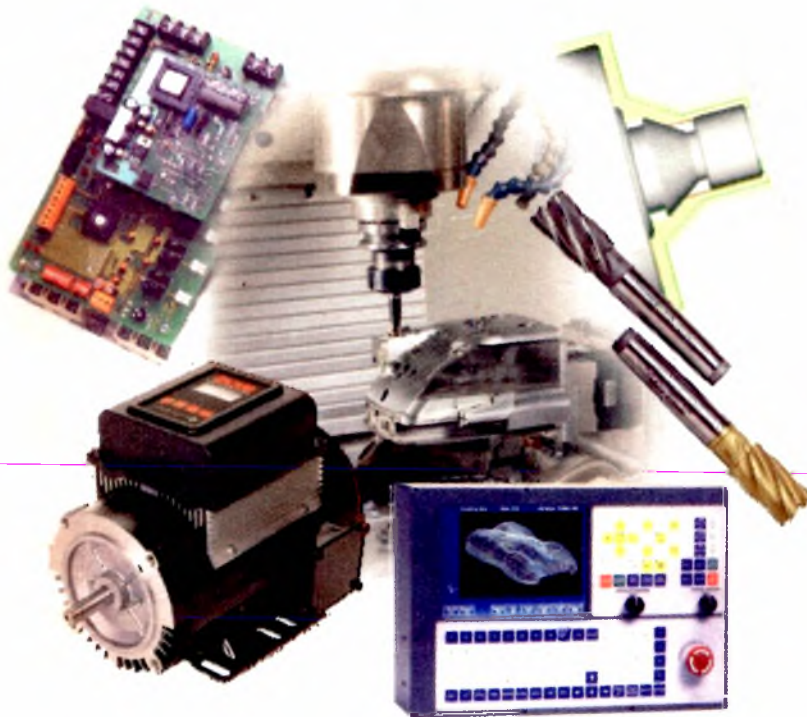




ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αυτόματος Έλεγχος και Διάγνωση Σφαλμάτων
σε Εργαλειομηχανές με Ψηφιακή Καθοδήγηση**

Χ. Σ. Μαυρίδης



Επιβλέπων: Φ. Ν. Κουμπουλής

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αυτόματος Έλεγχος και Διάγνωση Σφαλμάτων
σε Εργαλειομηχανές με Ψηφιακή Καθοδήγηση**

Χ. Σ. Μαυρίδης

Επιβλέπων: Φ. Ν. Κουμπούλης



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 772/1

Ημερ. Εισ.: _____

Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ

2000

ΜΑΥ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000062098

*Αφιερώνεται στους γονείς μου
Στράτο - Κυριακή*

Περιεχόμενα

Πρόλογος	9
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	11
Κεφάλαιο 2: Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες	
2.1 Εισαγωγικά Στοιχεία για DC Κινητήρες	
2.1.1 Γενικά Στοιχεία-Εφαρμογές.....	20
2.1.2 Κατηγορίες DC Κινητήρων.....	20
2.1.3 Αρχές Λειτουργίας-Περιγραφή.....	21
2.1.4 Έλεγχος DC Κινητήρων.....	23
2.2 P-D Ελεγκτής σε DC Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη	
2.2.1 Περιγραφή του Μοντέλου.....	23
2.2.2 Έλεγχος Ταχύτητας.....	25
2.2.3 Έλεγχος Θέσης.....	27
2.2.4 Προσομοίωση DC Κινητήρα Σταθερού Μαγνήτη.....	30
2.2.4.1 Έλεγχος Ταχύτητας.....	31
2.2.4.2 Έλεγχος Θέσης.....	31

2.3	P-D Ελεγκτής σε DC Κινητήρες Παράλληλης Διέγερσης	
2.3.1	Περιγραφή του Μοντέλου.	35
2.3.2	Έλεγχος Ταχύτητας για Σταθερή Τάση στον Ρότορα.	37
2.3.3	Προσομοίωση DC Κινητήρα Παράλληλης Διέγερσης με Σταθερή Τάση στον Ρότορα.	39
2.3.4	Έλεγχος Ταχύτητας για Σταθερή Τάση στον Στάτορα.	42
2.3.5	Προσομοίωση DC Κινητήρα Παράλληλης Διέγερσης με Σταθερή Τάση στον Στάτορα.	44
2.3.6	Έλεγχος Ταχύτητας και Ρεύματος στο Ρότορα.	46
2.3.7	Προσομοίωση DC Κινητήρα Παράλληλης Διέγερσης με Έλεγχο Ταχύτητας και Ρεύματος του Ρότορα.	48
2.4	P-D Ελεγκτής σε DC Κινητήρες Σειριακής Διέγερσης	
2.4.1	Περιγραφή του Μοντέλου.	51
2.4.2	Έλεγχος Ταχύτητας.	53
2.4.3	Προσομοίωση DC Κινητήρα Σειριακής Διέγερσης.	54
2.5	Εκτίμηση της Ροπής Φορτίου	
2.5.1	Σχέσεις Εκτίμησης της Ροπής Φορτίου.	57
2.5.2	Σφάλμα Εκτίμησης.	58

Κεφάλαιο 3: Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε AC Κινητήρες

3.1	Εισαγωγικά Στοιχεία για AC Κινητήρες	
3.1.1	Γενικά Στοιχεία-Εφαρμογές.	64
3.1.2	Αρχές Λειτουργίας-Περιγραφή.	65
3.1.3	Κατηγορίες AC Κινητήρων.	66
3.1.4	Έλεγχος AC Κινητήρων.	67



3.2 P-D Ελεγκτής σε Επαγωγικό AC Κινητήρα

3.2.1 Περιγραφή του Μοντέλου και του P-D Ελεγκτή. **68**

3.2.2 Εκτίμηση της Ροπής. **70**

3.3 P-D Ελεγκτής σε Σύγχρονο AC Κινητήρα

3.3.1 Περιγραφή του Μοντέλου. **72**

3.3.2 Έλεγχος Ταχύτητας και Ρεύματος. **73**

3.3.3 Προσομοίωση Σύγχρονου AC Κινητήρα με Έλεγχο Ταχύτητας και Ρεύματος. **76**

3.3.4 Σχέσεις Εκτίμησης της Ροπής Φορτίου. **79**

3.3.5 Σφάλμα Εκτίμησης της Ροπής Φορτίου. **80**

Κεφάλαιο 4: Διάγνωση Σφαλμάτων κατά την Κατεργασία Υλικών

4.1 Εισαγωγικά Στοιχεία Κατεργασιών

4.1.1 Γενικά Στοιχεία. **83**

4.1.2 Κατεργασίες Κοπής. **85**

4.1.3 Τόρνευση. **86**

4.1.4 Φρεζάρισμα. **87**

4.1.5 Εργαλειομηχανές Αριθμητικού Έλεγχου. **89**

4.1.6 Διατάξεις Κίνησης και Μέτρησης σε Εργαλειομηχανές. **94**

4.2 Βασικά Σφάλματα κατά την Κοπή. 95

4.3 Εκτίμηση Σφαλμάτων

4.3.1 Εφαρμογή της Εκτίμησης της Ροπής. **100**

4.3.2 Εκτίμηση Σφαλμάτων σε DC Κινητήρες. **101**

4.3.3 Εκτίμηση Σφαλμάτων σε Επαγωγικούς AC Κινητήρες. **105**

4.3.4 Εκτίμηση Σφαλμάτων σε Σύγχρονους AC Κινητήρες. **106**

4.4 Προσαρμοστικός Αλγόριθμος Διάγνωσης και Αναίρεσης Σφαλμάτων

4.4.1 Προσαρμοστικός αλγόριθμος. 107

4.4.2 Υπολογισμός της ροπής κατά την κοπή. 112

Κεφάλαιο 5: Πειραματικά Αποτελέσματα

5.1 Γενικά Στοιχεία. 119

5.2 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης. 120

5.3 Διάταξη Μεταβολής της Ροπής. 121

5.4 Πειραματικά Αποτελέσματα

5.4.1 Αποτελέσματα για Σταθερή Ροπή. 124

5.4.2 Αποτελέσματα για Περιοδικά Μεταβαλλόμενη Ροπή. 131

5.5 Προτεινόμενη Διάταξη Άσκησης Σταθερής Ροπής. 135

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα-Μελλοντική Έρευνα. 141

Παράρτημα Α: Κώδικες Προσομοίωσης

A.1 Κώδικες Προσομοίωσης για DC κινητήρες. A-2

A1.1 DC Κινητήρας Σταθερού Μαγνήτη. A-2

A1.2 DC Κινητήρες Παράλληλης Διέγερσης. A-4

A.1.2.1 Έλεγχος ταχύτητας για Σταθερή Τάση στον Ρότορα. . A-5

A.1.2.2 Έλεγχος ταχύτητας για Σταθερή Τάση στον Στάτορα. A-6

A.1.2.3 Έλεγχος ταχύτητας και Ρεύματος του Ρότορα. A-6

A.1.3 DC Κινητήρας Σειριακής Διέγερσης. A-7

A.2 Κώδικες Προσομοίωσης για Σύγχρονους AC

Κινητήρες. A-9

Πρόλογος



Στην σύγχρονη βιομηχανία, στα πλαίσια της αυτοματοποίησης, οι μηχανουργικές κατεργασίες πραγματοποιούνται με εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου με ηλεκτρονικό υπολογιστή (Computer Numeric Control, CNC). Αυτές οι εργαλειομηχανές δίνουν την δυνατότητα κατεργασίας με υψηλή ακρίβεια, επαναληψιμότητα και σε υψηλές ταχύτητες. Ταυτόχρονα εξαλείφουν σε μεγάλο βαθμό τα ανθρώπινα λάθη. Η επιθυμητή ακρίβεια των κινήσεων της εργαλειομηχανής επιτυγχάνεται με την χρήση ελεγκτών, ταχύτητας ή θέσης, για τους ηλεκτρικούς κινητήρες της. Η εξέλιξη των συστημάτων CNC δίνει πλέον την δυνατότητα κατεργασίας τεμαχίων εξαιρετικά πολύπλοκης γεωμετρίας με μεγάλες ταχύτητες κοπής. Οι μεγάλες ταχύτητες κοπής προκαλούν ταχύτερη φθορά των κοπτικών εργαλείων καθώς και ταλαντώσεις στο σύστημα εργαλειομηχανή-εργαλείο-τεμάχιο. Τα δύο αυτά σφάλματα προκαλούν διαστατική ανακρίβεια, μεγάλη τραχύτητα και καταπόνηση της εργαλειομηχανής.

Για την διάγνωση και την αντιμετώπιση των παραπάνω σφαλμάτων αναπτύσσεται προσαρμοστικός αλγόριθμος με βάση την εκτίμηση της ροπής που ασκείται στους ηλεκτρικούς κινητήρες της εργαλειομηχανής. Για την εκτίμηση της ροπής ταυτόχρονα με τον εύρωστο τέλειο έλεγχο εξόδου με αποκοπή διαταραχών αναπτύσσονται P-D ελεγκτές. Το αποτέλεσμα επαληθεύεται πειραματικά για έναν τριφασικό επαγωγικό κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η διπλωματική αυτή διαμορφώνεται σε έξη κεφάλαια και σε ένα παράρτημα. Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η εισαγωγή και σκοπός της εργασίας. Στο Κεφάλαιο 2 μελετώνται οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος στους οποίους εφαρμόζονται οι

κατάλληλοι νόμοι ελέγχου και εκτιμάται η εξωτερική ροπή φορτίου. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται η αντίστοιχη μελέτη για τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην συνέχεια στο Κεφάλαιο 4 επιλύεται το πρόβλημα της διάγνωσης και αντιμετώπισης των σφαλμάτων που μπορούν να προκύψουν κατά τις κατεργασίες κοπής. Στο Κεφάλαιο 5 επαληθεύονται τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει θεωρητικά με την χρήση κατάλληλης πειραματικής διάταξης και στο Κεφάλαιο 6 αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα. Τέλος στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται οι κώδικες προσομοίωσης σε VisSim. Σημειώνεται ότι τμήματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχουν αποσταλεί προς δημοσίευση.

Κλείνοντας τον πρόλογο, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα μου στην διπλωματική εργασία, κ. Φ. Κουμπουλή ο οποίος με ενθάρρυνε για την διερεύνηση ενός προβληματισμού μου σε σχέση με την διάγνωση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Ο προβληματισμός αυτός αποτέλεσε το έναυσμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον θέλω να τον ευχαριστήσω για την ακούραστη καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας και για τις βαρύνουσες σημασίας ιδέες του που μοιράστηκε μαζί μου. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Γ. Πετρόπουλο, μέλος της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής για τις πολύτιμες συμβουλές του, καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής, σε θέματα μηχανουργικών κατεργασιών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κ. Πανταζάρα, μέλος της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, για τις γνώσεις που μου προσέφερε σε θέματα μηχανολογικών κατασκευών. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μ. Σκαρπέτη για τις συμβουλές του σε θέματα ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων και υπολογιστικών προσομοιώσεων.



Εισαγωγή 1


Οι μηχανουργικές κατεργασίες κοπής αποτελούν την βασική μέθοδο παραγωγής μεταλλικών μηχανολογικών εξαρτημάτων. Η αύξηση των απαιτήσεων, για καλύτερη ποιότητα και για μεγαλύτερη παραγωγικότητα με ταυτόχρονη ελάττωση του κόστους ανά τεμάχιο, υποδεικνύει την ανάγκη για συνεχή εξέλιξη των εργαλειομηχανών που χρησιμοποιούνται στις κατεργασίες κοπής. Με την εξέλιξη της βιομηχανικής παραγωγής μηχανολογικών τεμαχίων επικράτησε αρχικά η χρήση αριθμητικού ελέγχου (Numerical control, NC) προσφέροντας την δυνατότητα προγραμματισμού της εργαλειομηχανής. Ο αριθμητικός έλεγχος γινόταν με την χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που ενσωμάτωνε η εργαλειομηχανή και έδιναν μικρές δυνατότητες τροποποιήσεων των εντολών κατά την εξέλιξη της κατεργασίας, στοχεύοντας κυρίως στην εδραίωση μιας ομοιομορφίας στην ποιότητα της παραγωγής. Σήμερα η καθοδήγηση των εργαλειομηχανών γίνεται με αριθμητικό έλεγχο με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή (Computer Numeric Control, CNC) που δίνει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες ρύθμισης της εργαλειομηχανής, ευκολία στον χειρισμό της, δίνει την δυνατότητα άμεσης επέμβασης στο πρόγραμμα των εντολών και επιτρέπει την εφαρμογή προσαρμοστικού ελέγχου που τροποποιεί κατάλληλα τις συνθήκες της κατεργασίας. Η ταυτόχρονη εξέλιξη των προσωπικών ηλεκτρονικών υπολογιστών, έδωσε το έναυσμα για την άμεση επικοινωνία των εργαλειομηχανών με έναν ή περισσότερους υπολογιστές από τους οποίους δέχονται πλέον τις εντολές τους. Αυξανόμενων των απαιτήσεων για ακρίβεια στις κινήσεις των εργαλειομηχανών

καθιερώθηκε η χρήση ελεγκτών ταχύτητας και θέσης για τους ηλεκτρικούς κινητήρες της εργαλειομηχανής.

Η βελτίωση της ακρίβειας και της στιβαρότητας των εργαλειομηχανών δίνει πλέον την δυνατότητα κατεργασίας τεμαχίων εξαιρετικά πολύπλοκης γεωμετρίας και μεγάλης σκληρότητας με υψηλές ταχύτητες κοπής. Οι μεγάλες ταχύτητες κοπής συνεπάγονται ταχύτερη φθορά (wear) των κοπτικών εργαλείων και ταλαντώσεις στο σύστημα εργαλειομηχανή-εργαλείο-τεμάχιο (chatter). Και τα δύο αυτά σφάλματα προκαλούν καταπόνηση της εργαλειομηχανής και διαστατική ανακρίβεια καθώς και κακή τραχύτητα στο τελικό προϊόν.

Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη για κατασκευή ανθεκτικότερων κοπτικών εργαλείων, έλεγχο της κατάστασης φθοράς τους σε πραγματικό χρόνο (real-time estimation) και για την εξάλειψη των δημιουργούμενων ταλαντώσεων. Για την διάγνωση της φθοράς και την αντιμετώπιση των ταλαντώσεων επιβάλλεται η χρήση προσαρμοστικού ελέγχου (adaptive control) στο σύστημα. Είναι σαφές ότι για την καλύτερη λειτουργία των εργαλειομηχανών είναι απαραίτητο να εφαρμόζονται ικανοποιητικές τεχνικές ελέγχου των ηλεκτροκινητήρων τους. Οι τεχνικές ελέγχου συνεισφέρουν με την σειρά τους στο πρόβλημα της διάγνωσης βλαβών, με την έννοια ότι επιτρέπουν την καλύτερη εκτίμηση των εξωτερικών ροπών που ασκούνται στους κινητήρες της εργαλειομηχανής. Η συνεισφορά οφείλεται στο γεγονός ότι ο έλεγχος σταθεροποιεί την ταχύτητα ή την θέση ή και την ροή στους κινητήρες που καθοδηγούν το κοπτικό εργαλείο.

Το πρόβλημα του ελέγχου των DC κινητήρων συναντάται συχνά στην βιβλιογραφία, εξαιτίας της πολύ διαδεδομένης εφαρμογής τους. Ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής για την οποία προορίζονται έχουν γίνει προσπάθειες για την ανάπτυξη ελέγχου θέσης και ταχύτητας [1]-[3]. Ειδικά οι DC κινητήρες σταθερού μαγνήτη θεωρούνται ιδανικοί για έλεγχο επειδή το μαθηματικό μοντέλο που τους περιγράφει είναι γραμμικό [1]. Η έρευνα για ελεγκτές έχει επίσης επικεντρωθεί στους κινητήρες χωρίς διάταξη εναλλαγής πολικότητας λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής τους [4], [5]. Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί νόμοι ελέγχου που βασίζονται σε νευρωνικά δίκτυα [4], [6] και γενετικούς αλγορίθμους [7]. Οι ελεγκτές αναπτύσσονται τόσο στο συνεχή όσο και στον διακριτό χρόνο [6] με χρήση γραμμικών η και μη γραμμικών νόμων ελέγχου [1], [8].



Το πρόβλημα του ελέγχου των AC κινητήρων εστιάζεται κυρίως στον έλεγχο ταχύτητας (ή θέσης) [9]-[16], και σπανιότερα συνολικής μαγνητικής ροής [10], [15] ή ρεύματος [16]. Μετά την δεκαετία του 70 έντονο ενδιαφέρον παρουσιάζει η έρευνα στην εφαρμογή μη γραμμικών νόμων ελέγχου [10], [13], [15] και την τελευταία κυρίως δεκαετία η χρήση ελεγκτών βασισμένων σε νευρωνικά δίκτυα [17]. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει τέλος και η εκτίμηση του φορτίου του κινητήρα [10], [12], [15]-[17]. Ειδικά στους σύγχρονους κινητήρες χρησιμοποιούνται νόμοι ελέγχου που αποσκοπούν κυρίως στον έλεγχο της ταχύτητας τους [12], [13].

Για την επίλυση του προβλήματος της διάγνωσης και αντιμετώπισης σφαλμάτων στις εργαλειομηχανές με ψηφιακή καθοδήγηση έχει παραχθεί μια πλειάδα αποτελεσμάτων στην σχετική βιβλιογραφία. Η ανίχνευση της κατάστασης φθοράς πραγματοποιείται συνήθως με χρήση έμμεσων τεχνικών μέτρησης, όπως είναι η μέτρηση των διαστάσεων του κομματιού [18], χρήση μετρήσεων ακουστικών σημάτων και ταλαντώσεων [19], της ισχύος [20] ή απευθείας μέτρηση της δύναμης και της ροπής [21]. Για την ανίχνευση της αυτοδιεγερόμενης ταλάντωσης γίνεται μέτρηση των μετατοπίσεων του κατεργαζόμενου κομματιού [22], ακουστικών σημάτων [19], της δύναμης και της ροπής [21], μέτρηση επιτάχυνσης [23], [24]. Η αναγνώριση των σφαλμάτων για λήψη απόφασης γίνεται με χρήση προσαρμοστικών αλγορίθμων ελέγχου [18], [21] ή νευρωνικά δίκτυα [19]. Στην περίπτωση της αυτοδιεγερόμενης ταλάντωσης η συνηθέστερη μέθοδος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η συνεχής μεταβολή της ταχύτητας της πρωτεύουσας κίνησης της εργαλειομηχανής [24], [25].


Στην παρούσα εργασία στόχος είναι η ανάπτυξη αναλυτικών μοντέλων για την εκτίμηση της ροπής. Με αυτό τον γνώμονα αναπτύσσονται ελεγκτές με ανατροφοδότηση τύπου P-D (Proportional plus Derivative) που είναι μια ειδική κατηγορία των ελεγκτών PID (Proportional plus Derivative plus Integral) με μηδενισμό του όρου I. Με χρήση αυτών των ελεγκτών επιτυγχάνεται εύρωστος τέλειος έλεγχος εξόδου με ταυτόχρονη αποκοπή διαταραχών. Το άγνωστο εξωτερικά ασκούμενο φορτίο μπορεί να εκτιμηθεί επακριβώς με μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων και των ρευμάτων που διαρρέουν τα τυλίγματα του ρότορα και του στάτορα. Το σύστημα αποδεικνύεται ότι είναι ασυμπτωτικά ευσταθές και συνολικά ευσταθές για φραγμένες εξωτερικές εισόδους με φραγμένες παραγώγους. Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν αυτοί οι νόμοι ελέγχου είναι ότι είναι ανεξάρτητοι από αβεβαιότητες του συστήματος, όπως είναι ο συντελεστής τριβής και από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του όπως είναι η ροπή αδράνειας. Οι αναλυτικές σχέσεις που

προκύπτουν για την εκτίμηση της ροπής φορτίου ισχύουν για σταθερή και μεταβαλλόμενη ταχύτητα του κινητήρα και για γνωστό και άγνωστο συντελεστή τριβής. Για την περίπτωση του ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα τριφασικού ρεύματος χρησιμοποιείται ελεγκτής τύπου P-D έχει αναπτυχθεί στο παρελθόν [9].

