



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και μοντελοποίηση μικροηλεκτρομηχανικών  
στοιχείων»

**Φοιτητής**

Αργυρόπουλος Γεώργιος 514013

**Επιβλέπων**

Δρ. Κυριάκος Τσιακμάκης

Ιούλιος 2022

Μελέτη και μοντελοποίηση μικροηλεκτρομηχανικών στοιχείων

Κωδικός: 22126

Φοιτητής: Αργυρόπουλος Γεώργιος

Εισηγητής: Δρ Κυριάκος Τσιακμάκης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 07-03-2022

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 10-06-2022

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Γεώργιου Αργυρόπουλου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.



## Περίληψη

Η εργασία αφορά τη μελέτη και μοντελοποίηση μικροηλεκτρομηχανικών στοιχείων εστιάζοντας σε δύο μεγάλες κατηγορίες τα διακοπτικά και τα πολυμερή. Περιγράφονται οι υποκατηγορίες τους και τα ισοδύναμα μοντέλα τους με ιδιαίτερη έμφαση στο πολυμερές υλικό IPMC. Χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα αναλύεται ο τρόπος εξαγωγής του μοντέλου και της συνάρτησης μεταφοράς του ενεργοποιητή IPMC με τη βοήθεια εργαλείων της Matlab.

## « Study and modeling microelectromechanical elements»

### **Abstract**

This dissertation concerns the study and modeling of microelectromechanical elements focusing on two major categories of switches and polymers. Their subcategories and their models are described with special emphasis on IPMC polymeric material. Using experimental data, the method of exporting the model and the transfer function of the IPMC actuator is analyzed with the help of Matlab tools.

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον επιβλέπων κ. Τσιακμάκη για τη πολύτιμη καθοδήγηση του και την παροχή πειραματικών δεδομένων.

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
Ευχαριστίες.....	vi
Περιεχόμενα .....	vii
Κατάλογος Σχημάτων .....	viii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	10
1.1 Εισαγωγή.....	10
1.2 Δομή της εργασίας .....	11
Κεφάλαιο 2ο: Εισαγωγή στα μικροηλεκτρομηχανικά στοιχεία.....	12
2.1 Εισαγωγή.....	12
2.2 Μικροηλεκτρομηχανικοί MEMS ενεργοποιητές.....	13
2.3 Μικροηλεκτρομηχανικοί MEMS αισθητήρες.....	14
2.4 Μικροηλεκτρομηχανικοί MEMS switch.....	16
2.5 IPMC.....	18
2.5.1 IPMC ενεργοποιητές (actuators).....	18
2.5.2 IPMC αισθητήρες (sensors) .....	20
Κεφάλαιο 3ο: Μοντέλα μικροηλεκτρομηχανικών στοιχείων .....	22
3.1 MEMS.....	22
3.2 IPMC Ηλεκτρομηχανικό μοντέλο.....	23
3.3 Ηλεκτρικό Ισοδύναμο IPMC .....	24
3.4 Grey Box Μοντέλο IPMC .....	26
3.5 Black Box Μοντέλο IPMC .....	27
Κεφάλαιο 4ο: Μοντελοποίηση από δεδομένα.....	29
4.1 Μοντέλο IPMC από ταυτοποίηση.....	29
4.1.1 Χρήση συνάρτησης μεταφοράς με κώδικα Matlab και Μετασχηματισμός σε z-πεδίο 45	
4.1.2 Απλοποίηση μοντέλου - Μείωση τάξης συνάρτησης μεταφοράς .....	49
4.1.3 Εξαγωγή συνάρτησης μεταφοράς από σύνθετο σήμα .....	61
Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης .....	66

## Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 2.1: MEMS sensor.....	15
Εικόνα 2.1: IPMC actuator – Αρχή λειτουργίας .....	19
Εικόνα 3.1: IPMC δοκός (cantilever).....	24
Εικόνα 3.2: IPMC ηλεκτρικό ισοδύναμο.....	25
Εικόνα 3.3: Μέθοδος μοντελοποίησης με τη μέθοδο ‘Μαύρο Κουτί’ .....	27
Εικόνα 4.1: Βηματική Απόκριση του IPMC 2cm x 0.5cm.....	30
Εικόνα 4.2: System Identification παράθυρο .....	31
Εικόνα 4.3: Εισαγωγή Δεδομένων.....	32
Εικόνα 4.4: Εξαγωγή μοντέλου .....	33
Εικόνα 4.5: Επιλογή τάξης για το εξαγόμενο μοντέλο.....	33
Εικόνα 4.6: Μοντέλα που εξήχθησαν – tf1.....	34
Εικόνα 4.7: Πληροφορίες για το εξαγόμενο μοντέλο tf1.....	34
Εικόνα 4.8: Βηματική απόκριση tf1.....	35
Εικόνα 4.9: Συχνотική Απόκριση tf1.....	36
Εικόνα 4.10: Διάγραμμα θέσεων πόλων-μηδενικών για tf1.....	36
Εικόνα 4.11: Φάσμα ενέργειας για tf1.....	37
Εικόνα 4.12: Διάγραμμα απόκρισης προσομοίωσης και μετρούμενης για την tf1.....	38
Εικόνα 4.13: Εκτίμηση συνάρτησης μεταφοράς με 4 πόλους και 2 μηδενικά – 4 <sup>ης</sup> τάξης.....	39
Εικόνα 4.14: Μοντέλα που εξήχθησαν – tf1 και tf2 .....	40
Εικόνα 4.15: Πληροφορίες για το εξαγόμενο μοντέλο tf2.....	40
Εικόνα 4.16: Βηματική απόκριση tf2.....	41
Εικόνα 4.17: Συχνотική Απόκριση t2.....	41
Εικόνα 4.18: Διάγραμμα θέσεων πόλων-μηδενικών για tf2.....	42
Εικόνα 4.19: Διάγραμμα απόκρισης προσομοίωσης και μετρούμενης για την tf2.....	42
Εικόνα 4.20: Πληροφορίες για το εξαγόμενο μοντέλο tf3.....	43
Εικόνα 4.21: Βηματική απόκριση tf3.....	44
Εικόνα 4.22: Διάγραμμα απόκρισης προσομοίωσης και μετρούμενης για την tf3.....	45
Εικόνα 4.23: Βηματική απόκριση Hz1 - 2 <sup>ης</sup> τάξης – Διακριτό μοντέλο.....	47
Εικόνα 4.24: Βηματική απόκριση Hz1 - 2 <sup>ης</sup> τάξης – Διακριτό μοντέλο.....	49
Εικόνα 4.25: Βηματική απόκριση της Hcs2.....	51
Εικόνα 4.26: Βηματική απόκριση απλοποιημένης Hcs2Red.....	51
Εικόνα 4.27: Σύγκριση βηματικών αποκρίσεων Hcs2 και απλοποιημένης Hcs2Red.....	52
Εικόνα 4.28: Bode Διαγράμματα για τις sys1,sys2,sys4,sys6 .....	55
Εικόνα 4.29: Βηματικές Αποκρίσεις για τις sys1,sys2,sys4,sys6.....	56

Εικόνα 4.30: Βηματικές Αποκρίσεις για τις sys1,sys2,sys4,sys6 – Μεγέθυνση σε περιοχή ενδιαφέροντος.....	57
Εικόνα 4.31: Έξοδος με είσοδο ημίτονο με πλάτος 2V και συχνότητας 1 Hz για 2 <sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση μεταφοράς.....	58
Εικόνα 4.32: Έξοδος με είσοδο τετραγωνικό σήμα με πλάτος 2V και συχνότητας 1 Hz για 2 <sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση μεταφοράς.....	59
Εικόνα 4.33: Έξοδος με είσοδο τετραγωνικό σήμα με πλάτος 2V και συχνότητας 1 Hz για 4 <sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση μεταφοράς.....	59
Εικόνα 4.34: Simulink για 2 <sup>ης</sup> τάξης σε s και z domain.....	60
Εικόνα 4.35: Βηματική απόκριση στο Simulink για 2 <sup>ης</sup> τάξης σε s και z domain .....	60
Εικόνα 4.36: Απόκριση από σύνθετο σήμα HsComplex .....	61
Εικόνα 4.37: Βηματική απόκριση της HsComplex .....	62
Εικόνα 4.38: Validation της HsComplex.....	62
Εικόνα 4.39: Απόκριση από σύνθετο σήμα HsComplex2.....	64
Εικόνα 4.40: Βηματική απόκριση της HsComplex2 .....	64
Εικόνα 4.41: Validation της HsComplex2.....	65

# Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

## 1.1 Εισαγωγή

Τα μικροηλεκτρο-μηχανικά συστήματα (MEMS) αντιπροσωπεύουν μια πολύ σημαντική κατηγορία εφαρμογών συστημάτων που κυμαίνονται από μικρούς ενσωματωμένους αισθητήρες και ενεργοποιητές, παθητικά εξαρτήματα σε πεδία ραδιοσυχνότητας και μικροκυμάτων και οπτικά μικροκάτοπτρα. Η σημαντικότητα των MEMS πηγάζει από τα πολλά πλεονεκτήματά τους, μεταξύ των οποίων είναι το μικρό συμπαγές μέγεθος που μπορεί να ενσωματωθεί με άλλα εξαρτήματα, η χαμηλή απώλεια και η μεταβλητότητα των παραμέτρων. Από δομική άποψη, κάθε στοιχείο MEMS είναι από μόνο του ένα πολύ μικρό ηλεκτρομηχανικό σύστημα ετερογενούς δομής που αποτελείται από υλικά με διαφορετική χημική σύσταση (διηλεκτρικό υπόστρωμα, κράματα μετάλλων και αγωγίμο σύρμα) και διαφορετικές φυσικές (ηλεκτρικές, θερμικές, μηχανικές) ιδιότητες.

Επιπλέον τα στοιχεία MEMS μπορεί να είναι στατικά συστήματα ή μπορεί να περιέχουν ορισμένα κινούμενα μέρη, όπως μεταβλητό πυκνωτή, κινούμενες μεμβράνες και δοκούς-cantilevers. Η κλίμακα διαστάσεων των διαφορετικών τμημάτων των εξαρτημάτων MEMS μπορεί να ποικίλλει από πολύ μικρή (πχ micro) όπως το πάχος μιας πλάκας, έως συγκριτικά μεγάλη από μερικές εκατοντάδες μικρά σε άλλες διαστάσεις

Αποτελούν συστήματα στα οποία λαμβάνουν χώρα και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ηλεκτρικά, θερμικά, μηχανικά και άλλα φυσικά φαινόμενα. Η μαθηματική μοντελοποίηση και προσομοίωση μελετιέται εδώ και δεκαετίες εδώ και δεκαετίες για την κατανόηση του υλικού ή συστήματος αλλά και για την μείωση του κόστους και του χρόνου κατασκευής. Ωστόσο, η ετερογενής φύση των δομών των MEMS, σε συνδυασμό με φαινόμενα πολλαπλής φυσικής που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία τους, καθιστά τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση στοιχείων MEMS, μια πολύπλοκη και δύσκολη εργασία.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη και μοντελοποίηση μικροηλεκτρομηχανικών στοιχείων εστιάζοντας σε δύο μεγάλες κατηγορίες τα διακοπτικά και τα πολυμερή. Περιγράφονται οι υποκατηγορίες τους και τα ισοδύναμα μοντέλα τους με ιδιαίτερη έμφαση στο πολυμερές υλικό IPMC. Χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα αναλύεται ο τρόπος εξαγωγής του μοντέλου και της συνάρτησης μεταφοράς του ενεργοποιητή IPMC με τη βοήθεια εργαλείων της Matlab.

Επειδή τα IPMCs μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν πρώτα ως ενεργοποιητές και μετά ως αισθητήρες πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να αναπτύξουν φυσικά μοντέλα που να ερμηνεύουν με ακρίβεια την συμπεριφορά τους. Δυστυχώς μέχρι σήμερα δεν είναι τόσο ξεκάθαρο το φαινόμενο της ηλεκτρομηχανικής και χημικής μεταγωγής που επιδρά στο υλικό. Το έργο των ερευνητών όσο αφορά

την εύρεση του μοντέλου του IPMC μπορεί να χωριστεί σε τρεις κύριες κατηγορίες, το φυσικό μοντέλο, το μοντέλο μαύρου κουτιού και το μοντέλο γκρι κουτιού.

Η ανάγκη για εξαγωγή του μοντέλου ενός υλικού όπως το IPMC είναι ότι δεν μπορεί να εξαχθεί εύκολα μέσω ηλεκτρομηχανικών εξισώσεων και η χρήση του σε συστήματα ελέγχου. Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα συστήματα ελέγχου πρέπει να βρεθεί μια κατάλληλης τάξης συνάρτηση μεταφοράς που να το περιγράφει με μεγάλη προσέγγιση και για να μπορέσει να ενσωματωθεί σε μικροσυστήματα, όπως οι μικροελεγκτές.

## **1.2 Δομή της εργασίας**

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή της εργασίας, οι στόχοι και η δομή της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή στα μικροηλεκτρομηχανικά στοιχεία με ιδιαίτερη έμφαση στα υλικά IPMC.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα μοντέλα των ηλεκτρομηχανικών στοιχείων και των IPMCs.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται οι μέθοδοι μοντελοποίησης και εξαγωγής των συναρτήσεων μεταφοράς του υλικού από τα δεδομένα εισόδου-εξόδου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και θέματα για μελλοντική έρευνα.

## Κεφάλαιο 2ο: Εισαγωγή στα μικροηλεκτρομηχανικά στοιχεία

### 2.1 Εισαγωγή

Το MEMS (μικροηλεκτρομηχανικό σύστημα) είναι μια μικροσκοπική μηχανή που έχει τόσο μηχανικά όσο και ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Η φυσική διάσταση ενός MEMS μπορεί να κυμαίνεται από πολλά χιλιοστά έως λιγότερο από ένα μικρόμετρο, διάσταση πολλές φορές μικρότερη από το πλάτος μιας ανθρώπινης τρίχας.

Το ακρωνύμιο MEMS χρησιμοποιείται για να περιγράψει τόσο μια κατηγορία μικρομηχανικών συσκευών όσο και τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή τους. Ορισμένα MEMS δεν διαθέτουν μηχανικά μέρη, ωστόσο ταξινομούνται ως MEMS επειδή μικραίνουν τις δομές που χρησιμοποιούνται σε συμβατικά μηχανήματα, όπως ελατήρια, κανάλια, κοιλότητες, οπές και μεμβράνες. Επειδή ορισμένες συσκευές MEMS μετατρέπουν ένα μηχανικό σήμα σε ηλεκτρικό ή οπτικό σήμα, μπορούν επίσης να αναφέρονται ως μετατροπείς. Στην Ιαπωνία τα MEMS είναι πιο γνωστά ως μικρομηχανές και στις ευρωπαϊκές χώρες τα MEMS αναφέρονται πιο συχνά ως τεχνολογία μικροσυστημάτων.

Τα MEMS αποτελούνται από μέρη όπως μικροαισθητήρες, μικροεπεξεργαστές, μικροενεργοποιητές, μονάδες επεξεργασίας δεδομένων και εξαρτήματα που μπορούν να αλληλεπιδράσουν με εξωτερικά περιφερειακά. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μηχανικές συσκευές, τα MEMS συχνά κατασκευάζονται με τις ίδιες τεχνικές κατασκευής παρτίδας που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (IC) και πολλά εμπορικά προϊόντα MEMS ενσωματώνονται και συσκευάζονται μαζί με IC. Η κατασκευή MEMS επιτρέπει στους μικροαισθητήρες που συλλέγουν δεδομένα και στους μικροενεργοποιητές που μετατρέπουν την ενέργεια σε κίνηση, να ενσωματωθούν στο ίδιο υπόστρωμα. Αν και τα MEMS έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής ανά συσκευή η συσκευασία μπορεί να είναι δύσκολη. Κάθε MEMS πρέπει να είναι συσκευασμένο έτσι ώστε τα ηλεκτρικά ή οπτικά κυκλώματα και τα άλλα εξαρτήματα της συσκευής να παραμένουν απαλλαγμένα από μόλυνση αέρα και νερού, ενώ θα μπορούν να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον και να εξυπηρετούν την κίνηση.

Το ολοκληρωμένο - σύστημα που προσαρμόζει αυτόματα τον προσανατολισμό της οθόνης σε ένα κινητό τηλέφωνο είναι ένα παράδειγμα ενός MEMS. Καθώς τα MEMS γίνονται μικρότερα, απαιτούν λιγότερη ενέργεια και είναι φθηνότερα στην κατασκευή τους και αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο ασύρματο διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) και στον οικιακό αυτοματισμό. Άλλες εμπορικές εφαρμογές του MEMS μπορούν να βρεθούν σε συστήματα θέρμανσης και ψύξης, ανίχνευση περιβαλλοντικών αλλαγών σε δωμάτια, μικροστόμια για τον έλεγχο της ροής του μελανιού σε εκτυπωτές ink-jet. Επίσης, σε μικροσκοπικά γυροσκόπια, βαρόμετρα, επιταχυνσιόμετρα και μικρόφωνα, αισθητήρες πίεσης μιας χρήσης, συσκευές οπτικής μεταγωγής που επιτρέπουν σε ένα οπτικό σήμα να ελέγχει ένα άλλο οπτικό σήμα.

Η ιδέα της δημιουργίας MEMS ξεκίνησε τη δεκαετία του 1980. Ωστόσο, τα μέσα για την παραγωγή MEMS δεν ήταν αρκετά διαθέσιμα μέχρι τη δεκαετία του 1990. Ένας από τους πρώτους λίγους τύπους MEMS που παράγονται ήταν για ελεγκτές αερόσακων και κεφαλές εκτύπωσης ink-jet. Με την πάροδο του χρόνου, οι μικροαισθητήρες άρχισαν να χρησιμοποιούνται για μεγάλο αριθμό τύπων αισθητήρων, συμπεριλαμβανομένων αισθητήρων για θερμοκρασία, πίεση, μαγνητικά πεδία και ακτινοβολία. Σε πολλές περιπτώσεις, οι αισθητήρες που χρησιμοποιούσαν MEMS ήταν πολύ πιο αποδοτικοί όσον αφορά την απόδοση σε σύγκριση με μεγαλύτερους αντίστοιχους. Σήμερα, οι περισσότεροι άνθρωποι αλληλεπιδρούν με το MEMS καθημερινά. Κάθε νέο αυτοκίνητο που βγαίνει από μια γραμμή συναρμολόγησης έχει τουλάχιστον 50 MEMS. Επίσης, αποτελούν βασικά εξαρτήματα σε διάφορα υποχρεωτικά συστήματα ασφαλείας, συμπεριλαμβανομένων των αερόσακων, του ηλεκτρονικού ελέγχου ευστάθειας (ESC) και των συστημάτων παρακολούθησης της πίεσης των ελαστικών (TPMS).

## 2.2 Μικροηλεκτρομηχανικοί MEMS ενεργοποιητές

Καθώς οι ενεργοποιητές MEMS χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο από τις εμπορικές εφαρμογές, απαιτείται αυξημένη αξιοπιστία, ταχύτητα και ακρίβεια απόδοσης. Έχουν αναπτυχθεί πέντε βασικές τεχνολογίες ενεργοποιητή MEMS σε ολοκληρωμένο: μαγνητική, πιεζοηλεκτρική, θερμική, οπτική και ηλεκτροστατική. Ανεξάρτητα από την εφαρμοζόμενη τεχνική ενεργοποίησης, τα MEMS συνήθως οδηγούνται απευθείας με τρόπο ανοιχτού βρόχου εφαρμόζοντας απλά σήματα ενεργοποίησης. Κατά συνέπεια η επίτευξη καλύτερης δυναμικής συμπεριφοράς της συσκευής MEMS, όσον αφορά την ακρίβεια και την ταχύτητα απόκρισης, περιορίζεται μόνο από τις βελτιώσεις σχεδιασμού της. Οι ενεργοποιητές MEMS σταδιακά τροποποιούνται και βελτιώνονται από την άποψη της μηχανικής σχεδίασης για καλύτερη απόδοση. Οι απαιτήσεις για καλύτερη δυναμική συμπεριφορά είχαν ως αποτέλεσμα τη εφαρμογή βελτιωμένων προσεγγίσεων ενεργοποίησης. Με την εισαγωγή πιο σύνθετων σημάτων ενεργοποίησης είχαν ως αποτέλεσμα καλύτερο έλεγχο.

Οι ενεργοποιητές MEMS, συσκευές που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική κίνηση, αποτελούν περισσότερο από το 50% της ταχέως αναπτυσσόμενης αγοράς MEMS. Χρησιμοποιούνται σε μια ποικιλία οπτικών, ραδιοσυχνοτήτων και βιομηχανικών εφαρμογών. Παραδείγματα περιλαμβάνουν μεταβλητούς πυκνωτές (varactors), μικροελέ για VLSI χαμηλής κατανάλωσης, οπτικούς μετατοπιστές φάσης, θόνοι επόμενης γενιάς, μικρο-λαβές για ρομποτική χειρουργική και μηχανισμούς εστίασης για κάμερες σε κινητές συσκευές.

Οι σχεδιαστές αντιμετωπίζουν αυξανόμενη πίεση να μειώσουν τόσο τον χρόνο διάθεσης στην αγορά όσο και το κόστος. Αυτές οι πιέσεις επιβάλλουν αλλαγές στην παραδοσιακή εξάρτηση από την εσωτερική ανάπτυξη εργαλείων και τους επαναλαμβανόμενους κύκλους κατασκευής και δοκιμών. Η

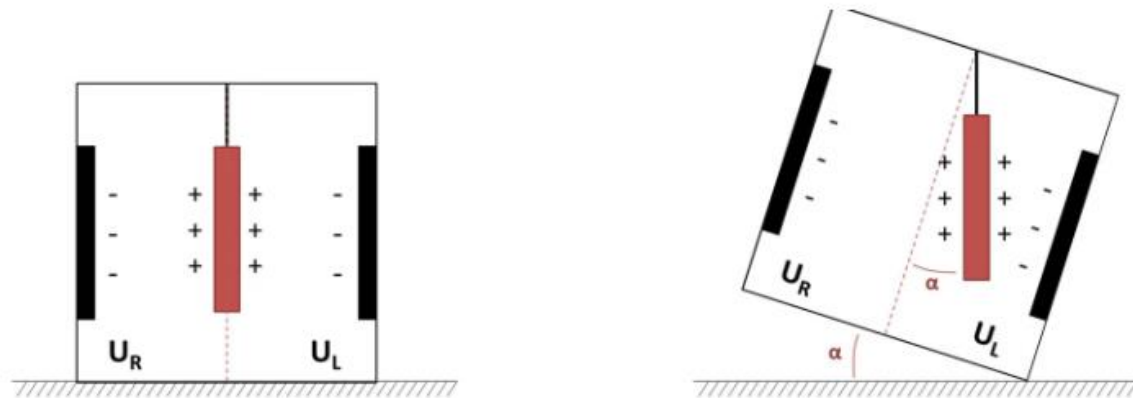
βασική πρόκληση για τους σχεδιαστές ενεργοποιητών MEMS είναι να δημιουργήσουν μια συσκευή που πληροί τα κριτήρια απόδοσης για δύναμη, μετατόπιση, χρόνο μεταγωγής, ισχύ, μέγεθος, σταθερότητα θερμοκρασίας και αξιοπιστία. Για να επιτύχουν οι σχεδιαστές πρέπει να υπολογίσουν σωστά τις αποστάσεις στα υλικά και μηχανικά μέρη.

Οι σχεδιαστές μπορούν πρώτα να αξιολογήσουν και να βελτιστοποιήσουν τον ενεργοποιητή MEMS σε μια μεγάλη ποικιλία γεωμετρικών αλλαγών, προδιαγραφών υλικού και ανοχών. Κάθε μία από αυτές τις αλλαγές μπορεί να επηρεάσει ξεχωριστά την απόδοση και τη δυνατότητα κατασκευής της συσκευής και η σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ τους πρέπει να εξεταστεί σε πραγματικό χρόνο. Η ταχύτητα και η χωρητικότητα της προσομοίωσης είναι ένα βασικό πλεονέκτημα σε αυτή τη διαδικασία σχεδιασμού. Η ικανότητα γρήγορης εξερεύνησης και επιλογής ενός βέλτιστου σχεδιαστικού συνδυασμού, όταν χρησιμοποιείται ένας τόσο μεγάλος αριθμός μεταβλητών, μπορεί να βοηθήσει τους σχεδιαστές να αποφύγουν υποβέλτιστες και υπερβολικά δαπανηρές προσεγγίσεις στη διαδικασία σχεδιασμού.

### **2.3 Μικροηλεκτρομηχανικοί MEMS αισθητήρες**

Ένα MEMS έχει αναπτυχθεί για να επιτύχει μια συγκεκριμένη σχεδιαστική ικανότητα ή λειτουργία με ηλεκτρομηχανικά ή ηλεκτροχημικά μέσα. Οι αισθητήρες που κατασκευάζονται από μια διαδικασία MEMS είναι μηχανικοί αισθητήρες αλλά απλά κατασκευάζεται σε κλίμακα μικρομέτρου. Ο πυρήνας στο MEMS ως επί το πλείστον αποτελείται από δύο κύρια τμήματα: ανίχνευση ή ενεργοποίηση δηλαδή sensor ή actuator. Όλα τα MEMS συσκευές εξαρτώνται από τη δομή όπως η δοκός, γρανάζι, αντλία και κινητήρες. Οι αισθητήρες μικροκλίμακας κατασκευάζονται για να ανιχνεύσουν την παρουσία και την ένταση ορισμένων φυσικών, χημικών ή βιολογικών ποσοτήτων ή μεγεθών όπως θερμοκρασία, πίεση, δύναμη, ήχος, φως, πυρηνική, ακτινοβολία, μαγνητική ροή και χημική ακτινοβολία και χημική σύνθεση. Έχουν το όφελος της καλύτερης ευαισθησίας και ακρίβειας. Λόγω μικρότερου μεγέθους τείνει να κινούνται πιο γρήγορα από τα μεγάλα συστήματα λόγω χαμηλή αδράνεια της μάζας.

Το MEMS, ή Micro Electro-Mechanical System, είναι μια τεχνολογία που βασίζεται σε τσιπ όπου οι αισθητήρες αποτελούνται από μια αναρτημένη μάζα μεταξύ ενός ζεύγους χωρητικών πλακών. Όταν ο αισθητήρας έχει κλίση, δημιουργείται μια διαφορά στο ηλεκτρικό δυναμικό από αυτή την αιωρούμενη μάζα. Η διαφορά που δημιουργείται στη συνέχεια μετράται ως αλλαγή στην χωρητικότητα.



