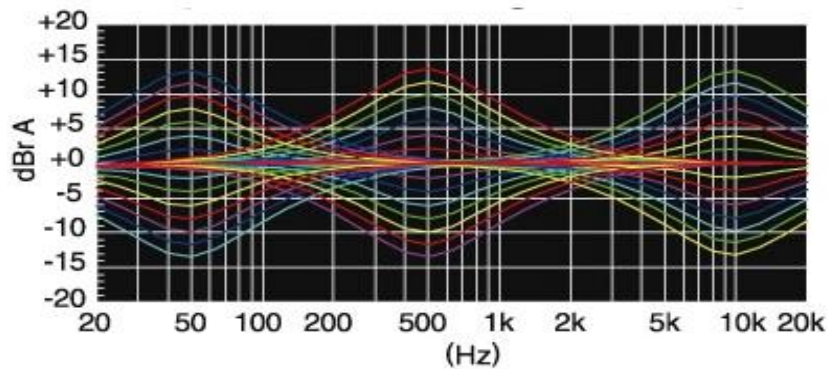


ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη του Σχεδιασμού και Μοντελοποίησης Μεγαφώνων για
Ενσωματωμένα Συστήματα Ήχου



ΒΑΣΙΛΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

ΠΛΙΑΤΣΙΚΑ ΒΗΣΣΑΡΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Καρακίτσος Γεώργιος

ΠΥΡΓΟΣ
ΜΑΙΟΣ 2015

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η αγορά των κινητών τηλεφώνων και των φορητών συσκευών έχει αναπτυχθεί με εντυπωσιακή ταχύτητα, αποτελώντας ένα από τα κύρια πεδία της τεχνολογικής ανάπτυξης και της βιομηχανικής δραστηριότητας. Στον αγώνα για την περαιτέρω βελτίωση των συσκευών αυτών, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην βελτίωση της ποιότητας του ήχου και στα ενσωματωμένα μικροηχεία.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των μεγαφώνων ως προς τη δομή, τα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία τους, καθώς και τα μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς τους από μηχανολογικής και ηλεκτρικής άποψης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα μικρά μεγάφωνα (μικροηχεία), τα οποία βρίσκουν εφαρμογή σε όλες τις σύγχρονες φορητές συσκευές και γενικότερα στα ενσωματωμένα συστήματα ήχου.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αναλυτικά οι ηλεκτρομηχανικές παράμετροι των συστημάτων αυτών, καθώς και το κλασσικό γραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς του τυπικού ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου, το οποίο ισχύει και στην περίπτωση των μικροηχείων. Επίσης, παρουσιάζονται οι βασικότερες ανομοιομορφίες των παραμέτρων του γραμμικού μοντέλου, οι οποίες εξηγούν τους λόγους κατασκευής μη γραμμικών μοντέλων συμπεριφοράς.

Στο πλαίσιο του πρακτικού μέρους της εργασίας, σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε γραφική διεπαφή με το περιβάλλον GUIDE του Matlab και υλοποιήθηκε το γραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς του ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου με το περιβάλλον Simulink του Matlab. Η εφαρμογή επιτρέπει στον χρήστη να πειραματιστεί με τις τιμές των ηλεκτρομηχανικών παραμέτρων του μικροηχείου και να παρατηρήσει τη συμπεριφορά του στα πεδία της συχνότητας και του χρόνου. Υπό αυτήν την έννοια, η εφαρμογή μπορεί να αποτελεί χρήσιμο βοήθημα για την καλύτερη κατανόηση των βασικών αρχών που διέπουν τα συστήματα αυτά.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Περιεχόμενα.....	ii
Κατάλογος Εικόνων.....	iv
Κατάλογος Σχημάτων.....	vi
Κατάλογος Πινάκων.....	vii
Εισαγωγή.....	viii
1 Μεγάφωνα - Ηχεία.....	1
1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	1
1.2 Κατηγορίες Μεγαφώνων.....	4
1.3 Δομικά Μέρη Ηλεκτροδυναμικού Μεγαφώνου.....	5
1.4 Αρχές Λειτουργίας Ηλεκτροδυναμικού Μεγαφώνου.....	7
1.5 Ενσωματωμένα Συστήματα Ήχου – Μικροηχεία.....	8
2 Μοντέλα Συμπεριφοράς Μεγαφώνων.....	11
2.1 Παράμετροι Thiele – Small.....	11
2.2 Γραμμικό Μοντέλο.....	15
2.2.1 Ηλεκτρικό Κύκλωμα.....	15
2.2.2 Μηχανικό Κύκλωμα.....	18
2.2.3 Ακουστικό Φορτίο.....	21
2.2.3.1 Τοποθέτηση σε Κλειστό Κουτί.....	23
2.2.3.2 Τοποθέτηση σε Εξαεριζόμενο Κουτί.....	24
2.2.4 Ακουστική Ακτινοβολία και Στάθμη Ακουστικής Πίεσης.....	26
2.2.5 Απόκριση Συχνότητας.....	27
2.2.5.1 Απόκριση Κλειστού Κουτιού.....	28
2.2.5.2 Απόκριση Εξαεριζόμενου Κουτιού.....	32
2.2.6 Αποδοτικότητα.....	33

2.3	Μη Γραμμικό Μοντέλο	35
2.3.1	Ανομοιομορφία Μαγνητικού Πεδίου	35
2.3.2	Ανομοιομορφία Σκληρότητας Ανάρτησης	37
2.3.3	Ανομοιομορφία Αυτεπαγωγής	39
2.3.4	Ανομοιομορφία Μάζας.....	40
2.3.5	Ανομοιομορφία Επιφάνειας Ακουστικής Ακτινοβολίας	40
2.3.6	Μαγνητική Ελκτική Δύναμη.....	41
2.3.7	Συχνотική Παραμόρφωση.....	42
2.3.8	Κατασκευή Μη Γραμμικού Μοντέλου	42
3	MATLAB	44
3.1	Βασικά Χαρακτηριστικά.....	44
3.2	Το Περιβάλλον <i>GUIDE</i>	45
3.3	<i>Simulink</i>	55
4	Σχεδίαση και Υλοποίηση Εφαρμογής	65
4.1	Σχεδίαση Γραφικής Διεπαφής <i>GUIDE</i>	67
4.1.1	Βασικό Παράθυρο της Εφαρμογής.....	68
4.1.2	Παράθυρο Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης <i>Simulink</i>	77
4.2	Σχεδίαση Μοντέλου <i>Simulink</i>	79
4.3	Προγραμματισμός Συμπεριφοράς της Εφαρμογής	84
4.3.1	Εκτέλεση Υπολογισμών – Προσομοίωσης (Πλήκτρο «Εκτέλεση»).....	84
4.3.2	Προγραμματισμός Μπαρών Κύλισης	90
4.3.3	Τερματισμός Εφαρμογής – Κλείσιμο Παραθύρων	95
4.4	Εκτέλεση Εφαρμογής.....	96
4.5	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Εφαρμογής.....	101
5	Συμπεράσματα	109
6	Προοπτικές - Μελλοντικές Βελτιώσεις	110
	Βιβλιογραφία	111

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Οδηγός δημιουργίας παραθύρου	47
Εικόνα 2: Περιβάλλον σχεδίασης νέου παραθύρου του GUIDE	47
Εικόνα 3: Παράθυρο αποθήκευσης εφαρμογής GUIDE	48
Εικόνα 4: Γραμμή εργαλείων διαχείρισης του GUIDE	50
Εικόνα 5: Παράθυρο <i>Align Objects</i> του GUIDE	52
Εικόνα 6: Παράθυρο <i>MenuEditor</i> του GUIDE	52
Εικόνα 7: Παράθυρο <i>Tab Order Editor</i> του GUIDE	53
Εικόνα 8: Παράθυρο <i>Toolbar Editor</i> του GUIDE	53
Εικόνα 9: Παράθυρο <i>Object Browser</i> του GUIDE	53
Εικόνα 10: Παράθυρο <i>Editor</i> του GUIDE	54
Εικόνα 11: Παράθυρο <i>Property Inspector</i> του GUIDE	54
Εικόνα 12: Παράθυρο <i>Library Browser</i> του <i>Simulink</i>	56
Εικόνα 13: Παράθυρο με τα <i>blocks</i> της κατηγορίας <i>Continuous</i> και αρχείο προσομοίωσης	57
Εικόνα 14: Παράδειγμα μοντέλου <i>Simulink</i> με διάφορα συνδεδεμένα <i>blocks</i>	61
Εικόνα 15: Παράθυρο ρύθμισης παραμέτρων του <i>blockTransferFcn</i>	61
Εικόνα 16: Καρτέλα <i>Solver</i> του παραθύρου ρύθμισης παραμέτρων προσομοίωσης.....	62
Εικόνα 17: Καρτέλα <i>DataImport/Export</i> του παραθύρου ρύθμισης παραμέτρων προσομοίωσης.....	63
Εικόνα 18: Το κεντρικό παράθυρο της εφαρμογής, όπως φαίνεται στο GUIDE του Matlab. Τα τμήματα του παραθύρου εμφανίζονται με κόκκινη σήμανση	69
Εικόνα 19: Το βασικό παράθυρο (<i>electrodynamicMicrospeaker.fig</i>) κατά τον χρόνο εκτέλεσης	76
Εικόνα 20: Παράθυρο αποτελεσμάτων προσομοίωσης <i>Simulink</i> στο πεδίο του χρόνου και στη συχνότητα συντονισμού του μικροηχείου	79
Εικόνα 21: Μοντέλο <i>Simulink</i> για την προσομοίωση του γραμμικού μοντέλου του ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου.....	80
Εικόνα 22: Αρχική οθόνη εφαρμογής	97
Εικόνα 23: Μπάρα προόδου εργασιών	98
Εικόνα 24: Αποτελέσματα εκτέλεσης με ενεργοποιημένο το πλαίσιο «Πεδίο χρόνου»	98
Εικόνα 25: Αποτελέσματα εκτέλεσης στο πεδίο της συχνότητας.....	99
Εικόνα 26: Το πλαίσιο υπολογισμού των βασικών <i>T/S</i> παραμέτρων και μερικών επιπλέον χαρακτηριστικών παραμέτρων του μικροηχείου.....	100
Εικόνα 27: Τερματισμός εφαρμογής	101
Εικόνα 28: Γραφική παράσταση πλάτους συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης στο πεδίο των συχνοτήτων	104
Εικόνα 29: Γραφική παράσταση πλάτους συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης στο πεδίο του χρόνου.....	105

<i>Εικόνα 30: Γραφική παράσταση φάσης συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης στο πεδίο του χρόνου</i>	<i>105</i>
<i>Εικόνα 31: Γραφική παράσταση στάθμης ακουστικής πίεσης στο πεδίο των συχνοτήτων</i>	<i>106</i>
<i>Εικόνα 32: Γραφική παράσταση μετατόπισης στο πεδίο των συχνοτήτων</i>	<i>107</i>
<i>Εικόνα 33: Γραφική παράσταση μετατόπισης στο πεδίο του χρόνου</i>	<i>107</i>
<i>Εικόνα 34: Γραφική παράσταση ταχύτητας μετατόπισης στο πεδίο των συχνοτήτων</i>	<i>108</i>
<i>Εικόνα 35: Γραφική παράσταση ταχύτητας μετατόπισης στο πεδίο του χρόνου</i>	<i>108</i>

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Δομικά μέρη ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου (Bright, 2002).....	7
Σχήμα 2: Τα βασικά μέρη ενός ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου (Bright, 2002).....	9
Σχήμα 3: Απλοποιημένο μοντέλο με τα ηλεκτρικά στοιχεία ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου (Bright, 2002).....	16
Σχήμα 4: Αναπαράσταση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου (Bright, 2002).....	19
Σχήμα 5: Ηλεκτρομηχανικό κύκλωμα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου.....	20
Σχήμα 6: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για το ηλεκτρομηχανικό κύκλωμα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου.....	21
Σχήμα 7: Συνολικό ηλεκτρο-μηχανο-ακουστικό κύκλωμα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου.....	22
Σχήμα 8: Τοποθέτηση μεγαφώνου σε κλειστό κουτί (Bright, 2002).....	24
Σχήμα 9: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μεγαφώνου τοποθετημένο σε κλειστό κουτί.....	24
Σχήμα 10: Τοποθέτηση μεγαφώνου σε αεριζόμενο κουτί (Bright, 2002).....	25
Σχήμα 11: Τιμές της $\varphi(x_a)$ σε σχέση με την μετατόπιση του συστήματος πηνίο φωνής-διάφραγμα σε ένα τυπικό μικροηχείο (Bright, 2002).....	37
Σχήμα 12: Τιμές της $k(x_a)$ σε σχέση με την μετατόπιση του συστήματος πηνίο φωνής-διάφραγμα σε ένα τυπικό μικροηχείο (Bright, 2002).....	38

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Εξέλιξη των συστημάτων παραγωγής ήχου (ηχείων).....	1
Πίνακας 2: Θεμελιώδεις ηλεκτρομηχανικές παράμετροι μεγαφώνου.....	12
Πίνακας 3: Σύγκριση παραμέτρων και αποδοτικότητας ενός τυπικού μικροηχείου και ενός ηχείου 6,5 ιντσών (Pedersen, 2012)	35
Πίνακας 4: Στοιχεία ελέγχου της εργαλειοθήκης του GUIDE	48
Πίνακας 5: Στοιχεία γραμμής εργαλείων διαχείρισης του GUIDE.....	50
Πίνακας 6: Βασικές κατηγορίες διαγραμμάτων (blocks) του Simulink.....	57
Πίνακας 7: Χειριστήρια του βασικού παραθύρου <i>electrodynamicMicrospeaker.fig</i>	69
Πίνακας 8: <i>BlocksSimulink</i> για το γραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς μικροηχείου	81
Πίνακας 9: Προκαθορισμένες τιμές ηλεκτρομηχανικών παραμέτρων μικροηχείου	102

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η αγορά των κινητών τηλεφώνων και των φορητών συσκευών έχει αναπτυχθεί με εντυπωσιακή ταχύτητα, αποτελώντας ένα από τα κύρια πεδία της τεχνολογικής ανάπτυξης και της βιομηχανικής δραστηριότητας. Τεράστια πρόοδος έχει σημειωθεί όσον αφορά στις οθόνες αφής, στις γραφικές διεπαφές και γενικότερα στην αλληλεπίδραση με τον χρήστη, ωστόσο, αρκετοί κατασκευαστές θεωρούν ότι έχουν πλέον πλησιάσει το επίπεδο όπου η περαιτέρω βελτίωσή τους δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι (Hermann, 2010). Στον αγώνα για τη βελτίωση και την ανάπτυξη νέων λειτουργιών που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αγορά νέων μοντέλων τηλεφώνων και φορητών συσκευών, η έμφαση δίνεται πλέον στην βελτίωση της ποιότητας του ήχου και στα ενσωματωμένα μικροηχεία.

Ο σχεδιασμός των μεγαφώνων – ηχείων χρονολογείται από την εφεύρεση του τηλεφώνου, σχεδόν 150 χρόνια πριν, ωστόσο η βασική αρχή παραμένει η ίδια. Το μεγάφωνο είναι ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα, όπου καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται μέσα από ένα πηνίο, το οποίο είναι τοποθετημένο μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, δημιουργεί μια δύναμη η οποία κινεί μια μεμβράνη, προκαλώντας έτσι την κίνηση του αέρα που βρίσκεται γύρω από αυτή, παράγοντας ήχο. Η ακριβής δυναμική του συστήματος είναι αρκετά περίπλοκη, καθώς στο σύστημα υπάρχουν πολλές παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία του. Μάλιστα, οι παράμετροι αυτές παρουσιάζουν διάφορες ανομοιομορφίες, εξαρτώνται από τον χρόνο, ενώ συχνά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, καθιστώντας πιο πολύπλοκη τη μελέτη και πιο δύσκολη την κατανόηση του ακριβή τρόπου λειτουργίας του συστήματος. Στην προσπάθεια μίας πιο ολοκληρωμένης ερμηνείας και κατανόησης της δυναμικής του συστήματος, έχουν κατασκευαστεί πολλά μαθηματικά μοντέλα τα οποία προσεγγίζουν τη λειτουργία των μεγαφώνων – μικροηχείων, αν και τις περισσότερες εφαρμογές θεωρείται αρκετή η προσέγγιση με την χρήση των απλούστερων γραμμικών μοντέλων συμπεριφοράς.

Στη συνέχεια ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή της δομής της εργασίας.

Στην πρώτη και στη δεύτερη ενότητα παρουσιάζεται το βασικό θεωρητικό πλαίσιο της εργασίας, ενώ στις επόμενες ενότητες ακολουθεί το πρακτικό μέρος της εργασίας.

Στην πρώτη ενότητα αρχικά γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά δομικά μέρη και οι αρχές λειτουργίας των ηλεκτροδυναμικών μεγαφώνων, εστιάζοντας στην κατηγορία των ενσωματωμένων συστημάτων ήχου - μικροηχείων.

Στη δεύτερη ενότητα γίνεται αναφορά στις βασικές ηλεκτρομηχανικές παραμέτρους του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου, καθώς και στις παραμέτρους Thiele–Small. Ύστερα, παρουσιάζονται αναλυτικά οι βασικές αρχές λειτουργίας, όπου αναλύονται αφενός το κλασσικό γραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς του τυπικού ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου, αφετέρου οι ανομοιομορφίες των παραμέτρων του γραμμικού μοντέλου, οι οποίες εξηγούν τους λόγους κατασκευής μη γραμμικών μοντέλων συμπεριφοράς.

Στην τρίτη ενότητα γίνεται αναφορά στο Matlab και παρουσιάζονται συνοπτικά το περιβάλλον δημιουργίας γραφικών διεπαφών GUIDE και το περιβάλλον κατασκευής μοντέλων και εκτέλεσης προσομοιώσεων Simulink του Matlab. Τα εργαλεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση και την ανάπτυξη εφαρμογής που αφορά το γραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς του ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου, η οποία παρουσιάζεται στην Ενότητα 4.

Στην τέταρτη ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικά η σχεδίαση και η ανάπτυξη της εφαρμογής που αφορά το πρακτικό μέρος της παρούσας εργασίας. Η γραφική διεπαφή της εφαρμογής σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε με το GUIDE, ενώ η σχεδίαση του γραμμικού μοντέλου συμπεριφοράς του μικροηχείου έγινε με το Simulink. Επίσης, παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα εκτέλεσης και της εφαρμογής και ο τρόπος λειτουργίας της, ενώ γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που παράγει. Οι καινοτομίες της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι α) η διαφανής επικοινωνία της γραφικής διεπαφής GUIDE με το αντίστοιχο μοντέλο

Simulinkτης εφαρμογής και β) ηδυνατότητα που δίνεται στον χρήστη να επιλέξει τη μελέτη της συμπεριφοράς του μικροηχείου είτε στο πεδίο της συχνότητας είτε στο πεδίο του χρόνου ή και στα δύο πεδία μαζί.

Στην πέμπτη ενότητα παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και στην έκτη ενότητα παρουσιάζονται οι προοπτικές – μελλοντικές βελτιώσεις της παρούσας εργασίας και εφαρμογής.

1 Μεγάφωνα - Ηχεία

Στην ενότητα αυτή αρχικά γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή και στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικοί βασικοί ορισμοί, καθώς και τα βασικά μέρη και ο τρόπος λειτουργίας ενός μεγαφώνου – ηχείου, εστιάζοντας στα ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα. Τέλος, γίνεται αναφορά στα μικροηχεία.

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ιστορία του μεγαφώνου ξεκινά στα τέλη του 19^{ου} αιώνα παράλληλα με τις μεγάλες εφευρέσεις και επιστημονικές ανακαλύψεις εκείνης της εποχής. Το μεγάφωνο είναι η βασική συσκευή για την παραγωγή του ήχου με ηλεκτρικό σύστημα. Πρώτα, όμως, πρέπει να αναφερθεί ο ορισμός του ήχου:

«Ο ήχος ορίζεται ως μηχανική διαταραχή που διαδίδεται με ορισμένη ταχύτητα μέσα σε ένα μέσο που μπορεί να αναπτύξει εσωτερικές δυνάμεις (για παράδειγμα, ελαστικότητας, εσωτερικής τριβής κ.ο.κ) και έχει τέτοιο χαρακτήρα ώστε να διεγείρει το αισθητήριο ακοής και να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα» (Σκαρλάτος, 2008).

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 1) καταγράφονται σε χρονολογική σειρά οι σημαντικότερες ανακαλύψεις – εξελίξεις, σχετικά με τα ηχεία (Πετρίδης, 1974).

Πίνακας 1: Εξέλιξη των συστημάτων παραγωγής ήχου (ηχείων)

Χρονολογία	Εφευρέσεις/Βελτιώσεις	Εφευρέτες
1874	Περιγραφή της «δυναμική» της συσκευής παραγωγής ήχου με κινούμενο πηνίο	Ernst Werner von Siemens
1876	Κατασκευή του πρώτου ηλεκτρικού μεγαφώνου, βασισμένο στην ηχητική μετάδοση μέσω ενός μετατροπέα κινούμενου πηνίου.	Alexander Graham Bell

1908	Βελτίωση του μεγαφώνου κινούμενου πηνίου, χρησιμοποιώντας την λεγόμενη «αράχνη» (spider), προκειμένου το πηνίο φωνής να είναι ευθυγραμμισμένο και να συγκρατείται στη σωστή θέση.	Anton Pollak
1911	Κατασκευή του μεγαφώνου κινητού πηνίου με την ονομασία «Nagnavox».	Edwin S. Pridham & Peter L. Jensen
1916	Κατασκευή του πρώτουμόνιμου μαγνήτη υψηλής αντοχής.	Kataro Honda
1921	Κατασκευή του «Phonotron», του πρώτου μεγαφώνου πηνίου με απευθείας μετάδοση ήχου σε σχέση με τα μεγάφωνα τύπου χοάνης.	ClairLoringFarrand
1924	Κατασκευή ενός ευρέως φάσματος μεγαφώνου άμεσης ακτινοβολίας. Το μεγάφωνο διαθέτει πιο ευέλικτη ανάρτηση, η οποία συνδυάζεται με μια «αράχνη» για το σωστό κεντράρισμα – ευθυγράμμιση με το πηνίο φωνής.	Edward W. Kellogg & Chester W. Rice
1925	Κατασκευή μεγαφώνου άμεσης ακτινοβολίας με διάφραγμα ελεγχόμενης μάζας, το οποίο	Edward W. Kellogg & Chester W. Rice

	οδηγείται από ένα μικρό πηνίο που στηρίζεται πάνω σε μπάφλα.	
1928	Κατασκευή ομοαξονικού μεγαφώνου.	Herman I. Ferman
1929	Κατασκευή ηλεκτροστατικού μεγαφώνου.	E.W.Kellogg
1930	Περιγραφή της αρχής λειτουργίας ανάκλασης χαμηλών συχνοτήτων (bass- reflex).	Albert L. Thuras
1941	Περιγραφή του μαθηματικού σχεδιασμού κυκλωμάτων crossover.	John Hilliard
1948	Ανάλυση των αιτιών ηλεκτροακουστικής μετατόπισης φάσης στα ηχεία.	C.A. Ewaskio
1952	Εφαρμογή των ηλεκτρικών κυκλωμάτων για την επίλυση των μηχανικών προβλημάτων του μεγαφώνου.	Bartholomew N. Locanthi II
1957	Κατασκευή του πρώτου ευρέως φάσματος ηλεκτροστατικού ηχείου, με την ονομασία «QuadESL».	Peter J. Walker & D. Williamson
1982	Κατασκευή του ηχητικού συστήματος «THX». Το «THX»είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα αναπαραγωγής ήχου με	GeorgeLucas&TomlinsonHolman

	υψηλές και αυστηρές προδιαγραφές.	
--	-----------------------------------	--

1.2 Κατηγορίες Μεγαφώνων

Το μεγάφωνο λαμβάνει στην είσοδό του την ηχητική πληροφορία με την μορφή ηλεκτρικών ταλαντώσεων, τις οποίες μετατρέπει σε μηχανικές και στην συνέχεια τις εκπέμπει στο χώρο - αέρα. Οι μηχανικές αυτές ταλαντώσεις μεταφέρονται μέσω του αέρα με την μορφή ηχητικών κυμάτων και έτσι γίνονται αντιληπτές από τα αισθητήρια της ακοής.

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι μεγαφώνων, οι οποίοι διαχωρίζονται βάση της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται στον μηχανισμό τους (Σηφάκης, 2004):

- 1. Ηλεκτροδυναμικά:** Σε αυτό τον τύπο μεγαφώνου η διάταξη μετατροπής του ηλεκτρικού σήματος εισόδου σε μηχανική ταλάντωση βασίζεται σε ένα πηνίο το οποίο περιστρέφεται εντός του μαγνητικού πεδίου ενός ισχυρού μαγνήτη. Καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει το πηνίο, αυτό περιστρέφεται ομαλά. Ως αποτέλεσμα της κίνησης αυτής του πηνίου το κατάλληλα συνδεδεμένο διάφραγμα ταλαντώνεται και εκπέμπει ηχητική ακτινοβολία.
- 2. Ηλεκτρομαγνητικά ή τύπου ταινίας:** Στα μεγάφωνα αυτά χρησιμοποιείται ένα έλασμα από μαλακό μέταλλο αντί πηνίου. Το έλασμα αυτό είναι συνδεδεμένο με το διάφραγμα του μεγαφώνου και μπορεί να κινείται ελεύθερα εντός του μαγνητικού πεδίου ισχυρού ηλεκτρομαγνήτη ο οποίος διαρρέεται από το ηλεκτρικό ρεύμα εισόδου. Η κίνηση του ελάσματος προκαλείται από δύο αγώγιμα πλέγματα τοποθετημένα στις πλευρές του. Η κίνηση του διαφράγματος εκπέμπει την ηχητική ακτινοβολία.
- 3. Μεμβράνης:** Η ανάγκη για μείωση του όγκου των ηχείων οδήγησε στην ανάπτυξη του εν λόγω τύπου μεγαφώνων. Τα συγκεκριμένα μεγάφωνα αποτελούνται από μια εύκαμπτη μεμβράνη και η λειτουργία τους βασίζεται στην εκμετάλλευση των στάσιμων κυμάτων που αναπτύσσονται σε δονούμενες επιφάνειες. Ο ήχος αναπαράγεται με την πρόκληση

δονήσεων από έναν ειδικό ηλεκτρικό διεγέρτη στην επιφάνεια της μεμβράνης – διαφράγματος.

Στο υπόλοιπο της εργασίας μας θα ασχοληθούμε με τα ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα, καθώς είναι τα πιο διαδεδομένα και χρησιμοποιούνται ευρέως και στα ενσωματωμένα συστήματα ήχου.

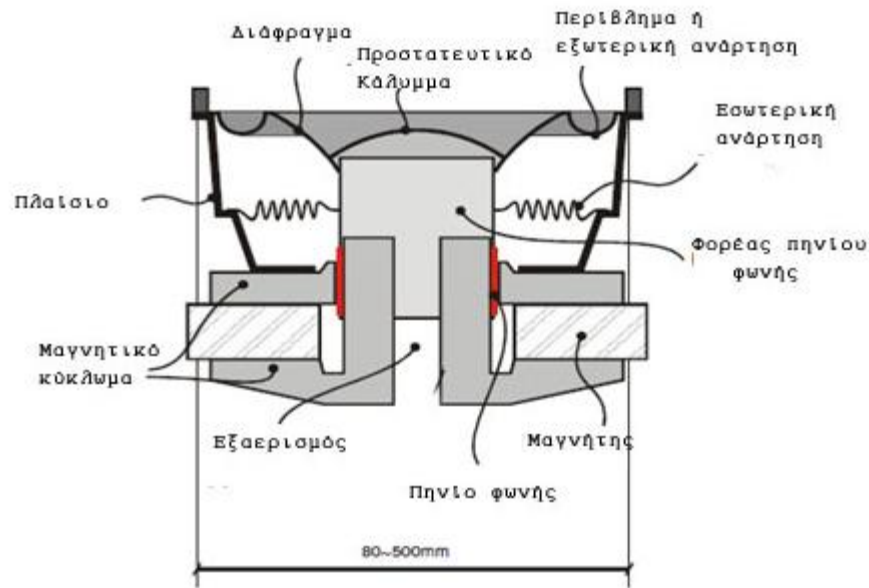
1.3 Δομικά Μέρη Ηλεκτροδυναμικού Μεγαφώνου

Τα βασικά δομικά μέρη ενός τυπικού ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου χαμηλών συχνοτήτων φαίνονται στο Σχήμα 1. Πιο συγκεκριμένα, τα μέρη αυτά είναι:

- **Διάφραγμα (ή κώνος):** Το διάφραγμα, συνήθως υλοποιείται από έναν ειδικά σχεδιασμένο κώνο από κατάλληλο υλικό, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κίνηση, ενώ διαθέτει σχετικά μικρή μάζα και καλή απόσβεση για τον έλεγχο των ταλαντώσεων. Ο ρόλος του διαφράγματος είναι να μετατρέπει τη μηχανική κίνηση που παράγει το μεγάφωνο σε ηχητικά κύματα.
- **Προστατευτικό κάλυμμα:** Αποτελεί τμήμα του διαφράγματος και τοποθετείται ακριβώς πάνω από το φορέα του πηνίου. Αυξάνει την αποτελεσματική περιοχή ακτινοβολίας του μεγαφώνου, ενώ παράλληλα προστατεύει το εσωτερικό του μεγαφώνου από την είσοδο σκόνης και άλλων ξένων σωμάτων.
- **Ανάρτηση (ή εσωτερική ανάρτηση ή «αράχνη»):** Η ανάρτηση συνδέει τον φορέα του πηνίου με το πλαίσιο, παρέχοντας την κύρια δύναμη επαναφοράς στη θέση ισορροπίας του διαφράγματος (Dickason, 2006).
- **Περίβλημα (ή εξωτερική ανάρτηση):** Το περίβλημα είναι κατασκευασμένο από ελαστικό υλικό (λχ καουτσούκ, αφρώδες υλικό ή ύφασμα) και ο σκοπός του είναι να διατηρεί το διάφραγμα σταθερό στο κέντρο του μεγαφώνου, παρέχοντας επιπλέον και μέρος της δύναμης επαναφοράς, η οποία συγκρατεί το πηνίο γύρω από τον φορέα του. Επίσης, εμποδίζει την κίνηση του αέρα από το πίσω μέρος του διαφράγματος προς τα εμπρός. Επειδή το περίβλημα συνδέεται με το διάφραγμα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ταλαντώνεται με την ίδια συχνότητα και να λειτουργεί ως προέκταση του διαφράγματος,

συμβάλλοντας έτσι ένα μικρό ποσοστό της συνολικής ηχητικής ακτινοβολίας του μεγαφώνου(Dickason, 2006).

- **Πλαίσιο στήριξης:** Χρησιμοποιείται για τη στήριξη των μηχανικών μερών του μεγαφώνου στο φορέα του πηνίου. Πιο συγκεκριμένα, το περίβλημα στηρίζεται στην επάνω μεριά του φορέα του πηνίου, η εσωτερική ανάρτηση στηρίζεται στα πλάγια και στη μέση, ενώ στην πίσω μεριά στηρίζεται ο μαγνήτης.
- **Φορέας πηνίου:** Είναι ένας μεταλλικός κυλινδρικός πύρος, γύρω από τον οποίο είναι τυλιγμένο το κινούμενο πηνίο, το οποίο συνδέεται με το διάφραγμα. Συνήθως κατασκευάζεται από αγώγιμα υλικά, ώστε να μην παρεμποδίζουν το μαγνητικό πεδίο.
- **Μαγνήτης:** Είναι ένας μόνιμος μαγνήτης, τοποθετημένος μέσα σε μία δομή μαλακού σιδήρου (μαγνητικό κύκλωμα), οδηγώντας και συγκεντρώνοντας τη μαγνητική ροή στο διάκενο του μαγνήτη.
- **Πηνίο φωνής:** Το πηνίο φωνής είναι τυλιγμένο και στερεωμένο με ειδική θερμοανθεκτική κόλλα γύρω από το φορέα και είναι τοποθετημένο με ακρίβεια στο κέντρο του διάκενου του μαγνητικού πεδίου. Εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου, το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο προκαλεί την εμφάνιση δύναμης Laplace, η οποία με τη σειρά της προκαλεί τη μετατόπιση του πηνίου φωνής.
- **Εξαερισμός:** Στο πίσω μέρος του μεγαφώνου υπάρχει τρύπα ώστε να παρέχεται ο κατάλληλος εξαερισμός του συστήματος.



Σχήμα 1: Δομικά μέρη ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου (Bright, 2002)

1.4 Αρχές Λειτουργίας Ηλεκτροδυναμικού Μεγαφώνου

Τα ηχεία (μεγάφωνα) βρίσκονται ανάμεσα στην ηλεκτρική και την ακουστική ενέργεια, γεγονός που σημαίνει ότι στην είσοδο τους θα λαμβάνουν διάφορες τάσεις, τις οποίες καλούνται να μετατρέψουν σε ηχητικά κύματα ανάλογης συχνότητας και έντασης, δηλαδή σε διάφορες πιέσεις του αέρα. Με εξαίρεση κάποιους τύπους ηχείων που βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο (λχ. τα ηχεία ιονισμού) και ανεξάρτητα από τη μέθοδο μετατροπής που χρησιμοποιούν, όλες οι υλοποιήσεις βασίζονται τη λειτουργία τους σε κάποιο είδος επιφάνειας (διάφραγμα) που πάλλεται, σπρώχνοντας και ασκώντας πίεση στη μάζα του αέρα που βρίσκεται σε επαφή μαζί της και θέτοντας τα σωματίδια της σε ταλάντωση. Η ταλάντωση αυτή θα γεννήσει τα ηχητικά κύματα, που πρέπει να φέρουν και να μεταφέρουν όλα τα ηχητικά χαρακτηριστικά (συχνότητα, πλάτος και άλλα) που υπήρχαν και στο ηλεκτρικό σήμα.

Ωστόσο, τα ηχητικά κύματα έχουν διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με τη συχνότητα τους. Πιο συγκεκριμένα, οι υψηλές συχνότητες επιβάλλουν την ταχύτερη και ακριβέστατη κίνηση του διαφράγματος και τα στοιχεία του μεγαφώνου θερμαίνονται έντονα εξαιτίας των μεγάλων επιταχύνσεων που αναπτύσσονται.

Αυτά όμως τα ζητήματα λύνονται σχετικά εύκολα, ειδικά αν τα αντιμετωπίσουμε ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα.