Το αποτέλεσμα που προκύπτει επαληθεύεται πειραματικά για την περίπτωση ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος. Μελετάται ξεχωριστά η περίπτωση της άσκησης σταθερής ροπής σε αντιστοίχιση με την φθορά του κοπτικού εργαλείου που εξελίσσεται σε αργούς ρυθμούς και περιοδικά μεταβαλλόμενης αντίστοιχα με την αυτοδιεγερόμενη ταλάντωση του συστήματος. Χρησιμοποιείται εμπειρική σχέση που αναδεικνύει την ποιοτική μεταβολή της ροπής. Η σχέση αυτή αποδεικνύεται και θεωρητικά. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι είναι δυνατό να προσδιορισθούν ικανοποιητικά τα δύο σφάλματα των μηχανουργικών κατεργασιών.

Επιπλέον στόχος της εργασίας είναι η αναγνώριση και αντιμετώπιση των σφαλμάτων που παρουσιάζονται στις κατεργασίες κοπής. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με την χρήση ενός αλγορίθμου προσαρμοστικού ελέγχου που επιτρέπει την διάγνωσή τους και την κατάλληλη αλλαγή των παραμέτρων της κατεργασίας για την έγκαιρη αντιμετώπιση των αρνητικών επιπτώσεων στο κατεργαζόμενο κομμάτι και την εργαλειομηχανή. Παράλληλα με την λήψη των αποφάσεων οι τιμές της ροπής που εκτιμώνται και οι συχνότητες με σημαντικό πλάτος που ανιχνεύονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία βάσεων δεδομένων για ποικίλες συνθήκες κατεργασίας.


Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρούσης διπλωματικής εργασίας με αυτά άλλων συγγενικών στην περιοχή εργασιών [3]-[6], [8], [9], [12]-[14] διαπιστώνουμε ότι με την χρήση P-D νόμων ελέγχου οι μεταβλητές απόδοσης του συστήματος κλειστού βρόχου δεν εξαρτώνται από το μηχανικό τμήμα του ηλεκτρικού κίνητρα, καθώς και ότι επιτυγχάνεται πλήρης αποκοπή των διαταραχών. Δεν οι περισσότερες μέθοδοι αντιμετώπισης των σφαλμάτων για τις κατεργασίες κοπής βασίζονται στην έμμεση μέτρηση της ροπής [18]-[20], [22]-[24]. Σε καμία όμως περίπτωση δεν γίνεται με τον υπολογισμό της από τα ρεύματα και την γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα, όπως εδώ, ή από άλλες παραμέτρους που δεν επηρεάζονται από τις συνθήκες εκτέλεσης της κατεργασίας και των συνθηκών του γύρω χώρου. Τέλος η λήψη των αποφάσεων με τον προτεινόμενο αλγόριθμο προσαρμοστικού ελέγχου αντιμετωπίζει ταυτόχρονα και τα



δύο σφάλματα και δεν περιορίζεται στην αντιμετώπιση μόνο της φθοράς [18], [20] ή μόνο της αυτοδιέγερσης του συστήματος [22], [24], [25].

Βιβλιογραφία-Αρθρογραφία

- [1] Lyshevski S. E.(1998) Nonlinear control of mechatronic systems with permanent-magnet DC motors. *Mechatronics*, vol. 9, 539-552.
- [2] Seok-Hee Han, Young-Hoon Kim, and In-Joong Ha: “ Iterative Identification of State-Dependent Disturbance Torque for High-Precision Velocity Control of Servo Motors”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 43, No. 5, pp. 724-729 May 1998
- [3] M.D. Minkova, D. Minkov, J. L. Rodgerson and R. G. Harley: “Adaptive neural speed controller of a DC motor”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 47 pp.123-132, 1998
- [4] Ahmed Rubaai and Raj Kotaru: “Neural Net-Based Robust Controller Design for Brushless DC Motor Drives”, *IEEE Transactions on Systems Man, and Cybernetics*, Vol. 29, No. 3, pp. 460-474, August 1999
- [5] Chee W. Lu: “ Torque Controller for Brushless DC Motors”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 46, No. 2, pp.471-473, April 2000
- [6] Chern T. L.,Chuang C. W. and Rong L. J. (1996) Design of discrete integral variable structure control systems and application to a brushless DC motor control. *Automatica* Vol.32, No. 5,pp 773-779.
- [7] Wander G. da Silva, Paul P. Acarnley and John W. Finch: “Application of Genetic Algorithms to the Online Tuning of Electric Drive Speed Controllers”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 1, pp.217-219, February 2000
- [8] David M. Alter and Tsu-Chin Tsao: “Control of Linear Motors for Machine Tool Feed Drives: Experimental Investigation of Optimal Feedforward Tracking Control”, *Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.120, pp.137-142, March 1998
- [9] Leonard W. *Control of electrical drives 2nd edition*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996.
- [10] Θ. Μπούκας: Διπλωματική Εργασία “Μη Γραμμικός Έλεγχος Επαγωγικών Ηλεκτροκινητήρων”, Βόλος 1998

-
- 
- [11] S. P. Srivastava, V. K. Verma and Bhim Singh: "Steady-state analysis of a self-controlled synchronous motor", *Electric Power Systems Research* Vol. 36 pp. 211-216, 1996
- [12] Guchuan Zhu, Louis-A. Dessaint, Ouassima Akhrif and Azeddine Kaddouri: "Speed Tracking Control of a Permanent-Magnet Synchronous Motor with State and Load Torque Observer", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 2, pp. 346-355 April 2000
- [13] In-Cheol Baik, Kyeong-Hwa Kim and Myung-Joong Youn: 'Robust Nonlinear Speed Control of PM Synchronous Motor Using Boundary Layer Integral Sliding Mode Control Technique", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 47-54, January 2000
- [14] Ortega R., Nicjlasson P. J. and G. Espinoza-Perez, "On Speed Control of Induction Motors", *Automatica*, Vol. 32 pp.455-460, 1996
- [15] Koumboulis F. N. and Boukas T., "Towards Perfect Output Control for Induction Motors", submitted.
- [16] Seok-Hee Han, Young-Hoon Kim and In-Joong Ha: "Iterative Identification of State-Dependent Disturbance Torque for High-Precision Velocity Control of servo Motors", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 43, No. 5, pp. 724-728, May 1998
- [17] Chich-Yi Huang, Tien-Chi Chen, and Ching-Lien Huang: "Robust Control of Induction Motor with A Neural-Network Load Torque Estimator and A Neural-Network identification", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 46, No. 5, pp. 990-998, October 1999
- [18] J. I. El Gomayel and K. D. Bregger: "On-line Tool Wear Sensing for Turning Operations", *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*, vol. 108, pp.44-47, February 1986
- [19] X. Q. Li, Y. S. Wong and A. Y. C. Nee: "A Comprehensive Identification of Tool Failure and Chatter Using a Parallel Multi-ART2 Neural Network", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.120, pp.433-442, May 1998
- [20] D. Cuppini, G. D errico and G. Rutelli: "Tool wear Monitoring Based on cutting power measurement" *Wear*, Vol.139, pp.303-311, 1990
- [21] S. A. Spiewak and J. Di Corpo: "Adaptive Compensation of Dynamic Characteristics for In-process sensors", *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol.113, pp.198-206, May 1991
-

- [22] M. Rahman: “In-Process Detection of Chatter Threshold”, *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol.110, pp.44-50, February 1988
- [23] Sung-Gwang Chen, A. Galip Ulsoy and Yoram Koren: “Error Source Diagnostics Using a Turning Process Simulator”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.120, pp. 409-416, May 1998
- [24] K. Jemielniak and A. Widota: “Suppression of Self-Excited Vibration by the Spindle Speed Variation Method”, *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol.24, No.3, pp.207-214, 1984
- [25] Y. S. Liao and Y. C. Young: “A new on-line spindle speed regulation strategy for chatter control”, *J. Int. Mach. Tools Manufact.* Vol. 36, No. 5, pp. 651-660, 1996



Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες

2

Ονοματολογία Συμβόλων

B_m : Συντελεστής τριβής

i_r, i_s : Ρεύμα ρότορα και στάτορα

J : Ροπή αδράνειας κινητήρα

L_r, L_s : Αυτεπαγωγή ρότορα και στάτορα

N_s : Αριθμός σπειρών στο τύλιγμα του στάτορα

R_r, R_s : Αντίσταση ρότορα και στάτορα

R_p : Εξασθένιση του μαγνητικού πεδίου

r : Σχέση μετάδοσης

T_l, T_m : Ροπή φορτίου και ροπή παραγόμενη από τον κινητήρα

\hat{T}_l, \hat{T}_l' : Εκτιμώμενη ροπή φορτίου και εκτιμώμενη ροπή φορτίου συμπεριλαμβανομένης της τριβής

V_r, V_s : Τάση ρότορα και στάτορα

V_b : Επαγόμενη τάση (e.m.f.)

θ_l, θ_m : Θέση (γωνία) φορτίου και θέση του άξονα του κινητήρα

κ_1, κ_2 : Σταθερές συσχετιζόμενες με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα (διαστάσεις, σχήμα, υλικό κτλ)

ω_l, ω_m : Γωνιακή ταχύτητα του φορτίου και του άξονα του κινητήρα

2.1 Εισαγωγικά Στοιχεία για DC Κινητήρες

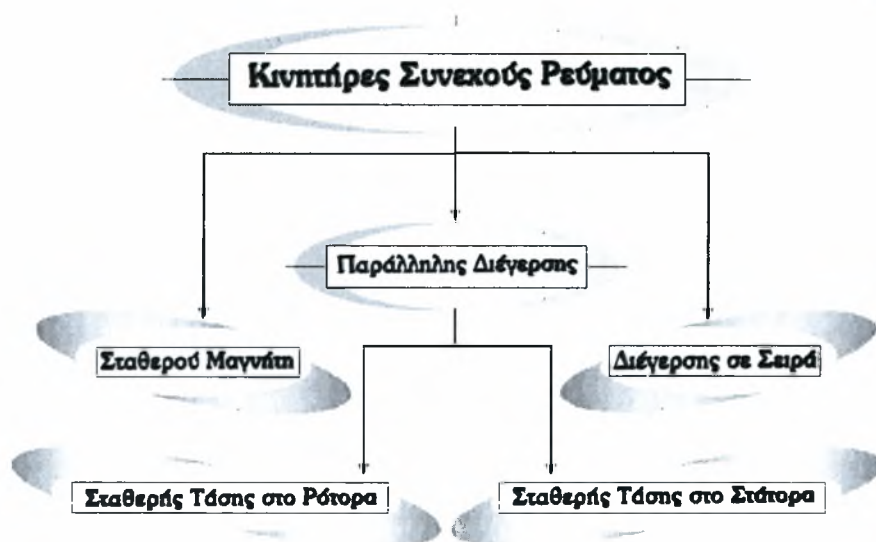
2.1.1 Γενικά Στοιχεία-Εφαρμογές

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (Direct Current, DC), χρησιμοποιούνται ευρύτατα στον χώρο της βιομηχανίας εξαιτίας της εύκολης, σχετικά με άλλους κινητήρες, δυνατότητα ρύθμισης των στοφών τους, σε μεγάλο εύρος τιμών [1], [2]. Επιπλέον κυριαρχούν σε ένα σημαντικό πεδίο εφαρμογών μηχανικής [3]. Χαρακτηριστικές εφαρμογές κινητήρων DC συναντώνται σε γεραμούς και ανελκυστήρες, σε εργαλειομηχανές [4], στην χαλυβουργία, στην κλωστοϋφαντουργία και την τυπογραφία [2]. Οι μικρότερου μεγέθους κινητήρες χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και σε φορητές συσκευές που τροφοδοτούνται από μπαταρίες. Τέλος DC κινητήρες χρησιμοποιούνται και για κίνηση οχημάτων (τρόλεϊ, ηλεκτρικοί σιδηρόδρομοι, ηλεκτρικά αυτοκίνητα) [1].

Το κυριότερο συνήθως μειονέκτημα των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι η ύπαρξη μηχανικού εναλλάκτη πολικότητας του ρεύματος που περιορίζει την ισχύ και τις στροφές που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας, αυξάνει το βάρος και την ροπή αδράνειας και απαιτεί συχνή συντήρηση [2]. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με την χρήση κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς διάταξη εναλλαγής πολικότητας [5]. Το μειονέκτημα της χρήσης εναλλάκτη πολικότητας δεν παρουσιάζεται και στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Όμως στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιείται μεταβλητή συχνότητα τροφοδοσίας για μεταβολή της ταχύτητας τους, η οποία απαιτεί ακριβή ηλεκτρονικά ισχύος.

2.1.2 Κατηγορίες DC κινητήρων

Ανάλογα με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίζονται στις βασικές κατηγορίες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1.1.



Σχήμα 2.1.1 Κατηγορίες DC κινητήρων

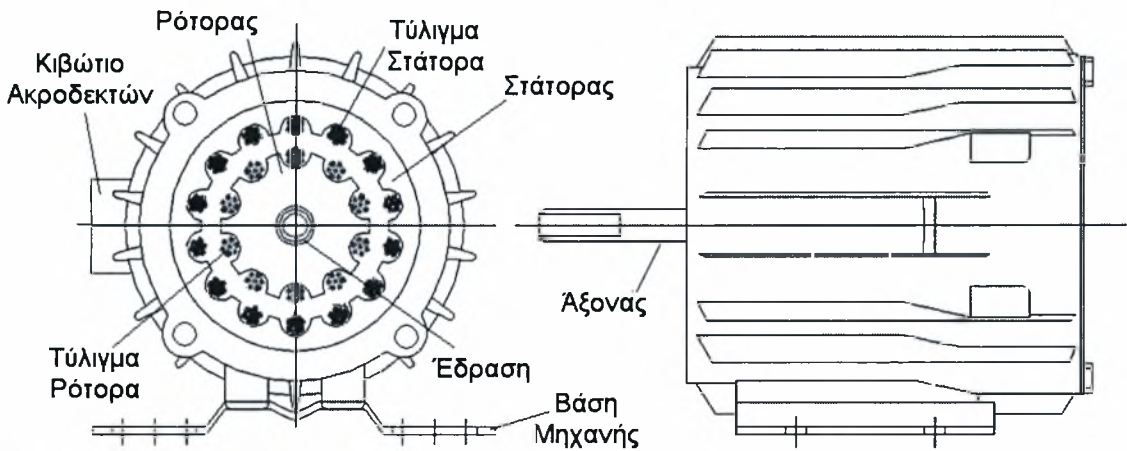
Ο διαχωρισμός γίνεται με βάση την διάταξη των τυλιγμάτων σε δύο βασικές κατηγορίες: κινητήρες με σταθερό μαγνήτη (Permanent Magnet, PM) και κινητήρες με τυλίγματα στον ρότορα και στον στάτορα. Επιπλέον διαχωρισμός στην δεύτερη κατηγορία γίνεται με βάση την σύνδεση των τυλιγμάτων του στάτορα και του ρότορα. Αν υπάρχει διαφορετική τροφοδοσία στο κάθε τύλιγμα ονομάζονται κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης (separately excited DC motors). Αν υπάρχει σειριακή σύνδεση του ρότορα και του στάτορα ονομάζονται κινητήρες διέγερσης σε σειρά (DC motors with series field winding) [1]. Υπάρχει και μια ακόμη κατηγορία κινητήρων με σύνθετη διέγερση που με την σειρά της χωρίζεται σε δύο τύπους κινητήρες, αθροιστικής σύνθετης διέγερσης και διαφορικής σύνθετης διέγερσης [2]. Η συμπεριφορά των κινητήρων αυτών των τύπων είναι ενδιαφέρουσα από τους κινητήρες σειριακής και παράλληλης διέγερσης. Για αυτό τον λόγο δεν θα μας απασχολήσουν στην συνέχεια. Τέλος σημειώνεται ότι υπάρχει και μεγάλη πληθώρα κινητήρων συνεχούς ρεύματος με χαρακτηριστικά που αποτελούν συνδυασμό των παραπάνω [2]. Οι κινητήρες αυτοί έχουν σαν στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση ορισμένων ιδιοτήτων, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής για την οποία προορίζονται [5], [6],

2.1.3 Αρχές Λειτουργίας- Περιγραφή

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.2 όπου φαίνεται μια τομή ενός τυπικού κινητήρα DC, τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται είναι ο ρότορας ή δρομέας

2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες

(rotor), ο οποίος έχει την δυνατότητα να περιστρέφεται και είναι στερεωμένος επάνω στον άξονα. Ο ρότορας συνήθως φέρει τυλίγματα ηλεκτρικού αγωγού τα οποία τροφοδοτούνται σε μερικούς τύπους κινητήρα από μία διάταξη εναλλαγής πολικότητας (electrical commutator). Η διάταξη αυτή αποτελείται από τον συλλέκτη και τον ψηκτροφορέα. Ο ψηκτροφορέας είναι ακίνητος ενώ ο συλλέκτης περιστρέφεται μαζί με τον άξονα. Ο άξονας ο οποίος μεταφέρει την μηχανική ενέργεια έξω από την διάταξη του κινητήρα εδράζεται επάνω στο περίβλημα του κινητήρα με δύο έδρανα ολίσθησης ή κύλισης, ανάλογα με το μέγεθός του κινητήρα και την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Ο στάτορας ή στάτης (stator) τέλος που είναι ακίνητος φέρει τυλίγματα αγωγού ή ισχυρό μαγνήτη [2].



Σχήμα 2.1.2 Περιγραφή τυπικού DC κινητήρα

Με την τροφοδοσία του κινητήρα με συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα ασκείται ροπή στο ρότορα (δύναμη μαγνητικού πεδίου σε ρευματοφόρο αγωγό) που τον εξαναγκάζει να περιστραφεί [1]. Καθώς περιστρέφεται η διάταξη εναλλαγής πολικότητας του ρεύματος εξασφαλίζει ότι η δύναμη που ασκείται στον ρότορα θα έχει συνεχώς την ίδια φορά εξασφαλίζοντας την συνεχή περιστροφή του άξονα. Σε κινητήρες μεγάλης ισχύος όπου υπάρχει πρόβλημα απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας, προσαρμόζεται φτερωτή επάνω στον άξονα για καλύτερη κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό του κινητήρα [2].



2.1.4 Έλεγχος DC Κινητήρων

Το πρόβλημα του ελέγχου των DC κινητήρων συναντάται συχνά στην βιβλιογραφία, εξαιτίας της πολύ διαδεδομένης εφαρμογής τους και επειδή το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τους κινητήρες αυτού του τύπου είναι απλούστερο από όλους του υπόλοιπους τύπους κινητήρων. Έτσι ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής για την οποία προορίζονται έχουν γίνει προσπάθειες για την ανάπτυξη ελέγχου θέσης και ταχύτητας [3], [6], [7]. Ειδικά οι DC κινητήρες σταθερού μαγνήτη θεωρούνται ιδανικοί για έλεγχο επειδή το μαθηματικό μοντέλο που τους περιγράφει είναι γραμμικό [3]. Η έρευνα για ελεγκτές έχει επίσης επικεντρωθεί στους κινητήρες χωρίς διάταξη εναλλαγής πολικότητας λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής τους [5], [8]. Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί νόμοι ελέγχου που βασίζονται σε νευρωνικά δίκτυα [5], [9] και γενετικούς αλγορίθμους [10]. Οι ελεγκτές αναπτύσσονται τόσο στο συνεχή όσο και στον διακριτό χρόνο [9] με χρήση γραμμικών η και μη γραμμικών νόμων ελέγχου [3], [4]. Στην παρούσα διπλωματική εφαρμόζεται ένας P-D νόμος ελέγχου που επιτυγχάνει τέλειο έλεγχο ταχύτητας (και θέσης). Ταυτόχρονα είναι ανεξάρτητος από μηχανικά χαρακτηριστικά του κινητήρα όπως είναι η ροπή αδράνειας, ο συντελεστής τριβής και η εξωτερικά ασκούμενη ροπή.

2.2 P-D Ελεγκτής σε DC Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη

2.2.1 Περιγραφή του Μοντέλου

Το σύστημα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος σταθερού μαγνήτη περιγράφεται μαθηματικά από ένα σύστημα τριών γραμμικών διαφορικών εξισώσεων [3], [11]. Η πρώτη εξίσωση συσχετίζει τη γωνιακή ταχύτητα του ρότορα και τη θέση του.

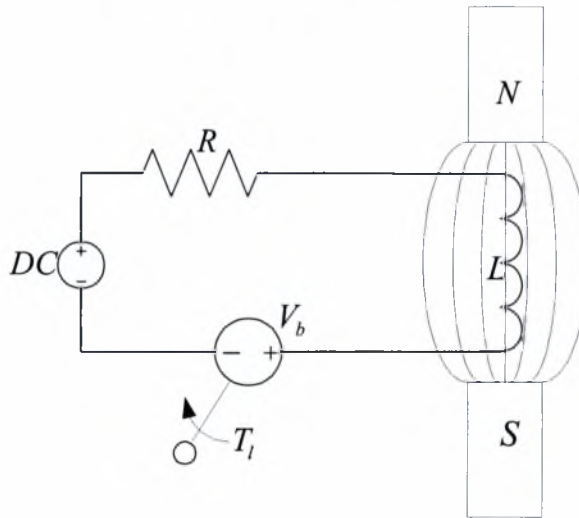
$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \quad (2.2.1)$$

Η δεύτερη εξίσωση είναι η εφαρμογή του τρίτου νόμου του Νεύτωνα για το εξωτερικό φορτίο [3].

