ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Εργαστήριο Οχημάτων

Διπλωματική εργασία

Ευάγγελου Μπρέμπου

Μοντελοποίηση υδροπνευματικής ανάρτησης οχήματος

Επιβλέπων: Θ. Κωστόπουλος D.Sc.

Αθήνα 2013

Περίληψη

Τα σύγχρονα οχήματα χρησιμοποιούν συστήματα αναρτήσεων για την άνεση των επιβατών τους, για να διατηρούν την πρόσφυση των τροχών ακόμα και σε ακραίες συνθήκες, για να μπορούν να μεταφέρουν με ασφάλεια ανθρώπους και αγαθά κλπ. Ήδη από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα έχουν αναπτυχτεί συστήματα ανάρτησης που αξιοποιούν της ιδιότητες των ρευστών.

Η εργασία αυτή στοχεύει στην ανάπτυξη, την μελέτη και την προσομοίωση ενός υδροπνευματικού συστήματος ανάρτησης. Το σύστημα αυτό θα παρέχει άνεση στους επιβάτες χωρίς να περιορίζει την δυνατότητα του οχήματος να αναπτύσσει πλευρικές επιταχύνσεις. Στα παρακάτω κεφάλαια περιγράφονται:

- τα σταδία εξέλιξης της διάταξης
- η μοντελοποίηση του συστήματος
- η προσομοίωση του συστήματος με χρήση αριθμητικών μεθόδων
- τα αποτελέσματα της προσομοίωσης
- τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση αυτή.

Για την μοντελοποίηση τους συστήματος αναπτύχτηκε half car model, το όποιο έχει τα χαρακτηριστικά του συστήματος υδροπνευματικής ανάρτησης που μελετάται. Τα χαρακτηριστικά αυτά προκύπτουν από την σύνδεση των τροχών του ιδίου άξονα μέσω του υδραυλικού κυκλώματος καθώς και από την αξιοποίηση κυλίνδρων, σωληνώσεων και τοπικών απωλειών για την απορρόφηση και την απόσβεση των διεγέρσεων που δέχεται το όχημα από το οδόστρωμα.

Μετά την μοντελοποίηση έγινε προσομοίωση της κίνησης του οχήματος με όμοια ημιτονοειδή διέγερση στους δυο τροχούς του άξονα αλλά και με ημιτονοειδή διέγερση στον ένα τροχό και μηδενική στον άλλο. Επίσης προσδιορίστηκε η κλίση του οχήματος υπό την επίδραση πλευρικής επιτάχυνσης σε σταθερές συνθήκες.

Abstract

Title: Modeling of vehicle's hydro-pneumatic suspension

Modern vehicles use suspension systems for the comfort of the passengers, to maintain the grip of the tires even in extreme conditions, to transport safely people and goods, etc. Since the middle of the past century suspension systems have been developed, that use the characteristics of fluids.

This thesis aims in the development, modeling and simulation of a hydro- pneumatic suspension system. This system will allow achieving high lateral acceleration without limiting the passengers comfort. The following chapters describe:

- The development of the system
- The modeling
- The simulation with numerical methods
- The results of the simulation
- The conclusions from the analysis

To model the system a half car model was developed with the characteristics of the hydro-pneumatic suspension. Those characteristics arise from the connection of the wheels of the same axle through the hydraulic system and from the use of cylinders, pipes and orifices to absorb the stimulation the car becomes from the road.

After the modeling the movement of the system was simulated with the same sinusoidal stimulation on both wheels and also for sinusoidal stimulation in one wheel while the other has zero simulation. The car's roll because of lateral acceleration was also analyzed.

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την βοήθεια του κ. Δημήτρη Κουλοχέρη, ο όποιος με τα μαθήματα κατασκευής οχημάτων μου έδωσε της βάσεις για να ασχοληθώ με την δυναμική οχήματος και στην συνέχεια με καθοδήγησε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Καθοριστικό ρολό στην επιλογή του θέματος έπαιξε επίσης και η ομάδα FSAE του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, μέσα στην όποια είδα την εφαρμογή των θεωρητικών γνώσεων στην πράξη κατά την ανάπτυξη ενός μονοθέσιου οχήματος αγώνων.

Τελειώνοντας την διπλωματική μου εργασία φτάνει στο τέλος της και η πορεία μου ως προπτυχιακός φοιτητής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Για το λόγο αυτό ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους που στάθηκαν δίπλα μου καθ’ όλη την διάρκεια της εκπαίδευσης μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη 3

Abstract 4

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή 10

1.1 Συστήματα αναρτήσεων 10

1.2 Λειτουργία ελατηρίου 11

1.3 Λειτουργία αποσβεστήρα 11

1.4 Είδη αναρτήσεων 12

1.4.1 Παθητική ανάρτηση 12

1.4.2 Ημιενεργητική ανάρτηση 13

1.4.3 Ενεργητική ανάρτηση 14

1.5 Υδραυλικά και πνευματικά συστήματα 16

1.6 Υδροπνευματικές αναρτήσεις 16

Κεφάλαιο 2 Υδροπνευματική ανάρτηση με σύνδεση τροχών του ίδιου άξονα 20

Κεφάλαιο 3 Μοντελοποίηση διάταξης 28

3.1 Μοντέλα οχημάτων 28

3.1.1 Quarter car model 28

3.1.2 Half car model 29

3.1.3 μοντέλο πλήρους αυτοκινήτου 30

3.2 Μοντέλο διάταξης 30

3.3 Ενέργεια συστήματος 33

3.4 Προσομοίωση 33

3.5 body roll 34

Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα προσομοίωσης 36

4.1 Σύνδεση των τροχών του ίδιου άξονα 36

4.2 Car roll 43

4.3 Άνεση επιβατών 50

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα 57

5.1 Χαρακτηριστικά συστήματος 57

5.2 Πλεονεκτήματα διάταξης 58

5.3 Μειονεκτήματα διάταξης 59

Βιβλιογραφία 62

Παράρτημα Κώδικας MATLAB 64

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Συστήματα αναρτήσεων

Ανάρτηση είναι το μηχανικό σύστημα που συνδέει τους τροχούς με το σώμα του οχήματος, ενώ επιτρέπει την σχετική κίνηση τους. Μέσω της ανάρτησης οι τροχοί μπορούν να μεταφέρουν δυνάμεις ώστε το όχημα να επιταχύνεται, να επιβραδύνεται και να αλλάζει κατεύθυνση. Η ανάρτηση επηρεάζει επίσης την οδική συμπεριφορά του οχήματος καθώς και την άνεση των επιβατών.

Εικόνα 1.1
Εμπρός ανάρτηση αγωνιστικού αυτοκίνητου

Η ανάπτυξη ενός συστήματος ανάρτησης σκοπεύει στην βελτιστοποίηση ορισμένων χαρακτηριστικών όπως την άνεση των επιβατών, την οδική συμπεριφορά σε μεγαλύτερες ταχύτητες, την μέγιστη αξιοποίηση των ελαστικών κλπ. Ωστόσο σε ειδικές εφαρμογές γίνεται βελτιστοποίηση ακόμα και ως προς την ελαχιστοποίηση του χρόνου που απαιτείται για την κάλυψη μιας ορισμένης διαδρομής, όπως γίνεται συχνά σε αγώνες ταχύτητας.

Οι τομείς που μελετούνται σε ένα σύστημα ανάρτησης είναι αυτοί της δυναμικής και της κινηματικής, οι οποίοι συνδέονται άμεσα μεταξύ τους. Η δυναμική ασχολείται με το είδος και την σκληρότητα των ελατηρίων που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και με την απαιτούμενη

απόσβεση, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις μάζες του οχήματος, αναρτώμενες και μη αναρτώμενες, καθώς και την κατανομή τους. Επηρεάζει κυρίως την άνεση των επιβατών και την οδική συμπεριφορά του οχήματος. Η κινηματική ασχολείται με την γεωμετρία της ανάρτησης και πως επηρεάζεται η επαφή τροχού-οδοστρόματος κατά την κίνηση της. Καθορίζει την ποσότητα πληροφοριών που φτάνει στον οδηγό μέσω του συστήματος διεύθυνσης και επηρεάζει και τον βαθμό αξιοποίησης του ελαστικού.

1.2 Λειτουργία ελατηρίου

Το ελατήριο αποθηκεύει δυναμική ενέργεια όταν παραμορφώνεται την οποία έχει μετατρέψει από κινηματική κατά την μη ομαλή κίνηση του οχήματος. Τα ελατήρια, κατά την κίνηση, του οχήματος συμβάλουν στην μόνιμη επαφή των τροχών με το οδόστρωμα.

Εικόνα 1.2
Ελικοειδή ελατήρια

Τα είδη ελατηρίων που υπάρχουν σε αναρτήσεις είναι τα ελικοειδή ελατήρια, τα ημιελλειπτικά ελατήρια (σούστες), οι ράβδοι στρέψης και ορισμένα πνευματικά συστήματα. Λόγω της μειωμένης σκληρότητας τους τα ελικοειδή ελατήρια συχνά χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με αντιστρεπτική ράβδο. Η αντιστρεπτική ράβδος συνδέει τους τροχούς του ιδίου άξονα και περιορίζει τις κλίσεις του οχήματος.

1.3 Λειτουργία αποσβεστήρα

Ο αποσβεστήρας μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε θερμική. Χρησιμοποιείται για να μειώνει τις ταλαντώσεις του οχήματος και να αυξάνει τις δυνάμεις που ασκούνται στον τροχό, ώστε να βελτιώνεται η πρόσφυση.

Εικόνα 1.3
αποσβεστήρας

Οι αποσβεστήρες σε συνδυασμό με τα ελατήρια και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανάρτησης καθορίζουν την οδική συμπεριφορά του οχήματος, δηλαδή την άνεση που προσφέρει στους επιβάτες και την δυνατότητα του να επιταχύνεται κατά τον εγκάρσιο και διαμήκη άξονα του.

1.4 Είδη αναρτήσεων

Οι αναρτήσεις που χρησιμοποιούνται σε οχήματα χωρίζονται σε παθητικές, ημιενεργητικές και ενεργητικές, ανάλογα με την δυνατότητα να μεταβάλουν τα χαρακτηριστικά τους κατά την διάρκεια κίνησης του οχήματος.

1.4.1 Παθητική ανάρτηση

Η πλειοψηφία των αυτοκινήτων χρησιμοποίει συστήματα παθητικών αναρτήσεων. Τα χαρακτηριστικά αυτών των συστημάτων (μέτρο ελαστικότητας, απόσβεση) είναι σταθερά ανεξάρτητα από της συνθήκες οδήγησης. οι παθητικές αναρτήσεις αποτελούν έναν συμβιβασμό μεταξύ άνεσης και επιδόσεων. Η ευρεία χρήση τους οφείλεται κυρίως στο μειωμένο κόστος τους και στον μικρότερο χρόνο εξέλιξης τους, συγκριτικά με τα υπόλοιπα είδη αναρτήσεων.

Ωστόσο οι παθητικές αναρτήσεις καλύπτουν τις απαιτήσεις των περισσότερων οδηγών σε άνεση και επιδώσεις. Παρά τους συμβιβασμούς που γίνονται, ο κάθε τύπος αυτοκινήτου αλλά και η κάθε εταιρία προσανατολίζεται κυρίως σε ορισμένα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, σε οχήματα επιδόσεων δεν συνηθίζονται αναρτήσεις που να στοχεύουν στην άνεση των επιβατών αλλά στης επιδόσεις του οχήματος, ενώ σε οικογενειακά αυτοκίνητα δίνεται μεγαλύτερη προτεραιότητα στην άνεση των επιβατών.

1.4.2 Ημιενεργητική ανάρτηση

Οι ημιενεργητικές αναρτήσεις δίνουν την δυνατότητα τον οδηγό να επιλέξει μεταξύ ορισμένων συνόλων ρυθμίσεων, επηρεάζοντας τα δυναμικά χαρακτηριστικά της ανάρτησης του οχήματος του. Συνήθως υπάρχουν δυο επιλογές, μια για άνεση και μια για επιδόσεις, οπού εκτός των χαρακτηριστικών της αναρτώσης επηρεάζουν ηλεκτρονικά και άλλα χαρακτηριστικά του οχήματος, όπως την απόκριση, την δράση των συστημάτων ευσταθείας κλπ. Η ημιενεργητικές αναρτήσεις μεταβάλουν συνήθως τα χαρακτηριστικά των αποσβεστήρων. Η μεταβολή αυτή γίνεται είτε με αλλαγή της γεωμετρίας του Έμβολου του αποσβεστήρα, είτε με χρήση μαγνητοροϊκών υγρών.

Εικόνα 1.4
Μαγνητοροϊκή ανάρτηση

Τα συστήματα που λειτουργούν με αλλαγή της γεωμετρίας έχουν ένα σύστημα που μεταβάλει τον συντελεστή απωλειών κατά την κίνηση του ρευστού μέσα στον αποσβεστήρα. Αυτό επιτυγχάνεται με αλλαγή του αριθμού των οπών που έχει το εμβολο.

Τα μαγνητοροϊκά υγρά χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια στις ημιενεργητικές αναρτήσεις, σε ακριβά αυτοκίνητα δρόμου και σε στρατιωτικά οχήματα. Λόγω των μαγνητιζόμενων σωματιδίων που περιέχουν, τα μαγνητοροϊκά υγρά αλλάζουν το ιξώδες τους όταν βρεθούν σε μαγνητικό πεδίο. Με τοποθέτηση ηλεκτρομαγνήτη μέσα στον αποσβεστήρα γίνεται δυνατός ο έλεγχος του ιξώδους οπότε και η απόσβεση της ανάρτησης.

Η ημιενεργητικές αναρτήσεις έχουν το πλεονέκτημα, ότι μπορούν να ρυθμίσουν την συμπεριφορά του οχήματος, ώστε να είναι πιο κοντά στις απαιτήσεις του οδηγού. Ωστόσο έχουν αυξημένο κόστος για την κατασκευή, την εξέλιξη τους άλλα και για την λειτούργει τους διότι υπάρχει κατανάλωση ενεργείας για την αλλαγή των ρυθμίσεων. Άλλο ένα μειονέκτημα των ημιενεργητικών αναρτήσεων είναι η ταχύτητα αλλαγής ρύθμισης, η οποία εξαρτάται

κυρίως από τον οδηγό, που δίνει την εντολή της αλλαγής, και ελάχιστα από το ηλεκτρονικό σύστημα. Αυτό το χαρακτηριστικό επηρεάζει σε περιπτώσεις όπου, ενώ το όχημα είναι ρυθμισμένο για να παρέχει κυρίως άνεση στους επιβάτες, απαιτείται η γρήγορη αντίδραση του οδηγού όπου επικεντρώνεται στον ελιγμό χωρίς όμως να εκμεταλλεύεται πλήρως τις δυνατότητες του οχήματος του.

1.4.3 Ενεργητική ανάρτηση

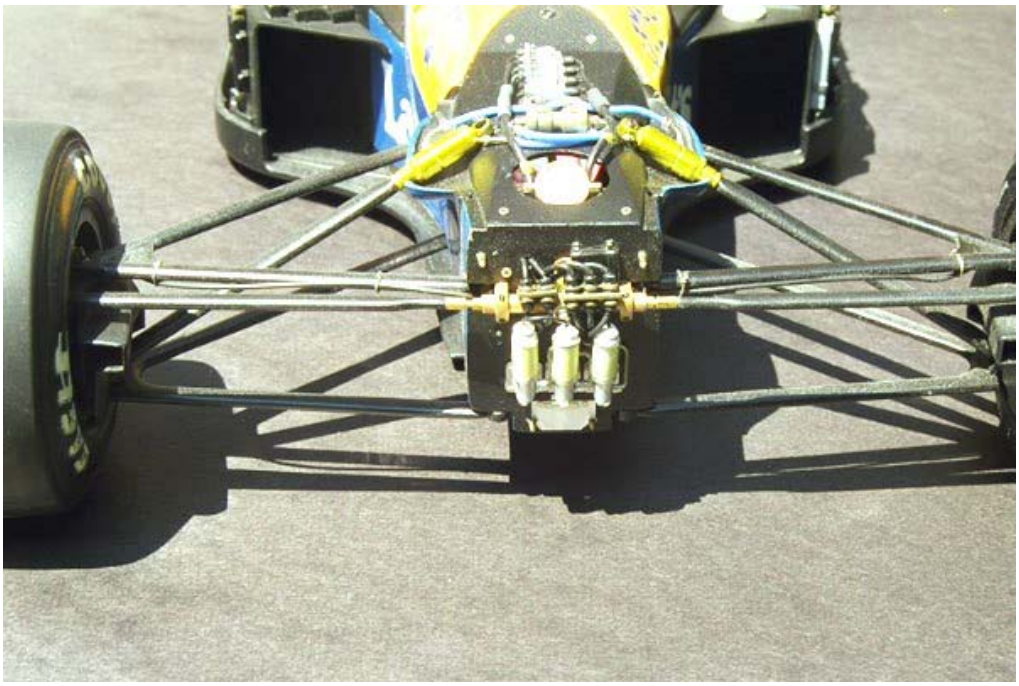
Οι ενεργητικές αναρτήσεις χρησιμοποιούν αισθητήρες και επενεργητές ώστε να μεταβάλουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος καθώς και την ενέργεια του συστήματος ανάρτησης, με σκοπό την βελτίωση της οδικής συμπεριφορά ανάλογα με τις στιγμιαίες απαιτήσεις. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται παρέχουν μετρήσεις για τις επιταχύνσεις που δέχεται το όχημα, την ταχύτητα του, την κλίση που έχει, την ισχύ που δίνει ο κινητήρας στους τροχούς, την θέση των ποδόπληκτρων γκαζιού και φρένων, την γωνιά του τιμονιού κλπ. Από την επεξεργασία των μετρήσεων προκύπτουν οι παρεμβάσεις που απαιτούνται στα χαρακτηριστικά της ανάρτησης, ώστε να το όχημα να έχει την καλύτερη δυνατή οδική συμπεριφορά. Οι παρεμβάσεις αυτές υλοποιούνται μέσω ηλεκτρονικών, υδραυλικών ή πνευματικών συστημάτων. Μέσω των επενεργητών αυτών είναι εφικτή η μεταβολή της απόσβεσης και του μέτρου ελαστικότητας που έχει η ανάρτηση, καθώς και η άσκηση δύναμης στον τροχό, ανεξάρτητης από την σχετική θέση του ως προς το όχημα.

Εικόνα 1.5
ενεργητική ανάρτηση BMW Dynamic Drive

Το αποτέλεσμα της ανάδρασης των ενεργητικών αναρτήσεων στις συνθήκες κίνησης του οχήματος έχει αισθητό αποτέλεσμα την ενεργητική ασφάλεια, την άνεση αλλά και τις επιδόσεις των οχημάτων που τις περιλαμβάνουν. Τα οχήματα με ενεργητικές αναρτήσεις έχουν ιδιαίτερα αισθητό προβάδισμα συγκρινόμενα με αυτά που έχουν παθητική ή ημιενεργητική. Για τον λόγο αυτό οι ενεργητικές αναρτήσεις έχουν απαγορευτεί από την FIA

(Fédération Internationale de l'Automobile) σε διάφορα ειδή μηχανοκινήτου αθλητισμού όπως για παράδειγμα στη Formula 1.

Ενεργητικές αναρτήσεις χρησιμοποιήθηκαν στη Formula 1 από το 1987, που η Lotus τις ενσωμάτωσε στο μονοθέσιο της Lotus 99T, έως το 1994 οπού απαγορεύτηκαν μαζί με άλλα ηλεκτρονικά συστήματα επειδή έκαναν της ικανότητες του οδηγού σχεδόν ανεξάρτητες της επίδοσης του οχήματος στον αγώνα. Η μεγίστη εκμετάλλευση του συστήματος την επιτεύχθηκε στο μονοθέσιο Williams FW14B. Εκτός από την δυναμική συμπεριφορά των μονοθεσιών, οι ενεργητικές αναρτήσεις είχαν σημαντικό αντίκτυπο και στην αεροδυναμική τους, λόγω της δυνατότητας τους να διατηρούν το όχημα παράλληλο με το οδόστρωμα και να μεταβάλουν το ύψος ανάλογα με την ταχύτητα του άνεμου. Ενδεικτικά η Lotus 99T εκτός των αισθητήρων σε σημεία των αναρτήσεων είχε και αισθητήρες ταχύτητας άνεμου, ενώ χρειάζονταν 87 παράμετροι για να υπολογιστεί η ανάδραση του υδραυλικού συστήματος.



Εικόνα 1.6
Σύστημα ανάρτησης από το μονοθέσιο Williams FW14B

Εκτός από τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι ενεργητικές αναρτήσεις έχουν και αρκετά μειονεκτήματα. Αυτά δεν σχετίζονται με την συμπεριφορά του οχήματος αλλά με το κόστος τους. Εκτός από το αυξημένο κόστος των απαιτούμενων εξαρτημάτων, η εξέλιξη ενός συστήματος ενεργητικής ανάρτησης είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και απαιτεί εξέλιξη συστημάτων επενέργειας, μετρήσεων και επεξεργασίας των μετρήσεων. Η λειτούργει ενός συστήματος ενεργητικής ανάρτησης απαιτεί επίσης ενέργεια, με αποτέλεσμα να περιορίζει την τελική απόδοση του οχήματος. Ένα αρκετά οικονομικό συστήματα που χρησιμοποίησε η Lotus σε μονοθέσιο της, κατανάλωνε σε ομαλό δρόμο 4 - 4,5 ίππους, ενώ η κατανάλωση τους μπορούσε να φτάσει ακόμα και τους 9 ίππους. Επιπλέον τα εξαρτήματα που απαιτούνται έκτος από το κόστος αυξάνουν και το βάρος του οχήματος.

1.5 Υδραυλικά και πνευματικά συστήματα

Τα υδραυλικά και πνευματικά συστήματα είναι μηχανισμοί που χρησιμοποιώντας ένα υδραυλικό ρευστό (υγρό ή αέριο) μεταφέρουν κίνηση ή ισχύ. Η λειτουργία των υδραυλικών και πνευματικών συστημάτων στηρίζεται στο νόμο του Pascal σύμφωνα με τον οποίο εφαρμόζοντας πίεση σε ένα υδραυλικό ρευστό που βρίσκεται σε κλειστό δοχείο, η πίεση μεταδίδεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις.

Τα πνευματικά συστήματα μπορούν να αποδώσουν αρκετά μικρότερες δυνάμεις συγκριτικά με τα υδραυλικά. Ωστόσο τα πνευματικά συστήματα αξιοποιούν τον ατμοσφαιρικό αέρα και τη συμπιεστότητα του, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται δεξαμενή ή υδραυλικό υγρό και η λειτουργία τους να είναι λιγότερο άμεση στις μεταβολές. Λόγω της συμπιεστότητας των αερίων αντικαθιστώνται, σε ορισμένες εφαρμογές, τα ελατήρια από πνευματικά συστήματα.

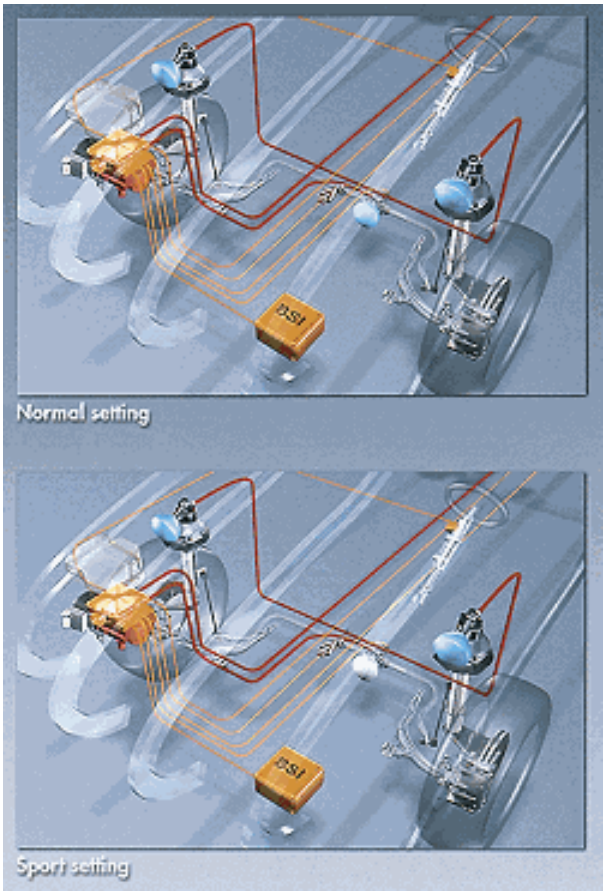
Η χρήση υδραυλικών συστημάτων είναι αρκετά διαδεδομένη λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ισχύος τους. Αυτό το χαρακτηριστικό τους προκύπτει από τις υψηλές πιέσεις που μπορούν να αναπτύσσουν. Άλλο ένα χαρακτηριστικό των υδραυλικών κυκλωμάτων είναι η άμεση μετάδοση δυνάμεων λόγω της ελαχίστης συμπιεστότητας των υγρών. Τα περισσότερα σύγχρονα οχήματα περιλαμβάνουν υδραυλικά συστήματα, με τα πιο γνωστά να είναι τα υδραυλικά φρένα και το υδραυλικό σύστημα διεύθυνσης. Ωστόσο υδραυλικά συστήματα χρησιμοποιούνται και σε άλλα υποσυστήματα των οχημάτων, όπως στις αναρτήσεις, στην κίνηση υπερκατασκευών, στην μετάδοση κίνησης κλπ.

