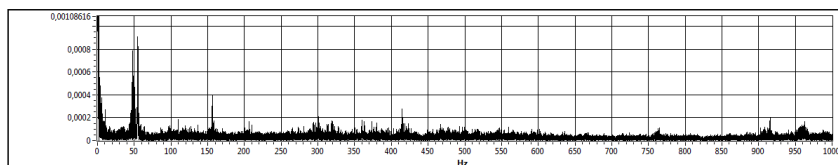
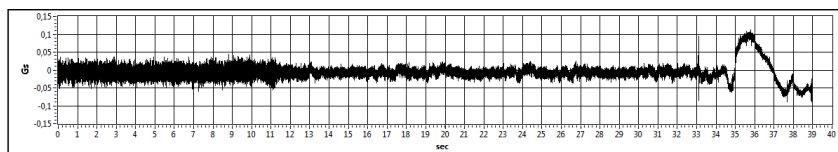
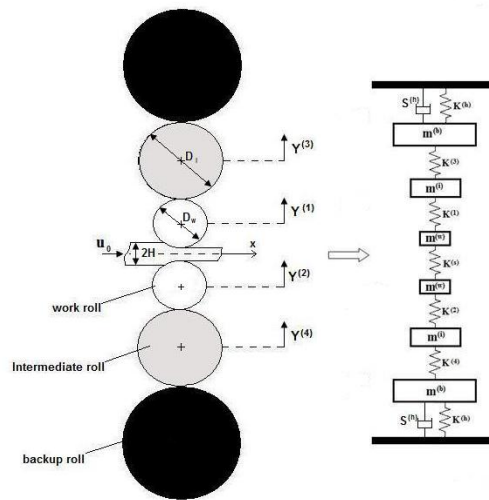




Διπλωματική Εργασία

Μοντελοποίηση και Πειραματική Ανάλυση Δυναμικής Συμπεριφοράς Βιομηχανικού Ελάστρου



Γεώργιος Ν. Τσανικίδης

ΑΘΗΝΑ 2009

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την κατασκευή ενός δυναμικού μοντέλου ενός ελαστρου έξι ραούλων για την εφαρμογή του στη διάγνωση και την πρόβλεψη του chattering στην έλαση. Γίνεται σύντομη ιστορική αναδρομή και περιγραφή της κατεργασίας της έλασης, καθώς και του φαινομένου Chattering. Επίσης γίνεται αναφορά στις μεθόδους και του τρόπους μέτρησης κραδασμών σε μηχανές. Τέλος παρουσιάζεται το μοντέλο δυναμικής ανάλυσης ενός ελαστρου της βιομηχανίας ΕΛΒΑΛ, στα Οινόφυτα Βοιωτίας, και γίνεται γραμμική, αριθμητική και πειραματική ανάλυση.

Περιεχόμενα

1	Περίληψη	5
2	Έλαση.....	6
2.1	Εισαγωγή	6
2.2	Ιστορική Αναδρομή	8
2.2.1	Η Πρώιμη Εποχή της έλασης	8
2.2.2	Ευρεσιτεχνίες του 18 ^{ου} αιώνα	12
2.2.3	Ιστορική εξέλιξη της θερμής έλασης	14
2.2.4	Ιστορική εξέλιξη της Ψυχρής έλασης.	17
2.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	21
2.3.1	Είδη έλασης.....	21
2.3.2	Εργαλειομηχανές Έλασης	24
2.3.3	Μηχανική της έλασης.....	31
3	Μέθοδοι και τρόποι μέτρησης κραδασμών	36
3.1	Εισαγωγή	36
3.2	Επεξεργασία κραδασμών - πλάτος και συχνότητα.....	37
3.3	Σημεία μέτρησης	39
3.4	Μέθοδοι και αισθητήρια μέτρησης	41
3.5	Συνολικό επίπεδο κραδασμών ("Overall" Vibration).....	45
3.6	Φασματική ανάλυση με FFT (Fast Fourier Transformation)	48
3.7	Μέθοδος αποδιαμόρφωσης «Φακέλου» (Envelope Detection).....	50
3.8	Μέθοδος εντοπισμού υψηλής συχνότητας (High Frequency Detection) ..	52

4	Μηχανικές δονήσεις στην έλαση (Chatter).....	53
4.1	Εισαγωγή	53
4.2	Ιστορική αναδρομή.....	57
4.3	Είδη chattering.....	59
5	Ανάλυση του Chatter	62
5.1	Καθορισμός του μοντέλου.....	62
5.1.1	Μοντέλα κραδασμών τεσσάρων και έξι βαθμών ελευθερίας	62
5.1.2	Σταθερές ελατηρίων και Δυνάμεις από τα ράουλα	69
5.1.3	Δύναμη του ελάσματος	72
5.2	Γραμμική ανάλυση	79
5.2.1	Μοντέλο τεσσάρων βαθμών ελευθερίας.....	79
5.2.2	Μοντέλο έξι βαθμών ελευθερίας	82
5.2.3	Ανάλυση ευαισθησίας του γραμμικού μοντέλου	87
5.3	Αριθμητική προσομοίωση	93
5.4	Πειραματική ανάλυση	101
5.4.1	Περιγραφή του Συστήματος μέτρησης	101
5.4.2	Εισαγωγή στην πειραματική ανάλυση	105
5.4.3	Πρώτο Στάδιο Ανάλυσης των σημάτων.....	108
5.4.4	Δεύτερο Στάδιο Ανάλυσης των σημάτων	113
6	Παράρτημα.....	131
7	Βιβλιογραφία	138

1 Περίληψη

Το φαινόμενο του chattering στην έλαση αφορά το θέμα της εργασίας. Πρόκειται για ένα φαινόμενο υψηλών κραδασμών που παρουσιάζονται κατά την κατεργασία της έλασης, οι οποίοι έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ελαττωματικών προϊόντων και μερικές φορές ακόμα και καταστρεπτικές συνέπειες επί του ελάστρου.

Αρχικά γίνεται μελέτη του φαινομένου και των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την συμπεριφορά του ελάστρου κατά τη κατεργασία. Ακολουθεί μοντελοποίηση ενός ελάστρου έξι ραούλων της βιομηχανίας ΕΛΒΑΛ. Τα δύο μοντέλα που παρουσιάζονται είναι τεσσάρων και έξι βαθμών ελευθερίας.

Στην συνέχεια επιλύεται το σύστημα βρίσκοντας τις ιδιοσυχνότητες και τα ιδιοδιανύσματα της έλασης και γίνεται μια ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου ως προς τη δύναμη έλασης, τη δυσκαμψία του ελάσματος και τη δυσκαμψία από το κέλυφος.

Έπειτα γίνεται προσομοίωση της έλασης βάση του προηγούμενου μοντέλου σε περιβάλλον MATLAB και διερευνώνται πως επηρεάζουν διάφορες παράμετροι της έλασης την απόκριση του συστήματος όπως η ταχύτητα, η δύναμη καθώς και η τριβή της έλασης .

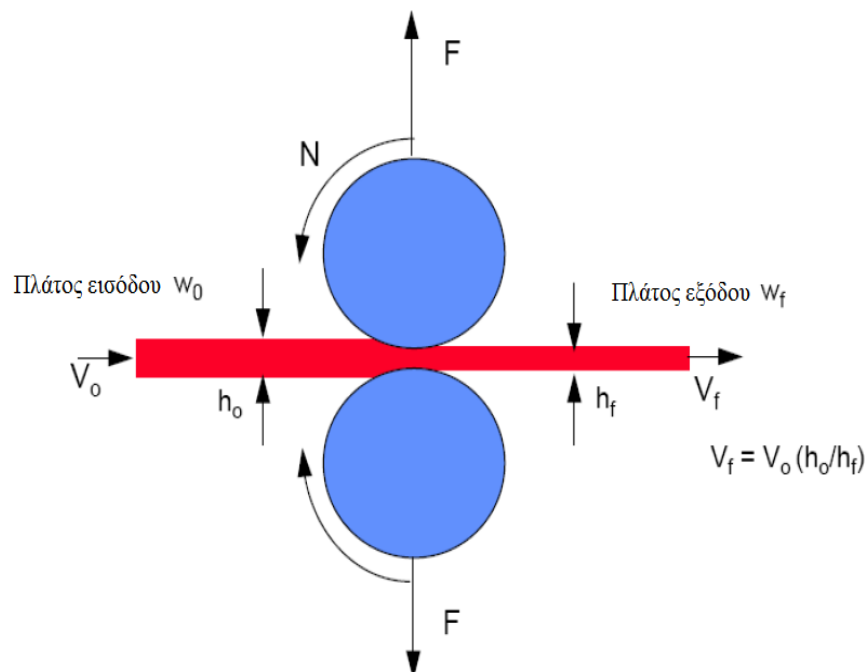
Τέλος βάση των μετρήσεων των κραδασμών κατά τη κατεργασία της έλασης γίνεται πειραματική διερεύνηση του φαινομένου και ταυτοποίηση με τα υπολογιστικά αποτελέσματα του μοντέλου.

2 Έλαση

2.1 Εισαγωγή

Η έλαση (rolling) είναι μια κατεργασία μετάλλου κατά την οποία το τεμάχιο, υπό τη μορφή ράβδου ή πλάκας, διέρχεται μέσα από ένα σύστημα περιστρεφόμενων ραούλων (rolls) και υφίσταται πλαστική παραμόρφωση υπό την επίδραση δύναμης συμπίεσης (σχήμα 1.1).

Είναι μια ευρύτατα χρησιμοποιούμενη κατεργασία μετάλλων η οποία αναπτύχθηκε στα τέλη του 16ου αιώνα. Υπολογίζεται ότι αποτελεί το 90% των μετάλλων που παράγονται από μεταλλουργικές διαδικασίες. Οι λόγοι για τους οποίους είναι τόσο διαδεδομένη είναι ότι επιτρέπει έναν υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης κλειστού βρόγχου, υψηλές ταχύτητες παραγωγής και πολύ καλή ποιότητα προϊόντος σε χαμηλό κόστος.



Σχήμα 2.1 Σχηματική παράσταση έλασης

Η βασική λειτουργία είναι η επίπεδη έλαση, ή απλά έλαση, όπου τα προϊόντα έλασης είναι τα ελάσματα (plates) και τα λεπτά ελάσματα (sheets). Τα ελάσματα έχουν πάχος μεγαλύτερο από 6 mm ενώ τα λεπτά ελάσματα μικρότερο από 6 mm.

Υφίσταται υπό την μορφή της Ψυχρής έλασης (εάν η θερμοκρασία του τεμαχίου είναι μικρότερη από την θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του μετάλλου) και της Θερμής έλασης (αν είναι μεγαλύτερη).

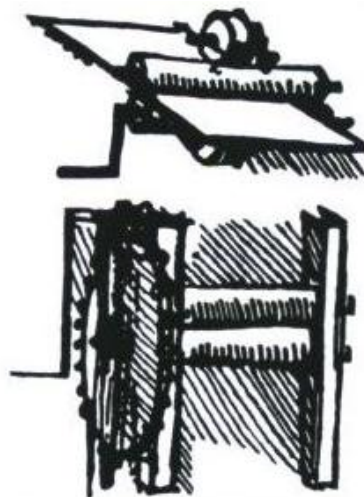
Η έλαση είναι η πιο σημαντική κατεργασία για μέταλλα τα οποία παράγονται μεταλλουργικά με τήξη. Τα προϊόντα της εμφανίζονται σε ευρεία χρήση στην καθημερινή ζωή όπως π.χ. στο αυτοκίνητο, σε οροφές των κτιρίων, σε ηλεκτρικές συσκευές, στους αεραγωγούς του κλιματισμού, στη συσκευασία τροφίμων κλπ. Οι παραπάνω είναι μόνο κάποιες από τις πολυάριθμες χρήσεις των ελασμάτων ορισμένες εκ των οποίων έχουν εξαιρετικά υψηλές απαιτήσεις ποιότητας. Για παράδειγμα, η ακρίβεια στο πάχος των ελασμάτων που κατασκευάζονται για τη βιομηχανία αυτοκινήτων είναι της τάξης του μm. Ακόμα και η μικρότερη ανομοιομορφία στη σύσταση ή την επιφανειακή τραχύτητα είναι δυνατό να καταστήσει ολόκληρα ελάσματα άχρηστα.

2.2 Ιστορική Αναδρομή

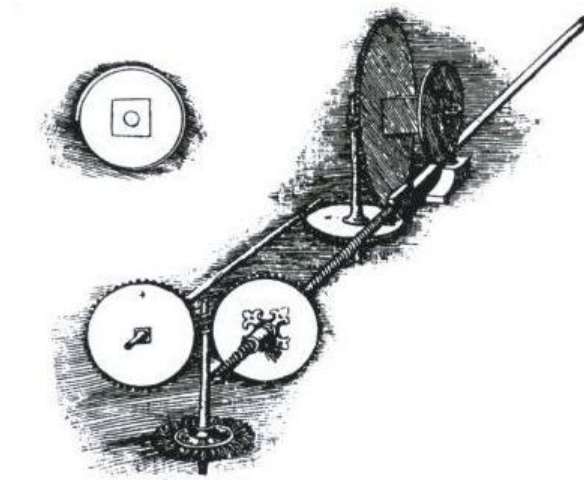
2.2.1 Η Πρώιμη Εποχή της έλασης

Στις απαρχές, η έλαση επίπεδων μετάλλων ήταν περιορισμένη στα μέταλλα που ήτο δυνατό να επεξεργαστούν ψυχρά, και πιθανότατα οι πρώτοι που την χρησιμοποίησαν ήταν χρυσοχόοι σε κοσμήματα ή άλλα έργα τέχνης. Όμως η έλαση μετάλλων, όπως και άλλες μέθοδοι κατεργασιών, δεν μπορεί να αποδοθεί σε έναν εφευρέτη.

Κατά την διάρκεια του 14^{ου} αιώνα, χρησιμοποιούσαν ένα μικρό έλαστρο, με διάμετρο ραούλου περίπου μισή ίντσα, για να ισιώσουν το χρυσό και το ασημί. Ωστόσο, τα πρώτα πραγματικά έλαστρα που έχουν καταγραφεί σχεδιάστηκαν από τον Λεονάρντο Νταβίντσι, τα οποία δεν γνωρίζουμε αν έχουν κατασκευαστεί ποτέ. Παρόλα αυτά πριν τα μέσα του 16^{ου} αιώνα, γνωρίζουμε ότι η έλαση δεν είχε καμία διάδοση και ανάπτυξη.



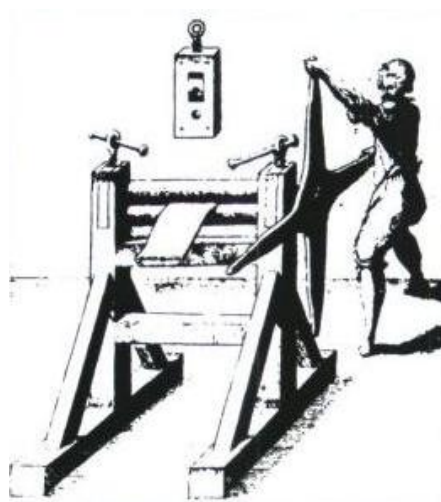
Σχήμα 2.2 Σκίτσο του Λ. Νταβίντσι 1495



Σχήμα 2.3 Σκίτσα του Λ. Νταβίντσι μιας μηχανής έλασης μολύβδου

Τον 16^ο αιώνα τουλάχιστον δύο έλαστρα είναι γνωστό ότι λειτουργούσαν. Το 1552 ένας Γάλλος με το όνομα Brulier ελασματοποίησε χρυσό και ασήμι για την δημιουργία ομοιόμορφων νομισμάτων σε νομισματοκοπεία ενώ το 1590 ο Godefroi de Bochs εγκατέστησε στο Βέλγιο ένα έλαστρο που είχε συλλάβει ο Bevis Bulmer.

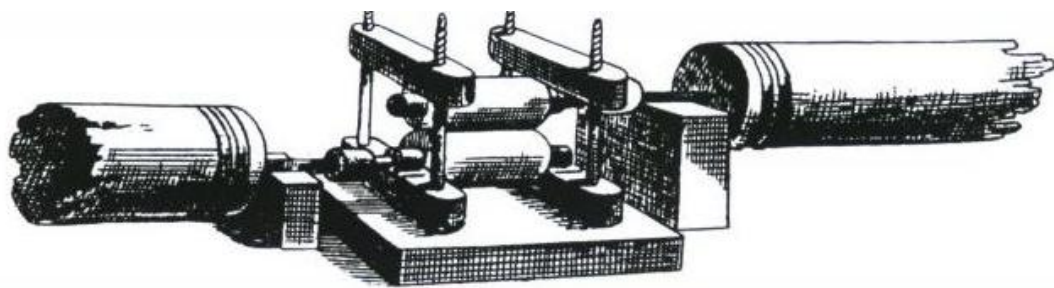
Το επόμενο έλαστρο που έχει καταγραφεί κατασκευάστηκε από τον Γάλλο Salomon de Caus το 1615 για να ελασματοποιεί μολύβδο και κασσίτερο που εύρισκαν μεγάλη χρήση αυτήν την εποχή. (Σχήμα 1.4)



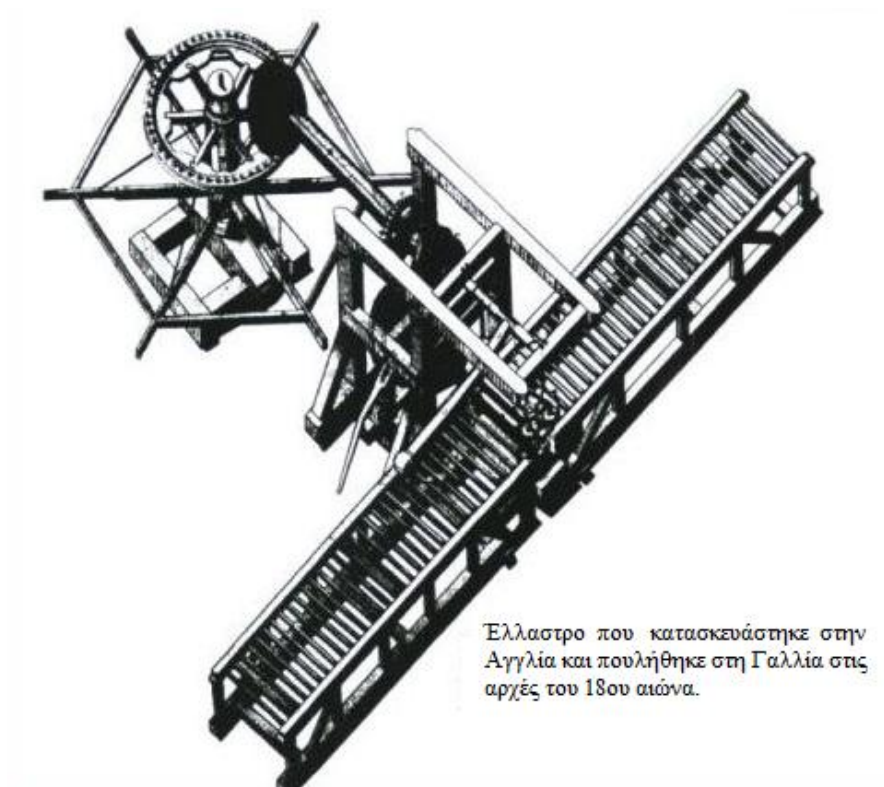
Σχήμα 2.4 Έλαστρο του Salomon de Caus

Ενώ η ανάπτυξη των ελαστρων ήταν εμφανής όλα τα ελαστρα που έχουν καταγραφεί, με εξαίρεση αυτό του Bulmer, επεξεργάζονται μαλακά μέταλλα με ψυχρή κατεργασία. Η χρήση ελαστρων για κατεργασία σιδήρου αναπτύχθηκε σχεδόν ταυτόχρονα στην Αγγλία, το Βέλγιο και την Γερμανία χωρίς να γνωρίζουμε σε ποια χώρα εμφανίστηκε πρώτα. Η πρώτη όμως καταγραφή για χρήση ελαστρου σε κατεργασία σιδήρου βρίσκεται κοντά στην πόλη Bristol της Αγγλίας το 1665.

Η έλαση ράβδων προαναγγέλθηκε κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου αλλά δεν είχε παρουσιαστεί ενώ οι ράβδοι μέχρι τότε σφυρηλατούνταν. Το 1679 ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας εκδόθηκε καλύπτοντας το φινιρίσμα των μπιγетών μεγάλης διατομής (blooms) από έλαση, και το 1680 πλέον περνούσαν τις ράβδους μέσω επίπεδων ραούλων για να ισιώσουν εξωτερικές ανωμαλίες. Εντούτοις, από το 1682, μεγάλα ελαστρα που επεξεργάζονταν σιδηρούχα υλικά με θερμή κατεργασία, ήταν σε λειτουργία κοντά στο Newcastle της Αγγλίας. Σύντομα μετά από αυτήν την ημερομηνία, στην Ουαλία, ο John Hanbury άρχισε στα σιδηρουργεία του ένα έλαστρο ως ανεξάρτητη μηχανή για την παραγωγή λεπτού ελάσματος σιδήρου (σχήμα 1.5), κινούμενο από νερόμυλο. Μετά από αυτό η Ουαλία ήταν ο μεγαλύτερος παραγωγός φύλων σιδήρου και κασσίτερου για περισσότερο από 150 χρόνια ενώ πριν η Γερμανία ήταν μονοπώλιο στην αγγλική αγορά.



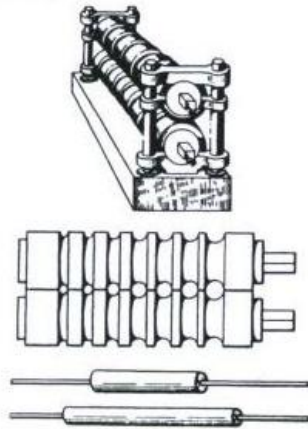
Σχήμα 2.5 Έλαστρο του John Hanbury για έλαση ελασμάτων σιδήρου



Σχήμα 2.6

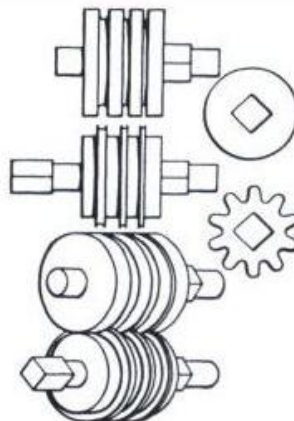
2.2.2 Ευρεσιτεχνίες του 18^{ου} αιώνα

- 1728, Το έλαστρο του Άγγλου John Payne το οποίο επεξεργαζόταν σφυρηλατημένες ράβδους δίνοντας τους τα σχήματα και τις μορφές που απαιτούνταν (σχήμα1.7).



Σχήμα 2.7

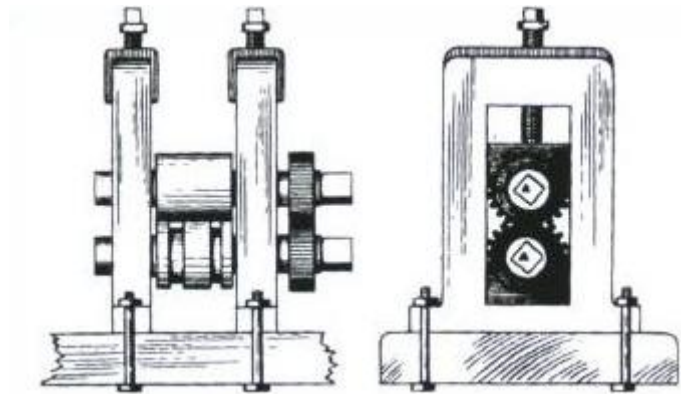
- 1766, Το έλαστρο του John Purnell με αυλακωμένα ράουλα (σχήμα1.8).



Σχήμα 2.8

- 1766, Το πρώτο διαδοχικό έλαστρο (Tandem mill) από τον Άγγλο Richard Ford.

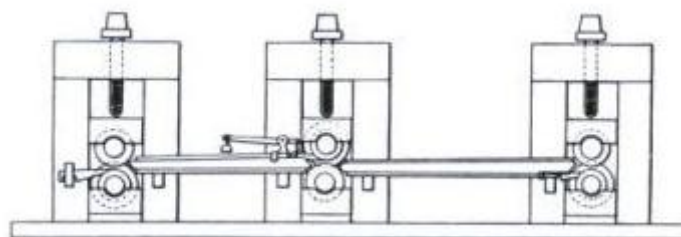
- 1783, Το έλαστρο του William Playfield, εγκατεστημένο σε ειδικό κέλυφος (housing) και ενιαία κίνηση με τη βοήθεια γραναζιών (σχήμα1.9).



Σχήμα 2.9

- 1783, Σύγχρονα έλαστρα ράβδων σιδήρου από τον Henry Cort που του απέδωσαν και τον χαρακτηρισμό ως “πατέρα της σύγχρονης έλασης”.

- 1798, Διαδοχικό έλαστρο με οδηγούς από τον Άγγλο John Hazeldine (σχήμα1.10).



Σχήμα 2.10

2.2.3 Ιστορική εξέλιξη της θερμής έλασης

Με τον ερχομό πλέον του 19^{ου} αιώνα και της βιομηχανικής επανάστασης που λάμβανε χώρα στην Αγγλία, η απαίτηση για το σίδηρο και το χάλυβα αυξήθηκε κατά πολύ. Αυτό έφερε ως αποτέλεσμα μια ραγδαία, αριθμητικά και τεχνολογικά, εξέλιξη στις μηχανές έλασης.

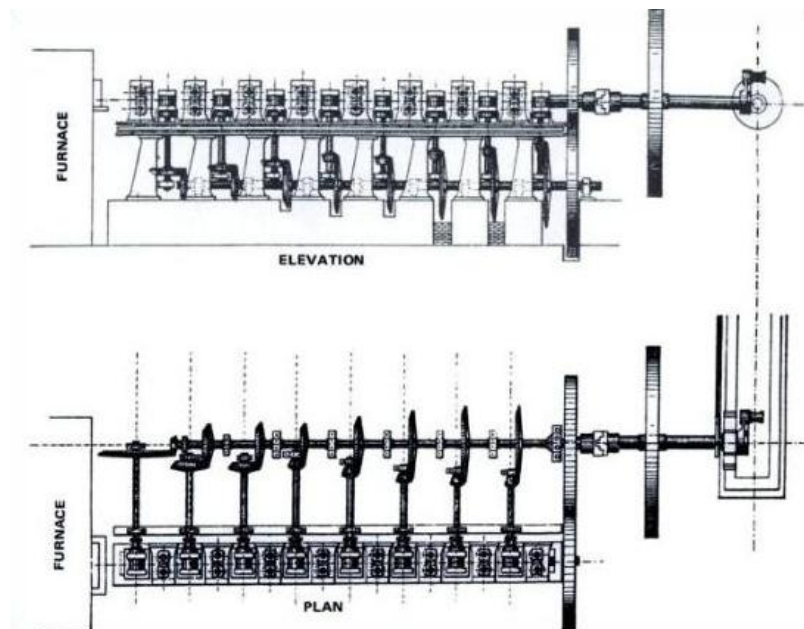
Το 1820 ο John Birkenshaw ξεκίνησε το πρώτο έλαστρο ραγών και παρήγαγε ράγες τύπου fish-bellied επεξεργασμένου σιδήρου σε μήκη 15 έως 18 πόδια. Το 1831 έκανε την εμφάνιση του στην Αγγλία ένα έλαστρο T-rail (του ίδιου βασικού σχεδίου με αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα) και το 1849 ελάσθηκαν τα πρώτα I-beams από τον Zores στο Παρίσι.

Τα μεγέθη των ελαστρων καθώς και τα μεγέθη των ραούλων αυξήθηκαν γρήγορα. Η εταιρεία Consett Iron παρουσίασε το 1851 τη μεγαλύτερη πλάκα που είχε ελασθή μέχρι τότε με διαστάσεις 20 πόδια μήκος, 3,5 ίντσες πλάτος, 7/16 της ίντσας πάχος και βάρος 1125 λίβρες.

Το 1853 έκανε την εμφάνιση του το πρώτο έλαστρο τριών ραούλων (3-h mill) με κατοχύρωση της ευρεσιτεχνίας από τον Βρετανό R. B. Roden που εργαζόταν για την Abersychen Iron Works. Σε αυτό το έλαστρο το μεσαίο ράουλο οδηγιόταν και στηριζόταν στο κέλυφος ενώ το επάνω και το κάτω ράουλο ήταν διευθετημένα σε μία θέση. Ακόμα είχε ένα σύστημα ανύψωσης που λειτουργούσε με ατμό ώστε να αυξάνει ή να μειώνει το πάχος του μετάλλου που ελάσσεται.

Στα μέσα του αιώνα, λειτούργησε το πρώτο έλαστρο με αναστρεφόμενη κίνηση στην εταιρεία Parkgate Works στην Αγγλία, και γνωρίζουμε ότι το 1854 χρησιμοποιήθηκε για την έλαση πλακών για το ατμόπλοιο “Great Eastern”. Το 1848, εφευρέθηκε το καθολικό έλαστρο από τον R. M. Daelen από το Lendesdorf της Γερμανίας, ο οποίος το κατασκεύασε 7 χρόνια μετά. Αλλά το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για “συνεχή” έλαστρα θερμής κατεργασίας δόθηκε στον Sir Henry Bessemer το 1857 και στον Dr. R. V. Leachin το 1859.

Ωστόσο, ένα πιο επιτυχημένο συνεχές έλαστρο κατοχυρώθηκε το 1862 από τον George Bedson της εταιρείας Bradford Iron Works στο Manchester της Αγγλίας. Στο έλαστρο αυτό χρησιμοποιήθηκαν μια σειρά από ράουλα τοποθετημένα σε ποικίλες γωνίες και με το οποίο η ανάγκη τοννάριατος του μετάλλου αποφεύχθηκε. Αυτό ήταν ένα έλαστρο ράβδων στο οποίο μιγέτες τετραγωνική διατομής $1\text{-}1/16\text{ in}^2$ και βάρους 100 λιβρών περνούσαν μέσω 16 ζευγαριών ραούλων, 8 κατακόρυφα και 8 οριζόντια (σχήμα 1.11). Η παραγωγή του ήταν τόσο μεγάλη που 20 τόνοι ράβδων σιδήρου ελάσσονταν σε 10 ώρες.



Σχήμα 2.11

Το 1862 ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας διανεμήθηκε στον J.T. Newton, από την Ουαλία, στο οποίο περιέγραφε τον προκάτοχο του σύγχρονου ελάστρου τύπου cluster, δεδομένου ότι χρησιμοποιούσε μικρά ράουλα εργασίας που υποστηρίζονταν από άλλα μεγαλύτερης διαμέτρου. Τα ράουλα εργασίας οδηγούντουσαν αλλά η πίεση εφαρμοζόταν από τα μεγάλα εφεδρικά ράουλα, μια αρχή που χρησιμοποιείται και στα σύγχρονα έλαστρα.

Το έλαστρο με τέσσερα ράουλα (4-h mill), στο ίδιο κάθετο επίπεδο, εισήχθη από τον Bleckley στην Αγγλία το 1872, που το χρησιμοποίησε για την αποπεράτωση επεξεργασμένου σιδήρου σε ράγες.

Η διαδοχική έλαση θερμού χάλυβα είχε μια άνοδο γύρο στο 1890. Το 1892 ένα ημισυνεχές θερμό έλαστρο με ένα μηχανικά συνδεδεμένο σύστημα 2 ραούλων αποπεράτωσης φτιάχτηκε στη Βοημία. Είχε αναφερθεί ότι αυτό το έλαστρο είχε επεξεργαστεί φύλλα μέχρι 50 ίντσες πλάτος, σε πάχη από 0,8 in έως 0,12 in και σε μήκη έως 60 πόδια.

2.2.4 Ιστορική εξέλιξη της Ψυχρής έλασης.

Παρά το γεγονός ότι η πρώτη έλαση μετάλλων ήταν ψυχρή έλαση, η επίπεδη ψυχρή έλαση του σιδήρου δεν φαίνεται να πραγματοποιείται επιτυχώς μέχρι το τέλος του δέκατου όγδοου αιώνα, αν και η επίπεδη, θερμή έλαση του χάλυβα είχε εφαρμοστεί σε έλαστρα 2 ραούλων από το 1660 περίπου. Εντούτοις, πρέπει να σημειωθεί ότι η ψυχρή έλαση, υπό μορφή κατεργασίας πλανίσματος μετάλλου, πραγματοποιήθηκε σε έλασμα κασσίτερου στην Αγγλία από το 1747, στην ίδια χώρα, ο John West πρότεινε την ψυχρή μείωση λωρίδων χάλυβα για τα ελατήρια ρολογιών. Από το 1825 έως 1860, λόγω της βελτίωσης της κατασκευής των ραούλων, μη αμελητέα ποσά υψηλά-ανθρακούχου επίπεδου σύρματος παρήχθησαν με ψυχρή έλαση.

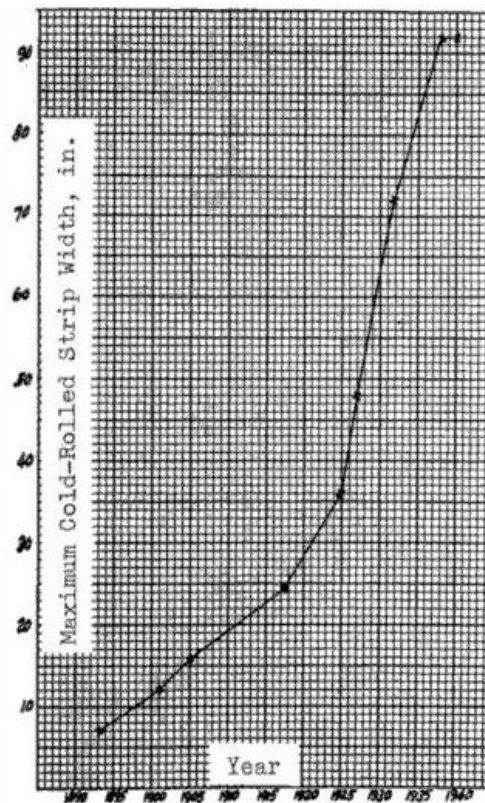
Η ανάπτυξη της επίπεδης, ψυχρής-έλασης του χάλυβα ως διαδικασία παραγωγής, εντούτοις, κέρδισε την πραγματική ώθηση μόνο μετά από την εξέλιξη του ελάστρου τριών ραούλων ψυχρής κατεργασίας, με το μεσαίο ράουλο εργασίας να είναι μικρότερης διαμέτρου. Τα πλεονεκτήματα της μικρότερης διαμέτρου του ραούλου εργασίας είχαν αναγνωριστεί πολύ νωρίτερα από τον Christopher Polhem που περιέγραψε ένα έλαστρο τεσσάρων ραούλων για επίπεδη επεξεργασία σιδήρου, θερμής έλασης χρησιμοποιώντας μικρά ράουλα εργασίας, από επεξεργασμένο σίδηρο, που υποστηρίζονται από μεγάλα ράουλα χυτοσιδήρου, επειδή τα μικρά ράουλα έχουν πολύ περισσότερη δύναμη επιμήκυνσης του υλικού από ότι τα μεγάλα. Η εμπορευματοποίηση του ψυχρού ελάστρου πραγματοποιήθηκε κυρίως στην Αμερική από την παλαιά αμερικανική επιχείρηση σιδήρου & χάλυβα του Pittsburgh, που αποκτήθηκε αργότερα από την Jones & Laughlin.

Λόγω των υψηλών ιδιοτήτων της, η ψυχρή έλαση άρχισε να χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο, σε μικρό διάστημα διαδόθηκε ευρύτατα, πρώτιστα σε έλαστρα 2 ραούλων και στη συνέχεια σε έλαστρα τεσσάρων και έξι ραούλων. Το πρώτο έλαστρο τεσσάρων ραούλων ψυχρής έλασης χάλυβα χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε πειραματική βάση μόλις το 1923 από την εταιρία χάλυβα Allegheny Ludlum.

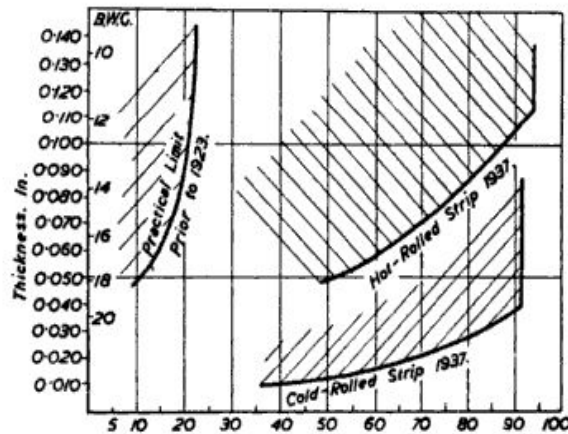
Η πρώτη καταγραφή λειτουργίας, διαδοχικής ψυχρής έλασης λουρίδας χάλυβα, είναι το 1904, όταν η επιχείρηση West Leechburg Steel Company εγκατέστησε ένα διαδοχικό έλαστρο τεσσάρων θέσεων 2 ραούλων, όπου κάθε θέση οδηγείται από ένα ξεχωριστό ηλεκτρικό κινητήρα ταχύτητας. Η πραγματική λειτουργία ελαστρων διαδοχικών θέσεων, με υψηλές τανύσεις μεταξύ των θέσεων, αναπτύχθηκαν περίπου το 1915, στα έλαστρα που εγκαταστάθηκαν από την Superior Steel Company και από την Morris & Bailey Steel Company από το Pittsburgh. Και το 1926, το πρώτο, ψυχρό, διαδοχικό, με 4 ράουλα και 4 θέσεις εργασίας έλαστρο τέθηκε σε λειτουργία από την American Rolling Mill Company στις εγκαταστάσεις της.

Τα έλαστρα αντιστροφής της κίνησης σε ψυχρή κατεργασία, 2 ραούλων, εμφανιστήκαν, το 1920, στη Γερμανία και το 1932 χρησιμοποιήθηκαν έλαστρα αντιστροφής 4-ραούλων.

Παρόλη την εξέλιξη της ψυχρής έλασης μέχρι τη δεκαετία του 30 οι περισσότερες κατεργασίες έλασης ήταν θερμής μορφής. Εκείνη τη δεκαετία, η ψυχρή μείωση πάχους της θερμά-κατεργασμένης λουρίδας χάλυβα εξελίχθηκε από μια μάλλον εξειδικευμένη κατεργασία μικρής κλίμακας, σε μια κατεργασία πρωταρχικής σπουδαιότητας στην παραγωγή των ελασματοποιημένων εν ψυχρώ ράβδων, ελασμάτων και λουρίδων. Αυτά τα προϊόντα διαφέρουν μεταξύ τους κυρίως στις διαστάσεις όπως καθορίζονται σε επόμενη παράγραφο. Τα μέγιστα διαθέσιμα πλάτη των ελασματοποιημένων εν ψυχρώ ρόλων αυξήθηκαν γρήγορα από το 1925 και μετά όπως διευκρινίζεται στο σχήμα και το ελάχιστο πάχος για ένα δεδομένο πλάτος μειώθηκε. Μέχρι το 1937, τα όρια πάχους-πλάτους για θερμά και ψυχρά ελασματοποιημένα ρόλα είχαν φθάσει στις τιμές που παρουσιάζονται στο σχήμα 1.13. Σήμερα τα πλατιά προϊόντα έλασης είναι διαθέσιμα σε ακόμα μεγαλύτερες αναλογίες πλάτους-πάχους.



