



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΕΥΡΩΣΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥΣ
ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ**

ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΓΑΛΑΝΟΥΛΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αργύρης Σολδάτος

ΑΘΗΝΑ 2018

Περίληψη

Η αντισεισμική προστασία των κτιρίων αποτελεί μία περιοχή έρευνας αλλά και εφαρμογών που παρουσιάζει ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον. Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτάθηκε ένα σύστημα ελέγχου αντισεισμικής προστασίας όπου εξετάζεται ο συνδυασμός παθητικής και ενεργητικής προστασίας κτιρίων. Η προτεινόμενη μέθοδος απαιτεί εφαρμογή δύναμης ελέγχου μόνο στην βάση της κτιριακής εγκατάστασης. Για την εφαρμογή της απαραίτητης δύναμης ελέγχου αναπτύχθηκε το μη γραμμικό μοντέλο ενός υδραυλικού συστήματος επενέργειας που αποτελείται από μία ηλεκτροϋδραυλική σερβοβαλβίδα και έναν υδραυλικό επενεργητή, η λειτουργία των οποίων εξετάζεται αναλυτικά. Για να μπορέσει να υπολογιστεί η απαιτούμενη δύναμη ελέγχου ώστε να περιοριστεί η απόλυτη μετατόπιση και ταχύτητα των ορόφων, σχεδιάστηκε ένας ελεγκτής H_{∞} , ο οποίος αξιοποιεί τις μετρήσεις αισθητήρων εγκατεστημένων σε κάθε όροφο της εγκατάστασης. Για να μπορέσει να εφαρμοστεί η απαιτούμενη δύναμη ελέγχου γίνεται χρήση και ενός ελεγκτή PID. Εκτελώντας τις απαραίτητες προσομοιώσεις επιβεβαιώθηκε πως το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου επιτυγχάνει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Τέλος, προτείνεται μία διάταξη ανίχνευσης και απομόνωσης σφαλμάτων στα αισθητήρια όργανα της εγκατάστασης, ώστε να διασφαλίζεται η παροχή αξιόπιστων πληροφοριών στη διάταξη ελέγχου.

Λέξεις Κλειδιά: Σεισμική προστασία, σεισμικά μονωμένη βάση, σερβοβαλβίδα, υδραυλικός επενεργητής, χώρος κατάστασης, έλεγχος H_{∞} , έλεγχος PID, διάγνωση σφαλμάτων, απομόνωση σφαλμάτων, Matlab, Simulink.

Abstract

Seismic protection of buildings constitutes an area of applied and theoretical research which has recently attracted significant attention. In this thesis, a control scheme for seismic protection is proposed where the combination of passive and active control is studied. The proposed method requires control force application only at the base of the structure. The application of the control force is achieved using a nonlinear model of a hydraulic actuator. This system consists of an electrohydraulic servovalve and a hydraulic actuator whose function is demonstrated analytically. In order to calculate the required control force for reducing the absolute displacements and velocities of the floors, an H_∞ controller is designed which utilizes measurements from sensors attached on each floor of the building. In order to assure the application of the required control force, a PID controller is used. The efficacy of the proposed control scheme is demonstrated by extensive simulation studies. Finally, a fault detection and identification scheme is proposed to test the proper operation of the sensors used for real time data acquisition.

Keywords: Seismic protection, seismic base isolation, servovalve, hydraulic actuator, state space, H_∞ control, PID control, fault detection, fault isolation, Matlab, Simulink.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αργύρη Σολδάτο για την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου. Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα μπορούσε να είχε ολοκληρωθεί χωρίς την υποστήριξη της οικογένειάς μου και των φίλων μου τους οποίους ευχαριστώ θερμά.

Πίνακας περιεχομένων

1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντισεισμική προστασία κτιρίων	2
1.1.1 Παθητικά Συστήματα Ελέγχου	2
1.1.2 Ενεργητικά Συστήματα Ελέγχου.....	5
1.1.3 Υβριδικά Συστήματα Ελέγχου.....	6
1.1.4 Ημι-ενεργητικά Συστήματα Ελέγχου.....	7
1.2 Αντικείμενο διπλωματικής.....	8
1.3 Οργάνωση κειμένου.....	9
2 Μοντελοποίηση Υδραυλικού Συστήματος Επενέργησης	10
2.1 Ιδιότητες Υδραυλικών Ρευστών και Υδραυλική Ροή	12
2.1.1 Πυκνότητα.....	12
2.1.2 Πίεση	13
2.1.3 Ιζώδες.....	13
2.1.4 Μέτρο όγκου και μέτρο συμπιεστότητας.....	13
2.1.5 Υδραυλική Ροή.....	14
2.2 Έλεγχος υδραυλικής ισχύος.....	17
2.2.1 Γενική Ανάλυση Βαλβίδας.....	18
2.2.2 Ηλεκτροϋδραυλική Σερβοβαλβίδα	20
2.3 Επενεργητής.....	23
2.4 Μοντέλο Ηλεκτροϋδραυλικού Μηχανισμού Επενέργησης	26
3 Σχεδιασμός Ελεγκτή H^∞ και χρήση Ελεγκτή PID.....	28
3.1 Θεωρία ελέγχου H^∞	29
3.1.1 Σχεδίαση ελέγχου H^∞ με ανάδραση εξόδου	32
3.2 Ελεγκτής PID	37
3.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	38
3.3.1 Σεισμική διαταραχή <i>El Centro</i>	38
3.3.2 Σεισμική διαταραχή <i>Kobe</i>	41

4 Παρατηρητής Άγνωστης Εισόδου και Ανίχνευση και Απομόνωση Σφαλμάτων	45
4.1 Διάγνωση σφαλμάτων βασισόμενη στο μοντέλο	46
4.1.1 Γενική δομή παραγωγής υπολειπόμενων σημάτων σε συστήματα ανίχνευσης σφαλμάτων βασισόμενα στο μοντέλο.....	49
4.1.2 Ανιχνευσιμότητα σφαλμάτων.....	50
4.1.3 Απομόνωση σφαλμάτων.....	51
4.2 Σχεδιασμός Παρατηρητή Άγνωστης Εισόδου	52
4.3 Εύρωστη ανίχνευση σφαλμάτων με UIO.....	55
4.4 Εύρωστα συστήματα ανίχνευσης σφαλμάτων βασισόμενα σε Παρατηρητή Άγνωστης Εισόδου	57
4.4.1 Εύρωστη απομόνωση σφαλμάτων αισθητήρων.....	57
4.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	59
4.5.1 Σφάλμα στον αισθητήρα 1.....	59
4.5.2 Σφάλμα στον αισθητήρα 2.....	61
4.5.3 Σφάλμα στον αισθητήρα 3.....	63
4.5.4 Σφάλμα στον αισθητήρα 4.....	65
5 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	68
5.1 Συμπεράσματα	68
5.2 Μελλοντική Εργασία	69
Βιβλιογραφία.....	71
Παράρτημα Α.....	74
Παράρτημα Β.....	77
Παράρτημα Γ	80
Παράρτημα Δ	84
Παράρτημα Ε	88

1

Εισαγωγή

Ως σεισμός ορίζεται η κίνηση του εδάφους της Γης εξαιτίας ξαφνικής έκλυσης ενέργειας στον φλοιό της, όπου έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία σεισμικών κυμάτων. Ο σεισμός είναι ένα από τα πιο καταστροφικά φυσικά φαινόμενα. Εξαιτίας του μπορεί όχι μόνο να προκληθούν καταστροφές σε κτίρια και άλλες υποδομές, αλλά η επιρροή του στο ευρύτερο περιβάλλον όπου λαμβάνει χώρα μπορεί να προκαλέσει από κατολισθήσεις και ρωγμές στο έδαφος έως και τσουνάμι. Τα σεισμικά φαινόμενα εμφανίζονται με συχνότητα η οποία είναι δύσκολο να προβλεφθεί, όπως αντίστοιχα και η τοποθεσία στην οποία θα συμβούν. Κατά μέσο όρο εμφανίζονται περίπου 200 σεισμοί υψηλού πλάτους ανά δεκαετία, όπου το 10%-20% αυτών εμφανίζεται στον ωκεάνιο φλοιό [4][8]. Ο σχεδιασμός λοιπόν των κτιρίων και λοιπών κατασκευών παραμένει πρόκληση για την επίτευξη κατασκευών αρκετά ανθεκτικών τόσο σε σεισμικές διαταραχές όσο και στις διαταραχές εξαιτίας ισχυρών ανέμων. Η παραδοσιακή σχεδίαση και η χρήση εξολοκλήρου παθητικών συστημάτων θέτει αρκετούς περιορισμούς ως προς τις δυνατότητες προστασίας των κατασκευών από δονήσεις. Έτσι τις τελευταίες δεκαετίες η έρευνα και οι εφαρμογές άλλων τεχνολογιών για έλεγχο των δονήσεων στις κατασκευές είναι ολοένα αυξανόμενη [7].

1.1 Αντισεισμική προστασία κτιρίων

Η κίνηση του εδάφους κοντά στο επίκεντρο του σεισμού χαρακτηρίζεται από υψηλή μέγιστη τιμή της επιτάχυνσής του και έναν μεγάλο παλμό ταχύτητας και μετατόπισης. Η επιτάχυνση του εδάφους δημιουργεί αδρανειακές δυνάμεις στη δομή του κτιρίου προκαλώντας παραμορφώσεις [26].

Οι συμβατικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για την προστασία των κτιρίων από σεισμούς βασίζονται στο πόσο η ίδια η κατασκευή είναι στιβαρή και ανθεκτική, ώστε να καταφέρει να απορροφήσει την ενέργεια που παράγεται από τον σεισμό. Η ιδιότητα αυτή προέρχεται από την ανελαστική λειτουργία του σκελετού του κτιρίου, η οποία όμως μετά από πιθανότατα πολλούς κύκλους κατά τους οποίους θα βρεθεί υπό το φορτίο της σεισμικής δόνησης, να οδηγήσει σε καταστροφή της δομής του. Πιο συγκεκριμένα, η οριζόντια κίνηση του εδάφους είναι η πιο καταστροφική ως προς τη δομή του κτιρίου [16]. Η ανωτέρω κατασκευή των κτιρίων αποτελεί μία παθητική μορφή αντισεισμικής προστασίας.

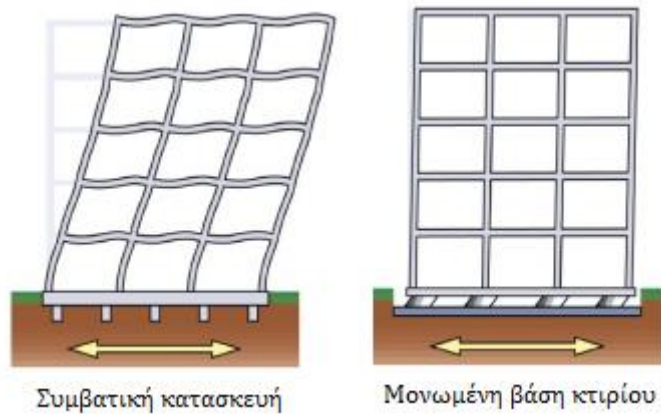
Γενικά, οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί με στόχο την αντισεισμική προστασία κτιρίων και άλλων εγκαταστάσεων μπορούν να χαρακτηριστούν ως παθητικές, ημι-ενεργητικές, ενεργητικές και υβριδικές.

Ειδικά σε χώρες οι οποίες είναι ιδιαίτερα σεισμογενείς, οι εφαρμογές των ανωτέρω τεχνολογιών εφαρμόζονται σε έναν αυξανόμενο αριθμό κτιρίων, κυρίως μεγάλου ύψους, και άλλων κατασκευών.

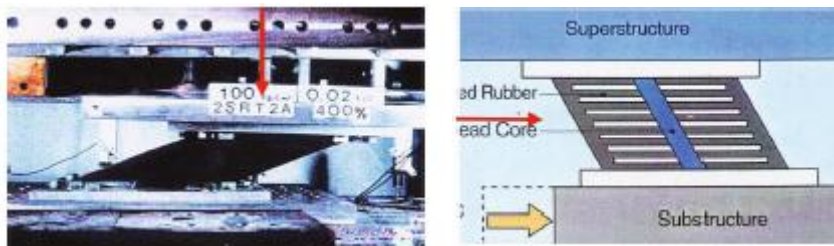
1.1.1 Παθητικά Συστήματα Ελέγχου

Τα παθητικά συστήματα ελέγχου έχουν την δυνατότητα να μειώσουν την ενέργεια της σεισμικής διαταραχής η οποία θα επενεργήσει στη δομή του κτιρίου, μειώνοντας έτσι πιθανές καταστροφές. Τέτοια συστήματα όμως έχουν περιορισμένη δυνατότητα ελέγχου μιας και είναι αποτελεσματικά σε ένα στενό εύρος συχνοτήτων της διαταραχής.

Ένα ευρέως εφαρμοζόμενο παθητικό σύστημα είναι σεισμική μόνωση βάσης (base seismic isolation). Η συγκεκριμένη τεχνολογία γίνει αποδεκτή σε σεισμογενείς χώρες όπως Ιαπωνία, ΗΠΑ, Ιταλία και Νέα Ζηλανδία και εφαρμόζεται τόσο σε κτίρια όσο και σε γέφυρες [25]. Η τεχνολογία αυτή αφορά την παθητική απορρόφηση ενέργειας της σεισμικής δόνησης κάνοντας χρήση εφευρέσεων στα υποστυλώματα του κτιρίου. Συγκεκριμένα, το κτίριο στηρίζεται πάνω σε υλικά τα οποία έχουν χαμηλή πλευρική ακαμψία και είναι ελαστικά, ενώ παράλληλα έχουν υψηλή κάθετη ακαμψία. Έτσι, κατά την διάρκεια του σεισμού η εύκαμπτη αυτή βάση που έχει δημιουργηθεί είναι ικανή να αποσβέσει τις υψηλές συχνότητες από την κίνηση του εδάφους απομονώνοντάς το από την οριζόντια κίνησή του, μειώνοντας έτσι το μέγεθος της καταπόνησης που θα υποστεί το κτίριο (σχ. 1-1, 1-2, 1-3) [7][11].



Σχήμα 1-1. Σεισμικά μονωμένη βάση κτιρίου (1)

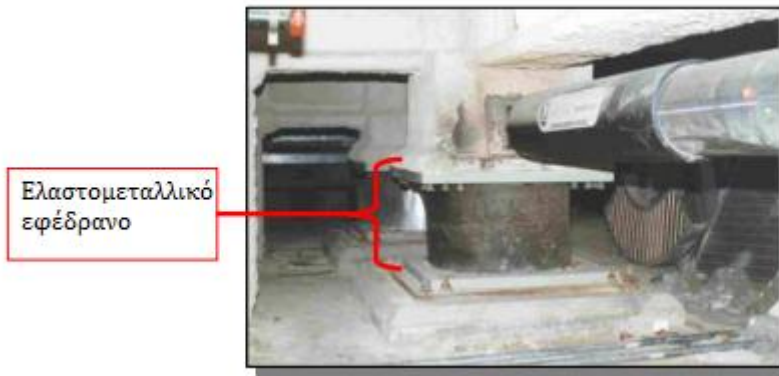


Σχήμα 1-2. Σεισμικά μονωμένη βάση κτιρίου (2)

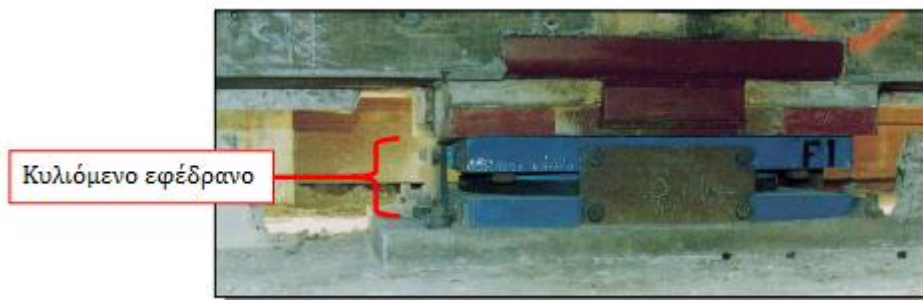


Σχήμα 1-3. Σεισμικά μονωμένη βάση κτιρίου Shaanxi Province

Η μόνωση βάσης μπορεί να γίνει είτε μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων (elastomeric bearings) (σχ. 1-4) είτε μέσω κυλιόμενων εφεδράνων (sliding bearings) (σχ. 1-5). Τα ελαστικά εφέδρανα λόγω της χαμηλής απόσβεσης που προσφέρουν πρέπει να συνδυαστούν με κάποια πρόσθετη συσκευή απόσβεσης προκειμένου να μπορέσουν να διαχειριστούν υψηλές πλευρικές μετατοπίσεις.



Σχήμα 1-4. Ελαστικό εφέδρανο

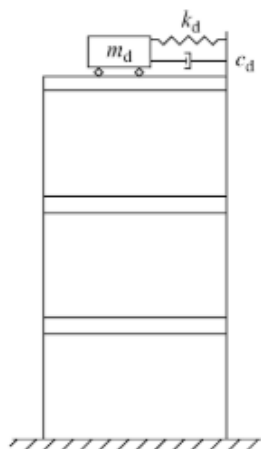


Σχήμα 1-5. Κυλιόμενο εφέδρανο

Μία ακόμη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για παθητικό έλεγχο των κτιριακών εγκαταστάσεων είναι αυτή των αποσβεστήρων συντονισμένης μάζας (Tuned Mass Damper - TMD) η οποία χρησιμοποιείται για σεισμική προστασία αλλά και για προστασία από τις δυνάμεις εξαιτίας του ανέμου. Και αυτή η τεχνολογία ως παθητική δεν απαιτεί εξωτερική τροφοδοσία ούτε κάνει χρήση μετρήσεων σχετικά με την κατάσταση του κτιρίου. Στην πιο απλή εκδοχή της, μία μάζα συνδυασμένη με ελατήριο και αποσβεστήρα τοποθετείται συνήθως στη κορυφή του κτιρίου, έτσι επιτυγχάνεται δυναμική απορρόφηση των δονήσεων που υπόκειται το κτίριο, μίας και η μάζα του θα παραμένει ακίνητη ενώ ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας θα ταλαντώνεται με συχνότητα ανάλογη της διέγερσης από την σεισμική διαταραχή. Οι TMD έχουν κάποιους βασικούς περιορισμούς, ειδικά σε περίπτωση που η χρήση τους αφορά σεισμική προστασία, όπως η λειτουργία τους σε μία μόνο πιθανή κατάσταση, η ευπάθειά τους στην κακή ρύθμιση των παραμέτρων τους και ο μεγάλος όγκος που καταλαμβάνουν.

Τα παθητικά συστήματα ελέγχου είναι γενικά αποτελεσματικά στο να μειώσουν την επιρροή της σεισμικής διαταραχής στο κτίριο, ειδικά όταν πρόκειται για μικρής ή μεσαίας ισχύος σεισμική διαταραχή. Καθώς όμως η διαταραχή γίνεται πιο ισχυρή, ή το κτίριο βρίσκεται πιο κοντά στο επίκεντρό της, η επιτάχυνση του εδάφους αυξάνεται πολύ πιο απότομα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα παθητικά συστήματα ελέγχου πιθανότατα να μην επαρκούν ώστε να

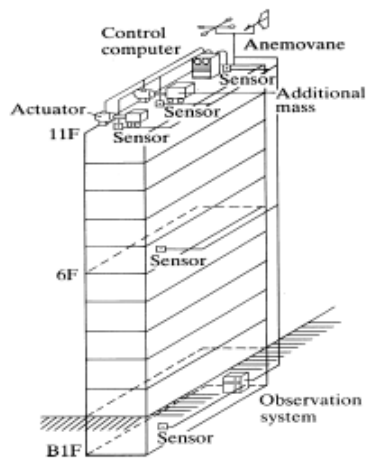
αποσβεστεί άμεσα και επαρκώς η ενέργεια της διαταραχής, αυξάνοντας τον κίνδυνο πρόκληση καταστροφών στο κτίριο [26].



Σχήμα 1-6. Κατασκευή με χρήση αποσβεστήρα συντονισμένης μάζας (TMD)

1.1.2 Ενεργητικά Συστήματα Ελέγχου

Ένα ενεργητικό σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει εξωτερική πηγή ενέργειας όπου τροφοδοτεί επενεργητές, συνήθως ηλεκτροϋδραυλικούς ή ηλεκτρομηχανικούς, οι οποίοι εφαρμόζουν κατάλληλες δυνάμεις στην κατασκευή. Οι δυνάμεις αυτές χρησιμοποιούνται τόσο για να προσθέσουν ενέργεια όσο και για να απορροφήσουν ενέργεια από την κατασκευή υπό έλεγχο. Σε ένα ενεργητικό σύστημα κλειστού βρόχου τα σήματα ελέγχου των επενεργητών προκύπτουν από μετρήσεις αισθητήρων όπου έχουν τοποθετηθεί στο κτίριο. Οι αισθητήρες μπορεί να είναι οπτικοί, μηχανικοί, ηλεκτρικοί κ.α. Η πληροφορία που παρέχεται από τους αισθητήρες αξιοποιείται από τον κατάλληλα σχεδιασμένο αλγόριθμο ελέγχου της εγκατάστασης ώστε να εφαρμοστούν τελικά οι απαιτούμενες δυνάμεις από τους επενεργητές (σχ. 1-3). Βασικό πλεονέκτημα των ενεργητικών συστημάτων γενικότερα είναι πως η ικανότητα που έχουν να προσαρμοστούν στις συνθήκες που προκύπτουν εξαιτίας των χαρακτηριστικών της διαταραχής, ειδικά όταν πρόκειται για κτίριο το οποίο βρίσκεται κοντά στο επίκεντρό της και η επιρροή της επιτάχυνσης του εδάφους είναι πολύ σημαντική [14] [19][22][26][28].



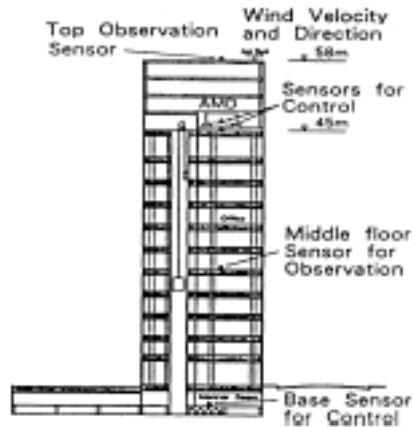
Σχήμα 1-7. Εφαρμογή Ενεργητικού Συστήματος Ελέγχου στο Kyobashi Seiwa Building

1.1.3 Υβριδικά Συστήματα Ελέγχου

Στα υβριδικά συστήματα ελέγχου παθητικά συστήματα συνδυάζονται κατάλληλα με ενεργητικά συστήματα ελέγχου ώστε να επιτευχθεί αύξηση της συνολικής απόδοσης. Η ύπαρξη πολλαπλών στοιχείων ελέγχου οδηγεί στην αναίρεση κάποιων περιορισμών που θα είχε κάθε σύστημα μεμονωμένα. Ακόμη, τα υβριδικά συστήματα ελέγχου μπορούν να χαρακτηριστούν ως πιο αξιόπιστα συγκριτικά με κάποια αμιγώς ενεργητικά συστήματα, αλλά παράλληλα έχουν αυξημένη πολυπλοκότητα ως προς την υλοποίησή τους (σχ. 1-6, 1-7) [14][22].



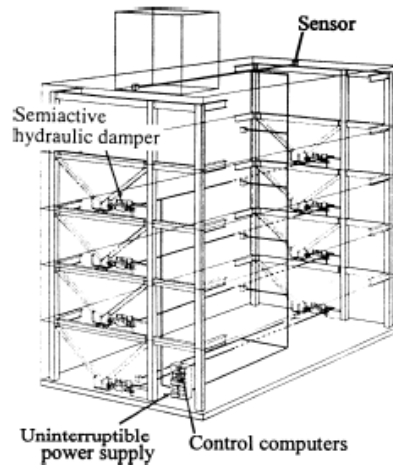
Σχήμα 1-8. Υβριδικός έλεγχος κτιρίου Guangzhou Tower (TMD+AMD)



Σχήμα 1-9. Εφαρμογή Υβριδικού Συστήματος Ελέγχου στο Sendagaya INTES Building

1.1.4 Ημι-ενεργητικά Συστήματα Ελέγχου

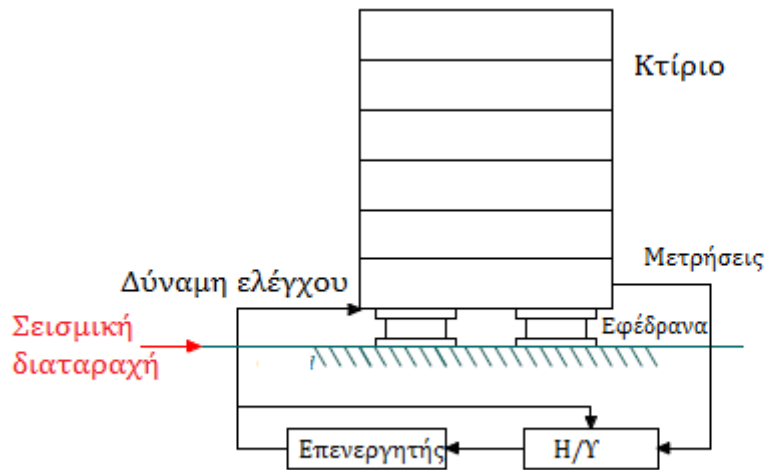
Τα ημι-ενεργητικά συστήματα ελέγχου είναι μία πιο πρόσφατη υλοποίηση για εφαρμογές ελέγχου δομής μίας εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, είναι συνήθως παθητικά συστήματα ελέγχου τα οποία έχουν τροποποιηθεί έτσι ώστε τελικά οι μηχανικές τους ιδιότητες να μπορούν ελεγχθούν και να προσαρμοστούν ανάλογα με τις συνθήκες. Έτσι συνήθως δεν χρησιμοποιούνται για να προσφέρουν μηχανική ενέργεια στη δομή της κατασκευής. Οι δυνάμεις ελέγχου, όπως σε ένα παθητικό σύστημα, δημιουργούνται ως αποτέλεσμα της ίδιας της κίνησης της κατασκευής, αλλά μιας και υπάρχει παράλληλα και ο κατάλληλος ελεγκτής, όπως σε ένα ενεργητικό σύστημα, μέσω ανάδρασης από τις μετρήσεις των αισθητήρων, γίνεται η κατάλληλη ρύθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών τους. Τα ημι-ενεργητικά συστήματα ελέγχου επίσης κατατάσσονται στα συστήματα των οποίων οι ενεργειακές απαιτήσεις από εξωτερική πηγή τροφοδοσίας είναι τάξεις μεγέθους μικρότερες από αυτές που απαιτούνται σε εφαρμογές ενεργητικών συστημάτων ελέγχου (σχ. 1-5) [14] [24].



Σχήμα 1-10. Εφαρμογή Ημι-ενεργητικού Συστήματος Ελέγχου στο Kajima Shizuoka Building

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η διάταξη όπου θα χρησιμοποιηθεί αφορά ένα μοντέλο κτιρίου τεσσάρων ορόφων (Παράρτημα Γ) στο οποίο υπάρχει σεισμική μόνωση της βάσης του. Ακόμη, θα υπάρχει εγκατεστημένος ένας υδραυλικός επενεργητής ελεγχόμενος από μία ηλεκτροϋδραυλική σερβοβαλβίδα. Έτσι, εκμεταλλευόμενοι τα πλεονεκτήματα του παθητικού ελέγχου, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των διαταραχών που μεταδίδονται από την οριζόντια κίνηση του εδάφους στον πρώτο όροφο (βάση) του κτιρίου. Στη συνέχεια κάνοντας χρήση των πληροφοριών της κίνησης της δομής του κτιρίου, μέσω του ενεργητικού ελέγχου, ασκούνται δυνάμεις κατάλληλες ώστε να αντισταθμίσουν τις δυνάμεις διαταραχής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί από μια μοναδική δύναμη επενέργησης στην βάση της δομής του κτιρίου [21]. Η βάση του επενεργητή βρίσκεται στο έδαφος ενώ το έμβολο του επενεργητή θα ασκεί δυνάμεις ελέγχου στον πρώτο όροφο του κτιρίου (σχ. 1-11). Μετρήσεις για την κατάσταση του κτιρίου λαμβάνονται μέσω επιταχυνσιόμετρων κατάλληλα τοποθετημένων σε κάθε όροφο της εγκατάστασης. Στην συνέχεια ο νόμος ελέγχου που σχεδιάστηκε υπολογίζει την απαιτούμενη δύναμη, ώστε ασκώντας την στον πρώτο όροφο του κτιρίου, οι απόλυτες μετατοπίσεις και ταχύτητες των ορόφων να μειωθούν τόσο σε πλάτος όσο και σε συχνότητα.



Σχήμα 1-11. Διάταξη Ελέγχου του κτιρίου

1.3 Οργάνωση κειμένου

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάστηκαν τεχνολογίες που αφορούν την αντισεισμική προστασία και τον έλεγχο δονήσεων σε κτίρια και άλλες εγκαταστάσεις, όπως και η προσέγγιση που θα ακολουθηθεί στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Στο Κεφάλαιο 2 θα αναλυθεί η λειτουργία της ηλεκτροϋδραυλικής σερβοβαλβίδας αλλά και του υδραυλικού επενεργητή. Παράλληλα θα αναπτυχθεί το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει το μη γραμμικό αυτό σύστημα. Στο Κεφάλαιο 3 θα σχεδιαστεί ο εύρωστος ελεγκτής H_∞ που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της δύναμης ελέγχου που απαιτείται από τον υδραυλικό επενεργητή. Ακόμη θα σχεδιαστεί ένας ελεγκτής PID ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της δύναμης που θα εφαρμόζεται από τον υδραυλικό επενεργητή στο κτίριο. Στο Κεφάλαιο 4 θα παρουσιαστεί η λειτουργία ενός Παρατηρητή Άγνωστης Εισόδου (Unknown Input Observer) και θα χρησιμοποιηθεί ώστε να σχεδιαστεί η διάταξη ανίχνευσης και αναγνώρισης σφαλμάτων στους αισθητήρες όπου θα βρίσκονται εγκατεστημένοι στο κτίριο. Τέλος στο Κεφάλαιο 5 θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν με την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων και η μελλοντική εργασία που προτείνεται να γίνει.

2

Μοντελοποίηση Υδραυλικού Συστήματος

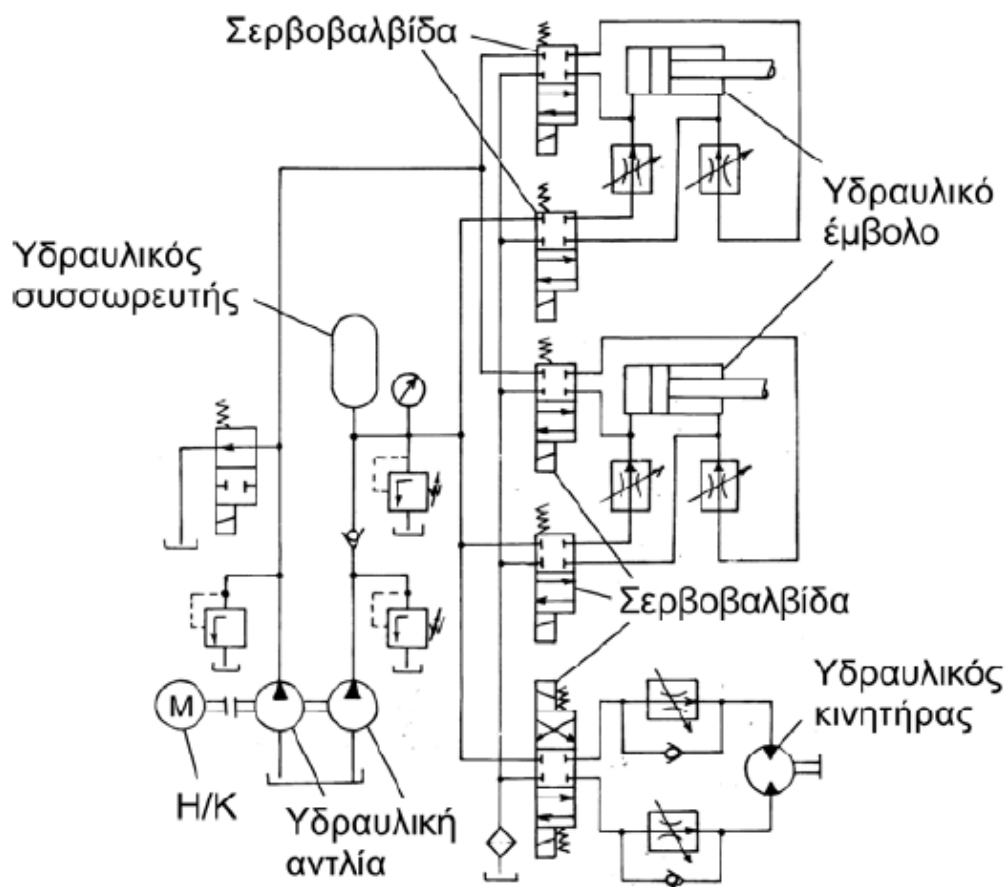
Επενέργησης

Για τον έλεγχο του μοντέλου της κτιριακής εγκατάστασης θα γίνει χρήση ενός υδραυλικού επενεργητή, ο οποίος θα είναι τοποθετημένος στον πρώτο όροφο του κτιρίου. Ο έλεγχος της αποδιδόμενης υδραυλικής ισχύος θα γίνεται μέσω μίας ηλεκτροϋδραυλικής σερβοβαλβίδας.