1.6 Υδροπνευματικές αναρτήσεις

Σε πολλά σύγχρονα αυτοκίνητα, ειδικά μεγάλων κατηγοριών, χρησιμοποιούνται υδροπνευματικές αναρτήσεις. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτών είναι η άνεση που προσφέρουν και η ρυθμισιμότητα όσον αφορά την απόσβεση των κραδασμών και το ύψος του οχήματος. Ωστόσο κάποια συστήματα υδροπνευματικών αναρτήσεων στοχεύουν και στη μείωση των κλίσεων του οχήματος στις στροφές ή την βελτίωση της συμπεριφοράς του οχήματος κατά την διάρκεια ελιγμών.

Μερικά υδροπνευματικά συστήματα είναι τα:

- **Citroen Hydractive**



Εικόνα 1.7
Citroen Hydractive

Το 1954 η Citroen κυκλοφόρησε το πρώτο αυτοκίνητο της με υδροπνευματική ανάρτηση, συγκεκριμένα με το σύστημα Hydractive, η εξέλιξη του οποίου συνεχίζεται μέχρι σήμερα ενώ έχουν υπάρξει ήδη πάνω από 3 διαφορετικές εκδοχές του σε αυτοκίνητα της γαλλικής εταιρίας. Το Hydractive, ανάλογα με την έκδοση, επιδρά στην απόσβεση, τις σταθερές ελατηρίων, το ύψος του οχήματος και δρα ως αντιστρεπτική ράβδος. Στις νεότερες εκδοχές του δέχεται δεδομένα από μετρητικές διατάξεις και μεταβάλλει τα παραπάνω χαρακτηριστικά ώστε να έχει κατά περίπτωση από πολύ άνετη οδήγηση έως οδική συμπεριφορά αγωνιστικού αυτοκινήτου. Τα δεδομένα αυτά αφορούν επιταχύνσεις, την θέση ποδόπληκτρου γκαζιού, την γωνία τιμονιού κλπ.

- **Mercedes Active Body Control (ABC)**

Η Mercedes-Benz ξεκίνησε να χρησιμοποιεί πνευματικές αναρτήσεις σε οχήματα της το 1964 με το μοντέλο Mercedes-Benz 600. Στόχος της ήταν η μεγαλύτερη άνεση των επιβατών. Δέκα χρόνια αργότερα κυκλοφόρησε η Mercedes-Benz 450SEL 6.9 με υδροπνευματική ανάρτηση στα χνάρια της Citroen. Το σύστημα αυτό παρείχε αρκετή άνεση στους επιβάτες ενώ εξακολουθούσε να έχει ιδιαίτερα καλές επιδόσεις για αυτοκίνητο της γενιάς και της κατηγορίας του.

Εικόνα 1.8
Mercedes Active Body Control

Η πιο σύγχρονη υλοποίηση των υδροπνευματικών αναρτήσεων της εταιρίας από την Στουτγάρδη είναι το σύστημα Active Body Control (ABC). Σε αντίθεση με τα σύγχρονα συστήματα Hydractive, το ABC είναι ιδιαίτερα απλό, μεταβάλει με τη χρήση υδραυλικού συστήματος, τις σταθερές των ελατηρίων και εξασφαλίζει μειωμένες κλίσεις οχήματος.

- **Jeep Quadra Lift και Selec-Trac**

Εικόνα 1.9
Jeep Quadra Lift

Η αμερικάνικη εταιρία Jeep κατασκευάζει οχήματα για οδήγηση εκτός δρόμου. Τα οχήματα αυτά έχουν ιδιαιτέρες απαιτήσεις όσον αφορά το ύψος τους από το έδαφος, την σκληρότητα και την διαδρομή των αναρτήσεων τους. Τα τελευταία χρόνια η Jeep, για λογούς οικονομίας καυσίμου και άνεσης επιβατών, εξοπλίζει ορισμένα από τα αυτοκίνητα που παράγει με τα συστήματα Quadra Lift και Selec-Trac. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με χρήση αερίου υπό πίεση (ατμοσφαιρικού αέρα ή αζώτου ανάλογα με την έκδοση), ώστε να αλλάζουν το ύψος του οχήματος και την οδική συμπεριφορά του αντίστοιχα.

- **Tesla motors ACTIVE AIR SUSPENSION**

Εικόνα 1.10
Active Air Suspension

Η Tesla motors με έδρα την Καλιφόρνια των Η.Π.Α. κατασκευάζει από το 2003 ηλεκτροκίνητα οχήματα. Στο αυτοκίνητο Tesla Model S ενσωματώνει το σύστημα Active Air Suspension, το οποίο χρησιμοποιείται για να μεταβάλει, με την χρήση πνευματικού συστήματος, το ύψος του οχήματος, είτε για οδήγηση σε ανώμαλο οδόστρωμα είτε για βελτίωση της αεροδυναμικής του οχήματος, καθώς και για να περιορίζει τις κλίσεις του αμαξώματος λόγω ανομοιόμορφης κατανομής φορτίου.

- **WABCO Electronically Controlled Air Suspension (ECAS)**

Το σύστημα ECAS χρησιμοποίει πνευματικό σύστημα ελεγχόμενο από μια ηλεκτρονική μονάδα έλεγχου (ECU) για να περιορίσει της κλίσεις του οχήματος και να βελτιώσει την οδική συμπεριφορά του. Επιπλέον το σύστημα αυτό προσαρμόζει την σκληρότητα του παραμορφώσιμου μέσου, μεταβάλλοντας την ποσότητα του αέρα, με αποτέλεσμα να έχει το όχημα ομαλότερη κύλιση όταν κινείται χωρίς φορτίο. Το σύστημα αυτό μπορεί να συνδεθεί επίσης και με άλλα πνευματικά συστήματα που υπάρχουν σε οχήματα, όπως το σύστημα έλεγχου των θυρών των λεωφορείων.

Κεφάλαιο 2

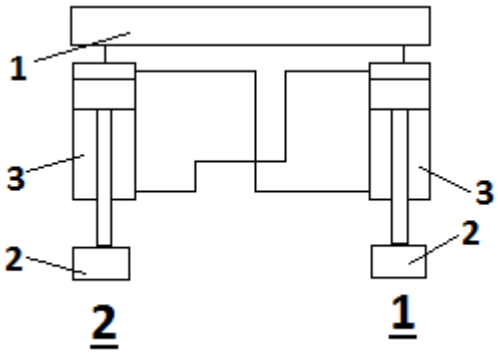
Υδροπνευματική ανάρτηση με σύνδεση τροχών του ίδιου άξονα

Η ανάπτυξη του συστήματος ξεκίνησε θέτοντας τους έξης στόχους:

- ανάπτυξη πλήρως λειτουργικής ανάρτησης με χρήση υδραυλικών κυκλωμάτων.
- Διασύνδεση των τροχών για περιορισμό κλίσεων, ώστε να μην απαιτείται αντιστρεπτική ράβδος.

Για την αντικατάστασης της αντιστρεπτικής ράβδου θέλουμε ένα σύστημα που η κίνηση του ενός τροχού προς μια κατεύθυνση να συμβάλει στην κίνηση του συμμετρικού του τροχού προς την ίδια κατεύθυνση.

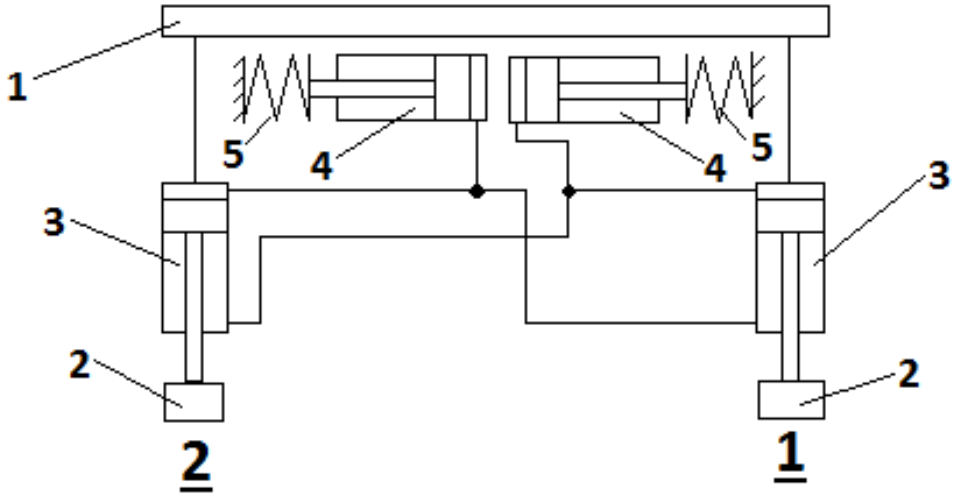
Η πρώτη ιδέα ήταν η αντικατάσταση του συνόλου ελατηρίου και αποσβεστήρα με υδραυλικό έμβολο. Αυτό θα περιόριζε τις μη αναρτώμενες μάζες του οχήματος. Για την σύνδεση των τροχών του ιδίου άξονα θα γινόταν σύνδεση των εμβολών της ανάρτησης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Ωστόσο αυτή η διάταξη δεν θα μπορούσε να αποτελέσει πλήρως λειτουργική ανάρτηση, γιατί η κίνηση που θα επιτρεπόταν δεν θα ήταν από παραμόρφωση ελατηρίου αλλά από την συμπιεστότητα του ρευστού και την παραμόρφωση των μηχανικών μερών. Αυτό γίνεται λόγω τις διαφοράς όγκου στους θαλάμους των κυλίνδρων εξ αιτίας του βάκτρου.



Σχήμα 2.1
αρχική ιδέα για την σύνδεση των τροχών

1	**αναρτώμενη μάζα**
2	**μη αναρτώμενη μάζα**
3	**κύλινδρος που συνδέει αναρτώμενη και μη αναρτώμενη μάζα**

Τα προβλήματα της παραπάνω διάταξης μπορούν να αντιμετωπιστούν με χρήση δυο επιπλέων υδραυλικών κυλίνδρων οι όποιοι θα παραμορφώνουν ελατήρια, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2. Με αυτόν τον τρόπο απομακρύνονται τα παραμορφώσιμα στοιχεία από τον τροχό, οπότε οι μη αναρτώμενες μάζες παραμένουν μικρότερες από τα συμβατικά συστήματα ανάρτησης. Εκτός αυτού η διαδρομή της ανάρτησης μπορεί να είναι διαφορετική από το μήκος που παραμορφώνεται το ελατήριο, λόγω τον διαφορετικών κυλίνδρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.



Σχήμα 2.2
παθητικό υδροπνευματικό σύστημα ανάρτησης

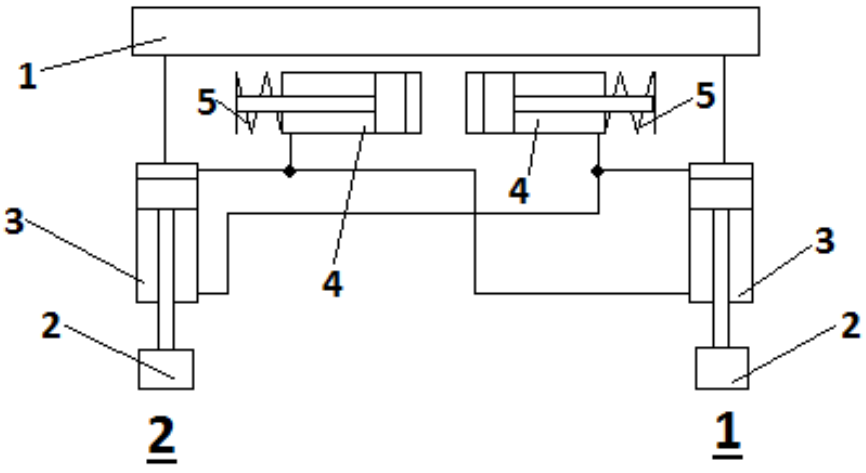
1	**αναρτώμενη μάζα**
2	**μη αναρτώμενη μάζα**
3	**κύλινδρος που συνδέει αναρτώμενη και μη αναρτώμενη μάζα**
4	**κύλινδρος παραμόρφωσης ελατηρίων**
5	**ελατήριο**

Η απομάκρυνση των αποσβεστήρων και των ελατηρίων από τον τροχό για την μείωση των μη αναρτώμενων μαζών είναι συνήθεις σε οχήματα που προορίζονται για αγώνες σε πίστα και υπάρχει και σε μικρό αριθμό αυτοκινήτων δρόμου. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούν μοχλό που ενώνει το σύστημα ελατηρίου και αποσβεστήρα με μια ράβδο που είναι συνδεδεμένη με την έδραση του τροχού. Η ράβδος μπορεί να δέχεται θλιπτικά (pullrod) ή εφελκυστικά (pushrod) φόρτια ανάλογα με την μορφή της διάταξης. Στην εικόνα 2-1 φαίνεται το σύστημα pullrod που χρησιμοποιείται στην Lamborghini Aventador.

Εικόνα 2.1
Lamborghini Aventador suspension system

Λόγω της χρήσης μοχλού η συμπροφορά της ανάρτησης δεν είναι γραμμική ενώ για μεγάλες διαδρομές ανάρτησης προκύπτουν ογκώδεις και βαριές διατάξεις. Κατά των σχεδιασμό τέτοιον διατάξεων απαιτείται η ενίσχυση των σημείων του πλαισίου που θα εδράζονται οι μοχλοί και τα συστήματα απορρόφησης κραδασμών, καθώς και απαιτείται να μην υπάρχουν άλλα συστήματα που να παρεμποδίζουν την κίνηση των επιμέρους τμημάτων του συστήματος. Αυτό μπορεί να γίνει αρκετά περιοριστικό στην χωροταξία ενός οχήματος. Τα προαναφερθέντα προβλήματα, με εξαίρεση την απαίτηση σε ενίσχυση αρκετών σημείων του πλαισίου, λύνονται με χρήση της υδραυλικής διάταξης του σχήματος 2.2. Οι κύλινδροι έχουν γραμμική παροχή, η οποία μεταφέρεται με σωλήνες σε οποιοδήποτε μέρος του οχήματος και δεν περιορίζει την διαδρομή της ανάρτησης.

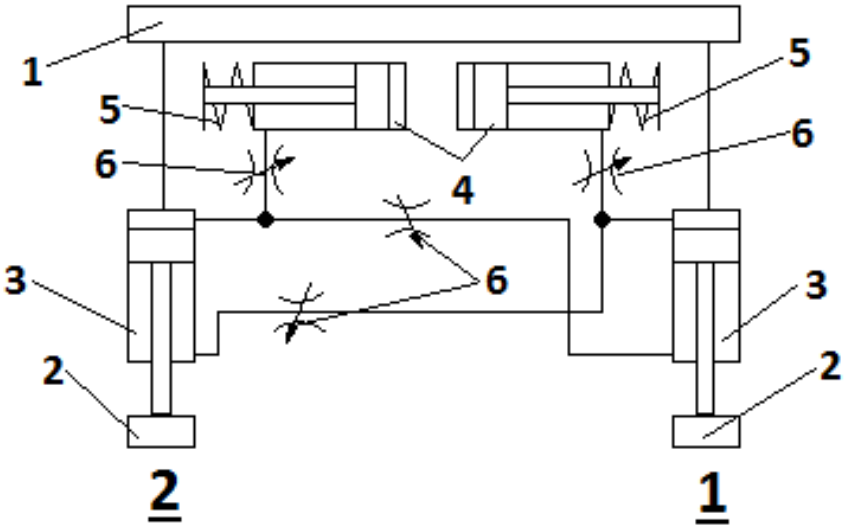
Η επόμενη βελτίωση που έγινε στο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 2.3. Η τροποποίηση αυτή έγινε με σκοπό στο βάκτρο να ασκούνται εφελκυστικά φορτία αντί για θλιπτικά. Με αυτήν την τροποποίηση μειώνονται τα σημεία που απαιτούν ενίσχυση του πλαισίου άρα και το βάρος και η πολυπλοκότητα του. Επίσης είναι εφικτό, με τοποθέτηση των κυλίνδρων που φέρουν τα ελατήρια σε σημείο με εύκολη πρόσβαση, να μειωθεί ο χρόνος αλλαγής ελατήριων. Αυτό θα είχε θετικά αποτελέσματα κατά την φάση δοκιμών και εξέλιξης του οχήματος.



Σχήμα 2.3
εξέλιξη παθητικού υδροπνευματικού συστήματος ανάρτησης

1	**αναρτώμενη μάζα**
2	**μη αναρτώμενη μάζα**
3	**κύλινδρος που συνδέει αναρτώμενη και μη αναρτώμενη μάζα**
4	**κύλινδρος παραμόρφωσης ελατηρίων**
5	**ελατήριο**

Η απόσβεση των ταλαντώσεων στην παραπάνω διάταξη γίνεται από τις απώλειες στις σωληνώσεις και την τριβή των κυλίνδρων. Ωστόσο για καλύτερη οδική συμπεριφορά και για να υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης των ταλαντώσεων και των κλίσεων του οχήματος θα πρέπει να τοποθετηθούν βαλβίδες ή άλλες τοπικές αντιστάσεις. Η χρήση ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενων βαλβίδων δίνει την δυνατότητα μεταβολής της απόσβεσης όποτε και της οδικής συμπεριφοράς του οχήματος. Μια τοποθέτηση ρυθμιζόμενων τοπικών απωλειών η οποία θα διευκόλυνε στην ρύθμιση της συμπεριφοράς του οχήματος για της κατακόρυφες ταλαντώσεις αλλά και για τις κλίσεις φαίνεται στο σχήμα 2.4.

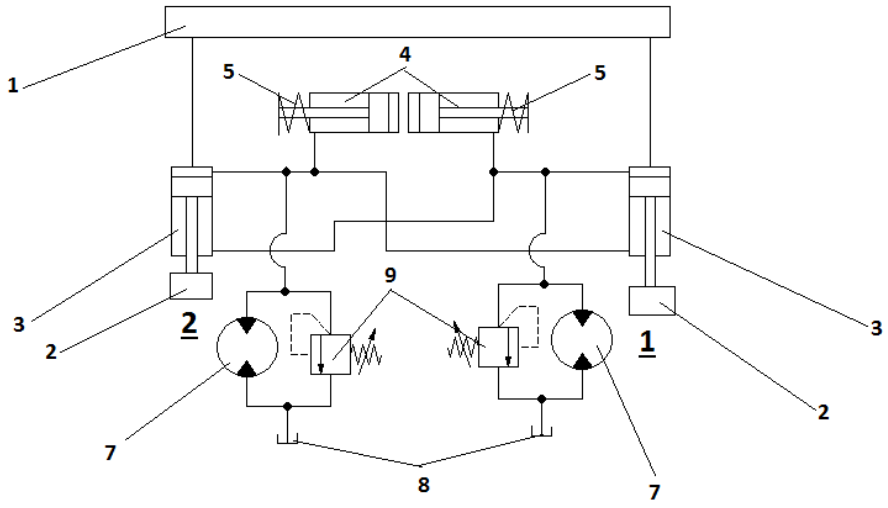


Σχήμα 2.4
εξέλιξη παθητικού υδροπνευματικού συστήματος ανάρτησης

1	αναρτώμενη μάζα
2	μη αναρτώμενη μάζα
3	κύλινδρος που συνδέει αναρτώμενη και μη αναρτώμενη μάζα
4	κύλινδρος παραμόρφωσης ελατηρίων
5	ελατήριο
6	τοπικές απώλειες

Για την προστασία του συστήματος από υψηλές πιέσεις απαραίτητες είναι οι ασφαλιστικές διατάξεις, οι οποίες ολοκληρώνουν το υδραυλικό κύκλωμα. Για την συγκεκριμένη διάταξη απαιτούνται δυο ασφαλιστικά, ένα για κάθε κλειστό κύκλωμα. Η θέση που είναι πιθανό να εμφανιστούν υψηλές πιέσεις στο κύκλωμα είναι, λόγω δυναμικών φαινομένων, μετά τον κύλινδρο που συνδέεται με τον τροχό στην πλευρά όπου έχουμε την μεγαλύτερη επιφάνια κυλίνδρου όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.

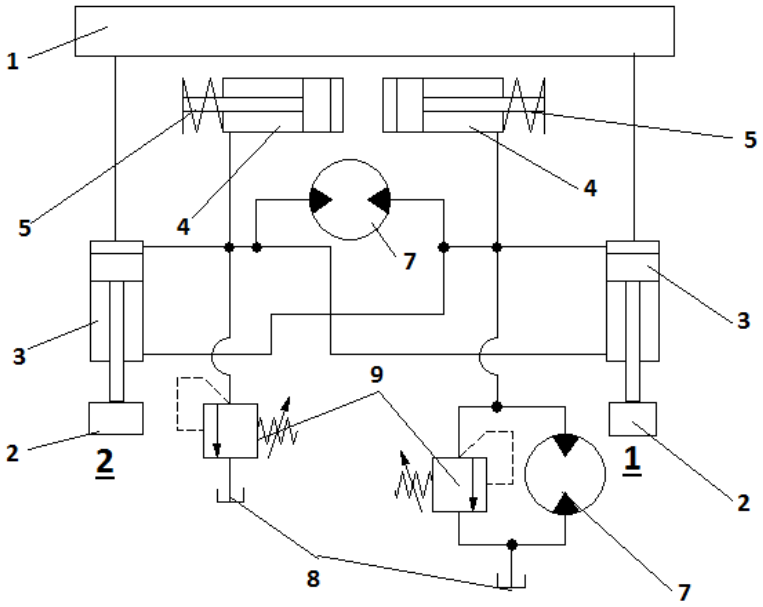
Στο ίδιο σχήμα φαίνονται και δυο αντλίες, μια για κάθε κύκλωμα, οι οποίες είναι για την μεταβολή του ύψους του οχήματος. Η αλλαγή του ύψους έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε οχήματα που δεν χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σε πίστα, αυτά είναι είτε για αποφυγή εμποδίων λόγω κακού οδοστρώματος, χιονιού κλπ είτε για χρήση εκτός δρόμου είτε για βελτίωση της αεροδυναμικής για μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Για να είναι το σχήμα πιο ευανάγνωστο έχουν παραλειφθεί οι διατάξεις τοπικών απωλειών οι οποίες παραμένουν στις θέσεις που φαίνονται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.5
υδροπνευματικό σύστημα ανάρτησης με δυνατότητα μεταβολής ύψους

1	**αναρτώμενη μάζα**
2	**μη αναρτώμενη μάζα**
3	**κύλινδρος που συνδέει αναρτώμενη και μη αναρτώμενη μάζα**
4	**κύλινδρος παραμόρφωσης ελατηρίων**
5	**ελατήριο**
7	**αντλία υδραυλικού υγρού**
8	**δεξαμενή υδραυλικού υγρού**
9	**ασφαλιστικό**

Η ρύθμιση του ύψους και της απόσβεσης δεν είναι η μόνες επιδράσεις που μπορεί να ενσωματωθούν στο συγκεκριμένο σύστημα ώστε να επηρεάζεται η οδική συμπεριφορά. Με αξιοποίηση αισθητήρων για την μέτρηση των κλίσεων του οχήματος και των επιταχύνσεων που δέχεται σε διαμήκη, εγκάρσιο και κατακόρυφο άξονα μπορεί να γίνει χρήση των αντλιών με σκοπό το όχημα να μένει επίπεδο, χωρίς να επηρεάζεται από ανώμαλο οδόστρωμα ή πλευρικές επιταχύνσεις. Ωστόσο για ταχύτερη ανάδραση και απλούστερη λειτουργιά του συστήματος που θα αναιρεί τις κλίσεις του οχήματος προτιμάται χρήση μιας αντλίας όπου θα μεταφέρει ρευστό από το ένα κλειστό κύκλωμα στο άλλο. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η αδράνεια του συστήματος ανάδρασης, δεν επηρεάζεται το σύστημα από αποκλίσεις στην παροχή των αντλιών και γίνεται το σύστημα οικονομικότερο διότι απαιτείται μονό ένας κινητήρας ο όποιος να έχει την δυνατότητα άμεσης εκκίνησης και μεταβολής ταχύτητας περιστροφής , ενώ δεν αυξάνεται ο συνολικός αριθμός αντλιών. Το σύστημα φαίνεται στο σχήμα 2.6, στο οποίο επίσης έχουν παραλειφθεί οι διατάξεις τοπικών απωλειών οι οποίες παραμένουν στις θέσεις που φαίνονται στο σχήμα 2.4.