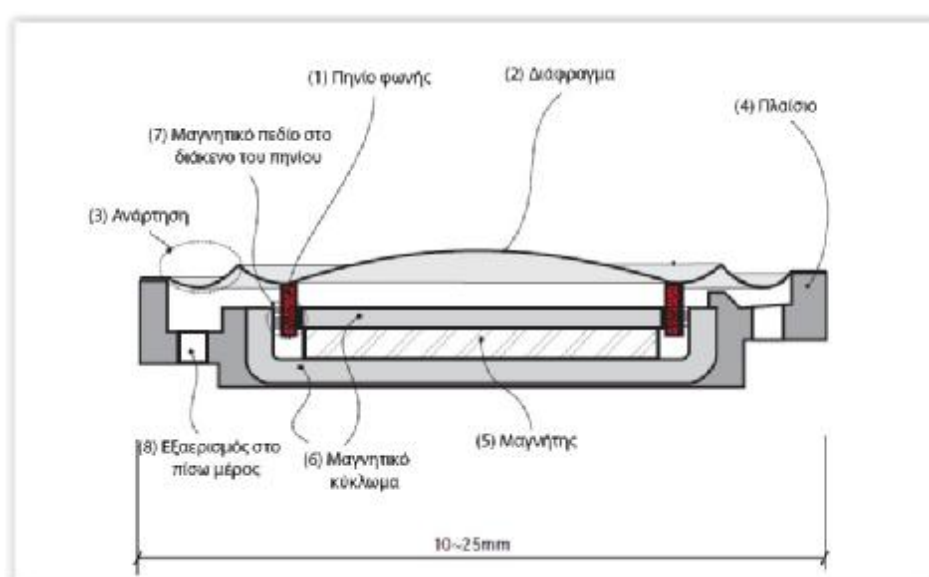
Η φυσική ωστόσο αναφέρει ότι όσο πιο μεγάλο είναι το μήκος κύματος της συχνότητας που θέλουμε να δημιουργήσουμε (χαμηλές συχνότητες), τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η διάμετρος της παλλόμενης επιφάνειας. Έτσι, μεγάλα διαφράγματα συνεπάγονται και μεγάλες μάζες κάτι που σημαίνει ότι αυξάνεται η αδράνεια του μεγάφωνου. Έτσι το διάφραγμα εμφανίζει αυξημένη αδράνεια και μειωμένη ευαισθησία, ενώ απαιτεί και πολύ μεγαλύτερα ποσά ισχύος για να μετακινηθεί. Επίσης, η ένταση των χαμηλών συχνοτήτων είναι συνυφασμένη με τη ποσότητα του αέρα που μπορεί να μετακινήσει το διάφραγμα. Δεν είναι, συνεπώς, παράξενο το γεγονός ότι τα ηχεία είναι ένας μετατροπέας πολύ χαμηλής απόδοσης (μετατρέπουν σε ήχο το 1% - 5% και στις καλύτερες περιπτώσεις έως 20% της ισχύος που λαμβάνουν) ούτε το ότι αναγκαζόμαστε να καταφεύγουμε στη σχεδίαση μονάδων δύο ή περισσότερων δρόμων, όπου χωριστά διαφράγματα αναλαμβάνουν την αναπαραγωγή διαφορετικών περιοχών συχνοτήτων. Η τακτική πάντως αυτή επιβάλλει την χρήση δικτυωμάτων διαχωρισμού συχνοτήτων τα λεγόμενα crossover, τα οποία ευθύνονται για πολλές από τις ηχητικές αλλοιώσεις που προκαλούν τα ηχεία ειδικά σε μονάδες χαμηλού κόστους.

Όλα αυτά συνθέτουν μια εξαιρετικά πολύπλοκη εξίσωση και οι προτάσεις που κατακλύζουν την αγορά μπορούν να ικανοποιήσουν κάθε μας απαίτηση σε παρεχόμενη ποιότητα, κόστος και εφαρμογή (Gordon, 1982).

1.5 Ενσωματωμένα Συστήματα Ήχου – Μικροηχεία

Τα μικροηχεία είναι μικρά, λεπτά ηχεία που μοιάζουν με ακουστικά ή τηλεφωνικούς δέκτες που χρησιμοποιούνται σε φορητές συσκευές για την παραγωγή ήχων προειδοποίησης, για την ομιλία και για hands-free τηλεφωνία. Το μικροηχείο φτιάχνεται από τα ίδια βασικά στοιχεία, όπως τα συνηθισμένα ηλεκτροδυναμικά μεγάφωνα, όμως διαφέρουν κυρίως στο μέγεθος και στο σχήμα. Μάλιστα, τα σύγχρονα μικροηχεία βασίζονται στην ηλεκτροδυναμική αρχή και χρησιμοποιούνται χωρίς επιπλέον υπογούφερ.

Τα βασικά στοιχεία ενός λεπτού ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου ή μικροηχείου φαίνονται στο Σχήμα 2. Πιο συγκεκριμένα, το πηνίο φωνής (1), συνδέεται σε ένα διάφραγμα (2), που στηρίζεται σε ένα σταθερό πλαίσιο (4) μέσω μιας ανάρτησης (3). Ένα μαγνητικό πεδίο παράγεται από έναν μόνιμο μαγνήτη (5), το οποίο καθοδηγείται στην περιοχή του πηνίου μέσω ενός μαγνητικού κυκλώματος (6). Αυτό δημιουργεί ένα πυκνό μαγνητικό πεδίο στην περιοχή του διάκενου στο πηνίο (7). Τρύπες στο πίσω μέρος του πλαισίου (8) παρέχουν εξαερισμό στο πίσω μέρος της συσκευασίας του μικροηχείου (Bright, 2002).



Σχήμα 2: Τα βασικά μέρη ενός ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου (Bright, 2002).

Σύμφωνα με τους νόμους της κλασικής ηλεκτροδυναμικής, λόγω της παρουσίας του μαγνητικού πεδίου, το ηλεκτρικό ρεύμα που διέρχεται μέσα από το πηνίο φωνής θα δημιουργήσει μια δύναμη $Laplace_f$, η οποία με τη σειρά της θα προκαλέσει τη μετατόπιση του συστήματος πηνίο – διάφραγμα κατά x_d .

Ωστόσο, παρατηρώντας τα σχήματα του τυπικού μεγαφώνου (Σχήμα 1) και του μικροηχείου (Σχήμα 2), εντοπίζονται μερικές βασικές διαφορές που πρέπει να αναφέρουμε. Πιο συγκεκριμένα:

1. Στο τυπικό μεγάφωνο το πηνίο φωνής είναι τυλιγμένο γύρω από ένα φορέα, ο οποίος έχει μια μηχανική σύνδεση με το διάφραγμα. Μάλιστα, το διάφραγμα αποτελείται από δύο μέρη, την εξωτερική μεμβράνη (διάφραγμα) και το

προστατευτικό κάλυμμα, το οποίο τοποθετείται πάνω από το φορέα του πηνίου. Στο μικροηχείο δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο.

2. Επίσης, στο τυπικό μεγάφωνο χρησιμοποιούνται δύο αναρτήσεις: (α) η εξωτερική ανάρτηση (ή περίβλημα), η οποία συνδέει το διάφραγμα με το πλαίσιο στήριξης και (β) η εσωτερική ανάρτηση (ή αράχνη) που συνδέει το φορέα του πηνίου με το πλαίσιο στήριξης. Αυτό το ζεύγος των αναρτήσεων δημιουργεί μια ισχυρή ακαμψία ενάντια στους κραδασμούς και στις ταλαντώσεις του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής. Η απουσία της δεύτερης ανάρτησης (αράχνης) στα μικροηχεία, καθιστά τα μικροηχεία ιδιαίτερα ευαίσθητα σε αυτό το πρόβλημα. Συνεπώς, η ανάρτηση του μικροηχείου παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από ότι αυτή του τυπικού μεγαφώνου.

2 Μοντέλα Συμπεριφοράς Μεγαφώνων

Ένα ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο αποτελείται από το ηλεκτρικό τμήμα, το μηχανικό τμήμα (μέρος του οποίου θεωρείται και το ακουστικό φορτίο) και τον ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα. Στην ενότητα αυτή αρχικά θα παρουσιαστούν οι βασικές ηλεκτρομηχανικές παράμετροι του ηλεκτροδυναμικού μεγάφωνου, καθώς και οι παράμετροι Thiele–Small. Ακολούθως, θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι βασικές αρχές της φυσικής που σχετίζονται με τα τμήματα των μεγαφώνων. Επίσης, θα γίνει παρουσίαση αφενός του κλασσικού γραμμικού μοντέλου συμπεριφοράς ενός τυπικού ηλεκτροδυναμικού μεγάφωνου, αφετέρου θα παρουσιαστούν οι διάφορες ανομοιομορφίες που παρουσιάζουν οι παράμετροι του γραμμικού μοντέλου και οι οποίες εξηγούν τους λόγους κατασκευής μη γραμμικών μοντέλων συμπεριφοράς, που αφορούν άμεσα και τα μικροηχεία.

2.1 Παράμετροι Thiele–Small

Ο όρος «Thiele – Small» ή «T/S» αναφέρεται σε ένα σύνολο ηλεκτρομηχανικών παραμέτρων, οι οποίες καθορίζουν τις επιδόσεις ενός μεγαφώνου – ηχείου στις χαμηλές συχνότητες. Οι Thiele(1971) και Small(1973) ήταν οι πρώτοι που υιοθέτησαν τις παραμέτρους αυτές για την ανάλυση και την περιγραφή της συμπεριφοράς μεγαφώνων. Πλέον, όλοι οι κατασκευαστές ενσωματώνουν τις τιμές των παραμέτρων «T/S» στις προδιαγραφές των μεγαφώνων που κατασκευάζουν.

Η γνώση των παραμέτρων «T/S» είναι πολύ σημαντική για τους σχεδιαστές μεγαφώνων, οι οποίοι χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους αυτές μπορούν να προσομοιώσουν και να μελετήσουν τα στοιχεία που συνθέτουν τη συμπεριφορά ενός μεγαφώνου τοποθετημένο σε κλειστό κουτί, όπως είναι η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση του κώνου, η εμπέδηση εισόδου (συνολική ηλεκτρομηχανο-ακουστική εμπέδηση) και η ακουστική έξοδος. Ωστόσο, πολλές από τις παραμέτρους «T/S» ορίζονται αυστηρά για τη συχνότητα μηχανικού συντονισμού του μεγαφώνου, όπου η κίνηση του διαφράγματος είναι καθαρά «πιστονική»,

δηλαδή ο κώνος ταλαντώνεται ομοιογενώς χωρίς να εισάγονται παραμορφώσεις (Small, 1973). Το γεγονός αυτό περιορίζει το συχνοτικό εύρος αναφοράς των παραμέτρων «T/S».

Για τον υπολογισμό των τιμών των παραμέτρων «T/S» πρέπει να είναι γνωστές οι τιμές των θεμελιωδών ηλεκτρομηχανικών παραμέτρων του μεγαφώνου. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2) καταγράφονται οι παράμετροι αυτοί (Thiele, 1971).

Πίνακας 2: Θεμελιώδεις ηλεκτρομηχανικές παράμετροι μεγαφώνου

Παράμετρος	Σύντομη Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
S_d	Είναι η ενεργός επιφάνεια του διαφράγματος, που ακτινοβολεί ηχητική ενέργεια.	m^2
M_{ms}	Είναι η συνολική μάζα του συστήματος διάφραγμα – πηνίο συμπεριλαμβανομένου και του ακουστικού φορτίου, δηλαδή της μάζας αέρα που παγιδεύει και «σπρώχνει» ο κώνος.	kg
C_{ms}	Είναι η ενδοτικότητα της ανάρτησης του κώνου και ισούται με το αντίστροφο της σκληρότητας της ανάρτησης.	m/N
R_{ms}	Είναι η μηχανική αντίσταση της ανάρτησης και εκφράζει τις απώλειες λόγω τριβής. Επηρεάζεται από την τοπολογία της ανάρτησης, τα υλικά και από το υλικό του πηνίου φωνής.	$N \cdot s/m$
R_e	Είναι η ωμική αντίσταση του πηνίου.	Ohm
L_e	Είναι η αυτεπαγωγή του πηνίου φωνής.	mH
Bl	Είναι το γινόμενο της μαγνητικής επαγωγής επί το μήκος του πηνίου φωνής. Χαρακτηρίζεται και ως	T·m

	συντελεστής δύναμης ή συντελεστής μεταγωγής και εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και το υλικό του και του πηνίου φωνής.	
--	--	--

Οι βασικότερες παράμετροι «T/S» είναι οι εξής:

- **Συχνότητα μηχανικού συντονισμού** f_s , που μετράται σε Hertz (Hz). Είναι η συχνότητα για την οποία μεγιστοποιείται η μηχανική ενέργεια του συστήματος, που περιλαμβάνει την ανάρτηση και την κινούμενη μάζα και ο κώνος αποκτά τη μέγιστη ταχύτητα. Πρακτικά, η f_s καθορίζει το κάτω όριο των συχνοτήτων που μπορεί να αναπαράγει ικανοποιητικά ένα ηχείο, ενώ σήματα με πολύ μικρότερες συχνότητες από την f_s ενδέχεται να το καταστρέψουν.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα woofers έχουν περίπου 13 – 60Hz, τα τυπικά ηχεία έχουν f_s 60 – 500Hz, τα tweeters 500 – 4Hz, ενώ τα τυπικά μικροηχεία έχουν f_s από 800 – 1000Hz. Επιπλέον, οι εργοστασιακές προδιαγραφές της f_s για τα ηχεία έχουν αποδεκτή απόκλιση ως 15%, ενώ για τα μικροηχεία ως 10% (Wikipedia, 2015). Για τον υπολογισμό της f_s χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{ms}M_{ms}}} \text{ (Εξίσωση 1)}$$

- **Ηλεκτρικός συντελεστής ποιότητας** Q_{es} , που είναι αδιάστατο μέγεθος (καθαρός αριθμός) και περιγράφει την ηλεκτρική απόσβεση του μεγαφώνου. Η κίνηση του πηνίου φωνής μέσα στο μαγνητικό πεδίο προκαλεί την παραγωγή ρεύματος, λόγω της εμφάνισης αντίθετης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (BackEMF) που αντιτίθεται στην κίνηση του πηνίου. Έτσι, μειώνεται το συνολικό ρεύμα που διέρχεται από το πηνίο φωνής στις συχνότητες κοντά στη συχνότητα f_s , μειώνοντας την ταλάντωση του κώνου και αυξάνοντας την εμπέδηση. Για τον υπολογισμό του Q_{es} χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$Q_{es} = \omega_s \frac{M_{ms}R_e}{Bl^2}, \text{ όπου } \omega_s = 2\pi f_s \text{ (Εξίσωση 2)}$$

- **Μηχανικός συντελεστής ποιότητας** Q_{ms} , που είναι αδιάστατο μέγεθος και περιγράφει τη μηχανική απόσβεση του οδηγού, δηλαδή οι απώλειες της ανάρτησης. Ο συντελεστής Q_{ms} κυμαίνεται από 0,5 ως 10 με τυπική τιμή κοντά στο 3. Υψηλό Q_{ms} σημαίνει λιγότερες μηχανικές απώλειες, ενώ το αντίστροφο για χαμηλό Q_{ms} . Ο συντελεστής Q_{ms} σχετίζεται με την εμπέδηση του μεγαφώνου, όπου τα μεγάφωνα με υψηλή τιμή Q_{ms} , παρουσιάζουν υψηλότερη τιμή της μέγιστης εμπέδησης.

Συνήθως, τα ηχεία που χρησιμοποιούν μεταλλικό φορέα για το πηνίο φωνής (voicewindformer) έχουν χαμηλότερες τιμές Q_{ms} , που οφείλονται στη δημιουργία «ρευμάτων δίνης», τα οποία αντιστέκονται στην ταλάντωση του κώνου και αυξάνουν την απόσβεση. Αντιθέτως, τα ηχεία των οποίων το πηνίο φωνής βρίσκεται μέσα σε φορέα κατασκευασμένο από μη αγώγιμα υλικά, όπως χαρτί ή πλαστικό, παρουσιάζουν υψηλές τιμές Q_{ms} (Wikipedia, 2015).

Για τον υπολογισμό του Q_{ms} χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$Q_{ms} = \omega_s \frac{M_{ms}}{R_{ms}}, \text{ όπου } \omega_s = 2\pi f_s \text{ (Εξίσωση 3)}$$

- **Συνολικός συντελεστής ποιότητας** Q_{ts} , που είναι αδιάστατο μέγεθος και εκφράζει τον συνδυασμό της ηλεκτρικής και μηχανικής απόσβεσης του ηχείου. Η τιμή του Q_{ts} είναι ανάλογη της αποθηκευμένης ενέργειας προς την ενέργεια που χάνεται και ορίζεται στη συχνότητα μηχανικού συντονισμού f_s . Τυπικές τιμές Q_{ts} για ηχεία είναι μεταξύ 0,2 και 0,5 (Wikipedia, 2015). Για τον υπολογισμό του Q_{ts} χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{es} Q_{ms}}{Q_{es} + Q_{ms}} \text{ (Εξίσωση 4)}$$

- **Όγκος ισοδύναμης ενδοτικότητας** V_{as} , που μετράται σε κυβικά μέτρα (m^3) και είναι ένα μέτρο της σκληρότητας της ανάρτησης με τον οδηγό τοποθετημένο να εκπέμπει στον ελεύθερο χώρο. Ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το θεωρητικό όγκο αέρα που έχει την ίδια σκληρότητα με την ανάρτηση του μεγαφώνου, όταν υλοποιείται με τη μορφή ενός πιστονιού, το οποίο έχει την ίδια ενεργή επιφάνεια (S_d) με τον κώνο. Μεγαλύτερες τιμές του V_{as} σημαίνουν χαμηλότερη

σκληρότητα ανάρτησης και γενικά ότι απαιτείται η τοποθέτηση του ηχείου μέσα σε μεγαλύτερο κουτί. Για τον υπολογισμό του V_{as} χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$V_{as} = \rho_o c_o^2 S_d^2 C_{ms} \text{ (Εξίσωση 5)}$$

όπου οι όροι:

$\rho_o = 1.21 \text{ kg/m}^3$ = πυκνότητα αέρα και

$c_o = 343 \text{ m/sec}$ = ταχύτητα ήχου στον αέρα

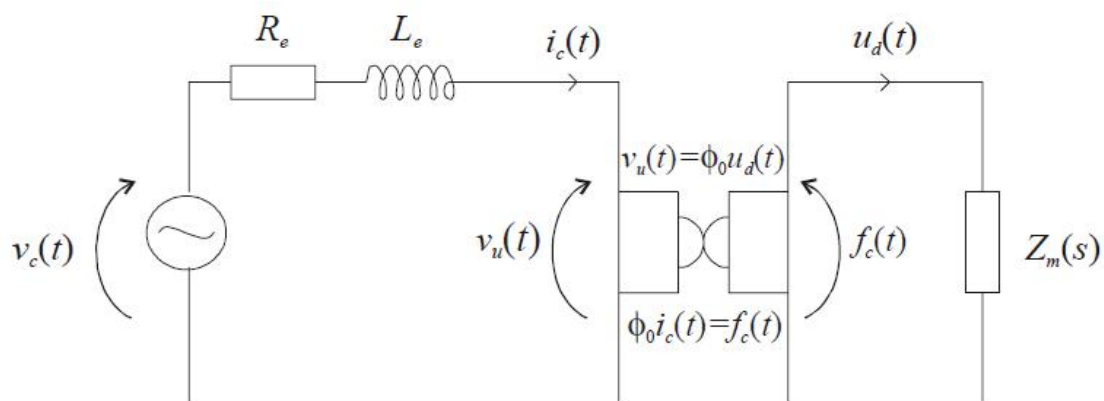
Συχνά, είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι τιμές των θεμελιωδών ηλεκτρομηχανικών παραμέτρων του μεγαφώνου. Ωστόσο, οι παράμετροι «T/S» μπορούν εύκολα να υπολογιστούν και με διαφορετικό τρόπο, γνωρίζοντας τη συνολική εμπέδηση του μεγαφώνου. Αυτό καθιστά τις παραμέτρους «T/S» πολύ βολικές στο σχεδιασμό νέων συστημάτων.

2.2 Γραμμικό Μοντέλο

Τα γραμμικά μοντέλα περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος στις χαμηλές συχνότητες ή όταν η μετατόπιση του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής είναι μικρή. Προφανώς, τα γραμμικά μοντέλα αποτελούν εννοιολογικές απλοποιήσεις, ωστόσο, είναι πολύ χρήσιμα γιατί αποτελούν τη βάση για την καλύτερη κατανόηση των βασικών αρχών και της δυναμικής του συστήματος.

2.2.1 Ηλεκτρικό Κύκλωμα

Ένα απλό μοντέλο που περιγράφει τη ηλεκτρική συμπεριφορά ενός μεγαφώνου φαίνεται στο αριστερό τμήμα το ακόλουθου σχήματος (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Απλοποιημένο μοντέλο με τα ηλεκτρικά στοιχεία ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου(Bright, 2002)

Ένας ενισχυτής παίζει το ρόλο της ηλεκτρικής πηγής στο κύκλωμα, εφαρμόζοντας τάση $v_c(t)$ στα άκρα του κυκλώματος. Η αντίσταση R_e αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική αντίσταση του πηνίου φωνής, ενώ το πηνίο L_e αντιπροσωπεύει την αυτεπαγωγή του πηνίου φωνής. Η ηλεκτρομηχανική σύζευξη μοντελοποιείται με έναν μετατροπέα (μεταγωγέα) τοποθετημένο στη μέση του Σχήματος 3. Έτσι οι μεταβολές της τάσης στο πρωτεύον κύκλωμα (αριστερό τμήμα του Σχήματος 3) επηρεάζουν την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το δευτερεύον κύκλωμα (δεξιό τμήμα του Σχήματος 3). Το ρεύμα που διαρρέει το δευτερεύον κύκλωμα είναι ανάλογο με την ταχύτητα κίνησης του πηνίου φωνής $u_d(t)$, συνεπώς η τάση στα άκρα του ηλεκτρομηχανικού μετατροπέα θα είναι:

$$v_u(t) = \varphi_0 u_d(t), \text{ όπου } \varphi_0 = Bl \text{ (συντελεστής μεταγωγής)} \text{ (Εξίσωση 6)}$$

Δεδομένου επίσης, ότι ο ηλεκτρομηχανικός μετατροπέας αναλαμβάνει την μετατροπή του ηλεκτρικού ρεύματος $i_c(t)$ στην κινητήρια δύναμη $f_c(t)$, η οποία προκαλεί την κίνηση του συστήματος διάφραγμα – πηνίοφωνής, ισχύει ότι:

$$f_c(t) = Bl i_c(t) = \varphi_0 i_c(t) \text{ (Εξίσωση 7)}$$

Ο μετασχηματισμός Laplace της τελευταίας σχέσης έχει ως εξής:

$$f_c(s) = Bl_i(s) = \phi_0 i_c(s), \text{ όπου } s = j\omega \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

Από το δεύτερο νόμο του Kirchhoff για το πρωτεύον κύκλωμα και την εξίσωση 6, προκύπτει ότι:

$$v_c(t) = R_e i_c(t) + L_e \frac{di_c(t)}{dt} + \phi_0 u_d(t) \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

όπου οι όροι της τελευταίας εξίσωσης είναι:

$v_c(t)$: Τάση στα άκρα του πηνίου φωνής

R_e : Ηλεκτρική αντίσταση πηνίου φωνής

L_e : Αυτεπαγωγή πηνίου φωνής

$i_c(t)$: Ένταση ρεύματος

ϕ_0 : Συντελεστής μεταγωγής, όπου $\phi_0 = Bl$

$u_d(t)$: Ταχύτητα του συστήματος διάφραγμα-πηνίο φωνής

Οι όροι R_e και L_e αποτελούν την εσωτερική ηλεκτρική εμπέδηση του μεγαφώνου, η οποία λέγεται και μπλοκαρισμένη ηλεκτρική εμπέδηση Z_{eb} , επειδή περιγράφει την εμπέδηση του μεγαφώνου, όταν το πηνίο φωνής είναι μηχανικά φραγμένο (δεν μπορεί να κινηθεί). Έτσι είναι:

$$Z_{eb}(j\omega) = R_e + j\omega L_e \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

Η μπλοκαρισμένη ηλεκτρική εμπέδηση Z_{eb} επηρεάζεται από το φαινόμενο εμφάνισης ρευμάτων δίνης, τα οποία εμφανίζονται λόγω του αγώγιμου υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα μέρη του μεγαφώνου που διαρρέονται από ρεύμα. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά μοντέλα για την περιγραφή της συμπεριφοράς των ρευμάτων δίνης, όπου το πιο κλασικό είναι αυτό του

Vanderkooy(1989). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, τα ρεύματα δίνης μπορούν να περιγραφούν μέσω μίας αυτεπαγωγής, όπου η τιμή της μεταβάλλεται ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της συχνότητας. Ωστόσο, στην περίπτωση των μικροηχείων και για τις συχνότητες ως τα 5kHz έχει αποδειχθεί ότι η συνολική συνεισφορά της αυτεπαγωγής στη μπλοκαρισμένη ηλεκτρική εμπέδηση Z_{eb} είναι τόσο μικρή (μικρότερη από 10%) ώστε να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα ή μηδέν (Bright, 2002). Συνεπώς, για τα μικροηχεία μπορούμε με ασφάλεια να παραβλέψουμε την ύπαρξη του φαινομένου αυτού, θεωρώντας ότι $Z_{eb} \approx R_e$.

Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace (μικροδική συχνότητα) στην εξίσωση 9 και αντικαθιστώντας και τον μετασχηματισμό Laplace της εξίσωσης 10, προκύπτει η σχέση:

$$v_c(s) = Z_{eb}(s)i_c(s) + \varphi_o u_d(s) \text{ (Εξίσωση 11)}$$

Αν μάλιστα θεωρήσουμε ότι $Z_{eb} \approx R_e$, τότε η εξίσωση 11 γράφεται ως εξής:

$$v_c(s) = R_e(s)i_c(s) + \varphi_o u_d(s) \text{ (Εξίσωση 12)}$$

2.2.2 Μηχανικό Κύκλωμα

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται το μηχανικό ανάλογο σύστημα που περιγράφει την μηχανική συμπεριφορά ενός τυπικού ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου. Η ποσότητα Z_{m} αναπαριστά μία γενικευμένη μηχανική εμπέδηση, η οποία αντιπροσωπεύει το ακουστικό φορτίο.



Σχήμα 4: Αναπαράσταση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου (Bright, 2002)

Εφαρμόζοντας τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα στο σύστημα προκύπτει η σχέση:

$$f_c(t) = m_d a_d(t) + c_d u_d(t) + k_d x_d(t) \text{ (Εξίσωση 13)}$$

όπου οι όροι της τελευταίας εξίσωσης είναι:

$f_c(t)$: Δύναμη που ασκείται στο διάφραγμα, λόγω ρεύματος πηνίου φωνής

$x_d(t)$: Μετατόπιση του συστήματος πηνίου-διαφράγματος

$u_d(t)$: Ταχύτητα του συστήματος πηνίου-διαφράγματος

$a_d(t)$: Επιτάχυνση του συστήματος πηνίου-διαφράγματος

m_d : Μάζα κινούμενου συστήματος

c_d : Μηχανικές απώλειες λόγω της ανάρτησης

k_d : Σκληρότητα ανάρτησης

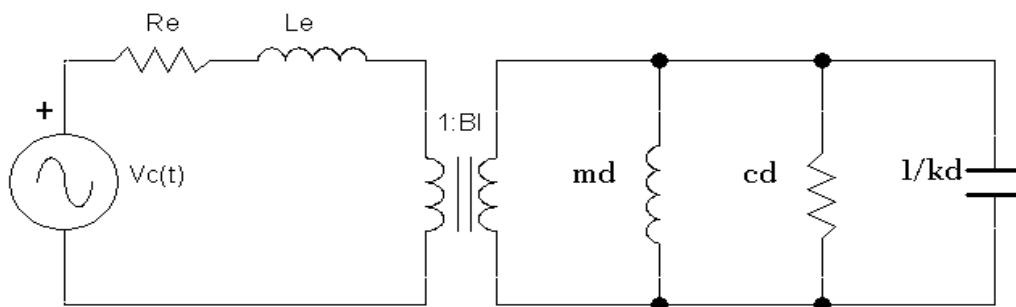
Ο μετασχηματισμός Laplace της προηγούμενης εξίσωσης μας δίνει:

$$f_c(s) = m_d u_d(s)s + c_d u_d(s) + \frac{k_d u_d(s)}{s} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{f_c(s)}{u_d(s)} = sm_d + c_d + \frac{k_d}{s} = Z_{mo}(s) \text{ (Εξίσωση 14)}$$

Η ποσότητα Z_{mo} λέγεται εσωτερική μηχανική εμπέδηση του συστήματος και πρόκειται για τη μηχανική εμπέδηση του συστήματος, όταν το σύστημα δεν διαρρέεται από ρεύμα και δεν υπάρχει ακουστική εμπέδηση.

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος είναι συχνά προτιμότερο να αναπαριστώνται τόσο οι ηλεκτρικές όσο και οι μηχανικές παράμετροι του συνολικού συστήματος μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, όπου όλες οι παράμετροι θα έχουν μετασχηματιστεί σε ηλεκτρικές ή μηχανικές. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5) φαίνεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για το ηλεκτρομηχανικό σύστημα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου, στο οποίο έχουν τοποθετηθεί οι μηχανικές παράμετροι του συστήματος.



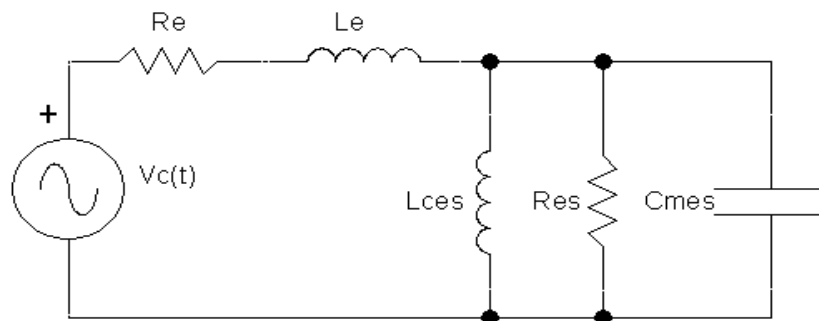
Σχήμα 5: Ηλεκτρομηχανικό κύκλωμα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 6) φαίνεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα στο οποίο όλες οι μηχανικές παράμετροι στο σύστημα έχουν αναχθεί σε ηλεκτρικές παραμέτρους με βάση τις εξής σχέσεις:

$$L_{ms} = \frac{(Bl)^2}{k_d} \text{ (μετριέται σε H)} \text{ (Εξίσωση 15)}$$

$$R_{gs} = \frac{(Bl)^2}{c_d} \text{ (μετριέται σε } \Omega \text{)} \text{ (Εξίσωση 16)}$$

$$C_{mes} = \frac{m_d}{(Bl)^2} \text{ (μετριέται σε } F \text{)} \text{ (Εξίσωση 17)}$$



Σχήμα 6: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για το ηλεκτρομηχανικό κύκλωμα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου

2.2.3 Ακουστικό Φορτίο

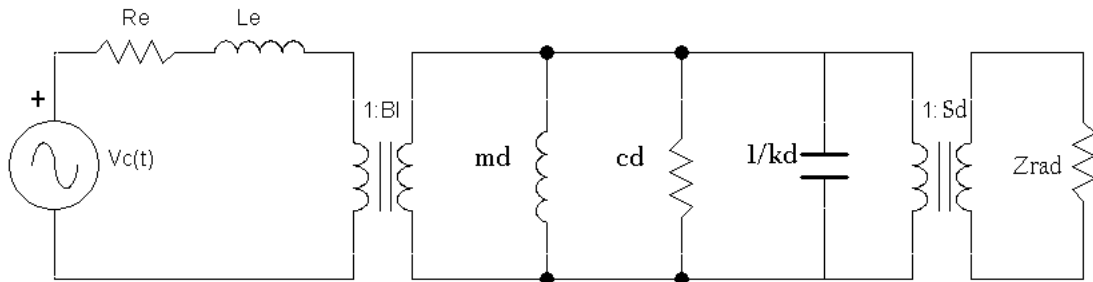
Το ακουστικό φορτίο του μεγαφώνου σχετίζεται με τον αέρα που βρίσκεται στο εμπρός και στο πίσω μέρος του διαφράγματος. Ο αέρας αυτός θα πρέπει να ληφθεί υπόψη προκειμένου το μοντέλο να είναι ολοκληρωμένο. Συνήθως το μεγάφωνο βρίσκεται τοποθετημένο σε ένα κλειστό κουτί. Έτσι, το ακουστικό φορτίο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

(α) στο εμπρός μέρος του μεγαφώνου (μπροστά από το διάφραγμα) η μάζα του κινούμενου αέρα μπορεί να προστεθεί στη μάζα m_d του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής,

(β) στο πίσω μέρος του μεγαφώνου (πίσω από το διάφραγμα) ο αέρας λειτουργεί ως ανάρτηση, οπότε μπορεί να συμπεριληφθεί στην ανάρτηση k_d του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής.

Η μάζα του αέρα που κινείται λόγω της επαφής της με το διάφραγμα, μπορεί να εισαχθεί στο μοντέλο ως μηχανική παράμετρος, εναλλακτικά μπορεί να εισαχθεί ως ακουστική παράμετρος, αφού μετατραπεί σε μηχανική (πολλαπλασιασμός με S_d – εμβαδό αποτελεσματικής επιφάνειας του διαφράγματος).

Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 7) φαίνεται το ηλεκτρο-μηχανο-ακουστικό κύκλωμα του συνολικού γραμμικού μοντέλου του μεγαφώνου, όπου το ακουστικό φορτίο έχει αναπαρασταθεί με τη σύνθετη αντίσταση Z_{rad} . Το αριστερό κύκλωμα είναι το ηλεκτρικό μέρος, το ενδιάμεσο είναι το μηχανικό και το δεξί κύκλωμα είναι το ακουστικό μέρος του συνολικού συστήματος.



Σχήμα 7:Συνολικό ηλεκτρο-μηχανο-ακουστικό κύκλωμα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου

Η ύπαρξη του αέρα στο σύστημα επηρεάζει τη μηχανική του συμπεριφορά, συνεπώς στην εξίσωση 13 θα πρέπει να προσθέσουμε νέους όρους στο δεξιό μέρος της, προκειμένου να ενσωματώσουμε την ακουστική εμπέδηση. Αυτή η ακουστική εμπέδηση οφείλεται στην ανάπτυξη δύναμης – ακουστικής πίεσης, που εξαρτάται από τη μετατόπιση x_d του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής. Η ακουστική δυναμική μπορεί να αναπαρασταθεί μέσω μίας ισοδύναμης μηχανικής εμπέδησης Z_{rm} , η οποία λέγεται εμπέδηση ακουστικής ακτινοβολίας.

Έτσι, λοιπόν, η συνολική μηχανική εμπέδηση Z_m του συστήματος θα είναι:

$$Z_m(s) = \frac{f_c(s)}{u_d(s)} = Z_{mo}(s) + Z_{rm}(s), \text{ όπου } Z_{rm}(s) = Z_{rad}(s)S_d^2 \text{ (Εξίσωση 18)}$$

Συνήθως, το μεγάφωνο τοποθετείται σε κλειστό κουτί, απομονώνοντας την εμπρός από την πίσω περιοχή του διαφράγματος, επιτρέποντας έτσι τη θεώρηση ανεξάρτητων ακουστικών εμπεδήσεων για το εμπρός (Z_{mf}) και το πίσω μέρος (Z_{mr}) του διαφράγματος. Συνεπώς, η συνολική μηχανική εμπέδηση γράφεται ως εξής:

$$Z_m(s) = Z_{mo}(s) + Z_{rmf}(s) + Z_{rnr}(s) \text{ (Εξίσωση 19)}$$

2.2.3.1 Τοποθέτηση σε Κλειστό Κουτί

Στην απλούστερη περίπτωση το μεγάφωνο είναι τοποθετημένο σε ένα κλειστό κουτί που περιέχει παγιδευμένο αέρα. Η τοποθέτηση σε κλειστό κουτί βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα της ακουστικής, αφού έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απόδοση και κέρδος στις χαμηλές συχνότητες.

