

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ - ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ**  
**ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:**  
**Θ.Ν. ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ**  
**ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ**  
**ΤΩΝ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ**

**Μανιάτη Μαρί – Μισέλ**

**Αθήνα 2007**

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα Καθηγητή Θ.Ν. Κωστόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια, στήριξη και καθοδήγηση, που παρείχε κατά την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της μετατόπισης των οδοντώσεων στην ακρίβεια των τροχών, κατά πόσο, δηλαδή, από την κατασκευαστική διαμόρφωσή τους απέχουν από τη θεωρητικά γεωμετρική μορφή που προβλέπεται γι' αυτούς. Η απόκλιση της πραγματικής, από την προβλεπόμενη από τη θεωρία, τιμής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους, οφείλεται σε κατασκευαστικά σφάλματα, που αφορούν είτε στη μορφή του κοπτικού εργαλείου, είτε στην τοποθέτηση του, καθώς και στη φύση της μεθόδου κοπής που επιλέγεται.

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των οδοντωτών τροχών, επιτρέπει μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου παράλληλα ως προς τον άξονα των υπό κατασκευή τροχών, ώστε όπως θα αναλυθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο 1, να αποφευχθούν οι υποκοπές, τμήματα δηλαδή της κατατομής των οδόντων που θα δυσχεράνουν τη συνεργασία των τροχών, καθώς για να υπάρξει αυτή θα πρέπει να ακολουθείται ο βασικός νόμος της οδόντωσης σε κάθε σημείο της συνεργασίας των κατατομών. Παρατηρήθηκε, μάλιστα, πως με τη μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου, διαφοροποιούνται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οδόντων των τροχών, με τρόπο που να αυξάνεται η αντοχή τους σε συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, με τη μετατόπιση είναι δυνατή η κατασκευή τροχών σε μη τυποποιημένες διαστάσεις και έτσι ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής είναι δυνατόν να εφαρμοστούν τροχοί στην επιθυμητή απόσταση λειτουργίας, τόσο για διαστασιολογικούς σκοπούς, όσο και για ανάγκες μείωσης θορύβου.

Η επίδραση της μετατόπισης του κοπτικού εργαλείου στην ακρίβεια ενός οδοντωτού τροχού είναι το κύριο θέμα που καλούμαστε να διερευνήσουμε, επειδή υπάρχει η διαφοροποίηση στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Επίσης, επειδή η μετατόπιση συμβαίνει μέχρι κάποια καθορισμένη τιμή, καλούμαστε να διερευνήσουμε αν η επίδραση της εκτείνεται σε όλο το εύρος των τιμών που αυτή λαμβάνει και τον τρόπο που μεταβάλλεται. Για το λόγο αυτό, διεξάγουμε πείραμα με σκοπό τη διαπίστωση της επίδρασης της μετατόπισης στην ακρίβεια των τροχών, καθώς και τη διατύπωση εμπειρικών σχέσεων της μετατόπισης και των σφαλμάτων από τα πειραματικά δεδομένα, αν όντως παρατηρηθεί η ύπαρξη κάποιας τέτοιας σχέσεως.

Για τους σκοπούς του πειράματος, χρησιμοποιούνται συνολικά δώδεκα οδοντωτοί τροχοί, τριών διαφορετικών μεγεθών οδοντώσεως. Διαθέτουμε τους κανονικούς οδοντωτούς τροχούς για κάθε μέγεθος οδόντωσης και τους αντίστοιχους μετατοπισμένους για τρεις διαφορετικές τιμές της μετατόπισης, και μετρώνται τα σφάλματα κατασκευής τους για τις διάφορες τιμές της μετατόπισης. Η μέθοδος μέτρησης τους επιλέχθηκε να γίνεται με χρήση πρότυπου τροχού, για να υπάρχει αντιστοίχιση με τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Για την ανάλυση των μετρήσεων, απαιτείται γνώση της μεθόδου και σωστή επεξεργασία τους, όπως εξηγείται στο κεφάλαιο 2. Ο διατιθέμενος εξοπλισμός περιγράφεται εκτενώς στο κεφάλαιο 3, όπως επίσης και η εκτέλεση του πειράματος παράλληλα με τον οδηγό χειρισμού του εξοπλισμού. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται και η εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Τέλος, στο κεφάλαιο 4, παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα από την επεξεργασία των μετρήσεων σε κώδικα MatLab και γίνεται η ανάλυσή τους με χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS. Εξάγονται οι εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος των σφαλμάτων με τη μετατόπιση και παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

## Εισαγωγή

Η εργασία αυτή έχει ως σκοπό την πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της επιτρεπόμενης μετατόπισης του κοπτικού εργαλείου κατά την κατασκευαστική διαμόρφωση των οδοντωτών τροχών, στην ακρίβειά τους. Η μετατόπιση αυτή του κοπτικού εργαλείου συμβαίνει για να αποφευχθούν γεωμετρικές ατέλειες και να εξασφαλίζεται έτσι η ομαλή συνεργασία με άλλο τροχό.

Κατά την κοπή των τροχών εμφανίζονται σφάλματα στα επιμέρους γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους που αφορούν στη μορφή του κοπτικού εργαλείου, στην τοποθέτησή του και στη φύση της μεθόδου κοπής. Για τη μελέτη της ακρίβειας και κατ' επέκταση τον ποιοτικό έλεγχο των οδοντωτών τροχών, σημασία έχει η συνολική απόκλιση τους από τη θεωρητική τιμή και για το λόγο αυτό γίνεται υπέρθεση των σφαλμάτων που αφορούν στα επιμέρους γεωμετρικά χαρακτηριστικά, που ορίζεται ως **σύνθετο σφάλμα**.

Ο ποιοτικός έλεγχος των οδοντωτών τροχών συνίσταται στον καθορισμό συγκεκριμένων ορίων απόκλισης από τη θεωρητική τιμή των γεωμετρικών διαστάσεων τους, ώστε ανάλογα με το μέγεθος της απόκλισης να κατατάσσονται οι τροχοί σε κατηγορίες ποιότητας.

Η διεξαγωγή του ποιοτικού ελέγχου στη βιομηχανία γίνεται με στατιστική επεξεργασία κατόπιν μέτρησης ενός δείγματος από μία σειρά παραγωγής, που εξαρτάται από το μέγεθός της, το μέγεθος του δείγματος, τη μέθοδο κοπής, αλλά και τη μέθοδο μέτρησης.

Η ανάγκη για ποιοτικό έλεγχο στους οδοντωτούς τροχούς πηγάζει από τη φύση της συνεργασίας τους. Όταν δύο τροχοί βρίσκονται σε συνεργασία για τη μετάδοση κίνησης και τη μεταφορά ισχύος, επιθυμούμε η μετάδοση αυτή να γίνεται με το δυνατόν ομαλότερο τρόπο. Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, η ύπαρξη των οδόντων στους τροχούς, αιτιολογείται από αυτή την απαίτηση. Σε περιστροφή του κινητήριου τροχού κατά γωνία  $\varphi_1$ , ενώ θεωρητικά αναμένεται περιστροφή του κινούμενου τροχού κατά  $\varphi$ , ώστε  $\varphi_2 = \varphi_1 z_1 / z_2$ , όπου  $z_1$  και  $z_2$  ο αριθμός των οδόντων του κάθε τροχού αντιστοίχως, στην πράξη παρατηρείται απόκλιση από αυτή τη τιμή για τη  $\varphi_2$ , που σαφώς επηρεάζει την ομαλότητα της μετάδοσης κίνησης και ισχύος. Η διαφορά της θεωρητικά προβλεπόμενης και της πραγματικής τιμής της γωνίας  $\varphi$ ,

καλείται **σφάλμα μετάδοσης** και οφείλεται , τόσο στα σφάλματα των τροχών από την κατασκευή τους ή ακόμα και την επερχόμενη φθορά από τη λειτουργία τους, όσο και στην πιθανή παραμόρφωση των οδόντων υπό καθεστώς φόρτισης.

Έτσι ο ποιοτικός έλεγχος, η μελέτη δηλαδή της ακρίβειας των τροχών από την κατασκευή τους, συμβαίνει για να εξαχθεί ένα μέτρο της ποιότητας της μετάδοσης της κίνησης και ισχύος, του λόγου που χρησιμοποιούνται ευρύτατα τα συγκεκριμένα στοιχεία μηχανών και προτιμώνται έναντι άλλων διατάξεων στις τεχνολογικές εφαρμογές. Με απαγωγή της δυναμικής παραμέτρου και της αλλοίωσης της μορφής των κατατομών από τη λειτουργία τους, εξετάζονται τα κινηματικά χαρακτηριστικά που προσδίδονται στους τροχούς από την κοπή τους.

Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά στις προδιαγραφές κατά AGMA (American Gear Manufactures Association) σύμφωνα με τις οποίες ορίζονται κατηγορίες ποιότητας, που προκύπτουν από τα βασικά γεωμετρικά στοιχεία των οδοντωτών τροχών, όπως η διάμετρος του αρχικού τους κύκλου και το μέγεθος της οδόντωσης (module), που περιγράφονται διεξοδικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Σημαντικό στοιχείο για την αξιολόγηση των μετρήσεων αποτελεί το γεγονός ότι οι εν λόγω προδιαγραφές ισχύουν μόνο για οδοντωτούς τροχούς που έχουν κατασκευαστεί χωρίς μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου. Ο λόγος που δεν γίνεται αναφορά στους μετατοπισμένους οδοντωτούς τροχούς είναι ότι διατηρούν τα ίδια βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μη μετατοπισμένων τροχών, τη διάμετρο του αρχικού κύκλου και το module, διαφοροποιούνται όμως άλλες διαστάσεις, λειτουργικές, όπως το πάχος των οδόντων, αλλά κυρίως ο κύκλος κυλίσεως, επί του οποίου βρίσκεται το σημείο κυλίσεως, καθοριστικό για την τήρηση του βασικού νόμου της οδόντωσης, για να υπάρχει συνεργασία δύο τροχών. Μάλιστα, το σημείο κυλίσεως εξαρτάται από τον συνεργαζόμενο τροχό, άρα για κάθε εφαρμογή θα απαιτούνταν διαφορετικές προδιαγραφές. Χάριν λοιπόν της γενικότητας και για αποφυγή της εξειδίκευσης στις προδιαγραφές δεν προβλέπεται κάποια αναφορά στους μετατοπισμένους τροχούς. Εξάγεται ακόμα το συμπέρασμα ότι υπάρχει ο κίνδυνος ένταξης σε άλλη κατηγορία ποιότητας ενός μετατοπισμένου τροχού, λόγω της διαφορετικής βαθμονόμησης που οφείλεται στα διαφοροποιημένες λειτουργικές διαστάσεις του. Επειδή ο μετατοπισμένος τροχός έχει παχύτερους οδόντες στον αρχικό κύκλο σε σχέση με το μη μετατοπισμένο, μπορεί να ενταχθεί σε κάποια κατηγορία ποιότητας που να μην αντιστοιχεί στην πραγματική ποιότητά του. Ακόμη,

οι κεφαλές των οδόντων ενός μετατοπισμένου τροχού είναι λεπτότερες από αυτές του μη μετατοπισμένου, άρα είναι φανερός ο κίνδυνος ένταξης του τροχού σε κατηγορία ποιότητας που δεν αντιστοιχεί στην πραγματική, παρόλο που πολλές φορές στην πράξη γίνεται κοπή των κεφαλών των οδόντων, για λόγους αντοχής και μείωσης θορύβου.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ιδιαιτερότητες της μεθόδου μέτρησης με χρήση πρότυπου τροχού, που επιλέχθηκε λόγω της αντιστοίχισης της με τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.	Γενικά στοιχεία οδοντωτών τροχών & αρχές της συνεργασίας .....	1
1.1.	<b>Βασικός νόμος οδοντώσεως</b> .....	2
1.2.	Η εξειλιγμένη καμπύλη .....	5
1.3.	<b>Μεγέθη οδοντώσεων</b> .....	7
1.4.	<b>Κοπή οδοντώσεων</b> .....	16
	Κοπή σε φραιζομηχανή με εργαλείο μορφής (Milling cutter) .....	16
	Κοπή με οδοντωτό κανόνα (rack generation) .....	17
	Κοπή τροχών με τη μέθοδο Fellows (Gear shaper) .....	18
	Κοπή οδόντων με κοπτικό εργαλείο Hob (Hobbing) .....	19
	Κοπή οδοντώσεων με αφαίρεση υλικού (Broaching) .....	20
1.5.	<b>Διεργασίες ποιοτικής αναβάθμισης επιφανειών οδοντωτών τροχών</b> .....	23
1.6.	<b>Πρόκληση σφάλματος κατά την κοπή</b> .....	24
1.7.	<b>Κριτήρια καλής και αποδοτικής λειτουργίας μηχανισμών με οδοντωτούς τροχούς</b> .....	25
1.8.	<b>Αίτια πρόκλησης αστοχιών στις οδοντώσεις κατά τη λειτουργία τους</b> .....	26
1.9.	<b>Βλάβες οδοντωτών τροχών</b> .....	27
	Φθορά .....	28
	Πλαστική παραμόρφωση .....	29
	Κόπωση των κατατομών (Pitting) .....	29
	Θραύση οδόντος (Breakage) .....	30
1.10.	<b>Μετρήσεις και έλεγχος οδοντώσεων</b> .....	31
2.	Μέτρηση σύνθετου σφάλματος με πρότυπο τροχό .....	32
2.1.	<b>Η χρησιμότητα των μετρήσεων του σύνθετου σφάλματος</b> .....	34
2.2.	<b>Απαιτήσεις εξοπλισμού για τη μέτρηση του σύνθετου σφάλματος</b> .....	35
2.3.	<b>Πρότυποι τροχοί</b> .....	36
2.4.	<b>Μέθοδοι καθορισμού του άξονα αναφοράς</b> .....	38
2.5.	<b>Ονοματολογία βαθμού ακρίβειας πρότυπου τροχού</b> .....	41
2.6.	<b>Ρύθμιση της δύναμης του ελατηρίου</b> .....	42
2.7.	<b>Ερμηνεία των παραγόμενων γραφημάτων</b> .....	43
2.8.	<b>Σχέση μεταξύ επιτρεπόμενων σύνθετων σφαλμάτων</b> .....	45
2.9.	<b>Διαχωρισμός σύνθετου σφάλματος από- οδόντα- σε- οδόντα και εύρους καμπύλης</b> .....	46
2.10.	<b>Η σχέση μεταξύ του εύρους της καμπύλης και του σφάλματος βήματος</b> .....	49
2.11.	<b>Σύστημα ταξινόμησης της ακρίβειας μετωπικών οδοντωτών τροχών βάσει των προδιαγραφών κατά AGMA</b> .....	52
3.	Διατιθέμενος εξοπλισμός και εκτέλεση του Πειράματος .....	56
3.1.	<b>Η συσκευή Goulder Mikron 3R</b> .....	56
3.2.	<b>Πρόσθετες συσκευές παρεχόμενες από την κατασκευάστρια εταιρία</b> .....	60



3.3.	Επιπρόσθετος εξοπλισμός και ψηφιακές διατάξεις .....	61
3.4.	Διαθέσιμοι οδοντωτοί τροχοί.....	65
3.5	Διαδικασία της λήψης των μετρήσεων και εκτίμηση σφαλμάτων της συσκευής	68
3.6	Οδηγός χειρισμού του εξοπλισμού.....	70
3.7	Εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων και εύρεση αναδρομικής σχέσης σύνθετων σφαλμάτων-μετατόπισης.....	74
4.	Πειραματικά Αποτελέσματα .....	78
4.1.	Module 3.....	78
4.2.	Module 5.....	100
4.3.	Module 6.....	122
5.	Βιβλιογραφία .....	144

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1:	Τιμές ανοχών για Πρότυπους Τροχούς.....	37
Πίνακας 2-2:	Ανοχές μορφής επιφανειών αναφοράς και πρόσδεσης .....	40
Πίνακας 2-3:	Ανοχές μορφής επιφανειών πρόσδεσης .....	40
Πίνακας 2-4:	Αναγνωριστικά σημάδια Πρότυπων Τροχών .....	41
Πίνακας 2-5:	Ανοχές οδόντων για μετωπικούς και ελικοειδείς τροχούς .....	42
Πίνακας 2-6:	Ανοχές σύνθετου σφάλματος για μετωπικούς και ελικοειδείς τροχούς .....	42
Πίνακας 2-7:	Ρύθμιση της προέντασης του ελατηρίου .....	43
Πίνακας 3-1:	Ο οδηγός χειρισμού του εξοπλισμού.....	72
Πίνακας 3-2:	Η προτεινόμενη φόρμα καταγραφής .....	72
Πίνακας 4-1:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 1 (κάτω τμήμα) .....	82
Πίνακας 4-2:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 1 (μεσαίο τμήμα) .....	83
Πίνακας 4-3:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 1 (άνω τμήμα).....	83
Πίνακας 4-4:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 2 (κάτω τμήμα) .....	87
Πίνακας 4-5:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 2 (μεσαίο τμήμα) .....	88
Πίνακας 4-6:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 2 (άνω τμήμα).....	88
Πίνακας 4-7:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 3 (κάτω τμήμα) .....	92
Πίνακας 4-8:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 3 (μεσαίο τμήμα) .....	93
Πίνακας 4-9:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 3 (άνω τμήμα).....	93
Πίνακας 4-10:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 4 (κάτω τμήμα) .....	97
Πίνακας 4-11:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 4 (μεσαίο τμήμα) .....	98
Πίνακας 4-12:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 4 (άνω τμήμα).....	98
Πίνακας 4-13:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 5 (κάτω τμήμα) .....	104
Πίνακας 4-14:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 5 (μεσαίο τμήμα) .....	105
Πίνακας 4-15:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 5 (άνω τμήμα).....	105
Πίνακας 4-16:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 6 (κάτω τμήμα) .....	109
Πίνακας 4-17:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 6 (μεσαίο τμήμα) .....	110
Πίνακας 4-18:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 6 (άνω τμήμα).....	110
Πίνακας 4-19:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 7 (κάτω τμήμα) .....	114
Πίνακας 4-20:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 7 (μεσαίο τμήμα) .....	115
Πίνακας 4-21:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 7 (άνω τμήμα).....	115
Πίνακας 4-22:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 8 (κάτω τμήμα) .....	119
Πίνακας 4-23:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 8 (μεσαίο τμήμα) .....	120
Πίνακας 4-24:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 8 (άνω τμήμα).....	120
Πίνακας 4-25:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 9 (κάτω τμήμα) .....	126
Πίνακας 4-26:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 9 (μεσαίο τμήμα) .....	127
Πίνακας 4-27:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 9 (άνω τμήμα).....	127
Πίνακας 4-28:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 10 (κάτω τμήμα) .....	131
Πίνακας 4-29:	Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 10 (μεσαίο τμήμα) .....	132

Πίνακας 4-30:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 10 (άνω τμήμα).....	132
Πίνακας 4-31:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 11 (κάτω τμήμα) .....	136
Πίνακας 4-32:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 11 (μεσαίο τμήμα) .....	137
Πίνακας 4-33:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 11 (άνω τμήμα).....	137
Πίνακας 4-34:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 12 (κάτω τμήμα) .....	141
Πίνακας 4-35:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 12 (μεσαίο τμήμα) .....	142
Πίνακας 4-36:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 12 (άνω τμήμα).....	142

### ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1: Συνεργαζόμενες κατατομές .....	3
Σχήμα 1-2:Ο βασικός νόμος οδοντώσεως.....	4
Σχήμα 1-3:Η εξειλιγμένη καμπύλη.....	6
Σχήμα 1-4:Συνεργασία μετωπικών οδοντωτών τροχών με κατατομές οδόντων δι'εξειλιγμένης καμπύλης.....	7
Σχήμα 1-5:Συνεργασία μετωπικών οδοντωτών τροχών με κατατομές οδόντων δι'εξειλιγμένης καμπύλης.....	10
Σχήμα 1-6:Ελάχιστος αριθμός οδόντων .....	12
Σχήμα 1-7: Συνεργασία μετωπικών οδοντωτών τροχών με κατατομές οδόντων δι'εξειλιγμένης καμπύλης.....	14
Σχήμα 1-8: Κοπή οδόντος με εργαλείο μορφής.....	16
Σχήμα 1-9: Κοπή οδόντος με εργαλείο μορφής.....	17
Σχήμα 1-10: Κοπή τροχού με κανόνα.....	18
Σχήμα 1-11:Μέθοδος Fellows.....	19
Σχήμα 1-12:Hobbing.....	20
Σχήμα 1-13:Περιοχές αστοχίας οδοντωτού τροχού.....	28
Σχήμα 2-1:Μέθοδος 1 .....	38
Σχήμα 2-2:Μέθοδος 2 .....	39
Σχήμα 2-3:Μέθοδος 3 .....	39
Σχήμα 2-4:Καθορισμός επιφάνειας αναφοράς .....	39
Σχήμα 2-5:Υψηλής ποιότητας οδοντωτός τροχός .....	41
Σχήμα 2-6: Αποκλίσεις σε έκκεντρο οδοντωτό τροχό.....	50
Σχήμα 2-7:Οδοντωτός τροχός με μηδενική εκκεντρότητα αλλά με σημαντικό σφάλμα βήματος .....	50
Σχήμα 3-1: Η επίδραση του βαθμού επικάλυψης στο παραγόμενο γράφημα.....	70

### ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2-1: Διάγραμμα σύνθετου σφάλματος.....	32
Διάγραμμα 2-2: Διάγραμμα σύνθετου σφάλματος.....	43
Διάγραμμα 2-3:Διάγραμμα σφιχτής συνεργασίας, μικρός αριθμός οδόντων .....	44
Διάγραμμα 2-4: Διάγραμμα σφιχτής συνεργασίας, μεγάλος αριθμός οδόντων.....	45
Διάγραμμα 2-5: Διάγραμμα σφιχτής συνεργασίας, τροχού με αριθμό οδόντων 30 .....	46
Διάγραμμα 2-6: Μακροπρόθεσμη παράμετρος, τροχού με αριθμό οδόντων 30.....	47
Διάγραμμα 2-7: Βραχυπρόθεσμη παράμετρος, τροχού με αριθμό οδόντων 30 .....	47
Διάγραμμα 2-8: Διάγραμμα, τροχού με αριθμό οδόντων 12 .....	48
Διάγραμμα 2-9:Εμφάνιση μακροπρόθεσμων αποκλίσεων από οβάλ ή τριγωνικές μορφές ...	49
Διάγραμμα 2-10: Το διάγραμμα του οδοντωτού τροχού με μηδενική εκκεντρότητα αλλά με σημαντικό σφάλμα βήματος .....	51
Διάγραμμα 2-11:Διάγραμμα τροχού με μικρή εκκεντρότητα και σφάλμα βήματος.....	51
Διάγραμμα 3-1: Καταγραφή της εκκεντρότητας της ατράκτου.....	68
Διάγραμμα 4-1: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 1 (κάτω τμήμα) .	79
Διάγραμμα 4-2: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 1(κάτω τμήμα).....	79
Διάγραμμα 4-3: Το διάγραμμα 4-2 ομαλοποιημένο.....	79

Διάγραμμα 4-4: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 1 (μεσαίο τμήμα)	80
Διάγραμμα 4-5: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 1(μεσαίο τμήμα)	80
Διάγραμμα 4-6: Το διάγραμμα 4-5 ομαλοποιημένο	80
Διάγραμμα 4-7:Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 1 (άνω τμήμα)	81
Διάγραμμα 4-8:Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 1 (άνω τμήμα)	81
Διάγραμμα 4-9:Το διάγραμμα 4-8 ομαλοποιημένο	81
Διάγραμμα 4-10: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 2 (κάτω τμήμα)	84
Διάγραμμα 4-11: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 2 (κάτω τμήμα)	84
Διάγραμμα 4-12: Το διάγραμμα 4-11 ομαλοποιημένο	84
Διάγραμμα 4-13: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 2 (μεσαίο τμήμα)	85
Διάγραμμα 4-14: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 2 (μεσαίο τμήμα)	85
Διάγραμμα 4-15: Το διάγραμμα 4-14 ομαλοποιημένο	85
Διάγραμμα 4-16 Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 2 (άνω τμήμα)	86
Διάγραμμα 4-17 Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 2 (άνω τμήμα)	86
Διάγραμμα 4-18 Το διάγραμμα 4-17 ομαλοποιημένο	86
Διάγραμμα 4-19 Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 3 (κάτω τμήμα)	89
Διάγραμμα 4-20 Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 3 (κάτω τμήμα)	89
Διάγραμμα 4-21 Το διάγραμμα 4-20 ομαλοποιημένο	89
Διάγραμμα 4-22: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 3 (μεσαίο τμήμα)	90
Διάγραμμα 4-23: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 3 (μεσαίο τμήμα)	90
Διάγραμμα 4-24: Το διάγραμμα 4-23 ομαλοποιημένο	90
Διάγραμμα 4-25: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 3 (άνω τμήμα)	91
Διάγραμμα 4-26: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 3 (άνω τμήμα)	91
Διάγραμμα 4-27: Το διάγραμμα 4-26 ομαλοποιημένο	91
Διάγραμμα 4-28: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 4 (κάτω τμήμα)	94
Διάγραμμα 4-29: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 4 (κάτω τμήμα)	94
Διάγραμμα 4-30 Το διάγραμμα 4-29 ομαλοποιημένο	94
Διάγραμμα 4-31: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 4 (μεσαίο τμήμα)	95
Διάγραμμα 4-32: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 4 (μεσαίο τμήμα)	95
Διάγραμμα 4-33: Το διάγραμμα B4-32 ομαλοποιημένο	95
Διάγραμμα 4-34: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 4 (άνω τμήμα)	96
Διάγραμμα 4-35: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 4 (άνω τμήμα)	96
Διάγραμμα 4-36: Το διάγραμμα 4-35 ομαλοποιημένο	96
Διάγραμμα 4-37: Η αναδρομική σχέση ολικού σύνθετου σφάλματος-μετατόπισης για module=3	99
Διάγραμμα 4-38: Η αναδρομική σχέση σύνθετου σφάλματος από οδόντα σε οδόντα- μετατόπισης για module=3	99
Διάγραμμα 4-39: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 5 (κάτω τμήμα)	101
Διάγραμμα 4-40: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 5 (κάτω τμήμα)	101
Διάγραμμα 4-41: Το διάγραμμα 4-40 ομαλοποιημένο	101
Διάγραμμα 4-42: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 5 (μεσαίο τμήμα)	102
Διάγραμμα 4-43: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 5 (μεσαίο τμήμα)	102

Διάγραμμα 4-44: Το διάγραμμα 4-43 ομαλοποιημένο.....	102
Διάγραμμα 4-45: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 5 (άνω τμήμα)103	
Διάγραμμα 4-46: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 5 (άνω τμήμα).....	103
Διάγραμμα 4-47: Το διάγραμμα 4-46 ομαλοποιημένο.....	103
Διάγραμμα 4-48: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 6 (κάτω τμήμα).....	106
Διάγραμμα 4-49: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 6 (κάτω τμήμα).....	106
Διάγραμμα 4-50: Το διάγραμμα 4-49 ομαλοποιημένο.....	106
Διάγραμμα 4-51: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 6 (μεσαίο τμήμα).....	107
Διάγραμμα 4-52: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 6 (μεσαίο τμήμα).....	107
Διάγραμμα 4-53: Το διάγραμμα 4-52 ομαλοποιημένο.....	107
Διάγραμμα 4-54: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 6 (άνω τμήμα)108	
Διάγραμμα 4-55: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 6 (άνω τμήμα).....	108
Διάγραμμα 4-56: Το διάγραμμα 4-55 ομαλοποιημένο.....	108
Διάγραμμα 4-57: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 7 (κάτω τμήμα).....	111
Διάγραμμα 4-58: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 7 (κάτω τμήμα).....	111
Διάγραμμα 4-59: Το διάγραμμα 4-58 ομαλοποιημένο.....	111
Διάγραμμα 4-60: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 7 (μεσαίο τμήμα).....	112
Διάγραμμα 4-61: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 7 (μεσαίο τμήμα).....	112
Διάγραμμα 4-62: Το διάγραμμα 4-61 ομαλοποιημένο.....	112
Διάγραμμα 4-63: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 7 (άνω τμήμα)113	
Διάγραμμα 4-64: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 7 (άνω τμήμα).....	113
Διάγραμμα 4-65: Το διάγραμμα 4-64 ομαλοποιημένο.....	113
Διάγραμμα 4-66: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 8 (κάτω τμήμα).....	116
Διάγραμμα 4-67: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 8 (κάτω τμήμα).....	116
Διάγραμμα 4-68: Το διάγραμμα 4-67 ομαλοποιημένο.....	116
Διάγραμμα 4-69: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 8 (μεσαίο τμήμα).....	117
Διάγραμμα 4-70: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 8 (μεσαίο τμήμα).....	117
Διάγραμμα 4-71: Το διάγραμμα 4-70 ομαλοποιημένο.....	117
Διάγραμμα 4-72: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 8 (άνω τμήμα)118	
Διάγραμμα 4-73: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 8 (άνω τμήμα).....	118
Διάγραμμα 4-74: Το διάγραμμα 4-73 ομαλοποιημένο.....	118
Διάγραμμα 4-75: Η αναδρομική σχέση ολικού σύνθετου σφάλματος-μετατόπισης για module=5.....	121
Διάγραμμα 4-76: Η αναδρομική σχέση σύνθετου σφάλματος από οδόντα σε οδόντα-μετατόπισης για module=5.....	121
Διάγραμμα 4-77: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 9 (κάτω τμήμα).....	123
Διάγραμμα 4-78: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 9 (κάτω τμήμα).....	123
Διάγραμμα 4-79: Το διάγραμμα 4-78 ομαλοποιημένο.....	123
Διάγραμμα 4-80: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 9 (μεσαίο τμήμα).....	124
Διάγραμμα 4-81: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 9 (μεσαίο τμήμα).....	124

Διάγραμμα 4-82: Το διάγραμμα 4-81 ομαλοποιημένο.....	124
Διάγραμμα 4-83: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 9 (άνω τμήμα).....	125
Διάγραμμα 4-84: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 9 (άνω τμήμα).....	125
Διάγραμμα 4-85: Το διάγραμμα 4-84 ομαλοποιημένο.....	125
Διάγραμμα 4-86: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 10 (κάτω τμήμα).....	128
Διάγραμμα 4-87: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 10 (κάτω τμήμα).....	128
Διάγραμμα 4-88: Το διάγραμμα 4-87 ομαλοποιημένο.....	128
Διάγραμμα 4-89: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 10 (μεσαίο τμήμα).....	129
Διάγραμμα 4-90: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 10 (μεσαίο τμήμα).....	129
Διάγραμμα 4-91: Το διάγραμμα 4-90 ομαλοποιημένο.....	129
Διάγραμμα 4-92: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 10 (άνω τμήμα).....	130
Διάγραμμα 4-93: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 10 (άνω τμήμα).....	130
Διάγραμμα 4-94: Το διάγραμμα 4-93 ομαλοποιημένο.....	130
Διάγραμμα 4-95: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 11 (κάτω τμήμα).....	133
Διάγραμμα 4-96: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 11 (κάτω τμήμα).....	133
Διάγραμμα 4-97: Το διάγραμμα 4-97 ομαλοποιημένο.....	133
Διάγραμμα 4-98: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 11 (μεσαίο τμήμα).....	134
Διάγραμμα 4-99: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 11 (μεσαίο τμήμα).....	134
Διάγραμμα 4-100: Το διάγραμμα 4-99 ομαλοποιημένο.....	134
Διάγραμμα 4-101: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 11 (άνω τμήμα).....	135
Διάγραμμα 4-102: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 11 (άνω τμήμα).....	135
Διάγραμμα 4-103: Το διάγραμμα 4-102 ομαλοποιημένο.....	135
Διάγραμμα 4-104: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 12 (κάτω τμήμα).....	138
Διάγραμμα 4-105: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 12 (κάτω τμήμα).....	138
Διάγραμμα 4-106: Το διάγραμμα 4-105 ομαλοποιημένο.....	138
Διάγραμμα 4-107: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 12 (μεσαίο τμήμα).....	139
Διάγραμμα 4-108: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 12 (μεσαίο τμήμα).....	139
Διάγραμμα 4-109: Το διάγραμμα 4-108 ομαλοποιημένο.....	139
Διάγραμμα 4-110: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 12 (άνω τμήμα).....	140
Διάγραμμα 4-111: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 12 (άνω τμήμα).....	140
Διάγραμμα 4-112: Το διάγραμμα 4-111 ομαλοποιημένο.....	140
Διάγραμμα 4-113: Η αναδρομική σχέση ολικού σύνθετου σφάλματος-μετατόπισης για module=6.....	143
Διάγραμμα 4-114: Η αναδρομική σχέση σύνθετου σφάλματος από οδόντα σε οδόντα-μετατόπισης για module=6.....	143

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1: Ο τρόπος που εμφανίζονται τα διάφορα σφάλματα στο διάγραμμα .....	34
Εικόνα 3-1: Η συσκευή Goulde Mikron 3R .....	56
Εικόνα 3-2: Οι κύριες διαστάσεις .....	58
Εικόνα 3-3: Τα μηχανικά υποσύνολα .....	58
Εικόνα 3-4: Ηπλάκα προέκτασης .....	61
Εικόνα 3-5: Η συσκευή ελέγχου ευθυγράμμισης .....	61
Εικόνα 3-6: Ο βραχίονας ατέρμονα κοχλία .....	61
Εικόνα 3-7: Οι δίσκοι ελέγχου .....	61
Εικόνα 3-8: Σύστημα μειωτήρα ατέρμονα κοχλία -ηλεκτροκινητήρα .....	62
Εικόνα 3-9: Το χρησιμοποιούμενο inverter της OptiDrive της Invertek .....	62
Εικόνα 3-10: Σκαρίφιμα του κανόνα .....	63
Εικόνα 3-11: Η βαθμονόμηση του κανόνα .....	63
Εικόνα 3-12 Οι γενικές διαστάσεις του μετρητικού οργάνου ROD 450 .....	64
Εικόνα 3-13: Η μετρητική κάρτα IK 220 .....	64
Εικόνα 3-14: Τεχνικά δεδομένα του inverter της OptiDrive .....	65
Εικόνα 3-15: Πρότυπος Τροχός module 3 .....	66
Εικόνα 3-16: Πρότυπος Τροχός module 5 .....	66
Εικόνα 3-17: Πρότυπος Τροχός module 6 .....	66
Εικόνα 3-18: Οι υπό εξέταση τροχοί τοποθετημένοι ανά module .....	67
Εικόνα 3-19: Οι υπό εξέταση τροχοί του εργαστηρίου .....	67
Εικόνα 3-20: Ρύθμιση της προέντασης του ελατηρίου .....	73
Εικόνα 3-21: Ρύθμιση της ατράκτου καθ' ύψος .....	73
Εικόνα 3-22: Ρύθμιση στροφών .....	73
Εικόνα 4-1: Οι οδοντωτοί τροχοί με module 3, ο πρότυπος και οι υπό εξέταση .....	78
Εικόνα 4-2: Οι τροχοί σε συνεργασία .....	82
Εικόνα 4-3 : Ο τροχός 1 .....	82
Εικόνα 4-4: Ο τροχός 2 .....	87
Εικόνα 4-5: Ο τροχός 3 .....	92
Εικόνα 4-6: Ο τροχός 4 .....	97
Εικόνα 4-7: Οι οδοντωτοί τροχοί με module 5, ο πρότυπος και οι υπό εξέταση .....	100
Εικόνα 4-8 Ο τροχός 5 .....	104
Εικόνα 4-9: Ο τροχός 6 .....	109
Εικόνα 4-10: Ο τροχός 7 .....	114
Εικόνα 4-11: Ο τροχός 8 .....	119
Εικόνα 4-12: Οι οδοντωτοί τροχοί με module 6, ο πρότυπος και οι υπό εξέταση .....	122
Εικόνα 4-13: Οι τροχοί σε συνεργασία .....	126
Εικόνα 4-14: Ο τροχός 9 .....	126
Εικόνα 4-15: Ο τροχός 10 .....	131
Εικόνα 4-16: Ο τροχός 11 .....	136
Εικόνα 4-17: Ο τροχός 12 .....	141

## 1. Γενικά στοιχεία οδοντωτών τροχών & αρχές της συνεργασίας

Η χρήση οδοντωτών τροχών αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές λύσεις σε εφαρμογές όπου απαιτείται μετάδοση περιστροφικής κίνησης και μεταφορά ισχύος από την άτρακτο της κινητήριας μηχανής (ηλεκτροκινητήρας, μηχανή εσωτερικής καύσης, αεριο-ατμο-υδροστρόβιλος κλπ.) στην άτρακτο της κινούμενης μηχανής (εργομηχανής). Υπάρχουν κι άλλες μηχανικές διατάξεις, όπως ιμάντες, αλυσίδες, σύνδεσμοι κλπ., καθώς και υδραυλικές-πνευματικές, κ.ά.

Οι οδοντωτοί τροχοί είναι στοιχεία μηχανών που επιτυγχάνουν μετάδοση κίνησης και μεταφορά ισχύος μέσω της κατάλληλης εμπλοκής διαδοχικών ζευγών συνεργαζόμενων οδόντων κατά την περιστροφή των τροχών γύρω από άξονες που διέρχονται από τα κέντρα τους. Οι οδόντες είναι σχηματισμοί αλληπάλληλων εσοχών και προεξοχών στην περιφέρεια ενός οδοντωτού τροχού, τέτοιες ώστε να είναι δυνατή η συνεργασία της εσοχής του ενός τροχού με την προεξοχή του συνεργαζόμενου οδοντωτού τροχού και κατασκευάζονται με διάφορα προφίλ κατατομών, όπως αυτό της εξειλιγμένης, της ορθοκυκλοειδούς, της επικυκλοειδούς, της περικυκλοειδούς και της υποκυκλοειδούς καμπύλης, ή ακόμα τόξου κύκλου, ή σπείρας. Συνηθέστερη μεταξύ αυτών είναι η κατατομή εξειλιγμένης, η οποία είναι η καμπύλη εκείνη που διαγράφει ένα σημείο ευθείας κυλιόμενης χωρίς ολίσθηση επί κύκλου, και θα εξεταστεί αναλυτικότερα σε επόμενη παράγραφο.

Οι άξονες περί των οποίων περιστρέφονται δυο συνεργαζόμενοι τροχοί μπορεί να είναι παράλληλοι σε δεδομένη απόσταση, τεμνόμενοι υπό γωνία, ή ασύμβατοι σε δεδομένη απόσταση και υπό γωνία. Η σχετική θέση των αξόνων είναι βασικής σημασίας διότι ανάλογα με αυτή γίνεται η επιλογή της μορφής των τροχών που θα χρησιμοποιηθούν, που μπορεί να είναι μετωπικοί με ευθεία ή ελικοειδή οδόντωση, κωνικοί ή υποειδείς, ή ελικοειδείς ασύμβατων αξόνων, ή ακόμα σύστημα ατέρμονα κοχλία-κορώνας.

Η ύπαρξη των οδόντων θεωρητικά δεν είναι απαραίτητη για τη μετάδοση περιστροφικής κίνησης, καθίσταται όμως αναγκαία για τη μεταφορά μεγάλης στρεπτικής ροπής (δηλαδή μεγάλης ισχύος), για τη μεταφορά της οποίας, δεν επαρκεί η τριβή που αναπτύσσεται στην επιφάνεια επαφής δυο συνεργαζόμενων κυλινδρικών τροχών, καθώς επίσης και λόγω της απαίτησης για σταθερή και δεδομένη σχέση

μετάδοσης της κίνησης, ανεξαρτήτως του μεγέθους της εκάστοτε μεταφερόμενης ισχύος.

Από κινηματικής πλευράς δυο συνεργαζόμενοι οδοντωτοί τροχοί είναι ισοδύναμοι με δυο κυλινδρικούς τροχούς που μπορούν να περιστραφούν γύρω από τους ίδιους άξονες με τους οδοντωτούς τροχούς, παραμένοντας σε επαφή και χωρίς να ολισθαίνουν ο ένας ως προς τον άλλον. Τότε οι περιφερειακές ταχύτητες των δυο κυλίνδρων είναι ίσες, δηλαδή αναλυτικότερα,

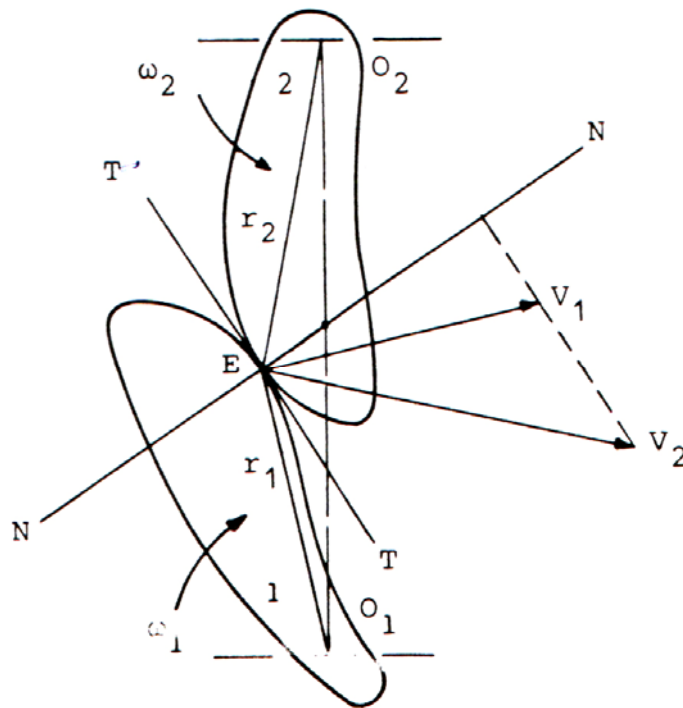
$$u_1 = u_2 \Leftrightarrow \omega_1 \cdot R_1 = \omega_2 \cdot R_2 \Leftrightarrow \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

από όπου αντιλαμβανόμαστε ότι η σχέση μετάδοσης της κίνησης είναι αντιστρόφως ανάλογη των ακτίνων των κυλίνδρων. Οι ακτίνες επομένως των κυλιόμενων επιφανειών, αν και θεωρητικό μέγεθος, αποτελούν στοιχείο μεγάλης σημασίας για τους οδοντωτούς τροχούς. Σε έναν οδοντωτό τροχό μετωπικής οδόντωσης η τομή της κυλινδρικής επιφάνειας αυτής με το επίπεδο περιστροφής αποτελεί τον αρχικό κύκλο, και έτσι κάθε οδοντωτός τροχός χαρακτηρίζεται μεταξύ άλλων και από την ακτίνα του αρχικού κύκλου του. Σε μη κανονικές οδοντώσεις, όπως είναι οι μετατοπισμένες οδοντώσεις, ορίζεται ο κύκλος κύλισης, όταν ο τροχός ανήκει σε βαθμίδα, δηλαδή σε ζεύγος συνεργαζόμενων οδοντωτών τροχών.

### 1.1. Βασικός νόμος οδοντώσεως

Οι συνεργαζόμενες κατατομές 1 και 2 του σχήματος που ακολουθεί, εφάπτονται σε κάποια χρονική στιγμή στο σημείο E και περιστρέφονται η μεν 1 δεξιόστροφα με γωνιακή ταχύτητα  $\omega_1$ , η δε 2 αριστερόστροφα με γωνιακή ταχύτητα  $\omega_2$ . Συνεπώς το σημείο επαφής E θεωρούμενο ως σημείο της κατατομής 1 θα έχει περιφερειακή ταχύτητα  $V_1 = \omega_1 r_1$  και ως σημείο της κατατομής 2 θα έχει περιφερειακή ταχύτητα  $V_2 = \omega_2 r_2$ . Αν η T-T είναι η κοινή εφαπτομένη των κατατομών στο σημείο E και N-N η κοινή κάθετος αυτών στο ίδιο σημείο E, τότε οι προβολές  $C_1$  και  $C_2$  των  $V_1$  και  $V_2$  αντίστοιχα επί της N-N πρέπει να είναι ίσες, ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή και χωρίς ολίσθηση κύλιση των αρχικών κύκλων των κατατομών.





Σχήμα 1-1: Συνεργαζόμενες κατατομές

Πρέπει να ισχύει η συνθήκη  $C_1=C_2=C$ , για να αποφευχθούν είτε η απομάκρυνση των κατατομών, αν ισχύει  $C_1 < C_2$ , είτε η εισχώρηση της κατατομής από το σκληρότερο υλικό εντός της κατατομής από το μαλακότερο υλικό, σε περίπτωση που θα ισχύει  $C_1 > C_2$ . Από τη συνθήκη ισότητας και όπως φαίνεται από το σχήμα που ακολουθεί, προκύπτει:

$$C = V_1 \cdot \sigma \nu \chi = \frac{g_1}{R_1} \cdot V_1 = V_2 \cdot \sigma \nu \psi = \frac{g_2}{R_2} \cdot V_2$$

από την οποία συνεπάγεται:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{g_1}{g_2}$$

όμως επειδή  $V_1 = \omega_1 r_1$  και  $V_2 = \omega_2 r_2$ :

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{g_1}{g_2}$$

Εάν η κοινή κάθετος N-N των κατατομών στο σημείο επαφής E τέμνει την διάκεντρο  $O_1 O_2$  στο σημείο C', τότε από την ομοιότητα των τριγώνων  $KC'O_1$  και  $LC'O_2$  θα είναι:



ομοιόμορφη μετάδοση κίνησης και μεταφορά ισχύος από τον κινητήριο στον κινούμενο οδοντωτό τροχό, χωρίς ολίσθηση των αρχικών κύκλων, η οποία θα προκαλούσε ανομοιομορφία της μεταδιδόμενης κίνησης και δημιουργία αδρανειακών δυνάμεων επί των οδόντων.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να επισημάνουμε πως η ανυπαρξία ολίσθησης των αρχικών κύκλων δεν συνεπάγεται την ανυπαρξία ολίσθησης των κατατομών μεταξύ τους σε όλα τα σημεία επαφής, εκτός βέβαια από την περίπτωση που η επαφή των κατατομών γίνεται στο σημείο κυλίσεως.

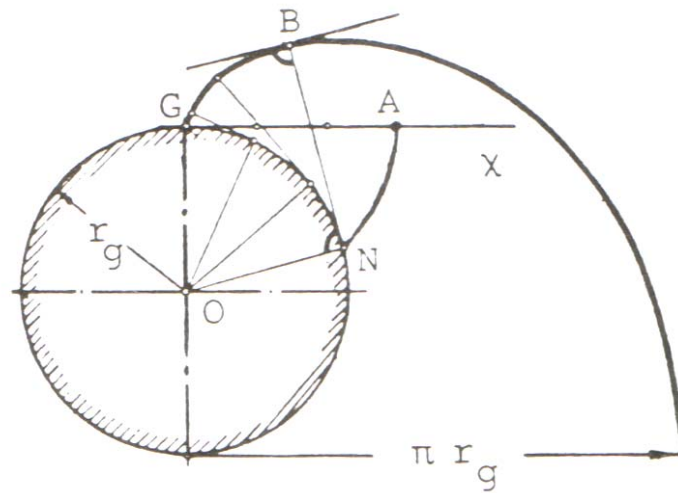
Επιπλέον πρέπει να διευκρινίσουμε ότι τα παραπάνω αναφέρονται σε κανονικές οδοντώσεις, στις οποίες οι αρχικοί κύκλοι ταυτίζονται με τους αντίστοιχους κύκλους κυλίσεως. Στην περίπτωση των μη κανονικών οδοντώσεων που ο αρχικός κύκλος ενός οδοντωτού τροχού διαφέρει από τον κύκλο κυλίσεως του με τον συνεργαζόμενο οδοντωτό τροχό, για να ισχύει ο βασικός νόμος της οδόντωσης, θα πρέπει η κοινή κάθετος N-N των κατατομών να διέρχεται από το σημείο επαφής των κύκλων κυλίσεως.

Με βάση το νόμο αυτό και με δεδομένη τη γεωμετρία της μίας κατατομής, αποδεικνύεται ότι μπορεί να βρεθεί η γεωμετρία της άλλης κατατομής, με γραφική (κατασκευή Reulaux) ή αναλυτική μέθοδο. Οι κατατομές αυτές λέγονται **συνεργαζόμενες** με την έννοια ότι κατά τη συνεργασία τους ακολουθούν το βασικό νόμο της οδόντωσης. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στο γεγονός ότι το τμήμα επαφών των συνεργαζόμενων κατατομών, δηλαδή ο γεωμετρικός τόπος των σημείων επαφής των εργαζόμενων πλευρών των οδόντων, ορίζεται μονοσήμαντα (γενικευμένη θεωρία οδοντώσεως).

## 1.2. Η εξηλιγμένη καμπύλη

Η εξηλιγμένη καμπύλη προκύπτει από την τροχιά που διαγράφει ένα σημείο ευθείας γραμμής, όταν αυτή κυλιέται χωρίς ολίσθηση επί της περιφέρειας κύκλου, τον οποίο αποκαλούμε βασικό (O,rg).

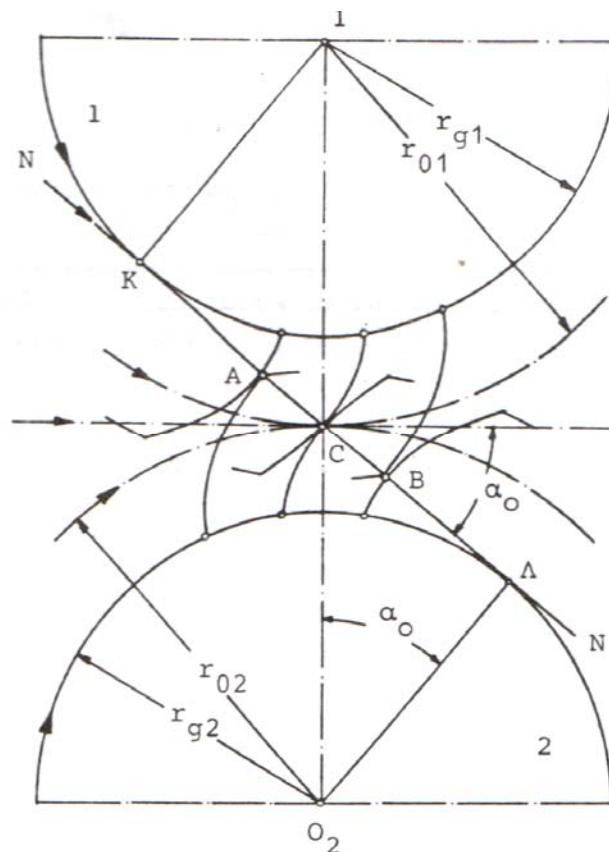
Όπως προκύπτει από το σχήμα που ακολουθεί, το σημείο G διαγράφει την εξηλιγμένη GB ενώ ταυτόχρονα το σημείο A διαγράφει την εξηλιγμένη AN. Προφανώς τα μήκη GB και AN είναι ίσα μεταξύ τους, ενώ τα GA και BN είναι ίσα με το μήκος του τόξου GN.



Σχήμα 1-3: Η εξειλιγμένη καμπύλη

Εφόσον η  $BN$  είναι η νέα θέση της κυλιόμενης ευθείας  $GA$  και εφάπτεται στην περιφέρεια του βασικού κύκλου, προκύπτει ότι είναι ταυτόχρονα και η ακτίνα καμπυλότητας της εξειλιγμένης στη θέση  $B$ . Δηλαδή η  $BN$  είναι κάθετη στην εξειλιγμένη στο σημείο  $B$  και συνεπώς είναι η κάθετη ευθεία  $N-N$  του επόμενου σχήματος, του βασικού νόμου της οδόντωσης, και διέρχεται από το σημείο κύλισης των δυο συνεργαζόμενων κατατομών.

Προκύπτει, επομένως το συμπέρασμα ότι η τροχιά επαφών των κατατομών με προφίλ εξειλιγμένης δυο συνεργαζόμενων οδοντωτών τροχών, που είναι ευθεία γραμμή, εφάπτεται εσωτερικά των βασικών κύκλων των δυο τροχών.



Σχήμα 1-4 Συνεργασία μετωπικών οδοντωτών τροχών με κατατομές οδόντων δι' εξειλιγμένης καμπύλης

### 1.3. Μεγέθη οδοντώσεων

Για οδοντωτό τροχό, κανονικής μετωπικής τομής με προφίλ εξειλιγμένης, αριθμού οδόντων  $z$ , ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη

- Το βήμα στον αρχικό κύκλο, δηλαδή το μήκος τόξου του αρχικού κύκλου που περιλαμβάνεται μεταξύ δυο όμοιων διαδοχικών κατατομών, θα είναι

$$\pi \cdot d_0 = z \cdot t_0 \Leftrightarrow t_0 = \pi \cdot \frac{d_0}{z}$$

όπου  $2r_0$  είναι η ακτίνα του αρχικού κύκλου.