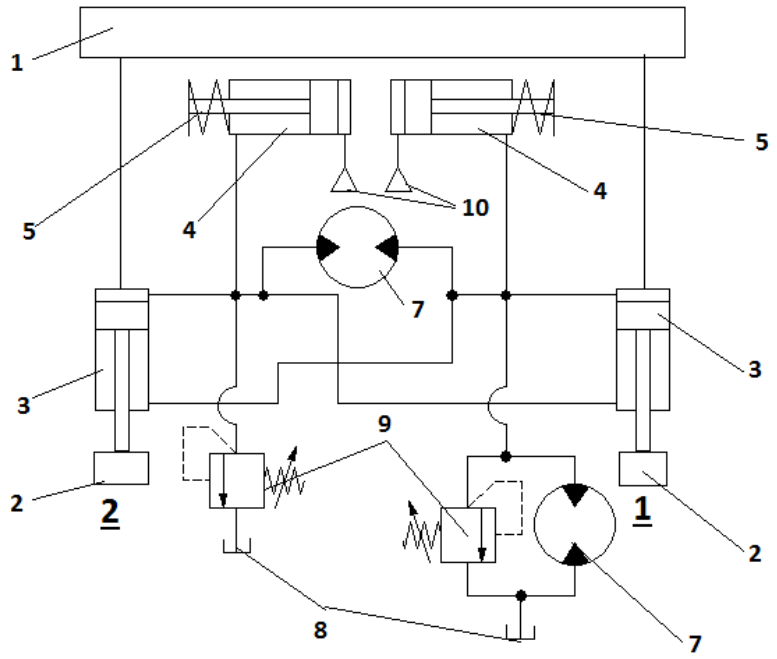
Σχήμα 2.6
υδροπνευματικό σύστημα ανάρτησης με αντιστάθμιση κλίσεων

1	**αναρτώμενη μάζα**
2	**μη αναρτώμενη μάζα**
3	**κύλινδρος που συνδέει αναρτώμενη και μη αναρτώμενη μάζα**
4	**κύλινδρος παραμόρφωσης ελατηρίων**
5	**ελατήριο**
7	**αντλία υδραυλικού υγρού**
8	**δεξαμενή υδραυλικού υγρού**
9	**ασφαλιστικό**

Άλλος ένας τρόπος να εισάγεται ενεργεία στο σύστημα, ώστε να υπάρχει άμεση επίδραση στην πρόσφυση του οχήματος είναι με χρήση πνευματικής αντίθλιψης στους κυλίνδρους που φέρουν τα ελατήρια. Με την εισαγωγή αεριού στους κυλίνδρους αυτούς είναι εφικτή επίσης η μεταβολή της σκληρότητας της ανάρτησης. Η χρήση αέρα ως ελατηρίου, εκμεταλλευόμενοι την συμπιεστότητα του, αναιρεί την γραμμική συμπεριφορά των ελατηρίων διότι η πίεση ενός αεριού διπλασιάζεται όταν ο όγκος του μειώνεται στο μισό, θεωρώντας τις υπόλοιπες συνθήκες σταθερές. Η ρύθμιση του όγκου είναι εύκολα επιτεύξιμη, αλλά με περιορισμούς, με χρήση βαλβίδων που θα περιορίζουν το αέριο στον κύλινδρο και σε τμήμα της σωλήνωσης του πνευματικού συστήματος, ενώ με χρήση πνευματικής αντλίας είναι εφικτό να μεταβάλλεται ιδιαίτερα αισθητά η σκληρότητα της ανάρτησης.

Επειδή η σκληρότητα της ανάρτησης προκύπτει από το ελατήριο αλλά και από το πνευματικό σύστημα έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί και αποκλείστηκα με το ένα σύστημα σε λειτούργει σε περίπτωση βλάβης του άλλου. Αυτό στοχεύει στην αύξηση της αξιοπιστίας του οχήματος. Στο σχήμα 2.7 φαίνεται το σύστημα του σχήματος 2.6 με την

προσθήκη παροχής αεριού στους κυλίνδρους ώστε να συνεισφέρουν στην σταθερά του ελατηρίου.



Σχήμα 2.7
σύστημα ενεργητικής υδροπνευματικής ανάρτησης

1	αναρτώμενη μάζα
2	μη αναρτώμενη μάζα
3	κύλινδρος που συνδέει αναρτώμενη και μη αναρτώμενη μάζα
4	κύλινδρος παραμόρφωσης ελατηρίων
5	ελατήριο
7	αντλία υδραυλικού υγρού
8	δεξαμενή υδραυλικού υγρού
9	ασφαλιστικό
10	είσοδος πνευματικού συστήματος

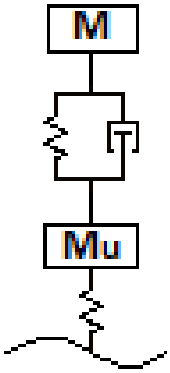
Κεφάλαιο 3

Μοντελοποίηση διάταξης

3.1 Μοντέλα οχημάτων

Τα οχήματα είναι συστήματα πολλών βαθμών ελευθερίας. Η άνεση των επιβατών εξαρτάται από τις ταλαντώσεις που δέχεται το όχημα, οι οποίες είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις ιδιοσυχνότητες του οχήματος.

3.1.1 Quarter car model

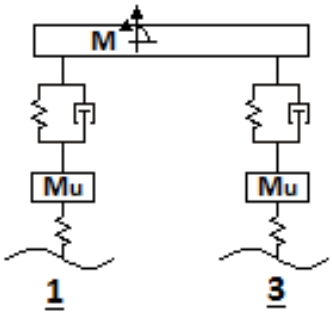


Σχήμα 3.1
Quarter car model

Για την βελτιστοποίηση ενός συστήματος ανάρτησης ως προς τις κατακόρυφες ταλαντώσεις του οχήματος αναλύουμε το σύστημα με ένα μοντέλο Quarter car. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει την μάζα του οχήματος διαιρεμένη με τον αριθμό τέσσερα, συνδεδεμένη με την μη αναρτώμενη μάζα με χρήση ελατηρίου και αποσβεστήρα. Η μη αναρτώμενη μάζα συνδέεται με χρήση απλού ελατηρίου με το έδαφος. Το σύστημα αυτό είναι δυο βαθμών ελευθερίας και μας επιτρέπει να αναλύσουμε την επίδραση των κατακόρυφων επιταχύνσεων στο όχημα.

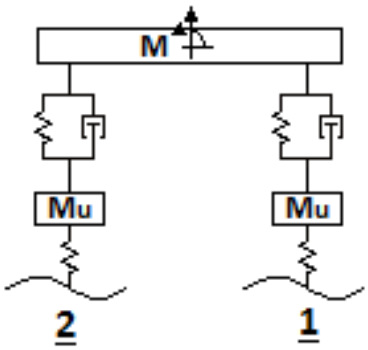
3.1.2 Half car model

Με χρήση Quarter car model είναι ανέφικτο να μελετηθεί η επίδραση των επιταχύνσεων στον διαμήκη και τον εγκάρσιο άξονα, καθώς και των κλίσεων που επιφέρουν. Η περιστροφή του σώματος περί τον εγκάρσιο άξονα μελετάται με μοντέλο ποδήλατου, δηλαδή με χρήση του της μιας μόνο πλευράς του οχήματος. Το σύστημα αυτό αποτελείται από την μισή μάζα του οχήματος συνδεδεμένης μέσω ελατηρίων και αποσβεστήρων με της αναρτώμενες μάζες ενός τροχού από κάθε άξονα, οι όποιοι είναι συνδεδεμένου με το έδαφος με ελατήριο. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2
Bicycle model

Έκτος από το μοντέλο ποδήλατου χρησιμοποιείται επίσης μοντέλο του μισού οχήματος με τους τροχούς του ιδίου άξονα. Με αυτό το μοντέλο μπορούμε να προσδιορίσουμε τις κλίσεις του οχήματος περί τον διαμήκη άξονα του. Αυτό το μοντέλο αποτελείται από την μισή μάζα του οχήματος συνδεδεμένης με τις μη αναρτώμενες μάζες στους τροχούς του ιδίου άξονα μέσω ελατηρίων και αποσβεστήρων, ενώ οι μη αναρτώμενες μάζες συνδέονται με το οδόστρωμα με χρήση ελατηρίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Με αυτό το σύστημα παρατηρείται και η επίδραση αντιστρεπτικής ράβδου στο όχημα.

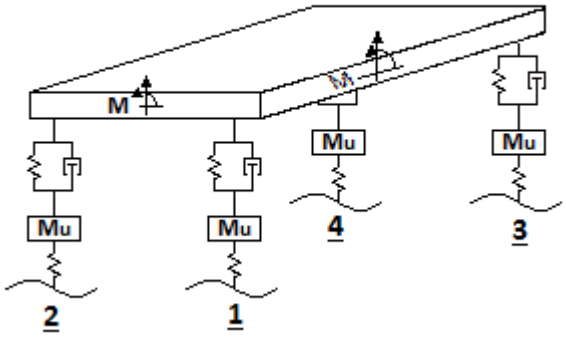


Σχήμα 3.3
Half car model

Τα δυο παραπάνω συστήματα είναι 4^{ων} βαθμών ελευθερίας, αφού αποτελούνται από την διάφορα ύψους του κέντρου μάζας του οχήματος και των εξεταζόμενων μη αναρτώμενων μαζών καθώς και την μεταβολή τις κλίσης του οχήματος.

3.1.3 Μοντέλο πλήρους αυτοκινήτου

Για να προσημειωθεί με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια η συμπεριφορά του οχήματος χρησιμοποιείται μοντέλο που περιγράφει ολόκληρο το όχημα. Αυτό αποτελείται από ολόκληρη την μάζα του οχήματος, συνδεδεμένη μέσω ελατηρίων και αποσβεστήρων με τις μη αναρτώμενες μάζες, οι οποίες συνδέονται μέσω ελατηρίου στο οδόστρωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει τις μεταβολές στις γωνίες περί τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα καθώς και των υψών του κέντρου μάζας και των μη αναρτώμενων μαζών, οπότε είναι σύστημα 7 βαθμών ελευθερίας. Οι επιπλέων δυνατότητες που προσφέρει αυτό το μοντέλο είναι η μελέτη διαφορετικών διεγέρσεων στην κάθε πλευρά του οχήματος και της ύπαρξης διαφορετικών διατάξεων αναρτώσης στους άξονες.



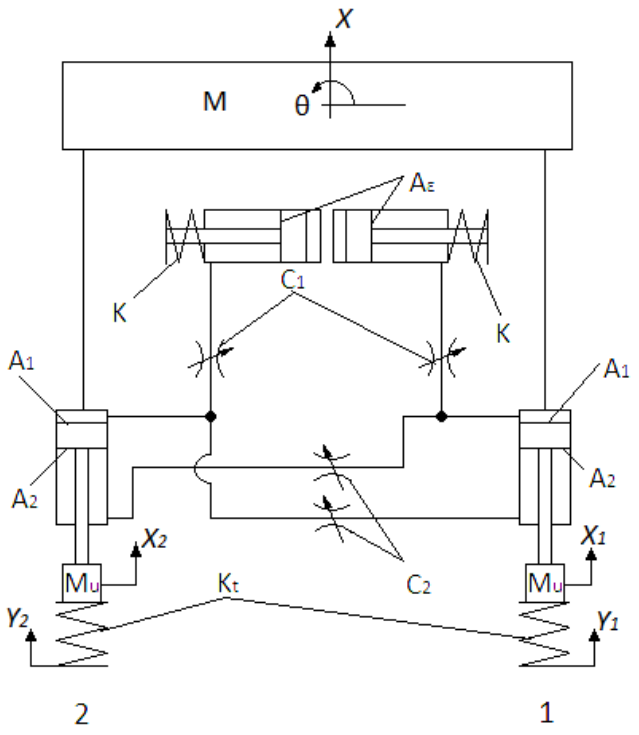
Σχήμα 3.4
Full car vibrating model

Στα παραπάνω μοντέλα παρουσιάζεται το επίσωτρο σαν απλό ελατήριο χωρίς απόσβεση. Αυτό γίνεται επειδή η απόσβεση που παρουσιάζει το ελαστικό είναι αρκετά μικρότερη από αυτήν του συστήματος ανάρτησης, ενώ ταυτόχρονα το μετρό ελαστικότητας είναι ιδιαίτερα μεγαλύτερο, οπότε η παράβλεψη της απόσβεσης του ελαστικού επιφέρει μικρές αποκλίσεις από την πραγματικότητα.

3.2 Μοντέλο διάταξης

Λόγο της σύνδεσης των τροχών του ιδίου άξονα μεταξύ τους η διάταξη μπορεί να περιγράφει με χρήση μοντέλου half car όπου θα εξετάζονται οι τροχοί του ιδίου άξονα. Για την

κατανόηση του συστήματος το μοντέλο παρουσιάζει το παθητικό σύστημα ανάρτησης, αυτό γίνεται γιατί η επιδράσεις που θα δεχόταν αν υπήρχε ανάδραση στις εξωτερικές επιδράσεις δεν θα ήταν εμφανής ο τρόπος λειτουργιάς της ανάρτησης. Το μοντέλο στην μορφή που εξεταστικέ φαίνεται στο σχήμα 3.5. Για την ανάπτυξη του μοντέλου έγιναν οι παρακάτω παραδοχές. Αμελήθηκε η τριβή που παρουσιάζεται στους κυλίνδρους και η απόσβεση του επισώτρου. Οι απώλειες των σωληνώσεων συνοψίστηκαν στις τοπικές απώλειες. Θεωρήθηκε επίσης σταθερή η θέση του κέντρου μάζας στο μέσο του μετατροχίου του οχήματος, η όποια επηρεάζεται από την κίνηση του υδραυλικού ρευστού και την κίνηση των ελατηρίων. Στο υδραυλικό σύστημα θεωρήθηκαν επίσης ως απαραμόρφωτα το υγρό και οι σωληνώσεις.



Σχήμα 3.1
σύστημα που προσομοιώθηκε

Από την δυναμική ανάλυση του συστήματος πρόεκυψαν οι εξισώσεις:

$$
\begin{aligned}
& m\ddot{X} + s_1 * (2*X - X_1 - X_2) \\
& + s_2 * ((\dot{X} - b*\dot{\theta} - X_2)^2 + (\dot{X} + b*\dot{\theta} - \dot{X}_1)^2) \\
& + s_3 * ((\dot{X} - b*\dot{\theta} - \dot{X}_2) * (\dot{X} + b*\dot{\theta} - \dot{X}_1)) \\
& + s_4 * ((\dot{X} - b*\dot{\theta} - \dot{X}_2)^2 + (\dot{X} + b*\dot{\theta} - \dot{X}_1)^2) = 0
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
& I*\ddot{\theta} + s_5 * (2*b*\theta - X_1 + X_2) \\
& + s_6 * ((\dot{X} + b*\dot{\theta} - \dot{X}_1)^2 + (\dot{X} - b*\dot{\theta} - \dot{X}_2)^2) \\
& + s_7 * ((\dot{X} - b*\dot{\theta} - \dot{X}_2)^2 + (\dot{X} + b*\dot{\theta} - \dot{X}_1))^2) = 0
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
& m_u * \ddot{X}_1 + K_t * (X_1 - Y_1) \\
& + s_8 * (A_1 * (X - b*\theta - X_2) - A_2 * (X + b*\theta - X_1)) \\
& + s_9 * (A_1 * (X + b*\theta - X_1) - A_2 * (X - b*\theta - X_2)) \\
& + s_{10} * (A_1 * (\dot{X} + b*\dot{\theta} - \dot{X}_1) - A_2 * (\dot{X} - b*\dot{\theta} - \dot{X}_2))^2
\end{aligned}
$$

$+ s_{11} * (A_2 * (\dot{X} + b*\dot{\theta} - \dot{X}_1))^2 = 0$

$m_u * \ddot{X}_2 + K_t * (X_2 - Y_2)$
$+ s_8 * (A_1 * (X + b*\theta - X_1)) - A_2 * (X - b*\theta - X_2))$
$+ s_9 * (A_1 * (X - b*\theta - X_2) - A_2 * (X + b*\theta - X_1)))$
$+ s_{10} * (A_1 * (\dot{X} - b*\dot{\theta} - \dot{X}_2) - A_2 * (\dot{X} + b*\dot{\theta} - \dot{X}_1))^2$
$+ s_{11} * (A_2 * (\dot{X} - b*\dot{\theta} - \dot{X}_2))^2 = 0$

Οι συντελεστές s_1 εως s_{11} δίνονται από τις σχέσεις:

$s1 = K*(\frac{A_1 - A_2}{A_\varepsilon})^2$
$s2 = C_1 * (A_1^2 + A_2^2) * (A_1 - A_2)$

$s3 = -4 * A_1 * A_2 * C_1 * (A_1 - A_2)$

$s4 = -C_2 * A_2^3$

$s5 = K*b*(\frac{A_1 - A_2}{A_\varepsilon})^2$
$s6 = C_1 * b * (A_1 + A_2)^2 * (A_1 - A_2)$
$s7 = A_2^3 * b * C_2$

$s8 = K*\frac{A_2}{A_\varepsilon^2}$
$s9 = -K*\frac{A_1}{A_\varepsilon^2}$
$s10 = -C_1 * A_1$

$s11 = C_2 * A_2^3$

Όπου:
X: μεταβολή ύψους αναρτώμενης μάζας

Θ: μεταβολή γωνίας αναρτώμενης μάζας

X_1*:* μεταβολή ύψους μη αναρτώμενης μάζας 1

X_2*:* μεταβολή ύψους μη αναρτώμενης μάζας 2

m: αναρτώμενη μάζα (του μισού οχήματος)

I: ροπή αδρανείας της αναρτώμενης μάζας

m_u*:* μη αναρτώμενη μάζα

b: μήκος μετατροχίου /2

K_t: μετρό ελαστικότητας επισώτρων

K: μετρό ελαστικότητας ελατηρίων

C_1: εντοπισμένες απώλειες σωλήνωσης προς τον κύλινδρο του ελατηρίου

C_2: εντοπισμένες απώλειες σωλήνωσης προς τον κύλινδρο του απέναντι τροχού

A_1: επιφάνεια κυλίνδρου τροχού

A_2: επιφάνεια κυλίνδρου τροχού μειωμένη κατά την επιφάνεια του βάκτρου

A_ε: επιφάνεια κυλίνδρου ελατηρίου μειωμένη κατά την επιφάνεια του βάκτρου

Y_1: ύψος οδοστρώματος στον τροχό 1

Y_2: ύψος οδοστρώματος στον τροχό 2

3.3 Ενέργεια συστήματος

Για την χρήση της μεθόδου Lagrange χρειάζεται να υπολογιστούν οι κινητική και δυναμική ενέργεια του συστήματος καθώς και η απώλεια ενέργειας.

Η κινητική ενέργεια του συστήματος είναι:

$$KE = \frac{1}{2}\, m\, \dot{X}^2 + \frac{1}{2}\, I\, \dot{\Theta}^2 + \frac{1}{2}\, m_u\, \dot{X}_1{}^2 + \frac{1}{2}\, m_u\, \dot{X}_2{}^2$$

Η δυναμική ενέργεια του συστήματος είναι:

$$\Delta E = \frac{1}{2}\, K_\tau\, (X_1 - Y_1)^2 + \frac{1}{2}\, K_\tau\, (X_2 - Y_2)^2$$
$$+ \frac{1}{2}\, K \left[\frac{(X - X_1 + b\Theta) * A_1 - (X - X_2 - b\Theta) * A_2}{A_\varepsilon}\right]^2$$
$$+ \frac{1}{2}\, K \left[\frac{(X - X_2 - b\Theta) * A_1 - (X - X_1 + b\Theta) * A_2}{A_\varepsilon}\right]^2$$

Και η απώλεια ενέργειας του συστήματος είναι:

$$AE = + \frac{1}{2}\, C_1\, [(X - X_1 + b\Theta) * A_1 - (X - X_2 - b\Theta) * A_2]^2$$
$$+ \frac{1}{2}\, C_1\, [(X - X_2 - b\Theta) * A_1 - (X - X_1 + b\Theta) * A_2]^2$$
$$+ \frac{1}{2} C_2 [(X - X_2 - b\Theta) * A_2]^2 + \frac{1}{2} C_2 [(X - X_1 + b\Theta) * A_2]^2$$

3.4 Προσομοίωση

Με χρήση του λογισμικού MATLAB, αξιοποιώντας την εντολή ode45, προσομοιώθηκε η κίνηση του μοντέλου. Πραγματοποιηθήκαν προσομοιώσεις, για κίνηση σε δυο διαφορετικά οδοστρώματα. Οι διεγέρσεις από το πρώτο οδόστρωμα είναι ημιτονοειδούς μορφής με το ίδιο

ύψος οδοστρώματος και στους δυο τροχούς, ενώ για το δεύτερο οδόστρωμα χρησιμοποιήθηκε η προηγούμενη ημιτονοειδής μορφή στον τροχό 1 και ο τροχός 2 δεχόταν μηδενική διέγερση. Το οδόστρωμα ακλουθούσε την καμπύλη $Y_i = a\sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right)$, όπου α= 25mm, L= 350mm και $x = v * t$. Οι ταχύτητες (v) που προσομοιοθικαν ηταν από 5 m/s έως 30 m/s, οι οποίες εξετάστηκαν ανά 5 m/s. Οι αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης είναι με τα σώματα ακίνητα στην θέση ισορροπίας τους.

Το όχημα για το όποιο προσομοιώνει το μοντέλο έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

m = 542.5

m_u = 40

I= 820

b= 0,725

K_t: 500000

C_1: 300

C_2: 100

A_1: 5026,5 $*10^{-6}$

A_2: 2199,1 $*10^{-6}$

A_ε: 1472,6 $*10^{-6}$

Οι μονάδες των μεγεθών είναι σε S.I.

Τα A_1, A_2 και A_ε αντιστοιχούν σε κυλίνδρους με:

D= 80mm, d= 60mm για αυτόν που συνδέεται με τους τροχούς

και D=50mm, d=25mm για αυτόν που συνδέεται με το ελατήριο

Λόγω των διαφορετικών επιφανειών στους κυλίνδρους το μετρό ελαστικότητας των ελατηρίων υπολογίστηκε από τον τύπο

$$K = K_{\iota\sigma}\,\frac{A_\varepsilon}{A_1 - A_2}$$

Με $K_{\iota\sigma}$το μετρό ελαστικότητας των ελατηρίων που θα χρησιμοποιούνταν σε συμβατικό σύστημα. Η προσομοίωση έγινε για $K_{\iota\sigma}$=2000 N/m.

3.5 body roll

Έκτος από το half car model μελετήθηκε και η κλίση του αμαξώματος υπό την επίδραση σταθερής πλευρικής επιτάχυνσης. Το αποτέλεσμα που πρόεκυψε δείχνει ότι η κλίση του

οχήματος επηρεάζεται εκτός από τα συνήθη μεγέθη (μάζα, μετατρόχιο, ύψος κέντρου μάζας και μέτρα ελαστικότητας των ελατηρίων και των επισώτρων) και από της διαστάσεις των κυλίνδρων που χρησιμοποιούνται.

$$\tan\theta = \frac{\sigma_{12}}{1 + g * \sigma_{12}} * \alpha$$

Όπου

$$\sigma_{12} = \frac{m * h}{2b^2} * \left[\frac{1}{K_t} + \frac{1}{K_{\iota\sigma}} * \frac{A_\varepsilon}{A_1 + A_2}\right]$$

Με h το ύψος του κέντρου μάζας, και *α* η πλευρική επιτάχυνση.

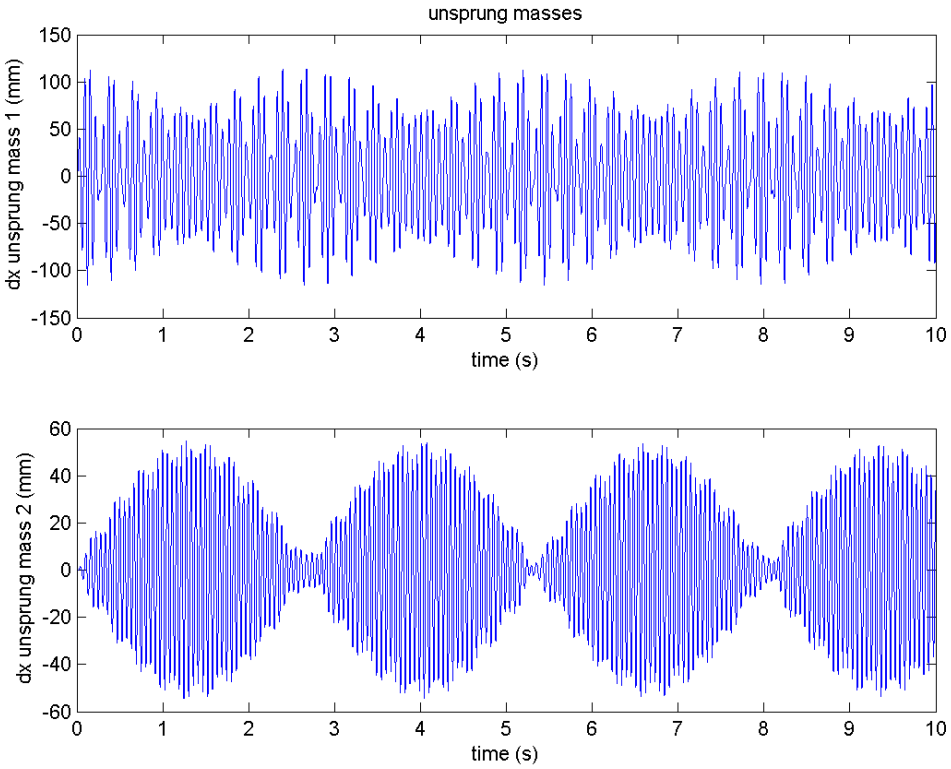
Για την μελέτη του συστήματος θεωρήθηκε *h* = 0,4 m.