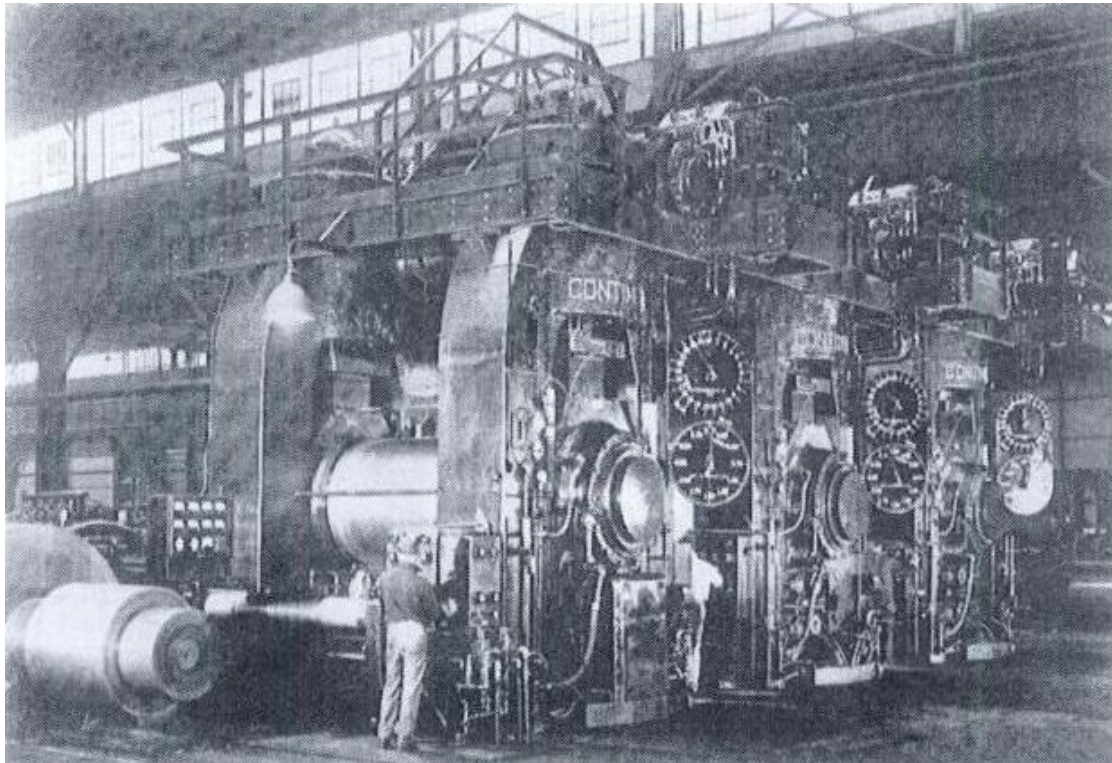
Σχήμα 2.12



Σχήμα 2.13

Χαρακτηριστικό έλαστρο που κατασκευαζόταν τη δεκαετία του '30 είναι το τριών-θέσεων, διαδοχικό έλαστρο 84 ιντσών που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.14. Αυτό το

έλαστρο χρησιμοποιούσε ράουλα εργασίας 20 και 1/2 ιντσών διαμέτρων, με εφεδρικά ράουλα 56 ιντσών διαμέτρων, και η οδήγηση του γινότανε από μηχανές συνολικής ισχύς 6.850-HP σε ταχύτητες πάνω από 542 πόδια/λεπτό.



Σχήμα 2.14 Χαρακτηριστικό έλαστρο 3 θέσεων ψυχρής έλασης 1930

Οι ταχύτητες των ελάστρων αυξήθηκαν ραγδαία τα αμέσως επόμενα χρόνια αλλά με εμφανής μια σταθερή βελτίωση στην ποιότητα των ελασματοποιημένων προϊόντων. Τα αυτόματα συστήματα ελέγχου διαμετρημάτων έχουν διατηρήσει την καλή ομοιομορφία στο πάχος το προϊόντος και τα βελτιωμένα λιπαντικά έχουν διατηρήσει, τα ρολά που αναπτύσσουν θερμοκρασίες, μέσα στα επιτρεπτά όρια. Αν και τα προβλήματα μορφής επανεμφανίζονται ακόμα σε διαδικασίες έλασης, οι τεχνικές λείανσης ραούλων έχουν βελτιωθεί έτσι ώστε, μαζί με την σύγχρονο έλεγχο των ελάστρων, τέτοια προβλήματα γίνονται λιγότερο συχνά.

2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

2.3.1 Είδη έλασης

Τα είδη της έλασης μπορούν να κατανεμηθούν βάση της θερμοκρασίας της κατεργασίας και των προϊόντων της κατεργασίας που θα παραχθούν. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο η έλαση μπορεί να γίνει ως Ψυχρή κατεργασία και ως Θερμή.

Θερμή Έλαση

Η θερμή έλαση χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στην επεξεργασία πλινθωμάτων (ingots) και μπιγιετών (billets) ώστε να τους προσδώσει μια επιθυμητή μορφή κατά την πρώτη φάση επεξεργασίας τους.

Πλεονεκτήματα Θερμής έλασης :

- Μικρότερες δυνάμεις.
- Μικρότερες τανύσεις.
- Λιγότερη απαίτηση σε δύναμη.
- Μη ύπαρξη σκλήρυνσης λόγω πλαστικής παραμόρφωσης.
- Δυνατότητα μεγάλης παραμόρφωσης.
- Δυνατότητα ένταξης στην επιθυμητή μικροδομή του μετάλλου.

Μειονεκτήματα Θερμής έλασης:

- Η ανάγκη να ψύχονται τα ράουλα.
- Ο δύσκολος χειρισμός των μετάλλων.
- Η ανάγκη ειδικής προστασίας του προσωπικού.

Ψυχρή έλαση

Η ψυχρή έλαση είναι συχνότερα μια δευτεροβάθμια διαδικασία διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ράβδων (bars), λεπτών ελασμάτων (sheets) και λεπτών λουρίδων (strips), με την επιφάνεια τους πλήρως κατεργασμένη υπό τις απαιτούμενες διαστατικές ανοχές.

Πλεονεκτήματα Ψυχρής έλασης :

- Λόγω της σκληρότερης κατεργασίας αυξάνεται η αντοχή.
- Άριστη επιφάνεια αποπεράτωσης.
- Άριστη ανοχή διαστάσεων.

Μειονεκτήματα Ψυχρής έλασης :

- Υψηλές δυνάμεις.
- Οι μικρές μειώσεις αυξάνουν τις επιφανειακές τάσεις και δίνουν ανομοιόμορφη διανομή της τάσης.
- Αυτοδιεγερούμενες μηχανικές δονήσεις επονομαζόμενες Chatter

Ο διαχωρισμός των ειδών έλασης με βάση τα προϊόντα της έχει να κάνει με το είδος αυτών και τη φάση κατά την οποία παράγονται (σχήμα 1.15).

Ανάλογα με τη φάση της έλασης και τη μορφή του προϊόντος, ακολουθείται η εξής τυποποίηση:

❖ **Ημι-κατεργασμένα προϊόντα**

- Μπιγέτα πρώτης έλασης (bloom) – τετραγωνικής διατομής με εμβαδόν:

$$A \geq 15 \times 15 \text{ cm}^2$$

Περαιτέρω μείωση του πάχους μπορεί να οδηγήσει σε:

- Μπιγέτα (billet) τετραγωνικής διατομής με μικρότερο εμβαδόν ($A \geq 4 \times 4 \text{ cm}^2$) ή σε

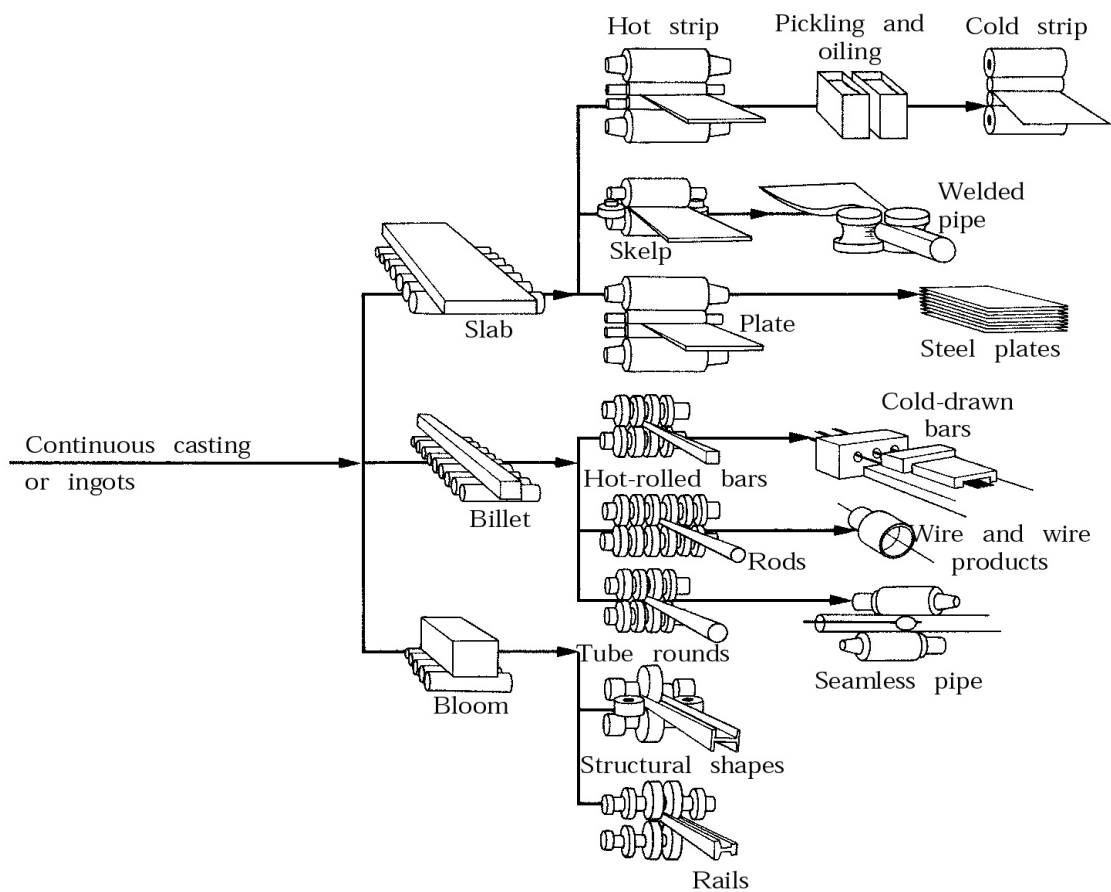
- Πλάκα (slab) ορθογωνικής διατομής με εμβαδόν $A \geq 100 \text{ cm}^2$ και πλάτος τουλάχιστον διπλάσιο του πάχους της.

❖ **Τελικά προϊόντα**

Περαιτέρω διαμόρφωση των ημικατεργασμένων προϊόντων οδηγεί σε:

- Επιμήκη προϊόντα μορφής που προέρχονται από την έλαση μπιγετών (μορφοδοκοί, ήλοι με σπείρωμα, δακτύλιοι κλπ.) με ειδικές μεθόδους έλασης.

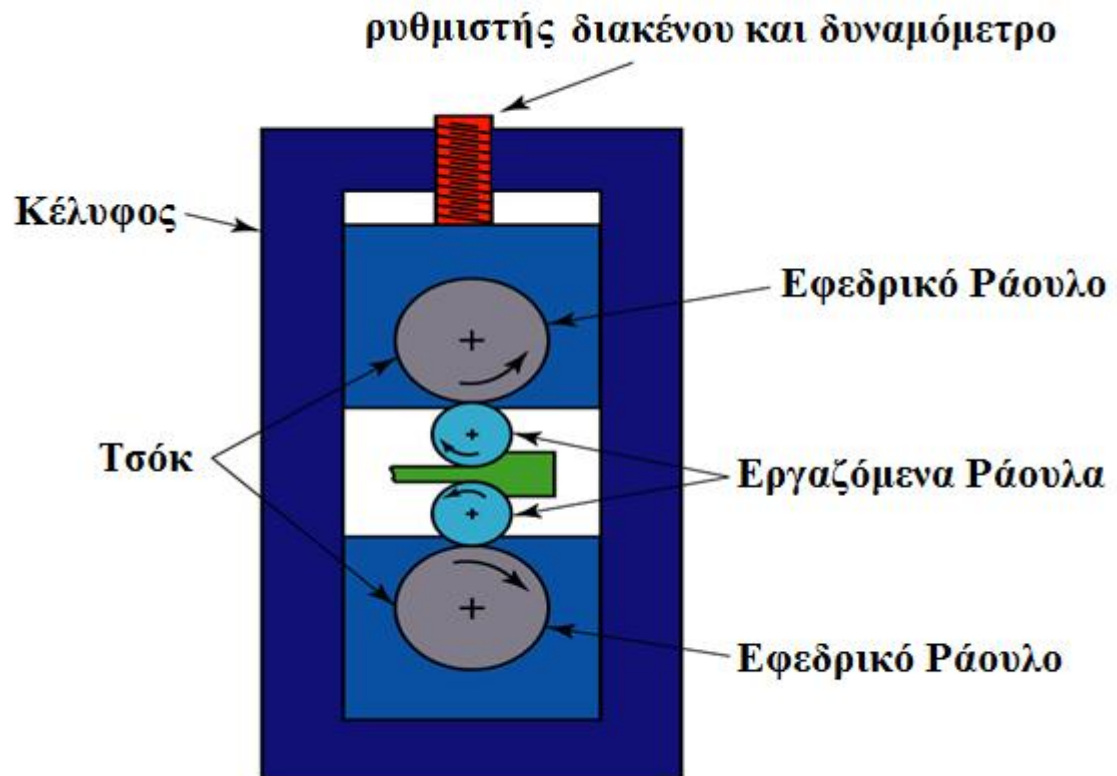
- Πλατιά προϊόντα που προέρχονται από την έλαση πλακών και διακρίνονται ανάλογα με το πάχος και το πλάτος τους σε:
 - Ελάσματα (plates) με πάχος ≥ 6 mm
 - Λεπτά ελάσματα (sheets) με πάχος < 6 mm και πλάτος ≥ 600 mm
 - Λεπτές λωρίδες (strips) με πάχος < 6 mm και πλάτος < 600 mm.



Σχήμα 2.15 Προϊόντα έλασης

2.3.2 Εργαλειομηχανές Έλασης

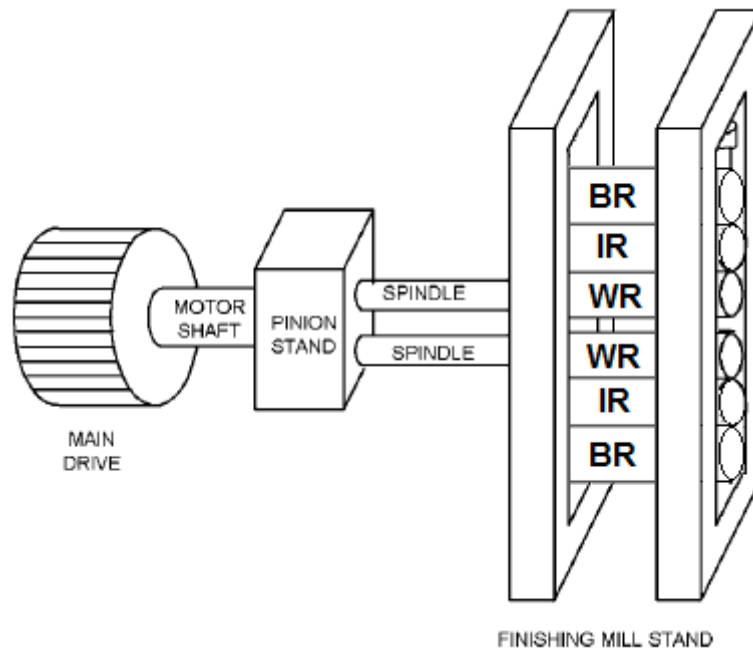
Η εργαλειομηχανή της έλασης ονομάζεται έλαστρο (mill). Τα δομικά μέρη ενός ελάστρου φαίνονται στο Σχ. 1.16. Αποτελείται από τα ράουλα (rolls), οι άξονες των οποίων στρέφονται μέσα σε κουζινέτα (bearings), ενώ όλα μαζί είναι εγκατεστημένα σε ειδικό κέλυφος (housing).



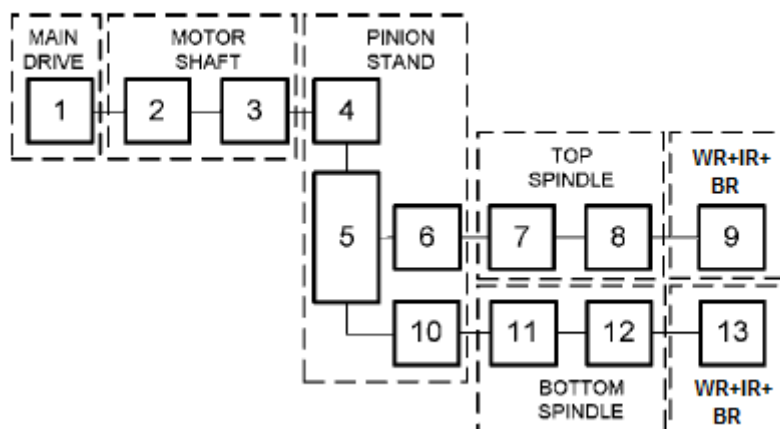
Σχήμα 2.16 Σχηματική παράσταση ενός ελάστρου

Τα άκρα των αξόνων είναι κατάλληλα διαμορφωμένα ώστε να συνδέονται μέσω σταυροειδών συνδέσμων με το αξονικό σύστημα της εγκατάστασης, το οποίο με τη σειρά του μεταδίδει κίνηση στα ράουλα (ανεξάρτητη για κάθε ράουλο) παραλαμβάνοντας ισχύ από σύστημα ηλεκτροκινητήρα/μειωτήρα. Στο σχήμα 1.17

και στο σχήμα 1.18 μπορούμε να δούμε σχηματικά την διαδρομή της κίνησης στο έλαστρο.



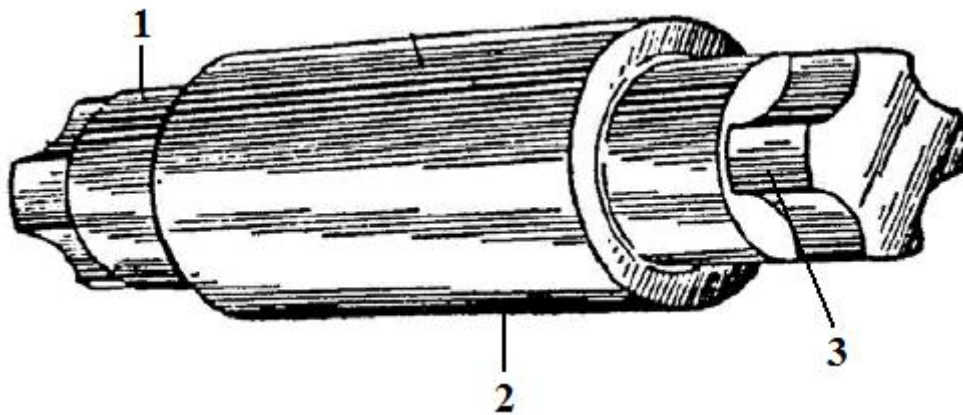
Σχήμα 2.17



Σχήμα 2.18

Τα ράουλα είναι χαλύβδινα κυλινδρικά τύμπανα με ομοιόμορφη διατομή (σχήμα 1.19) ή έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα (ράουλα μορφής), ώστε να αποδίδουν το αντίστοιχο γεωμετρικό σχήμα στο τελικό προϊόν. Τα ράουλα που επιτελούν την

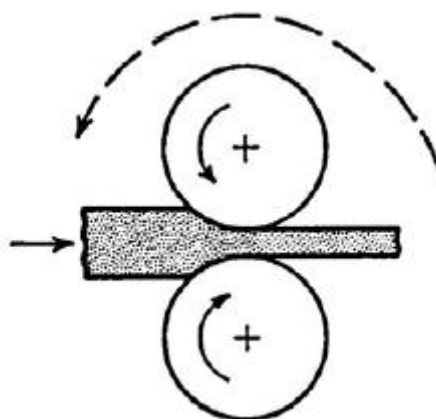
πλαστική παραμόρφωση τοποθετούνται με οριζόντιους άξονες το ένα πάνω στο άλλο, ενώ κατακόρυφα ράουλα χρησιμοποιούνται βοηθητικά για τον έλεγχο του πλάτους του τελικού προϊόντος.



Σχήμα 2.19 Ράουλο έλασης

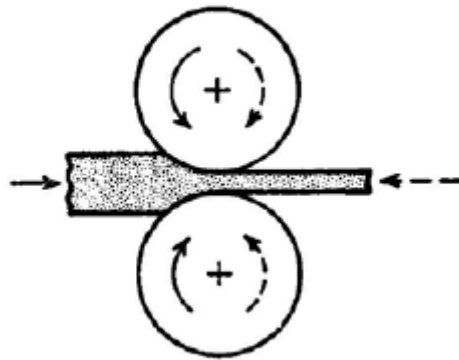
Τα έλαστρα, ανάλογα με την εργασία που έχουν να επιτελέσουν και τα φορτία που δέχονται κατασκευάζονται σε ανάλογες διατάξεις. Οι διάφορες μορφές ελάστρων είναι οι ακόλουθες :

- Έλαστρο δύο ραούλων (2-high mill) (σχήμα 1.20): Πρόκειται για την απλούστερη κατασκευή ελάστρου.



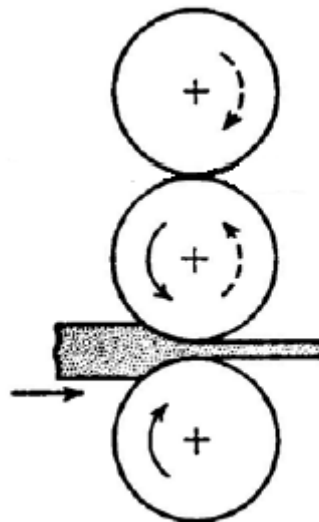
Σχήμα 2.20

- Έλαστρο δύο ραούλων με αναστρεφόμενη κίνηση (2-high reversing mill) (σχήμα 1.21): Εξασφαλίζει περαιτέρω μείωση του πάχους με αναστροφή της περιστροφής των ραούλων, αποφεύγοντας έτσι την μεταφορά του τεμαχίου σε άλλη θέση (εξοικονόμηση χρόνου κατεργασίας)



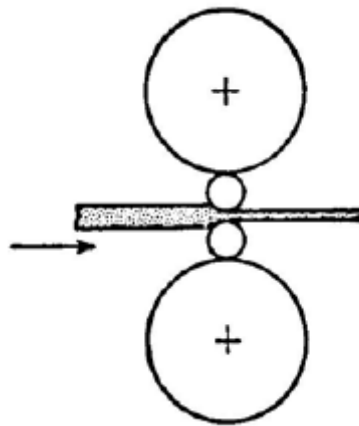
Σχήμα 2.21

- Έλαστρο τριών ραούλων (3-high mill) (σχήμα 1.22): Στρέφονται τα άνω και κάτω ράουλα ενώ των μεσαίο στρέφεται μέσω της αναπτυσσόμενης τριβής. Πρόκειται για εναλλακτική λύσης της προηγούμενης μορφής.



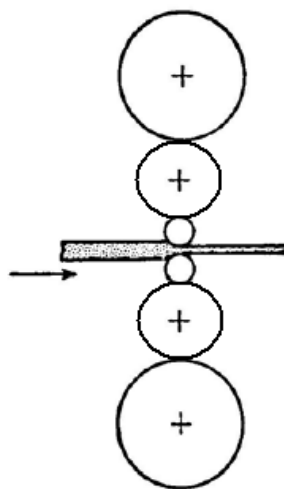
Σχήμα 2.22

- Έλαστρο τεσσάρων ραούλων (4-high mill) (σχήμα 1.23): Τα ενεργά ράουλα είναι μικρότερης διαμέτρου και στηρίζονται σε δύο ράουλα αντιστήριξης μεγαλύτερης διαμέτρου για να αποφευχθεί ο κίνδυνος κάμψης τους από τα φορτία έλασης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας και μεγαλύτερη μείωση πάχους ανά πάσο.



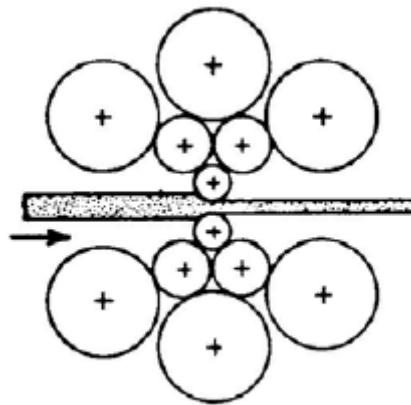
Σχήμα 2.23

- Έλαστρο έξι ραούλων (6 - high mill) (σχήμα 1.24): Βασίζεται στο πρότυπο του 4-h ελάστρου μόνο που προστίθεται και ένα ενδιάμεσο ράουλο (intermediate roll).



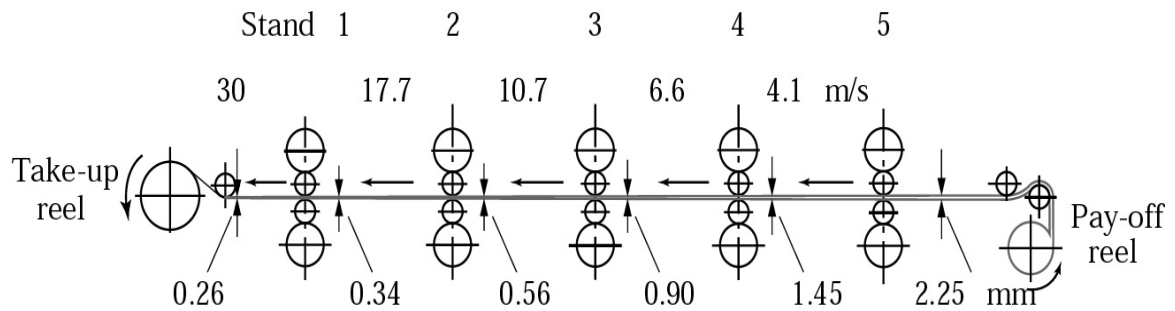
Σχήμα 2.24

- Έλαστρο τύπου cluster (cluster mill) (σχήμα 1.25), στο οποίο κάθε ενεργό ράουλο στηρίζεται από δύο ράουλα αντιστήριξης και κάθε ράουλο αντιστήριξης από δύο άλλα μεγαλύτερης διαμέτρου. Παραλλαγή του τύπου αυτού είναι το έλαστρο Sendzimir. Τα έλαστρα αυτά χρησιμοποιούνται για την κατεργασία πολύ λεπτών ελασμάτων (foils).



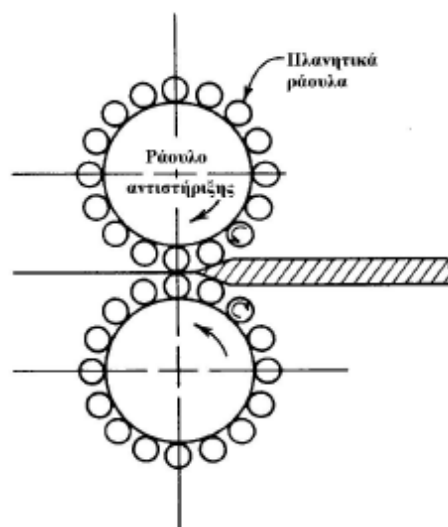
Σχήμα 2.25

Όταν απαιτείται μεγάλη παραγωγή, προτιμάται η έλαση εν σειρά (tandem rolling), κατά την οποία τα έλαστρα τοποθετούνται το ένα μετά το άλλο (σχήμα. 1.26) και το κατεργαζόμενο τεμάχιο διέρχεται και κατεργάζεται συγχρόνως από όλα τα έλαστρα αποκτώντας έτσι βαθμιαία μείωση του πάχους του. Στην περίπτωση αυτή δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο συγχρονισμό των επιμέρους ελαστρων με ρύθμιση των ταχυτήτων περιστροφής τους, ώστε το τεμάχιο να εξέρχεται από κάθε θέση με την αντίστοιχη ταχύτητα εισόδου της επόμενης βαθμίδας (αποφυγή ολίσθησης του TE στην EM).



Σχήμα 2.26 Διαδοχικό έλεστρο

Ειδική διάταξη ελάστρου είναι το *έλαστρο με πλανητικά ράουλα* (planetary mill) (σχήμα 1.27). Αποτελείται από δύο ράουλα αντιστήριξης μεγάλης διαμέτρου που περιβάλλονται από μεγάλο αριθμό μικρών περιφερειακών (πλανητικών) ραούλων. Ο κύριος ρόλος των πλανητικών ραούλων είναι η απευθείας μείωση (εν θερμώ) του πάχους ελάσματος σε ένα πάσο. Καθένα απ' αυτά εξασφαλίζει σχεδόν ομοιόμορφη μείωση πάχους και είναι διαταγμένα έτσι ώστε, μόλις παύει την επενέργεια του ένα ζεύγος πλανητικών ραούλων, να αναλαμβάνει δράση το επόμενο ζεύγος. Η συνολική δράση με τη χρήση πλανητικών ραούλων προσιδιάζει περισσότερο με την διαδικασία σφυρηλάτησης.



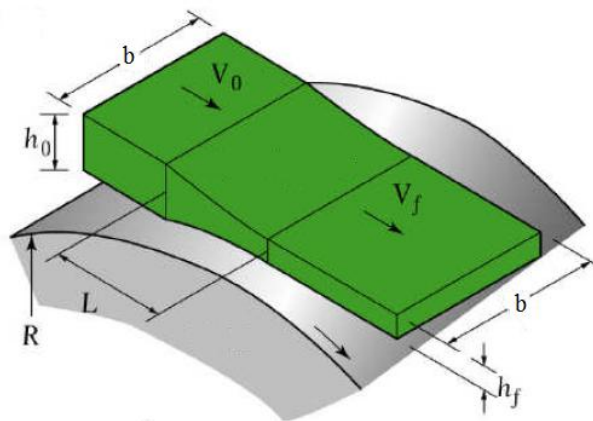
Σχήμα 2.27

2.3.3 Μηχανική της έλασης

Ταχύτητες

Αν εφαρμοστεί η εξίσωση συνέχειας στη ροή του υλικού στην είσοδο, έξοδο και σε τυχούσα θέση μέσα στην πλαστική ζώνη (σχήμα 1.28) προκύπτει η σχέση

$$b \cdot h_0 \cdot V_0 = b \cdot h \cdot V = b \cdot h_f \cdot V_f \quad 1.1$$



Σχήμα 2.28

όπου b το πλάτος της μπιγέτας, h το πάχος της, v η ταχύτητα, ενώ οι δείκτες 0 και f αναφέρονται στην είσοδο και την έξοδο, αντίστοιχα.

Επειδή ισχύει $h_0 > h > h_f$ θα είναι προφανώς

$$v_0 < v < v_f$$

Από την εξ. (1.1) συνάγεται ότι αρχικά η γραμμική ταχύτητα στην περιφέρεια του ραούλου θα είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του TE στην είσοδο του ανοίγματος

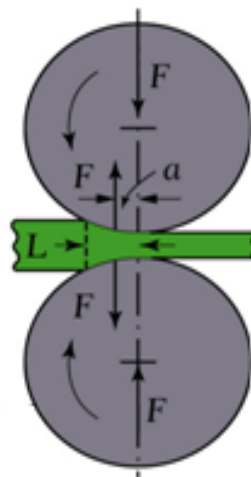
για να μπορεί να εισαχθεί τούτο στην πλαστική ζώνη, στη συνέχεια υπάρχει βαθμιαία αύξηση της ταχύτητας μέσα στην πλαστική ζώνη μέχρις ότου αυτή εξισωθεί με την γραμμική ταχύτητα του ραούλου στη θέση ουδετέρου επιπέδου και στη συνέχεια μέχρι την έξοδο η ταχύτητα της μπιγέτας θα υπερβαίνει την γραμμική ταχύτητα του ραούλου. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μέσα στην πλαστική ζώνη θα υφίσταται ροή του υλικού προς την είσοδο (ροή αριστερά του ουδετέρου επιπέδου) και προς την έξοδο (ροή δεξιά του ουδετέρου επιπέδου), αντίστοιχα.

Δυνάμεις

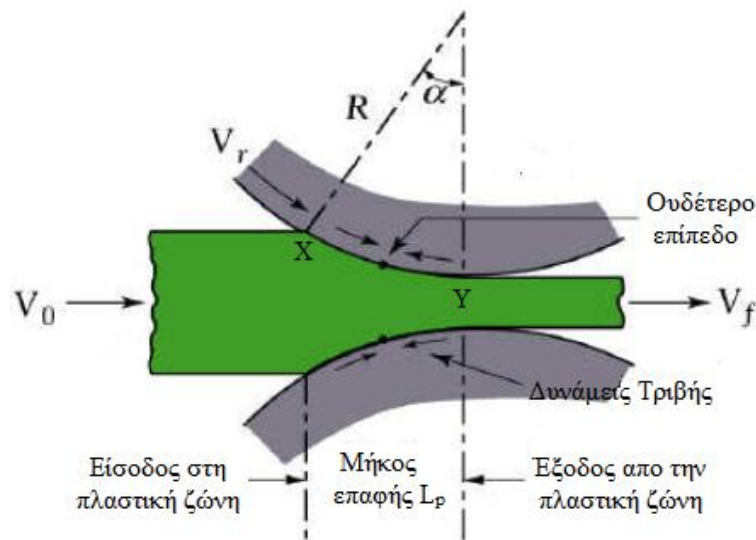
Οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο υλικό σε τυχόν σημείο μέσα στην πλαστική ζώνη είναι το ακτινικό φορτίο έλασης P (rolling load, separating load) και η τριβή F που αντιτίθεται στη ροή του υλικού (σχήμα 1.29). Προφανώς συνδέονται με τη σχέση

$$F = \mu \cdot P \quad 1.2$$

όπου μ ο συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια TE/EP.



Σχήμα 2.29



Σχήμα 2.30

Μήκος τόξου επαφής

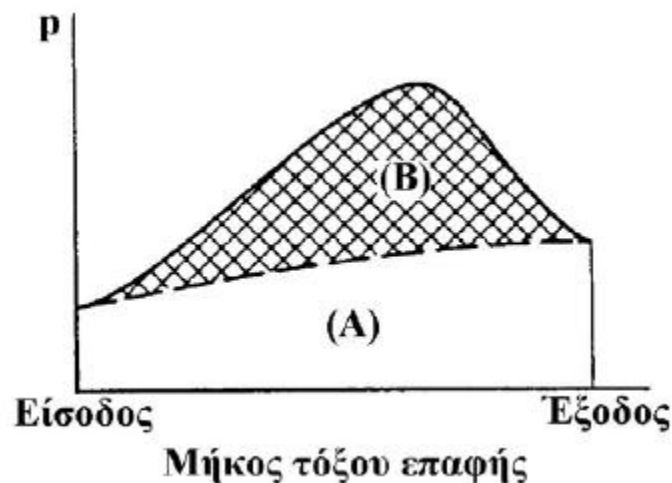
Η επιφάνεια επαφής TE/ραούλου εκτείνεται κατά μήκος του τόξου επαφής XY, το οποίο έχει προβεβλημένο μήκος L_p κατά τον άξονα του τεμαχίου ίσο με:

$$L_p = \left[R \cdot (h_0 - h_f) - \frac{(h_0 - h_f)^2}{4} \right]^{1/2} \approx [R \cdot (h_0 - h_f)]^{1/2} = (R \cdot \Delta h)^{1/2} \quad 1.3$$

Κατανομή της πίεσης στα ράουλα

Η κατανομή της πίεσης p των ραούλων φαίνεται στο σχήμα 1.31 Αρχικά σημειώνεται αύξηση της πίεσης μέχρι μια μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί στη θέση του ουδετέρου επιπέδου και στη συνέχεια μειώνεται εκ νέου. Διακρίνονται δύο χαρακτηριστικές περιοχές, η περιοχή A που αντιπροσωπεύει το πλαστικό έργο που απαιτείται για την ομογενή παραμόρφωση του τεμαχίου και η περιοχή B που

αντιστοιχεί στο πρόσθετο έργο για την υπερνίκηση των τριβών. Η μορφή της καμπύλης κατανομής της πίεσης ραούλων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, δεδομένου ότι εξασφαλίζει τον προσδιορισμό του σημείου εφαρμογής της συνισταμένης δύναμης έλασης και διευκολύνει έτσι τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ροπής στρέψης και της ισχύος κατεργασίας.



Σχήμα 2.31 Κατανομή της πίεσης στην πλαστική ζώνη

Υπολογισμός του φορτίου έλασης

1) Ομοιογενής παραμόρφωση

Το φορτίο P προκύπτει από τη μέση πίεση ραούλου πολλαπλασιασμένη με την προβεβλημένη επιφάνεια επαφής, δηλαδή

$$P = p \cdot b \cdot L_p = \sigma'_0 \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad 1.4$$

όπου η τάση διαρροής σ'_0 ισούται με το όριο διαρροής Y σε μονοαξονικό εφελκυσμό στην έλαση ορθογωνικής μιγέτας και με $2 \cdot Y/\sqrt{3}$ στην περίπτωση έλασης πλάκας (επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση).

2) Ανομοιογενής παραμόρφωση (προσεγγιστική λύση)

Θεωρώντας το πρόβλημα ως σφυρηλάτηση ορθογωνικής μιγέτας με μέσο πάχος $\bar{h} = (h_0 + h_f)/2$, προκύπτει ο προσεγγιστικός τύπος

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0 \left[\frac{1}{Q} (e^Q - 1) \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \right] \quad 1.4$$

όπου $\bar{\sigma}_0 = (Y_0 + Y_f)/2$ και $Q = \mu \cdot L_p/\bar{h}$.

Υπολογισμός ροπής στρέψης ραούλων και ισχύος κατεργασίας

- Ροπή στρέψης ραούλων : $T = 2 \cdot P \cdot (\lambda \cdot L_p)$

όπου ο συντελεστής λ ισούται με 0.5 για θερμή έλαση ή 0.45 για ψυχρή έλαση.

- Απαιτούμενο έργο κατεργασίας: $W = 2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L_p) \cdot P$

- Ισχύς κατεργασίας: $\dot{W} = 4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L_p \cdot P \cdot N$

όπου N η συχνότητα περιστροφής των ραούλων.

3 Μέθοδοι και τρόποι μέτρησης κραδασμών

3.1 Εισαγωγή

Το αντικείμενο της ανάλυσης των δονήσεων(-ταλαντώσεων), βρίσκεται στο γεγονός ότι οι μηχανές είναι κατασκευασμένες με τέτοιο τρόπο, ώστε όταν υποβάλλονται σε δυναμικές φορτίσεις, να παράγουν ταλαντωτικά σήματα σε διάφορες συχνότητες. Οι συχνότητες των σημάτων αυτών, είναι ταυτόσημες με τις συχνότητες των φορτίσεων που τα προκάλεσαν.

Η παρακολούθηση και η ανάλυση των κραδασμών παρέχει πολλές χρήσιμες πληροφορίες για την κατάσταση μίας μηχανής. Θεωρητικά όλες, και πρακτικά οι περισσότερες ατέλειες ή βλάβες μίας μηχανής μεταβάλλουν το επίπεδο κραδασμών της. Πολλοί έμπειροι μηχανικοί ή τεχνίτες, παρακολουθώντας με πρωτογενή μέσα, είτε άμεσα το επίπεδο των ίδιων των κραδασμών είτε του εκπεμπόμενου θορύβου, είναι σε θέση να αντιληφθούν μία βλάβη (π.χ. "σφύριγμα" ενός ένσφαιρου τριβέα).

Σήμερα, για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται πιο σύγχρονες και αποτελεσματικές μέθοδοι. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται οι «τυπικές» μέθοδοι ανάλυσης. Επιδιώκεται επίσης να θεμελιωθεί η κεντρική ιδέα της ανάλυσης των μηχανών με αυτή την τεχνοτροπία.

