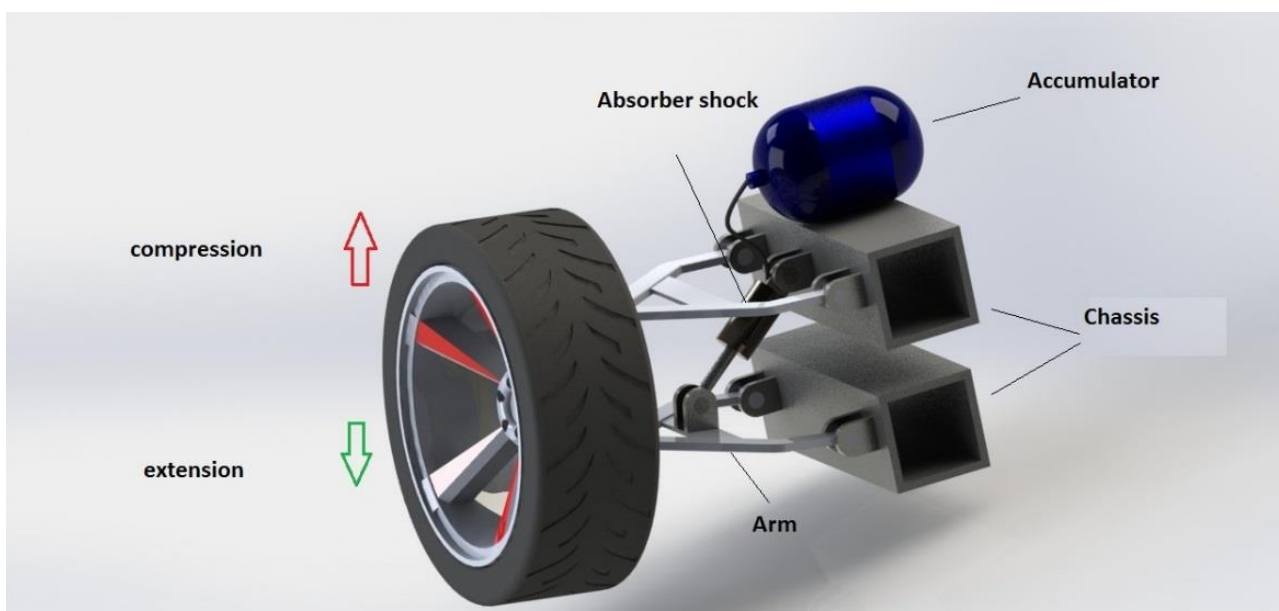




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ &
ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Ανάκτηση Ενέργειας από Αναρτήσεις Οχημάτων



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Γεράσιμος Λουβερδής- Φοιτής

Επιβλέπων: Δρ. Ι. Αντωνιάδης
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Αθήνα

Μάρτιος 2015

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ και με την ευκαιρία θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλλαν άμεσα ή έμμεσα σε αυτές.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον καθηγητή κ. Ι. Αντωνιάδη για την εμπιστοσύνη του και την πολύτιμη καθοδήγηση του σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Ευχαριστώ επίσης τον καθηγητή κ. Stanisław Radkowski και τα μέλη του εργαστηρίου Οχημάτων του πολυτεχνείου της Βαρσοβίας για τη φιλοξενία και τη βοήθειά τους στη διεξαγωγή των μετρήσεων της εργασίας μου.

Φυσικά, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και τους φίλους μου για την έμπρακτη υποστήριξη, εμπιστοσύνη και υπομονή που δείχνουν όλα αυτά τα χρόνια. Ευχαριστώ όλους ξεχωριστά...

Περίληψη

Ο ανταγωνισμός στην σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία έχει ωθήσει τους κατασκευαστές στον περιορισμό της ενέργειας που διαχέεται άσκοπα στο περιβάλλον και στην ανάπτυξη τεχνολογίας ανάκτησης της ενέργειας αυτής για την ιδιοκατανάλωση του οχήματος. Ένας τομέας στον οποίο αναπτύσσονται τεχνολογικές λύσεις τα τελευταία χρόνια είναι τα συστήματα ανάρτησης. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη σχετικά με την δυνατότητα των συστημάτων ανάρτησης να ανακτήσουν ένα μέρος της ενέργειας που διαχέεται μέσω των αποσβεστήρων και η σχεδίαση ενός υδροπνευματικού αποσβεστήρα που να συμβάλλει σε αυτήν.

Στο πρώτο σκέλος της εργασίας επιχειρείται η ποσοτική προσέγγιση της ενέργειας που διαχέεται στο περιβάλλον μέσω της λειτουργίας της ανάρτησης για διαφορετικούς τύπους οχημάτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για τα επιβατικά οχήματα είναι εφικτή η ανάκτηση ισχύος έως 400Watt ενώ για οχήματα με μεγαλύτερη μάζα το ποσό μπορεί να φτάσει τα 3000Watt θέτοντας ως κύριο τεχνολογικό στόχο τα βαρέα οχήματα. Παράλληλα αναπτύσσεται υπολογιστικός κώδικας ο οποίος προσομοιώνει το δυναμικό μοντέλο της ανάρτησης και δείχνει την επίδραση των δυναμικών χαρακτηριστικών της ανάρτησης.

Το δεύτερο σκέλος αφορά στη μελέτη μαγνητορεολογικών αποσβεστήρων. Συγκεκριμένα μελετήθηκε σε διάταξη προσομοίωσης οχήματος ένας μαγνητορεολογικός αποσβεστήρας για διαφορετικές τιμές του ρεύματος εισόδου του, μεταβάλλοντας κατά αυτόν τον τρόπο το μαγνητικό πεδίο του και κατ' επέκταση το συντελεστή απόσβεσής του. Τα αποτελέσματα παρείχαν πληροφόρηση για την ενέργεια που διαχέεται από ένα πραγματικό σύστημα ανάρτησης που εμφανίζει μη γραμμική συμπεριφορά και έγινε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το γραμμικό δυναμικό μοντέλο του υπολογιστικού κώδικα.

Τέλος, στο τρίτο σκέλος παρουσιάζεται το μοντέλο μίας υδροπνευματικής ανάρτησης που αποσκοπεί στον περιορισμό των απωλειών ενέργειας μέσω του αποσβεστήρα και ο σχεδιασμός της επιτρέπει την τοποθέτηση ηλεκτροενεργών πολυμερών στοιχείων για την αποθήκευση και απόδοση της ενέργειας αυτής.

Abstract

Competition in the modern automotive industry has pushed manufacturers to limit the power dissipated unnecessarily in the environment and the development of this energy recovery technology for their own consumption of the vehicle. One area where technological solutions developed in recent years is the suspension systems. The purpose of this thesis is the study of the potential harvesting energy of the suspension systems which is dissipated by the dampers and the design of a hydro pneumatic damper that contributes to it.

In the first part of the thesis, the quantitative approach to the energy dissipated into the environment through the operation of the suspension for different types of vehicles is investigated. The results indicate that typical vehicles can recover up to 400W of power while in vehicles with more mass the same amount can reach 3000W, setting heavy vehicles as the main technological aim. In addition, a computational code is developed which simulates the dynamic model of the suspension and shows the effect of the dynamic characteristics of the suspension.

The second part concerns the study of Magnetorheological dampers. Specifically, a Magnetorheological damper is studied in a vehicle simulator for alternative current values. In this way the magnetic field changes and hence the rate of depreciation is altered as well. The results provide information on the energy dissipated by an actual suspension system exhibiting nonlinear behavior and are compared with the corresponding results from the linear dynamic model of computer code.

Finally, the third part presents the model of hydropneumatic suspension, which aims to reduce the energy loss through the damper and its design allows placement of electroactive polymers for the storage and performance of the energy.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
Abstract	5
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή	11
Εισαγωγή	11
1.1 Συστήματα Αναρτήσεων	12
1.1.1 Παθητική Ανάρτηση	12
1.1.2 Ημιενεργητική Ανάρτηση	13
1.1.3 Ενεργητική Ανάρτηση.....	14
1.2 Αποσβεστήρες.....	15
1.2.1 Αποσβεστήρες Παθητικής Ανάρτησης	15
1.2.2 Αποσβεστήρες Ημιενεργητικής Ανάρτησης	18
1.2.3 Αποσβεστήρες Ενεργητικής Ανάρτησης	19
1.3 Διατάξεις Αναρτήσεων με Ανάκτηση Ενέργειας.....	21
1.3.1 Μηχανικά Συστήματα	21
1.3.2 Ηλεκτρομαγνητικά Συστήματα	23
Κεφάλαιο 2 ^ο : Υπολογισμός Δυνητικά Ανακτώμενης Ενέργειας.....	27
Εισαγωγή.....	27
2.1 Μοντελοποίηση Οδοστρώματος	28
2.1.1 Power Spectral Density	28
2.2 Μοντέλο Ανάρτησης Οχήματος -Base excitation.....	31
2.3 Αποτελέσματα	34
2.4 Συμπεράσματα	36
Κεφάλαιο 3 ^ο : Υπολογιστικός Κώδικας Προσομοίωσης του Συστήματος Ανάρτησης	37
Εισαγωγή.....	37
3.1 Εξισώσεις Κίνησης.....	37
3.1.1 Quarter Car Model – 1 βαθμός ελευθερίας.....	37
3.1.2 Quarter Car Model-2 βαθμών ελευθερίας.....	38
3.1.3 Bicycle Car Model-4 βαθμοί ελευθερίας	39
3.1.4 Half Car Model- 4 βαθμοί ελευθερίας	41
3.2 Υπολογισμός Φυσικών Συχνοτήτων	42
3.3 Ανάπτυξη Υπολογιστικού Μοντέλου- Matlab.....	43

3.4 Αποτελέσματα.....	47
3.4.1 Επιβατικό Όχημα	47
3.4.2 Λεωφορείο.....	52
3.5 Σύγκριση Ισχύος.....	56
3.6 Ρόλος του Λόγου Απόσβεσης ζ.....	58
Κεφάλαιο 4 ^ο : Μετρήσεις σε Μαγνητορευολογικό Αποσβεστήρα.....	60
Εισαγωγή.....	60
4.1 Μαγνητορευολογικοί Αποσβεστήρες	60
4.2 Πειραματική Διάταξη.....	62
4.3 Διεξαγωγή Μετρήσεων	63
4.4 Αποτελέσματα.....	66
4.4.1 Διέγερση 1Hz	66
4.4.2 Διέγερση 1.5Hz	70
4.4.3 Σύγκριση Πειραματικών Μετρήσεων και Υπολογιστικού Μοντέλου.....	74
Κεφάλαιο 5 ^ο : Σχεδίαση και Μοντελοποίηση Υδροπνευματικής Ανάρτησης	76
Εισαγωγή.....	76
5.1 Μοντέλο Συμβατικού Αποσβεστήρα	76
5.2 Σχεδίαση Υδροπνευματικής Ανάρτησης με χρήση Συσσωρευτή	80
5.3 Μοντελοποίηση της υδροπνευματικής ανάρτησης.....	81
5.4 Σχηματική Απεικόνιση της διάταξης	86
5.5 Αποθήκευση Ενέργειας.....	88
Κεφάλαιο 6 ^ο : Συμπεράσματα.....	91
6.1 Συμπεράσματα	91
6.2 Προτάσεις για το μέλλον.....	92
Βιβλιογραφία	93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	100

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Διάταξη τυπικής παθητικής ανάρτησης	13
Εικόνα 2. Λειτουργία παθητικού αποσβεστήρα	14
Εικόνα 3. Διάταξη ενεργητικής ανάρτησης με γραμμικό ηλεκτρομαγνητικό κινητήρα	14
Εικόνα 4. Λειτουργία παθητικού αποσβεστήρα	16
Εικόνα 5. Διάταξη “monotube” και “twintube”	17
Εικόνα 6. Τμήματα παθητικού αποσβεστήρα.....	17
Εικόνα 7. Αρχή λειτουργίας βαλβίδων, ανοιχτή και κλειστή θέση.....	18
Εικόνα 8. Αρχή λειτουργίας MR damper	19
Εικόνα 9. Ενεργητικός αποσβεστήρας της εταιρίας Bose	19
Εικόνα 10. Διάταξη ενεργητικού γραμμικού αποσβεστήρα	20
Εικόνα 11. Διάταξη αποσβεστήρα Ball Screw	20
Εικόνα 12. Διάταξη αποσβεστήρα rack pinion.....	21
Εικόνα 13. VLT σύστημα για μηχανική ανάκτηση ενέργειας.....	22
Εικόνα 14. Γραμμικός ηλεκτρομαγνητικός αποσβεστήρας.....	23
Εικόνα 15. Διάταξη περιστροφικού αποσβεστήρα με μετάδοση rack pinion	24
Εικόνα 16. Ανάρτηση υδραυλικού κινητήρα-γεννήτριας.....	25
Εικόνα 17. Εσωτερικό MR damper	26
Εικόνα 18. Ροή ενέργειας στο όχημα και δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας.....	27
Εικόνα 19. Προφίλ οδοστρώματος	28
Εικόνα 20. Μοντέλο 1 BE- base excitation	31
Εικόνα 21. Quarter car model – 1 BE	37
Εικόνα 22. Quarter car model – 2 BE	38
Εικόνα 23. Bicycle car model – 4 BE	40
Εικόνα 24. Half car model – 4 BE	41
Εικόνα 25. Quarter car model που χρησιμοποιήθηκε στο υπολογιστικό μοντέλο	43
Εικόνα 26. Δ.Ε.Σ. μη αναρτώμενης μάζας	44
Εικόνα 27. Δ.Ε.Σ. αναρτώμενης μάζας.....	44
Εικόνα 28. Θάλαμος MR damper	61
Εικόνα 29. Εφαρμογή μαγνητικού πεδίου σε MR damper	61
Εικόνα 30. Πειραματική διάταξη προσομοίωσης κίνησης τροχού.....	62
Εικόνα 31. Διάταξη συμβατικού αποσβεστήρα.....	77
Εικόνα 32. Υδροπνευματικός αποσβεστήρας με accumulator	81
Εικόνα 33. Δ.Ε.Σ. εμβόλου	83
Εικόνα 34. Διάταξη υδροπνευματικής ανάρτησης	86
Εικόνα 35. Μετατόπιση υδραυλικού ρευστού κατά τη συμπίεση	86
Εικόνα 36. Μετατόπιση υδραυλικού ρευστού κατά την επιστροφή.....	87
Εικόνα 37. Τυπική συνδεσμολογία συσσωρευτή σε διατάξεις απόσβεσης.....	87
Εικόνα 38. Συσσωρευτής με αεριοφυλάκιο και Συσσωρευτής με αέριο και έμβολο ..	88

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1. Ισχύς διαφορετικών τύπων Οχημάτων ανά Ταχύτητα Κίνησης.....	35
Διάγραμμα 2. Δυνατότητα Ανάκτησης Ενέργειας ανά Όχημα.....	36
Διάγραμμα 3. Απόκριση Συχνοτήτων για Επιβατικό Όχημα	47
Διάγραμμα 4. Μετατοπίσεις Μαζών Επιβατικού Οχήματος- 30 Km/h.....	48
Διάγραμμα 5. Ταχύτητες Μαζών Επιβατικού Οχήματος- 30Km/h.....	49
Διάγραμμα 6. Δυνάμεις αποσβεστήρα και ελαστικού για επιβατικό όχημα- 30Km/h	49
Διάγραμμα 7. Στιγμιαία Ισχύς για επιβατικό όχημα- 30Km/h	50
Διάγραμμα 8. Μετατοπίσεις Μαζών για επιβατικό όχημα-90Km/h.....	50
Διάγραμμα 9. Ταχύτητες Μαζών για επιβατικό όχημα-90Km/h.....	51
Διάγραμμα 10. Δυνάμεις αποσβεστήρα και ελαστικού για επιβατικό όχημα- 90Km/h	51
Διάγραμμα 11. Στιγμιαία Ισχύς για επιβατικό όχημα- 90Km/h	52
Διάγραμμα 12. Απόκριση Συχνοτήτων για λεωφορείο	52
Διάγραμμα 13. Μετατόπιση Μαζών για λεωφορείο-30Km/h	53
Διάγραμμα 14. Ταχύτητες Μαζών για λεωφορείο-30Km/h	53
Διάγραμμα 15. Δυνάμεις αποσβεστήρα και ελαστικού για λεωφορείο-30Km/h	54
Διάγραμμα 16. Στιγμιαία Ισχύς για λεωφορείο-30Km/h.....	54
Διάγραμμα 17. Μετατόπισης Μαζών για λεωφορείο-90Km/h.....	55
Διάγραμμα 18. Ταχύτητες Μαζών για λεωφορείο-90Km/h	55
Διάγραμμα 19. Δυνάμεις αποσβεστήρα και ελαστικού για λεωφορείο-90Km/h	56
Διάγραμμα 20. Στιγμιαία Ισχύς για λεωφορείο-90Km/h.....	56
Διάγραμμα 21. Σύγκριση Ισχύος μεταξύ του υπολογιστικού κώδικα (2BE) και της προσέγγισης 1BE	57
Διάγραμμα 22. Επιβατικό Όχημα: Ισχύς-ζ	58
Διάγραμμα 23. Λεωφορείο: Ισχύς-ζ	59
Διάγραμμα 24. Χαρακτηριστικό Διάγραμμα Δύναμης- Ταχύτητας του MR Damper	64
Διάγραμμα 25. Χαρακτηριστικό Διάγραμμα Δύναμης- Μετατόπισης του MR Damper.....	64
Διάγραμμα 26. Μετατόπιση Αποσβεστήρα για 1Hz	66
Διάγραμμα 27. Ταχύτητα Αποσβεστήρα για 1Hz.....	67
Διάγραμμα 28. Δύναμη Αποσβεστήρα για 1Hz.....	67
Διάγραμμα 29. Στιγμιαία Ισχύς Αποσβεστήρα για 1Hz-Σύγκριση Μεθόδων.....	68
Διάγραμμα 30. Στιγμιαία Ισχύς Αποσβεστήρα για 1Hz	68
Διάγραμμα 31. Δύναμη-Μετατόπιση Αποσβεστήρα για 1Hz	69
Διάγραμμα 32. Δύναμη-Ταχύτητα Αποσβεστήρα για 1Hz	69
Διάγραμμα 33. Μετατόπιση Αποσβεστήρα για 1,5Hz	70
Διάγραμμα 34. Ταχύτητα Αποσβεστήρα για 1,5Hz.....	70
Διάγραμμα 35. Δύναμη Αποσβεστήρα για 1,5Hz.....	71
Διάγραμμα 36. Δύναμη Αποσβεστήρα για 1,5Hz.....	71
Διάγραμμα 37. Στιγμιαία Ισχύς Αποσβεστήρα για 1,5Hz-Σύγκριση Μεθόδων.....	72
Διάγραμμα 38. Στιγμιαία Ισχύς Αποσβεστήρα για 1,5Hz	72
Διάγραμμα 39. Δύναμη-Μετατόπιση Αποσβεστήρα για 1,5Hz	73

Διάγραμμα 40. Δύναμη-Ταχύτητα Αποσβεστήρα για 1,5Hz	73
Διάγραμμα 41. Σύγκριση Ισχύος μεταξύ του υπολογιστικού κώδικα και των πειραματικών μετρήσεων	74
Διάγραμμα 42. Επίδραση του λόγου απόσβεσης στην Αποσβενόμενη Ισχύ	74

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Τιμές μεταβλητών για το μοντέλο PSD	29
Πίνακας 2 Τιμές Χαρακτηριστικών Οχημάτων	35
Πίνακας 3 Τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό μοντέλο	47
Πίνακας 4. Υπολογισμοί για Accumulator -Δεδομένα Κατασκευαστών	90

Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή

Εισαγωγή

Ανάρτηση οχήματος καλείται η μηχανική διάταξη που παρεμβάλλεται μεταξύ της αναρτημένης και μη αναρτημένης μάζας ενός οχήματος και επιτρέπει τη σχετική κίνηση μεταξύ τους. Η ανάρτηση είναι ένα είδος ελαστικού συνδέσμου που αποτελείται συνήθως από ένα ελατήριο, τον αποσβεστήρα και τις διάφορες μηχανικές αρθρώσεις που απαιτούνται για τη στήριξή τους και έχει ως κύρια λειτουργία την άνεση των επιβατών και τον έλεγχο της κατακόρυφης κίνησης του τροχού σε σχέση με το σασί του οχήματος.

Η χρήση των συστημάτων ανάρτησης αποσκοπεί σε τρεις βασικούς παράγοντες. Αρχικά στην άνεση των επιβατών, αφού η κύρια λειτουργία των αναρτήσεων είναι η απόσβεση των διαταραχών από το έδαφος με αποτέλεσμα την ομαλότερη συμπεριφορά του οχήματος όταν περνά από ανωμαλίες του εδάφους. Ο δεύτερος παράγοντας είναι η βελτίωση της οδηγικής συμπεριφοράς του οχήματος. Η ανάρτηση είναι η διάταξη που επιδιώκει τη διαρκή επαφή του ελαστικού με το δρόμο και ελαχιστοποιεί το χρόνο που το όχημα χάνει την επαφή με αυτόν. Αυτή η λειτουργία της ανάρτησης συμβάλει στον καλύτερο έλεγχο του οχήματος. Η τρίτη λειτουργία είναι η ασφάλεια του οχήματος. Εκτός από την καλύτερη οδηγική συμπεριφορά που ασφαλώς βελτιώνει την ασφάλεια του οχήματος, μέσω της ανάρτησης μεταφέρονται όλες οι δυνάμεις μεταξύ οχήματος και περιβάλλοντος όπως οι δυνάμεις επιβράδυνσης- επιτάχυνσης, οι κάθετες και οριζόντιες δυνάμεις από το έδαφος κτλ. Η ανάρτηση αντιδρά κατάλληλα σε αυτές τις δυνάμεις και βοηθάει στο να παραμείνει το όχημα στην επιθυμητή πορεία και να μη χαθεί ο έλεγχος.

Η ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των στόχων της ανάρτησης (αυξημένη ασφάλεια- άνεση επιβατών- καλύτερος έλεγχος) είναι μία δύσκολη διαδικασία για τους μηχανικούς καθώς οι τρεις αυτοί στόχοι είναι ασυμβίβαστοι μεταξύ τους. Γι' αυτό το λόγο κατά τη διάρκεια σχεδίασης ενός ολοκληρωμένου συστήματος ανάρτησης γίνονται συμβιβασμοί και δίνεται προτεραιότητα στους στόχους που ταιριάζουν περισσότερο με το χαρακτήρα του οχήματος και την χρήση του. Για παράδειγμα σε ένα αγωνιστικό όχημα δίνεται έμφαση στην αυξημένη επαφή των τροχών με το έδαφος και τον καλύτερο έλεγχο από τον οδηγό εις βάρος της άνεσης των επιβατών. Αντίθετα σε ένα επιβατικό όχημα η άνεση και ο έλεγχος είναι οι προτεραιότητες για τη σχεδίαση της ανάρτησης ενώ οι επιδόσεις του οχήματος αποτελούν στοιχείο δευτερεύουσας σημασίας.

1.1 Συστήματα Αναρτήσεων

Στα σύγχρονα οχήματα χρησιμοποιούνται πολλών ειδών διατάξεις ανάρτησης. Τα συστήματα ανάρτησης διακρίνονται ανάλογα με τον τύπο τους (μηχανικά-υδραυλικά-ηλεκτρομαγνητικά), ανάλογα με το είδος του αποσβεστήρα τους (Active-semi active – passive) ή τη διάταξη των συνδέσμων τους (ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων-γόνατα McPherson- ημιάκαμπτοι άξονες κτλ.). Ωστόσο παρά τις πολλές διαφορετικές διατάξεις και τις διαφορετικές τεχνολογίες τα κύρια στοιχεία από τα οποία αποτελείται μία τυπική ανάρτηση είναι:

- Ο αποσβεστήρας
- Το ελατήριο
- Οι μηχανικοί σύνδεσμοι

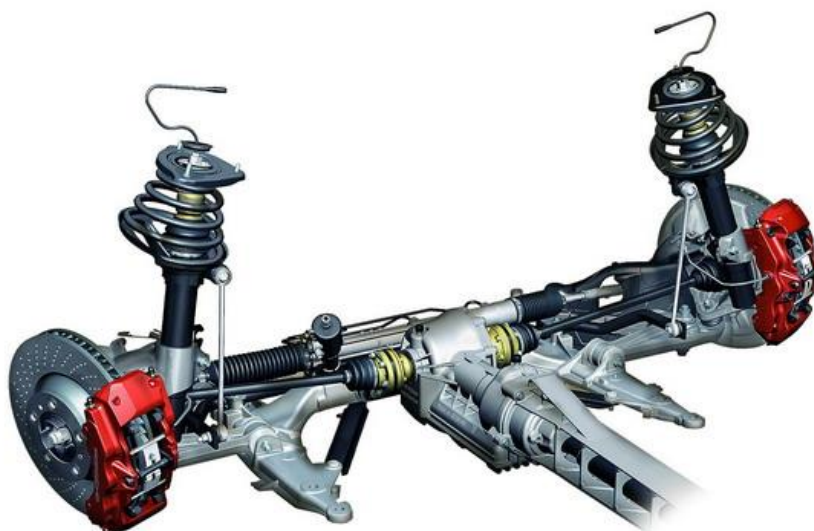
Τα στοιχεία αυτά συνδέουν την αναρτώμενη (Sprung Mass) και την μη αναρτώμενη μάζα (Unsprung Mass) του οχήματος και καθορίζουν την δυναμική συμπεριφορά του.

Η πρωταρχική λειτουργία της ανάρτησης είναι να αντιτίθεται στην ανεπιθύμητη κίνηση της μη αναρτώμενης μάζας και να ελέγχει την μετατόπιση της αναρτώμενης μάζας. Δηλαδή να περιορίζει την κίνηση του κυρίως πλαισίου του οχήματος προσφέροντας ομαλότερη συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, καθώς οι τροχοί κυλίνουν στο δρόμο, οι ανωμαλίες του εδάφους αποτελούν την ‘εξωτερική διέγερση’ για το όχημα. Οι διεγέρσεις αυτές μεταδίδονται μέσω των τροχών στο υπόλοιπο όχημα μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Οι αποσβεστήρες και τα ελατήρια λειτουργούν ως φίλτρα και σταματούν ή περιορίζουν την διάδοση των διεγέρσεων του εδάφους.

Ανάλογα με τον βαθμό ελέγχου των χαρακτηριστικών του αποσβεστήρα, οι αναρτήσεις χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες.

1.1.1 Παθητική Ανάρτηση

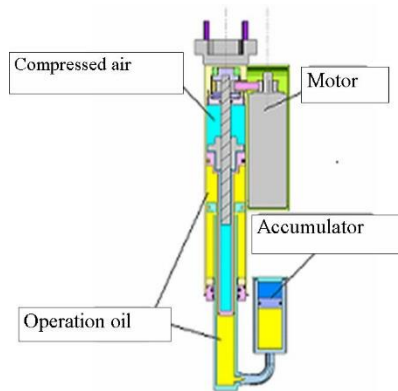
Τα συστήματα παθητικής ανάρτησης είναι ευρέως διαδεδομένα και χρησιμοποιούνται στα περισσότερα επιβατικά οχήματα. Το χαμηλό κόστος εξέλιξης και η απλή κατασκευή τους, τα καθιστά ως το πιο εμπορικό είδος αναρτήσεων από τη στιγμή που καλύπτουν τις βασικές απαιτήσεις των οδηγών. Οι παθητικές αναρτήσεις είναι σχεδιασμένες με σκοπό να καταστρέφουν την ενέργεια των κραδασμών λόγω της τριβής του ρευστού του αποσβεστήρα. Τα χαρακτηριστικά των παθητικών αναρτήσεων (συντελεστής απόσβεσης, σκληρότητα) είναι σταθερά και προεπιλεγμένα από τον κατασκευαστή. Στη γενική τους μορφή αποτελούνται από ελατήρια και ένα αποσβεστήρα ο οποίος μπορεί να είναι της μορφής mono tube ή twin tube. Οι αποσβεστήρες συνήθως δεν έχουν γραμμική συμπεριφορά ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν καλύτερα διαφορετικά εδάφη και συνθήκες οδήγησης ωστόσο τα σταθερά χαρακτηριστικά τους αποτελούν το βασικότερο περιορισμό στην αποτελεσματικότητά τους. Έτσι οι κατασκευαστές έχουν να επιλέξουν ανάμεσα σε μαλακά αμορτισέρ που προσφέρουν αυξημένη άνεση στους επιβάτες και σε σκληρά αμορτισέρ που βελτιώνουν την οδηγική συμπεριφορά και τις επιδόσεις του οχήματος. Σε κάθε περίπτωση τα συστήματα παθητικής ανάρτησης υστερούν σε απόδοση έναντι των άλλων συστημάτων ανάρτησης.



Εικόνα 1. Διάταξη τυπικής παθητικής ανάρτησης

1.1.2 Ημιενεργητική Ανάρτηση

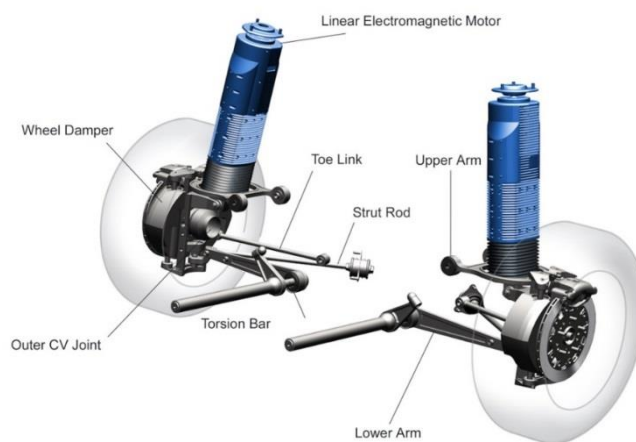
Τα συστήματα ημιενεργητικής ανάρτησης προσφέρουν την δυνατότητα επιλογής διαφορετικών χαρακτηριστικών του αποσβεστήρα και ως αποτέλεσμα την διαφορετική συμπεριφορά της ανάρτησης. Ο οδηγός έχει στη διάθεσή του προεπιλεγμένες ρυθμίσεις και μπορεί να αλλάζει τη δυναμική συμπεριφορά ανάλογα με τη χρήση και τις ανάγκες του. Οι ημιενεργητικές αναρτήσεις χρησιμοποιούν σύνθετους αποσβεστήρες που μπορούν να μεταβάλλουν τη σκληρότητα και το συντελεστή απόσβεσης (συντελεστής απωλειών) τους, αλλάζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εμβόλου όπως ο αριθμός των οπών, το μήκος της διαδρομής κτλ. Μία άλλη μέθοδος είναι με χρήση αποσβεστήρων με μαγνητορευστικά. Τα ρευστά αυτά κινούνται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο και έχουν την ιδιότητα να αλλάζουν το ιξώδες τους όταν αλλάζει η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο έλεγχος του ιξώδους του ρευστού και κατ' επέκταση της απόσβεσης του αμορτισέρ. Η απόδοση των ημιενεργητικών αναρτήσεων είναι καλύτερη σε σύγκριση με τα παθητικά συστήματα διότι μπορεί και προσαρμόζεται καλύτερα σε περισσότερες συνθήκες εδάφους. Επίσης ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ότι σε περίπτωση αστοχίας της διάταξης ελέγχου της ημιενεργητικής ανάρτησης, η ανάρτηση συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά ως παθητική ανάρτηση πλέον και δεν θέτει σε κίνδυνο το όχημα. Στα μειονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου συγκαταλέγονται το αυξημένο κόστος και η πολυπλοκότητα των αποσβεστήρων που χρησιμοποιούνται.



Εικόνα 2. Λειτουργία παθητικού αποσβεστήρα

1.1.3 Ενεργητική Ανάρτηση

Τα συστήματα ενεργητικής ανάρτησης είναι η πιο προηγμένη τεχνολογία στον τομέα τους. Η λειτουργία τους βασίζεται σε επενεργητές και σε αισθητήρια όργανα τα οποία αντιλαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο τις κινηματικές διεγέρσεις του εδάφους και μεταβάλλουν κατάλληλα τα χαρακτηριστικά της ανάρτησης. Συγκεκριμένα οι ενεργητικές αναρτήσεις χρησιμοποιούν αισθητήρες ταχύτητας, επιτάχυνσης, ύψους κ.α., επεξεργάζονται τα δεδομένα και στέλνουν εντολές στους επενεργητές ώστε να προσαρμόζουν το συντελεστή απόσβεσης ή και να ασκούν εξωτερικές δυνάμεις στους τροχούς με σκοπό τη βέλτιστη οδηγική συμπεριφορά και την μεγαλύτερη ασφάλεια. Η κύρια διαφορά από τις ημιενεργητικές αναρτήσεις είναι η χρήση των επενεργητών και ο έλεγχος της απόσβεσης όχι μέσω προκαθορισμένων ρυθμίσεων αλλά εξαιτίας της ανάδρασης από τα μετρητικά συστήματα. Ωστόσο, οι ενεργητικές αναρτήσεις χρησιμοποιούνται μόνο σε περιορισμένα οχήματα λόγω του πολύ ακριβού κόστους κατασκευής και ανάπτυξης τους, ενώ παράλληλα το βάρος αλλά και η ενέργεια που χρησιμοποιούν για την λειτουργία τους τις κάνει ακατάλληλες για απλά επιβατικά οχήματα.



Εικόνα 3. Διάταξη ενεργητικής ανάρτησης με γραμμικό ηλεκτρομαγνητικό κινητήρα

1.2 Αποσβεστήρες

Οι αποσβεστήρες (ή αμορτισέρ) αποτελούν το κυριότερο στοιχείο της ανάρτησης αφού σε αυτούς πραγματοποιείται η καταστροφή της ενέργειας των κραδασμών. Έχουν σχεδιαστεί με σκοπό η ενέργεια από την κινηματική διέγερση του εδάφους να διαχέεται μέσω της τριβής του υδραυλικού ρευστού ή αερίου στο περιβάλλον με τη μετατροπή της σε θερμική ενέργεια. Η τριβή μεταξύ των επιφανειών του αμορτισέρ και του ρευστού είναι ο μηχανισμός με τον οποίο η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμικές απώλειες. Στην αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιούνται ευρέως δύο τύποι παθητικών αποσβεστήρων, οι αποσβεστήρες λαδιού mono-tube και twin tube. Τα τελευταία χρόνια όμως γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλείς οι ημιενεργητικοί αποσβεστήρες (semi-active dampers) λόγω της καλύτερης απόδοσης τους και της προσαρμοστικότητάς τους σε διαφορετικές συνθήκες και απαιτήσεις. Για τον έλεγχο των χαρακτηριστικών των ημιενεργητικών αναρτήσεων έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί πολλές τεχνολογίες οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια. Τέλος, οι ενεργητικοί αποσβεστήρες (active dampers) αποτελούν στην ουσία έναν επενεργητή. Έχουν αναπτυχθεί με σκοπό να επιτυγχάνουν τη βέλτιστη λειτουργία της ανάρτησης κάθε στιγμή με κύρια μειονεκτήματα όμως το κόστος, την κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία τους και το μέγεθός τους.

Μία δεύτερη κατηγοριοποίηση που γίνεται ανάμεσα στους αποσβεστήρες είναι αναφορικά με την δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας. Οι ημιενεργητικοί αποσβεστήρες οι οποίοι καταναλώνουν ενέργεια από μία εξωτερική πηγή για τον έλεγχο και τη λειτουργία τους καλούνται μη αναγεννητικοί αποσβεστήρες (non-regenerative dampers) και κατά τη λειτουργία τους έχουν αντίστοιχα χαρακτηριστικά με αυτά ενός παθητικού αμορτισέρ. Αντίθετα, οι αναγεννητικοί αποσβεστήρες (regenerative dampers) εκτελούν παράλληλα δύο λειτουργίες. Αφενός παράγουν την απαραίτητη απόσβεση ώστε να λειτουργεί αποτελεσματικά η ανάρτηση αφετέρου ανακτούν ένα μέρος της δυναμικής ενέργειας λόγω των δονήσεων και δεν το αποβάλλουν στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Η ενέργεια που ανακτάται μετατρέπεται σε αξιοποιήσιμη μορφή ενέργειας (όπως ηλεκτρική ενέργεια) και αποθηκεύεται. Η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των αισθητήριων οργάνων και της μονάδας ελέγχου του αποσβεστήρα καθώς και της ιδιοκατανάλωσης του. Παράλληλα αν υπάρχει περίσσεια ανακτώμενης ενέργειας αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται σε άλλα συστήματα του οχήματος μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου.

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι αποσβεστήρες για κάθε είδος ώστε να είναι δυνατή η σύγκρισή τους και η κατανόηση των χαρακτηριστικών της κάθε διάταξης.

1.2.1 Αποσβεστήρες Παθητικής Ανάρτησης

Οι αποσβεστήρες των παθητικών αναρτήσεων είναι ο πιο συμβατικός τύπος αποσβεστήρων που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η απλότητα κατασκευής, το μικρό κόστος και η αξιοπιστία λόγω της μακροχρόνιας εξέλιξης είναι οι αιτίες που οι παθητικοί αποσβεστήρες χρησιμοποιούνται στην συντριπτική πλειοψηφία των οχημάτων.

