



ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Χ. ΣΠΥΡΙΔΗΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ,
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΦΙΛΟΣΟΦΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

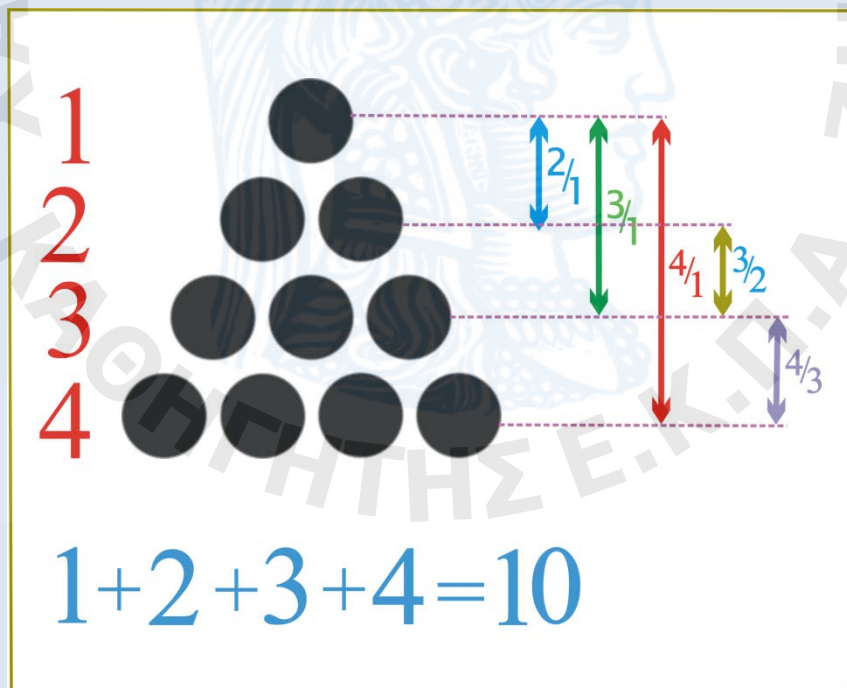
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΠΟΛΗ ΖΩΓΡΑΦΟΥ Τ.Κ. 157 84

e-mail: hspyridis@music.uoa.gr

☎ 210 - 72.77.832

Μία τετρακτὺς εκ της ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ:

1. Ένταση (W/m^2)
2. Στάθμη Έντασης (dB)
3. Ακουστότητα (sone)
4. Στάθμη Ακουστότητας (phon) του Ήχου



Κυρίες και κύριοι σύνεδροι, προκειμένου να καταστήσω καταληπτό το νόημα του τίτλου της εισηγήσεώς μου, οφείλω να πραγματοποιήσω μια αναδρομή στο παρελθόν. Οι Πυθαγόρειοι θεωρούσαν αναγκαίο να πλάθουν λέξεις εσωτερικής σημασίας, όπως είναι οι λέξεις φιλοσοφία, κόσμος, τετρακτύς, κάθαρσις, εχεμύθια, κατάρτυσις, στις οποίες απέδιδαν ιδιαίτερη σημασία.

Η ιερά τετρακτύς συμβολικά παριστάνεται με δέκα κουκίδες, που έχουν την εξής κανονική τριγωνική διάταξη:



Την τετρακτύ, ως σχήμα, γνώρισε ο Πυθαγόρας στη Βαβυλώνα. Έχει βρεθεί έντυπη η τετρακτύς επάνω σε χρυσή λαβή ξίφους του 2700 π.Χ. στην πόλη Ουρ. Κάθε κουκίδα της τετρακτύος ήταν και ένα σπουδαιότατο σύμβολο, διότι:

- ✓ Η μία κουκίδα ήταν σύμβολο του ενεργού στοιχείου ή του Δημιουργού.
- ✓ Οι δύο κουκίδες συμβόλιζαν την ύλη, το παθητικό στοιχείο.
- ✓ Οι τρεις κουκίδες συμβόλιζαν τον Κόσμο, δηλαδή την ένωση του ενεργού και του παθητικού στοιχείου.
- ✓ Οι τέσσερις κουκίδες συμβόλιζαν τις ελεύθερες τέχνες, που συμπληρώνουν και τελειοποιούν τον Κόσμο.

Η τετρακτύς εταυτίζετο με το Απολλώνιον ΕΙ, αριθμητικώς εξεφράζετο δια του «τριγωνικού» αριθμού $10=1+2+3+4$, ενώ ταυτόχρονα οι αριθμοί 1, 2, 3, 4 κατεδείκνυαν τη Μουσική αρμονία. Η τετρακτύς όντως εμπεριέχει όλες τις Πυθαγόρειες μουσικές συμφωνίες. 4:1 είναι ο τετραπλάσιος λόγος και εκφράζει τη συμφωνία, δηλαδή το εύφωνο μουσικό διάστημα της δις διαπασών (δύο οκτάβες), 3:2 είναι ο ημιόλιος λόγος και εκφράζει τη διά πέντε συμφωνία (διάστημα πέμπτης καθαρής), ο 4:3 είναι ο επίτριτος λόγος και εκφράζει τη διά τεσσάρων συμφωνία (διάστημα τετάρτης καθαρής), 2:1 είναι ο διπλάσιος λόγος και εκφράζει την διαπασών συμφωνία (διάστημα οκτάβας). Κατά την τελετή της μνήσεως των Πυθαγορείων οι μυσούμενοι νεοφώτιστοι ήσαν υποχρεωμένοι να δίνουν τον περίφημο Πυθαγόρειο όρκο στην ιερά τετρακτύ «Ού, μὰ τὸν ἀμετέρα ψυχὰ παραδόντα τετρακτύν, παγὰν ἀενάου φύσιος ριζώματ' ἔχουσας».

Τέλος, «τετρακτύς» εσήμαινε μια τετράδα, δηλαδή τέσσερα πράγματα. Ο Θεών ο Σμυρναίος μας πληροφορεί ότι οι Πυθαγόρειοι διέκριναν και εσέβοντο 11 διαφορετικές τετρακτεῖς, δηλαδή 11 διαφορετικές τετράδες.

