



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΡΥΘΜΙΣΗ (TUNING) ΕΛΕΓΚΤΩΝ PID ΓΙΑ
ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΝΕΡΓΗΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

Υπό

Χαρισιάδη Γεωργίου

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ Αλεξανδρίδης Αλέξανδρος

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του Διπλώματος

Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, Σεπτέμβριος 2018

Copyright©2018 Χαρισιάδης Γεώργιος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εξεταστική Επιτροπή

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Αλεξανδρίδης Αλέξανδρος
(Επιβλέπων) Καθηγητής
Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών
Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Παπαδημητρίου Κωνσταντίνος
Καθηγητής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Κερμανίδης Αλέξης
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να προσδώσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αλέξανδρο Αλεξανδρίδη για την πολύτιμη αρωγή του, την καθοδήγηση αλλά και τον χρόνο που αφιέρωσε στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα 2 μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους καθηγητές κ. Παπαδημητρίου Κωνσταντίνο και κ. Κερμανίδη Αλέξη για τη συμμετοχή τους και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ευχαριστώ επίσης την οικογένειά μου που με στήριξε και με ενθάρρυνε καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησης μου, αλλά και τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά τη μητέρα μου Μαρία και τον αδερφό μου Κωνσταντίνο για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη που μου έχουν προσφέρει και θα συνεχίσουν να μου προσφέρουν, αλλά και την εμπιστοσύνη που επιδεικνύουν στις επιλογές μου μέχρι σήμερα.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο ευρύτερο πεδίο του αυτομάτου ελέγχου και στόχος της ήταν η κατάλληλη ρύθμιση (tuning) ενός PIDελεγκτή για το σχεδιασμό της ενεργής ανάρτησης σε μοντέλο ανάρτησης ενός τετάρτου (quarter car model). Με την εισαγωγή στο σύστημα ενός ηλεκτρο-υδραυλικού ενεργοποιητή τεσσάρων σερβοβαλβίδων, αυτομάτως η ανάρτηση μετατρέπεται από παθητική σε ενεργή. Ρυθμίζοντας κατάλληλα τις δράσεις του ελεγκτή, επιτυγχάνεται και ο καλύτερος δυνατός σχεδιασμός της ανάρτησης. Τα κριτήρια σχεδιασμού αφορούν τις αποκρίσεις των μεταβλητών του συστήματος ως προς τη μορφή των καμπυλών και τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. overshoot, μέγιστη τιμή, χρόνος απόκρισης, άθροισμα τετραγώνων σφαλμάτων). Οι μεταβλητές του συστήματος είναι οι μετατοπίσεις και οι ταχύτητες του αμαξώματος και του τροχού, η δύναμη του ενεργοποιητή και η μετατόπιση της βαλβίδας. Όμως η ρύθμιση του ελεγκτή γίνεται με βάση την απόκριση της επιτάχυνσης του αμαξώματος, που αποτελεί και το κύριο κριτήριο αξιολόγησης της ρύθμισης του ελεγκτή. Αρχικά, θέτοντας τον ελεγκτή σε εφαρμογή για διάφορα, αλλά συγκεκριμένα προφίλ δρόμου, εξετάστηκε η ορθή λειτουργία του, προχωρώντας, με αυτόν τον τρόπο σε ένα τυχαίο προφίλ δρόμου (πιο κοντά, δηλαδή, σε πραγματικές συνθήκες). Ρυθμίζοντας τον ελεγκτή με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος, στην κάθε περίπτωση και, τελικώς, στο τυχαίο προφίλ δρόμου, επιτεύχθηκε η βελτίωση των αποκρίσεων των μεταβλητών και ειδικότερα της επιτάχυνσης του αμαξώματος, βάσει πάντα των παραμέτρων αξιολόγησης. Το ερώτημα που τέθηκε στο σημείο αυτό είναι εάν μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη βελτίωση. Στο ερώτημα αυτό κλήθηκε να απαντήσει μια αυτοματοποιημένη μέθοδος βελτιστοποίησης μη γραμμικών συστημάτων, αυτή των γενετικών αλγορίθμων. Η απάντηση ήταν θετική και εν τέλει ο γενετικός αλγόριθμος κατάφερε να επιφέρει ακόμα μεγαλύτερη βελτίωση σε όλες τις παραμέτρους αξιολόγησης της καμπύλης επιτάχυνσης του αμαξώματος. Στην προσπάθεια να εξεταστούν όλα τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον «Matlab» και το γραφικό περιβάλλον μοντελοποίησης «Simulink».

Λέξεις Κλειδιά

- Μοντέλο ανάρτησης ενός τετάρτου
- Αναλογικός - Ολοκληρωτικός-Διαφορικός Ελεγκτής
- Ενεργή Ανάρτηση
- Γενετικοί Αλγόριθμοι
- Ρύθμιση του ελεγκτή

Summary

The current diploma thesis was devised in the wider field of automatic control principals and its primary aspiration is to tackle the problem of PID controller tuning in the design of active suspension systems for a quarter car model. By importing an electro-hydraulic actuator consisting of 4 servovalves to the system, automatically passive suspension is converted to active. The best feasible designing of the suspension can be accomplished by tuning the PID actions in a proper way . The evaluation criteria concern the responses of system variables over their forms and their characteristics (e.g. overshoot, max value, settling time, sum of square errors). The system variables are the displacement of car body and wheel, the velocity of car body and wheel, the force actuator and the valve displacement. The proposed PID tuning procedure is mainly based on the car body acceleration response, which is used as the basic evaluation criterion. Firstly, controller operation was tested in some simple and specific road profiles. Then, controller was tested for a random road profile, which approaches to real conditions. Many attempts for various combinations of PID parameters took place and it managed to improve the system variables responses and especially car body acceleration response, based always on evaluation parameters. Can system variables responses be improved more? Genetic algorithms, an optimization method, can answer to this question. Finally, genetic algorithms improved all the evaluation parameters of the body car acceleration . The programming environment "Matlab" and its graphical and modeling environment "Simulink" were used in order this research to be implemented.

Key words

- Quarter Car Model
- PID Controller
- Active Suspension
- Genetic Algorithms
- PID Controller Tuning

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΑΝΑΡΤΗΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟΥ.....	4
2.1 Περιγραφή του μοντέλου.....	4
2.2 Μαθηματική περιγραφή του μοντέλου.....	4
3. ΕΝΕΡΓΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΣ-ΟΛΟΚΛΗΤΩΤΙΚΟΣ-ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ.....	7
3.1 Ενεργή ανάρτηση.....	7
3.2 Χρήση αναλογικού-ολοκληρωτικού-διαφορικού ελεγκτή.....	9
4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ - ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ.....	10
4.1 Περιγραφή μεθόδου.....	10
4.2 Διαφορές μεταξύ γενετικών αλγορίθμων και άλλων παραδοσιακών μεθόδων.....	11
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ.....	13
5.1 Εισαγωγή - περιγραφή τρόπου αξιολόγησης αποτελεσμάτων.....	13
5.2 Παθητική ανάρτηση.....	13
5.3 Ενεργή ανάρτηση - Εισαγωγή ελεγκτή.....	17
5.4 Περιπτώσεις διαταραχών στο προφίλ του δρόμου.....	25
5.5 Τυχαίο προφίλ δρόμου.....	36
5.6 Βελτιστοποίηση ρυθμίσης ελεγκτή με χρήση γενετικών αλγορίθμων.....	49
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	51
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	52
Παράρτημα.....	54

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η άνεση στην οδήγηση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες αξιολόγησης της απόδοσης του οχήματος. Τα συστήματα αναρτήσεως σχεδιάζονται με σκοπό να διατηρούν την σταθερότητα του οχήματος. Αυτό το επιτυγχάνουν περιορίζοντας τις επιρροές από τα δυναμικά φορτία που δέχεται το όχημα. Παράλληλα παρέχουν άνεση στην οδήγηση, μειώνοντας τα κρουστικά φορτία που οφείλονται στα χαρακτηριστικά του εδάφους. Το σύστημα αναρτήσεως είναι ένας μηχανισμός που διαχωρίζει με φυσικό τρόπο το αμάξωμα από τον τροχό του οχήματος. Δυο βασικές μέθοδοι αξιολόγησης για την οδηγική άνεση ενός οχήματος, είναι

- **το πραγματικό πείραμα** (σε πραγματικές συνθήκες στο δρόμο) και
- **η υπολογιστική προσομοίωση.**

Η μέθοδος της υπολογιστικής προσομοίωσης, είναι η μέθοδος με την οποία ασχοληθήκαμε στην παρούσα εργασία και βασίζεται σε ένα δυναμικό μαθηματικό μοντέλο του οχήματος.

Η ανάρτηση διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες,

1. την **παθητική**
2. την **ημι-ενεργή** και
3. την **ενεργή** ανάρτηση.



Σχήμα 1.1 : Παθητική ανάρτηση^[36] Σχήμα 1.2 : Ημι-ενεργή ανάρτηση^[36]



Σχήμα 1.3 : Ενεργή ανάρτηση^[36]

Η παθητική ανάρτηση συναποτελείται από ελατήρια και αποσβεστήρες και συνδέει το αμάξωμα με τους τροχούς του οχήματος. Η μόνη διαφορά της παθητικής από την ημι-ενεργή ανάρτηση, είναι πως η δεύτερη μπορεί να διαθέτει διαφορετικό μηχανισμό απόσβεσης, όπως υδραυλικό μηχανισμό, μηχανισμό τριβής ή μαγνητοροϊκό μηχανισμό. Η ενεργή ανάρτηση, η οποία και αποτελεί το κύριο σημείο ενδιαφέροντος της εργασίας, διαθέτει επιπλέον υδραυλικό μηχανισμό, ο οποίος της επιτρέπει να παράγει τα επιθυμητά φορτία για ολόκληρο το σύστημα αναρτήσεως. Ο σχεδιασμός της ημι-ενεργής και ιδιαίτερα της ενεργής ανάρτησης των οχημάτων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Η παρούσα εργασία εστιάζει στην ενεργή ανάρτηση, όπου ο απλός απορροφητής κραδασμών της παθητικής ανάρτησης, αντικαθίσταται από έναν ευθύγραμμο υδραυλικό ενεργοποιητή που διέπεται από 4 ηλεκτρο-υδραυλικές σερβοβαλβίδες. Οι ενεργητικές αναρτήσεις έχουν την ικανότητα να ρυθμίζουν τη ροή της ενέργειας από και προς το σύστημα^[1]. Επιπλέον, τα δυναμικά χαρακτηριστικά μιας ενεργής ανάρτησης μπορούν να ρυθμίζονται διαρκώς βασιζόμενα στις συνθήκες οδήγησης, οι οποίες μετρούνται από ειδικούς αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στο όχημα. Έτσι παρέχεται ένας καλύτερος συμβιβασμός ανάμεσα στην οδηγική άνεση και στην σταθερότητα κατά την οδήγηση^[2]. Εκτεταμένες τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των ελεγκτών της ενεργής ανάρτησης, λαμβάνουν υπόψη τους^[3] την δύναμη εισόδου. Κατ' αυτήν την προσέγγιση, υπάρχουν δύο ξεχωριστά και ενδιαφέροντα ερευνητικά θέματα.

- ✓ Ο τρόπος ελέγχου του ενεργοποιητή ώστε να αποκτηθεί αυτή η επιθυμητή δύναμη
- ✓ Ο τρόπος δημιουργίας της επιθυμητής δύναμης.

Αρκετοί συγγραφείς που έχουν ασχοληθεί με την διαδικασία παραγωγής της δύναμης του ηλεκτρο-υδραυλικού σερβοσυστήματος για την ενεργή ανάρτηση^[4], προειδοποιούν ότι αγνοώντας τις μη γραμμικές επιδράσεις της δυναμικής του ενεργοποιητή^[5], οδηγούμαστε σε αστάθεια του συστήματος. Οι προηγούμενες προσπάθειες για την εύρεση λύσης στο πρόβλημα της ανίχνευσης της δύναμης, αποδείχθηκαν μη ικανές για να δώσουν κατάλληλα αποτελέσματα^[6]. Έτσι, ο σχεδιασμός και η εφαρμογή μετατράπηκαν σε πιο πολύπλοκους και μη γραμμικούς αλγορίθμους ελέγχου^[7], που καθίστανται αναγκαίοι ώστε να επιτευχθεί μια αποδεκτή και επιθυμητή απόδοση ^[8]. Οι απλές μέθοδοι αδυνατούν να επιλύσουν το πρόβλημα^[9], γεγονός το οποίο πηγάζει από τους θεμελιώδεις περιορισμούς στην βασική διατύπωση για τον εντοπισμό της δύναμης. Η απουσία ενός καθαρού στοιχείου απόσβεσης στο σύστημα (π.χ. ένας απορροφητής κραδασμών) και η έμφυτη ανατροφοδότηση της ταχύτητας του πιστονιού στο θάλαμο πίεσης του ενεργοποιητή, οδηγούν στην εμφάνιση μηδενικών στην συνάρτηση μεταφοράς του μη ρυθμιζόμενου δακτυλίου δύναμης. Αυτά τα μηδενικά δεν μπορούν να τροποποιηθούν από μια απλή ανατροφοδότηση και δημιουργούν σοβαρούς περιορισμούς εύρους ζώνης στον ελεγκτή για την ανίχνευση της δύναμης. Ωστόσο, υπάρχει λύση στο πρόβλημα αυτό ^[10]. Ένας τεχνητός όρος απόσβεσης έρχεται να προστεθεί στη δυναμική του συστήματος, καθιστώντας το πλέον ικανό για να αποσβέσει καλύτερα τις «μηδενικές» δυναμικές του συστήματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης, η πιθανότητα να χρησιμοποιούνται πληροφορίες από το προφίλ του δρόμου. Με βάση ορισμένους συγγραφείς που έχουν ασχοληθεί με το πρόβλημα αυτό, όπως ο Tomizuka^[11], ο Hac^[12] και ο Thomson^[13] παρουσιάστηκαν κάποιοι πιθανοί τρόποι επίλυσης του προβλήματος. Επιπλέον, είναι σημαντικό να μην αγνοηθούν τα μη γραμμικά στοιχεία του συστήματος, σύμφωνα με όσα πραγματεύεται ο Gopalasamy^[14].

Η εργασία αυτή, η οποία πραγματοποιήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του «**Matlab**», βασισμένη αρχικά σε μελέτες προηγούμενων ερευνητών, έχει ως κύριο στόχο της, το σχεδιασμό μιας ενεργής ανάρτησης. Σε αυτό συνέβαλλε η χρήση ενός ελεγκτή που εισάγεται στο σύστημα. Ο ελεγκτής αυτός συνδέεται με τα υδραυλικά μέρη του συστήματος της ενεργής ανάρτησης και με την κατάλληλη χρήση και ρύθμιση του, μπορεί να βελτιώσει τις αποκρίσεις των μεταβλητών του συστήματος. Η ρύθμιση του ελεγκτή μπορεί να πραγματοποιηθεί χειροκίνητα, χρησιμοποιώντας τις γνώσεις και τα αποτελέσματα από προηγούμενες έρευνες, είτε χρησιμοποιώντας κάποια μέθοδο βελτιστοποίησης μη γραμμικού συστήματος, ρυθμίζοντας δηλαδή τη δράση του ελεγκτή με τη χρήση μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων, ως μέθοδος βελτιστοποίησης μη γραμμικού συστήματος. Στη μελέτη του συστήματος της ανάρτησης, έρχεται να βοηθήσει το «**μοντέλο ανάρτησης του ενός τετάρτου**», ή με την επίσημη ορολογία το λεγόμενο «**quarter car model**» ^[15]. Το μοντέλο ανάρτησης του ενός τετάρτου, όπως λέει και το όνομα του, είναι το ένα τέταρτο του οχήματος,

δηλαδή ο ένας τροχός μαζί με το αμάξωμα που αναλογεί σε αυτόν. Πρόκειται για ένα σύστημα ενός ή δύο βαθμών ελευθερίας το οποίο απασχολεί πολλούς τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπως η πρόβλεψη των αποκρίσεων της δυναμικής του συστήματος, η αναγνώριση, η βελτιστοποίηση και ο έλεγχος των οχημάτων εδάφους [16], [17]. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το μοντέλο ανάρτησης ενός τετάρτου είναι η απλότητα του και οι ποιοτικά σωστές πληροφορίες που παρέχει, ειδικά σε έρευνες που σχετίζονται με την οδήγηση και το χειρισμό των οχημάτων. Επιπροσθέτως, οι πληροφορίες που εξάγονται από τέτοια απλά μοντέλα, αποτελούν συνήθως μια ισχυρή βάση για πιο διεξοδικές, ακριβείς και ολοκληρωμένες μελέτες, στις οποίες εμπλέκονται περισσότερο δυναμικά μοντέλα οχημάτων [18]. Εισάγοντας λοιπόν στο μοντέλο ανάρτησης του ενός τετάρτου, έναν ελεγκτή, έγινε προσπάθεια να σχεδιαστεί η ενεργή ανάρτηση, έχοντας ως κριτήριο τις αποκρίσεις των μεταβλητών του συστήματός μας και πιο συγκεκριμένα της επιτάχυνσης του αμαξώματος. Ρυθμίζοντας κατάλληλα τις παραμέτρους του ελεγκτή, μπορεί να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο βελτιστοποίησης των γενετικών αλγορίθμων, όπως προαναφέρθηκε, βρέθηκαν για τις παραμέτρους του ελεγκτή οι κατάλληλες τιμές, μέσω μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας. Πρώτα όμως έπρεπε να διασφαλισθεί πως το μοντέλο ανάρτησης του ενός τετάρτου λειτουργούσε με ορθό τρόπο και στην παθητική περίπτωση (χωρίς ελεγκτή) και έπειτα στην ενεργή. Αυτό ελέγχθηκε αρχικώς, με την χρήση απλών προφίλ δρόμου, όπως ένα σαμαράκι. Εξετάζοντας τις αποκρίσεις των μεταβλητών του συστήματος ως προς τη μορφή της καμπύλης και τα χαρακτηριστικά της κάθε καμπύλης, ελέγχθηκε η σωστή και ορθή λειτουργία του μοντέλου. Αφού διασφαλίστηκε ότι το μοντέλο λειτουργεί σωστά για απλά προφίλ δρόμου, ήταν θεμιτό να εξεταστεί ότι το μοντέλο της ανάρτησης του ενός τετάρτου λειτουργεί σωστά και σε πιο πραγματικές συνθήκες. Για να επιτευχθεί αυτό, δημιουργήσαμε ένα τυχαίο προφίλ δρόμου με τυχαίες διαταραχές και έπειτα βασιζόμενοι πάνω σε αυτό, ρυθμίστηκε κατάλληλα ο ελεγκτής. Τέλος πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη χειροκίνητη ρύθμιση του ελεγκτή και αυτών που εξήχθησαν με τη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων. Έτσι προέκυψαν και τα συμπεράσματα της μελέτης.

Η δομή της εργασίας αποτελείται από 6 κεφάλαια με το πρώτο να είναι το παρόν κείμενο της εισαγωγής.

Στο **κεφάλαιο 2** εξηγούνται λεπτομερώς ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου ανάρτησης του ενός τετάρτου, ποιες εξισώσεις περιγράφουν το σύστημα, καθώς και ο τρόπος που προέκυψαν.

Στο **κεφάλαιο 3** γίνεται μια πιο ειδική ανάλυση για το ποια είναι η χρήση του ελεγκτή και με ποιο τρόπο μπορεί να τον ρυθμιστεί, ώστε να ληφθούν και τα κατάλληλα αποτελέσματα.

Στο **κεφάλαιο 4** αναλύεται η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του ελεγκτή.

Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα διαφορετικά πειράματα επάνω στο μοντέλο.

Στο **κεφάλαιο 6** βρίσκονται τα συμπεράσματα της έρευνας.

Τέλος, παρατίθενται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήσαμε για τη συλλογή πληροφοριών και τη μελέτη παλιότερων ερευνών, καθώς και παράρτημα, όπου παρατίθενται οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον του «Matlab» για να εκπονηθεί το υπολογιστικό κομμάτι της εργασίας.

2. ΑΝΑΡΤΗΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟΥ

2.1 Περιγραφή του μοντέλου

Τα αυτοκινητιστικά συστήματα ενεργής ανάρτησης αξιοποιούν ηλεκτρο-υδραυλικούς ενεργοποιητές με σκοπό να αποτρέψουν τις κατακόρυφες κινήσεις που προέρχονται από τις ατέλειες του δρόμου.

Η επικέντρωση σε μόνο μια ρόδα ενός αυτοκινήτου είναι το λεγόμενο μοντέλο ανάρτησης ενός τετάρτου (quarter car model), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 .

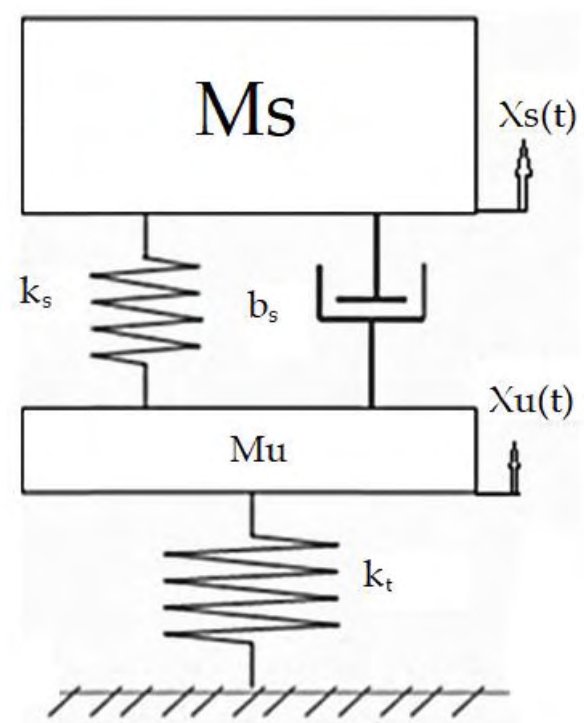
Το μοντέλο ανάρτησης ενός τετάρτου είναι ένα δυναμικό σύστημα που αποτελείται από 2 συνδεδεμένα υποσυστήματα τα οποία ονομάζονται αναρτημένη και μη αναρτημένη μάζα (sprung and unsprung mass).

Η ρόδα συνδέεται με την μη αναρτημένη μάζα μέσω ενός ελατηρίου ενώ η αναρτημένη με την μη αναρτημένη συνδέονται με ένα ελατήριο ένα αποσβεστήρα και με ένα υδραυλικό ενεργοποιητή.

Η χρήση του τελευταίου αφορά τον έλεγχο των δονήσεων της αναρτημένης μάζας και είναι και αυτός που μετατρέπει την ανάρτηση από παθητική σε ενεργή.

Επιπρόσθετα, η τοποθέτηση του αποσβεστήρα παράλληλα στον ενεργοποιητή στοχεύει στην απομάκρυνση των κραδασμών.

Οι υδραυλικοί ενεργοποιητές ελέγχονται από ηλεκτρο-υδραυλικές σερβοκινούμενες βαλβίδες και τοποθετούνται παράλληλα στα ελατήρια της παθητικής ανάρτησης, επιτρέποντας τη δημιουργία φορτίων μεταξύ της αναρτημένης και της μη αναρτημένης μάζας.



Σχήμα 2.1: Μοντέλο ανάρτησης ενός τετάρτου

2.2 Μαθηματική περιγραφή του μοντέλου

Το σύστημα των εξισώσεων που περιγράφει το μοντέλο της ανάρτησης του ενός τετάρτου αποτελείται από 2 βαθμούς ελευθερίας και εμπεριέχει και μη γραμμικά στοιχεία, όπως όλα τα πραγματικά φυσικά συστήματα, τα οποία και λαμβάνονται υπόψη στην μελέτη. Η δύναμη που παράγεται από τον ενεργοποιητή εμπεριέχει έμφυτα μη γραμμικά στοιχεία. Επίσης, τα δυναμικά χαρακτηριστικά των συστατικών της ανάρτησης (ελατήριο-απόσβεση) έχουν μη γραμμικές ιδιότητες και δεν είναι ανεξάρτητα του χρόνου, αλλά αλλάζουν κατά τη διάρκεια των κύκλων ζωής του οχήματος.

Οι Παράμετροι^[9] που χρησιμοποιούνται για την μελέτη των εξισώσεων του quarter car model παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1 .

Παράμετροι (συμβολισμός)		Τιμή
Αναρτημένη μάζα	(m_s)	2,800 kg
Μη αναρτημένη μάζα	(m_u)	270 kg
Δυσκαμψία ανάρτησης - γραμμικό μέρος	(k_s^l)	240,000 N/m
Δυσκαμψία ανάρτησης - μη γραμμικό μέρος	(k_s^{nl})	2,350,000 N/m
Δυσκαμψία ελαστικών	(k_t)	1,000,000 N/m
Αποσβεστήρας-γραμμικό μέρος	(b_s^l)	12,000 (N/m)/s
Αποσβεστήρας-συμμετρικό μέρος	(b_s^{sym})	400 (N/m)/s
Αποσβεστήρας- μη γραμμικό μέρος	(b_s^{nl})	400 (N/m)/s
Παράμετρος ενεργοποιητή1	(α)	2.27×10^9
Παράμετρος ενεργοποιητή2	(β)	1
Περιοχή ποτονιού	(A)	0.0044m ²
Πίεση τροφοδοσίας	(P_s)	20,684,000 Pa
Σταθερά χρόνου	(τ)	0.003 sec

Πίνακας 2.1: Πίνακας παραμέτρων του προβλήματος

Για την μελέτη του quarter car model χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα με 6 αγνώστους^[20] που προέκυψε από τις εξισώσεις 2.1 - 2.12 .

Από το 2^ο νόμο του Newton έχουμε τις 2.1 και 2.2 .

$$\mathbf{F}_{ms} = \mathbf{F}_{ks} + \mathbf{F}_{bs} - \mathbf{F} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{F}_{mu} = -\mathbf{F}_{ks} - \mathbf{F}_{bs} - \mathbf{F}_{kt} + \mathbf{F} \quad (2.2)$$

Όπου

- $\mathbf{F}_{ms} = m_s \ddot{x}_1$ (2.3)
- $\mathbf{F}_{mu} = m_u \ddot{x}_2$ (2.4)
- $\mathbf{F}_{bs} = b_s^l(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - b_s^{sym} |\dot{x}_2 - \dot{x}_1| + b_s^{nl}(\sqrt{|\dot{x}_2 - \dot{x}_1|}) \operatorname{sgn}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$ (2.5)
- $\mathbf{F}_{ks} = k_s^l(x_2 - x_1) + k_s^{nl}(x_2 - x_1)^3$ (2.6)
- $\mathbf{F}_{kt} = k_t(x_2 - w)$ (2.7)
- $\mathbf{F} = Ax_p$ (2.8)

Τα $x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1$ αφορούν την αναρτημένη μάζα ενώ τα $x_2, \dot{x}_2, \ddot{x}_2$ τη μη αναρτημένη. Το x_p ισοδυναμεί με την πτώση πίεσης P_L (εξίσωση 2.8) του ποτονιού τεσσάρων βαλβίδων, βάσει αρχικής θεώρησης και η παράγωγός του δίνεται από τη σχέση 2.10 .

- $x_p = P_L$ (2.9)
- $\frac{V_t}{\beta_e} \dot{P}_L = Q - C_{tp}P_L - A(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$ (2.10)

$$\text{Όπου } Q = \text{sgn}[P_s - \text{sgn}(x_v)P_L]C_d S x_v \sqrt{\frac{1}{\rho} |P_s - \text{sgn}(x_v)P_L|} \quad (2.11)$$

Ο πίνακας 2.2 παρουσιάζει τις τιμές των παραμέτρων^[21] του πιστονιού.

Παράμετροι (Συμβολισμός)	Τιμές
Συντελεστής διαρροής του πιστονιού (C_{tp})	$15 \times 10^{-12} (\text{m}^3/\text{Pa})\text{s}^{-1}$
Ελαστική σταθερά όγκου του συστήματος (β_e)	689475728 Pa
Συνολικός όγκος ενεργοποιητή (V_t)	$6 \times 10^{-5} \text{m}^3$
Πυκνότητα υδραυλικού υγρού (ρ)	850kg/m ³
Κλίση περιοχής πηγίου βαλβίδας (S)	0.008m
Συντελεστής απορρίψεως (C_d)	0.7

Πίνακας 2.2: Τιμές παραμέτρων πιστονιού

- $\dot{x}_v = \frac{1}{\tau} (-x_v + u) \quad (2.12)$

Όπου x_v είναι η μετατόπιση της σερβοκινούμενης βαλβίδας που ελέγχεται από την είσοδο u .

Τελικά το σύστημα που προκύπτει είναι το:

$$\dot{x} = f(x) + gu$$

με $x = [x_1 x_2 x_3 x_4 x_p x_v]^T$

$$g = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{1}{\tau}]^T$$

και ο πίνακας $f(x)_{[6 \times 1]} =$

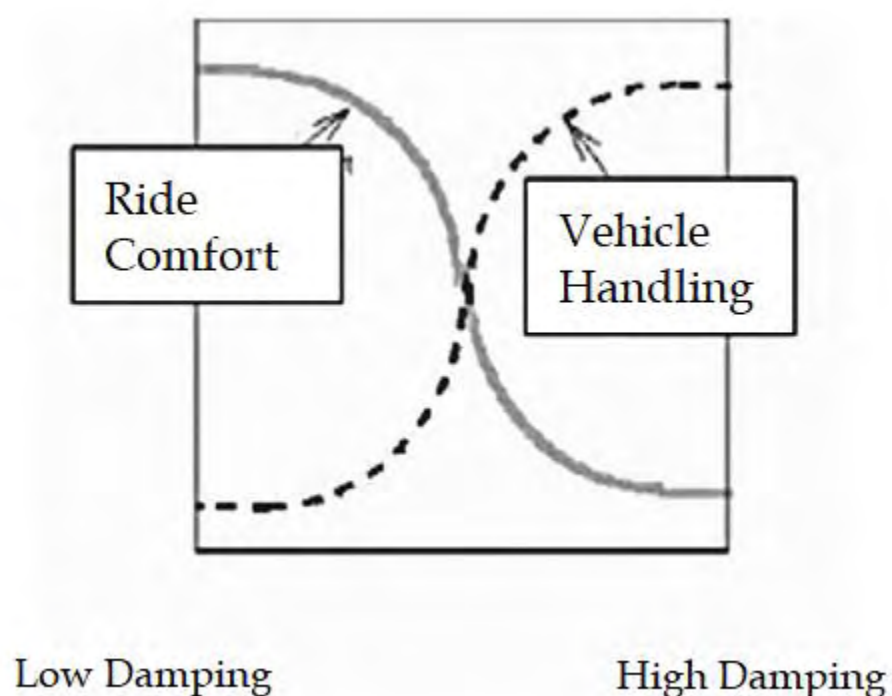
$$\left\{ \begin{array}{l} x_3 \\ x_4 \\ \frac{1}{m_s} (F_{k_s} + F_{b_s} - A x_p) \\ \frac{1}{m_u} (-F_{k_u} - F_{k_t} - F_{b_u} + A x_p) \\ -\beta x_p - a A (x_3 - x_4) + a Q \\ -\frac{1}{\tau} x_v \end{array} \right.$$

3. ΕΝΕΡΓΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΣ-ΟΛΟΚΛΗΤΩΤΙΚΟΣ-ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ

3.1 Ενεργή ανάρτηση

Τα αυτοκινούμενα συστήματα ανάρτησης που χρησιμοποιούν παθητικά στοιχεία έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν ενέργεια μέσω των ελατηρίων και να τη διαχέουν μέσω των αποσβεστήρων. Η ενεργή ανάρτηση μπορεί να αποθηκεύει, να διαχέει, αλλά και να εισάγει ενέργεια στο σύστημα. Οι παράμετροί της μπορεί να ποικίλουν και εξαρτώνται από τις συνθήκες λειτουργίας. Η ενεργή ανάρτηση έχει την ικανότητα να προσαρμόζεται στα φορτία που δημιουργούνται από τον ενεργοποιητή και να καταστέλλει τις κατακόρυφες δονήσεις που δέχεται το αμάξωμα. Έχει τη δυνατότητα να μετριάξει τους κραδασμούς^[22] από ανώμαλους δρόμους, να διασφαλίζει καλές επιδόσεις οδήγησης και να βελτιώνει την οδηγική άνεση.

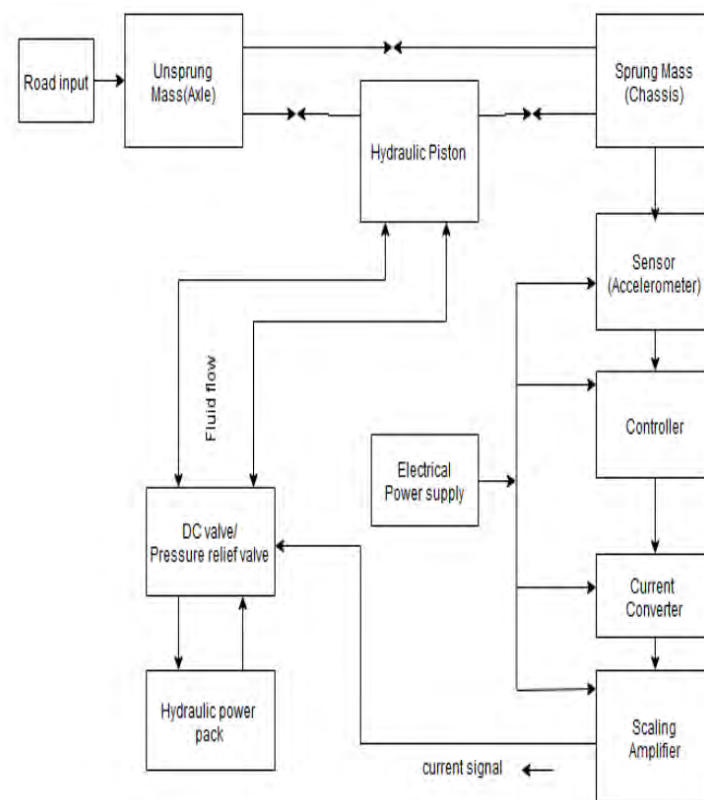
Η παθητική ανάρτηση μπορεί να προσφέρει μόνο τον συμβιβασμό ανάμεσα στις δυνατότητες της ενεργής ανάρτησης (εικόνα 3.1). Πιο συγκεκριμένα, εάν η παθητική ανάρτηση σχεδιαστεί πιο σκληρή, θα μπορεί να μεταφέρει στην αναρτημένη μάζα μεγαλύτερο μέρος από τους κραδασμούς που προκαλούνται από τις ατέλειες του δρόμου. Αντίθετα, εάν σχεδιαστεί πιο μαλακή, το όχημα δε θα διαθέτει την ίδια σταθερότητα στις στροφές ή θα είναι πιο επιρρεπές στο να αναποδογυρίσει. Η απόδοση της ανάρτησης, δηλαδή, εξαρτάται αποκλειστικά από το προφίλ που διαθέτει ο δρόμος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα χαρακτηριστικά της παθητικής ανάρτησης εξαρτώνται αποκλειστικά από την κατασκευή της και δεν μπορούν να ρυθμιστούν από κανένα μηχανικό μέρος. Για αυτόν τον λόγο, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, εμφανίζεται ολοένα και περισσότερο η χρήση της ενεργής ανάρτησης στα μοντέρνα οχήματα με την προσθήκη του υδραυλικού ενεργοποιητή, ο οποίος είναι ένας κλειστός βρόγχος. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα μηχανικό εξάρτημα το οποίο προστίθεται στο σύστημα, παράλληλα στα ελατήρια, και ελέγχεται από έναν ελεγκτή. Με τη βοήθεια ορισμένων αισθητήρων^[23] στην είσοδο οι οποίοι θα δώσουν τις απαραίτητες πληροφορίες και τα απαραίτητα δεδομένα για το προφίλ του δρόμου, ο ελεγκτής θα αποφανθεί εάν θα αποθηκευτεί ή θα διαχυθεί ενέργεια από το σύστημα. Επομένως, στο σύστημα της ενεργής ανάρτησης εμπεριέχεται ένα ενεργητικό στοιχείο, το οποίο ικανοποιεί τις ανάγκες για άνετη και ασφαλέστερη οδήγηση, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του ίδιου του συστήματος.



Σχήμα 3.1: Συσχέτιση του σχεδιασμού παθητικής ανάρτησης με τις δυνατότητες οδήγησης^[24]

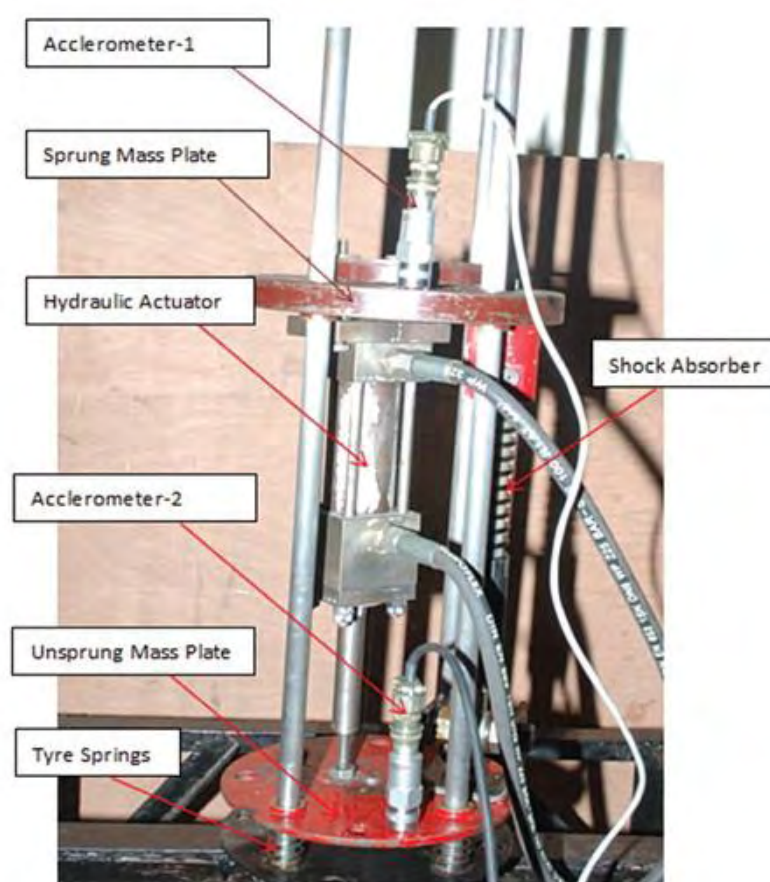
Μια ενεργή ανάρτηση, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 3.2, για να αναπτυχθεί χρειάζεται ορισμένα από τα ακόλουθα υδραυλικά δομικά στοιχεία^[25]:

- Πηγή συμπιεσμένου υδραυλικού υγρού
- Βαλβίδα ανακούφισης πίεσης για τον έλεγχο του υδραυλικού υγρού
- Βαλβίδα ελέγχου κατεύθυνσης
- Υδραυλικός κύλινδρος (που μετατρέπει την υδραυλική πίεση σε δύναμη η οποία με τη σειρά της μεταδίδεται ανάμεσα στην αναρτημένη και τη μη αναρτημένη μάζα)



Σχήμα 3.2: Μοντέλο ενός τετάρτου ενεργής ανάρτησης με παρουσία ηλεκτρο-υδραυλικών στοιχείων^[24]

Στο σχήμα 3.3 απεικονίζεται ένα ομοίωμα από το μοντέλο του ενός τετάρτου με προσαρμοσμένο επάνω του τον υδραυλικό ενεργοποιητή.



Σχήμα 3.3: Ομοίωμα μοντέλου του ενός τετάρτου με χρήση υδραυλικού ενεργοποιητή^[24]

3.2 Χρήση αναλογικού-ολοκληρωτικού-διαφορικού ελεγκτή

Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής^[26](ΑΟΔ ελεγκτής ή PID controller) είναι η πιο κοινή μορφή σχεδιασμού ανατροφοδότησης. Ο ΑΟΔ συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των τριών δράσεων ελέγχου και γι' αυτό ονομάζεται και ελεγκτής τριών όρων(3-term controller). Εάν θεωρήσουμε $u(t)$ ως την είσοδο που στέλνεται στο σύστημα, $y(t)$ ως την πραγματική τιμή εξόδου, $r(t)$ ως την επιθυμητή τιμή εξόδου και $e(t) = r(t) - y(t)$ ως το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, τότε η σχέση που περιγράφει τον ελεγκτή τριών όρων είναι η 3.1.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Όπου K_p , K_i και K_d οι παράμετροι της αναλογικής, ολοκληρωτικής και διαφορικής δράσης αντίστοιχα.

Η επιθυμητή δυναμική του κλειστού βρόγχου μπορεί να επιτευχθεί προσαρμόζοντας κατάλληλα τις 3 παραμέτρους K_p , K_i και K_d , πραγματοποιώντας τη λεγόμενη εναρμόνιση ή ρύθμιση του ελεγκτή (PID tuning). Ο αναλογικός όρος βοηθά στη βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος τόσο στη μεταβατική όσο και στη μόνιμη κατάσταση, αλλά αδυνατεί να εξαλείψει το μόνιμο σφάλμα. Δεν μπορεί να ανταπεξέλθει ικανοποιητικά σε όλους τους τύπους των συστημάτων και των εξωτερικών διαταραχών, γι' αυτό (όπου απαιτείται) συνδυάζεται με τους άλλους 2. Ο ολοκληρωτικός όρος χρησιμοποιείται σε συστήματα που παρουσιάζουν σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση. Για όσο χρόνο υπάρχει σφάλμα, η έξοδος του ελεγκτή, λόγω του ολοκληρώματος, αυξάνεται, με αποτέλεσμα την εξάλειψη του σφάλματος. Αυτό βέβαια γίνεται σε βάρος της ταχύτητας απόκρισης και της ευστάθειας του συστήματος. Τέλος, ο διαφορικός όρος αυξάνει την ευστάθεια του συστήματος και βελτιώνει τη συμπεριφορά του κατά τη μεταβατική κατάσταση. Όμως, λόγω της επιβολής στην πράξη περιορισμού της εξόδου του ελεγκτή, δε χρησιμοποιείται ποτέ μόνος του. Οι ελεγκτές τριών όρων αποτελούν το πιο παγιωμένο κομμάτι των συστημάτων ελέγχου, ωστόσο δεν ενδείκνυται η χρήση τους σε ορισμένα περισσότερο πολύπλοκα προβλήματα.

Η μορφή της συνάρτησης του ελεγκτή που χρησιμοποιήθηκε στο simulink για την παρούσα εργασία είναι η εξίσωση 3.2. Κάθε φορά που θα αναφερόμαστε στην παρούσα εργασία σε κάποιον ελεγκτή, θα εννοείται αυτομάτως και χάρη συντομίας ότι πρόκειται για αναλογικό-ολοκληρωτικό-διαφορικό ελεγκτή. Ο όρος N αφορά τη σταθερά φιλτραρίσματος του ελεγκτή (filter coefficient) και χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς μας και στην ρύθμιση που επιχειρούμε να εφαρμόσουμε στον ελεγκτή.

$$K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (3.2)$$

Με τη σωστή ρύθμιση των παραμέτρων του ελεγκτή στο πρόβλημα της ενεργής ανάρτησης του μοντέλου ενός τετάρτου, θα επιτευχθεί καλύτερη απόδοση στην ανάρτηση του οχήματος και έτσι θα ικανοποιεί ταυτόχρονα όλα τα σημεία για τα οποία έχει κατασκευαστεί.

