



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και σύγκριση συστημάτων ελέγχου
μικροηλεκτρομηχανικών στοιχείων»

Φοιτητής

Δεσίπρης Δημήτριος 514034

Επιβλέπων

Δρ. Κυριάκος Τσιακμάκης

Ιούλιος 2022

Μελέτη και σύγκριση συστημάτων ελέγχου μικροηλεκτρομηχανικών στοιχείων

Κωδικός: 22127

Φοιτητής: Δεσίπρης Δημήτριος

Εισηγητής: Δρ Κυριάκος Τσιακμάκης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 07-03-2022

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 12-06-2022

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 Δημήτριου Δεσίπρη που την εκτόνησε. 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 συστημάτων ελέγχου με χρήση Matlab για συγκεκριμένες εφαρμογές σε μικροηλεκτρομηχανικά στοιχεία με έμφαση στο υλικό-ενεργοποιητή IPMC, υλοποίηση και προσομοίωση του PID και του MRAC και σύγκριση μεταξύ τους.

« Study and comparison of microelectromechanical control systems »

Abstract

The work concerns the study of control systems using Matlab for specific applications in microelectromechanical components with emphasis on the IPMC actuator material, implementation and simulation of PID and MRAC and comparison between them.

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη συμπαράστασή τους και τον επιβλέπων κ. Τσιακμάκη Κυριάκο για τη καθοδήγηση του.

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: MEMS - μικροηλεκτρομηχανικά και πολυμερή στοιχεία.....	12
2.1 Ενεργοποιητές MEMS.....	12
2.1.1 IPMC ενεργοποιητές (actuators).....	15
Κεφάλαιο 3ο: Συστήματα Ελέγχου για IPMC.....	18
3.1 PID έλεγχος.....	18
3.1.1 Εισαγωγή στον PID έλεγχο.....	18
3.1.2 PID έλεγχο στα IPMCs.....	24
3.2 MRAC - Model Reference Adaptive Control έλεγχος.....	29
3.2.1 Εισαγωγή στον MRAC έλεγχο.....	29
3.2.2 MRAC έλεγχο στα IPMCs.....	31
Κεφάλαιο 4ο: Αποτελέσματα Συστημάτων Ελέγχων	33
4.1 Μοντέλο για Έλεγχο.....	33
4.2 PID και IPMC	40
4.3 MRAC και IPMC	49
Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	63

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 2.1: Βασικό MEMS – χτένα – Αρχή λειτουργίας [Kheyraddini Mousavi A]	14
Εικόνα 2.2: Ηλεκτρικό πεδίο MEMS – χτένα [Kheyraddini Mousavi A]	14
Εικόνα 2.2: Αρχή λειτουργίας IPMC ενεργοποιητή	17
Εικόνα 3.1: PID – Αρχή λειτουργίας	19
Εικόνα 3.2: Παράμετροι απόκρισης (βηματικής)	20
Εικόνα 3.3: Παράμετρος χρόνος αδράνειας απόκρισης (βηματικής)	21
Εικόνα 3.4: PID controller	22
Εικόνα 3.5: Βηματική Απόκριση IPMC (2cmx0.5cm) ενεργοποιητή.....	25
Εικόνα 3.6: Bode διάγραμμα του IPMC (2cm x 0.5cm) ενεργοποιητή.....	26
Εικόνα 3.7: Feedback control	27
Εικόνα 3.8: Feedforward control.....	28
Εικόνα 3.9: Feedback και Feedforward control μαζί	28
Εικόνα 3.10: Δομή του Model reference adaptive control [Black W.S.].....	30
Εικόνα 3.10: Δομή του Model reference adaptive control [Brufau J.]	32
Εικόνα 4.1: Βηματική Απόκριση του IPMC 2 ^{ης} τάξης	33
Εικόνα 4.2: Συχνотικό Διάγραμμα του IPMC 2 ^{ης} τάξης.....	34
Εικόνα 4.3: Μηδενικά και Πόλοι του IPMC 2 ^{ης} τάξης	34
Εικόνα 4.4: Βηματική Απόκριση του IPMC 1 ^{ης} τάξης	36
Εικόνα 4.5: Βηματική Απόκριση του IPMC 1 ^{ης} και 2 ^{ης} τάξης - Σύγκριση.....	36
Εικόνα 4.6: Σχεδίαση στο Simulink για τη 2 ^{ης} τάξης συνάρτηση μεταφοράς του IPMC	37
Εικόνα 4.7: Βηματική Απόκριση του IPMC 2 ^{ης}	37
Εικόνα 4.8: Απόκριση του IPMC 2 ^{ης} τάξης με είσοδο 3V	38
Εικόνα 4.9: Απόκριση του IPMC 2 ^{ης} τάξης με είσοδο sinus 1V 1Hz.....	38
Εικόνα 4.10: Απόκριση του IPMC 2 ^{ης} τάξης με είσοδο sinus 1V 0.1Hz.....	39
Εικόνα 4.11: Απόκριση του IPMC 2 ^{ης} τάξης με είσοδο square 1V 0.1Hz.....	39
Εικόνα 4.12: Απόκριση του IPMC 2 ^{ης} τάξης με είσοδο square 1V 1Hz	40
Εικόνα 4.13 Εφαρμογή PID στο IPMC - Simulink	40
Εικόνα 4.14 Ρύθμιση των όρων P-I-D.....	41
Εικόνα 4.15 Αυτόματη εύρεση και ρύθμιση των παραμέτρων P-I-D.....	42
Εικόνα 4.16 Ανανέωση τιμών P-I-D με το Update Block	43
Εικόνα 4.17 Βηματική απόκριση μετά το Tune	43
Εικόνα 4.18 Ρύθμιση για πιο γρήγορη απόκριση	44
Εικόνα 4.19 Ρύθμιση για πιο γρήγορη απόκριση – Βηματική απόκριση	44
Εικόνα 4.20 Ρύθμιση για πιο γρήγορη απόκριση και λιγότερο σταθερή.....	45
Εικόνα 4.21 Εφαρμογή PID στο IPMC – Είσοδος στο IPMC - Simulink	45
Εικόνα 4.22 Η τάση στην είσοδο του IPMC	46
Εικόνα 4.23 Saturation block στα -3V με 3V στην είσοδο του IPMC.....	46
Εικόνα 4.24 Saturation block στα -3V με 3V.....	47
Εικόνα 4.25 Βηματική απόκριση με την ύπαρξη του Saturation block στα -3V με 3V	47
Εικόνα 4.26 Είσοδος και Έξοδος του Saturation block.....	48
Εικόνα 4.27 Μεγέθυνση εξόδου του Saturation block -σταθερά στα 3V.....	48

Εικόνα 4.28 MRAC σύστημα ελέγχου.....	50
Εικόνα 4.29: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 0.1Hz με $c=-50$	51
Εικόνα 4.30: Σφάλμα ανάμεσα IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 0.1Hz με $c=-50$	51
Εικόνα 4.31: Παράμετροι θ , 1Hz με $c=-50$	52
Εικόνα 4.32: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 1Hz με $c=-50$	52
Εικόνα 4.33: Σφάλμα ανάμεσα IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 1Hz με $c=-50$	53
Εικόνα 4.34: Παράμετροι θ , 1Hz με $c=-50$	53
Εικόνα 4.35: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 5Hz με $c=-50$	54
Εικόνα 4.36: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 5Hz με $c=-50$ μέχρι 50s....	54
Εικόνα 4.37: Σφάλμα ανάμεσα IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 5Hz με $c=-50$	55
Εικόνα 4.38: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 1Hz με $c=-10$	56
Εικόνα 4.39: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 1Hz με $c=-500$	56
Εικόνα 4.40: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 5Hz με $c=-500$	57
Εικόνα 4.41: Σφάλμα ανάμεσα IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 5Hz με $c=-500$	57
Εικόνα 4.42: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 0.1Hz με $c=-500$	58
Εικόνα 4.43: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 0.1Hz με $c=-5000$	58
Εικόνα 4.44: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 0.1Hz με $c=-5000$	59
Εικόνα 4.45: Σφάλμα ανάμεσα IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 0.1Hz με $c=-5000$...	59
Εικόνα 4.46: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος square 2V, 0.1Hz με $c=-50$	60
Εικόνα 4.47: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος square 2V, 0.1Hz με $c=-500$	60
Εικόνα 4.48: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος βηματική με $c=-50$	61

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Ο έλεγχος του proportional–integral–derivative (PID) χρησιμοποιείται ευρέως ως μέθοδος ελέγχου σε πολλές βιομηχανίες. Για παράδειγμα σε πολλές βιομηχανίες που χρησιμοποιούν τον ρομποτικό βραχίονα, ο έλεγχος PID εφαρμόζεται σε κάθε άρθρωση για τον έλεγχο ολόκληρου του ρομποτικού βραχίονα. Προσαρμόζοντας τα κέρδη PID του ελεγκτή PID, μπορούμε να έχουμε την επιθυμητή απόδοση στην έξοδο. Ο προσαρμοστικός έλεγχος με αναφορά μοντέλου (MRAC- Model Reference Adaptive Control) είναι μια άλλη μέθοδος ελέγχου προτάθηκε από τον Landau. Ο προσαρμοστικός έλεγχος, ειδικά η προσέγγιση MRAC, εφαρμόζεται όταν οι παραδοσιακοί ελεγκτές δεν μπορούν να ακολουθήσουν και προσαρμόσουν αλλαγές του ωφέλιμου φορτίου. Με άλλα λόγια, όταν ο ενεργοποιητής έχει διαφορετικές μάζες ωφέλιμου φορτίου, ή με άλλα λόγια η συμπεριφορά ή συνάρτηση μεταφορά του αλλάζει μετά από κάθε χρήση ή κατά τη διάρκεια από διαταραχές τότε θα επηρεαστεί η ακρίβεια τοποθέτησης του τελικού άκρου. Ωστόσο, για το MRAC, αυτό το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί αποτελεσματικά και το αποτέλεσμα μεταβολής ωφέλιμου φορτίου μπορεί να αντισταθμιστεί. Για παράδειγμα, το MRAC που προτάθηκε από τον Horowitz περιέχει ένα μπλοκ προσαρμοστικού αλγορίθμου και ένα βρόχο ανάδρασης που παρέχει τη διαφορά μεταξύ των επιθυμητών και πραγματικών θέσεων των αρθρώσεων. Προτάθηκε και ένα υβρίδιο όπου ο ελεγκτής που προτείνεται είναι ένας PID ελεγκτής και το MRAC.

Στα συστήματα με MEMS(micro-electromechanical system) actuators – ενεργοποιητές ιδίως όταν έχουν μορφή δοκού ή πρέπει να γίνει έλεγχος της θέσης του ή παρακολούθηση της κίνησης του τότε επιβάλλεται η χρήση του PID ή και του MRAC ανάλογα την εφαρμογή.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η μελέτη δύο συστημάτων ελέγχου με χρήση Matlab για συγκεκριμένες εφαρμογές σε μικροηλεκτρομηχανικά στοιχεία, υλοποίηση των κυριότερων και σύγκριση μεταξύ τους.

Θα μελετήσουμε συγκεκριμένο υλικό MEMS που συγκαταλέγεται στην κατηγορία των έξυπνων υλικών, το IPMC (Ionic polymer–metal composite), σύνθετο ιοντικό πολυμερές υλικό με την ιδιότητα να ενεργεί ως δοκός με το ένα άκρο ελεύθερο.

Πραγματοποιείται έρευνα για τον έλεγχο της θέσης του IPMC ή καλύτερα η προσπάθεια να σταθεροποιήσουμε το ελεύθερο άκρο του σε μια θέση με το PID. Είναι εφικτή η εφαρμογή του PID για μια συνάρτηση μεταφοράς 2ης τάξης αν δεν υπάρχουν περιορισμοί επιπέδων τάσης στην είσοδο του plant IPMC. Το πρόβλημα είναι αν μπορεί να λειτουργήσει με αυτούς τους περιορισμούς.

Τα σύνθετα υλικά ιοντικού πολυμερούς μετάλλου έχουν αρκετά απρόβλεπτη συμπεριφορά με αλλαγές στη δυναμική τους απόκριση. Μετά από κάποια χρήση αλλάζει η συνάρτηση μεταφοράς του συνήθως ελάχιστα αλλά αυτή η απρόβλεπτη συμπεριφορά μπορεί να επιφέρει μεγάλα σφάλματα και αστάθειες. Για να αποφύγουμε αυτά τα προβλήματα προτείνουμε έλεγχο MRAC όπου η τελική απόκριση κλειστού βρόχου του συστήματος θα ακολουθεί πάντα τη δυναμική απόκριση του με ένα σταθερό μοντέλο αναφοράς ακόμα κι αν το μοντέλο IPMC αλλάζει με τον χρόνο.

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 MEMS μικροηλεκτρομηχανικά και στα πολυμερή στοιχεία.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα συστήματα ελέγχου για τα IPMC με έμφαση στο PID και στο MRAC.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συστημάτων ελέγχου PID και MRAC στο IPMC.

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

Κεφάλαιο 2ο: MEMS - μικροηλεκτρομηχανικά και πολυμερή στοιχεία

2.1 Ενεργοποιητές MEMS

Οι ενεργοποιητές MEMS είναι ένας τύπος μικροηλεκτρομηχανικού συστήματος (MEMS) που μετατρέπει την ενέργεια σε κίνηση. Τα MEMS είναι συστήματα που ενσωματώνουν μηχανικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα με διαστάσεις της τάξης των μικρομέτρων. Επομένως, οι τυπικές κινήσεις που επιτυγχάνονται από τους ενεργοποιητές MEMS είναι επίσης της τάξης των μικρομέτρων.

Τα MEMS είναι συστήματα που ενσωματώνουν μηχανικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα με διαστάσεις της τάξης των μικρομέτρων. Αν και η έννοια του MEMS υπάρχει από τη δεκαετία του 1960, λόγω της εμφάνισης τεχνικών μικροκατασκευής για τη σμίκρυνση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, ο όρος MEMS επινοήθηκε μόλις το 1986.

Οι ενεργοποιητές MEMS είναι μια συγκεκριμένη κατηγορία MEMS που μετατρέπουν την ενέργεια σε κίνηση. Οι μηχανισμοί με τους οποίους η ενέργεια μετατρέπεται σε κίνηση είναι συνήθως φυσικοί ή χημικοί. Η κίνηση του ενεργοποιητή MEMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τοποθέτηση, άνοιγμα και κλείσιμο βαλβίδων, χαρακτηρισμό διαδικασιών μετατροπής ενέργειας, μεταγωγή και χαρακτηρισμό υλικού σε μικρο/νανοκλίμακα. Μια εμπορική εφαρμογή για τοποθέτηση με ενεργοποιητές MEMS είναι αυτή της Texas Instruments Digital Micromirror Device (DMD), όπου οι μικροκάτοπτρα τοποθετούνται (περιστρέφονται) προκειμένου να κατευθύνουν το φως για τη δημιουργία εικόνων σε προβολείς για εφαρμογές προβολής. Το άνοιγμα και το κλείσιμο των (μικρο) βαλβίδων είναι σημαντικό για εφαρμογές μικρορευστοποίησης και εργαστηρίου σε τσιπ. Οι ενεργοποιητές MEMS μπορούν να διαμορφωθούν ώστε να είναι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας ή να ανιχνεύουν ποσότητες που σχετίζονται με τη μετατροπή ενέργειας. Τα MEMS ραδιοσυχνότητας (RF) χρησιμοποιούν ενεργοποιητές MEMS για να δημιουργήσουν συντονιστές για χρήση σε φίλτρα, ταλαντωτές αναφοράς, διακόπτες, πυκνωτές μεταγωγής και μεταβλητές. Τέλος, οι ενεργοποιητές MEMS χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μελέτη των αποκρίσεων υλικού σε μικροκλίμακα και νανοκλίμακα. Χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή μηχανικών δυνάμεων στα υλικά προκειμένου να χαρακτηριστούν μηχανικά οι ιδιότητες των υλικών τους.

Η κατασκευή ενεργοποιητών MEMS πραγματοποιείται συνήθως μέσω μεθόδων κατασκευής από πάνω προς τα κάτω. Αυτές οι μέθοδοι ξεκινούν με ένα μεγαλύτερο κομμάτι υλικού, συνήθως Si, και στη συνέχεια διαμορφώνουν το Si σε μορφή ενεργοποιητή. Οι περισσότεροι ενεργοποιητές MEMS είναι εξωθήσεις ενός μοτίβου 2D που μεταφέρονται στο Si μέσω μιας φωτολιθογραφικής διαδικασίας. Τρεις συνήθεις μέθοδοι με τις οποίες κατασκευάζονται οι ενεργοποιητές MEMS είναι: Επιφανειακή

Μικρομηχανική, Μικροκατεργασία Επιφανείας με Πυρίτιο σε Μονωτήρα (SOI) και Αντιδραστική Χαλκογραφία και Μεταλλοποίηση Μονού Κρυστάλλου (SCREAM).

Οι ενεργοποιητές MEMS μετατρέπουν διαφορετικές μορφές ενέργειας σε δύναμη και κίνηση. Για παράδειγμα, δύο ηλεκτρικά απομονωμένες παράλληλες πλάκες με εφαρμοσμένη διαφορά δυναμικού θα αναπτύξουν ηλεκτροστατική δύναμη μεταξύ των πλακών. Εάν αυτές οι πλάκες βρίσκονται σε εύκαμπτα ελατήρια, τότε θα κινηθούν η μία προς την άλλη. Αυτός ο τύπος μετατροπής ενέργειας σε κίνηση ονομάζεται ηλεκτροστατική ενεργοποίηση. Άλλοι τύποι ενεργοποιητών χρησιμοποιούν επίσης ηλεκτροστατική ενεργοποίηση, όπως ο ενεργοποιητής nanotractor , scratch drive actuators και shuffle motor. Πέρα από τους ηλεκτροστατικούς ενεργοποιητές, έχουν αναπτυχθεί πολλοί άλλοι ενεργοποιητές που χρησιμοποιούν ρευστές δυνάμεις, μαγνητικές δυνάμεις, πίεση ακτινοβολίας, πιεζοηλεκτρικά και θερμική διαστολή [Kheyraadini].

Προκειμένου να δημιουργηθεί η δύναμη που εφαρμόζεται στον ενεργοποιητή MEMS, μία από τις πιο κοινές μεθόδους είναι η χρήση πυκνωτών. Οι συνήθεις μέθοδοι είναι οι πυκνωτές παράλληλης πλάκας και οι πυκνωτές χτενίσματος. Οι πυκνωτές παράλληλης πλάκας έχουν χωρητικότητα ίση με:

$$C_{pp} = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

(Εξ 2.1)

όπου ϵ_0 είναι η διαπερατότητα του υλικού μεταξύ των πλακών (συνήθως αέρας ή κενό), A είναι η περιοχή του πυκνωτή παράλληλης πλάκας και d είναι το διάκενο μεταξύ των παράλληλων πλακών.

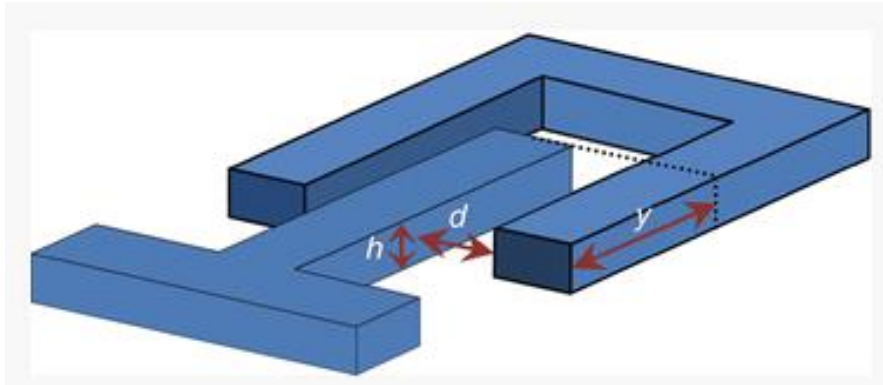
Η ηλεκτροστατική ενέργεια είναι $\frac{1}{2}C_{pp} V^2$, όπου V είναι η τάση μεταξύ των πυκνωτών παράλληλης πλάκας. Λαμβάνοντας την παράγωγό της ως προς το διάκενο, η δύναμη υπολογίζεται ότι είναι:

$$F_{pp} = -\frac{\epsilon_0 A V^2}{2d^2}$$

(Εξ 2.2)

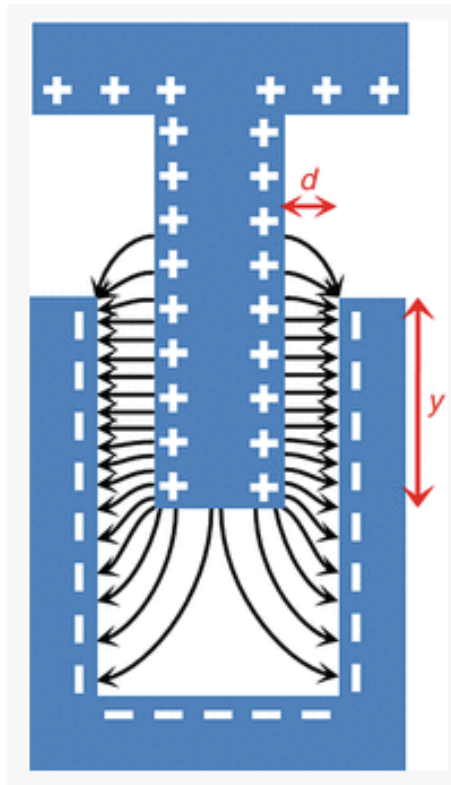
Σημειώστε ότι το F_{pp} είναι μη γραμμικό όχι μόνο στην τάση, αλλά και στο διάκενο μεταξύ των παράλληλων πλακών. Αυτή η γεωμετρική μη γραμμικότητα καθιστά τον έλεγχο των ενεργοποιητών δύσκολο και οδήγησε στην ανάπτυξη πυκνωτών χτενίσματος.

Οι διατάξεις πυκνωτών χτένας έχουν συνήθως εκατοντάδες έως χιλιάδες χτένες για να δημιουργήσουν την επιθυμητή δύναμη. Για λόγους ανάλυσης, η Εικόνα 2.1 δείχνει μια μονάδα κίνησης χτένας.



Εικόνα 2.1: Βασικό MEMS – χτένα – Αρχή λειτουργίας [Kheyreddini Mousavi A]

Όταν συνδέονται σε μια εξωτερική πηγή, αντίθετα φορτία συγκεντρώνονται στις επιφάνειες των δακτύλων της χτένας που δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο, όπως στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Ηλεκτρικό πεδίο MEMS – χτένα [Kheyreddini Mousavi A]

Σημειώστε ότι κατά μήκος της κατακόρυφης γραμμής συμμετρίας στην Εικόνα 2.2 τα οριζόντια στοιχεία δεξιά και αριστερά είναι ίσα και αντίθετα. Έτσι η καθαρή δύναμη που οφείλεται στις οριζόντιες συνιστώσες είναι μηδέν. Ωστόσο, τα κατακόρυφα στοιχεία του πεδίου κροσσών στην άκρη του δακτύλου της χτένας δεν είναι ισορροπημένα και προκύπτει μια καθαρή ελκτική δύναμη. Η χωρητικότητα μιας συστοιχίας πυκνωτών χτενίσματος βρέθηκε ότι είναι [Kheyreddini]:

$$C_{cc} = 2n \frac{\epsilon_0 h y}{d}$$

(Εξ 2.3)

και τελικά η δύναμη προκύπτει

$$F_{cc} = \frac{n\epsilon_0 h}{d} V^2$$

(Εξ 2.4)

2.1.1 IPMC ενεργοποιητές (actuators)

Τα έξυπνα υλικά έχουν προωθηθεί ευρέως ως βασική τεχνολογία που θα υποστηρίξει κάθε είδους νέα προϊόντα με μοναδικές δυνατότητες. Πολλά έξυπνα υλικά και προϊόντα είναι διαθέσιμα στο εμπόριο και οι τεχνολογίες συνεχίζουν να αποτελούν αντικείμενο ευρείας ακαδημαϊκής έρευνας. Ωστόσο, υπάρχει μια ευρέως διαδεδομένη άποψη ότι τα υπάρχοντα έξυπνα υλικά θα μπορούσαν να βρουν πολύ πιο διαδεδομένες χρήσεις. Συζητείται ευρέως στην τεχνική βιβλιογραφία για το τι ακριβώς είναι τα «έξυπνα» ή «έξυπνα» υλικά. Πολλοί δείχνουν ότι είναι υλικά που αισθάνονται κάποιο ερέθισμα από το εξωτερικό περιβάλλον και δημιουργούν μια χρήσιμη απόκριση, αλλά αυτό θα περιλαμβάνει συμβατικά υλικά ανίχνευσης όπως το Ionic Σύνθετα Πολυμερή-Μέταλλα (IPMCs) τα οποία αρκετοί ερευνητές κατηγοριοποιούν ως «έξυπνα».

Ορισμένοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι δεν υπάρχουν πράγματα όπως έξυπνα υλικά αλλά μόνο υλικά που παρουσιάζουν ορισμένα εγγενή χαρακτηριστικά που μπορούν να αξιοποιηθούν σε προϊόντα, συστήματα ή δομές που με τη σειρά τους παρουσιάζουν «έξυπνη» συμπεριφορά. Παραδείγματα του αυτή η συμπεριφορά περιλαμβάνει αποκρίσεις σε εξωτερικά ερεθίσματα όπως αυτοαίσθηση, αυτοθεραπεία, αυτοενεργοποίηση, αυτοδιάγνωση και αλλαγή σχήματος. Τα IPMC ως πολυλειτουργικά έξυπνα υλικά διαθέτουν ενεργοποίηση, συγκομιδή ενέργειας και δυνατότητες ανίχνευσης. Οι ενεργοποιητές IPMC, οι αισθητήρες και οι τεχνητοί μύες αποτελούνται μιας υπερφθοριωμένης μεμβράνης ανταλλαγής ιόντων, η οποία είναι χημικά σύνθετη με ευγενή μέταλλα όπως ο χρυσός, το παλλάδιο, η πλατίνα και το ασήμι.

Τα IPMC είναι εξαιρετικοί αισθητήρες που παράγουν κάποια mV, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση, τη μεταγωγή και τη συλλογή ενέργειας από κύματα ανέμου ή ωκεανού. Αυτά τα μοναδικά υλικά λειτουργούν τέλεια σε υγρό περιβάλλον και ως εκ τούτου είναι

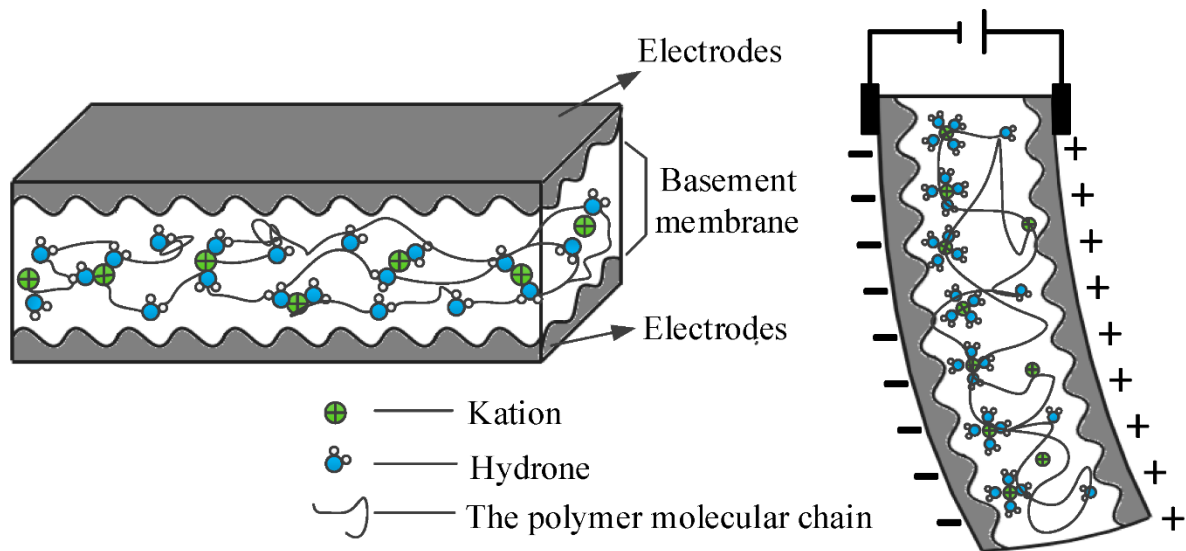
εξαιρετικοί υποψήφιοι για ιατρικές εφαρμογές. Αυτά μπορεί κυμαίνονται από ενδαγγειακά συστήματα διεύθυνσης και αναδευτήρες για να επιτρέπουν την πλοήγηση μέσα στον άνθρωπο. Από τη βιομηχανική πλευρά, λόγω του ότι οι IPMC είναι εξαιρετικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές χαμηλής τάσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για ανίχνευση όσο και για ταυτόχρονη ενεργοποίηση σε πολλές εφαρμογές μηχανικής. Τα IPMC χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό σε μικροσκοπία ατομικής δύναμης ως νέοι και δυναμικοί ανιχνευτές, μικροσκοπία με ανιχνευτή σάρωσης, καθώς και ρομποτική χειρουργική για τη διευκόλυνση της μεταφοράς, ειδική απτική, δύναμη, απτική και σύνθετη ανάδραση στους χειρουργούς.

Τα IPMC είναι ένας τύπος ηλεκτρενεργού πολυμερούς που κερδίζει μεγάλο έδαφος σήμερα ως ενεργοποιητής και αισθητήρας. Τα IPMC είναι ενεργοί ενεργοποιητές που παρουσιάζουν μεγάλη κάμψη παραμόρφωση με την εφαρμογή χαμηλής τάσης ενεργοποίησης και προκαλεί μεγάλη τάση κάμψης, που οδήγησε στην εξέτασή της για διάφορες πιθανές εφαρμογές όπως η ρομποτική, αεροδιαστημική κτλ.

Ένα τυπικό IPMC αποτελείται από μια λεπτή μεμβράνη πολυηλεκτρολύτη (συνήθως Nafion® ή Flemion®) και επικαλύπτεται χημικά και στις δύο όψεις της μεμβράνης από ένα ευγενές μέταλλο όπως ο χρυσός και η πλατίνα. Ένα IPMC υφίσταται μεγάλη παραμόρφωση κάμψης όταν ένα εξωτερικό ηλεκτρικό δυναμικό εφαρμόζεται σε όλο το υλικό. Αντίθετα, ένα μετρήσιμο ηλεκτρικό δυναμικό αναπτύσσεται κατά μήκος της λωρίδας όταν υποβάλλεται σε κάμψη ή συστροφή. Έτσι το IPMC μπορεί να χρησιμεύσει και ως ενεργοποιητής και ως αισθητήρας. Ένα IPMC προσφέρει πλεονεκτήματα όπως συμβατό, ελαφρύ, χαμηλής τάσης λειτουργία και ικανότητα εργασίας σε ένα υδάτινο μέσο. Αυτές οι ιδιότητες το καθιστούν πολλά υποσχόμενο για πολλές εφαρμογές μηχανική βιοϊατρικών, ναυτικών, ρομποτικών και μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS).