Κεφάλαιο 4

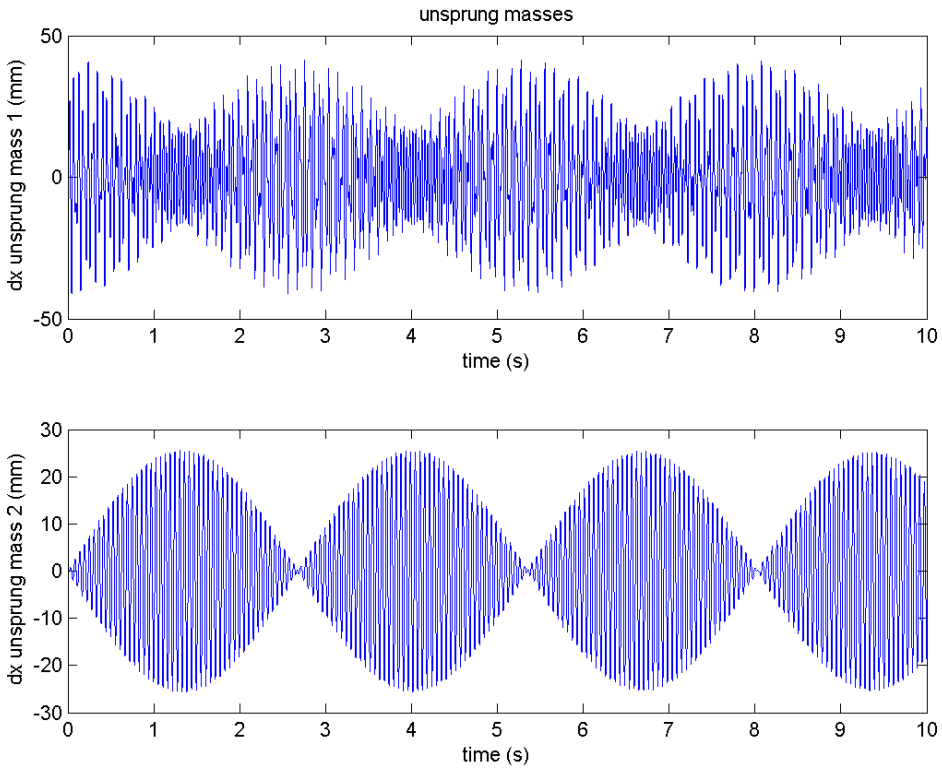
Αποτελέσματα προσομοίωσης

4.1 Σύνδεση των τροχών του ίδιου άξονα

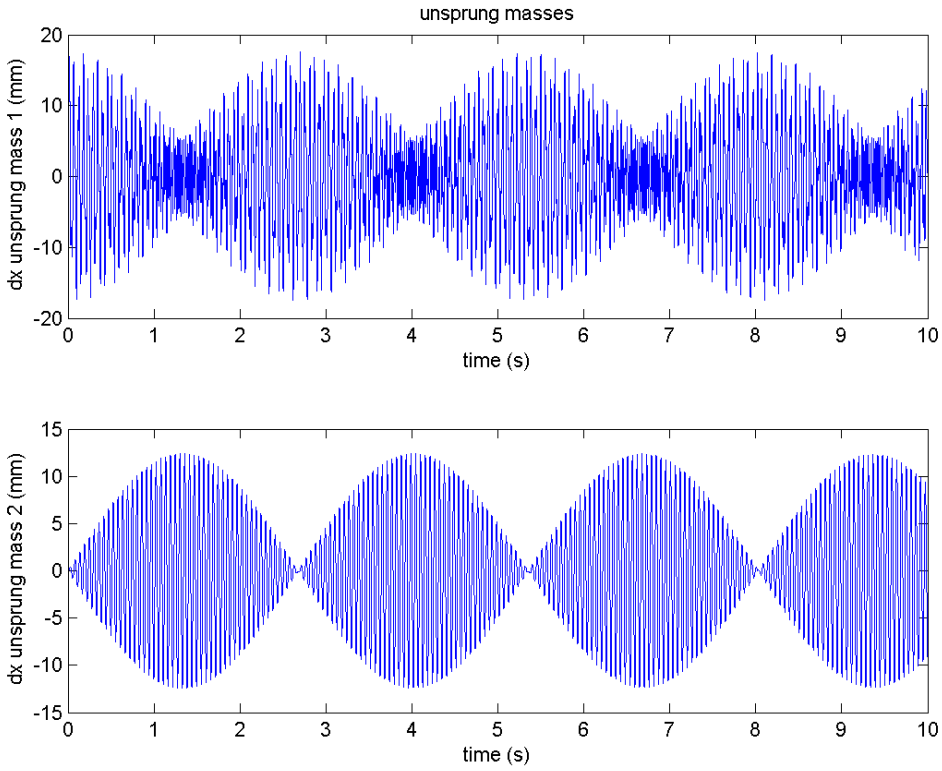
Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα. Αρχικά η διάταξη συνδέει τους τροχούς του ίδιου άξονα, με σκοπό να περιοριστούν οι κλίσεις του οχήματος. Η διάταξη που επιφέρει αντίστοιχα αποτελέσματα είναι η αντιστρεπτική ράβδος που χρησιμοποιείται συχνά στα οχήματα. Λόγο της διασύνδεσης και σε συνδυασμό με την συνεχή ημιτονοειδή διέγερση στον ένα μόνο τροχό του άξονα, παρατηρείται διαμόρφωση κατά συχνότητα στις καμπύλες των υψών των μη ανηρτημένων μαζών. Οι τιμές που παρατηρούνται για τις αποκρίσεις των μη αναρτώμενων μαζών μειώνονται κατά την αύξηση της ταχύτητας του οχήματος, στο εξεταζόμενο εύρος ταχυτήτων, αυτό δείχνει ότι οι ιδιοσυχνότητες των μη ανηρτημένων μαζών διεγείρονται για ταχύτητα οχήματος μικρότερη των 5m/s. Από την προσομοίωση προκύπτει επίσης ότι κατά την συνεχή κίνηση του οχήματος σε οδόστρωμα με την μορφή που εξετάσθηκε ($Y_i = a\sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right)$, όπου α= 25mm και L= 350mm) με ταχύτητα 5 m/s είναι πιθανή η απώλεια πρόσφυσης λόγω του μεγάλου πλάτους ταλάντωσης των μη αναρτώμενων μαζών. Επειδή η συμπεριφορά των ελαστικών δεν συμπίπτει με αυτήν των ελατηρίων, η προσομοίωση ταλαντώσεων με τόσο μεγάλο πλάτος ενδέχεται να παρουσιάζει αποκλίσεις από την πραγματικότητα. Στα διαγράμματα επίσης φαίνεται ότι μπορεί να υπάρχουν συντονισμοί δευτερευόντων συχνοτήτων, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 4.5. Παρακάτω φαίνονται οι μεταβολές στο ύψος των μη αναρτώμενων μαζών για ημιτονοειδή διέγερση στον τροχό 1 και μηδενική διέγερση στον τροχό 2.



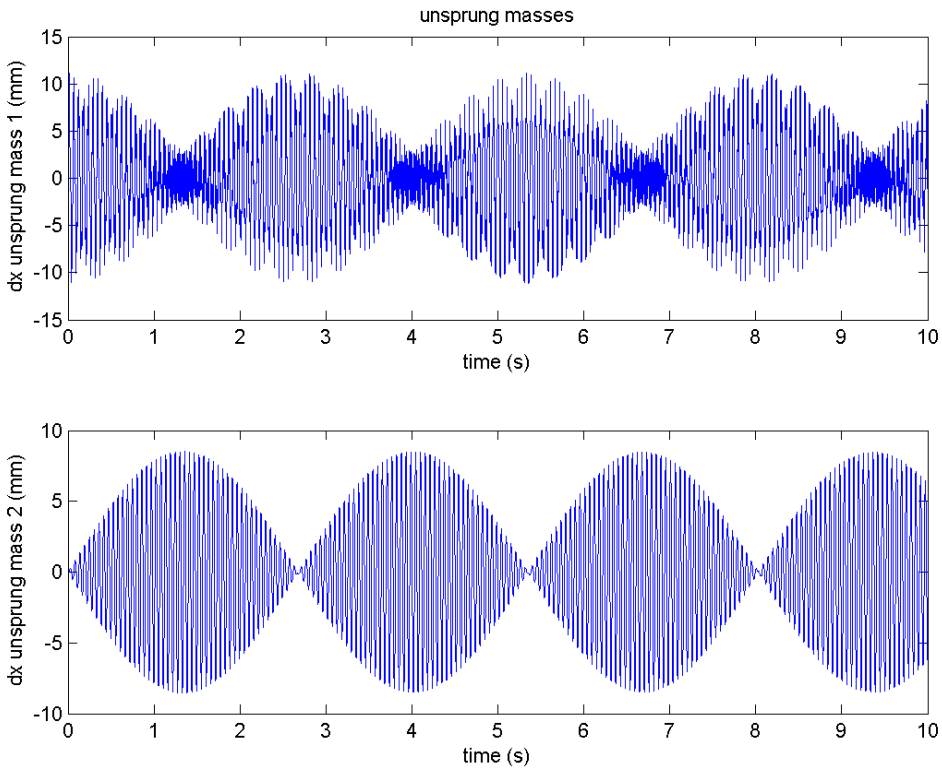
Σχήμα 4.1
ύψος μη αναρτώμενων μαζών 5 m/s



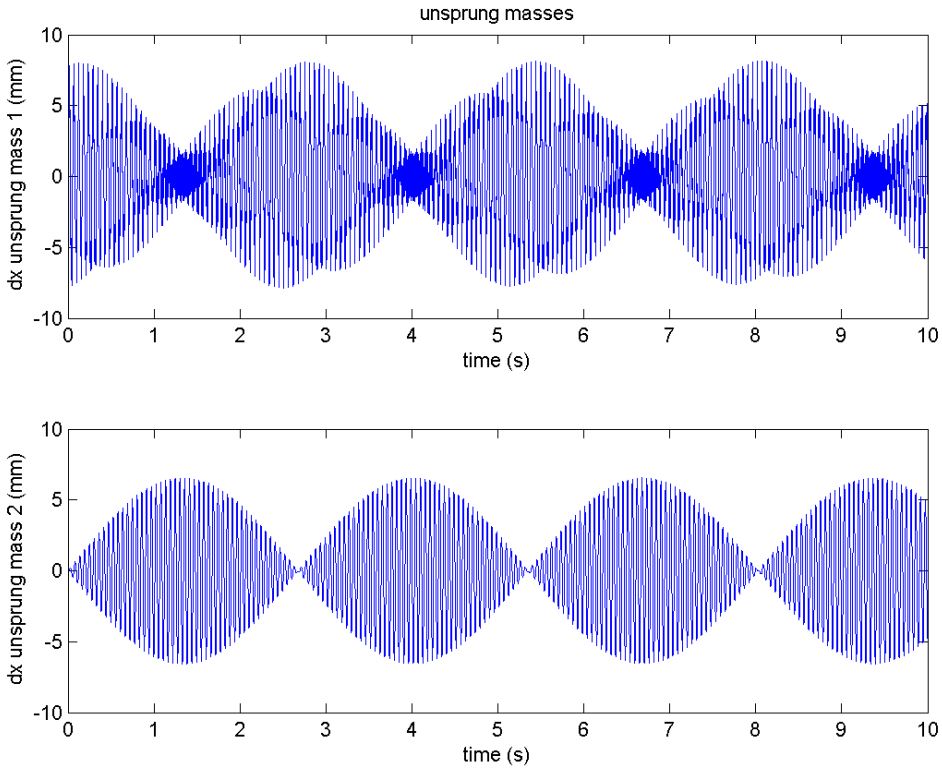
Σχήμα 4.2
ύψος μη αναρτώμενων μαζών 10 m/s



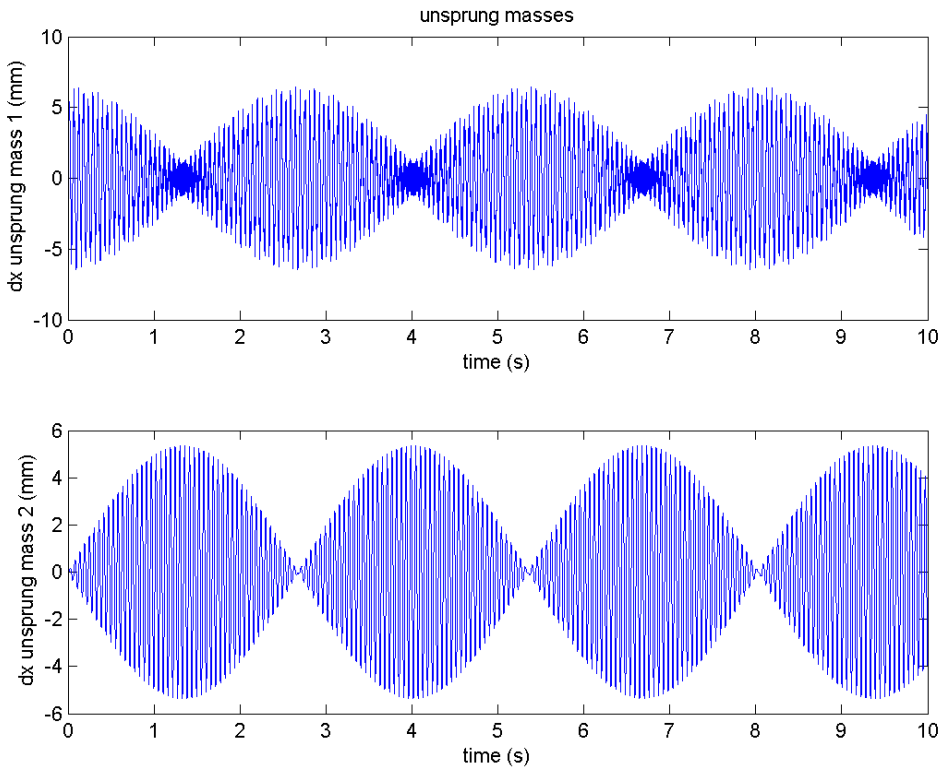
Σχήμα 4.3
ύψος μη αναρτώμενων μαζών 15 m/s



Σχήμα 4.4
ύψος μη αναρτώμενων μαζών 20 m/s

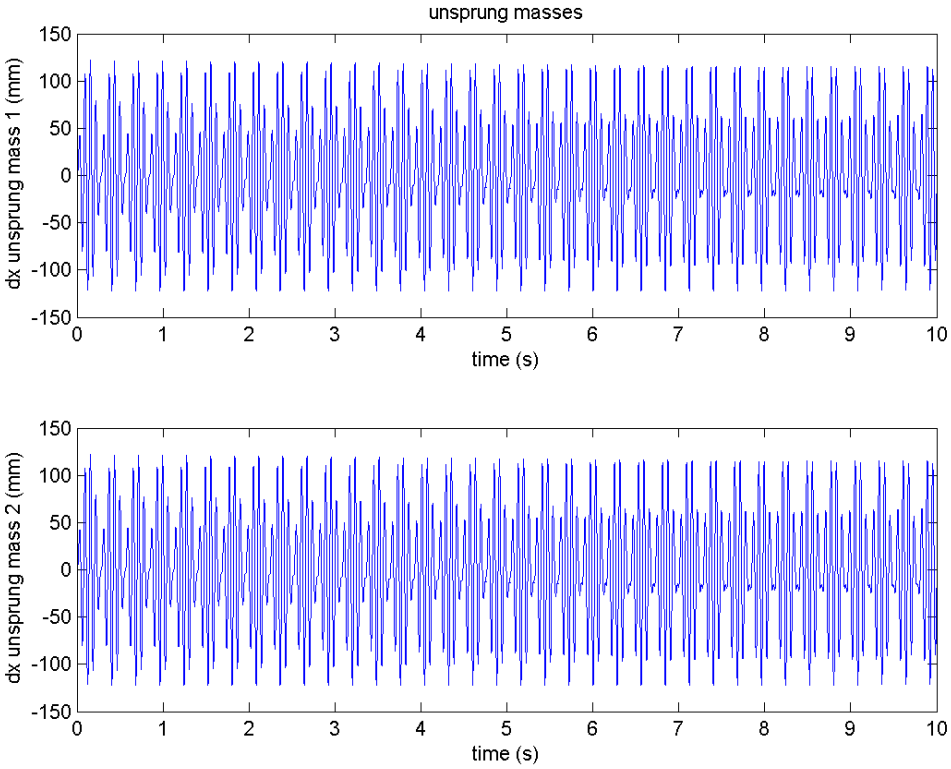


Σχήμα 4.5
ύψος μη αναρτώμενων μαζών 25 m/s

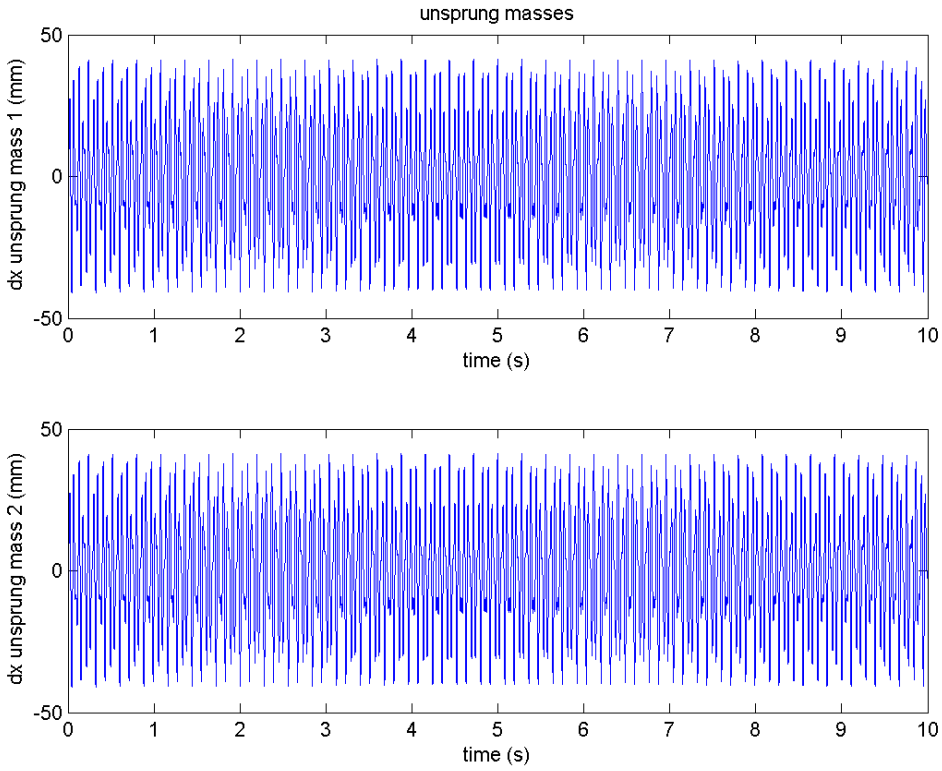


Σχήμα 4.6
ύψος μη αναρτώμενων μαζών 30 m/s

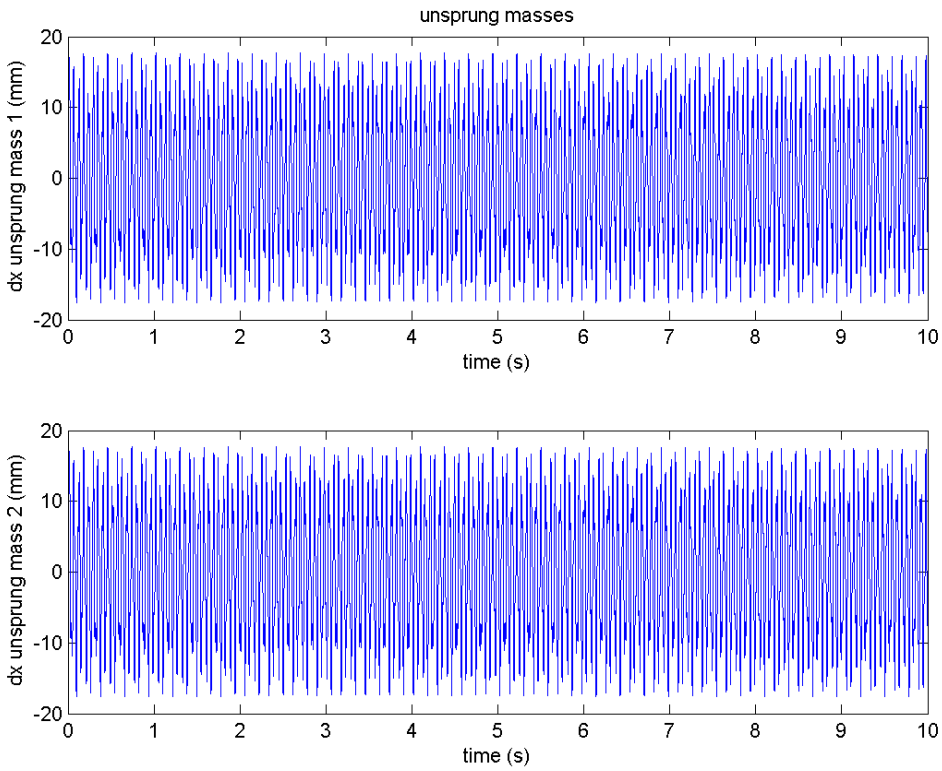
Κατά την κίνηση του οχήματος σε οδόστρωμα τέτοιο ώστε να έχουν και οι δυο τροχοί την ιδία ημιτονοειδή διέγερση δεν υπάρχουν αισθητές διαφορές στα διαγράμματα των υψών των μη αναρτώμενων μαζών. Η διαφορές που υπάρχουν, προκύπτουν από την αριθμητική επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει την διάταξη. Για τον ίδιο λόγο παρουσιάζονται μικρές κλίσεις της αναρτώμενης μάζας πάρα την συμμετρική διέγερση. Οι παρατηρούμενες κλίσεις είναι τάξης μεγέθους 10^{-5} μοίρες, ή μικρότερες, οπότε η επίδραση τους στο σύστημα είναι αμελητέα. Παρακάτω φαίνονται οι αποκρίσεις των μη αναρτώμενων μαζών με ίδια ημιτονοειδή διέγερση και στους δυο τροχούς. Στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούνται επίσης αυξημένες τιμές στις αποκρίσεις για ταχύτητες οχήματος 5m/s και 10 m/s, οι οποίες μειώνονται με περεταίρω αύξηση της ταχύτητας του οχήματος. Αυτό είναι λόγω της ιδιοσυχνότητες των μη αναρτώμενων μαζών και της συνεχούς ημιτονοειδούς διέγερσης που δέχονται οι τροχοί. Εμφανείς είναι σε ορισμένα από τα παρακάτω γραφήματα και δευτερεύουσες συχνότητες που διεγείρονται, όπως για παράδειγμα στο σχήμα 4.10 που επηρεάζεται πιθανός από την απόκριση της αναρτώμενης μάζας.