Η εύρεση του σωστού συνδυασμού των παραμέτρων του ελεγκτή, που θα οδηγήσουν στην καλύτερη απόδοση της ενεργής ανάρτησης, δεν είναι μια απλή διαδικασία. Αυτό προκύπτει εύκολα από το γεγονός ότι υπάρχουν χιλιάδες συνδυασμοί μεταξύ των παραμέτρων και απαιτούνται ακόμα περισσότερες δοκιμές ώστε να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός. Για να βρεθεί λοιπόν ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων του ελεγκτή, χρειάζεται μια διαδικασία όπου οι δοκιμές θα πραγματοποιούνται αυτόματα και γρήγορα. Έτσι, θα προκύψει ταχύτερα και πιο ξεκούραστα η βέλτιστη τιμή της δύναμης του ενεργοποιητή, που είναι και στόχος της εργασίας.

4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ-ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

4.1 Περιγραφή Μεθόδου

Η ιδέα της εφαρμογής της βιολογικής αρχής της φυσικής εξέλιξης σε συστήματα τεχνητής νοημοσύνης, που ξεκίνησε πριν από περισσότερο από τρεις δεκαετίες, παρουσίασε ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Τα πεδία των γενετικών αλγορίθμων, των εξελικτικών στρατηγικών, του εξελικτικού προγραμματισμού και του γενετικού προγραμματισμού υπάρχουν, συνήθως, ενοποιημένα κάτω από τον όρο «εξελικτικοί αλγόριθμοι» ή «εξελικτικός προγραμματισμός». Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι ευρέως διαδεδομένοι σήμερα, έχοντας εφαρμοστεί επιτυχώς σε ποικίλα προβλήματα διαφόρων επιστημών, όπως στη βελτιστοποίηση, τον αυτόματο προγραμματισμό και την εκμάθηση μηχανών, στα οικονομικά, την οικολογία, τη γενετική πληθυσμών, τις μελέτες της εξέλιξης και του τρόπου εκμάθησης, καθώς και σε κοινωνικά συστήματα.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι^[27] είναι οι κύριοι εκπρόσωποι των εξελικτικών αλγορίθμων. Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία που αποτελείται από έναν σταθερού μεγέθους πληθυσμό ατόμων και κάθε ένα από αυτά τα άτομα αναπαρίσταται ως μια σειρά από σύμβολα - γνωστή ως χρωμόσωμα - και επίσης κωδικοποιεί μια πιθανή λύση στον δεδομένο χώρο λύσεων του προβλήματος. Αυτός ο χώρος αναφέρεται ως χώρος αναζήτησης και αποτελείται από όλες τις πιθανές λύσεις του προβλήματος που δίνεται προς επίλυση.

Γενικά, οι γενετικοί αλγόριθμοι εφαρμόζονται σε προβλήματα όπου οι χώροι αναζήτησης είναι πολύ μεγάλοι, ώστε να ερευνηθούν πλήρως. Το αλφάβητο των χρησιμοποιούμενων συμβόλων είναι συνήθως δυαδικό, αν και πιο πρόσφατα έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλες αναπαραστάσεις, όπως η αναπαράσταση χαρακτήρων και οι αναπαραστάσεις ακέραιων αριθμών και πραγματικών τιμών.

Ένας τυπικός γενετικός αλγόριθμος ακολουθεί την εξής πορεία^[28]:

Δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός ατόμων τυχαία ή μετά από έρευνα. Σε κάθε εξελικτικό βήμα, γνωστό και ως γενιά, τα άτομα του τρέχοντα πληθυσμού αποκωδικοποιούνται και αξιολογούνται με βάση κάποιο κριτήριο ποιότητας που έχει οριστεί από πριν και είναι γνωστό ως ποιότητα ή συνάρτηση ποιότητας. Για να σχηματιστεί ο νέος πληθυσμός, δηλαδή η επόμενη γενιά, επιλέγονται ορισμένα άτομα με κριτήριο την ποιότητα τους. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι επιλογής και μια από τις απλούστερες είναι η αρχική μέθοδος επιλογής του Holland, στην οποία τα χρωμοσώματα επιλέγονται με πιθανότητα αναλογική της ποιότητας τους. Αυτό, εξασφαλίζει ότι οι αναμενόμενες φορές που θα επιλεγεί ένα άτομο είναι προσεγγιστικά ανάλογες της σχετικής απόδοσης του ατόμου στον πληθυσμό. Επομένως, τα άτομα υψηλής ποιότητας, τα «καλά άτομα», έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να αναπαραχθούν, ενώ τα άτομα χαμηλής ποιότητας είναι πιο πιθανό να εξαφανιστούν.

Η επιλογή από μόνη της δεν μπορεί να εισαγάγει κάποιο νέο άτομο στον πληθυσμό, δηλαδή δεν μπορεί να βρει νέες λύσεις στον χώρο αναζήτησης. Αυτές παράγονται από τελεστές που έχουν εμπνευστεί από την γενετική. Οι πιο γνωστοί τελεστές είναι ο ανασυνδυασμός (crossing) και η μετάλλαξη (mutation).

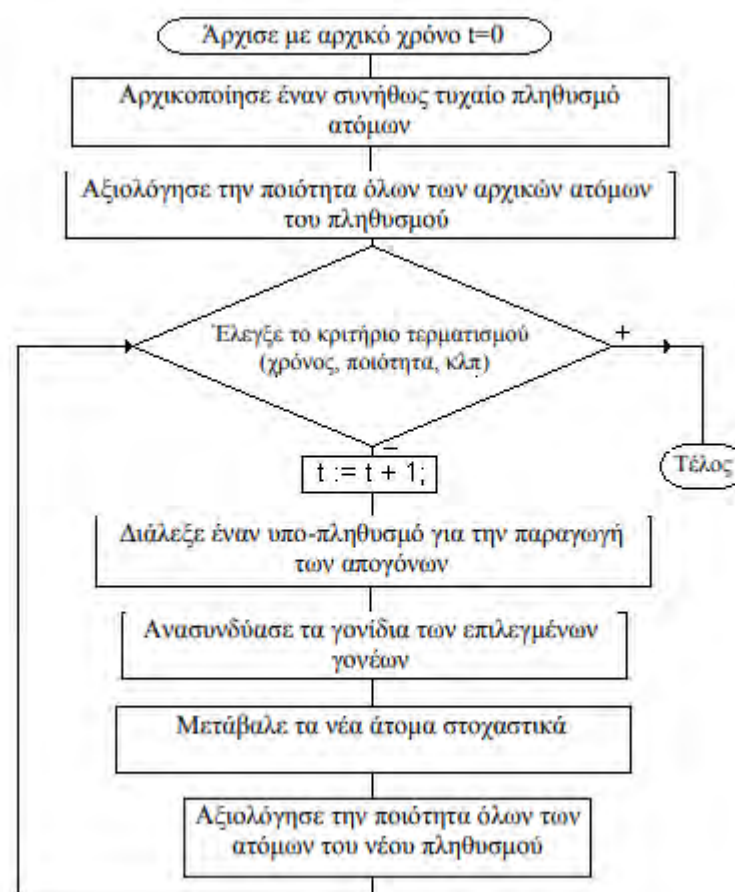
Ο ανασυνδυασμός εφαρμόζεται με πιθανότητα p_{cross} (πιθανότητα ανασυνδυασμού ή ρυθμός ανασυνδυασμού) μεταξύ δύο επιλεγμένων ατόμων που ονομάζονται γονείς, ανταλλάσσοντας κομμάτια των χρωμοσωμάτων τους για να σχηματιστούν δύο νέα χρωμοσώματα που ονομάζονται απόγονοι. Στην πιο απλή μορφή του ανασυνδυασμού, κομμάτια των χρωμοσωμάτων ανταλλάσσονται μετά από ένα σημείο ανασυνδυασμού το οποίο έχει επιλεγεί τυχαία. Ο τελεστής του ανασυνδυασμού τείνει να ωθεί την εξελικτική διαδικασία προς τις πιο «υποσχόμενες» περιοχές του χώρου αναζήτησης. Ο τελεστής της μετάλλαξης εισάγεται προκειμένου να εμποδίσει την πρόωρη σύγκλιση σε τοπικά βέλτιστα, με το να επιλέγει τυχαία νέα σημεία στο χώρο αναζήτησης. Στην δυαδική κωδικοποίηση πραγματοποιείται με το να αλλάζει την τιμή κάποιων επιλεγμένων τυχαία δυαδικών ψηφίων στο χρωμόσωμα με μικρή πιθανότητα p_{mut} .

Οι γενετικοί αλγόριθμοι [29] είναι στοχαστικές, επαναληπτικές, μέθοδοι που δεν εγγυώνται τη σύγκλιση στο βέλτιστο. Το κριτήριο τερματισμού μπορεί να είναι είτε η συμπλήρωση ενός μέγιστου αριθμού γενιών ή η εύρεση ατόμων με ικανοποιητική ποιότητα.

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής ενός κλασικού γενετικού αλγόριθμου.

Δύο από τις πιο αξιοθαύμαστες ιδιότητες των βιολογικών συστημάτων είναι η σταθερότητά τους και η ευελιξία τους. Τα βιολογικά συστήματα έχουν μεθόδους αυτο-οδήγησης, αυτο-επιδιόρθωσης και αναπαραγωγής. Πολύ λίγα τεχνητά συστήματα έχουν κάποια από αυτά τα στοιχεία και ίσως οι γενετικοί αλγόριθμοι διαθέτουν μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά διότι είναι μοντελοποιημένοι με βάση την εξέλιξη του βιολογικού κόσμου.

Τέλος, οι γενετικοί αλγόριθμοι αποδείχτηκαν σταθεροί, ευέλικτοι και αποτελεσματικοί κατά την εφαρμογή τους.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου [30]

4.2 Διαφορές μεταξύ γενετικών αλγορίθμων και άλλων παραδοσιακών μεθόδων

- Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μια ομάδα ή έναν πληθυσμό από σημεία για να πραγματοποιήσουν την αναζήτηση και όχι μόνο ένα σημείο του χώρου αναζήτησης. Αυτό τους δίνει τη δυνατότητα να πραγματοποιούν αποτελεσματικά αναζητήσεις σε χώρους με θόρυβο και διεσπαρμένους από τοπικά βέλτιστα σημεία. Αντί λοιπόν να βασίζονται σε ένα μοναδικό σημείο για την αναζήτηση στο χώρο, εξετάζουν πολλές διαφορετικές περιοχές του χώρου ταυτόχρονα και χρησιμοποιούν αυτήν την πληροφορία για να οδηγηθούν προς το ολικό βέλτιστο.
- Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες ποιότητας για να οδηγηθούν στην αναζήτηση. Πολλές τεχνικές αναζήτησης χρησιμοποιούν ένα πλήθος από πληροφορίες (π.χ. οι μέθοδοι αναρρίχησης λόφου που απαιτούν τη χρήση παραγώγων). Η μόνη πληροφορία που χρειάζεται ο γενετικός αλγόριθμος είναι κάποιο μέτρο του πόσο καλή είναι η λύση που εξετάζει, δηλαδή η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Όταν ο γενετικός αλγόριθμος γνωρίζει την τιμή της ποιότητας ενός σημείου, μπορεί να το χρησιμοποιήσει για να συνεχίσει την αναζήτησή του προς το βέλτιστο.

- Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι πιθανοτικοί από τη φύση τους και όχι ντετερμινιστικοί. Αυτό είναι αποτέλεσμα των στοχαστικών τεχνικών που χρησιμοποιούν. Εξαιτίας της στοχαστικής τους φύσης, δεν είναι εγγυημένη η εύρεση του βέλτιστου, όπως επίσης δεν είναι εγγυημένη και η σύγκλιση του αλγορίθμου στο ίδιο σημείο όταν επαναλαμβάνεται η εκτέλεση του.
- Τέλος, οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι παράλληλοι από τη φύση τους, γεγονός το οποίο αποτελεί το πιο σημαντικό τους πλεονέκτημα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι ελέγχουν ένα μεγάλο αριθμό σημείων του χώρου αναζήτησης του προβλήματος (χρωμοσωμάτων) ταυτόχρονα. Ο Holland υπολόγισε ότι καθώς ο γενετικός αλγόριθμος επεξεργάζεται n χρωμοσώματα σε κάθε γενιά, στην πραγματικότητα επεξεργάζονται n^3 χρήσιμα υπο-χρωμοσώματα.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ

5.1 Εισαγωγή - περιγραφή τρόπου αξιολόγησης αποτελεσμάτων

Κάθε προσομοίωση στο προγραμματιστικό περιβάλλον του matlab ή στο γραφικό περιβάλλον μοντελοποίησης simulink αφορά το μοντέλο της ανάρτησης του ενός τετάρτου. Η αξιολόγηση για την ορθότητα των αποτελεσμάτων βασίζεται αρχικά στην αναμενόμενη και επιθυμητή μορφή των καμπυλών των διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα που εξετάζονται στο μοντέλο αυτό είναι με τη σειρά αναφοράς τα εξής:

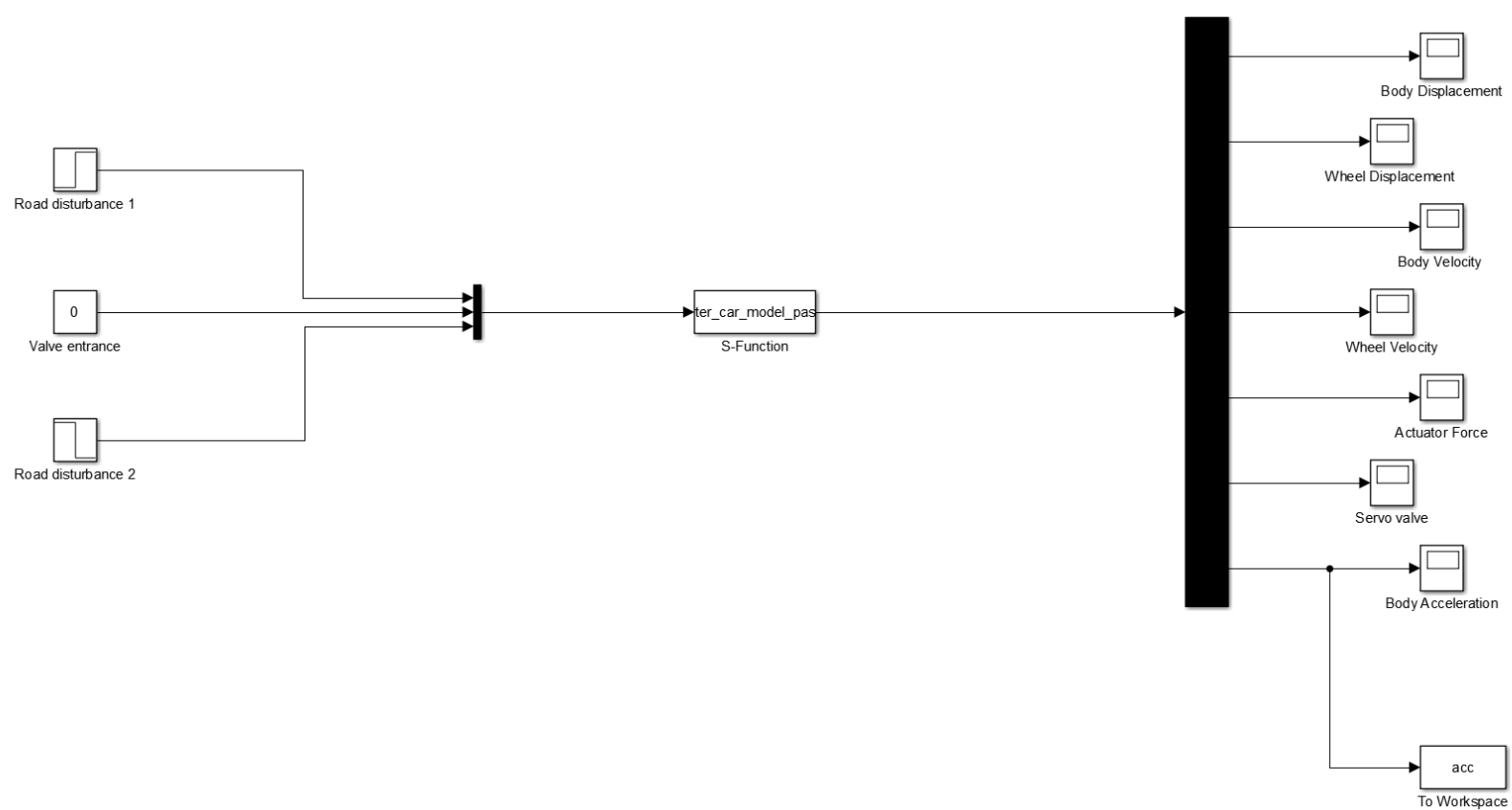
- Μετατόπιση του αμαξώματος
- Μετατόπιση του τροχού
- Ταχύτητα του αμαξώματος
- Ταχύτητα του τροχού
- Δύναμη του ενεργοποιητή
- Μετατόπιση της σεβοκινούμενης βαλβίδας
- Επιτάχυνση του αμαξώματος

Στη συνέχεια όμως, εξάγοντας τα αποτελέσματα της επιτάχυνσης του αμαξώματος, με τη βοήθεια του block «to workspace», στο περιβάλλον του matlab και με τη χρήση συγκεκριμένων εντολών (όπως της stepinfo), πήραμε ακριβή αποτελέσματα για παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν και θέλουμε να ελέγξουμε, όπως ο χρόνος αποκατάστασης ή το overshoot. Τα ακριβή νούμερα των παραμέτρων αυτών συμβάλλουν στη σωστή αξιολόγηση της εναρμόνισης ενός ελεγκτή. Επιπροσθέτως, παράμετροι όπως το άθροισμα του απολύτου σφάλματος ή του των τετραγώνων του σφάλματος, βοηθούν και στη σύγκριση ανάμεσα σε παθητική και ενεργή ανάρτηση ή ανάμεσα σε ενεργή ανάρτηση με χειροκίνητη εναρμόνιση του ελεγκτή και ενεργή ανάρτηση με αυτοματοποιημένη εναρμόνιση. Ο solver που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις στο simulink είναι ο «ode45 - Dormand-Prince»^[31].

Όσον αφορά το μοντέλο, το χρησιμοποιήσαμε για να στηθούν ορισμένα blocks του simulink. Το κυριότερο, το οποίο περιέγραφε το πρόβλημα της ανάρτησης του ενός τετάρτου και έδινε τις τιμές των μεταβλητών κάθε χρονική στιγμή, είναι το block «S-Function». Το μοντέλο αυτό έτρεχε έναν γραμμένο κώδικα στο περιβάλλον του matlab και περνούσε τις τιμές που υπολόγιζε για τις 6 μεταβλητές του προβλήματος την κάθε χρονική στιγμή. Η είσοδος των διαταραχών του δρόμου δινόταν με το block «step» και η είσοδος u με το block «constant» στην παθητική ανάρτηση και με τον ελεγκτή στην ενεργή. Για να προβληθούν τα διαγράμματα, χρησιμοποιήθηκαν τα γνωστά blocks που λέγονται «display». Επίσης χρησιμοποιήθηκε και ο αθροιστής «sum» σε πάνω από μία περιπτώσεις, όπως στην ανατροφοδότηση του ελεγκτή ή στο τυχαίο προφίλ δρόμου που δημιουργήσαμε, το οποίο αναλύεται πιο λεπτομερώς στο υποκεφάλαιο 5.5 .

5.2 Παθητική ανάρτηση

Το πρώτο κομμάτι που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, είναι η απλούστερη περίπτωση, όπου απουσιάζουν τα ηλεκτρο-υδραυλικά μέρη και τα μοναδικά στοιχεία της ανάρτησης είναι το ελατήριο και ο αποσβεστήρας. Πρόκειται δηλαδή για την περίπτωση της παθητικής ανάρτησης. Η διαφορά στη συνάρτηση μεταφοράς είναι πως η 5^η εξίσωση του συστήματος(που αφορά την πίεση του ενεργοποιητή) ισούται με 0, αφού απουσιάζουν τα υδραυλικά μέρη. Προσομοιώσαμε για 7 χρονικές μονάδες το μοντέλο του σχήματος 5.2.1 στο simulink, για διαταραχή δρόμου ένα σαμαράκι 5 εκατοστών (σχήμα 5.2.2). Η είσοδος u στη βαλβίδα ισούται με 0.

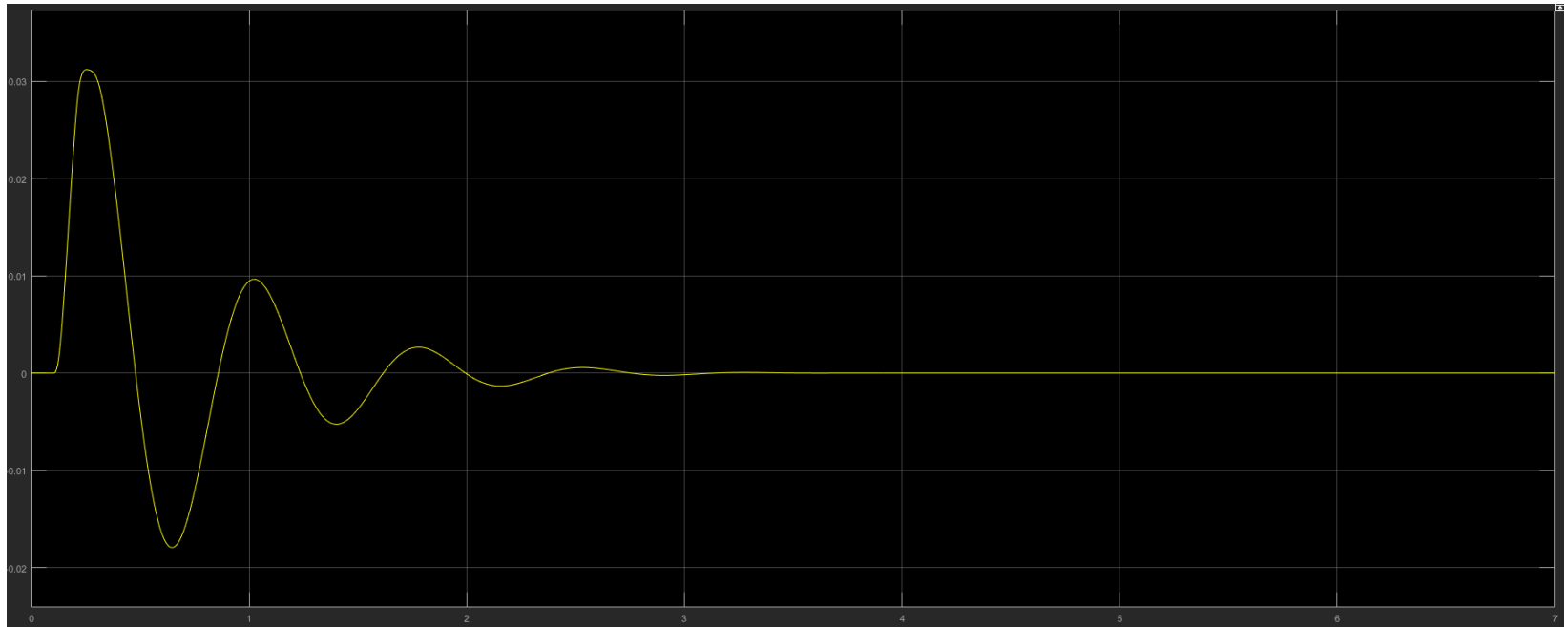


Σχήμα 5.2.1: Μοντέλο προσομοίωσης στο simulinkγια σαμαράκι 5 εκατοστών

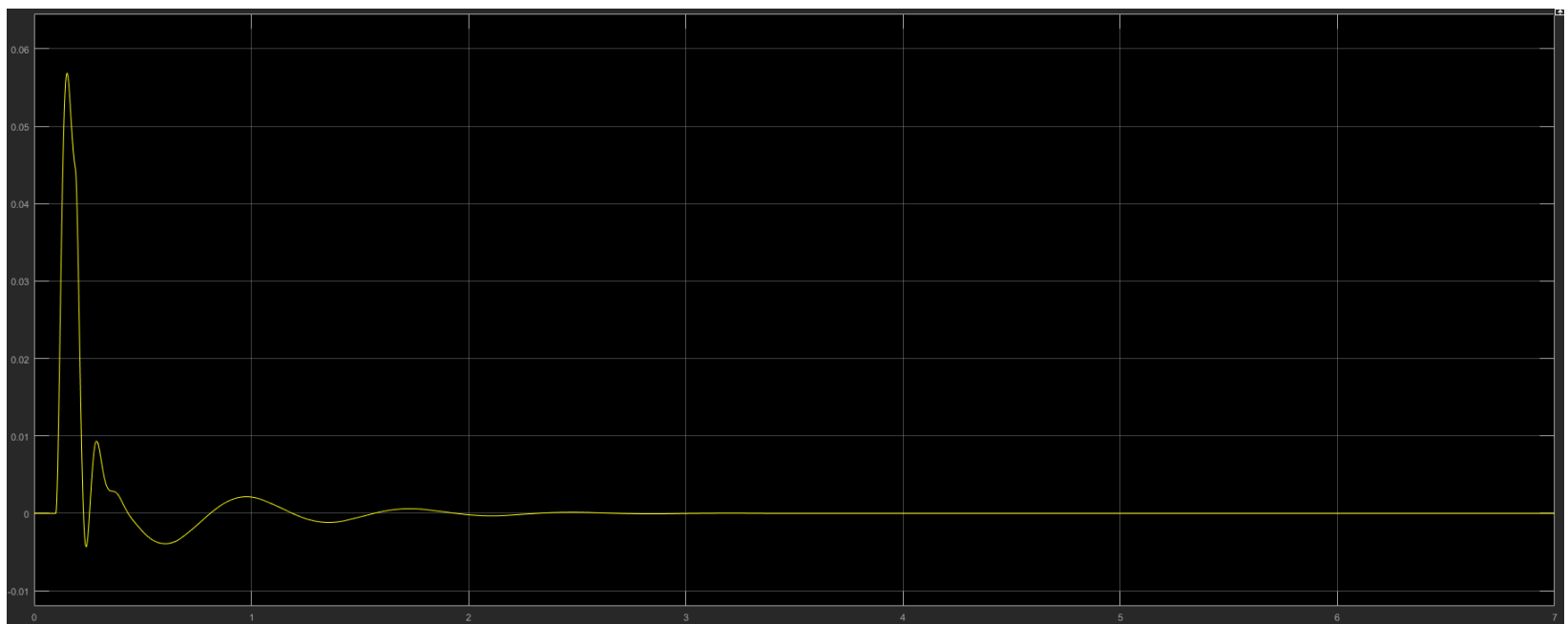
Η αξιολόγηση της σωστής λειτουργίας πραγματοποιήθηκε κυρίως βάσει του σχήματος της καμπύλης του διαγράμματος της επιτάχυνσης της αναρτημένης μάζας, αλλά και της επιθυμητής και αναμενόμενης σύγκλισης των διαγραμμάτων στις τιμές ισορροπίας. Τα σχήματα 5.2.3 έως 5.2.9 παρουσιάζουν τα διαγράμματα των μεγεθών του μοντέλου με τη σειρά που αναφέρεται στην εισαγωγή του κεφαλαίου. Στον πίνακα 5.2.1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν για το διάγραμμα της επιτάχυνσης του αμαξώματος, με τη βοήθεια του block «to workspace» και της εντολής stepinfo.



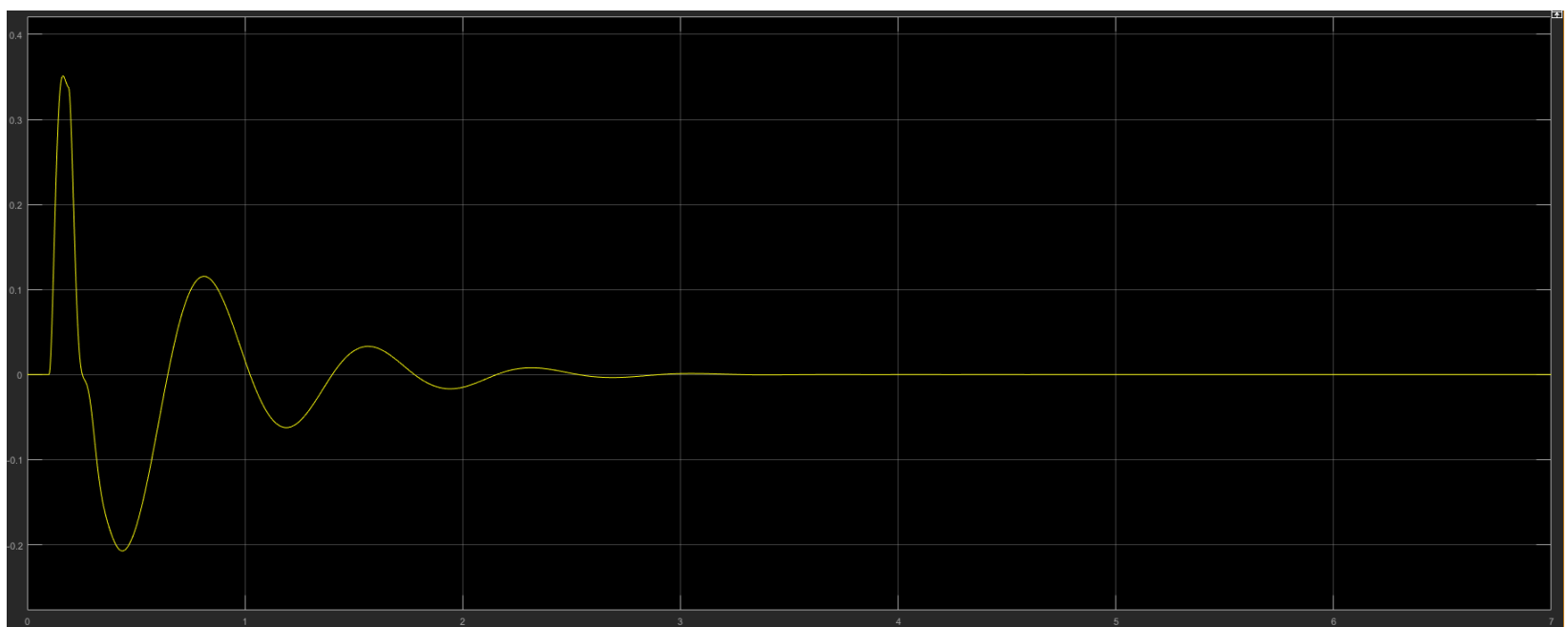
Σχήμα 5.2.2 : Προφίλ δρόμου με σαμαράκι 5 εκατοστών



Σχήμα 5.2.3: Διάγραμμα μετατόπισης αμαξώματος



Σχήμα 5.2.4: Διάγραμμα μετατόπισης τροχού



Σχήμα 5.2.5: Διάγραμμα ταχύτητας αμαξώματος



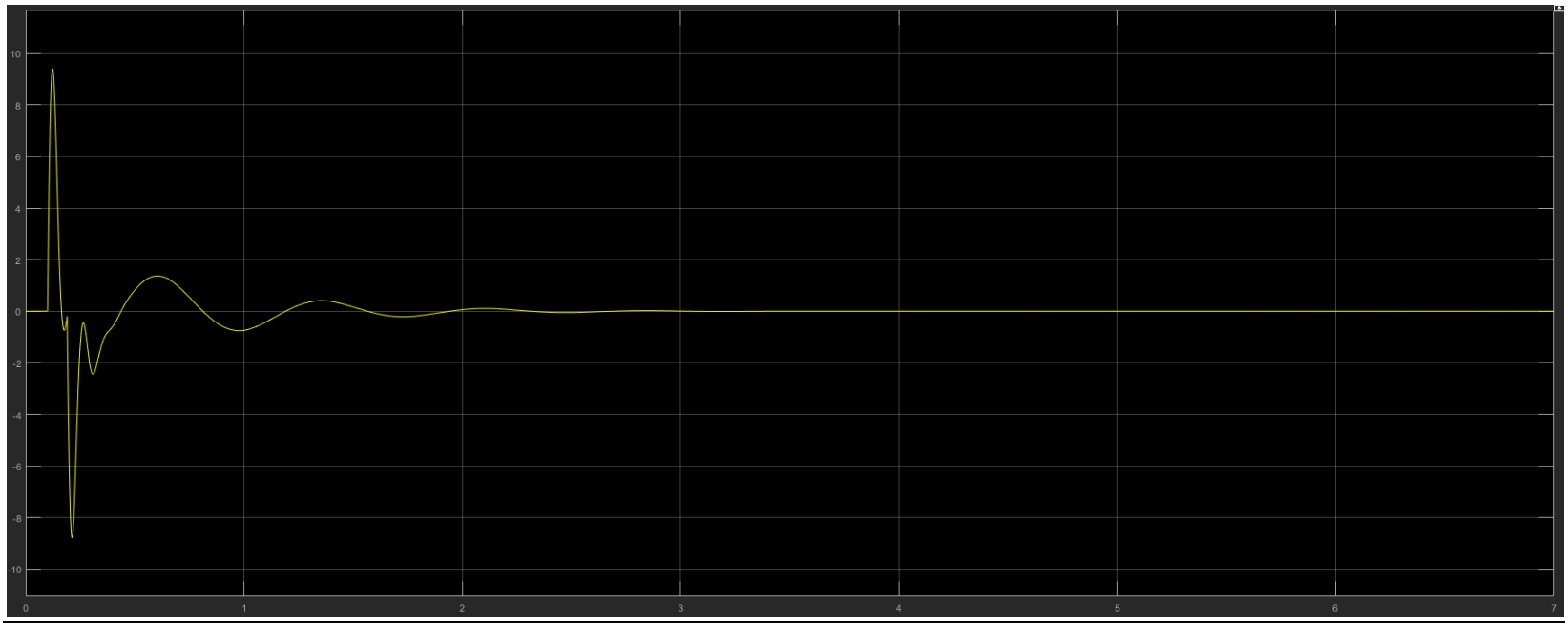
Σχήμα 5.2.6: Διάγραμμα ταχύτητας τροχού



Σχήμα 5.2.7: Διάγραμμα δύναμης ενεργοποιητή



Σχήμα 5.2.8: Διάγραμμα μετατόπισης βαλβίδας



Σχήμα 5.2.9: Διάγραμμα επιτάχυνσης αμαξώματος

- Τα διαγράμματα συγκλίνουν στις επιθυμητές τιμές αποκατάστασης. Η επιθυμητή τιμή αποκατάστασης για όλα τα διαγράμματα είναι μηδέν. Επομένως ως προς την τιμή ισορροπίας, το μοντέλο λειτουργεί σωστά. Οι μορφές των καμπυλών των διαγραμμάτων είναι λογικές και οι αναμενόμενες. Δεν παρατηρούνται πολλά όρη και κοιλιάδες. Οι καμπύλες των μεγεθών συγκλίνουν άμεσα στην τιμή αποκατάστασης τους. Όσον αφορά τα διαγράμματα της δύναμης του ενεργοποιητή και της μετατόπισης της βαλβίδας, είναι σταθερά στο μηδέν διότι στην παθητική ανάρτηση απουσιάζουν τα ηλεκτρο-υδραυλικά μέρη. Επομένως είναι λογικό να μην παρατηρείται δυναμική στις 2 αυτές μεταβλητές, κάτι που δε θα ισχύει με την είσοδο του ελεγκτή.

Χαρακτηριστικά διαγράμματος	Επιτάχυνση αμαξώματος (σχ. 5.2.8)
Χρόνος αποκατάστασης	2.9017 [χρον. μον.]
Μέγιστη τιμή	9.4072 [m/s ²]
Ελάχιστη τιμή	-8.7839 [m/s ²]
Overshoot	4.8864x10 ⁻⁶
Undershoot	4.5540x10 ⁻⁶
Βέλτιστη τιμή	9.4072 [m/s ²]
Χρόνος εμφάνισης βέλτιστης τιμής	0.1229 [χρον. μον.]

Πίνακας 5.2.1 : Χαρακτηριστικά διαγράμματος της επιτάχυνσης του αμαξώματος

- Ως προς τα χαρακτηριστικά του διαγράμματος της επιτάχυνσης του αμαξώματος που εξετάζουμε, επειδή δεν εξαγάγαμε άλλα αποτελέσματα παθητικής ανάρτησης - μιας και είναι η πρώτη μελέτη που πραγματοποιήσαμε - δεν μπορούμε να τα συγκρίνουμε και να τα σχολιάσουμε στο παρόν υποκεφάλαιο. Θα αποτελέσουν όμως τη βάση για τη σύγκριση ανάμεσα σε ενεργή και παθητική ανάρτηση.

5.3 Ενεργή ανάρτηση-Εισαγωγή ελεγκτή

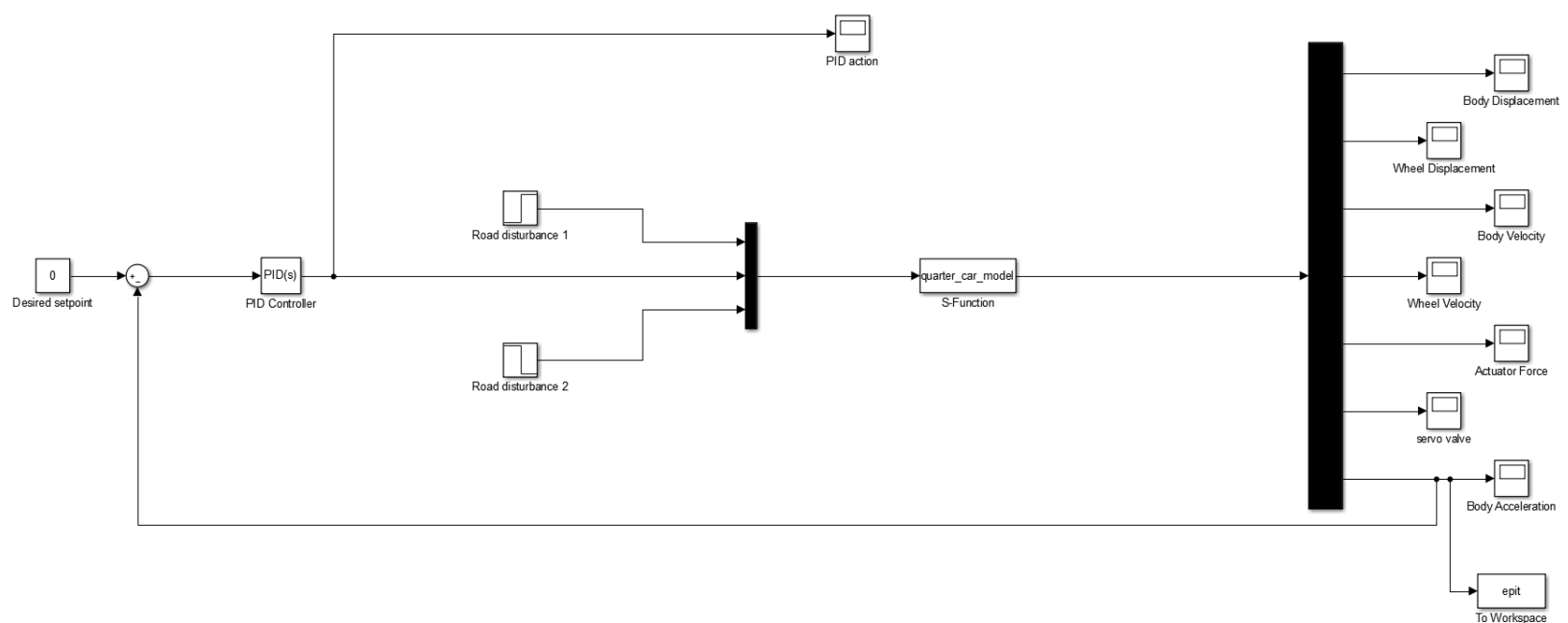
Με την προσθήκη των ηλεκτρο-υδραυλικών μερών στο σύστημα της ανάρτησης, καθώς και του ελεγκτή που είναι αναγκαίος για τον καλύτερο έλεγχο των μερών αυτών, το μοντέλο αυτομάτως περιπλέκεται. Πλέον η 5^η εξίσωση δεν ισούται με 0 αλλά με το γινόμενο της μεταβλητής της πίεσης (που εδώ δεν είναι 0) και του μεγέθους του πιστονιού.

Όπως και στην απλή περίπτωση, ο χρόνος προσομοίωσης είναι 7 χρονικές μονάδες και η διαταραχή του δρόμου είναι ένα σαμαράκι 5 εκατοστών. Το μοντέλο απεικονίζεται στο σχήμα 5.3.1.

Για την περίπτωση αυτή, ούσα πλέον ενεργή η ανάρτηση, χρειάστηκε η εναρμόνιση των παραμέτρων του ελεγκτή, δηλαδή του αναλογικού, του ολοκληρωτικού, του διαφορικού και του συντελεστή φιλτραρίσματος N. Για τη διαδικασία αυτή, οι πρώτες τιμές για τις παραμέτρους του ελεγκτή επιλέχθηκαν τυχαία και με δοκιμή και σφάλμα προέκυψε μια αρχικά σωστή τάξη μεγέθους για την κάθε παράμετρο ξεχωριστά, ώστε να πραγματοποιηθεί τελικά η εναρμόνιση και κατ' επέκταση η εξαγωγή των επιθυμητών διαγραμμάτων 5.3.3 - 5.3.9.

Στον πίνακα 5.3.1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή που προέκυψαν από την χειροκίνητη ρύθμιση του και στο σχήμα 5.3.2 η δράση του ελεγκτή.

Η ανατροφοδότηση του ελεγκτή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.3.2, γίνεται με βάση την πραγματική τιμή αποκατάστασης του διαγράμματος της επιτάχυνσης του αμαξώματος. Η επιθυμητή τιμή αποκατάστασης είναι 0 και σε αυτήν συγκλίνουν οι καμπύλες των διαγραμμάτων. Τα αποτελέσματα του πίνακα 5.3.2, που προέκυψαν με τη χρήση και πάλι του ίδιου blockστο simulink και της εντολής stepinfo, αφορούν την επιτάχυνση του αμαξώματος και αποτελούν το κύριο κριτήριο αξιολόγησης της εναρμόνισης του ελεγκτή.