Για την παρούσα εφαρμογή επιλέχθηκε ο υδραυλικός μηχανισμός που προαναφέρθηκε μιας και υπερτερεί σε σχέση με πνευματικά και ηλεκτρικά συστήματα. Βασικά πλεονεκτήματα των υδραυλικών συστημάτων όπου το εργαζόμενο μέσο είναι υγρό, είναι η δημιουργία πολύ μεγάλων δυνάμεων όπως και ο πολύ υψηλός λόγος δυνάμεως προς βάρος [32]. Στα υδραυλικά συστήματα δεν παρατηρούνται φαινόμενα ανάλογα του μαγνητικού κορεσμού όπως στις ηλεκτρικές μηχανές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η δύναμη που αναπτύσσεται να περιορίζεται μόνο από τα όρια ασφαλούς λειτουργίας της εκάστοτε εγκατάστασης. Έτσι, οι υδραυλικοί επενεργητές επιτυγχάνουν υψηλές ροπές έχοντας σχετικά μικρό μέγεθος εγκατάστασης. Επιπλέον, οι υδραυλικοί επενεργητές έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν υπό συνεχείς, διακοπτόμενες ή στάσιμες συνθήκες χωρίς να προκληθεί σε αυτούς κάποια βλάβη ή φθορά. Ακόμη, το υδραυλικό ρευστό δρα παράλληλα και ως λιπαντική ουσία, επεκτείνοντας έτσι την διάρκεια ζωής του συστήματος. Χάρη στην μεγάλη ακαμψία των υδραυλικών επενεργητών ακόμη και με εφαρμογή μεγάλου φορτίου, ειδικά σε εφαρμογές

κλειστού βρόχου, παρατηρείται μικρή πτώση στην ταχύτητα απόκρισης, όπως και μικρό σφάλμα θέσεως [17].

Τα κυριότερα δομικά στοιχεία ενός σερβοϋδραυλικού συστήματος επενέργειας είναι η μονάδα παροχής ισχύος και ο σερβομηχανισμός. Η μονάδα παροχής ισχύος περιλαμβάνει ηλεκτροκινητήρα, υδραυλική αντλία, αποταμιευτή ενέργειας, ανακουφιστικές βαλβίδες κ.α. Ο σερβομηχανισμός περιλαμβάνει την σερβοβαλβίδα η οποία είναι απαραίτητη για τον έλεγχο της διάταξης, τον υδραυλικό επενεργητή (περιστροφικός ή κυλινδρικός έμβολο) και το μηχανικό φορτίο. Στα συστήματα αυτά η μηχανική ισχύς μετατρέπεται μέσω της αντλίας σε υδραυλική ισχύ και μέσω του εργαζόμενου μέσου μεταφέρεται στον επενεργητή όπου και πάλι μετατρέπεται σε μηχανική, για την εκτέλεση του έργου που απαιτείται [17] [33].



Σχήμα 2-1. Τυπικό διάγραμμα σερβοϋδραυλικού συστήματος

Το μοντέλο που θα κατασκευαστεί στη συνέχεια δε θα συμπεριλαμβάνει τα στοιχεία παροχής ισχύος που προαναφέρθηκαν, μιας και στα πλαίσια της ανάλυσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν ήταν απαιτούμενο και απαραίτητο στοιχείο. Η μοντελοποίηση της ηλεκτροϋδραυλικής σερβοβαλβίδας και του επενεργητή, έχοντας ως δεδομένο την σταθερή

πίεση παροχής από την αντλία, επαρκεί ώστε να γίνει μία ρεαλιστική προσομοίωση της δυναμικής.

2.1 Ιδιότητες Υδραυλικών Ρευστών και Υδραυλική Ροή

Υγρά ή αέρια σώματα τα οποία παρουσιάζουν ροή χαρακτηρίζονται ως ρευστά. Συγκεκριμένα είναι τα σώματα τα οποία παραμορφώνονται με την επίδραση διατμητικών τάσεων και διαφέρουν από τα στερεά γιατί δεν μπορούν να υφίστανται διατμητική τάση χωρίς παράλληλα την ύπαρξη κινήσεως. Η διαρκής παραμόρφωση των ρευστών χαρακτηρίζεται ως ροή [32] [35].

2.1.1 Πυκνότητα

Η πυκνότητα βάρους (ειδικό βάρος) ορίζεται ως το βάρος του ρευστού ανά μονάδα όγκου και συμβολίζεται ως γ . Η πυκνότητα μάζας ενός ρευστού ορίζεται ως η μάζα του ρευστού ανά μονάδα όγκου. Η σχέση μεταξύ των δύο προαναφερθέντων πυκνοτήτων είναι:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (2-1)$$

Όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, $g = 9,81\text{m/s}$.

Η πυκνότητα ενός ρευστού είναι συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Κάνοντας χρήση σειράς Taylor μία εκτίμηση είναι η ακόλουθη:

$$\rho = \rho_0 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial P}\right)_T (P - P_0) + \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_P (T - T_0) \quad (2-2)$$

Όπου ρ , P και T είναι αντίστοιχα η πυκνότητα της μάζας, η πίεση και η θερμοκρασία του ρευστού και αντίστοιχα με το δείκτη μηδέν οι αρχικές τιμές τους.

Η εξ. (2-2) μπορεί να γραφεί ως:

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \frac{1}{\beta} (P - P_0) - \alpha (T - T_0) \right] \quad (2-3)$$

όπου

$$\beta = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_T \quad \text{και} \quad \alpha = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P \quad (2-4)$$

ισοδύναμα

$$\beta = -V_0 \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T \quad (2-5)$$

όπου β το μέτρο όγκου του ρευστού (bulk modulus).

2.1.2 Πίεση

Η πίεση ορίζεται ως ο λόγος της δύναμης που ασκεί το ρευστό σε μία επιφάνεια προς το εμβαδό της επιφάνειας αυτής:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2-6)$$

Υποθέτοντας ένα ρευστό περιορισμένο σε μία επιφάνεια, οποιαδήποτε μεταβολή της πίεσης σε οποιοδήποτε σημείο του ρευστού θα προκαλέσει ίση μεταβολή της πίεσης σε όλα τα σημεία του. Αυτή η φυσική αντίδραση ονομάζεται αρχή του Pascal και βάσει αυτής προκύπτει πως οποιαδήποτε πίεση ασκηθεί σε επιφάνεια ρευστού μεταδίδεται ομοιόμορφα εντός της επιφάνειας αυτής σε κάθε διεύθυνση και σε όλο το βάθος του [35].

2.1.3 Ιξώδες

Ως ιξώδες (συνεκτικότητα) ορίζεται το μέτρο της αντίστασης στην κίνηση ενός ρευστού πάνω σε μία επιφάνεια, αποτελεί μέτρο απωλειών ροής στα υδραυλικά συστήματα και δηλώνει τη δυσκολία του ρευστού να υπερνικήσει την τάση επαφής όταν το ρευστό κινείται σε μία στερεά επιφάνεια. Το κινηματικό ιξώδες ορίζεται ως:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-7)$$

$$\mu = \mu_0 e^{-\lambda(T-T_0)} \quad (2-8)$$

Όπου μ απόλυτο ιξώδες ρευστού, εξαρτάται κυρίως από τη μεταβολή της θερμοκρασίας T και λιγότερο από τη μεταβολή της πίεσης P . Όπου λ σταθερά σχετική με το ρευστό.

2.1.4 Μέτρο όγκου και μέτρο συμπιεστότητας

Η συμπιεστότητα των ρευστών ($1/\beta$) μεταδόσεως ισχύος αποτελεί βασικό παράγοντα για τον καθορισμό της συχνότητας συντονισμού του συστήματος, η οποία και θέτει περιορισμούς στην ταχύτητα απόκρισης της εξόδου [32]. Επίσης, το μέτρο όγκου β (bulk modulus) ενός ρευστού περιγράφει την μεταβολή του όγκου του ρευστού με την μεταβολή της πίεσης υπό σταθερή θερμοκρασία [29]. Όπως δείχθηκε προηγουμένως για το μέτρο όγκου ισχύει:

$$\frac{1}{\beta} = -\frac{1}{V_0} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad (2-9)$$

Ακόμη, το μέτρο όγκου μπορεί να μειωθεί σημαντικά εξαιτίας παγιδευμένων φυσαλίδων αέρα. Έτσι τελικά η τιμή του μέτρου όγκου που συμπεριλαμβάνει την επίδραση αυτή θα είναι χαμηλότερη και συμβολίζεται ως β_e (effective bulk modulus).

Για ρευστά με βάση το πετρέλαιο, μία αποδοτική τιμή του μέτρου όγκου μπορεί να θεωρηθούν τα 100.000 psi ώστε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα [17]. Το υδραυλικό ρευστό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του μοντέλου ήταν το Mobil DTE 25 [37].

2.1.5 Υδραυλική Ροή

Για τις περισσότερες εφαρμογές που αφορούν υδραυλικούς επενεργητές η πίεση λειτουργίας του υδραυλικού ρευστού είναι συνήθως αρκετά μικρότερη σε σχέση με αυτή του μέτρου όγκου. Επιπρόσθετα, η μεταβολή της πίεσης που επηρεάζει τον όγκο είναι αμελητέα. Έτσι συμπεραίνεται πως η ασυμπίεστη ροή είναι μία επαρκής προσέγγιση της υδραυλικής ροής του συστήματος με σταθερή τιμή πυκνότητας [17] [35].

Θεωρώντας έναν απειροστά μικρό όγκο ελέγχου και εφαρμόζοντας τον δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα για τις τρεις κατευθύνσεις της κίνησης, προκύπτουν οι εξισώσεις Navier - Stokes:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho X - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2-10)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho Y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2-11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho Z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2-12)$$

Οι όροι στην αριστερή πλευρά των εξισώσεων είναι αποτέλεσμα της αδράνειας του ρευστού, οι τελευταίοι τρεις όροι στην δεξιά πλευρά των εξισώσεων είναι αποτέλεσμα της ιξώδους τριβής.

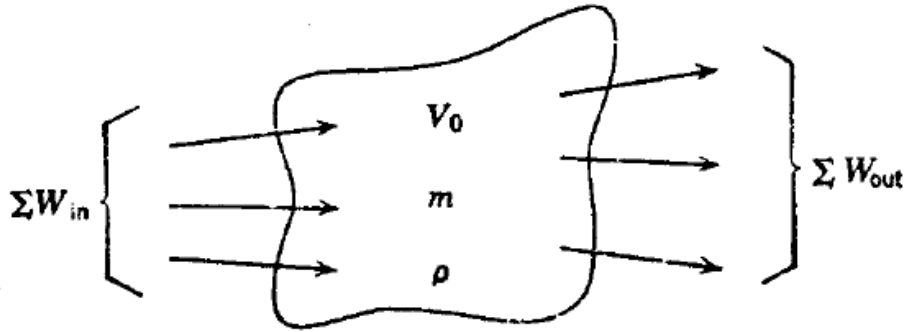
Ο λόγος της δύναμης εξαιτίας της αδράνειας προς τη δύναμη εξαιτίας του ιξώδους, ορίζεται ως ο αριθμός Reynolds. Ένας μεγάλος αριθμός Reynolds (> 4000) υποδηλώνει πως οι αδρανειακοί όροι είναι κυρίαρχοι και η ροή χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης, ενώ ένας μικρός αριθμός Reynolds (<2000) υποδηλώνει την υπερίσχυση των δυνάμεων τριβής εξαιτίας του ιξώδους του ρευστού και η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή. Ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται ως:

$$R = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{u d}{\nu} \quad (2-13)$$

Όπου u η μέση ταχύτητα της ροής, d χαρακτηριστικό μήκος της ροής, ν κινηματικό ιξώδες.

Η ροή μάζας του ρευστού ($M = \rho Q$) που εισέρχεται στον όγκο ελέγχου πρέπει να είναι ίση με αυτή του που εξέρχεται, έτσι προκύπτει η εξίσωση συνέχειας του ρευστού (εξ. 2-14, σχ. 2-2):

$$\sum W_{in} - \sum W_{out} = g \frac{dm}{dt} = g \frac{d(\rho V_0)}{dt} \quad (2-14)$$



Σχήμα 2-2. Ροές που εισέρχονται και εξέρχονται του όγκου ελέγχου

Εσωτερικά του όγκου ελέγχου του ρευστό καταναλώνει έργο $\frac{dW_x}{dt}$, ενώ παράλληλα μεταφέρεται και θερμική ενέργεια από το εξωτερικό περιβάλλον προς τον όγκο με ρυθμό $\frac{dQ_h}{dt}$. Έτσι από τον νόμο διατήρησης της ενέργειας (1ος Νόμος της Θερμοδυναμικής) προκύπτει:

$$\frac{dQ_h}{dt} - \frac{dW_x}{dt} + \sum W_{in} h_{oin} - \sum W_{out} h_{oout} = \frac{dE}{dt} \quad (2-15)$$

Όπου E η ολική ενέργεια του ρευστού εσωτερικά του όγκου ελέγχου και h συνολική ενέργεια.

Υποθέτοντας σταθερή ροή σε μία διάσταση, η οποία είναι ασυμπίεστη και χωρίς τριβές, από τις εξισώσεις Navier - Stokes προκύπτει:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2-16)$$

Ολοκληρώνοντας την εξ. 2-16 προκύπτει η εξίσωση Bernoulli:

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} = \text{σταθερό} \quad (2-17)$$

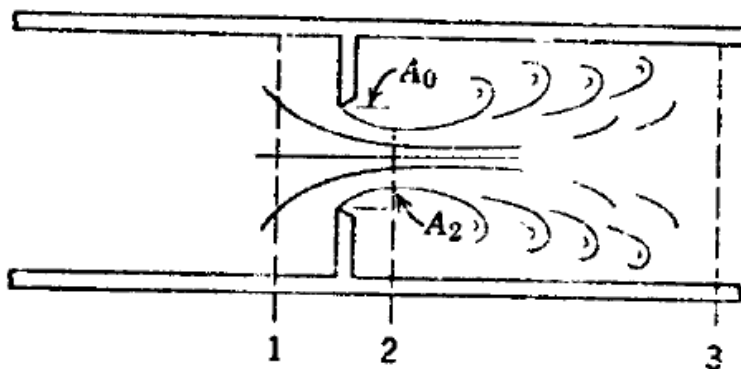
Για την ροή ρευστού σε στόμια όπως στο σχ. 2-3 και θεωρώντας ομοιόμορφη την ταχύτητα κατά την ροή, βάσει της εξίσωσης Bernoulli προκύπτει:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} = \frac{P_3}{\gamma} + \frac{u_3^2}{2g} \quad (2-18)$$

Για ένα ασυμπίεστο ρευστό, βάσει της διατήρησης της μάζας προκύπτει:

$$Q = A_1 u_1 = A_2 u_2 = A_3 u_3 \quad (2-19)$$

Όπου A οι αντίστοιχες επιφάνειες στο σχ. 2-3 και Q ο ρυθμός ροής του ρευστού.



Σχήμα 2-3. Ροή ρευστού μέσα από άνοιγμα

Στο σχ. 2-3 το σημείο όπου η δέσμη του ρευστού έχει τη μικρότερη επιφάνεια και τη μέγιστη ταχύτητα ονομάζεται σημείο συνεσταλμένης διατομής (vena contracta). Ο λόγος της περιοχής ροής στο σημείο συνεσταλμένης διατομής A_2 προς την επιφάνεια του στομίου A_0 ονομάζεται συντελεστής συστολής C_c .

$$A_2 = C_c A_0 \quad (2-20)$$

Από την εξ. 2-18 προκύπτει:

$$u_2^2 - u_1^2 = \frac{2}{\rho} (P_1 - P_2) \quad (2-21)$$

Συνδυάζοντας τις εξ. 2-19, 2-20, 2-21 προκύπτει:

$$Q = C_d A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (2-22)$$

Όπου $C_d = C_c / \sqrt{1 - C_c^2 (A_0/A_1)^2}$ ορίζεται ως ο συντελεστής εκφόρτισης και είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του στομίου και των ιδιοτήτων της ροής. Ο υπολογισμός του έχει υψηλό βαθμό δυσκολίας. Μία καλή εκτίμηση που χρησιμοποιείται γενικά για ροές σε μικρά στόμια ($A_0 \ll A_1$) είναι $C_d \cong 0.6$ [17].

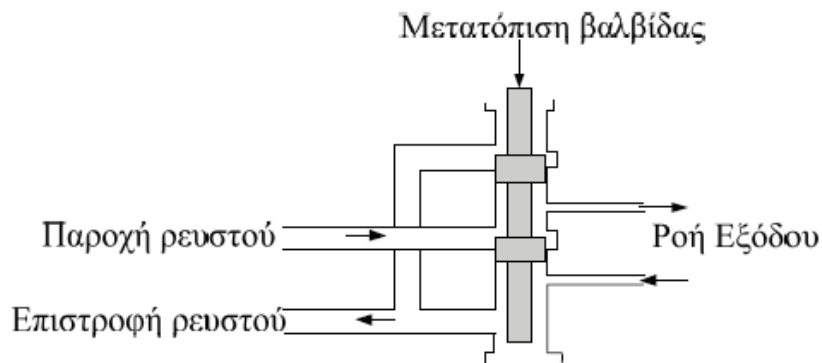
Θεωρώντας σταθερή τη θερμοκρασία από τις εξ. 2-3, 2-14, 2-15 προκύπτει:

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0}{\beta} \frac{dP}{dt} \quad (2-23)$$

Ο πρώτος όρος στα δεξιά της εξ. 2-23 δείχνει την ροή που καταναλώνεται εξαιτίας της διαστολής του όγκου ελέγχου (σε περίπτωση όπου ο όγκος δεν θεωρείται σταθερός, ειδάλως ο όρος αυτός θα είναι μηδενικός). Ο δεύτερος όρος είναι η ροή συμπιεστότητας και περιγράφει την ροή που προκύπτει από τις μεταβολές της πίεσης.

2.2 Έλεγχος υδραυλικής ισχύος

Για να μπορέσει ένα υδραυλικό σύστημα να έχει συνεχή, ομαλή και αποδοτική λειτουργία, θα πρέπει να βρίσκεται υπό κατάλληλο έλεγχο. Η ρύθμιση της υδραυλικής ισχύος και ο έλεγχος των χαρακτηριστικών του εργαζόμενου μέσου επιτυγχάνεται μέσω βαλβίδων. Οι βαλβίδες, όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στο σχ. 2-4, είναι συσκευές που αποτελούνται από ένα κέλυφος το οποίο εσωτερικά περιέχει διόδους μέσω των οποίων κινείται το υδραυλικό ρευστό και ένα κινούμενο εξάρτημα το οποίο βρίσκεται στο εσωτερικό του κελύφους. Η κίνηση αυτού του εξαρτήματος ανοίγει και κλείνει τις διάφορες διόδους της βαλβίδας ώστε τελικά να ρυθμιστεί κατάλληλα η πίεση του συστήματος, η κατεύθυνση της ροής και η παροχή [32].



Σχήμα 2-4. Βαλβίδα τύπου εμβόλου τεσσάρων δρόμων - τριών θέσεων

2.2.1 Γενική Ανάλυση Βαλβίδας

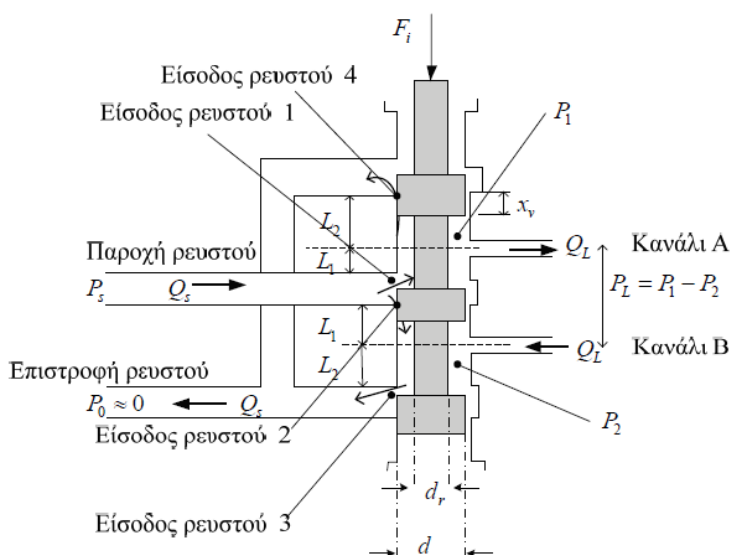
Οι σχέσεις και οι αρχές που θα αναπτυχθούν σε αυτό το κομμάτι είναι γενικές και μπορούν να αναφερθούν σε διάφορες διαφορετικές διατάξεις βαλβίδων. Στην παρούσα φάση στην ανάλυση της βαλβίδας του σχ. 2-5 θα επικεντρωθούμε στα χαρακτηριστικά μόνιμης κατάστασης. Έτσι οι ροές συμπιεστότητας θεωρούνται μηδενικές και οι εξισώσεις συνέχειας για τον κάθε θάλαμο προκύπτουν:

$$Q_L = Q_1 - Q_4 \quad (2-24)$$

$$Q_L = Q_3 - Q_2 \quad (2-25)$$

$$P_L = P_1 - P_2 \quad (2-26)$$

Όπου Q_L η ροή διαμέσου του φορτίου και P_L η πτώση πίεσης στο φορτίο.



Σχήμα 2-5. Βαλβίδα τύπου εμβόλου τεσσάρων δρόμων - τριών θέσεων

Οι ροές μέσω των στομιών εξαρτώνται από την πίεση και από την επιφάνεια του ανοίγματος του εκάστοτε στομιού, έτσι, θεωρώντας την πίεση επιστροφής $P_0 = 0$, οι ροές υπολογίζονται ως:

$$Q_1 = C_d A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)} \quad (2-27)$$

$$Q_2 = C_d A_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_2)} \quad (2-28)$$

$$Q_3 = C_d A_3 \sqrt{\frac{2}{\rho} P_2} \quad (2-29)$$

$$Q_4 = C_d A_4 \sqrt{\frac{2}{\rho} P_1} \quad (2-30)$$

Η βαλβίδα που μοντελοποιείται είναι τύπου κρίσιμου κέντρου (critical center valve) μιας και η πλειοψηφία των βαλβίδων είναι τέτοιας κατασκευής. Αυτό σημαίνει πως οι ακμές των στομιών θεωρούνται ιδανικά τετράγωνα. Ακόμη θεωρείται πως οι επιφάνειες του ανοίγματος των στομιών είναι συμμετρικές

$$A_1 = A_2 \quad (2-31)$$

$$A_2 = A_4 \quad (2-32)$$

Επιπλέον, λόγω συμμετρίας, προκύπτει όμοια και για τις ροές:

$$Q_1 = Q_3 \quad (2-33)$$

$$Q_2 = Q_4 \quad (2-34)$$

Αντικαθιστώντας τις εξ. 2-27, 2-29, 2-31 στην εξ. 2-33 προκύπτει:

$$P_s = P_1 + P_2 \quad (2-35)$$

Από τις εξ. 2-26 και 2-36 έχουμε:

$$P_1 = \frac{P_s + P_L}{2} \quad (2-36)$$

$$P_2 = \frac{P_s - P_L}{2} \quad (2-37)$$

Οι επιφάνειες των στομιών είναι συναρτήσεις της γεωμετρίας της βαλβίδας. Ορίζοντας ως x_v την μετατόπιση του εμβόλου της βαλβίδας, x_{vmax} την τιμή της μέγιστης μετατόπισης του εμβόλου της βαλβίδας και ως w την βαθμίδα επιφάνειας ανοίγματος (orifice area gradient), η επιφάνεια του στομιού μπορεί να εκφραστεί ως:

$$A_{vs} = w |\tilde{x}_v| x_{vmax} \quad (2-38)$$

Σημείωση: Ως $\tilde{x}_v = 0$ θεωρούμε την θέση κατά την οποία το έμβολο της βαλβίδας βρίσκεται ακριβώς στην μέση, αποκλείοντας έτσι την ροή μέσω των διόδων.

Έχοντας θεωρήσει την βαλβίδα ως κρίσιμου κέντρου, λόγω συμμετρίας οι ροές διαρροής (Q_2 και Q_4 για θετική μετατόπιση του εμβόλου της βαλβίδας και αντίστοιχα για αρνητική Q_1 και Q_3) είναι μηδενικές (θα εξεταστεί η επιρροή των διαρροών στη συνέχεια της ανάλυσης), έτσι αντικαθιστώντας τις εξ. 2-27 και 2-37 στην 2-24 και βάση της 2-33 προκύπτει:

$$Q_L = C_d A_{vs} \sqrt{\frac{2(P_s - P_L)}{\rho}} \text{ για } x_v > 0 \quad (2-39)$$

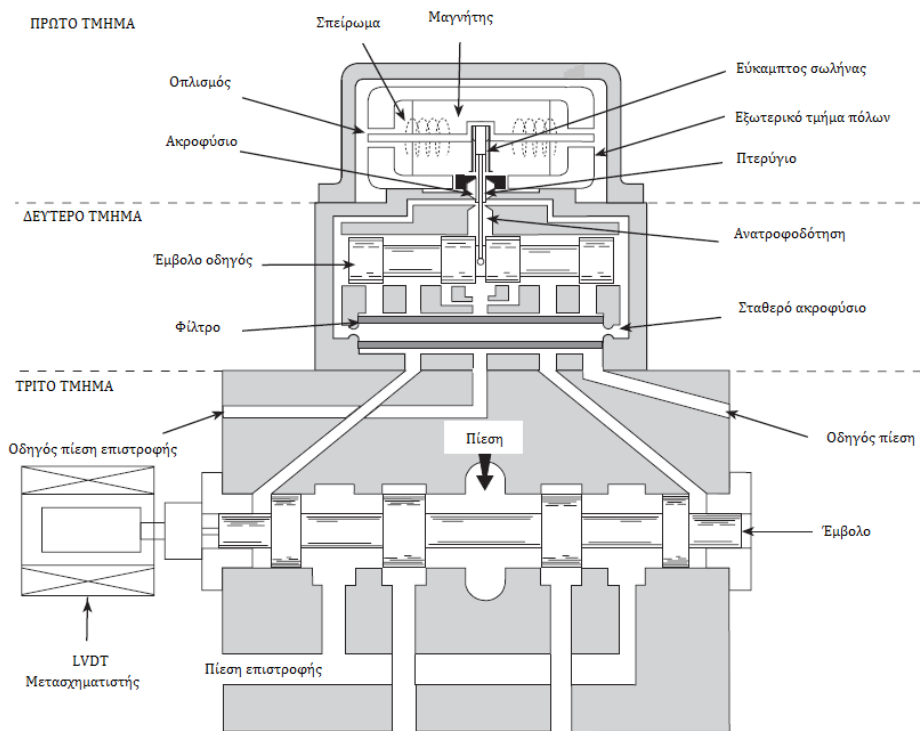
$$Q_L = -C_d A_{vs} \sqrt{\frac{2(P_s + P_L)}{\rho}} \text{ για } x_v < 0 \quad (2-40)$$

Ορίζοντας ως το κέρδος ροής της βαλβίδας $K_v = \left(C_d w x_{vmax} \sqrt{\frac{1}{\rho}} \right) \sqrt{P_s}$ από τις εξ. 2-40, 2-41 προκύπτει:

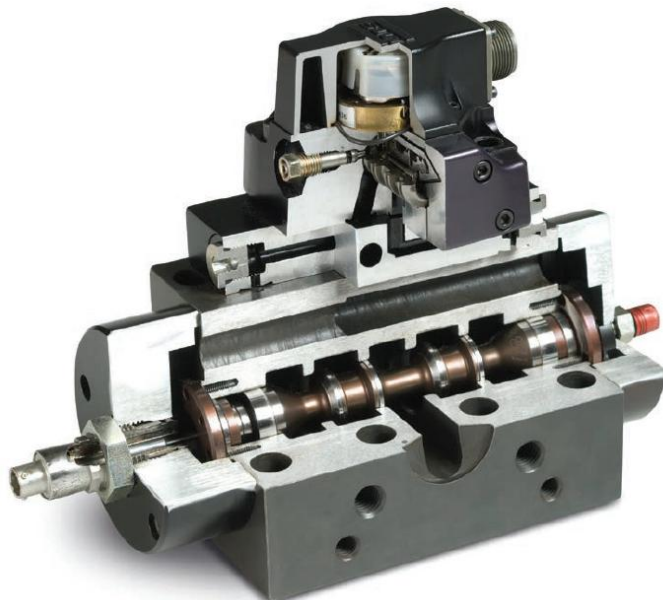
$$Q_L = K_v x_v \sqrt{1 - \frac{x_v P_L}{|x_v| P_s}} \quad (2-41)$$

2.2.2 Ηλεκτροϋδραυλική Σερβοβαλβίδα

Στην παρούσα εφαρμογή γίνεται χρήση ηλεκτροϋδραυλικής σερβοβαλβίδας μιας και αυτός ο τύπος βαλβίδας προσφέρει υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα λειτουργίας και έχει την ικανότητα διαχείρισης μεγάλων φορτίων, έχοντας ένα πολύ ευρύ φάσμα λειτουργίας. Συγκριμένα, η βαλβίδα που θα χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο μας είναι η MTS 256 (Περισσότερα στοιχεία στο Παράρτημα Α) [39]. Η βασική λειτουργία της σερβοβαλβίδας είναι να ενισχύει ηλεκτρικά σήματα ελέγχου που δέχεται και τελικά, μέσω της κίνησης του εμβόλου της, να ρυθμίζει κατάλληλα την ροή του υδραυλικού ρευστού δημιουργώντας την απαραίτητη διαφορά πίεσης κατά μήκος του φορτίου. Όπως διακρίνεται στο σχ. 2-6 η συγκεκριμένη βαλβίδα αποτελείται από τρία τμήματα.



Σχήμα 2-6. Ηλεκτροϋδραυλική Σερβοβαλβίδα MTS 256



Σχήμα 2-7. Τομή σερβοβαλβίδας MTS 256

Το πρώτο τμήμα της βαλβίδας είναι ένας κινητήρας ροπής, ο οποίος τροφοδοτείται με κατάλληλο σήμα ελέγχου και η ροπή που αναπτύσσεται κινεί τελικά το πτερύγιο που είναι συνδεδεμένο με τον οπλισμό του κινητήρα. Το δεύτερο τμήμα της βαλβίδας αποτελεί το έμβολο - οδηγό το οποίο θα κατευθύνει την υδραυλική ροή στο τρίτο τμήμα της βαλβίδας όπου βρίσκεται το βασικό έμβολο, χάρη στο οποίο τελικά θα δημιουργηθεί η κατάλληλη διαφορά πίεσης για τον έλεγχο του φορτίου. Για την παρούσα εφαρμογή το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας που μας ενδιαφέρει είναι σχετικά χαμηλό και έτσι η συμπεριφορά του εμβόλου - οδηγού μπορεί να περιγραφεί με επάρκεια από μία διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης χωρίς να χρειάζεται να αναπτυχθεί κάποιο πιο περίπλοκο μοντέλο ανώτερης τάξης [29][30]. Έτσι η διαφορική εξίσωση που προκύπτει είναι η ακόλουθη:

$$\tau \dot{Q}_{vp} + Q_{vp} = K_{vp} v_i \quad (2-42)$$

Όπου K_{vp} το κέρδος ροής της βαλβίδας - οδηγού, τ η σταθερά χρόνου της βαλβίδας και v_i το σήμα ελέγχου.