Ο τίτλος της εισηγήσεώς μου, κυρίες και κύριοι συνάδελφοι, αναφέρεται σε μια τετράδα μεγεθών της Ακουστικής

1. Ένταση του Ήχου,
2. Στάθμη Έντασης του Ήχου,
3. Στάθμη Ακουστότητας του Ήχου,
4. Ακουστότητα του Ήχου

με τις αντίστοιχες μονάδες μετρήσεώς των

1. W/m^2 ,
2. dB,
3. phon,
4. sone

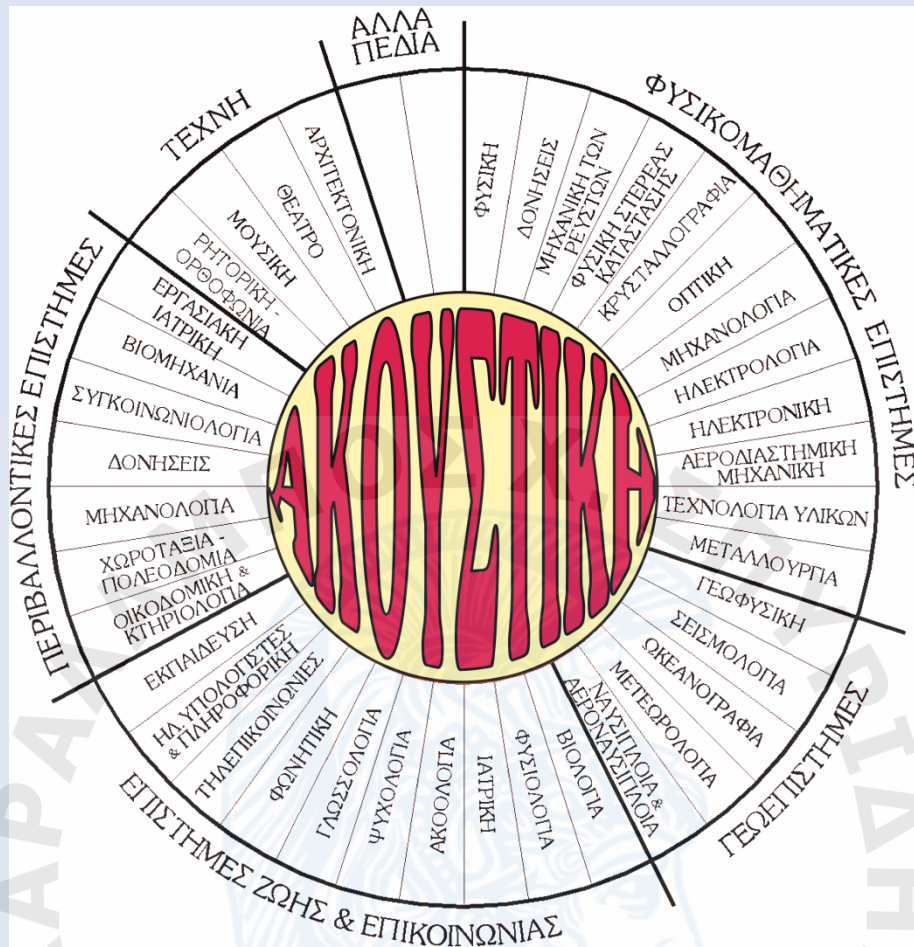
Κυρίες και κύριοι Σύνεδροι, εδώ και μερικά χρόνια στο Τμήμα Μουσικών Σπουδών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών παρέχεται ένας αριθμός μαθημάτων ελεύθερης επιλογής με τη φιλοσοφία των προαπαιτούμενων μαθημάτων για την κατάρτιση Ηχοληπτών. Ευελπιστούμε στην κατάρτιση Μουσικολόγων-Ηχοληπτών τριτοβαθμίου Εκπαιδεύσεως, οι οποίοι πλέον των απαραίτητων γνώσεων ενός

Μουσικολόγου, που αποκτώνται κατά τις πενταετείς σπουδές τους, θα είναι ικανοί να δαμάσουν ποικιλοτρόπως τον ήχο. Σύμβουλός τους θα είναι η γνώση, που αντλείται από τη Θεωρία, βοηθοί τους δε τα όργανα και οι διατάξεις καταγραφής και αναπαραγωγής του ήχου, που τους παρέχει η σύγχρονη Τεχνολογία του ήχου μέσα σε ένα υπερσύγχρονο και άριστα εξοπλισμένο Studio Ήχου του Εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας του Τμήματός μας.

Ένας σωστός επαγγελματίας ηχολήπτης εκτός από το ταλέντο, δηλαδή το προσωπικό συναίσθημα και τη φαντασία, θα πρέπει πρωτίτως να είναι καταρτισμένος με ουσιαστικές θεωρητικές και πρακτικές γνώσεις, οι οποίες θα του επιτρέψουν το ορθότερο κριτικό άκουσμα και την αρτιότερη ηχητική απόδοση αυτού και θα τον οδηγήσουν αξιόκρατα να διαπρέψει στον εργασιακό του χώρο.

Δυστυχώς, κυρίες και κύριοι ΦΥΣΙΚΟΙ, στα Λύκεια της πατρίδας μας δεν διδάσκονται όλα τα πεδία της Φυσικής με πρώτο-πρώτο το πεδίο της Ακουστικής, της επιστήμης των ήχων. Τραγική συνέπεια είναι οι πρωτοετείς φοιτητές των Τμημάτων Μουσικών Σπουδών στα Πανεπιστήμια, αλλά και οι σπουδαστές των Ωδείων, των Σχολών Ηχοληψίας, των Σχολών Ήχου, κ.λπ. να μη γνωρίζουν τα στοιχειώδη περί του ήχου, το υλικό δηλαδή, που καλούνται να δαμάσουν ή να επεξεργασθούν, προκειμένου να δημιουργήσουν. Ορισμένοι, μάλιστα, μη συναισθανόμενοι την άγνοιά τους σχετικά με τα φαινόμενα του ήχου και έχοντας υπερεκτιμήσει τη σύγχρονη Τεχνολογία, έχουν τη νοοτροπία ότι, για να γίνει κανείς π.χ. ένας καλός ηχολήπτης, πρέπει και αρκεί να είναι απλώς και μόνον ένας καλός χειριστής της κονσόλας! Άλλοι αδιαφορούν πλήρως γι' αυτή τη θεωρητική γνώση και λειτουργούν ως υποκείμενα-εμπειροτέχνες μπροστά από την κονσόλα με ό,τι αυτό συνεπάγεται!