Η μεταβολή των κραδασμών ως συνέπεια βλάβης, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ο μηχανολογικός εξοπλισμός αποτελεί τη μεγαλύτερη κατηγορία βιομηχανικού εξοπλισμού, καθιστούν σήμερα την παρακολούθηση των κραδασμών σαν την επικρατέστερη μέθοδο "*Προβλεπτικής Συντήρησης*" στις σύγχρονες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Η έγκαιρη αντίληψη και διάγνωση μίας βλάβης στα αρχικά της στάδια, παρέχει στο προσωπικό συντήρησης όλη τη χρονική ευχέρεια για τη διόρθωση της, προτού η βλάβη επεκταθεί, με πολλαπλασιαστικά καταστροφικά αποτελέσματα, που μπορεί να οδηγήσουν ακόμη και στη διακοπή όλης της παραγωγικής μονάδας.

3.2 Επεξεργασία κραδασμών - πλάτος και συχνότητα

Κραδασμός είναι η συμπεριφορά ενός μηχανολογικού εξαρτήματος κάποιας μηχανής, ως αντίδραση στην επιβολή κάποιου εσωτερικού ή εξωτερικού φορτίου.

Επειδή τα περισσότερα μηχανικά προβλήματα εμφανίζονται ως υπερβολικές ταλαντώσεις, τα σήματα κραδασμών χρησιμοποιούνται σαν ενδείξεις της μηχανολογικής κατάστασης κάποιας μηχανής. Επίσης, κάθε μηχανολογικό πρόβλημα ή κατασκευαστική ατέλεια παράγει δόνησεις με το δικό της μοναδικό τρόπο. Για αυτό το λόγο αναλύεται ο «τύπος» της δόνησης, ώστε να αναγνωριστεί το αίτιο της και ληφθούν τα απαραίτητα διορθωτικά μέτρα.

Όταν αναλύεται η δόνηση, εξετάζονται δύο κύριες συνιστώσες του σήματος δόνησης, η συχνότητα και το πλάτος.

- **Συχνότητα**

είναι ο αριθμός των φορών που θα εμφανιστεί ένα γεγονός σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο (το γεγονός αντιστοιχίζεται με έναν κύκλο δόνησης). Η συχνότητα στην οποία εμφανίζεται η δόνηση, υποδεικνύει τον τύπο της βλάβης. Έτσι, συγκεκριμένοι τύποι βλαβών εμφανίζονται «τυπικά» σε συγκεκριμένες συχνότητες. Εγκαθιδρύοντας τη συχνότητα στη οποία εμφανίστηκε η βλάβη, διαμορφώνεται μία καθαρότερη εικόνα για το τί θα μπορούσε να την προκαλέσει.

- **Πλάτος**

είναι το μέγεθος του σήματος δόνησης. Το πλάτος του σήματος δόνησης καθορίζει τη σοβαρότητα της βλάβης. Όσο πιο ψηλό είναι το πλάτος, τόσο μεγαλύτερη είναι η δόνηση (ή ταλάντωση), και επομένως τόσο πιο μεγάλο είναι το πρόβλημα. Το πλάτος εξαρτάται από τον τύπο της μηχανής και εξετάζεται πάντα σε σχέση με το επίπεδο δόνησης της μηχανής όταν αυτή είναι σε «καλή» κατάσταση (δηλαδή «καινούρια»).

Για την κλασική ανάλυση των κραδασμών χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες μέθοδοι υπολογισμού όπως:

- Συνολικοί Κραδασμοί (Overall Vibration)
- Μέτρηση Φάσης (Phase)
- Αποδιαμόρφωση «Φακέλου» (Envelope Detection)
- Ακουστικές-Ηχητικές Εκπομπές (SEE-Acoustic Emissions)
- Εντοπισμός υψηλής συχνότητας (High Frequency Detection-HFD)
- Άλλες τεχνολογίες συντονισμού των αισθητήριων οργάνων.

3.3 Σημεία μέτρησης

Η επιλογή των σημείων στα οποία θα τοποθετηθούν τα αισθητήρια μέτρησης είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο στην όλη διαδικασία, αφού από αυτά επηρεάζεται κατά ανάλογο τρόπο η ποιότητα των σημάτων που λαμβάνονται. Θα πρέπει να αποφεύγονται τοποθετήσεις σε χρωματισμένες επιφάνειες, σε επιφάνειες στις οποίες τα υποκείμενα ρουλεμάν δεν υπόκεινται σε κάποιο σημαντικό φορτίο, σε διαιρούμενα προστατευτικά καλύμματα και σε κατασκευαστικά κενά.

Οι επιφάνειες στην ιδανική περίπτωση, πρέπει να είναι απολύτως επίπεδες. Κατά τη μέτρηση κραδασμών με χειροκίνητα αισθητήρια, είναι επιτακτική η λήψη συνακόλουθων μετρήσεων (η μετακίνηση των αισθητηρίων έστω και για λίγα εκατοστά μπορεί να επιφέρει την παραγωγή τελείως διαφορετικών κραδασμών), δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στη θέση του αισθητηρίου πάνω στη μηχανή, τη γωνία που σχηματίζει το αισθητήριο με το μηχάνημα και την πίεση επαφής με την οποία συγκρατείται το αισθητήριο πάνω στη μηχανή.

Οι κραδασμοί θα πρέπει να μετρούνται σε τρεις διευθύνσεις (σχήμα 2.2 και 2.3):

- **Οριζόντια κατεύθυνση** - Horizontal direction (H).

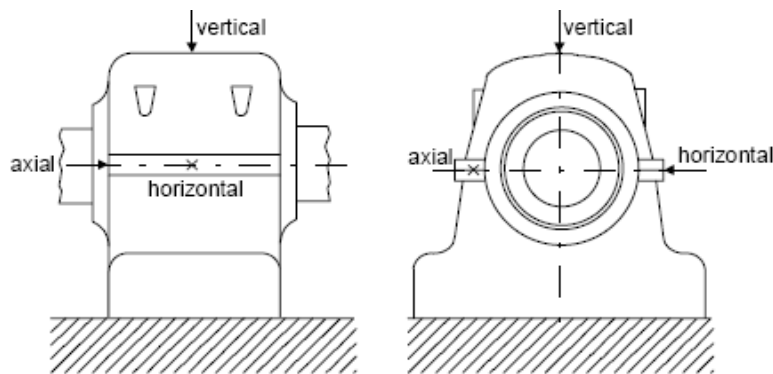
Οι μετρήσεις κατά την οριζόντια κατεύθυνση τυπικά δείχνουν το μεγαλύτερο μέρος των κραδασμών, επειδή η μηχανή είναι πιο εύκαμπτη κατά το οριζόντιο επίπεδο. Επίσης, η αζυγοσταθμία, που είναι ένα από τα πιο κοινά μηχανικά προβλήματα, παράγει ακτινικούς κραδασμούς, οι οποίοι είναι κατά ένα μέρος κάθετοι και κατά ένα άλλο οριζόντιοι.

- **Κάθετη κατεύθυνση** - Vertical direction (V).

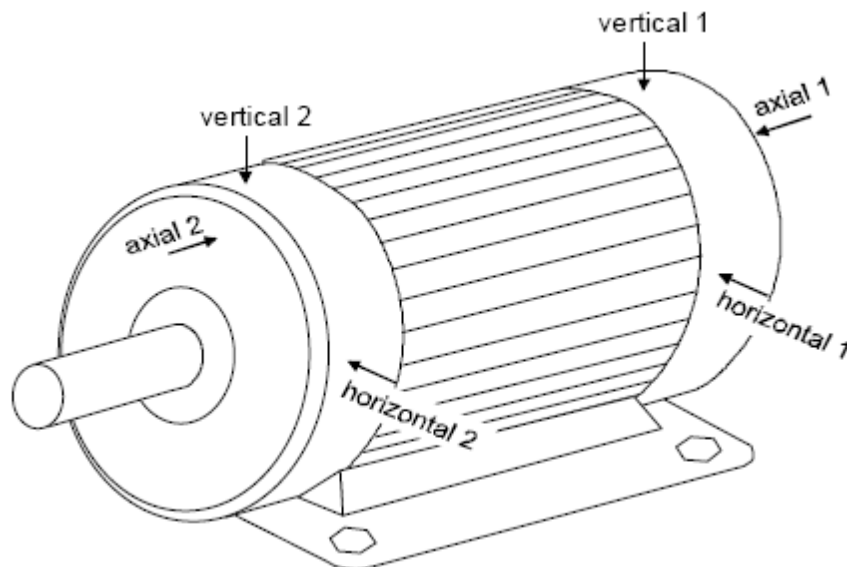
Οι μετρήσεις κατά την κάθετη κατεύθυνση τυπικά δείχνουν μικρότερους κραδασμούς σε σχέση με την οριζόντια, επειδή συνεπιδρούν η στιβαρότητα που προσδίδει το πλαίσιο στήριξης, καθώς και το βάρος της ίδιας της κατασκευής.

- **Αξονική κατεύθυνση - Axial direction (A).**

Κάτω από ιδανικές συνθήκες, οι μετρήσεις κατά την αξονική κατεύθυνση δείχνουν πολύ μικρούς κραδασμούς αφού οι περισσότερες φορτίσεις παράγονται κάθετα στους άξονες. Ωστόσο, η κακή ευθυγράμμιση και προβλήματα από λυγισμένους άξονες προκαλούν κραδασμούς και στην αξονική κατεύθυνση.



Σχήμα 3.1 Σημεία μέτρησης σε βάση ρουλεμάν

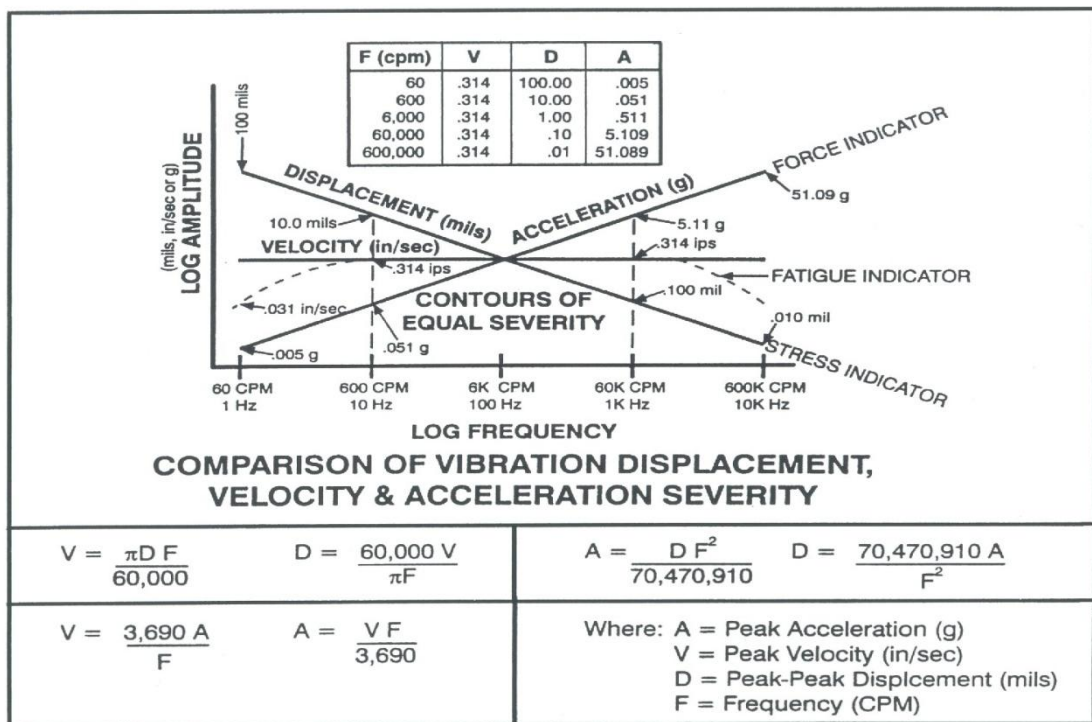


Σχήμα 3.2 Σημεία μέτρησης σε κινητήρα

Τέλος η γωνία επαφής των αισθητηρίων πρέπει να είναι πάντα κάθετη στην επιφάνεια της μηχανής ($90^\circ \pm 10^\circ$), ενώ η πίεση επαφής, πρέπει να είναι ομοιόμορφη και σταθερή, σε σημείο όμως που να μην επηρεάζει και να μειώνει το σήμα του κραδασμού.

3.4 Μέθοδοι και αισθητήρια μέτρησης

Οι βασικές μηχανικές ποσότητες, με τις οποίες μπορούν άμεσα να μετρηθούν οι κραδασμοί, είναι η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Θεωρητικά, είναι όλες ισοδύναμες μεταξύ τους για τη μέτρηση των κραδασμών. Οι σχέσεις μεταξύ τους στο πεδίο του χρόνου -παραγωγή ή ολοκλήρωση- και στο πεδίο συχνότητας -πολλαπλασιασμός ή διαίρεση-όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4, καθιστούν τη μετατροπή των μετρήσεων ευχερή από το ένα μέγεθος στο άλλο.



Σχήμα 3.3

1. **Μετατόπιση (Displacement):** Η μεταβολή στην απόσταση ή θέση ενός αντικειμένου σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς. Το μέγεθος της μετατόπισης είναι το **πλάτος**, και οι μονάδες του είναι τα χιλιοστόμετρα μέτρα (millisecond) ή τα μικρόμετρα (micrometer).

Τα αισθητήρια μετατόπισης είναι διατάξεις μη-επαφής, τα οποία μετράνε τη σχετική απόσταση μεταξύ δύο επιφανειών. Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούνται για να εμφανίσουν δονήσεις αξόνων, ενώ βρίσκουν εφαρμογή ως επί το πλείστον σε

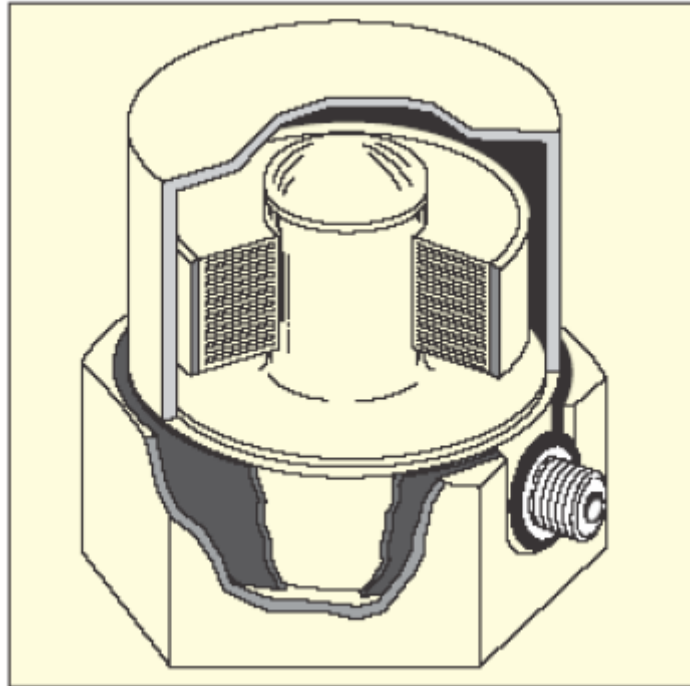
μηχανές με υδροδυναμικά ρουλεμάν. Σημειώνεται ότι μετράνε την κίνηση του άξονα ή του στροφέα σε σχέση με το κουζινέτο. Έτσι, αν η μηχανή και ο στροφέας κινούνται μαζί, η μετατόπιση είναι μηδέν, ενώ στην πραγματικότητα η μηχανή μπορεί να δονείται σε μεγάλο βαθμό.

2. Ταχύτητα (Velocity): Η μεταβολή στη μετατόπιση ως συνάρτηση του χρόνου. Είναι η πρώτη παράγωγος της μετατόπισης, και μετράται σε ίντσες ανά δευτερόλεπτο (in/sec) ή σε χιλιοστάμετρα ανά δευτερόλεπτο (mm/sec).

Τα αισθητήρια ταχύτητας είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα στις μετρήσεις δονήσεων σε μηχανές. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι σε πολύ χαμηλές (π.χ. 10Hz) ή πολύ υψηλές (π.χ. 2kHz) συχνότητες χάνουν την αποδοτικότητά τους.

3. Επιτάχυνση (Acceleration): Ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας. Είναι η δεύτερη παράγωγος της μετατόπισης, και μετράται σε ίντσες ανά /δευτερόλεπτο² (in/sec²), σε χιλιοστάμετρα / δευτερόλεπτο² (mm/sec²) ή σε Gs. Οι δονήσεις στο επίπεδο της επιτάχυνσης μετρούνται με τα επιταχυνσιόμετρα.

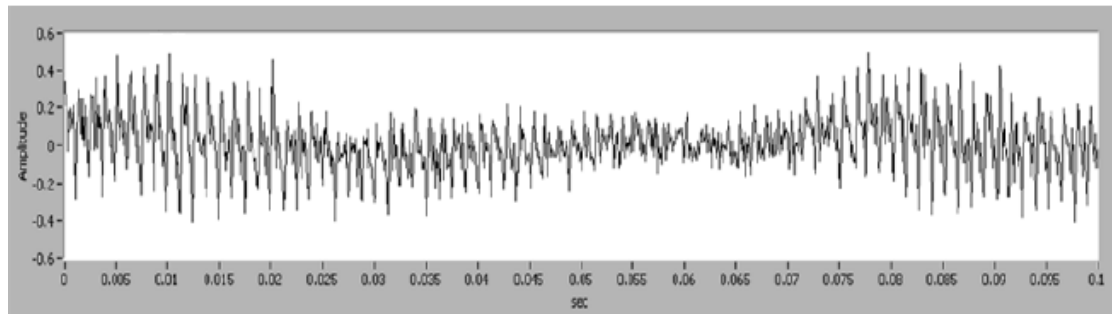
Ένα επιταχυνσιόμετρο συνήθως αποτελείται από ένα στοιχείο πιεζοκρυσταλλού και μία μάζα, όπως παριστάνεται και στο σχήμα 2.5. Όταν ο πιεζοκρυσταλλός πιέζεται παράγει μία ηλεκτρική τάση ανάλογη της επιτάχυνσης. Ο κρυσταλλός πιέζεται από τη μάζα όταν αυτή ταλαντώνεται από το στοιχείο στο οποίο είναι συνδεδεμένη. Το βασικό πλεονέκτημα των επιταχυνσιόμετρων είναι ότι είναι πολύ ανθεκτικά εξαρτήματα, ενώ το πεδίο λειτουργίας τους φτάνει σε εύρος συχνοτήτων μέχρι και πάνω από 400 kHz.



Σχήμα 3.4 Κλασικό επιταχυνσιόμετρο

Παρά το γεγονός ότι τα τρία ανωτέρω χαρακτηριστικά συνδέονται μαθηματικά, ωστόσο πρόκειται για διαφορετικές ποσότητες. Είναι σημαντικό κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, να επιλέγεται η ποσότητα μέτρησης και ο τύπος του αισθητηρίου που έχουν τις περισσότερες πιθανότητες να αποκαλύψουν τα αναμενόμενα ενδεικτικά χαρακτηριστικά.

Με την τοποθέτηση επιταχυνσιομέτρων σε στρατηγικά σημεία όπου βρίσκονται τα ρουλεμάν, μπορεί να μετρηθεί η επιτάχυνση και εν συνεχεία με τη διαδικασία της ολοκλήρωσης μπορεί να υπολογισθεί η ταχύτητα. Αυτές οι μετρήσεις στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση και να παρασταθούν σε γραφικές παραστάσεις. Η γραφική παράσταση του πλάτους συναρτήσει του χρόνου ονομάζεται **χρονική κυματομορφή**.



Σχήμα 3.5 Γραφική παράσταση στο πεδίο του χρόνου

Η παραπάνω γραφική παράσταση παρουσιάζει τον τρόπο που εμφανίζεται ένα σήμα το οποίο έχει ληφθεί από κάποιο επιταχυνσιόμετρο ή αισθητήριο ταχύτητας με διάσταση πλάτους συναρτήσει του χρόνου. Αυτός ο τύπος των γραφημάτων δόνησης (-ταλάντωσης) ονομάζεται επίσης γραφική παράσταση στο πεδίο του χρόνου.

3.5 Συνολικό επίπεδο κραδασμών ("Overall" Vibration)

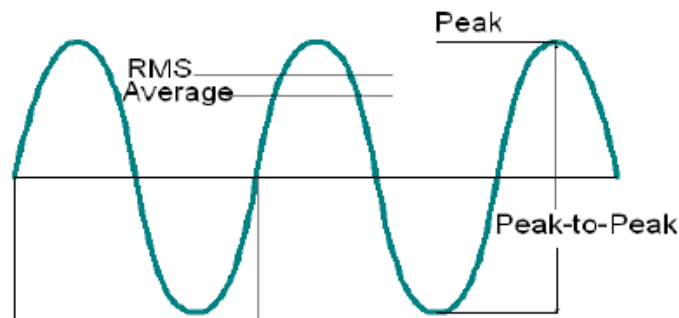
Συνολικοί κραδασμοί είναι η συνολική ενέργεια κραδασμών που μετράται μέσα σε μία ζώνη συχνοτήτων. Η μέτρηση των «συνολικών» κραδασμών μιας μηχανής ή ενός εξαρτήματος (π.χ. ένας στροφέας σε σχέση με τη μηχανή, ή η κατασκευή της μηχανής), και η σύγκριση τους με τις συνολικές μετρήσεις στη φυσιολογική τιμή (πρότυπη τιμή) καθορίζει την τρέχουσα κατάσταση της μηχανής. Μία ένδειξη των συνολικών κραδασμών που βρίσκεται αρκετά ψηλότερα από την πρότυπη, υποδεικνύει ότι “κάτι” αναγκάζει τη μηχανή ή το εξάρτημα να ταλαντώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό.

Ο κραδασμός θεωρείται η πλέον λειτουργική παράμετρος για την εξέταση δυναμικών συνθηκών «χαμηλών» συχνοτήτων όπως είναι η κακή ευθυγράμμιση, η μηχανολογική χαλαρότητα, η αζυγοσταθμία, ο κατασκευαστικός συντονισμός, η ασταθής θεμελίωση, το λύγισμα του άξονα, η εκτεταμένη φθορά κάποιου ρουλεμάν, ή η φθορά φτερού σε κάποιον στροφέα.

Η ζώνη συχνοτήτων στην οποία λαμβάνονται οι ενδείξεις των κραδασμών, καθορίζεται από τη συσκευή που πραγματοποιεί τις μετρήσεις. Το εύρος της ζώνης αυτής οριοθετείται συνήθως με βάση την κρίση αυτού που εκτελεί την ανάλυση. Παρά το γεγονός ότι η ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) έχει ορίσει ένα πρότυπο επίπεδο για το εύρος της ζώνης αυτής, ωστόσο ο καθορισμός της εξακολουθεί να αποτελεί σημείο διαφωνίας για το ποιο εύρος είναι πιο αντιπροσωπευτικό για τη μέτρηση των συνολικών κραδασμών. Για αυτό το λόγο, όταν γίνεται σύγκριση των συνολικών τιμών, είναι σημαντικό και οι δύο συνολικές τιμές να έχουν ληφθεί από τη ίδια ζώνη συχνοτήτων.

Κατά τη σύγκριση των συνολικών τιμών, θα πρέπει οι συντελεστές βαθμονόμησης (scale factors) οι οποίοι καθορίζουν τη διαδικασία μέτρησης να είναι συνακόλουθοι (να διατηρούνται δηλαδή οι ίδιοι για κάθε μέτρηση). Ο συντελεστές βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται είναι: η Τιμή Κορυφής (Peak), από Κορυφή σε Κορυφή (Peak to Peak), η Μέση Τιμή (Average) και η Μέση Τετραγωνική Τιμή (Root Mean Square-

RMS). Όταν γίνεται ανάλυση με ημιτονοειδείς κυματομορφές, τότε μεταξύ των συντελεστών αυτών υπάρχει άμεσος συσχετισμός, ο οποίος απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.6 Συντελεστές βαθμονόμησης σε μία ημιτονοειδή κυματομορφή κραδασμού

Ο συσχετισμός μεταξύ των συντελεστών δίνεται από τις σχέσεις:

- (1) **Κορυφή** = 1,0
- (2) **RMS** = 0,707*Κορυφή
- (3) **Μέση τιμή** = 0,637*Κορυφή
- (4) **Κορυφή σε Κορυφή** = 2*Κορυφή

Η τιμή της Κορυφής αντιπροσωπεύει την απόσταση της αιχμής της κυματομορφής μετρημένη σε αναφορά με μία μηδενική τιμή. Για πρακτικούς λόγους ορίζεται ότι η τιμή της θα είναι η μονάδα 1,0.

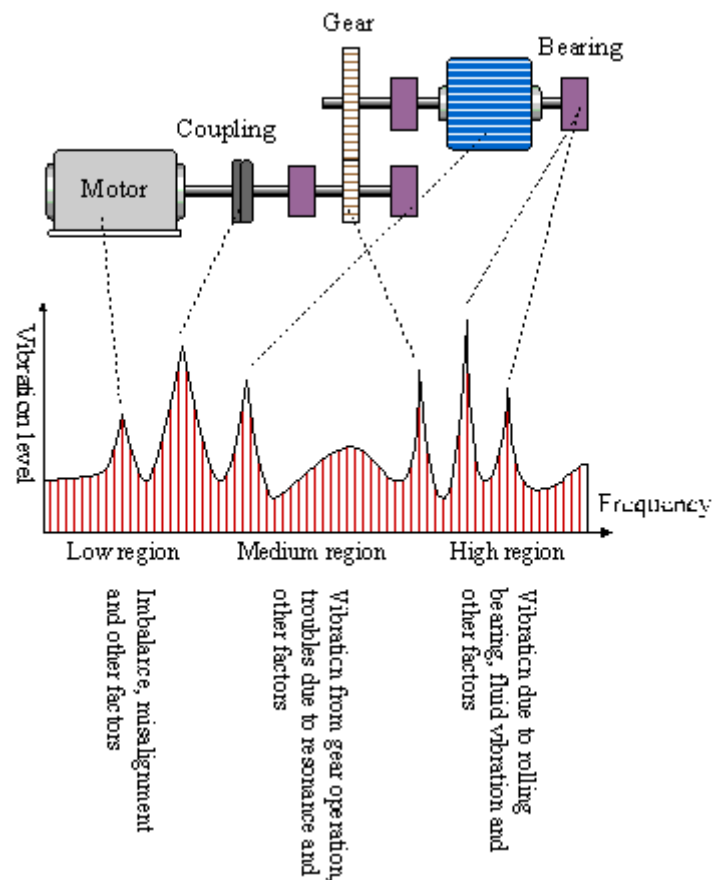
Η από Κορυφή σε Κορυφή τιμή είναι το πλάτος μετρούμενο από την κατώτατη αιχμή της κυματομορφής έως την ανώτατη αιχμή.

Η **Μέση Τιμή** είναι η μέση τιμή του πλάτους της κυματομορφής. Η μέση τιμή για μία αμιγώς ημιτονοειδή κυματομορφή είναι μηδέν (είναι σε τέτοιο βαθμό θετική, όσο και αρνητική). Ωστόσο, οι περισσότερες κυματομορφές δεν είναι αμιγώς ημιτονοειδείς. Επίσης, κυματομορφές οι οποίες δεν είναι κεντραρισμένες γύρω από κάποια μηδενική τιμή, είναι δυνατό να παράγουν μόνο μη-μηδενικές μέσες τιμές.

Σε γενικές γραμμές, η **Μέση Τετραγωνική Τιμή - RMS** προέρχεται από τη μαθηματική μετατροπή που σχετίζει την DC ενέργεια με την AC ενέργεια. Τεχνικά, σε μία χρονική κυματομορφή, είναι η μέση τετραγωνική τιμή. Σε ένα φάσμα FFT, είναι η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος μιας ομάδας από τετραγωνισμένες τιμές. Αναφερόμενοι σε ένα αμιγώς ημιτονοειδές σήμα, η RMS τιμή είναι 0,707 φορές της τιμής Κορυφής.

3.6 Φασματική ανάλυση με FFT (Fast Fourier Transformation)

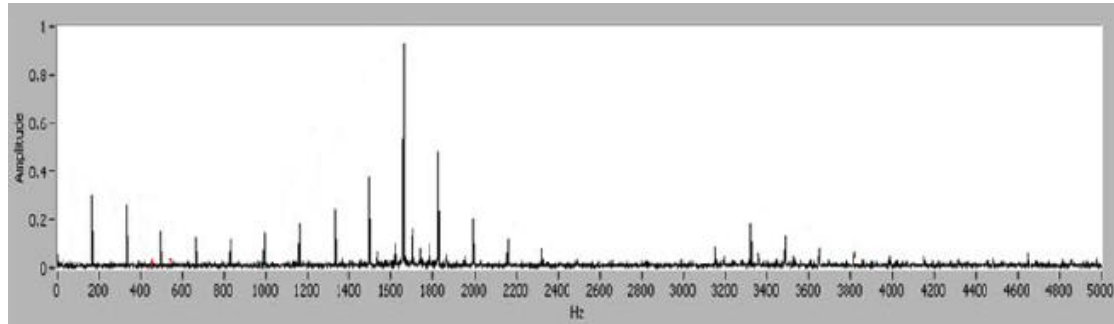
Μια μέθοδος για τη διερεύνηση του σήματος δόνησης, έτσι ώστε να είναι πιο αποτελεσματική η ανάλυση, είναι η εφαρμογή ενός ταχύ μετασχηματισμού Fourier - FFT (Fast Fourier Transformation). Με πιο απλά λόγια, αυτό σημαίνει ότι το σήμα «σπάει» σε συγκεκριμένα πλάτη με ποικίλες συνιστάμενες συχνότητες.



Σχήμα 3.7 Τρισδιάστατη κλίμακα συχνοτήτων, όπου εμφανίζονται οι συνιστώσες ενός σήματος δόνησης στις διάφορες συχνότητες περιστροφής τους

Για παράδειγμα, μετράται το πλάτος του σήματος στα 100Hz, εν συνεχεία στα 200Hz κ.ο.κ., μέχρι να σχηματιστεί μία λίστα τιμών για κάθε συχνότητα που περιέχει το σήμα. Αυτές οι τιμές ή τα πλάτη εν συνεχεία αποτυπώνονται σε διάγραμμα συναρτήσεως της κλίμακας των συχνοτήτων. Ο αριθμός των συνιστάμενων συχνοτήτων στις οποίες είναι χωρισμένη η κυματομορφή, που έχει σχηματιστεί,

αναφέρεται ως ο αριθμός των γραμμών της ανάλυσης -ή ευκρίνειας- (resolution). Το διάγραμμα που προκύπτει ονομάζεται **φάσμα FFT** (σχήμα 2.8).



Σχήμα 3.8 Παράδειγμα φάσματος FFT

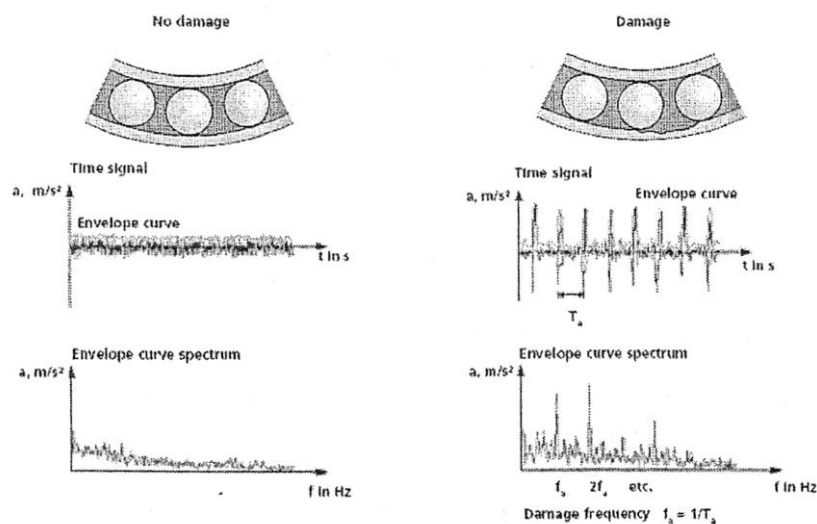
Η ανάλυση του FFT φάσματος είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο. Αν σε μια μηχανή υφίσταται κάποιο μηχανολογικό πρόβλημα, το φάσμα FFT μπορεί να παρέχει πληροφορίες για την προέλευση του προβλήματος, τα αίτια του και την προοπτική που έχει το πρόβλημα να καταστεί κρίσιμο και σε πόσο χρόνο. Επειδή οι συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι περισσότερες μηχανικές βλάβες είναι γνωστές, το φάσμα FFT αναλύεται επικεντρώνοντας την προσοχή στη μεταβολή του πλάτους σε διάφορα εύρη συχνοτήτων.

Παράλληλα με την εποπτεία και την ανάλυση των χρονικών κυματομορφών και του φάσματος FFT, τα σήματα δόνησης υπόκεινται και σε άλλες διαδικασίες οι οποίες εκτελούνται από ειδικά εξαρτήματα. Με την επεξεργασία των σημάτων δόνησης με πολύπλοκες μεθόδους παρέχονται περισσότεροι τρόποι για την ανάλυση των δεδομένων οι οποίοι να απέχουν από τους “πρότυπους”. Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν εν συντομία μερικές από τις κλασικές αυτές μεθόδους.

3.7 Μέθοδος αποδιαμόρφωσης «Φακέλου» (Envelope Detection)

Η επαναλαμβανόμενη δραστηριότητα των ρουλεμάν και των κιβωτίων ταχυτήτων, δημιουργεί σήματα δόνησης τα οποία είναι αρκετά μικρότερου πλάτους και υψηλότερων συχνοτήτων σε σχέση με τα σήματα δόνησης που προκύπτουν από την περιστροφή ή τα κατασκευαστικά στοιχεία των μηχανών.

Το αντικείμενο της αποδιαμόρφωσης (ή «φακελώματος» -enveloping-) μπορεί, χρησιμοποιώντας ειδικά φίλτρα, να αποβάλλει τις χαμηλές συχνότητες που προέρχονται από τα σήματα δόνησης εξ' αιτίας της περιστροφής των αξόνων, και να ενδυναμώνει τις επαναληπτικές συνιστώσες των σημάτων που οφείλονται στις βλάβες των ρουλεμάν, και τα οποία εμφανίζονται σε χαρακτηριστικό εύρος συχνοτήτων. Η διάγνωση με αποδιαμόρφωση είναι πιο κοινά διαδεδομένη στα έδρανα κύλισης και στην ανάλυση της εμπλοκής γραναζιών, όπου το χαμηλό πλάτος και η επαναληπτικότητα των σημάτων δόνησης που δημιουργούν, μπορεί να είναι κρυμμένα μέσα στο θόρυβο που προκαλούν οι δονήσεις περιστροφής και τα κατασκευαστικά στοιχεία των μηχανών.

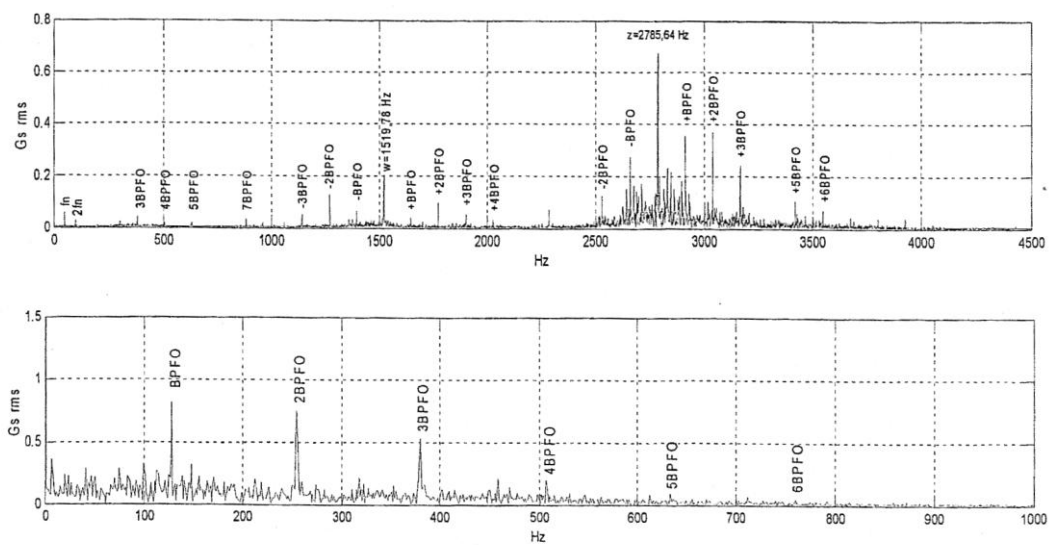


Σχήμα 3.9 Ελάττωμα στον εξωτερικό δακτύλιο ενός ρουλεμάν

Για παράδειγμα, εάν το στοιχείο ενός ένσφαιρου εδράνου έχει κάποιο ελάττωμα στον εξωτερικό του δακτύλιο (όπως φαίνεται στο άνω σχήμα), κάθε κύλινδρος του ρουλεμάν πηδάει πάνω στο ελάττωμα που βρίσκεται στην πορεία του και προκαλεί ένα μικρό, επαναλαμβανόμενο σήμα δόνησης, το οποίο θα βρίσκεται σε κάποιο χαρακτηριστικό εύρος συχνοτήτων όπου εμφανίζονται όλες οι βλάβες των ρουλεμάν.

Ωστόσο, αυτό το σήμα δόνησης είναι τόσο χαμηλής ενέργειας έτσι ώστε, σε σχέση με το επίπεδο των συνολικών δονήσεων, να χάνεται στο θόρυβο που προκαλούν οι δονήσεις περιστροφής και τα κατασκευαστικά στοιχεία των μηχανών.

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται δύο φάσματα του ίδιου σήματος εκ των οποίων το πρώτο είναι το κλασικό φάσμα, ενώ το δεύτερο είναι αυτό που προκύπτει μετά τη διαδικασία αποδιαμόρφωσης.



Σχήμα 3.10 Πάνω: Το φάσμα δονήσεων ενός ελαττωματικού ρουλεμάν. Κάτω: Για το ίδιο ελαττωματικό ρουλεμάν το φάσμα μετά την διαδικασία αποδιαμόρφωσης.

Τα τελευταία χρόνια, αυτή η μέθοδος μέτρησης έχει αποδειχθεί ένας πολύ επιτυχημένος δείκτης για μία μεγάλη τάξη μηχανών. Βλάβες σε κυλινδρικά ρουλεμάν, ελαττωματικά γρανάζια σε κιβώτια ταχυτήτων, προβλήματα σε ηλεκτρικούς κινητήρες κ.α. είναι όλα εφαρμογές της αποδιαμόρφωσης.

3.8 Μέθοδος εντοπισμού υψηλής συχνότητας (High Frequency Detection)

Η μέθοδος HFD παρέχει έγκαιρη προειδοποίηση για προβλήματα σε ρουλεμάν. Κατά τη διαδικασία παρουσιάζεται μία συνολική αριθμητική τιμή για δονήσεις υψηλής συχνότητας, οι οποίες προκαλούνται από μικρά ελαττώματα τα οποία συμβαίνουν μέσα σε εύρη ζωνών υψηλής συχνότητας (της τάξης των 5-60 kHz). Η συχνότητα συντονισμού του αισθητηρίου διάγνωσης είναι μέσα στο εύρος ζώνης, και χρησιμοποιείται για την ενίσχυση των σημάτων χαμηλής ενέργειας τα οποία δημιουργούνται από την επίδραση των μικρών ελαττωμάτων. Εξ' αιτίας του εύρους των υψηλών συχνοτήτων, η μέτρηση HFD πραγματοποιείται με επιταχυνσιόμετρα και χρησιμοποιεί μονάδες σε Gs. Η μέτρηση HFD μπορεί να γίνει είτε για τιμές κορυφής, είτε για τιμές RMS.