Το IPMC είναι ένα πορώδες φορτισμένο πολυμερές, κορεσμένο με ηλεκτρολυτικό διαλύτη και επιμεταλλωμένα από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Διαφορά στις τάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων δημιουργεί μηχανικές παραμορφώσεις (μηχανισμός ενεργοποίησης) οι οποίες με τη σειρά τους δίνουν διαφορά στις τάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων (μηχανισμός ανίχνευσης). Το ηλεκτρολυτικό διάλυμα περιλαμβάνει κινητά ιόντα και έναν αφόρτιστο διαλύτη. Ο μηχανισμός ενεργοποίησης βασίζεται στην κινητικότητα των ιόντων. Λόγω της διαφοράς στις τάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, τα κινητά ιόντα (λόγω της υδροφιλίας τους) εκτοπίζουν τον αφόρτιστο διαλύτη. Η βαθμίδα συγκέντρωσης του αφόρτιστου διαλύτη προκαλεί ογκομετρική διαστολή του υδρόφοβο πολυμερές το οποίο δεν είναι ομοιόμορφο κατά μήκος του πάχους. Έτσι, το πολυμερές παραμορφώνεται χωρίς να ασκούνται μηχανικές δυνάμεις πάνω του κατά τη διάρκεια του μηχανισμού ενεργοποίησης. Οι ταινίες IPMC αποτελούνται από ένα ιοντικό πολυμερές, όπως το Nafion ή το Flemion, το οποίο έχει σταθερά ανιόντα στο δίκτυο πολυμερών. Αυτό το δίκτυο ιοντομερών πολυμερών εξουδετερώνεται με ιοντικό διάλυμα με διαλύτες όπως νερό και κατιόντα όπως (Li⁺) ή ιόντα τετραβουτυλαμμωνίου (TBA⁺). Η επιφάνεια είναι αποτελείται από ένα αγωγίμο μέσο όπως ηλεκτρόδια πλατίνας ή χρυσού. Ένα σχηματικό μιας

λωρίδας IPMC φαίνεται στην Εικόνα 2.3. Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ στα δύο επιφανειακά ηλεκτρόδια, η λωρίδα IPMC κάμπτεται. Ανακατανομή των κινητών ιόντων και μόρια νερού λόγω διαφόρων φυσικών διεργασιών όπως διάχυση, ηλεκτροφόρηση μεταφορά διαλύτη και η σύζευξη διάχυσης-παραμόρφωσης προκαλεί την ηλεκτρομηχανική συμπεριφορά



Εικόνα 2.3: Αρχή λειτουργίας IPMC ενεργοποιητή

[https://www.mdpi.com/mathematics/mathematics-07-00741/article_deploy/html/images/mathematics-07-00741-g001.png]

Το IPMC έχει κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας τη διαδικασία χημικής εναπόθεσης και η μοντελοποίηση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την κατανομημένη πίεση κατά την κίνηση κάμψης σύμφωνα με τη μέθοδο Euler-Bernoulli. Επιπλέον, το ενεργειακό μοντέλο του ενεργοποιητή Ag IPMC προέρχεται σύμφωνα με την αρχή του Lagrangian θεωρώντας την ενυδατωμένη κατάσταση. [Inamuddin]

Κεφάλαιο 3ο: Συστήματα Ελέγχου για IPMC

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουν τα δύο σημαντικότερα συστήματα ελέγχου για το MEMS υλικό IPMC ενεργοποιητή, το PID και το MRAC.

3.1 PID έλεγχος

3.1.1 Εισαγωγή στον PID έλεγχο

Ο έλεγχος Proportional-Integral-Derivative (PID) είναι ο πιο κοινός αλγόριθμος ελέγχου που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία και έχει γίνει παγκοσμίως αποδεκτός στον βιομηχανικό έλεγχο. Η δημοτικότητα των ελεγκτών PID μπορεί να αποδοθεί εν μέρει στην ισχυρή τους απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας και εν μέρει στη λειτουργική τους απλότητα, η οποία επιτρέπει στους μηχανικούς να τους χειρίζονται με απλό και απλό τρόπο.

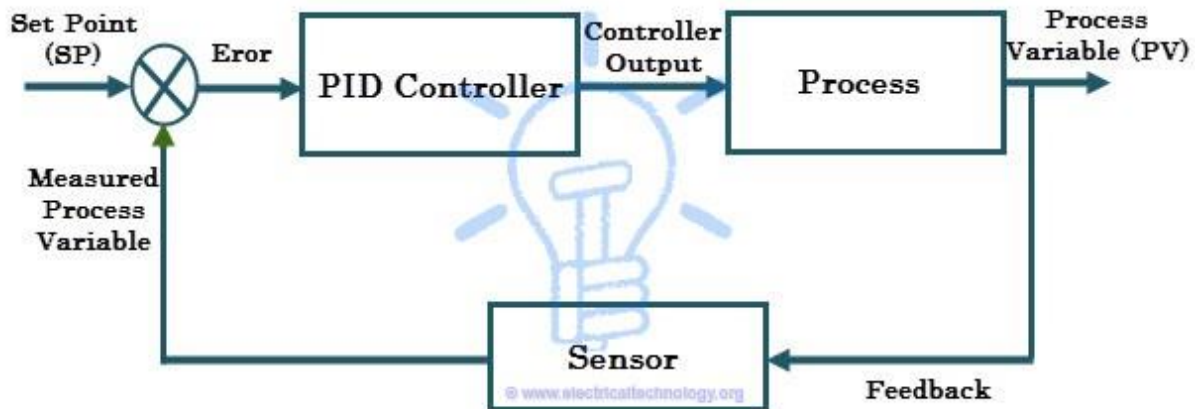
Όπως υποδηλώνει το όνομα, ο αλγόριθμος PID αποτελείται από τρεις βασικούς συντελεστές: proportional–integral–derivative, αναλογικό, ολοκληρωτικό και διαφορικό οι οποίοι αλλάζουν για να πετύχουμε τη βέλτιστη απόκριση. Τα συστήματα κλειστού βρόχου, η θεωρία του κλασικού PID και τα αποτελέσματα του συντονισμού ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου αναφέρονται σε αυτή την παράγραφο.

Η κεντρική ιδέα πίσω σε έναν ελεγκτή PID είναι να διαβάσει έναν αισθητήρα και στη συνέχεια να υπολογίζει την επιθυμητή έξοδο του ενεργοποιητή υπολογίζοντας τις αναλογικές, ολοκληρωτικές και διαφορικές αποκρίσεις και αθροίζοντας αυτά τα τρία για τον υπολογισμό της εξόδου.

Σε ένα τυπικό σύστημα ελέγχου, η μεταβλητή διεργασίας είναι η παράμετρος συστήματος που πρέπει να ελεγχθεί, όπως για παράδειγμα θερμοκρασία (°C). Ένας αισθητήρας χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της μεταβλητής διεργασίας και την παροχή ανατροφοδότησης στο σύστημα ελέγχου. Το σημείο ρύθμισης είναι η επιθυμητή τιμή ή τιμή εντολής για τη μεταβλητή διεργασία, όπως 80 °C στην περίπτωση συστήματος ελέγχου θερμοκρασίας. Σε κάθε δεδομένη στιγμή, η διαφορά μεταξύ της μεταβλητής διεργασίας και του σημείου ρύθμισης χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο του συστήματος ελέγχου (ένας αντισταθμιστής), για να προσδιοριστεί η επιθυμητή έξοδος ενεργοποιητή για την κίνηση του συστήματος.

Για παράδειγμα αν η μετρούμενη μεταβλητή της διαδικασίας θερμοκρασίας είναι 80 °C και το επιθυμητό σημείο ρύθμισης θερμοκρασίας είναι 100 °C, τότε η έξοδος του ενεργοποιητή που καθορίζεται από τον αλγόριθμο ελέγχου μπορεί να είναι η οδήγηση μιας θερμοαντλίας. Η εκκίνηση

ενός ενεργοποιητή για την ενεργοποίηση μιας θερμοαντλίας προκαλεί το σύστημα να γίνει θερμότερο και οδηγεί σε αύξηση της μεταβλητής της θερμοκρασίας. Αυτό ονομάζεται σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου, επειδή η διαδικασία διαβάσματος αισθητήρων για την παροχή σταθερής ανάδρασης και υπολογισμού της επιθυμητής εξόδου του ενεργοποιητή επαναλαμβάνεται συνεχώς και με σταθερό ρυθμό στο βρόχο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: PID – Αρχή λειτουργίας

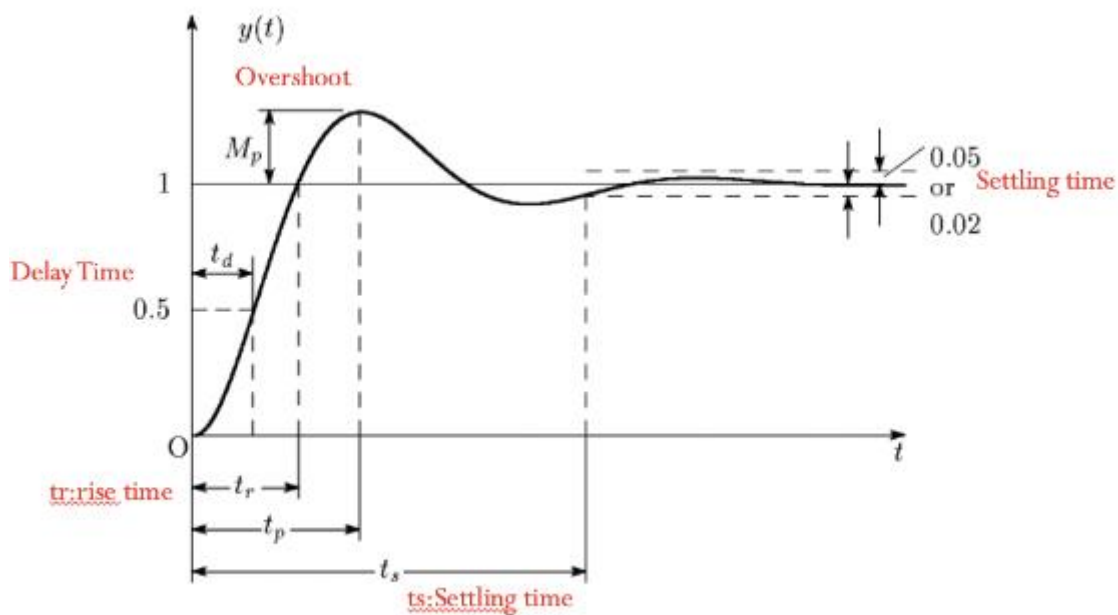
[<https://www.electricaltechnology.org/wp-content/uploads/2015/10/PID-controller-for-process-control.jpg>]

Σε πολλές περιπτώσεις, η έξοδος του ενεργοποιητή δεν είναι μόνο ένα σήμα που έχει επίδραση στο σύστημα. Για παράδειγμα σε έναν θάλαμο θερμοκρασίας μπορεί να υπάρχει μια πηγή ψυχρού αέρα που μερικές φορές φυσά μέσα στον θάλαμο και διαταράσσει τη θερμοκρασία. Ένας τέτοιος όρος αναφέρεται ως διαταραχή. Συνήθως προσπαθούμε να σχεδιάσουμε το σύστημα ελέγχου για να ελαχιστοποιήσουμε την επίδραση των διαταραχών στη μεταβλητή της διαδικασίας.

Η διαδικασία σχεδιασμού του ελέγχου ξεκινά με τον καθορισμό των απαιτήσεων για την απόδοση. Η απόδοση του συστήματος ελέγχου μετριέται συχνά εφαρμόζοντας μια βηματική συνάρτηση ως μεταβλητή εντολής για το σημείο ρύθμισης και στη συνέχεια μετρώντας την απόκριση της μεταβλητής διεργασίας. Συνήθως, η απόκριση ποσοτικοποιείται με μέτρηση καθορισμένων χαρακτηριστικών κυματομορφής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2. Έτσι έχουμε:

- Ο χρόνος ανόδου (Rise Time) είναι ο χρόνος που χρειάζεται το σύστημα για να μεταβεί από το 10% στο 90% της τιμής σταθερής κατάστασης ή τελικής.
- Ποσοστό υπέρβασης (Percent Overshoot) είναι η τιμή που η μεταβλητή διεργασίας υπερβαίνει την τελική τιμή, εκφραζόμενη ως ποσοστό της τελικής τιμής.

- Ο χρόνος καθίζησης (Settling Time) είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη μεταβλητή διεργασίας για να τακτοποιηθεί εντός ενός συγκεκριμένου ποσοστού (συνήθως 5%) της τελικής τιμής.
- Σφάλμα σταθερής κατάστασης (Steady-State Error) είναι η τελική διαφορά μεταξύ της μεταβλητής διεργασίας και του σημείου ρύθμισης.
- Χρόνος Καθυστερήσης (Delay Time) είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει στο 0.5



Εικόνα 3.2: Παράμετροι απόκρισης (βηματικής)

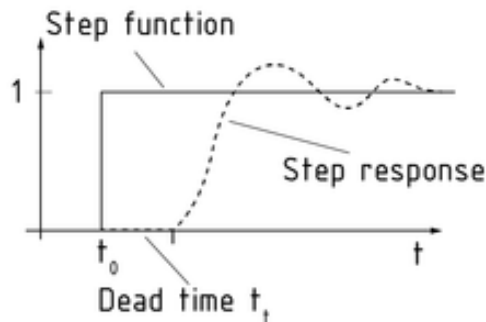
[<https://media.cheggcdn.com/media/205/20523c72-4acf-4252-af7a-3d251959b6db/phpcteUSt.png>]

Μετά τη χρήση κάποιων από αυτών των ποσοτήτων για τον καθορισμό των απαιτήσεων της απόδοσης για το σύστημα ελέγχου μας πρέπει να καθοριστούν και οι χειρότερες συνθήκες στις οποίες το σύστημα ελέγχου πρέπει να πληροί αυτές τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Πολλές φορές υπάρχει μια διαταραχή στο σύστημα που επηρεάζει τη μεταβλητή διεργασίας ή τη μέτρηση της μεταβλητής διεργασίας. Οπότε πρέπει να σχεδιαστεί ένα σύστημα ελέγχου που να αποδίδει ικανοποιητικά στις ακραίες-χειρότερες συνθήκες.

Το πόσο καλά μπορεί το σύστημα ελέγχου να ξεπεράσει τις επιπτώσεις των διαταραχών ονομάζεται ως η απόρριψη διαταραχών του συστήματος ελέγχου. Σε πολλές περιπτώσεις η απόκριση του συστήματος σε μια δεδομένη έξοδο ελέγχου μπορεί να αλλάξει με την πάροδο του χρόνου ή σε σχέση με κάποια μεταβλητή. Σε ένα μη γραμμικό σύστημα στο οποίο οι παράμετροι ελέγχου που δίνουν την επιθυμητή απόκριση σε ένα σημείο λειτουργίας ενδέχεται να μην πετυχαίνουν ικανοποιητική απόκριση σε ένα άλλο σημείο λειτουργίας. Για παράδειγμα έστω ότι σε ένα ψυγείο παρουσιάσει πολύ ταχύτερη απόκριση στην έξοδο του ψυκτήρα του (σωληνάκια) όταν είναι σχεδόν άδειος από ότι όταν είναι σχεδόν γεμάτος. Το μέτρο του πόσο καλά το σύστημα ελέγχου θα ανεχθεί τις διαταραχές και τις μη

γραμμικότητες αναφέρεται ως η *robustness* του συστήματος ελέγχου. Ορισμένα συστήματα παρουσιάζουν μια ανεπιθύμητη συμπεριφορά που ονομάζεται *deadtime*.

Deadtime είναι μια καθυστέρηση μεταξύ του πότε αλλάζει μια μεταβλητή διεργασίας και του πότε μπορεί να παρατηρηθεί αυτή η αλλαγή. Για παράδειγμα, εάν ένας αισθητήρας θερμοκρασίας τοποθετηθεί *μακριά* από μια βαλβίδα εισαγωγής υγρού ζεστού νερού, δεν θα μετρήσει αμέσως μια αλλαγή θερμοκρασίας εάν η βαλβίδα ανοίξει ή κλείσει.



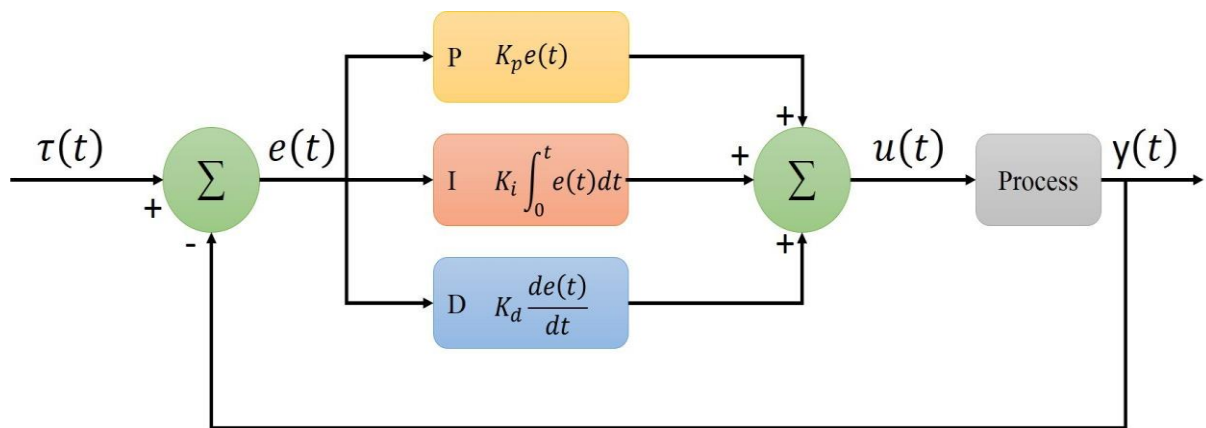
Εικόνα 3.3: Παράμετρος χρόνος αδράνειας απόκρισης (βηματικής)

[https://glossar.item24.com/fileadmin/_processed_/a/f/csm_X00009_2_04_29e89552a8.png]

Αυτό ο χρόνος αδράνειας μπορεί να προκληθεί από ένα σύστημα ή έναν ενεργοποιητή εξόδου που καθυστερεί να ανταποκριθεί στην εντολή ελέγχου. Για παράδειγμα μια βαλβίδα που αργεί να ανοίξει ή η καθυστέρηση που προκαλείται από τη ροή του υγρού μέσα στους σωλήνες.

Επιπλέον να τονισθεί ότι ο κύκλος βρόχου είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος ενός συστήματος κλειστού βρόχου. Το χρονικό διάστημα μεταξύ των κλήσεων σε έναν αλγόριθμο ελέγχου είναι ο χρόνος κύκλου βρόχου. Τα συστήματα που αλλάζουν γρήγορα ή έχουν πολύπλοκη συμπεριφορά απαιτούν ταχύτερους ρυθμούς βρόχου ελέγχου.

Το διάγραμμα ενός PID controller παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: PID controller

[<https://plcynergy.com/wp-content/uploads/2021/01/PID-controller.jpg>]

Η έξοδος του ελεγκτή PID σχηματίζεται από το άθροισμα τριών όρων, ενός όρου P (Proportional) αναλόγου του σφάλματος, ενός όρου I (Integral) αναλόγου του ολοκληρώματος του σφάλματος και ενός όρου D (Derivative) αναλόγου της παραγώγου του σφάλματος.

Proportional D

Η αναλογική συνιστώσα εξαρτάται μόνο από τη διαφορά μεταξύ του σημείου ρύθμισης και της μεταβλητής διεργασίας. Αυτή η διαφορά αναφέρεται και ως όρος Σφάλμα. Το αναλογικό κέρδος (K_d) καθορίζει τον λόγο της απόκρισης εξόδου προς το σήμα σφάλματος. Για παράδειγμα, εάν ο όρος σφάλματος έχει μέγεθος 20, ένα αναλογικό κέρδος 2 θα παρήγαγε μια αναλογική απόκριση 40.

Γενικά,

η αύξηση του αναλογικού κέρδους θα αυξήσει την ταχύτητα της απόκρισης του συστήματος ελέγχου.

Ωστόσο, εάν το αναλογικό κέρδος είναι πολύ μεγάλο, η μεταβλητή διεργασίας θα αρχίσει να *ταλαντώνεται*. Εάν το K_c αυξηθεί περαιτέρω, οι ταλαντώσεις θα γίνουν μεγαλύτερες και το σύστημα θα γίνει ασταθές και μπορεί ακόμη και να ταλαντωθεί εκτός ελέγχου.

Integral

Ο ολοκληρωτής αθροίζει τον όρο σφάλματος e με την πάροδο του χρόνου. Το αποτέλεσμα είναι ότι ακόμη και ένας μικρός όρος σφάλματος θα προκαλέσει την αργή αύξηση του ολοκληρωτή. Η ολοκληρωτική απόκριση θα αυξάνεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου εκτός εάν το σφάλμα είναι μηδέν, επομένως το αποτέλεσμα είναι να μηδενιστεί το σφάλμα σταθερής κατάστασης. Το σφάλμα

σταθερής κατάστασης είναι η τελική διαφορά μεταξύ της μεταβλητής διεργασίας και του σημείου ρύθμισης.

Derivative

Ο αναλογικός όρος προκαλεί μείωση της εξόδου εάν η μεταβλητή διεργασίας αυξάνεται γρήγορα. Η απόκριση της παραγώγου είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μεταβλητής διεργασίας. Αύξηση του χρόνου παραγώγου (K_p) η παράμετρος θα κάνει το σύστημα ελέγχου να αντιδρά πιο έντονα στις αλλαγές στον όρο σφάλματος και θα αυξήσει την ταχύτητα της συνολικής απόκρισης του συστήματος ελέγχου. Τα περισσότερα πρακτικά συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούν πολύ μικρό χρόνο παραγώγου (K_p) επειδή η απόκριση παραγώγου είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στο θόρυβο στο σήμα της μεταβλητής διεργασίας. Εάν το σήμα ανάδρασης του αισθητήρα είναι θορυβώδες ή εάν ο ρυθμός βρόχου ελέγχου είναι πολύ αργός, η απόκριση της παραγώγου μπορεί να κάνει το σύστημα ελέγχου ασταθές.

Τα κέρδη ενός ελεγκτή PID μπορούν να ληφθούν με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος. Σε αυτή τη μέθοδο, οι όροι I και D ορίζονται πρώτα στο μηδέν και το αναλογικό κέρδος αυξάνεται μέχρι να ταλαντωθεί η έξοδος του βρόχου. Καθώς κάποιος αυξάνει το αναλογικό κέρδος, το σύστημα γίνεται πιο γρήγορο, αλλά πρέπει να ληφθεί μέριμνα να μην γίνει το σύστημα ασταθές. Μόλις το P έχει ρυθμιστεί για να ληφθεί μια επιθυμητή γρήγορη απόκριση, ο ολοκληρωτικός όρος αυξάνεται για να σταματήσουν οι ταλαντώσεις. Ο ολοκληρωτικός όρος μειώνει το σφάλμα σταθερής κατάστασης, αλλά αυξάνει την υπέρβαση. Κάποια υπέρβαση είναι πάντα απαραίτητη για ένα γρήγορο σύστημα, ώστε να μπορεί να ανταποκρίνεται άμεσα στις αλλαγές. Ο όρος ολοκλήρωσης τροποποιείται για να επιτευχθεί ένα ελάχιστο σφάλμα σταθερής κατάστασης. Μόλις ρυθμιστεί το P και το I για να λάβουμε το επιθυμητό σύστημα γρήγορου ελέγχου με ελάχιστο σφάλμα σταθερής κατάστασης, ο όρος της παραγώγου αυξάνεται έως ότου ο βρόχος φτάσει αποδεκτά γρήγορα στο σημείο ρύθμισης. Η αύξηση του όρου παραγώγου μειώνει την υπέρβαση και αποδίδει υψηλότερο κέρδος με σταθερότητα, αλλά θα έκανε το σύστημα να είναι πολύ ευαίσθητο στο θόρυβο.

Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζεται η συσχέτιση των όρων

Πίνακας 3.1. Αλληλεξαρτήσεις των όρων του PID

Term	Response	Rise Time	Overshoot	Settling Time	S-S Error
Proportional		Decrease	Increase	Small Change	Decrease
Integral	(-)	Decrease	Increase	Increase	Eliminate
Derivative		Small Change	Decrease	Decrease	No Change

[<https://www.semanticscholar.org/paper/Simulation-and-Numerical-Analysis-and-Comparative-a-Scherlozer-Orsini/51d43f8345cf2a85dadbf9652acc18e38574f951>]

3.1.2 PID έλεγχο στα IPMCs

[<https://pubs.rsc.org/en/content/chapterhtml/2015/bk9781782620778-00354?isbn=978-1-78262-077-8&sercode=bk>]

Τα σύνθετα υλικά ιοντικών πολυμερών μετάλλων (IPMCs), ένας τύπος ηλεκτρενεργού πολυμερούς, κερδίζουν γρήγορα την προσοχή για χρήση σε πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των μαλακών ενεργοποιητών και αισθητήρων. Μερικά αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα των IPMC περιλαμβάνουν τη χαμηλή τάση οδήγησης (<5V) και την ικανότητα λειτουργίας σε υδάτινα περιβάλλοντα. Υπάρχουν, ωστόσο, μειονεκτήματα στους ενεργοποιητές IPMC, συμπεριλαμβανομένων των δυναμικών επιδράσεων, των επιδράσεων χαλάρωσης και των συμπεριφορών που μεταβάλλονται χρονικά. Αυτά οι επιδράσεις μπορούν να περιορίσουν την απόδοση των ενεργοποιητών που βασίζονται σε IPMC.

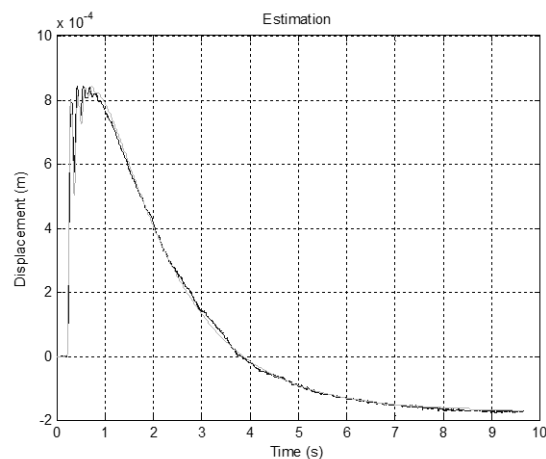
Στην εργασία του James D. Carrico και λοιπών [James D. Carrico] εστιάζουν σε προσεγγίσεις ελέγχου ανάδρασης και ανάδρασης για τον έλεγχο ακριβείας των ενεργοποιητών IPMC. Συγκεκριμένα, περιγράφεται ένας ελεγκτής τροφοδοσίας που βασίζεται σε μοντέλο για να αντισταθμίσει τα δυναμικές επιδράσεις. Ένας επαναλαμβανόμενος έλεγχος εισάγεται για την παρακολούθηση τροχιών περιόδου και περιγράφεται μια μέθοδος που εκμεταλλεύεται τμηματοποιημένα IPMC με ενσωματωμένο ελεγκτή ανάδρασης και ανάδρασης προς τα εμπρός για να μετριάσει τη συμπεριφορά χαλάρωσης προς τα πίσω.

Το σύνθετο υλικό ιοντικού πολυμερούς μετάλλου (IPMC) είναι μια κατηγορία ηλεκτροενεργών πολυμερών (EAPs) που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ενεργοποίησης και/ή ανίχνευσης. Αυτό το καινοτόμο ενεργό (έξυπνο) υλικό έχει πρόσφατα διερευνηθεί για εφαρμογές που περιλαμβάνουν βιοϊατρικές λαβίδες, τεχνητά ψάρια όπως προωθητές, ρομποτικοί χειριστές, βαλβίδες μικροαντλίας για συστήματα μικρορευστοποίησης και αισθητήρες σε προσθετικά συστήματα. Σε σύγκριση με συμβατικούς ενεργοποιητές με βάση μέταλλο ή κεραμικό, όπως κράματα μνήμης σχήματος και πιεζοηλεκτρικά κεραμικά, τα IPMC είναι ελαφριά, χαμηλής ισχύος, ανθεκτικά σε θραύση, και κατασκευάζονται και διαμορφώνονται εύκολα σε πολύπλοκα σχήματα. Επιπλέον, οι ιδιότητες των IPMC μπορούν να προσαρμοστούν για τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, καθιστώντας τα ελκυστικά για αναδυόμενες εφαρμογές στην μαλακή ρομποτική και τα βιοσυστήματα. Δυστυχώς, η συμπεριφορά των ενεργοποιητών IPMC εμφανίζει αρκετές ανεπιθύμητες επιδράσεις που περιλαμβάνουν χαλάρωση προς τα πίσω, επαγόμενους δομικούς κραδασμούς και χρονικά μεταβαλλόμενες μη γραμμικές συμπεριφορές. Χρειάζεται έλεγχος ακριβείας. Πρώτον, τα αποτελέσματα που προκαλούνται από κραδασμούς αντισταθμίζονται με τη χρήση μιας προσέγγισης τροφοδοσίας που βασίζεται σε μοντέλο που λαμβάνει υπόψη την εξαρτώμενη από τη συχνότητα συμπεριφορά εισόδου-εξόδου του IPMC. Στην προσέγγιση του συγγραφέα ένα αντίστροφο μοντέλο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό εισόδων τροφοδοσίας που παρακολουθούν με ακρίβεια μια επιθυμητή έξοδο τροχιά. Μια τέτοια προσέγγιση εκμεταλλεύεται το μοντέλο του συστήματος για την εύρεση των εισόδων του ελέγχου που

αντισταθμίζουν τα μειονεκτήματα στην απόδοση. Για εφαρμογές που απαιτούν παρακολούθηση μιας περιοδικής τροχιάς, όπως η κίνηση σάρωσης της ενεργής ενδοσκόπησης που βασίζεται σε IPMC, παρουσιάζεται μια προσέγγιση επαναληπτικού ελέγχου που βασίζεται σε ανάδραση. Αυτή η τεχνική ελέγχου που βασίζεται σε ανάδραση εκμεταλλεύεται τη διαδικασία επανάληψης για τοποθέτηση ακριβείας. Τέλος, για να μετριαστεί το φαινόμενο της οπίσθιας χαλάρωσης, περιγράφεται μια προσέγγιση ελέγχου master-slave και εφαρμόζεται σε IPMC με μοτίβο. Τα IPMC με μοτίβο δημιουργούνται με την προσεκτική απομόνωση μοτίβων ηλεκτροδίων στην επιφάνεια του σύνθετου πολυμερούς μετάλλου, όπου τμήματα του το σύνθετο μπορεί να λειτουργήσει ως ενεργοποιητής, ενώ άλλες περιοχές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση παραμόρφωσης και αποκρίσεων σε εξωτερική διέγερση.