Η λειτουργία των παθητικών αποσβεστήρων είναι ιδιαίτερα απλή. Κατά την κίνηση του οχήματος, η κατακόρυφη κίνηση του τροχού μεταφέρεται σε κίνηση του εμβόλου του αποσβεστήρα. Το υδραυλικό ρευστό (λάδι κατά κύριο λόγο) κινείται μέσω των οπών του εμβόλου και λόγω του αυξημένου ιξώδους του αντιστέκεται στην κίνηση του εμβόλου. Επομένως η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του ρευστού και των οπών του εμβόλου διαχέει την δυναμική ενέργεια και οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού. Σε πολλές περιπτώσεις εκτός από τις οπές του εμβόλου περιλαμβάνονται και επιπλέον βαλβίδες για την επιπρόσθετη αντίσταση στη ροή του ρευστού. Η δύναμη αντίστασης που παράγεται στον αποσβεστήρα εξαρτάται από την σχετική ταχύτητα κίνησης του εμβόλου μέσα στο ρευστό και είναι της γενικής μορφής:

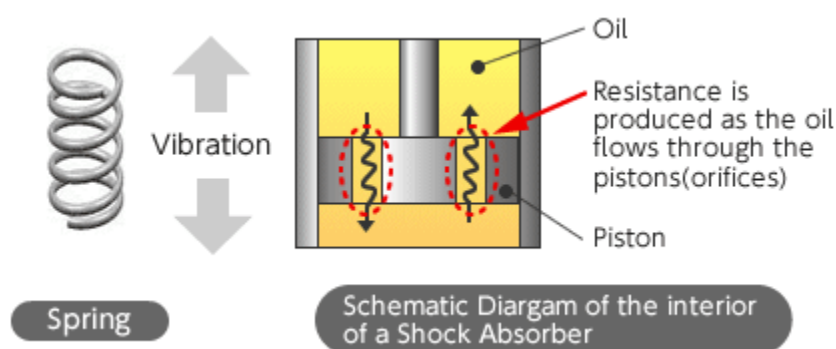
$$F = C * V^\lambda$$

Όπου $\lambda=0$: Δύναμη Τριβής Coulomb-Σταθερή

$\lambda=1$: Γραμμικός αποσβεστήρας –Viscous-like friction

$\lambda=2$: Δυναμική Τριβή (Quadratic friction type)

C: Συντελεστής απόσβεσης- damping coefficient

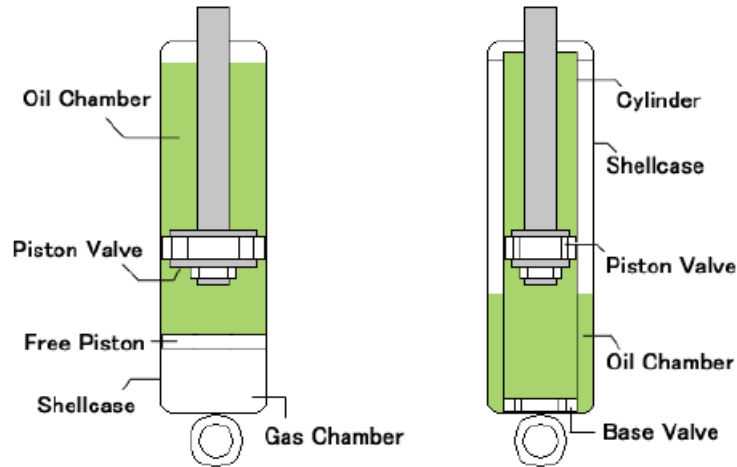


Εικόνα 4. Λειτουργία παθητικού αποσβεστήρα

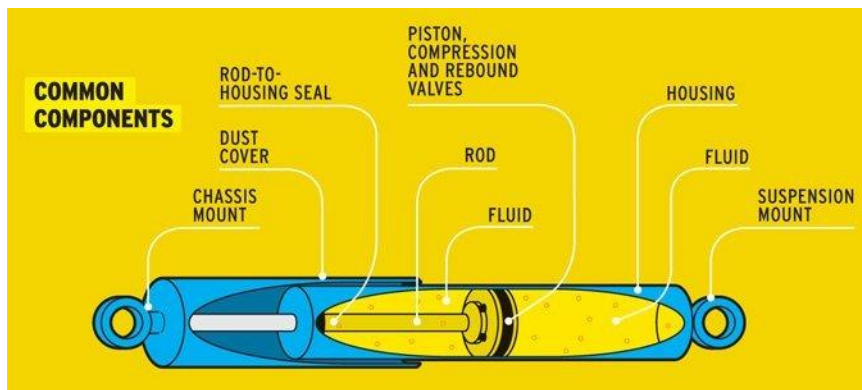
Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι παθητικών αποσβεστήρων όσο αναφορά τη σχεδίαση τους. Οι αποσβεστήρες mono tube και twin tube.

Οι αποσβεστήρες mono tube αποτελούνται από ένα έμβολο που κινείται μέσα σε ένα σφραγισμένο κυλινδρικό θάλαμο. Ο θάλαμος χωρίζεται εν γένει σε τρία τμήματα, στο θάλαμο λαδιού συμπίεσης (piston chamber), στο θάλαμο λαδιού έκτασης (rod chamber) και στο θάλαμο αερίου (gas chamber). Κατά την κίνηση του εμβόλου μέσα στο θάλαμο του αποσβεστήρα το υδραυλικό ρευστό οδηγείται μέσω των οπών στον αντίστοιχο θάλαμο και λόγω του ιξώδους του αναπτύσσεται η επιθυμητή δύναμη αντίστασης. Η δύναμη αυτή εξαρτάται από τις διαμέτρους των οπών του εμβόλου και των βαλβίδων. Επίσης επειδή οι βαλβίδες επιτρέπουν την κίνηση προς τη μία πλευρά μόνο ο αποσβεστήρας έχει διαφορετικό συντελεστή απόσβεσης κατά την συμπίεση και την έκτασή του, ανάλογα με τον τύπο των βαλβίδων. Τέλος, ο θάλαμος αερίου είναι

απαραίτητος αφενός για να εξασφαλίζεται η είσοδος του στελέχους του εμβόλου που αρχικά βρίσκεται εκτός του θαλάμου αφετέρου λειτουργεί ως ελατήριο λόγω της συμπίεσης του. Στο σχήμα φαίνονται τα τμήματα ενός τέτοιου αποσβεστήρα.



Εικόνα 5. Διάταξη “monotube” και “twintube”



Εικόνα 6. Τμήματα παθητικού αποσβεστήρα

Ο δεύτερος τύπος αποσβεστήρα είναι αυτό του twin tube. Στην σχεδίαση αυτή υπάρχουν ξανά τα τρία τμήματα που προαναφέρθηκαν ωστόσο ο θάλαμος λαδιού συμπίεσης είναι συνδεδεμένος με τον θάλαμο αερίου και επίσης εκτός από τις οπές του εμβόλου υπάρχουν οπές στο κάτω τμήμα του εσωτερικού θαλάμου. Κατά τη φάση της συμπίεσης οι οπές του εμβόλου και του θαλάμου μοιράζονται την παραγωγή αντίστασης ενώ κατά τη φάση της έκτασης του εμβόλου κυρίαρχο ρόλο παίζουν οι οπές του εμβόλου.

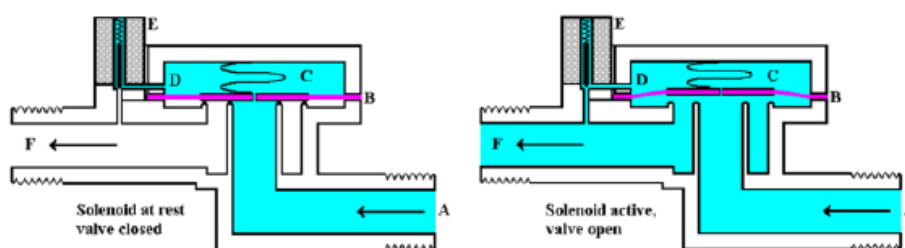
Κάθε διάταξη έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η διάταξη monotube είναι απλούστερη και φθηνότερη κατασκευαστικά αλλά η πίεση του θαλάμου αερίου παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Αντίθετα ο τύπος διπλού θαλάμου είναι κατασκευαστικά πολυπλοκότερος και η σύνδεση του θαλάμου αερίου με του λαδιού

περιορίζει την τοποθέτηση του αποσβεστήρα με έναν μόνο προσανατολισμό ωστόσο η πίεση παραμένει πιο σταθερή και χαμηλότερη από την αντίστοιχη της διάταξης monotube.

1.2.2 Αποσβεστήρες Ημιενεργητικής Ανάρτησης

Οι αποσβεστήρες ημιενεργητικών αναρτήσεων χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές με σκοπό να ελέγχουν την απόσβεση που προσφέρει το αμορτισέρ. Οι τεχνικές αυτές συνήθως αφορούν στον έλεγχο των βαλβίδων του αποσβεστήρα ή τη μεταβολή του ιξώδους του ρευστού. Όπως και οι παθητικοί αποσβεστήρες, είναι σχεδιασμένοι να παράγουν αντίσταση ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης του αμορτισέρ. Οι τεχνολογίες που υπάρχουν ποικίλουν (solenoid-valve, ER-fluid, MR-fluid, Eddy current and electromagnetic dampers) ωστόσο οι πλέον συνηθισμένοι τύποι ημιενεργητικών αποσβεστήρων είναι δύο: Οι αποσβεστήρες με ηλεκτροβαλβίδες και οι αποσβεστήρες που χρησιμοποιούν μαγνητορεολογικά ρευστά.

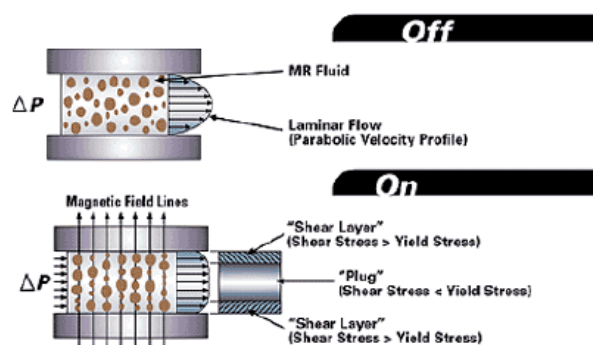
Οι αποσβεστήρες με ηλεκτροβαλβίδες στηρίζουν τη λειτουργία τους στη μεταβολή του συντελεστή απωλειών του αποσβεστήρα λόγω αλλαγής των οπών από τις οποίες διέρχεται το ρευστό. Όταν οι ηλεκτροβαλβίδες είναι ανοιχτές (ενεργές) το ρευστό έχει μειωμένη αντίσταση, αντίθετα όταν οι ηλεκτροβαλβίδες λαμβάνουν εντολή να κλείσουν αυξάνεται ο συντελεστής απωλειών άρα και η δύναμη απόσβεσης. Γενικότερα, με τη διάταξη αυτή γίνεται εφικτός ο ταχύς και ακριβής έλεγχος της δύναμης απόσβεσης και η ανάρτηση προσαρμόζεται καλύτερα στα επιθυμητά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 7. Αρχή λειτουργίας βαλβίδων, ανοιχτή και κλειστή θέση

Η δεύτερη τυπική διάταξη που χρησιμοποιείται είναι αυτή των MR fluid (μαγνητορεολογικών ρευστών). Το χαρακτηριστικό των ρευστών αυτών είναι ότι αλλάζουν το ιξώδες τους ανάλογα με το μαγνητικό πεδίο στο οποίο βρίσκονται. Στους αποσβεστήρες αυτούς το υδραυλικό λάδι περιβάλλεται από ηλεκτρομαγνήτες που αλλάζουν το μαγνητικό πεδίο ανάλογα με την εντολή που δέχονται από τα αισθητήρια όργανα. Όταν δεν υφίσταται κάποιο μαγνητικό πεδίο τα μαγνητικά σωματίδια κινούνται ελεύθερα μέσα στο λάδι, όταν όμως εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο, τα σωματίδια αυτά προσανατολίζονται ταχύτατα και αποτελούν εμπόδιο στην κίνηση του

ρευστού. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται η απόσβεση του αμορτισέρ. Όσο μεγαλύτερο μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται από τους ηλεκτρομαγνήτες τόσο αυξάνεται το ιξώδες του ρευστού και η δύναμη απόσβεσης. Ο χρόνος που απαιτείται για την μεταβολή των χαρακτηριστικών του αποσβεστήρα είναι πολύ μικρός της τάξης των millisecond ενώ τα χαρακτηριστικά μπορούν να μεταβάλλονται πολύ ομαλά επιτυγχάνοντας εξαιρετικό έλεγχο. Ωστόσο όταν απαιτείται μεγάλη αντίσταση, το μαγνητικό πεδίο καταναλώνει σημαντική ισχύ κάνοντας αρκετά ενεργοβόρα την παρούσα διάταξη.



Εικόνα 8. Αρχή λειτουργίας MR damper

1.2.3 Αποσβεστήρες Ενεργητικής Ανάρτησης

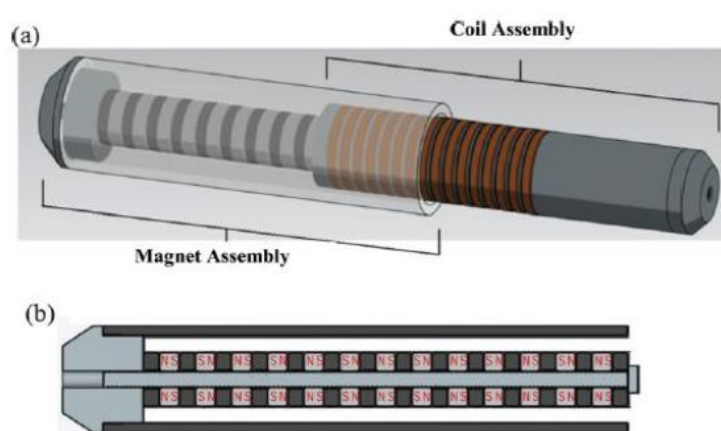
Η ενεργητική ανάρτηση έχει διαφορετική φιλοσοφία σε σχέση με τις προηγούμενες διατάξεις. Για την βελτιστοποίηση της απορρόφησης των κραδασμών και του καλύτερου ελέγχου η δύναμη απόσβεσης δεν παράγεται από την δύναμη τριβής μεταξύ του ρευστού και του αποσβεστήρα αλλά προέρχεται από την δράση ενός επενεργητή. Κατά κύριο λόγο οι ενεργητικές αναρτήσεις αποτελούνται από ηλεκτρομαγνητικούς αποσβεστήρες στους οποίους η δύναμη που ασκείται στο έμβολο παράγεται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα (επενεργητή).

Στην αυτοκινητοβιομηχανία οι σημαντικότεροι τύποι ενεργητικών αποσβεστήρων που έχουν επικρατήσει είναι οι γραμμικοί ηλεκτρομαγνητικοί επενεργητές (linear electromagnetic actuator), η διάταξη ball screw electromagnetic damper, και η διάταξη rack-pinion based electromagnetic damper.



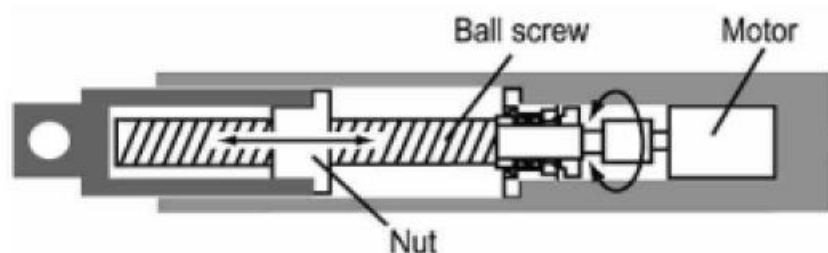
Εικόνα 9. Ενεργητικός αποσβεστήρας της εταιρίας Bose

Η πρώτη διάταξη ενεργητικής ανάρτησης που αναπτύχθηκε είναι με τη χρήση του γραμμικού ηλεκτρομαγνητικού επενεργητή. Η λειτουργία της διάταξης αυτής στηρίζεται στο νόμο του Faraday. Ο αποσβεστήρας αποτελείται από ένα σύστημα μαγνητών και από ένα πηνίο. Ανάλογα με την ένταση του ρεύματος που διέρχεται από το πηνίο αναπτύσσεται ένα επιπρόσθετο μαγνητικό πεδίο πέρα από αυτό των μόνιμων μαγνητών. Η κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης που αναπτύσσεται εξαρτάται από την κατεύθυνση του ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό ελέγχοντας το μαγνητικό πεδίο του αποσβεστήρα ελέγχεται παράλληλα η δύναμη απόσβεσης. Το κύριο μειονέκτημα της διάταξης αυτής είναι ότι η διαδρομή του αποσβεστήρα είναι μικρή και η δύναμη απόσβεσης που επιτυγχάνεται περιορισμένη.



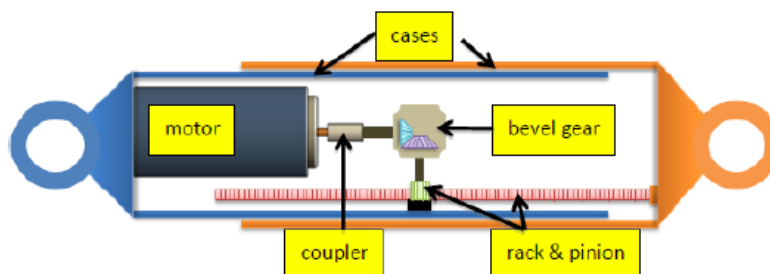
Εικόνα 10. Διάταξη ενεργητικού γραμμικού αποσβεστήρα

Για την επίλυση του προβλήματος της περιορισμένης δύναμης που μπορεί να εφαρμοστεί από την προηγούμενη διάταξη αναπτύχθηκε ο αποσβεστήρας ball screw. Στην περίπτωση αυτή η αντίσταση προέρχεται από ένα περιστροφικό κινητήρα και η κίνηση μετατρέπεται σε γραμμική. Μεταξύ του κινητήρα και του ball screw υφίσταται ένας μειωτήρας με αποτέλεσμα να επιτρέπει την ανάπτυξη μεγαλύτερων δυνάμεων αλλά και ταχύτερη απόκριση λόγω της αυξημένης ροπής. Ωστόσο η ανάγκη για μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε γραμμική προσθέτει σημαντικές απώλειες ενέργειας και επιβαρύνει την αξιοπιστία και τη διάρκεια χρήσης του αποσβεστήρα.



Εικόνα 11. Διάταξη αποσβεστήρα Ball Screw

Σε παρόμοιες αρχές λειτουργίας βασίζεται και η διάταξη rack pinion. Και πάλι εδώ χρησιμοποιείται ηλεκτροκινητήρας και η κίνηση μετατρέπεται από περιστροφική σε γραμμική. Το πρόβλημα της διάταξης αυτής είναι η έκκεντρη φόρτιση που δέχεται ο μηχανισμός καθώς και η αξιοπιστία του οδοντωτού τροχού.



Εικόνα 12. Διάταξη αποσβεστήρα rack pinion

1.3 Διατάξεις Αναρτήσεων με Ανάκτηση Ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια στην προσπάθεια των κατασκευαστών να περιορίσουν την κατανάλωση καυσίμων έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες που περιορίζουν τις απώλειες ενέργειας κατά την κίνηση του οχήματος. Οι κυριότερες απώλειες ενέργειας σε ένα όχημα εμφανίζονται στο κινητήρα του και ειδικότερα στις απώλειες θερμότητας των καυσαερίων. Επίσης σημαντικές απώλειες εμφανίζονται στο σύστημα πέδησης. Για τις περιπτώσεις αυτές υπάρχει ήδη προηγμένη τεχνολογία και εφαρμόζεται σε πολλά οχήματα. Ο τομέας της ανάκτησης ενέργειας από το σύστημα των αναρτήσεων βρίσκεται υπό εξέλιξη και ήδη υπάρχουν τεχνολογίες είτε υπό ανάπτυξη είτε που ήδη χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες κυρίως περιπτώσεις. Ακολουθεί μία βασική επισκόπηση της υπάρχουσας τεχνολογίας ώστε να γίνει η σύγκριση των διαφορετικών διατάξεων και τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται καθώς επίσης αναφέρονται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε διάταξης.

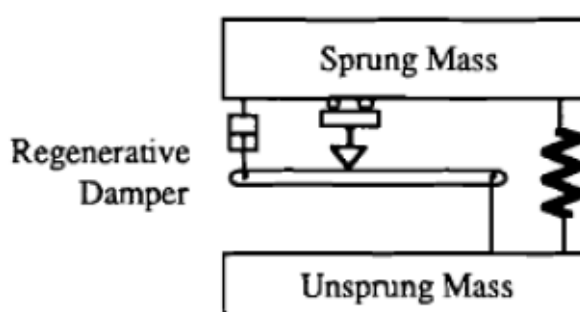
Τα συστήματα ανάρτησης με ανάκτηση ενέργειας χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο ανάκτησης και αποθήκευσης της ενέργειας, στα μηχανικά συστήματα και στα ηλεκτρομαγνητικά.

1.3.1 Μηχανικά Συστήματα

Τα μηχανικά συστήματα χρησιμοποιούν συνήθως υδροπνευματικές διατάξεις και μετατρέπουν την κινητική ενέργεια της ανάρτησης σε υδραυλική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται σε υδραυλικούς συσσωρευτές (accumulators).

Ένα μηχανικό σύστημα είναι αυτό που πρότειναν οι Fodor και Redfield, το σύστημα VLT (variable linear transmission mechanism). Ένα έμβολο ωθεί το ρευστό στο συσσωρευτή παράγοντας υδραυλική ισχύ. Ο αποσβεστήρας που είναι συνδεδεμένος χρησιμοποιεί την ισχύ αυτή για να παράγει την απαιτούμενη δύναμη απόσβεσης. Η λειτουργία ωστόσο στηρίζεται στη δοκό που φαίνεται στο σχήμα. Η δοκός αποτελεί στην ουσία ένα μοχλοβραχίονα που ενισχύει την δύναμη εισόδου ώστε να είναι μεγαλύτερη από την δυναμική ενέργεια, λόγω της υπερπίεσης, στον συσσωρευτή και

εν τέλει να αποθηκευτεί η ενέργεια σε αυτόν. Συγκεκριμένα η δύναμη που απαιτείται για να φορτιστεί ο συσσωρευτής είναι συνάρτηση της θέσης του μοχλοβραχίονα. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι το σύστημα είναι ελέγξιμο ως προς την δύναμη απόσβεσης που εφαρμόζει. Ιδανικά, το σύστημα μπορεί να λειτουργεί ως ένας παθητικός αποσβεστήρας αφού η δύναμη είναι ευθέως ανάλογη με την θέση του μοχλοβραχίονα σε αντιστοίχιση με το σταθερό ιξώδες που έχουν οι παθητικοί αποσβεστήρες. Ωστόσο στην πραγματικότητα δεν είναι δυνατή η λειτουργία του κατά αυτόν τον τρόπο διότι το σύστημα ελέγχου της θέσης του υπομοχλίου προσθέτει καθυστέρηση φάσης και εν τέλει η λειτουργία του προσομοιάζεται με αυτή του αποσβεστήρα τριβής Coulomb. Στα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης διάταξης συγκαταλέγεται το γεγονός ότι ο έλεγχος της θέσης του μοχλοβραχίονα απαιτεί μεγάλη ενέργεια και επίσης ότι το σύστημα δεν ανταποκρίνεται αποτελεσματικά σε όλες τις απαραίτητες συχνότητες διέγερσης.



Εικόνα 13. VLT σύστημα για μηχανική ανάκτηση ενέργειας

Ένα διαφορετικό μηχανικό σύστημα έχει κατοχυρωθεί από τον James Stansbury. Στη διάταξη αυτή χρησιμοποιείται ένας συσσωρευτής και ένας υδραυλικός κινητήρας. Το υδραυλικό ρευστό οδηγείται από το έμβολο στο συσσωρευτή με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ο κινητήρας. Με τον έλεγχο της παροχής από/ προς το συσσωρευτή επιτυγχάνεται η επίτευξη της επιθυμητής δύναμης απόσβεσης και παράλληλα με χρήση μιας υδραυλικής γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη με τον κινητήρα παράγεται ηλεκτρική ενέργεια που φορτίζει τις μπαταρίες του οχήματος.

Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μηχανικών-υδραυλικών συστημάτων είναι τα εξής:

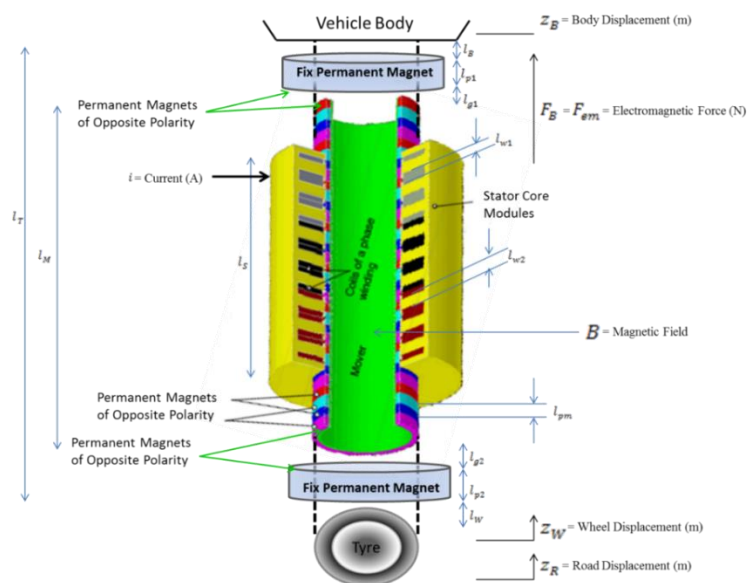
- Εύκολη προσαρμογή των συσσωρευτών στα υπάρχοντα συστήματα αποσβεστήρων
- Υψηλότερη συγκέντρωση ισχύος από τα ηλεκτρομαγνητικά
- Αποτελεσματικότερη μετάδοση ενέργειας- μειωμένες απώλειες
- Ανάκτηση ενέργειας κατά την έκταση και τη συμπίεση του αποσβεστήρα
- Οι συσσωρευτές μπορούν να τοποθετηθούν στο πλαίσιο του οχήματος μειώνοντας την μη αναρτώμενη μάζα του
- Αυξημένο βάρος και χώρος του συστήματος
- Μειωμένη απόκριση στις χαμηλές συχνότητες διέγερσης

1.3.2 Ηλεκτρομαγνητικά Συστήματα

Στα ηλεκτρομηχανικά συστήματα αναγεννησιακών αποσβεστήρων περιλαμβάνονται τα αμορτισέρ τα οποία μετατρέπουν την ανακτώμενη ενέργεια σε ηλεκτρική και την αποθηκεύουν σε μπαταρίες. Ο τρόπος με τον οποίο ανακτάται η ενέργεια ποικίλει και δεν στηρίζεται μόνο σε ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα αλλά και σε μηχανικά-υδραυλικά, ωστόσο η διαφορά αυτής της κατηγορίας με την προηγούμενη είναι ότι η εκμεταλλεύσιμη ενέργεια είναι πάντα ηλεκτρική. Τα ηλεκτρομηχανικά συστήματα έχουν επικρατήσει διότι είναι ευκολότερη η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, το βάρος τους είναι μικρότερο και ο βαθμός απόδοσης υψηλός. Επίσης εκμεταλλεύονται την ευκολία να αλλάζουν το μαγνητικό πεδίο εντός του αποσβεστήρα και κατ' επέκταση το συντελεστή αντίστασης χρησιμοποιούνται στις ημιενεργητικές και ενεργητικές αναρτήσεις. Οι πιο διαδεδομένες διατάξεις είναι αυτές που αναφέρονται στη συνέχεια και κατατάσσονται ανάλογα με το design τους στις ακόλουθες υποκατηγορίες.

- Direct drive linear electromagnetic suspension

Στη διάταξη αυτή αντί του κλασικού αποσβεστήρα χρησιμοποιείται ένας γραμμικός κινητήρας και σταθεροί μαγνήτες. Με τον τρόπο αυτό δεν χρειάζεται μετατροπή της γραμμικής κίνησης της ανάρτησης και η ανάκτηση ενέργειας γίνεται απευθείας στο χώρο του αποσβεστήρα. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι ότι ο κινητήρας- γεννήτρια μετατρέπει την κινητική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική (ως γεννήτρια) εκμεταλλεύομενη την κίνηση μέσα στο μαγνητικό πεδίο. Παράλληλα λαμβάνοντας πληροφόρηση από τα αισθητήρια όργανα ασκεί την κατάλληλη δύναμη απόσβεσης όπως μία τυπική ενεργητική ανάρτηση. Στην κατάσταση αυτή λειτουργεί ως κινητήρας και όχι ως γεννήτρια.



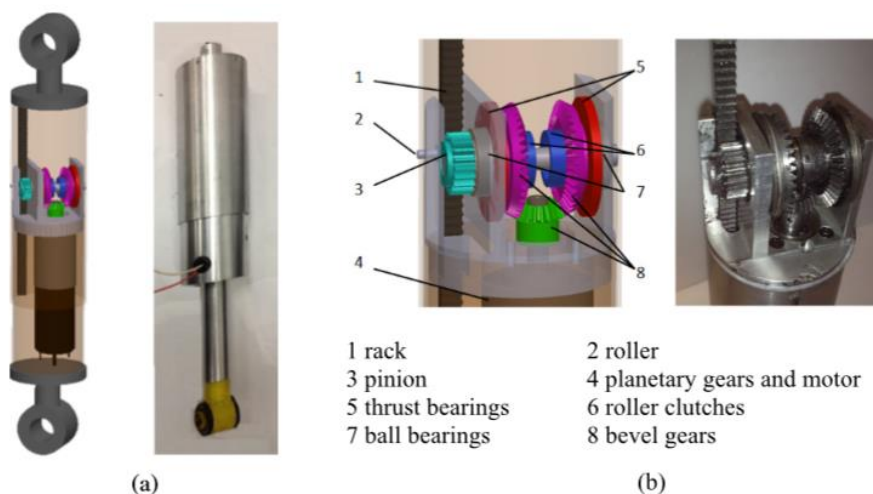
Εικόνα 14. Γραμμικός ηλεκτρομαγνητικός αποσβεστήρας

Έχουν παρουσιαστεί αρκετές παρόμοιες διατάξεις πάνω σε αυτό το μοντέλο όπως των Okada- Harada- Suzuki (1997) ή των Nakano- Suda- Nakadai (2003), καθώς επίσης και από την εταιρία Bose η οποία ανέπτυξε μία ανάρτηση αυτού του τύπου (με γραμμικό κινητήρα-γεννήτρια) και υποστηρίζει ότι καταναλώνει το 1/3 της ισχύος που χρειάζεται το σύστημα air condition ενός οχήματος.

Στα μειονεκτήματα αυτής της κατηγορίας είναι η χαμηλή συγκέντρωση ισχύος που μπορεί να επιτύχει η γραμμική γεννήτρια και ότι αν και πρόκειται για ένα αξιόπιστο σύστημα σε περίπτωση βλάβης το αμορτισέρ δεν λειτουργεί ως απλή παθητική ανάρτηση αλλά καταστρέφεται ολοσχερώς.

- Rotatory Regenerative Damper

Λόγω της χαμηλής δύναμης απόσβεσης που μπορεί να επιτευχθεί με τη διάταξη του γραμμικού κινητήρα αναπτύχθηκαν διαφορετικές διατάξεις που χρησιμοποιούν πάλι ένα κινητήρα-γεννήτρια αλλά περιστροφικό αυτή τη φορά. Στη σχεδίαση αυτή είναι φυσικά αναγκαία η μετατροπή (μετάδοση) της γραμμικής κίνησης του αμορτισέρ στην περιστροφική του κινητήρα και το ανάποδο. Ο πρώτος τύπος αυτού του είδους αμορτισέρ είναι η διάταξη Ball Screw Electromagnetic Suspension. Ο αποσβεστήρας αυτός χρησιμοποιεί τη διάταξη Ball-screw για την μετατροπή της γραμμικής κίνησης σε περιστροφική. Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος περιστρέφει τη βίδα και συνεργαζόμενη με το παξιμάδι ασκείται η επιθυμητή δύναμη απόσβεσης. Αντίστοιχη λειτουργία εκτελεί και η δεύτερη σχεδίαση αυτή του αμορτισέρ Rack-Pinion Electromagnetic Suspension. Η διαφορά έγκειται στο σύστημα μετάδοσης. Εδώ για τη μετατροπή της κίνησης χρησιμοποιείται ένας ατέρμονας κοχλίας και ένα σύστημα συνεργαζόμενων γραναζιών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με τη συγκεκριμένη διάταξη επιτυγχάνεται επαρκής δύναμη απόσβεσης ενώ η ταχύτητα ελέγχου του συστήματος και η αποτελεσματικότητα ως προς τη συμπεριφορά του οχήματος βελτιώθηκαν σημαντικά.

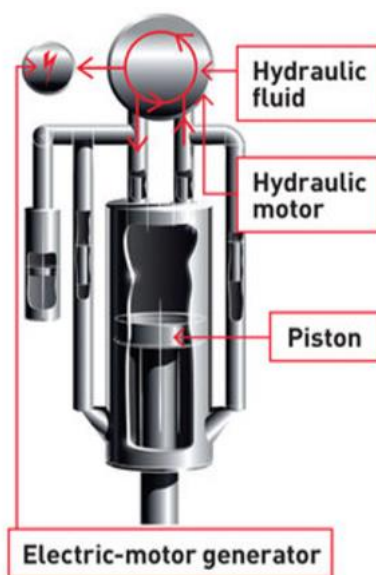


Εικόνα 15. Διάταξη περιστροφικού αποσβεστήρα με μετάδοση rack pinion

Στα πλεονεκτήματα των διατάξεων συγκαταλέγεται η ισχυρή δύναμη απόσβεσης και ο καλύτερος έλεγχος που μπορούν να επιτύχουν. Επίσης η χρήση απλών μικρών περιστροφικών κινητήρων τα καθιστά οικονομικότερα και μικρότερα σε όγκο. Ωστόσο τα κύρια μειονεκτήματα των δύο διατάξεων είναι το αυξημένο βάρος του αποσβεστήρα, οι μεγάλες απώλειες λόγω τριβών στα συστήματα μετάδοσης της κίνησης και κυρίως η αδυναμία ανάκτησης επαρκούς ενέργειας από τις μικρο-διεγέρσεις του εδάφους λόγω της μη αποτελεσματικότητας των διατάξεων αυτών σε υψηλές συχνότητες. Επίσης η συνεργασία των μηχανικών μερών καταπονεί το σύστημα μετάδοσης περιορίζοντας την αξιοπιστία τους.

- Hydraulic Transmission Electromagnetic Suspension

Η εταιρία Levant Power ανέπτυξε μία υδραυλική ανάρτηση που ανακτά ενέργεια με τη βοήθεια ενός υδραυλικού κινητήρα-γεννήτρια. Το έμβολο της ανάρτησης ωθεί το ρευστό να περάσει από μία πτερωτή η οποία με τη σειρά της περιστρέφει τον άξονα της γεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό παράγεται ηλεκτρική ενέργεια και αποθηκεύεται στις μπαταρίες του οχήματος. Οι δοκιμές που έγιναν σε φορτηγό με έξι αποσβεστήρες έδειξαν ότι είναι δυνατή η ανάκτηση ενέργειας έως 1 KW σε κανονικό δρόμο. Ο αποσβεστήρας αυτός έγινε η βάση για το ολοκληρωμένο σύστημα ενεργητικής ανάρτησης της εταιρίας με την ονομασία GenShock , το οποίο περιλαμβάνει μία υδραυλική αντλία, έναν ηλεκτρικό κινητήρα και ένα ολοκληρωμένο ηλεκτρονικό σύστημα που ελέγχει τη λειτουργία όλων των επενεργητών.



Εικόνα 16. Ανάρτηση υδραυλικού κινητήρα-γεννήτριας

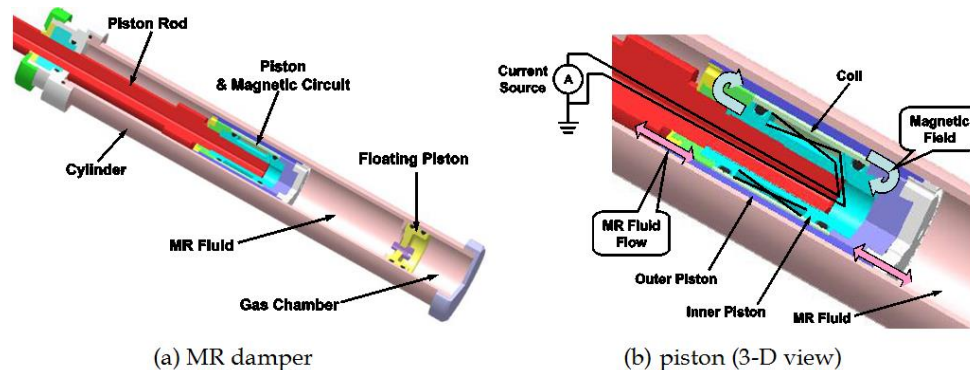
Με την κατάλληλη σύνδεση του υδραυλικού συστήματος επιτυγχάνεται σταθερή φορά περιστροφής της πτερωτής ανεξάρτητα της κατεύθυνσης κίνησης του εμβόλου,

ενισχύοντας την απόδοση του συστήματος. Η έλλειψη μηχανικών μερών για την μετάδοση της κίνησης και οι μειωμένες θερμοκρασίες στον αποσβεστήρα λόγω της μη διάχυσης της ενέργειας κάνουν το σύστημα περισσότερο αξιόπιστο και με λιγότερες απαιτήσεις συντήρησης.

- Self -Powered Magnetorheological Suspension

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα η τεχνολογία των μαγνητορεολογικών αναρτήσεων. Με τη χρήση εξειδικευμένων μαγνητικών ρευστών (MR fluids) και σύγχρονων ηλεκτρομαγνητών είναι δυνατός ο έλεγχος του συντελεστή απόσβεσης του αμορτισέρ ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται στους ηλεκτρομαγνήτες. Οι αποσβεστήρες αυτοί είναι δυνατόν να εφαρμόσουν ένα μεγάλο εύρος δύναμης απόσβεσης έχοντας μικρές απαιτήσεις ισχύος. Παράλληλα η απλότητα του μηχανισμού τους τα καθιστά αξιόπιστα και οικονομικά.

Ο Jung πρότεινε τη χρήση ενός αυτόνομου ενεργειακά MR damper, ο οποίος λειτουργεί ως εξής: Ο αποσβεστήρας αποτελείται από δύο ξεχωριστά- αυτόνομα συστήματα, ένα τυπικό αποσβεστήρα MR και ένα ηλεκτρομαγνητικό επαγωγέα (EMI). Ο ηλεκτρομαγνητικός επαγωγέας κατά την κίνηση του αποσβεστήρα ανακτά την κινητική ενέργεια μετατρέποντάς την σε ηλεκτρική, και στη συνέχεια τροφοδοτεί τον μαγνητορεολογικό αποσβεστήρα (MR) καλύπτοντας τις ενεργειακές του απαιτήσεις.



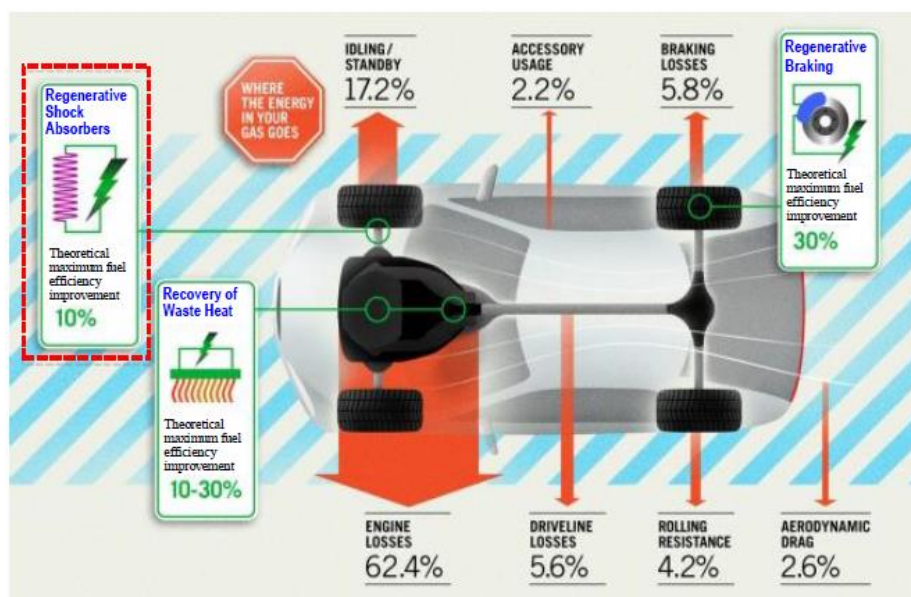
Εικόνα 17. Εσωτερικό MR damper

Κεφάλαιο 2^ο : Υπολογισμός Δυνητικά Ανακτώμενης Ενέργειας

Εισαγωγή

Το πρωταρχικό ζήτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να πραγματοποιηθεί μία διερεύνηση για το ποσό της ενέργειας που παράγεται στους αποσβεστήρες διαφόρων τύπων οχημάτων και κατά δεύτερον το ποσοστό της ενέργειας αυτής που μπορεί να ανακτηθεί. Τα τελευταία χρόνια είναι ολοένα και πιο δημοφιλείς οι “πράσινες” τεχνολογίες, δηλαδή τεχνολογίες και μέθοδοι που συνεισφέρουν στην προστασία του περιβάλλοντος και τον περιορισμό των ρύπων. Συγκεκριμένα στο τομέα των οχημάτων οι τεχνολογίες αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές καθώς η ρύπανση των πόλεων σχετίζεται άμεσα από τους ρύπους των οχημάτων. Παράλληλα η αύξηση του κόστους των καυσίμων σε παγκόσμια κλίμακα και η τάση για έρευνα σε νέες τεχνολογίες έχουν αναγκάσει τις αυτοκινητοβιομηχανίες να αναζητήσουν λύσεις που θα εξασφαλίζουν μεγαλύτερη οικονομία και λιγότερους ρύπους ώστε τα αυτοκίνητά τους να είναι πιο ανταγωνιστικά και να συμμορφώνονται με τους ολοένα αυστηρότερους περιβαλλοντικούς κανονισμούς αντίστοιχα.