Η ακουστική πίεση $p_c(t)$ καθορίζεται από τις μεταβολές του όγκου του αέρα V_c που είναι παγιδευμένος μέσα στο κουτί, οι οποίες προκαλούνται από την κίνηση του διαφράγματος (Σχήμα 8). Μια θετική πίεση στο εσωτερικό του κουτιού (πίσω από το διάφραγμα) δημιουργεί δύναμη πίεσης ίδιας φοράς με την ταχύτητα του διαφράγματος (Bright, 2002). Ο μετασχηματισμός Laplace της μηχανικής εμπέδησης του αέρα στο κουτί δίνεται από τη σχέση (Bright, 2002):

$$Z_{rnr}(s) = \frac{p_c(s)}{u_d(s)} S_d = \frac{S_d^2 \rho_o c_o^2}{s V_c} \text{ (Εξίσωση 20)}$$

Όπου οι όροι της τελευταίας εξίσωσης είναι οι εξής:

S_d : Εμβαδό αποτελεσματικής περιοχής ακτινοβολίας (εμβαδό διαφράγματος)

u_d : Ταχύτητα κίνησης διαφράγματος

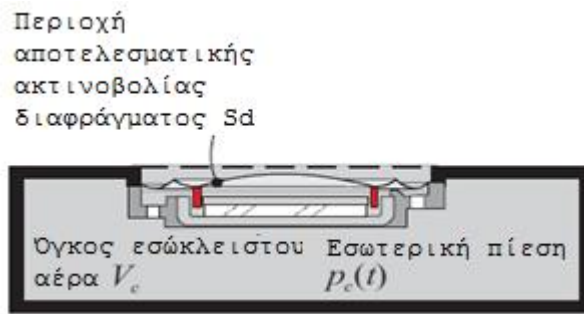
p_c : ακουστική πίεση

V_c : όγκος εσώκλειστου αέρα στο κουτί

ρ_o : πυκνότητα αέρα = 1,21 kg/m³

c_o : ταχύτητα αέρα = 343 m/sec

s : μεταβλητή Laplace = $j\omega$

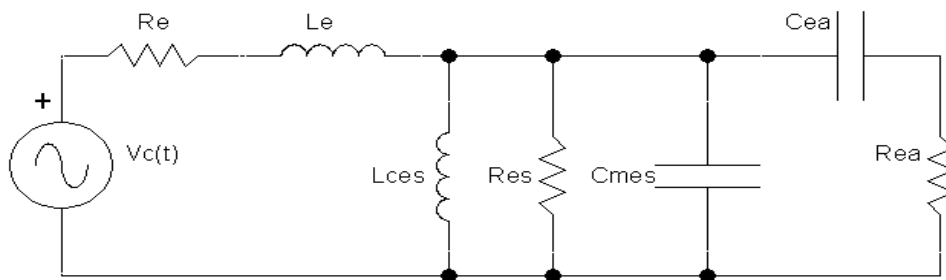


Σχήμα 8: Τοποθέτηση μεγαφώνου σε κλειστό κουτί (Bright, 2002)

Το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του μεγαφώνου σε κλειστό κουτί φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 9), όπου τα στοιχεία R_{ea} και C_{ea} είναι η αντίσταση και η ενδοτικότητα αντίστοιχα της ακουστικής εκπομπής (εσώκλειστου αέρα) και αντιπροσωπεύουν την σύνθετη ακουστική αντίσταση Z_{rm} . Επισημαίνεται ότι παράμετροι R_{ea} και C_{ea} έχουν αναχθεί σε ισοδύναμες ηλεκτρικές, σύμφωνα με τις εξής σχέσεις:

$$R_{ea} = \frac{(Bl)^2}{\rho_o c_o S_d} \text{ (μετριέται σε } \Omega \text{)} \text{ (Εξίσωση 21)}$$

$$C_{ea} = \frac{8\rho_o r_d S_d}{3\pi (Bl)^2} \text{ (μετριέται σε } F \text{)}, r_d = \text{ ακτίνα διαφράγματος (Εξίσωση 22)}$$

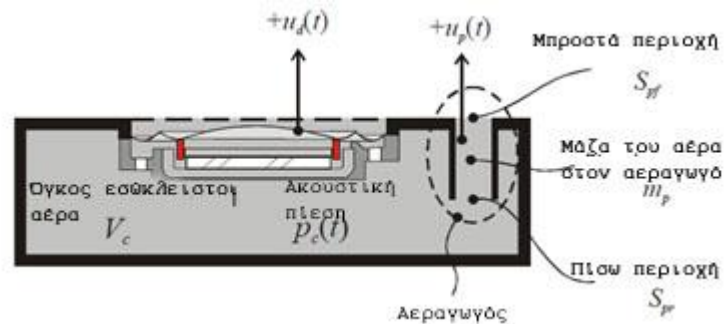


Σχήμα 9: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μεγαφώνου τοποθετημένο σε κλειστό κουτί

2.2.3.2 Τοποθέτηση σε Εξαεριζόμενο Κουτί

Η ύπαρξη ενός τουλάχιστον αεραγωγού στο σύστημα (Σχήμα 10) βελτιώνει ακόμα περισσότερο την απόκριση, μειώνοντας περισσότερο τη συχνότητα αποκοπής και το

ρυθμό μεταβολής της ακουστικής πίεσης προς τη μετατόπιση. Έτσι, επιτυγχάνεται υψηλότερη ακουστική έξοδο για το ίδιο εύρος μετατοπίσεων x_d του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής.



Σχήμα 10: Τοποθέτηση μεγαφώνου σε αεριζόμενο κουτί (Bright, 2002)

Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης ορμής και μετασχηματίζοντας κατά Laplace, προκύπτει:

$$\left(sm_p + c_p + Z_{rmp}(s) \right) u_p(s) = p_c(t) S_p \text{ (Εξίσωση 23)}$$

όπου, οι όροι της εξίσωσης είναι οι εξής:

m_p : Μάζα του αέρα μέσα στον αεραγωγό.

c_p : Αντίσταση ροής του αέρα στον αεραγωγό.

$Z_{rmp}(s)$: Ακουστική εμπέδηση του αεραγωγού σε σχέση με το εξωτερικό του κουτιού

$u_p(s)$: Ταχύτητα ροής αέρα στον αεραγωγό. Θετική ταχύτητα σημαίνει κίνηση προς τα έξω του κουτιού.

$p_c(s)$: Ακουστική πίεση στο εσωτερικό του κουτιού

S_p : Διατομή αεραγωγού

Σύμφωνα με το αναλυτικό μοντέλο του Klarman(1940), η ακουστική εμπέδηση $Z_{rmp}(s)$ συνεισφέρει ελάχιστα στη συνολική εμπέδηση (λιγότερο από 10%), συνεπώς μπορεί με ασφάλεια να αγνοηθεί ως αμελητέα ή να ενσωματωθεί στις τιμές των παραμέτρων c_p και m_p .

Στην περίπτωση του εξαεριζόμενου κουτιού, η ακουστική πίεση $p_c(t)$ εντός του κουτιού, καθώς και η ισοδύναμη μηχανική εμπέδηση του αέρα στην περιοχή πίσω από το διάφραγμα ορίζονται από τις εξής σχέσεις (Bright, 2002):

$$p_c(s) = \frac{\rho_o c_o^2}{sV_c} [-S_d u_d(s) - S_p u_p(s)] \quad (\text{Εξίσωση 24})$$

$$Z_{rnr}(s) = \frac{S_d^2 \rho_o c_o^2}{s V_c} \left(1 - \frac{S_p^2 \frac{\rho_o c_o^2}{sV_c}}{sm_p + c_p + S_p^2 \frac{\rho_o c_o^2}{sV_c}} \right) \quad (\text{Εξίσωση 25})$$

2.2.4 Ακουστική Ακτινοβολία και Στάθμη Ακουστικής Πίεσης

Το απλούστερο μοντέλο ακουστικής ακτινοβολίας για τα μικροηχεία περιγράφεται από τη σχέση (Bright, 2002):

$$p_r(s) = s\rho_o S_d u_d(s) \frac{e^{ikr}}{4\pi r} \quad (\text{Εξίσωση 26})$$

όπου, οι όροι της εξίσωσης είναι οι εξής:

p_r : ακουστική ακτινοβολία σε απόσταση r μέτρα

r : Απόσταση στην οποία γίνεται η μέτρηση

s : μεταβλητή Laplace = $j\omega$

ρ_o : πυκνότητα αέρα = 1,21 kg/m³

S_d : Εμβαδό αποτελεσματικής περιοχής ακτινοβολίας (εμβαδό διαφράγματος)

u_d : Ταχύτητα κίνησης διαφράγματος

π : Σταθερά = 3,14

i : Μιγαδική σταθερά, όπου $i = -j$

k : κυματικός αριθμός, με $k = \omega/c$, όπου ω =συχνότητα, c =ταχύτητα ήχου=343m/sec

Επίσης, η στάθμη ακουστικής πίεσης στο 1 μέτρο (SPL) μετράται σε dB και ορίζεται ως εξής:

$$SPL = 20 \log\left(\frac{p_{1r}(s)}{2 * 10^{-5}}\right), \mu s 2 * 10^{-5} = \text{ακουστική πίεση αναφοράς (Εξίσωση 27)}$$

Για απόσταση $r=1$ μέτρο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι $e^{ikr}=1$, συνεπώς η εξίσωση 26 γράφεται ως εξής:

$$p_{1m}(s) = s\rho_o S_d u_d(s) \frac{1}{4\pi} \quad (\text{Εξίσωση 28})$$

Τελικά, η SPL δίνεται από τη σχέση:

$$SPL = 20 \log\left(\frac{s\rho_o S_d u_d(s)}{4\pi * 2 * 10^{-5}}\right) \quad (\text{Εξίσωση 29})$$

Επισημαίνεται ότι βασικό στοιχείο για την εκτέλεση των υπολογισμών είναι η γνώση της ταχύτητας u_d του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής, η οποία υπολογίζεται ως η παράγωγος της μετατόπισης x_d .

2.2.5 Απόκριση Συχνότητας

Η απόκριση συχνότητας του γραμμικού μοντέλου για το ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο μπορεί να υπολογιστεί μέσω των μετασχηματισμών Laplace των βασικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος. Πρόκειται για τις εξισώσεις 8, 11 και 14, οι οποίες περιγράφονται στις προηγούμενες υποενότητες, όμως για την καλύτερη κατανόηση από πλευράς του αναγνώστη, οι εξισώσεις αυτές παραθέτονται παρακάτω:

$$f_c(s) = \varphi_o i_c(s) \Leftrightarrow i_c(s) = \frac{f_c(s)}{\varphi_o}$$

$$v_c(s) = Z_{sb}(s) i_c(s) + \varphi_o u_d(s)$$

$$f_c(s) = sm_d u_d(s) + c_d u_d(s) + \frac{k_d}{s} u_d(s) \Leftrightarrow f_c(s) = u_d(s) Z_m(s)$$

Με χρήση των σχέσεων αυτών, η συνάρτηση μεταφοράς της τάσης εισόδου $v_c(s)$ προς την ταχύτητα $u_d(s)$ θα είναι:

$$H(s) = \frac{u_d(s)}{v_c(s)} = \frac{\varphi_o}{Z_{ab}(s)Z_m(s) + \varphi_o^2} \quad (\text{Εξίσωση 30})$$

Επισημαίνεται ότι στην τελευταία σχέση, η Z_m είναι το άθροισμα της εσωτερικής μηχανικής εμπέδησης και της ακουστικής εμπέδησης, δηλαδή $Z_m(s) = Z_{m0}(s) + Z_{m1}(s)$, σύμφωνα άλλωστε και με την εξίσωση 18.

Με παρόμοιο τρόπο και αξιοποιώντας και τη σχέση 26 της ακουστικής πίεσης, μπορούμε να ορίσουμε τη συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφει την απόκριση συχνότητας της ακουστικής πίεσης προς την τάση εισόδου. Έτσι προκύπτει η σχέση:

$$P(s) = \frac{p_r(s)}{v_c(s)} = s\rho_o S_d \frac{\varphi_o}{Z_{ab}(s)Z_m(s) + \varphi_o^2} \frac{e^{ikr}}{4\pi r} \quad (\text{Εξίσωση 31})$$

Επίσης, η συνολική ηλεκτρική εμπέδηση μπορεί να οριστεί ως η απόκριση συχνότητας της τάσης εισόδου προς την ένταση του ρεύματος, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Z_e(s) = \frac{v_c(s)}{i_c(s)} = Z_{ab}(s) + \frac{\varphi_o^2}{Z_m(s)} \quad (\text{Εξίσωση 32})$$

2.2.5.1 Απόκριση Κλειστού Κουτιού

Η απόκριση συχνότητας για ένα μεγάφωνο που έχει τοποθετηθεί σε κλειστό κουτί μπορεί να αναπαρασταθεί με τη μορφή ενός ανωδιαβατού φίλτρου δεύτερης τάξης, το οποίο ενσωματώνει τις βασικές ηλεκτρομηχανοακουστικές παραμέτρους του μεγαφώνου και έχει την εξής γενική μορφή (Thiele, 1971), (Small, 1973):

$$H(s) = S_o \frac{s^2 T_c^2}{1 + sT_c/Q + s^2 T_c^2} \quad (\text{Εξίσωση 33})$$

Όπου οι όροι της σχέσης αυτής είναι οι εξής:

s: Μεταβλητή Laplace

S₀: Σταθερά ενίσχυσης

T_c: Χρονική σταθερά συστήματος, όπου $T_c = 1/\omega_c = 1/2\pi f_c$ και
f_c=συχνότητα αποκοπής του συστήματος

Q: Συντελεστής ποιότητας

Προκειμένου να εκφράσουμε την εξίσωση 31, η οποία περιγράφει τη συνάρτηση μεταφοράς της τάσης εισόδου προς την ακουστική πίεση, στη γενική μορφή που περιγράφεται από την εξίσωση 33, θα πρέπει να γράψουμε την ηλεκτρική Z_{eb}, μηχανική Z_m και ακουστική εμπέδηση Z_{rm} του συστήματος συναρτήσει των αντίστοιχων παραμέτρων τους. Πιο συγκεκριμένα είναι:

$$Z_{eb}(s) = R_e + sL_e \text{ (Εξίσωση 34)}$$

$$Z_{mo}(s) = sm_d + c_d + \frac{k_d}{s} \text{ (Εξίσωση 35)}$$

$$Z_{rm}(s) = sm_a + \frac{\rho_a c_a^2 S_a^2}{sV_c} \text{ (Εξίσωση 36)}$$

Η συνολική μηχανική εμπέδηση του συστήματος είναι το άθροισμα της εσωτερικής μηχανικής εμπέδησης Z_{mo} και της ισοδύναμης μηχανικής Z_{rm} της ακουστικής εμπέδησης:

$$Z_m(s) = Z_{mo}(s) + Z_{rm}(s) = sm_t + c_t + \frac{k_t}{s} \text{ (Εξίσωση 37)}$$

όπου οι όροι της τελευταίας σχέσης είναι οι εξής:

m_t : Συνολική μάζα κινούμενου συστήματος. Πρόκειται για το άθροισμα της μάζας του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής m_d και της μάζας του εσωκλειστού αέρα στο κουτί m_a .

c_t : Συνολικές μηχανικές απώλειες. Συνήθως ταυτίζονται με την c_d .

k_t : Συνολική σκληρότητα. Πρόκειται για το άθροισμα της σκληρότητας της ανάρτησης k_d και της ενδοτικότητας του εσωκλειστού αέρα στο κουτί $\rho_a c_a^2 S_a^2 / l$, ο οποίος λειτουργεί ως ανάρτηση.

s : Μεταβλητή Laplace

Σύμφωνα με αυτά θα έχουμε:

$$m_t = m_d + m_a \text{ (Εξίσωση 38)}$$

$$c_t = c_d \text{ (Εξίσωση 39)}$$

$$k_t = k_d + \frac{\rho_a c_a^2 S_a^2}{V_c} \text{ (Εξίσωση 40)}$$

Ειδικά για τα μικροηχεία, μπορούμε με ασφάλεια να κάνουμε τις εξής θεωρήσεις (Bright, 2002):

- Χαυτεπαγωγή L_e του πηνίου θεωρείται αμελητέα ($L_e = 0$), δεδομένου ότι η συνεισφορά της στη συνολική ηλεκτρική εμπέδηση είναι μικρότερη από 10% για συχνότητες ως τα 5KHz. Συνεπώς είναι $Z_{eb} = R_e$.
- Δεδομένου ότι η μέτρηση της ακουστικής πίεσης γίνεται σε απόσταση 1 μέτρου και το ακουστικό πεδίο εκτείνεται σφαιρικά στο χώρο, τότε $e^{ikr}/4\pi = 1/4\pi$.

Με βάση τις παραδοχές αυτές και αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 37, 38, 39, 40 στην εξίσωση 31, η συνάρτηση μεταφοράς της τάσης εισόδου προς την ακουστική πίεση γράφεται ως εξής:

$$P(s) = \frac{p_{1m}(s)}{v_o(s)} = \frac{\rho_o S_d \varphi_o}{4\pi R_e} \frac{s^2}{m_t s^2 + s \left(c_t + \frac{\varphi_o^2}{R_e} \right) + k_t} \quad (\text{Εξίσωση 41})$$

Τώρα, πλέον, η τελευταία συνάρτηση μεταφοράς σχέση μπορεί να γραφτεί με τη μορφή ανωδιαβατού φίλτρου δεύτερης τάξης, ως εξής:

$$P(s) = \frac{p_{1m}(s)}{v_o(s)} = S_o \frac{\frac{s^2}{\omega_o^2}}{\frac{s^2}{\omega_o^2} + \frac{s}{\omega_o} Q_{tc} + 1} \quad (\text{Εξίσωση 42})$$

όπου η όροι της τελευταίας εξίσωσης είναι:

S_o : Σταθερά ενίσχυσης, που λέγεται και χαρακτηριστική ευαισθησία

ω_o : Συχνότητα μηχανικού συντονισμού του συστήματος, όπου $\omega_o = 2\pi f_o$

Q_{tc} : Συνολικός συντελεστής ποιότητας

Από τις εξισώσεις 41 και 42 υπολογίζονται εύκολα οι ποσότητες S_o , ω_o και Q_{tc} , όπου:

$$S_o = \frac{\rho_o S_d \varphi_o}{4\pi R_e m_t} \quad (\text{Εξίσωση 43})$$

$$\omega_o = \sqrt{\frac{k_t}{m_t}}, \text{ όπου } \omega_o = 2\pi f_o \text{ άρα } f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_t}{m_t}} \quad (\text{Εξίσωση 44})$$

$$Q_{tc} = \frac{\sqrt{k_t m_t}}{c_t + \frac{\varphi_o^2}{R_e}} \quad (\text{Εξίσωση 45})$$

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να εκφράσουμε και τη συνολική ηλεκτρική εμπέδηση Z_e του συστήματος, γράφοντας την με τη μορφή ενός ζωνοδιαβατού φίλτρου δεύτερης τάξης, ως εξής:

$$Z_g(s) = R_g \frac{\frac{s^2}{\omega_o^2} + \frac{s}{\omega_o Q_{tc}} + 1}{\frac{s^2}{\omega_o^2} + \frac{s}{\omega_o Q_{ms}} + 1} \quad (\text{Εξίσωση 46})$$

Στην περίπτωση αυτή, ο συντελεστής ποιότητας Q_{ms} , που εισήγαγε ο Small(1973), εκφράζεται από την εξής σχέση:

$$Q_{ms} = \frac{\sqrt{k_t m_t}}{c_t} \quad (\text{Εξίσωση 47})$$

Επίσης, η συνολική ηλεκτρική εμπέδηση μπορεί να γραφτεί και με την εξής μορφή:

$$Z_g(s) = \frac{v_c(s)}{i_c(s)} = R_g \frac{s^2 + \left(\frac{\varphi_o^2}{m_t R_g} + \frac{c_t}{m_t}\right)s + \frac{k_t}{m_t}}{s^2 + \frac{c_t}{m_t}s + \frac{k_t}{m_t}} \quad (\text{Εξίσωση 48})$$

Επισημαίνεται ότι μία αναλυτικότερη περιγραφή των συντελεστών ποιότητας Q_{es} , Q_{ms} και των υπόλοιπων παραμέτρων Thiele – Small, παρουσιάζονται στην υποενότητα 2.1.

2.2.5.2 Απόκριση Εξαεριζόμενου Κουτιού

Στην περίπτωση που το μεγάφωνο είναι τοποθετημένο μέσα σε κουτί που διαθέτει κάποιον αγωγό – οπή εξαερισμού, τότε η ακουστική πίεση θα εξαρτάται από το άθροισμα της ταχύτητας κίνησης του διαφράγματος u_d και της ταχύτητας κίνησης του όγκου αέρα που βρίσκεται μέσα στον αγωγό εξαερισμού u_p . Συνεπώς, η ακουστική πίεση στο 1 μέτρο θα είναι:

$$p_{1m}(s) = \frac{s \rho_o}{4\pi} (S_d u_d(s) + S_p u_p(s)) \quad (\text{Εξίσωση 49})$$

Η συνάρτηση μεταφοράς της τάσης εισόδου προς την ακουστική πίεση στο 1 μέτρο μπορεί να γραφτεί ως εξής (Bright, 2002):

$$\frac{p_m(s)}{v_c(s)} = \frac{s\rho_o}{4\pi} \left(S_d - \frac{S_p^2 S_d \frac{\rho_o c_o^2}{sV_c}}{sm_p + c_p + S_p^2 \frac{\rho_o c_o^2}{sV_c}} \right) \frac{\varphi_o}{Z_{sb}(s)Z_m(s) + \varphi_o^2} \quad (\text{Εξίσωση 50})$$

Σύμφωνα με τον Thiele (1971) μπορούν να γίνουν οι εξής απλουστεύσεις:

- Η αυτεπαγωγή του πηνίου L_e μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, άρα $Z_{eb}(s) = R_e$
- $Z_{mo}(s) + Z_{rmf}(s) \approx sm_t + c_t + k_d/s$

Δεδομένου ότι $Z_m(s) = Z_{mo}(s) + Z_{rmf}(s) + Z_{rmr}(s)$ και με βάση τις προηγούμενες απλοποιήσεις, η εξίσωση 50 μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\frac{p_m(s)}{v_c(s)} = \frac{s\rho_o}{4\pi} \left(S_d - \frac{S_p^2 S_d \frac{\rho_o c_o^2}{sV_c}}{sm_p + c_p + S_p^2 \frac{\rho_o c_o^2}{sV_c}} \right) \frac{\varphi_o}{R_e(Z_{rmr}(s) + sm_t + c_t + \frac{k_d}{s}) + \varphi_o^2} \quad (\text{Εξίσωση 51})$$

Τέλος, η συνολική ηλεκτρική εμπέδηση μπορεί να γραφτεί με βάση τις σχέσεις 32, 19 και τις προηγούμενες απλουστεύσεις ως εξής:

$$Z_e(s) = \frac{v_c(s)}{i_c(s)} = R_e + \frac{\varphi_o^2}{Z_{rmr}(s) + sm_t + c_t + \frac{k_d}{s}} \quad (\text{Εξίσωση 52})$$

Επισημαίνεται ότι η ποσότητα $Z_{rmr}(s)$ δίνεται από την εξίσωση 25, όπου για διευκόλυνση του αναγνώστη παραθέτουμε και εδώ:

$$Z_{rmr}(s) = \frac{S_d^2 \rho_o c_o^2}{sV_c} \left(1 - \frac{S_p^2 \frac{\rho_o c_o^2}{sV_c}}{sm_p + c_p + S_p^2 \frac{\rho_o c_o^2}{sV_c}} \right)$$

2.2.6 Αποδοτικότητα

Τα μεγάφωνα συνήθως έχουν πολύ μικρή αποδοτικότητα, εξαιτίας του ακουστικού φορτίου στο διάφραγμα, το οποίο είναι μικρό συγκριτικά με το μηχανικό. Επιπλέον, η ηλεκτρομηχανική μετατροπή είναι πολύ χαμηλής απόδοσης (Borwick, 2001).

Η αποδοτικότητα υπολογίζεται ως η ακουστική ισχύς προς την καταναλισκόμενη ισχύ. Η ισχύς που καταναλώνεται είναι το άθροισμα της θερμικής ισχύος που αναπτύσσεται στο πηνίο, τις μηχανικές απώλειες, την απορρόφηση από τη συσκευασία του μεγαφώνου, τα ρεύματα δίνης και την ισχύ της ακουστικής ακτινοβολίας. Στα μεγάφωνα η ακουστική ισχύς είναι κατά πολύ μικρότερη της ισχύος που καταναλώνεται, οπότε και η απόδοση είναι μικρή (Borwick, 2001).

Η θερμική ισχύς που καταναλώνεται στην αντίσταση του πηνίου δίνεται από τη σχέση:

$$W_s = I_{rms}^2 R_s \text{ (Εξίσωση 53)}$$

Επίσης, η ισχύς της ακουστικής ακτινοβολίας (ακουστική ισχύς) είναι:

$$W_a = 1,57 \frac{\rho_o}{c_o} r_d^4 \left(\frac{\varphi_o I_{rms}}{m_t} \right)^2 \text{ (Εξίσωση 54)}$$

όπου:

ρ_o = πυκνότητα αέρα = 1,21 kg/m³

c_o = ταχύτητα ήχου στον αέρα = 343m/sec

r_d = ακτίνα διαφράγματος

Έτσι, η αποδοτικότητα του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου θα είναι:

$$Eff = \frac{W_a}{W_s} = 1,57 \frac{\rho_o}{c_o} r_d^4 \frac{\varphi_o^2}{m_t^2 R_s} \text{ (Εξίσωση 55)}$$

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3) παρουσιάζονται και συγκρίνονται οι τιμές των βασικών παραμέτρων, καθώς και η αποδοτικότητα ενός τυπικού μικροηχείου και ενός ηχείου 6,5 ιντσών. Η διαφορά της αποδοτικότητας του μικροηχείου είναι δραματικά μικρότερη συγκριτικά με αυτή του ηχείου των 6,5 ιντσών.

Πίνακας 3: Σύγκριση παραμέτρων και αποδοτικότητας ενός τυπικού μικροηχείου και ενός ηχείου 6,5 ιντσών(Pedersen, 2012)

Παράμετρος	Μικροηχείο	Ηχείο 6.5''	Διαφορά
R_e	7.2 Ω	5.7 Ω	-21%
BI (ϕ_0)	0.32 N/A	6.6 N/A	1963%
m_t	23 mg	11.3 gr	49030%
S_d	0.65cm ²	137 cm ²	20977%
Eff	0.0063%	0.63%	9900%

2.3 Μη Γραμμικό Μοντέλο

Τα γραμμικά μοντέλα περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος στις χαμηλές συχνότητες που η μετατόπιση του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής είναι μικρή. Ωστόσο, στις υψηλές συχνότητες και στις μεγάλες μετατοπίσεις οι παράμετροι του συστήματος δεν συμπεριφέρονται με γραμμικό τρόπο, αλλά παρουσιάζουν διάφορες ανομοιομορφίες, με βασικό τους χαρακτηριστικό την εξάρτησή τους από τη μετατόπιση x_d .

Στο υπόλοιπο αυτής της υποενότητας θα παρουσιαστούν οι ανομοιομορφίες που παρουσιάζουν οι παράμετροι του συστήματος, καθώς και οι λόγοι που τις προκαλούν, ενώ στο τέλος θα παρουσιαστούν οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του μη γραμμικού μοντέλου.

2.3.1 Ανομοιομορφία Μαγνητικού Πεδίου

Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το μαγνητικό κύκλωμα του μεγαφώνου στην πραγματικότητα δεν είναι ομοιόμορφο σε ολόκληρη την περιοχή κίνησης του πηνίουφωνής, αλλά εξαρτάται κυρίως από τη θέση-μετατόπιση του πηνίου. Έτσι, όταν το πηνίο φωνής απομακρύνεται από τη θέση ισορροπίας του και ένα μέρος του βρίσκεται έξω από το μαγνητικό πεδίο, αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση του

συντελεστή μεταγωγής $\phi_0=BI$, δεδομένου ότι μειώνεται το μήκος του καλωδίου l του πηνίου που βρίσκεται εντός του μαγνητικού πεδίου. Έτσι, η ποσότητα $\phi_0=BI$, που λέγεται και συντελεστής δύναμης ή συντελεστής μεταγωγής, μπορεί να θεωρηθεί ως συνάρτηση της μετατόπισης x_d και να εκφραστεί ως εξής:

$$BI(x_d) = \phi(x_d) = \int_{-h/2}^{h/2} B(\xi - x_d) d\xi, h = \text{ύψος πηνίου φωνής (Εξίσωση 56)}$$

Η τιμή της $\phi(x_d)$ μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά είτε μέσω μιας Gaussian καμπύλης είτε μέσω μίας δυναμοσειράς, σχηματίζοντας ένα πολυώνυμο τάξης N_ϕ , σύμφωνα με τις εξής σχέσεις:

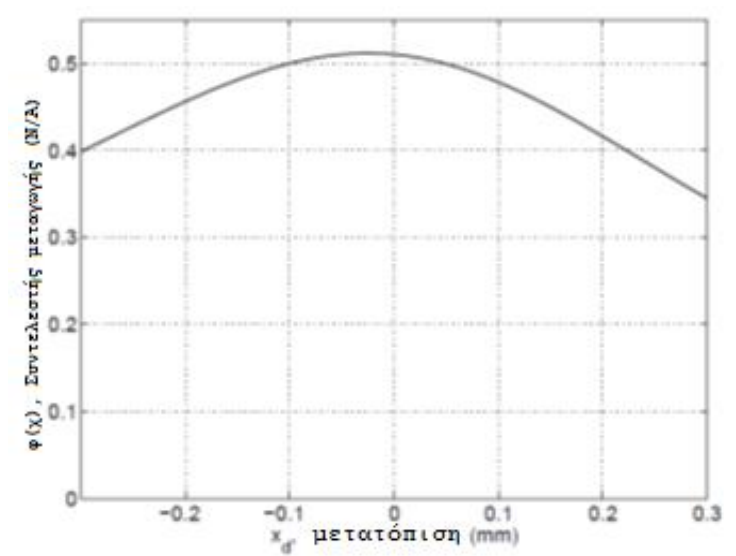
$$\phi(x_d) = \sum_{k=0}^{N_\phi} \phi_k x_d^k \quad (\text{Εξίσωση 57})$$

$$\phi(x_d) = \phi_0 * e^{-\mu(x-x_0)^2} \quad (\text{Εξίσωση 58})$$

Για παράδειγμα, αν $N_\phi=2$, τότε $\phi(x_d)=\phi_0+\phi_1x_d^1+\phi_2x_d^2$, όπου οι συντελεστές ϕ_1 , ϕ_2 υπολογίζονται με τεχνικές προσέγγισης στα δεδομένα των πραγματικών μετρήσεων, ενώ ο συντελεστής $\phi_0 = \phi(x_d=0) = BI$, όταν το πηνίο βρίσκεται στη θέση ισορροπίας.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το μαγνητικό πεδίο είναι η γεωμετρία του πηνίου και η γεωμετρία του μαγνήτη.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 11) φαίνεται η γραφική παράσταση των τιμών της $\phi(x_d)$ σε σχέση με την μετατόπιση του συστήματος πηνίο φωνής – διάφραγμα ενός τυπικού μικροηχείου.



Σχήμα 11: Τιμές της $\phi(x_d)$ σε σχέση με την μετατόπιση του συστήματος πηνίο φωνής-διάφραγμα σε ένα τυπικό μικροηχείο (Bright, 2002)

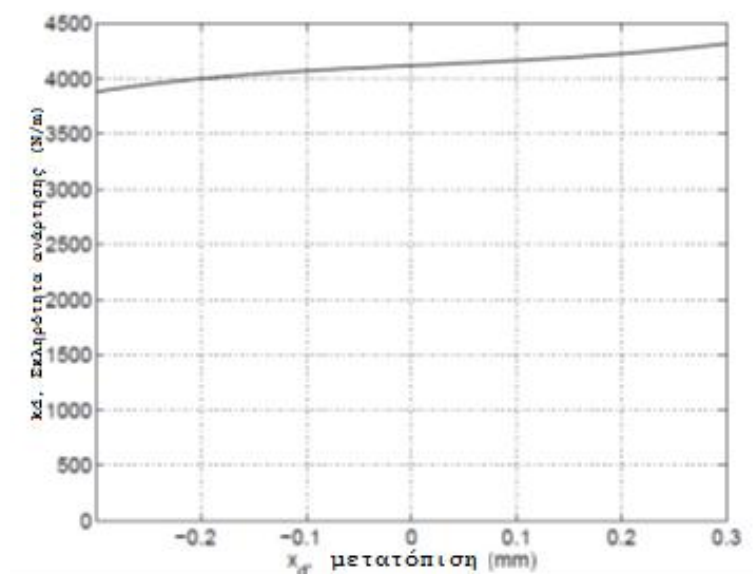
2.3.2 Ανομοιομορφία Σκληρότητας Ανάρτησης

Η σκληρότητα της ανάρτησης στην πραγματικότητα δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο το εύρος της μετατόπισης x_d του πηνίου φωνής. Τυπικά, η σκληρότητα αυξάνεται στις μεγάλες μετατοπίσεις, φαινόμενο που είναι γνωστό ως «σκλήρυνση ελατηρίου». Ο Olson (1944) μελέτησε το φαινόμενο, το οποίο αναφέρεται πλέον ως φαινόμενο «μεταπήδησης» ή «άλματος». Αυτό οφείλεται στις απότομες μεταβολές του πλάτους της απόκρισης συχνότητας στην περιοχή κοντά στη συχνότητα συντονισμού του συστήματος. Εξαιτίας του φαινομένου σκλήρυνσης του ελατηρίου στις μεγάλες μετατοπίσεις, η συχνότητα συντονισμού επίσης αυξάνει στις μεγάλες μετατοπίσεις, για ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων κοντά στη συχνότητα συντονισμού, ενώ στις υψηλές συχνότητες το πλάτος της απόκρισης συχνότητας παρουσιάζει υψηλές διακυμάνσεις. Έτσι, όταν η συχνότητα ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή, τότε το πλάτος της απόκρισης θα κάνει «άλμα».

Η σκληρότητα της ανάρτησης μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά μέσω μίας δυναμοσειράς, σχηματίζοντας πολυώνυμο τάξης N_k , ως εξής:

$$k(x_d) = \sum_{i=0}^{N_k} k_i x_d^i \text{ (Εξίσωση 59)}$$

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 12) φαίνεται η μεταβολή της σκληρότητας της ανάρτησης ενός τυπικού μικροηχείου. Φαίνεται ότι η συμπεριφορά της ανάρτησης στα μικροηχεία δεν παρουσιάζει την αναμενόμενη συμπεριφορά σύμφωνα με το φαινόμενο σκλήρυνσης ελατηρίου. Πιο συγκεκριμένα, στα μικροηχεία η σκληρότητα της ανάρτησης αυξάνεται με την θετική (μετατόπιση προς τα εμπρός) μετατόπιση, ενώ μειώνεται με την αρνητική (προς τα πίσω) μετατόπιση.