Ασφαλώς κάθε μία από τις μεθόδους που αναλύθηκαν πιο πάνω παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Γίνεται αντιληπτό ότι μία συνδυασμένη χρήση τους θα μπορούσε να αποβάλλει τα κατά περιπτώσεις μειονεκτήματα. Επομένως μία προσεγμένη πολύ-παραμετρική προσέγγιση του προβλήματος, θα οδηγούσε στην πιο έγκαιρη, αποδοτική και αποτελεσματική αντιμετώπιση του.

Στο κεφάλαιο που ολοκληρώθηκε αναφέρθηκαν και αναλύθηκαν με τον πιο απλό και κατανοητό κατά το δυνατόν τρόπο, τα βασικά στοιχεία και οι κύριες μέθοδοι της τεχνολογίας της διαγνωστικής βλαβών.

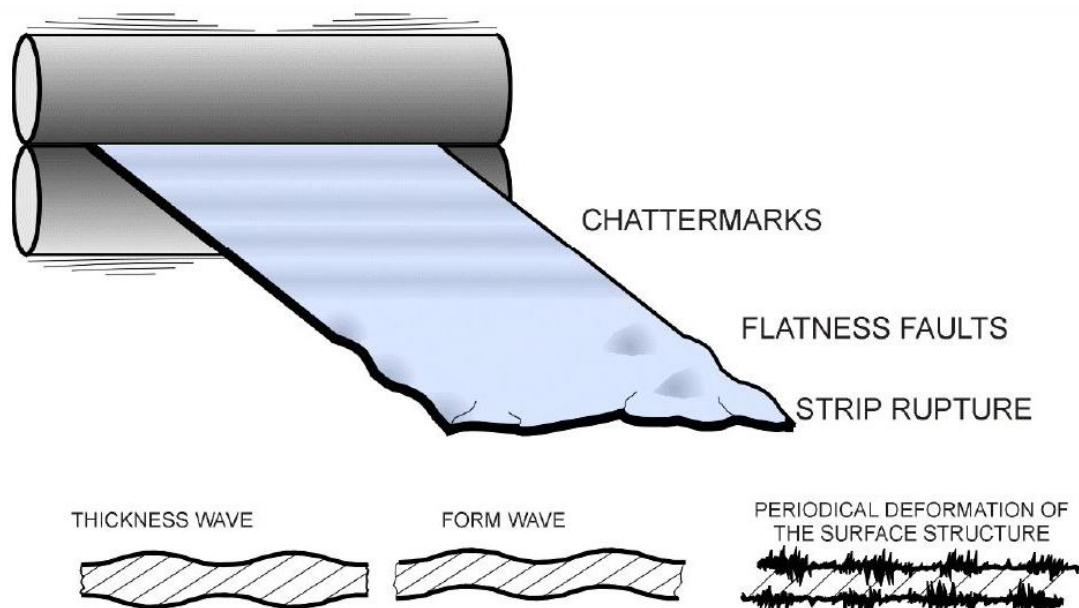
4 Μηχανικές δονήσεις στην έλαση (Chatter)

4.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο κατά την διάρκεια της έλασης λεπτού μεταλλικού ελάσματος, σε μεγάλες ταχύτητες, εμφανίζονται ανεπιθύμητες μηχανικές δονήσεις επονομαζόμενες και Chatter.

Η δόνηση του chatter έχει συνήθως ανεπιθύμητα αποτελέσματα, όπως είναι :

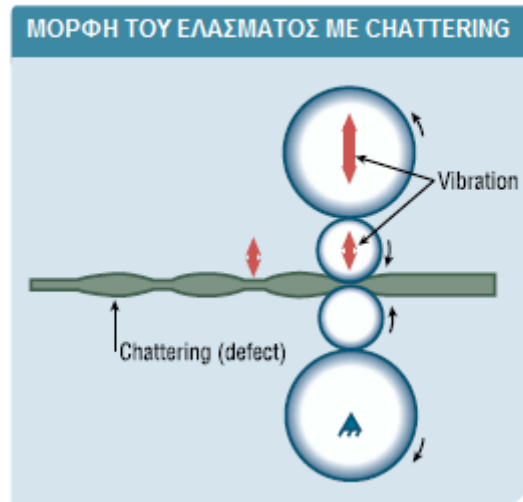
- η επιταχυνόμενη φθορά εργαλείων,
- υπερβολικός θόρυβος στο περιβάλλον εργασίας,
- βλάβες της εργαλειομηχανής (ή και καταστροφή της σε εξαιρετικές περιπτώσεις),
- κακή ποιότητα επιφάνειας προϊόντος όπως : περιοδικές, εγκάρσιες, φωτεινές και σκοτεινές ζώνες κατά μήκος του ελάσματος (*chattermarks*) καθώς και περιοδικά σφάλματα στο πάχος και στο σχήμα του ελάσματος. Δυνατοί κραδασμοί μάλιστα, είναι δυνατόν να προκαλέσουν ακόμα και θραύση στο έλασμα (σχήμα 3.1).
- χαμηλή διαστατική ακρίβεια του προϊόντος.



Σχήμα 4.1 Πιθανά ελαττώματα ελάσματος κατά την διάρκεια έλασης με δονήσεις



Σχήμα 4.2 Ελαττωματικό έλασμα από Chattering



Σχήμα 4.3

Οι δονήσεις του chatter εμφανίζονται ως αποτέλεσμα των δυναμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ της διαδικασίας της έλασης και της δομής των ελαστρών. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις μπορεί να παρασταθούν σχηματικά από ένα διάγραμμα κλειστού βρόγχου όπως αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4, όπου οι δυναμικές δυνάμεις που παράγονται κατά τη διαδικασία έλασης εκτρέπουν τη δομή του ελαστρού και οδηγούν σε διακυμάνσεις του διακένου και της ταχύτητας των ραούλων.



Σχήμα 4.4 Αναπαράσταση του chatter από έναν κλειστό βρόγχο

Το κεντρικό πρόβλημα της ανάλυσης και της πρόληψης του chatter είναι η κατανόηση των όρων που οδηγούν στη δυναμική αστάθεια της διαδικασίας της έλασης. Κατά συνέπεια, η αλληλεπίδραση μεταξύ της δυναμικής δομής του ελαστρού και της δυναμικής της διαδικασίας της έλασης πρέπει να ερευνηθεί. Αυτή η έρευνα διεξάγεται αρχικά με τη μοντελοποίηση του ελαστρού και της διαδικασίας της έλασης για να κατανοηθεί χωριστά η συμπεριφορά της δυναμικής τους. Κατόπιν, βασισμένοι σε αυτά τα μοντέλα εξετάζουμε την αλληλεπίδραση τους και παρατηρούμε την συνδυασμένη δυναμική συμπεριφορά τους που είναι και το αποτέλεσμα του chatter.

Το δυσκολότερο μέρος στη μοντελοποίηση του chatter είναι να βρεθεί ένα σαφές μαθηματικό μοντέλο της διαδικασίας της έλασης που να περιέχει όλες τις σύνθετες σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών παραγόντων. Διάφορα μοντέλα που παρουσιάζουν τη δύναμη έλασης ως συνάρτηση των παραμέτρων λειτουργίας έχουν παρουσιασθεί την τελευταία εικοσαετία από διάφορους ερευνητές αλλά ακόμα δεν έχει καθορισθεί ένα ικανοποιητικό μοντέλο.

Μια συνήθως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για να αποφευχθεί το chatter στην κατεργασία είναι να επιλεγτούν χαμηλές ταχύτητες αξόνων και μικρά βάθη κοπής. Λαμβάνοντας όμως υπόψη το υψηλό κόστος ενός σύγχρονου ελαστρού παραγωγής (σε μια παραγγελία μεγάλου κόστους), η μείωση της παραγωγικότητας λόγω του chatter μπορεί να έχει ένα πολύ σημαντικό αντίκτυπο στο κόστος των προϊόντων έλασης. Έτσι για μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας, η πρόβλεψη του chatter καθίσταται απαραίτητη.

4.2 Ιστορική αναδρομή

Με την ραγδαία βιομηχανική ανάπτυξη του 20^{ου} αιώνα αυξήθηκαν και οι ανάγκες για ταχύτερα ελαστρα με καλή ποιότητα προϊόντων. Έτσι η αύξηση της ταχύτητας παραγωγής των ελαστρων έφερε στην επιφάνεια και το φαινόμενο του chattering στην έλαση.

Οι πρώτες προσπάθειες για διερεύνηση του φαινομένου ξεκίνησαν στα μέσα του 70, όμως ήταν όλες εμπειρικές και δεν έδιναν κάποια ικανοποιητική εξήγηση για τους λόγους εμφάνισης του chatter και για την ευστάθεια της ελάσεως.

Από τους πρώτους ερευνητές που ανέπτυξαν ένα ικανοποιητικό μοντέλο ήταν ο W.L.Robert's. Ο Robert σε άρθρο του που δημοσιεύθηκε το 1978 προσπάθησε με ένα απλό μοντέλο, μάζας - ελατηρίου, να εξηγήσει το φαινόμενο των ταλαντώσεων, στην 5^η οκτάβα συχνοτήτων, που αναπτύσσονται ξαφνικά σε σύστημα 4-ραούλων.

Μια άλλη σημαντική επιστημονική δημοσίευση είναι αυτή του Yarita και της επιστημονικής του ομάδας που δημοσιεύθηκε επίσης το 1978 και περιγράφει ένα σύστημα 2 βαθμών και 4 βαθμών ελευθερίας. Το σύστημα των τεσσάρων βαθμών ελευθερίας περιγράφει την κίνηση ενός χρονικά εξαρτημένου συστήματος 4 ραούλων.

Ο Chefneux και λοιποί, το 1984, επίσης ανέπτυξαν ένα αριθμητικό πρότυπο τεσσάρων βαθμών ελευθερίας. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι το chatter τείνει να εμφανίζεται όταν η ευαισθησία του ελαστρου είναι υψηλή και υπάρχει μια ξαφνική αλλαγή στη δύναμη κυλίσματος (π.χ. η παρουσία μιας γραμμής συγκόλλησης ή ξαφνική αλλαγή στη λίπανση). Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το chatter είναι μια αυτοδιεγειρούμενη δόνηση προκαλούμενη από τις εσωτερικές τάσεις.

Ακολούθησαν και άλλες πολλές δημοσιεύσεις που προσπαθούσαν να προσεγγίσουν το πρόβλημα του chatter από διάφορες σκοπιές.

Το αποτέλεσμα όλης αυτής της έρευνας είναι να μπορούμε πλέον σε κάποιες βασικές περιπτώσεις να αναγνωρίσουμε το chatter σε διάφορες φάσεις της

κατεργασίας. Βέβαια ακόμα δεν έχει βρεθεί ένα ικανοποιητικό μοντέλο καθώς και ο τρόπος ώστε να μπορούμε να το εξαλείψουμε αυτόματα σε όλες τις περιπτώσεις.

4.3 Είδη chattering

Στην ψυχρή έλαση σιδηρούχων και μη μετάλλων έχουμε εμφάνιση τριών ειδών δονήσεων chattering. Το πρώτο είδος είναι το χαμηλών συχνοτήτων Torsional Chattering (στρεπτικό). Τα άλλα δύο σχετίζονται με την κάθετη ταλάντωση των ραούλων και είναι τα **third octave** (3^{ης} οκτάβας) και **fifth octave** (5^{ης} οκτάβας) chattering.

- **Torsional Mode Chatter**

Παρατηρείτε σε εύρος συχνοτήτων 5-15 Hz. Πρόκειται, ουσιαστικά, για “ανωμαλία” κατά τη περιστροφή των ραούλων με αποτέλεσμα η ταχύτητα τους να μη διατηρείται σταθερή. Προκαλεί εμφανείς φωτεινές και σκοτεινές ζώνες αλλά μικρή διακύμανση στο πάχος του ελάσματος.

- **Third Octave Mode Chatter**

Παρατηρείται σε εύρος συχνοτήτων 125~240 Hz. Περιλαμβάνει καθαρά αυτοδιεγειρόμενους κραδασμούς. Προκαλεί σοβαρές και μη αποδεκτές αποκλίσεις τόσο στο πάχος όσο και στην επιφάνεια του τελικού προϊόντος καθώς και πολύ έντονες διακυμάνσεις στη τάση μεταξύ των διαδοχικών εδράσεων έλασης, που συχνά οδηγεί σε θραύση του ελάσματος. Είναι συνήθως το επικρατέστερο κατά την έλαση υλικών υψηλής αντοχής και μικρού πάχους.

Στα 4-high rolling mills το 3rd octave chattering λαμβάνει χώρα στη φυσική συχνότητα των βοηθητικών ραούλων όταν αυτά συντονίζονται εκτός φάσης με το καθένα να προκαλεί σημαντικές ταλαντώσεις.

Πολυάριθμες αναλύσεις υπέδειξαν ως κύριες αιτίες εμφάνισης αυτού του τύπου chattering την ανεπαρκή λίπανση, τη φθορά των ρουλεμάν και την υπερβολική χάρη στις αρθρώσεις των ατράκτων.

- **Fifth Octave Mode Chatter**

Παρατηρείται σε εύρος συχνοτήτων 500~800 Hz. Περιλαμβάνει τη συνεχή παρουσία κραδασμών που επιφέρουν αποκλίσεις στην επιφάνεια των ραούλων και συνεπώς προκαλείται αντίστοιχη φθορά στο παραγόμενο έλασμα.

Οι ερευνητές αγνοούν συνήθως το Fifth Octave Mode Chatter επειδή προκαλεί τη λιγότερη ζημία στην ελασμένη λουρίδα και στα ράουλα από ότι το Third Octave Mode Chatter.

Το Fifth Octave Mode Chatter συνοδεύεται γενικά από τη δημιουργία φωτεινών και σκοτεινών ζωνών στην επιφάνεια του ελάσματος που, στη συνέχεια, μπορούν να γίνουν οι πηγές καταστρεπτικότερων μορφών chatter.

Το Fifth Octave Mode Chatter είναι μοναδικό υπό την έννοια ότι τείνει να αναπτυχθεί βαθμιαία, και συνήθως δεν είναι τόσο δύσκολο να κατασταλεί όπως το Third Octave Mode Chatter.

Εντούτοις, το Fifth Octave Mode Chatter απαιτεί επίσης πολυάριθμα μέτρα για την αποφυγή του, που έχουν επιπτώσεις στην παραγωγικότητα. Αυτά περιλαμβάνουν τις συχνές αλλαγές στη λειτουργική ταχύτητα του ελάστρου, της προσεκτικής επιλογής και της αλλαγής των ραούλων, της αποφυγής του chatter κατά τη διάρκεια της λείανσης των ραούλων κ.λπ.

Στα 4-high rolling mills το 5th octave chatter λαμβάνει χώρα στη φυσική συχνότητα των εργαζόμενων ραούλων όταν αυτά συντονίζονται στην ίδια φάση προκαλώντας αυλακώσεις στο έλασμα.

Ως υπεύθυνες πηγές για την εμφάνιση αυτού του τύπου chatter αναγνωρίστηκαν διάφορα ελαττώματα των ρουλεμάν, φθορά στα πινιόν κ.α.

Μεταξύ των παραπάνω τριών τύπων chatter, το 3rd octave chatter είναι το πιο σημαντικό πρόβλημα κραδασμών που συναντιέται σε ταχείες κατεργασίες έλασης και έχει τα πιο καταστροφικά αποτελέσματα στην αποδοτικότητα των ελάστρων εξαιτίας των μικρών ταχυτήτων κατεργασίας που απαιτούνται προκειμένου να αποφευχθεί το

φαινόμενο. Χαρακτηρίζεται από ένα πολύ ξαφνικό περιστατικό (συνήθως <math>< 5 \text{ seconds}</math>) με αυξανόμενες ταλαντώσεις κι έτσι φαίνεται να είναι αυτοδιεγειρόμενος κραδασμός.

Η διαφοροποίηση των εμφανιζόμενων συχνοτήτων σε εκείνες που εξαρτώνται από την ταχύτητα και σε εκείνες που δεν εξαρτώνται ίσως βοηθήσει να περιγραφεί το φαινόμενο των κραδασμών και των εκδηλώσεων του.

Αιτίες περιστατικών που σχετίζονται με την ταχύτητα ελάσεως μπορεί να είναι:

- χαλασμένο υλικό από gage chatter
- πολυγωνικό σχήμα των ραούλων
- σφάλμα ισορροπίας - εκκεντρότητα των ραούλων
- σφάλμα στα ρουλεμάν
- μη ομαλή οδήγηση - κακή τοποθέτηση αξόνων

Αιτίες περιστατικών που δε σχετίζονται με την ταχύτητα ελάσεως:

- φυσικοί κραδασμοί των εδράσεων των ραούλων
- ανομοιογένεια του υλικού
- ύπαρξη ολίσθησης
- υπερβολική χάρη

Δυστυχώς η γνώση των αιτιών που οδηγούν κυρίως στο gage chatter είναι αρκετά περιορισμένη. Για το λόγο αυτό το φαινόμενο δεν είναι δυνατόν να αντιμετωπισθεί εν τη γενέση του με αποτέλεσμα η πιο αξιόπιστη μέθοδος καταστολής του να είναι η μείωση της ταχύτητας λειτουργίας που οδηγεί σε πτώση της αποδοτικότητας της εγκατάστασης. Πολλά εργοστάσια μάλιστα δέχονται την προκύπτουσα ελάττωση της παραγωγής ως κάτι φυσιολογικό.

5 Ανάλυση του Chatter

5.1 Καθορισμός του μοντέλου

5.1.1 Μοντέλα κραδασμών τεσσάρων και έξι βαθμών ελευθερίας

Τα εργαζόμενα (work), τα ενδιάμεσα (intermediate) και τα εφεδρικά (backup) ράουλα μιας χαρακτηριστικής θέσης ελάστρου παρουσιάζονται στο σχήμα 4.2.

Για την εφαρμογή των ακόλουθων μοντέλων του ελάστρου 6 ραούλων (6-high) που χρησιμοποιεί το ελεύθερο διάγραμμα σωμάτων, δύο υποθέσεις γίνονται ως εξής: Η πρώτη υπόθεση είναι ότι η φυσική επαφή των ραούλων μεταξύ τους μπορεί να προσομοιωθεί από ένα ελατήριο με αμελητέα την μεταξύ τους απόσβεση. Η δεύτερη υπόθεση είναι ότι δεν υπάρχει κανένας διαχωρισμός/διάκενο μεταξύ των ραούλων κατά την λειτουργία του ελάστρου.

Για το σύστημα τεσσάρων βαθμών ελευθερίας (Four DOF System) υποθέτουμε ότι τα δύο backup roll υποστηρίζονται άκαμπτα στα κέντρα τους από τα κουζινέτα και το κέλυφος του ελάστρου και μόνο τα work roll και τα intermediate roll επιτρέπεται να κινηθούν. Η κίνηση των ραούλων προσομοιάζεται από την ελαστική παραμόρφωση στη διεπαφή μεταξύ των work roll και των intermediate roll καθώς και στη διεπαφή μεταξύ των intermediate roll και των backup roll και από την πλαστική παραμόρφωση του ελάσματος στη ζώνη μείωσης διατομής του από τα ράουλα (roll bite). Τα δύο work rolls καθώς και τα δύο intermediate rolls έχουν κάθετες μετατοπίσεις.

Αυτές ορίζονται ως εξής :

Work roll:

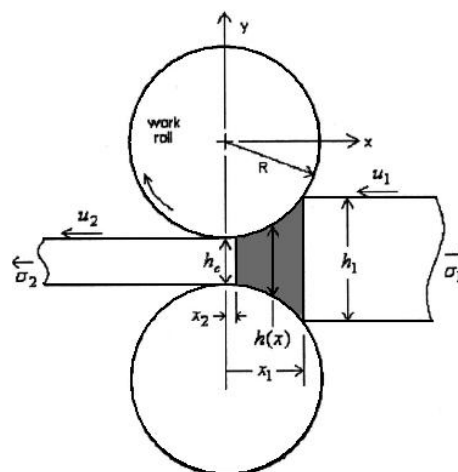
$$Y^{(1)} = Y_s + Y_D^{(1)}(t) \quad 4.1$$

$$Y^{(2)} = -Y_s + Y_D^{(2)}(t) \quad 4.2$$

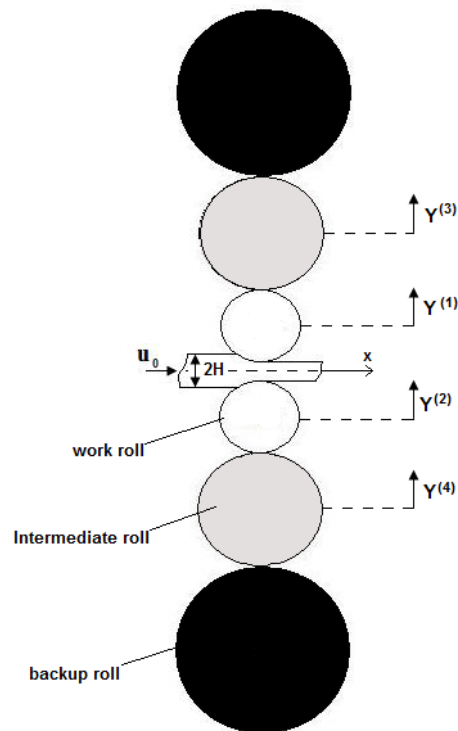
Intermediate roll:

$$Y^{(3)} = Y_s + Y_D^{(3)}(t) \quad 4.3$$

$$Y^{(4)} = -Y_s + Y_D^{(4)}(t) \quad 4.4$$



Σχήμα 5.1 Γεωμετρία πλαστικής ζώνης παραμόρφωσης



Σχήμα 5.2 Θέση έλασης

Αυτές οι μετατοπίσεις αποτελούνται από δύο μέρη. Μια στατική μετατόπιση, $(\pm Y_s)$ που συνδέεται με τα σταθερά φορτία που παράγονται στο roll bite από το έλασμα που υποβάλλεται σε κατεργασία, και από ένα ασταθές ή δυναμικό μέρος:

$$(Y_D^{(i)}, i = 1, 2, 3, 4).$$

Το δυναμικό μέρος της μετατόπισης προέρχεται από την κάθετη κίνηση λόγω του chatter. Αυτή η ταλάντωση προκαλεί την πρόσθετη ελαστική παραμόρφωση μεταξύ των ραούλων και την πρόσθετη πλαστική παραμόρφωση του ελάσματος στο roll bite. Το διάκενο μεταξύ των work rolls (σχήμα 4.1) μεταβάλλεται λόγω του chatter και είναι:

$$h_c(t) = h_{c0} + 2[Y_D^{(1)} - Y_D^{(2)}] \quad 4.5$$

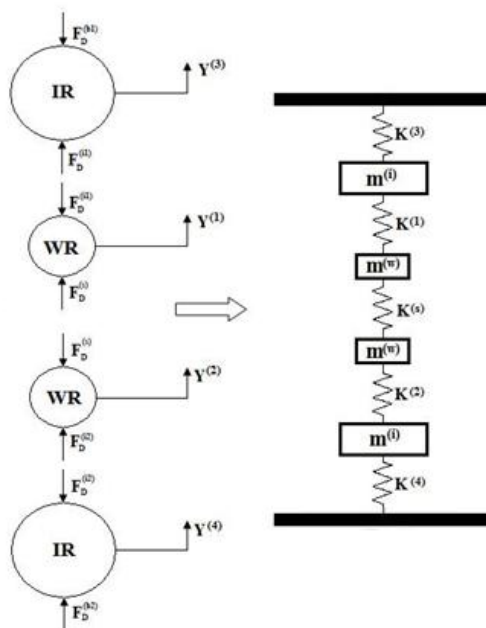
$$\dot{h}_c = 2[\dot{Y}_D^{(1)} - \dot{Y}_D^{(2)}] \quad 4.6$$

Χωρίς κραδασμό το διάκενο είναι σταθερό και ίσο με $h_{c0} = h_c(0)$.

Κατά τη διάρκεια της έλασης και χωρίς ταλαντώσεις (σταθερές δυνάμεις), οι δυναμικές συνεισφορές στις δυνάμεις εξαφανίζονται ($F_D^{(b1)} = F_D^{(i1)} = F_D^{(s)} = 0$), και οι δυνάμεις που ασκούνται στα ράουλα μεταξύ τους και από το roll bite ισορροπούν δηλαδή ισχύει $F_s^{(b1)} = F_s^{(i1)} = F_s^{(s)} = F_s$.

Όταν παρουσιάζεται το chatter, το work roll ταλαντεύεται μεταξύ του intermediate roll και του ελάσματος ενώ το intermediate roll ταλαντεύεται μεταξύ του work roll και του backup roll. Η πρόσθετη ελαστική παραμόρφωση στη διεπαφή μεταξύ των ραούλων παρέχει μια δύναμη αποκατάστασης όμοια με αυτή του μοντέλου ελατηρίου. Το backup roll ασκεί μια συνολική δύναμη $F^{(b1)} = F_s + F_D^{(b1)}$, το intermediate roll ασκεί μια συνολική δύναμη $F^{(i1)} = F_s + F_D^{(i1)}$ και το έλασμα ασκεί επίσης μια σταθερή και μια δυναμική δύναμη $F_s + F_D^{(s)}$. Τα κάτω συμμετρικά ράουλα συμπεριφέρονται ομοίως και διαχωρίζονται με έναν αριθμό $\pi\chi$ (b2).

Το δυναμικό μέρος των δυνάμεων που ασκούνται επάνω στα ράουλα καθώς και το Four DOF System μοντέλου “μαζών - ελατηρίων” φαίνεται στο σχήμα 4.3.

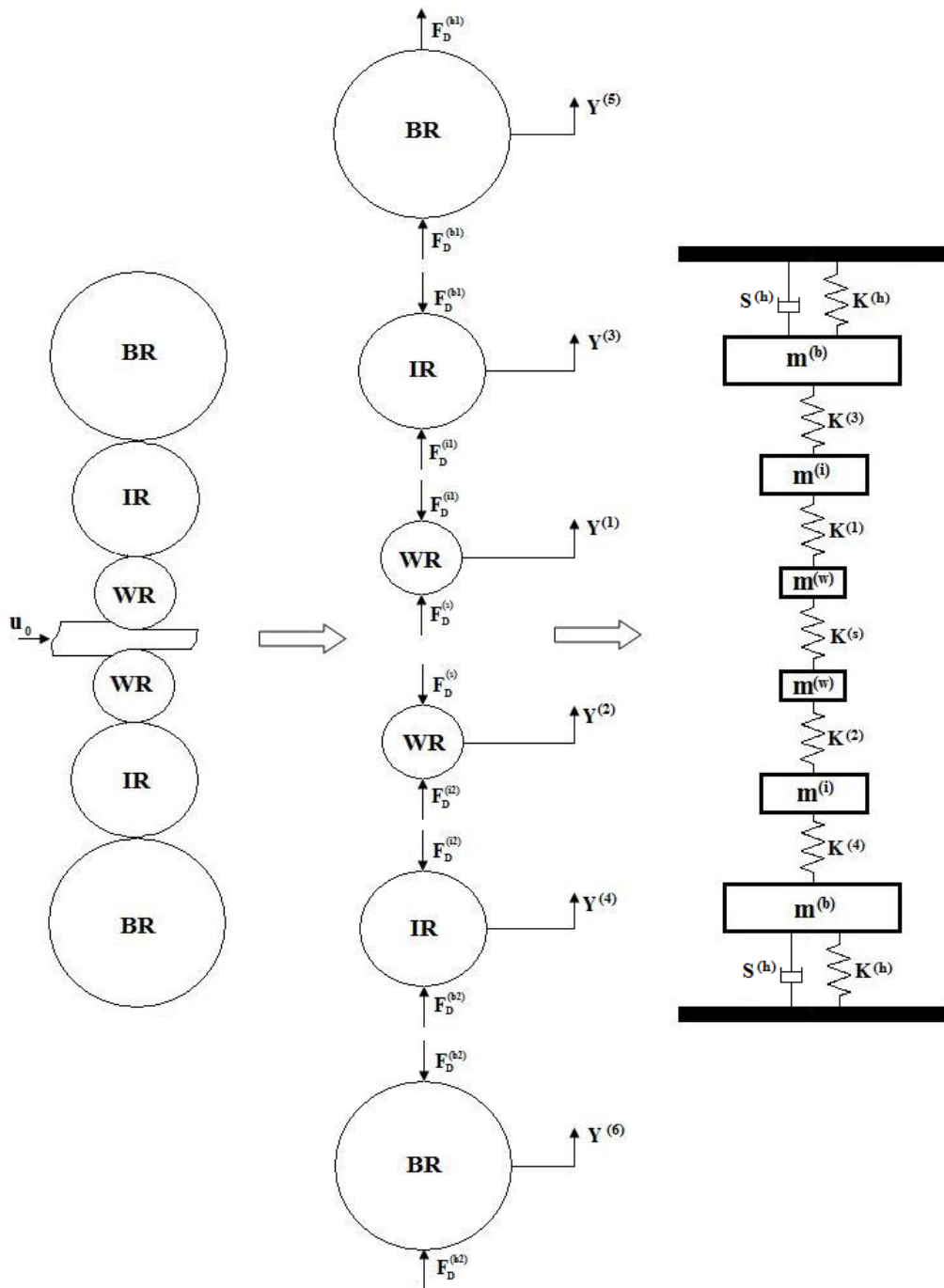


Σχήμα 5.3 Τέσσερις βαθμοί ελευθερίας

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι εξετάζουμε ένα δισδιάστατο πρόβλημα και ότι οι μάζες m έχουν μονάδες μάζα/μήκος, οι δυνάμεις F έχουν μονάδες δύναμη/μήκος και τα ελατήρια έχουν μονάδες δύναμη/εμβαδόν.

Στο σύστημα έξι βαθμών ελευθερίας (Six DOF System) όλα τα ράουλα πλέον είναι ελεύθερα να κινηθούν (σχήμα 4.4). Το κέλυφος και τα κουζινέτα του ελάστρου παρέχουν τις πρόσθετες δυνάμεις ελατηρίου και απόσβεσης. Ο Yarıta ήταν ένας από τους πρώτους που εξέτασε αυτήν την περίπτωση κίνησης ραούλων σε Four DOF System, παρουσίασε τις εξισώσεις και αξιολόγησε τις φυσικές συχνότητες αριθμητικά όταν είχαν και τα τέσσερα ράουλα διαφορετική μάζα.

Στην παρούσα διπλωματική διατριβή παρουσιάζουμε τις αναλυτικές εκφράσεις για τις φυσικές συχνότητες όταν κάθε ζευγάρι των ραούλων έχει την ίδια μάζα, και η δύναμη του κελύφους στο Backup roll είναι η ίδια για τα άνω και κάτω ράουλα.



Σχήμα 5.4 Έξι βαθμοί ελευθερίας

Οι εξισώσεις στο Six DOF System είναι:

$$m^{(w)} \frac{d^2 Y_D^{(1)}}{dt^2} = F^{(S)} - F_D^{(i1)} \quad 4.7$$

$$m^{(w)} \frac{d^2 Y_D^{(2)}}{d\hat{t}^2} = -F^{(S)} + F_D^{(i2)} \quad 4.8$$

$$m^{(i)} \frac{d^2 Y_D^{(3)}}{d\hat{t}^2} = F_D^{(i1)} - F_D^{(b1)} \quad 4.9$$

$$m^{(i)} \frac{d^2 Y_D^{(4)}}{d\hat{t}^2} = F_D^{(b2)} - F_D^{(i2)} \quad 4.10$$

$$m^{(b)} \frac{d^2 Y_D^{(5)}}{d\hat{t}^2} = F_D^{(h1)} + F_D^{(b1)} \quad 4.11$$

$$m^{(b)} \frac{d^2 Y_D^{(6)}}{d\hat{t}^2} = F_D^{(h2)} - F_D^{(b2)} \quad 4.12$$

Η δύναμη /μήκος από το κέλυφος στο backup roll ορίζεται ως

$F_D^{(h1)} = -K^{(h)} Y_D^{(5)} - S^{(h)} \dot{Y}_D^{(5)}$ και $F_D^{(h2)} = -K^{(h)} Y_D^{(6)} - S^{(h)} \dot{Y}_D^{(6)}$. Το $S^{(h)}$ έχει μονάδες δύναμη/(ταχύτητα x μήκος).

5.1.2 Σταθερές ελατηρίων και Δυνάμεις από τα ράουλα

Η μετατοπίσεις των work και intermediate rolls βάση της θεωρίας επαφής δυο περιστρεφόμενων κυλίνδρων μπορεί να αποδειχθεί ότι είναι της μορφής [6]:

$$Y^{(1)} = \frac{2 f(1 - \nu^2)}{\pi E} \left(\frac{2}{3} + \ln \left(\frac{0.78125 E (D_i + D_w)}{f(1 - \nu^2)} \right) \right) \quad 4.13$$

$$Y^{(3)} = \frac{2 f(1 - \nu^2)}{\pi E} \left(\frac{2}{3} + \ln \left(\frac{0.78125 E (D_b + D_i)}{f(1 - \nu^2)} \right) \right) \quad 4.14$$

Όπου D_w , D_i και D_b οι διάμετροι του work, του intermediate roll και του backup roll αντίστοιχα.

Οι σταθερές των ελατηρίων προσομοίωσης της ταλάντωσης των περιστρεφόμενων ραούλων μπορούν να υπολογιστούν ως εξής :

$$K_i = \frac{df}{dY_i} \quad 4.15$$

Σημειώνεται εδώ ότι το φορτίο f στις παρακάτω εξισώσεις προέρχεται από τη δύναμη παραμόρφωσης των ελασμάτων δηλαδή την F^s και με την υπόθεση ότι τα ράουλα είναι από τα ίδια υλικά με κοινά το μέτρο ελαστικότητας E και τον λόγο Poisson ν με παραγωγή των εξισώσεων 4.13 και 4.14 έχουμε :

$$\frac{dY^{(1)}}{df} = \frac{2(1-\nu^2)}{\pi E} \left(\frac{-1}{3} + \ln \left(\frac{0.78125E(D_W + D_i)}{f^s(1-\nu^2)} \right) \right) \quad 4.16$$

$$\frac{dY^{(3)}}{df} = \frac{2(1-\nu^2)}{\pi E} \left(\frac{-1}{3} + \ln \left(\frac{0.78125E(D_i + D_b)}{f^s(1-\nu^2)} \right) \right) \quad 4.17$$

Τώρα μπορούμε με τη βοήθεια των εξισώσεων 4.16 και 4.17 να υπολογίσουμε τις σταθερές ελατηρίων από την 4.15 :

$$K^{(1)} = \frac{\pi \cdot E}{2 \cdot (1-\nu^2) \cdot \left(\frac{-1}{3} + \ln \left(\frac{0,78 \cdot E \cdot (D_W + D_i)}{f^s \cdot (1-\nu^2)} \right) \right)} \quad 4.18$$

$$K^{(3)} = \frac{\pi \cdot E}{2 \cdot (1-\nu^2) \cdot \left(\frac{-1}{3} + \ln \left(\frac{0,78 \cdot E \cdot (D_i + D_b)}{f^s \cdot (1-\nu^2)} \right) \right)} \quad 4.19$$

Λόγω συμμετρίας του προβλήματος όπως έχει ορισθεί ισχύουν $K^{(1)} = K^{(2)}$ και $K^{(3)} = K^{(4)}$.

Το δυναμικό μέρος των δυνάμεων των ραούλων μπορεί να προσεγγισθεί βάση του σχήματος 4.4 ως εξής :

$$F_D^{(i1)} = K^{(1)} \cdot \left(Y_D^{(1)} - Y_D^{(3)} \right) \quad 4.20$$

$$F_D^{(b1)} = K^{(3)} \cdot (Y_D^{(3)} - Y_D^{(5)}) \quad 4.21$$

$$F_D^{(i2)} = K^{(2)} \cdot (Y_D^{(2)} - Y_D^{(4)}) \quad 4.22$$

$$F_D^{(b2)} = K^{(4)} \cdot (Y_D^{(4)} - Y_D^{(6)}) \quad 4.23$$

$$F_D^{(h1)} = K^{(h)} \cdot Y_D^{(5)} \quad 4.24$$

$$F_D^{(h2)} = K^{(h)} \cdot Y_D^{(6)} \quad 4.25$$

5.1.3 Δύναμη του ελάσματος

Η δύναμη που προέρχεται από το έλασμα, κατά την πλαστική παραμόρφωση του, μπορεί να προσεγγισθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος προσέγγισης της είναι να γίνει υπολογισμός αναλυτικά και να μπει στις εξισώσεις ως μια εξωτερική διέγερση δηλαδή ως μια δύναμη διαταραχής του συστήματος. Ο δεύτερος τρόπος είναι να προσεγγισθεί, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ως ένα επιπλέον ελατήριο χωρίς απόσβεση.

Πρώτος Τρόπος [18]

Το μεταλλικό έλασμα υποτίθεται ότι είναι ομογενές υλικό και ιδανικά ελαστοπλαστικό.

Χρησιμοποιώντας την παραβολική προσέγγιση για το roll bite, η διατομή σε μια τυχαία θέση x μέσα στο roll bite είναι :

$$h(x) = h_c + \frac{x^2}{R} \quad 4.26$$

Όπου h_c είναι το διάκενο ανάμεσα στα δύο ράουλα όπως ορίζεται από την εξίσωση 4.5, R είναι η ακτίνα του Work roll.

Με την αρχή διατήρησης του όγκου, η διατομή του μετάλλου σε μια τυχαία θέση μπορεί να γραφεί ως:

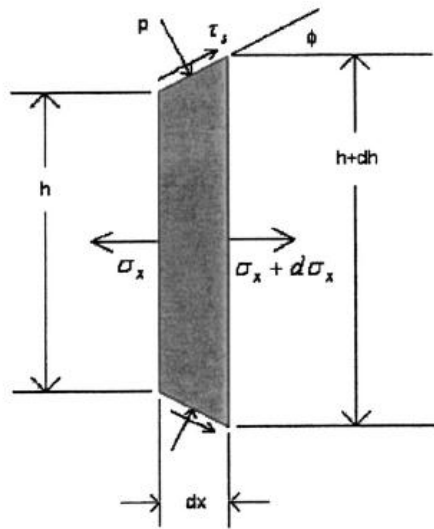
$$u(x)h(x) = u_1h_1 - (x_1 - x)h_c \quad 4.27$$

Όπου $u(x)$ είναι η οριζόντια ταχύτητα σε τυχαία θέση και u_1 είναι η ταχύτητα εισόδου (σχήμα 4.1).

Σύμφωνα με το κριτήριο Tresca για επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση έχουμε:

$$\tau_y^2 = \frac{1}{4} (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \tau_{xy}^2 \quad 4.28$$

Όπου τ_y είναι η διατμητική αντοχή του ελάσματος, τα σ_{xx} και σ_{yy} είναι οι τάσεις και το τ_{xy} είναι η διατμητική τάση.



Σχήμα 5.5 Κάθετη τομή της επιφάνειας παραμόρφωσης

Ο συντελεστή τριβής ορίζεται:

$$\tau_s = \pm \mu \tau_y \quad 4.29$$

Όπου μ είναι η τριβή επαφής ανάμεσα στο work roll και το έλασμα και το τ_s είναι η διατμητική τάση στην επιφάνεια του ελάσματος όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.

