

## **Βελτιστοποίηση σχεδίασης στις χαμηλές συχνότητες πανκατευθυντικών πηγών ήχου για μετρήσεις**

Δημήτριος Καπράλος, Χρήστος Σεβαστιάδης,  
Γεώργιος Παπανικολάου  
Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
kapralosd@ece.auth.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η έννοια της πανκατευθυντικής ηχητικής πηγής υποδηλώνει ένα σύστημα ικανό να εκπέμπει ηχητικά κύματα ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η χρήση των πηγών αυτών αφορά τη μέτρηση και την αξιολόγηση της ακουστικής κλειστών χώρων, καθώς και στην ηχομόνωσή τους. Ο κύριος στόχος της εργασίας, ήταν η αύξηση της ηχητικής ισχύος των πανκατευθυντικών πηγών στις χαμηλές συχνότητες. Για να επιτευχθεί αυτό, πραγματοποιήθηκε μια εκτεταμένη ανάλυση, χρησιμοποιώντας μεθοδολογίες σχετικές με το σχεδιασμό συστημάτων μεγάφωνων, εξειδικεύοντάς τις στις πανκατευθυντικές μετρητικές πηγές ήχου. Η μελέτη επικεντρώθηκε σε τρεις διαφορετικούς τύπους πανκατευθυντικής πηγής: στη κλειστή δωδεκάεδρη ηχητική πηγή, στη κλειστή εικοσιδωδεκάεδρη πηγή και στη εικοσιδωδεκάεδρη πηγή με διόδους. Με την χρήση αλγοριθμικών μεθόδων βελτιστοποίησης αναζητήθηκε αρχικά ο βέλτιστος τύπος πανκατευθυντικής πηγής και στη συνέχεια, εξετάστηκαν πιθανά πλεονεκτήματα από την ενσωμάτωση διόδων.*

### ***Design optimization at low frequencies of omnidirectional sound sources for measurements***

#### **ABSTRACT**

*An omnidirectional sound source implies a system capable of emitting sound waves uniformly in all directions. The use of such sources is concerned with the measurement and assessment of the acoustics of enclosed spaces and their sound insulation. The main objective of the study was to increase the sound power of omnidirectional sources at low frequencies. To achieve this, an extensive analysis was carried out, using methodologies related to loudspeaker system design, specializing them in omnidirectional sound sources. The study focused on three different types of omnidirectional source: the closed-box dodecahedron sound source, the closed-box icosidodecahedron source and the icosidodecahedron source with ports. Using algorithmic optimization methods, the optimal omnidirectional source type was first searched for and then possible advantages of diode integration were considered.*

## Εισαγωγή

Οι πανκατευθυντικές ηχητικές πηγές, είναι βασικά εργαλεία στον τομέα της ακουστικής. Το κύριο χαρακτηριστικό των πανκατευθυντικών πηγών, είναι η ομοιόμορφη εκπομπή ήχου, προς όλες τις κατευθύνσεις. Από πρακτική άποψη, οι πηγές αυτές χρησιμοποιούνται σε ακουστικές μετρήσεις όπως, στην αξιολόγηση των ακουστικών ιδιοτήτων χώρων και στην ανάλυση των ακουστικών ιδιοτήτων αρχιτεκτονικών στοιχείων. Επειδή οι μετρήσεις κτιριακής ακουστικής έχουν επεκταθεί σε συχνότητες κάτω των 100 Hz, όπου ο θόρυβος υποβάθρου συνήθως είναι υψηλότερης στάθμης, προκύπτει πλέον η ανάγκη εκπομπής υψηλότερης ισχύος στις πολύ χαμηλές συχνότητες. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού, στη παρούσα εργασία, ήταν η ενσωμάτωση διόδων σε πηγές με πανκατευθυντικό χαρακτήρα. Ως δίοδος ορίζεται ένα συντονισμένο άνοιγμα στο κέλυφος της πηγής, που επιτρέπει στον αέρα να δονείται μέσα και έξω, λειτουργώντας σε συνδυασμό με τη δόνηση του περικλειστού από το κέλυφος αέρα, που δονείται από το διάφραγμα του μεγάφωνου. Το εμβαδόν της διόδου γίνεται συνήθως ίσο ή μικρότερο από την ενεργή επιφάνεια του διαφράγματος του μεγάφωνου. Ο κατάλληλος συνδυασμός της συχνότητας συντονισμού του κελύφους και της διόδου, επιτρέπει την εκπομπή ηχητικής ισχύος από τη δίοδο. Το αποτέλεσμα είναι το αεριζόμενο μεγαφωνικό σύστημα να έχει ευρύτερη απόκριση σε χαμηλές συχνότητες σε σύγκριση με αυτήν που παράγεται από το ίδιο μεγάφωνο σε κλειστό κουτί.