Εικόνα 2.1: MEMS sensor

[<https://www.althensensors.com/althenpedia/mems-sensors-what-are-they-and-how-do-they-work/#:~:text=MEMS%2C%20or%20Micro%20Electro%2DMechanical,as%20a%20change%20in%20capacitance.>]

Η τεχνολογία MEMS έχει κάποια πλεονεκτήματα. Οι αισθητήρες MEMS παρέχουν διαθέσιμες λειτουργίες με κάθε άλλη γραμμική αισθητήρων χωρίς περιορισμούς χώρου. Επιπλέον, το MEMS χρησιμοποιεί πολύ συμπαγή εξαρτήματα μικρομηχανής τόσο μικροσκοπικά που κάθε αισθητήρας MEMS μπορεί εύκολα να χωρέσει στην παλάμη του χεριού. Επιπλέον, οι αισθητήρες MEMS διαθέτουν στεγανοποίηση IP67 και οι αισθητήρες είναι σε θέση να αντέχουν ορισμένες έντονες θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 40° έως +85°C. Οι περισσότερες βιομηχανίες στις οποίες χρησιμοποιούνται αισθητήρες MEMS λειτουργούν σε ακραίες θερμοκρασίες. Αυτή η σφράγιση επιτρέπει στους αισθητήρες να βυθίζονται σε ρηγά νερά για μικρές περιόδους, επιτρέποντάς τους να παρακολουθούν υποθαλάσσιες εφαρμογές. Κάποιοι ηλεκτρολυτικοί αισθητήρες μπορεί να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά είναι συχνά πιο ευαίσθητοι στη θερμοκρασία. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτών των αισθητήρων MEMS είναι η αντοχή τους σε κραδασμούς. Αυτοί οι αισθητήρες δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε άκρως συγκλονιστικά σενάρια όπως στρατιωτικές εφαρμογές, αλλά μπορούν να αντέξουν σε βιομηχανικές μετρήσεις και έλεγχο, εξοπλισμό γεώτρησης και κάποια γεωτεχνική παρακολούθηση.

Ο όρος Bio-MEMS έχει χρησιμοποιείται εκτενώς τελευταία και περιλαμβάνει βιοαισθητήρες, βιολογικά όργανα και συσκευές χειρουργικής. Οι βιοϊατρικοί αισθητήρες και οι βιοαισθητήρες έχουν ένα σημαντικό μερίδιο αγοράς-χρήσης για αισθητήρες mems μετά από την χρήση τους στην αυτοκινητοβιομηχανία. Οι αισθητήρες που βασίζονται σε μικροπρόβολο -micro cantilever διακρίνουν την αλλαγή στη συχνότητα συντονισμού ενός cantilever. Τα cantilevers χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της καταπόνησης που προκαλείται από αλλαγή αντίστασης που παράγεται από ένα συγκεκριμένο βιομόριο. Όταν τα βιομόρια απορροφώνται, το υλικό ανίχνευσης προσροφά ειδικά το ξένο υλικό, επιφέροντας μια μικρή ογκομετρική αλλαγή το αισθητήριο υλικό. Αυτή η ογκομετρική

αλλαγή είναι μετρίεται ως απλή αλλαγή αντίστασης στο πιεζοαντιστατικό μικροπρόβολο και τα βιομόρια ανιχνεύονται στο ελεύθερο άκρο του.

## **2.4 Μικροηλεκτρομηχανικοί MEMS switch**

Οι διακόπτες RF MEMS είναι μικροί, μικρομηχανικοί διακόπτες που έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μπορούν να παραχθούν χρησιμοποιώντας τεχνολογία κατασκευής MEMS. Μοιάζουν με έναν διακόπτη φώτων σε ένα δωμάτιο, όπου μια επαφή ανοίγει ή κλείνει για να μεταφέρει ένα σήμα κατά μήκος του διακόπτη. Στην περίπτωση συσκευών RF MEMS, τα μηχανικά εξαρτήματα του διακόπτη έχουν μέγεθος μόνο  $\mu\text{m}$ . Σε αντίθεση με έναν διακόπτη φώτων, το σήμα που μεταδίδεται σε έναν διακόπτη RF MEMS βρίσκεται στην περιοχή ραδιοσυχνότητας.

### **Τεχνολογία διακόπτη RF**

Η μεταγωγή ραδιοσυχνότητας μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μια σειρά από διαφορετικές τεχνολογίες. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι διακοπών RF που ανταγωνίζονται τους διακόπτες RF MEMS: ηλεκτρομηχανικοί διακόπτες ραδιοσυχνότητας και διακόπτες ραδιοσυχνότητας στερεάς κατάστασης. Οι διακόπτες στερεάς κατάστασης χρησιμοποιούν τεχνολογίες ημιαγωγών για τη λειτουργία τους, όπως διόδους πυριτίου ή PIN, FET (τρανζίστορ φαινομένου πεδίου) και υβριδικές τεχνολογίες (που έχουν PINS και FET) και κατασκευάζονται με υποστρώματα με βάση το πυρίτιο. Οι διακόπτες RF MEMS ανταγωνίζονται τους συνεχώς βελτιωμένους διακόπτες με βάση το Silicon on Insulator, οι οποίοι αποτελούν την κυρίαρχη λύση στην αγορά σήμερα. Υπάρχουν πολλοί τύποι διακοπών RF MEMS και μπορούν να ενεργοποιηθούν χρησιμοποιώντας διαφορετικούς μηχανισμούς. Η ηλεκτροστατική ενεργοποίηση χρησιμοποιείται συνήθως σε σχέδια διακοπών RF MEMS, λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και του μικρού μεγέθους. Οι διακόπτες MEMS μπορούν επίσης να ανοίξουν ή να κλείσουν χρησιμοποιώντας αδρανειακή, ηλεκτρομαγνητική, ηλεκτροθερμική ή πιεζοηλεκτρική δύναμη. Σε ένα τυπικό διακόπτη RF MEMS προβολικής δέσμης μια σταθερή δέσμη αναρτάται πάνω από ένα υπόστρωμα και όταν η δέσμη πιέζεται προς τα κάτω, ένα ηλεκτρόδιο στη δέσμη έρχεται σε επαφή με ένα ηλεκτρόδιο στο υπόστρωμα, θέτοντας τον διακόπτη σε κατάσταση ON.

### **Χωρητικοί διακόπτες RF MEMS**

Η τελευταία γενιά διακοπών RF MEMS είναι ως επί το πλείστον συσκευές που βασίζονται σε χωρητικότητα. Οι χωρητικοί διακόπτες λειτουργούν χρησιμοποιώντας χωρητική σύζευξη και είναι κατάλληλοι για εφαρμογές ραδιοσυχνότητας υψηλής συχνότητας. Κατά τη λειτουργία, ασκείται δύναμη σε μια δοκό που αναρτάται σαν γέφυρα σε ένα υπόστρωμα. Όταν η δέσμη έλκεται προς τα

κάτω από μια δύναμη (όπως μια ηλεκτροστατική δύναμη), η δέσμη έρχεται σε επαφή με ένα διηλεκτρικό στο υπόστρωμα και το σήμα τερματίζεται.

Η ανάπτυξη των διακοπών RF MEMS ξεκίνησε πριν από 20 χρόνια αλλά η επιτυχία του στην αγορά ήταν μικρή εκείνη την εποχή. Το κύριο εμπόδιο ήταν η αξιοπιστία. Οι διακόπτες RF πρέπει να επιβιώσουν σε δισεκατομμύρια κύκλους μεταγωγής-χρήσης. Ήταν δύσκολο να βρεθούν υλικά που είναι αρκετά σκληρά για να διατηρήσουν μεγάλο αριθμό κύκλων μεταγωγής, ενώ ταυτόχρονα είναι αρκετά μαλακά για να κάνουν καλή επαφή όταν είναι κλειστά. Οι διακόπτες RF MEMS απαιτούν μια τεχνολογία κατασκευής που βασίζεται σε σύνθετα στρώματα μηχανικών υλικών. Η αξιοπιστία ενός διακόπτη RF MEMS επηρεάζεται από την ηλεκτρική και μηχανική καταπόνηση σε αυτά τα σύνθετα υλικά, μαζί με τις εξαρτήσεις από τη θερμοκρασία και την ευαισθησία σε κραδασμούς. Υπάρχει μια αυξανόμενη ζήτηση για διακόπτες RF MEMS και άλλες συσκευές RF MEMS σε συστήματα τηλεπικοινωνιών επόμενης γενιάς και έξυπνα τηλέφωνα. Επιπλέον, οι ταλαντωτές RF MEMS θα χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη νέων σταθμών βάσης και υπολογιστών αιχμής που συνδέονται με 5G.

Λόγω της μηχανικής τους φύσης, οι διακόπτες RF MEMS έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπάρχουσες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένης της πολύ χαμηλής αντίστασης όταν είναι κλειστοί και πολύ υψηλής αντίστασης όταν είναι ανοιχτοί. Οι διακόπτες RF-MEMS προσφέρουν τα πλεονεκτήματα του μικρού μεγέθους, των χαμηλών απαιτήσεων ισχύος, του γρήγορου χρόνου μεταγωγής, της χαμηλής απώλειας σήματος, της υψηλής απομόνωσης εκτός κατάστασης, των δυνατοτήτων ολοκλήρωσης σε κλίμακα κυκλώματος και άλλα. Οι διακόπτες RF-MEMS σε συχνότητες της τάξης των δεκάδων GHz θα χρησιμοποιούνται ευρέως σε μελλοντικά συστήματα τηλεπικοινωνιών, όπως η κινητή κυψελωτή επικοινωνία 5G, ιδιαίτερα καθώς οι νέες διαδικασίες και υλικά κατασκευής γίνονται πιο εύκολα διαθέσιμα. Οι συσκευές RF MEMS, συμπεριλαμβανομένων των διακοπών RF MEMS, θα γνωρίσουν μεγαλύτερη ανάπτυξη ως μέρος της επόμενης γενιάς 5G και άλλων συστημάτων τηλεπικοινωνιών.

### **Σχεδίαση και προσομοίωση διακόπτη RF και μεταβλητού πυκνωτή MEMS**

Την τελευταία δεκαετία, οι διακόπτες RF MEMS έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές χαμηλού όγκου στις αγορές αεροδιαστημικής, άμυνας, τηλεπικοινωνιών και αυτοματοποιημένου εξοπλισμού δοκιμών RF. Υπάρχει πλέον ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση διακοπών RF MEMS στην αγορά κινητών συσκευών μεγάλου όγκου, για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις σχεδιασμού RF και να βελτιωθεί η λειτουργικότητα και η απόδοση των σημερινών τεχνολογιών ραδιοφώνου. Οι συσκευές RF MEMS μπορούν να ενεργοποιήσουν συντονισμό κεραίας χαμηλής εξασθένησης για διαφορετικές ζώνες βάσης

και ρυθμιζόμενους ενισχυτές ισχύος. Οι διακόπτες και τα ρελέ RF-MEMS παρέχουν επίσης μεγάλο εύρος ζώνης, χαμηλή απώλεια εισαγωγής, εξαιρετική απομόνωση και εξαιρετική γραμμικότητα.

## 2.5 IPMC

### 2.5.1 IPMC ενεργοποιητές (actuators)

Τα υλικά και οι συσκευές που έχουν τη δυνατότητα να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια απευθείας σε μηχανική εργασία έχουν επικεντρώσει το ενδιαφέρον των ερευνητών τα τελευταία χρόνια. Από την πρώτη αναφορά για το EAP (ηλεκτροενεργά πολυμερή) στα μέσα της δεκαετίας του 1970, εφαρμογές όπως οι τεχνητοί μύες και η απτική απεικόνιση έχουν αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον για την επιστημονική κοινότητα. Βασικά τα EAP είναι υλικά που έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται μηχανικά μια ηλεκτρική διέγερση, επομένως, που προκαλεί σημαντική αλλαγή στο σχήμα και το μέγεθος.

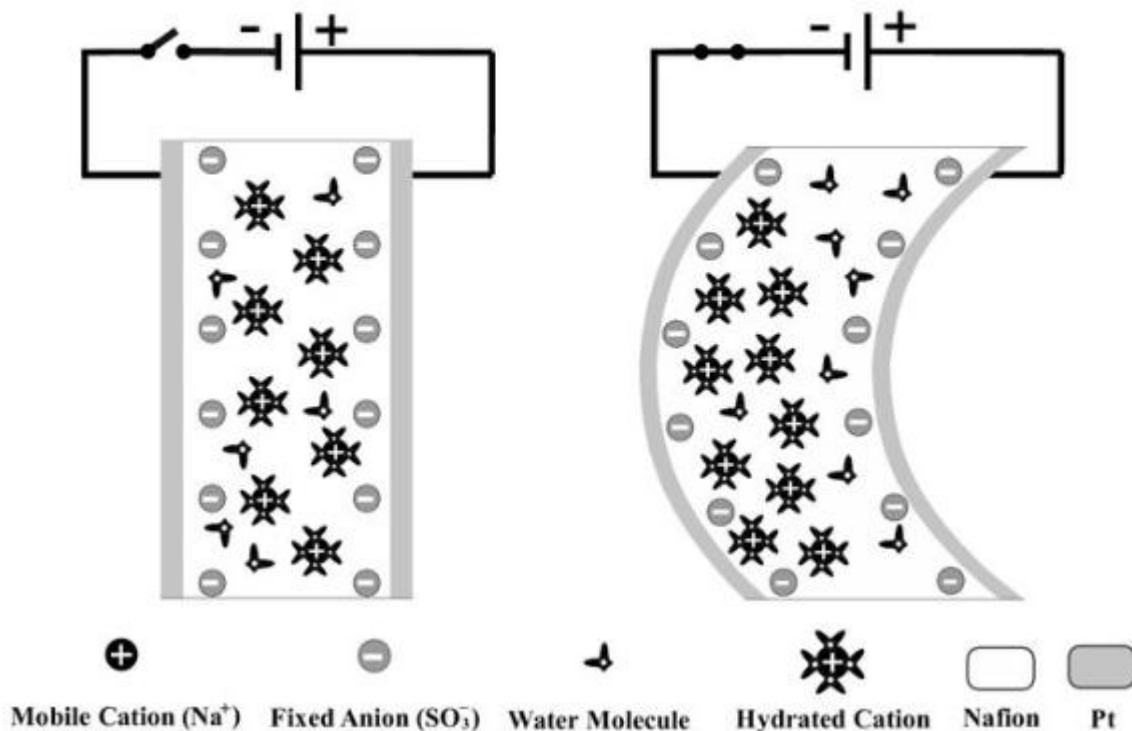
Έτσι, τα EAP ταξινομούνται συνήθως σε δύο κύριες κατηγορίες με βάση τη λειτουργία τους μηχανισμός: ηλεκτρονικός και ιοντικός. Τα ηλεκτρονικά ενεργοποιημένα EAP απαιτούν συνήθως μια τάση ενεργοποίησης και δυνάμεις Coulomb θα οδηγήσουν τη συσκευή. Για παράδειγμα, τα ηλεκτροστατική, πιεζοηλεκτρική ή τα σιδηροηλεκτρικά υλικά μπορούν να ενεργοποιηθούν με παροχή DC τάσης. Από την άλλη, τα ιοντικά ηλεκτροενεργά υλικά επιτρέπουν τη μετατόπιση ιόντων. Τα Ionic EAPs όπως τα σύνθετα μεταλλικά ιοντικά πολυμερή, νανοσωλήνες άνθρακα και τα αγώγιμα πολυμερή, μπορούν να ενεργοποιούνται με την εφαρμογή πολύ χαμηλής τάσης, η οποία οδηγεί σε κίνηση- κάμψη. Αυτοί οι ενεργοποιητές θα πρέπει να διαθέτουν και συγκεκριμένες ιδιότητες. Οι ενεργοποιητές IPMC (σύνθετα υλικά ιοντικών πολυμερών μετάλλων) διαθέτουν μικρή τάση ενεργοποίησης, αλλά η ενεργειακή τους πυκνότητα είναι χαμηλή λόγω της ανάγκης τους για υγρό ηλεκτρολύτη για να λειτουργήσει σωστά.

Οι ενεργοποιητές ιοντικών πολυμερών σύνθετων μετάλλων (IPMC) έχουν σημαντικά δυναμότητες για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Αν και οι ενεργοποιητές IPMC μελετήθηκαν ευρέως για τις ηλεκτρομηχανικές τους ιδιότητες, οι περισσότερες μελέτες έχουν διεξαχθεί στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η ηλεκτρομηχανική απόδοση των ενεργοποιητών IPMC σε υψηλότερη θερμοκρασία δεν έχουν μελετηθεί αρκετά και αυτό γιατί το υλικό θέλει να είναι καλά ενυδατωμένο. Τα IPMC είναι μαλακά με βάση πολυμερή σύνθετα υλικά που μπορούν να σχεδιαστούν ως μαλακοί ενεργοποιητές και αισθητήρες. Οι ενεργοποιητές IPMC έχουν πολλές μοναδικές ιδιότητες, όπως χαμηλή πυκνότητα, μεγάλη τάση κάμψης, χαμηλό θόρυβο, υψηλή ελαστικότητα και χαμηλή τάση λειτουργίας που κάνουν

την εφαρμογή τους πιο πρακτική σε σύγκριση με πολλά από τα αντίστοιχα με βάση το μέταλλο ή το κεραμικό.

Τα εξαρτώμενα από το χρόνο χαρακτηριστικά κάμψης των ενεργοποιητών IPMC έχουν μελετηθεί ευρέως, πειραματικά και θεωρητικά, ως τεχνητοί μύες για βιοϊατρικές εφαρμογές, βιομηχανική μικρορομποτική και εργαλεία σκληρού περιβάλλοντος.

Τυπικά, ένας ενεργοποιητής IPMC είναι κατασκευασμένος από ένα επίπεδο πολυμερούς που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια. Πιο συγκεκριμένα, η πολυμερής μήτρα αποτελείται από ένα οργανικό πολυμερές που περιέχει ομοιοπολικά συνδεδεμένες σταθερές ιοντικές ομάδες. Τα πιο δημοφιλή πολυμερή βασίζονται σε υπερφθοριωμένο αλκένιο που περιέχει κοντές πλευρικές αλυσίδες που τερματίζονται με ένα ιοντική ομάδα ( $\text{SO}_3^-$  ή  $\text{CO}_2^-$ ) για ανταλλαγή κατιόντων. Η μεγάλη ραχοκοκαλιά του πολυμερούς καθορίζει τη μηχανική ιδιότητα του πολυμερούς ενώ η ιοντική κοντή πλευρική αλυσίδα ομάδες αλληλεπιδρούν με τον ηλεκτρολύτη (νερό ή οργανικός πολικός διαλύτης) και επιτρέπουν την διέλευση ιόντων. Εμπορικά, υπάρχουν αρκετές πολυμερείς μήτρες ανταλλαγής ιόντων όπως Nafion®, Aciplex™ και Flemion™ κ.λπ.



Εικόνα 2.2: IPMC actuator – Αρχή λειτουργίας

[[https://www.researchgate.net/publication/350192084\\_A\\_3D\\_analytical\\_ion\\_transport\\_model\\_for\\_ionic\\_polymer\\_metal\\_composite\\_actuators\\_in\\_large\\_bending\\_deformations](https://www.researchgate.net/publication/350192084_A_3D_analytical_ion_transport_model_for_ionic_polymer_metal_composite_actuators_in_large_bending_deformations)]

Για να χαρακτηριστεί σωστά ο ενεργοποιητής, απαιτούνται αρκετές μετρήσεις στη σειρά για να εξαχθούν πληροφορίες για τις φυσικές και ηλεκτρονικές ιδιότητές τους. Οι ιδιότητες όπως η αντοχή εφελκυσμού, η ακαμψία και ο συντελεστής θερμικής διαστολής, παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη μηχανική αντοχή, την τάση μπλοκαρίσματος, τη μηχανική ενέργεια καθώς και τη θερμική συμβατότητα του ενεργοποιητή. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός περιλαμβάνει τις τέσσερις κύριες ιδιότητες όπως τη μέγιστη τάση, τα φάσματα σύνθετης αντίστασης, το μη γραμμικό ρεύμα και την αντίσταση φύλλου.

Η μέγιστη τάση είναι σημαντική, καθώς καθορίζει τα όρια της ασφαλούς λειτουργίας της συσκευής. Το φάσμα σύνθετης αντίστασης παρέχει δεδομένα αντίστασης και χωρητικότητας τα οποία είναι χρήσιμα για τον υπολογισμό της πυκνότητας ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και της ηλεκτρικής χαλάρωση/διάχυση και το αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα. Το μη γραμμικό ρεύμα χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της μη γραμμικής απόκρισης και των περιορισμών οδήγησης.

Οι ηλεκτροενεργές ιδιότητες όπως η καταπόνηση, η τάση και η ακαμψία είναι επιζήμια στον χαρακτηρισμό των επιδόσεων του ενεργοποιητή. Η καταπόνηση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τάσης μπλοκαρίσματος καθώς και της μηχανικής ενεργειακής πυκνότητας. Η ηλεκτρικά επαγόμενη δύναμη (stress) παρέχει πληροφορίες για τη δύναμη/ροπή ή το φορτίο που προκαλείται από την καταπόνηση. Τέλος, η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ελεγχόμενη ακαμψία από τάση.

Ένα IPMC έχει κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας τη διαδικασία χημικής εναπόθεσης και η μοντελοποίηση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την κατανεμημένη πίεση κατά την κίνηση κάμψης σύμφωνα με τη μέθοδο Euler - Bernoulli. Το ενεργειακό μοντέλο του ενεργοποιητή IPMC προέρχεται σύμφωνα με την αρχή του Lagrangian θεωρώντας την ενυδατωμένη κατάσταση. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με βάση τα πειραματικά δεδομένα παραμόρφωσης για διαφορετικές εφαρμοζόμενες τάσεις έγιναν για να αποδειχθεί η απόκριση που εξαρτάται από το χρόνο της θέσης κορυφής.

## **2.5.2 IPMC αισθητήρες (sensors)**

Οι αισθητήρες πίεσης παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος και κατανομή της δύναμης κατά μήκος της διεπαφής. Για να χαρακτηρίσουμε τη δύναμη ως μέτρο οι αισθητήρες πίεσης μετατρέπουν τη δύναμη σε ειδικά ηλεκτρικά σήματα. Τα σύνθετα ιοντικά πολυμερή μετάλλων έχουν λάβει μεγάλο ενδιαφέρον για την τεχνολογία αισθητήρων πίεσης από εφαρμογές μαλακών βιομημητικών ενεργοποιητών.

Το πρώτο παράδειγμα χρήσης του IPMC αναφέρθηκε σχεδόν στις αρχές του 1990. Στο σύστημα χρησιμοποιήθηκε IPMC για τη μετατροπή του υδρογόνου και οξυγόνου στο νερό και την ηλεκτρική ενέργεια. Μετά την ανακάλυψη των ηλεκτροενεργών ιδιοτήτων του IPMC σαν actuator, μελετήθηκαν

εφαρμογές αισθητήρων, ιδιαίτερα οι αισθητήρες πίεσης. Υποστηρίχθηκε ότι οι αισθητήρες πίεσης που βασίζονται σε IPMC μπορούν να παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως υψηλή ταχύτητα απόκρισης γύρω στα 100 Hz, καλύτερη ευαισθησία έναντι εφαρμοζόμενης παραμόρφωσης, ευελιξίας, ελαφρού βάρους, λειτουργίας στο νερό και αντοχής κ.λπ. Σε μια τυπική εφαρμογή αισθητήρα IPMC, μια ιοντική μεμβράνη όπως π.χ το Nafion τοποθετήθηκε ανάμεσα στα αγώγιμα ηλεκτρόδια όπως ο χρυσός ή η πλατίνα. Αυτός ο σχεδιασμός παρήγαγε μια τάση όταν εφαρμόστηκε η παραμόρφωση κάμψης σε αυτό. Οι λεπτομέρειες του μηχανισμού πίσω από αυτή την παραγωγή τάσης υπό πίεση, που μπορεί συσχετίζονται με την παραμόρφωση κάμψης βρίσκονται στην αναφορά του ερευνητή Shahinpoor.

Το πρώτο παράδειγμα χρήσης IPMC ως αισθητήρα πίεσης ήταν ξεκίνησε γύρω στο 1992 με τη μελέτη των Yang et al., όπου οι συγγραφείς παρήγαγαν μια τάση από IPMC που βασίζεται στο Nafion υπό διαφορετικές πιέσεις. Ισχυρίστηκαν ότι η παραγόμενη τάση εξαρτιόταν σε μεγάλο βαθμό τόσο από την εφαρμοζόμενη πίεση όσο και από το οξυγόνο. Πρότειναν ότι παράγεται μια τάση μεταξύ των δύο αγώγιμα ηλεκτρόδια λόγω κάμψης του IPMC (είτε στατικά είτε δυναμικά). Παρατηρήθηκε ότι υλικό Nafion 117 με  $2\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 5\text{ mm}$  μπορεί να παράγει 2 mV όταν υπήρχε παραμόρφωση κάμψης 1 mm. Παρατηρήθηκε σε υλικά Flemion να μπορούν να κατασκευαστούν με 1 mV/mm ευαισθησία, τα οποία έχουν εκπληκτικά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής ως αισθητήρα αντί ως ενεργοποιητή.

Ο Konyo et al. εξέτασε τη σχέση μεταξύ της εξόδου του αισθητήρα και των δυναμικών παραμορφώσεων. Λόγω της εξόδου του αισθητήρα που σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα των εφαρμοζόμενων αισθητήρων πίεσης που βασίζονται στον ενεργοποιητή το IPMC μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και ως αισθητήρας ταχύτητας.

Οι Zhu et al. χρησιμοποίησαν το IPMC και κατάφεραν να φτάσουν σε μέγιστες τάσεις 25 mV υπό ασκούμενη πίεση. Πραγματοποίησαν υπολογιστική ανάλυση πίεσης και αυτό έγινε κατανοητό ότι ο λόγος αυτής της παραγωγής υψηλής τάσης οφειλόταν στο stress και στην ασύμμετρη σχεδίαση της συσκευής.