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m = T_m - rT_l \quad (2.2.2)$$

Η τρίτη εξίσωση αποτελεί το ηλεκτρικό ισοζύγιο στο τύλιγμα του ρότορα και περιγράφει το κύκλωμα του Σχήματος 2.2.1.

$$L_r \frac{di_r}{dt} + R_r i_r = V_r - V_b \quad (2.2.3)$$



Σχήμα 2.2.1 Ηλεκτρικό Κύκλωμα κινητήρα σταθερού μαγνήτη

Η σύζευξη μεταξύ των ηλεκτρικών και μηχανικών εξισώσεων εκφράζεται με τις ακόλουθες σχέσεις που έχουν προκύψει από τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.

$$T_m = \kappa_1 \phi i_r, \quad V_b = \kappa_2 \phi \omega_m \quad (2.2.4)$$

Οπότε, το σύστημα των εξισώσεων που περιγράφει τον DC κινητήρα στον χώρο κατάστασης είναι:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \quad (2.2.5a)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\frac{B_m}{J} \omega_m + \frac{k_m}{J} i_r - \frac{r}{J} T_l \quad (2.2.5b)$$

$$\frac{di_r}{dt} = -\frac{k_b}{L_r} \omega_m - \frac{R_r}{L_r} i_r + \frac{1}{L_r} V_r \quad (2.2.5c)$$

όπου $k_m = \kappa_1 \phi$, $k_b = \kappa_2 \phi$. Οι μεταβλητές απόδοσης του συστήματος επιλέγονται να είναι η γωνιακή ταχύτητα του φορτίου, έστω ω_l , ή η θέση του φορτίου, έστω θ_l . Οι μεταβλητές αυτές σχετίζονται με τα ω_m και θ_m διαμέσου της σχέσης μετάδοσης r (π.χ. μεταξύ γραναζιών) ως εξής:

$$\omega_l = \frac{1}{r} \omega_m, \quad \theta_l = \frac{1}{r} \theta_m \quad (2.2.6)$$

2.2.2 Έλεγχος Ταχύτητας

Στο σύστημα (2.2.5b-2.2.5c) εφαρμόζεται ο P-D νόμος ανατροφοδότησης:

$$V_r = f_1 \frac{d\omega_m}{dt} + f_2 \frac{di_r}{dt} + k_1 \omega_m + k_2 i_r + gw \quad (2.2.7)$$

όπου f_1 , f_2 και k_1 , k_2 είναι οι βαθμοί ελευθερίας του διαφορικού (Derivative D) και του αναλογικού (Proportional P) όρου αντίστοιχα. Η παράμετρος g είναι η ενίσχυση του προαντισταθμιστή (precompensator) και w είναι η εξωτερική εντολή. Επιλέγοντας τους βαθμούς ελευθερίας να είναι:

$$f_1 = 0, \quad f_2 = L_r, \quad k_1 = k_b - \frac{1}{r}, \quad k_2 = R_r \quad (2.2.8)$$

ο P-D ελεγκτής ανατροφοδότησης παίρνει την μορφή:

$$V_r = L_r \frac{di_r}{dt} + \left(k_b - \frac{1}{r} \right) \omega_m + R_r i_r + gw \quad (2.2.9)$$

αντικαθιστώντας τον ελεγκτή (2.2.9) στην περιγραφή του DC κινητήρα (2.2.5b-2.2.5c) το σύστημα κλειστού βρόγχου που προκύπτει περιγράφεται από τις εξισώσεις:

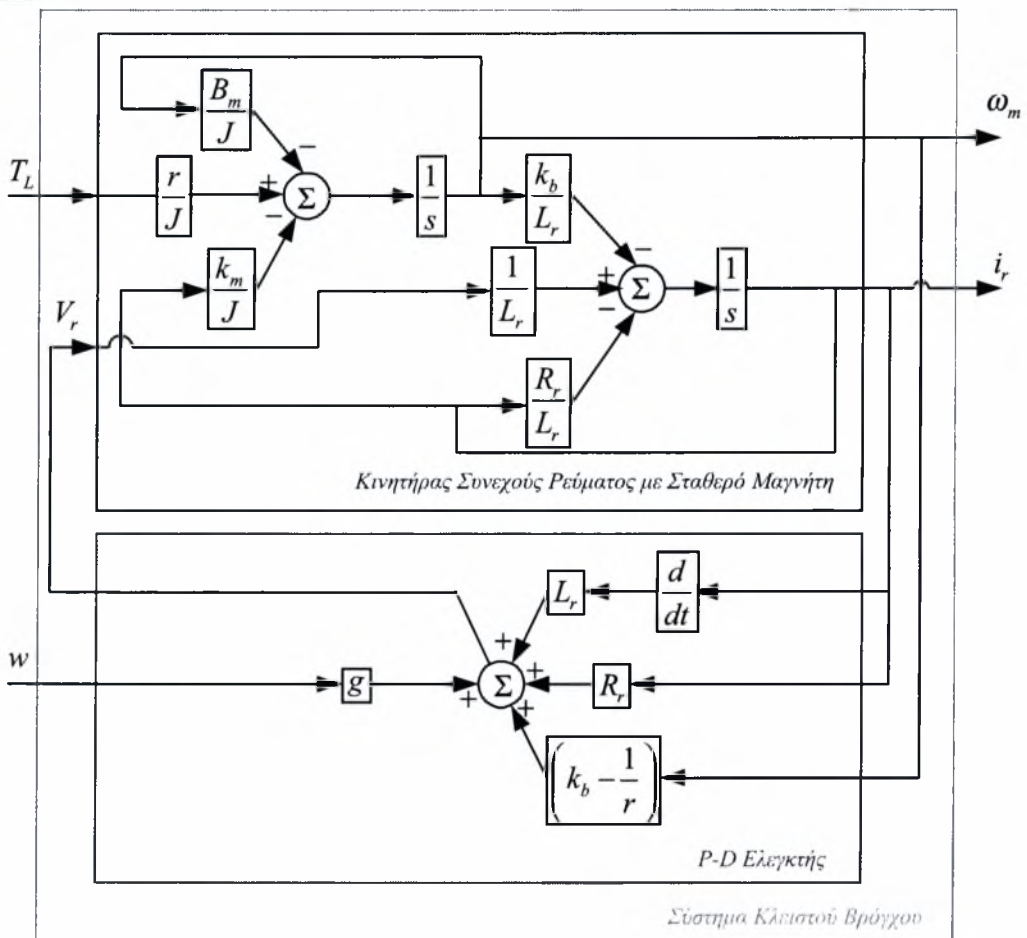
$$i_r = \frac{J}{k_m} rg \frac{dw}{dt} + \frac{B_m}{k_m} rgw + \frac{r}{k_m} T_l \quad (2.2.10a)$$

$$\omega_m = rgw \quad (2.2.10b)$$

ενώ η μεταβλητή εξόδου ω_l παίρνει την μορφή:

$$\omega_l = gw \quad (2.2.10c)$$

Το σύστημα κλειστού βρόγχου του κινητήρα με τον ελεγκτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.2.



Σχήμα 2.2.2 Σύστημα κλειστού βρόγχου για έλεγχο ταχύτητας

Από την σχέση (2.2.10c) προκύπτει ότι, χρησιμοποιώντας τον νόμο ανατροφοδότησης (2.2.9) έχει επιτευχθεί τέλειος έλεγχος εξόδου για έλεγχο ταχύτητας [12], [13].

Μελετώντας την ευστάθεια φραγμένης εισόδου-φραγμένης εξόδου (Bounded Input-Bounded Output, BIBO) του συστήματος κλειστού βρόγχου, διαπιστώνεται ότι αν η εξωτερική εντολή $w(t)$ είναι φραγμένη, τότε εξασφαλίζεται ότι τόσο η μεταβλητή εξόδου ω_i όσο και η μεταβλητή ω_m είναι φραγμένη. Επιπλέον αν η πρώτη παράγωγος της εντολής $w(t)$ είναι φραγμένη τότε, σύμφωνα με την σχέση (2.2.10a) εξασφαλίζεται ότι και το ρεύμα i_r είναι φραγμένο $\forall t > 0$ [14].

Μελετώντας την ασυμπτωτική ευστάθεια προκύπτει για $w(t) = 0$ ότι:

$$\omega_i = 0, \omega_m = 0, i_r(t) = \frac{r}{k_m} T_l(t) \quad (\forall t > 0)$$



Μελετώντας την ευρωστία του συστήματος κλειστού βρόγχου διαπιστώνονται δυο τύπων αβεβαιότητας. Η πρώτη είναι ο συντελεστής τριβής B_m που είναι γενικά άγνωστος αλλά δεν διαφοροποιείται σημαντικά με τον χρόνο. Η δεύτερη είναι το σφάλμα υλοποίησης του ελεγκτή, που προκύπτει από τον υπολογισμό της παραγώγου του ρεύματος. Στην πράξη η παράγωγος του ρεύματος $\frac{di_r}{dt}$ υλοποιείται στον ελεγκτή ως

$\frac{di_r}{dt} + e_d(t)$. Η ποσότητα $e_d(t)$ αποτελεί το σφάλμα υλοποίησης της παραγώγου του ρεύματος του ρότορα. Γίνεται φανερό ότι το σφάλμα μπορεί να θεωρηθεί ως χρονομεταβλητή αβεβαιότητα με γρήγορες μεταβολές. Συμπεριλαμβάνοντας και το σφάλμα υλοποίησης της παραγώγου ο ελεγκτής παίρνει τη μορφή:

$$V_r = L_r \frac{di_r}{dt} + L_r e_d + \left(k_b - \frac{1}{r} \right) \omega_m + R_r i_r + g w \quad (2.2.11)$$

Αντικαθιστώντας τον ελεγκτή (2.2.11) στο μοντέλο του κινητήρα που περιγράφεται από τις σχέσεις (2.2.5b-2.2.5c), το σύστημα κλειστού βρόγχου που προκύπτει έχει την μορφή:

$$\omega_m = r g w + L_r r e_d \quad \text{και} \quad \omega_l = g w + L_r e_d .$$

Το σφάλμα της μεταβλητής απόδοσης εξόδου $|\omega_l - g w(t)|$ είναι ίσο με $|L_r e_d|$ που μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με το e_d και είναι ανεξάρτητο από το B_m . Προκύπτει σύμφωνα με τα παραπάνω ότι η εύρωστη συμπεριφορά του συστήματος κλειστού βρόγχου είναι εγγυημένη για κάθε B_m και για μικρό σφάλμα υλοποίησης της παραγώγου του ρεύματος e_d .

Για την πραγματοποίηση του νόμου ελέγχου, σημειώνεται ότι χρησιμοποιούνται μετρήσεις των μεταβλητών ω_l (ισοδύναμα του ω_m) και του i_r . Η πρώτη μεταβλητή μπορεί να μετρηθεί με την χρήση ενός οπτικού κωδικοποιητή και η δεύτερη με την χρήση ενός αμπερομέτρου.

2.2.3 Έλεγχος Θέσης

Στο σύστημα (2.2.5a-2.2.5c) εφαρμόζεται ο P-D νόμος ανατροφοδότησης:

$$V_r = +f_1 \frac{d\theta_m}{dt} + f_2 \frac{d\omega_m}{dt} + f_3 \frac{di_r}{dt} + +k_1 \theta_m + k_2 \omega_m + k_3 i_r + g w \quad (2.2.12)$$

2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες

όπου f_1, f_2, f_3 και k_1, k_2, k_3 είναι οι βαθμοί ελευθερίας του διαφορικού και του αναλογικού όρου αντίστοιχα. Η παράμετρος g είναι η ενίσχυση του προαντισταθμιστή και w είναι η εξωτερική εντολή. Επιλέγοντας τους βαθμούς ελευθερίας:

$$f_1 = k_b - \lambda_1, \quad f_2 = 0, \quad f_3 = L_r, \quad k_1 = -\frac{1}{r}, \quad k_2 = \lambda_1, \quad k_3 = R_r \quad (2.2.13)$$

όπου λ_1 είναι αυθαίρετη μεταβλητή. Ο P-D ελεγκτής ανατροφοδότησης παίρνει την μορφή:

$$V_r = (k_b - \lambda_1) \frac{d\theta_m}{dt} + L_r \frac{di_r}{dt} - \frac{1}{r} \theta_m + \lambda_1 \omega_m + R_r i_r + gw \quad (2.2.14)$$

αντικαθιστώντας τον ελεγκτή (2.2.14) στο μοντέλο του DC κινητήρα (2.2.5a-2.2.5c) το σύστημα κλειστού βρόγχου που προκύπτει γίνεται:

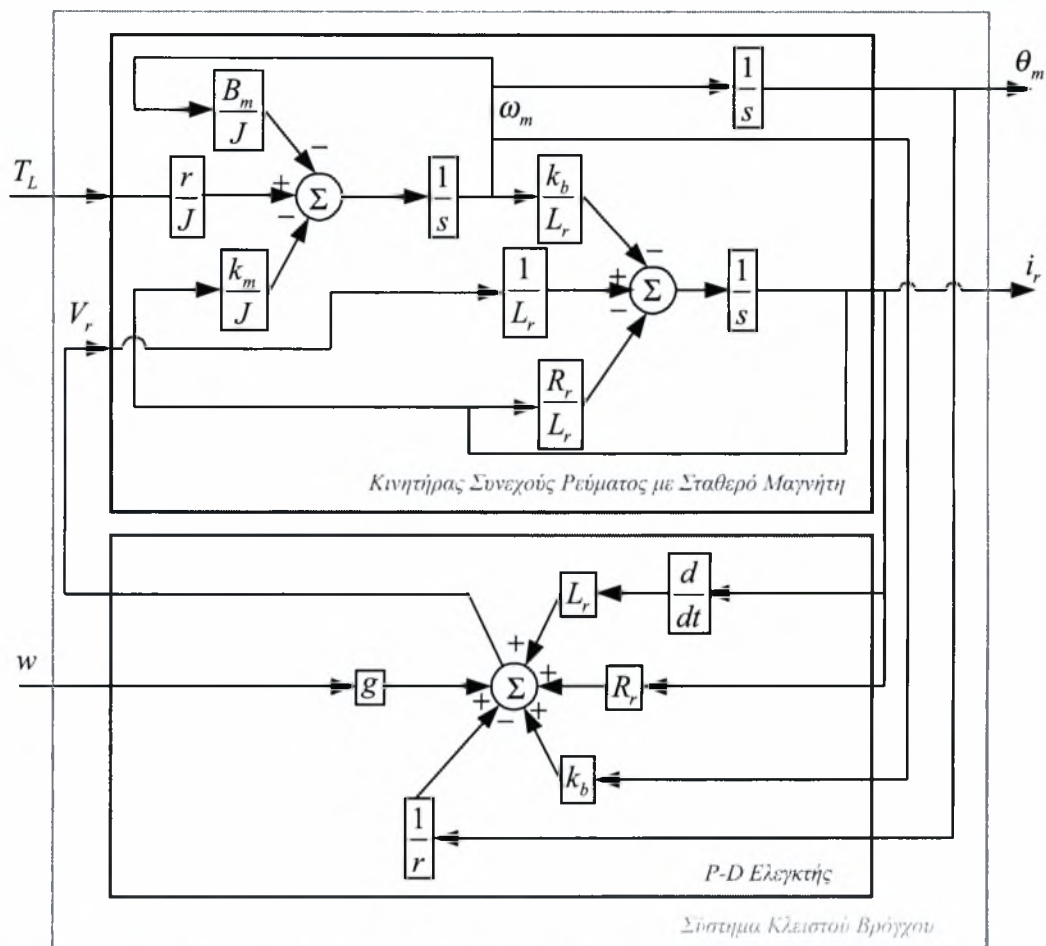
$$\omega_m = rg \frac{dw}{dt} \quad (2.2.15a)$$

$$i_r = \frac{J}{k_m} rg \frac{d^2w}{dt^2} + \frac{B_m}{k_m} rg \frac{dw}{dt} + \frac{r}{k_m} T_l \quad (2.2.15b)$$

$$\theta_m = rgw \quad (2.2.15c)$$

ενώ η μεταβλητή εξόδου θ_l παίρνει την μορφή:

$$\theta_l = gw \quad (2.2.15d)$$



Σχήμα 2.2.3 Σύστημα κλειστού βρόγχου για έλεγχο θέσης

Από την σχέση (2.2.15d) φαίνεται ότι, χρησιμοποιώντας τον νόμο ανατροφοδότησης (2.2.14) έχει επιτευχθεί τέλειος έλεγχος εξόδου για έλεγχο θέσης.

Μελετώντας την ευστάθεια BIBO του συστήματος κλειστού βρόγχου, προκύπτει το συμπέρασμα ότι αν η εξωτερική εντολή $w(t)$ είναι φραγμένη, τότε εξασφαλίζεται ότι οι μεταβλητές εξόδου θ_l και θ_m είναι φραγμένες. Επιπλέον αν η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος της εξωτερικής εντολής $w(t)$ είναι φραγμένη τότε, σύμφωνα με την σχέση (2.2.15b) εξασφαλίζεται ότι και το ρεύμα i_r είναι φραγμένο $\forall t > 0$.

Μελετώντας την ασυμπτωτική ευστάθεια διαπιστώνεται ότι για $w(t) = 0$ προκύπτει ότι:

$$\theta_l = 0, \theta_m = 0, i_r(t) = \frac{r}{k_m} T_l(t) \quad (\forall t > 0)$$

2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες

Μελετώντας την ευρωστία του συστήματος κλειστού βρόγχου διαπιστώνεται η ύπαρξη των αβεβαιοτήτων B_m , $e_d(t)$ και $e_\omega(t)$. Η πρώτη είναι ο συντελεστής τριβής, η δεύτερη είναι το σφάλμα υλοποίησης της παραγωγού του ρεύματος και η τρίτη είναι το σφάλμα υλοποίησης της παραγωγού της θέσης. Αν είναι διαθέσιμος ένας οπτικός κωδικοποιητής για μετρήσεις της ταχύτητας τότε δεν υφίσταται το σφάλμα υλοποίησης $e_\omega(t)$ στον υπολογισμό του $\frac{d\theta_m}{dt}$. Σε αυτή την περίπτωση ο ελεγκτής παίρνει την μορφή:

$$V_r = (k_b - \lambda_1) \frac{d\theta_m}{dt} + L_r \frac{di_r}{dt} + e_d L_r - \frac{1}{r} \theta_m + \lambda_1 \omega_m + R_r i_r + g w \quad (2.2.16)$$

Αντικαθιστώντας τον νόμο ελέγχου (2.2.16) στο μοντέλο του κινητήρα (2.2.5a-2.2.5c), το σύστημα κλειστού βρόγχου που προκύπτει έχει την μορφή: $\theta_m = r g w + L_r r e_d$ και $\theta_l = g w + L_r e_d$. Το σφάλμα της μεταβλητής εξόδου $|\theta_l - g w(t)|$ είναι ίσο με $|L_r e_d|$, δηλαδή μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με το e_d και είναι ανεξάρτητο από το B_m . Η εύρωστη συμπεριφορά του συστήματος κλειστού βρόγχου είναι εγγυημένη για κάθε B_m και για μικρό σφάλμα υλοποίησης της παραγωγού του ρεύματος e_d . Αν μετράται μόνο η θέση θ_l ή ισοδύναμα η θ_m με την χρήση ενός ποτενσιόμετρου ή ενός οπτικού κωδικοποιητή υπάρχει η επιπλέον αβεβαιότητα στον υπολογισμό του ω_m , η e_ω . Σε αυτή την περίπτωση ο όρος $\frac{d\theta_m}{dt}$ στον ελεγκτή αντικαθίσταται με τον όρο $\frac{d\theta_m}{dt} + e_\omega$.

Για την πραγματοποίηση του νόμου ελέγχου, σημειώνεται ότι χρησιμοποιούνται μετρήσεις των μεταβλητών ω_l (ισοδύναμα του ω_m) και του i_r . Η πρώτη μεταβλητή μπορεί να μετρηθεί με την χρήση ενός οπτικού κωδικοποιητή και η δεύτερη με την χρήση ενός αμπερομέτρου.

2.2.4 Προσομοίωση DC Κινητήρα Σταθερού Μαγνήτη (ESCAP 35NT2R82-426SP)

Τα προηγούμενα αποτελέσματα θα εφαρμοστούν στον έλεγχο ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος σταθερού μαγνήτη ισχύος 75Watt ESCAP 35NT2R82-426SP. Οι παράμετροι του κινητήρα είναι: $B_m = 0.002[\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$, $J = 71.4 \cdot 10^{-7}[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$, $r = 2$,

$k_b = 0.312 [V \cdot s]$, $L_r = 0.0004 [H]$ και $R_r = 2.2 [\Omega]$. Η άγνωστη ροπή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.4.

2.2.4.1 Έλεγχος Ταχύτητας

Επιλέγοντας $g = 2$ και σύμφωνα με την σχέση (2.2.9) ο P-D νόμος ανατροφοδότησης γίνεται:

$$V_r = 0.0004 \frac{di_r}{dt} + \left(0.312 - \frac{1}{2} \right) \omega_m + 2.2i_r + 2w$$

Η επιθυμητή γωνιακή ταχύτητα της εξόδου του κιβωτίου μετάδοσης είναι: $w = 10 [V]$. Ο όρος της παραγώγου στον ελεγκτή υλοποιήθηκε με την χρήση οπισθόδρομης διακριτοποίησης (sample και hold) με περίοδο δειγματοληψίας ίση με $0.001 [s]$. Η απόδοση των μεταβλητών του DC κινητήρα για εξωτερική εντολή $w = 10 [V]$, παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.2.5-2.2.8 όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για όλες τις μεταβλητές του κινητήρα.