Η μετατόπιση του άκρου των ενεργοποιητών IPMC περιλαμβάνει οπίσθια χαλάρωση, μη γραμμικότητες, δομικές δυναμικές επιδράσεις και χρονικά μεταβαλλόμενες συμπεριφορές, τα οποία καθιστούν την τοποθέτηση του υλικού δύσκολη. Έτσι, ο έλεγχος θέσης με υψηλή ακρίβεια των ενεργοποιητών IPMC είναι ιδιαίτερα επιθυμητός σε πολλές εφαρμογές που κυμαίνονται από ρομποτικούς χειριστές έως βιοϊατρικές συσκευές.

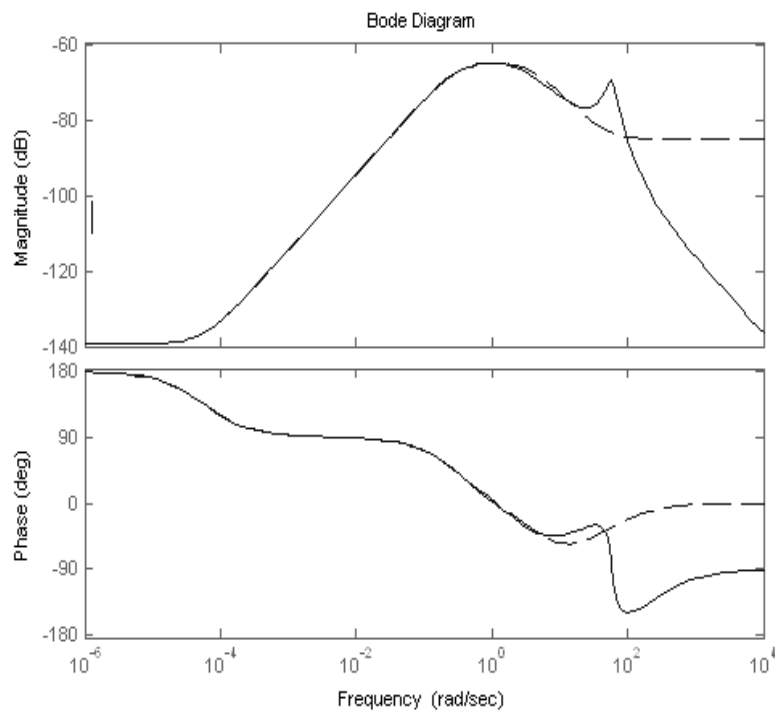
Στην εικόνα 3.5 παρουσιάζεται μια βηματική απόκριση ενός IPMC (2cm x 0.5cm) ενεργοποιητή και φαίνεται ότι υπάρχει μια σχετικά γρήγορη κίνηση προς τα εμπρός όταν εφαρμόζεται η τάση εισόδου, ακολουθούμενη από μια αργή περίοδο χαλάρωσης. Ωστόσο, η χαλάρωση δεν υπάρχει μόνο όταν υποβάλλεται σε εισόδους DC. Εφόσον το σήμα εισόδου έχει αρκετά χαμηλή περιεκτικότητα συχνότητας, θα ενεργοποιηθεί η οπίσθια χαλάρωση.



Εικόνα 3.5: Βηματική Απόκριση IPMC (2cmx0.5cm) ενεργοποιητή

Η σχέση χαλάρωσης και υγρασίας έχει μελετηθεί εκτενώς. Έχει αποδειχθεί ότι όταν λειτουργεί σε ένα όλο και πιο υγρό περιβάλλον, η ακαμψία του IPMC μειώνεται και το επίπεδο χαλάρωσης αυξάνεται, όπως και η αρχική κίνηση προς τα εμπρός [Nemat]. Αυτό σημαίνει ότι εάν ένα IPMC λειτουργούσε

στον αέρα και όχι στο νερό, η χαλάρωση θα μειωνόταν με την πάροδο του χρόνου, καθώς ο ενεργοποιητής αφυδατώνεται περισσότερο. Δυστυχώς, η κίνηση προς τα εμπρός θα μειωνόταν επίσης με την πάροδο του χρόνου, έως ότου τελικά ο ενεργοποιητής στεγνώσει εντελώς και δεν θα υπήρχε ουσιαστικά καμία κίνηση. Θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι υπάρχει ιδανική υγρασία, επιτυγχάνοντας μια ισορροπία μεταξύ της κίνησης προς τα εμπρός και της χαλάρωσης. Αυτό θα απαιτούσε, ωστόσο, ένα περιβάλλον ελεγχόμενης υγρασίας, το οποίο δεν είναι ρεαλιστικό για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές. Οι δυναμικές επιδράσεις αποκαλύπτονται εξετάζοντας μια απόκριση συχνότητας. Για παράδειγμα, ένα δείγμα απόκρισης συχνότητας IPMC δίνεται στην Εικόνα 3.6.



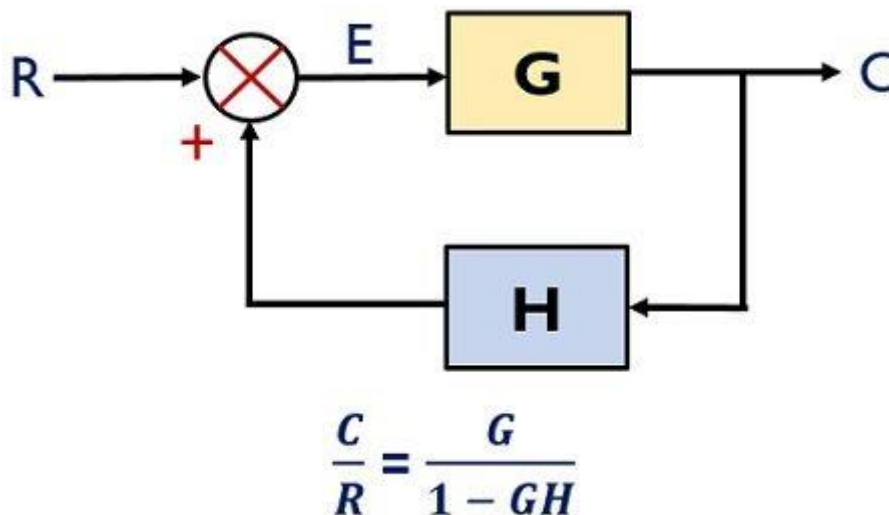
Εικόνα 3.6: Bode διάγραμμα του IPMC (2cm x 0.5cm) ενεργοποιητή

Σε ένα εύρος σχετικά υψηλής συχνότητας, το IPMC δείχνει μια τυπική απόκριση δεύτερης τάξης, συμπεριλαμβανομένου ενός συντονισμού, μετά τον οποίο το μέγεθος της εξόδου μειώνεται και η φάση παρουσιάζει μεγάλη μετατόπιση. Οι δυναμικές επιδράσεις απαιτούν κάποια μορφή ελέγχου για τις περισσότερες εφαρμογές. Η χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά και η μη επαναληψιμότητα των δυναμικών επιδράσεων και η εκ νέου χαλάρωση οδηγούν σε αποκλίσεις μεταξύ των αποκρίσεων IPMC στην ίδια είσοδο και καθιστούν την προσπάθεια ελέγχου κάπως πιο δύσκολη. Η κύρια πηγή μη γραμμικότητας σε ένα IPMC είναι η ηλεκτρική απόκριση. Το ρεύμα που διαρρέει τον ενεργοποιητή εξαρτάται μη γραμμικά από την τάση εισόδου. Για παράδειγμα, ακόμη και σε ένα εύρος σχετικά χαμηλής τάσης, το ρεύμα σταθερής κατάστασης του IPMC δείχνει μια πολύ μη γραμμική τάση. Αυτή η μη γραμμικότητα διαδίδεται μέσω της υπόλοιπης απόκρισης για την παραγωγή μη γραμμικών

μετατοπίσεων κορυφής. Η μη γραμμικότητα μπορεί επίσης να κάνει τη διαδικασία μοντελοποίησης πιο δύσκολη.

Η παρακολούθηση της κίνησης των ενεργοποιητών IPMC είναι σημαντική για τον έλεγχο ανάδρασης βάσει αισθητήρων, καθώς και για τη μοντελοποίηση του συστήματος. Οι μέθοδοι παρακολούθησης θέσης-κίνησης για IPMC μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: (1) με ενσωματωμένους ή (2) μη ενσωματωμένους αισθητήρες. Οι ενσωματωμένοι αισθητήρες είναι είτε μέρος του σύνθετου υλικού (αυτοανίχνευσης), μόνιμα προσαρτημένοι ή ενσωματωμένοι μέσα στο σύνθετο υλικό. Για παράδειγμα, η ικανότητα μηχανοηλεκτρικής μεταγωγής των υλικών IPMC μπορεί να αξιοποιηθεί για τη δημιουργία αισθητήρων που βασίζονται σε IPMC. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τη δημιουργία δύο απομονωμένων περιοχών του σύνθετου υλικού, μίας για ενεργοποίηση και μίας για ανίχνευση της παραμόρφωσης. Η προσέγγιση αυτοανίχνευσης είναι συμπαγής. Ωστόσο, οι κύριες προκλήσεις είναι να διασφαλιστεί ότι τα ηλεκτρόδια ενεργοποίησης και ανίχνευσης είναι σωστά απομονωμένα για να ξεπεραστούν προβλήματα τροφοδοσίας. Σε αυτή την περίπτωση, προτιμώνται οι αισθητήρες λεπτής μεμβράνης για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης του συνδεδεμένου αισθητήρα στη φυσική συμπεριφορά του ενεργοποιητή IPMC κατά την κανονική λειτουργία. Η τροφοδοσία μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης στα ηλεκτρόδια IPMC και του προσαρτημένου αισθητήρα μέσω του μονωτικού στρώματος πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά.

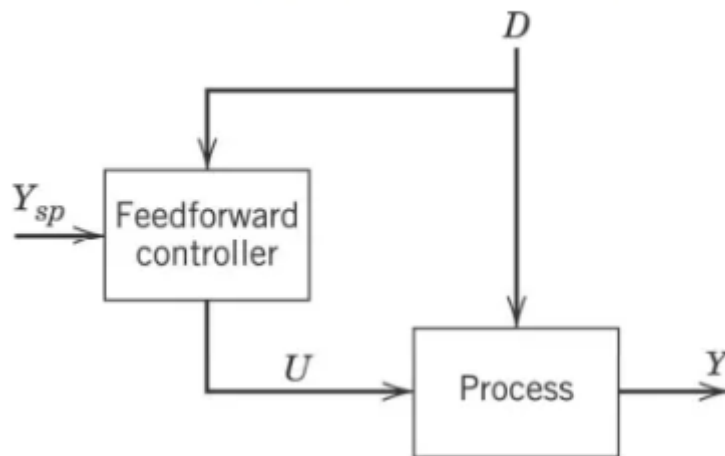
Έχουν προταθεί πολυάριθμες προσεγγίσεις για τον έλεγχο της συμπεριφοράς των IPMC. Οι τεχνικές ελέγχου εμπίπτουν σε δύο γενικές κατηγορίες: (1) έλεγχος feedback και (2) έλεγχος feedforward. Αυτά τα δύο σχήματα και ο συνδυασμός τους απεικονίζονται στις παρακάτω Εικόνες.



Εικόνα 3.7: Feedback control

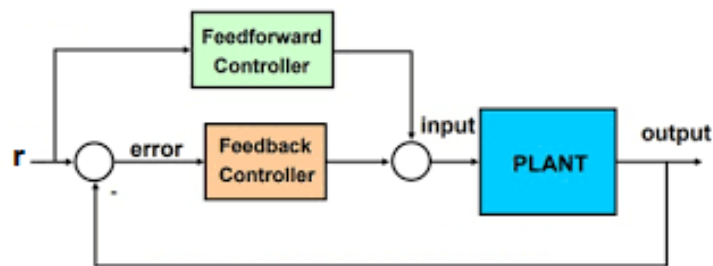
[<https://electronicscoach.com/feedback-system.html>]

Feedforward Control



Εικόνα 3.8: Feedforward control

[<https://instrumentationtools.com/feedforward-vs-feedback-control/>]



Εικόνα 3.9: Feedback και Feedforward control μαζί

Η βασική ιδέα του ελέγχου προώθησης τροφοδοσίας είναι η μέτρηση σημαντικών μεταβλητών διαταραχών και η λήψη διορθωτικών μέτρων προτού διαταράξουν τη διαδικασία.

Τα κύρια πλεονεκτήματά του feedback είναι τα εξής.

- Η διορθωτική ενέργεια πραγματοποιείται μόλις η ελεγχόμενη μεταβλητή αποκλίνει από το καθορισμένο σημείο, ανεξάρτητα από την πηγή και τον τύπο της διαταραχής.

- Ο έλεγχος ανάδρασης απαιτεί ελάχιστη γνώση σχετικά με τη διαδικασία που πρέπει να ελεγχθεί. Συγκεκριμένα, δεν απαιτείται μαθηματικό μοντέλο της διαδικασίας, αν και μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο για το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου.
- Ο ελεγκτής PID είναι και ευέλικτος και robust. Εάν αλλάξουν οι συνθήκες διεργασίας, ο επανασυντονισμός του ελεγκτή συνήθως παράγει ικανοποιητικό έλεγχο.

Ο έλεγχος ανατροφοδότησης έχει κάποια μειονεκτήματα:

- Οι μεταβλητές διαταραχής πρέπει να μετρώνται on-line. Σε πολλές εφαρμογές, αυτό δεν είναι εφικτό.
- Για να γίνει αποτελεσματική χρήση του ελέγχου προώθησης τροφοδοσίας, θα πρέπει να είναι διαθέσιμο τουλάχιστον ένα κατά προσέγγιση μοντέλο διαδικασίας.

Ο έλεγχος ανάδρασης, μια αντιδραστική προσέγγιση που απαιτεί ανάδραση με αισθητήρα, είναι η πιο ευρέως εφαρμοσμένη τεχνική για τις ιδιότητες απλότητας και στιβαρότητάς του. Οι παραδοσιακοί ελεγκτές PID και κατάστασης ανάδρασης βελτιώνουν τόσο τις μεταβατικές όσο και τις αποκρίσεις σταθερής κατάστασης. Πιο προηγμένες τεχνικές που βασίζονται στην ανάδραση περιλαμβάνουν τον προσαρμοστικό και ισχυρό έλεγχο, όπου ο πρώτος έχει σχεδιαστεί για να προσαρμόζεται στις παραλλαγές η συμπεριφορά του ενεργοποιητή με την πάροδο του. Ο έλεγχος ανάδρασης είναι συχνά περιορισμένος στο εύρος ζώνης και είναι δύσκολο να σταθεροποιηθεί για συστήματα χαμηλής ποιότητας. Σε αντίθεση με τον έλεγχο κλειστού βρόχου (ανάδραση), ο έλεγχος ανατροφοδότησης έχει εξεταστεί για τους ενεργοποιητές IPMC [Dewey]. Συγκεκριμένα, ο έλεγχος προώθησης τροφοδοσίας βάσει αναστροφής που χρησιμοποιεί ένα στατικό μοντέλο έχει εφαρμοστεί στους ενεργοποιητές IPMC. Ένας μη γραμμικός αντισταθμιστής τροφοδοσίας σε συνδυασμό με έναν ελεγκτή PID χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της καμπτικής κίνησης ενός ενεργοποιητή IPMC που κατασκευάστηκε με μια νέα προσέγγιση[Fang].

3.2 MRAC - Model Reference Adaptive Control έλεγχος

3.2.1 Εισαγωγή στον MRAC έλεγχο

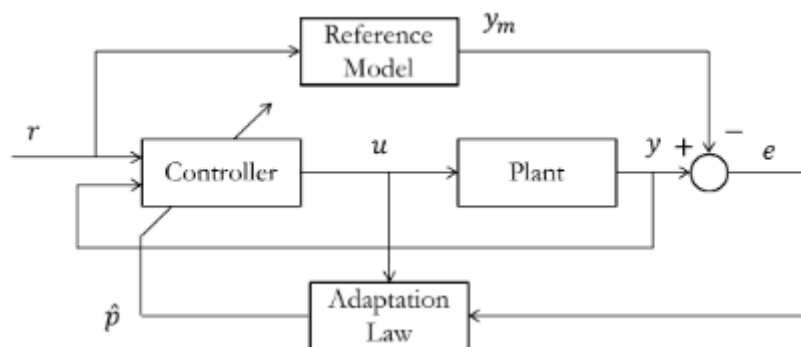
Το μπλοκ Προσαρμοστικού Ελέγχου Αναφοράς Μοντέλου υπολογίζει ενέργειες ελέγχου για να κάνει ένα αβέβαιο ελεγχόμενο σύστημα να παρακολουθεί τη συμπεριφορά ενός δεδομένου μοντέλου εγκατάστασης αναφοράς. Χρησιμοποιώντας αυτό το μπλοκ, μπορούμε να εφαρμόσουμε τους ακόλουθους αλγόριθμους προσαρμοστικού ελέγχου αναφοράς μοντέλου (MRAC).

- Απευθείας MRAC — Υπολογίζουμε τα κέρδη του ελεγκτή ανάδρασης και ανάδρασης με βάση το σφάλμα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο μεταξύ των καταστάσεων του μοντέλου εγκατάστασης αναφοράς και του ελεγχόμενου συστήματος.
- Έμμεσο MRAC — Υπολογίζουμε τις παραμέτρους του ελεγχόμενου συστήματος με βάση το σφάλμα παρακολούθησης μεταξύ των καταστάσεων του μοντέλου εγκατάστασης αναφοράς και του εκτιμώμενου συστήματος. Στη συνέχεια, εξάγουμε τα κέρδη του ελεγκτή ανάδρασης και ανάδρασης με βάση τις παραμέτρους του εκτιμώμενου συστήματος και του μοντέλου αναφοράς.

Τόσο το άμεσο όσο και το έμμεσο MRAC εκτιμούν επίσης ένα μοντέλο των εξωτερικών διαταραχών και της αβεβαιότητας στο σύστημα που ελέγχεται. Στη συνέχεια, ο ελεγκτής χρησιμοποιεί αυτό το μοντέλο για να αντισταθμίσει τις διαταραχές και την αβεβαιότητα κατά τον υπολογισμό των ενεργειών ελέγχου.

Και στις δύο περιπτώσεις, ο ελεγκτής ενημερώνει τις εκτιμώμενες παραμέτρους και το μοντέλο διαταραχών σε πραγματικό χρόνο με βάση το σφάλμα παρακολούθησης.

Ο προσαρμοζόμενος έλεγχος αναφοράς μοντέλου, ή MRAC, είναι μια δομή συστήματος ελέγχου στην οποία η επιθυμητή απόδοση ενός συστήματος ελάχιστης φάσης (σταθερά μηδενικά) εκφράζεται ως μοντέλο αναφοράς που δίνει την επιθυμητή απόκριση σε ένα σήμα εντολής. Το σήμα εντολής τροφοδοτείται τόσο στο μοντέλο όσο και στο πραγματικό σύστημα και ο ελεγκτής προσαρμόζει τα κέρδη έτσι ώστε τα σφάλματα εξόδου να ελαχιστοποιούνται και το πραγματικό σύστημα να ανταποκρίνεται όπως το σύστημα του μοντέλου (επιθυμητό). Δείχνουμε το μπλοκ διάγραμμα για αυτή τη δομή στην Εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10: Δομή του Model reference adaptive control [Black W.S.]

Το plant μοντέλο θεωρείται ότι είναι άγνωστο. Για γραμμικά μοντέλα το πλήθος των όρων των πόλων και των μηδενικών είναι γνωστό. Οι τιμές της εξόδου του y_m είναι οι επιθυμητές τιμές που πρέπει να έχει η έξοδος του plant, μέσω του μηχανισμού προσαρμογής.

Το μοντέλο αναφοράς πρέπει να ικανοποιεί δύο σημαντικά κριτήρια. Το πρώτο είναι να ικανοποιεί τις προδιαγραφές επίδοσης του plant και το δεύτερο η συμπεριφορά του να είναι προσαρμόσιμη από το σύστημα ελέγχου.

Ο ελεγκτής ο οποίος παραμετροποιείται από ένα πλήθος παραμέτρων θ (Adaptation Law). Ο ελεγκτής είναι υπεύθυνος για την συνεχή προσαρμογή του σήματος εισόδου του plant ώστε η έξοδος του να γίνει παρόμοια με αυτή του μοντέλου αναφοράς.

Αυτός είναι ο μηχανισμός προσαρμογής και ο σκοπός του είναι ο μηδενισμός του σφάλματος e , μέσω της ρύθμισης των παραμέτρων του ελεγκτή

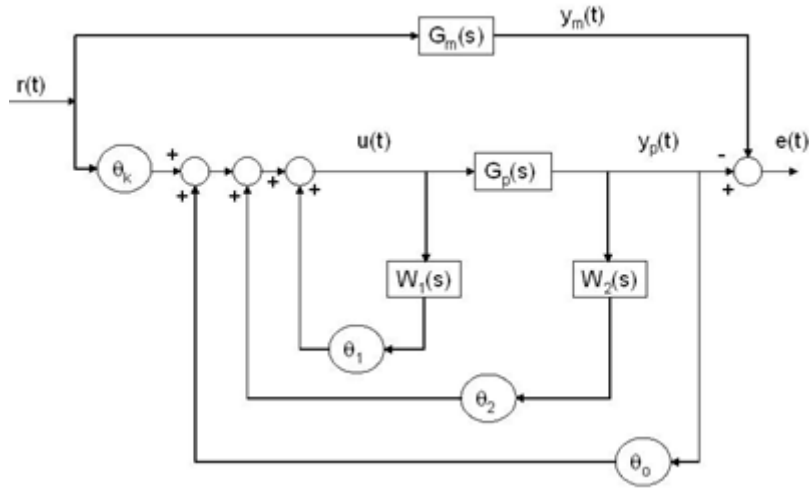
όπου $e(t) = y_p(t) - y_m(t)$

Είναι προφανές ότι η δυνατότητα ρύθμισης των παραμέτρων μέσω ελεγκτή καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας είναι και η κύρια διαφορά του MRAC με άλλα συστήματα ελέγχου όπου οι παράμετροι είναι σταθεροί.

3.2.2 MRAC έλεγχο στα IPMCs

Μια από τις πιο σημαντικές ερευνητικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την εφαρμογή του MRAC σε IPMC έγινε από τους [Brufau-Tsiakmakis].

Επειδή απόκριση των IPMC ως ενεργοποιητές είναι ακόμα πολύ απρόβλεπτη, δυναμική τους απόκριση εξακολουθεί να υπόκειται σε αρκετές κρίσιμες παραμέτρους που ποικίλλουν με το χρόνο και επομένως η εξαγωγή ενός ακριβούς και επαναλαμβανόμενου μοντέλου είναι πολύ δύσκολη. Η εργασία παρουσιάζει τον σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός προσαρμοστικού αποδοτικού συστήματος ελέγχου θέσης για έναν ενεργοποιητή IPMC που λειτουργεί σε υποβρύχιες συνθήκες. Το σύστημα ελέγχου είναι ένα μοντέλο προσαρμοστικού ελέγχου αναφοράς (MRAC) που βασίζεται σε ένα μοντέλο αναφοράς και μια προσαρμογή που ελέγχει μια λωρίδα IPMC μήκους $1 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm}$ που βασίζεται σε μια μεμβράνη Nafion 117 Na⁺. Ως μοντέλο αναφοράς χρησιμοποιείται ένα εμπειρικό μοντέλο δεύτερης τάξης του IPMC.



Εικόνα 3.11: Δομή του Model reference adaptive control [Brufau J.]

Η συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει με είσοδο το σήμα αναφοράς $r(t)$ και την έξοδο από το IPMC y_p προκύπτει:

$$\frac{y_p(s)}{r(s)} = \frac{\theta_k G_p(s)}{1 - W_1(s)\theta_1 - (W_2(s)\theta_2 + \theta_0)G_p(s)} \quad (\text{Εξ. 3.1})$$

το σύστημα είναι σταθερό όταν το σφάλμα e τείνει στο μηδέν, δηλαδή

$$\begin{aligned} e(t) &= y_p(t) - y_m(t) = \\ &= \left(\frac{\theta_k G_p(s)}{1 - W_1(s)\theta_1 - (W_2(s)\theta_2 + \theta_0)G_p(s)} - G_m(s) \right) * r(t) \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 3.2})$$

Κεφάλαιο 4ο: Αποτελέσματα Συστημάτων Ελέγχων

4.1 Μοντέλο για Έλεγχο

Για ένα συγκεκριμένο υλικό IPMC που έχει διαστάσεις 2cm x 0.5cm έχει βρεθεί πειραματικά σύμφωνα με τις εργασίες [Brufau-Tsiakmakis] να έχει συνάρτηση μεταφοράς 2^{ης} τάξης:

Hcs =

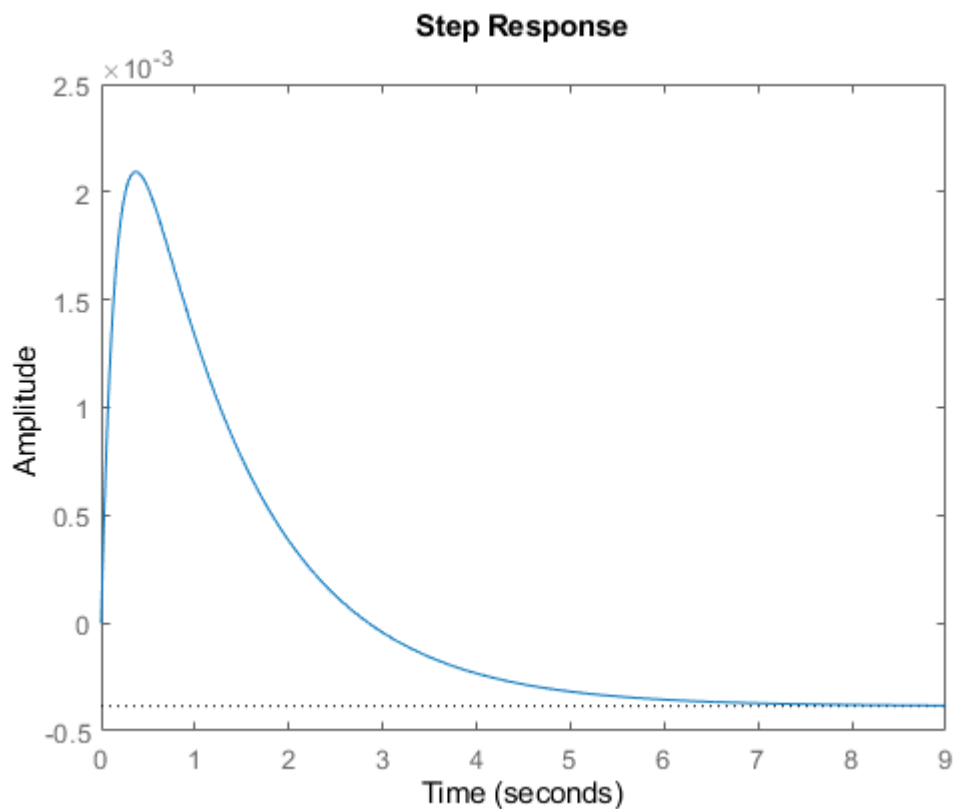
0.01747 s - 0.001844

s² + 6.718 s + 4.785

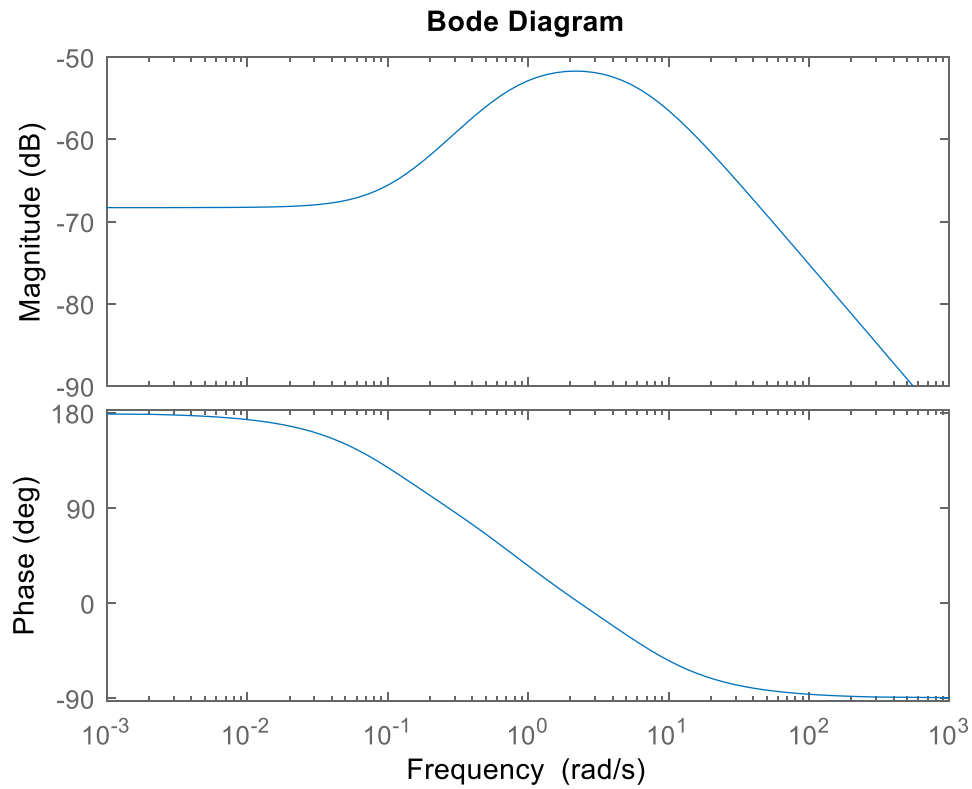
με

Numerator = [0 0.01747387 -0.0018435423];

