

Ανάπτυξη Συστήματος Ελέγχου για Ενεργητική Ανάρτηση Οχήματος

Βασίλης Προβατάς

Επιβλέπων καθηγητής
Δημήτρης Ιψάκης

Χανιά, Σεπτέμβριος 2021

Περίληψη

Μια από τις εφαρμογές της τεχνολογίας του αυτόματου ελέγχου είναι και ο έλεγχος στα σύγχρονα αυτοκίνητα. Ο έλεγχος μπορεί να γίνει σε πολλά τμήματα του αυτοκινήτου όπως και στις αναρτήσεις.

Σε αυτήν την διπλωματική, σκοπός αποτελεί η ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου στο σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης ενός οχήματος. Αρχικά, έγινε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στα διάφορα συστήματα αναρτήσεων που υπάρχουν. Έπειτα πραγματοποιήθηκε η μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος της ανάρτησης στο πεδίο του χρόνου και έπειτα η μετατροπή του στο πεδίο της συχνότητας (μέσω Laplace), καθώς και στο πεδίο του χώρου κατάστασης. Όπως αποδείχθηκε, τα τρία αυτά μοντέλα είναι ισοδύναμα και με ελάχιστες διαφορές (γραμμικοποιημένο vs μη-γραμμικό μοντέλο) μεταξύ τους. Έτσι διευκολύνουμε την εξαγωγή κάποιων χαρακτηριστικών για το σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης και την προσομοίωση της στο περιβάλλον της Matlab. Εν συνεχεία, μέσω του γεωμετρικού τόπου των ριζών έγινε η ανάπτυξη των πρώτων ελεγκτών (P, PI, PID), όπου εφαρμοστήκαν στο κλειστό βρόχο του συστήματος της ανάρτησης μέσω της μεθόδου Ziegler-Nichols, και ακλούθησε η σύνθεση ελεγκτή με την μέθοδο Morari-Zafiriou.

Οι παραπάνω ελεγκτές συγκρίθηκαν στα πλαίσια διαφορετικών σεναρίων. Τα πρώτα δυο σενάρια αφορούν μια βηματική διαταραχή (απλή και σύνθετη), το τρίτο σενάριο αφορά μια διαταραχή συνημιτονοειδούς μορφής και το τελευταίο σενάριο αφορά βηματικές διαταραχές σε συνδυασμό με διαφορετικά σήματα αναφοράς. Από κάθε σενάριο έγινε εξαγωγή γραφικών παραστάσεων για κάθε ελεγκτή όπου περιγράφουν την απόκριση της ανάρτησης στο κλειστό βρόχο. Μέσα από τις γραφικές παραστάσεις γίνεται εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών για τον κάθε ελεγκτή με σκοπό το να αντιληφτούμε ποιος είναι ο καλύτερος ελεγκτής για τα δεδομένα της συγκεκριμένης διπλωματικής και για τα συγκεκριμένα σενάρια. Όπως προέκυψε από τα σενάρια, οι δυο καλύτεροι ελεγκτές ήταν η σύνθεση του ελεγκτή (Morari-Zafiriou) και ο PID ελεγκτής (Ziegler-Nichols) διότι παρουσίασαν γρηγορότερες ταχύτητες σύγκλισης προς την τιμή αναφοράς (set point) από ότι οι ελεγκτές P και PI (Ziegler-Nichols), όπου οι συγκλίσεις ήταν σχετικά πιο αργές. Όμως, στον PID ελεγκτή η ανάρτηση παρουσίασε μεγάλα πλάτη ταλάντωσης, το οποίο δεν ήταν επιθυμητό, ενώ η ανάρτηση με την σύνθεση ελεγκτή παρουσίασε αρκετά μικρότερα πλάτη ταλάντωσης. Οπότε οδηγηθήκαμε στο συμπέρασμα ότι για τα συγκεκριμένα σενάρια η σύνθεση του ελεγκτή είναι ο πιο αξιόπιστος ελεγκτής.

Abstract

One of the applications of the automatic control is the car control. This could apply in many parts of the car like the suspension.

The aim of this thesis is the development of a control system in the energetic suspension of a car. Initially, a literature review was occurred. Afterwards, the mathematical model of the suspension was developed and then followed by the transformation into the Laplace domain, as well as into the space state domain. As it turned out, those three models are equivalent with some minor differences (linear vs non-linear model between them). Through this way we facilitated the extraction of some characteristics for the energetic suspension system and for simulation in the Matlab environment. Consequently, through the root locus, a set of controllers were developed and applied in the closed loop of the suspension system through the method of Ziegler-Nichols and then through the method of Morari-Zafiriou.

The above controllers were compared through the frame of different scenarios. The first two are about a step change (simple and complex), the third scenario is about a disturbance and the last scenario is about step change in conjunction with different set point. In each scenario, a set of tables and graphs revealed the response of the suspension in a closed loop. Through these graphs the extraction of important information for each controller occurs with the aim of realizing the best controller for this thesis and the specific scenario. The best two controllers were the synthesis through Morari-Zafiriou and the PID of Ziegler-Nichols because they presented faster convergences towards the set point than the P and PI (Ziegler-Nichols) controllers (slow response). However, into the PID controller the suspension presented wide oscillation, which wasn't desirable, whereas the suspension with the controller composite resented less oscillation.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στο σύστημα ανάρτησης	
1.1 Η ιστορία της ανάρτησης και ο ρόλος της.....	6
1.2 Τύποι ανάρτησης.....	6
1.2.1 Σύστημα παθητικής ανάρτησης	6
1.2.2 Σύστημα ημι-ενεργητικής ανάρτησης.....	7
1.2.3 Σύστημα ενεργητικής ανάρτησης.....	9
Κεφάλαιο 2: Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου για το σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης του αυτοκινήτου	
2.1 Αναλυτική περιγραφή του «μοντέλου $\frac{1}{4}$ »	14
2.2 Μαθηματικό μοντέλο στο πεδίο του χρόνου.....	16
2.3 Μετατροπή του συστήματος της ανάρτησης στο πεδίο της συχνότητας	20
2.4 Μετατροπή του συστήματος της ανάρτησης στο πεδίο του χώρου κατάστασης.....	25
2.5 Σύγκριση μαθηματικών μοντέλων.....	29
Κεφάλαιο 3: Ανάπτυξη ελεγκτών στο σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης ενός οχήματος	
3.1 Γενικά	31
3.2 Η μέθοδος Ziegler-Nichols.....	32
3.3 Γεωμετρικός τόπος των ριζών.....	35
3.4 Ανάπτυξη ελεγκτών με την μέθοδο Ziegler-Nichols.....	38
3.5 Ανάπτυξη ελεγκτή με την μέθοδο Morari - Zafiriou.....	40
3.6 Τυπική συμπεριφορά συστήματος κλειστού βρόχου.....	46
Κεφάλαιο 4: Δοκιμή ελεγκτών	
4.1 Γενικά.....	47
4.2 Σενάριο 1: Σταθερό σήμα αναφοράς με βηματική μορφή διαταραχής (απλή μορφή).....	48
4.3 Σενάριο 2: Σταθερό σήμα αναφοράς με διαταραχή βηματικής μορφής (σύνθετη μορφή).....	51
4.4 Σενάριο 3: Σταθερό σήμα αναφοράς με συνεχής διαταραχής, συνημιτονοειδής μορφής.....	54
4.5 Σενάριο 4 :Μεταβλητό σήμα αναφοράς με διαταραχή βηματικής μορφής.....	59
4.6 Παρουσίαση καλύτερων ελεγκτών.....	63
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα / Μελλοντικές επεκτάσεις.....	67
Αναφορές/Βιβλιογραφία.....	69
Παράρτημα Α.....	71

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στο σύστημα ανάρτησης

1.1 Η ιστορία της ανάρτησης και ο ρόλος της

Μέχρι τις αρχές του 19ου αιώνα, οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν τις άμαξες για να μετακινούνται, να μεταφέρουν αντικείμενα κτλ. Στα τέλη του 19ου αιώνα έκαναν για πρώτη φορά την εμφάνιση τους τα πρώτα αυτοκίνητα. Η ανακάλυψη των αυτοκινήτων θεωρήθηκε κάτι πρωτοποριακό για την εποχή καθώς διευκόλυνε τους ανθρώπους σε πολλούς τομείς (μεταφορά ανθρώπων, αντικειμένων κτλ.) και αντικατέστησε πλήρως τις άμαξες.

Τα πρώτα αυτοκίνητα ουσιαστικά ήταν άμαξες με κινητήρα εσωτερικής καύσης όπου περιείχαν και κάποιο σύστημα ανάρτησης, σαφώς τότε δεν ήταν υπό την μορφή της σημερινής ανάρτησης. Οι πρώτες αναρτήσεις, όπου υπάρχουν μέχρι και σήμερα χωρίς ιδιαίτερες αλλαγές, αποτελούνταν από πολλά χαλύβδινα φύλλα δηλαδή ένα παθητικό σύστημα ανάρτησης. Ωστόσο από πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν επιτευχτεί άλματα όσο αναφορά την εξέλιξη του αυτοκινήτου και την βελτίωση της ανάρτησης.

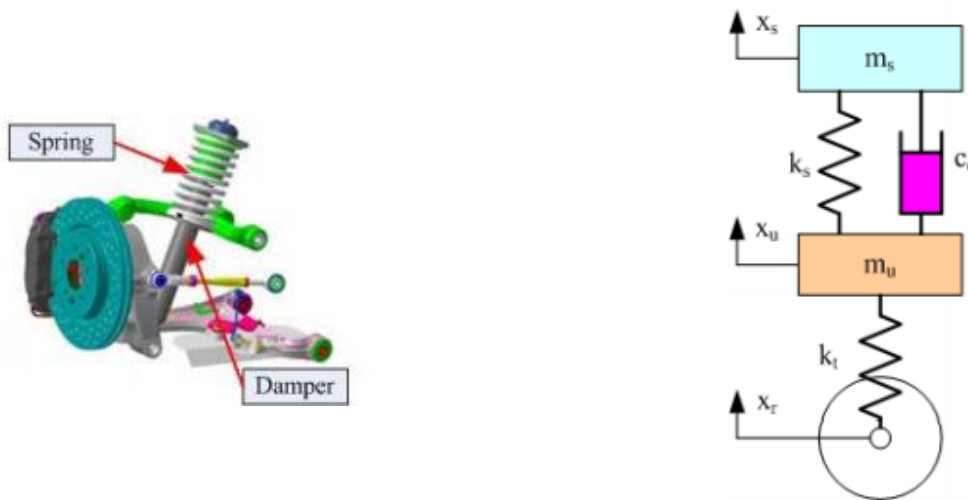
Πλέον το σύστημα της ανάρτησης είναι αναπόσπαστο κομμάτι του αυτοκινήτου καθώς ο ρόλος του είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Ο ρόλος της ανάρτησης είναι η απομόνωση της καμπίνας του οχήματος, όπου βρίσκονται ο οδηγός μαζί με τους επιβάτες, από τις διάφορες διαταραχές που μπορούν να προέρθουν είτε από κάποιο εσωτερικό παράγοντα (επιβράδυνση, επιτάχυνση) είτε από κάποιον εξωτερικό παράγοντα (οδόστρωμα, μεταφορά βάρους κτλ.). Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι συστημάτων ανάρτησης: το ενεργητικό, το παθητικό και το ημι-ενεργητικό σύστημα ανάρτησης. [4][7]

1.2 Τύποι ανάρτησης

1.2.1 Σύστημα παθητικής ανάρτησης

Η παθητική ανάρτηση είναι ένα σύστημα όπου αποτελείται από ένα παθητικό ελατήριο και έναν παθητικό αποσβεστήρα, που είναι υπεύθυνος για την απορρόφηση των κραδασμών, και τα δυο στοιχεία είναι σταθερά και δεν μεταβάλλονται οι συντελεστές τους (δηλαδή είναι σταθερός ο συντελεστής ελατηρίου και αποσβεστήρα). Τα δυο συστήματα όπου αναφέρθηκαν είναι παράλληλα μεταξύ τους, λειτουργούν μηχανικά και βρίσκονται ενδιάμεσα από το αμάξωμα και τον τροχό. Όσο αφορά τον αποσβεστήρα είναι ένας κύλινδρος όπου εσωτερικά περιέχει υδραυλικό λάδι ή συμπιεσμένο αέρα και ένα εμβολο. Το εμβολο κινείται παλινδρομικά μέσα στον κύλινδρο όπου είναι γεμάτο με υγρό ή αέριο, ανάλογα τον αποσβεστήρα (υδραυλικός ή πνευματικός αντίστοιχα).

Το υγρό ή το αέριο καθώς πιέζεται αναγκάζεται να διαφύγει μέσα από κάποιες μικρές οπές, όπου περιέχει η βαλβίδα του εμβόλου. Αυτή η ροή του υγρού ή του αέριου ενεργοποιεί μια δύναμη αντίδρασης από την κίνηση του εμβόλου, άρα και κατά συνέπεια από την κίνηση της ανάρτησης. Η απόσβεση επιτυγχάνεται μέσα από την μετατροπή ενός μεγάλου ποσοστού της ενέργειας της ταλάντωσης σε θερμότητα λόγω της τριβής όπου δημιουργείται μεταξύ των μορίων του λαδιού ή του αέρα μέσα στον κύλινδρο. Στην παθητική ανάρτηση δεν υπάρχει η δυνατότητα κάποιου ελέγχου λόγω του ότι αποτελείται από παθητικά στοιχεία (ελατήριο, αποσβεστήρας) δηλαδή οι τιμές δύνονται κατά την σχεδίαση αυτών των στοιχείων ανάλογα με την χρήση όπου προορίζεται η ανάρτηση. Τέλος την παθητική ανάρτηση την χρησιμοποιούν οι περισσότερες αυτοκινητοβιομηχανίες λόγω του γεγονός ότι είναι σχετικά φθηνή και δεν φθείρεται εύκολα. [1][2]

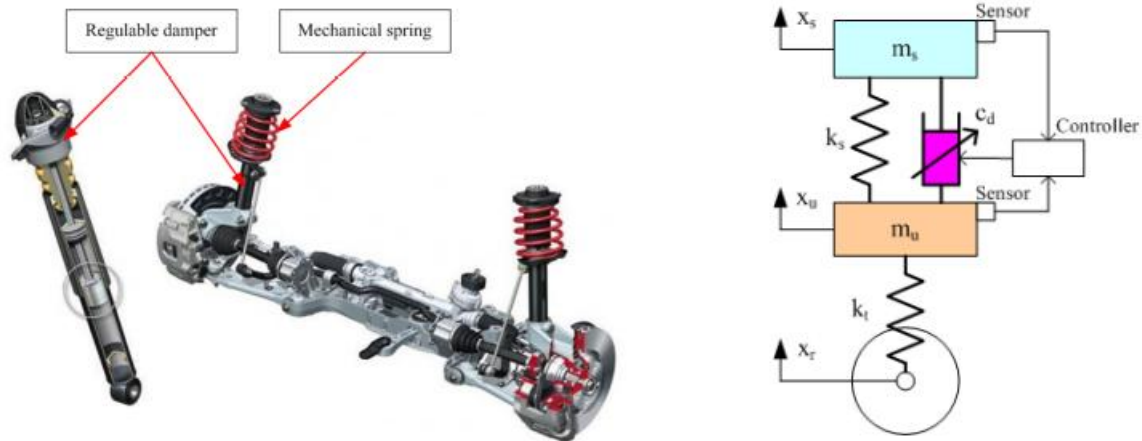


Σχήμα 1.1: Δομή παθητικής ανάρτησης αυτοκινήτου [1]

1.2.2 Σύστημα ημι-ενεργητικής ανάρτησης

Η ημι-ενεργητική ανάρτηση έχει παρόμοια διάταξη με το παθητικό σύστημα ανάρτησης δηλαδή περιέχει έναν ενεργητικό αποσβεστήρα (με μεταβλητά χαρακτηριστικά απόσβεσης), ένα παθητικό ελατήριο (με σταθερό συντελεστή ελατηρίου). Τα δυο στοιχεία λειτουργούν μηχανικά και είναι παράλληλα μεταξύ τους όπως και στο παθητικό σύστημα ανάρτησης. Η κυριότερη διαφορά της ημι-ενεργητικής ανάρτησης σε σχέση με την παθητική είναι ότι περιέχει ένα σύστημα ελέγχου μέσω κάποιων αισθητήρων και επενεργειών, δηλαδή υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής είτε της γεωμετρίας του εμβόλου του αποσβεστήρα, είτε της συνεκτικότητας (ιξώδες) του υγρού ανάλογα την κατάσταση που καλείται να αντιμετωπίσει η ανάρτηση. Οι

αποσβεστήρες στην ημι-ενεργητική ανάρτηση συνήθως είναι ηλεκτροϋδραυλικοί, μαγνητοερολογικοί, ηλεκτροερολογικοί.



Σχήμα 1.2: Δομή ημι-ενεργητικής ανάρτησης αυτοκινήτου [1]

Η κύρια λειτουργία του ηλεκτροϋδραυλικού αποσβεστήρα είναι η μεταβολή της γεωμετρίας του εμβόλου όταν υπάρχει κάποιος εξωτερικός ή εσωτερικός παράγοντας όπου το επιβάλλει (ανομοιόμορφο οδόστρωμα, απότομο φρενάρισμα). Η παραπάνω μεταβολή οφείλεται στην ηλεκτρονική βαλβίδα του εμβόλου όπου βρίσκετε μέσα στο σώμα του αποσβεστήρα, όπου είναι και η κύρια διαφορά σε σχέση με έναν αποσβεστήρα παθητικού συστήματος ανάρτησης. Ουσιαστικά υπάρχει εσωτερικά ή εξωτερικά του αποσβεστήρα ένα ηλεκτροϋδραυλικό σύστημα όπου δίνει σήμα στην ηλεκτρονική βαλβίδα του εμβόλου με σκοπό την αύξηση ή την μείωση των οπών της βαλβίδας του εμβόλου. Με την μεταβολή του μεγέθους των οπών της βαλβίδας επιτυγχάνεται η αλλαγή του συντελεστή απόσβεσης. Για παράδειγμα, αν υπάρχει ανομοιόμορφο οδόστρωμα έχουμε μείωση των οπών της βαλβίδας του εμβόλου όπου αυτό συνεπάγεται με την μείωση της ποσότητας του ρευστού όπου μπορεί να περάσει μέσα από αυτές «μονομιάς» με την άσκηση μεγάλης πίεσης. Χάρη στην παραπάνω διαδικασία επιτυγχάνουμε την μείωση της ταλάντωσης του εμβόλου και κατά συνέπεια, την απόσβεση του ελατηρίου.

Ο μαγνητοερολογικός και ο ηλεκτροερολογικός αποσβεστήρας έχει σαν κύριο χαρακτηριστικό την μεταβολή της συνεκτικότητας του υγρού. Αυτό συμβαίνει μέσω των μαγνητοροϊκών ή ηλεκτροροϊκών ρευστών, όπου βρίσκονται μέσα στον αποσβεστήρα. Αυτοί του είδους οι αποσβεστήρες έχουν επέλθει τα τελευταία χρόνια και χρησιμοποιούνται κυρίως σε αυτοκίνητα πολυτελείας όπου έχουν ημι-ενεργητικές αναρτήσεις.

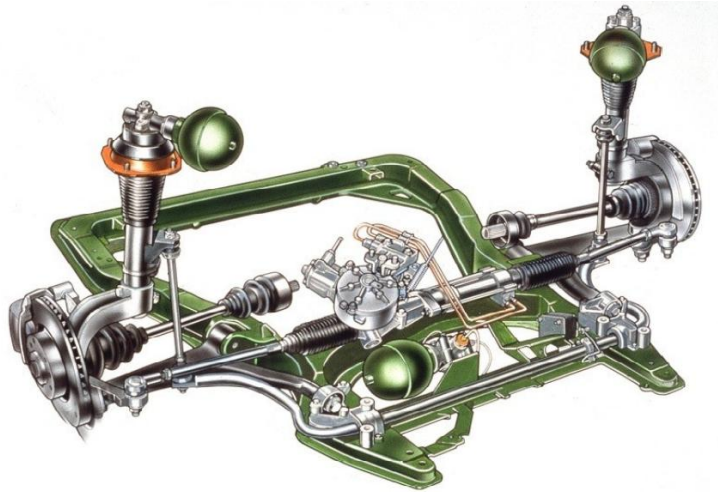
Τα μαγνητοροϊκά ρευστά όταν δεν βρίσκονται σε μαγνητικό πεδίο ρέουν ελευθέρα μέσα στον αποσβεστήρα. Στην περίπτωση όμως όπου βρεθούν σε κάποιο μαγνητικό πεδίο, λόγω των μαγνητιζόμενων σωματιδίων που περιέχουν, έχουν την ιδιότητα της μεταβολής του ιξώδους τους, ανάλογα με το μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται. Στην περίπτωση της ανάρτησης αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση στοιχείων, όπου έχουν την δυνατότητα δημιουργίας μαγνητικού πεδίου, μέσα στο έμβολο. Χάρης την παραπάνω διαδικασία αναπτύσσεται ένα σύστημα ελέγχου, όπου ανάλογα τις συνθήκες υπάρχει η εφαρμογή του κατάλληλου μαγνητικού πεδίου στο έμβολο, με σκοπό την προσαρμογή της συνεκτικότητας του ρευστού όπου συνεπάγεται με την ρύθμιση του συντελεστή απόσβεσης.

Παρόμοια διαδικασία ακολουθούν και τα ηλεκτροροϊκά ρευστά με την μονή διαφορά ότι στα συγκριμένα ρευστά έχουμε αλλαγή της συνεκτικότητας τους όταν βρεθούν μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο. Το παραπάνω φαινόμενο οφείλεται στα σωματίδια όπου περιέχει το συγκεκριμένο ρευστό, όπου παρουσιάζουν ευαισθησία στα ηλεκτρικά πεδία με αποτέλεσμα την ρύθμιση του ιξώδους του ρευστού και πιο συγκεκριμένα του συντελεστή απόσβεσης. Αρχικά το ρευστό ρέει ελευθέρα μέσα στον αποσβεστήρα και όταν απαιτηθεί η διαδικασία της απόσβεσης παρουσιάζετε ανάπτυξη του ηλεκτρικού πεδίου, ανάμεσα από το έμβολο και τον κύλινδρο του αποσβεστήρα, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μεγαλύτερη αντίσταση του ρευστού κατά την ροή του δηλαδή η ροή του ρευστού γίνεται δυσκολότερη λόγω της αύξησης του ιξώδους του ρευστού.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις της ημι-ενεργητικής ανάρτησης η απόσβεση προέρχεται μέσω της τριβής όπου αναπτύσσεται ανάμεσα στα σωματίδια του ρευστού μέσα στον κύλινδρο του αποσβεστήρα. Η ανάπτυξη της τριβής ανάμεσα στα γειτονικά μόρια του ρευστού έχει σαν αποτέλεσμα την μετατροπή ενός μεγάλου μέρους της ενέργειας της ταλάντωσης σε θερμότητα άρα και την εμφάνιση της απόσβεσης της ανάρτησης. Τέλος έχει αποδεχτεί ότι η ημι-ενεργητική ανάρτηση δεν καταφέρνει να ανταποκριθεί με την ταχύτητα και την ακρίβεια ενός ενεργού συστήματος ανάρτησης. [1][2][6]

1.2.3 Σύστημα ενεργητικής ανάρτησης

Ένα σύστημα ενεργητικής ανάρτησης αποτελείται από ένα παθητικό ελατήριο , έναν παθητικό αποσβεστήρα και έναν ενεργοποιητή. Ο ενεργοποιητής μπορεί να είναι υδραυλικός ή πνευματικός ή ηλεκτρομαγνητικός και ανάλογα με τον ενεργοποιητή το ενεργητικό σύστημα ανάρτησης μπορεί να αποκαλεστεί υδραυλικό ή πνευματικό ή ηλεκτρομαγνητικό σύστημα ανάρτησης. Οι ενεργοποιητές παράγουν κάποιου είδους δύναμη, η οποία ελέγχετε ηλεκτρονικά από έναν ελεγκτή όπου χρησιμοποιεί τις πληροφορίες όπου έχει συλλέξει από τους αισθητήρες του αυτοκινήτου, έτσι ώστε να υπάρξει απομόνωση της καμπίνας του αυτοκινήτου (όπου βρίσκονται ο οδηγός και οι επιβάτες) σε μια ανωμαλία του οδοστρώματος ή κάποιο απότομο φρενάρισμα. [1][2][3]

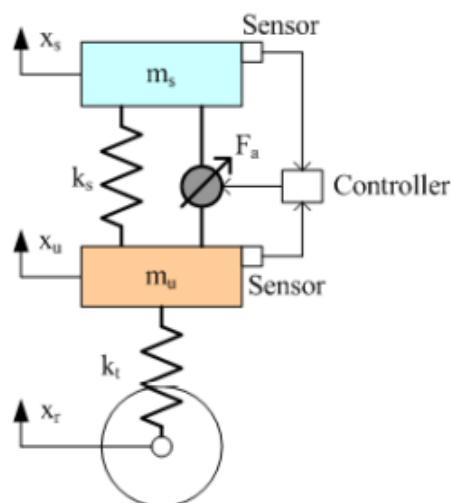


Σχήμα 1.3: Υδραυλικό σύστημα μπροστινής ανάρτησης σε ένα Citroen XM [5]

Παρακάτω θα αναφερθούν οι τρεις διατάξεις ενεργητικών αναρτήσεων όπου υπάρχουν:

α. Σύστημα ενεργητικής ανάρτησης υψηλού εύρους

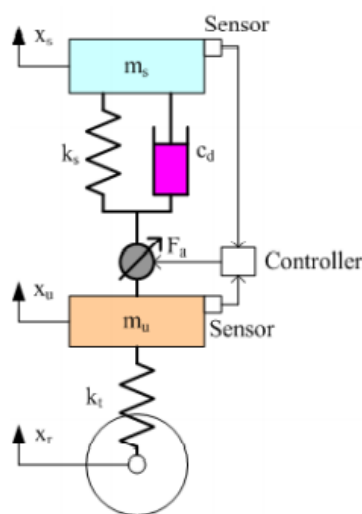
Το σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης υψηλού εύρους ζώνης περιέχει το μηχανικό ελατήριο και τον επενεργοποιητή σε παράλληλη σύνδεση. Αυτού του είδους η διάταξη ελέγχει τόσο την μη αναρτημένη μάζα (μ -Unsprung) όσο και την αναρτημένη μάζα του αυτοκινήτου (m s-Sprung). Στα συστήματα ενεργητικών αναρτήσεων υψηλού εύρους χρησιμοποιείται κυρίως ο ηλεκτρομαγνητικός ενεργοποιητής, και η συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ισχύς μπορεί να φτάσει έως τα 100 Hz. [1]



Σχήμα 1.4: Δομή ενεργητικής ανάρτησης αυτοκινήτου υψηλού εύρους [1]

β. Σύστημα ενεργητικής ανάρτησης χαμηλού εύρους

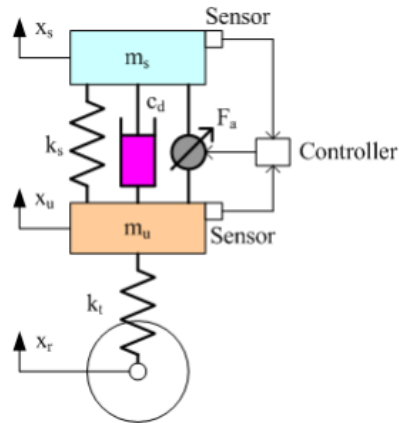
Το σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης όπου ανήκει στην κατηγορία του χαμηλού εύρους ζώνης είναι εκείνο, το οποίο έχει τον ενεργοποιητή συνδεδεμένο σε σειρά με το μηχανικό ελατήριο και τον αποσβεστήρα. Η ενεργή ανάρτηση χαμηλού εύρους ζώνης ελέγχει την μάζα του αυτοκινήτου (ms-Sprung) ενώ η μάζα του ελαστικού ελέγχετε έμμεσα από τα παθητικά στοιχεία της ανάρτησης (ελατήριο, αποσβεστήρας). Επίσης ο υδραυλικός και πνευματικός ενεργοποιητής είναι κατάλληλος για την ανάρτηση χαμηλού εύρους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο σύστημα ανάρτησης λειτουργεί για συχνότητες κάτω των 5 Hz. [1]



Σχήμα 1.5: Δομή ενεργητικής ανάρτησης αυτοκινήτου χαμηλού εύρους [1]

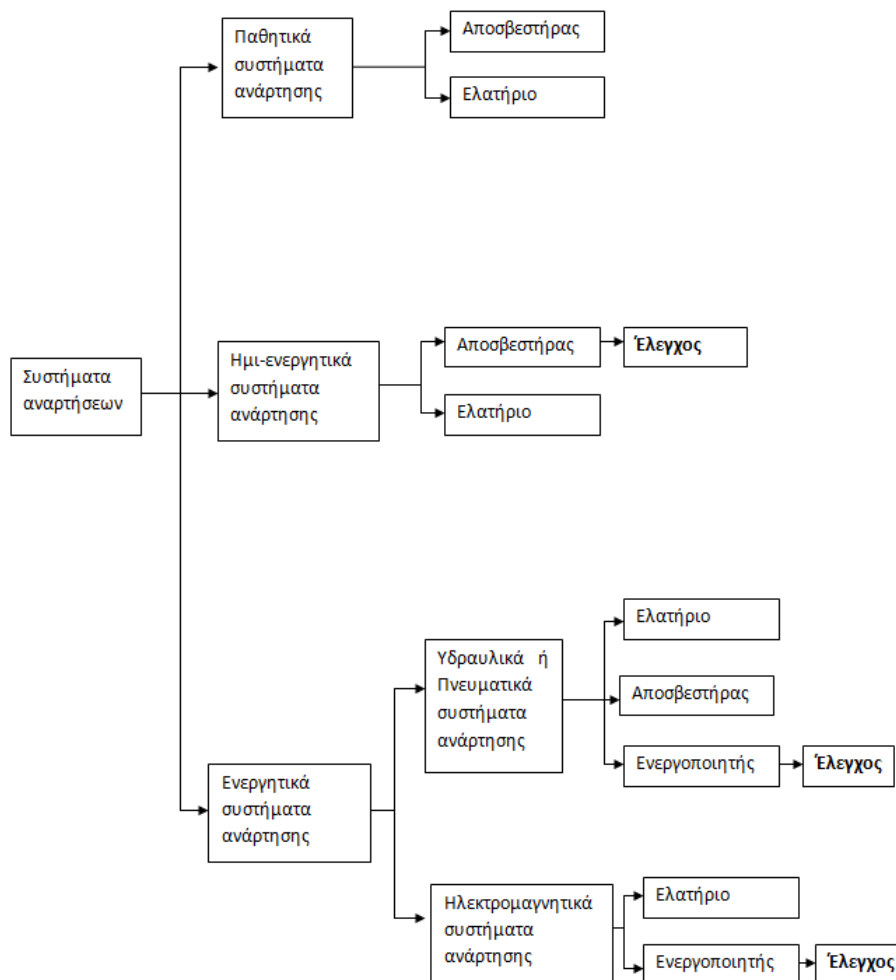
γ. Σύστημα ενεργητικής ανάρτησης μεσαίου εύρους

Η συγκεκριμένη διάταξη είναι παρόμοια με την διάταξη της ενεργητικής ανάρτησης υψηλού εύρους με την μόνη διαφορά ότι περιέχει έναν αποσβεστήρα επιπλέον. Πιο συγκεκριμένα, στο συγκεκριμένο είδος ανάρτησης ελέγχετε τόσο η μάζα του ελαστικού (m_u -Unsprung) όσο και η μάζα του αυτοκινήτου (m_s -Sprung), όταν το μηχανικό ελατήριο, ο αποσβεστήρας και ο ενεργοποιητής είναι παράλληλα συνδεδεμένοι. Για αυτού του είδους την ανάρτηση (μεσαίου εύρους) χρησιμοποιείται κυρίως υδραυλικός και πνευματικός ενεργοποιητής και λειτουργεί κυρίως σε συχνότητες όπου φτάνουν έως 30 Hz. [1]



Σχήμα 1.6: Δομή ενεργητικής ανάρτησης αυτοκινήτου μεσαίου εύρους [1]

Παρακάτω θα παρουσιαστεί μια συνοπτική ανακεφαλαίωση όλων των συστημάτων των αναρτήσεων σε μορφή διαγράμματος:



Σχήμα 1.7: Διάγραμμα των διαφόρων συστημάτων αναρτήσεων ενός αυτοκινήτου

Τα κύρια κεφάλαια όπου θα αποτελείται η παρούσα εργασία είναι τα εξής:

- **Κεφάλαιο 1:** Θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση διάφορων συστημάτων των αναρτήσεων.
- **Κεφάλαιο 2:** Θα πραγματοποιηθεί η μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος της ενεργητικής ανάρτησης ενός οχήματος. Επίσης θα γίνει η μετατροπή του συστήματος της ανάρτησης από το πεδίο του χρόνου, στο πεδίο της συχνότητας (Laplace) και στο πεδίο του χώρου κατάστασης.
- **Κεφάλαιο 3:** Θα πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη κάποιων ελεγκτών με την μέθοδο Ziegler-Nichols και την μέθοδο Morari και Zafiriou.
- **Κεφάλαιο 4:** Θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση σεναρίων για κάθε ελεγκτή, με σκοπό την παρακολούθηση της απόκρισης του κάθε ελεγκτή για τους διάφορους τύπους διαταραχών και την διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

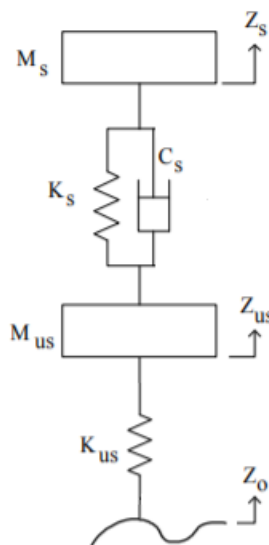
Κύριοι στόχοι της παρούσας εργασίας:

- Παρατήρηση της απόκρισης της ενεργητικής ανάρτησης ενός οχήματος χωρίς την παρουσία κάποιου ελεγκτή.
- Παρατήρηση της απόκρισης της ενεργητικής ανάρτησης του οχήματος με την παρουσία διαφόρων ελεγκτών, όπου θα αναπτυχτούν.
- Προσομοίωση της ενεργητικής ανάρτησης του αυτοκινήτου, με την ανάπτυξη των ελεγκτών, σε διάφορα σενάρια διαταραχής (ομαλό οδόστρωμα , ανώμαλο οδόστρωμα κτλ.).
- Σύγκριση των ελεγκτών με χρήση των αποτελεσμάτων από την προσομοίωση των διαφόρων σεναρίων.
- Επιλογή του καλύτερου ελεγκτή, ο οποίος θα έχει την καλύτερη απόκριση στα διάφορα σενάρια.