- Το μέτρο της οδόντωσης ή module, είναι το μέγεθος:

$$m = \frac{t_0}{\pi}$$

Το module είναι γεωμετρικό μέγεθος και λαμβάνει τυποποιημένες τιμές.

- Η συσχέτιση διαμέτρου στον αρχικό κύκλο και αριθμού οδόντων γίνεται μέσω του module ως εξής:

$$d_0 = m \cdot z$$

Σε τυποποιημένες οδοντώσεις το ύψος κεφαλής  $h_k$  ισούται με  $1 \cdot m$  ενώ το ύψος ποδός  $h_f$  λαμβάνεται συνήθως ίσο με  $(1,25-1,30)m$ , ώστε να υπάρχει ακτινική χάρη, για λειτουργικούς λόγους.

- Το εργαζόμενο ύψος οδόντος είναι ίσο με  $2 \cdot m$ .

Έτσι η διάμετρος κύκλου κεφαλής  $d_k$  είναι

$$d_k = (z + 2) \cdot m$$

και η διάμετρος κύκλου ποδός  $d_f$  είναι

$$d_f = (z - 2,5) \cdot m$$

Η απόσταση των αξόνων δυο συνεργαζόμενων τροχών, που προφανώς θα έχουν ίδιο βήμα και module, αν  $z_1$  και  $z_2$  είναι οι αριθμοί των οδόντων τους και αυτοί είναι ευθείς, βρίσκεται από τη σχέση:

$$a_{12} = r_{01} + r_{02} = (z_1 + z_2) \cdot \frac{m}{2}$$

Που αλλιώς γράφεται:

$$a_{12} = r_{01} + r_{02} = (1 + i_{12}) \cdot \frac{m \cdot Z_1}{2}$$

όπου το μέγεθος  $i_{12}$  είναι:

$$i_{12} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_{02}}{d_{01}}$$

η σχέση μετάδοσης της βαθμίδας.

Η γωνία επαφής, που είναι η οξεία γωνία μεταξύ της γραμμής ενέργειας και της κοινής εφαπτομένης των αρχικών κύκλων στο σημείο κύλισης (αναφερόμαστε σε κανονικές οδοντώσεις), στις οδοντώσεις με προφίλ εξειλιγμένης παραμένει σταθερή και λέγεται **γωνία εξειλιγμένης**. Λαμβάνεται ίση με  $20$  ή ακόμη και  $25$ , ενώ παλαιότερα αλλά ακόμα και σήμερα στο αγγλοσαξονικό σύστημα, τη συναντάμε με τιμή  $14,5$ .

Ο βαθμός επικάλυψης ή διάρκεια επαφής  $\varepsilon$ , είναι ο λόγος του μήκους επαφών ( $e$ ) προς το βήμα του αρχικού κύκλου ( $t$ ). Ως μήκος επαφών ορίζεται το μήκος τόξου του αρχικού κύκλου το οποίο διατρέχει η εργαζόμενη πλευρά του οδόντος ενός οδοντωτού τροχού από το πρώτο έως το τελευταίο σημείο επαφής της με τη συνεργαζόμενη πλευρά του οδόντος του άλλου τροχού.

$$\varepsilon = \frac{e_0}{t_0} = \frac{e_0 \cdot z}{\pi \cdot d}$$

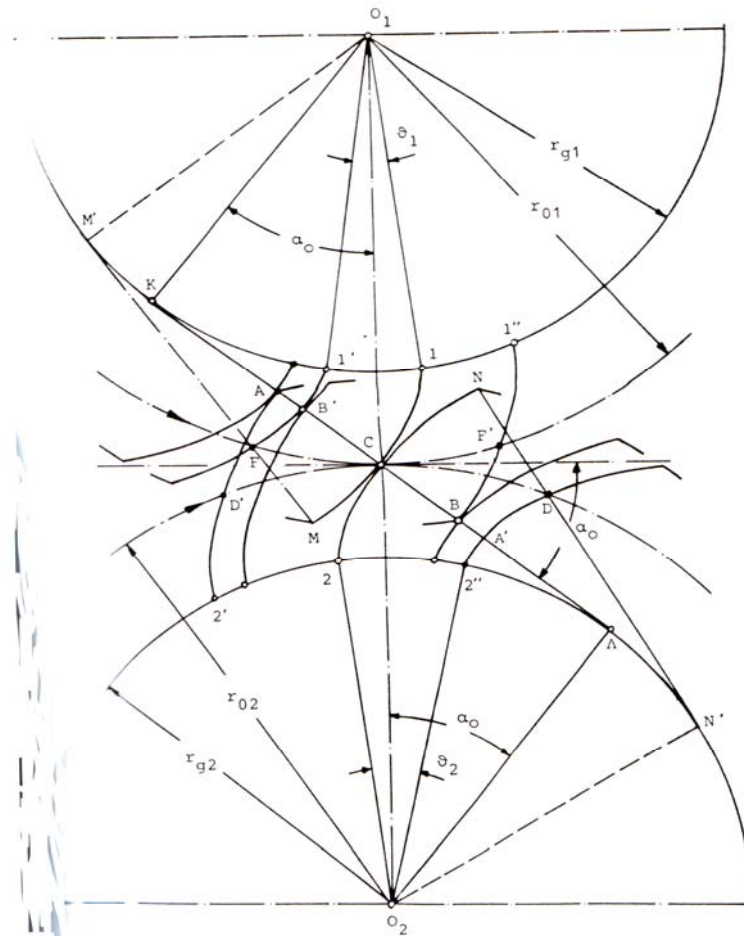
Από το σχήμα που ακολουθεί, και με χρήση των ιδιοτήτων της εξειλιγμένης, μπορούμε να συσχετίσουμε το μήκος επαφών με τη γωνία εξειλιγμένης, ως εξής:

$$\theta_1 = F\hat{O}_1C = I'\hat{O}_11 = 1\hat{O}_11''$$

$$\overline{FM} = I'\hat{1} = r_{g1}\theta_1 = r_{o1}\sigma\nu\alpha_0\theta_1$$

$$\overline{FC} = C\hat{F}' = r_{o1}\theta_1$$

$$\overline{FM} = FC\hat{\sigma}\nu\alpha_0$$



Σχήμα 1-5: Συνεργασία μετωπικών οδοντωτών τροχών με κατατομές οδόντων δι' εξειλιγμένης καμπύλης

$$\overline{FM} = FC \widehat{\sigma} \nu \alpha_0$$

$$\overline{BC} = CF' \widehat{\sigma} \nu \alpha_0$$

ομοίως αποδεικνύεται ότι:

$$\overline{AC} = D'C \widehat{\sigma} \nu \alpha_0$$

ώστε

$$e_0 = D'\widehat{C}F' = D'\widehat{C} + CF'$$

Αθροίζοντας κατά μέλη προκύπτει:

$$\overline{AC} + \overline{BC} = (D'\widehat{C} + CF') \widehat{\sigma} \nu \alpha_0$$

$$\text{ή } AB = e_0 \widehat{\sigma} \nu \alpha_0$$



τελικά:

$$\varepsilon = \frac{e_0}{t_0} = \frac{AB}{t_0 \sigma \nu \alpha_0} = \frac{AB}{t_g}$$

όπου:

$$t_g = t_0 \sigma \nu \alpha_0$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, φαίνεται ότι βαθμός επικάλυψης είναι και ο αριθμός των βημάτων του βασικού κύκλου που περιέχονται στο τμήμα επαφών AB.

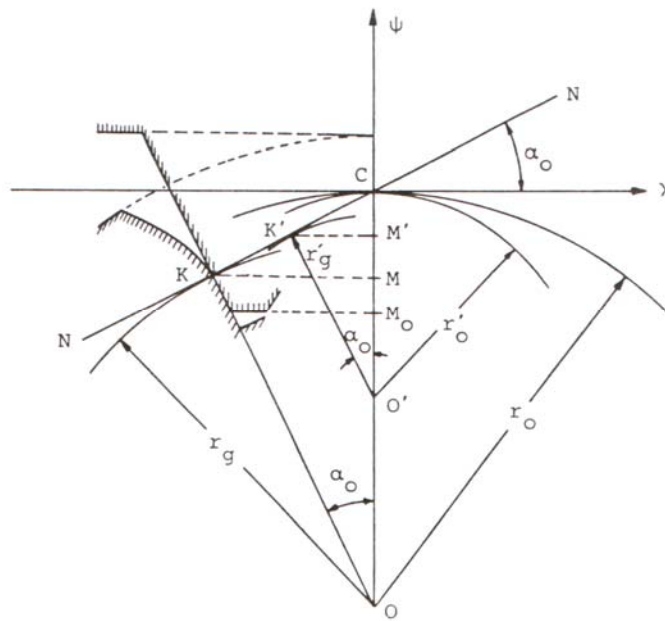
Ουσιαστικά, ο βαθμός επικάλυψης σχετίζεται με το μέσο αριθμό των συγχρόνως συνεργαζόμενων οδόντων των τροχών μιας βαθμίδας, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι βρίσκεται συνεχώς σε επαφή σταθερός αριθμός οδόντων. Με άλλα λόγια, το μήκος επαφών δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από το βήμα των τροχών στον αρχικό κύκλο. Άρα

$$\varepsilon \geq 1,0$$

Η συνθήκη αυτή μπορεί να είναι αναγκαία για την ομαλή συνεργασία δυο οδοντωτών τροχών, αλλά δεν είναι ικανή από μόνη της να την εξασφαλίσει. Για λόγους τυποποίησης, είναι απαραίτητο οι οδοντωτοί τροχοί να έχουν εναλλαξιμότητα. Αυτό σημαίνει ότι, ανεξάρτητα από τον αριθμό των οδόντων, όλοι οι οδοντωτοί τροχοί μίας οικογένειας τροχών, δηλαδή τροχών με ίδια βασικά χαρακτηριστικά (γωνία εξειλιγμένης, module) θα πρέπει να μπορούν να συνεργάζονται τόσο μεταξύ τους όσο και με τον οδοντωτό κανόνα της οικογένειάς τους, ο οποίος ορίζεται πλήρως από τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη της οικογένειας των τροχών. Η εναλλαξιμότητα εξασφαλίζεται όταν ο τροχός μπορεί να συνεργαστεί με τον κανόνα κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο τροχός να συνεργάζεται με οποιαδήποτε πλευρά του με τον κανόνα, πράγμα το οποίο μπορεί να συμβαίνει μόνο όταν το τμήμα επαφών τους είναι συμμετρικό ως προς το σημείο κύλισής τους. Λόγω της μοναδικότητας του κανόνα και δεδομένου ότι αποτελεί κατά βάση το κοπτικό εργαλείο όλων των τροχών της οικογένειάς του, γίνεται φανερός ο λόγος του ενδιαφέροντος των μελετητών και κατασκευαστών οδοντωτών τροχών για αυτόν.

Μελετώντας τις συνθήκες κοπής, λοιπόν, από τον κανόνα, μπορούμε να διακρίνουμε το οριακό σημείο K, το οποίο είναι τέτοιο ώστε κατά την KCN ο κανόνας έρχεται σε επαφή με την εξειλιγμένη κατατομή του οδόντος κατά μήκος του τμήματος επαφών, σε κάθε σημείο του οποίου ισχύει ο βασικός νόμος της οδόντωσης. Για ακτίνα μικρότερη της  $r_g$  κατασκευάζεται το μεταξύ βασικού κύκλου και κύκλου

ποδός τμήμα του οδόντος που δεν είναι εξειλιγμένη, στο οποίο εξακολουθεί να ισχύει ο βασικός νόμος της οδόντωσης, το λεγόμενο τροχοειδές (fillet), το οποίο πολύ κοντά στο βασικό κύκλο είναι ακτινικό. Επομένως, για να κατασκευαστεί από τον κανόνα οδοντωτός τροχός με οδόντωση εξειλιγμένης χωρίς προβλήματα, θα πρέπει ο κανόνας να κόψει εξειλιγμένη επί της KCN μέχρι το οριακό σημείο K, που ορίζεται κάθε φορά από το βασικό κύκλο.



Σχήμα 1-6: Ελάχιστος αριθμός οδόντων

Ισχύουν τα εξής:

$$CM = h_k = 1,0 \cdot m$$

Για να έχουν οι τυποποιημένες οδοντώσεις εργαζόμενο ύψος ποδός ίσο με  $1,0 m$ , και

$$CM_0 = (1 + C) \cdot m$$

Όπου  $C$  είναι η ακτινική χάρη των κατατομών.

Από το ανωτέρω σχήμα αποδεικνύεται ότι:

$$OM = r_g \sin \alpha_0 = r_o \sin^2 \alpha_0 = r_o - r_o \eta \mu^2 \alpha$$

Και

$$OM = r_o - CM = r_o - 1,0 \cdot m$$

Από τις οποίες προκύπτει:

$$m = r_0 \cdot \eta \mu^2 \alpha_0$$

Από την τελευταία σχέση συμπεραίνουμε ότι με το δεδομένο κανόνα (δεδομένη γωνία εξειλιγμένης και module), ο τροχός που θα κατασκευαστεί για το συγκεκριμένο οριακό σημείο K, θα πρέπει να έχει ακτίνα αρχικού κύκλου την  $r_0$ , που είναι η μικρότερη δυνατή. Κι αυτό γιατί αν η ακτίνα ήταν μικρότερη από την  $r_0$ , έστω  $r_0'$ , θα αναφερόμασταν σε κύκλο με κέντρο το  $O'$ , ο οποίος όμως δέχεται εξειλιγμένη μέχρι την περιφέρεια του βασικού του κύκλου, δηλαδή μέχρι το σημείο  $K'$  του τμήματος επαφών. Έτσι ο κανόνας θα αφαιρούσε υλικό κάτω από το σημείο  $K'$ , που είναι η αρχή δημιουργίας **υποκοπών** στον τροχό ακτίνας  $r_0'$ .

Επομένως, θα πρέπει:

$$r_0 \geq r_{0\min} = \frac{m}{\eta \mu^2 \alpha_0}$$

Και επειδή:

$$r_0 = \frac{Z \cdot m}{2} \quad r_{0,\min} = \frac{Z_{\min} \cdot m}{2}$$

Προκύπτει:

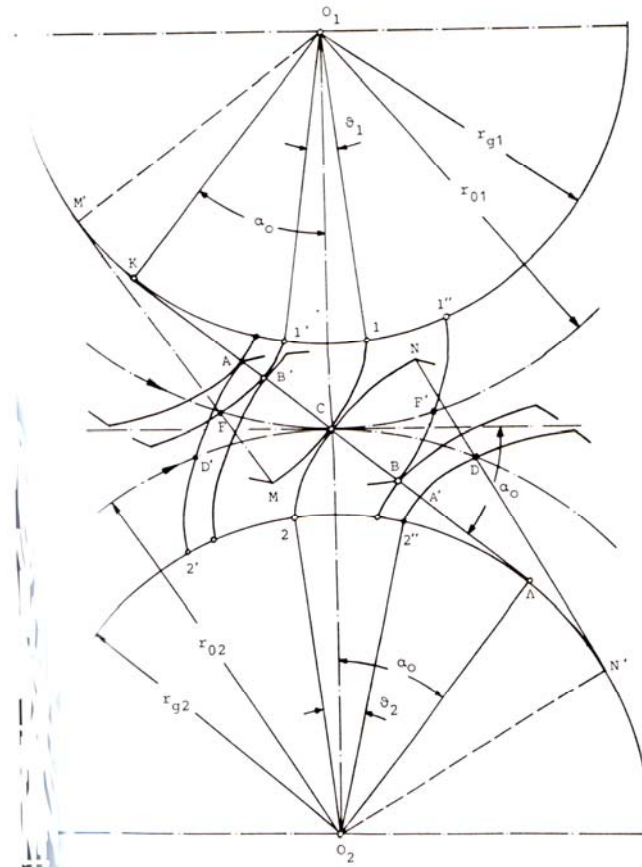
$$Z \geq Z_{\min} = \frac{2}{\eta \mu^2 \alpha_0}$$

Ο αριθμός οδόντων  $Z_{\min}$  είναι ο **ελάχιστος αριθμός οδόντων** σε κανονικό οδοντωτό τροχό.

Κατά την κατασκευή τροχού με  $Z < Z_{\min}$ , δηλαδή τροχού με κέντρο το  $O'$  και ακτίνα την  $r_0'$ , εμφανίζονται υποκοπές στους οδόντες του τροχού αυτού, που ονομάζονται **υποκοπές κατασκευής** (undercutting), και έχουν ως αποτέλεσμα την ελάττωση του πάχους των οδόντων στον πόδα, το οποίο σημαίνει μείωση της αντοχής του τροχού και μείωση του βαθμού επικάλυψης μίας βαθμίδας συνεργαζόμενων τροχών.

Για την αποφυγή των υποκοπών κατασκευής, ο κανόνας μετατοπίζεται παράλληλα προς την αρχική του θέση, δηλαδή απομακρύνεται από το κέντρο  $O'$  του τροχού κατά απόσταση  $\chi m$ , όπου  $m$  είναι το module και  $\chi$  είναι θετικός αριθμός που αντιπροσωπεύει τη θετική (προς τα έξω) μετατόπιση του κανόνα, ως ποσοστό του module, και άρα των οδόντων του τροχού. Ο τροχός που προκύπτει με μετατόπιση

του κανόνα λέγεται μετατοπισμένος τροχός, ή οδοντωτός τροχός με μετατοπισμένους οδόντες.



**Σχήμα 1-7:** Συνεργασία μετωπικών οδοντωτών τροχών με κατατομές οδόντων δι'έξειλιγμένης καμπύλης

Πέραν όμως των υποκοπών κατασκευής, υπάρχουν και οι **υποκοπές λειτουργίας** (interference) που δημιουργούνται από το συνεργαζόμενο τροχό και έχουν τις ίδιες αρνητικές επιπτώσεις με αυτές των υποκοπών κατασκευής. Για να εξασφαλιστεί επομένως η μη ύπαρξη των υποκοπών λειτουργίας και στους δυο τροχούς κατά τη συνεργασία τους, θα πρέπει βάσει του προηγούμενου σχήματος

$$ΚΛ = ΚC + CΛ = (r_{01} + r_{02}) \cdot \eta \mu \alpha_0$$

$$ΚΟ_1 = r_{g1} = r_{01} \cdot \sigma \nu \nu \alpha_0$$

$$ΛΟ_2 = r_{g2} = r_{02} \cdot \sigma \nu \nu \alpha$$

Ωστε ο κύκλος κεφαλής του τροχού 1 να έχει ακτίνα μικρότερη ή το πολύ ίση με την απόσταση των σημείων Λ και Ο1, οπότε η κεφαλή του τροχού 1 δεν δημιουργεί υποκοπές στον πόδα του τροχού 2, ενώ ταυτόχρονα ο κύκλος κεφαλής του τροχού 2 πρέπει να έχει ακτίνα μικρότερη απόσταση των σημείων Κ και Ο2, για να μη δημιουργεί υποκοπές στον πόδα του τροχού 1. Οι δυο πρώτες σχέσεις, βάσει των υπολοίπων, παίρνουν τη μορφή

$$r_{k1} \leq \left[ (r_{o1} + r_{o2})^2 \cdot \eta \mu^2 \alpha + r_{o1}^2 \cdot \sigma \nu^2 \alpha_0 \right]^{1/2}$$

$$r_{k2} \leq \left[ (r_{o1} + r_{o2})^2 \cdot \eta \mu^2 \alpha + r_{o2}^2 \cdot \sigma \nu^2 \alpha_0 \right]^{1/2}$$

Έτσι εξασφαλίζεται η μη ύπαρξη των υποκοπών λειτουργίας και στους δυο τροχούς κατά τη συνεργασία τους.

Τελικά, για την ομαλή συνεργασία δυο οδοντωτών, θα πρέπει όπως έχει ήδη αναφερθεί ο βαθμός επικάλυψης να είναι μεγαλύτερος ή το πολύ ίσος με τη μονάδα, και οι συνεργαζόμενοι τροχοί δεν πρέπει να εμφανίζουν υποκοπές κατασκευής, που δημιουργούνται κατά την κατασκευή των τροχών από τον κανόνα αν ο τροχός έχει αριθμό οδόντων μικρότερο από τον ελάχιστο αριθμό  $Z_{\min}$ , δηλαδή θα πρέπει

$$\varepsilon \geq 1,0 \quad (\text{θεωρητική τιμή})$$

Ενώ για λειτουργικούς λόγους (ομαλή μετάδοση κίνησης και παραλαβή φορτίων) θα πρέπει να είναι

$$\varepsilon > 1,3$$

επιπλέον,

$$Z_1 \geq Z_{\min}$$

και

$$Z_2 \geq Z_{\min}$$

Αυτές οι συνθήκες αποτελούν τις **ικανές και αναγκαίες συνθήκες ομαλής συνεργασίας** δυο κανονικών οδοντωτών τροχών, οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί με τον ίδιο κανόνα.

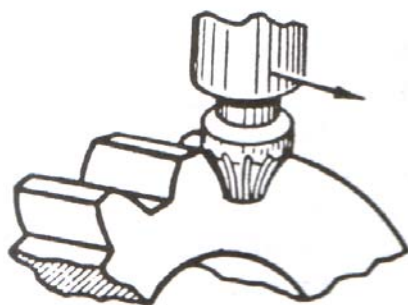
#### 1.4. Κοπή οδοντώσεων

Εφόσον ασχολούμαστε με τον ποιοτικό έλεγχο των οδοντωτών τροχών, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε στους τρόπους κατασκευής τους και τα διάφορα σφάλματα που προκαλούνται κατά την κοπή.

Οι οδοντωτοί τροχοί που είναι κατάλληλοι για μετάδοση κίνησης και μεταφορά ισχύος σε μηχανισμούς υψηλών απαιτήσεων κατασκευάζονται με έναν από τους ακόλουθους τρόπους.

#### Κοπή σε φραιζομηχανή με εργαλείο μορφής (Milling cutter)

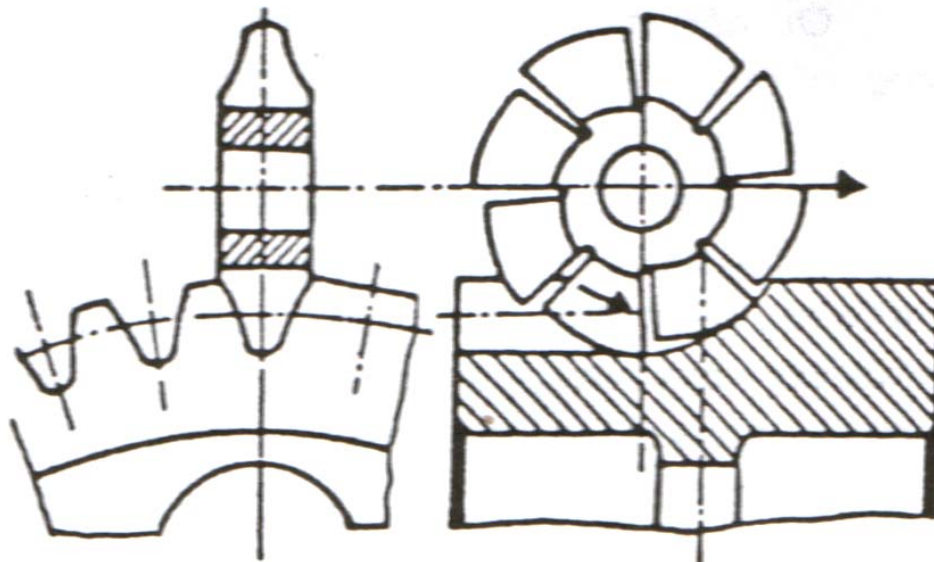
Για κοπή οδοντώσεων με αυτή τη μέθοδο απαιτείται κατάλληλο εργαλείο για συγκεκριμένη κατατομή οδόντων. Το εργαλείο αυτό έχει τη μορφή διακένου μεταξύ των οδόντων και χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει το υλικό μεταξύ των υπό κατασκευή οδόντων. Με τη μέθοδο αυτή κατασκευάζεται κάθε φορά ένα διάκενο και για να κατασκευαστεί το επόμενο διάκενο, ο υπό κατασκευή τροχός περιστρέφεται κατά  $2\pi/z$ , όπου  $z$  ο αριθμός των οδόντων που θα κατασκευαστούν.



Σχήμα 1-8: Κοπή οδόντος με εργαλείο μορφής

Είναι φανερό ότι το κάθε κοπτικό εργαλείο είναι ικανό να κατασκευάσει μόνο ενός ζευγους  $m$  και  $z$  τροχό. Όμως μια τόσο περιορισμένη χρήση του εργαλείου είναι τελείως αντισυμβατική, γι' αυτό από κάθε τέτοιο εργαλείο κατασκευάζονται οκτώ έως δέκα διαφορετικοί τροχοί ίδιου module αλλά διαφορετικών αριθμών οδόντων  $z$ .

Φυσικά, από τους τροχούς της σειράς αυτής μόνο για μία τιμή του  $z$  επιτυγχάνεται ακριβής κατασκευή, ενώ για τις υπόλοιπες τιμές του  $z$  οι τροχοί που παράγονται δεν είναι ακριβείς.



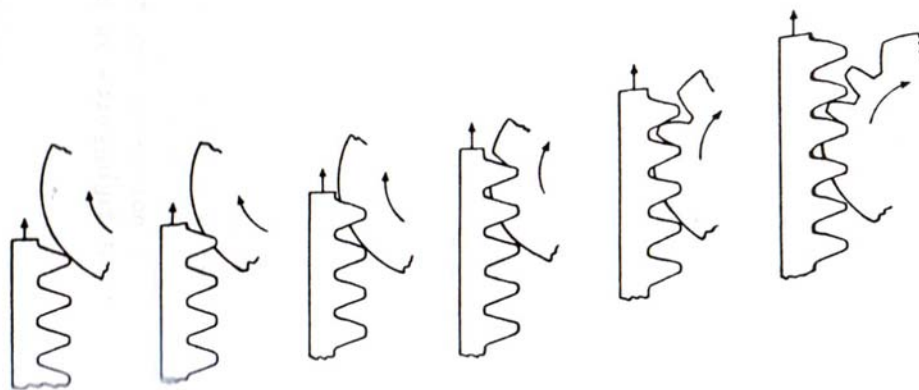
Σχήμα 1-9: Κοπή οδόντος με εργαλείο μορφής

### Κοπή με οδοντωτό κανόνα (rack generation)

Ο οδοντωτός κανόνας ουσιαστικά είναι ένας οδοντωτός τροχός με άπειρη ακτίνα και όπως ήδη αναφέρθηκε μπορεί να συνεργαστεί με όλους τους τροχούς της ίδιας οικογένειας τροχών, άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κοπτικό εργαλείο όλων αυτών των τροχών. Το υλικό του κανόνα είναι βαμμένος χάλυβας και οι ακμές του έχουν διαμορφωθεί με ιδιότητες κοπτικών εργαλείων.

Κατά τη διαδικασία της κοπής ο κανόνας παλινδρομεί παράλληλα με τον άξονα του υπό κατασκευή τροχού και μετά από κάθε αφαίρεση υλικού, ο τροχός περιστρέφεται κατά μικρή γωνία και ο κανόνας μετατοπίζεται κατά απόσταση ίση με το τόξο που διανύθηκε επί του αρχικού κύκλου του τροχού, ώστε να γίνεται κύλιση χωρίς ολίσθηση.

Προφανώς, απαιτείται ένας μόνο κανόνας για κάθε module, οποιοσδήποτε και να είναι ο αριθμός οδόντων των τροχών που κατασκευάζονται. Μόνο που αυτή η μέθοδος μειονεκτεί όσον αφορά τόσο την ταχύτητα κατασκευής των τροχών, καθώς είναι πολύ μικρή, όσο και την ανακρίβεια που προκαλείται λόγω της αναγκαίας συχνής επανατοποθέτησης του κανόνα, ο οποίος διαθέτει περιορισμένο αριθμό οδόντων.



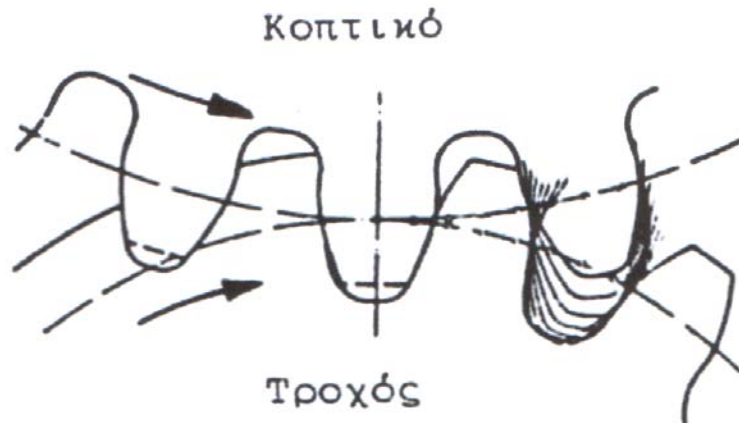
Σχήμα 1-10: Κοπή τροχού με κανόνα

### Κοπή τροχών με τη μέθοδο Fellows (Gear shaper)

Κατά τη μέθοδο Fellows η διαδικασία κοπής είναι παρόμοια με την κοπή από οδοντωτό κανόνα, με μόνη διαφορά ότι το κοπτικό εργαλείο είναι ένας οδοντωτός τροχός και όχι κανόνας. Οι δύο τροχοί περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα και ο τροχός-κοπτικό εργαλείο παλινδρομεί παράλληλα προς τον άξονά του αφαιρώντας υλικό και δημιουργώντας τα μεταξύ των οδόντων διάκενα.

Η μέθοδος αυτή παράγει τροχούς μεγαλύτερης ακρίβειας από την κοπή με κανόνα, καθώς με αυτή δεν υπάρχει η ανάγκη και συνεπώς το σφάλμα επανατοποθέτησης του κοπτικού εργαλείου. Αξίζει να σημειωθεί πως επιπλέον δίνεται η δυνατότητα κοπής ακόμα και εσωτερικής οδόντωσης, όμως το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι το παραμικρό σφάλμα της κατατομής έστω και ενός οδόντος του κοπτικού εργαλείου, μεταφέρεται απ'ευθείας στις κατατομές των αντίστοιχων οδόντων του τροχού που κατασκευάζεται.



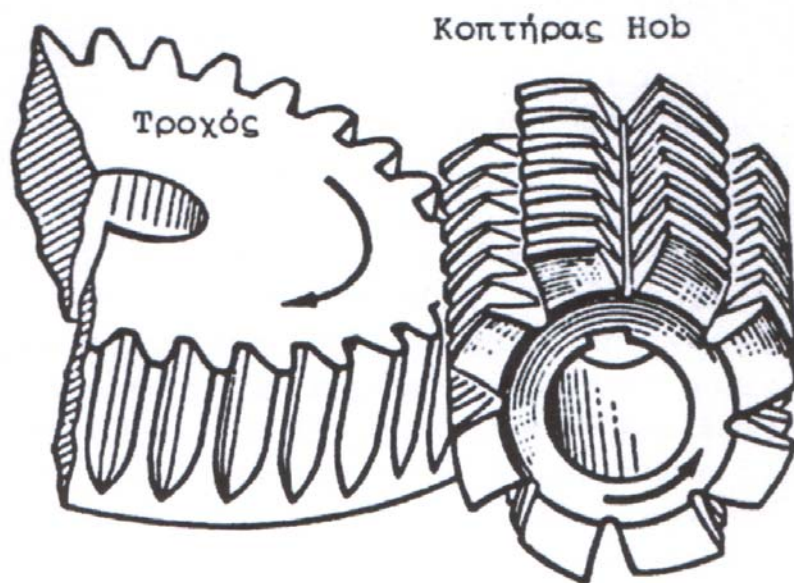


Σχήμα 1-11: Μέθοδος Fellows

### Κοπή οδόντων με κοπτικό εργαλείο Hob (Hobbing)

Κατά τη μέθοδο αυτή περιστρέφονται τόσο ο κοπτήρας Hob όσο και ο υπό κατασκευή τροχός, συνδυάζοντας έτσι την κοπή με εργαλείο μορφής, όσον αφορά την αφαίρεση υλικού, και την κοπή με κανόνα, από κινηματικής πλευράς. Η κεφαλή της έλικας του κοπτικού υποκαθιστά τη μεταφορική κίνηση του κανόνα, ενώ η μετακίνηση του κοπτήρα Hob παράλληλα προς τον άξονα του τροχού μέχρι το απαιτούμενο πλάτος του τροχού, υποκαθιστά την κίνηση του εργαλείου μορφής.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται επανατοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου, καθώς επιπλέον ότι κάθε διάκενο δημιουργείται από πολλούς οδόντες του κοπτικού και έτσι η επίδραση τυχόν ατελειών ενός από αυτούς στην κατατομή των παραγόμενων οδόντων εξομαλύνεται από τη διαδικασία κοπής από τους υπόλοιπους οδόντες του κοπτήρα.



Σχήμα 1-12:Hobbing

### Κοπή οδοντώσεων με αφαίρεση υλικού (Broaching)

Η αφαίρεση υλικού επιτυγχάνεται με κοπτικό που ωθείται ή έλκεται πάνω σε μία επιφάνεια σε γλύφانو. Συνήθως εφαρμόζεται στην παραγωγή εσωτερικών οδοντώσεων, όπου όλοι οι οδόντες κατεργάζονται ταυτόχρονα, πράγμα που αποτελεί και βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου και την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογή σε μεγάλη παραγωγή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι με τις μεθόδους Fellows και Hobbing οι οδοντώσεις που παράγονται έχουν πάχος οδόντος στην περιοχή της κεφαλής ελάχιστα μικρότερο από αυτό που προβλέπεται από τη θεωρητική ανάλυση, έχουν δηλαδή μία μικρή ανακούφιση ακμής στο πάχος κεφαλής. Τα αντίστοιχα κοπτικά εργαλεία έχουν υποστεί κάποια μετατροπή στην περιοχή της κατατομής ποδός των οδόντων τους για να μπορούν να κόψουν στον τροχό οδόντες στενότερους στην περιοχή της κεφαλής τους. Σε βαθμίδες συνεργαζόμενων οδοντωτών τροχών αυτού του είδους, τα ζεύγη οδόντων κατά την εμπλοκή τους, στο πρώτο σημείο της τροχιάς επαφών, παραλαμβάνουν το φορτίο τους πιο ομαλά. Έτσι αποφεύγεται η δημιουργία οξέων αδρανειακών φαινομένων και επιπλέον τυχόν σφάλματα κατατομών και τοποθετήσεων των αξόνων έχουν μικρότερη επίδραση στην εμφάνιση ταλαντώσεων και θορύβου.

Υπάρχουν και μέθοδοι παραγωγής οδοντωτών τροχών μεγάλων ποσοτήτων με μικρό κόστος, χαμηλότερης όμως ποιότητας. Αυτές είναι οι εξής

### **Χύτευση με πίεση**

Οι οδοντωτοί τροχοί που παράγονται με τη μέθοδο αυτή χυτεύονται υπό πίεση σε κατάλληλες μήτρες. Όπως ισχύει για όλες τις χυτεύσεις, οι μεταβολές του οδοντωτού τροχού λόγω συστολών και η ακρίβεια με την οποία είναι κατασκευασμένο το καλούπι, επηρεάζουν την ποιότητα του τροχού που παράγεται. Για τη βελτίωση της ποιότητας είναι απαραίτητες διεργασίες ποιοτικής αναβάθμισης της επιφάνειας του τροχού, που σαφώς επιδρούν αρνητικά στο κόστος παραγωγής. Για αυτές τις διεργασίες γίνεται λόγος στη συνέχεια.

### **Έλαση**

Κατά την ψυχρή έλαση το μέταλλο περνάει μέσα από διαφορετικού μεγέθους ανοίγματα και το τελικό προϊόν είναι ένας οδοντωτός τροχός πολύ μεγάλου πλάτους, από τον οποίον κόβονται πολλοί περισσότεροι ίδιου module και ίδιου αριθμού οδόντων τροχοί με ίδια ή διαφορετικά πλάτη.

Κατά τη θερμή έλαση το υλικό ωθείται, παρά έλκεται όπως στην ψυχρή έλαση, μέσα από τον extruder. Η απώλεια υλικού είναι ελάχιστη και οι παραγόμενοι τροχοί έχουν μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις τους και πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Η μέθοδος αυτή συμφέρει οικονομικά για παραγωγή οδοντωτών τροχών μικρών διαστάσεων, όπως είναι τα πινιόν, και πολλές φορές είναι αδύνατη η εφαρμογή οποιασδήποτε άλλης μεθόδου για την κατασκευή τέτοιων τροχών, ακριβώς λόγω των μικρών διαστάσεων.

### **Sintering**

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μέθοδο κονεομεταλλουργίας, κατά την οποία μεταλλική σκόνη οδηγείται υπό πίεση σε κατάλληλα καλούπια για να πάρει τη μορφή οδοντωτού τροχού. Στη συνέχεια το προϊόν αυτό τοποθετείται σε κλίβανο ώστε θερμαινόμενο να αποκτήσει αντοχή. Συνεπώς το υψηλό κόστος των εγκατεστημένων

μηχανών, για μικρή παραγωγή κρίνεται απαγορευτικό, παρόλο που η ακρίβεια της κατασκευής είναι αρκετά καλή.

### **Stamping**

Με τη μέθοδο αυτή παράγονται οδοντωτοί τροχοί από μεταλλικά φύλλα με τη χρήση πρέσσας και κατάλληλης μήτρας για την κοπή τους. Έχουν μικρό πλάτος, λόγω της φύσεως της μεθόδου, και για απαιτήσεις μεγαλύτερου πλάτους συνήθως συγκολλούνται ή τοποθετούνται μαζί πολλοί λεπτότεροι τροχοί, καθώς η εφαρμογή τους περιορίζεται σε κατασκευές μικρών έως ελαφρών φορτίων.

### **Injection molding**

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή πλαστικών οδοντωτών τροχών με μικρό κόστος και σε μεγάλες ποσότητες, και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να παράγει τροχούς σε ασυνήθεις και πολύπλοκες μορφές. Κατά τη μέθοδο αυτή πρέπει να προβλέπονται μεγάλες χάρες κατατομών, λόγω του πολύ μεγαλύτερου θερμικού συντελεστή των πλαστικών υλικών από τον αντίστοιχο συντελεστή του χάλυβα, για την ομαλή συνεργασία των τροχών σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος που πρόκειται να λειτουργήσουν. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη την αντικατάσταση μεταλλικών τροχών από πλαστικούς.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου για ελαφρά φορτιζόμενους τροχούς από πλαστικά υλικά, είναι τα εξής

Παράγονται τροχοί οποιουδήποτε μεγέθους και πολύπλοκων μορφών

Συνήθως δεν απαιτείται ποιοτική αναβάθμιση της επιφάνειάς τους

Ενώ το αρχικά εγκατεστημένο κόστος είναι υψηλό, μεγάλη παραγωγή δίνει προϊόντα χαμηλού κόστους

Απαιτούν ελάχιστη ή καθόλου λίπανση, λόγω του χαμηλού συντελεστή τριβής των υλικών αυτών

Οι ανοχές δεν έχουν μεγάλη σημασία. Επειδή η ενδοτικότητα των υλικών αυτών επιτρέπει στους τροχούς να συνεργάζονται ομαλά και χωρίς θόρυβο.

## **1.5. Διεργασίες ποιοτικής αναβάθμισης επιφανειών οδοντωτών τροχών**

Για να μπορέσει ένας οδοντωτός τροχός να εργαστεί σε υψηλές ταχύτητες και με μεγάλα φορτία, πρέπει μετά την κατασκευή του από το κοπτικό εργαλείο να υποστεί την κατάλληλη ποιοτική αναβάθμιση με την αντίστοιχη βελτιωτική διεργασία. Τέτοιες βελτιωτικές διεργασίες είναι

### **1.Shaving**

Σε αυτή τη διεργασία ο οδοντωτός τροχός τίθεται σε συνεργασία με έναν ειδικό κοπήρα, που μοιάζει με τροχό ή με κανόνα. Ο οδόντας του κοπήρα έχει ένα κοπτικό εργαλείο που κινείται παράλληλα με τον άξονα του τροχού, επιτυγχάνοντας έτσι εξομάλυνση της επιφάνειας της κατατομής των οδόντων του τροχού με αφαίρεση των τριχοειδών υπολειμμάτων μετάλλου από αυτήν. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται πριν από τη σκλήρυνση του υλικού.

### **2.Honing**

Όταν πλέον το υλικό του τροχού έχει υποστεί σκλήρυνση, ο τροχός συνεργάζεται σε υψηλές ταχύτητες με το εργαλείο hone και προς τις δύο κατευθύνσεις κίνησης. Με αυτόν τον τρόπο αφαιρούνται πολύ λεπτά σωματίδια από την επιφάνεια των οδόντων του τροχού και βελτιώνονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά της οδόντωσης.

### **3.Lapping**

Για την αφαίρεση πολύ μικρών σωματιδίων μετάλλου από την επιφάνεια των οδόντων, μετά από τη θερμική κατεργασία του υλικού, ακολουθείτε ένας από τους παρακάτω δύο τρόπους. Είτε με χρήση του κοπτικού εργαλείου για lapping, όσον αφορά τους μετωπικούς τροχούς, είτε θέτοντας σε περιστροφή δύο συνεργαζόμενους τροχούς, αν πρόκειται για κωνικούς, ελικοειδείς ασύμβατων αξόνων και υποειδείς τροχούς.

Η αφαίρεση των υπολειμμάτων μετάλλου γίνεται με μία λειαντική ουσία και βασίζεται στην ταχύτητα ολίσθησης των κατατομών, που έχει μέγιστη τιμή στην περιοχή του ποδός ενός τροχού και ελαττώνεται μέχρι να μηδενιστεί στην περιοχή του κύκλου κυλίσεως, κατά τα προβλεπόμενα από το βασικό νόμο της οδόντωσης. Στη συνέχεια, αυξάνει μέχρι μία άλλη μέγιστη τιμή στην κεφαλή του ίδιου οδόντος. Συνεπώς, η λειαντική ουσία έχει διαφορετική επίδραση στα διάφορα σημεία της κατατομής ενός οδόντος και για την περιοχή του σημείου κυλίσεως απαιτείται συμπληρωματικός τρόπος λείανσης.

#### **4.Grinding**

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για να δώσει την τελική μορφή των επιφανειών των κατατομών, μετά την απαιτούμενη θερμική κατεργασία που προσδίδει στις επιφάνειες τα αναγκαία χαρακτηριστικά αντοχής σε φθορά. Και σε αυτή τη διεργασία γίνεται χρήση λειαντικού υλικού.

#### **1.6. Πρόκληση σφάλματος κατά την κοπή**

Κατά τη διαδικασία κατασκευής ενός οδοντωτού τροχού, δηλαδή κατά την κοπή, εντοπίζονται οι εξής παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν αποκλίσεις από την επιθυμητή γεωμετρία του τροχού.

#### **Σφάλματα στην κατατομή του κοπτικού εργαλείου**

Αυτά τα σφάλματα αναπαράγουν ίσα και αντίθετα σφάλματα στις κατατομές των παραγόμενων οδόντων. Για την αντιμετώπιση των σφαλμάτων αυτών, προτιμάται η χρήση μη φθαρμένου κοπτικού στο στάδιο του φινιρίσματος, αν τέτοιο στάδιο προβλέπεται στα πλαίσια της κατασκευής του τροχού.

#### **Σφάλματα τοποθέτησης του κοπτικού εργαλείου**

Στη λανθασμένη τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου, οφείλονται

- οι ανισομέρειες στο βήμα των οδοντώσεων (πλάνισμα με οδοντωτή ράβδο)

- οι οδοντώσεις στραμμένες κατά ορισμένη γωνία σε σχέση με την προβλεπόμενη (εργαλείο σε λάθος γωνία)
- η εσφαλμένη κατατομή πάχους οδόντος (έκκεντρη ή σε λάθος απόσταση τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου).

Από τα παραπάνω σφάλματα ιδιαίτερα επιβαρυντικά ως παράγοντες πρόκλησης θορύβου είναι τα σφάλματα βήματος, και θα πρέπει να περιορίζονται καθώς πολλαπλασιάζουν το σφάλμα μετάδοσης. Επομένως, είναι φανερό ότι απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου, ενώ φθαρμένα πέραν του ορίου κοπτικά εργαλεία πρέπει να αντικαθίστανται, ή να χρησιμοποιούνται αποκλειστικά και μόνο στο στάδιο του «ξεχονδρίσματος».

Τα σφάλματα αφορούν στα εξής μεγέθη ενός οδοντωτού τροχού:

- Βήμα
- Πάχος οδόντος
- Κατατομή
- Εκκεντρότητα

Σφάλμα σε καθένα από αυτά τα μεγέθη χαρακτηρίζεται **απλό σφάλμα**, ενώ η υπέρθεσή τους καλείται **σύνθετο σφάλμα**.

### **1.7. Κριτήρια καλής και αποδοτικής λειτουργίας μηχανισμών με οδοντωτούς τροχούς**

Όπως όλοι οι μηχανισμοί, έτσι και οι αποτελούμενοι από οδοντωτούς τροχούς πρέπει να έχουν καλή και αποδοτική λειτουργία, το οποίο σημαίνει να λειτουργούν καλύτερα ή και ίδια με τις προδιαγραφές που ορίζει γι' αυτούς ο κατασκευαστής τους.

Συγκεκριμένα για τους οδοντωτούς τροχούς, υπάρχουν διάφορα κριτήρια που είναι ενδεικτικά για την καλή και αποδοτική λειτουργία τους, όπως

#### **Η απώλεια ισχύος**

Η απώλεια ισχύος που οφείλεται στην τριβή και μετατρέπεται σε θερμότητα αποτελεί καλή ένδειξη για τον τρόπο λειτουργίας των τροχών. Αυτό, γιατί μπορεί το ποσό θερμότητας να μετρηθεί και να συγκριθεί με αυτό που προυπολογίζεται για το συγκεκριμένο μηχανισμό, και πρέπει να βρεθεί ίσο ή μικρότερο.

## **Οι ταλαντώσεις**

Από τις πρώτες ενέργειες που γίνονται για τα περιστρεφόμενα μηχανικά μέρη ενός μηχανισμού, όπως είναι ένα κιβώτιο ταχυτήτων, είναι η δυναμική ζυγοστάθμιση. Ταλαντώσεις όμως πρέπει να παράγονται, και αποτελούν ένδειξη καλής λειτουργίας εφόσον βρίσκονται μέσα σε προβλεπόμενα όρια.

Ανεπιθύμητες ταλαντώσεις είναι αυτές που προκαλούνται από κακή συναρμολόγηση ή ευθυγράμμιση των διάφορων εξαρτημάτων, καθώς και από τα κατασκευαστικά σφάλματα ή λειτουργικά λάθη των κατατομών.

### **1.8. Αίτια πρόκλησης αστοχιών στις οδοντώσεις κατά τη λειτουργία τους**

Εκτός από τα σφάλματα που δημιουργούνται κατά την κοπή των οδοντώσεων, ανωμαλίες στην εργαζόμενη επιφάνεια των οδόντων μπορεί να προκληθούν και από τα παρακάτω αίτια.

#### **Υπερφόρτιση**

Κατά την υπερφόρτιση δημιουργούνται ραβδώσεις στην κατατομή, οι οποίες απογυμνώνουν τον οδόντα. Η υπερφόρτιση είναι το αποτέλεσμα των κρουστικών φορτίων που αναπτύσσονται κατά τη συνεργασία των οδοντώσεων.

#### **Υπερβολική ταχύτητα**

Είναι πολύ πιθανό σε εφαρμογές που δεν υπάρχουν συσκευές ελέγχου της ταχύτητας, οι τροχοί να εργαστούν σε ταχύτητες μεγαλύτερες του επιτρεπόμενου.

#### **Ακατάλληλη λίπανση**

Το σύστημα λίπανσης θα πρέπει να κατορθώνει να λιπαίνει όλες τις θέσεις εργασίας στις οδοντώσεις, ενώ το λιπαντικό απαιτείται να μπορεί να παραμείνει στην κατατομή μέχρι τη στιγμή της επαφής της με τη συνεργαζόμενη της. Ακόμα, το



λιπαντικό θα πρέπει να φιλτράρεται καλά για την απομάκρυνση σωματιδίων και η θερμοκρασία του να είναι τέτοια ώστε να απομακρύνει από τις συνεργαζόμενες κατατομές το παραγόμενο, λόγω τριβής, ποσό θερμότητας. Αν η λίπανση δεν είναι κατάλληλη, τότε οι συνεργαζόμενες κατατομές στιγμιαία συγκολλούνται και έπειτα απομακρύνονται, γεγονός που οδηγεί τους οδοντωτούς τροχούς σε αστοχία.

### **Ύπαρξη ξένων σωματιδίων**

Η ύπαρξη ξένων σωματιδίων που είτε προέρχεται από το λιπαντικό, είτε βρίσκονται πάνω στις κατατομές, όπως για παράδειγμα η σκουριά, δημιουργούν επαφή στερεού με στερεό, η οποία προκαλεί τοπική συγκόλληση και κατά συνέπεια βλάβη στις κατατομές.

### **Ακατάλληλη θερμική κατεργασία**

Η κατεργασία επιφανειακής σκλήρυνσης που συνήθως υφίστανται οι οδόντες, θεωρείται ακατάλληλη αν το πάχος σκλήρυνσης προκύψει ανομοιόμορφο.

### **Ακατάλληλη κατασκευή και συναρμολόγηση**

Οι κατατομές πρέπει να έχουν κατασκευαστεί με ακρίβεια, ιδιαίτερα στην περιοχή του κύκλου ποδός, αλλά και στην περιοχή του κύκλου κεφαλής για την αποφυγή πρόκλησης υποκοπών λειτουργίας κατά τη συνεργασία των τροχών. Επιπλέον για να μην προκύψουν απρόβλεπτες δυνάμεις που οδηγούν πολύ γρήγορα σε αστοχία, θα πρέπει οι τροχοί να εργάζονται στην ακριβώς προβλεπόμενη απόσταση.

### **1.9. Βλάβες οδοντωτών τροχών**

Οι παραπάνω αιτίες που προκαλούν αστοχίες στις κατατομές των οδόντων ή και συνδυασμός τους, με αποτέλεσμα να φθείρονται οι επιφάνειες τους και να γίνεται θορυβώδης η λειτουργία τους, δημιουργούν προβλήματα στους οδοντωτούς τροχούς που χαρακτηρίζονται βλάβες και χωρίζονται στις εξής τέσσερις κατηγορίες.