### 1. Γωνία ανοίγματος

Στο σχεδιασμό και την ανάλυση πανκατευθυντικών συστημάτων μεγαφώνων, η γωνία ανοίγματος του εμβόλου είναι μια παράμετρος που επηρεάζει την κατευθυντικότητα, τα υποδείγματα ακτινοβολίας και τη συνολική ηχητική απόδοση του μεγάφωνου. Ως γωνία ανοίγματος  $\alpha$  ορίζεται η γωνιακή έκταση κατά την οποία το έμβολο μέσα στο περίβλημα εκπέμπει ηχητική ενέργεια. Καθορίζει την περιοχή κάλυψης ή το υπόδειγμα πολικής ακτινοβολίας του ήχου, που παράγεται από το μεγάφωνο. Μια μεγαλύτερη γωνία ανοίγματος αντιστοιχεί σε μια ευρύτερη περιοχή κάλυψης, ενώ μια μικρότερη γωνία οδηγεί σε μια πιο εστιασμένη ή κατευθυνόμενη ηχητική εκπομπή. Από την ανάλυση των συντελεστών κατευθυντικότητας που πραγματοποιήθηκε για τα διάφορα πλατωνικά στερεά [1], το δωδεκάεδρο στερεό παρουσιάζει την καλύτερη πανκατευθυντική προσέγγιση, στην περιοχή συχνοτήτων έως 5 kHz, όταν εφαρμόζεται η μέγιστη γωνία ανοίγματος. Από την άλλη το εικοσιδωδεκάεδρο στερεό παρουσιάζει για τον ίδιο όγκο πηγής ένα πιο σφαιρικό σχήμα και κατ' επέκταση μία πιο σφαιρική κατευθυντικότητα ακουστικής εκπομπής.

### 2. Ανάλυση

Για την ανάλυση των διατάξεων κλειστής πηγής και πηγής με διόδους, χρησιμοποιήθηκε ένα ημι-αναλυτικό μοντέλο το οποίο περιγράφεται από μητρώα μετάδοσης [2]. Το ημι-αναλυτικό μοντέλο αυτό είναι ένα ηλεκτρο-μηχανο-

αναλογικό κύκλωμα, διαφορετικό από αυτά που έχουν προταθεί από τους Beranek [3] και Small [4], καθώς χρησιμοποιεί δίκτυα δύο θυρών. Το μοντέλο αυτό ενσωματώνει διάφορα στοιχεία όπως το πηνίο, ηλεκτρομηχανική μηχανοακουστική μετατροπή και το διάφραγμα. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία αντιπροσωπεύεται από μητρώα μετάδοσης. Τα μητρώα μετάδοσης περιγράφουν την σχέση μεταξύ ηχητικής πίεσης και ηχητικής ταχύτητας όγκου στα δύο άκρα του συστήματος. Στην περίπτωση της πηγής με διόδους, στο ημι-αναλυτικό μοντέλο, υπάρχουν επιπλέον μητρώα μετάδοσης για την διόδο και την ακτινοβολία που αυτή εκπέμπει αλλά και για τις διαρροές.

### 3. Βελτιστοποίηση σχεδίασης πηγής

Για την αναζήτηση του βέλτιστου τύπου πανκατευθυντικής μετρητικής πηγής ήχου, εξετάστηκαν τρεις διατάξεις: η κλειστή δωδεκάεδρη πηγή, η κλειστή εικοσιδωδεκάεδρη πηγή και η εικοσιδωδεκάεδρη πηγή με διόδους. Η επιλογή προσθήκης διόδων μόνο στο εικοσιδωδεκάεδρο στερεό, έγκειται στην δυσκολία κατασκευής δωδεκάεδρης πηγής με διόδους, καθώς η τοποθέτησή τους πρέπει να γίνει στις κορυφές. Αντίθετα, το εικοσιδωδεκάεδρο έχει σε κάθε κορυφή του πεντάγωνου ένα ισόπλευρο τρίγωνο, διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο την δημιουργία ανοιγμάτων για την προσθήκη διόδων.