Στα πλαίσια αυτής της έρευνας των αυτοκινητοβιομηχανιών, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες που έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τον περιορισμό των απωλειών κατά την κίνηση του οχήματος και την ανάκτηση ποσοστού της ενέργειας αυτής. Όπως φαίνεται και στο σχήμα έχουν αναπτυχθεί τεχνολογικές λύσεις που ανακτούν ενέργεια από κάθε σχεδόν υποσύστημα του αυτοκινήτου. Ο τομέας του συστήματος ανάρτησης εμφανίζει σημαντικές απώλειες και στο παρόν κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια προσέγγισης αυτού του ποσού της ενέργειας.



Εικόνα 18. Ροή ενέργειας στο όχημα και δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας

Σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ανακτώμενη ενέργεια είναι τα χαρακτηριστικά του οχήματος, τα χαρακτηριστικά της ανάρτησης (η επιλογή τους γίνεται με βάση τις επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας ανάλογα με την εφαρμογή), η ταχύτητα κίνησης και φυσικά το προφίλ του οδοστρώματος στο οποίο κινείται. Οι παράγοντες αυτοί αναλύονται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

2.1 Μοντελοποίηση Οδοστρώματος

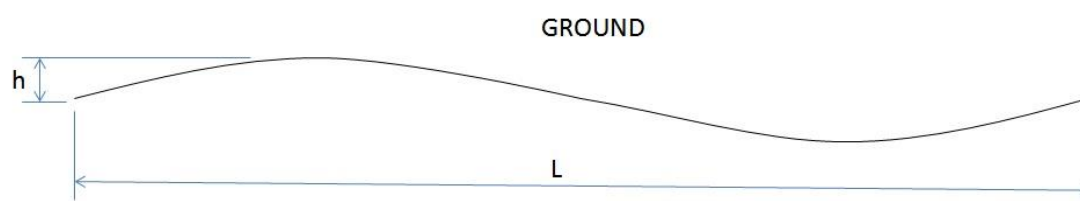
Το προφίλ του οδοστρώματος στο οποίο κινείται ένα όχημα επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί. Όπως είναι γνωστό, η βασική λειτουργία των συστημάτων ανάρτησης είναι να αποσβένουν τους κραδασμούς του εδάφους και να κρατούν τους τροχούς σε άμεση επαφή με το έδαφος. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι τα ελαστικά ακολουθούν το προφίλ του οδοστρώματος και η κίνηση αυτή μεταφέρεται στον αποσβεστήρα όπου γίνεται η καταστροφή της ενέργειας. Επομένως το προφίλ (ύψος) των ανωμαλιών του δρόμου και η συχνότητα εμφάνισής τους είναι η «είσοδος» του συστήματος ανάρτησης.

Στην παρούσα προσέγγιση, ο δρόμος μοντελοποιείται ως ημιτονοειδής είσοδος με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά πλάτους και συχνότητας.

Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία ένας τυπικός δρόμος μπορεί να παρασταθεί με τις εξής τιμές:

Η απόσταση μεταξύ των κορυφών $L=5-9$ μέτρα

Ύψος $h: 0.8-15$ mm



Εικόνα 19. Προφίλ οδοστρώματος

2..1.1 Power Spectral Density

Μία άλλη μέθοδος που προσδιορίζει ρεαλιστικά το προφίλ του δρόμου είναι η μέθοδος Power Spectral Density (PSD). Η μέθοδος αυτή αποτελεί ουσιαστικά μία γραφική παράσταση των πλατών της κατακόρυφης μετατόπισης των ανωμαλιών του δρόμου στο πεδίο της συχνότητας. Έχουν αναπτυχθεί πολλά διαφορετικά μοντέλα PSD ωστόσο τα αποτελέσματα έχουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Στην παρούσα εργασία τα διαφορετικά προφίλ του δρόμου επηρεάζουν αισθητά το ποσό της ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί. Στους υπολογισμούς έχουν χρησιμοποιηθεί δύο διαφορετικά προφίλ δρόμου. Το ένα που προσομοιώνει ένα τυπικό δρόμο του αστικού δικτύου και ένα που προσομοιώνει ένα σχετικά ομαλό χωματόδρομο όπως αυτός μπορεί να συναντηθεί σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή εργοστάσια. Επαναλαμβάνεται ότι είναι ιδιαίτερα

σημαντικός παράγοντας η εφαρμογή του εκάστοτε οχήματος και το περιβάλλον στο οποίο κινείται στην ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί. Για το ίδιο όχημα, με ίδια επιλογή αποσβεστήρων ενδέχεται η διαφορά της ανακτώμενης ενέργειας μεταξύ διαφορετικών προφίλ δρόμου να φτάνει το 400%.

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η προσέγγιση με τη μέθοδο PSD θέλει προσοχή καθώς οι περισσότερες προσεγγίσεις δίνονται στο πεδίο της συχνότητας. Αυτό σημαίνει ότι υπολογίζει τον αριθμό των διακυμάνσεων του πλάτους του δρόμου ανά διανυόμενη απόσταση. Επομένως ο αριθμός των διακυμάνσεων ανά δευτερόλεπτο (πεδίο χρόνου) εξαρτάται από την ταχύτητα του οχήματος. Για να μετατραπούν λοιπόν τα δεδομένα από το πεδίο της συχνότητας (Hz) σε ακτίνια rad/s απαιτείται ο πολλαπλασιασμός με τον όρο $2\pi V$. Αυτό είναι ένα επιπλέον πρόβλημα καθώς σε πραγματικές συνθήκες η ταχύτητα των οχημάτων δεν παραμένει σταθερή. Για την απλοποίηση του προβλήματος μπορούμε να θεωρήσουμε μία σταθερή ταχύτητα και να εφαρμόσουμε τη μέθοδο Tamboli. Η μέθοδος PSD τότε έχει τη μορφή:

$$G(f) = a e^{-bf} \quad (2.1)$$

Όπου a : περιγραφή της τραχύτητας του δρόμου

b : περιγραφή κατανομής του κύματος

f : αναφέρεται στη συχνότητα (Hz)

Οι τιμές των ανώτερων μεταβλητών βρίσκονται από τον Πίνακα ανάλογα με τον τύπο του δρόμου:

Road type	a (m ² /Hz)	b
Highway	4.85×10^{-4}	0.19
City	23.0244×10^{-4}	0.213

Πίνακας 1 Τιμές μεταβλητών για το μοντέλο PSD

Έτσι υπολογίζεται αρχικά η μέση τετραγωνική μετατόπιση-πλάτος των οδικών ανωμαλιών:

$$\bar{Z}^2 = \int_0^{(x)} G(f) df \quad (2.2)$$

Και για μία συγκεκριμένη συχνότητα η μέση απόκλιση προκύπτει:

$$\bar{Z}_{1,f_n} = \sqrt{\int_{f_n - \frac{h}{2}}^{f_n + \frac{h}{2}} G(f) df} \quad (2.3)$$

Όπου f_n : η μέση συχνότητα του εύρους συχνοτήτων

h : το εύρος συχνοτήτων

Η εξίσωση περιγράφει το πλάτος των ανωμαλιών του δρόμου για ένα δεδομένο εύρος συχνοτήτων. Η μέση τιμή της πραγματικής απόκρισης των τροχών του οχήματος σχετίζεται με το πλάτος των ανωμαλιών του εδάφους στο ίδιο όμως εύρος συχνοτήτων. Η μέση τιμή της συνάρτησης απόκρισης συχνότητας (FRF-frequency response function) προκύπτει:

$$\bar{H}_{f_n} = \frac{1}{h} \int_{f_n - \frac{h}{2}}^{f_n + \frac{h}{2}} |H_{u(\omega)}| df \quad (2.4)$$

Όπου ω γνωστόν: $\omega = 2\pi f$ (rad/s)

Επομένως η απόκριση της μη αναρτώμενης μάζας του οχήματος υπολογίζεται:

$$\bar{Z}_{2,f_n} = \bar{Z}_{1,f_n} \times \bar{H}_{f_n} \quad (2.5)$$

Τέλος με αντικατάσταση των ανωτέρω εξισώσεων προκύπτει ο τελικός τύπος:

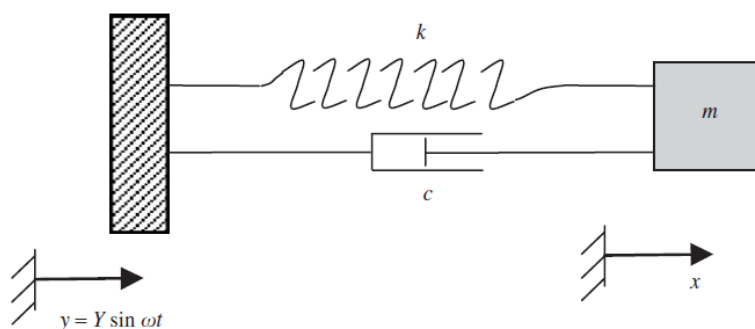
$$R_{\frac{1}{4}} = \frac{k_t}{\left(\frac{m_{\frac{1}{4}}}{4} + m_u\right)g} \sqrt{\sum_{n=1}^k (\bar{Z}_{1,f_n} - \bar{Z}_{2,f_n})^2} \quad (2.6)$$

2.2 Μοντέλο Ανάρτησης Οχήματος -Base excitation

Για μία αρχική προσέγγιση της ενέργειας που ανακτάται στην ανάρτηση μπορεί να κατασκευαστεί το εξής απλουστευμένο μοντέλο. Είναι ένα μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας το οποίο αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Συγκεντρωμένη μάζα η οποία θα αντιστοιχεί στο 25% του βάρους του οχήματος χωρίς να γίνεται διαχωρισμός μεταξύ της αναρτώμενης και μη αναρτώμενης μάζας.
- Ελατήριο K
- Αποσβεστήρας C
- Επιβολή κινηματικής διέγερσης της βάσης (που αντιστοιχεί στο έδαφος). Η κινηματική διέγερση (μετατόπιση) δημιουργεί τη δύναμη που επενεργεί στο σύστημα. Η μετατόπιση της βάσης θεωρούμε ότι ακολουθεί ημιτονοειδή καμπύλη με βάση τις τιμές από τη βιβλιογραφία.

Η σχηματική απεικόνιση φαίνεται στο σχήμα:



Εικόνα 20. Μοντέλο 1 BE- base excitation

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση της μάζας δίνεται από τον τύπο:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.7)$$

Και πολλαπλασιάζοντας με την ταχύτητα κίνησης της μάζας x'

$$k(y - x)\dot{y} + c(\dot{y} - \dot{x})\dot{y} = c(\dot{x} - \dot{y})^2 + m\dot{x}\ddot{x} + k(x - y)(\dot{x} - \dot{y}) \quad (2.8)$$

ή

$$k(y - x)\dot{y} + c(\dot{y} - \dot{x}) = c(\dot{x} - \dot{y})^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{k(x - y)^2}{2} \right) \quad (2.9)$$

Η εξίσωση αυτή αποτελεί έκφραση της διατήρησης της ενέργειας. Η στιγμιαία ισχύς του συστήματος είναι ίση κάθε στιγμή με την ενέργεια που απορροφάται-καταστρέφεται στον αποσβεστήρα συν την αύξηση της κινητικής ενέργειας και των παραμορφώσεων (δυναμική) του μοντέλου.

Ο συντελεστής απόσβεσης χωρίζεται σε δύο κατηγορίες στον ηλεκτρικό και μηχανικό συντελεστή απόσβεσης. Όπως φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση ο συντελεστής απόσβεσης c , εμφανίζεται και στις δύο πλευρές τις εξίσωσης. Η φυσική ερμηνεία είναι ότι συμμετέχει τόσο στη μεταφορά της ενέργειας από το περιβάλλον στη διάταξη ενώ συμμετέχει ταυτόχρονα στη διάχυση της.

Η ενέργεια που εισφέρει στον αποσβεστήρα ανά κύκλο λειτουργίας, μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδέν στην περίπτωση του συντονισμού. (συχνότητα διέγερσης ίση με συχνότητα διέγερσης). Επιπρόσθετα, ο μηχανικός συντελεστής απόσβεσης δεν μπορεί να παρέχει περισσότερη ενέργεια από αυτήν που καταστρέφει.

Επιλύοντας την εξίσωση ως προς την απόλυτη μετατόπιση της του αποσβεστήρα, δηλαδή τη σχετική μετατόπιση μεταξύ μάζας και εδάφους, $z=x-y$ και εφαρμόζοντας την ημιτονοειδή είσοδο στο έδαφος $y=Y\sin(\omega t)$ γίνεται:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = m\omega^2 Y \sin \omega t \quad (2.10)$$

Η λύση μόνιμης κατάστασης είναι:

$$z = Z \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.11)$$

όπου

$$Z = \frac{m\omega^2 Y}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + c^2 \omega^2}} \quad (2.12)$$

Αντίστοιχα η μετατόπιση της μάζας υπολογίζεται ως $x=y+z$ και η απόκριση της μόνιμης κατάστασης είναι:

$$x = X \sin(\omega t - \psi) \quad (2.13)$$

$$X = \frac{\sqrt{k^2 + c^2 \omega^2}}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + c^2 \omega^2}} \quad (2.14)$$

Και η διαφορά φάσης

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{m c \omega^3}{k(k - \omega^2 m) + c^2 \omega^2} \right) \quad (2.15)$$

Στην περίπτωση της κινηματικής εισόδου (base excitation) μπορούν να οριστούν δύο διαφορετικές συχνότητες συντονισμού. Η μάζα, δηλαδή, το όχημα στην προκειμένη περίπτωση αποκτά τη μέγιστη μετατόπιση του όταν διεγείρεται με συχνότητα

$$\omega_R = \frac{\omega_n}{2\zeta} \left(\sqrt{1+8\zeta^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (2.16)$$

Η συχνότητα αυτή είναι πάντα μικρότερη από την φυσική συχνότητα χωρίς απόσβεση και αναπτύσσοντας τη ρίζα ως διωνυμικό πολυώνυμο και απορρίπτοντας τους όρους ανώτερης της δεύτερης τάξης προκύπτει η συχνότητα συντονισμού $\omega_R = \omega_n$ ενώ αγνοώντας τους όρους 4ης τάξης και πάνω προκύπτει:

$$\sqrt{1+8\zeta^2} = 1 + 4\zeta^2 - 8\zeta^4 + 32\zeta^8 - \dots \quad \text{και} \quad \omega_R = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-2\zeta^2}} \quad (2.17)$$

Η στιγμιαία ισχύς που παραλαμβάνεται από τον αποσβεστήρα είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας κίνησης του $c(x)^2$

$$\text{Και επομένως : } P_{ins} = c\omega^2 X^2 \cos^2(\omega t - \varphi) \quad (2.18)$$

Η Ενέργεια που αποθηκεύεται ανά κύκλο λειτουργίας είναι:

$$E_{cycle} = cX^2 \omega^2 \int_0^{\tau=2\pi/\omega} \cos^2(\omega t - \varphi) dt = \pi c \omega X^2 \quad (2.19)$$

Όπου $\tau=2\pi/\omega$ (περίοδος της κίνησης)

Η μέση ροή ισχύος υπολογίζεται $P_{av} = E_{cycle}/\tau$ και άρα

$$P_{ins} = c\omega^2 Z^2 / 2 = \zeta m \omega_n \omega^2 Z^2 \quad (2.20)$$

Με αντικατάσταση του πλάτους Z της ταλάντωσης

$$P_{av} = \frac{cm^2 \omega^6 Y^2}{2((k - \omega^2 m)^2 + c^2 \omega^2)} \quad (2.21)$$

και σε αδιάστατη μορφή ο τελικός τύπος είναι

$$P_{av} = \frac{m\zeta Y^2 (\omega / \omega_n)^3 \omega^3}{(1 - (\omega / \omega_n)^2)^2 + (2\zeta \omega / \omega_n)^2} = \frac{m\zeta Y^2 (\omega / \omega_n)^6 \omega_n^3}{(1 - (\omega / \omega_n)^2)^2 + (2\zeta \omega / \omega_n)^2} \quad (2.22)$$

Παρατηρήσεις

Η ισχύς η οποία καταστρέφεται στον αποσβεστήρα (και άρα μπορεί μέρος αυτής να ανακτηθεί) εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι οποίοι είναι χαρακτηριστικά του οχήματος και του προφίλ του οδοστρώματος.

Κύρια συμμετοχή στο ποσό της ενέργειας έχει η συχνότητα εμφάνισης των διεγέρσεων από το οδόστρωμα και το κατά πόσο είναι κοντά η συχνότητα αυτή (διέγερσης) με την φυσική συχνότητα του οχήματος.

Με τη σειρά της η φυσική συχνότητα εξαρτάται από τη μάζα του οχήματος και τα χαρακτηριστικά της ανάρτησης (σκληρότητα ελατηρίου).

Επίσης μεγάλη επιρροή έχει το πλάτος των ανωμαλιών του δρόμου.

Στην θεωρητική περίπτωση του συντονισμού (που φυσικά σε πραγματικές συνθήκες είναι εξαιρετικά δύσκολο να συμβεί για μεγάλο χρονικό διάστημα) η ισχύς θα προέκυπτε: $P_{av} = \omega_n^3 m Y^2 / (4\zeta)$

Ο συνολικός συντελεστής απόσβεσης (ένα μέρος του οποίου είναι η μηχανική απόσβεση) συντελεί ένα σύνθετο ρόλο τόσο στην απορρόφηση και διάχυση της ενέργειας που λαμβάνει από το περιβάλλον αλλά και τον τρόπο μεταφοράς της μετατόπισης από τη βάση (έδαφος) στην αναρτώμενη μάζα.

Αποδεικνύεται ότι η καθαρή ροή ενέργειας από το έδαφος στον αποσβεστήρα είναι άλλοτε θετική ($\omega > \omega_n$), άλλοτε αρνητική ($\omega < \omega_n$) και μηδενική στην περίπτωση συντονισμού $\omega = \omega_n$.

Επίσης η ενέργεια η οποία μπορεί να παραλάβει το μηχανικό τμήμα του αποσβεστήρα είναι μικρότερο πάντα από το ποσό ενέργειας που μπορεί να διαχύσει.

Ένα σύστημα ανάρτησης με μεγάλη ικανότητα απόσβεσης (υψηλό συντελεστή απόσβεσης) μπορεί να απορροφήσει ενέργεια σε ένα μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων μεγαλύτερων ή μικρότερων της φυσικής συχνότητας ωστόσο η συγκομιδή ενέργειας θα είναι μικρότερη.

2.3 Αποτελέσματα

Η ανάλυση που προηγήθηκε στο κεφάλαιο αυτό έγινε ώστε να ευρεθεί μία μαθηματική έκφραση που να δίνει την ενέργεια-ισχύ που μπορεί να απορροφάται από το σύστημα ανάρτησης ενός οχήματος. Η μοντελοποίηση που προηγήθηκε όπως αναφέρθηκε είναι ενός βαθμού ελευθερίας και παρουσιάζει σε απλουστευμένη μορφή τον μηχανισμό.

Είναι σημαντικός ο προσδιορισμός του ποσού της ενέργειας ανά τύπο οχήματος. Το ποσό της ενέργειας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες τόσο του οχήματος όσο και του οδοστρώματος.

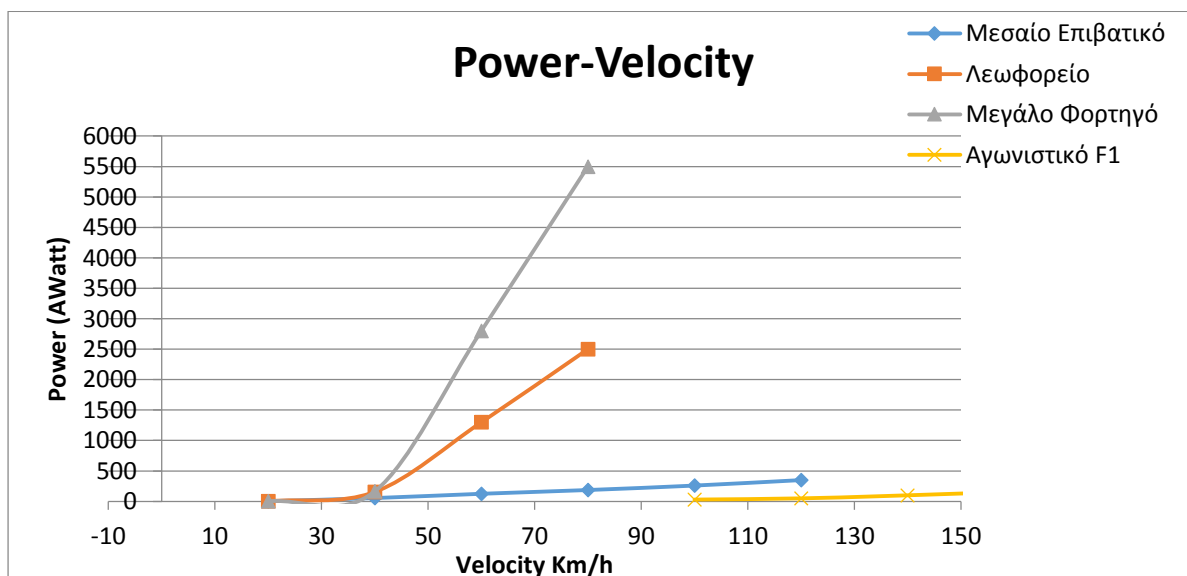
Χρησιμοποιήθηκαν τιμές από τη βιβλιογραφία για τέσσερις διαφορετικούς τύπους οχημάτων ώστε να γίνει η σύγκριση μεταξύ τους. Η σύγκριση αυτή είναι σημαντική διότι θέτει τον τεχνολογικό στόχο, δηλαδή σε ποιες περιπτώσεις έχει αξία η προσπάθεια για ανάκτηση ενέργειας από το σύστημα ανάρτησης.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές των χαρακτηριστικών της ανάρτησης που χρησιμοποιήθηκαν, (σκληρότητα ελατηρίου, συντελεστής απόσβεσης), η μάζα του οχήματος και ο λόγος απόσβεσης ζ .

Vehicle Type	Total Mass m(kg)	Damping Coefficient C (Ns/m)	Spring Stiffness K (N/m)	Damping ratio ζ
Μεσαίο Επιβατικό	1800	1000	15000	0,23
Λεωφορείο	5000	7000	200000	0,25
Μεγάλο Φορτηγό	12000	25000	650000	0,21
Αγωνιστικό F1	780	6000	100000	0,65

Πίνακας 2 Τιμές Χαρακτηριστικών Οχημάτων

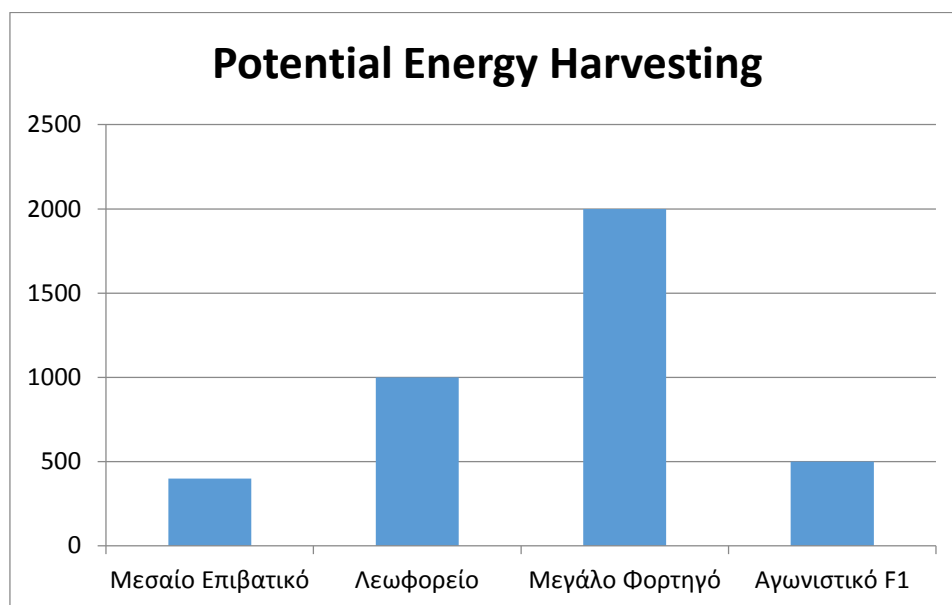
Τα αποτελέσματα φαίνονται στο εξής διάγραμμα:



Διάγραμμα 1. Ισχύς διαφορετικών τύπων Οχημάτων ανά Ταχύτητα Κίνησης

Για το τυπικό προφίλ οδοστρώματος που έχει χρησιμοποιηθεί και για τους συγκεκριμένους λόγους απόσβεσης ($\zeta=0.2-0.45$) παρατηρούμε ότι η ισχύς και η ταχύτητα είναι ανάλογα μεγέθη. Για κάθε τύπο οχήματος χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις ένα φυσιολογικό εύρος ταχυτήτων που εναρμονίζεται κάθε φορά με την εκάστοτε εφαρμογή.

Τα ποσοτικά αποτελέσματα ήταν τα εξής. Η μέση τιμή της ισχύος (σε Watt) που είναι διαθέσιμη προς ανάκτηση σε κάθε εφαρμογή είναι:



Διάγραμμα 2. Δυνατότητα Ανάκτησης Ενέργειας ανά Όχημα

Ήδη από την περίπτωση του μεσαίου επιβατικού οχήματος παρατηρούμε ότι μπορούν να ανακτηθούν έως 400W ισχύος, ποσό που θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό και μπορεί να προσφέρει μείωση της κατανάλωσης του οχήματος.

Στις περιπτώσεις των μεγαλύτερων οχημάτων όπως λεωφορεία και βαρέα φορτηγά τα αποτελέσματα είναι ακόμη πιο ενθαρρυντικά. Το ποσό της ισχύος μπορεί να φτάσει και τα 2.5-3.0 KW.

2.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μία πρώτη ποσοτική προσέγγιση της ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί από το σύστημα των αναρτήσεων. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε ήταν όπως αναφέρθηκε ένα απλοποιημένο δυναμικό μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας που είχε ως στόχο μία ποσοτική προσέγγιση και όχι την πλήρη περιγραφή του φαινομένου η οποία επιχειρείται στη συνέχεια.

Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά αφού έδειξαν ότι η ισχύς που μπορεί να ανακτηθεί σε ένα επιβατικό όχημα φτάνει τα 400W ενώ σε μεγαλύτερες εφαρμογές όπως λεωφορεία ή μεγάλα φορτηγά μπορεί να φτάσει τα 3 KW.

Επομένως τα κύρια συμπεράσματα του κεφαλαίου είναι ότι η τεχνολογία ανάκτησης ενέργειας από τα συστήματα ανάρτησης αξίζει περαιτέρω έρευνας ενώ παράλληλα γίνεται κατανοητή και η κατεύθυνση της τεχνολογίας αυτής σε οχήματα μεγάλης μάζας.

Κεφάλαιο 3^ο : Υπολογιστικός Κώδικας Προσομοίωσης του Συστήματος Ανάρτησης

Εισαγωγή

Τα συστήματα ανάρτησης αποτελούν από μηχανολογική σκοπιά δυναμικά συστήματα. Για τη μελέτη των δυναμικών συστημάτων έχουν αναπτυχθεί διαφορετικά δυναμικά μοντέλα τα οποία προσομοιώνουν τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε διάταξης. Στον τομέα των οχημάτων χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα ανάλογα με το επίπεδο προσέγγισης και σφάλματος που επιθυμεί ο μηχανικός. Έτσι υπάρχουν απλοποιημένα δυναμικά μοντέλα ενός βαθμού ελευθερίας έως το πλήρες μοντέλο ενός οχήματος (full-car model) το οποίο αποτελείται από επτά βαθμούς ελευθερίας.

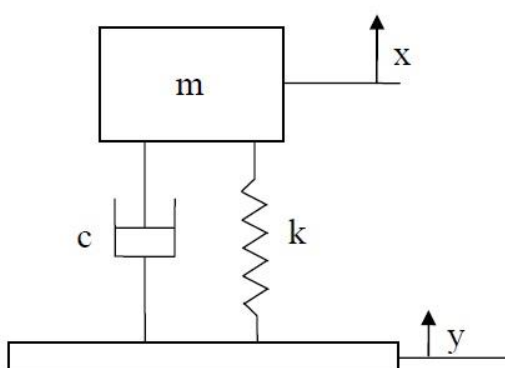
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά και σύγκριση ορισμένων από αυτά τα δυναμικά μοντέλα ενώ αναλύεται εκτενώς το μοντέλο του Quarter Car Model δύο βαθμών ελευθερίας το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσέγγιση της κίνησης της ανάρτησης και του οχήματος.

Ο προγραμματισμός του μοντέλου έγινε στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab και ο κώδικας επισυνάπτεται στο παράρτημα 'Α' στο τέλος της εργασίας.

3.1 Εξισώσεις Κίνησης

Τα κυριότερα μοντέλα προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων που χρησιμοποιούνται στις υπολογιστικές προσομοιώσεις είναι τα ακόλουθα.

3.1.1 Quarter Car Model – 1 βαθμός ελευθερίας



Εικόνα 21. Quarter car model – 1 BE

Το μοντέλο αυτό αποτελεί μία απλή προσέγγιση καθώς έχει μόνο ένα βαθμό ελευθερίας. Λέγεται Quarter Car Model καθώς η αναρτώμενη μάζα αναφέρεται στο

25% της συνολικής μάζας του οχήματος, όση δηλαδή προσεγγιστικά παραλαμβάνει ο κάθε ένας τροχός.

Η εξίσωση κίνησης έχει μορφή

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} = \omega_n^2 x = \omega_n^2 f(t) \quad (3.1)$$

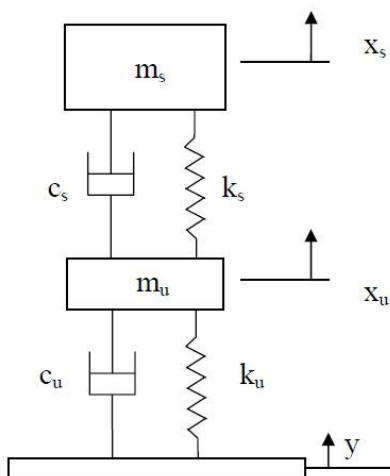
Όπου

$$f(t) = \frac{2\xi}{\omega_n} \dot{y}(t) + y(t) \quad (3.2)$$

3.1.2 Quarter Car Model-2 βαθμών ελευθερίας

Το μοντέλο αυτό είναι το δημοφιλέστερο στην μελέτη των οχημάτων καθώς συνδυάζει αξιόπιστα αποτελέσματα με καλή προσέγγιση και ιδιαίτερα απλό υπολογιστικό τρόπο.

Το μοντέλο έχει 2 βαθμούς ελευθερίας καθώς γίνεται διαχωρισμός της αναρτώμενης και μη αναρτώμενης μάζας του οχήματος. Δηλαδή, ο τροχός, τα ελαστικά και τα μέρη της ανάρτησης που είναι αναρτώμενα στο πλαίσιο του οχήματος προσομοιώνονται ως μία ξεχωριστή μάζα που συνδέεται με το ελατήριο και τον αποσβεστήρα με το υπόλοιπο πλαίσιο. Όπως δηλαδή συμβαίνει και στην πραγματικότητα. Η μη αναρτώμενη μάζα επίσης συνδέεται με ένα ελατήριο και αποσβεστήρα με το έδαφος προσομοιώνοντας έτσι τη συμπεριφορά του ελαστικού. Στην εργασία αυτή αμελήθηκε ο όρος της απόσβεσης του ελαστικού καθώς η συνεισφορά του είναι ιδιαίτερα μικρή.



Εικόνα 22. Quarter car model – 2 BE

Οι εξισώσεις κίνησης που περιγράφουν το μοντέλο είναι οι εξής:

(σε επόμενη παράγραφο αναφέρεται αναλυτικά η διαδικασία με την οποία προκύπτουν).

$$m_s \ddot{x}_s = -k_s (x_s - x_u) - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) \quad (3.3)$$

$$m_u \ddot{x}_u = k_s (x_s - x_u) + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) - k_u (x_u - y) - c_u (\dot{x}_u - \dot{y}) \quad (3.4)$$

Η κάθε εξίσωση αναφέρεται αντίστοιχα στις δύο μάζες.

Από τη μητρωϊκή μορφή των εξισώσεων μπορούν να υπολογιστούν τα μητρώα μάζας, ακαμψίας και απόσβεσης αντίστοιχα τα οποία διαμορφώνονται ως:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_u \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

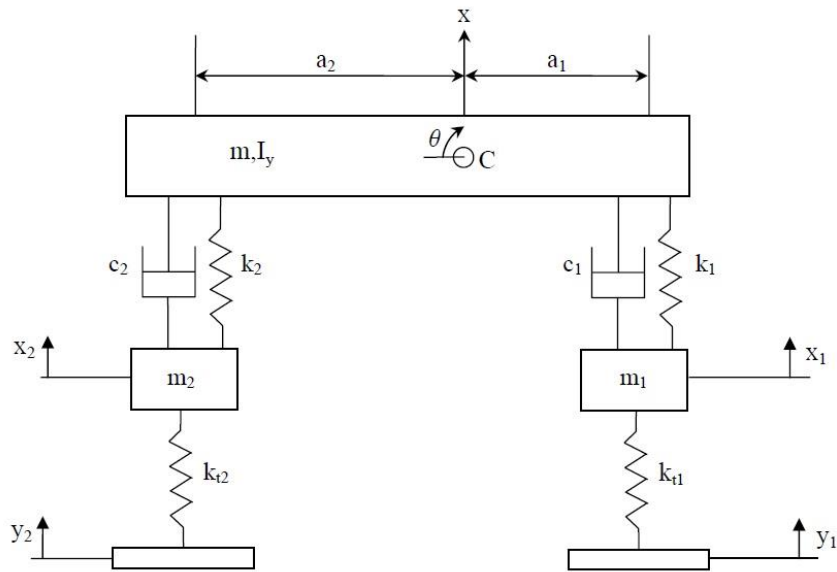
$$[K] = \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_u \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_s & -c_s \\ c_s & c_s + c_u \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.1.3 Bicycle Car Model-4 βαθμοί ελευθερίας

Το μοντέλο του ποδηλάτου περιλαμβάνει τους τροχούς της ίδια πλευράς του οχήματος και ως αναρτώμενη μάζα τη μισή μάζα του οχήματος. Το πλεονέκτημα του μοντέλου είναι ότι επιτρέπει τη μελέτη της επίδρασης της περιστροφής του οχήματος κατά τον εγκάρσιο άξονα που προκαλεί αντίστοιχες επιταχύνσεις οι οποίες δεν μελετώνται με το μοντέλο του Quarter Car Model.

Στο σχήμα απεικονίζεται η μορφή του μοντέλου.



Εικόνα 23. Bicycle car model – 4 BE

Και οι εξισώσεις κίνησης σε αυτή την περίπτωση είναι:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c_1(\dot{x} - \dot{x}_1 - a_1\dot{\theta}) + c_2(\dot{x} - \dot{x}_2 - a_2\dot{\theta}) \\ + k_1(x - x_1 - a_1\theta) + k_2(x - x_2 - a_2\theta) = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

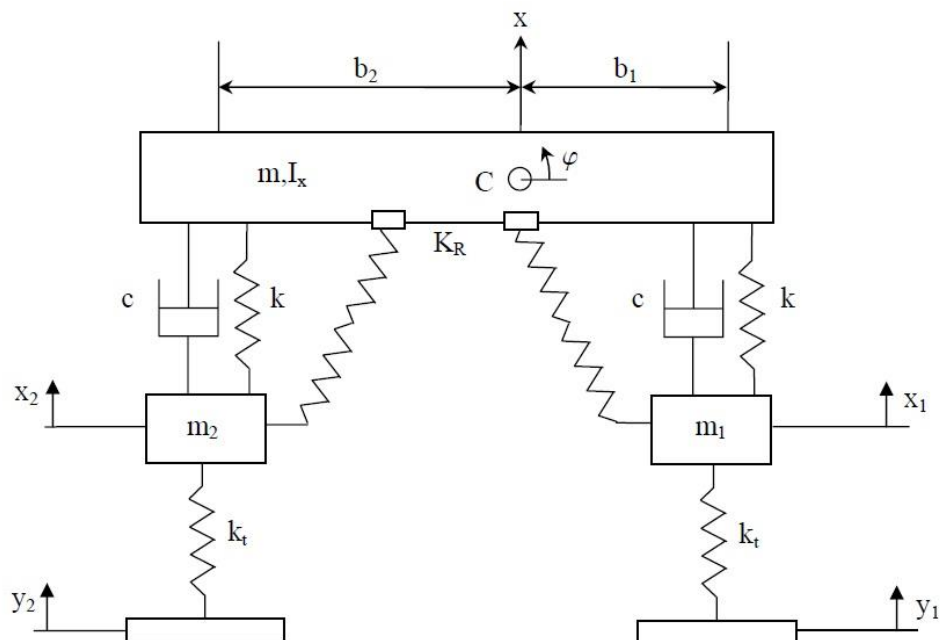
$$\begin{aligned} I_z\ddot{\theta} - a_1c_1(\dot{x} - \dot{x}_1 - a_1\dot{\theta}) + a_2c_2(\dot{x} - \dot{x}_2 - a_2\dot{\theta}) \\ - a_1k_1(x - x_1 - a_1\theta) + a_2k_2(x - x_2 - a_2\theta) = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$m_1\ddot{x}_1 - c_1(\dot{x} - \dot{x}_1 - a_1\dot{\theta}) + k_{t1}(x_1 - y_1) - k_1(x - x_1 - a_1\theta) = 0 \quad (3.10)$$

$$m_2\ddot{x}_2 - c_2(\dot{x} - \dot{x}_2 - a_2\dot{\theta}) + k_{t2}(x_2 - y_2) - k_2(x - x_2 - a_2\theta) = 0 \quad (3.11)$$

3.1.4 Half Car Model- 4 βαθμοί ελευθερίας

Αντίστοιχα με το μοντέλου ποδηλάτου είναι και το μοντέλο του Half Car Model. Περιλαμβάνει τους δύο τροχούς του ίδιου άξονα και συνδεδεμένους με την μάζα του οχήματος που αντιστοιχεί στον άξονα αυτόν. Κατά αντιστοιχία λοιπόν με το προηγούμενο μοντέλο, στην περίπτωση αυτή μελετάται η επίδραση των κλίσεων του οχήματος κατά τον διαμήκη άξονά του.