## Φθορά

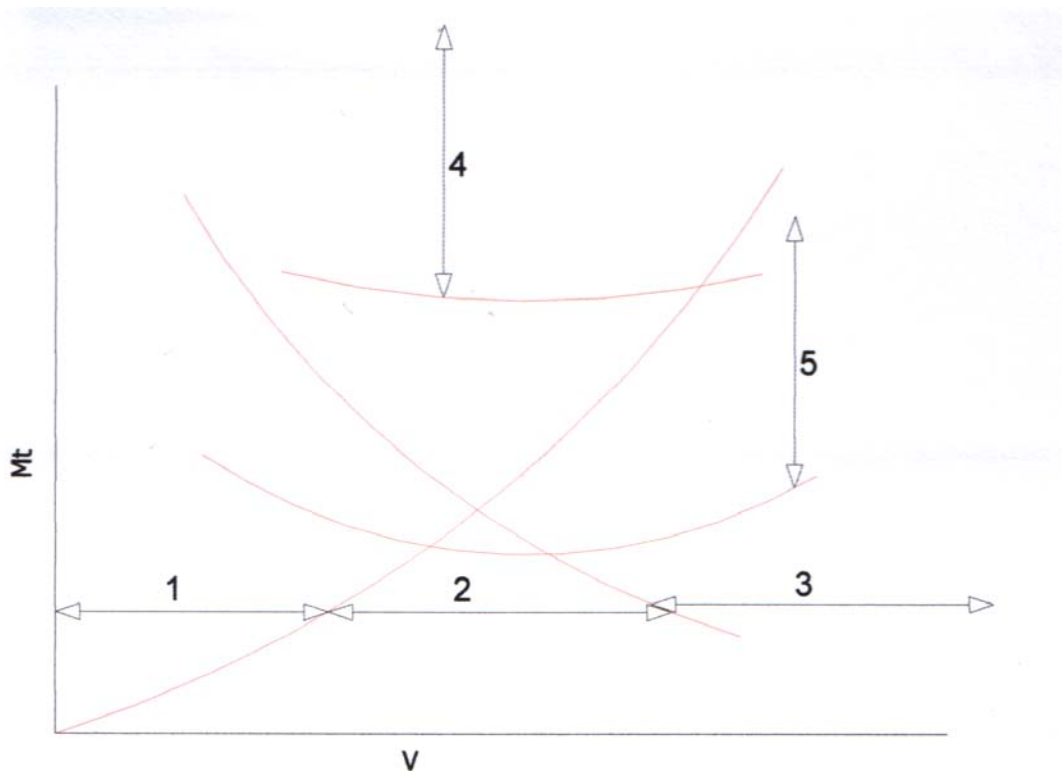
Ορίζεται ως το είδος εκείνο της καταστροφής της επιφάνειας του οδόντος, κατά το οποίο αφαιρούνται από αυτήν επιφανειακά στρώματα μετάλλου με ομοιόμορφο τρόπο. Συνήθως οφείλεται σε

Υπαρξη ξένων σωματιδίων στο λιπαντικό (abrasion)

Χημικές αντιδράσεις εξ' αιτίας αποσύνθεσης του λιπαντικού ή από πρόσθετα χημικά αντιδραστήρια (corrosive wear)

Αποτυχημένη λίπανση στη θέση επαφής των κατατομών (scoring)

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι διάφορες περιοχές στρεπτικής ροπής σε συνάρτηση με την περιφερειακή ταχύτητα του σημείου κλίσεως, όπου παρατηρούνται βλάβες. Η φθορά συναντάται ακόμα και στην περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (2) και συγκεκριμένα στις περιοχές 1, 2 και 3. Αναλυτικά



Σχήμα 1-13: Περιοχές αστοχίας οδοντωτού τροχού

### Περιοχή 1

Ο τροχός δεν έχει αρκετή ταχύτητα για να μπορεί να διατηρήσει το στρώμα λιπαντικού ως τη θέση επαφής της κατατομής.

## Περιοχή 2

Είναι η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας. Η ταχύτητα είναι αρκετή για τη διατήρηση του στρώματος λίπανσης και εφόσον το λιπαντικό είναι απαλλαγμένο από ξένα σωματίδια, η διάρκεια ζωής των τροχών είναι απεριόριστη. Αποτελεί την επιθυμητή περιοχή λειτουργίας και οι τροχοί πρέπει να σχεδιάζονται για να λειτουργήσουν σε αυτήν.

## Περιοχή 3

Σε αυτή την περιοχή έχουμε συνδυασμό υψηλών φορτίων με υψηλές ταχύτητες, που καταστρέφουν το στρώμα λιπαντικού στις θέσεις επαφής και προκαλούν ταχύτατη φθορά της επιφάνειας των κατατομών.

## Περιοχή 4

Η εμφάνιση πολύ υψηλών φορτίων σε αυτή την περιοχή δημιουργεί κίνδυνο θραύσης.

## Περιοχή 5

Εδώ εμφανίζονται πολύ υψηλά φορτία και επέρχεται κόπωση στις κατατομές.

## Πλαστική παραμόρφωση

Η πλαστική παραμόρφωση προκαλείται από υψηλά φορτία συνήθως σε μαλακά ή μεσαίας σκληρότητας υλικά. Η αστοχία ξεκινά ως scoring αλλά εξ' αιτίας της καταστροφής της επιφάνειας της κατατομής σε συνδυασμό με τα δυναμικά φορτία που αναπτύσσονται εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση στους οδόντες.

## Κόπωση των κατατομών (Pitting)

Η επιφανειακή κόπωση των κατατομών εκδηλώνεται με την παρουσία εκκοιλάνσεων, οι οποίες είναι τριών τύπων

Αρχικές εκκοιλάνσεις, οι οποίες εμφανίζονται συνήθως σε θέσεις υψηλών συγκεντρώσεων τάσεως και οφείλονται σε τοπική φυσιολογική φθορά των επιφανειών.

Καταστρεπτικές εκκοιλάνσεις, οι οποίες είναι λάκκοι πολύ μεγαλύτεροι από τους προηγούμενους και οδηγούν πάντα σε καταστροφή της κατατομής, χωρίς να δίνεται το περιθώριο διόρθωσης ή επαναφοράς της κατατομής.

Εκκοιλάνσεις που δημιουργούν σμίλευση της κατατομής, οι οποίες είναι ουσιαστικά η ίδια φθορά με την προηγούμενη και μπορούν να θεωρηθούν το επόμενο στάδιο των καταστρεπτικών εκκοιλάνσεων, αφού οι λάκκοι είναι πολύ μεγαλύτεροι, και τα σωματίδια που προκαλούνται από αυτές παρεμβάλλονται ανάμεσα στις συνεργαζόμενες κατατομές.

### **Θραύση οδόντος (Breakage)**

Κατά τη θραύση ολόκληρος οδόντας ή σημαντικό τμήμα του αποχωρίζεται από τον τροχό. Ξεκινά με ένα ελαφρό ραγίσμα στην επιφάνεια που εμποτίζεται με λιπαντικό και εξ' αιτίας της σχετικής κίνησης των επιφανειών του ραγίσματος, δημιουργείται από το λιπαντικό που βρίσκεται εκεί φθορά των τριβόμενων επιφανειών, που μετά τη θραύση αποτελεί ένδειξη του χρόνου που απαιτήθηκε για να επέλθει η θραύση.

Μπορεί να οφείλεται σε στιγμιαία υπερφόρτιση του οδόντος, η οποία δημιουργεί θραύση ινώδους μορφής, ή σε κρουστικό φορτίο ή ακόμα, και πιο πιθανό, να οφείλεται σε κόπωση που προήλθε από συνεχώς επαναλαμβανόμενες φορτίσεις άνω των ορίων δυναμικής ή χρονικής αντοχής του υλικού. Επιπλέον μπορεί να οφείλεται σε σχισμές στην περιοχή του κύκλου ποδός, σε ραγίσματα λόγω θερμικής κατεργασίας κλπ.

Κατά συνέπεια, οι διαστάσεις ενός οδοντωτού τροχού είναι πιθανό να απέχουν από τη θεωρητική τιμή τους, από το στάδιο της κατασκευής του, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επιπλέον, η αρχική του μορφή αλλοιώνεται όταν ο τροχός εργάζεται, καθώς υπόκειται σε πολλούς φθοροποιούς παράγοντες. Άρα, θα συναντώνται αποκλίσεις στις πραγματικές διαστάσεις από τις θεωρητικά

γεωμετρικές διαστάσεις ενός τροχού, που μπορούμε να εντοπίσουμε και να υπολογίσουμε, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες μετρητικές διατάξεις.

### **1.10. Μετρήσεις και έλεγχος οδοντώσεων**

Για τη μέτρηση και τον έλεγχο των οδοντώσεων χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι και ποικίλα όργανα, εργαλεία και μηχανήματα. Αναφέρονται επιγραμματικά μερικές βασικές μέθοδοι

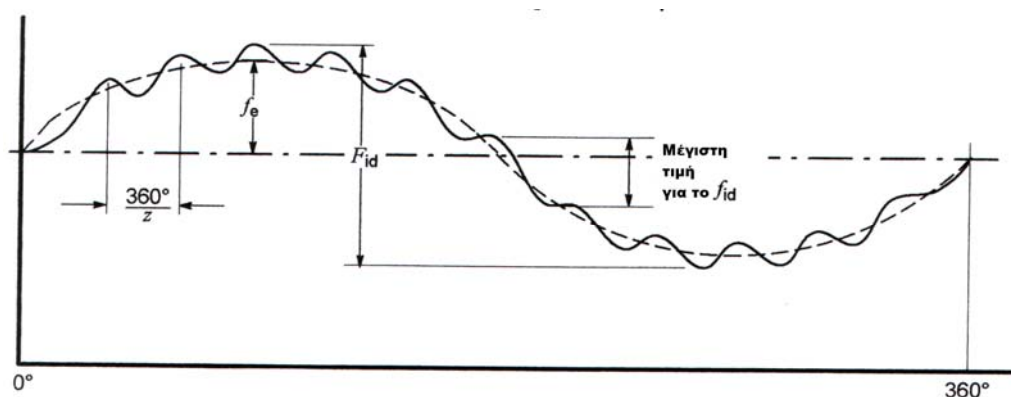
- Μέτρηση πάχους μετατοπισμένου (θετικά) οδόντα με ειδικό παχύμετρο.
- Μέτρηση πάχους οδόντα με μικρόμετρο φλάντζας.
- Μέτρηση πάχους οδόντα με τη μέθοδο των κυλίνδρων για μετωπικούς τροχούς με ευθείς οδόντες και τη μέθοδο των σφαιρών για μετωπικούς τροχούς με ελικοειδείς οδόντες.
- Μέτρηση βήματος στο βασικό κύκλο.
- Μέτρηση πάχους χορδής οδόντα με τη μέθοδο σταθερής χορδής.
- Μέτρηση πάχους χορδής οδόντα με τη μέθοδο της μέγιστης χορδής.
- Μέτρηση σύνθετου σφάλματος με πρότυπο τροχό.

## 2. Μέτρηση σύνθετου σφάλματος με πρότυπο τροχό

Υπάρχουν δύο μέθοδοι για τη μέτρηση του σύνθετου σφάλματος ενός οδοντωτού τροχού με χρήση πρότυπου τροχού. Με τη μία μέθοδο, επιτυγχάνουμε μέτρηση των ακτινικών μετατοπίσεων που συμβαίνουν επί της διακέντρου των δύο τροχών που συνεργάζονται σε σφικτή συνεργασία, λόγω της εμφάνισης απωστικής δύναμης, και με την άλλη λαμβάνουμε μέτρηση του σφάλματος μετάδοσης ως γωνιακή μετατόπιση των τροχών κατά την ονομαστική απόσταση συνεργασίας τους.

Θα ασχοληθούμε με την πρώτη μέθοδο, κατά την οποία ο πρότυπος και ο υπό εξέταση τροχός βρίσκονται σε σφικτή συνεργασία. Οι μετρήσεις λαμβάνονται με κατάλληλη συσκευή στην οποία το ζεύγος των τροχών εφαρμόζεται με τον έναν τροχό να εδράζεται σε σταθερή θέση και με τον άλλο σε θέση επί φορείου, που δύναται να μετακινηθεί και διαθέτει ελατήριο που ρυθμίζεται ώστε οι δύο τροχοί να διατηρούν τη σφικτή συνεργασία τους κατά την ακτινική διεύθυνση. Οι μεταβολές επί της διακέντρου, που συμβαίνουν καθώς οι τροχοί περιστρέφονται, καταγράφονται είτε αναλογικά με τη χρήση μετρητικού ρολογιού και γραφίδας σε μιλιμετρέ χαρτί, είτε ηλεκτρονικά με την κατάλληλη ψηφιακή διάταξη, οπότε και το σφάλμα της μέτρησης περιορίζεται σημαντικά.

Τα μετρούμενα μεγέθη είναι το σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα και το ολικό σύνθετο σφάλμα. Το ολικό σύνθετο σφάλμα  $F_{id}$ , του υπό εξέταση τροχού, είναι ίσο προς τη μέγιστη μεταβολή της απόστασης σφικτής συνεργασίας κατά τη διάρκεια μίας περιστροφής, ενώ το σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα  $f_{\theta}$ , είναι η μεταβολή της απόστασης των κέντρων των τροχών σε περιστροφή που αντιστοιχεί σε ένα βήμα, ώσπου να πάρει δηλαδή ο ένας οδόντας τη θέση του προηγούμενού του.



Διάγραμμα 2-1: Διάγραμμα σύνθετου σφάλματος

Επίσης υπάρχει η δυνατότητα, σε ορισμένες περιπτώσεις να μετρηθούν το λειτουργικό πάχος οδόντος και η εκκεντρότητα του υπό εξέταση τροχού.

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται, δηλαδή τα σύνθετα σφάλματα, πάντα περιλαμβάνουν αποκλίσεις που σχετίζονται με τον πρότυπο τροχό. Ελαχιστοποιώντας τις αποκλίσεις αυτές, έχουμε πιο ρεαλιστικές μετρήσεις.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε πως η ακρίβεια και ο σχεδιασμός του πρότυπου τροχού, ειδικά η συνεργασία του με τον υπό εξέταση τροχό, επηρεάζουν τα αποτελέσματα της μέτρησης. Στον πρότυπο τροχό θα πρέπει να υπάρχει επαρκές βάθος οδόντων, για να είναι δυνατή η επαφή του με όλο το εργαζόμενο ύψος οδόντος του υπό εξέταση τροχού, χωρίς όμως να έρχεται σε επαφή με σημεία του οδόντος που δεν περιλαμβάνονται στο εργαζόμενο ύψος αυτού ή βρίσκονται πέραν του κύκλου ποδός. Τέτοιου είδους επαφή μπορεί να αποφευχθεί όταν οι οδόντες του πρότυπου τροχού είναι αρκετά παχείς ώστε να προβλεφθεί η συνεργασία με τον υπό εξέταση τροχό με τέτοιο περιθώριο ικανό ίσα για να μη μπλοκάρουν.

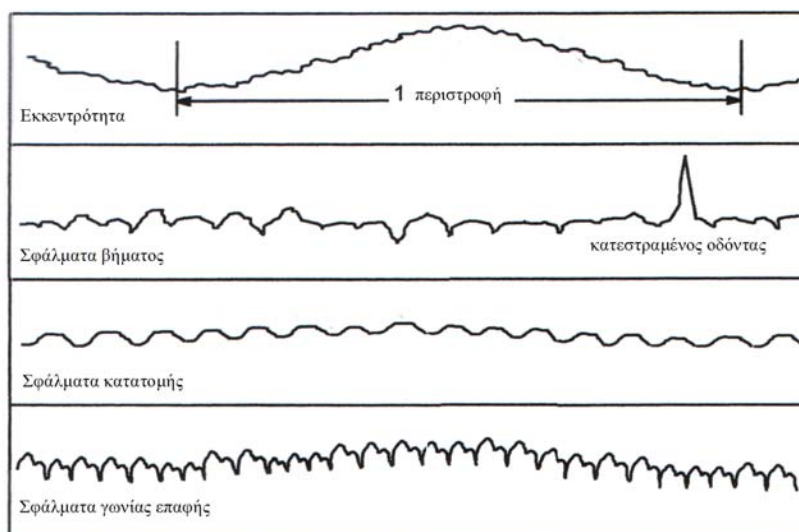
Για σκοπούς ποιοτικού ελέγχου, για την ένταξη του υπό εξέταση τροχού σε κάποια κατηγορία ποιότητας, η ακρίβεια του πρότυπου τροχού και η διαδικασία μέτρησης θα πρέπει να συμφωνηθούν μεταξύ κατασκευαστή και αγοραστή. Ο βαθμός επικάλυψης  $\varepsilon$ , μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα των μετρήσεων των σύνθετων σφαλμάτων, όταν εξετάζονται ελικοειδείς τροχοί. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των αποκλίσεων απ'τη θεωρητική τιμή, που για μετωπικούς τροχούς με ευθεία οδόντωση είναι εμφανή, στους ελικοειδείς τροχούς μπορεί να είναι συγκαλυμμένα, λόγω του γεγονότος ότι εμπλέκονται περισσότεροι οδόντες και ότι η τροχιά επαφών είναι διαγώνια ως προς το επίπεδο περιστροφής. Προτείνεται να επιλέγεται πάχος πρότυπου τροχού τέτοιο ώστε, ο βαθμός επικάλυψης που προκύπτει από τη συνεργασία του με τον υπό εξέταση τροχό να είναι μικρότερος ή ίσος του 0,5. Ωστόσο, θα πρέπει να εξετάζεται ο τροχός σε όλο του το πλάτος.

Το παραγόμενο γράφημα που έχει σχεδόν ημιτονοειδή μορφή (με εύρος  $2fe$ ) για μία πλήρη περιστροφή, καταδεικνύει εκκεντρότητα,  $fe$ , των οδόντων. Στο σχήμα 2 φαίνεται η μορφή που μπορεί να έχει μία τέτοια ημιτονοειδής καμπύλη. Ως εκκεντρότητα ορίζεται η απόκλιση μεταξύ του θεωρητικά γεωμετρικού άξονα των οδόντων και του άξονα αναφοράς (π.χ. της ατράκτου).

## 2.1. Η χρησιμότητα των μετρήσεων του σύνθετου σφάλματος

Οι μετρήσεις του σύνθετου σφάλματος που λήφθηκαν με τη μέθοδο σφικτής συνεργασίας των τροχών περιλαμβάνουν τις αποκλίσεις από τη θεωρητική γεωμετρία του τροχού και των δύο πλευρών των οδόντων. Κατά συνέπεια, ο προσδιορισμός του σύνθετου σφάλματος για την κάθε πλευρά του οδόντος ξεχωριστά, δεν είναι δυνατός. Η μέτρηση του σύνθετου σφάλματος με αυτή τη μέθοδο παρέχει γρήγορα πληροφορίες για τα ποιοτικά ελαττώματα της μηχανής παραγωγής, του κοπτικού εργαλείου ή και του τρόπου τοποθέτησης του πρότυπου τροχού για τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για τον έλεγχο παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων, αλλά και για τροχούς μικρού βήματος.

Το σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα, που αντιστοιχεί σε περιστροφή του υπό εξέταση τροχού ενός βήματος αυτού, καταδεικνύει σφάλματα κατατομής του οδόντα. Ένα μεγάλο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα μπορεί να καταδεικνύει ένα μεγάλο απλό σφάλμα βήματος ή κατεστραμμένο οδόντα.



Εικόνα 2-1:Ο τρόπος που εμφανίζονται τα διάφορα σφάλματα στο διάγραμμα



Με τη σωστή τοποθέτηση του πρότυπου τροχού, η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί η απόσταση των τροχών με την οποία επιτυγχάνεται συνεργασία των τροχών με ελάχιστη χάρη των κατατομών (backlash), δηλαδή γωνία που αντιστοιχεί σε αυτή που θα διαγράψει ο κινητήριος τροχός αν γίνει αλλαγή της φοράς περιστροφής του, μέχρι να βρεθεί πάλι σε επαφή με τον κινούμενο τροχό. Σαφώς για να καταστεί αυτό εφικτό, θα πρέπει να γίνει σωστή και ακριβής βαθμονόμηση (calibration) της συσκευής ελέγχου, όσον αφορά την απόσταση των κέντρων των ατράκτων και της παραλληλότητας των αξόνων τους. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη για τον έλεγχο τροχών που βρίσκουν εφαρμογή σε απαιτήσεις λειτουργίας με ελάχιστη χάρη κατατομών, καθώς το εύρος του λειτουργικού πάχους οδόντος διαφοροποιείται από το σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα.

Για τον προσδιορισμό του βαθμού ποιότητας, ο υπό εξέταση τροχός θα πρέπει να ελέγχεται με τον πρότυπο τροχό στο 100% του εργαζόμενου ύψους των οδόντων του. Έμφαση πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι η ένταξη του τροχού στην κατηγορία ποιότητας που προκύπτει με αυτή τη μέθοδο, αφορά στο σύνθετο σφάλμα και δεν παρέχονται πληροφορίες για τα επιμέρους σφάλματα, του βήματος, του πάχους οδόντα, του σφάλματος κατατομής, που μπορεί να εντάσσουν του ίδιο τροχό σε άλλες κατηγορίες ποιότητας, ανάλογα με τη μέθοδο που ακολουθείται για την κάθε περίπτωση. Συνεπώς, θα πρέπει να αποφεύγεται η παρερμηνεία και η σύγχυση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών μεθόδων.

## **2.2. Απαιτήσεις εξοπλισμού για τη μέτρηση του σύνθετου σφάλματος**

Οι βασικές κινηματικές και μηχανικές απαιτήσεις για τη μέτρηση του σύνθετου σφάλματος, για να μπορούν να εφαρμοστούν οι προδιαγραφές κατά AGMA, είναι:

Ελάχιστη εκκεντρότητα που προκύπτει από τον τρόπο πρόσδεσης του πρότυπου τροχού.

Παραλληλότητα αξόνων.

Επιφάνεια πρόσδεσης του υπό εξέταση τροχού, ώστε να είναι η ίδια επιφάνεια πρόσδεσης με αυτή της τελικής εφαρμογής του.

Διατήρηση της προβλεπόμενης σφικτής συνεργασίας.

Πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να διατηρείται η δύναμη που κρατά τους τροχούς σε σφικτή συνεργασία και πρέπει αυτή να είναι ομοιόμορφη. Δύο κλασικοί τρόποι να επιτευχθεί αυτό, είναι:

- 1) με τη βαρύτητα και
- 2) με τη βοήθεια ενός ελατηρίου

Σωστή καταγραφή των μετατοπίσεων των κέντρων των τροχών σε κατάλληλη κλίμακα, δηλαδή σωστή βαθμονόμηση (calibration) των μετρητικών οργάνων.

Άλλες απαιτήσεις. Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στην ευκολία χειρισμού και την ακρίβεια των μετρήσεων είναι

- μέσα για γρήγορη και ακριβή ρύθμιση της απόστασης συνεργασίας των τροχών
- μέσα για διατήρηση χαμηλής ταχύτητας διεξαγωγής των μετρήσεων ώστε να καταγράφεται μεγάλο πλήθος μετρήσεων και να μην αγνοηθούν μικρές αποκλίσεις.
- μέσα προστασίας του εξοπλισμού από τυχαία αίτια.
- σταθερή βάση και περιβάλλον σταθερής θερμοκρασίας, χωρίς σκόνη.

### 2.3. Πρότυποι τροχοί

Οι πρότυποι τροχοί που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο μέτρησης του σύνθετου σφάλματος είναι τριών τύπων.

Πρότυποι τροχοί ειδικά σχεδιασμένοι για εξέταση ενός τροχού. Εξασφαλίζεται έτσι πλήρης και ακριβής εξέταση.

Πρότυποι τροχοί γνωστών διαστάσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξέταση πολλών διαφορετικών οδοντωτών τροχών ίδιου module. Προσοχή πρέπει να δοθεί στις συνθήκες συνεργασίας για να μην έρχονται σε επαφή τμήματα του υπό εξέταση τροχού που δεν περιλαμβάνονται στο εργαζόμενο ύψος οδόντος. Αυτό οφείλεται σε υπερβολικό βάθος επαφής λόγω μεγαλύτερης από την προβλεπόμενη για τη συγκεκριμένη συνεργασία εξωτερικής διαμέτρου του πρότυπου τροχού.

Επιλεγμένοι τροχοί γνωστής ποιότητας, που με τους απαραίτητους υπολογισμούς παρέχουν ακριβή αποτελέσματα.

Τα διάκενα ενός πρότυπου τροχού πρέπει να έχουν συμφωνηθεί μεταξύ κατασκευαστή και αγοραστή, αφού σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό του έχει η χρήση για την οποία προορίζεται, δηλαδή το είδος της συσκευής με την οποία θα διεξαχθούν οι μετρήσεις. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται ενδεικτικές ανοχές των διάκενων και κατατάσσονται οι τροχοί στις κατηγορίες M1 και M2, ανάλογα με την τιμή των ανοχών των διάκενων τους.

χαρακτηρισμός		Ανοχή Διάκενου Πρότυπου Τροχού(μm)	
		M1	M2
Αξονική απόκλιση	Διάμετρος<75mm	2,0	2,0
	Διάμετρος<75mm	4,0	4,0
Ακτινική απόκλιση πλευρών οδόντος	Διάμετρος<75mm	2,0	2,0
	Διάμετρος<75mm	3,0	4,0
Εκκεντρότητα εξωτερικής διαμέτρου		8,0	8,0
Εκκεντρότητα διαμέτρου πλήμνης τροχού	Διάμετρος<30mm	2,5	2,5
	Διάμετρος<30mm	5,0	5,0

**Πίνακας 2-1:Τιμές ανοχών για Πρότυπους Τροχούς**

Οι διαστάσεις των διάκενων και οι ανοχές τους, όπως επίσης και οι αποκλίσεις των διαστάσεων των επιφανειών πρόσδεσης του τροχού, μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στις συνθήκες επαφής και λειτουργίας των συνεργαζόμενων τροχών. Επειδή είναι συνήθως οικονομικότερο να κατασκευάζονται τα διάκενα σε υψηλό βαθμό ακρίβειας από το να κατασκευάζονται οι οδόντες, θεωρείται πως θα πρέπει οι ανοχές τους να διατηρηθούν στις ελάχιστες δυνατές τιμές, σύμφωνα βέβαια με τα διαθέσιμα κατασκευαστικά μέσα. Αυτή η πρακτική, επιτρέπει να κατασκευάζονται τροχοί με λιγότερο ακριβείς ανοχές και συνήθως αποτελεί τον πιο οικονομικό συνολικό σχεδιασμό.

Η ανάγκη να καθοριστεί άξονας αναφοράς για έναν πρότυπο τροχό, είναι προφανής αν λάβουμε υπ' όψιν ότι οι τιμές των ανοχών που αναφέραμε και όλων των παραμέτρων που αφορούν στην ακρίβεια του τροχού, έχουν νόημα σε σχέση με έναν συγκεκριμένο άξονα περιστροφής. Επιδιώκεται ο άξονας αυτός να συμπίπτει με τον άξονα περιστροφής του τροχού σε πραγματικές συνθήκες, γεγονός που εξαρτάται από την πρόσδεση του τροχού.

Ο άξονας αναφοράς είναι αυτός που χρησιμοποιείται από τον κατασκευαστή για να καθορίσει τη γεωμετρία των οδόντων και αποτελεί ευθύνη του να επιβεβαιώσει ότι ο άξονας αναφοράς καθορίζεται με σαφήνεια και ακρίβεια για να

εξασφαλίσει ότι πληρούνται οι απαιτήσεις του οδοντωτού τροχού σε σχέση με το λειτουργικό άξονα.

Πολύ συχνά, ο άξονας αναφοράς καθορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπίπτει με το λειτουργικό άξονα χρησιμοποιώντας τις επιφάνειες πρόσδεσης ως επιφάνειες αναφοράς.

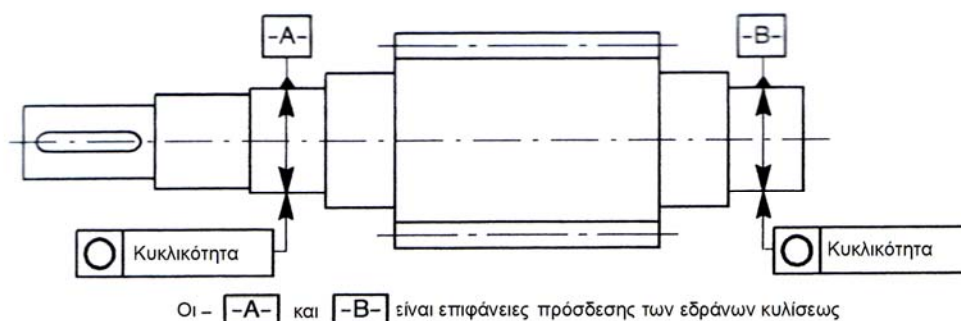
Γενικά, είναι απαραίτητο να ορίζεται ο άξονας αναφοράς και έπειτα να συσχετίζονται όλες οι άλλες επιφάνειες με αυτόν με τις κατάλληλες ανοχές.

#### 2.4. Μέθοδοι καθορισμού του άξονα αναφοράς

Ο άξονας αναφοράς ενός στοιχείου μηχανών καθορίζεται από επιφάνειες αναφοράς και υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι να γίνει αυτό:

##### Μέθοδος 1

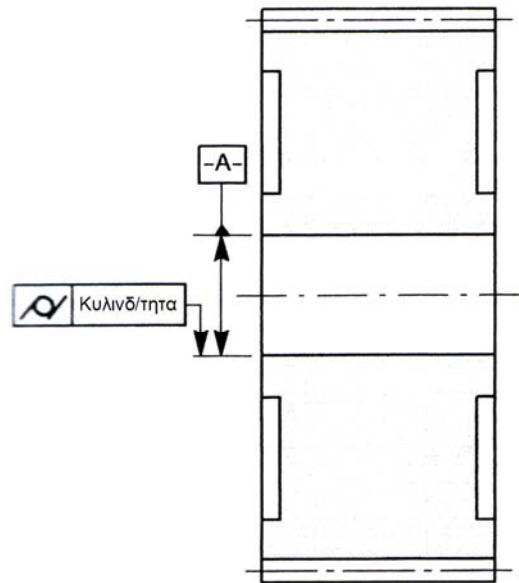
Δύο σημεία του άξονα καθορίζονται ως τα κέντρα συγκεκριμένων κύκλων σε δύο «κοντές» κυλινδρικές ή κωνικές επιφάνειες αναφοράς.



Σχήμα 2-1: Μέθοδος 1

##### Μέθοδος 2

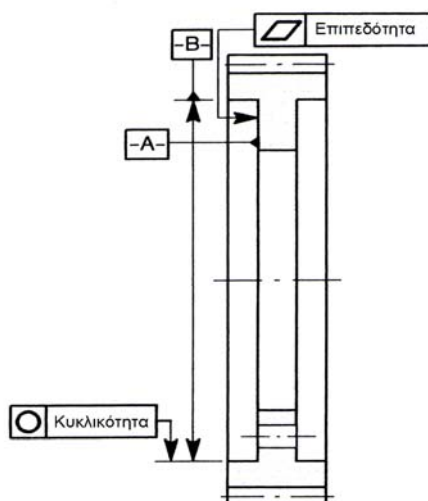
Η θέση και κατεύθυνση του άξονα καθορίζονται και οι δύο από μία «μακριά» κυλινδρική επιφάνεια αναφοράς. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο άξονας του τρύματος του τροχού μπορεί να παρασταθεί επαρκώς από τον άξονα του στελέχους πρόσδεσης.



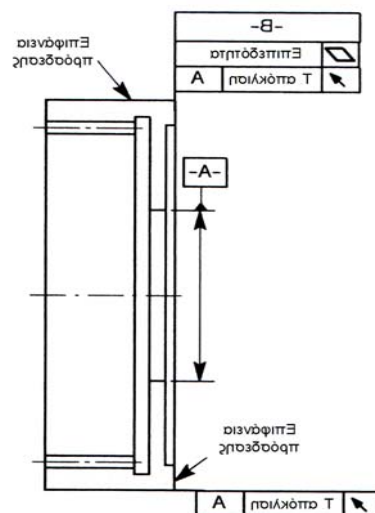
Σχήμα 2-2:Μέθοδος 2

**Μέθοδος 3**

Η θέση του άξονα καθορίζεται από το κέντρο ενός κύκλου επάνω σε «κοντή» κυλινδρική επιφάνεια αναφοράς και η κατεύθυνση του από επιφάνεια αναφοράς κάθετη στον άξονα.



Σχήμα 2-3:Μέθοδος 3



Σχήμα 2-4:Καθορισμός επιφάνειας αναφοράς

Στις μεθόδους 1 και 3, οι κυλινδρικές ή κωνικές επιφάνειες αναφοράς, πρέπει να είναι αξονικά «κοντές» ώστε να μην καθορίζουν η κάθε μία από μόνη της έναν ξεχωριστό άξονα. Στη μέθοδο 3 η διάσταση της κάθετης στον άξονα επιφάνειας αναφοράς πρέπει να είναι όσο πιο μεγάλη γίνεται.

Οι ανοχές μορφής των λειτουργικών επιφανειών-επιφανειών πρόσδεσης δε θα πρέπει να ξεπερνούν τις τιμές που δίνονται στον πίνακα 2-2:

Μέθοδος	Κυκλικότητα	Κυλινδρικότητα	Επιπεδότητα
Μέθοδος 1	0,04(L/b) ή 0,1Fr		
Μέθοδος 2		0,04(L/b) ή 0,1Fr	
Μέθοδος 3	0,06 Fr		0,06(Dd/b) Fβ

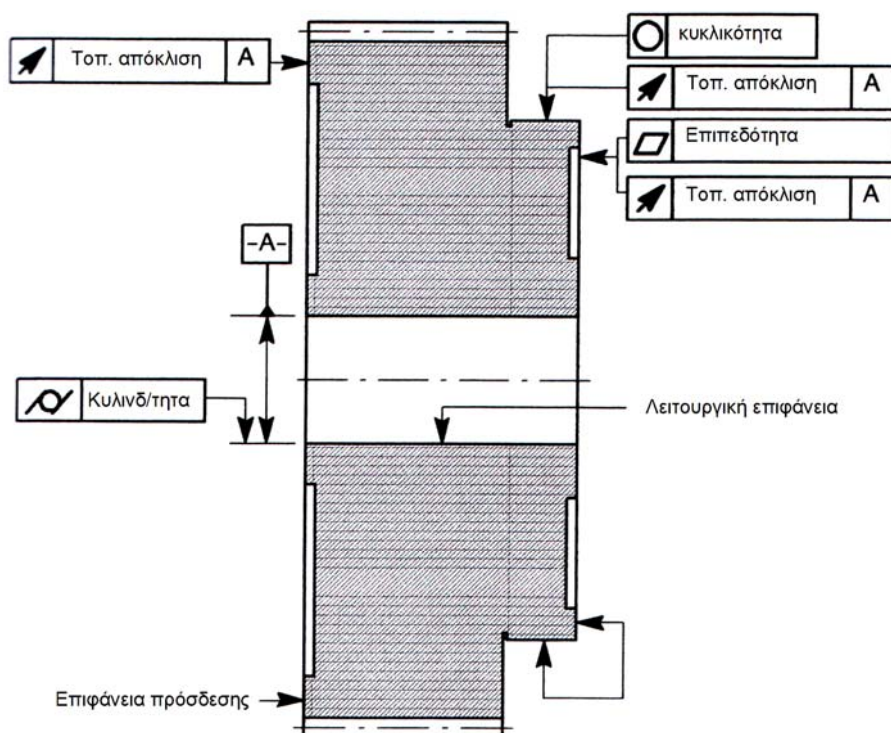
**Πίνακας 2-2:Ανοχές μορφής επιφανειών αναφοράς και πρόσδεσης**

Όταν ο άξονας αναφοράς δεν συμπίπτει με το λειτουργικό άξονα, τότε συμβουλευόμαστε τον παρακάτω πίνακα:

Μέθοδος	Ακτινική απόκλιση	Αξονική απόκλιση
Μέθοδος 2	0,15(L/b) Fβ ή 0,3Fr	
Μέθοδος 3	0,3Fr	0,2(Dd/b) Fβ

**Πίνακας 2-3:Ανοχές μορφής επιφανειών πρόσδεσης**

Για τους πρότυπους τροχούς, που οι απαιτήσεις ακρίβειας είναι μεγάλες, ειδικές επιφάνειες αναφοράς πρέπει να ορίζονται και οι επιφάνειες των ατράκτων στις οποίες θα προσδεθούν χρησιμεύουν ως επιφάνειες αναφοράς.



Σχήμα 2-5: Υψηλής ποιότητας οδοντωτός τροχός

Το υλικό των πρότυπων τροχών πρέπει να είναι χάλυβας που έχει σκληρυνθεί και λειανθεί και η τελική επιφάνεια του πρέπει να έχει σκληρότητα 60 HRC τουλάχιστον.

Οι πρότυποι τροχοί φέρουν σημάδια αναγνώρισης που αναλυτικά περιγράφονται από τον πίνακα που ακολουθεί.

	Αναγνωριστικό σημάδι	
Module	M	Απαιτούμενο
Γωνία επαφής	PA	Απαιτούμενο
Διάμετρος κύκλου ποδός	BD	Προαιρετικό
Αριθμός οδόντων	T	Απαιτούμενο
Τόξο πάχους οδόντος	CTT	Απαιτούμενο
Κατηγορία AGMA	M1T, M2T, M1R, M2R	Απαιτούμενο
Κατασκευαστής	XYZ	Προαιρετικό

Πίνακας 2-4: Αναγνωριστικά σημάδια Πρότυπων Τροχών

## 2.5. Ονοματολογία βαθμού ακρίβειας πρότυπου τροχού

Ο βαθμός ακρίβειας για μετωπικούς τροχούς ευθείας ή ελικοειδούς οδόντωσης, καθορίζεται από τον αριθμό ακρίβειάς τους, με πρόθεμα το γράμμα M,

που υποδηλώνει *Αριθμό Ακριβείας Πρότυπου Τροχού* και κατάληξη ένα κωδικό γράμμα, T ή R, που υποδηλώνει τη μέθοδο με την οποία εξασφαλίστηκε η ακρίβεια του πρότυπου τροχού. Το γράμμα T είναι για την υπολογισμό της ακρίβειας με μέτρηση των απλών σφαλμάτων, και το γράμμα R με μέτρηση του σύνθετου σφάλματος.

Για παράδειγμα. Τροχός M2R. Όταν η ακρίβεια του τροχού έχει εξακριβωθεί και με τους δύο τρόπους, όπως απαιτείται για την κατηγορία 1, τότε η κατάληξη θα είναι RT. Για παράδειγμα. M1RT. Στον παρακάτω πίνακα παρέχονται τα εύρη των απλών και σύνθετων σφαλμάτων για την κατάταξη των πρότυπων τροχών.

		M1T	M2T
Ακτινική διεύθυνση	0,5<m<1,25 και d<50mm	3,0	5,0
	1,25<m<5,0 ή d>50mm	5,0	7,0
Αξονική διεύθυνση	0,5<m<1,25 και d<50mm	2,0	3,0
	1,25<m<5,0 ή d>50mm	3,5	3,5
Βήμα		2,5	3,5
Έλικά	b<13	2,0	3,0
Έλικά	13<b<25	2,5	3,5
Έλικά	25<b<50	3,0	4,0
Έλικά	50<b<75	3,5	4,5
Έλικά	75<b<100	4,0	5,0
Έλικά	100<b<125	5,0	6,0

Πίνακας 2-5: Ανοχές οδόντων για μετωπικούς και ελικοειδείς τροχούς

		M1R	M2R
Σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	0,2<m<1,25 και d<60mm	1,5	2,5
	1,25<m<2,5 ή d>60mm	4,0	5,0
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	0,2<m<1,25 και d<60mm	2,5	5,0
	1,25<m<2,5 ή d>60mm	8,5	12,0

Πίνακας 2-6: Ανοχές σύνθετου σφάλματος για μετωπικούς και ελικοειδείς τροχούς

## 2.6. Ρύθμιση της δύναμης του ελατηρίου

Είναι πολύ σημαντικό για την εξέταση τροχών, η δύναμη του ελατηρίου να έχει ρυθμιστεί κατάλληλα για την κάθε περίπτωση. Υπερβολική δύναμη σε εξέταση τροχών λεπτού βήματος, μικρού πλάτους ή τροχών από μαλακά υλικά, έχει ως αποτέλεσμα λανθασμένες μετρήσεις λόγω παραμόρφωσης των οδόντων. Στην αντίθετη περίπτωση, μικρή δύναμη σε παχείς οδόντες σχετικά μεγάλου πλάτους, θα



έχει ως αποτέλεσμα λανθασμένες μετρήσεις λόγω αποκλίσεων που θα σχετίζονται με την επαφή του υπό εξέταση και του πρότυπου τροχού.

Η προτεινόμενη προένταση του ελατηρίου βασίζεται στο μέγεθος των οδόντων και δίνεται στον παρακάτω πίνακα. Οι τιμές έχουν προσδιοριστεί εμπειρικά για μεταλλικούς τροχούς σε πλάτος 2,5 mm. Για μη μεταλλικούς τροχούς λαμβάνεται το ήμισυ των τιμών αυτών, ενώ για διαφορετικά πλάτη οι τιμές μεταβάλλονται αναλογικά.

module	Προένταση (kg)
2,5 έως 25,0	1,0 έως 1,2
1,25 έως 2,5	0,9 έως 1,1
0,80 έως 1,25	0,8 έως 1,0
0,60 έως 0,80	0,7 έως 0,8
0,50 έως 0,60	0,6 έως 0,7
0,40 έως 0,50	0,5 έως 0,6
0,30 έως 0,40	0,3 έως 0,4
0,25 έως 0,30	0,1 έως 0,2
0,20 έως 0,25	0,1 έως 0,2

Πίνακας 2-7: Ρύθμιση της προέντασης του ελατηρίου

## 2.7. Ερμηνεία των παραγόμενων γραφημάτων

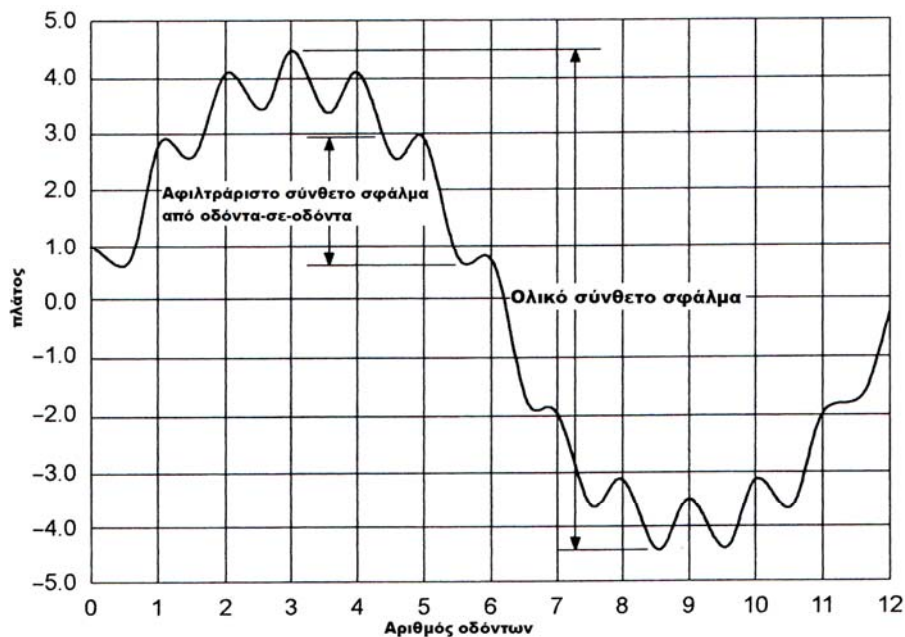
Τα μετρούμενα μεγέθη, το ολικό σύνθετο σφάλμα και το σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα ερμηνεύονται από το παραγόμενο γράφημα ως εξής. Το ολικό σύνθετο σφάλμα είναι η διαφορά μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου σημείου του γραφήματος και το σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα είναι η μέγιστη μεταβολή που παρατηρείται σε διάστημα του γραφήματος εύρους  $360/z$ .



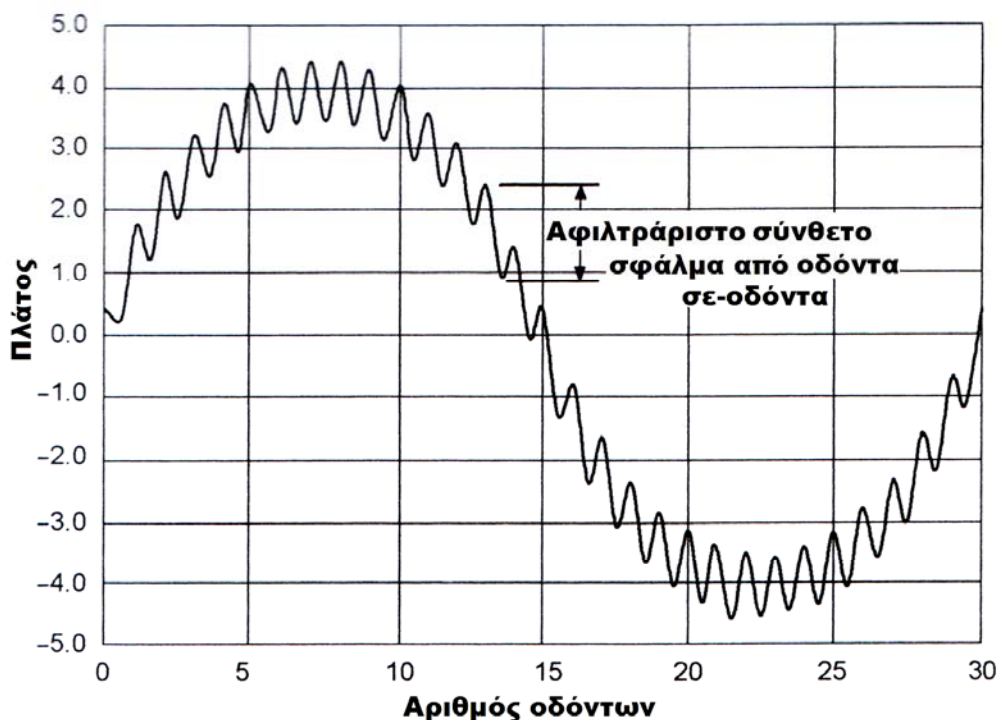
Διάγραμμα 2-2: Διάγραμμα σύνθετου σφάλματος

Αυτό μπορεί να γίνει αποδεκτό για αξιολόγηση της ποιότητας του τροχού, στην τελική μορφή του, σχετικά με την εφαρμογή που θα έχει. Ωστόσο, δεν αποτελεί την πραγματική εικόνα του, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαγνωστικούς σκοπούς. Για παράδειγμα δεν βοηθάει να βγουν συμπεράσματα για την εκτίμηση του επιπέδου του παραγόμενου θορύβου. Επίσης, για την αξιολόγηση της παραγωγικής διαδικασίας, η εικόνα που παίρνουμε είναι αλλοιωμένη και απέχει από τη μορφή του οδόντος που η μηχανή και το κοπτικό εργαλείο παράγουν. Στην ιδανική περίπτωση θα πρέπει να αποκοπούν από το γράφημα οι επιδράσεις του σφάλματος κατατομής και αυτό θα πρέπει να αντιμετωπιστεί ξεχωριστά από την παραγωγική διαδικασία.

Το πρόβλημα είναι ότι το σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα είναι υπερβολικό στα σημεία του παραγόμενου γραφήματος με τη μέγιστη αιχμή. Σαν αποτέλεσμα έχουμε αλλοίωση του εύρους της μέσης καμπύλης του γραφήματος, σχετικά με τον συγκεκριμένο οδόντα. Για την ίδια ποιότητα μορφής οδόντος και εύρους της μέσης καμπύλης, το σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα θα είναι μεγαλύτερο για τροχό με μικρό αριθμό οδόντων απ'ότι με μεγάλο αριθμό οδόντων.



Διάγραμμα 2-3: Διάγραμμα σφικτής συνεργασίας, μικρός αριθμός οδόντων



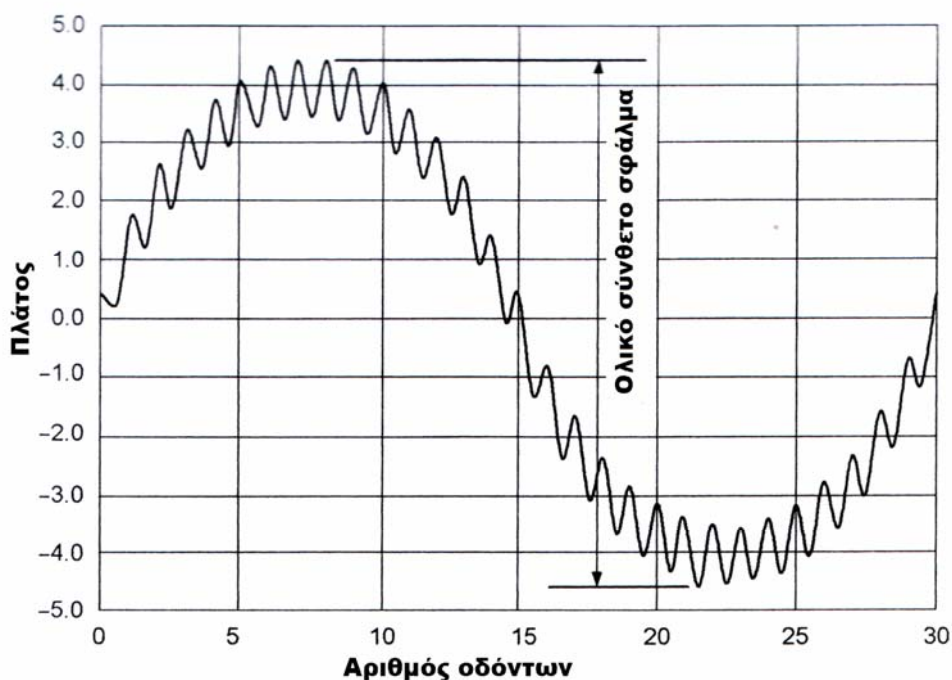
Διάγραμμα 2-4: Διάγραμμα σφικτής συνεργασίας, μεγάλος αριθμός οδόντων

## 2.8. Σχέση μεταξύ επιτρεπόμενων σύνθετων σφαλμάτων

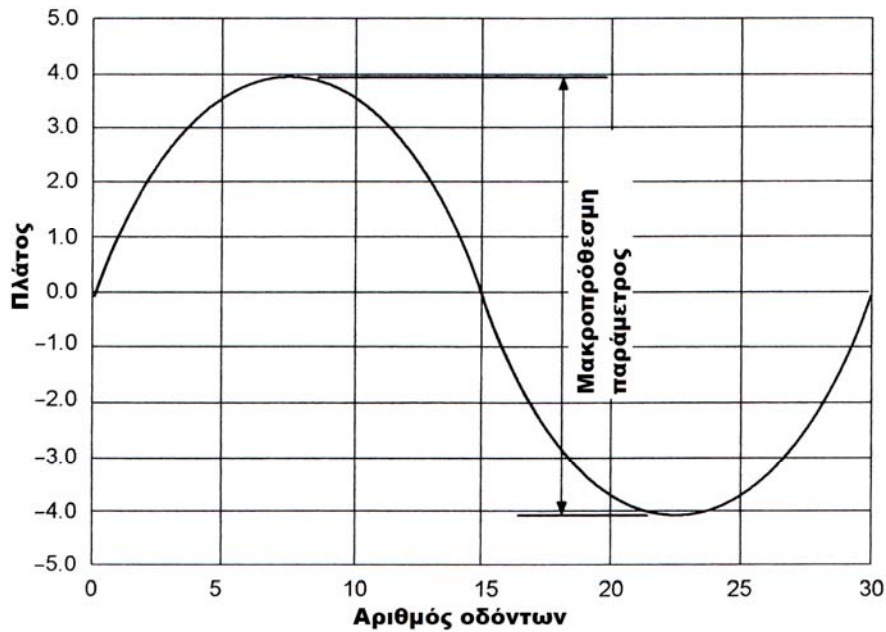
Σε παλαιότερες προδιαγραφές το επιτρεπόμενο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα είναι περίπου το  $\frac{1}{2}$  με  $\frac{1}{3}$  του ολικού σύνθετου σφάλματος. Όμως λόγω της σχέσης μεταξύ του εύρους της καμπύλης και του σύνθετου σφάλματος από οδόντα σε οδόντα, αυτή η εκτίμηση θεωρείται μη ρεαλιστική, ειδικά για τροχούς με μικρό αριθμό οδόντων. Θα πρέπει να υπάρχει μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ του επιτρεπόμενου σύνθετου σφάλματος από οδόντα σε οδόντα και του ολικού σύνθετου σφάλματος ( $f_{id}=0,1$  έως  $0,2F_{id}$ ). Αυτό επιτυγχάνεται με διαχωρισμό του σφάλματος από οδόντα σε οδόντα από το εύρος της καμπύλης.