Το κριτήριο της εξίσωσης (4.28) μπορεί να απλοποιηθεί με την υπόθεση ομογενούς παραμόρφωσης ως εξής:

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = \tau_y \quad 4.30$$

Όπου η διατμητική τάση αγνοήθηκε. Η απόσταση από την είσοδο του ελάσματος στην πλαστική ζώνη μέχρι την κεντρική γραμμή όπου εξετάζεται και η ταλάντωση είναι:

$$x_1 = \sqrt{(h_1 - h_c)R} \quad 4.31$$

Ενώ η απόσταση της εξόδου του ελάσματος από την πλαστική ζώνη μέχρι την κεντρική γραμμή και πάλι είναι:

$$x_2 = \frac{Rh_c \dot{h}_c}{2(u_1 h_1 - x_1 \dot{h}_c)} \quad 4.32$$

Το διάκενο στο σημείο εξόδου είναι:

$$h_2 = h_c + \frac{x_2^2}{R} \quad 4.33$$

Η ισορροπία των στατικών δυνάμεων κατά την κατεύθυνση x μπορεί να υπολογισθεί βάση του σχήματος 4.5 :

$$\begin{aligned}
 (\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) \pm 2\tau_s \sqrt{dx^2 + dh^2/4} \cos\varphi \\
 + 2p \sqrt{dx^2 + dh^2/4} \sin\varphi = \sigma_x h
 \end{aligned}
 \tag{4.34}$$

Όπου $\cos\varphi$ και $\sin\varphi$ είναι συναρτήσεις των διαφορικών dx και dh όπως φαίνονται παρακάτω :

$$\cos\varphi = \frac{dx}{\sqrt{dx^2 + dh^2/4}}
 \tag{4.35}$$

$$\sin\varphi = \frac{dh/2}{\sqrt{dx^2 + dh^2/4}}
 \tag{4.36}$$

Η εξίσωση (4.34) μπορεί να απλοποιηθεί επιπλέον ως:

$$\frac{dh}{dx}(\sigma_x + p) + h \frac{d\sigma_x}{dx} \pm 2\tau_s = 0
 \tag{4.37}$$

Όπου το πρόσημο της τριβής καθορίζεται ανάλογα με την θέση x . Από τη μια πλευρά του ουδετέρου σημείου, x_n , η τριβή είναι θετική, και στην άλλη πλευρά είναι αρνητική.

Η οριζόντια κατανομή της τάσης σε τυχαία θέση x μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\sigma_x = \sigma_1 \int_{x_1}^x \frac{2\tau_y}{h(x)} \left(\mp \mu - \frac{2x}{R} \right) dx
 \tag{4.38}$$

Θέτοντας τους παράγοντες τριβής ως $-\mu_2$, όταν το x είναι ανάμεσα στο x_n και στο x_2 , και ως $+\mu_1$, όταν το x βρίσκεται ανάμεσα στο x_n και στο x_1 . Η λύση της εξίσωσης (4.37) μπορεί να ληφθεί ως:

$$\sigma_x = \sigma_1 + 2\tau_y(\mu_1 + \mu_2) \sqrt{\frac{R}{h_c}} \tan^{-1} \left(\frac{x_n}{\sqrt{Rh_c}} \right) - 2\tau_y \sqrt{\frac{R}{h_c}} \left[\mu_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_1}{\sqrt{Rh_c}} \right) + \mu_2 \tan^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{Rh_c}} \right) \right] - 2\tau_y \ln \left(\frac{h(x)}{h_1} \right) \quad 4.39$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.39) για να εκφράσουμε το σ_2 στη θέση x_2 , το ουδέτερο σημείο, μπορεί να προσδιορισθεί ως:

$$x_n = \sqrt{Rh_c} \tan \left[\frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \tan^{-1} \left(\frac{x_1}{\sqrt{Rh_c}} \right) + \frac{\mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \tan^{-1} \left(\frac{x_2}{\sqrt{Rh_c}} \right) + \frac{1}{2\tau_y(\mu_1 + \mu_2)} \sqrt{\frac{h_c}{R}} \left(\sigma_2 - \sigma_1 + 2\tau_y \ln \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \right) \right] \quad 4.40$$

Το διάκενο στο ουδέτερο σημείο είναι:

$$h_n = h_c + \frac{x_n^2}{R} \quad 4.41$$

Από το σχήμα η πίεση είναι $p=2\tau_y - \sigma_x$, στην επιφάνεια του ελάσματος σε τυχαία θέση είναι:

$$p(x) = 2\tau_y - \left(\sigma_1 + \int_{x_1}^x \frac{2\tau_y}{h(x)} \left(\bar{\tau}\mu - \frac{2x}{R} \right) \right) \quad 4.42$$

Τελικώς η δύναμη παραμόρφωσης κατά την κατεύθυνση y μπορεί να υπολογισθεί από την ολοκλήρωση της τ_s και της p ανάμεσα στο x_1 και στο x_2 .

$$F^s \cong \int_{x_2}^{x_1} p(x) dx + \int_{x_2}^{x_1} \bar{\tau}\tau_s \tan\varphi dx \quad 4.43$$

Μετά τις πράξεις ολοκλήρωσης η (4.43) γίνεται:

$$\begin{aligned} F^s = & (2\tau_y + \sigma_1)(x_2 - x_1) + \frac{\tau_y}{p} [\mu_2(x_2^2 - x_n^2) + \mu_1(x_1^2 - x_n^2)] \\ & + \tau_y R \mu_2 \ln\left(\frac{h_2}{h_n}\right) + \tau_y R \mu_1 \ln\left(\frac{h_1}{h_n}\right) + 2\tau_y x_2 \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) + 2\tau_y (\mu_1 \\ & + \mu_2) x_2 \sqrt{\frac{R}{h_c}} \tan^{-1}\left(\frac{x_n}{\sqrt{R h_c}}\right) \\ & + \left(4\tau_y \sqrt{R h_c} - 2\tau_y \mu_1 x_2 \sqrt{\frac{R}{h_c}} \right) \tan^{-1}\left(\frac{x_1}{\sqrt{R h_c}}\right) \\ & - \left(4\tau_y \sqrt{R h_c} - 2\tau_y \mu_2 x_2 \sqrt{\frac{R}{h_c}} \right) \tan^{-1}\left(\frac{x_2}{\sqrt{R h_c}}\right) \end{aligned} \quad 4.44$$

Δεύτερος Τρόπος

Ο δεύτερος τρόπος προσέγγισης όπως αναφέραμε και παραπάνω έχει να κάνει με την μοντελοποίηση της δύναμης από ένα ελατήριο. Η διαφορά με το προηγούμενο τρόπο είναι ότι πλέον ασχολιόμαστε μόνο με το δυναμικό μέρος της δύναμης από το έλασμα. Ο τρόπος υπολογισμού της σταθεράς του ελατηρίου είναι παρόμοιος με αυτόν που ακολουθήθηκε παραπάνω, για τον λόγο αυτό δεν θα κάνουμε αναλυτική απόδειξη των σχέσεων όπως στην προηγούμενη παράγραφο (για περαιτέρω ανάλυση ας ανατρέξει ο αναγνώστης στη δημοσίευση των R.E. Johnson και Quan Qi [10]).

Η δυναμική δύναμη που ασκεί το έλασμα στα ράουλα είναι:

$$F_D^{(s)} = K^{(s)} \cdot (Y_D^{(2)} - Y_D^{(1)}) \quad 4.49$$

$$K^{(s)} = \frac{1}{2} \cdot K^{(s)} \eta \quad 4.50$$

$$K^{(s)} = \int_0^1 N_D dx - \frac{1}{2(h_1 - h_2)} (N_s - \sigma_1) \quad 4.51$$

Όπου N_D και N_s προκύπτουν από την ανάλυση της πίεσης σε στατικό και δυναμικό μέρος .

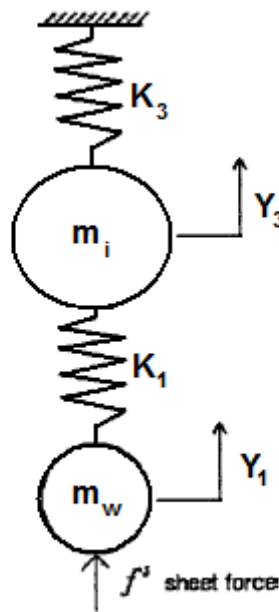
$$\eta = \frac{pl}{h_1} \quad 4.52$$

Το p είναι η πίεση ενώ το l είναι το μήκος επαφής του ελάσματος με το work roll.

5.2 Γραμμική ανάλυση

5.2.1 Μοντέλο τεσσάρων βαθμών ελευθερίας

Για το Four Dof system λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζει το πρόβλημα θα χρησιμοποιήσουμε μόνο το άνω μέρος του ελαστρού όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα ελεύθερου σώματος

Έτσι :

$$m^{(w)} \frac{d^2 Y_D^{(1)}}{dt^2} + K^{(1)} \cdot (Y_D^{(1)} - Y_D^{(3)}) - F^{(s)} = 0 \quad 4.53$$

$$m^{(i)} \frac{d^2 Y_D^{(3)}}{dt^2} + K^{(3)} \cdot (Y_D^{(3)} - Y_D^{(5)}) - K^{(1)} \cdot (Y_D^{(1)} - Y_D^{(3)}) = 0 \quad 4.54$$

Μπορούμε να γράψουμε τις εξισώσεις σε μητρωϊκή μορφή ως :

$$\begin{bmatrix} m_w & 0 \\ 0 & m_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Y}_1 \\ \ddot{Y}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 + K_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^{(S)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad 4.55$$

Οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος 4.55 είναι

$$\omega_1^2 = \frac{\sqrt{K_1^2 m_i^2 + 2K_1^2 m_i m_w + K_1^2 m_w^2 - 2K_1 K_3 m_i m_w + 2K_1 K_3 m_w^2 + K_3^2 m_w^2 + K_1 m_i + K_1 m_w + K_3 m_w}}{2m_w m_i}$$

$$\omega_2^2 = \frac{K_1 m_i - \sqrt{K_1^2 m_i^2 + 2K_1^2 m_i m_w + K_1^2 m_w^2 - 2K_1 K_3 m_i m_w + 2K_1 K_3 m_w^2 + K_3^2 m_w^2 + K_1 m_w + K_3 m_w}}{2m_w m_i}$$

E	207Gpa
v	0,3
D _w	0,49 m
D _i	0,56 m
D _b	1,4 m
m _w	1484,1 kg/m
m _i	1938,4 kg/m
m _b	12114,9 kg/m
F ^(s)	2,6 MN/m

Πίνακας 5.1 Τυπικές παράμετροι ελάστρου 6 ραούλων

Με βάση τις τιμές του πίνακα 4.1 για τις παραμέτρους των παραπάνω εξισώσεων βρίσκουμε τις ιδιοσυχνότητες του μοντέλου **fn1 = 1000,35 Hz** και **fn2 = 396,35 Hz**.

Παρατηρούμε ότι οι ιδιοσυχνότητες που υπολογίσαμε είναι εκτός των ορίων της διεθνούς βιβλιογραφίας που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.3. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι επειδή όλοι οι μελετητές έχουν ασχοληθεί με το φαινόμενο του chatter σε έλαστρα τεσσάρων ραούλων.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι τα όρια που παρουσιάζεται το κάθε είδος chattering αναπροσαρμόζονται για τις περιπτώσεις που έχουμε έλαστρο έξι ραούλων.

5.2.2 Μοντέλο έξι βαθμών ελευθερίας

Στο μοντέλο των έξι βαθμών ελευθερίας δεν θα κάνουμε χρήση τις συμμετρίας του προβλήματος για να δούμε πως συμπεριφέρεται το σύστημα συνολικά. Επιπλέον εδώ θα χρησιμοποιήσουμε τον δεύτερο τρόπο προσέγγισης της δύναμης που προέρχεται από το έλασμα.

Ακολουθώς, οι σχέσεις 4.7-4.12 λόγω των 4.18-4.25 και της 4.49, γίνονται:

$$m^{(w)} \frac{d^2 Y_D^{(1)}}{dt^2} + K^{(1)} \cdot (Y_D^{(1)} - Y_D^{(3)}) - K^{(s)} \cdot (Y_D^{(2)} - Y_D^{(1)}) = 0 \quad 4.56$$

$$m^{(w)} \frac{d^2 Y_D^{(2)}}{dt^2} + K^{(2)} \cdot (Y_D^{(2)} - Y_D^{(4)}) + K^{(s)} \cdot (Y_D^{(2)} - Y_D^{(1)}) = 0 \quad 4.57$$

$$m^{(i)} \frac{d^2 Y_D^{(3)}}{dt^2} + K^{(3)} \cdot (Y_D^{(3)} - Y_D^{(5)}) - K^{(1)} \cdot (Y_D^{(1)} - Y_D^{(3)}) = 0 \quad 4.58$$

$$m^{(i)} \frac{d^2 Y_D^{(4)}}{dt^2} + K^{(4)} \cdot (Y_D^{(4)} - Y_D^{(6)}) - K^{(2)} \cdot (Y_D^{(2)} - Y_D^{(4)}) = 0 \quad 4.59$$

$$m^{(b)} \frac{d^2 Y_D^{(5)}}{dt^2} + K^{(h)} \cdot Y_D^{(5)} - K^{(3)} \cdot (Y_D^{(3)} - Y_D^{(5)}) = 0 \quad 4.60$$

$$m^{(b)} \frac{d^2 Y_D^{(6)}}{dt^2} + K^{(h)} \cdot Y_D^{(6)} - K^{(4)} \cdot (Y_D^{(4)} - Y_D^{(6)}) = 0 \quad 4.61$$

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να γραφούν και σε μητρική μορφή ως

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{K}\mathbf{Y} = \mathbf{0} \quad 4.62$$

Όπου \mathbf{K} , \mathbf{M} :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K^{(1)} + K^{(5)} & -K^{(5)} & -K^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ -K^{(5)} & K^{(2)} + K^{(5)} & 0 & -K^{(2)} & 0 & 0 \\ -K^{(1)} & 0 & K^{(1)} + K^{(3)} & 0 & -K^{(3)} & 0 \\ 0 & -K^{(2)} & 0 & K^{(4)} + K^{(2)} & 0 & -K^{(4)} \\ 0 & 0 & -K^{(3)} & -K^{(2)} & K^{(h)} + K^{(3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K^{(4)} & 0 & K^{(h)} + K^{(4)} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m^{(w)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m^{(w)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m^{(l)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m^{(l)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m^{(b)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m^{(b)} \end{bmatrix}$$

ή αλλιώς :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K^{(h)} + K^{(3)} & -K^{(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K^{(3)} & K^{(1)} + K^{(3)} & -K^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K^{(1)} & K^{(1)} + K^{(s3)} & -K^{(s3)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K^{(s3)} & K^{(2)} + K^{(s3)} & -K^{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K^{(2)} & K^{(4)} + K^{(2)} & -K^{(4)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K^{(4)} & K^{(h)} + K^{(4)} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m^{(b)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m^{(l)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m^{(w)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m^{(w)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m^{(l)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m^{(b)} \end{bmatrix}$$

Τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε τις ιδιοτιμές επιλύοντας την εξίσωση :

$$\det[\mathbf{K} - \lambda \cdot \mathbf{M}] = 0 \quad 4.63$$

Αντίστοιχα μπορούμε να υπολογίσουμε και τα ιδιοδιανύσματα που θα είναι:

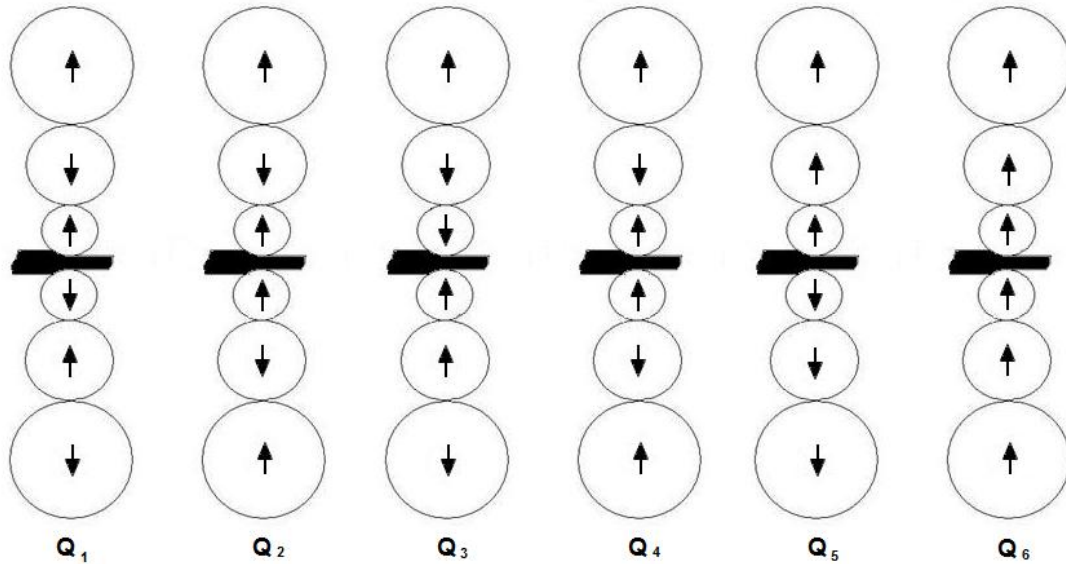
$$\begin{aligned}
 Q_k = & \\
 = & \left\{ 1, \frac{B_{k1}}{K^{(3)}}, \frac{-K^{(3)^2} + B_{k1}B_{k2}}{K^{(1)}K^{(3)}}, \frac{-K^{(1)^2}B_{k1} + B_{k3}(-K^{(3)^2} + B_{k1}B_{k2})}{K^{(1)}K^{(3)}K^{(s')}}, \right. \\
 & \frac{K^{(s')^2}K^{(3)^2} - K^{(s')^2}B_{k1}B_{k2} + B_{k4}(-K^{(1)^2}B_{k1} + B_{k3}(-K^{(3)^2} + B_{k1}B_{k2}))}{K^{(1)}K^{(2)}K^{(3)}K^{(s')}}, \\
 & \left. K^{(4)} \frac{K^{(s')^2}K^{(3)^2} - K^{(s')^2}B_{k1}B_{k2} + B_{k4}(-K^{(1)^2}B_{k1} + B_{k3}(-K^{(3)^2} + B_{k1}B_{k2}))}{K^{(1)}K^{(2)}K^{(3)}K^{(s')}B_{k5}} \right\}^T
 \end{aligned}$$

$$B_{k1} = K^{(h)} + K^{(3)} - \lambda_k m^{(b)}, B_{k2} = K^{(1)} + K^{(3)} - \lambda_k m^{(i)},$$

$$B_{k3} = K^{(1)} + K^{(s')} - \lambda_k m^{(w)}, B_{k4} = K^{(2)} + K^{(s')} - \lambda_k m^{(w)} \text{ και}$$

$$B_{k5} = K^{(h)} + K^{(4)} - \lambda_k m^{(b)}.$$

Τα έξι ιδιοδιανύσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.7 και μας δείχνουν πως θα ταλαντώνεται το κάθε ράουλο στην αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα.



Σχήμα 5.7 Ιδιοδιανύσματα ελαστρού.

$K^{(h)}$	$2,62 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$
$K^{(s)}$	$4,8 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

Πίνακας 5.2

Βάση των τιμών του πίνακα 4.1 και του πίνακα 4.2 για τις παραμέτρους των παραπάνω εξισώσεων και με τη βοήθεια του εμπορικού προγράμματος Matlab υπολογίζουμε τις ιδιοτιμές, τις ιδιοσυχνότητες και τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα του μοντέλου :

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
4,02E+07	4,00E+07	8,21E+06	7,85E+06	7,59E+04	1,69E+04

Πίνακας 5.3

f_{n1}	f_{n2}	f_{n3}	f_{n4}	f_{n5}	f_{n6}
1010,10 Hz	1007,22 Hz	456,36 Hz	446,27 Hz	43,87 Hz	20,67 Hz

Πίνακας 5.4

Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
-17,812	-17,705	-2,832	-2,664	0,975	1,002
15,352	14,966	-4,823	-4,662	0,945	1,003
-15,352	14,966	4,823	-4,662	-0,945	1,003
17,812	-17,705	2,832	-2,664	-0,975	1,002
-1,000	1,000	-1,000	1,000	-1,000	1,000

Πίνακας 5.5

5.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας του γραμμικού μοντέλου

Για να έχουμε μία πιο εμπειριστατωμένη άποψη για το πώς συμπεριφέρεται το μοντέλο συναρτήσει κάποιων παραμέτρων έλασης καθώς και κάποιων κατασκευαστικών παραμέτρων του ελάστρου κάνουμε ακολούθως μια ανάλυση ευαισθησίας ως προς αυτές.

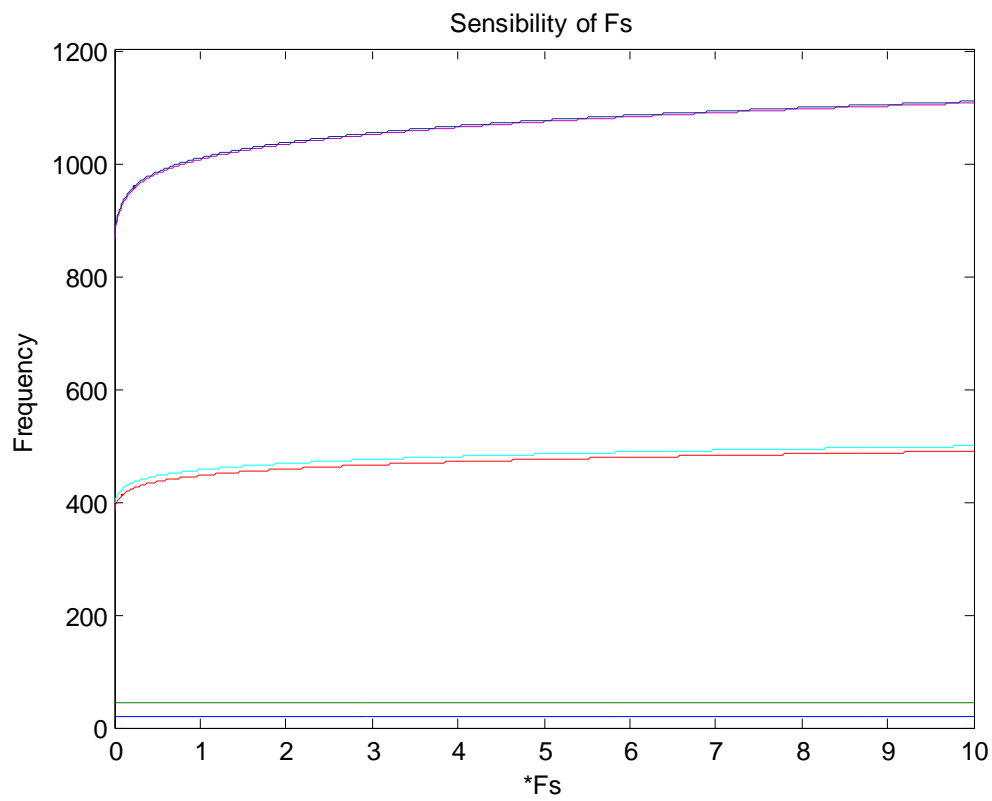
Ευαισθησία του μοντέλου ως προς την δύναμη αντίδρασης του ελάσματος F_s

Η σύγκριση γίνεται συναρτήσει της αρχικής δύναμης που επιλέχτηκε $F_s = 2.6 \cdot 10^6$ N έτσι έχουμε ως αποτέλεσμα τον ακόλουθο πίνακα :

2·Fs	5·Fs	10·Fs
20,7 Hz	20,7 Hz	20,7 Hz
43,9 Hz	43,9	44 Hz
458 Hz	475,2	489,5 Hz
467,9 Hz	484,7	498 Hz,7
1033,8	1073,6	1106,9 Hz
1036,6	1076,3	1109,5 Hz

Πίνακας 5.6

εκτελώντας το μοντέλο σε περιβάλλον Matlab παίρνουμε γραφικά το πώς επηρεάζονται οι ιδιοσυχνότητες σχήμα 4.8



Σχήμα 5.8 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς F_s

Παρατηρούμε ότι η δύναμη έλασης επηρεάζει τις ιδιοσυχνότητες στις περιοχές 400 – 600 Hz και 900 – 1200 Hz.

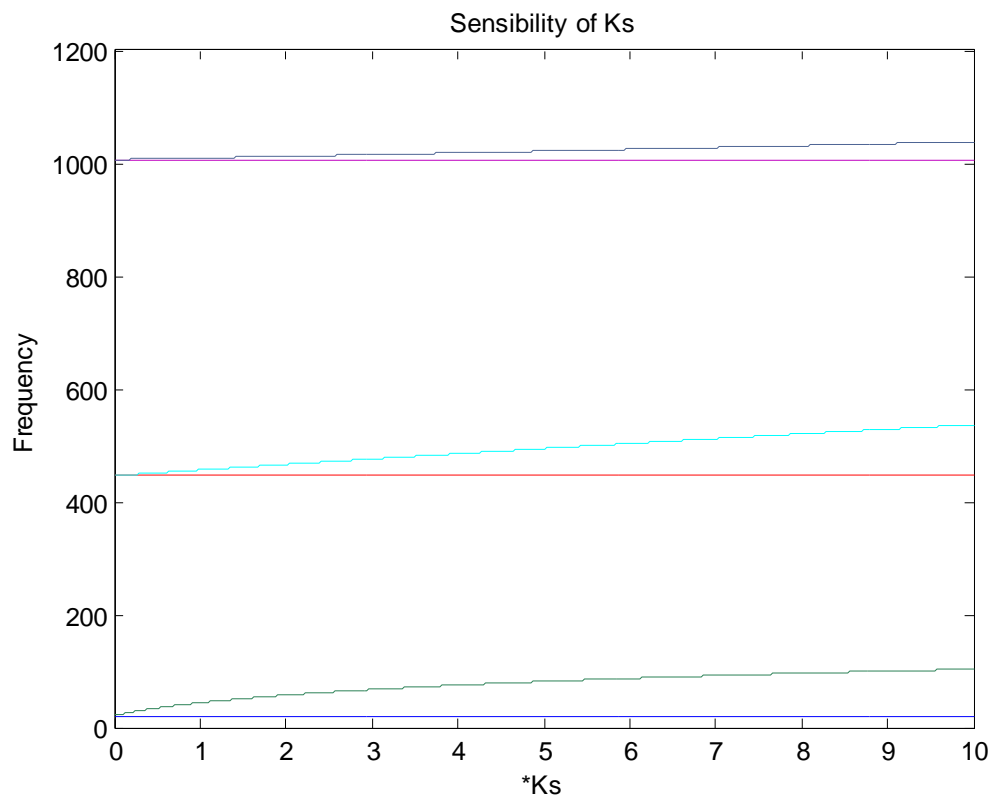
Ευαισθησία του μοντέλου ως προς την δυσκαμψία του ελάσματος Ks

Η σύγκριση γίνεται συναρτήσει της αρχικής δυσκαμψίας $K_s = 4,81 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

2·Ks	5·Ks	10·Ks
20,7 Hz	20,7 Hz	20,7 Hz
57,2 Hz	81,5 Hz	103,2 Hz
446,2 Hz	446,2 Hz	446,2 Hz
466,2 Hz	494,4 Hz	536,7 Hz
1006,5 Hz	1006,5 Hz	1006,5 Hz
1012,3 Hz	1021,5 Hz	1038,2 Hz

Πίνακας 5.7

εκτελώντας το μοντέλο σε περιβάλλον Matlab παίρνουμε γραφικά το πώς επηρεάζονται οι ιδιοσυχνότητες σχήμα 4.9.



Σχήμα 5.9 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς Ks

Παρατηρούμε ότι η δυσκαμψία του ελάσματος επηρεάζει τη μεγαλύτερη ιδιοσυχνότητα σε κάθε περιοχή.

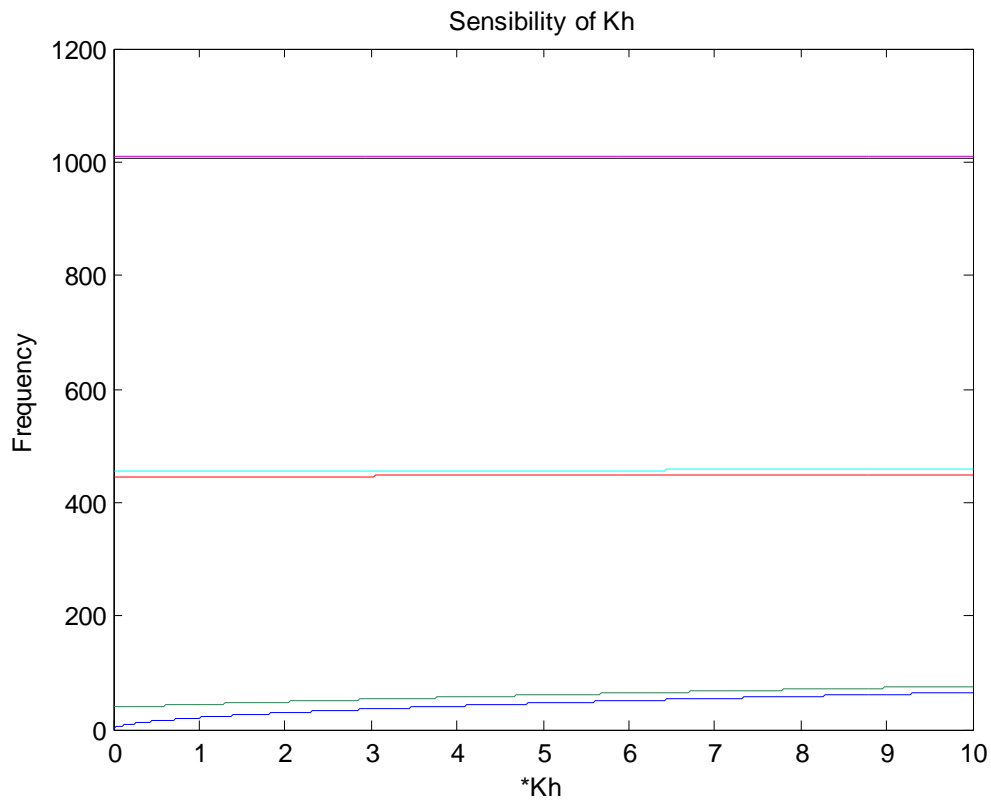
Ευαισθησία του μοντέλου ως προς την δυσκαμψία K_h

Η σύγκριση γίνεται συναρτήσει της αρχικής δυσκαμψίας $K_h = 2,62 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$

2·kh	5·kh	10·kh
29,2 Hz	46,1 Hz	65,2 Hz
48,5 Hz	60,5 Hz	76,2 Hz
446,4 Hz	446,8 Hz	447,4 Hz
456,5 Hz	456,8 Hz	457,4 Hz
1006,5 Hz	1006,5 Hz	1006,5 Hz
1009,4 Hz	1009,4 Hz	1009,4 Hz

Πίνακας 5.8

εκτελώντας το μοντέλο σε περιβάλλον Matlab παίρνουμε γραφικά το πώς επηρεάζονται οι ιδιοσυχνότητες σχήμα 4.10.

Σχήμα 5.10 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς K_h

Παρατηρούμε ότι η δυσκαμψία της έδρασης των backup rolls επηρεάζει μόνο τις ιδιοσυχνότητες στην περιοχή 10 – 100 Hz. Αυτό που μπορούμε να συμπεραίνουμε είναι ότι η μικρότερη ιδιοσυχνότητα επηρεάζεται μόνο από τις κατασκευαστικές παραμέτρους του ελάστρου και όχι από τις παραμέτρους έλασης.

5.3 Αριθμητική προσομοίωση

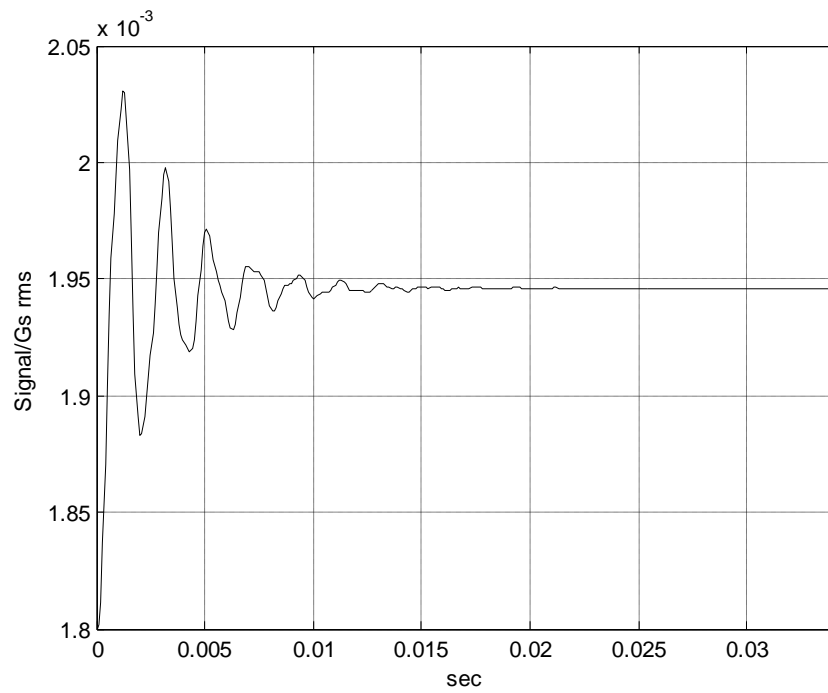
Σε αυτήν την παράγραφο, τα δυναμικά χαρακτηριστικά και ο μηχανισμός της αστάθειας που προκύπτει από το chatter, διερευνώνται χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους. Αυτός ο τρόπος προσέγγισης παρουσιάζεται, για να γίνει κατανοητό τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζουν το μοντέλο τα μη γραμμικά στοιχεία που περιέχει και τα οποία αγνοήθηκαν κατά την γραμμική επίλυση του προβλήματος στην προηγούμενη παράγραφο.

Ένας επιπλέον λόγος για την χρήση αριθμητικής μεθόδου είναι η δυνατότητα που μας δίνεται έτσι ώστε να δούμε πως επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος οι διάφοροι παράγοντες που υπεισέρχονται στο πρόβλημα.

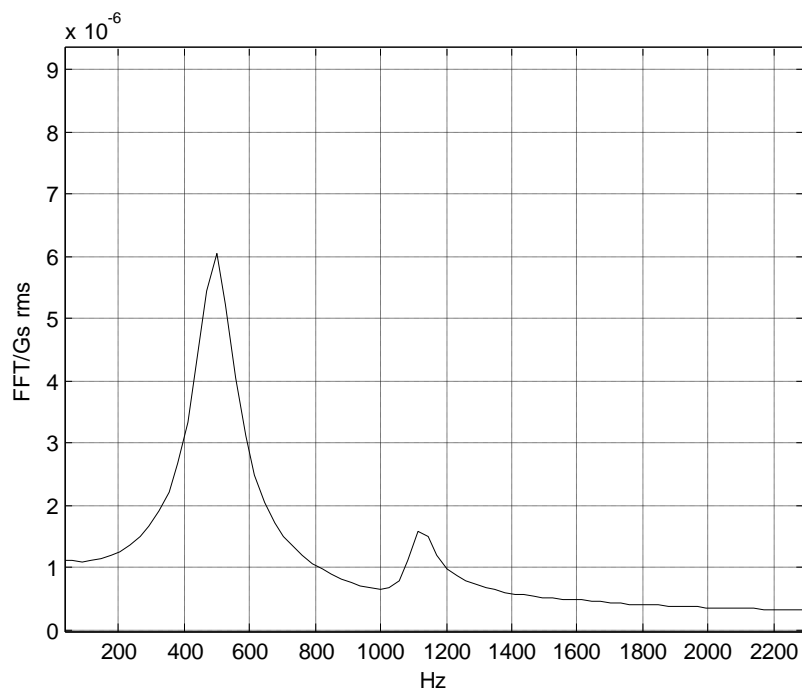
Θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης από το μοντέλο 4 βαθμών ελευθερίας της προηγούμενης παραγράφου για διάφορες ταχύτητες εισόδου του μεταλλικού ελάσματος καθώς και για διαφορετικές τριβές.

Η πρώτη περίπτωση θεωρείται όταν το πάχος εισόδου του μεταλλικού ελάσματος είναι 2,54mm και η αρχική θέση του πάνω work roll, h_{c0} , είναι 1,8mm. Επιπρόσθετα ο συντελεστής τριβής είναι $\mu_1 = \mu_2 = 0,1$ και η ταχύτητα εισόδου του ελάσματος είναι $u_1 = 12,7$ m/s. Οι βασικές παράμετροι από τους πίνακες 1 και 2 παραμένουν ίδιες.

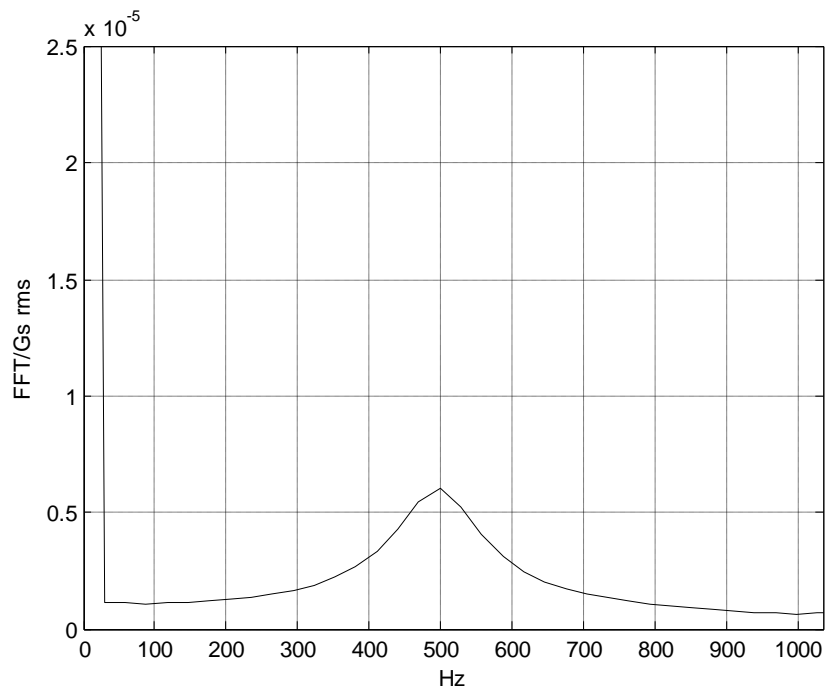
Το σχήμα 4.11 δείχνει την μεταβατική απόκριση του διακένου σε μη μηδενικές αρχικές συνθήκες της θέσης h_{c0} . $Y_d(t=0) = +0,1\%$ και $\dot{Y}_d(t = 0) = 0$.