Επιπλέον, εσωτερικά της βαλβίδας υπάρχει ένας γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (Linear Variable Differential Transformer - LVDT), με τον συντελεστή ευαισθησίας του να αντιπροσωπεύεται από την μεταβλητή K_3 , ο οποίος χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει την θέση του εμβόλου της βαλβίδας. Γίνεται έλεγχος μέσω ανάδρασης και ένας PD ελεγκτής ενσωματωμένος της βαλβίδας ρυθμίζει το σήμα ελέγχου.

Η επίδραση της μάζας του εμβόλου, της τριβής και άλλων δυνάμεων που δρουν πάνω του μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες και έτσι το δεύτερο τμήμα της βαλβίδας συνδέεται με το τρίτο τμήμα με την ακόλουθη σχέση:

$$A_v \ddot{x}_v = Q_{vp} \quad (2-43)$$

Από την ανωτέρω ανάλυση τελικά η δυναμική της ηλεκτροϋδραυλικής σερβοβαλβίδας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{x_v}{v} = \frac{K_{vp}}{\tau A_v s^2 + A_v s + K_3 K_{vp}} \frac{1}{x_{vmax}} \quad (2-44)$$

Όπου \tilde{x}_v ορίστηκε η μετατόπιση του κυρίως εμβόλου της βαλβίδας, ενώ με x_v συμβολίζεται η κανονικοποίηση της μετατόπισης προς την μέγιστη τιμή της.

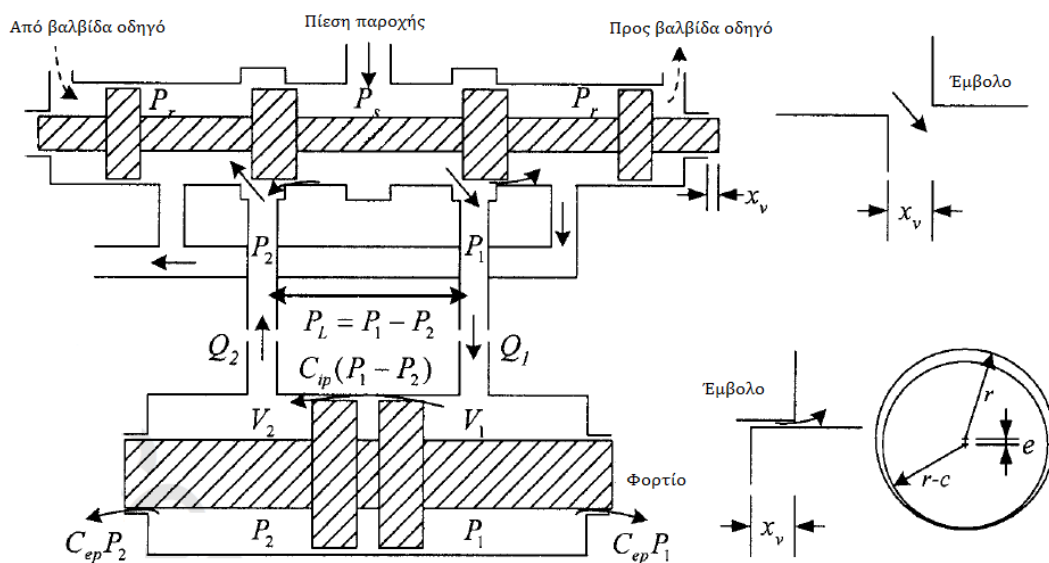
2.3 Επενεργητής

Για την μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας από το άνοιγμα των στομιών της σερβοβαλβίδας σε μηχανική ισχύ, χρησιμοποιείται ένας υδραυλικός κύλινδρος διπλής ενέργειας. Συγκεκριμένα έχει επιλεγθεί ο MTS 244 ο οποίος μπορεί να ανταπεξέλθει με επάρκεια στις απαιτήσεις της εφαρμογής [38].



Σχήμα 2-8. Επενεργητής MTS 244

Όπως προαναφέρθηκε, εκτός από την ροή του φορτίου, υπάρχουν και ροές εξαιτίας διαρροών στο υδραυλικό σύστημα επενέργειας όπως διακρίνονται στο σχ. 2-9.



Σχήμα 2-9. Σχηματικό διάγραμμα σερβοβαλβίδας - επενεργητή

Η ροή των εσωτερικών διαρροών μπορεί να υπολογιστεί κάνοντας χρήση του συντελεστή εσωτερικών διαρροών $C_{ip} = \frac{\pi r c^3}{6\mu L} \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{e}{c} \right)^2 \right]$ ως:

$$Q_{ip} = C_{ip}(P_1 - P_2) \quad (2-45)$$

Όπου r , c και e σταθερές σχετικές με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης (σχ. 2-9) και το L αναφέρεται στην μετατόπιση της βαλβίδας.

Οι εξωτερικές διαρροές υπολογίζονται ως:

$$Q_{epi} = C_{ep}P_i \quad (2-46)$$

όπου C_{ep} ο συντελεστής εξωτερικών διαρροών και P_i η πίεση του εκάστοτε θαλάμου του επενεργητή.

Έτσι, βάσει των ανωτέρω, κάνοντας χρήση της εξ. 2-23 για κάθε θάλαμο του υδραυλικού κυλίνδρου προκύπτει:

$$Q_1 - C_{ip}(P_1 - P_2) - C_{ep}P_1 = \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dP_1}{dt} \quad (2-47)$$

$$C_{ip}(P_1 - P_2) - C_{ep}P_2 - Q_2 = \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dP_2}{dt} \quad (2-48)$$

Καθώς ο κύλινδρος του επενεργητή μετακινείται εξαιτίας της υδραυλικής ροής, ο όγκος του υδραυλικού ρευστού σε κάθε θάλαμό του μεταβάλλεται. Συγκεκριμένα, η αύξηση του όγκου στην μία πλευρά του κυλίνδρου συντελεί στην αντίστοιχη μείωση του όγκου της άλλης πλευράς λόγω συμμετρίας. Έτσι, υποθέτοντας ως αρχικούς όγκους ρευστού V_{01} και V_{02} για κάθε θάλαμο και γραμμή τροφοδοσίας του, A την ενεργή επιφάνεια του κυλίνδρου και x_p την μετατόπισή του:

$$V_1 = V_{01} + Ax_p \quad (2-49)$$

$$V_2 = V_{02} - Ax_p \quad (2-50)$$

Παραγωγίζοντας τις ανωτέρω εξισώσεις προκύπτει η μεταβολή του όγκου σε κάθε θάλαμο:

$$\dot{V}_1 = A\dot{x}_p \quad (2-51)$$

$$\dot{V}_2 = -A\dot{x}_p \quad (2-52)$$

Ως συνολικός όγκος του υδραυλικού ρευστού θεωρείται:

$$V_t = V_1 + V_2 \quad (2-53)$$

Παραγωγίζοντας και τις εξ. 2-37, 2-38 προκύπτει αντίστοιχα και η μεταβολή της πίεσης σε κάθε πλευρά του επενεργητή:

$$\dot{P}_1 = \frac{1}{2} \dot{P}_L \quad (2-54)$$

$$\dot{P}_2 = -\frac{1}{2} \dot{P}_L \quad (2-55)$$

Η διαρροή της σερβοβαλβίδας προσεγγίζεται ως:

$$Q_{lv} = \frac{\pi r c^3}{6 \mu \dot{x}_v} \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{e}{c} \right)^2 \right] \frac{P_s + P_L}{2} \quad (2-56)$$

Ή ισοδύναμα:

$$Q_{lv} = C_{lv} P_L \quad (2-57)$$

Βάσει των ανωτέρω προκύπτει:

$$Q_1 = Q_L - Q_{lv} \text{ και } Q_2 = Q_L - Q_{lv} \quad (2-58)$$

Αντικαθιστώντας τις εξ. 2-52, 2-53, 2-54, 2-55, 2-56 στην εξ. 2-48 και 2-49 και αφαιρώντας την εξ. 2-49 από την εξ. 2-48:

$$(Q_1 + Q_2) - 2C_{ip}(P_1 - P_2) - C_{ep}(P_1 - P_2) = 2A\dot{x}_p + \frac{V_t}{2\beta_e} \frac{dP_L}{dt} \quad (2-59)$$

Ακόμη, αντικαθιστώντας τις εξ. 2-26, 2-58, 2-59 στην εξ. 2-60 προκύπτει:

$$Q_L = K_a \dot{P}_L + C_l P_L + A\dot{x}_p \quad (2-60)$$

Όπου $K_a = \frac{V_t}{4\beta_e}$ συντελεστής συμπιεστότητας του υδραυλικού ρευστού και $C_l = C_{lv} + C_{ip} + \frac{C_{ep}}{2}$ ο συντελεστής της συνολικής διαρροής.

Τέλος, εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα για τις δυνάμεις του υδραυλικού κυλίνδρου και κάνοντας χρήση της εξ. 2-6:

$$AP_L - F_C = m_t \ddot{x}_p + c \dot{x}_p + kx_p \quad (2-61)$$

όπου F_C η τριβή Coulomb, m_t η ολική μάζα της εγκατάστασης, c ο συντελεστής απόσβεσης και k η σταθερά ελατηρίου.

2.4 Μοντέλο Ηλεκτροϋδραυλικού Μηχανισμού Επενέργειας

Η ανάλυση της προηγούμενης ενότητας έδωσε ένα σύνολο εξισώσεων που περιγράφουν την μη γραμμική δυναμική της ηλεκτροϋδραυλικής σερβοβαλβίδας και του κυλίνδρου επενέργειας. Το μοντέλο αυτό εισήχθη στο λογισμικό Matlab/Simulink με στόχο την προσομοίωση της λειτουργίας της διάταξης που αναφέρθηκε. Στο μοντέλο αυτό το πρώτο τμήμα της ηλεκτροϋδραυλικής σερβοβαλβίδας περιγράφηκε από μία συνάρτηση μεταφοράς η οποία έχει ως είσοδο την τιμή της τάσης ελέγχου σε *Volt* και η έξοδός της είναι η κανονικοποιημένη τιμή της μετατόπισης του εμβόλου της βαλβίδας (-1 έως 1). Από την συνάρτηση μεταφοράς περιγράφεται στην εξ. 2-45 προκύπτει:

$$\ddot{x}_v = \frac{K_{vp}}{\tau A_v} v - \frac{\dot{x}_v}{\tau} - \frac{K_3 K_{vp}}{\tau A_v} x_v \quad (2-62)$$

Στη συνέχεια, η έξοδος αυτή θα γίνει η είσοδος του δεύτερου τμήματος του μοντέλου:

$$\dot{P}_L = \frac{K_v}{K_a} x_v \sqrt{1 - \frac{x_v P_L}{|x_v| P_s}} - C_l \frac{P_L}{K_a} - \frac{A}{K_a} \dot{x}_p \quad (2-63)$$

$$\ddot{x}_p = \frac{1}{m_t} (AP_L - b \dot{x}_p - c x_p - F_C) \quad (2-64)$$

Έτσι έχοντας ως μεταβλητές κατάσταση:

$$x_1 = P_L$$

$$x_2 = x_p$$

$$x_3 = \dot{x}_p$$

Και ως είσοδο:

$$u = x_v$$

Προκύπτει το ακόλουθο μοντέλο μεταβλητών κατάστασης:

$$\dot{x}_1 = \frac{K_v}{K_a} u \sqrt{1 - \frac{u x_1}{|u| P_s}} - C_l \frac{x_1}{K_a} - \frac{A}{K_a} x_3 \quad (2-65)$$

$$\dot{x}_2 = x_3 \quad (2-66)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{m_t}(Ax_1 - bx_3 - cx_2 - F_c) \quad (2-67)$$

Η δύναμη που παράγεται από την έξοδο του επενεργητή, όπως θα δειχθεί στην συνέχεια, θα υπολογίζεται κάθε στιγμή από κατάλληλο νόμο ελέγχου νόρμας H_∞ , ώστε έτσι να αποσβεστεί η δύναμη διαταραχής που ενεργεί στην κτιριακή κατασκευή εξαιτίας της σεισμικής δόνησης.

Σημείωση: Το σταθερό τμήμα του υδραυλικού επενεργητή θα είναι εγκατεστημένο στο έδαφος ενώ το έμβολο του επενεργητή θα εφάπτεται με τον τοίχο του πρώτου ορόφου της εγκατάστασης. Έτσι για την εφαρμογή των ανωτέρω εξισώσεων θα πρέπει να γίνει χρήση της σχετικής μετατόπισης του εμβόλου μιας και σε περίπτωση σεισμικής διαταραχής το σταθερό τμήμα του υδραυλικού επενεργητή θα μετατοπιστεί. Έτσι, αντί της μεταβλητής x_p θα χρησιμοποιηθεί η διαφορά της θέσης του πρώτου ορόφου με τη θέση του εδάφους (Παράρτημα Γ).

3

Σχεδιασμός Ελεγκτή H_∞ και χρήση Ελεγκτή PID

Τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διαταραχής είναι αδύνατο να είναι γνωστά εκ των προτέρων. Η σεισμική διαταραχή μπορεί να θεωρηθεί πως εισέρχεται στο κτίριο ως ένας συνδυασμός μετατόπισης και ταχύτητας του εδάφους. Ο ελεγκτής που θα σχεδιαστεί θα πρέπει να είναι εύρωστος σε άγνωστες διαταραχές που θα εισέλθουν στο σύστημα προς έλεγχο, ώστε να υπολογίσει με ακρίβεια την απαιτούμενη δύναμη ελέγχου. Η δύναμη ελέγχου θα εφαρμοστεί στον πρώτο όροφο του μοντέλου του κτιρίου (βάση του κτιρίου) και θα πρέπει να είναι ικανή να μειώσει όσο το δυνατόν περισσότερο την απόλυτη μετατόπιση και ταχύτητα των ορόφων. Επίσης, η συχνότητα των διαταραχών αυτών θα πρέπει να μειωθεί δραστικά. Βάσει των απαιτήσεων αυτών ο ελεγκτής που θα σχεδιαστεί θα στηριχθεί στην θεωρία ελέγχου H_∞ .

Στην συνέχεια, η δύναμη που θα έχει υπολογιστεί θα πρέπει να εφαρμοστεί μέσω του υδραυλικού επενεργητή στον πρώτο όροφο του κτιρίου. Για να μπορέσει να γίνει ο έλεγχος του επενεργητή μέσω της σερβοβαλβίδας του θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και ένας δεύτερος ελεγκτής, ο οποίος στηρίζεται στην θεωρία ελέγχου PID, και θα ελέγχει την δύναμη εξόδου του επενεργητή συγκρίνοντάς την με την δύναμη που απαιτείται, η οποία έχει υπολογιστεί από την ελεγκτή H_∞ όπως προαναφέρθηκε.

3.1 Θεωρία ελέγχου H_∞

Η θεωρία εύρωστου ελέγχου της νόρμας-άπειρο ($H - infinity norm$, όπου H αναφέρεται σε χώρο Hardy) (Παράρτημα Β) αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1980 και στηρίχθηκε στην δουλειά που παρουσίασε ο George Zames. Βασικό κίνητρο για την ανάπτυξη της θεωρίας αυτής ήταν η χαμηλή ευρωστία που παρουσίαζε ο έλεγχος LQG (Linear Quadratic Gaussian), οι λύσεις του οποίου μπορούν να συσχετιστούν με λύσεις στη χώρο την νόρμας-2 (H_2) και δεν παρουσιάζουν ευρωστία σε διάφορες μορφές αβεβαιότητας που μπορεί να παρουσιαστούν στο μοντέλο. Οι αβεβαιότητες που πιθανότατα να παρουσιαστούν μπορεί να είναι είτε μη μοντελοποιημένες παράμετροι του συστήματος είτε άγνωστες διαταραχές που επηρεάζουν το σύστημα. Οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτιστοποίησης ελαχίστου τετραγώνου ισοδυναμούν με την ελαχιστοποίηση μιας νόρμας H_2 και έτσι σε κάποιες περιπτώσεις η παραγόμενη λύση δεν παρουσιάζει ευρωστία.

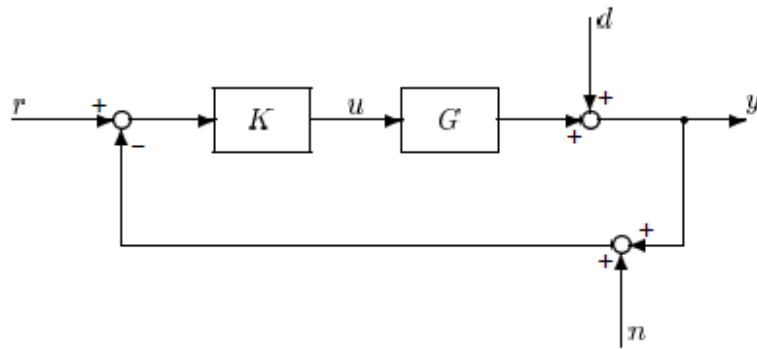
Ο χώρος H_∞ είναι ο χώρος μίας συνάρτησης μεταφοράς ενός αιτιατού, γραμμικού, χρονικά αμετάβλητου συστήματος. Τέτοια σύστημα παρουσιάζουν ευστάθεια φραγμένης-εισόδου φραγμένης-εξόδου. Η νόρμα H_∞ ορίζεται ως το μέγιστο πλάτος της απόκρισης συχνότητας της συνάρτησης μεταφοράς. Έτσι, η νόρμα H_∞ αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό μέτρο του κέρδους του συστήματος και συχνά χρησιμοποιείται για την μέτρηση των τιμών της συνάρτησης ευαισθησίας ή της συνάρτησης μεταφοράς κλειστού βρόχου [13].

Πιο συγκεκριμένα για την νόρμα H_∞ , γίνεται χρήση της ιδιάζουσας τιμής (σ) του συστήματος και επιλέγεται η μέγιστη τιμή της ως συνάρτηση της συχνότητας. Ελαχιστοποιώντας την νόρμα H_∞ στην ουσία μειώνουμε την μέγιστη ιδιάζουσα τιμή του συστήματος. Για ένα σύστημα $G(A, B, C, D)$ η νόρμα H_∞ υπολογίζεται αριθμητικά ως η μικρότερη τιμή του συντελεστή $\gamma > 0$ (δείκτης κατάστασης, η αναλογία μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης ιδιάζουσας τιμής) ώστε ο χαμιλτονιανός πίνακας H να μην έχει ιδιοτιμές επάνω στον άξονα των φανταστικών, όπου H :

$$H = \begin{bmatrix} A + BR^{-1}D^TC & BR^{-1}B^T \\ -C^{-1}(I + DR^{-1}D^T)C & -(A + BR^{-1}D^TC)^T \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$$\text{με } R = \gamma^2 I - D^T D$$

Ο σχεδιασμός του ελέγχου θα γίνει με κριτήρια τόσο την απόδοση όσο και την ευρωστία του συστήματος κατά την ύπαρξη διαταραχών και σφαλμάτων μοντελοποίησης. Έστω ο ελεγκτής K , το σύστημα G , το σήμα εισόδου r , εξωτερική διαταραχή d , θόρυβος μετρήσεων n (σχ. 3-1).



Σχήμα 3-1. Διάταξη ανατροφοδότησης

Ορίζοντας την συνάρτηση ευαισθησίας $S = (I - GK)^{-1}$ και την συνάρτηση συμπληρωματικής ευαισθησίας $T = GK(I + GK)^{-1} = I - S$ και τη συνάρτηση KS κλειστού βρόχου μεταξύ των διαταραχών d και των σημάτων ελέγχου:

1. Για απόρριψη διαταραχών πρέπει η $\bar{\sigma}(S)$ να έχει μικρή τιμή.
2. Για απόσβεση θορύβου πρέπει η $\bar{\sigma}(T)$ να έχει μικρή τιμή.
3. Για την ακολούθηση σήματος εισόδου πρέπει $\bar{\sigma}(T) \approx \bar{\sigma}(S) \approx 1$.
4. Για μείωση την ενέργειας ελέγχου πρέπει $\bar{\sigma}(KS)$ να έχει μικρή τιμή.
5. Για εύρωστη απόδοση στην περίπτωση προσθετικών διαταραχών πρέπει $\bar{\sigma}(KS)$ να έχει μικρή τιμή.
6. Για εύρωστη ευστάθεια στην περίπτωση πολλαπλασιαστικών διαταραχών εξόδου πρέπει $\bar{\sigma}(T)$ να έχει μικρή τιμή.

Οι απαιτήσεις κλειστού βρόχου 1 έως 6 δεν είναι εφικτό να ικανοποιηθούν ταυτοχρόνως. Έτσι ο σχεδιασμός του ελέγχου είναι ένας συμβιβασμός αντικρουόμενων στόχων σε διάφορες συχνότητες. Αποδεικνύεται πως:

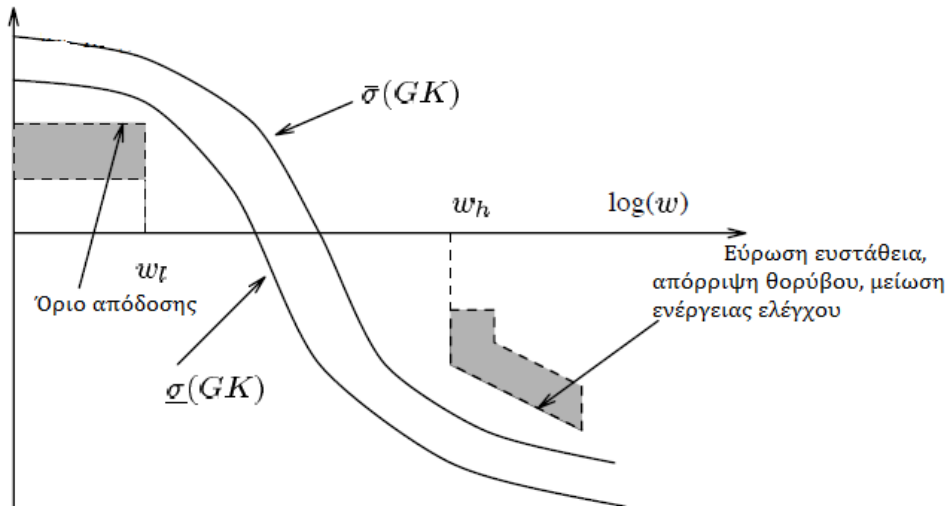
$$\bar{\sigma}(L) - 1 \leq \frac{1}{\bar{\sigma}(S)} \leq \bar{\sigma}(L) + 1 \quad (3-2)$$

Έτσι, για ένα εύρος συχνοτήτων μπορούν να επιτευχθούν οι απαιτήσεις κλειστού βρόχου θέτοντας τους ακόλουθους στόχους για τον σχεδιασμό του ανοικτού βρόχου:

1. Για απόρριψη διαταραχών πρέπει η $\underline{\sigma}(GK)$ να έχει μεγάλη τιμή, ισχύει για συχνότητες όπου $\underline{\sigma}(GK) \gg 1$.

2. Για απόσβεση θορύβου πρέπει η $\bar{\sigma}(GK)$ να έχει μικρή τιμή, ισχύει για συχνότητες όπου $\bar{\sigma}(GK) \ll 1$.
3. Για ακολούθηση εισόδου πρέπει η $\underline{\sigma}(GK)$ να έχει μεγάλη τιμή, ισχύει για συχνότητες όπου $\underline{\sigma}(GK) \gg 1$.
4. Για μείωση ενέργειας ελέγχου πρέπει η $\bar{\sigma}(K)$ να έχει μικρή τιμή, ισχύει για συχνότητες όπου $\bar{\sigma}(GK) \ll 1$.
5. Για εύρωστη ευστάθεια σε προσθετικές διαταραχές πρέπει η $\bar{\sigma}(K)$ να έχει μικρή τιμή, ισχύει για συχνότητες όπου $\bar{\sigma}(GK) \ll 1$.
6. Για εύρωστη ευστάθεια σε πολλαπλασιαστικές διαταραχές πρέπει η $\bar{\sigma}(GK)$ να έχει μικρή τιμή, ισχύει για συχνότητες όπου $\bar{\sigma}(GK) \ll 1$.

Έτσι, ο σχεδιασμός του ελεγκτή K πρέπει να είναι κατάλληλος ώστε να απορριχθούν οι σκιασμένες περιοχές του σχ. 3-2, ώστε απαιτήσεις 1 έως 6 να ικανοποιηθούν καταλλήλως [20].



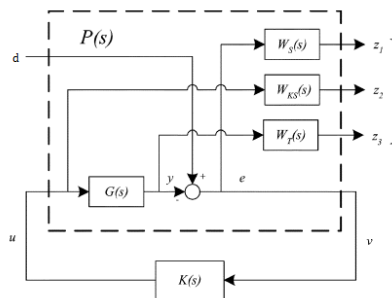
Σχήμα 3-2. Συμβιβασμός συχνοτήτων για σχεδιασμό ανοιχτού βρόχου

Για την επίτευξη των ανωτέρω απαιτήσεων μπορεί να σχεδιαστεί ένας εύρωστος ελεγκτής μικτής ευαισθησίας (mixed-sensitivity H_∞ control). Κατά την συγκεκριμένη μορφοποίηση του προβλήματος τόσο η συνάρτηση ευαισθησίας S , η συνάρτηση συμπληρωματικής ευαισθησίας T και η συνάρτηση KS μπορούν να συνδυαστούν σε μία συνάρτηση νόρμας H_∞ ως:

$$\left\| \begin{array}{c} W_s S \\ W_{ks} KS \\ W_t T \end{array} \right\|_\infty \quad (3-3)$$

Η εξ. 3-3 είναι γνωστή ως συνάρτηση κόστους μικτής ευαισθησίας η οποία πρόκειται να ελαχιστοποιηθεί. Ακόμη κάθε μία από τις συναρτήσεις S, K, T έχει συνδυαστεί με την αντίστοιχη συνάρτηση βάρους.

Από το σχ. 3-3 παρατηρείται πως η συνάρτηση μεταφοράς από το σήμα d στο z_1 είναι η σταθμισμένη συνάρτηση ευαισθησίας $W_s S$ και αφορά το κριτήριο απόρριψης της διαταραχής. Η συνάρτηση μεταφοράς από το σήμα u στο z_2 είναι η σταθμισμένη συνάρτηση βρόχου $W_{ks} K S$ και αφορά το κριτήριο της ενέργειας ελέγχου. Η συνάρτηση μεταφοράς από το σήμα y στο z_3 είναι η σταθμισμένη συνάρτηση ευαισθησίας $W_t T$ και αφορά το κριτήριο ακολουθήσεως εισόδου και απόσβεσης θορύβου.



Σχήμα 3-3. Μοντέλο συστήματος με συναρτήσεις βάρους για σχεδιασμό ελεγκτή H_∞

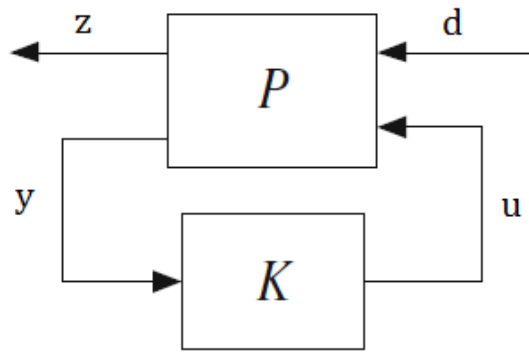
Το γενικευμένο μοντέλο του συστήματος προκύπτει:

$$P = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_s & -W_s G \\ 0 & W_{ks} \\ 0 & W_t \\ I & -G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ u \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

όπου και τελικά θα βρεθεί ο ελεγκτής όπου θα ικανοποιεί την ακόλουθη συνθήκη της εξ. 3-3 [3] [9] [10][20].

3.1.1 Σχεδίαση ελέγχου H_∞ με ανάδραση εξόδου

Υποθέτεται ένα σύστημα P και έναν ελεγκτή K , το πρόβλημα έλεγχου H_∞ μπορεί να παρουσιαστεί ως (σχ. 3-4):



Σχήμα 3-4. Σύστημα για πρόβλημα ελέγχου H_∞

όπου:

- d η εξωτερική διαταραχή στο σύστημα
- u η είσοδος ελέγχου του συστήματος
- z η εικονική έξοδος του συστήματος όπου χρησιμοποιείται για ως κριτήριο απόδοσης
- y η μετρούμενη έξοδος του συστήματος η οποία και είναι διαθέσιμη στον ελεγκτή

Η σχεδίαση του νόμου ελέγχου για ώστε να υπολογιστεί η απαιτούμενη δύναμη που θα εφαρμοστεί στη κτιριακή εγκατάσταση έγινε στον χώρο κατάστασης.

Για την σχεδίαση του ελεγκτή το σύστημα που απεικονίζεται στο σχ. 3-4 ορίζεται ως:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1d(t) + B_2u(t) \quad (3-5)$$

$$z(t) = C_1x(t) + D_{11}d(t) + D_{12}u(t) \quad (3-6)$$

$$y(t) = C_2x(t) + D_{21}d(t) + D_{22}u(t) \quad (3-7)$$

$$u(t) = Ky(t) \quad (3-8)$$

Το σύστημα προς έλεγχο είναι το πρότυπο κτίριο που έχει κατασκευαστεί με σκοπό την εκτέλεση μίας σειράς πειραμάτων αντισεισμικής προστασίας. Το μοντέλο του συστήματος παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Γ. Στις εξ. 3-9, 3-10 το μοντέλο αναπαρίσταται στον χώρο κατάστασης, όπου σε αντιστοιχία με τις εξ. 3-5, 3-7 ο πίνακας B_1 ισούνται με τον πίνακα E , ο B_2 ισούται με τον B και ο C_2 ισούται με τον C .

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \quad (3-9)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3-10)$$

Βάσει αυτών το γενικευμένο σύστημα P προκύπτει ως:

$$P = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \text{ και } K = \begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} \\ \hat{C} & \hat{D} \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

$$z = F_l(P, K)d \quad (3-12)$$

Όπου K είναι ένας ελεγκτής που σταθεροποιεί το σύστημα και F_l ο κατώτερος γραμμικός κλασματικός μετασχηματισμός (Παράρτημα Β) του συστήματος. Η λύση του προβλήματος ελέγχου H_∞ περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση της νόρμας $F_l(P, K)$.

Ακόμη, για την λύση του προβλήματος H_∞ στον χώρο κατάστασης, οι ακόλουθες υποθέσεις πρέπει να είναι αληθείς:

1. το (A, B_1) σταθεροποιήσιμο και το (C_1, A) ανιχνεύσιμο
2. το (A, B_2) σταθεροποιήσιμο και το (C_2, A) ανιχνεύσιμο
3. D_{12} και D_{21} έχουν πλήρη βαθμό
4. $\begin{bmatrix} A - \lambda I & B_2 \\ C_1 & D_{12} \end{bmatrix}$ έχει πλήρη βαθμό στηλών για κάθε $Re \lambda \geq 0$
5. $\begin{bmatrix} A - \lambda I & B_2 \\ C_2 & D_{12} \end{bmatrix}$ έχει πλήρη βαθμό σειρών για κάθε $Re \lambda \geq 0$

Η υπόθεση 1 απαιτείται ώστε να υπάρχει ελεγκτής K ο οποίος θα σταθεροποιεί το σύστημα και η υπόθεση 2 για να διασφαλίσει ότι ο ελεγκτής είναι υλοποιήσιμος. Οι υποθέσεις 4 και 5 διασφαλίζουν ότι ο βέλτιστος ελεγκτής δεν θα ακυρώσει πόλους με μηδενικά οδηγώντας σε αστάθεια κλειστού βρόχου. Ακόμη θεωρώντας $D_{11} = D_{22} = 0$ απλοποιεί συμπαντικά την επίλυση του προβλήματος.