## 2.9. Διαχωρισμός σύνθετου σφάλματος από- οδόντα- σε- οδόντα και εύρους καμπύλης

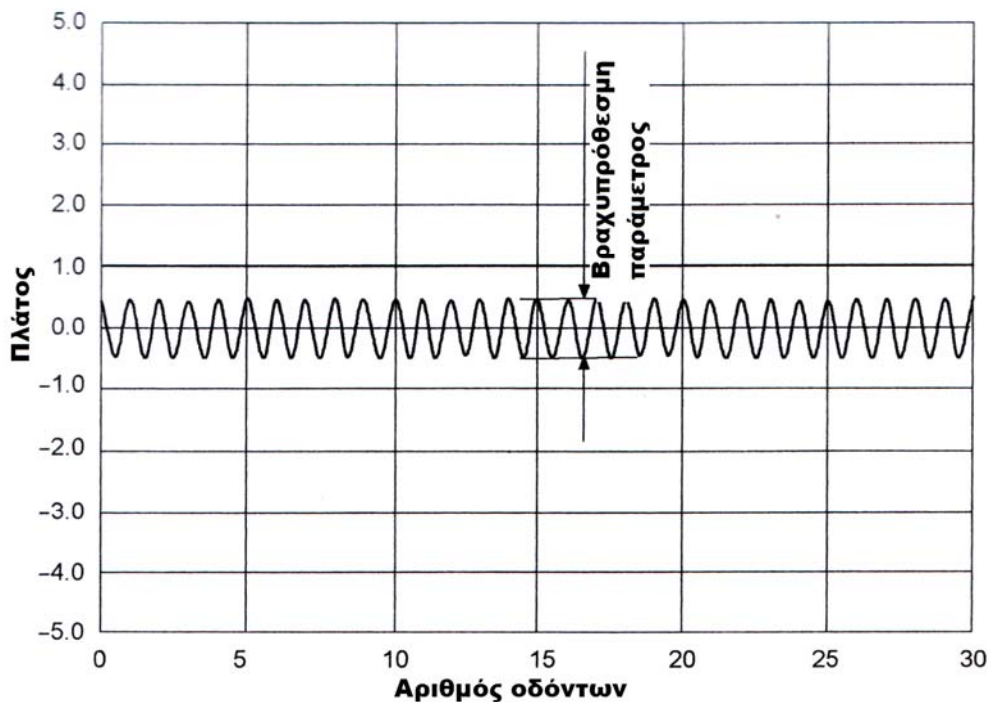
Ο διαχωρισμός του σφάλματος από οδόντα σε οδόντα από το εύρος της καμπύλης μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους, όπως με ηλεκτρονικά φίλτρα που μπορεί να είναι είτε αναλογικά κυκλώματα είτε ψηφιακά σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τα αποτελέσματα μίας τέτοιας μεθόδου φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν. Αν κάποια τέτοια μέθοδος δεν είναι διαθέσιμη, μια πολύ καλή προσέγγιση μπορεί να γίνει με το χέρι, σχεδιάζοντας την επάνω και κάτω περιβάλλουσα στο γράφημα. Η επάνω περιβάλλουσα αποτελεί την μακροπρόθεσμη παράμετρο και η κάθετη απόσταση μεταξύ της επάνω και κάτω περιβάλλουσας είναι η βραχυπρόθεσμη παράμετρος, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2-8.



Διάγραμμα 2-5: Διάγραμμα σφικτής συνεργασίας τροχού με αριθμό οδόντων 30



Διάγραμμα 2-6: Μακροπρόθεσμη παράμετρος, τροχού με αριθμό οδόντων 30

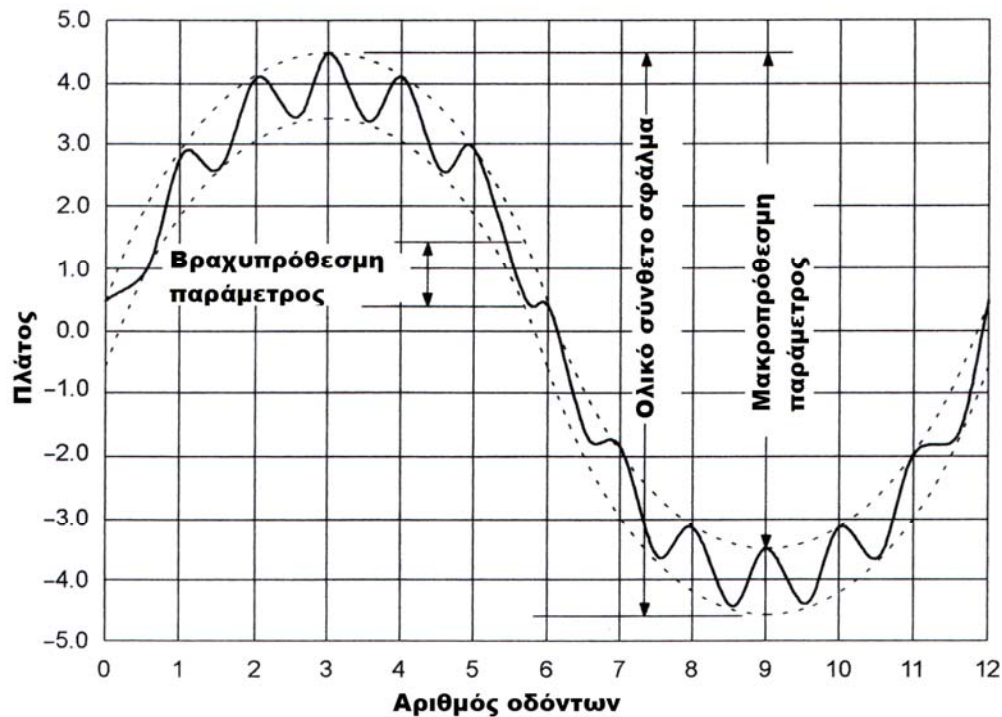


Διάγραμμα 2-7: Βραχυπρόθεσμη παράμετρος, τροχού με αριθμό οδόντων 30

Στις περισσότερες περιπτώσεις που εμφανίζονται αποκλίσεις μακροπρόθεσμης παραμέτρου, θα είναι ημιτονοειδούς μορφής που οφείλεται στην εκκεντρότητα. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που οι μακροπρόθεσμες αποκλίσεις εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα, όπως στο διάγραμμα 2-9, και προκαλούνται

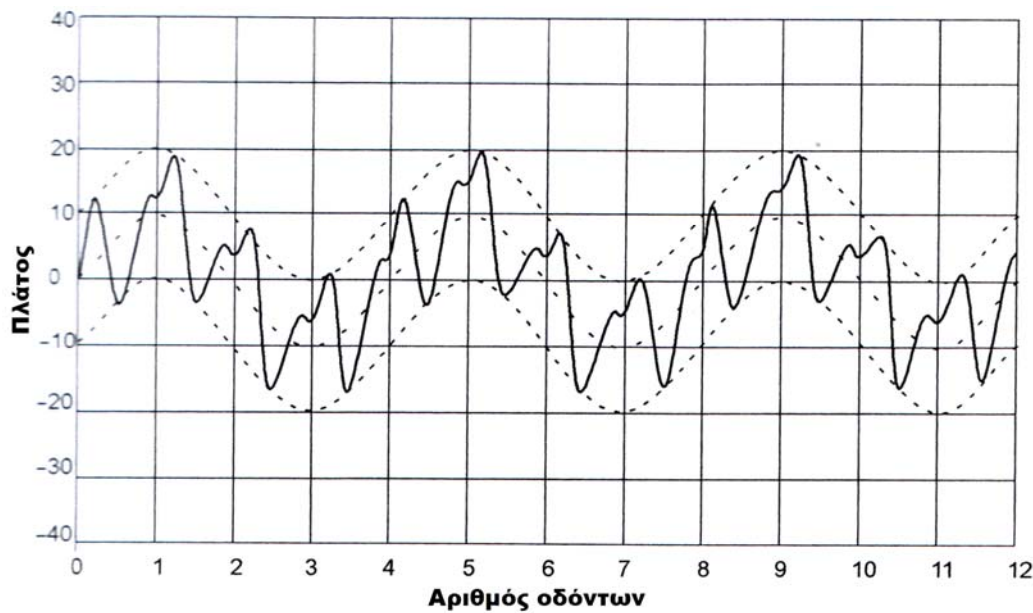
από οβάλ ή τριγωνικές μορφές. Ακόμα και η βραχυπρόθεσμη παράμετρος αλλοιώνεται σ' αυτές τις περιπτώσεις.

Η ανάλυση των αποκλίσεων υψηλής συχνότητας γίνεται με τεχνικές μετασχηματισμού Fourier, όπως η μέθοδος FFT, ή με ηλεκτρονικά φίλτρα. Μπορεί να γίνει και με το χέρι, μέχρι κάποιο βαθμό, με χρήση των περιβάλλουσων καμπυλών.



Διάγραμμα 2-8: Διάγραμμα, τροχού με αριθμό οδόντων 12





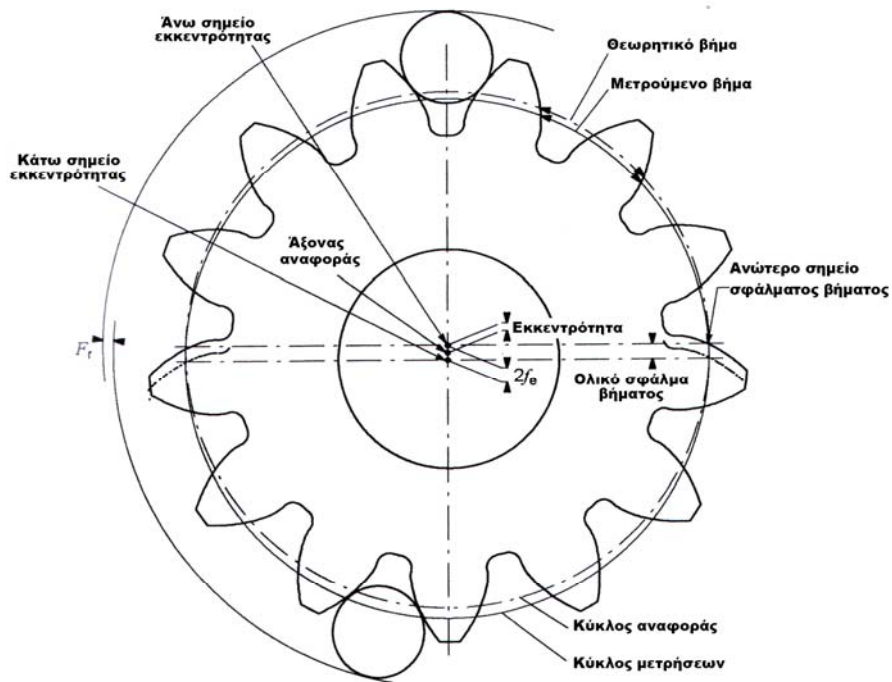
Διάγραμμα 2-9: Έμφανιση μακροπρόθεσμων αποκλίσεων από οβάλ ή τριγωνικές μορφές

## 2.10. Η σχέση μεταξύ του εύρους της καμπύλης και του σφάλματος βήματος

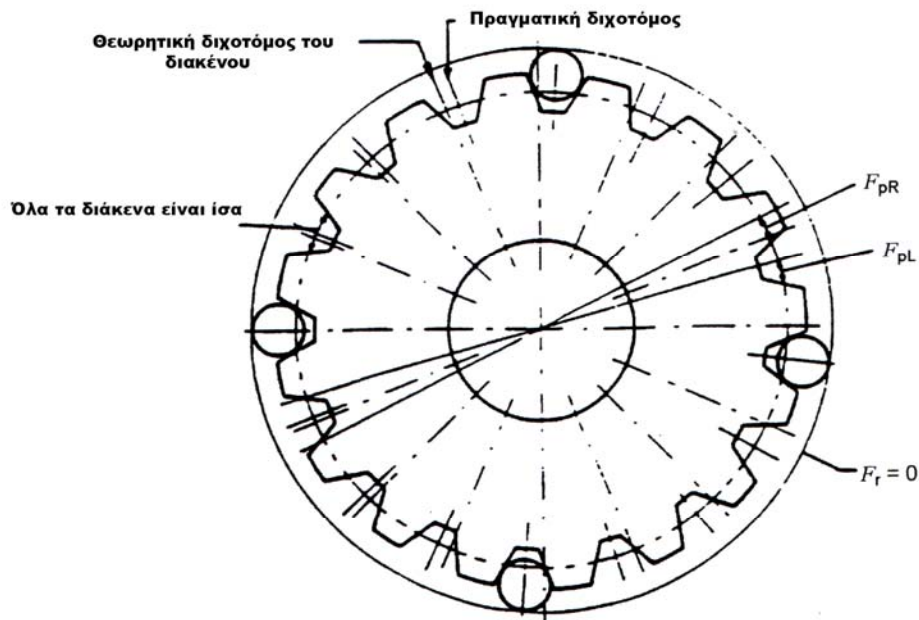
Όταν ένας, κατά τα άλλα ιδανικός, οδοντωτός τροχός παρουσιάζει εκκεντρότητα  $f_e$ , και περιστραφεί γύρω από τον άξονά του, το εύρος της παραγόμενης καμπύλης θα είναι περίπου ίσο με  $2f_e$ . Η εκκεντρότητα προκαλεί απλά σφάλματα βήματος στην περιφέρεια του τροχού, με μέγιστη τιμή  $2f_e[\sin(180/z)]/\cos\alpha$ . Το επακόλουθο συνολικό σφάλμα βήματος θα έχει επίσης ημιτονοειδή μορφή, με μέγιστη τιμή  $2f_e/\cos\alpha$ . Όπως φαίνεται στο σχήμα, η γωνία μεταξύ του μέγιστου συνολικού σφάλματος βήματος και του εύρους λόγω εκκεντρότητας είναι περίπου  $90^\circ$ . Η τιμή αυτής της γωνίας μεγαλώνει στην αριστερή πλευρά του οδόντος και μικραίνει στη δεξιά. Το εύρος λόγω εκκεντρότητας, έχει επιπτώσεις στο backlash και προκαλεί επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις εξ' αιτίας των σφαλμάτων βήματος που προκύπτουν.

Παρόλα αυτά, όταν εμφανίζεται καμπύλη με ελάχιστο ή μηδενικό εύρος, δε σημαίνει ότι δεν υπάρχουν σφάλματα στο βήμα. Στο σχήμα 2-7, φαίνεται τροχός στον οποίο όλα τα διάκενα των οδόντων είναι ίσα, οπότε και δεν παρουσιάζεται εκκεντρότητα, ωστόσο υπάρχει σημαντικό σφάλμα βήματος. Γραφικά η κατάσταση αυτή απεικονίζεται στο διάγραμμα 2-10, ενώ στο διάγραμμα 2-11, φαίνεται ένα

παράδειγμα μέτρησης ενός τροχού με μικρή εκκεντρότητα, αλλά με σημαντικά μεγάλο σφάλμα βήματος.

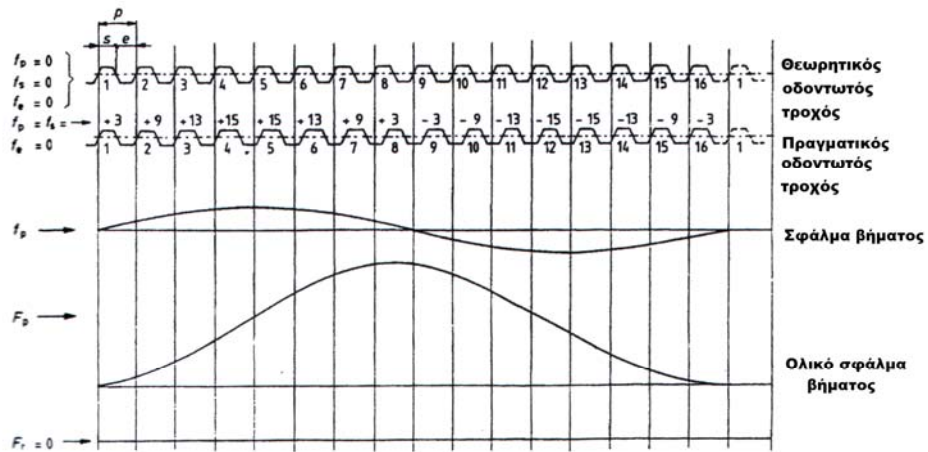


Σχήμα 2-6: Αποκλίσεις σε έκκεντρο οδοντωτό τροχό

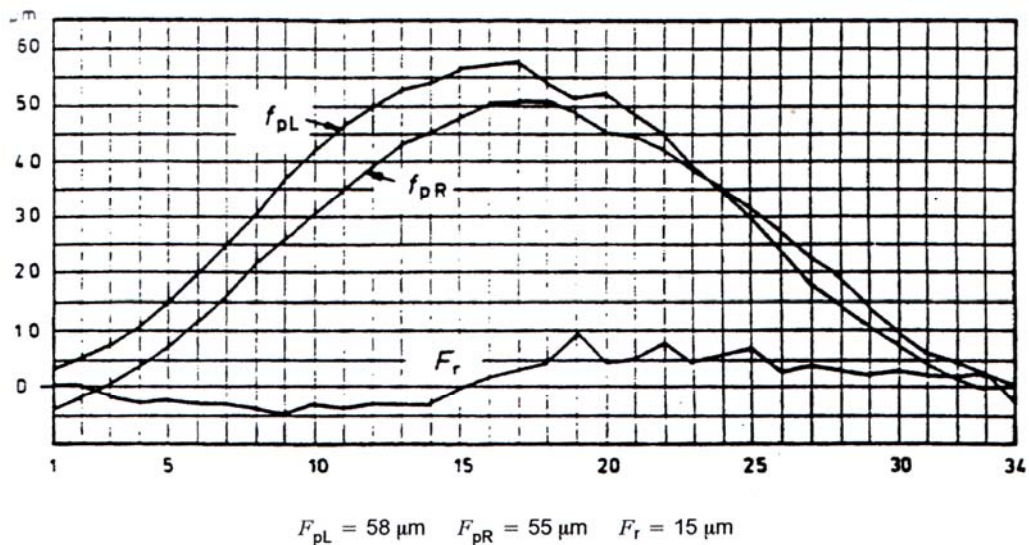


Σχήμα 2-7: Οδοντωτός τροχός με μηδενική εκκεντρότητα αλλά με σημαντικό σφάλμα βήματος





Διάγραμμα 2-10: Το διάγραμμα του οδοντωτού τροχού με μηδενική εκκεντρότητα αλλά με σημαντικό σφάλμα βήματος



Διάγραμμα 2-11: Διάγραμμα τροχού με μικρή εκκεντρότητα και σφάλμα βήματος

## 2.11. Σύστημα ταξινόμησης της ακρίβειας μετωπικών οδοντωτών τροχών βάσει των προδιαγραφών κατά AGMA

Βάσει της προδιαγραφής ANSI/AGMA 2015, καθορίζεται η δομή του συστήματος ταξινόμησης της ακρίβειας μετωπικών οδοντωτών τροχών με κατατομή εξειλιγμένης. Το σύστημα ταξινόμησης της ακρίβειας με μέτρηση του σύνθετου σφάλματος, έχει διαφορετικά εύρη βαθμών ακρίβειας από το σύστημα που χρησιμοποιείται όταν είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις των απλών σφαλμάτων. Ακόμη, τα εύρη που αφορούν στην εξεταζόμενη διάμετρο αρχικού κύκλου και στο module είναι διαφορετικά.

Το σύστημα ταξινόμησης της ακρίβειας κατά AGMA είναι ένας αλφαριθμητικός κώδικας που αποτελείται από δύο μέρη, έναν ακέραιο αριθμό που είναι ο βαθμός-επίπεδο ακρίβειας και ένα γράμμα ως πρόθεμα, που υποδηλώνει την προδιαγραφή-πηγή των επιπέδων ακριβείας. Όταν το πρόθεμα είναι το γράμμα A, το επίπεδο καθορίζεται από την προδιαγραφή ANSI-AGMA 2015-1-A01 και αφορά στο σφάλμα μετάδοσης, το γράμμα B υποδηλώνει καθορισμό του επιπέδου ακριβείας από την προδιαγραφή ANSI-AGMA 2009-B01 και αφορά στους κωνικούς οδοντωτούς τροχούς, και το γράμμα C είναι αυτό που καθορίζεται από την προδιαγραφή 2015-2-A06 και αφορά στα σύνθετα σφάλματα.

Το σύστημα ταξινόμησης της ακρίβειας με μέτρηση του σύνθετου σφάλματος αποτελείται από εννέα (9) βαθμούς ακρίβειας, που αφορούν στο ολικό σύνθετο σφάλμα και στο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα. Ο βαθμός C4 είναι αυτός που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ ο βαθμός C12 στη μικρότερη. Η βαθμονόμηση αυτή ισχύει για τα εξής εύρη:

$$0,2 \leq m_n \leq 5$$

$$2mm \leq d \leq 1000mm$$

$$3 \leq z \leq 1000$$

$$\beta \leq 45^\circ$$

Το επίπεδο ακρίβειας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$f_{idT} = 0,2[0,025d + 0,3m_n + 19](\sqrt{2})^{C-5}$$

για το σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα, και από την εξίσωση:

$$F_{idT} = 1.08[0,025d + 0,3m_n + 19](\sqrt{2})^{C-5}$$

για το ολικό σύνθετο σφάλμα.

Από τις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να προσδιοριστούν τα όρια των βαθμών ακρίβειας, για κάθε διάμετρο και module που εξετάζονται, θέτοντας αντί του γράμματος C τις τιμές 4 έως 12 και εξάγοντας έτσι τις ανώτερες τιμές για το ολικό σύνθετο σφάλμα και το σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα, για κάθε βαθμό ακρίβειας.

Αν δεν έχουν προσδιοριστεί τα όρια των βαθμών ακρίβειας, και εισάγουμε στις παραπάνω σχέσεις τα μετρούμενα μεγέθη, υπολογίζουμε μία τιμή του C, που για να προσδιορίσουμε το βαθμό ακρίβειας του υπό εξέταση τροχού, θα πρέπει να την στρογγυλοποιήσουμε προς τα πάνω. Για παράδειγμα, αν έχουμε τροχό αρχικής διαμέτρου d=114mm και module 3mm, προκύπτουν για κάθε κατηγορία ποιότητας οι εξής ανώτερες τιμές των σύνθετων σφαλμάτων:

C=4	fid=3,21685	Fid=17,37099
C=5	fid=4,55000	Fid=24,57000
C=6	fid=6,43370	Fid=34,74198
C=7	fid=9,10000	Fid=49,14000
C=8	fid=12,86740	Fid=69,48396
C=9	fid=18,20000	Fid=98,28000
C=10	fid=25,73480	Fid=138,96792
C=11	fid=36,40000	Fid=196,56000
C=12	fid=51,47415	Fid=277,96041

Αν όμως λάβουμε μία μέτρηση, έστω για το ολικό σύνθετο σφάλμα με τιμή  $Fid=55,55555$  και θέλουμε να καθορίσουμε το βαθμό ακρίβειας, επιλύοντας την εξίσωση ως προς  $C$  θα προκύψει  $C=7,35406$ . Η κατηγορία ποιότητας του τροχού θα είναι η  $C=8$  καθώς σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται οι τροχοί με  $49,14000 < Fid < 69,48396$  όπως φαίνεται από τις παραπάνω τιμές. Άρα χρειάζεται προσοχή στη στρογγυλοποίηση αν επιλέξουμε να εργαστούμε με αυτόν τον τρόπο.

Εφόσον οι διαθέσιμοι τροχοί, που αναλυτικά θα περιγραφούν στο κεφάλαιο του διαθέσιμου εξοπλισμού, έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

$m=3\text{mm}$  αρχικής διαμέτρου  $d=114\text{mm}$

$m=5\text{mm}$  >>  $d=120\text{mm}$

$m=6\text{mm}$  >>  $d=144\text{mm}$

και διατίθενται και οι αντίστοιχοι μετατοπισμένοι, παρατίθενται οι ανώτερες τιμές των κατηγοριών ποιότητας για τους μη μετατοπισμένους τροχούς. Έτσι έχουμε:

$m=5\text{mm}$   $d=120\text{mm}$

$C=4$	$fid=3,32290$	$Fid=17,94366$
$C=5$	$fid=4,70000$	$Fid=25,38000$
$C=6$	$fid=6,64580$	$Fid=35,88732$
$C=7$	$fid=9,40000$	$Fid=50,76000$
$C=8$	$fid=13,29160$	$Fid=71,77464$
$C=9$	$fid=18,80000$	$Fid=101,52000$
$C=10$	$fid=26,58320$	$Fid=143,54928$
$C=11$	$fid=37,60000$	$Fid=203,04000$
$C=12$	$fid=53,17110$	$Fid=287,12394$

$m=6\text{mm}$   $d=144\text{mm}$

$C=4$	$fid=3,45016$	$Fid=18,63086$
$C=5$	$fid=4,88000$	$Fid=26,35200$
$C=6$	$fid=6,90032$	$Fid=37,26173$

C=7	fid=9,76000	Fid=52,70400
C=8	fid=13,80064	Fid=74,52346
C=9	fid=19,52000	Fid=105,40800
C=10	fid=27,60128	Fid=149,04691
C=11	fid=39,04000	Fid=210,81600
C=12	fid=55,20744	Fid=298,12018

Βάσει των τιμών αυτών θα γίνει η ένταξη των τροχών στις αντίστοιχες κατηγορίες ποιότητας, ακόμα και των μετατοπισμένων τροχών, καθώς δεν προβλέπεται κάποια αντίστοιχη προδιαγραφή για τους τροχούς αυτούς. Έπειτα από τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων θα μπορέσουμε να συμπεράνουμε αν και κατά πόσο επηρεάζει η μετατόπιση και το μέγεθος της, το επίπεδο ακρίβειας των τροχών.



### 3. Διατιθέμενος εξοπλισμός και εκτέλεση του Πειράματος

Για την πραγματοποίηση του πειράματος έχουμε στη διάθεσή μας, τη συσκευή Goulde Mikron 3R, αναβαθμισμένη από προηγούμενες διπλωματικές εργασίες με τις κατάλληλες ψηφιακές διατάξεις και ηλεκτροκινητήρα, τα πρόσθετα εξαρτήματά της από την κατασκευάστρια εταιρία, που πλέον δεν υφίσταται, ηλεκτρονικό υπολογιστή και οδοντωτούς τροχούς διαφόρων module και μετατοπίσεων.

#### 3.1. Η συσκευή Goulde Mikron 3R

Η συσκευή ελέγχου ποιότητας οδοντωτών τροχών Goulde Mikron 3R αποκτήθηκε από το εργαστήριο του Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου στις 28.06.1965. Κατόπιν σχετικής έρευνας μεταξύ των διαθέσιμων συσκευών ελέγχου οδοντώσεων της εποχής, επιλέχθηκε το μοντέλο Νο3 Rolling Gear Tester της εταιρίας Goulde Mikron ανάμεσα σε άλλες αντίστοιχες συσκευές των εταιριών Parkson, Mahr, Krautkramer, Tinius Olsen κ.ά.



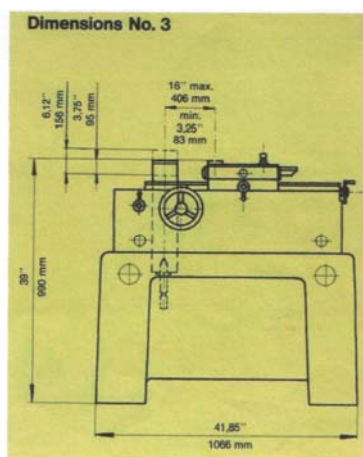
Εικόνα 3-1: Η συσκευή Goulde Mikron 3R

Η κατασκευάστρια εταιρία Goulder Mikron πλέον δεν υφίσταται και το συγκεκριμένο μοντέλο της αποκτήθηκε από τον αποκλειστικό αντιπρόσωπο Ember Trading Company, προσφέρει τη δυνατότητα δοκιμής οδοντωτών τροχών που συνεργάζονται σε αξονική απόσταση μεταξύ του διαστήματος 82-405mm. Τα μεγέθη οδοντώσεων, οι τιμές του module δηλαδή που μπορούν να ελεγχθούν είναι από 0,6 έως 8,5mm.

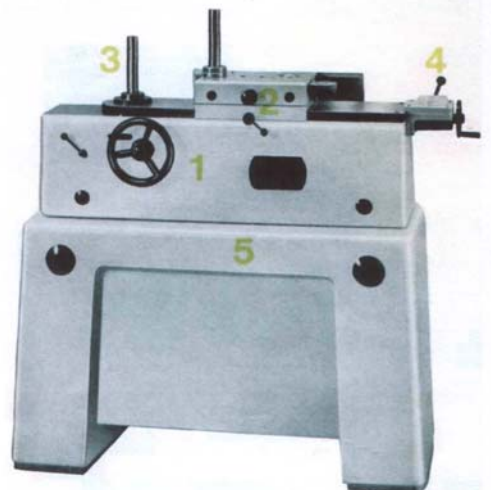
Βέβαια, καθώς η κατασκευάστρια εταιρία ήταν Βρετανική, οι διαστάσεις της συσκευής είναι όλες στο Αγγλοσαξονικό σύστημα, όμως παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου οδοντώσεων που είναι τυποποιημένες στο μετρικό σύστημα, με ικανοποιητική ακρίβεια, καθώς η διακριτική ικανότητα της συσκευής δεν εξαρτάται από το σύστημα μονάδων. Συγκεκριμένα, η διακριτική ικανότητα δεν διευκρινίζεται, όμως το σφάλμα ανάγνωσης στο καταγραφικό χαρτί της αναλογικής συσκευής καταγραφής ανέρχεται στο 1/1000 της ίντσας, δηλαδή 25,4  $\mu\text{m}$ .

Επειδή είναι αναγκαίο για τον ποιοτικό έλεγχο να καθορίζεται η ακρίβεια των μετρούμενων μεγεθών, θεωρήθηκε σκόπιμο να αναβαθμιστεί η συσκευή με τις κατάλληλες ψηφιακές διατάξεις, τόσο για να συμβαδίσει με τη σημερινή τεχνολογία, όσο και κυρίως για να καθοριστούν τα συστηματικά σφάλματα της λήψης των μετρήσεων. Για το λόγο αυτό, ανατέθηκαν στο παρελθόν διπλωματικές εργασίες με θέμα την επαναφορά της συσκευής σε λειτουργία και τον εκσυγχρονισμό της. Η έρευνα και η αγορά εξοπλισμού έγινε κατά την εκπόνηση διπλωματικής εργασίας το 1998 και η τοποθέτηση του και η γραφή κώδικα λογισμικού επεξεργασίας των μετρήσεων το 2005.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου με την οποία γίνεται η λήψη των μετρήσεων, δηλαδή η συνεργασία του υπό εξέταση τροχού με χρήση πρότυπου τροχού, είναι ότι οι μετρήσεις αντιστοιχούν σε πραγματικές συνθήκες συνεργασίας και το γεγονός αυτό καθιστά τη συσκευή Goulder Mikron 3R μια αξιόλογη συσκευή ελέγχου. Γι'αυτό άλλωστε κρίθηκε σκόπιμο να ανατεθεί η αναβάθμισή της στα πλαίσια διπλωματικών εργασιών.



Εικόνα 3-2: Οι κύριες διαστάσεις



Εικόνα 3-3: Τα μηχανικά υποσύνολα

Όπως περιγράφεται στο εγχειρίδιο της κατασκευάστριας εταιρίας, η συσκευή Goulder Mikron 3R αποτελείται από πέντε μηχανικά υποσύνολα και πολλά πρόσθετα εξαρτήματα. Οι κύριες διαστάσεις της φαίνονται στην εικόνα 3-2.

Το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος στο φορείο καθορίζεται από τον κατασκευαστή στα 34kg, ενώ στην κύρια άτρακτο επιτρέπεται να αναρτηθεί μέγιστο βάρος που ανέρχεται στα 181kg. Έτσι, σε συνδυασμό με τις μεγάλες της διαστάσεις, η συσκευή Goulder Mikron 3R, παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου αρκετά μεγάλων οδοντωτών τροχών.

### Τα πέντε μηχανικά υποσύνολα της συσκευής είναι τα εξής:

1. Τράπεζα. Η τράπεζα της συσκευής Goulder Mikron 3R φέρει διαμήκη αύλακα στο μέσο της ως οδηγό για τη μετακίνηση του φορείου. Η αύλακα, οι εκατέρωθεν αυτής επιφάνειες ολίσθησης του φορείου και ο κοχλίας κίνησης του επιβάλλεται να λιπαίνονται με στρώμα μολυβδαινιούχου γράσου (MoS<sub>2</sub>) χαμηλού ιξώδους, ώστε να διατηρείται επάνω στις επιφάνειες παρά την τακτική μετακίνηση του φορείου. Με το ίδιο γράσο προβλέπεται να λιπαίνονται και τα σώματα κύλισης στο εσωτερικό του φορείου, καθώς και τα έδρανα της κύριας ατράκτου, όπου όμως η λίπανση διατηρείται σε αρκετό βάθος χρόνου και δεν απαιτείται συχνά ανανέωση.

2. Φορείο και κλιμακόμετρο με βερνιέρο. Το φορείο είναι χυτό και κατασκευασμένο με πολύπλοκη εσωτερική διαμόρφωση. Αποτελείται από δύο τεμάχια τα οποία έρχονται σε επαφή κατά το οριζόντιο επίπεδο και φέρει διαμήκη



πείρο στη μία πλευρά του, ο οποίος του επιτρέπει να ανοίγει και να κλείνει όπως θα συνέβαινε με ένα κουτί με καπάκι. Εντός του φορείου υπάρχουν τέσσερα κυλινδρικά σώματα κύλισης, τα οποία εξασφαλίζουν την ελεύθερη και ατριβή μετατόπιση του άνω μισού του φορείου, όπου εδράζεται ο πρότυπος τροχός. Επιπλέον, εντός του φορείου είναι τοποθετημένο ένα ελατήριο μέτριας σκληρότητας με δυνατότητα προφόρτισης, που εξασφαλίζει την ύπαρξη της προβλεπόμενης κάθε φορά δύναμης επαναφοράς του άνω μισού του φορείου. Για την ασφαλή έδραση του πρότυπου τροχού, στο άνω μισό του φορείου υπάρχει οπή με εσωτερικό σπείρωμα και κοχλία στην οποία στερεώνεται το έδρανο του τροχού.

Η ανάγνωση των ενδείξεων μεταβολής στην αξονική διεύθυνση αρχικά γινόταν με καταγραφή από κατάλληλη συσκευή με γραφίδα σε μιλιμετρέ χαρτί. Η τοποθέτηση του φορείου στην προβλεπόμενη κάθε φορά απόσταση γινόταν με τη βοήθεια μετρητικού κανόνα και βερνιέρου, με ακρίβεια επιβαλλόμενη από το σφάλμα ανάγνωσης ίση με 20μm.

3. Τρύμα με άτρακτο και ενσωματωμένο κεντροφορέα στο κατώτερο τμήμα του. Το τρύμα της κύριας ατράκτου έχει τη δυνατότητα να κινείται κατά τον κατακόρυφο άξονα και να σταθεροποιείται στο επιθυμητό ύψος με τη βοήθεια χειροκίνητου τροχού και μοχλού-φρένου, ώστε το εκάστοτε ζεύγος τροχών να βρίσκεται στο ίδιο ύψος για να μπορεί να συνεργαστεί, αλλά και για να εξετάζεται σε όλο το πλάτος του ο υπό εξέταση τροχός. Στα δύο άκρα του τρύματος στερεώνονται τα έδρανα ολίσθησης της κύριας ατράκτου.

4. Μηχανισμός ταχείας επιστροφής φορείου. Το εξάρτημα ταχείας επιστροφής φορείου είναι πολύ εξυπηρετικό σε διαδοχικές μετρήσεις οδοντωτών τροχών της ίδιας διαμέτρου και module. Επιτρέπει την ταχύτερη απομάκρυνση του φορείου από την κύρια άτρακτο κατά 38mm χωρίς να χρειάζεται να μετρηθεί εκ νέου η απόσταση των αξόνων κατά την τοποθέτηση του επόμενου υπό εξέταση τροχού.

5. Χυτοσιδηρή βάση. Η χυτοσιδηρή βάση της συσκευής εξυπηρετεί στην τοποθέτηση της σε ύψος τέτοιο ώστε η τράπεζα να είναι εύκολα προσβάσιμη από το χειριστή, αλλά και στην πάκτωση της συσκευής για την αποφυγή ταλαντώσεων που έχουν αρνητικές επιπτώσεις στις μετρήσεις.

### 3.2. Πρόσθετες συσκευές παρεχόμενες από την κατασκευάστρια εταιρία

Η συσκευή ελέγχου οδοντωτών τροχών Goulder Mikron 3R είναι κατασκευασμένη για να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε λειτουργικότητα, ακρίβεια και πιστή αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων σε σειρά ίδιων δοκιμών. Με χρήση πρόσθετων εξαρτημάτων που παρείχε η κατασκευάστρια εταιρία και υπάρχουν στο εργαστήριο του Τομέα, γίνεται δυνατή η εξέταση πολλών διαφορετικών ειδών οδοντωτών τροχών, ελικοειδών, κωνικών και ατέρμωνων κοχλιών, οπότε και επεκτείνονται οι δυνατότητες της συσκευής.

Οι διάφορες αυτές ιδιοσυσκευές είναι οι εξής:

1. Η πλάκα προέκτασης, που προσαρμόζεται στην άνω επιφάνεια του σώματος του φορείου με δύο κοχλίες εξαγωνικής κεφαλής. Φέρει άτρακτο διαμέτρου 58,72mm σε απόσταση αξόνων 76,2mm από την άτρακτο του φορείου και δίνει τη δυνατότητα να μειωθεί η ελάχιστη αξονική απόσταση συνεργασίας.

2. Ο βραχίονας ατέρμονα κοχλία, που επίσης προσαρμόζεται στην άνω επιφάνεια του φορείου με δύο κοχλίες, αφού πρώτα εφαρμόσει σε αυτόν η βάση της ατράκτου του φορείου. Έχει τη δυνατότητα περιστροφικής κίνησης και προς τις δύο κατευθύνσεις, γύρω από το οριζόντιο και παράλληλο με το σώμα της συσκευής άξονά του, κατά 10 μοίρες προς κάθε κατεύθυνση. Στις δύο πλευρές του φέρει ολισθαίνοντες κεντροφορείς, με τους οποίους είναι δυνατό να συγκρατηθεί ο πρότυπος ατέρμων κοχλίας, ενώ μπορεί ακόμα να περιστρέφεται κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Η ελάχιστη αξονική απόσταση συνεργασίας που επιτυγχάνεται είναι 31,75mm.

3. Η συσκευή ελέγχου ευθυγράμμισης, που τοποθετείται στην ίδια θέση με τις παραπάνω συσκευές, με τον ίδιο τρόπο πρόσδεσης. Φέρει ολισθαίνουσα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση βάση, στην οποία στερεώνεται σε οριζόντια θέση ειδικό μετρητικό ωρολόγιο με οριζόντιο, επίσης, βραχίονα. Όταν ο βραχίονας έρχεται σε επαφή με το προφίλ του υπό έλεγχο τροχού και καθώς ο τροχός περιστρέφεται, από τις ενδείξεις του ωρολογίου γίνεται φανερό αν ο άξονας του τροχού δεν είναι ευθυγραμμισμένος κατάλληλα. Η ακρίβεια του ωρολογίου ανέρχεται στα 25,4 μm (0,001 in).

4. Οι δίσκοι ελέγχου, που έχουν την ίδια διάμετρο που προβλέπεται και για τις ατράκτους των τροχών και προσαρμόζονται εύκολα σε αυτές. Ο ένας εκ των δύο

δίσκων έχει γνωστή εκκεντρότητα, η οποία καθορίζεται από τον κατασκευαστή στα 0,30mm, ενώ ο άλλος είναι απόλυτα συμμετρικός.



Εικόνα 3-4: Η πλάκα προέκτασης



Εικόνα 3-5: Η συσκευή ελέγχου ευθυγράμμισης



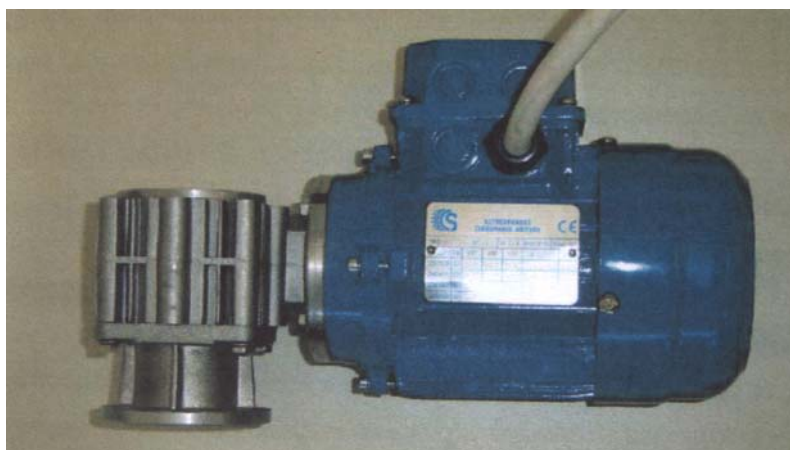
Εικόνα 3-6: Ο βραχίονας ατέρμονα κοχλία



Εικόνα 3-7: Οι δίσκοι ελέγχου

### 3.3. Επιπρόσθετος εξοπλισμός και ψηφιακές διατάξεις

Η συσκευή Goulder Mikron 3R εκσυγχρονίστηκε με εξοπλισμό που περιλαμβάνει σύστημα κινητήρα τριφασικού ρεύματος, ισχύος 0,12 HP ή 0,09 KW με μειωτήρα ατέρμονα κοχλία, σχέσης μετάδοσης  $i=25$  για την επίτευξη χαμηλών στροφών στην κύρια άτρακτο. Όμως επειδή οι 1450 RPM του κινητήρα με τη μεσολάβηση του μειωτήρα ελαττώνονται μόνο μέχρι τις 58 RPM και υπάρχει ανάγκη για εξασφάλιση της απουσίας δυναμικών φαινομένων για να είναι αξιόπιστες οι μετρήσεις, αναζητήθηκε για την τροφοδοσία και οδήγηση του κινητήρα ένα ηλεκτρονικό inverter και επιλέχθηκε το OptiDrive-E της Invertek. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται η βραδεία περιστροφή των τροχών και κατά συνέπεια διαρκεί περισσότερο χρόνο η λήψη των μετρήσεων, άρα καταγράφονται περισσότερες μετρήσεις. Το inverter είναι ικανό να διαχειριστεί ισχύ έως και 0,37 KW, ανήκει στην αμέσως μεγαλύτερη τυποποιημένη κατηγορία που διατίθεται στο εμπόριο και επιτυγχάνει τη σταθερότητα των στροφών. Διαθέτει μνήμη στον οποία εισάγονται τα χαρακτηριστικά του κινητήρα, δηλαδή οι ονομαστικές στροφές λειτουργίας του και προεπιλέγεται ανώτατο και κατώτατο όριο επιτρεπόμενων στροφών.



Εικόνα 3-8: Σύστημα μειωτήρα ατέρμονα κοιλία -ηλεκτροκινητήρα



Εικόνα 3-9: Το χρησιμοποιούμενο inverter της OptiDrive της Invertek

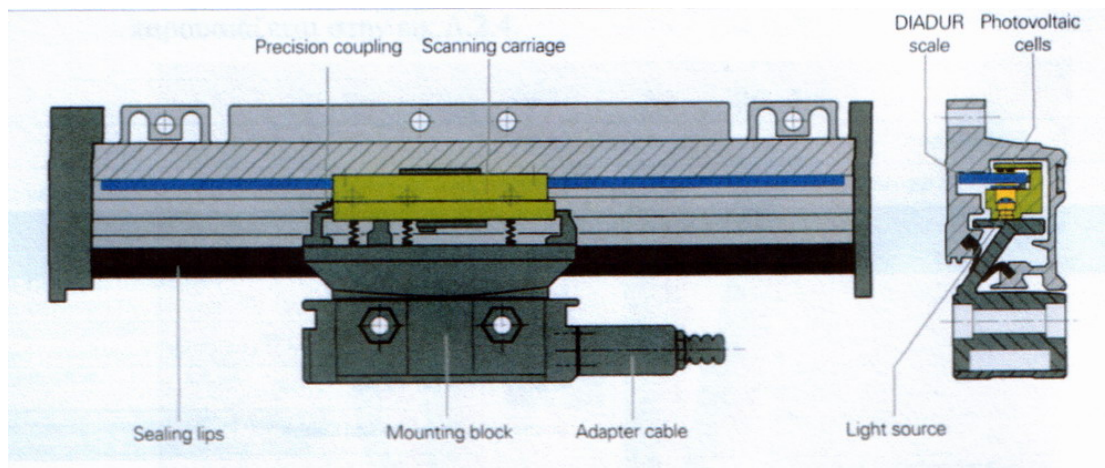
Η λήψη των μετρήσεων με τη συσκευή Goulder Mikron 3R και όπως υπαγορεύει η μέθοδος μέτρησης σφαλμάτων με χρήση πρότυπου τροχού, αφορά στη μέτρηση της γωνίας περιστροφής του υπό εξέταση τροχού, του κινητήριου της διάταξης και της μετατόπισης του πρότυπου, του κινούμενου τροχού. Αυτό διότι ενδιαφερόμαστε άμεσα για τον εντοπισμό της θέσης επί του εξεταζόμενου τροχού που θα παρουσιαστεί απόκλιση από τη θεωρητική τιμή της γεωμετρίας του και επιπλέον διότι θα υπήρχαν σημαντικές αποκλίσεις στην ακρίβεια αν ο πρότυπος τροχός ήταν ο κινητήριος καθώς η μετρούμενη μετατόπιση δε θα αντιστοιχούσε επακριβώς στη γωνία που αυτή συμβαίνει και θα αλλοιωνόταν το μέγεθός της.

Έτσι επιλέχθηκαν δύο ψηφιακά όργανα, ο μετρητικός κανόνας LF 401 και το γωνιόμετρο ROD 450,000-5,000 , της εταιρίας Heidenhain που τοποθετήθηκαν ο μεν κανόνας επί του φορείου της συσκευής, το δε γωνιόμετρο επί της κύριας ατράκτου. Τα όργανα αυτά παρέχουν σημαντικά βελτιωμένη ακρίβεια των μετρήσεων και συγκεκριμένα με τον κανόνα το μέγιστο σφάλμα που προκύπτει είναι 0,08  $\mu\text{m}$  για μία περίοδο σήματος, δηλαδή 4 $\mu\text{m}$ , όσο είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων αναφοράς στη βαθμονομημένη κλίμακα του, ενώ το μέγιστο μήκος

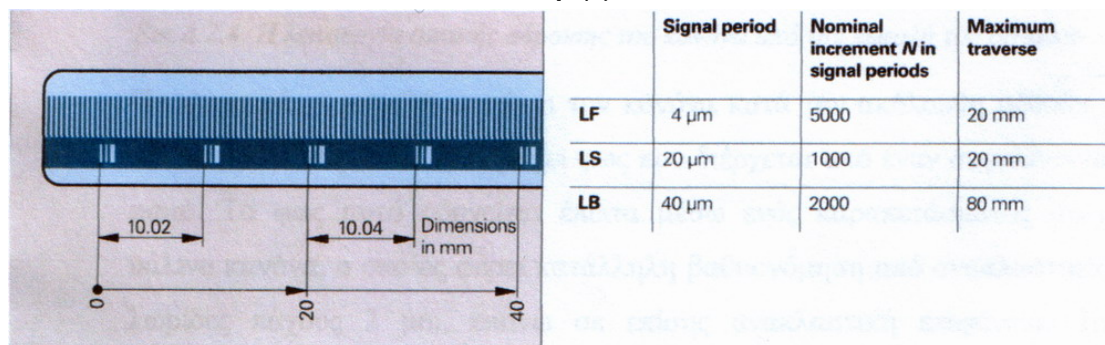
μέτρησης είναι 401mm, και η ακρίβεια του γωνιόμετρου σύμφωνα με τον κατασκευαστή ανέρχεται στα 5'' (δεύτερα λεπτά της μοίρας).

Τα δύο αυτά όργανα συνδέονται στον υπολογιστή του εργαστηρίου με χρήση της αντίστοιχης μετρητικής κάρτας, που επιλέχθηκε να είναι η IK 220 και συνδέθηκε στη μητρική κάρτα του υπολογιστή με διάυλο PCI. Τα χαρακτηριστικά της είναι

- Διακριτική ικανότητα 48 bits
- Βήμα μέτρησης (υποδιαίρεση σήματος) 4096
- Συχνότητα δειγματοληψίας 500 kHz (για είσοδο 1 Vpp)
- Εσωτερική μνήμη 8192 τιμών-θέσεων

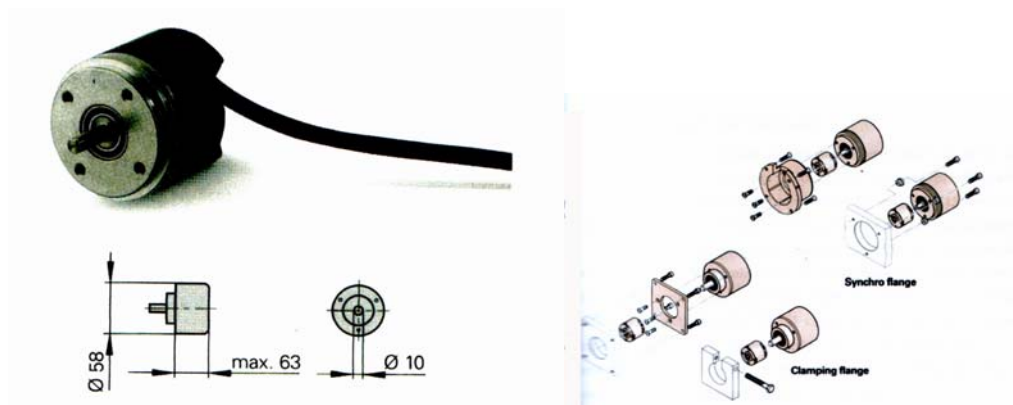


Εικόνα 3-10: Σκαρίψιμο του κανόνα



Εικόνα 3-11: Η βαθμονόμηση του κανόνα



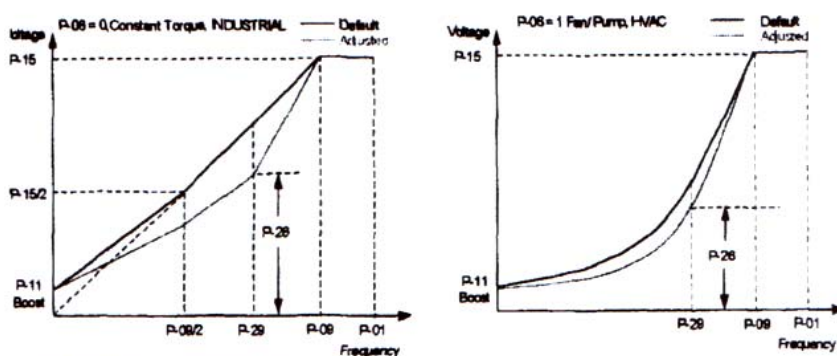


Εικόνα 3-12 Οι γενικές διαστάσεις του μετρητικού οργάνου ROD 450

IK 220				
<b>Universal PC counter card</b> The IK 220 is an adapter card for AT compatible PCs for measured value acquisition of <b>two incremental or absolute linear and angular encoders</b> . The subdivision and counting electronics <b>subdivide the sinusoidal input signals up to 4096-fold</b> . Driver software is included.				
<b>Input signals (switchable)</b>	<table border="1"> <tr> <td><math>\sim 1 \text{ V}_{pp}</math></td> <td><math>\sim 11 \mu\text{A}_{pp}</math></td> <td>EnDat SSI</td> </tr> </table>	$\sim 1 \text{ V}_{pp}$	$\sim 11 \mu\text{A}_{pp}$	EnDat SSI
$\sim 1 \text{ V}_{pp}$	$\sim 11 \mu\text{A}_{pp}$	EnDat SSI		
Encoder inputs	Two D-sub ports (15-pin), male			
Input frequency (max.)	500 kHz      33 kHz      -			
Cable length (max.)	60 m (197 ft)      10 m (32.8 ft)			
<b>Signal subdivision</b>	Up to 4096-fold (signal period : measuring step)			
<b>Data register for measured values (per channel)</b>	48 bits (44 bits used)			
<b>Internal memory</b>	For 8192 position values			
<b>Interface</b>	PCI bus (plug and play)			
<b>Driver software and demonstration program</b>	<b>For Windows 95/98/NT/2000/XP</b> in VISUAL C++, VISUAL BASIC and BORLAND DELPHI			
<b>Dimensions</b>	Approx. 190 mm x 100 mm			

Εικόνα 3-13: Η μετρητική κάρτα IK 220

STANDARD PARAMETER SET					
Par.	Description	Range	Default	Explanations	Set to
P-01	Maximum speed	P-02 to 5*P-09 (max 1kHz)	50Hz	Maximum speed limit - Hz or rpm. See P-10	
P-02	Minimum speed	0 to P-01 (max 1kHz)	0Hz	Minimum speed limit - Hz or rpm. See P-10	
P-03	Accel ramp time (s)	0 to 3.000s	5s	Acceleration ramp time from 0 to base speed (P-9) in seconds	
P-04	Decel ramp time (s)	0 to 3.000s	5s	Deceleration ramp time from base speed (P-9) to 0 in seconds	
P-05	Stop mode select	0: 2 Ramp stop 1: Coast to stop	0	If the supply is lost and P-05=0 then the drive will try to continue running by reducing the speed of the load using the load as a generator. If P-05=2, the drive ramps at P-07 to stop.	
P-06	V/f characteristic	0: Constant torque 1: Pump/fan, HVAC INDUSTRIAL	0	Either $V = k\sqrt{f}$ (linear) or $V = kf^2$ (pumps / fans with HVAC rating). Note when P-06 is set to 1 the ramps are automatically set to 60s.	
P-07	Fast stop (s)	0 to 25s (Disabled when 0 Gs)	0 Gs	Deceleration ramp time after mains loss (P-05 = 0 or 2) or when fast stop activated (see P-19). When P-05 = 2 and P-07 = 0, activating the fast stop disables the drive without braking (effectively coasting to stop).	
P-08	Motor rated current	25% - 100% of drive current rating	Drive rating	Rated (nameplate) current of the motor (Amps). In HVAC (P-06 = 1) mode, the rated motor current limit is increased, allowing P-08 to be set to a higher level.	
P-09	Motor rated frequency	25Hz to 1kHz	50 Hz	Rated (nameplate) frequency of the motor. Changing P-09 resets P-02, P-10, P-26 & P-28 to 0, & P-01=P-09.	
P-10	Motor rated speed	0: P-09*12 to P-09*60 eg for 50Hz motor, range is 600 to 3000 rpm	0	When non-zero, speed is displayed in rpm in parameters P-01, P-02, P-20, P-23, P-27 and P-28, also slip compensation is automatically activated whenever this parameter is non-zero - see also P-24.	
P-11	Voltage boost	0 to 25% of max output voltage	3%	Applies an adjustable boost to the Optidrive voltage output at low speed to assist with starting 'sticky' loads. For continuous applications at low speed use a forced ventilated motor.	
P-12	Terminal or Keypad control	0: Terminal control 1: Keypad control - fwd only 2: Keypad control - fwd and rev 3: Terminal control 4: Not used	0 (Terminal control)	When P-12 = 2, the keypad START key toggles between forward and reverse. When stopped, target speed can be accessed / changed using the STOP & ▲ ▼ buttons.	
P-13	Trip log	Last four trips stored	Read only	Most recent 4 trips stored in order of occurrence. In on entry, display shows most recent first. Press ▲ or ▼ to step through all four.	
P-14	Extended menu access	Code 0 to 9999	0	Set to '01' (default) for extended menu access. Change code in P-37 to prevent unauthorised access to the Extended Parameter Set.	



