

---

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ  
Συστήματα Αυτοματισμού

Εύρωστος Μη Γραμμικός Έλεγχος Με  
Προσαρμοστικό Παρατηρητή

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΣΩΤΗΡΙΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αργύρης Σολδάτος

Αθήνα 2018

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του  
Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Συστήματα Αυτοματισμού  
του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

---



# Περίληψη

Η αντισεισμική προστασία των κτηρίων αποτελεί μία περιοχή έρευνας αλλά και εφαρμογών που παρουσιάζει ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον. Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτάθηκε ένα σχήμα 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 με στόχο τον περιορισμό της κίνησής της. Ο νόμος ελέγχου απαιτεί την ανάδραση του διανύσματος κατάστασης της συστήματος καθώς και τις τιμές των παραμέτρων της κτηρίου (δηλ. μάζες, ελαστικότητες, κλπ.). Σε μια πραγματική εφαρμογή είναι δύσκολο να εκτιμηθεί το διάνυσμα κατάστασης μέσω αισθητήρων όπως και ο υπολογισμός των παραμέτρων της εγκατάστασης, για αυτό το λόγο στο σχήμα ελέγχου προστέθηκε ένα προσαρμοστικός παρατηρητής τέτοιας δομής που επιτρέπει την εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης καθώς και την αναγνώριση του συστήματος υπό έλεγχο. Διενεργώντας προσομοίωση με το κτήριο τοποθετημένο σε ελαστικά εφέδρανα και εφαρμόζοντας το σχήμα ελέγχου με το παρατηρητή επιβεβαιώθηκε η βελτίωση της απόκρισης, μετά από ικανοποιητική εκτίμηση της κατάστασης και ταυτόχρονη σύγκλιση των παραμέτρων, στις πραγματικές τους τιμές.



# Abstract

Seismic protection of buildings is 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 in order to reduce its movement. This way the building remains close to its undisturbed configuration during an earthquake. The designed controller makes use of the state vector and the structural parameters of the building. In a real application such information may not be available from sensor measurements or design design considerations. For this reason an adaptive observer is introduced with the control scheme. It is then possible to estimate the state vector and the same time to identify the system parameters. Extensive simulation studies illustrate the efficacy of the proposed scheme. Convergence of both the estimated state vector and the structural parameters to their true values is obtained within a satisfactory time interval for such applications.



# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Αργύρη Σολδάτο για την μύησή μου στο τομέα του Προσαμοστικού Ελέγχου, για τις επιχοδομητικές συζητήσεις στη Θεωρία Ελέγχου και για τις συμβουλές βελτίωσης της εργασίας μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και τα αδέρφια μου για την στήριξη τους στην συνέχιση των σπουδών μου σε ανώτερο επίπεδο. Τέλος θέλω να αφιερώσω αυτή την εργασία στη σύζυγο και στον γιο μου για την αμέριστη στήριξη και υπομονή που έδειξαν μέχρι την ολοκλήρωσή της.





*Στον Άγγελο και στη Μαριέττα*



'I have always liked people who can't adapt themselves to life pragmatically.'

*Αντρέι Ταρκόφσκι, Σμιλεύοντας το Χρόνο*



# Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Ευχαριστίες	v
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Αντισεισμική Προστασία Κτηρίων . . . . .	1
1.1.1 Παθητικός Έλεγχος . . . . .	2
1.1.2 Ενεργητικός Έλεγχος . . . . .	4
1.1.3 Υβριδικός Έλεγχος . . . . .	6
1.2 Σύστημα Ελέγχου . . . . .	7
1.3 Προσαρμοστικά Συστήματα . . . . .	8
1.3.1 Τεχνικές Προσαρμοστικού Ελέγχου . . . . .	9
1.3.2 Τεχνικές Προσαρμοστικού Παρατηρητή . . . . .	10
1.4 Σκοπός της Εργασίας . . . . .	12
<b>2 Μοντελοποίηση Συστήματος Κτηρίου</b>	<b>14</b>
2.1 Αναπαράσταση Κτηρίου $N$ - ορόφων σε Σύστημα Απόλυτων Συντεταγμένων . . .	15
2.2 Αναπαράσταση Κτηρίου $N$ - Ορόφων στο Χώρο Κατάστασης . . . . .	17

2.3	Προσομοίωση Κτηρίου Τριών Ορόφων υπό Σεισμική Διέγερση . . . . .	20
2.4	Απλοποιημένη Αναπαράσταση Κτηρίου . . . . .	25
2.5	Σύνοψη Κεφαλαίου . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Προσαρμοστικός Παρατηρητής Μη-ελαχίστης μορφής</b>	<b>27</b>
3.1	Ελαχιστη και Μη-ελάχιστη Υλοποίηση Συστήματος . . . . .	27
3.2	Προσαρμοστικός Παρατηρητής/Εκτιμητής . . . . .	33
3.2.1	Νόμοι Προσαρμογής . . . . .	35
3.2.2	Εκτιμητής Κατάστασης . . . . .	37
3.2.3	Παράδειγμα . . . . .	39
3.3	Σύνοψη Κεφαλαίου . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Αντισεισμικός Έλεγχος Κτηρίου Με Προσαρμοστικό Παρατηρητή</b>	<b>44</b>
4.1	Εισαγωγή . . . . .	44
4.2	Εύρωστος Μη Γραμμικός Έλεγχος . . . . .	45
4.3	Προσαρμοστικός Παρατηρητής . . . . .	46
4.4	Προσομοίωση . . . . .	48
4.5	Μελλοντική Εργασία . . . . .	54
	<b>Παράρτημα</b>	<b>55</b>
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>57</b>

# Κατάλογος Πινάκων

2.1	Παράμετροι Συστήματος Κτηρίου Τριών Ορόφων . . . . .	20
3.1	Παράμετροι Προσαρμοστικού Παρατηρητή Παραδείγματος . . . . .	40
4.1	Παράμετροι Απλοποιημένου Συστήματος Κτηρίου Προσομοίωσης . . . . .	49
4.2	Παράμετροι Προσαρμοστικού Παρατηρητή Προσομοίωσης . . . . .	49





# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Σκαρίφημα Παθητικού Αποσβεστήρα . . . . .	2
1.2	Διάταξη Κτηρίου Μονωμένης Βάσης . . . . .	3
1.3	Σχηματική Αναπαράσταση Δομής Ενεργητικού Αποσβεστήρα . . . . .	4
1.4	Διάταξη Κτηρίου με Ενεργητικούς Αποσβεστήρες . . . . .	5
1.5	Σκαρίφημα Κτηρίου με Σύστημα DUOX HMD . . . . .	7
1.6	Δομικό διάγραμμα MRAC Συστήματος . . . . .	10
1.7	Δομικό διάγραμμα MRAS Συστήματος . . . . .	11
2.1	Αναπαράσταση Κτηρίου σε Αδρανειακό Σύστημα Αναφοράς . . . . .	17
2.2	El Centro, Επιτάχυνση, Ταχύτητα, Μετατόπιση εδάφους . . . . .	21
2.3	Ταχύτητες Κτηρίου Τριών Ορόφων χωρίς Έλεγχο . . . . .	22
2.4	Μετατοπίσεις Κτηρίου Τριών Ορόφων χωρίς Έλεγχο . . . . .	23
3.1	Δομικό Διάγραμμα Συστήματος Ελάχιστης Υλοποίησης . . . . .	30
3.2	Δομικό Διάγραμμα Συστήματος Μη-Ελάχιστης Υλοποίησης . . . . .	32
3.3	Μοντέλο Μη-Ελάχιστης Υλοποίησης Προσαρμοζόμενων Παραμέτρων . . . . .	34
3.4	Παράδειγμα: Είσοδος Συστήματος . . . . .	40
3.5	Παράδειγμα: Αναγνώριση Παραμέτρων Συστήματος Ελάχιστης Υλοποίησης . . . . .	41

3.6	Παράδειγμα: Εκτίμηση Καταστάσεων Αρχικού Συστήματος . . . . .	42
4.1	Σκαρίφημα Ελέγχου Κτηρίου Προσομοίωσης . . . . .	45
4.2	Δομικό Διάγραμμα Συστήματος Προσαρμοστικού Ελέγχου μέσω Προσαρμοστικού Παρατηρητή . . . . .	47
4.3	Εκτίμηση Καταστάσεων Απλοποιημένου Συστήματος Κτηρίου . . . . .	50
4.4	Αναγνώριση Παραμέτρων Απλοποιημένου Συστήματος Κτηρίου . . . . .	51
4.5	Αναγνώριση Παραμέτρων Συστήματος Ελάχιστης Υλοποίησης . . . . .	52
4.6	Καταστάσεις Συστήματος Με και Χωρίς Έλεγχο . . . . .	53
4.7	Είσοδου Ελέγχου Εγκατάστασης . . . . .	54

# 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Αντισεισμική Προστασία Κτηρίων

Η αντισεισμική θωράχιση κατασκευών ευρισκόμενων σε σειсмоγενείς περιοχές επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο αντισεισμικό σχεδιασμό, είτε στο στάδιο της μελέτης αν πρόκειται για νέες κατασκευές είτε ως μελέτη σεισμικής ενίσχυσης υφιστάμενων κτηρίων. Ο βασικός στόχος κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό είναι να μελετηθεί η κατασκευή ώστε να μπορεί με ασφάλεια να φέρει τα επιβαλλόμενα σεισμικά φορτία σχεδιασμού και την ένταση που αυτά προκαλούν στα φέροντα στοιχεία της κατασκευής καθώς και ο περιορισμός και η ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων και των ζημιών του κτηρίου ανάλογα με την στάθμη επιτελεστικότητας για την οποία σχεδιάζεται [2].

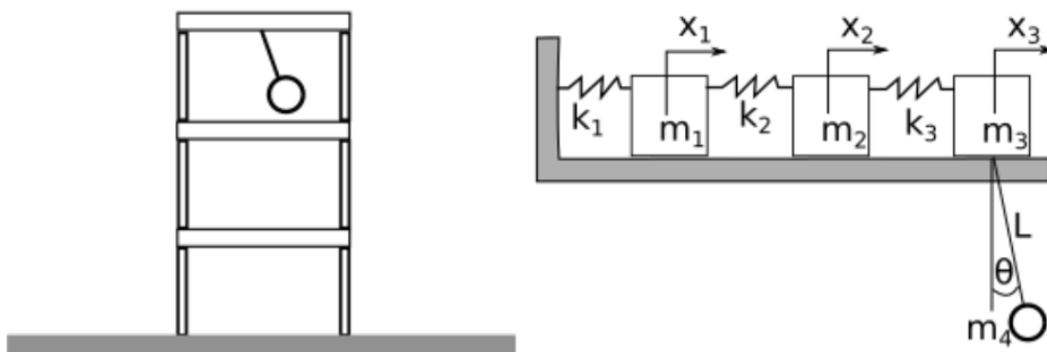
Αυτή η δυνατότητα απορρόφησης της ενέργειας προέρχεται από τη μη ελαστική λειτουργία του σκελετού της κατασκευής αλλά μπορεί, εάν επιδράσουν πολλοί κύκλοι φόρτισης να οδηγήσει σε ζημιές στο σκελετό του κτηρίου. Επιπλέον, θα μπορούσε να έχει καταστροφική επίδραση και σε μη δομικά τμήματα, εσωτερικά ευαίσθητα όργανα, συσκευές και στον άνθρωπο. Τέτοιες προσεγγίσεις αποτελούν παθητικό έλεγχο για την προστασία των κτηρίων [25].

Σύγχρονοι ερευνητές έχουν προτείνει μια πληθώρα από μεθόδους βελτίωσης της αντισεισμικής συμπεριφοράς των κτηρίων, άλλες περισσότερο και άλλες λιγότερο πρακτικά εφαρμόσιμες. Μερικές από αυτές υιοθετούν τη χρήση αυτοματισμών για το μετριασμό της επίδρασης των διαταραχών.

Αυτές τις τεχνικές ενεργητικού ελέγχου που είναι η δεύτερη μεγάλη τεχνική προστασίας κτηρίων θα μπορούσαν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: εκείνες που χρησιμοποιούν ενεργητικά, υβριδικά και ημι-ενεργητικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου (active, hybrid, semi-active control systems).

### 1.1.1 Παθητικός Έλεγχος

Προκειμένου να μειωθούν οι κραδασμοί σε κτηριακές εγκαταστάσεις, διάφορα είδη συστημάτων ελέγχου έχουν προταθεί και εφαρμοστεί, αποτελούμενα κατά κανόνα από παθητικά συστήματα, τα οποία απαρτίζονται από τους παθητικούς αποσβεστήρες ή Tuned Mass Dampers (TMDs)[23]. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται στα αριστερά ένα απλοποιημένο γραφικό κτηρίου με εκκρεμές που ταλαντεύεται στην κορυφή, και δεξιά, ένα ισοδύναμο σύστημα Μαζας-Ελατηρίου-Εκκρεμές απαραίτητο για τη ρύθμιση του Παθητικού Αποσβεστήρα. Αυτό το είδος των συσκευών έχει ως στόχο την προσθήκη απόσβεσης στο σύστημα για τη μείωση της δυναμικής του απόκρισης [13, 21]. Αυτό αποτελεί μια καλή στρατηγική ελέγχου, διότι, σε περίπτωση εμφάνισης προβλημάτων συντονισμού, το εύρος της απόκρισης επηρεάζεται έντονα από τον βαθμό απόσβεσης του συστήματος.

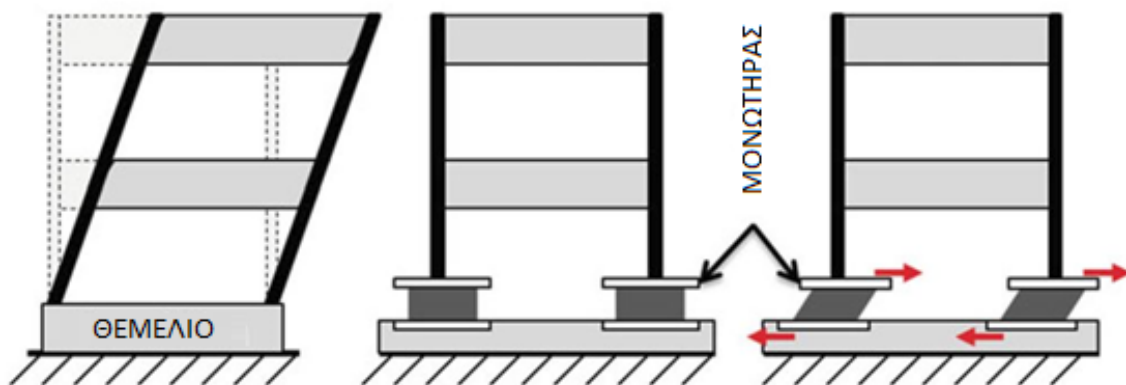


Σχήμα 1.1: Σκαρίφημα Παθητικού Αποσβεστήρα

Τα παθητικά συστήματα ελέγχου μπορεί να έχουν ορισμένα προβλήματα τα οποία μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την χρήση τέτοιων συσκευών. Για παράδειγμα, οι TMDs είναι ουσιαστικά χρήσιμοι σε περιπτώσεις που είναι δυνατόν να συνδεθούν διαφορετικά σημεία της δομής που χαρακτηρίζονται από σημαντική μετατόπιση με την εφαρμογή κάποιας διέργησης. Ακόμα και όταν είναι

πρακτικώς δυνατό η εφαρμογή τέτοιων κατασκευών, στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις υπάρχουν σημαντικοί αρχιτεκτονικοί περιορισμοί που μπορεί να περιορίσουν αυτή τη λύση. Οι TMDs είναι επίσης ευπρόσβλητοι σε ορισμένα προβλήματα, ιδίως στη ρύθμιση της συχνότητας. Έχει καλά μελετηθεί, ότι σχετικά μικρές αποκλίσεις συχνότητας της δομής μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της αποδοτικότητας. Επιπλέον, οι TMDs είναι σχεδιασμένα για να ελέγχουν μια συγκεκριμένη διέργηση, γεγονός που σημαίνει ότι θα χρειάζονται τόσοι TMDs όσες και οι μορφές δόνησης που πρέπει να ελέγχονται [18].

Οι οριζόντιες συνιστώσες της κίνησης του εδάφους είναι οι πιο επικίνδυνες για τα κτήρια και το περιεχόμενό τους. Σύμφωνα με μία νέα προσέγγιση όσον αφορά την σεισμική προστασία, ονομαζόμενη σεισμική μόνωση βάσης το κτήριο εδράζεται πάνω σε μία σειρά από ελαστικά εφέδρανα, στόχος των οποίων είναι να αποζεύξουν το κτήριο από την οριζόντια κίνηση του εδάφους (βλ. Σχήμα 1.2). Το κτήριο μονώνεται σεισμικά στην βάση, και όχι μόνο τα φορτία στην κτηριακή κατασκευή μειώνονται αλλά οι ένοικοι και το περιεχόμενο του κτηρίου προστατεύεται. Οι μονωτήρες, είναι συσκευές παθητικής σεισμικής προστασίας. Παρότι η έννοια της σεισμικής μόνωσης βάσης δεν είναι νέα, η πρόοδος στην τεχνολογία κατασκευής ελαστικών έχει δώσει πλέον την δυνατότητα της ουσιαστικής πρακτικής εφαρμογής της [4].



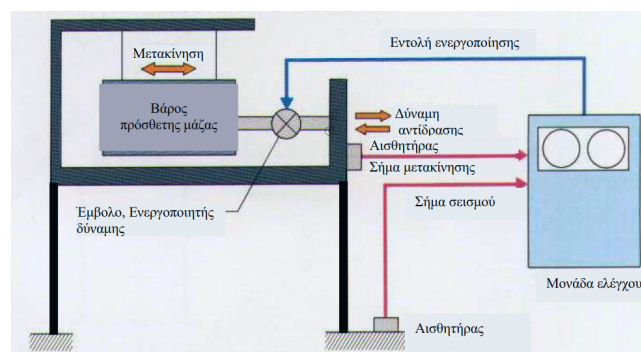
Σχήμα 1.2: Διάταξη Κτηρίου Μονωμένης Βάσης

Τα ελαστικά εφέδρανα προσφέρουν την απλούστερη μέθοδο μόνωσης, ενώ παράλληλα η κατασκευή τους είναι εύκολη. Η μακρά εμπειρία από την χρήση σε εφέδρανα γεφυρών μας διαβεβαιώνει για την ανθεκτικότητα και την αξιοπιστία τους. Τα εφέδρανα για τη σεισμική μόνωση βάσης κατασκευάζο-

νται με σύνδεση μέσω βουλκανισμού φύλλων τεχνητού ελαστικού σε λεπτές ενισχυτικές ατσάλινες πλάκες. Τα εφέντρανα έχουν το μηχανικό χαρακτηριστικό να είναι πολύ εύκαμπτα στην οριζόντια κατεύθυνση, ενώ στην κατακόρυφη είναι πολύ δύσκαμπτα. Η δράση τους κατά την διάρκεια του σεισμού είναι να απομονώσουν το κτήριο από τις οριζόντιες συνιστώσες της κίνησης του εδάφους. Οι κατακόρυφες συνιστώσες του σεισμού μεταφέρονται αυτούσιες στην κατασκευή, παρόλο που τα εφέντρανα θα παρέχουν κάποια μόνωση στις υψηλές συχνότητες, οι οποίες προέρχονται από την κίνηση στους δρόμους και σε υπόγεια μεταφορικά μέσα. Τα εφέντρανα είναι κατάλληλα για χαμηλά κτήρια, έως επτά ορόφους, όπου και η φόρτιση λόγω του ανέμου είναι σχετικά μικρή [10]. Η μόνωση της βάσης αποτελεί τεχνική παθητικού ελέγχου. Αλλά εναλλακτικά σχέδια ελέγχου που έχουν προταθεί είναι ο ενεργητικός και ο ημι-ενεργητικός έλεγχος [3, 8]. Μία άλλη κατηγορία των συσκευών μόνωσης βάσης είναι ο συνδυασμός παθητικής μόνωσης βάσης με ενεργό ή ημι-ενεργό έλεγχο βάσης [24]. Σε κάποιες εφαρμογές, η σεισμική δραστηριότητα μπορεί να μειωθεί τοποθετώντας μονωτήρες μεταξύ των ορόφων, και όχι στη θεμελίωση, αυτοί αποκαλούνται σεισμικοί μονωτήρες.