Σχήμα 12: Τιμές της $k(x_d)$ σε σχέση με την μετατόπιση του συστήματος πηνίο φωνής-διάφραγμα σε ένα τυπικό μικροηχείο (Bright, 2002)

Επιπλέον, όταν εφαρμόζεται παρατεταμένα κάποια δύναμη στην ανάρτηση, τότε η ανάρτηση παρουσιάζει μία μικρή μεταβολή της σκληρότητάς της. Αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο ολίσθησης. Ένα ικανοποιητικό μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά της ανάρτησης σε συνάρτηση με τη συχνότητα δίνεται από τη σχέση (Knudsen & Jensen, 1993):

$$C_{MS}(j\omega) = C_{MS} \left(1 - \lambda \log_{10} \frac{j\omega}{j\omega_0} \right), \omega_0 = 2\pi f_0 \text{ (Εξίσωση 60)}$$

όπου οι όροι της τελευταίας σχέσης είναι:

$C_{ms}(j\omega)$: Συμμόρφωση ανάρτησης(αντίστροφο σκληρότητας ανάρτησης, $C_{ms}=1/k_d$)

C_{ms} : Συμμόρφωση της ανάρτησης στην αρχική θέση ισορροπίας

ω : Συχνότητα

ω_0 : Συχνότητα συντονισμού

λ : Συντελεστής ολίσθησης της ανάρτησης. Υπολογίζεται πειραματικά.

Επίσης, υπάρχει ένα φυσικό όριο στη μετατόπιση του συστήματος διάφραγμα-πηνίο φωνής. Καθώς το διάφραγμα κινείται προς τα εμπρός και απομακρύνεται από το μαγνήτη, η σκληρότητα της ανάρτησης σταδιακά αυξάνεται, μέχρις ότου η ανάρτηση να είναι σε πλήρη έκταση. Τότε, καθώς το διάφραγμα θα κινηθεί προς τα πίσω, υπάρχει η περίπτωση το σύστημα διάφραγμα - πηνίο φωνής να ακουμπήσει σε κάποιο σημείο του μαγνήτη ή του πλαισίου. Στην περίπτωση αυτή, προφανώς, το σύστημα διάφραγμα - πηνίο φωνής δεν μπορεί να κινηθεί παραπέρα, αφού η κίνησή του είναι μηχανικά μπλοκαρισμένη. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να μοντελοποιηθεί θέτοντας την τιμή της σκληρότητας της ανάρτησης να είναι άπειρη. Για τα μικροηχεία, μία τυπική τιμή για την μέγιστη επιτρεπτή μετατόπιση - απομάκρυνση του συστήματος διάφραγμα - πηνίο φωνής είναι τα 0,35 χιλιοστά.

2.3.3 Ανομοιομορφία Αυτεπαγωγής

Η αυτεπαγωγή L_e θα ποικίλει ανάλογα με τη θέση - μετατόπιση του συστήματος διάφραγμα - πηνίο φωνής. Καθώς το πηνίο κινείται προς τα εμπρός και απομακρύνεται από το μαγνήτη, θα υπάρχει λιγότερο σιδηρομαγνητικό υλικό εντός του μαγνητικού πεδίου που παράγει το πηνίο, οπότε η L_e θα έχει χαμηλότερη τιμή.

Η L_e μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά μέσω μιας δυναμοσειράς, σχηματίζοντας πολυώνυμο τάξης N_L , ως εξής:

$$L_e(x_d) = \sum_{k=0}^{N_L} L_{e_k} x_d^k \text{ (Εξίσωση 61)}$$

Προφανώς, ο συντελεστής L_{e0} του παραπάνω πολυωνύμου ισούται με την τιμή της L_e στη θέση ισορροπίας.

Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί, ότι στην περίπτωση των μικροηχείων, η επαγωγή του πηνίου επηρεάζει ελάχιστα τη συνολική ηλεκτρική εμπέδηση στη συχνοτική περιοχή ως τα 5kHz, συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ως αμελητέα ή μηδέν (Bright, 2002).

2.3.4 Ανομοιομορφία Μάζας

Οι Olsen και Thorborg(1995)έδειξαν ότι η αποτελεσματική μάζα του διαφράγματος του μεγαφώνου μεταβάλλεται συναρτήσει της θέσης – μετατόπισης του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής. Μάλιστα διαπίστωσαν ότι όταν το σύστημα διάφραγμα – πηνίο φωνής βρίσκεται στη θέση μέγιστης απομάκρυνσης από τη θέση ισορροπίας, τότε η αποτελεσματική μάζα του συστήματος παρουσίαζε μία μεταβολή της τάξης του 20%.

Η μεταβολή της μάζας συναρτήσει της μετατόπισης x_d βρέθηκε ότι μπορεί να μοντελοποιηθεί ικανοποιητικά μέσω ενός πολυωνύμου πρώτης τάξης, ως εξής:

$$m(x_d) = \sum_{k=0}^1 m_k x_d^k = m_0 + m_1 x_d \text{ (Εξίσωση 62)}$$

Η τιμή του συντελεστή m_0 ισούται με τη μάζα m_d του συστήματος στη θέση ισορροπίας.

2.3.5 Ανομοιομορφία Επιφάνειας Ακουστικής Ακτινοβολίας

Στην ίδια έρευνα, οι Olsen και Thorborg(1995)έδειξαν ότι η αποτελεσματική επιφάνεια ακουστικής ακτινοβολίας εξαρτάται επίσης από τη μετατόπιση του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής. Αυτή η διακύμανση στην αποτελεσματική

επιφάνεια ακουστικής ακτινοβολίας οφείλεται στον ίδιο μηχανισμό που προκαλεί την ανομοιομορφία στη μάζα του συστήματος. Μάλιστα έδειξαν ότι όταν το σύστημα διάφραγμα – πηνίο φωνής βρίσκεται στη θέση μέγιστης απομάκρυνσης από τη θέση ισορροπίας, τότε η αποτελεσματική επιφάνεια ακουστικής ακτινοβολίας του συστήματος παρουσίαζε μία μεταβολή της τάξης του 12% και μπορεί να μοντελοποιηθεί ικανοποιητικά μέσω ενός πολυωνύμου πρώτης τάξης, ως εξής:

$$S_d(x_d) = \sum_{k=0}^1 S_{d_k} x_d^k = S_{d_0} + S_{d_1} x_d \quad (\text{Εξίσωση 63})$$

Η τιμή του συντελεστή S_{d_0} ισούται με το εμβαδό της επιφάνειας του διαφράγματος S_d στη θέση ισορροπίας.

2.3.6 Μαγνητική Ελκτική Δύναμη

Η μαγνητική ελκτική δύναμη μελετήθηκε αρχικά από τον Cunningham(1949). Πρόκειται για την κλασική ηλεκτροδυναμική ελκτική δύναμη η οποία αναπτύσσεται σε οποιοδήποτε αγωγό διαρρέεται από ρεύμα και κοντά του βρίσκεται κάποιο άλλο αγωγίμο υλικό. Στην περίπτωση του ηλεκτροδυναμικού μεγαφώνου, η δύναμη αυτή αναπτύσσεται στο πηνίο φωνής εξαιτίας του υλικού κατασκευής του πηνίου και του υλικού του μαγνητικού κυκλώματος. Στην περίπτωση που το μαγνητικό υλικό του συστήματος πλησιάζει ή βρίσκεται σε κατάσταση μαγνητικού κορεσμού, η επίδραση της δύναμης αυτής εξασθενίζει.

Η μαγνητική ελκτική δύναμη σχετίζεται με την παράγωγο ως προς τη θέση x_d της αυτεπαγωγής L_e του πηνίου, σύμφωνα με της σχέση:

$$F_{ma} = \frac{1}{2} i_o^2(t) \frac{dL_e(x_d(t))}{dx_d(t)} \quad (\text{Εξίσωση 64})$$

Σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση, φαίνεται ότι η δύναμη αυτή σχετίζεται άμεσα και με την ανομοιομορφία της αυτεπαγωγής L_e του πηνίου φωνής και

επιπλέον συνεπάγεται ότι θα πρέπει να προστεθεί άλλη μία δύναμη στην εξίσωση του μηχανικού συστήματος (Εξίσωση 13).

2.3.7 Συχνοτική Παραμόρφωση

Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα διάφραγμα – πηνίο φωνής έχει πεπερασμένη ταχύτητα καθώς ταλαντώνεται, προκαλώντας την εμφάνιση επιπλέον συχνοτήτων στην έξοδο από αυτές στην είσοδο, προκαλώντας άσχημο ακουστικό αποτέλεσμα. Διάφορες προσομοιώσεις (Klipsch, 1968), (Butterweck, 1989), (Zoltogorski, 1993) έδειξαν ότι το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με την ανομοιομορφία της ανάρτησης και του μαγνητικού πεδίου, ωστόσο, η επίδραση αυτού του φαινομένου είναι αρκετές τάξεις ασθενέστερη σε σχέση με τις ανομοιομορφίες αυτές.

2.3.8 Κατασκευή Μη Γραμμικού Μοντέλου

Ένα μη γραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς μεγαφώνου μπορεί να κατασκευαστεί αν στις εξισώσεις τάσης και δύναμης προσθέσουμε τις παραμέτρους ανομοιομορφίας, οι οποίες αναφέρονται στις προηγούμενες υποενότητες 2.3.1 ως 2.3.7.

Πιο συγκεκριμένα, η εξίσωση τάσης μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$v_c(t) = R_\theta i_c(t) + L_\theta(x_d(t)) \frac{di_c(t)}{dt} + \varphi(x_d(t)) \frac{dx_d(t)}{dt} + i_c(t) \frac{dL_\sigma(x_d(t))}{dx} \frac{dx_d(t)}{dt} \quad (\text{Εξίσωση 65})$$

Στην εξίσωση αυτή έχει ενσωματωθεί η ανομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου και της επαγωγής, οι οποίες εξαρτώνται από τη θέση του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής.

Επίσης, η εξίσωση δύναμης μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$i_c(t)\varphi(x_d(t)) = m_r(x_d(t)) \frac{d^2x_d(t)}{dt^2} + c_r(t) \frac{dx_d(t)}{dt} + k(x_d(t))x_d(t) - \frac{1}{2} i_c^2(t) \frac{dL_\sigma(x_d(t))}{dx_d(t)} \quad (\text{Εξίσω. 66})$$

Στην εξίσωση αυτή έχει ενσωματωθεί η ανομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου, της μάζας, της ανάρτησης και της μαγνητικής ελκτικής δύναμης, οι οποίες εξαρτώνται από τη θέση του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής.

Οι λύσεις των παραπάνω διαφορικών εξισώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του μεγαφώνου, αφού προηγουμένως δοθούν κατάλληλες περιγραφές στις παραμέτρους ανομοιομορφίας του συστήματος. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι διαφορικές αυτές εξισώσεις είναι μη γραμμικές ως προς τη μετατόπιση $x_d(t)$, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι δεν είναι δυνατή η εύρεση μίας γενικής λύσης στο πεδίο της συχνότητας για τη μετατόπιση συναρτήσει της τάσης εισόδου.

Για την επίλυση των τελευταίων διαφορικών εξισώσεων υπάρχουν διάφορες προσεγγιστικές μαθηματικές τεχνικές, όπως αυτή των σειρών Volterra (Kaiser, 1987), της Αρμονικής Ισορροπίας (Klippel, 1992), της NARMAX (Potirakis, Alexakis, Tsilis, & Xenitides, 1999) και της αριθμητικής ολοκλήρωσης (Christensen & Olsen, 1996). Μέχρι σήμερα, όλες αυτές οι τεχνικές έχουν αποδειχθεί ότι είναι υπερβολικά πολύπλοκες και υπολογιστικά ασύμφορες, εκτός της αριθμητικής ολοκλήρωσης, η οποία προσφέρεται ως η μόνη συμφέρουσα τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

3 MATLAB

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά στο εργαλείο Matlab και παρουσιάζονται συνοπτικά το περιβάλλον δημιουργίας γραφικών διεπαφών GUIDE και το περιβάλλον του Simulink του Matlab. Τα εργαλεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση και την ανάπτυξη της γραφική διεπαφής της εφαρμογής και του μοντέλου προσομοίωσης του ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 4.

3.1 Βασικά Χαρακτηριστικά

Το MATLAB είναι μία γλώσσα υψηλού επιπέδου, που χρησιμοποιείται για τεχνικούς υπολογισμούς. Το όνομα Matlab προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Matrix Laboratory και η λειτουργία του βασίζεται κυρίως στην χρήση πινάκων, τα στοιχεία των οποίων μπορούν να είναι πραγματικοί ή μιγαδικοί αριθμοί. Σχεδιάστηκε με αρχικό σκοπό την υπολογιστική επίλυση απλών και σύνθετων μαθηματικών προβλημάτων, ωστόσο σήμερα χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλους τους επιστημονικούς κλάδους. Τα προγράμματα που είναι γραμμένα σε Matlab είναι γενικά σαφή, ευανάγνωστα και εύκολα στην κατανόηση. Η γλώσσα είναι αυστηρά δομημένη στη σύνταξη των εντολών και διαθέτει όλα τα χαρακτηριστικά μίας σύγχρονης γλώσσας προγραμματισμού, η οποία υποστηρίζεται από ένα εξελιγμένο προγραμματιστικό περιβάλλον με πληθώρα βοηθητικών εργαλείων. Τα προγράμματα σε Matlab είναι ανεξάρτητα της πλατφόρμας στην οποία εκτελούνται, ενώ ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι το γεγονός ότι ο προγραμματιστής δεν απαιτείται να ορίζει τον τύπο των μεταβλητών. Επιπλέον, η δυνατότητα του Matlab να κάνει συμβολικές πράξεις και ο μεγάλος αριθμός έτοιμων βιβλιοθηκών που διαθέτει, το κατατάσσει στα καλύτερα λογισμικά της κατηγορίας του (Marchand & Holland, 2003).

3.2 Το Περιβάλλον GUIDE

Το MATLAB διαθέτει ένα ενσωματωμένο περιβάλλον – εργαλειοθήκη για τη σχεδίαση φιλικών στον χρήστη γραφικών διεπαφών. Το περιβάλλον αυτό, που καλείται και ως GUIDE (GraphicalUserInterfaceDesignEnvironment), διαθέτει μία πληθώρα έτοιμων στοιχείων ελέγχου, όπως πλήκτρα, πλαίσια, μενού, άξονες, πίνακες κ.ο.κ.

Μία γραφική διεπαφή αποτελείται από διάφορα παράθυρα, που μπορούν να διαθέτουν ποικίλα στοιχεία ελέγχου, όπως πεδία κειμένου, πλήκτρα, μπάρες κύλισης κ.ο.κ. Τα παράθυρα μπορούν να καλούν το ένα το άλλο, να δέχονται είσοδο από τον χρήστη, να επικοινωνούν μεταβιβάζοντας δεδομένα μεταξύ τους και γενικότερα να επιτελούν διάφορες λειτουργίες (Lent, 2013). Προκειμένου το GUIDE να το πετύχει αυτό, για κάθε ένα παράθυρο δημιουργεί δύο αρχεία, ένα Fig - file και ένα M - file. Πιο συγκεκριμένα:

- Το Fig – file είναι το παράθυρο (figure), όπου το MATLAB αποθηκεύει τα στοιχεία ελέγχου και την ακριβή τους θέση. Ουσιαστικά, στο αρχείο αυτό ο προγραμματιστής σχεδιάζει την εμφάνιση του παραθύρου.
- Το M – file είναι το αρχείο στο οποίο ο προγραμματιστής συγγράφει τον κώδικα που αφορά τη συμπεριφορά των στοιχείων ελέγχου του παραθύρου, προκειμένου το παράθυρο να επιτελεί τις επιθυμητές λειτουργίες.

Επισημαίνεται ότι κάθε fig - file πρέπει να συνοδεύεται από ένα ομώνυμο αρχείο m – file. Αν χαθεί ή καταστραφεί το M – file, τότε το παράθυρο δε θα είναι λειτουργικό. Όποτε ο χρήστης δημιουργεί ένα νέο παράθυρο, το GUIDE δημιουργεί αυτομάτως και τους δύο προαναφερθέντες τύπους αρχείων (Βαρσάμης, 2006).

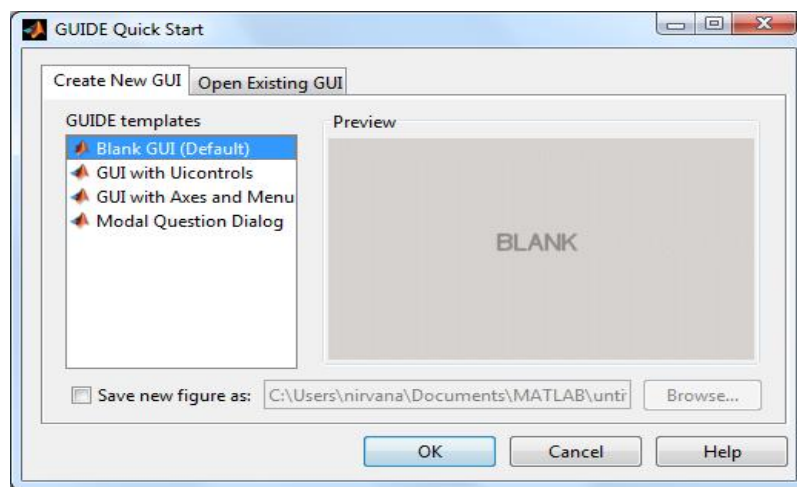
Η εκκίνηση του GUIDE γίνεται με δύο τρόπους:

1. Γράφοντας την εντολή «guide» στη γραμμή εντολών του Matlab
2. Από το μενού του Matlab «File» → «New» → «GUI»

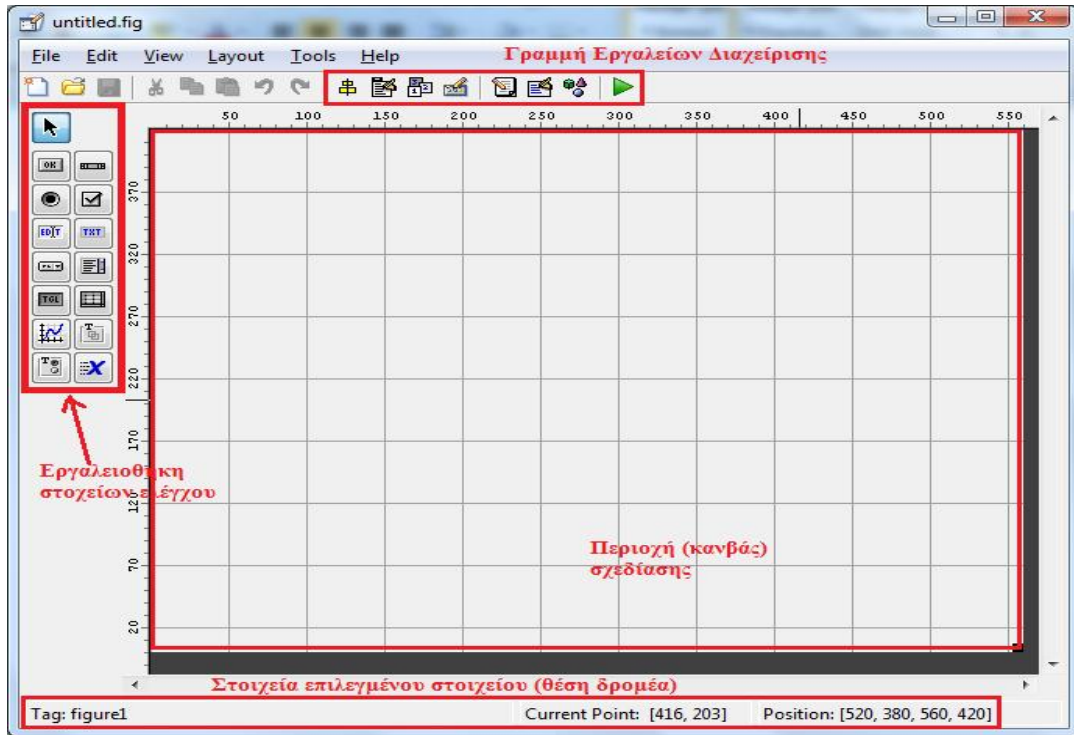
Αμέσως θα ξεκινήσει ένας οδηγός που θα καθοδηγήσει τον χρήστη στη

δημιουργία ενός παραθύρου. Αρχικά ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει αν θέλει να δημιουργήσει ένα κενό παράθυρο (BlankGUI) ή ένα παράθυρο βασισμένο σε κάποια πρότυπα (πχ με άξονες και μενού) ή αν θέλει να ανοίξει ένα έτοιμο παράθυρο. Μόλις ο χρήστης επιλέξει το είδος του παραθύρου επιθυμεί, τότε θα εμφανιστεί το νέο παράθυρο στο περιβάλλον σχεδίασης του GUIDE.

Στις ακόλουθες εικόνες (Εικόνα 1 και Εικόνα 2) φαίνεται ο οδηγός δημιουργίας ενός παραθύρου του GUIDE και το περιβάλλον σχεδίασης του νέου παραθύρου. Τα βασικά τμήματα του περιβάλλοντος σχεδίασης του GUIDE έχουν κόκκινη σήμανση.

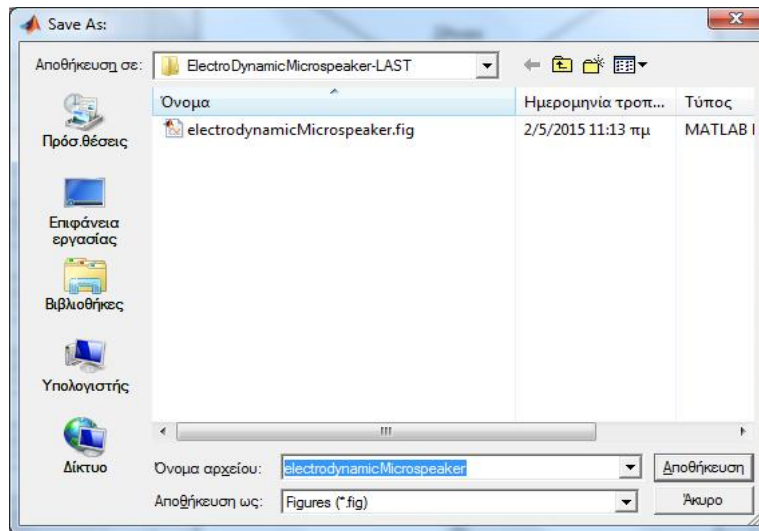


Εικόνα 1: Οδηγός δημιουργίας παραθύρου



Εικόνα 2: Περιβάλλον σχεδίασης νέου παραθύρου του GUIDE

Για την αποθήκευση του παραθύρου, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει «File» → «Saveas...», να επιλέξει τη θέση και το όνομα που θέλει να δώσει στο παράθυρο και να πατήσει το πλήκτρο «Αποθήκευση». Το Matlab θα δημιουργήσει το fig – file και το M – file και θα εμφανίσει σε ένα νέο παράθυρο τον κώδικα του M-file που αφορά το παράθυρο. Στην Εικόνα 3 φαίνεται το παράθυρο αποθήκευσης εφαρμογής GUIDE.











Εικόνα 3: Παράθυρο αποθήκευσης εφαρμογής GUIDE








Στο παράθυρο σχεδίασης του GUIDE ο προγραμματιστής μπορεί να σχεδιάσει τη γραφική διεπαφή που θα εξυπηρετεί την εφαρμογή του. Για το σκοπό αυτόν, το GUIDE διαθέτει μία εργαλειοθήκη στοιχείων ελέγχου, όπου ο προγραμματιστής μπορεί να επιλέξει και να σύρει πάνω στον κανβά σχεδίασης το επιθυμητό στοιχείο.

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4) περιγράφεται η λειτουργία καθενός στοιχείουελέγχου της εργαλειοθήκης του GUIDE.Επισημαίνεται ότι ο προγραμματιστής μπορεί να γράψει κώδικα για οποιοδήποτε στοιχείο ελέγχου, προκειμένου να καθορίσει τη συμπεριφορά του κατά την εκτέλεση της εφαρμογής.

Πίνακας 4: Στοιχεία ελέγχου της εργαλειοθήκης του GUIDE

Εικονίδιο	Λεκτικό	Περιγραφή
	Select	Εργαλείο επιλογής και μετακίνησης αντικειμένων.
	Push Button	Δημιουργεί ένα πλήκτρο, το οποίο εκτελεί μια διαδικασία (Callback) όταν πατηθεί από τον χρήστη κατά την εκτέλεση της εφαρμογής.

	Slider	<p>Δημιουργεί μία μπάρα κύλισης, η οποία δέχεται μία αριθμητική είσοδο εντός ενός πεδίου τιμών που ορίζει ο προγραμματιστής.</p>
	Radio Button	<p>Δημιουργεί ένα πλήκτρο τύπου radio. Ο προγραμματιστής πρέπει να φροντίζει ώστε όταν κατά την εκτέλεση της εφαρμογής ο χρήστης επιλέξει κάποιο radio button, τότε να απενεργοποιούνται τα υπόλοιπα radio buttons. Χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να δώσουμε τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει μόνο μία επιλογή από ένα πλήθος διαθέσιμων επιλογών.</p>
	Check Box	<p>Δημιουργεί ένα πλήκτρο τύπου check. Μοιάζει με ένα radio button, όμως όταν επιλέγεται (τσεκάρεται) από τον χρήστη κατά την εκτέλεση της εφαρμογής, δεν χρειάζεται να απενεργοποιούνται τα υπόλοιπα.</p>
	Edit Text	<p>Δημιουργεί ένα πλαίσιο μέσα στο οποίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει δεδομένα μέσω του πληκτρολογίου κατά την εκτέλεση της εφαρμογής. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά μπορεί να τα αξιοποιήσει η εφαρμογή.</p>
	Static Text	<p>Επιτρέπει τη δημιουργία στατικών κειμένων, για την παροχή πληροφοριών προς τον χρήστη κατά την εκτέλεση της εφαρμογής.</p>
	Pop-Up Menu	<p>Δημιουργεί μία αναπτυσσόμενη λίστα επιλογών.</p>

	List Box	Δημιουργεί μία απλή λίστα επιλογών.
	Toggle Button	Δημιουργεί ένα πλήκτρο τύπου «toggle». Μοιάζει με ένα απλό πλήκτρο (pushbutton) με τη διαφορά ότι μπορεί να έχει δύο τιμές, τις «On» και «Off».
	Table	Χρησιμοποιείται για την οργάνωση και την παρουσίαση δεδομένων σε μορφή πίνακα.
	Axes	Επιτρέπει την τοποθέτηση γραφικών στοιχείων, όπως εικόνων και γραφημάτων.
	Panel	Χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση πολλών εργαλείων.
	Button Group	Χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση πολλών radiobuttons ή togglebuttons.
	ActiveX Control	Επιτρέπει την προσθήκη και εμφάνιση ActiveX χειριστηρίων. Χρησιμοποιείται μόνο στα Windows.








Επιπλέον, το περιβάλλον του GUIDE διαθέτει μία γραμμή εργαλείων διαχείρισης, η οποία παρέχει άμεση πρόσβαση σε χρήσιμα εργαλεία. Η γραμμή των εργαλείων διαχείρισης φαίνεται στην Εικόνα 4.




Εικόνα 4: Γραμμή εργαλείων διαχείρισης του GUIDE

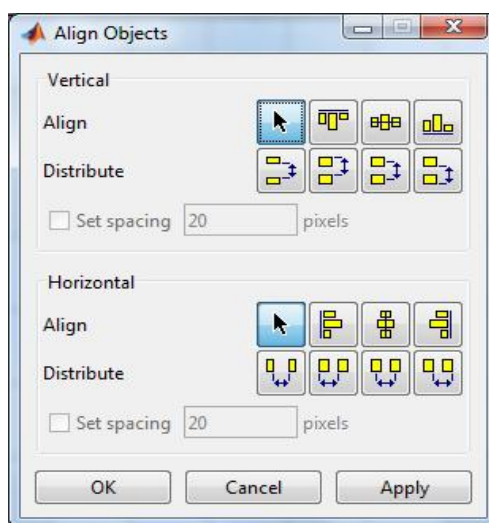
Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5) περιγράφεται η λειτουργία καθενός στοιχείου της γραμμής εργαλείων διαχείρισης του GUIDE.

Πίνακας 5: Στοιχεία γραμμής εργαλείων διαχείρισης του GUIDE

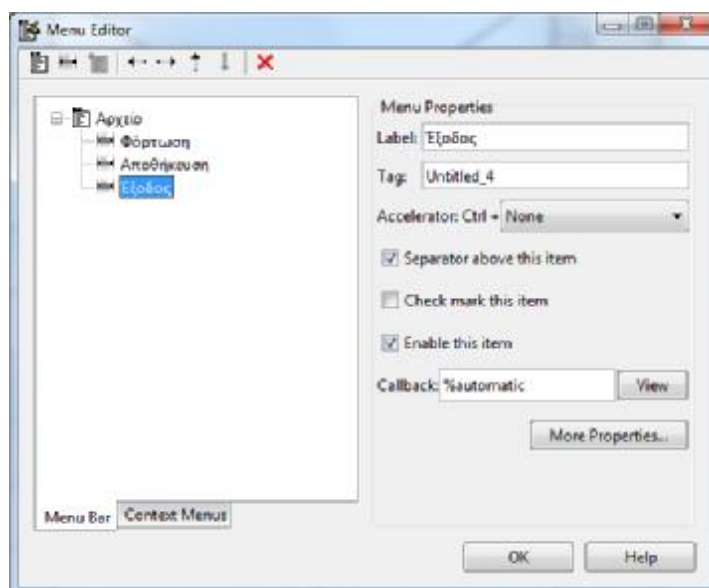
Εικονίδιο	Λεκτικό	Περιγραφή
	Align Objects	Εργαλείο για τη στοίχιση των αντικειμένων – στοιχείων ελέγχου στο παράθυρο της εφαρμογής.
	Menu Editor	Επιτρέπει τη δημιουργία και διαχείριση ενός βασικού μενού για το παράθυρο της εφαρμογής. Επιπλέον, επιτρέπει και τη δημιουργία αναπτυσσόμενων μενού, που ενεργοποιούνται όταν ο χρήστης κάνει δεξί κλικ κατά την εκτέλεση της εφαρμογής.
	Tab Order Editor	Χρησιμεύει για τον ορισμό της σειράς με την οποία τα στοιχεία ελέγχου του παραθύρου αποκτούν την εστίαση, όταν ο χρήστης πατάει το πλήκτρο «Tab» κατά την εκτέλεση της εφαρμογής.
	Toolbar Editor	Επιτρέπει τη δημιουργία γραμμής εργαλείων στο παράθυρο της εφαρμογής.
	Editor	Ανοίγει το παράθυρο επεξεργασίας του κώδικα του παραθύρου, ο οποίος βρίσκεται στο ομώνυμο M-file.
	Property Inspector	Πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον προγραμματιστή, αφού παρέχει άμεση πρόσβαση στις ιδιότητες του επιλεγμένου στοιχείου ελέγχου. Οι ιδιότητες αυτές εμφανίζονται σε ένα παράθυρο.
	Object Browser	Επίσης πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον προγραμματιστή, αφού εμφανίζει την ιεραρχία των στοιχείων ελέγχου που έχει τοποθετήσει στο

		παράθυρο της εφαρμογής.
	RunFigure	Εκτελεί το παράθυρο της εφαρμογής.

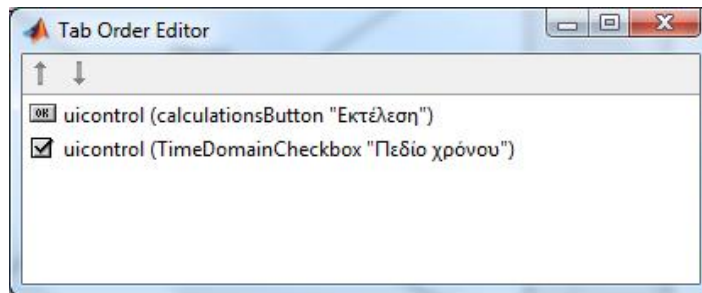
Επίσης, στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα5 ως Εικόνα 9) παρουσιάζονται τα παράθυρα που αντιστοιχούν στα στοιχεία της γραμμής εργαλείων διαχείρισης του GUIDE.



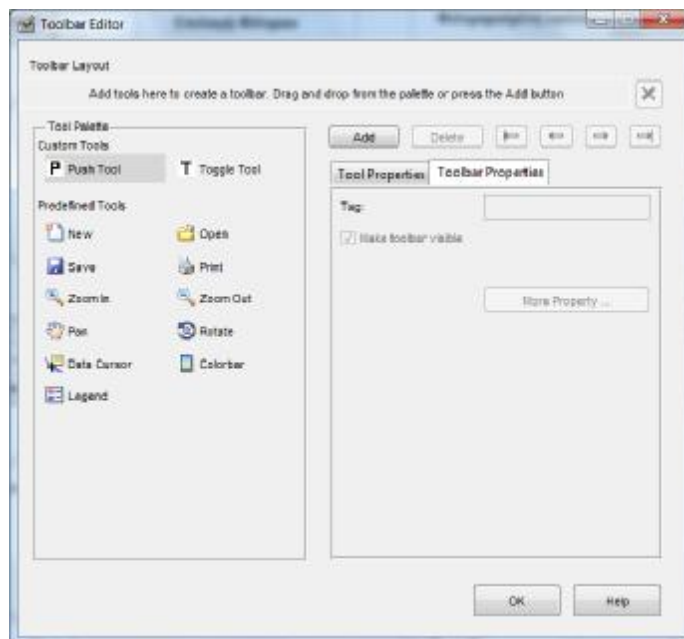
Εικόνα5: ΠαράθυροAlign Objects τουGUIDE



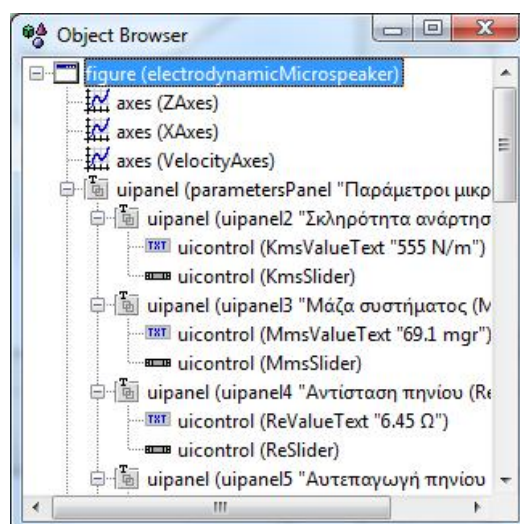
Εικόνα 6: Παράθυρο MenuEditorτου GUIDE



Εικόνα7: ΠαράθυροTab Order Editor τουGUIDE



Εικόνα8: ΠαράθυροToolbar Editor τουGUIDE



Εικόνα 9: Παράθυρο Object Browser του GUIDE

3.3 Simulink

Το Simulink είναι ένα λογισμικό πακέτο του Matlab, που επιτρέπει τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση δυναμικών συστημάτων. Υποστηρίζει γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα, μοντελοποιημένα σε συνεχή ή διακριτό χρόνο ή ακόμη και υβριδικά συστήματα (εν μέρει μοντελοποιημένα σε συνεχή και εν μέρει σε διακριτό χρόνο). Υποστηρίζονται ακόμη συστήματα με τμηματικά διαφορετικούς χρόνους δειγματοληψίας.