Εικόνα 24. Half car model – 4 BE

Οι Εξισώσεις κίνησης διαμορφώνονται ως εξής:

$$m_1 \ddot{x}_1 - c(\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1 \dot{\varphi}) + k_t(x_1 - y_1) - k(x - x_1 + b_1 \varphi) = 0 \quad (3.12)$$

$$I_x \ddot{\varphi} + b_1(\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1 \dot{\varphi}) - b_2 c(\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2 \dot{\varphi}) + b_1 k(x - x_1 - b_1 \varphi) - b_2 k(x - x_2 - b_2 \varphi) + K_R \varphi = 0 \quad (3.13)$$

$$m \ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{x}_1 - b_1 \dot{\varphi}) + c(\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2 \dot{\varphi}) + k(x - x_1 - b_1 \varphi) + k(x - x_2 - b_2 \varphi) = 0 \quad (3.14)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - c(\dot{x} - \dot{x}_2 + b_2 \dot{\varphi}) + k_t(x_2 - y_2) - k(x - x_2 + b_2 \varphi) = 0 \quad (3.15)$$

Και από τη μητρική μορφή λαμβάνονται τα αντίστοιχα μητρώα με το μοντέλο του Quarter Car Model.

3.2 Υπολογισμός Φυσικών Συχνοτήτων

Ο προσδιορισμός των φυσικών συχνοτήτων για κάθε όχημα είναι μέγιστης σημασίας καθώς η διαφορά της φυσικής του συχνότητας από τη συχνότητα των διεγέρσεων καθορίζει τη συμπεριφορά του οχήματος και τον τρόπο με τον οποίο αλληλοεπιδρά το όχημα με το περιβάλλον του.

Ο υπολογισμός των φυσικών συχνοτήτων γίνεται από τις εξισώσεις κίνησης του εκάστοτε μοντέλου αμελώντας τον όρο της απόσβεσης.

Γενικά οι φυσικές συχνότητες υπολογίζονται επιλύοντας την εξίσωση (η οποία προέρχεται από τις εξισώσεις κίνησης χωρίς απόσβεση).

$$([K] - \omega^2 [M])\{X\} = 0 \quad (3.16)$$

Και επομένως πρέπει να επιλυθεί η ορίζουσα:

$$\det([K] - \omega^2 [M]) = 0 \quad (3.17)$$

Συγκεκριμένα λοιπόν οι φυσικές συχνότητες σε αντιστοιχία με τα παραπάνω μοντέλα προκύπτουν:

- Quarter Car Model – 1 βαθμός ελευθερίας

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad (3.18)$$

- Quarter Car Model – 2 βαθμών ελευθερίας

$$\det \begin{bmatrix} k_s - m_s \omega^2 & -k_s \\ -k_s & k_s + k_u - m_u \omega^2 \end{bmatrix} = 0 \quad (3.19)$$

- Bicycle Car Model-4 βαθμοί ελευθερίας

$$\det \begin{bmatrix} k_1 + k_2 - m\omega^2 & -a_1k_1 + a_2k_2 & -k_1 & -k_2 \\ -a_1k_1 + a_2k_2 & a_1^2k_1 + a_2^2k_2 - I_z\omega^2 & a_1k_1 & -a_2k_2 \\ -k_1 & a_1k_1 & k_1 + k_2 - m_1\omega^2 & 0 \\ -k_2 & -a_2k_2 & 0 & k_2 + k_{t2} - m_2\omega^2 \end{bmatrix} = 0 \quad (3.20)$$

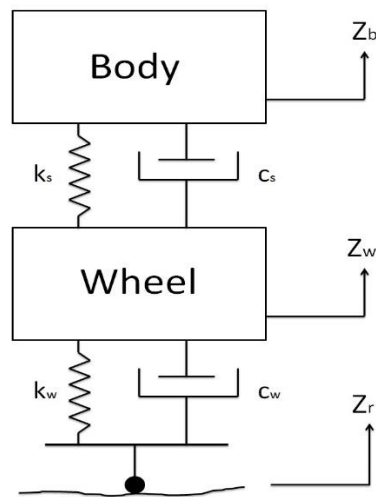
- Half Car Model- 4 βαθμοί ελευθερίας

$$\det \begin{bmatrix} 2k - m\omega^2 & b_1k - b_2k & -k & -k \\ b_1k - b_2k & b_1^2k + b_2^2k + kR - I_x\omega^2 & -b_1k & b_2k \\ -k & -b_1k & k + k_t - m_1\omega^2 & 0 \\ -k & b_2k & 0 & k + k_t - m_1\omega^2 \end{bmatrix} = 0 \quad (3.21)$$

3.3 Ανάπτυξη Υπολογιστικού Μοντέλου- Matlab

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε υπολογιστικός κώδικας που αποσκοπεί στην προσομοίωση της κίνησης της αναρτημένης και μη αναρτώμενης μάζας του οχήματος καθώς κινείται σε έδαφος με ημιτονοειδή μορφή. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά προς υπολογισμό ήταν η ισχύς που αναπτύσσεται στον αποσβεστήρα και που μπορεί επομένως να ανακτηθεί αντί να καταστρέφεται.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, όπως αναφέρθηκε, είναι αυτό του Quarter Car Model – 2 βαθμών ελευθερίας.

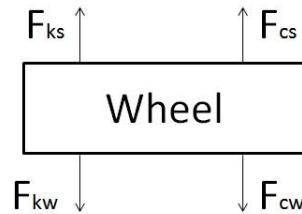


Εικόνα 25. Quarter car model που χρησιμοποιήθηκε στο υπολογιστικό μοντέλο

Στο εδάφιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος εύρεσης όλων των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των επιθυμητών χαρακτηριστικών ενώ στο

παράρτημα της εργασίας βρίσκεται ολόκληρος ο κώδικας. Να σημειωθεί ότι η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων ήταν η μέθοδος Runge-Kutta 4^{ης} τάξης.

Πρώτο βήμα της ανάλυσης είναι η σχεδίαση και ο υπολογισμός των Δ.Ε.Σ. των μαζών της διάταξης.



Εικόνα 26. Δ.Ε.Σ. μη αναρτώμενης μάζας

Για την μη αναρτώμενη μάζα ισχύουν:

$$\Sigma F_W = F_{ks} + F_{cs} - F_{kw} - F_{cw} = m_w \ddot{Z}_w \quad (3.22)$$

Από το ΔΕΣ της μάζας:

$$F_{ks} = K_s (Z_B - Z_w) \quad (3.23)$$

$$F_{kw} = K_w (Z_w - Z_R) \quad (3.24)$$

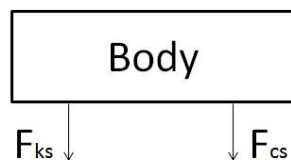
$$F_{cs} = C_s (\dot{Z}_B - \dot{Z}_w) \quad (3.25)$$

$$F_{cw} = C_w (\dot{Z}_w - \dot{Z}_R) \quad (3.26)$$

Και άρα:

$$m_w \ddot{Z}_w = K_s (Z_B - Z_w) + C_s (\dot{Z}_B - \dot{Z}_w) - K_w (Z_w - Z_R) - C_w (\dot{Z}_w - \dot{Z}_R) \quad (3.27)$$

Αντίστοιχα για την αναρτώμενη μάζα από το ΔΕΣ ισχύουν:



Εικόνα 27. Δ.Ε.Σ. αναρτώμενης μάζας

$$\Sigma F_B = -F_{ks} - F_{cs} \quad (3.28)$$

$$m_B \ddot{Z}_B = -K_s (Z_B - Z_w) - C_s (\dot{Z}_B - \dot{Z}_w) \quad (3.29)$$

Με τη μεθοδολογία αυτή προκύπτουν οι εξισώσεις κίνησης του μοντέλου για κάθε έναν από τους βαθμούς ελευθερίας.

$$\text{Body: } m_B \ddot{Z}_B + C_s (\dot{Z}_B - \dot{Z}_w) + K_s (Z_B - Z_w) = 0 \quad (3.30)$$

$$\text{Wheel: } m_w \ddot{Z}_w + C_s (\dot{Z}_w - \dot{Z}_B) + K_s (Z_w - Z_B) + K_w (Z_w - Z_R) = 0 \quad (3.31)$$

Από την παραπάνω μορφή των εξισώσεων είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι δυνάμεις απόσβεσης και ελατηρίου αντίστοιχα.

$$F_{spring} = K_s (Z_B - Z_w) \quad (3.32)$$

$$F_{Damper} = C_s (\dot{Z}_B - \dot{Z}_w) \quad (3.33)$$

Γίνονται οι μετασχηματισμοί:

$$Z_B - Z_R = x_B \quad (3.34)$$

$$Z_w - Z_R = x_w \quad (3.35)$$

$$Z_B - Z_w = x_B - x_w = x \quad (3.36)$$

και με αντικατάσταση στις εξισώσεις προκύπτει:

$$m_B \ddot{x}_B + C_s (\dot{x}_B - \dot{x}_w) + K_s (x_B - x_w) = -m_B \ddot{Z}_R \quad (3.37)$$

$$m_w \ddot{x}_w + C_s (\dot{x}_w - \dot{x}_B) + K_s (x_w - x_B) + K_w x_w = -m_w \ddot{Z}_R \quad (3.38)$$

Η μητρική μορφή είναι:

$$\begin{bmatrix} m_B & 0 \\ 0 & m_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_B \\ \ddot{x}_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & -C_s \\ -C_s & C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_B \\ \dot{x}_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -K_s \\ -K_s & K_s + K_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B \\ x_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_B \ddot{Z}_R \\ -m_w \ddot{Z}_R \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Όπου

$$Z_w = X_R \cos(\omega t) \quad (3.40)$$

$$\ddot{Z}_w = a_w = -\omega^2 x_R \cos(\omega t) \quad (3.41)$$

Στον προσδιορισμό της απόκρισης φυσικά παίζει σημαντικό ρόλο το προφίλ του οδοστρώματος και η ταχύτητα κίνησης του οχήματος η οποία επηρεάζει τη συχνότητα διέγερσης αφού ισχύει:

$$\omega = 2\pi \frac{U_B}{L_R} \quad (3.42)$$

Με αντικατάσταση της ημιτονοειδούς εισόδου:

$$Z_w = X_R \cos(\omega t) \quad (3.42)$$

Οι φυσικές συχνότητες υπολογίζονται με επίλυση της εξίσωσης

$$\det([K] - \omega^2 [M]) = 0 \quad (3.43)$$

Και τελικά προκύπτουν:

$$\omega_{n1}^2 = \frac{B_1 - \sqrt{B_1^2 - 4A_1C_1}}{2A_1} \quad (3.44)$$

$$\omega_{n2}^2 = \frac{B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4A_1C_1}}{2A_1} \quad (3.45)$$

Όπου

$$A_1 = m_B m_w \quad (3.46)$$

$$B_1 = m_B K_s + m_B K_w + K_s m_w \quad (3.47)$$

$$C_1 = K_s K_w \quad (3.48)$$

Για την επίλυση των εξισώσεων θεωρώ το μετασχηματισμό

$$\begin{aligned} x_1 &= x_B & \dot{x}_1 &= \dot{x}_2 \\ x_2 &= \dot{x}_B & \dot{x}_2 &= -a_w - F_s / m_B \\ x_3 &= x_w & \text{και επομένως ισχύουν οι ισότητες} & \dot{x}_3 &= \dot{x}_4 \\ x_4 &= \dot{x}_w & & \dot{x}_4 &= -a_w + \frac{F_s}{m_B} - K_w \frac{x_w}{m_B} \end{aligned} \quad (3.49)$$

Οι δυνάμεις των δύο στοιχείων, του αποσβεστήρα και του ελατηρίου βρίσκονται:

$$F_s = C_s (\dot{x}_B - \dot{x}_w) + K_s (x_B - x_w) \quad (3.50)$$

$$F_w = K_w x_s = K_w x_3 \quad (3.51)$$

Και τελικά η ισχύς είναι:

$$P_s = F_s(\dot{x}_B - \dot{x}_s) \quad (3.52)$$

$$P_{av} = \frac{P_s}{t} \quad (3.53)$$

3.4 Αποτελέσματα

Το υπολογιστικό μοντέλο έτρεξε για δύο διαφορετικά οχήματα, ένα μεσαίο επιβατικό όχημα και ένα λεωφορείο. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι του μοντέλου φαίνονται στον πίνακα:

	Επιβατικό Όχημα	Λεωφορείο
Sprung Mass	370 Kg	1000 Kg
Unsprung Mass	70 Kg	200 Kg
Spring Stiffness	35.000 N/m	180.000 N/m
Tyre Stiffness	190.000 N/m	350.000 N/m
Damping Ratio	0.2	0.2

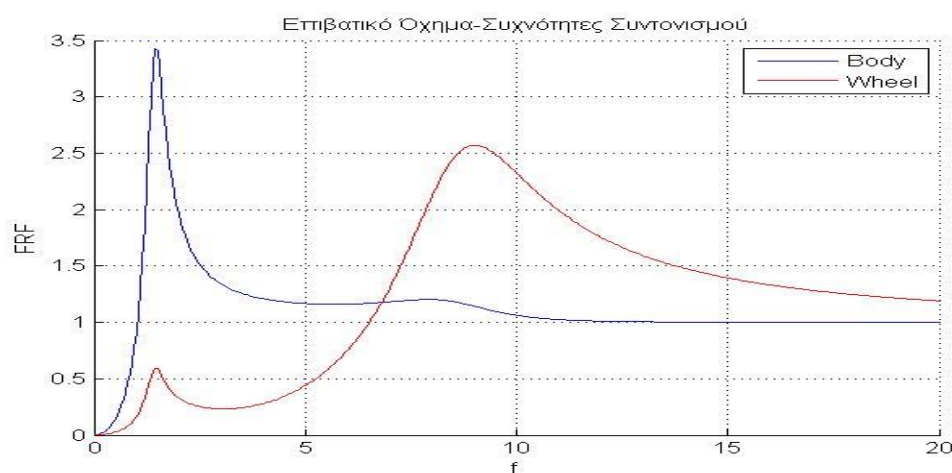
Πίνακας 3Τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό μοντέλο

Η διαδικασία επαναλήφθηκε για 3 διαφορετικές ταχύτητες. Τα διαγράμματα που υπολογίστηκαν σε κάθε περίπτωση αφορούν στις συχνότητες συντονισμού, στις μετατοπίσεις και ταχύτητες των μαζών (αναρτώμενη και μη αναρτώμενη) του οχήματος, στις δυνάμεις του αποσβεστήρα και του ελατηρίου.

Τα διαγράμματα που προέκυψαν παρουσιάζονται ομαδοποιημένα ανά τύπο διαγράμματος ώστε να γίνεται ευκολότερη η μεταξύ τους σύγκριση.

3.4.1 Επιβατικό Όχημα

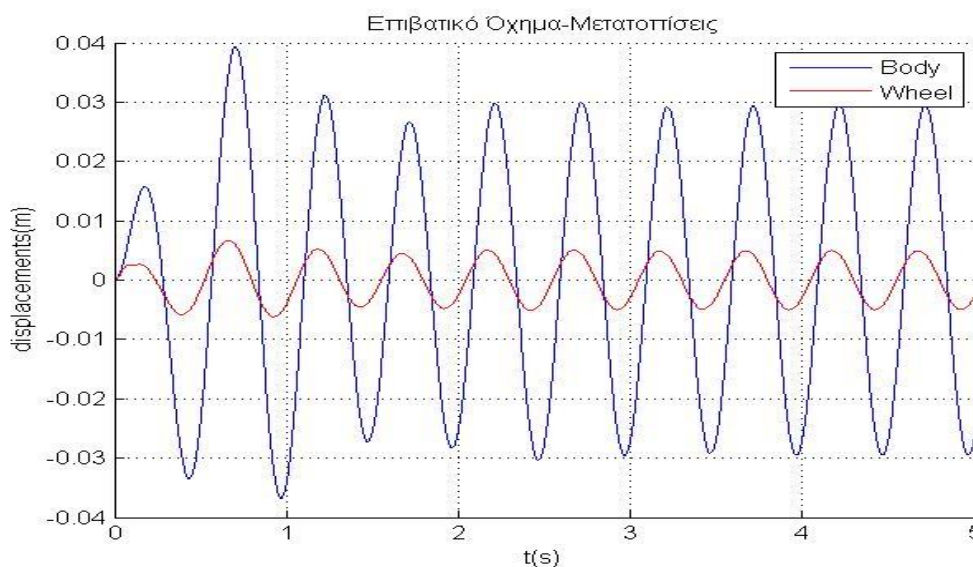
Αρχικά για το επιβατικό όχημα ελήφθησαν τα διαγράμματα για ταχύτητα 30 Km/h:



Διάγραμμα 3. Απόκριση Συχνότητων για Επιβατικό Όχημα

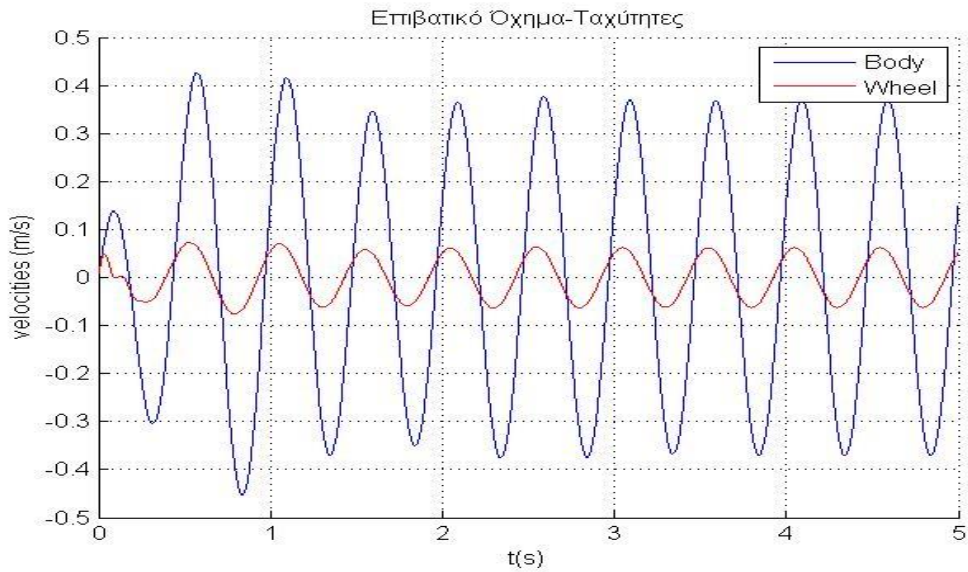
Διάγραμμα Συχνοτήτων: Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται το πλάτος των ταλαντώσεων για ένα εύρος συχνοτήτων διέγερσης. Οι ιδιοσυχνότητες του επιβατικού οχήματος υπολογίστηκαν ως $f_1= 1.4318$ Hz και $f_2= 8.739$ Hz. Η πρώτη ιδιοσυχνότητα αφορά την αναρτώμενη μάζα (body) ενώ η δεύτερη την μη αναρτώμενη (Wheel) του οχήματος. Οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων κρίνονται φυσιολογικές καθώς η πλειοψηφία των οχημάτων επιδιώκει ιδιοσυχνότητα αναρτώμενης μάζας γύρω στο 1-1.5 Hz διότι στο εύρος αυτό επιτυγχάνεται άνεση των επιβατών. Παράλληλα η φυσική συχνότητα της μη αναρτώμενης μάζας κυμαίνεται στα 8-11 Hz για την εξασφάλιση της ασφάλειας του οχήματος.

Το διάγραμμα δεν επηρεάζεται από την ταχύτητα κίνησης του οχήματος οπότε δεν επαναλαμβάνεται στην περίπτωση των άλλων ταχυτήτων.



Διάγραμμα 4. Μετατοπίσεις Μαζών Επιβατικού Οχήματος- 30 Km/h

Οι μετατοπίσεις της αναρτώμενης μάζας και της μη αναρτώμενης μάζας. Παρατηρείται ότι το πλάτος των ταλαντώσεων της αναρτώμενης μάζας είναι μεγαλύτερη από αυτή των τροχών για τη συγκεκριμένη συχνότητα διέγερσης. Για διαφορετική ταχύτητα ή άλλο προφίλ οδοστρώματος το πλάτος των δύο μεταβάλλεται ανάλογα με την σχέση της ιδιοσυχνότητας της κάθε μάζας με την συχνότητα διέγερσης.

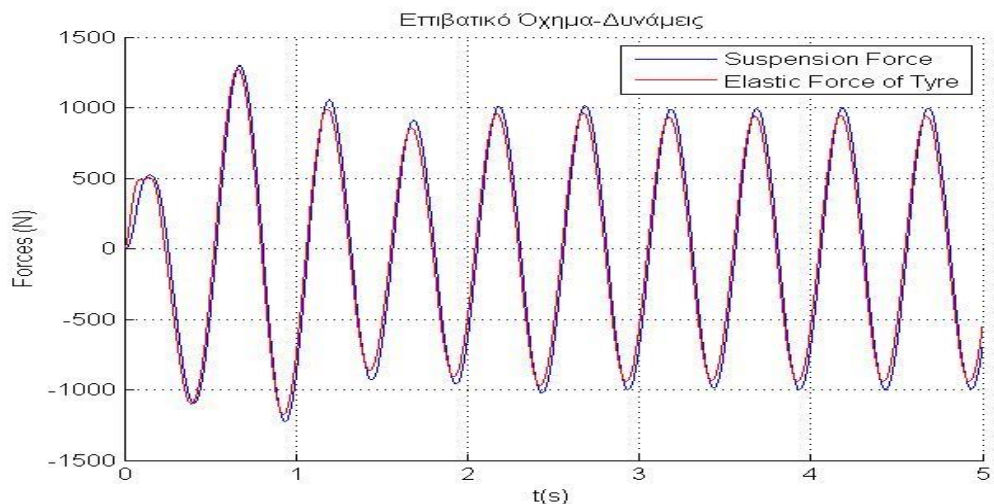


Διάγραμμα 5. Ταχύτητες Μαζών Επιβατικού Οχήματος- 30Km/h

Οι ταχύτητες των δύο μαζών ακολουθούν όπως ήταν αναμενόμενο τη μορφή των μετατοπίσεων. Η ταχύτητα με την οποία κινείται ο αποσβεστήρας προκύπτει από τη διαφορά κάθε στιγμή της ταχύτητας της αναρτώμενης και μη αναρτώμενης μάζας. Αυτή είναι και η ταχύτητα η οποία είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της ενέργειας που καταστρέφεται στον αποσβεστήρα. Υπενθυμίζεται ότι

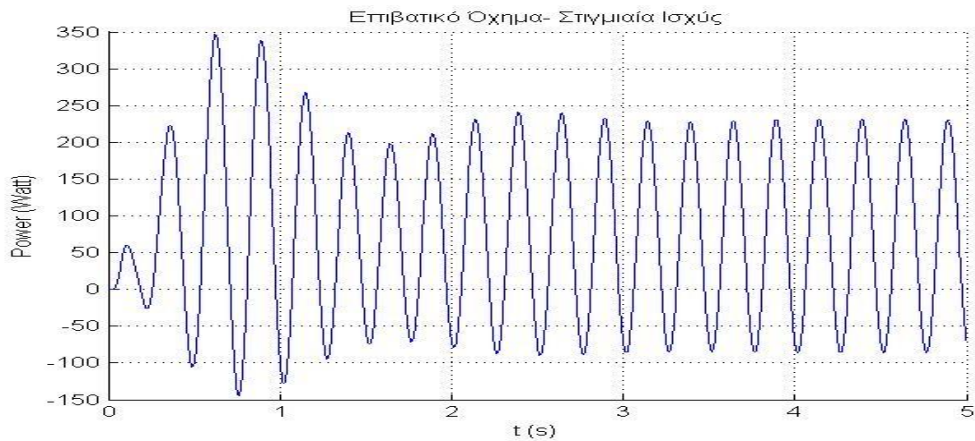
$$P = F_d (V_b - V_w) = C_d (V_b - V_w)^2 \quad (3.54)$$

Οι τιμές της ταχύτητας 0.3-0.4 m/s που εμφανίζονται είναι στα φυσιολογικά πλαίσια των τιμών που καταγράφονται στη βιβλιογραφία.



Διάγραμμα 6. Δυνάμεις αποσβεστήρα και ελαστικού για επιβατικό όχημα- 30Km/h

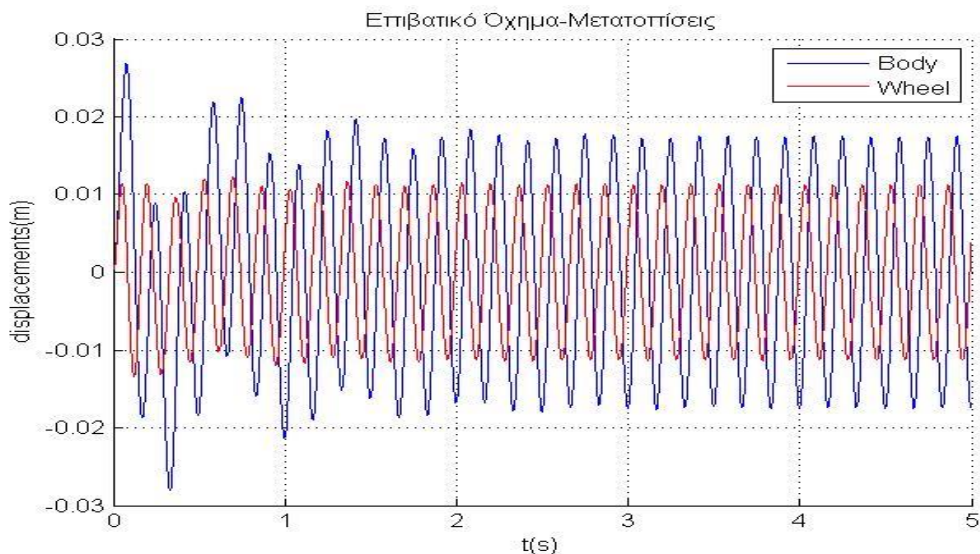
Δυνάμεις: Στο διάγραμμα χαράσσονται οι δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται στα δύο παθητικά στοιχεία του μοντέλου, στο ελατήριο και στον αποσβεστήρα. Το πλάτος της δύναμης προσεγγίζει τα 1000N .



Διάγραμμα 7. Στιγμιαία Ισχύς για επιβατικό όχημα- 30Km/h

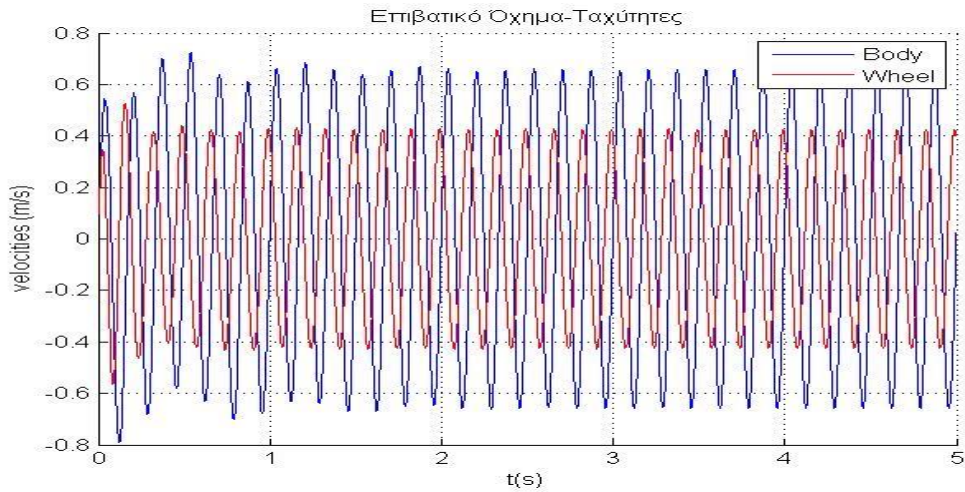
Ισχύς: Στο διάγραμμα αυτό χαράσσεται η στιγμιαία ισχύς (Instant Power- P_s) του αποσβεστήρα. Το ολοκλήρωμα των τιμών του διαγράμματος ως προς τον χρόνο δίνει την μέση αποσβενόμενη ισχύ. $P_{av} = P_s/t$

Για ταχύτητα 90Km/h τα αντίστοιχα διαγράμματα είναι:



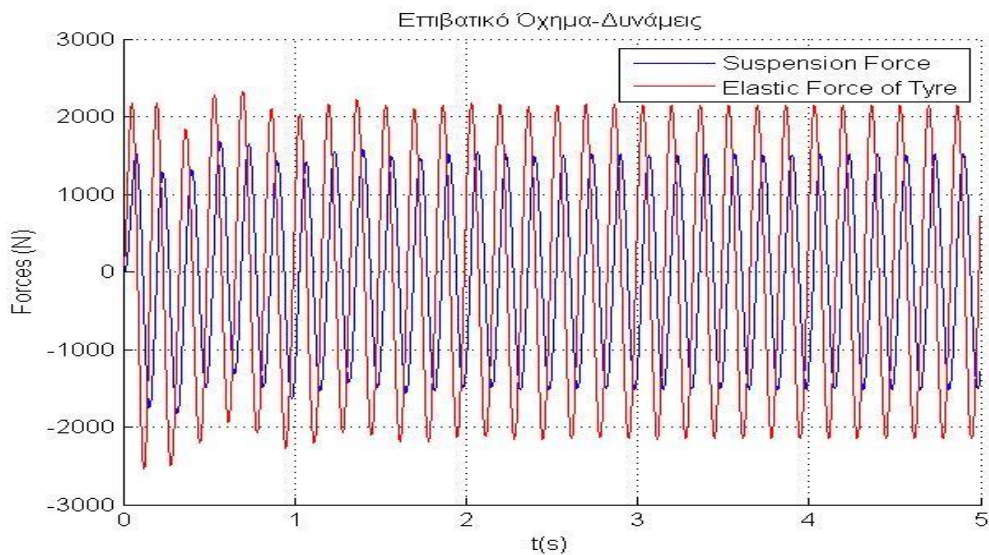
Διάγραμμα 8. Μετατοπίσεις Μαζών για επιβατικό όχημα-90Km/h

Μετατόπιση: Στο διάγραμμα των μετατοπίσεων παρατηρείται διαφορά σε σχέση με το αντίστοιχο για ταχύτητα κίνησης 30Km/h. Η μετατόπιση της αναρτώμενης μάζας έχει μειωθεί ενώ αντίθετα αυξάνεται αυτή της μη αναρτώμενης μάζας. Η διαφορά οφείλεται στην αλλαγή της συχνότητας διέγερσης.



Διάγραμμα 9. Ταχύτητες Μαζών για επιβατικό όχημα-90Km/h

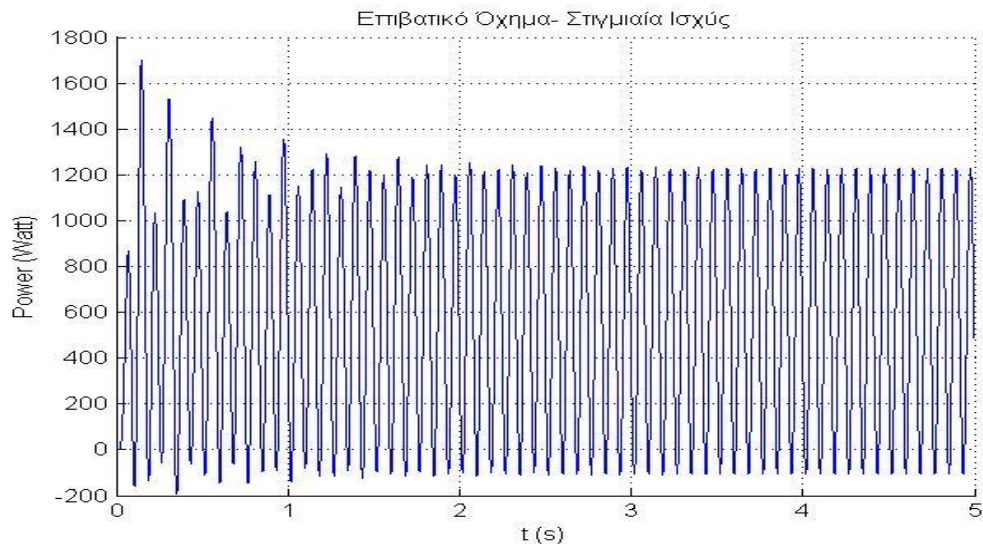
Ταχύτητα: Η ταχύτητα των δύο μαζών είναι αισθητά αυξημένες σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.



Διάγραμμα 10. Δυνάμεις αποσβεστήρα και ελαστικού για επιβατικό όχημα- 90Km/h

Δύναμη: Οι δυνάμεις είναι επίσης αυξημένες. Η δύναμη του αποσβεστήρα έχει πλάτος περίπου 1400 N σε αντίθεση με τα 1000 N για την ταχύτητα των 30Km/h.

Το ίδιο συμβαίνει και για τη δύναμη η οποία αναπτύσσεται στο ελαστικό.



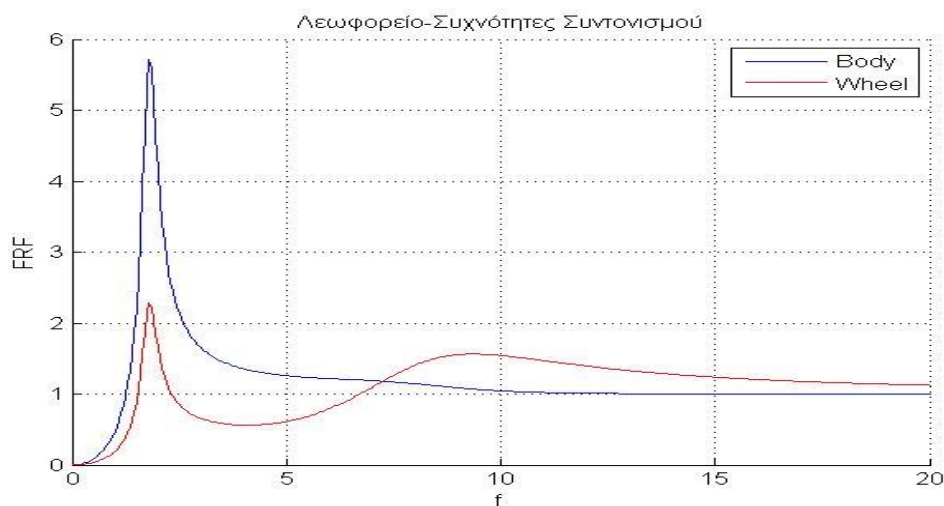
Διάγραμμα 11. Στιγμιαία Ισχύς για επιβατικό όχημα- 90Km/h

Ισχύς: Η στιγμιαία ισχύς έχει την ίδια μορφή όπως ήταν αναμενόμενο αλλά με μεγαλύτερο πλάτος. Για τον λόγο αυτό τελικά προκύπτει ότι η μέση αποσβενόμενη ισχύς για ταχύτητα κίνησης του οχήματος με 90Km/h είναι μεγαλύτερη από αυτή των 30Km/h.

3.4.2 Λεωφορείο

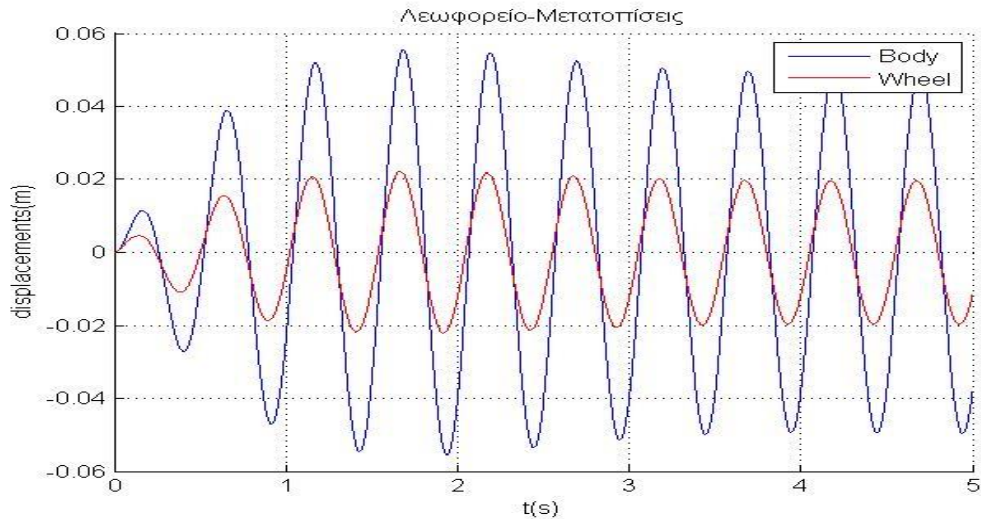
Παρουσιάζονται επίσης τα διαγράμματα που προέκυψαν για τις ίδιες ταχύτητες για την περίπτωση του λεωφορείου.

Λεωφορείο- Ταχύτητα 30 Km/h



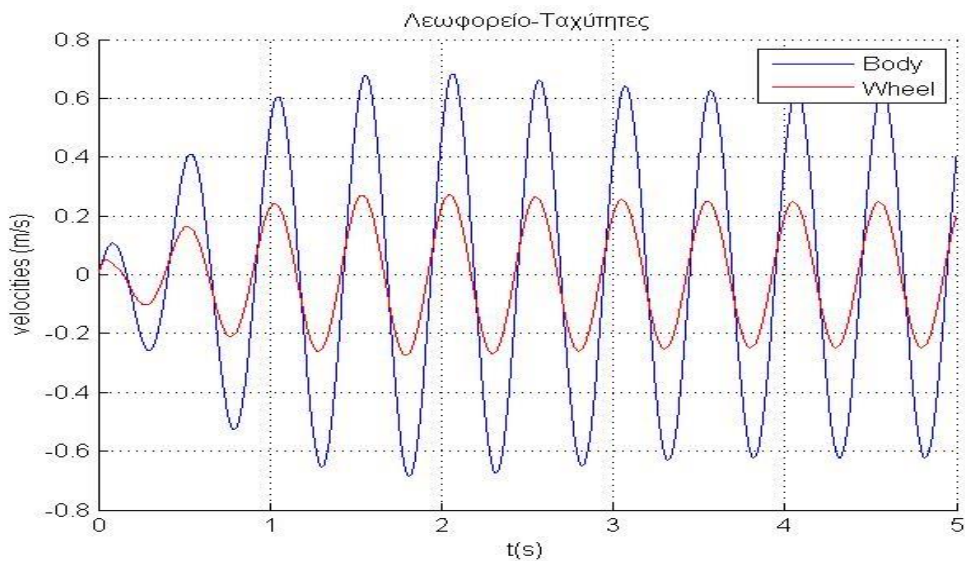
Διάγραμμα 12. Απόκριση Συχνότητων για λεωφορείο

Ιδιοσυχνότητες: Στην περίπτωση του λεωφορείου οι ιδιοσυχνότητες της αναρτώμενης και μη αναρτώμενης μάζας προκύπτουν ως: $f_1=1.55\text{Hz}$ και $f_2=7.30\text{Hz}$.