Η εύρεση όλων των ελεγκτών K που σταθεροποιούν το σύστημα γίνεται ως:

$$\|F_l(P, K)\|_\infty = \sup_\omega \bar{\sigma}(F_l(P, K)(j\omega)) \quad (3-13)$$

Επιλέγοντας ως γ_{min} την ελάχιστη τιμή του $F_l(P, K)$ για όλους τους ελεγκτές όπου σταθεροποιούν το σύστημα, τότε για $\gamma > \gamma_{min}$ το πρόβλημα ελέγχου H_∞ προκύπτει ως:

$$\|F_l(P, K)\|_\infty < \gamma \quad (3-14)$$

Καθώς η τιμή του γ μειώνεται επαναληπτικά, προσεγγίζεται μία βέλτιστη λύση [10] [20].

Ο γενικός αλγόριθμος υπολογισμού της νόρμας H_∞ ώστε να υπάρχει ο κατάλληλος ελεγκτής K όπως έχει σχολιαστεί, συνοψίζεται ως εξής:

1. $X_\infty \geq 0$ ορίζεται μία λύση της αλγεβρικής εξίσωσης Riccati

$$A^T X_\infty + X_\infty A + C_1^T C_1 + X_\infty (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_\infty = 0 \quad (3-15)$$

τέτοια ώστε $Re \lambda_i [A + (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_\infty] < 0$ για κάθε i

2. $Y_\infty \geq 0$ ορίζεται μία λύση της αλγεβρικής εξίσωσης Riccati

$$A^T Y_\infty + Y_\infty A + B_1^T B_1 + Y_\infty (\gamma^{-2} C_1 C_1^T - C_2^T C_2) Y_\infty = 0 \quad (3-16)$$

τέτοια ώστε $Re \lambda_i [A + Y_\infty (\gamma^{-2} C_1 C_1^T - C_2^T C_2)] < 0$ για κάθε i

- 3.

$$\rho(X_\infty, Y_\infty) < \gamma^2 \quad (3-17)$$

όπου ρ : φασματική ακτίνα.

Όλοι οι ελεγκτές που προκύπτουν $K = F_l(K_C, Q)$, όπου K_C :

$$K_C = \begin{bmatrix} A_\infty & -Z_\infty L_\infty & Z_\infty B_2 \\ F_\infty & 0 & I \\ -C_2 & I & 0 \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

όπου

$$F_\infty = -B_2^T X_\infty \quad (3-19)$$

$$L_\infty = -Y_\infty C_2^T \quad (3-20)$$

$$Z_\infty = (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1} \quad (3-21)$$

$$A_\infty = A + \gamma^{-2} B_1 B_2^T X_\infty + B_2 F_\infty + Z_\infty L_\infty C_\infty \quad (3-22)$$

και Q είναι οποιαδήποτε ευσταθής συνάρτηση τέτοια ώστε $\|Q\|_\infty < \gamma$ [3][10][20][23][31].

Οι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος ελέγχου H_∞ στον χώρο κατάστασης αναμένεται να δώσουν ελεγκτές ίδιας τάξης με αυτή του συστήματος υπό έλεγχο [27].

Για τον υπολογισμό του ελεγκτή K χρησιμοποιήθηκε το Robust Control Toolbox του λογισμικού Matlab. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση `hinfscn`, η οποία για δεδομένο σύστημα ανοιχτού βρόχου θα υπολογίσει τον νόμο ελέγχου H_∞ .

Η σύνταξη της έχει ως εξής:

$$[K, CL, GAM, INFO] = \text{hinfscn}(P, NMEAS, NCON, GMIN, GMAX, TOL, RIC)$$

όπου:

P = το επαυξημένο σύστημα της εξ. 3-11

NMEAS = αριθμός εξόδων του συστήματος

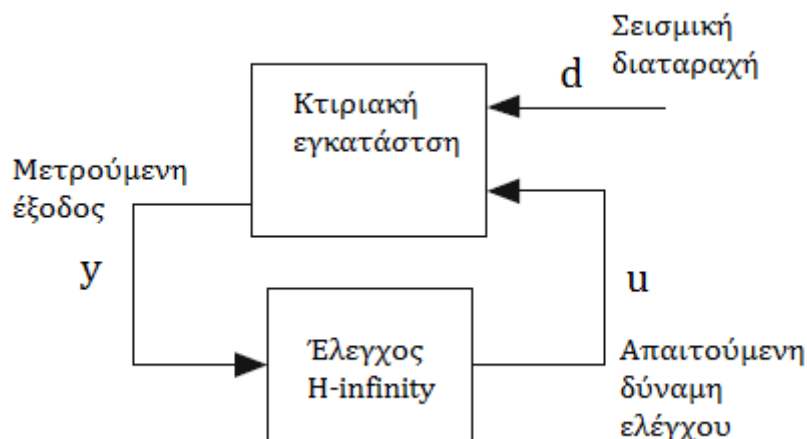
NCON = αριθμός εισόδων του συστήματος

GMIN = ελάχιστη επιθυμητή τιμή γ

GMAX = μέγιστη επιθυμητή τιμή γ

TOL = ανοχή στον υπολογισμό του γ

RIC = επιλογή εξίσωσης Riccati.



Σχήμα 3-5. Διάταξη ελέγχου H_∞

Κριτήριο σχεδιασμού του ελεγκτή είναι η αποδιδόμενη δύναμη ελέγχου που θα προκύψει να είναι κατάλληλη ώστε να ελαχιστοποιήσει την επιρροή της σεισμικής διαταραχής στο μοντέλο του κτιρίου αλλά παράλληλα να είναι και υλοποιήσιμη από το σύστημα επενέργειας. Έτσι, βάσει της θεωρίας που αναπτύχθηκε έγινε η κατάλληλη επιλογή των πινάκων D_{11} , D_{12} , D_{21} , D_{22} ώστε να ικανοποιούνται οι υποθέσεις 1 έως 5 αλλά και των ορίων για τις αποδεκτές τιμές γ , ώστε να μπορέσει να υλοποιηθεί ο αλγόριθμος υπολογισμού της νόρμας H_∞ . Το σήμα $z(t)$ (σχ. 3-1) αναπαριστά τις μεταβλητές όπου απαιτείται να είναι "μικρές" (δηλαδή οι μεταβλητές κατάστασης του κτιρίου, ταχύτητα και μετατόπιση του κάθε ορόφου). Ακόμη περιλαμβάνει την απαραίτητη ποινή επί του σήματος ελέγχου ώστε η προκύπτουσα λύση να αναπαριστά υλοποιήσιμη δύναμη από το υδραυλικό σύστημα επενέργειας. Ελαχιστοποιώντας την νόρμα H_∞ γίνεται ελαχιστοποίηση της χείριστης επίδρασης επί της ενέργειας του $z(t)$ της άγνωστης σεισμικής διαταραχής $d(t)$ [34]. Με την ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας τελικά προέκυψε ένας ελεγκτής K 8ης τάξης με τιμή $\gamma = 1.431$. Όπως θα δειχθεί και στην συνέχεια ο συγκεκριμένος ελεγκτής παρουσιάζει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για τις απαιτήσεις του συστήματος ελέγχου του κτιρίου.

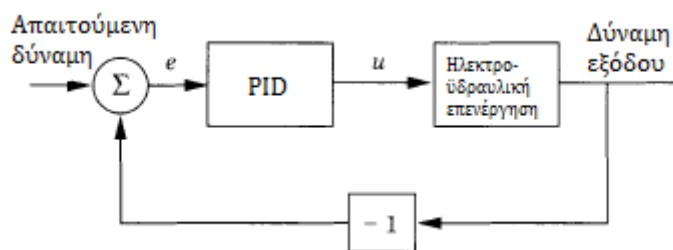
3.2 Ελεγκτής PID

Ο Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Διαφορικός έλεγχος (Proportional-Integral-Derivative - PID) είναι η πιο κοινή μορφή ελέγχου με ανάδραση. Ο συγκεκριμένος έλεγχος χρησιμοποιείται και εξελίσσεται επί πολλές δεκαετίες και έχει ένα πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογών, παρέχοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η είσοδος του ελεγκτή είναι το σφάλμα $e(t)$ μεταξύ της ελεγχόμενης μεταβλητής και της μετρούμενης μεταβλητής. Η έξοδος $u(t)$ του ελεγκτή είναι ένα σήμα το οποίο είναι το άθροισμα τριών όρων:

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt})$$

Ο P - όρος είναι το κέρδος K το οποίο καθιστά το σήμα ελέγχου ανάλογο του σφάλματος. Το στοιχείο αυτό εξασφαλίζει ότι ο ελεγκτής δε θα οδηγήσει σε ταλαντώσεις το σύστημα για μικρές τιμές του σφάλματος. Ο I - όρος είναι το κέρδος $\frac{1}{T_i}$ και καθιστά το σήμα ελέγχου ανάλογο του ολοκληρώματος του σφάλματος εξασφαλίζοντας έτσι ότι η έξοδος δεν θα έχει απόκλιση από την είσοδο, εκμηδενίζοντας έτσι το σφάλμα σταθερής κατάστασης. Ο D - όρος είναι το κέρδος T_d το οποίο καθιστά το σήμα ελέγχου ανάλογο της παραγώγου του σφάλματος προσδίδοντας έτσι το χαρακτηριστικό της γραμμικής πρόγνωσης του σφάλματος για T_d μονάδες χρόνου στο μέλλον [1][2][18].

Η δύναμη ελέγχου που έχει υπολογιστεί από τον ελεγκτή H_∞ θα πρέπει, μέσω κατάλληλων σημάτων ελέγχου στην σερβοβαλβίδα, να εφαρμοστεί από το έμβολο του υδραυλικού επενεργητή στον πρώτο όροφο του κτιρίου. Για να γίνει αυτό εφικτό θα πρέπει να επαληθευτεί μέσω ενός δεύτερου ελεγκτή ότι η εφαρμοζόμενη δύναμη είναι και η απαιτούμενη δύναμη. Ο ελεγκτής ο οποίος είναι υπεύθυνος για αυτήν την λειτουργία είναι ένας ελεγκτής PID (σχ.3-6).



Σχήμα 3-6. PID έλεγχος

Το σφάλμα που θα είναι η είσοδος του ελεγκτή υπολογίζεται από την διαφορά της απαιτούμενης δύναμης με αυτήν που εφαρμόζεται στον πρώτο όροφο του κτιρίου μετρούμενη από κατάλληλο αισθητήρα δύναμης (load cell), προσαρτημένο στο έμβολο του επενεργητή. Έτσι, μέσω του ελεγκτή προκύπτει το κατάλληλο σήμα ελέγχου της ηλεκτροϋδραυλικής σερβοβαλβίδας.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του ελεγκτή, η αρχική εκτίμησή του έγινε με χρήση της μεθόδου Ziegler-Nichols και στη συνέχεια μέσω κατάλληλων δοκιμών έγινε η βελτίωσή τους για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

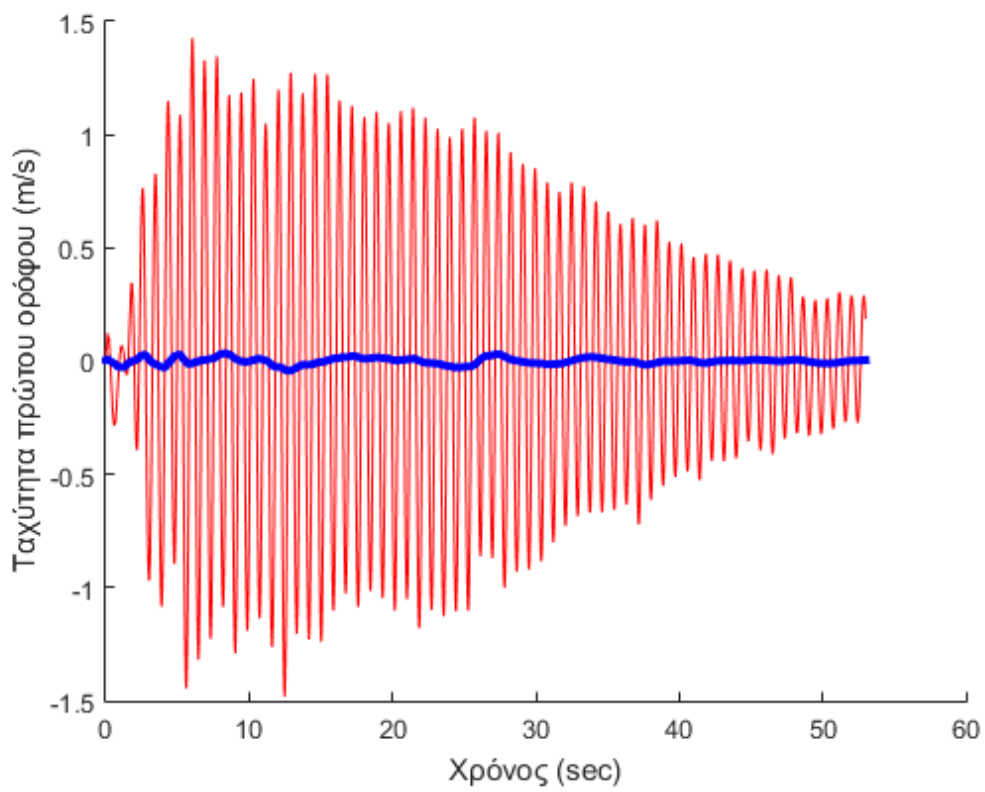
3.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Έχοντας κατασκευάσει το μοντέλο του ηλεκτροϋδραυλικού επενεργητή, το μοντέλο της κτιριακής εγκατάστασης και των νόμων ελέγχου όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, θα ακολουθήσει μία σειρά προσομοιώσεων στο λογισμικό Matlab/Simulink ώστε να μελετηθεί η απόδοση και η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου. Τα δεδομένα των σεισμικών διαταραχών όπου θα εισαχθούν στο μοντέλο του συστήματος βρίσκονται στο Παράρτημα Δ.

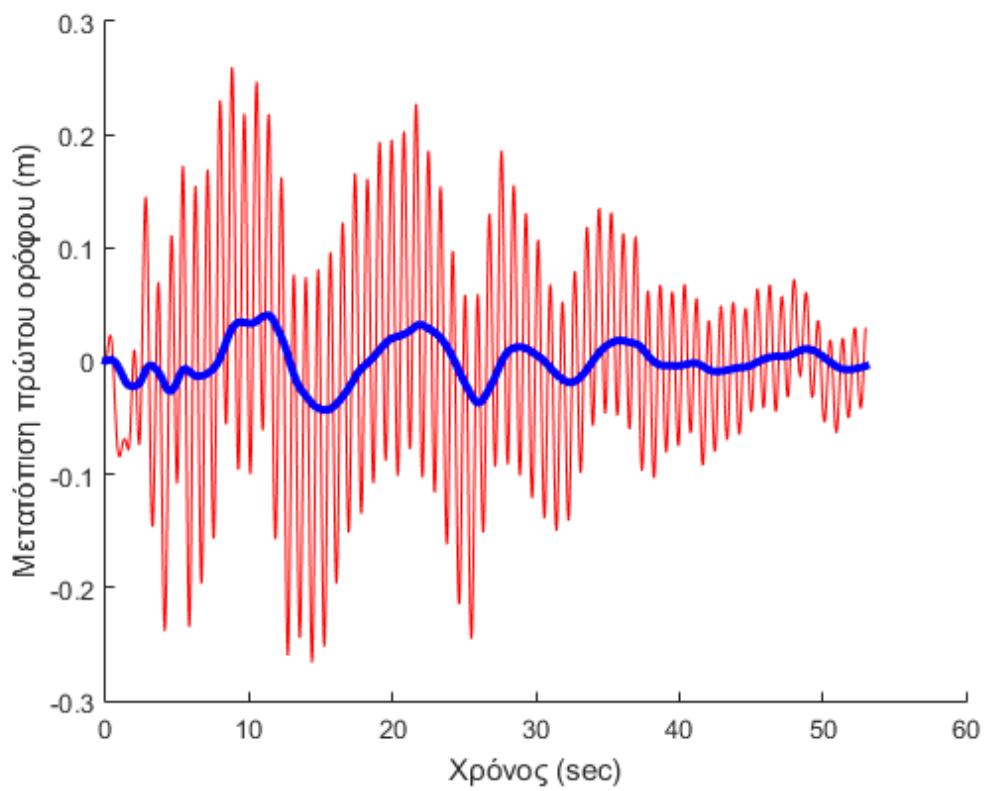
Ακόμη, όπως αποδεικνύεται, η απόκριση του πρώτου ορόφου παρουσιάζει ελάχιστη διαφοροποίηση σε σχέση με την απόκριση των υπόλοιπων ορόφων [16][21]. Έτσι, για συντομία, θα παρουσιαστούν οι καμπύλες που αφορούν την απόκριση μόνο του πρώτου ορόφου του κτιρίου.

3.3.1 Σεισμική διαταραχή *El Centro*

Με το κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η απόκριση του πρώτου ορόφου χωρίς να έχει εφαρμοστεί η δύναμη ελέγχου, ενώ με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η απόκρισή του με την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου βάσει του συστήματος ελέγχου που παρουσιάστηκε.

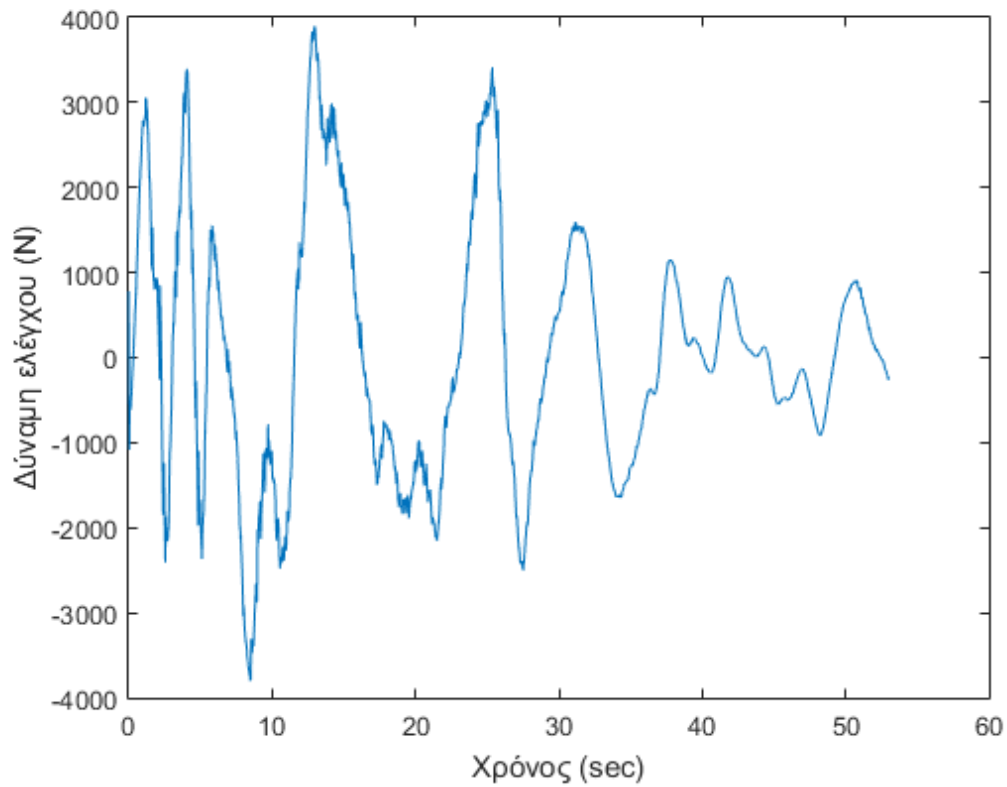


Σχήμα 3-7. Ταχύτητα του πρώτου ορόφου

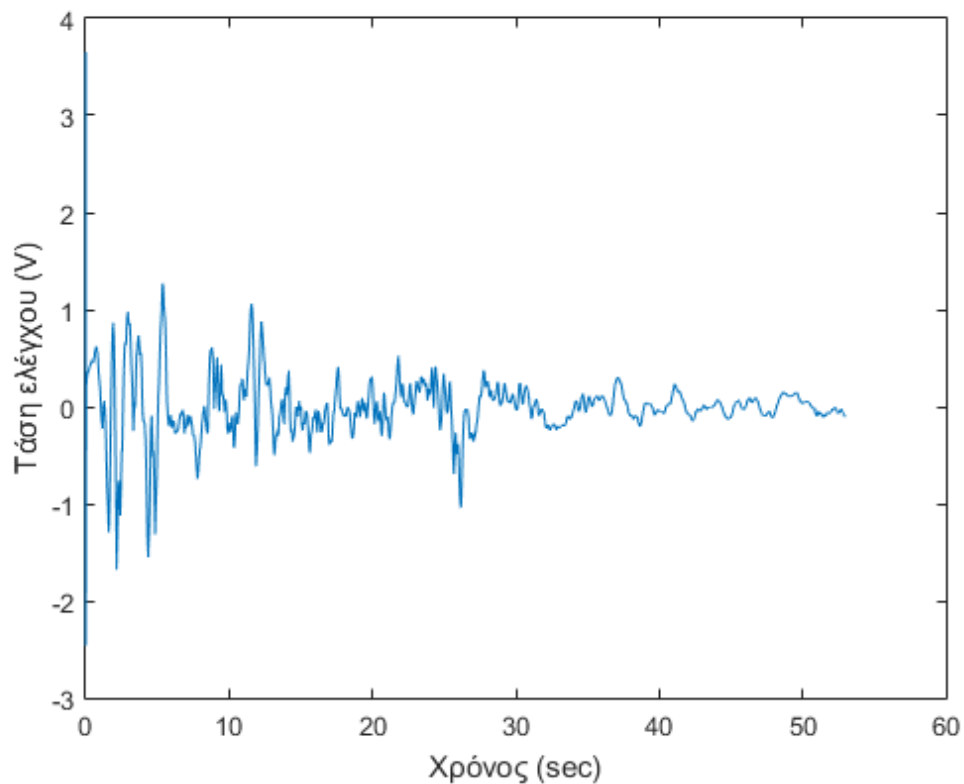


Σχήμα 3-8. Μετατόπιση του πρώτου ορόφου

Παρατηρείται πως με την εφαρμογή του συστήματος ελέγχου σημειώνεται σημαντική μείωση του εύρους ταχύτητας και μετατόπισης του πρώτου ορόφου καθώς και σημαντική μείωση της συχνότητας με οποία την ταλαντώνεται. Η απόκριση που παρατηρείται με την εφαρμογή του συστήματος ελέγχου είναι και η επιθυμητή για την σεισμική προστασία του κτιρίου.



Σχήμα 3-9. Δύναμη ελέγχου εφαρμοζόμενη στον πρώτο όροφο

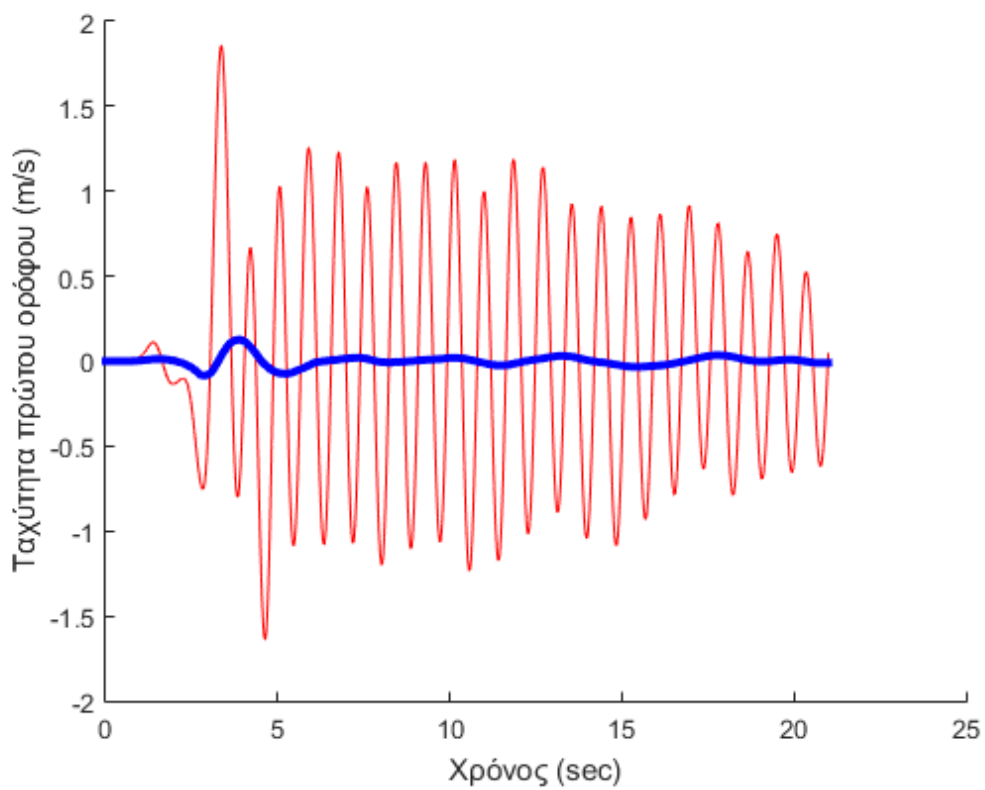


Σχήμα 3-10. Τάση ελέγχου της σερβοβαλβίδας

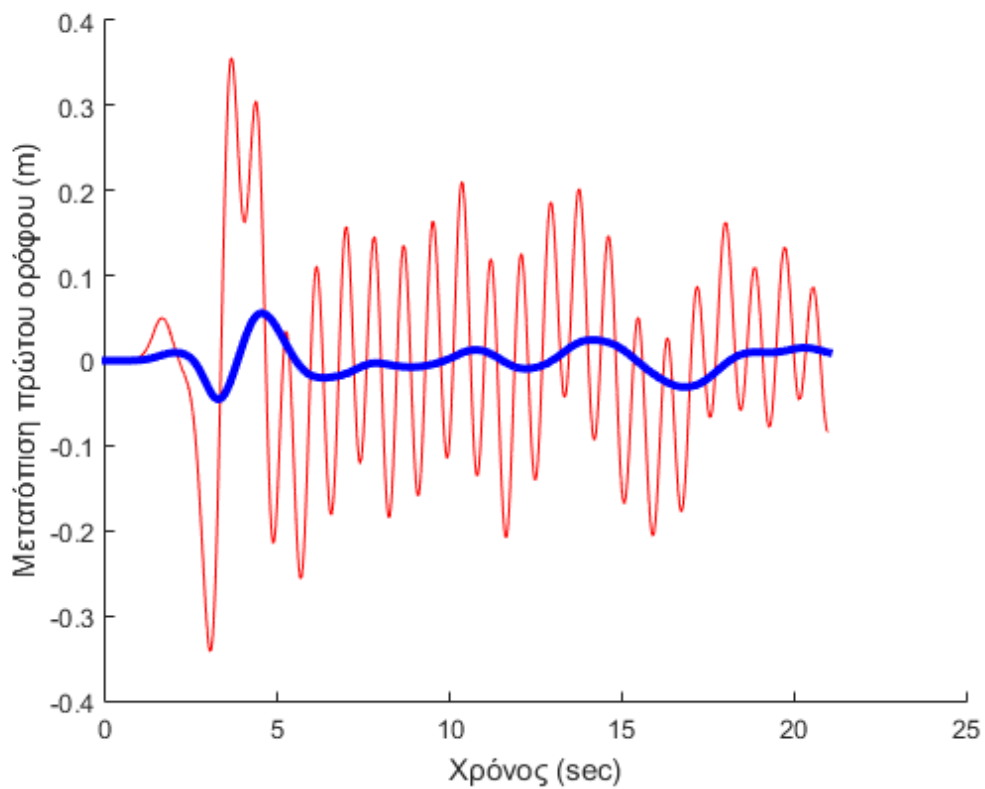
Παρατηρείται επίσης πως τόσο η δύναμη ελέγχου όσο και η τάση ελέγχου της σερβοβαλβίδας είναι εντός των αποδεκτών ορίων λειτουργίας του ηλεκτροϋδραυλικού συστήματος.

3.3.2 Σεισμική διαταραχή Kobe

Όμοια με την προηγούμενη ενότητα, με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η απόκριση του πρώτου ορόφου χωρίς να έχει εφαρμοστεί η δύναμη ελέγχου, ενώ με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η απόκρισή του με την εφαρμογή της δύναμης ελέγχου βάσει του συστήματος ελέγχου που παρουσιάστηκε.

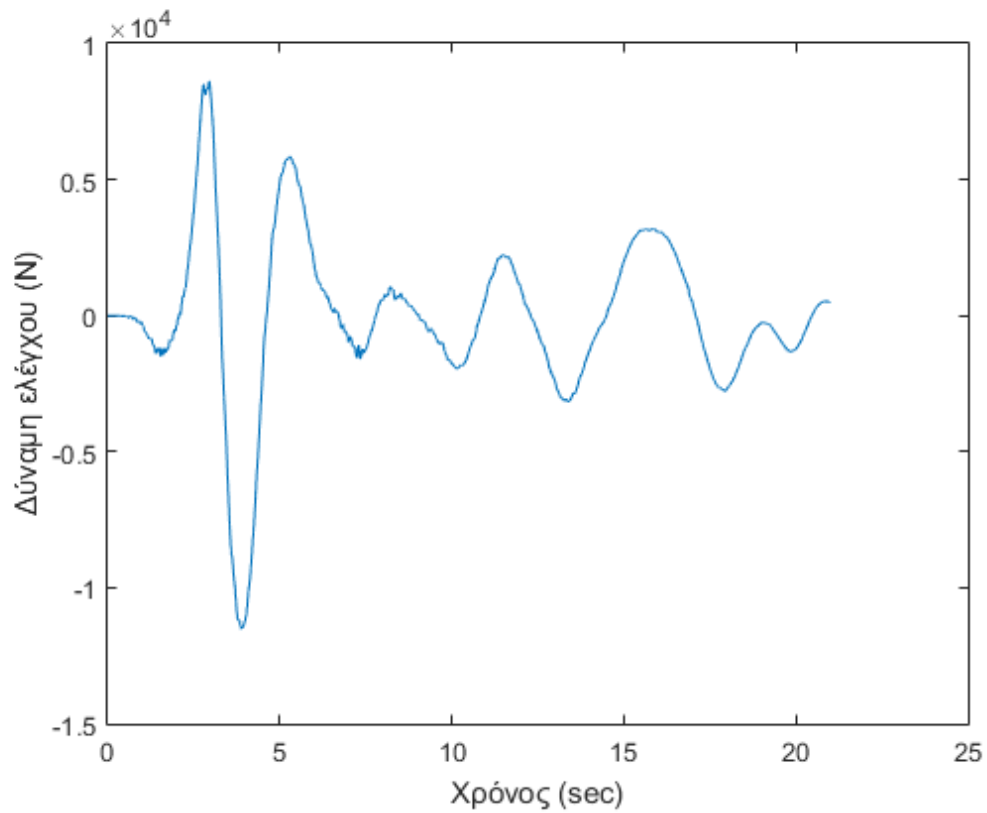


Σχήμα 3-11. Μετατόπιση του πρώτου ορόφου

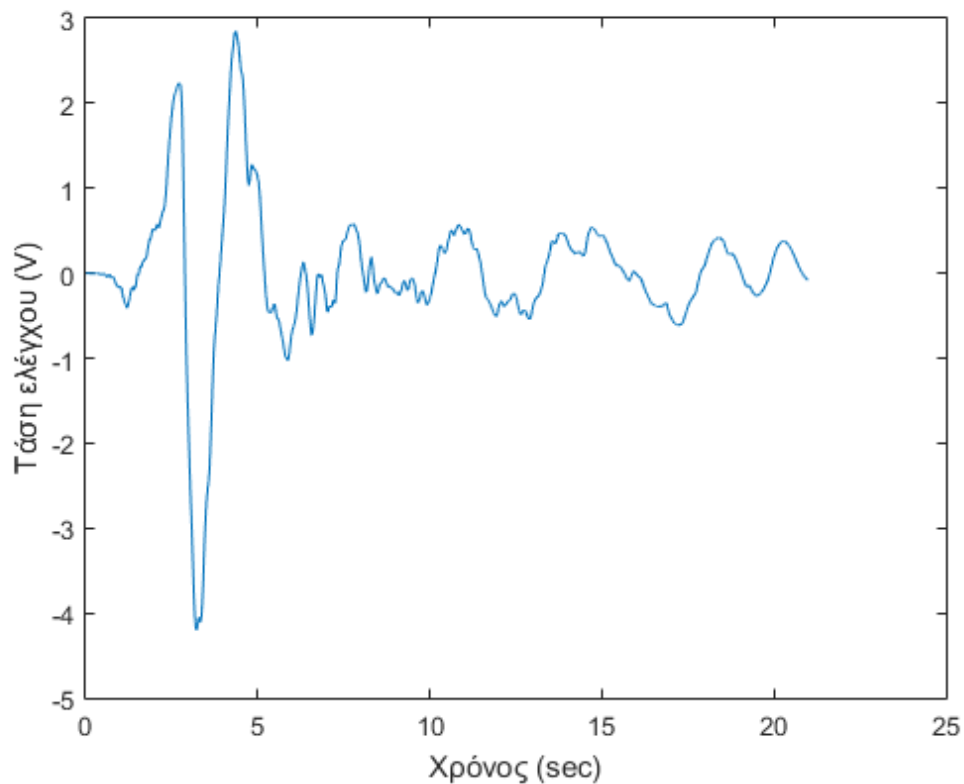


Σχήμα 3-12. Μετατόπιση του πρώτου ορόφου

Και σε αυτή την περίπτωση σεισμικής διαταραχής το σύστημα ελέγχου επιτυγχάνει να μειώσει σημαντικά το εύρος της ταχύτητας, μετατόπισης και συχνότητας της ταλάντωσης του πρώτου ορόφου.