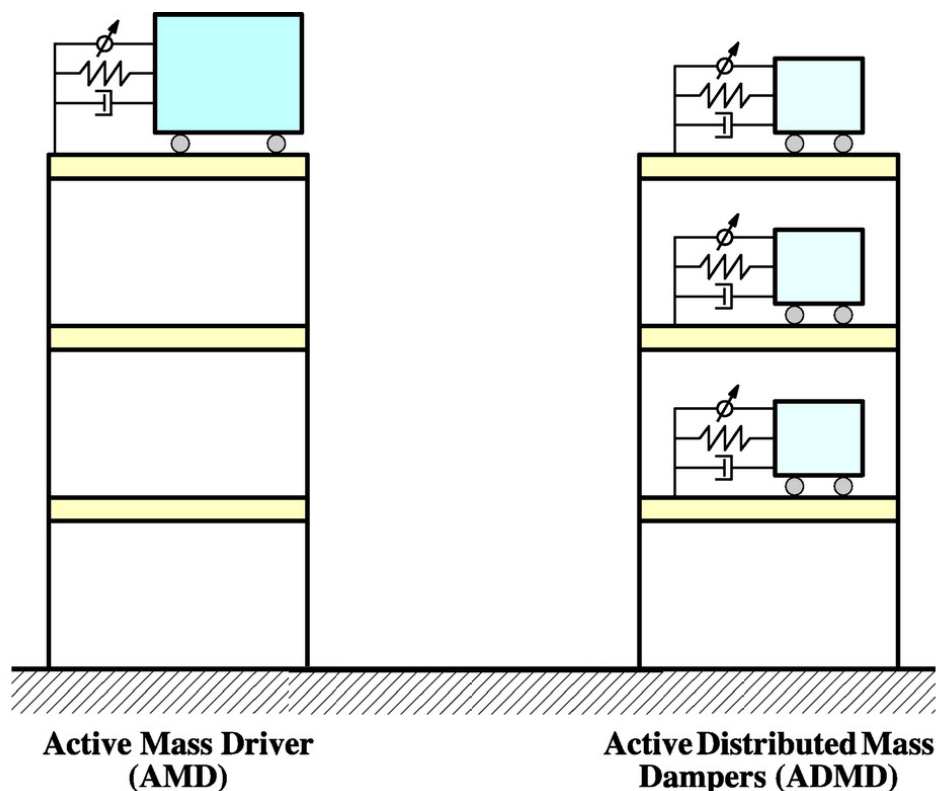
### 1.1.2 Ενεργητικός Έλεγχος

Μία συνήθης μέθοδος στην κατηγορία του ενεργητικού ελέγχου χρησιμοποιεί ενεργητικούς αποσβεστήρες (Active Mass Dampers – AMD). Μικρές βοηθητικές μάζες που δεν υπερβαίνουν το 1% του βάρους της κατασκευής, τοποθετούνται σε έναν από τους τελευταίους ορόφους του κτηρίου. Ένας ενεργοποιητής π.χ. έμβολο, συνδέει την κατασκευή με τις μάζες (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3: Σχηματική Αναπαράσταση Δομής Ενεργητικού Αποσβεστήρα

Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στις μετρήσεις των αισθητήρων στην οροφή ή/και σε ενδιάμεσους ορόφους οι οποίοι μετρούν τις αποκρίσεις τροφοδοτώντας τον κεντρικό υπολογιστή ελέγχου. Ο υπολογιστής στη συνέχεια επεξεργάζεται τις μετρήσεις και στέλνει το κατάλληλο σήμα ελέγχου στα έμβολα [22]. Τα έμβολα κινούν τις μάζες σε διεύθυνση αντίθετη με εκείνη της διαταραχής, μειώνοντας έτσι την απόκριση της κατασκευής[25]. Μια διάταξη με ενεργητικούς αποσβεστήρες σε δυο διαφορετικούς σχηματισμούς φαίνεται στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Διάταξη Κτηρίου με Ενεργητικούς Αποσβεστήρες

Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν έτυχε ευρύτερης αναγνώρισης, επειδή παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι στηρίζεται αποκλειστικά σε εξωτερικές πηγές ενέργειας [5]. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το αυξημένο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, οδήγησε τους ερευνητές σε συστήματα που συνδυάζουν ενεργητικό και παθητικό έλεγχο, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία και μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις. Έτσι πρόεκυψαν τα υβριδικά συστήματα ελέγχου.

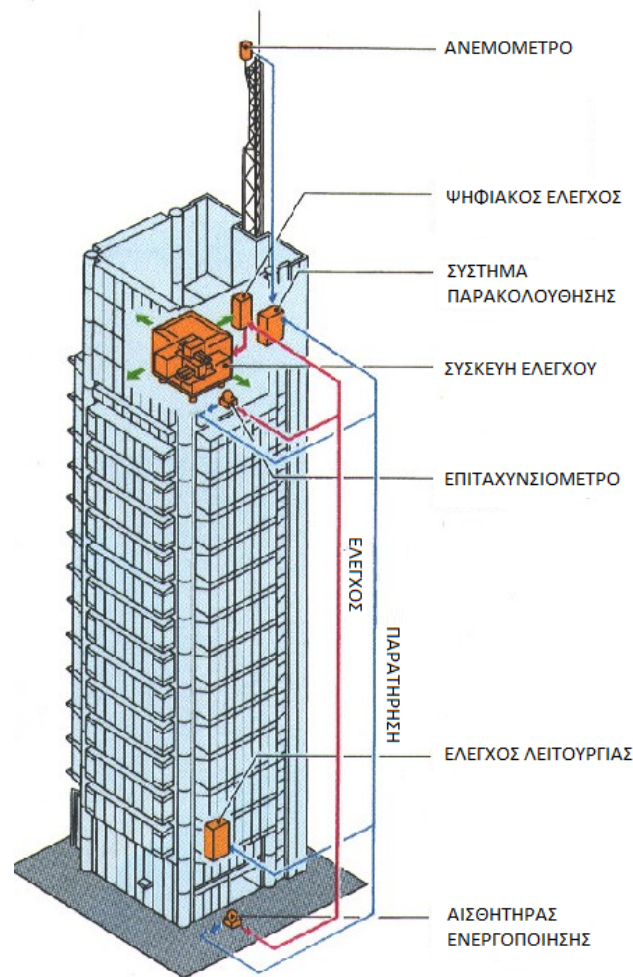
### 1.1.3 Υβριδικός Έλεγχος

Υβριδικό σύστημα ελέγχου για μια κατασκευή θεωρείται εκείνο το σύστημα που συνδυάζει συσκευές και μηχανήματα παθητικού και ενεργητικού ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο παρακάμπτονται περιορισμοί από τη χρήση μόνο του ενός από τους δυο ελέγχους. Οι αποσβεστήρες HMD (Hybrid Mass Damper) είναι η πιο συνηθισμένη συσκευή ελέγχου που χρησιμοποιούνται σε πλήρη κλίμακα σε κατασκευαστικά έργα[24]. Ένας HMD είναι ένας συνδυασμός από TMD, καθώς και έναν ενεργοποιητή ενεργητικού ελέγχου. Η ικανότητα αυτής της διάταξης να μειώνει τις αποκρίσεις της κατασκευής βασίζεται κυρίως στην φυσική κίνηση του TMD. Οι δυνάμεις από τον ενεργοποιητή ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της αποτελεσματικότητας του HMD και για την αύξηση της ευρωστίας του σε αλλαγές των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής [6]. Η ενέργεια και δύναμη που απαιτούνται για τη λειτουργία ενός τυπικού HMD είναι πολύ μικρότερες από εκείνες που αφορούν ένα πλήρες σύστημα ενεργητικού αποσβεστήρα με παρόμοιες συνθήκες [23].

Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας εφαρμογής είναι το σύστημα αποσβεστήρων HMD που εγκαταστάθηκε στο κτίριο Sendagaya INTES στο Τόκιο το 1991. Οι αποσβεστήρες HMD έχουν εγκατασταθεί πάνω στον 11ο όροφο και αποτελείται από δύο μάζες για τον έλεγχο της εγκάρσιων και στρεπτικών κινήσεων της κατασκευής, με τους υδραυλικούς ενεργοποιητές να παρέχουν τις δυνατότητες του ενεργητικού ελέγχου. Οι μάζες στηρίζονται σε πολύ-επίπεδα ελαστικά εφέδρανα που προορίζονται για τη μείωση της ενέργειας ελέγχου που καταναλώνεται στους HMD και για την εξασφάλιση της ομαλής μαζικής κίνησης. Όταν οι μάζες κινούνται σε φάση τότε ελέγχουν την πλευρική μετατόπιση, αντίθετα σε συνθήκες διαφοράς φάσης ελέγχουν την στρέψη.

Παραλλαγές αυτής της διαμόρφωσης των αποσβεστήρων HMD περιλαμβάνουν το εκκρεμές πολλαπλού βήματος (multi-step pendulum HMD), το οποίο έχει εγκατασταθεί στο υψηλότερο κτήριο της Ιαπωνίας (Yokohama Landmark Tower) και στο TC Tower στο Kaohsiung της Ταϊβάν. Επιπλέον, στις παραλλαγές περιλαμβάνεται και το σύστημα DUOX HMD το οποίο αποτελείται από έναν TMD, ενεργητικά ελεγχόμενο από μια βοηθητική μάζα, ο οποίος έχει τοποθετηθεί στην συγκεκριμένη περίπτωση, στην κορυφή του κτηρίου Ando Nishikicho στο Τόκιο (βλ. Σχήμα 1.5) [23].





Σχήμα 1.5: Σκαρίφημα Κτηρίου με Σύστημα DUOX HMD

Σχεδιαστικοί περιορισμοί, όπως περιορισμοί χώρου, μπορούν να αποκλείσουν τη χρήση ενός συστήματος HMD ή TMD. Σε αυτή την περίπτωση εφαρμόζονται πρακτικές που ανήκουν στην κατηγορία του Ενεργητικού Ελέγχου.

## 1.2 Σύστημα Ελέγχου

Ο στόχος του ελέγχου κτηριακών συστημάτων είναι η ελαχιστοποίηση των δονήσεων και η βελτίωση της ακεραιότητας των κτηρίων σε καταστάσεις σεισμού ή φορτίων λόγω ανέμου μέσω εξωτερικής δύναμης ελέγχου [11]. Κύριως στόχος λοιπόν είναι να σχεδιαστεί ένας ελεγκτής που θα στέλνει το σήμα ελέγχου στις συσκευές ελέγχου με στόχο την μείωση των δονήσεων. Η τεχνική

ελέγχου θα πρέπει να είναι απλή, εύρωστη, ανεκτική σε σφάλματα, όχι απαραίτητα βέλτιστη, αλλά προτίστως υλοποιήσιμη [26].

Βασικό στοιχείο στο σύστημα ελέγχου κτηριακής εγκατάστασης κάτω από σεισμική διέγερση αποτελεί ο τρόπος με τον οποίο εκτελείται ο έλεγχος. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που υπολογίζουμε τις δυνάμεις που πρέπει να επιβληθούν στην κατασκευή σε κάθε χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας αισθητήρες σε κατάλληλο σημείο της κατασκευής, τότε αναφερόμαστε σε έλεγχο πρόσω δράσης (feed forward control). Στην περίπτωση όμως της καταγραφής των μεταβλητών απόκρισης του συστήματος, και χρήση αυτών σε κάποιο αλγόριθμο ελέγχου, με στόχο τον υπολογισμό των δυνάμεων που πρέπει να επιβληθούν στην κατασκευή σε κάθε χρονική στιγμή, τότε αναφερόμαστε σε έλεγχο ανάδρασης (feedback control).

Για τον έλεγχο με ανάδραση, μία άλλη κατηγοριοποίηση αφορά το πλήθος των μεταβλητών κατάστασης του κτηρίου που αξιοποιούνται. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιούνται όλες οι μεταβλητές για τον υπολογισμό της δύναμης ελέγχου τότε έχουμε έλεγχο με ολόκληρη την κατάσταση του συστήματος (full state control). Αν όμως έχουμε διαθέσιμες μερικές μεταβλητές κατάστασης, και με χρήση μια τεχνικής υπολογίζουμε την συνολική κατάσταση την οποία χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό των δυνάμεων ελέγχου, τότε διάταξη ελέγχου με παρατηρητή (observer-based control)

Οι πιθανές μεταβλητές κατάστασης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι η ταχύτητα και η μετατόπιση των των μαζών του κτηρίου ή ακόμα και τα σχετικά μεγέθη των προηγούμενων. Η επιλογή των μεταβλητών προσδιορίζεται κυρίως από την μοντελοποίηση του κτηρίου καθώς και από την επιλογή του συστήματος ελέγχου, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

### 1.3 Προσαρμοστικά Συστήματα

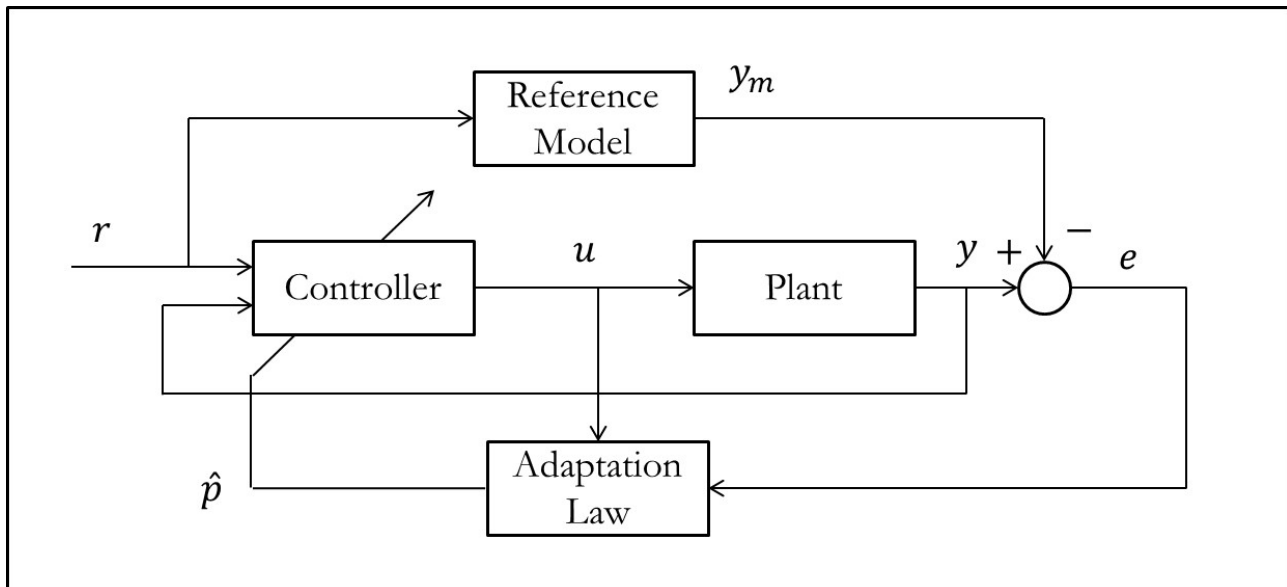
Όλα τα συστήματα είτε είναι μηχανικά, φυσικά, βιολογικά ή και κοινωνικά θεωρούνται προσαρμοστικά εάν μπορούν να διατηρήσουν την συμπεριφορά τους, ή να επιβιώσουν ανεξάρτητα από τις ραγδαίες αλλαγές στο περιβάλλον τους ή στα δομικά στοιχεία που τα διέπουν. Αντίθετα, αλλαγές μικρής κλίμακας στη δομή των συστημάτων ή στις παραμέτρους τους μπορούν να θεωρηθούν

συστημικές αβεβαιότητες, οι οποίες μπορούν να αντιμετωπιστούν δυναμικά μέσω στατικών δομικών τροποποιήσεων (παθητικός έλεγχος) ή μέσω σχεδιασμού συστημάτων ελέγχου με ανάδραση (feedback control) ή με πρόσω δράση (feed-forward control).

Η γνώση των αρχικών συνθηκών και η μαθηματικές σχέσεις καθορίζουν, κυρίως, την εξέλιξη των καταστάσεων (state) του συστήματος ή τους βαθμούς ελευθερίας του. Η συμπεριφορά των συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων της ευστάθειας είναι στη θεωρία εκφρασμένα με συναρτήσεις των καταστάσεων τους. Η διατήρηση της συμπεριφοράς τους, λοιπόν, παρουσία ραγδαίων αλλαγών στο περιβάλλον ή στη δομή των συστημάτων ορίζεται ως προσαρμοστικότητα στην βιβλιογραφία της Θεωρίας Ελέγχου. Και στις δύο περιπτώσεις, τα προσαρμοστικά συστήματα είναι εγγενώς μη γραμμικά, καθώς οι παράμετροί τους είναι συναρτήσεις των καταστάσεών τους.

### 1.3.1 Τεχνικές Προσαρμοστικού Ελέγχου

Η πρώτη πιο αξιοσημείωτη και ευρέως διαδεδομένη χρήση του όρου *Προσαρμοστικός Έλεγχος* (adaptive control) έγινε τη δεκαετία του '50 από τον κλάδο της αεροναυπηγικής στην προσπάθεια σχεδιασμού αυτόματων πιλότων [1]. Μαζί με την εξέλιξη των κινητήρων, και όχι μόνο, αυξήθηκε και ο φάκελος πτήσης (flight envelope) του οποίου συνεπάγεται ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας των αεροσκαφών, το οποίο οδήγησε στην ανάπτυξη της μεθόδου MRAC [19]. Εκείνη την περίοδο όμως η έννοια της ευστάθειας του κλειστού βρόχου ανάδρασης και της προσαρμογής δεν ήταν πλήρως κατανοητή ή τόσο ώριμη σαν ιδέα όπως σήμερα. Γύρω στα τέλη του '50 αρχές '60 έκανε την εμφάνισή του η αναπαράσταση των συστημάτων στο χώρο κατάστασης καθώς και η χρήση της θεωρίας ευστάθειας κατά Lyapunov στα συστήματα ελέγχου [9]. Την εμφάνισή τους έκαναν με τη σειρά τους και τα συστήματα MRAC σχεδιασμένα με αυτό τον τρόπο που ο νόμος προσαρμογής τους να βασίζεται στη θεωρία ευστάθειας κατά Lyapunov [20]. Εκείνη την περίοδο αναπτύχθηκαν και άλλοι σχηματισμοί προσαρμοστικού ελέγχου όπως το Adaptive Pole Placement, Adaptive Sliding Mode Control, Extremum Seeking.



Σχήμα 1.6: Δομικό διάγραμμα MRAC Συστήματος

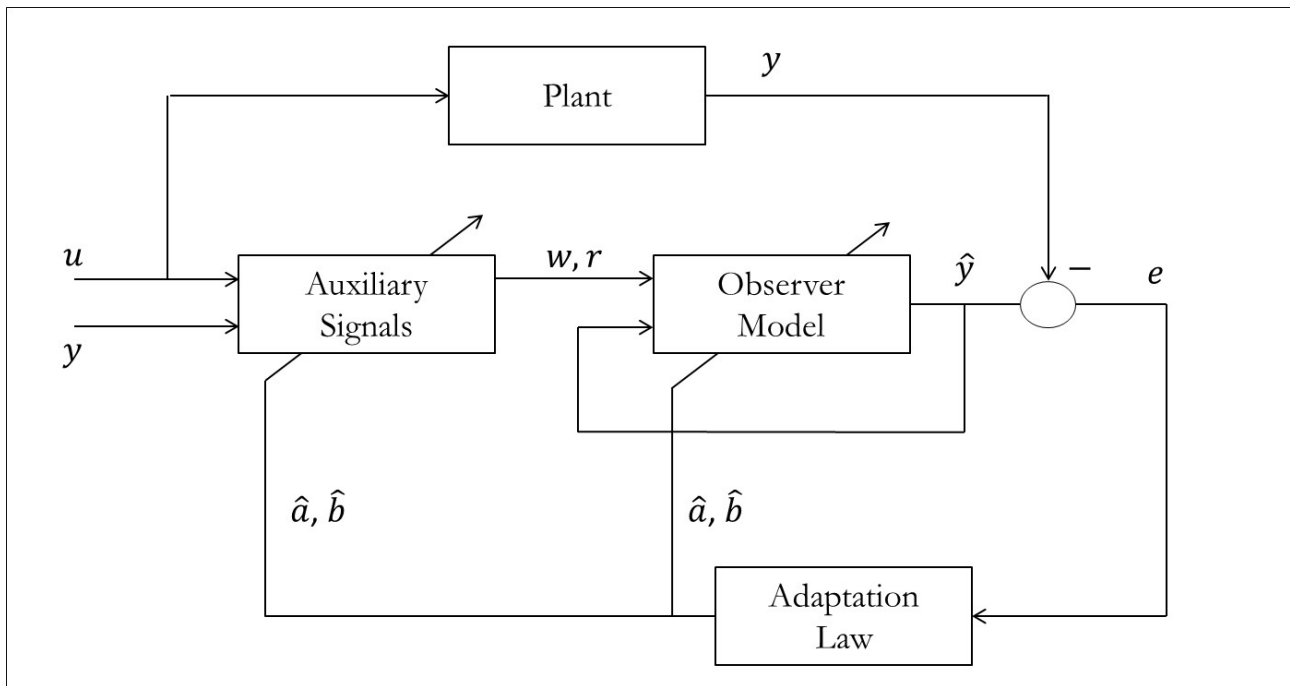
Το MRAC είναι ένας σχηματισμός συστήματος ελέγχου κατά το οποίο η επιθυμητή συμπεριφορά ενός συστήματος ελαχίστης φάσης (ευσταθείς μηδενιστές) χαρακτηρίζεται από ένα πρότυπο αναφοράς το οποίο αποδίδει την επιθυμητή απόκριση σε κατάλληλο σήμα εισόδου. Το ίδιο σήμα εισέρχεται ταυτόχρονα και στο πρότυπο και στο πραγματικό σύστημα, ο ελεγκτής λοιπόν προσαρμόζεται (μέσω των κερδών του) με τέτοιο τρόπο που το σφάλμα εξόδου του προτύπου και του πραγματικού συστήματος να ελαχιστοποιείται. Για αυτού του είδους σύστημα ελέγχου υπάρχουν 2 πιθανές μέθοδοι υλοποιήσεις, ο άμεσος ή ο έμμεσος έλεγχος. Μέσω του πρώτου προσαρμόζονται οι παράμετροι του ελεγκτή ενώ με τον δεύτερο παίρνουμε εκτιμήσεις των παραμέτρων του πραγματικού συστήματος οι οποίες χρησιμοποιούνται για να ενημέρωσουν τις στατικές εξισώσεις του ελεγκτή. Να σημειώσουμε πως σε αυτά τα συστήματα προσαρμοστικού ελέγχου θεωρούμε ότι το διάνυσμα κατάστασης (output) του συστήματος είναι πλήρως μετρήσιμο, το οποίο δεν είναι πιθανό σε πραγματική εφαρμογή.