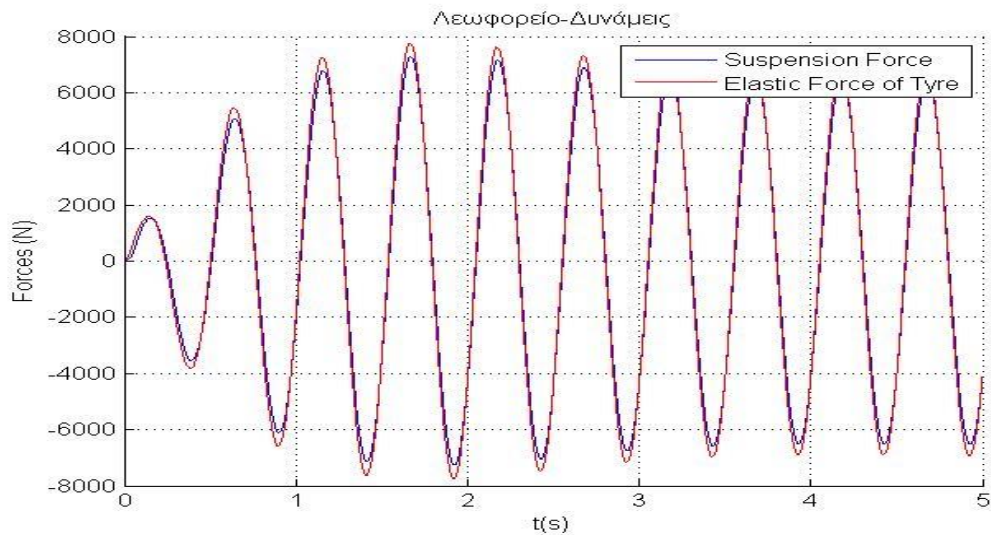
Διάγραμμα 13. Μετατόπιση Μαζών για λεωφορείο-30Km/h

Μετατοπίσεις: Οι μετατοπίσεις των μαζών του λεωφορείου είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις του επιβατικού οχήματος. Ο λόγος απόσβεσης μπορεί να παραμείνει ίδιος 0.2 και στις δύο περιπτώσεις ωστόσο οι ιδιοσυχνότητες του λεωφορείου είναι πιο κοντά στη συχνότητα διέγερσης.



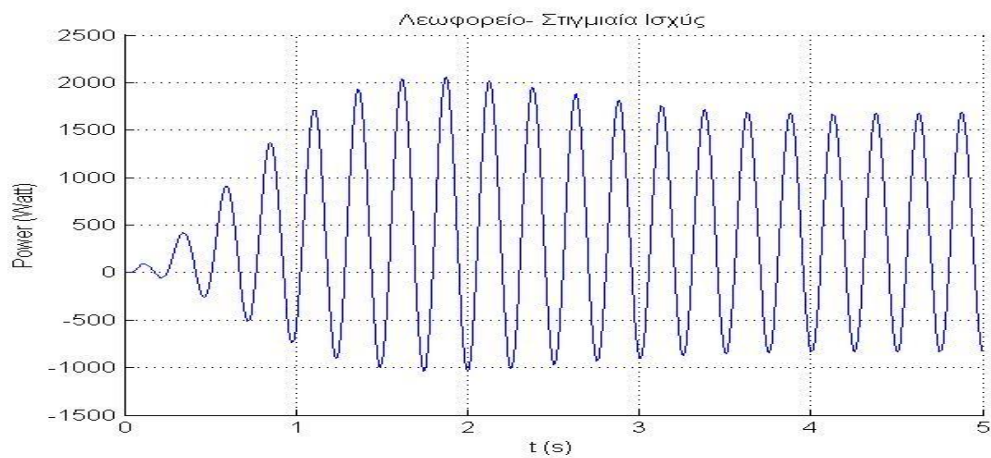
Διάγραμμα 14. Ταχύτητες Μαζών για λεωφορείο-30Km/h

Ταχύτητες: αντίστοιχα είναι αυξημένες και οι ταχύτητες των μαζών. Και σε αυτήν την περίπτωση ωστόσο η ταχύτητα του αποσβεστήρα παραμένει σχεδόν ίδια στα επίπεδα των 0.3-0.4 m/s.



Διάγραμμα 15. Δυνάμεις αποσβεστήρα και ελαστικού για λεωφορείο-30Km/h

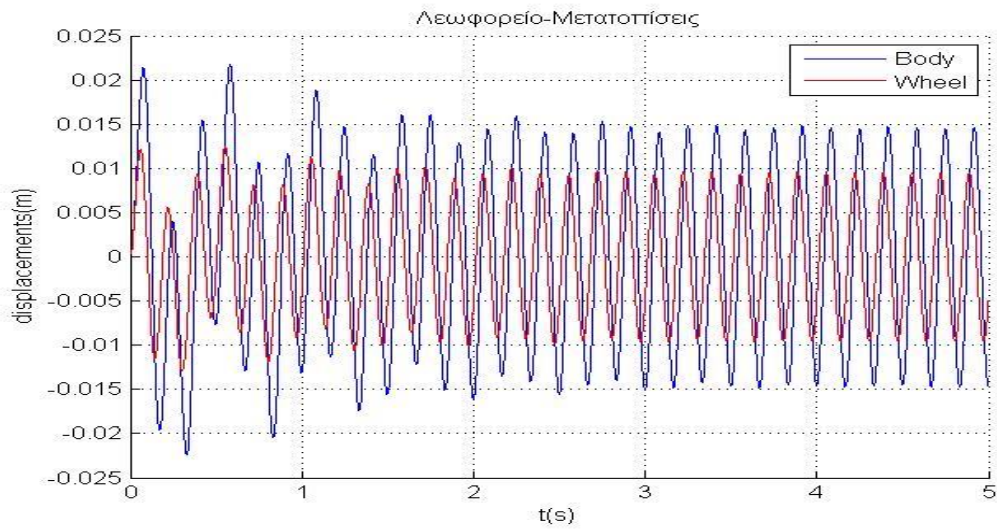
Δυνάμεις: Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα παθητικά στοιχεία της διάταξης είναι αισθητά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του επιβατικού οχήματος. Η αύξηση αυτή είναι αναμενόμενη καθώς η δύναμη εξαρτάται από τη μάζα του οχήματος. Στην περίπτωση του λεωφορείου το πλάτος της δύναμης του αποσβεστήρα αγγίζει τα 7000N σε αντίθεση με τα 1000N του επιβατικού οχήματος.



Διάγραμμα 16. Στιγμιαία Ισχύς για λεωφορείο-30Km/h

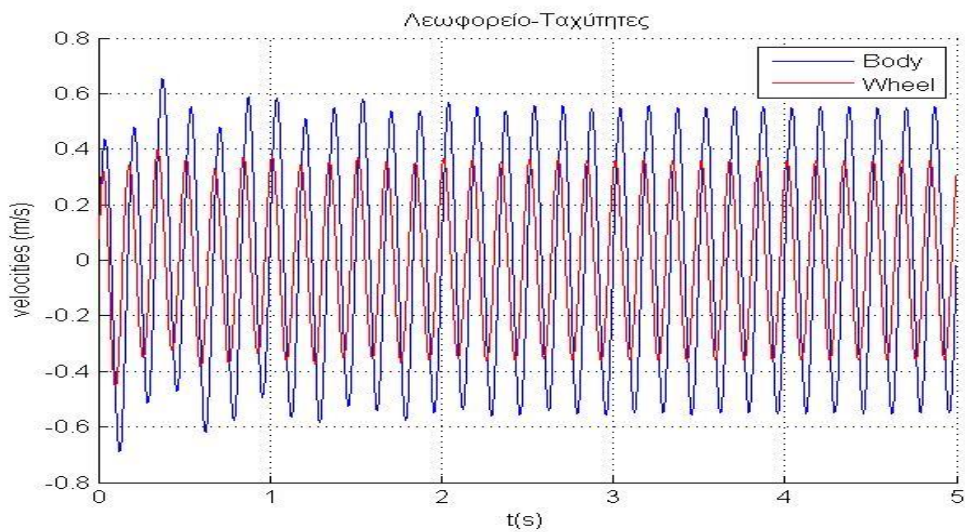
Ισχύς: Αντίστοιχη αύξηση παρατηρείται στην μέση ισχύ που καταστρέφεται στον αποσβεστήρα, όπως ήταν αναμενόμενο.

Αντίστοιχα για ταχύτητα 90 Km/h του λεωφορείου προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:



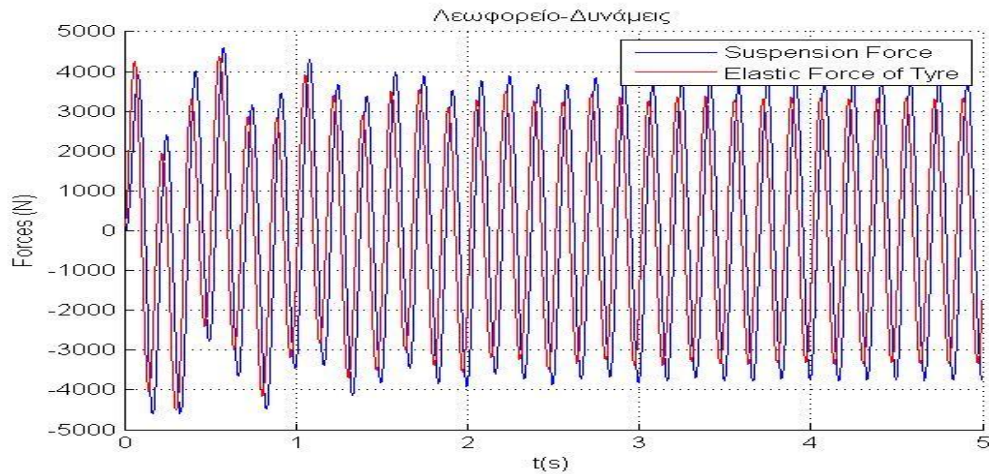
Διάγραμμα 17.Μετατοπίσης Μαζών για λεωφορείο-90Km/h

Μετατόπιση: Οι μετατοπίσεις για την ταχύτητα των 90Km/h προκύπτουν αισθητά μικρότερες από αυτές για χαμηλότερη ταχύτητα. Αυτό οφείλεται στην διαφορετική συχνότητα διέγερσης και ότι βρίσκεται πιο μακριά από τη φυσική συχνότητα των μαζών του λεωφορείου.



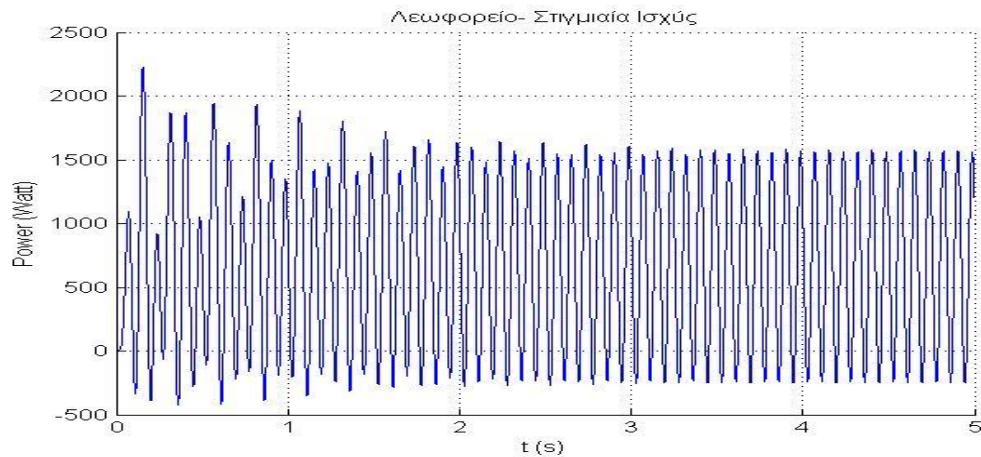
Διάγραμμα 18.Ταχύτητες Μαζών για λεωφορείο-90Km/h

Ταχύτητα: Και η ταχύτητα κίνησης εμφανίζεται μικρότερη από την αντίστοιχη των 30Km/h.



Διάγραμμα 19. Δυνάμεις αποσβεστήρα και ελαστικού για λεωφορείο-90Km/h

Δύναμη: Οι δυνάμεις του αποσβεστήρα έχουν πλάτος 4000N ενώ στην προηγούμενη ταχύτητα ήταν 7000N.

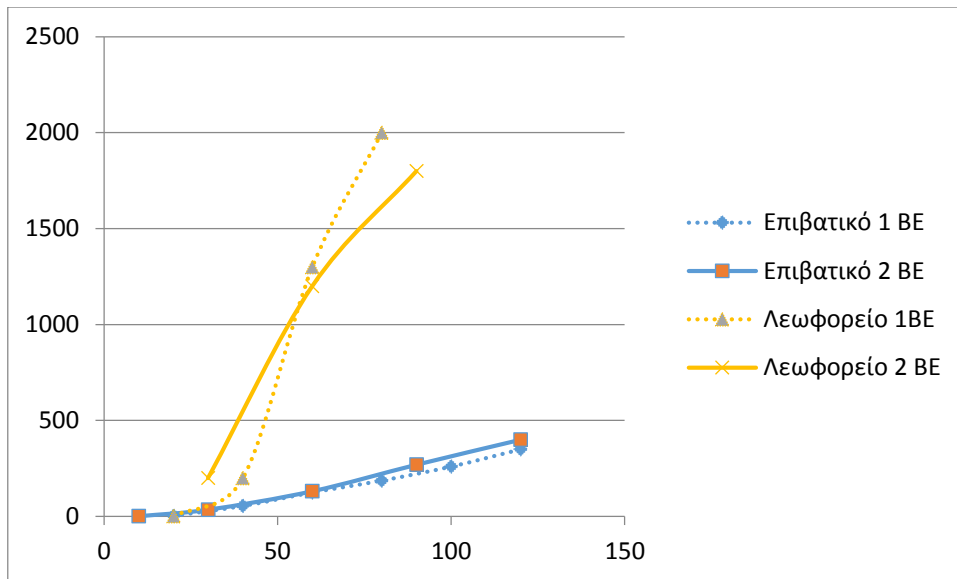


Διάγραμμα 20. Στιγμιαία Ισχύς για λεωφορείο-90Km/h

Ισχύς: Η ισχύς εμφανίζει και αυτή μειωμένο πλάτος αλλά η μέση τιμή (θετικοί – αρνητικοί όροι) είναι αντίστοιχοι και στις δύο περιπτώσεις. Επίσης αν και μειωμένες οι δυνάμεις και η ταχύτητα του αποσβεστήρα, η μέση ισχύς (υπενθυμίζεται ότι ισούται με την ενέργεια ανά δευτερόλεπτο) είναι σημαντικά μεγαλύτερη λόγω του τριπλασιασμού της συχνότητας με την οποία εμφανίζονται οι διεγέρσεις.

3.5 Σύγκριση Ισχύος

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού κώδικα μπορούν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του δεύτερου κεφαλαίου. Για την περίπτωση του επιβατικού οχήματος και του λεωφορείου τα αποτελέσματα που προέκυψαν σχετικά με την ισχύ που διαχέεται αναλογικά με την ταχύτητα κίνησης από τις δύο συγκρίσεις είναι τα εξής:



Διάγραμμα 21. Σύγκριση Ισχύος μεταξύ του υπολογιστικού κώδικα (2BE) και της προσέγγισης 1BE

Όπως φαίνεται και οι δύο προσεγγίσεις είναι αρκετά κοντά η μία στην άλλη. Ωστόσο εμφανίζουν διαφορές. Στην περίπτωση των επιβατικών οχημάτων η διαθέσιμη ενέργεια προς ανάκτηση είναι της τάξης των 100W-400W ενώ αντίστοιχα στην περίπτωση του λεωφορείου είναι από 300W-2000W.

Να σημειωθεί ότι όπως φαίνεται από το συγκεκριμένο διάγραμμα μπορεί να θεωρήσει κανείς ότι η ισχύς είναι ανάλογη με την ταχύτητα, το οποίο αυτό συμπέρασμα είναι λάθος, ειδικά παρατηρώντας τη γραφική παράσταση για το μοντέλο του 1^{ου} Βαθμού Ελευθερίας. Στο υπολογιστικό μοντέλο το οποίο είναι 2 Β.Ε. αποτυπώνεται καλύτερα το γεγονός ότι η ισχύς και η ταχύτητα δεν έχουν απολύτως γραμμική συσχέτιση σε όλο το εύρος. Φυσικά σε μία καλοσχεδιασμένη ανάρτηση και σε τυπικά οδοστρώματα με αύξηση της ταχύτητας παρατηρείται και αύξηση της μέσης ισχύος που απορροφάται. Η ισχύς αυξάνεται όχι αποκλειστικά λόγω μεγαλύτερων εμφανιζόμενων δυνάμεων και ταχυτήτων αλλά λόγω της μεγαλύτερης συχνότητας των διεγέρσεων.

Το κύριο χαρακτηριστικό που επιδρά στο ποσό της ενέργειας είναι το πόσο κοντά είναι η συχνότητα διέγερσης (που εξαρτάται από τη μορφή του δρόμου και την ταχύτητα κίνησης του οχήματος) και οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος.

Για διαφορετικό επομένως προφίλ εδάφους για αντίστοιχες ταχύτητες η συχνότητα διέγερσης αλλάζει. Η ενέργεια δηλαδή δεν είναι γραμμική ως προς την ταχύτητα. Όταν απομακρύνεται η συχνότητα διέγερσης από τις ιδιοσυχνότητες του οχήματος το πλάτος της ταλάντωσης του αποσβεστήρα μειώνεται.

3.6 Ρόλος του Λόγου Απόσβεσης ζ

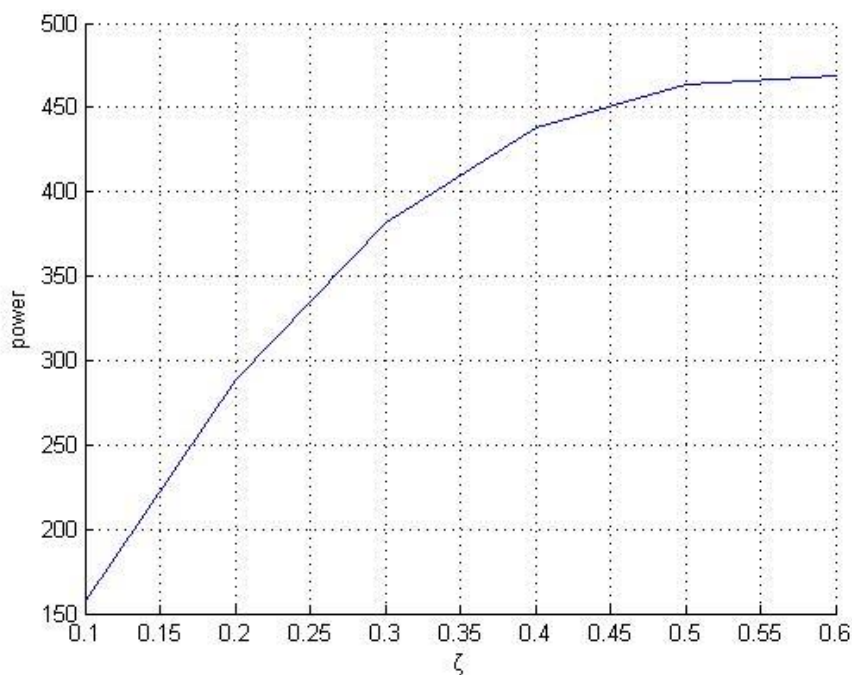
Κατά τη σχεδίαση των αναρτήσεων των οχημάτων καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά του οχήματος έχει ο λόγος απόσβεσης ζ. Ο λόγος απόσβεσης δίνεται από τον τύπο (3.55) και σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του οχήματος όπως η μάζα, ο συντελεστής απόσβεσης και η σκληρότητα των ελατηρίων.

$$\zeta = \frac{C_d}{2\omega m} = \frac{C_d}{2\sqrt{mk}} \quad (3.55)$$

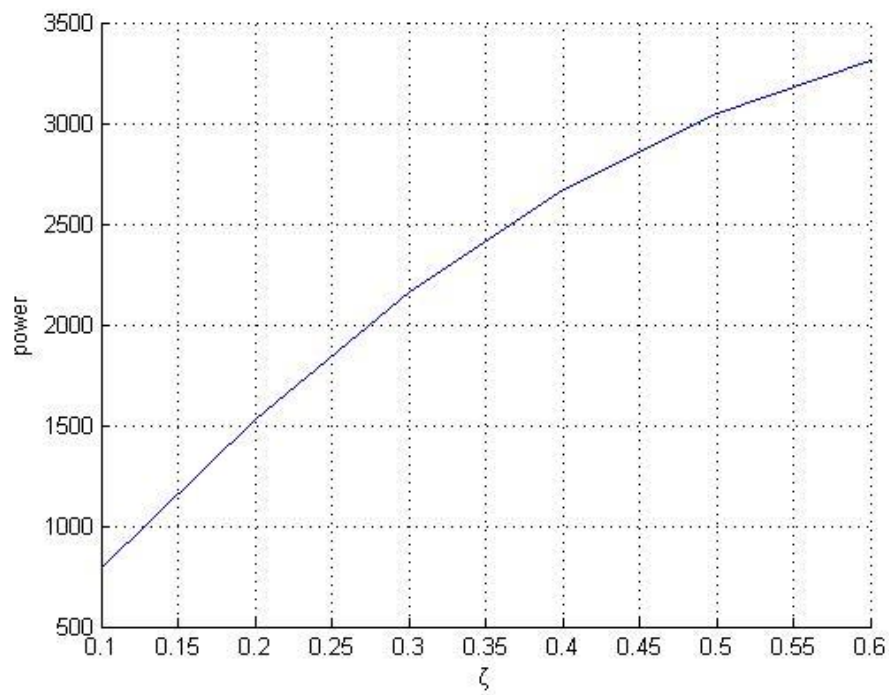
Τυπικές τιμές κατά τη σχεδίαση των οχημάτων για τον λόγο απόσβεσης κυμαίνονται από 0.2-0.6 για συμβατικά οχήματα ενώ υψηλότερες 0.7- 1 για αγωνιστικά οχήματα και ειδικές εφαρμογές. Μεταξύ των τιμών αυτών το όχημα προσφέρει στους επιβάτες ικανοποιητικό συνδυασμό ασφάλειας (επαφή τροχών με το έδαφος) όσο και άνεσης.

Γίνεται επομένως κατανοητό ότι η επιλογή του αποσβεστήρα και των ελατηρίων πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη το λόγο απόσβεσης που προκύπτει για την εκάστοτε εφαρμογή.

Η επίδραση του λόγου απόσβεσης στην ενέργεια που διαχέεται στον αποσβεστήρα και επομένως μπορεί να ανακτηθεί αποτυπώνεται στα ακόλουθα διαγράμματα. Παρατηρείται ότι για αύξηση του λόγου απόσβεσης αυξάνεται η ισχύς που μπορεί να ανακτηθεί ωστόσο ο σκοπός της σχεδίασης θα πρέπει να είναι ο βαθμός απόδοσης να είναι κατάλληλος για την εφαρμογή του οχήματος.



Διάγραμμα 22. Επιβατικό Όχημα: Ισχύς-ζ



Διάγραμμα 23. Λεωφορείο: Ισχύς- ζ

Κεφάλαιο 4^ο : Μετρήσεις σε Μαγνητορευολογικό Αποσβεστήρα

Εισαγωγή

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας συμμετείχα στο πρόγραμμα ανταλλαγής φοιτητών Erasmus, κατά τη διάρκεια του οποίου είχα την ευκαιρία να βρεθώ στο τμήμα μηχανολόγων μηχανικών του Πολυτεχνείου της Βαρσοβίας. Εκεί στο εξειδικευμένο εργαστήριο που διαθέτουν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε ένα σύγχρονο μαγνητορευολογικό αποσβεστήρα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις αυτές και η σύγκριση τους με τα αποτελέσματα των προηγούμενων κεφαλαίων αποτελούν το αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού.

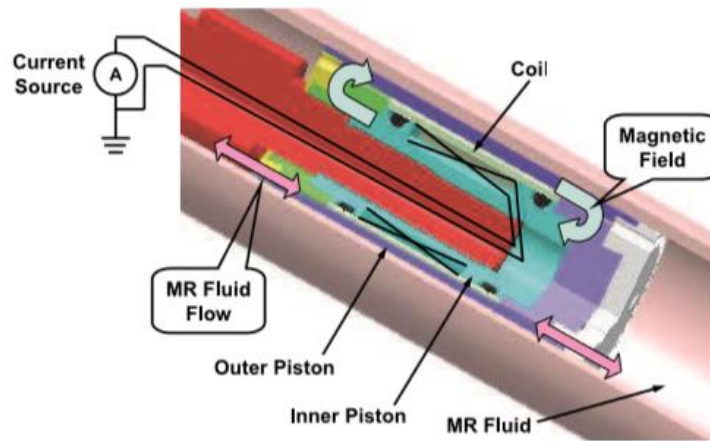
Η ανάλυση των προηγούμενων κεφαλαίων έχει γίνει με τη θεώρηση ότι οι αποσβεστήρες έχουν γραμμική συμπεριφορά σε όλο το εύρος λειτουργίας τους. Ωστόσο η θεώρηση αυτή δεν αντικατοπτρίζει απόλυτα την πραγματικότητα καθώς οι περισσότεροι αποσβεστήρες εμφανίζουν μη γραμμική συμπεριφορά, ιδιαίτερα στα άκρα λειτουργίας τους. Αυτό συμβαίνει διότι για την προστασία του αποσβεστήρα η σχεδιάσή τους γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε όταν αυξάνει η μετατόπιση του βάρου και προσεγγίζει τα τοιχώματα του αποσβεστήρα, η δύναμη απόσβεσης αυξάνει μη γραμμικά για να μην έχουν κρουστική επαφή.

Η συμπεριφορά αυτή δεν συμπεριλαμβάνεται στο υπολογιστικό μοντέλο του προηγούμενου κεφαλαίου, οπότε με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πραγματικό αποσβεστήρα μπορεί να γίνει σύγκριση και να εξαχθεί αποτέλεσμα για το εάν η μη γραμμική συμπεριφορά επηρεάζει το ποσό της ενέργειας αισθητά σε βαθμό που το γραμμικό υπολογιστικό μοντέλο να μην μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο.

4.1 Μαγνητορευολογικοί Αποσβεστήρες

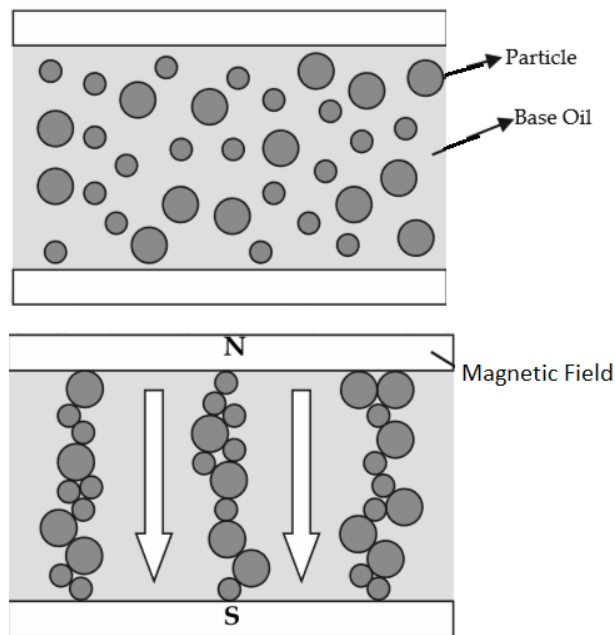
Τα μαγνητορευολογικά αμορτισέρ είναι μία ενδιαφέρουσα σύγχρονη τεχνολογία στον τομέα των αποσβεστήρων. Η λειτουργία τους βασίζεται στη χρήση ειδικών ρευστών που έχουν την ιδιότητα να μεταβάλλουν το ιξώδες τους ανάλογα με το μαγνητικό πεδίο στο οποίο βρίσκονται μέσα. Το ρευστό αυτό μπορεί να γίνεται λεπτόρευστο ή παχύρευστο σχεδόν ακαριαία χωρίς τη συμμετοχή κινούμενων μηχανικών μερών. Έτσι αποτελούν έναν απλό μηχανισμό χωρίς βαλβίδες, οπές και ελατήρια παρά μόνο ένα ηλεκτρομαγνήτη που θα καθορίζει τα μαγνητικά πεδία μέσα στον αποσβεστήρα.

Ένας τυπικός μαγνητορευολογικός αποσβεστήρας αποτελείται από το θάλαμο του εμβόλου, το βάρου και το μαγνητορευολογικό ρευστό όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο χώρος μέσα στον οποίο κινείται το ρευστό είναι ένας αγωγός που οι πλευρές του λειτουργούν ως οι πόλοι του ηλεκτρομαγνήτη που τον περιβάλλει.



Εικόνα 28. Θάλαμος MR damper

Μεταβάλλοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου το μαγνητορεολογικό ρευστό το οποίο αποτελείται από ειδικά μαγνητικά σωματίδια, διατάσσει τα σωματίδια αυτά με προσανατολισμό είτε παράλληλο είτε κατακόρυφο στην διεύθυνση κίνησης του βάκτρου. Τα σωματίδια αυτά είναι η αιτία που μεταβάλλεται η απόσβεση του αμορτισέρ με την αλλαγή της έντασης του μαγνητικού πεδίου.



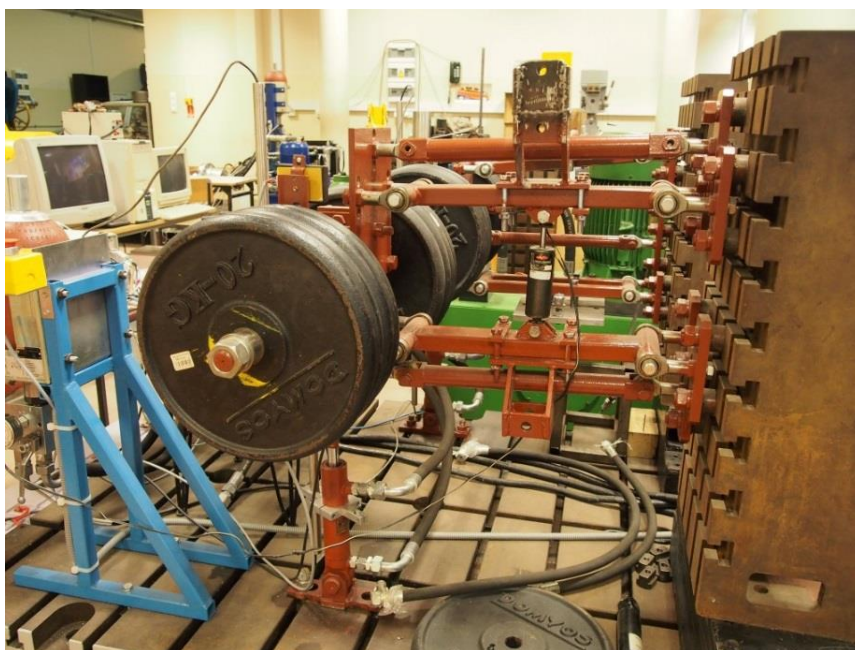
Εικόνα 29. Εφαρμογή μαγνητικού πεδίου σε MR damper

4.2 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις αποτελείται από τα εξής:

- Σύστημα που προσομοιώνει την αναρτώμενη και μη αναρτώμενη μάζα του οχήματος και στο οποίο τοποθετείται ο αποσβεστήρας και το ελατήριο της ανάρτησης.
- Υδραυλικό επενεργητή ο οποίος ασκεί δύναμη (επιβάλλει μετατόπιση) στο σύστημα σε συχνότητα και πλάτος που καθορίζεται πλήρως.

Η διάταξη απεικονίζεται στο σχήμα. Με τη διάταξη αυτή επιτυγχάνεται η προσομοίωση της κίνησης του τροχού ενός οχήματος με έλεγχο της συχνότητας της κινηματικής εισόδου.



Εικόνα 30. Πειραματική διάταξη προσομοίωσης κίνησης τροχού

Τα χαρακτηριστικά της διάταξης είναι:

- Μάζα: 175Kg
- Σταθερά Ελατηρίου: 12.000 N/m
- Αποσβεστήρας με δυνατότητα ρύθμισης του συντελεστή απόσβεσης από 2000Ns/m έως 8000Ns/m.

Τα μετρητικά όργανα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- 2 Αισθητήρες Μετατόπισης, εκ των οποίων ο ένας τοποθετήθηκε ώστε να υπολογίζει τη μετατόπιση του κάτω μέρους της διάταξης και υπολογίζει την επιβαλλόμενη μετατόπιση. Ο δεύτερος αισθητήρας ήταν στην άνω πλευρά της αναρτώμενης μάζας και υπολογίζει την μετατόπιση του πλαισίου του οχήματος.

- Επιταχυνσιόμετρο δύο αξόνων, τοποθετημένο στο άνω ψαλίδι της ανάρτησης.
- Αισθητήρας Δύναμης: πρόκειται για έναν πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα ο οποίος καταγράφει τη δύναμη την οποία μεταδίδει το υδραυλικό έμβολο στην ανάρτηση, αφού είναι τοποθετημένος στο σημείο σύνδεσης του εμβόλου με το υπόλοιπο σύστημα.

4.3 Διεξαγωγή Μετρήσεων

Στόχος των μετρήσεων είναι ο υπολογισμός της ενέργειας που διαχέεται στον αποσβεστήρα της ανάρτησης σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος και τον τύπο του οχήματος.

Η ισχύς υπολογίζεται ως

$$P=F*V \quad (4.1)$$

Όπου F: η δύναμη αντίδρασης του αποσβεστήρα

V: η ταχύτητα κίνησης του βάρου μέσα στο ρευστό

Για την περίπτωση του γραμμικού αποσβεστήρα η δύναμη που αναπτύσσεται είναι ανάλογη της ταχύτητας και ίση με

$$F=C*V \quad (4.2)$$

Όπου C: ο συντελεστής απόσβεσης του αποσβεστήρα.

$$\text{Επομένως: } P= C_d * (V_b-V_s)^2 \quad (4.3)$$

V_b : η ταχύτητα του άνω κλάδου της διάταξης (άνω ψαλίδι)

V_s : η ταχύτητα του κάτω κλάδου της διάταξης (κάτω ψαλίδι)

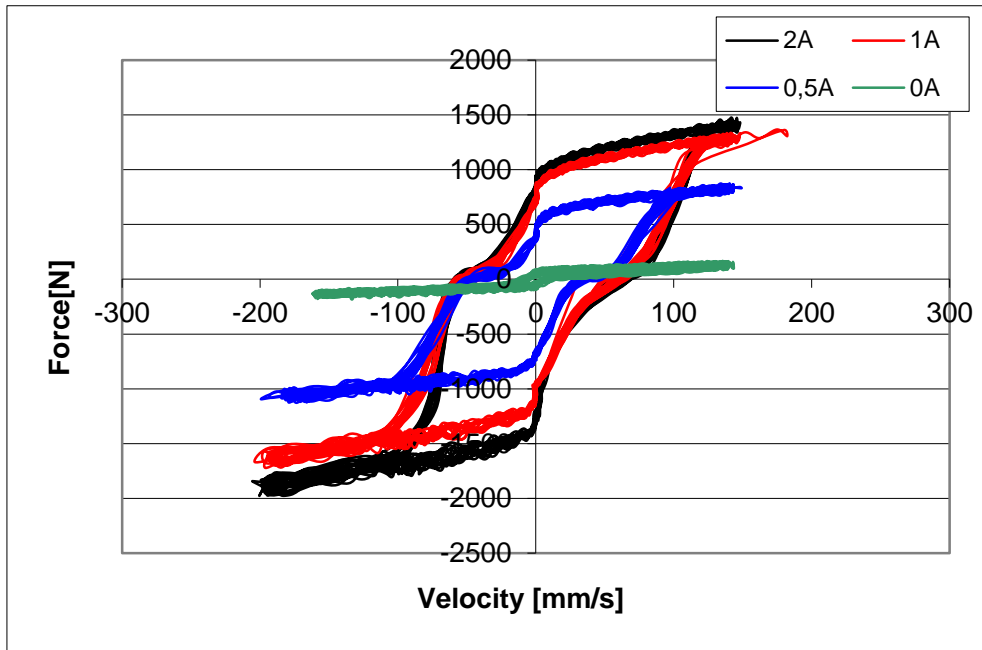
Για μεγαλύτερη προσέγγιση μπορεί ο αποσβεστήρας να μοντελοποιηθεί ως δι-γραμμικός δηλαδή να θεωρηθούν δύο διαφορετικοί συντελεστές απόσβεσης, ένας κατά την έκταση του βάρου και ένας κατά τη συμπίεση. Το μοντέλο αυτό είναι ακριβέστερο καθώς στην πραγματικότητα τα αμορτισέρ έχουν διαφορετικές δυνάμεις κατά την έκταση και συμπίεσή τους.

$$F_d=C_{de}* V_e (V_e<0) \quad (4.4)$$

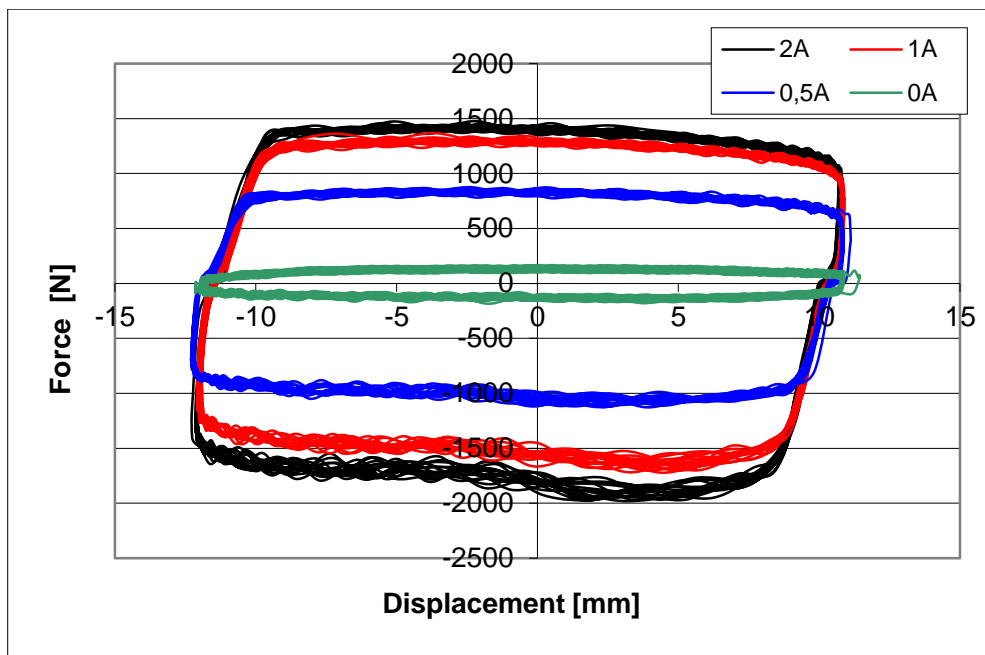
$$F_d=C_{dc}*V_c (V_c>0) \quad (4.5)$$

Να σημειωθεί ότι στην παρούσα εργασία υπολογίστηκε ο συντελεστής απόσβεσης ως ο μέσος όρος των συντελεστών που βρέθηκαν κατά την πλήρη κίνησή του.