Μια μικρή απλή εξήγηση του αισθητήρα IPMC είναι: υπάρχουν κινητά κατιόντα που κατανέμονται κατά μήκος του ιοντικού πολυμερούς μαζί με μόρια νερού που σχηματίζουν ενυδατωμένα κατιόντα. Το σύστημα βρίσκεται αρχικά σε ηρεμία όπου τα ενυδατωμένα κατιόντα κατανέμονται ομοιόμορφα. Κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης κάμψης, τα κατιόντα μεταναστεύουν κατά την κατεύθυνση του πάχους με χαμηλότερη υδραυλική πίεση και ως αποτέλεσμα η όλη διαδικασία οδηγεί σε μια αρχική αύξηση της τάσης. Ωστόσο, αφού έφτασε στη σταθερή κατάσταση, η τάση άρχισε να μειώνεται με τον καιρό λόγω της οπισθοδρόμησης διάχυσης κατιόντων.

## Κεφάλαιο 3ο: Μοντέλα μικροηλεκτρομηχανικών στοιχείων

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στα μοντέλα των mems και του IPMC.

Η παρακολούθηση και ο έλεγχος είναι πολύ σημαντικοί για τη διατήρηση των ποιοτικών αποτελεσμάτων, τη μείωση των χρόνων διακοπής λειτουργίας και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των διαδικασιών μιας λειτουργίας. Η εξαγωγή των συναρτήσεων μεταφοράς - μοντέλων χρειάζονται για να γνωρίζουμε την συμπεριφορά του υλικού (ή συστήματος) σε διάφορες καταστάσεις (εισόδους).

Στην εργασία αυτή δεν θα αναλυθεί το μοντέλο ενός MEMS cantilever ή κάποια τοπολογία τους, ούτε ενός RF-MEM διακόπτη. Θα εστιάσουμε στην ανάλυση του υλικού IPMC και τη μοντελοποίηση του.

### 3.1 MEMS

Θα αναφερθούμε αρχικά στην αρχή λειτουργίας του MEMS.

Το MicroElectroMechanical System (MEMS) είναι ένας συνδυασμός ηλεκτρικών και μηχανικών συστημάτων και το μέγεθος αυτού του συστήματος είναι σε μικρόμετρα. Η μετατροπή κραδασμών σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τρεις μεθόδους

- 1.Επαγωγική
- 2.Πιεζοηλεκτρική και
- 3.Χωρητική

Η μεταβλητή χωρητική μέθοδος θεωρείται εύκολη και καλή αλλά χρειάζεται πόλωση με τάση για τη διαδικασία μετατροπής.

Η ιδέα του βασικού σχεδιασμού για το μοντέλο πυκνωτή παράλληλης πλάκας MEMS βασίζεται σε σύστημα μάζας-ελατηρίου- ταμπλό.



Εικόνα 3.1: Σύστημα μάζας-ελατηρίου- ταμπλό

Στο σύστημα ελατηρίου-μάζας-ταμπλό, η μάζα αναστέλλεται με το ελατήριο και τη μάζα κινείται με δονήσεις που παρέχονται στη μάζα ως δύναμη διέγερσης. Το ταμπλό λειτουργεί ως δύναμη απόσβεσης στο σύστημα.

Μάζα =  $m$ , σταθερά ελατηρίου =  $k$ , σταθερά απόσβεσης =  $c$  και μετατόπιση μάζας =  $x$

Σε αυτό το σύστημα, η μάζα συνδέεται με τον νόμο του ελατηρίου του Χουκ,

Ετσι,

Δύναμη ελατηρίου =  $-kx$

Δύναμη απόσβεσης:  $-c \frac{dx}{dt}$

Τώρα, από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, η επιτάχυνση  $a$  ενός σώματος είναι παράλληλη και ευθέως ανάλογη της καθαρής δύναμης  $F$  και αντιστρόφως ανάλογη της μάζας  $m$  και προκύπτει:

$$m\ddot{x} = -c\dot{x} - kx$$

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0.$$

Αυτό δίνει την εξίσωση που ισχύει για το σύστημα ταμπλό μάζας ελατηρίου.

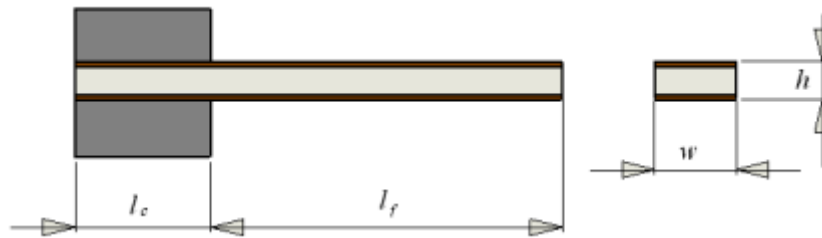
### 3.2 IPMC Ηλεκτρομηχανικό μοντέλο

Οι ενεργοποιητές IPMC μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμοι δοκοί - cantilevers. Το σχήμα 1 δείχνει τη μηχανική διαμόρφωση του ενεργοποιητή IPMC και τις σχετικές παραμέτρους. Μετά δείχνουμε τη διαμόρφωση και τις σχετικές γεωμετρικές παραμέτρους ως εξής: Το  $L_c$  υποδηλώνει το μήκος του τμήματος του IPMC. Το  $L_f$  είναι το συνολικό ελεύθερο μήκος του IPMC. Τα  $w$  και  $h$  δηλώνουν το πλάτος και το ύψος της διατομής IPMC. Το καρφωτό άκρο χρησιμοποιείται για την εφαρμογή των ηλεκτρικών τάσεων στα άκρα τους κατεύθυνση πάχους. Σύμφωνα με μηχανική ανάλυση, η κάμψη - παραμόρφωση του ενεργοποιητή IPMC προκύπτει από το εσωτερική ανακατανομή μορίων του νερού. Υπό την επίδραση των εφαρμοζόμενων τάσεων, τα μόρια νερού στον ενεργοποιητή IPMC ανακατανέμονται ακολουθώντας δύο στάδια:

(1) Όταν το ηλεκτρικό σήμα-τάση εφαρμόζεται σε IPMC's, κάθε ενυδατωμένο ιόν νατρίου κινείται μαζί με τέσσερα ενυδατωμένα μόρια νερού προς την πλευρά της καθόδου όπως απεικονίζεται στην

Εικόνα 3.2. Τότε δημιουργείται παραμόρφωση κάμψης από τη διόγκωση του Nafion117 κοντά στην πλευρά της καθόδου και συστολή κοντά στην πλευρά της ανόδου.

(2) Σε σύντομο χρονικό διάστημα, λόγω της αυτοδιάχυσης του νερού-μόρια, τα ελεύθερα μόρια νερού ρέουν προς την πλευρά της ανόδου σταδιακά, γεγονός που μειώνει τη συγκέντρωση των μορίων του νερού στην κάθοδο.



Εικόνα 3.2: IPMC δοκός (cantilever)

Τα ισοδύναμα μοντέλα ενεργοποιητών που βασίζονται σε IPMC χωρίζονται σε δύο στάδια. Το ηλεκτρικό και το μηχανικό μοντέλο. Το πρώτο αφορά την εύρεση της μετατόπισης του άκρου του υλικού σε συνάρτηση με το σήμα εισόδου αλλά με όρους ηλεκτρικών μεγεθών. Όσον αφορά το δεύτερο η ακαμψία του υλικού είναι η κύρια ρυθμιζόμενη παράμετρος για τη συμπεριφορά κάμψης. Πρώτον, το μέτρο ελαστικότητας εκφυλισμού και μέτρο ελαστικότητας κάμψης σύνθετης δοκού συνάγονται αναλυτικά. Απαιτείται finite element analysis - FEA η οποία είναι μια χρήσιμη μέθοδος πρόβλεψης για τη σχέση δύναμης-μετατόπισης ενός ενεργοποιητή IPMC, η οποία είναι βασική για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό πολλών μηχανικών συσκευών. Για έναν ενεργοποιητή IPMC δοκού, η μετατόπιση άκρου είναι προσομοίωση με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) σύμφωνα με το δεδομένα της μετρούμενης δύναμης (που εφαρμόζεται) κάτω από μια τάση εισόδου. Με τη γραμμική στατική ανάλυση, χρησιμοποιώντας το συμπαγές μοντέλο και δύναμη ζευγαριών (φόρτωση), εξάγεται η μετατόπιση του άκρου της δοκού IPMC.

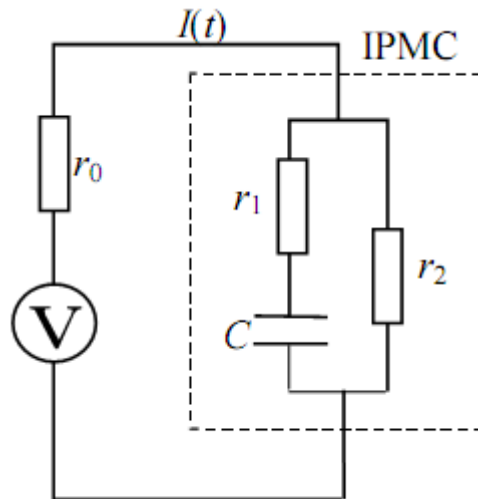
### 3.3 Ηλεκτρικό Ισοδύναμο IPMC

Ο ενεργοποιητής IPMC οδηγείται από την ηλεκτρική τάση, οπότε έχει κάποια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια θα εξάγουμε ένα ισοδύναμο κύκλωμα RC για τη μοντελοποίηση του ενεργοποιητή IPMC, το οποίο είναι ικανό να μετατρέψει το σήμα της εφαρμοζόμενης τάσης σε εσωτερικό ρεύμα. Αυτό το μοντέλο RC χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του ηλεκτρικού φορτίου

που παράγεται από μια τάση εισόδου. Αυτό το εσωτερικό ρεύμα είναι στην πραγματικότητα μια ανακατανομή των εσωτερικών ιόντων που παράγει ένα ηλεκτρικό πεδίο κατά την κατεύθυνση του πάχους του ενεργοποιητή IPMC.

Τα ηλεκτρικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα RC μπορούν να αξιολογηθούν με βάση τις φυσικές ιδιότητες οι οποίες επιτρέπουν την κλιμάκωσή τους με βάση τη γεωμετρία του IPMC.

Το IPMC έχει δύο παράλληλα ηλεκτρόδια και ηλεκτρολύτη μεταξύ των ηλεκτροδίων. Οι πυκνωτές διπλής στρώσης σχηματίζονται στις διεπαφές δύο ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης μεταξύ των ηλεκτροδίων μπορεί να εισάγει μια εσωτερική αντίσταση. Αυτό το κύκλωμα σειράς C-R-C μπορεί να απλοποιηθεί σε κύκλωμα R-C. Σύν την πιθανή διαρροή, κατασκευάστηκε ένα κύκλωμα  $(R-C)||R$  όπως παρουσιάζεται στο Εικόνα 3.3, όπου  $r$  είναι η εσωτερική αντίσταση της πηγής τάσης. Κάτω από την τάση  $V$ , η απόκριση του ρεύματος εισόδου προκύπτει ως



Εικόνα 3.3: IPMC ηλεκτρικό ισοδύναμο

$$I(t) = \frac{V}{r_0 + r_2} \left[ 1 + \left( \frac{r_1 + r_2}{R} - 1 \right) e^{-\alpha t} \right] \quad (\text{Εξ 3.1})$$

$$R = r_1 + \frac{r_0 r_2}{r_0 + r_2} \quad \alpha = \frac{1}{RC} \quad (\text{Εξ 3.2})$$

Κατά την εφαρμογή βηματικής τάσης, μετά από μια πολύ γρήγορη κάμψη προς την άνοδο, η λωρίδα παρουσιάζει μια αργή χαλάρωση προς την κάθοδο, υποδηλώνοντας την ύπαρξη δύο σταθερών χρόνου. Κατασκευάσαμε το μοντέλο χρησιμοποιώντας την κατανόηση του πιθανού μηχανισμού των

φαινομένων. Υποθέτουμε ότι τα θετικά ιόντα φέρνουν περισσότερο νερό στην κάθοδο από το νερό που θα έπρεπε να συνδέονται σε ισορροπία. Υπάρχει διάχυση του νερού πίσω στην άνοδο μετά την αρχική μετακίνηση στην κάθοδο.

$$\frac{dk}{dt} = K_1 \frac{dq}{dt} - \frac{1}{\tau_2} (k - K_2 q) \quad (\text{Εξ 3.3})$$

όπου  $k$  είναι η καμπυλότητα της λωρίδας,  $q$  το ηλεκτρικό φορτίο,  $K_1$  είναι ο συντελεστής για την επίδραση κάμψης του φορτίου που μετακινήθηκε πρόσφατα στο ηλεκτρόδιο,  $K_2$  είναι ο συντελεστής για το φαινόμενο κάμψης του φορτίου σε κατάσταση ισορροπίας και  $\tau_2$  είναι ο χρόνος χαλάρωσης συνεχής. Όταν το μοντέλο κυκλώματος συσσωρευμένου RC μπορεί να αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική απόκριση εισόδου του δείγματος, χρησιμοποιούμε το μοντέλο για να υπολογίσουμε το ηλεκτρικό φορτίο στο ηλεκτρόδιο,

$$R \frac{dq}{dt} = V - \frac{q}{C}$$

$$q = VC(1 - e^{-t/RC}) = VC(1 - e^{-t/\tau_1})$$

$$k = V \left( K_{V2} - \frac{K_{V1}\tau_2 - K_{V2}\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-t/\tau_1} + \frac{\tau_2(K_{V1} - K_{V2})}{\tau_2 - \tau_1} e^{-t/\tau_2} \right)$$

$$K_{V1} = CK_1 \quad \text{and} \quad K_{V2} = CK_2$$

### 3.4 Grey Box Μοντέλο IPMC

Η εύρεση του μοντέλου IPMC με χρήση της μεθόδου Γκρι Κουτιού - Grey Box είναι μια εναλλακτική προσέγγιση που συνδυάζει το πολύπλοκο φυσικό μοντέλο και το απλό μαύρο κουτί μοντέλο. Η εύρεση του μοντέλου στηρίζεται κυρίως σε τρία επίπεδα:

- το ηλεκτρικό επίπεδο,
- το επίπεδο παραγωγής πίεσης-δύναμης και
- στο μηχανικό επίπεδο.

Κάθε επίπεδο συνδέεται στη σειρά με το άλλο. Στο ηλεκτρικό επίπεδο το IPMC χωρίζεται σε μικρά τμήματα των 0,5-1mm συνδεδεμένα σε σειρά. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω κάθε κομμάτι είναι μια

αντίσταση σε σειρά με ένα πυκνωτή και αντίσταση σε παραλληλία. Η είσοδος του επιπέδου είναι η τάση εισόδου και η έξοδος του είναι το ρεύμα εξόδου που συνδέεται ως είσοδος σε επόμενο επίπεδο. Το επίπεδο πίεσης/δύναμης αποτελείται από μια εξίσωση δεύτερης τάξης ενώ η έξοδος του είναι η είσοδος του μηχανικού επιπέδου το οποίο αποτελεί ένα δυναμικό στοιχείο με αναλογική απόσβεση. Σε αυτό το σημείο το σύστημα (μοντέλο) δεν παίρνει υπόψη την αμφίδρομη μεταγωγή.

Η αμφίδρομη μεταγωγή με ένα αμφίδρομο γραμμικό κλιμακωτό μοντέλο που στηρίζεται σε εξισώσεις των πιεζοηλεκτρικών υλικών και φαίνεται η εξάρτηση της συχνότητας από την αγωγιμότητα, τον πιεζοηλεκτρικό συντελεστή και τον παράγοντα του Young.

Ένα γκρι κουτί - μοντέλο μπορεί να είναι ένα μοντέλο που προκύπτει από ένα μη γραμμικό ισοδύναμο κύκλωμα παίρνοντας υπόψη την εξάρτηση της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το IPMC όταν εφαρμόζουμε τάση στα άκρα του [Bonomo].

### 3.5 Black Box Μοντέλο IPMC

Στην επιστήμη, τους υπολογιστές και τη μηχανική, ένα μαύρο κουτί είναι μια συσκευή, σύστημα ή αντικείμενο που παράγει χρήσιμες πληροφορίες χωρίς να αποκαλύπτει καμία πληροφορία για την εσωτερική λειτουργία του. Οι εξηγήσεις για τα συμπεράσματά του παραμένουν αδιαφανείς ή «μαύρες».

Το μοντέλο μαύρου κουτιού χρησιμοποιείται στη μηχανική για τη δημιουργία προγνωστικών μοντέλων που υπάρχουν σε κώδικα υπολογιστή και όχι σε φυσική μορφή. Οι μεταβλητές μπορούν στη συνέχεια να αναλυθούν, να δοκιμαστούν και να αναθεωρηθούν χωρίς την δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία της πραγματικής κατασκευής τους στον πραγματικό κόσμο.



Εικόνα 3.4: Μέθοδος μοντελοποίησης με τη μέθοδο ‘Μαύρο Κουτί’

[<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7c/Blackbox3D-withGraphs.png/500px-Blackbox3D-withGraphs.png>]

Από την πλευρά της μηχανικής πολλές φορές είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούμε πιο απλά μοντέλα. Στην εργασία μας το black box μοντέλο εξάγει την συνάρτηση μεταφοράς του ενεργοποιητή χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα.

Ο Kanno χρησιμοποίησε πειραματικά δεδομένα από την απόκριση της βηματικής εισόδου. Η βηματική απόκριση δεν μπορεί σε αρκετές περιπτώσεις να περιγράψει μοντέλα με τάξη ανώτερη της πρώτης με μεγάλο ποσοστό επιτυχίας.

## Κεφάλαιο 4ο: Μοντελοποίηση από δεδομένα

### 4.1 Μοντέλο IPMC από ταυτοποίηση

Στην παράγραφο θα περιγραφεί η μέθοδος εύρεσης του μοντέλου του IPMC ενεργοποιητή χρησιμοποιώντας την μέθοδο του μαύρου κουτιού. Η μέθοδος που ακολουθείται έχει ως στόχο την εύρεση των τιμών των παραμέτρων μιας συνάρτησης μεταφοράς συγκεκριμένης μορφής (πρότυπης) που προσεγγιστικά περιγράφει την συμπεριφορά του ενεργοποιητή. Οι παράμετροι προσεγγίζονται πειραματικά συγκρίνοντας τα πειραματικά δεδομένα με τα δεδομένα που προέρχονται από την πρότυπη συνάρτηση μεταφοράς. Τα υλικά IPMC που χρησιμοποιήθηκαν έχουν διαστάσεις 1cm x 0.5cm, 2cm x 0.5cm και 3cm x 0.5cm (Nafion 117 μεμβράνη με Na<sup>+</sup> ιόντα) και τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με το υλικό τοποθετημένο μέσα σε δοχείο με απιονισμένο νερό.

Έχουμε ένα αρχείο με δεδομένα εισόδου Vin ενός τετραγωνικού παλμού πολύ χαμηλής συχνότητας 0.01Hz, με ημιπερίοδο 50s για να προσομοιώνει την βηματική είσοδο step και ένα αρχείο με τη μετατόπιση displacement (του άκρου του υλικού).

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τον Κ. Τσιακμάκη με laser και κάμερα και τα δεδομένα δόθηκαν για την μελέτη και την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων.

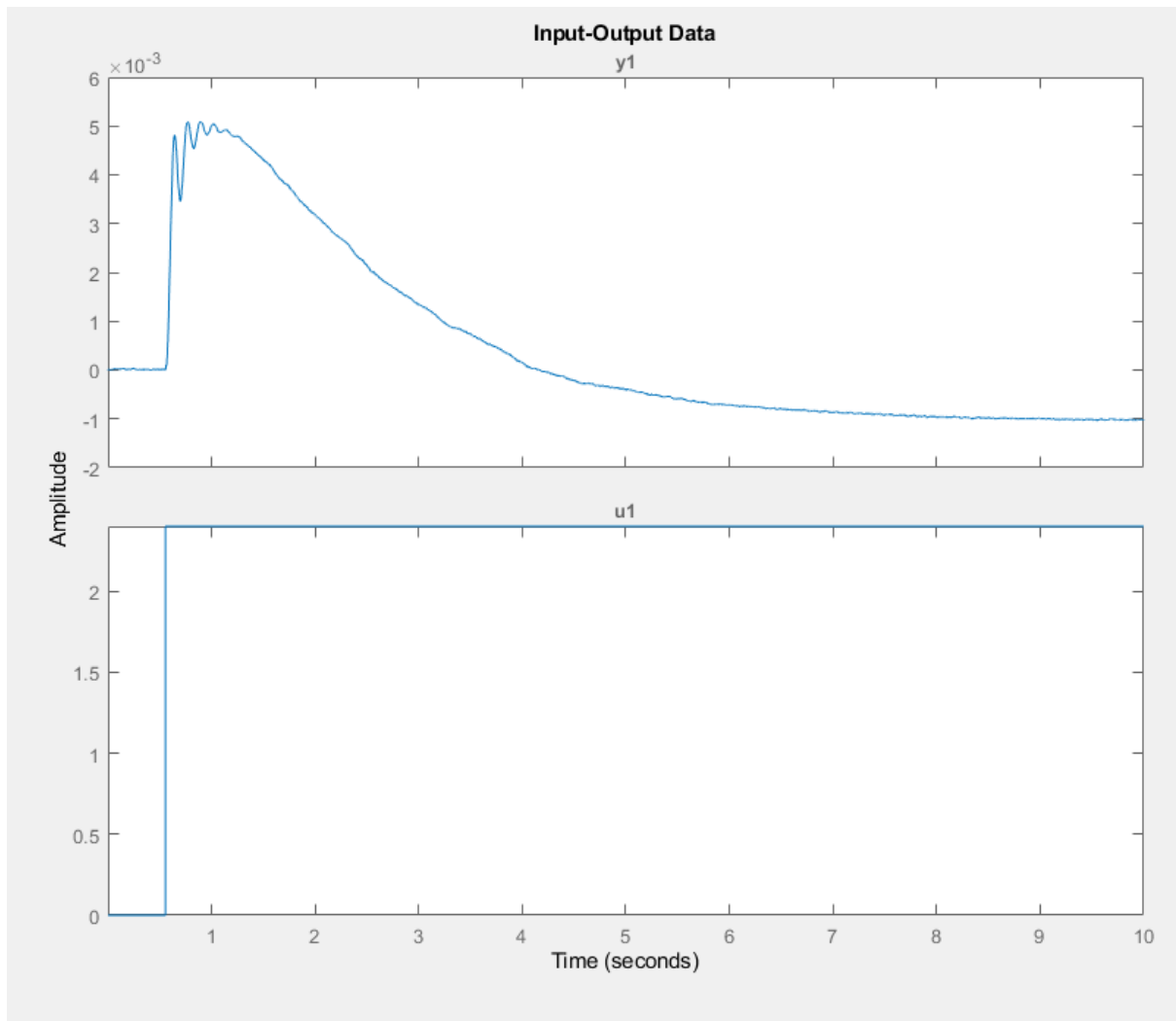
Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 0.001s σε όλα τα πειράματα.

Σύμφωνα με τον παρακάτω κώδικα διαβάζουμε τα δεδομένα (τα πρώτα 10000 δείγματα) από τα αρχεία:

```
load 'step_response_din.lvm'  
din=step_response_din(1:10000)*1e-3;  
load 'step_response_vin.lvm'  
vin=step_response_vin(1:10000);  
  
stepdata=iddata(din,vin,1/1000)
```

και μπορούμε να προβάλλουμε την μετατόπιση και την είσοδο σε κοινό διάγραμμα για τα πρώτα 10s με την εντολή:

```
plot(stepdata)
```



Εικόνα 4.1: Βηματική Απόκριση του IPMC 2cm x 0.5cm

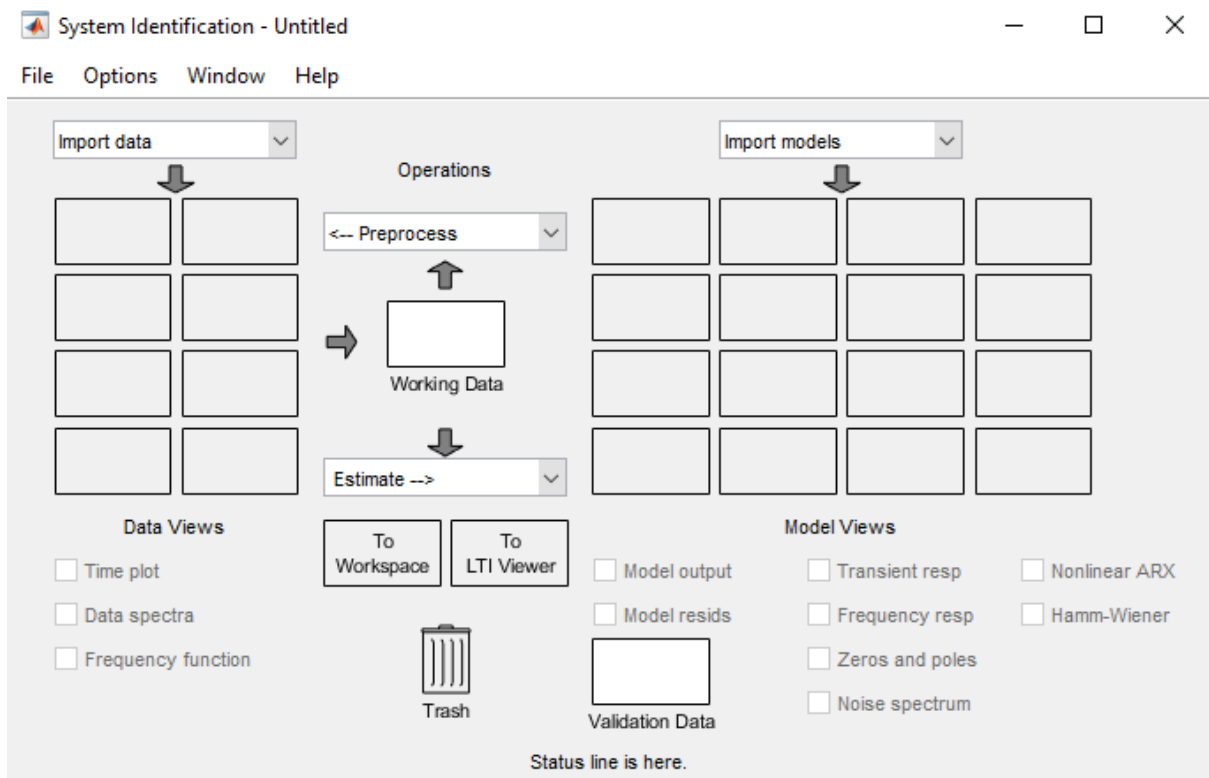
Στη συνέχεια θα εξάγουμε το μοντέλο-συνάρτηση μεταφοράς του υλικού σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουμε στη διάθεση μας από τις μετρήσεις.