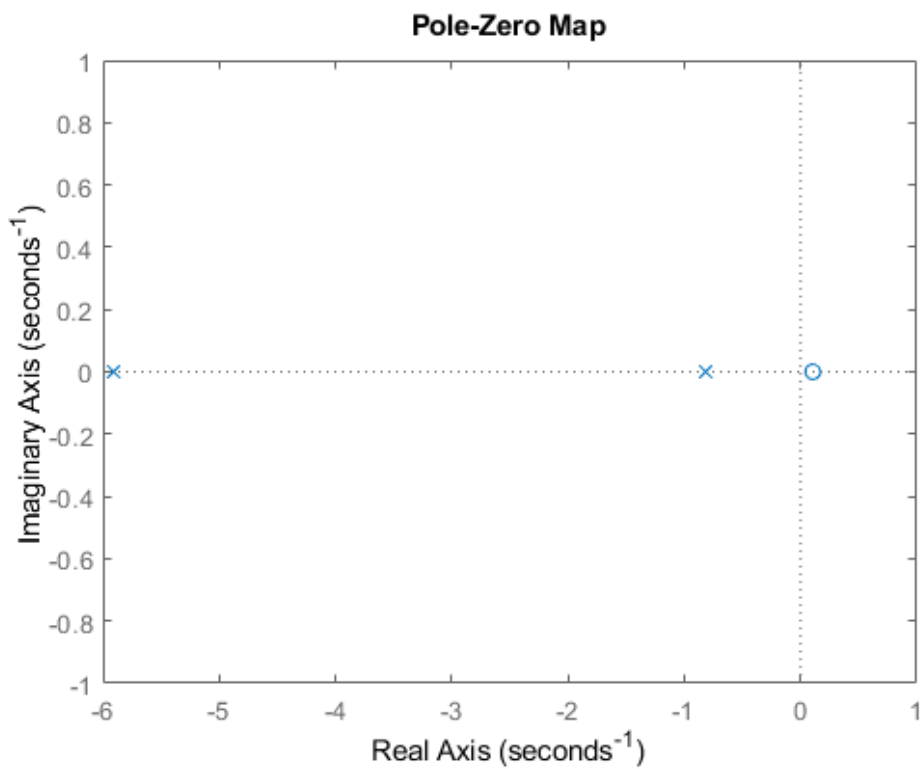
Denominator = [1 6.717634 4.78543];



Εικόνα 4.1: Βηματική Απόκριση του IPMC 2^{ης} τάξης



Εικόνα 4.2: Συχνοτικό Διάγραμμα του IPMC 2^{ης} τάξης



Εικόνα 4.3: Μηδενικά και Πόλοι του IPMC 2^{ης} τάξης

Στο z-domain με ρυθμό δειγματοληψίας 1kHz και χρόνο 0.001ms είναι:

```
Hdz = c2d(Hcs, 0.001)
num = Hdz.Numerator{1}
den = Hdz.Denominator{1}
```

με

Hdz =

$$\frac{1.741e-05 z - 1.742e-05}{z^2 - 1.993 z + 0.9933}$$

Αν απλοποιήσουμε το μοντέλο σε 1^ης τάξης με τη βοήθεια της balred προκύπτει:

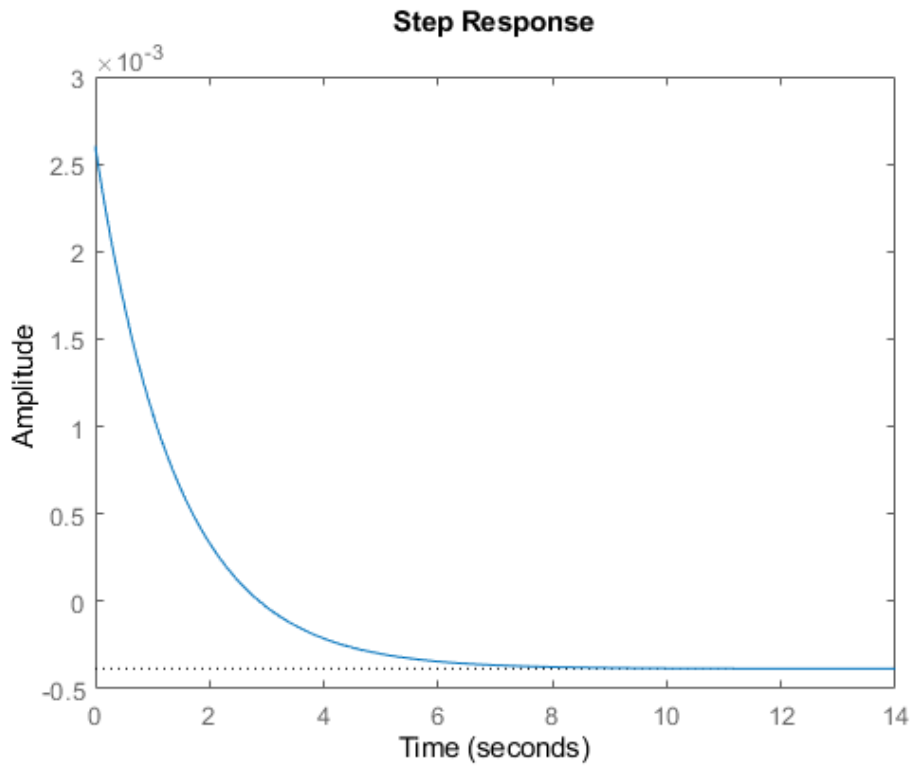
```
HcsReduction = balred(Hcs, 1)
stepplot(Hcs)
```

συνάρτηση μεταφοράς

HcsReduction =

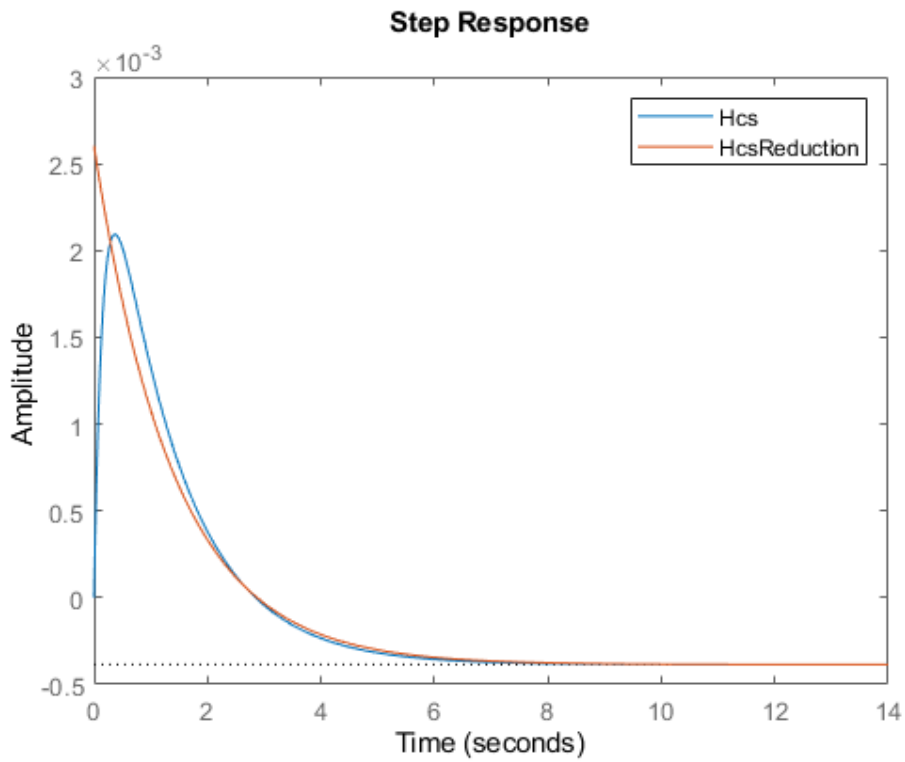
$$\frac{0.002604 s - 0.0002746}{s + 0.7127}$$

με βηματική απόκριση όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4.



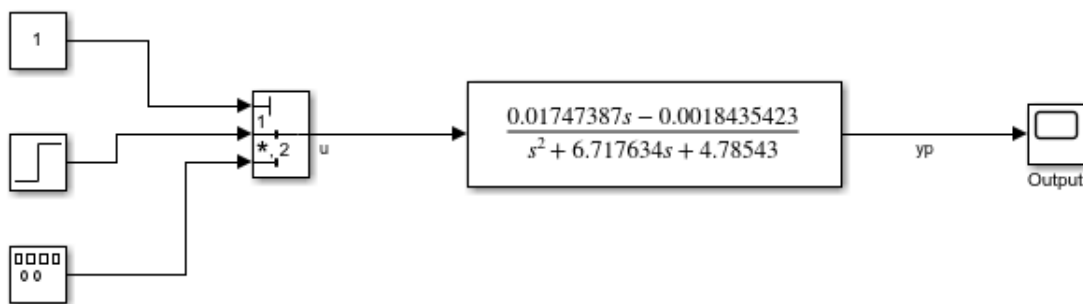
Εικόνα 4.4: Βηματική Απόκριση του IPMC 1^{ης} τάξης

Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ HcsReduction και Hcs, 1^{ης} και 2^{ης} τάξης.

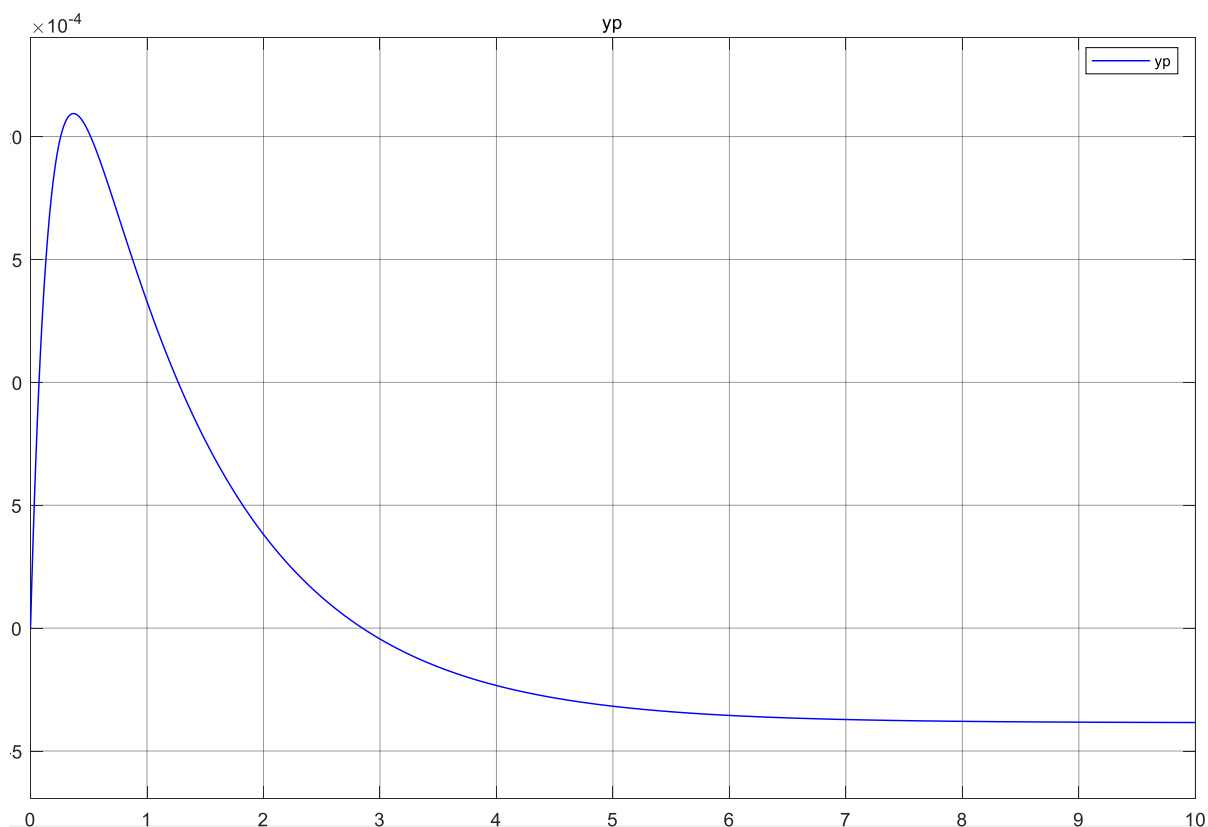


Εικόνα 4.5: Βηματική Απόκριση του IPMC 1^{ης} και 2^{ης} τάξης - Σύγκριση

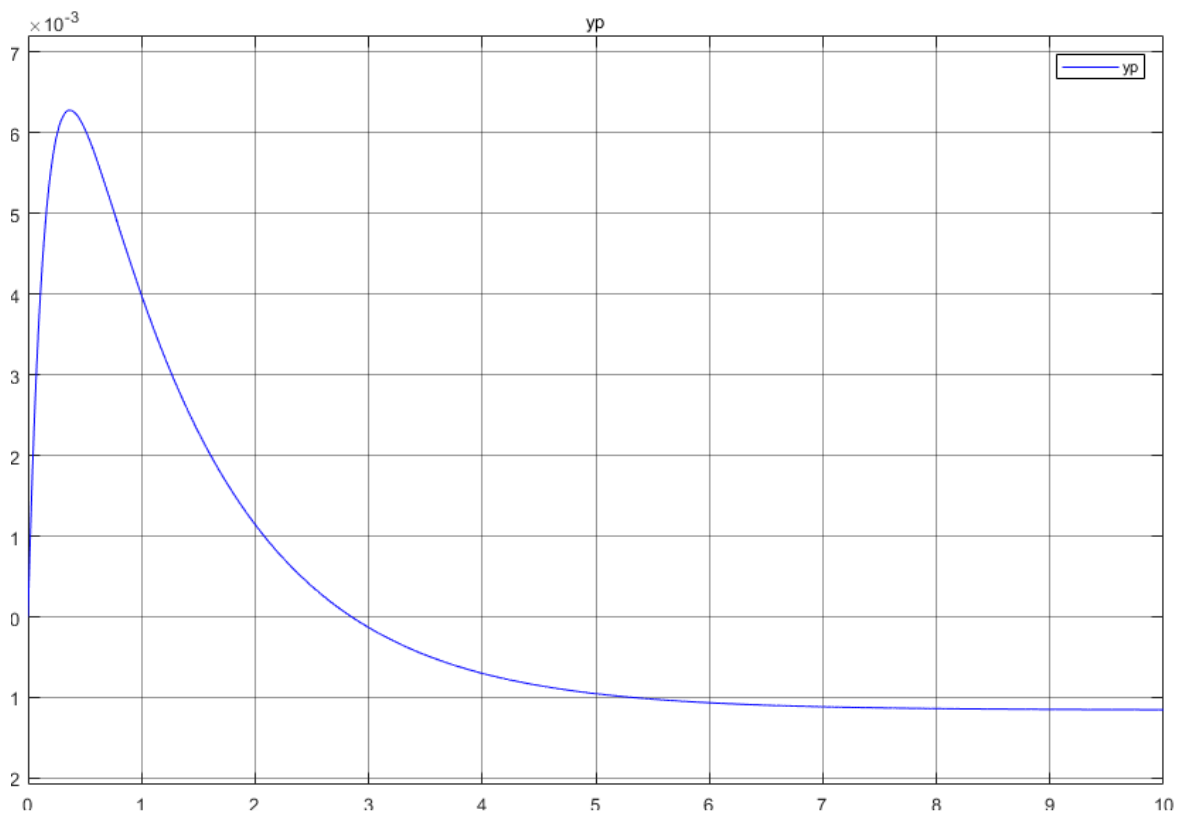
Φαίνεται ότι δεν μας εξυπηρετεί η 1^η τάξης λόγω ότι είναι διαφορετική από της 2^{ης} τάξης και δεν περιγράφει το σύστημα ικανοποιητικά αφού το IPMC cantilever είναι 2^{ης} τάξης και έχει και φυσική συχνότητα. Θα μπορούσε ένα 4^{ης} τάξης να το περιγράψει καλύτερα αλλά δεν θα μπορούσαμε να το εφαρμόσουμε στα συστήματα ελέγχου. Οι έρευνες έχουν δείξει ότι το 2^{ης} και 4^{ης} τάξης διαφέρουν ελάχιστα σε χαμηλές συχνότητες [Tsiakmakis]



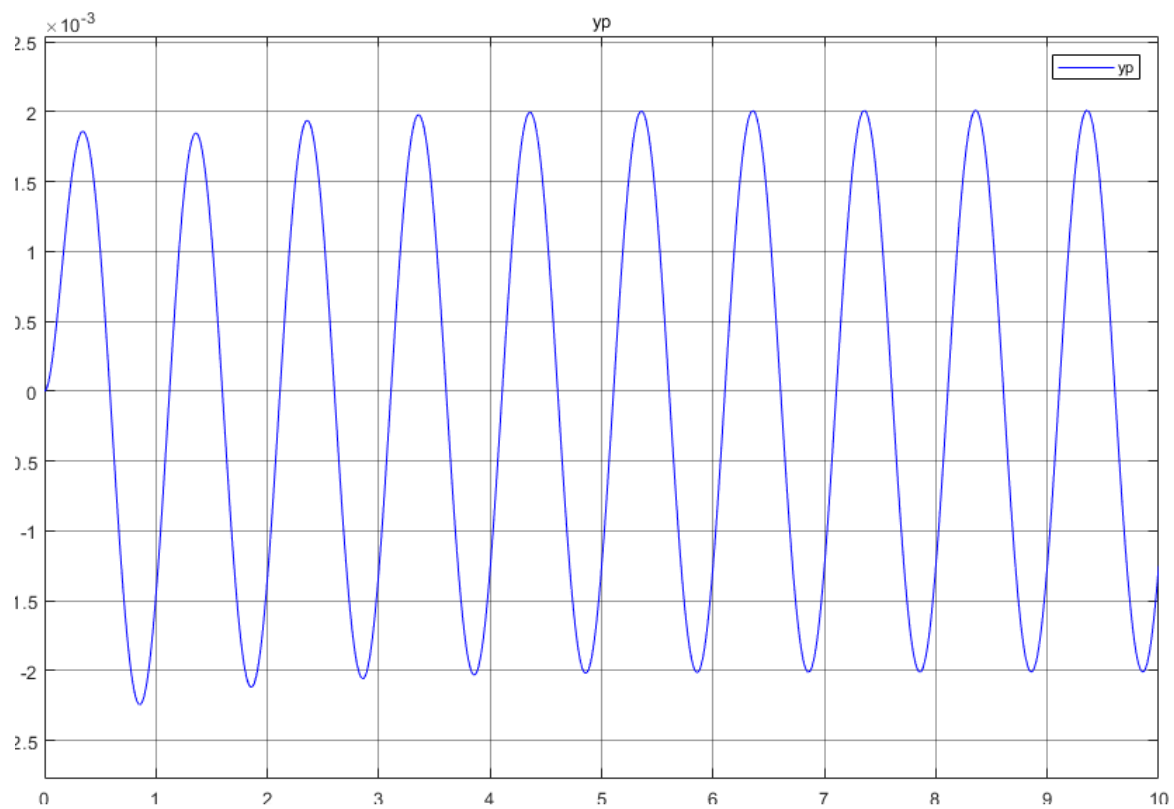
Εικόνα 4.6: Σχεδίαση στο Simulink για τη 2^{ης} τάξης συνάρτηση μεταφοράς του IPMC



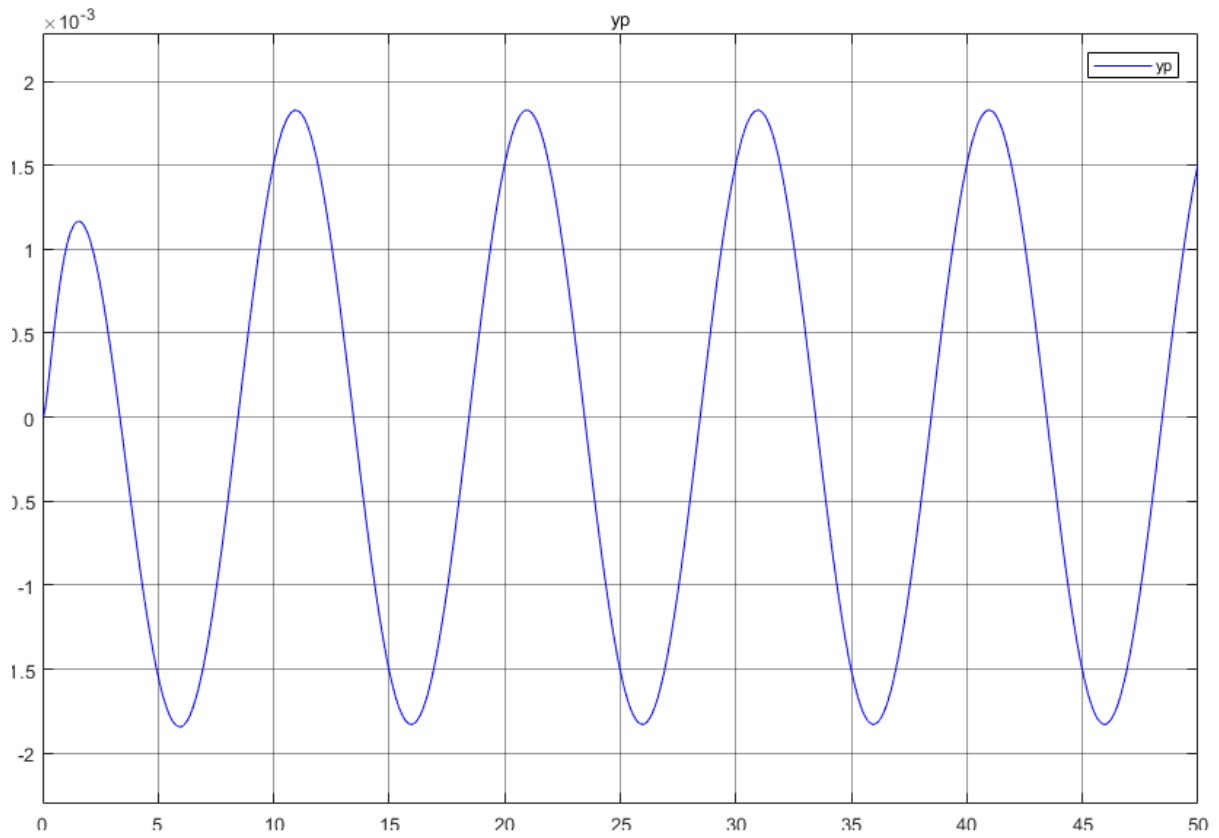
Εικόνα 4.7: Βηματική Απόκριση του IPMC 2^{ης}



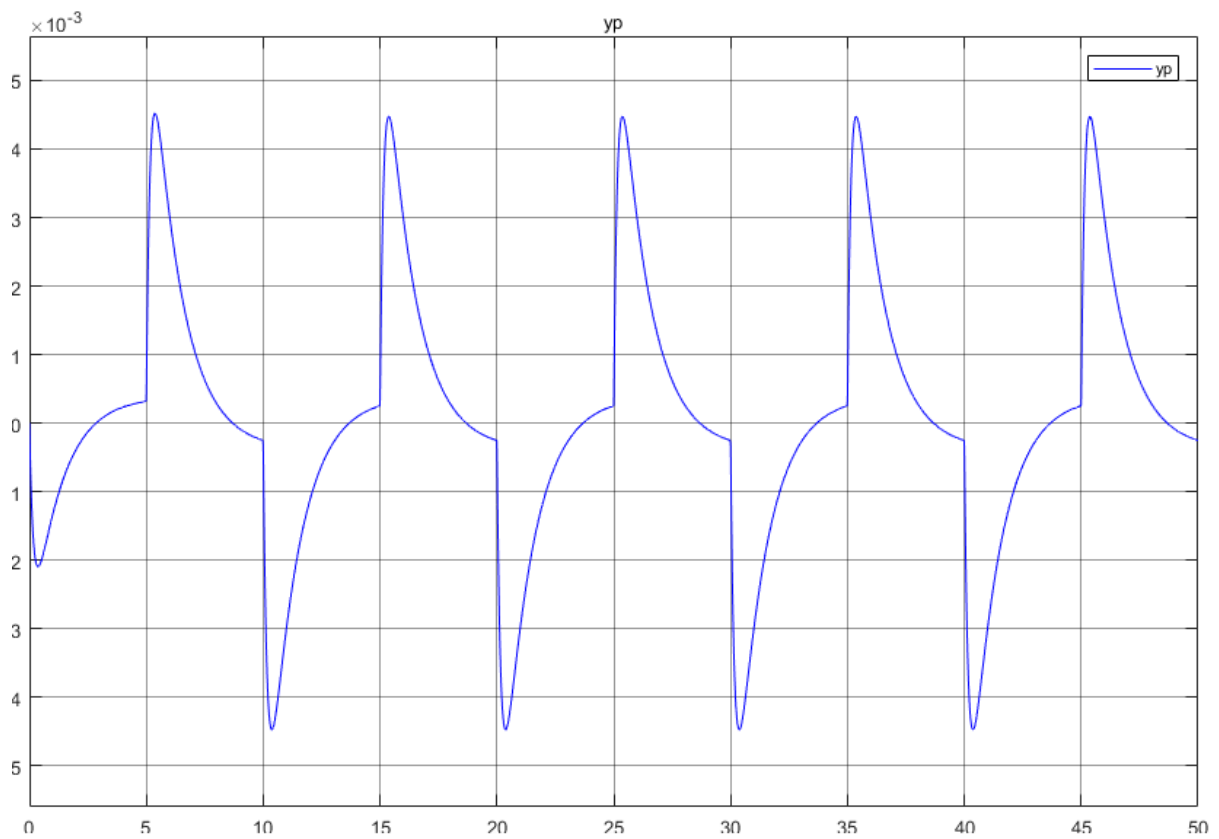
Εικόνα 4.8: Απόκριση του IPMC 2^{ης} τάξης με είσοδο 3V



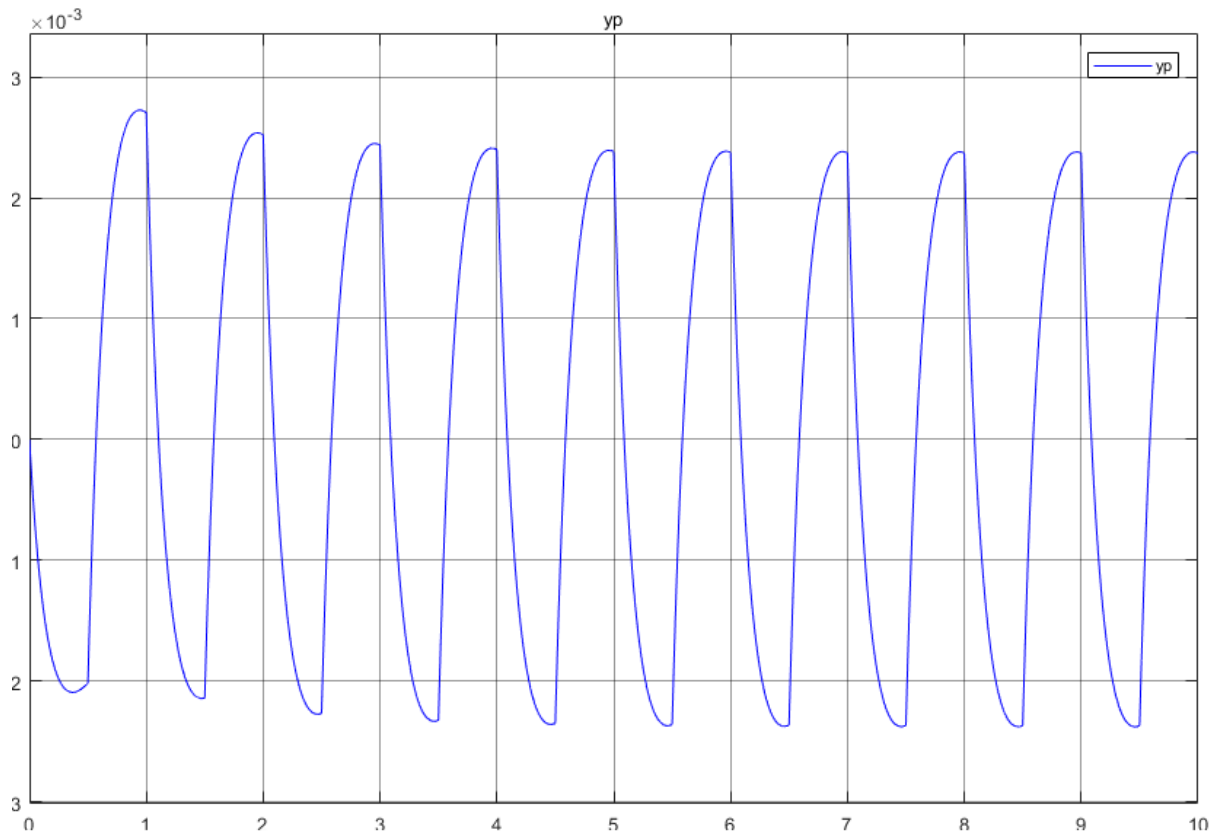
Εικόνα 4.9: Απόκριση του IPMC 2^{ης} τάξης με είσοδο sinus 1V 1Hz