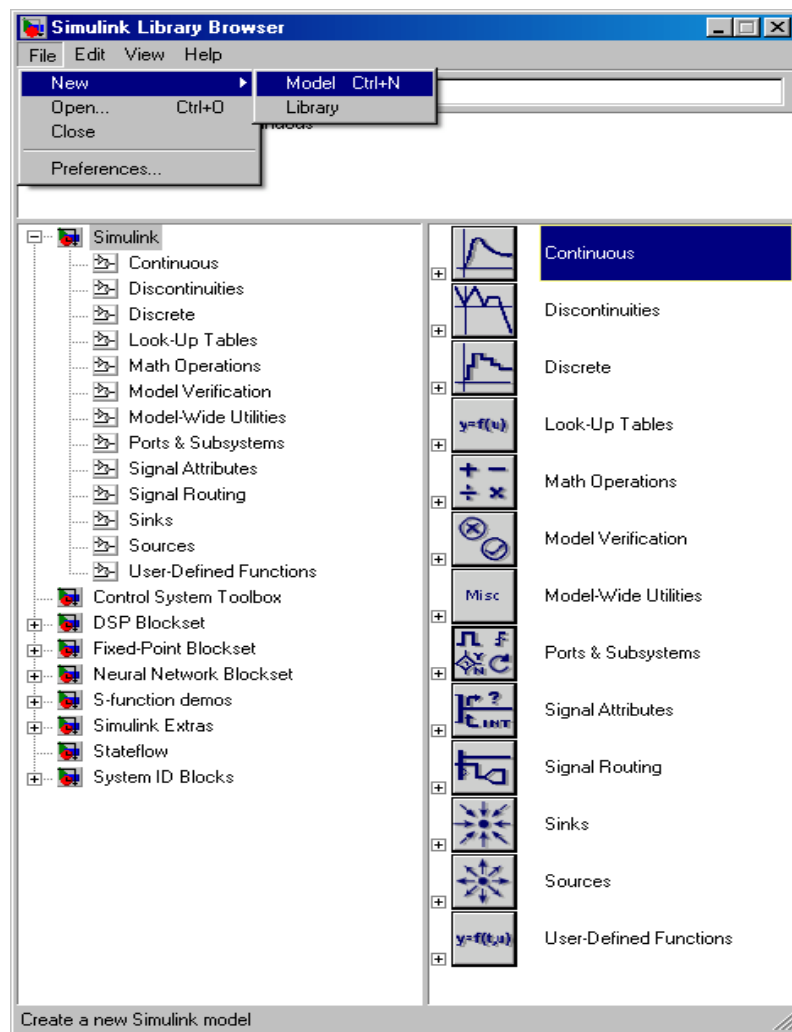
Για τη μοντελοποίηση, το Simulink παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον που επιτρέπει την κατασκευή μοντέλων ως δομικών διαγραμμάτων, χρησιμοποιώντας λειτουργίες click&drag του ποντικιού. Το Simulink περιλαμβάνει ένα πλήθος βιβλιοθηκών δομικών στοιχείων (blocks), τα βασικότερα από τα οποία είναι οι πηγές (sources), τα στοιχεία «απορρόφησης» (sinks), τα συνεχή γραμμικά στοιχεία, τα μη γραμμικά στοιχεία και τα στοιχεία σημάτων και συστημάτων. Είναι επίσης δυνατή η τροποποίηση και η δημιουργία νέων δομικών στοιχείων από το χρήστη.

Τα μοντέλα Simulink είναι ιεραρχικά (ένα μοντέλο μπορεί να περιέχει blocks, τα οποία περιέχουν με τη σειρά τους άλλα blocks), έτσι μπορούν να ιδωθούν σε διάφορα επίπεδα. Ένα σύστημα που έχει ιεραρχική δομή μπορεί να ιδωθεί αρχικά σε υψηλό επίπεδο ως ένα σύνολο διασυνδεδεμένων υποσυστημάτων, κάθε ένα από τα οποία μοντελοποιείται ως ένα block. Στη συνέχεια, κάνοντας διπλό κλικ με το ποντίκι στα επιμέρους blocks, ο χρήστης μπορεί να κατέβει σε χαμηλότερα επίπεδα ώστε να δει αυξανόμενους βαθμούς λεπτομέρειας (MathWorks.com, 2014).

Μετά τη δημιουργία ενός μοντέλου, είναι δυνατή η προσομοίωση του, χρησιμοποιώντας μια από τις διάφορες μεθόδους ολοκλήρωσης που παρέχει το Simulink. Χρησιμοποιώντας παλμογράφους (scopes) και άλλα block απεικόνισης, μπορούμε να παρακολουθούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς αυτή εξελίσσεται. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να εξαχθούν στον χώρο εργασίας του Matlab για περαιτέρω επεξεργασία. Επιπλέον, το Simulink μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση και έλεγχο συστημάτων σε πραγματικό χρόνο, μέσω της εργαλειοθήκης πραγματικού

χρόνου (Real TimeWorkshop).

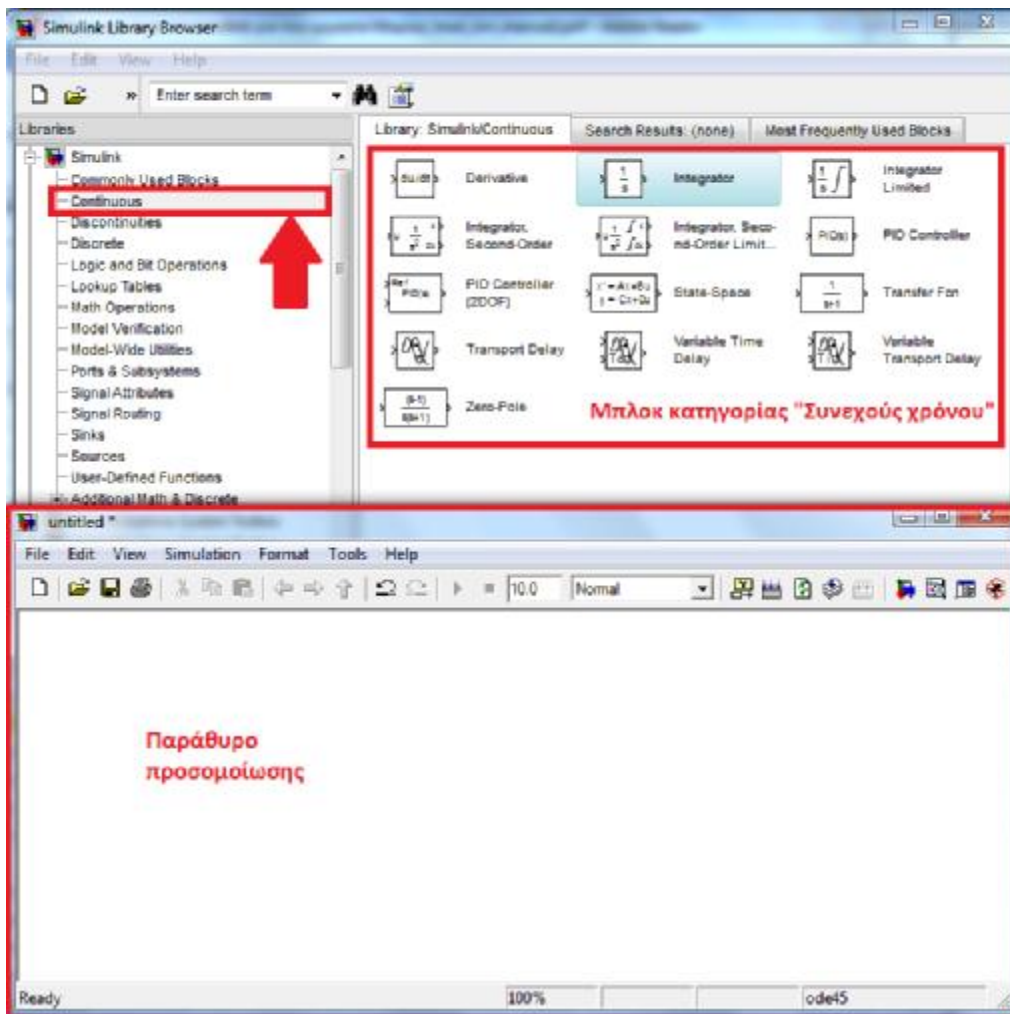
Η εκκίνηση του περιβάλλοντος Simulink γίνεται γράφοντας την εντολή «Simulink» στο παράθυρο εντολών (CommandWindow) του Matlab. Μόλις ανοίξει το Simulink εμφανίζεται το παράθυρο με τη βιβλιοθήκη των blocks (Simulink Library Browser) και επιλέγοντας File → Model μπορούμε να αρχίσουμε ένα νέο μοντέλο (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Παράθυρο Library Browser του Simulink

Πατώντας πάνω σε κάποια κατηγορία, μια λίστα από διαγράμματα (blocks) θα εμφανισθεί σε ξεχωριστό παράθυρο. Αυτά τα διαγράμματα μπορούν να εισαχθούν με απλό σύρσιμο τους στο αρχείο untitled, που αντιπροσωπεύει το μοντέλο της προσομοίωσης. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 13) φαίνονται τα blocks

της κατηγορίας συνεχούς χρόνου (Continuous) και το αρχείο προσομοίωσης untitled.



Εικόνα 13: Παράθυρο με τα block της κατηγορίας Continuous και αρχείο προσομοίωσης

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6) παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικότερες κατηγορίες block που διαθέτει το Simulink. Για κάθε κατηγορία δίνεται μία σύντομη περιγραφή και αναφέρονται τα πιο αντιπροσωπευτικά blocks.

Πίνακας 6: Βασικές κατηγορίες διαγραμμάτων (blocks) του Simulink

Κατηγορία	Περιγραφή	Αντιπροσωπευτικά blocks
Continuous	Blocks για τη μοντελοποίηση γραμμικών συστημάτων συνεχούς χρόνου	<ul style="list-style-type: none"> Derivative Integrator

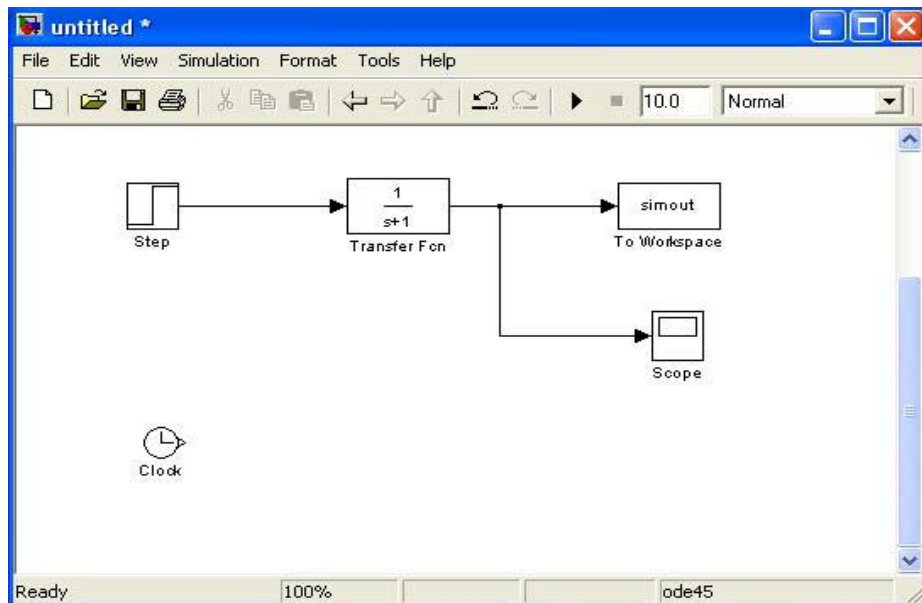
		<ul style="list-style-type: none"> · State Space – · Transfer Fcn
Discontinuities	Blocksγια τη μοντελοποίηση φαινομένων ασυνέχειας	<ul style="list-style-type: none"> · Saturation · Quantizer
Discrete	Blocksγια τη μοντελοποίηση διακριτών συστημάτων	<ul style="list-style-type: none"> · Delay · Difference · Discrete Derivative · Discrete FIR Filter · Discrete Transfer Fcn
Logic & Bit Operations	Χρήσιμα blocksγια την υλοποίηση λογικών πράξεων και πράξεων σε επίπεδο bit	<ul style="list-style-type: none"> · Bitwise Operator · Compare to Constant · Detect Change · Logical Operator
Look-Up Tables	Τα blocksαυτά επιτρέπουν την χρήση συσχετισμένων δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά συνήθως είναι αποθηκευμένα σε πίνακες τιμών	<ul style="list-style-type: none"> · 1-D Lookup Table · N-D Lookup Table · Sine · Cosine
Math Operations	Περιέχει blocksπου υλοποιούν μαθηματικές πράξεις και συναρτήσεις	<ul style="list-style-type: none"> · Abs · Gain · Sum · MinMax

		<ul style="list-style-type: none"> · Rounding Function
Model Verification	Διαθέτει blocks που είναι χρήσιμα για τον έλεγχο και την εκσφαλμάτωση συστημάτων	<ul style="list-style-type: none"> · Assertion · Check Dynamic Range · Check Input Resolution
Model-Wide Utilities	Χρήσιμα blocks για την τεκμηρίωση και καταγραφή των ιδιοτήτων συστημάτων	<ul style="list-style-type: none"> · Model Info · Time based Linearization
Ports & Subsystems	Περιέχει blocks για την υλοποίηση διακλαδώσεων, καθώς και για την υλοποίηση υποσυστημάτων	<ul style="list-style-type: none"> · If · Switch Case · In1 · Out1
Signal Attributes	Πρόκειται για blocks που επιτρέπουν τη διαχείριση ιδιοτήτων των σημάτων, καθώς και την μετατροπή τους σε άλλη μορφή	<ul style="list-style-type: none"> · Bus to Vector · Signal Conversion · Weighted Sample Time
Signal Routing	Πρόκειται για blocks που επιτρέπουν τη δρομολόγηση, πολυπλεξία, αποπολυπλεξία και τον έλεγχο της ροής των σημάτων	<ul style="list-style-type: none"> · Bus Creator · Bus Assignment · Demux · Mux · Data Store Memory
Sinks	Blocks που απορροφούν κάποιο σήμα, δηλαδή δέχονται κάποιο σήμα στην είσοδό τους, ενώ δεν έχουν έξοδο	<ul style="list-style-type: none"> · Display · Scope · Floating

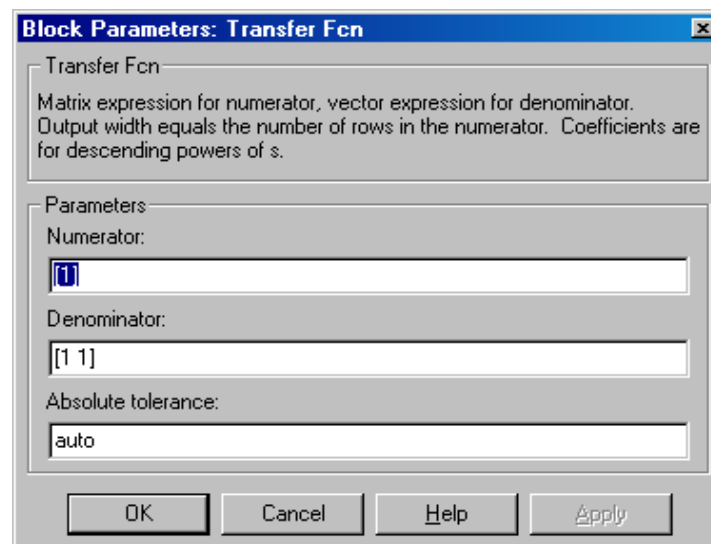
		<ul style="list-style-type: none"> Scope · To File · To Workspace · Stop Simulation · XY Graph
Sources	Blocks που είναι πηγές σημάτων, δηλαδή παράγουν κάποιο σήμα στην έξοδό τους	<ul style="list-style-type: none"> · Clock · Random Number · Step · Constant · From Workspace · Signal Generator · Pulse Generator · Sine Wave
User-Defined Functions	Blocks που επιτρέπουν στον χρήστη να ορίσει νέες δικές του συναρτήσεις	<ul style="list-style-type: none"> · S Function · Matlab Function · Fcn
Additional Discrete & Math Operations	Διαθέτει blocks που επιτρέπουν την εκτέλεση πιο εξεζητημένων μαθηματικών πράξεων	<ul style="list-style-type: none"> · Transfer Fcn Direct Form II · Decrement Time to Zero

Η κατασκευή ενός μοντέλου γίνεται τοποθετώντας τα κατάλληλα blocks, τα οποία στη συνέχεια θα πρέπει να τα συνδέσουμε μεταξύ τους και να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους του καθενός. Η σύνδεση των blocks γίνεται σχεδιάζοντας γραμμές από την έξοδο ενός block προς την είσοδο ενός άλλου block, ενώ η ρύθμιση των

παραμέτρων για το καθένα block γίνεται κάνοντας διπλό κλικ πάνω του. Στις δύο εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 14 και Εικόνα 15) φαίνεται ένα παράδειγμα ολοκληρωμένου μοντέλου με διάφορα συνδεδεμένα blocks (Εικόνα 14), καθώς και το παράθυρο ρύθμισης των παραμέτρων ενός block τύπου Συνάρτησης Μεταφοράς (TransferFcn)(Εικόνα 15).



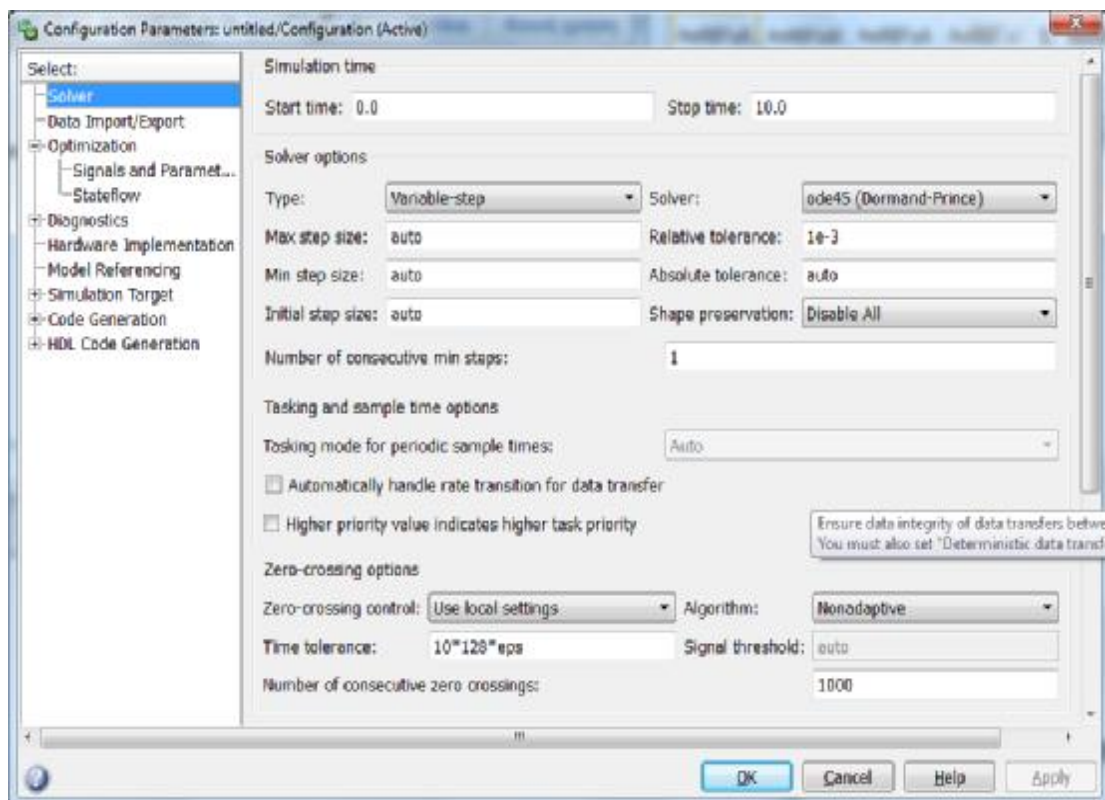
Εικόνα 14: Παράδειγμα μοντέλου Simulink με διάφορα συνδεδεμένα blocks



Εικόνα 15: Παράθυρο ρύθμισης παραμέτρων του block TransferFcn

Μετά τον καθορισμό όλων των απαιτούμενων παραμέτρων για τα blocks που περιλαμβάνονται στο μοντέλο, πρέπει να καθοριστούν οι παράμετροι

της προσομοίωσης. Αυτό γίνεται μέσω του μενού «Simulation» → «ConfigurationParameters» του παραθύρου του μοντέλου, οπότε εμφανίζεται το παράθυρο που φαίνεται στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 16), έχοντας επιλεγμένη την καρτέλα «Solver». Μέσω της καρτέλας αυτής καθορίζονται ο χρόνος έναρξης και λήξης της προσομοίωσης (σε δευτερόλεπτα), η μέθοδος ολοκλήρωσης που θα χρησιμοποιηθεί ανάλογα με αυτήν οι απαιτούμενες παράμετροι.



Εικόνα 16: Καρτέλα Solver του παραθύρου ρύθμισης παραμέτρων προσομοίωσης

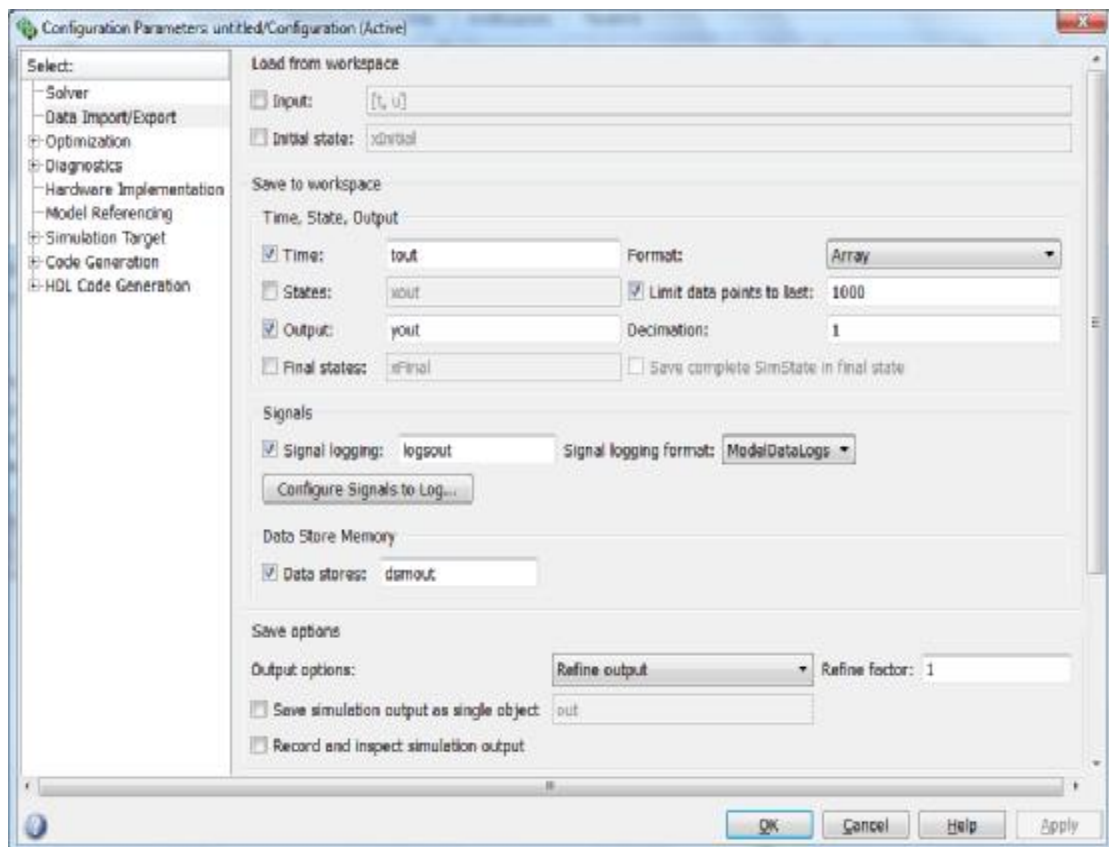
Επίσης, πολύ σημαντική είναι η καρτέλα «DataImport/Export» που φαίνεται στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 17), μέσω της οποίας είναι δυνατή η επικοινωνία με το χώρο εργασίας (workspace) του Matlab. Πιο συγκεκριμένα:

- Με τις επιλογές «Loadfromworkspace» καθορίζεται αν το μοντέλο θα δεχτεί είσοδο ή κάποια αρχική κατάσταση μέσω μεταβλητών του χώρου εργασίας
- Με τις επιλογές «Savetoworkspace» καθορίζονται οι έξοδοι προς το χώρο εργασίας. Στο συγκεκριμένο μοντέλο έχει επιλεγεί η αποθήκευση με μορφή πινάκων «Array» στο χώρο εργασίας του χρόνου προσομοίωσης (με τις


χρονικές στιγμές της ολοκλήρωσης) ως μεταβλητή με όνομα «tout» και των εξόδων του μοντέλου ως μεταβλητή με όνομα «yout».


- Μέσω των επιλογών «Saveoptions» καθορίζονται ορισμένες επιλογές για την αποθήκευση μεταβλητών στο χώρο εργασίας. Η επιλογή του «Limitdatapointstolast:» έχει ως αποτέλεσμα την αποθήκευση μόνο του αριθμού των τελευταίων βημάτων της ολοκλήρωσης που εμφανίζεται στο παράθυρο (η προκαθορισμένη τιμή είναι 1000).

Αν δεν καθοριστούν οι παράμετροι των blocks και/ή της προσομοίωσης, τότε το Simulink θα χρησιμοποιήσει τις προκαθορισμένες παραμέτρους και τιμές.



Εικόνα 17: Καρτέλα DataImport/Export του παράθυρου ρύθμισης παραμέτρων προσομοίωσης

Μετά και τον καθορισμό των παραμέτρων της προσομοίωσης μπορούμε να αποθηκεύσουμε το μοντέλο (σε αρχείο με επέκταση .mdl) και στη συνέχεια να εκτελέσουμε την προσομοίωση. Αυτό γίνεται είτε από το μενού «Simulation» à «Start» του παράθυρου του μοντέλου, είτε κάνοντας κλικ στο εικονίδιο . Η

προσομοίωση σταματάει μόλις ο χρόνος φτάσει την τιμή που είχε τεθεί στην παράμετρο «Stoptime». Εναλλακτικά, μπορούμε να διακόψουμε την προσομοίωση αν επιλέξουμε «Simulation» → «Stop» ή αν κάνουμε κλικ στο εικονίδιο παύσης .

Συνοψίζοντας, τα βήματα για την κατασκευή ενός μοντέλου Simulink και την εκτέλεση της προσομοίωσης είναι τα εξής:

1. Κάνουμε κλικ στο εικονίδιο του browser βιβλιοθηκών, οπότε ανοίγει ένα παράθυρο νέου μοντέλου (untitled)
2. Εισάγουμε τα επιθυμητά blocks από τις κατάλληλες βιβλιοθήκες κάνοντας click & drag με το ποντίκι απευθείας στο παράθυρο του νέου μοντέλου (τα περιεχόμενα μιας βιβλιοθήκης εμφανίζονται κάνοντας διπλό κλικ πάνω στο εικονίδιο του browser)
3. Κάνουμε τις κατάλληλες διασυνδέσεις με click & drag από την έξοδο ενός block στην είσοδο του άλλου
4. Καθορίζουμε τις παραμέτρους των blocks
5. Καθορίζουμε τις παραμέτρους της προσομοίωσης
6. Αποθηκεύουμε το μοντέλο μέσω του μενού «File»
7. Εκτελούμε το μοντέλο

4 Σχεδίαση και Υλοποίηση Εφαρμογής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η σχεδίαση και η υλοποίηση εφαρμογής για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου σύμφωνα με το γραμμικό μοντέλο, που αναπτύχθηκε στην υποενότητα 2.2της παρούσας εργασίας. Η εφαρμογή υλοποιήθηκε με τα περιβάλλονταGUIDEκαι Simulinkτου Matlab έκδοσης 2012a. Πιο συγκεκριμένα, με το περιβάλλον GUIDEκατασκευάστηκε η γραφική διεπαφή της εφαρμογής για τη μελέτη της συμπεριφοράς του μικροηχείου στο πεδίο της συχνότητας, ενώ με το Simulinkαναπτύχθηκε το αντίστοιχο μοντέλο για την προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου. Τα δύο τμήματα της εφαρμογής αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με διαφανή τρόπο προς τον χρήστη.

Σκοπός της εφαρμογής είναι η παροχή ενός γραφικού περιβάλλοντος, που θα επιτρέπει στον χρήστη να επιλέγει τις τιμές των θεμελιωδών ηλεκτρομηχανικών παραμέτρων ενός μικροηχείου και στη συνέχεια θα εμφανίζει μέσω γραφικών παραστάσεων τα βασικά χαρακτηριστικά της απόκρισης του μικροηχείου συναρτήσει της συχνότητας και του χρόνου. Μελετώντας τις γραφικές παραστάσεις ο χρήστης θα είναι σε θέση να εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επιλογή των τιμών των παραμέτρων του μικροηχείου, προκειμένου να επιτύχει την επιθυμητή συμπεριφορά. Υπό αυτήν την έννοια, η εφαρμογή μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο σχεδιαστικό βοήθημα – εργαλείο για την καλύτερη κατανόηση και μελέτη των βασικών αρχών που διέπουν το ηλεκτροδυναμικό μικροηχείο και την επιλογή των βασικών σχεδιαστικών παραμέτρων του.

Στην τρέχουσα έκδοση της εφαρμογής υποστηρίζεται το γραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς του ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου, τοποθετημένο:

1. σε κλειστό κουτί με εσώκλειστο όγκο αέρα και
2. σε άπειρη μπάφλα σε κενό αέρα

Ωστόσο, δεδομένης της ανοικτής αρχιτεκτονικής που διαθέτει η εφαρμογή, μπορεί εύκολα να επεκταθεί μελλοντικά ώστε να μπορεί να καλύψει περισσότερες παραμέτρους και/ή μη γραμμικά μοντέλα συμπεριφοράς, που σχετίζονται με τις ανομοιομορφίες των παραμέτρων του μικροηχείου, όπως αυτές αναφέρονται στην υποενότητα 2.3 της παρούσας εργασίας.

Η επιλογή του Matlab και των ενσωματωμένων περιβαλλόντων GUIDE και Simulink ως προγραμματιστικά περιβάλλοντα για την ανάπτυξη της εφαρμογής έγιναν λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, όπως αναφέρονται στην ενότητα 3 της παρούσας εργασίας. Το βασικότερο πλεονέκτημά τους είναι η ευκολία που παρέχουν στην υλοποίηση γραφικών διεπαφών και μοντέλων συστημάτων, επιτρέποντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα εκτέλεσης προσομοιώσεων με διαφανή και εύκολο τρόπο, τόσο για τον προγραμματιστή όσο και για τον τελικό χρήστη.

Η επιλογή υλοποίησης του γραμμικού μοντέλου συμπεριφοράς του ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου έγινε λόγω της χαμηλότερης μαθηματικής και προγραμματιστικής πολυπλοκότητας που παρουσιάζει και επειδή το γραμμικό μοντέλο προσομοιώνει αρκετά ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του μικροηχείου, επιτρέποντας την ευκολότερη μελέτη και κατανόηση των βασικών αρχών που διέπουν τέτοιου είδους συστήματα.

Επίσης, η επιλογή τοποθέτησης του μικροηχείου σε κλειστό κουτί (με ακουστικό φορτίο) και στο κενό (χωρίς ακουστικό φορτίο) έγινε επειδή αυτός είναι ο τυπικός πειραματικός τρόπος μέτρησης των χαρακτηριστικών της συμπεριφοράς των μικροηχείων στη βιομηχανία.

Η καινοτομία της συγκεκριμένης εφαρμογής βρίσκεται στη διαφάνεια της σύνδεσης της γραφικής διεπαφής GUIDE με το αντίστοιχο μοντέλο Simulink της εφαρμογής και στη δυνατότητα που δίνεται στον χρήστη να επιλέξει τη μελέτη της συμπεριφοράς του μικροηχείου στο πεδίο της συχνότητας ή στο πεδίο του χρόνου ή και στα δύο πεδία μαζί.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή της συνολικής εφαρμογής συνοψίζονται στα εξής:

1. Σχεδίαση της γραφικής διεπαφής με το περιβάλλον GUIDE
2. Σχεδίαση του μοντέλου Simulink
3. Προγραμματισμός των χειριστηρίων της γραφικής διεπαφής και της αλληλεπίδρασης με τον χρήστη και το μοντέλο Simulink

Η σχεδίαση και η κατασκευή της γραφικής διεπαφής της εφαρμογής με το περιβάλλον GUIDE ακολουθεί τους 10 κανόνες ευχρηστίας του Nielsen (Nielsen&Mack, 1994).

Επίσης, ένας βασικός περιορισμός αναφορικά με την εκτέλεση της εφαρμογής είναι ότι η εφαρμογή τρέχει μέσα από το περιβάλλον GUIDE του Matlab 2012a, συνεπώς ο τελικός χρήστης πρέπει να διαθέτει το Matlab έκδοσης τουλάχιστον 2012a, με ενσωματωμένα τα περιβάλλοντα GUIDE και Simulink.

4.1 Σχεδίαση Γραφικής Διεπαφής GUIDE

Το τμήμα της συνολικής εφαρμογής που αναπτύχθηκε στο GUIDE του Matlab, επιτρέπει στον τελικό χρήστη να επιλέξει τις τιμές των βασικών ηλεκτρομηχανικών παραμέτρων του μικροηχείου και στη συνέχεια να υπολογίσει και να εμφανίσει με μορφή γραφημάτων τη συχνотική και τη χρονική απόκριση του μικροηχείου. Ο χρήστης μεταβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων του μικροηχείου και μελετώντας τις γραφικές παραστάσεις μπορεί να εξαγάγει συμπεράσματα σχετικά με την επιλογή των παραμέτρων και τη συμπεριφορά του μικροηχείου.

Η εφαρμογή μέσω της γραφικής της διεπαφής παρέχει τις εξής δυνατότητες στον χρήστη:

- Επιλογή των τιμών των βασικών ηλεκτρομηχανικών παραμέτρων του μικροηχείου.
- Επιλογή εκτέλεσης υπολογισμών στο πεδίο της συχνότητας και του χρόνου.

Η εκτέλεση στο πεδίο του χρόνου εκτελεί στο παρασκήνιο την

προσομοίωση του μοντέλου Simulink και πραγματοποιείται ανταλλαγή δεδομένων της γραφικής διεπαφής με το μοντέλο Simulink.

- Εμφάνιση των βασικών παραμέτρων T/S και γραφημάτων που αφορούν:
 - συνολική ισοδύναμη ηλεκτρική εμπέδηση. Στο πεδίο της συχνότητας εμφανίζεται μόνο το πλάτος, ενώ στο πεδίο του χρόνου εμφανίζονται το πλάτος και η φάση.
 - στάθμη της ακουστικής πίεσης (μόνο στο πεδίο της συχνότητας)
 - μετατόπιση του συστήματος διάφραγμα - πηνίο φωνής και
 - ταχύτητα μετατόπισης του συστήματος διάφραγμα - πηνίο φωνής.