Στην Matlab πατάμε στο Command Window

```
systemIdentification
```

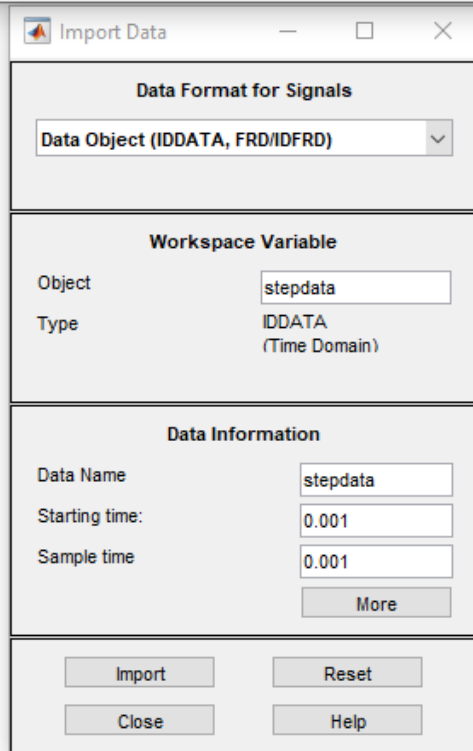
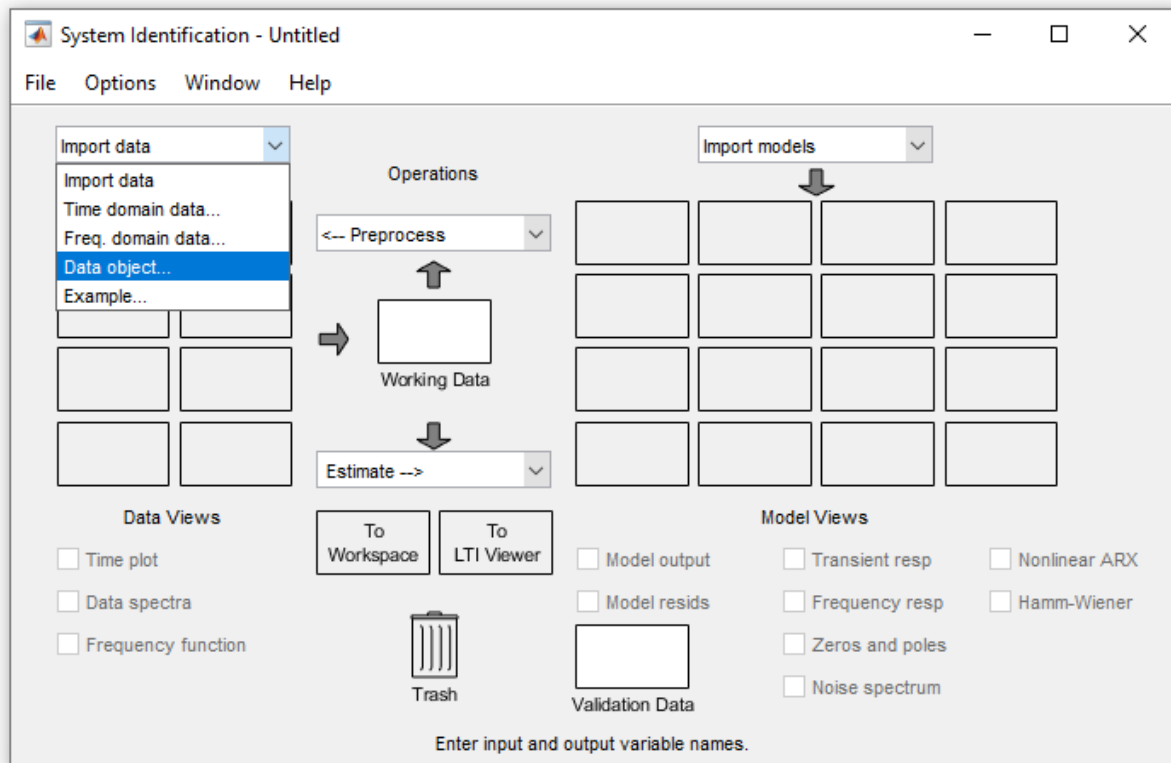
και ανοίγει το παράθυρο για

```
System Identification
```



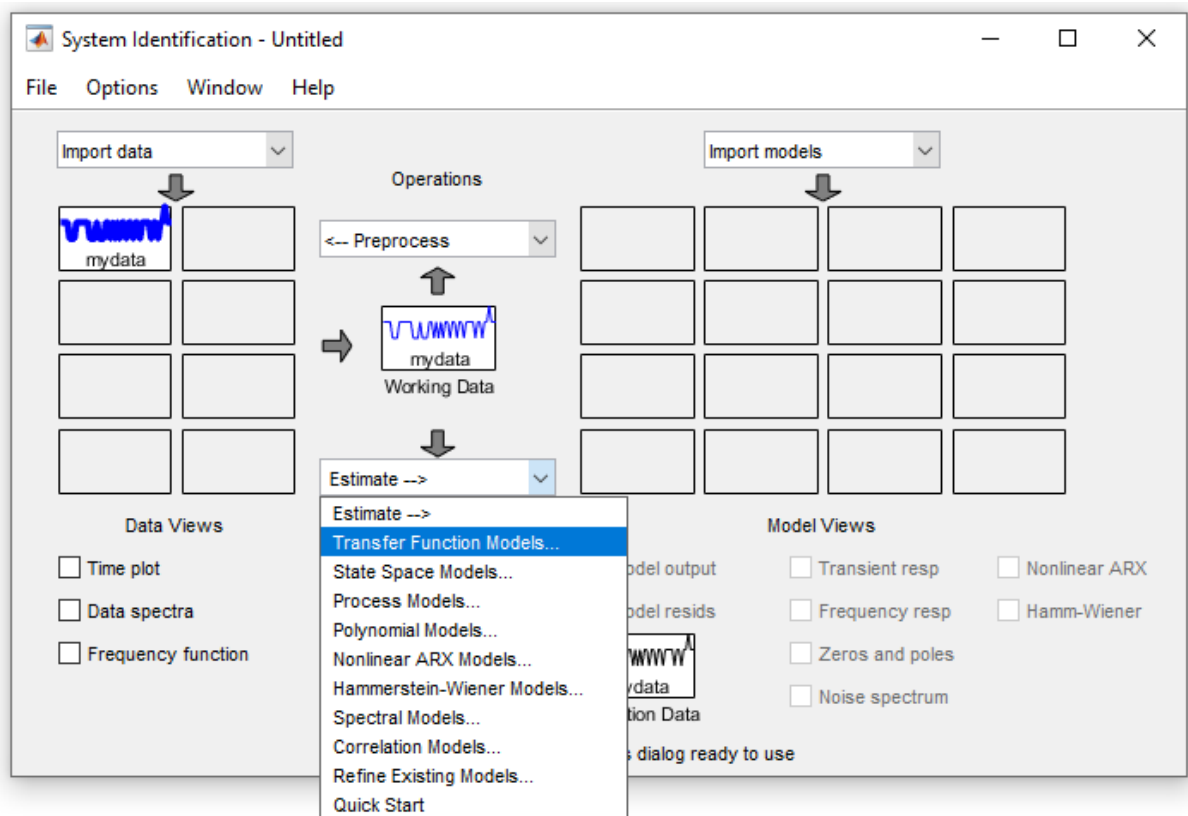
Εικόνα 4.2: System Identification παράθυρο

Το System Identification Toolbox παρέχει λειτουργίες MATLAB, μπλοκ Simulink και μια εφαρμογή για την κατασκευή μαθηματικών μοντέλων δυναμικών συστημάτων από μετρούμενα δεδομένα εισόδου-εξόδου. Επιτρέπει να δημιουργούμε και να χρησιμοποιούμε μοντέλα δυναμικών συστημάτων που δεν μοντελοποιούνται εύκολα. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δεδομένα εισόδου-εξόδου χρόνου και συχνότητας για να προσδιορίσουμε συναρτήσεις μεταφοράς συνεχούς και διακριτού χρόνου, μοντέλα διεργασιών και μοντέλα χώρου καταστάσεων. Η εργαλειοθήκη παρέχει επίσης αλγόριθμους για ενσωματωμένη ηλεκτρονική εκτίμηση παραμέτρων. Η εργαλειοθήκη παρέχει τεχνικές αναγνώρισης, όπως μέγιστη πιθανότητα, ελαχιστοποίηση πρόβλεψης-λάθους (PEM) και αναγνώριση συστήματος υποχώρου. Για να αναπαραστήσουμε τη μη γραμμική δυναμική του συστήματος, μπορούμε να υπολογίσουμε τα μοντέλα Hammerstein-Wiener και τα μη γραμμικά μοντέλα ARX με μη γραμμικότητες δικτύου κυματιδίων, διαμερισμάτων δέντρων και σιγμοειδών δικτύου. Η εργαλειοθήκη εκτελεί αναγνώριση συστήματος γκριζού κουτιού για την εκτίμηση των παραμέτρων ενός μοντέλου που ορίζεται από το χρήστη. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το αναγνωρισμένο μοντέλο για πρόβλεψη απόκρισης συστήματος και μοντελοποίηση στο Simulink. Η εργαλειοθήκη υποστηρίζει επίσης μοντελοποίηση δεδομένων χρονοσειρών και πρόβλεψη χρονοσειρών.



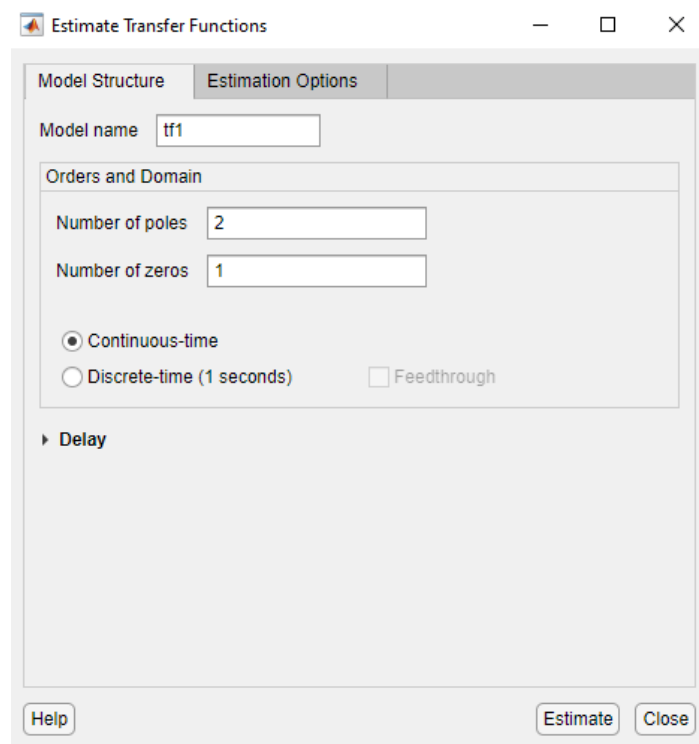
Εικόνα 4.3: Εισαγωγή Δεδομένων

Στην Εικόνα 4.3 εισάγουμε τα δεδομένα εισόδου-εξόδου.

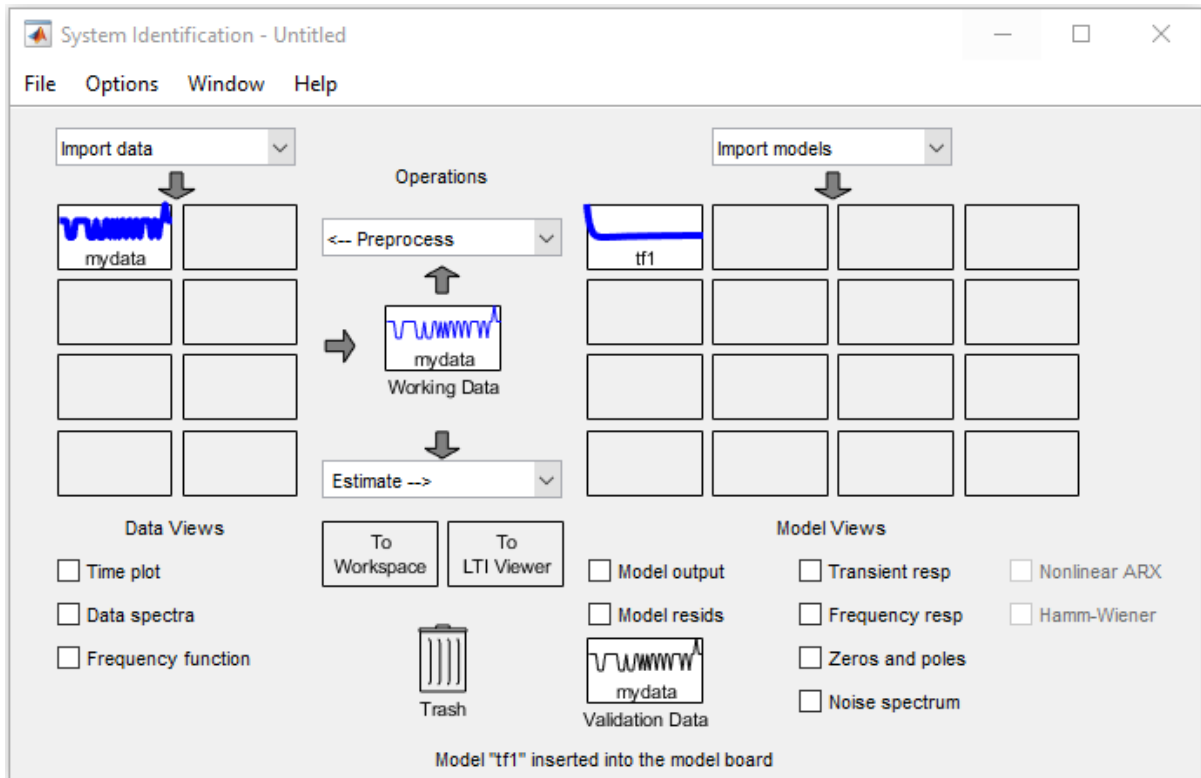


Εικόνα 4.4: Εξαγωγή μοντέλου

Επιλέγουμε 2<sup>η</sup> τάξης με 2 πόλους και ένα μηδενικό.



Εικόνα 4.5: Επιλογή τάξης για το εξαγόμενο μοντέλο



Εικόνα 4.6: Μοντέλα που εξήχθησαν – tf1

```

From input "u1" to output "y1":
0.01805 s - 0.001627
-----
s^2 + 6.907 s + 3.323
Name: tf1
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
  Number of poles: 2   Number of zeros: 1
  Number of free coefficients: 4
  Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using TFEST on time domain data "mydata".
Fit to estimation data: 90.26% (stability enforced)

```

Εικόνα 4.7: Πληροφορίες για το εξαγόμενο μοντέλο tf1

Η συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει είναι η παρακάτω:

tf1 =

$$0.01805 s - 0.001627$$

-----

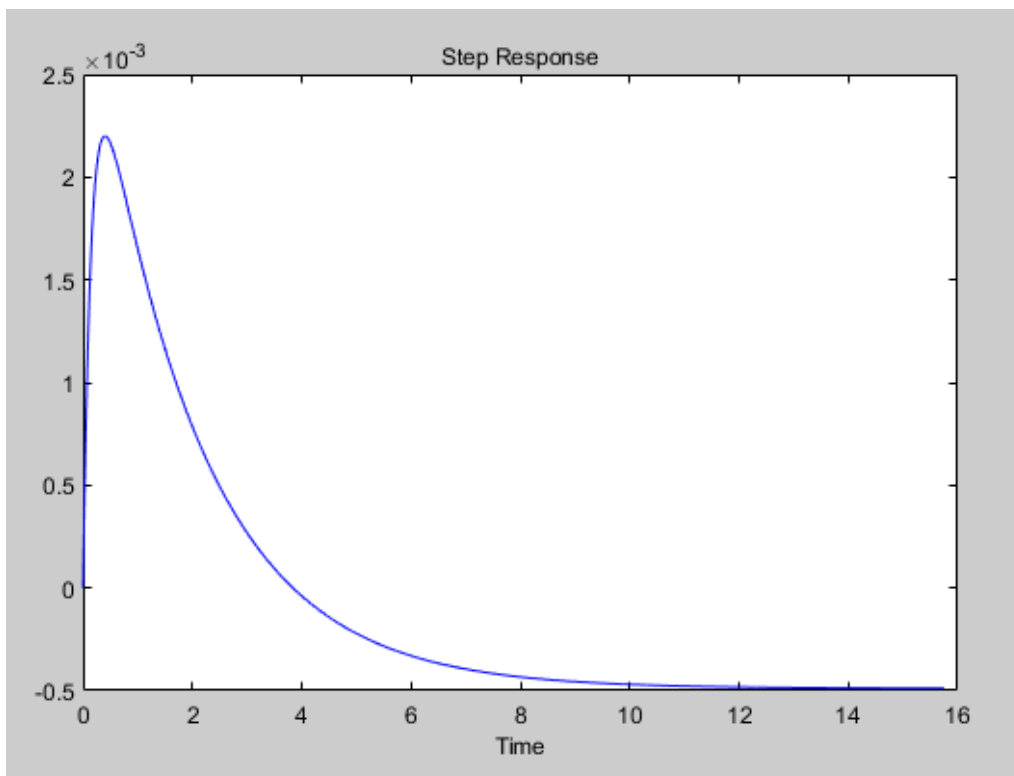
$$s^2 + 6.907 s + 3.323$$

Numerator =

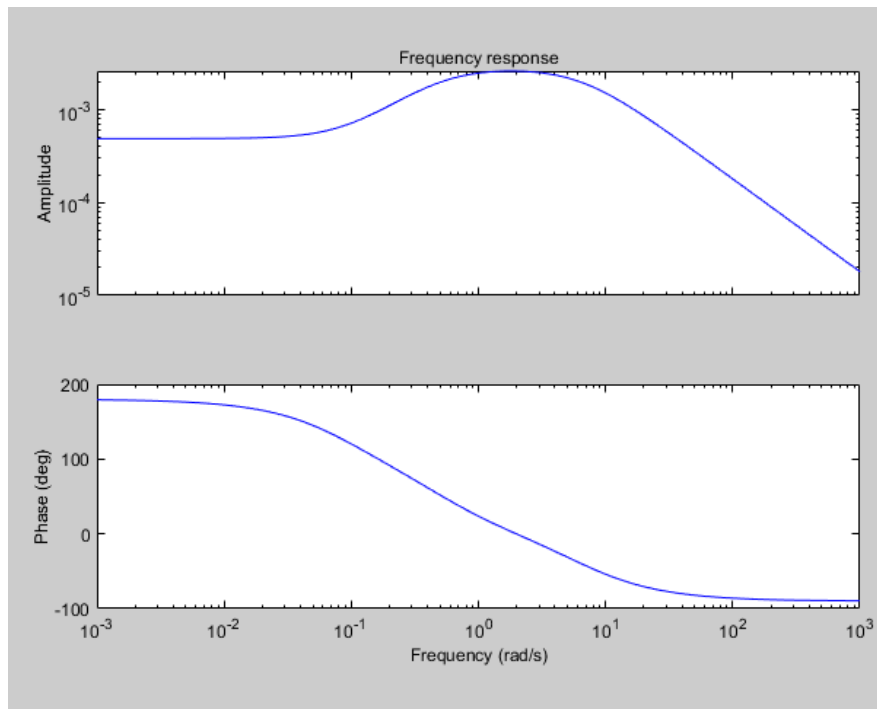
$$[0.018052193474682 \quad -0.001626598359985]$$

Denominator =

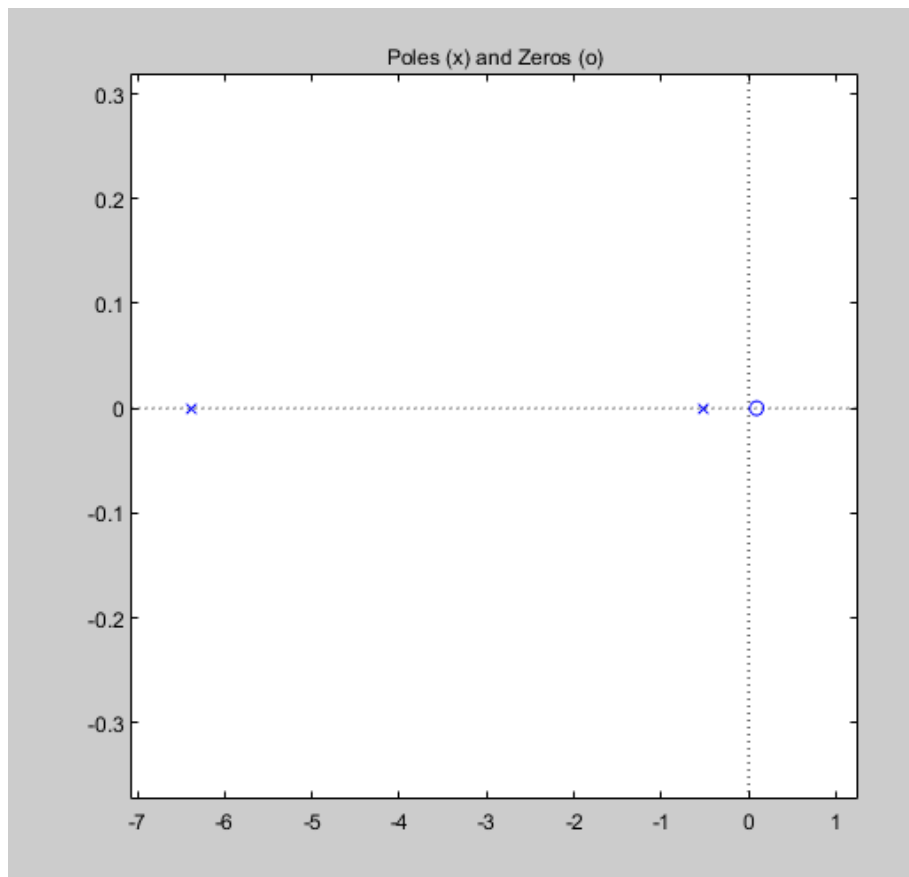
$$[1.000000000000000 \quad 6.907124340207496 \quad 3.322760417671959]$$