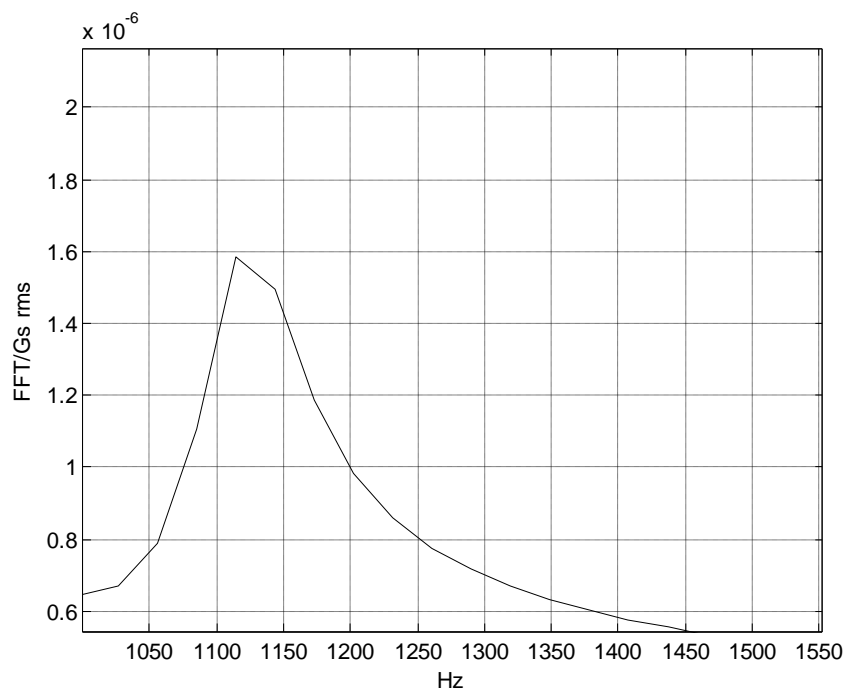
Σχήμα 5.11



Σχήμα 5.12



Σχήμα 5.13



Σχήμα 5.14

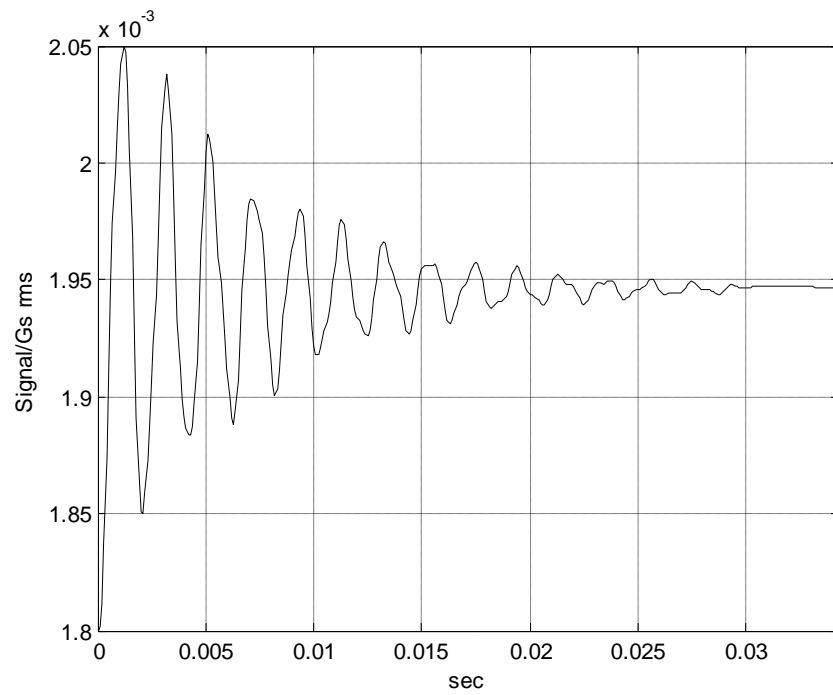
Πρέπει να σημειωθεί ότι η υπόθεση που έγινε προηγουμένως σχετικά με την επαφή του intermediate roll με το work roll, και του work roll με το έλασμα αποδίδει πάντα την απόκριση στο work roll ακριβώς την ίδια με αυτήν της ζώνης παραμόρφωσης του ελάσματος.

Τα ελαστικά χαρακτηριστικά του μεταλλικού ελάσματος προκαλούν την αρχική απόκριση έξω από τα όρια και η πλαστική παραμόρφωση, στη ζώνη παραμόρφωσης, παρέχει επαρκή απόσβεση για να απορροφήσει την κινητική ενέργεια και τελικά να αποσβέσει τον διεγερμένο κραδασμό.

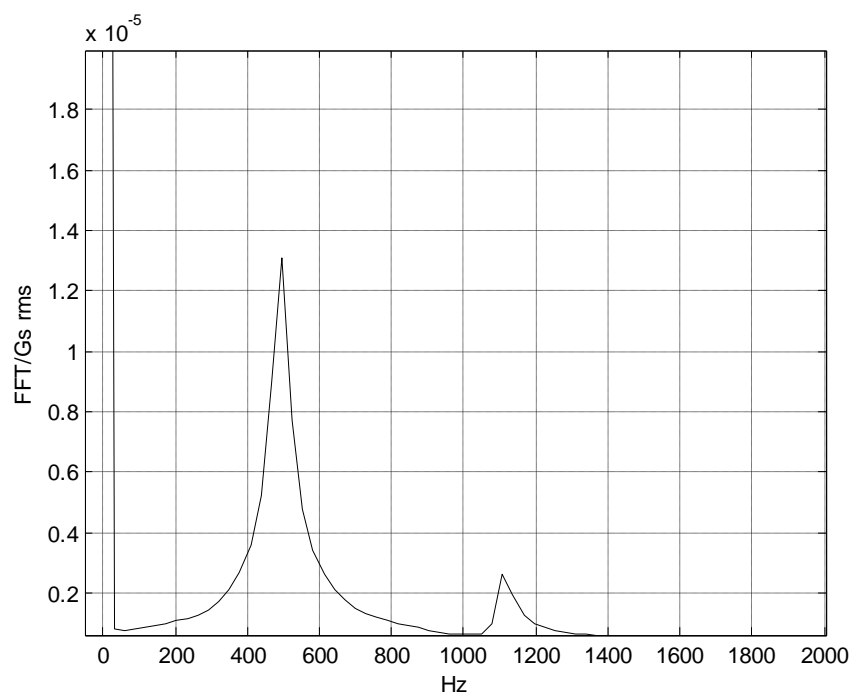
Τα σχήματα 4.13 – 4.14 δείχνουν ότι οι φυσικές συχνότητες αυτού του μη γραμμικού συστήματος είναι περίπου 500Hz και 1120 Hz κάνοντας χρήση FFT ανάλυσης. Η συχνότητες είναι πιο υψηλές από τις φυσικές συχνότητες των work roll και intermediate roll χωρίς υπολογισμό των δυνάμεων παραμόρφωσης του ελάσματος που παρουσιάστηκαν στην γραμμική ανάλυση 4 βαθμών ελευθερίας.

Αυτό το φαινομενικά αντικρουόμενο φαινόμενο ότι το σύστημα με την πλαστική παραμόρφωση αποδεικνύεται πιο “δύσκαμπτο” είναι το αποτέλεσμα της αρχικής υπόθεσης ότι οι κινήσεις των ραούλων είναι συμμετρικές και αντίθετες. Χωρίς να υπολογίσουμε ότι η δύναμη του ελάσματος είναι αυτή που χωρίζει τα δύο μέρη αγνοήσαμε την σημαντική επίδραση της δύναμης του ελάσματος στις σταθερές των ελατηρίων 4.18 και 4.19.

Στη δεύτερη περίπτωση διερευνάται πως συμπεριφέρεται η απόκριση, στον ίδιο χρόνο και τις ίδιες αρχικές συνθήκες, όταν η ταχύτητα τίθεται στα 25,4 m/s, στο σχήμα 4.15 και 4.16 βλέπουμε την απόκριση και το φάσμα συχνοτήτων αυτής της περίπτωσης αντίστοιχα.



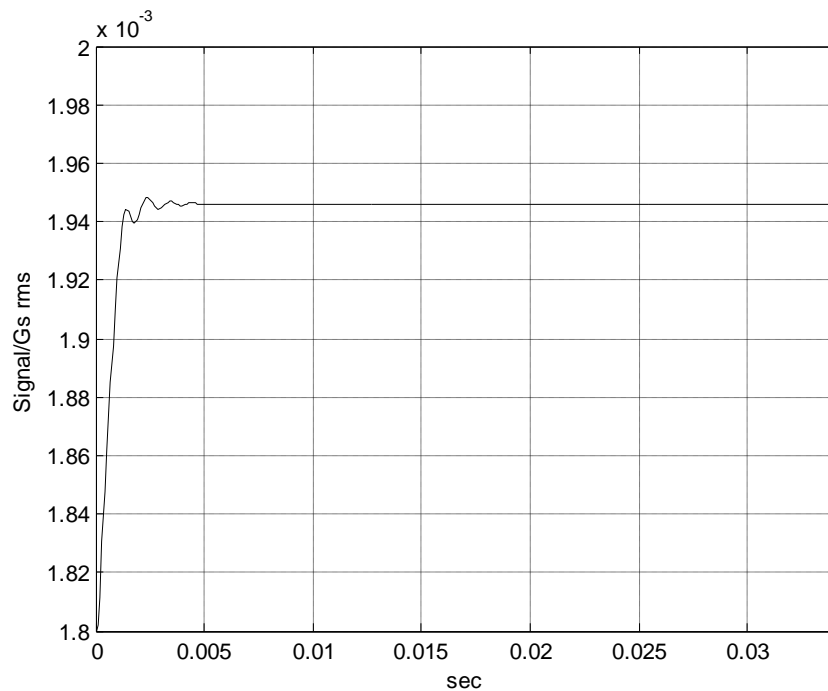
Σχήμα 5.15



Σχήμα 5.16

Στο σχήμα 4.15 παρατηρούμε ότι το σήμα έχει μεγαλύτερη μέγιστη υπερακόντιση και μεγαλύτερο χρόνο αποκατάστασης σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.

Στο σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η χρονική απόκριση που προέκυψε από μια μειωμένη ταχύτητα έλασης ίση με 2.54 m/s. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε ότι δεν έχουμε ταλάντωση αλλά κρίσιμη απόσβεση οπότε συμπεραίνουμε ότι με αυτήν την ταχύτητα έλασης το σύστημα είναι πολύ σταθερό.

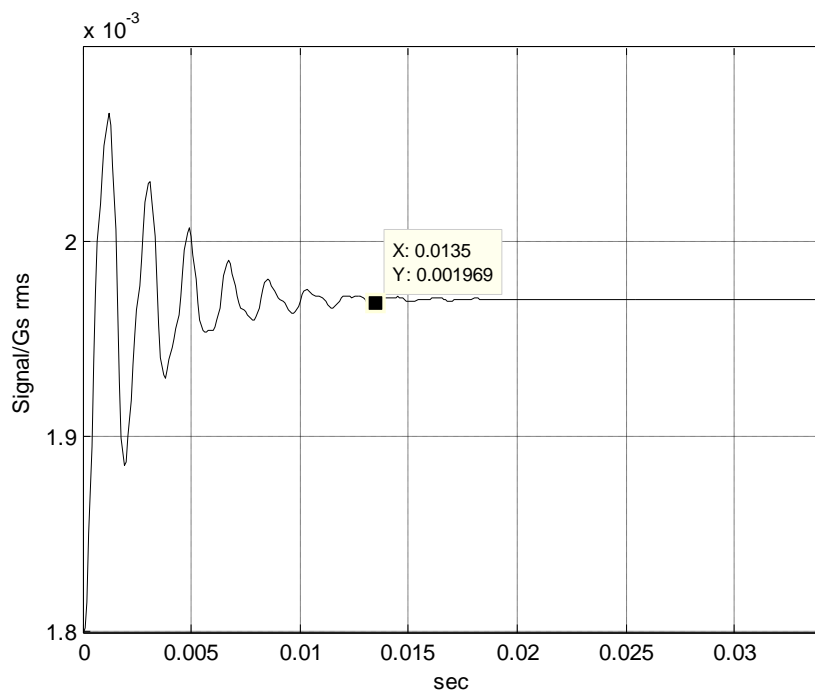


Σχήμα 5.17

Όπως βλέπουμε, το σύστημα έλασης αποκρίνεται διαφορετικά σε διαφορετικές ταχύτητες. Συγκεκριμένα σε υψηλότερες ταχύτητες έλασης παρατηρείται αύξηση της ευαισθησίας του συστήματος σε εξωτερικές διαταραχές. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το συμπέρασμα των ερευνητών που κατέδειξαν την μείωση της ταχύτητας έλασης ως έναν τρόπο αποφυγής του chatter.

Είναι γνωστό ότι μια διαφορά στους συντελεστές τριβής είναι ένας σημαντικός παράγοντας ισοδύναμος με μια αρνητική απόσβεση, και θα μπορούσε να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη αστάθεια γνωστή και ως αυτοδιέγερση.

Παρακάτω, οι συντελεστές τριβής, μ_1 και μ_2 , τίθενται στις τιμές 0.2 και 0.7, αντίστοιχα. Η υπερακόνηση της απόκρισης του συστήματος που φάνεται στο σχήμα 4.18 είναι μεγαλύτερη από την απόκριση στο σχήμα 4.8, όπου είχαμε θέσει $\mu_1 = \mu_2 = 0,1$.

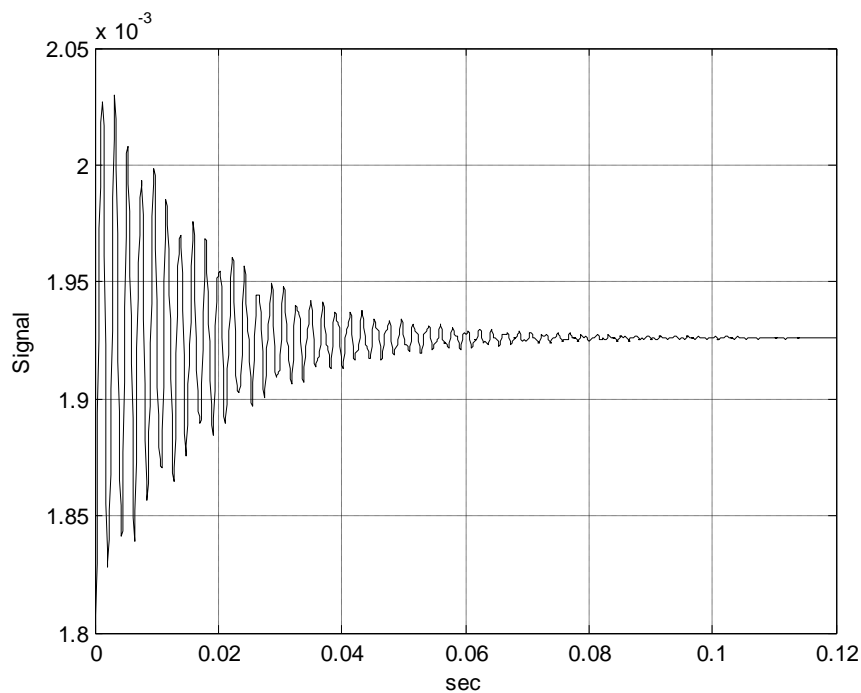


Σχήμα 5.18

Οι διαφορετικοί συντελεστές τριβής στην είσοδο και την έξοδο της περιοχής πλαστικής παραμόρφωσης ασκούν σημαντική επίδραση στην αστάθεια της έλασης. Ωστόσο, δεδομένου ότι παρουσιάζεται μόνο η κάθετη κίνηση των ραούλων, η χρονική απόκριση στο σχήμα 4.18, επομένως, δεν μεταβιβάζει την επίδραση της αυτοδιέγερσης στην οριζόντια κίνηση. Στην οριζόντια κίνηση των ραούλων, η αυτοδιέγερση που προκαλείται από την τριβή είναι πιθανότατα μη γραμμική και μεγάλη. Όταν έχουμε αυτοδιέγερση, τα work rolls κινούνται και ταλαντεύονται στην οριζόντια κατεύθυνση. Η οριζόντια ταλάντωση αναγκάζει τις τάσεις να

ταλαντεύονται επίσης, οι οποίες επηρεάζουν στη συνέχεια την κάθετη κίνηση του work roll. Για να καταδειχτεί ότι η ταλάντωση των τάσεων είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το chatter, διερευνάται παρακάτω η επίδραση που δημιουργούν δύο μη σταθερές και άνισες οριζόντιες τάσης, σ_1 και σ_2 .

Εξετάζεται η περίπτωση που οι δύο οριζόντιες τάσεις ταλαντεύονται, με το 60 % του μεγέθους τους σε συχνότητες 105 και 100 Hz, αντίστοιχα, η προκύπτουσα απόκριση του συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.19. Μια προσεκτική εξέταση του σχήματος 4.19 φανερώνει ότι η απόκριση είναι μια παρατεταμένη ταλάντωση, ένα σύνηθες φαινόμενο του chatter. Ακριβώς όπως η τριβή, έτσι και η τάση είναι επίσης ένας από τους μηχανισμούς μέσω των οποίων εμφανίζεται το chatter.



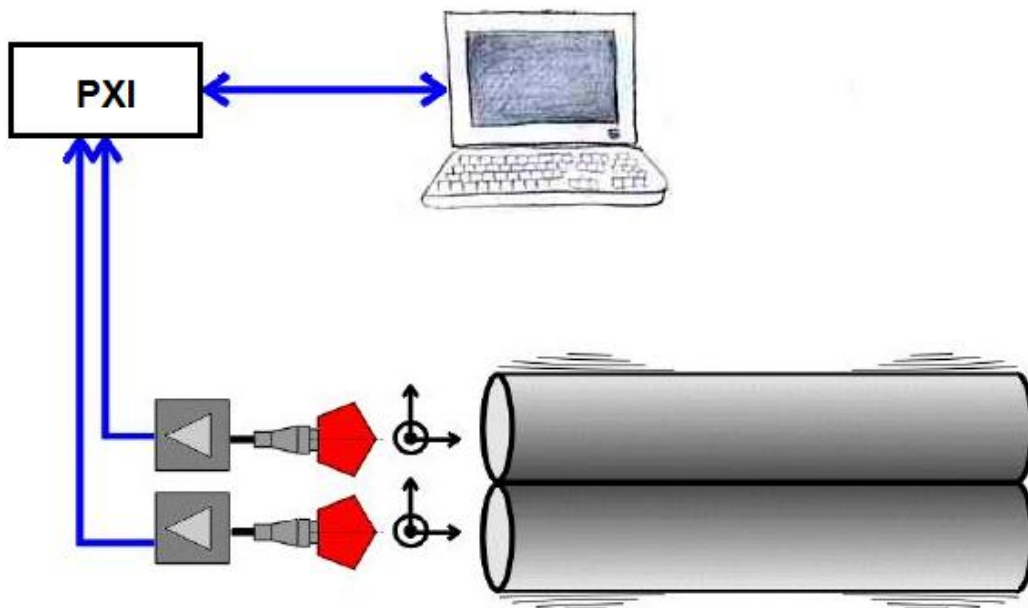
Σχήμα 5.19

Μια άλλη περίπτωση που θα μπορούσε να μελετηθεί είναι η μη σταθερή διατομή εισόδου του ελάσματος. Η πρώτη ύλη της έλασης που συνήθως είναι ημικατεργασμένο προϊόν έλασης, κατά την οποία ίσως να είχε εμφανιστεί το φαινόμενο chatter, πολλές φορές δεν έχει σταθερή διατομή. Αυτή η μη σταθερή διατομή έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να είναι ένας λόγος εμφάνισης του chatter.

5.4 Πειραματική ανάλυση

5.4.1 Περιγραφή του Συστήματος μέτρησης

Στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος του εργαστηρίου δυναμικής μηχανών εγκαταστάθηκε, στην βιομηχανική μονάδα της εταιρείας ΕΛΒΑΛ στα Οινόφυτα Βοιωτίας, ένα σύστημα μέτρησης και ανάλυσης των κραδασμών (σχήμα 4.20) σε ένα έλαστρο ψυχρής κατεργασίας αλουμινίου έξι ραούλων.



Σχήμα 5.20 Σύστημα μέτρησης Κραδασμών

Το σύστημα που εγκαταστάθηκε αποτελείται από:

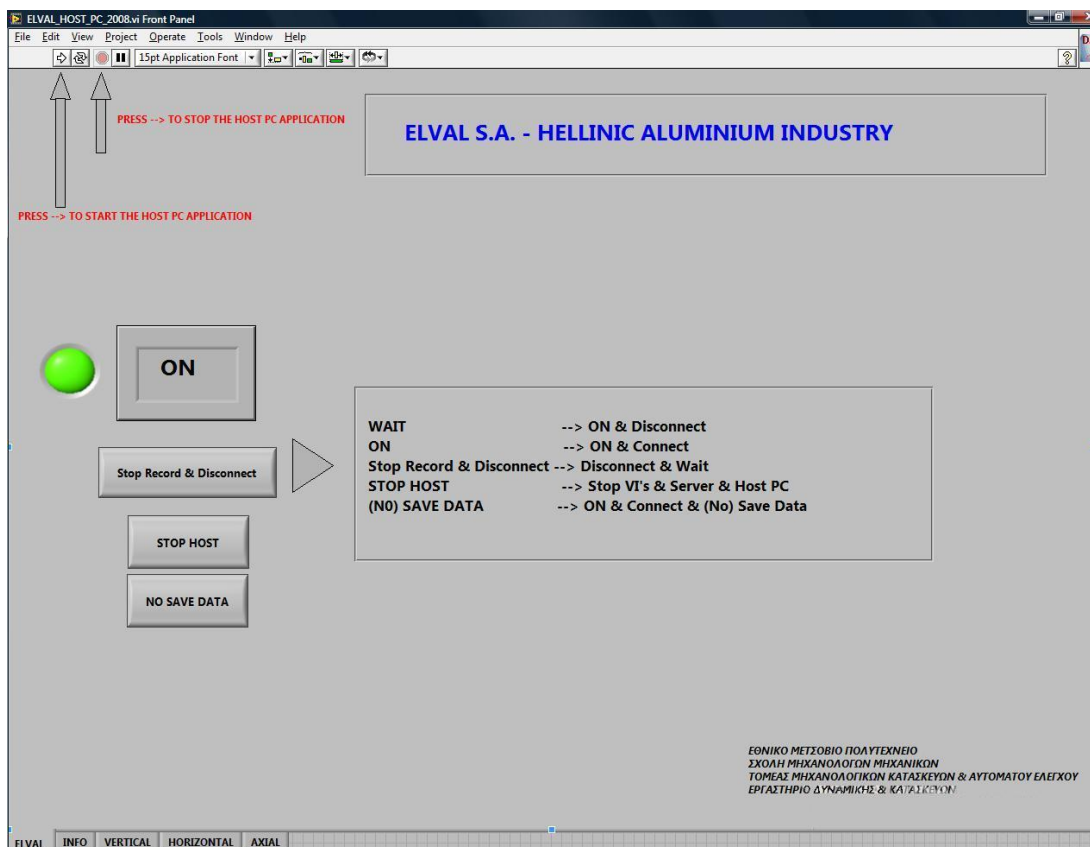
- Τρία επιταχυνσιόμετρα που τοποθετήθηκαν στις τρεις κατεύθυνσης: οριζόντια, κάθετη και αξονική. Όμως λόγω δυσκολιών που θα προέκυπταν κατά την διαδικασία της παραγωγής τα επιταχυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν στο κέλυφος του ελάστρου ακριβώς επάνω από τα ράουλα.
- Ειδικά καλώδια μεταφοράς το σήματος στο σύστημα
- Ειδική πλατφόρμα PXI κατάλληλα προγραμματισμένη. Αυτή η πλατφόρμα βασίζεται σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή και έχει εκτός τον άλλον μια κάρτα εισόδου του αναλογικού σήματος και μια κάρτα δικτύου για τη σύνδεση της με το υπολογιστή ελέγχου.



Σχήμα 5.21 PXI

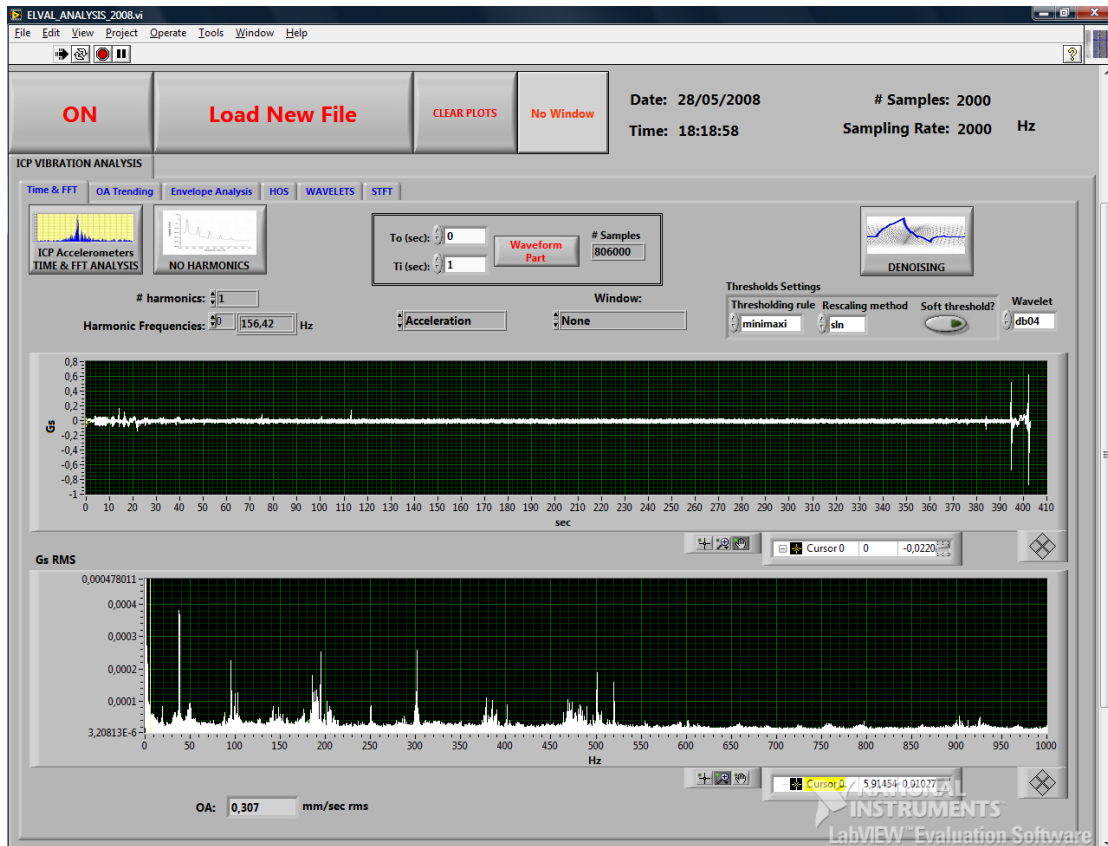
- Έναν Ηλεκτρονικό υπολογιστή ελέγχου στον οποίο εγκαταστάθηκαν τα προγράμματα ELVAL_HOST_PC και ELVAL_ANALYSIS γραμμένα σε LabView από τους τεχνικούς επιστήμονες του εργαστηρίου δυναμικής μηχανών.

- Το ELVAL_HOST_PC είναι ένα πρόγραμμα επικοινωνίας με το PXI στο οποίο μπορούμε να παρακολουθούμε on-line τους κραδασμούς του ελάστρου στις τρεις κατευθύνσεις, να κάνουμε ανάλυση FFT καθώς επίσης και να προσθέσουμε ένα σύστημα συναγερμού για την περίπτωση έναρξης του φαινομένου chattering. Επιπλέον το ELVAL_HOST_PC αποθηκεύει αυτόματα τα σήματα των ρόλων έλασης χωρίς απαραίτητη την παρουσία τεχνικού.



Σχήμα 5.22 Διεπιφάνεια προγράμματος ELVAL_HOST_PC

- Το πρόγραμμα ELVAL_ANALYSIS χρησιμοποιείται για επιπλέον ανάλυση των σημάτων κραδασμών που έχουν αποθηκευθεί νωρίτερα και έχει ενσωματωμένες πολλές μεθόδους ανάλυσης των κραδασμών που μπορούν να βοηθήσουν τον μελετητή ή των ερευνητή των κραδασμών.



Σχήμα 5.23 Διεπιφάνεια προγράμματος ELVAL_ANALYSIS

5.4.2 Εισαγωγή στην πειραματική ανάλυση

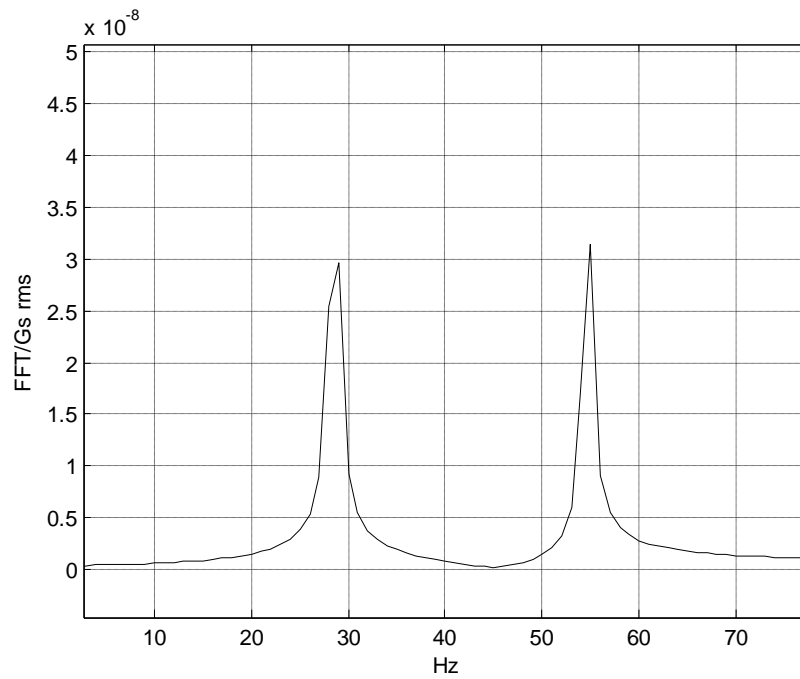
Οι μετρήσεις των κραδασμών στο έλαστρο ξεκίνησαν τον Μάρτιο του 2008 και συνεχίζονται ακόμα και σήμερα. Όμως τα δεδομένα που θα χρησιμοποιήσουμε στο πρώτο στάδιο της παρούσας έρευνας είναι από τις τελευταίες ημέρες του Μαΐου του 2008, όπου και μας ενημέρωσαν οι τεχνικοί του εργοστασίου ότι υπήρξαν σε ορισμένα ρόλα αυξημένοι κραδασμοί, εμφανείς και χωρίς κάποια μέτρηση.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι η εμφάνιση του chatter δεν γίνεται πάντα αντιληπτή από τον τεχνίτη, χωρίς μέτρηση. Βέβαια οι μικρού μεγέθους δονήσεις που δεν γίνονται αντιληπτές, όπως είναι το torsional chatter και το fifth octave chatter, δεν έχουν μεγάλες επιπτώσεις όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Όμως πρέπει να γίνεται παρακολούθηση τους γιατί από την εξέλιξη αυτών των ειδών chatter μπορεί να γεννηθεί και το third octave chatter που είναι και το πιο καταστρεπτικό.

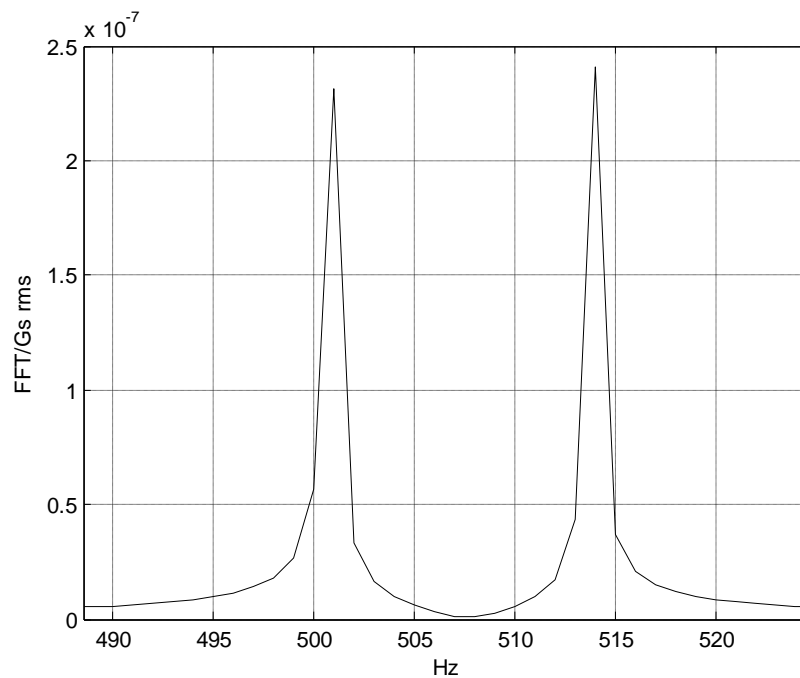
Το σύστημα που εγκαταστάθηκε είχε ρυθμιστεί να δουλεύει με συχνότητα δειγματοληψίας 2000 Hz. Αυτή η επιλογή έγινε γιατί η βιβλιογραφία καταδεικνυε τις ενδιαφέρουσες συχνότητες, εμφανίσεις του chatter, κάτω από τα 1000 Hz. Στην παρούσα έρευνα, όμως, υπολογίσαμε συχνότητες και πάνω από τα 1000Hz έτσι δεν θα μπορούμε να δούμε στο φάσμα συχνοτήτων αυτές τις συχνότητες.

Αρχικά για να έχουμε κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα μπορούμε να δούμε πως θα εμφανίζονταν οι συχνότητες στο μοντέλο σε περιβάλλον Matlab, δίνοντας του συχνότητα δειγματοληψίας 2000 Hz, το αποτέλεσμα είναι οι μετατοπισμένες συχνότητες που θα εμφανισθούν. Παρατηρώντας τα σχήματα 4.24 - 4.25 - 4.26 , που είναι αποτέλεσμα αυτής ακριβώς της ανάλυσης, συνειδητοποιούμε ότι οι συχνότητες που περιμένουμε να εμφανιστούν στα πειραματικά αποτελέσματα είναι :

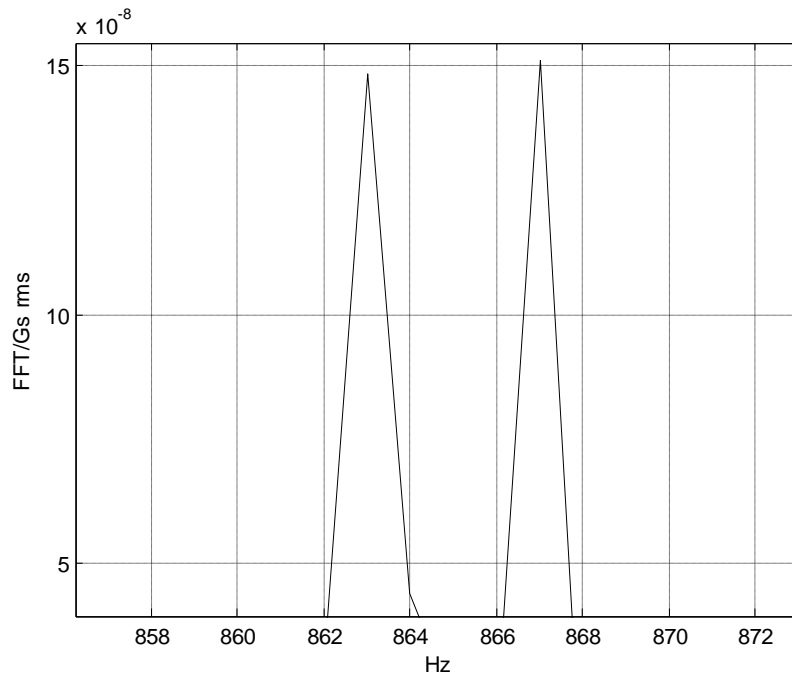
- 15 ~ 50 Hz
- 400 ~ 600 Hz
- 800 ~ 1000 Hz



Σχήμα 5.24



Σχήμα 5.25



Σχήμα 5.26

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι στα διαγράμματα συχνοτήτων δεν περιμένουμε την εμφάνιση των ιδιοσυχνοτήτων να είναι σταθερή αριθμητικά από ρόλο σε ρόλο. Ο λόγος είναι, όπως έχουμε καταδείξει και σε προηγούμενη παράγραφο, ότι οι ιδιοσυχνότητες επηρεάζονται από το υλικό που ελάσσεται καθώς και από κάποιες συνθήκες της έλασης. Για τον λόγο αυτό το εύρος συχνοτήτων που έχει ορισθεί παραπάνω είναι ένας καλός τρόπος να εντοπισθούν οι ιδιοσυχνότητες γραφικά.

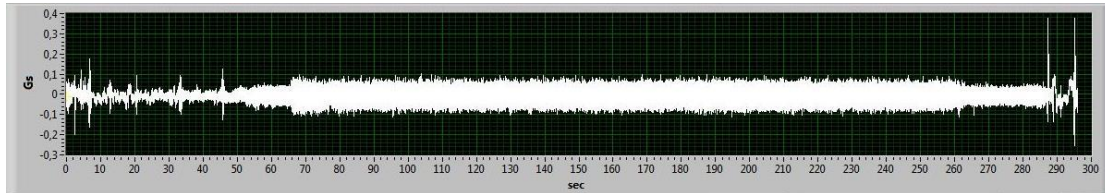
5.4.3 Πρώτο Στάδιο Ανάλυσης των σημάτων

Όπως αναφέραμε, κατά την περιγραφή της διάταξης, τα επιταχυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν στο κέλυφος του ελαστρού αντί στα κουζινέτα των ραούλων. Αυτό περιμένουμε να επιφέρει στα σήματα αυξημένο θόρυβο και ίσως στα διαγράμματα συχνοτήτων να εμφανίζονται συχνότητες που να αντιστοιχούν σε άλλα στοιχεία της μηχανής του ελαστρού όπως ρουλεμάν, γρανάζια κλπ. Έτσι τα συγκεκριμένα σήματα θα μας χρησιμεύσουν για μια αρχική επόπτευση του φαινομένου σύμφωνα με όσα έχουν υπολογισθεί κατά την γραμμική και αριθμητική ανάλυση του φαινομένου.

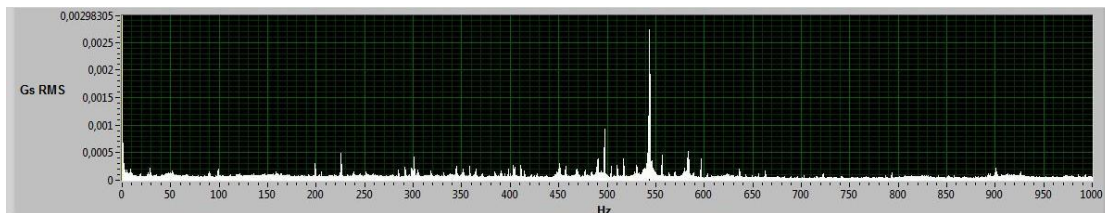
Τα φάσματα συχνοτήτων των σημάτων που θα μελετήσουμε προέρχονται από τις μετρήσεις του επιταχυνσιόμετρου της κάθετης διεύθυνσης. Ακολούθως παρουσιάζονται αυτά τα σήματα καθώς και τα διαγράμματα συχνοτήτων για τις ημερομηνίες 28/05/2008, 29/05/2008 και 30/05/2008.

Στις εικόνες των φασμάτων που ακολουθούν παρατηρούμε αιχμές συχνοτήτων οι οποίες αντιστοιχούν στις περιοχές όπου αναμένουμε την εμφάνιση του chattering, σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, και μας δίνουν την αρχική εκτίμηση που θέλουμε.