Εικόνα 4.10: Απόκριση του IPMC 2^{ης} τάξης με είσοδο sinus 1V 0.1Hz

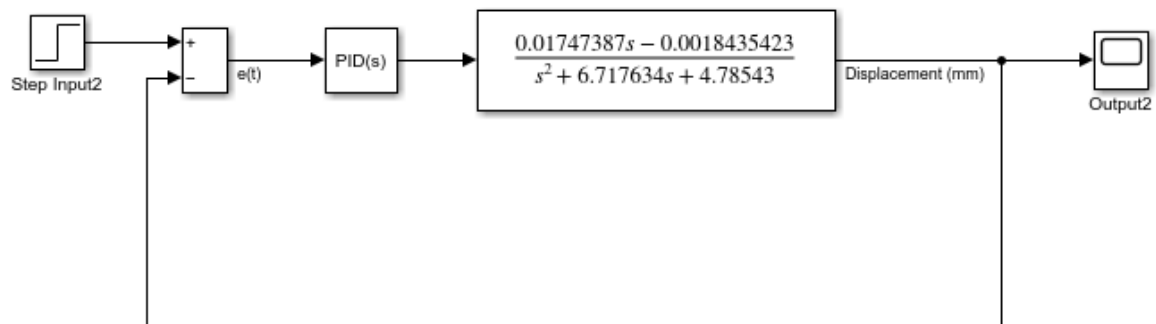


Εικόνα 4.11: Απόκριση του IPMC 2^{ης} τάξης με είσοδο square 1V 0.1Hz

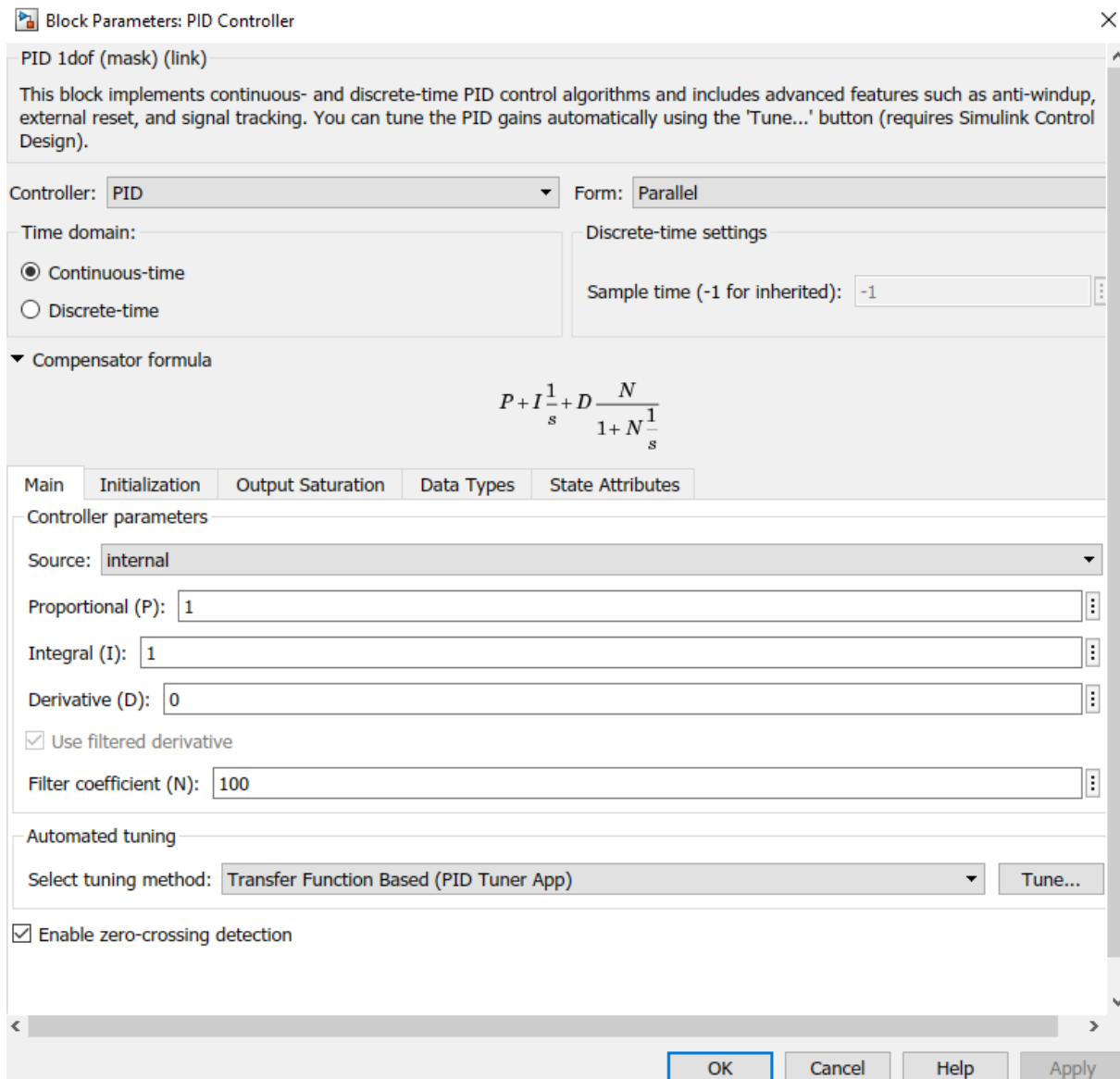


Εικόνα 4.12: Απόκριση του IPMC 2^{ης} τάξης με είσοδο square 1V 1Hz

4.2 PID και IPMC



Εικόνα 4.13 Εφαρμογή PID στο IPMC - Simulink



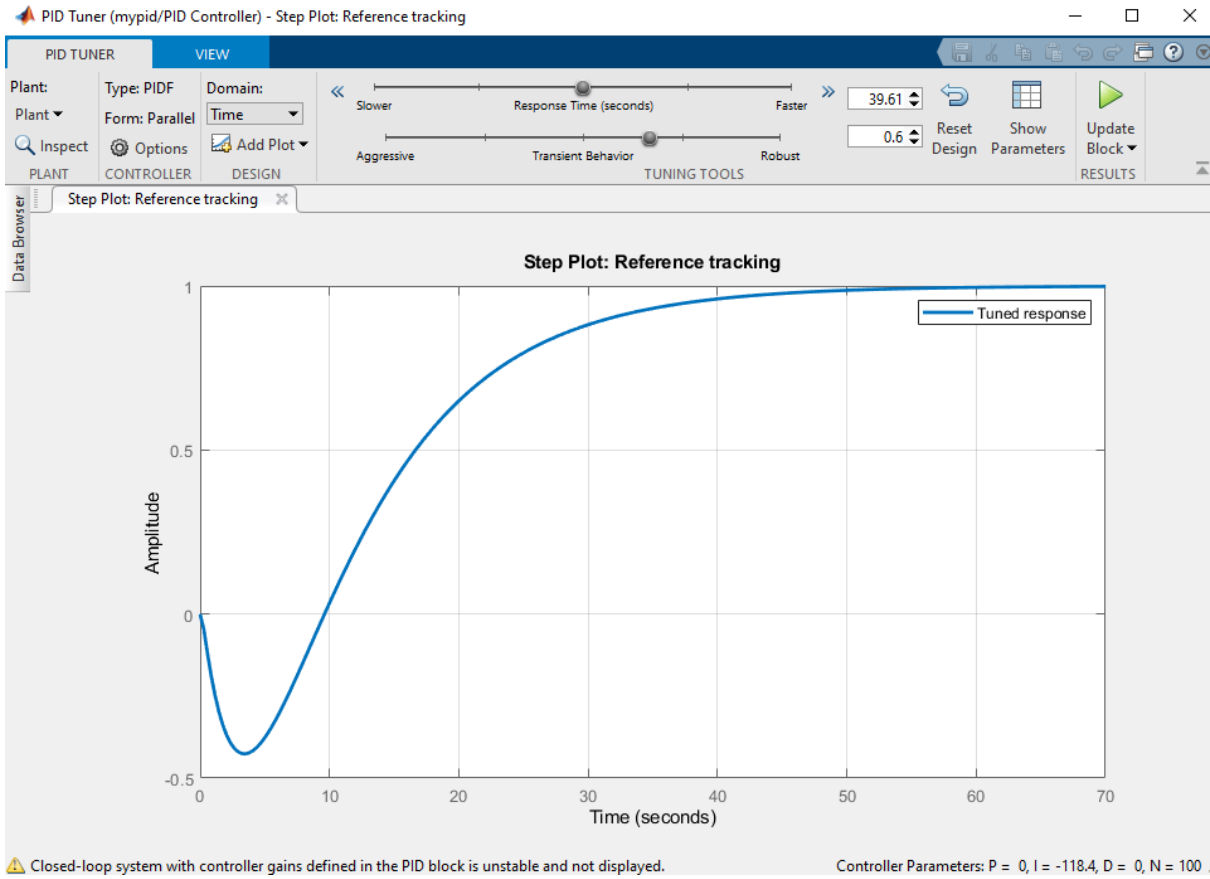
Εικόνα 4.14 Ρύθμιση των όρων P-I-D

Η ρύθμιση των όρων P-I-D είναι τυχαία και μπορεί κάποιος να τοποθετήσει τιμές για να δει το αποτέλεσμα στο και κατά πόσο τον ικανοποιεί ο τελικός έλεγχος.

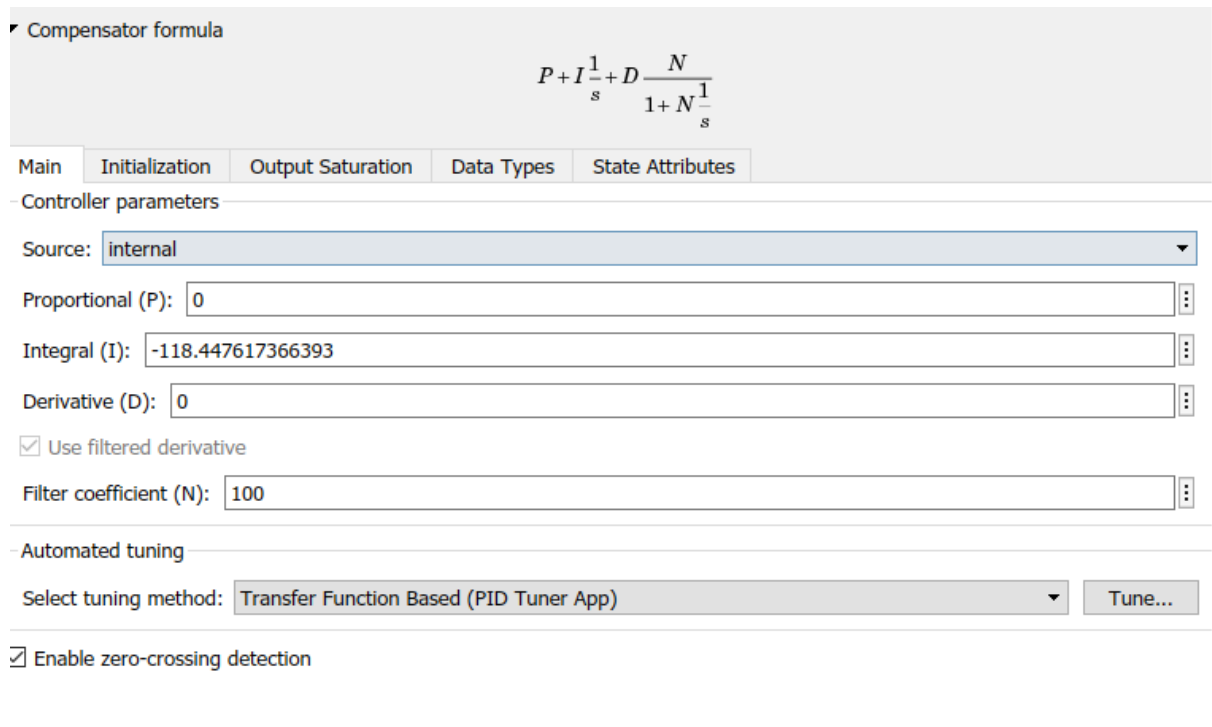
Σκοπός μας με το PID είναι να φέρουμε τη θέση του IPMC σε μια σταθερή θέση και να παραμείνει σταθερά εκεί κατά τη διάρκεια του χρόνου.

Η Matlab μέσω του αυτόματου PID εξαρτήματος που έχει και την επιλογή Tune που φαίνεται στην Εικόνα 4.14 μπορεί να μας δώσει τις τιμές των P-I-D ώστε να έχουμε το καλύτερο αποτέλεσμα.

Μάλιστα μπορούμε να αλλάξουμε το εύρος των Response Time και Transient Behavior για να το κάνουμε πιο γρήγορο ή πιο σταθερό

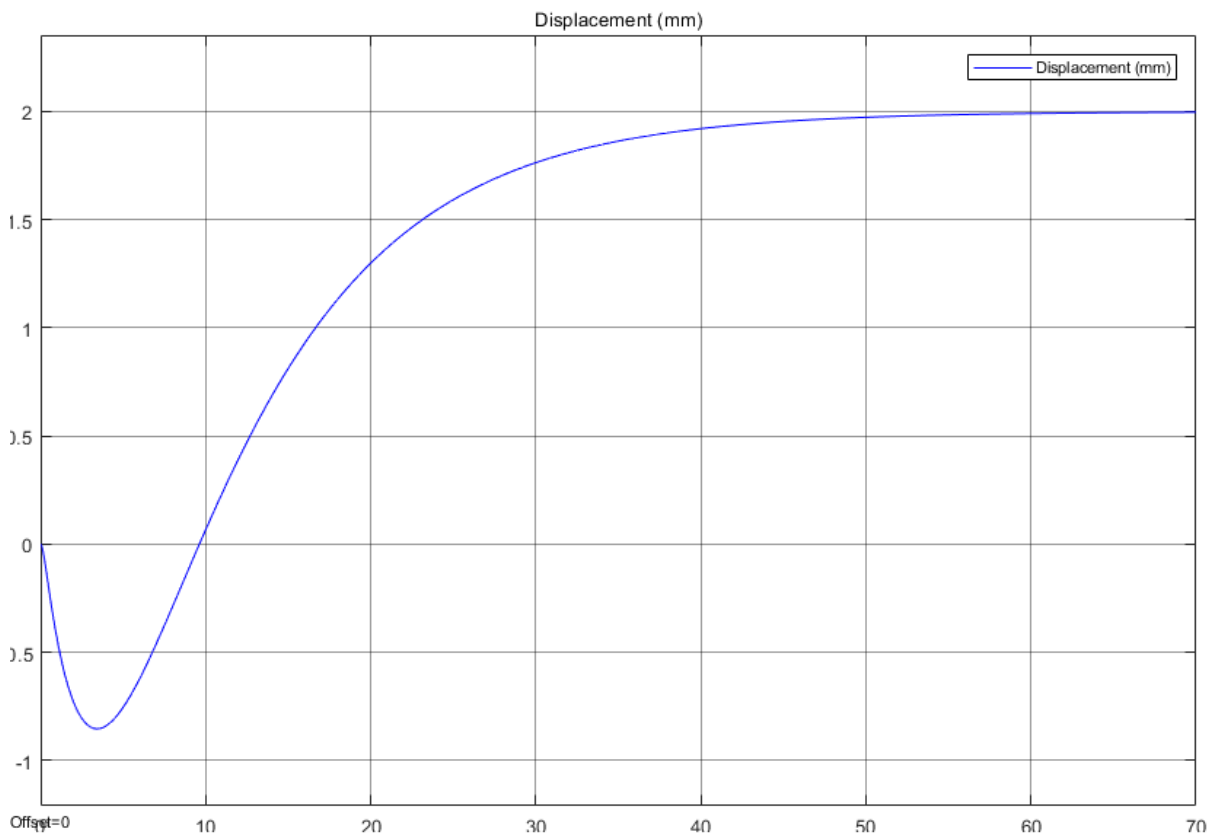


Εικόνα 4.15 Αυτόματη εύρεση και ρύθμιση των παραμέτρων P-I-D



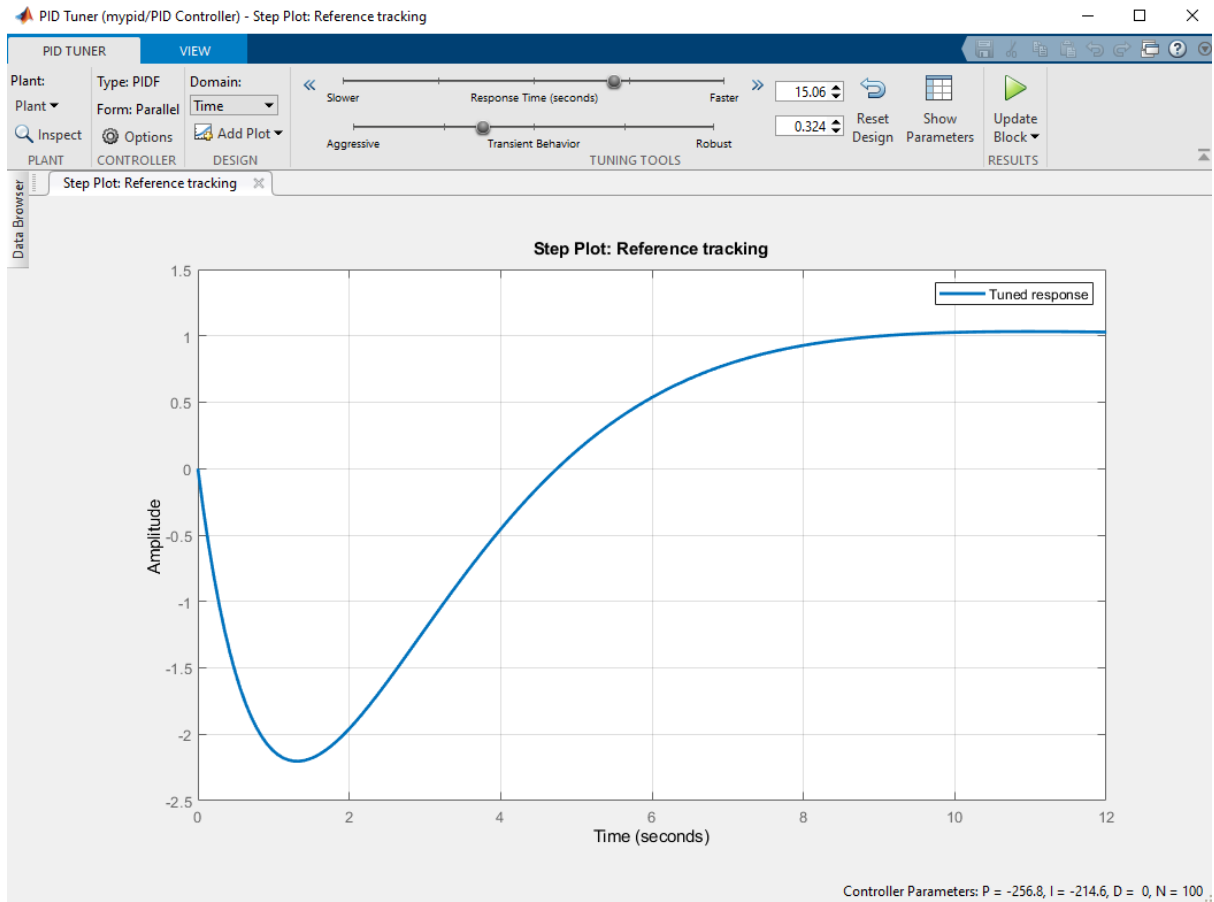
Εικόνα 4.16 Ανανέωση τιμών P-I-D με το Update Block

Με το πάτημα του Update Block μπορούμε να φέρουμε στο μπροστινό panel τις τιμές P-I-D.

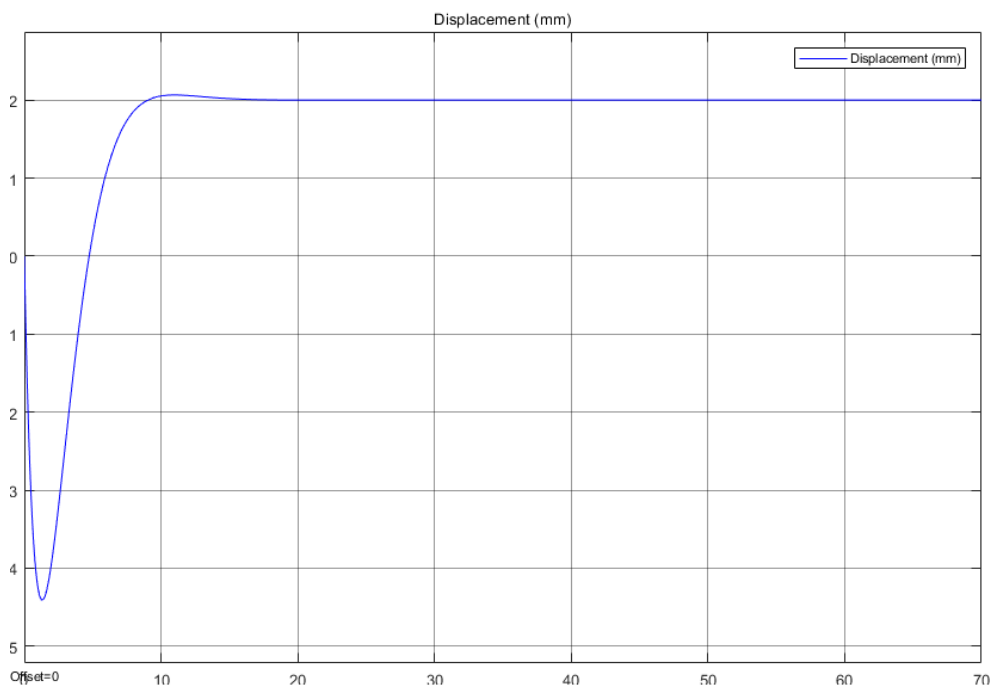


Εικόνα 4.17 Βηματική απόκριση μετά το Tune

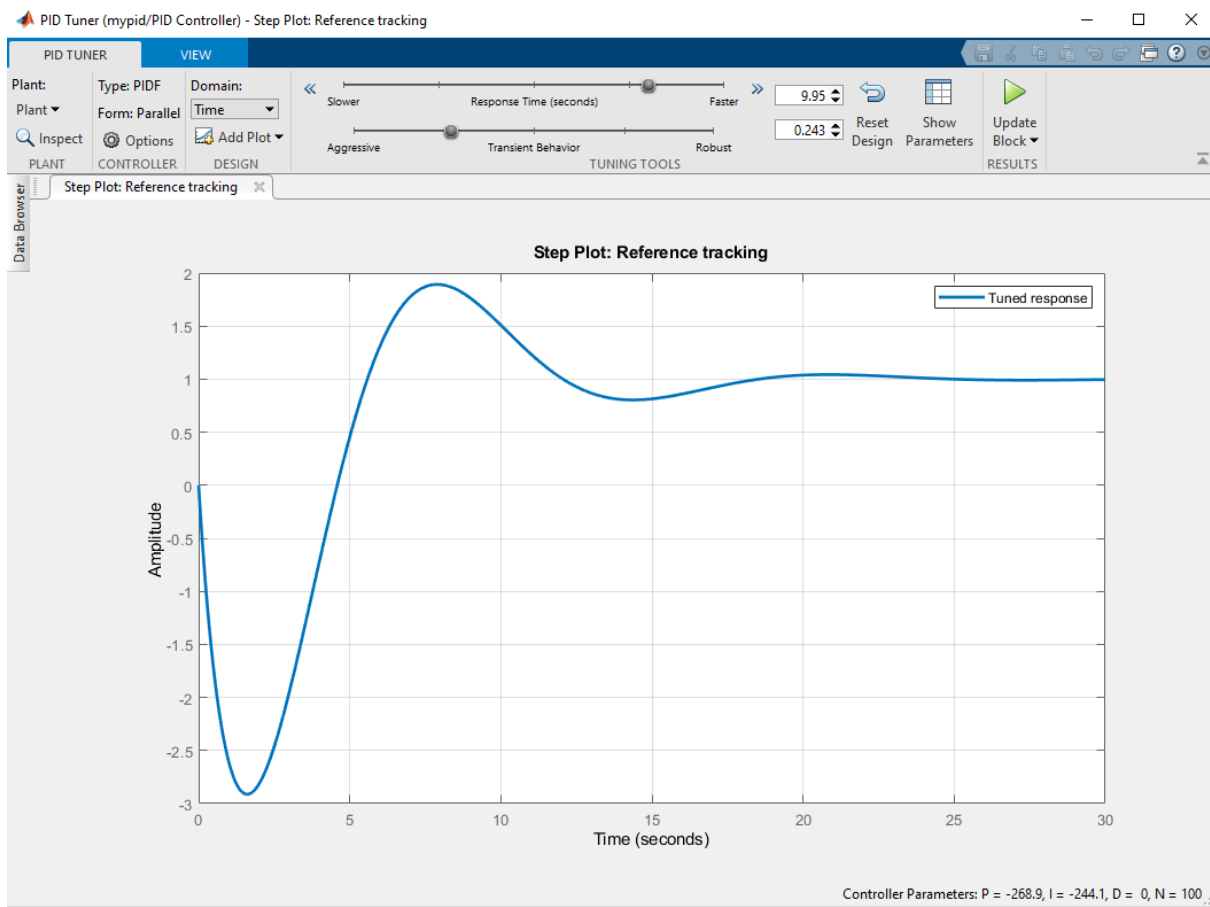
Αν αλλάξω το Response Time για πιο γρήγορη απόκριση λαμβάνουμε το αποτέλεσμα της Εικόνας 4.18.



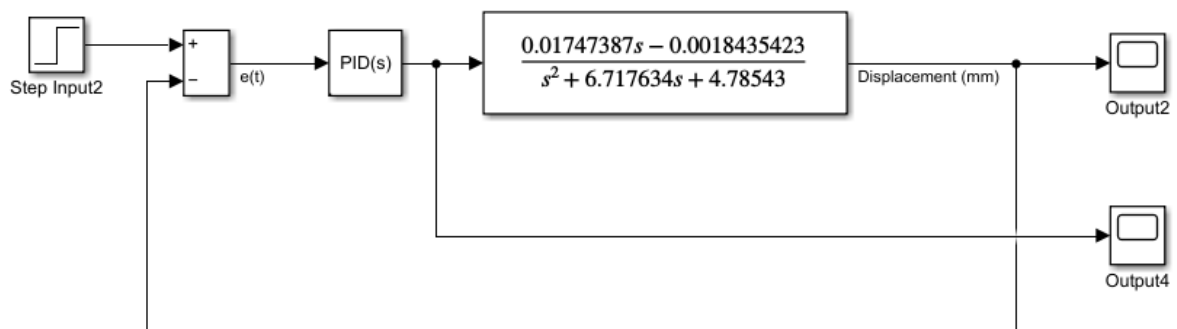
Εικόνα 4.18 Ρύθμιση για πιο γρήγορη απόκριση



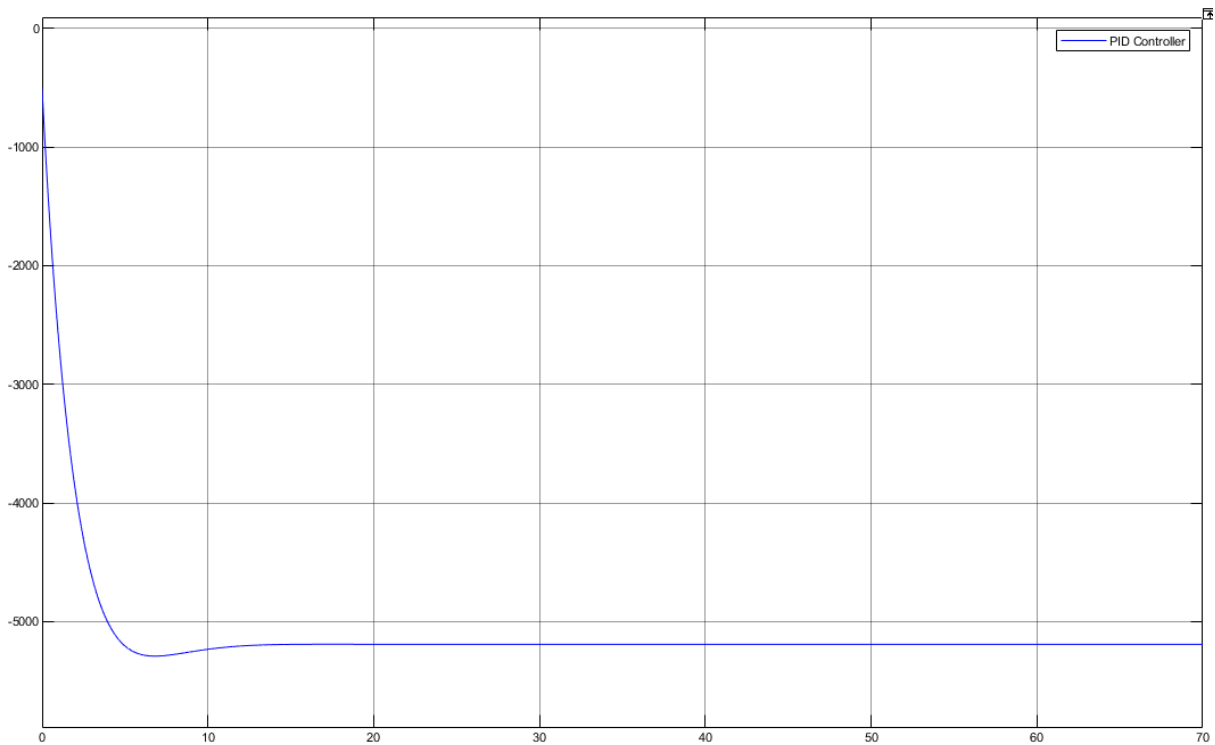
Εικόνα 4.19 Ρύθμιση για πιο γρήγορη απόκριση – Βηματική απόκριση



