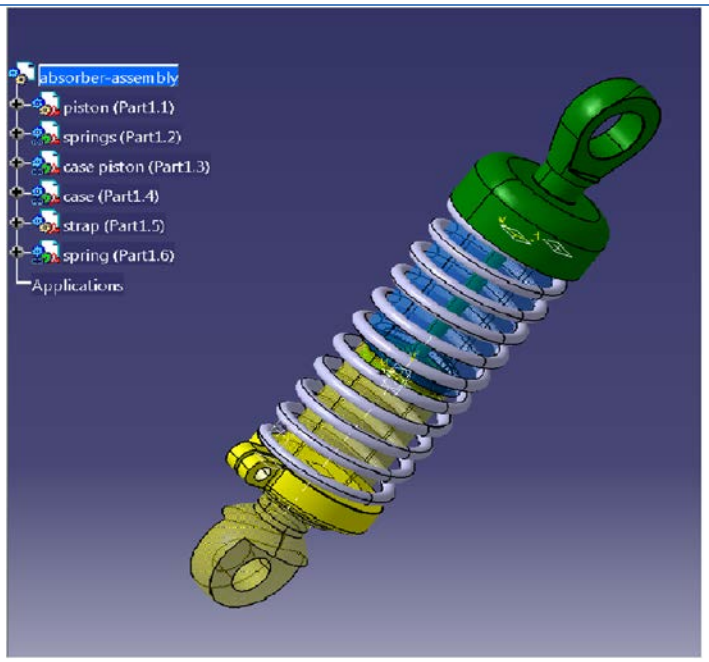
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΤΣΙΜΙΓΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ-ΛΥΔΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ι.ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ευκαιρία της περάτωσης της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω εκείνους που συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην ολοκλήρωση της προπτυχιακής μου πορείας.

Καταρχήν, πρέπει να ευχαριστήσω τον κ. Ι. Αντωνιάδη, ο οποίος μου ανέθεσε το εν λόγω πολύ ενδιαφέρον θέμα του σχεδιασμού καινοτομικής διάταξης ανάρτησης αυτοκινήτου.

Επιπλέον, ευχαριστώ τους συναδέλφους μου που έκαναν ευχάριστη τη φοίτησή μου στη σχολή.

Τέλος, το φιλικό και οικογενειακό μου περιβάλλον που με στήριξε με όποιον τρόπο μπορούσε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η καινοτομική σχεδίαση της διάταξης της ανάρτησης ενός επιβατηγού οχήματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια θεωρητική εισαγωγή σχετικά με τις αναρτήσεις και τα εξαρτήματα αυτών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται οι λεπτομέρειες, σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο γίνεται το design των ελατηρίων και οι τύποι με τους οποίους γίνεται ο έλεγχος σε αντοχή αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετάται η συμβατική ανάρτηση ως δυναμικό σύστημα ενός βαθμό ελευθερίας μάζας, ελατηρίου και αποσβεστήρα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εισάγεται το θεωρητικό γραμμικό ελατήριο αρνητικής ελαστικότητας το οποίο αναλαμβάνει την παύση των ταλαντώσεων επαναφοράς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο σχεδιάζεται η πραγματική πλέον διάταξη της ανάρτησης με το αρνητικό γραμμικό ελατήριο να αντικαθίσταται από ζεύγος οριζόντιων στη θέση ισορροπίας ελατηρίων.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο αξιολογούνται και συγκρίνονται συνολικά τα αποτελέσματα της μελέτης.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the innovative design of a car suspension system.

The first chapter is a theoretical introduction about suspensions and their components.

The second chapter lists the details about how we design springs and how we evaluate their effectiveness and their reliability.

The third chapter studies the conventional suspension as a dynamic system of one degree of freedom. (mass-spring-absorber)

In the fourth chapter the theoretical negative linear spring is introduced which is responsible for the termination of oscillations.

In the fifth chapter the actual suspension layout is designed and the negative linear spring is replaced by a pair of springs in horizontal equilibrium position.

In the sixth and last chapter the results of the study are assessed.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εξώφυλλο.....1

Ευχαριστίες.....3

Περίληψη.....4

Abstract.....5

Περιεχόμενα.....6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΑΝΑΡΤΗΣΕΙΣ.....9

1.1:ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ.....9

1.2:ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΓΟΝΑΤΟ.....11

1.3:ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΙΣΩ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ.....12

1.4:ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.....12

1.5:ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΟΙ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ.....13

1.6:ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΣΗΣ.....13

1.7:ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ.....14

1.7.1:ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ.....14

1.7.1.1:ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ ΕΛΑΤΗΡΙΑ.....14

1.7.1.2:ΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΡΑΒΔΟΙ.....16

1.7.1.3:ΕΛΑΤΗΡΙΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΦΥΛΛΩΝ.....17

1.8:ΓΩΝΙΑ CASTER.....17

1.9:ΓΩΝΙΑ CAMBER.....18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:ΕΛΑΤΗΡΙΑ.....20

2.1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....20

2.2:ΕΛΑΤΗΡΙΟ ΡΑΒΔΟΣ.....20

2.3:ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ ΕΛΑΤΗΡΙΑ.....20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΣΥΣΤΗΜΑ M-K-C.....28

4.1:ΜΑΖΑ.....28

4.2:ΕΛΑΤΗΡΙΟ.....28

4.3:ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑΣ.....28

4.4:ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....29

4.5:ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΥΤΗΜΑΤΟΣ.....31

4.5.1:ΚΥΚΛΙΚΗ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....31

4.5.2:ΛΟΓΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ.....32

4.6:ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....32

4.7:ΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....33

4.7.1:ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ ΑΡΧΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ.....33

4.7.2:ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ.....34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ Μ-Κ-C ΜΕ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΕΛΑΤΗΡΙΟ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....35

5.1:ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ Μ-Κ-C.....35

5.2:ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ.....36

5.3:ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ.....38

5.3.1:ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΕ ΕΠΙΒΟΛΗ ΑΡΧΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ.....39

5.3.2:ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΕ ΕΠΙΒΟΛΗ ΑΡΧΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΠΛΑΓΙΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ.....41

6.1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....41

6.2:ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....42

6.3:ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ.....44

6.3.1:ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ K_S 44

6.3.2:ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ K_e.....45

6.3.3:ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ K_O.....45

6.3.4:ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....45

6.4:ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....46

6.4.1:ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΛΟΓΩ ΑΡΧΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ.....47

6.4.2:ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΛΟΓΩ ΑΡΧΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....47

6.5:ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ANSYS.....48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....50

7.1: ΕΠΙΒΟΛΗ ΑΡΧΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ.....50

7.2:ΕΠΙΒΟΛΗ ΑΡΧΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....52

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....54

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....56

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....58

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....59

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.....60

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ.....61

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ.....63

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΡΤΗΣΕΙΣ

1.1:ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ

Εικόνα 1.1: Αποσβεστήρας

Οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων (αμορτισέρ) έχουν σκοπό την απόσβεση των ταλαντώσεων των ελατηρίων των αναρτήσεων. Οι δυο μπροστινοί αποσβεστήρες είναι συνδεδεμένοι με την μπροστινή ανάρτηση στο σασί, ενώ οι δυο πίσω μεταξύ της πίσω ανάρτησης και του σασί. Ελέγχουν τη συμπεριφορά των ελατηρίων των ταλαντώσεων προκειμένου να παρέχεται άνεση στους επιβάτες του οχήματος, αποτρέπουν την ταλάντευση και την κλίση του οχήματος όταν αυτό στρίβει και μειώνουν την ανύψωση του πέλματος του ελαστικού πράγμα που επιφέρει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του ελαστικού, μικρότερη ολίσθηση και ευστάθεια κατά την οδήγηση. Στην περίπτωση που οι αποσβεστήρες έχουν υποστεί φθορά εμφανίζονται υπερβολικές ταλαντώσεις σε ανώμαλες επιφάνειες του οδοστρώματος οι οποίες επιδρούν αρνητικά στο σύστημα διεύθυνσης, υπάρχει μεγάλη ταλάντευση και κλίση στις στροφές και μπορεί να οδηγήσει και απώλεια ελέγχου του αυτοκινήτου. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι αποσβεστήρων ανάλογα με τη συμπεριφορά του ελατηρίου το οποίο αυτοί ελέγχουν.

Το κάτω μισό ενός αποσβεστήρα είναι ένας διπλός χαλύβδινος σωλήνας ο οποίος περιέχει λάδι. Στο κάτω μέρος υπάρχει μια ανακουφιστική βαλβίδα. Εσωτερικά

κινείται το έμβολο που φέρει τη ράβδο κίνησης (διωστήρας). Εξωτερικά βρίσκεται ένας σωλήνας ούτως ώστε να προστατεύεται το όργανο από λάσπη, σκόνη, υγρασία κλπ. Επάνω και κάτω είναι τοποθετημένοι δακτύλιοι για τη στήριξή του. Όταν το όχημα περάσει πάνω από ένα εξόγκωμα του δρόμου ο τροχός κινείται ανοδικά προς τα πάνω σε σχέση με το πλαίσιο, προκαλώντας τη συμπίεση του ελατηρίου της ανάρτησης. Το ελατήριο αποθηκεύει ενέργεια την οποία εκλύει ωθώντας προς τα κάτω τον τροχό. Εάν αυτή η παλινδρομική κίνηση του ελατηρίου δεν είναι ελεγχόμενη ο τροχός θα χτυπήσει το οδόστρωμα ενώ θα συνεχίζει να ταλαντώνεται. Αυτό το ρόλο για την εξομάλυνση της επαναφοράς αναλαμβάνει ο αποσβεστήρας. Όταν, λοιπόν το ελατήριο συμπιέζεται το μήκος του αποσβεστήρα μικραίνει και το λάδι περνά μέσα από τις οπές του εμβόλου προκαλώντας τριβή και άρα καταστροφή της ενέργειας που θα αποθηκευόταν στο ελατήριο. Οι βαλβίδες που φέρει ο αποσβεστήρας ταυτόχρονα ελέγχουν και τη ροή του λαδιού. Επίσης και κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης του ελατηρίου περνά πάλι το λάδι από τις οπές του εμβόλου με αποτέλεσμα να ελέγχεται και η καθοδική κίνηση του τροχού. Η αντίσταση του εμβόλου του αποσβεστήρα αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας του αυτοκινήτου με αποτέλεσμα αν ο τροχός χτυπήσει ένα ανάχωμα με μεγάλη ταχύτητα τότε οι ταλαντώσεις επαναφοράς θα μειωθούν σημαντικά. Αναλόγως ισχύει και για το ύψος του αναχώματος στο οποίο θα χτυπήσει ο τροχός.

Τα έμβολα των αποσβεστήρων ταλαντώσεων έχουν μεγάλη ποικιλία οπών και βαλβίδων για τη ροή του λαδιού από τη μια μεριά στην άλλη. Κατά τις αργές κινήσεις του τροχού και της ανάρτησης μικρά ακροφύσια ελέγχουν τη ροή, ενώ κατά τις μέγιστες ταχύτητες κίνησης οι μεγαλύτερες οπές λαμβάνουν μέρος. Το ποσοστό της απόσβεσης εξαρτάται ωστόσο από τη γεωμετρία των οπών. Κατά τη διάρκεια γρήγορης ανοδικής κίνησης στη φάση της συμπίεσης, η υπερβολικά μεγάλη πίεση στον κάτω θάλαμο του αποσβεστήρα εξαναγκάζει το λάδι να διοχετευθεί μέσω της κάτω βαλβίδας στο ρεζερβουάρ.

Υπάρχουν επίσης και αποσβεστήρες με λειτουργικό μέσο αέριο (αμορτισέρ αερίου).

Οι περισσότεροι αποσβεστήρες είναι διπλής ενέργειας και ελέγχουν τη δράση των ελατηρίων κατά τη διάρκεια των ανοδικών και των καθοδικών κινήσεων του τροχού. Το έμβολο και οι βαλβίδες είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να παρέχεται μεγαλύτερος έλεγχος κατά την επιμήκυνση του αποσβεστήρα της τάξης 70% για την επιμήκυνση 30% για τη συμπίεση. Αυτό συμβαίνει γιατί το φαινόμενο της έκτασης του ελατηρίου πρέπει να ελέγχεται καλύτερα από τη φάση της συμπίεσης του.

1.2: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΓΟΝΑΤΟ(ΜΠΡΟΣΤΙΝΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ)

Για πολλά χρόνια, τα οχήματα που είχαν την κίνηση στους πίσω τροχούς ήταν εφοδιασμένα με μπροστινούς και πίσω αποσβεστήρες ταλαντώσεων. Τα περισσότερα εμπροσθοκίνητα οχήματα ήταν εφοδιασμένα με αναρτήσεις μπροστινών συστημάτων (γόνατα MacPherson- τηλεσκοπικά αμορτισέρ) αλλά και πίσω διέθεταν την ίδια ανάρτηση. Ένας αριθμός τέτοιων οχημάτων παρήχθη τη δεκαετία 1980-1990.

Η ανάρτηση με γόνατο MacPherson χρησιμοποιείται κυρίως σε εμπροσθοκίνητα οχήματα αλλά και σε οπισθοκίνητα. Αναφέρονται ως τηλεσκοπικά αμορτισέρ διότι το μήκος των αποσβεστήρων ταλάντωσης είναι μεγαλύτερο. Για την επισκευή τους, αντικαθίσταται το αμορτισέρ μαζί με το ελατήριο που το περιβάλει. Το ελατήριο βρίσκεται εξωτερικά από τον αποσβεστήρα και το μήκος του είναι συγκεκριμένο για τον κάθε τύπο ανάρτησης. Η παράλειψη ή η βλάβη του ελατηρίου επιδρά αρνητικά στην οδική συμπεριφορά του οχήματος. Το κάτω άκρο της ανάρτησης είναι βιδωμένο στο μπράτσο διευθύνσεως, ενώ το επάνω μέρος στο θόλο του φτερού. Το ελατήριο βρίσκεται μεταξύ της επάνω και της κάτω έδρας του αποσβεστήρα και κείτεται πάνω σε ελαστικούς μονωτικούς δακτυλίους. Οι δακτύλιοι είναι τέτοιοι ώστε να μην παράγονται ήχοι τριβής μεταξύ του μετάλλου του ελατηρίου και του μετάλλου του αποσβεστήρα.

Όταν οι μπροστινοί τροχοί στρίψουν ο αποσβεστήρας μαζί με το ελατήριο περιστρέφονται με το μπράτσο διευθύνσεως στο κάτω μέρος, ενώ η επάνω στήριξη περιστρέφεται λόγω των ρουλεμάν που φέρει. Μερικά οχήματα φέρουν πολυσυνδέσμους με σφαιρικούς συνδέσμους λόγω της στροφής της μπροστινής ανάρτησης.

Εικόνα 1.2: Μπροστινή ανάρτηση MacPherson

1.3: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΙΣΩ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Σε μερικά συστήματα πίσω ανάρτησης, το κάτω άκρο αυτής είναι βιδωμένο στο ακροαξόνιο και το πάνω μέρος είναι βιδωμένο στο πλαίσιο. Η διαφορά έγκειται στα ελατήρια τα οποία είναι διαχωρισμένα από τον αποσβεστήρα και στερεωμένα ξεχωριστά από το υπόλοιπο σύστημα. Συχνά παρατηρείται το ελατήριο να είναι προσαρμοσμένο στον αποσβεστήρα θυμίζοντας MacPherson.

1.4: ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Μερικά συστήματα ανάρτησης περιλαμβάνουν αποσβεστήρες ταλαντώσεων με στενά διαμήκη αυλάκια στον κάτω θάλαμο λαδιού. Τα αυλάκια αυτά είναι παράλληλα με τα ακροφύσια του εμβόλου και το λάδι ρέει μέσα σε αυτά όπως ακριβώς και στα ακροφύσια. Κάτω από κανονικές συνθήκες οδήγησης και οδοστρώματος τα ακροφύσια και τα αυλάκια είναι έτσι ρυθμισμένα ώστε να

παρέχουν κανονικό έλεγχο της δράσης του ελατηρίου που συνεργάζεται με το συγκεκριμένο αποσβεστήρα ταλαντώσεων. Αν ο μπροστινός αποσβεστήρας ταλαντώσεων πέσει ξαφνικά, όπως ακριβώς σαν να έπεφτε σε μια λακούβα του οδοστρώματος, το έμβολο κινείται μέσα στο στενό τμήμα του θαλάμου λαδιού. Κάτω από αυτές τις συνθήκες όλη η ροή του λαδιού θα πρέπει να ρέει διαμέσου των ακροφυσίων του εμβόλου πράγμα που αυξάνει σημαντικά την αντίσταση του αποσβεστήρα ταλαντώσεων στην κίνηση του ελατηρίου. Αυτή η δράση του αποσβεστήρα ταλαντώσεων προλαμβάνει τη σκλήρυνση της ανάρτησης έναντι του εσωτερικού ελαστικού προφυλακτήρα.

1.5: ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΟΙ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ

Μερικοί από τους αποσβεστήρες ταλαντώσεων που χρησιμοποιούνται είτε μπρος είτε πίσω στο όχημα διαθέτουν χειροκίνητη ρύθμιση που επιτρέπει στον οδηγό του οχήματος ή στον τεχνίτη να ρυθμίζει τους αποσβεστήρες ανάλογα με τις συνθήκες οδήγησης. Το ρυθμιστικό κομβίο εξαρτάται από τον τύπο του αποσβεστήρα. Το κομβίο έχει συνήθως οχτώ θέσεις. Η εργοστασιακή είναι η υπ' αριθμόν 3 και αυτή είναι η ενδιάμεση ρύθμιση του αποσβεστήρα ταλαντώσεων. Η 1 παρέχει μειωμένο έλεγχο του αυτοκινήτου και άρα μαλακότερη ανάρτηση. Η ρύθμιση 8 παρέχει σκληρότερη ανάρτηση. Το ρυθμιστικό κομβίο είναι συνήθως άμεσης πρόσβασης χωρίς να απαιτείται η ανύψωση του οχήματος.

1.6: ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΣΗΣ

Οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων αυτόματης οριζοντίωσης χρησιμοποιούνται σε συνεργασία με μια ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου του ύψους των αναρτήσεων. Ένας αεροσυμπιεστής είναι αυτός που συμπιέζει αέρα στους πίσω αποσβεστήρες ανάλογα με τις εντολές της μονάδας, προκειμένου το ύψος να ελέγχεται πλήρως, άμεσα και πολύ γρήγορα. Με αυτό τον τρόπο το όχημα ανυψώνεται ή χαμηλώνει ανάλογα με τις ανάγκες, μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα ανακουφίζει τους αποσβεστήρες όταν πρέπει να πέσει η πίεση σε αυτούς και να κατέλθει το πίσω μέρος του σασί. Ένας ηλεκτρομαγνητικός αισθητήρας ύψους μπορεί να περιλαμβάνεται στον αποσβεστήρα ταλαντώσεων ή και να είναι εξωτερικά αυτού. Ο αισθητήρας αυτός στέλνει σήμα προς τη μονάδα ελέγχου σε σχέση με το ύψος του σασί του οχήματος. Η μονάδα ελέγχου ελέγχει τον αεροσυμπιεστή και ανοίγει το σωληνοειδές (ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα) προκειμένου να ελέγχει η πίεση στα αμορτισέρ. Η ενέργεια αυτή διατηρεί ένα καθορισμένο ύψος στην πίσω ανάρτηση. Εάν τοποθετηθεί ένα βαρύ φορτίο, το σασί του οχήματος ωθείται προς τα κάτω.