Ένας Ηχολήπτης μπροστά στην κονσόλα και πριν αρχίσει να τοποθετεί τα «κουμπιά» της σε διάφορες θέσεις θα πρέπει να γνωρίζει κάλλιστα τη σημασία των φράσεων «**ο ήχος ΕΙΝΑΙ δυνατός**» και «**ΜΟΥ ΦΑΙΝΕΤΑΙ ότι ο ήχος είναι δυνατός**». Με άλλα λόγια θα πρέπει να γνωρίζει για την πρώτη περίπτωση τα **ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΑ** μεγέθη του ήχου (Ένταση και Στάθμη Έντασης) και για τη δεύτερη περίπτωση τα **ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΑ** μεγέθη του ήχου (Ακουστότητα και Στάθμη Ακουστότητας). Θα πρέπει να γνωρίζει τέσσερα Ακουστικά μεγέθη, δηλαδή μια Ακουστική τετρακτύ.



Διάγραμμα 1: Τα πεδία του επιστητού, στα οποία βρίσκει εφαρμογή η Ακουστική.

Ένταση του ήχου

Ως γνωστόν, κάθε ελεύθερα δονούμενο σύστημα χάνει με το πέρασμα του χρόνου ενέργεια με αποτέλεσμα να εκτελεί φθίνουσα ταλάντωση. Ο ρυθμός απώλειας της ενέργειάς του, δηλαδή $\left(\frac{\text{Ενέργεια}}{\text{Χρόνος}}\right)$, εκφράζεται με το μέγεθος Ισχύς και μετρείται σε

$$\text{μονάδες Watt} = \frac{\text{Joule}}{\text{sec}}.$$

Το μέγεθος της ηχητικής ισχύος που εκπέμπεται από τα διάφορα μουσικά όργανα, παραθέτω στον Πίνακα Ι.

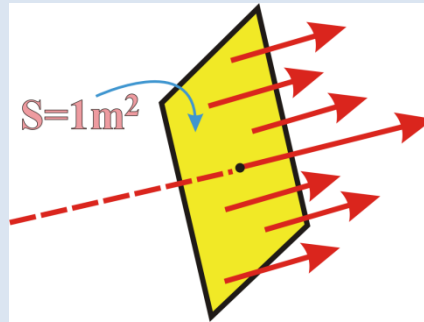
Πίνακας Ι: Ακουστικές ισχύεις, που εκπέμπουν διάφορα μουσικά όργανα

Μουσικό όργανο	Ακουστική Ισχύς σε Watt
Κλαρινέτο	0,05
Κόρνο	0,05
Φλάουτο	0,06
Κόντρα Μπάσο	0,16
Τούμπα	0,20
Τρομπέτα	0,31
Πιάνο	0,44
Τρομπόνι	6,00
Κύμβαλα	9,50
Ντραμς	25,00
Ορχήστρα	67,00

Αναλογισθείτε ότι ισχύ 100 Watt, που δίδει ένας λαμπτήρας φωτισμού, ισοδυναμεί με την ισχύ που δίδουν 2000 κλαρινέτα μαζί ή 2000 κόρνα μαζί ή 1667 φλάουτα μαζί ή 625 κόντρα μπάσσα μαζί ή 500 τούμπες μαζί ή 323 τρομπέτες μαζί ή 227 πιάνο μαζί ή 17 τρομπόνια μαζί ή 11 κύμβαλα μαζί ή 4 ντραμς μαζί ή περίπου 2 ορχήστρες μαζί.

Πρέπει να τονισθεί με ιδιαίτερη έμφαση ότι κατά μέσον όρο μόνο το 1% της ενεργείας ενός δονουμένου ηχοπαραγωγού μηχανικού συστήματος μετατρέπεται σε ηχητική ενέργεια!

Η ηχητική ενέργεια, διαδιδόμενη ομοιόμορφα στο χώρο, διαπερνά επιφάνεια σφαίρας ολοένα και μεγαλύτερου εμβαδού, με αποτέλεσμα επιφάνειες ίσου εμβαδού σε διαφορετική απόσταση από την ηχητική πηγή να διαπερνώνται από διαφορετική ποσότητα ηχητικής ενέργειας. Για την περιγραφή αυτού του γεγονότος οι Φυσικοί οδηγήθηκαν στην εισαγωγή ενός καινούργιου μεγέθους, αυτού της έντασης (Intensity) του ημιτονοειδούς ήχου. Μιλώντας για την ένταση του ημιτονοειδούς ήχου σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου και προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, σύμφωνα με τον κανονισμό ΕΛΟΤ 556.1 (2.29) θα εννούμε το πηλίκο της ηχητικής ενέργειας (W), που διαπερνά κάθετα στη μονάδα του χρόνου (sec) τη μονάδα της επιφάνειας (m²) ή θα εννοούμε το πηλίκο της ηχητικής ισχύος (P), που διαπερνά κάθετα τη μονάδα της επιφάνειας (m²).



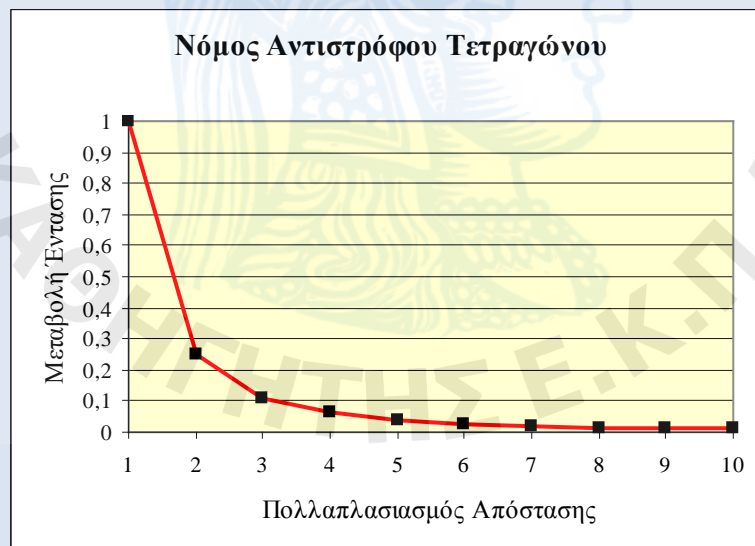
Σχήμα 1: Ενέργεια που διαπερνά κάθετα μια επιφάνεια με εμβαδόν 1 m^2 .