### 1.3.2 Τεχνικές Προσαρμοστικού Παρατηρητή

Από τις αρχές της δεκαετίας του '70 έγιναν αρκετές μελέτες πάνω σε προβλήματα προσαρμοστικών παρατηρητών, παρόλα αυτά το μεγαλύτερη απήχηση φάνηκε να έχουν τα προβλήματα προσαρμοστικού ελέγχου. Οι προσαρμοστικοί παρατηρητές (observers)/ αναγνωριστές (identifiers) παρου-

σιάζουν μια δομή παρόμοια με εκείνης των Έμμεσων Προσαρμοστικού Ελέγχου Συστημάτων με Πρότυπο Αναφοράς Indirect - MRAC, και αυτό τους κάνει απαραίτητους σε τέτοια προβλήματα. Αυτού του είδους προσαρμοστικά συστήματα οπτικοποιούνται ως Προσαρμοστικά Συστήματα Προτύπων Αναφοράς (Model Reference Adaptive Systems) και η δομή τους φαίνεται στο Σχήμα 1.7. Εναλλάσσοντας τις θέσεις του πραγματικού συστήματος (Plant) και του μοντέλου τότε έχουμε ένα ΜΡΑΣ Identifier [14].

Στη περίπτωση προσαρμοστικού ελέγχου τροποποιούμε το σύστημα ούτως ώστε να συμπεριφέρεται όπως το πρότυπο (βλ. Σχήμα 1.6), ενώ για την περίπτωση παρατήρησης μεταβάλλουμε το πρότυπο/παρατηρητή για να πετύχουμε κοινή συμπεριφορά με το σύστημα. Οι μέθοδοι προσαρμοστικής αναγνώρισης συστήματος όχι μόνο έδωσε λύση στο πρόβλημα της ανάδρασης εξόδου για τα προσαρμοστικά συστήματα, αλλά η συμβολή τους ήταν σημαντική και στο τομέα της παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας.



Σχήμα 1.7: Δομικό διάγραμμα MRAS Συστήματος

Οι διάφοροι παρατηρητές που έχουν αναπτυχθεί εκμεταλλεύονται αναλόγως την διαφορετική κανονική δομή του συστήματος, η οποία παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, κατά την εφαρμογή τους. Οι πρώτες έρευνες πάνω στο αντικείμενο των προσαρμοστικών παρατηρητών προϋποθέτουν το άγνωστο προς μελέτη σύστημα να δίνεται στην ελαχιστη υλοποίηση (minimal

realization) [12, 15]. Έπειτα παρουσιάστηκαν κάποιες μέθοδοι κατά τις οποίες το προς μελετη σύστημα μπορεί να δωθεί στην μη-ελάχιστη κανονική μορφή (non-minimal canonical form) [16]. Ως εκ τούτου οι παρατηρητές δύναται να κατηγοριοποιούνται σε δυο κατηγορίες, στους παρατηρητές υλοποίησης ελαχίστης δομής τυπου Luenberger και σε εκείνους μη-ελαχίστης μορφής που αποτελούν προέκταση των πρώτων.

Η μέθοδος η οποία βασίζεται στην ελάχιστη υλοποίηση, προϋποθέτει την εφαρμογή σημάτων ευστάθειας στο σύστημα για να διασφαλιστεί η συνολική ευστάθεια του, κάτι το οποίο καθιστά την διάταξη του προσαρμοστικού παρατηρητή εγγενώς σύνθετη. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την υλοποίηση και εφαρμογή προσαρμοστικού παρατηρητή στην μη-ελάχιστη κανονική μορφή που πρωτο-διατυπώθηκε από τους Luders-Narendra.

## 1.4 Σκοπός της Εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή ενός συστήματος ελέγχου που συνδυάζει τον ενεργητικό έλεγχο κτηρίου με σεισμικά μονωμένη βάση. Για την εφαρμογή αυτού του τύπου ελέγχου, είναι απαραίτητη η γνώση του διανύσματος κατάστασης του κτηρίου, το οποίο περιλαμβάνει τις μετατοπίσεις και τις ταχύτητες για τον κάθε όροφο του κτηρίου, ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Οι ποσότητες αυτές δεν μπορούν να μετρηθούν απευθείας με κάποιον αισθητήρα. Παρόλα αυτά, μπορεί να μετρηθεί η απόλυτη επιτάχυνση των ορόφων με χρήση επιταχυνσιόμετρων. Οι αντίστοιχες ζητούμενες ταχύτητες και μετατοπίσεις μπορούν να προκύψουν με ολοκλήρωση, δεδομένου ότι οι αρχικές συνθήκες είναι γνωστές και η επίδραση των θορύβων φιλτράρεται κατάλληλα. Παρόλα αυτά, η ύπαρξη θορύβων και σταθερών σφαλμάτων στην έξοδο των οργάνων μέτρησης μπορεί να οδηγήσει σε βάθος χρόνου την εκτίμηση της κατάστασης σε σημαντικές αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές. Το γεγονός αυτό μπορεί να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα στην πρακτική εφαρμογή ενός αντισεισμικού συστήματος ελέγχου, και για αυτό τον λόγο, απαιτείται χρήση παρατηρητή με σκοπό την εκτίμηση των μεταβλητών κατάστασης. Παράλληλα για την εφαρμογή του ελέγχου απαιτείται γνώση και του συστήματος. Οι τιμές των παραμέτρων που διέπουν το σύστημα δεν είναι γνωστές ανά πάσα στιγμή, παρά μόνο κάποιες ονομαστικές τιμές. Κατάλλη-

λη επιλογή προσαρμοστικού παρατηρητή που θα συνδυάζει την αναγνώριση των παραμέτρων του συστήματος ταυτόχρονα με την εκτίμηση της κατάστασης θα μελετηθεί και θα προσομοιωθεί στα τελευταία κεφάλαια.

## Μοντελοποίηση Συστήματος Κτηρίου

Το φυσικό σύστημα του κτηρίου θεωρούμε ότι είναι ένα διασυνδεδεμένο σύστημα  $N$  ορόφων, του οποίου η βάση είναι μονωμένη. Για την παρούσα ανάλυση το φυσικό σύστημα εξιδανικεύεται με την χρήση ενός αντίστοιχου γραμμικού μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα το κτήριο μοντελοποιείται ως ένα σύνολο μαζών, που αντιστοιχούν στους ορόφους του κτηρίου, ενώ η διασύνδεση μεταξύ των ορόφων μοντελοποιείται με την χρήση γραμμικών ελατηρίων και αποσβεστήρων. Η κίνηση των μαζών θεωρείται ότι συντελείται κατά την οριζόντια διεύθυνση. Στροφικές και εξωτερικές επιδράσεις απόσβεσης, ενώ σε γενικό πλαίσιο είναι υπαρκτές, δεν εξετάζονται στην παρούσα μελέτη.

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να αποκτήσουμε μία μαθηματική αναπαράσταση του μοντέλου του κτηρίου, κατάλληλη για σκοπούς ελέγχου και εκτίμησης της κατάστασης του κτηρίου. Στην παράγραφο 2.1 εισάγουμε την περιγραφή ως προς ένα απόλυτο σύστημα συντεταγμένων, ενώ στην παράγραφο 2.2 παρουσιάζουμε το αντίστοιχο μοντέλο εξισώσεων κατάστασης σε μορφή πινάκων, η οποία ενδείκνυται για τον σκοπό του ελέγχου.



## 2.1 Αναπαράσταση Κτηρίου $N$ - ορόφων σε Σύστημα Απόλυτων Συντεταγμένων

Στην βιβλιογραφία, χρησιμοποιούνται κυρίως δύο συστήματα συντεταγμένων, αναλόγως με την εφαρμογή. Ένας τρόπος είναι να μετρήσουμε την θέση των ορόφων του κτηρίου σε σχέση με ένα σύστημα αναφοράς προσκολλημένο στο έδαφος. Το σύστημα όμως αναφοράς του εδάφους, καθώς το έδαφος κινείται και επιταχύνεται λόγω του σεισμού, δεν είναι αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Συνήθως η αναπαράσταση αυτή χρησιμοποιείται όταν επιθυμούμε να μετακινούμε τους ορόφους του κτηρίου παράλληλα με το έδαφος, αποσκοπώντας στην κατά το δυνατόν μείωση των σχετικών μετατοπίσεων των ορόφων μεταξύ τους, και σε σχέση με το έδαφος. Μία τέτοια πρακτική όμως θα οδηγούσε σε ισχυρές επιταχύνσεις και δυνάμεις που θα ασκούνταν σε ολόκληρο το κτήριο.

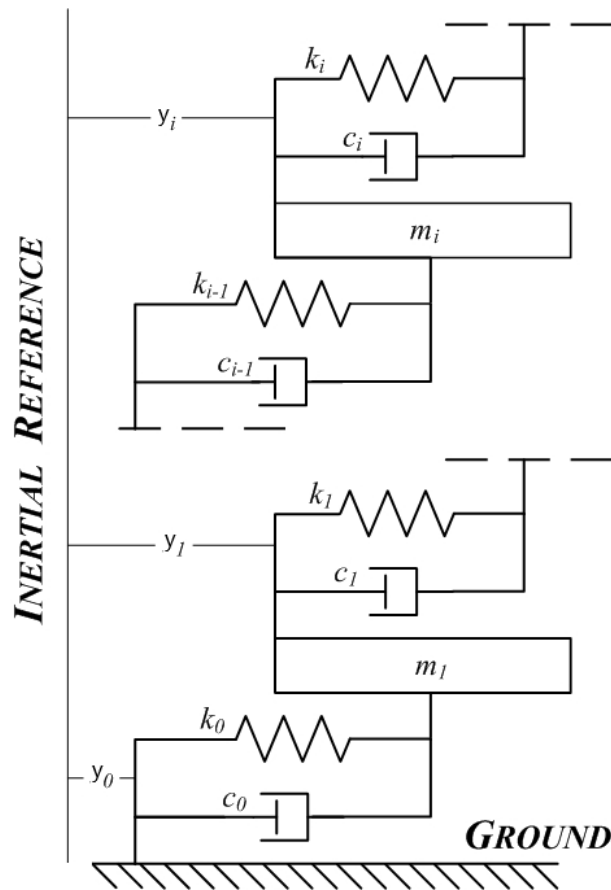
Στην περίπτωση της σεισμικής μόνωσης βάσης, ακολουθούμε μία διαφορετική φιλοσοφία. Σκοπός μας είναι να διατηρήσουμε το κτήριο κατά το δυνατόν ακίνητο ως προς ένα απόλυτο – αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό θέλουμε, ενώ το έδαφος κάτω από το κτήριο κινείται, το κτήριο να παραμένει ακίνητο, αποσβένοντας την διαταραχή που προέρχεται από το σεισμό. Για αυτό τον σκοπό, ενδείκνυται οι θέσεις των ορόφων του κτηρίου να μετρώνται ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, και όχι ως προς το σύστημα αναφοράς του εδάφους [17]. Πιο συγκεκριμένα ας θεωρήσουμε  $y_0(t)$  την μετατόπιση του εδάφους και  $y_i(t)$  την μετατόπιση του ορόφου  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ , σε σχέση με ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, αρχικά ακίνητου σε σχέση με το έδαφος, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1. Έστω επίσης  $m_i$  είναι η μάζα του ορόφου  $i$ , ενώ  $c_{i-1}$  είναι η σταθερά απόσβεσης και  $k_{i-1}$  η σταθερά ελατηρίου στην σύνδεση του ορόφου  $i$  με τον αμέσως απο κάτω του όροφο ή το έδαφος. Οι ποσότητες  $k_0$  και  $c_0$  αναφέρονται στις παραμέτρους της σεισμικής μόνωσης βάσης. Οι αντίστοιχες δυναμικές εξισώσεις κίνησης του συστήματος προκύπτουν ως,

$$\begin{aligned}
m_1\ddot{y}_1 &= -c_0(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) - k_0(y_1 - y_0) - c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - k_1(y_1 - y_2) \\
m_2\ddot{y}_2 &= -c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_1(y_2 - y_1) - c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_3) - k_2(y_2 - y_3) \\
&\vdots \\
m_i\ddot{y}_i &= -c_{i-1}(\dot{y}_i - \dot{y}_{i-1}) - k_{i-1}(y_i - y_{i-1}) - c_i(\dot{y}_i - \dot{y}_{i+1}) - k_i(y_i - y_{i+1}) \\
&\vdots \\
m_n\ddot{y}_n &= -c_{n-1}(\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1}) - k_{n-1}(y_n - y_{n-1})
\end{aligned} \tag{2.1}$$

ενώ

$$y_i(t_0) = y_i^0, \dot{y}_i(t_0) = \dot{y}_i^0 \tag{2.2}$$

είναι οι αρχικές συνθήκες στο  $t = t_0$ , για  $i = 1, 2, \dots, n$ .



Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση Κτηρίου σε Αδρανειακό Σύστημα Αναφοράς

Σύμφωνα με τα παραπάνω η διαταραχή του σεισμού  $c_0\dot{y}_0 + k_0y_0$  επιδρά άμεσα μόνο στον πρώτο όροφο του κτηρίου. Η επίδραση αυτή συμπεριλαμβάνει την μετατόπιση του εδάφους  $y_0$  και την ταχύτητα  $\dot{y}_0$ , και μπορεί να μειωθεί ελαττώνοντας τις τιμές  $k_0$  και  $c_0$  [7].

## 2.2 Αναπαράσταση Κτηρίου $N$ - Ορόφων στο Χώρο Κατάστασης

Είναι επιθυμητό να κρατήσουμε την κίνηση ενός δεδομένου ορόφου σε σχέση με τον επόμενο και τον προηγούμενο όροφο όσο μικρότερη γίνεται ώστε να αποτρέψουμε πιθανές ζημιές και καταπονήσεις στο εσωτερικό του κτηρίου. Κάτι τέτοιο γίνεται εφικτό με την χρήση ενός επενεργητή ο οποίος ασκεί συγκεκριμένη δύναμη στην βάση του κτηρίου μάζας  $m_1$ . Το ποσό της δύναμης που χρειάζεται να εφαρμοστεί για την συγκράτηση του κτηρίου και την απόσβεση των διαταραχών του

σεισμού από το να διαδοθούν κατά μήκος του κτηρίου, το υπολογίζει ένα κατάλληλο σύστημα αυτομάτου ελέγχου.

Για την εφαρμογή πληθώρας τεχνικών ελέγχου είναι εξαιρετικά χρήσιμο να μετατρέψουμε την περιγραφή της Σχέσης (2.1), (2.2) σε μοντέλο εξισώσεων κατάστασης με μορφή πινάκων. Θεωρώντας ως μεταβλητές κατάστασης τις συνιστώσες του διανύσματος  $x = [x_1, x_2, \dots, x_{2n}]^T$  με  $x_i = \dot{z}_i$  και  $x_{i+n} = z_i$  για  $i = 1, 2, \dots, n$ . Οι δυναμικές εξισώσεις κίνησης, της Σχέσης (2.1) και (2.2), μπορούν να γραφούν ως

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Ed(t) + Bu(t), \quad x(t_0) = x_0 \\ y &= Cx(t) \end{aligned} \tag{2.3}$$

όπου,

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ I_{n \times n} & O_{n \times n} \end{bmatrix}$$

με

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= \begin{bmatrix} -\frac{(c_0+c_1)}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{c_1}{m_2} & -\frac{(c_1+c_2)}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \frac{c_{i-1}}{m_i} & -\frac{(c_{i-1}+c_i)}{m_i} & \frac{c_i}{m_i} & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & 0 & \dots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{n-1}}{m_n} & -\frac{c_{n-1}}{m_n} \end{bmatrix} \\
 A_{12} &= \begin{bmatrix} -\frac{(k_0+k_1)}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{k_1}{m_2} & -\frac{(k_1+k_2)}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \frac{k_{i-1}}{m_i} & -\frac{(k_{i-1}+k_i)}{m_i} & \frac{k_i}{m_i} & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & 0 & \dots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{n-1}}{m_n} & -\frac{k_{n-1}}{m_n} \end{bmatrix} \\
 E &= \begin{bmatrix} -\frac{c_0}{m_1} & -\frac{k_0}{m_1} \\ O_{(n-1)} & O_{(n-1)} \end{bmatrix}, \\
 B &= \begin{bmatrix} \frac{1}{m_1} \\ O_n \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

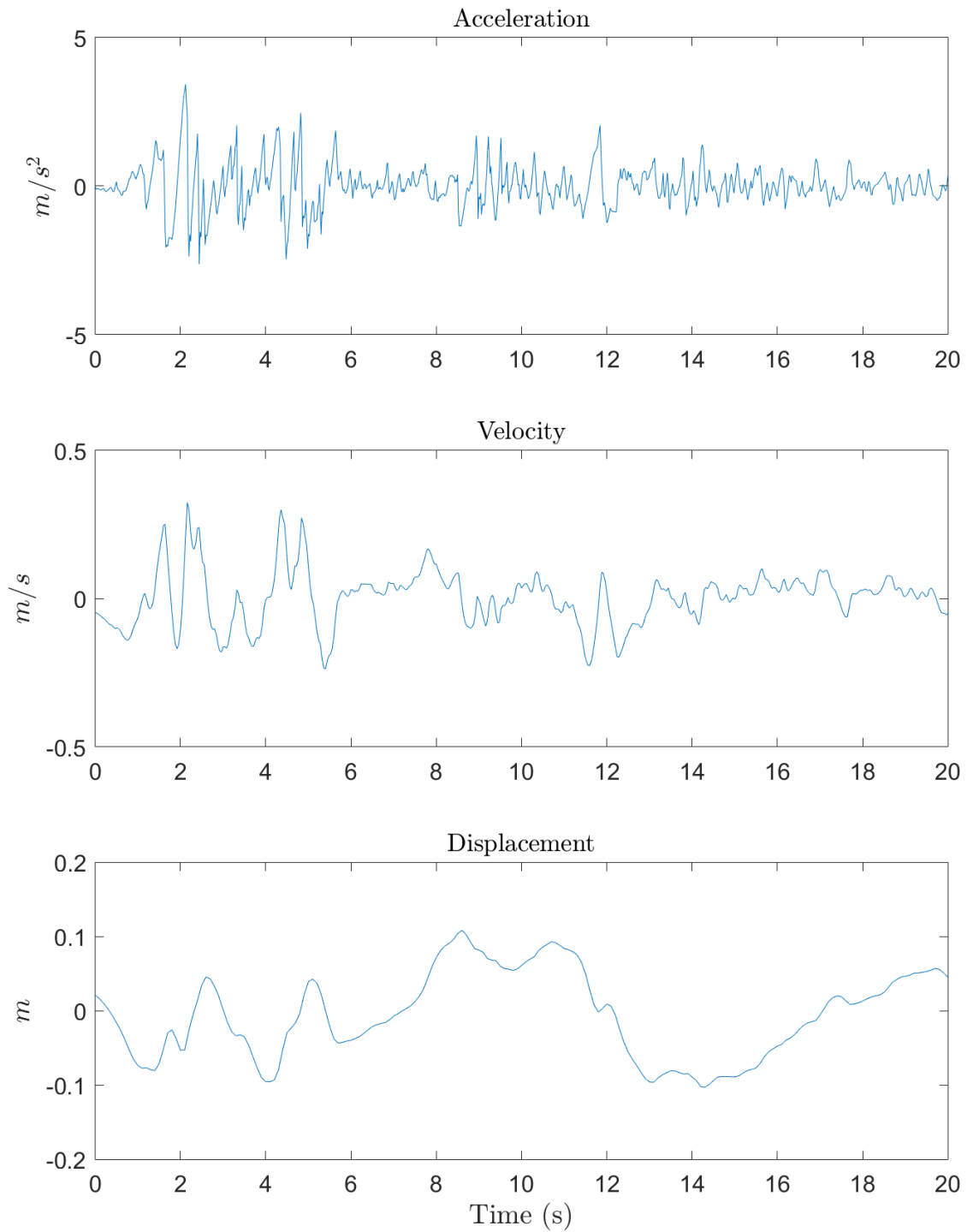
ενώ  $d(t) = [\dot{y}_0 \ y_0]^T$  είναι η είσοδος του σεισμού και  $u(t)$  είναι η δύναμη που ασκείται απο τον επενεργητή του συστήματος αυτομάτου ελέγχου στον πρώτο όροφο του κτηρίου, όταν αυτό είναι ενεργοποιημένο.