Εικόνα 4.20 Ρύθμιση για πιο γρήγορη απόκριση και λιγότερο σταθερή

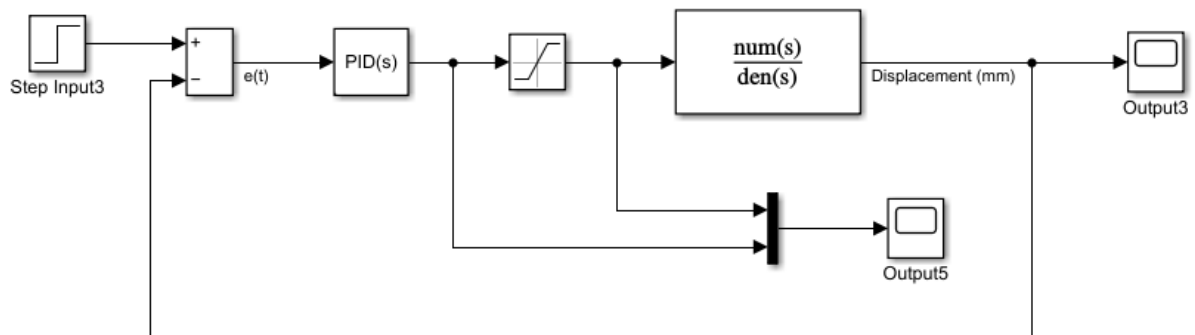


Εικόνα 4.21 Εφαρμογή PID στο IPMC – Είσοδος στο IPMC - Simulink

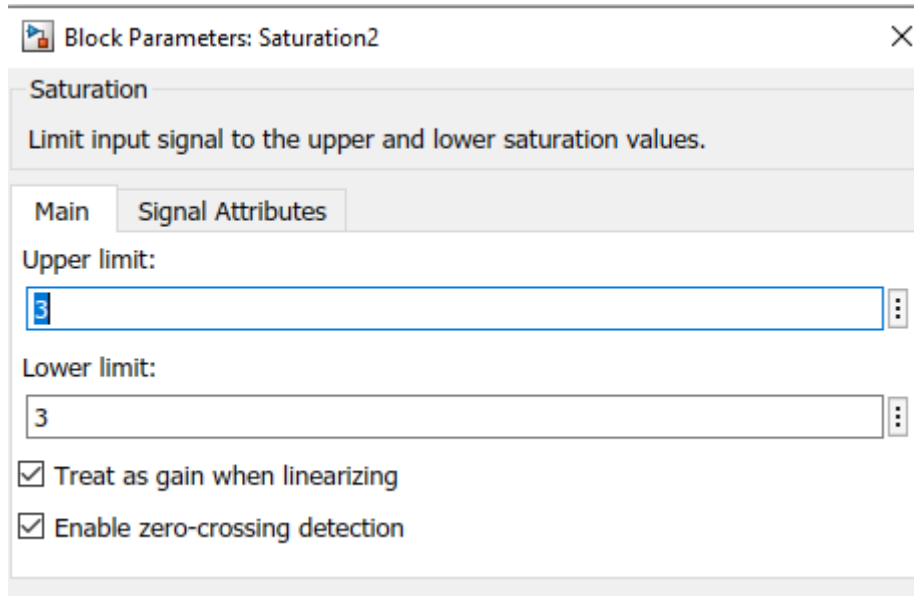


Εικόνα 4.22 Η τάση στην είσοδο του IPMC

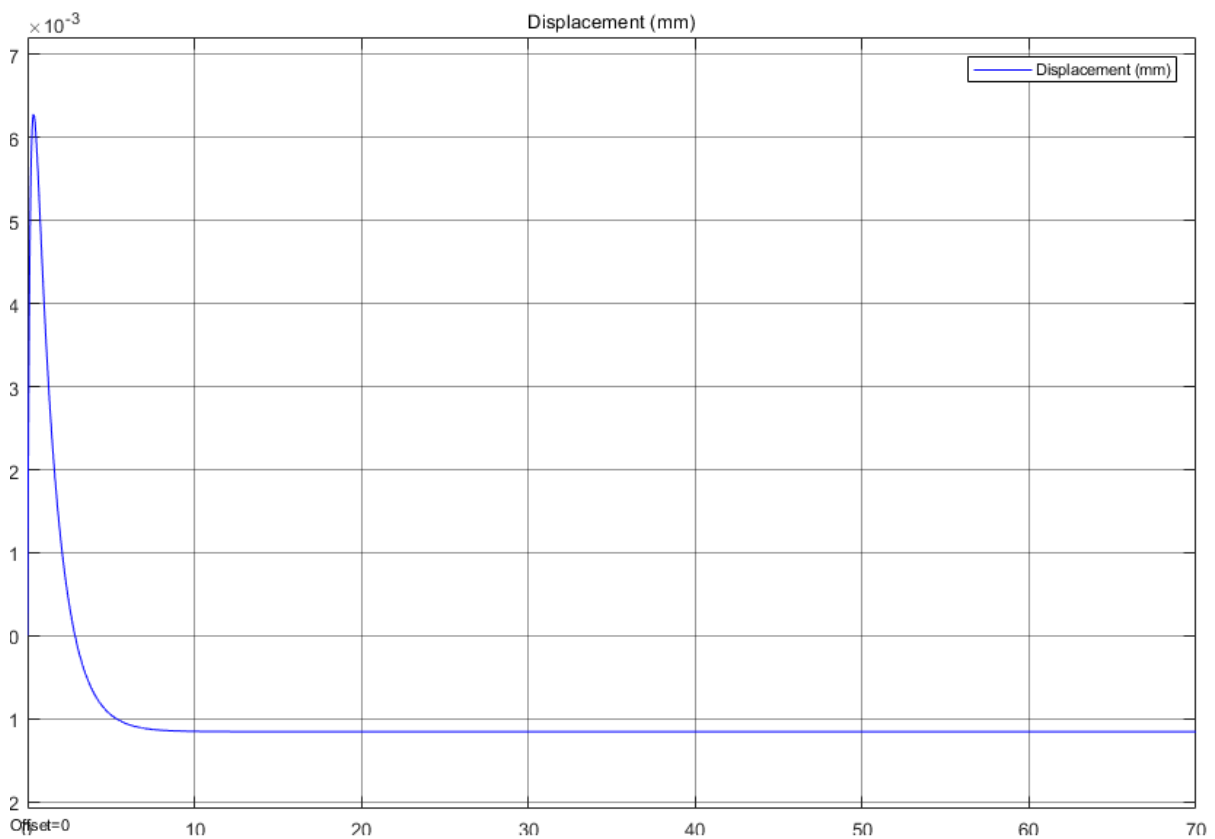
Για να σταθεροποιηθεί η έξοδος – displacement του IPMC πρέπει η τάση στην είσοδο του να πάρει τιμές πολύ μεγάλες. Το IPMC όμως δεν μπορεί να δεχθεί τιμές τάσης πάνω από $|3|V$. Για αυτό τοποθετούμε ένα saturation block που περιορίζει την τιμή ανάμεσα στα $-3V$ με $3V$.



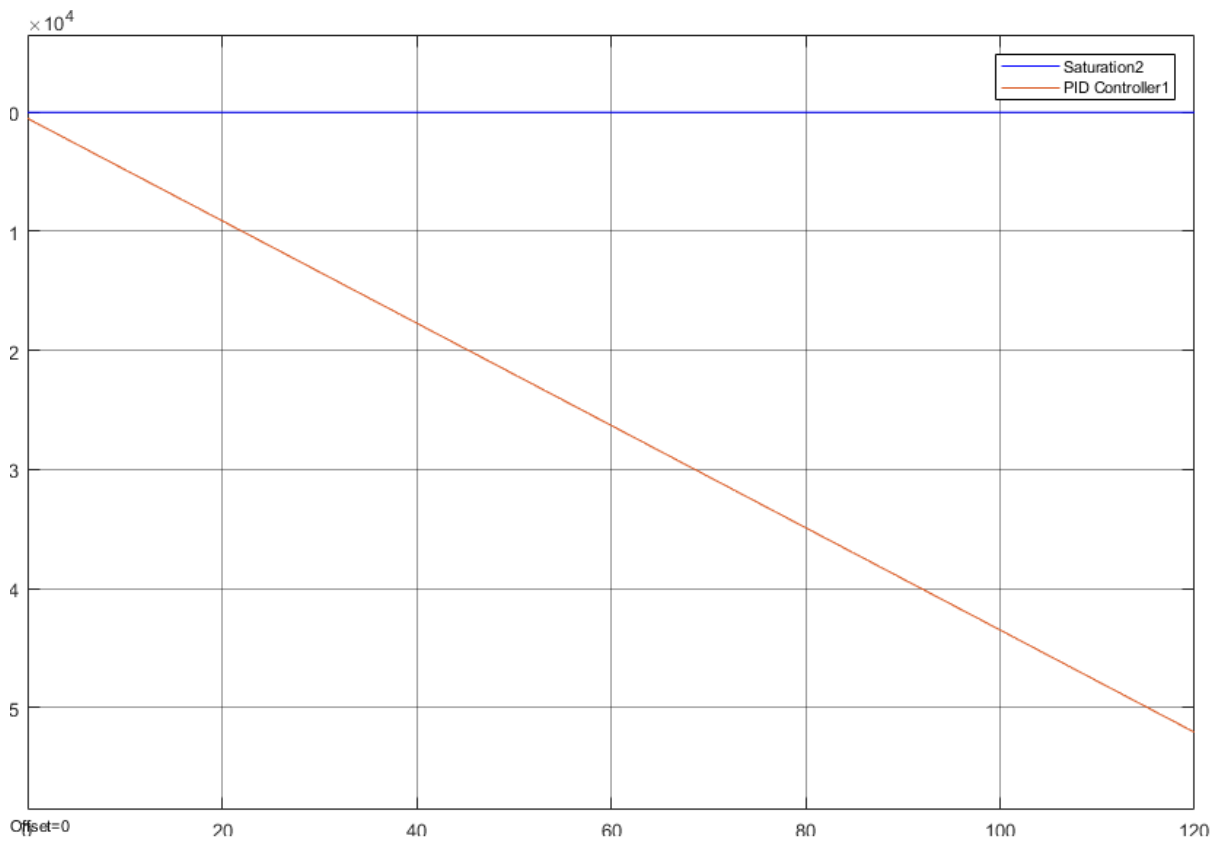
Εικόνα 4.23 Saturation block στα $-3V$ με $3V$ στην είσοδο του IPMC



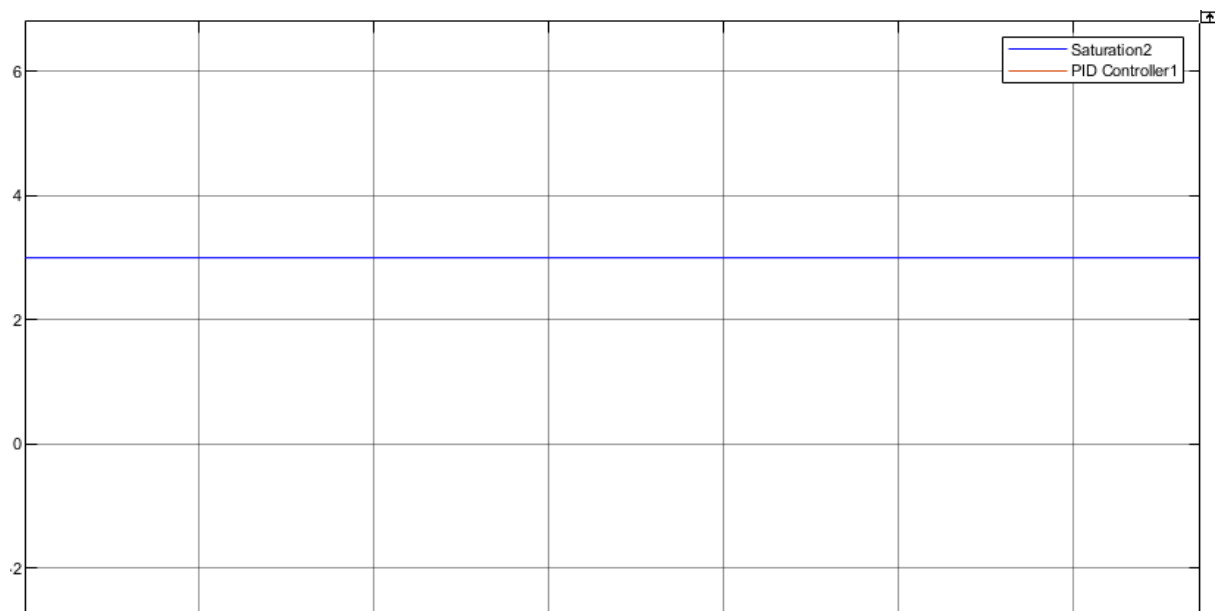
Εικόνα 4.24 Saturation block στα -3V με 3V



Εικόνα 4.25 Βηματική απόκριση με την ύπαρξη του Saturation block στα -3V με 3V



Εικόνα 4.26 Είσοδος και Έξοδος του Saturation block



Εικόνα 4.27 Μεγέθυνση εξόδου του Saturation block -σταθερά στα 3V

Ένα πρώτο συμπέρασμα είναι ότι δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε για το IPMC για τον έλεγχο της θέσης του ή καλύτερα να σταθεροποιήσουμε το ελεύθερο άκρο του σε μια θέση με το PID, διότι δεν μπορεί να δεχτεί τιμές τάσης πάνω από ένα όριο.

Μπορούμε όμως να εφαρμόσουμε PID για μια τέτοια συνάρτηση 2^{ης} τάξης αν δεν έχουμε περιορισμός στην είσοδο του plant.

4.3 MRAC και IPMC

Τα σύνθετα υλικά ιοντικού πολυμερούς μετάλλου έχουν αρκετά απρόβλεπτη συμπεριφορά λόγω πολλών κρίσιμων πτυχών που προκαλούν μια αλλαγή στη δυναμική τους απόκριση. Σε ορισμένες εφαρμογές θα δημιουργήσει αυτή η απρόβλεπτη συμπεριφορά καταστροφικά λάθη. Για να αποφύγουμε αυτά τα προβλήματα, εμείς εφαρμόζουμε έλεγχο MRAC όπου η τελική απόκριση κλειστού βρόχου του συστήματος θα ακολουθεί πάντα τη δυναμική απόκριση του ένα σταθερό μοντέλο αναφοράς ακόμα κι αν το μοντέλο IPMC αλλάζει με τον χρόνο. Φυσικά αυτό το μοντέλο αναφοράς πρέπει να είναι εφαρμόσιμο με το σύστημα ελέγχου. Ο έλεγχος που προτείνεται σε αυτή την ενότητα είναι να ακολουθεί πάντα την προσδιορισμένη απόκριση ανοιχτού βρόχου ακόμα κι αν αλλάξει η δυναμική του IPMC.

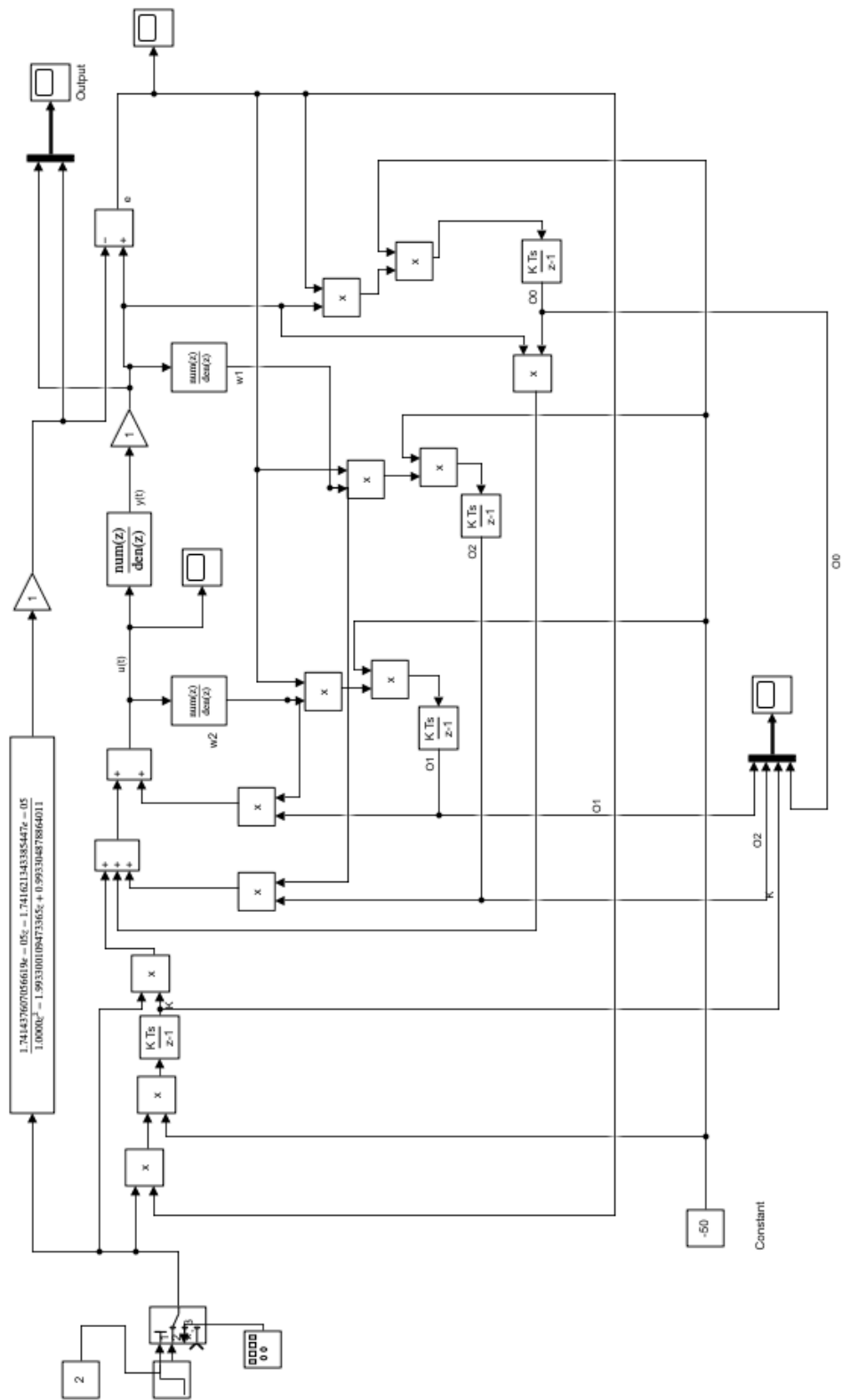
Υπάρχουν διαφορετικές διαμορφώσεις και δυνατότητες για να σχεδιάσουμε ένα στοιχείο ελέγχου MRAC, αλλά πολλά από αυτά βασίζονται σε τρία κύρια μέρη. Το πρώτο είναι η αναφορά μοντέλου που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό τη δυναμική απόκριση του συστήματος. Το δεύτερο είναι το ελεγκτής παραμετροποιημένος από έναν αριθμό ρυθμιζόμενων παραμέτρων. Ο ελεγκτής πρέπει να έχει τέλεια ικανότητα παρακολούθησης επιτρέποντας τη σύγκλιση παρακολούθησης μεταξύ της αναφοράς μοντέλο και σύστημα κλειστού βρόχου. Το τελευταίο είναι η προσαρμογή-μηχανισμός που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση των τιμών των παραμέτρων για τη διασφάλιση μηδενικού σφάλματος παρακολούθησης. Είναι ξεκάθαρο ότι αυτό το τελευταίο το τμήμα ελέγχου αντιπροσωπεύει την κύρια διαφορά με τα κλασικά στοιχεία ελέγχου. Αυτό το εξάρτημα πρέπει επίσης να εγγυάται τη σταθερότητα του συστήματος ελέγχου.

Στην Εικόνα 4.28 βλέπουμε ένα σύστημα ελέγχου MRAC όπως αναφέρεται στην εργασία Brufau etc και το δοκιμάζουμε με μια δική μας συνάρτηση μεταφοράς 2^{ης} τάξης.

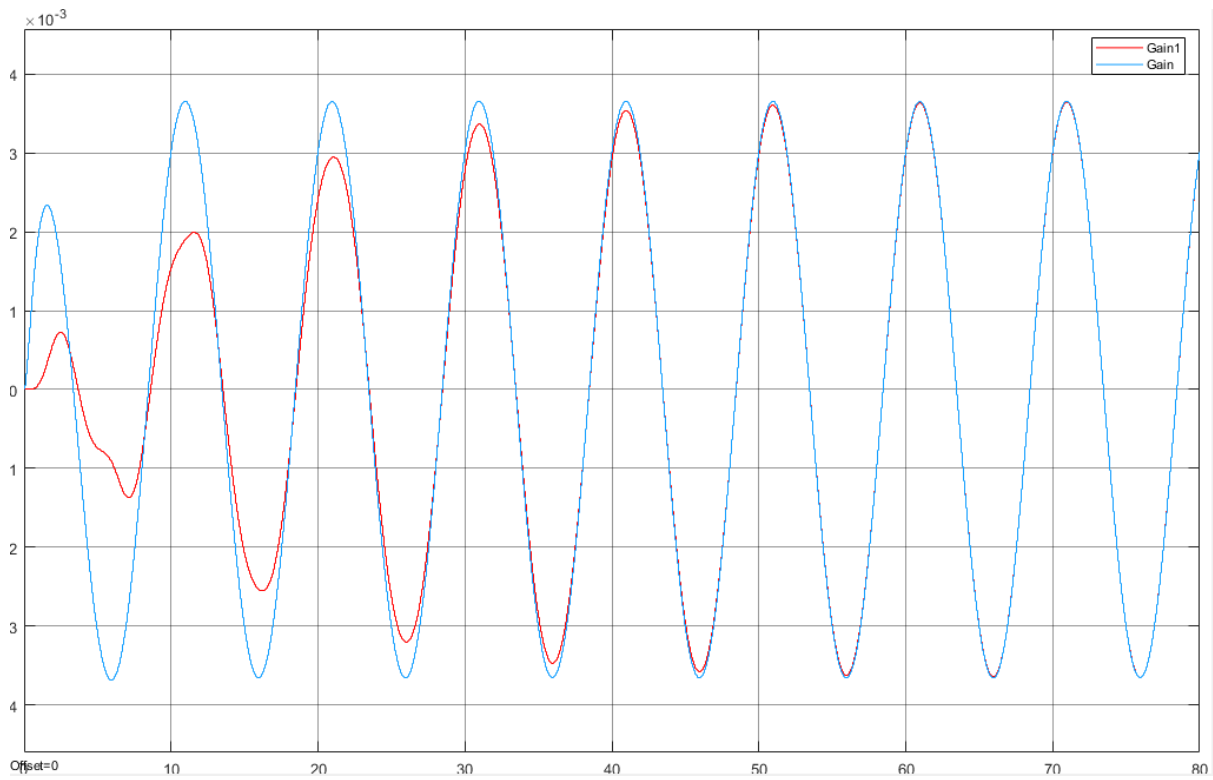
Μπορεί κάποιος να ανατρέξει στην εργασία για περισσότερες λεπτομέρειες. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε διάφορα αποτελέσματα διαφορετικών προσομοιώσεων με διαφορετική συνάρτηση μεταφοράς.

Υπάρχει μια σταθερά Constant που διαδραματίζει έντονο ρόλο επειδή η αλλαγή του κάνει το σύστημα πιο γρήγορο ή πιο ασταθές.

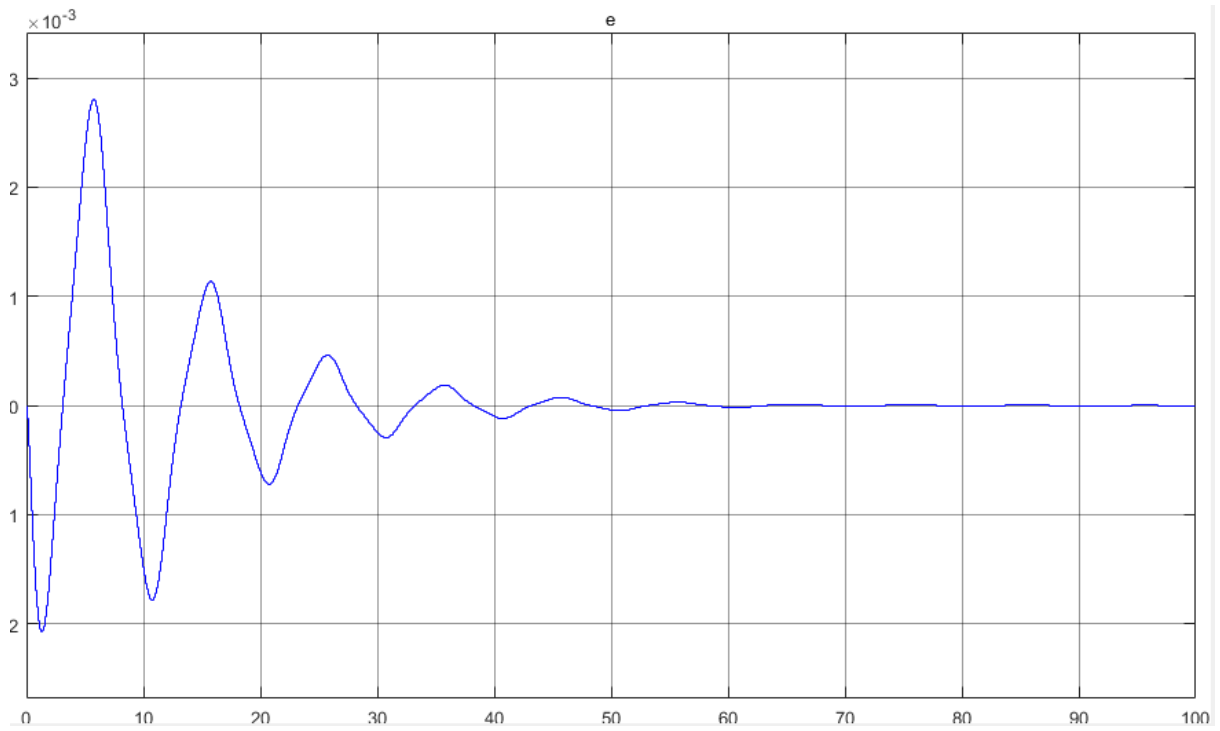
Όπου Gain είναι η έξοδος-displacement του IPMC μοντέλου αναφοράς και όπου Gain1 είναι η έξοδος-displacement του πραγματικού IPMC Plant.



Εικόνα 4.28 MRAC σύστημα ελέγχου

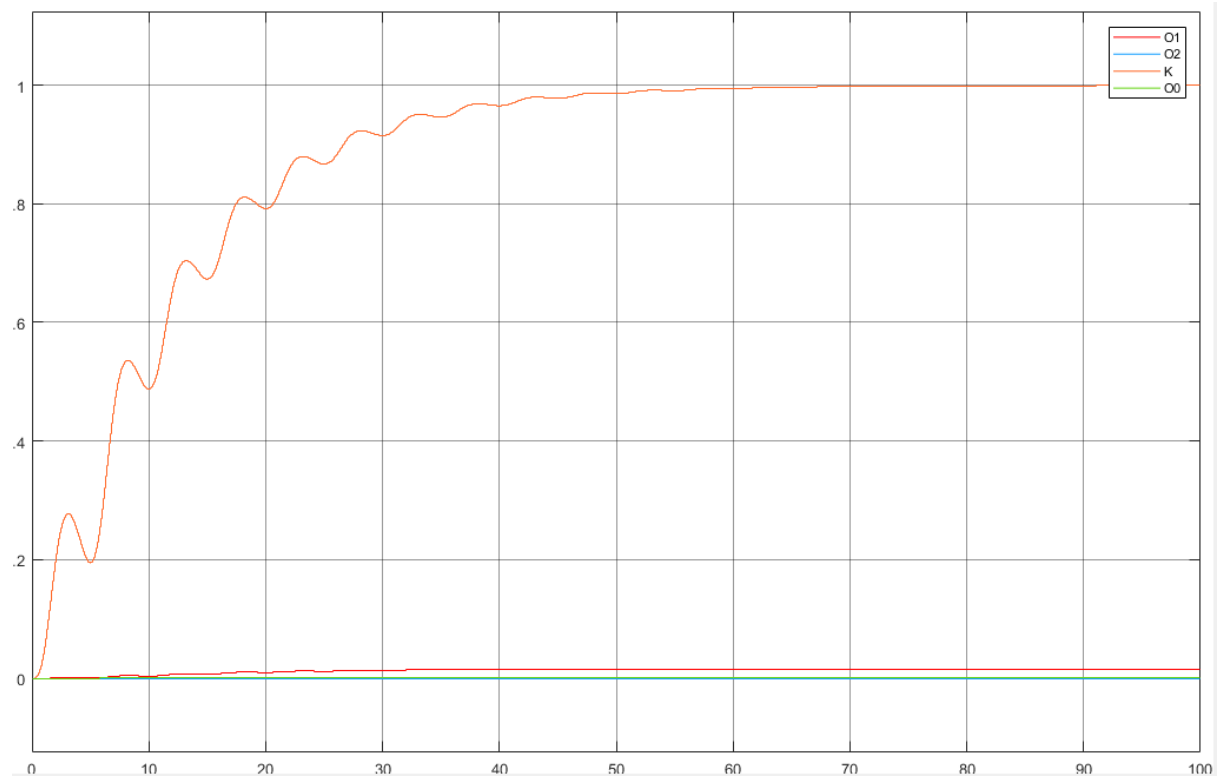


Εικόνα 4.29: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 0.1Hz με $c=-50$

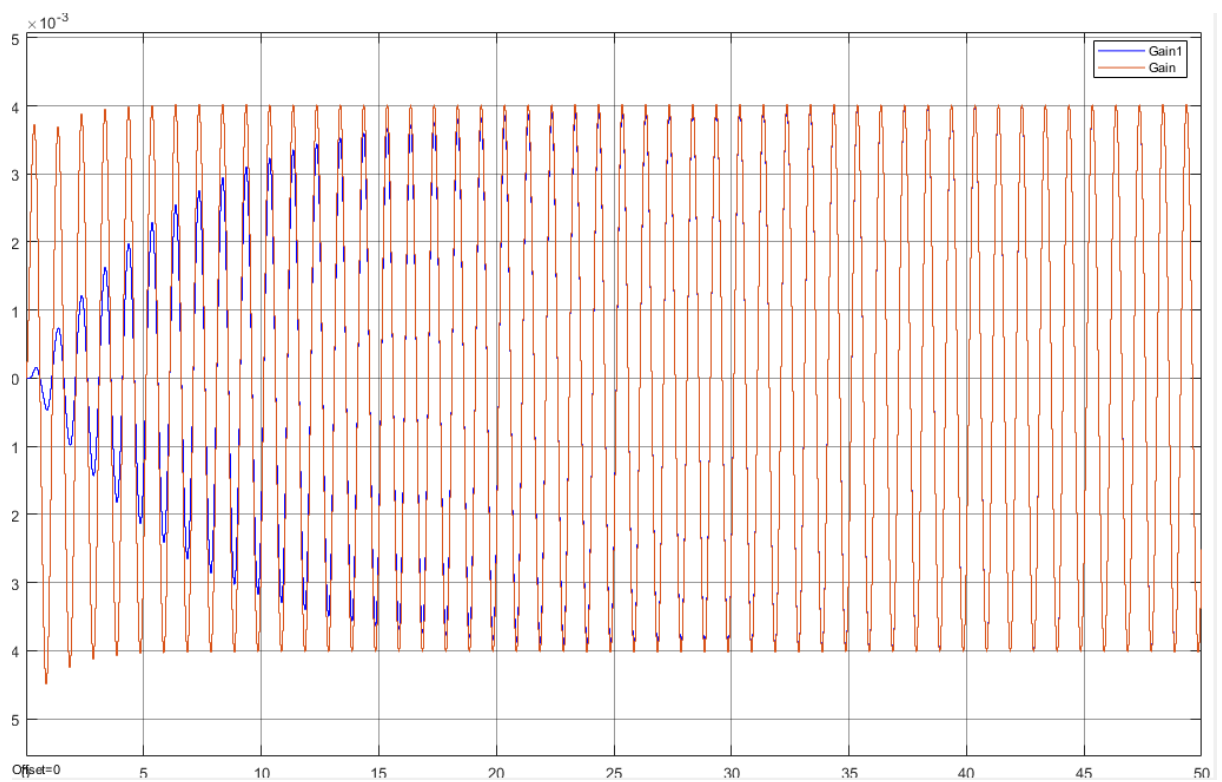


Εικόνα 4.30: Σφάλμα ανάμεσα IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 0.1Hz με $c=-50$