Μονάδα μέτρησης της έντασης του ημιτονοειδούς ήχου είναι το $\frac{W}{m^2}$.

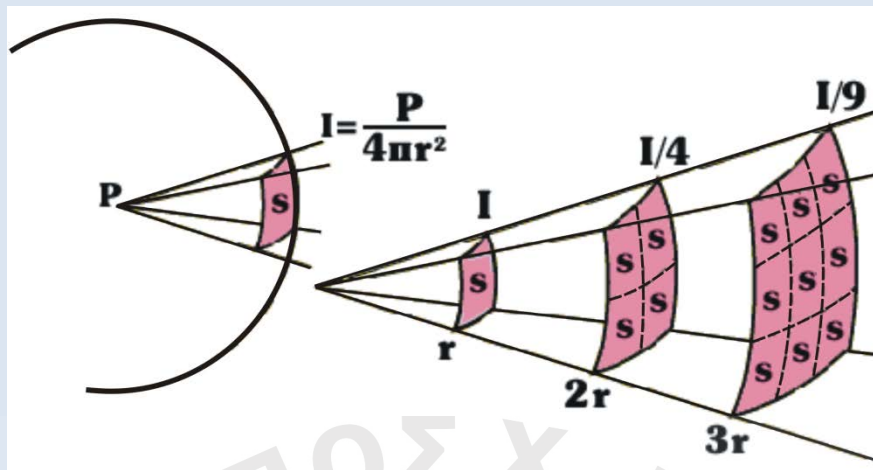
Όπως έχουμε πει, η ηχητική ισχύς, καθώς απομακρύνεται από τη σημειακή ηχητική πηγή μέσα σ' ένα ελεύθερο ηχητικό πεδίο, εξαπλούται ομοιόμορφα στην επιφάνεια σφαίρας με ολοένα αυξανόμενη ακτίνα με αποτέλεσμα η ένταση να μειούται σύμφωνα

με το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου $\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου είναι γενικός και ισχύει για όλα τα κύματα (μηχανικά και ηλεκτρομαγνητικά).



Σχήμα 2: Ο γραμμικός νόμος και ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου για τα κύματα.



Σχήμα 2: Η αύξηση του εμβαδού της επιφανείας επιφέρει τη μείωση της εντάσεως του κύματος.

Στάθμη Μεγεθών

Κυρίες και κύριοι Σύνεδροι, γνωρίζετε πολύ καλά ότι μέτρηση ενός μεγέθους ονομάζεται η σύγκριση αυτού του μεγέθους με ένα άλλο ομοειδές μέγεθος, το οποίο εμείς είτε αυθαίρετα, είτε με κοινή συμφωνία το εκλάβαμε ως μονάδα μέτρησης. Αποτέλεσμα της μέτρησης ενός μεγέθους είναι το μέτρο του μεγέθους. Το μέτρο πολλαπλασιαζόμενο επί την μονάδα μέτρησης δίνει το μετρούμενο μέγεθος.

Μερικές φορές είναι δυνατόν να συγκρίνουμε ένα μέγεθος με ένα άλλο ομοειδές, χωρίς αυτό να είναι η μονάδα μέτρησης, και να σχηματίσουμε μια ιδέα (όχι, όμως, ακριβή) για το μέγεθος, που μας ενδιαφέρει. Λέμε, επί παραδείγματι, ότι ο Γιάννης είναι 10 cm ψηλότερος από τον Κώστα, αλλά, αφού δεν γνωρίζουμε το ύψος του Κώστα, δεν μπορούμε να αντιληφθούμε με ακρίβεια πόσο ψηλός είναι ο Γιάννης.

Εάν, όμως, μας ήταν γνωστό ότι το ύψος του Κώστα είναι 1,70 m, τότε αμέσως θα καταλαβαίναμε ότι το ύψος του Γιάννη είναι 1,80 m.

Επειδή μεγαλύτερη σχέση με τις ανθρώπινες αισθήσεις έχουν οι λόγοι, παρά οι διαφορές των μεγεθών, είναι δυνατόν να λαμβάνουμε τον λόγο του μετρούμενου μεγέθους προς το μέγεθος ή τη στάθμη αναφοράς.

Στα μέσα του 19^{ου} αιώνα οι Φυσικοί **Ernst Weber** και **Gustaf Fechner** κατέληξαν σε έναν ψυχοφυσικό νόμο, ο οποίος λέει ότι το αίσθημα είναι ανάλογο του δεκαδικού λογαρίθμου του ερεθίσματος, που το προκαλεί. Δηλαδή

$$\text{Αίσθημα} = k \log(\text{Ερεθίσμα})$$

όπου k είναι μια σταθερά αναλογίας που, κατά περίπτωση, έχει κάποια τιμή.

Από δύο δοθέντα ομοειδή ερεθίσματα ε_1 και ε_2 τα προκαλούμενα αισθήματα α_1 και α_2 , αντίστοιχα, είναι:

$$\alpha_1 = k \log(\varepsilon_1)$$

$$\alpha_2 = k \log(\varepsilon_2)$$

Η διαφορά $\alpha_1 - \alpha_2$ των δύο προκαλουμένων αισθημάτων εκφράζεται από τη σχέση:

$$\alpha_1 - \alpha_2 = k \log(\varepsilon_1) - k \log(\varepsilon_2) = k \log\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)$$

Βλέπει κανείς ότι στη σχέση αυτή δεν εισάγεται μόνον ο λόγος των δύο μεγεθών ε_1 και ε_2 , αλλά και ο λογάριθμος του λόγου τους.