Κεφάλαιο 2: Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου για το σύστημα της ενεργής ανάρτησης του αυτοκινήτου

2.1 Αναλυτική περιγραφή του «μοντέλου 1/4 »

Το μοντέλο 1/4 , σε γενικές γραμμές χρησιμοποιείται πολύ συχνά για την ανάλυση της ανάρτησης, διότι είναι σχετικά απλό και αντιπροσωπεύει σε μεγάλο βαθμό το πλήρες μοντέλο του αυτοκινήτου και μπορούν να εξαχθούν σημαντικές πληροφορίες. Ουσιαστικά το συγκεκριμένο μοντέλο περιγράφει τον ένα από τους τέσσερις τροχούς μιας παθητικής ανάρτησης , όπου στηρίζεται το 1/4 του βάρους του αμαξώματος ή αλλιώς η αναρτημένη μάζα (M_s), πάνω στην κύρια ανάρτηση. Η κύρια ανάρτηση αποτελείται από ένα ελατήριο (με σταθερά K_s) καθώς και έναν αποσβεστήρα (με σταθερά C_s). Επίσης η δυσκαμψία του ελαστικού περιγράφεται από ένα ελατήριο (με σταθερά K_{us}), όπου στηρίζεται μια δεύτερη μάζα πάνω σε αυτό, η μη αναρτημένη μάζα (M_{us}), η οποία περιέχει το βάρος της κύριας ανάρτησης, του δισκοφρένου και του τροχού. Όπως παρατηρείται και στην παρακάτω εικόνα. [7] [8] [13]



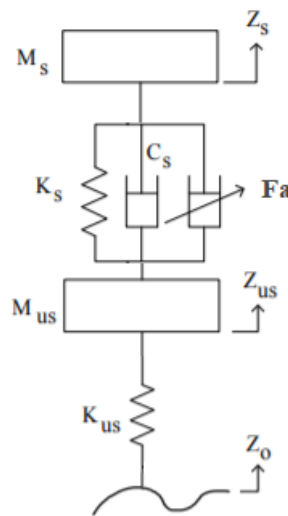
Σχήμα 2.1: Μοντέλο 1/4 , παθητικής ανάρτησης αυτοκινήτου [9]

Για την μετατροπή της παραπάνω παθητικής ανάρτησης σε σύστημα ενεργητικής ανάρτησης θα γίνει προσθήκη ενός ενεργοποιητή, ανάμεσα από την αναρτημένη και την μη αναρτημένη μάζα. Για την συγκεκριμένη μελέτη της ανάρτησης, μπορεί να θεωρηθεί ότι πρόκειται για έναν υδραυλικό ενεργοποιητή. Ο ενεργοποιητής ασκεί μια ενεργή δύναμη (F_a) στην αναρτημένη και την μη αναρτημένη μάζα (να σημειωθεί ότι η ενεργή δύναμη στην συνέχεια θα ελέγχετε ηλεκτρονικά από τον ελεγκτή με σκοπό την απόσβεση της ταλάντωσης της ανάρτησης). Η ενεργή δύναμη του

υδραυλικού ενεργοποιητή εξαρτάται από την πίεση (P) και την επιφάνεια (A). Πιο συγκεκριμένα η σχέση που περιγράφει την δύναμη του υδραυλικού ενεργοποιητή είναι η παρακάτω:

$$F_a = A * P \quad (2.1)$$

Η δομή του συστήματος της ενεργητικής ανάρτησης, όπου θα αναλυθεί και θα μελετηθεί, είναι η εξής:



Σχήμα 2.2: Μοντέλο 1/4 , ενεργητικής ανάρτησης αυτοκινήτου [9]

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο παραπάνω σύστημα παρατηρούνται δυο βαθμοί ελευθερίας, οι οποίοι προκύπτουν: ο ένας από την κάθετη μετατόπιση της αναρτημένης μάζας (Z_s) και ο άλλος από την κάθετη μετατόπιση της μη αναρτημένης μάζας (Z_{us}) . Επιπροσθέτως, υπάρχει και η διαταραχή όπου προέρχεται από την επιφάνεια του οδοστρώματος (Z_o). [9]

Πίνακας 2.1: Τα στοιχεία του «μοντέλου 1/4 » της ενεργητικής ανάρτησης

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
M_s	Αναρτημένη μάζα ($\frac{1}{4}$ αμαξώματος)	[Kg]
M_{us}	Μη αναρτημένη μάζα (Τροχός + Δισκόφρενα + Ανάρτηση)	[Kg]
K_s	Συντελεστής ελαστικότητας ελατηρίου κυρίας ανάρτησης	[N/m]
C_s	Συντελεστής απόσβεσης κυρίας ανάρτησης	[Ns/m]
A	Επιφάνεια υδραυλικού ενεργοποιητή	[m ²]
P	Πίεση στον υδραυλικό ενεργοποιητή	[Pa]
K_{us}	Συντελεστής ελαστικότητας ελατηρίου τροχού	[N/m]

Πίνακας 2.2: Βαθμοί ελευθερίας του «μοντέλου 1/4» της ενεργητικής ανάρτησης

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
Zs	Κάθετη μετατόπιση αναρτημένης μάζας	[m]
Zus	Κάθετη μετατόπιση μη αναρτημένης μάζας	[m]
Zo	Διαταραχή από την επιφάνεια του οδοστρώματος	[m]

Τα δεδομένα εισαγωγής όπου θα χρησιμοποιηθούν καθ' όλη την διάρκεια της μελέτης:

Πίνακας 2.3: Δεδομένα εισόδου. [12]

Σύμβολο	Τιμή
Ms	243 Kg
Mus	40 Kg
Ks	14671 N/m
Cs	370 Ns/m
A	$3,34 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
P	10342500 Pa
Kus	124660 N/m

2.2 Μαθηματικό μοντέλο στο πεδίο του χρόνου

Στην ενότητα 2.1 έγινε μια περαιτέρω ανάλυση του μοντέλου ¼, της ενεργητικής ανάρτησης και παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα στοιχεία, οι βαθμοί ελευθερίας, η διαταραχή καθώς και τα δεδομένα εισόδου της ανάρτησης. Όλα τα δεδομένα όπου παρουσιάστηκαν θα μας βοηθήσουν στην μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος της ενεργητικής ανάρτησης όπου θα πραγματοποιηθεί σε αυτήν την ενότητα. Στο τέλος αυτής της ενότητας αναμένω την εξαγωγή κάποιων διαφορικών εξισώσεων σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου χάρις αυτών θα πραγματοποιηθεί και η προσομοίωση της ενεργητικής ανάρτησης στο πεδίο του χρόνου για να παρατηρήσουμε πως αντιδρά για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο παρόν κεφάλαιο η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου της ενεργητικής ανάρτησης τους αυτοκινήτου αφορά ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου δηλαδή ένα σύστημα στο οποίο δεν υπάρχει παρουσία ελεγκτή.

Αρχικά, θα παρουσιαστεί συνοπτικά το θεωρητικό υπόβαθρο όπου θα χρησιμοποιηθεί στην μαθηματική μοντελοποίηση. [19]

1. Δύναμη ελατηρίου

Σύμφωνα με τον νόμο του Hooke η επιμήκυνση ενός ελατηρίου είναι ανάλογη της

δύναμης όπου ασκείται στο ελατήριο οπότε :

$$F_{\text{ελατηρίου}} = k \Delta x \quad (2.2)$$

Όπου, F (N) : η δύναμη του ελατηρίου

$K \left(\frac{N}{m} \right)$: η σταθερά ελατηρίου

Δx (m) : μετατόπιση ελατηρίου

2. Δύναμη αποσβεστήρα

$$F_{\text{αποσβεστήρα}} = c \Delta \dot{x} \quad (2.3)$$

Όπου, F (N): η δύναμη του αποσβεστήρα

$C \left(\frac{N \cdot s}{m} \right)$: συντελεστής απόσβεσης

$\Delta \dot{x} \left(\frac{m}{s} \right)$: μετατόπιση αποσβεστήρα

3. Δεύτερος νόμος του Νεύτωνα

Η επιτάχυνση ενός σώματος είναι ανάλογη της συνολικής δύναμης όπου ασκείται στο σώμα και αντίστροφος ανάλογη της μάζα του.

$$\Sigma F = m \alpha \quad (2.4)$$

Όπου, ΣF (N) : άθροισμα δυνάμεων

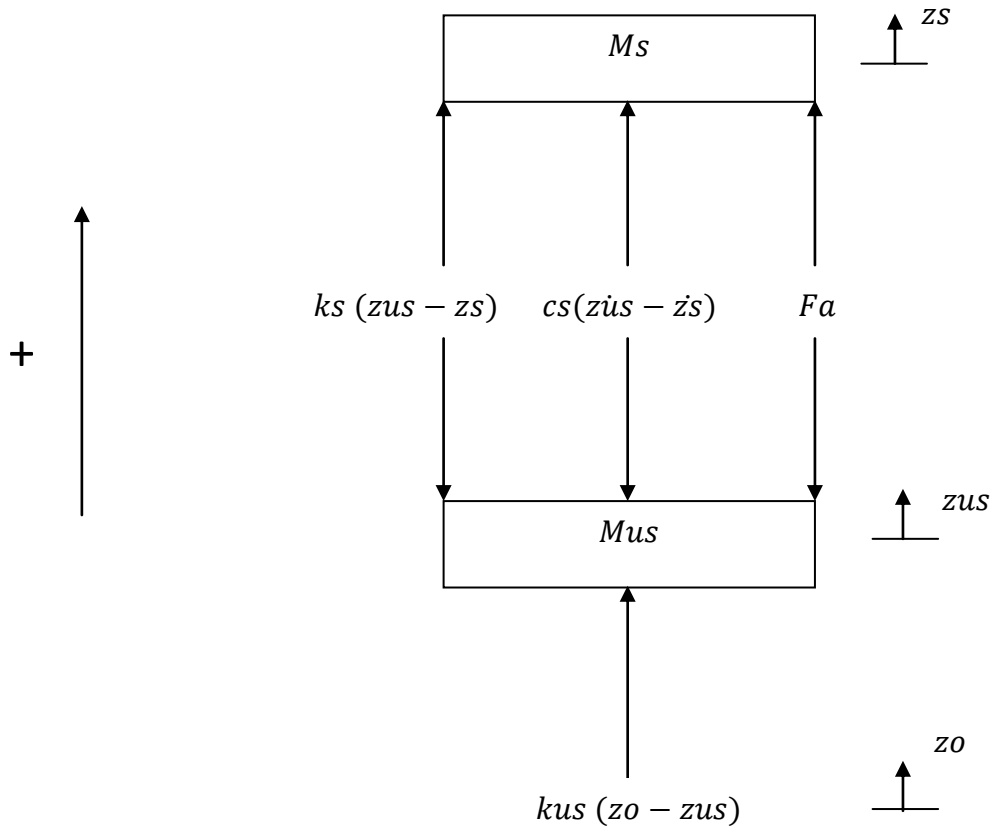
m (kg) : μάζα σώματος

$\alpha \left(\frac{m}{s^2} \right)$: επιτάχυνση σώματος

Πίνακας 2.4: Βασικά στοιχεία δυναμικής [19]

Στοιχείο	Φυσική σημασία	Αναπτυσσόμενες δυνάμεις	Εξισώσεις
m	Αδράνεια συστήματος	Αδρανειακές	$F = m \ddot{x}$
c	Καταστροφή ενέργειας	Απόσβεσης	$F = c \dot{x}$
k	Παραμορφωσιμότητα	Ελαστικές	$F = k x$

Διάγραμμα ελεύθερου σώματος για την M_s και για την M_{us} , με σκοπό την διευκόλυνση κατά μοντελοποίηση του συστήματος της ενεργητικής δύναμης.



Σχήμα 2.3: Ανάλυση δυνάμεων για ενεργητικής ανάρτησης αυτοκινήτου (μοντέλο ¼)

Εφαρμόζοντας τον 2^ο νόμο του Νεύτωνα, αρχικά για την αναρτημένη μάζα (M_s) και έπειτα για την μη αναρτημένη μάζα (M_{us}), προκύπτει [11] :

$$\text{Για } M_s: \Sigma F = m \alpha \rightarrow -k_s (z_s - z_{us}) - c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_{us}) + F_a = M_s \ddot{z}_s$$

$$\text{Για } M_{us}: \Sigma F = m \alpha \rightarrow k_s (z_s - z_{us}) + c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_{us}) + k_{us} (z_o - z_{us}) - F_a = M_{us} \ddot{z}_{us}$$

Οι παραπάνω σχέσεις βρίσκονται στο πεδίο του χρόνου οπότε:

$$-k_s (z_s(t) - z_{us}(t)) - c_s (\dot{z}_s(t) - \dot{z}_{us}(t)) + F_a(t) = M_s \ddot{z}_s(t) \quad (2.5)$$

$$k_s (z_s(t) - z_{us}(t)) + c_s (\dot{z}_s(t) - \dot{z}_{us}(t)) + k_{us} (z_o(t) - z_{us}(t)) - F_a(t) = M_{us} \ddot{z}_{us}(t) \quad (2.6)$$

Οι σχέσεις (2.5),(2.6) υποδεικνύουν ότι πρόκειται για ένα γραμμικό σύστημα διαφορικών εξισώσεων 2^{ης} τάξης στο πεδίο του χρόνου.

Λόγω του ότι πρόκειται για διαφορικές εξισώσεις 2^{ης} τάξης, θα γίνει χρήση βοηθητικών μεταβλητών (x_1, x_2, x_3, x_4) , έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η διαδικασία υποβιβασμού

σε διαφορικές εξισώσεις 1^{ης} τάξης. Η διαδικασία αυτή θα εξυπηρετήσει την προσομοίωση της ανάρτησης στο πεδίο του χρόνου. [15] [16]

$$\begin{aligned} x1 &= z_s \rightarrow \dot{x1} = \dot{z_s} = x2 \\ x2 &= \dot{z_s} \rightarrow \dot{x2} = \ddot{z_s} = - \left(\frac{cs}{ms} \right) (x2 - x4) - \left(\frac{ks}{ms} \right) (x1 - x3) + \left(\frac{A \cdot P}{ms} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$x3 = z_{us} \rightarrow \dot{x3} = \dot{z_{us}} = x4$$

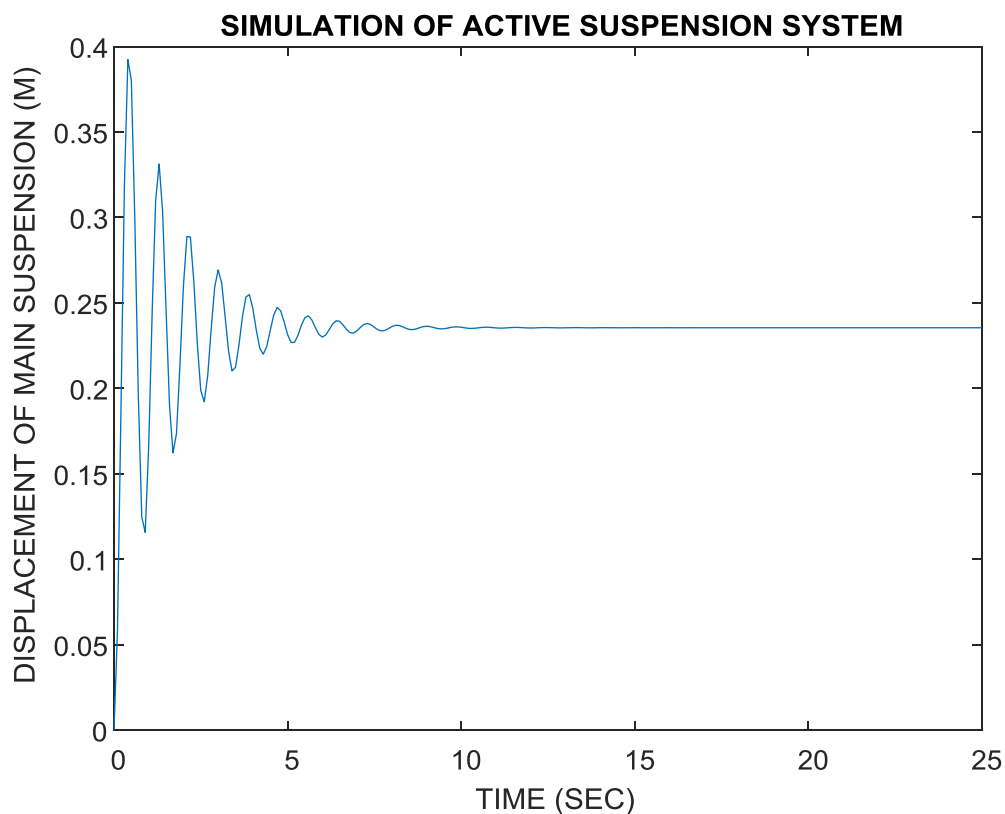
$$x4 = \dot{z_{us}} \rightarrow \dot{x4} = \ddot{z_{us}} = \left(\frac{k_{us}}{m_{us}} \right) (z_o - x3) + \left(\frac{k_s}{m_{us}} \right) (x1 - x3) + \left(\frac{cs}{m_{us}} \right) (x2 - x4) + \left(\frac{A \cdot P}{m_{us}} \right)$$

Στην παραπάνω διαδικασία οι βοηθητικές μεταβλητές $x1$ και $x3$ είναι οι μεταβλητές εξόδου διότι αφορούν τις κάθετες μετατοπίσεις των δυο μαζών του συστήματος της ενεργητικής ανάρτησης. Πιο συγκεκριμένα:

Αναρτημένη μάζα (M_s) → Κάθετη μετατόπιση Z_s

Μη αναρτημένη μάζα (M_{us}) → Κάθετη μετατόπιση Z_{us}

Αφού πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με χρήση των σχέσεων (2.7), της ενεργητικής ανάρτησης στο πεδίο του χρόνου, στο περιβάλλον της Matlab προέκυψε η παρακάτω γραφική παράσταση. Στο σχήμα 2.4, ο οριζόντιος άξονας περιγράφει τον χρόνο για τον οποίον πραγματοποιείται η προσομοίωση (χρόνος t για 25 δευτερόλεπτα με βήμα 0.1) ενώ ο κάθετος άξονας περιγράφει το πλάτος ταλάντωσης της κυρίας ανάρτησης ($x1-x3$)



Σχήμα 2.4: Προσομοίωση ενεργητικής ανάρτησης αυτοκινήτου (με απουσία ελεγκτή) στο πεδίο του χρόνου

Κατά την μοντελοποίηση είχαν οριστεί δυο έξοδοι, η μια ήταν η κάθετη μετατόπιση της αναρτημένης μάζας ($z_s=x_1$) και η άλλη αφορούσε την κάθετη μετατόπιση της μη αναρτημένης μάζας ($z_u=x_3$), δηλαδή οι κάθετες μετατοπίσεις του αμαξώματος και του τροχού. Στην παραπάνω γραφική παράσταση απεικονίζεται η διαφορά αυτών των δυο μετατοπίσεων δηλαδή περιγράφεται η ταλάντωση της κύριας ανάρτησης. Πιο συγκεκριμένα, έχει γίνει η προσομοίωση με σκοπό την παρακολούθηση της απόκρισης της ενεργητικής ανάρτησης ενός αυτοκινήτου (για σύστημα ανοιχτού βρόχου) για 25 δευτερόλεπτα. Το σύστημα της ανάρτησης παρατηρείται πως ανταποκρίνεται καθώς του ασκείται μια ενεργή δύναμη F_a , όπου προέρχεται από τον ενεργοποιητή (χωρίς να υπάρχει ακόμα ο έλεγχος της δύναμης F_a από κάποιον ελεγκτή) και ασκείται στις δυο μάζες. Παρατηρείται ότι η ταλάντωση της ανάρτησης έχει αποσβεστική μορφή ενώ υπάρχει ηρεμία της ανάρτησης μετά από τα 16 δευτερόλεπτα.

2.3 Μετατροπή του συστήματος της ανάρτησης στο πεδίο της συχνότητας

Σε αυτή την ενότητα μέσω του μετασχηματισμού Laplace θα μετατραπούν οι διαφορικές εξισώσεις σε αλγεβρικές εξισώσεις όπου χάρης αυτήν την μετατροπή η λύση τους θα γίνει ευκολότερη. Ουσιαστικά με τον μετασχηματισμό Laplace θα πραγματοποιηθεί μετασχηματισμός των συναρτήσεων ως προς το χρόνο, σε συναρτήσεις ως προς την μιγαδική μεταβλητή s . Τέλος από το πεδίο του χρόνου θα μεταβούμε στο πεδίο της συχνότητας σύμφωνα με τον παρακάτω ορισμό:

$$L\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2.8)$$

Όπου, L : συμβολίζει τον μετασχηματισμό Laplace

$F(s)$: συνάρτηση της μιγαδικής μεταβλητής s , της μορφής $s = \sigma + j\omega$

$f(t)$: συνάρτηση του χρόνου t

Διαφορικές εξισώσεις στο πεδίο του χρόνου:

$$-ks (z_s(t) - z_u(t)) - cs (\dot{z}_s(t) - \dot{z}_u(t)) + F_a(t) = M_s \ddot{z}_s(t) \quad (2.9)$$

$$ks (z_s(t) - z_u(t)) + cs (\dot{z}_s(t) - \dot{z}_u(t)) + k_u (z_u(t) - z_{us}(t)) - F_a(t) = M_u \ddot{z}_u(t) \quad (2.10)$$

Θα ακολουθήσει η διαδικασία μετασχηματισμού Laplace των παραπάνω διαφορικών εξισώσεων.

Αρχικά θεωρείται ότι δεν υπάρχει κάθετη μετατόπιση των μαζών της αναρτημένης και της μη αναρτημένης μάζας για $t=0$, άρα $z_s(0)=z_u(0)=0$.

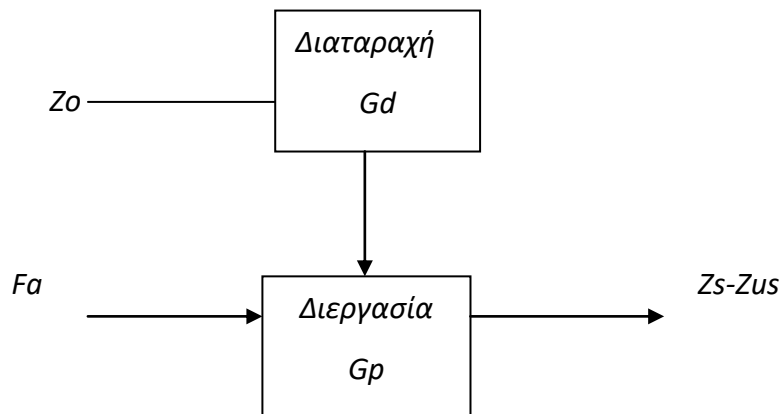
Μετασχηματισμός διαφορικής εξίσωσης (2.9):

$$-ks [zs(s) - zus(s)] - s cs[zs(s) - zus(s)] + Fa(s) = Ms(s^2 zs(s)) \quad (2.11)$$

Μετασχηματισμός διαφορικής εξίσωσης (2.10):

$$ks [zs(s) - zus(s)] + s cs[zs(s) - zus(s)] + kus [zo(s) - zus(s)] - Fa(s) = Mus(s^2 zus(s)) \quad (2.12)$$

Όσο αφορά τα συστήματα ελέγχου υπάρχει ο κλειστός και ο ανοιχτός βρόχος. Ο κλειστός βρόχος αναφέρεται στην παρουσία κάποιου ελεγκτή σε ένα σύστημα ενώ ο ανοιχτός βρόχος αναφέρεται στην απουσία του ελεγκτή σε ένα σύστημα. Στο συγκεκριμένο σημείο το σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης δεν υπάρχει παρουσία κάποιου ελεγκτή, άρα στην ορολογία των συστημάτων ελέγχου έχουμε ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από σήματα εισόδου, διεργασίες, σήματα εξόδου και διαταραχές. Πιο συγκεκριμένα, ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου όπου περιγράφει καταλληλότερα το μοντέλο της ενεργητικής ανάρτησης, που μελετά η παρούσα εργασία, είναι το παρακάτω διάγραμμα βαθμίδων: [17]



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα βαθμίδων, ανοιχτού βρόχου, για την ενεργητική ανάρτηση ενός αυτοκινήτου

Στο παραπάνω διάγραμμα βαθμίδων παρατηρούνται:

- **Σήμα εισόδου Fa**, όπου προέρχεται από την δύναμη που ασκεί ο ενεργοποιητής στην αναρτημένη και μη αναρτημένη μάζα.

- **Σήμα εξόδου Zs-Zus**, όπου προέρχεται από την διαφορά των καθέτων μετατοπίσεων της αναρτημένης και μη αναρτημένης μάζας δηλαδή περιγραφή της αντίδρασης της κύριας ταλάντωσης
- **Διαταραχή Zo**, όπου αφορά την μορφή του οδοστρώματος, η οποία επηρεάζει άμεσα το αυτοκίνητο και την οδηγική συμπεριφορά του.

Η σχέση όπου συνδέει την είσοδο, με την έξοδο και την διαταραχή, όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από το διάγραμμα βαθμίδων του ανοιχτού βρόχου είναι η ακόλουθη:

$$zs - zus = G_p Fa + G_d zo \quad (2.13)$$

Η G_p καλείται συνάρτηση μεταφοράς της διεργασίας και είναι το μαθηματικό μοντέλο όπου συνδέει την είσοδο με την έξοδο ενώ η G_d καλείται συνάρτηση μεταφοράς της διαταραχής και αφορά το μαθηματικό μοντέλο όπου συνδέει την έξοδο με την διαταραχή. Οι δυο συναρτήσεις μεταφοράς G_p , G_d είναι πολύ βασικές για την συνέχεια της μελέτης και για την προσομοίωση της ενεργητικής ανάρτησης στο πεδίο της συχνότητας. Αξιοποιώντας τις αλγεβρικές συναρτήσεις όπου προέκυψαν μετά τον μετασχηματισμό Laplace θα γίνει η εύρεση των G_p , G_d .

Από την σχέση (2.13) μπορεί να παρατηρηθεί ότι:

- Για την συνάρτηση μεταφοράς της διεργασίας, $G_p = \frac{zs - zus}{Fa}$ (με μηδενισμό της διαταραχής στην σχέση (2.13))
- Για την συνάρτηση μεταφοράς της διαταραχής, $G_d = \frac{zs - zus}{zo}$ (με μηδενισμό του σήματος εισόδου στην σχέση (2.13))

Παρακάτω θα ακολουθήσει η διαδικασία εύρεσης του μαθηματικού μοντέλου των συναρτήσεων μεταφοράς G_p , G_d . [14]

Πιο συγκεκριμένα μέσω των αλγεβρικών εξισώσεων (2.11),(2.12) θα γίνει εύρεση των παρακάτω κλασμάτων:

$$\frac{zs(s)}{Fa(s)}, \frac{zus(s)}{Fa(s)}, \frac{zs(s)}{zo(s)}, \frac{zus(s)}{zo(s)}$$

και έπειτα μέσω κάποιων αφαιρέσεων, όπου θα πραγματοποιηθούν μεταξύ των παραπάνω κλασμάτων, θα γίνει εύρεση των G_p και G_d .

Εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς της διεργασίας G_p

$$\frac{zs(s)}{Fa} = \frac{(Mus s^2 + kus)}{(Ms s^2 + cs s + ks)(Mus s^2 + cs s + ks + kus) - (cs s + ks)^2} \quad (2.14)$$

$$\frac{zus(s)}{Fa} = \frac{-Ms s^2}{(Ms s^2 + cs s + ks)(Mus s^2 + cs s + ks + kus) - (cs s + ks)^2} \quad (2.15)$$

Αφαιρώντας την σχέση (2.13) από την σχέση (2.14) θα προκύψει το κλάσμα:

$$G_p = \frac{zs(s) - zus(s)}{Fa} = \frac{(Mus + Ms) s^2 + kus}{(Ms s^2 + cs s + ks)(Mus s^2 + cs s + ks + kus) - (cs s + ks)^2} \quad (2.16)$$

Εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς της διαταραχής G_d

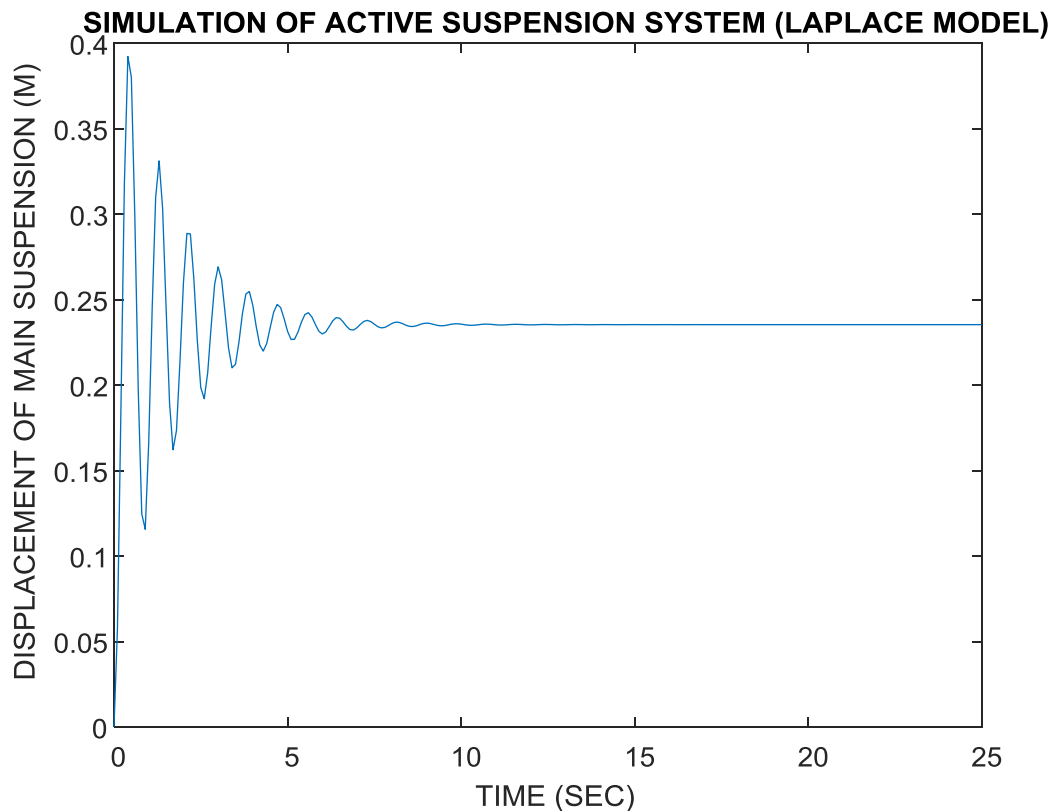
$$\frac{zs(s)}{zo(s)} = \frac{kus (cs s + ks)}{(Ms s^2 + cs s + ks)(Mus s^2 + cs s + ks + kus) - (cs s + ks)^2} \quad (2.17)$$

$$\frac{zus(s)}{zo(s)} = \frac{kus (Ms s^2 + cs s + ks)}{(Ms s^2 + cs s + ks)(Mus s^2 + cs s + ks + kus) - (cs s + ks)^2} \quad (2.18)$$

Αφαιρώντας την σχέση (2.16) από την σχέση (2.17) θα προκύψει το κλάσμα:

$$G_d = \frac{zs(s) - zus(s)}{zo} = \frac{-kus Ms s^2}{(Ms s^2 + cs s + ks)(Mus s^2 + cs s + ks + kus) - (cs s + ks)^2} \quad (2.19)$$

Κάνοντας χρήση των σχέσεων (2.13), (2.16), (2.19) έγινε η προσομοίωση της ενεργητικής ανάρτησης του αυτοκίνητου, το οποίο πλέον βρίσκεται στο πεδίο της συχνότητας, με σκοπό την παρατήρηση της απόκρισης της ανάρτησης. Προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Σχήμα 2.6), όπου ο οριζόντιος άξονας περιγράφει τον χρόνο για τον οποίον πραγματοποιείται η προσομοίωση (χρόνος t για 25 δευτερόλεπτα με βήμα 0.1) ενώ ο κάθετος άξονας περιγράφει το πλάτος ταλάντωσης της κυρίας ανάρτησης ($zs-zus$)



Σχήμα 2.6: Προσομοίωση ενεργητικής ανάρτησης αυτοκινήτου (με απουσία ελεγκτή) στο πεδίο της συχνότητας (μετασχηματισμός Laplace)

Στην μοντελοποίηση όπου έγινε έπειτα από την μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικών μέσω του μετασχηματισμού Laplace, ορίστηκε σαν έξοδος του μοντέλου η κάθετη μετατόπιση της αναρτημένης μάζας (αμάξωμα, zs) και η κάθετη μετατόπιση της μη αναρτημένης μάζας (τροχός, zus). Ωστόσο σκοπός της προσομοίωσης ήταν η παρακολούθηση της απόκρισης της κύριας ανάρτησης και για τον λόγω αυτό η έξοδος του συστήματος ορίστηκε να είναι η διαφορά των δυο αυτών μετατοπίσεων. Πιο συγκεκριμένα, στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε την απόκριση της ενεργητικής ανάρτησης για 25 δευτερόλεπτα όπου ορίστηκε η προσομοίωση. Η ταλάντωση αυτή προκλήθηκε έπειτα από ένα ερέθισμα όπου ασκήθηκε από την ενεργή δύναμη, η οποία βρίσκεται ενδιάμεσα από τις δυο μάζες. Η δύναμη αυτή είναι η F_a και ασκείται και στην αναρτημένη και στην μη αναρτημένη μάζα και δεν ελέγχεται από κάποιον ελεγκτή, διότι η προσομοίωση στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρεται σε μοντέλο ανοιχτού βρόχου. Παρατηρείται ότι με την άσκηση της ενεργής δύναμης η ανάρτηση ταλαντώνεται με μορφή αποσβεστική μέχρι σχεδόν τα 16 δευτερόλεπτα και έπειτα βρίσκεται σε ηρεμία. Αξίζει να σημειωθεί ότι για λόγους διευκόλυνσης η διαταραχή (zo) είναι μηδενική, δηλαδή δεν υπάρχει κάποια διαταραχή η οποία να προέρχεται από την επιφάνεια του οδοστρώματος

2.4 Μετατροπή του συστήματος της ανάρτησης στο πεδίο του χώρου κατάστασης

Σε αυτήν την ενότητα θα πραγματοποιηθεί μετασχηματισμός του μοντέλου της ενεργητικής ανάρτησης στο μοντέλου του χώρου κατάστασης, στο οποίο το σύστημα θα περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις 1^{ης} τάξης, οι όποιες περιγράφουν τις μεταβλητές κατάστασης. Οι μεταβλητές κατάστασης δεν μπορούν πάντα να μετρηθούν αλλά είναι αυτές όπου επηρεάζουν την συμπεριφορά του συστήματος ενώ «αποθηκεύουν» και την προηγούμενη συμπεριφορά του. Μέσω του μοντέλου χώρου κατάστασης θα παρθούν και κάποιες πληροφορίες για τις ιδιότητες του συστήματος, όπως είναι η ελεξιμότητα του ή παρατηρησιμότητα του και η ευστάθεια του. Το μοντέλο χώρου κατάστασης περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις κατάστασης : [17]

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A x(t) + B u(t) + E d(t) \\ y(t) &= C x(t) + D u(t) \\ x(t_0) &= x(0)\end{aligned}\tag{2.20}$$

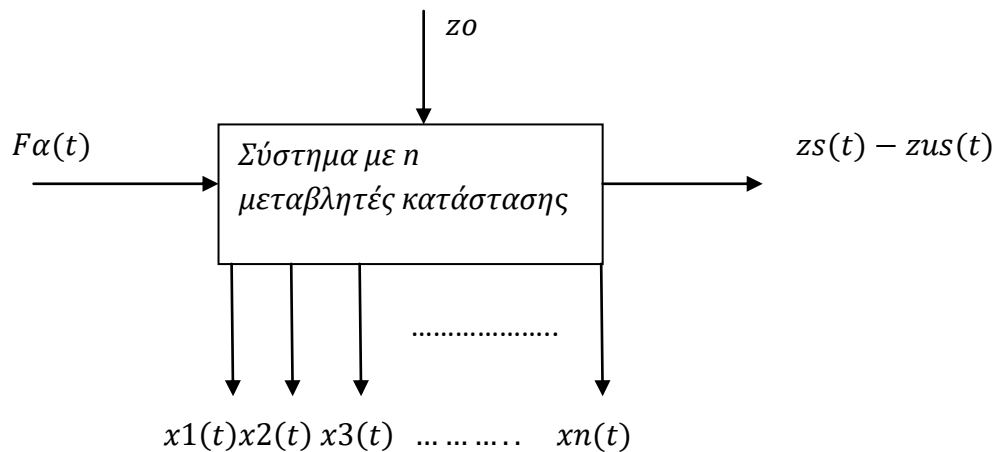
Όπου,

- Ο πίνακας A είναι τετραγωνικός πίνακας $(n \times n)$ και καλείται πίνακας του συστήματος και αντιπροσωπεύει το φυσικό σύστημα
- Ο πίνακας B καλείται πίνακας εισόδων $(n \times r)$
- Ο πίνακας E καλείται πίνακας διαταραχών $(n \times d)$
- Ο πίνακας C καλείται πίνακας εξόδων $(m \times n)$
- Ο πίνακας D καλείται απευθείας πίνακας $(m \times r)$
- Το διάνυσμα $x(t)$ αφορά τις μεταβλητές κατάστασης $(n \times 1)$
- Το διάνυσμα $u(t)$ αφορά τις εισόδους του συστήματος $(r \times 1)$
- Το διάνυσμα $d(t)$ αφορά τις διαταραχές του συστήματος $(d \times 1)$
- Το διάνυσμα $y(t)$ αφορά τις εξόδους του συστήματος $(m \times 1)$

Όσο αφορά το σύστημα ανοιχτού βρόχου της ενεργητικής ανάρτησης :

- Η είσοδος του συστήματος είναι η δύναμη η οποία ασκείται από τον ενεργοποιητή, όπου βρίσκεται ανάμεσα από τις δυο μάζες (αναρτημένη και μη αναρτημένη μάζα)

- Η έξοδος του συστήματος είναι η διαφορά των δυο κάθετων μετατοπίσεων της αναρτημένης μάζας και της μη αναρτημένης μάζας , όπου ουσιαστικά περιγράφουν την ταλάντωση της κύριας ανάρτησης του οχήματος
- Η διαταραχή του συστήματος της ενεργητικής ανάρτησης προέρχεται από την επιφάνεια του οδοστρώματος



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα βαθμίδων, ανοιχτού βρόχου, για το μοντέλο χώρου κατάστασης της ενεργητικής ανάρτησης ενός οχήματος για n μεταβλητές κατάστασης

Άρα οι εξισώσεις κατάστασης (2.20) ,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_{(n \times n)} x(t)_{(n \times 1)} + B_{(n \times 1)} Fa(t)_{(1 \times 1)} + E_{(n \times 1)} zo(t)_{(1 \times 1)} \\ (zs(t) - zus(t))_{(1 \times 1)} &= C_{(1 \times n)} x(t)_{(n \times 1)} + D_{(1 \times 1)} Fa(t)_{(1 \times 1)} \\ x(t_0) &= x(0) \end{aligned}$$

Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί η μετατροπή του μοντέλου της ενεργητικής ανάρτησης από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο του χώρου. Αυτή η μετατροπή θα επιτευχτεί με τον ορισμό τεσσάρων ($n=4$) μεταβλητών κατάστασης (x_1, x_2, x_3, x_4). Η διαδικασία μετατροπής της ενεργητικής ανάρτησης σε μοντέλο χώρου κατάστασης είναι η παρακάτω: [18]

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= z_s \\ x_2 &= \dot{z}_s \\ x_3 &= z_{us} \\ x_4 &= \dot{z}_{us} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{z}_s = x_2 \\ \dot{x}_2 &= \ddot{z}_s = -\left(\frac{cs}{ms}\right) * (x_2 - x_4) - \left(\frac{ks}{ms}\right) * (x_1 - x_3) + \left(\frac{Fa}{ms}\right) \\ \dot{x}_3 &= \dot{z}_{us} = x_4 \\ \dot{x}_4 &= \ddot{z}_{us} = \left(\frac{kus}{mus}\right) * (z_o - x_3) + \left(\frac{ks}{mus}\right) * (x_1 - x_3) + \left(\frac{cs}{mus}\right) * (x_2 - x_4) - \left(\frac{Fa}{mus}\right) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\left(\frac{cs}{ms}\right) x_2 + \left(\frac{cs}{ms}\right) x_4 - \left(\frac{ks}{ms}\right) x_1 + \left(\frac{ks}{ms}\right) x_3 + \left(\frac{Fa}{ms}\right) \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \left(\frac{kus}{mus}\right) z_o - \left(\frac{kus}{mus}\right) x_3 + \left(\frac{ks}{mus}\right) x_1 - \left(\frac{ks}{mus}\right) x_3 + \left(\frac{cs}{mus}\right) x_2 - \left(\frac{cs}{mus}\right) x_4 - \left(\frac{Fa}{mus}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

Για έξοδο:

$$y = x_1 - x_3$$

όπου,

- η x_1 αναφέρεται στην κάθετη μετατόπιση της αναρτημένης μάζας (z_s)
- η x_3 αναφέρεται στην κάθετη μετατόπιση της μη αναρτημένης μάζας (z_{us})

Έπειτα θα γίνει η εξαγωγή των πινάκων A, B, C, D, E μέσω των σχέσεων (2.21)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\left(\frac{ks}{ms}\right) & -\left(\frac{cs}{ms}\right) & \left(\frac{ks}{ms}\right) & \left(\frac{cs}{ms}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \left(\frac{ks}{mus}\right) & \left(\frac{cs}{mus}\right) & -\left(\frac{ks+kus}{mus}\right) & -\left(\frac{cs}{mus}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{ms} \\ 0 \\ \frac{1}{mus} \end{bmatrix} [Fa] + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{kus}{mus} \end{bmatrix} [z_o]$$

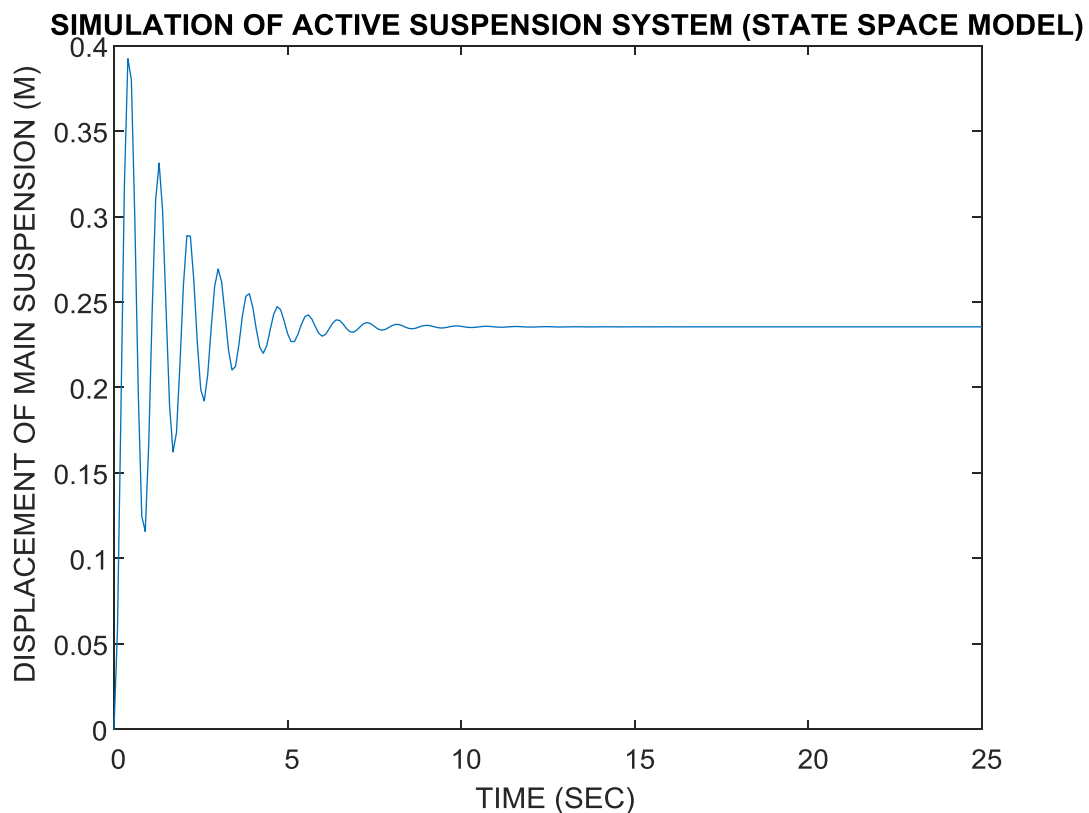
$$[y] = [1 \quad 0 \quad -1 \quad 0] \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \\ x4 \end{bmatrix} + [0] [Fa]$$

Οπότε,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\left(\frac{ks}{ms}\right) & -\left(\frac{cs}{ms}\right) & \left(\frac{ks}{ms}\right) & \left(\frac{cs}{ms}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \left(\frac{ks}{mus}\right) & \left(\frac{cs}{mus}\right) & -\left(\frac{ks+kus}{mus}\right) & -\left(\frac{cs}{mus}\right) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{ms} \\ 0 \\ \frac{1}{mus} \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{kus}{mus} \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0 \quad -1 \quad 0], \quad D = [0]$$

Στην συνέχεια έγινε η προσομοίωση του μοντέλου του χώρου κατάστασης της ενεργητικής ανάρτησης του αυτοκινήτου στο περιβάλλον της Matlab με χρήση των σχέσεων (2.21). Στο σχήμα 2.8 ο οριζόντιο άξονα απεικονίζεται ο χρόνος όπου πραγματοποιείται η προσομοίωση (χρόνος t για 25 δευτερόλεπτα με βήμα 0.1) ενώ στον κάθετο άξονα απεικονίζεται η κάθετη μετατόπιση της ανάρτησης ($y=x1-x3$).



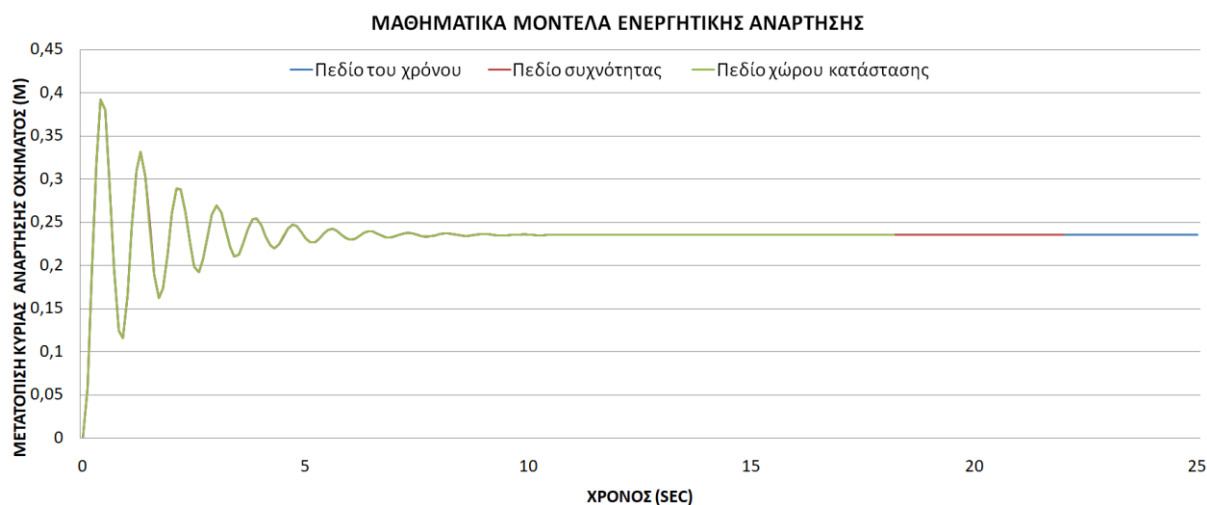
Σχήμα 2.8: Προσομοίωση ενεργητικής ανάρτησης αυτοκινήτου (με απουσία ελεγκτή) στο μοντέλο χώρου κατάστασης

Η ταλάντωση όπου εμφανίζεται προκύπτει από την διαφορά της μετατόπισης της αναρτημένης μάζας σε σχέση με την μη αναρτημένη μάζας. Η διαφορά των δυο μαζών περιγράφει την ταλάντωση της ανάρτησης του οχήματος για το χρονικό διάστημα των 25 δευτερολέπτων. Η ταλάντωση προέκυψε με την άσκηση μιας δύναμης F_a στην αναρτημένη και στην μη αναρτημένη μάζα. Η ταλάντωση με το πέρας του χρόνου παρουσιάζει αποσβεστικό χαρακτήρα μέχρι να φτάσει στο σημείο ηρεμίας, όπου βρίσκεται περίπου στα 16 δευτερόλεπτα. Στην παραπάνω προσημείωση η διαταραχή (zo) όπου μπορεί να προέρθει από το οδόστρωμα έχει μηδενιστεί για λόγους ευκολίας.

2.5 Σύγκριση μαθηματικών μοντέλων

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα δειχθεί ότι τα τρία μαθηματικά μοντέλα όπου αναλύσαμε στις παραπάνω ενότητες (πεδίο του χρόνου, πεδίο συχνότητας, πεδίο χώρου κατάστασης) είναι ισοδύναμα. Αυτό θα γίνει με την χρήση των τριών γραφικών παραστάσεων που εξήχθηκαν από κάθε μοντέλο και περιγράφουν την απόκριση της ανάρτησης. Ουσιαστικά θα δειχθεί ότι οι τρεις αποκρίσεις της ανάρτησης, των τριών μαθηματικών μοντέλων, είναι παρόμοιες. Χάρης αυτήν την απόδειξη θα επιτευχτεί στην συνέχεια η διευκόλυνση μας στην εξαγωγή κάποιων χαρακτηριστικών για το σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης και την προσομοίωση της στο περιβάλλον της Matlab.

Πιο συγκεκριμένα, στα τρία μοντέλα ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στον χρόνο όπου επιλέχτηκε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση και ο κάθετος άξονας στο πλάτος της ταλάντωσης της κύριας ανάρτησης (διαφορά αναρτημένης (Z_s) και μη αναρτημένης (Z_{us}) μάζας). Στην συγκεκριμένη μελέτη έχει επιλεχτεί η προσομοίωση της ανάρτησης για ανοιχτό βρόχο και για τα τρία μοντέλα. Η προσομοίωση επιλέχτηκε να γίνει για 25 δευτερόλεπτα. Για να γίνει πιο ξεκάθαρη η σύγκριση των τριών μαθηματικών μοντέλων (πεδίο του χρόνου, πεδίο συχνότητας, πεδίο χώρου κατάστασης) έγινε η μεταφορά των τριών γραφικών παραστάσεων σε ένα διάγραμμα (σχήμα 2.9), μέσω του excel.



Σχήμα 2.9: Απόκριση ενεργητικής ανάρτησης (ανοιχτού βρόχου) για το πεδίο του χρόνου, το πεδίο της συχνότητας, το πεδίο του χώρου

Όπως παρατηρείται και από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 2.9) η απόκριση της ανάρτησης και για τα τρία μοντέλα είναι παρόμοια καθώς οι γραφικές παραστάσεις μεταξύ τους παρουσιάζουν ελάχιστη έως μηδενική απόκλιση και για αυτό το λόγο φαίνονται να ταυτίζονται.

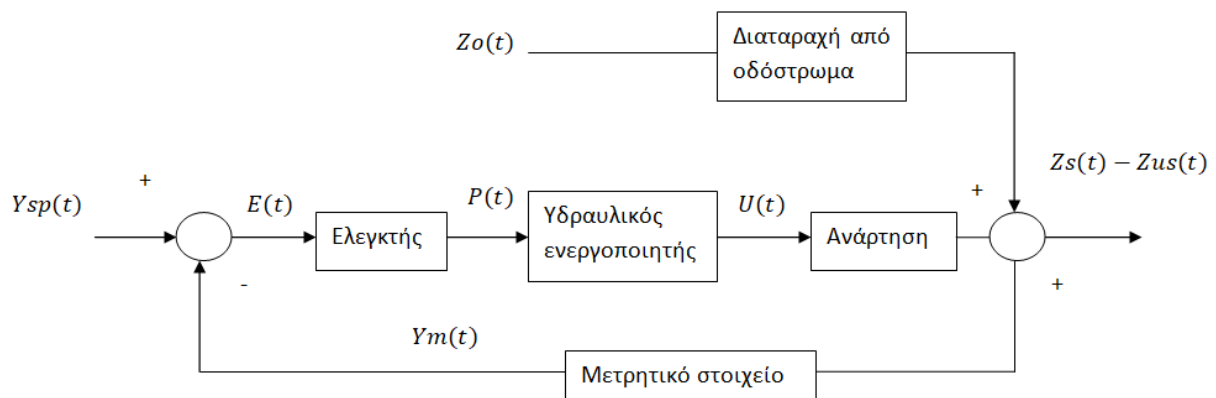
Οι μετατοπίσεις της κύριας ανάρτησης και για τα τρία μοντέλα άρχισαν με την άσκηση μιας ενεργής δύναμης F_a (χωρίς να ελέγχεται), η οποία προέρχεται από τον υδραυλικό ενεργοποιητή, στην αναρτημένη και στην μη αναρτημένη μάζα. Οι ταλαντώσεις παρουσιάζουν αποσβεστική μορφή, αφού με το πέρασ του χρόνου υπάρχει μείωση του πλάτους τους. Τα πλάτη ταλάντωσης σε κάθε χρονική περίοδο καθώς και η σύγκλιση των τριών γραφικών παραστάσεων, και για τα τρία μοντέλα, είναι ισοδύναμα. Παρατηρείται επίσης ότι υπάρχει ηρεμία της ανάρτησης με το πέρασ των 16 δευτερολέπτων και στα τρία μαθηματικά μοντέλα.

Εν κατακλείδι, συμπεραίνεται ότι και στα τρία μοντέλα η ανάρτηση παρουσιάζει παρόμοια απόκριση. Άρα, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι τα τρία μοντέλα είναι ισοδύναμα μεταξύ τους και τα αποτελέσματα όπου θα παρθούν από ένα μοντέλο θα είναι αντιπροσωπεύτηκα και για τα αλλά δυο μοντέλα. Τέλος αξίζει να σημειωθεί, για να γίνει αυτή η σύγκριση των μοντέλων επιλέχτηκαν τα ίδια χαρακτηριστικά και για τα τρία μοντέλα δηλαδή ίδια είσοδος, ίδια έξοδος, ίδιος χρόνος προσομοίωσης κτλ.

Κεφάλαιο 3: Ανάπτυξη ελεγκτών στο σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης ενός οχήματος

3.1 Γενικά

Στο παρόν Κεφάλαιο θα γίνει η μετάβαση στο κλειστό βρόχο (παρουσία ελεγκτή) της ενεργητικής ανάρτησης του οχήματος. Η παραπάνω μετατροπή θα πραγματοποιηθεί με την ανάπτυξη κάποιων ελεγκτών όπου θα είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο και την ρύθμιση της ενεργής δύναμης, η οποία θα προέρχεται από τον υδραυλικό ενεργοποιητή. Η ενεργή δύναμη θα ασκείται ανάμεσα από τις δυο μάζες (αναρτημένη και μη αναρτημένη μάζα) και μέσω του ελέγχου της, θα επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του πλάτους ταλάντωσης της κυρίας ανάρτησης. Πιο συγκεκριμένα μέσω του ελέγχου θα πραγματοποιηθεί, σε ένα μεγάλο βαθμό, απομόνωση της καμπίνας του οχήματος από τις διάφορες εξωτερικές διαταραχές (ανώμαλο οδόστρωμα κτλ.). Χάρης την εξάλειψη των διαταραχών θα αυξηθεί η ασφάλεια των επιβατών, η οδηγική άνεση και η καλύτερη συμπεριφορά του οχήματος. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα βαθμίδων κλειστού βρόχου για το μοντέλο της ενεργητικής ανάρτησης του αυτοκινήτου:



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα βαθμίδων, κλειστού βρόχου, της ενεργητικής ανάρτησης ενός οχήματος

Όπου,

$Y_{sp}(t)$: Σήμα αναφοράς ή Τιμή στόχος

$Z_o(t)$: Μεταβλητή της διαταραχής

$Z_s(t) - Z_{us}(t)$: Σήμα εξόδου του συστήματος

$E(t)$: Σφάλμα ($E(t) = Y_{sp}(t) - Y_m(t)$)

$P(t)$: Σήμα εξόδου από τον ελεγκτή

$U(t)$: Σήμα εξόδου από τον ενεργοποιητή

$Y_m(t)$: Μεταβλητή εξόδου από το μετρητικό στοιχείο

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι θα γίνει ανάπτυξη τεσσάρων ελεγκτών, κάποιων με τη χρήση της μεθόδου Ziegler-Nichols και κάποιων με την μέθοδο Morari και Zafiriou. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί όλοι η διαδικασία των τεσσάρων ελεγκτών με τις δυο μεθόδους.

3.2 Η μέθοδος Ziegler-Nichols

Το 1940 οι Ziegler και Nichols επινόησαν δυο εμπειρικές μεθόδους για την εύρεση των παραμέτρων των ελεγκτών. Οι δυο μέθοδοι είναι η εξής:

- **Μέθοδος συντονισμού ανοιχτού βρόχου Ziegler-Nichols**
- **Μέθοδος συντονισμού κλειστού βρόχου Ziegler-Nichols**

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την μέθοδο συντονισμού κλειστού βρόχου. Στην συγκεκριμένη μέθοδο γίνεται χρήση δυο παραμέτρων, της κρίσιμης τιμής κέρδους (K_{cr}) και της κρίσιμης περιόδου ταλάντωσης (P_{cr}). Η μέθοδος συντονισμού κλειστού βρόχου όπου αναπτύχθηκε από τους Ziegler και Nichols είναι σχετικά μια απλή μέθοδος συντονισμού των ελεγκτών και μπορεί να προσαρμοστεί και να τελειοποιηθεί με σκοπό τις καλύτερες προσεγγίσεις των ελεγκτών. Με την συγκεκριμένη μέθοδο θα γίνει ανάπτυξη τριών ελεγκτών. Οι τρεις ελεγκτές όπου θα αναπτυχθούν με την μέθοδο Ziegler-Nichols είναι οι εξής:

- Ο αναλογικός ελεγκτής P (όπου αποτελείται από το αναλογικό κέρδος K_c)
- Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής PI (όπου αποτελείται από το αναλογικό κέρδος K_c και από το ολοκληρωτικό κέρδος K_i)
- Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής PID (όπου αποτελείται από το αναλογικό κέρδος K_c , από το ολοκληρωτικό κέρδος K_i και από το διαφορικό κέρδος K_d)

Τα κέρδη K_i , K_d συνδέονται με δυο χρονικές παραμέτρους (τον χρόνο ολοκλήρωσης T_i και τον χρόνο παραγωγίσης T_d) και το αναλογικό κέρδος K_c :

- $$K_i = \frac{K_c}{T_i} \quad (3.1)$$

- $$K_d = K_c T_d \quad (3.2)$$

Από την μέθοδο Ziegler-Nichols μπορούν να παρθούν οι παράμετροι K_c (αναλογικό κέρδος) , T_i (χρόνος ολοκλήρωσης) , T_d (χρόνος παραγωγίσης), μέσω του πίνακα 3.1, κάνοντας χρήση των παραμέτρων K_{cr} , P_{cr} . Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παράμετροι K_{cr} ,

P_{cr} όπου θα χρειαστούν για την ανάπτυξη των ελεγκτών, θα βρεθούν στην συνέχεια μέσω της διαδικασίας εύρεσης του γεωμετρικού τόπου των ριζών.

Πίνακας 3.1: Ρύθμιση Ziegler - Nichols

Είδος Ελεγκτή	K_c	T_i	T_d
P	$0.5 \cdot K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 \cdot K_{cr}$	$(1/1.2) \cdot P_{cr}$	0
PID	$0.6 \cdot K_{cr}$	$0.5 \cdot P_{cr}$	$0.125 \cdot P_{cr}$

Όσο αφορά τους τρεις όρους P, I, D των ελεγκτών :

- **Αναλογικός όρος P :** Παράγει ένα σήμα εξόδου το οποίο αναφέρεται στην τρέχουσα τιμή του σφάλματος. Η έξοδος του αναλογικού όρου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Σήμα εξόδου στο πεδίο του χρόνου : } P_{out} = K_c E(t)$$

$$\text{Σήμα εξόδου στο πεδίο του Laplace : } P_{out} = K_c E(s)$$

- **Ολοκληρωτικός όρος I:** Ο ολοκληρωτικός όρος αφορά τις προηγούμενες τιμές σφάλματος δηλαδή αναφέρεται στο σφάλμα του παρελθόντος. Παράγει ένα σήμα εξόδου όπου σχετίζεται τόσο με το μέγεθος του σφάλματος όσο και με την διάρκεια του. Η έξοδος του ολοκληρωτικού ορού δίνεται από την σχέση:

$$\text{Σήμα εξόδου στο πεδίο του χρόνου : } I_{out} = K_i \int_0^t E(\tau) d\tau \quad \text{ή} \quad I_{out} = \frac{K_c}{T_i} \int_0^t E(\tau) d\tau$$

$$\text{Σήμα εξόδου στο πεδίο του Laplace: } I_{out} = \frac{K_i}{s} E(s) \quad \text{ή} \quad I_{out} = \frac{K_c}{T_i s} E(s)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ολοκλήρωμα του σφάλματος στην παραπάνω σχέση είναι το άθροισμα του στιγμιαίου σφάλματος με την πάροδο του χρόνου. Επίσης τ είναι η μεταβλητή ολοκλήρωσης.