Το συγκεκριμένο μαγνητορεολογικό αμορτισέρ που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις έχει χαρακτηριστικά λειτουργίας που αποτυπώνονται στο διάγραμμα F-V της λειτουργίας του για διαφορετικές τιμές ρεύματος εισόδου.



Διάγραμμα 24. Χαρακτηριστικό Διάγραμμα Δύναμης- Ταχύτητας του MR Damper



Διάγραμμα 25. Χαρακτηριστικό Διάγραμμα Δύναμης- Μετατόπισης του MR Damper

Σημαντική Παρατήρηση για την κατανόηση της λειτουργίας των μαγνητορεολογικών αποσβεστήρων είναι ότι η δύναμη που εμφανίζεται σε αυτούς είναι της μορφής:

$$F_d = Kx + C_d \dot{x} + F_{MR} \quad (4.6)$$

Δηλαδή εμφανίζεται ένας επιπλέον όρος σε σχέση με τα γραμμικά αμορτισέρ που έχουν προσομοιωθεί με τον υπολογιστικό κώδικα του προηγούμενου κεφαλαίου. Ο επιπλέον όρος μπορεί να προσδιοριστεί από τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις και με αντίστοιχη ανάδραση θα μπορούσε να τροποποιηθεί το υπολογιστικό μοντέλο.

Επομένως γίνεται κατανοητό ότι ο υπολογισμός της ισχύος έγκειται τελικά:

1. Στον υπολογισμό της ταχύτητας του βάρου του αμορτισέρ

Η ταχύτητα του βάρου υπολογίζεται από τα δεδομένα του επιταχυνσιόμετρου που είναι τοποθετημένο στο άνω ψαλίδι και από τις μετρήσεις των αισθητήρων μετατόπισης.

2. Στον υπολογισμό του συντελεστή απόσβεσης

Ο συντελεστής απόσβεσης C υπολογίζεται από την κλίση του διαγράμματος Δύναμης-Ταχύτητας για κάθε διαφορετική ρύθμιση του αμορτισέρ.

3. Η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη έχει το πλεονέκτημα ότι περιλαμβάνει στο μετρητικό σύστημα τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα που καταγράφει την δύναμη (εισόδου) του υδραυλικού εμβόλου προς το σύστημα. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι είναι δυνατός ο υπολογισμός της δύναμης του αποσβεστήρα χωρίς την ενδιάμεσο υπολογισμό του συντελεστή απόσβεσης. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς με δύο τρόπους ώστε να γίνει επαλήθευση μεταξύ των δύο.

Η διαδικασία με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι η εξής:

Η καταγραφή των τιμών των μετρητικών οργάνων γινόταν για χρονικό διάστημα 10 δευτερολέπτων με συχνότητα καταγραφής τα 100Hz για όλους τους αισθητήρες.

Οι συχνότητες διέγερσης από το υδραυλικό έμβολο ήταν κατά σειρά 1 Hz, 1.2 Hz και 1.5 Hz που αντιστοιχούν σε ταχύτητα οχήματος 30 Km/h, 35 Km/h και 45 Km/h αντίστοιχα. Στα αποτελέσματα της εργασίας παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δύο ακραίων ταχυτήτων καθώς οι τιμές της ενδιάμεσης μέτρησης των 1.2 Hz έχουν πολύ κοντινές τιμές με την πρώτη σειρά μετρήσεων.

Για κάθε διαφορετική συχνότητα διέγερσης μεταβαλλόταν το ρεύμα εισόδου στο μαγνητορολογικό αμορτισέρ από 0.1-0.6 A. Κάθε τιμή ρεύματος αντιστοιχεί σε διαφορετικό συντελεστή απόσβεσης. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα μελέτης του αμορτισέρ σε ένα εύρος των χαρακτηριστικών του.

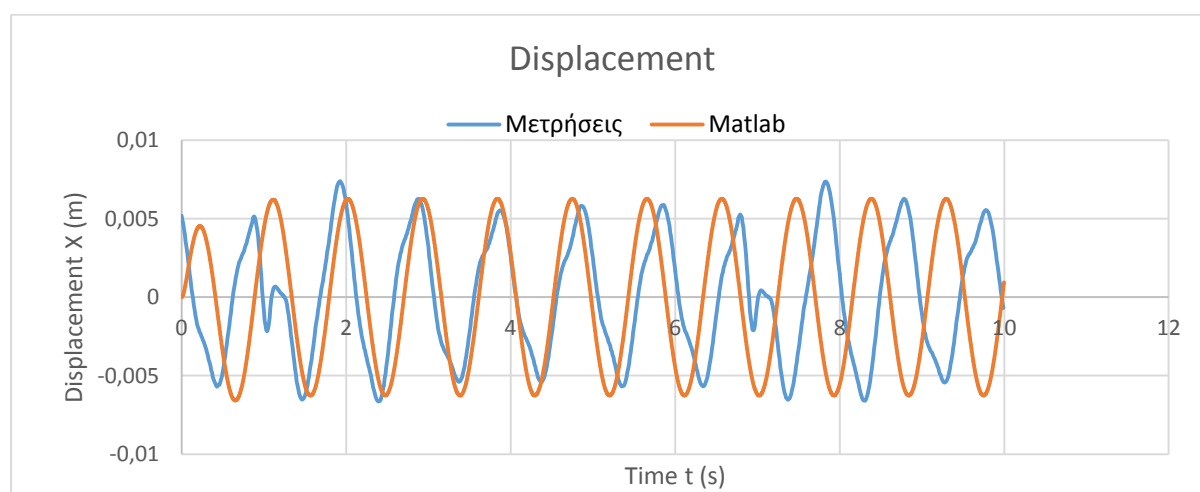
Με αύξηση της έντασης του ρεύματος αυξάνει το μαγνητικό πεδίο του αποσβεστήρα και επομένως και ο συντελεστής απόσβεσης.

4.4 Αποτελέσματα

Αποτέλεσμα των πειραματικών μετρήσεων ήταν η χάραξη των χαρακτηριστικών του αποσβεστήρα και η σύγκρισή του με τον υπολογιστικό κώδικα. Τα διαγράμματα τα οποία καταγράφηκαν είναι αντίστοιχα με αυτά του υπολογιστικού κώδικα του προηγούμενου κεφαλαίου. Δηλαδή παρουσιάζονται τα διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας, δύναμης και ισχύος συναρτήσει του χρόνου. Επιπρόσθετα χαράχθηκαν τα διαγράμματα δύναμης- μετατόπισης και δύναμης- ταχύτητας τα οποία είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του μαγνητορολογικού αποσβεστήρα.

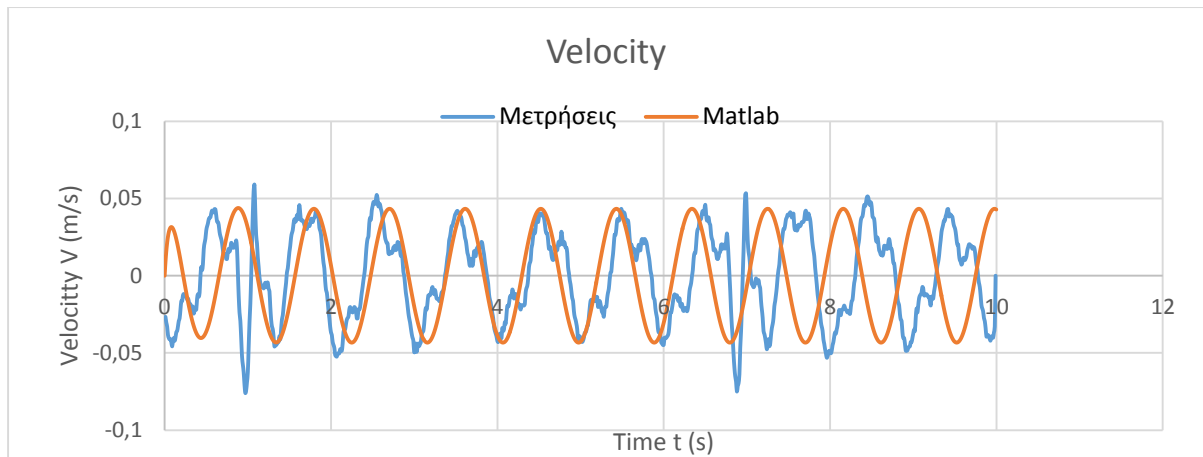
4.4.1 Διέγερση 1Hz

Για την περίπτωση διέγερσης 1 Hz η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα 30 Km/h τα διαγράμματα είναι:



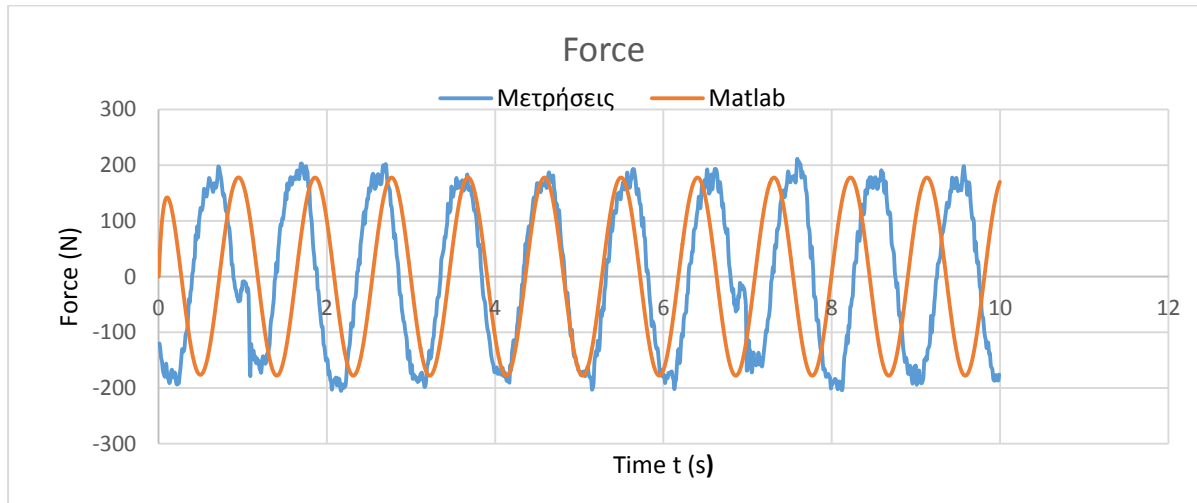
Διάγραμμα 26. Μετατόπιση Αποσβεστήρα για 1Hz

Μετατόπιση: Η μετατόπιση της αναρτώμενης μάζας προκαλείται από την κινηματική διέγερση που εφαρμόζει το υδραυλικό έμβολο και υπολογίζεται από τον αισθητήρα μετατόπισης που είναι τοποθετημένος στον άνω κλάδο του ψαλιδιού. Να σημειωθεί ότι επειδή το αισθητήριο όργανο δεν ήταν τοποθετημένο στη θέση ακριβώς που βρίσκεται το αμορτισέρ έγινε ο υπολογισμός του μοχλοβραχίονα που εφαρμόζεται από τη θέση του οργάνου έως το αμορτισέρ και βρέθηκε ο λόγος μετατόπισης μεταξύ των. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα η μετατόπιση της έφτασε τα 6mm για την περίπτωση με το χαμηλότερο συντελεστή απόσβεσης που αντιστοιχεί για είσοδο ρεύματος 0.1 A. Τέλος η σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων και του υπολογιστικού κώδικα δείχνει ότι η διάταξη προσομοιώνεται σωστά από τον κώδικα αφού ακολουθούν την ίδια ακριβώς κυματομορφή. Ο λόγος που αποκλίνει σε κάποιο σημείο η μία γραφική παράσταση από την άλλη είναι λόγω σφάλματος του υδραυλικού συστήματος που ωθεί το έμβολο, και συγκεκριμένα οφείλεται στην αποσυμπίεση του υδραυλικού συσσωρευτή. Για τον λόγο αυτό υπάρχει μία διαφορά φάσης μεταξύ των κυματομορφών.



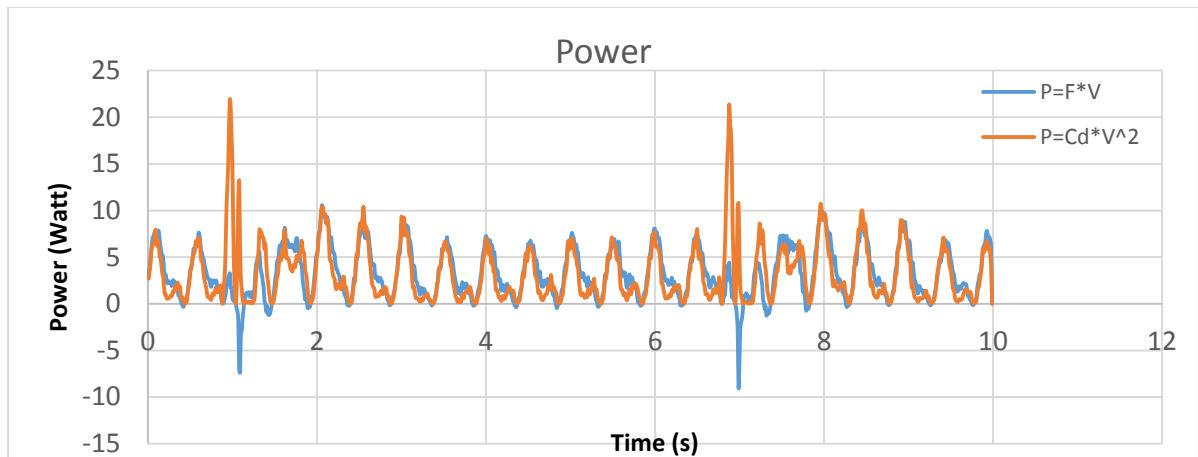
Διάγραμμα 27. Ταχύτητα Αποσβεστήρα για 1Hz

Ταχύτητα: Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για την ταχύτητα. Οι δύο γραφικές παραστάσεις εμφανίζουν τα ίδια χαρακτηριστικά μόνο που μετά από τη χρονική στιγμή των 6sec που παρατηρείται η ανωμαλία λόγω του συσσωρευτή υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ τους. Η μέγιστη ταχύτητα που εμφανίζεται είναι τα 5cm/sec η οποία βρίσκεται μέσα στα όρια χρήσης του μαγνητορολογικού αμορτισέρ για τη συγκεκριμένη είσοδο ρεύματος όπως αναφέρεται στα τεχνικά στοιχεία του αμορτισέρ που δίνει ο κατασκευαστής και παρατίθενται στο παράρτημα της εργασίας.



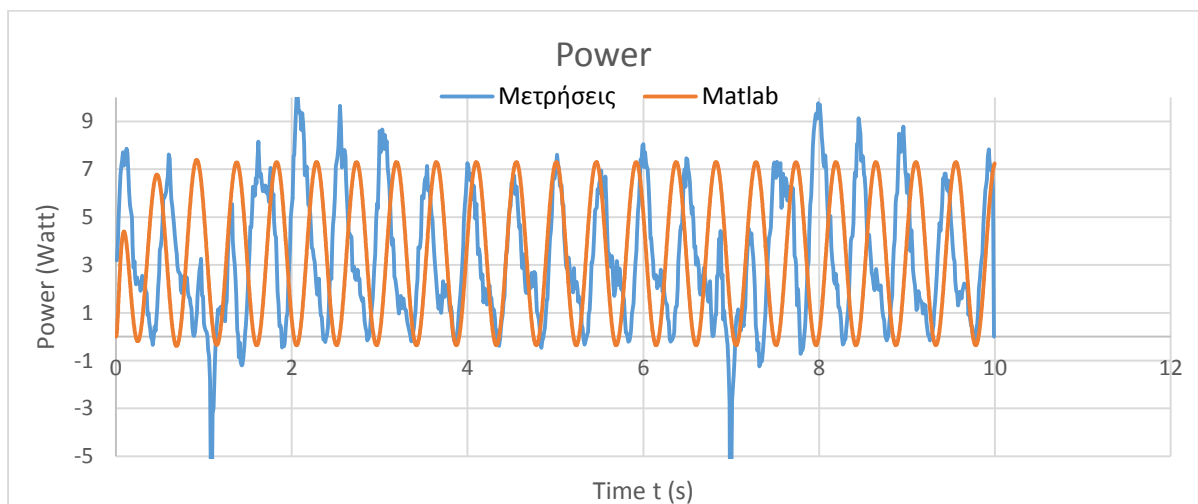
Διάγραμμα 28. Δύναμη Αποσβεστήρα για 1Hz

Δύναμη: Οι δυνάμεις βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία όσο αφορά το πλάτος και τη συχνότητα. Η διαφορά έγκειται στο ότι κατά τη χρονική στιγμή που ξεκίνησε η καταγραφή των μετρήσεων της διάταξης το αμορτισέρ δεν βρισκόταν στη θέση ισορροπίας του και για τον λόγο αυτό υπάρχει μία διαφορά φάσης. Η τάξη του πλάτους της δύναμης για το συγκεκριμένο λόγο απόσβεσης είναι 200 N.



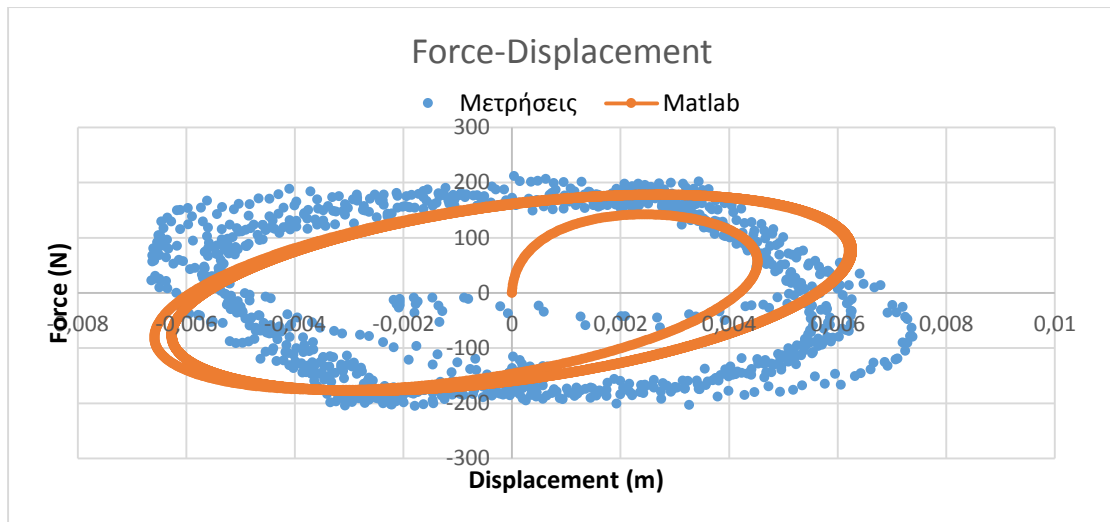
Διάγραμμα 29. Στιγμαία Ισχύς Αποσβεστήρα για 1Hz-Σύγκριση Μεθόδων

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ο υπολογισμός της ισχύος του αποσβεστήρα με δύο διαφορετικούς τρόπους. Στον πρώτο υπολογισμό έγινε ο αναλυτικός υπολογισμός της συνολικής δύναμης του αποσβεστήρα μέσω της εξίσωσης κίνησης και με χρήση των δεδομένων από τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση η δύναμη απόσβεσης υπολογίζεται από τη σχέση $F=C V$ όπου ο συντελεστής απόσβεσης C βρίσκεται από το διάγραμμα δύναμης- ταχύτητας του αμορτισέρ. Και στις δύο περιπτώσεις η μέση ισχύς βγαίνει το ίδιο με πολύ μικρή απόκλισης. (3.27Watt και 3.63Watt αντίστοιχα)



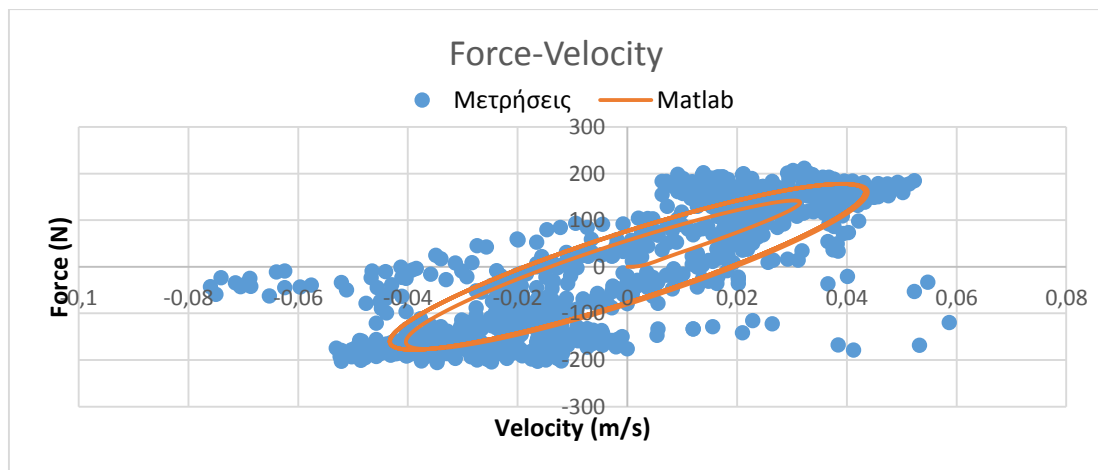
Διάγραμμα 30. Στιγμαία Ισχύς Αποσβεστήρα για 1Hz

Στο παραπάνω διάγραμμα γίνεται η σύγκριση της υπολογιζόμενης ισχύος με αυτήν που προκύπτει από το υπολογιστικό κώδικα. Οι τιμές προκύπτουν πρακτικά ίσες όπως φαίνεται σε επόμενο διάγραμμα.



Διάγραμμα 31. Δύναμη-Μετατόπιση Αποσβεστήρα για 1Hz

Το διάγραμμα αποτελεί ένα από τα δύο χαρακτηριστικά διαγράμματα που λαμβάνεται για κάθε αποσβεστήρα. Παρατηρούμε ότι η δύναμη είναι σχεδόν σταθερή για μικρές μετατοπίσεις και μόνο στα άκρα της ταλάντωσης μειώνεται και αυξάνεται αντίστοιχα.

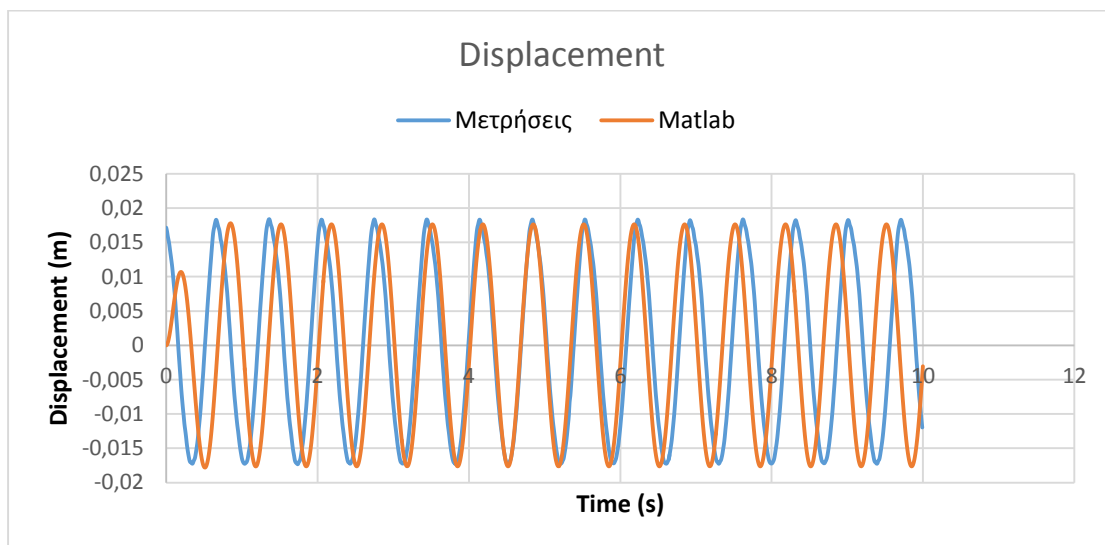


Διάγραμμα 32. Δύναμη-Ταχύτητα Αποσβεστήρα για 1Hz

Το διάγραμμα δύναμης – ταχύτητας είναι το διάγραμμα από το οποίο γίνεται ο προσδιορισμός του συντελεστή απόσβεσης C του αποσβεστήρα για κάθε διαφορετική είσοδο ρεύματος. Η δύναμη είναι σχεδόν γραμμική με την ταχύτητα όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ η κλίση είναι διαφορετική για τη συμπίεση και την επιστροφή του εμβόλου. Ο συντελεστής απόσβεσης μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ο μέσος όρος των δύο.

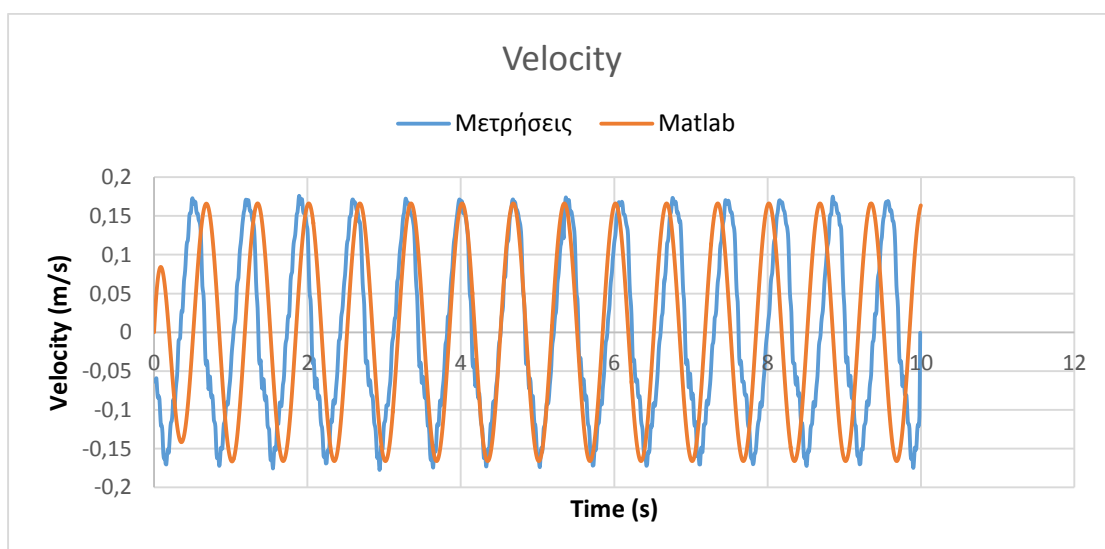
4.4.2 Διέγερση 1.5Hz

Για την περίπτωση διέγερσης 1.5 Hz τα αντίστοιχα διαγράμματα είναι:



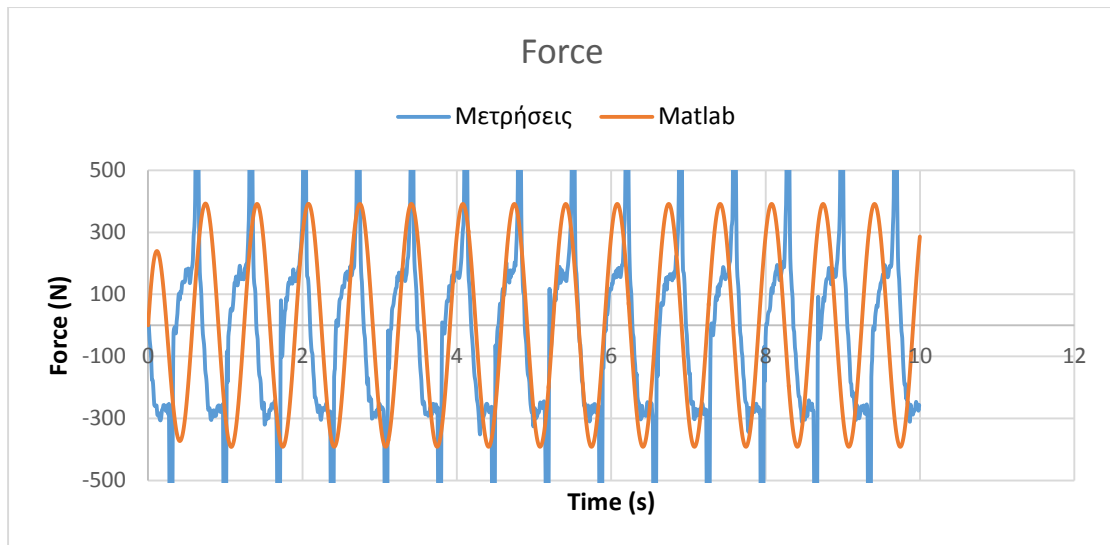
Διάγραμμα 33. Μετατόπιση Αποσβεστήρα για 1,5Hz

Το διάγραμμα των μετατοπίσεων για 1.5 Hz δίνει μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης από το αντίστοιχο του 1 Hz. Το πλάτος είναι στα 15mm σε σύγκριση με τα 6 mm προηγουμένως και αυτό διότι η συχνότητα της εξωτερικής διέγερσης βρίσκεται πιο κοντά στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος $f_n=1.35$ Hz.



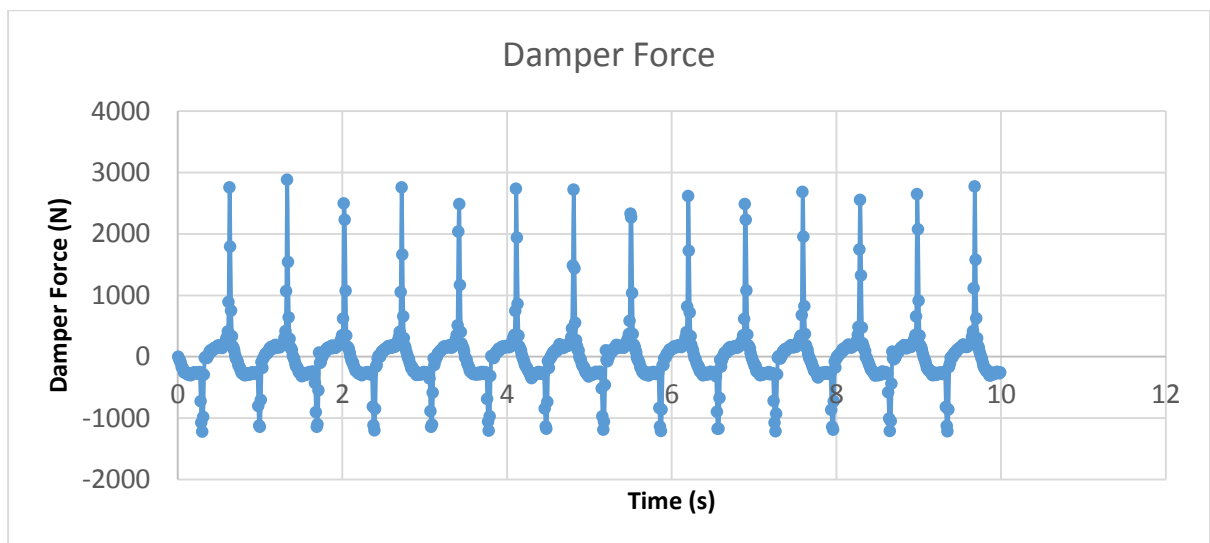
Διάγραμμα 34. Ταχύτητα Αποσβεστήρα για 1,5Hz

Οι ταχύτητες είναι αντίστοιχα αυξημένες αλλά παραμένουν στα όρια που καθορίζει ο κατασκευαστής. Τα διαγράμματα από το Matlab και σε αυτή την περίπτωση σχεδόν ταυτίζονται με τα πειραματικά με εξαίρεση μία μικρή διαφορά φάσης.



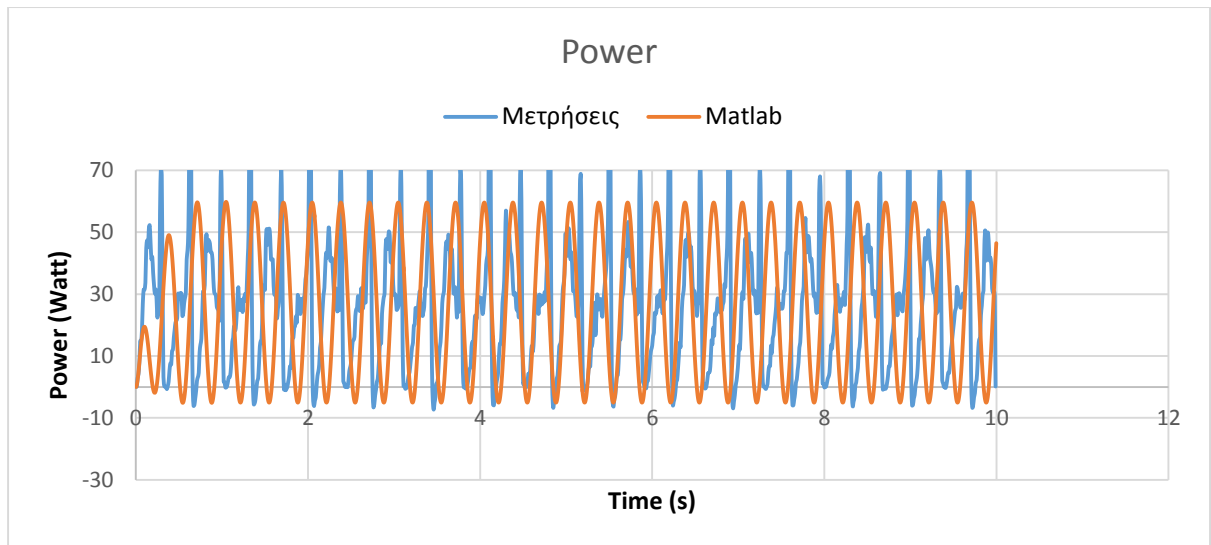
Διάγραμμα 35. Δύναμη Αποσβεστήρα για 1,5Hz

Στο διάγραμμα των δυνάμεων παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά από το αντίστοιχο του 1 Hz. Οι δυνάμεις δεν εμφανίζουν γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με τη μετατόπιση όπως φαίνεται και από επόμενο διάγραμμα. Σε κάθε ταλάντωση υπάρχει μία σύντομη αύξηση της δύναμης (δεκαπλάσια του μέσου πλάτους της). Γι' αυτό το λόγο παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα δύναμης χωρίς την αποκοπή του πλάτους της για να γίνει η σύγκριση.



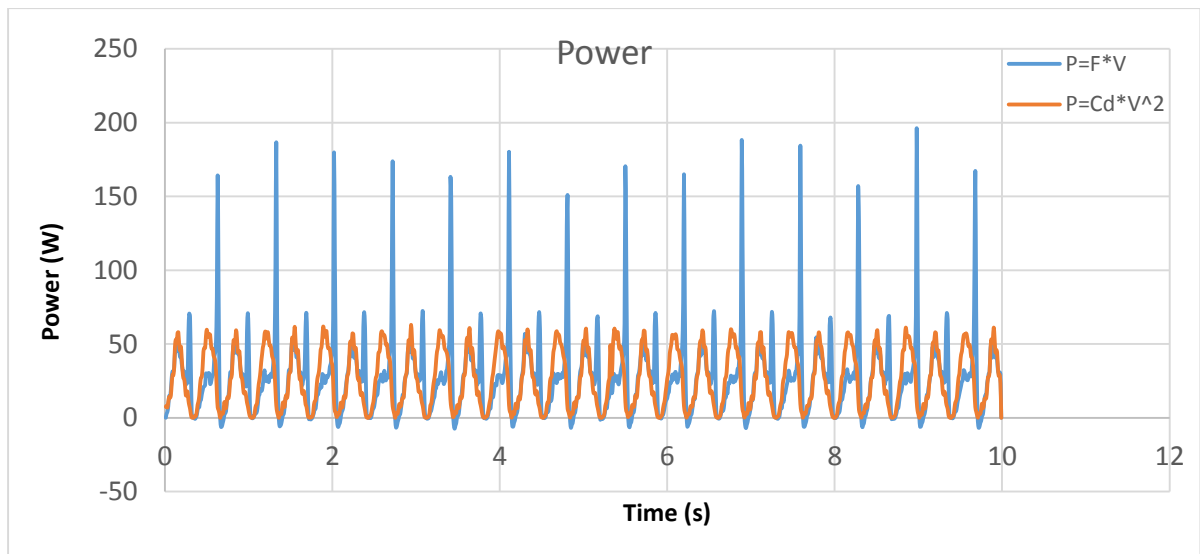
Διάγραμμα 36. Δύναμη Αποσβεστήρα για 1,5Hz

Υπάρχουν όπως φαίνεται ορισμένες καταγεγραμμένες τιμές πολύ υψηλής δύναμης στον αποσβεστήρα οι οποίες σχολιάζονται εκτενέστερα σε επόμενο διάγραμμα.