Εάν το ερέθισμα ε_2 ισούται με το κατώφλι του αισθήματος, οπότε το αίσθημα $\alpha_2=0$, η διαφορά $\alpha_1-\alpha_2$ των δύο προκαλουμένων αισθημάτων εκφράζει τη στάθμη (level) του προκαλουμένου αισθήματος α_1 από το ερέθισμα ε_1 με αναφορά το ερέθισμα ε_2 και δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \alpha_1 - 0 = \alpha_1 = k \log(\varepsilon_1) - k \log(\varepsilon_2) = k \log\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)$$

Χρησιμοποιώντας τη διαφορά των τιμών δύο μεγεθών είναι δυνατόν το διάστημα τιμών να είναι τρομακτικά μεγάλο και, ως εκ τούτου, δύσχρηστο στους καθημερινούς μας υπολογισμούς και δοσοληψίες. Το ίδιο πρόβλημα, ίσως σε ελαφρώς μικρότερη κλίμακα, εξακολουθεί να υφίσταται, όταν λαμβάνονται οι λόγοι των μεγεθών. Η εισαγωγή, όμως, του λογαρίθμου του λόγου των δύο μεγεθών συμπιέζει το όλο διάστημα τιμών, το εξαιρετικά μεγάλο, σε ένα κατά πάρα πολύ μικρότερο και, ως εκ τούτου, εύχρηστο διάστημα τιμών.

Για να καταστούν τα προηγούμενα κατανοητά, παραθέτω το ακόλουθο παράδειγμα:

Για κάθε ήχο μιας ορισμένης συχνότητας (ερέθισμα) υπάρχουν δύο όρια ευαισθησίας

(α) το κατώτερο όριο ακουστότητας ή κατώφλι ακουστότητας και

(β) το ανώτερο όριο ακουστότητας ή όριον πόνου ή ακμή ακουστότητας.

Το κατώφλι ακουστότητας αντιπροσωπεύει την ελαχιστότατη και μόλις ακουστή ένταση ήχου για μια συγκεκριμένη συχνότητα. Το όριο πόνου είναι αυτό που, όταν το ξεπερνούμε, προκαλείται πόνος στα αυτιά και, μοιραία, οδηγούμεθα στη φυσιολογική καταστροφή του μηχανισμού της ακοής.

Αυτά τα δύο όρια ποικίλουν από άτομο σε άτομο για την κάθε μία συχνότητα, αλλά στην περιοχή των 1000 Hz για όλους τους ανθρώπους με «οξεία» ακοή το εύρος των δύο ορίων είναι το μεγαλύτερο. Συγκεκριμένα σε αυτή τη συχνότητα το κατώφλι ακου-

στότητας αντιστοιχεί στα $10^{-12} \frac{W}{m^2}$ και το όριο πόνου στο $1 \frac{W}{m^2}$.

Η διαφορά των τιμών αυτών των δύο εντάσεων εξακολουθεί να είναι ένταση και ισούται με:

$$1 \frac{W}{m^2} - 10^{-12} \frac{W}{m^2} = 1 \frac{W}{m^2} - 0,000000000001 \frac{W}{m^2} = 0,999999999999 \frac{W}{m^2}$$

Ο λόγος αυτών των εντάσεων είναι καθαρός αριθμός (αδιάστατο μέγεθος) και ισούται με:

$$\frac{1 \frac{W}{m^2}}{10^{-12} \frac{W}{m^2}} = 10^{12} = 1.000.000.000.000$$

Ο δεκαδικός λογάριθμος του λόγου αυτών των εντάσεων ορίζει τη **στάθμη του μεγέθους του αριθμητού με αναφορά το ομοειδές μέγεθος του παρονομαστού** και εκφράζεται με έναν μικρό, και, συνεπώς, εύχρηστο αριθμό:

$$\log \frac{1 \frac{W}{m^2}}{10^{-12} \frac{W}{m^2}} = -\log 10^{-12} = 12$$

Η στάθμη των μεγεθών, εν γένει, καθιερώθηκε από τα Εργαστήρια του εργοστασίου Bell των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής στις αρχές του 20ού αιώνα να μετρείται σε μονάδες Bel, η οποία, όμως, ως μεγάλη και δύσχρηστη μονάδα αντικαταστάθηκε από το decibel (dB).

Η μονάδα decibel (dB), που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην Ακουστική, αποτελεί δάνειο από την Ηλεκτρική Μηχανολογία. Το decibel (dB) εν γένει εκφράζει το δεκαπλάσιο του λογαρίθμου του λόγου των αριθμητικών τιμών δύο μεγεθών

$$10 \cdot \log \left(\frac{\text{Αριθμητική Τιμή Μεγέθους}_1}{\text{Αριθμητική Τιμή Μεγέθους}_2} \right) \text{ dB}$$

και εκφράζει απόλυτες τιμές μεγεθών, στάθμες (levels) μεγεθών, μόνο στην περίπτωση που η αριθμητική τιμή του Μεγέθους₂, στον παρονομαστή, είναι σταθερή και γνωστή, οπότε εκλαμβάνεται ως αριθμητική τιμή αναφοράς (reference value).

Στα διάφορα πεδία έρευνας και μελέτης της Τεχνολογίας του Ήχου χρησιμοποιούνται διάφορες, καθιερωμένες πλέον, κλίμακες decibel, που η καθεμία έχει τη δική της προτυποποιημένη τιμή αναφοράς.

Στάθμη ισχύος (PL=Power Level)

Αναφερόμενοι στο decibel με την αυστηρή σημασία του όρου στο χώρο της Τεχνολογίας του Ήχου, προκειμένου να μετρήσουμε τη στάθμη ισχύος ενός σήματος (PL=Power Level), εννοούμε το δεκαπλάσιο του λογαρίθμου του λόγου των αριθμητικών τιμών των ισχύων δύο σημάτων, ένα εκ των οποίων εκλαμβάνεται ως σήμα αναφοράς, δηλαδή:

$$\begin{aligned} PL(\text{dB}) &= 10 \cdot \log \left(\frac{\text{Αριθμητική Τιμή Ισχύος Σήματος}}{\text{Αριθμητική Τιμή Ισχύος Σήματος}_{\text{αναφοράς}}} \right) = \\ &= 10 \cdot \log \left(\frac{P_1}{P_{\text{αναφοράς}}} \right) \end{aligned}$$

Όταν το 1 milliwatt (1 mW) εκλαμβάνεται ως η ισχύς αναφοράς, τότε η στάθμη ισχύος ενός σήματος εκφράζεται σε μονάδες dB_m .

Όταν το 1 Watt (1 W) εκλαμβάνεται ως η ισχύς αναφοράς, τότε η στάθμη ισχύος ενός σήματος εκφράζεται σε μονάδες dB_w .