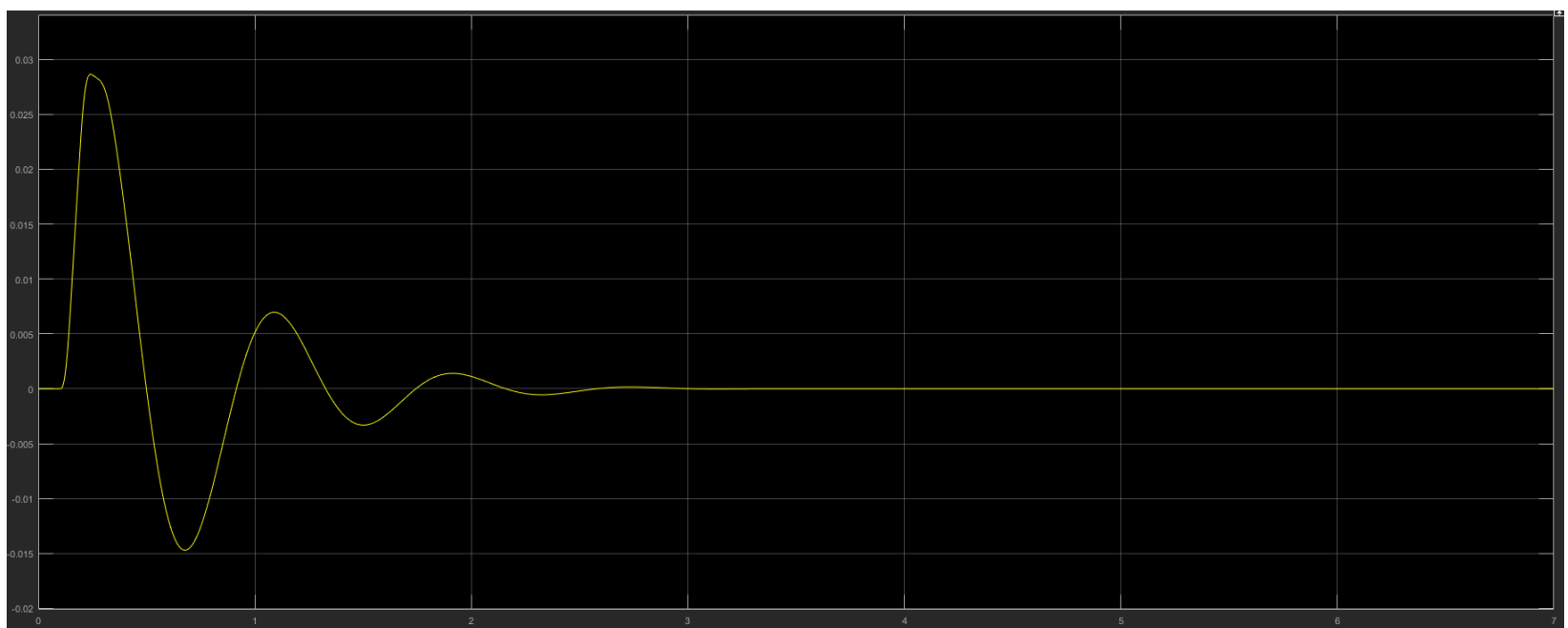
Σχήμα 5.3.1 : Μοντέλο προσομοίωσης στο simulink για σαμαράκι 5 εκατοστών με χρήση PIDελεγκτή

Αναλογική δράση -K _p	Ολοκληρωτική δράση - K _i	Διαφορική δράση - K _d	Συντελεστής φιλτραρίσματος - N
-1.2219764x10 ⁻¹²	-2.089549854x10 ⁻¹⁰	-9.8064738789x10 ⁻¹⁰	1.458743211

Πίνακας 5.3.1 : Τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή



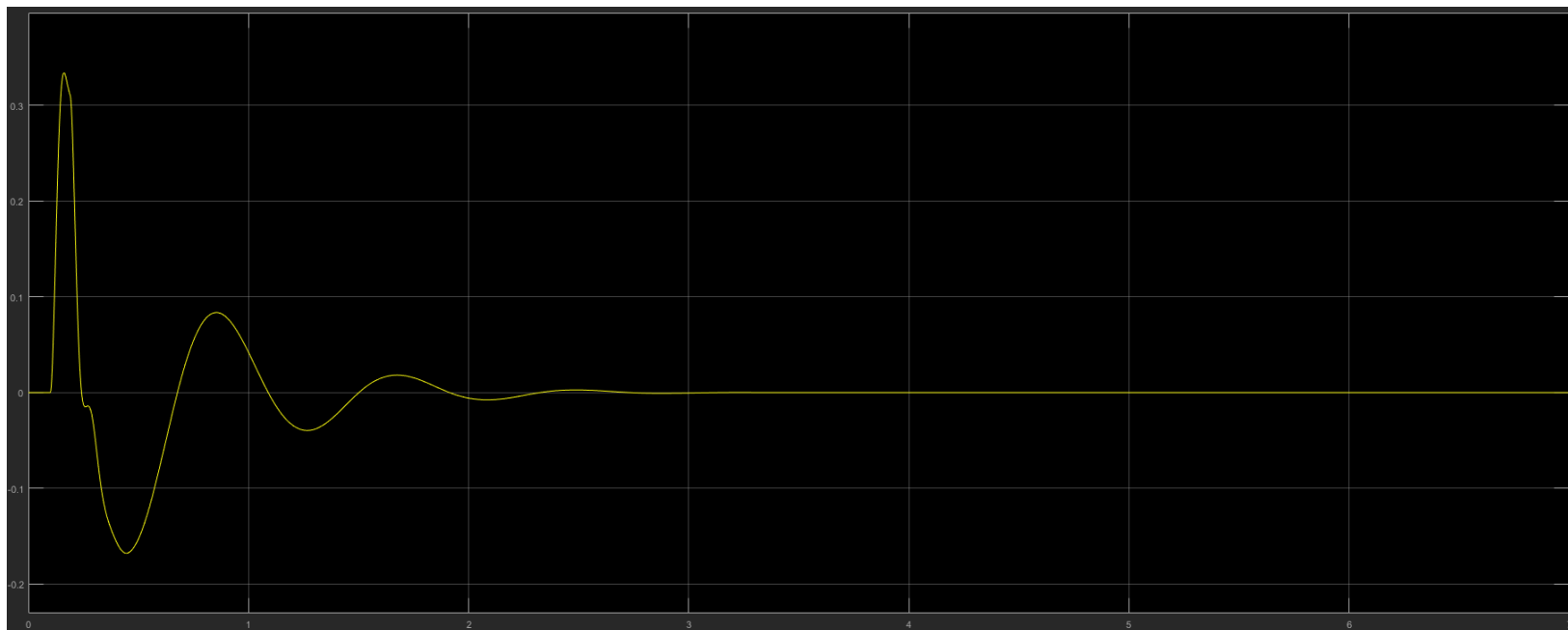
Σχήμα 5.3.2: Δράση του ελεγκτή



Σχήμα 5.3.3: Διάγραμμα μετατόπισης αμαξώματος



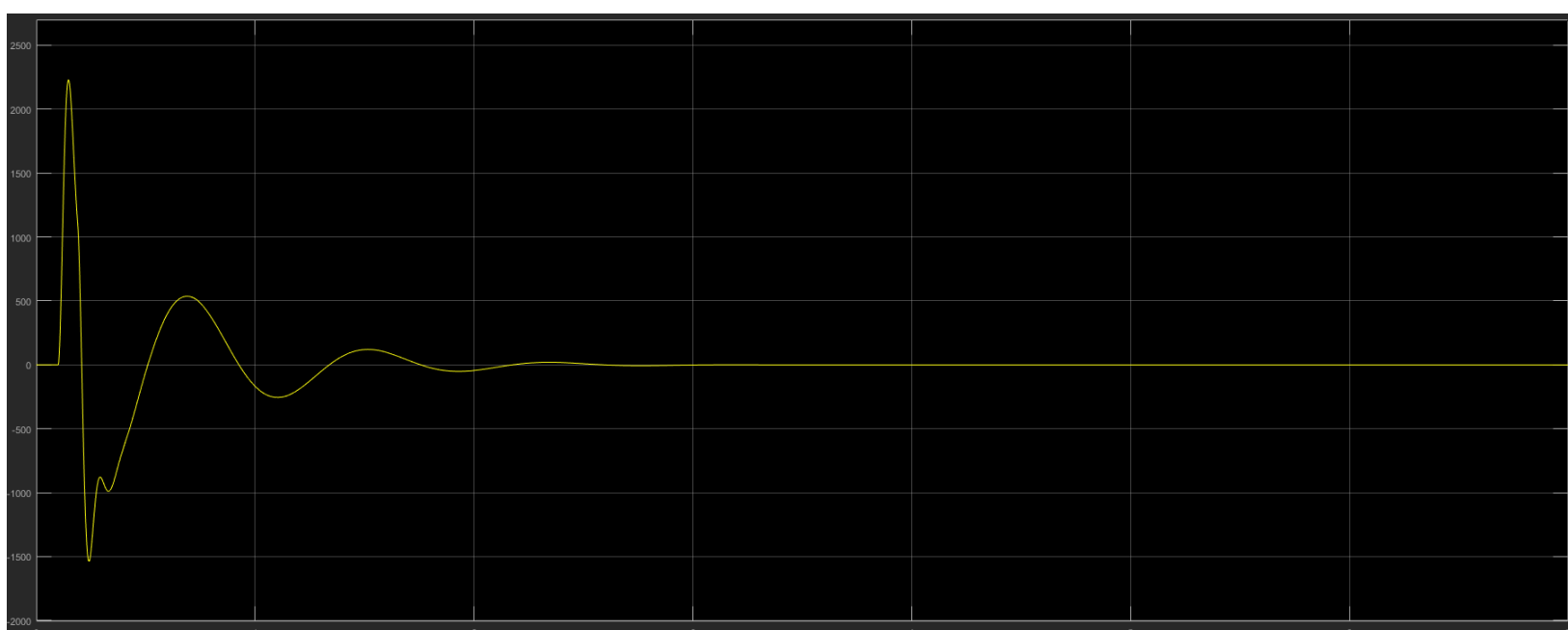
Σχήμα 5.3.4: Διάγραμμα μετατόπισης τροχού



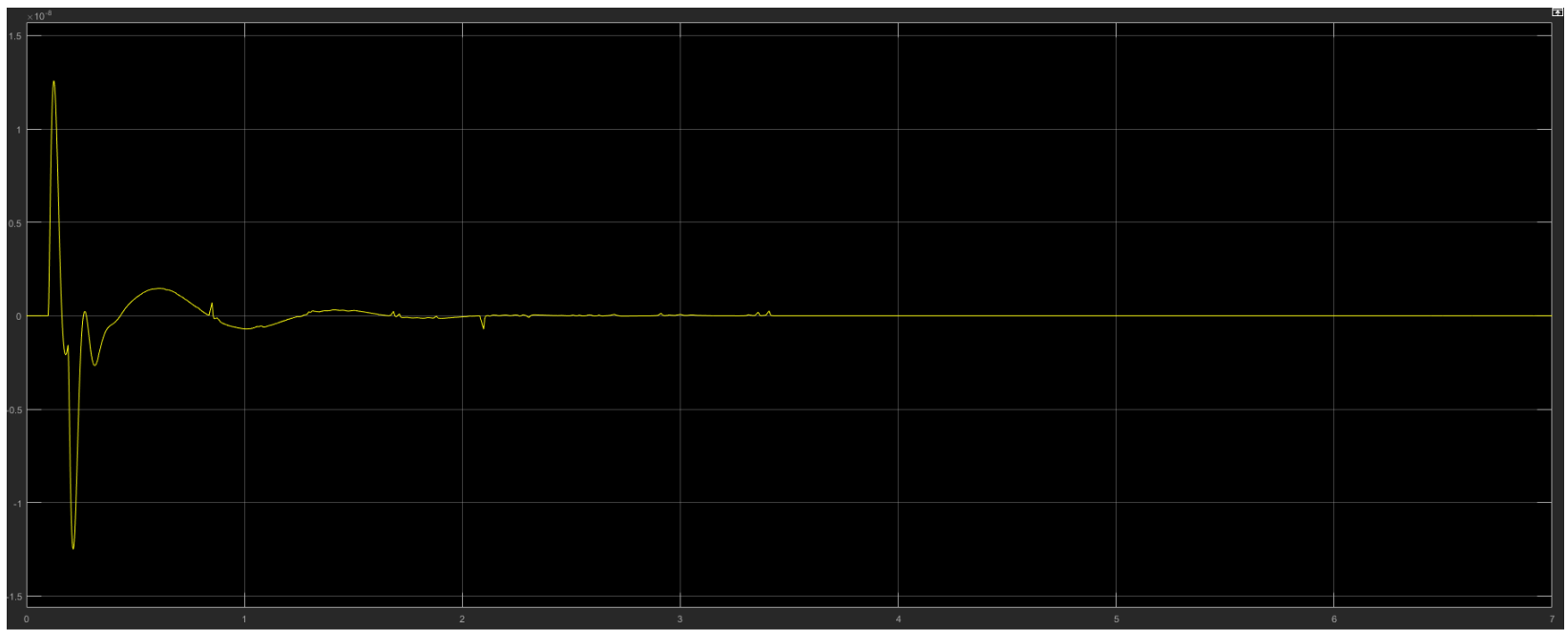
Σχήμα 5.3.5: Διάγραμμα ταχύτητας αμαξώματος



Σχήμα 5.3.6: Διάγραμμα ταχύτητας τροχού



Σχήμα 5.3.7: Διάγραμμα δύναμης ενεργοποιητή



Σχήμα 5.3.8: Διάγραμμα μετατόπισης βαλβίδας



Σχήμα 5.3.9: Διάγραμμα επιτάχυνσης αμαξώματος

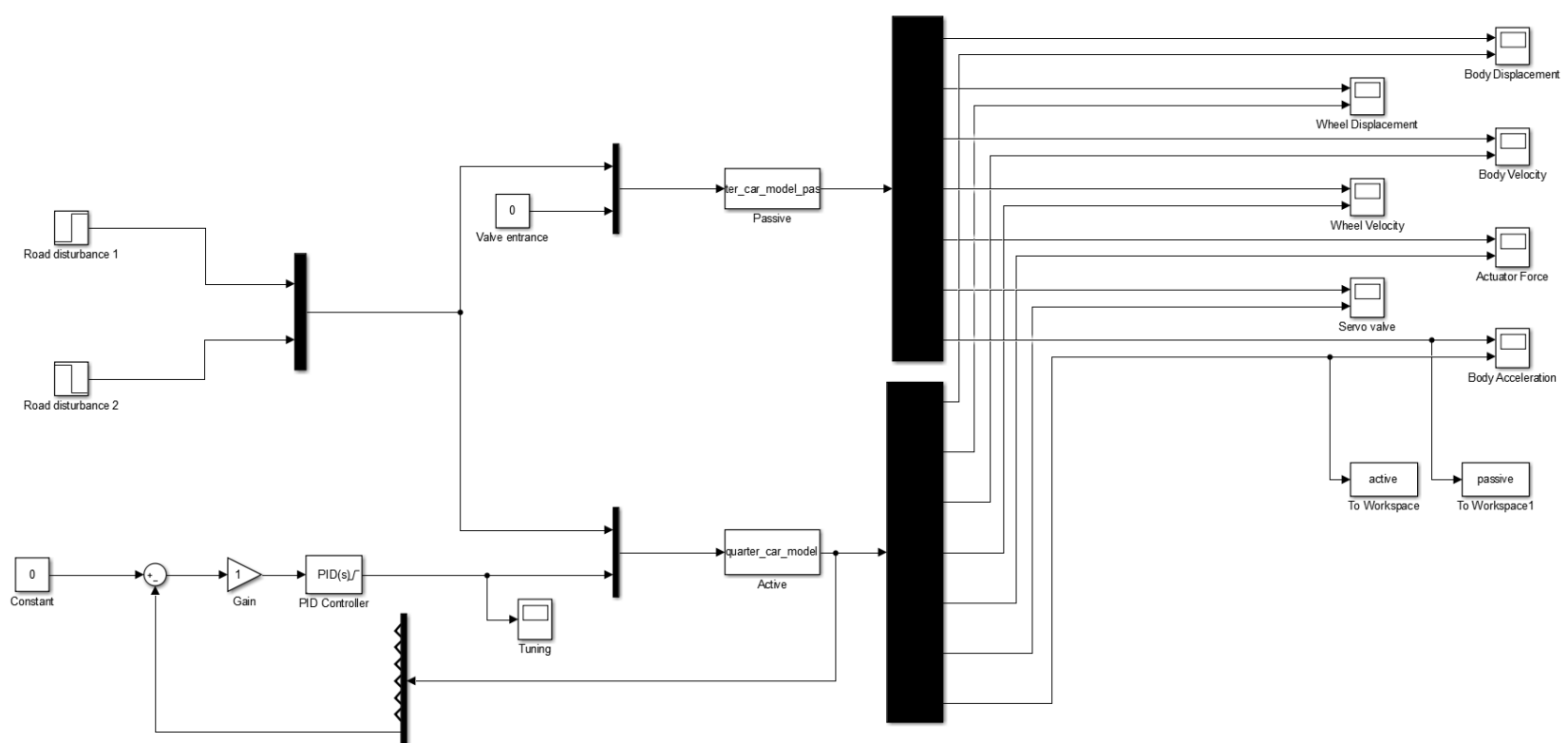
- Όσον αφορά τις δράσεις του ελεγκτή, η τιμή που επιλέχθηκε για την αναλογική παράμετρο K_P είναι αρνητική διότι θέλαμε να πετύχουμε θετική δράση και το ίδιο ισχύει και για το ολοκληρωτικό κομμάτι, αλλά όχι για το διαφορικό. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι αν το σφάλμα είναι αρνητικό (το οποίο προκύπτει από τη διαφορά επιθυμητή τιμή - πραγματική τιμή, σε συνδυασμό με αρνητική αναλογική ενίσχυση) τότε παίρνουμε θετική δράση, πράγμα το οποίο και θέλουμε. Βέβαια οι τιμές των ενισχύσεων του ολοκληρωτικού και διαφορικού κομματιού είναι πολύ κοντά στο μηδέν και δεν επηρεάζουν τη δράση του ελεγκτή το ίδιο με την αναλογική ενίσχυση, από την οποία θέλουμε να μας προσδώσει θετική δράση. Όμως, έπειτα από δοκιμές παρατηρήθηκε πως για τιμές αρνητικές για την ολοκληρωτική ενίσχυση και για τιμές θετικές για τη διαφορική, τα χαρακτηριστικά του διαγράμματος της επιτάχυνσης (βάσει αριθμών από την εντολή `stepinfo`) ήταν καλύτερα. Τέλος, η τιμή της σταθεράς φιλτραρίσματος επιλέχθηκε, όπως προτείνεται και στη βιβλιογραφία, σε μια τιμή ανάμεσα στο 0 και στο 20. Αυτό συνέβη διότι προσδίδοντας της άλλη τιμή μεγαλύτερη, τότε η διαφορική ενίσχυση αποκτά πολύ υψηλότερες τιμές, με αποτέλεσμα πολλές διαταραχές στην απόκριση των διαγραμμάτων.

- Παρατηρούμε από τα διαγράμματα των μεταβλητών του συστήματος, πως όλα ισορροπούν στην επιθυμητή τιμή αποκατάστασης, η οποία όπως και αναφέρθηκε είναι μηδέν, όπως συνέβη και στην παθητική ανάρτηση. Τα διαγράμματα της δύναμης του ενεργοποιητή και της μετατόπισης της βαλβίδας αποκτήσαν πλέον δυναμική, όπως ήταν αναμενόμενο, μιας και προστέθηκαν στο σύστημα τα ηλεκτρο-υδραυλικά μέρη.

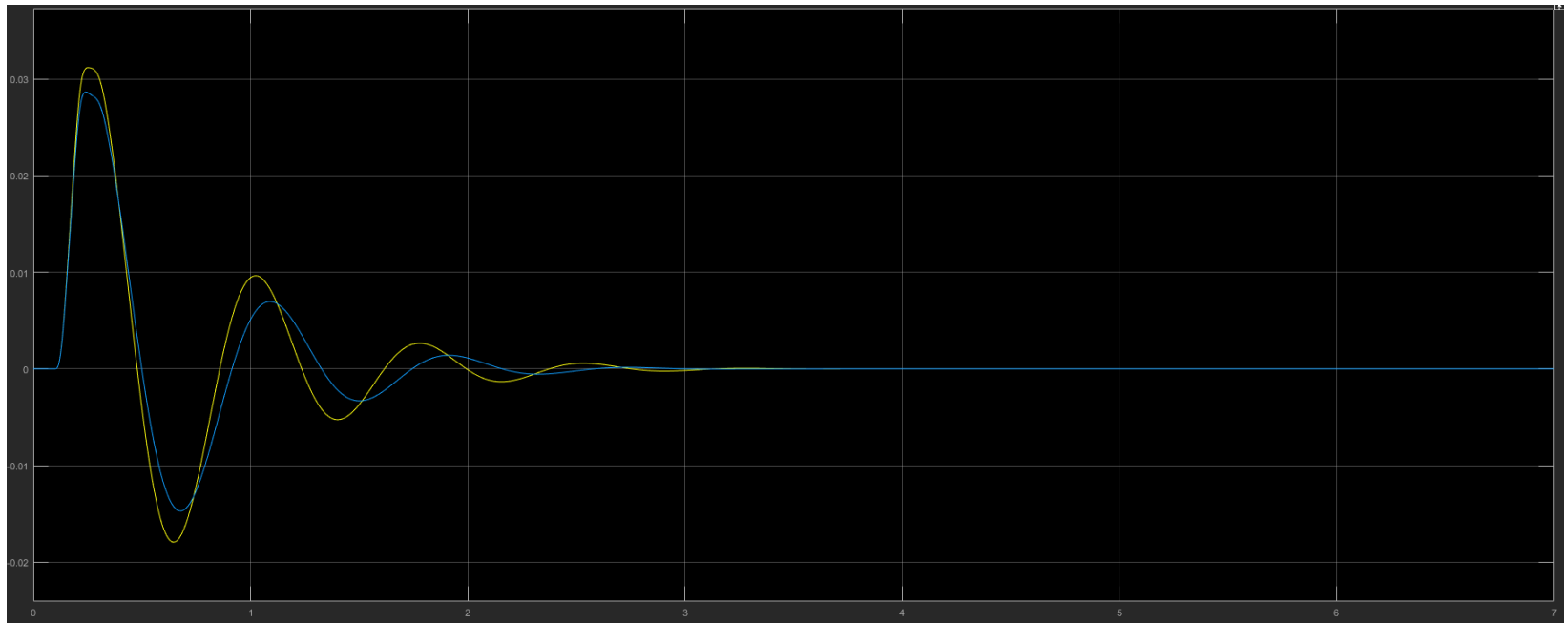
Χαρακτηριστικά διαγράμματος	Επιτάχυνση αμαξώματος (σχ. 5.3.8)
Χρόνος αποκατάστασης	2.3966 [χρον. μον.]
Μέγιστη τιμή	9.1022 [m/s ²]
Ελάχιστη τιμή	-8.6693 [m/s ²]
Overshoot	5.1729x10 ⁶
Undershoot	4.9270x10 ⁶
Βέλτιστη τιμή	9.1022 [m/s ²]
Χρόνος εμφάνισης βέλτιστης τιμής	0.1224[χρον. μον.]

Πίνακας 5.3.2 : Χαρακτηριστικά διαγράμματος της επιτάχυνσης του αμαξώματος

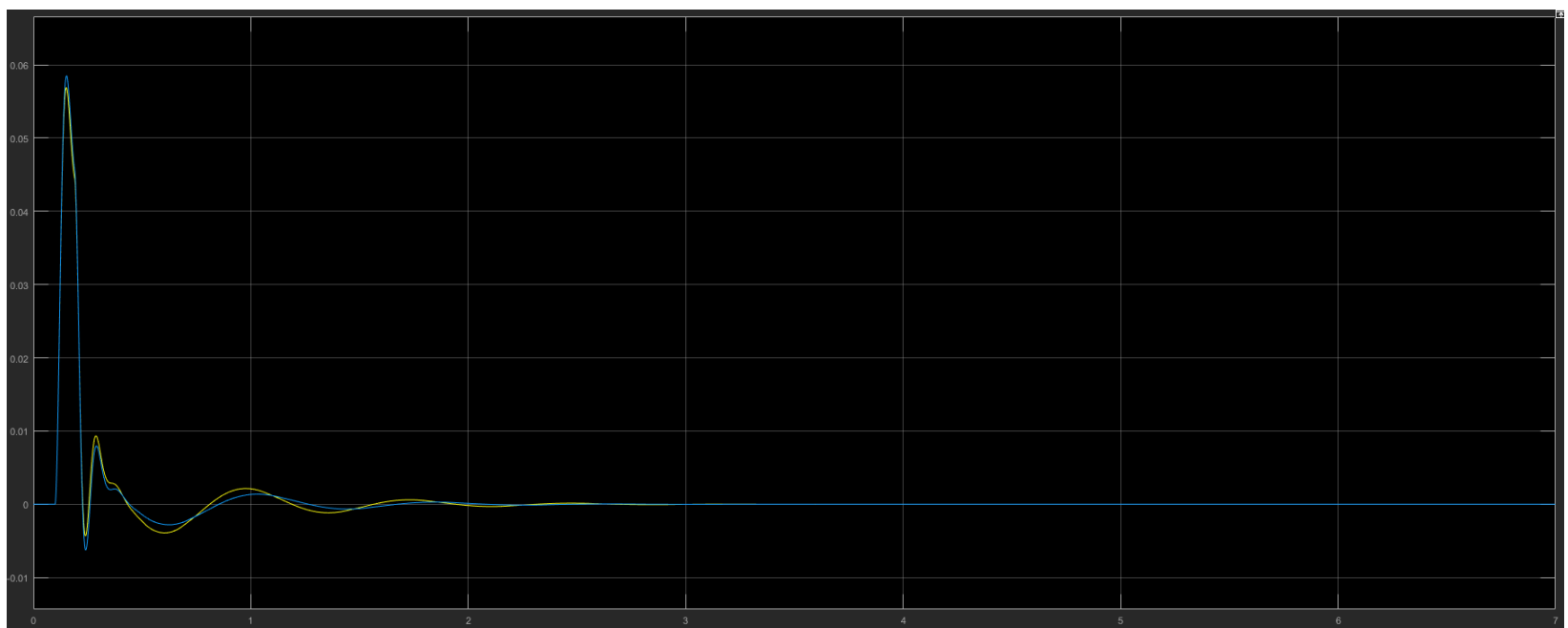
- Όπως προκύπτει από τον πίνακα 5.3.2 , η δράση του ελεγκτή βελτίωσε την απόκριση των διαγραμμάτων των μεταβλητών του συστήματος, γεγονός που προκύπτει κυρίως από τα χαρακτηριστικά της καμπύλης της επιτάχυνσης του αμαξώματος και όχι μόνο παρατηρώντας και συγκρίνοντας την εικόνα των διαγραμμάτων μεταξύ παθητικής και ενεργής περίπτωσης. Τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών για την επιτάχυνση του αμαξώματος δείχνουν και χαμηλότερο μέγιστο-ελάχιστο σε σχέση με την παθητική ανάρτηση, πιο γρήγορη σύγκλιση στην τιμή ισορροπίας, αλλά και μικρότερο overshoot-undershoot. Οι τιμές αυτές, όντας μικρότερες από τις αντίστοιχες του πίνακα 5.2.1 , αποδεικνύουν τη βελτίωση του συστήματος της ανάρτησης με τη χρήση του ελεγκτή. Για να επιβεβαιωθεί και σχηματικά αυτός ο ισχυρισμός, τοποθετήθηκαν σε κοινό διάγραμμα οι καμπύλες παθητικής και ενεργής ανάρτησης. Το μοντέλο που προσομοιώθηκε για την επίτευξη αυτής της μελέτης είναι στο σχήμα 5.3.10 . Οι καμπύλες παθητικής - ενεργής ανάρτησης που τοποθετήθηκαν πλέον σε κοινό διάγραμμα βρίσκονται στα σχήματα 5.3.11 – 5.3.17 . Με το κίτρινο χρώμα διακρίνεται η καμπύλη της παθητικής ανάρτησης, ενώ με το μπλε αυτή της ενεργής.



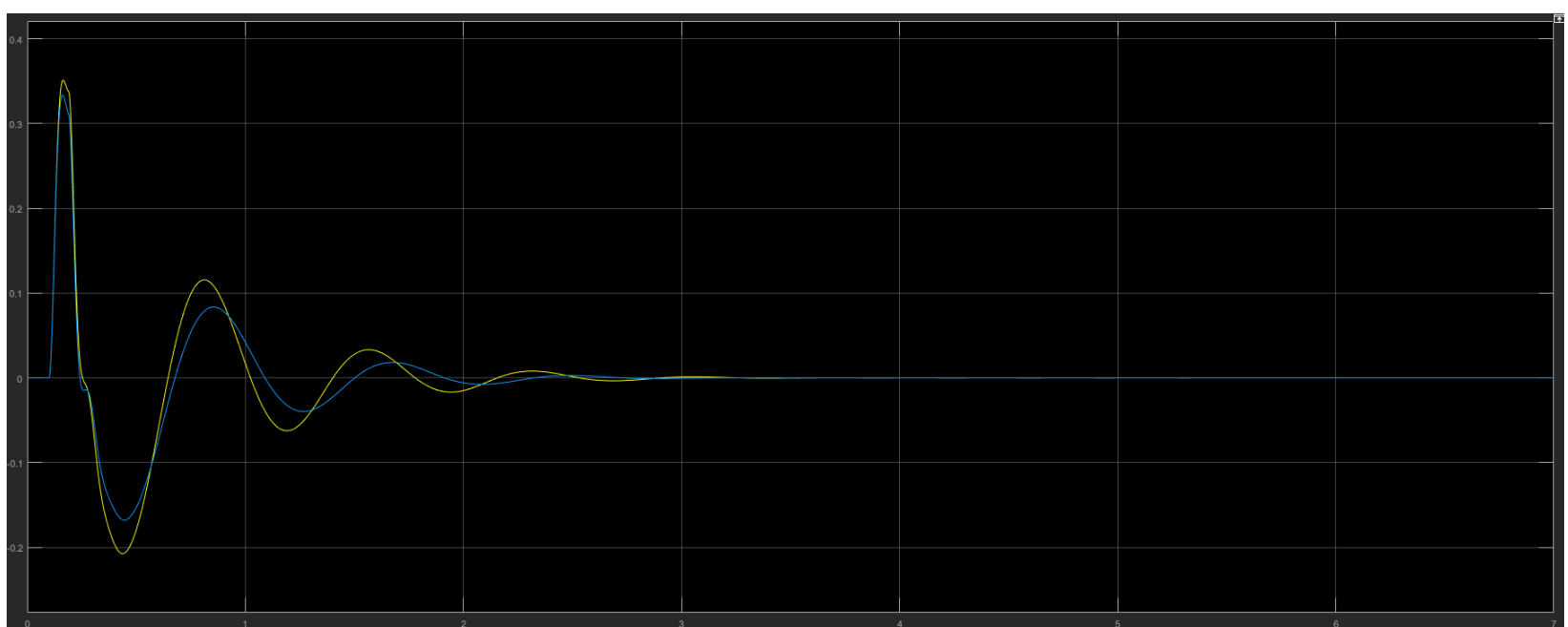
Σχήμα 5.3.10 : Μοντέλο στο simulink με ταυτόχρονη παρουσία παθητικής και ενεργής ανάρτησης



Σχήμα 5.3.11: Καμπόλες μετατοπίσεων αμαξώματος



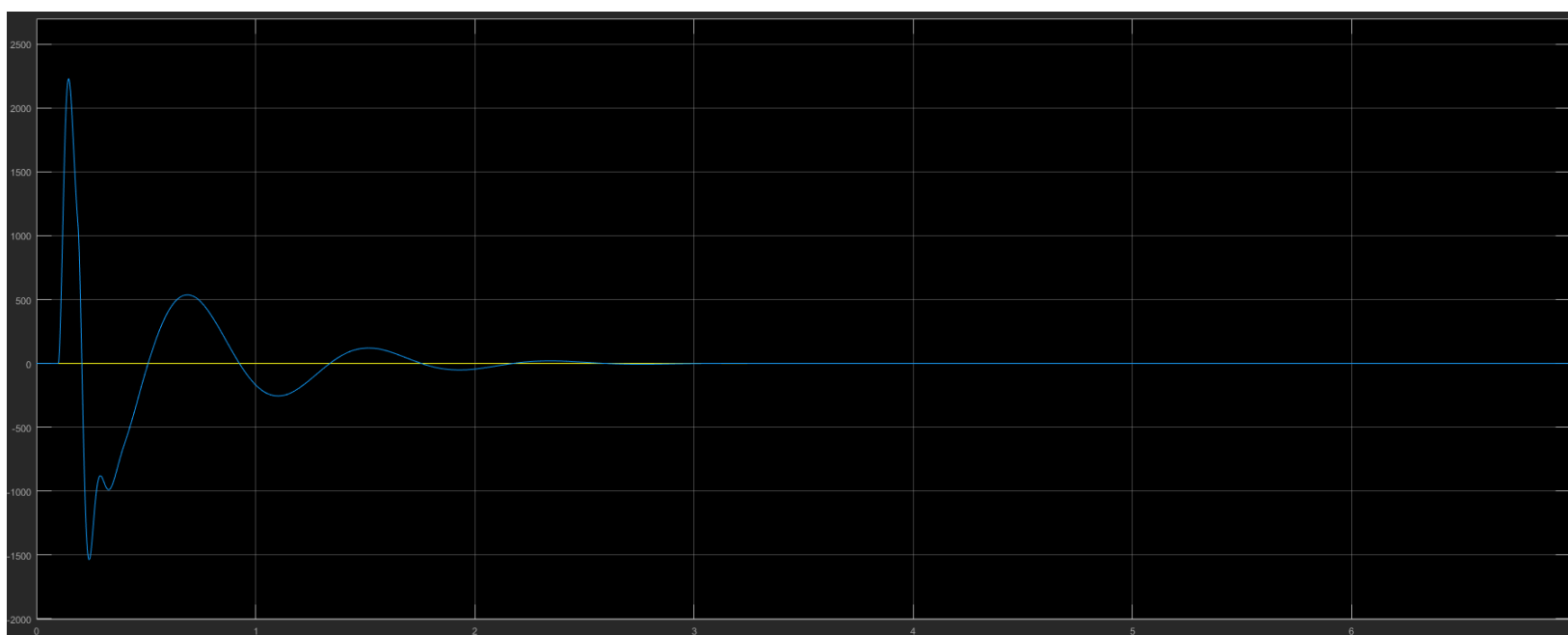
Σχήμα 5.3.12: Καμπόλες μετατοπίσεων τροχού



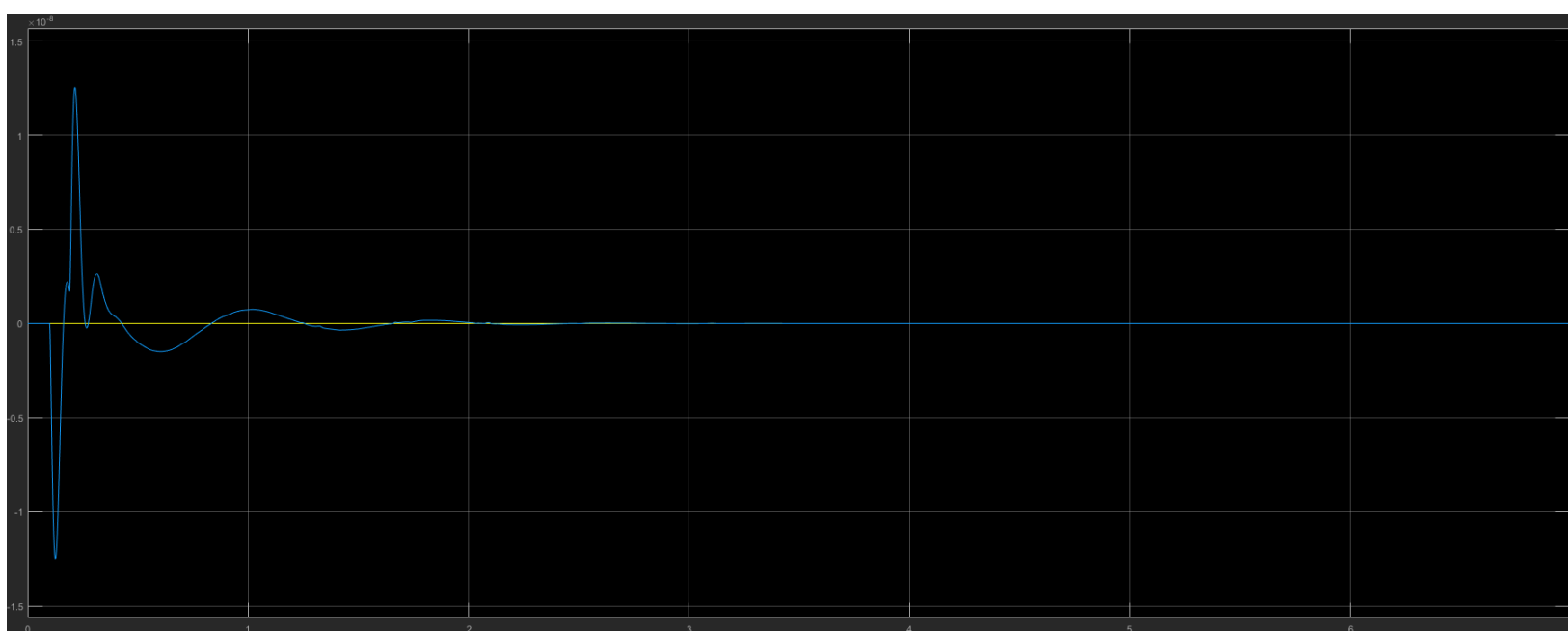
Σχήμα 5.3.13: Καμπόλες ταχυτήτων αμαξώματος



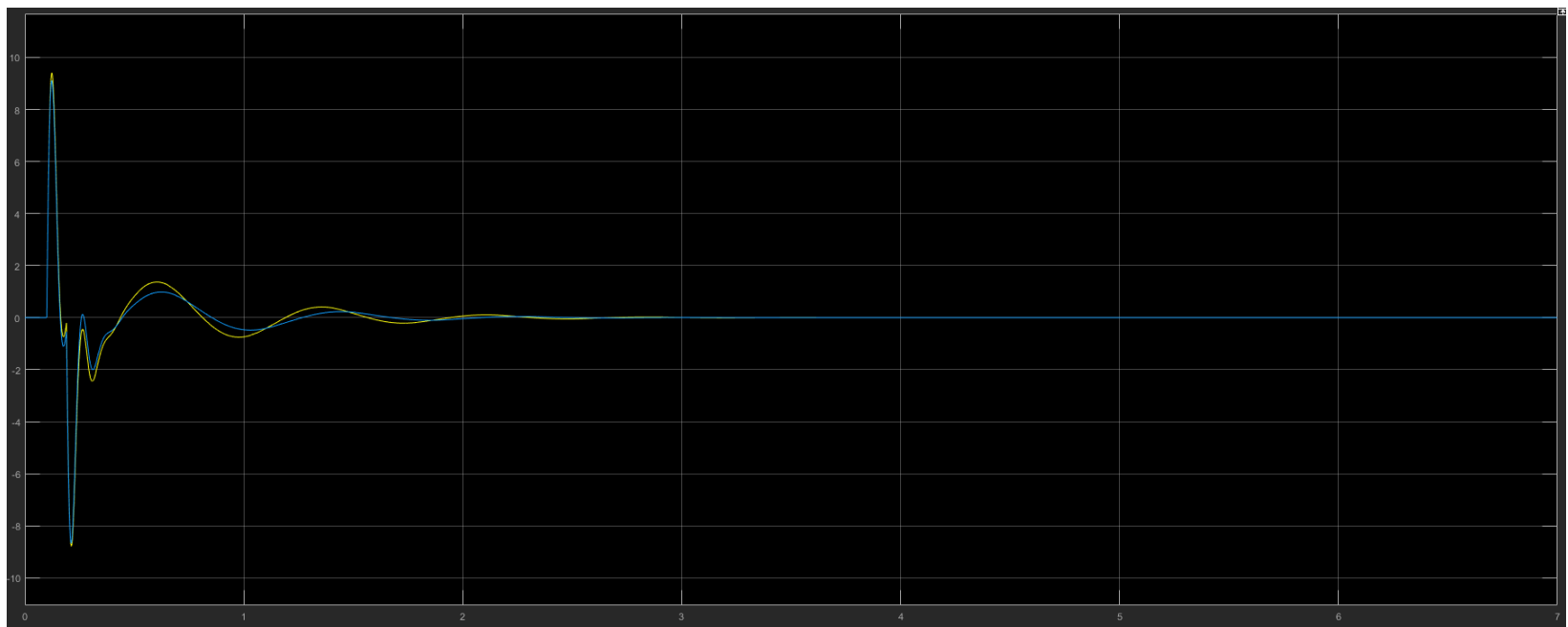
Σχήμα 5.3.14: Καμπόλες ταχυτήτων τροχού



Σχήμα 5.3.15: Καμπόλες δυνάμεων ενεργοποιητή



Σχήμα 5.3.16: Καμπόλες μετατοπίσεων βαλβίδας



Σχήμα 5.3.17: Καμπύλες επιταχύνσεων αμαξώματος

- Παρατηρώντας τις καμπύλες των μεταβλητών στα κοινά διαγράμματα, βλέπουμε ότι, πράγματι, η χρήση του ελεγκτή βελτιώνει σχεδόν όλες τις αποκρίσεις των καμπυλών. Στις καμπύλες μετατοπίσεων και ταχυτήτων του τροχού φαίνεται εμφανώς πως ο ελεγκτής δεν έδρασε θετικά και η παθητική ανάρτηση παρουσιάζει καλύτερη απόκριση από την ενεργή. Αποκλείουμε την περίπτωση λάθους διότι συμβαίνει και στις δύο μεταβλητές του τροχού τις οποίες μελετάμε και όχι μόνο στη μία από τις δύο. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί, επίσης, από το γεγονός ότι η εναρμόνιση του ελεγκτή σχετίζεται με την απόκριση του διαγράμματος επιτάχυνσης του αμαξώματος και όχι με αυτό της επιτάχυνσης του τροχού. Τελικώς, επιβεβαιώνονται και οι τιμές των χαρακτηριστικών από τα διαγράμματα της επιτάχυνσης του αμαξώματος, και πως με τον ελεγκτή μειώνονται τα overshoot - undershoot, ο χρόνος αποκατάστασης ισορροπίας και οι μέγιστες - ελάχιστες τιμές στα «όρη» και τις «κοιλιάδες» .

5.4 Περιπτώσεις διαταραχών στο προφίλ του δρόμου

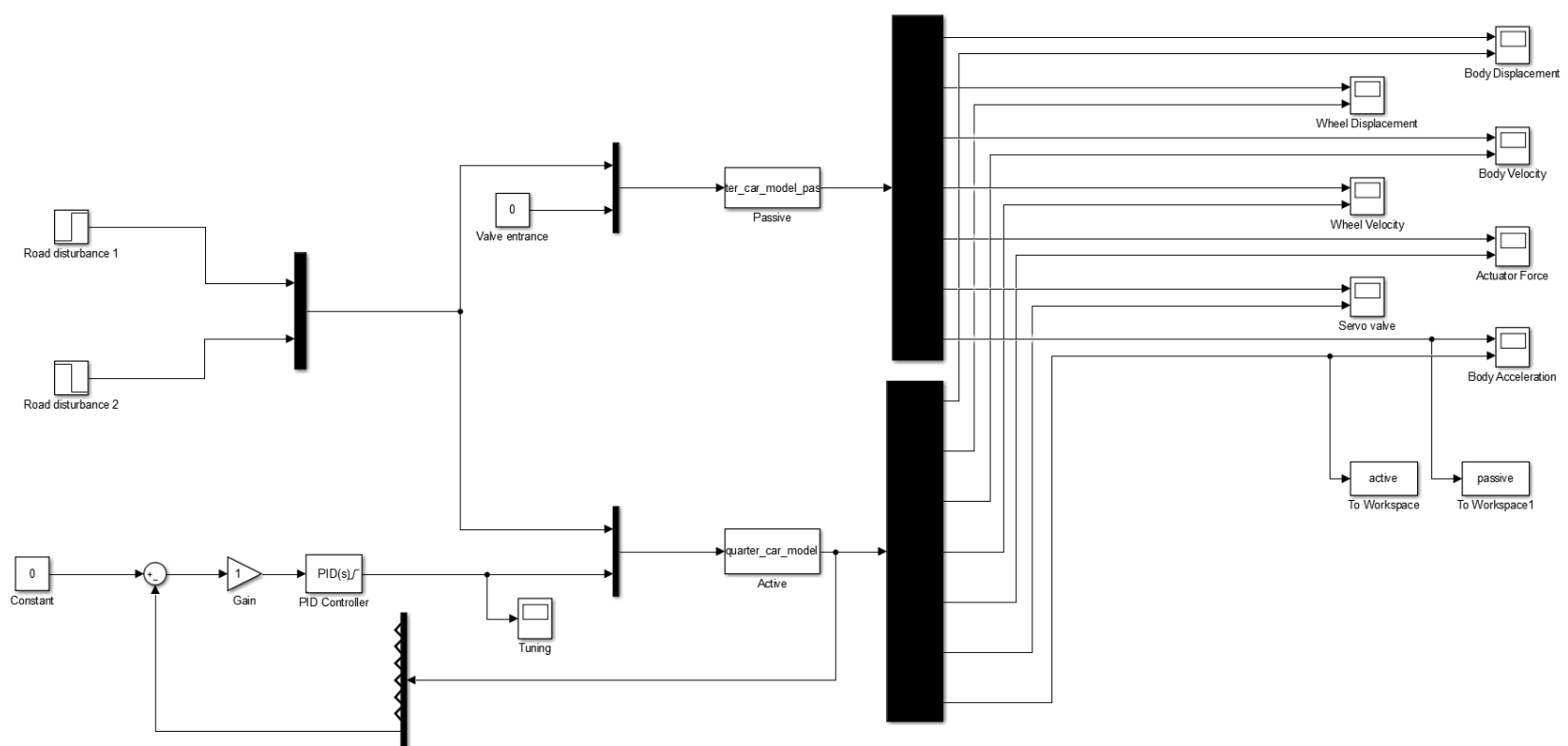
Για να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του ελεγκτή, προσομοιώθηκαν 2 ακόμη περιπτώσεις διαταραχών για το προφίλ δρόμου. Η μία είναι ύπαρξη ενός εμποδίου 5 εκατοστών, το οποίο το όχημα το συναντάει τη χρονική στιγμή 0.1 και συνεχίζει την πορεία του πάνω σε αυτό για άλλες 1.9 χρονικές μονάδες. Η δεύτερη είναι 2 σαμαράκια 5 εκατοστών στη σειρά, που εμφανίζονται τις χρονικές στιγμές 0.1 και 0.3 αντίστοιχα. Για να διανύσει το κάθε σαμαράκι, το όχημα χρειάζεται 0.09 χρονικές μονάδες. Για τις περιπτώσεις αυτές, καθώς και για την προηγούμενη περίπτωση με το ένα σαμαράκι, έγινε προσπάθεια να ρυθμίσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα τον ελεγκτή. Η ρύθμιση πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος.