- **Διαφορικός όρος D:** Αφορά την πρόβλεψη του σφάλματος μελλοντικά. Λαμβάνει υπόψη του το ρυθμό μεταβολής του σφάλματος και προσπαθεί να φέρει αυτόν τον ρυθμό στο μηδέν. Η έξοδος του διαφορικού ορού δίνεται από την σχέση:

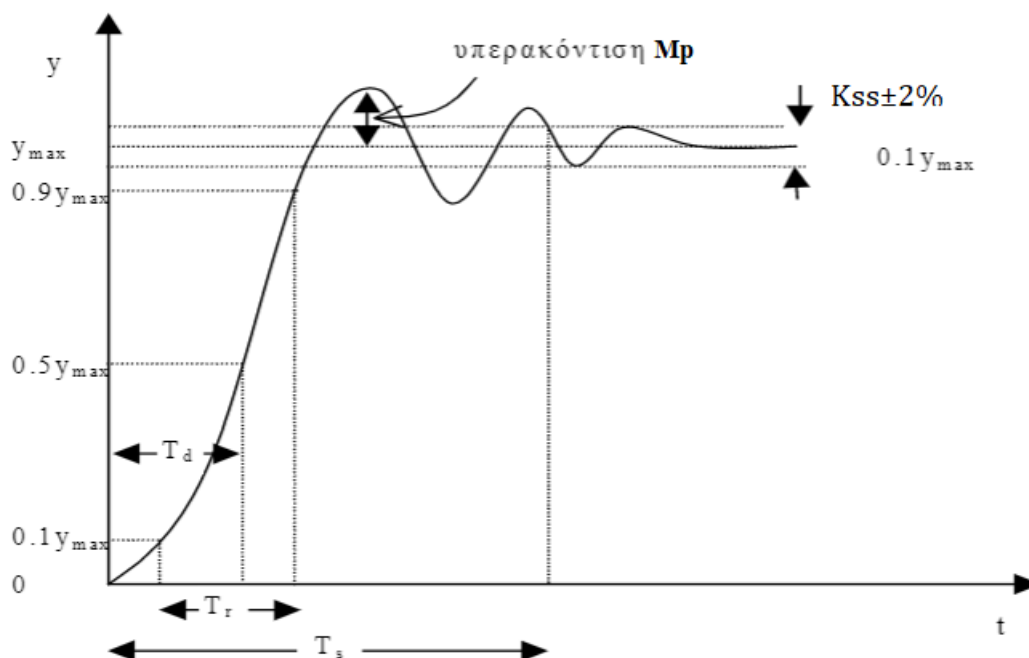
$$\text{Σήμα εξόδου στο πεδίο του χρόνου : } D_{out} = K_d \frac{dE(t)}{dt} \quad \text{ή} \quad D_{out} = K_c T_d \frac{dE(t)}{dt}$$

$$\text{Σήμα εξόδου στο πεδίο του Laplace: } D_{out} = K_d s E(s) \quad \text{ή} \quad D_{out} = K_c T_d s E(s)$$

Παρακάτω θα περιγραφεί υπό την μορφή πίνακα, πως επηρεάζουν τα κέρδη K_p , K_i , K_d ένα σύστημα.

Πίνακας 3.2: Επίδραση κερδών [20]

Κέρδη Ελεγκτών	Χρόνος ανύψωσης (T_r)	Χρόνος αποκατάστασης (T_s)	Υπερύψωση (M_p)	Μόνιμο σφάλμα
K_c	Μείωση	Μικρή αλλαγή	Αύξηση	Μείωση
K_i	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Εξάλειψη
K_d	Μικρή αλλαγή	Μείωση	Μείωση	Μικρή αλλαγή



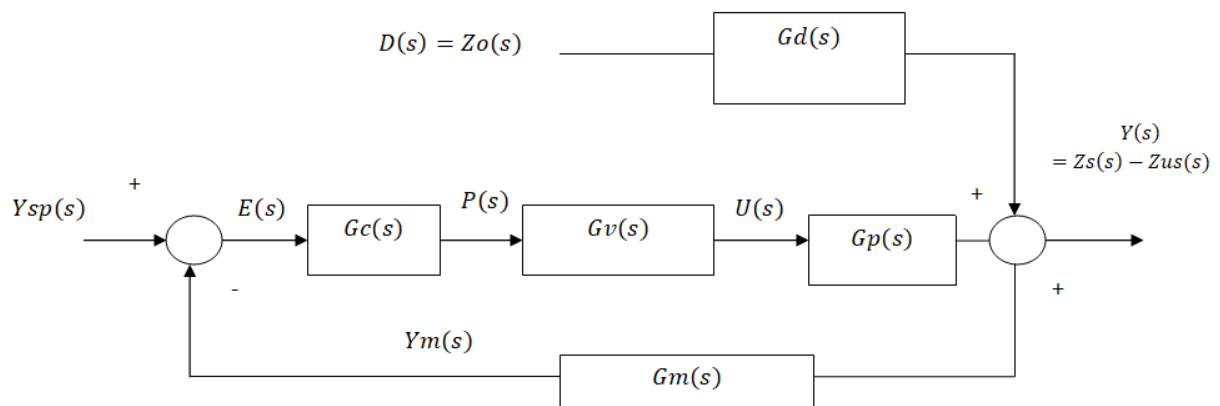
Σχήμα 3.2: Χαρακτηριστικά προδιαγραφής [22]

- Υπερύψωση (M_p): Η διαφορά της μέγιστης από την τελική τιμή της εξόδου (K_{ss})
- Χρόνος ανύψωσης (T_r): Είναι ο χρόνος όπου χρειάζεται η έξοδος ώστε να φτάσει από το 10% στο 90% της τελικής τιμής της (K_{ss})
- Χρόνος αποκατάστασης (T_s): Είναι ο χρόνος όπου χρειάζεται η έξοδος ώστε να φτάσει και να παραμείνει σε μια περιοχή της τελικής τιμής. Η περιοχή αυτή λαμβάνεται με μια απόκλιση $\pm 2\%$ της τελικής τιμής ($K_{ss} \pm 2\%$)

3.3 Γεωμετρικός τόπος των ριζών

Στην ενότητα 3.3, θα γίνει η ανάπτυξη του γεωμετρικού τόπου των ριζών του συστήματος της ενεργητικής ανάρτησης. Η διαδικασία εύρεσης του γεωμετρικού τόπου είναι πολύ σημαντική καθώς χάρις αυτήν θα βρεθούν το κρίσιμο κέδρος (K_{cr}) και η κρίσιμη περίοδος ταλάντωσης (P_{cr}). Πιο συγκεκριμένα σκοπός αυτής της ενότητας είναι ο προσδιορισμός των κρίσιμων τιμών των παραμέτρων K_{cr} και P_{cr} , έτσι ώστε στις επόμενες ενότητες να γίνει η ανάπτυξη των τριών ελεγκτών (P, PI, PID) μέσω της μεθόδου Ziegler-Nichols.

Αρχικά, το διάγραμμα βαθμίδων κλειστού βρόχου, το οποίο περιγραφεί το μοντέλο της ενεργητικής ανάρτησης του αυτοκίνητου είναι το εξής:



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα βαθμίδων, κλειστού βρόχου, της ενεργητικής ανάρτησης ενός οχήματος

Όπου,

- $G_c(s)$: Συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή
- $G_v(s)$: Συνάρτηση μεταφοράς του (υδραυλικού) ενεργοποιητή
- $G_p(s)$: Συνάρτηση μεταφοράς της διεργασίας (ενεργητικής ανάρτησης)
- $G_d(s)$: Συνάρτηση μεταφοράς της διαταραχής (επιφάνεια οδοστρώματος)
- $G_m(s)$: Συνάρτηση μεταφοράς μετρητικού στοιχείου (αισθητήρας θέσης)

Η εξίσωση η οποία περιγράφει την έξοδο του συστήματος κλειστού βρόχου, του σχήματος 3.3, είναι:

$$Y(s) = \frac{G_p(s)G_v(s)G_c(s)}{1+G_p(s)G_v(s)G_c(s)G_m(s)} Y_{sp}(s) + \frac{G_d(s)}{1+G_p(s)G_v(s)G_c(s)G_m(s)} D(s) \quad (3.3)$$

Δεδομένα:

- Συνάρτηση μεταφοράς της διεργασίας, μέσω μετασχηματισμού Laplace:

$$Gp = \frac{283 s^2 + 124660}{(243 s^2 + 370 s + 14671)(40 s^2 + 370 s + 139331) - (370 s + 14671)^2} \quad (3.4)$$

- Συνάρτηση μεταφοράς της διαταραχής, μέσω μετασχηματισμού Laplace:

$$Gd = \frac{-30292380 s^2}{(243 s^2 + 370 s + 14671)(40 s^2 + 370 s + 139331) - (370 s + 14671)^2} \quad (3.5)$$

- Συνάρτηση μεταφοράς του μετρητικού στοιχείου, προσεγγιστικά:

$$Gm = \frac{1}{30 s + 1} \quad (3.6)$$

- Συνάρτηση μεταφοράς του ενεργοποιητή, προσεγγιστικά:

$$Gv = \frac{1}{20 s + 1} \quad (3.7)$$

- Συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή:

Αρχικά ορίζουμε την συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος της ενεργητικής ανάρτησης ως εξής:

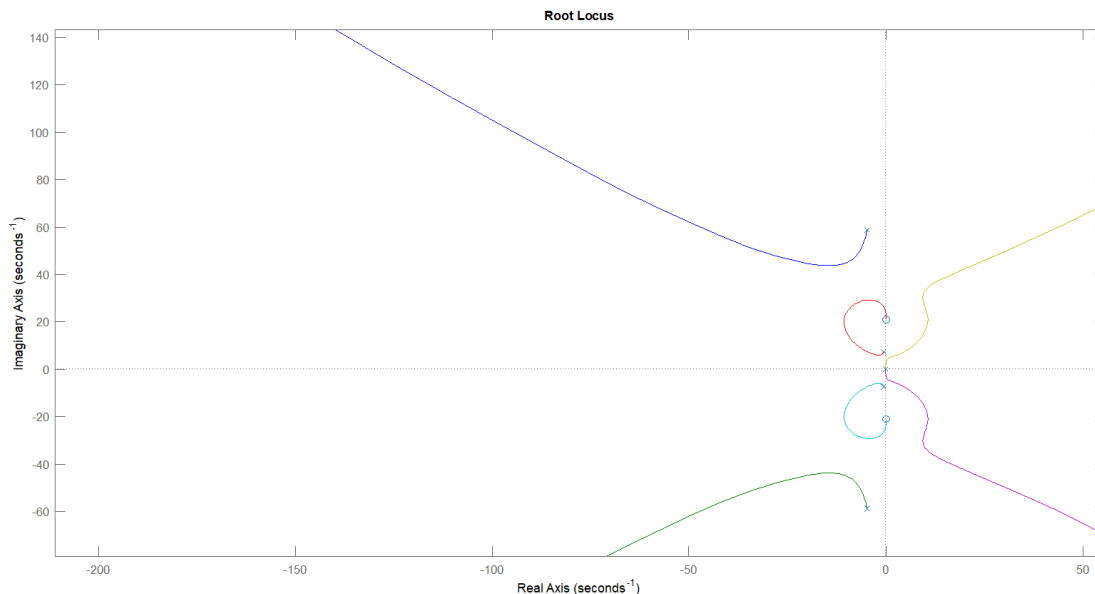
$$Gc = Kc \quad (3.8)$$

Η συγκεκριμένη υπόθεση έγινε με σκοπό την εύρεση του γεωμετρικού τόπου του συστήματος της ενεργητικής ανάρτησης και κατά συνέπεια την εύρεση του κρίσιμου κέρδους K_{cr} και του κρίσιμου πλάτους P_{cr} . Ουσιαστικά, πραγματοποιήθηκε η υπόθεση ότι ο ελεγκτής όπου έχει αναπτυχτεί είναι ένας αναλογικός ελεγκτής P όπου περιέχει το αναλογικό κέρδος Kc . Έπειτα, ακολουθώντας την διαδικασία δοκιμής-σφάλματος προσδιορίστηκε η τιμή του αναλογικού κέρδους (Kc) όπου, είναι η πιο κατάλληλη και δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, η τιμή αυτή είναι $Kc=1$.

Στην συνέχεια, η χαρακτηριστική εξίσωση του κλειστού βρόχου, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του γεωμετρικού τόπου είναι η παρακάτω:

$$G(s) = Gp(s)Gv(s)Gc(s)Gm(s) \quad (3.9)$$

Ο γεωμετρικός τόπος των ριζών του μοντέλου της ενεργητικής ανάρτησης όπου προέκυψε απεικονίζεται στο σχήμα 3.4. Ο οριζόντιος άξονας είναι εκείνος, ο οποίος περιέχει τους πραγματικούς αριθμούς ενώ ο κάθετος άξονας αναφέρεται στους φανταστικούς αριθμούς.

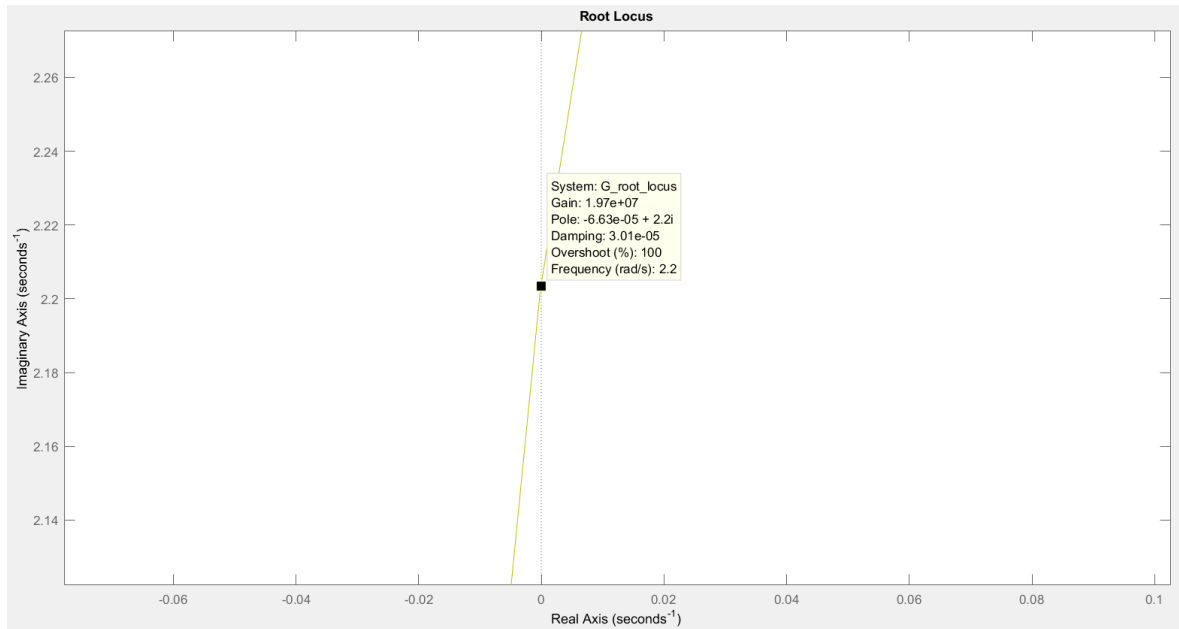


Σχήμα 3.4: Γεωμετρικός τόπος των ριζών

Σημαντικές διαπιστώσεις του γεωμετρικού τόπου:

- Ο αριθμός των ριζών της συνάρτησης $G(s)$ περιγράφει τον αριθμό των κλάδων του γεωμετρικού τόπου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ο αριθμός των ριζών της $G(s)$ είναι $n=6$, όπως και ο αριθμός των κλάδων όπως παρατηρούμε και από το σχήμα 3.4. Επίσης οι ρίζες της συνάρτησης $G(s)$ είναι η αρχή των κλάδων του γεωμετρικού τόπου (Ρίζες $G(s)$: $-4,7784 \pm 58,7801i$, $-0,6079 \pm 7,3301i$, $-0,1000$, $-0,0333$).
- Από τις ρίζες του συστήματος ή την αρχή κάθε κλάδου συμπεραίνεται ότι το σύστημα όπου μελετάται βρίσκεται σε ευστάθεια. Αυτό συμβαίνει διότι η αρχή κάθε κλάδου βρίσκεται αριστερά από τον φανταστικό άξονα, το οποίο σημαίνει ότι οι ρίζες του συστήματος έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος.
- Για το σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης, ο αριθμός των μηδενικών θέσεων του συστήματος πρέπει να είναι μικρότερος από τον αριθμό των ριζών. Ο αριθμός των μηδενικών θέσεων στο σύστημα της ανάρτησης είναι $m=2$, άρα ισχύει η συνθήκη $m < n$ και μπορούμε να συμπεράνουμε ότι $n-m=4$ κλάδοι του γεωμετρικού τόπου θα καταλήγουν σε μηδενικά τοποθετημένα στο άπειρο όπως και συμβαίνει (Μηδενικά συστήματος: $\pm 55,8256i$).
- Παρατηρείται συμμετρία ως προς τον οριζόντιο άξονα των πραγματικών αριθμών

Στην συνέχεια γίνεται η επιλογή ενός κλάδου ο οποίος τέμνει τον φανταστικό άξονα, έτσι ώστε να γίνει επιλογή του κρίσιμου κέρδους K_{cr} και του κρίσιμου πλάτους P_{cr} . Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχτηκε το σημείο τομής του κίτρινου κλάδου με τον φανταστικό άξονα, όπως παρατηρείται στο σχήμα 3.5, και οι πληροφορίες όπου πάρθηκαν είναι οι εξής:



Σχήμα 3.5: Το σημείο όπου επιλέχτηκε από τον γεωμετρικό τόπο των ριζών, για την εύρεση των K_{cr} και P_{cr}

Από τις πληροφορίες του σχήματος 3.5 μπορούν να παρθούν τα ζητούμενα αυτής της ενότητας, όπου είναι το κρίσιμο κέρδος K_{cr} και το κρίσιμο πλάτος P_{cr} και με τα οποία θα γίνει στην συνέχεια η ανάπτυξη των ελεγκτών:

- $K_{cr} = \text{Gain} = 1,97 \cdot 10^7$
- $Pole = 0 \pm 2,2i$ όπου, $\omega = 2,2$ άρα, $P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega} = 2,85$

3.4 Ανάπτυξη ελεγκτών με την μέθοδο Ziegler-Nichols.

Σε αυτήν την ενότητα θα πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη των τριών ελεγκτών στο σύστημα της ενεργής ανάρτησης. Οι ελεγκτές όπου θα αναπτυχτούν θα ελέγχουν την δύναμη του υδραυλικού ενεργοποιητή και θα την ρυθμίζουν με σκοπό την ελαχιστοποίηση του πλάτους ταλάντωσης της ανάρτησης. Οι ελεγκτές θα αναπτυχτούν με την μέθοδο Ziegler-Nichols χρησιμοποιώντας τον πίνακα 3.1. Όπως αναφέρθηκαν και στις προηγούμενες υποενότητες οι ελεγκτές όπου θα αναπτυχτούν με την συγκεκριμένη μέθοδο είναι οι παρακάτω:

- Ο αναλογικός ελεγκτής P
- Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής PI

- Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής PID

Για την ανάπτυξη των τριών ελεγκτών θα χρησιμοποιηθούν το κρίσιμο κέρδος και το κρίσιμο πλάτος όπου βρεθήκαν στην ενότητα 3.3 έτσι ώστε να βρεθούν τα ανάλογα κέρδη για κάθε ελεγκτή.

- $K_{cr} = 1,97 \cdot 10^7$
- $P_{cr} = 2,85$

Πίνακας 3.3: Υπολογισμός των παραμέτρων για την ρύθμιση Ziegler-Nichols.

Είδος Ελεγκτή	K_c	T_i	T_d
P	$0,985 \cdot 10^7$	∞	0
PI	$0,8865 \cdot 10^7$	2,375	0
PID	$1,182 \cdot 10^7$	1,425	0,35625

Οι τρεις παραπάνω ελεγκτές θα παράγουν κάποια σήματα εξόδου, που στο πεδίο του Laplace θα είναι τα εξής:

- Αναλογικός ελεγκτής: $P(s) = K_c E(s)$ (3.10)

- Αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής: $P(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s)$ (3.11)

- Αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής: $P(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s)$ (3.12)

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση των ελεγκτών στο κλειστό βρόχο της ενεργητικής ανάρτησης του αυτοκίνητου στο περιβάλλον της Matlab, κάνοντας χρήση του πίνακα 3.3, με σκοπό την εξέταση της λειτουργίας τους. Κατά την δοκιμή των ελεγκτών στο σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης παρατηρήθηκαν κάποια σημεία αστάθειας στον ελεγκτή PI. Οδηγηθήκαμε σε αυτό το συμπέρασμα καθώς το αποτέλεσμα της γραφικής παράστασης της απόκρισης εξόδου, δεν ήταν το επιθυμητό. Πιο συγκεκριμένα, εξήχθηκε μια γραφική στην οποία δεν υπήρχε απόσβεση του πλάτους ταλάντωσης με το πέρας του χρόνου αλλά αύξηση του πλάτους ταλάντωσης. Η αστάθεια όπου εμφανίστηκε οφειλόταν στο κρίσιμο κέρδος (K_{cr}) και στο κρίσιμο πλάτος (P_{cr}), για αυτό το λόγω με την χρήση της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος έγιναν κάποιες μετατροπές στις παραμέτρους Ziegler-Nichols, με σκοπό την αποφυγή της αστάθειας του συστήματος με την ανάπτυξη των ελεγκτών. Οι μετατροπές όπου συνέβησαν είναι ότι με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος έγινε διαίρεση του K_{cr} με τον αριθμό 20 και πολλαπλασιασμός του P_{cr} με το 15. Άρα, ο πίνακας ρύθμισης Ziegler-Nichols μετατράπηκε στον ακόλουθο:

Πίνακας 3.4: Μετατροπή της ρύθμιση Ziegler-Nichols για την αποφυγή της αστάθειας

Είδος Ελεγκτή	Kc	Ti	Td
P	$0.5 \cdot K_{cr}/20$	∞	0
PI	$0.45 \cdot K_{cr}/20$	$15 \cdot (1/1.2) \cdot P_{cr}$	0
PID	$0.6 \cdot K_{cr}/20$	$15 \cdot 0.5 \cdot P_{cr}$	$15 \cdot 0.125 \cdot P_{cr}$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μετατροπή των παραμέτρων K_{cr} και P_{cr} δεν συνέβη μόνο για τον PI ελεγκτή αλλά για όλους, έτσι ώστε να μπορέσει η σύγκριση των αποτελεσμάτων να είναι πιο αντικειμενική.

3.5 Ανάπτυξη ελεγκτή με την μέθοδο Morari και Zafiriou

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει ανάπτυξη του ελεγκτή με βάση το πρότυπο μοντέλο της συνάρτησης μεταφοράς διεργασία Gr. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει χρήση της ελαχίστης και της μη ελαχίστης φάσης της διεργασία και στην συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί η μεθοδολογία Morari και Zafiriou όπως θα αναπτυχτεί και παρακάτω. Σκοπό αυτής της ενότητας είναι ο σχεδιασμός ενός νέου ελεγκτή έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει η σύγκριση και η μελέτη με την προσομοίωση των τεσσάρων ελεγκτών στο σύστημα της ανάρτησης.

Αρχικά θα περιγράφει ένα συνοπτικό θεωρητικό μέρος της μεθοδολογίας Morari και Zafiriou.

Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι η συνάρτηση μεταφοράς διεργασίας, για την συγκεκριμένη μέθοδο, θα περιέχει και την συνάρτηση μεταφοράς του ενεργοποιητή και του μετρητικού στοιχείου, δηλαδή θα έχει την παρακάτω μορφή:

$$Gp(s) = Gp(s) Gm(s) Gv(s) \quad (3.13)$$

Επίσης η σύνθεση του νέου ελεγκτή, θα σχετίζεται την ελάχιστη και την μη-ελάχιστη φάση, άρα:

$$Gp(s) = Gp^-(s) Gp^+(s) \quad (3.14)$$

Όπου, $Gp^-(s)$: Ελάχιστη φάση

$Gp^+(s)$: Μη-ελάχιστη φάση (περιέχει νεκρό χρόνο , θετικά μηδενικά , εξισώσεις τις μορφής $Gp^+(s = i\omega) = 1$)

Από την μεθοδολογία Morari και Zafiriou γνωρίζω ότι η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή πρέπει να είναι της μορφής:

$$Gc(s) = \frac{Q(s)}{1 - Q(s)Gp(s)} \quad (3.15)$$

$$Q(s) = \left(\frac{1}{(\lambda s + 1)^r Gp^-(s)} \right) \quad (3.16)$$

$$Gc(s) = \left(\frac{1}{Gp^-(s)} \right) \left(\frac{1}{(\lambda s + 1)^r - Gp^+(s)} \right) \quad (3.17)$$

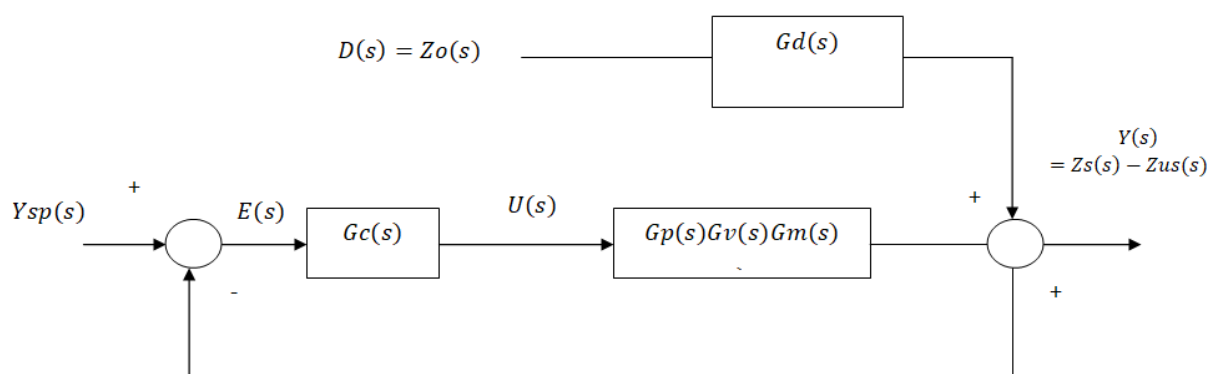
Όπου,

r: η διαφορά ανάμεσα στον βαθμό πολωνύμου του παρανομαστή και το βαθμό πολωνύμου του αριθμητή

λ: χρονική σταθερά ορίζεται από τον χρήστη

Με την παραπάνω εξίσωση επιτυγχάνεται ο σχεδιασμός ενός ελεγκτή όπου λαμβάνει υπόψη τα όλα τα χαρακτηριστικά της διεργασίας και μέσω της σταθεράς λ μπορεί να προσδιοριστεί η απόκριση της ταχύτητας του συστήματος από τον χρήστη.

Άρα, η τελική εξίσωση της απόκρισης του ελεγκτή σύμφωνα με το σχήμα 3.6 θα είναι της μορφής:



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα βαθμίδων, κλειστού βρόχου, της ενεργητικής ανάρτησης ενός οχήματος

$$Y(s) = \frac{1}{(\lambda s+1)^r} Gp^+(s) Ysp + \left[1 - \frac{1}{(\lambda s+1)^r} Gp^+(s) \right] D(s) \quad (3.18)$$

Όσο αφορά την ανάπτυξη του ελεγκτή στο μοντέλο της ενεργητικής ανάρτησης του οχήματος:

$$Gp(s) = Gp(s) Gm(s) Gv(s) = \frac{(283 s^2 + 124660)}{[(243 s^2 + 370 s + 14671)(40 s^2 + 370 s + 139331) - (370 s + 14671)^2][30 s + 1][20 s + 1]} \quad (3.19)$$

Επίσης, λόγω του ότι δεν υπάρχει στην παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς διεργασίας νεκρός χρόνος, θετικά μηδενικά ή εξίσωση της μορφής $Gp^+(s = i\omega) = 1$ ή μη-ελάχιστη φάση θα ισούται με «1» δηλαδή:

- $Gp(s)^- = Gp(s) \quad (3.20)$

- $Gp(s)^+ = 1 \quad (3.21)$

Η σταθερά r που υπάρχει στην συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή στην μεθοδολογία του Morari και Zafiriou θα ισούται με $r=6-2=4$, διότι ο παρανομαστής της συνάρτησης $Gp(s)$ είναι 4ου βαθμού και ο αριθμητής της συνάρτησης $Gp(s)$ είναι 2ου βαθμού. Άρα, η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή θα είναι της μορφής:

$$Gc(s) = \left(\frac{1}{Gp(s)} \right) \left(\frac{1}{(\lambda s+1)^4 - 1} \right) \quad (3.22)$$

Αφού, έγινε χρήση της παραπάνω εξίσωσης, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του νέου ελεγκτή στο περιβάλλον της Matlab. Έπειτα από την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος η τιμή της σταθεράς λ , όπου καθορίζει την ταχύτητα της απόκρισης της εξόδου, ορίστηκε να είναι η τιμή «5» διότι παρουσίαζε την ταχύτερη και καλύτερη συμπεριφορά η απόκριση της εξόδου του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι αρχικά η προσομοίωση του ελεγκτή θα πραγματοποιηθεί για σήμα αναφοράς «1», δηλαδή ότι η τελική θέση ηρεμίας της ανάρτησης θα είναι η θέση του 1ος εκατοστού και ότι για

λογούς διευκόλυνσης θα θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει κάποιους είδους διαταραχή από το οδόστρωμα.

3.6 Τυπική συμπεριφορά συστήματος κλειστού βρόχου

Έπειτα από την ανάπτυξη τεσσάρων ελεγκτών, τριών με την μεθοδολογία Ziegler-Nichols και ενός με την μέθοδο Morari και Zafiriou, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα όπου προκύπτουν με την ανάπτυξη αυτών των ελεγκτών στο σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης.

Αρχικά, να αναφερθούν κάποια βασικά στοιχεία για τους ελεγκτές καθώς και οι συναρτήσεις μεταφοράς κάθε ελεγκτή:

Για κρίσιμο κέρδος $K_{cr} = 1,97 \cdot 10^7$ και κρίσιμο πλάτος $P_{cr} = 2,85$ οι παράμετροι όπου θα χρησιμοποιηθούν για την εύρεση των συναρτήσεων μεταφοράς των ελεγκτών (με την μέθοδο Ziegler-Nichols) θα έχουν τις παρακάτω τιμές. Να σημειωθεί ότι οι παρακάτω τιμές έχουν υπολογιστεί έπειτα από την μετατροπή που πραγματοποιήθηκε στην ενότητα 3.4, για τις παραμέτρους K_c , T_i , T_d με σκοπό την αποφυγή της αστάθειας.

Πίνακας 3.5: Τιμές των παραμέτρων K_c , T_i , T_d

Είδος Ελεγκτή	K_c	T_i	T_d
P	$0,04925 \cdot 10^7$	∞	0
PI	$0,044325 \cdot 10^7$	35,625	0
PID	$0,0591 \cdot 10^7$	21,375	5,34375

Άρα, οι συναρτήσεις μεταφοράς για τους τρεις ελεγκτές όπου αναπτύχτηκαν με την μέθοδο Ziegler-Nichols θα είναι οι παρακάτω:

- Για τον ελεγκτή P: $G_c(s) = 0,04925 \cdot 10^7$ (3.23)

- Για τον ελεγκτή PI: $G_c(s) = \frac{1,5791 \cdot 10^7 s + 0,044325 \cdot 10^7}{35,625 s}$ (3.24)

- Για τον ελεγκτή PID: $G_c(s) = \frac{6,7502 \cdot 10^7 s^2 + 1,2632 \cdot 10^7 s + 0,0591 \cdot 10^7}{21,375 s}$ (3.25)

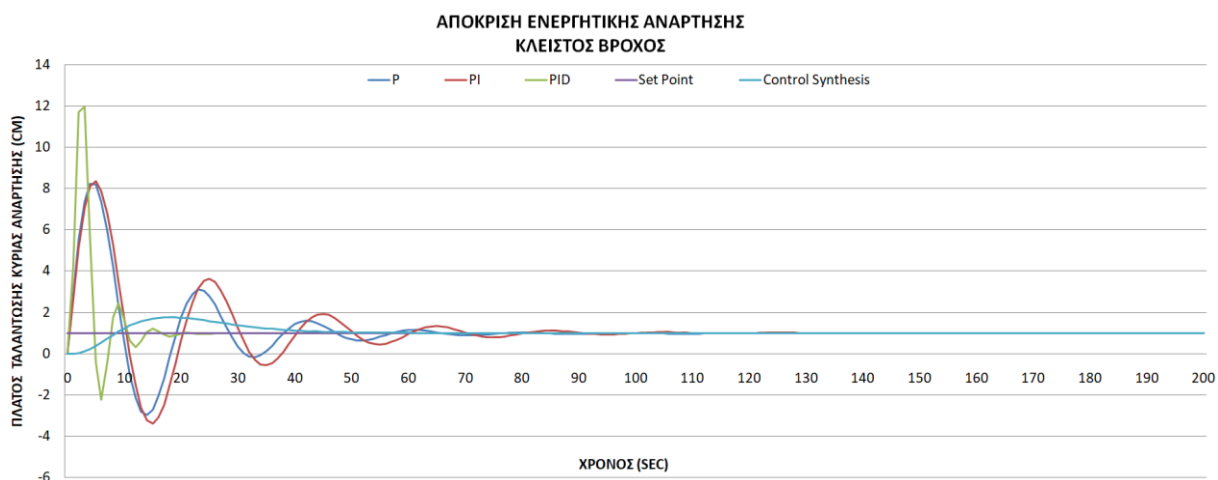
Για τον ελεγκτή όπου αναπτύχτηκε με την μέθοδο Morari – Zafiriou η συνάρτηση μεταφοράς του θα έχει την τιμή:

$$G_c(s) = \left[\frac{[(243 s^2 + 370 s + 14671)(40 s^2 + 370 s + 139331) - (370 s + 14671)^2][30 s + 1][20 s + 1]}{(283 s^2 + 124660)} \right] \left[\frac{1}{(5 s + 1)^4 - 1} \right] \quad (3.26)$$

Έπειτα, τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν υπό την μορφή γραφημάτων και θα έχουν σκοπό την παρατήρηση και την μελέτη κάθε ελεγκτή. Επίσης από τα γραφήματα θα εξαρθούν σημαντικές πληροφορίες για το πώς λειτουργεί το σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης με την προσθήκη κάθε ελεγκτή ξεχωριστά. Ακόμα όσο αφορά τις προσομοιώσεις των συστημάτων κλειστού βρόχου της ενεργητικής ανάρτησης σε αυτήν την ενότητα δεν έχουν οριστεί κάποιες διαταραχές. Παρακάτω θα παρουσιαστούν δυο γραφήματα στα οποία θα παρατήσουμε:

1. Την απόκριση της ανάρτησης για κάθε ελεγκτή
2. Τις τιμές σφαλμάτων – πορεία σφάλματος

Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.7 μπορεί να παρατηρηθεί η απόκριση κάθε συστήματος ανάρτησης (κλειστού βρόχου) με την παρουσία διαφορετικών ελεγκτών υποθέτοντας ότι η επιθυμητή τελική θέση ηρεμίας της ανάρτησης (όπου αναμένετε να ισορροπήσει) είναι η θέση του 1ος εκατοστού (set point). Στον οριζόντιο άξονα περιγράφεται ο χρόνος για τον οποίο πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση, ο οποίος είναι 200 δευτερόλεπτα με βήμα 1, και ο κάθετος άξονας περιγράφει το πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης ($z_s(t)$ - $z_u(t)$). Να σημειωθεί ότι η ταλάντωση της ανάρτησης εξαρτάται από την διαφορά της αναρτημένης μάζας ($z_s(t)$) και της μη αναρτημένης μάζας ($z_u(t)$).