Στάθμη έντασης (IL=Intensity Level)

Η στάθμη έντασης (IL=Intensity Level) θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$IL (dB) = 10 \cdot \log \left(\frac{I_1}{I_{\text{αναφοράς}}} \right)$$

Ως ένταση αναφοράς εκλαμβάνεται η τιμή $I_{\text{αναφοράς}} = 10^{-12} \left(\frac{W}{m^2} \right)$, που είναι το κατώφλι

ακουστότητας στη συχνότητα των 1000 Hz για έναν άνθρωπο με οξεία ακοή.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι, εάν διπλασιασθεί η ένταση του ήχου, τότε η προκύπτουσα στάθμη έντασης του ήχου αυξάνει κατά 3 dB. Πρόκειται για το ονομαζόμενο σημείο των 3 dB (*the three dB point*).

Ισοδυνάμως, εάν υποδιπλασιασθεί η ένταση του ήχου, τότε η προκύπτουσα στάθμη έντασης του ήχου ελαττώνεται κατά 3 dB.

Η στάθμη πίεσης του ήχου (SPL=Sound Pressure Level).

Τα περισσότερα μικρόφωνα είναι ευαίσθητα στην πίεση του ήχου παρά στην έντασή του. Όταν τέτοια μικρόφωνα χρησιμοποιούνται σε μετρήσεις ηχητικών σταθμών με ηχόμετρα, οι υπολογισμοί δεν βασίζονται στην ένταση του ήχου, αλλά στην ενεργό πίεση του ήχου. Η σχέση που δίνει τη στάθμη πίεσης του ήχου (SPL) είναι η εξής:

$$SPL (dB) = 20 \cdot \log \left(\frac{P_0}{P_{0 \text{ αναφοράς}}} \right)$$

όπου P_0 το πλάτος πίεσης του ηχητικού κύματος και $P_{0 \text{ αναφοράς}}$ τα 20 μPa.

Για ένα τρέχον ή οδεύον κύμα οι αριθμητικές τιμές που προκύπτουν για την IL και την SPL είναι ταυτόσημες και τα IL και SPL αντιπροσωπεύουν ένα και το αυτό μέγεθος. Στην περίπτωση, όμως, στασίμων κυμάτων, επειδή δεν υπάρχει ροή ενέργειας, δεν μπορεί να προσδιορισθεί η ένταση I του ήχου, οπότε η IL χάνει το νόημά της. Πρέπει να τονισθεί με έμφαση ότι οι υπολογισμοί των IL και SPL δεν έχουν να κάνουν καθόλου με τη συχνότητα του ηχητικού κύματος.

Στην εικόνα παρουσιάζονται μερικές τυπικές τιμές της στάθμης έντασης που προκαλείται από διάφορες χαρακτηριστικές ηχητικές πηγές, προκειμένου να σχηματίσετε μια άποψη.

Πρόσθεση σταθμών έντασης ήχου

Έστω ότι μας δίδονται n πλήθους ηχητικές πηγές με στάθμες έντασης

$$I_1, I_2, I_3, \dots, I_n,$$

αντίστοιχα, οι οποίες συνηχούν σ' ένα χώρο. Η πρόσθεση αυτών των σταθμών έντασης αποδεικνύεται ότι πραγματοποιείται, λόγω της εμπεριεχομένης λογαριθμικότητας, με τη διαδικασία που υπαγορεύει η σχέση:

$$I_{ολ} = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{I_1}{10}} + 10^{\frac{I_2}{10}} + 10^{\frac{I_3}{10}} + \dots + 10^{\frac{I_n}{10}} \right).$$

Στην περίπτωση που όλες οι n ηχητικές πηγές έχουν την ίδια ένταση I , δηλαδή την ίδια στάθμη έντασης (I), τότε η παραπάνω σχέση παίρνει τη μορφή:

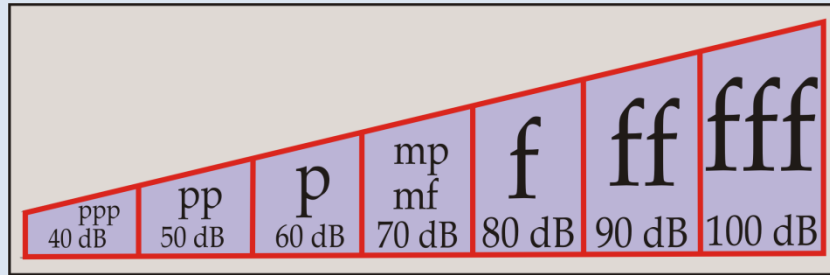
$$I_{ολ} = I + 10 \cdot \log(n)$$

Εάν σε μία αίθουσα διδασκαλίας με 25 μαθητές κάποια στιγμή φωνάξουν όλοι οι μαθητές μαζί με στάθμη έντασης 80 dB ο καθένας, τότε μέσα στην αίθουσα θα δημιουργηθεί ολική στάθμη έντασης ίση με $I_{ολ} = 80 + 10 \cdot \log 25 = 93,98 \text{ dB}$.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι, εάν σ' ένα χώρο συνηχήσουν δύο πηγές με την ίδια στάθμη έντασης (I), τότε η ολική στάθμη έντασης του ήχου αυξάνει κατά 3 dB. Πρόκειται και πάλι για το σημείο των 3 dB (*the three dB point*).

Στάθμες ήχου στη Μουσική

Συγκεκριμένες στάθμες έντασης ήχου αποδίδονται στις διάφορες σημάνσεις δυναμικής της κλασικής μουσικής, οι οποίες παρέχουν την πληροφορία για το πόσο δυνατά ή απαλά πρέπει να παιχθεί ένα μουσικό κομμάτι. Οι ιταλικές λέξεις forte (δυνατά) και piano (απαλά) συντομογραφικά συμβολίζονται, αντίστοιχα, ως ***f*** και ***p***. Ισχυρότερες διαβαθμίσεις της έντασης εκφράζονται με τους συμβολισμούς ***ff*** (fortissimo), ***fff*** (fortississimo), ενώ μεγαλύτερες διαβαθμίσεις της απαλότητας εκφράζονται με τους συμβολισμούς ***pp*** (pianissimo), ***ppp*** (pianississimo). Στο ενδιάμεσο υπάρχουν οι διαβαθμίσεις ***mf*** (mezzoforte) και ***mp*** (mezzopiano), όπου η λέξη mezzo σημαίνει «μισό-» ή «μέσο-».