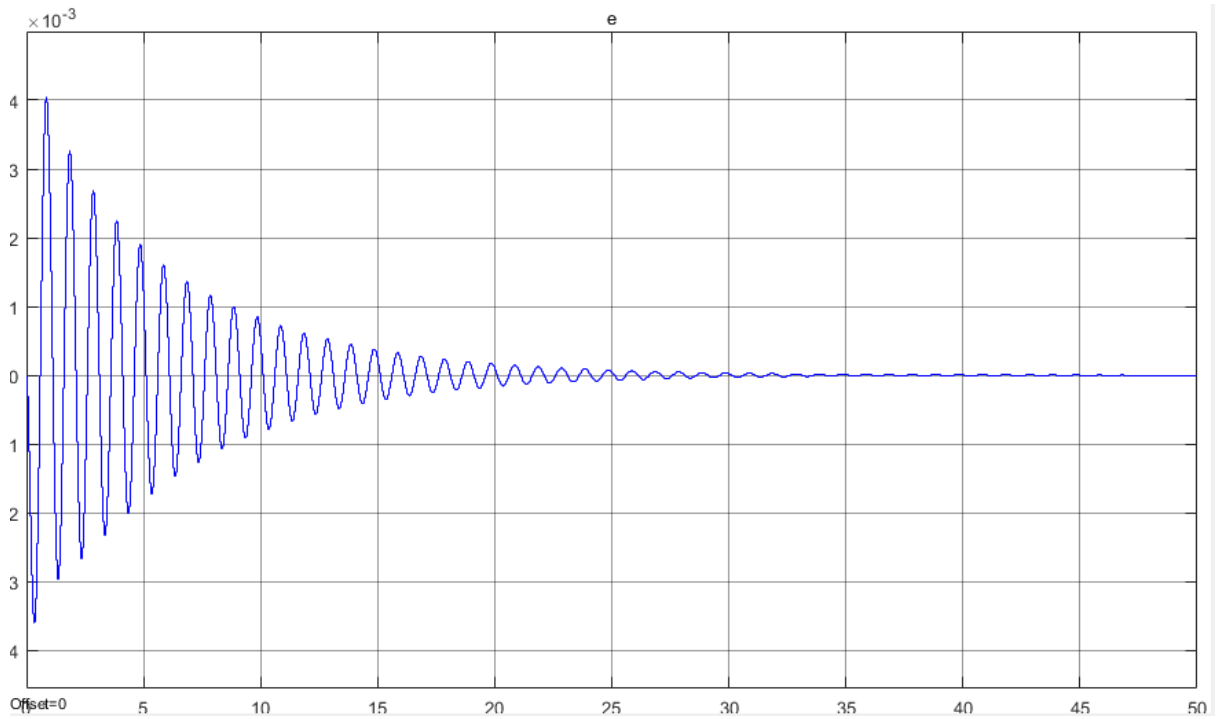
$c=-50$



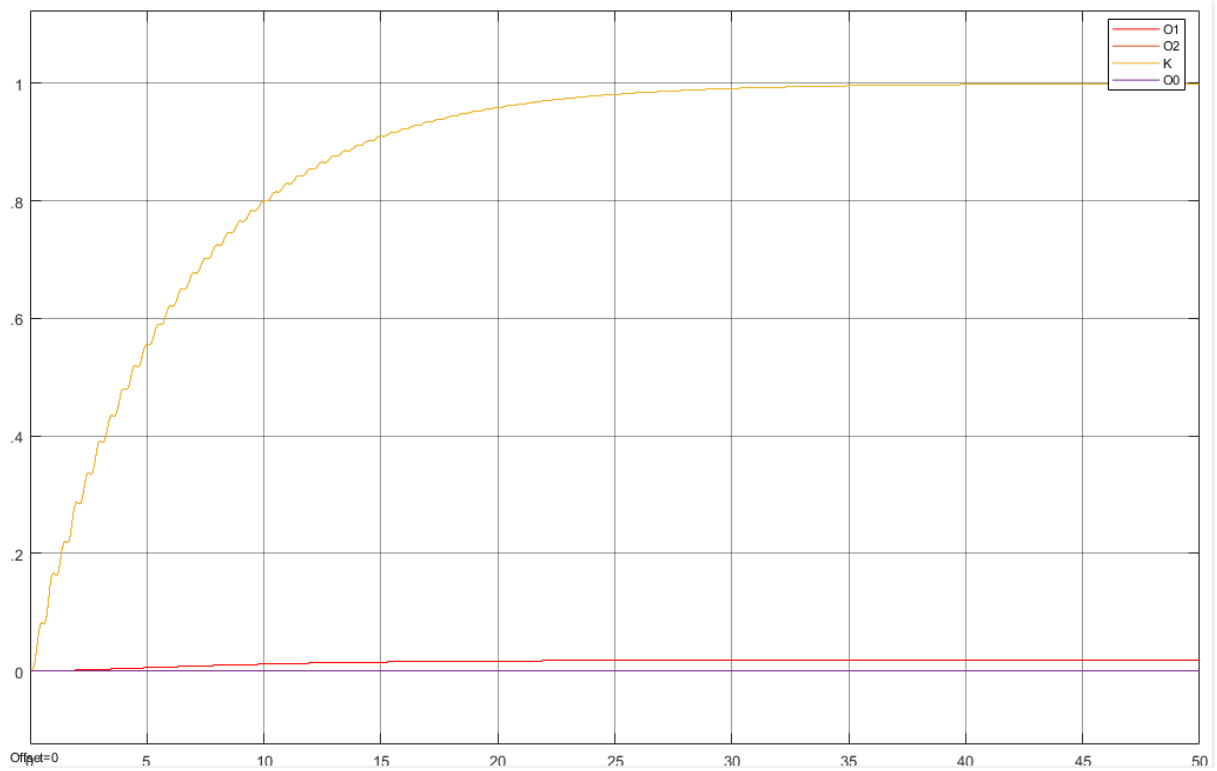
Εικόνα 4.31: Παράμετροι θ , 1Hz με $c=-50$



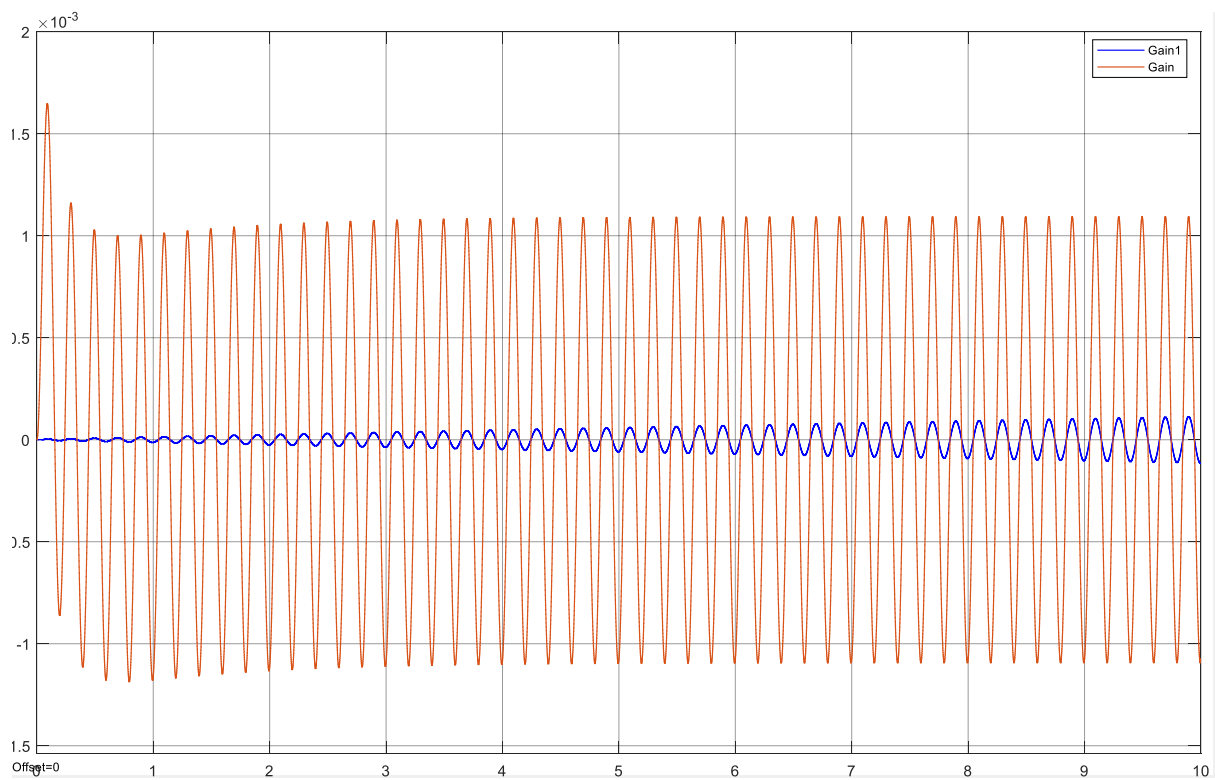
Εικόνα 4.32: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 1Hz με $c=-50$



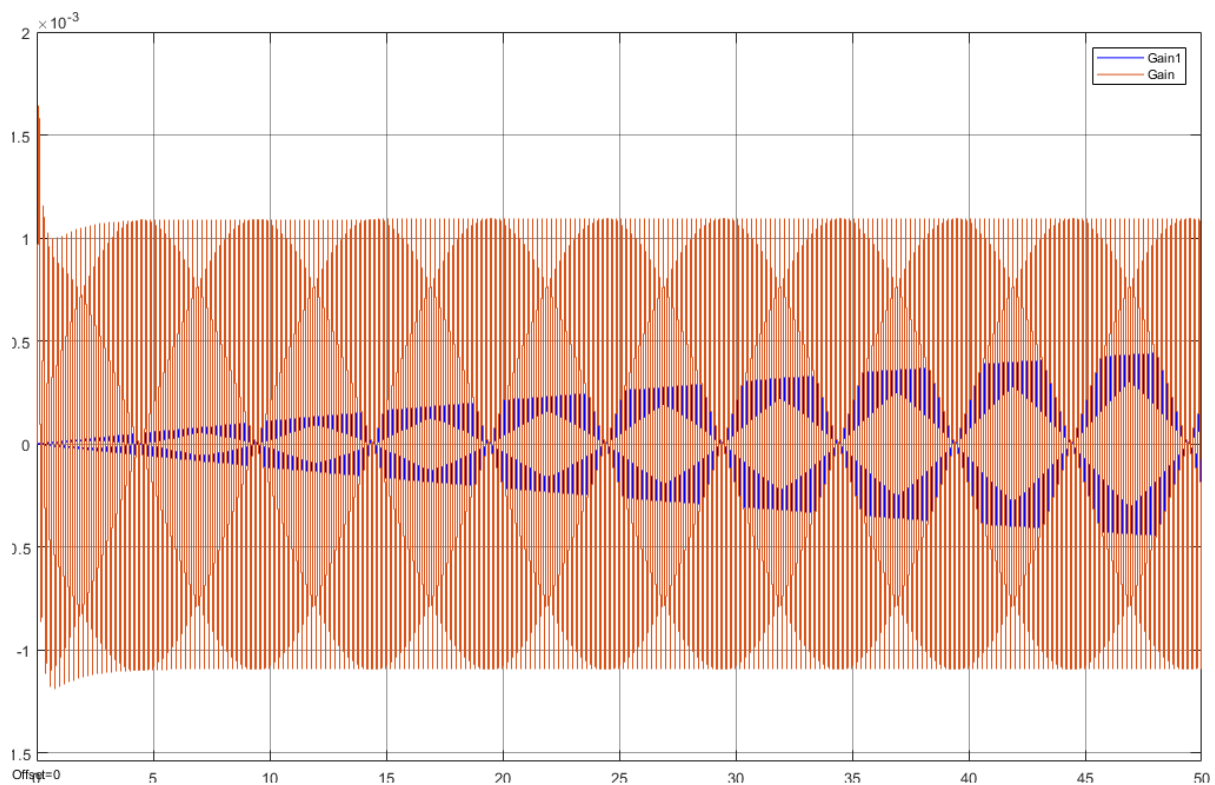
Εικόνα 4.33: Σφάλμα ανάμεσα IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 1Hz με $c=-50$



Εικόνα 4.34: Παράμετροι θ , 1Hz με $c=-50$

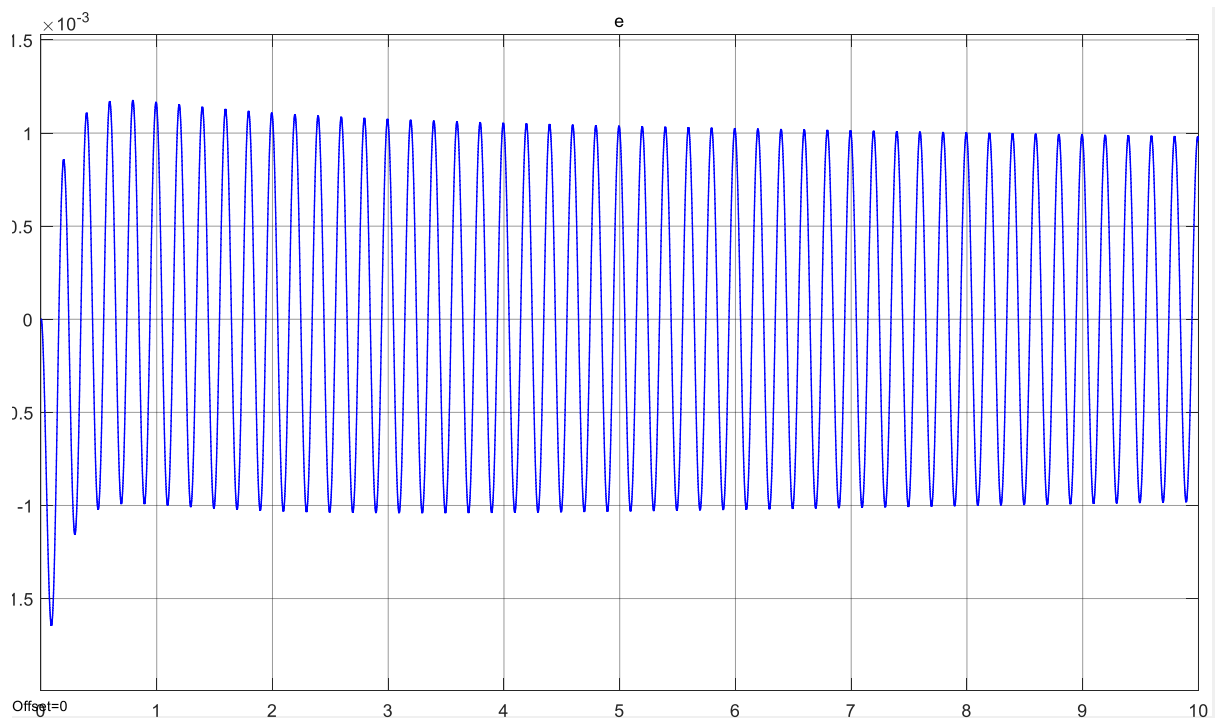


Εικόνα 4.35: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 5Hz με $c=-50$



Εικόνα 4.36: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 5Hz με $c=-50$ μέχρι 50s

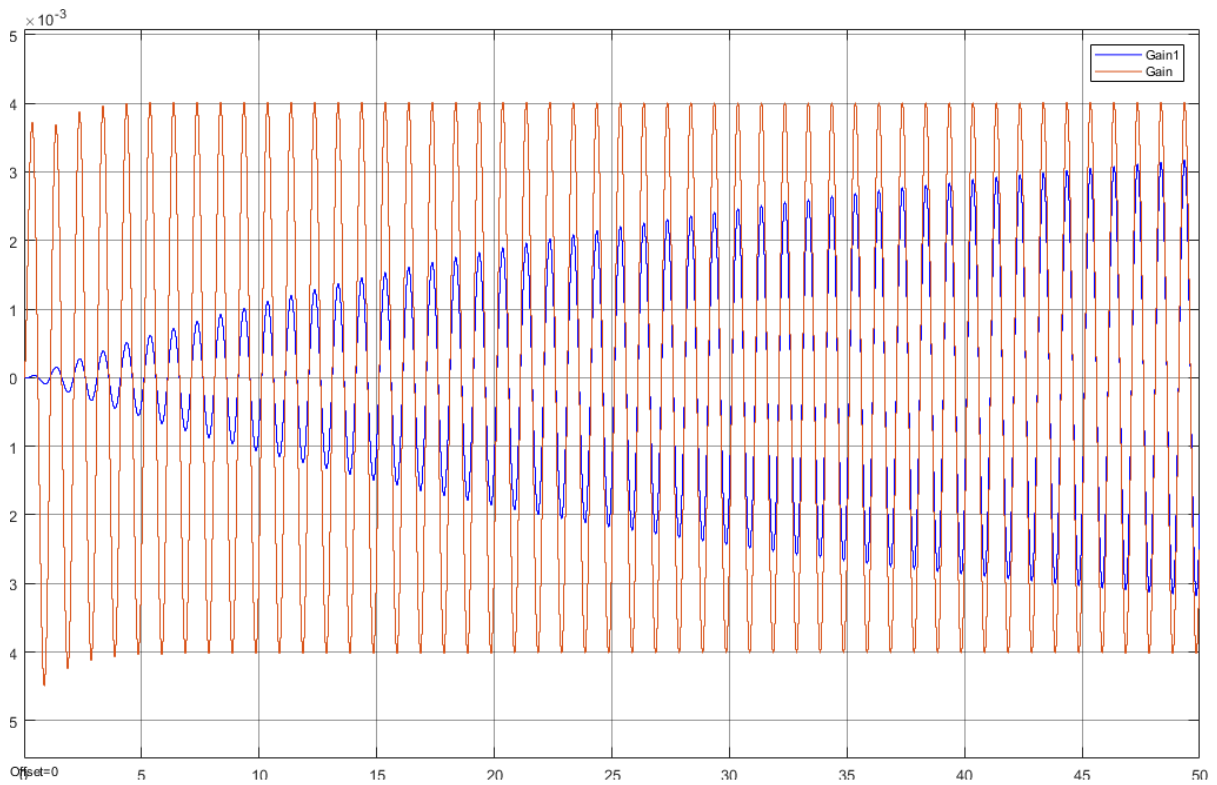
$c=-50$



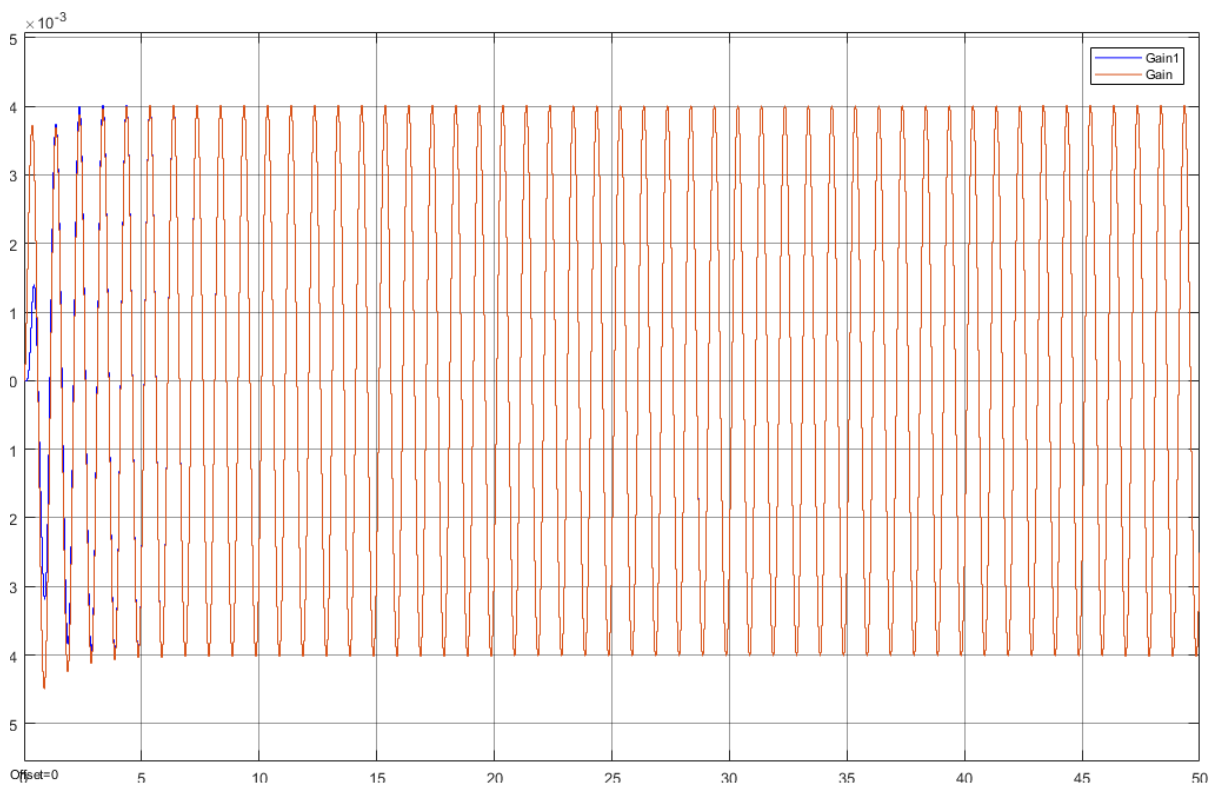
Εικόνα 4.37: Σφάλμα ανάμεσα IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 5Hz με $c=-50$

Στις παρακάτω Εικόνες 4.38 και 4.44 παρουσιάζονται οι έξοδοι των IPMC plant και reference με είσοδο sinus 2V, 1Hz αλλά με διαφορετικά c για να δούμε τη διαφορά και την επίδραση του.

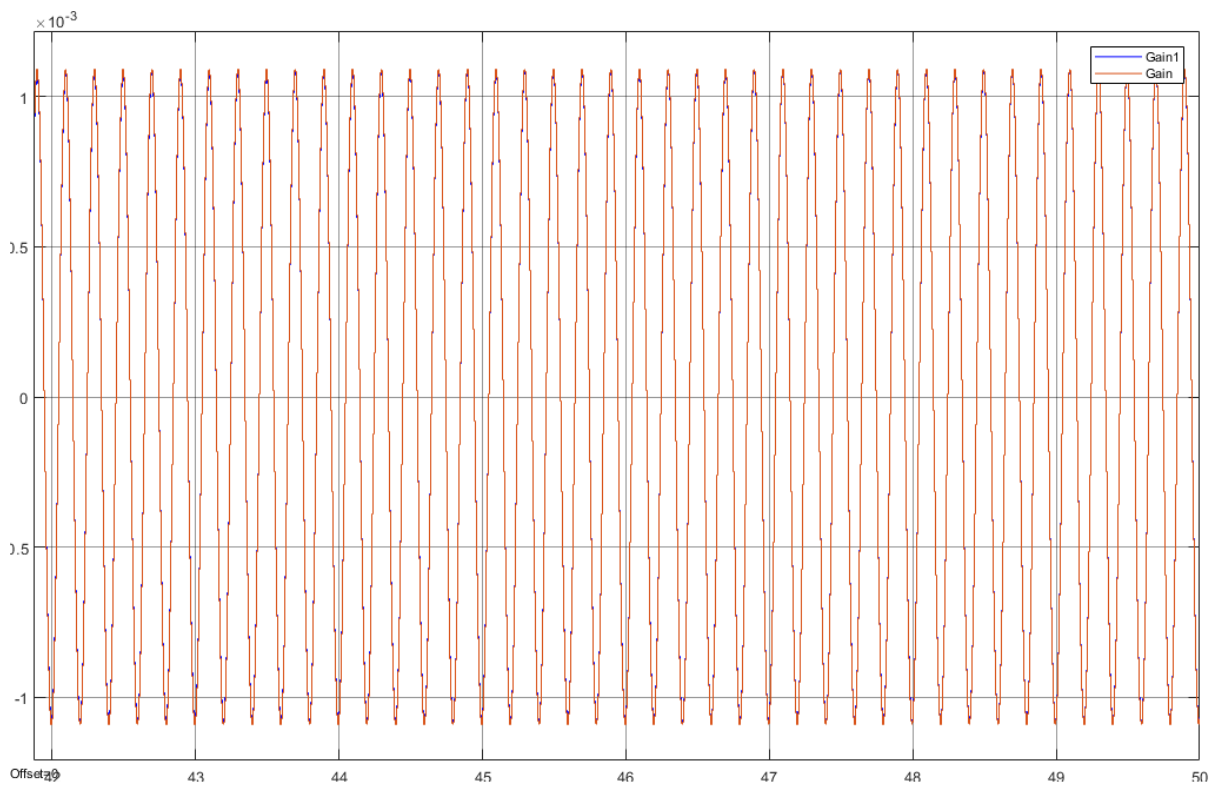
Θα παρατηρήσουμε ότι ενώ αυξάνεται το c το plant ακολουθεί πιο γρήγορα το μοντέλο αναφοράς αλλά μετά από κάποιο όριο το σύστημα γίνεται ασταθές.



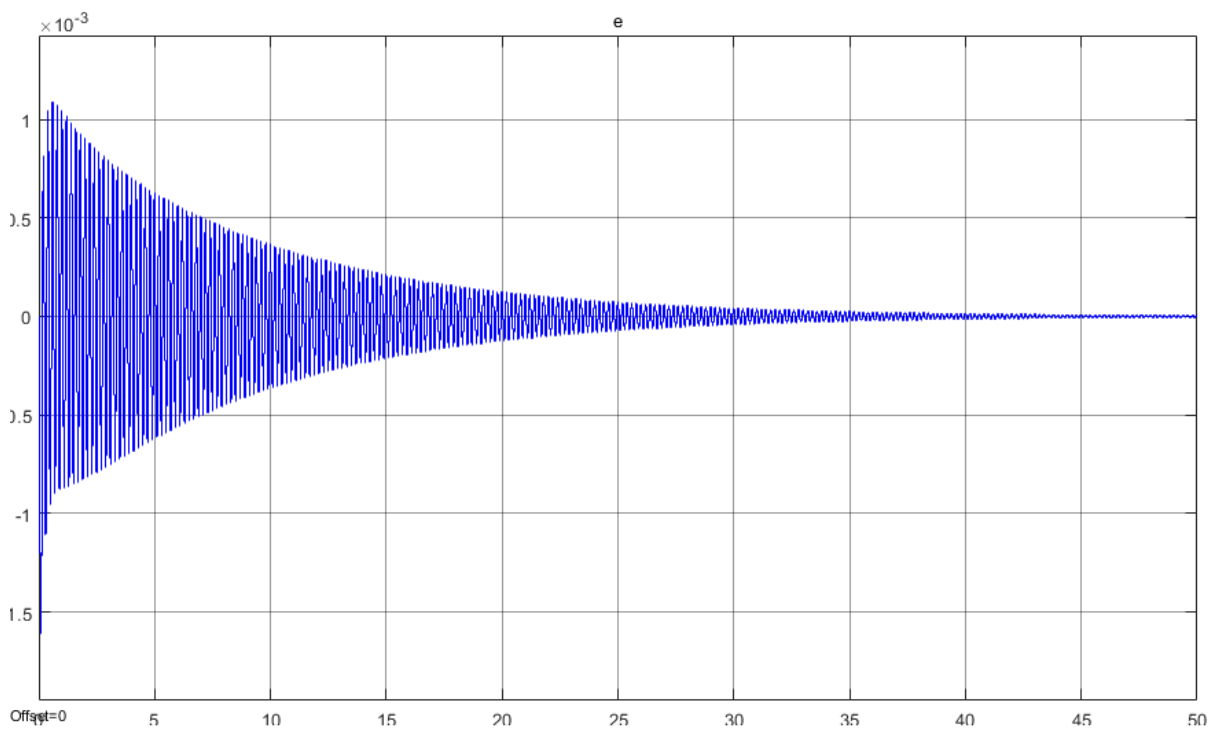
Εικόνα 4.38: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 1Hz με $c=-10$



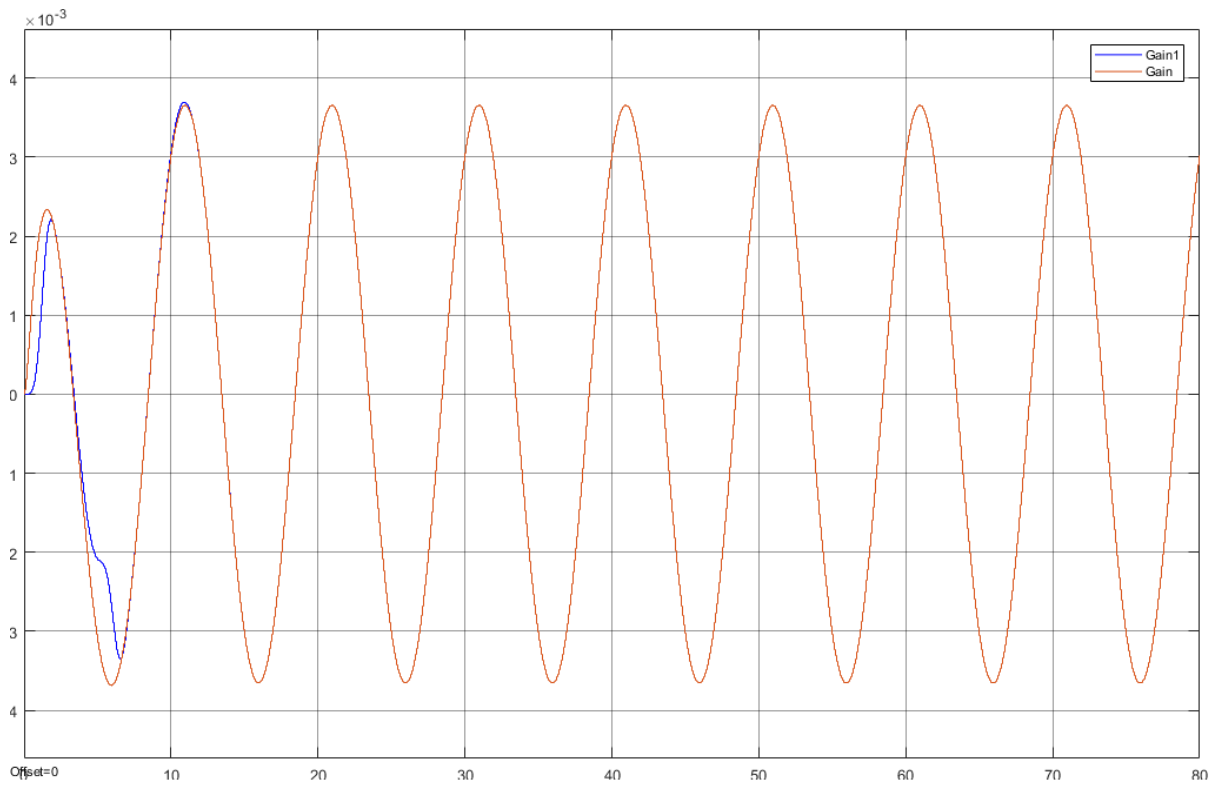
Εικόνα 4.39: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 1Hz με $c=-500$