Σχήμα 3-13. Δύναμη ελέγχου εφαρμοζόμενη στον πρώτο όροφο



Σχήμα 3-14. Τάση ελέγχου της σερβοβαλβίδας

Για την εφαρμογή του ελέγχου και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται πως τόσο η δύναμη ελέγχου όσο και η τάση ελέγχου της σερβοβαλβίδας, είναι εντός των αποδεκτών ορίων λειτουργίας του ηλεκτροϋδραυλικού συστήματος. Ανάλογη συμπεριφορά παρατηρείται και στους υπόλοιπους ορόφους του κτιρίου.

Συνοψίζοντας, παρατηρείται πως και στα δύο σενάρια σεισμικής διαταραχής υπήρξε επιτυχής εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου, παρουσιάζοντας μάλιστα σημαντική βελτίωση στην απόκριση του κτιρίου κατά την σεισμική διαταραχή, μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό την καταπόνηση που θα μπορούσε να είχε υποστεί.

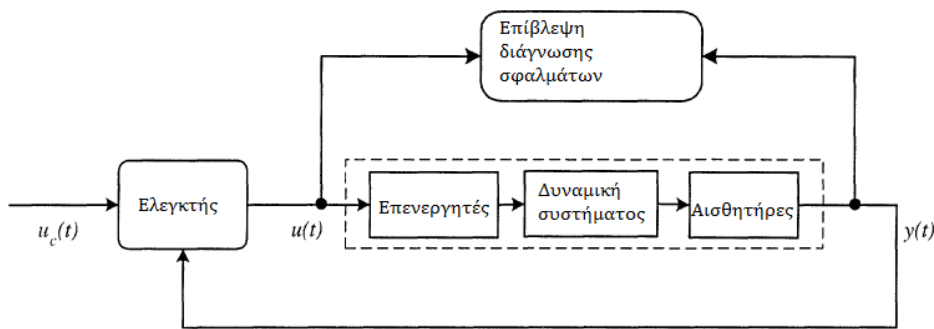
4

Παρατηρητής Άγνωστης Εισόδου και Ανίχνευση και Απομόνωση Σφαλμάτων

Από την δεκαετία του 1970 και έπειτα το πρόβλημα διάγνωσης σφαλμάτων απέκτησε ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον. Η ανάγκη για επίβλεψη συστημάτων, ειδικά κρίσιμων εφαρμογών, και η ικανότητα διάγνωσης πιθανού σφάλματος είναι εξαιρετικά σημαντική. Πολλές προσεγγίσεις έχουν προταθεί για την ανίχνευση, απομόνωση και αναγνώριση των σφαλμάτων, ενώ η έρευνα συνεχίζεται ακόμη εντατικά [12]. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αφορά την διάγνωση σφαλμάτων βασιζόμενη στο μοντέλο. Η διάγνωση σφαλμάτων βασιζόμενη στο μοντέλο (Model-Based Fault Diagnosis) ορίζεται ως η ανίχνευση, η απομόνωση και ο χαρακτηρισμός των σφαλμάτων σε στοιχεία του συστήματος, μέσω της σύγκρισης των διαθέσιμων μετρήσεων με τις πληροφορίες που προκύπτουν από το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος. Τα σφάλματα ανιχνεύονται ορίζοντας ένα κατώφλι για το υπολειπόμενο σήμα που παράγεται μέσω της διαφοράς των πραγματικών μετρήσεων και των αντίστοιχων εκτιμήσεων αυτών, βάσει του μαθηματικού μοντέλου. Μπορεί να σχεδιαστεί ένα σύνολο από υπολειπόμενα σήματα, όπου το κάθε σήμα θα έχει ευαισθησία σε μεμονωμένο σφάλμα του συστήματος. Η ανάλυση του κάθε υπολειπόμενου σήματος οδηγεί στην απομόνωση του εκάστοτε σφάλματος.

Σε ιδανικές συνθήκες, το υπολειπόμενο σήμα θα πρέπει να είναι ανεξάρτητο από τις εισόδους και τις εξόδους του συστήματος. Θα πρέπει να έχει τιμή κοντά στο μηδέν όταν δεν υπάρχει σφάλμα, ενώ σε περίπτωση σφάλματος κάποια τιμή διακριτά διαφορετική του μηδενός.

Η διάγνωση σφαλμάτων γίνεται καθώς το πραγματικό σύστημα βρίσκεται υπό λειτουργία μιας και οι πληροφορίες που απαιτούνται για την διάγνωση σφαλμάτων βασίζονται σε μοντέλο μόνον τότε είναι διαθέσιμες. Επίσης, το μοντέλο του συστήματος που χρησιμοποιείται, είναι αυτό του ανοιχτού βρόχου. Έτσι δεν είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί και ο ελεγκτής στο σχεδιασμό για την ανίχνευση σφαλμάτων (σχ. 4-1). Αυτό είναι συμβατό και με την αρχή του διαχωρισμού της θεωρίας ελέγχου μιας και η διάγνωση σφαλμάτων μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πρόβλημα παρατήρησης. Από την στιγμή που η εντολή εισόδου των επενεργητών είναι διαθέσιμη, το πρόβλημα διάγνωσης σφαλμάτων θα είναι το ίδιο, ανεξάρτητα αν γίνεται αναφορά σε ανοιχτό ή κλειστό βρόχο [5].

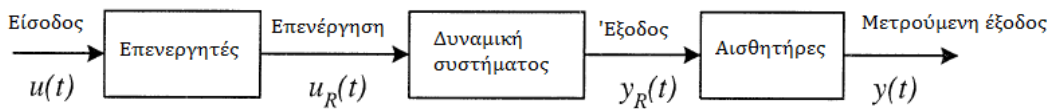


Σχήμα 4-1. Βρόχος ελέγχου και διάγνωση σφαλμάτων

4.1 Διάγνωση σφαλμάτων βασιζόμενη στο μοντέλο

Το πρώτο βήμα για την διάγνωση σφαλμάτων βασιζόμενη στο μοντέλο, είναι η σχεδίαση του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος που πρόκειται να βρεθεί υπό παρακολούθηση. Σε περίπτωση όπου το σύστημα είναι μη γραμμικό, θα πρέπει να γίνει γραμμικοποίησή του γύρω από ένα σημείο ισορροπίας. Κάνοντας χρήση του ανοιχτού βρόχου για την μοντελοποίηση μπορούν να διακριθούν τρία τμήματα (σχ. 4-2), οι επενεργητές, η δυναμική του συστήματος και οι αισθητήρες. Η δυναμική του συστήματος περιγράφεται ως:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu_R(t) \\ y_R(t) &= Cx(t) + Du_R(t) \end{aligned} \quad (4-1)$$

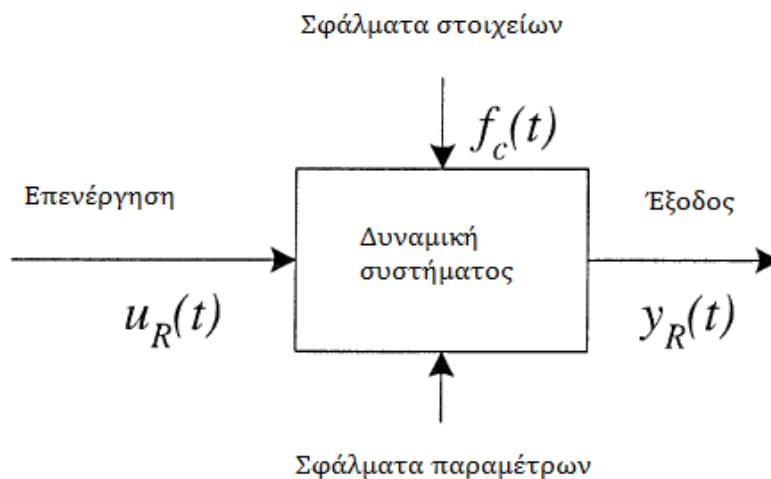


Σχήμα 4-2. Σύστημα ανοικτού βρόχου

Όπου $x \in R^n$ το διάνυσμα κατάστασης, $u_R \in R^r$ το διάνυσμα εισόδου στον επενεργητή και $y_R \in R^m$ το διάνυσμα της πραγματικής εξόδου του συστήματος, Οι πίνακες A, B, C, D θεωρούνται γνωστοί και έχουν τις κατάλληλες διαστάσεις.

Όταν συμβεί κάποιο σφάλμα σε κάποιο στοιχείο του συστήματος (σχ. 4-3), η δυναμική του συστήματος τότε περιγράφεται ως:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_R(t) + f_c(t) \quad (4-2)$$



Σχήμα 4-3. Δυναμική συστήματος υπό την παρουσία σφαλμάτων

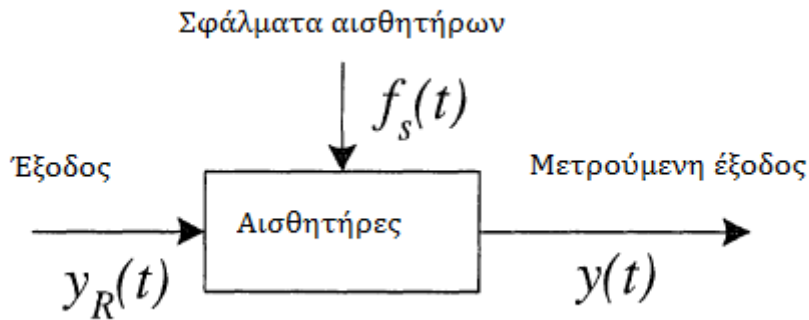
Το σφάλμα σε κάποιο στοιχείο παρουσιάζεται σαν μία αλλαγή η οποία καθιστά το μοντέλο του συστήματος μη έγκυρο. Σε κάποιες περιπτώσεις το σφάλμα παρουσιάζεται ως μία αλλαγή των παραμέτρων του συστήματος, όπως:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_R(t) + I_i \Delta a_{ij} x_j(t) \quad (4-3)$$

Γενικά, η πραγματική έξοδος του συστήματος y_R δεν είναι διαθέσιμη και έτσι γίνεται χρήση αισθητήρων. Αμελώντας την δυναμική των αισθητήρων:

$$y(t) = y_R(t) + f_s(t) \quad (4-4)$$

Όπου $f_s \in R^m$ το διάνυσμα σφάλματος αισθητήρων (σχ. 4-4).



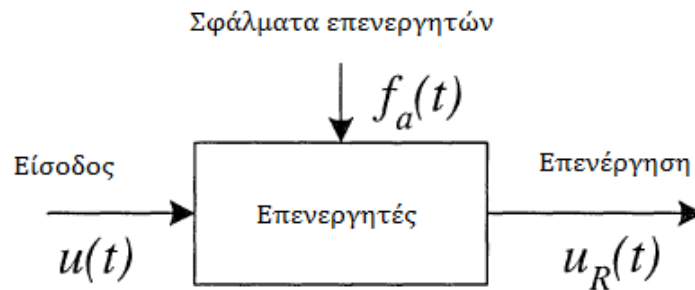
Σχήμα 4-4. Πραγματική έξοδος, μετρούμενη έξοδος και σφάλμα αισθητήρων

Με την κατάλληλη επιλογή του f_s , γίνεται να περιγραφούν όλες οι περιπτώσεις σφαλμάτων αισθητήρων.

Αντίστοιχα, το σήμα επενέργειας του συστήματος δεν είναι άμεσα διαθέσιμο πάντα, έτσι η απόκριση του επενεργητή σε ένα σήμα ελέγχου:

$$u_R(t) = u(t) + f_a(t) \quad (4-5)$$

Όπου $f_a \in R^r$ το διάνυσμα σφάλματος επενεργητών (σχ. 4-5).



Σχήμα 4-5. Επενεργητής, είσοδος και επενέργιση

Καταλήγοντας, η γενική περίπτωση όπου το σύστημα έχει όλα τα πιθανά σφάλματα:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + R_1 f(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + R_2 f(t) \end{aligned} \quad (4-6)$$

Όπου $f \in R^g$ το διάνυσμα σφαλμάτων, κάθε στοιχείο του αναφέρεται σε συγκεκριμένο σφάλμα και R_1, R_2 γνωστοί πίνακες όπου αντιπροσωπεύουν την επίδραση των σφαλμάτων στο σύστημα.

Σαν μία αναπαράσταση πίνακα μεταφοράς εισόδου-εξόδου συστήματος με πιθανά σφάλματα:

$$y(s) = G_u(s)u(s) + G_f(s)f(s) \quad (4-7)$$

Όπου

$$G_u(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (4-8)$$

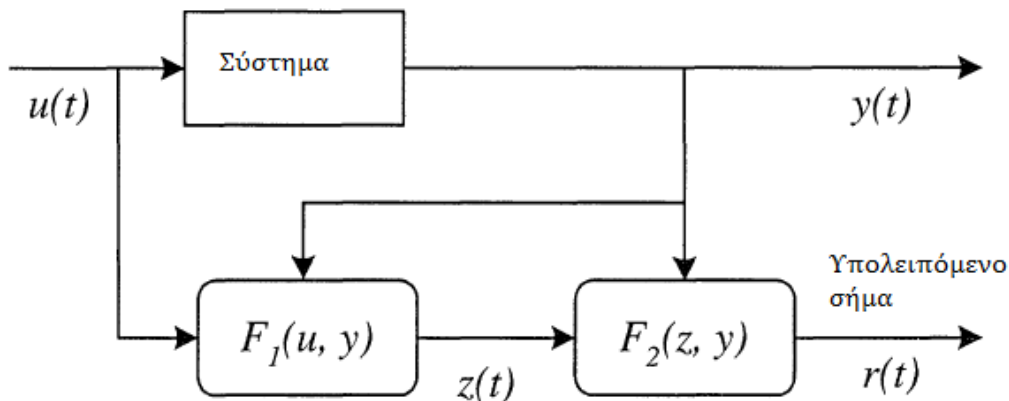
$$G_f(s) = C(sI - A)^{-1}R_1 + R_2$$

4.1.1 Γενική δομή παραγωγής υπολειπόμενων σημάτων σε συστήματα ανίχνευσης σφαλμάτων βασιζόμενα στο μοντέλο

Στο σχ. 4-6 η παραγωγή υπολειπόμενων σημάτων στηρίζεται στην δημιουργία ενός δευτερεύοντος σήματος $z(t)$, το οποίο παράγεται από το σύστημα $F_1(u, y)$, όπου κάνοντας χρήση και της εξόδου του συστήματος, παράγεται το υπολειπόμενο σήμα $r(t)$ (residual signal), το οποίο ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση (στην περίπτωση που δεν υπάρχει σφάλμα):

$$r(t) = F_2(y(t), z(t)) = 0 \quad (4-9)$$

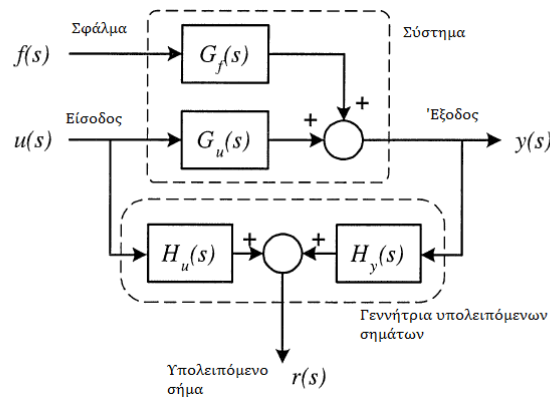
Σε περίπτωση που υπάρξει σφάλμα, η σχέση δεν θα ισούται πλέον με μηδέν.



Σχήμα 4-6. Δομή παραγωγής υπολειπόμενου σήματος

Η πιο απλή προσέγγιση για την παραγωγή του υπολειπόμενου σήματος $r(t)$ είναι να οριστεί το σύστημα F_1 το οποίο θα είναι όμοιο του συστήματος υπό μελέτη. Το σήμα $r(t)$ πλέον προκύπτει ως η εκτιμώμενη έξοδος και το υπολειπόμενο σήμα ορίζεται ως η διαφορά της εκτιμώμενης από την πραγματική έξοδο (σχ. 4-7). Η συγκεκριμένη προσέγγιση έχει το μειονέκτημα ότι σε περίπτωση όπου το σύστημα είναι ασταθές, είναι πιθανή και η αστάθεια

του συστήματος παραγωγής του υπολειπόμενου σήματος, μιας και κάνει χρήση του ανοιχτού βρόχου του συστήματος.



Σχήμα 4-7. Γενική δομή γεννήτριας υπολειπόμενων σημάτων

Η δομή αυτή αναπαρίσταται ως:

$$r(s) = [H_u(s) \ H_y(s)] \begin{bmatrix} u(s) \\ y(s) \end{bmatrix} = H_u(s)u(s) + H_y(s)y(s) \quad (4-10)$$

Όπου H_u, H_y πραγματοποιήσιμοι μόνο εάν το σύστημα είναι ευσταθές και γραμμικό. Τα υπολειπόμενα σήματα θα βρίσκονται στο μηδέν όσο δε συμβαίνει κάποιο σφάλμα στο σύστημα. Για να ικανοποιείται αυτή η συνθήκη πρέπει:

$$H_u(s) + H_y(s)G_u(s) = 0 \quad (4-11)$$

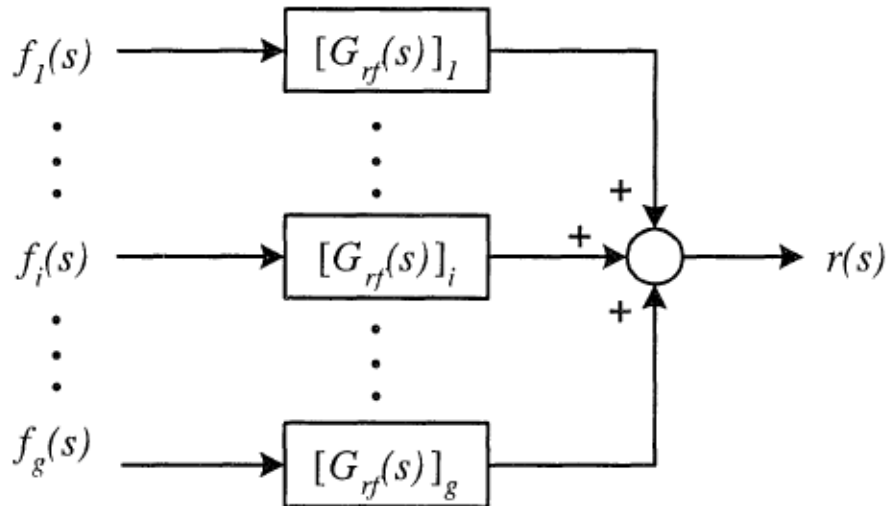
Η εξ. 4-10 είναι μία γενικευμένη αναπαράσταση όλων των γεννητριών υπολειπόμενων σημάτων. Ο σχεδιασμός της γεννήτριας βασίζεται στην επιλογή κατάλληλων H_u, H_y ώστε να ικανοποιείται η εξ. 4-11.

4.1.2 Ανιχνευσιμότητα σφαλμάτων

Όταν συμβεί κάποιο σφάλμα στο σύστημα το οποίο βρίσκεται υπό παρακολούθηση το διάνυσμα του υπολειπόμενου σήματος είναι:

$$r(s) = H_y(s)G_f(s)f(s) = G_{rf}(s)f(s) = \sum_{i=1}^g [G_{rf}(s)]_i f_i(s) \quad (4-12)$$

Όπου $G_{rf}(s)$ ο πίνακας μεταφοράς όπου αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ του υπολειπόμενου σήματος και των σφαλμάτων (σχ. 4-8).



Σχήμα 4-8. Σφάλματα και υπολειπόμενο σήμα

Για να καταστεί εφικτό το i -σφάλμα ως ανιχνεύσιμο μέσω του υπολειπόμενου σήματος ο πίνακας μεταφοράς πρέπει να είναι μη μηδενικός:

$$[G_{rf}(s)]_i \neq 0 \quad (4-13)$$

Σε περίπτωση όπου η εξ. 4-13 είναι αληθής, το σφάλμα f_i ορίζεται ως ανιχνεύσιμο από το υπολειπόμενο σήμα $r(t)$. Για να επιτευχθεί ισχυρή ανιχνευσιμότητα του σφάλματος προκύπτει πως πρέπει να εξεταστεί η σταθερή κατάσταση, χωρίς μεταβατικά φαινόμενα, έτσι η εξ. 4-13 γίνεται:

$$[G_{rf}(0)]_i \neq 0$$

4.1.3 Απομόνωση σφαλμάτων

Αφού έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία η ανίχνευση κάποιου σφάλματος, πρέπει στην συνέχεια να απομονωθεί ώστε να είναι διακριτό από αλλά πιθανά σφάλματα. Έτσι, είναι απαραίτητο ένα σύνολο υπολειπόμενων σημάτων (ή σε κάποιες περιπτώσεις ένα διάνυσμα υπολειπόμενων σημάτων).

Μια προσέγγιση για την απομόνωση σφαλμάτων είναι το δομημένο σύνολο υπολειπόμενων σημάτων. Κάθε υπολειπόμενο σήμα είναι δομημένο ώστε να είναι ευαίσθητο μόνο σε ένα υποσύνολο σφαλμάτων. Η διαδικασία σχεδίασης αυτής της δομής περιλαμβάνει αρχικά τον ορισμό των σχέσεων ευαισθησίας μεταξύ υπολειπόμενων σημάτων και σφαλμάτων και στη συνέχεια η κατασκευή των κατάλληλων γεννητριών υπολειπόμενων σημάτων. Το πλεονέκτημα αυτής της δομής είναι πως η διάγνωση σφάλματος απλοποιείται στην ανίχνευση του υπολειπόμενου σήματος όπου θα αποκτήσει μη μηδενική τιμή (στη συνέχεια μπορεί να

γίνει και σύγκριση με κάποιο κατώφλι, αν έχει οριστεί). Αν πρόκειται να απομονωθούν όλα τα πιθανά σφάλματα:

$$r_i(t) = R(f_i(t)) \quad i \in \{1, 2, \dots, g\} \quad (4-14)$$

Η εξ. 4-14 περιγράφει ένα σύνολο υπολειπόμενων σημάτων. Η λογική αυτή είναι πολύ ακριβής και έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει όλα τα σφάλματα ταυτοχρόνως αλλά έχει δυσκολία στην κατασκευή της. Μια πιο κοινή προσέγγιση είναι τα υπολειπόμενα σήματα να γίνουν ευαίσθητα σε όλα πλην ενός σφάλματος:

$$\begin{cases} r_1(t) = R(f_2(t), \dots, f_g(t)) \\ \dots \\ r_i(t) = R(f_2(t), \dots, f_{i-1}(t), f_{i+1}(t), \dots, f_g(t)) \\ \dots \\ r_g(t) = R(f_1(t), \dots, f_{g-1}(t)) \end{cases} \quad (4-15)$$

Η προσέγγιση αυτή (εξ.4-15) ορίζεται ως ένα γενικευμένο σύνολο υπολειπόμενων σημάτων και είναι γνωστό και ως γενικευμένη δομή παρατηρητή.

Για την παραγωγή των υπολειπόμενων σημάτων θα χρησιμοποιηθεί μία προσέγγιση όπου θα βασίζεται σε παρατηρητή. Παράλληλα ο παρατηρητής θα πρέπει να παρουσιάζει ευρωστία σε άγνωστες διαταραχές όπου πρόκειται να εισέλθουν στο σύστημα εξαιτίας της σεισμικής διαταραχής. Για τον λόγο αυτό ένας συμβατικός παρατηρητής δεν επαρκεί, αλλά θα πρέπει να είναι Παρατηρητής Άγνωστης Εισόδου [6]. Έτσι θα επιτευχθεί διάγνωση των πιθανών σφαλμάτων η οποία θα είναι αποπλεγμένη από αυτή την διαταραχή.

4.2 Σχεδιασμός Παρατηρητή Άγνωστης Εισόδου

Ένας παρατηρητής ορίζεται ως Παρατηρητής Άγνωστης Εισόδου (Unknown Input Observer - UIO), εάν το διάνυσμα σφάλματος εκτίμησης κατάστασης $e(t)$ προσεγγίζει ασυμπτωτικά το μηδέν, ανεξάρτητα από την παρουσία διαταραχών στο σύστημα [29]. Έτσι, μίας και το προς μελέτη σύστημα του μοντέλου κτιριακής εγκατάστασης θα βρεθεί υπό άγνωστη σεισμική διαταραχή ενδείκνυται η επιλογή του προαναφερθέντος παρατηρητή.

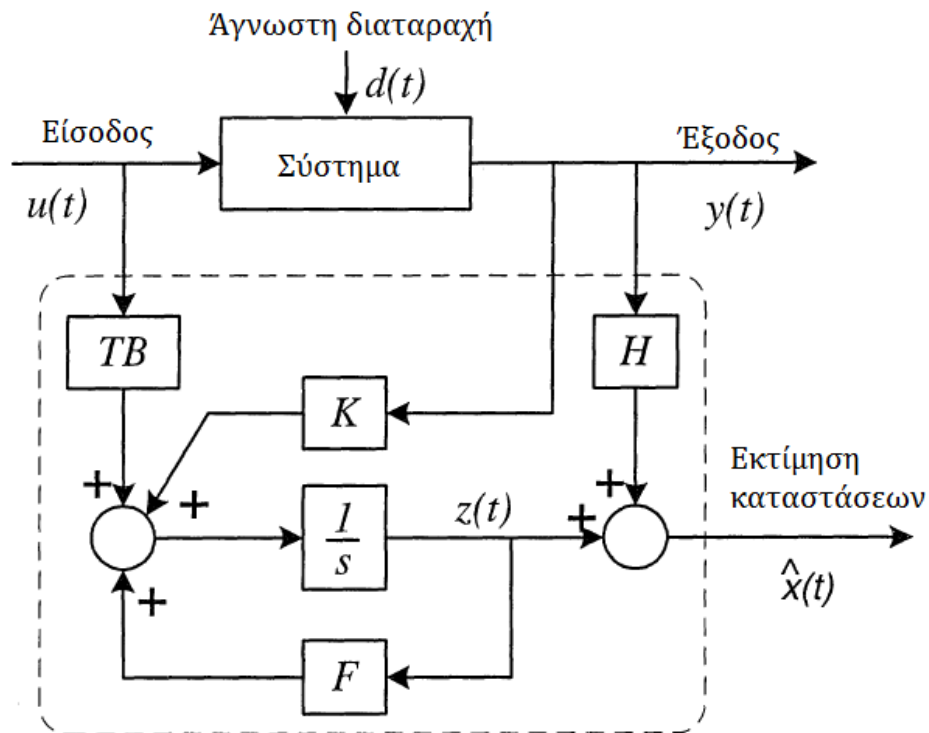
Βασική απαίτηση για την υλοποίηση ενός UIO είναι η εκ των προτέρων γνώση του πίνακα διανομής της διαταραχής E (Παράρτημα Γ), χωρίς βέβαια να είναι γνωστή η ίδια η διαταραχή. Για τον σχεδιασμό του παρατηρητή η διαταραχή ορίζεται ως ένας όρος προσθετικής αβεβαιότητας στη δυναμική εξίσωση του συστήματος:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{4-16}$$

Η δομή ενός UIO περιγράφεται ως (σχ. 4-8):

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= Fz(t) + TBu(t) + Ky(t) \\ \hat{x}(t) &= z(t) + Hy(t)\end{aligned}\tag{4-17}$$

Όπου $\hat{x} \in R^n$ το διάνυσμα εκτίμησης κατάστασης, $z \in R^n$ το διάνυσμα κατάστασης του παρατηρητή και F, T, K, H πίνακες που πρόκειται να σχεδιαστούν με στόχο την αποσύνδεση της διαταραχής και την βέλτιστη εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης του συστήματος.



Σχήμα 4-9. Παρατηρητής Αγνώστου Εισόδου (UIO)

Ως διάνυσμα σφάλματος εκτίμησης κατάστασης ορίζεται:

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t)\tag{4-18}$$

Παραγωγίζοντας την εξ. 4-18 και αντικαθιστώντας βάσει των εξ. 4-16 και 4-17:

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) &= (A - HCA - K_1C)e(t) + [F - (A - HCA - K_1C)]z(t) \\ &\quad + [K_2 - (A - HCA - K_1C)H]y(t) + [T - (I - HC)]Bu(t) \\ &\quad + (HC - I)Ed(t)\end{aligned}\tag{4-19}$$

όπου

$$K = K_1 + K_2 \quad (4-20)$$

Για την σχεδίαση του παρατηρητή πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις:

$$(HC - I)E = 0 \quad (4-21)$$

$$T = I - HC \quad (4-22)$$

$$F = A - HCA - K_1C \quad (4-23)$$

$$K_2 = FH \quad (4-24)$$

Όταν οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιηθούν τότε το διάνυσμα εκτίμησης κατάστασης προκύπτει:

$$\dot{e}(t) = Fe(t) \quad (4-25)$$

Βάσει της εξ. 4-23, για να μπορέσει να υλοποιηθεί ο UIO όλες οι ιδιοτιμές του F πρέπει να είναι ευσταθείς. Τότε και μόνο τότε το σφάλμα εκτίμησης κατάστασης $e(t)$ θα τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν.

Επίσης, απαραίτητες συνθήκες ώστε ο παρατηρητής της εξ. 4-17 να είναι παρατηρητής αγνώστου εισόδου του συστήματος της εξ. 4-6 είναι οι εξής (Περισσότερα στο Παράρτημα Δ):

1. $\text{rank}(CE) = \text{rank}(E)$
2. το σύστημα (C, A_1) να είναι ανιχνεύσιμο

όπου

$$A_1 = A - E[(CE)^T - CE]^{-1}(CE)^T CA \quad (4-26)$$

Από την στιγμή που η συνθήκη 1 ισχύει, η εξ. 4-21 έχει λύση. Μία γενική λύση της είναι:

$$H = E[(CE)^T CE]^{-1}(CE)^T \quad (4-27)$$

Τότε ο F , ο οποίος αντιπροσωπεύει την δυναμική του συστήματος γίνεται:

$$F = A - HCA - K_1C = A_1 - K_1C \quad (4-28)$$

Ο πίνακας F θα γίνει ευσταθής επιλέγοντας κατάλληλα το κέρδος K_1 , από την στιγμή που ισχύει η συνθήκη 2. Συγκεκριμένα υπάρχει ελευθερία στην επιλογή του K_1 , ο μόνος περιορισμός είναι ο πίνακας F να γίνεται ευσταθής. Ο πίνακας K_1 δεν είναι μοναδικός, εξαιτίας της πολυμεταβλητής φύσης του προβλήματος, έτσι υπάρχει ελευθερία σχεδίασης

ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του παρατηρητή με όσο το δυνατόν καλύτερα. Τέλος, οι πίνακες T, K, H θα υπολογιστούν βάσει των εξ. 4-22, 4-24.