Για τις εκφράσεις **fff ff f mf** ή **mp, p, pp, ppp** αποδίδονται τυπικές στρογγυλοποιημένες τιμές στάθμης έντασης του ήχου των 100, 90, 80, 70, 60, 50 και 40 dB.

Στάθμη Ακουστότητας (Loudness Level)

Η στάθμη ακουστότητας είναι το υποκειμενικό εκείνο χαρακτηριστικό γνώρισμα του ήχου, το οποίο παρέχει το μέγεθος της ακουστικής εντυπώσεως, που προκαλείται στο ακουστικό σύστημα του ανθρώπου.

Γενικά, η στάθμη ακουστότητας (LL), που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο σύστημα ακοής, δεν ταυτίζεται με τη στάθμη της ηχητικής έντασης (IL) ή τη στάθμη της ακουστικής πίεσης (SPL). Αυτό συμβαίνει επειδή το ανθρώπινο αυτί παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία στις διάφορες ακουστές συχνότητες.

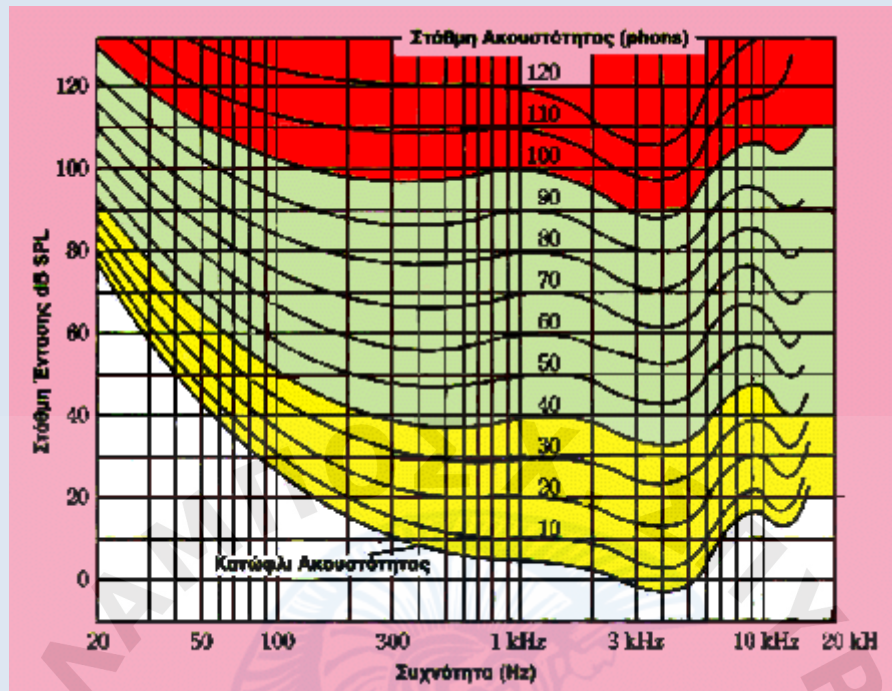
Ένα προσωπικό μέτρο της στάθμης ακουστότητας επιβάλλεται με ψυχοακουστικά πειράματα κατά τα οποία ερωτάται ένα πλήθος ατόμων, κατάλληλα επιλεγμένων, εάν ήχοι διαφορετικών συχνοτήτων και σταθμών έντασης ηχούν εξίσου δυνατά με έναν πρότυπο ημιτονοειδή ήχο. Ο πρότυπος ημιτονοειδής ήχος έχει ληφθεί με συχνότητα 1000 Hz αφενός μεν διότι είναι κοντά στη συχνοτική περιοχή της μεγάλης ευαισθησίας του αυτιού μας (2.000-6.000 Hz), αφετέρου δε διότι είναι δύναμη του αριθμού 10 (βάση του δεκαδικού αριθμητικού συστήματος) διευκολύνοντας τους υπολογισμούς και την ανάγνωση των διαφόρων διαγραμμάτων, που στην πλειοψηφία τους είναι λογαριθμικά. Ως μονάδα μέτρησης της στάθμης ακουστότητας ορίσθηκε από τον Barkhausen το 1926 το phon.

Με βάση τα παραπάνω, η κλίμακα της στάθμης ακουστότητας σε μονάδες phon ταυτίζεται αριθμητικά με την κλίμακα της στάθμης έντασης σε dB (αναφορά $10^{-12} \frac{W}{m^2}$)

) MONO στη συχνότητα αναφοράς, δηλαδή στη συχνότητα των 1000 Hz.

Για παράδειγμα, λέμε ότι ένας ημιτονοειδής ήχος έχει στάθμη ακουστότητας 60 phon, εάν ηχεί εξίσου δυνατά με έναν ημιτονοειδή ήχο συχνότητας 1000 Hz και στάθμης έντασης 60 dB.

Για όλες τις άλλες συχνότητες η μετάβαση από την κλίμακα της στάθμης ακουστότητας στην κλίμακα της στάθμης έντασης γίνεται με τη βοήθεια του διαγράμματος των ισοακουστικών καμπυλών, δημιουργήματα των H. Fletcher και W. A. Munson.



Σχήμα 3: Διάγραμμα ισοακουστικών καμπυλών των Fletcher-Munson ανά 10 phon για ημιτονοειδείς ήχους σε λογαριθμική χάραξη κατάλληλο για τη λήψη πληροφοριών που αφορούν συχνότητα (μουσικό ύψος), στάθμη έντασης και στάθμη ακουστότητας.