Προκειμένου να προκύψει ο βέλτιστος τύπος της πανκατευθυντικής πηγής, χρειάστηκε να οριστεί μία συνάρτηση κόστους. Αυτή η συνάρτηση αξιολογεί κάθε πιθανή λύση ως προς ένα δεδομένο μετρό ποιότητας και επιστρέφει αυτήν με την καλύτερη τιμή. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε με βάση τα διαγράμματα των αποκρίσεων των ηχητικών ισχύων και με ελάχιστη συχνότητα τα 50 Hz.

Για την εύρεση του βέλτιστου τύπου, η συνάρτηση κόστους που ορίστηκε αρχικά βασίστηκε στον υπολογισμό της μέσης ισχύος ( $L_w$ ) που προσφέρει κάθε υποψήφια λύση, με στόχο να αναζητηθεί αυτή με την υψηλότερη τιμή. Διαπιστώθηκε όμως πως η συγκεκριμένη συνάρτηση δεν εξετάζει πλήρως τις πιθανές λύσεις με βάση την ισχύ που προσφέρουν στις χαμηλές συχνότητες. Για τον λόγο αυτόν υπήρξε η ανάγκη ορισμού μίας δεύτερης συνάρτησης κόστους. Η συνάρτηση αυτή, βασίστηκε στον λογάριθμο του λόγου της ισχύος, των ενός τρίτου οκτάβων μέχρι την συχνότητα συντονισμού ( $W_{bfc}$ ), όπου σχεδόν τις περισσότερες φορές έχει και την μέγιστη τιμή, προς την ισχύ του ίδιου πλήθους ενός τρίτου οκτάβων μετά την συχνότητα συντονισμού ( $W_{afc}$ ). Οι βέλτιστες λύσεις, που προέκυψαν με την συγκεκριμένη συνάρτηση κόστους, ήταν έντονα συντονισμένες, δηλαδή, προς τις υψηλότερες συχνότητες παρουσίαζαν μείωση της ισχύος τους. Για τον λόγο αυτόν, η συνάρτηση κόστους που επιλέχθηκε αποτελεί υπέρθεση των δύο προηγούμενων συναρτήσεων, πολλαπλασιάζοντας την συνθήκη για τον υπολογισμό της μέγιστης μέσης ισχύος του συστήματος και την συνθήκη για τον υπολογισμό του λογάριθμου του λόγου της ισχύος με ένα συντελεστή 0,5.

$$\text{fitness}(L_w, W_{bfc}, W_{afc}) = 0,5 \cdot \text{mean}(L_w) + 0,5 \cdot 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{W_{bfc}}{W_{afc}} \right) \quad (3.1)$$

Τέλος μια ακόμα συνθήκη στην συνάρτηση κόστους ήταν η εφαρμογή άνω και κάτω ορίων στην γωνία ανοίγματος. Για μεγαλύτερη πληρότητα και περισσότερη

ακρίβεια στα αποτελέσματα, δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης: ο Γενετικός Αλγόριθμος [5], ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης με Σμήνος [6] και ο Αλγόριθμος Διαφορική Εξέλιξη [7]. Και για τις τρεις αυτές μεθόδους χρησιμοποιήθηκε ένας αρχικός πληθυσμός υποψήφιων λύσεων. Ο πληθυσμός αυτός περιλάμβανε διάφορα μεγάρφωνα, μήκη ακμών πεντάγωνων και κατ' επέκταση όγκων πηγών αλλά και διάφορα χαρακτηριστικά διόδων, όπως το μήκος, το πλήθος και η διάμετρος [8]. Για να διευκολυνθεί η συστηματική εκτέλεση αυτών των αναλύσεων και βελτιστοποιήσεων, αναπτύχθηκε ειδικό λογισμικό, το οποίο είναι διαθέσιμο ελεύθερα μέσω της πλατφόρμας προγραμματιστών GitHub [9].

#### 4. Αποτελέσματα

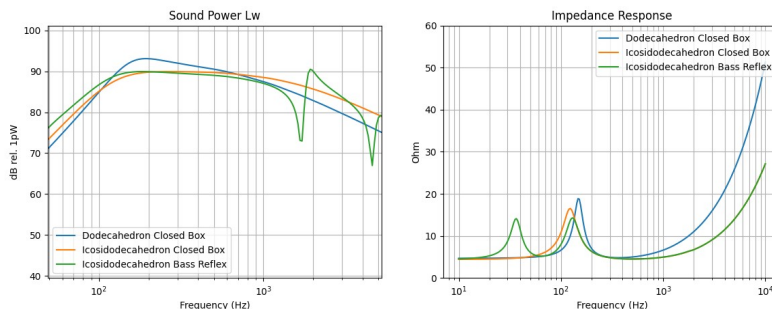
##### 4.1 Σύγκριση βέλτιστων λύσεων συνάρτησης κόστους

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται οι βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν από τις αλγοριθμικές μεθόδους βελτιστοποίησης, που χρησιμοποιήθηκαν, με χρήση της τελευταίας συνάρτησης κόστους όπως αυτή περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Για κάθε μία από τις διαφορετικές διατάξεις που εξετάστηκαν, και οι τρεις αλγόριθμοι συνέκλιναν στα ίδια αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Βέλτιστη λύση αλγορίθμων για τις τρεις διατάξεις.