#### GENERAL TECHNICAL DATA

- Supply frequency 48 to 62 Hz.
- Max. permissible 3-phase supply imbalance 3%.
- Max. ambient temperature 50 °C.
- Max. altitude 2000 m.
- Derate above 1000 m, 1% / 100 m.
- Derate output current 5%/°C above max. ambient temp up to 55°C
- I x t protection above 100% output current.
- 150% overload protection for 60 sec.
- 175% overload allowable for 2 sec.
- Storage temperature -40 to +60 °C

Εικόνα 3-14: Τεχνικά δεδομένα του inverter της OptiDrive

### 3.4. Διαθέσιμοι οδοντωτοί τροχοί

Οι πρότυποι οδοντωτοί τροχοί που έχει στη διάθεση του το εργαστήριο είναι τρεις και είναι οι εξής:

Πρότυπος οδοντωτός τροχός  $m=3$   $z=38$   $b=25$

>>  $m=5$   $z=24$   $b=40$

>>  $m=6$   $z=24$   $b=40$



Εικόνα 3-15: Πρότυπος Τροχός module 3



Εικόνα 3-16: Πρότυπος Τροχός module 5



Εικόνα 3-17: Πρότυπος Τροχός module 6

Για τους σκοπούς του πειράματος έγινε παραγγελία 12 οδοντωτών τροχών από την εταιρία «Τσιρίκος Α.Ε.» με τα εξής χαρακτηριστικά:

Οδοντωτός τροχός	1	m=3	z=38	b=30	d0=114	dk=120	x=0
Οδοντωτός τροχός	2	m=3	z=38	b=30	d0=114	dk=121,8	x=0,3
Οδοντωτός τροχός	3	m=3	z=38	b=30	d0=114	dk=123,6	x=0,6
Οδοντωτός τροχός	4	m=3	z=38	b=30	d0=114	dk=126	x=1
Οδοντωτός τροχός	5	m=5	z=24	b=45	d0=120	dk=130	x=0
Οδοντωτός τροχός	6	m=5	z=24	b=45	d0=120	dk=133	x=0,3
Οδοντωτός τροχός	7	m=5	z=24	b=45	d0=120	dk=136	x=0,6
Οδοντωτός τροχός	8	m=5	z=24	b=45	d0=120	dk=140	x=1
Οδοντωτός τροχός	9	m=6	z=24	b=45	d0=144	dk=156	x=0
Οδοντωτός τροχός	10	m=6	z=24	b=45	d0=144	dk=159,6	x=0,3
Οδοντωτός τροχός	11	m=6	z=24	b=45	d0=144	dk=163,2	x=0,6
Οδοντωτός τροχός	12	m=6	z=24	b=45	d0=144	dk=168	x=1

Οι οδοντωτοί τροχοί κόπηκαν με το ίδιο εργαλείο για κάθε module και θα διερευνήσουμε την επίδραση της μετατόπισης στο ολικό σύνθετο σφάλμα και στο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα, για τις ίδιες συνθήκες κοπής. Να σημειωθεί πως η τιμή  $x$  εκφράζει το ποσοστό του module που γίνεται η μετατόπιση, δηλαδή η μετατόπιση είναι  $C=x m$  και συνεπώς τροχοί διαφορετικού module με ίδια τιμή για το  $x$ , έχουν διαφορετική μετατόπιση. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε ως μετατόπιση την τιμή του  $x$  για λόγους απλότητας.





**Εικόνα 3-18: Οι υπό εξέταση τροχοί τοποθετημένοι ανά module**

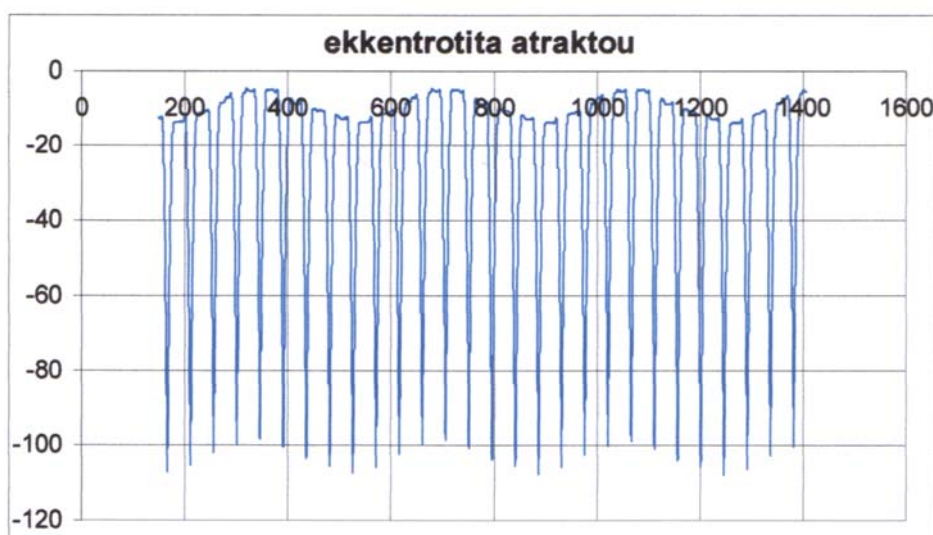


**Εικόνα 3-19: Οι υπό εξέταση τροχοί του εργαστηρίου**

### 3.5 Διαδικασία της λήψης των μετρήσεων και εκτίμηση σφαλμάτων της συσκευής

Πριν από οποιαδήποτε μέτρηση θα πρέπει να ελεγχθεί και να ρυθμιστεί η συσκευή ώστε να πληρούνται οι βασικές κινηματικές και μηχανικές απαιτήσεις του εξοπλισμού, όπως αυτές περιγράφονται στην παράγραφο 2-2, αλλά και να καθοριστεί το συνολικό σφάλμα της μεθόδου για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Κατ'αρχήν, με την πλάκα προέκτασης ερευνούμε την ύπαρξη εκκεντρότητας στην κύρια άτρακτο, φέρνοντας τα δύο αυτά στοιχεία σε επαφή με μεσολάβηση στρώματος λίπανσης και θέτοντας την άτρακτο σε περιστροφή. Προκύπτει η ακόλουθη κυματομορφή, όπως διαπιστώθηκε από την ανακατασκευή της συσκευής, που καταδεικνύει εκκεντρότητα της τάξης των 10 $\mu$ m.



**Διάγραμμα 3-1: Καταγραφή της εκκεντρότητας της ατράκτου**

Απαραίτητη για τη διεξαγωγή του πειράματος είναι η ρύθμιση της προέντασης του ελατηρίου, που από τις ενδεικτικές τιμές επιλέγεται να είναι για όλους τους τροχούς που θα ελέγξουμε ίση με 1kg. Η απόσταση σφιχτής συνεργασίας για το κάθε ζεύγος τροχών προκύπτει με επαναληπτική μέθοδο μεταβάλλοντας στις παρακάτω σχέσεις την ακτίνα  $r_x$  έως ότου το άθροισμα των παχών των οδόντων να γίνει ίσο με το βήμα  $t_x$  στην εν λόγω ακτίνα.

$$\phi_0 = \tan a_0 - a_0$$

$$r_0 = \frac{m \cdot z}{2}$$

$$\phi_{x1} = \tan(\arccos \frac{r_g}{r_{x1}}) - \arccos \frac{r_g}{r_{x1}}$$

$$\phi_{x2} = \tan(\arccos \frac{r_g}{r_{x2}}) - \arccos \frac{r_g}{r_{x2}}$$

$$S_0 = C \cdot s \cdot \pi \cdot m$$

$$S_{x1} = r_{x1} \left[ \frac{S_0}{r_{01}} + 2 \cdot (\phi_0 - \phi_{x1}) \right]$$

$$S_{x2} = r_{x2} \left[ \frac{S_0}{r_{02}} + 2 \cdot (\phi_0 - \phi_{x2}) \right]$$

$$r_{g1} = r_{01} \cos a$$

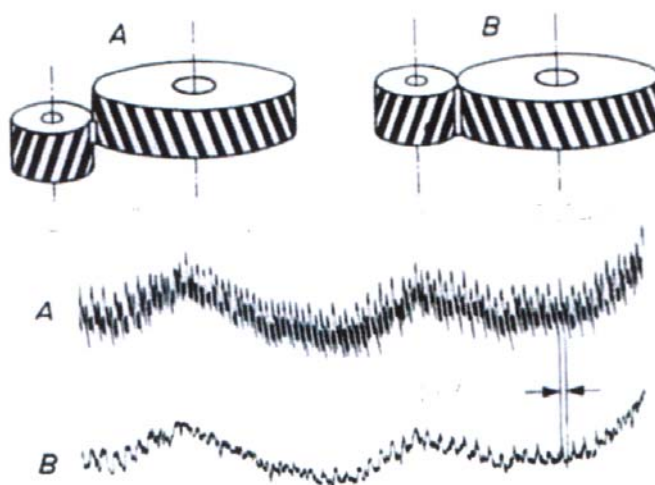
$$r_{g2} = r_{02} \cos a$$

$$t_0 = \pi \cdot m$$

$$t_x = 2 \cdot \pi \cdot \frac{r_{x1}}{z_1} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{r_{x2}}{z_2}$$

Για την αποφυγή εμφάνισης δυναμικών φαινομένων κατά την περιστροφή των τροχών επιβάλλεται η γωνιακή ταχύτητα να διατηρείται χαμηλή, γι' αυτό ρυθμίζεται στις 12-15 RPM ή και χαμηλότερη. Στην εμφάνιση κραδασμών κατά τη λειτουργία επιδρά και ο βαθμός επικάλυψης, όπως γίνεται αντιληπτό από τα γραφήματα του παρακάτω σχήματος που αντιστοιχούν στις δύο περιπτώσεις συνεργασίας ελικοειδών τροχών, με επαφή κατά ένα τμήμα του πλάτους τροχών και με επαφή ολόκληρου του πλάτους τους. Όταν οι τροχοί συνεργάζονται με επαφή ενός τμήματος του πλάτους τους υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις, συνεπώς ο υπό εξέταση τροχός, που είναι και ο κινητήριος, θα πρέπει να τοποθετείται με τρόπο ώστε οι πάνω και αντίστοιχα οι κάτω επιφάνειες των τροχών να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, ανάλογα με το τμήμα του τροχού που εξετάζεται. Λαμβάνονται τρεις μετρήσεις για κάθε τροχό, μία για το μεσαίο τμήμα του, μία για το πάνω και μία για το κάτω τμήμα του. Για τις δύο τελευταίες πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να μην υπάρξει επίδραση του βαθμού επικάλυψης και να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των τριών μετρήσεων. Οι υπό εξέταση τροχοί επιλέχθηκε να είναι παχύτεροι κατά 5mm από τους πρότυπους επειδή

η μέθοδος μέτρησης με πρότυπο τροχό επιβάλλει να είναι οι υπό εξέταση τροχοί αυτοί που μεταδίδουν την κίνηση.



Σχήμα 3-1: Η επίδραση του βαθμού επικάλυψης στο παραγόμενο γράφημα

### 3.6 Οδηγός χειρισμού του εξοπλισμού

α/α	Περιγραφή ενέργειας	Παρατήρηση	Έλεγχος
1	Έλεγχος κατάστασης της συσκευής	Γενικός οπτικός έλεγχος	
2	Κοχλίωση καλωδίων μετρητικών οργάνων στον Η/Υ		
3	Τροφοδοσία με ηλεκτρικό ρεύμα τάσης 220 V		
4	Έλεγχος όδευσης των καλωδίων	Δεν πρέπει να παρεμβάλλονται στη διαδρομή των κινητών στελεχών της συσκευής	
5	Έλεγχος ύπαρξης άλλων εμποδίων /ξένων σωμάτων	Εκτός των δύο ράβδων stop στην αύλακα κίνησης του φορείου	
6	Επιβεβαίωση ασφαλισμένου άνω μισού φορείου		
7	Επιβεβαίωση απασφαλισμένου φρένου φορείου		
8	Απομάκρυνση φορείου	ΠΡΟΣΟΧΗ! Όχι περισσότερο απ'ότι επιτρέπει η διαδρομή του μετρητικού κανόνα	
9	Κοχλίωση ατράκτου πρότυπου τροχού στο φορείο		
10	Τοποθέτηση κατάλληλου πρότυπου οδοντωτού τροχού	Έλεγχος κατατομών για ύπαρξη ξένων σωμάτων / ρύπων	
11	Ρύθμιση προέντασης ελατηρίου και ασφάλιση		
12	Ρύθμιση κύριας ατράκτου σε		

α/α	Περιγραφή ενέργειας	Παρατήρηση	Έλεγχος
	ύψος		
13	Ασφάλιση κύριας ατράκτου με φρένο	ΠΡΟΣΟΧΗ! Όχι υπερβολική σύσφιξη επειδή ο μηχανισμός είναι ευαίσθητος	
14	Τοποθέτηση του εξεταζόμενου τροχού στο πολύσφηνο και σημείωση αρχής περιστροφής στη μετωπική επιφάνεια	Έλεγχος κατατομών για ύπαρξη ξένων σωμάτων / ρύπων	
15	Απασφάλιση βραχίονα γωνιόμετρου και κάθοδος στην επιθυμητή θέση	ΠΡΟΣΟΧΗ! Με την απασφάλιση ο βραχίονας κινδυνεύει να κατέλθει ανεξέλεκτα και να καταστραφεί	
16	Ασφάλιση βραχίονα		
17	Έλεγχος ασφαλούς όδευσης καλωδίων μετρητικών οργάνων		
18	Απασφάλιση του άνω μισού φορείου		
19	Προσέγγιση φορείου		
20	Επίτευξη σφιχτής συνεργασίας και ασφάλιση φρένου φορείου	ΠΡΟΣΟΧΗ! Το άνω μισό του φορείου πρέπει να παραμείνει απασφαλισμένο	
21	Εκκίνηση Η/Υ		
22	Εκκίνηση προγράμματος “Data Recorder”		
23	Μηδενισμός ενδείξεων οργάνων		
24	Έλεγχος απασφάλισης του άνω μισού του φορείου	ΠΡΟΣΟΧΗ! Κίνδυνος πρόκλησης βλάβης αν παραβλεφθεί	
25	Εκκίνηση ηλεκτροκινητήρα με το πράσινο κομβίο ελέγχου		
26	Ρύθμιση στροφών ηλεκτροκινητήρα με ποτενσιόμετρο	Οι στροφές να ρυθμιστούν περί τις 300 RPM	
27	Εκκίνηση καταγραφής στο πρόγραμμα “Data Recorder”		
28	Καταγραφή ικανού αριθμού περιστροφών	3-5 περιστροφές κρίνονται αρκετές για τις περισσότερες περιπτώσεις	
29	Παύση καταγραφής στο “Data Recorder”		
30	Τερματισμός λειτουργίας ηλεκτροκινητήρα με το κόκκινο κομβίο ελέγχου	Ο ηλεκτροκινητήρας δεν πρέπει να λειτουργεί άσκοπα καθώς με τον επιθυμητό χαμηλό ρυθμό περιστροφής θερμαίνεται γρήγορα	
31	Αποθήκευση των μετρήσεων στο “Data Recorder”	Όνομα της μορφής «values.txt» στον φάκελο C:MatLab/work	
32	Εκκίνηση MatLab και “τρέξιμο”	Αλλαγή κάθε φορά του	

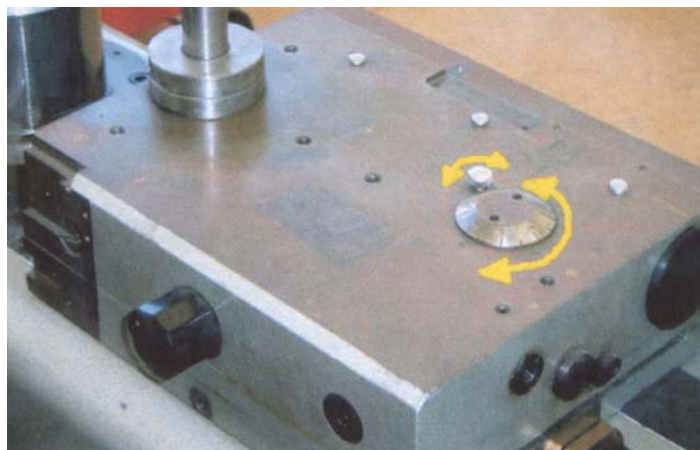
α/α	Περιγραφή ενέργειας	Παρατήρηση	Έλεγχος
	του προγράμματος επεξεργασίας των μετρήσεων	ονόματος του αρχείου που περιέχει τις μετρήσεις που θα επεξεργαστούν στη MatLab σε «values.txt»	
33	Επισκόπηση αποτελεσμάτων και αποθήκευσή τους	Ή / και εκτύπωση	
34	Απασφάλιση φορείου και απομάκρυνση του με το μηχανισμό ταχείας απομάκρυνσης	ΠΡΟΣΟΧΗ! Όχι περισσότερο από ότι επιτρέπει η διαδρομή του μετρητικού κανόνα	
35	Απελευθέρωση ελατηρίου φορείου		
36	Ασφάλιση άνω μισού φορείου		
37	Αφαίρεση πρότυπου τροχού και αποκοιλίωση ατράκτου		
38	Απασφάλιση βραχίονα γωνιόμετρου και επαναφορά σε υψηλότερη θέση		
39	Αφαίρεση εξεταζόμενου τροχού		
40	Απενεργοποίηση Η/Υ και αφαίρεση τροφοδοσίας		

Πίνακας 3-1: Ο οδηγός χειρισμού του εξοπλισμού

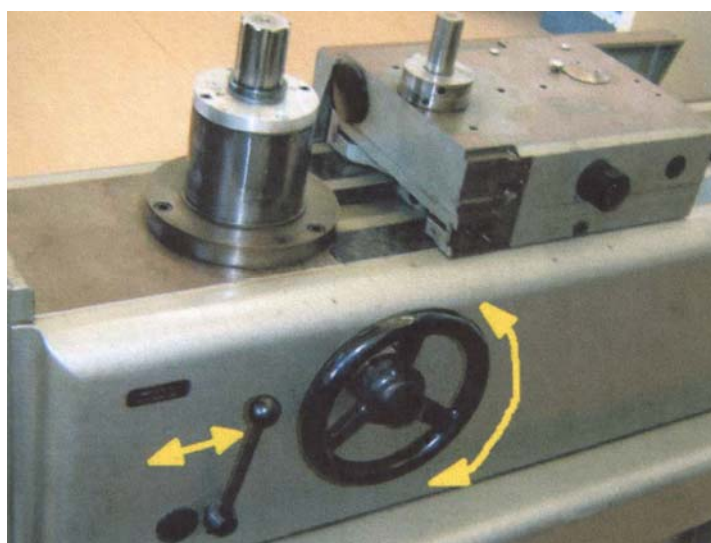
Προτείνεται η ακόλουθη φόρμα καταγραφής των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας των μετρήσεων:

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)		
Αριθμός οδόντων	Z		
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)		
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)		
Μετατόπιση	x (mm)		
Πλάτος	b (mm)		
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)		
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)		
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$		
Τυπική απόκλιση	std		
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$		
Εκκεντρότητα	$F_r$		
Παρατηρήσεις:			

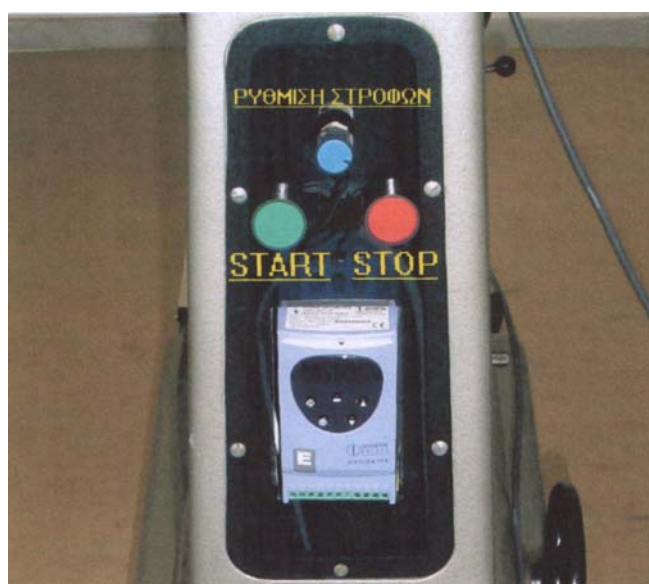
Πίνακας 3-2: Η προτεινόμενη φόρμα καταγραφής



Εικόνα 3-20: Ρύθμιση της προέντασης του ελατηρίου



Εικόνα 3-21: Ρύθμιση της ατράκτου καθ' ύψος



Εικόνα 3-22: Ρύθμιση στροφών



### 3.7 Εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων και εύρεση αναδρομικής σχέσης σύνθετων σφαλμάτων-μετατόπισης

Το σφάλμα της μέτρησης είναι η διαφορά μεταξύ του αποτελέσματος μιας μέτρησης και της πραγματικής τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Η θεωρία των σφαλμάτων δίνει τους κανόνες υπολογισμού του σφάλματος μιας μέτρησης, λαμβάνοντας υπ' όψιν όλους τους επιμέρους παράγοντες που προκαλούν σφάλματα κατά τη διαδικασία λήψης των μετρήσεων. Ανάλογα με την προέλευση τους τα σφάλματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Αυτές είναι:

Τα συστηματικά σφάλματα, τα σφάλματα δηλαδή που παραμένουν αμετάβλητα σε διαδοχικές μετρήσεις, ή που μεταβάλλονται με συστηματικό τρόπο. Μπορεί να οφείλονται σε ατέλειες των χρησιμοποιούμενων οργάνων, στη μέθοδο που επιλέγεται ή και στον ίδιο τον παρατηρητή. Τέτοια είναι:

Σφάλμα μηδενός: Πολύ κοινό σφάλμα που προκύπτει όταν ο δείκτης του οργάνου έχει μετατοπιστεί σε σχέση με την κλίμακά του. Αφορά κυρίως στα αναλογικά όργανα και στη συσκευή Goulder Mikron 3R είναι μηδενικό.

Σφάλμα μέτρησης του οργάνου: που είναι η απόκλιση της ένδειξης του οργάνου από την πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Όπως ήδη αναφέρθηκε για το μετρητικό κανόνα το σφάλμα αυτό ανέρχεται στα 0,08μm ανά 4μm και για το γωνιόμετρο στα 5'' (δεύτερα λεπτά της μοίρας).

Σφάλμα λόγω των συνθηκών μέτρησης: Ανάλογα με τις συνθήκες μέτρησης τα μετρητικά όργανα μπορεί να λειτουργήσουν με μικρότερη ακρίβεια από την προβλεπόμενη. Θα πρέπει να τηρούνται οι προδιαγραφές που θέτει ο κατασκευαστής για τις συνθήκες μέτρησης.

Σφάλμα οφειλόμενο στον παρατηρητή: είναι το σφάλμα που προκύπτει ως συνέπεια εσφαλμένης ανάγνωσης μιας ένδειξης ή χειρισμού του οργάνου. Με τον εξοπλισμό που διαθέτουμε, μπορούμε να θεωρήσουμε αυτό το σφάλμα μηδενικό, αφού οι μετρήσεις λαμβάνονται δίχως τη μεσολάβηση του ανθρώπινου παράγοντα.

Τα τυχαία σφάλματα:

Τυχαία είναι τα σφάλματα που οφείλονται σε πολλούς απρόβλεπτους παράγοντες, μεταβάλλονται με το χρόνο κατά ακανόνιστο τρόπο και είναι εξίσου πιθανό να είναι θετικά ή αρνητικά.



Κλασικό παράδειγμα είναι αυτό των σφαλμάτων που οφείλονται στο θερμικό θόρυβο ηλεκτρονικών οργάνων. Ο θόρυβος αυτός προέρχεται από την τυχαία θερμική κίνηση ηλεκτρονίων μέσα σε αντιστάσεις και άλλα στοιχεία του οργάνου, που οδηγεί την εμφάνιση μικρών διαφορών δυναμικού στα άκρα τους. Τα σήματα αυτά, αφού υποστούν την επεξεργασία στην οποία τα υποβάλλει το ίδιο το όργανο, εμφανίζονται στην έξοδό του ως τυχαίες αυξομειώσεις στην ένδειξη του οργάνου. Υπάρχουν βεβαίως τρόποι ελαχιστοποίησης του θερμικού θορύβου, είναι όμως πρακτικά και θεωρητικά αδύνατο να μηδενιστεί ο θόρυβος αυτός.

Η βασική ιδιότητα των τυχαίων σφαλμάτων να είναι με ίσες πιθανότητες θετικά ή αρνητικά, καθώς και το γεγονός ότι μικρές αποκλίσεις από την πραγματική τιμή είναι πιο πιθανές από τις μεγάλες, κάνουν δυνατό τον περιορισμό της αβεβαιότητας στον προσδιορισμό ενός μεγέθους με την επανάληψη της μέτρησης πολλές φορές, ώστε κατά μέσο όρο τα τυχαία σφάλματα να αλληλοαναιρούνται σε κάποιο βαθμό.

Στην πράξη είναι δύσκολο να γίνει διαχωρισμός των συστηματικών σφαλμάτων από τα τυχαία. Εξάλλου πολλά σφάλματα είναι συνδυασμός και των δύο τύπων. Συνήθως, οι τιμές των συστηματικών σφαλμάτων είναι πολύ μεγαλύτερες από των τυχαίων και επομένως καθοριστικές για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Για τον καθορισμό της αβεβαιότητας, δηλαδή για την εκτίμηση του τρόπου που επηρεάζουν τα διάφορα σφάλματα τη μετρητική διαδικασία, συμβουλευόμαστε τις προδιαγραφές κατά AGMA και συγκεκριμένα την ANSI/AGMA 2116-A05, σύμφωνα με την οποία υπάρχει 95% πιθανότητα η πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους να βρίσκεται εντός του εύρους που ορίζεται από την κατώθι σχέση

$$U_{95} = k \left[ (u_m^2 + u_s^2 + u_{\theta p} + u_a^2 + u_L^2 + u_T^2)^{0,5} \right] + |E|$$

Όπου:

$k$ , ο παράγοντας που συνήθως τίθεται  $k=2$ , ώστε να καλύπτεται μία διευρυμένη τιμή της αβεβαιότητας σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

$u_m$ , το συστηματικό σφάλμα των μετρητικών οργάνων. Αυτό ορίζεται στα  $0,08/4 \cdot 401 = 8,02 \mu\text{m}$  για τον κανόνα και θεωρείται μηδενικό για το γωνιόμετρο.

$u_s$ , το σφάλμα του πρότυπου τροχού που εμπεριέχεται στις μετρήσεις. Επειδή δεν δίνεται κάποια πληροφορία για τους πρότυπους τροχούς που διαθέτει το εργαστήριο, θεωρούμε το σφάλμα αυτό μηδενικό.

$u_{\theta p}$ , το σφάλμα ευθυγράμμισης στο κάθετο της διακέντρου των τροχών επίπεδο, που σχετίζεται με την τοποθέτηση των τροχών στην ακριβή απόσταση σφιχτής συνεργασίας τους.

$u_a$ , το σφάλμα ευθυγράμμισης στο παράλληλο της διακέντρου των τροχών επίπεδο, που εντοπίζεται με την εξέταση της εκκεντρότητας. Από την κυματομορφή που προκύπτει δεχόμαστε το σφάλμα αυτό ίσο με  $5 \mu\text{m}$ .

$u_L$ , το σφάλμα που σχετίζεται με την αβεβαιότητα που προκύπτει λόγω μεταβολής της προέντασης του ελατηρίου. Στο πείραμά μας όλοι οι τροχοί εξετάστηκαν με την ίδια προένταση, άρα δεν τίθεται θέμα επίδρασης της μεταβολής της προέντασης του ελατηρίου.

$u_T$ , το σφάλμα που σχετίζεται με την αβεβαιότητα που προκύπτει λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας και του θερμικού συντελεστή των οδοντωτών τροχών. Θεωρείται μηδενικό γιατί δεν παρατηρήθηκε επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας σε σειρά πειραμάτων μεγέθους 30 που έλαβαν χώρα ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με διαφορετική θερμοκρασία περιβάλλοντος.

$E$ , το σφάλμα της ακρίβειας αναπαραγωγής της πειραματικής διαδικασίας. Η διαφορά του μέσου όρου σειράς μετρήσεων με τον διατιθέμενο πρότυπο τροχό από τη βαθμονομημένη τιμή του, που σχετίζεται με την επαναληψιμότητα του εξοπλισμού (reproducibility). Σε σειρές μετρήσεων, μεγέθους 30, διαπιστώθηκε πως το σφάλμα αυτό είναι της τάξης των  $0,002 \mu\text{m}$  για τους όλους τους πρότυπους τροχούς.

Άρα:

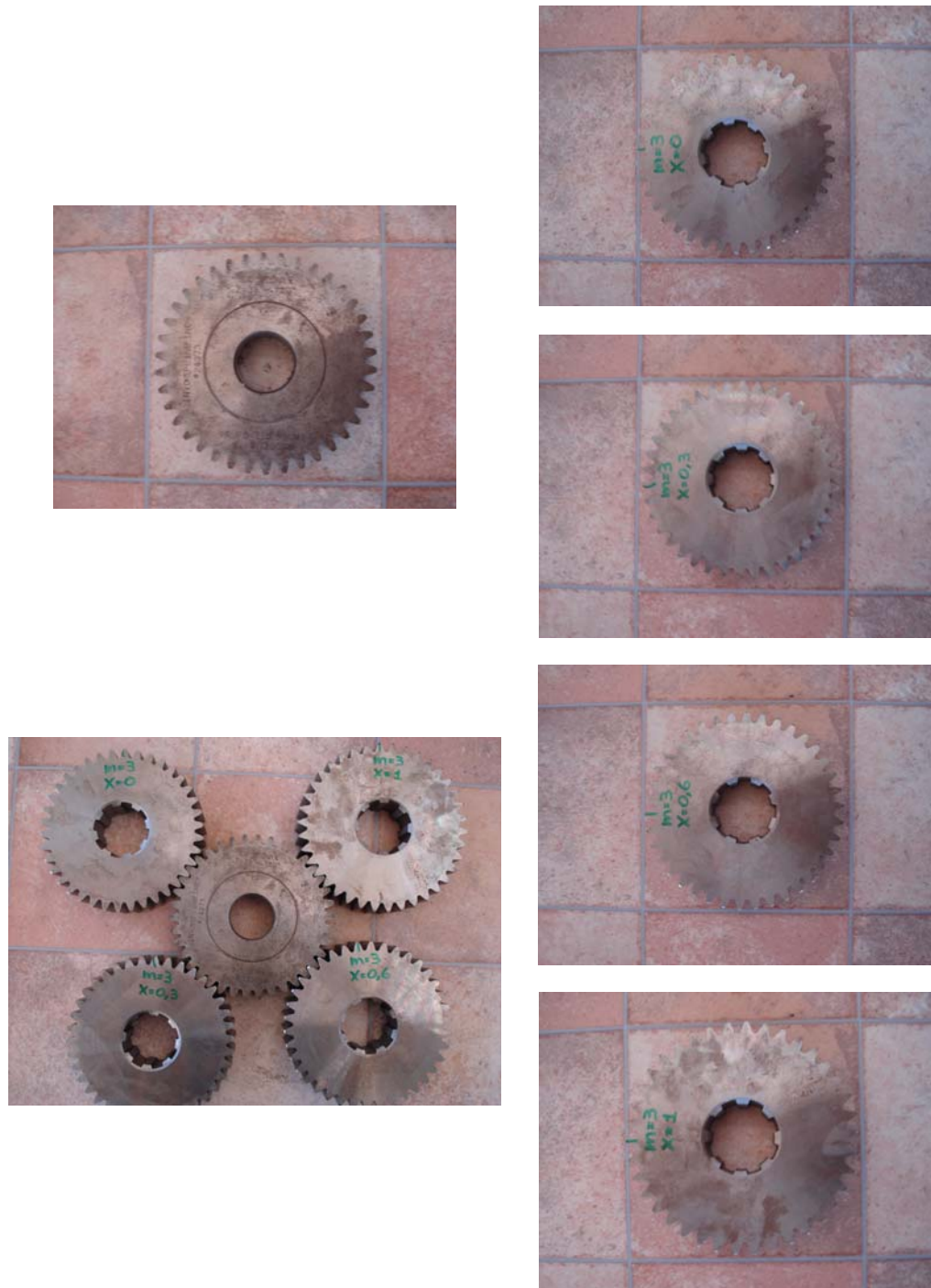
$$U_{95} = 9,45 \mu\text{m}$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω και αφού ληφθούν οι μετρήσεις όπως υποδεικνύει ο οδηγός χειρισμού του εξοπλισμού, γίνεται η επεξεργασία τους και η εύρεση της αναδρομικής σχέσης που συνδέει τα μετρούμενα μεγέθη. Διατυπώνεται μία

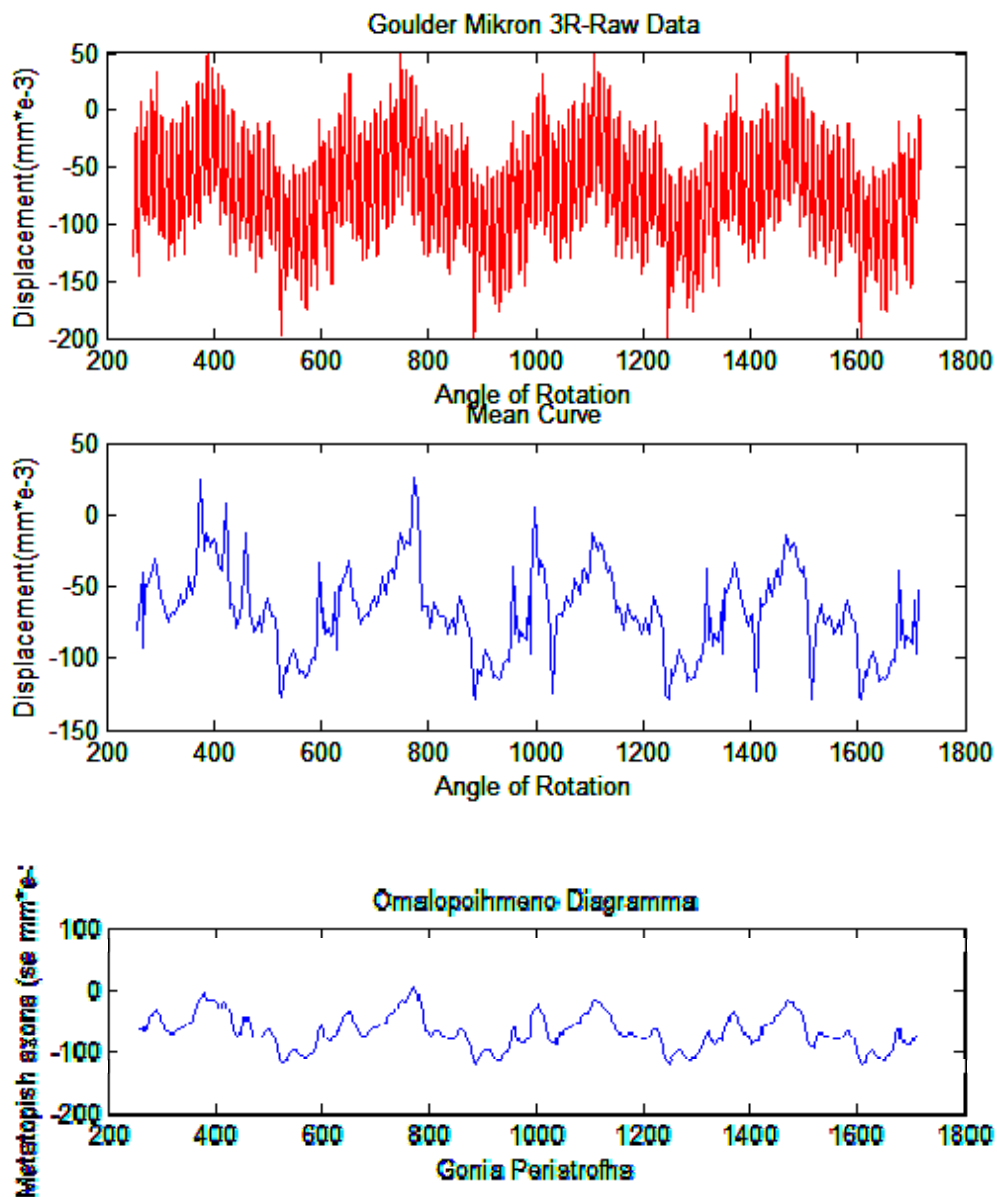
αναδρομική σχέση για κάθε module, λαμβάνοντας τις μέσες τιμές σφαλμάτων, συνολικού και από οδόντα σε οδόντα, ανεξάρτητα του τμήματος του τροχού που σημειώνονται, κάτω, μεσαίο ή πάνω. Η συνάρτηση αναδρομής είναι πολυωνυμική τρίτου βαθμού και για τον προσδιορισμό της χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο λογισμικού SPSS. Παρατηρείται από τη μορφή του πολυωνύμου ότι αυξανόμενης της μετατόπισης μειώνονται τα σύνθετα σφάλματα και συνεπώς οι μετατοπισμένοι τροχοί έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Η ευνοϊκή επίδραση της μετατόπισης όμως στην ακρίβεια, δεν εκτείνεται για τιμές μεγαλύτερες του  $x=0,6$  περίπου. Παρ'όλα αυτά, συμπεραίνουμε ότι με το ίδιο κοπτικό εργαλείο υπάρχει δυνατότητα κοπής τροχού με μετατόπιση, που τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του επηρεάζουν λιγότερο το σφάλμα μετάδοσης, απ' ό,τι του κανονικού οδοντωτού τροχού.

## 4. Πειραματικά Αποτελέσματα

### 4.1. Module 3



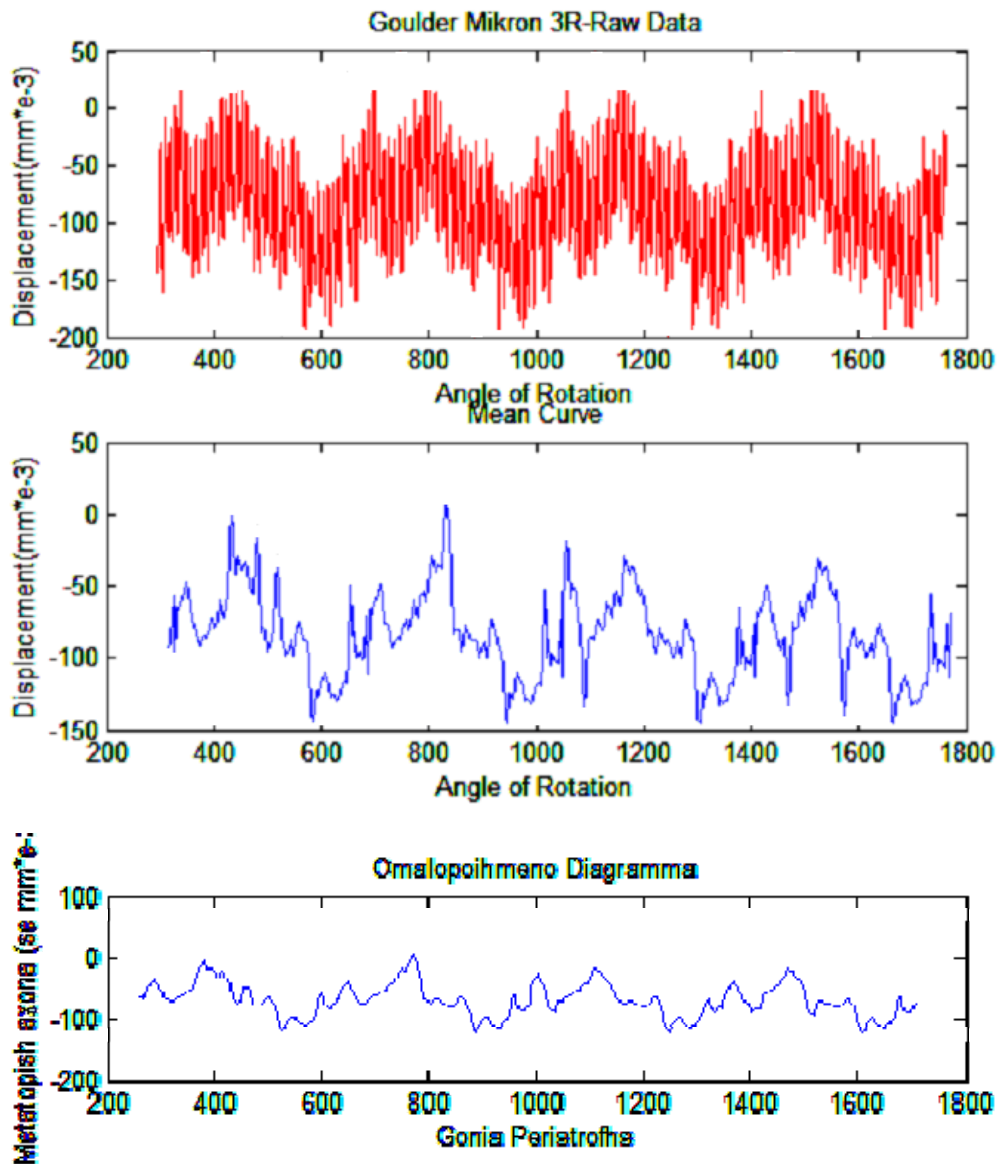
Εικόνα 4-1: Οι οδοντωτοί τροχοί με module 3, ο πρότυπος και οι υπό εξέταση

Module 3,  $x=0$ , κάτω τμήμα τροχού

Διάγραμμα 4-1: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 1 (κάτω τμήμα)

Διάγραμμα 4-2: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 1(κάτω τμήμα)

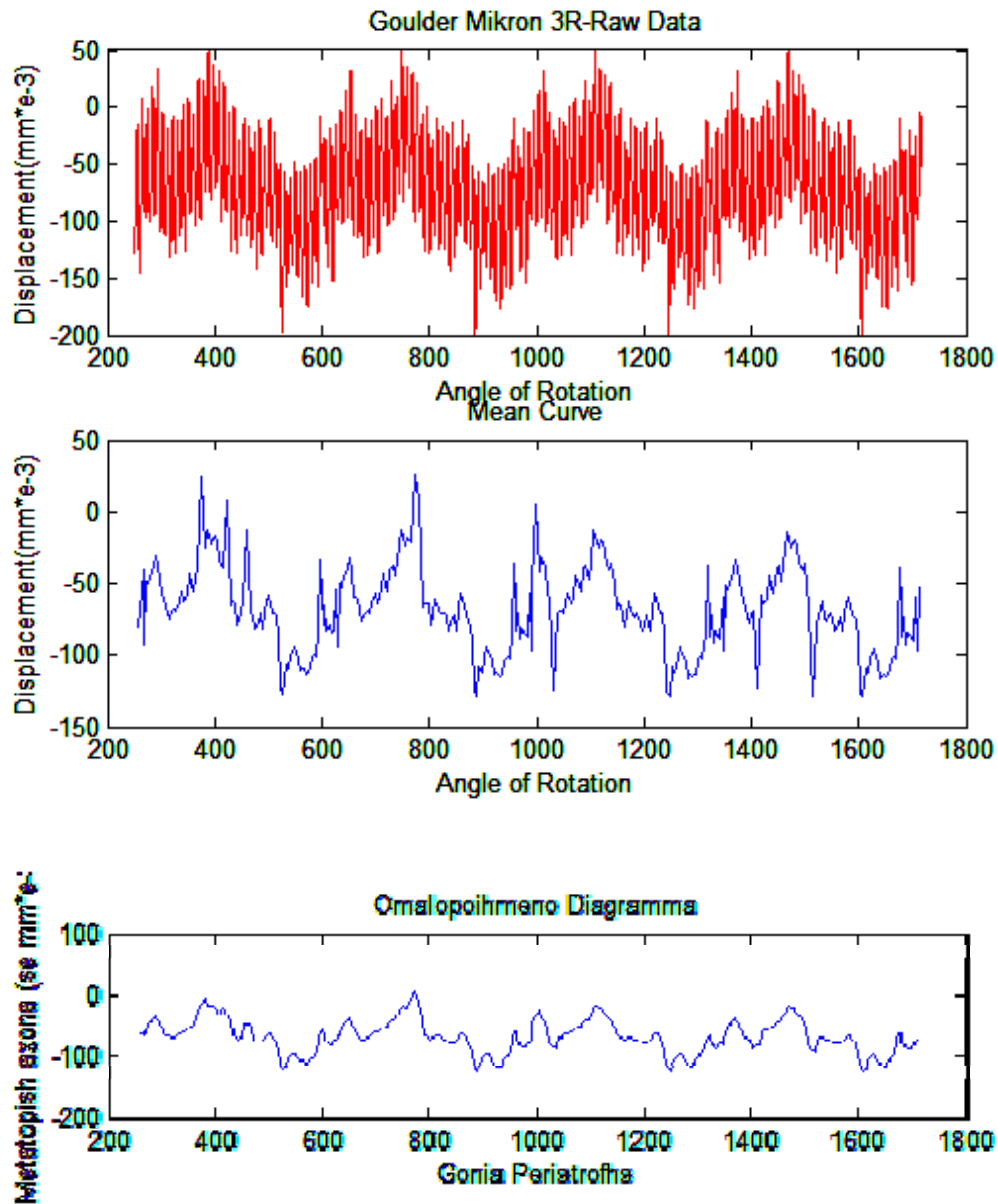
Διάγραμμα 4-3: Το διάγραμμα 4-2 ομαλοποιημένο

Module 3,  $x=0$ , μεσαίο τμήμα τροχού

Διάγραμμα 4-4: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 1 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-5: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 1(μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-6: Το διάγραμμα 4-5 ομαλοποιημένο

Module 3,  $x=0$ , άνω τμήμα τροχού

Διάγραμμα 4-7: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 1 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-8: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 1 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-9: Το διάγραμμα 4-8 ομαλοποιημένο



Εικόνα 4-2: Οι τροχοί σε συνεργασία



Εικόνα 4-3 : Ο τροχός 1

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	3	3
Αριθμός οδόντων	Z	38	38
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	114	114
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	120	120
Μετατόπιση	x (mm)	0	0
Πλάτος	b (mm)	25	30
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	114	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	112,9	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	102,08	
Τυπική απόκλιση	std	0,26	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	249,16	
Εκκεντρότητα	$F_r$	189,12	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-1:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 1 (κάτω τμήμα)