## 2.3 Προσομοίωση Κτηρίου Τριών Ορόφων υπό Σεισμική Διέγερση

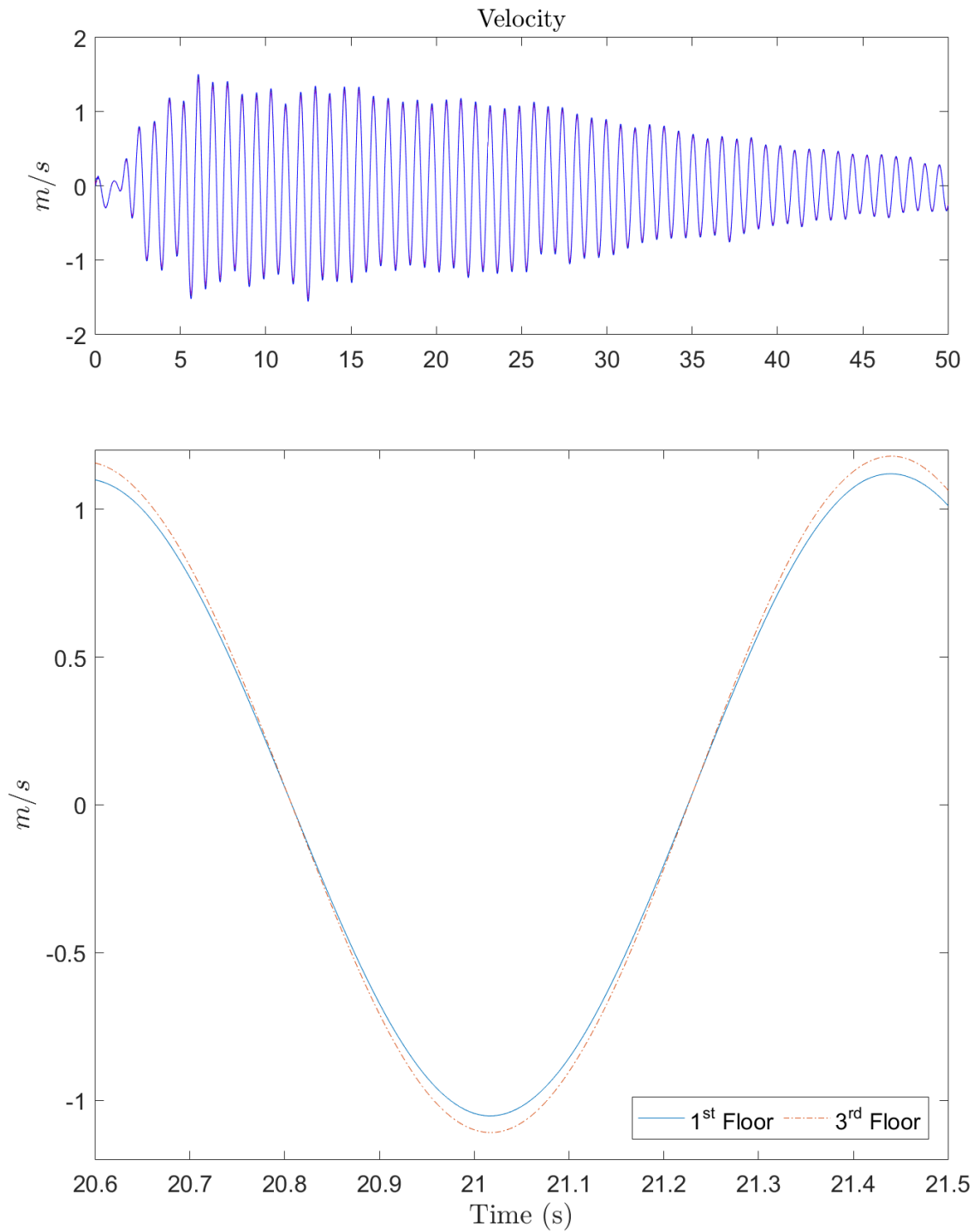
Πρωτού προχωρήσουμε στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του σχεδιασμού ενός συστήματος ελέγχου σε συνδυασμό προσαρμοστικού παρατηρητή για την εκτίμηση της κατάστασης του κτηρίου θα πραγματοποιήσουμε την προσομοίωση σεισμικής διέγερσης. Για την αναπαράσταση του κτηρίου θα χρησιμοποιήσουμε το σύστημα στο χώρο κατάστασης που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.1, ενώ ο σεισμός που θα αποτελέσει τη είσοδο στο σύστημα θα είναι ο σεισμός του 1940 στο El Centro της Νότιας Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Το κτήριο που επιλέξαμε είναι ένα κτήριο τριών ορόφων που φέρει σεισμική μόνωση βάσης, του οποίου τα χαρακτηριστικά αναφέρει αναλυτικά ο πίνακας 2.1.

Mass (Kg)	Spring (KN/m)	Damping (KNs/m)
$m_1 = 200$	$k_0 = 45,000$	$c_0 = 86$
$m_2 = 200$	$k_1 = 1,305,300$	$c_1 = 2,600$
$m_3 = 200$	$k_2 = 1,305,300$	$c_2 = 2,600$
$m_4 = 200$	$k_3 = 1,305,300$	$c_3 = 2,600$

Πίνακας 2.1: Παράμετροι Συστήματος Κτηρίου Τριών Ορόφων

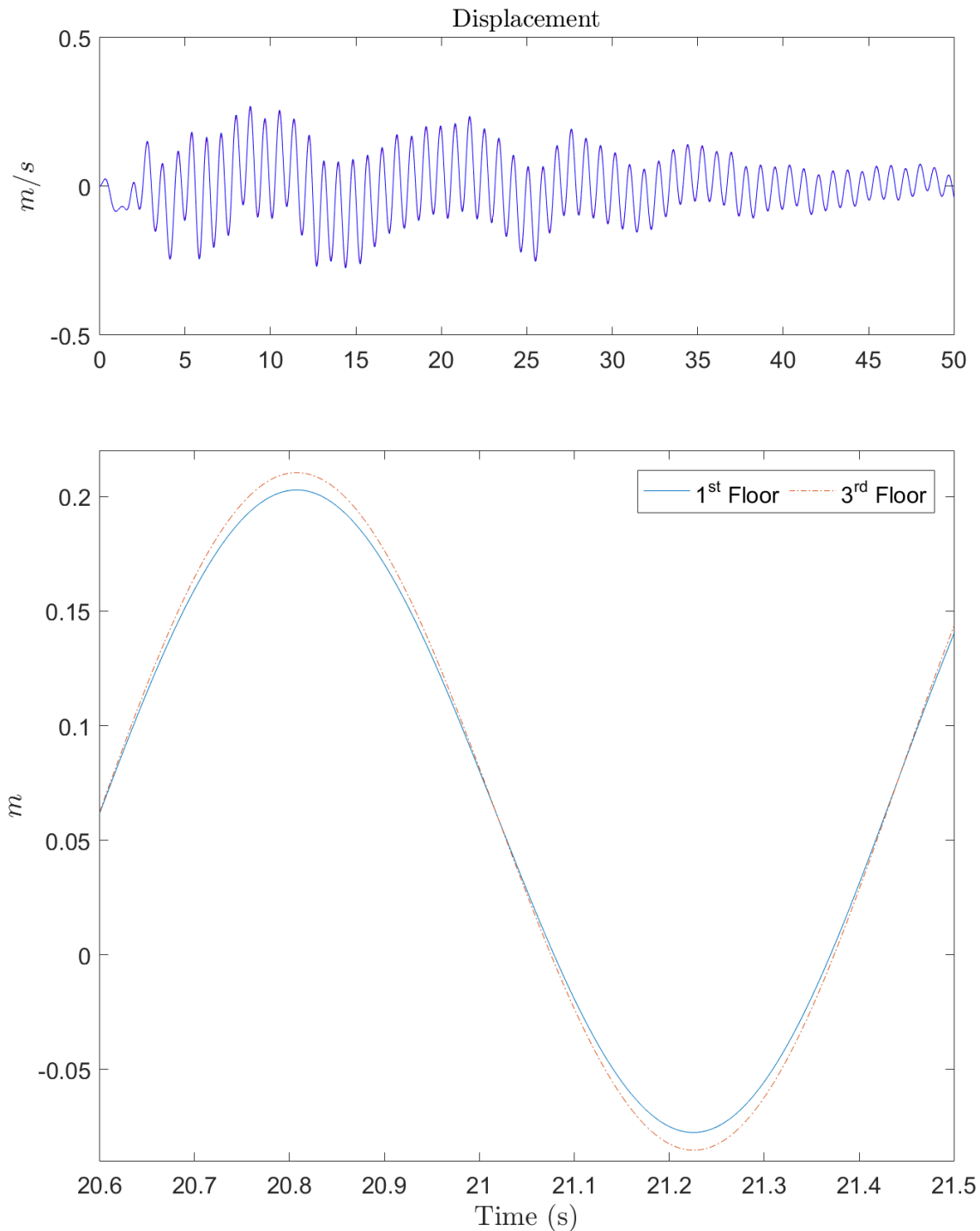


Σχήμα 2.2: El Centro, Επιτάχυνση, Ταχύτητα, Μετατόπιση εδάφους



Σχήμα 2.3: Ταχύτητες Κτηρίου Τριών Ορόφων χωρίς Έλεγχο  
[Πάνω: Ταχύτητα 1ου ορόφου. Κάτω: Ταχύτητα 1ου και 3ου ορόφου σε μεγένθυση.]





Σχήμα 2.4: Μετατοπίσεις Κτηρίου Τριών Ορόφων χωρίς Έλεγχο  
[Πάνω: Μετατόπιση 1ου ορόφου. Κάτω: Μετατόπιση 1ου και 3ου ορόφου σε μεγένθυση.]

Για την προσομοίωση της κίνησης του εδάφους του εδάφους θα χρησιμοποιήσουμε τα σεισμικά

δεδομένα από την καταγραφή του σεισμού. Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζονται και τα τρία μεγέθη του σεισμού, επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση του εδάφους, για διάστημα 20 δευτερολέπτων.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της κίνησης του κτηρίου χωρίς την εφαρμογή αυτομάτου ελέγχου στην βάση του παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η ταχύτητα στον κάθε ορόφου του κτηρίου ξεχωριστά κατά την διάρκεια του σεισμού, ενώ στο 2.4 αποτυπώνεται η μετατόπιση στο κάθε όροφο του κτηρίου. Παρατηρούμε πως τόσο οι ταχύτητες όσο και οι μετατοπίσεις όλων των ορόφων παρουσιάζουν παρόμοια κυματομορφή.

## 2.4 Απλοποιημένη Αναπαράσταση Κτηρίου

Δεδομένης της κοινής συμπεριφοράς των ορόφων σε κτήρια με μονωμένη βάση θεωρούμε απαραίτητο, για χάρην διευκόλυνσης της υλοποίησης του προβλήματος ελέγχου κτηρίων  $N$ -ορόφων, να εργαστούμε με ένα απλοποιημένο μοντέλο κτηρίου ενός ορόφου.

$$M = \sum_{i=1}^N m_i$$

όπου  $N$  είναι το πλήθος των ορόφων και  $m_i$  η μάζα του εκάστοτε. Τότε η εξίσωση κίνησης του κτηρίου θα είναι:

$$\ddot{y}_1(t) = -\frac{c_0}{M}(\dot{y}_1(t) - \dot{y}_0(t)) - \frac{k_0}{M}(y_1(t) - y_0(t)) + \frac{1}{M}u(t) \quad (2.4)$$

όπου  $y_1(t_0) = y_1^0$ ,  $\dot{y}_1(t_0) = \dot{y}_1^0$  και  $t_0$  είναι η αρχική χρονική στιγμή. Ο συμβολισμός παραμένει ίδιος με την παράγραφο 2.1. Εδώ ο όρος  $u(t)$  είναι η δύναμη επενέργησης στη μάζα  $M$ . Το κίνητρο για χρήση αυτής της εξίσωσης προκύπτει από το γεγονός ότι οι όροφοι του κινούνται ενιαία, και επομένως, πρακτικά δεν υφίσταται κίνηση μεταξύ των ορόφων. Εναλλακτικός τρόπος να εκφράσουμε την εξίσωση 2.4 είναι ο χώρος κατάστασης χρησιμοποιώντας τον συμβολισμό της παραγράφου 2.1:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \quad (2.5)$$

για την οποία ισχύει:  $x(t) = [\dot{y}_1(t) \ y_1(t)]^T$ ,  $d(t) = [\dot{y}_0(t) \ y_0(t)]^T$  και

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{c_0}{M} & -\frac{k_0}{M} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \frac{c_0}{M} & \frac{k_0}{M} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## 2.5 Σύνοψη Κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράψαμε την κίνηση ενός κτηρίου με γραμμικές διαφορικές εξισώσεις. Οι μετατοπίσεις και οι ταχύτητες των ορόφων έχουν οι υπολογιστεί ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Μία άλλη παρατήρηση αφορά τη μειωμένη σχετική κίνηση μεταξύ των ορόφων. Αυτό επιτρέπει την απλοποίηση του συστήματος κτηρίου πολλών ορόφων σε σύστημα κτηρίου ενός ορόφου. Θα μπορούσαμε λοιπόν να πούμε ότι το κτήριο κινείται ομοιόμορφα, και μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας την κατάσταση μόνο του πρώτου ορόφου καθώς εμμέσως περιγράφει την κατάσταση και των υπόλοιπων ορόφων. Για την επαλήθευση των παραπάνω αξιολογήσαμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κτηρίου σε σεισμική διέγερση.

# 3

## Προσαρμοστικός Παρατηρητής Μη-ελαχίστης μορφής

### 3.1 Ελαχιστη και Μη-ελάχιστη Υλοποίηση Συστήματος

Έστω ότι η συναρτηση μεταφοράς ενός αγνώστου συστήματος εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = G_p(s) = \frac{\beta_1 s^{n-1} + \beta_2 s^{n-2} + \dots + \beta_n}{s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \alpha_2 s^{n-2} + \dots + \alpha_n} \quad (3.1)$$

Όπου τα διανύσματα  $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$  και  $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]$  αποτελούν τα διανύσματα των άγνωστων παραμέτρων, τετοια ώστε  $2n$  άγνωστες παράμετροι να συσχετίζονται με το προς μελέτη σύστημα. Βασική προϋπόθεση αυτής της υλοποίησης είναι η προσβασιμότητα των σημάτων της εισόδου και εξόδου. Τα πολυώνυμα του αριθμητή και του παρανομαστή υποθέτουμε πως είναι μεταξύ του πρώτα πολυώνυμα. Οποιαδήποτε αναπαράσταση του συστήματος στο χώρο κατάστασης τάξεως  $n$  του οποίου η συνάρτηση μεταφοράς ισοδυναμεί με εκείνη της σχέσης (3.1) αποτελεί ελάχιστη υλοποίηση του προς μελέτη συστήματος. Μολονότι οι καταστάσεις του συστήματος μπορούν να προσδιοριστούν αυθαίρετα, όταν γίνεται αναφορά στη εκτίμηση καταστάσεων ενός συστήματος τότε η καταστάσεις του συστήματος είναι εκφρασμένες σύμφωνα με την ελάχιστη

υλοποίηση. Παρακάτω ακολουθεί μια τυπική ελάχιστη υλοποίηση που εμπεριέχει τις ίδιες ακριβώς παραμέτρους με εκείνες της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} -\alpha_1 & I_{n-1} \\ -\alpha_2 & \vdots \\ \vdots & 0 \\ -\alpha_n & \vdots \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & \vdots & 0 \end{bmatrix} x(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Το σύστημα της σχέση 3.2 είναι ανευ προϋποθέσεων παρατηρήσιμο, και ελέγξιμο δεδομένου ότι το αποτελεί ελάχιστη υλοποίηση του συστήματος  $G_p(s)$ .

Ας θεωρήσουμε ένα πολυώνυμο

$$\prod_{i=1}^n (s + \lambda_i)$$

για το οποίο ισχύουν τα κάτωθι:

1. Είναι σχετικώς πρώτο με το πολυώνυμο του παρανομαστή και αριθμητή της συνάστησης μεταφοράς  $G_p(s)$
2.  $\lambda_i \neq \lambda_j, i \neq j, i, j = 2, 3, \dots, n$ .
3.  $\lambda_i > 0, i = 2, 3, \dots, n$

Διαιρώντας τα πολυώνυμα του αριθμητή και του παρανομαστή με το παραπάνω πολυώνυμο και αναλύοντας τα σε μερικά κλάσματα, παράγουμε τη σχέση:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = G_p(s) = \frac{b_1 + \frac{b_2}{s+\lambda_2} + \dots + \frac{b_n}{s+\lambda_n}}{s - a_1 + \frac{a_2}{s+\lambda_2} + \dots + \frac{a_n}{s+\lambda_n}} \quad (3.3)$$

Από την οποία έχουμε στη συνέχεια:

$$y(s) = \frac{1}{s} \left\{ b_1 u(s) + a_1 y(s) + \sum_{i=2}^n (b_i u(s) + a_i y(s)) \frac{1}{s + \lambda_i} \right\} \quad (3.4)$$

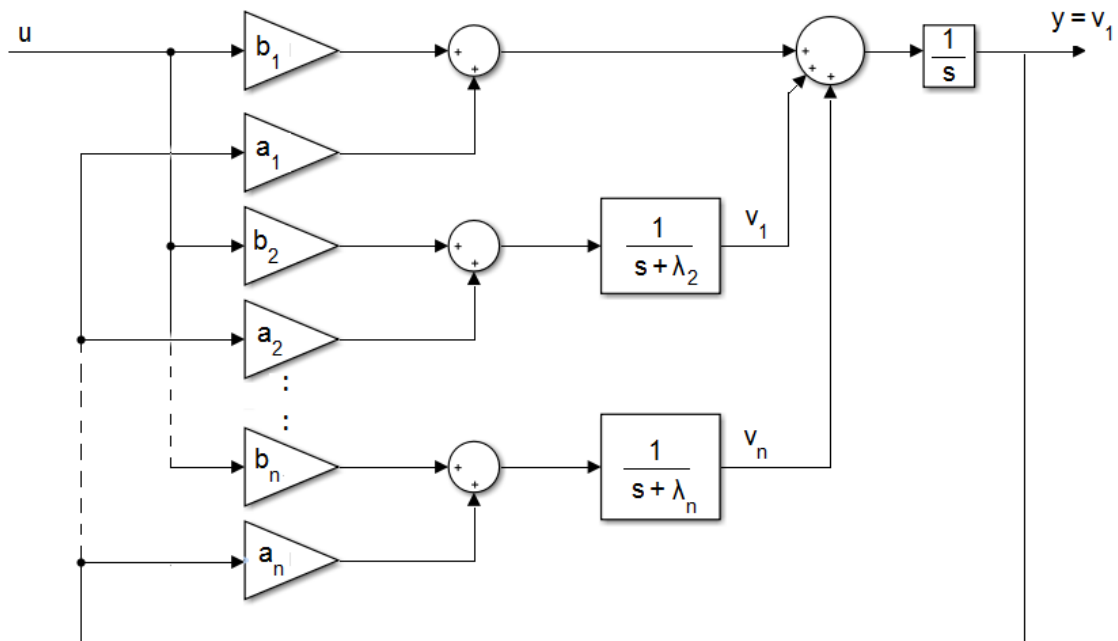
Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται το δομικό διάγραμμα του συστήματος που βασίζεται στην σχέση (3.4). Λαμβάνοντας υπόψη ότι το διάγραμμα βαθμίδων περιέχει  $n$  ανεξάρτητους ολοκληρωτές, αυτό συνεπάγεται ότι είναι διάγραμμα ελαχίστης υλοποίησης. Ορίζοντας τις μεταβλητές κατάστασης όπως στο σχήμα, παίρνουμε μια άλλη αναπαράσταση ελάχιστης υλοποίησης στο χώρο κατάστασης για το προς μελέτη σύστημα

$$\dot{v}(t) = \begin{bmatrix} \vdots & h^T \\ \alpha & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & -\Lambda \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} v(t) + bu(t) \quad (3.5)$$

$$y(t) = c^T v(t)$$

για την οποία ισχύουν:

$$\begin{aligned} a &= [a_1, a_2, \dots, a_n]^T \\ b &= [b_1, b_2, \dots, b_n]^T \\ h &= [1, 1, \dots, 1]^T \\ \Lambda &= \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] \\ c &= [1, 0, \dots, 0]^T \end{aligned} \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.1: Δομικό Διάγραμμα Συστήματος Ελάχιστης Υλοποίησης

Εφόσον ο ορισμός του διανύσματος κατάστασης είναι αυθαίρετος, στο εξής μπορούμε να ορίσουμε το διάνυσμα κατάστασης ως  $v$ , υποδεικνύοντας ότι η αναπαράσταση του συστήματος στο χώρο κατάστασης μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση (3.5).