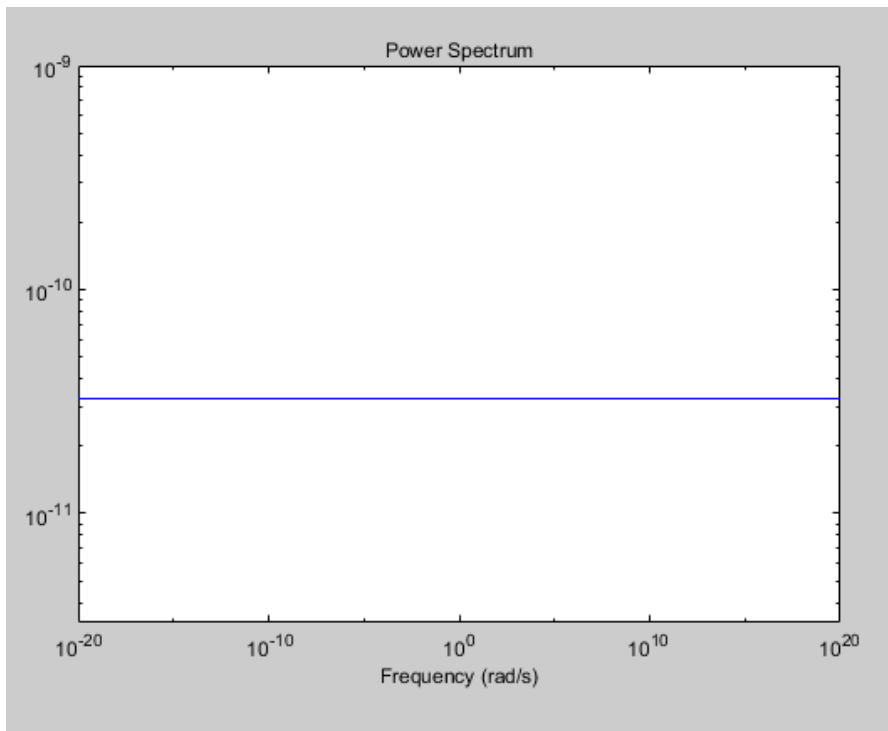
Εικόνα 4.8: Βηματική απόκριση tf1



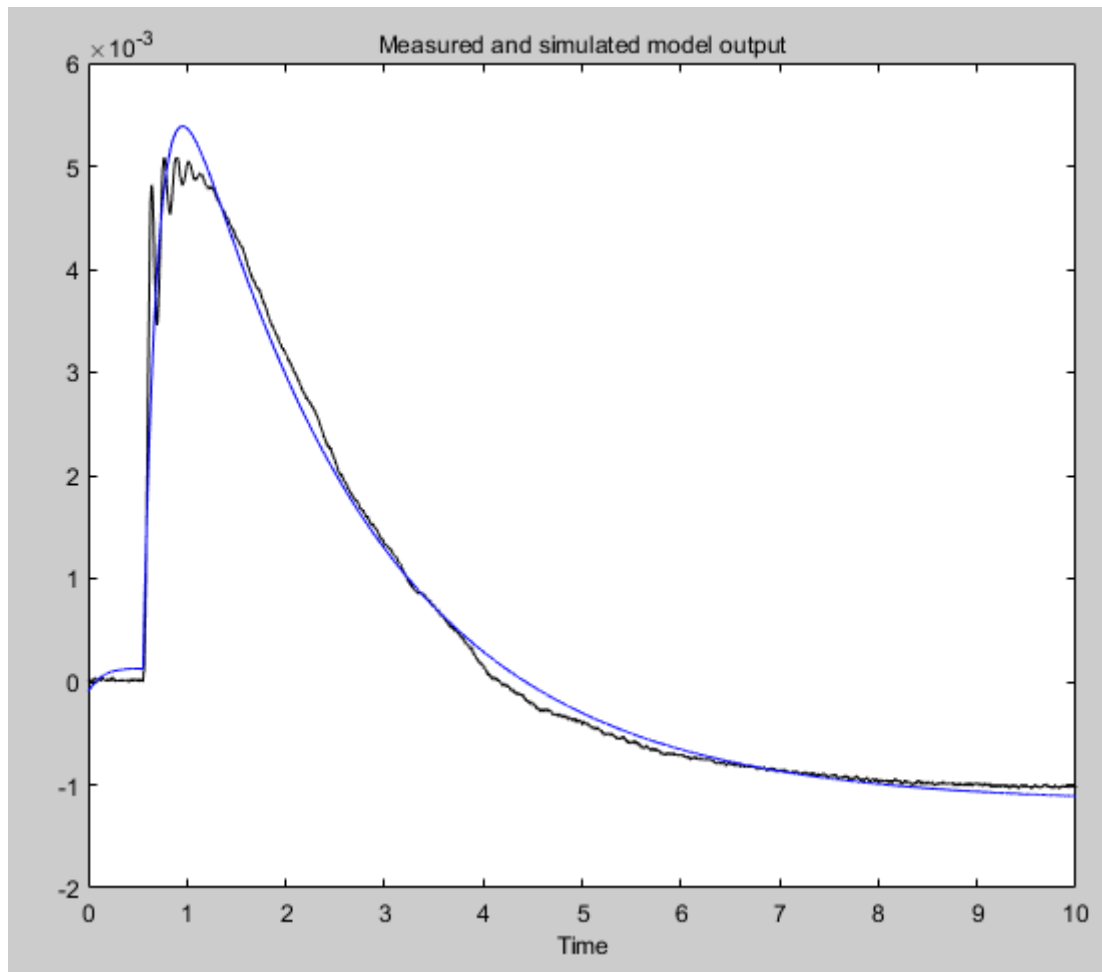
Εικόνα 4.9: Συχνοτική Απόκριση tf1



Εικόνα 4.10: Διάγραμμα θέσεων πόλων-μηδενικών για tf1



Εικόνα 4.11: Φάσμα ενέργειας για tf1

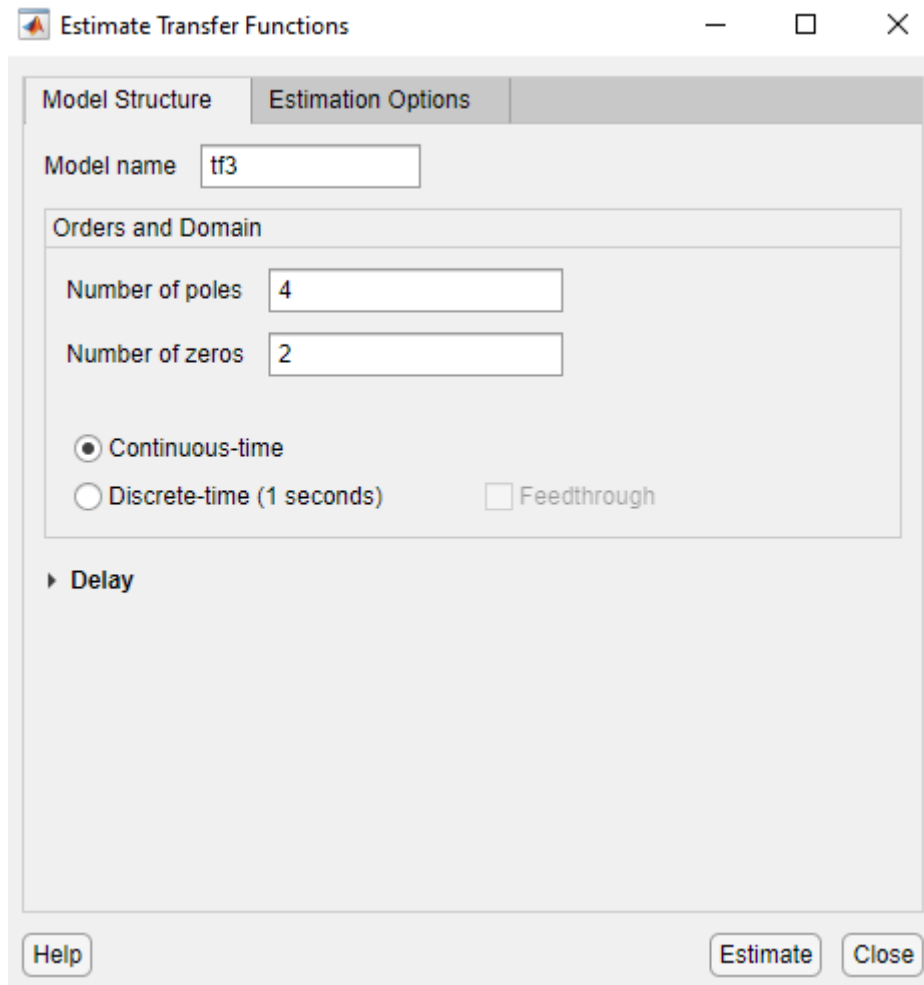


Εικόνα 4.12: Διάγραμμα απόκρισης προσομοίωσης και μετρούμενης για την tf1

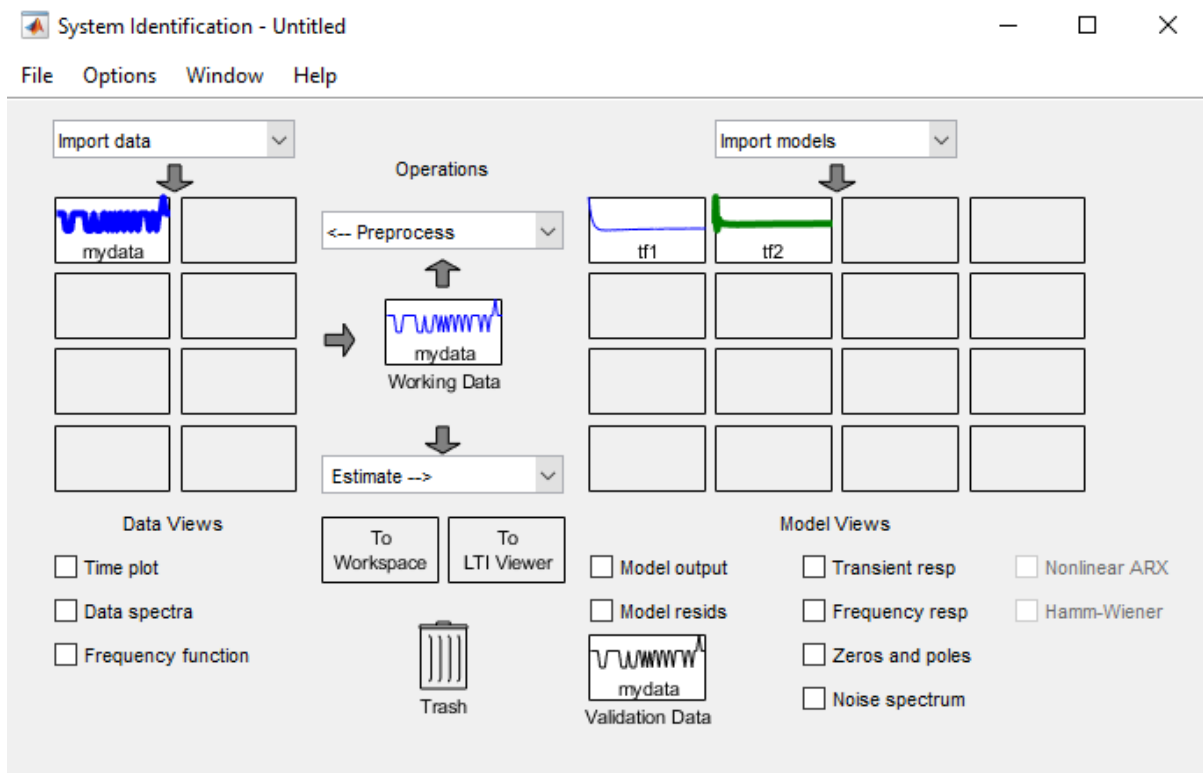
Στην Εικόνα 4.12 παρουσιάζεται το Διάγραμμα απόκρισης προσομοίωσης και μετρούμενης για την tf1 με ποσοστό επιτυχίας **90.26%**.

Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να εξάγουμε και άλλα μοντέλα – συναρτήσεις μεταφοράς και να τα συγκρίνουμε μεταξύ τους.

Επιλέγουμε 4<sup>η</sup> τάξης με 4 πόλους και 2 μηδενικά.



Εικόνα 4.13: Εκτίμηση συνάρτησης μεταφοράς με 4 πόλους και 2 μηδενικά – 4<sup>η</sup> τάξης



Εικόνα 4.14: Μοντέλα που εξήχθησαν – tf1 και tf2

```

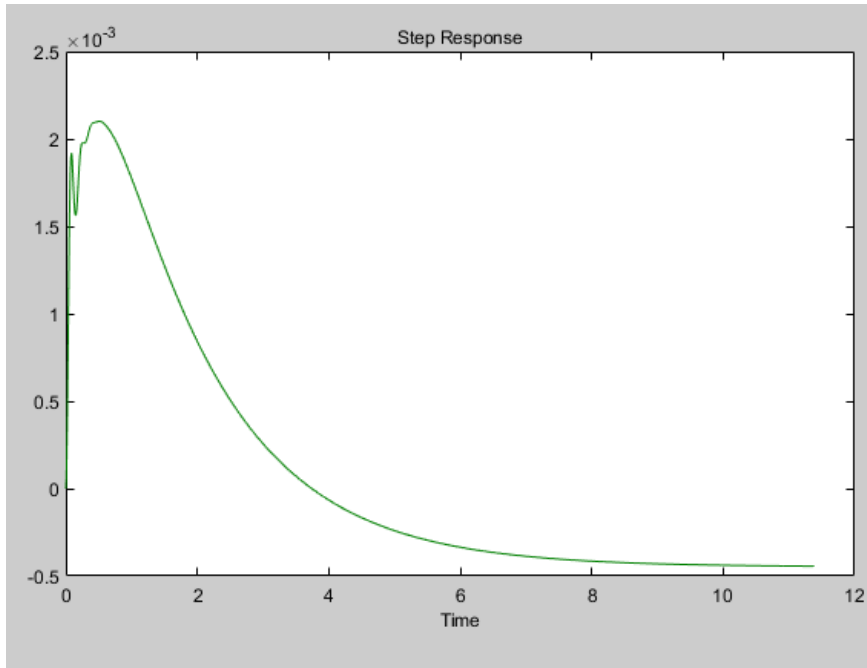
From input "u1" to output "y1":
      2.147 s^2 + 16.27 s - 1.379
-----
      s^4 + 28.69 s^3 + 1893 s^2 + 6177 s + 3077
Name: tf2
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
  Number of poles: 4   Number of zeros: 2
  Number of free coefficients: 7
  Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

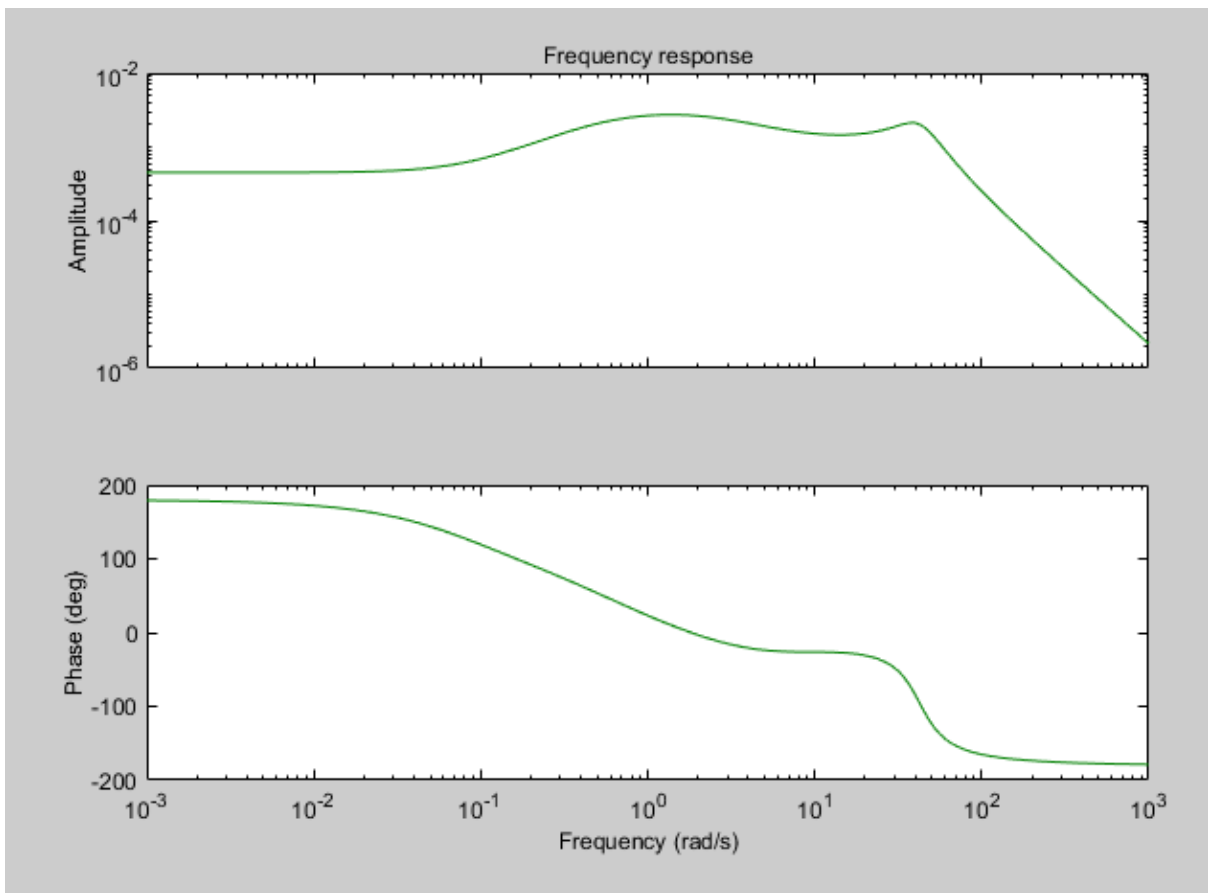
Status:
Estimated using TFEST on time domain data "mydata".
Fit to estimation data: 96.06% (stability enforced)

```

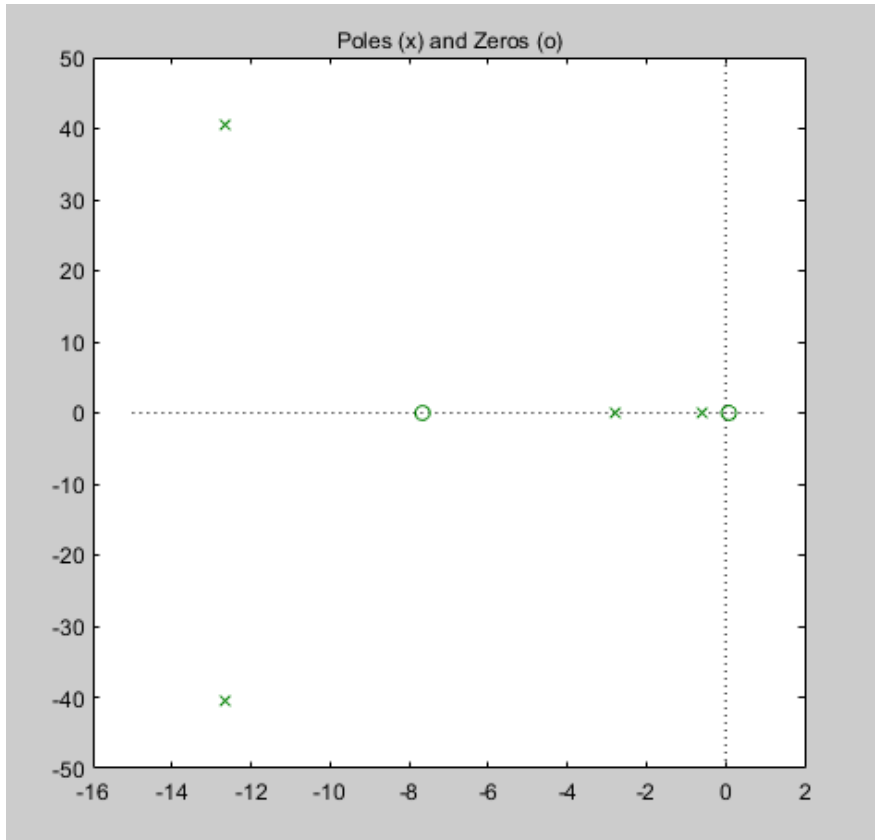
Εικόνα 4.15: Πληροφορίες για το εξαγόμενο μοντέλο tf2



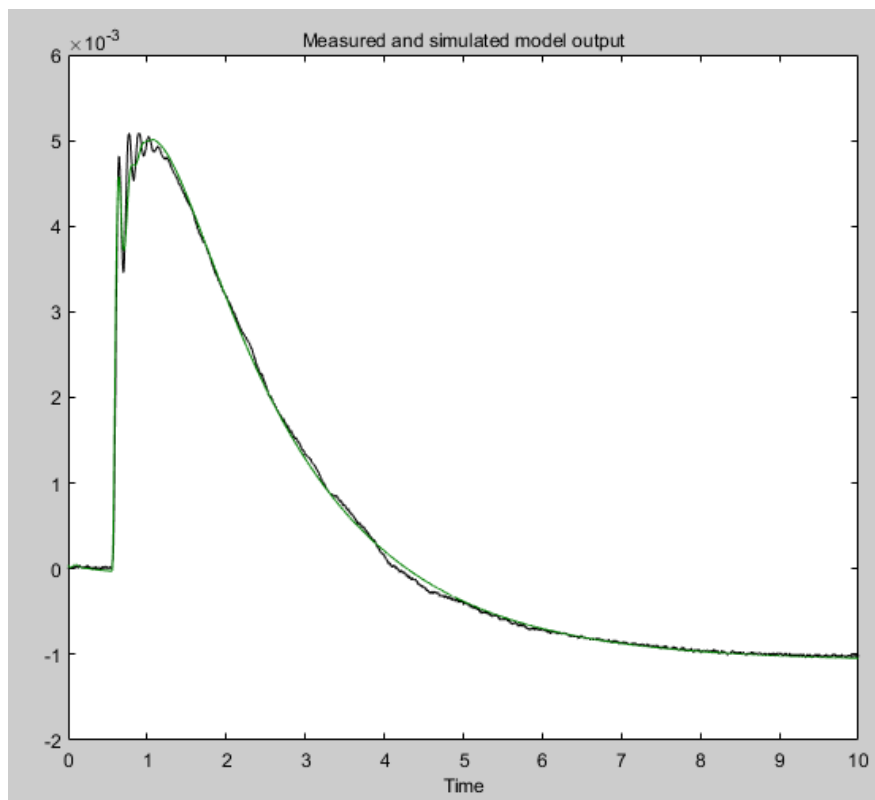
Εικόνα 4.16: Βηματική απόκριση tf2



Εικόνα 4.17: Συχνοτική Απόκριση tf2



Εικόνα 4.18: Διάγραμμα θέσεων πόλων-μηδενικών για tf2



Εικόνα 4.19: Διάγραμμα απόκρισης προσομοίωσης και μετρούμενης για την tf2

Προκύπτει η παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς με ποσοστό επιτυχίας **96.06%**.

tf2 =

$$\frac{2.147 s^2 + 16.27 s - 1.379}{s^4 + 28.69 s^3 + 1893 s^2 + 6177 s + 3077}$$

Numerator =

[2.146807709521427 16.270370513914013 -1.379004933524163]

Denominator =

1.0e+03 \*  
[0.0010000000000000 0.028690525196306 1.892630322523405 6.176523059569068  
3.076780536196971]

Ενδιαφέρον αποτελεί η εξαγωγή της συνάρτησης μεταφοράς 1<sup>ης</sup> τάξης ώστε να δυο με τα χαρακτηριστικά της και στη συνέχεια τα συγκριτικά αποτελέσματα με τις συναρτήσεις 2 και 4<sup>ης</sup> τάξης.

```
From input "u1" to output "y1":  
-0.0001954  
-----  
s + 0.1168  
Name: tf3  
Continuous-time identified transfer function.  
  
Parameterization:  
Number of poles: 1   Number of zeros: 0  
Number of free coefficients: 2  
Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.  
  
Status:  
Estimated using TFEST on time domain data "mydata".  
Fit to estimation data: 39.58% (stability enforced)
```

Εικόνα 4.20: Πληροφορίες για το εξαγόμενο μοντέλο tf3

tfFirstOrder =

-0.0001954

-----

s + 0.1168

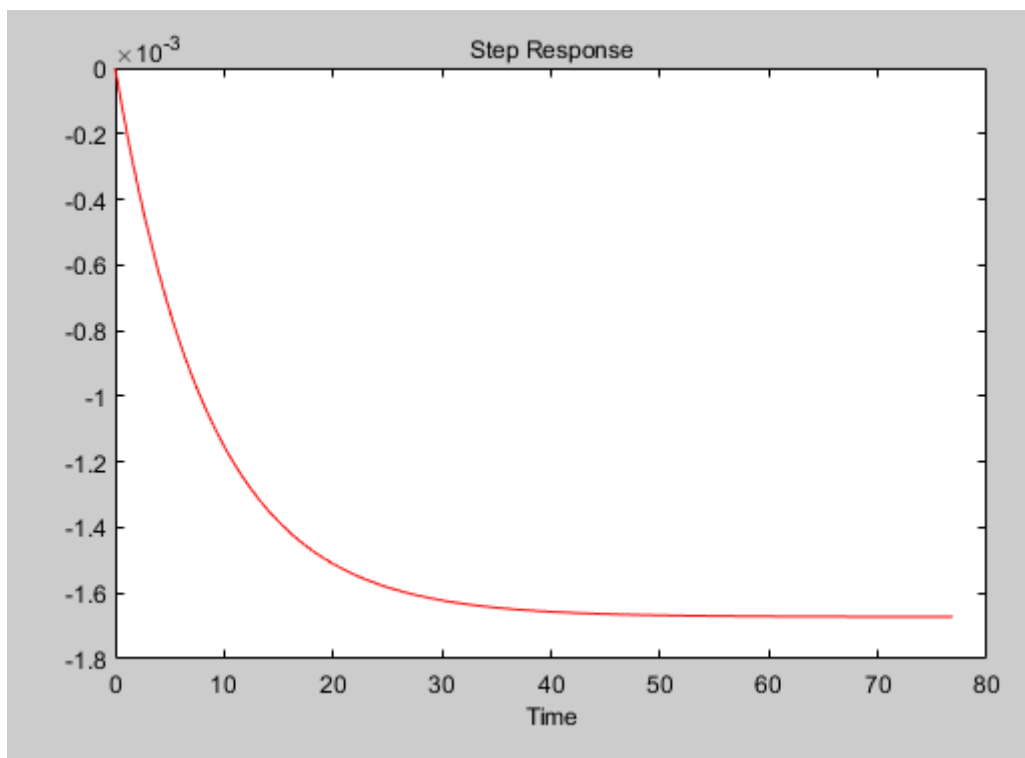
Numerator =

-1.953795765485700e-04

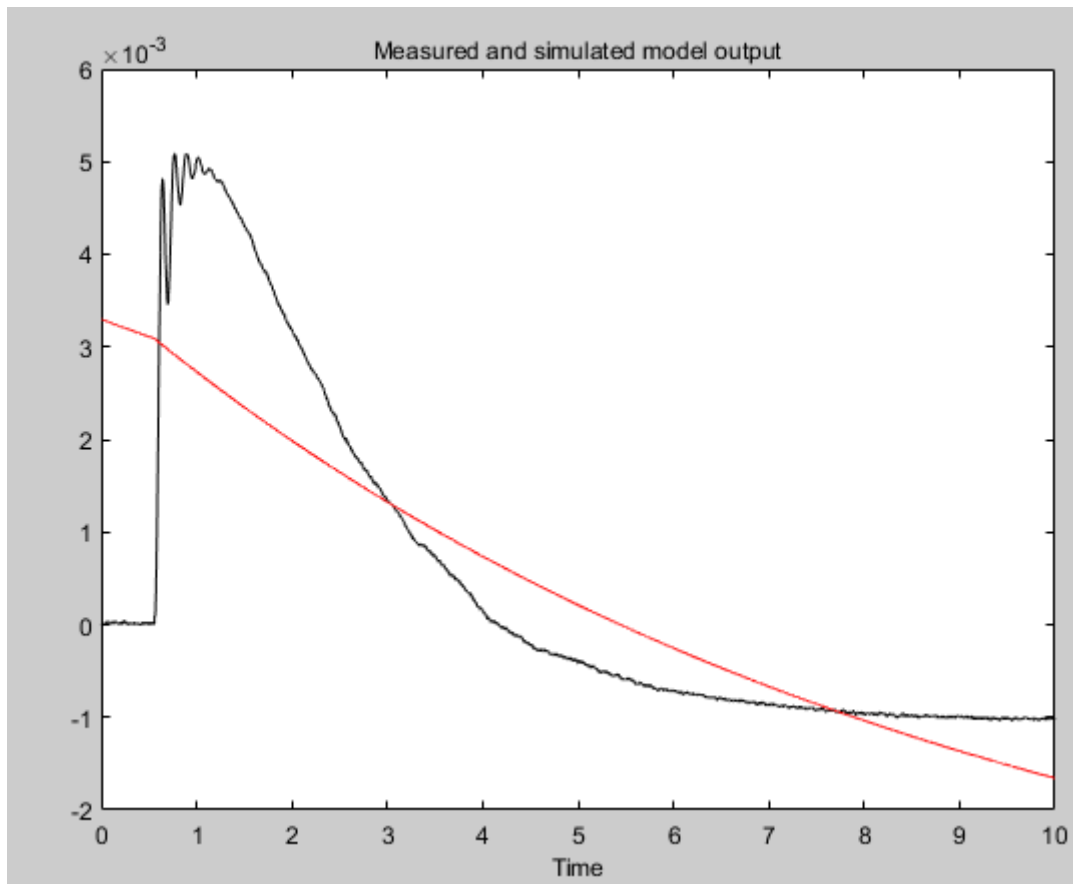
Denominator =

1.0

0.116843327010966



Εικόνα 4.21: Βηματική απόκριση tf3



Εικόνα 4.22: Διάγραμμα απόκρισης προσομοίωσης και μετρούμενης για την tf3

Στην Εικόνα 4.12 παρουσιάζεται το Διάγραμμα απόκρισης προσομοίωσης και μετρούμενης για την tf3 με ποσοστό επιτυχίας **39.58%**.

#### 4.1.1 Χρήση συνάρτησης μεταφοράς με κώδικα Matlab και Μετασχηματισμός σε z-πεδίο

Αφού έχουμε εξάγει το μοντέλο 4<sup>ης</sup> τάξης θα πραγματοποιήσουμε απλοποίηση του μοντέλου σε 2<sup>ης</sup> τάξης και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

Προτού προχωρήσουμε σε απλοποίηση μοντέλου-συνάρτησης μεταφοράς θα πρέπει να δούμε πως μπορούμε να εισάγουμε με κώδικα Matlab τη συνάρτηση μεταφοράς και ιδίως να μετατρέψουμε την συνάρτηση σε z-domain ώστε να μπορούμε να την χρησιμοποιήσουμε σε διακριτό πεδίο και να εισαχθεί σε μικροελεγκτές ή σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου.