Έτσι λοιπόν το αυτόματης οριζοντίωσης αμορτισέρ αυξάνει το μήκος του με βοήθεια όλου του μηχανισμού που αναφέρθηκε και το πίσω μέρος του οχήματος θα ανυψωθεί στο προκαθορισμένο ύψος από τον κατασκευαστή.

1.7: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Το σύστημα της ανάρτησης πρέπει να παρέχει ποικίλες και εξαιρετικά σημαντικές δυνατότητες ώστε το πλαίσιο του αυτοκινήτου να διατηρεί σταθερά τη σωστή διεύθυνση και τη σταθερότητα κατά την οδήγηση.

1.7.1: ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

1.7.1.1:ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ ΕΛΑΤΗΡΙΑ

Το ελικοειδές ελατήριο είναι το πιο συνηθισμένο εξάρτημα που χρησιμοποιείται στα μπροστινά ή και πίσω συστήματα ανάρτησης. Κατασκευάζονται από χάλυβα και έχουν διάφορες μορφές. Πολλά κατασκευάζονται από χαλυβοκράματα με ποικιλία προσμίξεων, όπως είναι το πυρίτιο και το χρώμιο. Κατασκευάζονται είτε εν θερμώ για διαδικασίες σκλήρυνσης και βαφής του χάλυβα είτε εν ψυχρώ. Είναι σχεδιασμένα να μεταφέρουν βαριά φορτία αλλά πρέπει να είναι ελαφριά τα ίδια. Πολλά από αυτά φέρουν επικάλυψη από βινύλιο ώστε να αυξάνεται η αντίστασή τους σε οξείδωση και να μειώνεται ο θόρυβος της λειτουργίας τους. Οι αστοχίες τους οφείλονται σε σταθερή υπερφόρτωση, συνεχείς συμπιέσεις και αποσυμπιέσεις, κόπωση του μετάλλου και σε ρωγμές ή ξεφλούδισμα.

Τα ελατήρια είναι κατανεμημένα στις κατηγορίες γραμμικής και μεταβλητής ελαστικότητας. Τα ελικοειδή ελατήρια γραμμικής ελαστικότητας έχουν ίσα διαστήματα μεταξύ των σπειρών τους και ίδια διάμετρο σπείρας καθ' όλο το μήκος τους. Όταν όμως αυξάνεται το φορτίο τους αυτά συστρέφονται και στρίβουν, ενώ όταν απομακρυνθεί το φορτίο επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση. Έχουν σταθερό βήμα κι αυτό εξαρτάται από το φορτίο τους. Δεν έχουν μεγάλη ικανότητα αντίστασης σε πλάγιες κινήσεις γι' αυτό και χρειάζονται ειδικές μπάρες κατά τη χρησιμοποίησή τους σε αναρτήσεις για να αποφεύγεται η στροφή τους.

Τα ελικοειδή ελατήρια υψηλής απόδοσης είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να μεταφέρουν φορτία κατά 3 έως 5% πιο μεγάλα από ότι τα κανονικής απόδοσης. Γι' αυτό τον λόγο η διάμετρός τους είναι μεγαλύτερη αυξάνοντας την ικανότητα αντοχής τους σε τέτοια φορτία.

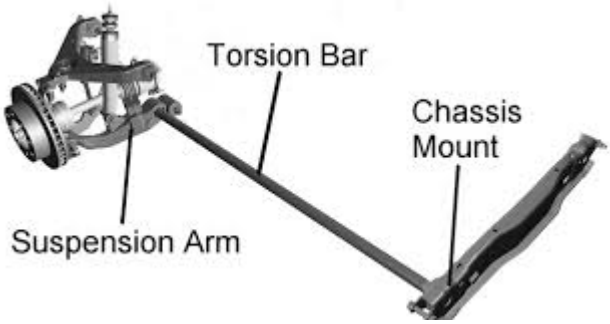
Τα ελικοειδή ελατήρια μεταβλητής αναλογίας έχουν μεγάλη ποικιλία μεγέθους και σχήματος σύρματος. Συνήθως έχουν μεγαλύτερη διάμετρο στο μέσο των ενεργών σπειρών και μικρότερη στις ακραίες σπείρες. Ο μέσος όρος του βήματος τέτοιων ελατηρίων εξαρτάται από το μέγεθος των φορτίων και γενικά έχουν μεγαλύτερη ικανότητα φόρτισης από ότι τα γραμμικής αναλογίας. Γενικά προτιμώνται όταν απαιτείται αυτόματη οριζοντίωση σε αυξημένα φορτία, ώστε να διατηρούν το σωστό ύψος του πλαισίου.

Εικόνα 1.3: Ελικοειδές ελατήριο σταθερής γεωμετρίας

Εικόνα 1.4: Ελικοειδές ελατήριο μεταβλητής γεωμετρίας

1.7.1.2: ΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΡΑΒΔΟΙ

Οι στρεπτικές ράβδοι αντικαθιστούν τα ελικοειδή ελατήρια. Κατά τη μεν ανοδική κίνηση του τροχού συστρέφονται ενώ κατά την καθοδική επανέρχονται στην αρχική τους θέση. Μια στρεπτική ράβδος μπορεί να θεωρηθεί σας ένα ίσιο επίπεδο ελατήριο που το ένα της άκρο πακτώνεται στο σασί και το άλλο στον κάτω βραχίονα της ανάρτησης. Μπορούν να τοποθετηθούν εγκάρσια ή κατά μήκος. Οι ράβδοι όπως και τα ελατήρια κατασκευάζονται από χαλυβοκράματα υψηλής αντοχής σε θερμότητα και υφίστανται ειδικές κατεργασίες για πρόσθετη αντοχή σε κόπωση από στρέψη. Μια στρεπτική ράβδος μπορεί να φέρει φορτίο ακόμα μεγαλύτερο από ότι τα ελικοειδή ελατήρια ή ημιελλειπτικά πεπλατυσμένα ελατήρια.

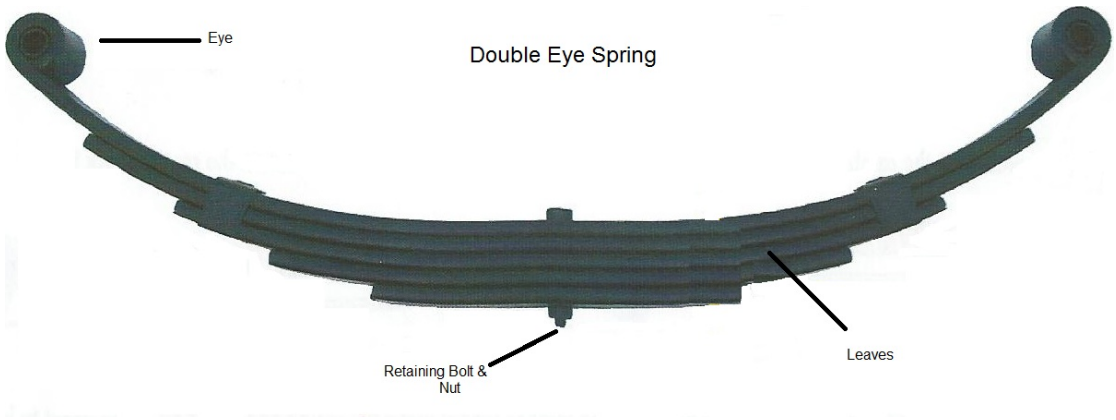


Εικόνα 1.5: Στρεπτική ράβδος

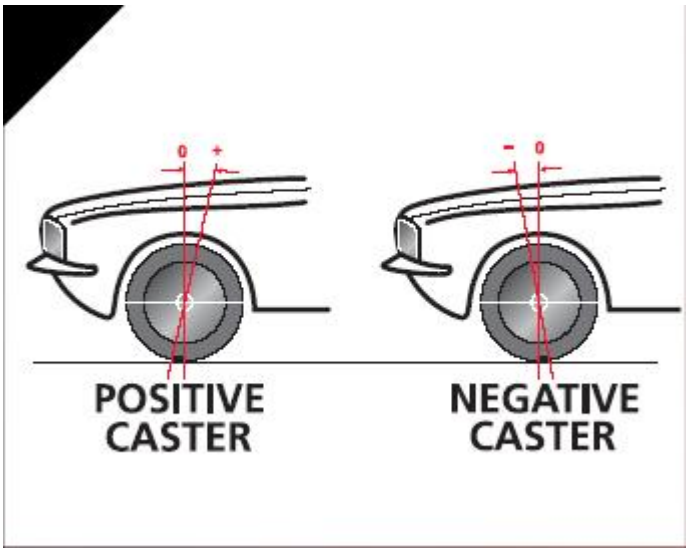
1.7.1.3: ΕΛΑΤΗΡΙΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΦΥΛΛΩΝ Η ΗΜΙΕΛΛΕΙΠΤΙΚΑ ΠΕΠΛΑΤΥΣΜΕΝΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ

Αναφέρονται και ως σούστες ενώ μπορούν να αποτελούνται κι από ένα μόνο φύλλο. Αποτελούνται από επίπεδα ελάσματα χάλυβα το ένα πάνω στο άλλο και είναι δεμένα με ειδικά εξαρτήματα που ονομάζονται επιδεσμίδες. Μπορούν να τοποθετηθούν εγκάρσια ή κατά μήκος του οχήματος. Το επάνω φύλλο είναι το κύριο και όλα μαζί στο κέτρο τους συγκρατούνται από κοχλία. Το κύριο φύλλο είναι το μακρύτερο και το μήκος των υπόλοιπων μειώνεται σταδιακά, ενώ όλα μαζί έχουν σχήμα μισής έλλειψης.

Εικόνα 1.6: Πεπλατυσμένα ημιελλειπτικά φύλλα



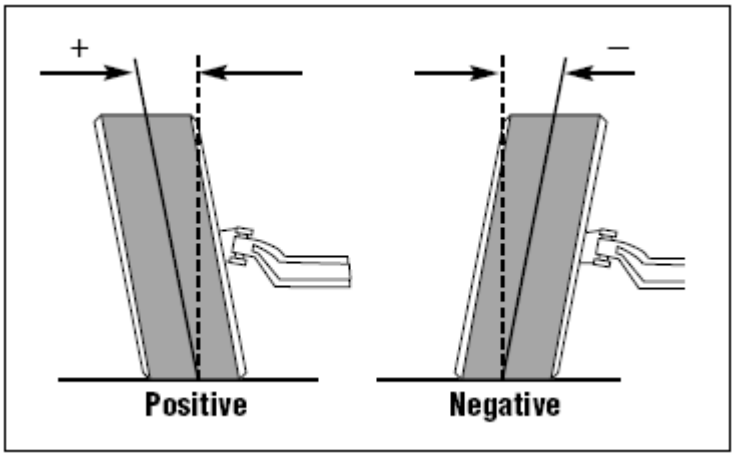
1.8: ΓΩΝΙΑ CASTER



Εικόνα 1.6: Γωνία Caster

Η γωνία caster είναι η γωνία μεταξύ του κατακόρυφο άξονα του τροχού και στον κατακόρυφο άξονα της ανάρτησης. Η θετική γωνία είναι όταν ο άξονας της ανάρτησης κλίνει προς την καμπίνα των επιβατών. Εάν το όχημα είναι υπερυψωμένο μπροστά τότε η γωνία παίρνει κλίση προς το πίσω μέρος του οχήματος.

1.9: ΓΩΝΙΑ CAMBER



Εικόνα 1.7: Γωνία camber

Είναι η γωνία μεταξύ του κατακόρυφου άξονα του τροχού και του κάθετου στο οδόστρωμα άξονα. Όταν ο τροχός κλίνει προς τα έξω είναι θετική ενώ όταν ο τροχός κλίνει προς τα μέσα είναι αρνητική.

Και οι δυο γωνίες που αναφέρθηκαν παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια του οχήματος και στη διευκόλυνση της οδήγησης. Εξαρτώνται από την ανηρτημένη μάζα, το ύψος της ανάρτησης και την ανωμαλία του εδάφους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΛΑΤΗΡΙΑ

2.1: Εισαγωγή

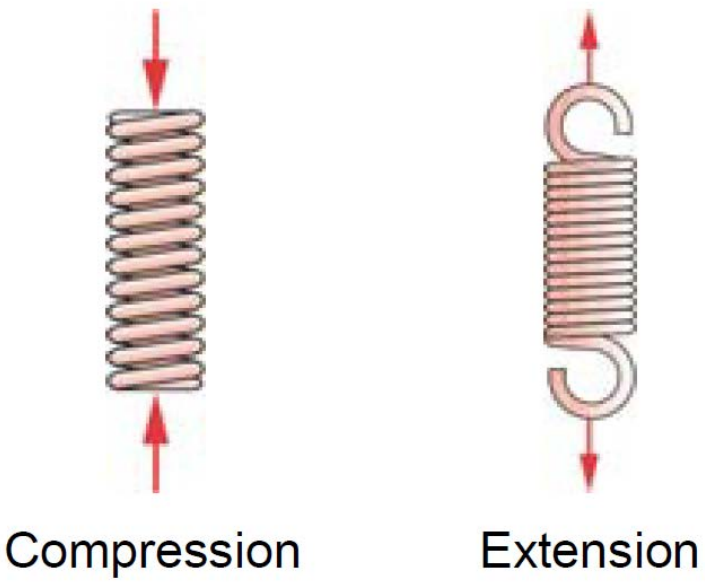
Τα ελατήρια είναι τα ελαστικά μέρη τα οποία ασκούν δυνάμεις και ροπές και απορροφούν ενέργεια, την οποία συνήθως αποθηκεύουν και στη συνέχεια την εκλύουν. Τα ελατήρια είναι συνήθως αλλά όχι απαραίτητα κατασκευασμένα από μέταλλο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πλαστικά ελατήρια όταν το φορτίο που φέρουν είναι μικρό. Όταν απαιτείται μικρή μάζα ελατηρίου χρησιμοποιούνται σύγχρονα σύνθετα υλικά.

2.2: Ελατήριο ράβδος

Η απλούστερη μορφή ελατηρίου είναι αυτή της ράβδου. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1 η στρεπτική ράβδος χρησιμοποιείται σε αναρτήσεις αυτοκινήτου είτε μόνη είτε επικουρικά στα ελικοειδή ελατήρια.

2.3: Ελικοειδή ελατήρια

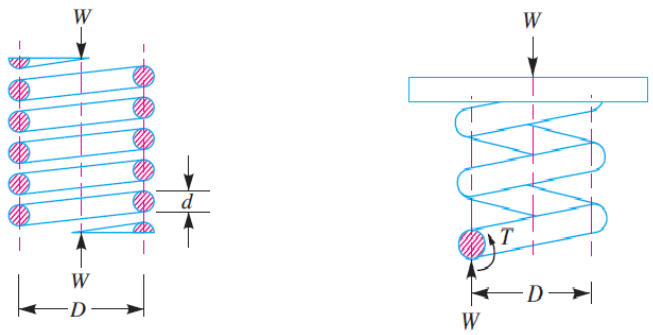
Τα ελικοειδή ελατήρια είναι συμπίεσης και έκτασης με μικρή γωνία κλίσης της έλικας.



Εικόνα 2.1: Ελικοειδή ελατήρια συμπίεσης και έκτασης

Η δύναμη θεωρείται ότι ασκείται στο κέντρο της σπείρας. Για ίση κατανομή της επιλέγεται οι δυο τελευταίες σπείρες συνήθως να είναι μηδενικού βήματος και να είναι και επίπεδων άκρων. Η τάση που ασκείται στα ελικοειδή ελατήρια είναι ανάλογη της δύναμης F , της διαμέτρου της σπείρας D και της διαμέτρου του σύρματος d.

Εικόνα 2.2: Γεωμετρικά μεγέθη ελατηρίου και δυνάμεις/τάσεις



$$\tau = \frac{T * r}{J} = \frac{16 * T}{\pi * d^3} = \frac{8 * F * D}{\pi * d^3}$$

Ένα ελικοειδές ελατήριο μπορεί να θεωρηθεί ως μια στρεπτική ράβδος τυλιγμένη σε έλικες. Ένα άλλο μέγεθος είναι ο λόγος της μέσης διαμέτρου της σπείρας προς τη διάμετρο του σύρματος.

$$C = \frac{D}{d}$$

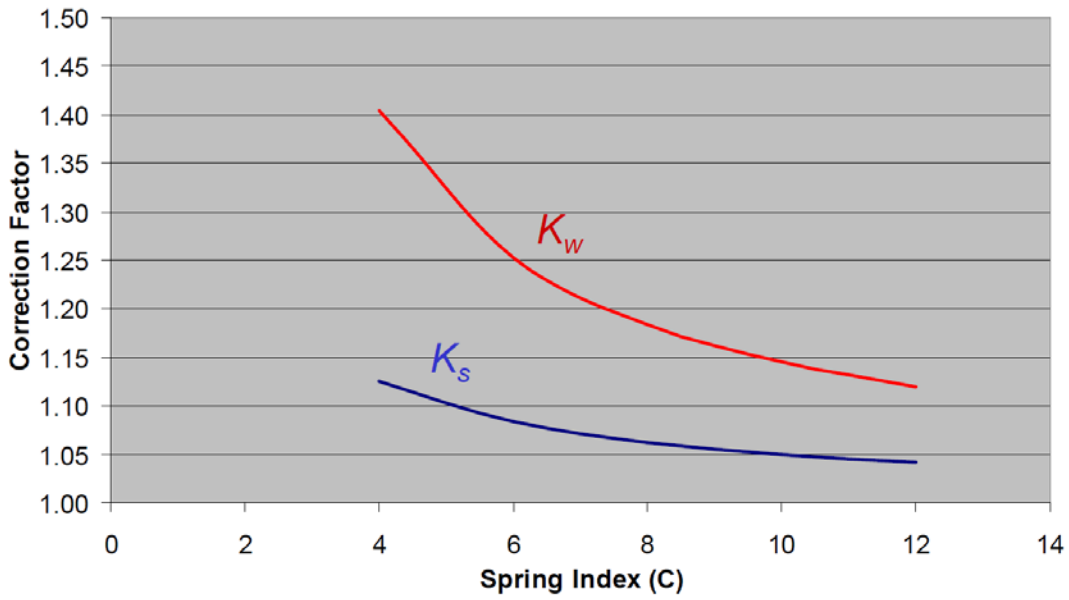
Ένας διορθωτικός παράγοντας λαμβάνεται υπόψη, ο παράγοντας K_w με τον οποίο η τάση ανάγεται στο μέσο του σύρματος.

$$K_w = \frac{4 * C - 1}{4 * C - 4} + \frac{0.615}{C}$$

Όταν πρόκειται για δυναμική καταπόνηση συνήθως χρησιμοποιούμε τον παράγοντα K_w. Όταν πρόκειται για στατική φόρτιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο παράγοντας K_s, όπου

$$K_s = 1 + \frac{0.615}{C}$$

Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να ληφθούν και από το αντίστοιχο διάγραμμα σε συνάρτηση με το λόγο της μέσης διαμέτρου του ελατήριου προς τη διάμετρο του σύρματός του.



