επιβάτη μπροστά από τον επιβάτη.

Αναφορικά με την μείωση της ακουστικής πίεσης που επιτυγχάνεται στα αυτιά του επιβάτη, παρατηρούμε ότι όταν η ακουστική διαταραχή περιλαμβάνει τις συχνότητες που προέρχονται από την λειτουργία των δύο ηλεκτρογεννητριών (55 και 52 Hz), η συνολική ηχοστάθμη μεταβάλλεται από τα 82.11 στα 69 dB στο αριστερό αυτί και από τα 80.9 στα 67.7 dB στο δεξί αυτί. Συνεπώς η διαφορά της ηχοστάθμης πριν και μετά την ενεργοποίηση του ΣΕΑΘ είναι περίπου 13 dB και στα δύο αυτιά. Επιπλέον το πλάτος της συχνότητας στα 55 Hz μειώνεται από τα 78.51 στα 56.28 dB (μείωση κατά 22 dB) και το πλάτος της συχνότητας στα 52 Hz από τα 76 στα 58 dB

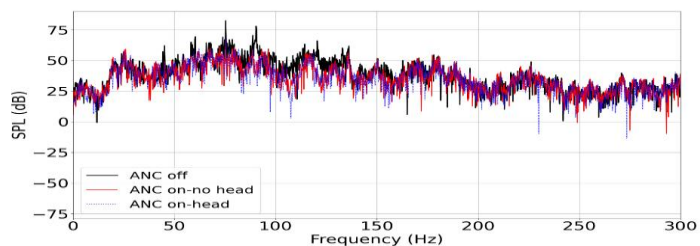
(μείωση κατά 18 dB), στο αριστερό αυτί του επιβάτη (Σχήμα (3.2)). Παρόμοιες μειώσεις παρατηρήθηκαν και στο δεξί αυτί.

Επιπλέον, όταν το σκάφος βρίσκεται εν πλω, η ακουστική διαταραχή στην καμπίνα αποτελείται κυρίως από αρμονικές της συχνότητας περιστροφής της μηχανής του σκάφους που βρίσκεται στα 15 Hz και από θόρυβο που σχετίζεται με τα κύματα και τον αέρα. Η ηχοστάθμη πριν τη λειτουργία του ΣΕΑΘ ήταν 86.93 και 85.1 dB στο αριστερό και το δεξί αυτί του επιβάτη αντίστοιχα. Μετά την ενεργοποίηση του ΣΕΑΘ οι αντίστοιχες ηχοστάθμες ήταν 77.55 και 76.53 dB, δηλαδή παρατηρήθηκε μείωση κατά 9.38 και 8.57 dB. Βέβαια οι επιμέρους αρμονικές στα 45, 60, 75 και 90 Hz παρουσιάζουν μείωση του πλάτους τους από 10 έως 20 dB (Σχήμα (3.3)). Συνεπώς το ΣΕΑΘ επιτυγχάνει αξιόλογη μείωση των αρμονικών στοιχείων της ακουστικής διαταραχής, χωρίς όμως αυτό να συνεπάγεται και μεγάλη μείωση του χαμηλόσυχνου ευρυζωνικού θορύβου. Η αδυναμία αξιόλογης μείωσης του θορύβου αυτού συντελεί στην περιορισμένη μείωση της συνολικής ηχοστάθμης.



Σχήμα 3.2: Φάσματα συχνοτήτων στα αυτιά του επιβάτη πριν και μετά την ενεργοποίηση του ΣΕΑΘ (ηλεκτρογεννήτριες).

Παρόλα αυτά τα ποσά μείωσης που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι κοντά στο όριο των 10 dB και θεωρούνται ικανοποιητικά. Επιπλέον, το ανθρώπινο αυτί μπορεί εύκολα να αντιληφθεί τη διαφορά της ηχοστάθμης πριν και μετά την ενεργοποίηση του ΣΕΑΘ.