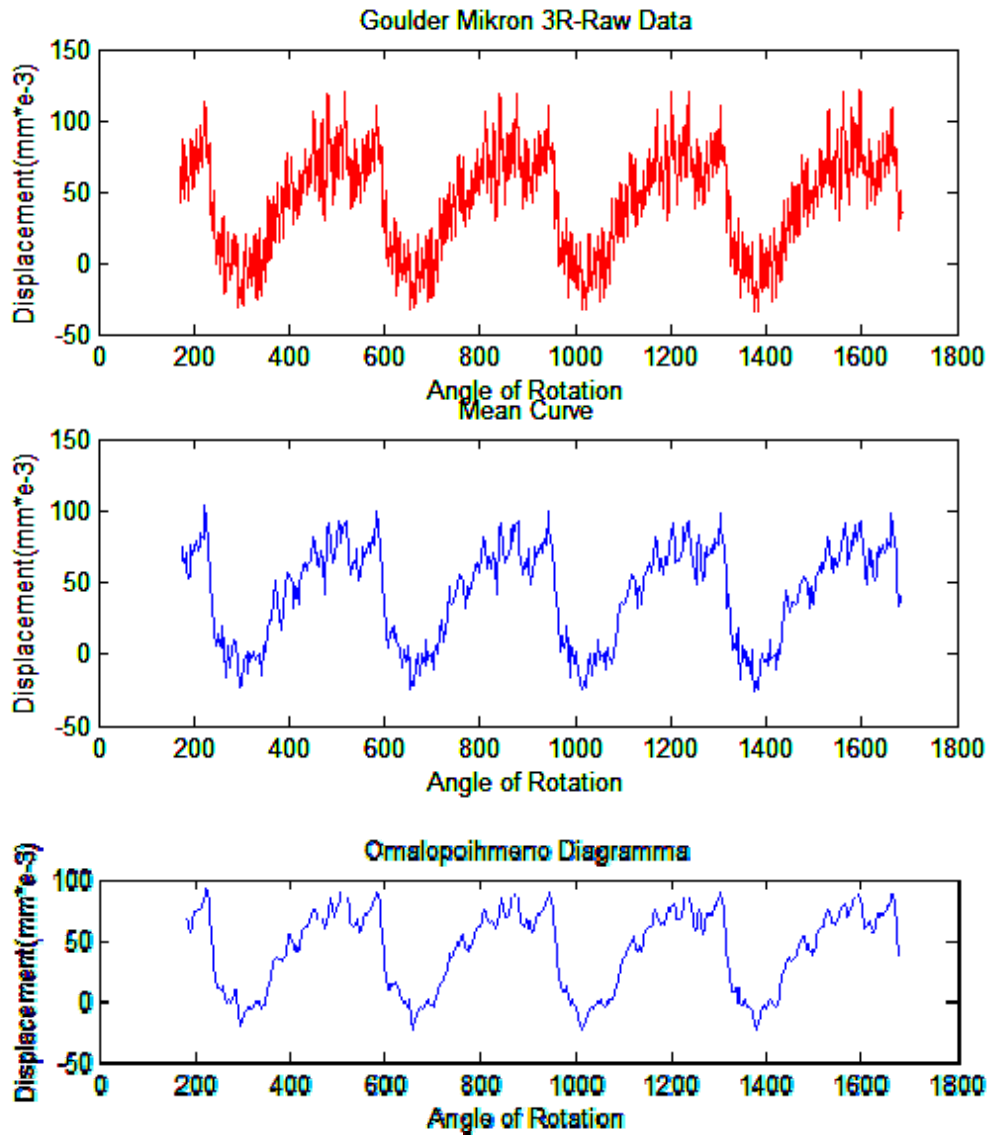
Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	3	3
Αριθμός οδόντων	Z	38	38
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	114	114
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	120	120
Μετατόπιση	x (mm)	0	0
Πλάτος	b (mm)	25	30
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	114	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	112,9	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	106,63	
Τυπική απόκλιση	std	0,24	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	211,40	
Εκκεντρότητα	$F_r$	158,64	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-2:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 1 (μεσαίο τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	3	3
Αριθμός οδόντων	Z	38	38
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	114	114
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	120	120
Μετατόπιση	x (mm)	0	0
Πλάτος	b (mm)	25	30
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	114	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	112,9	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	103,26	
Τυπική απόκλιση	std	0,29	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	249,16	
Εκκεντρότητα	$F_r$	154,92	
Παρατηρήσεις: άνω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-3:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 1 (άνω τμήμα)

module 3,  $x=0,3$  κάτω τμήμα τροχού

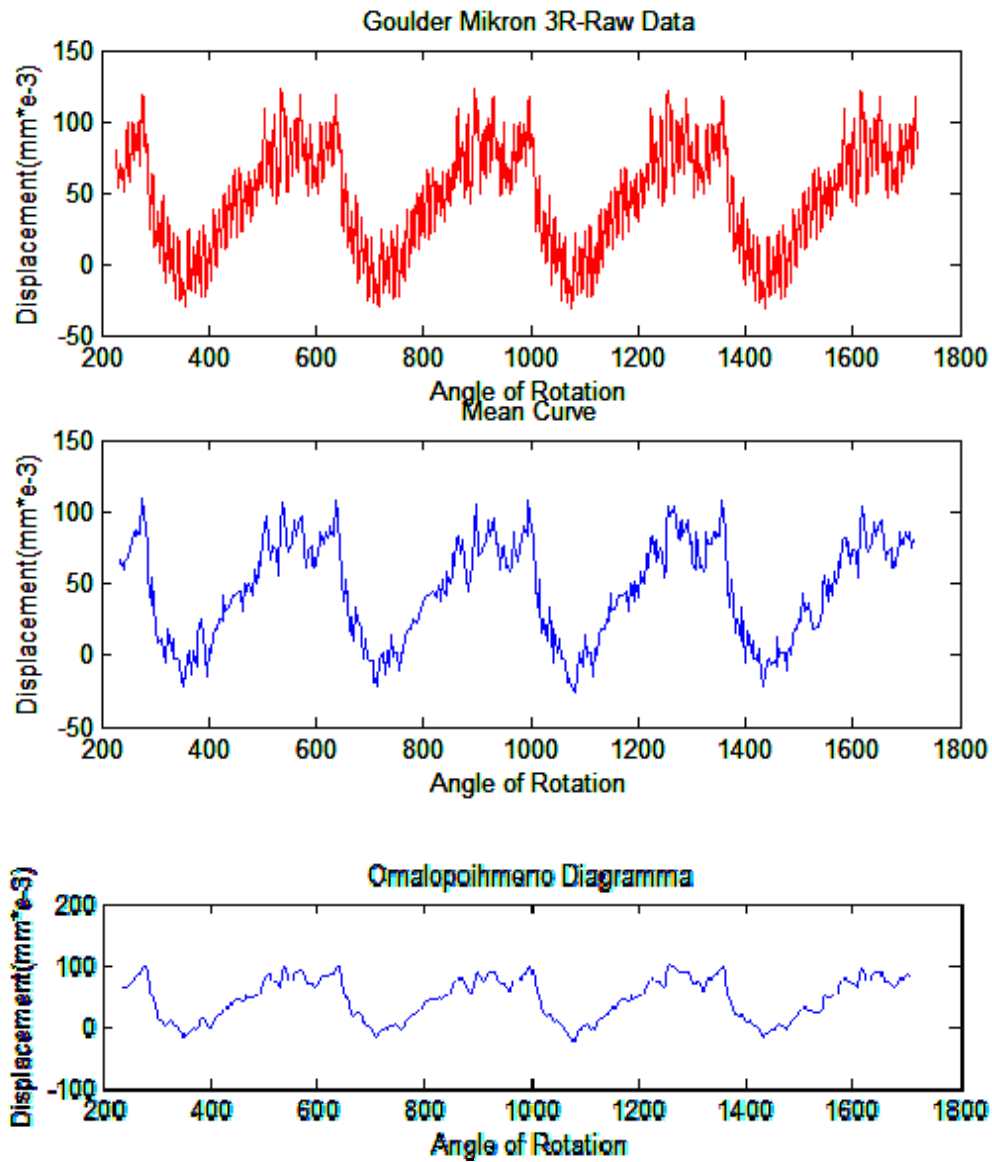


Διάγραμμα 4-10: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 2 (κάτω τμήμα)

Διάγραμμα 4-11: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 2 (κάτω τμήμα)

Διάγραμμα 4-12: Το διάγραμμα 4-11 ομαλοποιημένο

module 3,  $x=0,3$  μεσαίο τμήμα τροχού

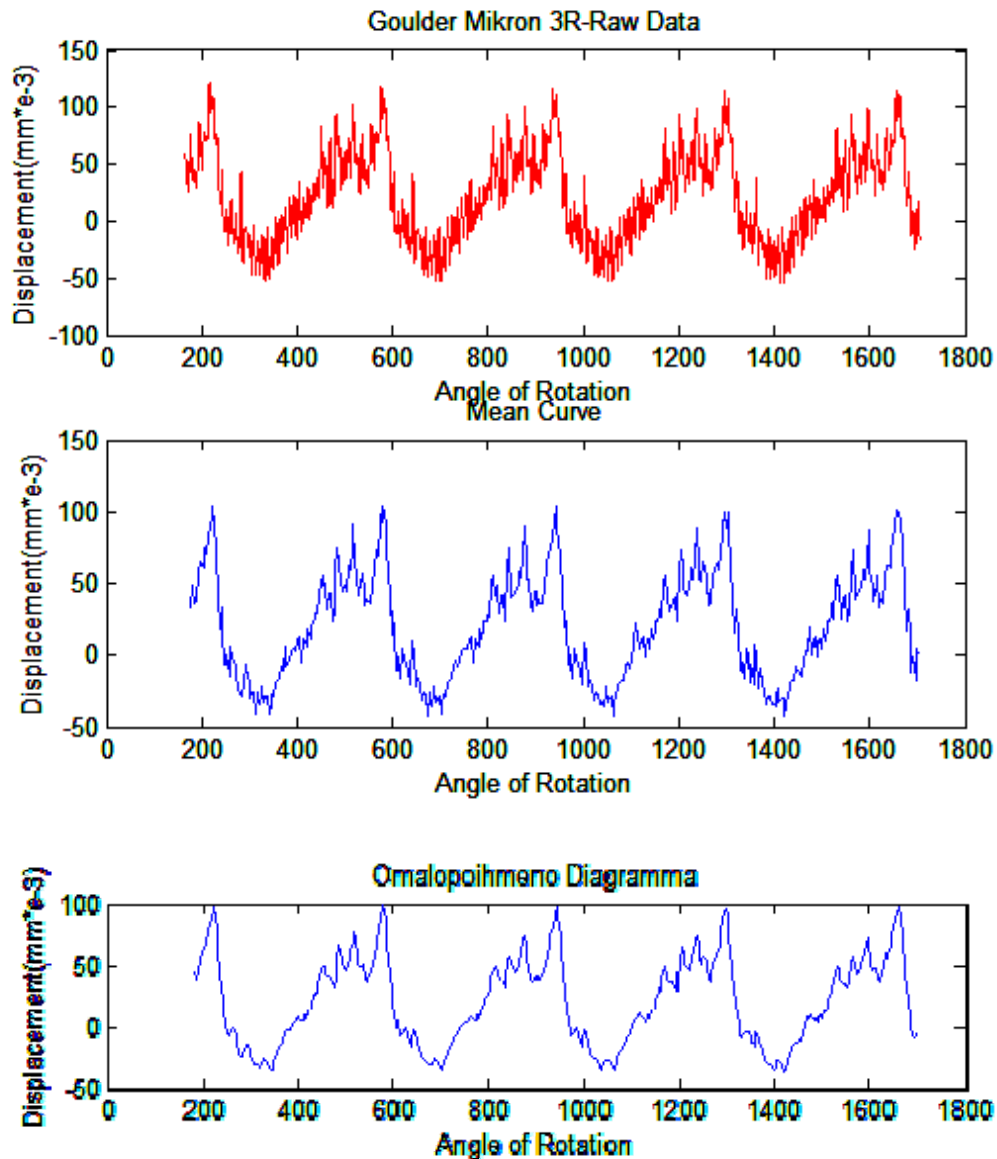


Διάγραμμα 4-13: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 2 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-14: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 2 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-15: Το διάγραμμα 4-14 ομαλοποιημένο

module 3,  $x=0,3$  άνω τμήμα τροχού



Διάγραμμα 4-16 Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 2 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-17 Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 2 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-18 Το διάγραμμα 4-17 ομαλοποιημένο



Εικόνα 4-4: Ο τροχός 2

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	3	3
Αριθμός οδόντων	Z	38	38
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	114	114
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	120	121,8
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,3
Πλάτος	b (mm)	25	30
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	114,9	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	114,3	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	27,49	
Τυπική απόκλιση	std	0,60	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	154,92	
Εκκεντρότητα	$F_r$	128,90	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-4: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 2 (κάτω τμήμα)

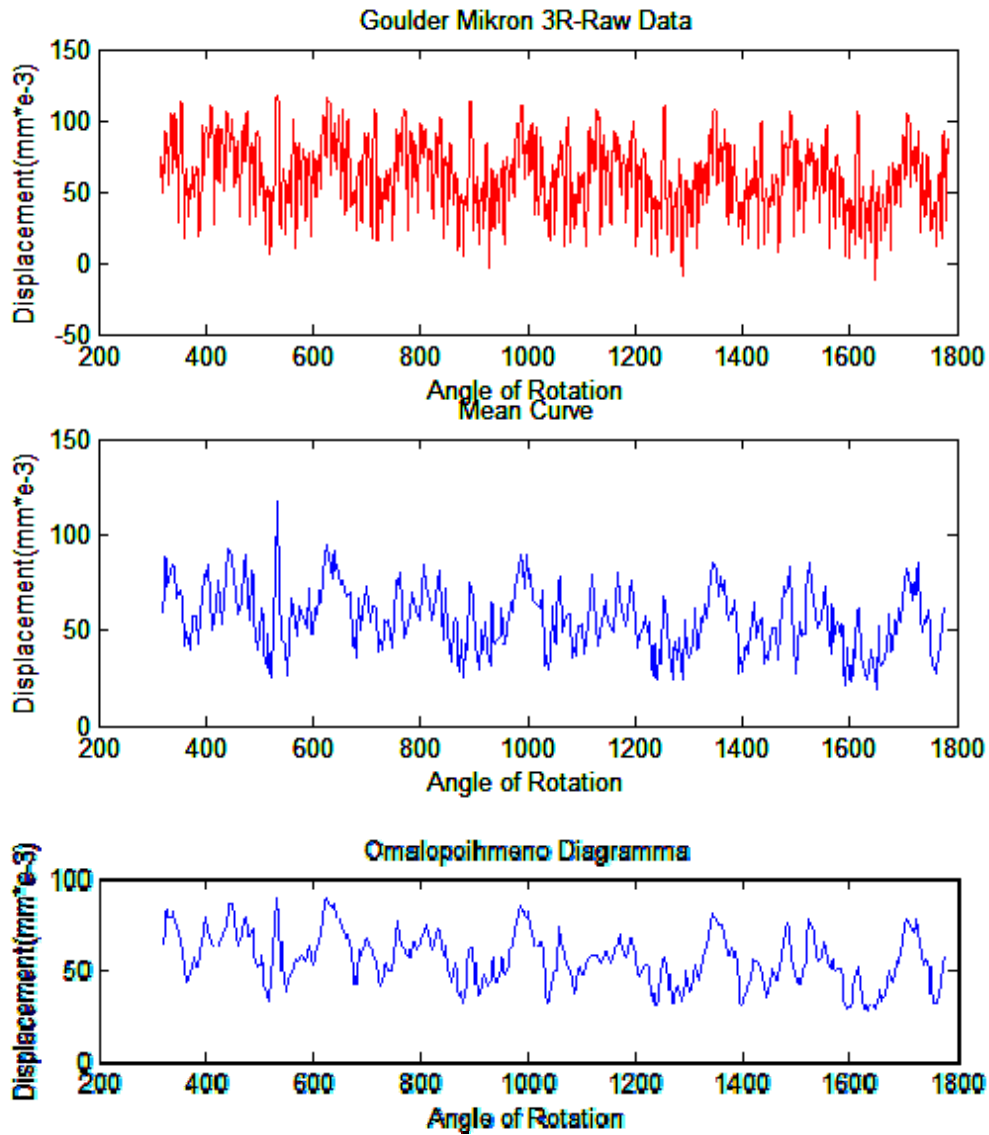
Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	3	3
Αριθμός οδόντων	Z	38	38
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	114	114
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	120	121,8
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,3
Πλάτος	b (mm)	25	30
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	114,9	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	114,3	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	26,71	
Τυπική απόκλιση	std	0,59	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	153,36	
Εκκεντρότητα	$F_r$	135,30	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-5:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 2 (μεσαίο τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	3	3
Αριθμός οδόντων	Z	38	38
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	114	114
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	120	121,8
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,3
Πλάτος	b (mm)	25	30
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	114,9	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	114,3	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	26,64	
Τυπική απόκλιση	std	0,64	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	174,92	
Εκκεντρότητα	$F_r$	147,10	
Παρατηρήσεις: άνω τμήμα τροχού			

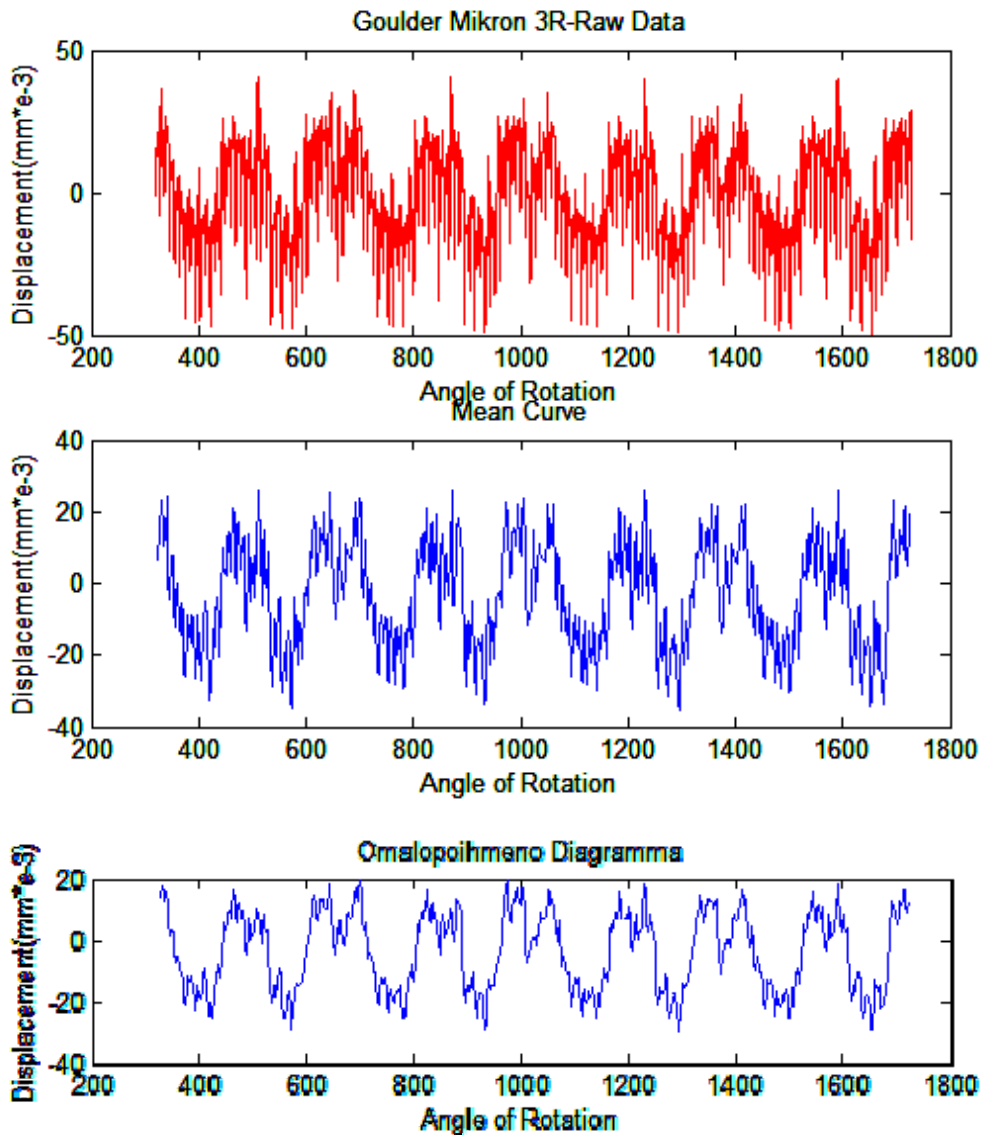
Πίνακας 4-6:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 2 (άνω τμήμα)

module 3, x=0,6 κάτω τμήμα τροχού



Διάγραμμα 4-19 Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 3 (κάτω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-20 Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 3 (κάτω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-21 Το διάγραμμα 4-20 ομαλοποιημένο

module 3, x=0,6 μεσαίο τμήμα τροχού



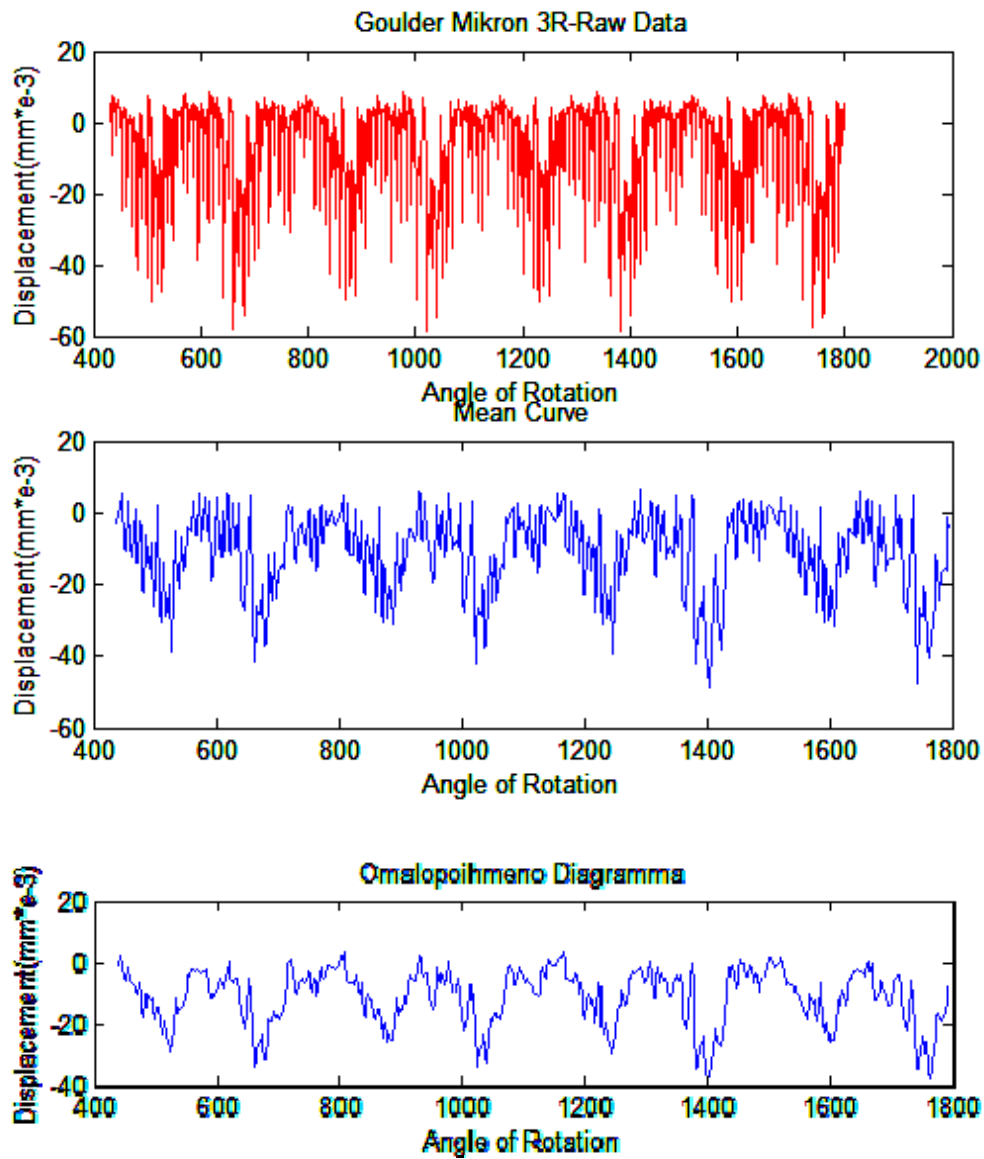
Διάγραμμα 4-22: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 3 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-23: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 3 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-24: Το διάγραμμα 4-23 ομαλοποιημένο



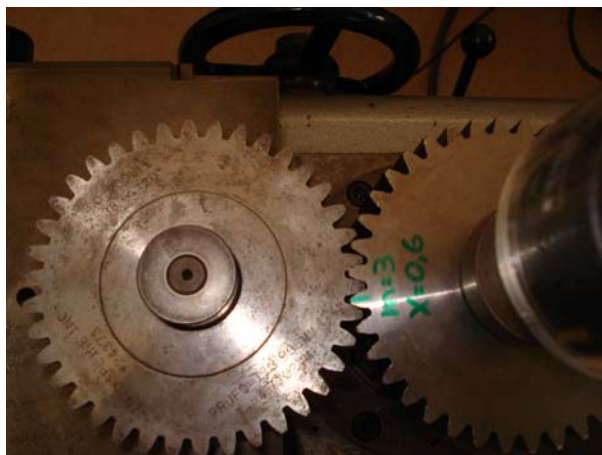
module 3,  $x=0,6$  άνω τμήμα τροχού



Διάγραμμα 4-25: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 3 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-26: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 3 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-27: Το διάγραμμα 4-26 ομαλοποιημένο



Εικόνα 4-5: Ο τροχός 3

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	3	3
Αριθμός οδόντων	Z	38	38
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	114	114
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	120	123,6
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,6
Πλάτος	b (mm)	25	30
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	115,8	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	115,6	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	36,38	
Τυπική απόκλιση	std	0,63	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	129,16	
Εκκεντρότητα	$F_r$	98,18	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-7: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 3 (κάτω τμήμα)

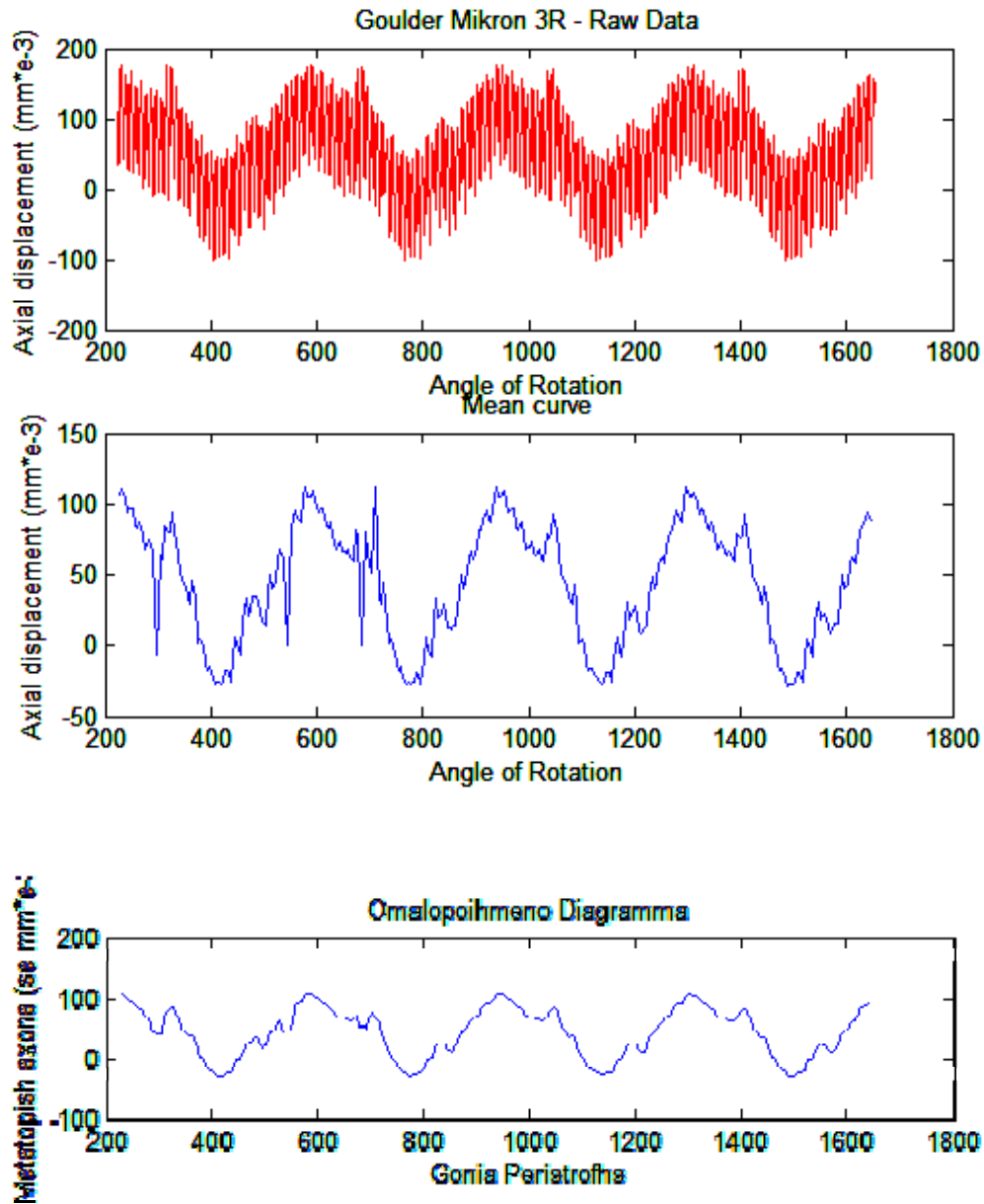
Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	3	3
Αριθμός οδόντων	Z	38	38
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	114	114
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	120	123,6
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,6
Πλάτος	b (mm)	25	30
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	115,8	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	115,6	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	24,51	
Τυπική απόκλιση	std	0,61	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	90,12	
Εκκεντρότητα	$F_r$	61,64	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-8:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 3 (μεσαίο τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	3	3
Αριθμός οδόντων	Z	38	38
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	114	114
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	120	123,6
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,6
Πλάτος	b (mm)	25	30
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	115,8	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	115,6	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	20,30	
Τυπική απόκλιση	std	0,70	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	67,28	
Εκκεντρότητα	$F_r$	55,64	
Παρατηρήσεις: άνω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-9:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 3 (άνω τμήμα)

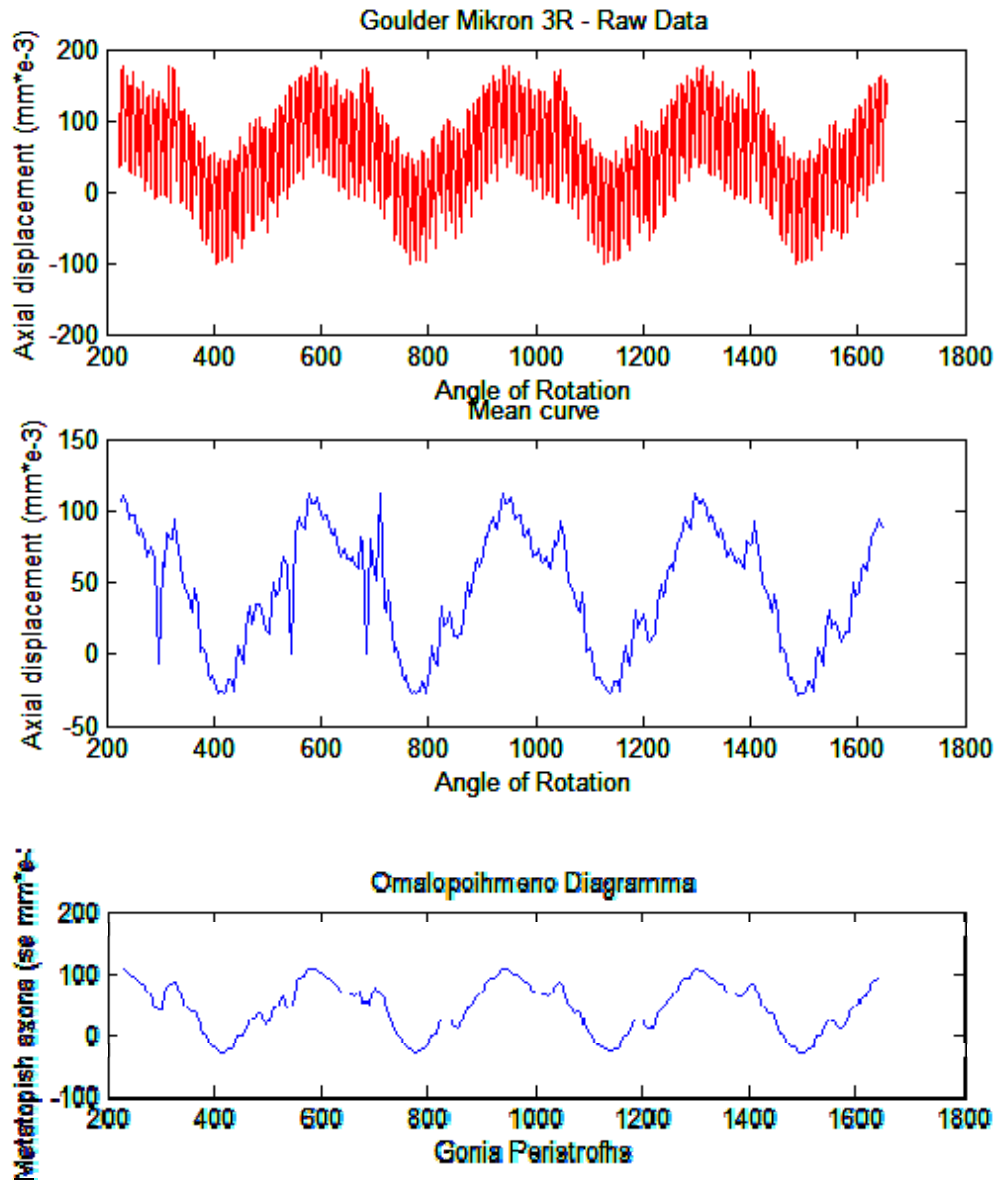
module 3, x=1, κάτω τμήμα τροχού



Διάγραμμα 4-28: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 4 (κάτω τμήμα)

Διάγραμμα 4-29: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 4 (κάτω τμήμα)

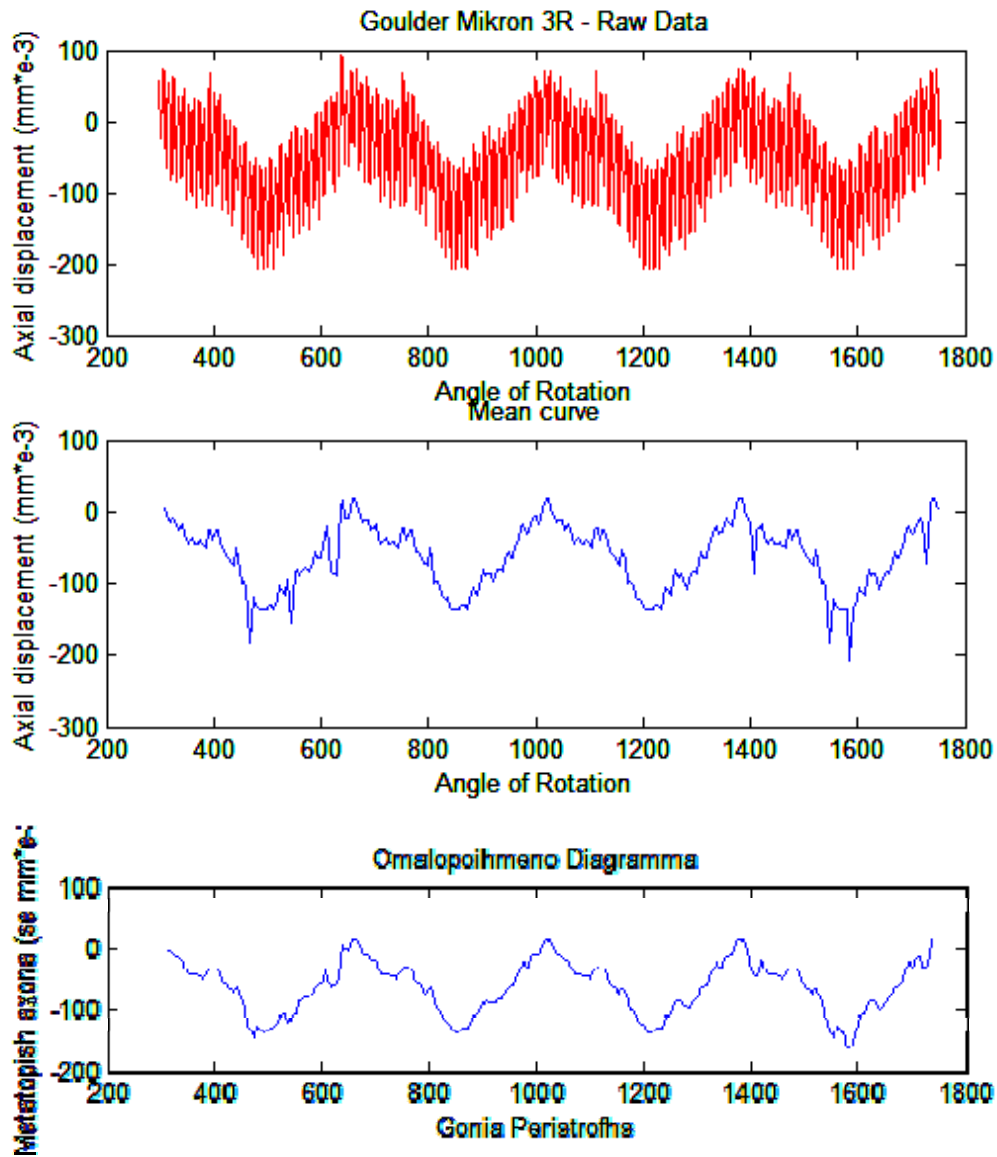
Διάγραμμα 4-30 Το διάγραμμα 4-29 ομαλοποιημένο

**module 3, x=1, μεσαίο τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-31: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 4 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-32: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 4 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-33: Το διάγραμμα B4-32 ομαλοποιημένο

module 3,  $\chi=1$ , άνω τμήμα τροχού

Διάγραμμα 4-34: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 4 (άνω τμήμα)  
 Διάγραμμα 4-35: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 4 (άνω τμήμα)  
 Διάγραμμα 4-36: Το διάγραμμα 4-35 ομαλοποιημένο



Εικόνα 4-6: Ο τροχός 4

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	3	3
Αριθμός οδόντων	Z	38	38
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	114	114
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	120	126
Μετατόπιση	x (mm)	0	1
Πλάτος	b (mm)	25	30
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	117	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	116,5	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	131,94	
Τυπική απόκλιση	std	0,20	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	284,04	
Εκκεντρότητα	$F_r$	202,54	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-10:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 4 (κάτω τμήμα)

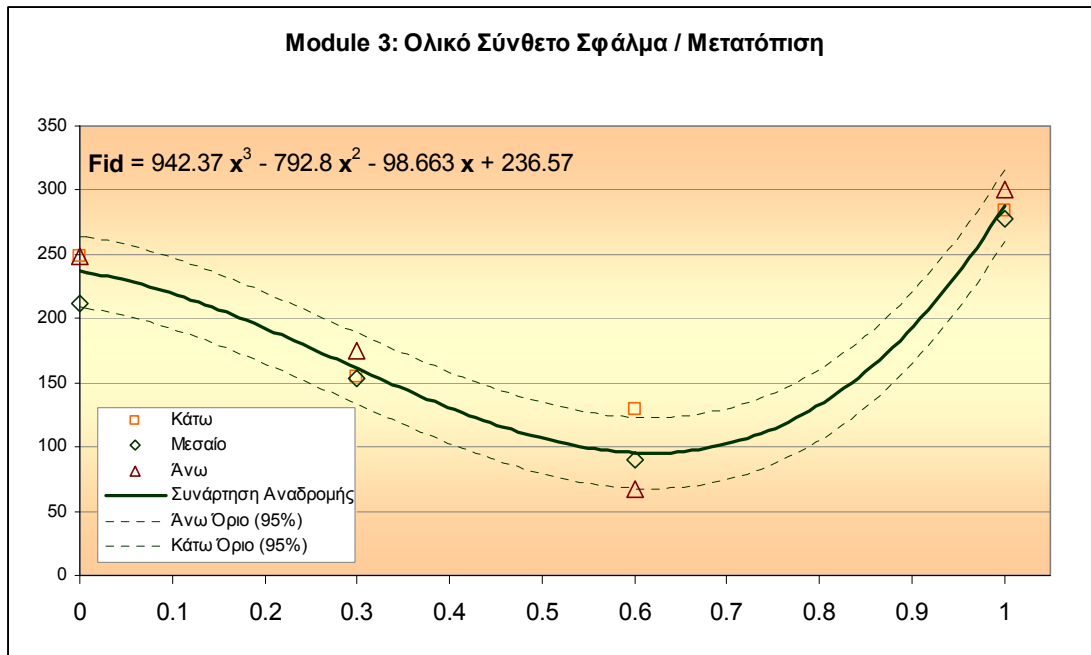
Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	3	3
Αριθμός οδόντων	Z	38	38
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	114	114
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	120	126
Μετατόπιση	x (mm)	0	1
Πλάτος	b (mm)	25	30
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	117	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	116,5	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	137,24	
Τυπική απόκλιση	std	0,16	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	278,08	
Εκκεντρότητα	$F_r$	140,24	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-11:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 4 (μεσαίο τμήμα)

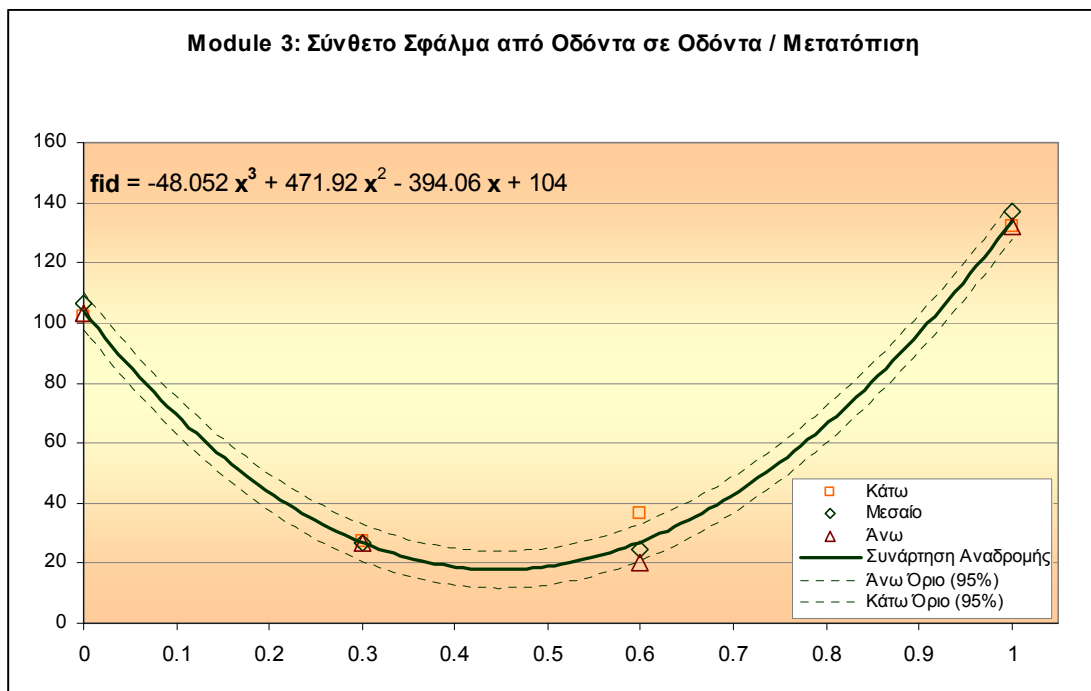
Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	3	3
Αριθμός οδόντων	Z	38	38
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	114	114
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	120	126
Μετατόπιση	x (mm)	0	1
Πλάτος	b (mm)	25	30
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	117	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	116,5	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	132,20	
Τυπική απόκλιση	std	0,20	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	300,32	
Εκκεντρότητα	$F_r$	225,68	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-12:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 4 (άνω τμήμα)





Διάγραμμα 4-37: Η αναδρομική σχέση ολικού σύνθετου σφάλματος-μετατόπισης για module=3

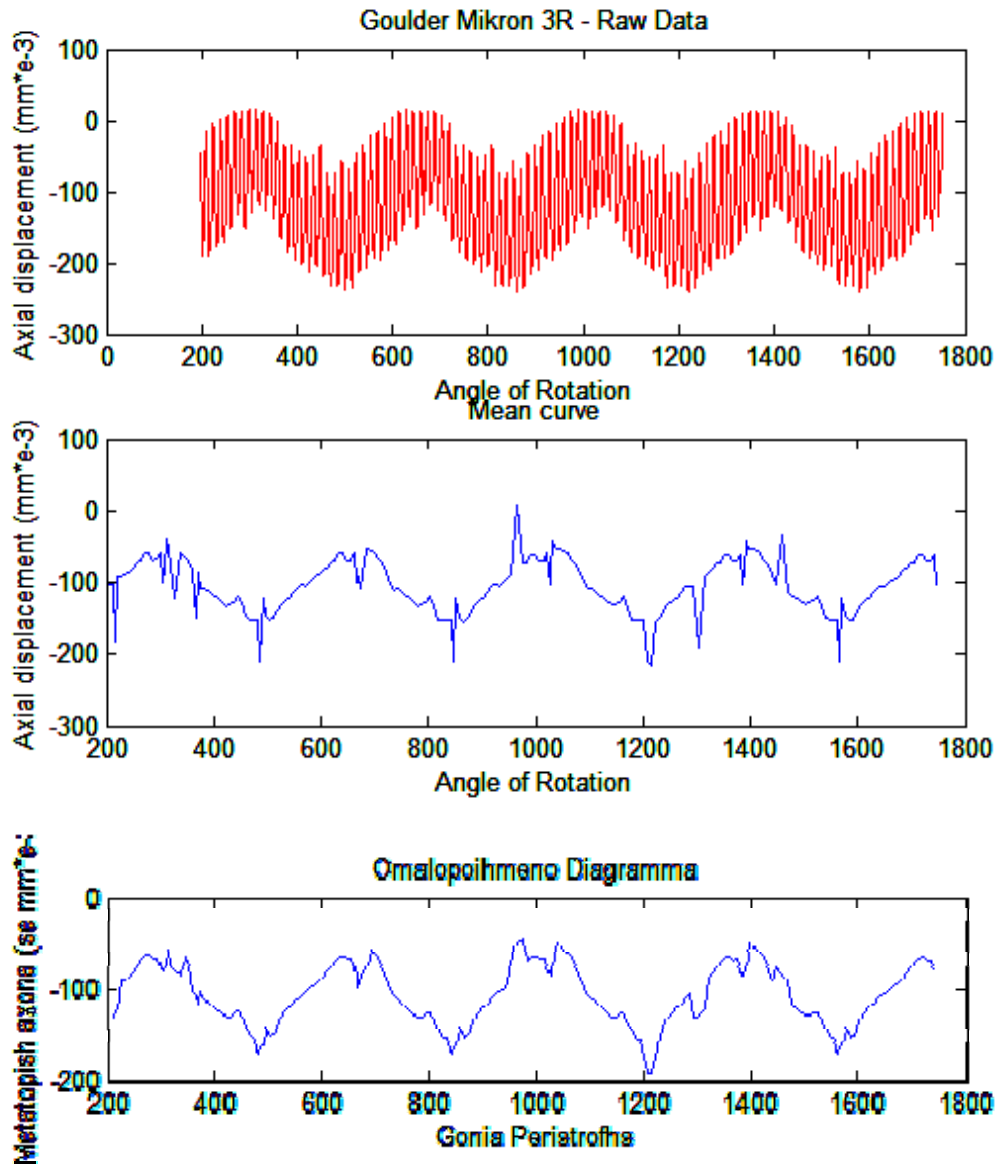


Διάγραμμα 4-38: Η αναδρομική σχέση σύνθετου σφάλματος από οδόντα σε οδόντα-μετατόπισης για module=3

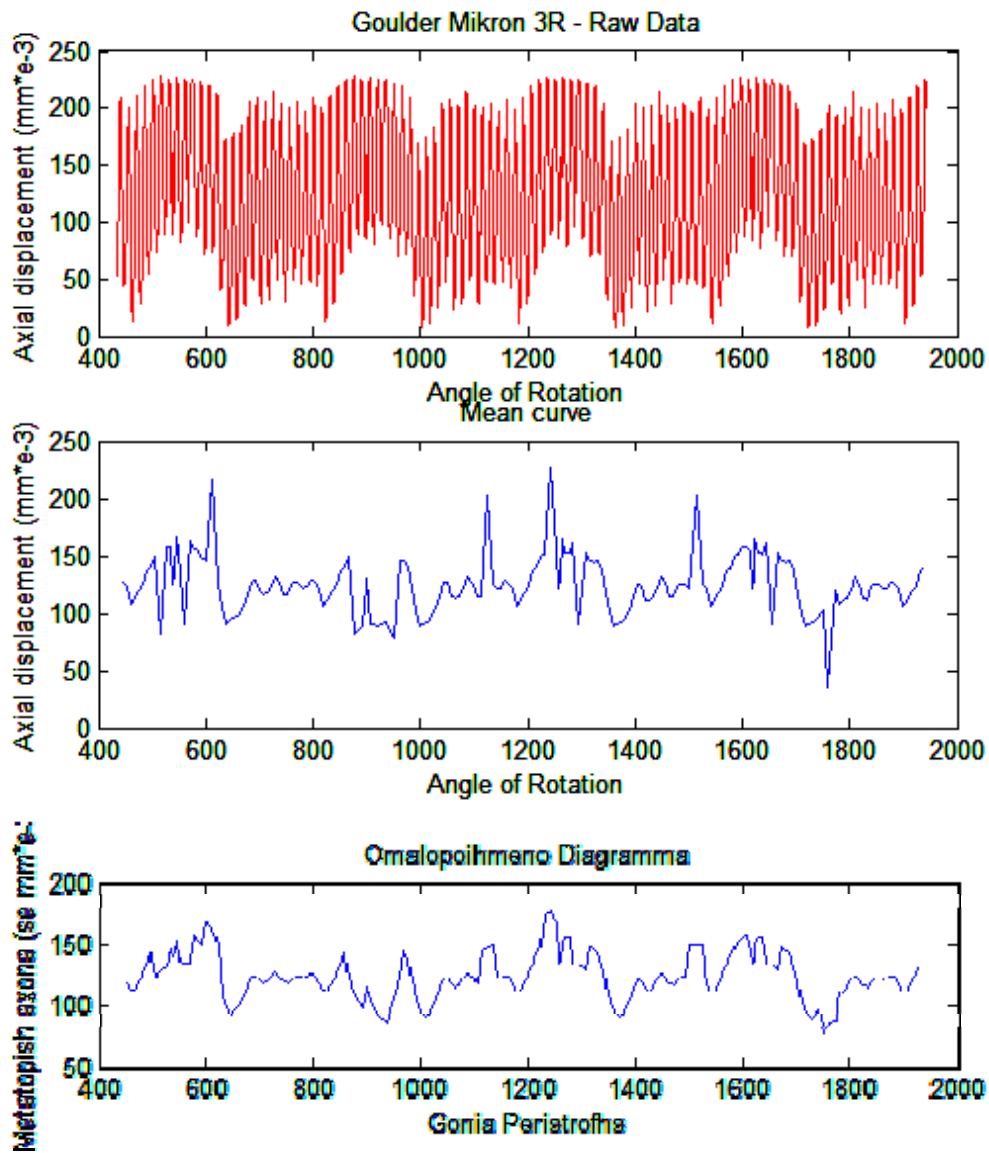
## 4.2. Module 5



Εικόνα 4-7: Οι οδοντωτοί τροχοί με module 5, ο πρότυπος και οι υπό εξέταση

**module 5, x=0, κάτω τμήμα τροχού**

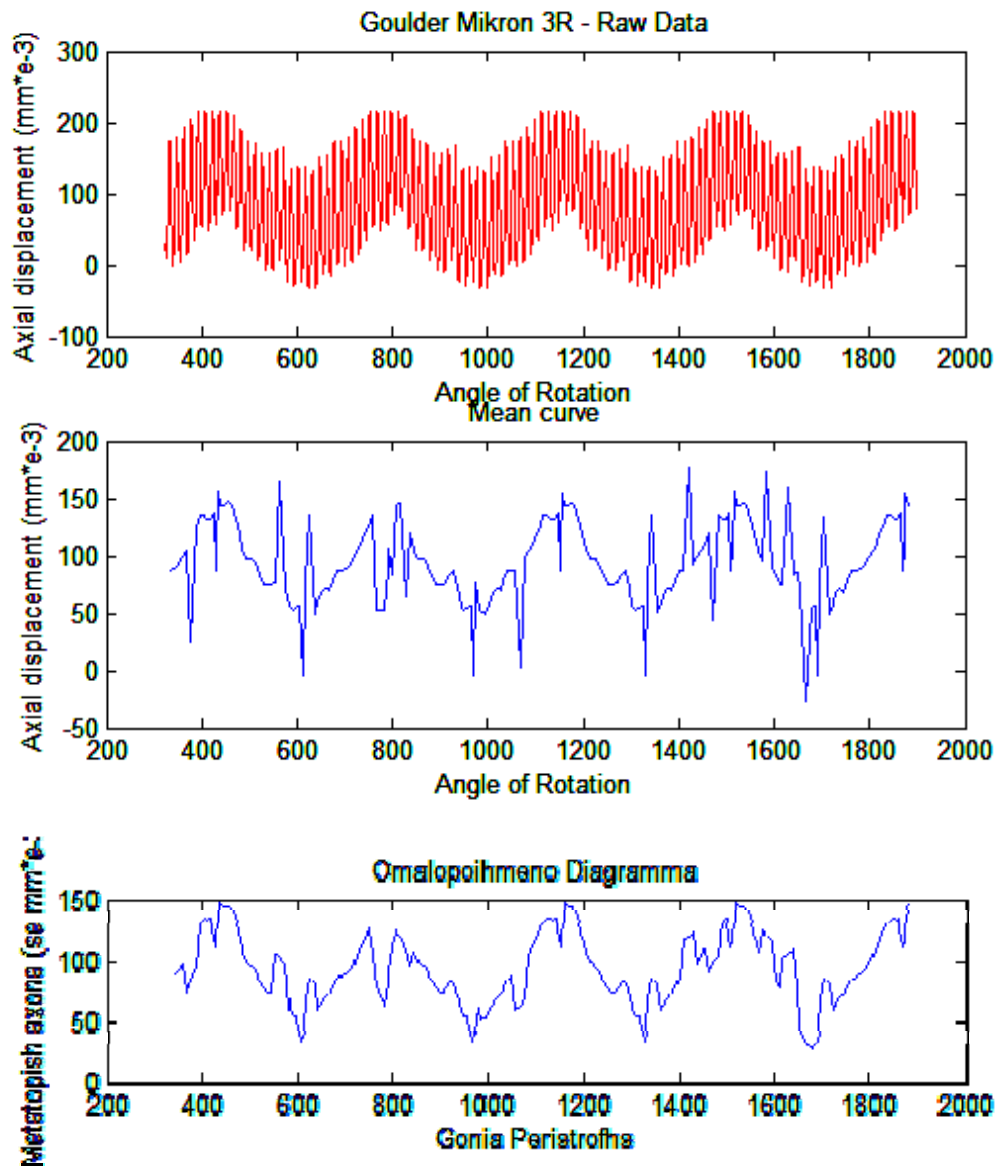
- Διάγραμμα 4-39: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 5 (κάτω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-40: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 5 (κάτω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-41: Το διάγραμμα 4-40 ομαλοποιημένο