Πέρα από τα χαρακτηριστικά του διαγράμματος της επιτάχυνσης του αμαξώματος, για να αξιολογήσουμε την εναρμόνιση εισήγαμε μία ακόμα παράμετρο, το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων, διαιρεμένο με τον αριθμό των χρονικών στιγμών που καταγράφηκαν από το block που συνδέσαμε στο μοντέλο του simulink. Ουσιαστικά, αθροίζουμε όλες τις διαφορές επιθυμητή τιμή - πραγματική τιμή, υψωμένες στο τετράγωνο, για κάθε χρονική στιγμή. Το άθροισμα αυτό, όσο πιο μικρό είναι, τόσο καλύτερη θεωρείται η εναρμόνιση των παραμέτρων του ελεγκτή.

1^η Περίπτωση

Η 1^η περίπτωση αφορά το σαμαράκι 5 εκατοστών, που παρουσιάστηκε στο σχήμα 5.2.2. Το μοντέλο που προσομοιώθηκε για 2 χρονικές μονάδες, φαίνεται στο σχήμα 5.4.1. Οι καμπύλες επιτάχυνσης του αμαξώματος για παθητική και ενεργή ανάρτηση παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα για τα τρία καλύτερα σεντ παραμέτρων που προέκυψαν, έτσι ώστε να γίνει η σύγκριση μεταξύ παθητικής και ενεργής ανάρτησης πιο άμεσα. Τα διαγράμματα είναι με τη σειρά τα 5.4.5 – 5.4.7. Με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται η παθητική ανάρτηση και με μπλε η ενεργή. Η δράση του ελεγκτή για κάθε ένα σεντ παραμέτρων παρουσιάζεται με τη σειρά στα διαγράμματα 5.4.2 – 5.4.4.

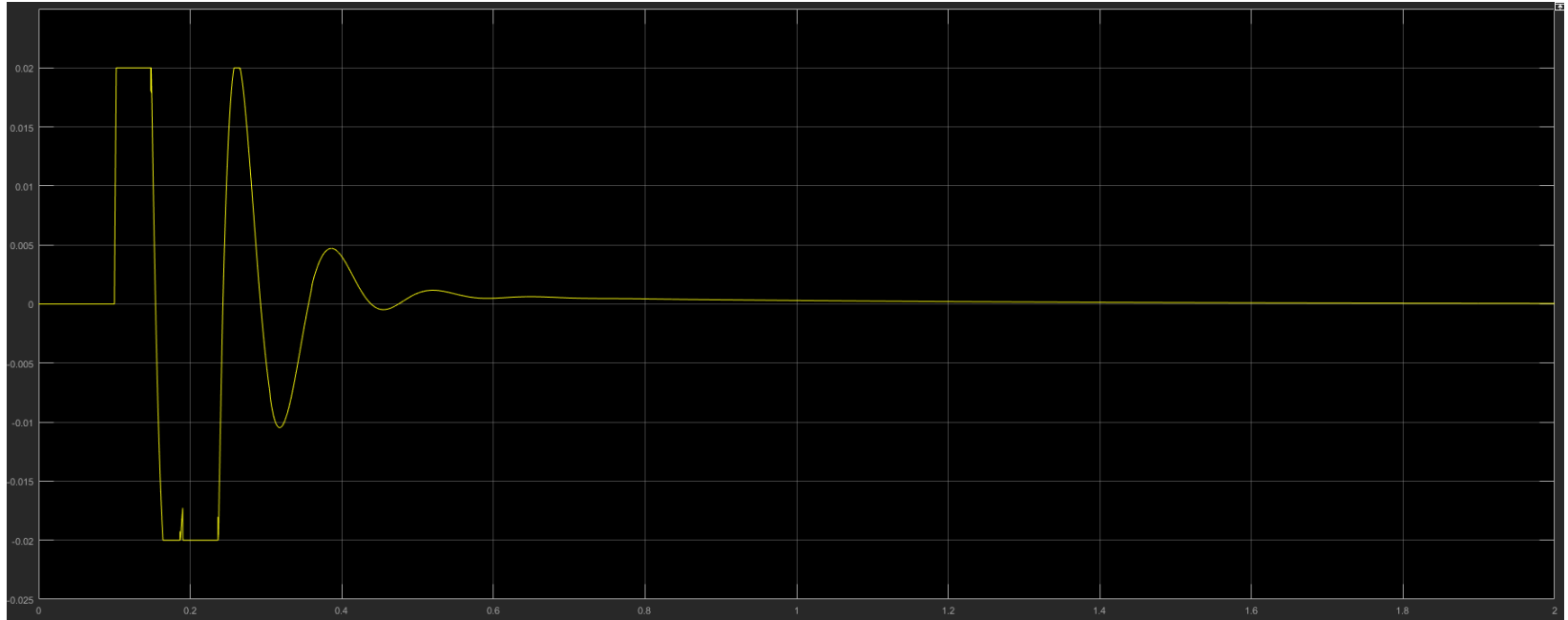
Ο πίνακας 5.4.1 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά για την παθητική και την ενεργή ανάρτηση και των τριών σεντ παραμέτρων του ελεγκτή. Επίσης, παρουσιάζεται και το άθροισμα τετραγωνικών σφαλμάτων διαιρεμένο με τον αριθμό των χρονικών στιγμών που καταγράφηκαν, που αποτελεί και το κυριότερο κριτήριο αξιολόγησης για την εναρμόνιση του ελεγκτή.



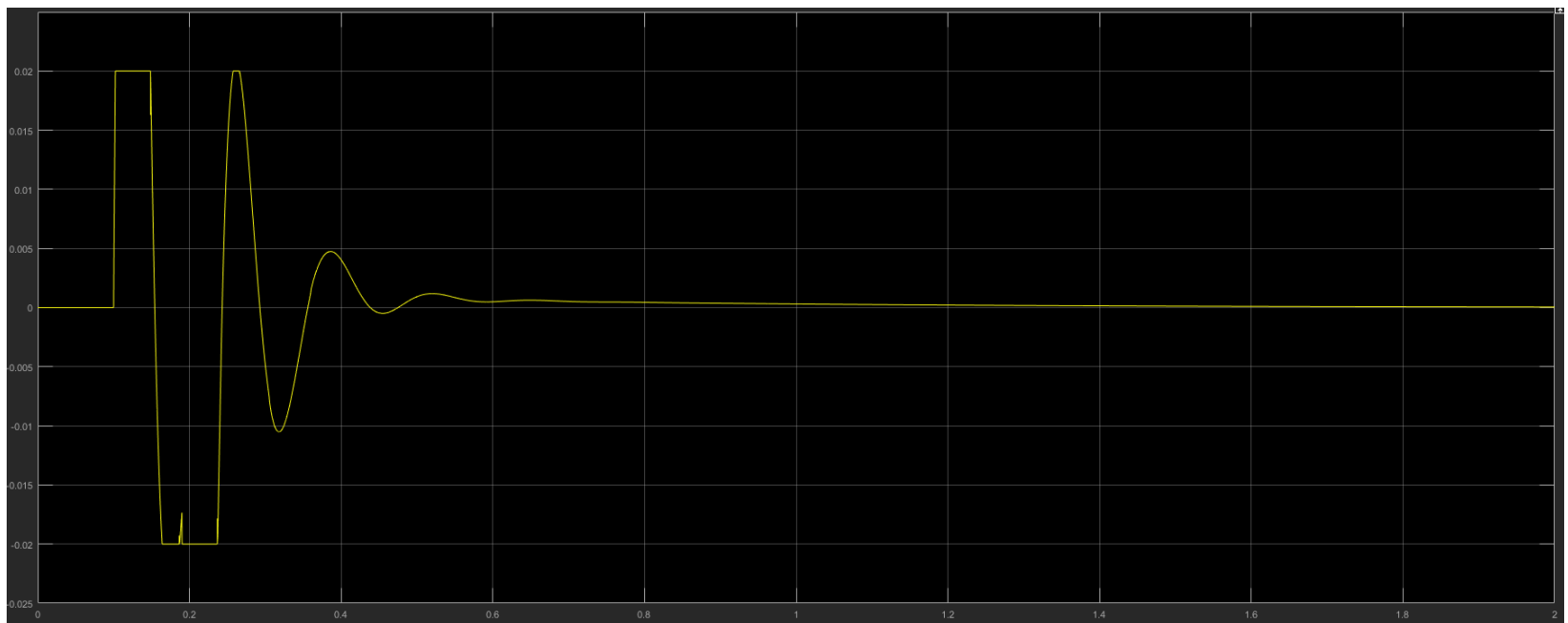
Σχήμα 5.4.1: Το μοντέλο στο simulink για σαμαράκι 5 εκατοστών

Ανάρτηση/Χαρακτηριστικά	Παθητική	Ενεργή Νο1	Ενεργή Νο2	Ενεργή Νο3
K_p	-	-0.0111231046639211	-0.011166104632211	-0.0123991046639211
K_i	-	-9.11530459427383x10 ⁻¹²	-8.11530459427383x10 ⁻¹²	-8.11530459427383x10 ⁻¹²
K_d	-	1.08820005532809x10 ⁻¹²	1.06720005532809x10 ⁻¹²	1.06720005532809x10 ⁻¹²
N	-	0.14659678554145	0.14659678554145	0.14659678554145
Χρόνος αποκατάστασης	-	1.1118 [χρον. μον.]	1.1118 [χρον. μον.]	1.1016 [χρον. μον.]
Μέγιστη τιμή	9.4076[m/s ²]	8.3606 [m/s ²]	8.36 [m/s ²]	8.3579 [m/s ²]
Ελάχιστη τιμή	-8.7856[m/s ²]	-8.886 [m/s ²]	-8.8841 [m/s ²]	-8.8678 [m/s ²]
Overshoot	1.5532x10 ⁶	1.963x10 ⁵	1.9485x10 ⁵	1.6252x10 ⁵
Undershoot	1.4599x10 ⁶	2.0874x10 ⁵	2.0717x10 ⁵	1.7265x10 ⁵
Βέλτιστη τιμή	9.4076[m/s ²]	8.886 [m/s ²]	8.8841 [m/s ²]	8.8678 [m/s ²]
Χρόνος βέλτιστης τιμής	0.1235	0.2099 [χρον. μον.]	0.21 [χρον. μον.]	0.2092 [χρον. μον.]
SSE	2.7926	1.5254	1.5104	1.3839

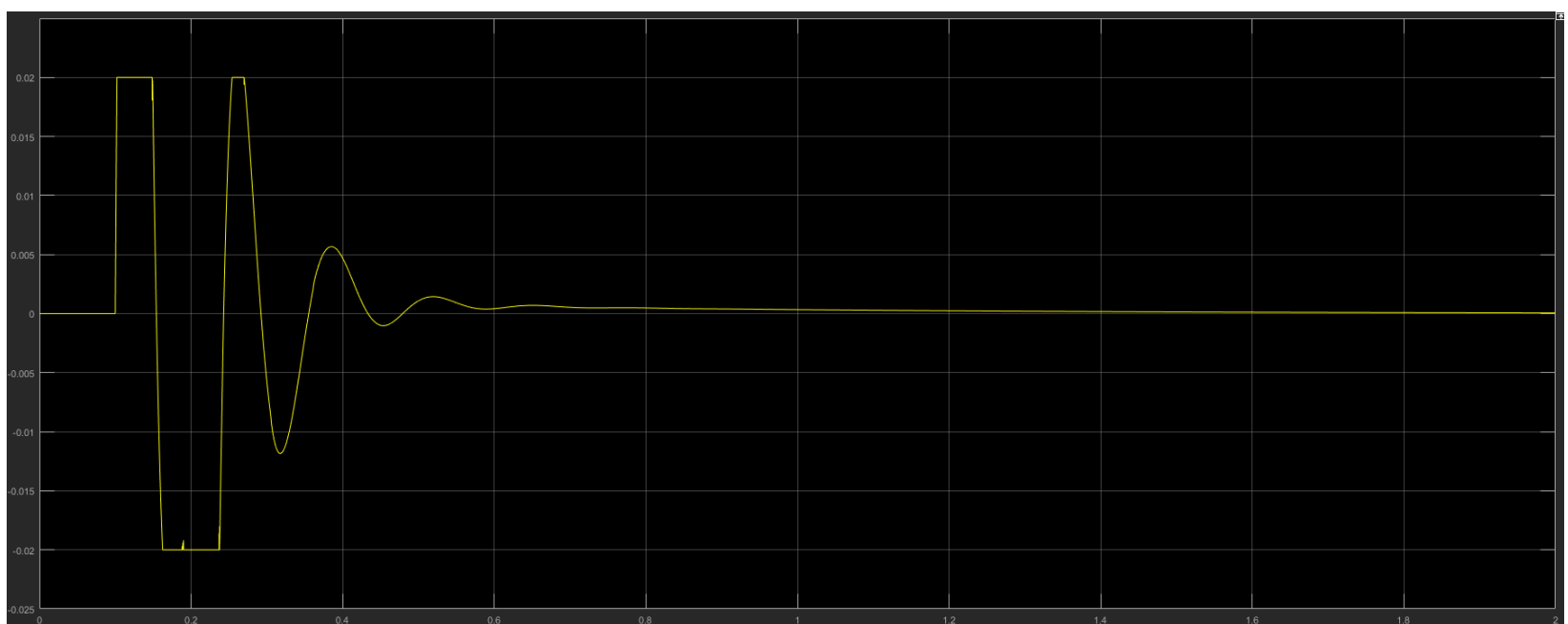
Πίνακας 5.4.1: Χαρακτηριστικά καμπύλης επιτάχυνσης αμαξώματος



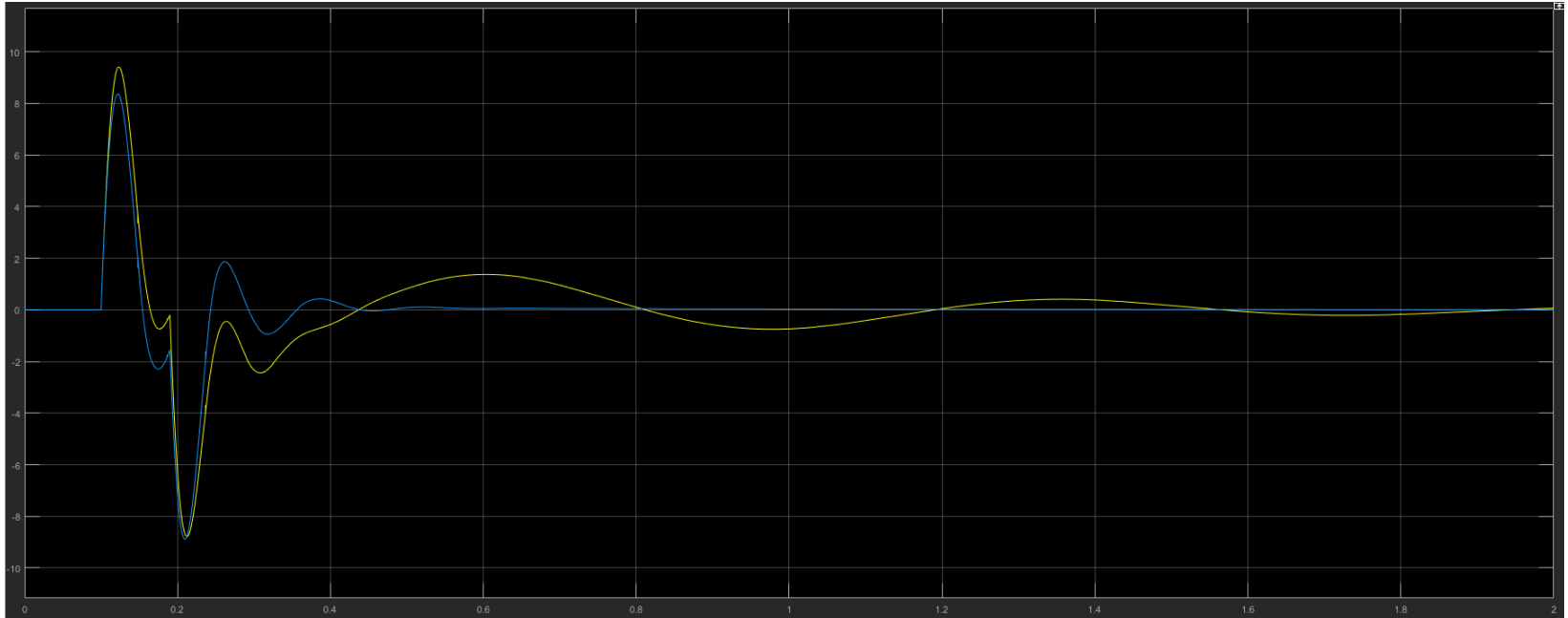
Σχήμα 5.4.2: Δράση του ελεγκτή για το 1^ο σετ παραμέτρων



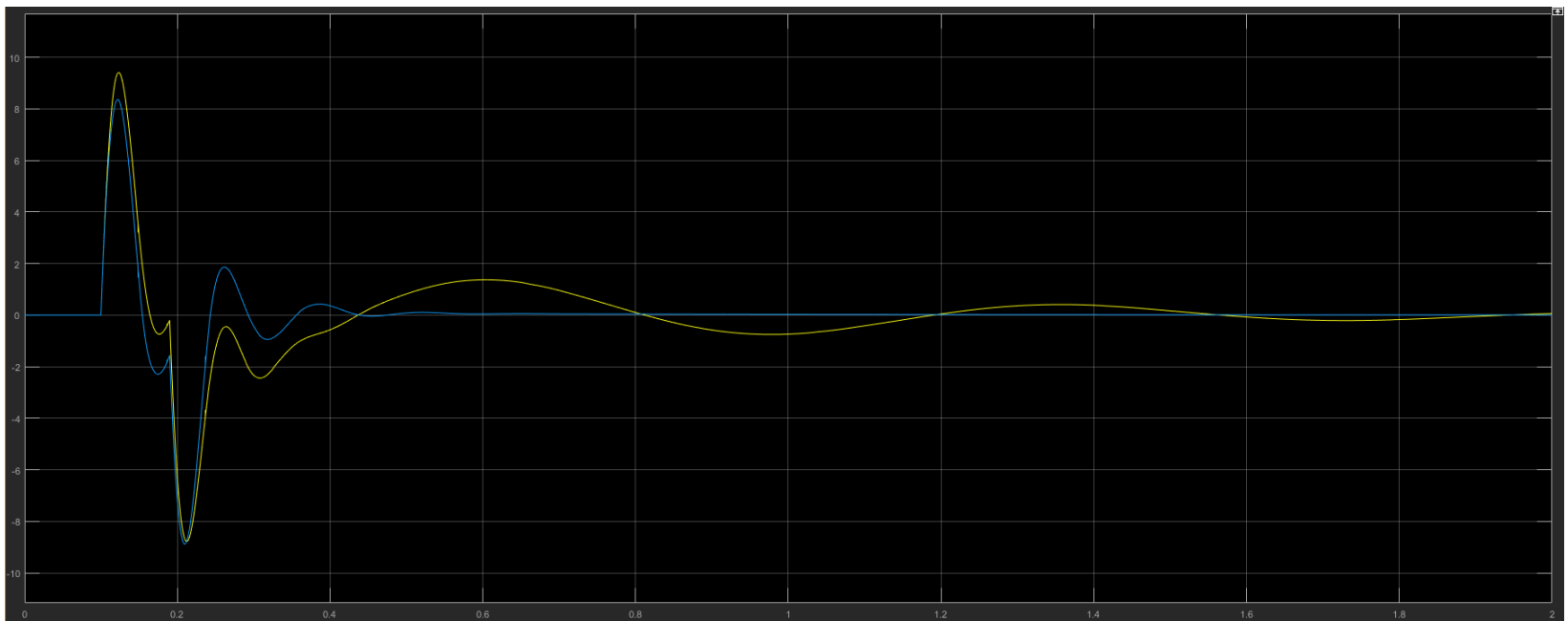
Σχήμα 5.4.3: Δράση του ελεγκτή για το 2^ο σετ παραμέτρων



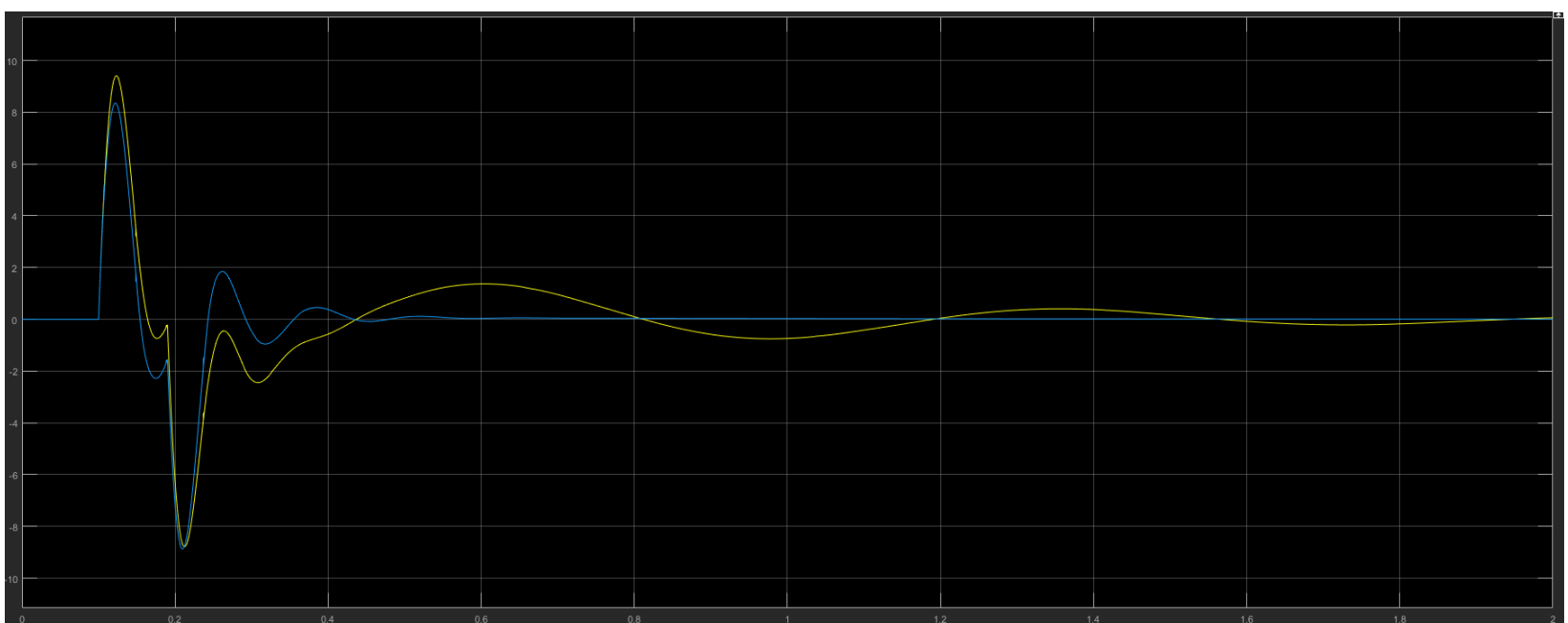
Σχήμα 5.4.4: Δράση του ελεγκτή για το 3^ο σετ παραμέτρων



Σχήμα 5.4.5: Καμπύλες επιτάχυνσης αμαξώματος για παθητική και ενεργή ανάρτηση σε κοινό διάγραμμα – 1^ο σετ παραμέτρων



Σχήμα 5.4.6: Καμπύλες επιτάχυνσης αμαξώματος για παθητική και ενεργή ανάρτηση σε κοινό διάγραμμα – 2^ο σετ παραμέτρων



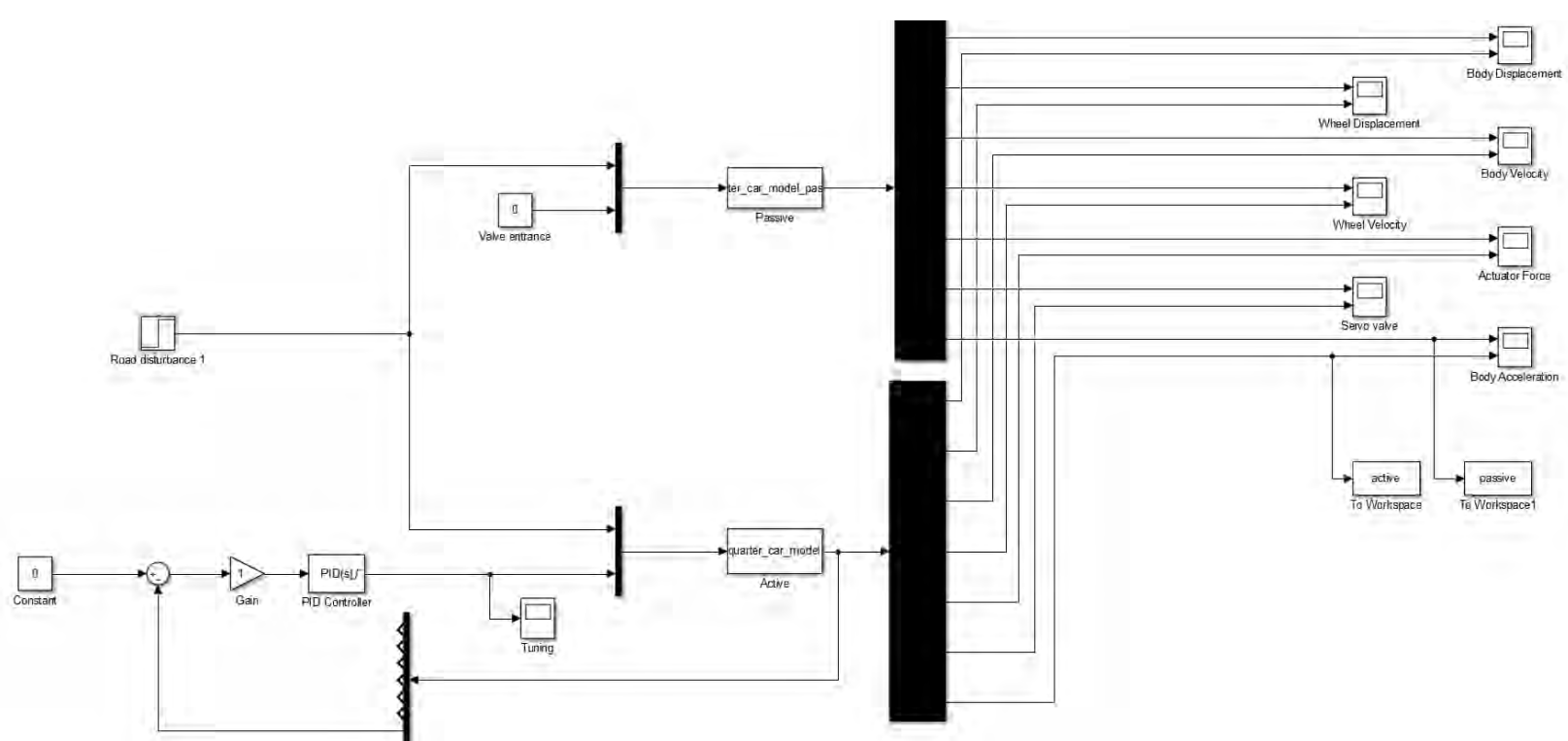
Σχήμα 5.4.7: Καμπύλες επιτάχυνσης αμαξώματος για παθητική και ενεργή ανάρτηση σε κοινό διάγραμμα – 3^ο σετ παραμέτρων

➤ Παρατηρώντας τα 6 διαγράμματα, δεν ξεχωρίζουν με μια απλή ματιά οι διαφορές ανάμεσα στα 3 σετ παραμέτρων, ούτε όσον αφορά τη δράση του ελεγκτή, ούτε όσον αφορά τις καμπύλες των επιταχύνσεων, αλλά τις αντιλαμβανόμαστε κοιτώντας τα αποτελέσματα του πίνακα 5.4.1. Αυτό που ξεχωρίζει είναι η βελτιωμένη απόκριση της επιτάχυνσης με τη χρήση του ελεγκτή, γεγονός που αποδεικνύεται και από τον πίνακα 5.4.1. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά στον πίνακα 5.4.1, παρατηρούμε πως προχωρώντας από το 1^ο σετ παραμέτρων προς το 3^ο, έχουμε βελτίωση σε όλα τα χαρακτηριστικά και στην παράμετρο SSE, που αποτελεί το κυριότερο κριτήριο μας. Ο χρόνος εμφάνισης της βέλτιστης τιμής είναι σχεδόν ίδιος και για τα τρία σετ παραμέτρων. Επιπλέον, η καμπύλη της παθητικής δεν έχει καταφέρει να συγκλίνει μέσα σε αυτές τις 2 χρονικές μονάδες. Τα χαρακτηριστικά των καμπυλών για την ενεργή ανάρτηση καθώς και η παράμετρος SSE, συγκριτικά με την καμπύλη της παθητικής ανάρτησης, είναι σαφώς βελτιωμένα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Συνοψίζοντας, η καλύτερη εναρμόνιση που έγινε για τον ελεγκτή σε αυτή την περίπτωση διαταραχής δρόμου, είναι το 3^ο σετ παραμέτρων.

2^η Περίπτωση

Η 2^η περίπτωση αφορά την ύπαρξη εμποδίου 5 εκατοστών, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4.9. Το μοντέλο που προσομοιώθηκε για 2 χρονικές μονάδες, φαίνεται στο σχήμα 5.4.8. Οι καμπύλες επιτάχυνσης του αμαξώματος για παθητική και ενεργή ανάρτηση, παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα για τα τρία καλύτερα σετ παραμέτρων που προέκυψαν. Τα διαγράμματα αυτά, είναι τα 5.4.13 - 5.4.15. Με το κίτρινο χρώμα εμφανίζεται η παθητική ανάρτηση και με μπλε η ενεργή. Τα διαγράμματα που παρουσιάζουν τη δράση του ελεγκτή για καθένα από τα 3 σετ παραμέτρων, είναι τα 5.4.10 - 5.4.12.

Ο πίνακας 5.4.2 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των καμπυλών της επιτάχυνσης του αμαξώματος για την παθητική και την ενεργή ανάρτηση και των τριών σετ παραμέτρων του ελεγκτή. Η τελευταία γραμμή του πίνακα 5.4.2 παρουσιάζει το κυριότερο κριτήριο αξιολόγησης για την εναρμόνιση του ελεγκτή, το οποίο είναι το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων διαιρεμένο με τον αριθμό των χρονικών στιγμών που καταγράφηκαν.



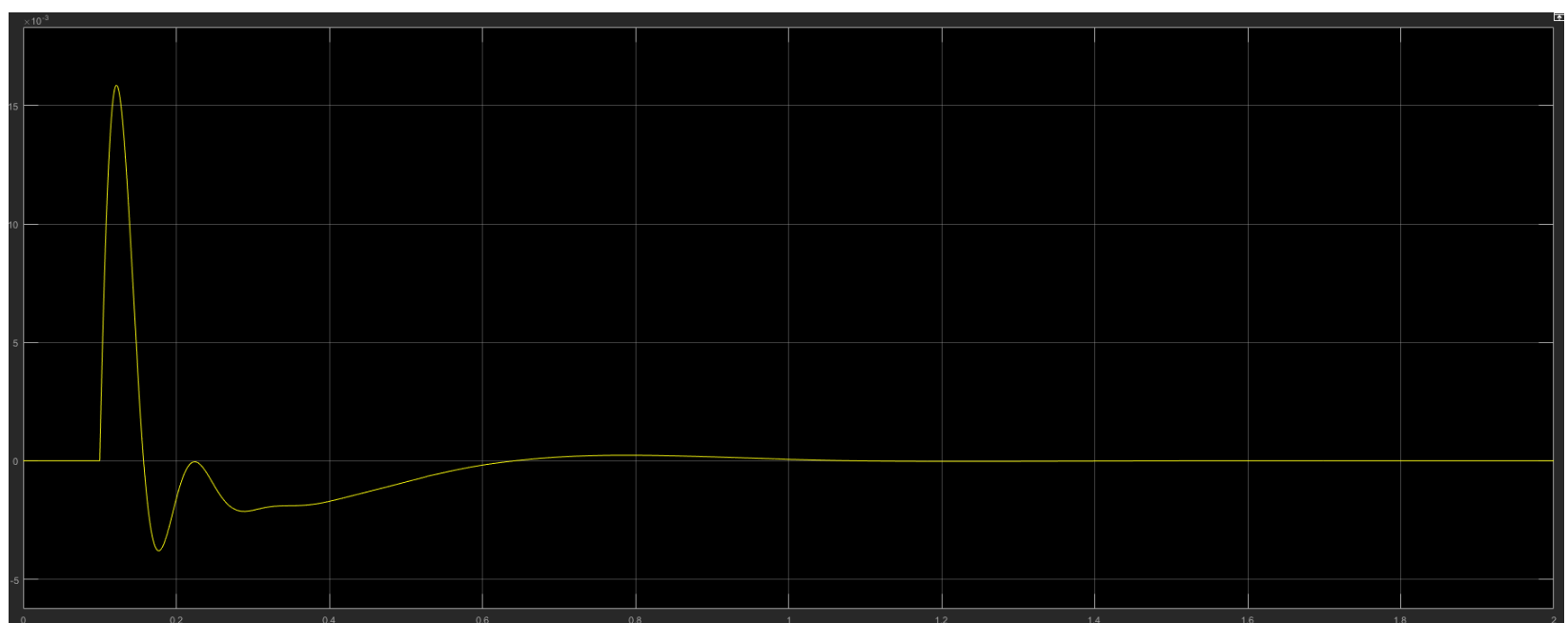
Σχήμα 5.4.8: Το μοντέλο στο simulink για εμπόδιο 5 εκατοστών

Ανάρτηση/Χαρακτηριστικά	Παθητική	Ενεργή Νο1	Ενεργή Νο2	Ενεργή Νο3
K_p	-	-0.00182824392618087	-0.00235824392618087	-0.00255824392618087
K_i	-	-1.494447332205x10 ⁻¹²	-1.483247332205x10 ⁻¹²	-1.472347332205x10 ⁻¹²
K_d	-	1.85420091347843x10 ⁻¹²	1.75420091347843x10 ⁻¹²	1.65420091347843x10 ⁻¹²
N	-	0.470326050664965	0.47032605554965	0.47032605554965
Χρόνος αποκατάστασης	-	1.0355 [χρον. μον.]	1.0240 [χρον. μον.]	1.0009 [χρον. μον.]
Μέγιστη τιμή	9.4087 [m/s ²]	8.6726 [m/s ²]	8.5560 [m/s ²]	8.5237[m/s ²]
Ελάχιστη τιμή	-2.3854 [m/s ²]	-2.0768 [m/s ²]	-2.3061 [m/s ²]	-2.3599 [m/s ²]
Overshoot	1.6446x10 ⁸	4.0730x10 ⁷	3.0326x10 ⁶	2.0873x10 ⁶
Undershoot	6.8819x10 ⁷	9.7536x10 ⁶	1.1252x10 ⁷	3.2822x10 ⁷
Βέλτιστη τιμή	9.4087 [m/s ²]	8.6726 [m/s ²]	8.5560 [m/s ²]	8.5237 [m/s ²]
Χρόνος βέλτιστης τιμής	0.1232 [χρον. μον.]	0.1220 [χρον. μον.]	0.1215 [χρον. μον.]	0.1215 [χρον. μον.]
SSE	10.4505	8.3844	8.2118	6.6693

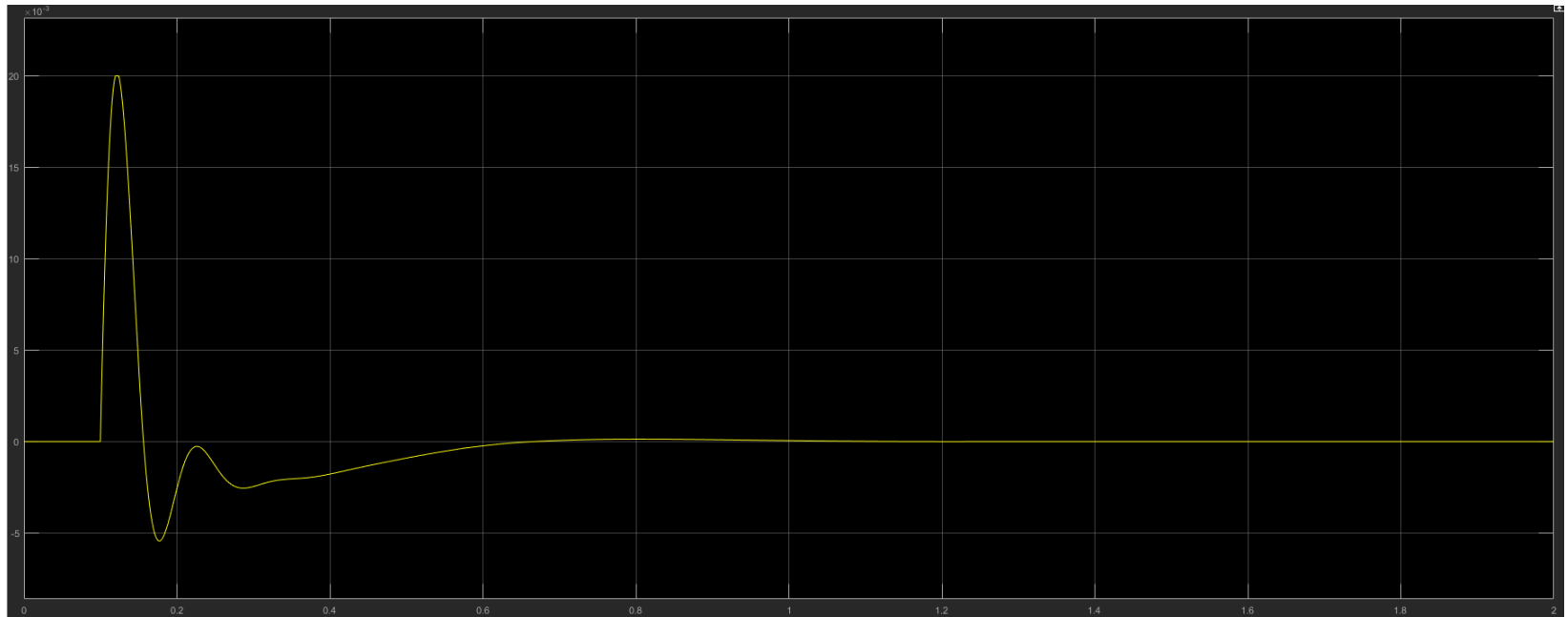
Πίνακας 5.4.2: Χαρακτηριστικά καμπύλης επιτάχυνσης αμαξώματος



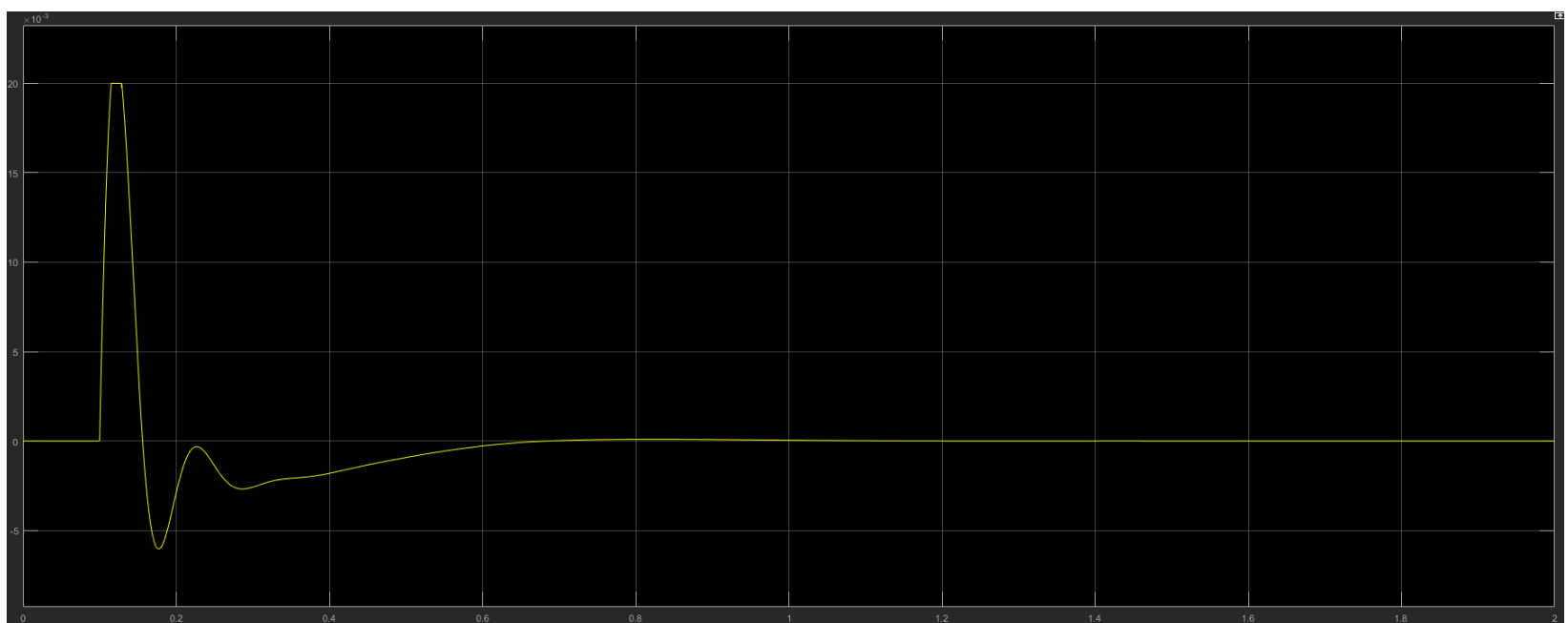
Σχήμα 5.4.9 : Προφίλ δρόμου για εμπόδιο 5 εκατοστών