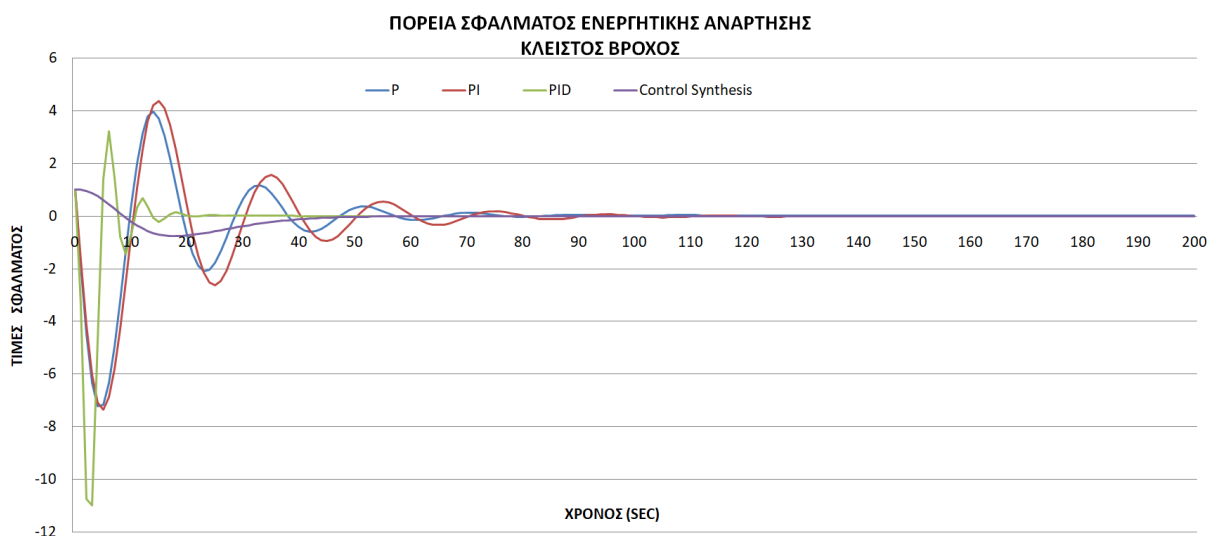


Σχήμα 3.7: Απόκριση ενεργητικής ανάρτησης μετά την ανάπτυξη των ελεγκτών.

Μια ιδανική αντίδραση ενός συστήματος ανάρτησης κλειστού βρόχου θα ήταν ένα ομαλό-μικρό πλάτος ταλάντωσης και μια σχετικά «γρήγορη» ταχύτητα σύγκλιση προς το σήμα αναφοράς, δηλαδή γρήγορη επαναφορά της ανάρτησης στην ανάλογη θέση ηρεμίας που έχει οριστεί. Στο παραπάνω σχήμα, παρατηρείται ότι ο ελεγκτής PID «εξαναγκάζει» την ενεργητική ανάρτηση στο να «πιάσει» σχετικά σε μικρό χρονικό διάστημα το σήμα αναφοράς. Βεβαίως ένα αρνητικό το οποίο μπορεί να παρατηρηθεί στην απόκριση της ανάρτησης είναι ότι υπάρχει ένα αρκετά μεγάλο πλάτος ταλάντωσης, πράγμα το οποίο δεν συνεπάγεται με την οδηγική άνεση και την

απομόνωση της καμπίνας από τις εξωτερικές διαταραχές. Επίσης, οι άλλοι δυο ελεγκτές οι οποίοι αναπτύχθηκαν με την μεθοδολογία Ziegler-Nichols, δηλαδή ο P και ο PI, στο σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης εμφανίζουν πιο μικρό πλάτος ταλάντωσης από ότι ο PID ελεγκτής αλλά παρατηρείται πιο «αργή» σύγκλιση προς το σήμα αναφοράς, το οποίο συνεπάγεται με περισσότερες ταλαντώσεις της ανάρτησης σε κάποιου είδους εξωτερικής διαταραχής (ανώμαλο οδόστρωμα). Τέλος το σύστημα της ανάρτησης στο οποίο έχει αναπτυχθεί ο ελεγκτής με την μέθοδο Morari και Zafiriou παρουσιάζει την καλύτερη απόκριση. Αυτό συμπεραίνεται από την ομαλή πορεία της ταλάντωσης της ανάρτησης, την γρήγορη σύγκλιση προς το σήμα αναφοράς (δηλαδή την σύγκλιση της ανάρτησης στην τιμή αναφοράς) και το μικρό πλάτος ταλάντωσης όπου εμφανίζει.

Στην συνέχεια στο Σχήμα 3.8, παρουσιάζεται η εναλλαγή του σφάλματος, δηλαδή η απόκλιση της τιμής αναφοράς από την έξοδο του συστήματος κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Ο οριζόντιος άξονας περιγράφει την χρονική περίοδο κατά την οποία πραγματοποιείτε η προσομοίωση, δηλαδή για 200 δευτερόλεπτα με βήμα 1, ενώ ο κάθετος άξονας περιγράφει την απόκλιση της ανάρτησης από την τιμή αναφοράς, δηλαδή την απόκλιση από την επιθυμητή τελική θέση ηρεμίας όπου αναμένεται να ισορροπήσει η ανάρτηση έπειτα από ένα χρονικό διάστημα ($y_{sp}(t)-y(t)$), η οποία η θέση του 1^{ος} εκατοστού (set point).



Σχήμα 3.8: Εναλλαγή σφάλματος στο σύστημα κλειστού βρόχου της ανάρτησης

Στο παραπάνω σχήμα, ουσιαστικά περιγράφεται η προσπάθεια εξάλειψης του σφάλματος (error), δηλαδή η σύγκλιση των γραφικών παραστάσεων προς την τιμή «0». Με την εξάλειψη του σφάλματος επιτυγχάνεται η πλήρης καθοδήγηση της ανάρτησης στην θέση αναφοράς (set point) μέσω των ελεγκτών, το οποίο είναι και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αυτό όπου αναμένουμε από τα συστήματα στα οποία έχουν αναπτυχθεί οι τέσσερις ελεγκτές είναι μια γρήγορη εξάλειψη του σφάλματος. Με μια γρήγορη μάτια,

παρατηρείται ότι οι ελεγκτές PID και ο ελεγκτής ο οποίος αναπτύχθηκε με την μέθοδο Morari και Zafiriou, καταφέρνουν να εξαλείψουν σε γρήγορο χρονικό διάστημα το σφάλμα, καθώς η καμπύλες αυτών των δυο ελεγκτών συγκλίνουν γρηγορότερα στο μηδέν. Από την άλλη πλευρά οι άλλοι δυο ελεγκτές P και PI παρουσιάζουν μια πιο αργή ταχύτητα σύγκλιση του σφάλματος προς το μηδέν, το οποίο δεν είναι τόσο επιθυμητό. Πιο αναλυτικά, ο ελεγκτής PID εξαλείφει το σφάλμα στα 21 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης, ο ελεγκτής PI στα 100 δευτερόλεπτα από της προσομοίωση, ο ελεγκτής P παρατηρείται ότι εξαλείφει το σφάλμα στα 94 δευτερόλεπτα ενώ ο ελεγκτής όπου αναπτύχθηκε με την μέθοδο Morari και Zafiriou στα 45 δευτερόλεπτα. Επίσης πολύ σημαντική πληροφορία, όπου αξίζει να αναφερθεί, είναι κατά ποσό το σφάλμα ταυτίζεται με το σημείο μηδέν ή παρουσιάζει κάποια απόκλιση, δηλαδή κατά ποσό η ανάρτηση επιστρέφει μετά από ένα αρχικό διάστημα στην αρχική της θέση ή αν παρουσιάζει κάποια απόκλιση από αυτήν. Για τους ελεγκτές PI, PID και τον ελεγκτή οπής αναπτύχθηκε με την μέθοδο Morari και Zafiriou εμφανίζεται μηδενικό σφάλμα, το οποίο σημαίνει ότι δεν υπάρχει απόκλιση μεταξύ του σημείου αναφοράς και του σήματος εξόδου, άρα η ανάρτηση «πιάνει» την θέση αναφοράς (set point). Όμως, ο ελεγκτής P σύμφωνα με το σφάλμα του δεν ταυτίζεται ακριβώς με το σήμα αναφοράς, δηλαδή ο συγκεκριμένος ελεγκτής δεν «οδηγεί» την ανάρτηση στην επιθυμητή θέση όπου έχει οριστεί αλλά συγκλίνει πολύ κοντά σε αυτήν. Πιο συγκεκριμένα, το σφάλμα του ελεγκτή P είναι της τάξεως του 2,89%. Το σφάλμα είναι πολύ μικρό και μπορεί να θεωρηθεί και αμελητέο ωστόσο δεν μπορεί να παραλειφτεί και να μην αναφερθεί αυτή η απόκλιση της ανάρτησης από την τιμή αναφοράς, η οποία στην συγκεκριμένη μελέτη έχει τεθεί ότι είναι το 1 εκατοστό.

Εν κατακλείδι, σύμφωνα με τα παραπάνω γραφήματα ο ελεγκτής όπου αναπτύχθηκε με την μέθοδο Morari και Zafiriou στο μοντέλο της ενεργητική ανάρτησης έχει καλύτερη συμπεριφορά στο σύστημα όπου μελετάμε. Πιο συγκεκριμένα, όπως παρατηρείται και από το σχήμα 3.7 η ανάρτηση παρουσιάζει ταχύτερη σύγκλιση προς το σήμα αφοράς και μικρότερο πλάτος ταλάντωσης όπου συνεπάγεται με ομαλότερη πορεία ταλάντωσης. Επίσης από το σχήμα 3.8, το σύστημα με το συγκεκριμένο ελεγκτή έχει πλήρη επαναφορά στην αρχική του θέση (set point), καθώς υπάρχει μηδενισμός του σφάλματος. Τα παραπάνω αποτελέσματα οδηγούν στην αύξηση της άνεση του οδηγού, στην καλύτερη οδηγική συμπεριφορά του οχήματος και καλύτερη απομόνωση της καμπίνας από της διάφορες διαταραχές.

Κεφάλαιο 4: Δοκιμή ελεγκτών

4.1 Γενικά

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκε η διαδικασία για την ανάπτυξη των τεσσάρων ελεγκτών μέσω των μεθοδολογιών Ziegler-Nichols και Morari-Zafiriou. Στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση των ελεγκτών στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab και εξήχθηκαν αρκετά σημαντικές πληροφορίες, μέσω των γραφικών παραστάσεων, για κάθε ελεγκτή ξεχωριστά. Ωστόσο η παραπάνω μελέτη των ελεγκτών έγινε με την υπόθεση του μηδενισμού της διαταραχής, δηλαδή έγινε η υπόθεση ότι δεν υπάρχει καμιά διαταραχή όπου να προέρχεται από το οδόστρωμα. Ουσιαστικά οι ελεγκτές προσπαθούσαν να «πιάσουν» το ανάλογο σήμα αναφοράς όπου είχε δοθεί. Πιο συγκεκριμένα, η ενεργητική ανάρτηση ξεκίνησε από την αρχική θέση των «0» εκατοστών και η τιμή αναφοράς ήταν το «1» εκατοστό, δηλαδή θέλαμε ο ελεγκτής να οδηγήσει την ανάρτηση στην θέση του «1ος» εκατοστού όπου θα βρισκόταν σε κατάσταση ηρεμίας έπειτα από κάποιες ταλαντώσεις και θα ισορροπούσε. Σε αυτό το κεφάλαιο σκοπός είναι η δημιουργία κάποιων σεναρίων έτσι ώστε να εμπλακεί σε όλο αυτόν τον έλεγχο και η παράμετρος της διαταραχής, δηλαδή η ανωμαλία του οδοστρώματος. Παρακάτω θα πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός των σεναρίων όπου θα δοκιμαστούν οι ελεγκτές και έπειτα θα γίνει η προσομοίωση αυτών των σεναρίων στο περιβάλλον της Matlab, για το σύστημα κλειστού βρόχου της ενεργητικής ανάρτησης. Τα σενάρια όπου θα αναπτυχτούν είναι τα εξής:

- **Σενάριο 1: Σταθερό σήμα αναφοράς με μη συνεχή διαταραχή, βηματικής μορφής (απλή μορφή)**
- **Σενάριο 2: Σταθερό σήμα αναφοράς με μη συνεχή διαταραχή βηματικής μορφής (σύνθετη μορφή)**
- **Σενάριο 3: Σταθερό σήμα αναφοράς με συνεχή διαταραχή, ημιτονοειδής μορφής**
- **Σενάριο 4: Μεταβλητό σήμα αναφοράς με διαταραχή βηματικής μορφής**

Τα αποτελέσματα όπου αναμένεται να παρθούν είναι κάποιες γραφικές όπου θα περιγράφουν την πορεία της ανάρτησης στις διάφορες διαταραχές και την ταχύτητα σύγκλισης προς την τιμή αναφοράς καθώς και την πορεία του σφάλματος από την αρχή της προσομοίωσης μέχρι την ελαχιστοποίηση του ή και τον μηδενισμό του, όπου είναι και το πιο επιθυμητό. Τέλος θα πραγματοποιηθεί και η σύγκριση των ελεγκτών έκτος από την μελέτη τους για κάθε σενάριο ξεχωριστά.

Τα διαγράμματα θα είναι τα εξής:

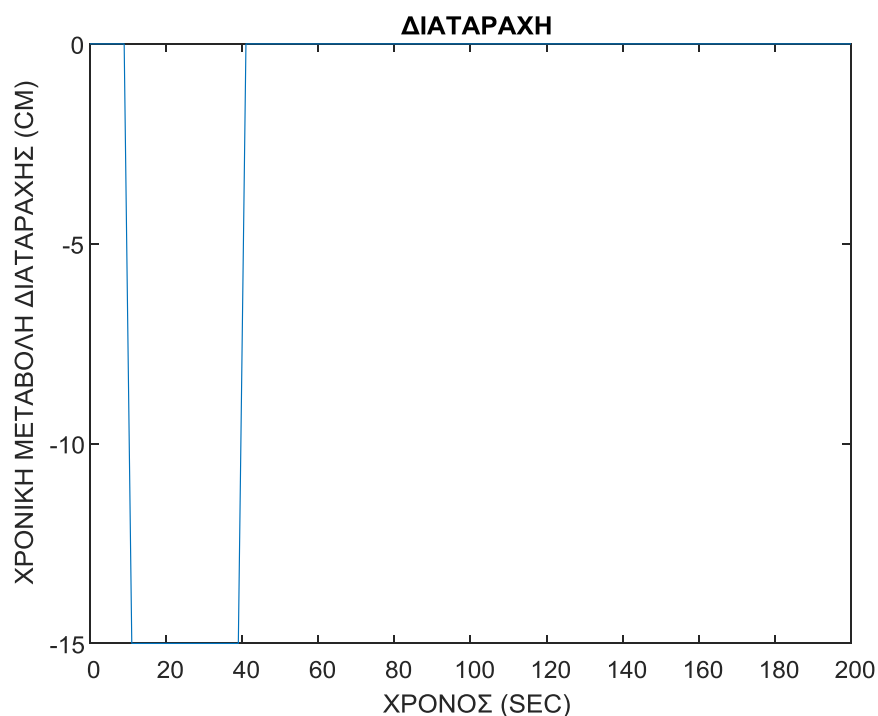
- **Διάγραμμα απόκρισης ενεργητικής ανάρτησης:** Σε αυτού του είδους τα σχήματα, θα παρουσιάζεται η απόκριση της ενεργητικής ανάρτησης. Θα περιέχει τέσσερις γραφικές παραστάσεις όπου η κάθε γραφική παράσταση περιγραφεί το σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης με διαφορετικό ελεγκτή. Να σημειωθεί

ότι έχουν αναπτυχθεί τέσσερις ελεγκτές (τρεις με την μεθοδολογία Ziegler-Nichols και ένας με την μέθοδο Morari-Zafiriou). Επίσης τα παρακάτω σχήματα θα περιέχουν και το σήμα αναφοράς, όπου είναι η τελική θέση ηρεμίας που αναμένουμε να καταλήξει η ανάρτηση έπειτα από τις ταλαντώσεις. Ο κάθετος άξονας θα περιγραφεί την μετατόπιση της κυρίας ανάρτησης (zs-zus) ενώ ο οριζόντιος άξονας θα περιγραφεί τον χρόνο για τον οποίο πραγματοποιείται η προσομοίωση.

- **Διάγραμμα πορείας σφάλματος:** Θα παρουσιάζεται η πορεία του σφάλματος ($\text{error} = y_{\text{sp}} - y$) η οποία αναφέρεται στην διαφορά της τιμής αναφοράς και της εξόδου του συστήματος της ενεργητικής ανάρτησης. Ο κάθετος άξονας θα περιγραφεί την τιμή του σφάλματος ενώ ο οριζόντιος τον χρόνο προσομοίωσης.

4.2 Σενάριο 1: Σταθερό σήμα αναφοράς με βηματική μορφή διαταραχής (απλή μορφή)

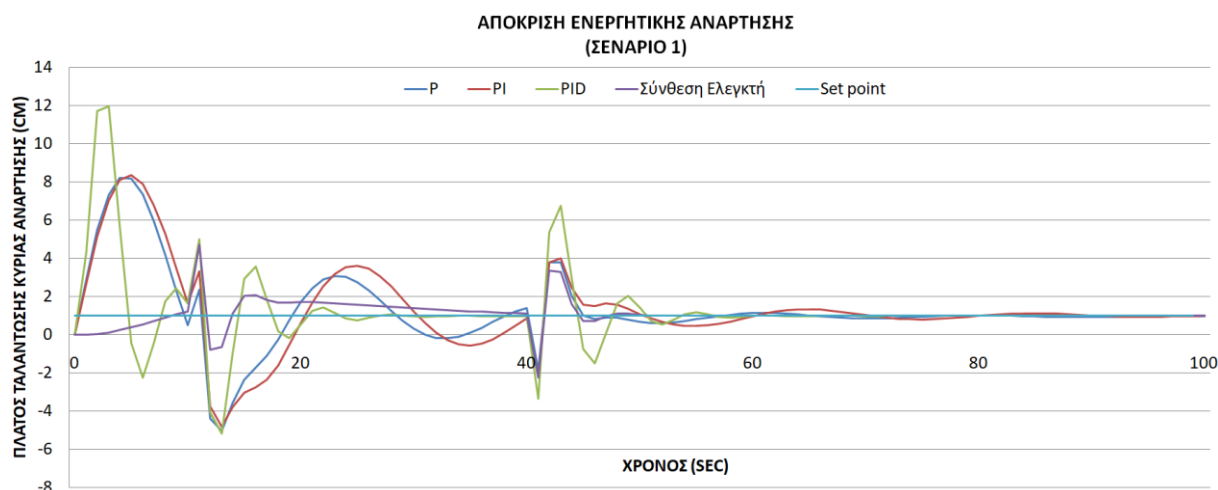
Στο παρόν σενάριο, επιλέχτηκε να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση σχετικά μιας απλής διαταραχής. Η διαταραχή είναι βηματικής μορφής και ουσιαστικά αποτελείται από δυο διαταραχές στα «10» και στα «40» δευτερόλεπτα με πλάτος «-15» εκατοστά και «15» εκατοστά αντίστοιχα. Το παρακάτω σενάριο θα μπορούσε να προσομοιαστεί και με μια «λακκούβα» 15 εκατοστών, όπου θα μπορούσε να υπάρχει στο οδόστρωμα. Επίσης σε αυτό το σενάριο έχει επιλεχτεί να υπάρχει σταθερό σήμα αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, η ανάρτηση θα βρίσκεται στην θέση ηρεμίας «0» και θα πρέπει να βρεθεί στο τελικό σημείο ισορροπίας του «1ος» εκατοστού έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα, όπου είναι και η τιμή αναφοράς.



Σχήμα 4.1: Διαταραχή πρώτου σεναρίου

Έπειτα, εφαρμόστηκε για κάθε σύστημα κλειστού βρόγχου της ενεργητικής ανάρτησης, το οποίο περιείχε και διαφορετικό ελεγκτή, η παραπάνω διαταραχή και αναμένεται να παρατηρηθεί η απόκριση της ανάρτησης και η πορεία του σφάλματος. Σκοπός κάθε ελεγκτή είναι η εξαλείψει της διαταραχής και η σύγκλιση της απόκρισης του σήματος εξόδου προς το σήμα αναφοράς μέσω των κατάλληλων ρυθμίσεων και του ελέγχου του υδραυλικού ενεργοποιητή και κατά συνέπεια της ενεργής δύναμης.

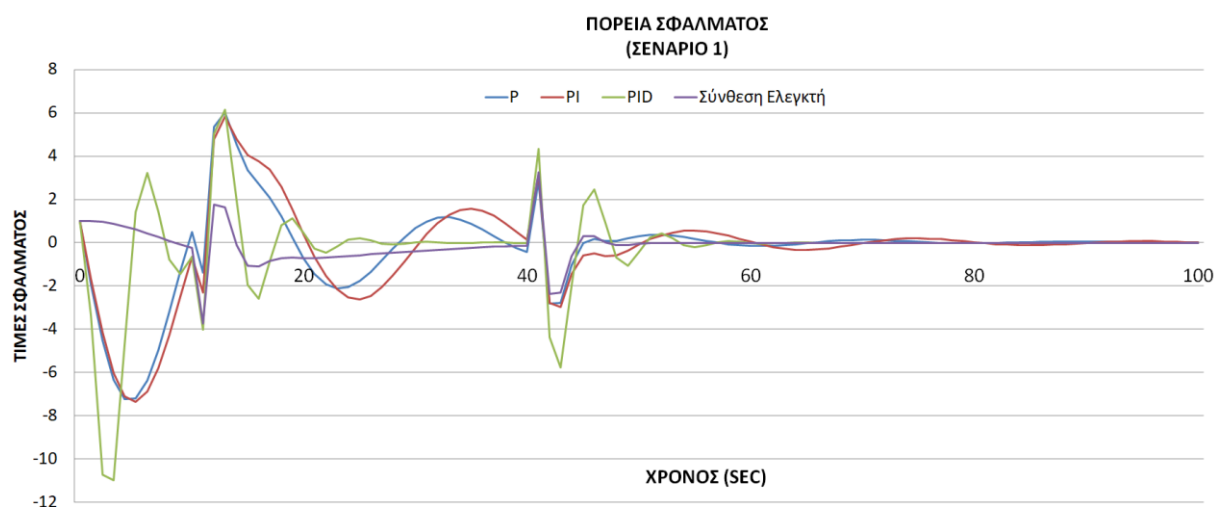
Να σημειωθεί ότι στις παρακάτω γραφικές, για το σενάριο 1, εμφανίζονται μόνο τα 100 πρώτα δευτερόλεπτα και αυτό συμβαίνει διότι έπειτα από τα 100 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης σχεδόν όλοι οι ελεγκτές έχουν «πιάσει» το σήμα αναφοράς. Άρα επιλέχτηκαν να δειχθούν τα 100 δευτερόλεπτα όπου συμβαίνουν οι διαταραχές και οι ελεγκτές κάνουν ακόμα τις απαραίτητες ρυθμίσεις ώστε οι ανάρτηση να συγκλίνει προς το ανάλογο σήμα αναφοράς.



Σχήμα 4.2: Απόκριση ανάρτησης στην διαταραχή του πρώτου σεναρίου για τα 100 πρώτα δευτερόλεπτα

Στο παραπάνω σχήμα μπορεί να γίνει αντιληπτό η εφαρμογή της βηματικής διαταραχής. Μπορούν να παρατηθούν οι δυο διαταραχές στα «10» και «40» δευτερόλεπτα της προσομοίωσης καθώς και οι τέσσερις ελεγκτές που προσπαθούν να την εξαλείψουν. Σε αυτά τα σημεία παρατηρείται ότι, και για τα τέσσερα συστήματα κλειστού βρόγχου, η ανάρτηση κάνει κάποιες ταλαντώσεις με σκοπό την επαναφορά της ανάρτησης στο σήμα αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα τα οποία περιέχουν τους ελεγκτές P και PI παρουσιάζουν παρόμοια πορεία. Οι ελεγκτές δεν καταφέρνουν να επαναφέρουν «γρήγορα» την ανάρτηση στην τελική θέση ισορροπίας (1^ο εκατοστό) έπειτα από την εφαρμογή των διαταραχών, δηλαδή παρατηρείται μια «αργή» ταχύτητα σύγκλισης προς το σήμα αναφοράς για τους δυο ελεγκτές, όπου αναφέρθηκαν, σε σχέση με τους άλλους δυο ελεγκτές στα σημεία των 10 και 40 δευτερολέπτων. Επίσης οι δυο ελεγκτές έκτος από αργή ταχύτητα σύγκλισης παρουσιάζουν και σχετικά μεγάλα πλάτη ταλάντωσης στα 10 και στα 40 δευτερόλεπτα λόγω των διαταραχών και αυτό δεν οδηγεί στην καλύτερη οδηγική άνεση και στην καλύτερη συμπεριφορά του οχήματος. Όσο αφορά τα άλλα δυο συστήματα ανάρτησης κλειστού βρόγχου, τα οποία περιέχουν

τους ελεγκτές PID και η σύνθεση ελεγκτής με την μέθοδο Morari-Zafiriou, παρουσιάζουν αρκετά «γρήγορη» σύγκλιση προς το σήμα αναφοράς στα σημεία εφαρμογής των διαταραχών, το οποίο είναι και το πιο επιθυμητό. Παρατηρείται όμως ότι το σύστημα ανάρτησης με τον PID ελεγκτή παρουσιάζει αρκετά μεγάλο πλάτος ταλάντωσης στα σημεία εφαρμογής των διαταραχών (10 και στα 40 δευτερόλεπτα), το οποίο δεν είναι αποδεκτό διότι αυτό σημαίνει ότι ο ελεγκτής δεν οδηγεί την ανάρτηση στην ταχεία εξάλειψη των διαταραχών και κατά συνέπεια στην απομόνωση της καμπίνας. Αντίθετα το σύστημα κλειστού βρόχου με τον ελεγκτή όπου αναπτύχθηκε με την μέθοδο Morari-Zafiriou έχει σχετικά μικρό πλάτος ταλάντωσης και αντιδρά καλύτερα από όλους τους ελεγκτές στα σημεία όπου εφαρμόστηκαν οι διαταραχές με σκοπό την εξαλείψει τους. Παρακάτω θα γίνει μια μελέτη της πορείας του σφάλματος.



Σχήμα 4.3: Πορεία σφάλματος στην διαταραχή του πρώτου σεναρίου

Στην περίπτωση της πορείας του σφάλματος αναμένεται οι γραφικές παραστάσεις όπου αναφέροντα στα συστήματα για διαφορετικούς ελεγκτές να μηδενίσουν το σφάλμα, δηλαδή να μειώσουν σε μηδενικό βαθμό την απόκλιση ανάμεσα στην τιμή αναφοράς και την τιμή εξόδου. Το παραπάνω γεγονός σημαίνει ότι η θέση της ανάρτησης είναι στο σημείο όπου είναι επιθυμητό, δηλαδή στην θέση του «1ος» εκατοστού. Στο παραπάνω σχήμα μπορούν να γίνουν αντιληπτές οι διαταραχές στα σημεία των 10 και 40 δευτερόλεπτων καθώς παρατηρούνται ταλαντώσεις στην πορεία του σφάλματος πράγμα το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει αλλαγή στις τιμές εξόδου του συστήματος. Στα παραπάνω σημεία παρατηρείται ότι ο ελεγκτής όπου αναπτύχθηκε με την μέθοδο Morari-Zafiriou αντιδρά καλύτερα από τους άλλους ελεγκτές όπου αναπτύχθηκαν με την μέθοδο Ziegler-Nichols. Αυτό συμπεραίνεται διότι η πορεία της γραφικής παράστασης όπου αφορά το σύστημα κλειστού βρόχου με τον συγκεκριμένο ελεγκτή παρουσιάζει στα σημεία των 10 και 40 δευτερόλεπτων «γρήγορη» ταχύτητα σύγκλισης προς την τιμή «0» και σχετικά μικρό πλάτος ταλάντωσης. Το παραπάνω γεγονός συμβαίνει διότι ο ελεγκτής αντιδρά στις διαταραχές και προσπαθεί μέσω της ρύθμισης της ενεργής δύναμης του υδραυλικού ενεργοποιητή να μηδενίσει το σφάλμα και έμμεσα να εξαλείψει τις διαταραχές. Οι ελεγκτές όπου αναπτύχθηκαν με την μέθοδο Ziegler-Nichols παρουσιάζουν πιο «αργή» σύγκλιση προς την τιμή «0» και πιο μεγάλο πλάτος

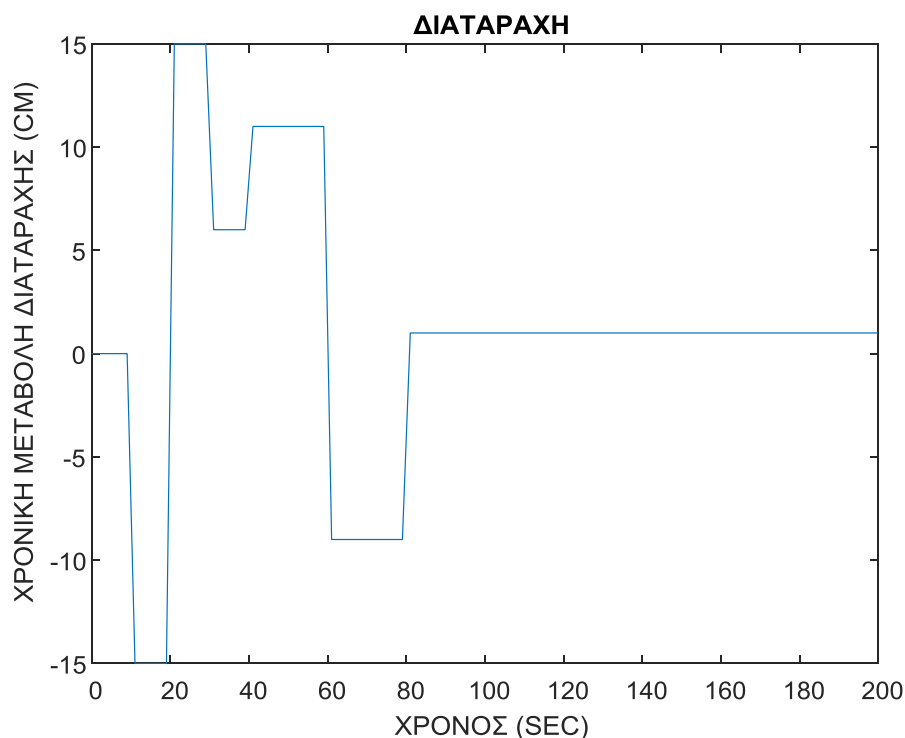
ταλάντωσης το οποίο σημαίνει ότι οι ρύθμισης που κάνουν στην ενεργή δύναμη δεν είναι τόσο στοχευόμενες όσο οι ρύθμισης όπου κάνει η σύνθεση ελεγκτή (μέθοδος Morari-Zafiriou) στο σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης.