Επίσης, η εφαρμογή αποτελείται από 2 βασικά παράθυρα:

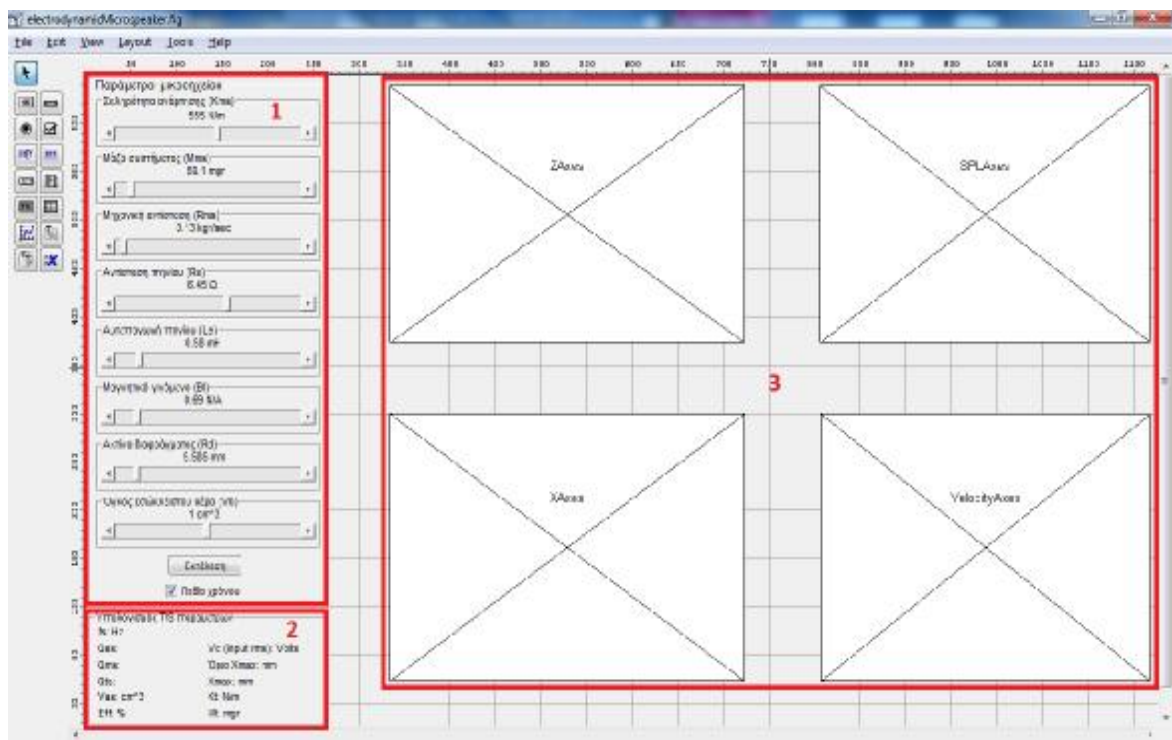
1. Το βασικό παράθυρο (αρχική οθόνη) της εφαρμογής, στο οποίο θα εμφανίζονται τα αποτελέσματα στο πεδίο της συχνότητας και
2. Το παράθυρο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Simulink στο πεδίο του χρόνου.

4.1.1 Βασικό Παράθυρο της Εφαρμογής

Το βασικό παράθυρο της εφαρμογής ονομάζεται `electrodynamicMicrospeaker.fig` και αποτελείται από τα εξής τρία (3) τμήματα:

1. Επιλογής παραμέτρων μικροηχείου,
2. Αποτελέσματα υπολογισμού παραμέτρων T/S,
3. Γραφικές παραστάσεις των χαρακτηριστικών της συμπεριφοράς του μικροηχείου στο πεδίο της συχνότητας.

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 18) παρουσιάζεται το βασικό παράθυρο της εφαρμογής και τα χειριστήριά του, όπως φαίνονται μέσα από το περιβάλλον GUIDE του Matlab. Οι διακριτές – αριθμημένες κόκκινες περιοχές αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα τμήματα του παραθύρου.



Εικόνα 18: Το κεντρικό παράθυρο της εφαρμογής, όπως φαίνεται στο GUIDE του Matlab. Τα τμήματα του παραθύρου εμφανίζονται με κόκκινη σήμανση

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 7) παρουσιάζονται όλα τα χειριστήρια του βασικού παραθύρου electrodynamicMicrospeaker.fig της εφαρμογής με σύντομη επεξήγηση της λειτουργίας τους.

Πίνακας 7: Χειριστήρια του βασικού παραθύρου electrodynamicMicrospeaker.fig

A/A	Τύπος	Όνομα	Λεκτικό	Περιγραφή λειτουργίας
1	Panel	parametersPanel	Παράμετροι μικροηχείου	Ομαδοποιείται χειριστήρια των βασικών παραμέτρων του μικροηχείου
2	Panel	uipanel2	Σκληρότητα ανάρτησης (Kms)	Ομαδοποιεί τα χειριστήρια που αφορούν την ανάρτηση Kms
3	Static text	KmsValueText	555 N/m	Εμφανίζει την τιμή της Kms

4	slider	KmsSlider	555.0	Μπάρα κύλισης για την επιλογή της τιμής της Kms
5	Panel	Uipanel3	Μάζα συστήματος (Mms)	Ομαδοποιεί τα χειριστήρια που αφορούν την μάζα του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής Mms
6	Static text	MmsValueText	69.1 mgr	Εμφανίζει την τιμή της Mms
7	slider	MmsSlider	69.1	Μπάρα κύλισης για την επιλογή της τιμής της Mms
8	Panel	uipanel4	Αντίσταση πηνίου (Re)	Ομαδοποιεί τα χειριστήρια που αφορούν την ηλεκτρική αντίσταση του πηνίου φωνής Re
9	Static text	ReValueText	6.45 Ω	Εμφανίζει την τιμή της Re
10	slider	ReSlider	6.45	Μπάρα κύλισης για την επιλογή της τιμής της Re
11	Panel	Uipanel5	Αυτεπαγωγή πηνίου (Le)	Ομαδοποιεί τα χειριστήρια που αφορούν την αυτεπαγωγή του πηνίου φωνής Le
12	Static text	LeValueText	0.58 mH	Εμφανίζει την τιμή της Le
13	slider	LeSlider	0.58	Μπάρα κύλισης για την επιλογή της τιμής της Le

14	Panel	uipanel6	Μαγνητικό γινόμενο (BI)	Ομαδοποιεί τα χειριστήρια που αφορούν το συντελεστή δύναμης (μαγνητικό γινόμενο) BI
15	Static text	BIValueText	0.69 N/A	Εμφανίζει την τιμή της BI
16	slider	BISlider	0.69	Μπάρα κύλισης για την επιλογή της τιμής της BI
17	Panel	Uipanel7	Μηχανική αντίσταση (Rms)	Ομαδοποιεί τα χειριστήρια που αφορούν τις μηχανικές αντιστάσεις – απώλειες του συστήματος Rms
18	Static text	RmsValueText	0.13 kgr/sec	Εμφανίζει την τιμή της Rms
19	slider	RmsSlider	0.13	Μπάρα κύλισης για την επιλογή της τιμής της Rms
20	Panel	Uipanel8	Ακτίνα διαφράγματος (Rd)	Ομαδοποιεί τα χειριστήρια που αφορούν την ακτίνα του διαφράγματος Rd
21	Static text	RdValueText	5.585 mm	Εμφανίζει την τιμή της Rd
22	slider	RdSlider	5.585	Μπάρα κύλισης για την επιλογή της τιμής της Rd
23	Panel	Uipanel9	Όγκος εσώκλειστου αέρα (Vb)	Ομαδοποιεί τα χειριστήρια που αφορούν τον όγκο του εσώκλειστου αέρα στο κουτί

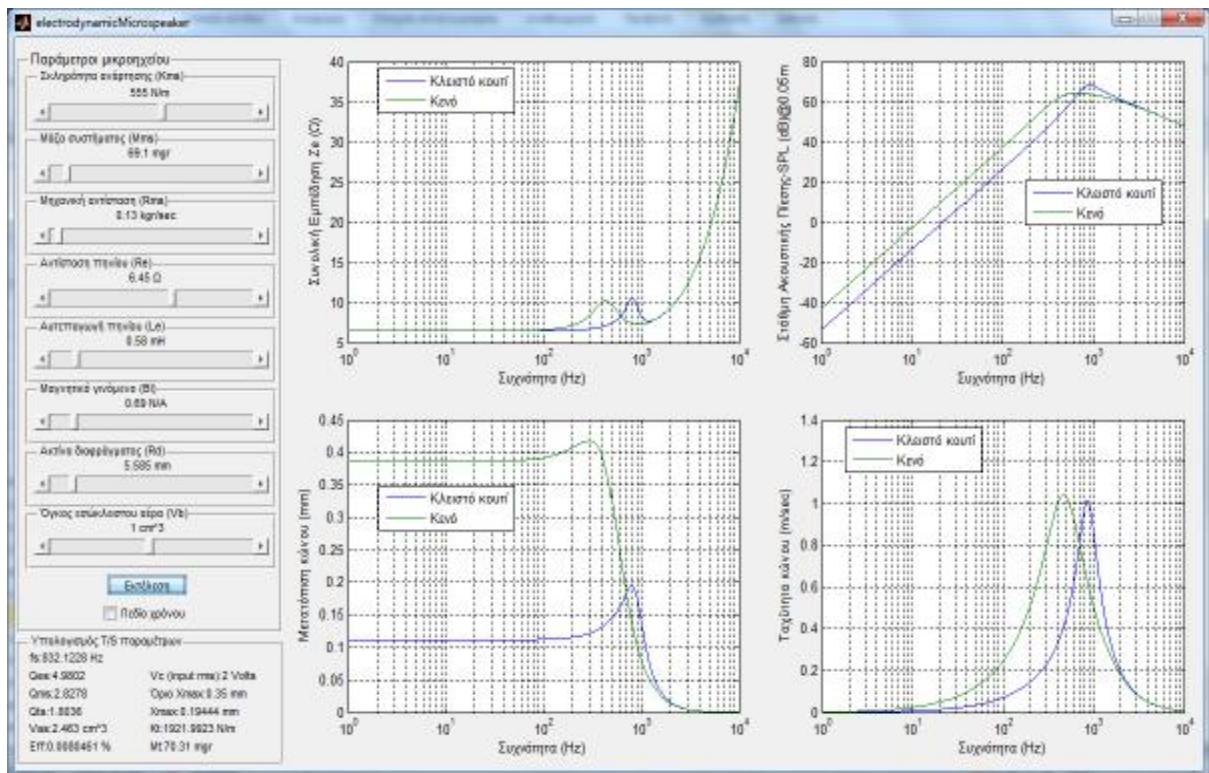
				Vb
24	Static text	VbValueText	1 cm ³	Εμφανίζει την τιμή της Vb
25	slider	VbSlider	1.0	Μπάρα κύλισης για την επιλογή της τιμής της Vb
26	checkbox	TimeDomainCheckbox	Πεδίο χρόνου	Κουτί επιλογής για την εκτέλεση και την εμφάνιση των αποτελεσμάτων στο πεδίο του χρόνου. Αρχικά είναι ενεργοποιημένο (value=on)
27	Pushbutton	calculationsButton	Εκτέλεση	Είναι το βασικό πλήκτρο για τη εκτέλεση όλων των υπολογισμών, καθώς και της προσομοίωσης Simulink, προκειμένου να υπολογιστούν και να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα στο πεδίο της συχνότητας και του χρόνου
28	Panel	uipanel10	Υπολογισμός T/S παραμέτρων	Ομαδοποιεί τα χειριστήρια κειμένου στα οποία θα εμφανίζονται οι τιμές των βασικών παραμέτρων Thiele/Small, καθώς και άλλων χαρακτηριστικών, που υπολογίζει η εφαρμογή
29	Static text	fsValueText	fs: Hz	Εμφανίζει την τιμή της

				συχνότητας συντονισμού του συστήματος
30	Static text	QesValueText	Qes:	Εμφανίζει την τιμή του ηλεκτρικού συντελεστή ποιότητας Qes του συστήματος
31	Static text	QmsValueText	Qms:	Εμφανίζει την τιμή του μηχανικού συντελεστή ποιότητας Qms του συστήματος
32	Static text	QtsValueText	Qts:	Εμφανίζει την τιμή του συνολικού συντελεστή ποιότητας Qts του συστήματος
33	Static text	VasValueText	Vas: cm ³	Εμφανίζει την τιμή του ισοδύναμου όγκου αέρα που έχει ίδια ενδοτικότητα με τη σκληρότητα της συνολικής ανάρτησης του συστήματος
34	Static text	EffValueText	Eff: %	Εμφανίζει την τιμή της αποδοτικότητας του συστήματος
35	Static text	XmaxLimitValueText	Όριο Xmax: mm	Εμφανίζει την τιμή του επιτρεπτού ορίου μέγιστης μετατόπισης του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής. Η τιμή του είναι ορισμένη στα

				0.35mm
36	Static text	XmaxValueText	Xmax: mm	Εμφανίζει την τιμή της μέγιστης μετατόπισης του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής στο εύρος των συχνοτήτων [1, 10000]Hz. Όταν η τιμή της υπερβαίνει το όριο Xmax (0.35mm) σημαίνει ότι ο χρήστης θα πρέπει να αλλάξει τις παραμέτρους ώστε η μετατόπιση να βρίσκεται στα επιτρεπτά όρια.
37	Static text	VcValueText	Vc (input rms): Volts	Εμφανίζει την τιμή της ενεργού τάσης τροφοδοσίας του μικροηχείου. Η τιμή της είναι σταθερή και ίση με 2 Volts
38	Static text	ktValueText	Kt: N/m	Εμφανίζει την τιμή της συνολικής σκληρότητας του συστήματος. Πρόκειται για το άθροισμα της σκληρότητας της μηχανικής ανάρτησης και της ενδοτικότητας του εσώκλειστου αέρα στο κουτί (ακουστικό φορτίο)
39	Static text	mtValueText	Mt: mgr	Εμφανίζει την τιμή της συνολικής μάζας του συστήματος. Πρόκειται για το

				άθροισμα της μάζας του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής και της μάζας του εσώκλειστου αέρα στο κουτί (ακουστικό φορτίο)
40	Axes	ZAxes	---	Περιοχή εμφάνισης του πλάτους της συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης $ Z_e $ του συστήματος συναρτήσει της συχνότητας. Μετριέται σε Ω
41	Axes	XAxes	---	Περιοχή εμφάνισης της μετατόπισης X του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής συναρτήσει της συχνότητας. Μετριέται σε mm
42	Axes	VelocityAxes	---	Περιοχή εμφάνισης της ταχύτητας μετατόπισης V του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής συναρτήσει της συχνότητας. Μετριέται σε m/s
43	Axes	SPLAxes	---	Περιοχή εμφάνισης της στάθμης της ακουστικής πίεσης SPL συναρτήσει της συχνότητας. Η μέτρηση γίνεται σε απόσταση $r=0.05m$ (5 cm)

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 19) παρουσιάζεται το βασικό παράθυρο και τα χειριστήρια της εφαρμογής κατά τον χρόνο εκτέλεσης.



Εικόνα 19: Το βασικό παράθυρο (electrodynamicMicrospeaker.fig) κατά τον χρόνο εκτέλεσης

Η επιλογή του εύρους των τιμών που χρησιμοποιήθηκαν για τις μάρκες κύλισης που σχετίζονται με τις παραμέτρους του μικροηχείου έχει γίνει με βάση πραγματικές τιμές τυπικών μικροηχείων του εμπορίου.

Στο κάτω αριστερό μέρος του παραθύρου φαίνεται το πλαίσιο «Υπολογισμός T/Σπαραμέτρων», στο οποίο εμφανίζονται τα αποτελέσματα υπολογισμού των βασικών παραμέτρων του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζονται οι τιμές των εξής παραμέτρων:

- F_s : Συχνότητα συντονισμού
- Q_{es}, Q_{ms}, Q_{ts} : Είναι αντίστοιχα ο ηλεκτρικός, μηχανικός και συνολικός συντελεστής ποιότητας του συστήματος

- V_{as} : Ισοδύναμος όγκος αέρα που έχει ίδια σκληρότητα με τη συνολική σκληρότητα (Kt) του συστήματος
- Eff : Αποδοτικότητα
- V_c ($input_{rms}$): Ενεργός τιμή τάσης τροφοδοσίας
- Όριο X_{max} : Μέγιστο επιτρεπτό όριο μετατόπισης διαφράγματος – πηνίου φωνής
- X_{max} : Μέγιστη μετατόπιση που επιτυγχάνεται
- Kt : Συνολική σκληρότητα συστήματος (συμπεριλαμβάνει το ακουστικό φορτίο)
- Mt : Συνολική μάζα συστήματος (συμπεριλαμβάνει το ακουστικό φορτίο)

Επίσης, τα γραφήματα που παρουσιάζονται είναι πλαισιωμένα με αντιπροσωπευτικά λεκτικά – κείμενα στον οριζόντιο και στον κατακόρυφο άξονα, ενώ επιπλέον σε κάθε γραφική παράσταση απεικονίζονται δύο καμπύλες:

- Μία καμπύλη μπλε χρώματος, που απεικονίζει τη συμπεριφορά του μικροηχείου όταν είναι τοποθετημένο σε κλειστό κουτί με εσώκλειστο όγκο αέρα (ακουστικό φορτίο)
- Μία καμπύλη πράσινου χρώματος, που απεικονίζει τη συμπεριφορά του μικροηχείου όταν είναι τοποθετημένο σε κενό αέρα (χωρίς ακουστικό φορτίο)

Τέλος, για τα γραφήματα στο πεδίο της συχνότητας έχει επιλεγεί η λογαριθμική κλίμακα απεικόνισης για τον οριζόντιο άξονα.

4.1.2 Παράθυρο Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης *Simulink*

Η εφαρμογή διαθέτει ένα επιπλέον παράθυρο, το οποίο δημιουργείται δυναμικά κατά την εκτέλεση, εφόσον ο χρήστης έχει επιλέξει το πλαίσιο «Πεδίο χρόνου» στο βασικό παράθυρο της εφαρμογής. Στο παράθυρο αυτό εμφανίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης *Simulink* του γραμμικού μοντέλου συμπεριφοράς του μικροηχείου στο πεδίο του χρόνου και στη συχνότητα συντονισμού που έχει

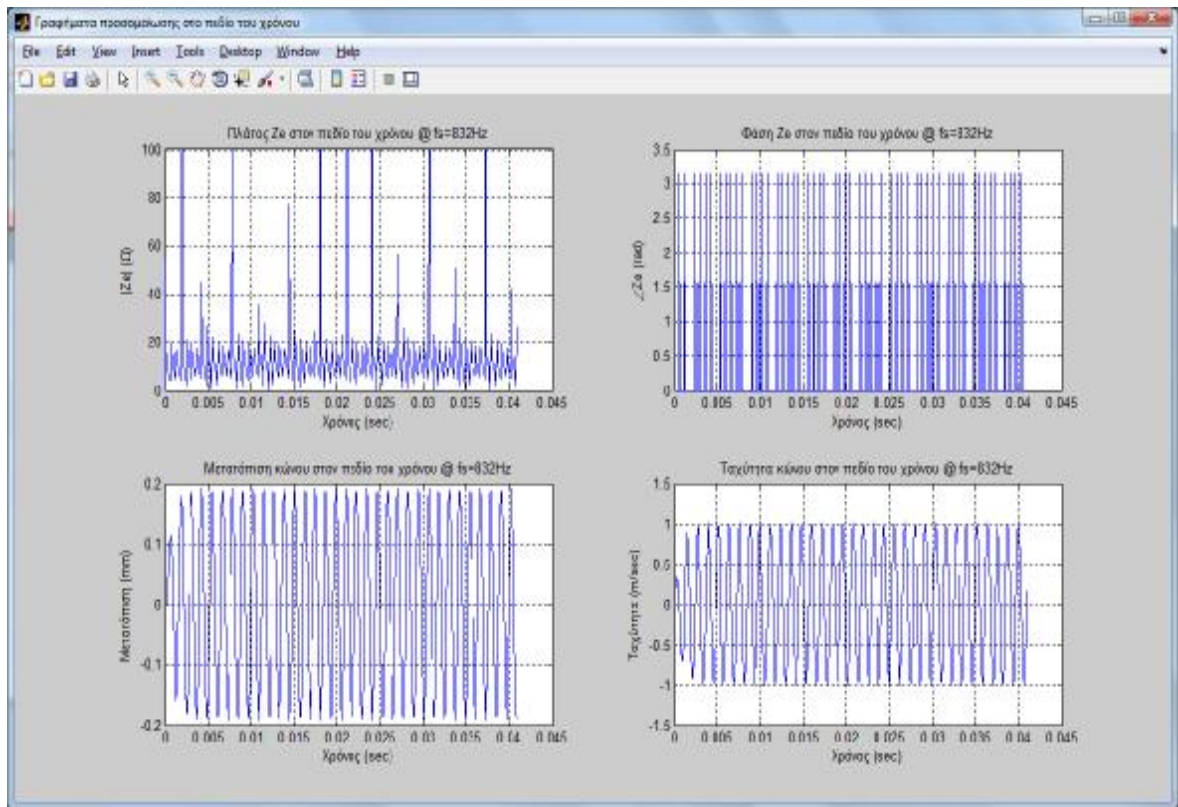
υπολογιστεί με βάσει τις παραμέτρους που έχει επιλέξει ο χρήστης. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται με τη μορφή γραφημάτων συμπεριλαμβάνοντας:

- Πλάτος της συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης του συστήματος
- Φάση της συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης του συστήματος
- Μετατόπιση του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής
- Ταχύτητα μετατόπισης του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής

Οι γραφικές παραστάσεις απεικονίζουν ένα τμήμα των συνολικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για το καθένα μέγεθος που μελετάται, δεδομένου ότι η απεικόνιση όλων τους προκαλεί την υπερφόρτωση των γραφημάτων σε βαθμό που είναι πρακτικά αδύνατο να μελετηθούν με γυμνό μάτι. Πιο συγκεκριμένα έχει επιλεγεί να εμφανίζονται τα 400 πρώτα χρονικά αποτελέσματα της προσομοίωσης, αριθμός που θεωρείται επαρκής για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στη διάθεση του χρήστη βρίσκονται και τα εργαλεία μεγέθυνσης, σμίκρυνσης, αποθήκευσης κοκ, που διαθέτει το παράθυρο, εφόσον ο χρήστης επιθυμεί να εκτελέσει τις αντίστοιχες λειτουργίες.

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 20) φαίνεται το παράθυρο με τα γραφήματα που αφορούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Simulink στο πεδίο του χρόνου και στη συχνότητα συντονισμού του μικροηχείου. Τα συγκεκριμένα γραφήματα έχουν υπολογιστεί με βάσει τις προκαθορισμένες τιμές της εφαρμογής για τις παραμέτρους του μικροηχείου.



Εικόνα 20: Παράθυρο αποτελεσμάτων προσομοίωσης Simulink στο πεδίο του χρόνου και στη συχνότητα συντονισμού του μικροηχείου

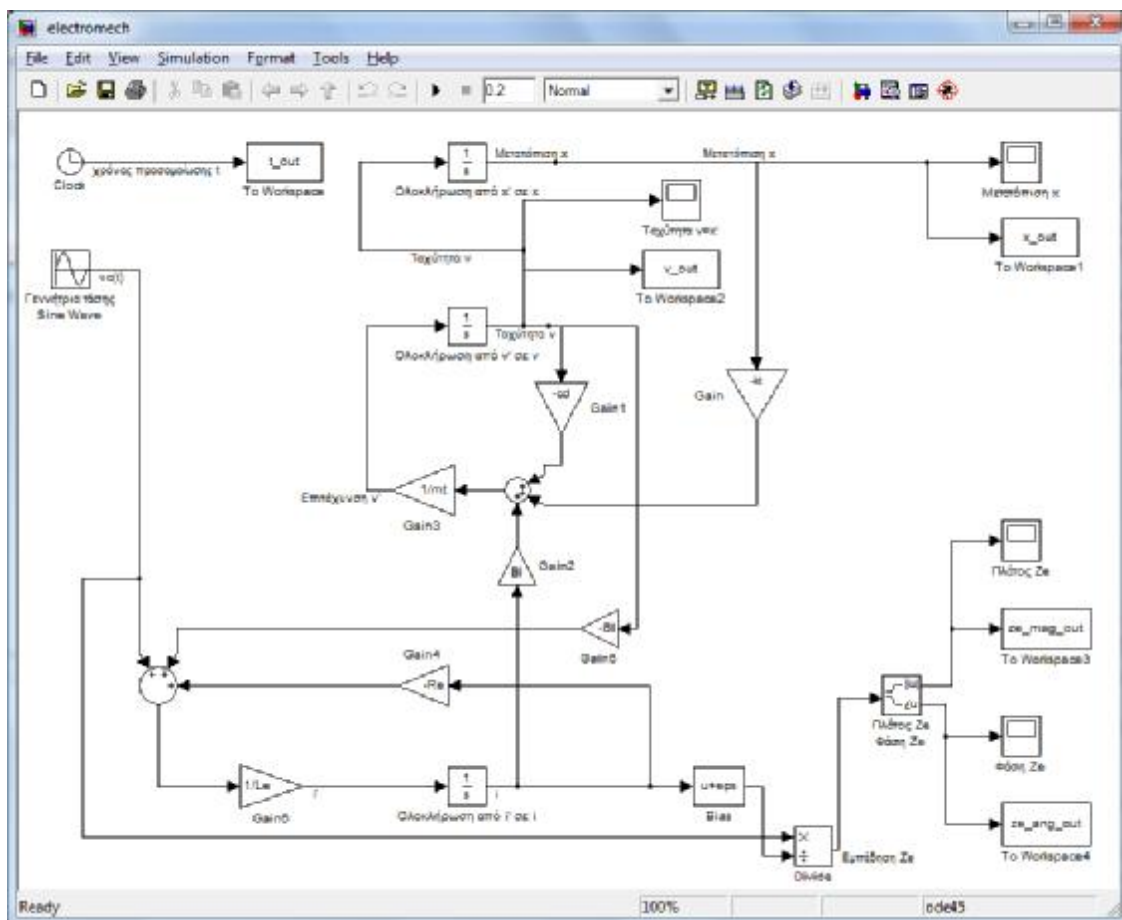
4.2 Σχεδίαση Μοντέλου Simulink

Το μοντέλο Simulink που κατασκευάστηκε αφορά το γραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς του μικροηχείου, όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις του ηλεκτρικού κυκλώματος (Εξίσωση 9) και του μηχανικού κυκλώματος (Εξίσωση 13) των υποενότητων 2.2.1 και 2.2.2 αντίστοιχα.

Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, το μοντέλο Simulink αλληλεπιδρά με τη βασική γραφική διεπαφή GUIDE της εφαρμογής, δεχόμενο ως εισόδους τη συχνότητα συντονισμού του συστήματος και τις τιμές των ηλεκτρομηχανικών παραμέτρων που έχει επιλέξει ο χρήστης και επιστρέφει ως εξόδους πίνακες με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο πεδίο του χρόνου για το πλάτος και τη φάση της συνολικής ηλεκτρικής εμπέδησης, τη μετατόπιση και την ταχύτητα μετατόπισης του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής. Τόσο η εκτέλεση της προσομοίωσης

όσο και η επικοινωνία του μοντέλου Simulink με τη γραφική διεπαφή GUIDE γίνεται στο παρασκήνιο, χωρίς να απαιτείται η παρέμβαση του χρήστη.


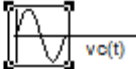
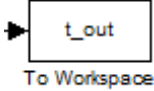
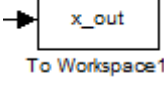

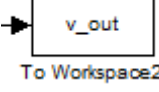
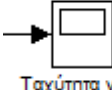
Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 21) παρουσιάζεται το μοντέλο που κατασκευάστηκε με το Simulink για την προσομοίωση του γραμμικού μοντέλου συμπεριφοράς του ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου, όταν είναι τοποθετημένο σε κλειστό κουτί με εσώκλειστο όγκο αέρα.

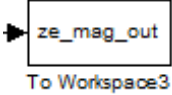

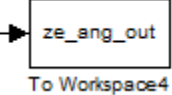
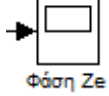
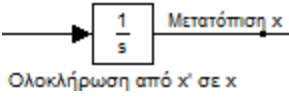
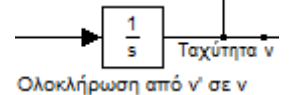
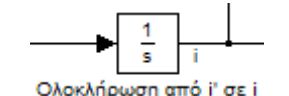
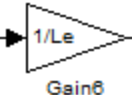


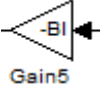
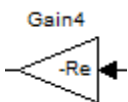

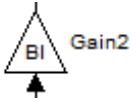
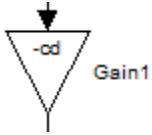
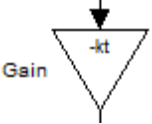
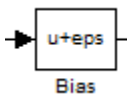
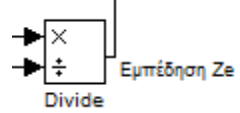
Εικόνα 21: Μοντέλο Simulink για την προσομοίωση του γραμμικού μοντέλου του ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου


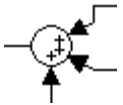

Επίσης, στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 8) φαίνονται τα blocks που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου μαζί με μία σύντομη περιγραφή τους.

Πίνακας 8: BlocksSimulink για το γραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς μικροηχείου

A/A	Τύπος	Εικονίδιο - Όνομα	Περιγραφή λειτουργίας
1	Source	 Clock	Χρόνος – διάρκεια της προσομοίωσης (0.2 sec)
2	Source	 Γεννήτρια τάσης Sine Wave	Παράγει ένα ημιτονοειδές σήμα, που εκφράζει την τάση που εφαρμόζεται στο μικροηχείο. Το πλάτος και η συχνότητα του σήματος λαμβάνουν τις τιμές τους από τη γραφική διεπαφή GUIDE
3	Sink	 To Workspace	Επιστρέφει στο περιβάλλον εργασίας του Matlab έναν πίνακα με τις χρονικές στιγμές εκτέλεσης της προσομοίωσης
4	Sink	 To Workspace1	Επιστρέφει στο περιβάλλον εργασίας του Matlab έναν πίνακα με τις τιμές της μετατόπισης στη διάρκεια της προσομοίωσης
5	Sink	 Μετατόπιση x	Παράθυρο τύπου scope για τη γραφική απεικόνιση της μετατόπισης στη διάρκεια της προσομοίωσης. Χρήσιμο για εποπτεία μέσα από το περιβάλλον Simulink
6	Sink	 To Workspace2	Επιστρέφει στο περιβάλλον εργασίας του Matlab έναν πίνακα με τις τιμές της ταχύτητας μετατόπισης στη διάρκεια της προσομοίωσης
7	Sink	 Ταχύτητα v=x'	Παράθυρο τύπου scope για τη γραφική απεικόνιση της ταχύτητας μετατόπισης στη διάρκεια της προσομοίωσης. Χρήσιμο για εποπτεία μέσα από το

			περιβάλλον Simulink
8	Sink		Επιστρέφει στο περιβάλλον εργασίας του Matlabέναν πίνακα με τις τιμές του πλάτους της ηλεκτρικής εμπέδησης στη διάρκεια της προσομοίωσης
9	Sink		Παράθυρο τύπου scopeγια τη γραφική απεικόνιση του πλάτους της ηλεκτρικής εμπέδησης στη διάρκεια της προσομοίωσης. Χρήσιμο για εποπτεία μέσα από το περιβάλλον Simulink
10	Sink		Επιστρέφει στο περιβάλλον εργασίας του Matlabέναν πίνακα με τις τιμές της φάσης της ηλεκτρικής εμπέδησης στη διάρκεια της προσομοίωσης
11	Sink		Παράθυρο τύπου scopeγια τη γραφική απεικόνιση της φάσης της ηλεκτρικής εμπέδησης στη διάρκεια της προσομοίωσης. Χρήσιμο για εποπτεία μέσα από το περιβάλλον Simulink
12	Integrator		Ολοκλήρωση ταχύτητας $v=x'$ για τον υπολογισμό της θέσης – μετατόπισης x
13	Integrator		Ολοκλήρωση επιτάχυνσης v' για τον υπολογισμό της ταχύτητας $v=x'$
14	Integrator		Ολοκλήρωση ηλεκτρικού φορτίου i' για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής έντασης i
15	Gain		Πολλαπλασιασμός με $1/L_e$. Η τιμή της αυτεπαγωγής L του πηνίου προέρχεται από τη γραφική διεπαφή

			GUIDE
16	Gain		Πολλαπλασιασμός με $-Bl$. Η τιμή του μαγνητικού γινομένου Bl προέρχεται από τη γραφική διεπαφή GUIDE
17	Gain		Πολλαπλασιασμός με $-Re$. Η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης Re προέρχεται από τη γραφική διεπαφή GUIDE
18	Gain		Πολλαπλασιασμός με $1/mt$. Η τιμή της συνολικής μάζας mt του συστήματος (μαζί με το ακουστικό φορτίο) προέρχεται από τη γραφική διεπαφή GUIDE
19	Gain		Πολλαπλασιασμός με Bl . Η τιμή του μαγνητικού γινομένου Bl προέρχεται από τη γραφική διεπαφή GUIDE
20	Gain		Πολλαπλασιασμός με $-cd$. Η τιμή των μηχανικών απωλειών cd του συστήματος προέρχεται από τη γραφική διεπαφή GUIDE
21	Gain		Πολλαπλασιασμός με $-kt$. Η τιμή της συνολικής σκληρότητας kt του συστήματος (μαζί με το ακουστικό φορτίο) προέρχεται από τη γραφική διεπαφή GUIDE
22	Bias		Προσθέτει μία πολύ μικρή τιμή στην τιμή της έντασης του ρεύματος, έτσι ώστε να μην μηδενίζει
23	Divide		Υπολογίζει την ηλεκτρική εμπέδηση Z_e του συστήματος, ως το πηλίκο τάσης προς ένταση

			ρεύματος
24	Magnitude - Angle		Υπολογίζει το πλάτος και τη φάση της ηλεκτρικής εμπέδηση Ζετου συστήματος, χρησιμοποιώντας τη μιγαδική μορφή της ηλεκτρικής εμπέδησης
25	Sum		Αθροίζει υπολογίζοντας την ποσότητα $[BI \cdot i_c(t) - kt \cdot x(t) - cd \cdot u(t)]$, η οποία στη συνέχεια θα πολλαπλασιαστεί με $1/mt$ (Gain3) ώστε να υπολογιστεί η επιτάχυνση v' . Ουσιαστικά υλοποιεί ένα κομμάτι της Εξίσωσης 13, που αναφέρεται στην υποενότητα 2.2.2
26	Sum		Αθροίζει υπολογίζοντας την ποσότητα $[-BI \cdot u(t) - Re \cdot i_c(t) + V_c(t)]$, η οποία στη συνέχεια θα πολλαπλασιαστεί με $1/Le$ (Gain6) ώστε να υπολογιστεί το ηλεκτρικό φορτίο. Ουσιαστικά υλοποιεί ένα κομμάτι της Εξίσωσης 9, που αναφέρεται στην υποενότητα 2.2.1

4.3 Προγραμματισμός Συμπεριφοράς της Εφαρμογής

Στην υποενότητα αυτή καταγράφεται ο προγραμματισμός (κώδικας Matlab) της συμπεριφοράς των χειριστηρίων της εφαρμογής και της συνολικής αλληλεπίδρασης με τον χρήστη, καθώς και η αλληλεπίδραση – επικοινωνία με το μοντέλο Simulink του κατασκευάστηκε.

4.3.1 Εκτέλεση Υπολογισμών – Προσομοίωσης (Πλήκτρο «Εκτέλεση»)

Ο κύριος όγκος του κώδικα βρίσκεται στο αρχείο `electrodynamicMicrospeaker.m`, το οποίο είναι το M-file του βασικού παραθύρου `electrodynamicMicrospeaker.fig`.