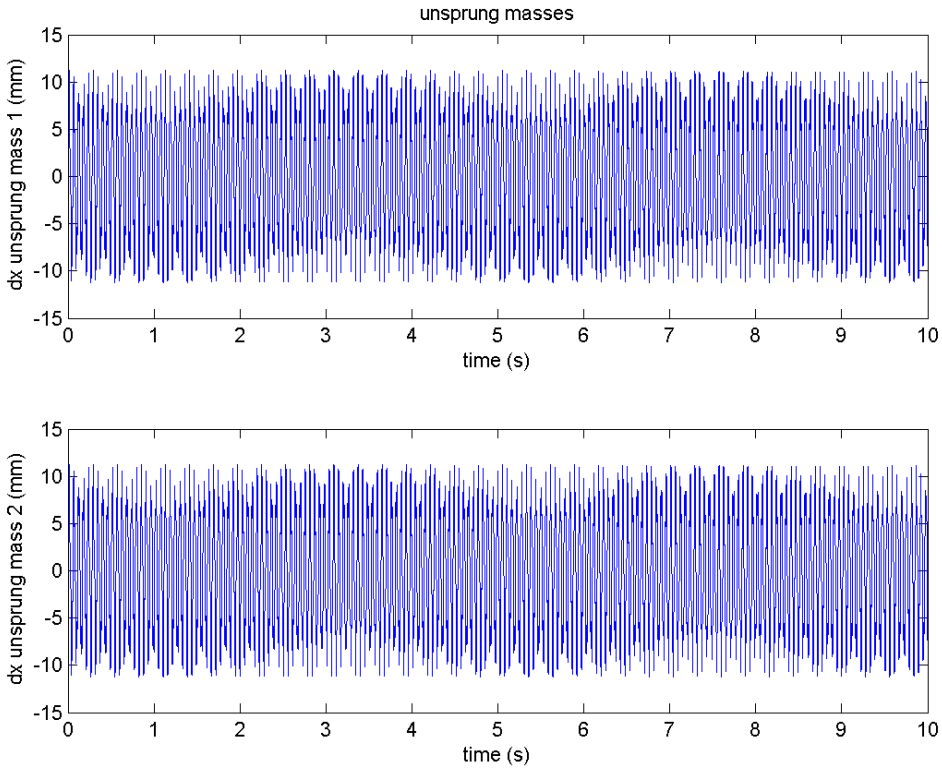
Σχήμα 4.7
ύψος μη αναρτώμενων μαζών 5 m/s



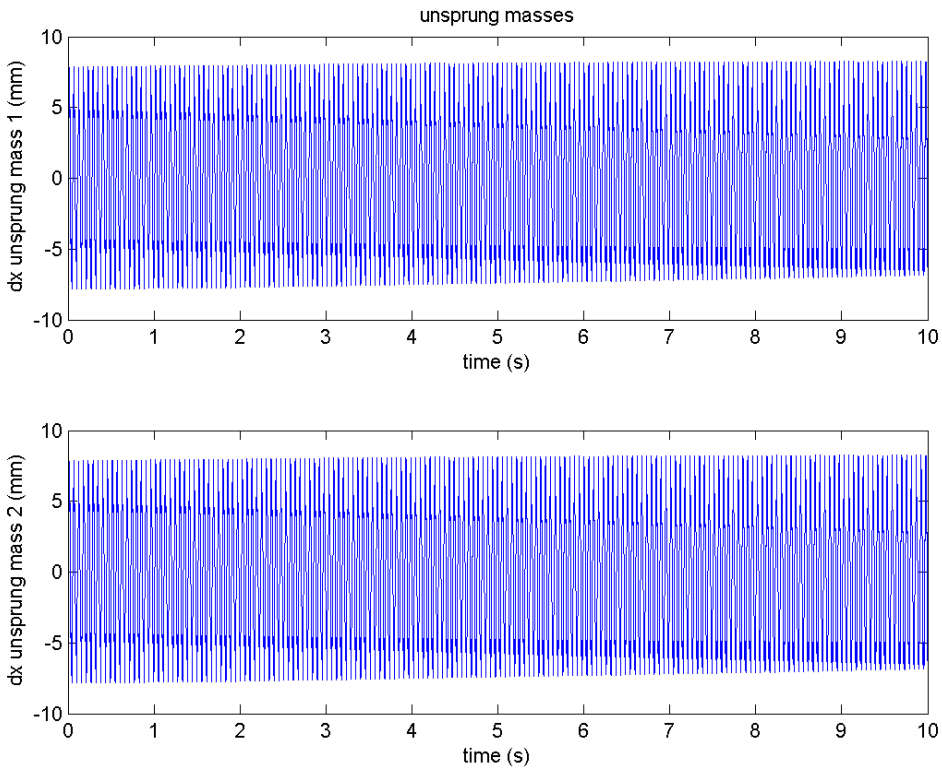
Σχήμα 4.8
ύψος μη αναρτώμενων μαζών 10 m/s



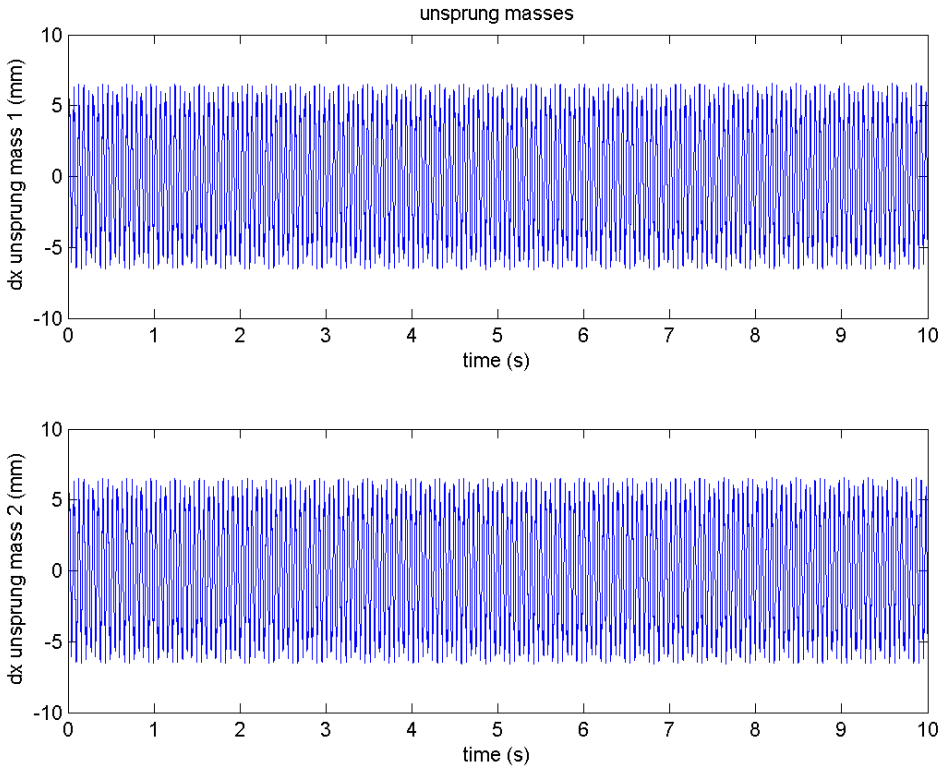
Σχήμα 4.9
ύψος μη αναρτώμενων μαζών 15 m/s



Σχήμα 4.10
ύψος μη αναρτώμενων μαζών 20 m/s



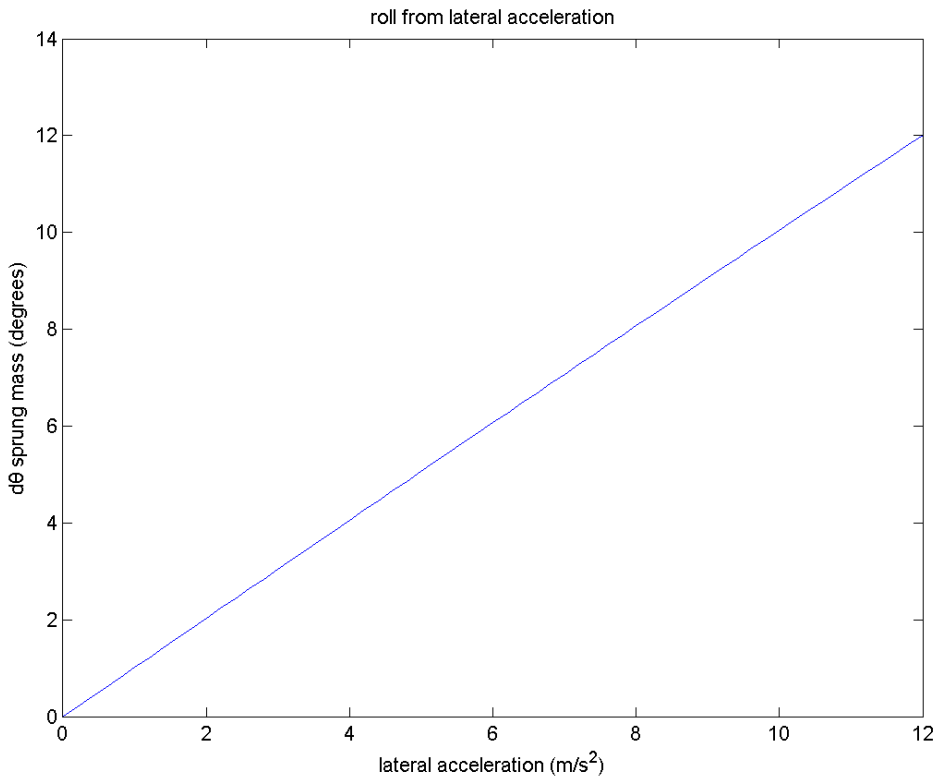
Σχήμα 4.11
ύψος μη αναρτώμενων μαζών 25 m/s



Σχήμα 4.12
ύψος μη αναρτώμενων μαζών 30 m/s

4.2 Car roll

Λόγω της σύνδεσης των τροχών μεταξύ τους παρατηρούνται ιδιαίτερα μικρές γωνίες κατά την κίνηση του οχήματος με ημιτονοειδή διέγερση στον ένα τροχό και μηδενική διέγερση στον άλλο. Οι τιμές που παρατηρούνται σε αυτήν την περίπτωση είναι τάξης μεγέθους 0,1 μοίρες ή μικρότερες. Σε αυτό συνεισφέρουν και τα ελατήρια και οι αποσβεστήρες που απορροφούν μεγάλο μέρος των κραδασμών και περιορίζουν της κατακόρυφες ταλαντώσεις του οχήματος, με αποτέλεσμα η άνεση των επιβατών να είναι σε πολύ καλά επίπεδα. Ωστόσο ο περιορισμός των κλίσεων του οχήματος δεν προκύπτει μόνο από την σκληρότητα των ελατηρίων αλλά και από τον λόγο $\frac{A_\varepsilon}{A_1+A_2}$. Οποτε με την χρηση των συγκεκριμενων χαρακτιριστηκων οχηματος η κλίση για σταθερή πλευρική επιτάχυνση ίση με την επιτάχυνση της βαρύτητας είναι 9,8610 μοίρες. Στο σχήμα 4.13 φαίνεται η κλίση του οχήματος υπό την επίδραση πλευρικής επιτάχυνσης, σε σταθερή κατάσταση.



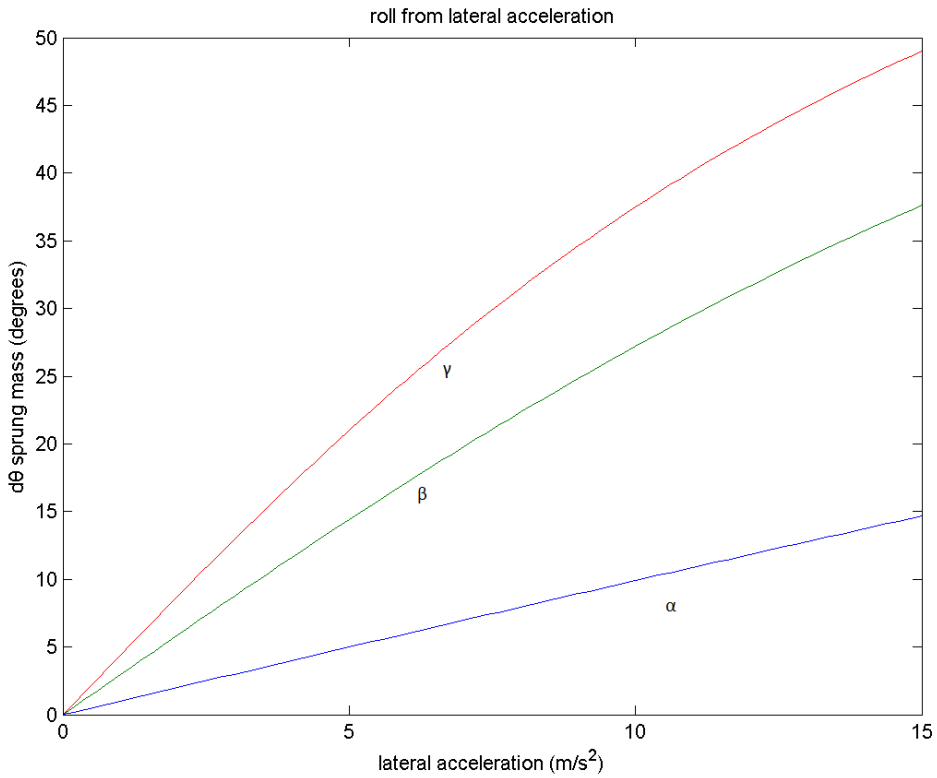
Σχήμα 4.13
roll υπό πλευρική επιτάχυνση

Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει μια σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ της πλευρικής επιτάχυνσης και της γωνίας roll του οχήματος. Αυτό συμβαίνει διότι στο εξεταζόμενο όχημα έχουμε $\frac{A_\varepsilon}{A_1+A_2} = 0{,}2038$, οπότε οι παρατηρούμενες γωνίες είναι ιδιαίτερα μικρές. Όταν το όχημα παρουσιάζει μεγαλύτερες κλίσεις φαίνεται η έλλειψη γραμμικότητας μεταξύ των μεγεθών. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.14.

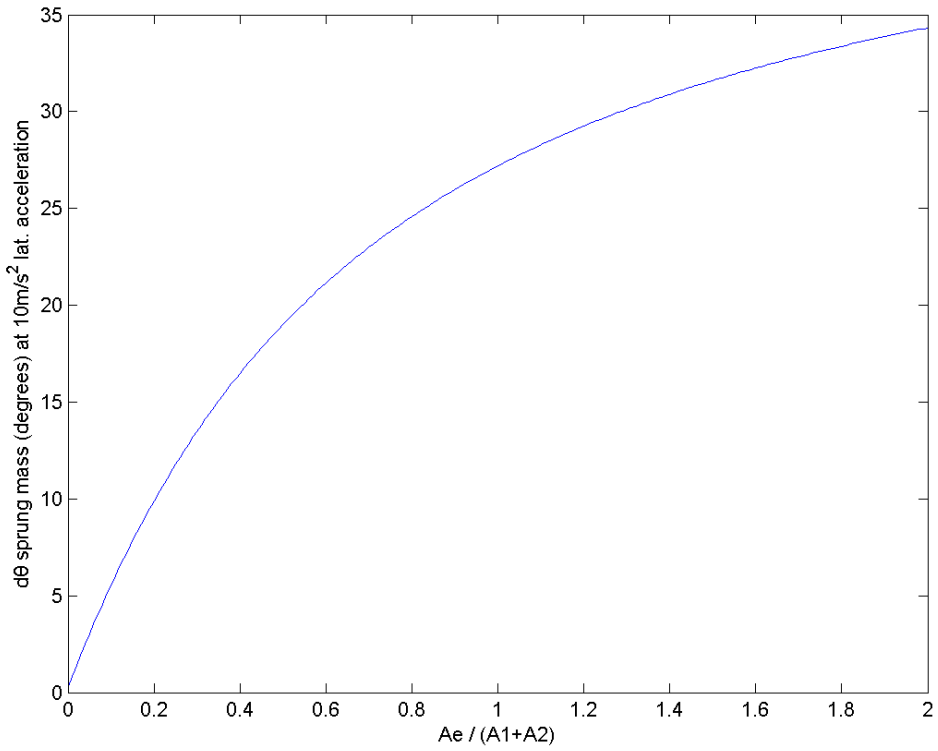
Στο σχήμα 4.15 φαίνεται η επίδραση του λόγου $\frac{A_\varepsilon}{A_1+A_2}$ στις κλισεις του οχηματος. Η καμπύλη προκύπτει από τον υπολογισμό των κλίσεων υπό πλευρική επιτάχυνση 10 m/s^2 σε όχημα όμοιων χαρακτηριστικών με το μελετώμενο όχημα, με εξαίρεση τις επιφανές A_1, A_2 και A_ε. Αντί των επιφανίων έχει χρησιμοποιηθεί η μεταβλητή $\lambda = \frac{A_\varepsilon}{A_1+A_2}$ η όποια εξεταστικέ στο εύρος [0,2]. Όπου για λ = 0 δεν χρησιμοποιείται κύλινδρος με ελατήριο (βλ. σχήμα 2.1) και η κλίση οφείλεται στην παραμόρφωση των ελαστικών.

Αντίστοιχα με το σχήμα 4.15 εξεταστικέ και η επίδραση του $K_{\iota\sigma}$ στην κλιση του οχηματος υπο σταθερη πλευρική επιτάχυνση. Στο σχήμα 4.16 φαίνεται η μεταβολή της κλίσης του οχήματος συνάρτηση του $K_{\iota\sigma}$, για τιμες του $K_{\iota\sigma}$ στο ευρος [100,10000] N/m. Κατά την ανάπτυξη ενός οχήματος ωστόσο είναι θεωρείται ο περιορισμός των κλίσεων μέσω των εμβαδών των κυλίνδρων προτιμητέος διότι επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό η συμπεριφορά του οχήματος σε κατακόρυφες διεγέρσεις. Η μεταβολή του $K_{\iota\sigma}$ επιρεαζει αμεσα την κατακορυφη αποκρηση του οχηματος και κ χρηση μεγαλυτερου $K_{\iota\sigma}$ θα είχε ως αποτέλεσμα την εντονότερη μεταφορά των ανωμαλιών του οδοστρώματος στον χώρο των επιβατών με την μορφή κραδασμών.

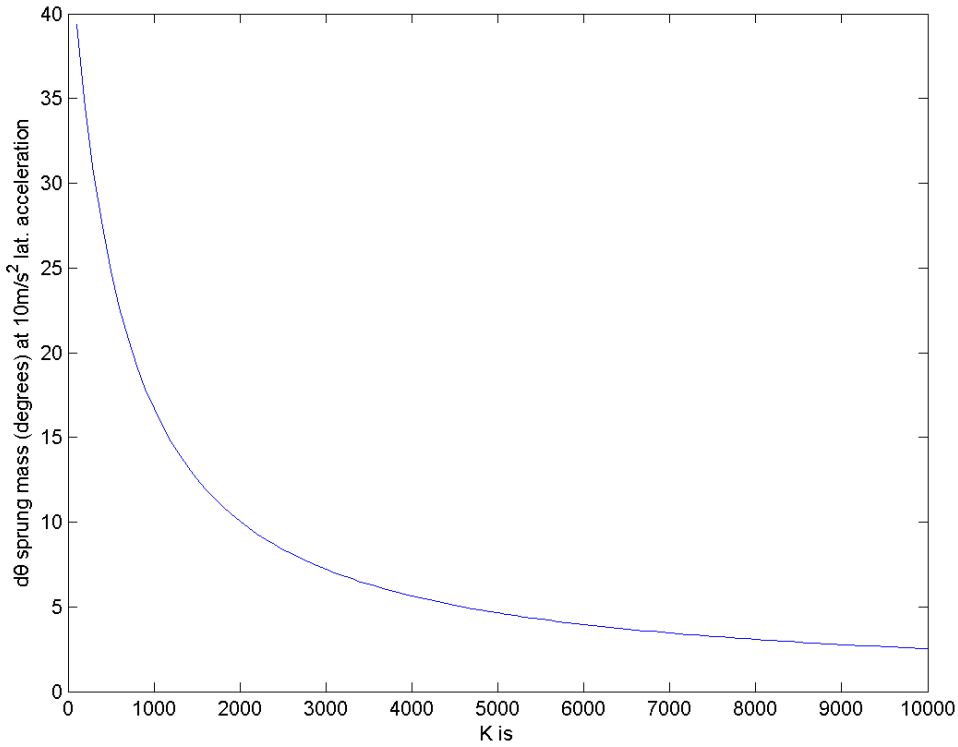
Στα σχήματα 4.17 έως 4.22 φαίνονται οι γωνίες roll του οχήματος για ταχύτητες από 5m/s έως 30m/s για ημιτονοειδή διέγερση στον ένα τροχό και μηδενική διέγερση στον άλλο.



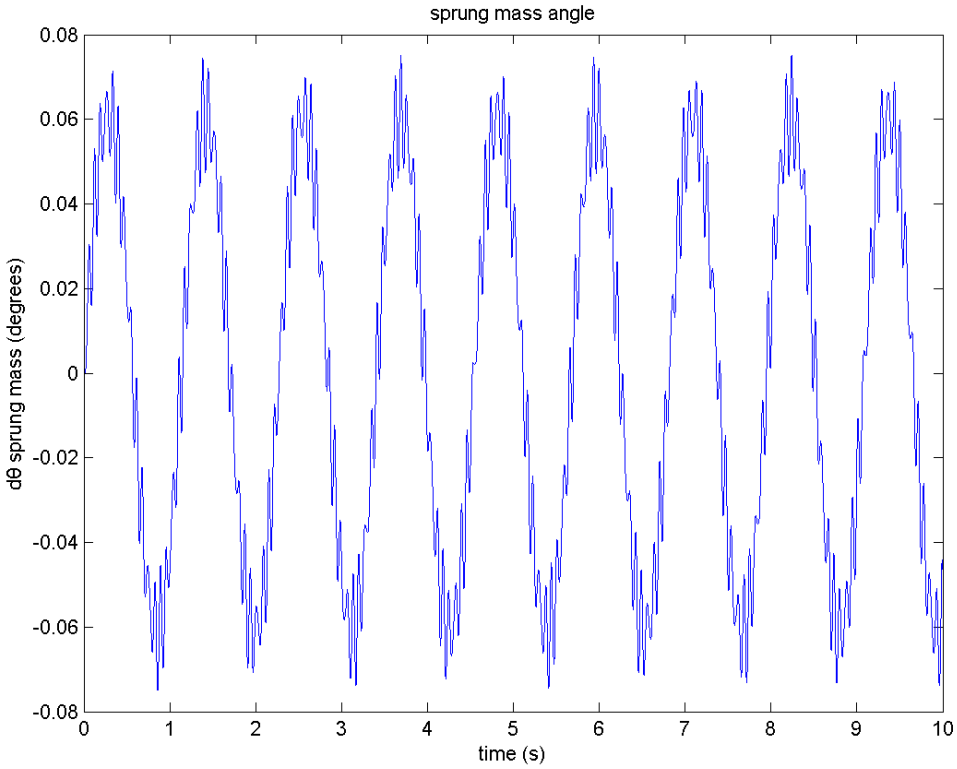
Σχήμα 4.14
roll υπό πλευρική επιτάχυνση
α) $\frac{A_\varepsilon}{A_1+A_2} = 0,2$
β) $\frac{A_\varepsilon}{A_1+A_2} = 1$
γ) $\frac{A_\varepsilon}{A_1+A_2} = 3$



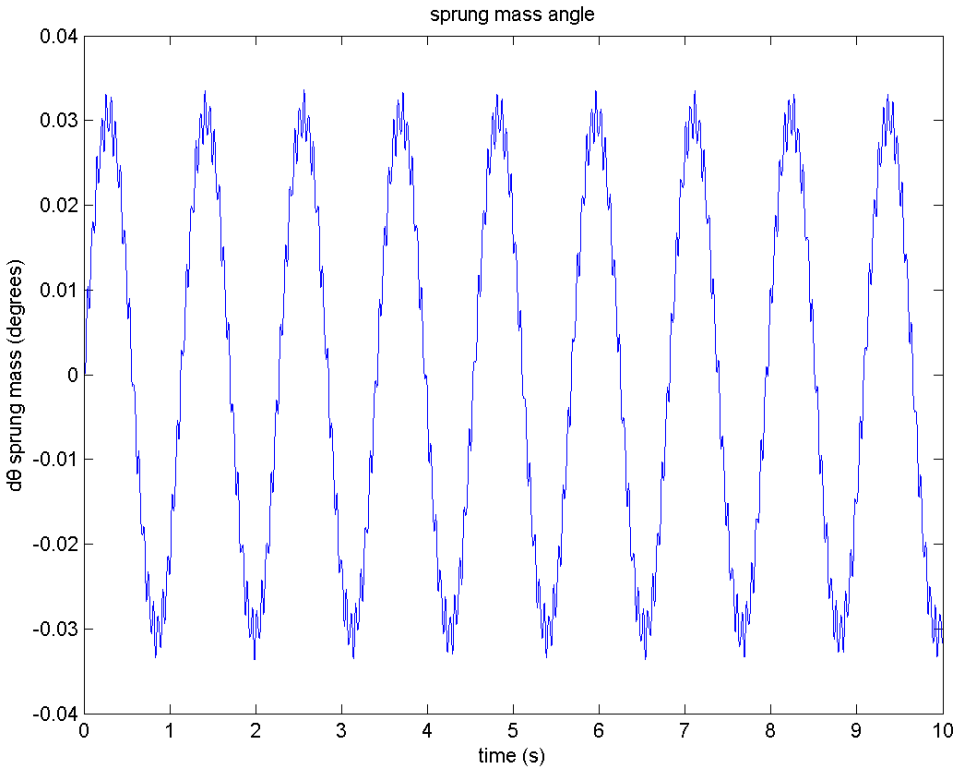
Σχήμα 4.15
επίδραση του λόγου $\frac{A_\varepsilon}{A_1+A_2}$ στην κλίση του οχήματος