Συμπεράσματα για τους ελεγκτές της ανάρτησης με την εφαρμογή του σεναρίου 1:

- Ελεγκτής P : Μειονεκτήματα: αργή ταχύτητα σύγκλισης προς το σήμα αναφοράς και μεγάλο πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης
- Ελεγκτής PI :Μειονεκτήματα: αργή ταχύτητα σύγκλισης προς το σήμα αναφοράς και μεγάλο πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης
- Ελεγκτής PID : Πλεονέκτημα: γρήγορη σύγκλιση προς το σήμα αναφοράς , Μειονέκτημα: μεγάλο πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης
- Σύνθεση Ελεγκτή: Πλεονέκτημα: γρήγορη σύγκλιση προς την τιμή αναφοράς και μικρό πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης

4.3 Σενάριο 2: Σταθερό σήμα αναφοράς με διαταραχή βηματικής μορφής (σύνθετη μορφή)

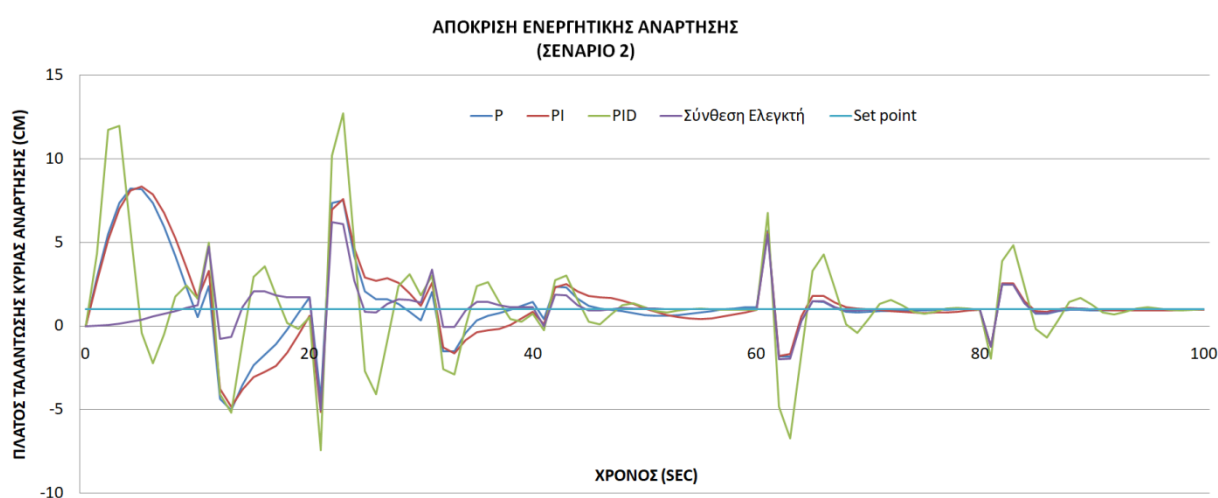
Στο σενάριο 2 επιλέχτηκε ένα πιο περίπλοκο σενάριο. Πρόκειται για μια βηματική διαταραχή όπου θα υπάρχουν έξι διαταραχές με διαφορετικά πλάτη και σε διαφορετική χρονική στιγμή. Ουσιαστικά αυτό το σενάριο είναι παρόμοιας σκέψης με το Σενάριο 1 αλλά έχει σαν σκοπό την παρατήρηση της ανάρτησης σε μια πιο περιπλοκή περίπτωση με περισσότερες διαταραχές και διαφορετικά πλάτη από ότι στο σενάριο 1. Να σημειωθεί ότι και σε αυτό το σενάριο σκοπός του ελεγκτή είναι η επαναφορά της ανάρτησης στην θέση του 1ος εκατοστού (set point).



Σχήμα 4.4: Διαταραχή δεύτερου σεναρίου

Παρακάτω θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της παραπάνω διαταραχής για κάθε σύστημα ανάρτησης κλειστού βρόχου με διαφορετικό ελεγκτή, έτσι ώστε να παρατηρηθεί η ταχύτητα σύγκλισης προς το σήμα αναφοράς, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι η τιμή «1» δηλαδή η θέση του «1ος» εκατοστού.

Να σημειωθεί ότι στις παρακάτω γραφικές, για το σενάριο 2, εμφανίζονται μόνο τα 100 πρώτα δευτερόλεπτα και αυτό γίνεται διότι έπειτα από τα 100 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης σχεδόν όλοι οι ελεγκτές έχουν «πιάσει» το σήμα αναφοράς. Άρα επιλέχθηκαν να δηχθούν τα 100 δευτερόλεπτα όπου συμβαίνουν οι διαταραχές και οι ελεγκτές κάνουν ακόμα τις απαραίτητες ρυθμίσεις ώστε οι ανάρτηση να συγκλίνει προς το σήμα αναφοράς.

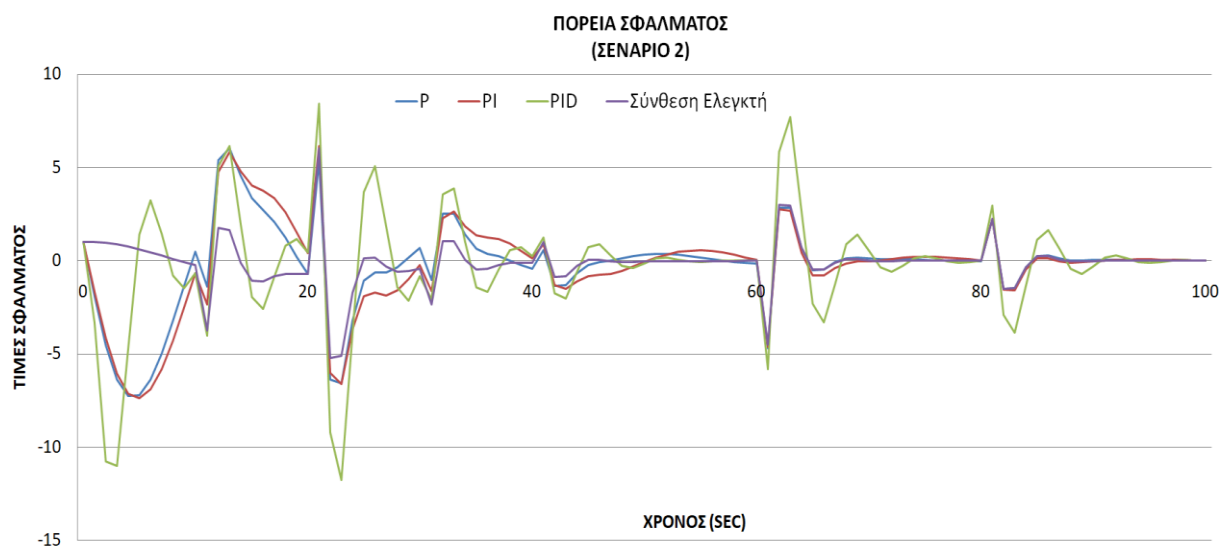


Σχήμα 4.5: Απόκριση ανάρτησης στην διαταραχή του δεύτερου σεναρίου για τα 100 πρώτα δευτερόλεπτα

Όπως προαναφέρθηκε σε αυτό το σενάριο υπάρχουν έξι διαφορετικές διαταραχές στα 10, 20, 30, 40, 60, 80 δευτερόλεπτα με διαφορετικά πλάτη η κάθε μια. Οι παραπάνω διαταραχές μπορούν να γίνουν αντιληπτές στο παραπάνω διάγραμμα στις θέσεις όπου συμβαίνουν διότι παρατηρούνται κάποιες ταλαντώσεις της ανάρτησης στις θέσεις αυτές με σκοπό την καθοδήγηση της ανάρτησης στο σήμα αναφοράς και κατά συνέπεια στην εξάλειψη αυτών. Ουσιαστικά όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο Σενάριο σκοπός του ελεγκτή, στην περίπτωση των βηματικών διαταραχών, είναι η ταχεία ταχύτητα σύγκλισης προς το σήμα αναφοράς όπου συνεπάγεται με την καλύτερη οδηγική άνεση και την απομόνωση της καμπίνας τους οχήματος. Όπως παρατηρείται από το σχήμα 4.5 κάθε σύστημα κλειστού βρόχου στις θέσεις όπου υπάρχει κάποια διαταραχή κάνει κάποιες ταλαντώσεις και εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά, δηλαδή διαφορετικό πλάτος και σύγκλιση προς την τιμή αναφοράς. Το παραπάνω γεγονός συμβαίνει λόγω των διαφορετικών ρυθμίσεων όπου συμβαίνουν από κάθε ελεγκτή ως προς την δύναμη όπου ασκείται από τον υδραυλικό ενεργοποιητή. Πιο συγκεκριμένα, οι τρεις ελεγκτές όπου αναπτύχθηκαν με την μεθοδολογία Ziegler-Nichols δεν έχουν τόσο καλή απόκριση όσο ο ελεγκτής όπου αναπτύχθηκε με την μεθοδολογία Morari-Zafiriou. Αυτό συμπεραίνεται διότι στο σύστημα ανάρτησης κλειστού βρόχου που έχει

αναπτυχτεί ο ελεγκτής με την μέθοδο Morari-Zafiriou στα σημεία όπου υπάρχει κάποια διαταραχή παρατηρείται πιο γρήγορη ταχύτητα σύγκλισης και πιο μικρά πλάτη ταλάντωσης από του υπόλοιπους ελεγκτές (P,PI,PID). Αυτό σημαίνει ότι ο ελεγκτής με την μέθοδο Morari-Zafiriou κάνει καλύτερο έλεγχο και καλύτερες ρυθμίσεις στην ενεργή δύναμη με σκοπό την εξάλειψη των διαταραχών και την απομόνωση της καμπίνας του οχήματος. Όσο, αφορά τα υπόλοιπα συστήματα ανάρτησης κλειστού βρόχου όπου έχουν αναπτυχτεί οι ελεγκτές P, PI παρατηρείται ότι έχουν πιο αργή ταχύτητα σύγκλισης προς την τιμή αναφοράς (όπου έχει οριστεί από τον χρήστη) αλλά πιο μικρό πλάτος ταλάντωσης σε σχέση με το σύστημα όπου έχει αναπτυχτεί ο PID ελεγκτής.

Παρακάτω θα γίνει μια μελέτη της πορείας του σφάλματος όπου είναι η διαφορά της τιμής αναφοράς σε σχέση με την τιμή εξόδου του συστήματος, δηλαδή την μετατόπιση της ανάρτησης μετά από κάποια ρύθμιση όπου συμβαίνει από τον ελεγκτή ($error=y_{sp}-y$).



Σχήμα 4.6: Πορεία σφάλματος στην διαταραχή του δεύτερου σεναρίου για τα 100 πρώτα δευτερόλεπτα

Στο παραπάνω σχήμα αναμένεται να παρατήσουμε πως μεταβάλλεται το σφάλμα σε σχέση με την θέση μηδέν, στα σημεία όπου εφαρμόζονται οι διαταραχές. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από το σχήμα 4.6 επαληθεύεται ο παραπάνω ισχυρισμός ότι η απόκριση του ελεγκτή όπου αναπτύχθηκε με την μέθοδο Morari-Zafiriou είναι η καλύτερη. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί διότι στα σημεία όπου υπάρχουν οι διαταραχές (10, 20, 30, 40, 60, 80 δευτερόλεπτα), η καμπύλη της γραφικής έχει μικρό πλάτος και γρήγορη ταχύτητα σύγκλισης προς το μηδέν. Η φυσική σημασία του παραπάνω ισχυρισμού είναι ότι ο ελεγκτής με την μέθοδο Morari-Zafiriou κάνει πιο στοχευμένες ρυθμίσεις στην ενεργητική ανάρτηση και πιο συγκεκριμένα στην ενεργή δύναμη του υδραυλικού ενεργοποιητή. Ο στοχευμένος έλεγχος του συγκεκριμένου ελεγκτή έχει σαν αποτέλεσμα την ταχεία μείωση του σφάλματος και κατά συνέπεια την επαναφορά της κυρίας ανάρτησης στην τελική θέση ισορροπίας όπου έχει οριστεί από τον χρήστη (τιμή αναφοράς). Όσο αφορά τους ελεγκτές όπου έχουν αναπτυχτεί με την μέθοδο Ziegler-

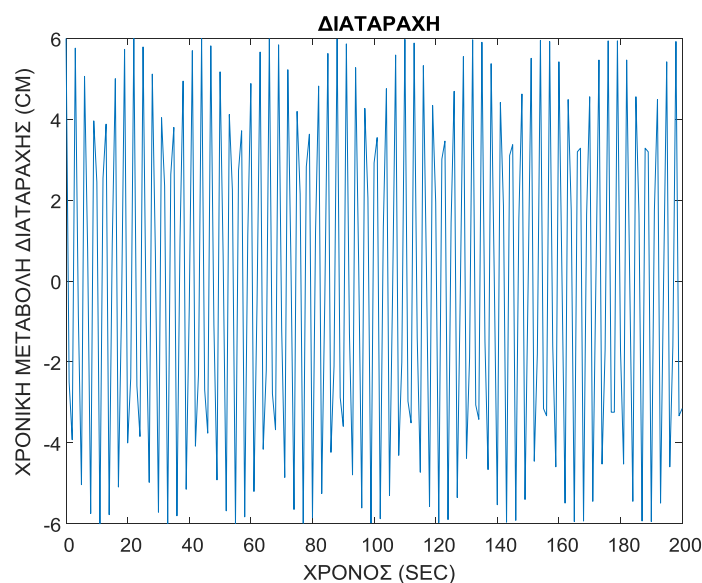
Nichols οι ρυθμίσεις του PID ελεγκτή είναι πιο στοχευμένες από ότι των ελεγκτών P και PI διότι παρατηρείται πιο γρήγορη ταχύτητα σύγκλισης προς την τιμή μηδέν το οποίο σημαίνει ότι ο ελεγκτής PID αντιστέκεται στην διαταραχή και προσπαθεί να την εξάλειψη πιο γρήγορα σε σχέση με τους άλλους ελεγκτές (P,PI) και κατά συνέπεια να επαναφέρει την κυρία ανάρτηση στην θέση ηρεμίας πιο γρήγορα (τιμή αναφοράς).

Συμπεράσματα για τους ελεγκτές της ανάρτησης με την εφαρμογή του σεναρίου 2:

- Ελεγκτής P , PI (παρόμοια αντίδραση): Μειονεκτήματα: αργή ταχύτητα σύγκλισης προς το σήμα αναφοράς και μεγάλο πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης στα σημεία εφαρμογής των διαταραχών
- Ελεγκτής PID : Πλεονέκτημα: γρήγορη σύγκλιση προς το σήμα αναφοράς , Μειονέκτημα: μεγάλο πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης
- Σύνθεση Ελεγκτή: Πλεονέκτημα: γρήγορη σύγκλιση προς την τιμή αναφοράς και μικρό πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης

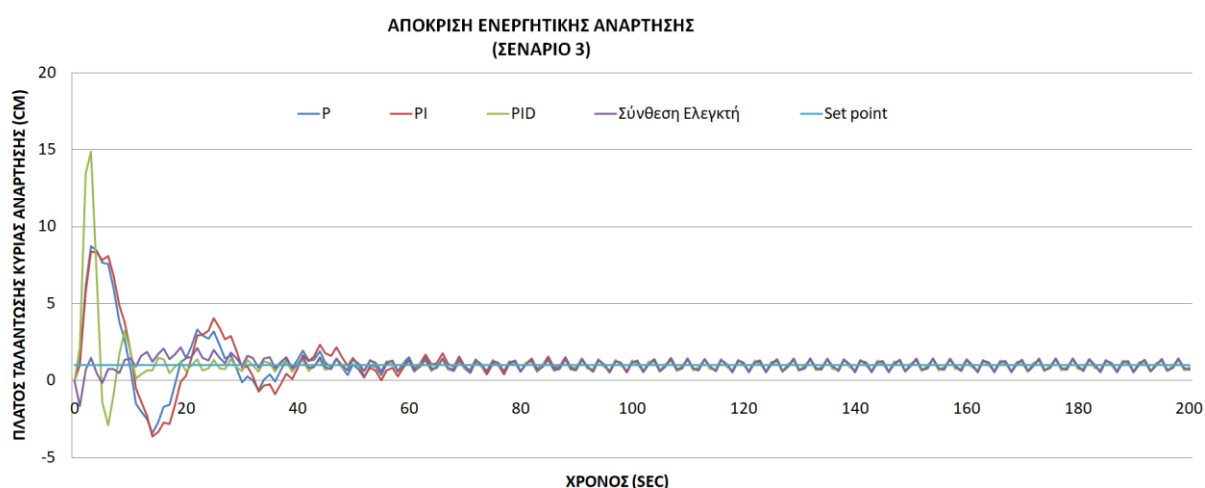
4.4 Σενάριο 3: Σταθερό σήμα αναφοράς με συνεχή διαταραχή, συνημιτονοειδής μορφής

Σε αυτή την ενότητα θα μελετηθεί ένα αλλού είδους σενάριο. Η διαταραχή όπου επιλέχτηκε να μελετηθεί έχει συνημιτονοειδής μορφής. Η συγκεκριμένη διαταραχή έχει πλάτος ταλάντωσης τα 6 (εκατοστά) και ρυθμό μεταβολής 2 (μονάδες ακτινίων ανά δευτερόλεπτο). Αυτού του είδους η διαταραχή επιλέχτηκε διότι είναι συνεχής, δηλαδή εφαρμόζεται καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης και μέσω αυτής θα παρατηρηθεί σε πιο μεγάλο βαθμός πως επηρεάζει κάθε ελεγκτής το σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης. Η διαταραχή αυτού τους είδους μπορεί να προσομοιάσει έναν συνεχή ανώμαλο δρόμο στην πραγματικότητα. Η μορφή της διαταραχής όπου θα γίνει η μελέτη των συστημάτων της ενεργητικής ανάρτησης για τους διαφορετικούς ελεγκτές απεικονίζεται παρακάτω.

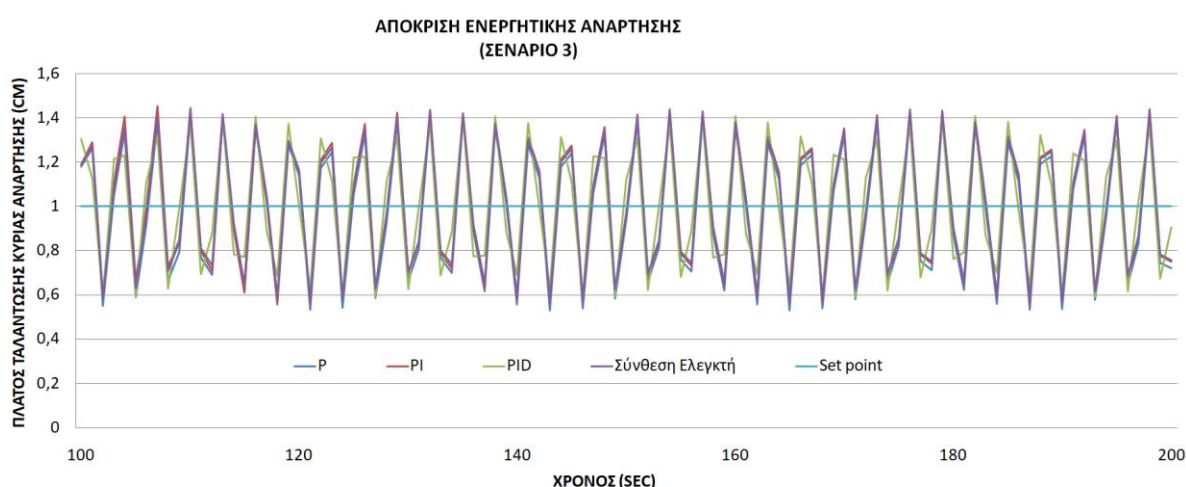


Σχήμα 4.7: Διαταραχή τρίτου σεναρίου

Αφού πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη της προσομοίωσης της διαταραχής στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab για κάθε ελεγκτή, εξήχθηκε σε μορφή γραφικής παράστασης, η απόκριση κάθε συστήματος ανάρτησης κλειστού βρόχου, για την συγκεκριμένη διαταραχή. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι οι ελεγκτές θα προσπαθήσουν να επαναφέρουν την ανάρτηση στην θέση ηρεμίας του 1ος εκατοστού διότι είναι η τιμή αναφοράς των συστημάτων (set point).



Σχήμα 4.8 (α): Απόκριση ανάρτησης στην διαταραχή του τρίτου σεναρίου

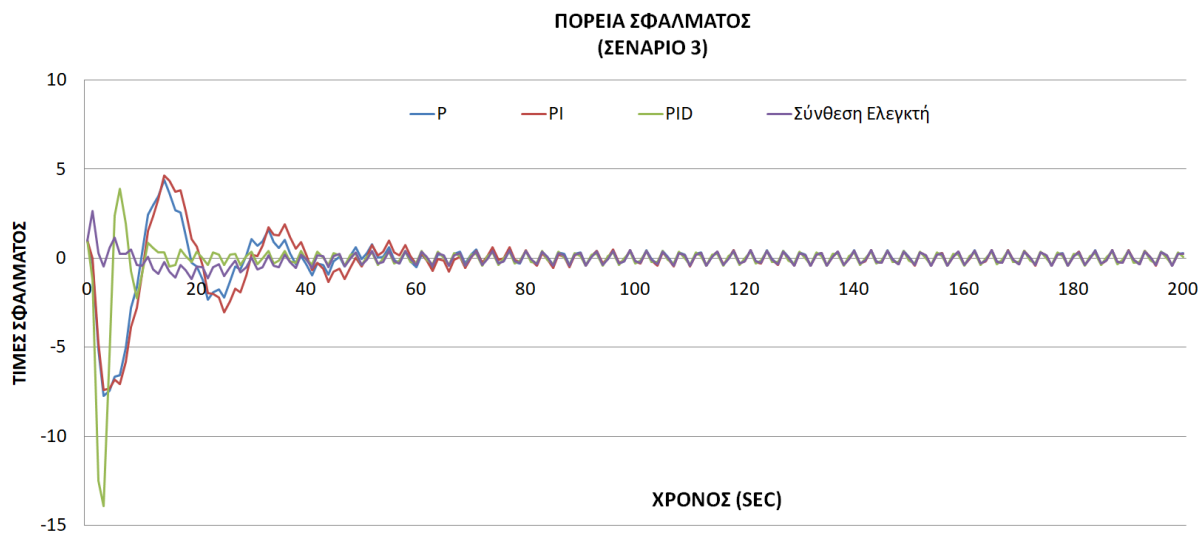


Σχήμα 4.8 (β): Απόκριση ανάρτησης στην διαταραχή του τρίτου σεναρίου (για τα 100 τελευταία δευτερόλεπτα)

Εφόσον η διαταραχή είναι συνεχής σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης, οπότε αναμένετε να έχω κάποιου είδους ταλαντώσεις καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης και όχι σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία όπως είχα στα παραπάνω σενάρια. Οι συνεχείς ταλαντώσεις όπου θα συμβαίνουν στα τέσσερα συστήματα κλειστού βρόχου είναι φυσιολογικές διότι οι ελεγκτές θα προσπαθούν μέσω των κατάλληλων ρυθμίσεων όπου θα ασκούν στην ενεργή δύναμη του υδραυλικού ενεργοποιητή να επαναφέρουν την ανάρτηση στην τιμή αναφοράς (θέση 1ος εκατοστού). Στο σχήμα 4.8 (α) παρατηρώ τέσσερις γραφικές παραστάσεις όπου

περιγράφουν τα τέσσερα συστήματα ανάρτησης (κλειστού βρόχου) όπου το κάθε ένα περιέχει και διαφορετικό ελεγκτή. Στο παραπάνω σχήμα παρατηρώ ότι από τους ελεγκτές όπου αναπτύχθηκαν με την μέθοδο Ziegler-Nichols (P,PI,PID) το σύστημα όπου περιέχει τον PID ελεγκτή παρουσιάζει την καλύτερη απόκριση σε σχέση με τους άλλους δυο ελεγκτές. Αυτό συμπεραίνεται διότι στο σχήμα 4.8 (α) φαίνεται ότι το σύστημα ανάρτησης κλειστού βρόχου με τον συγκεκριμένο ελεγκτή έχει πιο γρήγορη ταχύτητα σύγκλισης προς την τιμή αναφοράς, δηλαδή ο έλεγχος του PID ελεγκτή είναι πιο στοχευμένος καθώς επαναφέρει πιο γρήγορα την ανάρτηση στην τελική επιθυμητή θέση ηρεμίας (θέση 1ος εκατοστού) σε σχέση με τους άλλους δυο ελεγκτές. Βεβαία αξίζει να παρατηρηθεί ότι στα πρώτα 5 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης παρουσιάζει ένα αρκετά μεγάλο πλάτος ταλάντωσης το οποίο δεν συνάδει με την καλύτερη οδηγική άνεση και την καλύτερη οδηγική συμπεριφορά του οχήματος όπου είναι και ο στόχος του ελεγκτή. Τα συστήματα κλειστού βρόχου που περιέχουν τους άλλους δυο ελεγκτές της μεθοδολογίας Ziegler-Nichols (P,PI) παρατηρείται ότι έχουν αρκετά πιο αργή ταχύτητα σύγκλισης προς την τιμή αναφοράς κατά την διάρκεια της διαταραχής σε σχέση με τον PID ελεγκτή. Την καλύτερη αντίδραση στην συγκεκριμένη διαταραχή την παρουσιάζει το σύστημα ανάρτησης όπου περιέχει την μεθοδολογία Morari-Zafiriou. Αυτό το συμπεραίνω από τα σχήματα 4.8 (α) καθώς έχει την γρηγορότερη και ομαλότερη ταχύτητα σύγκλισης κατά την διάρκεια όλης της προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος ελεγκτής λειτουργεί αποτελεσματικότερα από του υπόλοιπους και μέσω του κατάλληλου ελέγχου και της στοχευμένης ρύθμισης της ενεργής δύναμης προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει σε μεγάλο βαθμό την διαταραχή με σκοπό την απομόνωση της καμπίνας, έτσι ώστε να μην γίνει αντιληπτή στους επιβαίνοντες του οχήματος. Οι παραπάνω ισχυρισμοί μπορούν να επιβεβαιωθούν και από το σχήμα 4.8(β) όπου περιγράφονται τα τελευταία 100 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης, στα οποία οι ελεγκτές έχουν «πιάσει» ουσιαστικά το σήμα αναφοράς (1 εκατοστό). Το παράδοξο είναι ότι όλοι οι ελεγκτές ταλαντεύονται γύρω από την θέση αναφοράς και όπως είπαμε και παραπάνω αυτό συμβαίνει λόγω της συνεχής διαταραχής. Άρα, σε αυτό το σενάριο σκοπός είναι να παρατηρήσουμε ποιος ελεγκτής έχει την μικρότερη απόκλιση από την τελική θέση ισορροπίας δηλαδή την θέση του 1^{ος} εκατοστού. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το σύστημα κλειστού βρόχου της ενεργητικής ανάρτησης που περιέχει την σύνθεση του ελεγκτή έχει σχετικά την μικρότερη απόκλιση από την τιμή αναφοράς. Αυτό συμπεραίνεται λόγω του μικρότερου πλάτους ταλάντωσης όπου κάνει η ανάρτηση στα τελευταία 100 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης όπως παρατηρείται και από το σχήμα 4.8 (β)

Στο παρακάτω σχήμα θα παρουσιαστεί υπό μορφή γραφήματος η πορεία του σφάλματος ($error=y_{sp}-y$)



Σχήμα 4.9: Πορεία σφάλματος στην διαταραχή του τρίτου σεναρίου

Μέσω της πορείας του σφάλματος θα παρατηρηθεί η αποτελεσματικότητα κάθε ελεγκτή καθώς μέσω του παραπάνω γραφήματος θα δειχθεί κατά ποσό κάθε ελεγκτής κάνει της κατάλληλες ρυθμίσεις στην ενεργή δύναμη του υδραυλικού ενεργοποιητή έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα με σκοπό την ελαχιστοποίηση ή και την εξάλειψη της διαταραχής. Σκοπός κάθε ελεγκτή είναι η αναφορά της ανάρτησης στην αναμενόμενη θέση αναφοράς (set point) αυτό ουσιαστικά υποδηλώνει ελαχιστοποίηση του σφάλματος (σύγκλιση προς την τιμή μηδέν). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω την καλύτερη αντίδραση την έχει το σύστημα όπου περιέχει τον ελεγκτή που αναπτύχθηκε με την μέθοδο Morari-Zafiriou. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το σχήμα 4.9 διότι η γραφική παράσταση του συγκεκριμένου ελεγκτή, σε σχέση με τις γραφικές παραστάσεις των υπολοίπων ελεγκτών, παρουσιάζει γρήγορη σύγκλιση προς την τιμή μηδέν. Η φυσική σημασία του παραπάνω γεγονότος είναι ότι οι ρυθμίσεις του συγκεκριμένου ελεγκτή είναι καλύτερες από τους υπόλοιπους καθώς η θέση όπου οδηγεί την ανάρτηση κάθε χρονική περίοδο είναι κοντά στην τιμή αναφοράς. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι και σε αυτήν την γραφική παράσταση παρατηρείται ότι κανένα σύστημα κλειστού βρόχου δεν μηδενίζει το σφάλματα του και αυτό συμβαίνει λόγω της συνεχούς διαταραχής που έχει οριστεί. Άρα, σκοπός των ελεγκτών είναι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος για κάθε σύστημα έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαταραχή.