Συνοψίζοντας, καταλήγουμε σε μία διαδικασία 10 βημάτων που απαιτούνται ώστε να σχεδιαστεί ο UIO:

1. Έλεγχος των βαθμών των πινάκων E, CE . Σε περίπτωση που η συνθήκη 1 δεν ικανοποιείται και προκύπτει $rank(CE) \neq rank(E)$ τότε ο παρατηρητής είναι αδύνατο να υλοποιηθεί και η διαδικασία τερματίζεται.
2. Υπολογισμός των πινάκων H, T, A_1
3. Έλεγχος παρατηρησιμότητας του (C, A_1) . Σε περίπτωση που είναι παρατηρήσιμο το ζεύγος αυτό, ο παρατηρητής είναι υλοποιήσιμος. Υπολογίζεται ο K_1 μέσω της τεχνικής τοποθέτησης πόλων και αλγόριθμος σχεδιασμού συνεχίζει στο βήμα 9.
4. Σε περίπτωση όπου το (C, A_1) δεν είναι παρατηρήσιμο, δημιουργούμε τον πίνακα μετασχηματισμού P , ώστε να εκτελεστεί κανονική παρατηρήσιμη διάσπαση (observable canonical decomposition) (Παράρτημα Β) επιλέγοντας $n_1 = rank(obsv(C, A_1))$ γραμμικώς ανεξάρτητα ιδιοδιανύσματα, ώστε να κατασκευαστεί ο μη ιδιόμορφος πίνακας: $P = [p_1, \dots, p_{n_0}, p_{n_0+1}, \dots, p_n]^T$
5. Πραγματοποιώντας observable canonical decomposition:

$$PA_1P^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{12} & A_{22} \end{bmatrix} \quad CP^{-1} = [C^* \quad 0]$$
6. Έλεγχος ανιχνευσιμότητας του ζεύγους (C, A_1) , σε περίπτωση που οποιαδήποτε ιδιοτιμή του A_{22} είναι ασταθής, τότε ο παρατηρητής δεν είναι υλοποιήσιμος και η διαδικασία τερματίζεται.
7. Επιλογή n_1 επιθυμητών ιδιοτιμών και τοποθέτησή τους στο $A_{11} - K_p^{-1}C^*$ μέσω της τεχνικής τοποθέτησης πόλων.
8. Υπολογισμός $K_1 = P^{-1}K_p = P^{-1}[(K_p^1)^T (K_p^2)^T]^T$, όπου K_p^2 οποιοσδήποτε $(n - n_1) \times m$ πίνακας.
9. Υπολογισμός $F = A_1 - K_1C$, $K = K_1 + K_2 = K_1 + FH$
10. Τέλος αλγορίθμου σχεδίασης παρατηρητή άγνωστης εισόδου.

4.3 Εύρωστη ανίχνευση σφαλμάτων με UIO

Βασικός στόχος της εύρωστης ανίχνευσης σφαλμάτων είναι η παραγωγή ενός υπολειπόμενου σήματος το οποίο είναι εύρωστο σε αβεβαιότητες του συστήματος. Για την ανίχνευση ενός συγκεκριμένου σφάλματος, το υπολειπόμενο σήμα πρέπει να είναι ευαίσθητο

στο συγκεκριμένο σφάλμα. Ένα σύστημα το οποίο υπόκειται σε πιθανά σφάλματα αισθητήρων και επενεργητών μπορεί να περιγραφεί ως:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) + Bf_a(t) \\ y(t) &= Cx(t) + f_s(t) \end{aligned} \quad (4-29)$$

Όπου $f_a \in R^r$ υποδηλώνει την παρουσία σφαλμάτων επενεργητών και $f_s \in R^m$ παρουσία σφαλμάτων αισθητήρων. Για την παραγωγή ενός εύρωστου, αποσυνδεδεμένου από την διαταραχή, υπολειπόμενου σήματος, απαιτείται η χρήση ενός UIO. Όταν η εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης είναι διαθέσιμη, τότε το υπολειπόμενο σήμα μπορεί να παραχθεί ως:

$$r(t) = y(t) - C\hat{x}(t) = (I - CH)y(t) - Cz(t) \quad (4-30)$$

Όταν γίνει χρήση αυτής της μεθόδου παραγωγής υπολειπόμενο σήματος στο σύστημα της εξ. 4-29 τότε, το υπολειπόμενο σήμα και το σφάλμα εκτίμησης του διανύσματος κατάστασης έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= (A_1 - K_1C)e(t) + TBf_a(t) - K_1f_s - Hf_s(t) \\ r(t) &= Ce(t) + f_s(t) \end{aligned} \quad (4-31)$$

Από την εξίσωση του υπολειπόμενου σήματος $r(t)$ (εξ.-30) παρατηρείται πως η επίδραση της διαταραχής έχει απεμπλακεί από το σήμα. Για την ανίχνευση σφαλμάτων επενεργητών πρέπει η σχεδίαση να είναι τέτοια ώστε:

$$TB \neq 0$$

Πιο συγκεκριμένα, το σφάλμα του i επενεργητή θα επηρεάσει το υπολειπόμενο σήμα μόνο εάν:

$$Tb_i \neq 0$$

Όπου b_i είναι η i στήλη του πίνακα B .

Όμοια, το υπολειπόμενο σήμα πρέπει να γίνει ευαίσθητο στα σφάλματα f_s , ώστε να επιτευχθεί και ανίχνευση σφαλμάτων αισθητήρων. Αυτή η συνθήκη ικανοποιείται εύκολα μιας και όπως βλέπουμε από την εξ. 4-31 σφάλματα αισθητήρων έχουν άμεση επιρροή στο υπολειπόμενο σήμα. Ακόμη, για την ανίχνευση των σφαλμάτων μπορούν να θεωρηθούν κάποια κατώφλια ώστε η λογική ανίχνευσης να είναι η εξής:

$$\begin{aligned} \|r(t)\| &< \text{Κατώφλι} && \text{για την περίπτωση απουσίας σφάλματος} \\ \|r(t)\| &> \text{Κατώφλι} && \text{για την περίπτωση παρουσίας σφάλματος} \end{aligned}$$

4.4 Εύρωστα συστήματα ανίχνευσης σφαλμάτων βασιζόμενα

σε Παρατηρητή Άγνωστης Εισόδου

Το πρόβλημα της απομόνωσης σφαλμάτων αφορά την διαπίστωση ποιού στοιχείου από τους αισθητήρες ή επενεργητές είναι αυτό που παράγει το σφάλμα. Η λογική της ανίχνευσης, κάνοντας χρήση γενικευμένων υπολειπόμενων σημάτων, είναι, ιδανικά, να γίνει κάθε υπολειπόμενο σήμα ευαίσθητο σε όλα τα σφάλματα πλην ενός, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Κάνοντας χρήση αυτής της λογικής η εκμετάλλευση στο μέγιστο της σχεδιαστικής ελευθερίας ώστε το σύστημα ανίχνευσης σφαλμάτων να αποκτήσει τη μεγαλύτερη δυνατή ευρωστία.

4.4.1 Εύρωστη απομόνωση σφαλμάτων αισθητήρων

Για τον σχεδιασμό του εύρωστου συστήματος απομόνωσης σφαλμάτων αισθητήρων, θα υποθεθεί πως δεν συμβαίνει κάποιο σφάλμα στους επενεργητές του συστήματος. Οι εξισώσεις του συστήματος προκύπτουν:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \quad (4-32)$$

$$y^j(t) = C^j x(t) + f_s^j(t) \quad \text{για } j = 1, 2, \dots, m \quad (4-33)$$

$$y_j(t) = c_j x(t) + f_{sj}(t) \quad (4-14)$$

Η εξ. 4-32 αναφέρεται στο μοντέλο της κτιριακής εγκατάστασης όπως αυτό παρουσιάζεται στο Παράρτημα Γ. Οι αισθητήρες είναι επιταχυνσιόμετρα και είναι συνολικά τέσσερις, ένας για κάθε όροφο του κτιρίου.

Όπου $c_j \in R^{1 \times n}$ είναι η j γραμμή του πίνακα C , $C^j \in R^{(m-1) \times n}$ προκύπτει από τον πίνακα C διαγράφοντας από αυτόν την j γραμμή c_j , y_j είναι το j στοιχείο του διανύσματος y , $y^j \in R^{m-1}$ προκύπτει από το διάνυσμα y διαγράφοντας από αυτό το j στοιχείο y_j . Ακόμη πρέπει να πληρούνται οι απαιτήσεις σχεδιασμού του UIO και να είναι αληθείς οι απαιτήσεις των 10 βημάτων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο εδάφιο. Βάσει αυτών, μπορούν να σχεδιαστούν m γεννήτριες υπολειπόμενων σημάτων βασιζόμενες σε παρατηρητή άγνωστης εισόδου ως εξής:

$$\begin{cases} \dot{z}^j(t) = F^j z^j(t) + T^j Bu(t) + K^j y^j(t) \\ r^j(t) = (I - C^j H^j) y^j(t) - C^j z^j(t) \end{cases} \quad (4-35)$$

Όπου οι παράμετροι της εξ. 4-35 πρέπει να υπακούουν στις εξής εξισώσεις:

$$H^j C^j E = E \quad (4-36)$$

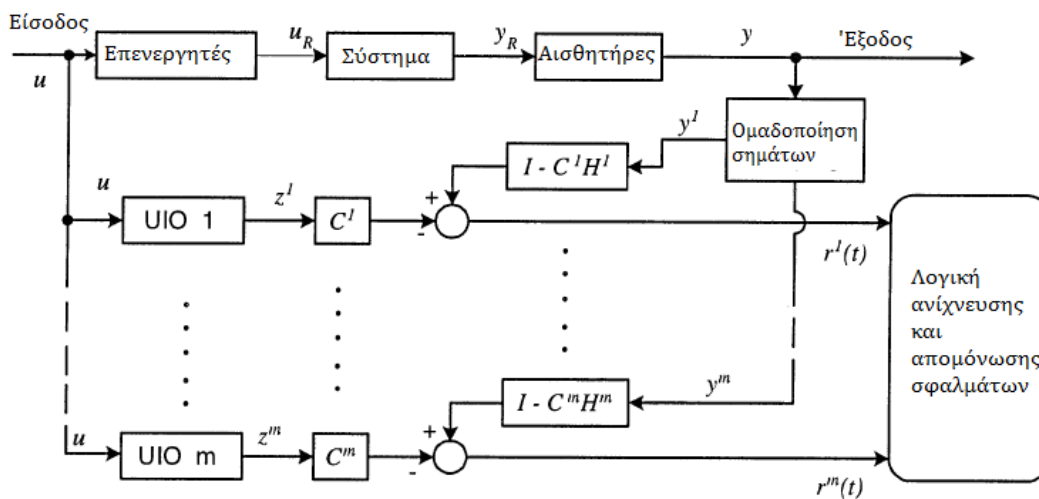
$$T^j = I - H^j C^j \quad (4-37)$$

$$F^j = T^j A - K_1^j C^j \quad (4-38)$$

$$K_2^j = F^j H^j \quad (4-39)$$

$$K^j = K_1^j + K_2^j \quad (4-40)$$

Όπου το K_1^j που θα επιλεγεί μέσω τοποθέτησης πόλων να είναι κατάλληλο ώστε η εξ. 4-38 να είναι ευσταθής. Όπως προκύπτει από τις εξ. 4-36 έως 4-40 η κάθε γεννήτρια υπολειπόμενου σήματος χρησιμοποιεί όλες τις εισόδους και όλες πλην μίας εξόδου του συστήματος (σχ. 4-10).



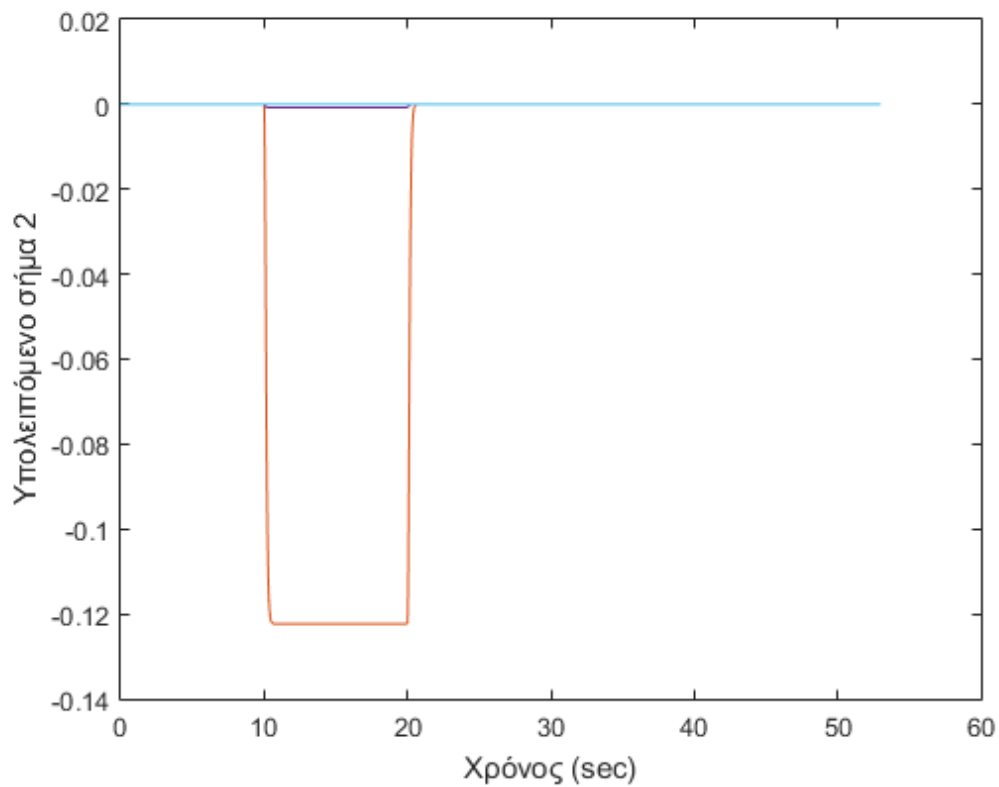
Σχήμα 4-10. Εύρωστη απομόνωση σφαλμάτων αισθητήρων

Κάνοντας χρήση της θεωρίας που αναλύθηκε σχεδιάστηκαν συστήματα ανίχνευσης σφαλμάτων για τον κάθε αισθητήρα εκτός του αισθητήρα του πρώτου ορόφου. Η σχεδίαση του συστήματος ανίχνευσης σφάλματος για τον πρώτο αισθητήρα ήταν αδύνατη, μιας και η συνθήκη του βήματος 1 από τα βήματα σχεδίασης που πρέπει να ακολουθηθούν για την κατασκευή ενός UIO δεν ήταν δυνατό να ικανοποιηθεί. Το γεγονός αυτό είναι αποτρεπτικό για την συνέχιση της σχεδίασης του συστήματος ανίχνευσης σφάλματος του συγκεκριμένου αισθητήρα. Έχοντας όμως σχεδιάσει με επιτυχία τους αντίστοιχους UIO για τους υπόλοιπους αισθητήρες, η παραγόμενη πληροφορία συνολικά επαρκεί ώστε να ανιχνευθεί και απομονωθεί τελικά σφάλμα και στον πρώτο αισθητήρα, όπως διαπιστώνεται και στο επόμενο εδάφιο.

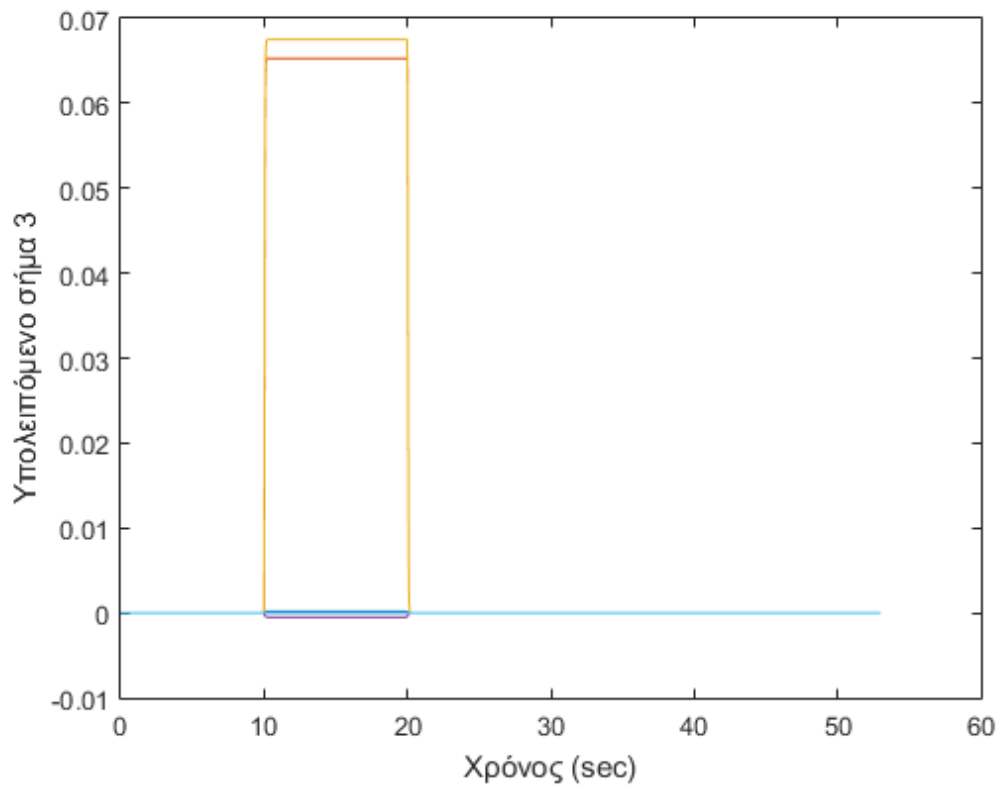
4.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Κατά την λειτουργία του συστήματος ελέγχου του μοντέλου της κτιριακής εγκατάστασης υπό την σεισμική διαταραχή El Centro, θα εισαχθούν σφάλματα στην μέτρηση κάθε αισθητήρα διαδοχικά. Συγκεκριμένα, στο χρονικό διάστημα μεταξύ 10s έως 20s θα εισαχθεί ως σφάλμα στη μέτρηση ένα σήμα παλμού.

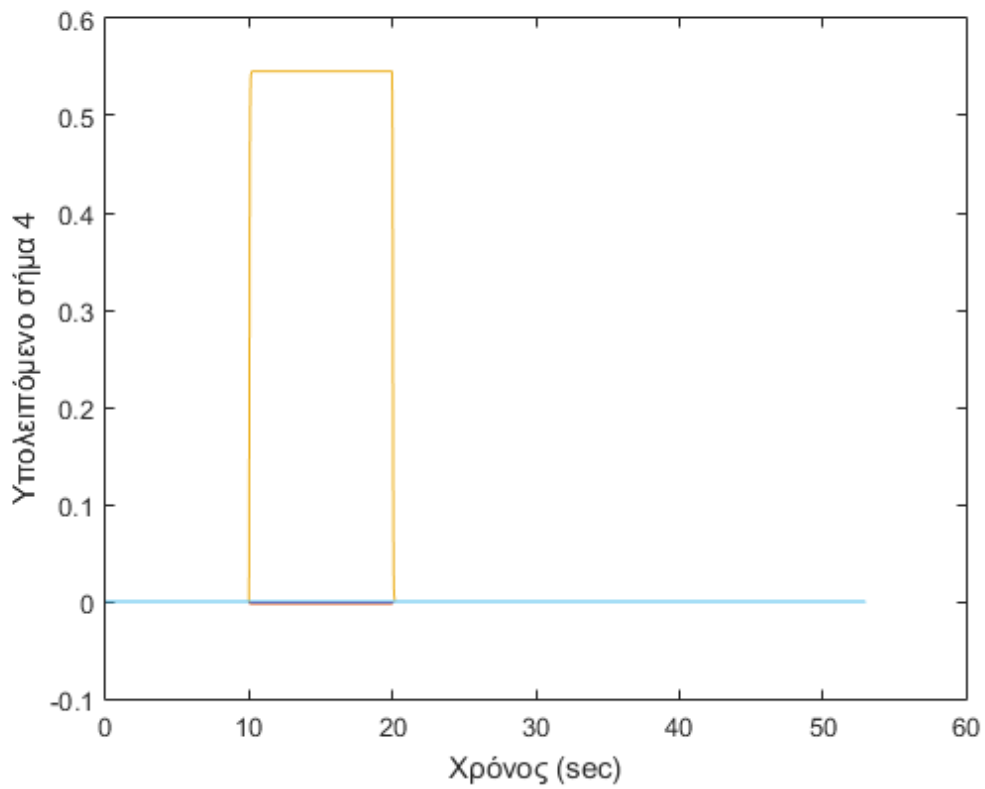
4.5.1 Σφάλμα στον αισθητήρα 1



Σχήμα 4-11. Υπολειπόμενο σήμα του αισθητήρα 2



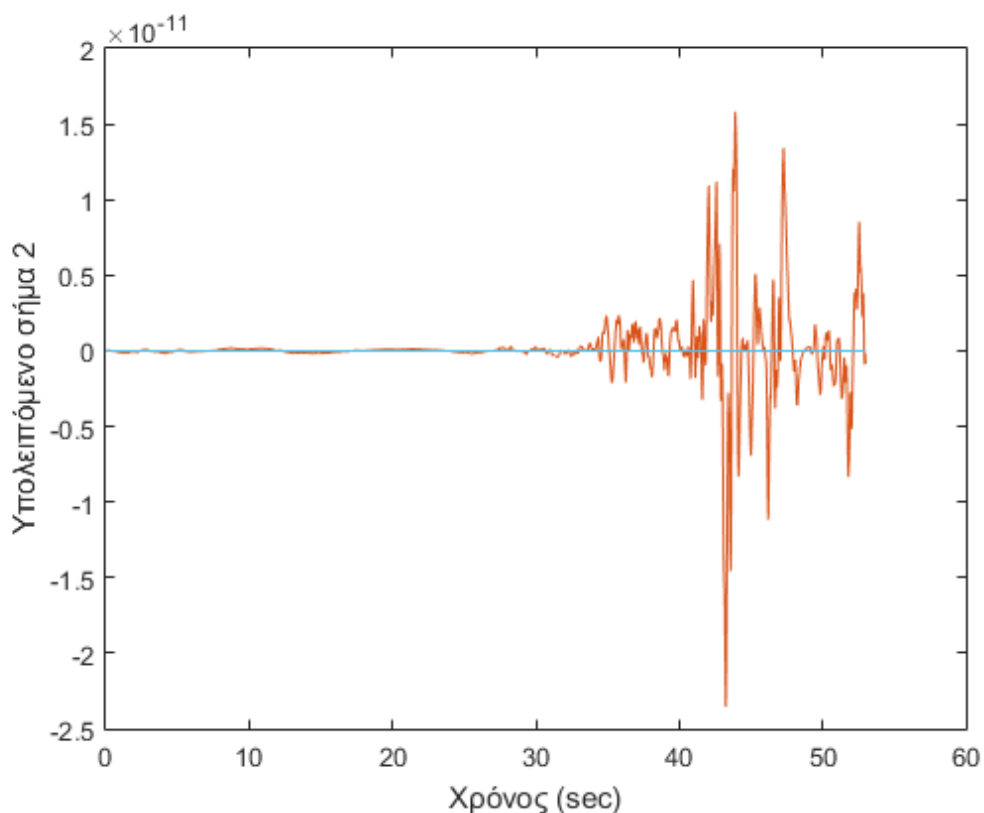
Σχήμα 4-12. Υπολειπόμενο σήμα του αισθητήρα 3



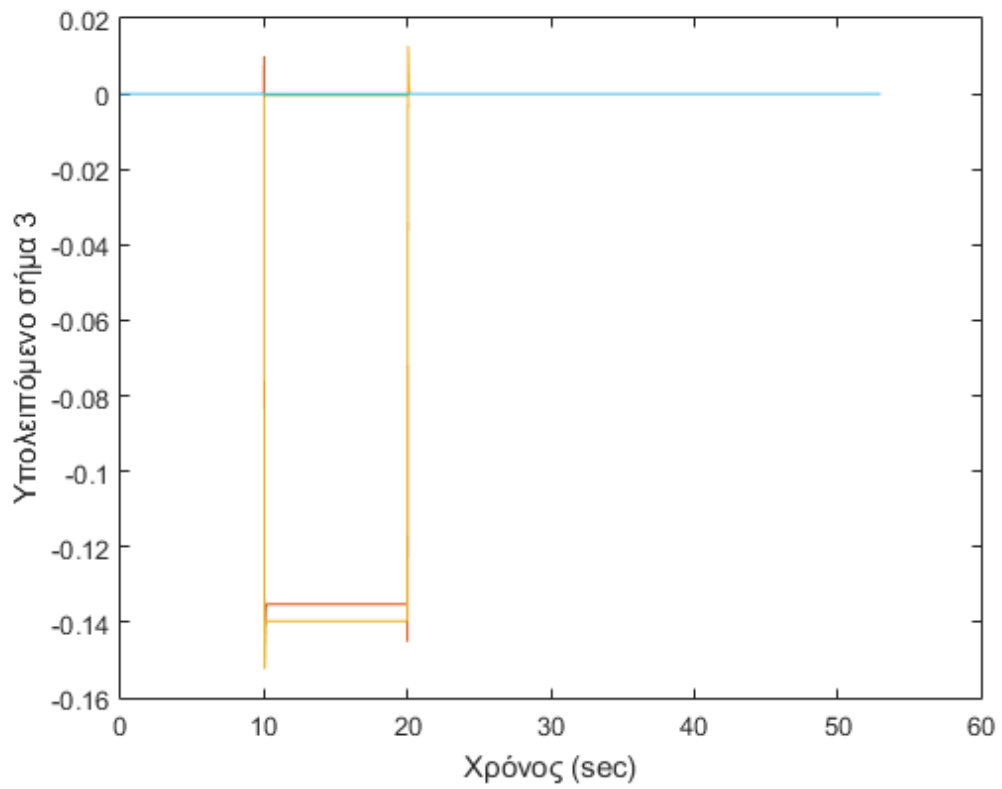
Σχήμα 4-1 Υπολειπόμενο σήμα του αισθητήρα 4

Εισάγοντας το σφάλμα στην μέτρηση του αισθητήρα 1, παρατηρείται πως τα υπολειπόμενα σήματα των υπόλοιπων αισθητήρων κατά την διάρκεια του σφάλματος αποκτούν τιμή διάφορη του μηδενός. Η συμπεριφορά αυτή είναι η αναμενόμενη, μιας και η κάθε γεννήτρια υπολειπόμενου σήματος έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι ευαίσθητη σε όλα τα σφάλματα αισθητήρων εκτός από το σφάλμα του αισθητήρα όπου αναφέρεται. Εξετάζοντας λοιπόν τα υπολειπόμενα διαπιστώνεται πως κατά την χρονική διάρκεια 10s έως 20s, ο αισθητήρας 1 παρουσιάζει σφάλμα μέτρησης.

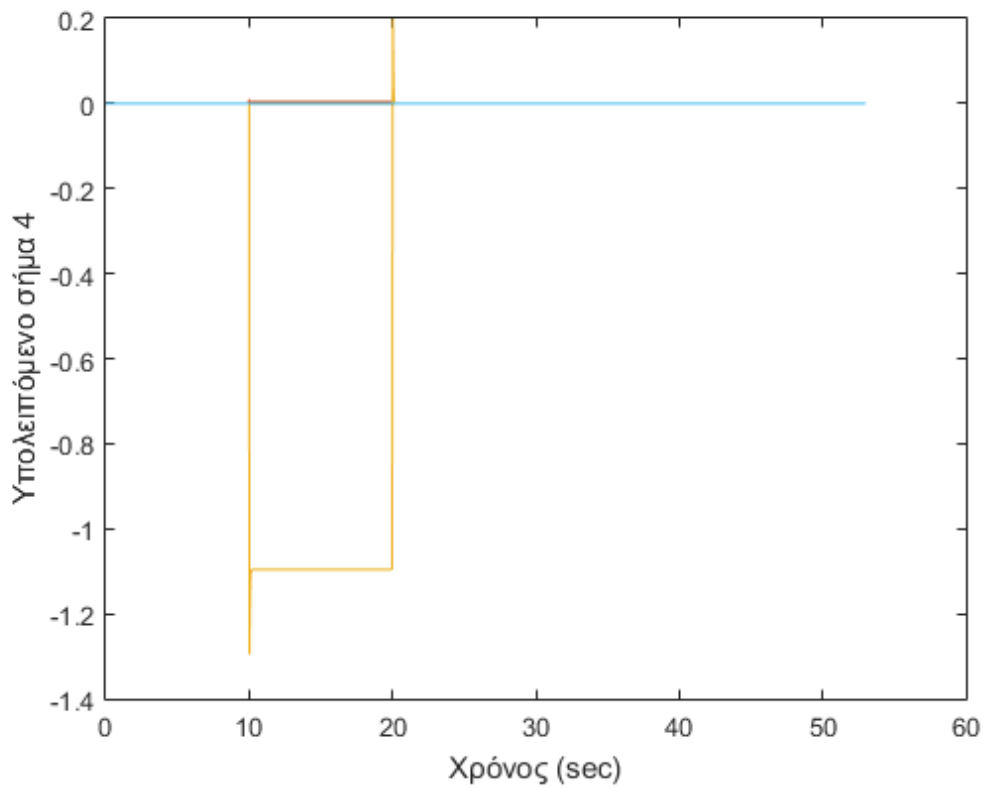
4.5.2 Σφάλμα στον αισθητήρα 2



Σχήμα 4-2 Υπολειπόμενο σήμα του αισθητήρα 2



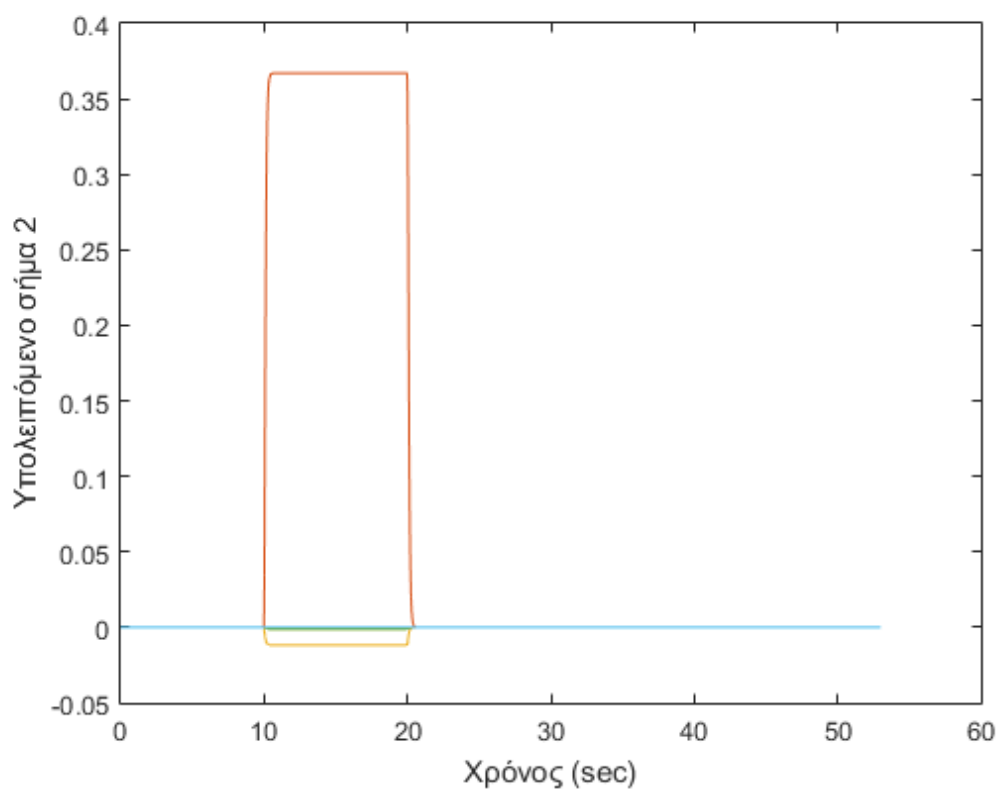
Σχήμα 4-3 Υπολειπόμενο σήμα του αισθητήρα 3



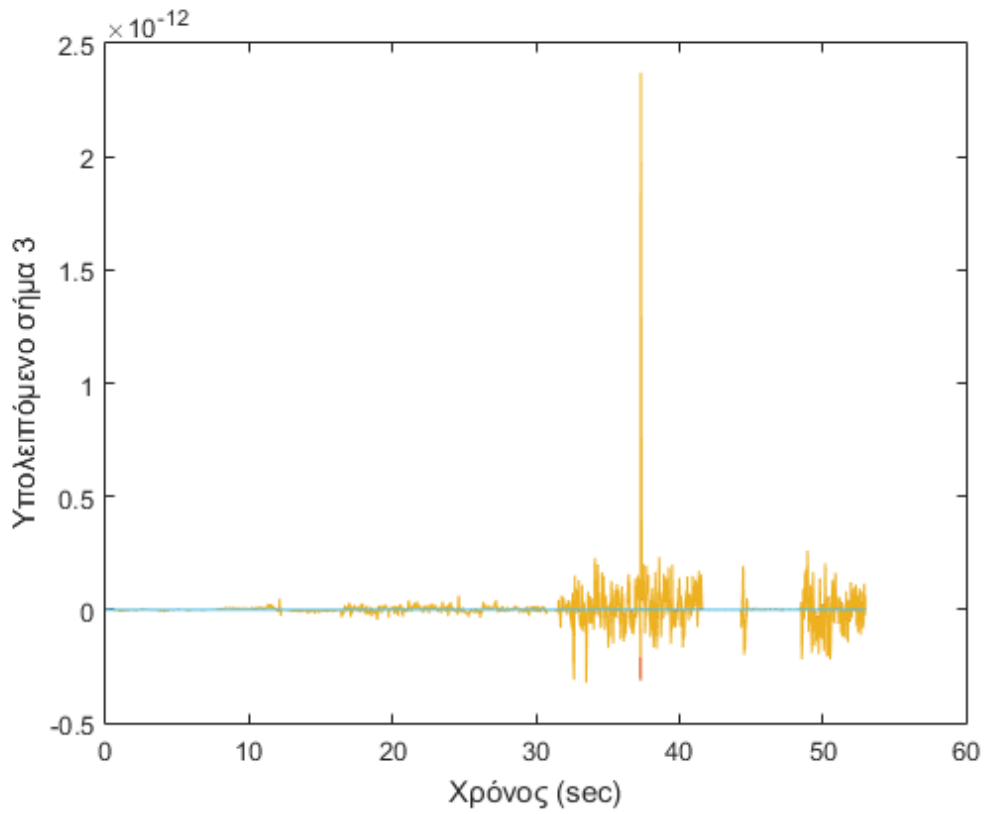
Σχήμα 4-4 Υπολειπόμενο σήμα του αισθητήρα 4

Εισάγοντας το σφάλμα στην μέτρηση του αισθητήρα 2, παρατηρείται πως τα υπολειπόμενα σήματα των υπόλοιπων αισθητήρων κατά την διάρκεια του σφάλματος αποκτούν τιμή διάφορη του μηδενός, εκτός από αυτό του αισθητήρα 2 όπου υπάρχει μόνο θόρυβος πολύ μικρού πλάτους. Η συμπεριφορά αυτή είναι η αναμενόμενη, μιας και η γεννήτρια υπολειπόμενου σήματος του δεύτερου αισθητήρα έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι ευαίσθητη σε όλα τα σφάλματα αισθητήρων εκτός από το σφάλμα του αισθητήρα όπου αναφέρεται. Εξετάζοντας λοιπόν τα υπολειπόμενα σήματα διαπιστώνεται πως κατά την χρονική διάρκεια 10s έως 20s, ο αισθητήρας 2 παρουσιάζει σφάλμα μέτρησης.