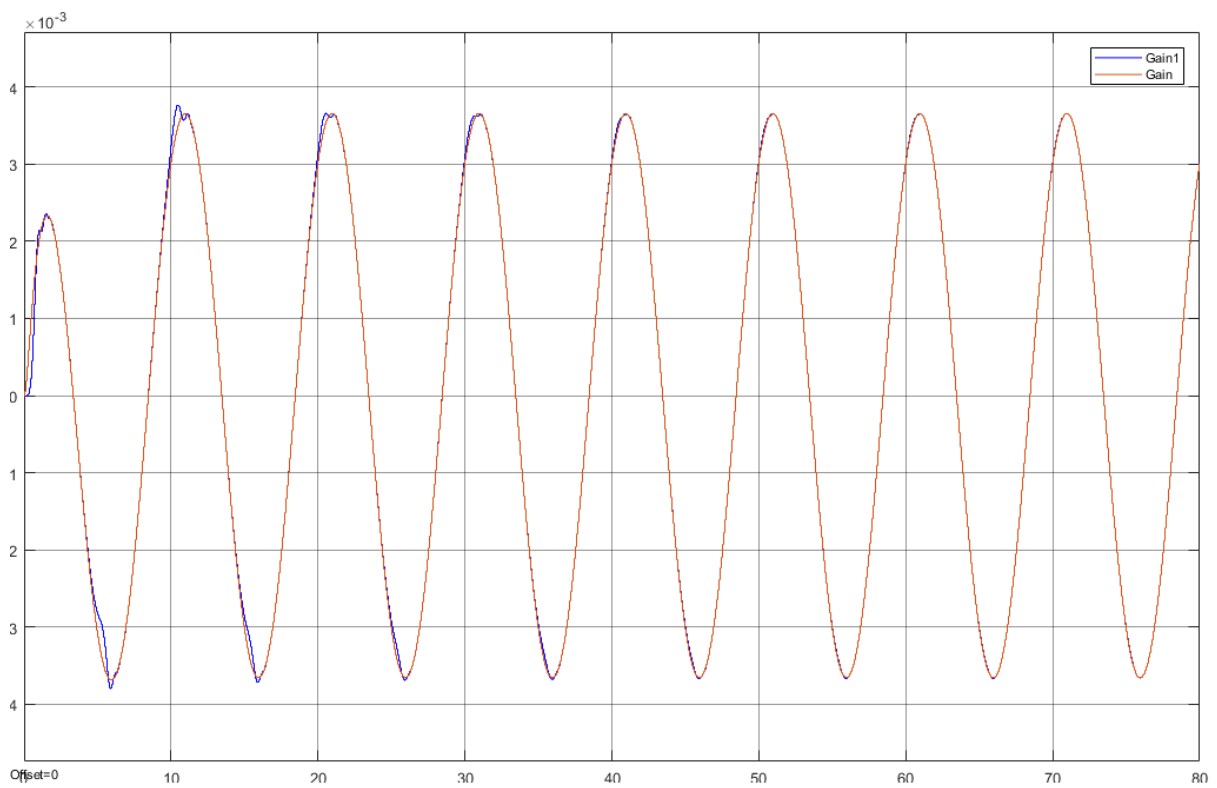
Εικόνα 4.40: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 5Hz με $c=-500$



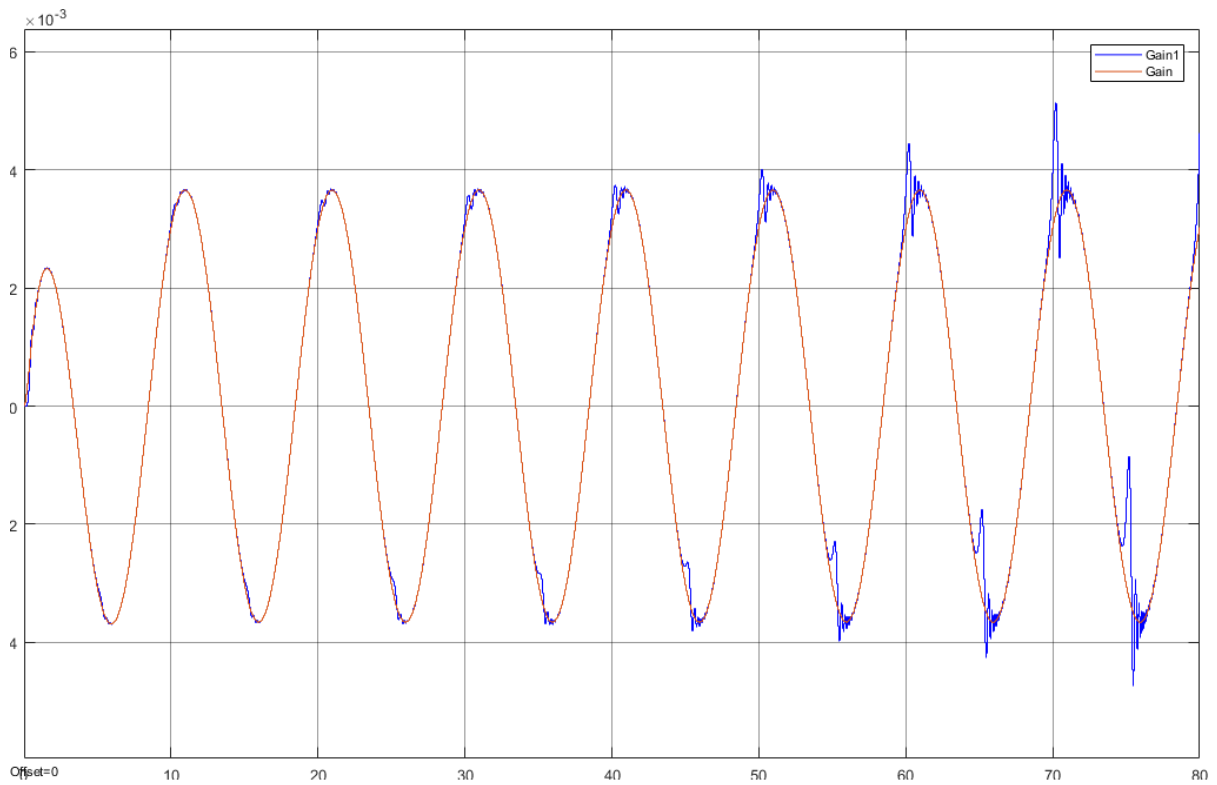
Εικόνα 4.41: Σφάλμα ανάμεσα IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 5Hz με $c=-500$



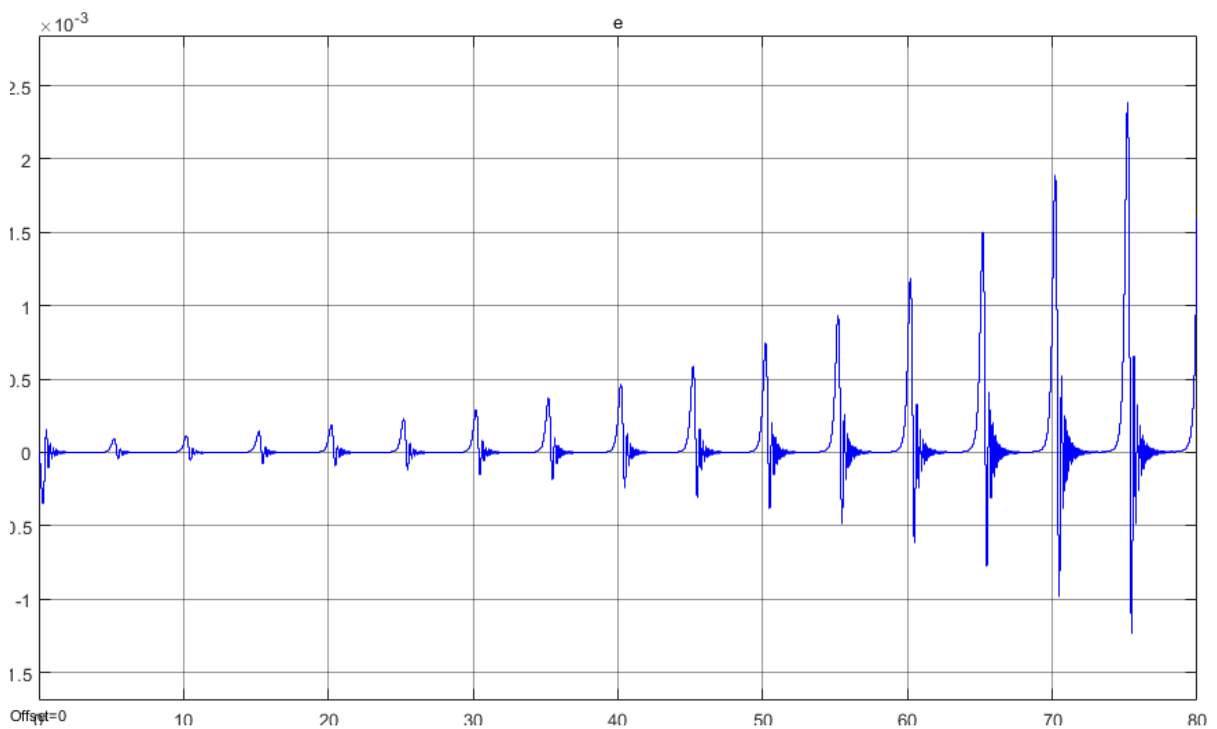
Εικόνα 4.42: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 0.1Hz με $c=-500$



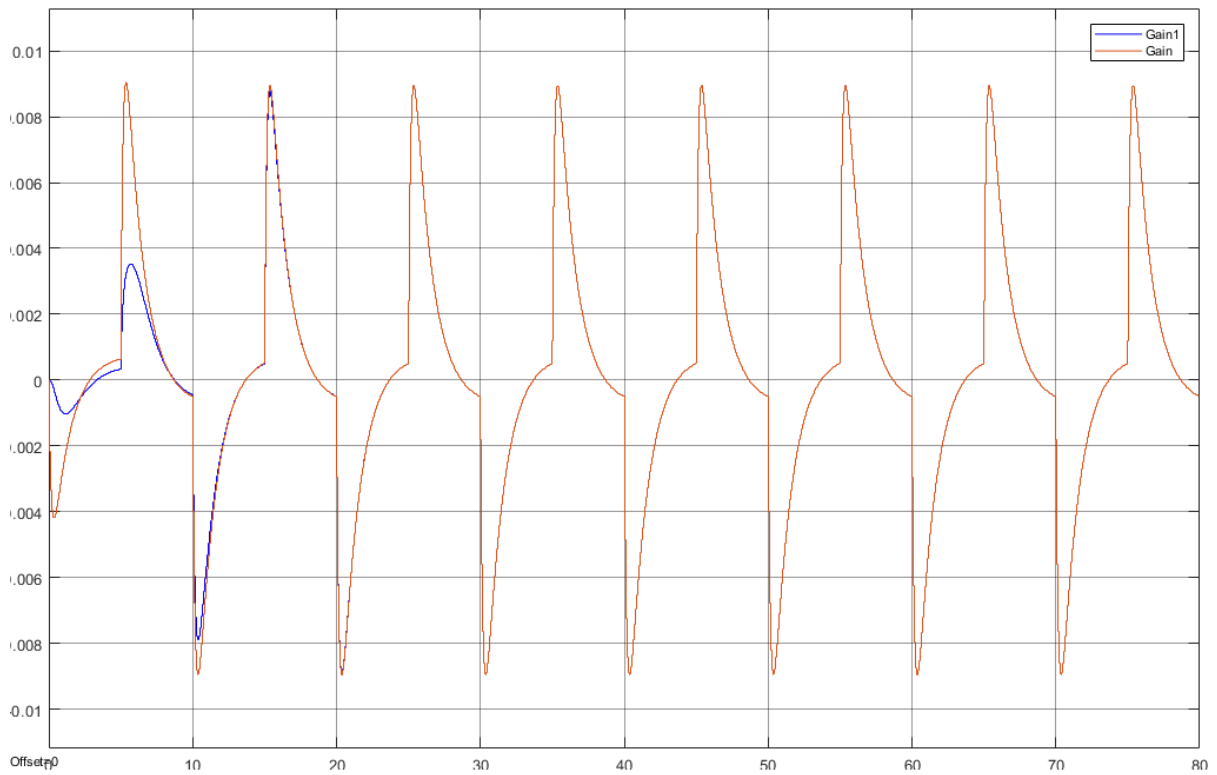
Εικόνα 4.43: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 0.1Hz με $c=-5000$



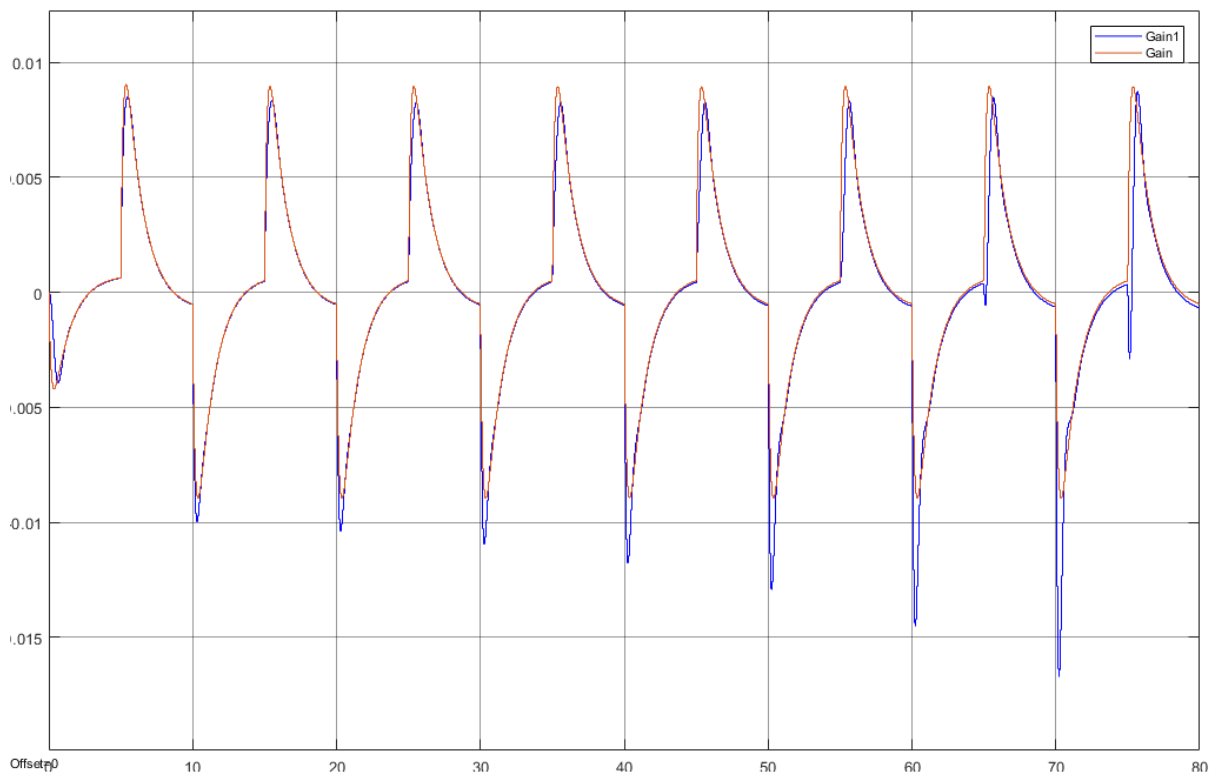
Εικόνα 4.44: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 0.1Hz με $c=-5000$



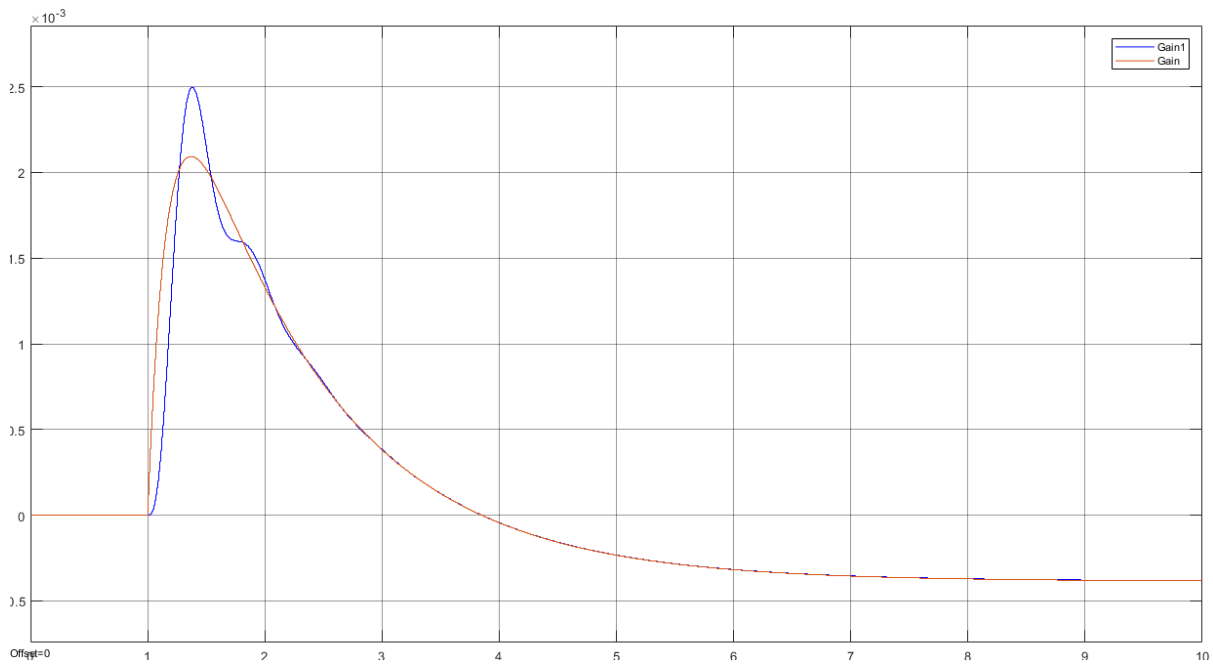
Εικόνα 4.45: Σφάλμα ανάμεσα IPMC plant και reference - Είσοδος sinus 2V, 0.1Hz με $c=-5000$



Εικόνα 4.46: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος square 2V, 0.1Hz με $c=-50$



Εικόνα 4.47: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος square 2V, 0.1Hz με $c=-500$



Εικόνα 4.48: Έξοδοι των IPMC plant και reference - Είσοδος βηματική με $c=-50$

Θα παρατηρήσουμε στις Εικόνες 4.46-4.47 ότι το plant IPMC ακολουθεί το μοντέλο αναφοράς όταν στην είσοδο έχουμε square $2V$, $0.1Hz$ με $c=-50$ αλλά δεν μπορεί όταν το c αυξηθεί αλγεβρικά.

Θα παρατηρήσουμε στην Εικόνα 4.48 ότι το plant IPMC δεν ακολουθεί το μοντέλο αναφοράς όταν εφαρμοστεί βηματική είσοδο.

Αυτό οφείλεται στη ρύθμιση του c ή ίσως στις επιμέρους ρυθμίσεις των κερδών για κάθε μέρος του MRAC συστήματος.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

Παρουσιάστηκε η μελέτη δύο συστημάτων ελέγχου με χρήση Matlab για συγκεκριμένες εφαρμογές σε μικροηλεκτρομηχανικά στοιχεία, υλοποίηση των κυριότερων και σύγκριση μεταξύ τους.

Δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε για το IPMC έλεγχο της θέσης του ή καλύτερα να σταθεροποιήσουμε το ελεύθερο άκρο του σε μια θέση με το PID, διότι δεν μπορεί να δεχτεί τιμές τάσης πάνω από ένα όριο. Βέβαια είναι εφικτή η εφαρμογή του PID για μια συνάρτηση 2ης τάξης αν δεν έχουμε περιορισμός στην είσοδο του plant.

Το PID δεν μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο θέσης ενός IPMC και δεν μπορεί να παρέχει παρακολούθηση μια συγκεκριμένης συμπεριφοράς.

Τα σύνθετα υλικά ιοντικού πολυμερούς μετάλλου έχουν αρκετά απρόβλεπτη συμπεριφορά με αλλαγές στη δυναμική τους απόκριση. Δηλαδή, μετά από κάποια χρήση αλλάζει η συνάρτηση μεταφοράς του συνήθως ελάχιστα. Σε ορισμένες εφαρμογές θα δημιουργήσει αυτή η απρόβλεπτη συμπεριφορά μεγάλα λάθη. Για να αποφύγουμε αυτά τα προβλήματα προτείνουμε έλεγχο MRAC όπου η τελική απόκριση κλειστού βρόχου του συστήματος θα ακολουθεί πάντα τη δυναμική απόκριση του με ένα σταθερό μοντέλο αναφοράς ακόμα κι αν το μοντέλο IPMC αλλάζει με τον χρόνο.

Ο έλεγχος που υλοποιήθηκε φαίνεται ότι το plant να ακολουθεί πάντα την προσδιορισμένη απόκριση ανοικτού βρόχου ακόμα κι αν αλλάξει η δυναμική του IPMC. Παρατηρήσαμε ότι το plant IPMC ακολουθεί το μοντέλο αναφοράς όταν στην είσοδο έχουμε ημίτονο για διάφορες τιμές της σταθεράς c . Θα παρατηρήσουμε ότι ενώ αυξάνεται το c το plant ακολουθεί πιο γρήγορα το μοντέλο αναφοράς αλλά μετά από κάποιο όριο το σύστημα γίνεται ασταθές.

Για είσοδο square 2V, 0.1Hz με $c=-50$ ότι το plant IPMC ακολουθεί το μοντέλο αναφοράς αλλά δεν μπορεί όταν το c αυξηθεί αλγεβρικά. Επίσης, το plant IPMC δεν ακολουθεί το μοντέλο αναφοράς όταν εφαρμοστεί βηματική είσοδο. Αυτό οφείλεται στη ρύθμιση του c ή ίσως στις επιμέρους ρυθμίσεις των κερδών για κάθε μέρος του MRAC συστήματος. Θα πρέπει να το προσαρμόζει συνέχεια ο σχεδιαστής είτε να εφαρμοστεί ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης ή ρύθμισης της σταθεράς c .

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- S. Nemat-Nasser and Y. Wu , Comparative experimental study of ionic polymer-metal composites with different backbone ionomers and in various cation forms, *J. Appl. Phys.*, 2003, **93** , 5255 —5267
- J. S. Dewey , K. K. Leang and S. Devasia , Experimental and theoretical results in output-trajectory redesign for flexible structures, *ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control*, 1998, 120 , 456 —461
- B.K. Fang , M.S. Ju and C.C. K. Lin , A new approach to develop ionic polymer-metal composites (IPMC) actuator: fabrication and control for active catheter systems, *Sens. Actuators, A*, 2007, 137 , 321 —329
- Black, W.S.; Haghi, P.; Ariyur, K.B. Adaptive Systems: History, Techniques, Problems, and Perspectives. *Systems* 2014, 2, 606-660. <https://doi.org/10.3390/systems2040606>
- Kheyraddini Mousavi A., Leseman Z.C. (2012) Basic MEMS Actuators. In: Bhushan B. (eds) *Encyclopedia of Nanotechnology*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9751-4_292
- Ionic Polymer Metal Composites for Sensors and Actuators (Engineering Materials) 1st ed. 2019 by Inamuddin (Editor), Abdullah M. Asiri (Editor)
- Brufau-Penella J., K. Tsiakmakis, T. Laopoulos, and M. Puig-Vidal (2008) "Model reference adaptive control for an ionic polymer metal composite in underwater applications," *Smart Materials and Structures*, p. 045020 (9 pp.).
- Datta A (1998) *Adaptive internal model control Advances in Industrial Control* (Berlin: Springer)
- Fukuda T., H. Ishihara, and F. Arai (1995) "Microrobotics, current of art and future," *Proceedings 1995 INRIA/IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation*. pp. 29-39 vol.3.
- Gevers, M. (2002). Modelling, identification and control. In: P. Albertos, & A. Sala (Eds.), *Iterative identification and control* (pp. 3–16). Berlin: Springer.
- Kothera C S and Leo D J (2005) Bandwidth characterization in the micropositioning of ionic polymer actuators *J. Intell. Mater. Struct.* 16:3–13.
- Lecchini A , Lanzon A , Anderson B.D.O (2006) A model reference approach to safe controller changes in iterative identification and control . *Automatica* 42(2): 193–203.

- Ljung, L. (1999). System identification: Theory for the user . Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- 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.
- Neural Network Control Systems: Model Reference Control, Matlab Toolbox, <http://www.mathworks.com/help/nnet/ug/model-reference-control.html>
- Newbury K. M. and D. J. Leo (2003) "Linear electromechanical model of ionic polymer transducers - Part II: Experimental validation," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 14, pp. 343-357.
- Obinata, G., & Anderson, B.D.O. (2000). Model reduction for control system design . Berlin: Springer
- Richardson R C, Levesley M C, Brown M D, Hawkes J A, Watterson K and Walker P G (2003) Control of ionic polymer metal composites *ASME Trans. Mechatron.*8 (2) 245–53.
- Slotine J.E. (1991) *Applied Non-Linear Control* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall)
- Tsiakmakis K., Brufau J., Puig-Vidal M., and Laopoulos Th. (2008) Modeling IPMC Actuators for Model Reference Motion Control, *Instrumentation and Measurement Technology Conference – IMTC 2008*, Victoria, Vancouver Island, Canada, May 12-1.
- Smith, S. M. and Brady, J. M., (1997) ‘SUSAN – A New Approach to Low Level Image processing’, *Int. Journal of Computer Vision*, 23(1), pp. 45-78.
- Traff, J. L., Gropp, W. D. and Thakur., R., (2010), ‘Self-consistent MPI performance guidelines’, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol 21, Issue 5, pp. 698–709.
- Tsiakmakis K. and Laopoulos Th. (2007), “Image Analysis for Measuring Motion Parameters with a CCD Camera”, *IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques(IST)*, May 2007, pp. 1-6
- Tsiakmakis K. Laopoulos T. (2011) Comparison of Improved Methods for Tracking Point of IPMC Actuator *6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications* September 15-17, pp. 467-472
- Tsiakmakis K. Laopoulos T. (2012) A Comparative Study on methods for improved Tracking of Mechanical Movements of IPMC Actuators, *Digital Image and Signal Processing for Measurement Systems*, River Publishers, pp. 101-103.
- Tsiakmakis K., Brufau J., Puig-Vidal M., and Laopoulos Th, (2007) Measuring Motion Parameters of Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) Actuators with a CCD

Camera, *Instrumentation and Measurement Technology Conference – IMTC 2007* Warsaw, Poland, May 1-3.

- Tsiakmakis, K. Laopoulos T. (2011) An Improved tracking technique for visual measurements of ionic polymer metal composites (IPMC) actuators using Compute Unified Device Architecture (CUDA) *Measurement Science and Technology* 22 114006.
- Tsiakmakis, K., Laopoulos, T. (2010) ‘Improving processing time for visual measurements of displacements of IPMC actuators using CUDA’, *Imaging Systems and Techniques (IST), IEEE International Conference on*, pp.176-181, July 2010
- Vincent O.R. and Folorunso O. (2009) ‘A Descriptive Algorithm for Sobel Image Edge Detection’ *Proceeding of the Information Science and Information technology Education Joint Conference Macon Georgia USA* 97-107.
- Xu, J., Xu, L., Xie, Y. (2010) ‘Approximating Minimum Bending Energy Path in a Simple Corridor’, *ISAAC*, (1) pp. 328-339.
- Shahinpoor M and Kim K J 2000 The effect of surface-electrode resistance on the performance of ionic polymer–metal composite (IPMC) artificial muscles *Smart Mater. Struct.* 9 543–51
- Nemat-Nasser S and Wu Y 2003 Comparative experimental study of ionic polymer–metal composites with different backbone ionomers and in various cation forms *J. Appl. Phys.* 93 5255–67
- Mallavparu K and Leo D J 2001 Feedback control of the bending response of ionic polymer actuator *J. Intell. Mater.Sys. Struct.* 12 143–55
- Newburry K 2002 Characterization, modelling and control of ionic polymer transducers Thesis Virginia Polytech Institut
- Richardson R C, Levesley M C, Brown M D, Hawkes J A, Watterson K and Walker P G 2003 Control of ionic polymer metal composites *ASME Trans. Mechatron.* 8 (2) 245–53
- Kothera C S and Leo D J 2005 Bandwidth characterization in the micropositioning of ionic polymer actuators *J. Intell. Mater. Struct.* 16 3–13
- Yamakita M, Sera A, Kamamichi N, Asaka K and Luo Z 2006 Integrated design of IPMC actuator/sensor *Int. Conf. on*
- Robotics and Automation pp 1834–9 Adolf D, Shahinpoor M, Segalman D and Witkowski W 1993
- Ouguro K, Asaka K and Takenaka H 1993 Actuator element US Patent Specification 5268082 (Issued December)

- Shahinpoor M, Bar-Cohen Y, Simpson J and Smith J 1998 Ionic polymer-metal composites (IPMC's) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles—a review *Smart Mater. Struct.* 7 R15–30
- Shahinpoor M and Kim K J 2001 Ionic polymer-meta composite: I. fundamentals *Smart Mater. Struct.* 10 819–33
- Shahinpoor M and Kim K J 2005 Ionic polymer-meta composite: IV. Industrial and medical applications *Smart Mater. Struct.* 14 197–214
- Brufau-Penella J, Puig-Vidal M, Giannone P, Graziani S and Strazzeri S 2008 Characterization of the harvesting capabilities of an ionic polymer metal composite device *Smart Mater. Struct.* 17 015009
- Guo S, Ge Y, Li L and Liu S 2006 Underwater swimming micro robot using IPMC actuator *Proc. of the Int. Conf. on Mechatronics and Automation* pp 249–58
- Dan ZHANG, Bin WEI. Convergence performance comparisons of PID, MRAC, and PID+MRAC hybrid controller. *Front. Mech. Eng.*, 2016, 11(2): 213–217
<https://doi.org/10.1007/s11465-016-0386-x>
- Landau Y D. *Adaptive Control: The Model Reference Approach*. New York: Marcel Dekker, 1979
- Horowitz R, Tomizuka M. An adaptive control scheme for mechanical manipulators—Compensation of nonlinearity and decoupling control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1986, 108(2): 127–135
- Sadegh N, Horowitz R. Stability and Robustness Analysis of a Class of Adaptive Controllers for Robotic Manipulators. *International Journal of Robotics Research*, 1990, 9(3): 74–92