Εικόνα 2.3: Διάγραμμα των διορθωτικών συντελεστών K_w και K_s σε συνάρτηση με το λόγο της μέσης διαμέτρου του ελατηρίου προς τη διάμετρο του σύρματός του.

Έτσι η τάση πλέον ορίζεται ανάλογα με το διορθωτικό συντελεστή που θα χρησιμοποιηθεί, δηλαδή ανάλογα τη φόρτιση που έχουμε ως:

$$\tau = \frac{8 * F * D}{\pi * d^3} * K_w$$

ή

$$\tau = \frac{8*F*D}{\pi*d^3} * K_s$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα του Castigliano προκύπτει η μετατόπιση του ελατηρίου λόγω επιβολής της δύναμης ως:

$$\delta = \frac{8 * F * D^3 * N}{d^4 * G}$$

Έτσι, διαιρώντας τη δύναμη με την μετατόπιση έχουμε τον τύπο που συνδέει τα γεωμετρικά μεγέθη του ελατηρίου με τη σταθερά του.

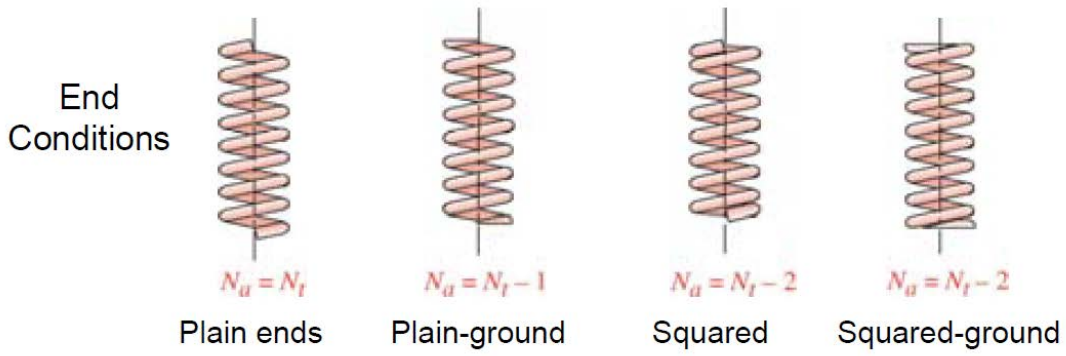
$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{d^4 * G}{8 * D^3 * N}$$

Είναι πρόδηλο ότι στους υπολογισμούς παίζει σημαντικό ρόλο η επιλογή του υλικού του ελατηρίου γι' αυτό παρατίθεται ο πίνακας που ανάλογα με τη χρήση του κάθε υλικού μας δίνει την μέγιστη αντοχή και τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης.

Material	*Allowable shear stress (τ) MPa*			*Modulus of rigidity (G) kN/m²*	*Modulus of elasticity (E) kN/mm²*
	Severe service	*Average service*	*Light service*		
1. Carbon steel					
(*a*) Upto to 2.125 mm dia.	420	525	651		
(*b*) 2.125 to 4.625 mm	385	483	595		
(*c*) 4.625 to 8.00 mm	336	420	525		
(*d*) 8.00 to 13.25 mm	294	364	455		
(*e*) 13.25 to 24.25 mm	252	315	392	80	210
(*f*) 24.25 to 38.00 mm	224	280	350		
2. Music wire	392	490	612		
3. Oil tempered wire	336	420	525		
4. Hard-drawn spring wire	280	350	437.5		
5. Stainless-steel wire	280	350	437.5	70	196
6. Monel metal	196	245	306	44	105
7. Phosphor bronze	196	245	306	44	105
8. Brass	140	175	219	35	100

Εικόνα 2.4: Πίνακας υλικών ελατηρίων

Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι στους υπολογισμούς αναφέρεται ο ενεργός αριθμός σπειρών του ελατηρίου. Ωστόσο, ο συνολικός αριθμός προκύπτει από το τρόπο με τον οποίο έχουν κατασκευαστεί τα άκρα του.

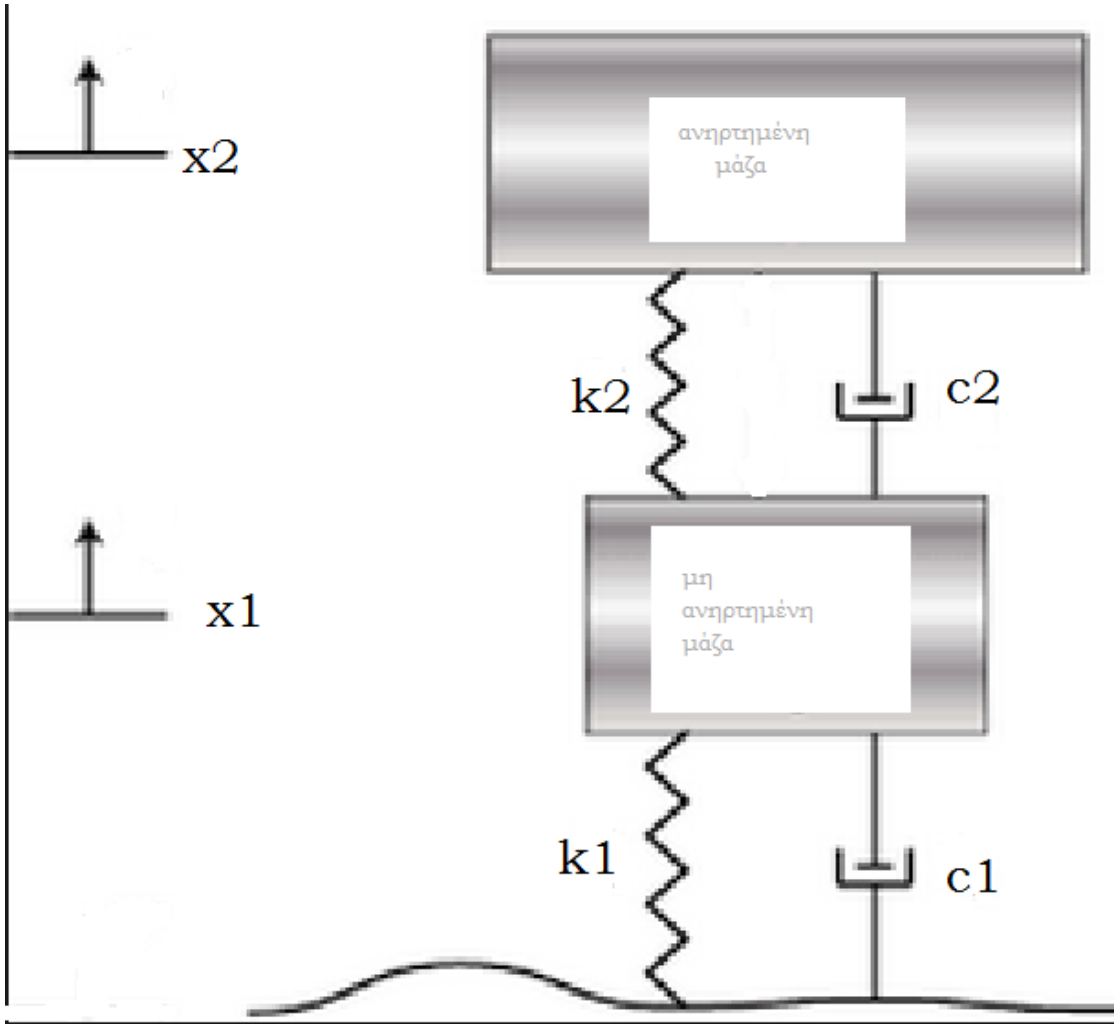


Εικόνα 2.5: Συνολικός αριθμός σπειρών ανάλογα με τα άκρα του ελατηρίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Σκοπός της υπολογιστικής διαδικασίας που ακολουθεί είναι η μελέτη του συστήματος ανάρτησης αυτοκινήτου. Καταρχήν, γίνεται ο έλεγχος για το τρόπο που αποκρίνεται το κλασικό σύστημα της ανάρτησης όπως αυτό παριστάνεται με ένα μοντέλο μάζας, ελατηρίου και αποσβεστήρα. Κατόπιν, προχωρούμε σε δύο φάσεις στο σχεδιασμό καινοτομικής ανάρτησης αυτοκινήτου με χρήση ελατηρίων τα οποία αναλαμβάνουν να αποσβέσουν στην ουσία τις ταλαντώσεις επαναφοράς. Στην πρώτη φάση χρησιμοποιείται γραμμικό ελατήριο αρνητικής σταθεράς ελατηρίου, ενώ στη δεύτερη φάση το ελατήριο αυτό αντικαθίσταται από ζεύγος πλαγίων ελατηρίων που παρουσιάζουν αρνητική συμπεριφορά. Αναλυτικά, η μελέτη αποτυπώνεται στα επόμενα κεφάλαια.

Το μοντέλο της διάταξης της ανάρτησης οχήματος μελετάται στο ένα τέταρτο του οχήματος, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Μοντέλο ενός τετάρτου οχήματος

Η ανηρτημένη μάζα αποτελεί το ένα τέταρτο της μάζας του οχήματος, η οποία στη μελέτη μας λαμβάνεται ίση με 375 κιλά. Αυτή η μάζα συνδέεται μέσω της ανάρτησης με τον τροχό. Η ανάρτηση στο υπολογιστικό μοντέλο θεωρείται ως ένα ελατήριο και ένας αποσβεστήρας, τα οποία συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους. Η σταθερά ελαστικότητας παίρνει την τιμή 15000 N/m και η σταθερά απόσβεσης 1425 N*s/m.

Η μη ανηρτημένη μάζα αποτελεί τον τροχό. Ο τροχός ο ίδιος παρουσιάζει ιδιότητες ελαστικότητας και απόσβεσης και γι' αυτό τον λόγο στο μοντέλο παριστάνεται να συνδέεται με το έδαφος με ένα ελατήριο και έναν αποσβεστήρα σε παράλληλα συνδεσμολογία.

Η διαδικασία του καινοτομικού σχεδιασμού της διάταξης της ανάρτησης αφορά το κομμάτι ανηρτημένης μάζας, ελατηρίου και απόσβεσης της ανάρτησης. Αυτό το μέρος μελετάται, αναλύεται και αντικαθίσταται με σκοπό να προκύψει η διάταξη της ανάρτησης η οποία εργάζεται κυρίως με τις δυνάμεις ελαστικότητας.

Έτσι, λοιπόν, η μελέτη ξεκινάει από το δυναμικό σύστημα μάζας ελατηρίου και αποσβεστήρα εκτενώς στο Κεφάλαιο 4. Η πρώτη μετατροπή έγκειται στην αντικατάσταση του ελατηρίου και του αποσβεστήρα από ένα σύστημα ελατηρίων, στοιχείο απόσβεσης και κυρίως από ένα γραμμικό ελατήριο το οποίο εισάγει θεωρητικά την έννοια της αρνητικής ελαστικότητας, όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 5. Τέλος, η πραγματική διάταξη εφόσον ελατήριο με αρνητική σταθερά ελαστικότητας δεν υφίσταται χρησιμοποιείται ζεύγος πλαγίων ελατηρίων τα οποία σε συνδυασμό συμπεριφέρονται αρνητικά, αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6.

Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την πλήρη μετατροπή της διάταξης της ανάρτησης σε μια καινούρια κατασκευαστικά και λειτουργικά διάταξη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΣΤΗΜΑ m-k-c

Το κλασικό σύστημα ανάρτησης μοντελοποιείται με τα απλά στοιχεία μάζα, ελατήριο και αποσβεστήρα. Το σύστημα αυτό ενός βαθμού ελευθερίας προσδιορίζει τη δυναμική συμπεριφορά της διάταξης και κατ' επέκταση του οχήματος. Λαμβάνοντας υπόψη τυπικές τιμές, η αριθμητική τιμή της μάζας στο μοντέλο ενός τετάρτου του οχήματος είναι 375 κιλά, η σταθερά ελαστικότητας της ανάρτησης 15000N/m και η σταθερά απόσβεσης 1425N*s/m.

4.1: Μάζα

Η μάζα αντιπροσωπεύει το στοιχείο της αδράνειας της διάταξης. Η αδράνεια του συστήματος εκφράζεται μέσω των αδρανειακών δυνάμεων όπως αυτές ορίζονται ανάλογα της επιτάχυνσης της μάζας με σταθερά αναλογίας την ίδια την μάζα.

$$F_m = m * \ddot{x}$$

4.2:Ελατήριο

Το ελατήριο αντιπροσωπεύει το στοιχείο ελαστικότητας της ανάρτησης. Συνδέει το σασί με τον τροχό και η ελαστικότητα εκφράζεται μέσω των ελαστικών δυνάμεων, οι οποίες είναι ανάλογες της σχετικής μετατόπισης των άκρων του ελατηρίου με σταθερά αναλογίας τη σταθερά ελαστικότητας.

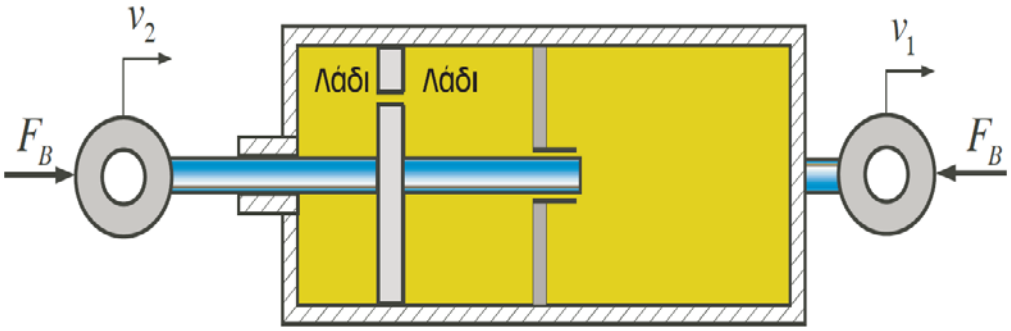
$$F_k = k * x$$

4.3:Αποσβεστήρας

Ο αποσβεστήρας αποτελεί το στοιχείο καταστροφής ενέργειας. Η καταστροφή της ενέργειας είναι εξαρτώμενη από το ιξώδες του υγρού του αποσβεστήρα και από τη γεωμετρία του. Η τυπική του μορφή παρουσιάζεται στην εικόνα 4.1. Η μετακίνηση του εμβόλου λόγω μετακίνησης από τη θέση ηρεμίας έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση του αποθηκευμένου υγρού. Το υγρό περνώντας μέσα από τις οπές προκαλεί μέσω του ιξώδους του την καταστροφή ενέργειας με αποτέλεσμα της παύση της

κίνησης του και συνεπώς των ταλαντώσεων. Η συμπεριφορά του αποσβεστήρα έχει να κάνει με το ιξώδες του υγρού και τη γεωμετρία αυτών των οπών.

Εικόνα 4.1: Αποσβεστήρας



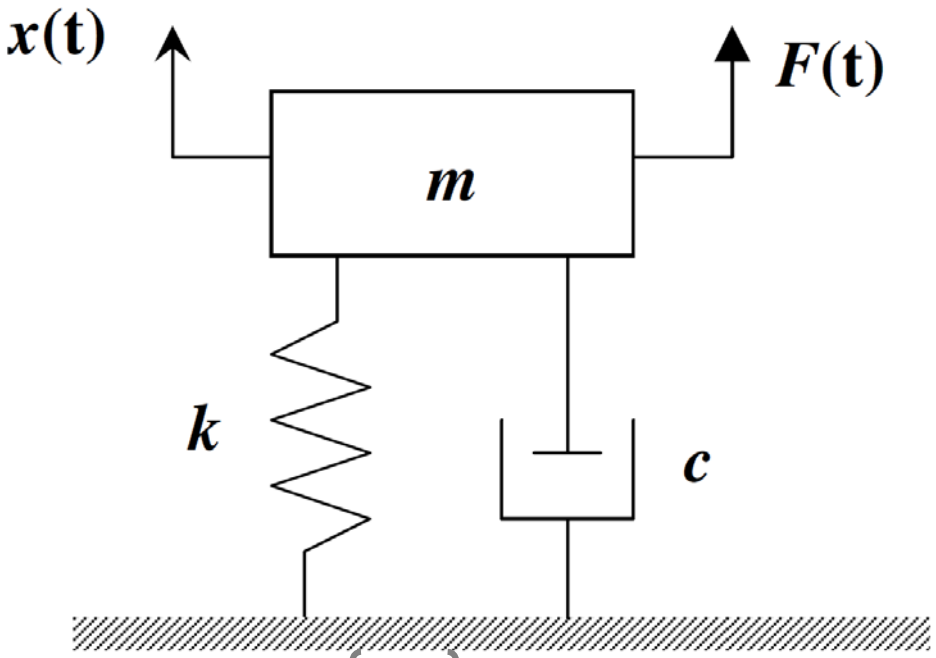
Όπως φαίνεται και από τη διάταξη του αποσβεστήρα, οι δυνάμεις απόσβεσης είναι ανάλογες της σχετικής ταχύτητας του αποσβεστήρα με σταθερά αναλογίας τη σταθερά απόσβεσης.

$$F_c = c * \dot{x}$$

4.4: Το σύστημα

Για το σύστημα m-k-c το οποίο μελετάται, τα στοιχεία ελαστικότητας και απόσβεσης, όπως αυτά αναλύθηκαν ανωτέρω, είναι παράλληλα προσδεδεμένα μεταξύ του άξονα του τροχού και του σκελετού του αμαξώματος, αντιπροσωπεύοντας με αυτό τον τρόπο τη διάταξη της ανάρτησης του οχήματος.

Εικόνα 4.2: Σύστημα m-k-c



Το άνω άκρο του ελατηρίου και του αποσβεστήρα έχει την ίδια μετατόπιση με τη μάζα, ενώ το κάτω είναι συνδεδεμένο με τον άξονα του τροχού και θεωρείται ακίνητο. Η μετατόπιση της μάζας αποτελεί και το μοναδικό βαθμό ελευθερίας σε πρώτη φάση, είναι χρονικά μεταβαλλόμενη και είναι εκείνη που φανερώνει τον τρόπο με τον οποίο θα αποκριθεί το σύστημα σε μια εξωτερική διέγερση ή με την επιβολή αρχικών συνθηκών που θα εκτρέψουν το σύστημα από τη θέση ισορροπίας του.