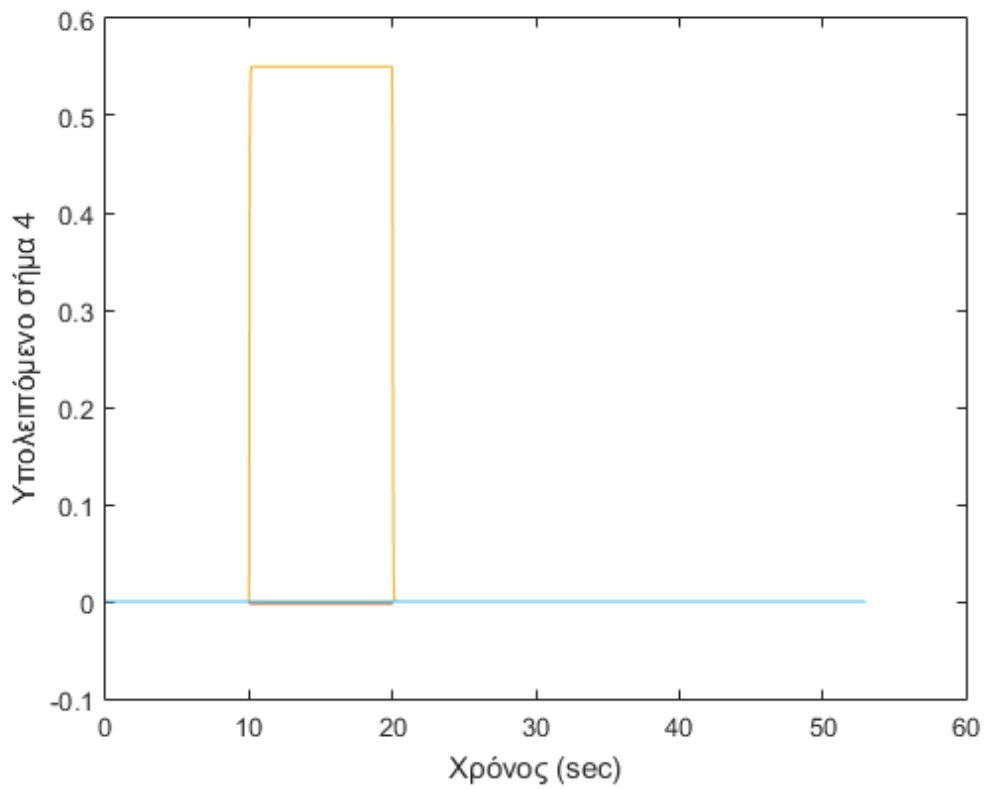
4.5.3 Σφάλμα στον αισθητήρα 3



Σχήμα 4-5 Υπολειπόμενο σήμα του αισθητήρα 2



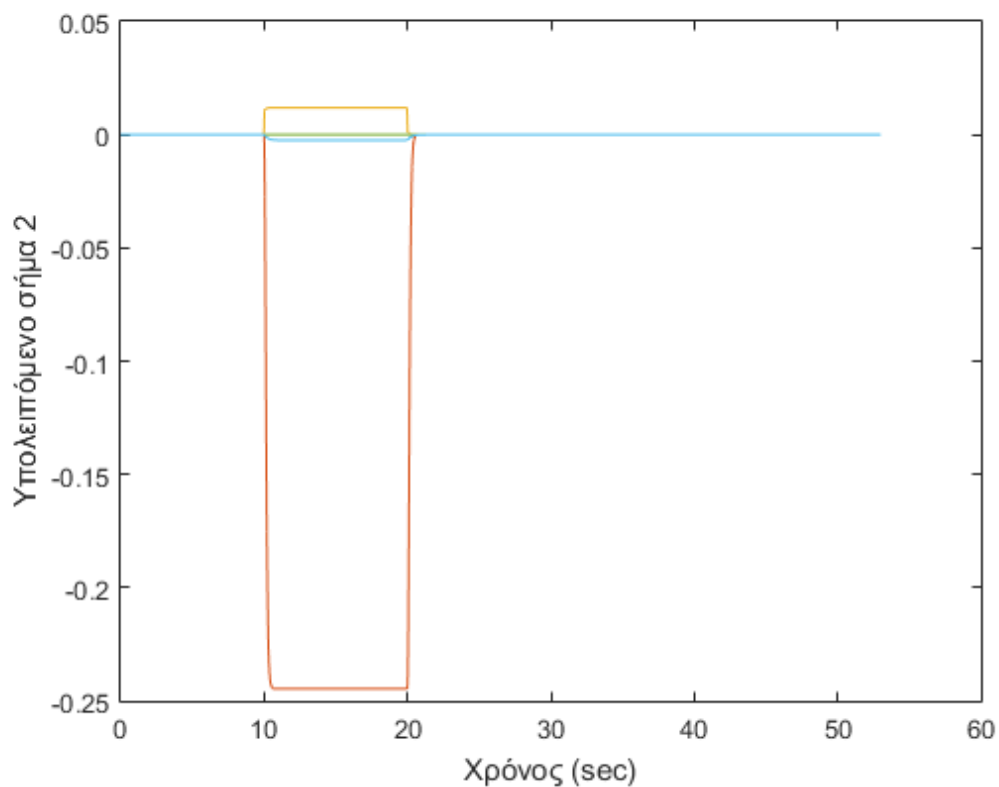
Σχήμα 4-6 Υπολειπόμενο σήμα του αισθητήρα 3



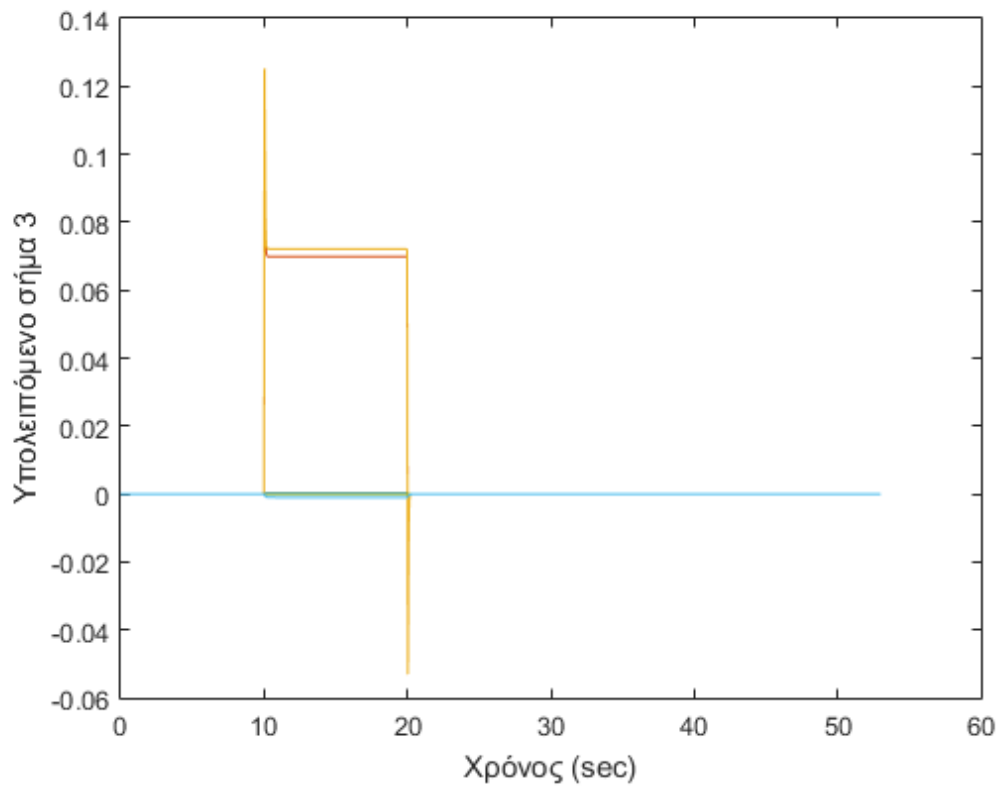
Σχήμα 4-19. Υπολειπόμενο σήμα του αισθητήρα 4

Εισάγοντας το σφάλμα στην μέτρηση του αισθητήρα 3, παρατηρείται πως τα υπολειπόμενα σήματα των υπόλοιπων αισθητήρων κατά την διάρκεια του σφάλματος αποκτούν τιμή διάφορη του μηδενός, εκτός από αυτό του αισθητήρα 3 όπου υπάρχει μόνο θόρυβος πολύ μικρού πλάτους. Η συμπεριφορά αυτή είναι η αναμενόμενη, μιας και η γεννήτρια υπολειπόμενου σήματος του τρίτου αισθητήρα έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι ευαίσθητη σε όλα τα σφάλματα αισθητήρων εκτός από το σφάλμα του αισθητήρα όπου αναφέρεται. Εξετάζοντας λοιπόν τα υπολειπόμενα σήματα διαπιστώνεται πως κατά την χρονική διάρκεια 10s έως 20s, ο αισθητήρας 3 παρουσιάζει σφάλμα μέτρησης.

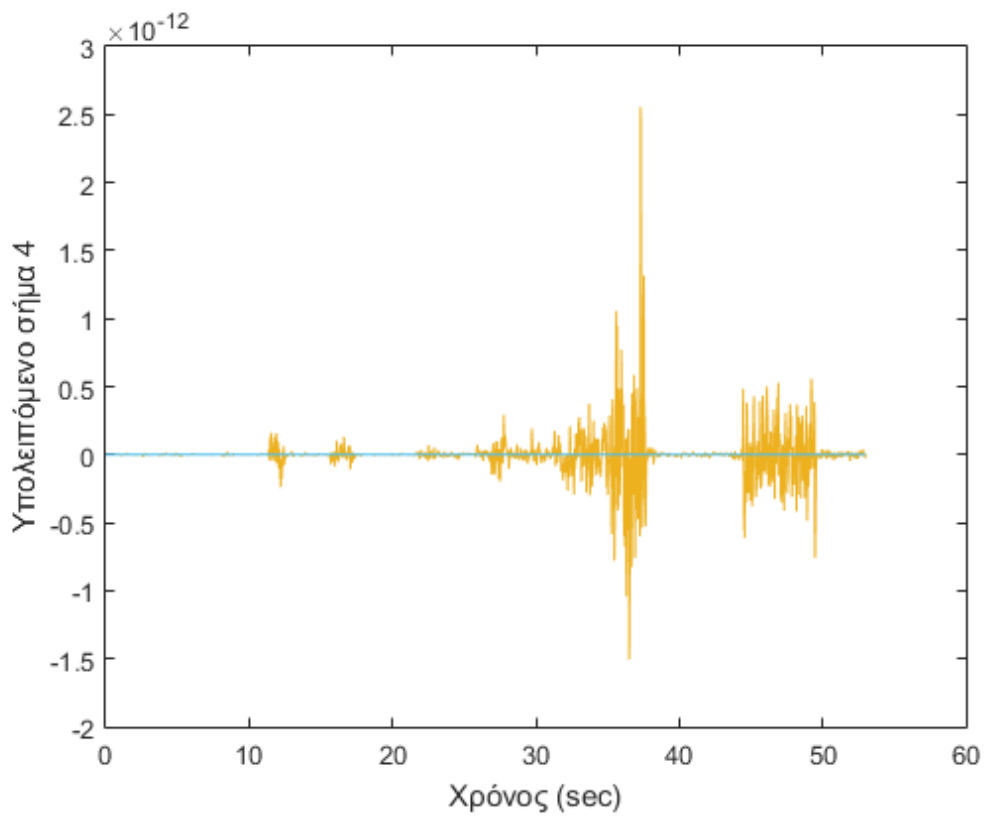
4.5.4 Σφάλμα στον αισθητήρα 4



Σχήμα 4-20. Υπολειπόμενο σήμα του αισθητήρα 2



Σχήμα 4-7 Υπολειπόμενο σήμα του αισθητήρα 3



Σχήμα 4-22. Υπολειπόμενο σήμα του αισθητήρα 4

Εισάγοντας το σφάλμα στην μέτρηση του αισθητήρα 4, παρατηρείται πως τα υπολειπόμενα σήματα των υπόλοιπων αισθητήρων κατά την διάρκεια του σφάλματος αποκτούν τιμή διάφορη του μηδενός, εκτός από αυτό του αισθητήρα 4 όπου υπάρχει μόνο θόρυβος πολύ μικρού πλάτους. Η συμπεριφορά αυτή είναι η αναμενόμενη, μιας και η γεννήτρια υπολειπόμενου σήματος του τέταρτου αισθητήρα έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι ευαίσθητη σε όλα τα σφάλματα αισθητήρων εκτός από το σφάλμα του αισθητήρα όπου αναφέρεται. Εξετάζοντας λοιπόν τα υπολειπόμενα σήματα διαπιστώνεται πως κατά την χρονική διάρκεια 10s έως 20s, ο αισθητήρας 4 παρουσιάζει σφάλμα μέτρησης.

Συμπεραίνεται λοιπόν πως η διάταξη ανίχνευσης και απομόνωσης σφαλμάτων των αισθητήρων του μοντέλου της κτιριακής εγκατάστασης ανιχνεύει και απομονώνει τα πιθανά σφάλματα με επιτυχία. Έχοντας την πληροφορία για το ποιος αισθητήρας παρέχει εσφαλμένη μέτρηση στο σύστημα, δίνεται η δυνατότητα να αντικατασταθεί η μέτρησή του με μία υγιή μέτρηση είτε του αισθητήρα που βρίσκεται σε ένα όροφο πιο ψηλά είτε σε έναν όροφο πιο χαμηλά, μιας και όπως έχει αναφερθεί τόσο η ταχύτητα όσο και η μετατόπιση του κάθε ορόφου παρουσιάζει μικρή απόκλιση μεταξύ ορόφων.

5

Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, αφού αρχικά παρουσιάστηκαν οι υπάρχουσες τεχνολογίες αντισεισμικής προστασίας, προτάθηκε ένα σύστημα αντισεισμικής προστασίας όπου παθητικός και ενεργητικός έλεγχος συνδυάζονται. Συγκεκριμένα, ο παθητικός έλεγχος του μοντέλου του κτιρίου γίνεται μέσω σεισμικής μόνωσης της βάσης του και ο ενεργητικός έλεγχος γίνεται μέσω του ηλεκτροϋδραυλικού συστήματος επενέργειας. Αναλύθηκε τόσο η λειτουργία της ηλεκτροϋδραυλικής βαλβίδας ελέγχου όσο και του υδραυλικού επενεργητή και παρουσιάστηκε το μη γραμμικό μαθηματικό τους μοντέλο. Έπειτα, για την δημιουργία κατάλληλης δύναμης επενέργειας, αναλύθηκε και σχεδιάστηκε ο ελεγκτής H_∞ . Επιπλέον, για την δημιουργία κατάλληλων τάσεων ελέγχου της σερβοβαλβίδας, έγινε χρήση ελέγχου PID, ώστε να διασφαλιστεί η εφαρμογή της απαιτούμενης δύναμης στο μοντέλο της κτιριακής εγκατάστασης. Με την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων, κατά τις οποίες επιβλήθηκαν στο μοντέλο της κτιριακής εγκατάστασης δύο διαφορετικές σεισμικές διαταραχές, διαπιστώθηκε σημαντική βελτίωση στην απόκρισή της εξαιτίας της εφαρμογής του ενεργητικού ελέγχου. Συγκεκριμένα, τόσο το πλάτος της ταχύτητας όσο και της μετατόπισης των ορόφων, όπως και η συχνότητα της ταλάντωσής τους, μειώθηκε σημαντικά. Ένα βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος σεισμικής προστασίας, εκμεταλλευόμενοι παράλληλα την σεισμική μόνωση της βάσης του, είναι πως επιδιώκει να διατηρήσει το κτίριο σταθερό ως προς την απόλυτη μετατόπιση των ορόφων, αντί να το κάνει σε σχέση με την κίνησή τους ως

προς το έδαφος, όπου θα απαιτούσε εφαρμογή υψηλών δυνάμεων ελέγχου σε κάθε όροφο. Κάνοντας χρήση του συστήματος ελέγχου που προτάθηκε διαπιστώνεται πως η εφαρμογή δύναμης ελέγχου μόνο στην βάση του κτιρίου επαρκεί. Έπειτα, προτάθηκε μία διάταξη ανίχνευσης σφαλμάτων στα αισθητήρια όργανα που είναι προσαρτημένα σε κάθε όροφο του κτιρίου, ώστε να διασφαλιστεί η ορθή μέτρηση των επιταχύνσεων των ορόφων χωρίς να απαιτούνται πλεονάζοντες αισθητήρες. Όπως επιβεβαιώθηκε μέσω των απαραίτητων προσομοιώσεων, όπου εισήχθη σφάλμα μέτρησης σε κάθε έναν αισθητήρα, οι παρατηρητές που σχεδιάστηκαν ανιχνεύουν και απομονώνουν το κάθε πιθανό σφάλμα.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας επιβεβαιώνουν πως το συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου είναι αποδοτικό ως προς την αντισεισμική προστασία κτηριακής εγκατάστασης αλλά θα μπορούσε κάλλιστα να παρέχει λύσεις και σε άλλες εφαρμογές, όπως αντίστοιχα και το προτεινόμενο σύστημα ανίχνευσης σφαλμάτων.

5.2 Μελλοντική Εργασία

Το σύστημα ελέγχου και ανίχνευσης σφαλμάτων που προτάθηκε για την αντισεισμική προστασία του μοντέλου κτιριακής εγκατάστασης, ενώ παρουσιάζει την επιθυμητή λειτουργία, θα μπορούσε να βελτιωθεί. Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει σε:

- Εισαγωγή αβεβαιότητας στις παραμέτρους του μοντέλου της κτιριακής εγκατάστασης και βελτιστοποίηση του ελεγκτή H_{∞} καταλλήλως.
- Μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του μοντέλου της κτιριακής εγκατάστασης στις τρεις διαστάσεις του χώρου.
- Δημιουργία συστήματος ανίχνευσης σφαλμάτων με την δυνατότητα ανίχνευσης και απομόνωσης πολλαπλών σφαλμάτων τα οποία συμβαίνουν την ίδια χρονική στιγμή.
- Ανάπτυξη συστήματος ανίχνευσης σφαλμάτων στο σύστημα επενέργειας του μοντέλου της κτιριακής εγκατάστασης.

Βιβλιογραφία

- [1] Astrom K.J. and Hagglund T., "Advanced PID Control", 2006
- [2] Astrom K.J. and Murray R. M., "Feedback Systems", 2012
- [3] Bishop R.H., " Mechatronic System Control, Logic and Data Acquisition", 2007
- [4] Castaldo P. "Integrated Seismic Design of Structure and Control Systems", 2014
- [5] Chen J. and Patton R., "Robust Model-Based Fault Detection Diagnosis For Dynamic Systems", 1999
- [6] Chen J., Patton R.J. and Zhang H.Y., "Design of Unknown Input Observers and Robust Fault Detection Filters", 1996
- [7] Cheng F.Y., Jiang H. "Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control", 2008
- [8] Choudhury M. and Saha P., "Effects of earthquake on the surrounding environment: An overview", 2016
- [9] Dey N., Mondal U. and Mondal D., " Design of H-infinity Robust Controller for a DC Servo Motor System", 2016
- [10] Doyle J.C., Glover K., Khargonnekar P.P. and Francis B.A., "State-Space Solutions to Sandard H_2 and H_∞ Control Problems", 1989
- [11] Efiloglu M., "Understanding the concept of base isolation" University of Manchester, 2013
- [12] Frank P.M. and Ding X., "Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems", 1997
- [13] Grimble M.J., "Robust Industrial Control Systems: Optima; Design Approach for Polynomial Systems", 2006
- [14] Housner G.W., "Structural Control: Past Present and Future", 1997
- [15] Horwich G., "Economic Lessons of the Kobe Earthquake", 2000

- [16] Kelly J.M., Leitmann G. and Soldatos A.G., "Robust Control of Base-Isolated Structures under Earthquake Excitation", 1987
- [17] Merrit H.E., "Hydraulic Control Systems", 1967
- [18] Ogata K., "Modern Control Engineering: Third Edition", 1997
- [19] Sakamoto M. and Koshika N., "Development and applications of structural control systems: Active-passive composite tuned mass damper", 2000
- [20] Skogestad S. and Postlethwaite I., "Multivariable Feedback Control: Analysis and design", 2001
- [21] Soldatos A.G., Arvanitidis K.G. and Zacharnakis E.C., "Active control schemes for aseismic base-isolated structures", 2002
- [22] Soong T.T. and Spencer B.F., "Active, Semi-Active and Hybrid Control of Structures", 2000
- [23] Stoorvogel A.A., "The H_∞ control problem: a state space approach", 2000
- [24] Symans M.D. and Constantinou M.C., "Semi-Active control systems for seismic protection of structures: a state of the art review", 1999
- [25] Warn G.P. and Ryan K.L." A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs", 2012
- [26] Yang J.N. and Agrawal A.K., "Semi-active hybrid control systems for nonlinear buildings against near-field earthquakes", 2002
- [27] Yang F., Gani M. and Henrion D., "Fixed-Order Robust H_∞ Controller Design with Regional Pole Assignment", 2007
- [28] Yu W. and Thenozhi S., "Active Structural Control with Stable Fuzzy PID Techniques", 2016
- [29] Zhao J., "Development of EFT for Nonlinear SDOF Systems", 2003
- [30] Zhao J., Shield C., French C. and Posbergh T., "Nonlinear System Modeling and Velocity Feedback Compensation for Effective Force Testing", 2005
- [31] Zhou K., Doyle J.C. and Glover K., "Robust and Optimal Control", 1996
- [32] Κωστόπουλος Θ.Ν., "Υδραυλικά και Πνευματικά Συστήματα", 2009
- [33] Νταβλιάκος Ι.Ν., "Έλεγχος Μηχανισμού Stewart με Υδραυλικές Οδηγήσεις Βασισμένος στη Δυναμική", 2007
- [34] Πουλιέζος Α., "Σύγχρονη Θεωρία Ελέγχου", 2015
- [35] Σκαρπέτης Μ. και Κουμπούλης Φ., "Αυτόματος Έλεγχος Υδραυλικών και Πνευματικών Συστημάτων", 2016

[36]

http://www.cityofelcentro.org/userfiles/file/Planning/General%20Plan/General%20Plan%20Upload/EI%20Centro%20GP_Safety.pdf

[37] <https://www.mobil.com/English-CA/Industrial/pds/GLXXMobil-DTE-20-Series>

[38] https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/dev_002093.pdf

[39] http://mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_006302.pdf

[40] https://en.wikipedia.org/wiki/1940_El_Centro_earthquake

[41] https://en.wikipedia.org/wiki/Great_Hanshin_earthquake

Παράρτημα Α

Τεχνικά χαρακτηριστικά σερβοβαλβίδας MTS της σειράς 256:

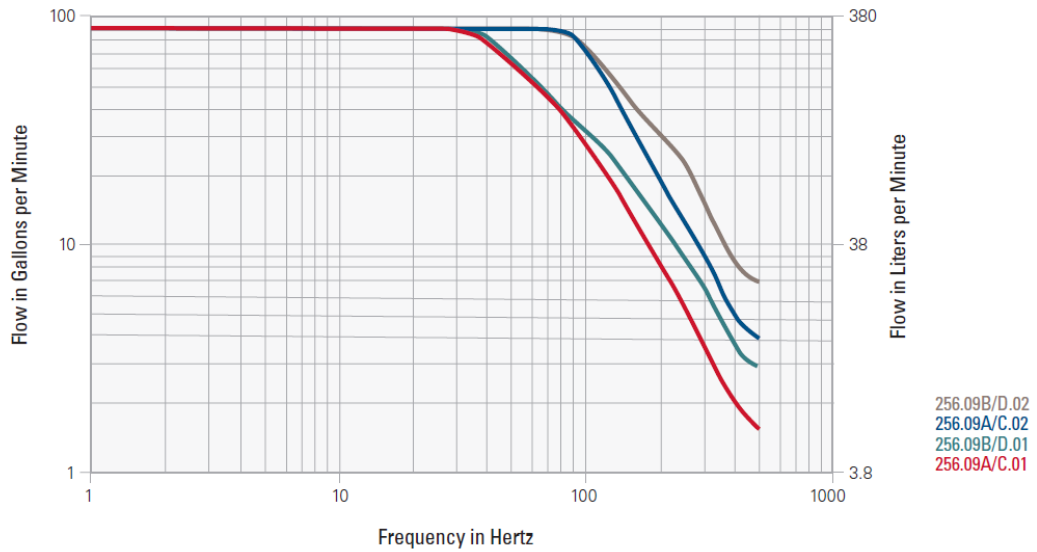
Η σειρά 256 ηλεκτροϋδραυλικών σερβοβαλβίδων της MTS χρησιμοποιεί σερβοβαλβίδες της σειράς 252 για την οδήγηση του κυρίως εμβόλου στο τρίτο στάδιο της βαλβίδας. Ακολουθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά της σειράς 256:

Πίνακας Α-1. Στατική απόδοση σερβοβαλβίδας

Model*	Rated Flow		Nominal Null Flow Gain		Null Pressure Gain (% supply/ % stroke)	Null Flow-Pressure Coefficient		Null Flow	
	L/min	gpm	L/min/% stroke	gpm/% stroke		cm ³ /kgf/sec	in. ³ /sec/psi	L/min	gpm
256.04	151	40	4.2	1.1	100	0.28	1.2 x 10 ⁻³	7.0	2.0
256.09	340	90	6.0	1.6	150	0.56	2.4 x 10 ⁻³	13.0	3.5
256.18	680	180	10.6	2.8	200	0.73	3.1 x 10 ⁻³	21.0	5.5
256.25	950	250	16.0	4.2	160	1.38	5.9 x 10 ⁻³	23.0	6.0
256.40	1500	400	29.0	7.7	250	1.61	6.9 x 10 ⁻³	28.0	7.5

Πίνακας Α-2. Δυναμική απόδοση σερβοβαλβίδας

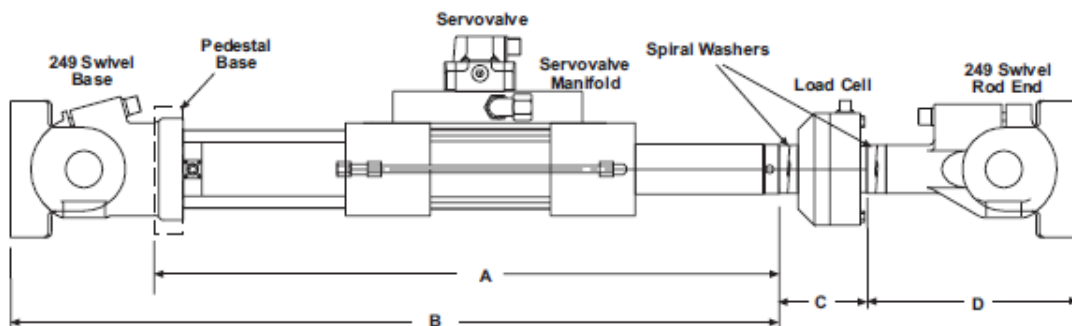
Model*	Rated Flow ¹		Pilot Flow		Full Flow Frequency ^{2,3} (Hz)	90° Phase Signal ^{3,4} (Hz)	Spool Stroke Rise Time (tr) ³ (milliseconds)	
	L/min	gpm	L/min	gpm			90% open	10% open
256.04X-01	151	40	3.8	1	100	130	3	2.5
256.09X-01	340	90	3.8	1	30	90(A) 165(B)	9	3.5
256.09X-02	340	90	9.5	2.5	60	85(A) 165(B)	4.6	2.5
256.09X-05	340	90	19	5	100	265(B)	3.5	3.5
256.18X-01	680	180	3.8	1	20	120	7.6	3
256.18X-02	680	180	9.5	2.5	47	130	5	2.5
256.18X-03	680	180	19	5	65	110	4.5	2
256.25X-01	950	250	3.8	1	10	90	15	10
256.25X-02	950	250	9.5	2.5	18	125	<10	<10
256.25X-05	950	250	19	5	25	125	8	4
256.40X-01	1500	400	3.8	1	4 ⁵	40 ⁵	65 ⁵	20 ⁵
256.40X-02	1500	400	9.5	2.5	9 ⁵	75 ⁵	26 ⁵	8 ⁵
256.40X-05	1500	400	19	5	12 ⁵	110	13	4
256.40X-10	1500	400	38	10	15 ⁵	110	10	3.5



Σχήμα A-1. Καμπύλες απόδοσης συχνότητας ροής

Τεχνικά χαρακτηριστικά υδραυλικού επενεργητή MTS της σειράς 244:

Οι επενεργητές της σειράς 244 είναι κατάλληλοι για εφαρμογές οι οποίες απαιτούν υψηλές συχνότητες λειτουργίας όντας εξοπλισμένοι με σφράγιση πίεσως πολυτετραφθοροαιθυλενίου (polytetrafluoroethylene - PTFE), προσφέροντας επίσης χαμηλές τριβές. Επιπλέον, τα εφέδρανα που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένα από πολυμερή όπου επιτρέπουν αντοχή σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας. Ακόμη, εσωτερικά του επενεργητή βρίσκεται αισθητήρας LVDT όπου παρέχει ανάδραση θέσης στον ελεγκτή.