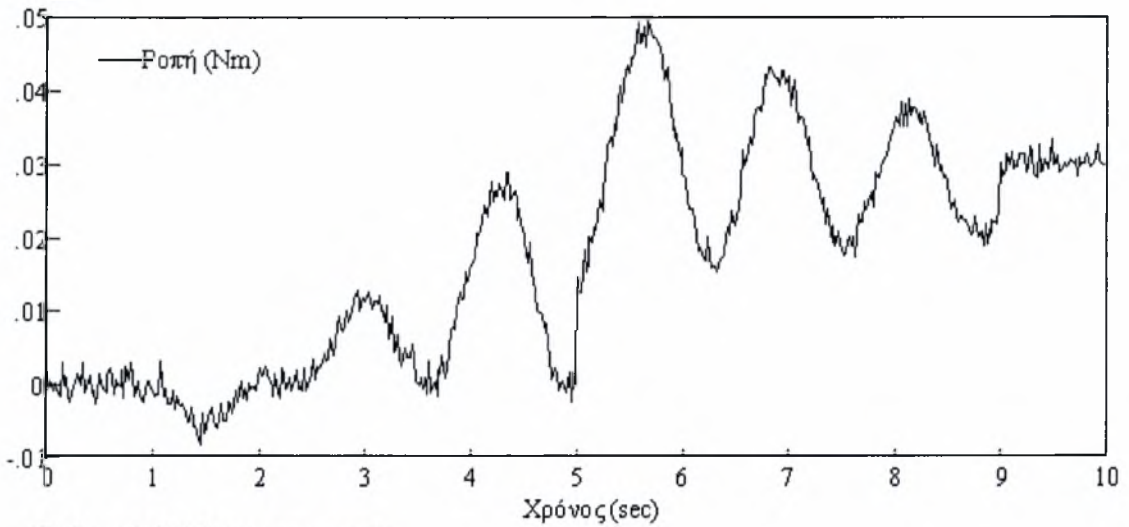
2.2.4.2 Έλεγχος Θέσης

Σύμφωνα με την σχέση (2.2.14) και επιλέγοντας $g = 2$, $\lambda_1 = 0$ ο P-D νόμος ανατροφοδότησης γίνεται:

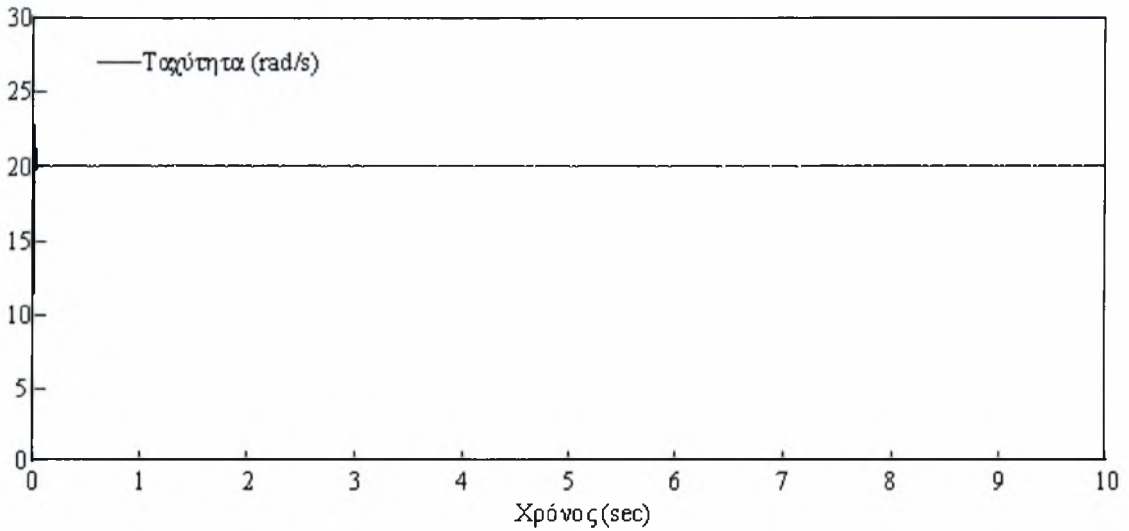
$$V_r = 0.312 \frac{d\theta_m}{dt} + 0.0004 \frac{di_r}{dt} - \frac{1}{2} \theta_m + 2.2i_r + 2w$$

Η επιθυμητή θέση της εξόδου του κιβωτίου μετάδοσης επιλέγεται να είναι: $4 [rad]$. Ο όρος της παραγώγου στον ελεγκτή υλοποιήθηκε με την χρήση οπισθόδρομης διακριτοποίησης (sample και hold) με περίοδο δειγματοληψίας ίση με $0.001 [s]$. Η απόδοση των μεταβλητών του DC κινητήρα για εξωτερική εντολή $w = 2 [V]$, παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.2.9-2.2.12 όπου παρουσιάζονται όλες οι μεταβλητές του κινητήρα.

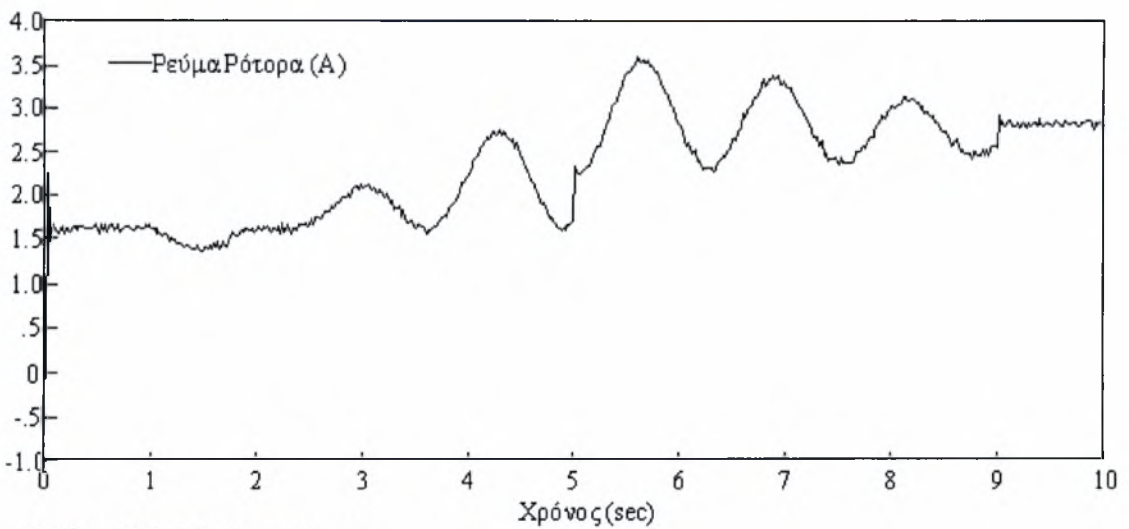
2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες



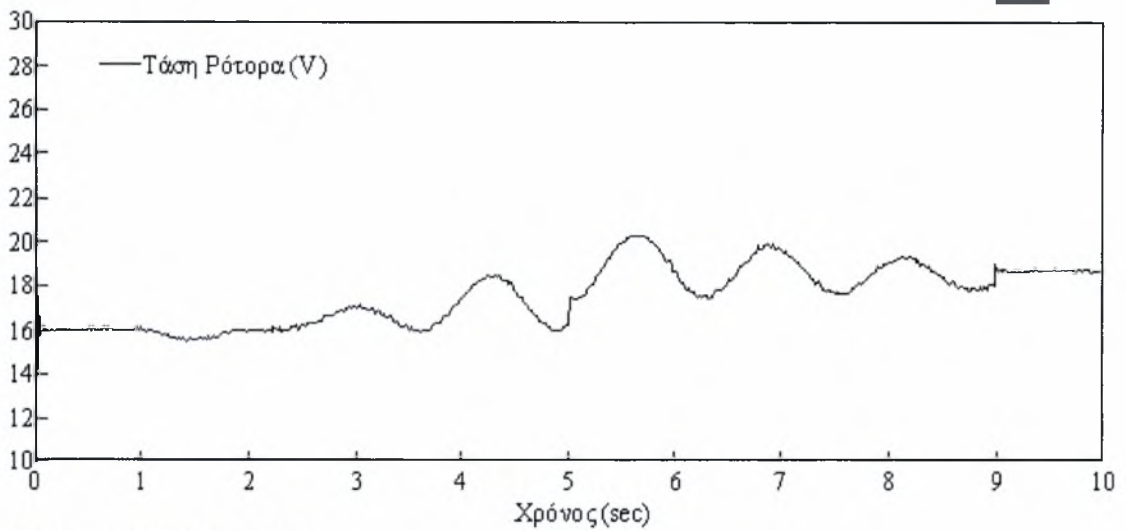
Σχήμα 2.2.4 Άγνωστη ροπή



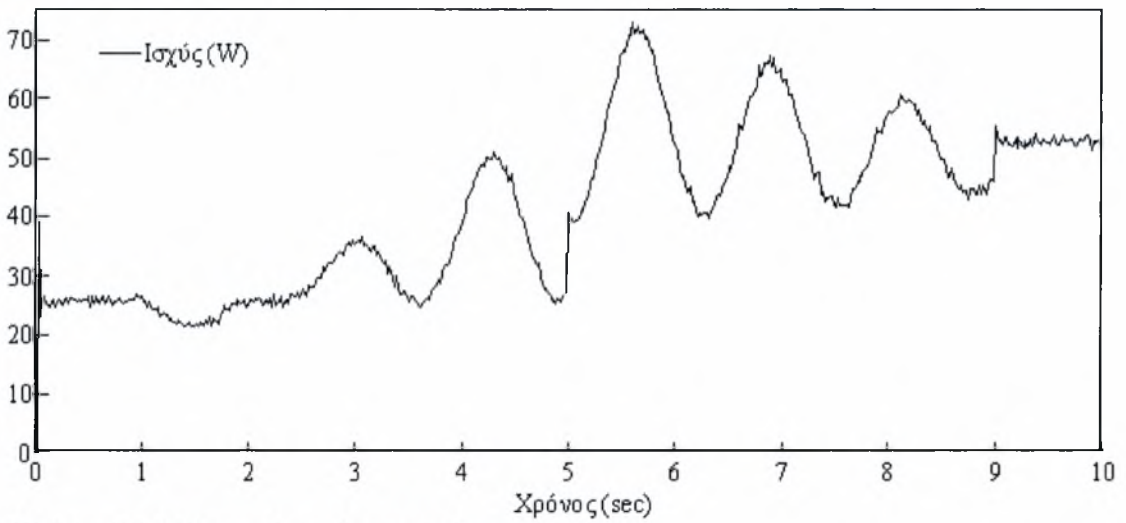
Σχήμα 2.2.5 Ταχύτητα κινητήρα



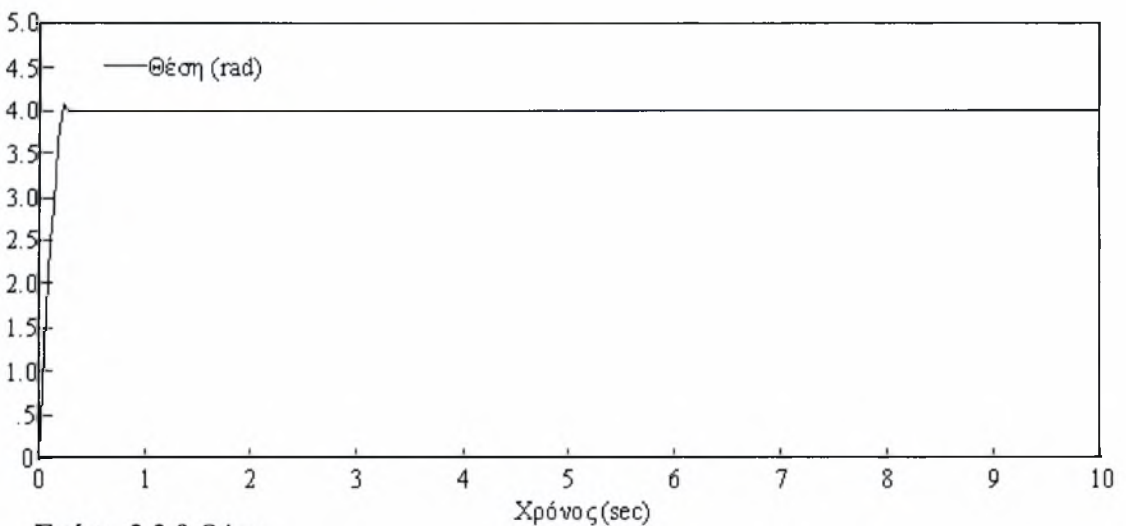
Σχήμα 2.2.6 Ρεύμα ρότορα



Σχήμα 2.2.7 Τάση ρότορα

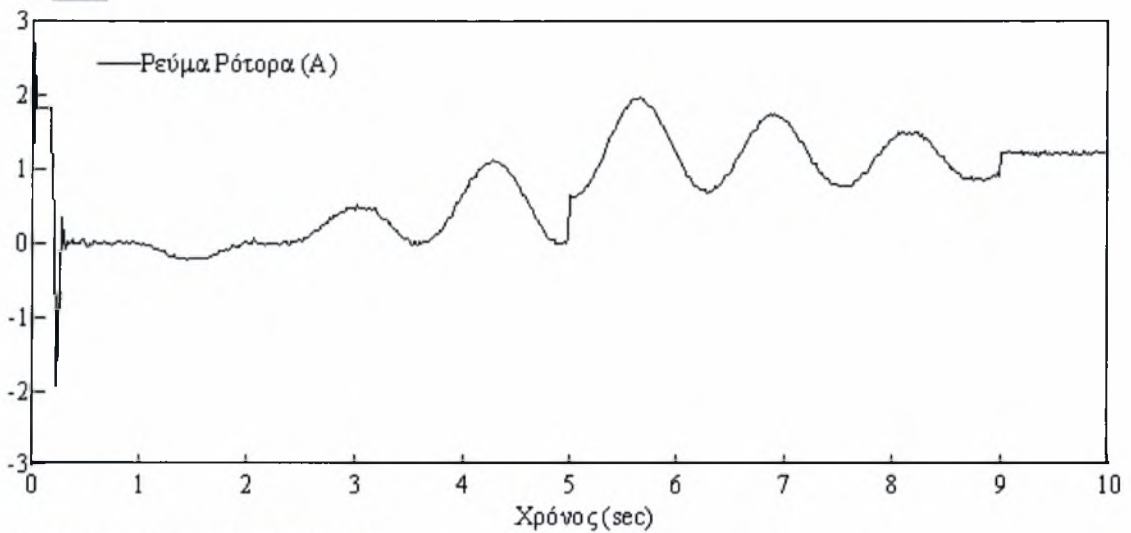


Σχήμα 2.2.8 Καταναλισκόμενη ισχύς

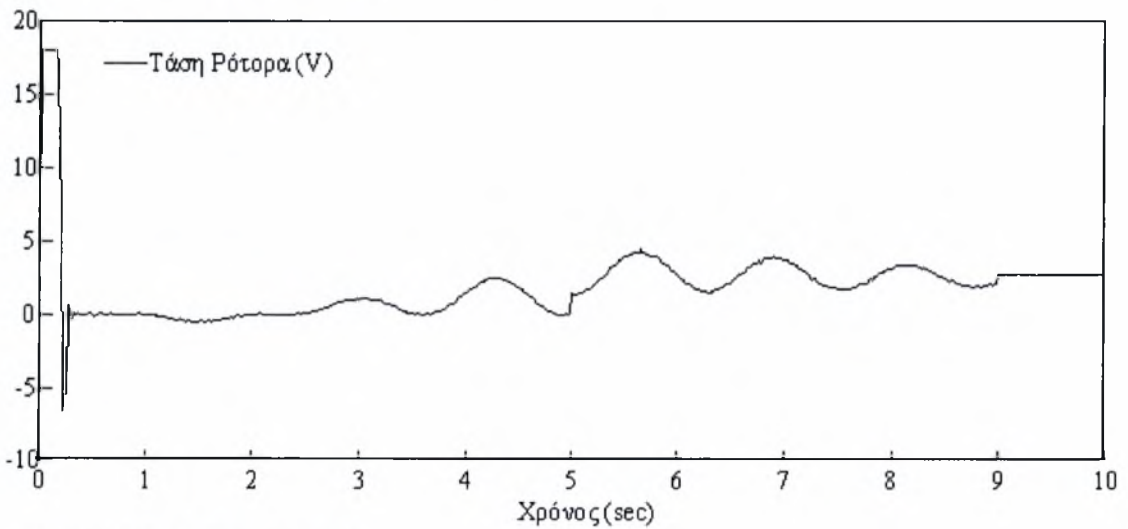


Σχήμα 2.2.9 Θέση

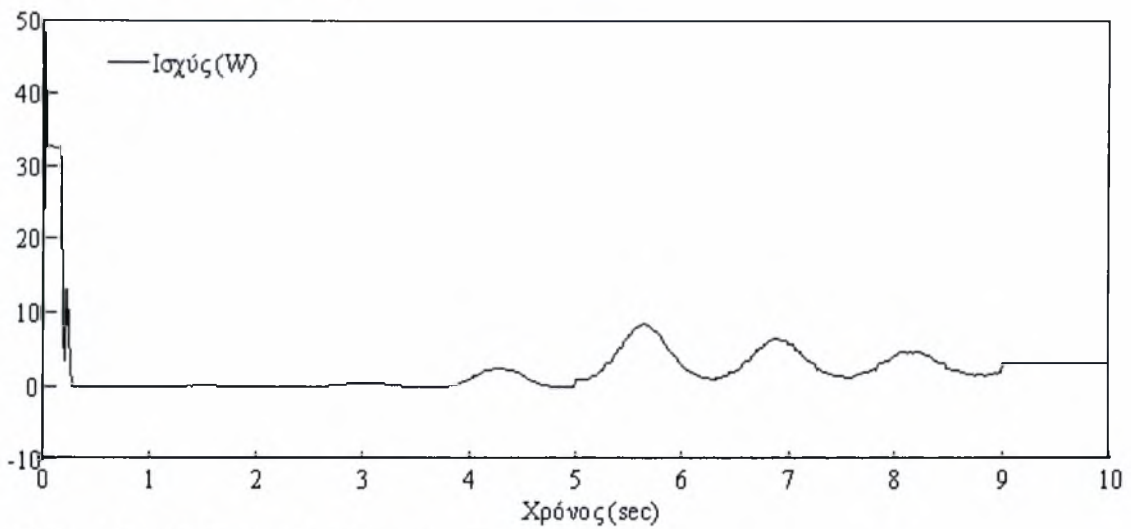
2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες



Σχήμα 2.2.10 Ρεύμα ρότορα



Σχήμα 2.2.11 Τάση ρότορα



Σχήμα 2.2.12 Καταναλισκόμενη ισχύς



2.3 P-D Ελεγκτής σε DC Κινητήρες Παράλληλης Διέγερσης

2.3.1 Περιγραφή του Μοντέλου

Το μοντέλο του κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC) παράλληλης διέγερσης περιγράφεται μαθηματικά από ένα σύστημα τριών γραμμικών διαφορικών εξισώσεων.[3] Η πρώτη εξίσωση είναι η εφαρμογή του τρίτου νόμου του Νεύτωνα για το εξωτερικό φορτίο.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m = T_m - rT_l \quad (2.3.1)$$

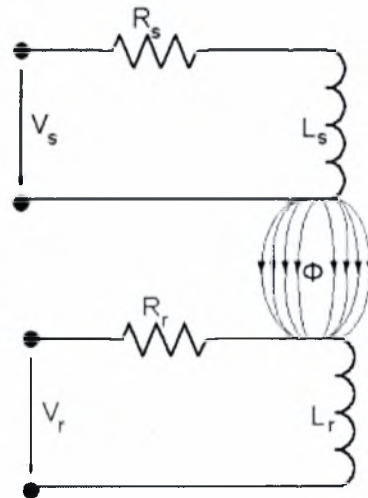
Η δεύτερη εξίσωση περιγράφει το ηλεκτρικό ισοζύγιο στο τύλιγμα του ρότορα.

$$L_r \frac{di_r}{dt} + R_r i_r = V_r - V_b \quad (2.3.2)$$

Η τρίτη εξίσωση περιγράφει το ηλεκτρικό ισοζύγιο στο τύλιγμα του στάτορα.

$$L_s \frac{di_s}{dt} + R_s i_s = V_s \quad (2.3.3)$$

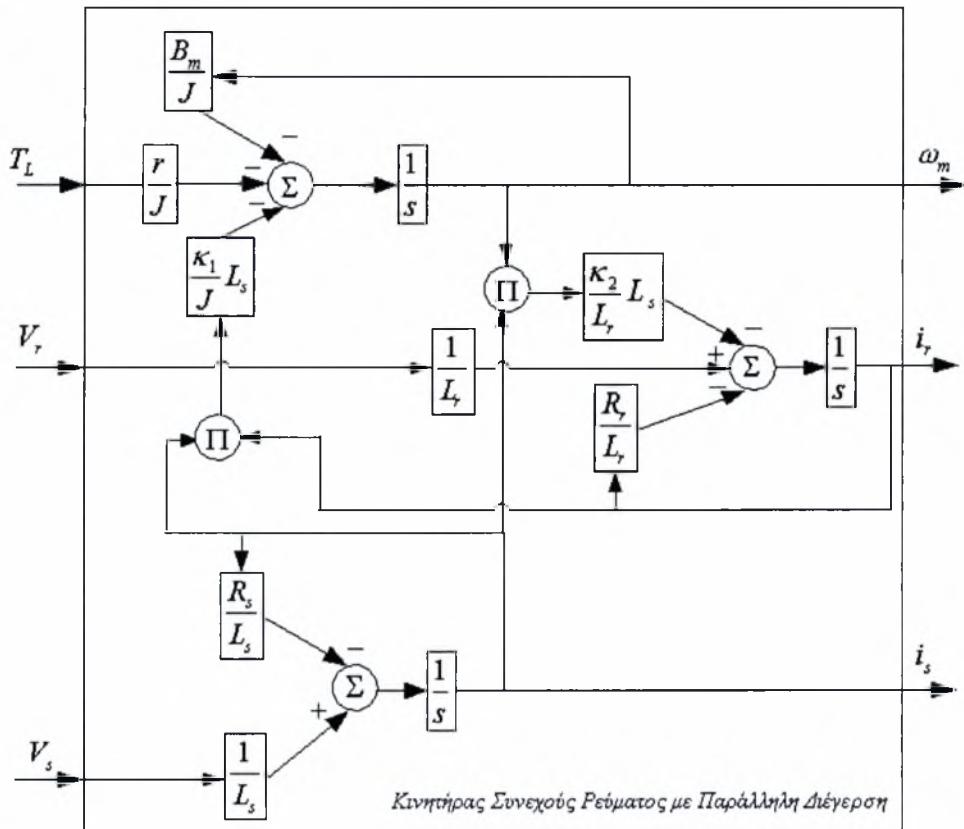
Τα ηλεκτρικά ισοζύγια (2.3.2-2.3.3) αποτελούν την μαθηματική περιγραφή του κυκλώματος του Σχήματος 2.3.1



Σχήμα 2.3.1 Ηλεκτρικό Κύκλωμα κινητήρα παράλληλης διέγερσης



2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες



Σχήμα 2.3.2 Γραφική απεικόνιση του μοντέλου του κινητήρα

Η σύζευξη μεταξύ των ηλεκτρικών και μηχανικών εξισώσεων εκφράζεται με τις ακόλουθες σχέσεις που προκύπτουν από τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.

$$T_m = \kappa_1 \phi_s i_r, \quad V_b = \kappa_2 \phi_s \omega_m, \quad \phi_s = L_s i_s \quad (2.3.4)$$

Οπότε, το σύστημα των εξισώσεων που περιγράφει τον DC κινητήρα στον χώρο κατάστασης είναι ένα μη γραμμικό τρίτης τάξης σύστημα διαφορικών εξισώσεων:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\frac{B_m}{J} \omega_m + \frac{\kappa_1}{J} L_s i_r i_s - \frac{r}{J} T_l \quad (2.3.5a)$$

$$\frac{di_r}{dt} = -\frac{\kappa_2}{L_r} L_s i_s \omega_m - \frac{R_r}{L_r} i_r + \frac{1}{L_r} V_r \quad (2.3.5b)$$

$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_s + \frac{1}{L_s} V_s \quad (2.3.5c)$$

Οι μεταβλητές απόδοσης του συστήματος επιλέγονται να είναι η γωνιακή ταχύτητα του φορτίου, έστω ω_l και το ρεύμα i_r . Η μεταβλητή ω_l σχετίζεται με το ω_m διαμέσου της σχέσης μετάδοσης r (μεταξύ των γραναζιών) με την σχέση (2.2.6).