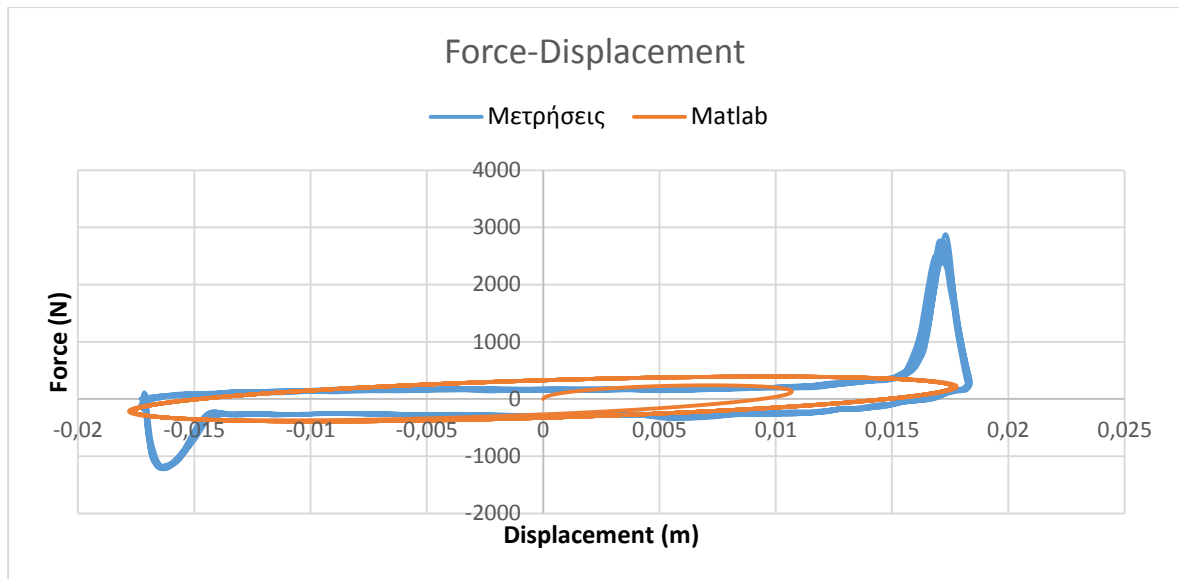
Διάγραμμα 37. Στιγμιαία Ισχύς Αποσβεστήρα για 1,5Hz-Σύγκριση Μεθόδων

Αντίστοιχα και η ισχύς εμφανίζει κάποιες κορυφές αφού εξαρτάται άμεσα από τη δύναμη του αποσβεστήρα. Ωστόσο επειδή αυτές οι δυνάμεις είναι «στιγμιαίες» δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μέσης ισχύος.



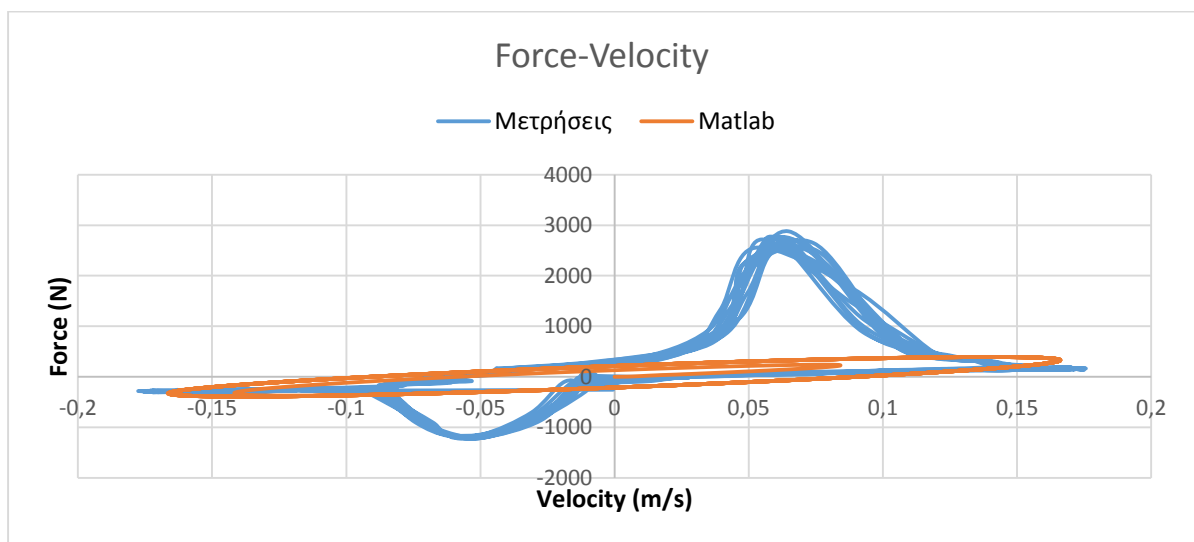
Διάγραμμα 38. Στιγμιαία Ισχύς Αποσβεστήρα για 1,5Hz

Η διαφορά των δύο μεθόδων υπολογισμού της ισχύος σε αυτό το διάγραμμα είναι εμφανέστερη. Ο πρώτος τρόπος υπολογισμού καταγράφει την συνολική δύναμη απόσβεσης και όχι μόνο ως συνάρτηση της ταχύτητας, ωστόσο το τελικό αποτέλεσμα και σε αυτήν την περίπτωση δεν έχει μεγάλη απόκλιση από της άλλης μεθόδου. Τα αποτελέσματα ήταν 27.25 W και 25.83W αντίστοιχα.



Διάγραμμα 39. Δύναμη-Μετατόπιση Αποσβεστήρα για 1,5Hz

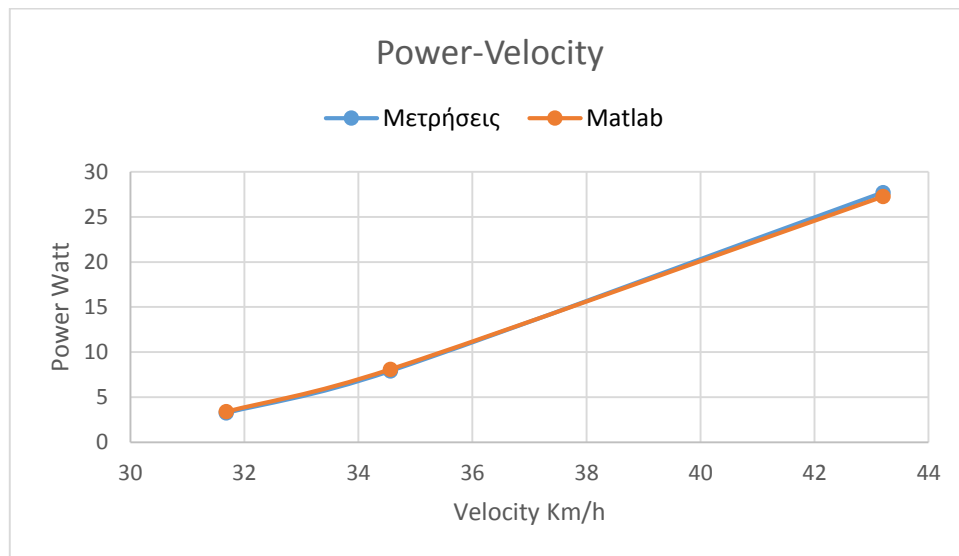
Στο διάγραμμα αυτό γίνεται αντιληπτή η αιτία για τη συμπεριφορά των προηγούμενων διαγραμμάτων. Όπως φαίνεται η δύναμη απόσβεσης αυξάνει μη γραμμικά όταν το έμβολο μετατοπίζεται για περισσότερο από 15mm από τη θέση ισορροπίας του. Στις προηγούμενες μετρήσεις η μετατόπιση ήταν μικρότερη οπότε δεν γινόταν αντιληπτή η συμπεριφορά αυτή. Το σημαντικό σε αυτή τη σύγκριση είναι το αποτέλεσμα μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και του υπολογιστικού κώδικα ο οποίος όπως φαίνεται και στο διάγραμμα δεν υπολογίζει αυτή τη μη γραμμικότητα.



Διάγραμμα 40. Δύναμη-Ταχύτητα Αποσβεστήρα για 1,5Hz

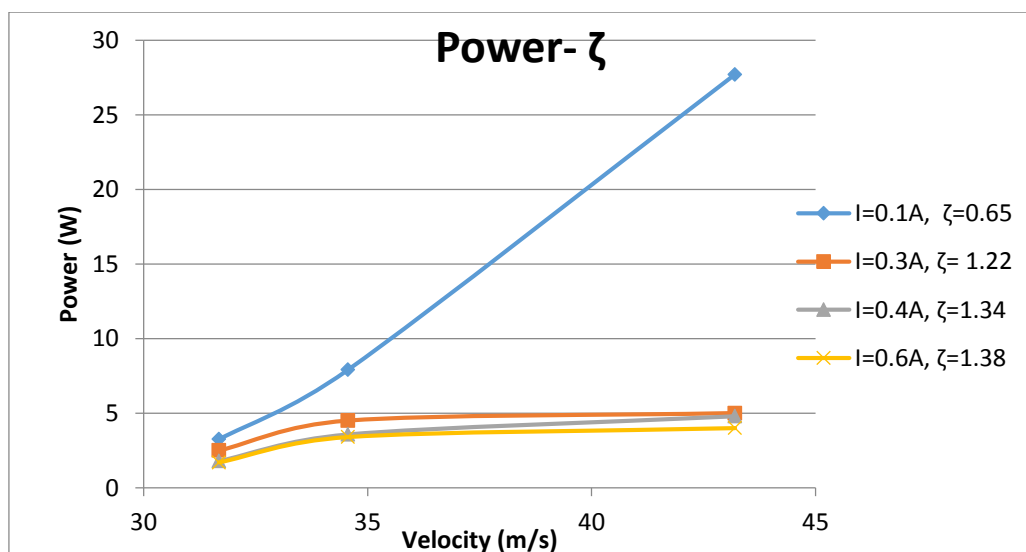
Αντίστοιχα με το διάγραμμα των μετατοπίσεων, η ταχύτητα και η δύναμη δεν έχουν γραμμική συμπεριφορά.

4.4.3 Σύγκριση Πειραματικών Μετρήσεων και Υπολογιστικού Μοντέλου



Διάγραμμα 41. Σύγκριση Ισχύος μεταξύ του υπολογιστικού κώδικα και των πειραματικών μετρήσεων

Το συγκεκριμένο διάγραμμα δεν έχει τόσο ποσοτική σημασία διότι η ποσότητα ισχύος που φαίνεται ότι καταστρέφεται σε αυτή την διάταξη είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Ωστόσο το σημαντικό στοιχείο είναι ότι το αποτέλεσμα της ισχύος μεταξύ του υπολογιστικού κώδικα και των πειραματικών μετρήσεων δείχνει να μην επηρεάζεται από αυτή τη συμπεριφορά του πραγματικού αμορτισέρ. Δηλαδή, στη συγκεκριμένη περίπτωση τουλάχιστον η μη γραμμική συμπεριφορά του αμορτισέρ δεν αποτελεί πρόβλημα για την προσομοίωση με το δυναμικό γραμμικό σύστημα.



Διάγραμμα 42. Επίδραση του λόγου απόσβεσης στην Αποσβενόμενη Ισχύ

Το τελευταίο διάγραμμα επίσης δεν έχει ποσοτική σημασία αλλά μόνο ποιοτική. Είναι η γραφική παράσταση της ισχύος μεταξύ των διαφορετικών συντελεστών απόσβεσης του αμορτισέρ, δηλαδή για τις διαφορετικές εισόδους ρεύματος. Ως προς τα ποσοτικά αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμο γιατί όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα ο λόγος απόσβεσης ο οποίος χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια αυτών των μετρήσεων κυμαινόταν από $\zeta=0.69-1.4$. προφανώς οι τιμές αυτές δεν αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (και σχεδιασμού) των συστημάτων ανάρτησης οχημάτων. Ίσως μόνο η περίπτωση του $\zeta=0.69$ μπορεί να υπάρξει σε ορισμένους τύπους οχημάτων. Οι υπόλοιπες περιπτώσεις άνω της κρίσιμης απόσβεσης ($\zeta=1$) δεν παρέχουν σωστή λειτουργία αφού η κίνηση της μάζας εξαναγκάζεται πλέον από την κινηματική είσοδο, γι' αυτό και δεν συμπεριελήφθησαν τα διαγράμματα από όλους τους συνδυασμούς (setup) που χρησιμοποιήθηκαν.

Κεφάλαιο 5^ο : Σχεδίαση και Μοντελοποίηση Υδροπνευματικής Ανάρτησης

Εισαγωγή

Οι αποσβεστήρες είναι μία σχετική απλή μηχανολογική διάταξη η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία συσκευή ανάπτυξης δυνάμεων (force-generating device). Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια η λειτουργία του αποσβεστήρα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη δύναμης που αντιτίθεται στην ανεπιθύμητη κίνηση της μη αναρτώμενης μάζας και ελέγχει την μετατόπιση της αναρτώμενης μάζας. Με τον τρόπο αυτό προσφέρει άνεση στους επιβάτες και ασφάλεια λόγω καλύτερου ελέγχου του οχήματος από τον οδηγό.

Στα σύγχρονα οχήματα υπάρχουν πολλές διαφορετικές διατάξεις αποσβεστήρων ωστόσο τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι όμοια καθώς βασίζονται στην ίδια αρχή.

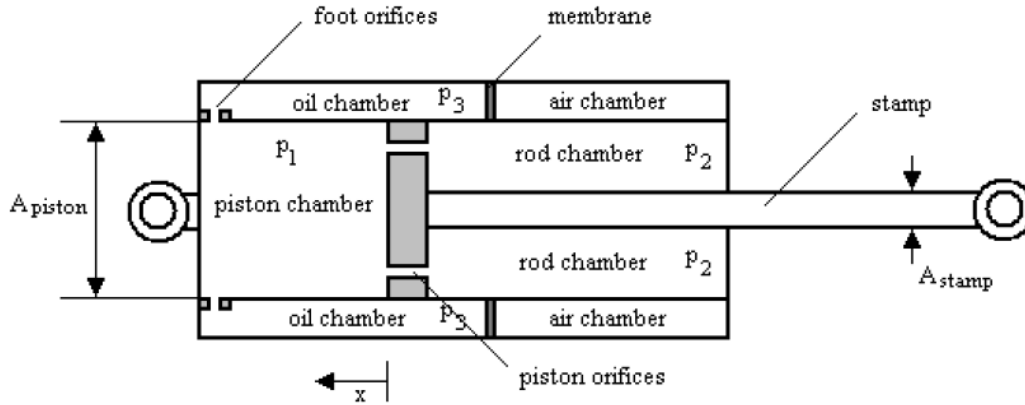
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αρχικά η ανάλυση ενός τυπικού αποσβεστήρα και το μαθηματικό μοντέλο το οποίο περιγράφει την λειτουργία του.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σχεδίαση μίας υδροπνευματικής διάταξης ανάρτησης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Σκοπός της σχεδίασης ήταν να σχεδιαστεί μία διάταξη που θα επιτρέπει την ανάκτηση της ενέργειας από τον αποσβεστήρα και τον περιορισμό της ενέργειας που διαχέεται σε αυτόν. Επίσης έγινε η μοντελοποίηση της διάταξης και η σύγκρισή του με το μοντέλο ενός συμβατικού αποσβεστήρα.

5.1 Μοντέλο Συμβατικού Αποσβεστήρα

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη σχεδίαση ενός συμβατικού αποσβεστήρα. Η σύνδεση και η τοποθέτηση των διαφόρων μερών του αποσβεστήρα μπορεί να είναι διαφορετική από αυτήν που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση ωστόσο οι βασικές αρχές λειτουργίας παραμένουν ουσιαστικά οι ίδιες σε κάθε διαφορετική διάταξη.

Ο αποσβεστήρας αποτελείται από το βάκτρο (έμβολο), το οποίο κινείται μέσα στον κυρίως κύλινδρο της ανάρτησης. Ο κύλινδρος συνδέεται με ένα εξωτερικό ρεζερβουάρ στο οποίο υπάρχει μέσα ειδικό αέριο. Στον κύλινδρο υπάρχει το ρευστό το οποίο κατά την κίνηση του εμβόλου ένα μέρος του περνάει μέσα από τις βαλβίδες του βάκτρου στην άλλη πλευρά του εμβόλου και το υπόλοιπο ρευστό διοχετεύεται μέσω των βαλβίδων ποδός (foot valves) στο ρεζερβουάρ με αποτέλεσμα την συμπίεση του αερίου.



Εικόνα 31. Διάταξη συμβατικού αποσβεστήρα

Κατά τη διαδικασία της συμπίεσης (κίνηση του εμβόλου προς τα αριστερά) το υδραυλικό ρευστό μετατοπίζεται από το έμβολο και εξαναγκάζεται να διέλθει μέσω των βαλβίδων ποδός και μέσω των βαλβίδων του ίδιου του εμβόλου. Επειδή η επιφάνεια του εμβόλου (Piston Chamber) είναι μεγαλύτερη της επιφάνειας του από την πλευρά του βάρου (Rod Chamber) λόγω του όγκου του άξονα (Stamp) όπως φαίνεται στο σχήμα ισχύουν:

$$A_{piston} \cdot x = A_{rod} \cdot x + A_{stamp} \cdot x \quad (5.1)$$

Όπου x : η μετατόπιση του εμβόλου

A_{piston} : επιφάνεια του εμβόλου

A_{rod} : επιφάνεια βάρου

A_{stamp} : επιφάνεια άξονα

Αντίστοιχα για την παροχή όγκου του υδραυλικού ρευστού ισχύουν οι εξισώσεις:

$$\Delta V_{piston} = A_{piston} \cdot x \quad (5.2)$$

$$\Delta V_{rod} = A_{rod} \cdot x \quad (5.3)$$

$$\Delta V_{stamp} = A_{stamp} \cdot x \quad (5.4)$$

Και λόγω της εξίσωσης συνέχειας:

$$\Delta V_{piston} = \Delta V_{rod} + \Delta V_{stamp} \quad (5.5)$$

Λόγω του όγκου του άξονα ο οποίος εισέρχεται μέσα στον χώρο του κυλίνδρου κατά τη συμπίεση το υδραυλικό ρευστό διοχετεύεται στον χώρο του ρεζερβουάρ

συμπιέζοντας το αέριο. Ο όγκος του είναι ίσος με τον όγκο του άξονα που εισέρχεται στον κύλινδρο (ΔV_{stamp}).

Εξαιτίας της μη συμπιεστότητας του υδραυλικού ρευστού επομένως, το αέριο του ρεζερβουάρ συμπιέζεται. Η συμπίεση του ακολουθεί το Νόμο των Αερίων και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{pV^n}{T} = C \quad (5.6)$$

Όπου n: ο πολυτροπικός εκθέτης (1.4 για αδιαβατική μεταβολή και 1 για ισόθερμη)

C: σταθερά

T: η θερμοκρασία του αερίου

P: η πίεση του αερίου

Η λειτουργία του αερίου είναι αντίστοιχη με αυτήν του υδραυλικού συσσωρευτή (Accumulator) και με βάση την παραπάνω εξίσωση κατά τη συμπίεση της ανάρτησης η πίεση του αερίου είναι:

$$p_3 = \frac{p_0 V_0^n}{V_3^n} = \frac{p_0 V_0^n}{(V_0 - \Delta V_{stamp})^n} \quad (5.7)$$

- Όπου P_0 και V_0 η αρχική πίεση και ο όγκος του αερίου πριν την επιβολή της συμπίεσης
- P_3 και V_3 η πίεση και ο όγκος αντίστοιχα μετά την συμπίεση

Κατά τη διαδικασία της έκτασης της ανάρτησης συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία. Η πίεση του αερίου αυξάνεται στην φάση της συμπίεσης και μειώνεται κατά την έκταση. Στο τέλος επανέρχεται στην κατάσταση ισορροπίας. Η λειτουργία επομένως του αερίου ή του συσσωρευτή αντικαθιστά τη λειτουργία του ελατηρίου καθώς επιτελεί τον ίδιο ρόλο. Η μόνη διαφορά είναι ότι η δύναμη ελατηρίου που αναπτύσσεται δεν είναι γραμμική ως προς την μετατόπιση λόγω του πολυτροπικού εκθέτη. (με θεώρηση ισόθερμης μεταβολής η λειτουργία είναι ίδια με αυτή του γραμμικού ελατηρίου).

Στους συμβατικούς αποσβεστήρες ωστόσο η δράση του αερίου ως ελατήριο δεν επαρκεί για να υποστηρίξει το βάρος ολόκληρου το οχήματος καθώς δεν είναι ανάλογος ο λόγος της πίεσης του αερίου προς την επιφάνεια του άξονα (stamp) με τον λόγο του βάρους του οχήματος προς την επιφάνεια του εμβόλου.

Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σπειροειδή ελατήρια σε παράλληλη διάταξη με τον αποσβεστήρα για να υποστηρίξουν το επιπλέον βάρος του οχήματος.

Η δύναμη που παράγεται συνολικά από τον αποσβεστήρα μπορεί να αναλυθεί σε δύο διαφορετικές συνιστώσες, σε μία δύναμη ελατηρίου (spring force) και σε μία δύναμη απόσβεσης (damper force).

Σε συνθήκες ισορροπίας (steady state) δεν υπάρχει μετάδοση υδραυλικού ρευστού μεταξύ των διαφορετικών χώρων του αποσβεστήρα και οι πίεση είναι ίδια για κάθε χώρο. (στις δύο πλευρές του εμβόλου και στο ρεζερβουάρ). Σε σταθερή κατάσταση λοιπόν η δύναμη του αποσβεστήρα είναι μόνο η συνιστώσα της δύναμης ελατηρίου καθώς χωρίς ταχύτητα κίνησης του εμβόλου δεν υπάρχει δύναμη απόσβεσης.

Οπότε: $F_{spring} = p_3 A_{stamp}$

Για τη δύναμη του αποσβεστήρα χρησιμοποιείται η εξίσωση Bernoulli μεταξύ των σημείων εκατέρωθεν των βαλβίδων του αποσβεστήρα. Η ροή μέσω των βαλβίδων δημιουργεί πτώση πίεσης και πολλαπλασιαζόμενη με την επιφάνεια στην οποία δρα παράγεται η δύναμη απόσβεσης. Αυτός ο μηχανισμός λειτουργίας περιγράφεται από την εξίσωση:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \Delta p_{st} \quad (5.8)$$

Η κατάσταση '1' αναφέρεται στη θέση αριστερά του εμβόλου (piston chamber) ενώ η κατάσταση '2' στη δεξιά πλευρά (rod chamber). Καθώς η διάμετρος του εμβόλου είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την διάμετρο της βαλβίδας η ταχύτητα στο χώρο του κυλίνδρου μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά μηδενική και οι απώλειες στατικής πίεσης μεταξύ των δύο χώρων μηδενικές.

$$\text{Για } V_2 = Q_{piston} / (C_d a_{piston}), V_1 = 0 \text{ και } \Delta p_{st} = 0 \quad (5.9)$$

$$p_1 - p_2 = \frac{Q_{piston}^2}{C_d^2 a_{piston}^2} \frac{\rho}{2} \quad (5.10)$$

Όπου Q_{piston} η συνολική ροή ρευστού μέσω των βαλβίδων, επιφάνειας a_{piston} .

C_d : ο συντελεστής απόσβεσης των βαλβίδων ο οποίος εξαρτάται από τη διάμετρό τους και το σχήμα τους.

Αντίστοιχα ισχύουν μεταξύ του χώρου του κυλίνδρου και του ρεζερβουάρ.

$$p_1 - p_3 = \frac{Q_{foot}^2}{C_d^2 a_{foot}^2} \frac{\rho}{2} \quad (5.11)$$

Η κατάσταση '3' αφορά τον χώρο του ρεζερβουάρ. (oil chamber)

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ο όρος της δύναμη απόσβεσης του αμορτισέρ ως:

$$F_{damper} = (p_1 - p_2)A_{piston} + (p_1 - p_3)A_{stamp} = \frac{Q_{piston}^2}{C_d^2 a_{piston}^2} \frac{\rho}{2} A_{piston} + \frac{Q_{foot}^2}{C_d^2 a_{foot}^2} \frac{\rho}{2} A_{stamp} \quad (5.12)$$

Προσθέτοντας τις δύο συνιστώσες η συνολική δύναμη του αποσβεστήρα είναι:

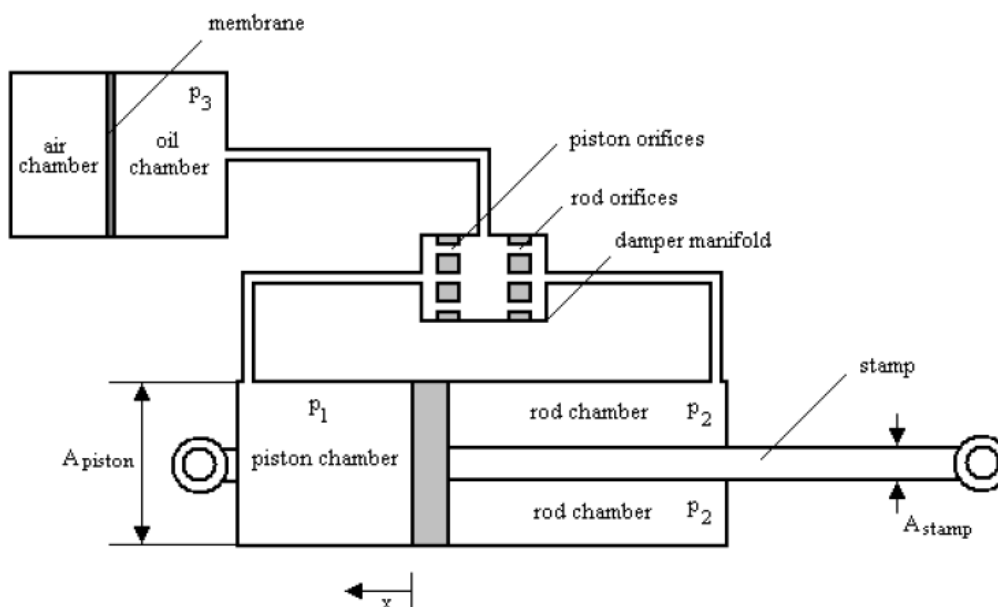
$$F_{stut} = F_{spring} + F_{damper} = p_3 A_{stamp} + \frac{Q_{piston}^2}{C_d^2 a_{piston}^2} \frac{\rho}{2} A_{piston} + \frac{Q_{foot}^2}{C_d^2 a_{foot}^2} \frac{\rho}{2} A_{stamp} \quad (5.13)$$

5.2 Σχεδίαση Υδροπνευματικής Ανάρτησης με χρήση Συσσωρευτή

Η κεντρική ιδέα για την σχεδίαση που προτείνεται στην παρούσα εργασία είναι η χρήση ηλεκτροενεργών πολυμερών υλικών για την ανάκτηση της ενέργειας του αποσβεστήρα. Τα ηλεκτροενεργά πολυμερή είναι διατάξεις που παράγουν τάση ρεύματος ανάλογη με την παραμόρφωσή τους. Περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται σε επόμενο εδάφιο. Επομένως η ιδέα ήταν να υπάρξει ένα κατάλληλο design ανάρτησης που να επιτρέπει την μεταφορά της ενέργειας από τη διέγερση του οδοστρώματος σε μία μορφή ενέργειας που να μπορεί έπειτα να μετατραπεί ή να αποθηκευτεί. Για το σκοπό αυτό προτείνεται η χρήση της ακόλουθης διάταξης υδροπνευματικής ανάρτησης η οποία χρησιμοποιείται στα φορτηγά οχήματα που αγωνίζονται στο rally Dakar.

Η διάταξη αποτελείται από τον κύλινδρο του αποσβεστήρα μέσα στον οποίο κινείται το έμβολο, το οποίο όμως σε αντίθεση με το μοντέλο του συμβατικού αποσβεστήρα δεν περιλαμβάνει σπές (βαλβίδες). Κατά την κίνηση του εμβόλου το υδραυλικό ρευστό ωθείται να περάσει από το σύστημα βαλβίδων και ένα μέρος αυτού οδηγείται στην άλλη πλευρά του εμβόλου και η περίσσεια του ρευστού μέσα στο συσσωρευτή. Ο συσσωρευτής σε αυτή τη διάταξη μπορεί να επικοινωνεί και με τις δύο πλευρές του εμβόλου σε αντίθεση με το ρεζερβουάρ του συμβατικού αμορτισέρ.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη της ανάρτησης.



Εικόνα 32. Υδροπνευματικός αποσβεστήρας με accumulator

Να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη διάταξη που χρησιμοποιείται στα αγωνιστικά φορτηγά όπως αναφέρθηκε, οι βαλβίδες ελέγχονται από ηλεκτρικό ρεύμα (ηλεκτροβαλβίδες) με αποτέλεσμα η ημιενεργητική ανάρτηση να μπορεί να έχει ελεγχόμενα χαρακτηριστικά από τον οδηγό.

Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης όσο αναφορά τη δυνατότητα που προσφέρει για ανάκτηση ενέργειας είναι η χρήση του μεγάλου σε όγκο συσσωρευτή.

Η επιφάνεια του συσσωρευτή παραμορφώνεται σε κάθε διέγερση της ανάρτησης και επομένως με την αντικατάστασή της με ένα ηλεκτροενεργό πολυμερές θα μπορούσε να παραχθεί ενέργεια (ηλεκτρική τάση) σε κάθε κίνηση του αμορτισέρ. Επιπρόσθετα η επιφάνεια ενός συσσωρευτή χαρακτηρίζεται αρκετά μεγάλη στοιχείο που ενισχύει την ικανότητα για ανάκτηση ενέργειας από ηλεκτροενεργά πολυμερή υλικά καθώς η ενέργεια που παράγουν είναι ανάλογη της παραμόρφωσης και του εμβαδού της επιφάνειάς τους.

5.3 Μοντελοποίηση της υδροπνευματικής ανάρτησης

Για την μελέτη της συγκεκριμένης διάταξης που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο είναι απαραίτητη η εύρεση του μηχανισμού λειτουργίας της, δηλαδή το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη λειτουργία του αμορτισέρ.

Αρχικά καταγράφονται οι εξισώσεις για κάθε υποσύστημα της διάταξης και μετά γίνεται η σύνδεση αυτών ώστε να υπολογιστεί τελικά η δύναμη απόσβεσης που

παράγεται από αυτόν τον τύπο αποσβεστήρα και οι παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται.

Με τη σχεδίαση αυτή το υδραυλικό ρευστό κινείται κάθε στιγμή προς το μέσα ή έξω από τον κύλινδρο και επομένως αφού δεν υπάρχουν οπές στο βάκτρο πρέπει να θεωρηθεί ως ένα υδραυλικό έμβολο και όχι ως αποσβεστήρας. Αντίστοιχα με την ανάλυση που έγινε για τον συμβατικό αποσβεστήρα και σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να γίνει η θεώρηση ότι η συνολική δύναμη του αποσβεστήρα κατανέμεται ως δύναμη ελατηρίου και δύναμη απόσβεσης. Επομένως με αντίστοιχη ανάλυση κατά τη συνθήκη ισορροπίας του οχήματος (μηδενική μετατόπιση της ανάρτησης), η δύναμη του αποσβεστήρα είναι η δύναμη ελατηρίου. Οι δύο αυτές δυνάμεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και η δύναμη ελατηρίου σχετίζεται αποκλειστικά από τη θέση του εμβόλου (μετατόπιση) ενώ η δύναμη απόσβεσης από την παροχή ρευστού (ταχύτητα) του εμβόλου.

Επομένως η δύναμη ελατηρίου εξαρτάται από τη συμπίεση του αερίου του συσσωρευτή και είναι ίση με το βάρος της αναρτώμενης μάζας που αντιστοιχεί στον αποσβεστήρα.

Για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να θεωρηθεί και ο λόγος μετατόπισης του τροχού προς τη μετατόπιση του αποσβεστήρα που υπολογίζει τη γεωμετρική συσχέτιση του μοχλοβραχίονα της ανάρτησης.

$$r_i = \frac{x_{wheel}}{x_{damper}} \quad (5.14)$$

$$\text{Και ισχύει } \frac{pV^n}{T} = C \quad (5.15)$$

με $P_{acc}=P_3$,

$$\text{τελικά: } p_{acc} A_{stamp} = \frac{m_g g}{2} r_i \quad (5.16)$$

$$F_{spring}=P_{acc} A_{stamp} \quad (5.17)$$

Η δύναμη που εφαρμόζεται κάθε στιγμή στο έμβολο είναι η διαφορά δύναμης μεταξύ των δύο πλευρών του εμβόλου (όπου κάθε στιγμή ισχύει $P=F A$), οπότε:

$$F_{sus}=F_{piston}-F_{rod} \quad (5.18)$$

$$F_{sus}=A_{piston} P_{piston}-A_{rod} P_{rod} \quad (5.19)$$

Και γνωρίζοντας ότι η δύναμη του αποσβεστήρα μπορεί να διααιρεθεί στις δύο κατηγορίες όπως αναφέρθηκε, ισχύει:

$$F_{sus} = F_{damper} + F_{spring} \quad (5.20)$$

Με αντικατάσταση των (5.18) (5.19) , στην (5.20) μπορεί να υπολογιστεί η δύναμη F_{damper} ως:

$$F_{damper} = P_1 \cdot A_{piston} - P_2 \cdot A_{rod} - P_3 \cdot A_{stamp} \quad (5.21)$$

$$F_{damper} = P_1 \cdot A_{piston} - P_2 \cdot A_{rod} - P_3 \cdot (A_{piston} - A_{rod}) \quad (5.22)$$

$$F_{damper} = P_1 \cdot A_{piston} - P_2 \cdot A_{rod} - P_3 \cdot A_{piston} + P_3 \cdot A_{rod} \quad (5.23)$$

$$\text{Επομένως, } F_{damper} = (P_1 - P_3) \cdot A_{piston} + (P_3 - P_2) \cdot A_{rod} \quad (5.24)$$

Η υπόλοιπη διάταξη μοντελοποιείται ως εξής:

Μετατόπιση του εμβόλου προκαλεί αντίστοιχα την παροχή υδραυλικού ρευστού:

$$\Delta V_{piston} = A_{piston} \cdot x \quad (5.25)$$

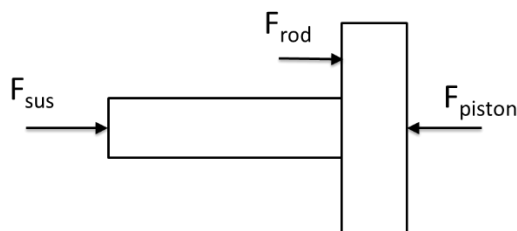
$$Q_{piston} = A_{piston} \cdot \dot{x}$$

$$\Delta V_{rod} = A_{rod} \cdot x$$

$$Q_{rod} = -A_{rod} \cdot \dot{x} \quad (5.26)$$

Οι πιέσεις μετατρέπονται σε δυνάμεις μέσω της δράσης τους στις δύο πλευρές του υδραυλικού κυλίνδρου

$$F_{sus} = F_{piston} - F_{rod} \quad (5.27)$$



Εικόνα 33. Δ.Ε.Σ. εμβόλου

Η πτώση πίεσης που προκαλείται κάθε φορά που το υδραυλικό μέσο διέρχεται από τις βαλβίδες και περιγράφει τη διαφορά πίεσης μεταξύ των τριών χώρων της διάταξης υπολογίζεται με εφαρμογή του νόμου Bernoulli για σημεία εκατέρωθεν των βαλβίδων.

Έτσι το μοντέλο των βαλβίδων δίνει:

$$P_1 - P_3 = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{Q_{piston}^2}{C_d^2 \cdot a_{piston}^2} \cdot A_{piston} + \Delta P_{stagnation}^1 \quad (5.28)$$

$$P_3 - P_2 = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{Q_{rod}^2}{C_d^2 \cdot a_{rod}^2} \cdot A_{rod} + \Delta P_{stagnation}^2 \quad (5.29)$$

$$\text{Όπου } \Delta P_{stagnation} = k \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{2 \cdot A^2} \quad (5.30)$$

Accumulator-Συσσωρευτής

Ο συσσωρευτής εκτελεί το έργο του ελατηρίου στη διάταξη καθώς η δύναμη που παράγεται σε αυτόν εξαρτάται από τη μετατόπιση του εμβόλου, δηλαδή τη θέση της ανάρτησης σε σχέση με τη θέση ισορροπίας. Η λειτουργία του οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω της διαφοράς όγκου του ρευστού εκατέρωθεν του κυλίνδρου (διότι υπάρχει ο όγκος του άξονα που εισέρχεται στον κύλινδρο) κατά τη συμπίεση αποθηκεύει την περίσσεια όγκου του ρευστού αυξάνοντας επομένως την πίεση του αεροθυλακίου. Η εξίσωση που το χαρακτηρίζει είναι η εξίσωση του νόμου των αερίων. Η μοντελοποίηση του Accumulator περιγράφεται με τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} A_{stamp} &= A_{piston} - A_{rod} \\ \Delta V_{stamp} &= \Delta V_{piston} - \Delta V_{rod} = A_{piston} \cdot x - A_{rod} \cdot x = A_{stamp} \cdot x \\ V_{acc} &= V_0 - \Delta V_{stamp} \\ P_{acc} &= \frac{P_0 \cdot V_0^n}{(V_0 - \Delta V_{stamp})^n} \end{aligned} \quad (5.31)$$

Με αντικατάσταση των εξισώσεων υπολογίζονται οι δυνάμεις ελατηρίου και αποσβεστήρα ως:

$$F_{spring} = P_{acc} \cdot A_{stamp} \quad (5.32)$$

$$F_{Damper} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{Q_{piston}^2}{C_D^2 \cdot a_{piston}^2} \cdot A_{piston} + \frac{\rho}{2} \cdot \frac{Q_{rod}^2}{C_D^2 \cdot a_{rod}^2} \cdot A_{rod} + \Delta P_{st}^1 + \Delta P_{st}^2 \quad (5.33)$$

Και επειδή η παροχή είναι $Q = A \cdot V$ τελικά:

$$F_{spring} = \frac{P_0 \cdot V_0^n \cdot A_{stamp}}{[V_0 - A_{stamp} \cdot x]^n} = \frac{\lambda_1}{[V_0 - A_{stamp} \cdot x]^n} \quad (5.34)$$

$$F_{Damper} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{A_{piston}^3}{C_D^2 \cdot a_{piston}^2} \cdot \dot{x}^2 + \frac{\rho}{2} \cdot \frac{A_{rod}^3}{C_D^2 \cdot a_{rod}^2} \cdot \dot{x}^2 + \frac{2 \cdot k \cdot \rho \cdot A_{piston}^2}{2 \cdot A^2} \cdot \dot{x}^2 \quad (5.35)$$

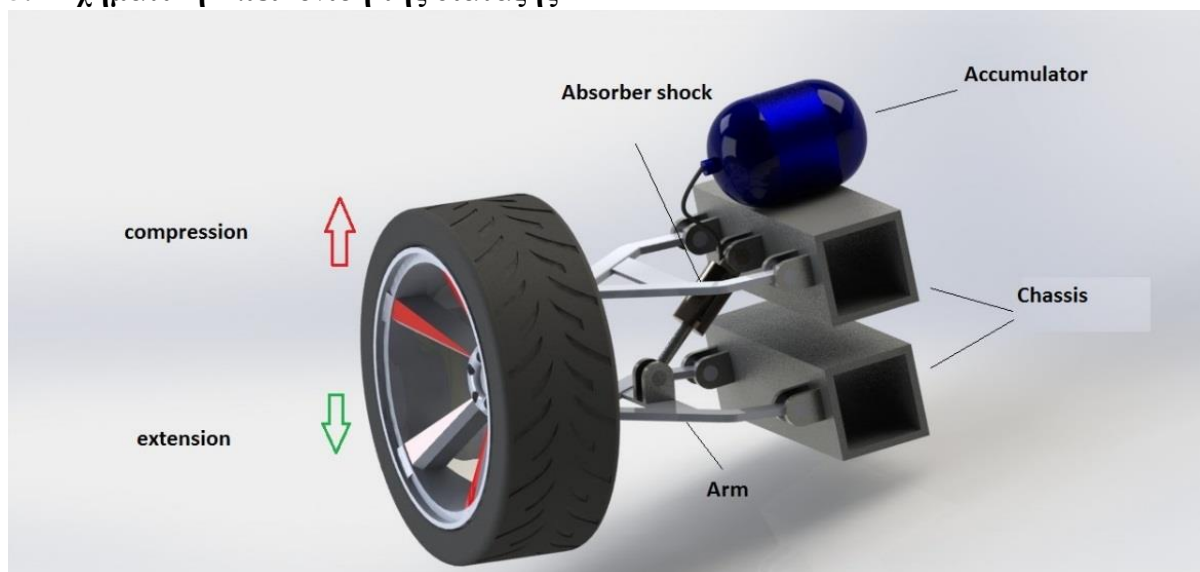
$$\begin{aligned}
\lambda_1 &= P_0 \cdot V_0^n \cdot A_{stamp} \\
\lambda_2 &= \frac{\rho}{2} \cdot \frac{A_{piston}^3}{C_D^2 \cdot a_{piston}^2} \\
\lambda_3 &= \frac{\rho}{2} \cdot \frac{A_{rod}^3}{C_D^2 \cdot a_{rod}^2} \\
\lambda_4 &= \frac{2 \cdot k \cdot \rho \cdot A_{piston}^2}{2 \cdot A^2}
\end{aligned}
\tag{5.36}$$

όπου

Οι σχέσεις στις οποίες κατέληξε η μοντελοποίηση της υδροπνευματικής ανάρτησης είναι ιδιαίτερα σημαντικές καθώς αποτελούν έκφραση της δύναμης του αποσβεστήρα συναρτήσει της μετατόπισης, της ταχύτητας και των υπόλοιπων γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διάταξης όπως είναι οι διάμετροι των κυλίνδρων, των βαλβίδων και των χαρακτηριστικών του Accumulator (αρχικός όγκος και προφόρτιση).