Σχήμα A-2. Επενεργητής MTS σειράς 244

Πίνακας Α-2. Τεχνικές προδιαγραφές επενεργητών της σειράς 244

Model	Force Rating		Stroke		Rod Threads	
	KN	lbs	mm	inches	Metric	English
244.11	15	3,300	150 250	6 10	M12x1.25	1/2"-20
244.12	25	5,500	150 250	6 10	M12x1.25	1/2"-20
244.21	50	11,000	150 250	6 10	M27x2	1"-14
244.22	100	22,000	150 250	6 10	M27x2	1"-14
244.23	150	35,000	150 250	6 10	M27x2	1"-14
244.31	250	55,000	150 250	6 10	M36x2	1 1/2"-12
244.41	500	110,000	150 250	6 10	M52x2	2"-12
244.51	1000	220,000	150 250	6 10	M76x2	3"-12

Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιηθήκαν για τα μοντέλα της σερβοβαλβίδας και του επενεργητή διακρίνονται στον πίνακα Α-4:

Πίνακας Α-4. Παράμετροι ηλεκτροϋδραυλικού συστήματος επενέργειας

A	$8.212e-3 \text{ m}^2$
A_v	$1.964e-4 \text{ m}^2$
C_l	$1.3e-8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ksi}$
k	$698.8 \text{ kN}/\text{m}$
K_3	$3,579.13 \text{ V}/\text{m}$
K_{vp}	$1.06e-5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{V}$
K_a	$7.56e-10 \text{ m}^3/\text{kPa}$
P_s	$1.9e4 \text{ kPa}$
x_{vmax}	$2.79e-3 \text{ m}$
c	$4.33 \text{ kN}/\text{m}/\text{s}$
τ	0.0014 s
K_v	$1.64e-2 \text{ m}^3/\text{s}$

Παράρτημα Β

Χώρος Hilbert

Ως χώρος Hilbert ορίζεται το πλήρες εσωτερικό γινόμενο χώρου με την επαγόμενη νόρμα από το εσωτερικό γινόμενο. Ο χώρος Hilbert είναι επίσης και χώρος Banach. Έστω $C^{n \times m}$ με το εσωτερικό του γινόμενο, μπορούμε να επαληθεύσουμε ότι είναι επίσης χώρος Hilbert πεπεραμένων διαστάσεων:

$$\langle A, B \rangle := \text{Trace} A * B = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} b_{ij} \quad \text{για κάθε } A, B \in C^{n \times m} \quad (\text{B-1})$$

Χώρος Hardy

Έστω μία συνάρτηση $f(s)$ ορισμένη και συνεχής σε ένα σύνολο κλειστών ορίων S και αναλυτική εσωτερικά του συνόλου αυτού. Το μέγιστο του $|f(s)|$ στο S επιτυγχάνεται στο όριο του S :

$$\max_{s \in S} |f(s)| = \max_{s \in \partial S} |f(s)| \quad (\text{B-2})$$

Όπου $s \in \partial S$ το όριο του S .

Κάποιοι συχνά χρησιμοποιούμενοι χώροι συναρτήσεων:

Χώρος L_2

Ο χώρος L_2 είναι ένας χώρος Hilbert συναρτήσεων στο jR και περιλαμβάνει όλες τις σύνθετες συναρτήσεις F όπως:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \text{Trace}[F^*(j\omega)F(j\omega)]d\omega < \infty \quad (\text{B-3})$$

Το εσωτερικό γινόμενο για αυτόν τον χώρο Hilbert ορίζεται ως:

$$\langle F, G \rangle := \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Trace}[F^*(j\omega)F(j\omega)]d\omega \quad (\text{B-4})$$

Όπου $F, G \in L_2$ και η επαγόμενη νόρμα δίνεται ως:

$$\|F\|_2 := \sqrt{\langle F, F \rangle} \quad (\text{B-5})$$

Χώρος H_2

Ο χώρος H_2 είναι υποχώρος του L_2 με συναρτήσεις πινάκων $F(s)$ αναλυτικές στο $\text{Re}(s) > 0$. Η προκύπτουσα νόρμα ορίζεται ως:

$$\|F\|_2^2 := \sup \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Trace}[F^*(\sigma + j\omega)F(\sigma + j\omega)]d\omega \right\} \quad (\text{B-6})$$

Χώρος L_∞

Ο χώρος L_∞ είναι χώρος Banach από συναρτήσεις πινάκων όπου είναι φραγμένοι στον jR με νόρμα:

$$\|F\|_\infty := \text{ess sup}_{\omega \in R} \bar{\sigma}[F(j\omega)] \quad (\text{B-7})$$

Χώρος H_∞

Ο χώρος H_∞ είναι υποχώρος του L_∞ με συναρτήσεις οι οποίες είναι αναλυτικές στο ανοιχτό δεξί ημιεπίπεδο και είναι φραγμένη πάνω στον φανταστικό άξονα. Η νόρμα H_∞ ορίζεται ως:

$$\|F\|_\infty := \sup_{\text{Re}(s) > 0} \bar{\sigma}[F(s)] = \text{ess sup}_{\omega \in R} \bar{\sigma}[F(j\omega)] \quad (\text{B-8})$$

Ο πραγματικός ρητός υποχώρος του H_∞ συμβολίζεται με RH_∞ και περιέχει όλους τους ορισμένους και πραγματικούς ευσταθείς ρητούς πίνακες μεταφοράς.

Γραμμικός κλασματικός μετασχηματισμός:

Έστω $P_{(n_1 \times n_2) \times (m_1 \times m_2)}$ τέτοιο ώστε:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{B-9})$$

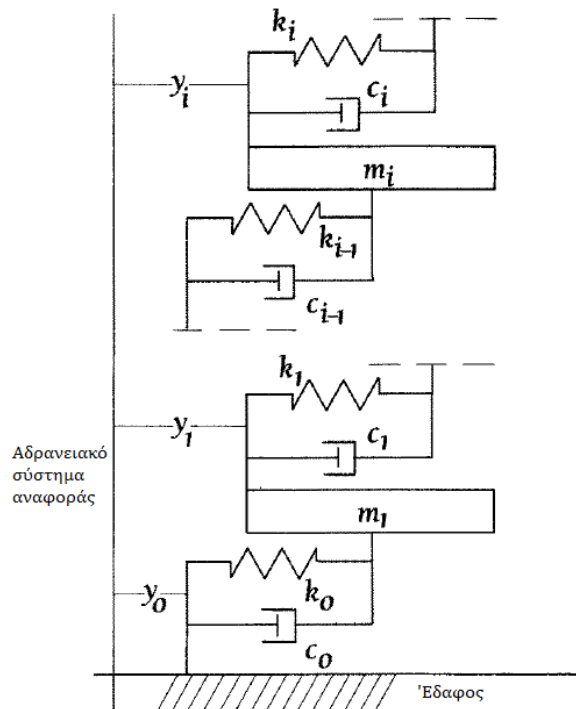
Επίσης έστω $\Delta_{m_1 \times n_1}$ και $K_{m_2 \times n_2}$. Τότε ως κατώτερος και ανώτερος γραμμικός κλασματικός μετασχηματισμός ορίζεται αντίστοιχα:

$$F_l(P, K) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \quad (\text{B-10})$$

$$F_u(P, K) = P_{22} + P_{21}\Delta(I - P_{11}K)^{-1}P_{12} \quad (\text{B-11})$$

Παράρτημα Γ

Το κτίριο στο οποίο αναφέρεται η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία περιλαμβάνει ένα μοντέλο κτιρίου με $N = 4$ ορόφους (3 ορόφους + οροφή) με σεισμικά μονωμένη βάση, κατασκευασμένο με στόχο την εκτέλεση μίας σειράς πειραματικών δοκιμών αντισεισμικής προστασίας [16]. Ως πρώτος όροφος θεωρείται η βάση του κτιρίου. Η αναπαράσταση που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της ανάλυσης που θα γίνει, περιλαμβάνει το γραμμικό μοντέλο του συστήματος. Ο κάθε όροφος i του μοντέλου του κτιρίου χαρακτηρίζεται από μία μάζα m_i . Ο όροφος i συνδέεται μέσω ελατηρίου σταθεράς k_{i-1} και αποσβεστήρα σταθεράς c_{i-1} με τον όροφο $i - 1$. Ως όροφος μηδέν θεωρείται το έδαφος στο οποίο βρίσκεται η εγκατάσταση και μέσω του οποίου θα εισέλθει η σεισμική διαταραχή, θεωρώντας πως η κίνηση λαμβάνει χώρα στην οριζόντια διεύθυνση μόνο.



Σχήμα Γ-1. Μοντέλο Κτιριακής Εγκατάστασης (χρήση απόλυτων συντεταγμένων)

Η περιγραφή της δυναμικής του μοντέλου του κτιρίου θα γίνει κάνοντας χρήση μεταβλητών κατάστασης οι οποίες θα αναφέρονται σε απόλυτες συντεταγμένες. Συγκεκριμένα ως y_i ορίζεται η απόλυτη μετατόπιση του i ορόφου και ως y_0 η απόλυτη μετατόπιση του εδάφους ως προς αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Το διάνυσμα κατάστασης ορίζεται ως:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_{2N})^T$$

όπου

$$x_i = \dot{y}_i$$

$$x_{i+N} = y_i$$

Έτσι, γνωρίζοντας τον τρόπο με τον οποίο εισέρχεται η διαταραχή στην δυναμική του μοντέλου του κτιρίου, κάνοντας χρήση του Δεύτερου Νόμου του Νεύτωνα προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 &= -c_0(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) - k_0(y_1 - y_0) + c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_1(y_2 - y_1) \\ m_2 \ddot{y}_2 &= -c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_1(y_2 - y_1) + c_2(\dot{y}_3 - \dot{y}_2) + k_2(y_3 - y_2) \\ &\dots \\ m_i \ddot{y}_i &= -c_{i-1}(\dot{y}_i - \dot{y}_{i-1}) - k_{i-1}(y_i - y_{i-1}) + c_1(\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i) + k_i(y_{i+1} - y_i) \\ &\dots \\ m_N \ddot{y}_N &= -c_{N-1}(\dot{y}_N - \dot{y}_{N-1}) - k_{N-1}(y_N - y_{N-1}) \end{aligned} \quad (\Gamma-1)$$

Η αναπαράσταση στον χώρο κατάστασης προκύπτει:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Ed(t) \quad (\Gamma-2)$$

Με του πίνακες αντίστοιχα μπορούν να γραφούν ως:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} (-c_0 - c_1)/m_1 & c_1/m_1 & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{i-1}/m_1 & (-c_{i-1} - c_i)/m_i & \dots & c_i/m_i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & c_{N-1}/m_N & \dots & -c_{N-1}/m_N \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} (-k_0 - k_1)/m_1 & k_1/m_1 & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{i-1}/m_1 & (-k_{i-1} - k_i)/m_i & \cdots & k_i/m_i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & k_{N-1}/m_N & \cdots & -k_{N-1}/m_N \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = I_{N \times N}$$

$$A_{22} = O_{N \times N}$$

$$E = \begin{bmatrix} k_0/m_1 & c_0/m_1 \\ O_{N-1 \times 2} \\ O_{N \times 2} \end{bmatrix}$$

και η διαταραχή:

$$d(t) = \begin{bmatrix} y_0(t) \\ \dot{y}_0(t) \end{bmatrix}$$

Με την ύπαρξη του επενεργητή στον πρώτο όροφο του μοντέλου του κτιρίου το σύστημα γίνεται:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \quad (\Gamma-3)$$

όπου

$$B = \begin{bmatrix} 1/m_1 \\ O_{N-1 \times 1} \\ O_{N \times 1} \end{bmatrix}$$

Ακόμη ως έξοδος του συστήματος θεωρείται το πλήρες διάνυσμα κατάστασης. Στην εγκατάσταση του μοντέλου του κτιρίου θα τοποθετηθούν τέσσερα επιταχυνσιόμετρα, ένα σε κάθε όροφο. Στη συνέχεια μέσω ολοκλήρωσης θα προκύψει η ταχύτητα και η θέση κάθε ορόφου. Έτσι η έξοδος του συστήματος ορίζεται ως:

$$y(t) = Cx(t) \quad (\Gamma-4)$$

όπου

$$C = I_{8 \times 8}$$

Οι παράμετροι του μοντέλου του κτιρίου που παρουσιάστηκε είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας Γ-1. Συντελεστές μοντέλου κτιρίου

Σταθερά ελατηρίου k_i (N/m)	Σταθερά απόσβεσης c_i (Ns/m)
$k_0 = 45000$	$c_0 = 86$
$k_1 = 1305300$	$c_1 = 2600$
$k_2 = 1305300$	$c_2 = 2600$
$k_3 = 1305300$	$c_3 = 2600$

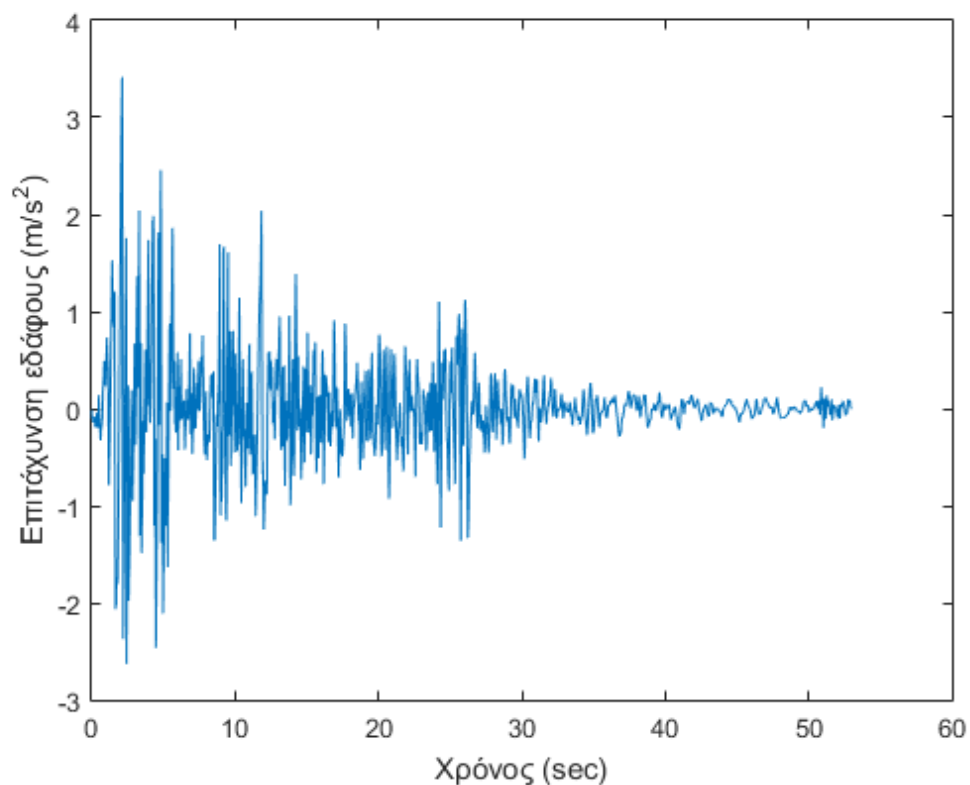
και μάζα κάθε ορόφου $m_i = 200 \text{ kg}$ $i = 1, \dots, 4$

Παράρτημα Δ

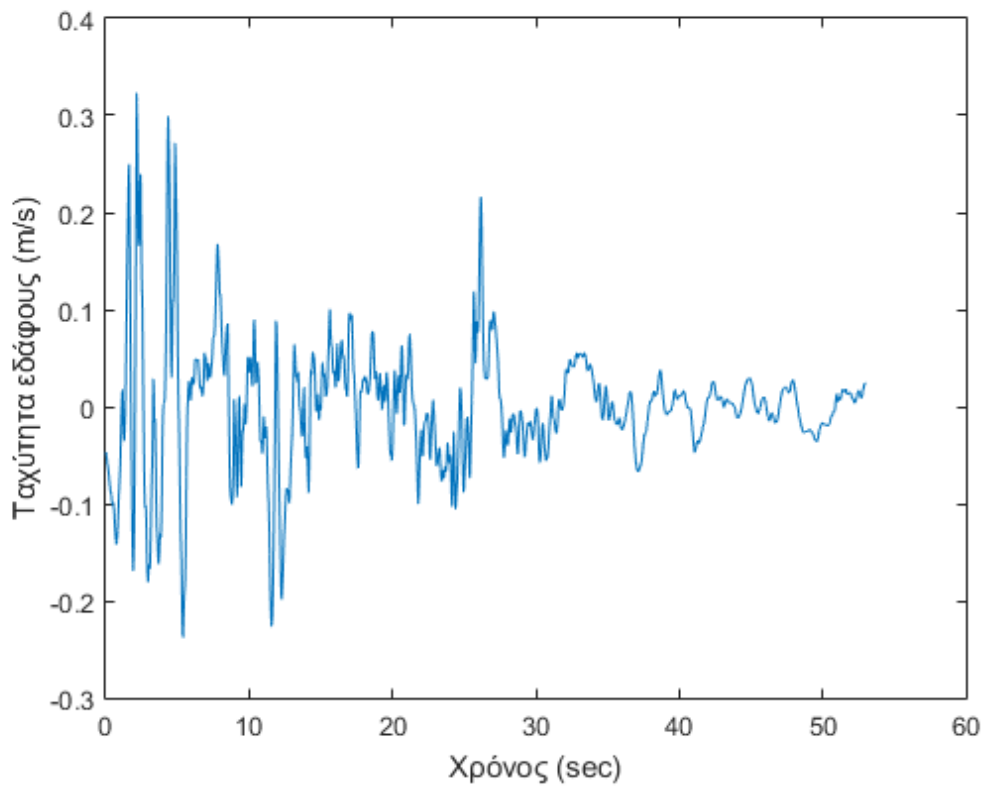
Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζονται τα προφίλ επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης του εδάφους από την κάθε μία σεισμική δόνηση που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των προσομοιώσεων.

1. El Centro, 1940, ΗΠΑ

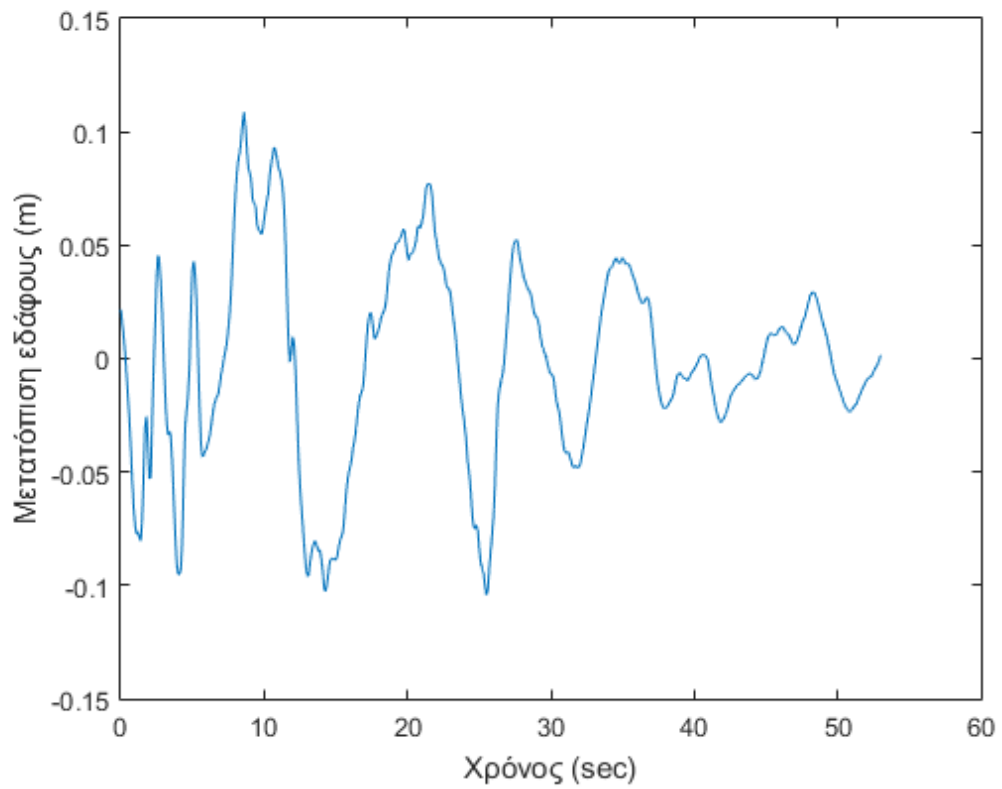
Ο συγκεκριμένος σεισμός ήταν ο μεγαλύτερος σεισμός που έχει σημειωθεί στην περιοχή Imperial Valley της Καλιφόρνια και ήταν μεγέθους 7.1 της κλίμακας Ρίχτερ. Αποτέλεσμα του σεισμού ήταν ο θάνατος 9 ανθρώπων. Ακόμη, προκάλεσε καταστροφές στο 80% των κτιρίων της πόλης και σε άλλες υποδομές [40][36].



Σχήμα Δ-1. Επιτάχυνση εδάφους



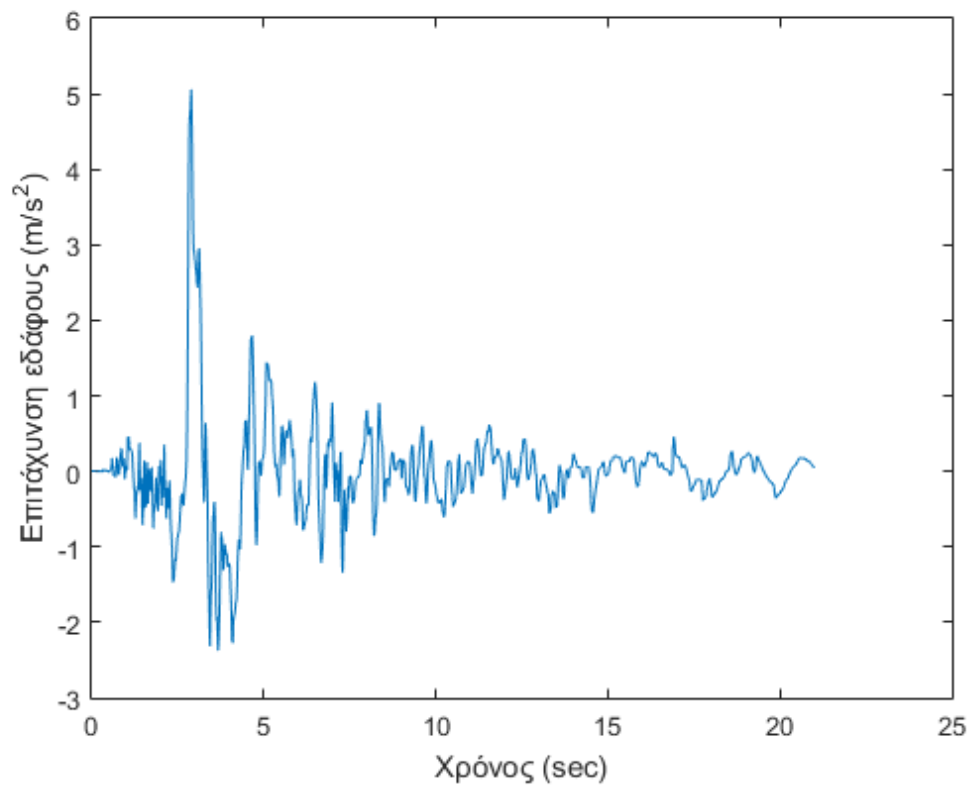
Σχήμα Δ-2. Ταχύτητα εδάφους



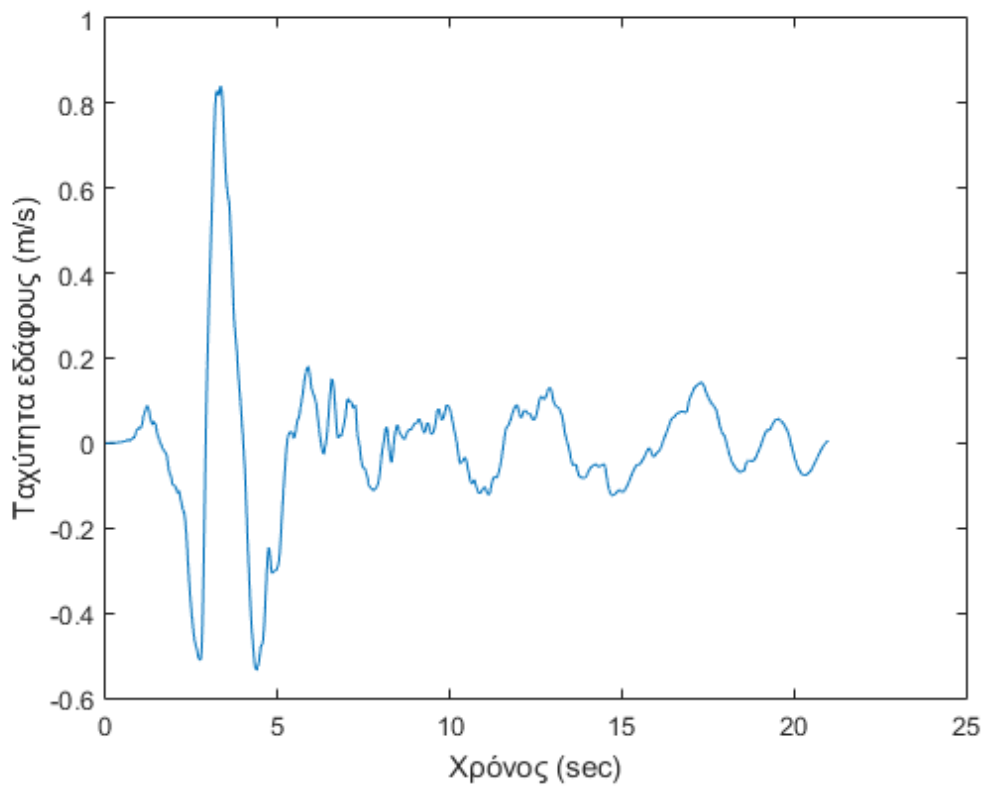
Σχήμα Δ-3. Μετατόπιση εδάφους

2. Kobe, 1995, Ιαπωνία

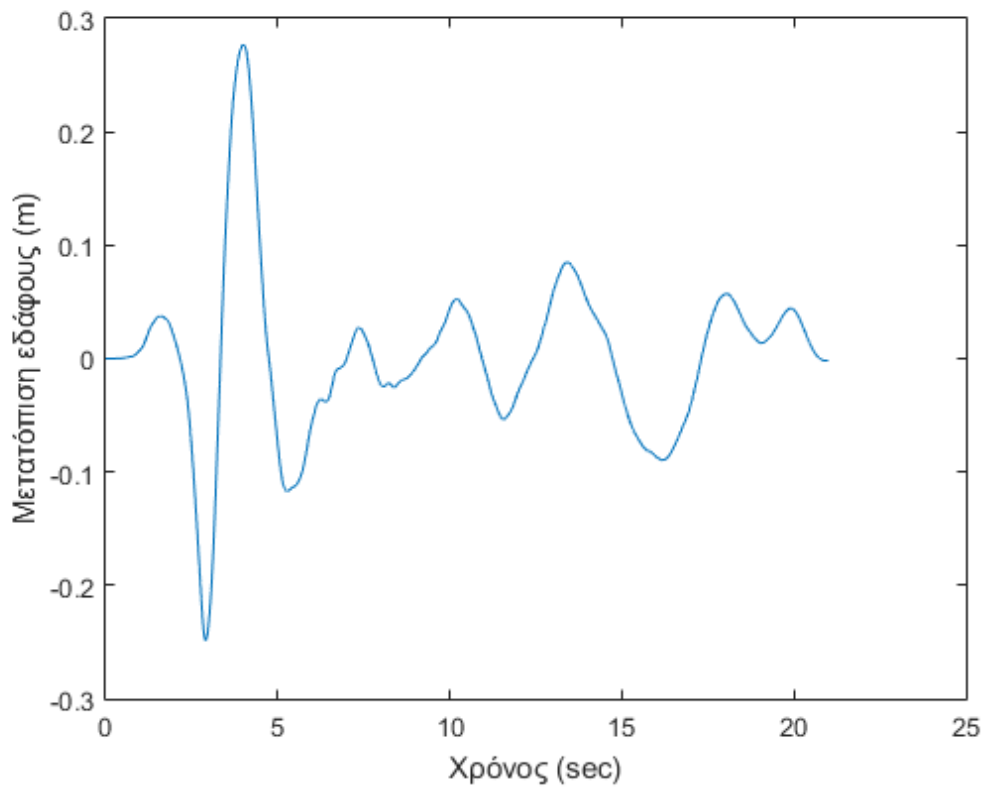
Γνωστός και ως Great Hanshin ο συγκεκριμένος σεισμός ήταν ο χειρότερος που σημειώθηκε τον 20ο αιώνα στην Ιαπωνία έπειτα από τον Great Kanto το 1923. Αποτέλεσμα του σεισμού ήταν 6.434 άνθρωποι να χάσουν τις ζωές του. Ακόμη, 100.000 κτίρια καταστράφηκαν πλήρως και 183.000 μερικώς, όπως και πολλές από τις υποδομές τις πόλης. Ο σεισμός χαρακτηρίστηκε ως κοντά σε ρήγμα και η έντασή του με 7.2 Ρίχτερ [41][15].



Δ-4. Επιτάχυνση εδάφους



Δ-5. Ταχύτητα Εδάφους



Δ-6. Μετατόπιση εδάφους

Παράρτημα E

Ο πίνακας παρατηρησιμότητας του (C,A) ορίζεται ως:

$$W_0 = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} \quad (\text{E-1})$$

Ο πίνακας παρατηρησιμότητας του (C_1,A) ορίζεται ως:

$$W_{01} = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{n-1} \\ CA^{n-1} \\ CA^n \end{pmatrix} \quad (\text{E-2})$$

Από το θεώρημα Cayley-Hamilton βλέπουμε πως το CA^n μπορεί να αναπαρασταθεί ως γραμμικός συνδυασμός των C, CA, \dots, CA^{n-1} . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα:

$$\text{rank}(W_0) = \text{rank}(W_{01}) = n_0 \quad (\text{E-3})$$

Επιλέγοντας n_0 γραμμικώς ανεξάρτητα διανύσματα σειρές $p_1^T, \dots, p_{n_0}^T$ από το πίνακα W_0 , αυτά τα διανύσματα θα είναι επίσης σειρές του W_{01} . Συνδυάζοντας αυτά τα διανύσματα με ακόμη $n - n_0$ τυχαία γραμμικώς ανεξάρτητα διανύσματα $p_{n_0+1}^T, \dots, p_n^T$ μπορεί να κατασκευαστεί η μη ιδιάζων πίνακας:

$$P = \begin{pmatrix} p_1^T \\ \dots \\ p_{n_0}^T \\ p_{n_0+1}^T \\ \dots \\ p_n^T \end{pmatrix} \quad (\text{E-4})$$

Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό P στο ζεύγη (C,A) και (C_1,A) , η κανονική παρατηρήσιμη διάσπαση όπου προκύπτει για το κάθε ένα έχει ως:

$$PAP^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad A \in R^{n_0 \times n_0} \quad (\text{E-5})$$

$$CP^{-1} = |C^* \quad 0| \quad C^* \in R^{m \times n_0} \quad (\text{E-6})$$

$$C_1P^{-1} = |C_1^* \quad 0| \quad C_1^* \in R^{2m \times n_0} \quad (\text{E-7})$$

Εάν το στοιχείο A_{22} είναι ευσταθές τότε το σύστημα ορίζεται ως ανιχνεύσιμο.