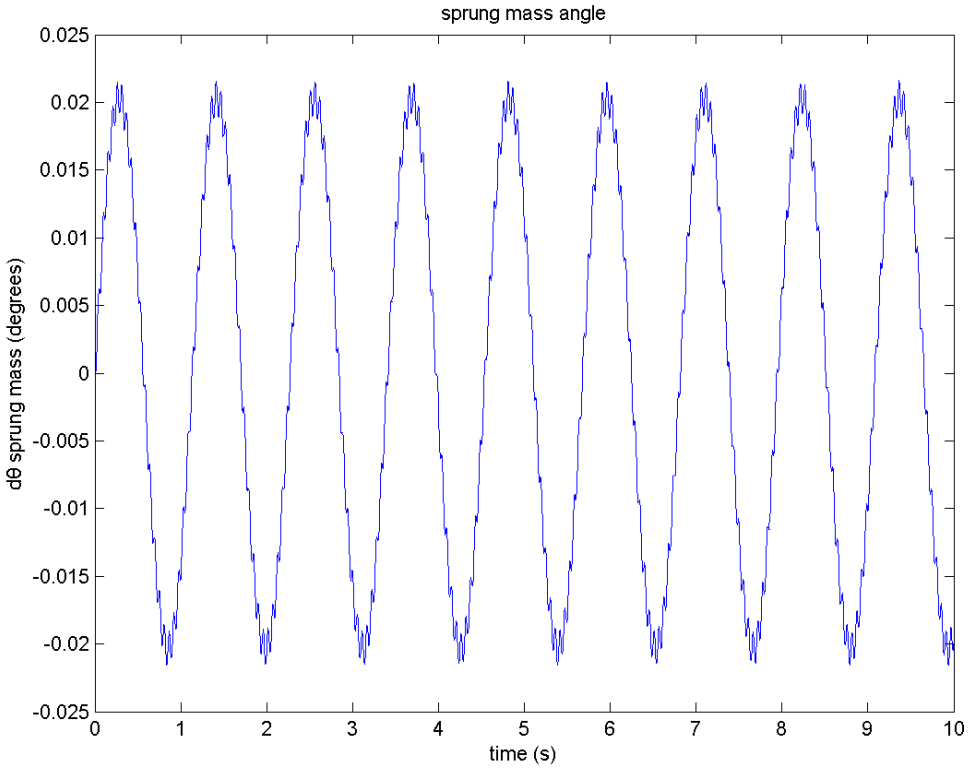
Σχήμα 4.16
επίδραση του $K_{\iota\sigma}$ στην κλίση του οχήματος



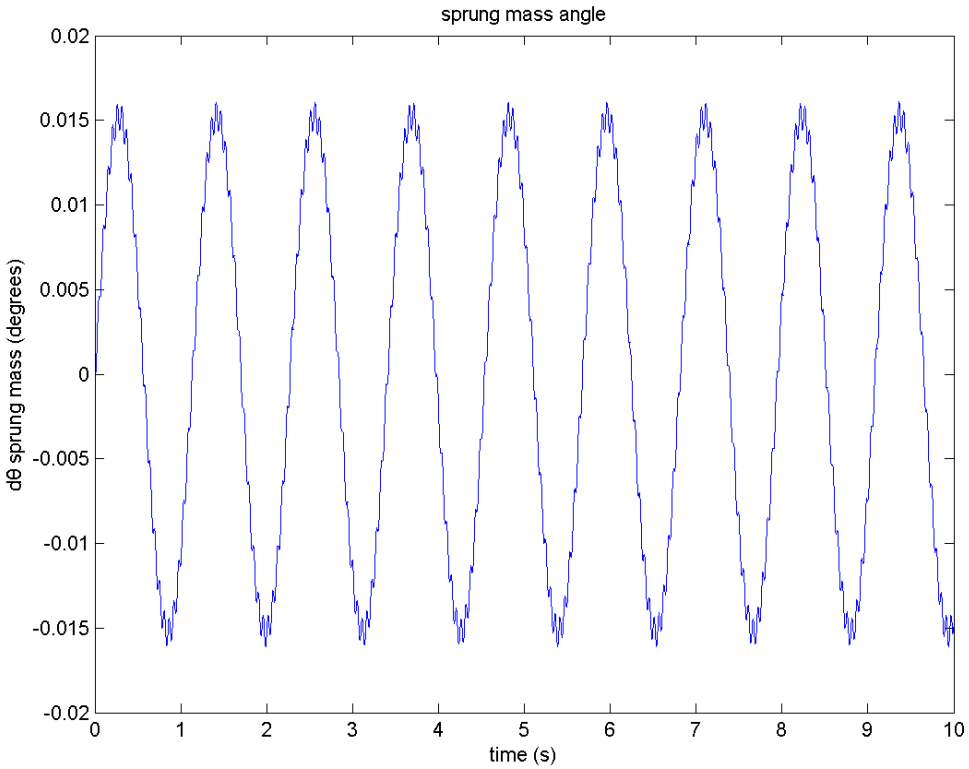
Σχήμα 4.17
roll αναρτώμενης μάζας 5 m/s



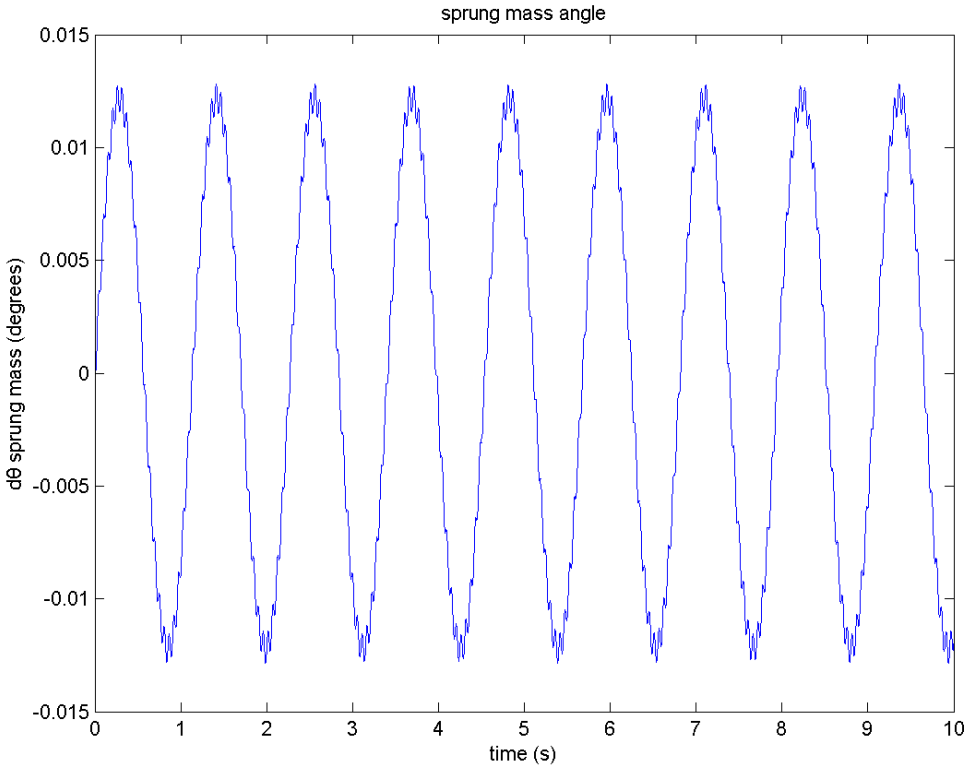
Σχήμα 4.18
roll αναρτώμενης μάζας 10 m/s



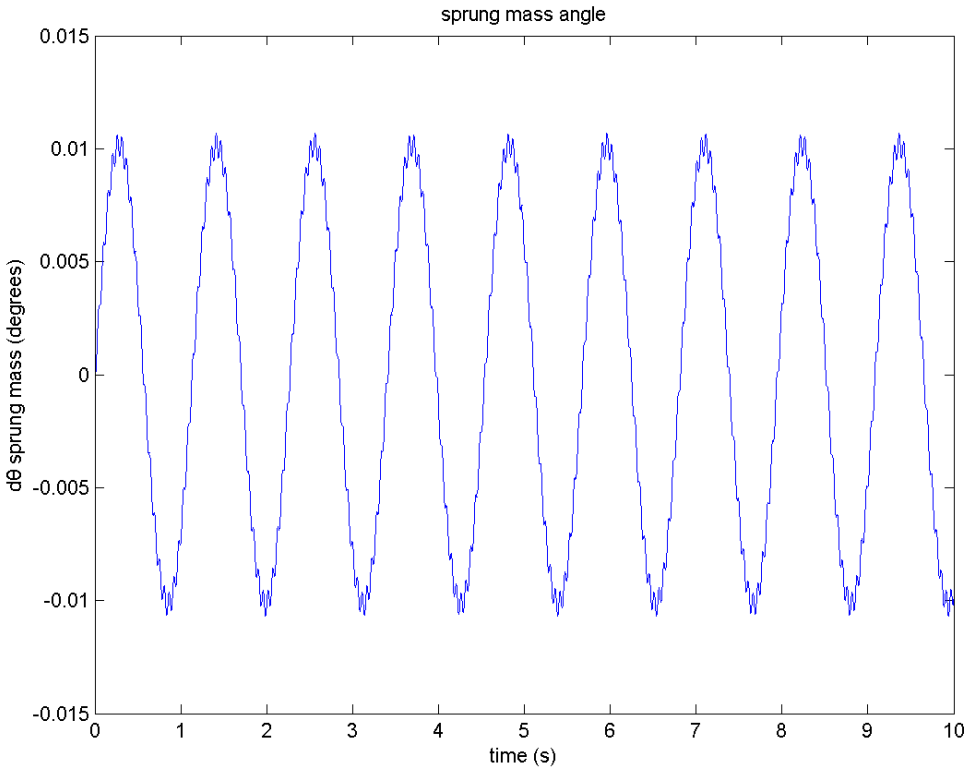
Σχήμα 4.19
roll αναρτώμενης μάζας 15 m/s



Σχήμα 4.20
roll αναρτώμενης μάζας 20 m/s



Σχήμα 4.21
roll αναρτώμενης μάζας 25 m/s

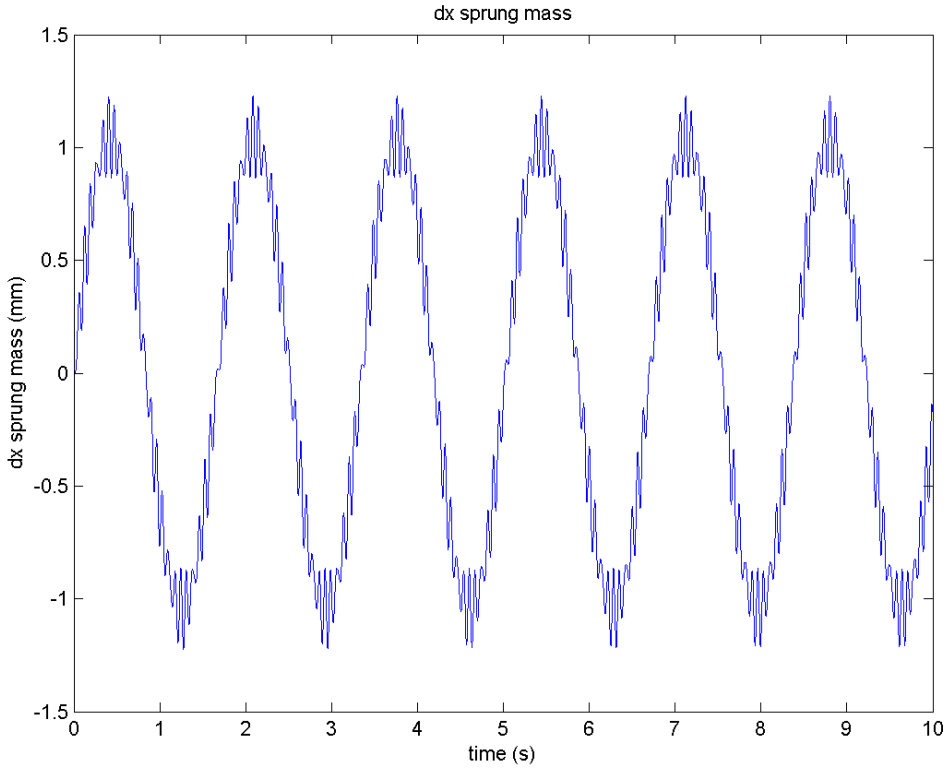


Σχήμα 4.22
roll αναρτώμενης μάζας 30 m/s

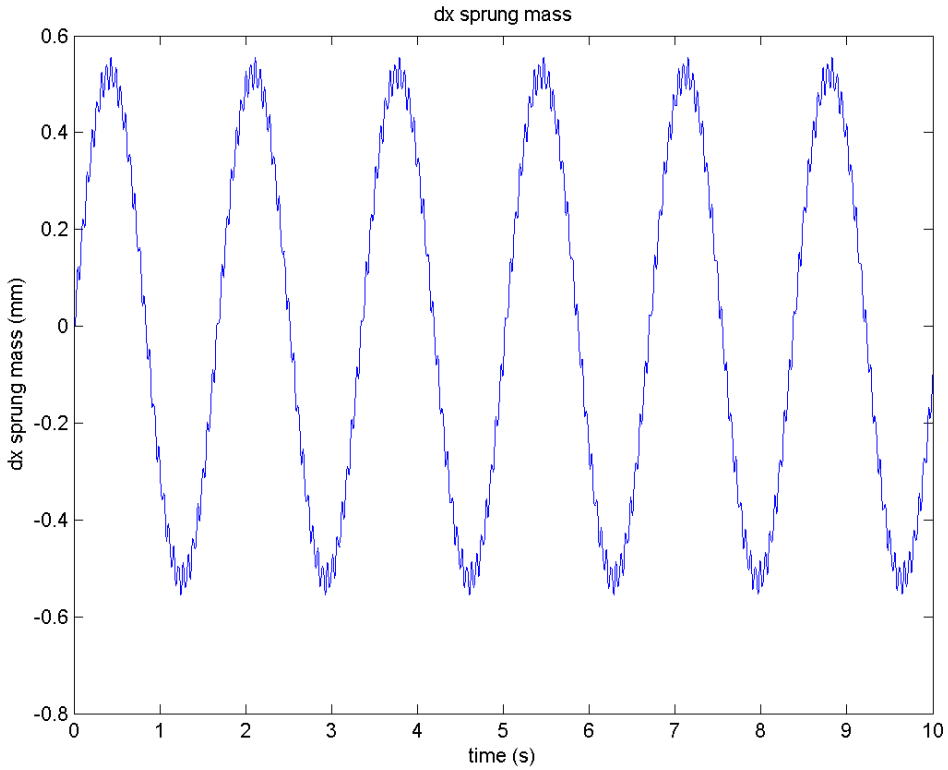
4.3 Άνεση επιβατών

Λόγο της δυνατότητας του περιορισμού των κλίσεων του οχήματος από το υδραυλικό κύκλωμα χωρίς να απαιτείται αύξηση του $K_{\iota\sigma}$, είναι εφικτή η χρήση μαλακότερων ελατηρίων άρα και η αύξηση της άνεσης των επιβατών. Μικρότερη σταθερά ελατηρίων σημαίνει ότι έχουμε μικρότερη μεταβολή της δύναμης που ασκείται από την ανάρτηση στο αμάξωμα όταν ο τροχός αντιδρά σε κατακόρυφη διέγερση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρότερων κατακόρυφων επιταχύνσεων και μικρότερων μεταβολών στο ύψος του οχήματος.

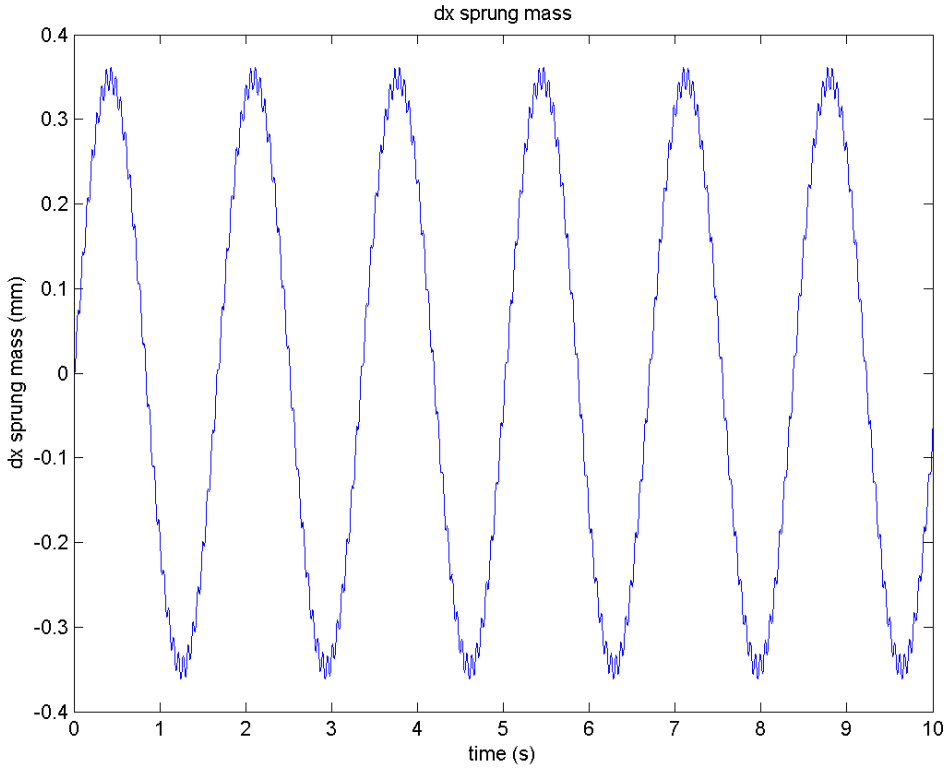
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος δείχνουν ιδιαίτερα ικανοποιητική απορρόφηση των ανωμαλιών του εδάφους. Η ταλάντωση της αναρτώμενης μάζας αποτελείται κυρίως από μια ταλάντωση συχνότητας μικρότερης του 1Hz και πλάτους που σε ταχύτητα 5 m/s και ημιτονοειδή διέγερση στους δυο τροχούς δεν ξεπερνά το 1,5 mm. Εμφανής είναι επίσης και μια μικρότερη ταλάντωση μεγαλύτερης συχνότητας αλλά αρκετά μικρότερου πλάτους. Η βασική ταλάντωση θα ήταν αισθητή στους επιβάτες του οχήματος χωρίς όμως να είναι ενοχλητική. Η μικρότερη ταλάντωση σε πραγματικές συνθήκες πιθανότατα δεν θα γινόταν αντιληπτή λόγω του πλάτους της αλλά και των υπολοίπων κραδασμών που υπάρχουν σε ένα όχημα και δεν περιγράφονται στο half car model, κραδασμοί όπως για παράδειγμα από τον κινητήρα και το διαφορικό του οχήματος. Παρακάτω φαίνονται οι αποκρίσεις του ύψους του οχήματος για ταχύτητες από 5m/s έως 30m/s για ημιτονοειδή διέγερση και στους δυο τροχούς (σχήματα 4.23 έως 4.28) και για ημιτονοειδή διέγερση στον ένα τροχό και μηδενική διέγερση στον άλλο (σχήματα 4.29 Εως4.34).



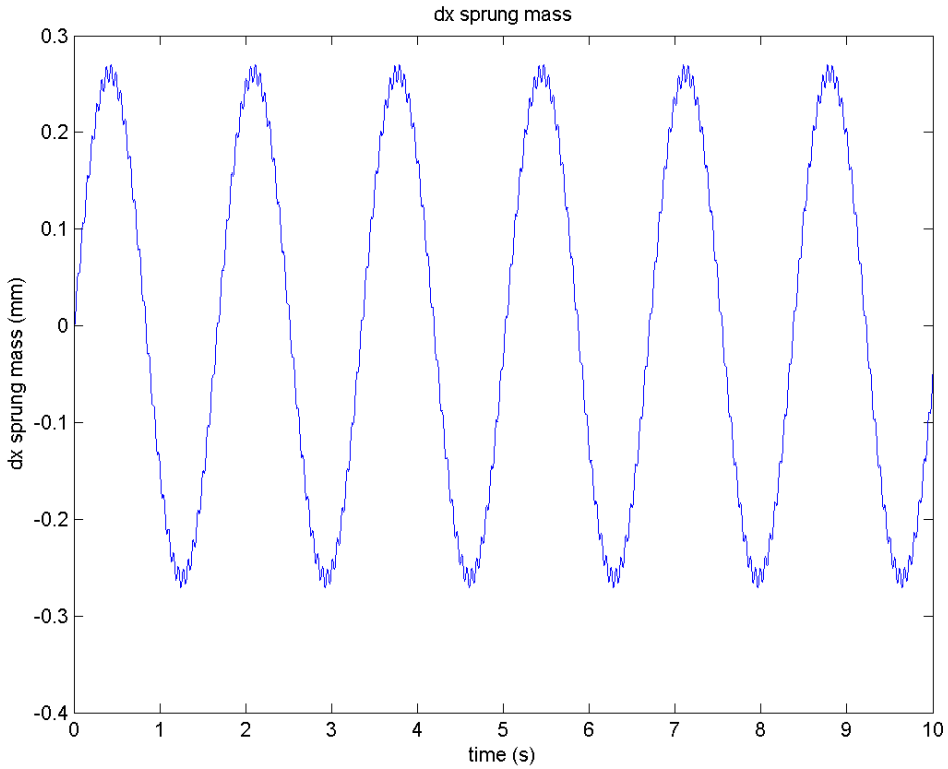
Σχήμα 4.23
ύψος αναρτώμενης μάζας 5 m/s



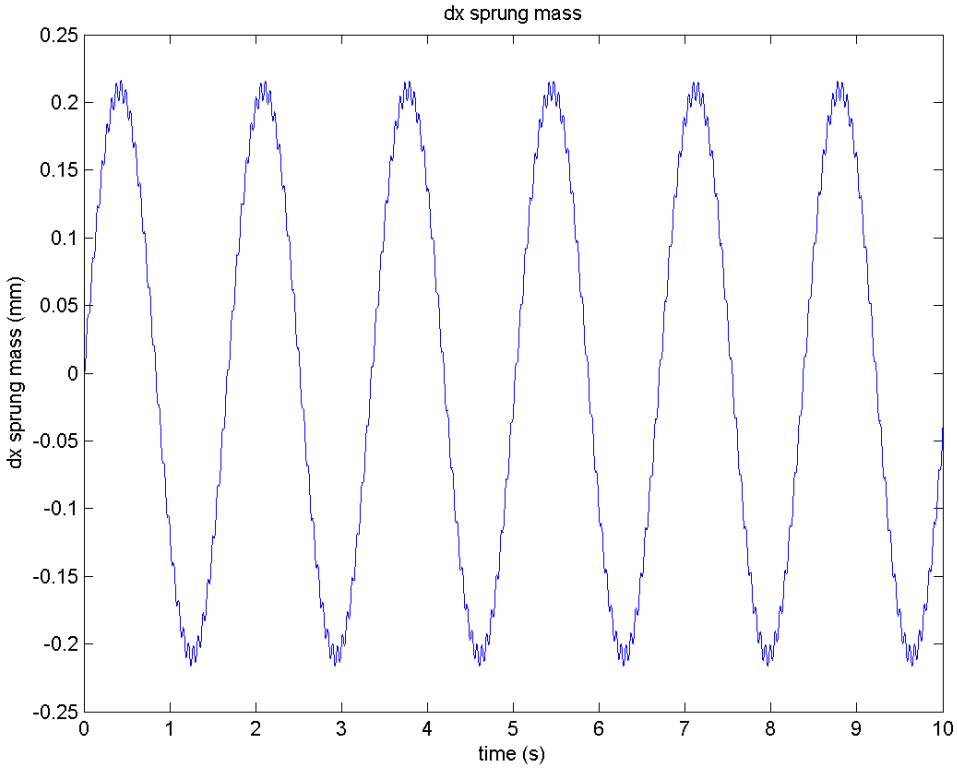
Σχήμα 4.24
ύψος αναρτώμενης μάζας 10 m/s