Ας πάρουμε την συνάρτηση μεταφοράς 2<sup>ης</sup> τάξης

```

nums=[0 0.018051417609033 -0.001694566203594];
dens=[1 6.640703845331021 3.169371482064676];

```

με την παρακάτω εντολή δημιουργούμε τη συνάρτηση μεταφοράς του σε s-domain

```
Hcs1= tf(nums,dens);
```

Hcs1 =

$$\frac{0.01805 s - 0.001627}{s^2 + 6.907 s + 3.323}$$

και με την παρακάτω εντολή δημιουργούμε τη συνάρτηση μεταφοράς του σε z-domain

με ρυθμό δειγματοληψίας 0.001s

```
Hz1= c2d(Hcs1,0.001)
```

Hz1 =

$$\frac{1.799e-05 z - 1.799e-05}{z^2 - 1.993 z + 0.9931}$$

και προκύπτουν οι παρακάτω μηδενικά και πόλοι:

```
num = [0 1.798917100240657e-05 -1.799079199567057e-05];
```

```
den = [1 -1.993113363706038 0.993116675016554];
```

Στη συνέχεια θα αρχικοποιήσουμε τις πρώτες τιμές της εξόδου-displacement yp

```
yp=u;  
yp(1)= 0;  
yp(2)= (num(2)*u(1));
```

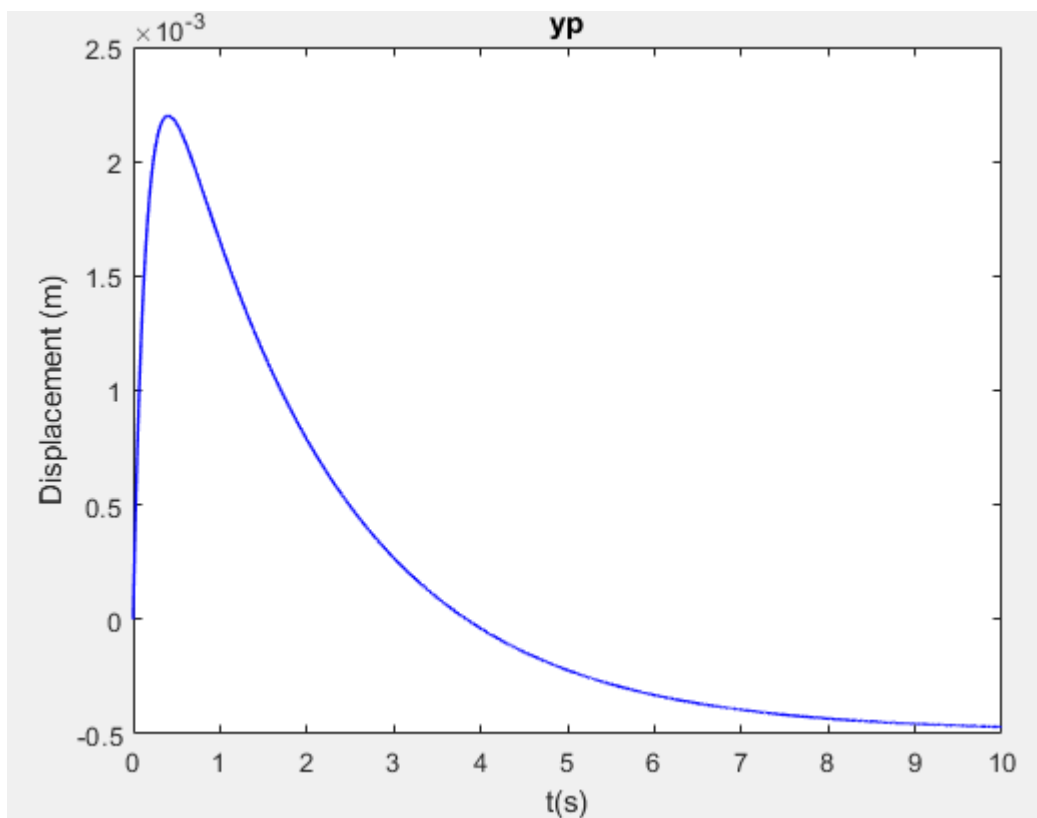
και θα δημιουργήσουμε όλο τον πίνακα με τις τιμές του yp για 10000 δείγματα

```
for n=3:10000  
    yp(n) = -den(2)*yp(n-1) -den(3)*yp(n-2) + (num(2)*u(n-1)+num(3)*u(n-2));  
end
```

και στο τέλος εξάγουμε το γράφημα Displacement-Time σύμφωνα με το χρόνο που παράγεται από την συνάρτηση:

```
t = linspace(0, 5, 10000);
```

και θεωρούμε ότι η είσοδος u είναι βηματική με πλάτος 1V.



Εικόνα 4.23: Βηματική απόκριση Hz1 - 2<sup>ης</sup> τάξης – Διακριτό μοντέλο

Αν πάρουμε την συνάρτηση μεταφοράς 4<sup>ης</sup> τάξης

Hcs2 =

$$\frac{2.147 s^2 + 16.27 s - 1.379}{s^4 + 28.69 s^3 + 1893 s^2 + 6177 s + 3077}$$

την μετατρέψουμε σε z-domain

H<sub>z</sub>2 =

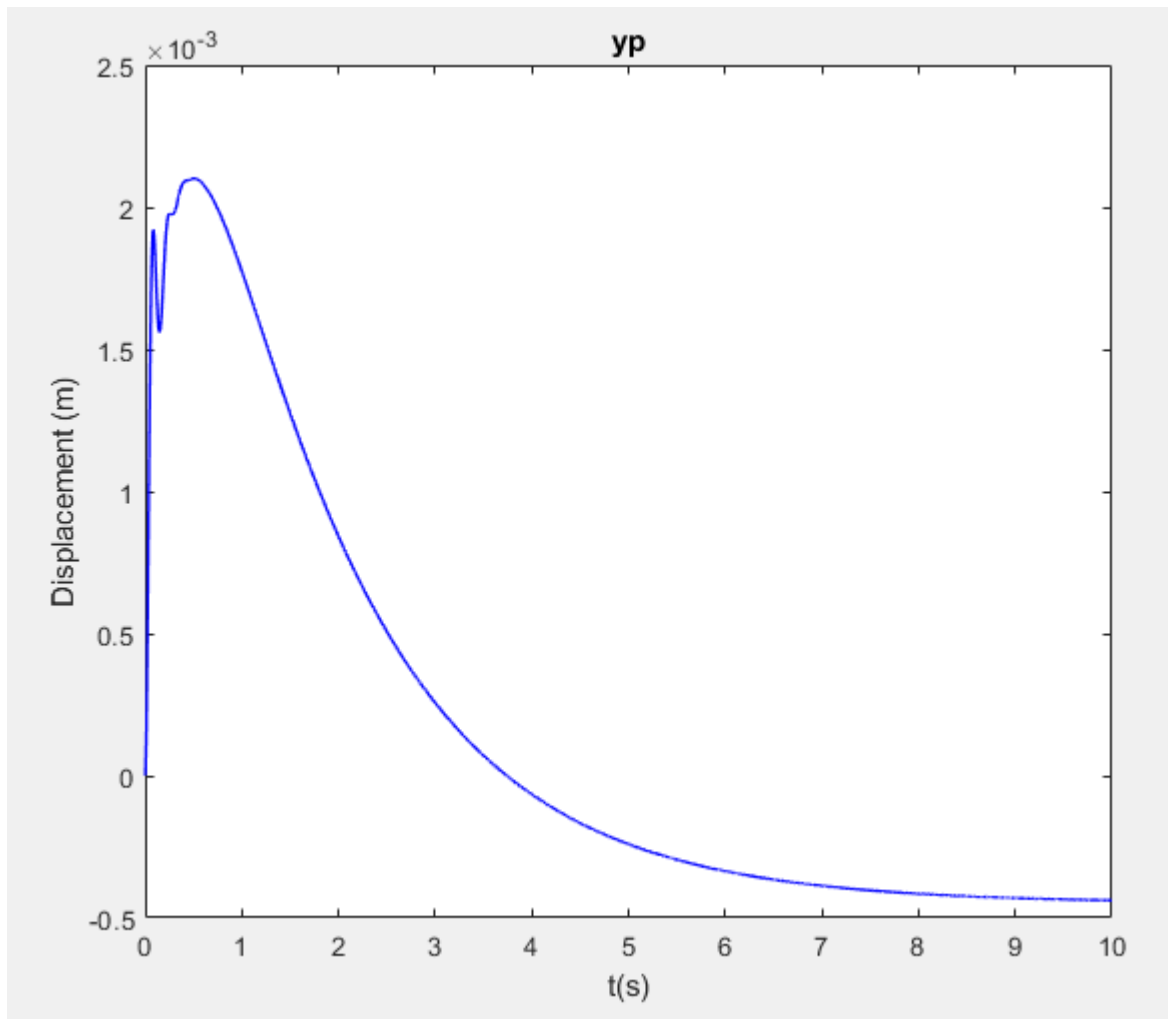
$$\frac{1.066e-06 z^3 - 1.065e-06 z^2 - 1.051e-06 z + 1.05e-06}{z^4 - 3.97 z^3 + 5.911 z^2 - 3.913 z + 0.9717}$$

και στη συνέχεια

εφαρμόσουμε διακριτό μετασχηματισμό

```
num = [0 1.065736169757488e-06 -1.065164451993159e-06  
-1.050844992820871e-06 1.050271915860348e-06];  
den = [1 -3.969848637340960 5.911420505431639 -  
3.913289004967684 0.971717139909590];  
  
yp2=u;  
yp2(1) = 0;  
yp2(2) = -den(2)*yp2(1) + num(2)*u(1);  
yp2(3) = -den(2)*yp2(2) -  
den(3)*yp2(1) + num(2)*u(2) + num(3)*u(1);  
yp2(4) = -den(2)*yp2(3) -den(3)*yp2(2) -den(4)*yp2(1) +  
num(2)*u(3) + num(3)*u(2) + num(4)*u(1);  
  
for n=5: 10000  
yp2(n) = -den(2)*yp2(n-1) -den(3)*yp2(n-2) -  
den(4)*yp2(n-3) -den(5)*yp2(n-4) + num(2)*u(n-  
1) + num(3)*u(n-2) + num(4)*u(n-3) + num(5)*u(n-4);  
end
```

και προκύπτει



Εικόνα 4.24: Βηματική απόκριση Hz1 - 2<sup>ης</sup> τάξης – Διακριτό μοντέλο

#### 4.1.2 Απλοποίηση μοντέλου - Μείωση τάξης συνάρτησης μεταφοράς

Θα χρησιμοποιήσουμε την `balred` που υπολογίζει μια προσέγγιση μειωμένης τάξης του μοντέλου.

Επιλέγουμε την

Hcs2 =

$$2.147 s^2 + 16.27 s - 1.379$$

-----

$$s^4 + 28.69 s^3 + 1893 s^2 + 6177 s + 3077$$

Όπου για επιλογή μείωση σε 2<sup>ης</sup> τάξης μας δίνει

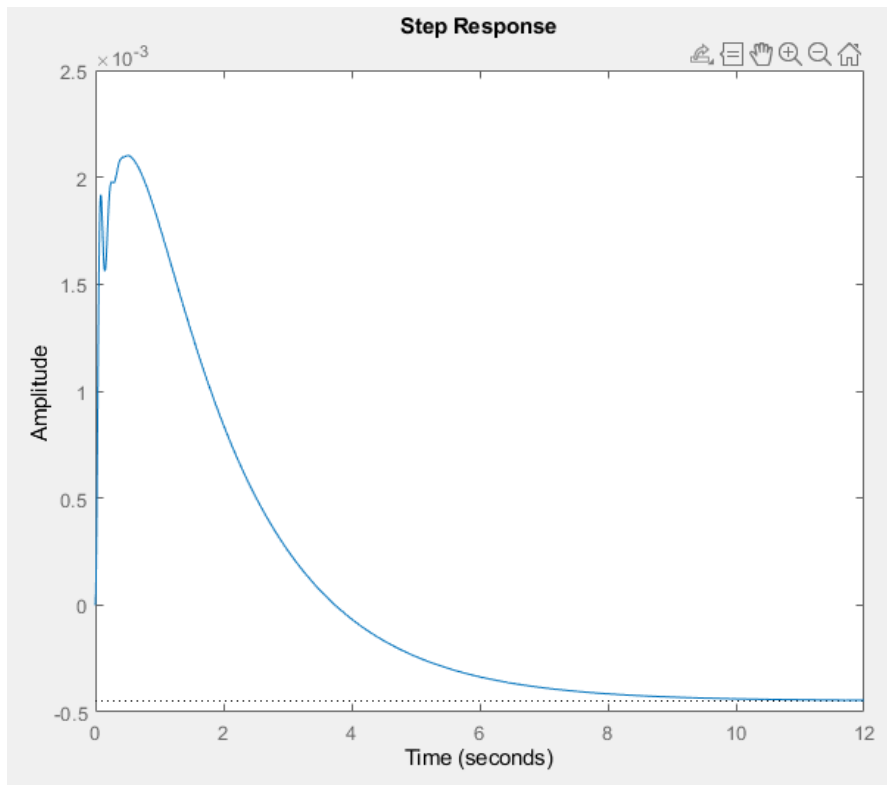
Hcs2Red = balred(Hcs2,2);

Hcs2Red =

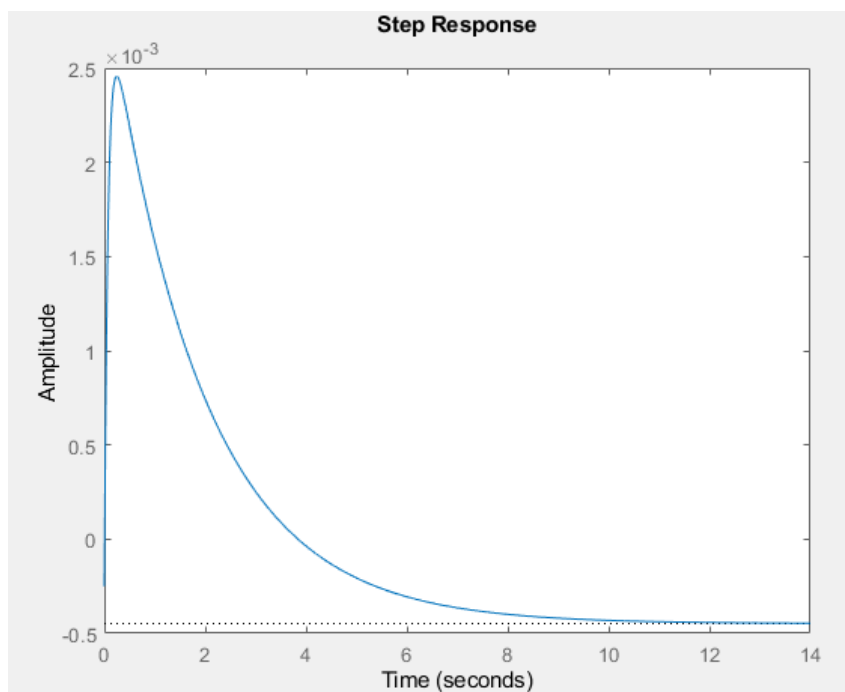
$$-0.0002498 s^2 + 0.03827 s - 0.003194$$

-----

$$s^2 + 13.95 s + 7.127$$

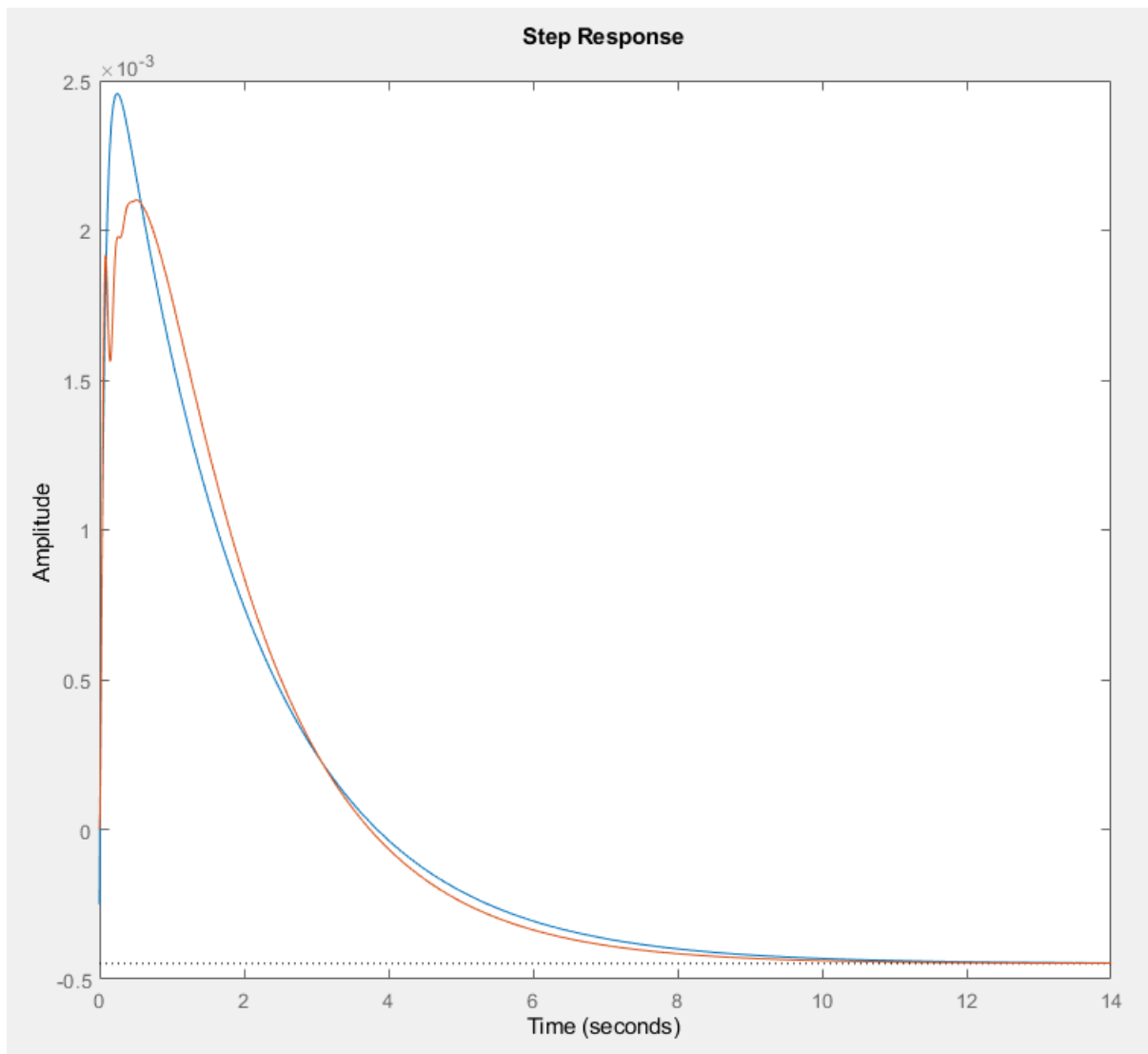


Εικόνα 4.25: Βηματική απόκριση της Hcs2



Εικόνα 4.26: Βηματική απόκριση απλοποιημένης Hcs2Red

Και οι δύο μαζί φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα.



Εικόνα 4.27: Σύγκριση βηματικών αποκρίσεων Hcs2 και απλοποιημένης Hcs2Red

Παρατηρούμε ότι τα δύο μοντέλα διαφέρουν στη προσέγγιση της μέγιστης τιμής αρκετά.

**Μια άλλη προσέγγιση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της συνάρτησης `tfest`**

Θα επιχειρήσουμε με 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup>, 4<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> τάξης

```
np = 1;  
sys1 = tfest(stepdata, np)
```

```
np = 2;
sys2 = tfest(stepdata,np)

np = 4;
sys4 = tfest(stepdata,np)

np = 6;
sys6 = tfest(stepdata,np)
```

με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται

**sys1 =**

From input "u1" to output "y1":

-0.0001954

-----

s + 0.1168

Fit to estimation data: 39.58%

**sys2 =**

From input "u1" to output "y1":

0.01805 s - 0.001627

-----

s<sup>2</sup> + 6.907 s + 3.323

Fit to estimation data: 90.26%

**sys4 =**

From input "u1" to output "y1":

$$-0.02694 s^3 + 2.527 s^2 + 18.96 s - 1.631$$

-----

$$s^4 + 29.46 s^3 + 2288 s^2 + 7321 s + 3651$$

Fit to estimation data: 96.78%

**sys6 =**

From input "u1" to output "y1":

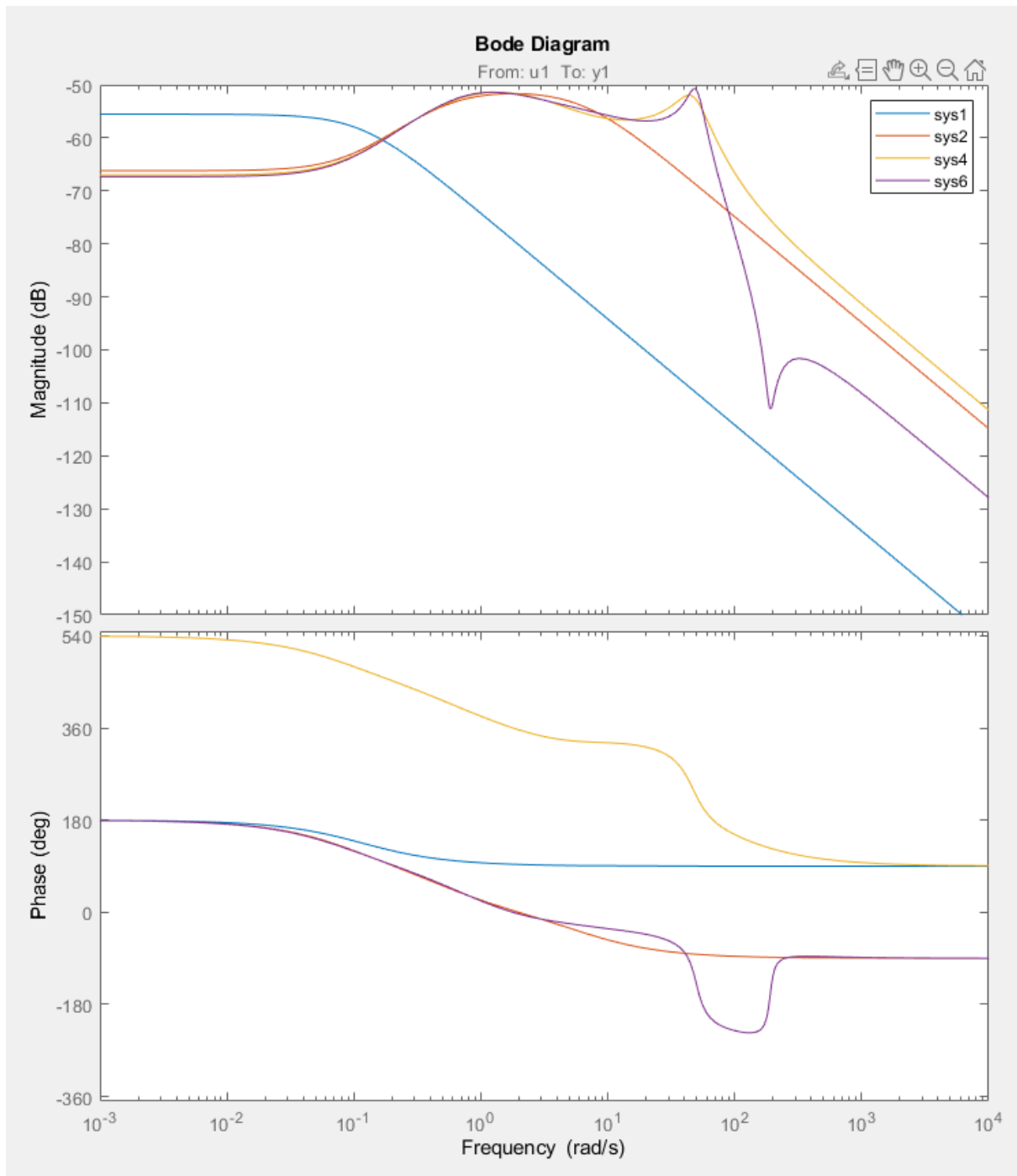
$$0.004024 s^5 + 0.1656 s^4 + 146.9 s^3 + 2512 s^2 + 5836 s - 500.2$$

-----

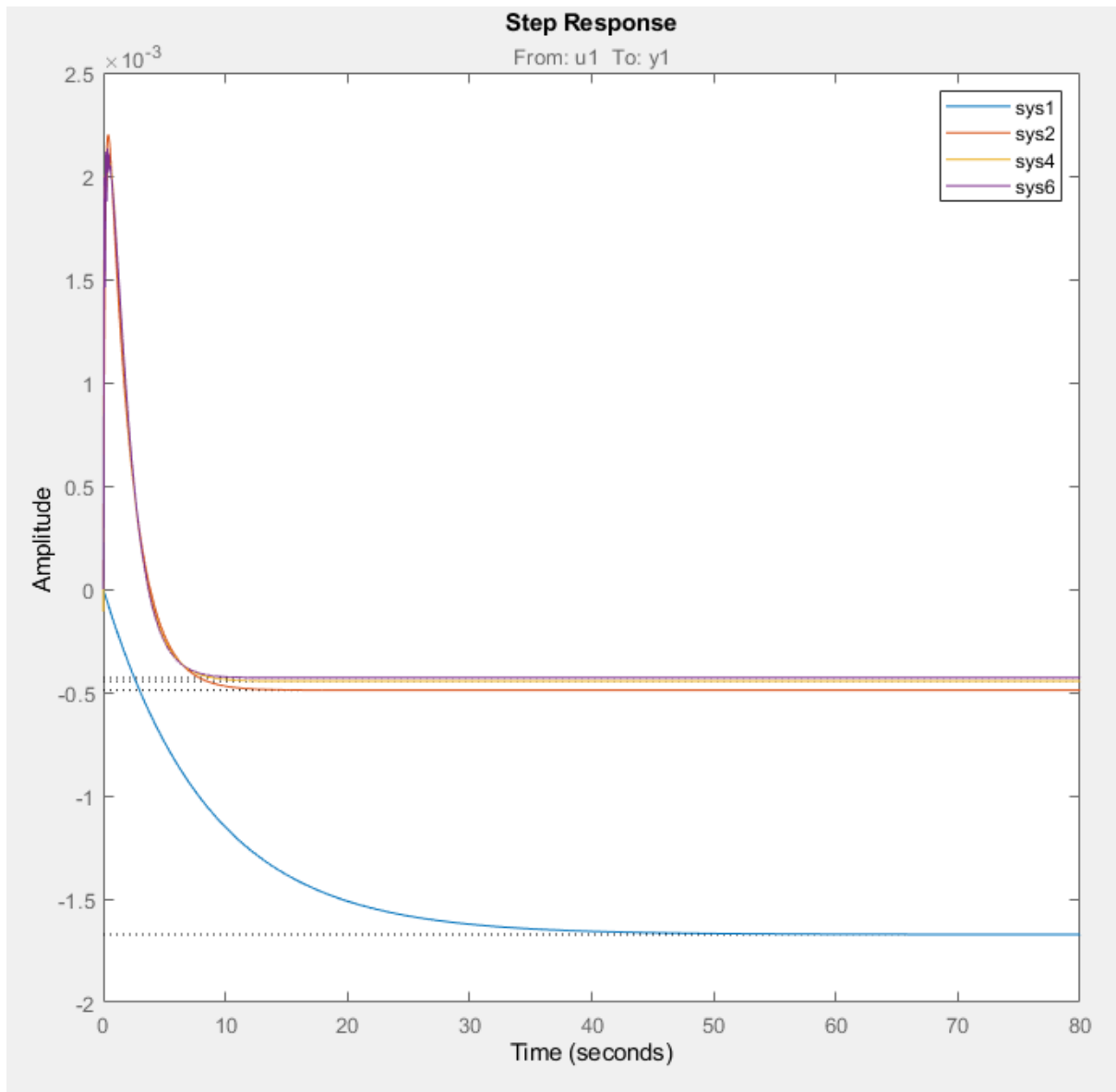
$$s^6 + 74.77 s^5 + 3886 s^4 + 1.604e05 s^3 + 1.402e06 s^2 + 2.568e06 s + 1.163e06$$