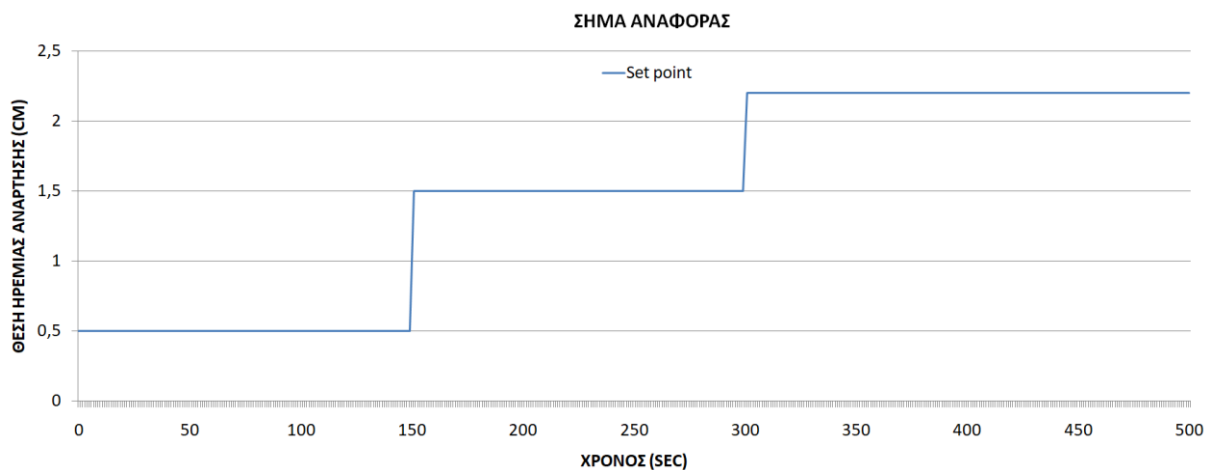
Συμπεράσματα για τους ελεγκτές της ανάρτησης με την εφαρμογή του σεναρίου 3:

- Ελεγκτής P : Μειονεκτήματα: αργή ταχύτητα σύγκλισης προς το σήμα αναφοράς και μεγάλο πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης
- Ελεγκτής PI :Μειονεκτήματα: αργή ταχύτητα σύγκλισης προς το σήμα αναφοράς και μεγάλο πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης
- Ελεγκτής PID : Πλεονέκτημα: γρήγορη σύγκλιση προς το σήμα αναφοράς , Μειονέκτημα: μεγάλο πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης

- Σύνθεση Ελεγκτή: Πλεονέκτημα: γρήγορη σύγκλιση προς την τιμή αναφοράς και μικρό πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης

4.5 Σενάριο 4 :Μεταβλητό σήμα αναφοράς με διαταραχή βηματικής μορφής

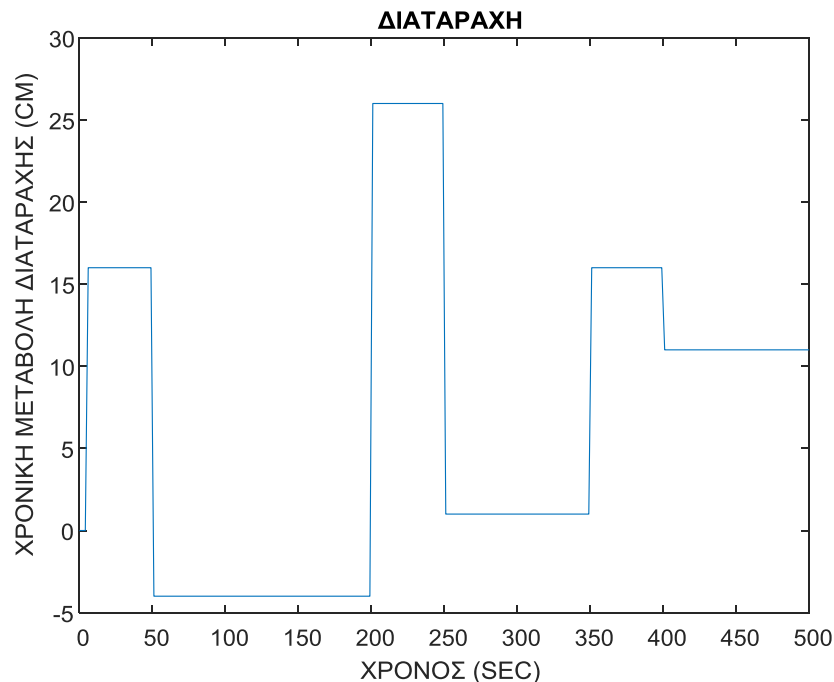
Το τελευταίο σενάριο θα μπορούσε να χαρακτηριστεί το πιο περίπλοκο από όλα τα αλλά, καθώς έκτος από τις διαταραχές όπου θα πραγματοποιηθούν στην ανάρτηση σε κάποιες συγκεκριμένες χρονικές στιγμές θα υπάρχει και μεταβλητό σήμα αναφοράς. Το μεταβλητό σήμα αναφοράς ουσιαστικά θα πάει ένα βήμα παρακάτω την μελέτη των ελεγκτών διότι τους ανατίθεται ακόμα ένας παράγοντας όπου θα πρέπει να λάβουν υπόψην τους. Η φυσική σημασία του μεταβλητού σήματος αναφοράς είναι ότι ουσιαστικά η ανάρτηση πρέπει να ηρεμεί σε διαφορετικές θέσεις κατά την προσομοίωση. Πιο συγκεκριμένα, έχει οριστεί για το συγκεκριμένο σενάριο η προσομοίωση να διαρκέσει 500 δευτερόλεπτα και το σήμα αναφοράς να μεταβληθεί στην θέση των 0,5 εκατοστών , στην θέση των 1,5 εκατοστών και τέλος στην θέση των 2,2 εκατοστών πάνω από την αρχική θέση όπου ισορροπεί η ανάρτηση (δηλαδή την θέση των μηδέν εκατοστών) . Το σήμα αναφοράς έχει οριστεί να αλλάζει ανά 150 δευτερόλεπτα. Στο παρακάτω σχήμα μπορεί να διακριθεί το μεταβλητό σήμα αναφοράς που έχει οριστεί. Στις παρακάτω θέσεις αναμένεται από τους ελεγκτές να επαναφέρουν την ενεργητική ανάρτηση σε σχετικά γρήγορο χρονικά διάστημα με σχετικά μικρή απόκλιση από τις συγκεκριμένες θέσης και με μια ομαλή πορεία ταλαντώσεις.



Σχήμα 4.10: Μεταβλητό σήμα αναφοράς για το σενάριο 4

Έπειτα οι ελεγκτές έκτος από το μεταβλητό σήμα αναφοράς θα πρέπει να αντιμετωπίσουν και κάποιες βηματικές διαταραχές. Οι διαταραχές έχουν οριστεί να βρίσκονται σε όλοι την διάρκεια τις προσομοιώσεις και σε όλες τις τιμές αναφοράς, δηλαδή τις διαφορετικές θέσεις όπου αναμένεται να ηρέμηση η ανάρτηση. Πιο συγκεκριμένα οι διαταραχές έχουν οριστεί να βρίσκονται στην θέση των 5, 50, 200, 250, 350 και 400 δευτερόλεπτων με διαφορετικά πλάτη η κάθε μια (16,-20,30,-25,15,-5 αντίστοιχα). Η διαταραχή όπου περιγράφεται παραπάνω εμφανίζεται στην συνέχεια με

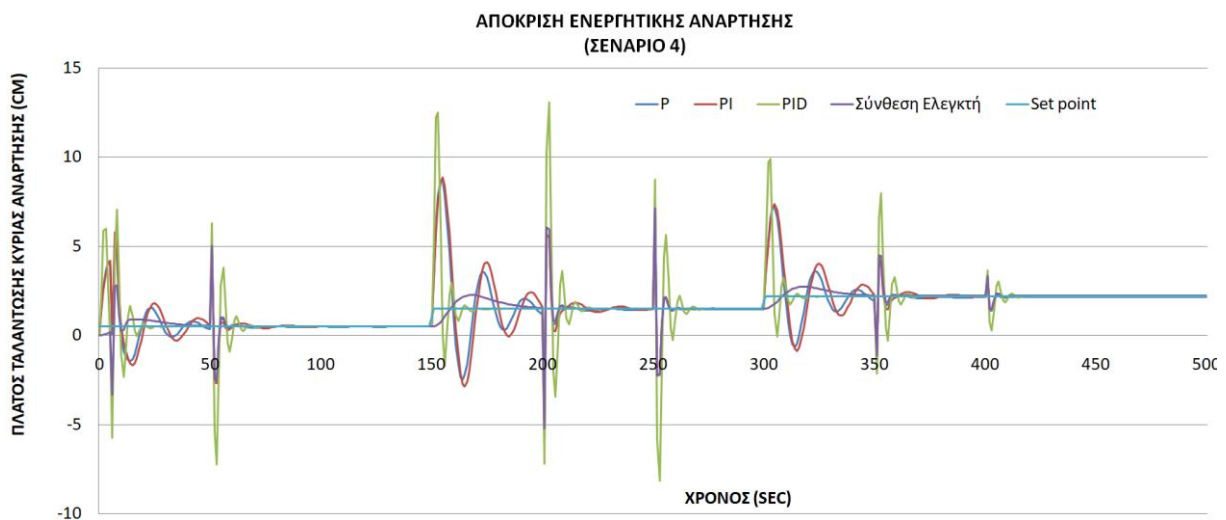
την μορφή σχήματος. Η παρακάτω διαταραχή μπορεί να περιγράψει στην πραγματικότητα έναν δρόμο με πολλές «λακκούβες».



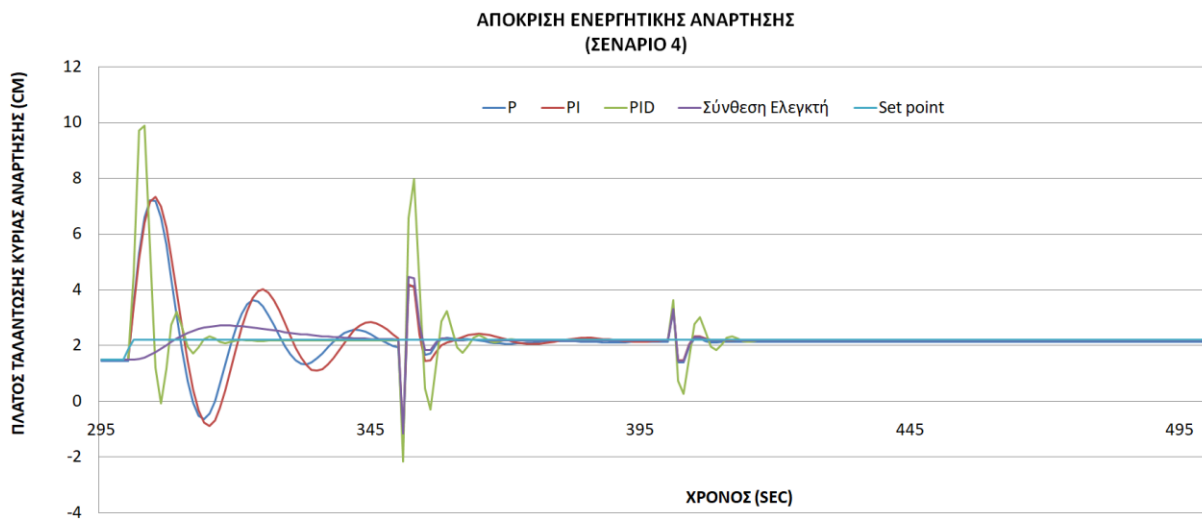
Σχήμα 4.11: Διαταραχή τέταρτου σεναρίου

Η παραπάνω διαταραχή αναπτύχθηκε στο περιβάλλον της Matlab και έγινε η δοκιμή του συστήματος της ενεργητικής ανάρτησης για κάθε ελεγκτή ξεχωριστά έτσι ώστε να παρατηρηθεί η απόκριση της ανάρτησης και η πορεία του σφάλματος για μεταβλητό σήμα αναφοράς και για τις διάφορες διαταραχές όπου έχουν οριστεί για κάθε σύστημα ξεχωριστά (για κάθε ελεγκτή).

Το παρακάτω γράφημα περιγράφει τις αποκρίσεις των συστημάτων κλειστού βρόχου της ανάρτησης για το παραπάνω σενάριο δηλαδή περιγράφει πως κάθε ελεγκτής επηρεάζει την ανάρτηση έτσι ώστε να την επαναφέρει στο ανάλογο σήμα αναφοράς και να εξαλείψει ταυτόχρονα τις διάφορες διαταραχές όπου προέρχονται από το οδόστρωμα.



Σχήμα 4.12 : Απόκριση ανάρτησης στην διαταραχή του τέταρτου σεναρίου

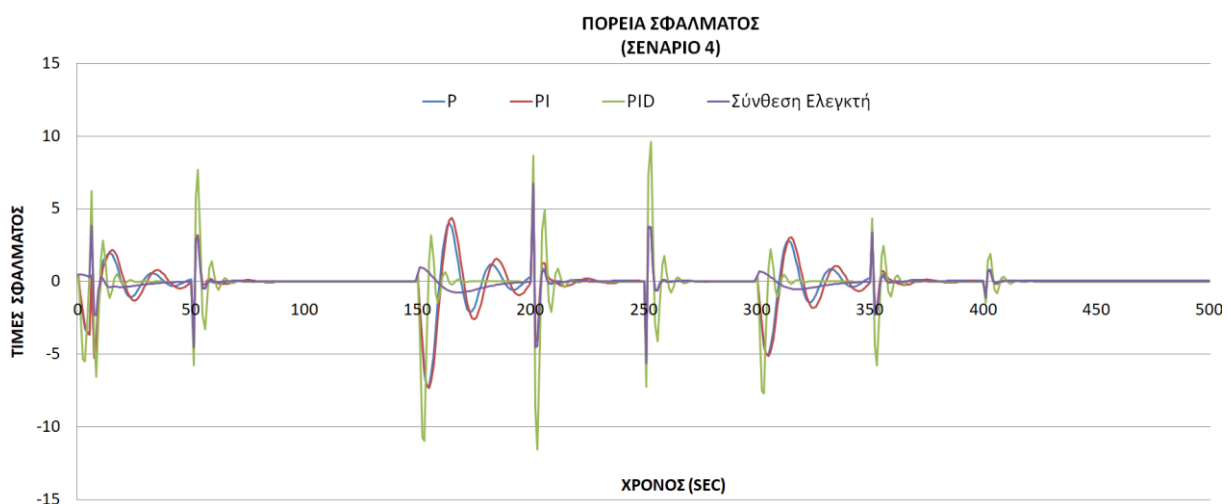


Σχήμα 4.13 : Απόκριση ανάρτησης στην διαταραχή του τέταρτου σεναρίου για το σήμα αναφοράς 2,2 εκατοστών για το χρονικό διάστημα 350 έως 500 δευτερόλεπτων

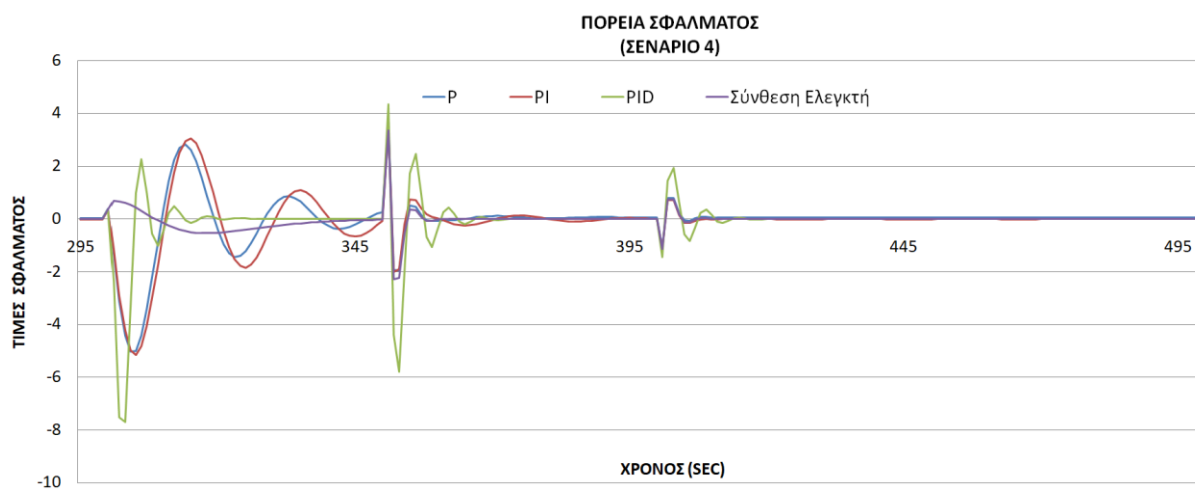
Όπως προαναφέρθηκε οι διαταραχές έχουν οριστεί στις χρονικές στιγμές των 5, 50, 200, 250, 350 και 400 δευτερολέπτων. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και από την απόκριση των αναρτήσεων καθώς σε αυτά τα σημεία παρατηρείται κάποιες ταλαντώσεις όπου είναι λογικό λόγω των διαταραχών. Σκοπός κάθε ελεγκτή είναι αυτή η ταλάντωση να είναι όσο το δυνατόν πιο σύντομη και ομαλή έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη οδηγική συμπεριφορά του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, σε όλα τα σήματα αναφοράς, δηλαδή τις διαφορετικές θέσεις ηρεμίας παρατηρείται ότι ο ελεγκτής PID και η σύνθεση του ελεγκτή (μέθοδο Morari-Zafiriou) παρουσιάζουν την πιο γρήγορη ταχύτητα σύγκλισης προς την ανάλογη τιμή αναφοράς σε σχέση με τα συστήματα όπου έχουν προσαρμοστεί οι ελεγκτές P και PI. Οι ελεγκτές P και PI παρατηρείται ότι κάνουν πιο αργή την ταχύτητα σύγκλισης της ανάρτησης προς το κάθε σήμα αναφοράς σε κάθε διαταραχή όπου εφαρμόζεται κατά την προσομοίωση. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω σκοπός είναι η γρήγορη σύγκλιση της ανάρτησης προς την ανάλογη θέση ισορροπίας (set point), όπου έχει οριστεί κάθε χρονική στιγμή, αυτό το καταφέρνουν καλύτερα οι ελεγκτές PID και η σύνθεση ελεγκτή. Ωστόσο σκοπός των ελεγκτών είναι και η απομόνωση της καμπίνας από τις διάφορες διαταραχές δηλαδή η εξάλειψη των διαταραχών σε κάθε σήμα αναφοράς. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί όταν οι ελεγκτές αναγκάζουν την ανάρτηση να ανταποκριθεί με μια ομαλή πορεία ταλαντώσεις, δηλαδή με μικρό πλάτος ταλάντωσης, στις διαφορά διαταραχές. Αυτό όπου παρατηρείται από το παραπάνω σχήμα είναι ότι ο ελεγκτής PID δεν παρουσιάζει ομαλή πορεία καθώς στα σημεία όπου υπάρχει διαταραχή η ανάρτηση παρουσιάζει μια απότομη και μεγάλη ταλάντωση όπου το παραπάνω γεγονός δεν συνάδει με την ομαλή πορεία της ανάρτησης. Άρα αυτό όπου συμπεραίνεται από τα παραπάνω είναι ότι το σύστημα της ανάρτησης όπου έχει αναπτυχθεί ο ελεγκτής με την μέθοδο Morari-Zafiriou έχει την καλύτερη απόκριση και στο μεταβλητό σήμα αναφοράς και στις διάφορες διαταραχές

καθώς η γραφική παράσταση όπου περιγράφει την πορεία και την ταλάντωσης της ανάρτησης παρουσιάζει στα σημεία των διαταραχών γρήγορη ταχύτητα σύγκλισης και ομαλή πορεία ταλαντώσεις με μικρά πλάτη ταλάντωσης. Στο σχήμα 4.13 έχει απομονωθεί μόνο το τελικό σήμα αναφοράς (θέση 2,2 εκατοστά) για να εξεταστούν οι πορείες των αναρτήσεων εις βάθος. Σε αυτήν την τιμή στόχος έχουν οριστεί δυο βηματικές διαταραχές στα 350 και 400 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και από το σχήμα 4.13 καθώς σε εκείνες τις χρονικές στιγμές μπορεί να παρατηρηθεί για όλα τα σύστημα κλειστού βρόχου της ανάρτησης η προσπάθειες των ελέγχων να εξαλείψουν αυτές τις διαταραχές, οι οποίες έχουν διαφορετικά πλάτη. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί την καλύτερη απόκριση την παρουσιάζει το σύστημα κλειστού βρόχου της ανάρτησης όπου έχει αναπτυχτεί η σύνθεση ελεγκτή. Αυτό βασίζεται στο ότι υπάρχει γρήγορη ταχύτητα σύγκλισης σε σχέση με τους άλλους ελεγκτές άρα ο συγκεκριμένος ελεγκτής προσπαθεί να εξαλείψει πιο γρήγορα τις διαταραχές σε σχέση με τους άλλους και μικρά πλάτη ταλάντωση σε σχέση με τους άλλους ελεγκτές το οποίο σημαίνει ομαλή πορεία ταλάντωσης της ανάρτησης άρα και καλύτερη οδηγική συμπεριφορά.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι πορείες των σφαλμάτων για τα συστήματα ανάρτησης όπου έχουν αναπτυχτεί. Ουσιαστικά θα μελετηθεί πόσο αποτελεσματικοί είναι οι ελεγκτές καθώς με τις σωστές ρυθμίσεις στην ενεργή δύναμη και το κατάλληλο έλεγχο θα πρέπει να μειώνεται η απόκλιση τις θέσης της ανάρτησης από το σήμα αναφοράς (την επιθυμητή θέση). Σκοπός δηλαδή είναι η πορεία του σφάλματος να συγκλίνει γρήγορα προς την τιμή αναφοράς, με μικρό πλάτος ταλάντωσης.



Σχήμα 4.14: Πορεία σφάλματος στην διαταραχή του τέταρτου σεναρίου



Σχήμα 4.15: Πορεία σφάλματος για το σήμα αναφοράς 2,2 εκατοστών για το χρονικό διάστημα 350 έως 500 δευτερόλεπτων

Παραπάνω παρουσιάζονται τέσσερις γραφικές (μια για κάθε ελεγκτή). Μπορεί να παρατηρηθεί ότι στα σημεία όπου έχουν εφαρμοστεί οι διαταραχές υπάρχει αύξηση του σφάλματος και έπειτα σταδιακή μείωση λόγω του έλεγχου κάθε ελεγκτή, αυτό συμβαίνει λόγω της προσπάθειας των ελεγκτών να εξαλείψουν τις διαταραχές. Επίσης στα 150 και στα 300 δευτερόλεπτα παρουσιάζεται αύξηση του σφάλματος λόγω της αλλαγής του σήματος αναφοράς και όχι λόγω κάποιας διαταραχής. Καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο ελεγκτής όπου αναπτύχθηκε με την μέθοδο Morari-Zafiriou κάνει τον πιο αποτελεσματικό έλεγχο. Αυτό συμπεραίνεται διότι στα σημεία όπου υπάρχει αλλαγή του σήματος αναφοράς ή έχει εφαρμοστεί κάποια διαταραχή η γραφική όπου παρουσιάζει την πορεία του σφάλματος έχει το μικρότερο πλάτος ταλαντώσεις και την γρηγορότερη σύγκλιση προς την τιμή μηδέν. Η φυσική σημασία του παραπάνω είναι ότι ο ελεγκτής κανείς τις πιο αποτελεσματικές ρυθμίσεις στην ενεργή δύναμη του υδραυλικού ενεργοποιητή για κάθε χρονική στιγμή και αυτό συνεπάγεται ότι μειώνει την απόκλιση της θέσης της ανάρτησης όπου βρίσκεται την συγκεκριμένη στιγμή με την επιθυμητή θέση ηρεμίας σχετικά γρήγορα. Άρα από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι ο έλεγχος του συγκεκριμένου ελεγκτή είναι ο πιο αποτελεσματικός. Στην συνέχεια μπορεί να παρατηρηθεί ότι και η πορεία του σφάλματος για τον ελεγκτή PID παρουσιάζει γρήγορη σύγκλιση προς την τιμή μηδέν αλλά είναι πιο χρονοβόρος ο έλεγχος του από ότι του προηγούμενου ελεγκτή καθώς υπάρχει μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης. Τέλος για του ελεγκτές P και PI ο έλεγχος δεν είναι τόσο αποτελεσματικός διότι έχουν αργή σύγκλιση προς το μηδέν στα σημεία όπου υπάρχει αλλαγή του σήματος αναφοράς και εφαρμογή κάποιας διαταραχής. Επίσης όλα τα παραπάνω μπορούν να διαπιστωθούν και στο τελικό σημείο αναφοράς (θέση 2,2 εκατοστών) όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.15. Το σχήμα 4.15 ουσιαστικά έχει παρουσιαστεί για να φανεί πιο ξεκάθαρα η γρηγορότερη και αποτελεσματικότερη εξάλειψη των διαταραχών (στα 350 και 400 δευτερόλεπτα) μέσω σύγκλισης προς την τιμή μηδέν όπου γίνεται στο σύστημα της ανάρτησης χάρες την σύνθεση ελεγκτή (Morari-Zafiriou).

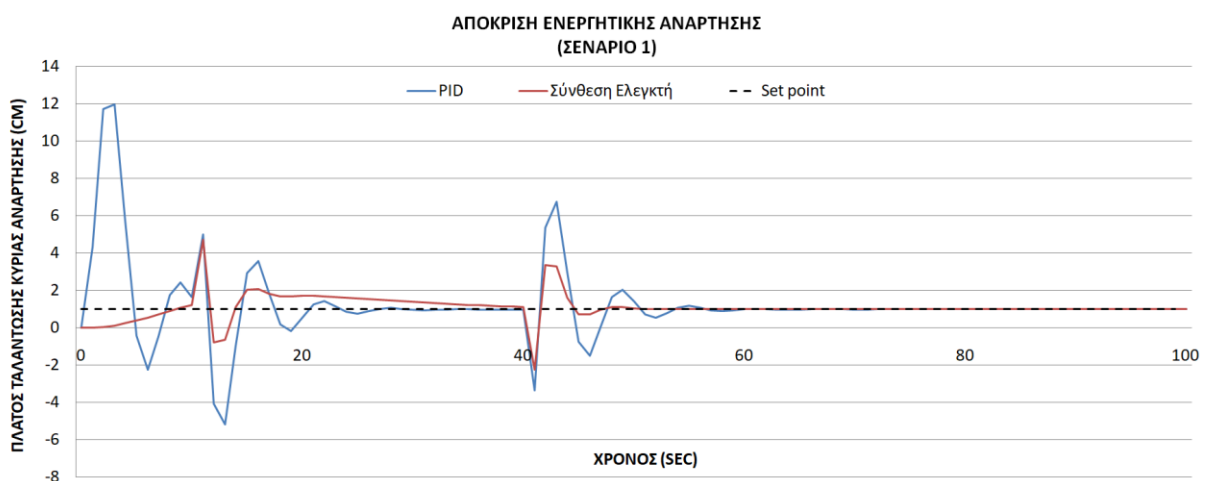
Συμπεράσματα για τους ελεγκτές της ανάρτησης με την εφαρμογή του σεναρίου 4:

- Ελεγκτής P, PI : Μειονεκτήματα: αργή ταχύτητα σύγκλισης προς το σήμα αναφοράς και μεγάλο πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης σε σχέση με τους άλλους ελεγκτές και για τις τρεις θέσεις ηρεμίας της ανάρτησης όπου έχουν οριστεί (σήμα αναφοράς)
- Ελεγκτής PID : Πλεονέκτημα: γρήγορη σύγκλιση προς το σήμα αναφοράς , Μειονέκτημα: μεγάλο πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης κατά την εφαρμογή των διαταραχών
- Σύνθεση Ελεγκτή: Πλεονέκτημα: γρήγορη σύγκλιση προς την τιμή αναφοράς και μικρό πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης στα σημεία των διαταραχών

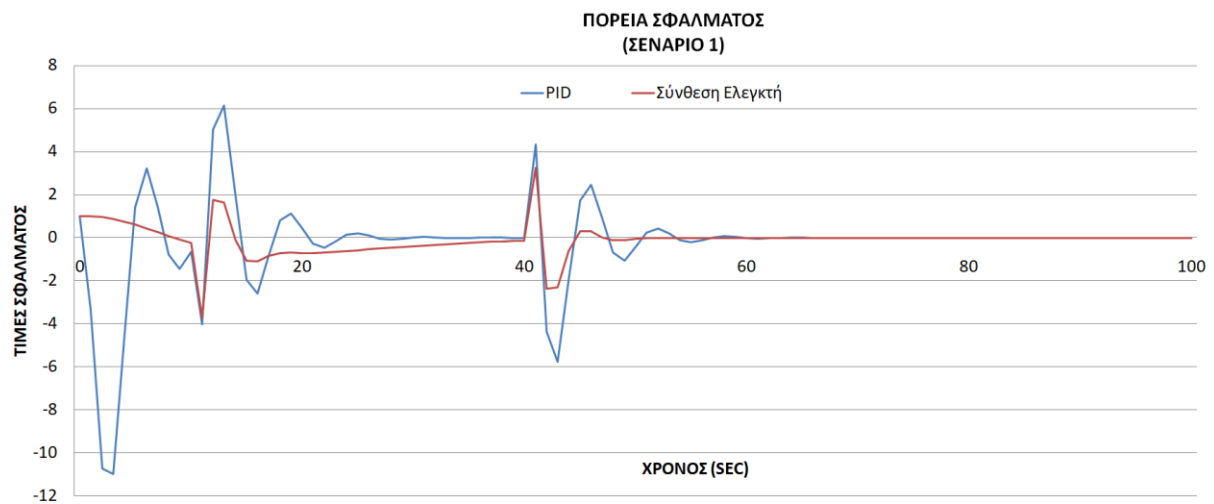
4.6 Παρουσίαση καλύτερων ελεγκτών

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει παρουσίαση των δυο καλύτερων ελεγκτών όπου πρόέκυψαν από τα τέσσερα σενάρια όπου αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Θα παρουσιαστούν τα τέσσερα σενάρια με τους δυο ελεγκτές και το κάθε σενάριο θα περιέχει μια γραφική για την απόκριση της ενεργητικής ανάρτησης και μια γραφική με την πορεία του σφάλματος.