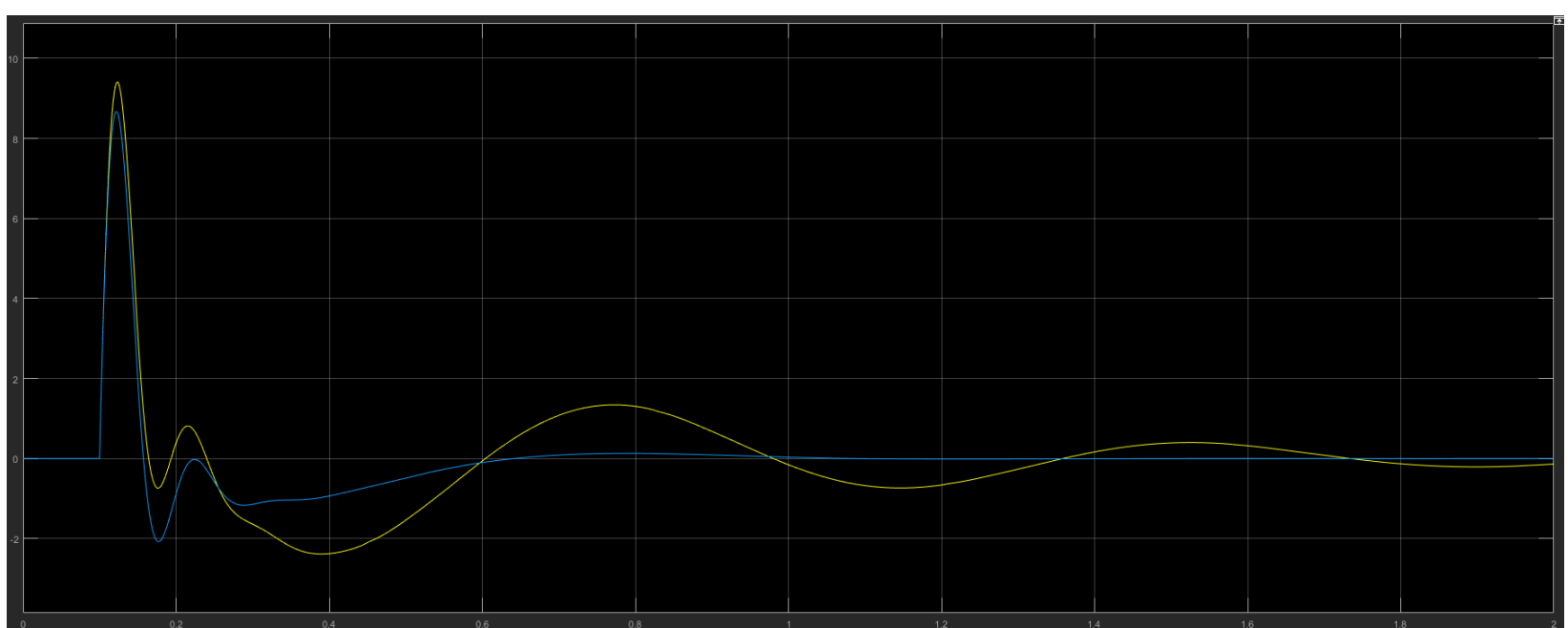
Σχήμα 5.4.10: Δράση του ελεγκτή για το 1^ο σετ παραμέτρων



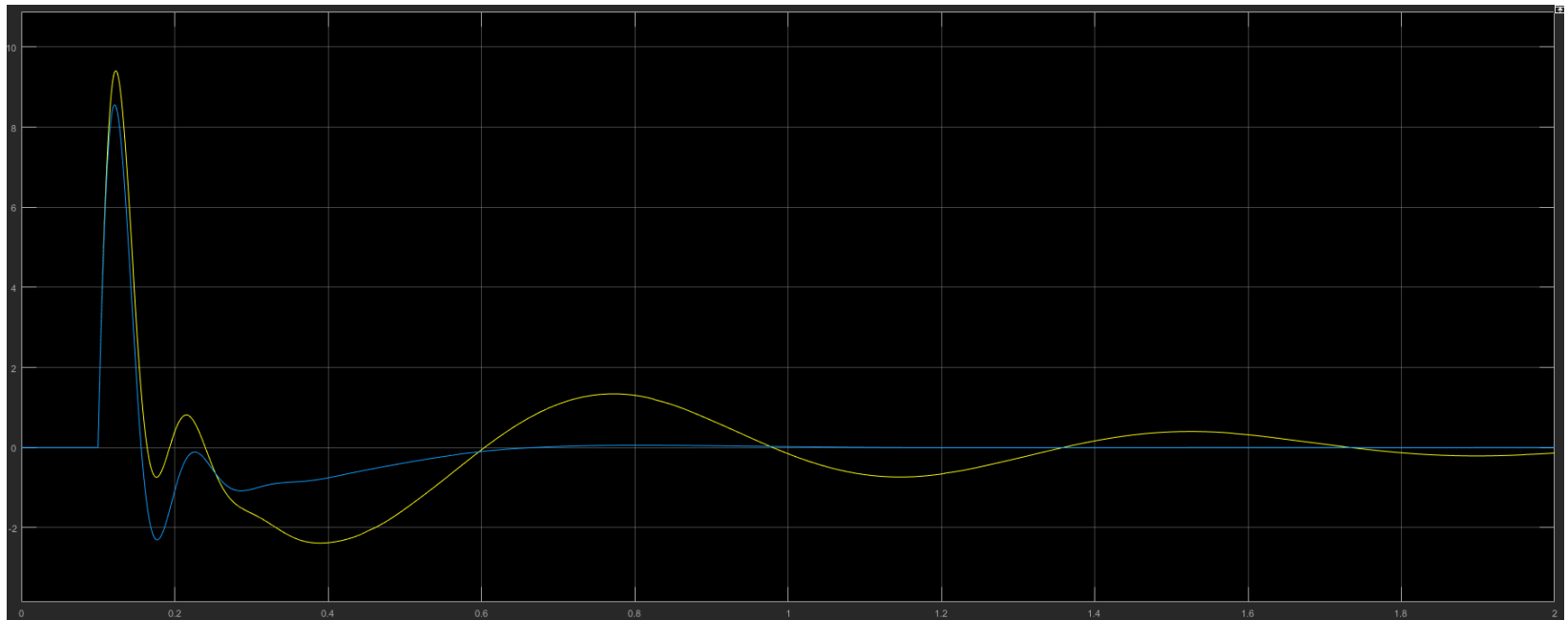
Σχήμα 5.4.11: Δράση του ελεγκτή για το 2^ο σετ παραμέτρων



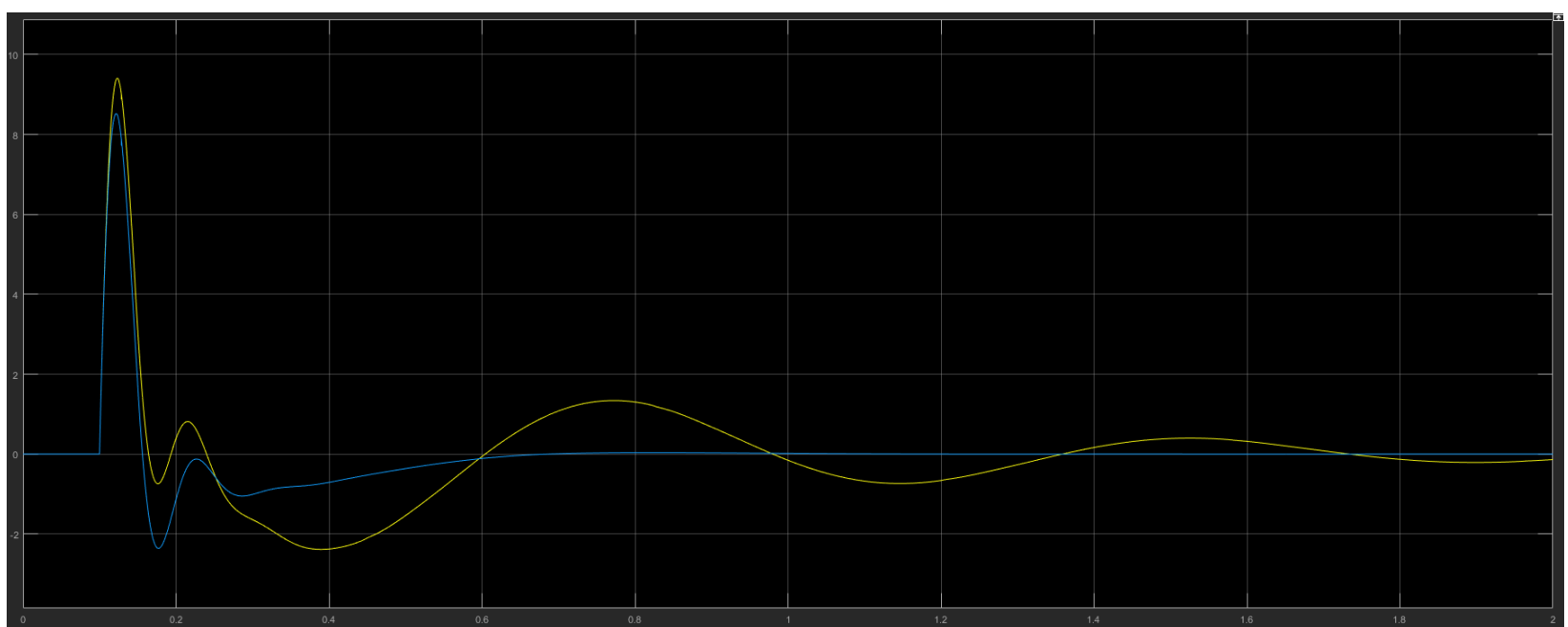
Σχήμα 5.4.12: Δράση του ελεγκτή για το 3^ο σετ παραμέτρων



Σχήμα 5.4.13: Καμπύλες επιτάχυνσης αμαξώματος για παθητική και ενεργή ανάρτηση σε κοινό διάγραμμα - 1^ο σετ παραμέτρων



Σχήμα 5.4.14: Καμπύλες επιτάχυνσης αμαξώματος για παθητική και ενεργή ανάρτηση σε κοινό διάγραμμα - 2^ο σετ παραμέτρων



Σχήμα 5.4.15: Καμπύλες επιτάχυνσης αμαξώματος για παθητική και ενεργή ανάρτηση σε κοινό διάγραμμα - 3^ο σετ παραμέτρων

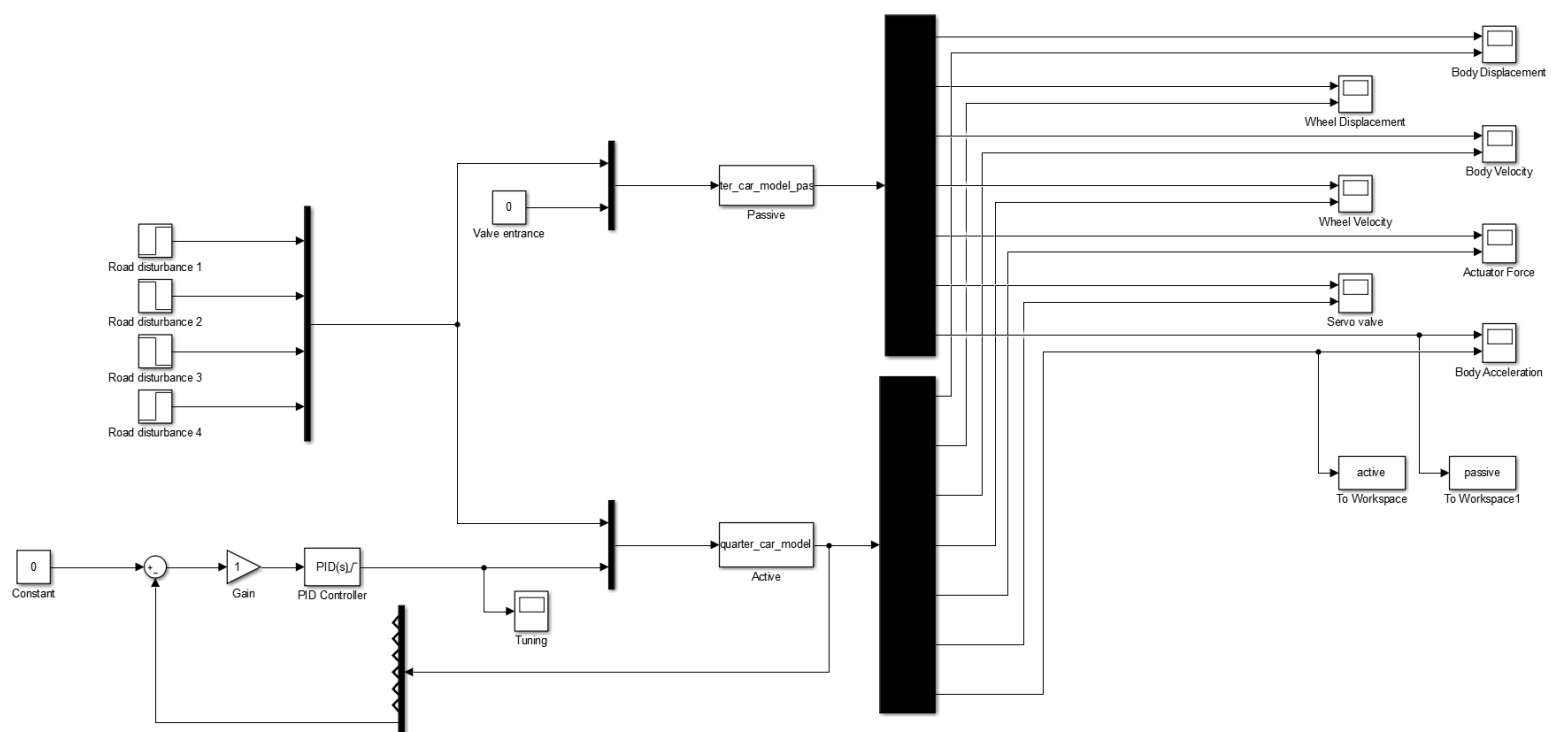
- Παρατηρώντας τα 6 διαγράμματα, δεν ξεχωρίζουν με μια απλή ματιά οι διαφορές ανάμεσα στα τρία παραμέτρων, ούτε όσον αφορά τη δράση του ελεγκτή, ούτε όσον αφορά τις καμπύλες των επιταχύνσεων, αλλά τις αντιλαμβανόμαστε κοιτώντας τα αποτελέσματα του πίνακα 5.4.2. Το μόνο που φαίνεται καθαρά από τα διαγράμματα της επιτάχυνσης, είναι η βελτίωση της απόκρισης από την παθητική στην ενεργή ανάρτηση, με τη χρήση του ελεγκτή και αποδεικνύεται και από τον πίνακα 5.4.2. Όσον αφορά τα αποτελέσματα του πίνακα 5.4.2, παρατηρούμε πως προχωρώντας από το 1^ο σετ παραμέτρων προς το 3^ο, έχουμε βελτίωση αρχικά στην παράμετρο SSE, στο χρόνο αποκατάστασης και στη μέγιστη τιμή. Η καμπύλη όμως μετατοπίζεται όλο και χαμηλότερα, που δικαιολογείται και από το ότι το ελάχιστο της καμπύλης σταδιακά αυξάνεται κατ' απόλυτη τιμή. Ο χρόνος εμφάνισης της βέλτιστης τιμής είναι σχεδόν ο ίδιος και στις τρεις καμπύλες και πιο συγκεκριμένα στη 2^η και 3^η ανάρτηση είναι ακριβώς ο ίδιος. Σχετικά με τα overshoot και undershoot μεταξύ των τριών σετ παραμέτρων, από το 1^ο σετ μέχρι και το 3^ο το overshoot μειώνεται όπως είναι λογικό, αφού το μέγιστο μειώνεται επίσης, ενώ το undershoot αυξάνεται διότι και το ελάχιστον αυξάνει η τιμή του προς τα αρνητικά. Η καμπύλη τώρα της παθητικής ανάρτησης, δεν έχει συγκλίνει ακόμη στην τιμή ισορροπίας και όπως βλέπουμε και στον πίνακα 5.4.2 όλα τα χαρακτηριστικά της και η παράμετρος SSE, είναι επιδεινωμένα συγκριτικά με αυτά της ενεργής ανάρτησης και για τα 3 σετ παραμέτρων που παρουσιάζονται, όπως

αναφέρθηκε και εξ αρχής στο σχολιασμό των αποτελεσμάτων. Συνοψίζοντας, η καλύτερη εναρμόνιση που πραγματοποιήθηκε για αυτήν την περίπτωση διαταραχής δρόμου, είναι το 3^ο σεντ παραμέτρων.

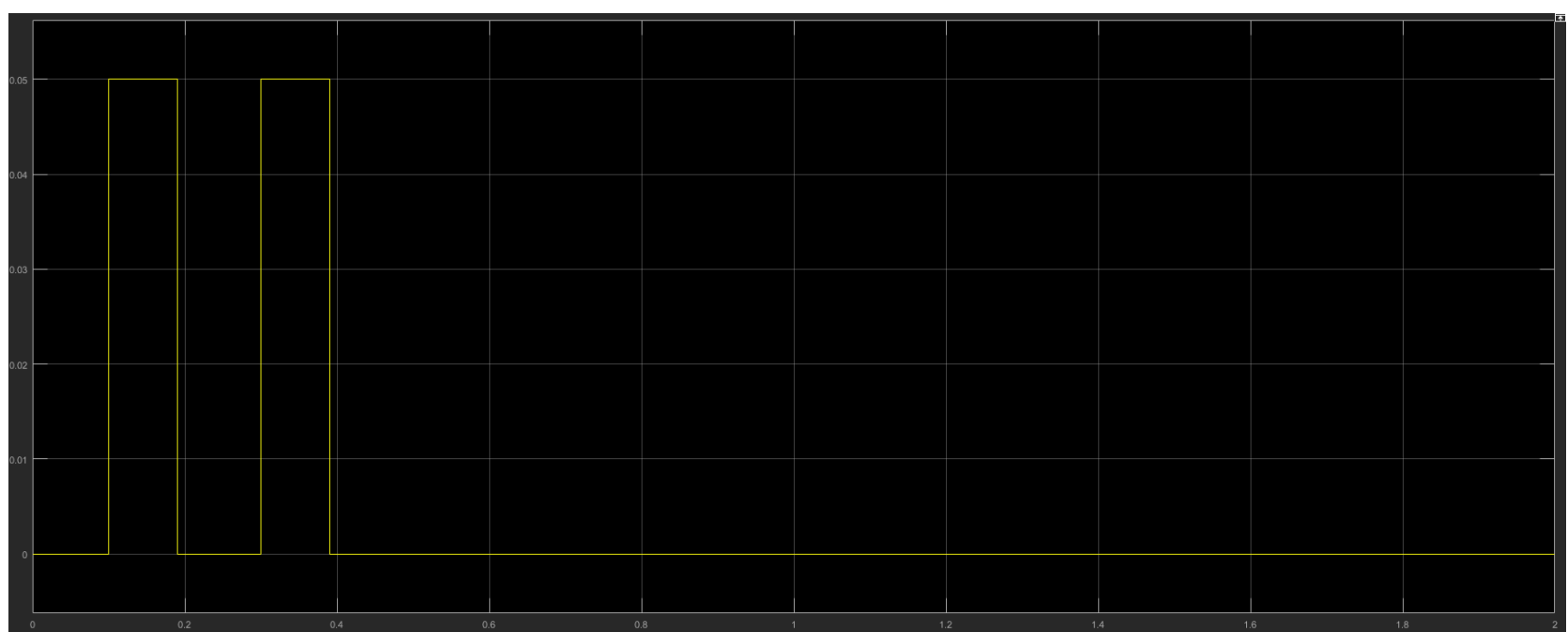
3^η Περίπτωση

Η 3^η περίπτωση αφορά την ύπαρξη 2 σαμαράκιων 5 εκατοστών στη σειρά, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.4.17. Το μοντέλο που προσομοιώθηκε για 2 χρονικές μονάδες, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.4.16. Οι καμπύλες επιτάχυνσης του αμαξώματος για παθητική και ενεργή ανάρτηση, παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα για τα τρία καλύτερα σεντ παραμέτρων που προέκυψαν. Τα διαγράμματα αυτά είναι τα 5.4.21 - 5.4.23. Με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται η παθητική ανάρτηση και με μπλε η ενεργή. Τα διαγράμματα που παρουσιάζουν τη δράση του ελεγκτή για το καθένα από τα σεντ παραμέτρων, είναι τα 5.4.18 - 5.4.20.

Ο πίνακας 5.4.3 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των καμπυλών της επιτάχυνσης του αμαξώματος για την παθητική και την ενεργή ανάρτηση και των τριών σεντ παραμέτρων του ελεγκτή. Επίσης, στην τελευταία γραμμή παρουσιάζεται το χαρακτηριστικό των καμπυλών, που αποτελεί το κυριότερο κριτήριο για την αξιολόγηση της εναρμόνισης του ελεγκτή. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι όπως και στις παραπάνω περιπτώσεις, το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων διαιρεμένο με τον αριθμό των χρονικών στιγμών που καταγράφηκαν.



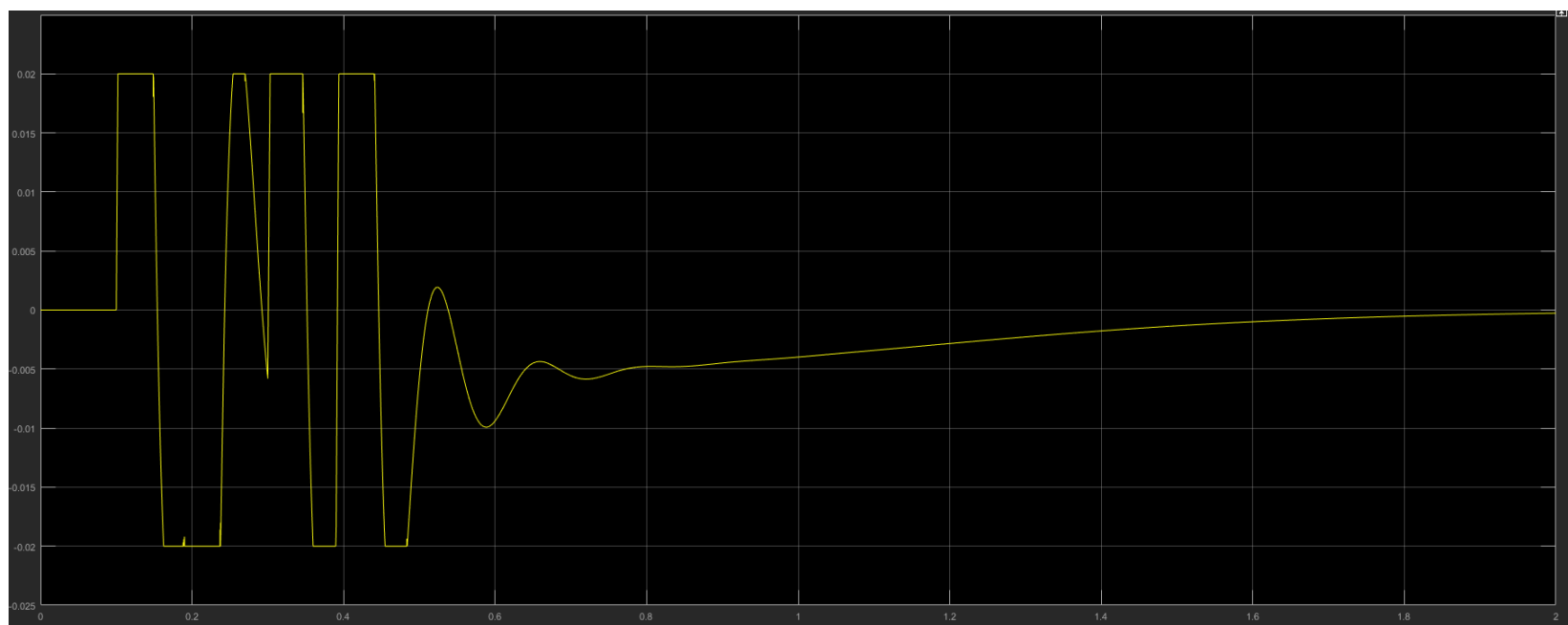
Σχήμα 5.4.16: Το μοντέλο στο *simulink* για τα 2 σαμαράκια 5 εκατοστών



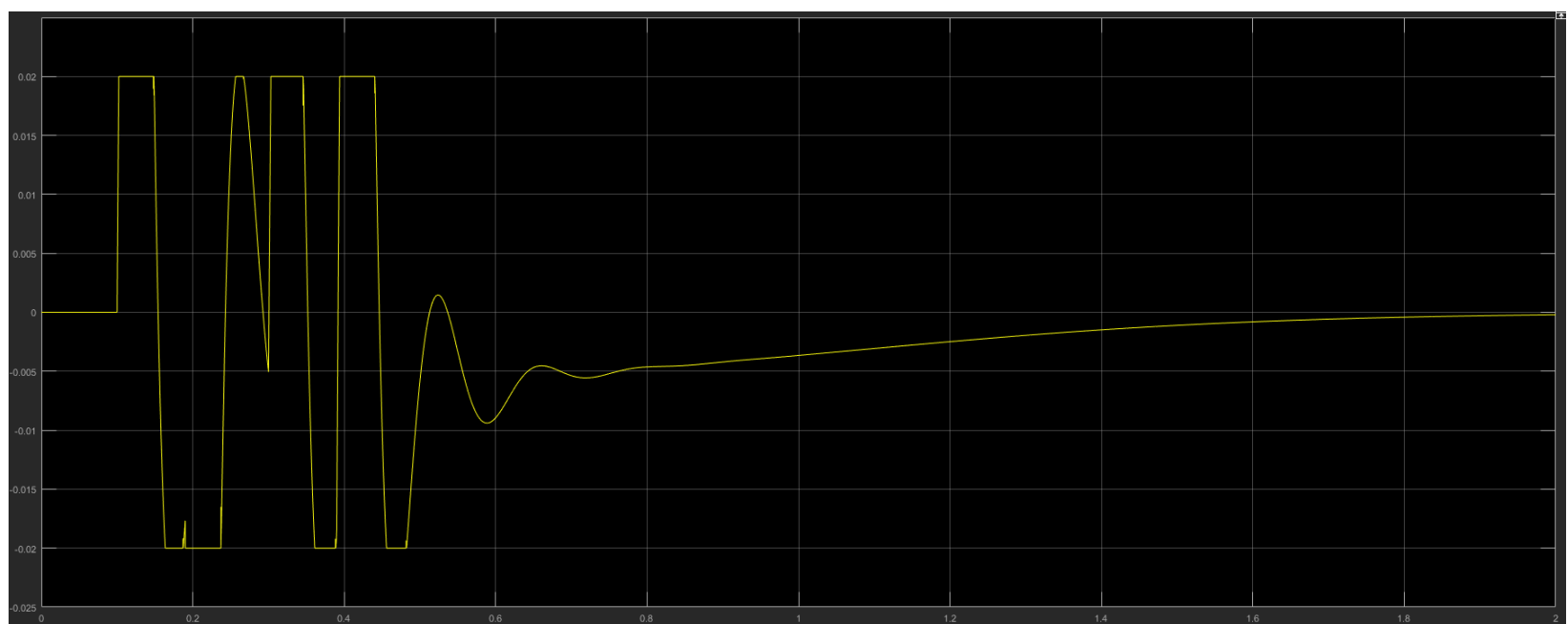
Σχήμα 5.4.17 : Προφίλ δρόμου για 2 σαμαράκια 5 εκατοστών

Ανάρτηση/Χαρακτηριστικά	Παθητική	Ενεργή Νο1	Ενεργή Νο2	Ενεργή Νο3
K_p	-	-0.0113991046639211	-0.0123991046639211	-0.0139871046639211
K_i	-	-9.21330459427383x10 ⁻¹²	-9.11530459427383x10 ⁻¹²	-9.11430459427383x10 ⁻¹²
K_d	-	1.06720005532809x10 ⁻¹²	1.08820005532809x10 ⁻¹²	1.09320005532809x10 ⁻¹²
N	-	0.14659678554145	0.14659678554145	0.14659678554145
Χρόνος αποκατάστασης	-	1.8051 [χρον. μον.]	1.8229 [χρον. μον.]	1.8448 [χρον. μον.]
Μέγιστη τιμή	9.8232 [m/s ²]	8.2712 [m/s ²]	8.2786 [m/s ²]	8.2893 [m/s ²]
Ελάχιστη τιμή	-8.7864 [m/s ²]	-8.8815 [m/s ²]	-8.8678 [m/s ²]	-8.86 [m/s ²]
Overhoot	1.2607x10 ⁵	4.9047x10 ⁴	4.1287x10 ⁴	3.3147x10 ⁴
Undershoot	1.4106x10 ⁵	4.6257x10 ⁴	3.9008x10 ⁴	3.1344x10 ⁴
Βέλτιστη τιμή	9.8232 [m/s ²]	8.8815 [m/s ²]	8.8678 [m/s ²]	8.86 [m/s ²]
Χρόνος βέλτιστης τιμής	0.4144 [χρον. μον.]	0.2094 [χρον. μον.]	0.2092 [χρον. μον.]	0.2095 [χρον. μον.]
SSE	4.2336	1.9917	1.9098	1.8021

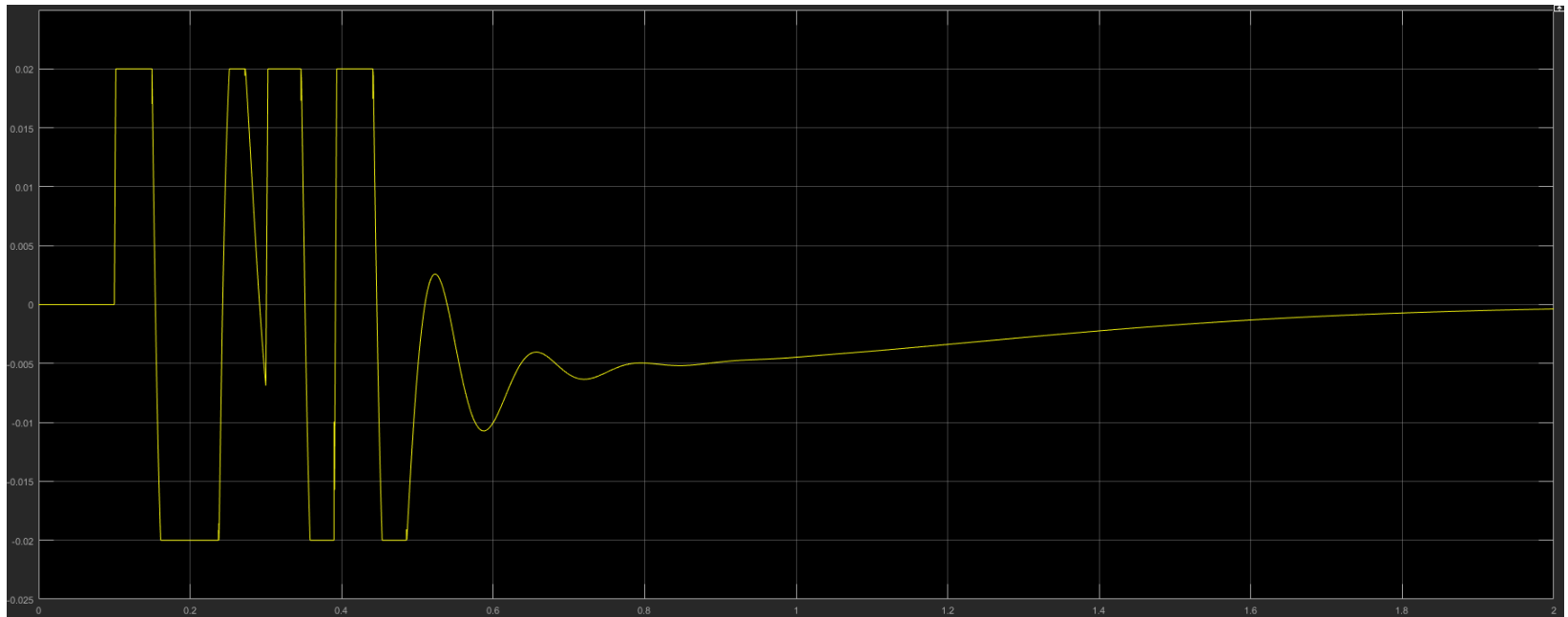
Πίνακας 5.4.3: Χαρακτηριστικά καμπύλης επιτάχυνσης αμαξώματος



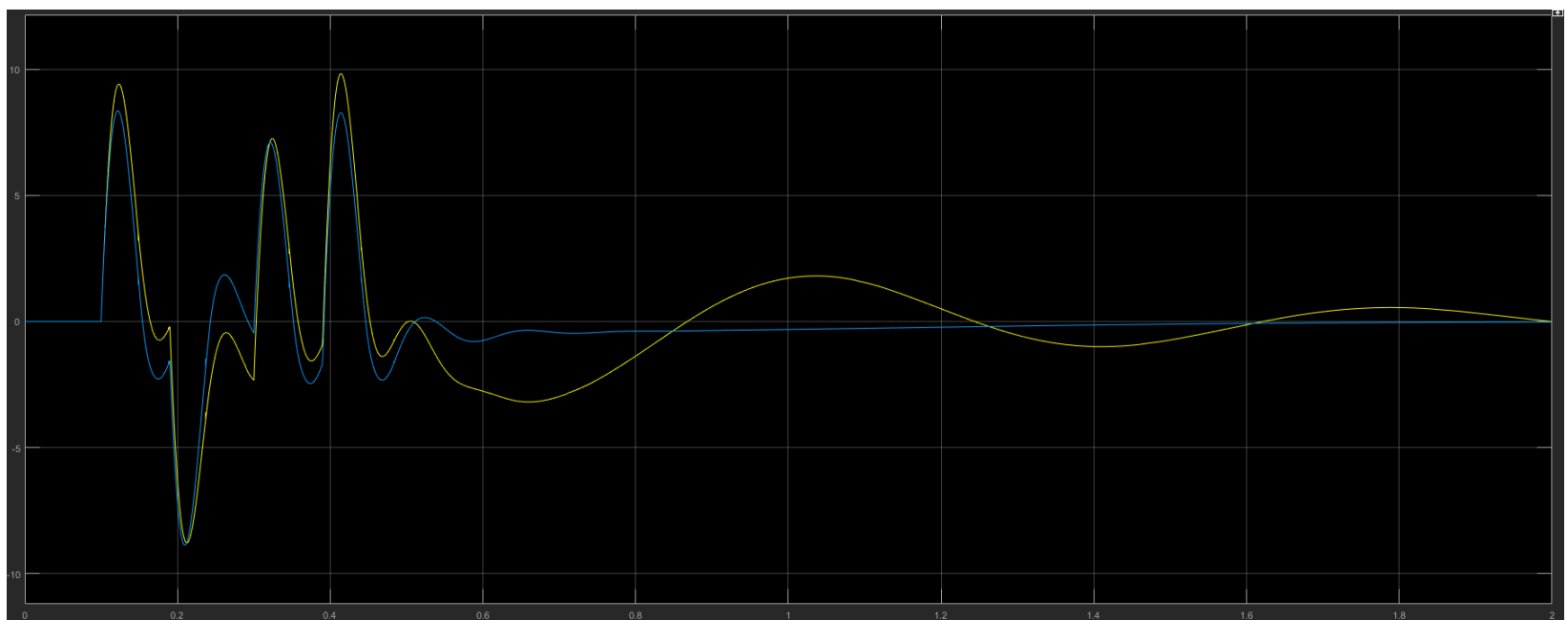
Σχήμα 5.4.18: Δράση του ελεγκτή για το 1^ο σετ παραμέτρων



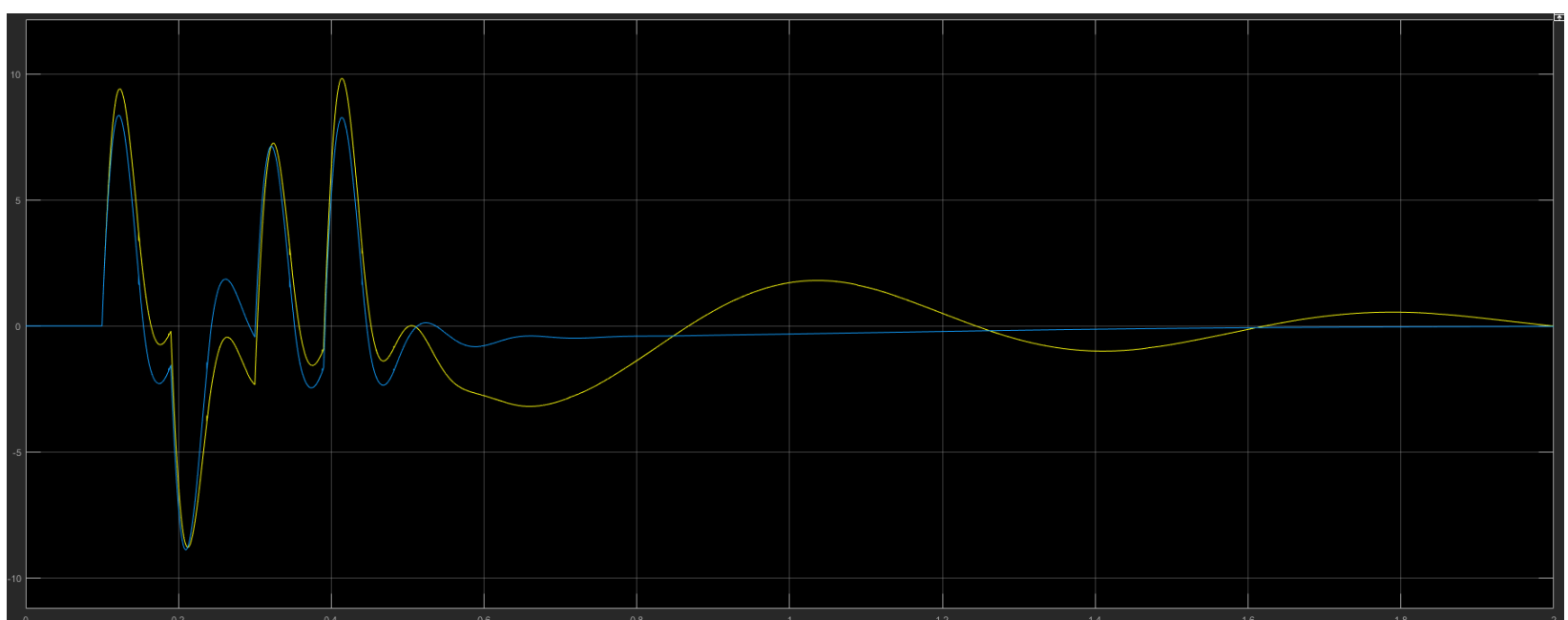
Σχήμα 5.4.19: Δράση του ελεγκτή για το 2^ο σετ παραμέτρων



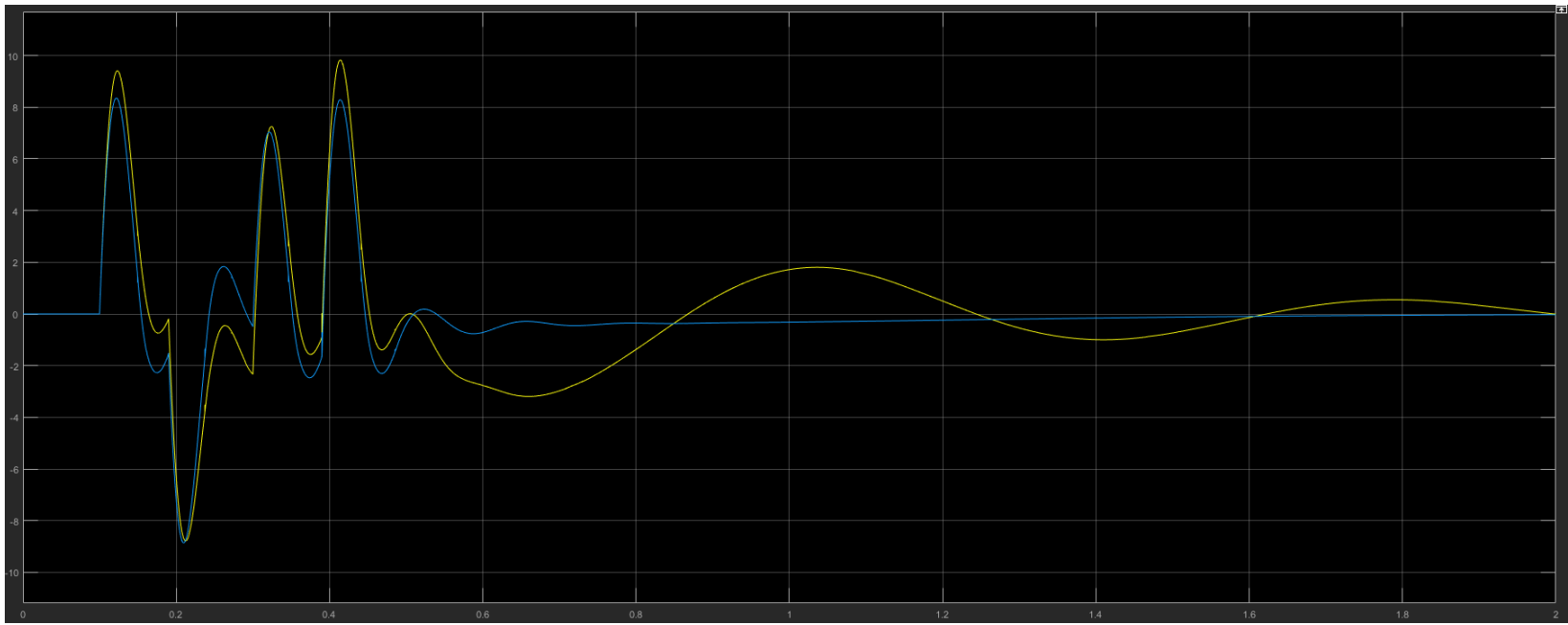
Σχήμα 5.4.20: Δράση του ελεγκτή για το 3^ο σετ παραμέτρων



Σχήμα 5.4.21: Καμπόλες επιτάχυνσης αμαξώματος παθητικής και ενεργής ανάρτησης σε κοινό διάγραμμα - 1^ο σετ παραμέτρων



Σχήμα 5.4.22: Καμπόλες επιτάχυνσης αμαξώματος παθητικής και ενεργής ανάρτησης σε κοινό διάγραμμα - 2^ο σετ παραμέτρων



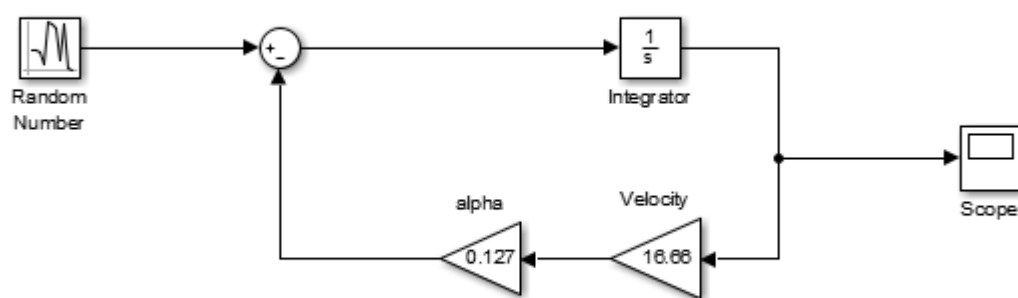
Σχήμα 5.4.23: Καμπύλες επιτάχυνσης αμαξώματος παθητικής και ενεργής ανάρτησης σε κοινό διάγραμμα - 3^ο σετ παραμέτρων

- Παρατηρώντας τα 6 διαγράμματα, φαίνεται η βελτίωση ανάμεσα στην παθητική ανάρτηση και την ενεργή αλλά και πάλι δεν ξεχωρίζουν έντονα οι διαφορές ανάμεσα στις 3 διαφορετικές εναρμονίσεις του ελεγκτή για την ενεργή ανάρτηση. Μπορούμε να τις αντιληφθούμε όμως εάν κοιτάξουμε τα αποτελέσματα στον πίνακα 5.4.3. Τα χαρακτηριστικά της ενεργής ανάρτησης και για τα 3 σετ παραμέτρων είναι εμφανώς καλύτερα συγκριτικά με την παθητική ανάρτηση. Προχωρώντας από το 1^ο σετ προς το 3^ο, σχεδόν όλα τα χαρακτηριστικά της καμπύλης βελτιώνονται και κυρίως το SSE, που είναι και ο κύριος παράγοντας αξιολόγησης για την εναρμόνιση του ελεγκτή. Αυτά που δεν βελτιώνονται είναι το μέγιστο το οποίο αυξάνεται ελάχιστα και ο χρόνος αποκατάστασης που στο 3^ο σετ παραμέτρων είναι λίγο μεγαλύτερος από αυτόν του 2^{ου} σετ. Παρόλα αυτά, επειδή και οι μεταβολές δεν είναι και τόσο μεγάλες και επειδή υπερσχύει ο παράγοντας SSE θα επιλέξουμε ως καλύτερη εναρμόνιση το 3^ο σετ παραμέτρων του ελεγκτή.