Έχει αποδειχθεί πως οποιοδήποτε LTI σύστημα μπορεί να μετασχηματιστεί σε δομή της σχέσης (3.5). Ο μετασχηματισμός μπορεί να οριστεί θεωρώντας ότι το σύστημα βρίσκεται εξ αρχής στην OCF δομή [15]. Έχοντας ορίσει τον πίνακα  $\Lambda$  του οποίου οι τιμές  $\lambda_i$  συντελούν ένα χαρακτηριστικό πολυώνυμο Hurwitz, στη συνέχεια ορίζεται το διάνυσμα  $c(\Lambda)$  που προκύπτει από τη σχέση:

$$\det(sI - \Lambda) = c(\Lambda)^T \begin{bmatrix} s^{n-1} \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

καθώς και τα  $n - 1$  διανύσματα  $c(\Lambda/\lambda_i)$  που με τη σειρά τους προκύπτουν από τη σχέση:

$$\frac{\det(sI - \Lambda)}{s - \lambda_i} = c(\Lambda/\lambda_i)^T \begin{bmatrix} s^{n-2} \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$



Ο πίνακας ομοιότητας που μετασχηματίζει το σύστημα ορίζεται ως:

$$T = \left[ c(\Lambda) \left| \begin{array}{ccc} 0 & \cdots & 0 \\ \hline t_2 & \cdots & t_n \end{array} \right. \right] \quad (3.9)$$

για τον οποίο έχουμε ότι  $t_i = c(\Lambda/\lambda_i)$

Εφεξής θα περιγράψουμε τα διανύσματα  $[v_2, v_3, \dots, v_n]^T$ ,  $[a_2, a_3, \dots, a_n]^T$  και  $[b_2, b_3, \dots, b_n]^T$  ως  $\bar{v}$ ,  $\bar{a}$ , και  $\bar{b}$  αντίστοιχα. Από τη σχέση (3.5) μπορούμε να εξάγουμε τη διαφορική,  $\dot{\bar{v}}(t) = -\Lambda\bar{v} + \bar{b}u$ , λύση της οποίας είναι:

$$\bar{v} = e^{-\Lambda t}\bar{v}_0 + \int_0^t e^{-\Lambda(t-\tau)}\bar{a}y(\tau)d\tau + \int_0^t e^{-\Lambda(t-\tau)}\bar{b}u(\tau)d\tau \quad (3.10)$$

Και πάλι από συνδυασμό των σχέσεων (3.5) και (3.10) παίρνουμε τη διαφορική της εξόδου του συστήματος:

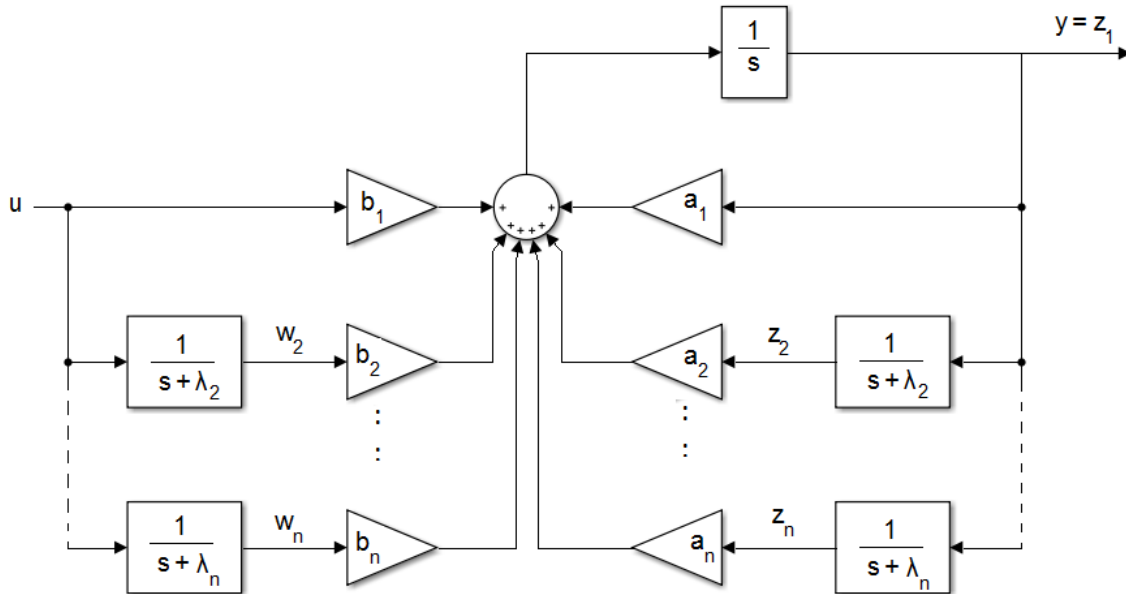
$$\dot{y}(t) = a_1y(t) + h^T e^{-\Lambda t}\bar{v}_0 + \int_0^t h^T e^{-\Lambda(t-\tau)}\bar{a}y(\tau)d\tau + \int_0^t h^T e^{-\Lambda(t-\tau)}\bar{b}u(\tau)d\tau + b_1u(t) \quad (3.11)$$

Φαίνεται καθαρά από την παραπάνω ανάλυση ότι το δομικό διάγραμμα του Σχήματος 3.1 μπορεί να σχεδιαστεί εναλλακτικά στο Σχήμα 3.2. Το νέο δομικό διάγραμμα εμφανίζει  $2n-1$  ολοκληρωτές συνολικά, και αποτελεί την μη-ελάχιστη υλοποίηση. Ορίζουμε τις μεταβλητές κατάστασης όπως παρουσιάζονται στο σχημα, και συμβολίζουμε τα διανύσματα  $[w_2, w_3, \dots, w_n]^T$  και  $[z_2, z_3, \dots, z_n]^T$  ως  $\bar{w}$  και  $\bar{z}$ , αντίστοιχα, για τις οποίες θεωρούμε μηδενικές αρχικές συνθήκες. Προκύπτουν επομένως οι σχέσεις:

$$\begin{aligned} \bar{w}(t) &= \int_0^t e^{-\Lambda(t-\tau)}u(\tau)d\tau \\ \bar{z}(t) &= \int_0^t e^{-\Lambda(t-\tau)}y(\tau)d\tau \end{aligned}$$

μέσω των οποίων διαμορφώνεται και η διαφορική της εξόδου για την μη-ελάχιστη υλοποίηση.

$$\dot{y}(t) = a_1 y(t) + \int_0^t h^T e^{-\Lambda(t-\tau)} \bar{a} y(\tau) d\tau + \int_0^t h^T e^{-\Lambda(t-\tau)} \bar{b} u(\tau) d\tau + b_1 u(t) \quad (3.12)$$



Σχήμα 3.2: Δομικό Διάγραμμα Συστήματος Μη-Ελάχιστης Υλοποίησης

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις 3.11 και 3.12, παρατηρούμε ότι η μοναδική διαφορά τους είναι ο όρος  $h^T e^{-\Lambda t} \bar{v}_0$ . Για να έχουμε κοινή λύση και από τις δύο εξισώσεις το μόνο που μένει είναι να τοποθετήσουμε αυτό τον όρο στο δεξί μέρος της εξίσωσης 3.11. Με αυτό το τρόπο το Σχήμα 3.2 είναι ισοδύναμο με το Σχήμα 3.1, με την προσθήκη μεταβατικών όρων.

Η μη-ελάχιστη αναπαράσταση στο χώρο κατάστασης που εξάγεται από το Σχήμα 3.3 είναι:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\bar{z}} \\ \dot{\bar{w}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & \bar{a}^T & \bar{b}^T \\ h & -\Lambda & 0 \\ 0 & 0 & -\Lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \bar{z} \\ \bar{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ h \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} h^T e^{-\Lambda t} \bar{v}_0$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \bar{z} \\ \bar{w} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$y(0) = y(0)$$

$$\bar{z}(0) = 0$$

$$\bar{w}(0) = 0$$

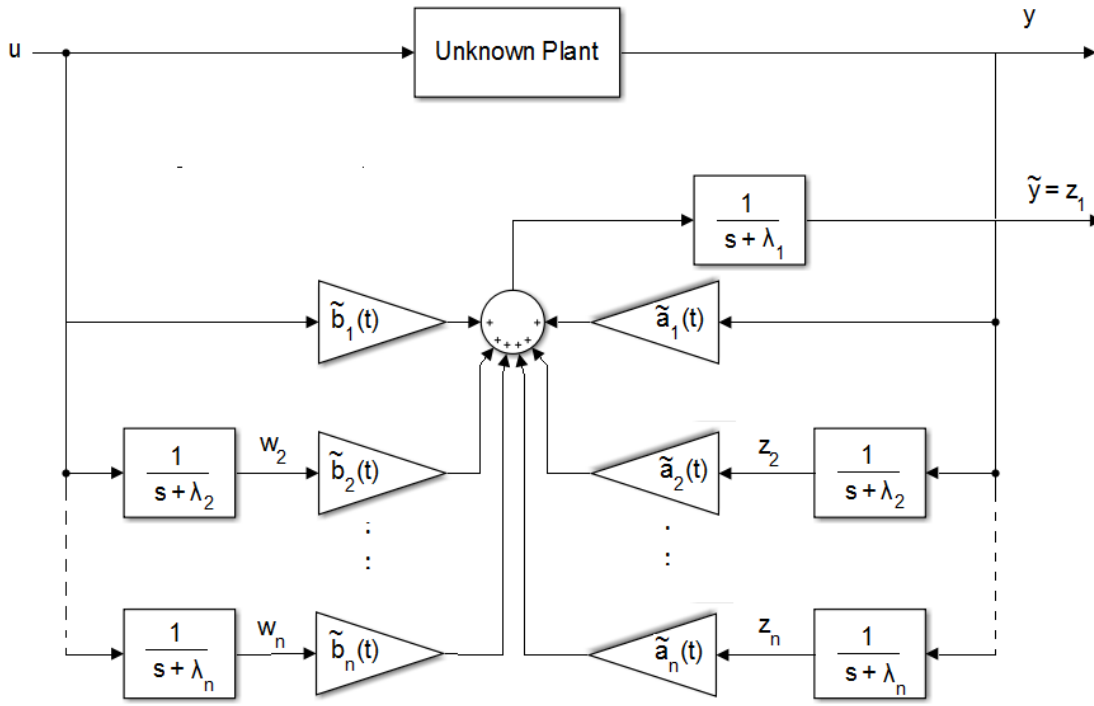
Αξίζει να σημειωθεί πως όλες οι μεταβλητές κατάστασης της μη ελάχιστης υλοποίησης του συστήματος είναι πλήρως προσβάσιμες. Η εξίσωση 3.12 μπορεί να γραφεί εναλλακτικά:

$$\dot{y} = a_1 y + \bar{a}^T \bar{z} + b_1 u + \bar{b}^T \bar{w} + h^T e^{-\Lambda t} \bar{v}_0 \quad (3.14)$$

όπου έχει προστεθεί και πάλι ο όρος  $h^T e^{-\Lambda t} \bar{v}_0$ .

## 3.2 Προσαρμοστικός Παρατηρητής/Εκτιμητής

Η δομή ενός μοντέλου το οποίο στο εσωτερικό του βρίσκονται προσαρμοζόμενοι (adjustable) παράμετροι είναι σχεδόν ίδιο με το σύστημα μη-ελάχιστης υλοποίησης. Η είσοδος πρόσω τροφοδότησης και είσοδος ανάδρασης στο μοντέλο είναι η  $u(t)$ , η είσοδος του συστήματος, και η  $y(t)$ , η έξοδος του συστήματος, αντίστοιχα. Το δομικό διάγραμμα του συστήματος μαζί με το μοντέλο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3,



Σχήμα 3.3: Μοντέλο Μη-Ελάχιστης Υλοποίησης Προσαρμοζόμενων Παραμέτρων

όπου  $\lambda_1$  είναι ένας αυθαίρετος θετικός αριθμός. Τα υπόλοιπα  $\lambda$  πρέπει να είναι ίδια με εκείνα που εφαρμόζονται στο σύστημα μη-ελάχιστης υλοποίησης και ως εκ τούτου είναι αυθαίρετα με μεγάλο περιθώριο. Όλες οι μεταβλητές κατάστασης συστήματος και του μοντέλου γίνονται ίσες εκτός των  $y$  και  $\tilde{y}$ , ορίζοντας μηδενικές αρχικές συνθήκες για τις καταστάσεις  $z_i(0)$  και  $w_i(0)$ ,  $i = 2, 3, \dots, n$ . Η μόνη διαφορά στο διάνυσμα κατάστασης είναι εκείνη μεταξύ  $y$  και  $\tilde{y}$ . Αρχική τιμή του  $\tilde{y}$  συμβολίζεται ως  $\tilde{y}_0$ . Από το Σχήμα 3.3 εξάγουμε την διαφορική της εξόδου

$$\dot{\tilde{y}} = -\lambda_1 \tilde{y} + (\tilde{a}_1(t) + \lambda_1)y + \tilde{a}^T(t)\bar{z} + \tilde{b}_1 u + \tilde{b}^T(t)\bar{w} \quad (3.15)$$

Ορίζοντας το σφάλμα ως  $e_1(t) = \tilde{y}(t) - y(t)$ , τότε από τις εξισώσεις 3.14 και 3.15 έχουμε τη διαφορική του σφάλματος:

$$\dot{e}_1 = -\lambda_1 e_1 + [\tilde{a}(t) - a]^T z + [\tilde{b}(t) - b]^T w - h^T e^{-\Lambda t} \bar{v}_0 \quad (3.16)$$

όπου  $z = [y, \bar{z}^T]^T$  και  $w = [u, \bar{w}^T]^T$ . Για λόγους διευκόλυνσης και ευταξίας, παρουσιάζουμε σε

αυτό το σημείο την αναπαράσταση του μοντέλου στο χώρο κατάστασης με τη δομή της εξίσωσης 3.13, καθώς θα χρησιμοποιηθεί σε επόμενη ενότητα του κεφαλαίου.

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{y}} \\ \dot{\tilde{z}} \\ \dot{\tilde{w}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_1 + \lambda_1 & \tilde{a}^T(t) & \tilde{b}^T(t) \\ h & -\Lambda & 0 \\ 0 & 0 & -\Lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \tilde{z} \\ \tilde{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{b}_1 & -\lambda_1 \\ 0 & 0 \\ h & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \tilde{y} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

### 3.2.1 Νόμοι Προσαρμογής

Τα συνολικά σφάλματα μεταξύ του συστήματος και του μοντέλου συνίσταται από το διανυσματικό σφάλμα καταστάσεων  $e = [\tilde{y}, \tilde{z}^T, \tilde{w}^T]^T - [y, \tilde{z}^T, \tilde{w}^T]^T$  και το διανύσματα των παραμετρικών σφαλμάτων,  $\tilde{a}(t) - a$  και  $\tilde{b}(t) - b$ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το διάνυσμα του σφάλματος είναι  $e = [e_1, 0, 0]^T$ . Καθώς η υπόψηφια συνάρτηση Lyapunov ενδείκνυται να είναι θετικά ορισμένη αναφορικά με αυτά τα τρία διανύσματα, η κατάλληλη υποψήφια συνάρτηση Lyapunov είναι η εξής.

$$V = \frac{1}{2}e_1^2(t) + (\tilde{a}(t) - a)^T \Gamma_1^{-1}(\tilde{a}(t) - a) + (\tilde{b}(t) - b)^T \Gamma_2^{-1}(\tilde{b}(t) - b) \quad (3.18)$$

όπου οι πίνακες  $\Gamma_1$  και  $\Gamma_2$  είναι οποιοδήποτε θετικά ορισμένοι πίνακες. Η παράγωγος της  $V$  μαζί με την τροχιά των λύσεων για  $\{e(t), a(t) - a, b(t) - b\}$  υπολογίζεται ως:

$$\dot{V} = -\lambda_1 e_1^2(t) + (\tilde{a}(t) - a)^T [\Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{a}}(t) + e_1(t)z] + (\tilde{b}(t) - b)^T [\Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{b}}(t) + e_1(t)w] - h^T e^{-\Lambda t} \tilde{v}_0 e_1(t) \quad (3.19)$$

Υποθέτωντας πως ο νόμος προσαρμογής προσδιορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{a}}(t) &= -\Gamma_1 e_1(t)z \\ \dot{\tilde{b}}(t) &= -\Gamma_2 e_1(t)w \end{aligned} \quad (3.20)$$

Τότε η εξίσωση 3.19 μειώνεται σε:

$$\dot{V} = -\lambda_1 e_1^2(t) - h^T e^{-\Lambda t} \bar{v}_0 e_1(t) \quad (3.21)$$

συνεπώς

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq h^T e^{-\Lambda t} \bar{v}_0 e_1(t) \\ &\leq |h^T e^{-\Lambda t} \bar{v}_0| |e_1(t)| \\ &\leq |h^T e^{-\Lambda t} \bar{v}_0| \sqrt{2V} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Έστω  $V = W^2$ ,  $W > 0$ , τότε η ανισότητα 3.22 γίνεται

$$\dot{W} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} |h^T e^{-\Lambda t} \bar{v}_0| \quad (3.23)$$

Δεδομένου ότι

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h^T e^{-\Lambda t} \bar{v}_0 = 0,$$

$\dot{W}$  επομένως και το  $\dot{V}$  προσεγγίζει το μηδέν για το  $t$  τείνωντος στο άπειρο, το οποίο με τη σειρά του συνεπάγεται πως το  $e_1 t$  τείνει στο μηδέν. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι από τη σχέση 3.17 πως

$$[\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{a}(t) - a]^T z + [\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{b}(t) - b]^T w = 0 \quad (3.24)$$

Επομένως, αν τα  $2n$  στοιχεία  $[z(t)^T, w^T]^T$  είναι γραμμικά ανεξάρτητα, τότε συμπεραίνουμε ότι

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{a}(t) &= a \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{b}(t) &= b \end{aligned} \quad (3.25)$$

επιτυγχάνοντας έτσι την αναγνώριση των παραμέτρων. Αν οι επιλογή των πινάκων για  $\Gamma_1$  και

$\Gamma_2$  είναι οι διαγώνιοι πίνακες  $diag[\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]$  και  $diag[\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n]$  αντίστοιχα, τότε ο νόμος προσαρμογής της σχέσης 3.20 μπορεί να απλοποιηθεί σε

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{a}}_1(t) &= -\gamma_1 e_1(t)y \\ \dot{\tilde{a}}_i(t) &= -\gamma_i e_1(t)z_i, \quad i = 2, 3, \dots, n \\ \dot{\tilde{b}}_1(t) &= -\delta_1 e_1(t)u \\ \dot{\tilde{b}}_i(t) &= -\delta_i e_1(t)w_i, \quad i = 2, 3, \dots, n\end{aligned}\tag{3.26}$$

Η επαλήθευση της σύγκλισης συνήθως βασίζεται στο θεώρημα του LaSalle, επομένως η είσοδος του συστήματος/παρατηρητή  $u(t)$  θα πρέπει να θεωρηθεί περιοδική συνάρτηση. Αυτό το στοιχείο είναι σημαντικό όταν ο προσαρμοστικός παρατηρητής πρόκειται να εφαρμοστεί σε έμμεσο βρόχο προσαρμοστικού ελέγχου (indirect adaptive control loop), όπου η είσοδος του συστήματος δεν μπορεί να είναι περιοδικής συνάρτησης.