Στην συνέχεια εξετάζονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- a) διατηρείται η τάση του ρότορα σταθερή και εφαρμόζεται ο νόμος ελέγχου στον στάτορα
- b) διατηρείται η τάση του στάτορα σταθερή και εφαρμόζεται ο νόμος ελέγχου στον ρότορα
- c) μεταβάλλονται και οι δύο τάσεις εφαρμόζοντας δύο νόμους ελέγχου.

2.3.2 Έλεγχος Ταχύτητας για Σταθερή Τάση στον Ρότορα

Στο σύστημα (2.3.5a-2.3.5c) εφαρμόζεται ο P-D νόμος ανατροφοδότησης:

$$V_r = f_1 \frac{d\omega_m}{dt} + f_2 \frac{di_r}{dt} + f_3 \frac{di_s}{dt} + k_1 \omega_m + k_2 i_r + k_3 i_s + gw \quad (2.3.6)$$

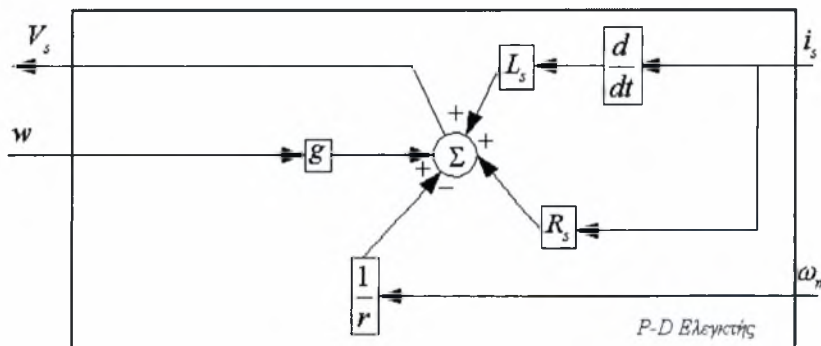
όπου f_1, f_2, f_3 και k_1, k_2, k_3 είναι οι βαθμοί ελευθερίας του διαφορικού και του αναλογικού όρου αντίστοιχα. Η παράμετρος g είναι η ενίσχυση του προαντισταθμιστή και w είναι η εξωτερική εντολή. Επιλέγοντας τους βαθμούς ελευθερίας να είναι:

$$f_1 = 0, \quad f_2 = 0, \quad f_3 = L_s, \quad k_1 = -\frac{1}{r}, \quad k_2 = 0, \quad k_3 = R_s \quad (2.3.7)$$

ο P-D ελεγκτής ανατροφοδότησης παίρνει την μορφή:

$$V_s = L_s \frac{di_s}{dt} + -\frac{1}{r} \omega_m + R_s i_s + gw \quad (2.3.8)$$

και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.3



Σχήμα 2.3.3 P-D Ελεγκτής

αντικαθιστώντας τον ελεγκτή (2.3.8) στο μαθηματικό μοντέλο του DC κινητήρα παράλληλης διέγερσης (2.3.5a-2.3.5c) το σύστημα κλειστού βρόγχου παίρνει την μορφή:

$$rg \frac{dw}{dt} = -\frac{B_m}{J} rgw + \frac{\kappa_1}{J} L_s i_r i_s - \frac{r}{J} T_l \quad (2.3.9a)$$

$$\frac{di_r}{dt} = -\frac{\kappa_2}{L_r} L_s i_s rgw - \frac{R_r}{L_r} i_r + \frac{1}{L_r} V_r \quad (2.3.9b)$$

$$\omega_m = rgw \quad (2.3.9c)$$

ενώ η μεταβλητή εξόδου ω_l γίνεται:

$$\omega_l = gw \quad (2.3.9d)$$

Από την σχέση (2.3.9d) προκύπτει το συμπέρασμα ότι με την χρήση του νόμου ανατροφοδότησης (2.3.8) έχει επιτευχθεί τέλειος έλεγχος εξόδου για έλεγχο ταχύτητας.


Το πρόβλημα της επιλυσιμότητας του συστήματος κλειστού βρόγχου σχέσεις (2.3.9a-2.3.9d) και της ευστάθειας είναι υπό διερεύνηση.

Μελετώντας την ευρωστία του συστήματος κλειστού βρόγχου οι δυο τύποι αβεβαιοτήτων που διαπιστώθηκαν στον κινητήρα σταθερού μαγνήτη παρατηρούνται και εδώ. Η πρώτη είναι ο συντελεστής τριβής B_m και η δεύτερη είναι το σφάλμα της παραγωγού του ρεύματος του στάτορα i_s , που συμβολίζεται με $e_d(t)$. Στην πραγματικότητα η παράγωγος του ρεύματος ($\frac{di_s}{dt}$) που υλοποιείται στον ελεγκτή είναι

$\frac{di_s}{dt} + e_d(t)$. Το σφάλμα αυτό μπορεί να θεωρηθεί γρήγορα μεταβαλλόμενη χρονομεταβλητή αβεβαιότητα. Συμπεριλαμβάνοντας και το σφάλμα υλοποίησης της παραγωγού ο ελεγκτής παίρνει τη μορφή:

$$V_s = L_s \frac{di_s}{dt} + L_s e_d - \frac{1}{r} \omega_m + R_s i_s + gw \quad (2.3.10)$$

Αντικαθιστώντας τον ελεγκτή (2.3.10) στο μοντέλο του κινητήρα (2.3.5a-2.2.5c), το σύστημα κλειστού βρόγχου γίνεται: $\omega_m = rgw + L_s r e_d$ και η μεταβλητή εξόδου γίνεται $\omega_l = gw + L_s e_d$. Το σφάλμα της μεταβλητής απόδοσης εξόδου $|\omega_l - gw(t)|$ είναι ίσο με $|L_s e_d|$, μεταβάλλεται γραμμικά με το e_d και είναι ανεξάρτητο από το B_m . Παρατηρείται ότι το σύστημα συμπεριφέρεται εύρωστα για κάθε B_m και για μικρό σφάλμα υλοποίησης της παραγωγού του ρεύματος e_d .



Για την πραγματοποίηση του νόμου ελέγχου, σημειώνεται ότι χρησιμοποιούνται μετρήσεις των μεταβλητών ω_i (ισοδύναμα του ω_m) με την χρήση ενός οπτικού κωδικοποιητή και του i_s με την χρήση ενός αμπερομέτρου.

2.3.3 Προσομοίωση DC Κινητήρα Παράλληλης Διέγερσης με Σταθερή Τάση στον Ρότορα

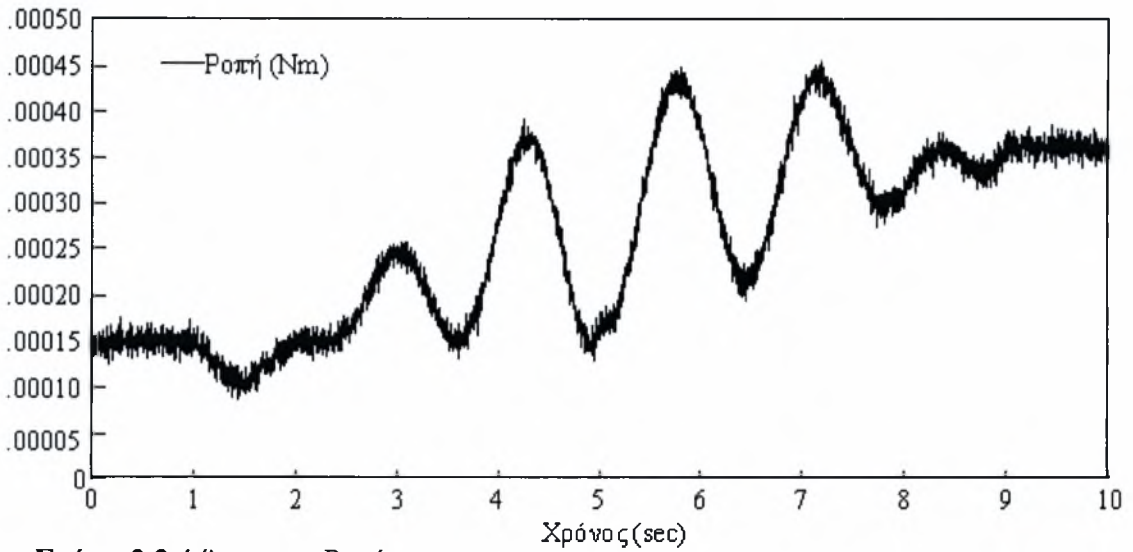
Τα προηγούμενα αποτελέσματα θα εφαρμοστούν στον έλεγχο ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης εξαιρετικά χαμηλής ισχύος. Οι παράμετροι του κινητήρα είναι: $B_m = 6 \cdot 10^{-6} [\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$, $J = 10^{-6} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$, $r = 2$, $\kappa_1 = \kappa_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 10^{-3} []$, $L_r = 0.04 [\text{H}]$, $L_s = 0.2 [\text{H}]$ και $R_r = R_s = 1 [\Omega]$. Η άγνωστη ροπή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.4.

Εφόσον ο κινητήρας είναι πολύστροφος επιλέγεται $g = 7$ και σύμφωνα με την σχέση (2.3.8) ο P-D νόμος ανατροφοδότησης γίνεται:

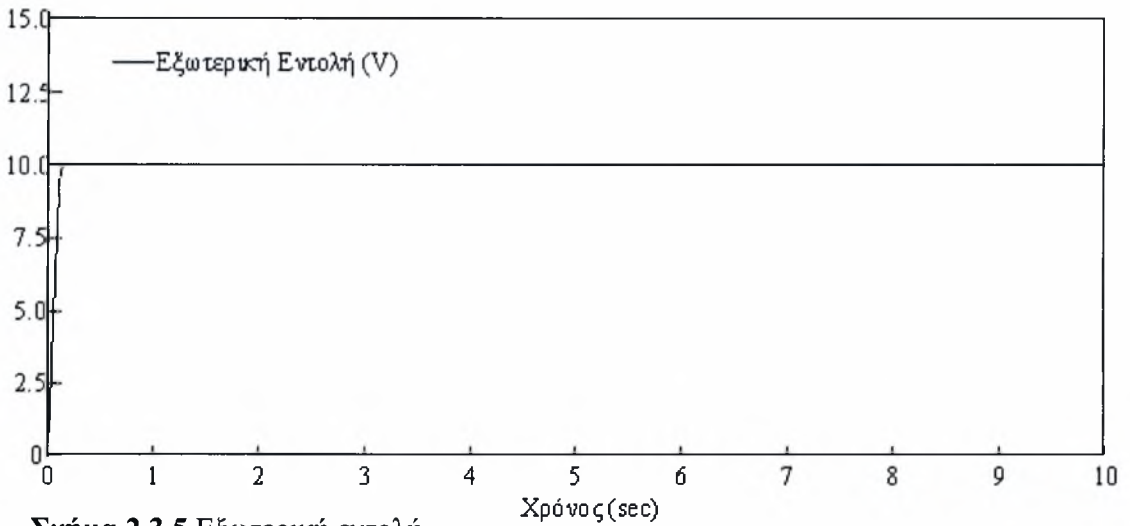
$$V_s = 0.2 \frac{di_s}{dt} - \frac{1}{2} \omega_m + i_r + 7w$$

Η εξωτερική εντολή w φαίνεται στο Σχήμα 2.3.5. Ο όρος της παραγώγου στον ελεγκτή υλοποιήθηκε με οπισθόδρομης διακριτοποίησης (sample και hold) με περίοδο δειγματοληψίας ίση με $0.0001 [\text{s}]$. Η απόδοση των μεταβλητών του DC κινητήρα παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.3.6-2.3.10 όπου απεικονίζεται η μεταβολή με τον χρόνο για όλες τις μεταβλητές του κινητήρα παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον ρότορα.

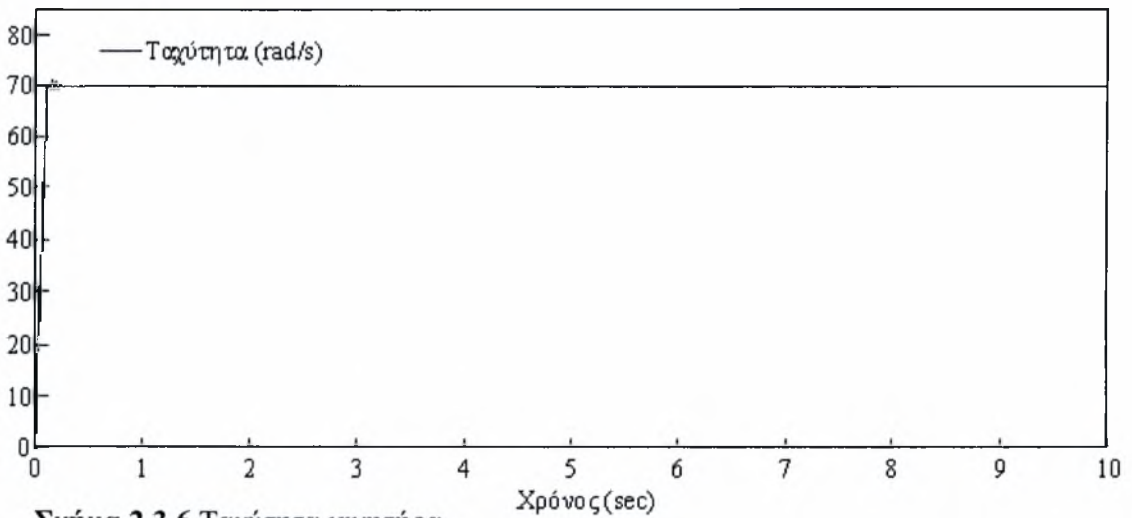
2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες



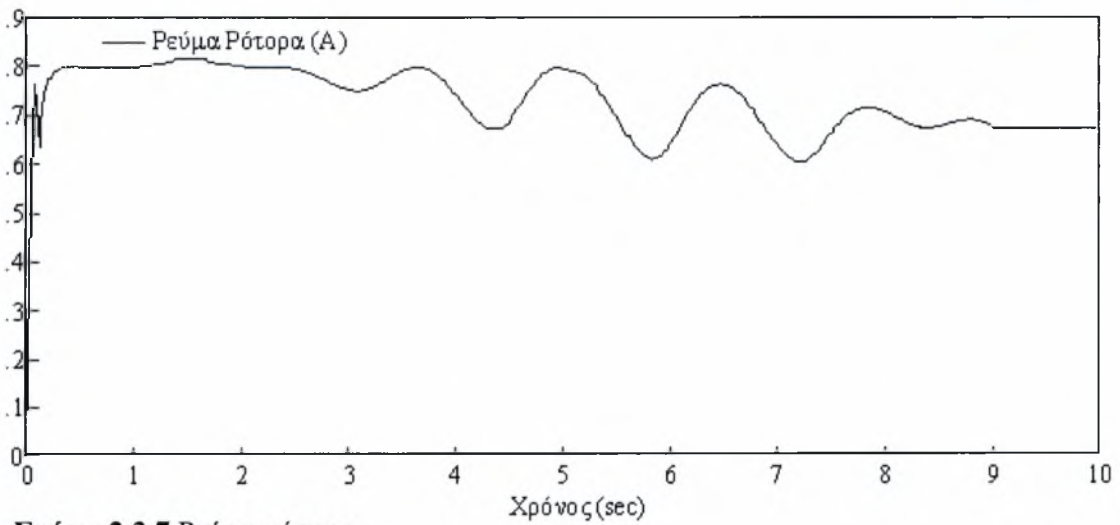
Σχήμα 2.3.4 Άγνωστη Ροπή



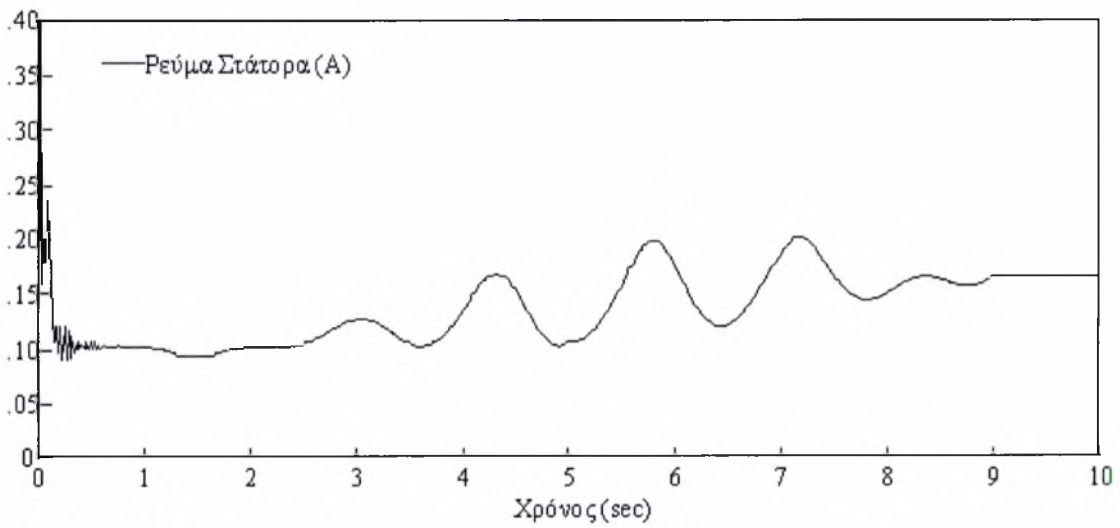
Σχήμα 2.3.5 Εξωτερική εντολή



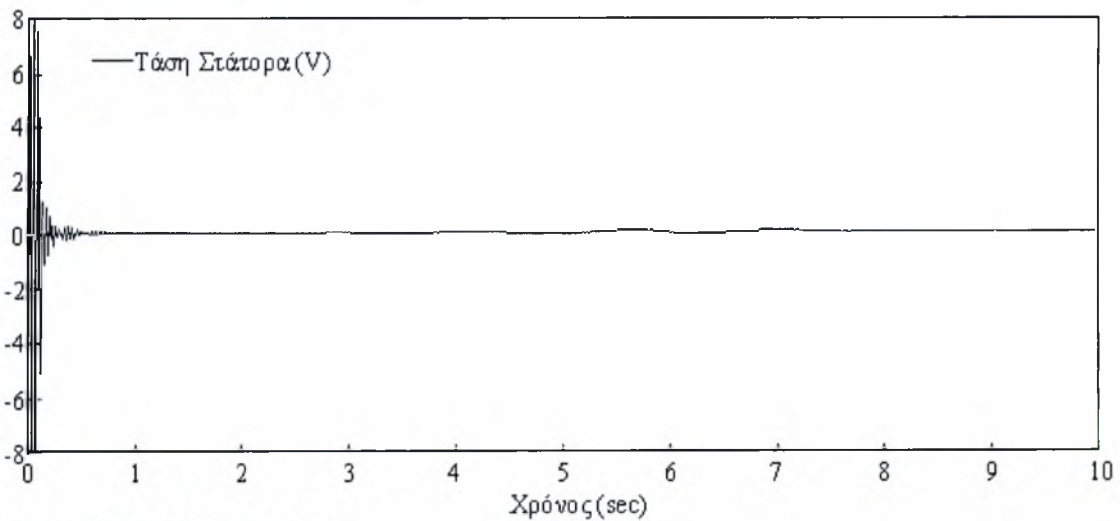
Σχήμα 2.3.6 Ταχύτητα κινητήρα



Σχήμα 2.3.7 Ρεύμα ρότορα

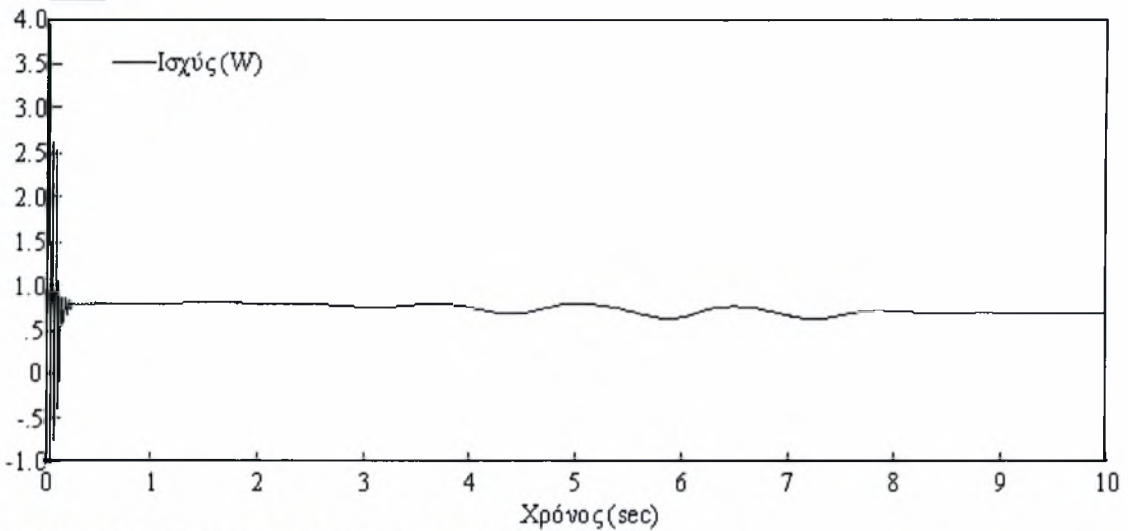


Σχήμα 2.3.8 Ρεύμα στάτορα



Σχήμα 2.3.9 Τάση στάτορα

2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες



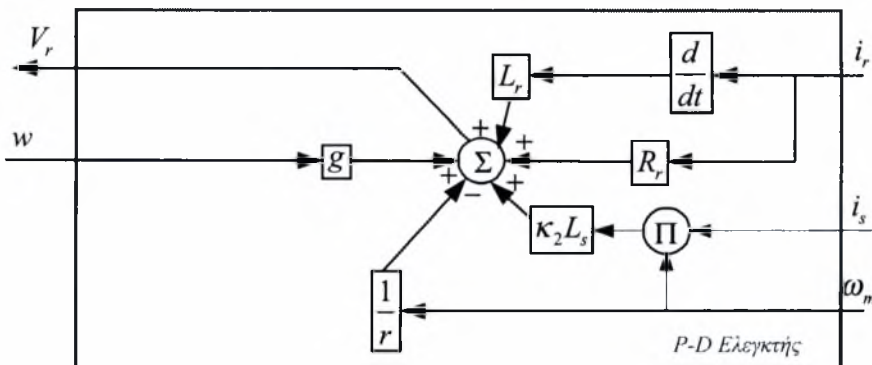
Σχήμα 2.3.10 Καταναλισκόμενη ισχύς

2.3.4 Έλεγχος Ταχύτητας για Σταθερή Τάση στον Στάτορα

Στο σύστημα (2.3.5a-2.3.5c) εφαρμόζεται ο P-D νόμος ελέγχου:

$$V_r = L_r \frac{di_r}{dt} + \kappa_2 L_s i_s \omega_m + R_r i_r - \frac{1}{r} \omega_m + gw \quad (2.3.11)$$

που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.11



Σχήμα 2.3.11 P-D Ελεγκτής

αντικαθιστώντας την εξίσωση του ελεγκτή (2.3.11) στο μοντέλο του DC κινητήρα παράλληλης διέγερσης (2.3.5a-2.3.5c) το σύστημα κλειστού βρόγχου που προκύπτει έχει την μορφή:

$$rg \frac{dw}{dt} = -\frac{B_m}{J} rgw + \frac{\kappa_1}{J} L_s i_r i_s - \frac{r}{J} T_l \quad (2.3.12a)$$



$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}i_s + \frac{1}{L_s}V_s \quad (2.3.12b)$$

$$\omega_m = rgw \quad (2.3.12c)$$

και η μεταβλητή εξόδου ω_l γίνεται:

$$\omega_l = gw \quad (2.3.12d)$$

Από την σχέση (2.3.12d) προκύπτει ότι με την χρήση του νόμου ανατροφοδότησης (2.3.11) έχει επιτευχθεί τέλειος έλεγχος εξόδου για έλεγχο ταχύτητας.