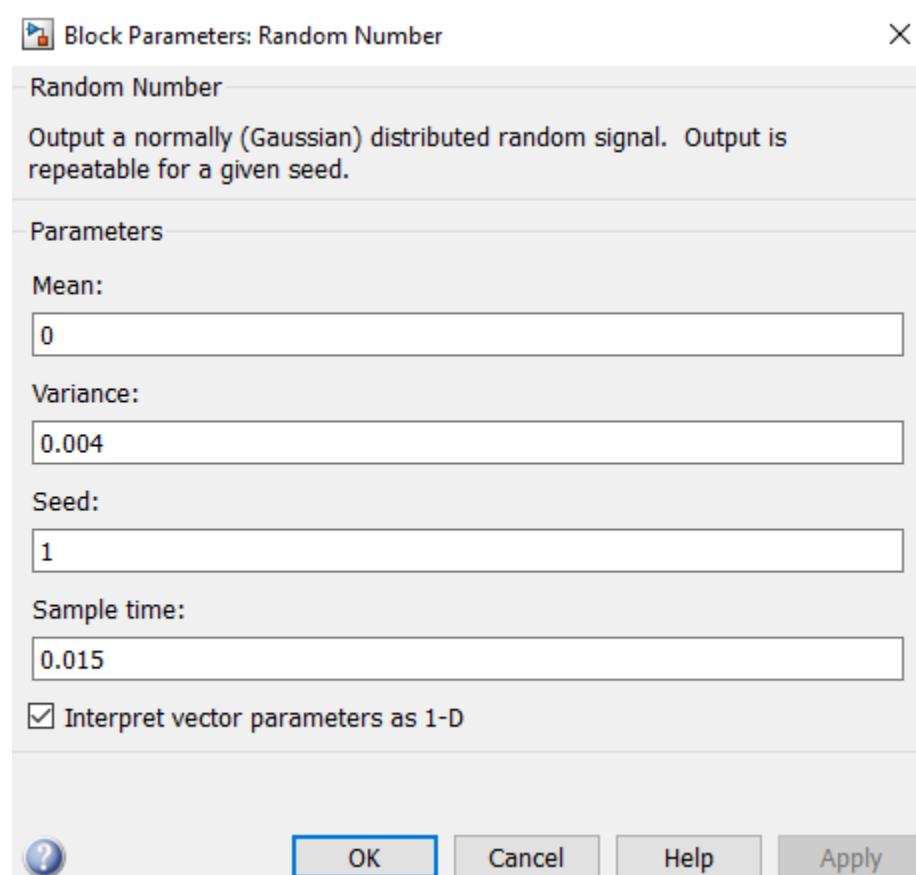
5.5 Τυχαίο προφίλ δρόμου

Επειδή, σε πραγματικές συνθήκες, το προφίλ ενός δρόμου δεν είναι τόσο ιδανικό όσο παρουσιάζεται στις 3 περιπτώσεις που μελετήσαμε, προσπαθήσαμε να εισαγάγουμε στο μοντέλο ένα τυχαίο προφίλ δρόμου^{[32],[33]}. Αυτό επιτυγχάνεται στο simulink, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5.1, με τη χρήση, αρχικά, μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών, η οποία παράγει αριθμούς με επιλεγμένη συχνότητα αλλά και επιλεγμένο εύρος αριθμών που καθορίζει στη συνέχεια την ποιότητα του προφίλ του δρόμου (σχήμα 5.5.2). Έπειτα η γεννήτρια συνδέεται με το block «integrator»(παράμετρος ολοκληρώματος) και συνεχίζει με την ανατροφοδότηση που αποτελείται από δύο ενισχύσεις σε σειρά, μία που εκφράζει την ταχύτητα που κινείται το όχημα σε m/s και μία που αφορά την παράμετρο «α» με την τιμή 0.127 rad/m σταθερά για οποιαδήποτε κατηγορία ποιότητας του δρόμου.

Αφού ελέγξαμε, βασισμένοι σε παρόμοια αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία^[34],ότι το σύστημα που εξάγει ένα προφίλ δρόμου για 10 χρονικές μονάδες, λειτουργεί σωστά, το εισήγαμε στο μοντέλο του ενός τετάρτου(σχήμα 5.5.3) και, στη συνέχεια, προχωρήσαμε στην εναρμόνιση του ελεγκτή. Στη προσπάθειά μας να εναρμονίσουμε τις παραμέτρους του ελεγκτή για ένα τυχαίο προφίλ δρόμου, κρατήσαμε σταθερή την ίδια τυχαία ακολουθία αριθμών που παράγει η γεννήτρια, ώστε κάθε φορά να έχουμε να κάνουμε με το ίδιο προφίλ δρόμου το οποίο αρχικώς είχε παραχθεί τυχαία.



Σχήμα 5.5.1: Μοντέλο γεννήτριας τυχαίου προφίλ δρόμου



Σχήμα 5.5.2: Παράμετροι block «Random Number»

Η επιλογή «mean» δεν επηρεάζει τη μορφή του προφίλ δρόμου που δημιουργείται και γι' αυτό το λόγο το αφήσαμε όπως είχε στην τιμή μηδέν. Το «variance» αφορά την ποιότητα του δρόμου βάσει του πίνακα 5.5.1, στη στήλη με τα «σ». Το «seed» κρατάει για κάθε τιμή που του προσδίδουν την ίδια ακολουθία τυχαίων αριθμών και τέλος η τιμή του «sample time» καθορίζει κάθε πόσες χρονικές μονάδες θα παράγεται μια τυχαία τιμή από τη γεννήτρια.

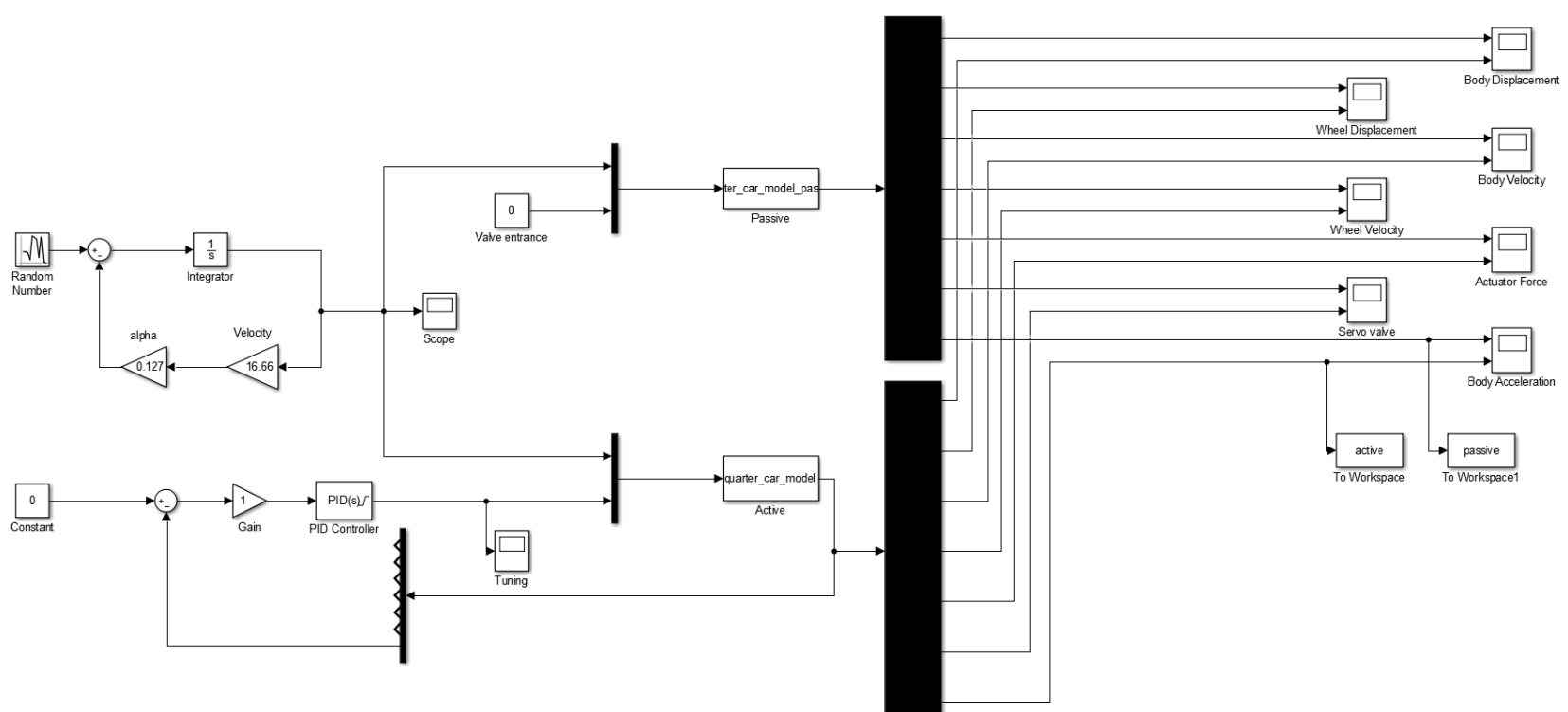
Ποιότητα-Κατηγορία δρόμου	Παράμετρος σ (10^{-3} m)	Παράμετρος α (rad/m)
A (πολύ καλή)	2	0.127
B (καλή)	4	0.127
Γ (μέτρια)	8	0.127
Δ (κακή)	16	0.127
E (πολύ κακή)	32	0.127

Πίνακας 5.5.1: Πίνακας παραμέτρων για κάθε κατηγορία δρόμου

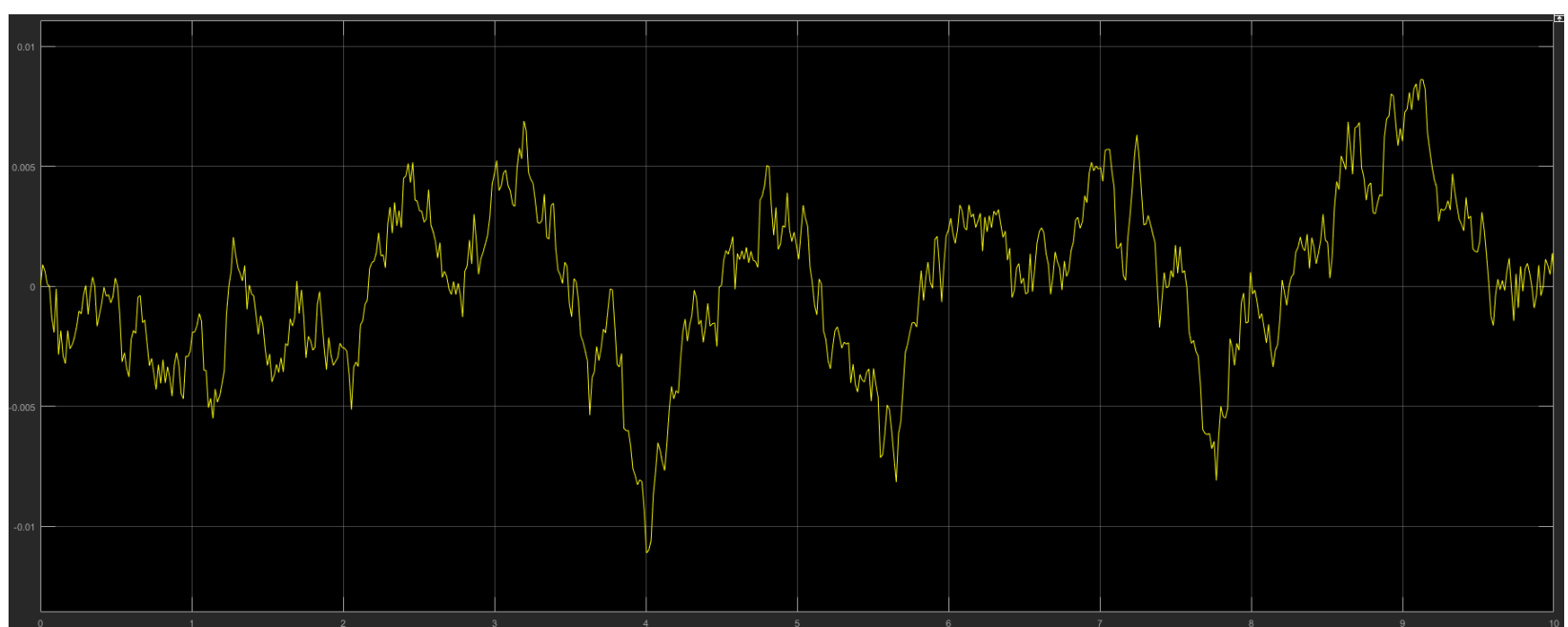
Στο μοντέλο μας επιλέξαμε προφίλ δρόμου B κατηγορίας, δηλαδή $\sigma = 0.004$ m και ταχύτητα του οχήματος 60 km/h, εκφρασμένη ως 16.66 m/s για να υπάρχει σωστή αντιστοιχία των μονάδων. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις προφίλ δρόμων, έτσι και εδώ θα απεικονίσουμε στο ίδιο διάγραμμα την παθητική ανάρτηση με την

ενεργή. Στο σχήμα 5.5.4 φαίνεται το προφίλ του δρόμου για το οποίο θα μελετήσουμε την ανάρτηση του ενός τετάρτου.

Ο πίνακας 5.5.2 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά του διαγράμματος της επιτάχυνσης του αμαξώματος για παθητική και ενεργή ανάρτηση. Αναζητώντας τη μικρότερη δυνατή τιμή, η παράμετρος του άθροισματος των τετραγωνικών σφαλμάτων (ή αλλιώς SSE) θα αποτελέσει το κυριότερο κριτήριο αξιολόγησης καταλληλότητας του σετ των παραμέτρων του ελεγκτή, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη και την εικόνα των διαγραμμάτων. Όμως, επειδή το άθροισμα αυτό προκύπτει από τιμές για τις χρονικές στιγμές που κατέγραψε το matlab, για να μπορούμε να συγκρίνουμε πιο αντικειμενικά, θα διαιρούμε το άθροισμα που θα προκύπτει με τον αριθμό των χρονικών στιγμών που μετρήθηκαν.



Σχήμα 5.5.3: Μοντέλο στο simulink για τυχαίο προφίλ δρόμου



Σχήμα 5.5.4: Το προφίλ του τυχαίου δρόμου

Στον πίνακα 5.5.2 παρουσιάζονται πέρα από την παθητική, τα αποτελέσματα για 3 σετ παραμέτρων του ελεγκτή. Το καθένα από αυτά έχει αναλογική δράση διαφορετικής τάξης μεγέθους, παρουσιάζοντας όλο και μεγαλύτερη βελτίωση στις καμπύλες, αυξάνοντας την τάξη της αναλογικής ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα, στον πίνακα

παρουσιάζεται ο καλύτερος συνδυασμός παραμέτρων, με βάση το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος κάθε χρονικής στιγμής, για κάθε τάξη μεγέθους της αναλογικής ενίσχυσης.

Το 1^ο σετ αφορά αναλογική ενίσχυση τάξεως 10^{-2} , το 2^ο τάξεως 10^{-1} και το 3^ο τάξεως 10^0 . Για πιο μεγάλη ενίσχυση, η επιτάχυνση του αμαξώματος έπανε πολύ μεγάλες τιμές, μη επιθυμητές και για το λόγο αυτό σταματήσαμε σε τιμή τάξεως 10^0 , η οποία και πάλι δημιουργεί κάποιο μη επιθυμητό χαρακτηριστικό στην καμπύλη και θα σχολιαστεί στο τέλος του υποκεφαλαίου.

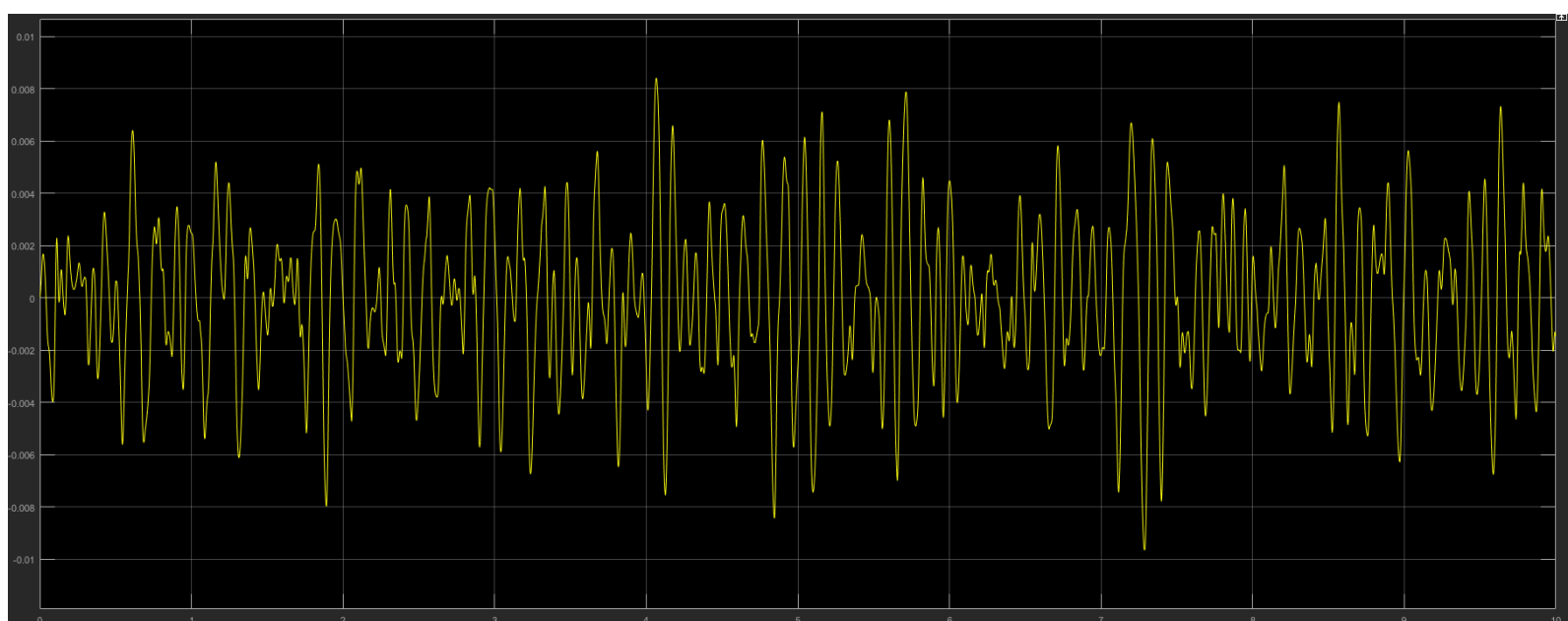
Οι ενισχύσεις της ολοκληρωτικής και διαφορικής δράσης παραμένουν σχεδόν σταθερές, μιας και η επιρροή τους είναι μηδαμινή, ειδικά αν τη συγκρίνουμε με την επιρροή της αναλογικής δράσης. Η σταθερά φιλτραρίσματος είναι σταθερή και στα 3 σετ παραμέτρων. Στα διαγράμματα η κίτρινη καμπύλη περιγράφει την παθητική ανάρτηση και η μπλε περιγράφει την ενεργή.

Χαρακτηριστικά	Παθητική	Ενεργή Νο1	Ενεργή Νο2	Ενεργή Νο3
K_p	-	-0.015129104338121	-0.3512910466239211	-3.542100552712
K_i	-	-8.13530451427161x10 ⁻⁵	-9.11530459427383x10 ⁻⁷	-8.83530459427383x10 ⁻⁶
K_d	-	1.04820005534209x10 ⁻⁵	1.08820005532809x10 ⁻⁶	1.16620005532809x10 ⁻⁶
N	-	0.14659678554145	0.14659678554145	0.14659678554145
Μέγιστη τιμή	0.7598 [m/s ²]	0.5560[m/s ²]	0.8037[m/s ²]	0.7369[m/s ²]
Ελάχιστη τιμή	-0.8253 [m/s ²]	-0.6383[m/s ²]	-0.7079 [m/s ²]	-0.6775[m/s ²]
Overshoot	1929.3	470.3647	2383.4	14705
Undershoot	1868	496.8380	2819.6	16103
Βέλτιστη τιμή	0.8253[m/s ²]	0.6383[m/s ²]	0.8037[m/s ²]	0.7369[m/s ²]
Χρόνος βέλτιστης τιμής	7.12 [χρον. μον.]	7.2864 [χρον. μον.]	5.7039 [χρον. μον.]	5.6968 [χρον. μον.]
SSE	0.0686	0.0367	0.0024	0.001

Πίνακας 5.5.2: Χαρακτηριστικά καμπυλών μετατόπισης του αμαξώματος

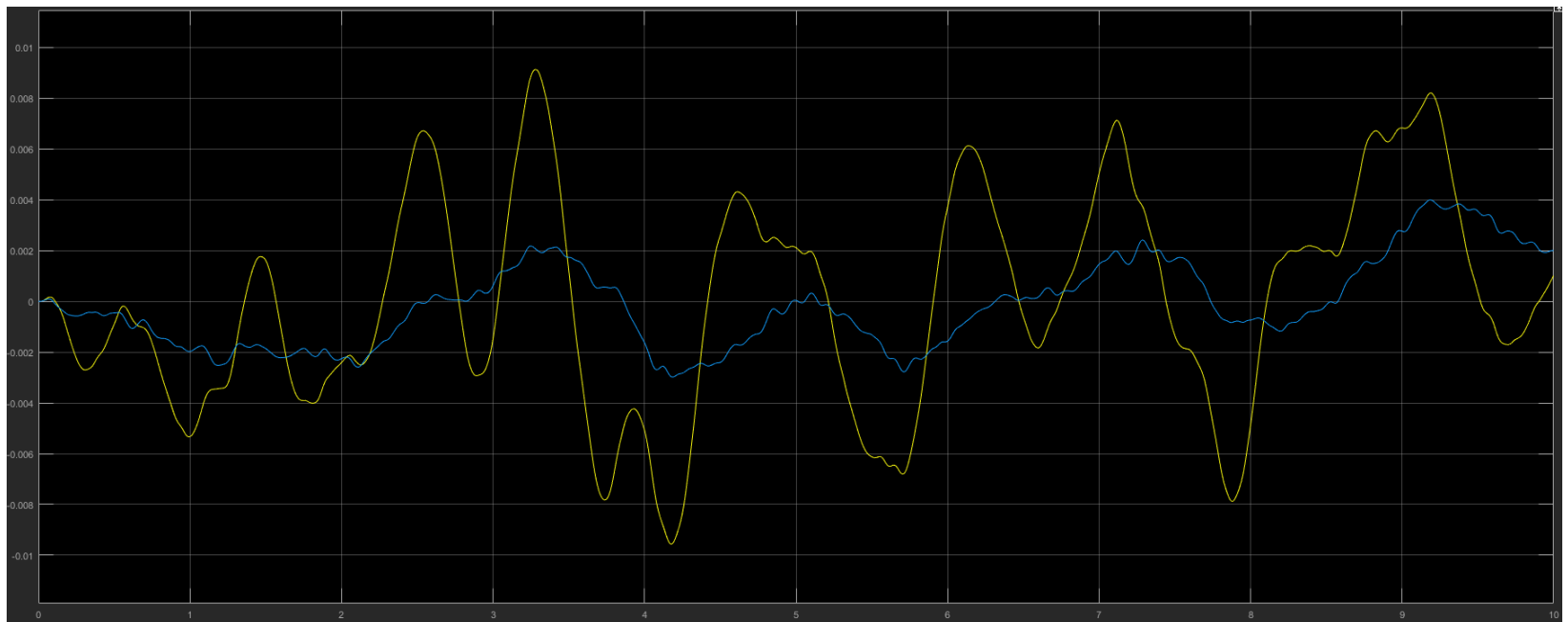
Σετ παραμέτρων Νο1 -Αναλογική ενίσχυση τάξεως 10^{-2}

Το διάγραμμα δράσεως του ελεγκτή είναι στο σχήμα 5.5.5 .

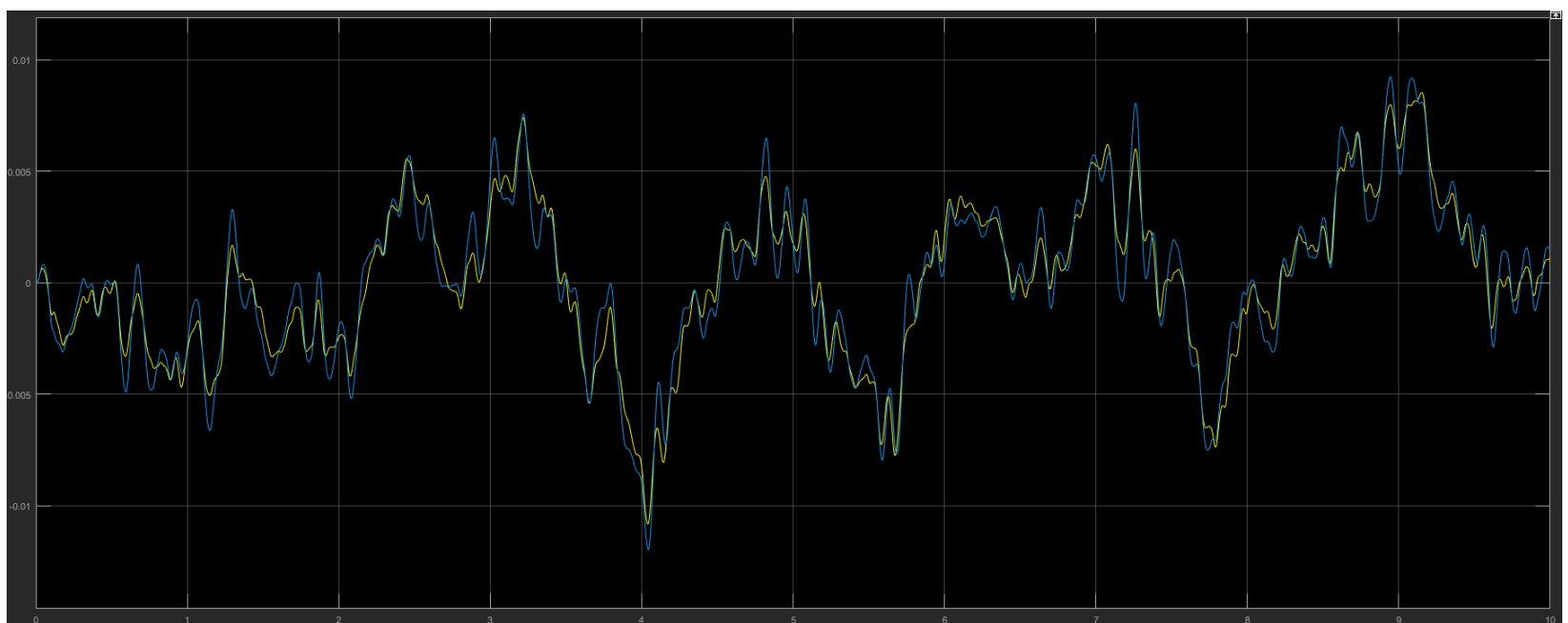


Σχήμα 5.5.5: Δράση του ελεγκτή για το 1^ο σετ παραμέτρων

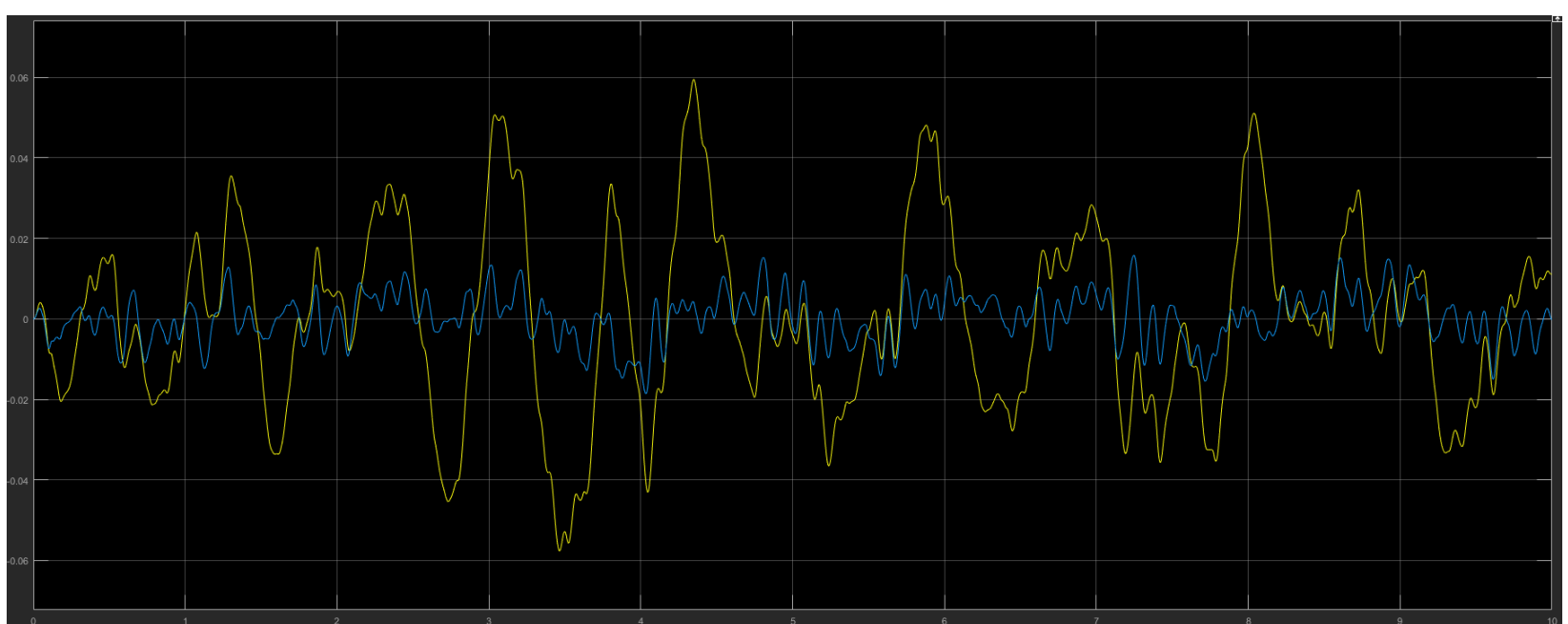
Οι καμπύλες παθητικής - ενεργής σε κοινά διαγράμματα για τις μεταβλητές του προβλήματος παρουσιάζονται στα σχήματα 5.5.6 - 5.5.12 .



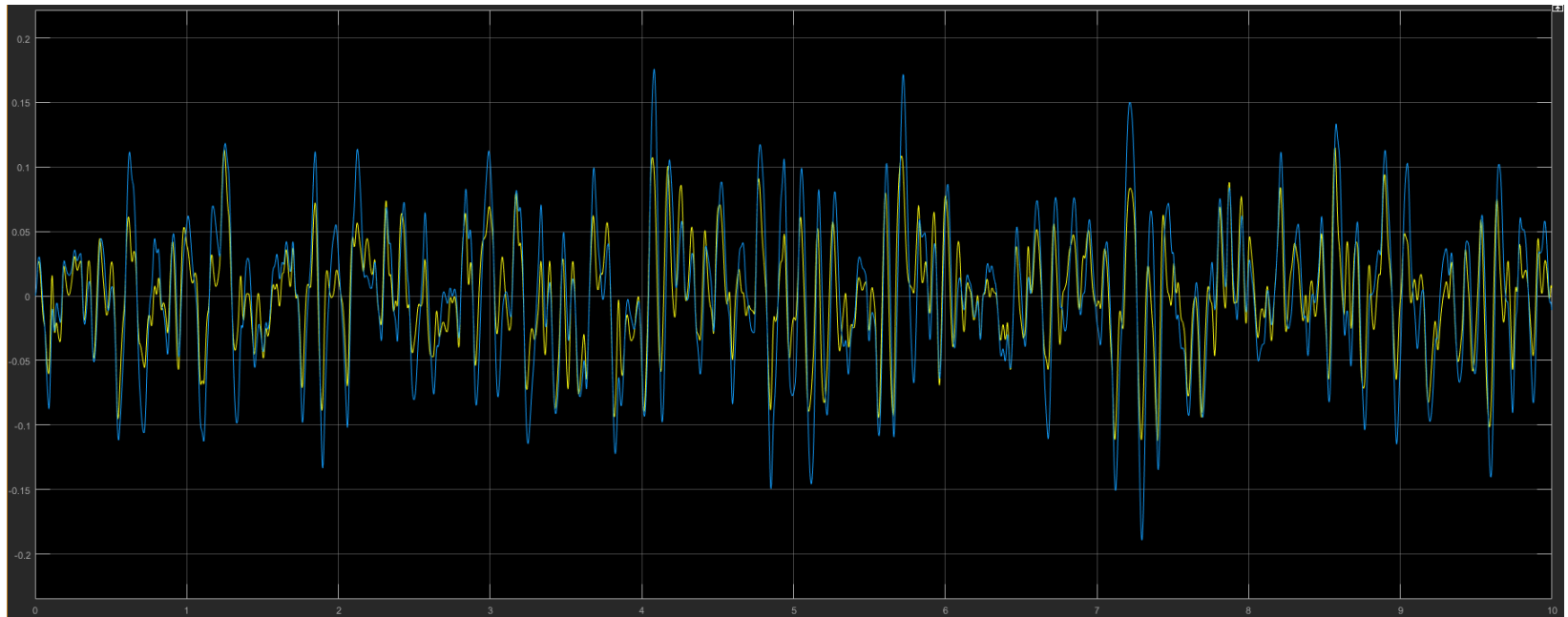
Σχήμα 5.5.6: Καμπύλες μετατοπίσεων αμαξώματος σε κοινό διάγραμμα



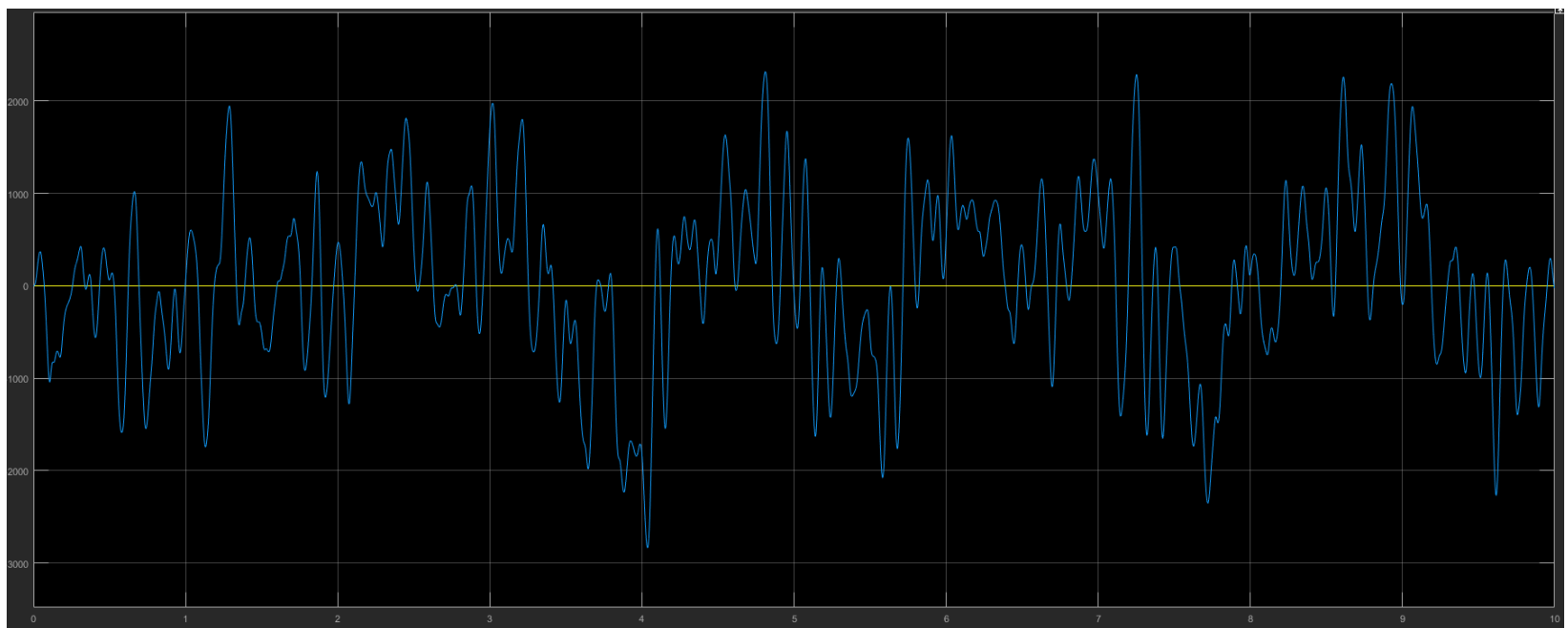
Σχήμα 5.5.7: Καμπύλες μετατοπίσεων τροχού σε κοινό διάγραμμα



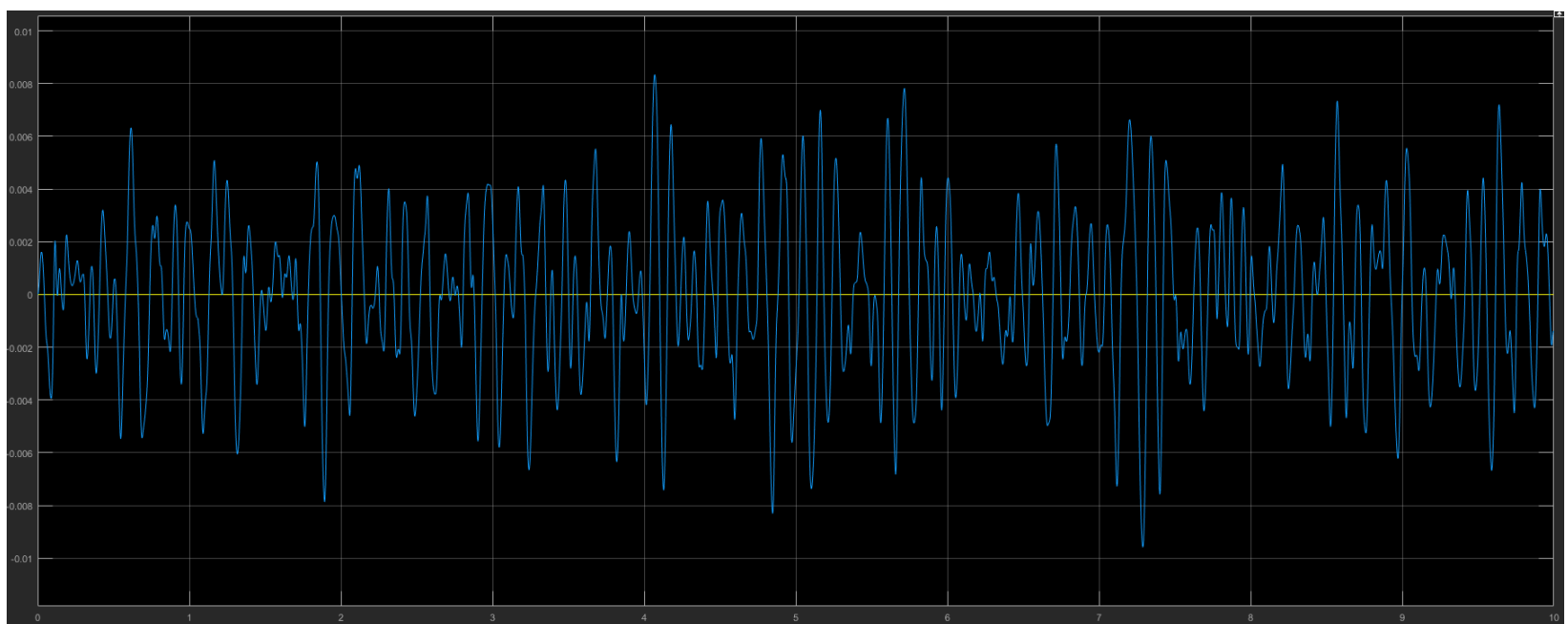
Σχήμα 5.5.8: Καμπύλες ταχυτήτων αμαξώματος σε κοινό διάγραμμα



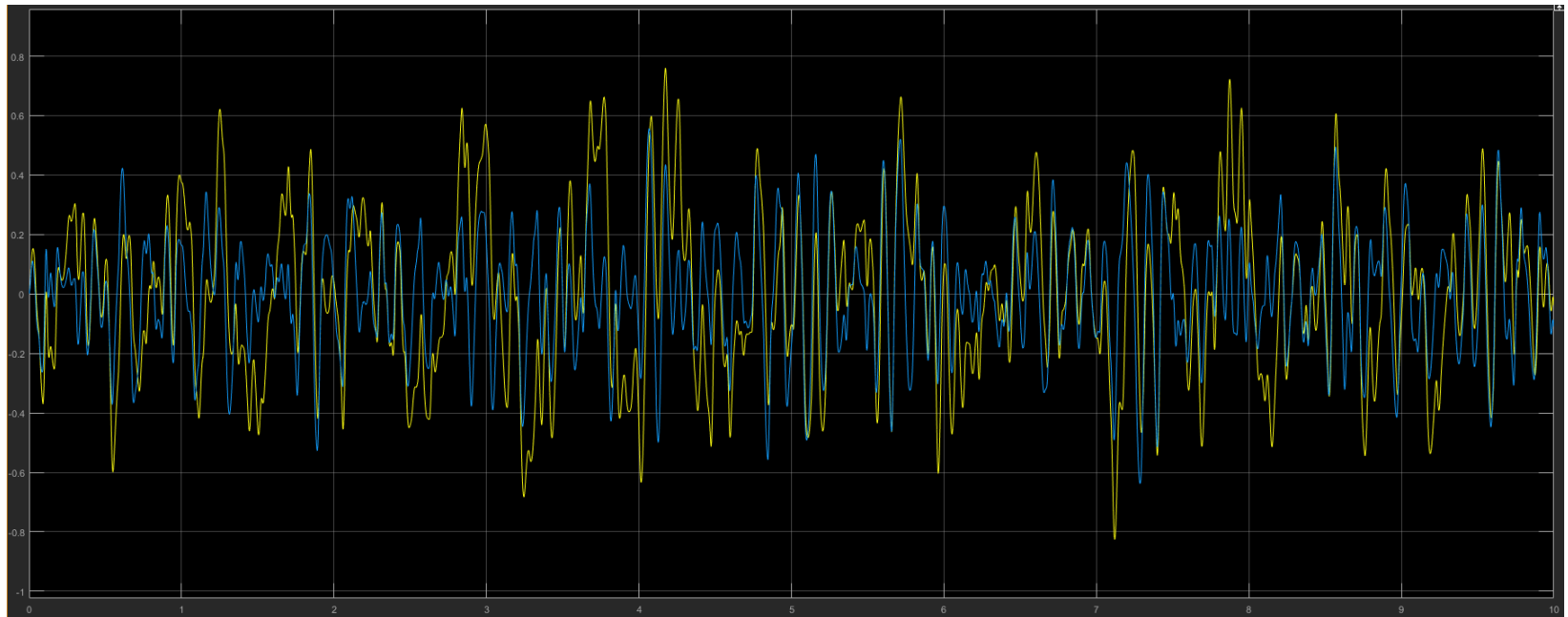
Σχήμα 5.5.9: Καμπύλες ταχυτήτων τροχού σε κοινό διάγραμμα



Σχήμα 5.5.10: Καμπύλες δύναμης ενεργοποιητή σε κοινό διάγραμμα



Σχήμα 5.5.11: Καμπύλες μετατοπίσεων βαλβίδας σε κοινό διάγραμμα

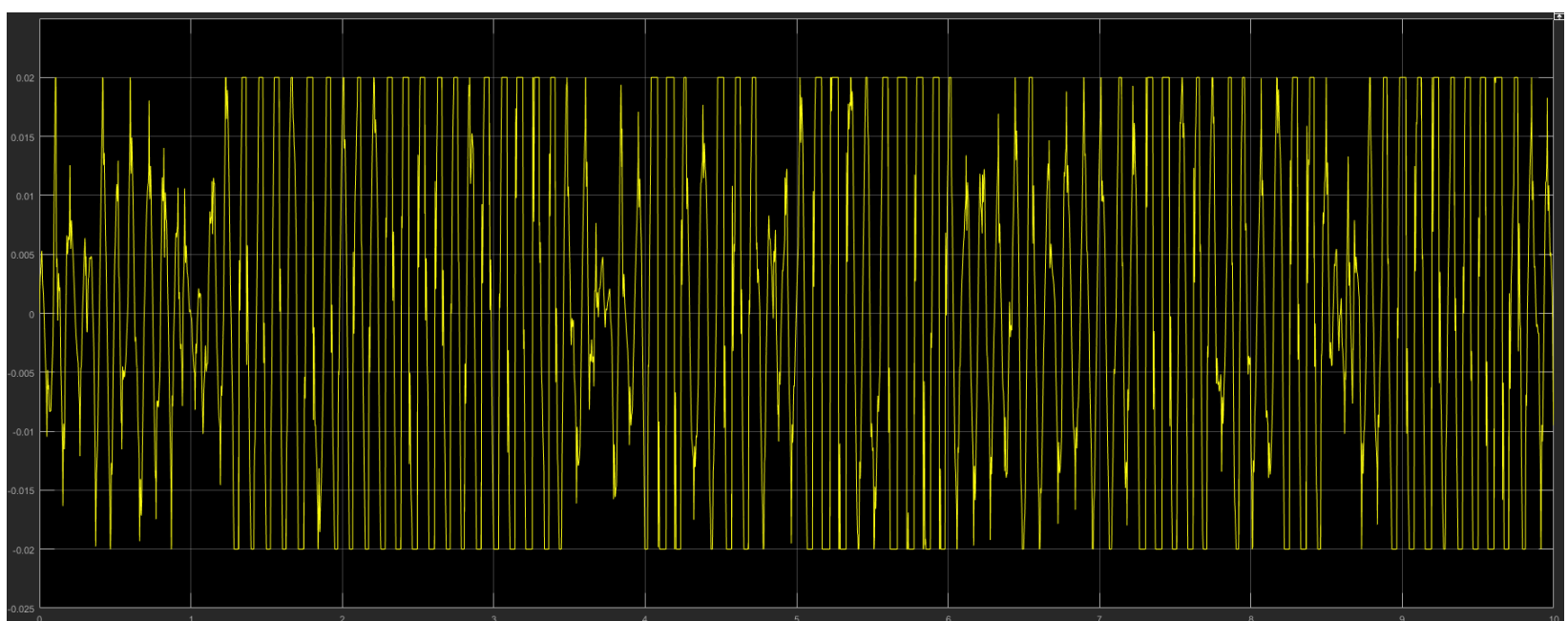


Σχήμα 5.5.12: Καμπόλες επιταχύνσεων αμαξώματος σε κοινό διάγραμμα

- Φαίνεται από τις καμπόλες των διαγραμμάτων πως ο ελεγκτής δρα θετικά στο σύστημα, διότι η ενεργή ανάρτηση που αφορά τα μεγέθη του αμαξώματος παρουσιάζει καλύτερη απόκριση από την παθητική, ενώ επίσης δεν παρατηρούνται περιεργές ακραίες τιμές και το overshoot - undershoot, βάσει του πίνακα 5.5.2, είναι σε χαμηλά επίπεδα. Οι καμπόλες της ενεργής ανάρτησης που αφορούν τον τροχό και σε αυτή την περίπτωση δεν παρουσιάζουν καλύτερη απόκριση συγκριτικά με την παθητική επιβεβαιώνοντας τον ισχυρισμό μας πως αυτό συμβαίνει λόγω του ότι ο ελεγκτής ρυθμίζεται σύμφωνα με την επιτάχυνση του αμαξώματος. Οι τιμές στις οποίες κυμαίνονται οι καμπόλες της δύναμης του ενεργοποιητή και της μετατόπισης της βαλβίδας είναι φυσιολογικές .