Παρουσίαση γραφημάτων για το σενάριο 1 για τους δυο καλύτερους ελεγκτές (PID, σύνθεση ελεγκτή)

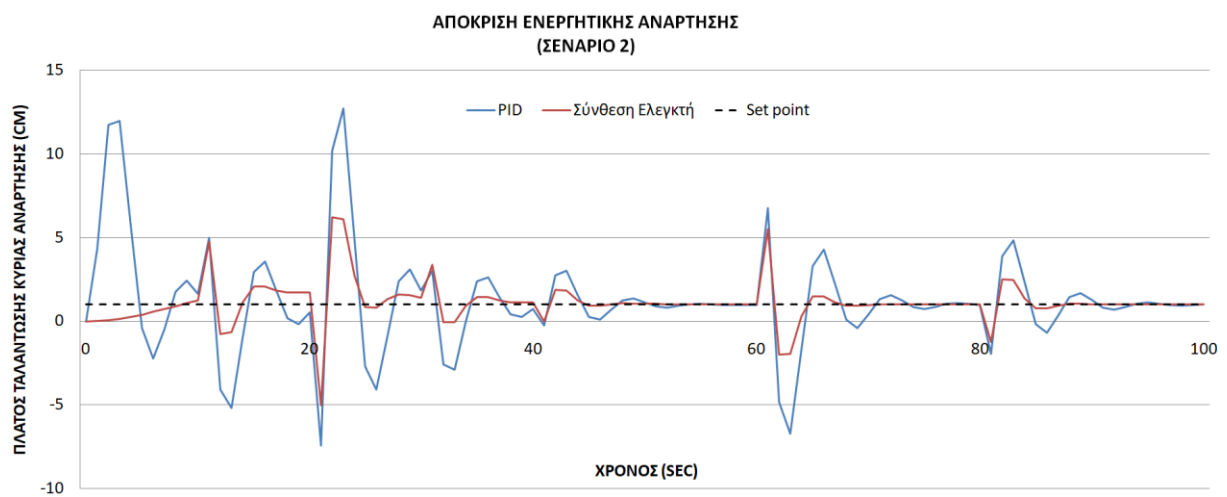


Σχήμα 4.16: Απόκριση των δυο καλύτερων ελεγκτών στην προσομοίωση του σεναρίου 1

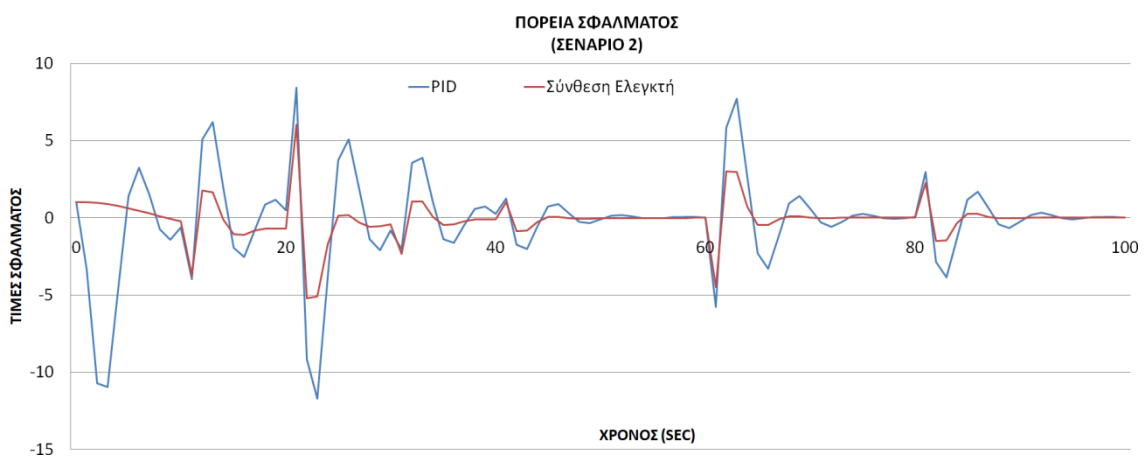


Σχήμα 4.17: Πορεία σφάλματος των δυο καλύτερων ελεγκτών στην προσομοίωση του σεναρίου 1

Παρουσίαση γραφημάτων για το σενάριο 2 για τους δυο καλύτερους ελεγκτές (PID, σύνθεση ελεγκτή)

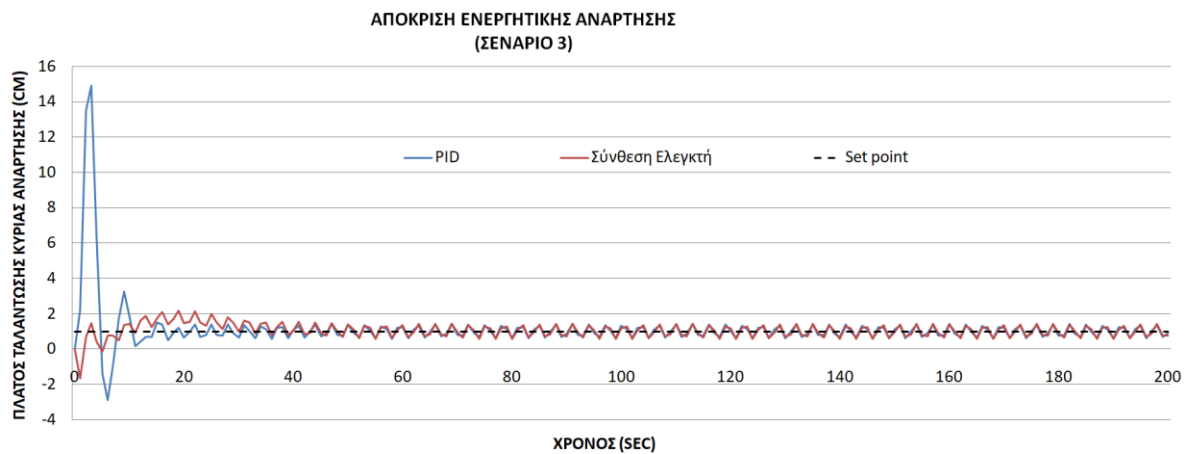


Σχήμα 4.18: Απόκριση των δυο καλύτερων ελεγκτών στην προσομοίωση του σεναρίου 2

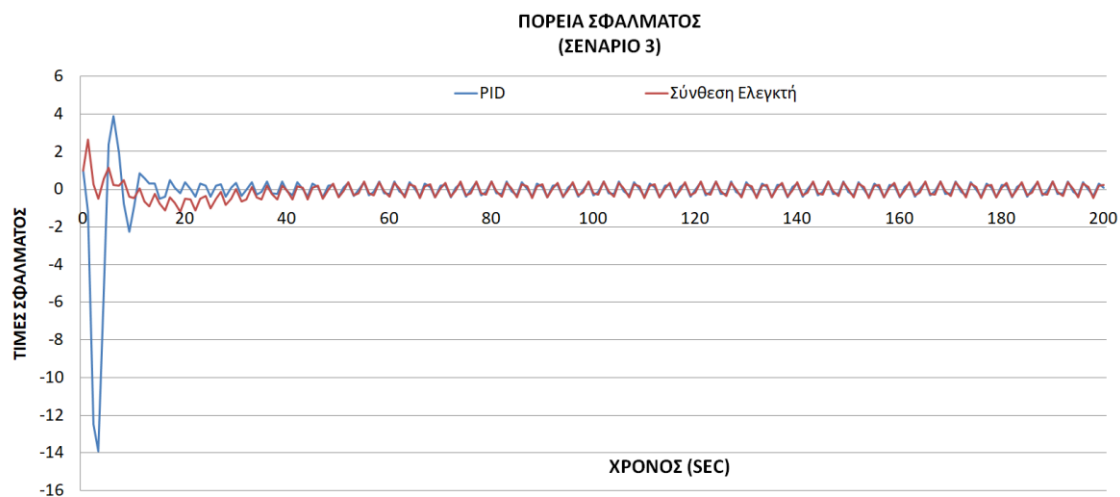


Σχήμα 4.19: Πορεία σφάλματος των δυο καλύτερων ελεγκτών στην προσομοίωση του σεναρίου 2

Παρουσίαση γραφημάτων για το σενάριο 3 για τους δυο καλύτερους ελεγκτές (PID, σύνθεση ελεγκτή)

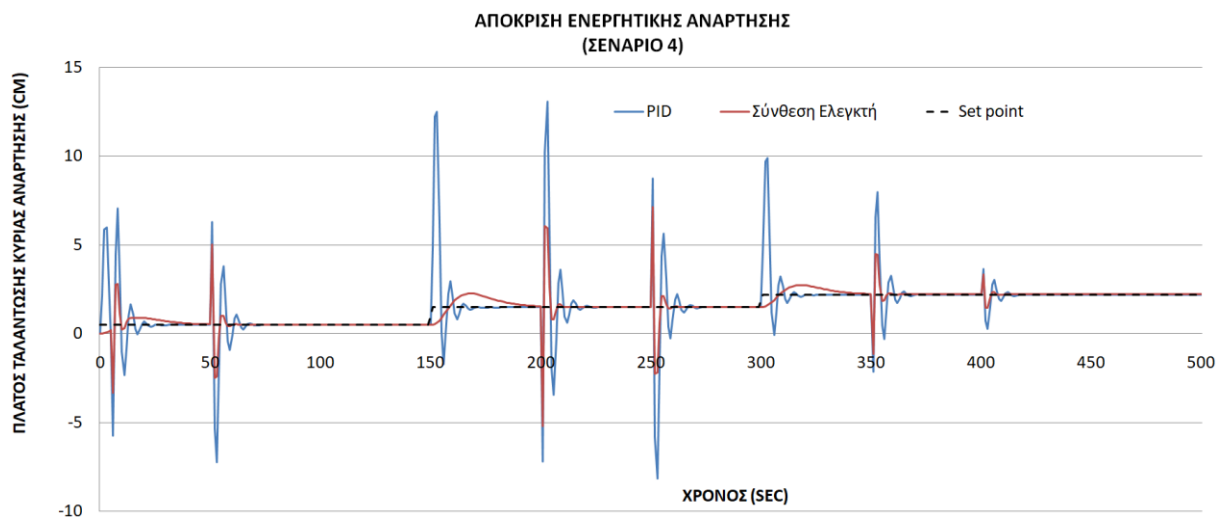


Σχήμα 4.20: Απόκριση των δυο καλύτερων ελεγκτών στην προσομοίωση του σεναρίου 3

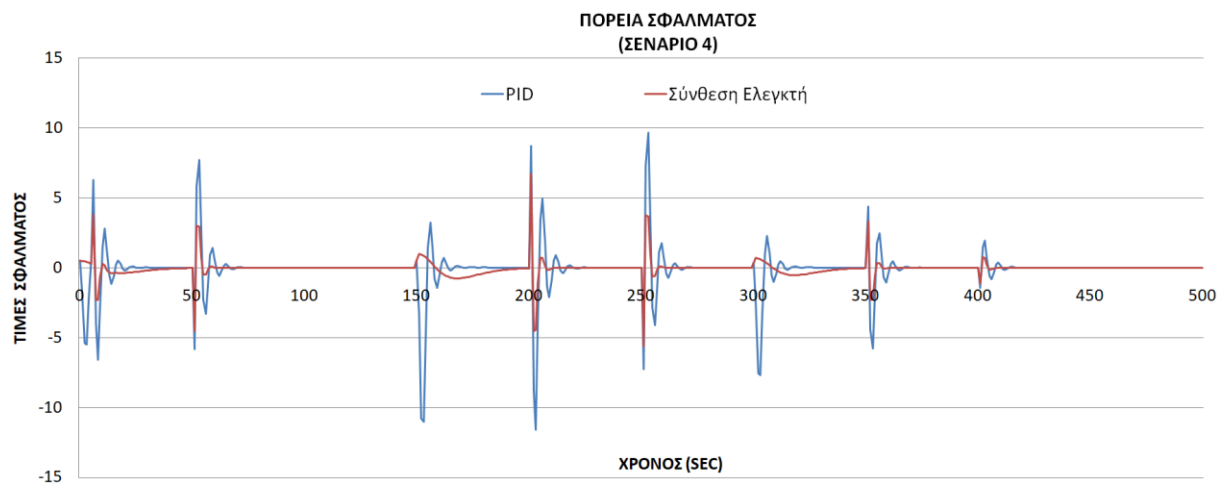


Σχήμα 4.20: Πορεία σφάλματος των δυο καλύτερων ελεγκτών στην προσομοίωση του σεναρίου 3

Παρουσίαση γραφημάτων για το σενάριο 4 για τους δυο καλύτερους ελεγκτές (PID, σύνθεση ελεγκτή)



Σχήμα 4.21: Απόκριση των δυο καλύτερων ελεγκτών στην προσομοίωση του σεναρίου 4



Σχήμα 4.22: Πορεία σφάλματος των δυο καλύτερων ελεγκτών στην προσομοίωση του σεναρίου 4

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα / Μελλοντικές επεκτάσεις

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εμβάθυνση στον τομέα των συστημάτων ελέγχους όπου μπορούν να αναπτυχθούν σε ένα όχημα και συγκεκριμένα στο σύστημα της ανάρτησης. Αυτό επιτεύχθηκε με την ανάπτυξη κάποιων συμβατικών ελεγκτών στο σύστημα της ανάρτησης και την μελέτη της αντίδρασης της ανάρτησης με την παρουσία, την απουσία των ελεγκτών και την παρουσία διαφόρων διαταραχών όπου προεχόντων από το οδόστρωμα.

Με βάση τα παραπάνω, η διπλωματική ξεκίνησε με μια μικρή βιβλιογραφική ανασκόπηση γύρω από το σύστημα της ανάρτησης, όπου περιέχει μια ιστορική αναδρομή και τα διάφορα είδη των συστημάτων ανάρτησης. Έπειτα πραγματοποιήθηκε η μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος μιας παθητικής ανάρτησης όπου καταλήξαμε σε δυο διαφορετικές εξισώσεις δευτέρου βαθμού, σε συνάρτηση με τον χρόνο. Στην συνέχεια ακολούθησε η μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας (Laplace) και στο πεδίο του χώρου κατάστασης. Αυτές οι μετατροπές θα μας διευκολύνουν στην συνέχεια, όσον αφορά την εύρεση κάποιων χαρακτηριστικών του συστήματος και όσον αφορά την προσομοίωση στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab. Επίσης για να μπορεί να γίνει η χρήση και των τριών μοντέλων, αποδεδείχθηκε ότι αυτά τα τρία μοντέλα είναι ισοδύναμα. Στην συνέχεια μέσω του μοντέλου της ανάρτησης στο πεδίο του Laplace πραγματοποιήθηκε η εύρεση των συναρτήσεων μεταφοράς της διεργασίας ($G_p(s)$) και της διαταραχής ($G_d(s)$) όπου είναι τα κύρια χαρακτηριστικά ενώ ανοιχτού και κλειστού συστήματος. Στην συνέχεια μέσω του γεωμετρικού τόπου του συστήματος της ανάρτησης έγινε η ανάπτυξη των ελεγκτών P, PI, PID μέσω της μεθόδου Ziegler-Nichols και μια σύνθεση ενός ελεγκτή μέσω της μεθόδου Morari-Zafiriou. Συνολικά αναπτύχθηκαν αυτοί οι τέσσερις ελεγκτές και τέλος πραγματοποιήθηκε η δόκιμη τους σε τέσσερα διαφορετικά σενάρια. Το κάθε σενάριο ουσιαστικά, περιγραφεί μια διαταραχή όπου προέρχεται από το οδόστρωμα. Τα πρώτα δυο σενάρια αφορούσαν μια βηματική διαταραχή (μια απλή και μια πιο σύνθετη), το τρίτο σενάριο αφορούσε μια συνεχή διαταραχή συνημιτονοειδούς μορφής και το τελευταίο σενάριο αποτελούταν από βηματικές διαταραχές με διαφορετικά σήματα αναφοράς. Από τα τέσσερα σενάρια πάρθηκαν κάποιες γραφικές όπου περιγράφουν την απόκριση της ενεργητικής ανάρτησης ενός κλειστού βρόχου και από αυτά εξήχθηκαν κάποια συμπεράσματα για το ποιος ελεγκτής είναι ο πιο αποτελεσματικός.

Εν κατακλείδι, για τα δεδομένα αυτής της διπλωματικής και για αυτά τα σενάρια ο καλύτερος ελεγκτής αποδεδείχθηκε ο ελεγκτής όπου πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο Morari-Zafiriou. Αυτό συμβαίνει διότι και στα τέσσερα σενάρια ο συγκεκριμένος ελεγκτής σε κάθε διαταραχή από το οδόστρωμα όπου το εφαρμοζόταν είχε την γρηγορότερη ταχύτητα σύγκλισης προς το σήμα αναφοράς και το μικρότερο πλάτος ταλάντωσης της ανάρτησης όπου αυτά τα δυο οδηγούν στην καλύτερη οδηγική άνεση, στην καλύτερη συμπεριφορά του οχήματος και στην εξάλειψη σε ένα μεγάλο βαθμό των διαταραχών από την καμπίνα του οχήματος.

Κάποιες μελλοντικά βήματα όπου θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν στην συγκεκριμένη διπλωματική είναι τα εξής:

- Η εφαρμογή άλλων σεναρίων (π.χ: συνεχής διαταραχή με συνδυασμό διαφορετικών σημάτων αναφοράς ή συνεχής διαταραχής ημιτονοειδής μορφής ή συνδυασμός συνεχής και μη συνεχής διαταραχής) .
- Η εφαρμογή μοντέρνων συστημάτων ελέγχου (πχ: προβλεπτικού ελέγχου).
- Η προσθήκη ενός αποσβεστήρα, εκτός από το ελατήριο, στην περιγραφή του ελαστικού έτσι ώστε να γίνει ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο.
- Η πραγματοποίηση των μαθηματικών μοντέλων του υδραυλικού ενεργοποιητή και του μετρητικού στοιχείου για πιο ακριβή αποτελέσματα.

Αναφορές/Βιβλιογραφία

- [1] Xue, X. D., K. W. E. Cheng, Z. Zhang, J. K. Lin, D. H. Wang, Y. J. Bao, M. K. Wong, and N. Cheung. 2011. «Study of Art of Automotive Active Suspensions»
- [2] Mohd Riduan, Aizuddin Fahmi, Noreffendy Tamaldin, Ajat Sudrajat, and Fauzi Ahmad. 2018. «Review on Active Suspension System»
- [3] Modern, Bring, Vehicle Design, T. O. Your, and H. O. W. I. T. Works. «ACTIVE SYSTEM» .
- [4] Πρωτογεράκης Αθανάσιος. 2020. «Διπλωματική Εργασία: Μοντελοποίηση Ανάρτησης Αυτοκινήτου Με Μη Γραμμικό Ελατήριο». ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
- [5] Καπουράνης Σταύρος, Μαλανδρός Αθανάσιος. 2018. «Διπλωματική Εργασία: ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΠΝΕΥΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ - ΕΠΙΒΑΤΙΚΩΝ». Α.Τ.Ε.Ι.Θ ΣΤΕΦ,ΤΜΗΜΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ
- [6] Εμμανουήλ Χρυσός. 2018. «Διπλωματική Εργασία: Βελτιστοποίηση χαρακτηριστικών ημι-ενεργητικής ανάρτησης οχήματος». ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΧΗΜΑΤΩΝ
- [7] Ανέστης Α. Λαμπάς. 2019. «Διπλωματική Εργασία: Ανάπτυξη Μοντέλου Και Συστήματος Ελέγχου Ενεργής Ανάρτησης Οχήματος». ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
- [8] Agharkakli, Abdolvahab, Ghobad Shafiei Sabet, and Armin Barouz. 2012. «Simulation and Analysis of Passive and Active Suspension System Using Quarter Car Model for Different Road Profile»
- [9] Hanafi, Dirman. 2010. «PID Controller Design for Semi-Active Car Suspension Based on Model from Intelligent System Identification»
- [10] Mouleeswaran, Senthilkumar. 2012. «Design and Development of PID Controller-Based Active Suspension System for Automobiles»
- [11] Ahmed, AbdElNasser., S. Ali. Ahmed, Nouby M. Ghazaly, and G. T. Abd el- Jaber. 2015. «PID Controller of Active Suspension System for a Quarter Car Model»
- [12] Heidari, M., and H. Homaei. 2013. «Design a PID Controller for Suspension System by Back Propagation Neural Network»
- [13] Aly, Ayman. 2012. «Car Suspension Control Systems: Basic Principles»
- [14] Fayyad, Sayel M. 2012. «Constructing Control System for Active Suspension System»
- [15] Ghazaly, Nouby M., Mostafa Makrahy, and Ahmad O. Moaaz. 2019. «Sliding Mode Controller for Different Road Profiles of Active Suspension System for Quarter-Car Model»
- [16] Senthilkumar, Mouleeswaran. 2011. «Development of Active Suspension System for a Pot Hole Using PID Controller»
- [17] Πουλιέζος Αναστάσιος. 2015. «Σύγχρονη Θεωρία Ελέγχου»
- [18] Chen, Yi. 2009. «Skyhook Surface Sliding Mode Control on Semi-Active Vehicle Suspension System for Ride Comfort Enhancement»

[19] Anon. 2016. «Δυναμική Μηχανών Ι»

[20] ΑΛΒΑΝΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ , ΙΩΣΗΦΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ. 2018. «Πτυχιακή Εργασία: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΤΕΤΡΑΚΟΠΤΕΡΟ». Τ.Ε.Ι ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

[21] Γιώργος Μαΐστρος. «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου»

[22] Ανθή Καρράς. 2014. «6. Αρχές Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου»

Παράρτημα Α

Το παράρτημα περιέχει όλους τους κώδικες όπου αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην Matlab, για την διεξαγωγή της συγκεκριμένης διπλωματικής από το σύστημα ανοιχτού βρόχου μέχρι και το τελικό σύστημα κλειστού βρόχου (ανάπτυξη ελεγκτών)

Προγράμματα

Προσομοίωση συστήματος ενεργητικής ανάρτησης στο πεδίο του χρόνου (ανοιχτός βρόχος)

```
clear
clc
%simulation - t
tspan=[0:0.1:25];
%Initial Values for State Variables
z0(1)=0;
z0(2)=0;
z0(3)=0;
z0(4)=0;
[tsol,xsol]=ode45(@Simulation_Motion1,tspan,z0);
figure(1);
plot(tsol,(xsol(:,1)-xsol(:,3)));
xlabel('TIME (SEC)');
ylabel('DISPLACEMENT OF MAIN SUSPENSION (M)');
title('SIMULATION OF ACTIVE SUSPENSION SYSTEM');
```

Συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση της ανάρτησης στο πεδίο του χρόνου με σκοπό τον υποβιβασμό των διαφορικών εξισώσεων 2^{ης} τάξης σε διαφορικές εξισώσεις 1^{ης} τάξης

```
function [dz] = Simulation_Motion1(Time,z)

%simulation -πεδίο του χρόνου - t
%Parameters
ms=243;
mu=40;
cs=370;
ks=14671;
ku=124660;           %fa=A*P
A=3.34*0.0001;
P=10342500;
z0=0;
%μετατροπή διαφορικής εξίσωσης 2 ταξης σε 1 ταξης αναλυτικά στο
χαρτι
%State Variables
x1    =z(1,1);
x2    =z(2,1);
x3    =z(3,1);
x4    =z(4,1);
```

```

%Dynamic Model of the Motion
dz = zeros(4,1);
%Help Variable x1(t)
dz(1)=x2;
%Help Variable x2(t)
dz(2)=-(cs/ms)*(x2-x4)-(ks/ms)*(x1-x3)+(A*P)/ms;
%Help Variable x3(t)
dz(3)=x4;
%Help Variable x4(t)
dz(4)=(ku/mu)*(z0-x3)+(ks/mu)*(x1-x3)+(cs/mu)*(x2-x4)-
(A*P)/mu;

```

Προσομοίωση συστήματος ενεργητικής ανάρτησης στο πεδίο του Laplace (ανοιχτός βρόχος)

```

syms s
%Περιπτωση ανοιχτου βροχου - simulation -laplace
%Parameters
ms=243;
mu=40;
cs=370;
ks=14671;
ku=124660;           %fa=A*P
A=3.34*0.0001;
P=10342500;
z0=0;
fa=A*P;
Gp=((ms+mu)*s^2+ku)/(((ms*s^2)+(cs*s)+ks)*((mu*s^2)+(cs*s)+ks
+ku)-(cs*s+ks)^2);
Gd=(-ms*ku*s^2)/(((ms*s^2)+(cs*s)+ks)*((mu*s^2)+(cs*s)+ks+ku)-
(cs*s+ks)^2));
Fa=fa/s;
Z0=z0/s;
Z=Gp*Fa+Gd*Z0;
z=ilaplace(Z);
Total_Time=25;
t=0:0.1:Total_Time;
z = subs(z,t);
z = double(z);
fa=ilaplace(Fa);
fa=subs(fa,t);
fa=double(fa);
z0=ilaplace(Z0);
z0=subs(z0,t);
z0=double(z0);
figure(1);plot(t,z);
xlabel('TIME (SEC)');
ylabel('DISPLACEMENT OF MAIN SUSPENSION (M) ');
title('SIMULATION OF ACTIVE SUSPENSION SYSTEM (LAPLACE
MODEL) ');

```


**Προσομοίωση συστήματος ενεργητικής ανάρτησης στο πεδίο χώρου κατάστασης
(ανοιχτός βρόχος)**

Χρήση συνάρτησης όπου ορίζονται οι μεταβλητές κατάστασης, όπου αποτελούνται από διαφορικές εξισώσεις 1ης τάξης.

```
function S=Car_Suspension
clc
clear
%simulation-μοντελο χωρου καταστασης
%Parameters
ms=243;
mu=40;
cs=370;
ks=14671;
ku=124660;           %fa=A*P
A=3.34*0.0001;
P=10342500;
z0=0;
%Initial Values at t=0
z_0(1)=0;
z_0(2)=0;
z_0(3)=0;
z_0(4)=0;
function dz=f(t,z)
%Status Variables
x_1      =z(1,1);
x_2      =z(2,1);
x_3      =z(3,1);
x_4      =z(4,1);
%Algebraic Equations
y1=x_1;
y2=x_3;
dz = zeros(4,1);
%Help Variable x1(t)
dz(1)=x_2;
%Help Variable x2(t)
dz(2)=-(cs/ms)*(x_2-x_4)-(ks/ms)*(x_1-x_3)+((A*P)/ms);
%Help Variable x3(t)
dz(3)=x_4;
%Help Variable x4(t)
dz(4)=(ku/mu)*(z0-x_3)+(ks/mu)*(x_1-x_3)+(cs/mu)*(x_2-x_4)-
((A*P)/mu);
end
%Solving Parameters
tspan=[0:0.1:25];
[tsol,xsol]=ode45(@f,tspan,z_0);
%Figures
figure(1);
plot(tsol,(xsol(:,1)-xsol(:,3)),'-','MarkerSize',10);
xlabel('TIME (SEC)');
```

```
ylabel('DISPLACEMENT OF MAIN SUSPENSION (M) ');
title('SIMULATION OF ACTIVE SUSPENSION SYSTEM (STATE SPACE MODEL) ');
end
```

**Χρήση του μοντέλου χώρου κατάστασης για την εύρεση διαφορών
χαρακτηριστικών του συστήματος της ανάρτησης (ανοιχτός βρόχος)**

Κάποια χαρακτηριστικά όπου βρέθηκαν είναι οι συναρτήσεις μεταφοράς της διεργασίας και της διαταραχής, οι πόλοι του συστήματος, τα μηδενικά του συστήματος, ευστάθεια, η εκλεξιμότητα και η παρατηρησιμότητα.

```
clc
clear

%Μοντελο χωρου-καταστασης
%Συναρτηση Μεταφορας και Χαρακτηριστικα
syms s
ms=243;
mu=40;
cs=370;
ks=14671;
ku=124660;          %fa=A*P
A=3.34*0.0001;
P=10342500;
A=[0 1 0 0; -ks/ms -cs/ms ks/ms cs/ms; 0 0 0 1; ks/mu cs/mu (-
ks-ku)/mu (-cs)/mu];
B=[0;1/ms;0;-1/mu];
C=[1 0 0 0 ; 0 0 1 0];
D=[0 ; 0];
E=[0 ; 0 ; 0 ; ku/mu ]; %πινακας διαταραχων
x0=[0;0;0;0];
size_A=rank(A);
I=eye(size_A);
fa_s=(3.34*0.0001*10342500)/s;
z0=0/s ;          %x'=A*x+B*u+E*d -> d=[z0]
d_s=z0             %διαταραχη - d
x_s=(inv(s*I-A)*x0)+(inv(s*I-A)*B*fa_s)+(inv(s*I-A)*E*d_s);
y_s=C*inv(s*I-A)*x0+[C*inv(s*I-A)*B+D]*fa_s+[C*inv(s*I-
A)*E]*d_s;
Gp=[C*inv(s*I-A)*B+D] %συνάρτηση μεταφοράς διεργασίας
Gd=[C*inv(s*I-A)*E]   %συναρτηση μεταφοράς διαταραχής
fa_t=ilaplace(fa_s);
d_t=ilaplace(d_s);
x_t=ilaplace(x_s);
y_t=ilaplace(y_s);
Total_Time=20;
t=0:0.1:Total_Time;
d_t=subs(d_t,t);
d_t=double(d_t);
fa_t=subs(fa_t,t);
```

```

fa_t=double(fa_t);
x_t=subs(x_t,t);
x_t=double(x_t);
y_t=subs(y_t,t);
y_t=double(y_t);
figure(1);plot(t,x_t(1,:),t,x_t(2,:), '--
',t,x_t(3,:),'. ',t,x_t(4,:), '*');xlabel('time,h/min/s');ylabel(
'x(t)')
figure(2);plot(t,y_t(1,:),t,y_t(2,:), '-');xlabel('time
h/min/s');ylabel('y(t)')
figure(3);plot(t,fa_t(1,:), '-
');xlabel('time,h/min/s');ylabel('fa(t)')
figure(4);plot(t,d_t(1,:), '--');xlabel('time
h/min/s');ylabel('d(t)')

%-----
P_rosenbrock=[s*I-A -B;C D]; %ιδιοτιμές A = πολλοι συστηματος
Eigenvalues_A=eig(A);
System_Poles=Eigenvalues_A
[m_p,n_p]=size(P_rosenbrock);
if m_p>n_p
    Size_P=n_p;
else
    Size_P=m_p;
end
for i=1:1:Size_P
    for j=1:1:Size_P
        P_rosenbrock_i(i,j)=P_rosenbrock(i,j);
    end
end %τα μηδενικά του συστήματος μας
Zeros=det(P_rosenbrock_i);
Zeros=sym2poly(Zeros);
System_Zeros= roots(Zeros)
%-----
L=eig(A);
[k1 , k2, k3, k4]=size(L);
for i=1:1:k1 %ευστάθεια
if real(L(i))<0
    disp('the system is stable')
elseif real(L(i))==0
disp('the system is marginally stable')
else
disp ('the system is unstable')
end
end
end
%-----
Contr=ctrb(A,B); %ελεγχιμότητα
Rank_A=rank(A);
Rank_Contr=rank(Contr);
if Rank_A==Rank_Contr
    disp('the system is controllable')

```

```

else
    disp('the system is uncontrollable')

end
%-----
Observ=obsv(A,C);           %παρατηρησιμότητα
Rank_Observ=rank(Observ);

if Rank_A==Rank_Observ
    disp('the system is observable')
else
    disp('the system is unobservable')

end

```

Γεωμετρικός τόπος των ριζών

Χρήση του γεωμετρικού τόπου με σκοπό την εύρεση των κρίσιμων τιμών (K_{cr} , P_{cr}) , έτσι ώστε να γίνει η ανάπτυξη των ελεγκτών P , PI , PID με την μέθοδο (Ziegler-Nichols)

```

clc
clear all
syms s
%Γεωμετρικός τοπος των πολων
%Parameters
ms=243;
mu=40;
cs=370;
ks=14671;
ku=124660;
Gp=((ms+mu)*s^2)+ku)/((ms*s^2)+(cs*s)+ks)*(mu*s^2)+(cs*s)+ks
+ku)-(cs*s+ks)^2);
Gv=1/(10*s+1);
Gm=1/(30*s+1);
Kc=1;
Gc=Kc;
G_open_loop=Gp*Gc*Gv*Gm;
G_open_loop=simplifyFraction(G_open_loop)
[num, den]=numden(G_open_loop)
num=sym2poly(num);
den=sym2poly(den);
G_root_locus=tf(num,den)
Char_Poly=den;
ROOTS=roots(Char_Poly)
[a,b]=size(ROOTS);
for i=1:1:a;
    if ROOTS(i)>0
        disp('astathes')
    elseif ROOTS(i)<0

```

```

        disp('eustathes')
    else
        disp('ariaka eustathes')
    end
end
figure(1);rlocus(G_root_locus)

```

Ανάπτυξη ελεγκτών στο σύστημα της ενεργητικής ανάρτησης (κλειστός βρόχος)

Ανάπτυξη των τριών ελεγκτών (P,PI,PID) με την μέθοδο Ziegler-Nichols και της σύνθεσης ελεγκτή με την μέθοδο Morari-Zafiriou, καθώς πραγματοποιείτε και η προσομοίωση των τεσσάρων σεναρίων, στα θα δοκιμαστούν οι ελεγκτές

```
%ΚΩΔΙΚΑΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΤΗΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ
```

```
syms s
```

```

ms=243;
mu=40;
cs=370;
ks=14671;
ku=124660;
r=4;
lamda=5;

```

```

Gp= ((ms+mu)*s^2)+ku) / ( ((ms*s^2)+(cs*s)+ks) * ((mu*s^2)+(cs*s)+ks+ku) - (cs*s+ks)^2) ;
Gd= (- (ms*ku*s^2) / ( ((ms*s^2)+(cs*s)+ks) * ((mu*s^2)+(cs*s)+ks+ku) - (cs*s+ks)^2) ) ;
Gv=1/(10*s+1);
Gm=1/(30*s+1);
% ΜΕΘΟΔΟΣ MORARI-ZAFIRIOU.....
Gc=(1/(Gp*Gv*Gm)) * (1/((lamda*s)+1)^(r)-1));
Gp+=1,Gp=Gp*Gv*Gm

```

```
%ΜΕΘΟΔΟΣ ZIEGLER-NICHOLS.....
```

```

Kcr=1.97e+07;
Pcr=2.85;

```

```

%P Ελεγχτης
Kc=0.5*Kcr/20;
P=Kc;

```

```

%PI Ελεγχτης
Kc=0.45*Kcr/20;
ti=15*(1/1.2)*Pcr ;
PI=Kc*(1+(1/(ti*s)));

```

```

%PID Ελεγχτης
Kc=0.6*Kcr/20;
ti=15*(0.5)*Pcr;
td=15*(0.125)*Pcr;

```

```

PID=Kc*(1+(1/(ti*s))+td*s);

Gc=P;

%.....

%Ysp=1/s;
%D=0/s;

%Σεναριο
1.....
%Ysp=1/s;
%D=(1/s)*(-15*exp(-10*s)+15*exp(-40*s));

%Σεναριο
2.....
%Ysp=1/s;
%D=(1/s)*(-15*exp(-10*s)+30*exp(-20*s)-9*exp(-30*s)+5*exp(-
40*s)-20*exp(-60*s)+10*exp(-80*s));

%Σεναριο
3.....
%Ysp=1/s;
%syms t
%D=6*cos(2*t);
%D=laplace(D);

%Σεναριο
4.....
%Ysp=(1/s)*(0.5+1*exp(-150*s)+0.7*exp(-300*s));
%D=(1/s)*(16*exp(-5*s)-20*exp(-50*s)+30*exp(-200*s)-25*exp(-
250*s)+15*exp(-350*s)-5*exp(-400*s));

Y=[(Gp*Gv*Gc/(1+Gp*Gv*Gm*Gc))*Ysp]+[(Gd/(1+Gp*Gv*Gm*Gc))*D];

%Yhelp=simplifyFraction(Y);
%[num,den]=numden(Yhelp);

%num=sym2poly(num);  %σε μεταβλητο set point το σβηνω
%den=sym2poly(den);

%num_roots=roots(num)
%Den_roots=roots(den)

%return

Error=Ysp-Y;
U=Gc*Error;

y=ilaplace(Y);
y=ilaplace(Ysp);
error=ilaplace(Error);

```

```

u=ilaplace(U);
d=ilaplace(D);

Total_Time=500;
t=0:1:Total_Time;
y=subs(y,t);
y=double(y);
ysp=subs(ysp,t);
ysp=double(ysp);
u=subs(u,t);
u=double(u);
error=subs(error,t);
error=double(error);
d=subs(d,t);
d=double(d);

%figure(1);plot(t,y,t,ysp,'--');axis([0      max(t)      -14
14]);xlabel('time,sec');ylabel('y(t)');title('Μετατόπιση
ανάρτησης')
%figure(2);plot(t,u);axis([0  max(t)  -20  20]);xlabel('time,
sec');ylabel('u(t)');title('Σήμα εξόδου ελεγκτή')
%figure(3);plot(t,error);axis([0 max(t) -14 14]);xlabel('time,
sec');ylabel('error(t)');title('Σφάλμα')
%figure(4);plot(t,d);ylabel('ΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ
(CM)');xlabel('ΧΡΟΝΟΣ (SEC)');title('ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ')

```