### 3.2.2 Εκτιμητής Κατάστασης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το διάνυσμα το οποίο θέλουμε να εκτιμηθεί είναι το  $v(t)$ , το οποίο αποτελεί το διάνυσμα κατάστασης της ελαχίστης αναπαράστασης 3.5. Μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα παρατηρητή Luenberger χρησιμοποιώντας τα διανύσματα  $\tilde{a}$  και  $\tilde{b}$  αντί των  $a$  και  $b$ . Ο παρατηρητής μπορεί να κατασκευαστεί ως εξής:

$$\dot{v}(t) = \begin{bmatrix} \tilde{a}(t) - g(t) & \vdots & h^T \\ & & \vdots \\ & & -\Lambda \end{bmatrix} v(t) - g(t)y + \tilde{b}(t)u\tag{3.27}$$

$$y(t) = c^T v(t)$$

Το διάνυσμα  $g(t)$  προσδιορίζεται από τη σχέση  $g(t) = \tilde{a}(t) - k$  όπου το διάνυσμα  $k$  είναι τέτοιο ώστε ο πίνακας

$$\begin{bmatrix} \vdots & h^T \\ k & \vdots \\ \vdots & -\Lambda \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

γίνεται ένας επιθυμητός πίνακας ασυμπτωτικά ευσταθής. Πιο συγκεκριμένα αν θεωρήσουμε  $p(s) = s^n + d_1 s^{n-1} + \dots + d_n$  το επιθυμητό ευσταθές χαρακτηριστικό πολυώνυμο, έτσι ώστε το  $k$  να προσδιορίζεται από την σχέση:

$$s - k_1 - \frac{k_2}{s + \lambda_2} - \dots - \frac{k_n}{s + \lambda_n} = \frac{p(s)}{(s + \lambda_2)(s + \lambda_3) \dots (s + \lambda_n)} \quad (3.29)$$

Με άλλα λόγια προκύπτει:

$$\begin{aligned} k_1 &= -d_1 + \sum_{i=2}^n \lambda_i \\ k_i &= -[p(s)(s + \lambda_i) / \prod_{i=2}^n s + \lambda_i]_{s=-\lambda_i} \quad i = 2, 3, \dots, n \end{aligned} \quad (3.30)$$

Δεδομένου ότι διάνυσμα  $k$  μπορεί να προσδιοριστεί από πριν με το διάνυσμα  $p(s)$  και τα  $\lambda_i$ ,  $i = 2, 3, \dots, n$  το  $g(t)$  μπορεί να καθοριστεί απόλυτα από το  $\tilde{a}(t)$ . Ο παρατηρητής μπορεί να ξαναγραφτεί λοιπόν:

$$\dot{v}(t) = \begin{bmatrix} \vdots & h^T \\ k & \vdots \\ \vdots & -\Lambda \end{bmatrix} v(t) - (\tilde{a}(t) - k)y + \tilde{b}(t)u \quad (3.31)$$



### 3.2.3 Παράδειγμα

Εφαρμόζοντας το παραπάνω σχεδιασμό προσαρμοστικού παρατηρητή, υλοποιήθηκε υπολογιστική προσωμοίωση αναγνώρισης των αγνώστων παραμέτρων και εκτίμηση των μη προσβάσιμων μεταβλητών κατάστασης του παρακάτω τρίτης-τάξεως γραμμικό σύστημα:

$$G_p(s) = \frac{2s^2 + 15s + 25}{s^3 + 7s^2 + 14s + 8}$$

Το πολυώνυμο  $(s+\lambda_2)(s+\lambda_3)$  που χρησιμοποιήθηκε είναι  $(s+3)(s+6)$ , ως εκ τούτου οι παράμετροι που πρέπει να αναγνωριστούν είναι:

$$a = \begin{bmatrix} 2 \\ -2/3 \\ -40/3 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 2 \\ -2/3 \\ -40/3 \end{bmatrix}$$

Η ελάχιστη αναπάρσταση του συστήματος δίνεται ως:

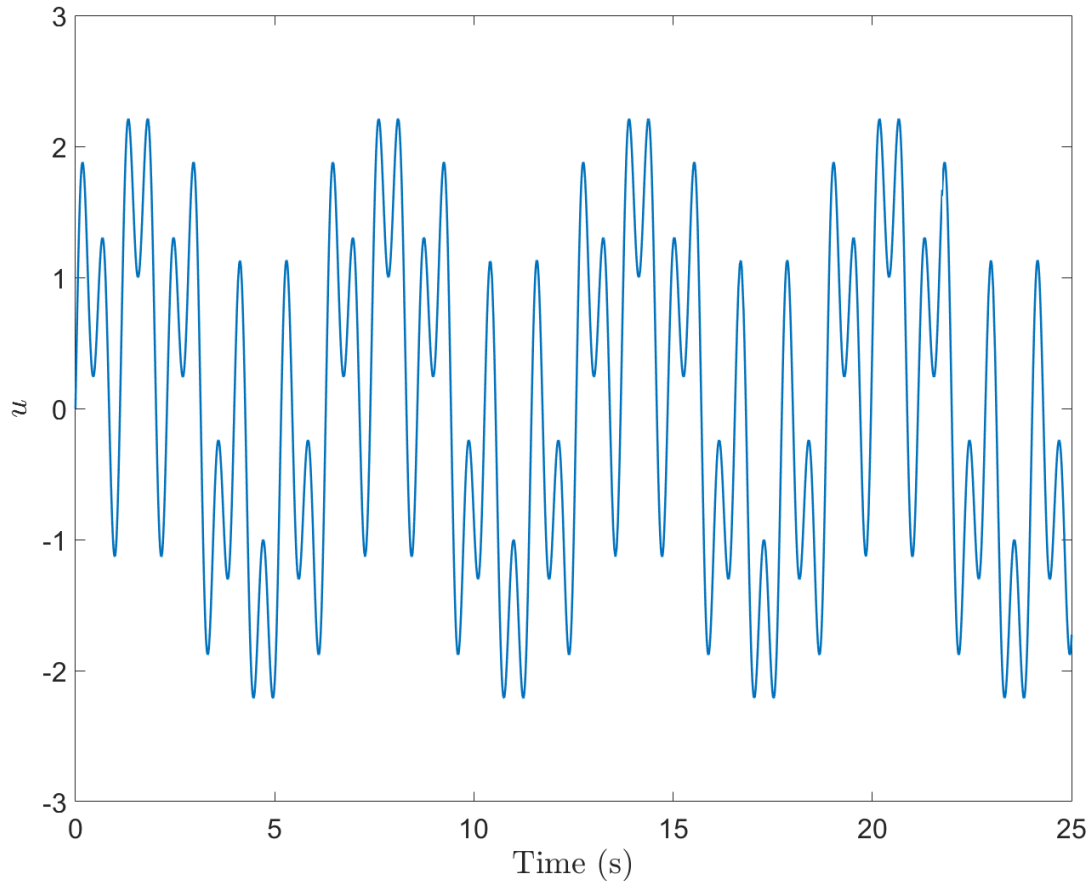
$$\begin{aligned} \dot{x}_p(t) &= \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ -2/3 & -\lambda_2 & 0 \\ -40/3 & 0 & -\lambda_3 \end{bmatrix} x_p(t) + \begin{bmatrix} 2 \\ -2/3 \\ -7/3 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_p(t) \end{aligned} \quad (3.32)$$

του οποίου οι αρχικές συνθήκες είναι:

$$x_p(0) = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} x_p(t)$$

ενώ το σήμα εισόδου του συστήματος που φαίνεται στο Σχήμα 3.4 έχει την εξής μαθηματική έκφραση:

$$u(t) = \sin t + \sin 5t + \sin 11t$$



Σχήμα 3.4: Παράδειγμα: Είσοδος Συστήματος

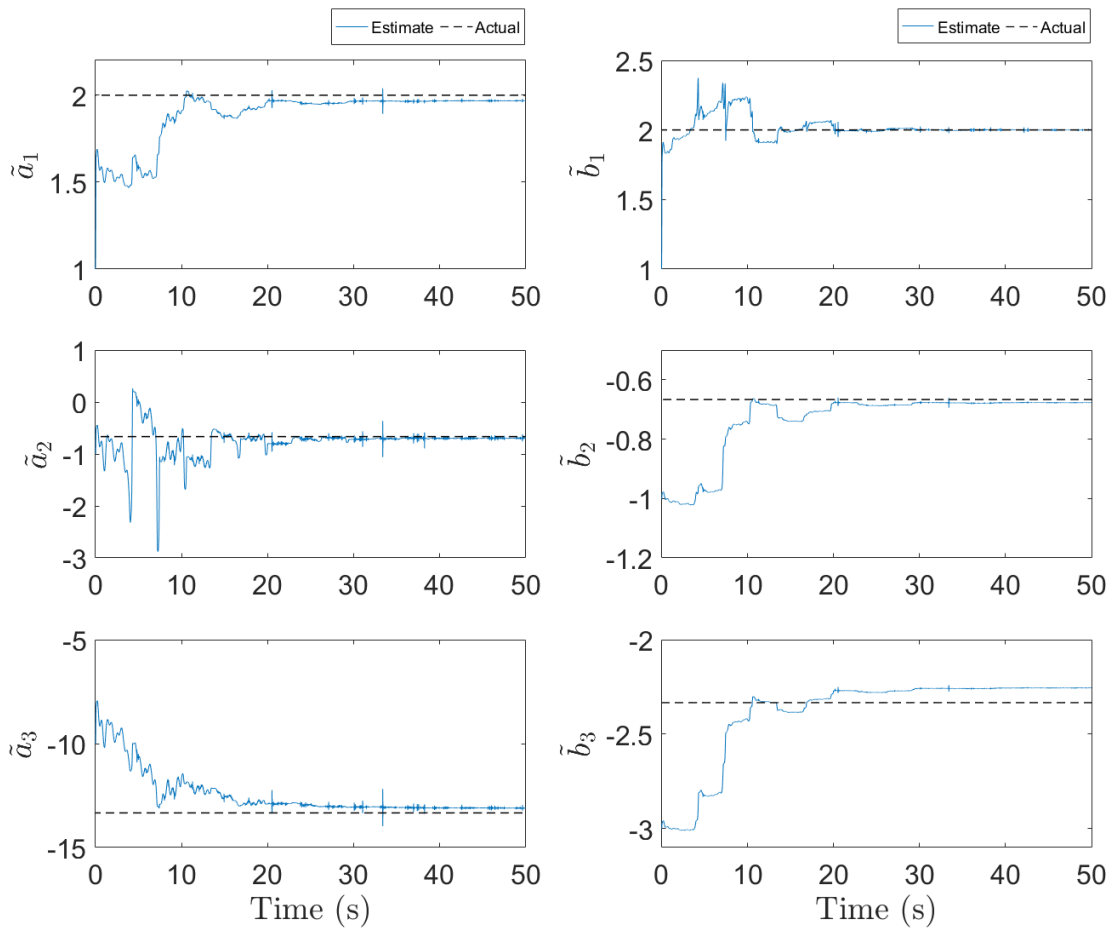
Παρόλο που η επιλογή των τιμών για τα  $\lambda_i$ ,  $\gamma_i$  και  $\delta_i$  είναι αυθαίρετη, φαίνεται πως για την επίτευξη γενικής ευστάθειας του συστήματος υπάρχει συγκεκριμένη τιμή για την κάθε παράμετρο. Από τη προσομοίωση αποδεικνύεται πως οι παρακάτω τιμές των παραμέτρων (Πίνακας 3.1) αποδίδουν ικανοποιητική σύγκλιση.

$\lambda_1 = 100$	$\lambda_2 = 3$	$\lambda_3 = 6$
$\gamma_1 = 500$	$\gamma_2 = 200,000$	$\gamma_3 = 800,000$
$\delta_1 = 10,000$	$\delta_2 = 10,000$	$\delta_3 = 20,000$

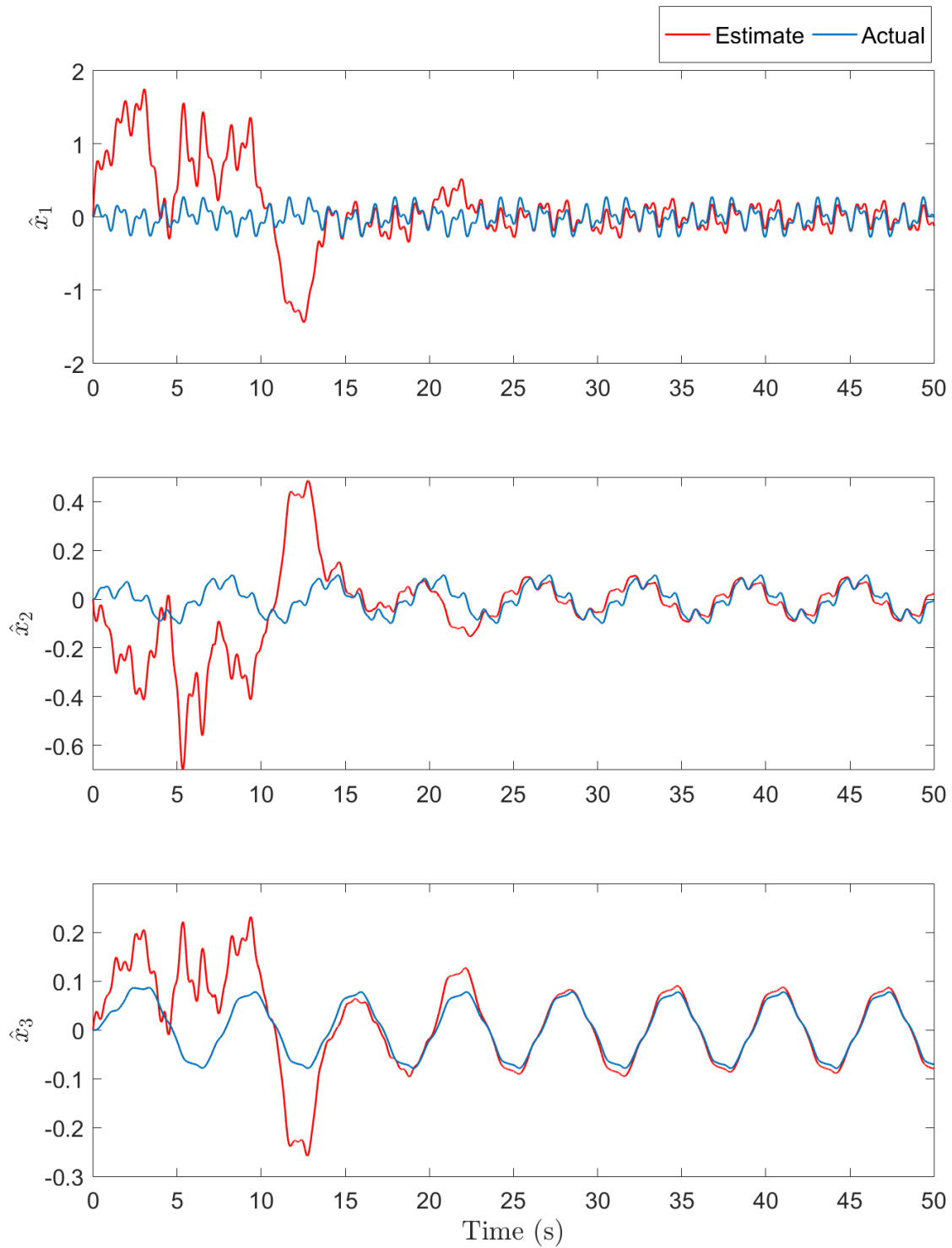
Πίνακας 3.1: Παράμετροι Προσαρμοστικού Παρατηρητή Παραδείγματος

Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται η σύγκλιση των εκτιμώμενων παραμέτρων  $\tilde{a}_i$  και  $\tilde{\beta}_i$  με τις πραγματικές τους τιμές. Για την αξιολόγηση της εκτίμησης των καταστάσεων του συστήματος στο Σχήμα 3.6 συγκρίνεται η μεταβατική συμπεριφορά των καταστάσεων  $\tilde{x}$ , μέσω του προσαρμοστικού πα-

ρατηρητή, με τις πραγματικές καταστάσεις  $x$  του συστήματος.



Σχήμα 3.5: Παράδειγμα: Αναγνώριση Παραμέτρων Συστήματος Ελαχίστης Υλοποίησης



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα: Εκτίμηση Καταστάσεων Αρχικού Συστήματος

Κάποια συμπεράσματα τα οποία εξάγαμε μετά από αρκετές προσομοιώσεις αφορούν τις τιμές των  $\lambda_i$ . Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή που επιλέγεται τόσο πιο γρήγορη είναι η σύγκλιση των παραμέτρων,

παρόλα αυτά το τίμημα αυτής της ταχύτητας είναι η μεγάλη μεταβατική συμπεριφορά κατά την εκτίμηση των καταστάσεων, το overshoot το οποίο παρατηρείται κατά την εκτίμηση και των τριών καταστάσεων (βλ. σχήμα 3.6).

### 3.3 Σύνοψη Κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύθηκε λεπτομερώς η δομή ενός προσαρμοστικού παρατηρητή εναλλακτικής κανονικής μορφής. Το πιο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό αυτού του προσαρμοστικού παρατηρητή στη μη-ελάχιστη υλοποίηση είναι η εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης, χρησιμοποιώντας τα μόνα μετρήσιμα σήματα (εισόδου και εξόδου), σε αντίθεση με τους παρατηρητές ελαχίστης δομής. Είδαμε πως η αναγνώριση του συστήματος και η εκτίμηση των καταστάσεων είναι δύο παράλληλες λειτουργίες. Τέλος υλοποιήθηκε προσομοίωση για σύστημα 3ης τάξης για να επαληθευτεί η ικανότητα ενός προσαρμοστικού παρατηρητή αυτής της δομής να εκτιμήσει τις καταστάσεις τους συστήματος και ταυτόχρονη αναγνώριση των παραμέτρων του.

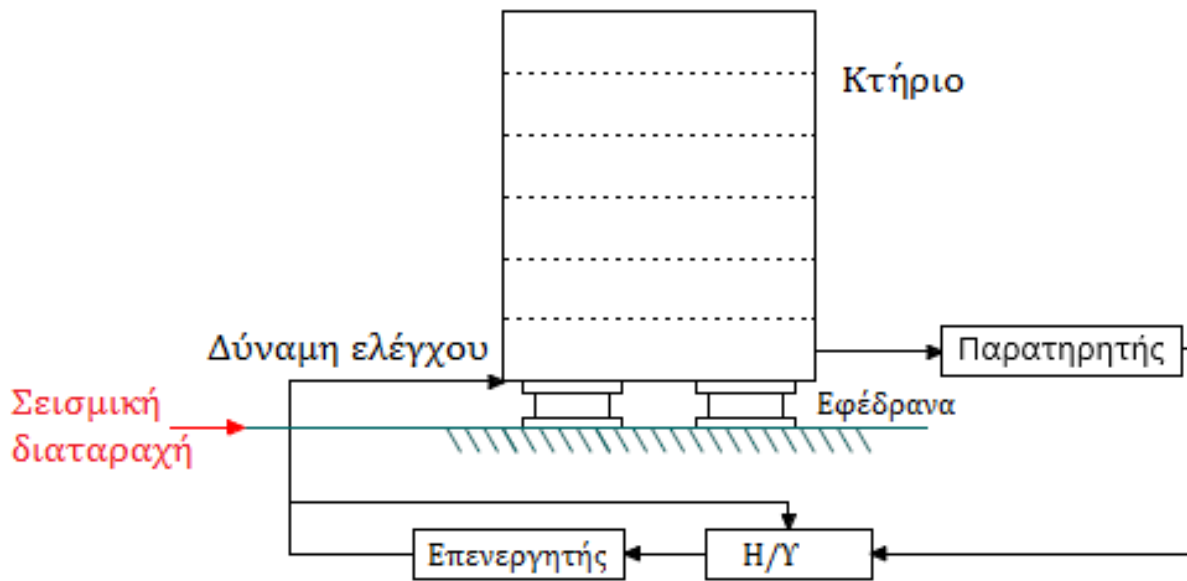
# 4

## Αντισεισμικός Έλεγχος Κτηρίου Με Προσαρμοστικό Παρατηρητή

### 4.1 Εισαγωγή

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο κάναμε αναφορά πως η χρήση ελαστικών εφεδράνων ως σεισμική μόνωση βάσης, μπορεί να φιλτράρει σε επιθυμητό βαθμό την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής διαταραχής. Για την καλύτερη απόσβεση των ταλαντώσεων και την σημαντική μείωση του πλάτους ταλάντωσης του κτηρίου, κρίνουμε σκόπιμο να εφαρμόσουμε στο σύστημα κάποια μέθοδο αυτομάτου ελέγχου. Ο έλεγχος αυτός, λαμβάνει υπ' όψιν την κατάσταση του συστήματος, και αντίστοιχα ασκεί μία δύναμη μέσω του επενεργητή στην βάση του κτηρίου τέτοια ώστε να μειώνεται κατά το δυνατόν η ταλάντωση του κτηρίου σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Για την ταχεία απόσβεση των δονήσεων του σεισμού, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πληθώρα μεθόδων αυτομάτου ελέγχου, ενώ ο τομέας αυτός αποτελεί ευρύ και ανοιχτό πεδίο έρευνας. Για την εφαρμογή της πλειοψηφίας των μεθόδων ελέγχου απαιτείται η γνώση του διανύσματος κατάστασης του συστήματος προς έλεγχο, ή τουλάχιστον μία εκτίμηση του διανύσματος αυτού. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου κτηρίου σε σεισμική διέγερση, με χρήση μη-γραμμικού ελεγκτή και προσαρμοστικού παρατηρητή, σχαρίφημα του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Για λόγους διευκόλυνσης θα σχεδιάσουμε το συνολικό σύστημα ελέγχου

παρουσιάζοντας το επιμέρους στοιχεία του σταδιακά.



Σχήμα 4.1: Σκαρίφημα Ελέγχου Κτηρίου Προσομοίωσης

## 4.2 Εύρωστος Μη Γραμμικός Έλεγχος

Θεωρούμε το κτήριο του κεφαλαίου 2, με εξισώσεις περιγραφής της μορφής 2.3. Θα σχεδιάσουμε ένα μη γραμμικό ελεγκτή ανατροφοδότησης κατάστασης. Η επιθυμητή συμπεριφορά του ελεγκτή είναι συνήθως η πρακτική ευστάθεια του σημείου ισορροπίας όπως περιγράφεται και στο παράρτημα της εργασίας. Το πιο σημαντικό σημείο του προβλήματος είναι το γεγονός ότι από αβέβαιες πληροφορίες όπως είναι η αβεβαιότητα της διαταραχής, ο ελεγκτής μας εγγυάται την επιθυμητή απόδοση. Το μόνο, γνωστό δεδομένο που απαιτείται είναι το εύρος των διαταραχών, για την ισχυρότερη αναμενόμενη σεισμική διέγερση.