28/05/2008 18:30:14



5.27 Χρονικό σήμα 28/05/2008 18:30:14

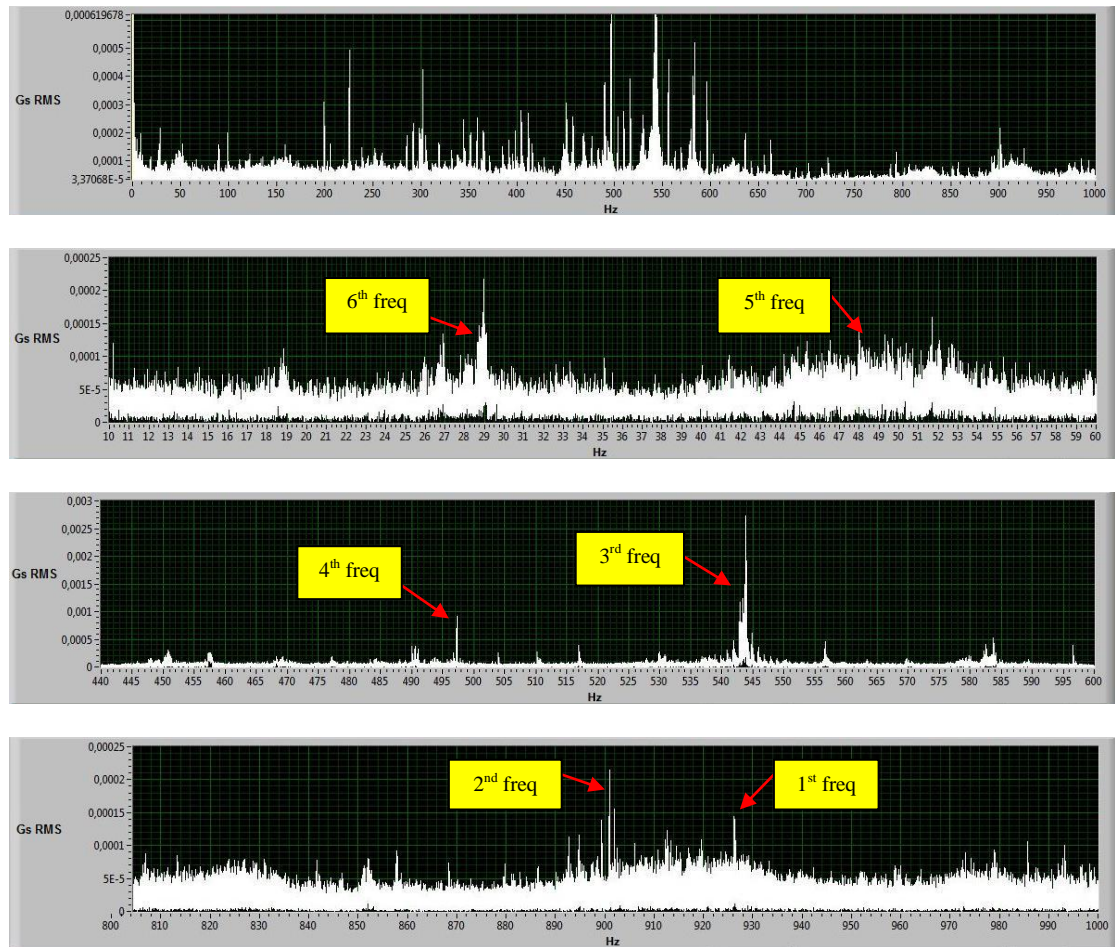


Σχήμα 5.28 Φάσμα συχνοτήτων 28/05/2008 18:30:14

Στο συγκεκριμένο ρόλο παρατηρείται αυξημένη ενέργεια στη περιοχή 400 – 600 Hz. Αυτό μας δείχνει ότι υπήρξαν μεγάλες δονήσεις των ραούλων κάτι που μας είχαν πει και οι τεχνικοί της εταιρείας.

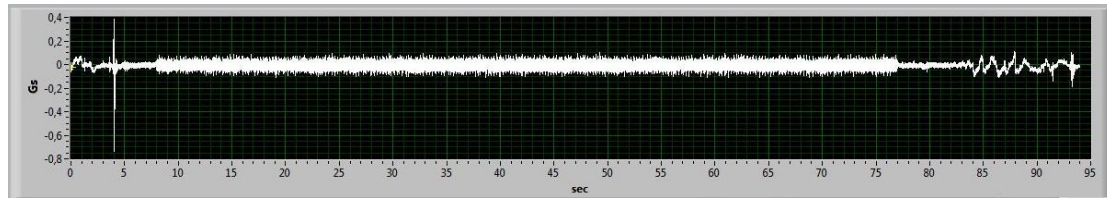
Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι αυτού που οι χειριστές του ελάστρου ονομάζουν “χτύπημα”, δηλαδή υπερβολικοί κραδασμοί εμφανείς χωρίς χρήση μετρητικών συστημάτων, εμφανίζεται στο φάσμα συχνοτήτων σε μια υψηλά διεγερμένη ιδιοσυχνότητα.

Με εστίαση στο διάγραμμα συχνοτήτων μπορούμε να παρατηρήσουμε καλύτερα και τις υπόλοιπες περιοχές.

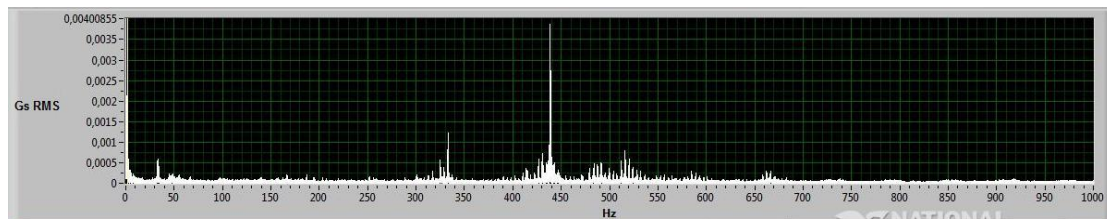


Σχήμα 5.29 Εστιασμένα φάσματα συχνότητων 28/05/2008 18:30:14

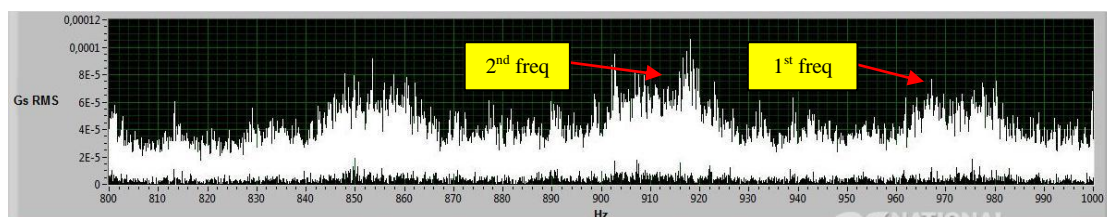
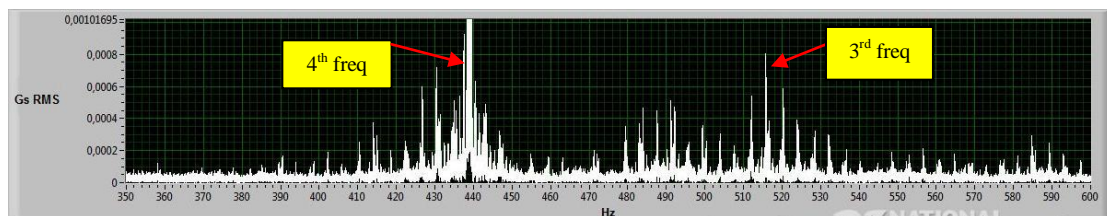
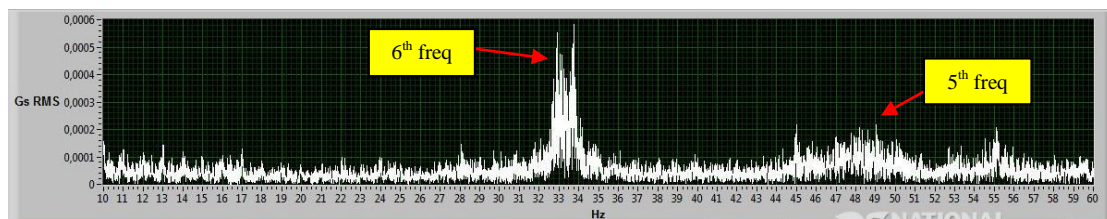
29/05/2008 4:30:08



Σχήμα 5.30 Χρονικό σήμα 29/05/2008 4:30:08

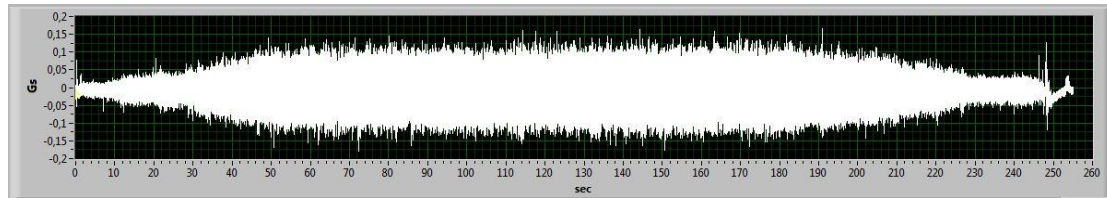


Σχήμα 5.31 Φάσμα συχνοτήτων 29/05/2008 4:30:08

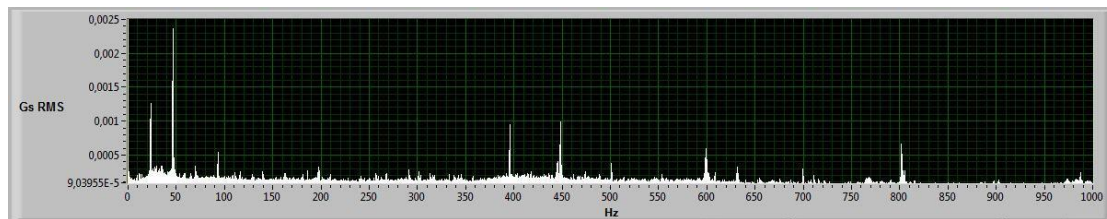


Σχήμα 5.32 Εστιασμένα φάσματα συχνοτήτων 29/05/2008 4:30:08

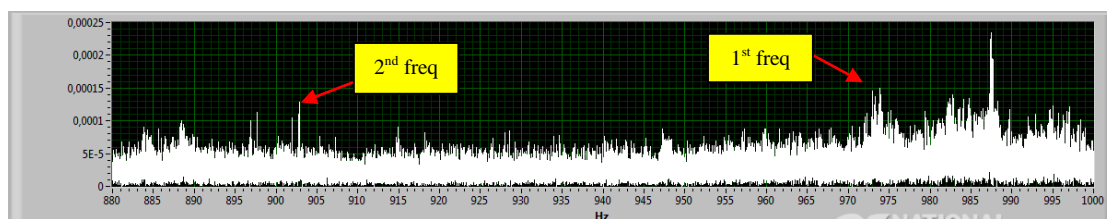
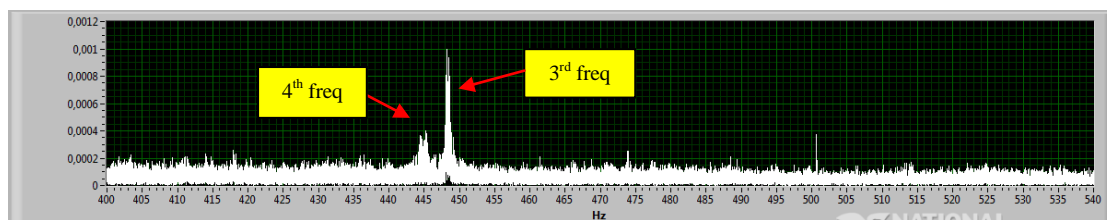
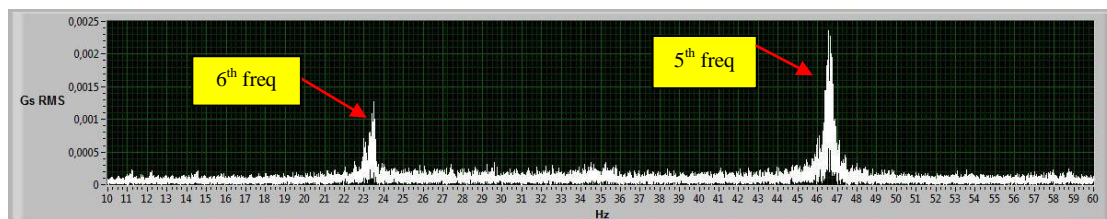
30/05/2008 16:39:07



Σχήμα 5.33 Χρονικό σήμα 30/05/2008 16:39:07



Σχήμα 5.34 Φάσμα συχνοτήτων 30/05/2008 16:39:07



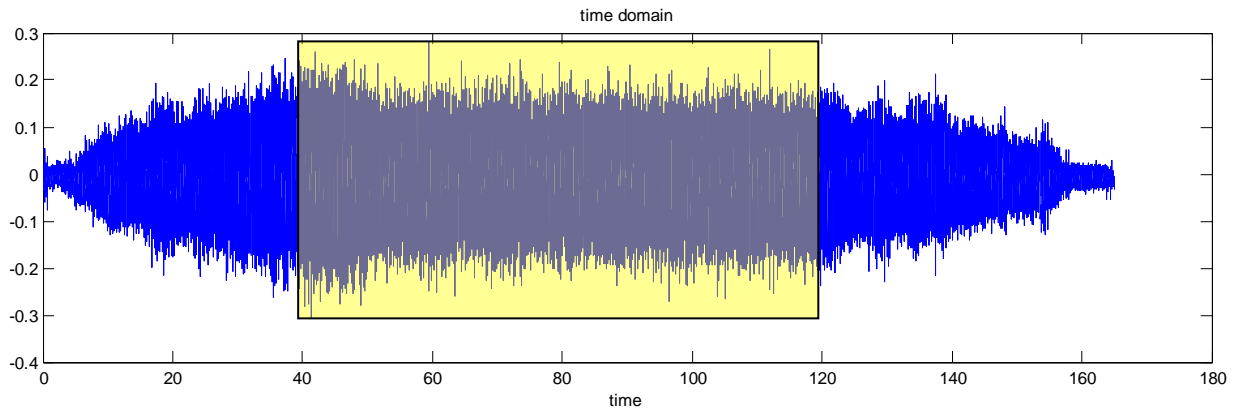
Σχήμα 5.35 Εστιασμένα φάσματα συχνοτήτων 30/05/2008 16:39:07

5.4.4 Δεύτερο Στάδιο Ανάλυσης των σημάτων

Στο δεύτερο στάδιο ανάλυσης πλέον αλλάξαμε την συχνότητα δειγματοληψίας στο σύστημα μέτρησης από 2000 Hz σε 4000 Hz και τώρα μπορούμε πλέον να καταδείξουμε τις ιδιοσυχνότητες του chatter με μεγαλύτερη ακρίβεια.

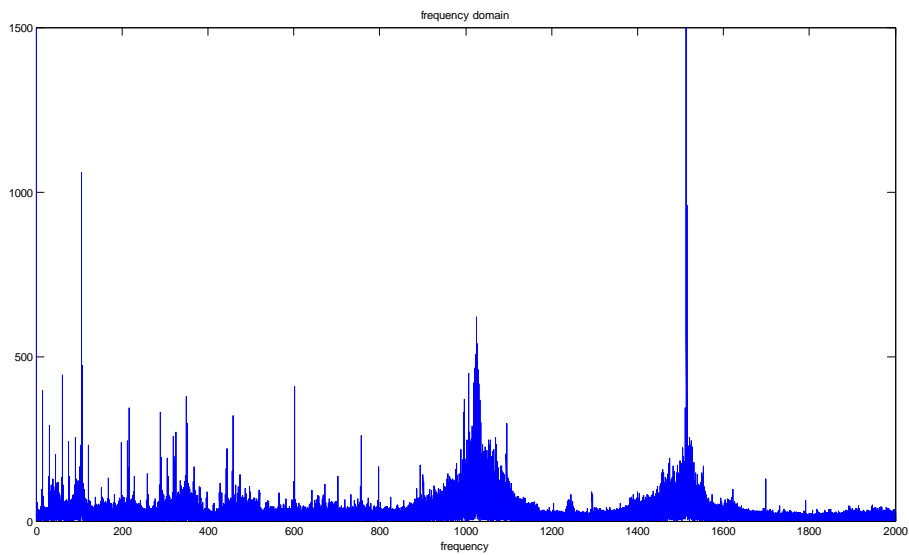
Οι μετρήσεις που ακολουθούν προέρχονται όπως και στην προηγούμενη περίπτωση από το επιταχυνσιόμετρο κατά την κάθετη διεύθυνση που είναι τοποθετημένο στο κέλυφος του ελάστρου. Για αυτό τον λόγο για να μπορέσουμε να διακρίνουμε καλύτερα τις ιδιοσυχνότητες σε αυτό το μέρος θα κάνουμε χρήση της μεθόδου short-time Fourier transform (stft) σε περιβάλλον matlab. Οι ακόλουθες μετρήσεις είναι από έλαση αλουμινίου στα μέσα του Μαρτίου του 2009.

17/03/2009 11:15

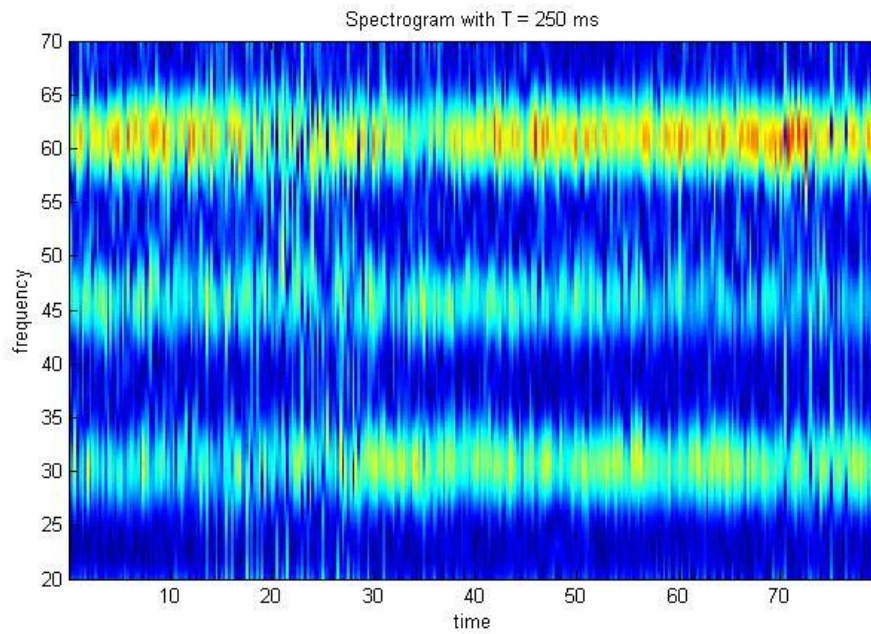


Σχήμα 5.36 Χρονικό σήμα 17/03/2009 11:15

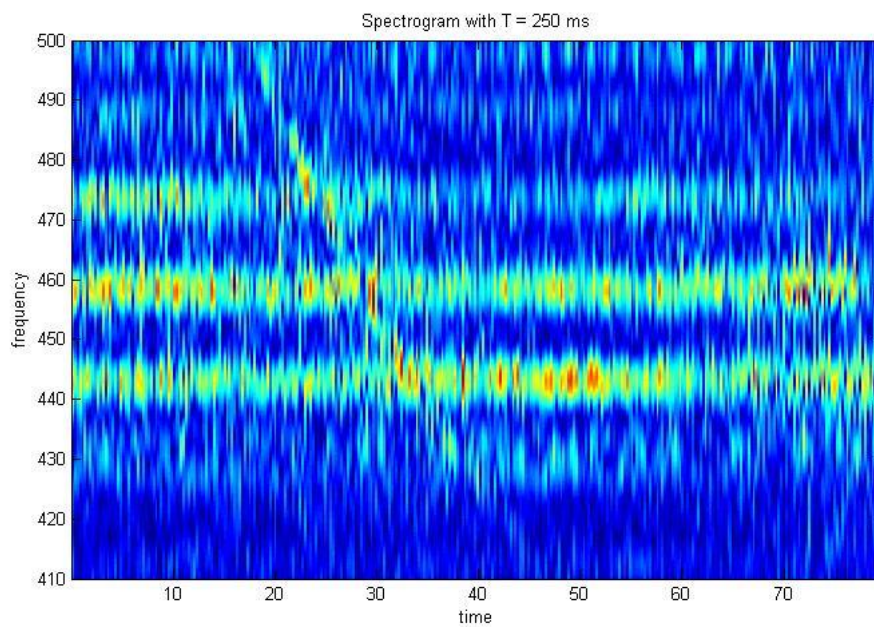
Στο σχήμα 4.36 παρατηρούμε ένα χρονικό σήμα έλασης και η σκιασμένη περιοχή, όπου το σήμα είναι περίπου σταθερό, είναι αυτή στην οποία θα γίνει η ανάλυση stft. Ακολουθούν το φάσμα συχνοτήτων καθώς και τα σχήματα της stft.



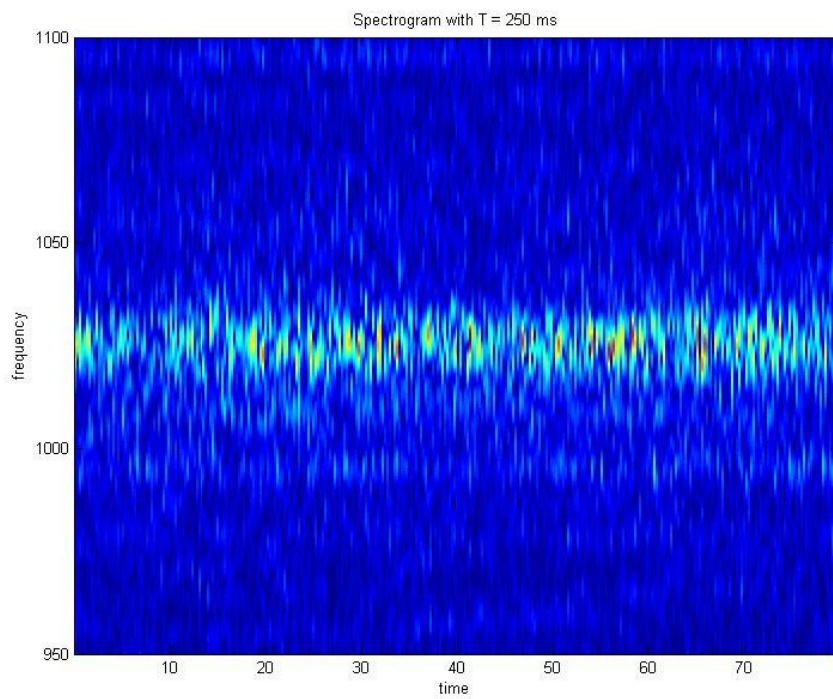
Σχήμα 5.37 Φάσμα συχνοτήτων 17/03/2009 11:15



Σχήμα 5.38 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=20\text{-}70\text{Hz}$, $t = 40 - 120 \text{ sec}$

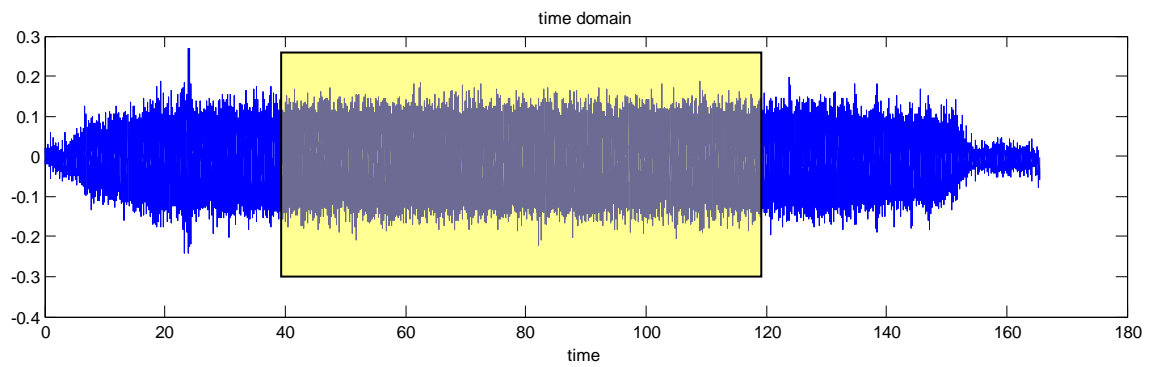


Σχήμα 5.39 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=410\text{-}500\text{Hz}$, $t = 40 - 120 \text{ sec}$

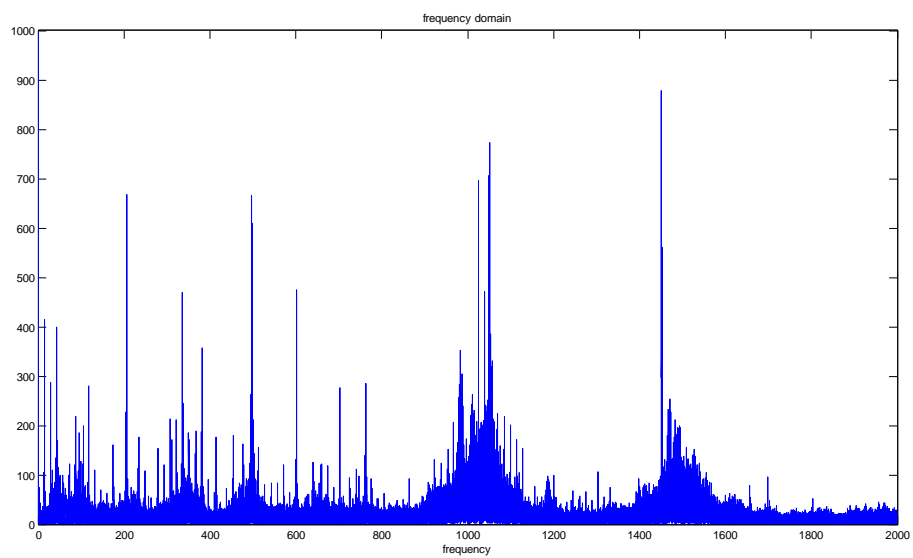


Σχήμα 5.40 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=950\text{-}1100\text{Hz}$, $t = 40 - 120 \text{ sec}$

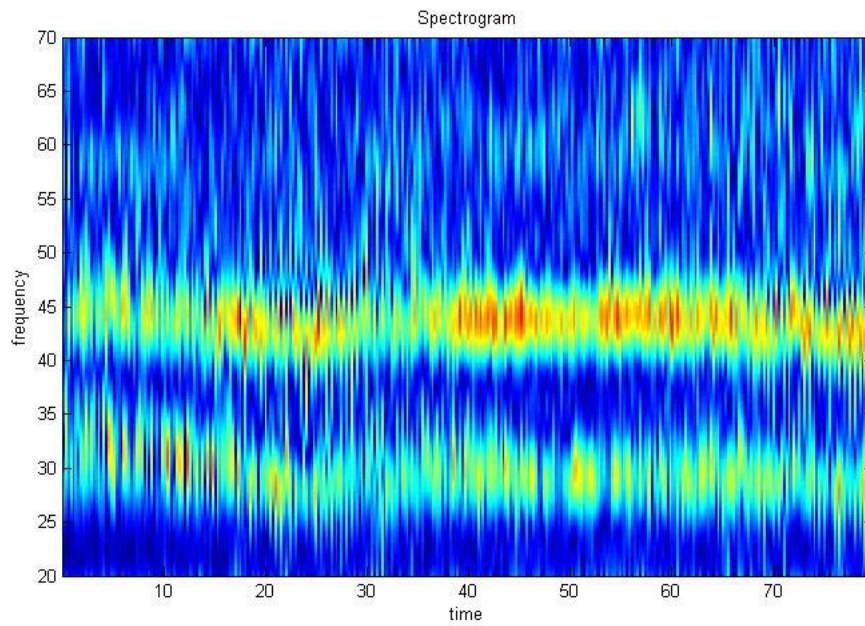
17/03/2009 11:22



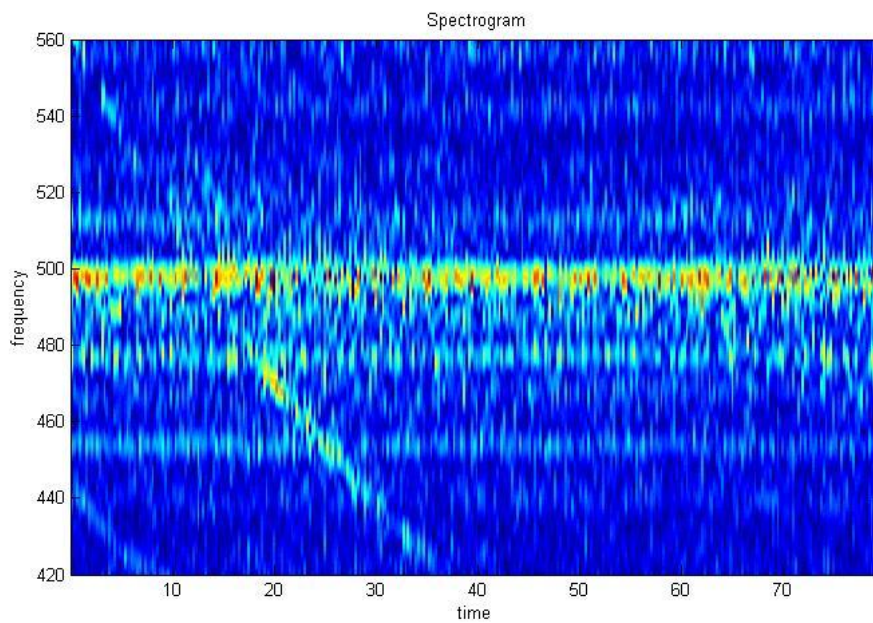
Σχήμα 5.41 Χρονικό σήμα 17/03/2009 11:22



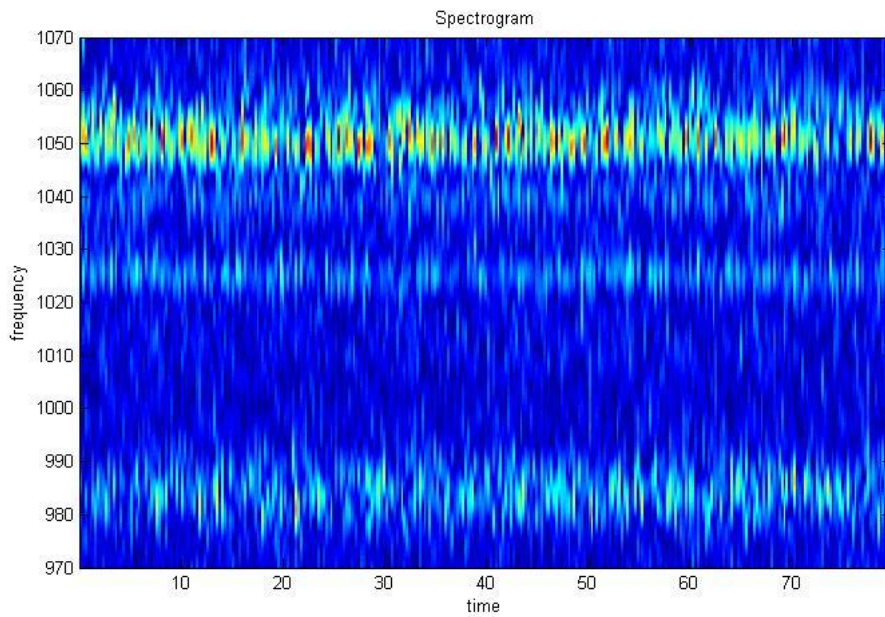
Σχήμα 5.42 Φάσμα συχνότητων 17/03/2009 11:22



Σχήμα 5.43 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=20\text{-}70\text{Hz}$, $t = 40 - 120 \text{ sec}$

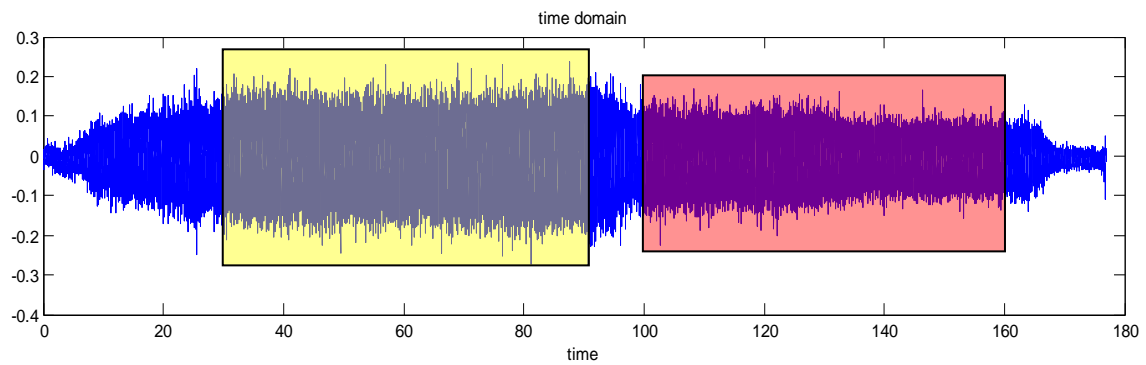


Σχήμα 5.44 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=420\text{-}560\text{Hz}$, $t = 40 - 120 \text{ sec}$



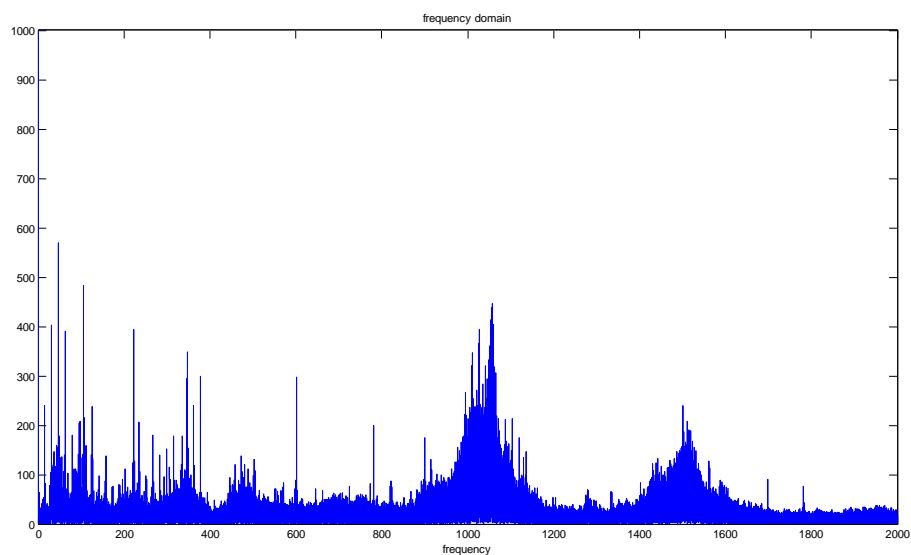
Σχήμα 5.45 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=970\text{-}1070\text{Hz}$, $t = 40 - 120 \text{ sec}$

17/03/2009 11:29

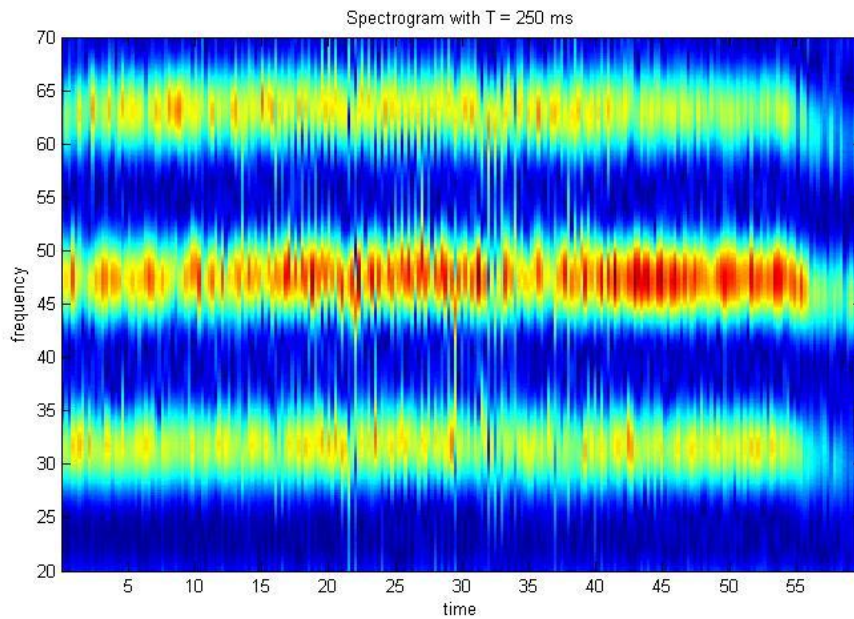


Σχήμα 5.46 Χρονικό σήμα 17/03/2009 11:29

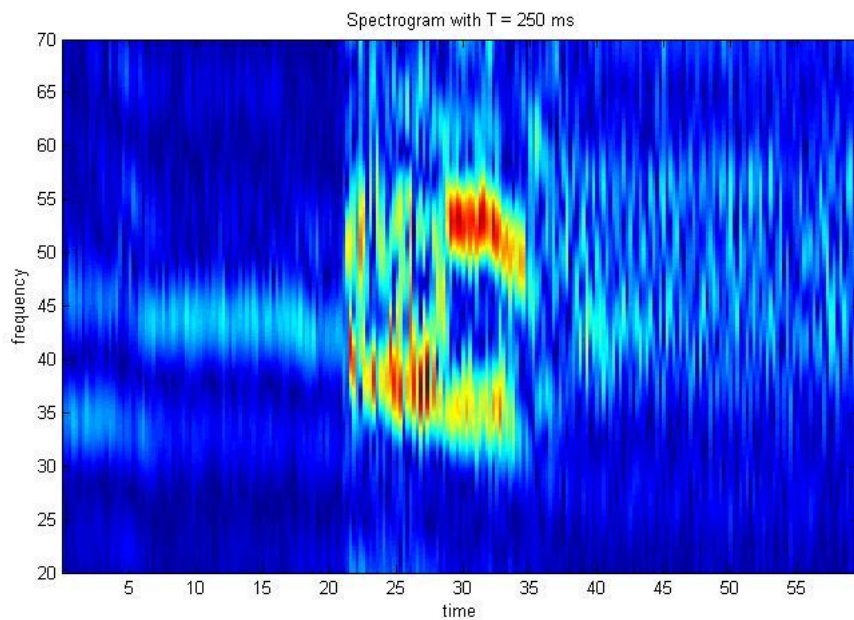
Σε αυτό το χρονικό σήμα παρατηρούμε μια μεταβατική φάση και το σήμα ξανά σταθεροποιείτε για αυτό τον λόγο θα μελετήσουμε δύο περιοχές.