Για τη δυναμική ισορροπία, οι εσωτερικές δυνάμεις, δηλαδή οι δυνάμεις αδράνειας, ελαστικότητας και απόσβεσης, πρέπει να ισούνται με την εξωτερικά ασκούμενη δύναμη, εάν πρόκειται για επιβολή εξωτερικής δύναμης, ή να ισούνται με μηδέν για απόκριση με βάση την επιβολή αρχικής μετατόπισης ή ταχύτητας.

$$F_m + F_c + F_k = f(t) \Rightarrow$$

$$m * \ddot{x} + c * \dot{x} + k * x = f(t)$$

Η εξίσωση αυτή όπως προέκυψε από τη δυναμική ισορροπία και με την αντικατάσταση των καταστατικών εξισώσεων των στοιχείων αποτελεί το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος και είναι αυτό με βάση το οποίο υπολογίζεται η απόκριση του συστήματος.

4.5: Ιδιότητες δυναμικού συστήματος

4.5.1: Κυκλική ιδιοσυχνότητα δυναμικού συστήματος

Η συχνότητα της ταλάντωσης του δυναμικού συστήματος όταν σε αυτό δεν ασκούνται εξωτερικές διεγέρσεις χαρακτηρίζεται από την κυκλική ιδιοσυχνότητα ή κυκλική φυσική συχνότητα με την οποία παριστάνεται το σημείο μέγιστης απορρόφησης ενέργειας (συντονισμού).

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{[rad/sec]}$$

ή

$$f = \frac{\omega}{2*\pi} \qquad [\text{Hz}]$$

ή

$$T = {}^{1}/_{f} \qquad [\text{sec}] \quad (\text{ιδιοπερίοδος})$$

4.5.2: Λόγος απόσβεσης

Η ικανότητα καταστροφής των εξωτερικών διεγέρσεων από τη θέση ισορροπίας εκφράζεται με το λόγο απόσβεσης όπως αυτός ορίζεται ανάλογος της σταθεράς απόσβεσης, της ιδιοσυχνότητας και της μάζας.

$$\zeta = \frac{c}{2*\omega*m}$$

4.6: Επίλυση μαθηματικού μοντέλου

Πρόκειται για μια γραμμική διαφορική εξίσωση δευτέρας τάξης, η οποία πρέπει να επιλυθεί ώστε να προκύψει η χρονικά μεταβαλλόμενη απόκριση του δυναμικού συστήματος. Λόγω της μελέτης της διάταξης της ανάρτησης η οποία γίνεται για απόκριση σε αρχικές συνθήκες, δηλαδή f(t)=0, πρόκειται στην ουσία για την επίλυση της αντίστοιχης ομογενούς εξίσωσης:

$$m * \ddot{x} + c * \dot{x} + k * x = 0$$

Αδιαστατοποιώντας την εξίσωση, διαιρούμε με τη μάζα και εισάγουμε την ιδιοσυχνότητα και το λόγο απόσβεσης:

$$\ddot{x} + 2 * \zeta * \omega * \dot{x} + \omega^2 * x = 0$$

Έτσι προκύπτει και το χαρακτηριστικό πολυώνυμο:

$$s^2 + 2 * \zeta * \omega * s + \omega^2 = 0$$

Για τις τυπικές αριθμητικές τιμές ανάρτησης αυτοκινήτου ο λόγος απόσβεσης προκύπτει 0,3. Για 0<ζ<1 πρόκειται για υποκρίσιμη απόσβεση και άρα ταλάντωση. Έτσι, οι ρίζες του χαρακτηριστικού πολυωνύμου είναι συζυγείς μιγαδικές με αρνητικό πραγματικό μέρος και η λύση προκύπτει:

$$x(t) = x_o(t) \\ = e^{-t*\zeta*\omega} * (x_o * \cos(\omega_n * t) \\ + \left(\frac{v_o + \zeta * \omega_n * x_o}{\omega_n}\right) * \sin(\omega_n * t))$$

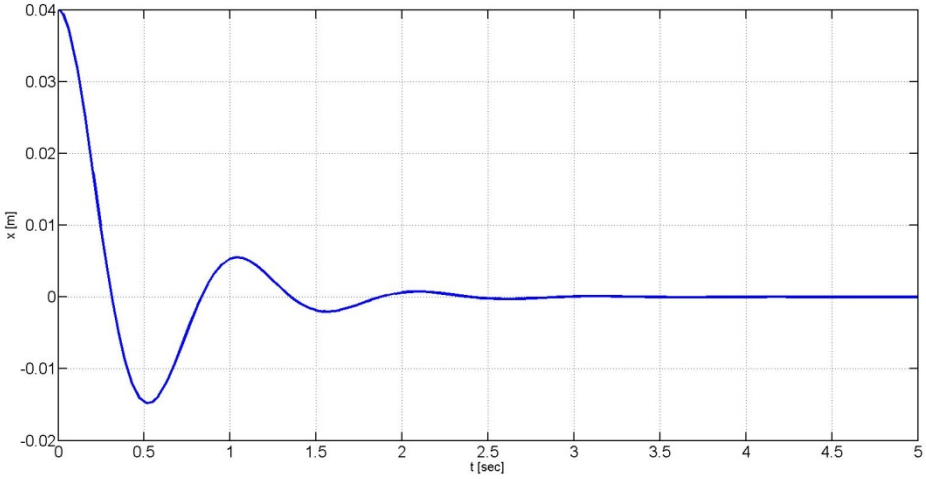
όπου $\omega_n = \omega * \sqrt{1 - \zeta^2}$ είναι η συχνότητα αποσβενόμενων ταλαντώσεων.

4.7: Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Στο παράρτημα Α, επισυνάπτονται τα προγράμματα matlab σύμφωνα με τα οποία έγινε η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος.

4.7.1: Απόκριση σε αρχική μετατόπιση

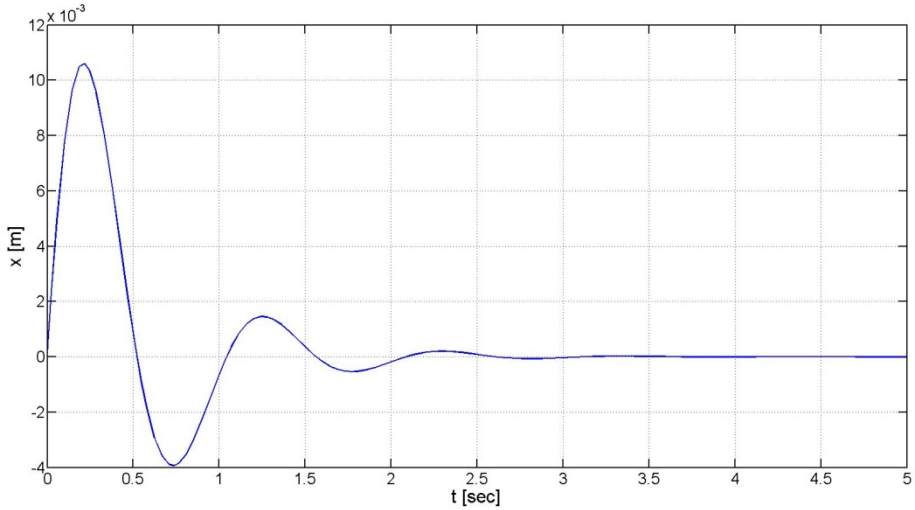
Πρώτα μελετήθηκε το δυναμικό σύστημα μάζας, ελατηρίου, αποσβεστήρα σε είσοδο αρχικής μετατόπισης 0,04m. Το αντίστοιχο διάγραμμα που αποτελεί τη μετατόπιση της μάζας συναρτήσει του χρόνου παρατίθεται κατωτέρω.



Εικόνα 3.3: Διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου για είσοδο αρχική μετατόπιση 0,04m

4.7.2: Απόκριση σε αρχική ταχύτητα

Επιπρόσθετα μελετήθηκε η απόκριση του συστήματος για είσοδο αρχικής ταχύτητας 0,1m/s.

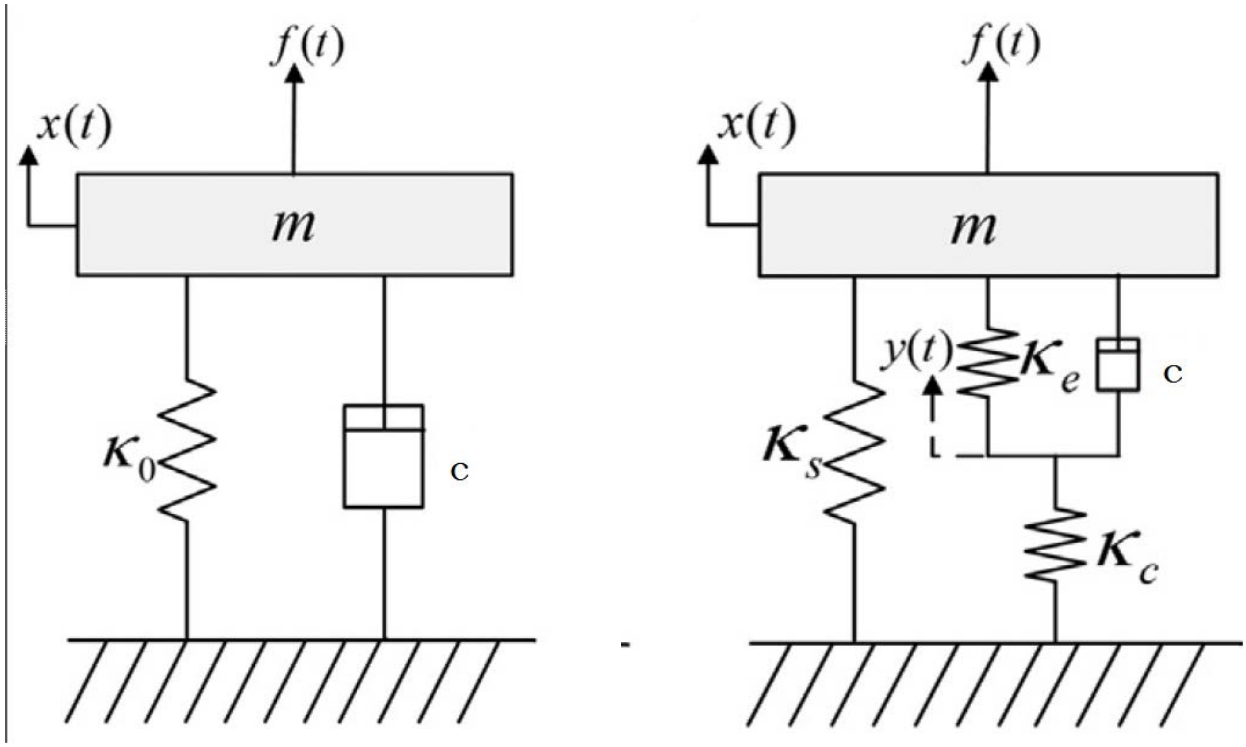


Εικόνα 3.4: Διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου για είσοδο αρχική ταχύτητα 0,1m/s

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ m-k-c ΜΕ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΕΛΑΤΗΡΙΟ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

5.1: Μετάβαση από το σύστημα m-k-c σε διβάθμιο σύστημα με αρνητική σταθερά ελαστικότητας

Στη δεύτερη φάση της μελέτης της ανάρτησης αυτοκινήτου, το δυναμικό σύστημα που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο θα μετατραπεί σε ένα γραμμικό σύστημα που όμως αυτή τη φορά θα φέρει γραμμικό ελατήριο με αρνητική σταθερά ελαστικότητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1: Μετατροπή δυναμικού συστήματος m-k-c ενός βαθμού ελευθερίας σε σύστημα με γραμμικό ελατήριο αρνητικής σταθεράς ελαστικότητας δυο βαθμών ελευθερίας

Στο δυναμικό σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας, προέκυψε για μάζα 375 κιλά, σταθερά ελαστικότητας 15000 N/m και σταθερά απόσβεσης 1425 N*s/m λόγος απόσβεσης 0,3. Το ζητούμενο είναι να σχεδιαστεί μια διάταξη ανάρτησης η οποία

θα επανέρχεται στη θέση ισορροπίας μέσω των ελαστικών δυνάμεων. Οπότε από λόγο απόσβεσης 0,3 θα σχεδιαστεί εκ νέου μια διάταξη η οποία θα έχει πολύ μικρό λόγο απόσβεσης της τάξης του 0,01. Η νέα διάταξη θα έχει την ίδια στατική ακαμψία, αλλά αρνητική ελαστικότητα και θα γίνει αναδιανομή απόσβεσης και ελαστικότητας με τις ελαστικές δυνάμεις να παρέχουν επαρκές επίπεδο ώστε να αντισταθμίζουν τις εξωτερικές διεγέρσεις. Έτσι, λοιπόν, γίνεται θεωρητική μελέτη στατικής και δυναμικής ευστάθειας.

5.2: Υπολογισμός των σταθερών των ελατηρίων

Το αρνητικό στοιχείο ελαστικότητας αντιπροσωπεύεται από το k_c. Η στατική ακαμψία θα παραμείνει ίδια και θα αποτελεί την ολική ακαμψία του συστήματος όπως αυτή προκύπτει για τα γραμμικά συνδεδεμένα ελατήρια k_e και k_c, τα οποία είναι παράλληλα συνδεδεμένα με το ελατήριο k_s.

$$k_{st,o} = k_s + \frac{k_e * k_c}{k_e + k_c}$$

Η ολική ακαμψία ισούται λοιπόν με 15000 N/m και η ολική μάζα ισούται με 375 κιλά. Η ιδιοσύχνοτητα λοιπόν παραμένει ίδια και για επιθυμητό λόγο απόσβεσης 0,01 προκύπτει η νέα τιμή της σταθεράς απόσβεσης 47 N*s/m.

Οι νέες εξισώσεις κίνησης του διβάθμιου συστήματος είναι:

$$m * \ddot{x} + c * (\dot{x} - \dot{y}) + k_s * x + k_e * (x - y) = f(t)$$

$$c * (\dot{x} - \dot{y}) + k_e * (x - y) - k_c * y = 0$$

Εκτός από τον εξωτερικό βαθμό ελευθερίας x που παραμένει η μετατόπιση της μάζας, προκύπτει και ένας νέος εσωτερικός βαθμός ελευθερίας y, ο οποίος δείχνει την μετατόπιση του άκρου του αρνητικού ελατηρίου k_c.

Για το νέο σύστημα έχουμε τρεις άγνωστες σταθερές ελατηρίων. Όσον αφορά το ελατήριο k_s, γίνεται η υπόθεση για γραμμική σχέση με την ολική σταθερά.

$$k_s = a * k_o$$

Επιλέγεται και ένας συντελεστής ασφαλείας ε ώστε για την επιλογή της σταθεράς k_c να είναι το σύστημα ευσταθές.

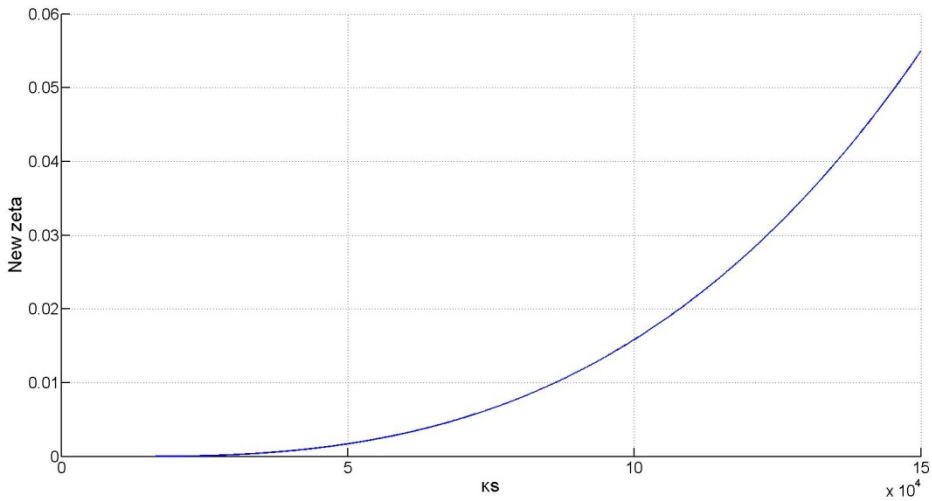
$$k_e = k_o * \frac{\varepsilon * \alpha * (\alpha - 1)}{1 + \varepsilon - \alpha * \varepsilon}$$

$$k_c = -k_o * \frac{\varepsilon * \alpha * (\alpha - 1)}{1 + \varepsilon}$$

Η νέα διάταξη είναι δυναμικά αντίστοιχη του μονοβάθμιου συστήματος m-k-c, ενώ οι σταθερές των ελατηρίων k_e,k_c και k_s είναι κατά απόλυτη τιμή μεγαλύτερες της ολικής ακαμψίας.

Για να υπολογιστούν οι άγνωστες σταθερές ελατηρίων θα πρέπει πρώτα να προσδιοριστούν οι άγνωστες σταθερές α και ε.

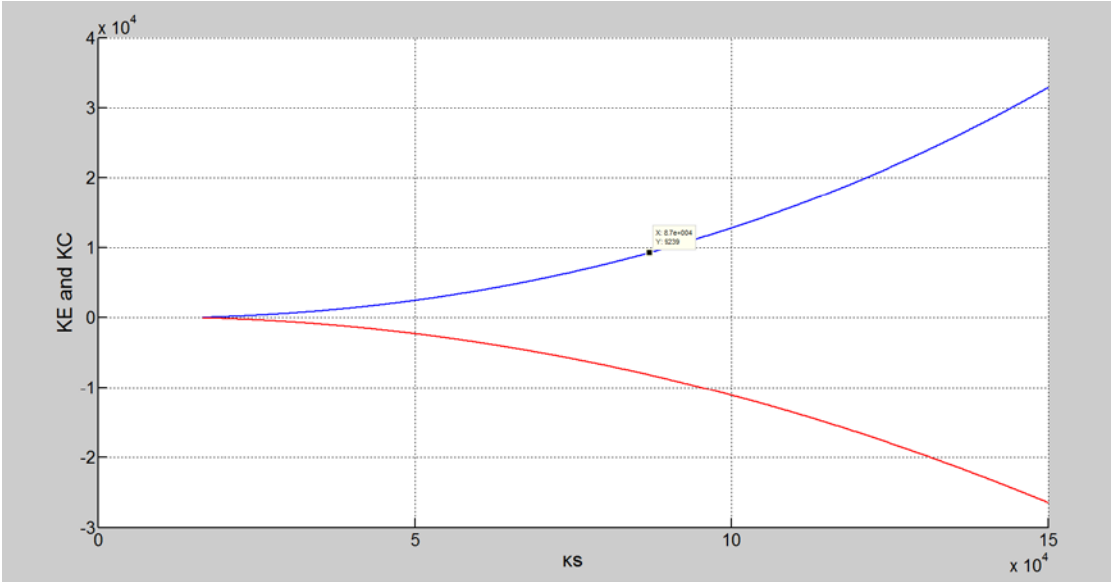
Από το παρακάτω διάγραμμα όπου για το νέο λόγο απόσβεσης προσδιορίζεται κατευθείαν η σταθερά του ελατηρίου k_s=87000N/m.