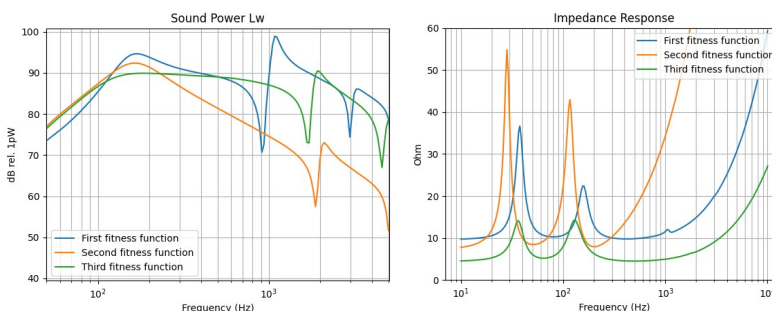
Διάταξη	Όγκος Πηγής	Πλήθος Διόδων	Μήκος Διόδων	Διάμετ. Διόδων	Γωνία Ανοίγμ.	Τιμή
Κλειστή δωδεκάεδρη	25,8 dm <sup>3</sup>	-	-	-	21,3°	45
Κλειστή εικοσιδωδεκάεδρη	30 dm <sup>3</sup>	-	-	-	20,1°	45.3
Εικοσιδωδεκάεδρη με διόδους	30 dm <sup>3</sup>	8	2.8 cm	2.7 cm	20,1°	50.6

Από τα διαγράμματα στο Σχήμα 4.1 διαπιστώνεται πως η κλειστή εικοσιδωδεκάεδρη πηγή προσφέρει υψηλότερη ηχητική ισχύ από την κλειστή δωδεκάεδρη πηγή. Η διαφορά αυτή, έχει μέγιστη τιμή περίπου 2 dB στα 50 Hz, ενώ η διαφορά αυτή μειώνεται σταδιακά μέχρι τα 100 Hz. Από την σύγκριση ανάμεσα στις κλειστές πηγές και την εικοσιδωδεκάεδρη πηγή με διόδους, παρατηρείται πως η προσθήκη διόδων προσφέρει αύξηση της ηχητικής ισχύος στο σύστημα. Η αύξηση αυτή είναι της τάξεως των 3 dB στα 50 Hz, από την κλειστή εικοσιδωδεκάεδρη και 5 dB απλό την κλειστή δωδεκάεδρη. Προχωρώντας προς υψηλότερες συχνότητες, συνεχίζεται να παρατηρείται μικρή αύξηση της ηχητικής ισχύς, στην περίπτωση της πηγής με διόδους, μέχρι την συχνότητα συντονισμού, σε σχέση με την κλειστή εικοσιδωδεκάεδρη. Τέλος η κλειστή δωδεκάεδρη πηγή, εμφανίζει 3 dB υψηλότερη ισχύ από τις εικοσιδωδεκάεδρες πηγές στην συχνότητα συντονισμού.



Σχήμα 4.1 Ηχητική ισχύς και εμπέδηση των τριών διατάξεων με εφαρμογή της βέλτιστης λύσης, για την τρίτη συνάρτηση κόστους.