**module 5, x=0, μεσαίο τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-42: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 5 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-43: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 5 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-44: Το διάγραμμα 4-43 ομαλοποιημένο

module 5,x=0, άνω τμήμα τροχού

Διάγραμμα 4-45: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 5 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-46: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 5 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-47: Το διάγραμμα 4-46 ομαλοποιημένο



Εικόνα 4-8 Ο τροχός 5

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	5	5
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	120	120
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	130	130
Μετατόπιση	x (mm)	0	0
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	120	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	119,8	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	149,26	
Τυπική απόκλιση	std	0,28	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	255,52	
Εκκεντρότητα	$F_r$	222,12	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

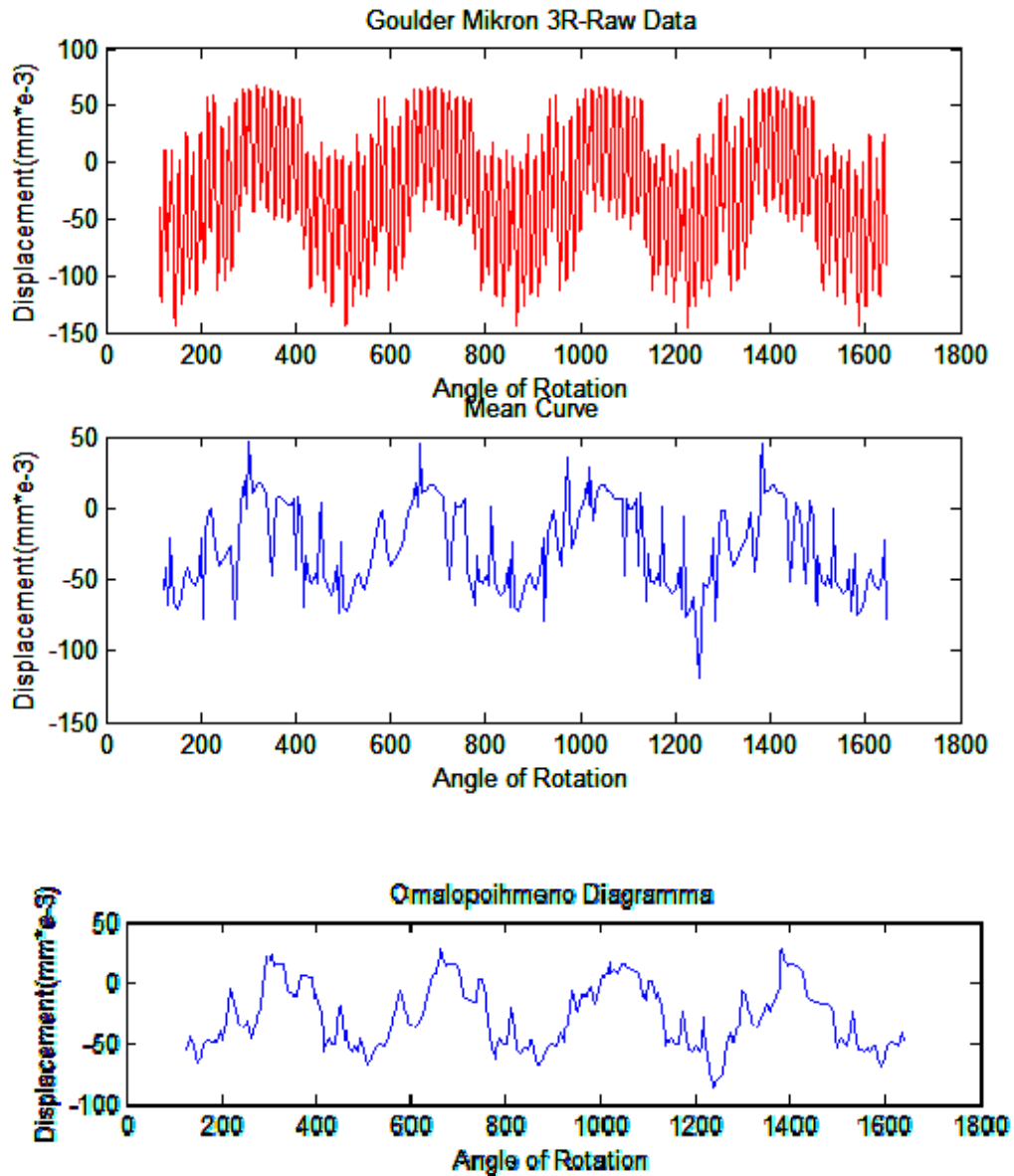
Πίνακας 4-13:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 5 (κάτω τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	5	5
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	120	120
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	130	130
Μετατόπιση	x (mm)	0	0
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	120	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	119,8	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	146,22	
Τυπική απόκλιση	std	0,31	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	220,56	
Εκκεντρότητα	$F_r$	191,26	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-14:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 5 (μεσαίο τμήμα)

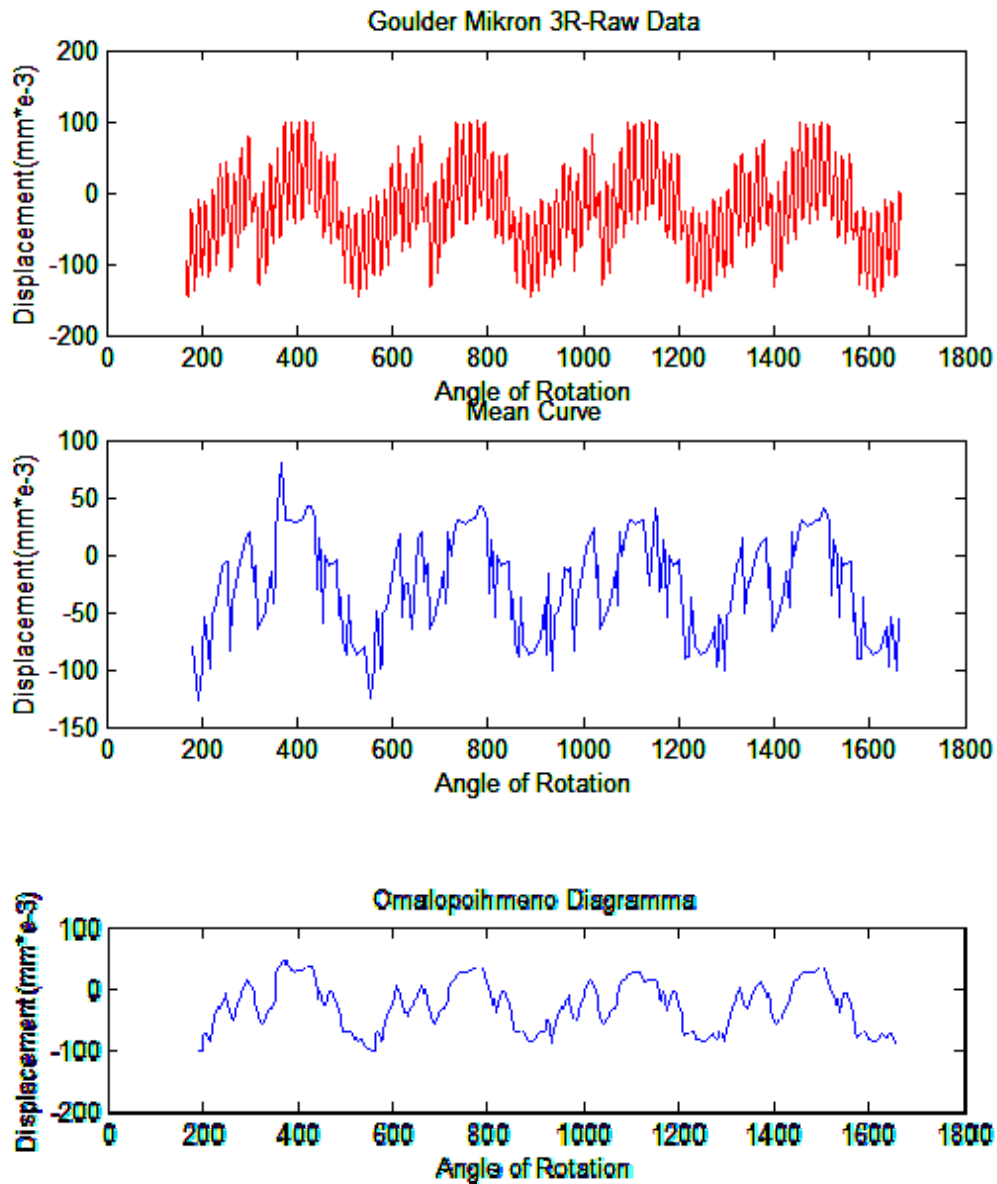
Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	5	5
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	120	120
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	130	130
Μετατόπιση	x (mm)	0	0
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	120	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	119,8	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	143,70	
Τυπική απόκλιση	std	0,35	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	249,52	
Εκκεντρότητα	$F_r$	203,82	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-15:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 5 (άνω τμήμα)

**Module 5,  $x=0,3$  κάτω τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-48: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 6 (κάτω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-49: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 6 (κάτω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-50: Το διάγραμμα 4-49 ομαλοποιημένο

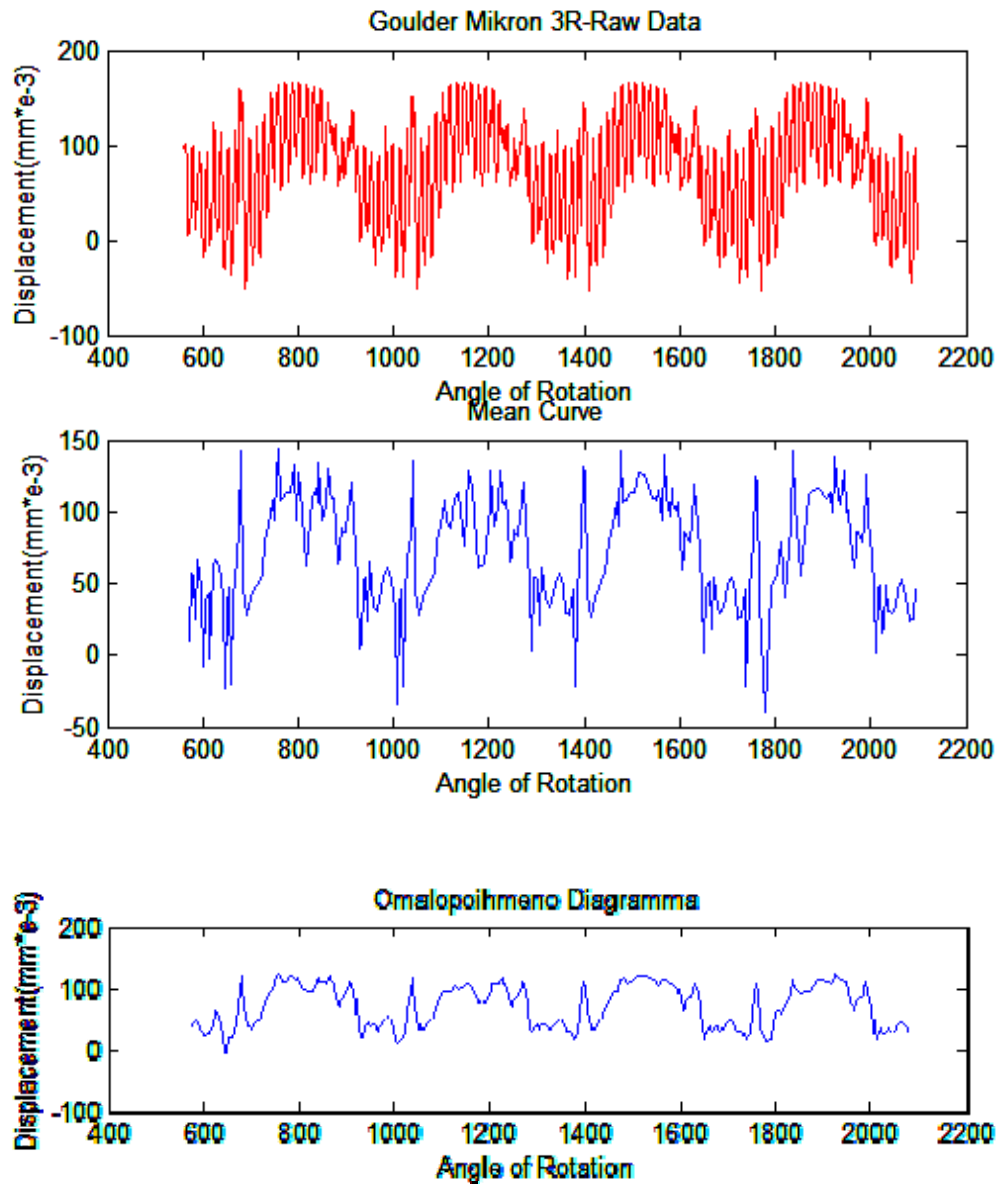


**module 5,  $x=0,3$  μεσαίο τμήμα τροχού**

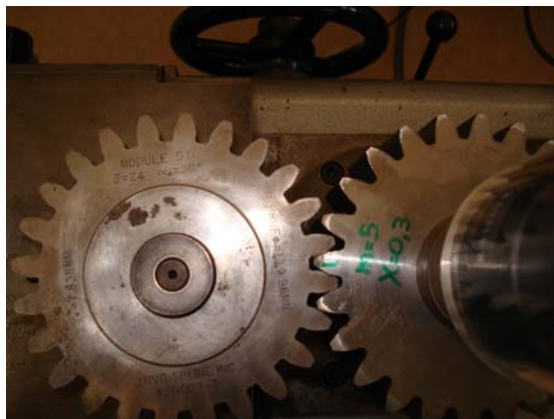
Διάγραμμα 4-51: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 6 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-52: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 6 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-53: Το διάγραμμα 4-52 ομαλοποιημένο

**module 5,  $x=0,3$  άνω τμήμα τροχού**

- Διάγραμμα 4-54: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 6 (άνω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-55: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 6 (άνω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-56: Το διάγραμμα 4-55 ομαλοποιημένο



Εικόνα 4-9: Ο τροχός 6

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	5	5
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	120	120
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	130	133
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,3
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	121,5	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	121,3	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	97,58	
Τυπική απόκλιση	std	0,47	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	212,44	
Εκκεντρότητα	$F_r$	165,38	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

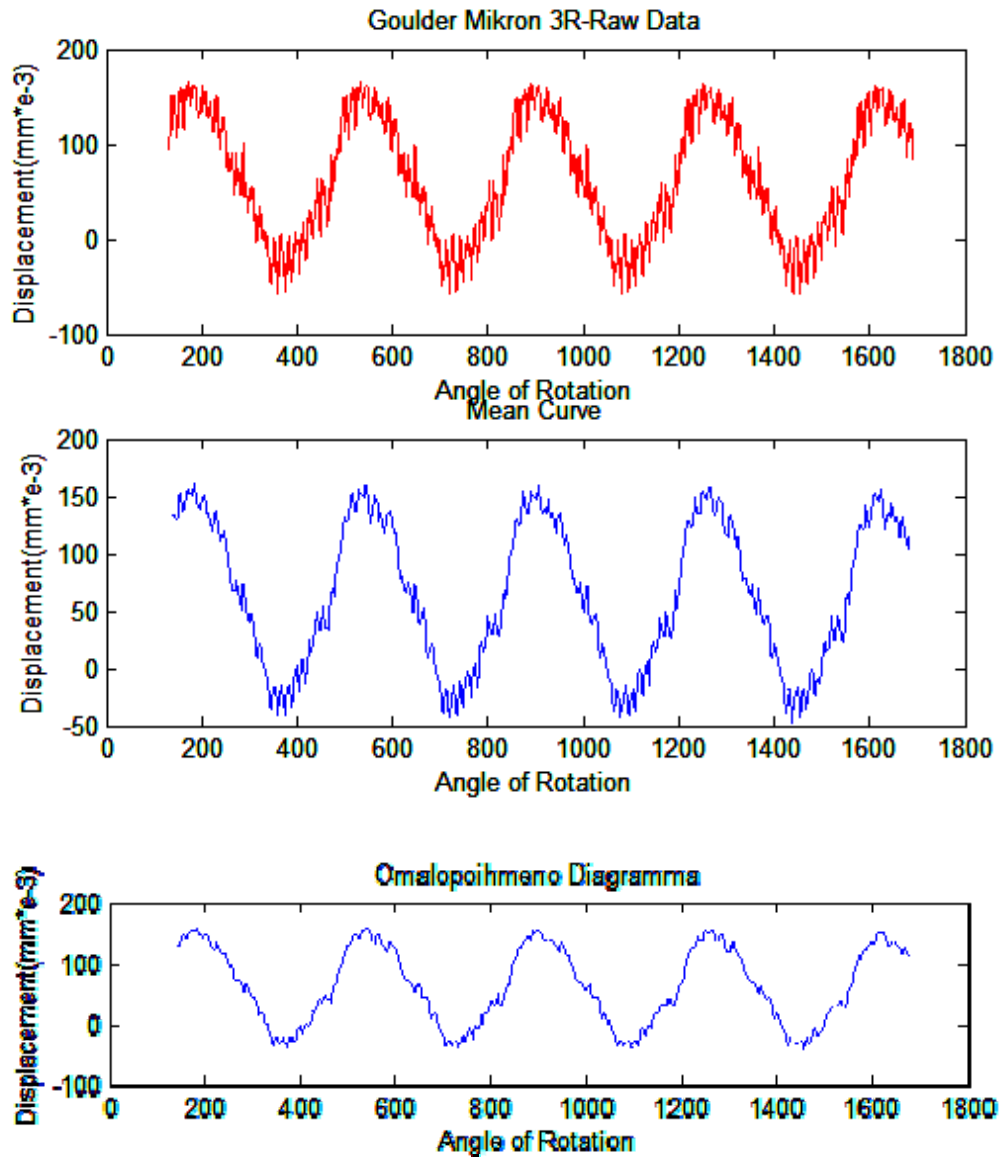
Πίνακας 4-16: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 6 (κάτω τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	5	5
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	120	120
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	130	133
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,3
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	121,5	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	121,3	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	90,05	
Τυπική απόκλιση	std	0,51	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	247,12	
Εκκεντρότητα	$F_r$	205,88	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-17:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 6 (μεσαίο τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	5	5
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	120	120
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	130	133
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,3
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	121,5	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	121,3	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	73,23	
Τυπική απόκλιση	std	0,66	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	219,36	
Εκκεντρότητα	$F_r$	182,76	
Παρατηρήσεις: άνω τμήμα τροχού			

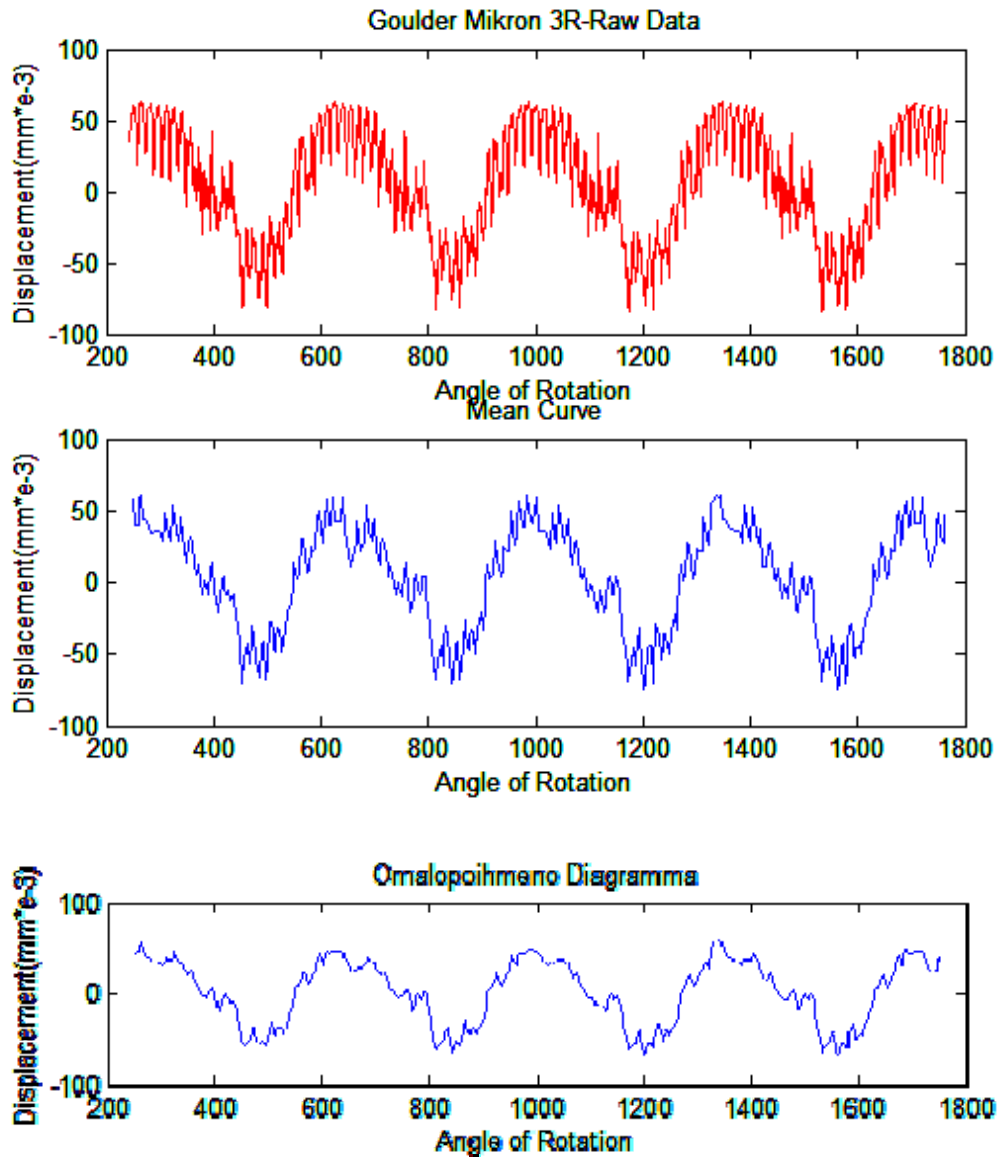
Πίνακας 4-18:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 6 (άνω τμήμα)

**module 5,  $x=0,6$  κάτω τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-57: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 7 (κάτω τμήμα)

Διάγραμμα 4-58: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 7 (κάτω τμήμα)

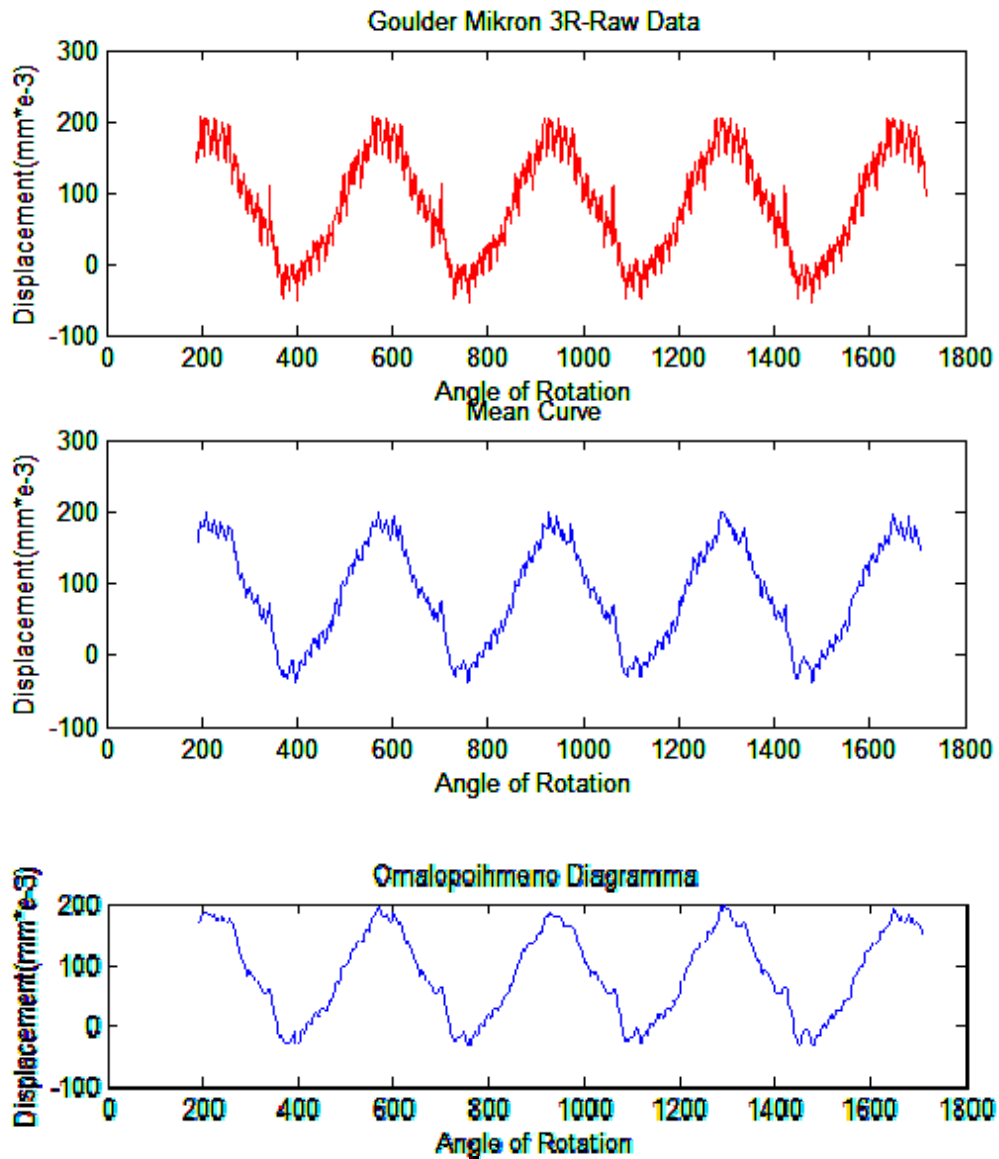
Διάγραμμα 4-59: Το διάγραμμα 4-58 ομαλοποιημένο

**module 5,  $x=0,6$  μεσαίο τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-60: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 7 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-61: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 7 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-62: Το διάγραμμα 4-61 ομαλοποιημένο

**module 5,  $x=0,6$  άνω τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-63: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 7 (άνω τμήμα)  
 Διάγραμμα 4-64: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 7 (άνω τμήμα)  
 Διάγραμμα 4-65: Το διάγραμμα 4-64 ομαλοποιημένο



Εικόνα 4-10: Ο τροχός 7

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	5	5
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	120	120
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	130	136
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,6
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	123	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	122,7	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	25,23	
Τυπική απόκλιση	std	0,59	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	223,00	
Εκκεντρότητα	$F_r$	207,50	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-19: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 7 (κάτω τμήμα)

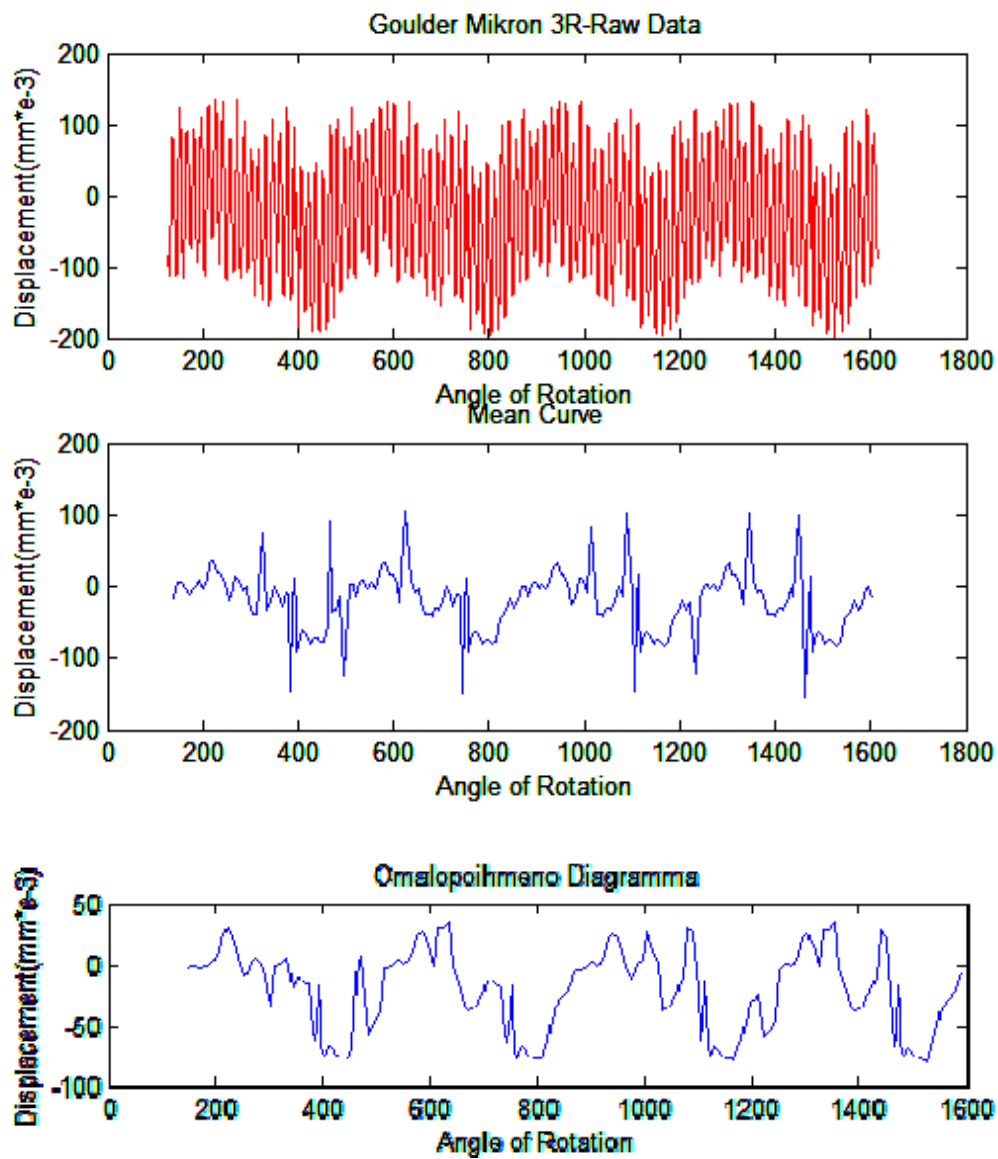


Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	5	5
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	120	120
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	130	136
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,6
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	123	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	122,7	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	25,15	
Τυπική απόκλιση	std	0,66	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	147,24	
Εκκεντρότητα	$F_r$	135,92	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-20:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 7 (μεσαίο τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	5	5
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	120	120
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	130	136
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,6
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	123	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	122,7	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	28,46	
Τυπική απόκλιση	std	0,59	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	259,44	
Εκκεντρότητα	$F_r$	238,70	
Παρατηρήσεις: άνω τμήμα τροχού			

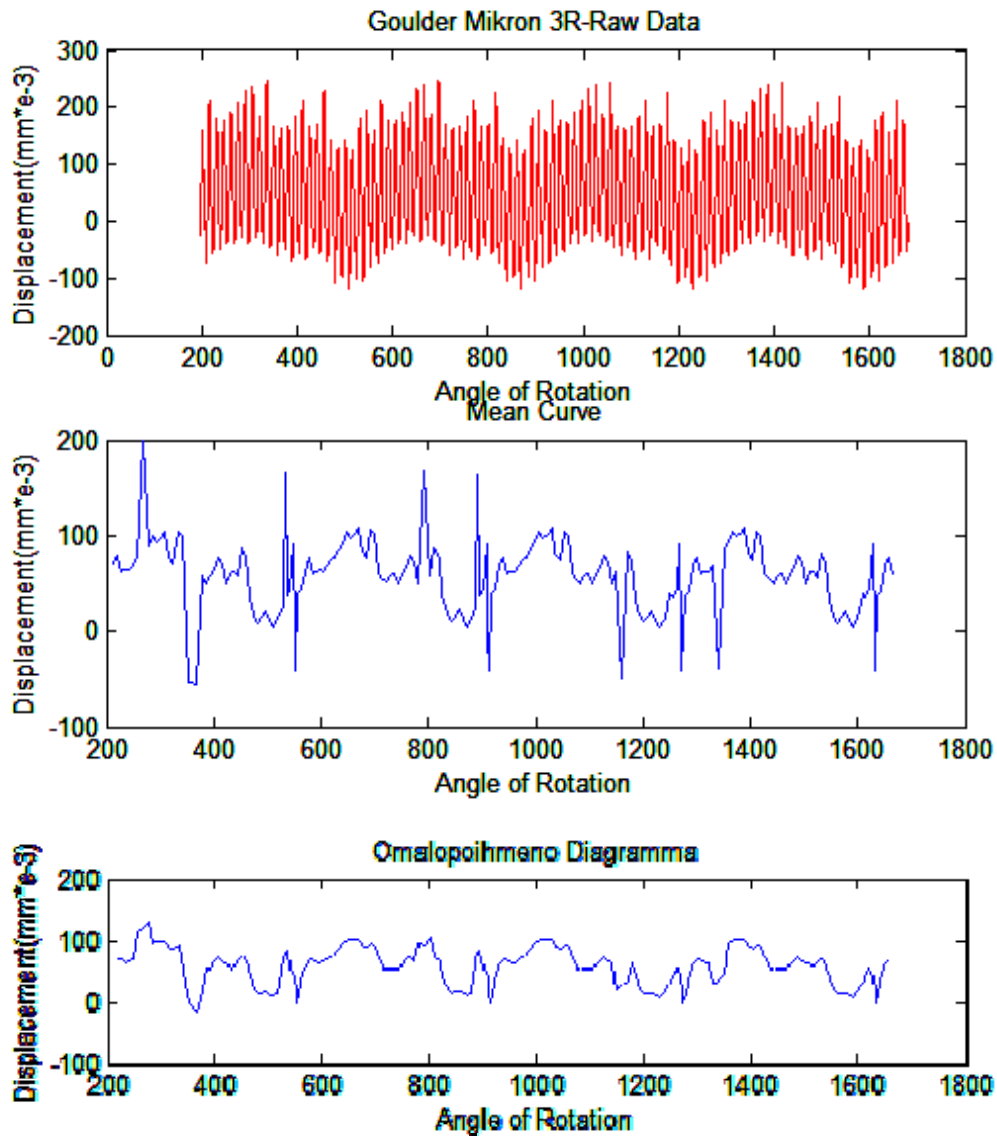
Πίνακας 4-21:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 7 (άνω τμήμα)

**module 5,  $\chi=1$  κάτω τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-66: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 8 (κάτω τμήμα)

Διάγραμμα 4-67: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 8 (κάτω τμήμα)

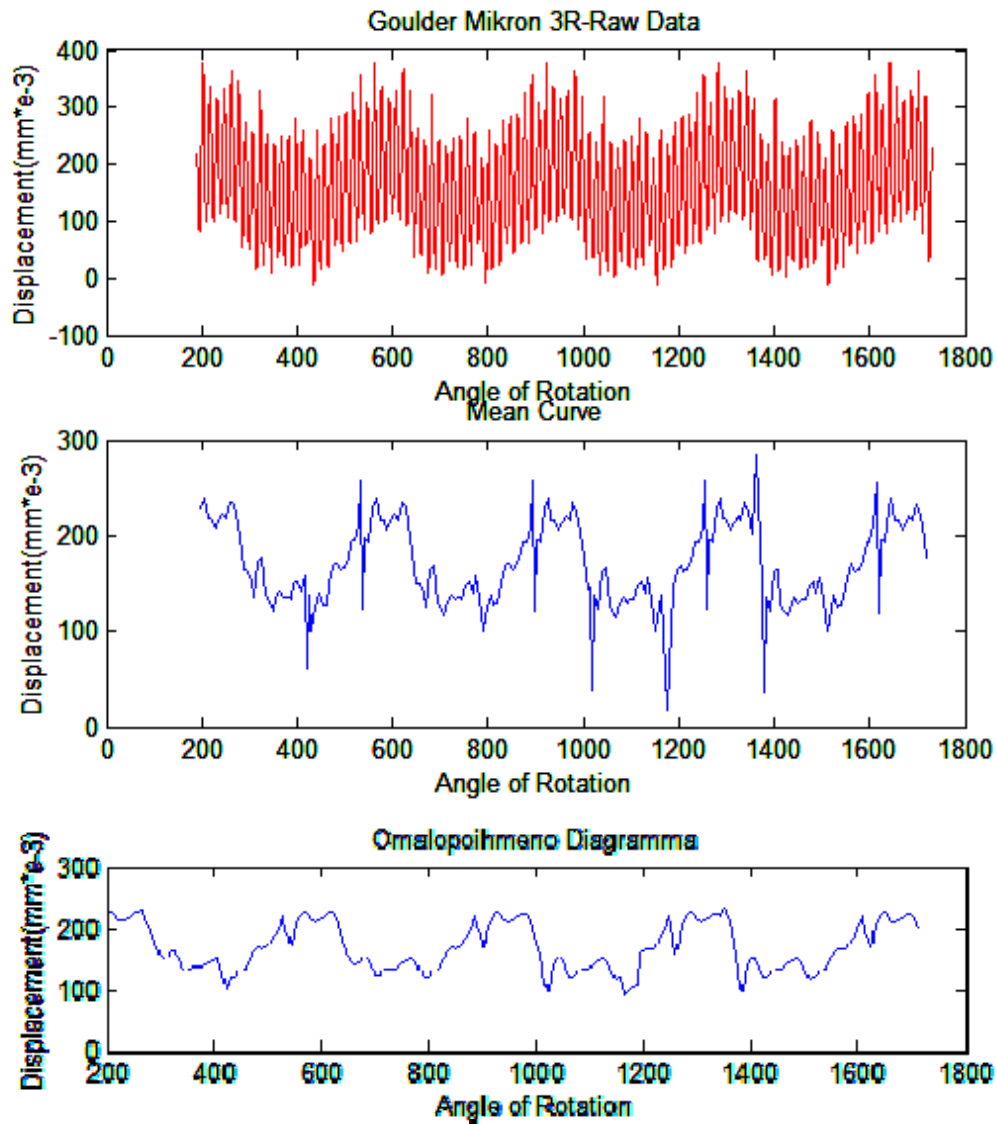
Διάγραμμα 4-68: Το διάγραμμα 4-67 ομαλοποιημένο

**module 5,  $\chi=1$  μεσαίο τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-69: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 8 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-70: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 8 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-71: Το διάγραμμα 4-70 ομαλοποιημένο

**module 5,  $\chi=1$  άνω τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-72: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 8 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-73: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 8 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-74: Το διάγραμμα 4-73 ομαλοποιημένο



Εικόνα 4-11: Ο τροχός 8

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	5	5
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	120	120
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	130	140
Μετατόπιση	x (mm)	0	1
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	125	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	124,3	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	205,71	
Τυπική απόκλιση	std	0,66	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	147,24	
Εκκεντρότητα	$F_r$	135,92	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

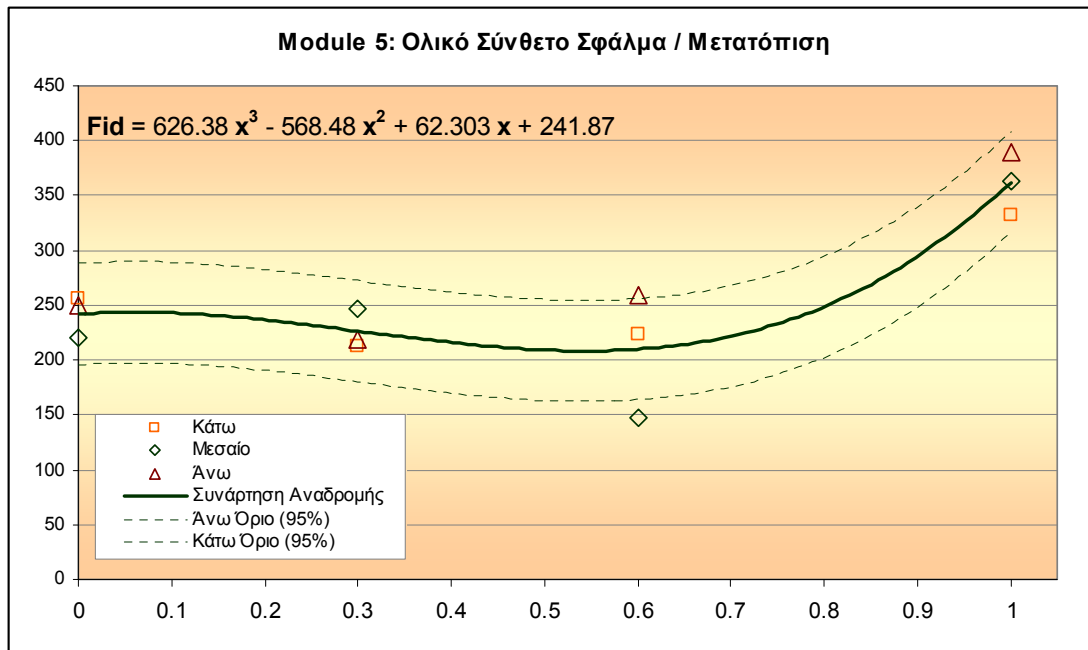
Πίνακας 4-22: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 8 (κάτω τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	5	5
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	120	120
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	130	140
Μετατόπιση	x (mm)	0	1
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	125	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	124,3	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	227,49	
Τυπική απόκλιση	std	0,28	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	363,56	
Εκκεντρότητα	$F_r$	253,56	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

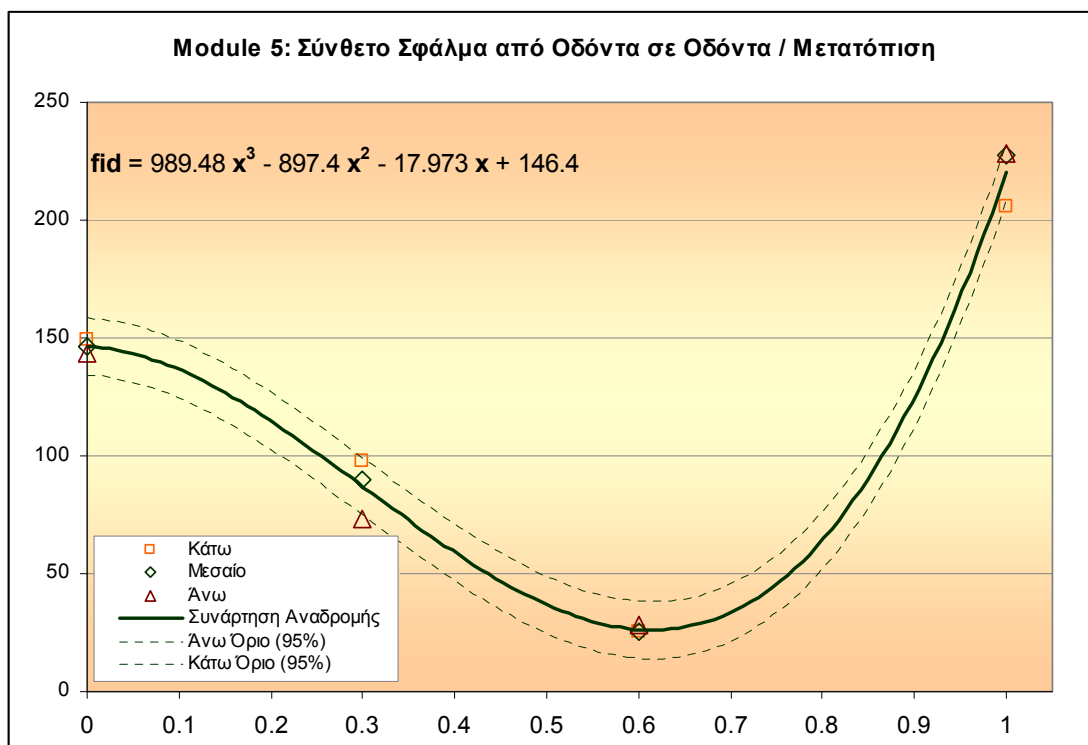
Πίνακας 4-23:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 8 (μεσαίο τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	5	5
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	120	120
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	130	140
Μετατόπιση	x (mm)	0	1
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	125	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	124,3	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	228,33	
Τυπική απόκλιση	std	0,23	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	389,96	
Εκκεντρότητα	$F_r$	268,02	
Παρατηρήσεις: άνω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-24:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 8 (άνω τμήμα)

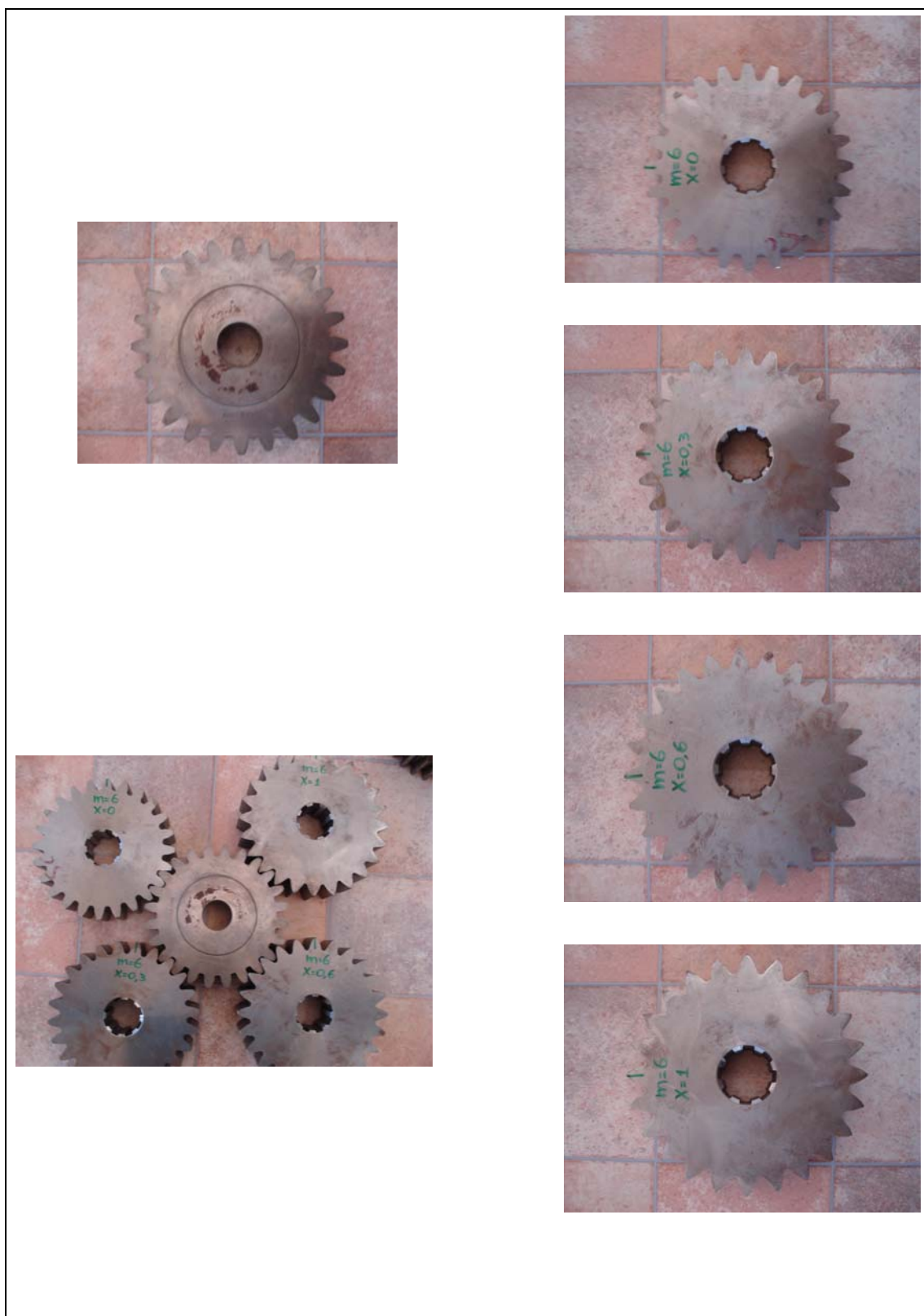


Διάγραμμα 4-75: Η αναδρομική σχέση ολικού σύνθετου σφάλματος-μετατόπισης για module=5



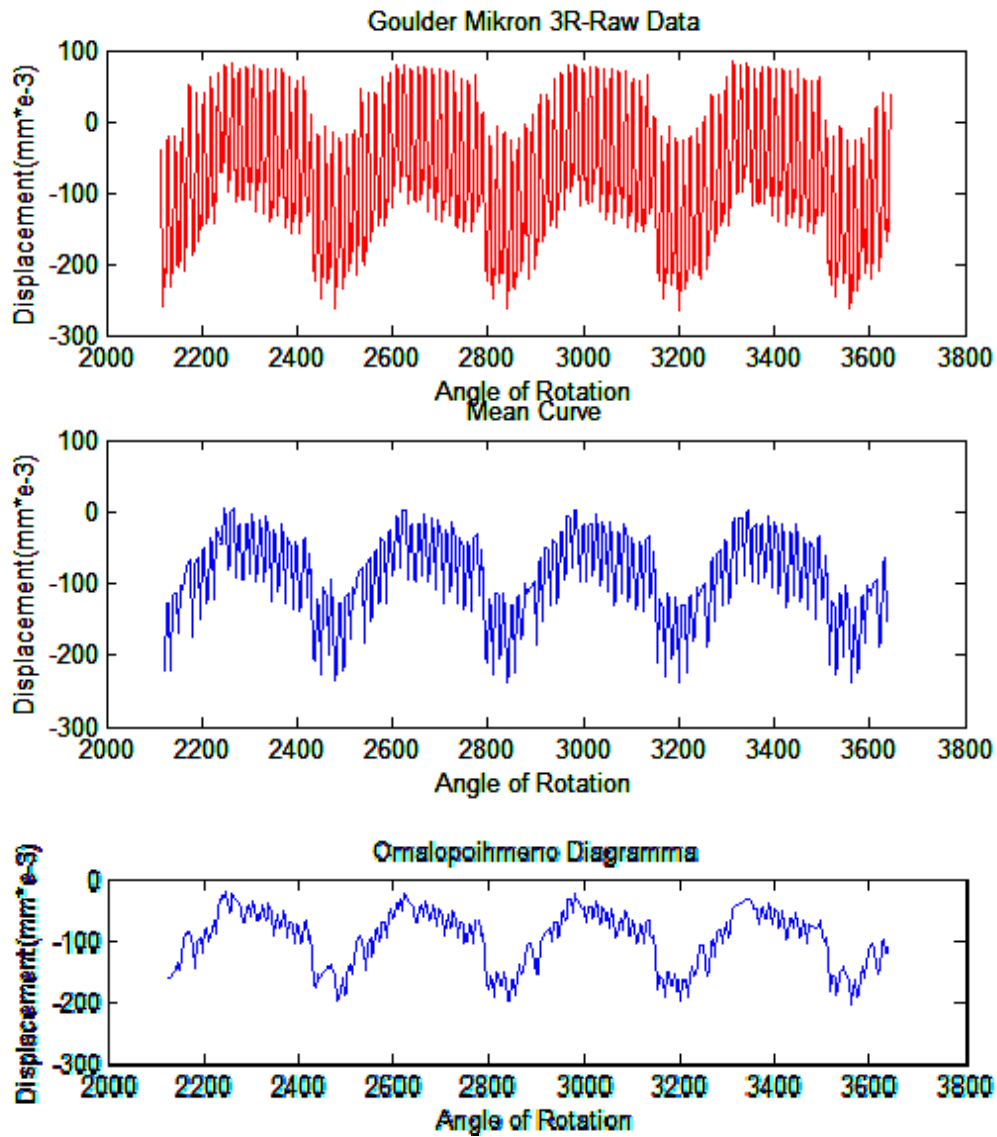
Διάγραμμα 4-76: Η αναδρομική σχέση σύνθετου σφάλματος από οδόντα σε οδόντα-μετατόπισης για module=5