Fit to estimation data: 98.54%

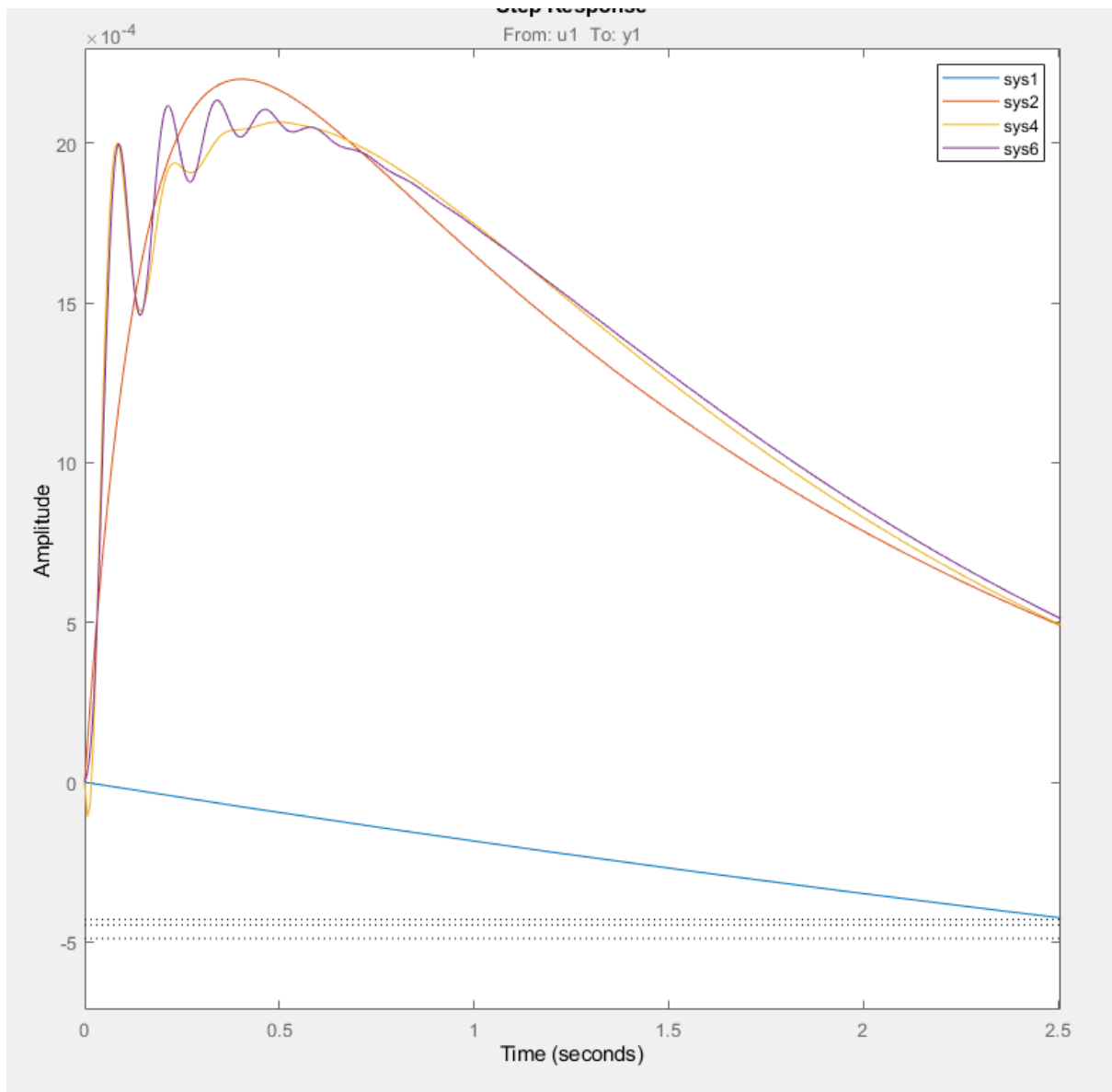
με τα bode και step response διαγράμματα να παρουσιάζονται στις παρακάτω Εικόνες.



Εικόνα 4.28: Bode Διαγράμματα για τις sys1,sys2,sys4,sys6



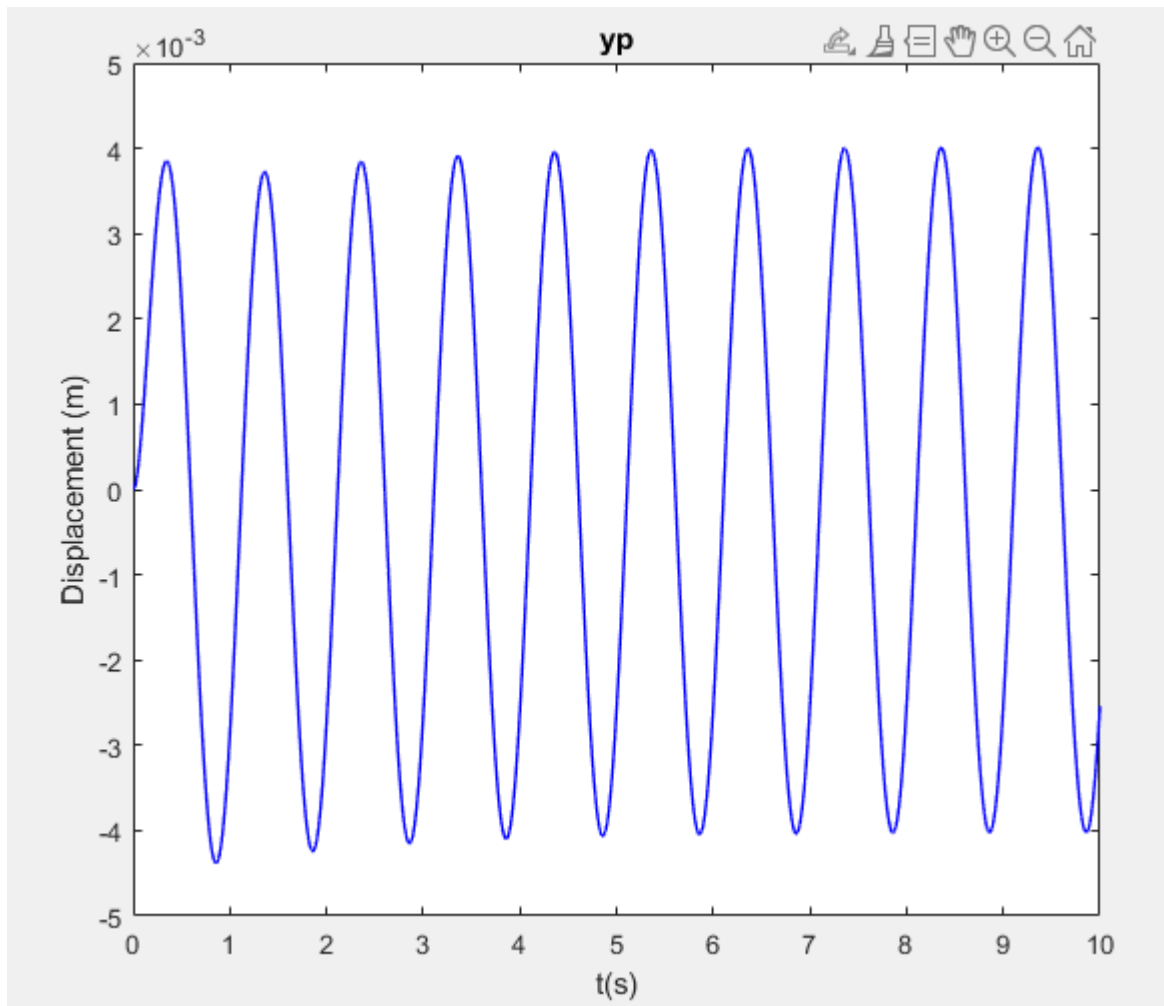
Εικόνα 4.29: Βηματικές Αποκρίσεις για τις sys1,sys2,sys4,sys6



Εικόνα 4.30: Βηματικές Αποκρίσεις για τις sys1,sys2,sys4,sys6 – Μεγέθυνση σε περιοχή ενδιαφέροντος

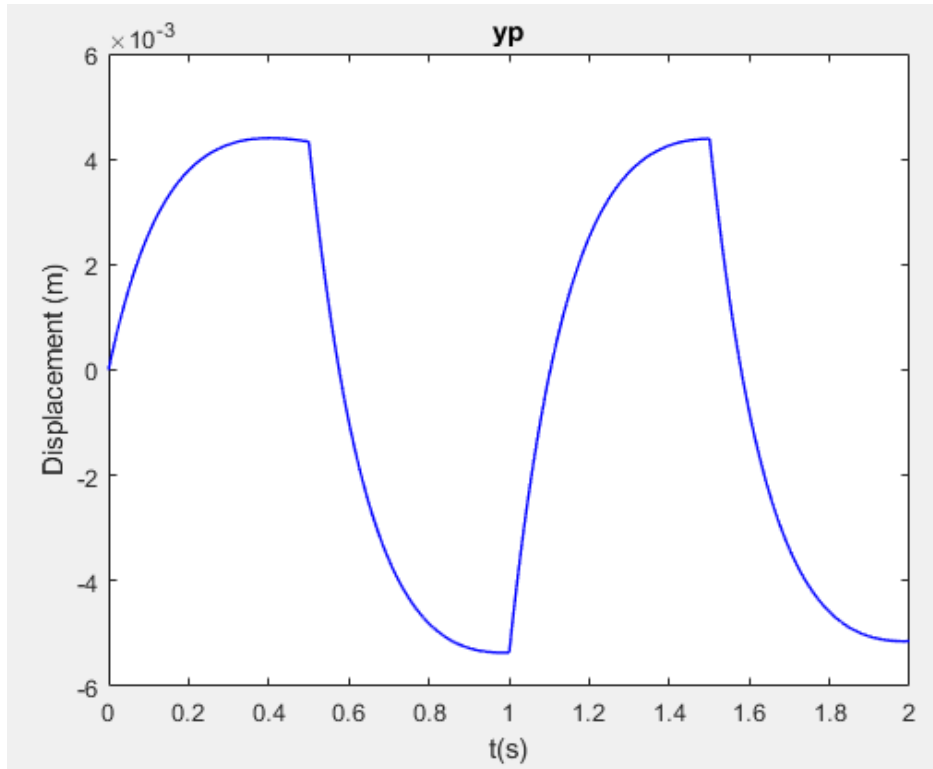
Παρατηρούμε ότι όσο ανεβαίνει η τάξη βελτιώνεται η προσέγγιση αλλά δεν μπορούμε να εξάγουμε μεγάλης τάξης μοντέλο και να το εφαρμόσουμε σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου ή σε άλλες διεργασίες που ενσωματώνονται σε μικροελεγκτές.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε την έξοδο όταν εφαρμοστεί στην είσοδο ημίτονο με πλάτος 2V και συχνότητας 1 Hz για 2<sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση μεταφοράς.

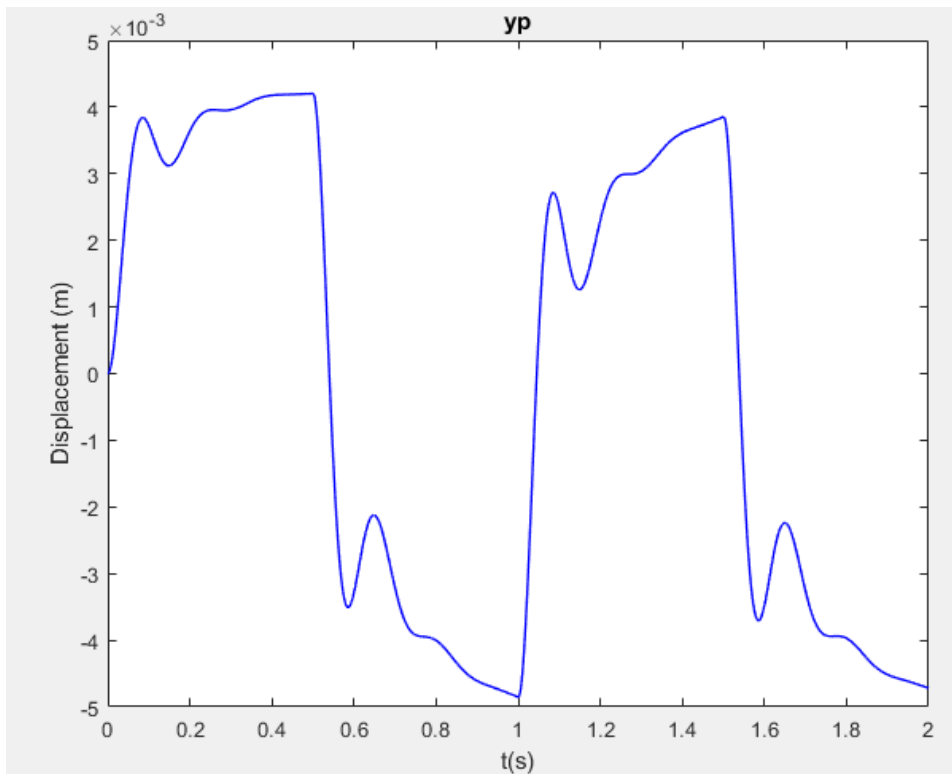


Εικόνα 4.31: Έξοδος με είσοδο ημίτονο με πλάτος 2V και συχνότητας 1 Hz για 2<sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση μεταφοράς

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε την έξοδο όταν εφαρμοστεί στην είσοδο τετραγωνικό σήμα με πλάτος 2V και συχνότητας 1 Hz για 2<sup>ης</sup> και 4<sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση μεταφοράς.

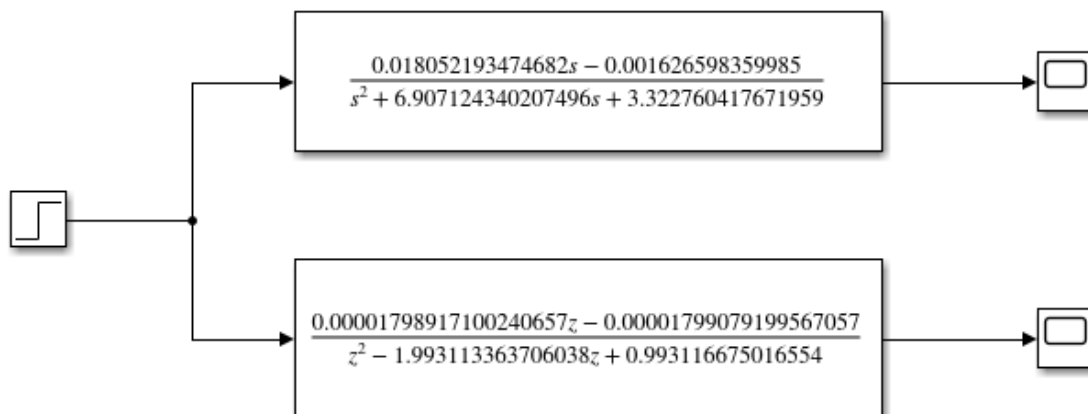


Εικόνα 4.32: Έξοδος με είσοδο τετραγωνικό σήμα με πλάτος 2V και συχνότητας 1 Hz για 2<sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση μεταφοράς

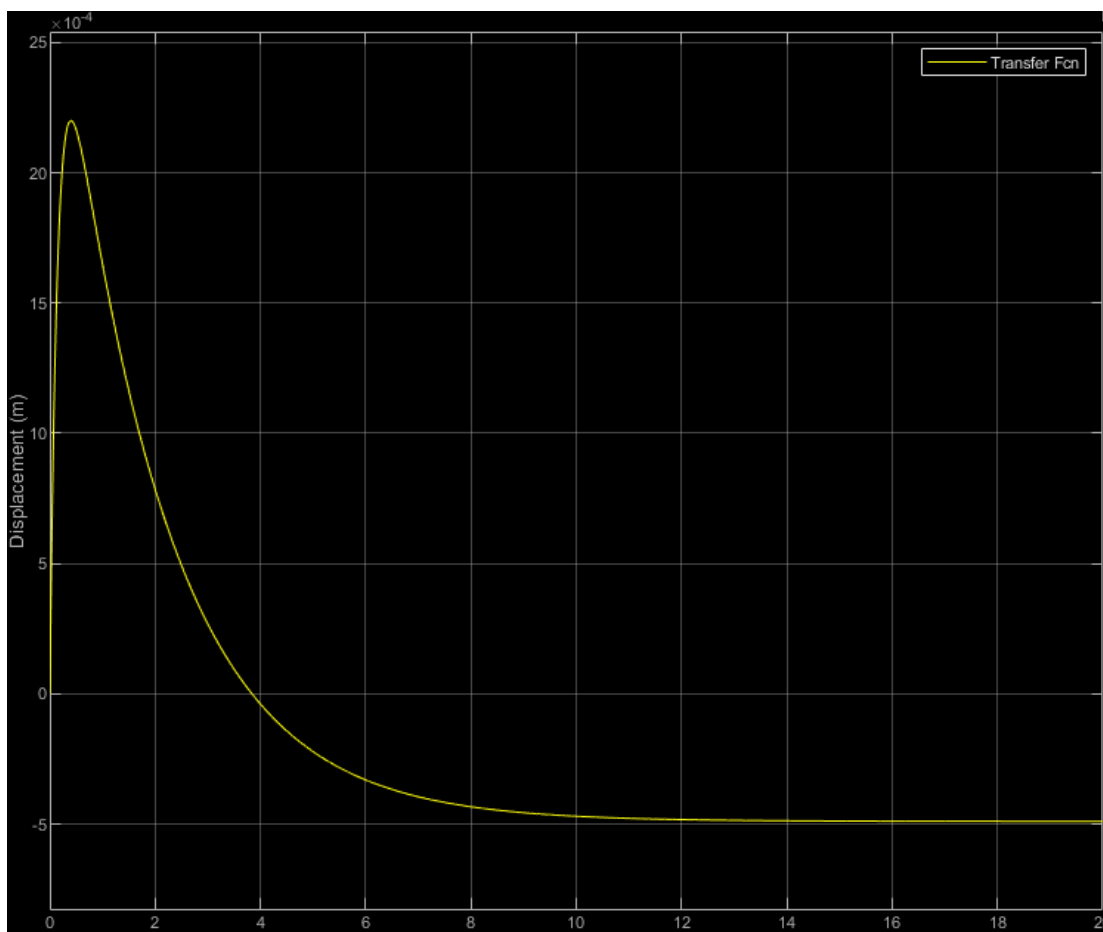


Εικόνα 4.33: Έξοδος με είσοδο τετραγωνικό σήμα με πλάτος 2V και συχνότητας 1 Hz για 4<sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση μεταφοράς

Η 2<sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση μεταφοράς υλοποιήθηκε και με Simulink και σε s και z domain και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες Εικόνες.



Εικόνα 4.34: Simulink για 2<sup>ης</sup> τάξης σε s και z domain

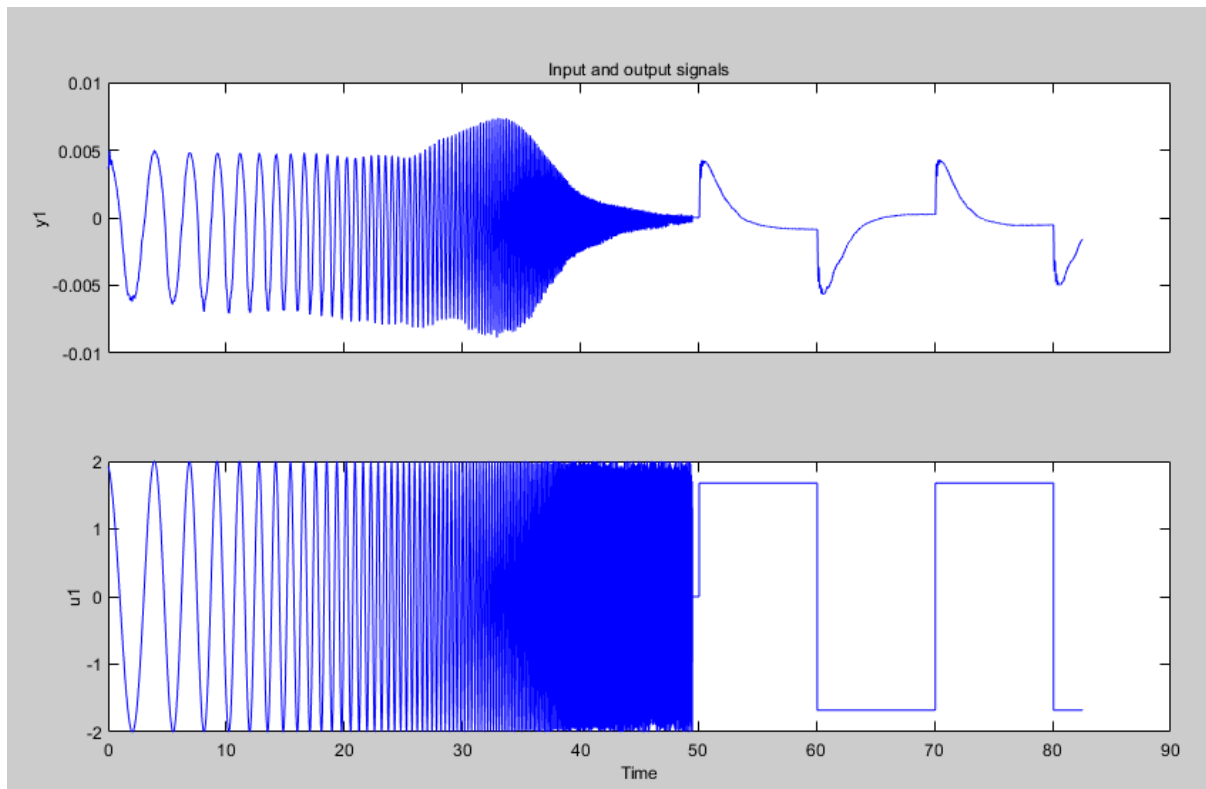


Εικόνα 4.35: Βηματική απόκριση στο Simulink για 2<sup>ης</sup> τάξης σε s και z domain

### 4.1.3 Εξαγωγή συνάρτησης μεταφοράς από σύνθετο σήμα

Στη συνέχεια προχωρήσουμε στην εξαγωγή συνάρτησης μεταφοράς από σύνθετο σήμα, όπως είναι ένα σήμα ημιτόνου με συχνοτικό εύρος 0.25Hz έως 40Hz συν ένα τετραγωνικό σήμα 0.05Hz όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Για την παραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων αναγνώρισης, το σήμα εισόδου πρέπει να έχει επαρκείς πληροφορίες ισχύος στην περιοχή συχνότητας όπου αναγνωρίζεται το μοντέλο.