Το πρόβλημα της επιλυσιμότητας και της ευστάθειας του συστήματος κλειστού βρόγχου (2.3.12a-2.3.12d) βρίσκεται υπό διερεύνηση.

Για την ευρωστία του συστήματος κλειστού βρόγχου, οι δυο τύποι αβεβαιοτήτων που διαπιστώθηκαν στον κινητήρα σταθερού μαγνήτη παρατηρούνται και εδώ. Η πρώτη αβεβαιότητα είναι ο συντελεστής τριβής B_m και η δεύτερη είναι το σφάλμα της παραγώγου του ρεύματος του ρότορα i_r , έστω $e_d(t)$. Η παράγωγος του ρεύματος ($\frac{di_r}{dt}$) που υλοποιείται στον ελεγκτή αν ληφθεί υπόψη και το σφάλμα είναι

$\frac{di_r}{dt} + e_d(t)$. Το σφάλμα αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μια χρονομεταβλητή αβεβαιότητα.

Συμπεριλαμβάνοντας και το σφάλμα υλοποίησης της παραγώγου ο ελεγκτής παίρνει τη μορφή:

$$V_r = L_r \frac{di_r}{dt} + L_r e_d + \kappa_2 L_s i_s \omega_m + R_r i_r - \frac{1}{r} \omega_m + gw \quad (2.3.13)$$

Αντικαθιστώντας τον νόμο ελέγχου (2.3.13) στο σύστημα (2.3.5a-2.2.5c), το σύστημα κλειστού βρόγχου παίρνει την μορφή: $\omega_m = rgw + L_r r e_d$ και η μεταβλητή εξόδου γίνεται $\omega_l = gw + L_r e_d$.

Το σφάλμα της μεταβλητής απόδοσης εξόδου $|\omega_l - gw(t)|$ είναι ίσο με $|L_r e_d|$, παρουσιάζει γραμμική μεταβολή με το e_d και δεν εξαρτάται από το B_m . Το σύστημα συμπεριφέρεται εύρωστα για κάθε B_m και για μικρό σφάλμα υλοποίησης της παραγώγου του ρεύματος του ρότορα e_d .

Για την υλοποίηση του νόμου ελέγχου, σημειώνεται ότι χρησιμοποιούνται μετρήσεις των μεταβλητών που μπορεί να γίνουν με ένα οπτικό κωδικοποιητή για το ω_l (ισοδύναμο του ω_m) και με ένα αμπερόμετρο για τα i_s , i_r .

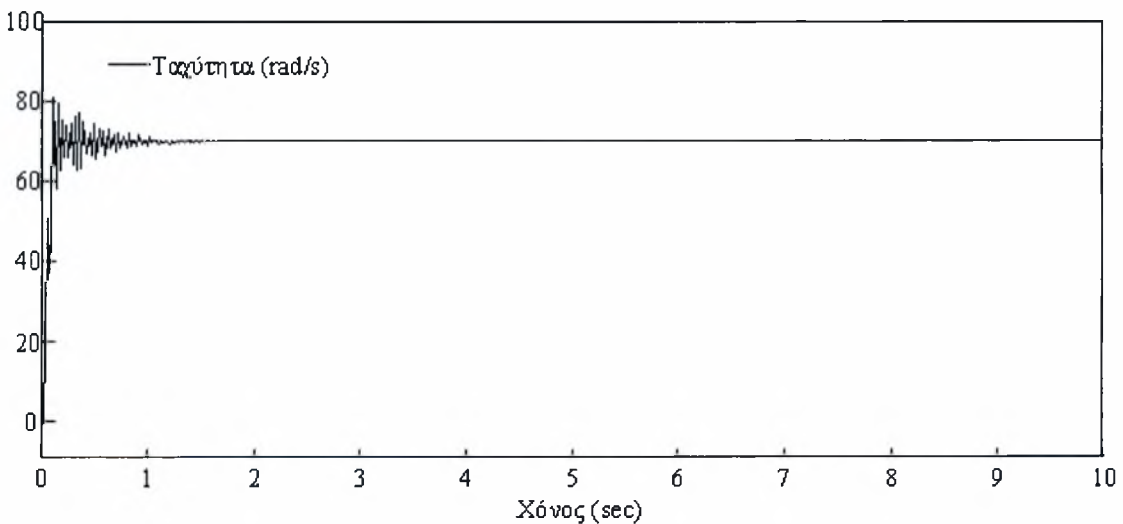
2.3.5 Προσομοίωση DC Κινητήρα Παράλληλης Διέγερσης με Σταθερή Τάση στον Στάτορα

Στην συνέχεια εφαρμόζονται τα παραπάνω αποτελέσματα για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης που μελετήθηκε και στην παράγραφο 2.3.3. Οι παράμετροι του κινητήρα παραμένουν οι ίδιοι και η άγνωστη ροπή παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.3.4.

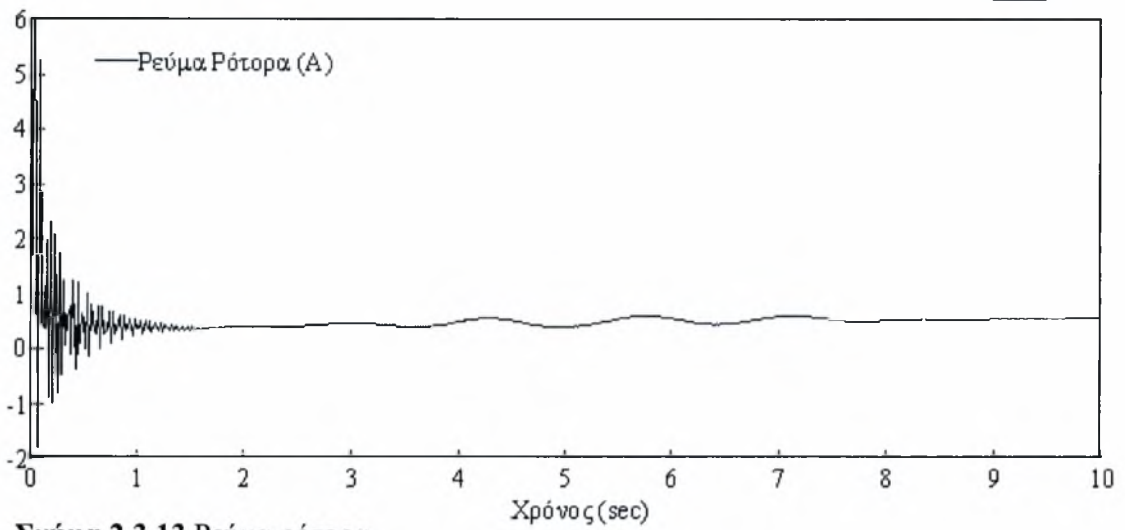
Επιλέγοντας $g = 7$ ο P-D νόμος ανατροφοδότησης γίνεται:

$$V_r = 0.04 \frac{di_r}{dt} + \sqrt{2} \cdot 10^{-4} i_s \omega_m + i_r - \frac{1}{2} \omega_m + 7w$$

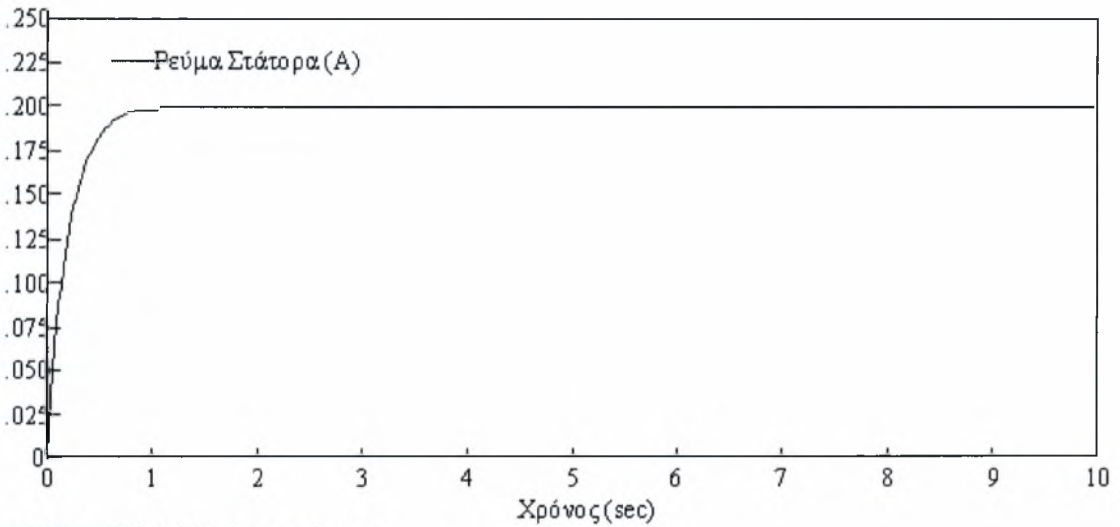
Η εξωτερική εντολή w φαίνεται στο Σχήμα 2.3.5. Ο όρος της παραγώγου υλοποιήθηκε με την ίδια μέθοδο και ακρίβεια και η απόδοση των μεταβλητών του DC κινητήρα παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.3.12-2.3.15.



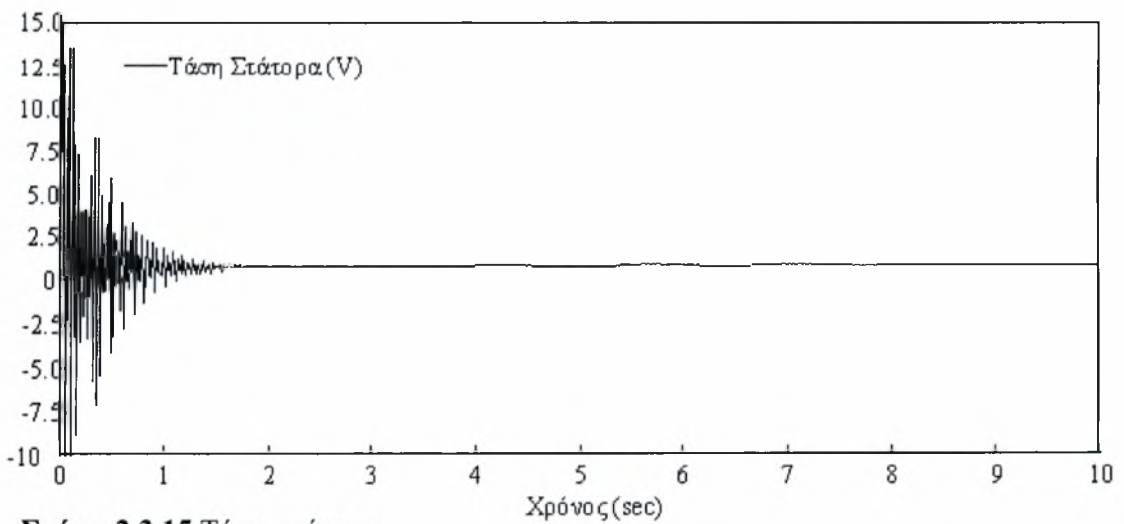
Σχήμα 2.3.12 Ταχύτητα κινητήρα



Σχήμα 2.3.13 Ρεύμα ρότορα

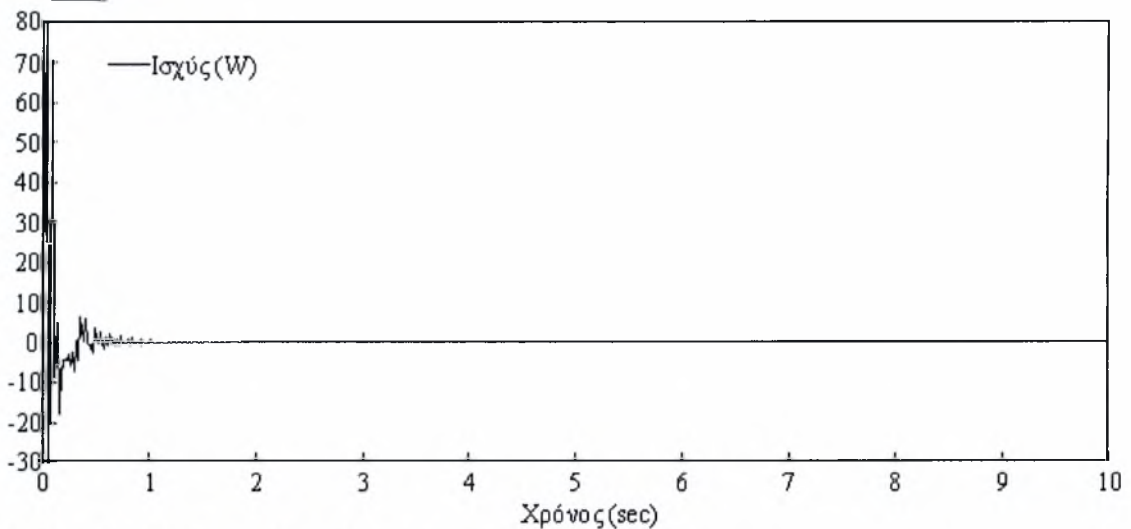


Σχήμα 2.3.14 Ρεύμα στάτορα



Σχήμα 2.3.15 Τάση στάτορα

2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες



Σχήμα 2.3.16 Καταναλισκόμενη ισχύς

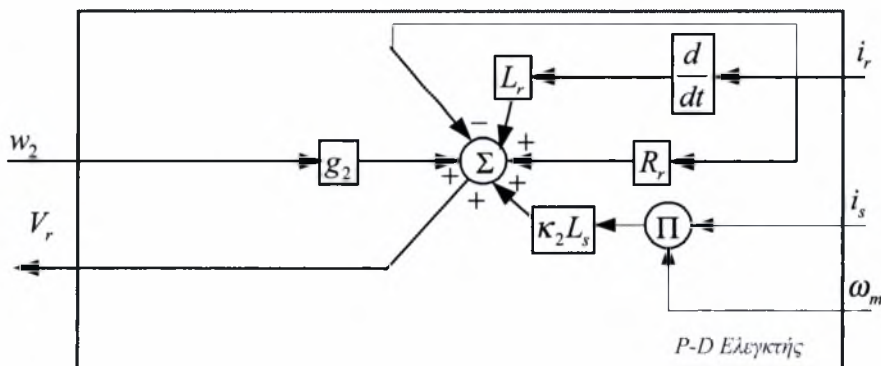
2.3.6 Έλεγχος Ταχύτητας και Ρεύματος στο Ρότορα

Στο σύστημα (2.3.5a-2.3.5c) εφαρμόζεται ο ακόλουθος P-D νόμος ελέγχου:

$$V_s = L_s \frac{di_s}{dt} + \frac{1}{r} \omega_m + R_s i_s + g_1 w_1 \quad (2.3.14a)$$

$$V_r = L_r \frac{di_r}{dt} + \kappa_2 L_s i_s \omega_m + R_r i_r - i_r + g_2 w_2 \quad (2.3.14b)$$

που παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.3.3 και 2.3.17



Σχήμα 2.3.17 P-D Ελεγκτής για έλεγχο ρεύματος

αντικαθιστώντας τις εξισώσεις του νόμου ελέγχου (2.3.14a-2.3.14b) στο μοντέλο του DC κινητήρα παράλληλης διέγερσης (2.3.5a-2.3.5c) το σύστημα κλειστού βρόγχου που προκύπτει έχει την μορφή:

$$rg_1 \frac{dw_1}{dt} = -\frac{B_m}{J} rg_1 w_1 + \frac{\kappa_1}{J} L_s g_2 w_2 i_s - \frac{r}{J} T_l \quad (2.3.15a)$$

$$i_r = g_2 w_2 \quad (2.3.15b)$$

$$\omega_m = rg_1 w_1 \quad (2.3.15c)$$

και η μεταβλητή εξόδου ω_l παίρνει την μορφή:

$$\omega_l = gw \quad (2.3.15d)$$

Από τις σχέσεις (2.3.15c-2.3.15d) συμπεραίνεται ότι με την χρήση του νόμου ανατροφοδότησης (2.3.14a-2.3.14b) έχει επιτευχθεί τέλειος έλεγχος εξόδου για έλεγχο ταχύτητας και ρεύματος στον ρότορα.

Μελετώντας την ευστάθεια BIBO του συστήματος κλειστού βρόγχου, προκύπτει ότι αν οι εξωτερικές εντολές $w_1(t)$, $w_2(t)$ είναι φραγμένες, τότε οι μεταβλητές εξόδου ω_l , ω_m και i_r είναι φραγμένες. Επιπλέον αν η πρώτη παράγωγος της εντολής $w_1(t)$ είναι φραγμένη τότε, σύμφωνα με την σχέση (2.3.15a) εξασφαλίζεται ότι και το ρεύμα i_s είναι φραγμένο $\forall t > 0$.

Μελετώντας την ασυμπτωτική ευστάθεια προκύπτει για $w_1(t) = 0$ και $w_2(t) \neq 0$ (γιατί για $w_2(t) = 0$ δεν θα υπήρχε ηλεκτρομαγνητική δύναμη και ο κινητήρας δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει) ότι:

$$\omega_l = 0, \omega_m = 0, i_r(t) = g_2 w_2(t) \text{ και } i_s(t) = \frac{rT_l(t)}{\kappa_1 L_s g_2 w_2(t)}, (\forall t > 0)$$

Για την ευρωστία του συστήματος κλειστού βρόγχου παρατηρείται ότι οι δυο τύποι αβεβαιοτήτων που διαπιστώθηκαν στους προηγούμενους τύπους κινητήρων παρατηρούνται και εδώ. Η πρώτη αβεβαιότητα είναι ο συντελεστής τριβής B_m και η δεύτερη είναι το σφάλμα της παραγωγού του ρεύματος του ρότορα i_r , αλλά και του ρεύματος του στάτορα i_s , έστω $e_{d1}(t)$, $e_{d2}(t)$. Η παράγωγος των ρευμάτων ($\frac{di_r}{dt}$ και $\frac{di_s}{dt}$) που υλοποιούνται στον ελεγκτή αν ληφθούν υπόψη και τα σφάλματα γίνονται $\frac{di_r}{dt} + e_{d1}(t)$ και $\frac{di_s}{dt} + e_{d2}(t)$. Τα σφάλματα θεωρούνται χρονομεταβλητές αβεβαιότητες με γρήγορες μεταβολές. Συμπεριλαμβάνοντας αυτά τα σφάλματα ο ελεγκτή παίρνει τη μορφή:

$$V_s = L_s \frac{di_s}{dt} + L_s e_{d2} - \frac{1}{r} \omega_m + R_s i_s + g_1 w_1 \quad (2.3.16a)$$

$$V_r = L_r \frac{di_r}{dt} + L_r e_{d2} + \kappa_2 L_s i_s \omega_m + R_r i_r - i_r + g_2 w_2 \quad (2.3.16b)$$

Αντικαθιστώντας τον νόμο ελέγχου (2.3.16a-2.3.16b) στο σύστημα (2.3.5a-2.2.5c), το σύστημα κλειστού βρόγχου παίρνει την μορφή: $\omega_m = r g_1 w_1 + L_s r e_{d1}$, $i_r = L_r e_{d2} + g_2 w_2$ και η μεταβλητή εξόδου ω_l γίνεται $\omega_l = g_1 w_1 + L_s e_{d1}$. Τα σφάλματα των μεταβλητών απόδοσης εξόδου $|\omega_l - g_1 w_1(t)|$ και $|i_r - g_2 w_2(t)|$ είναι ίσα με $|L_s e_{d1}|$ και $|L_r e_{d2}|$ αντίστοιχα και παρουσιάζουν γραμμική μεταβολή με τα e_{d1} , e_{d2} ενώ είναι ανεξάρτητα του B_m . Προκύπτει σύμφωνα με τα παραπάνω το συμπέρασμα ότι το σύστημα συμπεριφέρεται εύρωστα για κάθε B_m και για μικρό σφάλμα υλοποίησης της παραγωγού των ρευμάτων του ρότορα και του στάτορα.