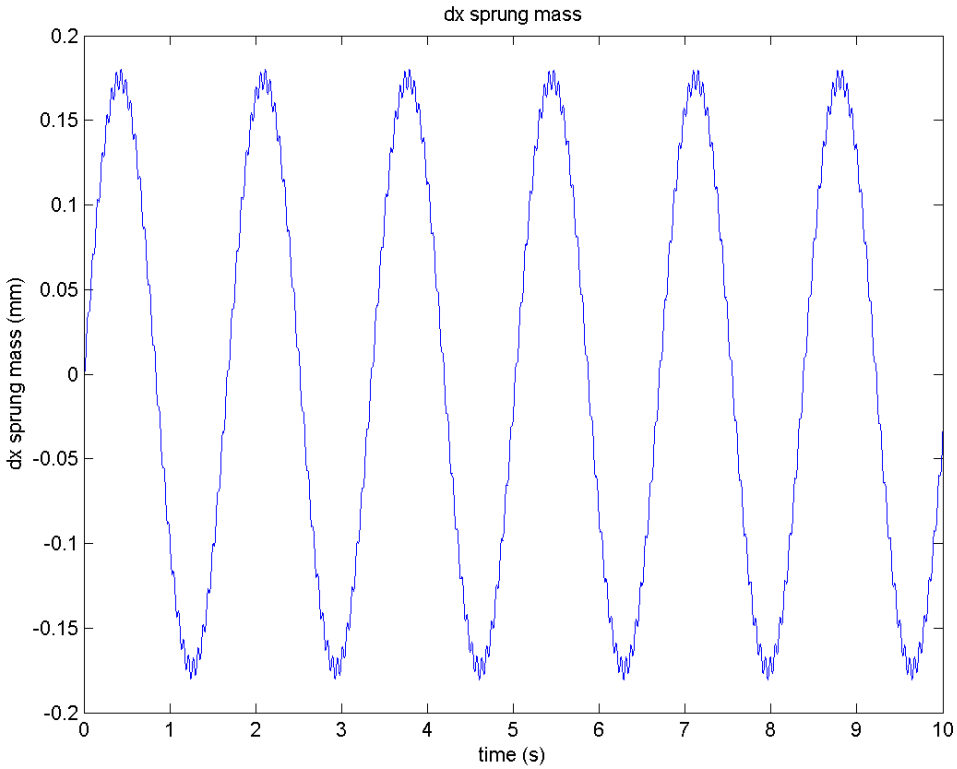
Σχήμα 4.25
ύψος αναρτώμενης μάζας 15 m/s



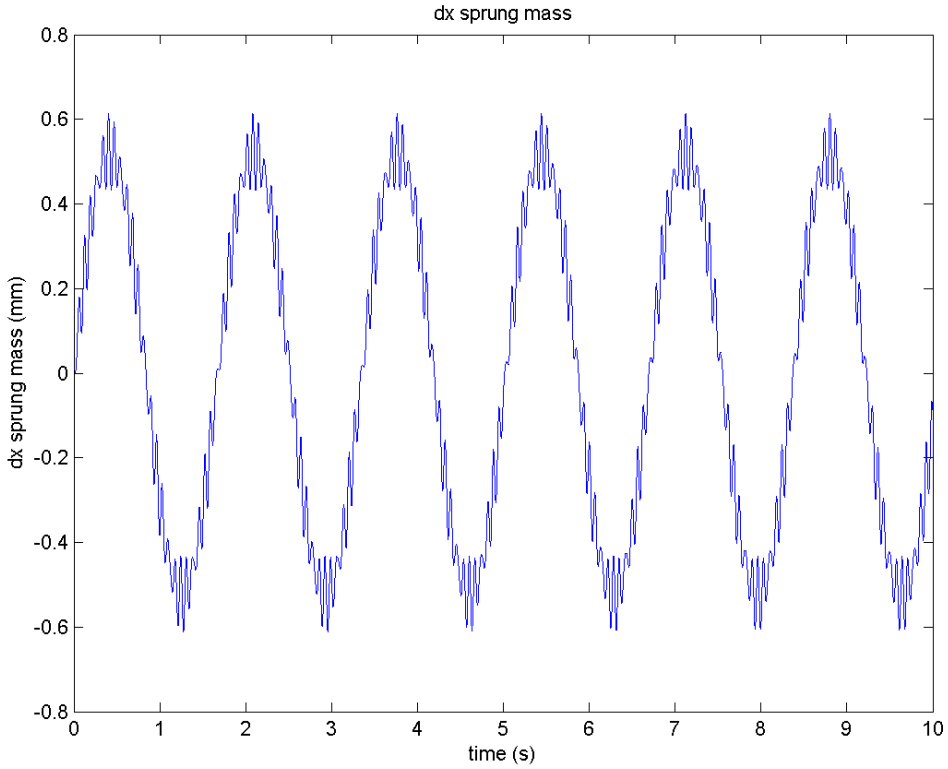
Σχήμα 4.26
ύψος αναρτώμενης μάζας 20 m/s



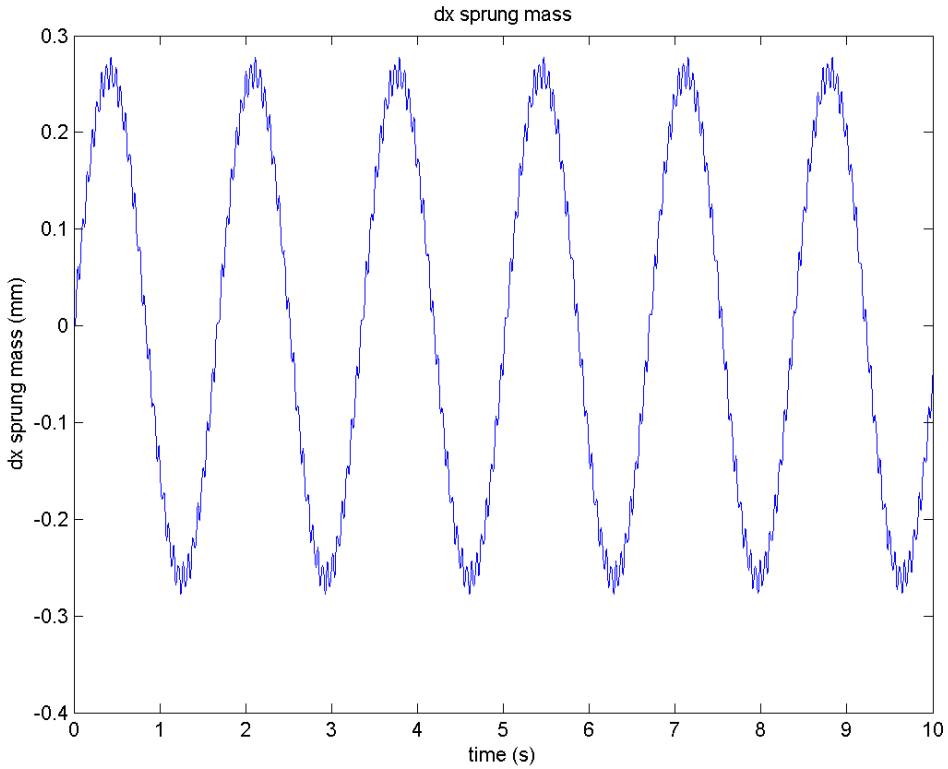
Σχήμα 4.37
ύψος αναρτώμενης μάζας 25 m/s



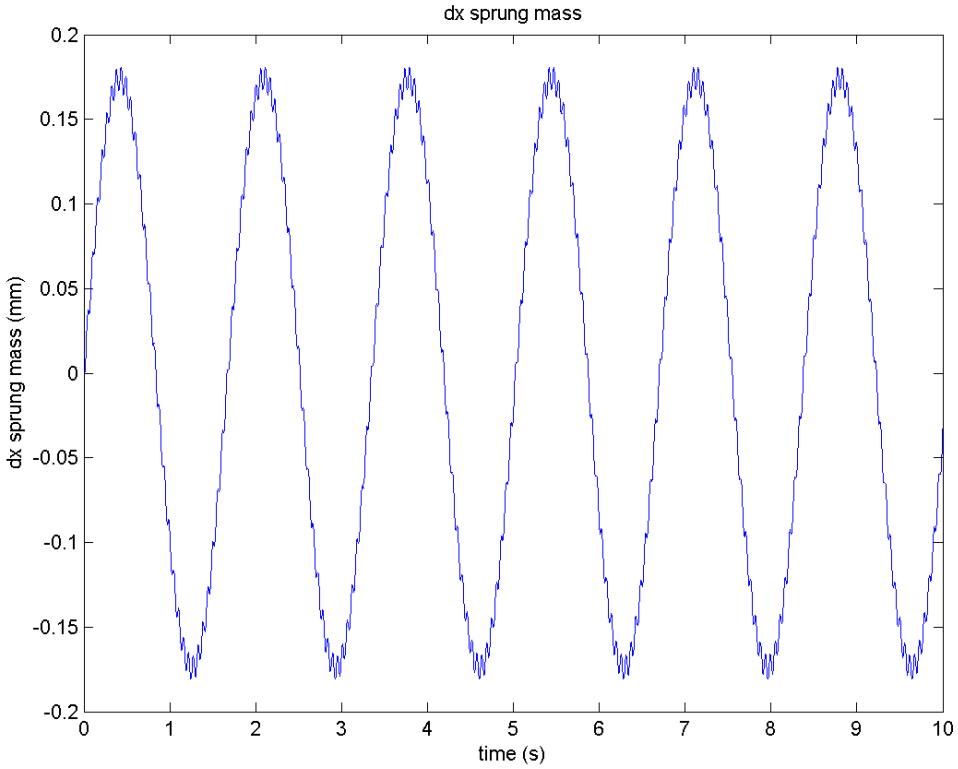
Σχήμα 4.48
ύψος αναρτώμενης μάζας 30 m/s



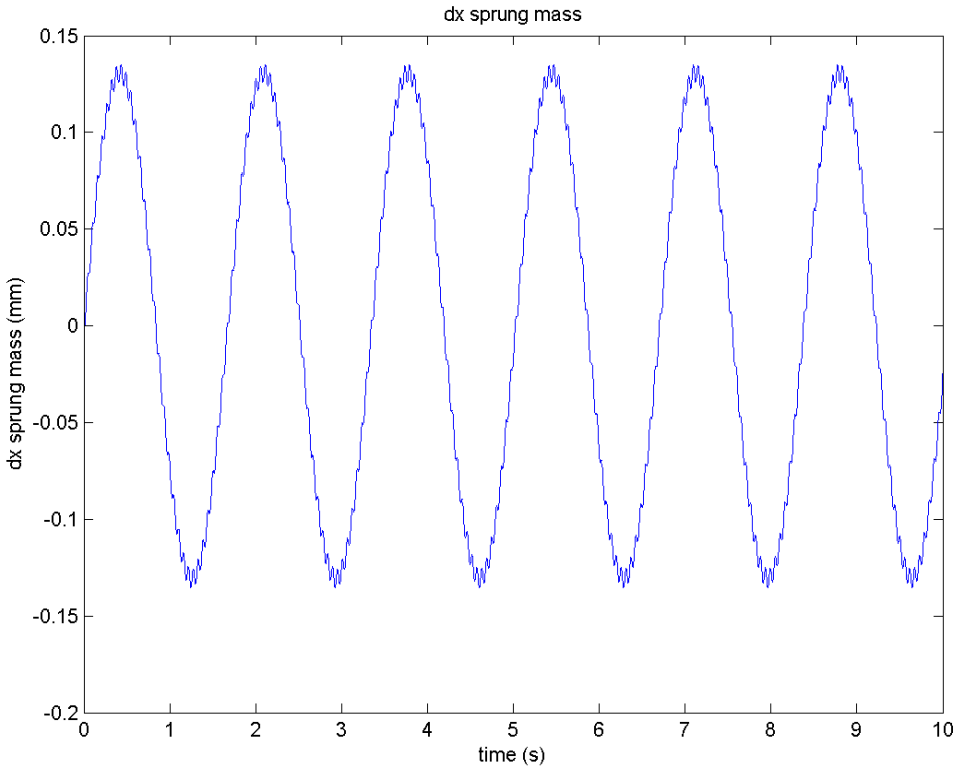
Σχήμα 4.59
ύψος αναρτώμενης μάζας 5 m/s



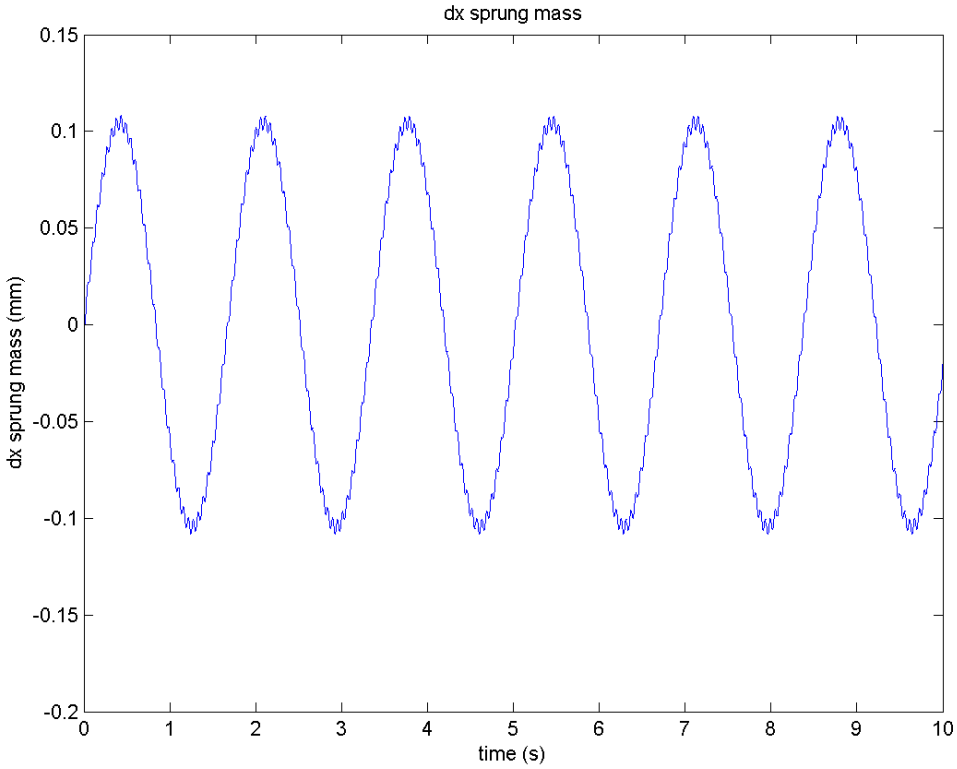
Σχήμα 4.30
ύψος αναρτώμενης μάζας 10 m/s



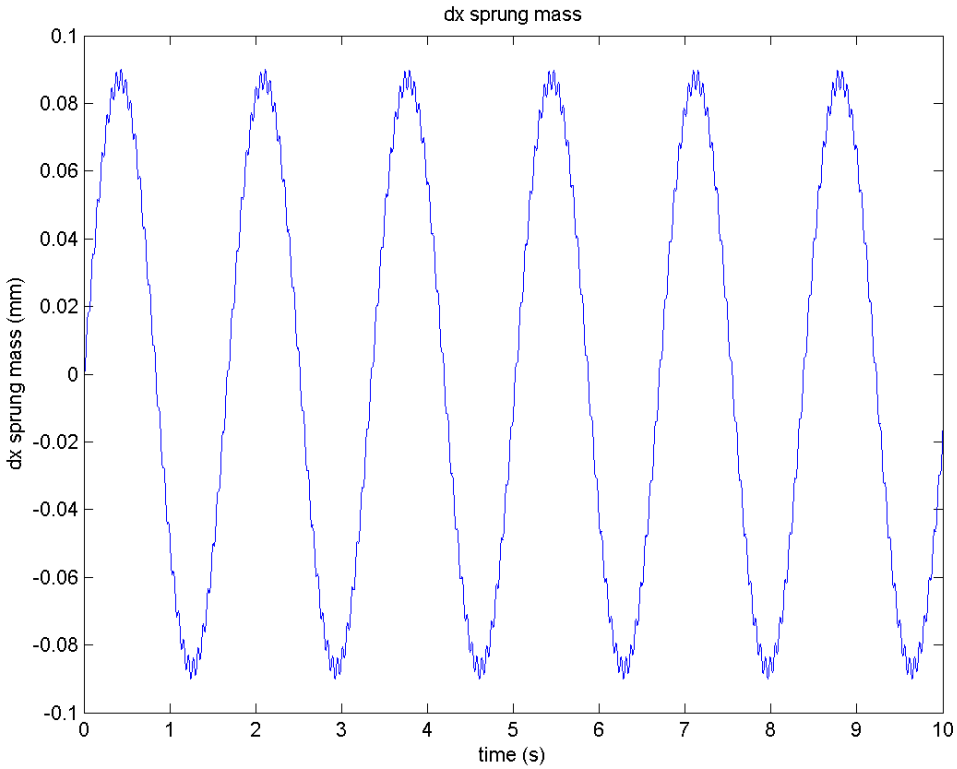
Σχήμα 4.31
ύψος αναρτώμενης μάζας 15 m/s



Σχήμα 4.32
ύψος αναρτώμενης μάζας 20 m/s



Σχήμα 4.33
ύψος αναρτώμενης μάζας 25 m/s



Σχήμα 4.34
ύψος αναρτώμενης μάζας 30 m/s

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

5.1 Χαρακτηριστικά συστήματος

Με το σύστημα υδροπνευματικής ανάρτησης που αναπτύχτηκε επιτυγχάνεται καλύτερη οδική συμπεριφορά από ότι θα υπήρχε με ένα συμβατικό σύστημα ανάρτησης, μέσω του περιορισμού των κλίσεων του οχήματος και της μείωσης των μη αναρτώμενων μαζών, χωρίς αυτό να περιορίζει την άνεση των επιβατών. Παράλληλα, ακόμα και σε υλοποίηση του χωρίς ανάδραση ως σύστημα παθητικής ανάρτησης, εξαλείφει την ανάγκη για αντιστρεπτική ράβδο, σε αντίθεση με την πλειοψηφία των παθητικών, ημιενεργητικών αλλά και ενεργητικών αναρτήσεων που υπάρχουν σε οχήματα. Το γεγονός ότι έλεγχος τον κλίσεων προκύπτει, όχι μόνο από την σκληρότητα των ελατηρίων, αλλά και από τους κυλίνδρους του υδραυλικού συστήματος, δίνει την δυνατότητα μείωσης των συμβιβασμών που γίνονται κατά την εξέλιξη του συστήματος ανάρτησης ενός οχήματος.

Παραπάνω αναφέρθηκαν ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του συστήματος στην παθητική του εκδοχή. Ωστόσο η δυνατότητα ανάδρασης δίνει στο σύστημα την δυνατότητα να μεταβάλει τα χαρακτηριστικά του, όχι μόνο της απόσβεσης, αλλά και της σκληρότητας του, του ύψους του οχήματος και τον ενεργητικό περιορισμό των κλίσεων. Τα υπόλοιπα συστήματα ενεργητικών αναρτήσεων δεν έχουν την δυνατότητα επίδρασης σε όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά, αλλά και η επίδραση τους συνήθως δεν είναι γραμμική.

Άλλο ένα προτέρημα της διάταξης είναι ότι τα εξαρτήματα που την αποτελούν, χρησιμοποιούνται ευρέως σε υδραυλικά και πνευματικά συστήματα με αποτέλεσμα, εφόσον γίνουν ορισμένοι συμβιβασμοί στην διαστασιολόγηση, πολλά από τα εξαρτήματα που απαρτίζουν την διάταξη να είναι τυποποιημένα. Όσον αφορά την κατασκευή της διάταξης παρατηρήθηκε ότι οι υπάρχουσες ενεργητικές αναρτήσεις που λειτουργούν με χρήση πνευματικού συστήματος παρουσιάζουν υψηλό αριθμό βλαβών. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες διατάξεις το πνευματικό σύστημα επιδρά στην διάταξη σε συνδυασμό με τα ελατήρια, ώστε να αυξήσει την σκληρότητα της. Για αυτόν τον λόγο μια βλάβη του πνευματικού συστήματος δεν απαιτεί την ακινησία του οχήματος, αλλά περιορίζει της δυνατότητες του. Έκτος αυτού, λόγω της σύνδεσης της παροχής αεριού στους κυλίνδρους που βρίσκονται σε σταθερό σημείο και μακριά από τους τροχούς, οπότε δεν υπάρχει κίνηση αλλά και η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι περιορισμένη, μειώνεται η πιθανότητα ανάπτυξης των προβλημάτων που εμφανίζονται σε παρόμοιες διατάξεις.

Άλλο ένα χαρακτηριστικό που αξίζει να αναφερθεί είναι το γεγονός ότι οι τοπικές απώλειες, η σταθερά των ελατήριων και οι διάμετροι των κυλίνδρων επηρεάζουν την οδική συμπεριφορά του οχήματος. Ωστόσο η σταθερά των ελατηρίων και οι διάμετροι των εμβόλων

είναι τα μεγέθη οπού χρήζουν βελτιστοποίησης κατά την ανάπτυξη ενός οχήματος με τέτοιου είδους ανάρτηση. Τα δυο αυτά χαρακτηριστικά, πέρα από την οδική συμπεριφορά, επηρεάζουν επίσης και το βάρος και το κόστος του οχήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν ο λόγος $\frac{A_\varepsilon}{A_1+A_2}$ παίρνει μικρές τιμές περιορίζονται μεν οι κλίσεις, αλλά απαιτείται μεγαλύτερη διαδρομή ελατήριου αρά και μεγαλύτερο εμβολο, τα όποια επιφέρουν αύξηση του κόστους και του βάρους. Για την μείωση του κόστους και του βάρους μπορεί να χρησιμοποιηθεί έμβολο μεγαλύτερης διαμέτρου για την συσπείρωση του ελατηρίου, άρα και μικρότερο ελατήριο μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητας, αλλά ο περιορισμός των κλίσεων του οχήματος δεν θα είναι εξίσου αποδοτικός.

Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι επειδή δεν απαιτείται ενίσχυση των σημείων εδράσεις, η εφαρμογή του συστήματος σε ένα όχημα που έχει ένα άλλο σύστημα ανάρτησης δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία. Η κύρια διάφορα που υπάρχει, προκύπτει από τις μικρότερες διαστάσεις που έχει ο κύλινδρος του μελετώμενου συστήματος, που συνδέει τον τροχό με το αμάξωμα, σε σύγκριση με το σύνολο ελατήριου και αποσβεστήρα που αντικαθιστά. Οι υπόλοιπες απαιτήσεις είναι χωροταξικές και όχι για λογούς αντοχής του πλαισίου.

Παρακάτω συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της διάταξης σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα αναρτήσεων.

5.2 Πλεονεκτήματα διάταξης

- **Μείωση μη αναρτώμενων μαζών**

  Η μείωση των μη αναρτώμενων μαζών έχει σαν αποτέλεσμα την βελτίωση την οδικής συμπεριφοράς του οχήματος αλλά και της δυνατότητας του να αναπτύσσει επιταχύνσεις σε μη ομαλό οδόστρωμα.
- **Δυνατότητα εύκολης και άμεσης μεταβολής ρυθμίσεων**

  Μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων είναι εύκολη η μεταβολή της απόσβεσης, της σταθεράς των ελατηρίων, του ύψους και των κλίσεων του οχήματος. Αυτό δίνει την δυνατότητα να προσαρμόζεται η συμπεριφορά του οχήματος στης απαιτήσεις του οδηγού και στης συνθήκες κίνησης του οχήματος.
- **Δυνατότητα χρήσης ανάδρασης**

  Εκτός από την μεταβολή των χαρακτηριστικών της ανάρτησης το σύστημα έχει την δυνατότητα της εισαγωγής ενέργειας στο σύστημα ώστε να αυξάνει την πρόσφυση των ελαστικών και της επιδόσεις που μπορεί να επιτύχει το όχημα.
- **Δεν απαιτείται χρήση αντιστρεπτικής ράβδου**

  Η χρήση αντιστρεπτικής ράβδου για τον περιορισμό του roll του οχήματος πέρα από τα πλεονεκτήματα που έχει, παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς. Η επίδραση της δεν είναι γραμμική και επηρεάζεται από την σχετική θέση των μη αναρτώμενων μαζών προς της αναρτώμενη μάζα και μεταξύ τους. Έκτος αυτού για

την σύνδεση των τροχών απαιτείται χώρος για την τοποθέτηση της αντιστρεπτικής και την κίνηση της, ενώ τα σημεία έδρασης της απαιτούν ενίσχυση ώστε να μπορούν να φέρουν τα ασκούμενα φόρτια. Η χρήση του συστήματος παρέχει γραμμική συμπεριφορά, ενώ το σασί του οχήματος δεν χρειάζεται να έχει την διαμόρφωση που θα είχε για χρήση αντιστρεπτικής. Αυτό μπορεί να οδηγήσει είτε σε μείωση βάρους και πολυπλοκότητας του αμαξώματος η ακόμα και σε μείωση του ύψους του κέντρου βάρους μέσω της τοποθέτησης του κινητήρα η άλλων εξαρτημάτων χαμηλότερα.

- **Χρήση τυποποιημένων εξαρτημάτων**

  Χρησιμοποιώντας τυποποιημένα εξαρτήματα στην ανάρτηση ενός οχήματος μειώνει το κόστος και βελτιώνει την πιθανότητα άμεσης εύρεσης ανταλλακτικών σε περίπτωση που χρειάζεται η αντικατάσταση κάποιου στοιχείου.

5.3 Μειονεκτήματα διάταξης

- **Αυξημένο κόστος και βάρος οχήματος**

  Λόγω της ύπαρξης κυλίνδρων που συσπειρώνουν τα ελατήρια, σωλήνων, αντλιών και δεξαμενής υδραυλικού υγρού, αυξάνεται το βάρος και το κόστος της διάταξης. Ωστόσο επειδή η μετάδοση της ενέργειας γίνεται μέσω του υδραυλικού κυκλώματος είναι εφικτή η τοποθέτηση των παραπάνω εξαρτημάτων σε σημεία ώστε να βελτιώνεται η κατανομή βάρους του οχήματος και να μειώνεται το ύψος του κέντρου μάζας του.