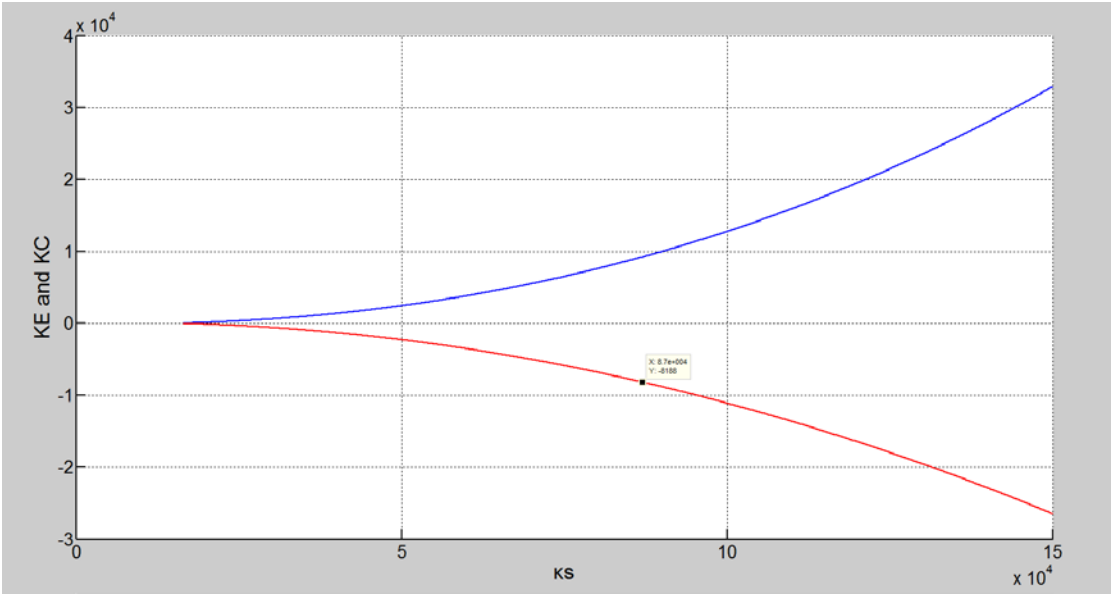
Εικόνα 5.2: Διάγραμμα k_s σε συνάρτηση με το νέο λόγο απόσβεσης 0,01

Έχοντας προσδιορίσει τη σταθερά του ελατηρίου k_s μπορούμε τώρα να προσδιορίσουμε από το επόμενο διάγραμμα , όπως αυτό προκύπτει από τον ίδιο

κώδικα τις σταθερές των άλλων δυο ελατηρίων. Έτσι έχουμε για k_s=87000N/m, ke=9239N/m k_c=-8188N/m.



Εικόνα 5.3: Διάγραμμα σταθεράς ελατηρίου k_e σε συνάρτηση με τη σταθερά ελατηρίου k_s



Εικόνα 5.4: Διάγραμμα σταθεράς ελατηρίου k_c σε συνάρτηση με τη σταθερά ελατηρίου k_s

5.3: Επίλυση των διαφορικών εξισώσεων κίνησης

Το επόμενο βήμα είναι να επιλυθούν οι διαφορικές εξισώσεις κίνησης ώστε να βρεθεί η απόκριση του εν λόγω συστήματος, η οποία θα τεθεί υπό σύγκριση και αξιολόγηση.

Οι τρεις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος είναι η μετατόπιση της μάζας x, η ταχύτητα της μάζας $\dot{x}$ και η μετατόπιση του άκρου του ελατηρίου k_c y. Έτσι προκύπτουν οι τρεις εξισώσεις κατάστασης του συστήματος:

$$\dot{x_1} = x_2$$

$$\dot{x_2} = (f - k_s * x_1 - k_c * x_3)/m$$

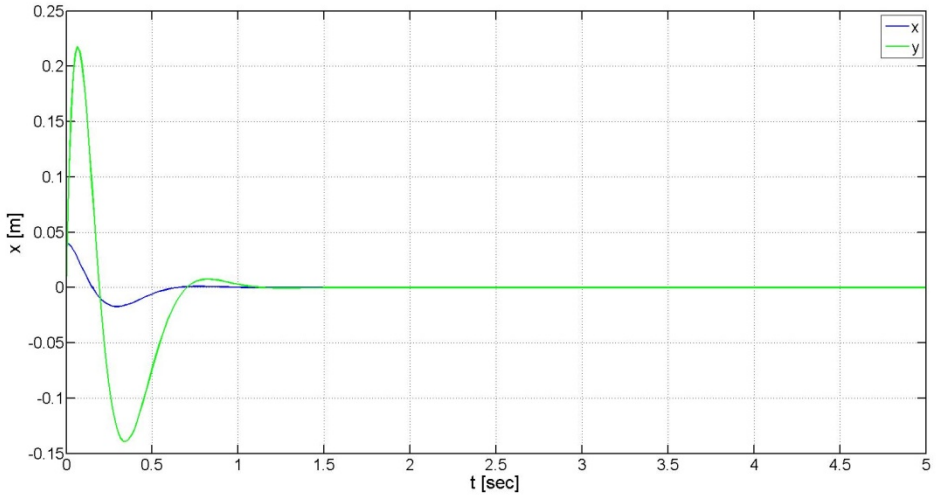
$$\dot{x_3} = x_2 + \frac{k_e}{c} * (x_1 - x_3) - \frac{k_c}{c} * x_3$$

όπου $x_1 = x, x_2 = \dot{x}$ και $x_3 = y$.

Η επίλυση των εξισώσεων κατάστασης γίνεται με τα προγράμματα όπως αυτά επισυνάπτονται στο Παράρτημα Β και προκύπτουν τα αντίστοιχα διαγράμματα για τη μετατόπιση της μάζας σε συνάρτηση με το χρόνο.

5.3.1: Απόκριση με επιβολή αρχικής μετατόπισης

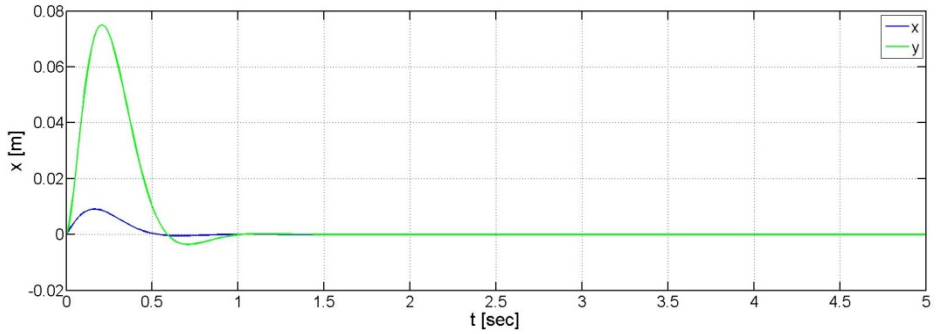
Επιβάλλοντας αρχική μετατόπιση στο δυναμικό σύστημα με το αρνητικό γραμμικό ελατήριο προκύπτει η εξής απόκριση μετατόπισης της μάζας ως προς το χρόνο.



Εικόνα 5.5: Διάγραμμα μετατόπισης της μάζας και του άκρου του ελατηρίου k_c για αρχική μετατόπιση της μάζας 0,04m

5.3.2: Απόκριση με επιβολή αρχικής ταχύτητας

Επιβάλλουμε αρχική ταχύτητα στη μάζα 0,1 m/sec και η απόκριση παρατίθεται στο επόμενο διάγραμμα.

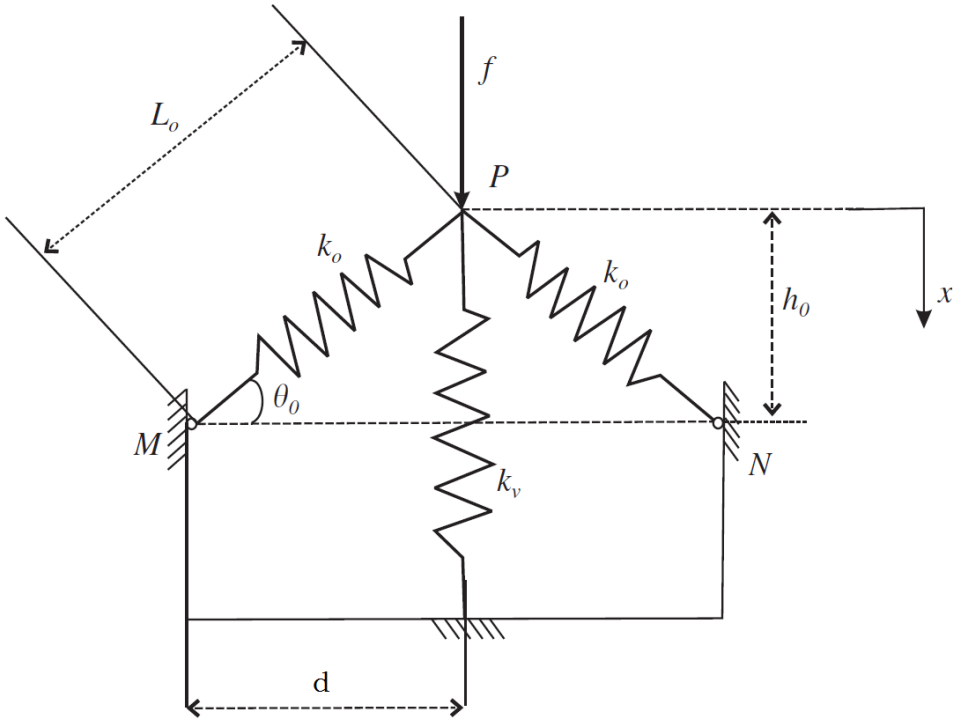


Εικόνα 5.6: Διάγραμμα μετατόπισης της μάζας και του άκρου του ελατηρίου k_c για αρχική ταχύτητα 0,1m/s

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΠΛΑΓΙΑ ΕΛΑΤΗΡΙΑ

6.1: Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε η θεωρητική μελέτη σχετικά με το πως οι δυνάμεις ελαστικότητας μπορούν να αναλάβουν να μηδενίσουν τις ταλαντώσεις επαναφοράς. Σε αυτό το κεφάλαιο σχεδιάζεται η πραγματική διάταξη της ανάρτησης αυτοκινήτου με αρνητική σταθερά ελαστικότητας. Αντί για το ελατήριο k_c το οποίο έχει αρνητική σταθερά ελαστικότητας χρησιμοποιείται ζεύγος πλαγίων προσυμπιεσμένων ελατηρίων, δηλαδή το ένα ελατήριο k_c αντικαθίσταται από το ζεύγος ελατηρίων με σταθερά k_o όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1: Διάταξη με πλάγια ελατήρια

Τα πλάγια ελατήρια στην Εικόνα 6.1 βρίσκονται στη θέση φυσικού τους μήκους όπου έχουν φυσικό μήκος L_o και βρίσκονται σε αρχική γωνία θ_o. Η γωνία αυτή αντιπροσωπεύεται από το συντελεστή γ όπου

$$\gamma = cos\theta_o = \frac{d}{L_o}$$

και d είναι η οριζόντια απόσταση των δυο άκρων του ελατηρίου, ενώ h_o είναι η κάθετη αντίστοιχη απόσταση. Η αρχική γωνία θ_o επιλέγεται μεταξύ 48 και 57

μοιρών ώστε η δυναμική ακαμψία που αυξάνεται μονοτονικά με τη μετατόπιση χ να περιορίζεται.

6.2: Επιλογή παραμέτρων

Καταρχήν η συνολική διάταξη της ανάρτησης με πλάγια ελατήρια για να είναι εφαρμόσιμη σε επιβατηγά οχήματα θα πρέπει να έχει διαστάσεις 0,30*0,30m. Τα πλάγια ελατήρια στη θέση ισορροπίας είναι οριζόντια και πλήρως συμπιεσμένα. Έτσι, ο πρώτος περιορισμός που τίθεται είναι η οριζόντια απόσταση d ισούται με 0,1m και άρα το μήκος του ελατηρίου στη θέση ισορροπίας L_e=0.1m=2*n*r, όπου n ο αριθμός των σπειρών του και r η ακτίνα του σύρματος του ελατηρίου. Επιλέγεται η τιμή του γ στη θέση φυσικού μήκους των πλάγιων ελατηρίων 0,6 οπότε το φυσικό μήκος των πλαγίων ελατηρίων είναι από τον τύπο του γ

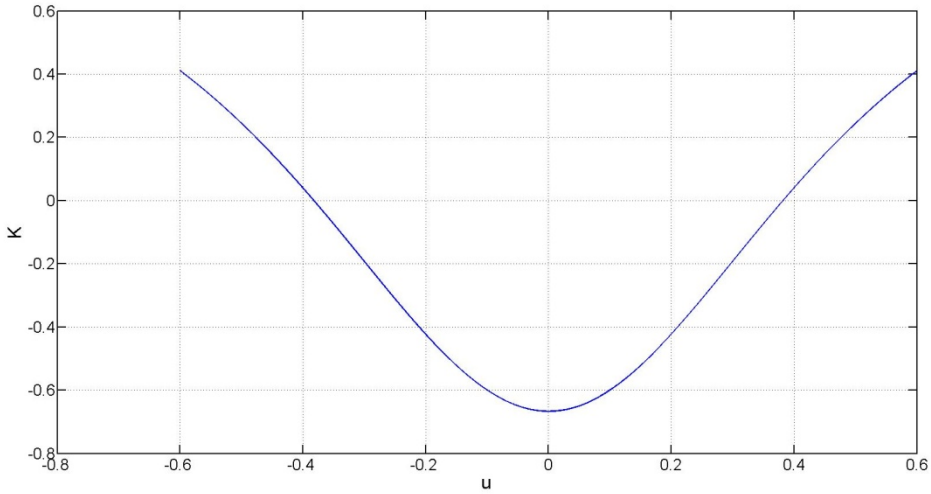
$$\gamma = cos\theta_o = \frac{d}{L_o}$$

L_o=0.1667m. Η δυναμική ακαμψία των δυο ελατηρίων εκφράζεται σε συνάρτηση της μετατόπισης, του συντελεστή γ και της σταθεράς των ελατηρίων k_o. Για τη μελέτη που γίνεται αυτή η σταθερά θα πρέπει να περιοριστεί στις αρνητικές της τιμές, οπότε θα πρέπει να μελετηθεί σε ποιο εύρος μετατοπίσεων θα πρέπει να κινείται το ελεύθερο άκρο των πλάγιων ελατηρίων. Η αδιάστατη δυναμική ακαμψία προσδιορίζεται μέσω του τύπου:

$$\widehat{K_n} = \frac{k_n}{k_o * 2} = \left(1 - \frac{{\gamma_o}^2}{(\hat{u}^2 + {\gamma_o}^2)^{3/2}}\right)$$

όπου $\hat{u} = \frac{u}{L_o}$ η αδιάστατη μετατόπιση του άκρου των ελατηρίων.

Πλοτάροντας την αδιάστατη δυναμική ακαμψία ως προς την αδιάστατη μετατόπιση του ελεύθερου άκρου των ελατηρίων, όπως γίνεται με το πρόγραμμα που παρατίθεται στο Παράρτημα Γ προκύπτει το εξής διάγραμμα.



Εικόνα 6.2: Διάγραμμα αδιάστατης δυναμικής ακαμψίας και αδιάστατης μετατόπισης ελεύθερου άκρου πλαγίων ελατηρίων

Επειδή τα πλάγια ελατήρια είναι στη θέση ισορροπίας οριζόντια

$$\widehat{u_e} = 0$$

και σε αυτή τη θέση

$$\widehat{k_n} = -0.6667$$

θέλουμε η διαστατή δυναμική ακαμψία να ισούται με την αρνητική σταθερά ελαστικότητας k_c=-8188N/m. Οπότε προκύπτει η σταθερά ελαστικότητας των ελατηρίων k_o=6141N/m. Για να κινούμαστε κατά τη λειτουργία των πλαγίων ελατηρίων στην αρνητική περιοχή του διαγράμματος τίθεται ο περιορισμός

$$\widehat{u_{min}} = -0.25$$

$$\widehat{u_{max}} = 0.25$$

οπότε

$$u_{min} = -0.042m$$

$$u_{max} = 0.042m$$

6.3: Διαστασιολόγηση ελατηρίων

Χρησιμοποιούνται ελικοειδή ελατήρια των οποίων η σταθερά ελαστικότητας υπολογίζεται από τον τύπο

$$k_{\varepsilon\lambda} = \frac{G * r^4}{4 * R^3 * n}$$

όπου G το μέτρο διάτμησης του υλικού που λαμβάνεται $77*10^9$Pa, r η ακτίνα του σύρματος του ελατηρίου, R η ακτίνα της σπείρας του ελατηρίου και n ο αριθμός των ενεργών σπειρών του ελατηρίου.

Το μήκος των ελατηρίων γεωμετρικά συνδέεται με τις λοιπές διαστάσεις και μεγέθη

$$L = n * (2 * r + 2 * R * sin\varphi).$$

6.3.1: Διαστασιολόγηση ελατηρίου k_s

Για το ελατήριο k_s, το οποίο συνδέει τη μάζα με τον άξονα του τροχού και σύμφωνα με το περιορισμό του ύψους της διάταξης στα 0,30m προκύπτει ότι το μήκος του στη θέση ισορροπίας θα είναι 0,30m συγκρατώντας τη μάζα. Δηλαδή εάν εφαρμόσουμε στατική ισορροπία μεταξύ της δύναμης του ελατηρίου και της βαρύτητας της μάζας

$$F_{\varepsilon\lambda} = m * g \Rightarrow$$

$$k_s * \Delta l = m * g \Rightarrow$$

$$L_{os} - L_{es} = \frac{m*g}{k_s} \Rightarrow$$

$L_{os} = 0.34m$ το φυσικό μήκος του ελατηρίου.

Επίσης λόγω της θέσης του ελατηρίου εσωτερικά του k_e και περιορίζεται η διάμετρος της σπείρας του D=0,05m. Έτσι, οι άγνωστοι είναι ο αριθμός των σπειρών και η ακτίνα σύρματος του ελατηρίου. Επιλύοντας το σύστημα δυο εξισώσεων με δυο αγνώστους σύμφωνα με τους τύπους που προηγήθηκαν στην

εισαγωγή του κεφαλαίου στο πρόγραμμα που παρατίθεται στο Παράρτημα Δ προκύπτουν r=0.006m και n=18.