Για την υλοποίηση του νόμου ελέγχου, γίνονται μετρήσεις των μεταβλητών το ω_l (ή ισοδύναμα του ω_m), i_s και i_r που μπορεί να γίνουν με ένα οπτικό κωδικοποιητή για και με αμπερόμετρο αντίστοιχα.

2.3.7 Προσομοίωση DC Κινητήρα Παράλληλης Διέγερσης με Έλεγχο Ταχύτητας και Ρεύματος του Ρότορα

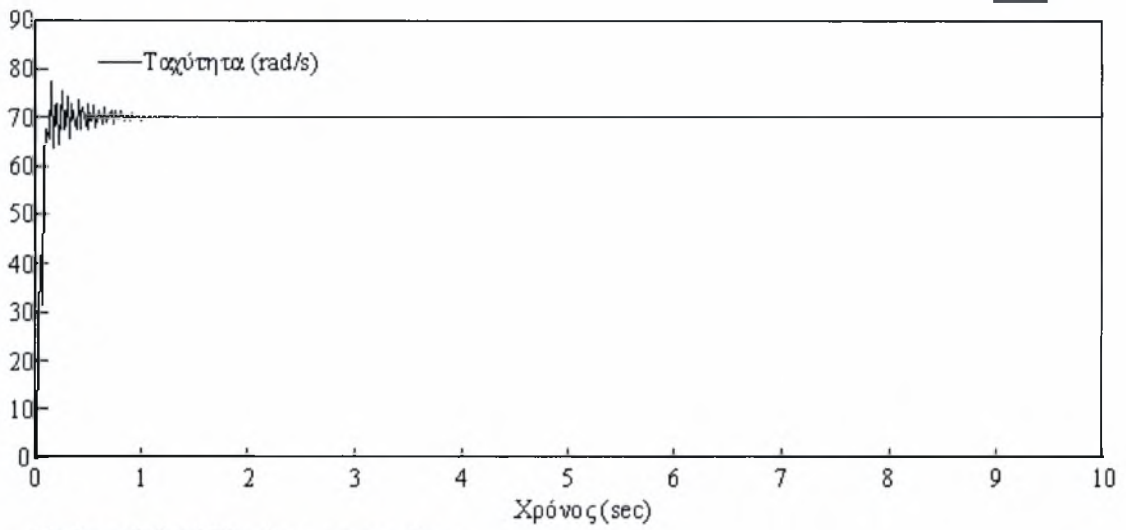
Τα παραπάνω αποτελέσματα εφαρμόζονται για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης που περιγράφεται από το μαθηματικό μοντέλο (2.3.5a-2.3.5c). Οι παράμετροι του κινητήρα παραμένουν οι ίδιοι και η άγνωστη ροπή παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.3.4.

Επιλέγοντας $g_1 = 7$, $g_2 = 1$ ο P-D νόμος ελέγχου γίνεται:

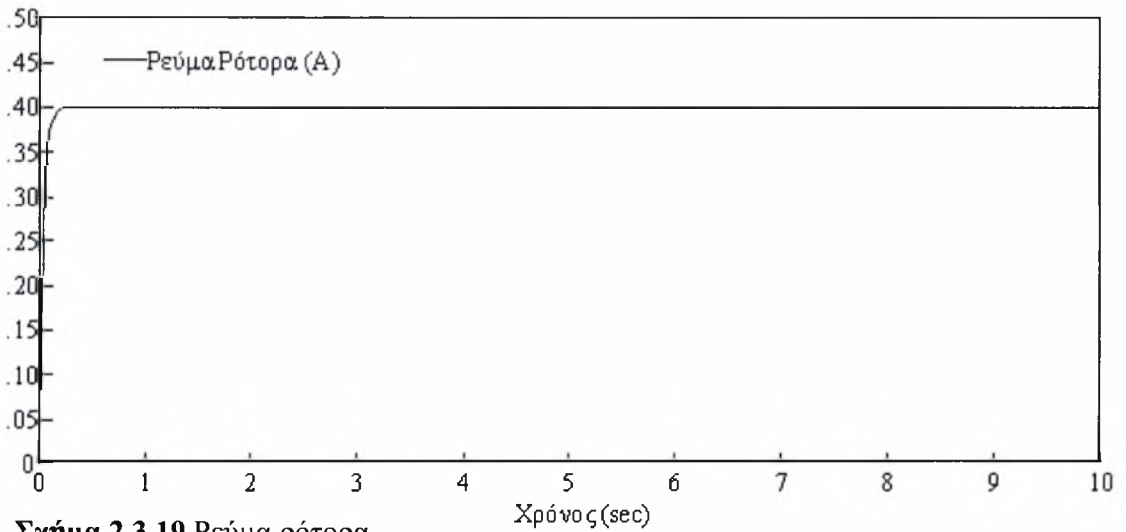
$$V_s = 0.2 \frac{di_s}{dt} - \frac{1}{2} \omega_m + i_s + 7 w_1$$

$$V_r = 0.04 \frac{di_r}{dt} + \sqrt{2} \cdot 10^{-4} i_s \omega_m + w_2$$

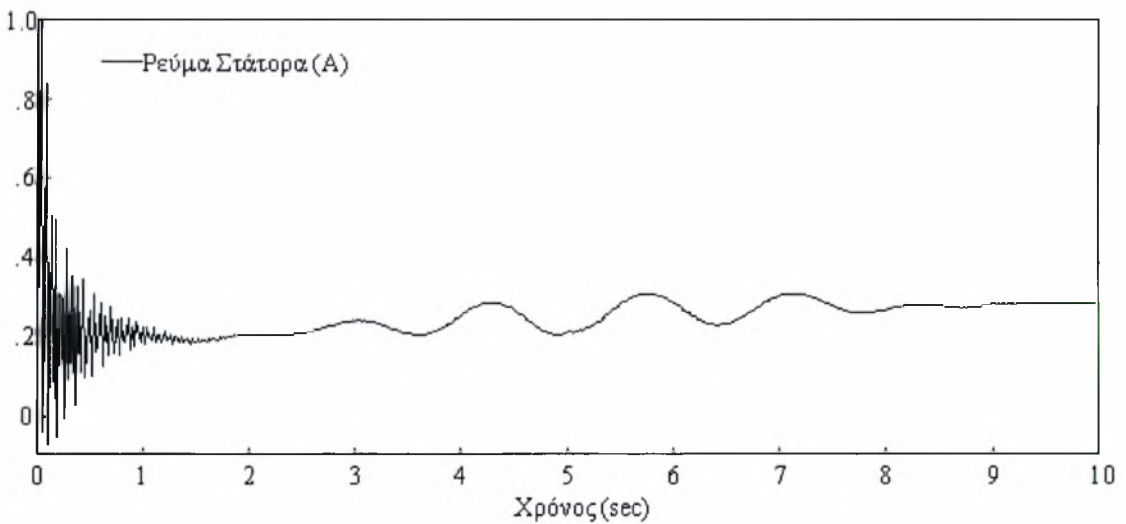
Η εξωτερική εντολή w_1 παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.5. Οι όροι της παραγωγού υλοποιήθηκαν με την ίδια μέθοδο και ακρίβεια όπως στην παράγραφο 2.3.3 και η απόδοση των μεταβλητών του DC κινητήρα παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.3.18-2.3.23.



Σχήμα 2.3.18 Ταχύτητα κινητήρα

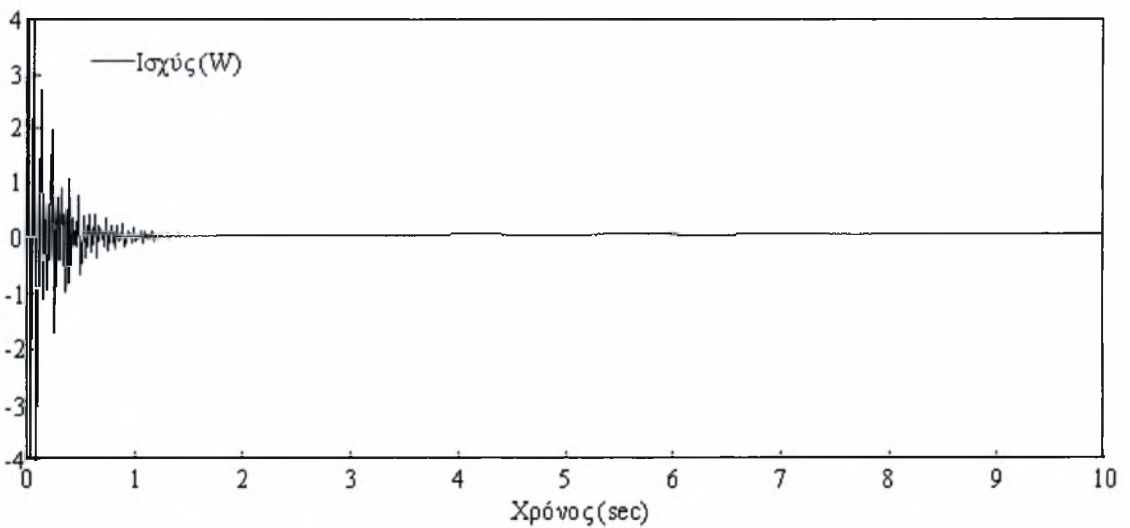
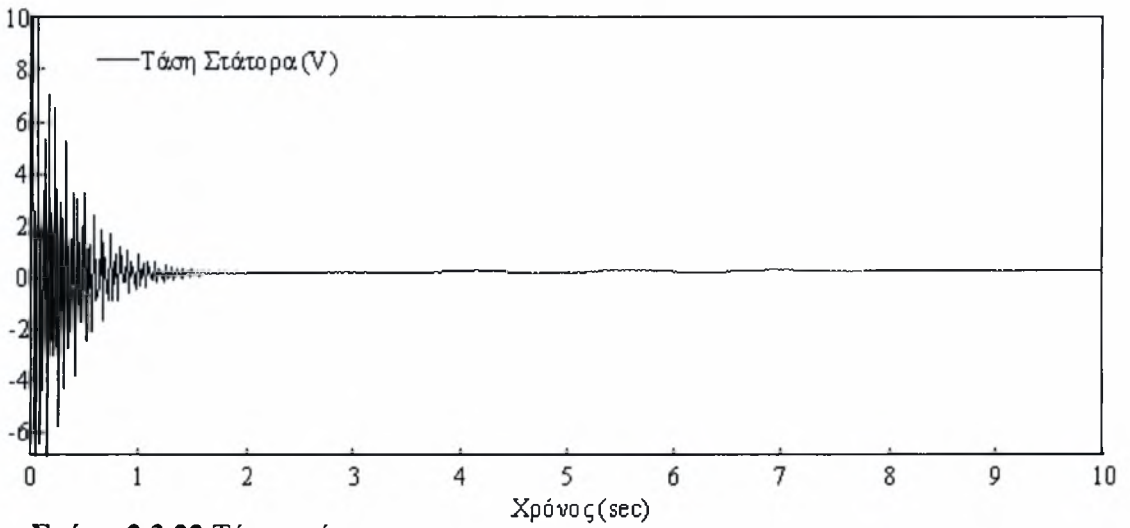
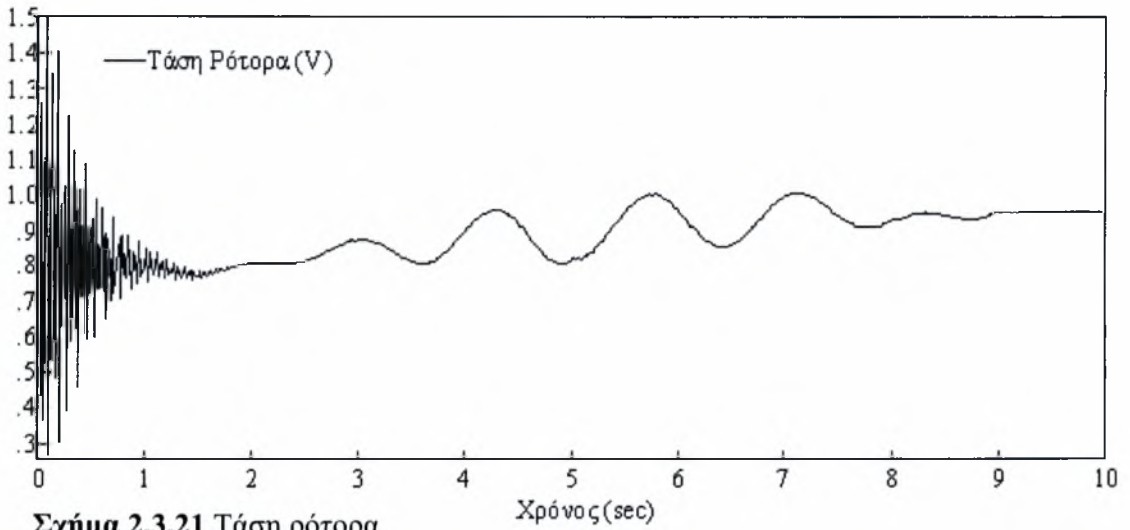


Σχήμα 2.3.19 Ρεύμα ρότορα



Σχήμα 2.3.20 Ρεύμα στάτορα

2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες



2.4 P-D Ελεγκτής σε DC Κινητήρες Σειριακής Διέγερσης

2.4.1 Περιγραφή του Μοντέλου

Το σύστημα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC) σειριακής διέγερσης περιγράφεται μαθηματικά από ένα σύστημα τριών γραμμικών διαφορικών εξισώσεων [1]. Η πρώτη εξίσωση αποτελεί εφαρμογή του μηχανικού ισοζυγίου για τον κινητήρα.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m = T_m - rT_i \quad (2.4.1)$$

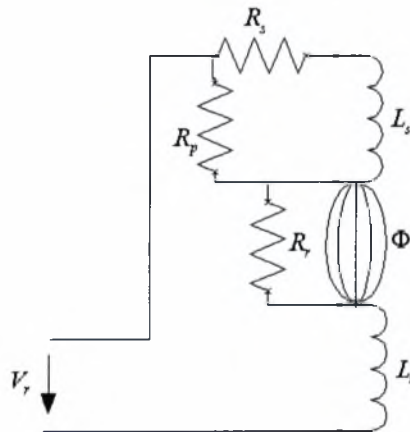
Η δεύτερη εξίσωση περιγράφει το ηλεκτρικό ισοζύγιο στο τύλιγμα του ρότορα.

$$L_r \frac{di_r}{dt} + R_r i_r + R_p (i_r - i_s) = V_r - V_b \quad (2.4.2)$$

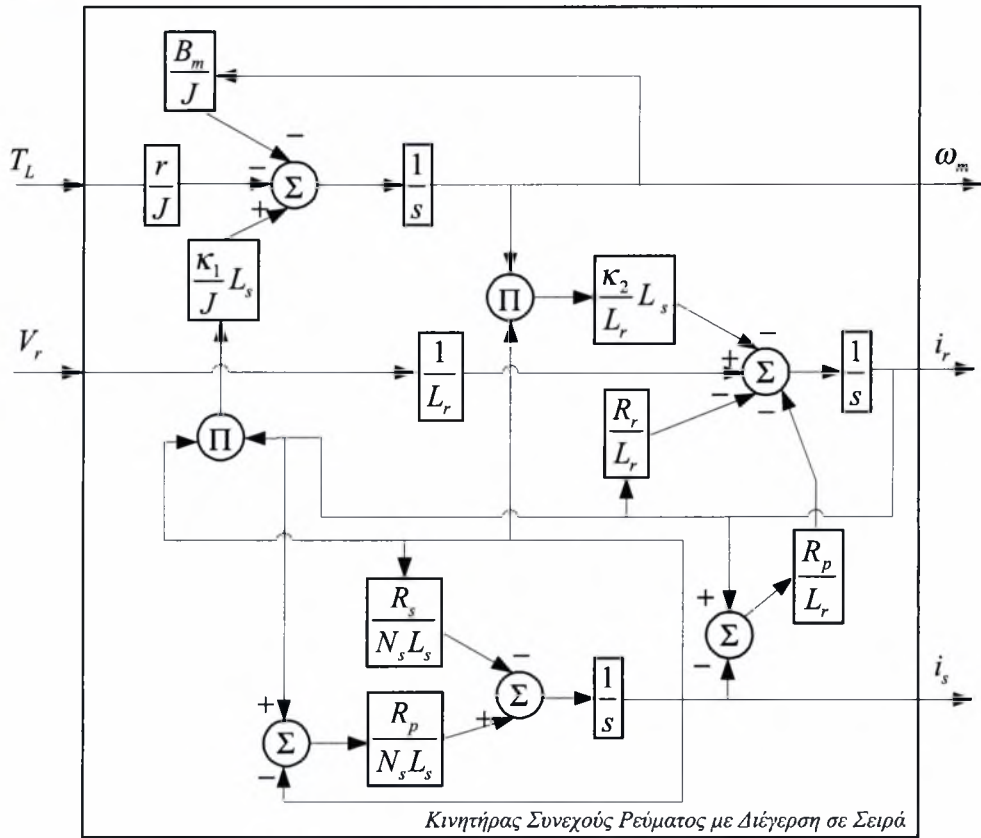
Η τρίτη εξίσωση περιγράφει το ηλεκτρικό ισοζύγιο στο τύλιγμα του στάτορα.

$$N_s L_s \frac{di_s}{dt} + R_s i_s = R_p (i_r - i_s) \quad (2.4.3)$$

Τα ηλεκτρικά ισοζύγια (2.4.2-2.4.3) αποτελούν την μαθηματική περιγραφή του κυκλώματος του Σχήματος 2.4.1



Σχήμα 2.4.1 Ηλεκτρικό Κύκλωμα κινητήρα διέγερσης σε σειρά



Σχήμα 2.4.2 Γραφική απεικόνιση του μοντέλου του κινητήρα

Η σύζευξη μεταξύ των εξισώσεων προέρχεται από τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και περιγράφεται από τις σχέσεις.

$$T_m = \kappa_1 \phi_s i_r, \quad V_b = \kappa_2 \phi_s \omega_m, \quad \phi_s = L_s i_s \quad (2.4.4)$$

Οπότε, το σύστημα των εξισώσεων που περιγράφει τον DC κινητήρα στον χώρο κατάστασης είναι ένα σύστημα μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων τρίτης τάξης.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\frac{B_m}{J} \omega_m + \frac{\kappa_1}{J} L_s i_r i_s - \frac{r}{J} T_l \quad (2.4.5a)$$

$$\frac{di_r}{dt} = -\frac{\kappa_2}{L_r} L_s i_s \omega_m - \frac{R_r}{L_r} i_r - \frac{R_p}{L_r} (i_r - i_s) + \frac{1}{L_r} V_r \quad (2.4.5b)$$

$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{R_s}{N_s L_s} i_s + \frac{R_p}{N_s L_s} (i_r - i_s) \quad (2.4.5c)$$

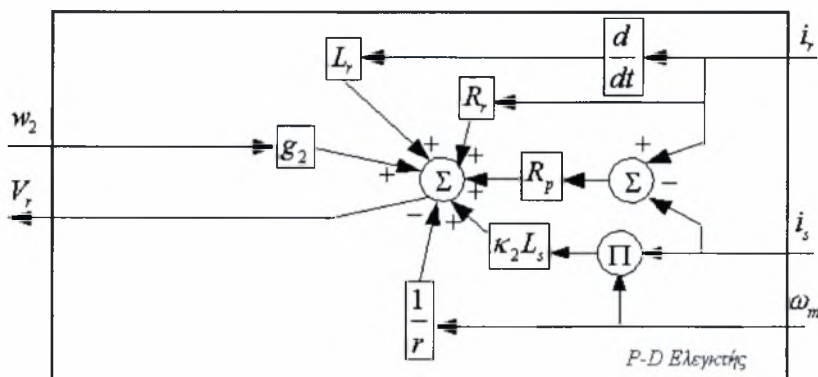
Η μεταβλητή απόδοσης του συστήματος επιλέγεται να είναι η γωνιακή ταχύτητα του φορτίου, ω_l . Η μεταβλητή ω_l σχετίζεται με το ω_m μέσω της σχέσης μετάδοσης r (π.χ. σε κιβώτιο μετάδοσης μεταξύ γραναζιών) με την σχέση (2.2.6).

2.4.2 Έλεγχος Ταχύτητας

Στο σύστημα (2.4.5a-2.4.5c) εφαρμόζεται ο P-D νόμος ελέγχου:

$$V_r = L_r \frac{di_r}{dt} + R_p(i_r - i_s) + \kappa_2 L_s i_s \omega_m - \frac{1}{r} \omega_m + R_r i_r + g w \quad (2.4.6)$$

ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.3



Σχήμα 2.4.3 P-D Ελεγκτής

αντικαθιστώντας τον ελεγκτή (2.4.6) στο μοντέλο του DC κινητήρα (2.4.5a-2.4.5c) σύστημα κλειστού βρόγχου που προκύπτει έχει την μορφή:

$$r g \frac{d w}{d t} = -\frac{B_m}{J} r g w + \frac{\kappa_1}{J} L_s i_r i_s - \frac{r}{J} T_l \quad (2.4.7a)$$

$$\frac{d i_s}{d t} = -\frac{R_s}{N_s L_s} i_s + \frac{R_p}{N_s L_s} (i_r - i_s) \quad (2.4.7b)$$

$$\omega_m = r g w \quad (2.4.7c)$$

και η μεταβλητή εξόδου ω_l παίρνει την μορφή:

$$\omega_l = g w \quad (2.4.7d)$$

Από την σχέση (2.4.7d) προκύπτει ότι με την χρήση του νόμου ανατροφοδότησης (2.4.6) έχει επιτευχθεί τέλειος έλεγχος ταχύτητας.

Η επίλυση του προβλήματος της επιλυσιμότητας και της ευστάθεια του συστήματος (2.4.7a-2.4.7d) βρίσκεται υπό διερεύνηση.