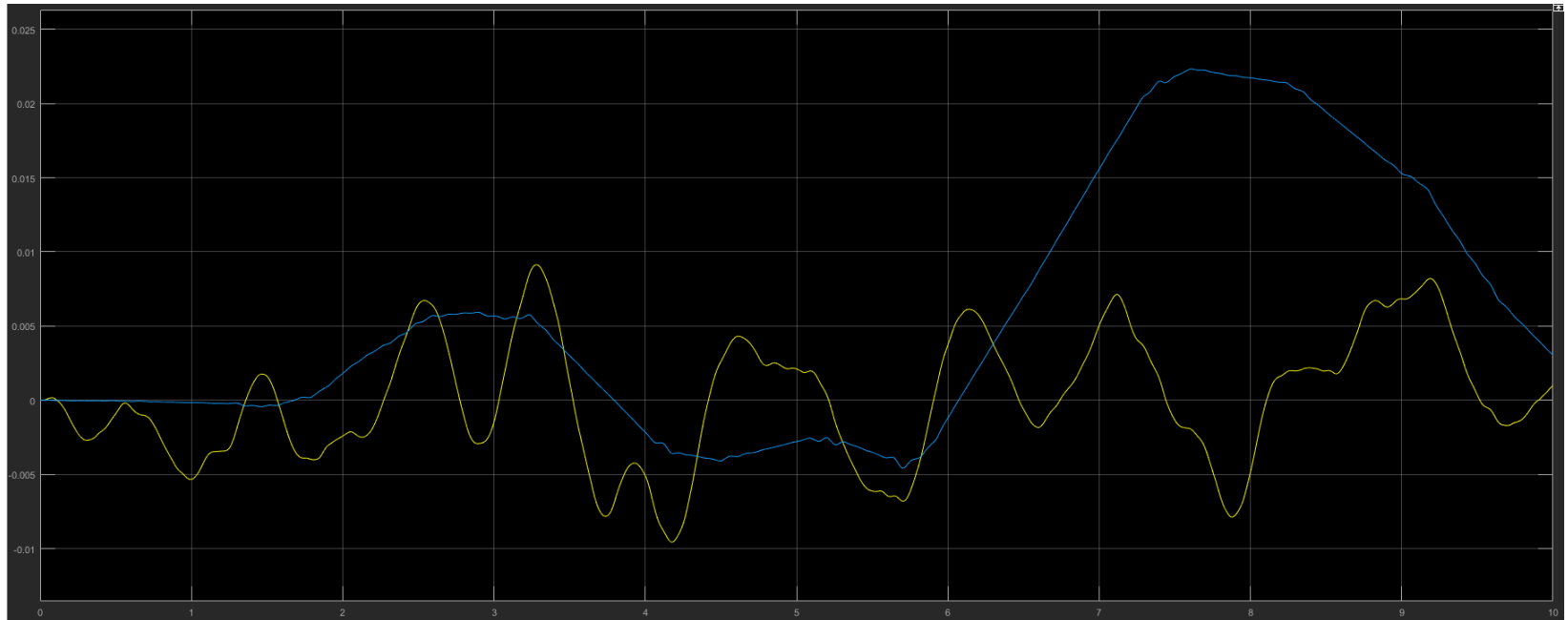
Σετ παραμέτρων No2 - Αναλογική ενίσχυση τάξεως 10^{-1}

Το διάγραμμα δράσεως του ελεγκτή για το σετ παραμέτρων No2 απεικονίζεται στο σχήμα 5.5.13 .

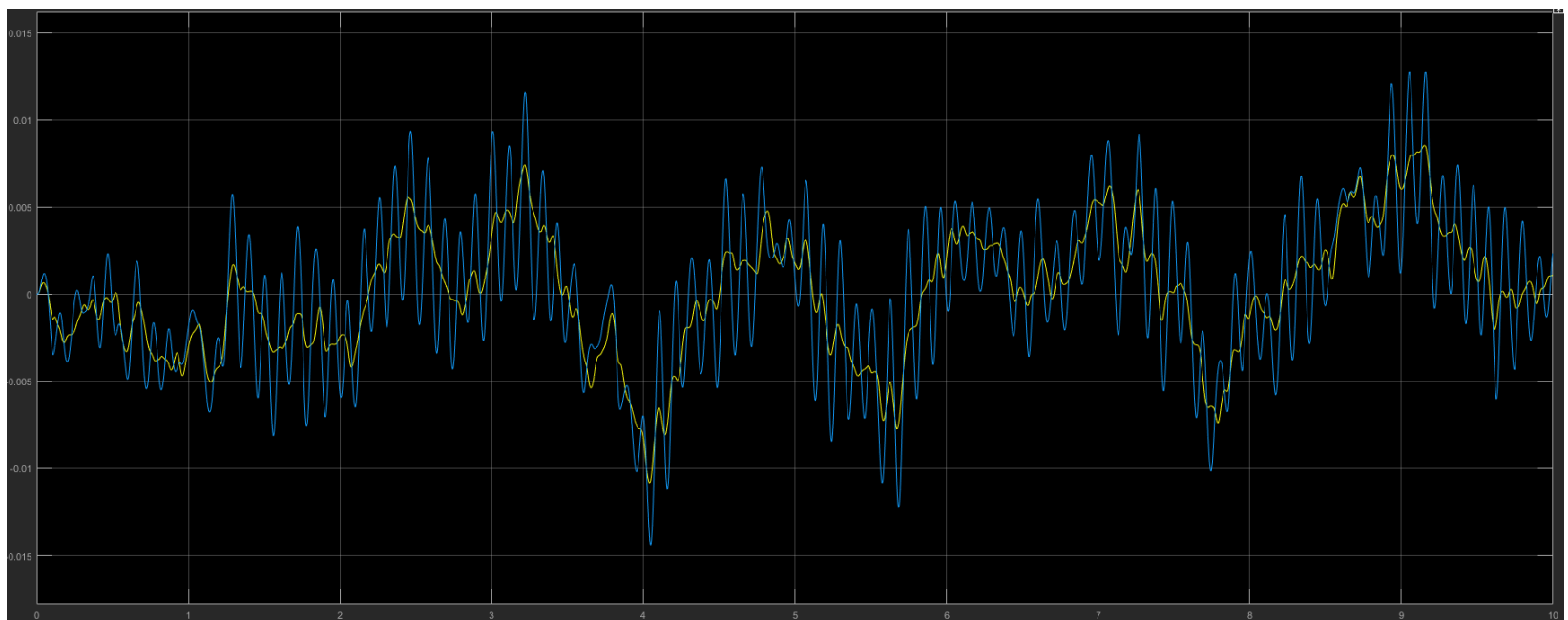


Σχήμα 5.5.13: Δράση ελεγκτή για το 2^ο σετ παραμέτρων

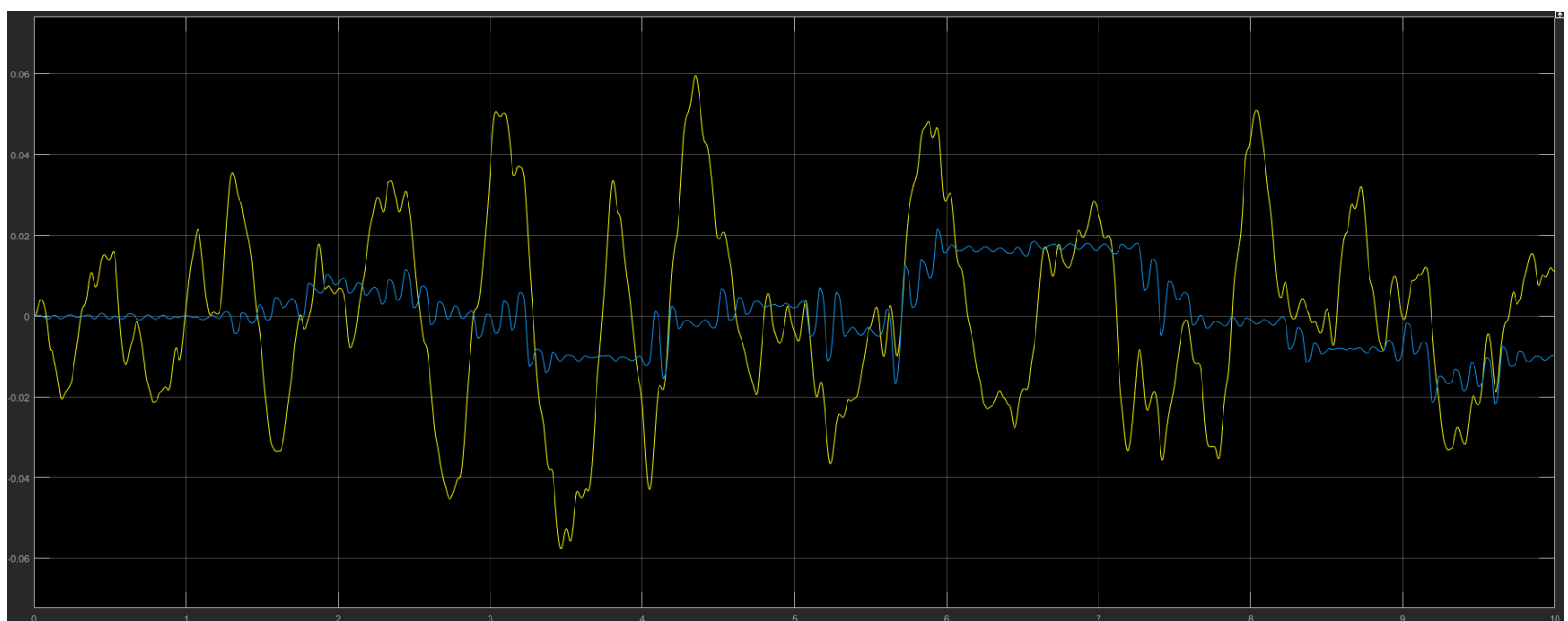
Οι καμπύλες παθητικής - ενεργής σε κοινό διάγραμμα παρουσιάζονται στα σχήματα 5.5.14 - 5.5.20.



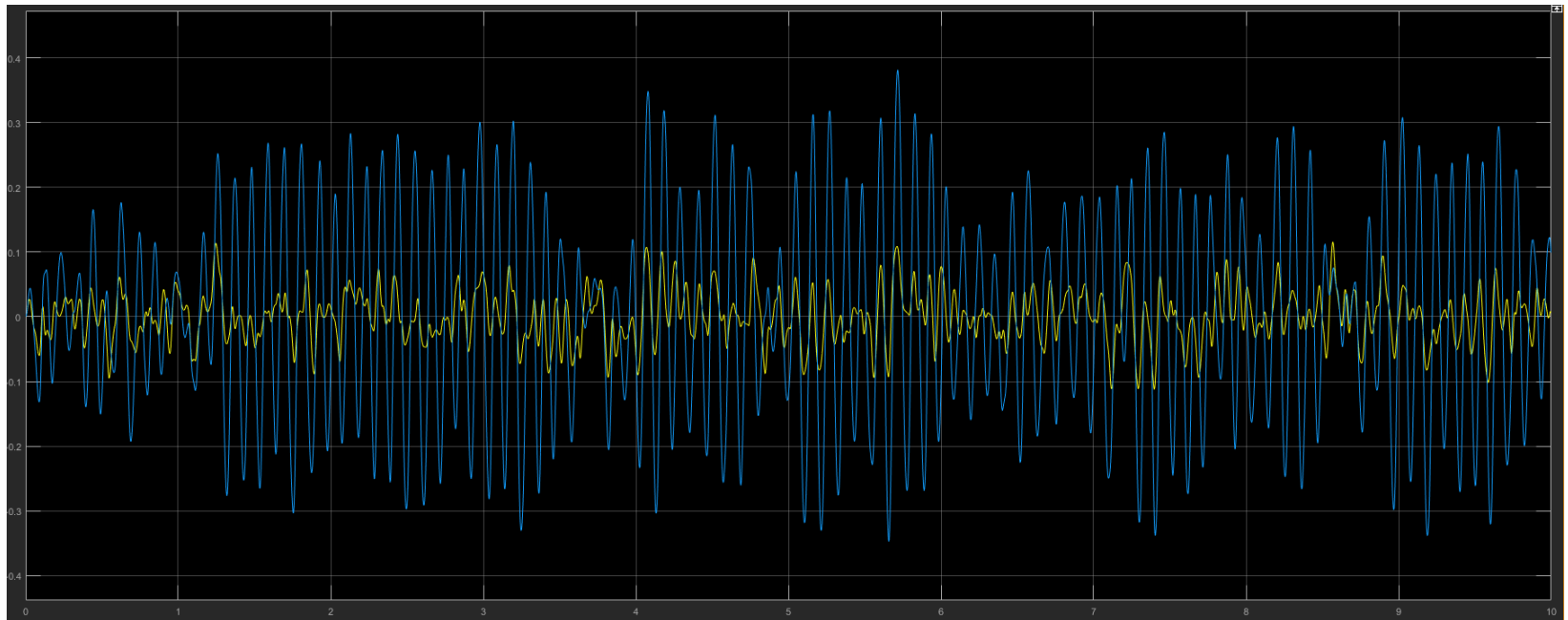
Σχήμα 5.5.14: Καμπύλες μετατοπίσεως αμαξώματος σε κοινό διάγραμμα



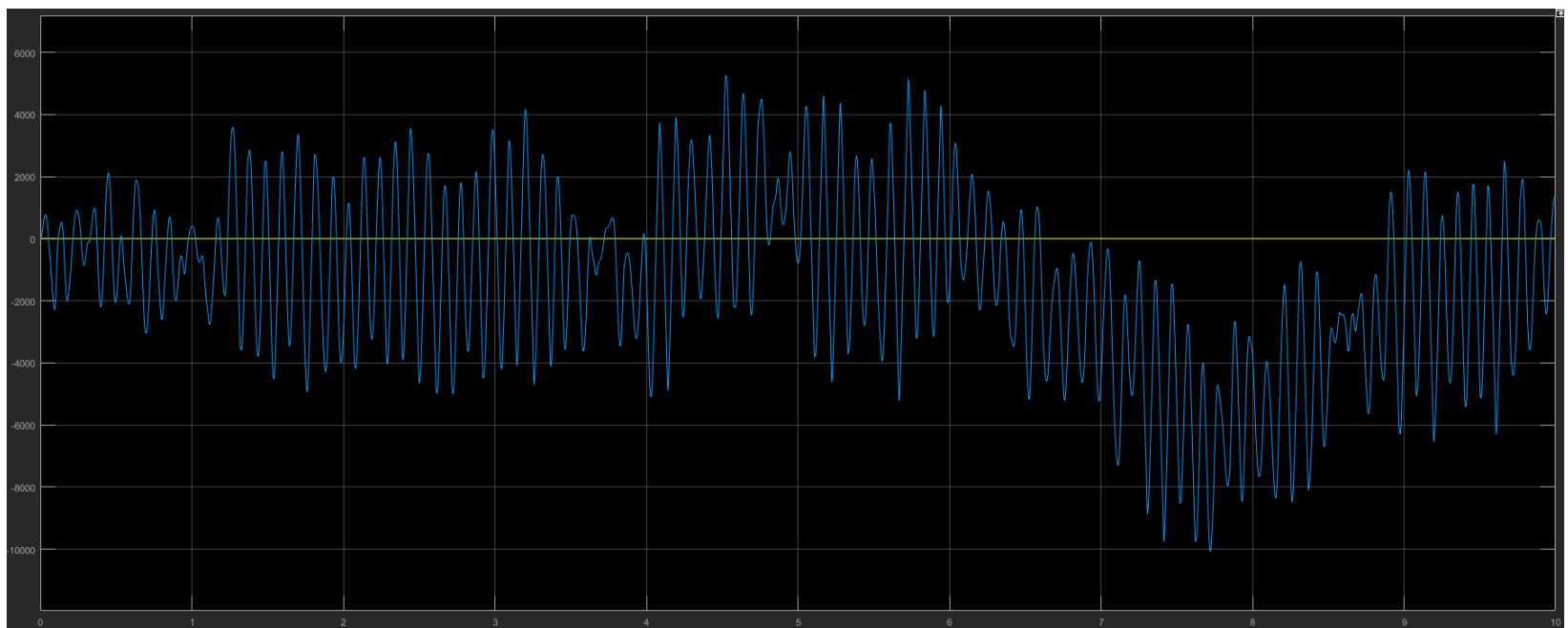
Σχήμα 5.5.15: Καμπύλες μετατοπίσεως τροχού σε κοινό διάγραμμα



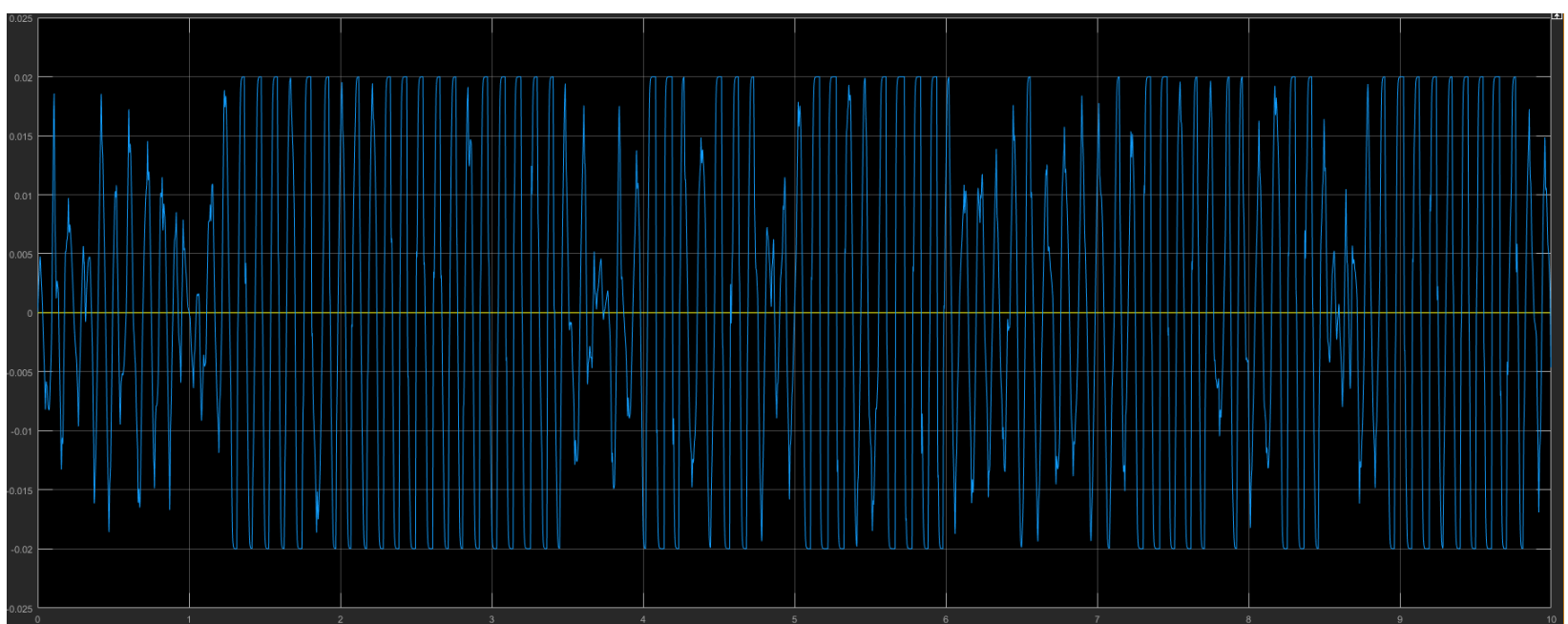
Σχήμα 5.5.16: Καμπύλες ταχυτήτων αμαξώματος σε κοινό διάγραμμα



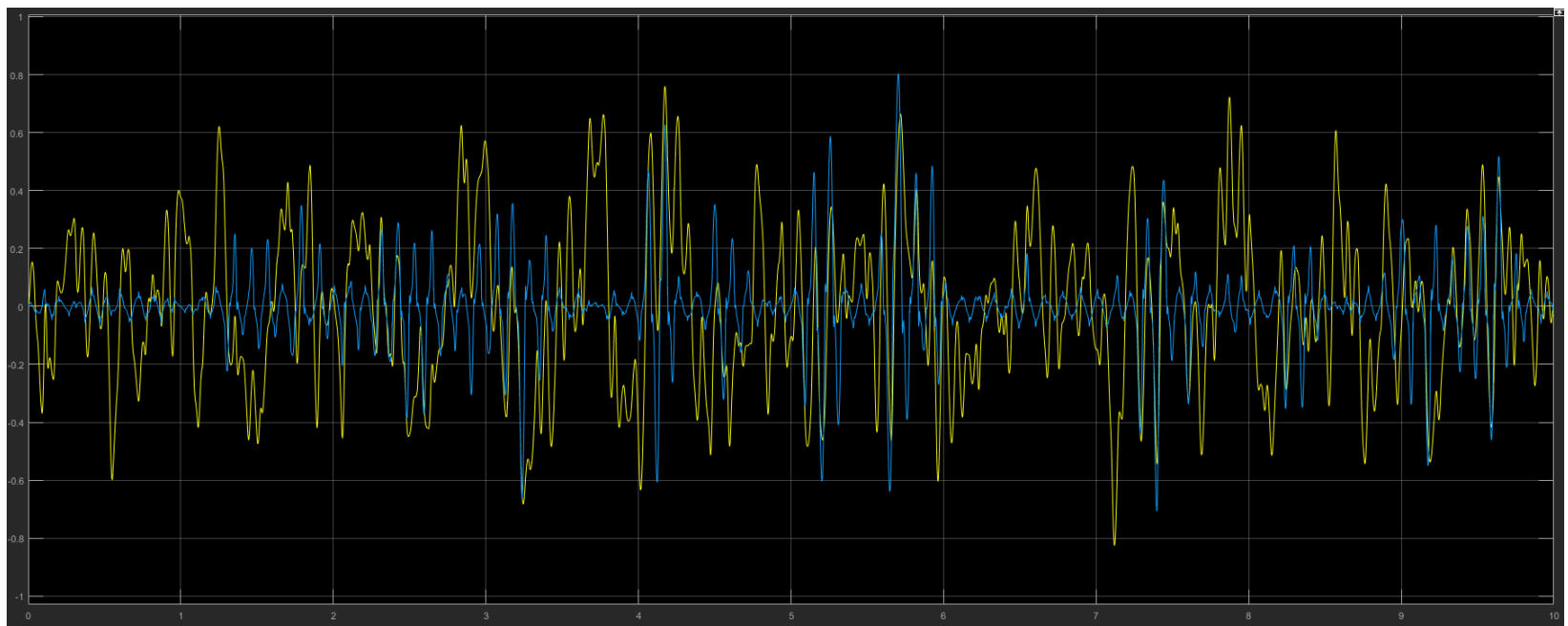
Σχήμα 5.5.17: Καμπόλες ταχυτήτων τροχού σε κοινό διάγραμμα



Σχήμα 5.5.18: Καμπόλες δυνάμεων ενεργοποιητή σε κοινό διάγραμμα



Σχήμα 5.5.19: Καμπόλες μετατοπίσεων βαλβίδας σε κοινό διάγραμμα

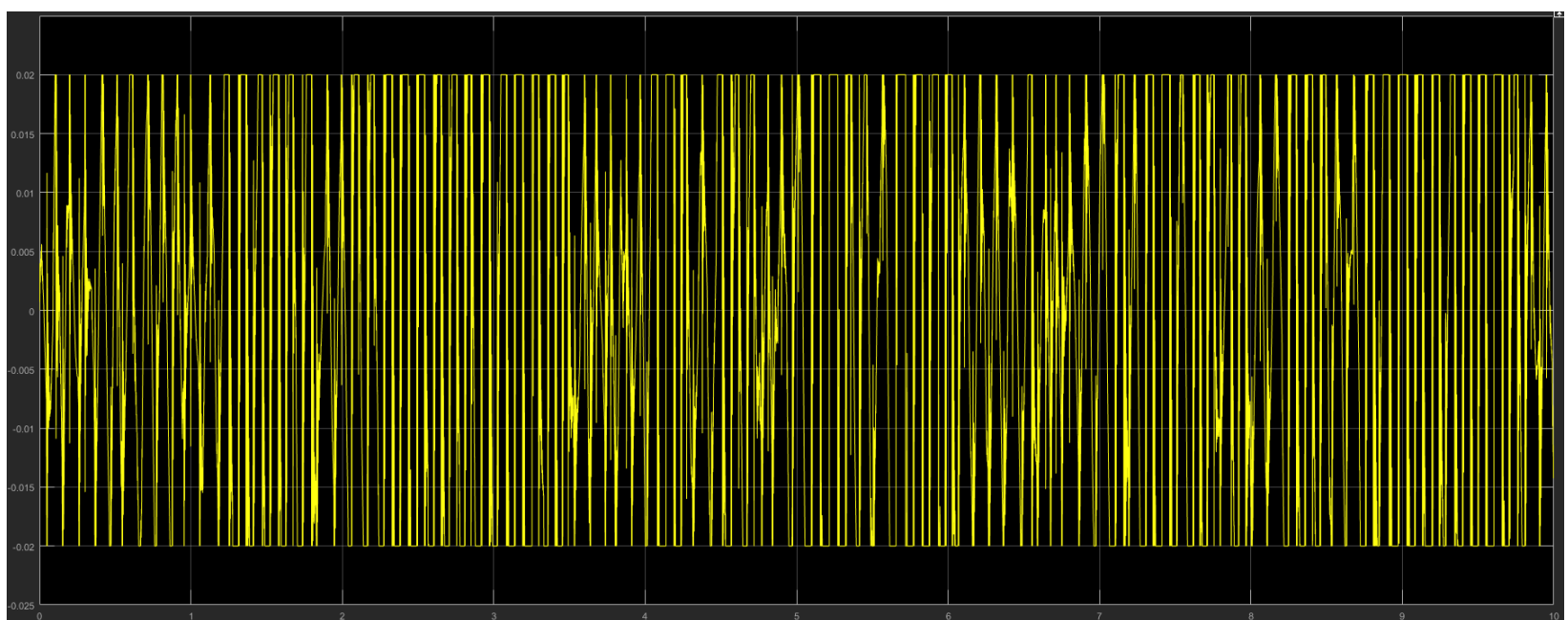


Σχήμα 5.5.20: Καμπύλες επιταχύνσεων αμαξώματος σε κοινό διάγραμμα

- Το 2^ο σετ παραμέτρων βελτιώνει ακόμα περισσότερο τις αποκρίσεις των καμπυλών που σχετίζονται με το αμάξωμα, συγκρίνοντας και τις τιμές των αθροισμάτων των τετραγώνων σφάλματος, αλλά και την εικόνα των διαγραμμάτων. Οι καμπύλες που σχετίζονται με τον τροχό, εξακολουθούν να μην επηρεάζονται από τον ελεγκτή. Οι τιμές που κυμαίνονται τα διαγράμματα της δύναμης του ενεργοποιητή και της μετατόπισης της βαλβίδας αυξήθηκαν, πράγμα λογικό αν αναλογιστούμε την εντονότερη επίδραση του αναλογικού κομματιού του ελεγκτή. Μεμονωμένα, το 2^ο σετ παραμέτρων παρουσιάζει και αυτό μικρά overshoot - undershoot καθώς και ομοιομορφία στις ακραίες τιμές των καμπυλών. Η χρονική στιγμή που παρουσιάζεται το μέγιστο διαφέρει από αυτή του 1^{ου} σετ παραμέτρων.

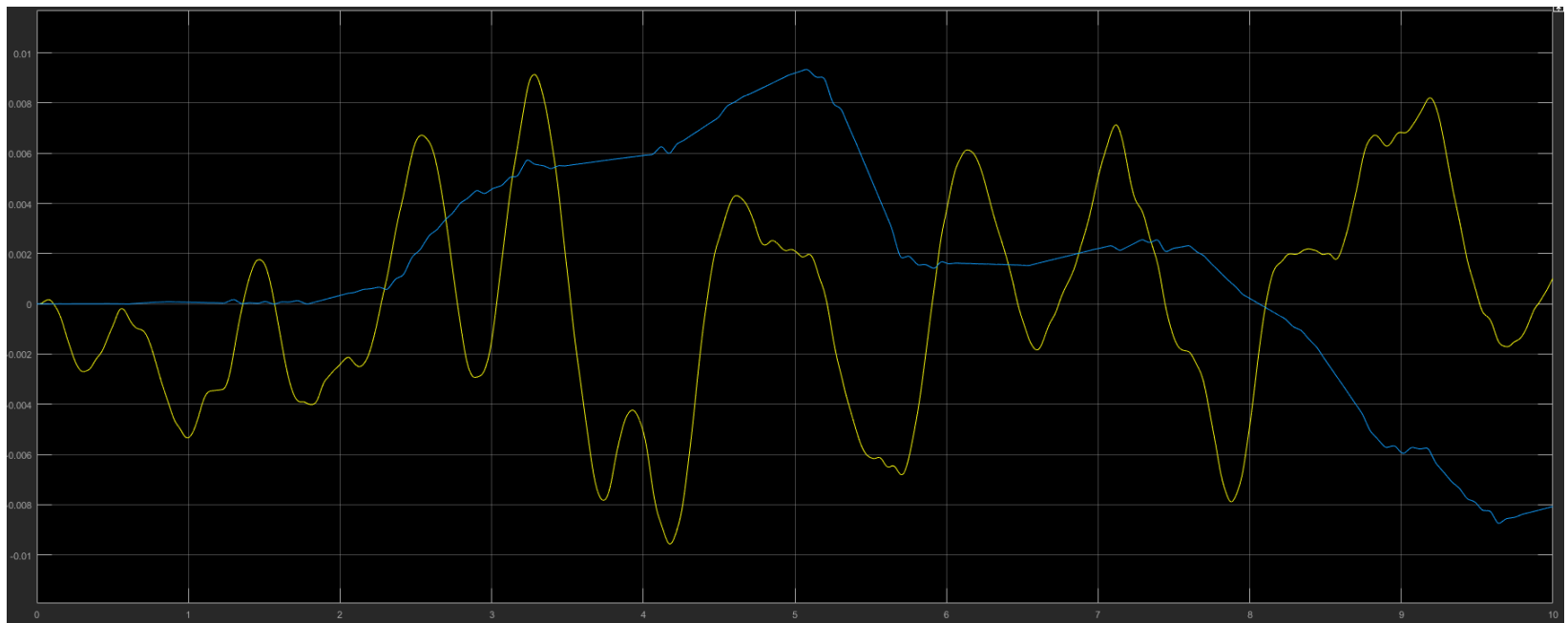
Σετ παραμέτρων Νο3 - Αναλογική ενίσχυση τάξεως 10⁰

Η δράση του ελεγκτή για το σετ παραμέτρων Νο3 παρουσιάζεται στο σχήμα 5.5.21 .

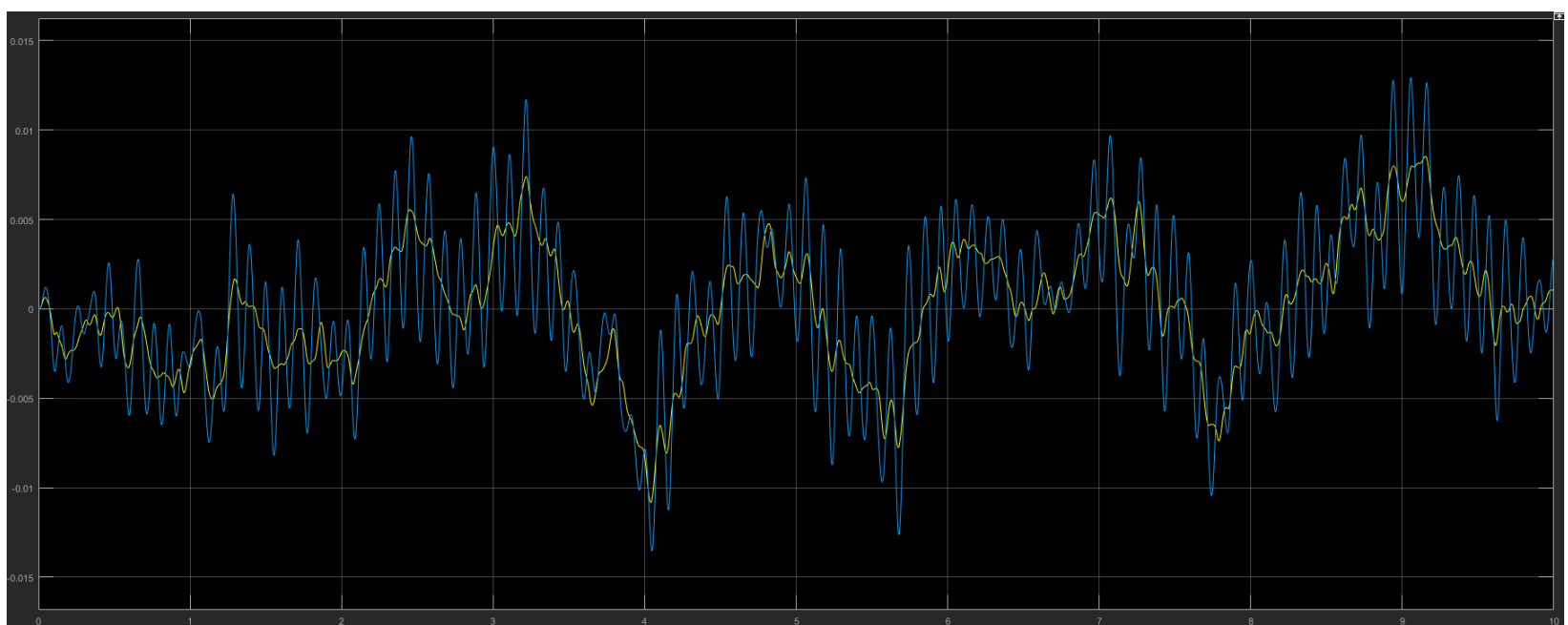


Σχήμα 5.5.21: Δράση του ελεγκτή για το σετ παραμέτρων Νο3

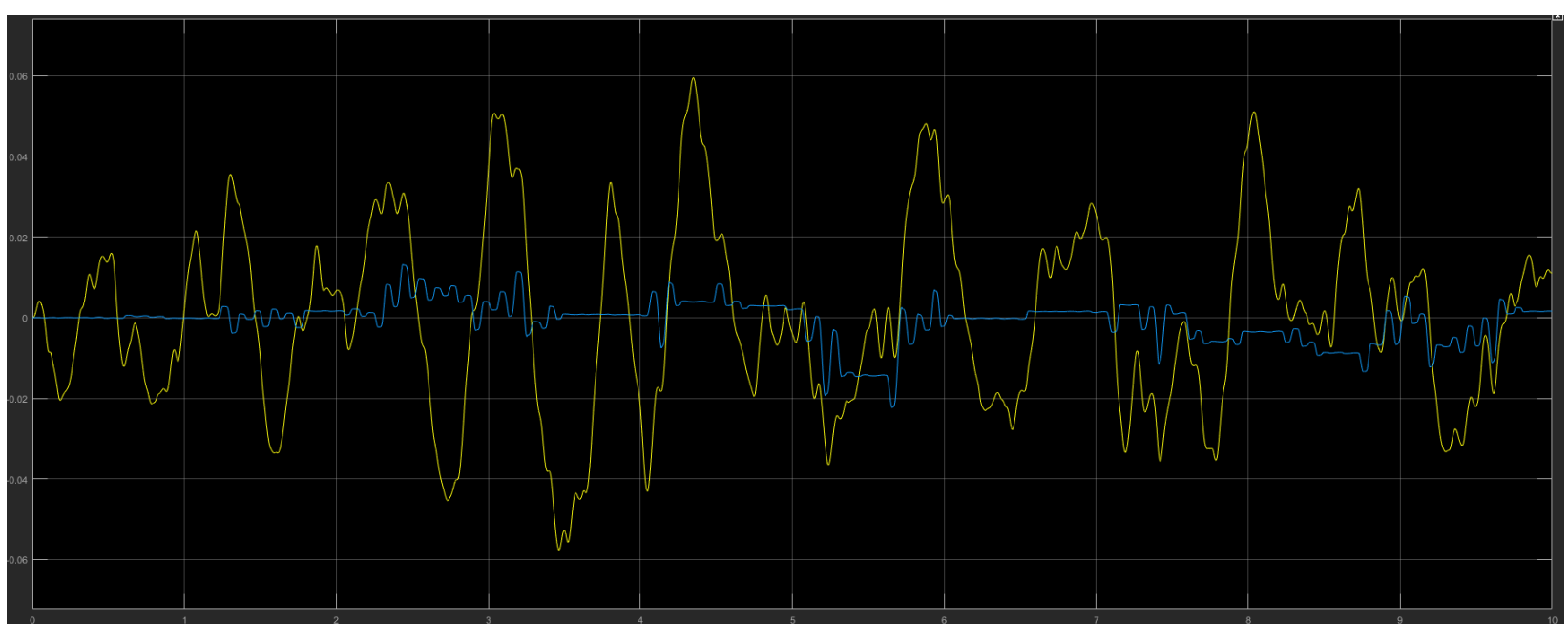
Στα σχήματα 5.5.22 - 5.5.28 απεικονίζονται οι καμπύλες παθητικής - ενεργής περίπτωσης σε κοινό διάγραμμα.