6.3.2: Διαστασιολόγηση ελατηρίου k_e

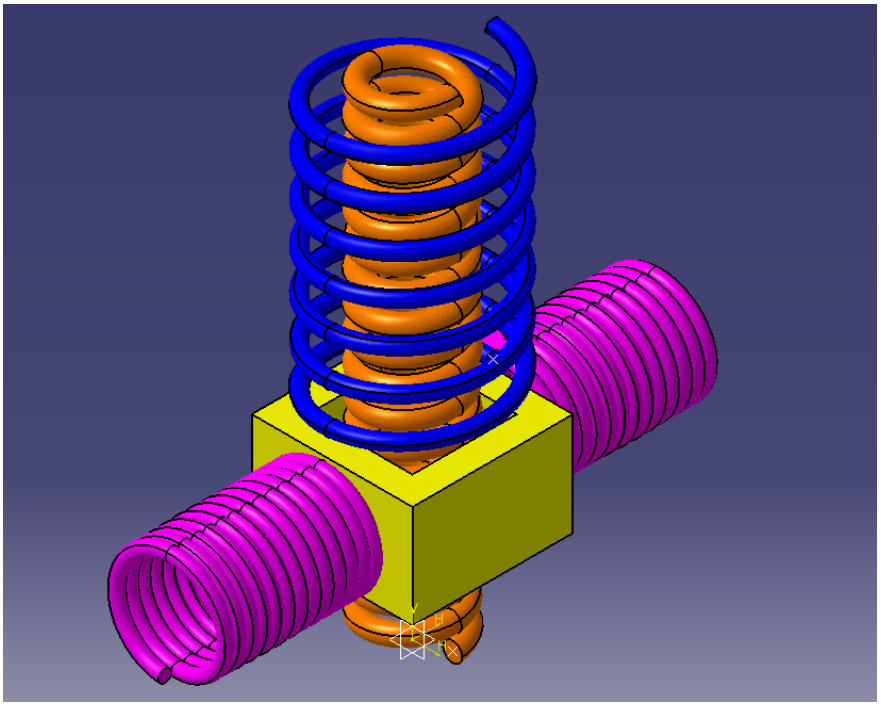
Το ελατήριο k_e συνδέει τη μάζα με το ελεύθερο άκρο των πλάγιων ελατηρίων. Για να υπάρχει επαρκής χώρος στη διάταξη να κινηθεί το άκρο των πλαγίων ελατηρίων το μήκος του k_e που είναι και το φυσικό του μήκος λαμβάνεται 0,16m. Επιπλέον, η διάμετρος του ελατηρίου ώστε το μήκος της διάταξης να είναι 0,30m λαμβάνεται 0,1m. Οπότε σε αυτήν την περίπτωση οι άγνωστοι είναι η ακτίνα του σύρματος και ο αριθμός των ενεργών σπειρών του ελατηρίου. Στο Παράρτημα Ε επισυνάπτεται ο αντίστοιχος κώδικας από τον οποίο προκύπτουν r=0.0045m και n=7.

6.3.3: Διαστασιολόγηση ελατηρίου k_o

Για τα ελατήρια k_o γνωρίζουμε ότι έχουν συμπιεσμένο πλήρως το μήκος τους το οποίο ισούται με 0,1m. Επιπλέον το ελεύθερο μήκος τους είναι 0,1667m, ενώ έχουμε και τη σταθερά ελαστικότητας δεδομένη και ίση με 6141N/m. Από αυτούς τους τρεις περιορισμούς-εξισώσεις προκύπτουν R=0.038m r=0.004m n=13.

6.3.4: Συνολική διάταξη

Η συνολική διάταξη σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA V5R20 με βάση τους υπολογισμούς που προηγήθηκαν. Τα οριζόντια ελατήρια είναι πακτωμένα στις άκρες τους, ενώ το ελεύθερο τους άκρο συνδέεται με το κάτω άκρο του ελατηρίου k_e. Το άνω άκρο του ίδιου ελατηρίου είναι πακτωμένο στη μάζα και το ελατήριο k_s βρισκόμενο εσωτερικά του k_e συνδέει τη μάζα με τον τροχό.



Εικόνα 6.3: Η τελική μορφή της ανάρτησης αυτοκινήτου

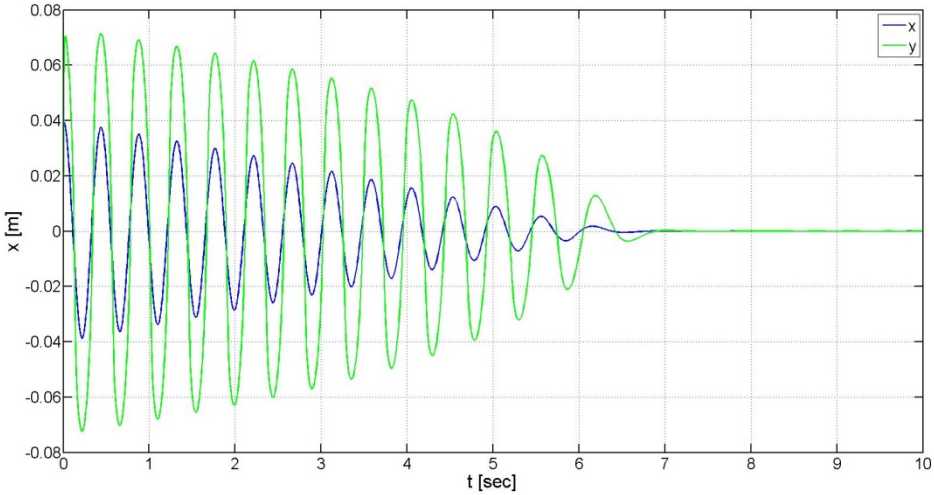
6.4: Απόκριση του συστήματος

Όπως και τα προηγούμενα συστήματα έτσι και το τελικό σύστημα της διάταξης δυο βαθμών ελευθερίας, της μετατόπισης της μάζας x και της μετατόπισης του άκρου του ζεύγους των ελατηρίων u θα μελετηθεί η απόκρισή του λόγω επιβολής αρχικής μετατόπισης και αρχικής ταχύτητας στη μάζα. Οι εξισώσεις κατάστασης που χρησιμοποιούνται είναι όμοιες με αυτές του προηγούμενου κεφαλαίου, όμως όπου έχει υπολογιστεί η δύναμη του αρνητικού ελατηρίου k_c*y πλέον χρησιμοποιείται η δύναμη λόγω του ζεύγους των ελατηρίων:

$$f_{neg} = 2 * k_o * \left(1 - \frac{1}{\sqrt{(\frac{u}{L_o})^2 + {\gamma_o}^2}}\right) * u$$

5.4.1: Απόκριση λόγω αρχικής μετατόπισης

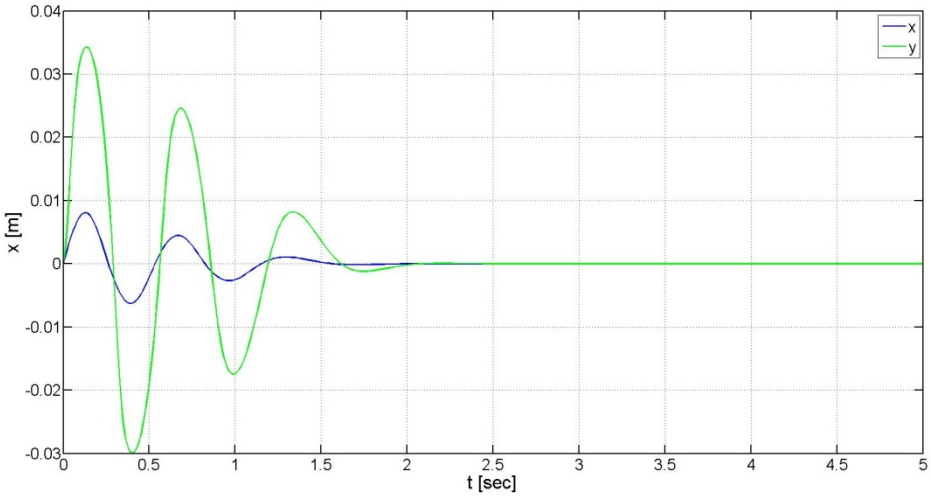
Στο σύστημα επιβάλλεται μια αρχική μετατόπιση στη μάζα 0,04m. Οι κώδικες που χρησιμοποιούνται και από τους οποίους προκύπτει το διάγραμμα μετατόπισης της μάζας, αλλά και του άκρου του ζεύγους των ελατηρίων επισυνάπτονται στο Παράρτημα ΣΤ.



Εικόνα 5.4: Διάγραμμα μετατόπισης μάζας x και μετατόπισης ελεύθερου άκρου πλαγίων ελατηρίων u λόγω επιβολής αρχικής μετατόπισης 0,04m

5.4.2: Απόκριση λόγω αρχικής ταχύτητας 0,1m

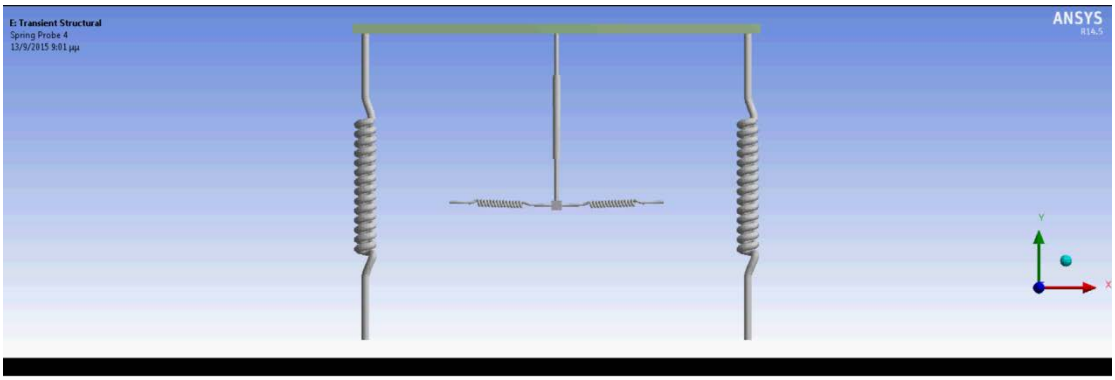
Στο σύστημα επιβάλλεται μια αρχική ταχύτητα στη μάζα 0,1m/sec και προκύπτει το διάγραμμα που δείχνει την μετατόπιση της μάζας αλλά και του ελεύθερου άκρου των πλάγιων ελατηρίων.



Εικόνα 5.5: Διάγραμμα μετατόπισης της μάζας x και του ελεύθερου άκρου του ζεύγους των ελατηρίων λόγω επιβολής αρχικής ταχύτητας 0,1m/sec

6.5: Προσομοίωση στο περιβάλλον του Ansys

Η απόκριση του συστήματος μελετήθηκε και στο περιβάλλον του Ansys ώστε να υπάρχει και οπτική παρακολούθηση της απόκρισης της μάζας λόγω επιβολής αρχικής ταχύτητας. Στην Εικόνα 6.6 φαίνεται η θεωρητική διάταξη που εισήχθη στο πρόγραμμα.

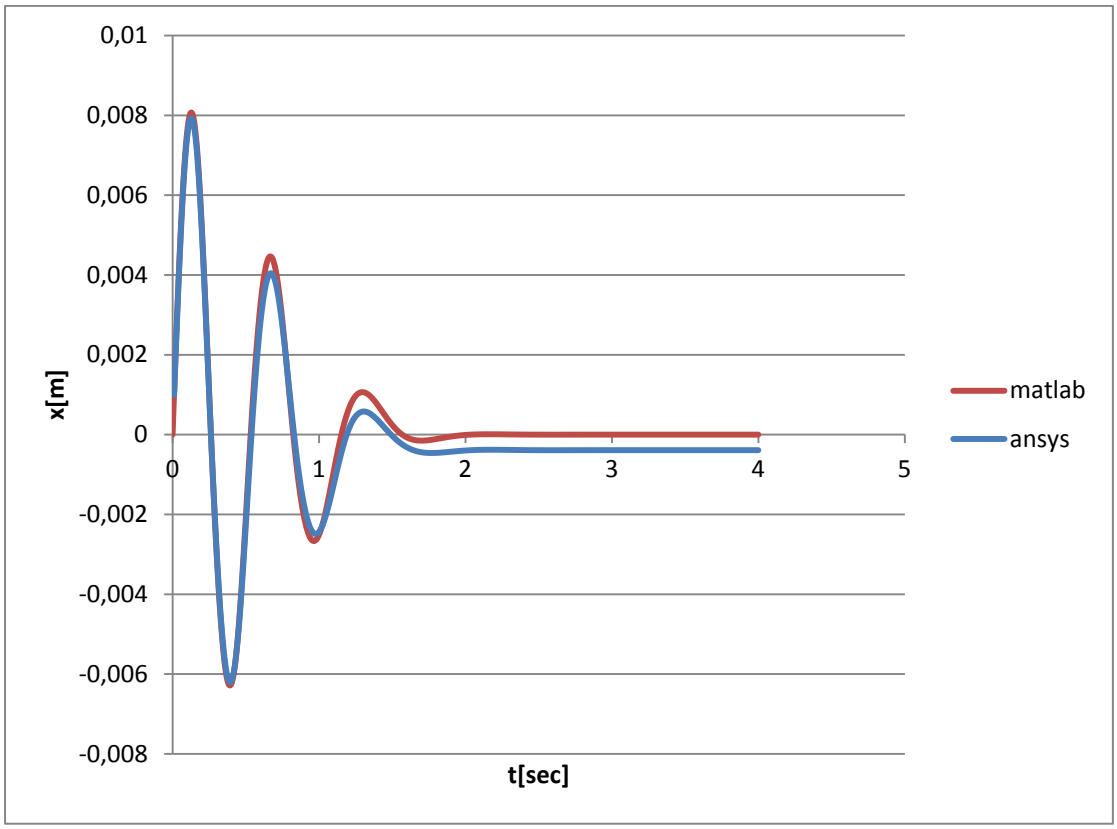


Εικόνα 5.6: Η διάταξη στο Ansys

Η μόνη διαφορά που υπάρχει σε σχέση με την πραγματική διάταξη όπως αυτή παρουσιάστηκε και αναλύθηκε ανωτέρω είναι ότι αντί για ένα ελατήριο k_s χρησιμοποιούνται δυο με το μισό της σταθεράς ελαστικότητας το καθένα. Έχει

ληφθεί υπόψη η παραλαβή της βαρύτητας της μάζας και από τα δυο. Το ελατήριο k_e εξακολουθεί να είναι ασυμπίεστο και να συνδέει τη μάζα με μια μικρότερη που πρόσθεσα στο άκρο του ζεύγους των πλαγίων ελατηρίων. Η απόσβεση έχει προστεθεί σε αυτό το ελατήριο επίσης.

Κατόπιν ακολουθεί το διάγραμμα όπως αυτό προέκυψε από την προσομοίωση στο περιβάλλον του Ansys και του Matlab για αρχική ταχύτητα 0,1m/sec επιβαλλόμενη στη μάζα.



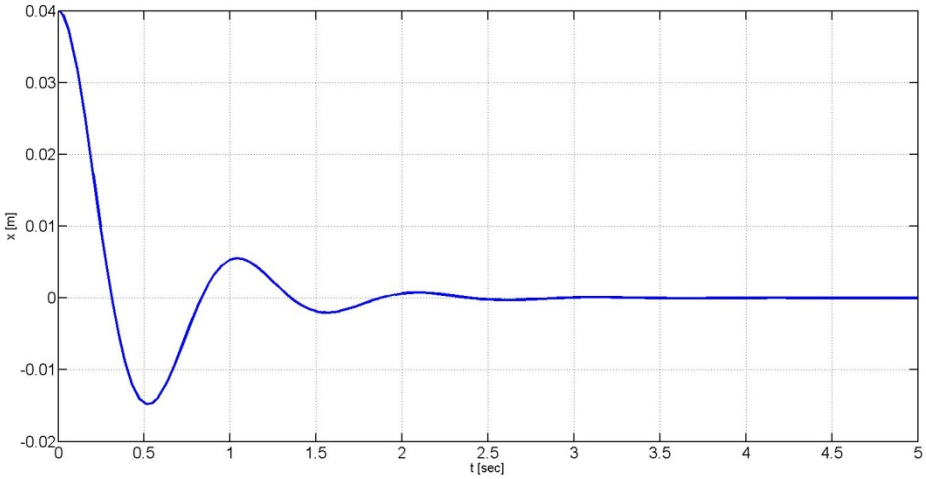
Εικόνα 6.7: Απόκριση της μάζας λόγω επιβολής αρχικής ταχύτητας 0,1m/sec σε αυτή από matlab και ansys

Όσον αφορά τα διαγράμματα υπάρχει μια απόκλιση στη θέση ισορροπίας από το Ansys κι αυτό λόγω της πρόσθεσης μιας απειροελάχιστης μάζας στο σημείο πρόσδεσης των οριζόντιων ελατηρίων και του ελατηρίου k_e, ώστε να μπορέσει να αναπαρασταθεί η διάταξη σε αυτό το περιβάλλον.

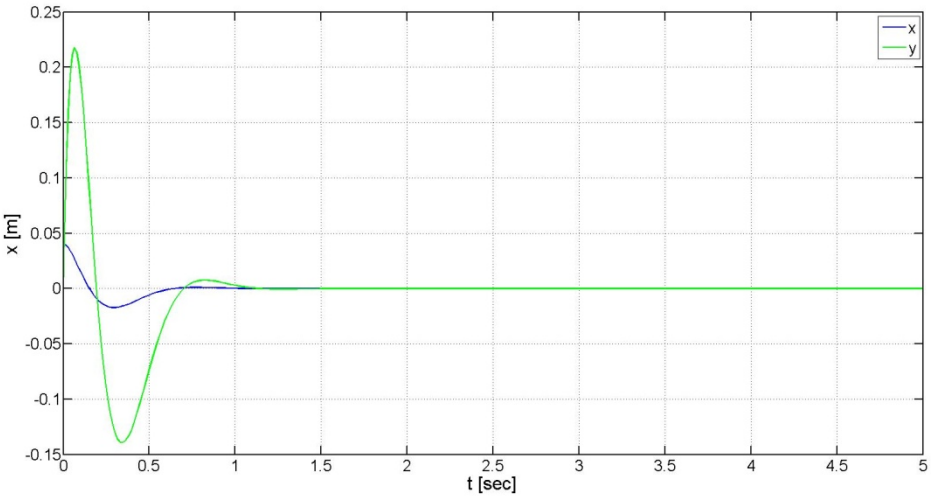
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η διπλωματική αυτή εργασία είχε σκοπό να μελετήσει κατά πόσο μια καινοτομική ανάρτηση αυτοκινήτου μπορούσε να αντικαταστήσει τη συμβατική με καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την απόκριση του συστήματος λόγω επιβολής αρχικής ταχύτητας και μετατόπισης στη μάζα. Έτσι λοιπόν πρέπει να αντιπαραβληθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα.