Σχήμα 3.3: Φάσματα συχνοτήτων στα αυτιά του επιβάτη πριν και μετά την ενεργοποίηση του ΣΕΑΘ (εν πλω)

Τέλος, παρόλο που μέσω της τεχνικής Head Tracking η μέγιστη μείωση της ακουστικής πίεσης παρατηρείται στις θέσεις των αυτιών, παράλληλα δημιουργούνται δυο μεγάλες ζώνες ησυχίας γύρω από αυτές τις θέσεις, οι οποίες σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες έχουν διάμετρο ίση περίπου με το 1/10 του μήκους κύματος της αντίστοιχης συχνότητας [3]. Παραδείγματος χάρη, στην περίπτωση μιας ακουστικής διαταραχής στα 55 Hz, η διάμετρος της ζώνης ησυχίας είναι 60 cm,

γεγονός που επιτρέπει την άνετη κίνηση του κεφαλιού του επιβάτη ακόμα και αν δεν υπήρχε σύστημα Head Tracking. Παρόλα αυτά το εν λόγω σύστημα οδηγεί σε μια περαιτέρω μείωση της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη μεταφέροντας το κέντρο της ζώνης ησυχίας ανάλογα με τη θέση του κεφαλιού.

#### 4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένα σύστημα τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου, που προορίζεται για εγκατάσταση στο προσκέφαλο θέσεων οχημάτων. Το σύστημα αυτό που αποτελείται από δυο woofer και τέσσερα μικρόφωνα αξιολογήθηκε πειραματικά ως προς τη δυνατότητα του να μειώσει την ακουστική πίεση γύρω από τα αυτιά του επιβάτη, όταν η ακουστική διαταραχή προέρχεται από την καμπίνα ενός σκάφους αναψυχής. Μάλιστα, ενσωματώθηκε και ένα σύστημα υπολογισμού της απόστασης του κεφαλιού από το προσκέφαλο, με σκοπό την μέγιστη μείωση της ηχοστάθμης γύρω από τα αυτιά. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε μια κλειστή καμπίνα στο εργαστήριο έδειξαν ότι το εν λόγω σύστημα μπορεί να μειώσει το πλάτος των αρμονικών που σχετίζονται είτε με τις ηλεκτρογεννήτριες, είτε με τις μηχανές του σκάφους αρκετά παραπάνω από 10 dB συντελώντας στην βελτίωση της ακουστικής άνεσης του επιβάτη. Μελλοντική έρευνα πάνω στο προτεινόμενο σύστημα θα περιλαμβάνει την βελτίωση της απόδοσης μέσω χρήσης αλγορίθμων που μπορούν να μειώσουν και την ακουστική πίεση που οφείλεται σε ευρυζωνικό θόρυβο και την βελτίωση της φορητότητας με την ενσωμάτωση του μικροφώνου αναφοράς στο προσκέφαλο και τη χρήση μικρότερου ψηφιακού επεξεργαστή σήματος.

#### 5. Αναφορές

- [1] C.Y. Chang, C.T. Chuang, S.M. Kuo, C.H. Lin «Multi-functional active noise control system on headrest of airplane seat», *Mechanical Systems and Signal Processing* **167**, 108552 (2022).
- [2] D. Mylonas, A. Erspamer, C. Yiakopoulos, I. Antoniadis «Global control of propeller-induced aircraft cabin noise using active sound absorbers», *Journal of Sound and Vibration* **573**, 118213 (2024).
- [3] P.A. Nelson, S.J. *Elliot Active Control of Sound* Academic Press (1993).
- [4] D. Moreau, B. Cazzolato, A. Zander, C. Petersen «A Review of Virtual Sensing Algorithms for Active Noise Control» *Algorithms* **1**, 69-99 (2008).
- [5] J.Y. Oh, H.W. Jung, M.H. Lee, K. H. Lee, Y. J. Kang «Enhancing active noise control of road noise using deep neural network to update secondary path estimate in real time», *Mechanical Systems and Signal Processing* **206**, 110940 (2024)
- [6] C.D. Kestell, B.S. Cazzolato, C.H. Hansen «Active noise control in a free field with virtual sensors» *Journal of Acoustic Society of America* **109**, 232–243 (2001).
- [7] S.J. Elliott, W. Jung, J. Cheer «Head tracking extends local active control of broadband sound to higher frequencies» *Scientific reports* **8**, 5403 (2018).
- [8] D. Mylonas, A. Erspamer, C. Yiakopoulos, I. Antoniadis, «An extrapolation-based virtual sensing technique of improving the control performance of the FxLMS algorithm in a maritime environment» *Applied Acoustics* **193**, (2022).