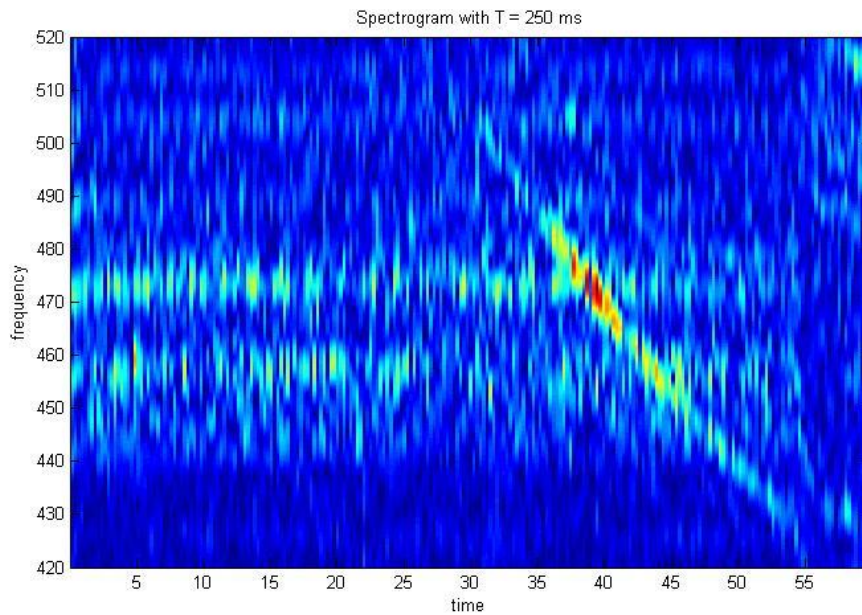
Σχήμα 5.47 Φάσμα συχνοτήτων 17/03/2009 11:29



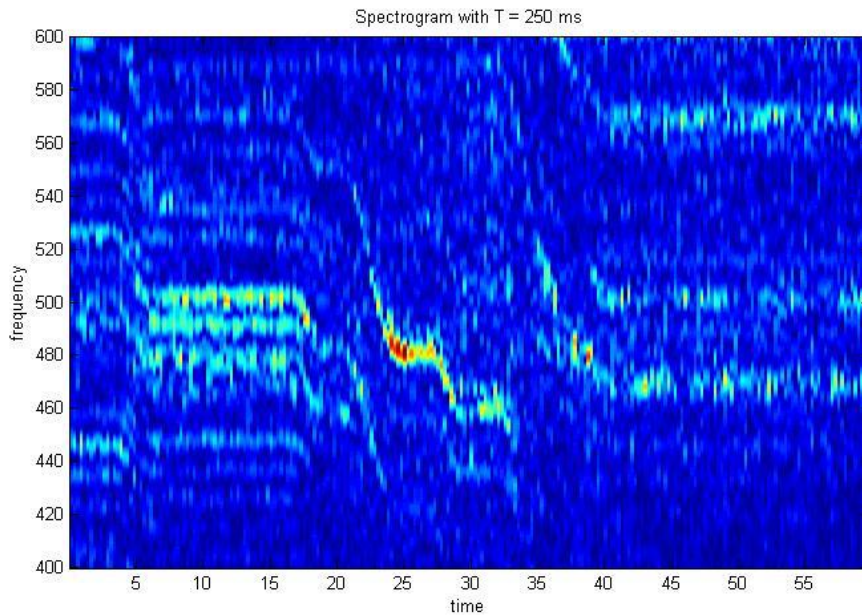
Σχήμα 5.48 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=20\text{-}70\text{Hz}$, $t = 30 - 90 \text{ sec}$



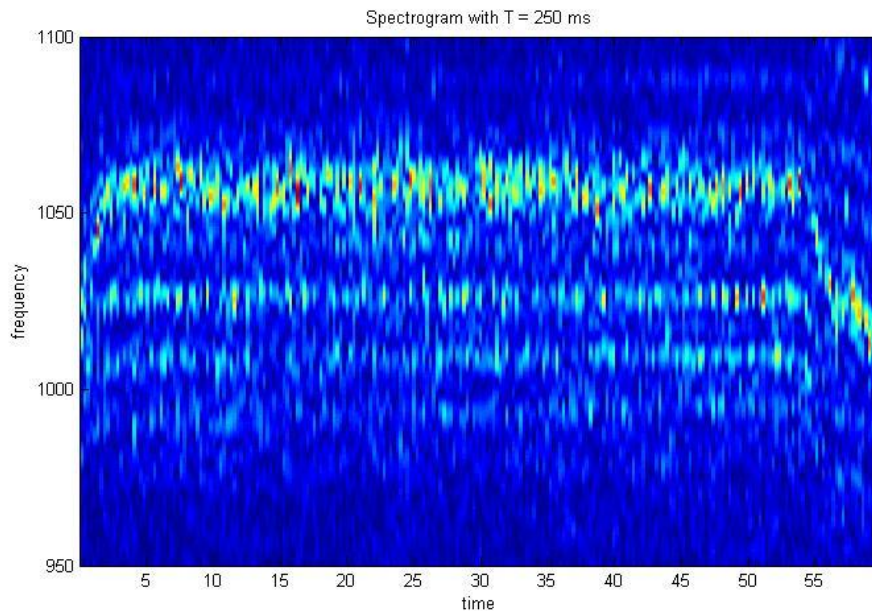
Σχήμα 5.49 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=20\text{-}70\text{Hz}$, $t = 100 - 160 \text{ sec}$



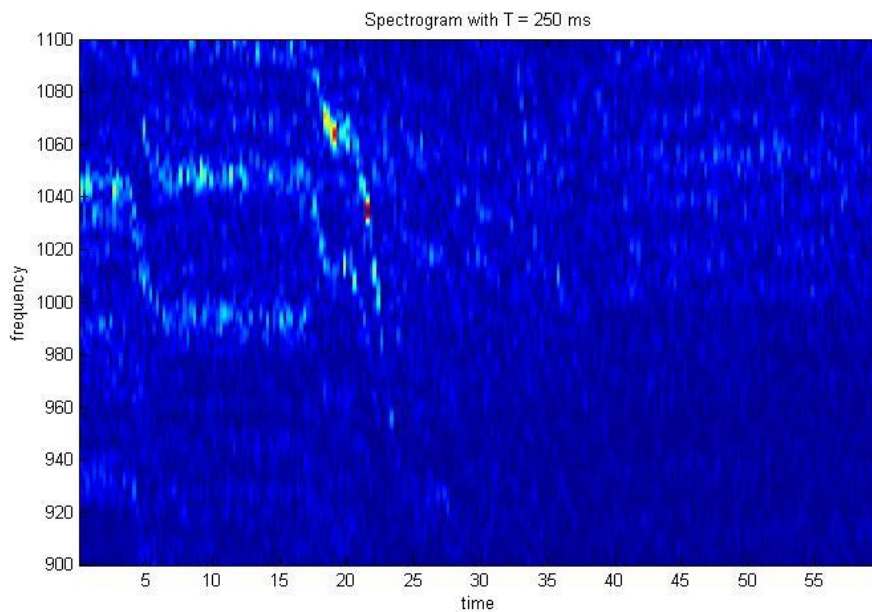
Σχήμα 5.50 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=420\text{-}520\text{Hz}$, $t = 30 - 90$ sec



Σχήμα 5.51 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=400\text{-}600\text{Hz}$, $t = 100 - 160$ sec

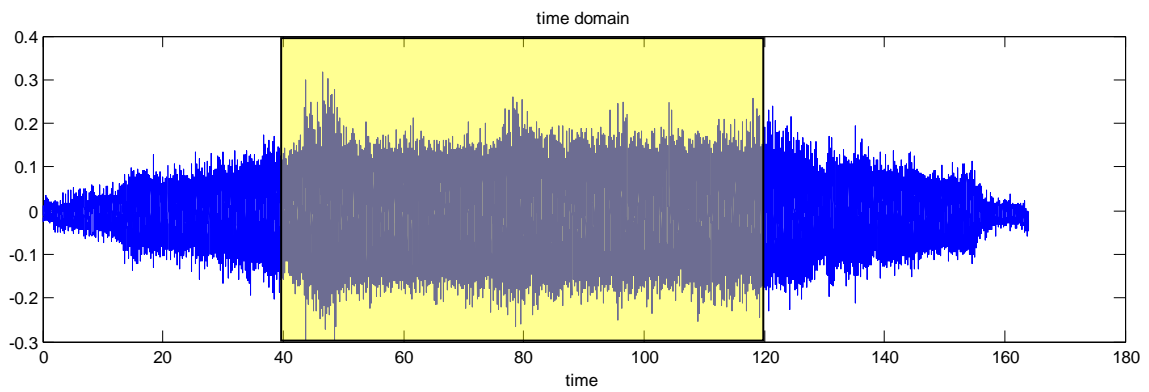


Σχήμα 5.52 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=950\text{-}1100\text{Hz}$, $t = 30 - 90 \text{ sec}$

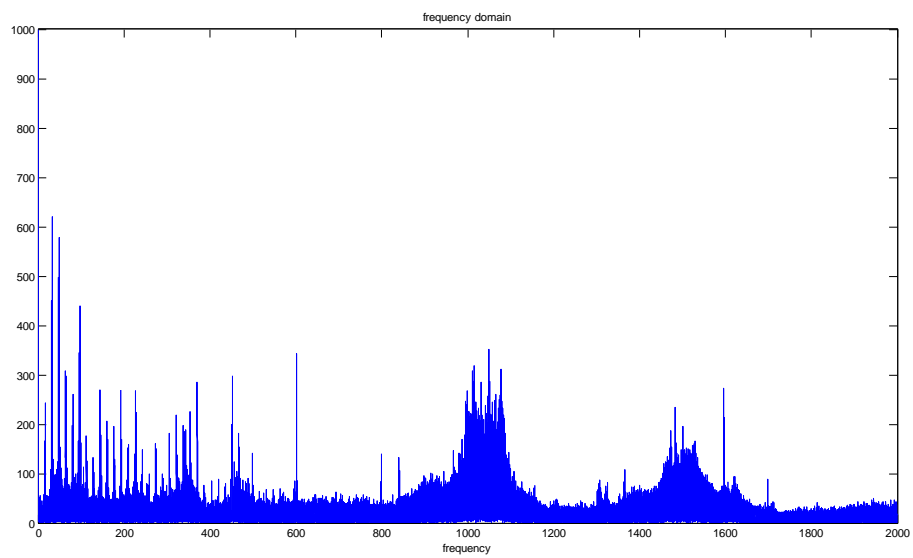


Σχήμα 5.53 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=950\text{-}1100\text{Hz}$, $t = 100 - 160 \text{ sec}$

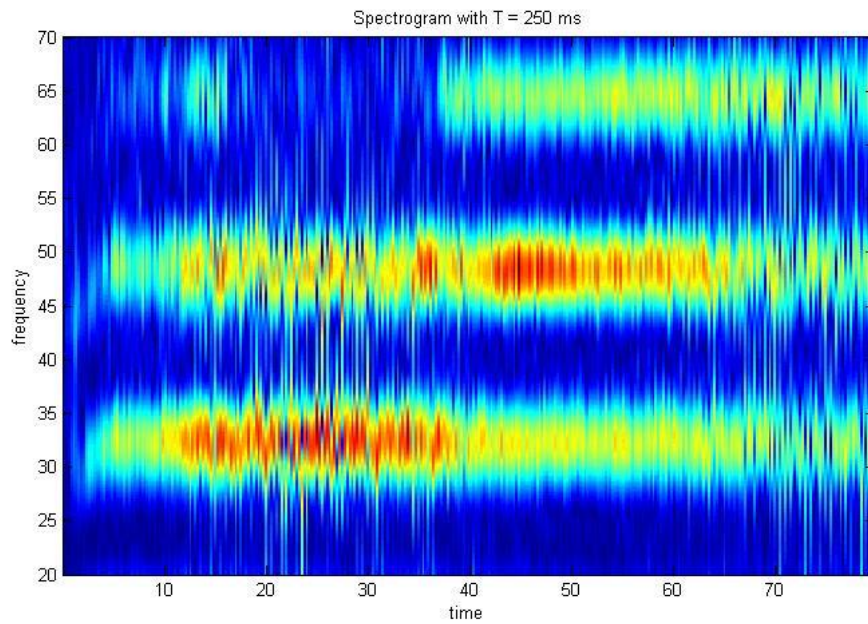
17/03/2009 11:37



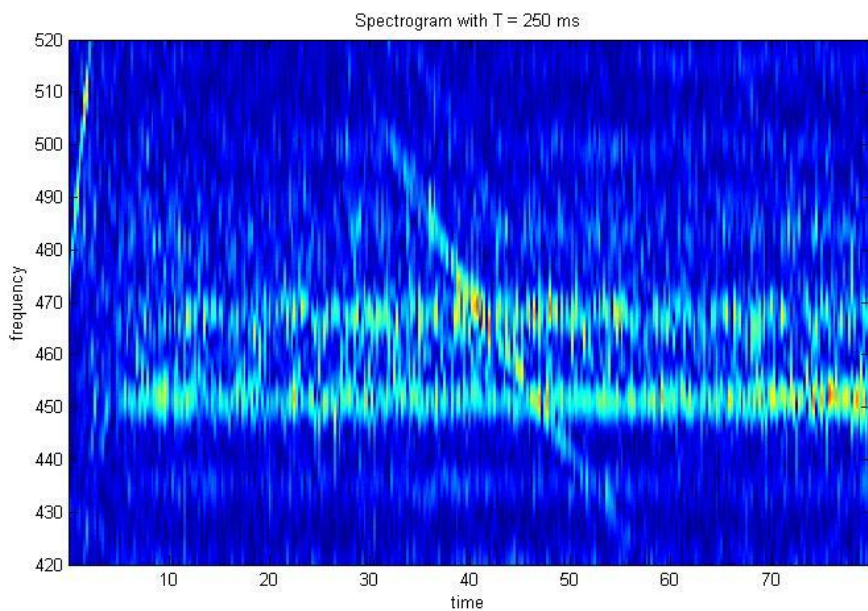
Σχήμα 5.54 Χρονικό σήμα 17/03/2009 11:37



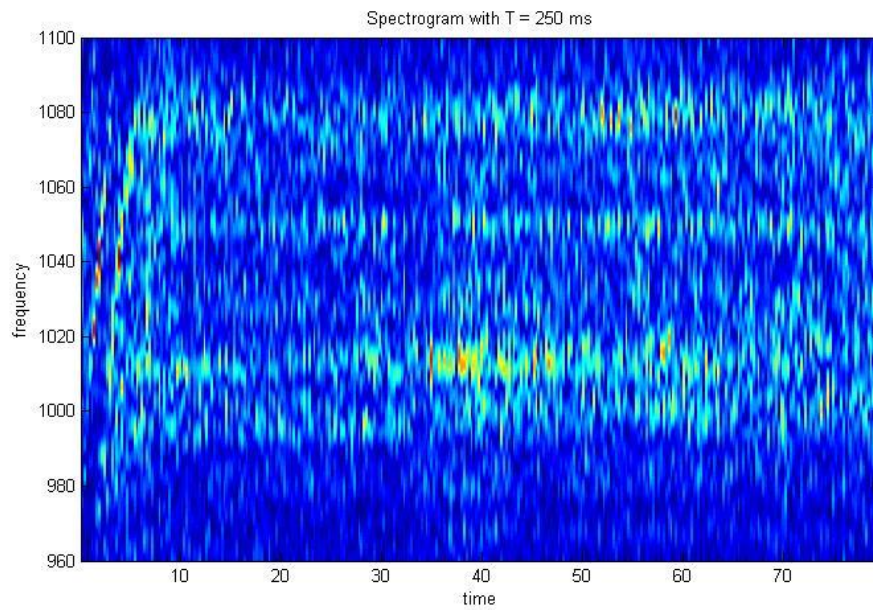
Σχήμα 5.55 Φάσμα συχνοτήτων 17/03/2009 11:37



Σχήμα 5.56 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=20\text{-}70\text{Hz}$, $t = 40 - 120 \text{ sec}$

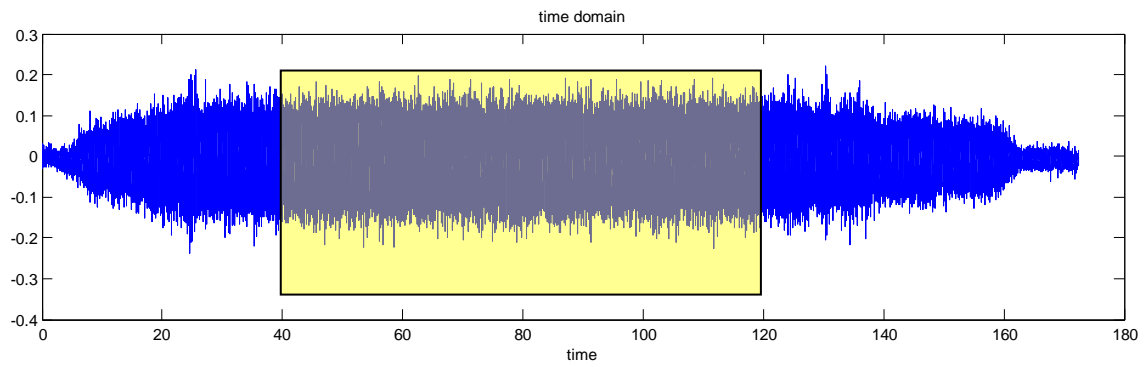


Σχήμα 5.57 Short time frequency analysis $w_s = 250\text{ms}$, $f=420\text{-}520\text{Hz}$, $t = 40 - 120 \text{ sec}$

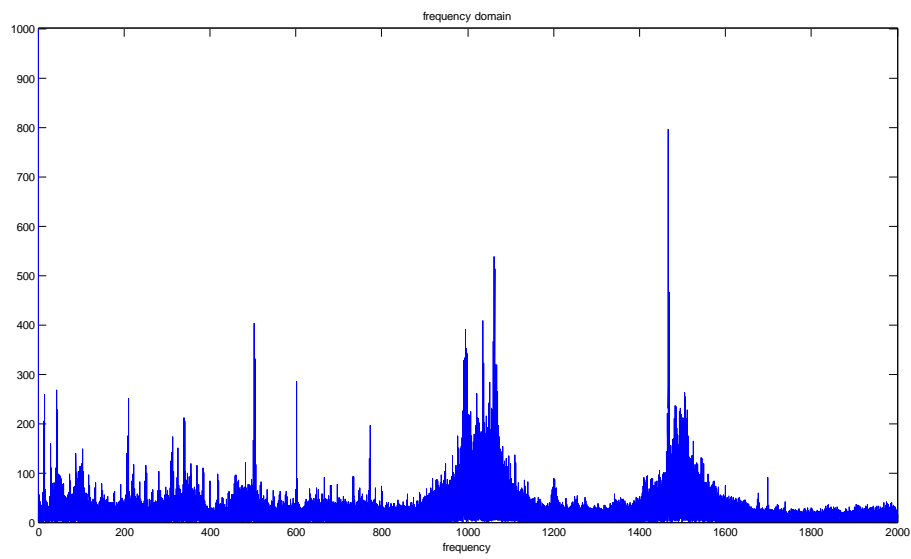


Σχήμα 5.58 Short time frequency analysis ws = 250ms, f=960-1100Hz, t = 40 – 120 sec

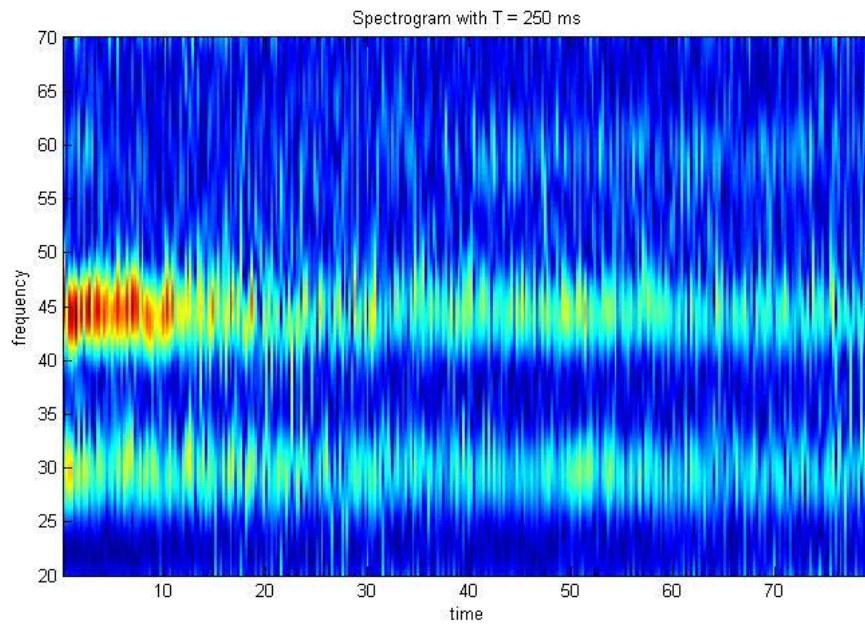
17/03/2009 11:44



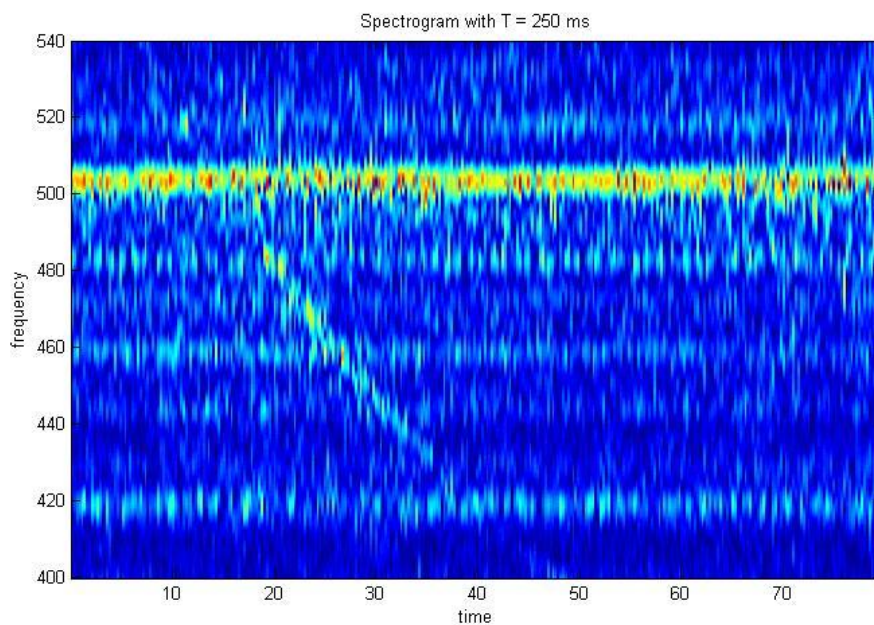
Σχήμα 5.59 Χρονικό σήμα 17/03/2009 11:44



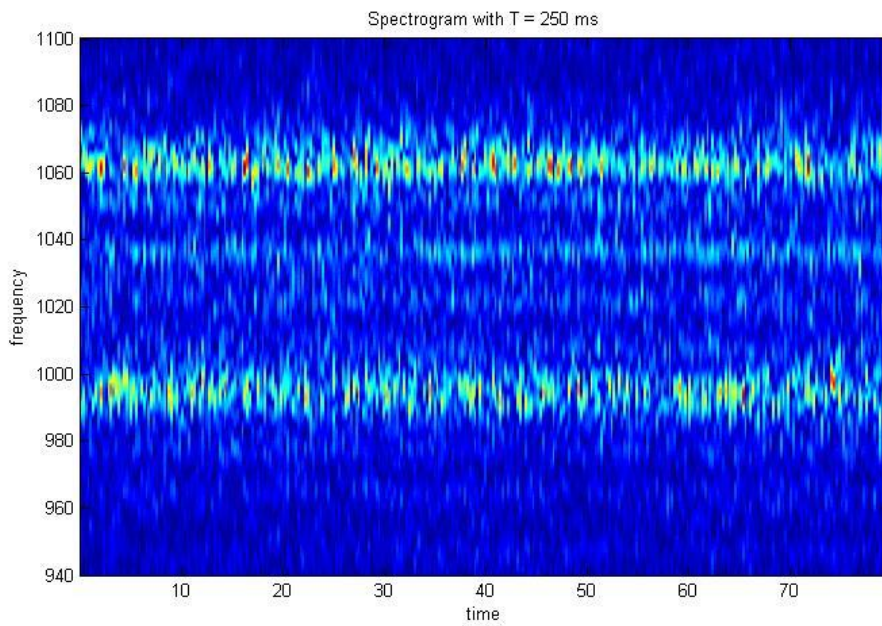
5.60 Φάσμα συχνοτήτων 17/03/2009 11:44



5.61 Short time frequency analysis ws = 250ms, f=20-70Hz t = 40 – 120 sec



5.62 Short time frequency analysis ws = 250ms, f=400-540Hz, t = 40 – 120 sec



5.63 Short time frequency analysis ws = 250ms, f=940-1100Hz, t = 40 – 120 sec

Ο ακόλουθος πίνακας παρέχει συνοπτικά όλες τις συχνότητες που παρατηρήσαμε με την short time frequency analysis για τα σήματα της ημερομηνίας 17/03/2009.

Από τον πίνακα μπορούμε να παρατηρήσουμε τις δυο χαμηλές ιδιοσυχνότητες να παραμένουν περίπου σταθερές στις τιμές των 30 Hz και 45 Hz κάτι που ήταν αναμενόμενο από την ανάλυση ευαισθησίας του γραμμικού μοντέλου με την οποία αποδείξαμε ότι οι παράμετροι έλασης δεν επηρεάζουν πολύ αυτές τις ιδιοσυχνότητες. Ακόμη παρατηρούνται επαναλαμβανόμενα και οι άλλες 4 ιδιοσυχνότητες στις περιοχές των 400 – 600 Hz και 900 – 1100 Hz.

Αυτό που συμπεραίνουμε τελικά είναι ότι το μοντέλο προβλέπει αρκετά ικανοποιητικά τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος. Έτσι θα μπορούσε να αποτελέσει μέρος ενός προγράμματος παρακολούθησης της εξέλιξης του chattering έτσι ώστε να μπορέσουμε να το καταστείλουμε.

Μέτρηση	11:15	11:22	11:29		11:37	11:44
Διάστημα ανάλυσης σε sec	40-120	40-120	30-90	100-160	40-120	40-120
Περιοχές συχνοτήτων						
900-1100	1025	1050	1058	-	1078	1062
	995	982	1026	-	1014	995
400-600	459	498	473	-	467	503
	443	477	453	-	451	483
10-90	45	45	47	-	48	44
	30	30	31	-	32	30

5.9 Συνοπτικά αποτελέσματα της Stft ανάλυσης

6 Παράρτημα

Πρόγραμμα επίλυση συστήματος

```

%*****
%
%           "Solution Model of rolling Chattering"
%
%           Tsanikidis Georgios
%           2008
%*****
clear
clc
tic
global k1 f1 mw mb k3 fs
%*****
%           Basic Parameters
%*****

fs = 10000;    % sampling rate (Hz)
olt=0.03;     % total time of resolution.
m1 = 0.1;     % forward friction
m2 = 0.1;     % backward friction
h1 = 2.54e-3; % entry thickness
hc0 = 1.8e-3; % initial roll gap
u1 = 25.43;   % strip velocity at entry
ty = 170*10^6; % strip shear yield strength
s1 = 200*10^6; % horizontal tensile stress at entry
s2 =170*10^6; % horizontal tensile stress at exit
mw = 1484.077; % mass of work roll
mb = 1938.386; % mass of intermediate roll
E =207*10^9;  % young modulus
n = 0.3;     % poisson ratio
Dw = 0.49;   % work roll diameter
Di = 0.56;   % intermediate roll diameter
Db = 1.4;    % backup roll diameter
R = Dw/2;   % work roll radius

y0=[0;1.8e-6;0;0]; %initial conditions

%*****
%
%           Oscillation of input parameters
%*****

fs1 = 0;% oscillation frequency of entry thickness (Hz)
mg1 = 0; % oscillation magnitude of entry thickness (%)

fs2 = 0; % oscillation frequency of horizontal tensile stress at
entry (Hz)
mg2 = 0; % oscillation magnitude of horizontal tensile stress at
entry (%)

```

```

fs3 = 0; % oscillation frequency of horizontal tensile stress at
exit (Hz)
mg3 = 0; % oscillation magnitude of horizontal tensile stress at
exit (%)

%*****
%
%                               Solution of Model
%
%*****

dt=1/fs;
h1 = h11+(mg1/100)*h11*sin(2*pi*fs1*(1:1:olt/dt));
s1 = s11+(mg2/100)*s11*sin(2*pi*fs2*(1:1:olt/dt));
s2 =s21+(mg3/100)*s21*sin(2*pi*fs3*(1:1:olt/dt));

hc=hc0+2*y0(2,1);

x1 = sqrt(h1(1)-hc)*R);

x2 = R*hc*(y0(1,1))/(2*(u1*h1(1)-x1*(y0(1,1))));

h2 = hc+x2^2/2;

var1 =
(m1/(m1+m2))*atan(x1/sqrt(R*hc))+(m2/(m1+m2))*atan(x2/sqrt(R*hc));
var2 = ((1/(2*ty*(m1+m2)))*sqrt(hc/R)*(s2(1)-
s1(1)+2*ty*log(h2/h1(1))));
xn = sqrt(R*hc)*tan(var1+var2);

hn = hc + (xn^2)/2;

var1 = (2*ty+s1(1))*(x2-x1)+(ty/R)*(m2*(x2^2-xn^2)+m1*(x1^2-xn^2));
var2 =
2*ty*x2*log(h1(1)/h2)+2*ty*(m1+m2)*x2*sqrt(R/hc)*atan(xn/sqrt(R*hc));
var3 = (4*ty*sqrt(R*hc)-2*ty*m1*x2*sqrt(R/hc))*atan(x1/sqrt(R*hc));
var4 = ty*R*m1*log(h1(1)/hn)+ty*R*m2*log(h2/hn);
var5 = (4*ty*sqrt(R*hc)+2*ty*m2*x2*sqrt(R/hc))*atan(x2/sqrt(R*hc));
f1 = var1+var2+var3+var4-var5;

k1 = pi*E/(2*(1-n^2)*(-1/3+log(0.78125*E*(Dw+Di)/(f1*(1-n^2))));

k3 = pi*E/(2*(1-n^2)*(-1/3+log(0.78125*E*(Di+Db)/(f1*(1-n^2))));

t0=0;
tf=dt;

for i=1:1:(olt/dt)

```

```

[t, y]=ode45('sys2m', [t0, tf], y0);
[me1 me2] = size(y);
y0=[y(me1,1);y(me1,2);y(me1,3);y(me1,4)];

for j=1:1:me1
    Y(i+j,1)=y(j,1);
    Y(i+j,2)=y(j,2);
    Y(i+j,3)=y(j,3);
    Y(i+j,4)=y(j,4);
    t1(i+j)=t(j);
end
clear y t
t0=tf;
tf=tf+dt;

hc=hc0+2*y0(2,1);

x1 = sqrt((h1(i)-hc)*R);

x2 = R*hc*(y0(1,1))/(2*(u1*h1(i)-x1*(y0(1,1))));

h2 = hc+x2^2/2;

var1 =
(m1/(m1+m2))*atan(x1/sqrt(R*hc))+(m2/(m1+m2))*atan(x2/sqrt(R*hc));
var2 = ((1/(2*ty*(m1+m2)))*sqrt(hc/R)*(s2(i)-
s1(i)+2*ty*log(h2/h1(i))));
xn = sqrt(R*hc)*tan(var1+var2);

hn = hc + (xn^2)/2;

var1 = (2*ty+s1(i))*(x2-x1)+(ty/R)*(m2*(x2^2-xn^2)+m1*(x1^2-
xn^2));
var2 =
2*ty*x2*log(h1(i)/h2)+2*ty*(m1+m2)*x2*sqrt(R/hc)*atan(xn/sqrt(R*hc));
var3 = (4*ty*sqrt(R*hc)-
2*ty*m1*x2*sqrt(R/hc))*atan(x1/sqrt(R*hc));
var4 = ty*R*m1*log(h1(i)/hn)+ty*R*m2*log(h2/hn);
var5 =
(4*ty*sqrt(R*hc)+2*ty*m2*x2*sqrt(R/hc))*atan(x2/sqrt(R*hc));
f1 = var1+var2+var3+var4-var5;
k1 = pi*E/(2*(1-n^2)*(-1/3+log(0.78125*E*(Dw+Di)/(f1*(1-n^2))));

k3 = pi*/(2*(1-n^2)*(-1/3+log(0.78125*E*(Di+Db)/(f1*(1-n^2))));

A(i+1,:) = [ hc h2 hn x1 x2 xn ];
KF(i+1,:) = [ k1 k3 f1];
end
t = t1;
clear me1 me2 i j t1 f1 k1 k3 dt m1 m2 x1 x2 xn fs1 fs2 fs3 mg1 mg2
mg3
clear var1 var2 var3 var4 t0 tf var5
toc

```

Υπορουτίνα προγράμματος (σύστημα)

```
function yd=sys2m(t,y);
global k1 k3 f1 w mb
yd = zeros(size(y));

%-- compute derivatives

yd(1) = -k1/mw*y(2)+k1*y(4)/mw + f1/mw;

yd(2) = y(1);

yd(3) = -(k1+k3)/mb*y(4)+k1*y(2)/mb;

yd(4) = y(3);
```

Πρόγραμμα FFT ανάλυσης

```
%*****
%
%                               "Spectrum Analysis (FFT)"
%
%*****

%*****
%                               Basic Parameters
%*****

P=olt*fs; % # of samples <- Insert the value of this parameter

t=0:1/fs:P/fs-1/fs;

%*****
%                               Measured Signal
%*****

z=Y(:,2)+hc0; % <- Insert the value of this parameter

%*****
%                               Waveform Graph of Signals
```

```

%*****

set(0, 'DefaultAxesColorOrder', [0 0 0], ...
      'DefaultAxesLineStyleOrder', '-|-.|--|:')
figure; plot(t(1:P), z(1:P)); set(gca, 'XLim', [0, P/fs]);
xlabel('sec'); ylabel('Signal'); grid; zoom;

%*****
%
%                               Spectrum Analysis of Signal
%
%*****

%*****
%                               Basic Parameters
%*****
ffff=0:fs/P:fs/2;

%*****
%                               FFT of Signal
%*****

for i=1:1:P
    psd(i)=0;
end

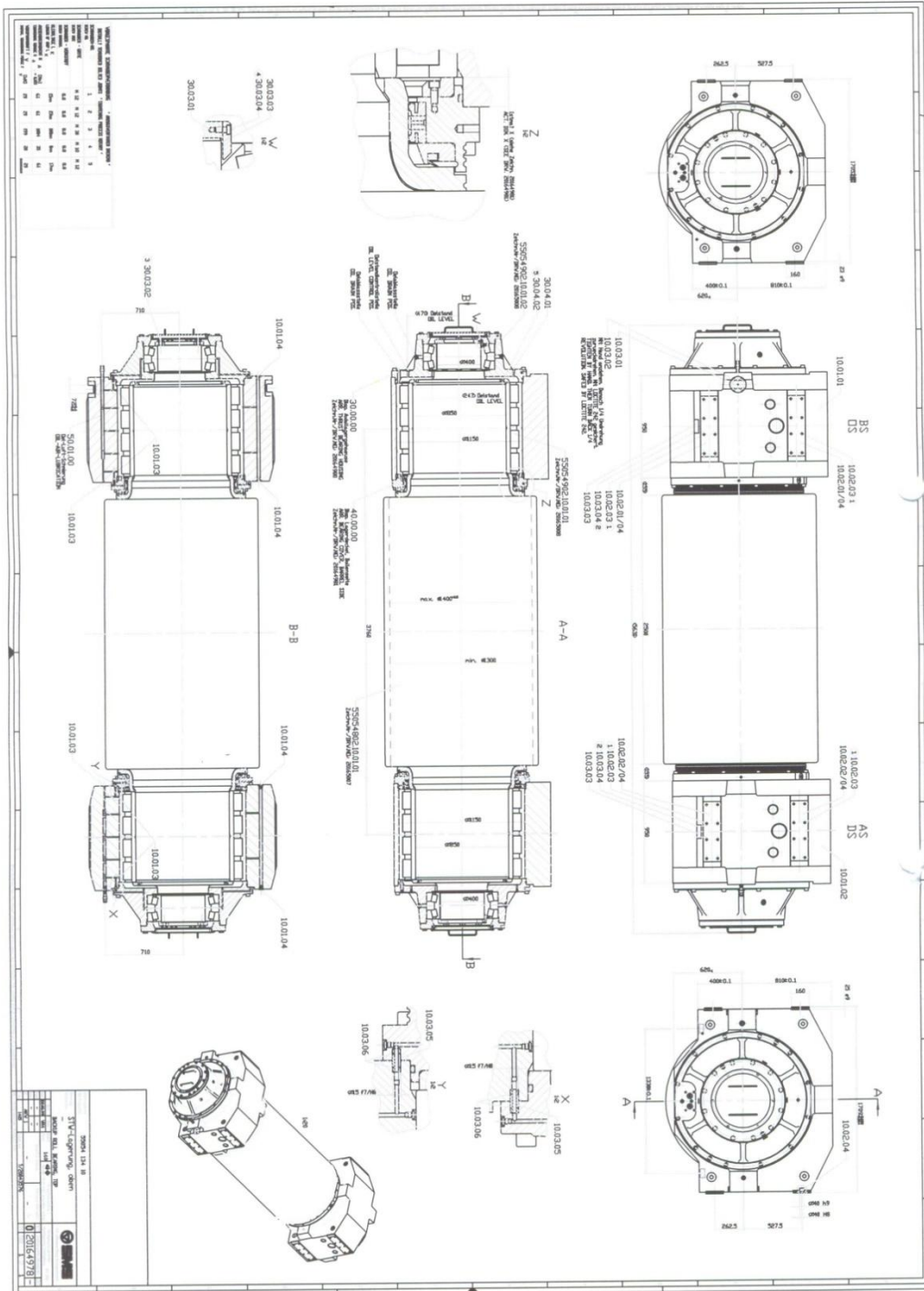
Fy=fft(z,P)/P;

for i=1:1:P
    ass=abs(Fy(i));
    psd(i)=psd(i)+ass; % FFT
end

figure; plot(ffff, psd(1:P/2+1)); set(gca, 'XLim', [0, fs/2]);
xlabel('Hz'); ylabel('FFT/Gs rms'); grid; zoom; % Plot of spectrum
analysis (FFT)
clc;

```

Σχέδια ελάστρου



Σχήμα 6.1 Ράουλα ελάστρου ΕΛΒΑΑ

7 Βιβλιογραφία

1. I. Αντωνιάδης, Α. Κανάραχος, 1998, Δυναμική Μηχανών, Παπασωτηρίου
2. Σημειώσεις μαθήματος Κατεργασίες I, ΕΜΠ
3. Eugene I. Radzimovsky, 1953, Stress Distribution And Strength Condition Of Two Rolling Cylinders Pressed Together
4. Cold Rolling of Steel, 1978, William L. Roberts
5. Hot Rolling of Steel, 1983, William L. Roberts
6. Young, C. W., 1989, Roark's Formulas for Stress and Strain, 6th Edition, McGraw-Hill
7. Dr.-Ing. J. Mackel, "Condition Monitoring and Diagnostic Engineering for Rolling Mills"
8. Roberts, W. L., 1978, "Four-H Mill-Stand Chatter of the Fifth-Octave Mode"
9. Tlustý, J., Chandra, G., Critchley, S., and Paton, D., 1982, "Chatter in Cold Rolling"
10. Johnson, R. E., and Qi, Q., 1994, "Chatter Dynamics in Sheet Rolling"
11. W. PERNG, W. T. TSENG, K. W. HAN, 1996, "Frequency Domain Analysis of Mechanical Vibrations in Automatic Rolling Systems"
12. I.S. Yun, W.R.D. Wilson, K.F. Ehmann, 1997, "Review of chatter studies in cold rolling"
13. Yun, I.-S., Ehmann, K. F., and Wilson, W. R. D., 1998, "Chatter in the Strip Rolling Process, Part 1: Dynamic Model of Rolling"
14. Yun, I.-S., Ehmann, K. F., and Wilson, W. R. D., 1998, "Chatter in the Strip Rolling Process, Part 2: Dynamic Rolling Experiments"

15. Yun, I.-S., Ehmann, K. F., and Wilson, W. R. D., 1998, “Chatter in the Strip Rolling Process, Part 3: Chatter Model”
16. Marcelo Lupinucci, Jorge Pérez, Guillermo Davilla and Leandro Tiseyra, 2000, “Improving Sheet Metal Quality and Product Throughput with Bently’s Machinery Management System”
17. Lin, Y.-J., Suh, C. S., and Noah, S. T., 2002, “Dynamic Characteristics of Sheet Rolling Instability”
18. Lin, Y.-J., Suh, C. S., and Noah, S. T., 2003, “On the Characteristics and Mechanism of Rolling Instability and Chatter”
19. Yukio KIMURA, Yasuhiro SODANI, Nobuo NISHIURA, Naoki IKEUCHI and Yutaka MIHARA, 2003, “Analysis of Chatter in Tandem Cold Rolling Mills”
20. Stefan DRAGOMIR, Georgeta DRAGOMIR, Marian BORDEI, 2006 , “RESEARCH ABOUT THE VIBRATION PARAMETERS FOR A COLD ROLLING MILL MACHINE”
21. E. A. Garber , N. L. Bolobanova, A. I. Traino, and E. V. Diligenskii, 2006, “Energy–Force Parameters of Six-High Stands in Wide-Strip Rolling Mills”