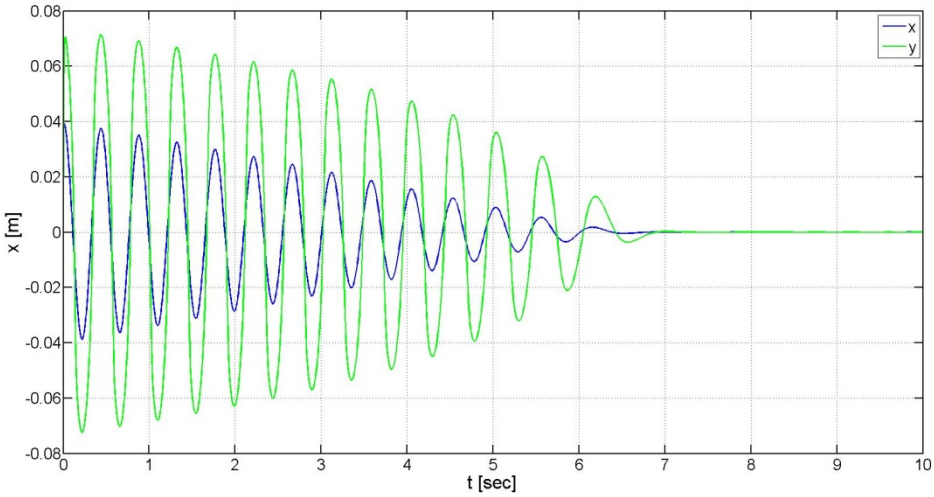
7.1: Επιβολή αρχικής μετατόπισης



Εικόνα 7.1: Διάγραμμα m-k-c



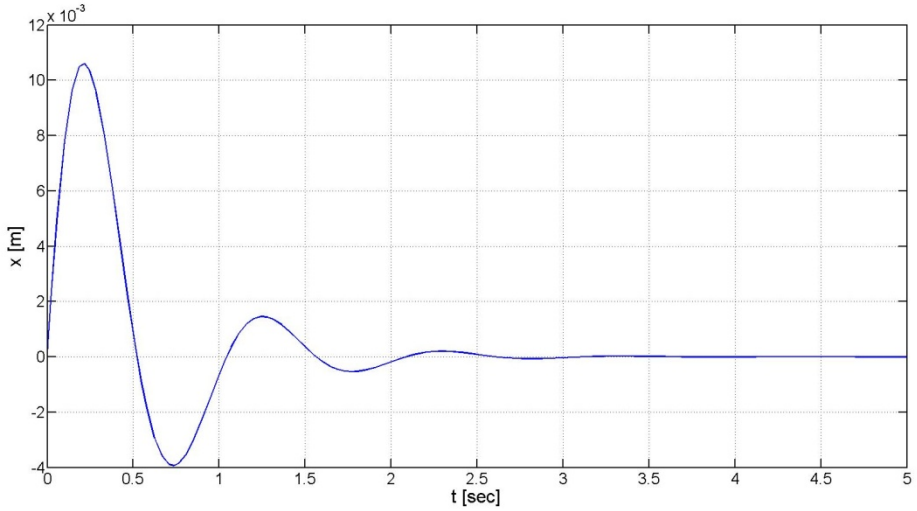
Εικόνα 7.2: Διάγραμμα με αρνητικό γραμμικό ελατήριο



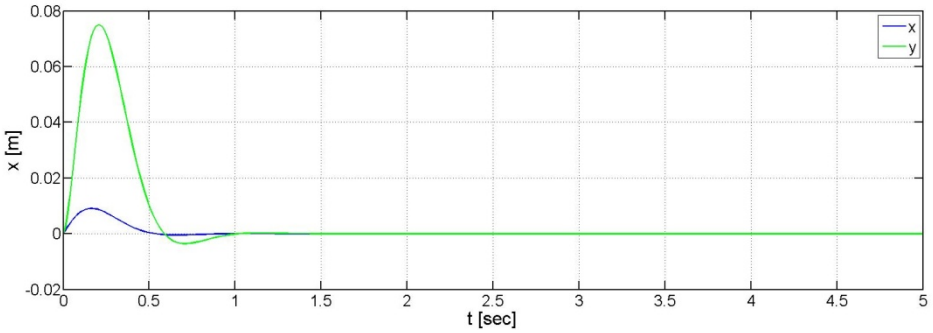
Εικόνα 7.3: Διάγραμμα με ζεύγος πλαγίων ελατηρίων

Θέτοντας τα τρία διαγράμματα υπό αξιολόγηση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Καταρχήν, η μετατροπή του κλασικού συστήματος m-k-c σε ένα αντίστοιχο με αρνητικό γραμμικό ελατήριο όπως αυτό αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4 έχει εμφανώς καλύτερα αποτελέσματα. Η μάζα ταλαντώνεται ελάχιστα και σε ένα δευτερόλεπτο έχει επανέλθει στη θέση ισορροπίας. Στη συνέχεια, η μετάβαση στο ζεύγος των οριζόντιων ελατηρίων επιφέρει περισσότερες ταλαντώσεις γύρω από τη θέση ισορροπίας και παύση σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι το συμβατικό σύστημα m-k-c. Ωστόσο, όσον αφορά τον εσωτερικό βαθμό ελευθερίας, παρατηρείται μια μεγάλη πτώση του πλάτους της ταλάντωσης του αν και πάλι φθίνει αργά.

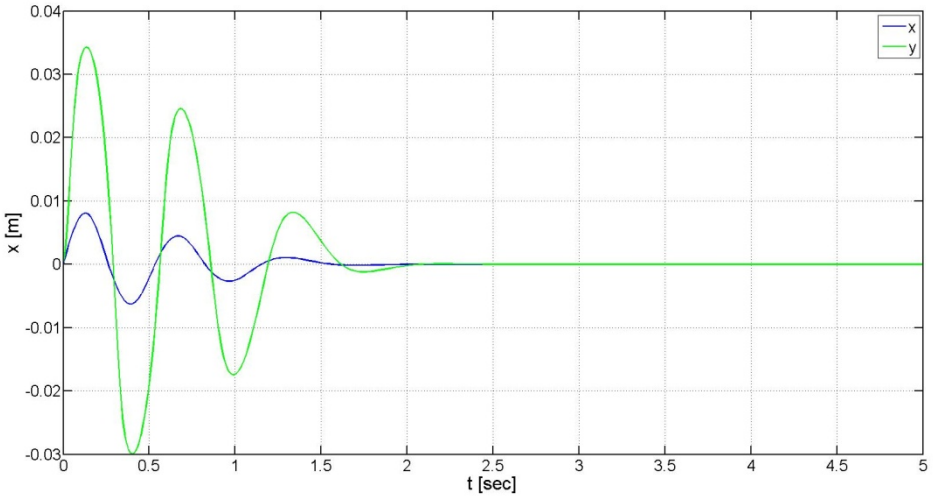
7.2: Επιβολή αρχικής ταχύτητας



Εικόνα 7.4: Διάγραμμα m-k-c



Εικόνα 7.5: Διάγραμμα με γραμμικό αρνητικό ελατήριο



Εικόνα 7.6: Διάγραμμα με ζεύγος ελατηρίων

Όσον αφορά την απόκριση λόγω επιβολής αρχικής ταχύτητας, το συμβατικό σύστημα m-k-c παρουσιάζει τη χειρότερη συμπεριφορά από τα τρία. Το γραμμικό

αρνητικό ελατήριο έχει την καλύτερη με την παύση των ταλαντώσεων επαναφοράς να υφίσταται αμέσως, ενώ για το ζεύγος των οριζόντιων ελατηρίων το πλάτος της ταλάντωσης είναι μικρότερο με την παύση των ταλαντώσεων να συμβαίνει σε δυο δευτερόλεπτα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Καταρχήν, δημιουργήθηκε η συνάρτηση spring1 με την οποία εισάγονται προς επίλυση οι εξισώσεις κατάστασης του συστήματος m-k-c. Οι εξισώσεις αυτές προκύπτουν για τις δυο ανεξάρτητες μεταβλητές κατάστασης, εφόσον η γραμμική διαφορική εξίσωση είναι δευτέρου βαθμού. Η πρώτη μεταβλητή κατάστασης w(1) είναι η μετατόπιση της μάζας x και η δεύτερη w(2) είναι η ταχύτητα της μάζας $\dot{x}$. Οι παράγωγοι που λαμβάνουν μέρος στο μοντέλο του δυναμικού συστήματος:

$$m * \ddot{x} + c * \dot{x} + k * x = 0$$

είναι wd(1)=w(2)=$\dot{x}$ και wd(2)=$\ddot{x}$=-$\frac{c}{m} * w(2) - \frac{k}{m} * w(1)$

```
function wd = spring1(t,w)

%eisagwgi twn eksiswsewn katastasis
%gia tin epilusi tis diaforikis

m=375; %maza se kg
c=1425; %aposvesi se N*s/m
k=15000; %stathera elatiriou N/m

wd=zeros(2,1);

wd(1)=w(2);
wd(2)=-c/m*w(2)-k/m*w(1);

end
```

Στη συνέχεια με το πρόγραμμα apokrisimkcmet δίνεται ως είσοδο αρχική μετατόπιση 0,04m, ενώ με το πρόγραμμα apokrisimkctax δίνεται ως είσοδος αρχική ταχύτητα 0,1m/sec.

apokrisimkcmet

```
[t,w]=ode23('spring1',[0,10],[0.04
0]);
figure (1)
plot(t,w(:,1))
```

apokrisimkctax

```
[t,w]=ode23('spring1',[0,5],[0 0.1]);
figure (2)
plot(t,w(:,1))
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Παρατίθενται οι κώδικες με τους οποίους προκύπτει η απόκριση του διβάθμιου συστήματος με γραμμικό ελατήριο αρνητικής σταθεράς ελαστικότητας.

Καταρχήν εισάγονται οι εξισώσεις κατάστασης με τη συνάρτηση gram.m.

```
function wd=gram(t,w)

ks=87000;
kc=-8188;
m=375;
ke=9239;
n=47;

wd=zeros(3,1);

wd(1)=w(2);
wd(2)=(-ks*w(1)-kc*w(3))/m;
wd(3)=w(2)+(ke*(w(1)-w(3))/n)-
kc*w(3)/n;

end
```

Για απόκριση με αρχική μετατόπιση της μάζας 0,04m χρησιμοποιείται ο κώδικας apokrisigrammikoumet.m ο οποίος επιλύει τις εξισώσεις κατάστασης για αρχική μετατόπιση της μάζας.

```
[t,w]=ode45('gram',[0 5],[0.04 0 0])

figure (1)
plot(t,w(:,1),'b',t,w(:,3),'g')
```

Για απόκριση με επιβολή αρχικής ταχύτητας στη μάζα 0,1m/sec χρησιμοποιείται ο κώδικας apokrisigrammikoutax.m ο οποίος επιλύει τις εξισώσεις κατάστασης για αρχική ταχύτητα στη μάζα 0,1m/sec.

```
[t,w]=ode45('gram',[0 5],[0 0.1 0])

figure (2)
plot(t,w(:,1),'b',t,w(:,3),'g')
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Παρατίθεται το πρόγραμμα PLOTKU.m με το οποίο προκύπτει το διάγραμμα της αδιάστατης δυναμικής ακαμψίας ως προς τη μετατόπιση του ελεύθερου άκρου των πλαγίων ελατηρίων.

```
GAM0=0.6;

UR=zeros(1000,1);
KNR=zeros(1000,1);
jj=1;
for ii=-0.6:0.0001:0.6

UR(jj,1)=ii;
KNR(jj,1)=1-
GAM0^2./(ii^2+GAM0^2).^(3/2);
jj=jj+1;
end

plot(UR,KNR)
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Παρατίθεται η συνάρτηση myfun1.m και το πρόγραμμα gewmetriaks.m τα οποία λύνουν το σύστημα δυο εξισώσεων με δυο αγνώστους ώστε να προκύπτει η ακτίνα του σύρματος ελατηρίου και ο αριθμός των σπειρών του.

```
function F=myfun1(x)

G=77*10^9;% metro diatmisis
S=87000;%stathera elatiriou
F=[4*0.025^3*x(1)*S-G*x(2)^4;
x(1)*(2*x(2)+2*0.025*0.14)-0.34];

end



x0=[2, 0.005];

[x,fval] = fsolve(@myfun1,x0)
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Παρατίθεται η συνάρτηση myfun2.m και το πρόγραμμα που την επιλύει gewmetriake.m.

```
function F=myfun2(x)

G=77*10^9;% metro diatmisis
S=9239;%stathera elatiriou
F=[4*0.005^3*x(1)*S-G*x(2)^4;
x(1)*(2*x(2)+2*0.005*0.14)-0.16];

end



x0=[2, 0.005];

[x,fval] = fsolve(@myfun2,x0)
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ

Επισυνάπτεται η συνάρτηση mhgram.m και τα προγράμματα apokrisimhgrammikoumet.m και apokrisimhgrammikoutax.m με τα οποία προκύπτουν τα διαγράμματα μετατόπισης της μάζας και του ελεύθερου άκρου των πλαγίων ελατηρίων για επιβολή αρχικής μετατόπισης και αρχικής ταχύτητας στη μάζα αντιστοίχως.

```
function wd=mhgram(t,w)

ks=87000;

m=375;
ke=9239;
n=47;
ko=6141;
gama0=0.6;
L0=0.1667;


wd=zeros(3,1);

wd(1)=w(2);
wd(2)=(-ks*w(1)-(2*ko*(1-
1/sqrt((w(3)/L0)^2+gama0^2))*w(3)))/m;
wd(3)=w(2)+ke*(w(1)-w(3))/n-(2*ko*(1-
1/sqrt((w(3)/L0)^2+gama0^2))*w(3))/n;
end



[t,w]=ode45('mhgram',[0 10],[0.04 0
0])


figure (1)
plot(t,w(:,1),'b',t,w(:,3),'g')
```

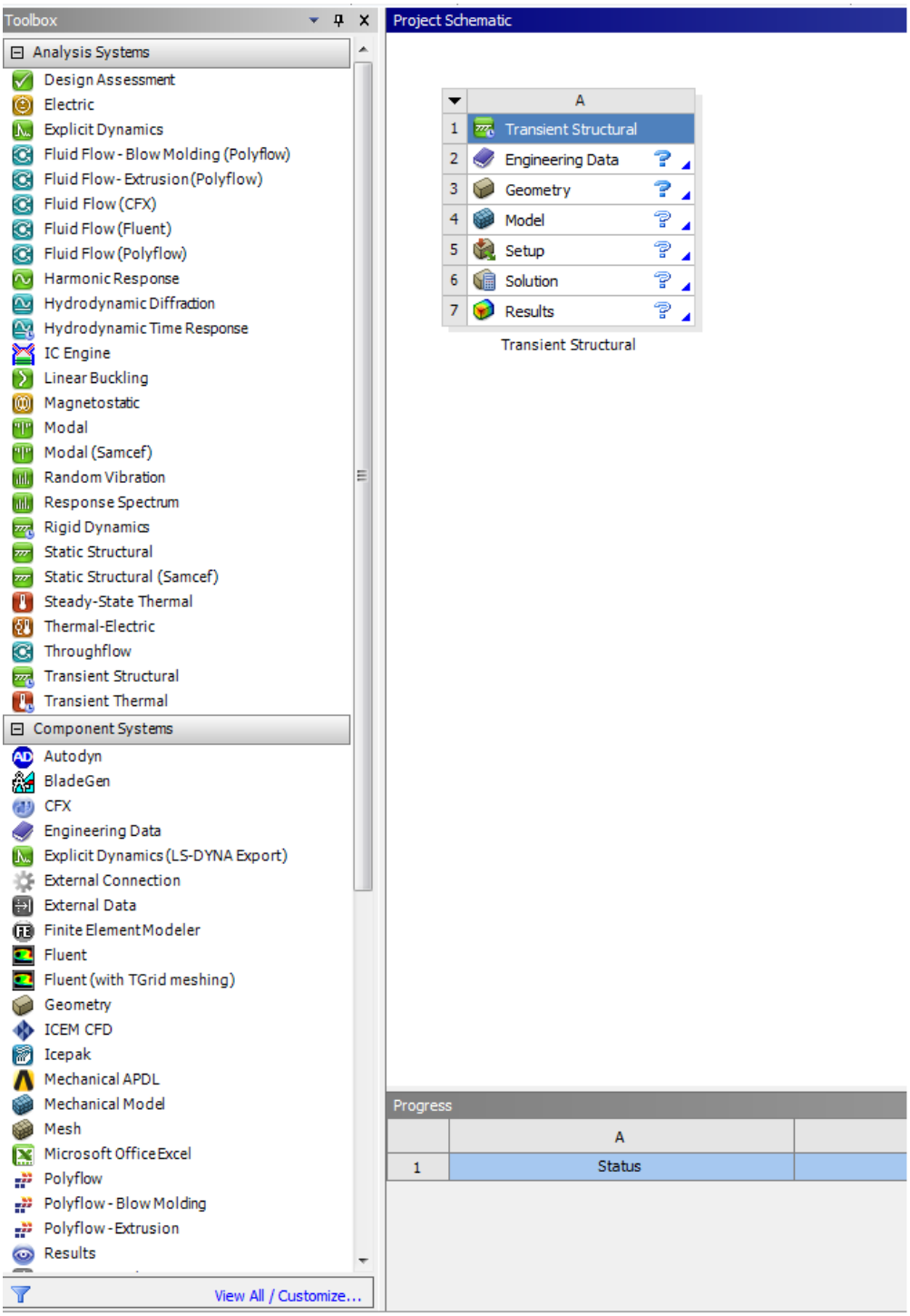
```
[t,w]=ode45('mhgram',[0 5],[0 0.1 0])