- **Πολυπλοκότητα συστήματος**

  Το σύστημα αποτελείται από περισσότερα εξαρτήματα από ότι μια συνηθισμένη παθητική ανάρτηση, για αυτό είναι αυξημένος και ο χρόνος εξέλιξης της. Εκτός από την εύρεση των απαιτούμενων τεχνικών χαρακτηριστικών των στοιχείων που την απαρτίζουν ώστε να έχουμε την επιθυμητή οδική συμπεριφορά, απαιτείται επίσης χρόνος εξέλιξης μετρητικού συστήματος και συστήματος επεξεργασίας δεδομένων και έλεγχου της ανάδρασης. Αυτά επίσης αυξάνουν το κόστος της διάταξης, ωστόσο είναι αντίστοιχα με τα υπόλοιπα ενεργητικά συστήματα αναρτήσεων.

- **Κατανάλωση ενέργειας**

  Για την ανάδραση στις διεγέρσεις, την εισαγωγή ενέργειας στο σύστημα αλλά και για τον ενεργητικό έλεγχο του roll του οχήματος καταναλώνεται ενεργεία από τους διαφόρους επενεργητές. Κατανάλωση ενέργειας έχουμε και από την μετρητική διάταξη και την μονάδα επεξεργασίας των δεδομένων. Αυτό αποτελεί μεγάλο περιορισμό ειδικά σε αυτοκίνητα μικρού κυβισμού η επιδόσεων. Ωστόσο η χρήση του ενεργητικού συστήματος δεν είναι απαραίτητη συνεχεία, οπότε αν η διάταξη λειτούργει παθητικά σε χαμηλές ταχύτητες και ενεργοποιείται όταν η ταχύτητα ξεπερνά κάποιο όριο επιτυγχάνεται εξοικονόμηση καυσίμου που είναι απαραίτητη, ειδικά σε οχήματα καθημερινής χρήσης.

- **Αδυναμία της ρύθμισης του συστήματος μέσω της ρύθμισης της αντιστρεπτικής ράβδου**

  Κατά την φάση δοκίμων των οχημάτων είναι σύνηθες να αλλάζει η ρύθμιση της αντιστρεπτικής ώστε να γίνει αντιληπτή η φόρτιση των τροχών και πως μπορεί αυτή να μεταβληθεί για να βελτιωθεί η πρόσφυση των ελαστικών. Η μελετώμενη διάταξη δεν απαιτεί αντιστρεπτική ράβδο, οπότε η δοκιμή διαφορετικών ρυθμίσεων δεν είναι εφικτή με αυτόν τον τρόπο. Ωστόσο με κατάλληλη χωροταξική διαμόρφωση μπορεί να απλουστευτεί ιδιαίτερα η διαδικασία αλλαγής ελατηρίων, ώστε να απαιτείται ελάχιστος χρόνος και εξοπλισμός για την αλλαγή αυτή. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται και επιταχύνεται η αλλαγή μεταξύ ρυθμίσεων ώστε να βρεθούν τα χαρακτηριστικά που δίνουν στο όχημα την απαιτουμένη οδική συμπεριφορά.

Βιβλιογραφία

Βιβλία

1. Jazar R. N. (2008) ***Vehicle Dynamics: Theory and Application.*** New York: Springer.
2. Milliken W.F., Milliken D.L. (1995)***Race car vehicle dynamics***. Warendale: Society of Automotive engineers
3. Κωστόπουλος, Θ. Ν. (2009) ***Υδραυλικά και πνευματικά συστήματα***. 2η έκδοση. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.
4. Demic M., Σπέντζας Κ. Ν. (2004) ***Θεωρία κινήσεως τροχοφόρων οχημάτων***. Αθήνα: Αυτοέκδοση.
5. Robinson R. W. (2009) ***OPTIMAL PASSIVE NONLINEAR DAMPER DESIGN METHODOLOGY FOR ROAD RACE APPLICATION.*** Albuquerque: Αυτοέκδοση.

Διαδικτυακές ιστοσελίδες

1. http://www.sae.org/
2. http://www.fia.com/
3. http://www.bmw.com/com/en/
4. http://www.audi.co.uk
5. http://www.citroen.gr/
6. http://eblog.mercedes-benz-passion.com/
7. http://wabco-auto.com
8. http://www.jeep.com
9. http://www.teslamotors.com
10. http://performance-suspension.eibach.de/en/
11. http://www.bilstein.de/
12. http://www.monroe.com
13. http://en.wikipedia.org
14. http://www.mathworks.com
15. http://www.mit.edu/
16. http://www.umich.edu/
17. http://www-control.eng.cam.ac.uk/
18. https://www.math.purdue.edu/
19. http://www.eng.auburn.edu/
20. http://www.engr.colostate.edu/
21. http://www.topgear.com
22. http://www.autozine.org
23. http://www.f1technical.net
24. http://www.popularmechanics.com
25. http://www.sandsmuseum.com/

26. http://www.autoblog.gr
27. http://beautifullyengineered.tumblr.com
28. http://www.automobileplanet.com/
29. http://enlightenments.wordpress.com/
30. http://www.f1fanatic.co.uk
31. http://www.autoproductsfinder.com
32. http://www.grandprixmerchandise.co.uk
33. http://www.carbibles.com
34. https://sites.google.com/site/vehiclestwo/
35. http://www.edmunds.com/car-technology/
36. http://www.wk2jeeps.com
37. http://jashwanthauto.blogspot.gr/
38. http://www.sciencedirect.com/
39. http://www.scarbsf1.com

Παράρτημα

Κώδικας MATLAB

run.m

```
%% globals

global d1 d2 de_ex de_vak v b

v     = 5     ; %m/s          car velosity
b     = 0.725  ; %m            (wheebase)/2
d1    = 0.08   ; %m            susp cyl diam 1
d2    = 0.06   ; %m            susp cyl diam 2
de_ex  = 0.05   ; %m            spring cyl diam 1
de_vak = 0.025  ; %m            spring cyl diam 2


%% ode

inval = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0] ; %initial conditions

[t,x]=ode45('dy',[0,10],inval);

save('results.mat')

post (t,x);
```

dy.m

```
function dy = dy(t,y)

global d1 d2 de_ex de_vak v b

%% car specs


m    = 542.5  ; %kg            (sprung mass)/2
mu   = 40     ; %kg            unsprung mass
I    = 820    ; %kg m^3        sprung mass inertia

c1   = 300    ; %              spring dampening)
c2   = 100    ; %              opposite wheel dampening)
k_is = 2000   ; %nm            spring rate eqiv
kt   = 500000 ; %nm            tyre spring rate


%% road equations

r1 = 0.025 *sin((2 * pi * v * t)/0.35)  ;      %road excitation 1

%r2 = 0.025 *sin((2 * pi * v * t)/0.35)  ;     %road excitation 2,a
r2 = 0 ;                                       %road excitation 2,b

%% factors

%cylinders
a1   = pi*(d1 ^2) / 4 ;
a2   = a1 - pi*(d2 ^2) / 4 ;
ae_ex   = pi*(de_ex ^2) / 4 ;
ae = ae_ex - pi*(de_vak ^2) / 4;

%spring rate factor
k    = k_is * (ae/(a1-a2))  ; %nm  synt metab logo diaf embadwn emb

%Force
s1 = k*((a1-a2)/ae)^2       ;
s2 = c1*(a1^2+a2^2)*(a1-a2)  ;
s3 = - 4*a1*a2*c1*(a1-a2)    ;
s4 = - c2*a2^3              ;

%Torque
s5 = k*b*((a1+a2)/ae)^2      ;
s6 = c1*b*(a1+a2)^2 *(a1-a2) ;
s7 = a2^3*b*c2              ;
```

```
%Tyres
s8 = k*a2/ae^2            ;
s9 = - k*a1/ae^2           ;
s10= - c1*a1              ;
s11= c2*a2^3              ;

%% equation

dy = zeros(10,1);    %vector

dy(1)  =0;     %road excitation input 1

dy(2)  =0;     %road excitation input 2

dy(3)  = y(4);  %unspung mass height right

dy(4)  = -1*(   kt* (y(3)  - r1   ) + s8 * (  (y(7)-b*y(9)-y(5))*a1 - (y(7)+b*y(9)-y(3))*a2)  + s9 * (
(y(7)+b*y(9)-y(3))*a1 - (y(7)-b*y(9)-y(5))*a2 )           + s10 * (  (dy(7)+b*dy(9)-dy(3))*a1 - (dy(7)-
b*dy(9)-dy(5))*a2 )^2   +  s11*  ((dy(7)+b*dy(9)-dy(3))*a2)^2  )/mu;

dy(5)  = y(6);  %unspung mass height left

dy(6)  = -1*(   kt* (y(5)  - r2   ) + s8 * (  -1*(y(7)-b*y(9)-y(5))*a2 + (y(7)+b*y(9)-y(3))*a1)  + s9 * (
-1*(y(7)+b*y(9)-y(3))*a2 + (y(7)-b*y(9)-y(5))*a1 )           + s10 * (  -1*(dy(7)+b*dy(9)-dy(3))*a2 +
(dy(7)-b*dy(9)-dy(5))*a1 )^2   +  s11*  ((dy(7)-b*dy(9)-dy(5))*a2)^2 )/mu ;

dy(7)  = y(8);  %sprung mass height (center of mass)

dy(8)  = -1*(   s1* (2*y(7)-y(3)-y(5)) + s2* ((dy(7)-b*dy(9)-dy(5))^2 + (dy(7)+b*dy(9)-dy(3))^2)
+s3 * ((dy(7)-b*dy(9)-dy(5)) * (dy(7)+b*dy(9)-dy(3)))   +s4 *  ((dy(7)-b*dy(9)-dy(5))^2 +
(dy(7)+b*dy(9)-dy(3))^2)        )/m   ;

dy(9)  = y(10); %sprung mass angle

dy(10) = -1*(   s5*  (2*b*y(9) -y(3) +y(5))    +s6*  ((dy(7)+b*dy(9)-dy(3))^2 + (dy(7)-b*dy(9)-
dy(5))^2)  +s7* ((dy(7)-b*dy(9)-dy(5))^2 + (dy(7)+b*dy(9)-dy(3))^2)       )/I  ;

end
```

post.m

```
function [ ] = post( t,x )
%POST prossesing and ploting of the data

global d1 d2 de_ex de_vak v b
%% diaxorismoi

x_unsp_1      = x(:,3) *1000  ;   %unsprung mass height right mm
x_unsp_2      = x(:,5) *1000  ;   %unsprung mass height left mm
x_sp          = x(:,7) *1000  ;   %sprung mass height mm
a_sp          = x(:,9) *360/2/pi  ;       %sprung mass angle

%% plots

figure(1)
subplot(2,1,1);
plot (t,x_unsp_1);
title('unsprung masses');
xlabel('time (s)');
ylabel('dx unsprung mass 1 (mm)');


subplot(2,1,2);
plot (t,x_unsp_2);
xlabel('time (s)');
ylabel('dx unsprung mass 2 (mm)');

h = figure(1);
print (h, '-dpng')

figure(2)
plot (t,x_sp);
title('dx sprung mass');
xlabel('time (s)');
ylabel('dx sprung mass (mm)');

h = figure(2);
print (h, '-dpng')

figure(3)
plot (t,a_sp);
title('sprung mass angle');
xlabel('time (s)');
ylabel('dθ sprung mass (degrees)');

h = figure(3);
print (h, '-dpng')
%% elatiria
```

```
a1   = pi*(d1 ^2) / 4 ;

a2   = a1 - pi*(d2 ^2) / 4 ;

ae_ex   = pi*(de_ex ^2) / 4 ;
ae = ae_ex - pi*(de_vak ^2) / 4;

x_el_1  = (( (x_sp+b*a_sp-x_unsp_1)*a1  -(x_sp-b*a_sp-x_unsp_2)*a2)  /ae );
x_el_2  = (( (x_sp-b*a_sp-x_unsp_2)*a1 - (x_sp+b*a_sp-x_unsp_1)*a2)  /ae );

figure(4)
subplot(2,1,1);
plot (t,x_el_1);
title('springs deformation');
xlabel('time (s)');
ylabel('dx spring 1 (mm)');

subplot(2,1,2);
plot (t,x_el_2);
xlabel('time (s)');
ylabel('dx spring 1 (mm)');

h = figure(4);
print (h, '-dpng')

clc
end
```

roll.m

```
%% equations and specs

b     = 0.725  ; %m            (wheebase)/2
d1    = 0.08   ; %m            susp cyl diam 1
d2    = 0.06   ; %m            susp cyl diam 2
de_ex  = 0.05    ; %m            spring cyl diam 1
de_vak = 0.025   ; %m            spring cyl diam 2
m    = 542.5  ; %kg           (sprung mass)/2
k_is = 2000   ; %nm           spring rate eqiv
kt   = 500000 ; %nm           tyre spring rate

a1   = pi*(d1 ^2) / 4 ;
a2   = a1 - pi*(d2 ^2) / 4 ;
ae_ex   = pi*(de_ex ^2) / 4 ;
ae = ae_ex - pi*(de_vak ^2) / 4;

h = 0.4; %m
g = 9.81;  %m/s^2

s12 =(m * h ) / ( 2 * b ^ 2 ) * ( 1 / kt + 1 / k_is * ae/(a1+a2 ));

a = 0:0.2:12;    %m/s^2          lateral acceleration
theta = atan(s12 / (1 + g * s12 )* a) *360/2/pi;

%% plot

figure(1)
plot (a,theta)
title('roll from lateral acceleration');
xlabel('lateral acceleration (m/s^2)');
ylabel('dθ sprung mass (degrees)');

h = figure(1);
print (h, '-dpng')
clc
```

roll2.m

```
%% equations and specs

a     = 10    ; %m/s^2          lateral acceleration

b     = 0.725  ; %m             (wheebase)/2
%d1     = 0.08   ; %m             susp cyl diam 1
%d2     = 0.06   ; %m             susp cyl diam 2
%de_ex  = 0.05    ; %m             spring cyl diam 1
%de_vak = 0.025   ; %m             spring cyl diam 2
m    = 542.5    ; %kg            (sprung mass)/2
k_is = 2000     ; %nm            spring rate eqiv
kt   = 500000   ; %nm            tyre spring rate

%a1   = pi*(d1 ^2) / 4 ;
%a2   = a1 - pi*(d2 ^2) / 4 ;
%ae_ex   = pi*(de_ex ^2) / 4 ;
%ae = ae_ex - pi*(de_vak ^2) / 4;

h = 0.4; %m
g = 9.81;  %m/s^2

%c = ae/(a1+a2) ;
c = 0:0.01:2;
for i = 1:1:201

theta(i) =360/2/pi* atan((m * h ) / ( 2 * b ^ 2 ) * ( 1 / kt + 1 / k_is * c(i)) / (1 + g * (m * h ) / ( 2 *
b ^ 2 ) * ( 1 / kt + 1 / k_is * c(i)) )* a);
end

%% plot

figure(1)
plot (c,theta)
%title('');
xlabel('Ae / (A1+A2)');
ylabel('dθ sprung mass (degrees) at 10m/s^2 lat. acceleration');

h = figure(1);
print (h, '-dpng')
clc
```

roll3.m

```
%% equations and specs

a     = 10     ; %m/s^2          lateral acceleration

b     = 0.725  ; %m             (wheebase)/2
d1    = 0.08   ; %m             susp cyl diam 1
d2    = 0.06   ; %m             susp cyl diam 2
de_ex  = 0.05    ; %m             spring cyl diam 1
de_vak = 0.025   ; %m             spring cyl diam 2
m    = 542.5    ; %kg            (sprung mass)/2
%k_is = 2000     ; %nm            spring rate eqiv
kt   = 500000   ; %nm            tyre spring rate

a1   = pi*(d1 ^2) / 4 ;
a2   = a1 - pi*(d2 ^2) / 4 ;
ae_ex   = pi*(de_ex ^2) / 4 ;
ae = ae_ex - pi*(de_vak ^2) / 4;

h = 0.4; %m
g = 9.81;  %m/s^2

k_is = 100:100:10000;

for i = 1:1:100

s12(i) =(m * h ) / ( 2 * b ^ 2 ) * ( 1 / kt + 1 / k_is(i) * ae/(a1+a2 ));
theta (i) = atan(s12(i) / (1 + g * s12(i) )* a) *360/2/pi;

end

%% plot

figure(1)
plot (k_is,theta)
%title('');
xlabel('K is');
ylabel('dθ sprung mass (degrees) at 10m/s^2 lat. acceleration');

h = figure(1);
print (h, '-dpng')
clc
```

roll4.m

```
%% equations and specs


b      = 0.725  ; %m            (wheebase)/2
m    = 542.5    ; %kg           (sprung mass)/2
k_is = 2000     ; %nm           spring rate eqiv
kt   = 500000   ; %nm           tyre spring rate


h = 0.4; %m
g = 9.81;  %m/s^2

%c = ae/(a1+a2) ;

ca = 0.2;
s12a =(m * h ) / ( 2 * b ^ 2 ) * ( 1 / kt + 1 / k_is * ca);
a = 0:0.2:15;    %m/s^2          lateral acceleration
thetaa = atan(s12a / (1 + g * s12a )* a) *360/2/pi;

cb = 1;
s12b =(m * h ) / ( 2 * b ^ 2 ) * ( 1 / kt + 1 / k_is * cb);
a = 0:0.2:15;    %m/s^2          lateral acceleration
thetab = atan(s12b / (1 + g * s12b )* a) *360/2/pi;

cc = 3;
s12c =(m * h ) / ( 2 * b ^ 2 ) * ( 1 / kt + 1 / k_is * cc);
a = 0:0.2:15;    %m/s^2          lateral acceleration
thetac = atan(s12c / (1 + g * s12c )* a) *360/2/pi;


%% plot

figure(1)
plot (a,thetaa,a,thetab,a,thetac)
title('roll from lateral acceleration');
xlabel('lateral acceleration (m/s^2)');
ylabel('dθ sprung mass (degrees)');

h = figure(1);
print (h, '-dpng')
clc
```

Ευρετήριο εικόνων και σχημάτων

Εικόνες

Κεφάλαιο 1

Εικόνα 1.1 Εμπρός ανάρτηση αγωνιστικού αυτοκίνητου 10

(πηγή: http://www.autoblog.gr/2012/01/25/ten-most-crazy-racing-cars-in-histrory-part-6/)

Εικόνα 1.2 Ελικοειδή ελατήρια 11

(πηγή: http://performance-suspension.eibach.de/en/)

Εικόνα 1.3 αποσβεστήρας 12

(πηγή: http://www.bilstein.de/en/products/high-performance-shock-absorbers/bilstein-b6/)

Εικόνα 1.4 Μαγνητοροϊκή ανάρτηση 13

(πηγή:http://www.audi.co.uk/new-cars/r8/r8-spyder/handling-and-control/audi-magnetic-ride.html)

Εικόνα 1.5 ενεργητική ανάρτηση BMW Dynamic Drive 14

(πηγή: http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/6series/coupe/2007/allfacts/engine_dynamicdrive.html)

Εικόνα 1.6 Σύστημα ανάρτησης από το μονοθέσιο Williams FW14B 15

(πηγή: http://www.grandprixmerchandise.co.uk/the-legends-and-their-cars-part-1/)

Εικόνα 1.7 Citroen Hydractive 17

(πηγή: http://www.sae.org/automag/techbriefs_05-00/03.htm)

Εικόνα 1.8 Mercedes Active Body Control 18

(πηγή:http://eblog.mercedes-benz-passion.com/2012/04/the-new-mercedes-benz-sl-chassis-and-suspension-best-contact-with-the-road/)

Εικόνα 1.9 Jeep Quadra Lift 18

(πηγή: http://www.jeep.com/en/2013/grand_cherokee/capability/off_road_performance/)

Εικόνα 1.10 Tesla motors ACTIVE AIR SUSPENSION 19

(πηγή:http://www.popularmechanics.com/cars/news/industry/2013s-most-innovative-car-is-the-tesla-model-s-3#slide-3)

Κεφάλαιο 2

Εικόνα 2.1 Lamborghini Aventador suspension system 22

(πηγή: http://www.topgear.com/uk/car-news/lamborghini-suspension-revealed-2011-01-25)

Σχήματα

Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2.1 αρχική ιδέα για την σύνδεση των τροχών 20

Σχήμα 2.2 παθητικό υδροπνευματικό σύστημα ανάρτησης 21

Σχήμα 2.3 εξέλιξη παθητικού υδροπνευματικού συστήματος ανάρτησης 23

Σχήμα 2.4 εξέλιξη παθητικού υδροπνευματικού συστήματος ανάρτησης 24

Σχήμα 2.5 υδροπνευματικό σύστημα ανάρτησης με δυνατότητα μεταβολής ύψους 25

Σχήμα 2.6 υδροπνευματικό σύστημα ανάρτησης με αντιστάθμιση κλίσεων 26

Σχήμα 2.7 σύστημα ενεργητικής υδροπνευματικής ανάρτησης 27

Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3.1 Quarter car model 28

Σχήμα 3.2 Bicycle model 29

Σχήμα 3.3 Half car model 29

Σχήμα 3.4 Full car vibrating model 30

Σχήμα 3.5 σύστημα που προσομοιώθηκε 31

Κεφάλαιο 4

Σχήμα 4.1 ύψος μη αναρτώμενων μαζών 5 m/s (single side excitation) 37

Σχήμα 4.2 ύψος μη αναρτώμενων μαζών 10 m/s (single side excitation) 37

Σχήμα 4.3 ύψος μη αναρτώμενων μαζών 15 m/s (single side excitation) 38

Σχήμα 4.4 ύψος μη αναρτώμενων μαζών 20 m/s (single side excitation) 38

Σχήμα 4.5 ύψος μη αναρτώμενων μαζών 25 m/s (single side excitation) 39

Σχήμα 4.6 ύψος μη αναρτώμενων μαζών 30 m/s (single side excitation) 39

Σχήμα 4.7 ύψος μη αναρτώμενων μαζών 5 m/s (both side excitation) 40

Σχήμα 4.8 ύψος μη αναρτώμενων μαζών 10 m/s (both side excitation) 41

Σχήμα 4.9 ύψος μη αναρτώμενων μαζών 15 m/s (both side excitation) 41

Σχήμα 4.10 ύψος μη αναρτώμενων μαζών 20 m/s (both side excitation) 42

Σχήμα 4.11 ύψος μη αναρτώμενων μαζών 25 m/s (both side excitation) 42

Σχήμα 4.12 ύψος μη αναρτώμενων μαζών 30 m/s (both side excitation) 43

Σχήμα 4.13 roll υπό πλευρική επιτάχυνση 44

Σχήμα 4.14 roll υπό πλευρική επιτάχυνση 45

Σχήμα 4.15 επίδραση του λόγου $\frac{A_\varepsilon}{A_1+A_2}$ στην κλίση του οχήματος 46

Σχήμα 4.16 επίδραση του $K_{\iota\sigma}$ στην κλίση του οχήματος 46

Σχήμα 4.17 roll αναρτώμενης μάζας 5 m/s (single side excitation) 47

Σχήμα 4.18 roll αναρτώμενης μάζας 10 m/s (single side excitation) 47

Σχήμα 4.19 roll αναρτώμενης μάζας 15 m/s (single side excitation) 48

Σχήμα 4.20 roll αναρτώμενης μάζας 20 m/s (single side excitation) 48

Σχήμα 4.21 roll αναρτώμενης μάζας 25 m/s (single side excitation) 49

Σχήμα 4.22 roll αναρτώμενης μάζας 30 m/s (single side excitation) 49

Σχήμα 4.23 ύψος αναρτώμενης μάζας 5 m/s(both side excitation) 51

Σχήμα 4.24 ύψος αναρτώμενης μάζας 10 m/s(both side excitation) 51

Σχήμα 4.25 ύψος αναρτώμενης μάζας 15 m/s(both side excitation) 52

Σχήμα 4.26 ύψος αναρτώμενης μάζας 20 m/s(both side excitation) 52

Σχήμα 4.27 ύψος αναρτώμενης μάζας 25 m/s(both side excitation) 53

Σχήμα 4.28 ύψος αναρτώμενης μάζας 30 m/s(both side excitation) 53

Σχήμα 4.29 ύψος αναρτώμενης μάζας 5 m/s (single side excitation) 54

Σχήμα 4.30 ύψος αναρτώμενης μάζας 10 m/s (single side excitation) 54

Σχήμα 4.31 ύψος αναρτώμενης μάζας 15 m/s (single side excitation) 55

Σχήμα 4.32 ύψος αναρτώμενης μάζας 20 m/s (single side excitation) 55

Σχήμα 4.33 ύψος αναρτώμενης μάζας 25 m/s (single side excitation) 56

Σχήμα 4.34 ύψος αναρτώμενης μάζας 30 m/s (single side excitation) 56