Σύμφωνα λοιπόν με το Παράρτημα, το  $v(t) \in V$ , είναι ένα γνωστό συμπαγές σύνολο. Οι μέγιστες τιμές της μετατόπισης και της ταχύτητας του εδάφους  $y_0^{\max}$ ,  $\dot{y}_0^{\max}$  είναι γνωστές για μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Ισχύει δηλαδή:

$$V = \{v \in R^2 \mid |v_1| \leq y_0^{\max}, |v_2| \leq \dot{y}_0^{\max}\} \quad (4.1)$$

Επαληθεύεται εύκολα, ότι η συνθήκη του Παραρτήματος (A.2) ικανοποιείται με την επιλογή  $F = [k_0, c_0]$ , ενώ το  $\bar{A} = A$  αποτελεί καλή επιλογή εφόσον ο  $A$  είναι ευσταθής. Ο ελεγκτής λοιπόν που παρέχει πρακτική ευστάθεια στο σύστημα δίνεται από την εξίσωση (A.5) του Παραρτήματος :

$$u(t) = \begin{cases} \frac{-B^T P x}{|B^T P x|} \rho, & \text{if } |B^T P x| \geq \epsilon \\ \frac{-B^T P x}{\epsilon} \rho, & \text{if } |B^T P x| < \epsilon \end{cases} \quad (4.2)$$

όπου ο πίνακας  $P$  αποτελεί λύση της εξίσωσης Lyapunov για δεδομένο  $Q > 0$

$$P\bar{A} + \bar{A}^T P + Q = 0 \quad (4.3)$$

και

$$\rho = \max_{v \in V} \|Fv\| = \sqrt{(k_0 y_0^{\max})^2 + (c_0 \dot{y}_0^{\max})^2} \quad (4.4)$$

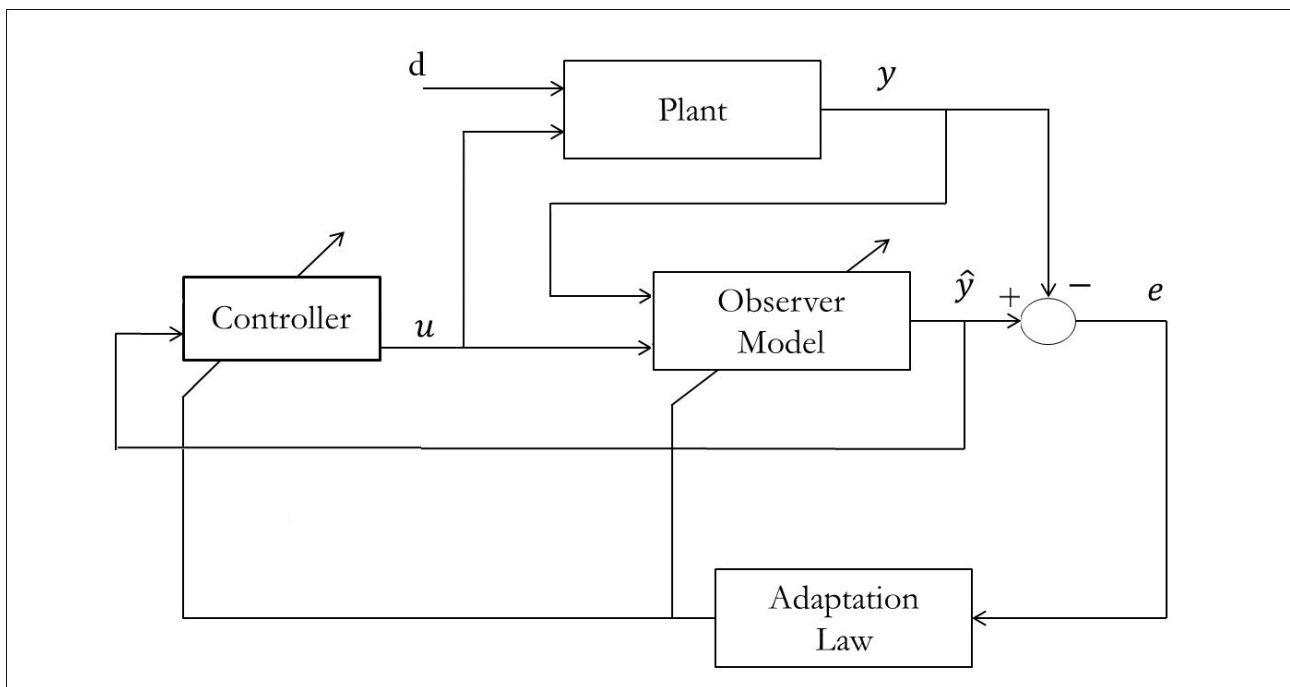
Αξίζει να σημειωθεί ότι ο βαθμωτός έλεγχος της Σχέσης (4.2) αποτελεί έλεγχο με κορεσμό, του οποίου η τιμή δεν μπορεί να ξεπερνά την τιμή του  $\rho$ , καθώς, αν δεν προκύπτει κορεσμός, αν δηλαδή  $|B^T P x| < \epsilon$ , τότε είναι ένας γραμμικός έλεγχος με ανάδραση. Επιπλέον για γνωστά όρια της διαταραχής  $y_0^{\max}$  και  $\dot{y}_0^{\max}$ , και ο μέγιστος δυνατός έλεγχος  $\rho$  μπορεί να περιοριστεί από κατάλληλο σχεδιασμό μόνωσης, το οποίο συνεπάγεται μείωση των συντελεστών  $k_0$  και  $c_0$ . Ο έλεγχος μπορεί να εφαρμοστεί, αν είναι γνωστοί οι πίνακες  $A$  και  $B$  του συστήματος. Η πληροφορία για τις καταστάσεις του κτηρίου πρέπει να είναι διαθέσιμη κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης.

### 4.3 Προσαρμοστικός Παρατηρητής

Σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, για να εφαρμόσουμε στο σύστημα έλεγχο ανατροφοδότησης κατάστασης, είναι απαραίτητη η γνώση του διανύσματος



κατάστασης  $x$  του κτηρίου. Το διάνυσμα κατάστασης όμως είναι μη μετρήσιμο και επί της ουσίας άγνωστο. Παρά το γεγονός αυτό όμως, όπως μελετήσαμε στο κεφάλαιο 3, μπορούμε να κατασκευάσουμε έναν παρατηρητή κατάστασης, ο οποίος θα μας κατασκευάζει μία - κατά το δυνατόν - καλή εκτίμηση  $\hat{x}$  για το διάνυσμα κατάστασης  $x$  του κτηρίου. Έτσι, για την εφαρμογή του ελέγχου, αντί του πραγματικού διανύσματος κατάστασης  $x$  του κτηρίου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την αντίστοιχη εκτίμηση  $\hat{x}$  για το διάνυσμα κατάστασης. Η χρήση ενός παρατηρητή κατάστασης του συστήματος, για την εφαρμογή ελέγχου στο σύστημά μας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Δομικό Διάγραμμα Συστήματος Προσαρμοστικού Ελέγχου μέσω Προσαρμοστικού Παρατηρητή

Να επισημάνουμε σε αυτό το σημείο πως η χρήση προσαρμοστικού παρατηρητή σε τέτοιο σχήμα ελέγχου είναι αναγκαίος καθώς ο ελεγκτής εξαρτάται από τις παραμέτρους του υπο έλεγχου συστήματος για τις οποίες δεν μπορούμε να έχουμε την ακριβή πληροφορία παρα μόνο κάποιες ονομαστικές τιμές. Επιπλέον να επαναλάβουμε πως το σύστημα που θέλουμε να ελέγχουμε θα πρέπει να μπορεί να μπει στην κανονική παρατηρήσιμη μορφή, καθώς επίσης η είσοδος και η έξοδος θα πρέπει να είναι μετρήσιμα μεγέθη. Ένας βασικός περιορισμός χρήσης τετοιου συστήματος ελέγχου είναι η πως το σύστημα θα πρέπει να είναι μιας εισόδου μιας εξόδου.

## 4.4 Προσομοίωση

Για την επιβεβαίωση της εφαρμοσιμότητας και της αποδοτικότητας του συνδυασμού των μεθόδων αυτομάτου ελέγχου και παρατήρησης της κατάστασης, που μελετήσαμε στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα πραγματοποιήσουμε μία προσομοίωση. Για την προσομοίωση έχουμε επιλέξει ένα κτήριο με συγκεντρωμένη τη μάζα των ορόφων σε μία μάζα, του οποίου η βάση είναι μονωμένη σεισμικά, και τα μηχανικά του χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Το σύστημα στο χώρο κατάστασης στην Ελάχιστη Υλοποίηση με εφαρμογή του μετασχηματισμού που παρουσιάσαμε στη παράγραφο 3.1 εκφράζεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax(t) + Bu(t) \\ y &= Cx(t) \end{aligned} \quad (4.5)$$

όπου,

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 1 \\ a_2 & -\lambda_2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ενώ για την μη-ελάχιστη υλοποίηση του συστήματος μέσω του οποίου εφαρμόζουμε τον παρατηρητή χρησιμοποιούμε τη Σχέση (3.17). Για τους σκοπούς της προσομοίωσης θεωρήσαμε ότι η μάζα του κτηρίου έχει μεταβληθεί ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι παρέμειναν ίδιες με τις ονομαστικές του τιμές. Η σεισμική διαταραχή που θα χρησιμοποιηθεί, είναι η ίδια με αυτή που χρησιμοποιήσαμε για την προσομοίωση στην παράγραφο, κάνοντας χρήση σεισμικών δεδομένων από τον σεισμό του El-Centro του 1940, (βλ. Σχήμα 2.2). Επίσης ο πίνακας εξόδου του συστήματος εγκατάστασης θεωρούμε ότι είναι τέτοιος που μπορούμε να μετρήσουμε την μετατόπιση της μάζας. Για τον ελεγκτή θεωρήσαμε τις μέγιστες τιμές της ταχύτητας και της μετατόπισης του εδάφους να είναι:  $y_0^{\max} = 0.52 \text{ m}$  και  $\dot{y}_0^{\max} = 0.65 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  οι οποίες καθορίζουν την μέγιστη τιμή του ελεγκτή σύμφωνα με τη Σχέση 4.2 και 4.4. Για τον υπολογισμό του πίνακα  $P$  της εξίσωσης 4.3 θεωρούμε έναν διαγώνιο πίνακα  $Q = \text{diag}[15, 15]$ , ενώ η τιμή του  $\epsilon$  είναι 0.0001. Όσον αφορά τις παραμέτρους σχεδίασης του παρατηρητή οι τιμές τους δίνονται στον Πίνακα 4.2. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι

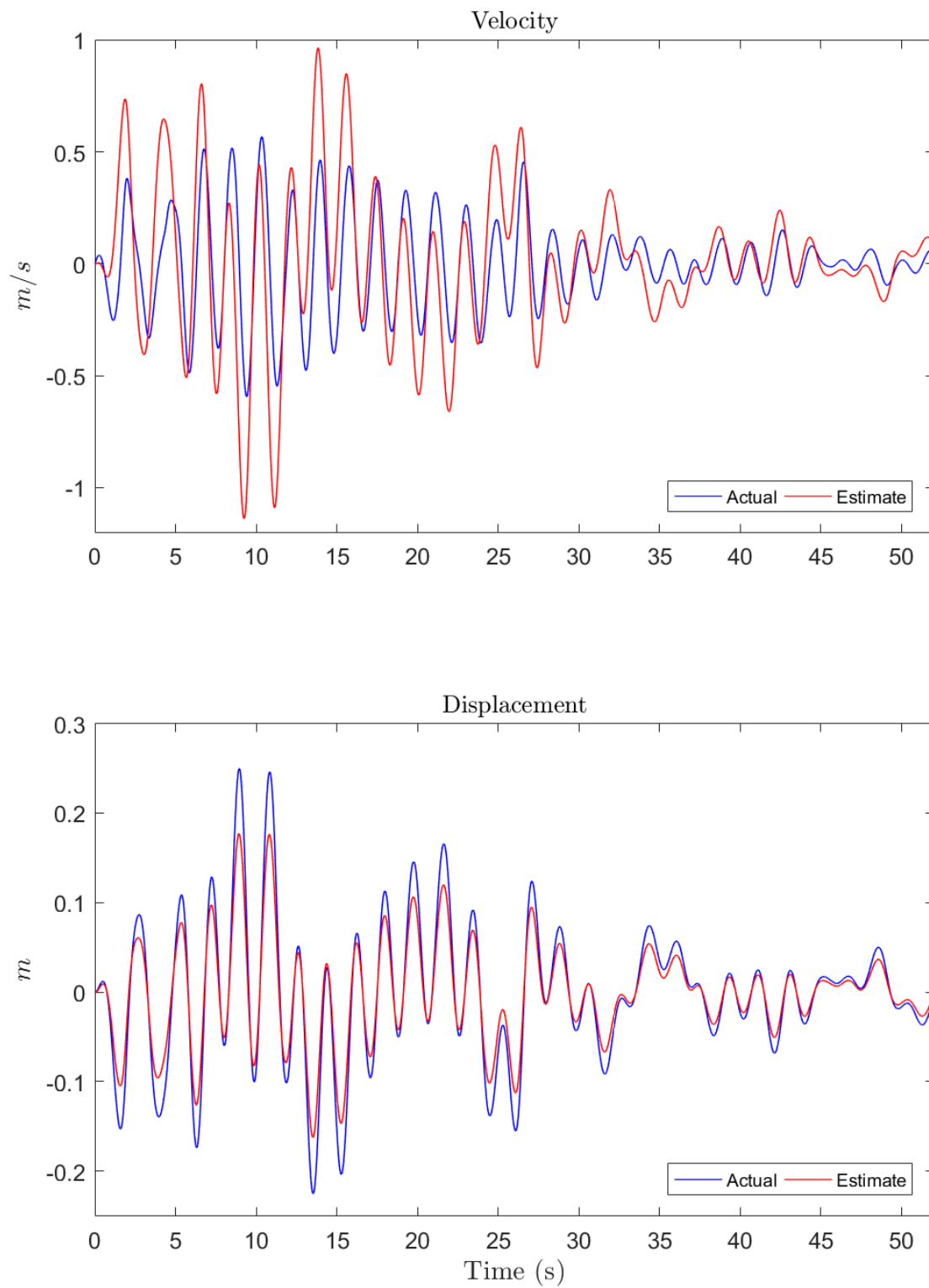
τιμές σχεδιασμού τόσο για τον ελεγκτή όσο και για τον παρανομαστή της διαγωνίου βρέθηκαν μετά από πολλές δοκιμές έτσι ώστε να επιτευχθεί μία υλοποιήσιμη μορφή ελέγχου με ικανοποιητική εκτίμηση καταστασης και συγκλίση των εκτιμώμενων παραμέτρων στις πραγματικές τιμές. Στο Σχήμα 4.3 δίνονται η ταχύτητα και η μετατόπιση του κτηρίου καθώς και η εκτίμησή τους. Όπως φαίνεται η εκτίμηση και για τις δύο καταστάσεις είναι ικανοποιητική.

	Mass (Kg)	Spring (KN/m)	Damping (KNs/m)
Real	$M = 42,000$	$k_0 = 1,200,000$	$c_0 = 2,400$
Nominal	$M = 36,285$	$k_0 = 1,200,000$	$c_0 = 2,400$

Πίνακας 4.1: Παράμετροι Απλοποιημένου Συστήματος Κτηρίου Προσομοίωσης

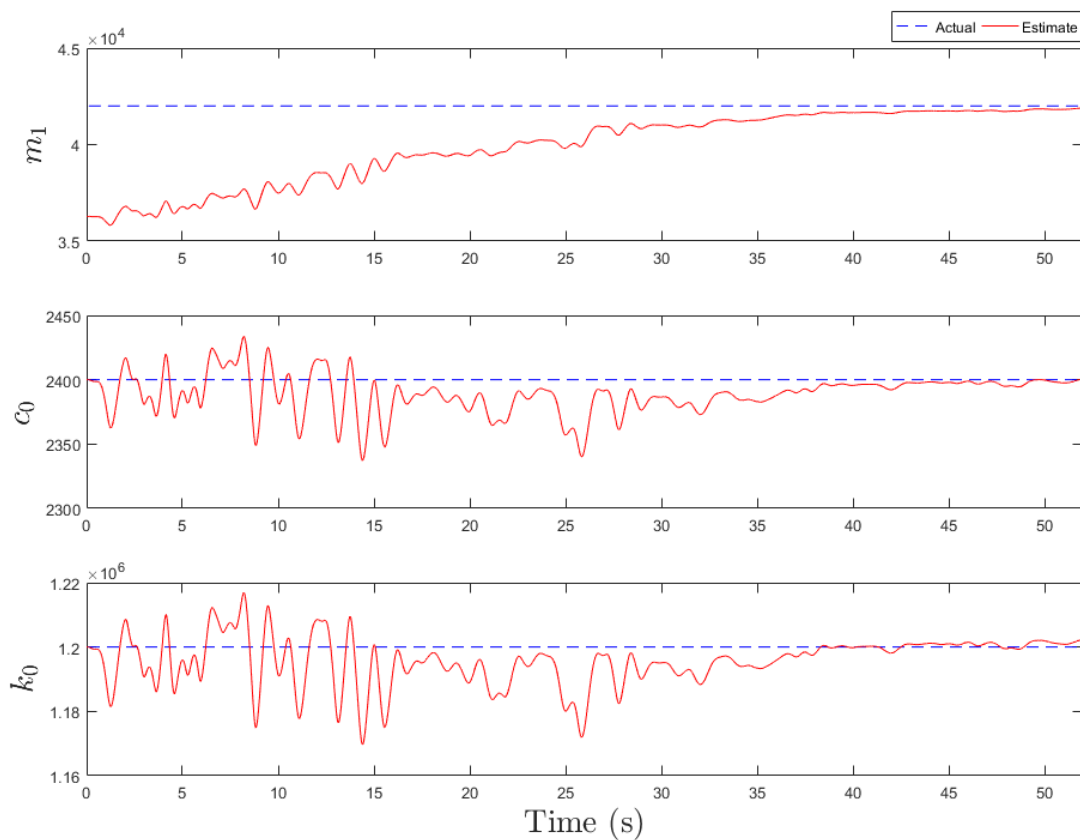
$\lambda_1 = 5$	$\lambda_2 = 50$
$\gamma_1 = 0.73$	$\gamma_2 = 15,000$
$\delta_1 = 0$	$\delta_2 = 28E-8$
$d_1 = -20$	$d_2 = -30$

Πίνακας 4.2: Παράμετροι Προσαρμοστικού Παρατηρητή Προσομοίωσης

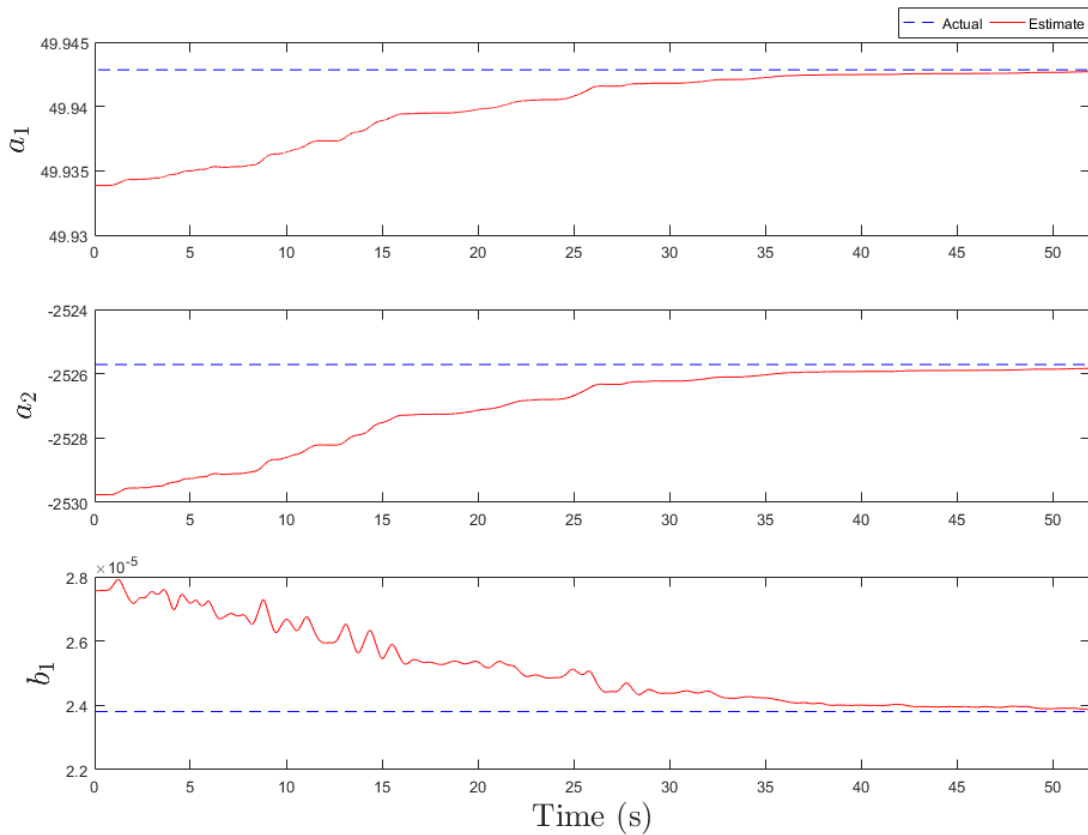


Σχήμα 4.3: Εκτίμηση Καταστάσεων Απλοποιημένου Συστήματος Κτηρίου  
[Πάνω: Εκτίμηση Ταχύτητας. Κάτω: Εκτίμηση Μετατόπισης]

Οι όποιες αποκλίσεις της εκτίμησης από την πραγματική τιμή της κατάστασης οφείλεται κυρίως στην αναγνώριση των παραμέτρων του συστήματος. Η αναγνώριση των παραμέτρων φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Όπως παρατηρούμε η εκτίμηση για όλες τις παραμέτρους συγκλίνει στην πραγματική τιμή. Παρόλο που οι τιμές για τα  $k_0$  και  $c_0$  θεωρήσαμε πως παραμένουν ίδιες με τις ονομαστικές βλέπουμε πως η εκτίμησή τους παρουσιάζει μια διακύμανση γύρω από την πραγματική τιμή η οποία μειώνεται με το χρόνο. Αυτή η απόκλιση οφείλεται στην εκτίμηση της μάζας  $m_1$  καθώς όπως μπορούμε να δούμε πως οι παράμετροι του συστήματος αποτελούν πηλίκα των παραμέτρων του κτηρίου. Η σύγκλιση των παραμέτρων  $m_1$ ,  $c_0$  και  $k_0$  της εγκατάστασης (βλ. Σχέση 2.5) προϋποθέτει την σύγκλιση των παραμέτρων του συστήματος στην ελάχιστη δομή, όπως προκύπτει από τη Σχέση (4.5). Η εκτίμηση των παραμέτρων της ελάχιστης δομής παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5. Να σημειώσουμε λοιπόν, σε αυτό το σημείο, πως καλύτερη επιλογή τιμών για τα  $\lambda$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  και  $d$  θα μειώνε περαιτέρω το σφάλμα εκτίμησης των καταστάσεων καθώς και θα μειωνόταν ο χρόνος σύγκλισης των παραμέτρων στις πραγματικές τιμές.