figure (2)
plot(t,w(:,1),'b',t,w(:,3),'g')
```

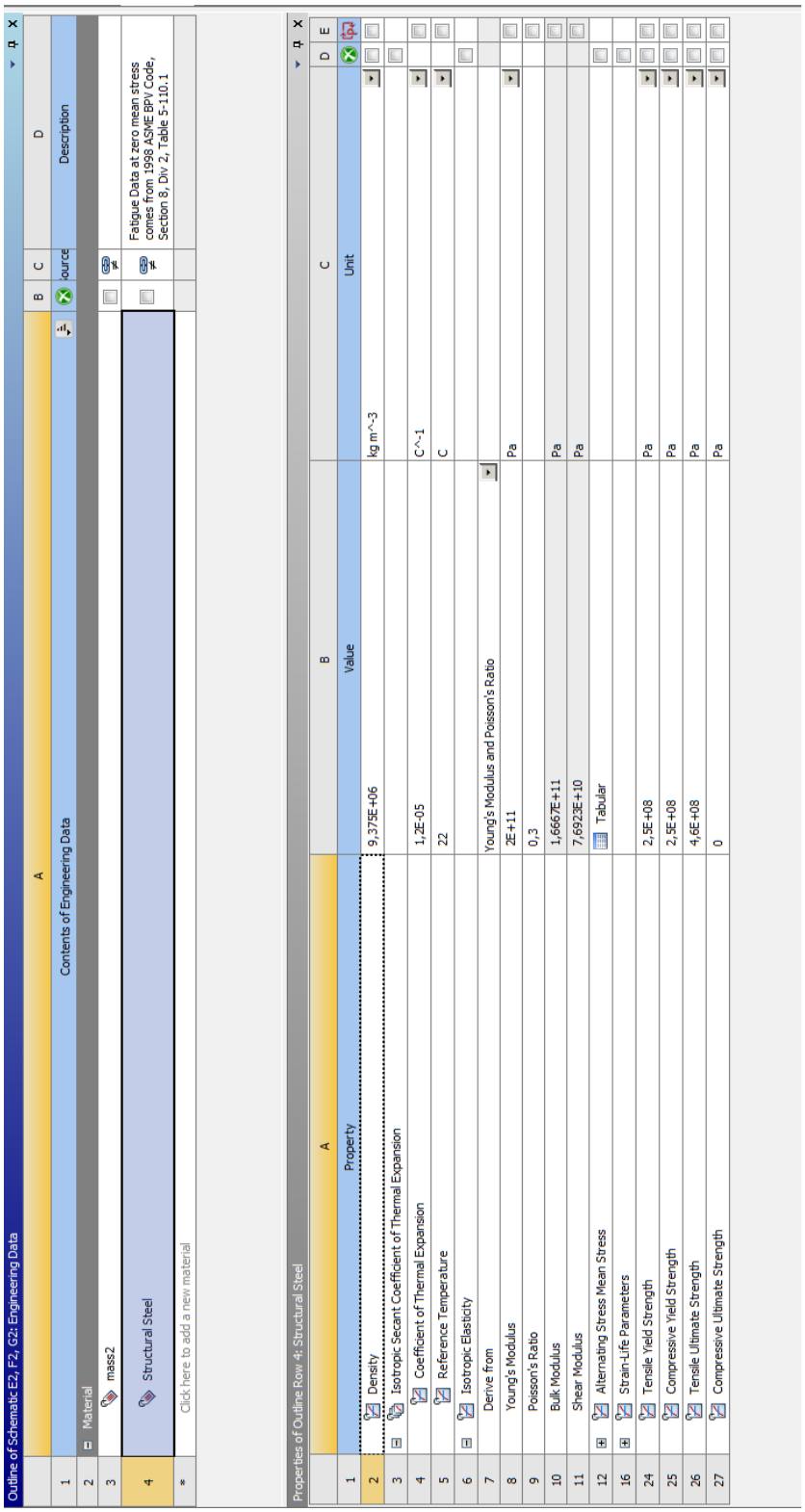
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ

Σε αυτό το παράρτημα θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο το μοντέλο της διάταξης προσομοιώθηκε στο Ansys.

Η προσομοίωση έγινε στο Transient Structural Ansys Multiphysics.



Αρχικά στο engineering data γίνεται η εισαγωγή των υλικών της μάζας της διάταξης και της βοηθητικής μάζας που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των ελατηρίων.



Outline of Schematic E2, F2, G2: Engineering Data

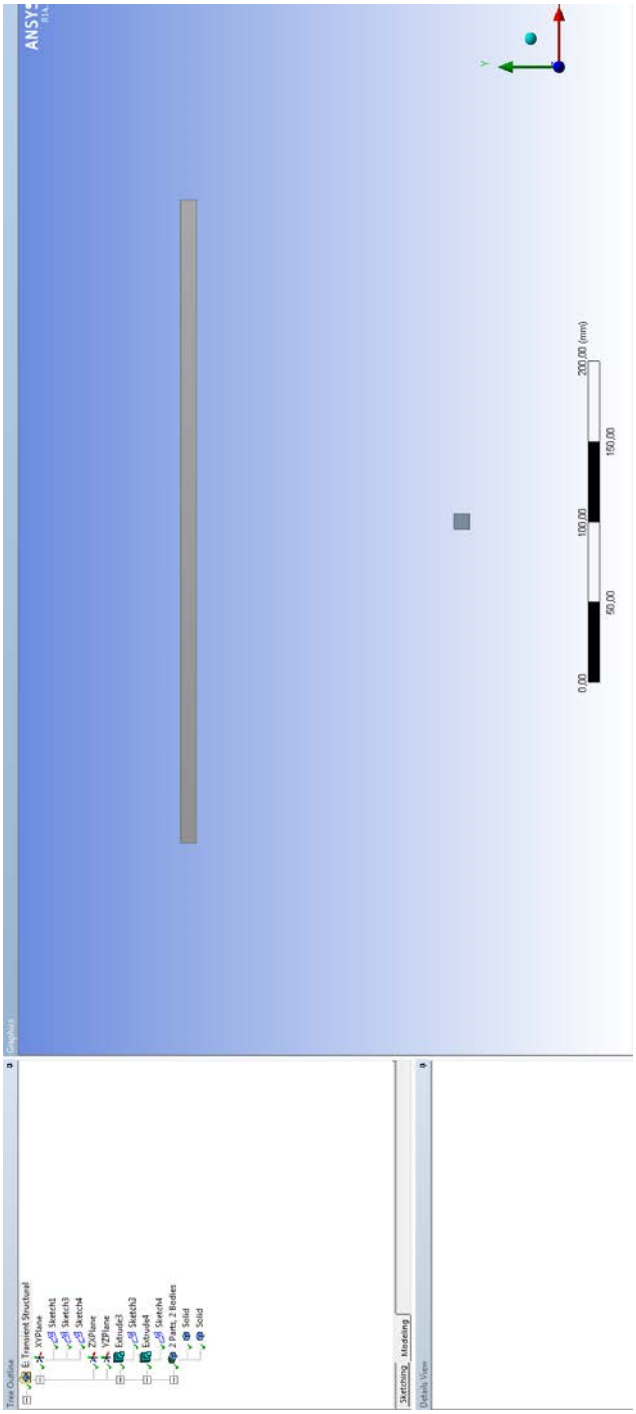
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	mass2			
4	Structural Steel			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: mass2

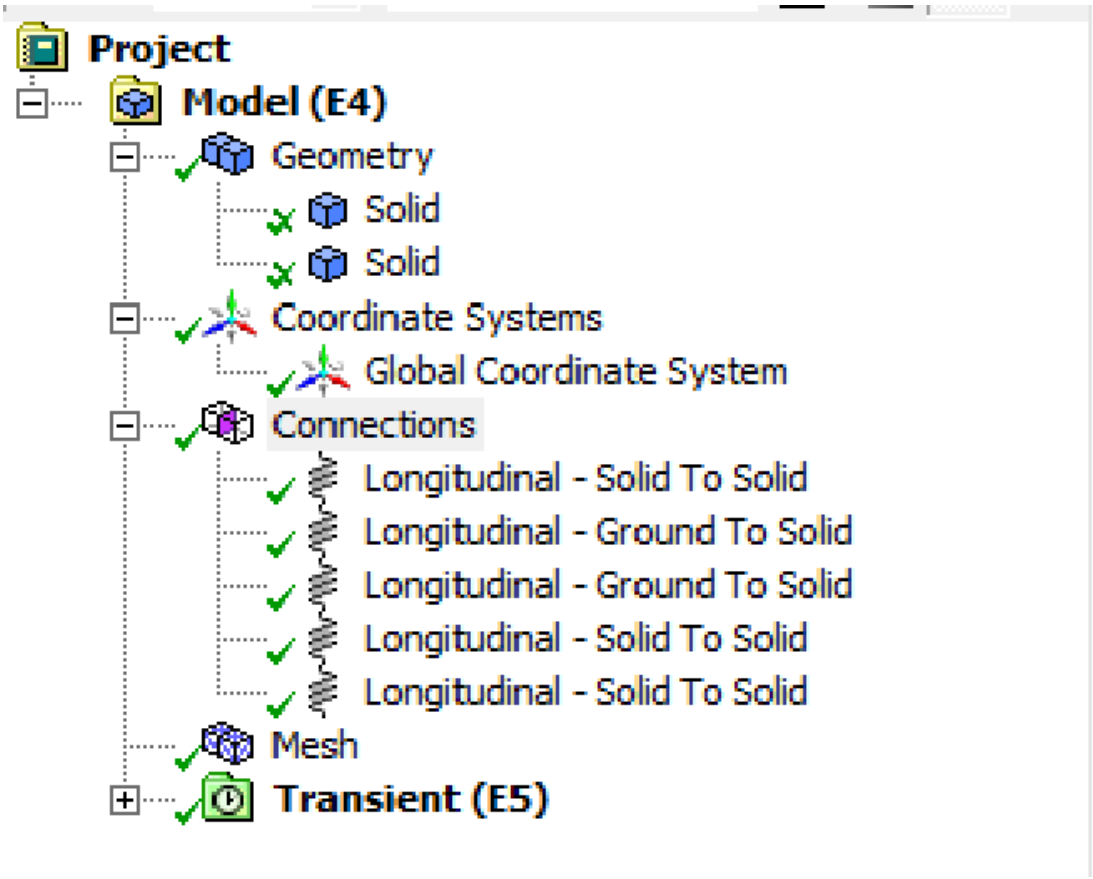
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	0,0001	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio			
8	Young's Modulus	2E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0,3			
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		

Στον πρώτο πίνακα εισάγονται οι ιδιότητες του υλικού της μάζας της διάταξης και στον δεύτερο οι ιδιότητες της βοηθητικής μάζας, η πυκνότητα της οποίας λαμβάνεται απειροελάχιστα μικρή για να μην επηρεάζει τη μελέτη της απόκρισής μας.

Στη συνέχεια εισάγουμε τη γεωμετρία των δυο μαζών στο Geometry.



Το αμέσως επόμενο βήμα είναι να καθορίσουμε τη διάταξή μας στο Model μετά την εισαγωγή της γεωμετρίας και συστήματος συντεταγμένων global. Ασχολούμαστε πρώτα με την εισαγωγή των ελατηρίων επιλέγοντας τις επιφάνειες μεταξύ των οποίων συνδέονται ή επιφάνεια με ground.



Όσον αφορά το κάθε ελατήριο, τις ιδιότητες και τη σύνδεση του καθενός έχουμε αναλυτικά.

Για το ελατήριο k_s το οποίο συνδέει τη μάζα με το ακλόνητο όριο (έδαφος):

Επιλέγονται δυο ελατήρια παράλληλα συνδεδεμένα όπου το καθένα έχει σταθερά ελαστικότητας 43500N/m, έχει φυσικό μήκος 0,3422m και συμπιεσμένο στη θέση ισορροπίας 0,3m.

Details of "Longitudinal - Solid To Solid"

Definition	
Type	Longitudinal
Spring Behavior	Both (Linear)
Longitudinal Stiffness	43500 N/m
Longitudinal Damping	0, N·s/m
Preload	Free Length
Free Length	0,3422 m
Suppressed	No
Spring Length	0,3 m
Scope	
Scope	Body-Ground
Reference	
Coordinate System	Global Coordinate System
Reference X Coordinate	0,1875 m
Reference Y Coordinate	0, m
Reference Z Coordinate	0, m
Reference Location	Click to Change
Behavior	Rigid
Pinball Region	All
Mobile	
Scoping Method	Geometry Selection
Scope	1 Face
Body	Solid
Coordinate System	Global Coordinate System
Mobile X Coordinate	0,1875 m
Mobile Y Coordinate	0,3 m
Mobile Z Coordinate	0, m
Mobile Location	Click to Change
Behavior	Rigid
Pinball Region	All

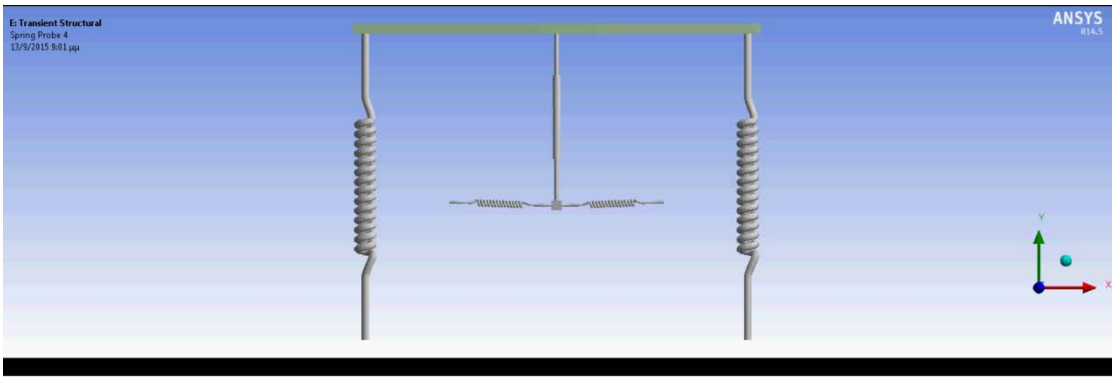
Για το ελατήριο k_e επιλέγεται σταθερά ελαστικότητας 9239N/m και φυσικό μήκος στη θέση ισορροπίας 0,16m. Το συγκεκριμένο ελατήριο είναι αυτό που φέρει και τη σταθερά απόσβεσης 47 N*s/m.

Details of "Longitudinal - Solid To Solid"	
Definition	
Type	Longitudinal
Spring Behavior	Both (Linear)
Longitudinal Stiffness	9239, N/m
Longitudinal Damping	47, N·s/m
Preload	None
Suppressed	No
Spring Length	0,16 m
Scope	
Scope	Body-Body
Reference	
Scoping Method	Geometry Selection
Scope	1 Face
Body	Solid
Coordinate System	Global Coordinate System
Reference X Coordinate	0, m
Reference Y Coordinate	0,14 m
Reference Z Coordinate	0, m
Reference Location	Click to Change
Behavior	Rigid
Pinball Region	All
Mobile	
Scoping Method	Geometry Selection
Scope	1 Face
Body	Solid
Coordinate System	Global Coordinate System
Mobile X Coordinate	0, m
Mobile Y Coordinate	0,3 m
Mobile Z Coordinate	0, m
Mobile Location	Click to Change
Behavior	Rigid
Pinball Region	All

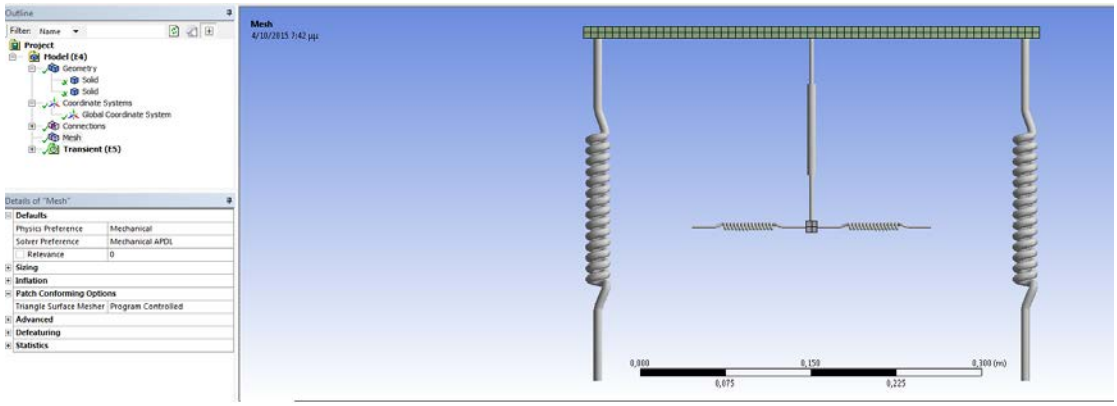
Τέλος, το ελατήριο k_o σταθεράς 6141N/m έχει φυσικό μήκος 0,1667m και μήκος πλήρως συμπιεσμένο στη θέση ισορροπίας 0,1m.

Definition	
Type	Longitudinal
Spring Behavior	Both (Linear)
Longitudinal Stiffness	6141, N/m
Longitudinal Damping	0, N·s/m
Preload	Free Length
Free Length	0,1667 m
Suppressed	No
Spring Length	1,e-001 m
Scope	
Scope	Body-Ground
Reference	
Coordinate System	Global Coordinate System
Reference X Coordinate	0,105 m
Reference Y Coordinate	0,135 m
Reference Z Coordinate	0, m
Reference Location	Click to Change
Behavior	Rigid
Pinball Region	All
Mobile	
Scoping Method	Geometry Selection
Scope	1 Face
Body	Solid
Coordinate System	Global Coordinate System
Mobile X Coordinate	5,e-003 m
Mobile Y Coordinate	0,135 m
Mobile Z Coordinate	0, m
Mobile Location	Click to Change
Behavior	Rigid
Pinball Region	All

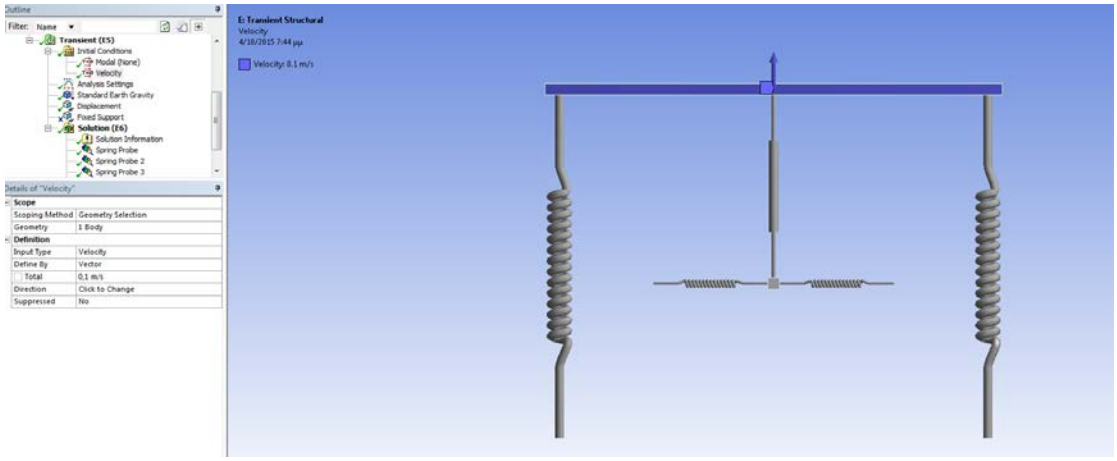
Έτσι προκύπτει η τελική διάταξη:



Κατόπιν προχωρούμε στη διακριτοποίηση των μαζών η οποία λόγω της απλής γεωμετρίας είναι απλών τετραγωνικών στοιχείων.



Επιλέγουμε αρχική ταχύτητα ως διέγερση 0,1m/s επιβαλλόμενη στη μάζα.



Προσθέτουμε την επίδραση της βαρύτητας και ορίζουμε τις θέσεις των άκρων των ελατηρίων ώστε να παίρνουμε την μετατόπισή τους ως αποτέλεσμα. Η ανάλυση γίνεται για 10 βήματα του ενός δευτερολέπτου. Έτσι, παίρνουμε και το αποτέλεσμα που αφορά στην μετατόπιση της μάζας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Miroslav Demic, Σπέντζας Κ.: Θεωρία Κινήσεως Τροχοφόρων Οχημάτων
- Robert C. Juvinall/Kurt M. Marshek: Fundamentals of Machine Component Design
- Don Knowles: Αναρτήσεις & Συστήματα Διευθύνσεως
- Ι.Αντωνιάδης: Ηλεκτρονικές σημειώσεις του μαθήματος Δυναμική Μηχανών Ι
- A.M.Wahl: Mechanical Springs
- K.Gopinath/M.M.Mayuram: Machine Design II
- Harris Yong: Theory and Calculation in the Context of Automobile
- I.Antoniadis, D.Chronopoulos,V.Spitas,D.Koulocheris: Hyper damping properties of a stiff and stable linear oscillator with a negative stiffness element
- A.Carrella, M.J.Brennan, T.P.Waters: Static analysis of a passive vibration isolator with quasi-zero-stiffness characteristics