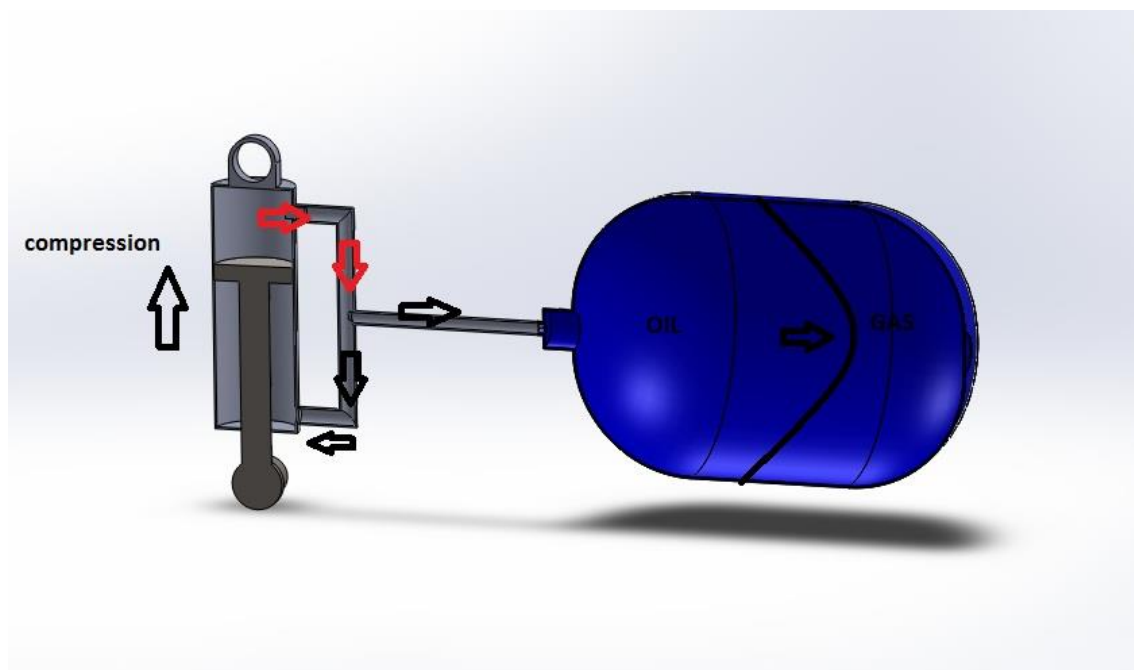
Με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτός ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της διάταξης ώστε να αποδίδει κάθε φορά την ίδια συμπεριφορά με το αντίστοιχο συμβατικό σύστημα ανάρτησης αλλά με το πλεονέκτημα της ανάκτησης ισχύος. Στα πλεονεκτήματα της διάταξης αυτής είναι η μη απαραίτητη χρήση σπειροειδών ελατηρίων και η συμβατότητα της διάταξης με ημιενεργητικές και ενεργητικές διατάξεις ανάρτησης.

5.4 Σχηματική Απεικόνιση της διάταξης



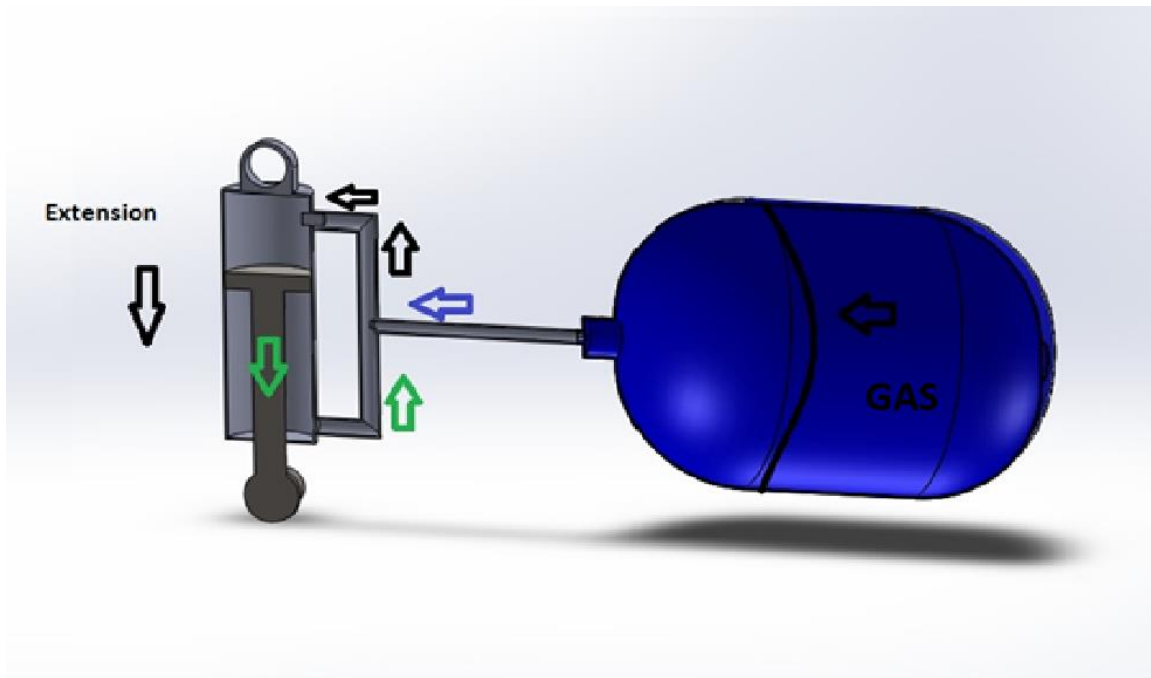
Εικόνα 34. Διάταξη υδροπνευματικής ανάρτησης

Η λειτουργία της διάταξης περιγράφεται σχηματικά στις ακόλουθες εικόνες. Κατά τη φάση της συμπίεσης το υδραυλικό ρευστό που ωθείται, προκαλεί την παραμόρφωση του ηλεκτροενεργού πολυμερούς.



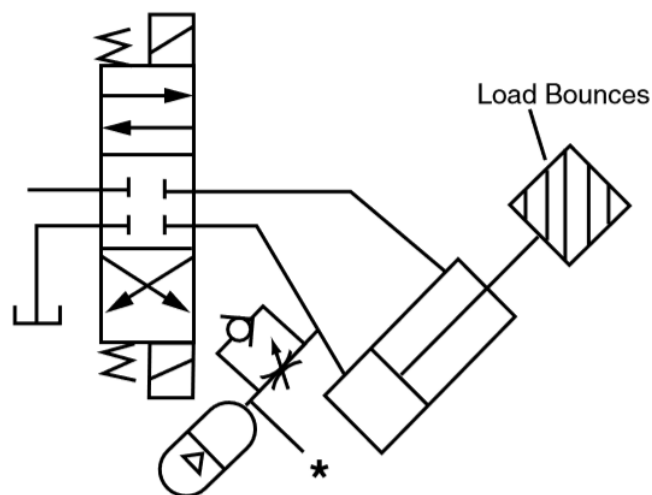
Εικόνα 35. Μετατόπιση υδραυλικού ρευστού κατά τη συμπίεση

Αντίθετα κατά την επαναφορά της ανάρτησης στη θέση ισορροπίας της το πολυμερές επαναφέρεται στην αρχική του κατάσταση.



Εικόνα 36. Μετατόπιση υδραυλικού ρευστού κατά την επιστροφή

Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται γενικά οι συσσωρευτές σε διατάξεις αποσβεστήρων περιλαμβάνει την ακόλουθη συνδεσμολογία που απεικονίζεται στο σχήμα:



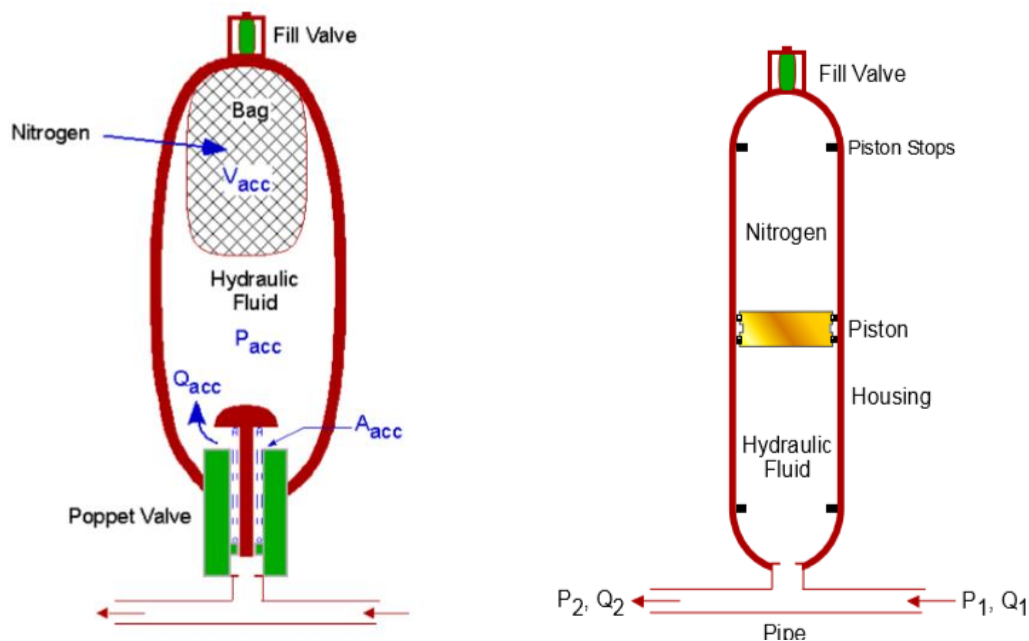
Εικόνα 37. Τυπική συνδεσμολογία συσσωρευτή σε διατάξεις απόσβεσης

5.5 Αποθήκευση Ενέργειας

Το χαρακτηριστικό της διάταξης που αναπτύχθηκε στις προηγούμενες παραγράφους είναι ότι επιτρέπει την ανάκτηση ενέργειας σε μορφή υδραυλικής πίεσης μέσα στον συσσωρευτή. Η ενέργεια αυτή μπορεί να μετατραπεί, να αποθηκευτεί και να αποδοθεί ξανά μέσω επενεργητών. Για την αποθήκευση και απόδοση της ενέργειας υπάρχουν πολλές εναλλακτικές λύσεις οι οποίες αποτελούν πεδίο περαιτέρω έρευνας που δεν συμπεριλαμβάνεται στην παρούσα εργασία.

Στην παράγραφο αυτή αναλύεται ο μηχανισμός με τον οποίο οι συσσωρευτές αποθηκεύουν ενέργεια και συγκρίνεται η λειτουργία τους και η χωρητικότητά τους με τις ηλεκτρικές μπαταρίες.

Για τους συσσωρευτές με αεριοφυλάκιο σημαντικό ρόλο στην αποταμίευση ενέργειας έχουν τα χαρακτηριστικά του όπως η πίεση προφόρτισης και ο όγκος που καταλαμβάνει το αέριο στην αρχή της συμπίεσης. Τυπικές τιμές είναι $P_0=0.9 P_1$ και $P_2 < 3 P_1$



Εικόνα 38. Συσσωρευτής με αεριοφυλάκιο και Συσσωρευτής με αέριο και έμβολο

Οι μεταβολές του αερίου είναι πολυτροπικές αλλά συνήθως λαμβάνονται αδιαβατικές. Ισχύει μεταξύ δύο καταστάσεων:

$$P_0 V_0^n = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n \quad (5.37)$$

Ο όγκος του αερίου που ελαττώνεται λόγω του εισερχόμενου υδραυλικού ρευστού είναι

$$\Delta V = V_1 - V_2 \quad (5.38)$$

$$\Delta V = V_0 \left\{ \left(\frac{p_o}{p_1} \right)^{1/n} - \left(\frac{p_o}{p_2} \right)^{1/n} \right\} \quad (5.39)$$

Για την περίπτωση του συσσωρευτή με αέριο και έμβολο και ξανά αδιαβατική μεταβολή ισχύουν:

$$Q_2 - Q_1 = V_1 - V_2 \quad (5.40)$$

$$\text{και } pV^\gamma = \text{const} \quad (5.41)$$

$$\text{προκύπτει } C\Delta p_2 = Q_2 - Q_1 \quad (5.42)$$

$$\text{Όπου } C = \frac{V_1 p_1^{1/\gamma}}{\gamma p_2^{(\gamma+1)/\gamma}} \quad (5.43)$$

Το έργο ΔW που απαιτείται για την αδιαβατική μεταβολή $dq=0$ είναι:

$$dE = dW = -pdV \quad (5.44)$$

Και τελικά η αποταμιευθείσα ενέργεια στον συσσωρευτή είναι:

$$\Delta E = \Delta W = -\int_1^2 pdV = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{\gamma - 1} = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right\} \quad (5.45)$$

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η ενέργεια που αποθηκεύεται και η ισχύς που αποδίδεται σε χρόνο 10 sec, σε συσσωρευτές ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τον τύπο τους όπως αναφέρονται στους καταλόγους των κατασκευαστών.

Accumulator	V1(L)	P1(bar)	V2(L)	P2(bar)	E(kJ)	E(kwh)	weight (Kg)	Power(kW) (10 sec)	ENERGY DENSITY (kJ/kg)	POWER DENSITY (kW/Kg)
Bladder										
3,79-210	3,5	80,00	1,00	200	20	0,006	14	2,00	1,43	0,14
9,46-210	9,4	80,00	2,69	200	54	0,015	39	5,37	1,38	0,14
18,9-210	18	80,00	5,14	200	103	0,028	63	10,29	1,63	0,16
37,9-210	37	80,00	10,57	200	211	0,059	102	21,14	2,07	0,21
41,6-210	41	80,00	11,71	200	234	0,065	123	23,43	1,90	0,19
50-400	49	152,00	14,00	380	532	0,147	150	53,20	3,55	0,35
					0	0,000				
9,46-345	9,4	128,00	2,69	320	86	0,024	52	8,59	1,65	0,17
18,9-345	18	128,00	5,14	320	165	0,046	73	16,46	2,25	0,23
37,9-245	37	128,00	10,57	320	338	0,094	113	33,83	2,99	0,30
Diaphragm										
3,5-250	3,2	80,00	0,91	200	18	0,005	11	1,83	1,66	0,17

Πίνακας 4.Υπολογισμοί για Accumulator -Δεδομένα Κατασκευαστών

Χαρακτηριστικό της αποθήκευσης ενέργειας σε υδραυλικούς συσσωρευτές είναι η χαμηλή συγκέντρωση ενέργειας που έχουν σε σχέση με τις μπαταρίες αλλά αντίθετα την υψηλή συγκέντρωση ισχύος που τα χαρακτηρίζει λόγω της ικανότητας απόδοσης όλης της αποθηκευμένης ενέργειας σε πολύ μικρό χρόνο. Η επιλογή φυσικά του τρόπου αποθήκευσης της ενέργειας είναι μία σύνθετη διαδικασία η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που διαφέρουν ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.

Κεφάλαιο 6^ο : Συμπεράσματα

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία μελετά τη δυνατότητα των συστημάτων ανάρτησης να χρησιμοποιηθούν ως συστήματα ανάκτησης ενέργειας. Δηλαδή, διερευνάται κατά πόσο είναι εφικτός ο περιορισμός της διάχυσης ενέργειας (υπό μορφή θερμότητας) του αποσβεστήρα στο περιβάλλον και με ποιόν τρόπο μπορεί να επιτευχθεί η ανάκτηση της για ιδιοκατανάλωση του οχήματος.

Στο πρώτο σκέλος της εργασίας γίνεται μία πρώτη ποσοτική προσέγγιση της ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί από το σύστημα των αναρτήσεων. Το μοντέλο με το οποίο γίνεται η ανάλυση είναι προσεγγιστικό αφού προσομοιώνει το σύστημα ανάρτησης-οχήματος με τη χρήση μοντέλου ενός βαθμού ελευθερίας που αποτελείται από μία μάζα- ένα αποσβεστήρα και ένα ελατήριο που τους επιβάλλεται μετατόπιση. Σκοπός της προσέγγισης αυτής είναι να βρεθεί η τάξη μεγέθους της ενέργειας που διαχέεται στα συστήματα ανάρτησης ανά τύπο οχήματος και που επομένως μπορεί θεωρητικά να ανακτηθεί. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για ένα μεσαίο επιβατικό όχημα που κινείται σε τυπικό προφίλ οδοστρώματος η ισχύς αυτή φτάνει τα 400W ενώ για οχήματα με μεγαλύτερη μάζα η ισχύς φτάνει τα 3000W για αντίστοιχες συνθήκες. Τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται ενθαρρυντικά και παράλληλα τίθεται ως βασικός τεχνολογικός στόχος τα βαρέα οχήματα όπως λεωφορεία και φορτηγά. Στη συνέχεια για την ακριβέστερη μελέτη του συστήματος αναπτύσσεται υπολογιστικός κώδικας που προσομοιώνει το σύστημα της ανάρτησης με το μοντέλο Quarter Car Model – 2 BE. Με τον τρόπο αυτό και έπειτα από πολλές διαφορετικές συνθήκες που δοκιμάζονται, γίνεται αντιληπτός ο μηχανισμός λειτουργίας του συστήματος και ο τρόπος με τον οποίο τα δυναμικά χαρακτηριστικά της ανάρτησης επιδρούν στο ποσό της δυνητικά ανακτώμενης ενέργειας.

Το δεύτερο σκέλος της εργασίας αφορά στη μελέτη των Μαγνητορολογικών αποσβεστήρων οι οποίοι αποτελούν σύγχρονη τεχνολογία στον τομέα των αποσβεστήρων. Με χρήση διάταξης μάζας-ελατηρίου-μαγνητορολογικού αποσβεστήρα που ελέγχεται από υδραυλικό σύστημα, επιβάλλεται μετατόπιση και καταγράφονται από τα μετρητικά συστήματα η ταχύτητα κίνησης, οι μετατοπίσεις, οι δυνάμεις και υπολογίζεται τελικά η ισχύς. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα από τον υπολογιστικό κώδικα και επιτρέπεται η διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το αν το γραμμικό μοντέλο του κώδικα προσομοιώνει με επάρκεια τη μη γραμμική συμπεριφορά του πραγματικού αμορτισέρ. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται από τις μετρήσεις η μη γραμμική συμπεριφορά του αμορτισέρ γίνεται αντιληπτή μετά από μετατόπιση 15mm ενώ μέχρι τότε είναι απολύτως γραμμικό. Τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση ήταν πρακτικά ίδια με μικρή απόκλιση οπότε μπορεί να υποστηριχθεί ότι το υπολογιστικό μοντέλο δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για τη χρήση πραγματικών αποσβεστήρων.

Στο τρίτο σκέλος σχεδιάζεται μία διάταξη υδροπνευματικής ανάρτησης που μπορεί να αντικαταστήσει τις διατάξεις των συμβατικών αποσβεστήρων. Για την αποθήκευση της ενέργειας χρησιμοποιείται υδραυλικός συσσωρευτής στο οποίο η επιφάνεια του αεροφυλακίου του αντικαθίσταται από ηλεκτροενεργό πολυμερές στοιχείο. Παράλληλα η μοντελοποίηση του συστήματος καταλήγει στην εύρεση της έκφρασης των δυνάμεων απόσβεσης και ελατηρίου συναρτήσει μόνο γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτός ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της διάταξης ώστε να αποδίδει κάθε φορά την ίδια συμπεριφορά με το αντίστοιχο συμβατικό σύστημα ανάρτησης αλλά με το πλεονέκτημα της ανάκτησης ισχύος. Στα πλεονεκτήματα της διάταξης αυτής είναι η μη απαραίτητη χρήση σπειροειδών ελατηρίων και η συμβατότητα της διάταξης με ημιενεργητικές και ενεργητικές διατάξεις ανάρτησης.

6.2 Προτάσεις για το μέλλον

- Η παρούσα εργασία κατέληξε στο ότι αξίζει η κατασκευή της διάταξης που αναπτύχθηκε ωστόσο απομένουν αρκετές εργασίες που πρέπει να γίνουν για την ολοκληρωμένη εικόνα του αντικειμένου. Προτείνονται τα εξής:
- Ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου που περιγράφει τη λειτουργία του ηλεκτροενεργού πολυμερούς και σύνδεσή του με το παρών μοντέλο. Έτσι, θα προκύψει κώδικας που θα μπορεί να υπολογίζει την ηλεκτρική τάση που θα λαμβάνεται στα άκρα του πολυμερούς για κάθε μετατόπιση από τις διεγέρσεις του εδάφους.
- Κατασκευή του υδραυλικού αποσβεστήρα και σχεδίαση του υδραυλικού κυκλώματος του συστήματος
- Αντικατάσταση του αεροθυλακίου ή του εμβόλου του συσσωρευτή με το πολυμερές
- Διεξαγωγή μετρήσεων με το τελικό προϊόν και σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα από τον υπολογιστικό κώδικα.
- Οικονομοτεχνική Μελέτη του προϊόντος

Βιβλιογραφία

1. John C. Dixon: The Shock Absorber Handbook
2. John C. Dixon: Tires, Suspension and Handling, second edition
3. Hans B. Pacejka: Tyre and Vehicle Dynamics
4. Κωστόπουλος Θ.: Υδραυλικά και Πνευματικά Συστήματα
5. Νατσιάβας Σ. : Ταλαντώσεις Μηχανικών Συστημάτων
6. Reza N. Jazar: Vehicle Dynamics: Theory and Applications
7. Claudiu Valentin Suci, Tsubasa Tobiishi, and Ryouta Mouri: Modeling and Simulation of a Vehicle Suspension with Variable Damping versus the Excitation Frequency
8. Miroslav Demic, Σπέντζας Κ.: Θεωρία Κινήσεως Τροχοφόρων Οχημάτων
9. M. Salem, W. Galal: Identification of Characteristics of Hydraulic Shock Absorbers Used in Light Weight Tracked Vehicles
10. Vikram Kedambadi Vasu: Regenerative Magnetic Shock Absorbers
11. Augustaitis, V. K., Gičan V., Šešok N., Iljin I. Computer-aided generation of equations and structural diagrams for simulation of linear stationary mechanical dynamic systems. ISSN 1392-1207.-Mechanika 1.-Kaunas: Technologija, 2011
12. Lei Zuo, Pei-Sheng Zhang : Energy Harvesting, Ride Comfort, and Road Handling of Regenerative Vehicle Suspensions
13. N.G. Stephen: On energy harvesting from ambient vibration, 2006
14. Dr. Paul J. Aisopoulos: Powering the Future With Zero Emission and Human Powered Vehicles –Terrassa 2011
15. Zhang Jin-qiu, Peng Zhi-zhao, Zhang Lei, Zhang Yu: A Review on Energy-Regenerative Suspension Systems for Vehicles
16. Yahaya Md. Sam and Khisbullah Hudha: PI/PISM Control of Hydraulically Actuated Active Suspension System
17. Malcolm C. Smith and Stuart J. Swift: Power dissipation in automotive suspensions
18. G.R. Siau, T.L. Spijkers: Development of a multi-body simulation model of the DAF Dakar rally truck
19. J.A. Razenberg: Modelling of the hydro-pneumatic suspension system of a rally truck
20. Özgür Bayrakdar: Random Vibration of a road Vehicle
21. Jarrod Biti: An Investigation into the Damping of a V8 Supercar
22. Pei Sheng Zhang: Design of Electromagnetic Shock Absorbers for Energy Harvesting from Vehicle Suspensions
23. By Jim Kasprzak: The Proper Damping for my Vehicle
24. Adam Theander: Design of a Suspension for a Formula Student Race Car
25. Milliken: Race Car Vehicle Dynamics
26. J. Melcer: Vehicle- Road Interaction, Analysis in a Frequency Domain
27. N. Bianchi, S. Bolognani, F. Tonel, " Design criteria of a tubular linear IPM motor", Department of Electrical Engineering, University of Padova, 2001
28. Babak Ebrahimi, Mir Behrad Khamesee, M. Farid Golnaraghi, "Feasibility Study of an Electromagnetic Shock Absorber with Position Sensing Capability"
29. Hall, B., "An Introduction to Modern Vehicle Design", Butterworth Heinemann, Edited by Julian Happpian-Smith, 2002
30. Huang, C.J. and. Lin, J. S, "Nonlinear Active Suspension Design for Half-Car Models," Proceedings of the 2002 International Conference on Control and

- Automation, Xiamen, P. R. China, 2002
31. Yang, J., Suematsu Y., and Kang, Z., IEEE Transactions on Control Systems Technology 9, 2001, pp. 295–317.
 32. Moran, A., and Nagai, M., “Optimal Active Control of Nonlinear Vehicle Suspension using Neural Networks”, *JSME International Journal, Series C* 37 (1994)
 33. Vetturi, D., Gadola, M., Cambiaghi, D. and Manzo, L., “Semi-active strategies for racing car suspension control”, SAE Technical Papers, No. 962553, II Motorsports Engineering Conference and Exposition, 1996, Dearborn, USA.
 34. Campos, J., Davis, L., Lewis, F. L., Ikenaga, S., Scully, S. and Evans, M., “Active suspension control of ground vehicle heave and pitch motions”, Proceedings of the 7th IEEE Mediterranean Control Conference on Control and Automation, 1999, Haifa, Israel.
 35. Pollard, M. G. and Simons, N. J., “Passenger comfort--the role of active suspension,” ImechE, Vol. 198D, 1984, pp.161-175.
 36. Genta, G., “Motor Vehicle Dynamics” (second ed.), World Scientific, Singapore,2003.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ο Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε είναι:

```
%  
% Analyze a car suspension system  
%  
  
clear all      % clear memory  
clc           % clear screen  
close all     % close all files  
clear global;  
  
global MB MS KS CS KW;  
global XR OMR;  
  
colour=['b','c','r','g','k'];  
marker=['o','s','d'];  
  
% DATA TO BE PROVIDED  
% -----  
  
%for i=1:3;  
MB=375.;      % Body  
MS=70.;      % SUSPENSION SYSTEM  
KS=35000.;   % SUSPENSION SPRING  
KW=190000;   % TYRE SPRING  
  
OMBA=sqrt(KS/MB);  
CS=2*0.2*OMBA*MB; % SUSPENSION DAMPER WITH ZS=0.2  
  
XR = 0.015;%Amplitude of road surface  
FR = 1*i;  
OMR = 2*pi*FR;  
i=i+1;  
%  
% Calculate matrices  
%  
  
MM(1,1) = MB; MM(1,2) = 0.;  
MM(2,1) = 0.; MM(2,2) = MS;  
  
KM(1,1) = KS ; KM(1,2) = -KS;  
KM(2,1) = -KS ; KM(2,2) = KS+KW;  
  
CM(1,1) = CS ; CM(1,2) = -CS;  
CM(2,1) = -CS ; CM(2,2) = CS;  
  
%  
% Calculate eigenfrequencies and modes  
%  
  
[EVEC,LAM]=eig(KM,MM);  
  
fr1=sqrt(LAM(1,1))/(2.*pi)  
fr2=sqrt(LAM(2,2))/(2.*pi)  
%  
% Calculate Transfer Function
```

```

%
nom=0;
for FX=0:0.05:20;
    nom=nom+1;
    FR(nom)=FX;
    OMX=2*pi*FX;
%
    AM=-OMX^2*MM+sqrt(-1)*OMX*CM+KM;
    FX(1)=OMX^2*MB*XR;
    FX(2)=OMX^2*MS*XR;
% seismic
    UR=inv(AM)*FX';
    TFB(nom)=UR(1)/XR;
    TFS(nom)=UR(2)/XR;
%
end;

% Normalize to zero frequency

figure;
hold on
grid on
xlabel('f');
ylabel('FRF');

%plot(OM,20*log10(abs(FRFS)), 'r');hold on;
title('Ëâùöïñâßî-Óð÷íüôçôâð Óóíôííéóííý');
plot(FR,abs(TFB), 'b');hold on;
plot(FR,abs(TFS), 'r');hold on;
legend('Body', 'Wheel');

%
% Time domain response
%
dt=0.1/64;
NT=ceil(20/dt);

% -----INITIAL CONDITIONS-----
x0(1)=0.; % Initial xb
x0(2)=0.; % Initial vb
x0(3)=0.; % Initial xs
x0(4)=0.; % Initial vs
% -----END OF DATA

% run Runge Kutta and calculate results
[x,t]=RK42D(x0,dt,NT);

figure;hold on;grid on;
title('Ëâùöïñâßî-Ïâôáôíðßóâéò');
xlabel('t(s)');ylabel('displacements(m)');
plot(t,x(1:NT,1), 'b');hold on;
plot(t,x(1:NT,3), 'r');hold on;
legend('Body', 'Wheel');
hold off

figure;hold on;grid on;

```



```

title('Áðéááôééü ¼÷çìá-Ôá÷ýôçôâð');
xlabel('t(s)');ylabel('velocity (m/s)');
plot(t,x(1:NT,2),'b');hold on;
plot(t,x(1:NT,4),'r');hold on;
plot(t,x(1:NT,2)-x(1:NT,4),'g');
legend('Body','Wheel');
hold off

% Calculate forces and power

[fs,fw,fxb,fxs,fib,fis,Ps] = POST2D(t,x,NT);

NSTART=ceil(6/dt);
PAV=sum(Ps(NSTART:NT))/(NT-NSTART+1)

figure;hold on;grid on;
title('Ëâüöïñâßî-ÄöíÛîääè');
xlabel('t(s)');ylabel('Forces (N)');
plot(t,fs,'b');hold on;
plot(t,fw,'r');hold on;
legend('Suspension Force','Elastic Force of Tyre');
%plot(t,fib,'c');hold on;
%plot(t,fis,'g');hold on;
hold off

figure;hold on;grid on;
title('Ëâüöïñâßî- Óðéâîléáßá Éó÷ýð');
xlabel('t (s)'),ylabel('Power (Watt)');
plot(t,Ps,'b');hold on;
hold off

% EVALUATE SUM OF FORCES
%for np=1:NT;
%sumb(np)=fib(np)+fs(np)-fxb(np);
%sums(np)=fis(np)-fs(np)+fw(np)-fxs(np);
%end

%figure;hold on;grid on;
%xlabel('t');ylabel('Force Balance');
%plot(t,sumb,'b');hold on;
%plot(t,sums,'r');hold on;
%hold off
End

```

```

function [fs,fw,fxb,fxs,fib,fis,Ps] = POST2D(t,x,NT)

% Calculate post results after the
% time domain analysis
% for a 2DOF dynamic system

% fs = suspension force
% fw = elastic force of the tyre
% fxb = inertial excitation force of the body

```

```

% fxs = inertial exhitation force of the suspension
% fib = inertial response force of the body
% fis = inertial response force of the suspension

% Ps = suspension power

% IAA 01/08/2014

global MB MS KS CS KW;
global XR OMR;

for np=1:NT;

tim=t(np);

xb = x(np,1);
vb = x(np,2);
xs = x(np,3);
vs = x(np,4);

% HARMONIC ROAD EXCITATION
aw =-OMR^2*XR*cos(OMR*tim);

% suspension force
fs(np)=CS*(vb-vs)+KS*(xb-xs);
% wheel force
fw(np)=KW*xs;

% inertial exhitation forces
fxb(np)=-MB*aw;
fxb(np)=-MS*aw;

% inertial response forces
fib(np)= fxb(np)-fs(np);
fis(np)= fxs(np)+fs(np)-fw(np);

% Power

Ps(np)=fs(np)*(vb-vs);

End

function [f] = RHF2D(t,x)

% Define the right hand side function of the
% RK4 algorithm
% for a 2DOF dynamic system

% IAA 01/08/2014

global MB MS KS CS KW;
global XR OMR;

xb = x(1);
vb = x(2);

```

```

xs = x(3);
vs = x(4);

% HARMONIC ROAD EXCITATION
aw =-OMR^2*XR*cos(OMR*t);

% suspension force
fs=CS*(vb-vs) + KS*(xb-xs);

f(1) = vb;
f(2) = - aw - fs / MB ;
f(3) = vs ;
f(4) = - aw + (fs - KW*xs) / MS ;

end

function [x,t]=RK42D(x0,dt,N);

% IAA
% Generic 4th order Runge - Kutta function
% for a 2 DOF system
%
% (01/08/2014)

% x(N,4)= Array of responses
% t(N) = Time instants

% x0 = Initial conditions
% dt = Time step
% N = Number time instants

for r=1:4; x(1,r)=x0(r);end;
t(1) = 0.;

for nt = 2:N;

    for r=1:4; xn(r)=x(nt-1,r);end;
    tn=t(nt-1);
    [k1] = RHF2D(tn , xn );
    [k2] = RHF2D(tn+0.5*dt , xn+0.5*dt*k1 );
    [k3] = RHF2D(tn+0.5*dt , xn+0.5*dt*k2 );
    [k4] = RHF2D(tn+ dt , xn+ dt*k3 );

    xn1 = xn + 1/6 * dt*(k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4);
    for r=1:4; x(nt,r)=xn1(r);end;
    t(nt) = tn + dt;

end %END of loop for Runge-Kutta

%end of function

end

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Μαγνητορολογικού αποσβεστήρα από τον κατασκευαστή.

LORD TECHNICAL DATA

RD-8040-1 and RD-8041-1 Dampers

Description

LORD RD-8040-1 (short stroke) and RD-8041-1 (long stroke) dampers are compact, magneto-rheological (MR) fluid dampers suitable for industrial suspension applications. Continuously variable damping is controlled by the increase in yield strength of the MR fluid in response to magnetic field strength.

Features and Benefits

Fast Response Time – responds in less than 15 milliseconds to changes in the magnetic field.

Easy to Use – provides simple electronics and straight forward controls.

Durable – provides excellent long term stability.

Storage

Dampers should be stored at -40 to +100°C (-40 to +212°F).

The RD-8040-1 and RD-8041-1 dampers are monotube shocks containing high-pressure nitrogen gas (300 psi). Handle with care and do not heat or puncture body.

Electrical Properties*

Input Current, Amp	
Continuous for 30 seconds	1 max
Intermittent	2 max
Input Voltage, Volt	12 DC
Resistance, ohms	
@ ambient temperature	5
@ 71°C (160°F)	7

*Data is typical and not to be used for specification purposes.

Typical Properties*

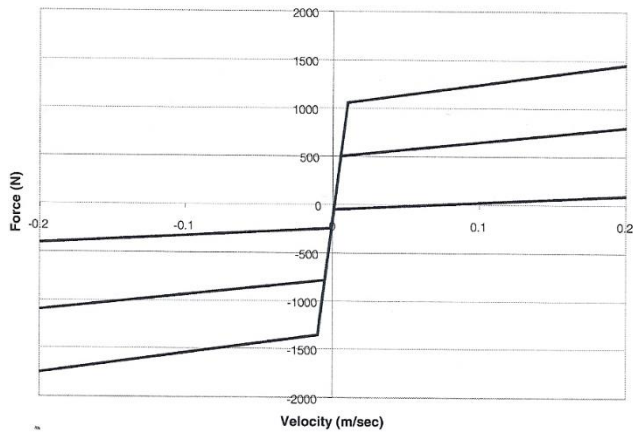
	RD-8040-1	RD-8041-1
Stroke, mm (in)	55 (2.17)	74 (2.91)
Extended Length, mm (in)	208 (8.2)	248 (9.76)
Body Diameter, mm (in)	42.1 (1.66) max	42.1 (1.66) max
Shaft Diameter, mm (in)	10 (0.39)	10 (0.39)
Tensile Strength, N (lbf)	8896 (2000) max	8896 (2000) max
Damper Forces, N (lbf)		
Peak to Peak		
5 cm/sec @ 1 A	>2447 (>550)	>2447 (>550)
20 cm/sec @ 0 A	<667 (<150)	<667 (<150)
Operating Temperature, °C (°F)	71 (160) max	71 (160) max

*Data is typical and not to be used for specification purposes.

LORD
AskUsHow™

LORD TECHNICAL DATA

Typical Force vs. Velocity



Offset at origin is due to gas precharge required for temperature compensation and to prevent cavitation.

Values stated in this technical data sheet represent typical values as not all tests are run on each lot of material produced. For formalized product specifications for specific product end uses, contact the Customer Support Center.

Information provided herein is based upon tests believed to be reliable. In as much as LORD Corporation has no control over the manner in which others may use this information, it does not guarantee the results to be obtained. In addition, LORD Corporation does not guarantee the performance of the product or the results obtained from the use of the product or this information where the product has been repackaged by any third party, including but not limited to any product end-user. Nor does the company make any express or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose concerning the effects or results of such use.

"Ask Us How" is a trademark of LORD Corporation or one of its subsidiaries.

LORD provides valuable expertise in adhesives and coatings, vibration and motion control, and magnetically responsive technologies. Our people work in collaboration with our customers to help them increase the value of their products. Innovative and responsive in an ever-changing marketplace, we are focused on providing solutions for our customers worldwide ... Ask Us How.

LORD Corporation World Headquarters

111 Lord Drive
Cary, NC 27511-7923
USA

Customer Support Center (in United States & Canada)
+1 877 ASK LORD (275 5673)

www.lord.com

For a listing of our worldwide locations, visit LORD.com/locations.

©2009 LORD Corporation OD DS7016 (Rev.0 6/09)

LORD
AskUsHow™