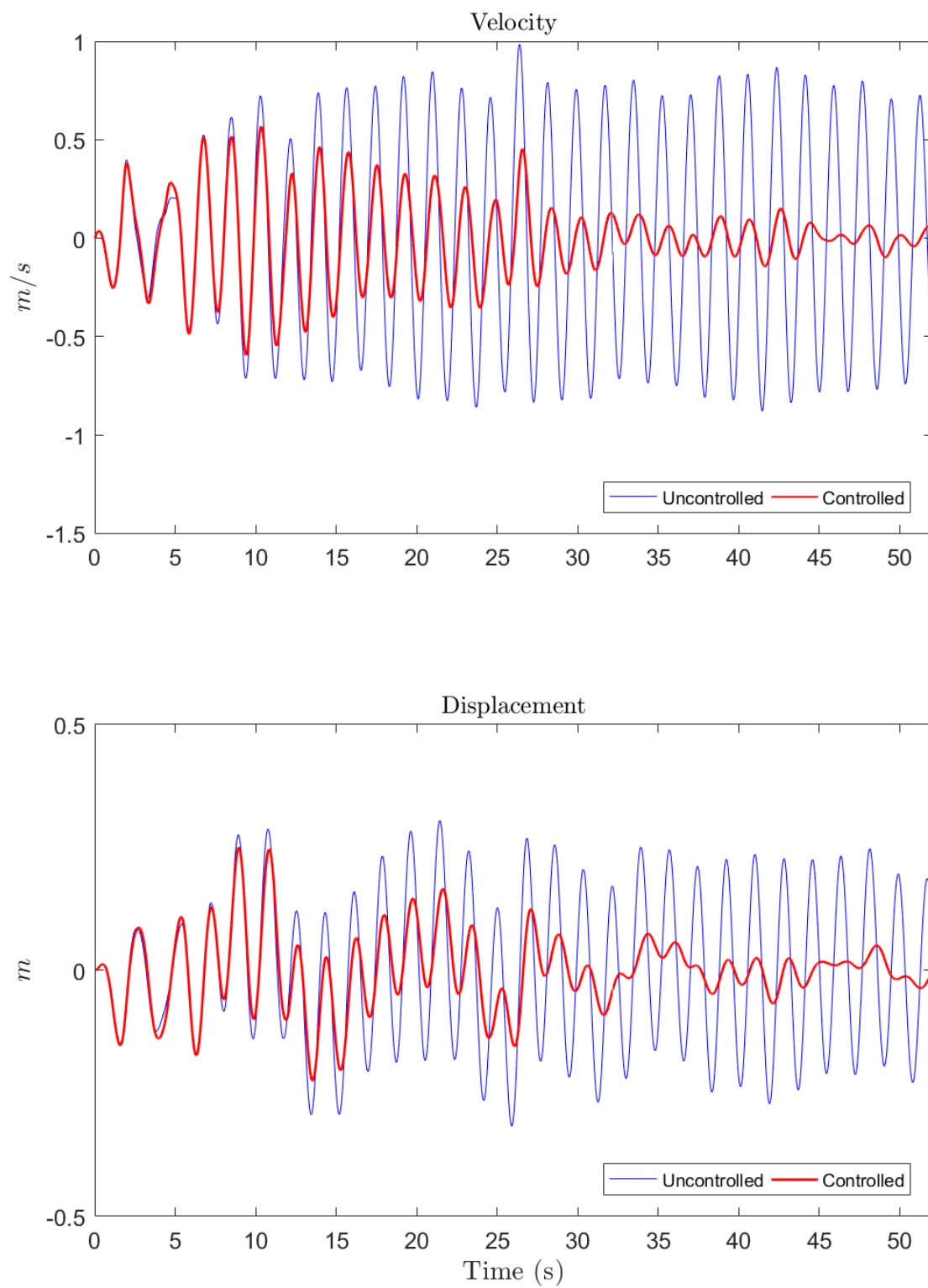


Σχήμα 4.4: Αναγνώριση Παραμέτρων Απλοποιημένου Συστήματος Κτηρίου

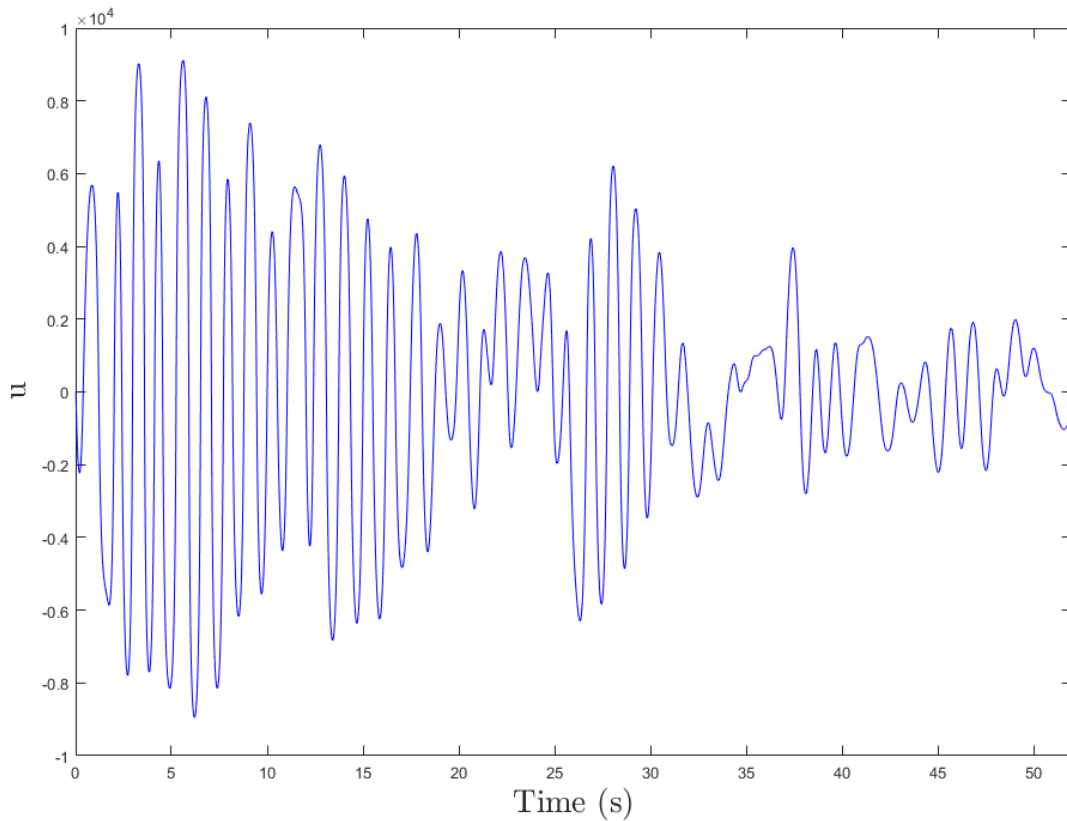


Σχήμα 4.5: Αναγνώριση Παραμέτρων Συστήματος Ελάχιστης Υλοποίησης

Πιο κάτω στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζονται η ταχύτητα και η μετατόπιση του κτηρίου με και χωρίς έλεγχο. Παρατηρείται ότι με την εφαρμογή του ελέγχου υπάρχει μια αξιοσημείωτη βελτίωση της απόκρισης του συστήματος. Αυτό αφορά τόσο το εύρος των τιμών στις ταχύτητες των ορόφων και τις μετατοπίσεις τους όσο και την συχνότητα των ταλαντώσεων. Επιπλέον παρουσιάζεται και η είσοδος ελέγχου που επενεργεί στο κτήριο στο Σχήμα 4.7. Όπως φαίνεται η δύναμη ελέγχου παρουσιάζει μια σχετική περιοδικότητα και αυτό ευνοεί τον παρατηρητή στην αναγνώριση των παραμέτρων και ως εκ τούτου στην εκτίμηση της κατάστασεων. Η βελτίωση αυτή θα ήταν ακόμα μεγαλύτερη αν επιλεγόταν μικρότερες τιμές του  $\epsilon$  ή μεγαλύτερες τιμές για τα στοιχεία της διαγωνίου του πίνακα  $Q$ . Σε αυτή την περίπτωση οι απαιτούμενες δυνάμεις ελέγχου θα ήταν μεγαλύτερες και θα εμφανιζόντουσαν προβλήματα στην υλοποίησή τους.



Σχήμα 4.6: Καταστάσεις Συστήματος Με και Χωρίς Έλεγχο  
[Πάνω: Έλεγχος Ταχύτητας. Κάτω: Έλεγχος Μετατόπισης]



Σχήμα 4.7: Είσοδου Ελέγχου

## 4.5 Μελλοντική Εργασία

Το σχήμα ελέγχου που προτάθηκε για την αντισεισμική προστασία του κτηρίου με χρήση προσαρμοστικού παρατηρητή, ενώ παρουσιάζει την επιθυμητή λειτουργία, θα μπορούσε να βελτιωθεί.

Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει σε:

1. Εισαγωγή αβεβαιότητας στους νόμους προσαρμογής του προσαρμοστικού παρατηρητή καθώς και στις μετρήσεις εξόδου για καλύτερη προσομοίωση πραγματικής εφαρμογής.
2. Καλύτερη επιλογή παραμέτρων σχεδίασης του προσαρμοστικού παρατηρητή για ταχύτερη σύγκλιση των παραμέτρων
3. Μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της κτηριακής εγκατάστασης στις δύο οριζόντιες διαστάσεις του χώρου και με στροφή.



# Παράρτημα

## Εύρωστος Ελεγκτής

Ας θεωρήσουμε το παρακάτω γενικευμένο δυναμικό σύστημα:

$$\begin{aligned}x(t) &= [A + \Delta A(r(t))]x(t) + [B + \Delta B(s(t))] u(t) + C\nu(t) \\x(t_0) &= x_0\end{aligned}\tag{A.1}$$

όπου  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$ ,  $\nu \in R^l$ ,  $r \in R^p$ ,  $s \in R^q$ , και

$A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^{n \times m}$ ,  $C \in R^{n \times l}$  είναι γνωστοί σταθεροί πίνακες και

$\Delta A(\cdot) : R^p \rightarrow R^{n \times n}$ ,  $\Delta B(\cdot) : R^q \rightarrow R^{n \times m}$  είναι γνωστές συνεχείς συναρτήσεις.

Οι αβεβαιότητες στον πίνακα του συστήματος, στον πίνακα εισόδου και στην είσοδο αντίστοιχα, μοντελοποιούνται με τις άγνωστες μετρήσιμες συναρτήσεις Lebesgue:

$$r(\cdot) : R \rightarrow \mathfrak{R}, \quad s(\cdot) : R \rightarrow \mathfrak{S}, \quad \nu(\cdot) : R \rightarrow \mathfrak{N}$$

όπου  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{S}$ ,  $\mathfrak{N}$  είναι γνωστά υποσύνολα των κατάλληλων χώρων.

Για το σύστημα (A1) υποθέτουμε ότι οι αβεβαιότητες ανήκουν στο χώρο που παράγουν οι στήλες του  $B$ , δηλαδή υποθέτουμε ότι υπάρχουν συνεχείς συναρτήσεις:

$D(\cdot) : R^p \rightarrow R^{n \times n}$ ,  $E(\cdot) : R^p \rightarrow R^n$  times  $n$  και ο σταθερός πίνακας  $F \in R^{m \times l}$ , έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες:

$$\begin{aligned} \Delta A(r) &= BD(r), \forall r \in \mathfrak{R} \\ \Delta B(s) &= BE(s), \forall s \in \mathfrak{S} \\ C &= BF \end{aligned} \tag{A.2}$$

με

$$\max_{s \in \mathfrak{S}} \|E(s)\| < 1 \tag{A.3}$$

Επιπλέον, υποθέτουμε ότι το ζεύγος πινάκων  $(A, B)$  είναι σταθεροποιήσιμο. Υπάρχει δηλαδή ένας σταθερός πίνακας  $K \in R^{m \times n}$  ώστε ο πίνακας  $\bar{A} = A + BK$  να είναι ευσταθής. Βέβαια, το ζεύγος  $(A, B)$  είναι σταθεροποιήσιμο εάν είναι ελέγξιμο.

Είναι επιθυμητό να βρεθεί έλεγχος  $u(t)$  που επιτυγχάνει τις παρακάτω δύο βασικές ιδιότητες:

**I1:** Ιδιότητα του Ομοιόμορφα Φραγμένου (Uniform Boundedness): Δοθέντος  $x_0 \in R^n$ , υπάρχει θετικός αριθμός  $d(x_0) < \infty$  τέτοιος ώστε για όλες τις λύσεις:  $x(\cdot) : [t_0, t_1] \rightarrow R^n$ ,  $x(t_0) = x_0$ ,

$$\|x(t)\| < d(x_0), \forall t \in [t_0, t_1]$$

**I2:** Ιδιότητα του Ομοιόμορφα Τελικά Φραγμένου (Uniform Ultimate Boundedness): Δοθέντος  $x_0 \in R^n$  και  $S = \{x \in R^n \mid \|x\| \leq \delta > 0\}$ , υπάρχει μη αρνητικός  $T(x_0, S) < \infty$  τέτοιος ώστε για όλες τις λύσεις  $x(\cdot) : [t_0, \infty) \rightarrow R^n$ ,  $x(t_0) = x_0$ ,

$$x(t) \in S, \forall t \geq t_0 + T(x_0, S)$$

Ομοιόμορφα φραγμένη λύση σημαίνει ότι κάθε λύση με αρχική συνθήκη  $x_0$  παραμένει εντός μιας φραγμένης περιοχής, η ακτίνα της οποίας μπορεί να εξαρτάται από το  $x_0$ . Ομοιόμορφα τελικά φραγμένη λύση σημαίνει ότι κάθε λύση με αρχική συνθήκη  $x_0$  θα εισέλθει και θα παραμείνει εντός μιας περιοχής με προκαθορισμένη ακτίνα,  $\delta$ , μετά από μία πεπερασμένη χρονική στιγμή, η οποία

μπορεί να εξαρτάται από το  $x_0$  και το  $\delta$ . Οι δύο αυτές ιδιότητες αποτελούν τα κύρια χαρακτηριστικά της πρακτικής ευστάθειας.

Ας θεωρήσουμε τώρα τον έλεγχο

$$u = Kx + p_e x \quad (\text{A.4})$$

έτσι ώστε για δεδομένο  $\epsilon > 0$  να ισχύει:

$$p_e(x) = \begin{cases} \frac{-B^T P x}{\|B^T P x\|} \rho, & \text{if } |B^T P x| \geq \epsilon \\ \frac{-B^T P x}{\epsilon} \rho, & \text{if } |B^T P x| < \epsilon \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

όπου ο πίνακας  $P$  αποτελεί λύση της εξίσωσης Lyapunov για δεδομένο  $Q > 0$

$$P\bar{A} + \bar{A}^T P + Q = 0 \quad (\text{A.6})$$

και

$$\rho(x) = \left[ 1 - \max_{s \in \mathfrak{S}} \|E(s)\| \right]^{-1} \left[ \max_{r \in \mathfrak{R}} \|D(r)x\| + \max_{s \in \mathfrak{S}} \|E(s)Kx\| + \max_{\nu \in \mathfrak{N}} \|F\nu\| \right] \quad (\text{A.7})$$

Με τις παραπάνω υποθέσεις, ο έλεγχος (A4) εξασφαλίζει πρακτική ευστάθεια για το αβέβαιο σύστημα (A1) και ειδικότερα τις ιδιότητες **I1** και **I2** για κάθε δυνατό συνδυασμό αβεβαιοτήτων  $r(\cdot)$ ,  $s(\cdot)$ ,  $\nu(\cdot)$ .

Πρέπει εδώ να σημειώσουμε ότι το  $\delta = \delta(\epsilon)$  και μπορεί να γίνει αυθαίρετα μικρό με κατάλληλη εκλογή του  $\epsilon$ . Μειώνοντας δηλαδή το  $\epsilon$ , μειώνεται η ακτίνα της φραγμένης περιοχής στην οποία θα εισέλθει τελικά το διάνυσμα κατάστασης  $x$ .

# Βιβλιογραφία

- [1] Astrom, K., Wittenmark, B. *Adaptive Control*, Dover Publications, Inc.: Mineola, NY, USA, 2008.
- [2] European Standard EN 1998-1:2004: Eurocode 8: *Design of structure for earthquake resistance*.
- [3] Chang, C. M., Spencer, B.F., Active base isolation of buildings subjected to seismic excitations. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 39, 1493–1512 (2010)
- [4] Cheng, F. Y., Jiang, H., Lou, K., *Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control*, (CRC Press, Boca Raton, 2008)
- [5] Datta, T. K., A state-of-the-art review on active control of structures. *ISET J. Earthq. Technol.* 40, 1–17 (2003)
- [6] Forrai, A., Hashimoto, S., Funato, H., Kamiyama, K., Structural control technology: system identification and control of flexible structures. *Comput. Control Eng. J.* 402, 1–40 (2001)
- [7] Gawronski, W. *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*, Springer, New York, NY, USA, 2004.
- [8] Iuliis, M. D., Faella, C., Effectiveness analysis of a semiactive base isolation strategy using information from an early-warning network. *Eng. Struct.* 52, 518–535 (2013)
- [9] Kalman, R., Bertram, J. Control System Analysis and Design via the Second Method of Lyapunov I: Continuous-Time Systems. *J. Basic Eng.* 1960, 82, 371–393

- [10] Kelly, R., A tuning procedure for stable PID control of robot manipulators. *Robotica* 13, 141–148 (1995)
- [11] Kim, S.B., Yun, C.B., Sliding mode fuzzy control: theory and verification on a benchmark structure. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 29, 1587–1608 (2000)
- [12] Kudva, P., Narendra, K. Synthesis of an Adaptive Observer Using Lyapunov's Direct Method. *Int. J. Control* 1973, 18, 1201–1210.
- [13] Kwok, K. C. S., Samali, B., Performance of tuned mass dampers under wind loads. *Eng. Struct.* 17, 655–667 (1995)
- [14] Landau, Y. *Adaptive Control: The Model Reference Approach*, Marcel Dekker Inc.: New York, NY, USA, 1979.
- [15] Luders, G., Narendra, K. An Adaptive Observer and Identifier for Linear Systems. *IEEE Trans. Autom. Control* 1973, 18, 496–499.
- [16] Luders, G., Narendra, K. A New Canonical Form for an Adaptive Observer. *IEEE Trans. Autom. Control* 1974, 19, 117–119.
- [17] Μάχιος, Κ. Σύγχρονες Τεχνικές Αυτομάτου Ελέγχου για την Αντισεισμική Προστασία Κτιρίων, Οκτώβριος 2001.
- [18] Mita, A., Feng, M. Q., *Response Control Strategy for Tall Buildings Using Interaction Between Mega and Sub-Structures*, Proc. Int. Workshop on Civil Infrastructural Systems, Taipei, Taiwan, Republic of China, pp. 329 – 341, 1994.
- [19] Osburn, P., Whitaker, H., Kezer, A. *New Developments in the Design of Model Reference Adaptive Control Systems (Paper No. 61-39)*, Institute of the Aerospace Sciences: Easton, PA, USA, 1961.
- [20] Parks, P. Lyapunov Redesign of Model Reference Adaptive Control Systems. *IEEE Trans. Autom. Control* 1966, 11, 362–367.

- [21] Saragih, R., Designing Active vibration control with minimum order for flexible structures. IEEE Int. Conf. Control Autom. 450–453 (2010)
- [22] Soong, T. T., Active Structural Control: Theory and Practice (Longman, New York, 1990)
- [23] Soong, T. T., Spencer, B. F. (2000). Active, semi-active and hybrid control of structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(3), 387-402.
- [24] Spencer, B.F., Sain, M.K., Controlling buildings: a new frontier in feedback. IEEE Control Syst. Mag. Emerg. Technol. 17, 19-35 (1997)
- [25] Symans, M.D., Constantinou, M.C., Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. Eng. Struct. 21, 469–487 (1999)
- [26] Tang, Y., Active control of SDF systems using artificial neural networks. Comput. Struct. 60, 695–703 (1996)