Η προσομοίωση Simulink καλείται από το βασικό παράθυρο της εφαρμογής, όταν ο χρήστης πατήσει το πλήκτρο «Εκτέλεση», ενώ τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εμφανίζονται σε νέο παράθυρο που δημιουργείται δυναμικά. Επειδή η προσομοίωση χρειάζεται να λάβει ως είσοδο τις τιμές των παραμέτρων του μικροηχείου, ώστε να μπορέσει να εκτελεστεί, είναι απαραίτητο οι μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους αυτές να αποθηκευτούν στον χώρο εργασίας (Workspace) του Matlab, ώστε να είναι ορατές στο Simulink.

Παρακάτω παρατίθεται σχολιασμένος ο κώδικας που εκτελείται όταν πατηθεί το πλήκτρο «Εκτέλεση»:

```
% --- Executes on button press in calculationsButton.
function calculationsButton_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to calculationsButton (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Σταθερές
c=343; % Ταχύτητα ήχου στον αέρα
p=1.21; % Πυκνότητα αέρα
Volts = 2.0; % Ενεργός τάση τροφοδοσίας
xmaxLimit=0.35*10^-3;%Όριο μετατόπισης διάφραγμα-πηνίο φωνής 0.35mm
r=0.05; % Απόσταση μέτρησης SPL σε m

% Συγκεντρώνω τα δεδομένα από τα χειριστήρια - sliders
Kms = get(handles.KmsSlider,'Value');
Mms = get(handles.MmsSlider,'Value');
Mms = Mms*0.000001; % Αναγωγήσε kg
Rms = get(handles.RmsSlider,'Value');
Re = get(handles.ReSlider,'Value');
Le = get(handles.LeSlider,'Value');
Le = Le*0.001; % Αναγωγήσε H
Bl = get(handles.BlSlider,'Value');
Rd = get(handles.RdSlider,'Value');
Rd = Rd*0.001; % Αναγωγήσε m
Vb = get(handles.VbSlider,'Value');
Vb = Vb*0.000001; % Αναγωγή σε m^3

Sd = pi*Rd^2; % Εμβαδό διαφράγματος
ka = p*c^2*Sd^2/Vb; % Ενδοτικότητα ακουστικού φορτίου λόγω
% εσώκλειστου αέρα
kt = Kms + ka; % Συνολική σκληρότητα
cd = Rms; % Συνολικές απώλειες συστήματος
ma = p*Vb; % Μάζα ακουστικού φορτίου (εσώκλειστου αέρα)
mt = Mms + ma; % Συνολική μάζα συστήματος με μάζα εσώκλειστου αέρα

eff = 1.57*p/c*Rd^4*Bl^2/(mt^2*Re); % Αποδοτικότητα
```

```

% Παράμετροι ανωδιαβατού φίλτρου 2ης τάξης
% wo = sqrt(kt/mt);
% fo = wo/(2*pi);
% So = p*Sd*Bl/(4*pi*Re*mt);
% Qtc = sqrt(kt*mt)/(cd + Bl^2/Re);
% Qms = sqrt(kt*mt)/cd;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Παράμετροι μικροηχείου (τοποθετημένο σε κενό και άπειρη μπάφλα)
mt_ideal = Mms;
kt_ideal = Kms;
% Συχνότητα συντονισμού
ws_ideal = sqrt(kt_ideal/mt_ideal);
fs_ideal = ws_ideal/(2*pi);

% Συντελεστής ποιότητας
Qes_ideal = ws_ideal*(mt_ideal*Re)/(Bl^2);
Qms_ideal = ws_ideal*(mt_ideal/cd);
Qts_ideal = (Qes_ideal*Qms_ideal)/(Qes_ideal+Qms_ideal);

% Ισοδύναμος όγκος
Vas_ideal = p*c^2*Sd^2/kt_ideal;

% Απόδοτικότητα
eff_ideal = 1.57*p/c*Rd^4*Bl^2/(mt_ideal^2*Re);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Μήνυμα αναμονής
hwait = waitbar(0, 'Παρακαλώ περιμένετε...', 'Name', 'Υπολογισμοί ...');

% Σάρωση συχνοτήτων από [1, 10000]Hz
for i=1:10000
    f(i) = i;           %% Συχνότητες
    w(i)=2*pi*f(i);   %% Γωνιακή ταχύτητα
    s=j*w(i);         %% Μιγαδική συχνότητα

    %%%%% Μπλοκαρισμένη ηλεκτρική εμπέδηση
    Zeb(i) = Re + s*Le;
    %%%%% Μηχανική εμπέδηση
    Zm(i) = s*mt + cd + kt/s;
    %%%%% Ιδανική μηχανική εμπέδηση
    Zm_ideal(i) = s*mt_ideal + cd + kt_ideal/s;

    % Μοντελοποίηση creep effect της ανάρτησης
    %l_coeff=1;
    %kt_creep = kt/(1-l_coeff*log10(f(i)/fo));
    %Zm(i) = s*mt + cd + kt_creep/s;

    %%%%% Ηλεκτρική εμπέδηση
    Ze(i) = Zeb(i) + Bl^2/Zm(i);
    %Ze(i) = (s^3*Le*mt +
    % s^2*(Re*mt+Le*cd)+s*(Re*cd+Le*kt+Bl^2)+Re*kt)/(s^2*mt+s*cd+kt);
    %Ze(i) = Re*((s^2/wo^2)+s/(wo*Qtc)+1)/((s^2/wo^2)+s/(wo*Qms)+1);
    %%%%% Ιδανική ηλεκτρική εμπέδηση
    Ze_ideal(i) = Zeb(i) + Bl^2/Zm_ideal(i);

```

```

%%%%%%%% Ταχύτητα κίνησης
    u(i) = Volts*( Bl/(Zeb(i)*Zm(i)+Bl^2) );
%u(i) = Volts*((s*Bl)/(s^3*Le*mt +
    % s^2*(Re*mt+Le*cd)+s*(Re*cd+Le*kt+Bl^2)+Re*kt));
%%%%%%%% Ταχύτητα κίνησης ιδανική
    u_ideal(i) = Volts*( Bl/(Zeb(i)*Zm_ideal(i)+Bl^2) );

%%%%%%%% Μετατόπιση
    x(i) = u(i)/s;
%%%%%%%% Μετατόπιση ιδανική
    x_ideal(i) = u_ideal(i)/s;

%%%%%%%% Ακουστική πίεση και SPL σε απόσταση r
    k=w(i)/c;          %% Κυματικός αριθμός
    eikr=cos(k*r)+j*sin(k*r);    %% Ταυτότητα Euler
Pr(i) = s*p*Sd*u(i)*r*eikr/(4*pi*r);
%Pr(i) = Volts*( (p*Sd*Bl)*(eikr/(4*pi*r)) )*( (s^2)/(s^3*Le*mt+
    % s^2*(Re*mt+Le*cd)+s*(Re*cd+Le*kt+Bl^2)+Re*kt) );
%Pr(i) = Volts*So*(s^2/wo^2)/((s^2/wo^2)+s/(wo*Qtc)+1);
    SPL(i) = 20*log10( abs(Pr(i))/(2*10^-5) );
%%%%%%%% Ακουστική πίεση και SPL σε απόσταση r ιδανική
Pr_ideal(i) = s*p*Sd*u_ideal(i)*r*eikr/(4*pi*r);
    SPL_ideal(i) = 20*log10( abs(Pr_ideal(i))/(2*10^-5) );
end

%%%%%%%%%%%%%% Υπολογισμός παραμέτρων T/S %%%%%%%%%%%%%%%
% Συχνότητα συντονισμού
ws = sqrt(kt/mt);
fs = ws/(2*pi);

% Συντελεστές ποιότητας
Qes = ws*(mt*Re)/(Bl^2);
Qms = ws*(mt/cd);
Qts = (Qes*Qms)/(Qes+Qms);

% Ισοδύναμος όγκος
Vas = p*c^2*Sd^2/Kms;

% Εύρεση της μέγιστης μετατόπισης
xmax = abs(max(x));
% Εύρεση της μέγιστης μετατόπισης ιδανική
xmax_ideal = abs(max(x_ideal));

% Ενημέρωση ηλεκτρικών
set(handles.fsValueText,'String',strcat('fs: ', num2str(fs), ' Hz'));
set(handles.QesValueText,'String',strcat('Qes: ', num2str(Qes)));
set(handles.QmsValueText,'String',strcat('Qms: ', num2str(Qms)));
set(handles.QtsValueText,'String',strcat('Qts: ', num2str(Qts)));
set(handles.VasValueText,'String',strcat('Vas: ', num2str(Vas*10^6),
' cm^3'));

set(handles.VcValueText,'String',strcat('Vc (input rms): ',
num2str(Volts), ' Volts'));
set(handles.XmaxLimitValueText,'String',strcat('Όριο Xmax: ',
num2str(xmaxLimit*10^3), ' mm'));

```

```

set(handles.XmaxValueText,'String',strcat('Xmax: ',
num2str(xmax*10^3), ' mm'));
set(handles.EffValueText,'String',strcat('Eff: ', num2str(eff*100), '
%'));
set(handles.ktValueText,'String',strcat('Kt: ', num2str(kt),' N/m'));
set(handles.mtValueText,'String',strcat('Mt: ', num2str(mt*10^6), '
mgr'));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Τέλος Υπολογισμός παραμέτρων T/S %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Αποστολή μεταβλητών στο workspace του Matlab για χρήση από Simulink
assignin('base','kt',kt);
assignin('base','mt',mt);
assignin('base','cd',cd);
assignin('base','Re',Re);
assignin('base','Le',Le);
assignin('base','Bl',Bl);
assignin('base','Volts',Volts);
assignin('base','fs',fs);
assignin('base','ws',ws);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Τέλος αποστολής μεταβλητών στο workspace του Matlab %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (get(handles.TimeDomainCheckbox,'Value')==1)
    waitbar(0.50,hwait,'Εκτέλεση μοντέλου Simulink...');
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Σύνδεση και Εκτέλεση μοντέλου Simulink %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
model='electromech'; % Όνομα μοντέλου
SimOut=sim(model,'ReturnWorkspaceOutputs','on'); %Εκτέλεση μοντέλου
t_out = SimOut.get('t_out'); % Χρόνος προσομοίωσης
x_out = SimOut.get('x_out'); % Θέση - Μετατόπιση
v_out = SimOut.get('v_out'); % Ταχύτητα
ze_mag_out=SimOut.get('ze_mag_out'); % Πλάτος συνολικής εμπίδησης Ze
ze_ang_out=SimOut.get('ze_ang_out'); % Φάση συνολικής εμπίδησης Ze
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Τέλος Σύνδεση και Εκτέλεση μοντέλου Simulink %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

waitbar(0.80,hwait,'Δημιουργία γραφημάτων');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Γραφικές παραστάσεις %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ισοδύναμη ηλεκτρική εμπέδηση συνολικού συστήματος συναρτήσει
% της συχνότητας
axes(handles.ZAxes);
semilogx(f,abs(Ze),f,abs(Ze_ideal));
set(handles.ZAxes,'xlim',[1 10000]);
xlabel('Συχνότητα (Hz)');
ylabel('Συνολική Εμπέδηση |Ze| (Ω)');
legend('Κλειστόκουτί','Κενό','Location','Best');
grid('on');

% SPL συναρτήσει συχνότητας
axes(handles.SPLAxes);
semilogx(f,SPL,f,SPL_ideal);
set(handles.SPLAxes,'xlim',[1 10000]);
xlabel('Συχνότητα (Hz)');
str = strcat('Στάθμη Ακουστικής Πίεσης-SPL (dB)@',num2str(r),'m');

```

```

ylabel(str);
legend('Κλειστόκουτί', 'Κενό', 'Location', 'Best');
grid('on');

% Μέγιστη μετατόπιση κώνου συναρτήσει συχνότητας
axes(handles.XAxes);
semilogx(f,abs(x)*1000,f,abs(x_ideal)*1000); % Μετατροπή σε mm
set(handles.XAxes, 'xlim',[1 10000]);
xlabel('Συχνότητα (Hz)');
ylabel('Μετατόπιση κώνου (mm)');
legend('Κλειστόκουτί', 'Κενό', 'Location', 'Best');
grid('on');

% Ταχύτητα κίνησης κώνου συναρτήσει συχνότητας
axes(handles.VelocityAxes);
semilogx(f,abs(u),f,abs(u_ideal));
set(handles.VelocityAxes, 'xlim',[1 10000]);
xlabel('Συχνότητα (Hz)');
ylabel('Ταχύτητα κώνου (m/sec)');
legend('Κλειστόκουτί', 'Κενό', 'Location', 'Best');
grid('on');

%%% Εφόσον είναι ενεργοποιημένο το TimeDomainCheckbox, θα εμφανιστούν
%%% και οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις (400 τιμές χρόνου) σε νέο
%%% figure
global hfig;
hfig = figure(1);
set(hfig, 'Name', 'Γραφήματα προσομοίωσης στο πεδίο του
χρόνου', 'NumberTitle', 'off');
set(hfig, 'CloseRequestFcn', @my_closereq);
set(hfig, 'Position', [260 50 975 650]);

% Έλεγχος κατάστασης TimeDomainCheckbox για προβολή γραφημάτων χρόνου
if (get(handles.TimeDomainCheckbox, 'Value') == 1)
    set(hfig, 'Visible', 'on')
else
    set(hfig, 'Visible', 'off')
end

%%% Πλάτος συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης Ze σε Ω
subplot(2,2,1);
plot(t_out(1:400), ze_mag_out(1:400));
xlabel('Χρόνος (sec)');
ylabel('|Ze| (Ω)');
str=strcat('Πλάτος Ze στον πεδίο του χρόνου @ fs=',
num2str(round(fs)), 'Hz');
title(str);
ylim([0 100]);
grid('on');

%%% Φάση συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης Ze σε rad
subplot(2,2,2);
plot(t_out(1:400), ze_ang_out(1:400));
xlabel('Χρόνος (sec)');
ylabel('\angleZe (rad)');

```

```

str=strcat('Φάση Ζεστον πεδίο του χρόνου @ fs=',
num2str(round(fs)), 'Hz');
title(str);
grid('on');

%%% Μετατόπιση σε mm
subplot(2,2,3);
plot(t_out(1:400),x_out(1:400)*1000);
xlabel('Χρόνος (sec)');
ylabel('Μετατόπιση (mm)');
str=strcat('Μετατόπιση κώνου στον πεδίο του χρόνου @ fs=',
num2str(round(fs)), 'Hz');
title(str);
grid('on');

%%% Ταχύτητα σε m/sec
subplot(2,2,4);
plot(t_out(1:400),v_out(1:400));
xlabel('Χρόνος (sec)');
ylabel('Ταχύτητα (m/sec)');
str=strcat('Ταχύτητα κώνου στον πεδίο του χρόνου @ fs=',
num2str(round(fs)), 'Hz');
title(str);
grid('on');

waitbar(1.0,hwait,'Ολοκλήρωση');
close(hwait);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ΤΕΛΟΣ Γραφικές παραστάσεις %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

4.3.2 Προγραμματισμός Μπαρών Κύλισης

Όταν ο χρήστης σέρνει ή κάνει κλικ πάνω στις μπάρες κύλισης, τότε μεταβάλλονται οι τιμές τους και ενημερώνονται τα αντίστοιχα λεκτικά ώστε ο χρήστης να γνωρίζει την τιμή που έχει επιλέξει.

Ακολουθεί ο σχετικός κώδικας Matlab, που εκτελείται όταν ο χρήστης σύρει κάποια μπάρα κύλισης:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Προγραμματισμός χειριστηρίων Sliders %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% --- Executes on slider movement.
function KmsSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to KmsSlider (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range
of slider
Kms = get(hObject,'Value');
set(handles.KmsValueText,'String',strcat(num2str(Kms),' N/m'));

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function KmsSlider_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to KmsSlider (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end
set(hObject, 'SliderStep', [1/get(hObject,'Max'),
10/get(hObject,'Max')]);

% --- Executes on slider movement.
function MmsSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to MmsSlider (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range
of slider
Mms = get(hObject,'Value');
set(handles.MmsValueText,'String',strcat(num2str(Mms),' mgr'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function MmsSlider_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to MmsSlider (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end
set(hObject, 'SliderStep', [1/get(hObject,'Max'),
10/get(hObject,'Max')]);

% --- Executes on slider movement.
function RmsSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to RmsSlider (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range
of slider
Rms = get(hObject,'Value');
set(handles.RmsValueText,'String',strcat(num2str(Rms),' kgr/sec'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function RmsSlider_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to RmsSlider (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end
set(hObject, 'SliderStep', [1/(get(hObject,'Max')*100),
10/(get(hObject,'Max')*100)]);

% --- Executes on slider movement.
function ReSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to ReSlider (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range
of slider
Re = get(hObject, 'Value');
set(handles.ReValueText, 'String', strcat(num2str(Re), ' Ω'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ReSlider_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to ReSlider (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end
set(hObject, 'SliderStep', [1/(get(hObject,'Max')*100),
10/(get(hObject,'Max')*100)]);

% --- Executes on slider movement.
function LeSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to LeSlider (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range
of slider
Le = get(hObject, 'Value');
set(handles.LeValueText, 'String', strcat(num2str(Le), ' mH'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function LeSlider_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to LeSlider (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called

```



```

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end
set(hObject, 'SliderStep', [1/(get(hObject,'Max')*100),
10/(get(hObject,'Max')*100)]);

% --- Executes on slider movement.
function B1Slider_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to B1Slider (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range
of slider
B1 = get(hObject,'Value');
set(handles.B1ValueText,'String',strcat(num2str(B1),' N/A'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function B1Slider_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to B1Slider (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end
set(hObject, 'SliderStep', [1/(get(hObject,'Max')*100),
10/(get(hObject,'Max')*100)]);

% --- Executes on slider movement.
function RdSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to RdSlider (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range
of slider
Rd = get(hObject,'Value'); % Ακτίνα διαφράγματος
set(handles.RdValueText,'String',strcat(num2str(Rd),' mm'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function RdSlider_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to RdSlider (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.

```

```

if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end
set(hObject, 'SliderStep', [1/(get(hObject,'Max')*100),
10/(get(hObject,'Max')*100)]);

% --- Executes on slider movement.
function VbSlider_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to VbSlider (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range
of slider
Vb = get(hObject,'Value'); % Όγκος εσώκλειστου αέρα
set(handles.VbValueText,'String',strcat(num2str(Vb),' cm^3'));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function VbSlider_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to VbSlider (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end
set(hObject, 'SliderStep', [1/(get(hObject,'Max')*100),
10/(get(hObject,'Max')*100)]);

% --- Executes on button press in TimeDomainCheckbox.
function TimeDomainCheckbox_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TimeDomainCheckbox (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

%Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of
TimeDomainCheckbox

% Ενεργοποίηση / Απενεργοποίηση γραφημάτων χρόνου
global hfig;
if (ishandle(hfig))
if (get(hObject,'Value') == 1)
    set(hfig, 'Visible', 'on');
else
    set(hfig, 'Visible', 'off');
end
end
end

```

4.3.3 Τερματισμός Εφαρμογής – Κλείσιμο Παραθύρων

Για να τερματίσει ο χρήστης την εφαρμογή θα πρέπει να πατήσει το πλήκτρο X κλεισίματος του βασικού παράθυρου. Ο τερματισμός της εφαρμογής συνοδεύεται από παράθυρο επιβεβαίωσης.

Ακολουθεί ο σχετικός κώδικας Matlab, που εκτελείται όταν ο χρήστης επιλέξει να τερματίσει την εφαρμογή:

```
% --- Executes when user attempts to close mainFigure.
function mainFigure_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to mainFigure (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: delete(hObject) closes the figure

global hfig;

selection = questdlg('Σίγουρα θέλετε να τερματίσετε την
εφαρμογή;',...
'Τερματισμός',...
'Ναι','Όχι','Ναι');

switch selection
case 'Ναι'
    set(0, 'ShowHiddenHandles', 'on');
    if ishandle(hfig)
        delete(hfig);
    end
    delete(hObject);
case 'Όχι'
    return;
end
```

Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι όταν ο χρήστης επιλέξει να κλείσει το παράθυρο στο οποίο φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Simulink, τότε εκτελείται η συνάρτηση my_closereq, της οποίας ο κώδικας βρίσκεται στο ομώνυμο αρχείο my_closereq.m και παρατίθεται παρακάτω:

```
function my_closereq(src, callbackdata)
% Close request function

set(gcf, 'Visible', 'off')
return

end
```

4.4 Εκτέλεση Εφαρμογής

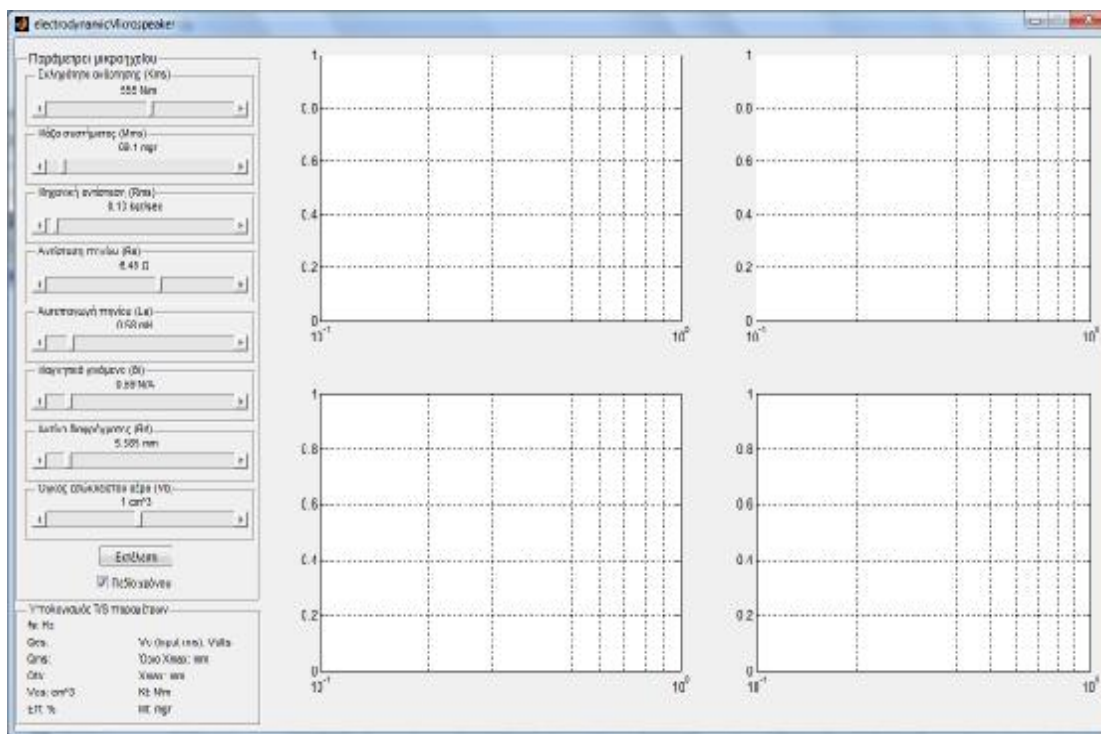
Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζεται το βασικό σενάριο χρήσης της εφαρμογής, το οποίο συνοψίζεται στα εξής βήματα:

1. Επιλογή των παραμέτρων του μικροηχείου
2. Ενεργοποίηση / απενεργοποίηση επιλογής της εκτέλεσης προσομοίωσης στο πεδίο του χρόνου
3. Εκτέλεση υπολογισμών

Ακολούθως, ο χρήστης μπορεί να πειραματιστεί μεταβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων και μελετώντας τις τιμές των υπολογισμένων μεγεθών και τις γραφικές παραστάσεις στο πεδίο της συχνότητας και/ή στο πεδίο του χρόνου, προκειμένου να αποφασίσει για τις ακριβείς τιμές των παραμέτρων με τις οποίες επιτυγχάνει την επιθυμητή συμπεριφορά του μικροηχείου.

Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή του καθενός βήματος.

Έχοντας εκτελέσει την εφαρμογή μέσα από το περιβάλλον GUIDE του Matlab, ο χρήστης έχει πρόσβαση στην αρχική οθόνη της εφαρμογής. Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 22) φαίνεται η αρχική οθόνη της εφαρμογής.

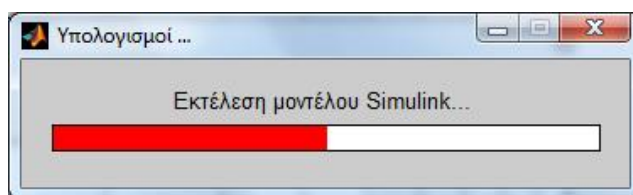


Εικόνα 22: Αρχική οθόνη εφαρμογής

Αρχικά, όλες οι παράμετροι έχουν κάποιες προεπιλεγμένες τιμές, οι οποίες αφορούν ένα πραγματικό τυπικό μικροηχείο κινητού τηλεφώνου Nokia. Επίσης, το πλαίσιο επιλογής «Πεδίο χρόνου» είναι ενεργοποιημένο, γεγονός που σημαίνει ότι θα εκτελεστεί και η προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου (μοντέλο Simulink).

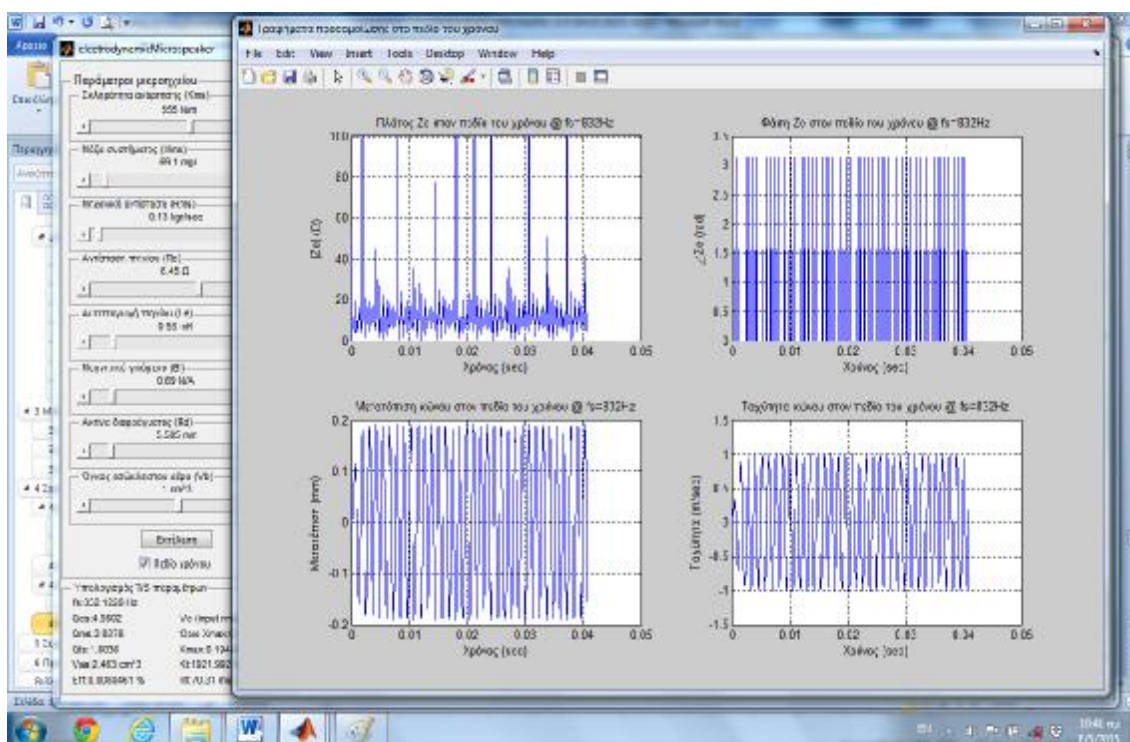
Στη συνέχεια, ο χρήστης μπορεί με το ποντίκι να μεταβάλλει τις τιμές των μπαρών κύλισης των παραμέτρων και να αλλάξει την κατάσταση του πλαισίου «Πεδίο χρόνου». Όταν τελειώσει αρκεί να πατήσει το κουμπί «Εκτέλεση», οπότε θα αρχίσουν οι υπολογισμοί και εφόσον είναι ενεργοποιημένη η επιλογή «Πεδίο χρόνου» θα εκτελεστεί στο παρασκήνιο και η προσομοίωση με το Simulink.

Επειδή οι υπολογισμοί ενδέχεται να διαρκέσουν αρκετό χρόνο κάνοντας τον υπολογιστή να μην αποκρίνεται στις ενέργειες του χρήστη, εμφανίζεται μία μπάρα πρόοδου, ενημερώνοντας τον χρήστη για την πρόοδο των υπολογισμών και την εργασία που εκτελείται κάθε στιγμή. Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 23) φαίνεται η μπάρα πρόοδου εργασιών.



Εικόνα 23: Μπάρα προόδου εργασιών

Επίσης, στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 24) φαίνονται τα αποτελέσματα εκτέλεσης, με ενεργοποιημένο το πλαίσιο «Πεδίο χρόνου». Στο παράθυρο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στον χρόνο, ο χρήστης μπορεί να δει τα γραφήματα που υπολογίστηκαν για τη συνολική ισοδύναμη ηλεκτρική εμπέδηση (πλάτος και φάση), την μετατόπιση και την ταχύτητα του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής του μικροηχείου, στην συχνότητα συντονισμού που έχει υπολογιστεί για τις τιμές των παραμέτρων που έχουν επιλεγεί.



Εικόνα 24: Αποτελέσματα εκτέλεσης με ενεργοποιημένο το πλαίσιο «Πεδίο χρόνου»

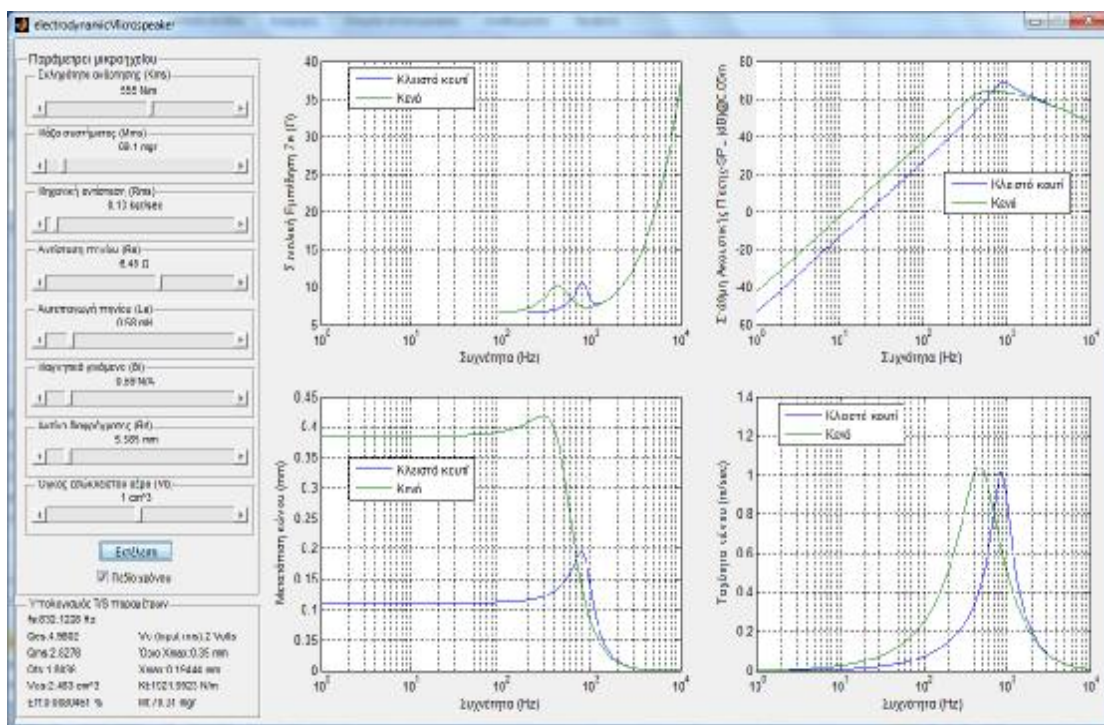
Επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα στο πεδίο του χρόνου υπολογίζονται από το μοντέλο Simulink και είναι προφανές ότι η προσομοίωση απαιτεί ένα μικρό χρονικό

διάστημα, προκειμένου το σύστημα να αρχίσει να παρουσιάζει σταθερή συμπεριφορά.

Επιπλέον, δεδομένου ότι η προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου εκτελείται στη συχνότητα συντονισμού, η οποία έχει υψηλή τιμή και συνήθως βρίσκεται στο διάστημα 800 – 1000 Hz, αρκεί να ένα μικρό χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, παρά το γεγονός ότι ως προκαθορισμένη τιμή για τη διάρκεια της προσομοίωσης Simulinkέχουν οριστεί τα 2 δευτερόλεπτα.

Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει τα ενσωματωμένα χειριστήρια του παραθύρου για να αποθηκεύσει, εκτυπώσει τα αποτελέσματα, ενώ μπορεί να κάνει μεγέθυνση στα γραφήματα που επιθυμεί χρησιμοποιώντας το εργαλείο Zoom.

Για να δει ο χρήστης τα αποτελέσματα στο πεδίο της συχνότητας μπορεί είτε να χαμηλώσει είτε να κλείσει το παράθυρο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στον χρόνο. Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 25) φαίνονται τα αποτελέσματα στο πεδίο της συχνότητας.



Εικόνα 25: Αποτελέσματα εκτέλεσης στο πεδίο της συχνότητας

Οι τέσσερις γραφικές παραστάσεις που καλύπτουν τη δεξιά μεριά του παραθύρου (Εικόνα 25) επιτρέπουν στον χρήστη να δει τα γραφήματα που υπολογίστηκαν για τη συνολική ισοδύναμη ηλεκτρική εμπέδηση (πλάτος), την στάθμη ακουστικής πίεσης (σε απόσταση 5cm από το μικροηχείο), την μετατόπιση και την ταχύτητα του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής του μικροηχείου συναρτήσει της συχνότητας. Στα γραφήματα αυτά παραθέτονται 2 καμπύλες, μία μπλε καμπύλη, που αφορά την τοποθέτηση του μικροηχείου σε κουτί με εσώκλειστο όγκο αέρα και μία πράσινη καμπύλη, που αφορά την τοποθέτηση του μικροηχείου σε κενό αέρα. Προφανώς, όταν το μικροηχείο βρίσκεται σε κενό αέρα έχει χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού και καλύτερες επιδόσεις, δεδομένου ότι μειώνονται οι μηχανικές απώλειες που σχετίζονται με το ακουστικό φορτίο (εσώκλειστος αέρας).

Επίσης, στο πλαίσιο «Υπολογισμός T/S παραμέτρων», που βρίσκεται στο κάτω αριστερά μέρος του παραθύρου, εμφανίζονται οι τιμές που έχουν υπολογιστεί για τις βασικότερες παραμέτρους Thiele/Small, καθώς και για μερικές επιπλέον χαρακτηριστικές παραμέτρους του μικροηχείου. Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 26) φαίνονται όλες οι υπολογισμένες παράμετροι.