Η ισοακουστική καμπύλη των μηδέν (0) phon ονομάζεται «κατώφλι ακουστότητας» και είναι αυτή που περνά από το σημείο με συντεταγμένες 1000 Hz για τη συχνότητα και 0 dB SPL για τη στάθμη έντασης, όταν πρόκειται για ακούσματα από το ένα αυτί μέσω ακουστικού. Για τα αμφιωτικά ακούσματα αυτή η καμπύλη είναι ελαφρώς υπερυψωμένη και περνά από το σημείο με συντεταγμένες 1000 Hz για τη συχνότητα και 4,2 dB SPL για τη στάθμη έντασης και συναντάται και με την ονομασία «καμπύλη ελαχίστου ακουστού πεδίου». Όλα τα σημεία αυτής της ισοακουστικής καμπύλης, παρόλο που ηχούν εξίσου δυνατά, δηλαδή έχουν την ίδια στάθμη ακουστότητας (0 phon ή 4,2 phon), απαιτούν διαφορετικές στάθμες έντασης dB SPL, ιδιαίτερα στις ακραίες συχνοτικές περιοχές απ' ό,τι στις κεντρικές 2000-6000 Hz και αυτό διότι το αυτί μας παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία στις διάφορες συχνοτικές περιοχές και είναι αδρανέστερο στις πολύ υψηλές και στις πολύ χαμηλές συχνότητες.

Ακουστότητα (Loudness)

Η ακουστότητα είναι ένα ψυχοφυσικό μέγεθος. Χαρακτηρίζει τους σύνθετους ήχους, όπως ακριβώς η ένταση, που είναι φυσικό μέγεθος, χαρακτηρίζει τους ημιτονοειδείς ήχους.

Η ακουστότητα έχει σχέση με το πόσο έντονα ακούγεται ο ήχος, δηλαδή χαρακτηρίζει το ποσοτικό αίσθημα ακοής, που προκαλεί ένας ήχος στο αισθητήριο της ακοής. Η ακουστότητα εξαρτάται από τη συχνότητα και τη στάθμη έντασης του ήχου και, ως ψυχοφυσικό μέγεθος, στηρίζεται σε υποκειμενικά κριτήρια.

Προκειμένου να μετρήσουμε την αντίληψη των ήχων από τον άνθρωπο, χρειαζόμαστε οπωσδήποτε μια καλώς ορισμένη μονάδα για την ακουστότητα που γίνεται αντιληπτή, και αυτή η μονάδα ονομάζεται sone.

Εάν ένας ακροατής, που διαθέτει κανονική ακοή, βρίσκεται μέσα σε έναν ανηχοϊκό θάλαμο και στέκεται απέναντι από ένα μεγάφωνο, θα λέμε ότι αντιλαμβάνεται έναν ήχο ακουστότητας 1 sone, όταν ακούει ημιτονοειδή ήχο συχνότητας 1000 Hz και στάθμης έντασης 40 dB SPL, ή, ισοδύναμα, όταν ακούει ημιτονοειδή ήχο συχνότητας 1000 Hz και στάθμης ακουστότητας 40 phon.

Το προσόν που διαθέτει το μέγεθος ακουστότητα έναντι της στάθμης έντασης είναι ότι υπακούει στην πράξη της πρόσθεσης κατά την γνωστή μας πρακτική αριθμητική, πράγμα που δεν ισχύει για τη στάθμη έντασης.

Επί παραδείγματι ακουστότητα 2 sones από κάποια ηχητική πηγή και ακουστότητα 2 sones από κάποια άλλη ηχητική πηγή, που συνηχεί, ισοδυναμούν με ακουστότητα $2+2=4$ sones, που προκαλεί από μόνη της μια κάποια τρίτη ηχητική πηγή. Ενώ στάθμη έντασης 60 dB από κάποια ηχητική πηγή και στάθμη έντασης 60 dB από κάποια άλλη ηχητική πηγή, που συνηχεί, ισοδυναμούν με στάθμη έντασης 63 dB και όχι $60+60=120$ dB, που προκαλεί από μόνη της μια κάποια τρίτη ηχητική πηγή.

Η Ακουστότητα (σε μονάδες sone) και η στάθμη Ακουστότητας (σε μονάδες phon) συνδέονται με τη σχέση

$$L = 2^{\frac{L-40}{10}}$$

Κυρίες και κύριοι σύνεδροι, καταλήγων την εισήγησή μου, θα επιθυμούσα με ένα παράδειγμα να υποδείξω τον τρόπο διαχείρισης των μεγαθών αυτής της τετρακτύος κατά τη λύση ασκήσεων.

Ημιτονοειδής ήχος συχνότητας 200 Hz έχει στάθμη έντασης 50 dB.

Θα υπολογίσουμε τη στάθμη της ακουστότητάς του και την ακουστότητά του.

Σε ποια στάθμη έντασης πρέπει να μεταφερθεί αυτός ο ήχος, ώστε να διπλασιασθεί η ακουστότητά του;

Λύση

Από το διάγραμμα των ισοακουστικών καμπυλών των Fletcher-Munson για συχνότητα $f=200$ Hz και στάθμη έντασης $IL=50$ dB προκύπτει στάθμη ακουστότητας (LL) 50 phon.

Με στάθμη ακουστότητας (LL) 50 phon από τη σχέση $S = 2^{\frac{(LL-40)}{10}}$ υπολογίζουμε την ακουστότητα του ημιτονοειδούς ήχου, η οποία προκύπτει ίση με

$$S = 2^{\frac{(50-40)}{10}} = 2 \text{ sone.}$$

Ένας ημιτονοειδής ήχος συχνότητας $f=200$ Hz για να μας φαίνεται διπλάσια δυνατός από τον δοθέντα, θα πρέπει να έχει διπλάσια ακουστότητα από αυτόν, δηλαδή θα πρέπει να έχει ακουστότητα ίση με

$$2 \cdot 2 = 4 \text{ sone.}$$

Λογαριθμίζοντας τη σχέση $S = 2^{\frac{(LL-40)}{10}}$, προκύπτει ότι η τιμή της στάθμης ακουστότητας του ημιτονοειδούς ήχου συναρτήσει της τιμής της ακουστότητάς του είναι:

$$LL = 10 \frac{\log S}{\log 2} + 40 \text{ phons.}$$

Για τιμή ακουστότητας 4 sone προκύπτει από την παραπάνω σχέση τιμή στάθμης ακουστότητας ίση με 60 phon.

Τέλος, από το διάγραμμα των ισοακουστικών καμπυλών των Fletcher-Munson για συχνότητα $f=200$ Hz και στάθμη ακουστότητας (LL) 60 phon προκύπτει στάθμη έντασης ίση με 60 dB.

Σας ευχαριστώ