## 4.3. Module 6



Εικόνα 4-12: Οι οδοντωτοί τροχοί με module 6, ο πρότυπος και οι υπό εξέταση

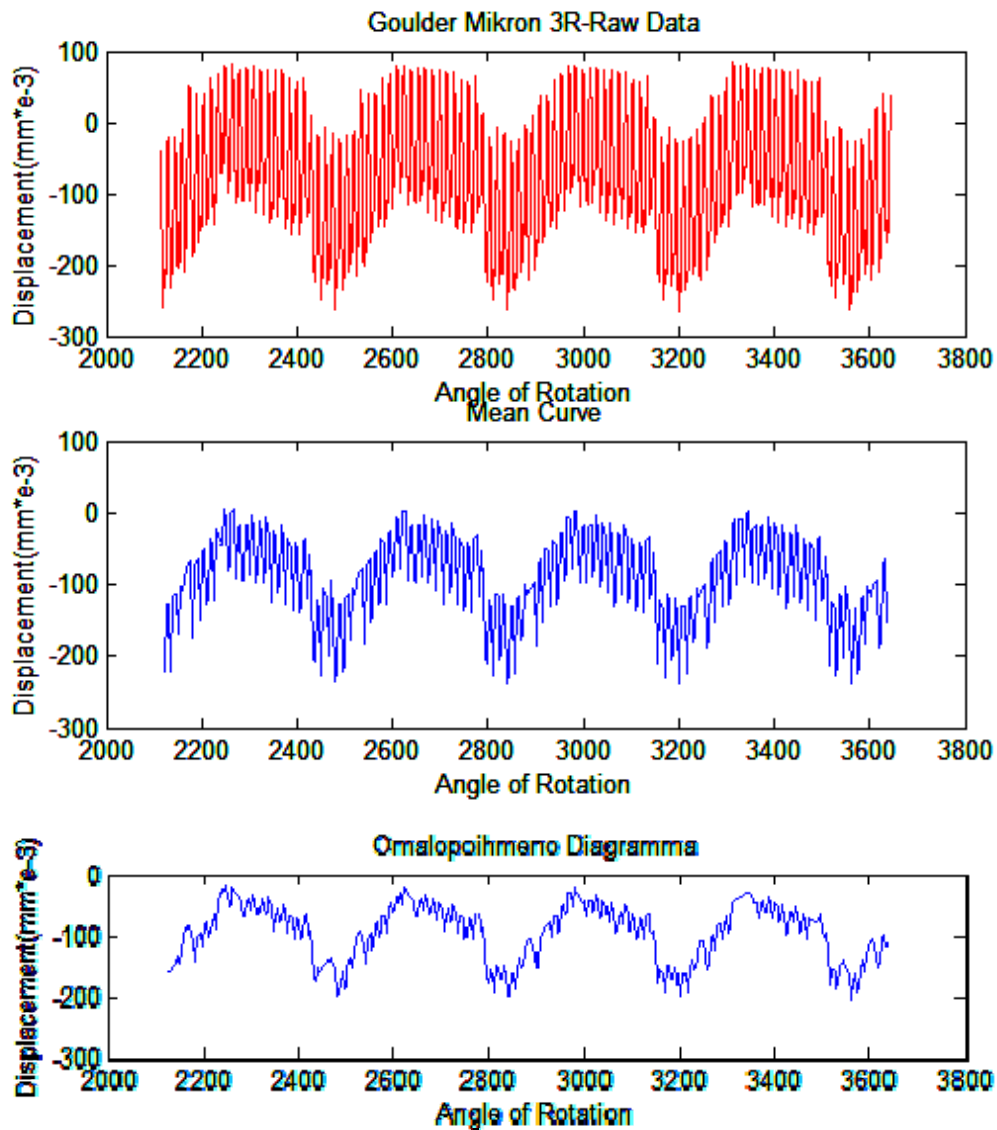


**Module 6,  $x=0$  κάτω τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-77: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 9 (κάτω τμήμα)

Διάγραμμα 4-78: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 9 (κάτω τμήμα)

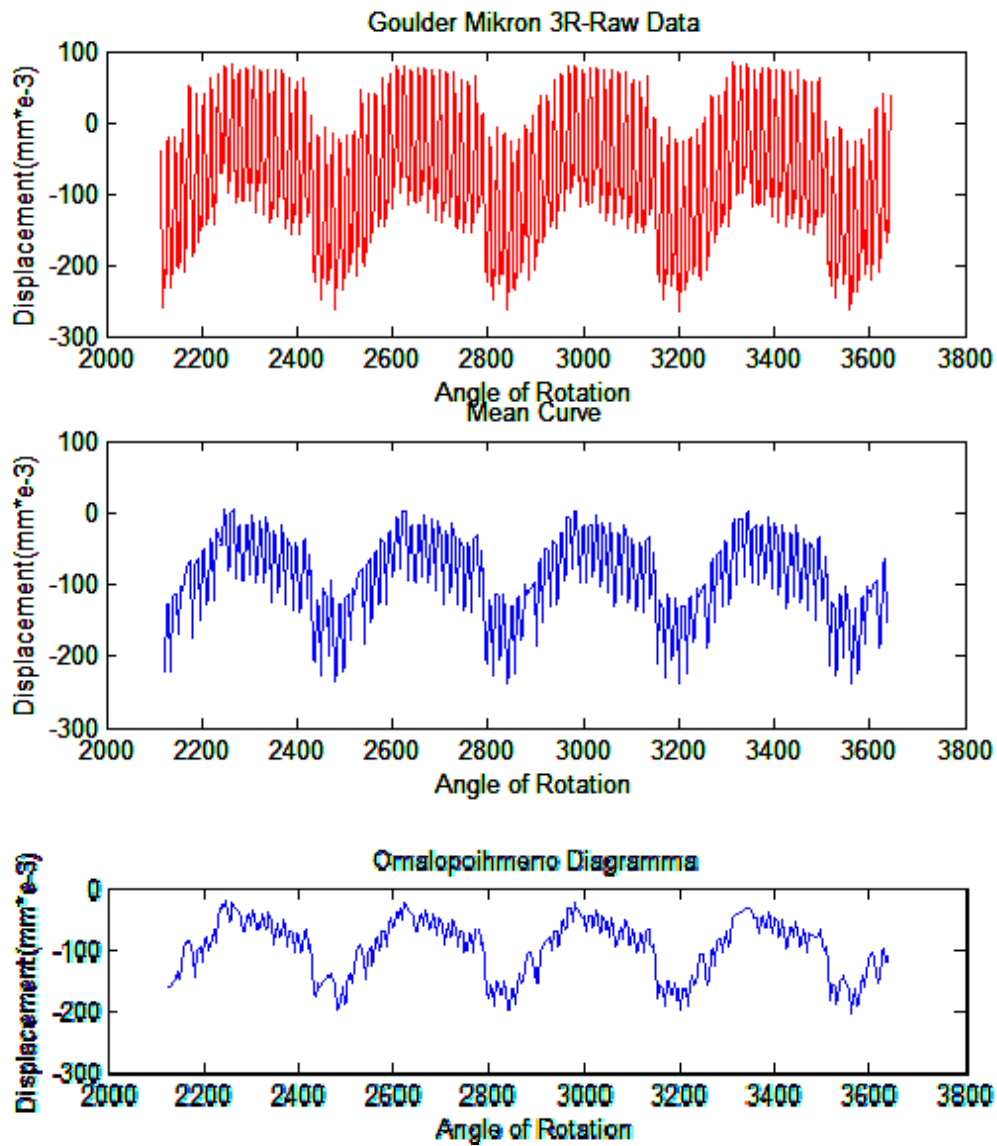
Διάγραμμα 4-79: Το διάγραμμα 4-78 ομαλοποιημένο

**Module 6,  $x=0$  μεσαίο τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-80: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 9 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-81: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 9 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-82: Το διάγραμμα 4-81 ομαλοποιημένο

**Module 6,  $x=0$  άνω τμήμα τροχού**

- Διάγραμμα 4-83: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 9 (άνω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-84: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 9 (άνω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-85: Το διάγραμμα 4-84 ομαλοποιημένο



Εικόνα 4-13: Οι τροχοί σε συνεργασία



Εικόνα 4-14: Ο τροχός 9

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	6	6
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	144	144
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	156	156
Μετατόπιση	x (mm)	0	0
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	144	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	143,5	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	119,39	
Τυπική απόκλιση	std	0,71	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	422,76	
Εκκεντρότητα	$F_r$	311,90	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

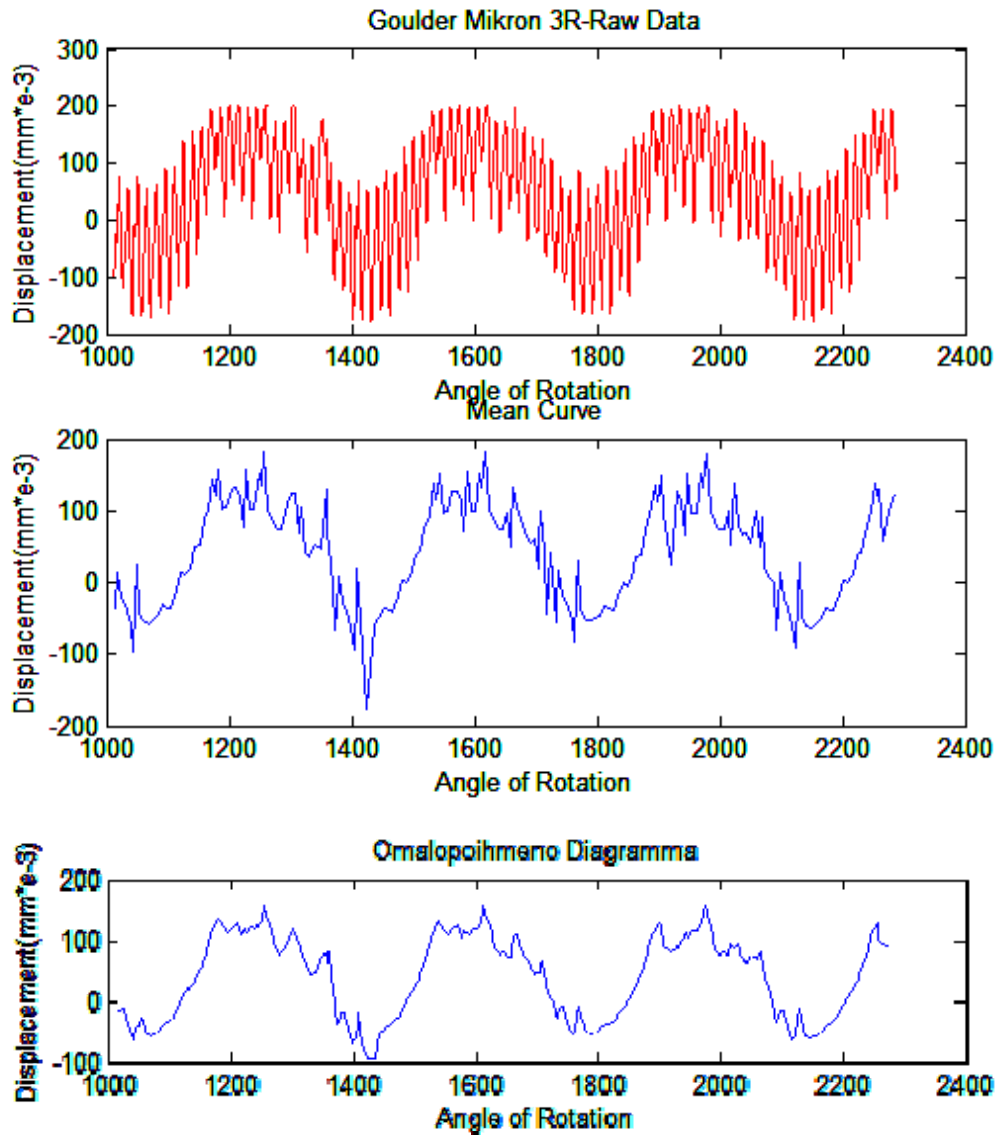
Πίνακας 4-25: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 9 (κάτω τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	6	6
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	144	144
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	156	156
Μετατόπιση	x (mm)	0	0
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	144	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	143,5	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	119,16	
Τυπική απόκλιση	std	0,71	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	349,20	
Εκκεντρότητα	$F_r$	245,30	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

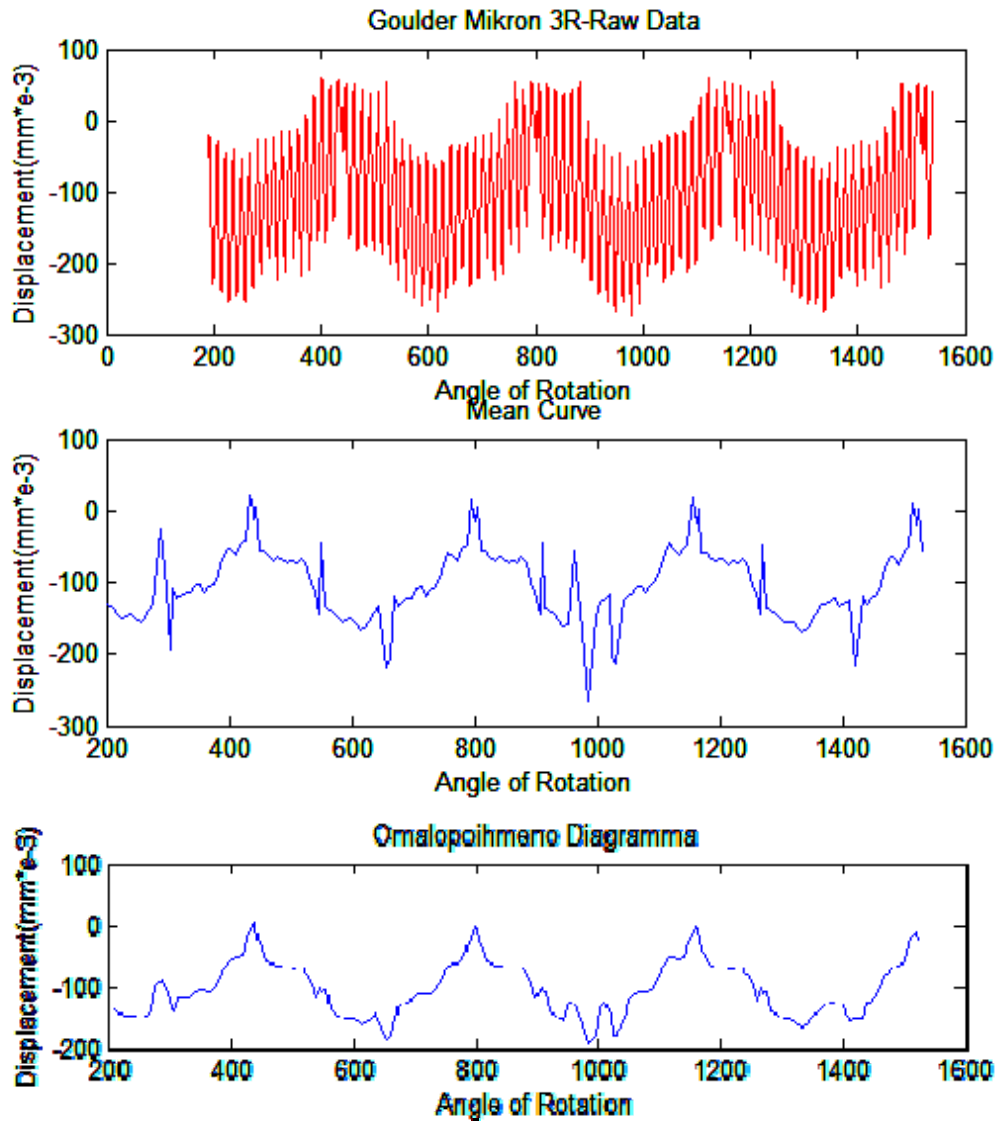
Πίνακας 4-26: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 9 (μεσαίο τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	6	6
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	144	144
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	156	156
Μετατόπιση	x (mm)	0	0
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	144	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	143,5	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	117,90	
Τυπική απόκλιση	std	0,58	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	480,36	
Εκκεντρότητα	$F_r$	341,92	
Παρατηρήσεις: άνω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-27: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 9 (άνω τμήμα)

**module 6,  $x=0,3$  κάτω τμήμα τροχού**

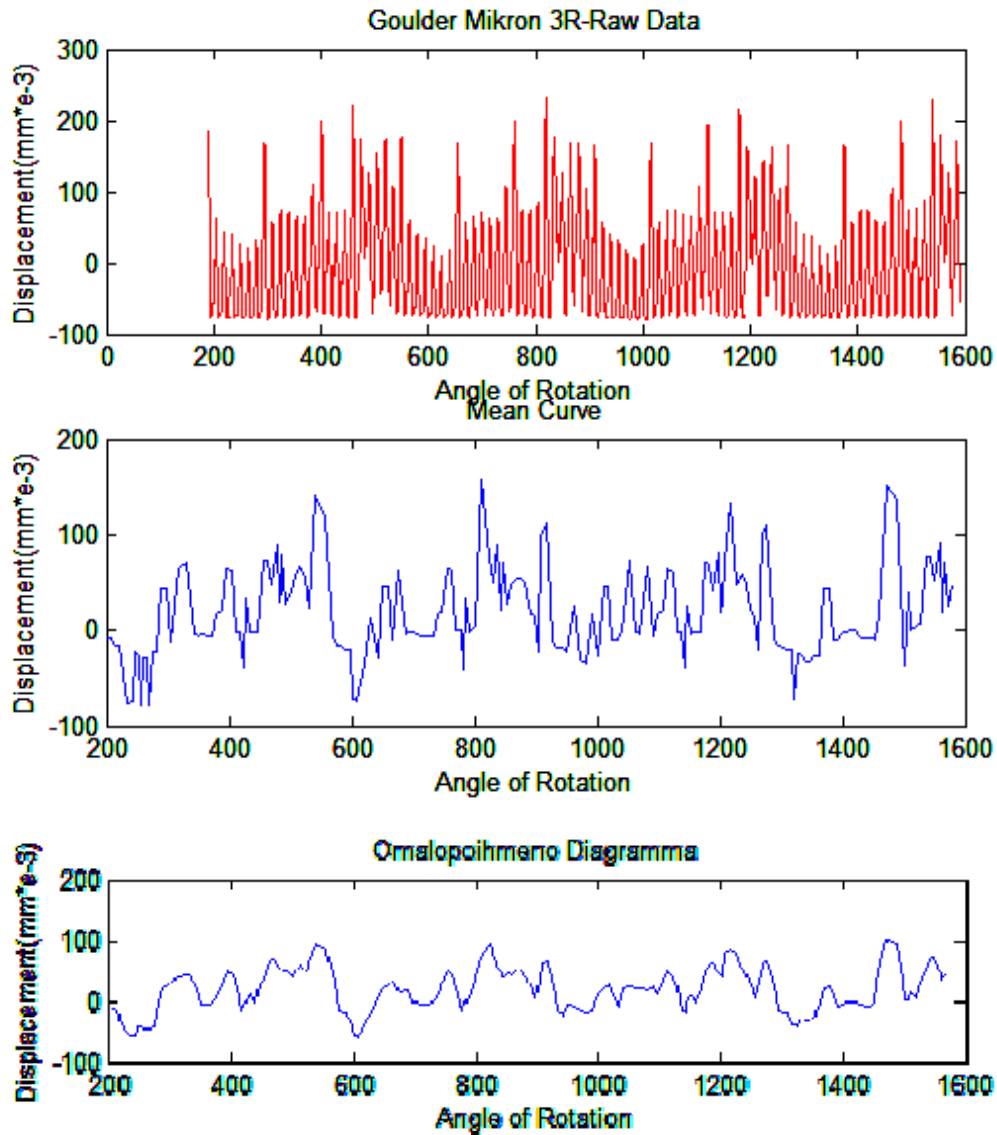
- Διάγραμμα 4-86: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 10 (κάτω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-87: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 10 (κάτω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-88: Το διάγραμμα 4-87 ομαλοποιημένο

**module 6,  $x=0,3$  μεσαίο τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-89: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 10 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-90: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 10 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-91: Το διάγραμμα 4-90 ομαλοποιημένο

**module 6,  $x=0,3$  άνω τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-92: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 10 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-93: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 10 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-94: Το διάγραμμα 4-93 ομαλοποιημένο





Εικόνα 4-15: Ο τροχός 10

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	6	6
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	144	144
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	156	159,6
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,3
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	145,8	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	145,5	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	167,46	
Τυπική απόκλιση	std	0,39	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	408,68	
Εκκεντρότητα	$F_r$	354,98	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

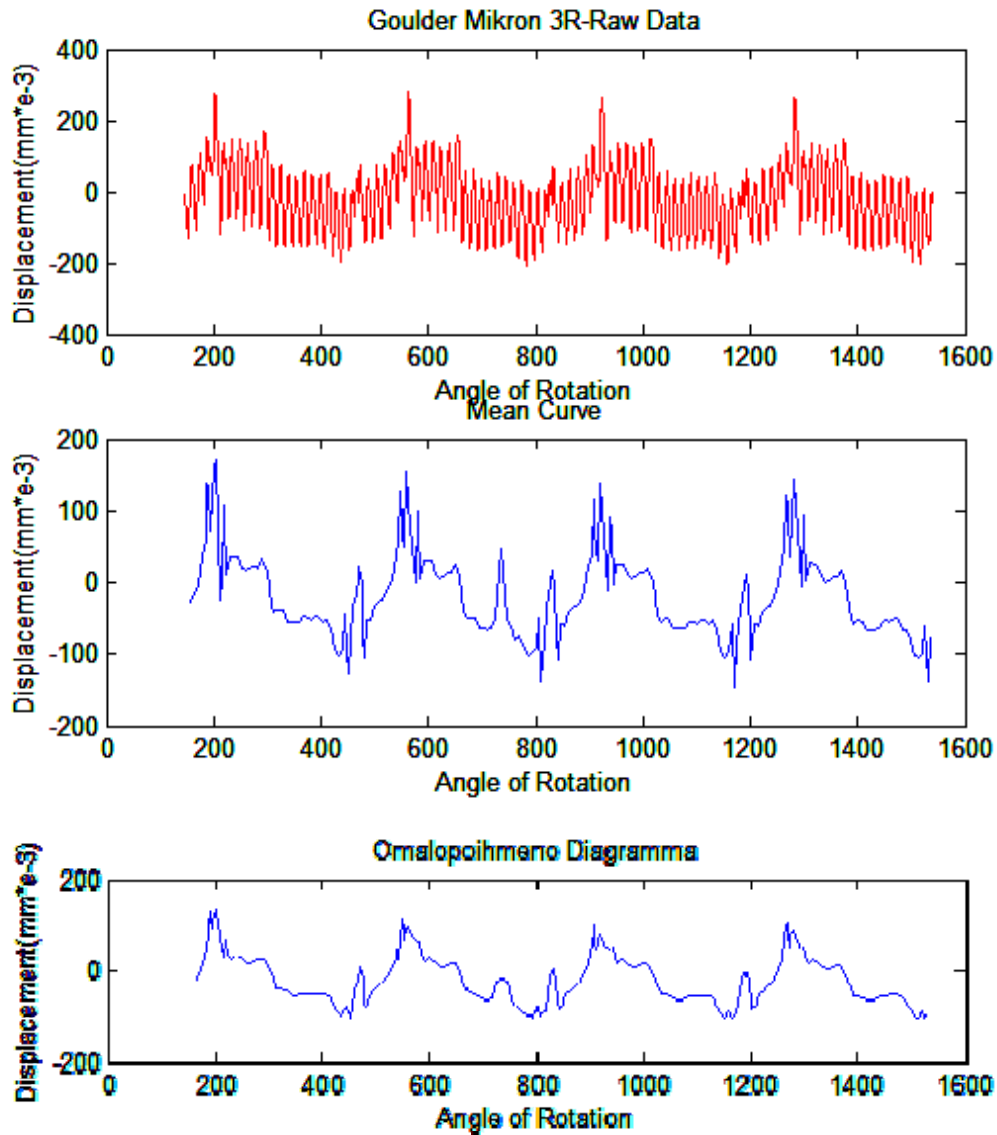
Πίνακας 4-28: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 10 (κάτω τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	6	6
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	144	144
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	156	159,6
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,3
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	145,8	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	145,5	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	183,04	
Τυπική απόκλιση	std	0,33	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	332,60	
Εκκεντρότητα	$F_r$	258,36	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

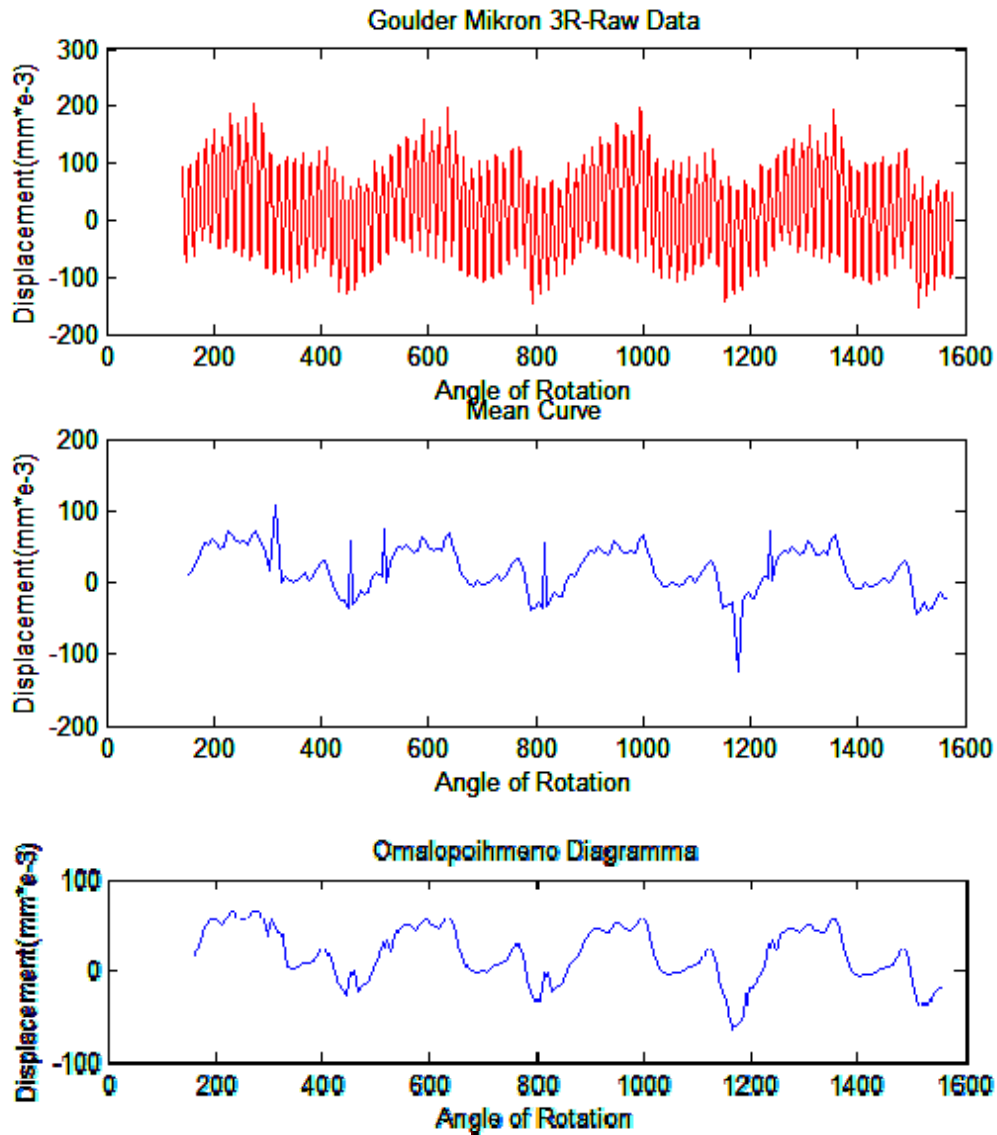
Πίνακας 4-29:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 10 (μεσαίο τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	6	6
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	144	144
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	156	159,6
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,3
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	145,8	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	145,5	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	139,64	
Τυπική απόκλιση	std	0,52	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	309,20	
Εκκεντρότητα	$F_r$	235,32	
Παρατηρήσεις: άνω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-30:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 10 (άνω τμήμα)

**module 6,  $x=0,6$  κάτω τμήμα τροχού**

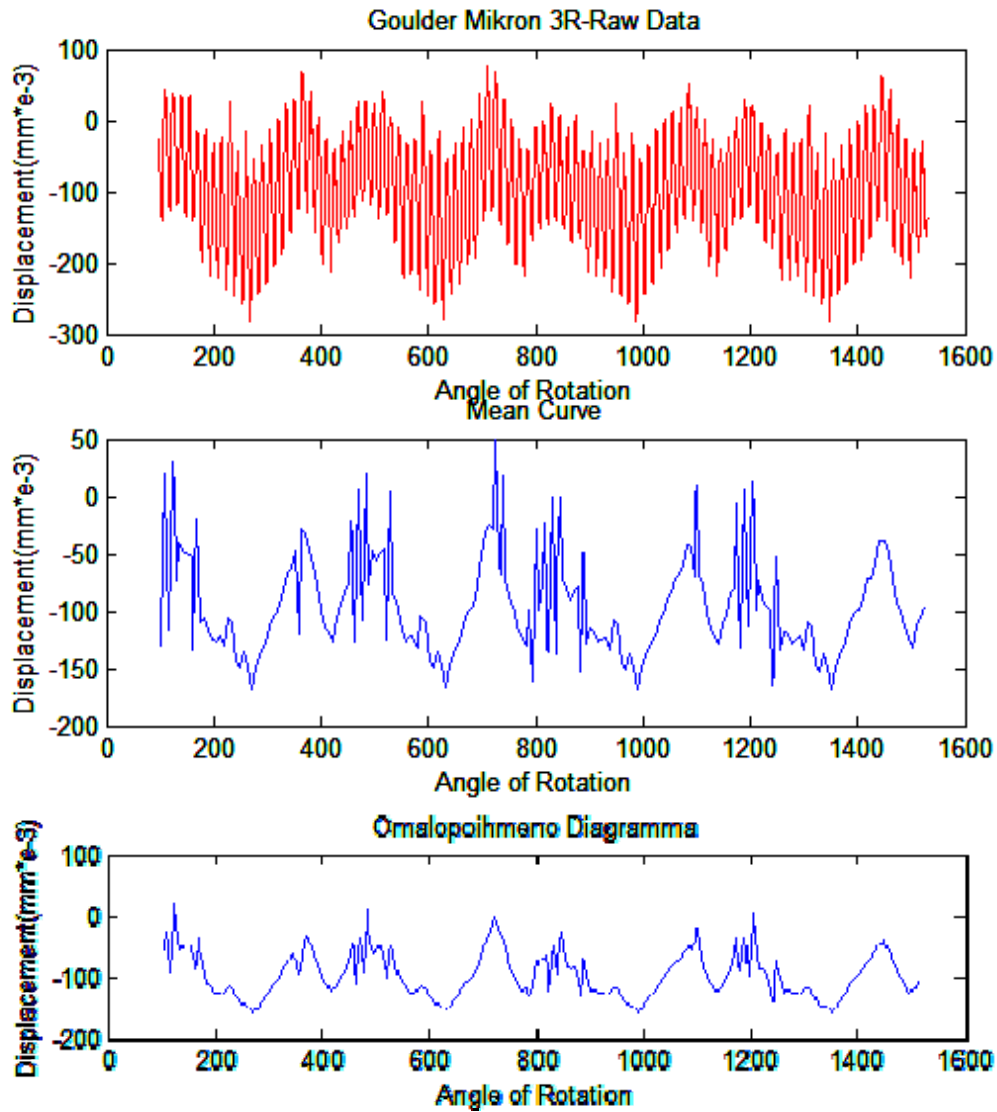
- Διάγραμμα 4-95: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 11 (κάτω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-96: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 11 (κάτω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-97: Το διάγραμμα 4-97 ομαλοποιημένο

**module 6,  $x=0,6$  μεσαίο τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-98: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 11 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-99: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 11 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-100: Το διάγραμμα 4-99 ομαλοποιημένο

**module 6,  $x=0,6$  άνω τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-101: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 11 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-102: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 11 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-103: Το διάγραμμα 4-102 ομαλοποιημένο



Εικόνα 4-16: Ο τροχός 11

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	6	6
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	144	144
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	156	163,2
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,6
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	147,6	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	146,9	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	172,75	
Τυπική απόκλιση	std	0,46	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	484,96	
Εκκενρότητα	$F_r$	315,92	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

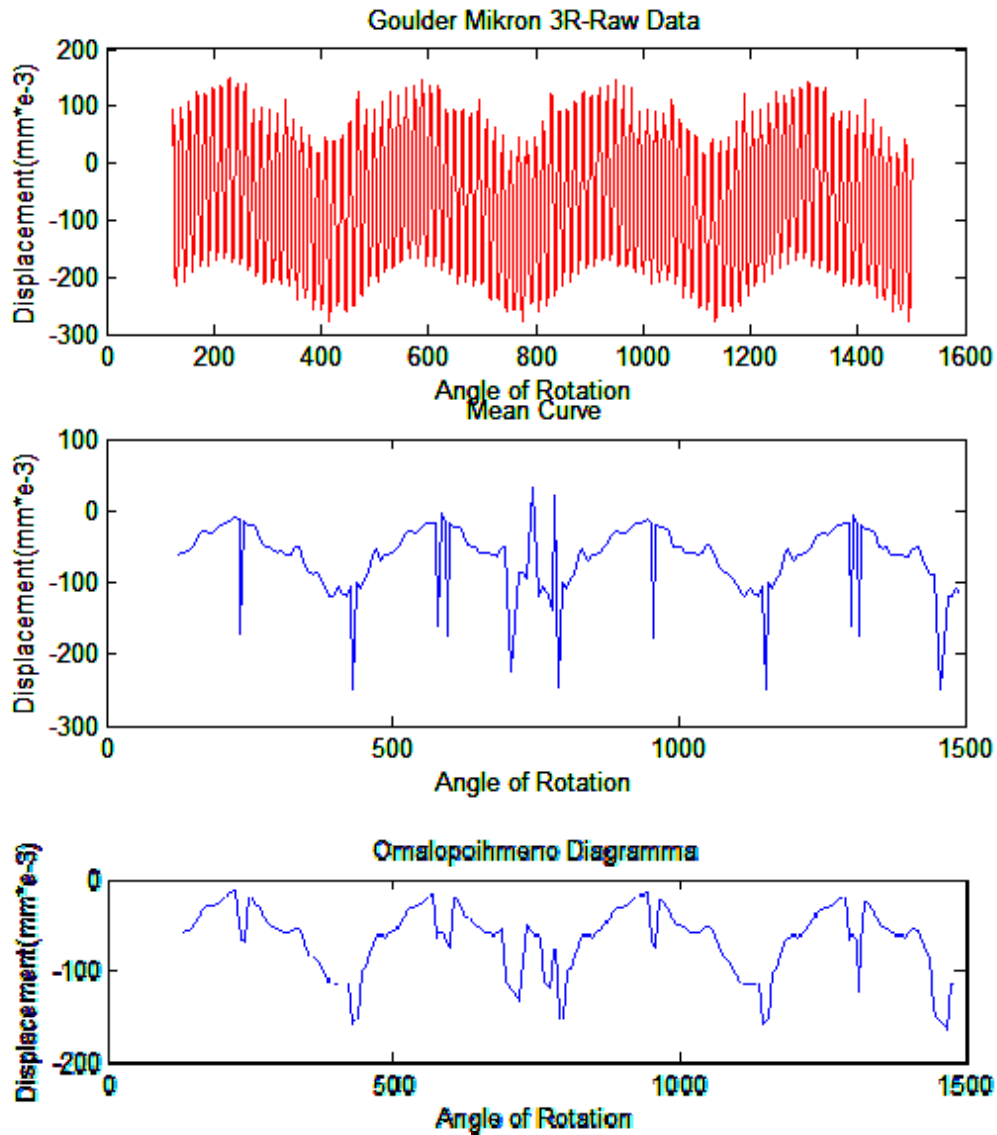
Πίνακας 4-31: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 11 (κάτω τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	6	6
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	144	144
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	156	163,2
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,6
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	147,6	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	146,9	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	192,36	
Τυπική απόκλιση	std	0,22	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	356,40	
Εκκεντρότητα	$F_r$	231,70	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-32:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 11 (μεσαίο τμήμα)

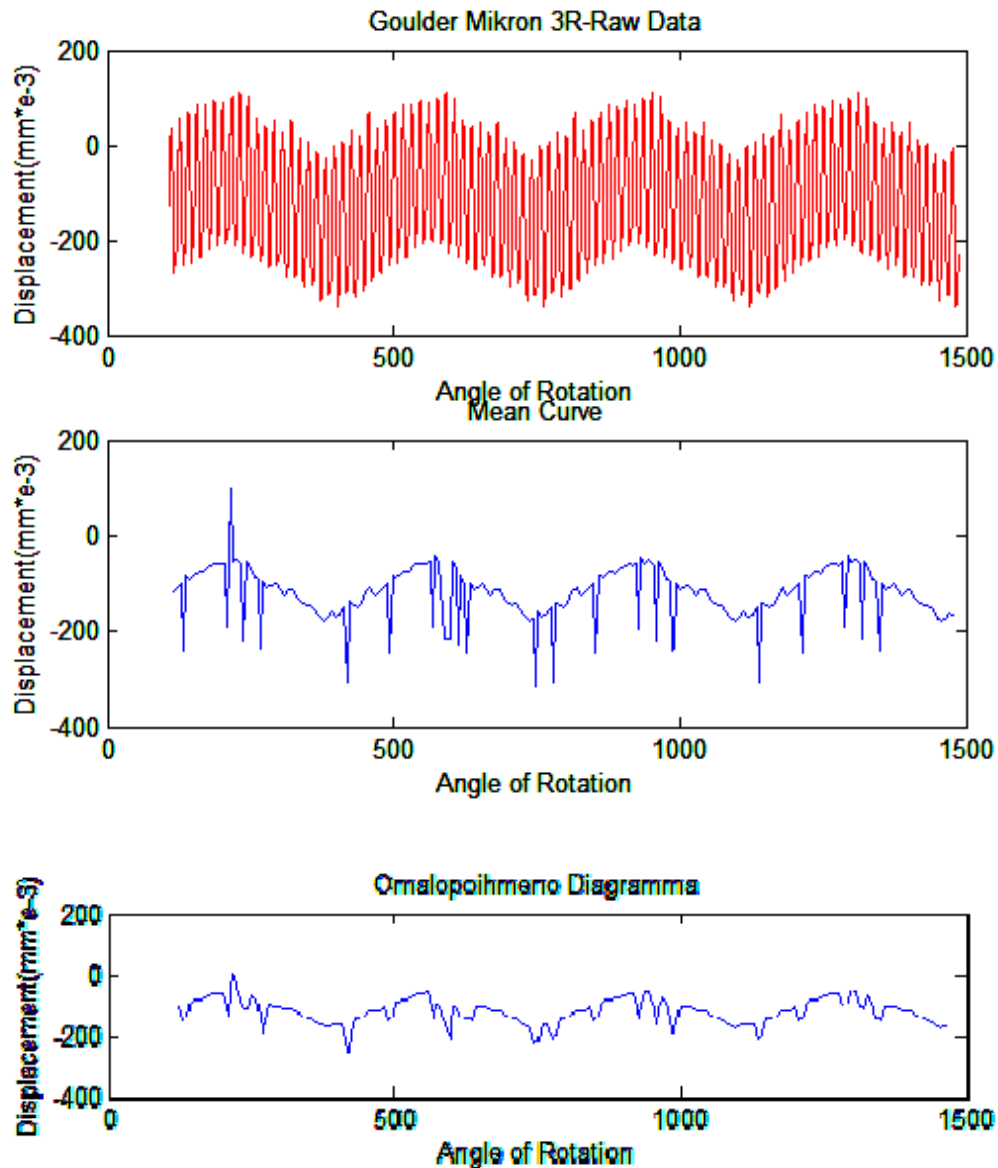
Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	6	6
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	144	144
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	156	163,2
Μετατόπιση	x (mm)	0	0,6
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	147,6	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	146,9	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	146,75	
Τυπική απόκλιση	std	0,52	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	357,36	
Εκκεντρότητα	$F_r$	217,20	
Παρατηρήσεις: άνω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-33:Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 11 (άνω τμήμα)

**module 6,  $x=1$  κάτω τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-104: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 12 (κάτω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-105: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 12 (κάτω τμήμα)  
Διάγραμμα 4-106: Το διάγραμμα 4-105 ομαλοποιημένο

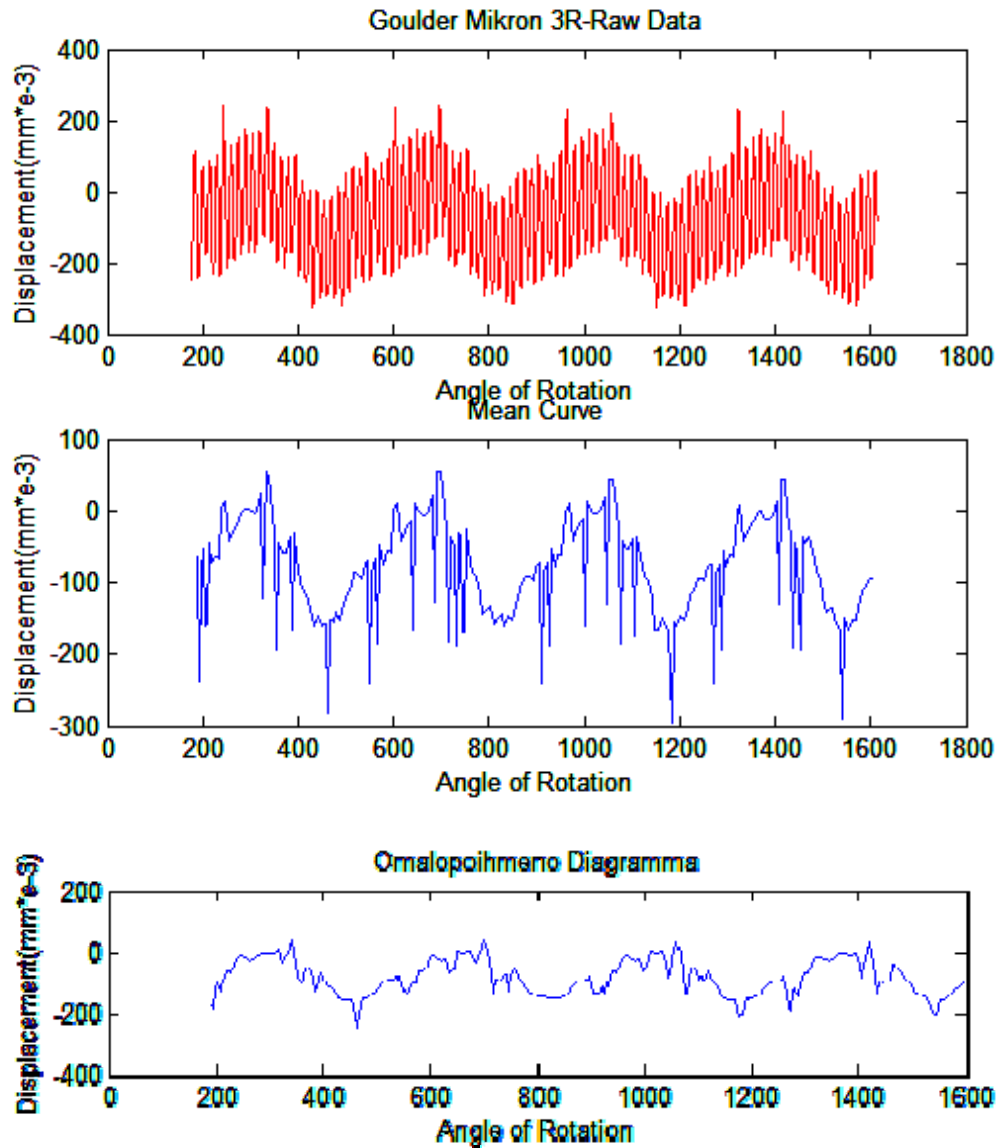


**module 6, x=1 μεσαίο τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-107: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 12 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-108: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 12 (μεσαίο τμήμα)

Διάγραμμα 4-109: Το διάγραμμα 4-108 ομαλοποιημένο

**module 6, x=1 άνω τμήμα τροχού**

Διάγραμμα 4-110: Διάγραμμα μετατόπισης- γωνίας περιστροφής του τροχού 12 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-111: Διάγραμμα μέσης τιμής της μετατόπισης-γωνίας περιστροφής του τροχού 12 (άνω τμήμα)

Διάγραμμα 4-112: Το διάγραμμα 4-111 ομαλοποιημένο



Εικόνα 4-17: Ο τροχός 12

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	6	6
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	144	144
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	156	168
Μετατόπιση	x (mm)	0	1
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	150	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	148,9	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	285,14	
Τυπική απόκλιση	std	0,27	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	428,20	
Εκκεντρότητα	$F_r$	283,16	
Παρατηρήσεις: κάτω τμήμα τροχού			

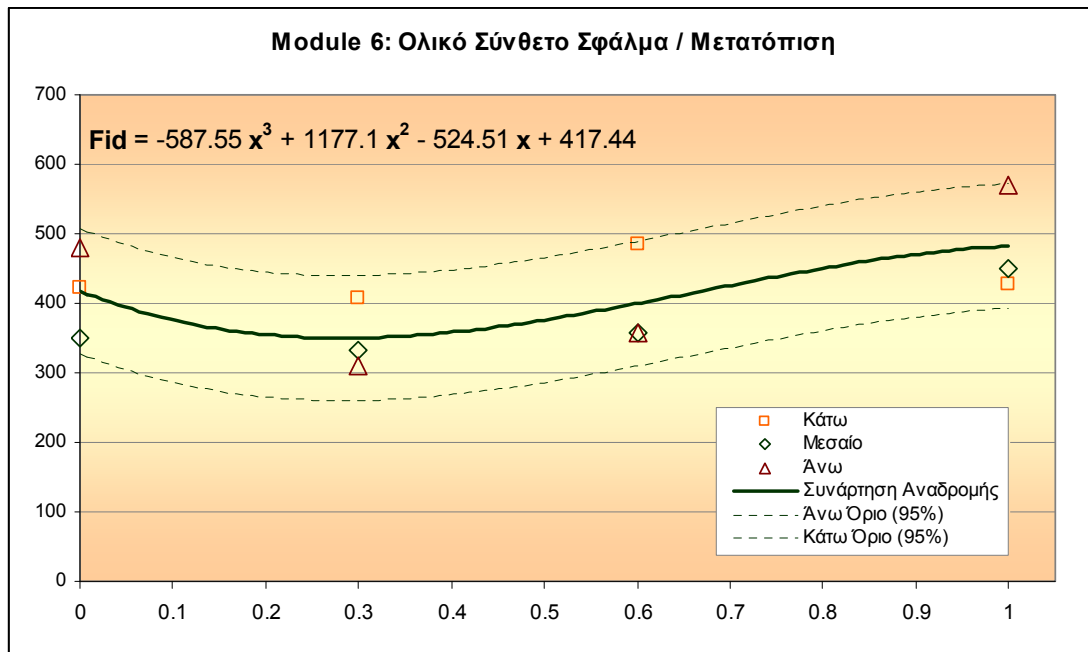
Πίνακας 4-34: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 12 (κάτω τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	6	6
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	144	144
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	156	168
Μετατόπιση	x (mm)	0	1
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	150	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	148,9	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	286,35	
Τυπική απόκλιση	std	0,40	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	450,28	
Εκκεντρότητα	$F_r$	414,06	
Παρατηρήσεις: μεσαίο τμήμα τροχού			

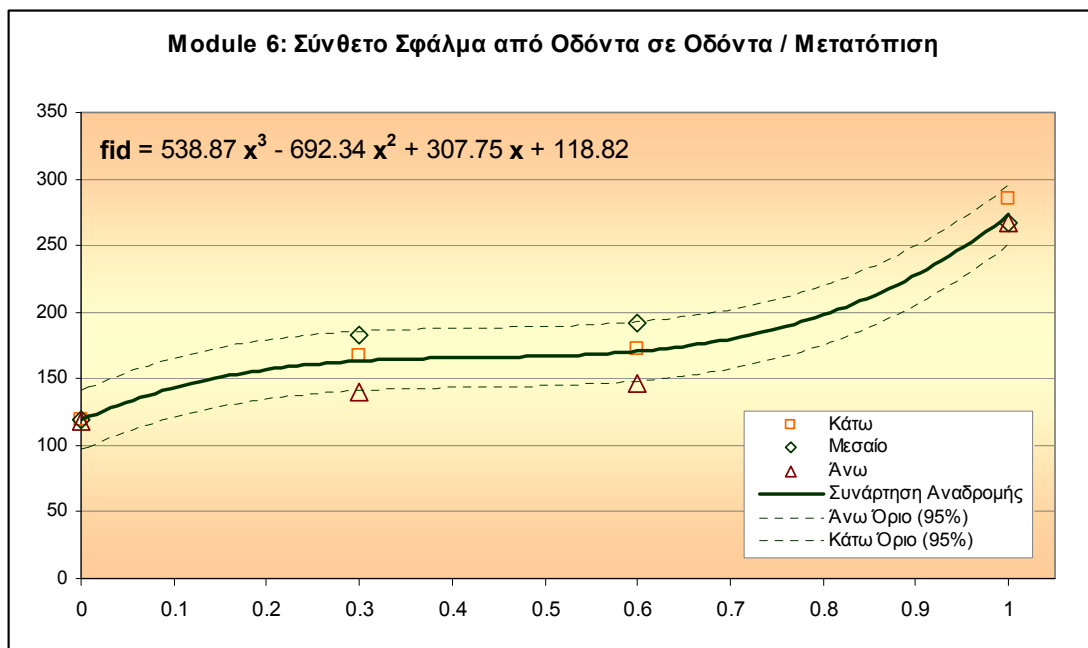
Πίνακας 4-35: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 12 (μεσαίο τμήμα)

Ημερομηνία			
Στοιχεία τροχών		Πρότυπος τροχός	Υπό εξέταση τροχός
Module	m (mm)	6	6
Αριθμός οδόντων	Z	24	24
Διάμετρος αρχικού κύκλου	$d_o$ (mm)	144	144
Διάμετρος κύκλου κεφαλής	$d_k$ (mm)	156	168
Μετατόπιση	x (mm)	0	1
Πλάτος	b (mm)	40	45
Ονομαστική απόσταση συνεργασίας	$a_o$ (mm)	150	
Απόσταση σφιχτής συνεργασίας	$a_\sigma$ (mm)	148,9	
Αποτελέσματα μετρήσεων			
Μέσο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα	$f_{id}$	267,30	
Τυπική απόκλιση	std	0,45	
Συνολικό σύνθετο σφάλμα	$F_{id}$	508,92	
Εκκεντρότητα	$F_r$	351,40	
Παρατηρήσεις: άνω τμήμα τροχού			

Πίνακας 4-36: Φόρμα καταγραφής των μετρήσεων του τροχού 12 (άνω τμήμα)



Διάγραμμα 4-113: Η αναδρομική σχέση ολικού σύνθετου σφάλματος-μετατόπισης για module=6



Διάγραμμα 4-114: Η αναδρομική σχέση σύνθετου σφάλματος από οδόντα σε οδόντα-μετατόπισης για module=6

---

## 5. Βιβλιογραφία

- [1] **Κωστόπουλος Θ.Ν.(1991).**Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών, *Εκδόσεις Συμεών*
- [2] **Σιμόπουλος Σ.Ε.(1989).** Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών, *Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ*
- [3] **Σφαντζικόπουλος Μ.Μ.(2003).** Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών ΙΙ, *Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ*
- [4] **Τομέας Φυσικής ΕΜΠ (1999).**Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής. *Εκδόσεις Συμμετρία*
- [5] **Κοσμάς Χ. (2005).** Διπλωματική Εργασία: Ανακατασκευή και Αναβάθμιση της Μηχανής Μέτρησης Οδοντώσεων Goulder Mikron 3R.
- [6] **ANSI/AGMA 2116-A05.** Evaluation of Double Flank Testers for Radial Composite Measurement of Gears. *AGMA STANDARD*
- [7] **ANSI/AGMA 2015-1-A01.** Accuracy Classification System- Tangential Measurements for Cylindrical Gears. *AGMA STANDARD*
- [8] **ANSI/AGMA 2015-2-A06.** Accuracy Classification System- Radial Measurements for Cylindrical Gears. *AGMA STANDARD*
- [9] **ANSI/AGMA 915-3-A99.** Inspection Practices- Gear Blanks, Shaft Center Distance and Parallelism. *AGMA STANDARD*
- [10] **ANSI/AGMA 915-2-A05.** Inspection Practices-Part 2: Cylindrical Gears- Radial Measurements *AGMA STANDARD*

---

[11] **ANSI/AGMA 1012-G05.** Gear Nomenclature, Definition of Terms with Symbols. *AGMA STANDARD*