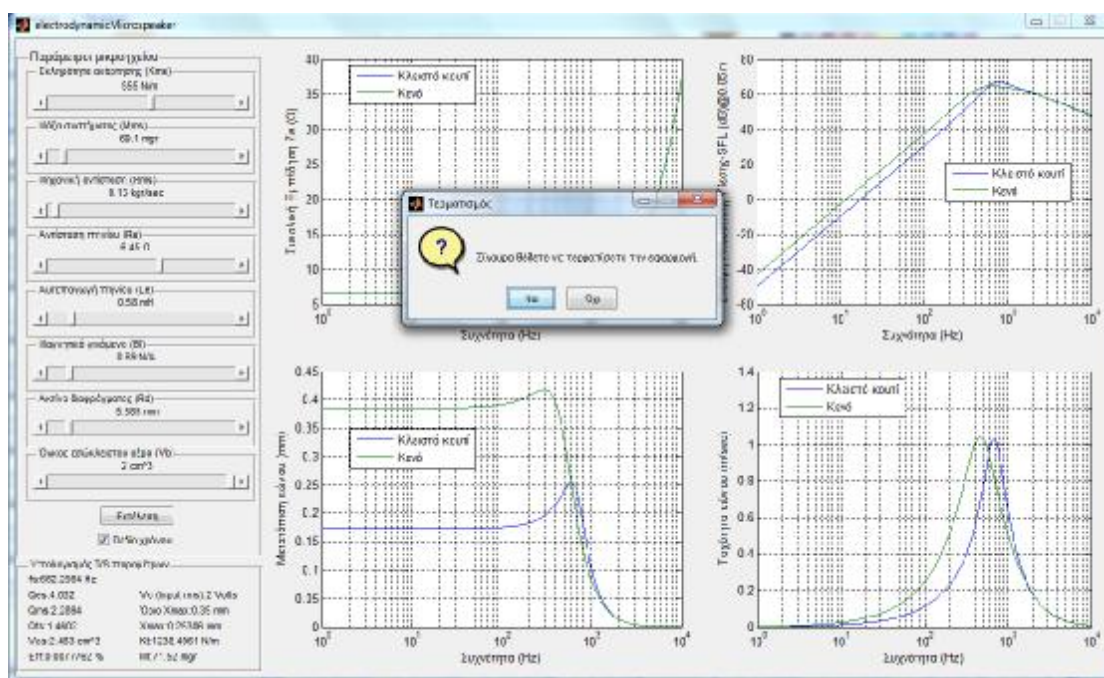
Υπολογισμός T/S παραμέτρων	
fs:832.1228 Hz	
Qes:4.9802	Vc (input rms):2 Volts
Qms:2.8278	Όριο Xmax:0.35 mm
Qts:1.8036	Xmax:0.19444 mm
Vas:2.463 cm ³	Kt:1921.9923 N/m
Eff:0.0080461 %	Mt:70.31 mgr

Εικόνα 26: Το πλαίσιο υπολογισμού των βασικών T/S παραμέτρων και μερικών επιπλέον χαρακτηριστικών παραμέτρων του μικροηχείου

Προφανώς, ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τις τιμές των παραμέτρων και να εκτελέσει εκ νέου τους υπολογισμούς και την προσομοίωση, προσπαθώντας να επιτύχει την επιθυμητή συμπεριφορά του μικροηχείου. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των διαδοχικών εκτελέσεων είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την επιλογή των κατάλληλων τιμών, για την επίτευξη της επιθυμητής συμπεριφορά του μικροηχείου. Είναι αυτονόητο ότι η διαδικασία αυτή

απαιτεί εξοικείωση με τις παραμέτρους του μικροηχείου και του τρόπου με τον οποίο επηρεάζουν τη συμπεριφορά του.

Τέλος, εφόσον ο χρήστης επιθυμεί να τερματίσει την εφαρμογή, μπορεί να επιλέξει από την αρχική οθόνη της εφαρμογής το πλήκτρο κλεισίματος του παραθύρου (X) και στο μήνυμα επιβεβαίωσης κλεισίματος της εφαρμογής που θα εμφανιστεί θα πρέπει να επιλέξει «Ναι», οπότε και θα τερματιστεί η εφαρμογή. Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 27) φαίνεται η διαδικασία τερματισμού της εφαρμογής.



Εικόνα 27:Τερματισμός εφαρμογής

4.5 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Εφαρμογής

Για να μπορέσει ο χρήστης να εξαγει συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των υπολογισμών της εφαρμογής για τις τιμές που έχει δώσει στις διάφορες παραμέτρους, θα πρέπει να αξιολογήσει όλα τα αποτελέσματα που του παρέχει η εφαρμογή και επίσης να κατανοεί τον τρόπο που η καθεμία παράμετρος επηρεάζει τη συμπεριφορά του μικροηχείου.

Στην εκκίνηση της εφαρμογής αποδίδονται αυτόματα κάποιες προκαθορισμένες τιμές, οι οποίες αφορούν ένα πραγματικό μικροηχείο από κινητό τηλέφωνο Nokia

που διατίθεται στο εμπόριο. Οι τιμές αυτές έχουν επιλεγεί ως αναφορά για να παρέχουν στον χρήστη τη δυνατότητα εύκολης σύγκρισης με τις δικές του επιλογές. Οι προκαθορισμένες τιμές των παραμέτρων του μικροηχείου φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 9).

Πίνακας 9: Προκαθορισμένες τιμές ηλεκτρομηχανικών παραμέτρων μικροηχείου

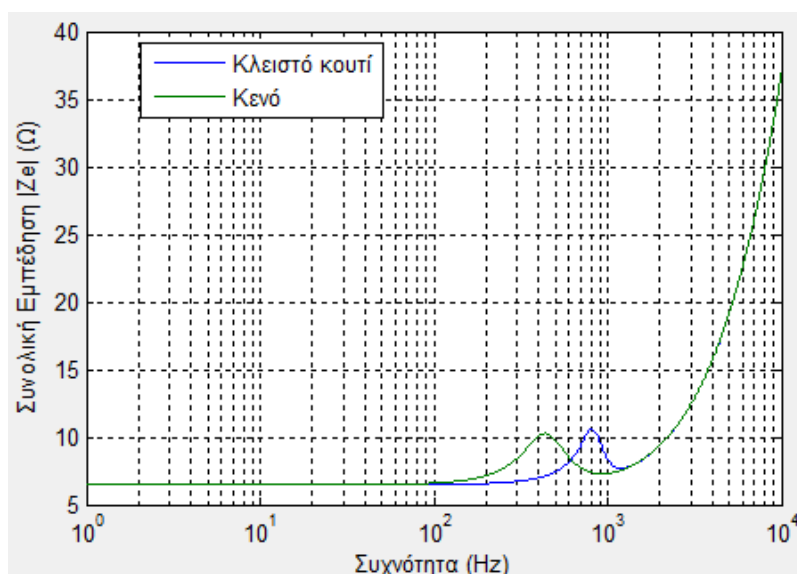
Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Kms	555	N/m
Mms	69.1	mgr
Rms	0.13	Kgr/sec
Re	6.45	Ω
Le	0.58	mH
Bl	0.69	N/A
Rd	5.585	mm
Vb	1	cm ³
Vc (rms)	2	Volts
Όριο Xmax	0.35	Mm
Απόσταση μέτρησης SPL	0.05	m

Εκτελώντας την εφαρμογή με τις προκαθορισμένες τιμές και παρατηρώντας τις τιμές των υπολογισμένων παραμέτρων που φαίνονται και στην Εικόνα 26, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η συχνότητα συντονισμού είναι στα 832Hz περίπου, που είναι μία τυπική τιμή για μικροηχείο.
- Οι συντελεστές ποιότητας έχουν περίπου τιμές $Q_{es}=5$, $Q_{ms}=2.8$, $Q_{ts}=1.8$, που είναι τυπικές τιμές για μικροηχείο.
- Η ενεργός τάση τροφοδοσίας του μικροηχείου είναι σταθερή στα 2Volts
- Η μέγιστη επιτρεπτή μετατόπιση του διαφράγματος (απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας) είναι τα 0.35mm, ενώ με βάσει τις επιλεγμένες παραμέτρους επιτυγχάνεται μέγιστη μετατόπιση 0.19mm περίπου. Συνεπώς, η μετατόπιση είναι εντός του επιτρεπτού ορίου, γεγονός που καταδεικνύει την πιθανή ορθή επιλογή των τιμών των παραμέτρων για το ζήτημα της μετατόπισης του διαφράγματος.
- Η συνολική σκληρότητα ανάρτησης (συμπεριλαμβάνει την ενδοτικότητα του ακουστικού φορτίου) είναι περίπου 1922 N/m. Παρατηρούμε ότι η ύπαρξη αέρα αυξάνει κατά πολύ τη σκληρότητα του συστήματος, δεδομένου ότι η μηχανική ανάρτηση έχει σκληρότητα 555N/A.
- Η συνολική κινούμενη μάζα (συμπεριλαμβάνει τη μάζα του ακουστικού φορτίου) είναι περίπου 70 mgr. Παρατηρούμε ότι η ύπαρξη αέρα αυξάνει ελαφρώς τη μάζα του συστήματος, δεδομένου ότι τα μηχανικά κινούμενα μέρη έχουν μάζα 69.1 mgr.
- Η αποδοτικότητα του μικροηχείου είναι 0.008%, τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη από αυτή ενός κανονικού ηχείου, όπως περιγράφει και ο Pedersen(2012).
- Ο ισοδύναμος όγκος V_a είναι περίπου 2.46 cm^3 , γεγονός που καταδεικνύει ότι θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε το μικροηχείο σε μεγαλύτερο κουτί με όγκο 2.46 cm^3 , αντί όγκου 1 cm^3 που είναι η προκαθορισμένη τιμή και έτσι να επιτυγχάναμε περαιτέρω βελτίωση της f_s και της απόκρισης του μικροηχείου.

Επίσης, παρατηρώντας προσεκτικά τα γραφήματα στο πεδίο της συχνότητας και στο πεδίο του χρόνου, μπορούμε να εξάγουμε επιπλέον πληροφορίες για τη συμπεριφορά του μικροηχείου.

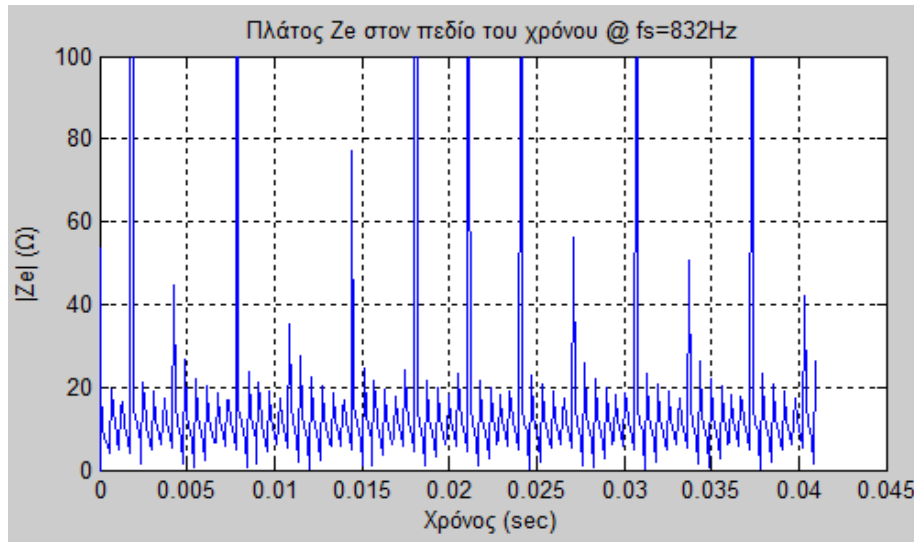
Στη συχνότητα συντονισμού των 832 Hz, το πλάτος της συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης όταν το μικροηχείο είναι τοποθετημένο σε κλειστό κουτί (μπλε καμπύλη) παρουσιάζει ένα μέγιστο περίπου στα 11 Ω, ορίζοντας το κάτω όριο των συχνοτήτων που μπορεί να αναπαράγει το μικροηχείο με καλή ποιότητα. Καθώς αυξάνεται η συχνότητα πλησιάζοντας τα 10KHz, το πλάτος της εμπέδησης αυξάνει εκθετικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη της αυτεπαγωγής (L) του πηνίου. Το ίδιο παρατηρείται και στην περίπτωση τοποθέτησης του μικροηχείου σε κενό αέρα (πράσινη καμπύλη), όμως η συχνότητα συντονισμού είναι μετατοπισμένη περίπου στα 450 Hz. Φυσικά, σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας το μικροηχείο δεν είναι τοποθετημένο σε κενό αέρος, οπότε η μπλε καμπύλη προσεγγίζει πολύ πιο ρεαλιστικά την πραγματικότητα. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 28).



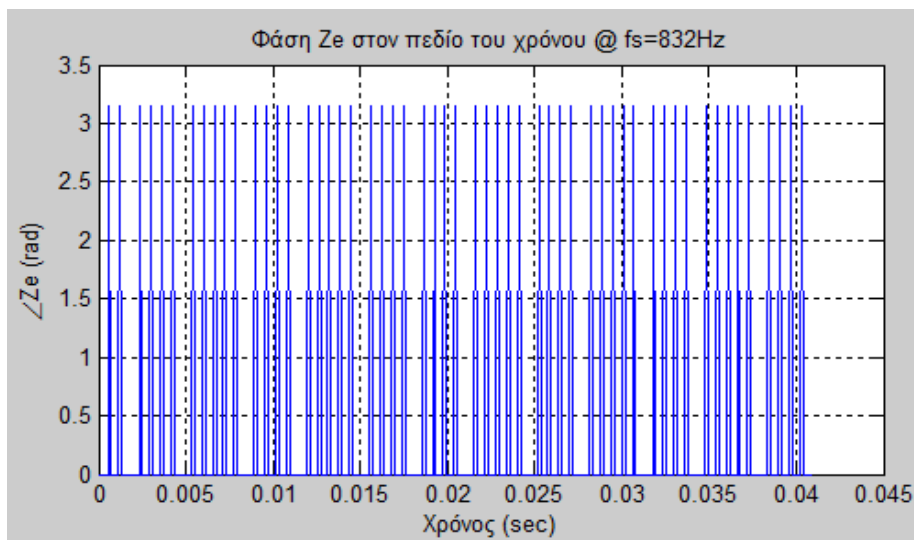
Εικόνα 28: Γραφική παράσταση πλάτους συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης στο πεδίο των συχνοτήτων

Παρατηρώντας το πλάτος της συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης στο πεδίο του χρόνου (Εικόνα 29) και στη συχνότητα συντονισμού των 832 Hz, διαπιστώνουμε ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι πράγματι το πλάτος της εμπέδησης μεταβάλλεται με κεντρική τιμή περίπου τα 11 Ω. Κάποιες χρονικές στιγμές το πλάτος της εμπέδησης απειρίζεται, ωστόσο αυτό είναι

αναμενόμενο δεδομένου ότι τις στιγμές αυτές ηένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο φωνής μηδενίζει. Στην πράξη αυτό αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις. Επίσης στο γράφημα της φάσης της εμπέδησης (Εικόνα 30) φαίνεται η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και της έντασης.



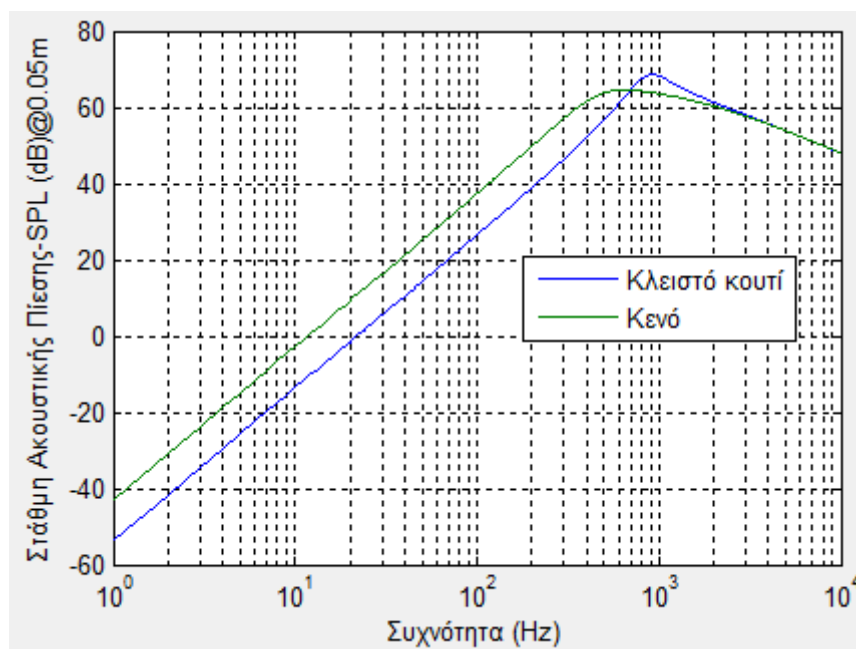
Εικόνα 29: Γραφική παράσταση πλάτους συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης στο πεδίο του χρόνου



Εικόνα 30: Γραφική παράσταση φάσης συνολικής ισοδύναμης ηλεκτρικής εμπέδησης στο πεδίο του χρόνου

Από τη γραφική παράσταση της στάθμης ακουστικής πίεσης (SPL) συναρτήσεως της συχνότητας και σε απόσταση 5 cm από το μικροηχείο (Εικόνα 31), φαίνεται ότι στη

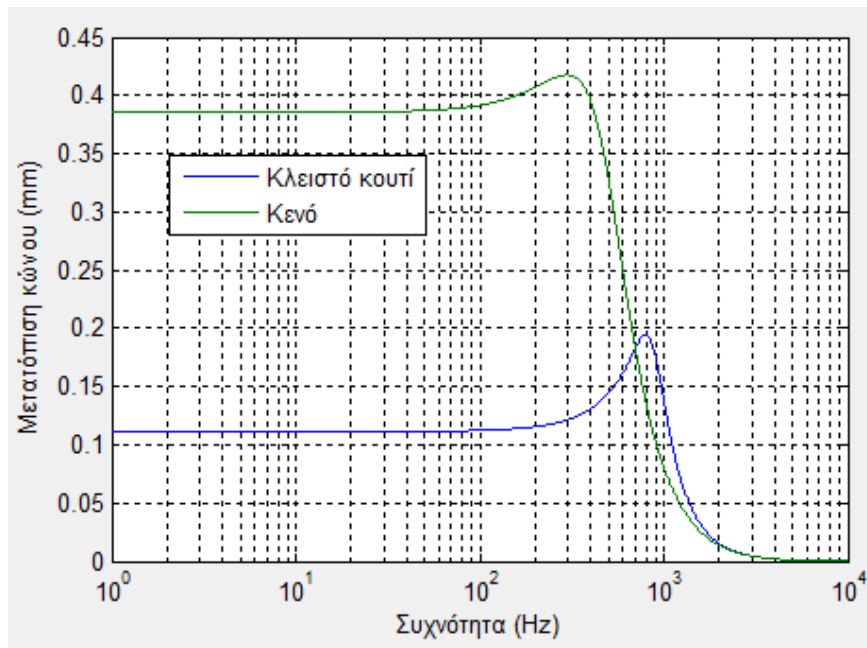
συχνότητα συντονισμού των 832 Hzη απόκριση είναι της τάξης των 70 dBπερίπου για το κλειστό κουτί και περίπου 65 dBκαι σε χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού όταν το μικροηχείο είναι σε κενό αέρα.



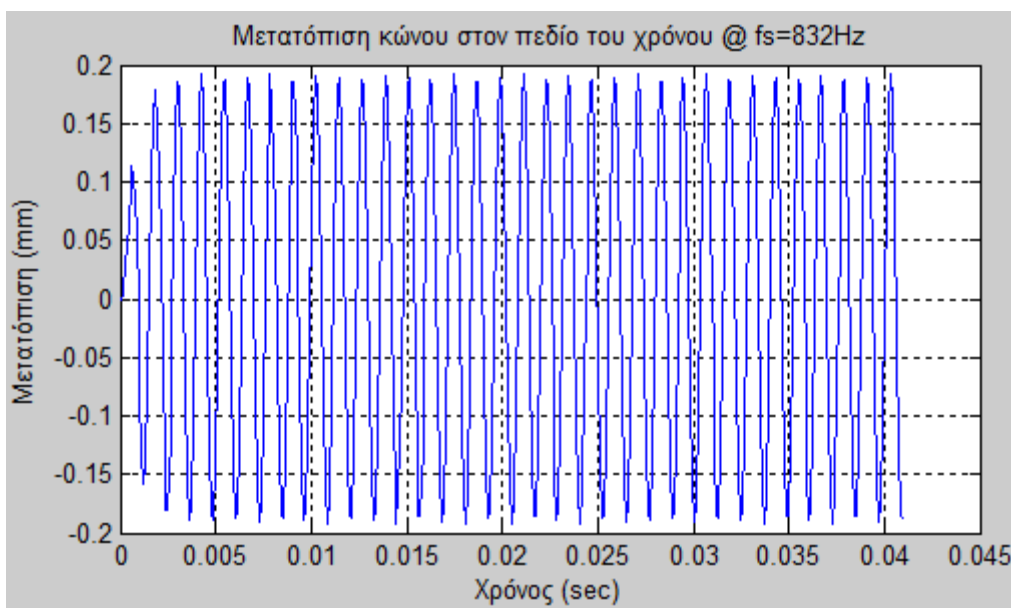
Εικόνα 31: Γραφική παράσταση στάθμης ακουστικής πίεσης στο πεδίο των συχνοτήτων

Από τη γραφική παράσταση της μετατόπισης του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής συναρτήσει της συχνότητας (Εικόνα 32), φαίνεται ότι η μέγιστη απομάκρυνση συμβαίνει στη συχνότητα συντονισμού των 832 Hzκαι είναι ίση με 0.19 mmπερίπου για το κλειστό κουτί και περίπου 0.42 mmκαι σε χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού όταν το μικροηχείο είναι σε κενό αέρα. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση τοποθέτησης σε κενό αέρα η μέγιστη απομάκρυνση ξεπερνάει το επιτρεπτό όριο. Επίσης, όσο αυξάνει η συχνότητα και μέχρι τα 4kHzπερίπου, η μετατόπιση μειώνεται απότομα, ενώ μετά τα 4kHzπρακτικά μηδενίζεται.

Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνονται και από την προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου, όπου η μέγιστη απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας είναι περίπου ίδια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 33.



Εικόνα 32: Γραφική παράσταση μετατόπισης στο πεδίο των συχνοτήτων

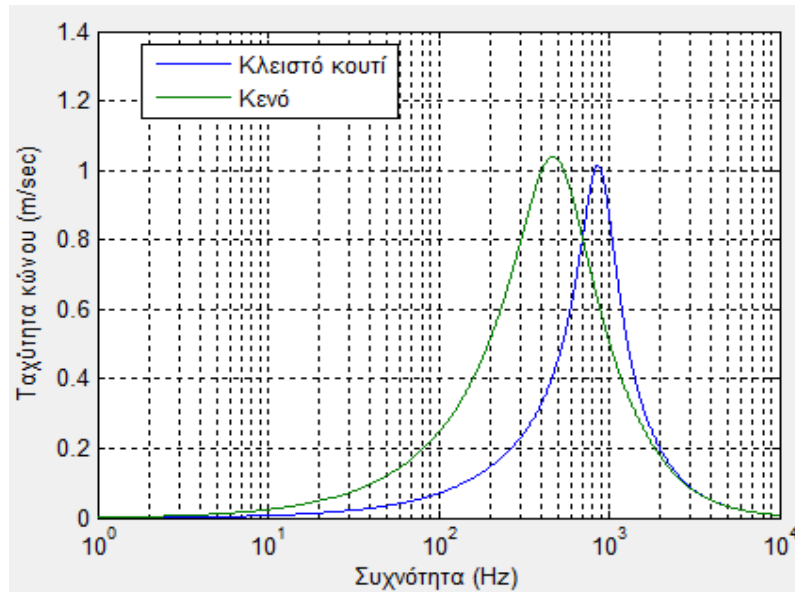


Εικόνα 33: Γραφική παράσταση μετατόπισης στο πεδίο του χρόνου

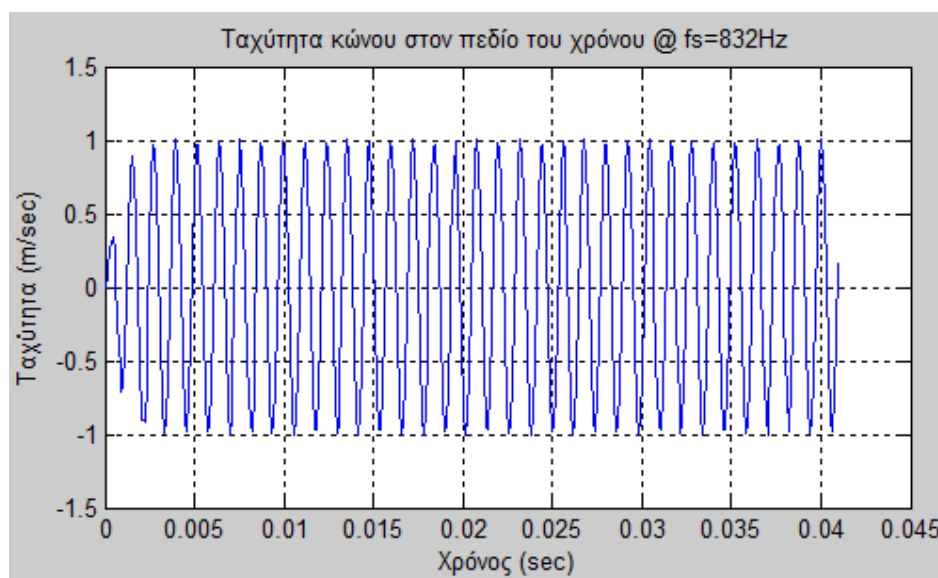
Τέλος, από τη γραφική παράσταση της ταχύτητας μετατόπισης του συστήματος διάφραγμα – πηνίο φωνής συναρτήσει της συχνότητας (Εικόνα 34), φαίνεται ότι η μέγιστη ταχύτητα συμβαίνει στη συχνότητα συντονισμού των 832 Hz και είναι ίση με 1 m/sec περίπου για το κλειστό κουτί και περίπου 1.05 m/sec και σε χαμηλότερη

συχνότητα συντονισμού όταν το μικροηχείο είναι σε κενό αέρα. Επίσης, όσο αυξάνει η συχνότητα, η ταχύτητα μειώνεται και μετά τα 4-5 kHz πρακτικά μηδενίζεται.

Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνονται και από την προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου, όπου η μέγιστη ταχύτητα απομάκρυνσης είναι περίπου ίδια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 35 Εικόνα 33.



Εικόνα 34: Γραφική παράσταση ταχύτητας μετατόπισης στο πεδίο των συχνοτήτων



Εικόνα 35: Γραφική παράσταση ταχύτητας μετατόπισης στο πεδίο του χρόνου

5 Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκε το βασικό θεωρητικό πλαίσιο της εργασίας, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις αρχές λειτουργίας και στο γραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς του ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου. Επίσης, αναλύθηκαν οι βασικές ηλεκτρομηχανικές παράμετροι του ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου, καθώς και οι βασικές ανομοιομορφίες των παραμέτρων και οι λόγοι που τις προκαλούν, οδηγώντας στη μαθηματική περιγραφή ενός μοντέλου που συμπεριλαμβάνει τις ανομοιομορφίες αυτές.

Ακολούθως, παρουσιάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά του Matlab, του περιβάλλοντος GUIDE που διαθέτει για τη δημιουργία γραφικών διεπαφών, καθώς και του περιβάλλοντος Simulink του Matlab, που επιτρέπει την κατασκευή μοντέλων για την εκτέλεση προσομοιώσεων.

Επίσης, παρουσιάστηκε αναλυτικά η κατασκευή εφαρμογής με τα εργαλεία αυτά, για την προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου σύμφωνα με το γραμμικό μοντέλο. Ο βασικός σκοπός της εφαρμογής είναι να αποτελέσει ένα χρήσιμο βοήθημα – εργαλείο για την καλύτερη κατανόηση και μελέτη των βασικών αρχών που διέπουν το ηλεκτροδυναμικό μικροηχείο και την επιλογή των βασικών σχεδιαστικών παραμέτρων του.

Αναφορικά με την κατασκευή της εφαρμογής, με το περιβάλλον GUIDE υλοποιήθηκε η γραφική διεπαφή της εφαρμογής για τη μελέτη της συμπεριφοράς του μικροηχείου στο πεδίο της συχνότητας, ενώ με το Simulink αναπτύχθηκε το αντίστοιχο γραμμικό μοντέλο για την προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου. Τα δύο τμήματα της εφαρμογής αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με διαφανή τρόπο προς τον χρήστη. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν και τις βασικές καινοτομίες της εφαρμογής. Στην τρέχουσα έκδοση της εφαρμογής υποστηρίζεται το γραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς του ηλεκτροδυναμικού μικροηχείου, τοποθετημένο α) σε κλειστό κουτί με εσώκλειστο όγκο αέρα και β) σε άπειρη

μπάφλα σε κενό αέρα, ωστόσο, η εφαρμογή είναι εύκολα επεκτάσιμη, λόγω της ανοικτής αρχιτεκτονικής της.

6 Προοπτικές - Μελλοντικές Βελτιώσεις

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη μελέτη της σχεδίασης και της μοντελοποίησης των ηλεκτροδυναμικών μικροηχείων και στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε εφαρμογή η οποία προσομοιώνει το γραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς τους. Ωστόσο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη των ανομοιομορφιών των παραμέτρων, οι οποίες οδηγούν στην κατασκευή μη γραμμικών μοντέλων συμπεριφοράς. Συνεπώς, η σχεδίαση ενός ολοκληρωμένου μοντέλου, το οποίο θα ενσωματώνει τις ανομοιομορφίες αυτές και στη συνέχεια η υλοποίησή του ως επέκταση της εφαρμογής που παρουσιάστηκε στην εργασία αυτή ή ως νέα εφαρμογή αποτελεί μία πολύ ενδιαφέρουσα μελλοντική βελτίωση.

Επίσης, υπάρχουν κάποιες παράμετροι για τις οποίες είτε δεν έγινε εκτενής αναφορά είτε δεν μελετήθηκαν, όπως λχ η θερμοκρασία, η υγρασία, το μήκος, το πάχος, το υλικό και ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου φωνής κοκ. Η μελέτη αυτών των παραμέτρων αποτελεί έναν ακόμα μελλοντικό στόχο, προκειμένου να αποκτήσουμε βαθύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο επηρεάζουν τη συμπεριφορά και τη λειτουργία των μικροηχείων.

Βιβλιογραφία

- Borwick, J. (2001). *Loudspeaker and Headphone Handbook*. Taylor & Francis.
- Bright, A. (2002). *Active Control of Loudspeakers: An Investigation of Practical Applications*. Denmark.
- Butterweck, H. J. (1989). About Doppler Nonlinearities in Loudspeakers. *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, (pp. 2061-2063).
- Christensen, K., & Olsen, E. (1996). Nonlinear Modelling of Low Frequency Loudspeakers - A More Complete Model. *100th Convention of the Audio Engineering Society*.
- Cunningham, W. J. (1949, May). Non-Linear Distortion in Dynamic Loudspeakers due to Magnetic Effects. *J. Acoustical Society of America*, 21, pp. 202-207.
- Dickason, V. (2006). *Loudspeaker Design Cookbook* (7 ed.). USA: Audio Amateur Press.
- Gordon, K. (1982). Συστήματα hi-fi, εγκατάσταση και αρχές λειτουργίας. Π. Γαλούτσι.
- Hermann, E. (2010). *iPhone 4 retina display: Better than the human eye?* Ανάκτηση 21 Μαρτίου 2015, από The Boys of Tech Podcast: [http://www.boysoftech.com](http://www.boysofttech.com)
- Kaiser, A. M. (1987, June). Modelling of the Nonlinear Response of an Electrodynamical Loudspeaker by a Volterra Series Expansion. *Journal of the Audio Eng. Soc.*, 42, pp. 421-433.
- Klapman, S. J. (1940, January). Interaction Impedance of a System of Circular Pistons. *Journal of the Acoust. Soc. Amer.*, 11, pp. 289-295.

- Klippel, W. (1992, June). Nonlinear Large-Signal Behaviour of Electrodynamic Loudspeakers at Low Frequencies. *Journal of the Audio Eng. Soc.*, 40(6), pp. 483-496.
- Klipsch, P. W. (1968, April 29). Modulation Distortion in Loudspeakers. *J. Audio Eng. Society*, pp. 194-206.
- Knudsen, M. H., & Jensen, J. G. (1993, January). Low-Frequency Loudspeaker Models that Include Suspension Creep. *Journal of the Audio Engineering Society*, 41, pp. 3-18.
- Lent, C. S. (2013). *Learning To Program With Matlab: Building GUI Tools*. Wiley & Sons.
- Marchand, P., & Holland, T. O. (2003). *Graphics And GUIs With Matlab* (3rd ed.). Washington DC: Chapman & Hall/CRC.
- MathWorks.com. (2014). *Simulink*. Ανάκτηση 21 Απριλίου 2015, από Simulink - MathWorks: <http://www.mathworks.com/products/simulink/features-b.html>
- Nielsen, J., & Mack, R. L. (1994). *Usability Inspection Methods*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Olsen, E., & Thorborg, K. (1995). Diaphragm Area and Mass Nonlinearities of Cone Loudspeakers. *99th Convention of the Audio Eng. Soc.*
- Olson, H. F. (1944, July). Action of a direct radiator loudspeaker with non-linear cone suspension. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 16(1), pp. 1-4.
- Pedersen, B. (2012, June 18). Thermal Modelling of Loudspeaker Unit and Efficiency Considerations. *Presentation for Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting*. Odense, Denmark.
- Potirakis, S. M., Alexakis, G. E., Tsilis, M. C., & Xenitides, P. J. (1999, June). Time-Domain Nonlinear Modelling of Practical Electroacoustic Transducers. *Journal of the Audio Eng. Soc.*, 47, pp. 447-468.

- Small, R. H. (1973, June). Vented-Box Loudspeaker Systems. *Journal of the Audio Engineering Society*, 21, pp. 363–372.
- Thiele, A. N. (1971, May & June). Loudspeakers in Vented Boxes, Part I and II. *Journal of the Audio Engineering Society*, 19, pp. 382-292, 471-483.
- Vanderkooy, J. (1989, May). A Model of Loudspeaker Driver Impedance Incorporating Eddy Currents in the Pole Structure. *Journal of the Audio Engineering Society*, pp. 119-128.
- Wikipedia. (2015). Ανάκτηση 10 Μαρτίου 2015, από Wikipedia: <http://en.wikipedia.org/wiki/Thiele/Small>
- Zoltogorski, B. (1993). Moving Boundary Condition and Non-Linear Propagation as the Sources of Non-Linear Distortions in Loudspeakers. *94th Convention of the Audio Engineering Society*.
- Βαρσάμης, Δ. (2006). MATLAB Graphical User Interfaces: Σημειώσεις GUI για το εργαστήριο μαθήματος Ασαφή Συστήματα. Σέρρες: ΤΕΙ Σερρών - Τμήμα Πληροφορικής και Επικοινωνιών.
- Πετρίδης, Α. (1974). *Ηλεκτροακουστική*. Αθήνα: Ο Επιστήμων.
- Σηφάκης, Μ. (2004). Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Ακουστικής. ΑΤΕΙ Ρεθύμνου.
- Σκαρλάτος, Δ. (2008). *Εφαρμοσμένη ακουστική* (3η εκδ.). Πάτρα: Gotsis.