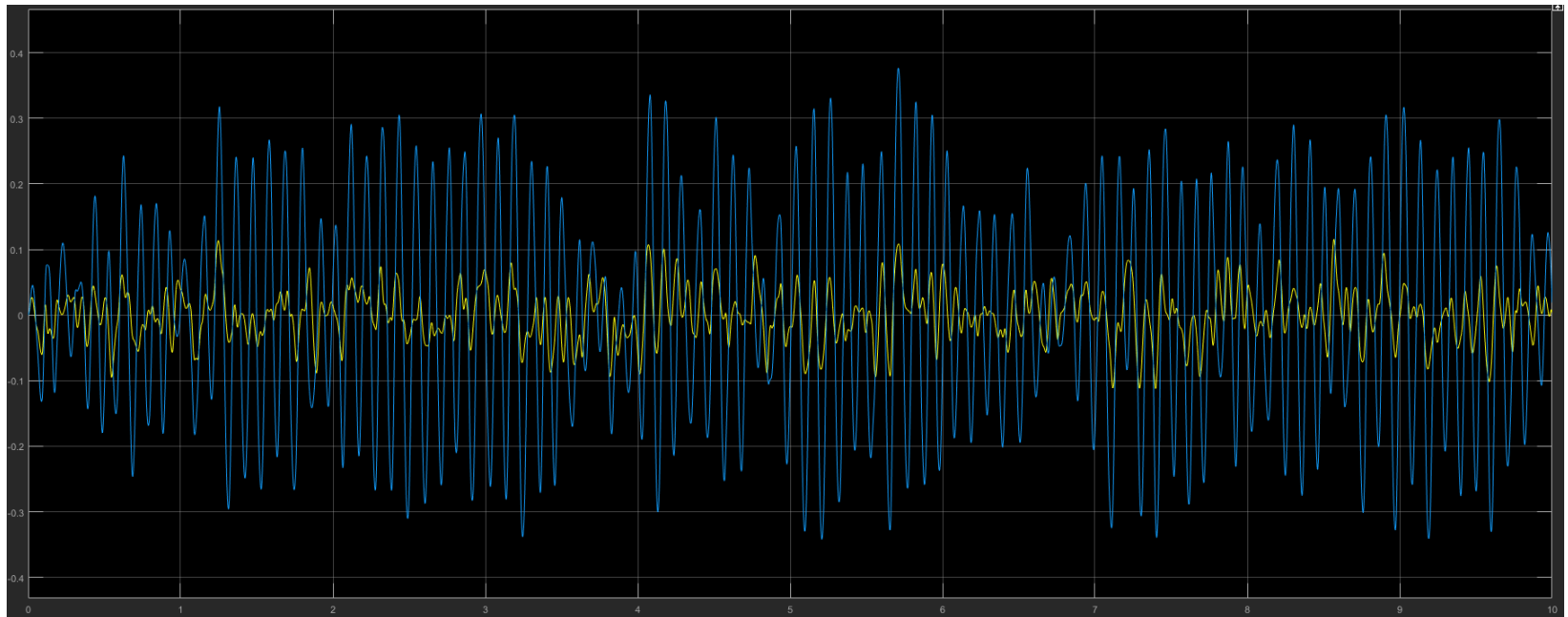
Σχήμα 5.5.22: Καμπύλες μετατοπίσεων αμαξώματος σε κοινό διάγραμμα



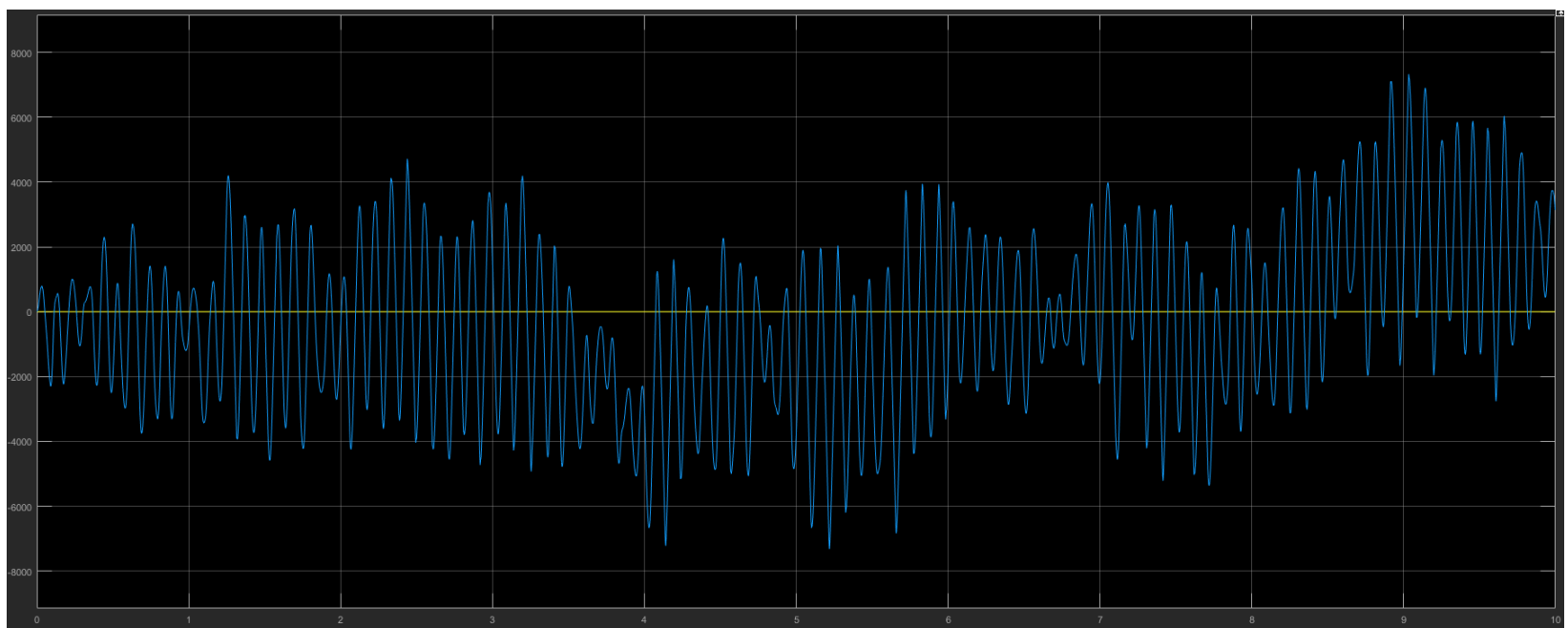
Σχήμα 5.5.23: Καμπύλες μετατοπίσεων τροχού σε κοινό διάγραμμα



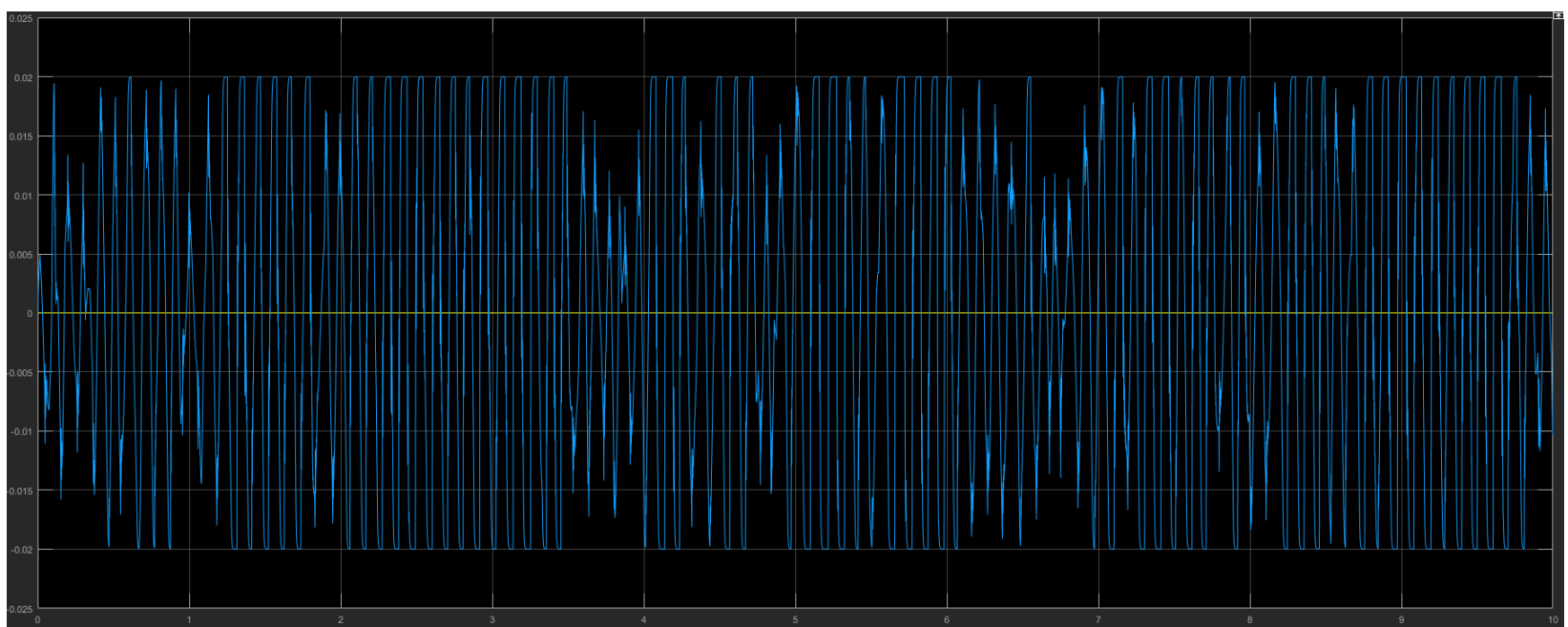
Σχήμα 5.5.24: Καμπύλες ταχυτήτων αμαξώματος σε κοινό διάγραμμα



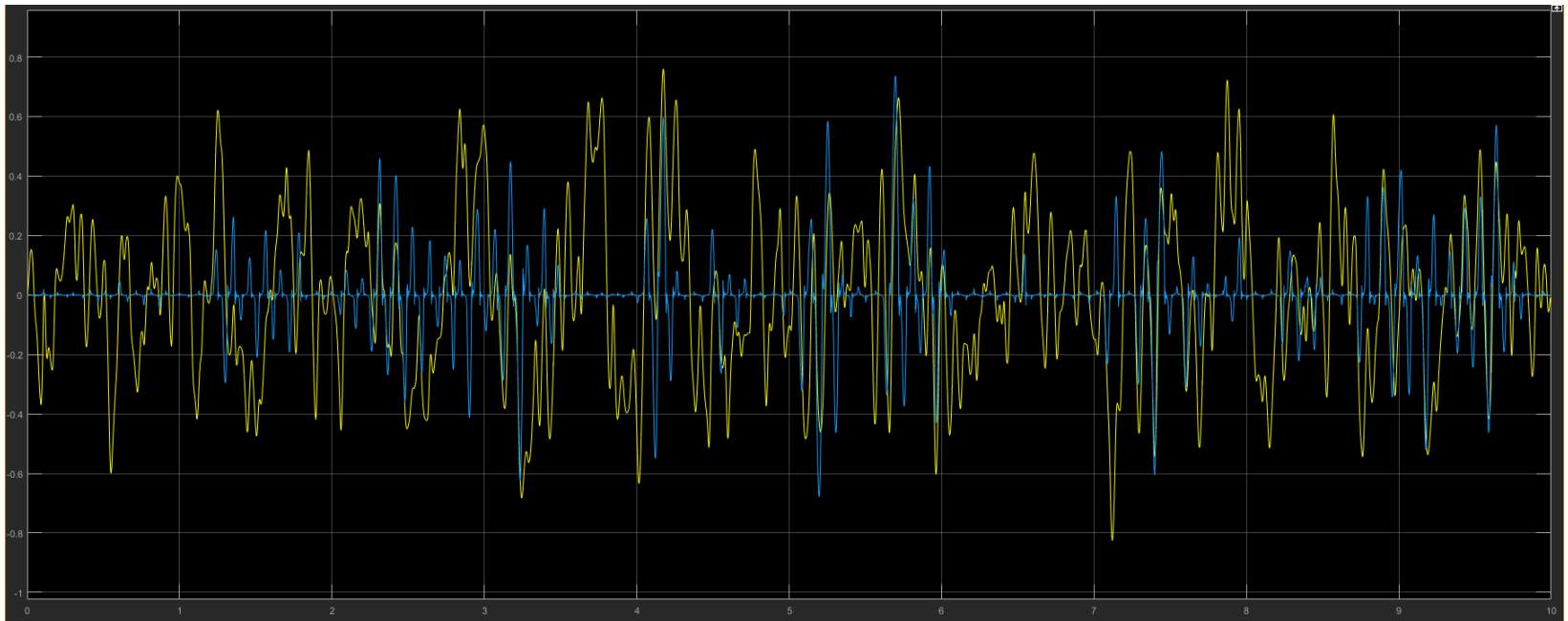
Σχήμα 5.5.25: Καμπόλες ταχυτήτων τροχού σε κοινό διάγραμμα



Σχήμα 5.5.26 Καμπόλες δύναμης ενεργοποιητή σε κοινό διάγραμμα

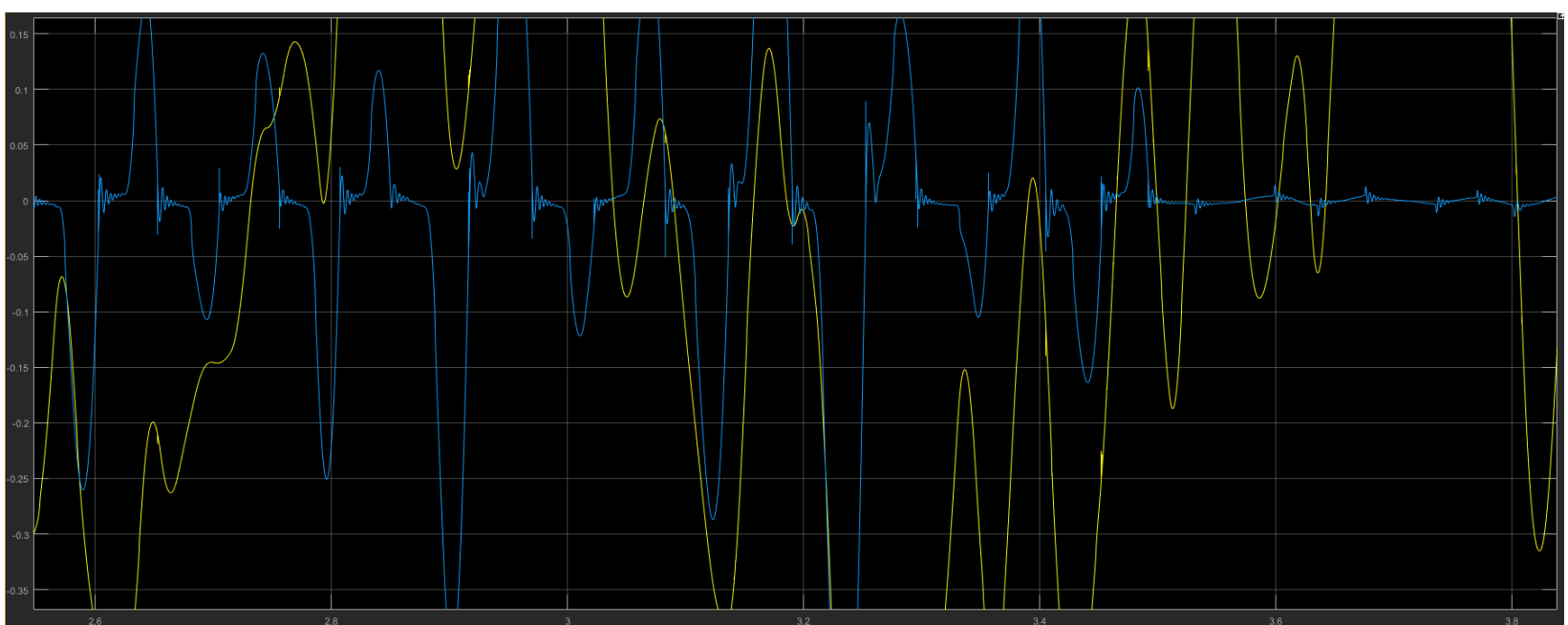


Σχήμα 5.5.27: Καμπόλες μετατοπίσεων βαλβίδας σε κοινό διάγραμμα



Σχήμα 5.5.28: Καμπύλες επιταχύνσεων αμαξώματος σε κοινό διάγραμμα

- Το 3^ο σετ παραμέτρων βελτιώνει περαιτέρω την απόκριση στη μετατόπιση και στην ταχύτητα του αμαξώματος όμως στο διάγραμμα της επιτάχυνσης παρατηρείται, σε πολλά σημεία, έντονη αστάθεια της καμπύλης (όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5.29) που δε δικαιολογείται με βάση το προφίλ δρόμου που εξετάζουμε. Το γεγονός αυτό το αντιλαμβανόμαστε και από τις αυξημένες τιμές στα overshoot - undershoot συγκριτικά με τα προηγούμενα σετ παραμέτρων. Παρατηρώντας λοιπόν ένα πολύ χαμηλότερο άθροισμα τετραγώνων σφάλματος και ομοιομορφία στις ακραίες τιμές, θα αναμέναμε και μικρότερα overshoot - undershoot, μιας και η απόκριση θα είχε βελτιωθεί. Επομένως, η μη αναμενόμενη αύξηση στις 2 παραμέτρους αυτές, ενώ αρχικά μας προβληματίζει, δικαιολογεί την εικόνα που βλέπουμε σε μια μεγαλύτερη μεγέθυνση και τελικώς μας οδηγεί στο να απορρίψουμε μια τέτοιας τάξης τιμή για την παράμετρο της αναλογικής δράσης του ελεγκτή. Η μη καταλληλότητα αυτής της τάξεως τιμών για το αναλογικό κομμάτι, θα χρησιμοποιηθεί και στο επόμενο υποκεφάλαιο, που αφορά την αυτοματοποιημένη εναρμόνιση των παραμέτρων του ελεγκτή. Τα μέγιστα και ελάχιστα βελτιώθηκαν συγκριτικά με το 2^ο σετ παραμέτρων, ενώ αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως το βέλτιστο παρουσιάζεται σχεδόν ακριβώς την ίδια χρονική στιγμή και στις 2 περιπτώσεις. Όσον αφορά τις υπόλοιπες καμπύλες, οι αποκρίσεις της μετατόπισης και της ταχύτητας του τροχού παραμένουν στα ίδια επίπεδα. Τέλος, οι αποκρίσεις της δύναμης του ενεργοποιητή και της μετατόπισης της βαλβίδας παρουσιάζουν πολύ μικρή βελτίωση, ενώ οι τιμές που κυμαίνονται οι καμπύλες για την ενεργή ανάρτηση, παραμένουν σχεδόν σταθερές.



Σχήμα 5.5.29: Μεγέθυνση για την καμπύλη της επιτάχυνσης του αμαξώματος – Εκτεταμένη ύπαρξη αστάθειας

- ✓ Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, καταλήγουμε πως την καλύτερη εναρμόνιση του ελεγκτή, αποτελεί το 2^ο σετ παραμέτρων, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.5.4 . Οι τιμές αυτές προέκυψαν με χειροκίνητη εναρμόνιση του ελεγκτή και θα συγκριθούν με τις τιμές των παραμέτρων που θα προκύψουν από αυτοματοποιημένη διαδικασία βελτιστοποίησης.

5.6 Βελτιστοποίηση εναρμόνισης ελεγκτή με χρήση γενετικών αλγορίθμων

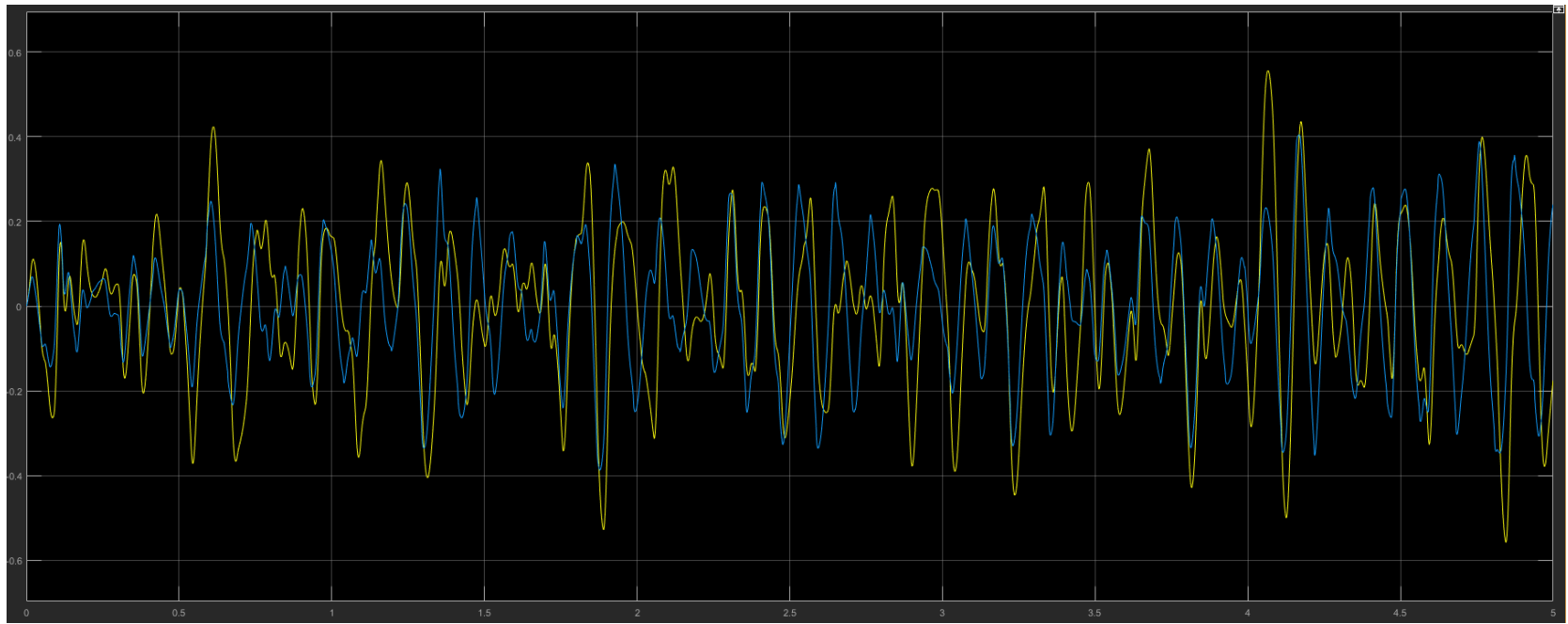
Χρησιμοποιώντας το προγραμματιστικό περιβάλλον του «matlab» και εκτελώντας συγκεκριμένες εντολές^[35], η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων εξήγαγε τα αποτελέσματα που θέλαμε. Με αντικειμενική συνάρτηση το SSE, προέκυψαν οι τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή για την ελάχιστη τιμή του SSE που παρατηρήθηκε. Πιο συγκεκριμένα, με κατάλληλη σύνταξη εντολών καλέσαμε τον γενετικό αλγόριθμο για να βρει τον καλύτερο συνδυασμό των 4 παραμέτρων του προβλήματος, που είναι οι παράμετροι του ελεγκτή K_p , K_i , K_d και N . Ο αριθμός των ατόμων του πληθυσμού που χρησιμοποιήσαμε είναι 10 και ο αριθμός των γενεών 30. Επιπλέον, η συνάρτηση μεταλλάξεως που κλήθηκε από τον γενετικό αλγόριθμο ήταν η «**mutationadaptfeasible**», ενώ η συνάρτηση ανασυνδυασμού ήταν η «**crossoverarithmetic**». Για τις 4 μεταβλητές αγνώστων που είναι οι παράμετροι του ελεγκτή, τέθηκαν κάποια όρια και πιο συγκεκριμένα $-5 \times 10^{-2} < K_p < -5 \times 10^{-3}$, $-1 \times 10^{-3} < K_i < -1 \times 10^{-11}$, $1 \times 10^{-11} < K_d < 1 \times 10^{-3}$, $10^{-2} < N < 2$. Τα όρια αυτά προέκυψαν από τις δοκιμές και τα αποτελέσματα των προηγούμενων προσομοιώσεων είτε για συγκεκριμένα προφίλ δρόμου, είτε για αυτό το τυχαίο προφίλ που εξετάζουμε. Για κάθε τετράδα τιμών των μεταβλητών του προβλήματος, με κατάλληλη εντολή εκτελούνταν η προσομοίωση του μοντέλου του simulink και αυτό πραγματοποιήθηκε 310 φορές για κάθε κλήση της συνάρτησης του γενετικού αλγορίθμου. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν 5 εκτελέσεις αυτής της διαδικασίας. Τα αποτελέσματα από τις εκτελέσεις του κώδικα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.6.1. Για κάθε επανάληψη, παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα της επιτάχυνσης του αμαξώματος (Σχήματα 5.6.2 - 5.6.8) . Επιπλέον, στον πίνακα 5.6.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων της επιτάχυνσης για καθεμία από τις 5 επαναλήψεις.

Παράμετροι	1 ^η Επανάληψη	2 ^η Επανάληψη	3 ^η Επανάληψη	4 ^η Επανάληψη	5 ^η Επανάληψη
Βέλτιστη SSE	0.0222	0.0221	0.0222	0.0228	0.0228
K_p	-0.0499	-0.05	-0.05	-0.0473	-0.0473
K_i	-7.4483×10^{-4}	-1.5323×10^{-4}	-2.7249×10^{-4}	-4.0055×10^{-4}	-4.0055×10^{-4}
K_d	5.9141×10^{-4}	9.9994×10^{-4}	8.8831×10^{-4}	2.9933×10^{-4}	2.9933×10^{-4}
N	0.3834	0.0258	0.6531	0.0627	0.0627

Πίνακας 5.6.1: Αποτελέσματα επαναλήψεων του γενετικού αλγορίθμου

- Παρατηρούμε ότι η καλύτερη τιμή που προέκυψε είναι της 2^{ης} επανάληψης με τιμή SSE = 0.0221
- Ο μέσος όρος είναι 0.02242
- Η τυπική απόκλιση είναι 3.4928×10^{-4}

Στο σχήμα 5.6.1 παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα η καμπύλη της επιταχύνσεως του αμαξώματος από το χειροκίνητο tuning (με κίτρινο χρώμα) του υποκεφαλαίου 5.5 και η καμπύλη από την καλύτερη επανάληψη της μεθόδου των γενετικών αλγορίθμων (με μπλε χρώμα). Επίσης στον πίνακα 5.6.2 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των καμπυλών.



Σχήμα 5.6.1: Κοινό διάγραμμα επιταχύνσεως για τις 2 καμπύλες επιτάχυνσης του αμαξώματος

Χαρακτηριστικά	Δοκιμή και Σφάλμα	Γενετικοί Αλγόριθμοι
K_p	-0.015129104338121	-0.05
K_i	-8.13530451427161x10 ⁻⁵	-1.5323x10 ⁻⁴
K_d	1.04820005534209x10 ⁻⁵	9.9994x10 ⁻⁴
N	0.14659678554145	0.0258
Μέγιστη τιμή	0.5560 [m/s ²]	0.4044 [m/s ²]
Ελάχιστη τιμή	-0.5577 [m/s ²]	-0.3870[m/s ²]
Overshoot	222.6151	67.2682
Undershoot	321.6105	160.0397
Βέλτιστη τιμή	0.5577[m/s ²]	0.4044[m/s ²]
Χρόνος εμφάνισης βέλτιστης τιμής	4.8455 [χρον. μον.]	4.1678 [χρον. μον.]
SSE	0.0334	0.0221

Πίνακας 5.6.2: Αποτελέσματα καμπυλών επιτάχυνσης του αμαξώματος

- ✓ Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.6.1 και στον πίνακα 5.6.2 , τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων υπερτερούν αυτών που προέκυψαν χωρίς τη χρήση κάποιας συγκεκριμένης μεθόδου. Βλέπουμε επίσης και χαμηλότερο overshoot - undershoot, που ήταν ένα ζήτημα στο υποκεφάλαιο 5.5 και ήταν σημαντικό να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα ανεξαρτήτως της μείωσης της τιμής του SSE. Τέλος, καταφέραμε βελτιώσαμε και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της καμπύλης.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις προσομοιώσεις για τις διάφορες περιπτώσεις προφίλ δρόμου αλλά και του τυχαίου προφίλ, εξήχθησαν ορισμένα αποτελέσματα τα οποία και αξιολογήθηκαν. Από την αξιολόγηση τους, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για την παρούσα εργασία. Αρχικά, με την προσθήκη και μόνο του ελεγκτή, επιβεβαιώνεται η βελτίωση των αποκρίσεων του συστήματος. Η βελτίωση αφορά τα χαρακτηριστικά της κάθε καμπύλης που σχετίζονται με το αμάξωμα και ιδιαίτερα την επιτάχυνση του αμαξώματος. Επίσης, με κατάλληλη ρύθμιση των δράσεων του αναλογικού-ολοκληρωτικού-διαφορικού ελεγκτή του συστήματος, είναι εφικτό να σχεδιαστεί μια ενεργή ανάρτηση με ορθή και ομαλή λειτουργία. Έπειτα από αρκετές δοκιμές και εφαρμογή πολλών συνδυασμών τιμών των παραμέτρων του ελεγκτή, μπορεί να σημειωθεί πως η αναλογική δράση είναι αυτή που επηρεάζει περισσότερο τη μορφή και τα χαρακτηριστικά των καμπυλών που σχετίζονται με το αμάξωμα. Αμέσως μετά την εύρεση ενός συνδυασμού παραμέτρων που παρέχει τα καλύτερα δυνατά χαρακτηριστικά στη λειτουργία της ενεργής ανάρτησης, έγινε προσπάθεια για εύρεση ενός νέου συνδυασμού που θα σε προσέδιδε στο σύστημα της ενεργής ανάρτησης, ακόμα καλύτερες αποκρίσεις στις μεταβλητές του προβλήματος. Σε αυτό βοήθησε η χρήση της μεθόδου των γενετικών αλγορίθμων, της οποίας τα αποτελέσματα έδειξαν, πως η επίτευξη της καλύτερης δυνατής ρύθμισης των δράσεων του ελεγκτή επιτυγχάνεται ευκολότερα με τη χρήση μιας αυτοματοποιημένης μεθόδου βελτιστοποίησης παρά χειροκίνητα με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος. Όμως, ορισμένες τιμές των δράσεων αυτών απορρίπτονται εάν δημιουργήσουν έστω και ένα ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό σε κάποια καμπύλη, ακόμα και αν βελτιώσουν αισθητά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά. Όπως προέκυψε δηλαδή στη ρύθμιση του ελεγκτή για την περίπτωση του τυχαίου προφίλ δρόμου, όπου ένας συνδυασμός παραμέτρων, είχε σαν αποτέλεσμα στην καμπύλη της επιτάχυνσης του αμαξώματος μικρό SSE και πολύ μεγάλο overshoot. Επομένως απαιτείται συμβιβασμός μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης της ρύθμισης του ελεγκτή. Τέλος, παρατηρήθηκε πως τα χαρακτηριστικά των καμπυλών που σχετίζονται με τον τροχό δεν επηρεάζονται θετικά παρά την οποιαδήποτε ρύθμιση του ελεγκτή και για όλες τις περιπτώσεις διαταραχής του δρόμου. Αυτό συμβαίνει επειδή η ρύθμιση του ελεγκτή γίνεται εξ ολοκλήρου βασισόμενη στη σύγκλιση της επιθυμητής τιμής για την επιτάχυνση του αμαξώματος και όχι για την επιτάχυνση του τροχού.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R.S. Sharp and S.A. Hassan. "The relative performance capabilities of passive, active and semi-active car suspension systems". In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, volume 203-3 of D, 219-228, 1986 .
- [2] A. Hac. "Suspension optimization of a 2-dof vehicle model using stochastic optimal control technique". Journal of Sound and Vibration, 100(3):343-357, 1985 .
- [3] D. Hrovat. "Survey of advanced suspension developments and related optimal control applications". Automatica, 33(10):1781-1817, 1997.
- [4] G.H. Engleman and G. Rizzoni. "Including the force generation process in active suspension control formulation". In Proceedings of the 1993 American Controls Conference, 701-705, San Francisco, CA, 1993.
- [5] A.G. Thompson, B.R. Davis, and C.E.M. Pearce. "An optimal linear active suspension with finite road preview". Paper 0148-7191/80/0225-0520(800520), Society of Automotive Engineers, 1980.
- [6] A. Alleyne and J.K. Hedrick. "Nonlinear control of a quarter car active suspension". In Proceedings of the 1992 American Control Conference, Chicago, IL, 1992.
- [7] R. Rajamani and J.K. Hedrick. "Observer-based control of an active suspension". In IEEE Conference on Control Applications, Dayton, OH, 1992.
- [8] A. Alleyne and J.K. Hedrick. "Nonlinear adaptive control of active suspensions". IEEE Transactions on Control Systems Technology, 3(1):94-102, 1995.
- [9] A. Alleyne and R. Liu. "On the limitations of force tracking control for hydraulic servosystems". ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1999.
- [10] C. Osorio, S. Gopaldasamy, and J.K. Hedrick. "Force tracking control for electro hydraulic active suspensions using output redefinition". In Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Nashville, TN, 1999.
- [11] M. Tomizuka. "Optimum linear preview control with application to vehicle suspension revisited". Trans. ASME, J. Dynamic Systems, Measurement and Control, 98(3):309-315, September 1976.
- [12] A. Hac. "Optimal linear preview control of active vehicle suspension". Vehicle System Dynamics, 21:167-195, 1992.
- [13] A.G. Thompson and P.M. Chaplin. "Force control in electrohydraulic active suspensions". Vehicle System Dynamics, 25:185-202, 1996.
- [14] S. Gopaldasamy, J.K. Hedrick, C. Osorio, and R. Rajamani. "Model predictive control for active suspensions-controller design and experimental study". ASME J. Dynamic Systems and Control, 61:725-733, 1997.
- [15] Galal Ali Hassaan, Emeritus Professor, Department of Mechanical Design and Production, Faculty of Engineering, Cairo University, Giza, Egypt , "Car Dynamics using Quarter Model and Passive Suspension, Part I: Effect of Suspension Damping and Car Speed".
- [16] Harrison, R. F. and Hammond, J. K., 1986, "Approximate, time-domain, non-stationary analysis of stochastically excited, non-linear systems with particular reference to the motion of vehicles on rough ground," Journal of Sound and Vibration 105, 361-371.
- [17] Metallidis, P., Verros, G., Natsiavas, S., and Papadimitriou, C., 2003, "Fault detection and optimal sensor location in vehicle suspensions," Journal of Vibration and Control 9, 337-359.

- [18] Verros, G. and Natsiavas, S., 2001, "Dynamics of vehicles with semi-active suspensions exhibiting wheel hop," *Vehicle System Dynamics (Supplement)* 35, 135-148.
- [19] M.D. Donahue J.K. Hedrick, "Implementation of an Active Suspension, Preview Controller for Improved Ride Comfort", 21-22, 2003.
- [20] P. Gaspar, I. Szasziy and J. Bokor, "Active suspension design using linear parameter varying control", *Int. J. of Vehicle Autonomous Systems (IJVAS)*, Vol. 1, No. 2, 2003, 208-211.
- [21] Merritt, H.E. (1967) "Hydraulic Control Systems", Wiley and Sons.
- [22] Wei Wang, Yuling Song, Yanbing Xue, Hongling Jin, Juncai Hou, Minglei Zhao, "An optimal vibration control strategy for a vehicle's active suspension bases on improved cultural algorithm".
- [23] Christoph Gohrle, Andreas Wagner, Andreas Schindler, Oliver Sawondy, "Active suspension controller using MPC based on a full-car model with preview information" .
- [24] Suresh A. Patil&Shridhar G. Joshi, " Experimental analysis of 2 DOF quarter-car passive and hydraulic active suspension systems for ride comfort".
- [25] Abd El-Nasser S. Ahmed¹, Ahmed S. Ali², Nouby M. Ghazaly¹, G. T. Abd El-Jaber¹, "PID controller of active suspension system for a quarter car model" .¹ Department of Mechanical Engineering, South Valley University, Qena, Egypt.²Department of Mechanical Engineering, Assuit University, Assuit, Egypt.
- [26] Ν.Ι. Κρικελής, Καθηγητής Ε.Μ.Π. "Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο", 4^η Έκδοση, 278-285.
- [27] Jenna Carr. "An Introduction to Genetic Algorithms".
- [28] Herrera, F., Lozano, M., and Verdegay, J. L. "Tackling real coded genetic algorithms: Operators and tools for behavioural analysis". *Artificial Intelligence Review* 12 (1998), 265-319.
- [29] Goldberg, D. E. "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning". Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [30] Ιωάννης Γ. Δαμούσης, "Ανάπτυξη Γενετικών Αλγορίθμων Και Εφαρμογή Τους Σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας".
- [31] Sulaymon Eshkabilov, Dynamics & Control Lab, Tashkent Automobile Road Institute Str. Mavaraunnaxr 20, Tashkent - 700060, Uzbekistan, "MATLAB/Simulink applications in solving Ordinary Differential Equations".
- [32] M. Agostinacchio, D. Ciampa, S. Olita, "The vibrations induced by surface irregularities in road pavements" - A «Matlab» approach.
- [33] Verros, G., S. Natsiavas, and C. Papadimitriou, "Design Optimization of Quarter-car Models with Passive and Semi-active Suspensions under Random Road Excitation. *Modal Analysis*, 2005. 11(5): p. 581-606".
- [34] Feng Tyan and Yu-Fen Hong Computational Dynamics and Control Lab Dept. of Aerospace Engineering Tamkang University Tamshui, Taipei County, Taiwan 25147, R. O. C. and Shun-Hsu Tu and Wes S. Jeng Sky Leading Corportation Chupei, Hsin Chu County, Taiwan 30204, R. O. C. "Generation of Random Road Profiles".
- [35] Tze-Fun Chan, Keli Shi. "Applied Intelligent Control Of Induction Motor Drives", 2011 John Willey & Sons (Asia) Pte Ltd.
- [36] Ευάγγελος Μπρέμπος, Διπλωματούχος Ε.Μ.Π. , "Μοντελοποίηση υδροπνευματικής ανάρτησης οχήματος" .

Παράρτημα

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του «Matlab» για να εκτελεστεί η S-function στο μοντέλο του «Simulink» παρουσιάζεται σε τρία μέρη στις εικόνες Π1, Π2, Π3. Επίσης οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση της βελτιστοποίησης με γενετικό αλγόριθμο παρατίθενται με τις εικόνες Π4 και Π5.

```
1 function [sys,x0,str,Tvector]=road irreg(t,x,u,flag)
2
3
4 global acca
5 switch flag,
6
7
8 case 0,
9     [sys,x0,str,Tvector,acca]=mdlInitializeSizes;
10
11 case 1,
12     [sys,acca]=mdlDerivatives(t,x,u);
13
14 case 2,
15     sys=mdlUpdate(t,x,u);
16
17 case 3,
18     sys=mdlOutputs(t,x,u,acca);
19
20 case 4,
21     sys=[];
22
23 case 9,
24     mdlTerminate
25
26 otherwise
27     error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
28
29 end
30
31
32
33
34 function [sys,x0,str,Tvector,acca]=mdlInitializeSizes
35
36 % Modify only the initial condition of states
37
38 sizes=simsizes;
39 sizes.NumContStates=6; % Number of states
40 sizes.NumDiscStates=0;
41 sizes.NumOutputs=7; % Number of Outputs
42 sizes.NumInputs=2; % Number of Inputs automatically calculated by MATLAB
43 sizes.DirFeedthrough=0;
```

Εικόνα Π1

```
43 sizes.DirFeedthrough=0;
44 sizes.NumSampleTimes=1;
45
46 sys=simsizes(sizes);
47 x0=[0 0 0 0 0 0]; % Initial condition for all states
48 str=[];
49 Tvector=[0 0];
50 acca=[0 0]
51
52 end
53
54 function [sys,acca]=mdlDerivatives(t,x,u)
55
56 Ms = 2800 ; % sprung mass [kg]
57 Mu = 270; % unsprung mass [kg]
58 ksL = 240e3; % suspension stiffness linear [N/m]
59 ksNL = 235e4; % suspension stiffness non linear [N/m]
60 kt = 1000e3; % tyre stiffness [N/m]
61 bsL = 12e3 ; % damping linear [N/m*s]
62 bsNL = 400; % damping non linear [N/m*s]
63 bsSYM = 400; % damping symmetric [N/m*s]
64 a1 = 2.27*10^9; % actuator parameters
65 b1 = 1;
66 g1 = 1.545*10^9;
67 c = 1.545*(10^9);
68 Ahyd = 0.0044; % area of piston [m^2]
69 Ps = 20684e3; % supply pressure [Pa]
70 timec = 0.003; % time constant [sec]
71
72 Ctp = 15e-12; % total leakage coefficient of the piston [m^3/Pa*s]
73 be = 689475728 ; % effective bulk modulus of system [Pa]
74 Vt = 6*(10^(-5)); % total actuator volume [m^3]
75 dens = 850; % hydraulic fluid density [kg/m^3]
76 S = 0.008; % spool valve area gradient [m]
77 Cd = 0.7; % discharge coefficient
78
79 a2 = 4*10^(-4)*be/Vt;
80 b2 = a1*Ctp;
81 g2 = a2*Cd*S*sqrt(1/dens) ;
82
83 w = u(1);
84
85 g=[0 0 0 0 0 (1/timec)];
```

Εικόνα Π2


```

85 - g=[0 0 0 0 0 (1/timec)];
86 - Fks = ksL*(x(2)-x(1)) + ksNL*((x(2)-x(1))^3);
87 - Fkt = kt*(x(2)-w);
88 - Fbs = bsL*(x(4)-x(3)) - bsSYM*abs(x(4)-x(3)) +bsNL*(sign(x(4)-x(3)))*(sqrt(abs(x(4)-x(3))));
89 - F = Ahyd*x(5);
90 - Q = sign(Ps-sign(x(6)))*x(5)*Cd*S*x(6)*sqrt((1/dens)*abs((Ps-sign(x(6)))*x(5)));
91
92 - xder1 = x(3) + u(2)*g(1);
93 - xder2 = x(4) + u(2)*g(2);
94 - xder3 = (1/Ms)*(Fks+Fbs-F) + u(2)*g(3);
95 - xder4 = (1/Mu)*(-Fks-Fkt-Fbs+F) + u(2)*g(4);
96 - xder5 = -b2*x(5)-a1*Ahyd*(x(3)-x(4))+al*Q+u(2)*g(5);
97 - xder6 = -(1/timec)*x(6) + u(2)*g(6);
98
99 - acca=[xder3 xder4];
100 - sys=[xder1 xder2 xder3 xder4 xder5 xder6];
101
102 - end
103
104 - function sys=mdlOutputs(t,x,u,acca)
105
106 - % Input right side of algebraic equations for all outputs
107 - sys(1)=x(1);
108 - sys(2)=x(2);
109 - sys(3)=x(3);
110 - sys(4)=x(4);
111 - sys(5)=x(5)*0.0044;
112 - sys(6)=x(6);
113 - sys(7)=acca(1);
114
115 - end
116
117 - function sys=mdlUpdate(t,x,u)
118
119 - sys=[];
120
121 - end
122 - % end mdlUpdate
123
124 - function mdlTerminate
125 - sys=[]
126
127 - end
128

```

Εικόνα Π3

```

1 - global Kp Ki Kd N deikths apotelesmata
2 - options = gaoptimset;
3
4 - options = gaoptimset(@ga);
5
6 - options = gaoptimset(options,'PopulationSize',10);
7 - options = gaoptimset(options,'Generations',30);
8 - options = gaoptimset(options,'MutationFcn',@mutationadaptfeasible)
9 - options = gaoptimset(options,'CrossoverFcn',@crossoverarithmetic)
10
11 - deikths = 0
12
13 - LB = [-5e-2 ; -1e-3 ; 1e-11 ; 0.01];
14 - UB = [-5e-3 ; -1e-11 ; 1e-3 ; 2];
15
16 - [X,FVAL,EXITFLAG,OUTPUT,POPULATION,SCORES] = ga(@functionPID,4,[],[],[],[],LB,UB,[],options);
17
18 - save results5

```

Εικόνα Π4

```

1 - function s = functionPID(x1)
2
3
4 - global summ deikths apotelesmata
5
6 - assignin('base','Kp',x1(1));
7 - assignin('base','Ki',x1(2));
8 - assignin('base','Kd',x1(3));
9 - assignin('base','N',x1(4));
10
11
12 - [tout,xout,yout] = sim('genetic_algorithm',[0,5]);
13
14
15 - [n,m] = size(active);
16
17 - summ = 0;
18
19 - for i = 1:n
20
21 - summ = summ + (0 - active(i)).^2
22
23 - end
24
25 - s = summ/n;
26
27 - apotelesmata(deikths + 1,1) = s;
28 - apotelesmata(deikths + 1,2) = x1(1);
29 - apotelesmata(deikths + 1,3) = x1(2);
30 - apotelesmata(deikths + 1,4) = x1(3);
31 - apotelesmata(deikths + 1,5) = x1(4);
32
33 - deikths = deikths + 1;
34
35 - clc;
36
37 - end

```

Εικόνα Π5