Εικόνα 4.36: Απόκριση από σύνθετο σήμα HsComplex

Αφού ακολουθήσουμε τη διαδικασία προσέγγισης και εξαγωγής συνάρτησης μεταφοράς προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς

HsComplex =

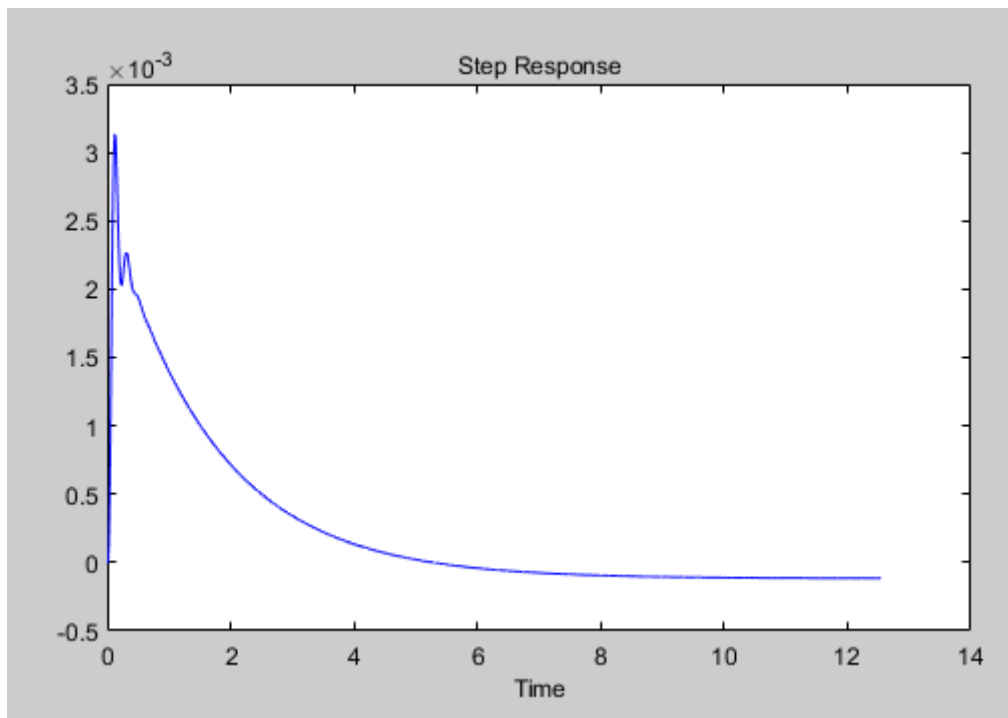
$$-0.566 s^2 + 116.9 s - 3.203$$

-----

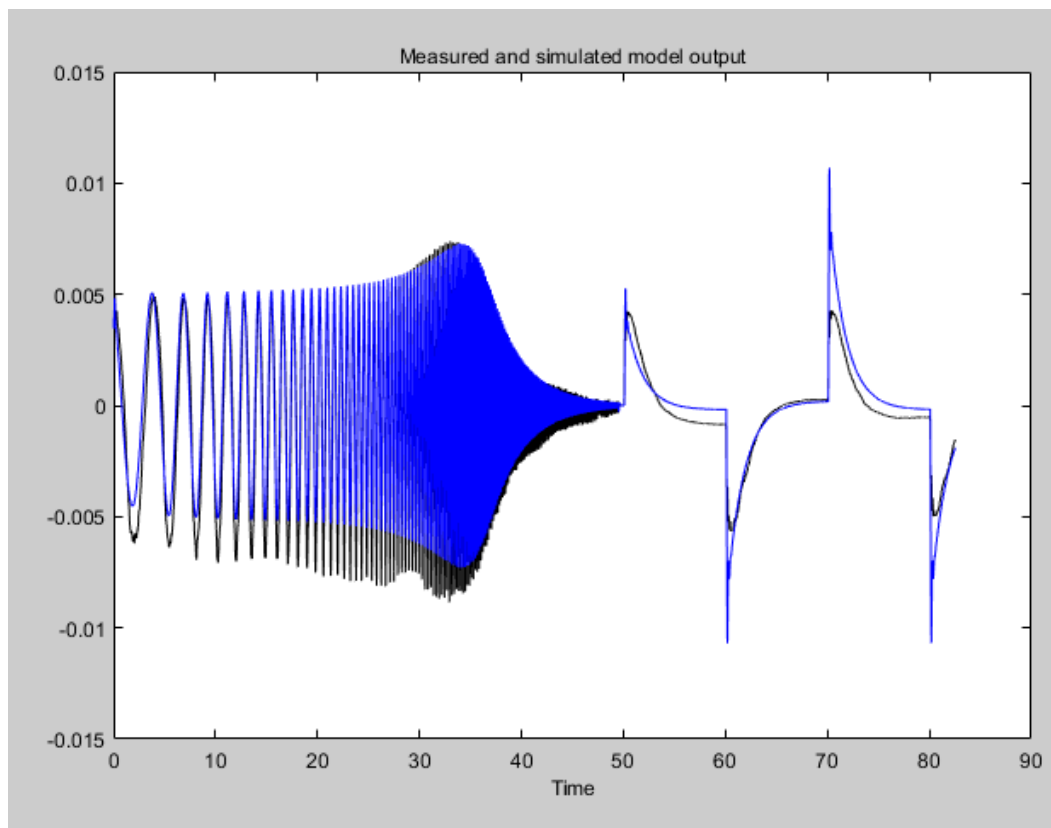
$$s^4 + 60.57 s^3 + 1968 s^2 + 4.67e04 s + 2.723e04$$

με 70% επιτυχία

Για την συνάρτηση αυτή παρουσιάζεται η βηματική απόκριση και η σύγκριση-επικύρωση της.



Εικόνα 4.37: Βηματική απόκριση της HsComplex



Εικόνα 4.38: Validation της HsComplex

Αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι το μοντέλο του IPMC συνήθως περιγράφεται επαρκώς με 4<sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση μεταφοράς όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$G(s) = \frac{a_1}{s + p_1} + \frac{a_2}{s + p_2} + \frac{a_3\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$$

Το υλικό παρουσιάζει ιδιοσυχνότητα  $\omega$ .

Επίσης το  $\zeta$  είναι η αναλογία απόσβεσης.

Ενδιαφέρον έχει να προσπαθήσουμε να εξάγουμε την ιδιοσυχνότητα της συνάρτησης μεταφοράς με τη βοήθεια της Matlab και της `getPeakGain`.

Προκύπτει ιδιοσυχνότητα 29.35 Hz με πλάτος 0.003V.

```
[gpeak,fpeak]=getPeakGain(tf1)
```

```
gpeak =
```

```
0.003685363117854
```

```
fpeak =
```

```
29.351564334396780
```

Λόγω ότι η προσέγγιση είναι χαμηλού ποσοστού επιτυχίας, κοντά στο 70%, τότε προσπαθήσαμε να απομονώσουμε το τετραγωνικό και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.

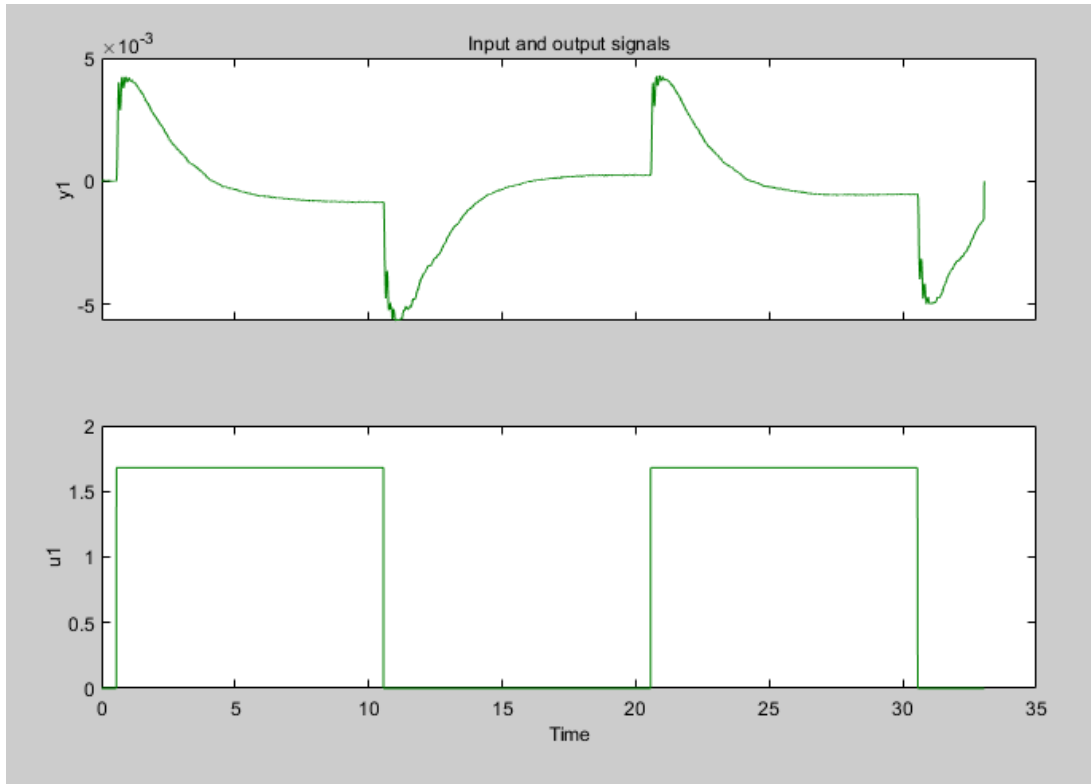
Προκύπτει:

```
HsComplex2=
```

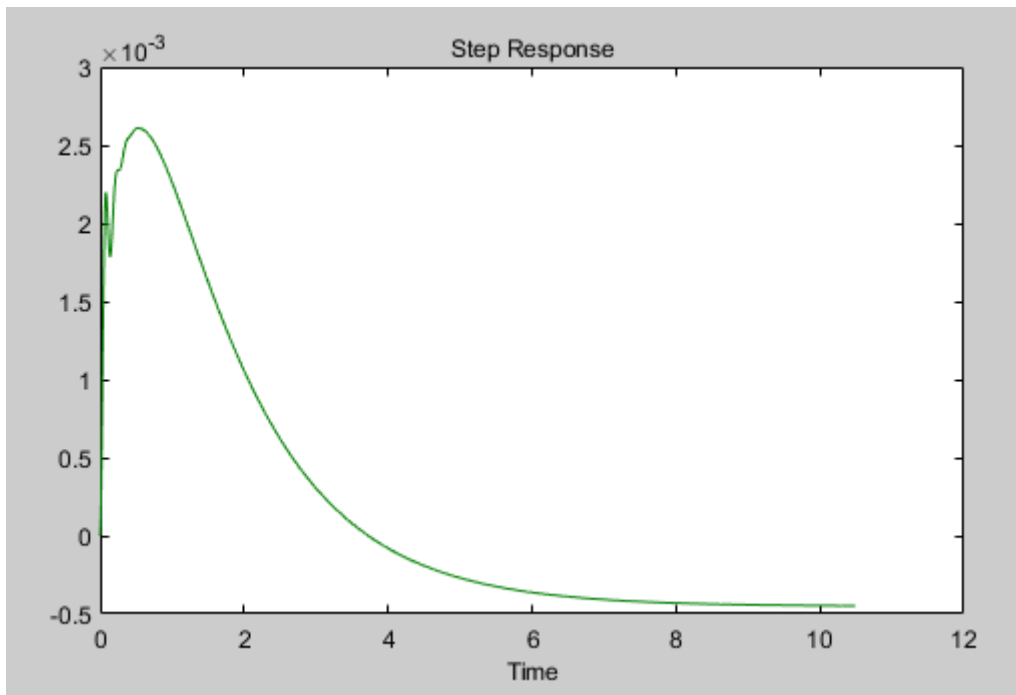
```
2.735 s^2 + 21.38 s - 1.564
```

```
-----
```

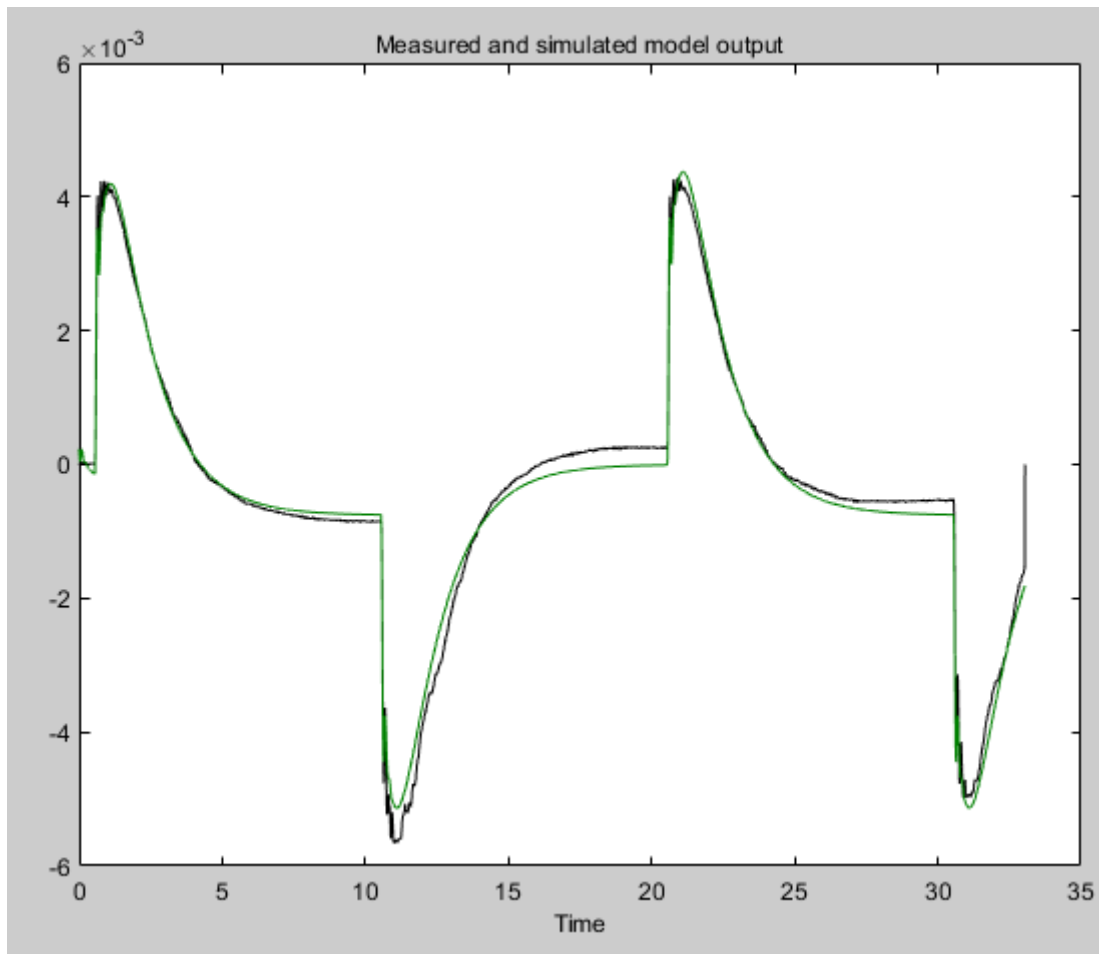
```
s^4 + 28.7 s^3 + 2141 s^2 + 6359 s + 3457
```



Εικόνα 4.39: Απόκριση από σύνθετο σήμα HsComplex2



Εικόνα 4.40: Βηματική απόκριση της HsComplex2



Εικόνα 4.41: Validation της HsComplex2

Η νέα προσέγγιση έχει υψηλότερο ποσοστό επιτυχίας στο 89.55%.

Αυτό οφείλεται ότι το σήμα ημιτόνου μεταβλητής συχνότητας δεν περιέχει σωστή πληροφορία (μικρός χρόνος) για την εξαγωγή της συνάρτησης μεταφοράς.

## Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η μελέτη και μεθόδους μοντελοποίησης ορισμένων μικροηλεκτρομηχανικών στοιχείων εστιάζοντας στην κατηγορία των πολυμερών IPMC. Περιγράφηκαν οι υποκατηγορίες τους και τα ισοδύναμα μοντέλα τους. Χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα και αναλύθηκε ο τρόπος εξαγωγής του μοντέλου και της συνάρτησης μεταφοράς του ενεργοποιητή IPMC με τη βοήθεια εργαλείων της Matlab.

Τα IPMCs μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν πρώτα ως ενεργοποιητές και οι ερευνητές προσπάθησαν να αναπτύξουν φυσικά μοντέλα που να ερμηνεύουν με ακρίβεια την συμπεριφορά τους. Το φαινόμενο της ηλεκτρομηχανικής και χημικής μεταγωγής που επιδρά στο υλικό δεν είναι καλά γνωστό και παρουσιάστηκε μεγάλη ανάγκη για εξαγωγή του μοντέλου ενός υλικού όπως το IPMC. Έτσι θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα ελέγχου. Βέβαια για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα συστήματα ελέγχου έπρεπε να βρεθεί μια κατάλληλης τάξης συνάρτηση μεταφοράς που να το περιγράφει με μεγάλη προσέγγιση και για να μπορέσει να ενσωματωθεί σε μικροσυστήματα, όπως οι μικροελεγκτές.

Έτσι εξετάστηκαν διάφοροι μέθοδοι και συναρτήσεις της Matlab με διάφορες προσεγγίσεις. Ξεκινώντας από μια απλή βηματική απόκριση ενός συγκεκριμένου υλικού εξάχθηκαν συναρτήσεις μεταφοράς διάφορων τάξεων και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Βρέθηκε ότι όσο ναιβένει η τάξη τόσο καλύτερη προσέγγιση γίνεται αλλά ταυτόχρονα είναι πο'ύ δύσκολο να ενσωματωθεί στα συστήματα ελέγχου και στους μικροπολογιστές. Επίσης λόγω ότι το IPMC έχει χαρακτηριστικά ενός cantilever μπορούμε να το προσεγγίσουμε καλύτερα με μια 4<sup>ης</sup> τάξης συνάρτηση μεταφοράς. Μελετήθηκε η απλοποίηση-μείωση της τάξης σε 2<sup>ης</sup> ή η απευθείας εξαγωγή της από τη Matlab και διαπιστώθηκε ότι δεν διαφέρει πολύ από της 4<sup>ης</sup> τάξης.

Στη συνέχεια προχωρήσαμε στην εξαγωγή συνάρτηση μεταφοράς από σύνθετο σήμα, όπως είναι ένα σήμα ημιτόνου με συχνοτικό εύρος 0.25Hz έως 40Hz συν ένα τετραγωνικό σήμα 0.05Hz.

Για την παραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων αναγνώρισης, το σήμα εισόδου πρέπει να έχει επαρκείς πληροφορίες ισχύος στην περιοχή συχνότητας όπου αναγνωρίζεται το μοντέλο.

Διαπιστώθηκε ότι το εξαγόμενο μοντέλο δεν ήταν ακριβές και είχε μικρό ποσοστό ταιριάσματος ενώ με ένα απλό τετραγωνικό με χαρακτηριστικά βηματικής εισόδου τότε τα αποτελέσματα ήταν πιο ικανοποιητικά.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- N. Yazdi, F. Ayazi, and K. Najafi, “Micromachined inertial sensors,” *Proc. IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1640–1658, 1998.
- I. Lee, G. H. Yoon, J. Park, S. Seok, K. Chun, and K. I. Lee, “Development and analysis of the vertical capacitive accelerometer,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 119, no. 1, pp. 8–18, 2005.
- G. Langfelder and A. Tocchio, “MEMS integrating motion and displacement sensors.,” *Woodhead Publ. Ser. Electron. Opt. Mater.*, 2014.
- R. Legtenberg, a W. Groeneveld, and M. Elwenspoek, “Comb-drive actuators for large displacements,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 6, no. 3, pp. 320–329, 1999.
- H. Fujita, “Microactuators and micromachines,” *Proc. IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1721–1732, 1998.
- K. E. Petersen, “Silicon as a Mechanical Material,” *Proc. IEEE*, vol. 70, no. 5, pp. 420–457, 1982.
- M. Kraft and N M White, “MEMS for automotive and aerospace applications,” *Woodhead Publishing Limited*, 2013.
- E. M. Yeatman, “Applications of MEMS in power sources and circuits,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 17, no. 7, pp. S184–S188, 2007.
- H.A.C. Tilmans, W.D. Raedt, E. Beyne, MEMS for wireless communications from RF-MEMS components to RF-MEMS SiP, *J. Micromech. Microeng.* 13 (2003) 139–163.
- G.M. Rebeiz, *RF MEMS Theory, Design and Technology*, Wiley, New Jersey, 2003.
- K. Rangra, B. Margesin, L. Lorenzelli, F. Giacomozzi, C. Collinni, M. Zen, et al., Symmetric toggle switch – a new type of rf MEMS switch for telecommunication applications: design and fabrication, *Sens. Actuators A: Phys* 123–124 (2005) 505–514.
- M. Angira, K. Rangra, Design and investigation of a low insertion loss, broadband, enhanced self and hold down power RF-MEMS switch, *Microsyst. Technol.* 21 (2015) 1173–1178
- Addington, M., Schodek, D.L. (eds.): *Smart Materials and Technologies in Architecture*. Architectural Press, Oxford (2004)
- Pelrine, R., Kornbluh, R., Pei, Q., Joseph, J.: High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%. *Science* 287, 836–839 (2000)
- Ashley, S.: Artificial muscles. *Sci. Am.* 289, 52–59 (2003)
- Sadeghipour, K., Salomon, R., Neogi, S.: Development of a novel electrochemically active membrane and “smart” material based vibration sensor/damper. *Smart Mater. Struct.* 1, 172–179 (1992)

- Oguro, K., Asaka, K., Takenaka, H.: Actuator element. US Patent 5,268,082, 26 Feb 1992(1993)
- Asaka, K., Oguro, K., Nishimura, Y., Mizuhata, M., Takenaka, H.: Bending of polyelectrolyte membrane-platinum composites by electric stimuli 1. Response characteristics to various waveforms. *Polym. J.* 27, 436–440 (1995)
- Asaka, K., Oguro, K.: Bending of polyelectrolyte membrane platinum composites by electric stimuli, part II. Response kinetics. *J. Electroanal. Chem.* 480, 186–198 (2000)
- Addington, M., Schodek, D.L. (eds.): *Smart Materials and Technologies in Architecture*. Architectural Press, Oxford (2004)
- Pelrine, R., Kornbluh, R., Pei, Q., Joseph, J.: High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%. *Science* 287, 836–839 (2000)
- Ashley, S.: Artificial muscles. *Sci. Am.* 289, 52–59 (2003)
- Sadeghipour, K., Salomon, R., Neogi, S.: Development of a novel electrochemically active membrane and “smart” material based vibration sensor/damper. *Smart Mater. Struct.* 1, 172–179 (1992)
- Oguro, K., Asaka, K., Takenaka, H.: Actuator element. US Patent 5,268,082, 26 Feb 1992 (1993)
- Asaka, K., Oguro, K., Nishimura, Y., Mizuhata, M., Takenaka, H.: Bending of polyelectrolyte membrane-platinum composites by electric stimuli 1. Response characteristics to various waveforms. *Polym. J.* 27, 436–440 (1995)
- Asaka, K., Oguro, K.: Bending of polyelectrolyte membrane platinum composites by electric stimuli, part II. Response kinetics. *J. Electroanal. Chem.* 480, 186–198 (2000)
- Abidian M. R., D. H. Kim, and D. C. Martin (M. R.) (2006 )"Conducting-polymer nanotubes for controlled drug release," *Advanced Materials*, vol. 18, pp. 405.
- Bar-Cohen Y. and C. Breazeal (2003) "Biologically inspired intelligent robotics," *Smart Structures and Materials 2003: Electroactive Polymer Actuators and Devices (Epad)*, vol. 5051, pp. 14-20
- Bonomo C., L. Fortuna, P. Giannone, S. Graziani (2005), A method to characterize the deformation of an IPMC sensing membrane, *Sensors and Actuators A*,, 123-124, pp. 146-154.
- Brufau-Penella J., J. Sanchez-Martin, and M. Puig-Vidal (2006) "Piezoelectric polymer model validation applied to mm size microrobot I-Swarm (Intelligent Swarm) - art. no. 61660Q," *Smart Structures and Materials 2006: Modeling, Signal Processing, and Control*, vol. 6166, pp. Q1660-Q1660
- Jung, J., Kim, B., Tak, Y. Park, J. (2003)"Undulatory Tadpole Robot using IPMC actuator," *Proceedings of the 2003 IEEE Intl. Conference of Intelligent Robots and Systems.*, pp. 2133-2138.

- Kanno R., A. Kurata, M. Hattori, S. Tadokoro and T. Takamori (1994) Characteristics and modelling of ICPF actuator Japan-USA Symp. on Flexible Automation 2 691–8
- Kelly A., Davidson R., and Uchico K. (2000), “Smart Composite Materials Systems”, *Comprehensive Composite Materials*, Volume 5, 469-474.
- Mallavarapu K. and D. J. Leo (2001), "Feedback control of the bending response of ionic polymer actuators," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 12, pp. 143-155.
- Manbachi, A. and Cobbold R.S.C.. (2011) "Development and Application of Piezoelectric Materials for Ultrasound Generation and Detection", *Rsm Journals, Ultrasound*, vol 19, pp 187-196.
- Nemat-Nasser S. and J. Y. Li (2000) "Electromechanical response of ionic polymer metal composites," *Smart Structures and Materials 2000: Electroactive Polymer Actuators and Divices (Eapad)*, vol. 3987, pp. 82-91
- Newbury K. M. and D. J. Leo (2003) "Linear electromechanical model of ionic polymer transducers - Part I: Model development," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 14, pp. 333-342.
- Ouguro, K., Asaka, K. and Takenaka (1993), H. “Actuator Element”, US Patent, 5, 268, 082.
- Shahinpoor M. and Kim K. J. (2005), “Ionic polymer-metal composites: VI. Industrial and medical applications,” *Smart Materials and Structures*, vol. 14., 197-214.
- Tadokoro S., S. Yamagami, T. Takamori, and K. Oguro (2000) "Modeling of Nafion-Pt composite actuators (ICPF) by ionic motion," *Smart Structures and Materials 2000: Electroactive Polymer Actuators and Divices (Eapad)*, vol. 3987, pp. 92-102.
- Takagi, K., Nakabo, Y., Luo, Z.W., .Mukai T (2006)“Modeling and Analysis of Incremental Bending Phenomenon of a Snake-Like Underwater Robot using IPMC," *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, vol.19, no.8, pp.319-326, Aug. 2006.
- Yao G. Z., F. F. Yap, G. Chen, W. H. Li, and S. H. Yeo, (2002 )"MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system," *Mechatronics*, vol. 12, pp. 963-973.
- <https://www.coventor.com/mems-solutions/rf-switch-varactor/>
- Yang, Y.W., Zhang, L., Soh, C.K. (2012). Ionic Polymer-Metal Composite and its Actuation Characteristics. In: *Smart Materials in Structural Health Monitoring, Control and Biomechanics. Advanced Topics in Science and Technology in China*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-24463-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24463-6_14)
- Konyo, M. and Tadokoro, S. (2009). IPMC Based Tactile Displays for Pressure and Texture Presentation on a Human Finger. In *Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators* (eds F. Carpi and E. Smela). <https://doi.org/10.1002/9780470744697.ch8>

- Hao M, Wang Y, Zhu Z, He Q, Zhu D, Luo M. A Compact Review of IPMC as Soft Actuator and Sensor: Current Trends, Challenges, and Potential Solutions From Our Recent Work. *Front Robot AI*. 2019 Dec 5;6:129. doi: 10.3389/frobt.2019.00129. PMID: 33501144; PMCID: PMC7806037.
- <https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/14572/research.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- L. Shi, S. Guo and K. Asaka, "Modeling and position control of IPMC actuators for the underwater biomimetic microrobot," 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2012, pp. 1698-1703, doi: 10.1109/ICMA.2012.6284392.
- Tsiakmakis K., Laopoulos Th., Lygouras.J, (2009) Measurement Method of Motion Parameters and Analysis of Modeling of IPMC actuators, *Conference on Electronics and Telecommunication*, Patra, Greece, March 20-22.
- Tsiakmakis, K., Brufau-Penella, J., Puig-Vidal, M., Laopoulos, T. (2009) "A Camera Based Method for the Measurement of Motion Parameters of IPMC Actuators," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, Vol. 58, No. 8, August 2009, pp.2626-2633.