#### 4.2 Σύγκριση βέλτιστων λύσεων εικοσιδωδεκάερης πηγής με διόδους



Σχήμα 4.2 Σύγκριση βέλτιστων λύσεων εικοσιδωδεκάερων πηγών με διόδους για τις τρεις συναρτήσεις κόστους.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την χρήση και των τριών συναρτήσεων κόστους, οι αλγόριθμοι ανέδειξαν ως βέλτιστη λύση, αυτή δηλαδή με την υψηλότερη ισχύ στις χαμηλές συχνότητες, την εικοσιδωδεκάερη πηγή με διόδους. Στο Σχήμα 4.2, παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των βέλτιστων αυτών λύσεων, για τις τρεις διαφορετικές συναρτήσεις κόστους που χρησιμοποιήθηκαν. Παρατηρούμε από τις καμπύλες ηχητικής ισχύος, πως οι βέλτιστες λύσεις της δεύτερης και τρίτης συναρτήσεων κόστους εκπέμπουν υψηλότερη ισχύ στις χαμηλότερες συχνότητες σε σύγκριση με την βέλτιστη λύση της πρώτης συνάρτησης κόστους. Επιπλέον η βέλτιστη λύση της τρίτης συνάρτησης κόστους παρουσιάζει μια πιο ομαλή απόκριση προς τις υψηλές συχνότητες σε σχέση με τις άλλες βέλτιστες λύσεις. Τέλος από τις καμπύλες της εμπέδησης των εικοσιδωδεκάερων πηγών με διόδους, αυτή της τρίτης συνάρτησης κόστους, εμφανίζει μεγαλύτερη συμμετρία υποδηλώνοντας με τον τρόπο αυτόν, μια ευθυγράμμιση Bessel [10].

## 5. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην αναζήτηση του βέλτιστου τύπου πανκατευθυντικής μετρητικής πηγής ήχου, με έμφαση στη μεγαλύτερη ηχητική ισχύ στις χαμηλότερες συχνότητες. Οι προσομοιώσεις με το ημι-αναλυτικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ανέδειξαν ότι το μοντέλο είναι κατάλληλο για την ανάλυση της ακουστικής συμπεριφοράς αυτών των πηγών. Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων διαδραματίζει η συνάρτηση κόστους, με την συγκεκριμένη που επιλέχθηκε να αποτελεί την πρότασή μας για την εύρεση της βέλτιστης επιλογής.

Η ανάλυσή μας συνήγαγε αρχικά, πως το εικοσιδωδεκάεδρο στερεό μπορεί να προσφέρει υψηλότερη ηχητική ισχύ στις χαμηλότερες συχνότητες, όταν επιλεγεί σαν περίβλημα μίας πανκατευθυντικής μετρητικής πηγής ήχου, σε σύγκριση με το δωδεκάεδρο στερεό. Συγκρίνοντας την ηχητική ισχύ των κλειστών πηγών και της εικοσιδωδεκάεδρης πηγής με διόδους, διαπιστώθηκε ότι η ενσωμάτωση διόδων μπορεί να επιφέρει αύξηση της ηχητικής ισχύος στο σύστημα. Η αύξηση αυτή παρατηρήθηκε στις χαμηλές συχνότητες με την μέγιστη διαφορά να φτάνει ως και τα 5 dB με την κλειστή δωδεκάεδρη πηγή.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτήν την εργασία, αποτελούν μια εκτίμηση της ακουστικής συμπεριφοράς των συγκεκριμένων διατάξεων. Στο μέλλον θα πρέπει να κατασκευαστεί η βέλτιστη λύση που προτείνεται, ώστε να διαπιστωθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

## 6. Βιβλιογραφία

- [1] C. Quested, A. Moorhouse, B. Piper, and B. Hu, «An analytical model for a do decahedron loudspeaker applied to the design of omni-directional loudspeaker arrays,» *Applied acoustics*, vol. 85, pp. 161–171, 2014.
- [2] L. Beranek and T. Mellow, *Acoustics: sound fields, transducers and vibration*. Academic Press, 2019.
- [3] L. Beranek, *Acoustics*. Electrical Engineering Series, McGraw-Hill, 1996.
- [4] R. H. Small, “Closed-box loudspeaker systems-part 1: Analysis,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 20, no. 10, pp. 798–808, 1972.
- [5] A. F. Gad, “Pygad: An intuitive genetic algorithm python library,” *Multimedia Tools and Applications*, pp. 1–14, 2023.
- [6] M. Juneja and S. Nagar, “Particle swarm optimization algorithm and its parameters: A review,” in *2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)*, pp. 1–5, IEEE, 2016.
- [7] A. K. Qin, V. L. Huang, and P. N. Suganthan, “Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization,” *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 2, pp. 398–417, 2008.
- [8] D. Kapralos, “Design optimization at low frequencies of omnidirectional sound sources for measurements,” Aristotle University of Thessaloniki, 2024.
- [9] D. Kapralos, “dimitris-kapralos/loudspeaker\_enclosure.” GitHub, [Online]. [https://github.com/dimitris-kapralos/Loudspeaker\\_Enclosure](https://github.com/dimitris-kapralos/Loudspeaker_Enclosure)
- [10] V. Dickason, *The Loudspeaker Design Cookbook*. Audio Amateur Press, 2007.