Μελετώντας την ευρωστία του συστήματος κλειστού βρόγχου παρουσιάζονται οι δυο τύποι αβεβαιοτήτων που μελετήθηκαν και στις προηγούμενες κατηγορίες κινητήρων. Η πρώτη είναι ο συντελεστής τριβής B_m και η δεύτερη είναι το σφάλμα της

2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες

παραγώγου του ρεύματος του ρότορα i_r , που συμβολίζεται με $e_d(t)$. Η παράγωγος του ρεύματος ($\frac{di_r}{dt}$) που υλοποιείται στον ελεγκτή αν ληφθεί υπόψη το σφάλμα είναι $\frac{di_r}{dt} + e_d(t)$. Το σφάλμα αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μια χρονομεταβλητή αβεβαιότητα με γρήγορες μεταβολές. Με το σφάλμα υλοποίησης της παραγώγου ο νόμος ελέγχου παίρνει την μορφή:

$$V_r = L_r \frac{di_r}{dt} + L_r e_d + \kappa_2 L_s i_s \omega_m + R_p (i_r - i_s) - \frac{1}{r} \omega_m + R_r i_r + g w \quad (2.4.8)$$

Αντικαθιστώντας τον ελεγκτή (2.4.8) στο μοντέλο του κινητήρα (2.4.7a-2.4.7c), το σύστημα κλειστού βρόγχου γίνεται: $\omega_m = r g w + L_r r e_d$ και η μεταβλητή εξόδου γίνεται $\omega_l = g w + L_r e_d$. Προκύπτει δηλαδή ότι το σφάλμα της μεταβλητής απόδοσης εξόδου $|\omega_l - g w(t)|$ είναι ίσο με $|L_r e_d|$, είναι γραμμικό ως προς το e_d και ανεξάρτητο του B_m . Κατά συνέπεια το σύστημα συμπεριφέρεται εύρωστα για κάθε B_m και για μικρό σφάλμα υλοποίησης της παραγώγου του ρεύματος e_d .

Για την υλοποίηση του νόμου ελέγχου, σημειώνεται ότι χρησιμοποιούνται μετρήσεις των μεταβλητών ω_l (ισοδύναμα του ω_m) που μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση οπτικού κωδικοποιητή και των i_s, i_r με την χρήση αμπερομέτρων.

2.4.3 Προσομοίωση DC Κινητήρα Σειριακής Διέγερσης

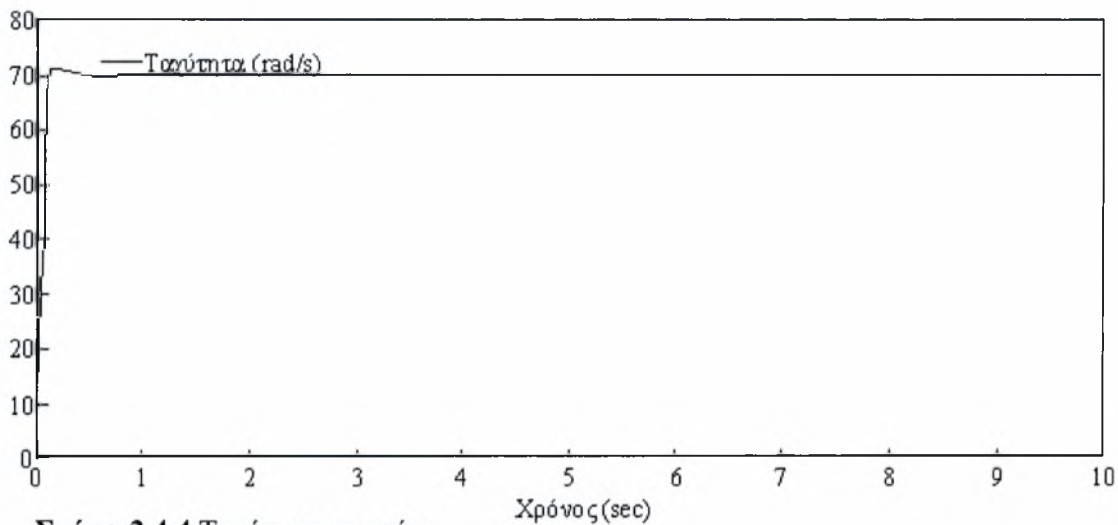
Τα παραπάνω αποτελέσματα θα εφαρμοστούν στον έλεγχο του κινητήρα συνεχούς ρεύματος που μελετήθηκε στην παράγραφο 2.3.3 με σειριακή σύνδεση των τυλιγμάτων του ρότορα και του στάτορα σύμφωνα με το Σχήμα 2.4.1. Οι παράμετροι του κινητήρα παραμένουν ως έχουν και επιπλέον ισχύει ότι: $N_s = 100$ [] και $R_p = 10^6$ [Ω]. Η άγνωστη ροπή παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.3.4.

Επιλέγοντας $g = 7$ ο P-D νόμος ανατροφοδότησης γίνεται:

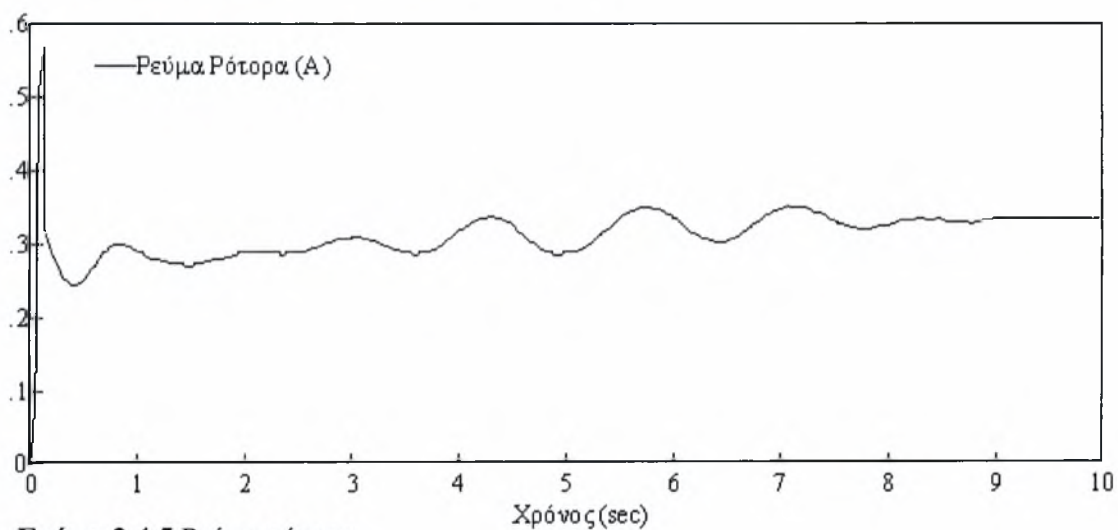
$$V_r = 0.04 \frac{di_r}{dt} + \sqrt{2} \cdot 10^{-4} i_s \omega_m + 10^6 (i_r - i_s) - \frac{1}{2} \omega_m + i_r + 7 w$$

Η εξωτερική εντολή w παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.3.5. Ο όρος της παραγώγου υλοποιήθηκε με την ίδια μέθοδο και δειγματοληψία ίση με 0.0001 [s]. Η απόδοση των

μεταβλητών του DC κινητήρα παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.4.4-2.4.8 όπου παρουσιάζονται όλες οι μεταβλητές του κινητήρα.

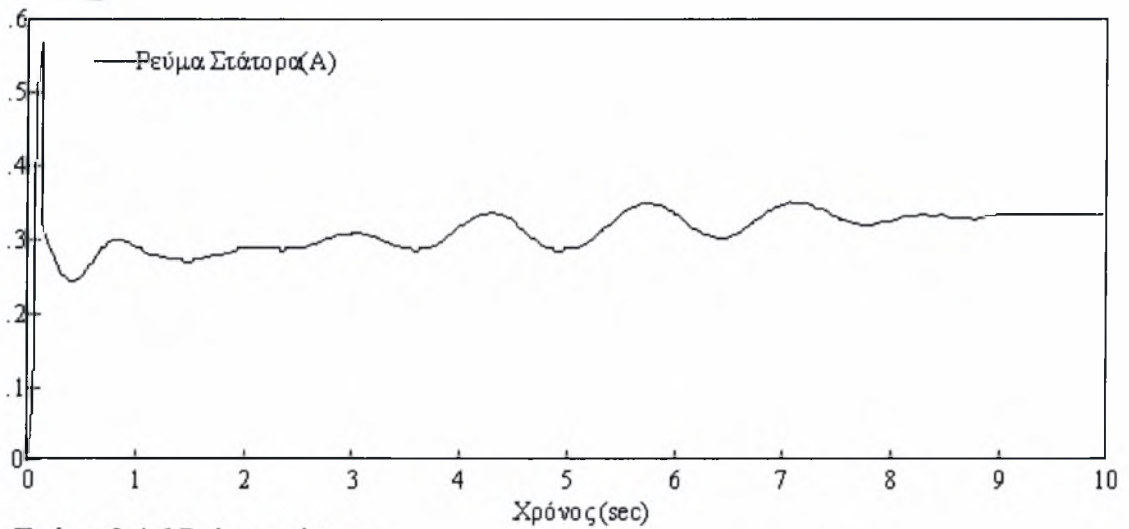


Σχήμα 2.4.4 Ταχύτητα κινητήρα

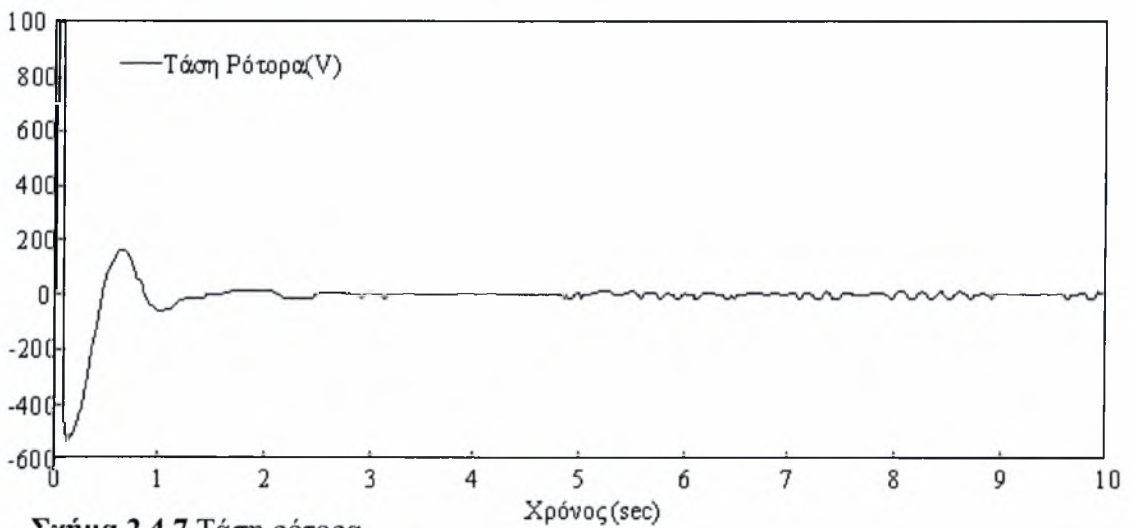


Σχήμα 2.4.5 Ρεύμα ρότορα

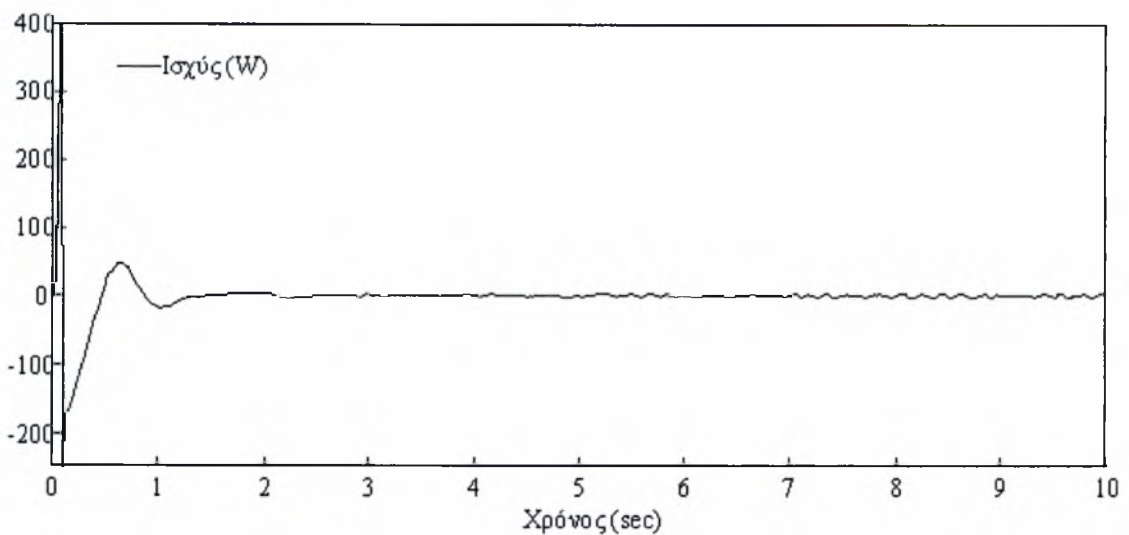
2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες



Σχήμα 2.4.6 Ρεύμα στάτορα



Σχήμα 2.4.7 Τάση ρότορα



Σχήμα 2.4.8 Καταναλισκόμενη ισχύς

2.5 Εκτίμηση της Ροπής Φορτίου

2.5.1 Σχέσεις Εκτίμησης της Ροπής Φορτίου

Από τα συστήματα κλειστού βρόγχου που προέκυψαν για τον κάθε τύπο κινητήρα μπορεί εκτιμηθεί η ροπή του φορτίου. Επιπλέον για σταθερή εντολή ταχύτητας προκύπτει μια απλούστερη σχέση υπολογισμού του άγνωστου εξωτερικά ασκούμενου φορτίου στον κινητήρα. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την μέτρηση των ρευμάτων. Συγκεκριμένα για κινητήρα σταθερού μαγνήτη από το σύστημα κλειστού βρόγχου για έλεγχο ταχύτητας (2.2.10a-2.2.10c) προκύπτει από την σχέση (2.2.10a) με κατάλληλη επίλυση ως προς T_l το εξωτερικό φορτίο. Για την περίπτωση της σταθερής ταχύτητας, επειδή $\frac{dw}{dt} = 0$ προκύπτει ότι:

$$\hat{T}_l = \frac{k_m}{r} i_r(t) - B_m g w \quad (2.5.1)$$

Αν θεωρηθεί την τριβή σαν αβεβαιότητα και την συμπεριληφθεί στην άγνωστη εξωτερικά ασκούμενη ροπή τότε η παραπάνω σχέση θα πάρει την μορφή:

$$\hat{T}_l' = \frac{k_m}{r} i_r(t) \quad (2.5.2)$$

Από τις σχέσεις αυτές προκύπτει το συμπέρασμα ότι η άγνωστη ροπή είναι ευθέως ανάλογη με το ρεύμα του ρότορα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

Στον κινητήρα παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον ρότορα αν εφαρμοσθεί ο ελεγκτής που προτείνεται στην σχέση (2.3.8) από το σύστημα κλειστού βρόγχου (2.3.9a-2.3.9d) με κατάλληλη επίλυση της σχέσης (2.3.9a) ως προς T_l προκύπτει το άγνωστο εξωτερικό φορτίο. Για σταθερή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα θα είναι:

$$\hat{T}_l = \frac{K_1 L_s}{r} i_r(t) i_s(t) - B_m g w \quad (2.5.3)$$

και αν συμπεριληφθεί στο φορτίο η τριβή:

$$\hat{T}_l' = \frac{K_1 L_s}{r} i_r(t) i_s(t) \quad (2.5.4)$$

2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες

Από τις σχέσεις (2.5.3-2.5.4) συμπεραίνεται ότι η άγνωστη ροπή είναι ευθέως ανάλογη με το γινόμενο των ρευμάτων του ρότορα και του στάτορα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.

Για κινητήρα παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον στάτορα και σταθερή ταχύτητα περιστροφής προκύπτουν εύκολα οι ίδιες σχέσεις.

Για την περίπτωση του κινητήρα παράλληλης διέγερσης με έλεγχο ταχύτητας και ρεύματος (2.3.15a-2.3.15d) με κατάλληλη επίλυση της σχέσης (2.3.15a) ως προς T_i προκύπτει το άγνωστο εξωτερικό φορτίο. Για σταθερή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα προκύπτει ότι:

$$\hat{T}_i = \frac{g_2 w_2 K_1 L_s}{r} i_s(t) - B_m g_1 w_1 \quad (2.5.5)$$

και

$$\hat{T}_i' = \frac{g_2 w_2 K_1 L_s}{r} i_s(t) \quad (2.5.6)$$

για άγνωστο συντελεστή τριβής στον κινητήρα. Και σε αυτό το σύστημα κλειστού βρόγχου κινητήρα-ελεγκτή προκύπτει ότι η ροπή είναι ανάλογη με το ρεύμα του στάτορα.

Τέλος για κινητήρα σειριακής διέγερσης με εφαρμογή τέλειου ελέγχου ταχύτητας η άγνωστη ροπή μπορεί να υπολογιστεί από τις Σχέσεις (2.4.5a) και (2.5.3), (2.5.4) για σταθερή ταχύτητα και γνωστό και άγνωστο συντελεστή τριβής αντίστοιχα.

2.5.2 Σφάλμα Εκτίμησης

Με την χρήση των προτεινόμενων P-D νόμων ελέγχου η εκτίμηση του άγνωστου εξωτερικά ασκούμενου φορτίου μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με χαμηλό κόστος και με μεγάλη ακρίβεια με την μέτρηση των ρευμάτων σε κάθε περίπτωση. Το σφάλμα εκτίμησης θα προκύψει με την αντικατάσταση στο μοντέλο του κάθε κινητήρα του ελεγκτή με το σφάλμα υλοποίησης της παραγωγού που εξετάσθηκε στην κάθε περίπτωση. Σε όλα τα μοντέλα των κινητήρων προκύπτει ότι η μεταβλητή εξόδου ω_m παίρνει την μορφή:

$$\omega_m = rgw + L_i r e_d \quad (2.5.7)$$

όπου με L_i παριστάνεται ο συντελεστής αυτεπαγωγής του τυλίγματος στο οποίο έχει εφαρμοστεί ο νόμος ελέγχου. Με αντικατάσταση της παραπάνω σχέσης στο μηχανικό

ισοζύγιο για τον κινητήρα σταθερού μαγνήτη και παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον στάτορα θα προκύψει για το σφάλμα εκτίμησης της ροπής e_T ότι:

$$|e_T| = \left| JL_r \frac{de_d}{dt} + B_m L_r e_d \right| \quad (2.5.8)$$

Στην περίπτωση του κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης με έλεγχο ταχύτητας και ρεύματος το σφάλμα της εκτίμησης της ροπής θα είναι:

$$|e_T| = \left| JL_s \frac{de_{d1}}{dt} + B_m L_s e_{d1} + \frac{\kappa_1 L_s L_r i_s}{r} e_{d2} \right| \quad (2.5.9)$$

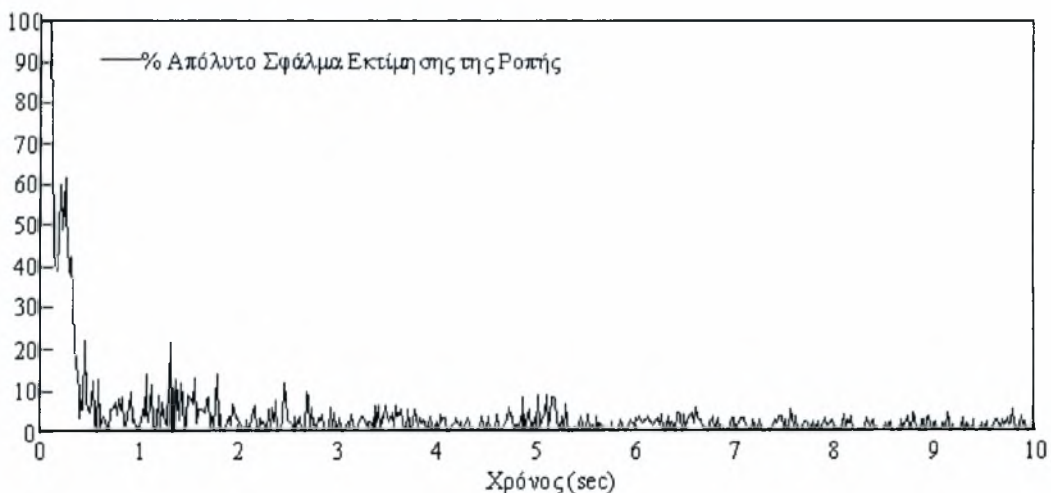
όπου e_{d1} , e_{d2} είναι τα σφάλματα υλοποίησης των παραγώγων για την ταχύτητα και το ρεύμα αντίστοιχα. Όπως διαπιστώνεται το σφάλμα της εκτίμησης είναι ανάλογο με το σφάλμα υλοποίησης της παραγώγου και της παραγώγου του στις παραπάνω περιπτώσεις.

Στον κινητήρα παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον ρότορα από το σύστημα κλειστού βρόγχου προκύπτει ότι το σφάλμα υλοποίησης της παραγώγου υπεισέρχεται και στο ηλεκτρικό ισοζύγιο του ρότορα και το σφάλμα εκτίμησης της ροπής προκύπτει από το σύστημα των εξισώσεων (2.5.10a-2.5.10b) με είσοδο το T_l .

$$rg \frac{dw}{dt} + L_s r \frac{de_d}{dt} = -\frac{B_m}{J} (rgw + L_s r e_d) + \frac{\kappa_1}{J} L_s i_r i_s - \frac{r}{J} T_l \quad (2.5.10a)$$

$$\frac{di_r}{dt} = -\frac{\kappa_2}{L_r} L_s i_s (rgw + L_s r e_d) - \frac{R_r}{L_r} i_r + \frac{1}{L_r} V_r \quad (2.5.10b)$$

Παρουσιάζεται στην συνέχεια το % απόλυτο σφάλμα που προκύπτει από την εκτίμηση της ροπής για κινητήρα παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον ρότορα στο Σχήμα 2.5.1.



Σχήμα 2.5.1 Απόλυτο % σφάλμα εκτίμησης της ροπής για κινητήρα παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον ρότορα

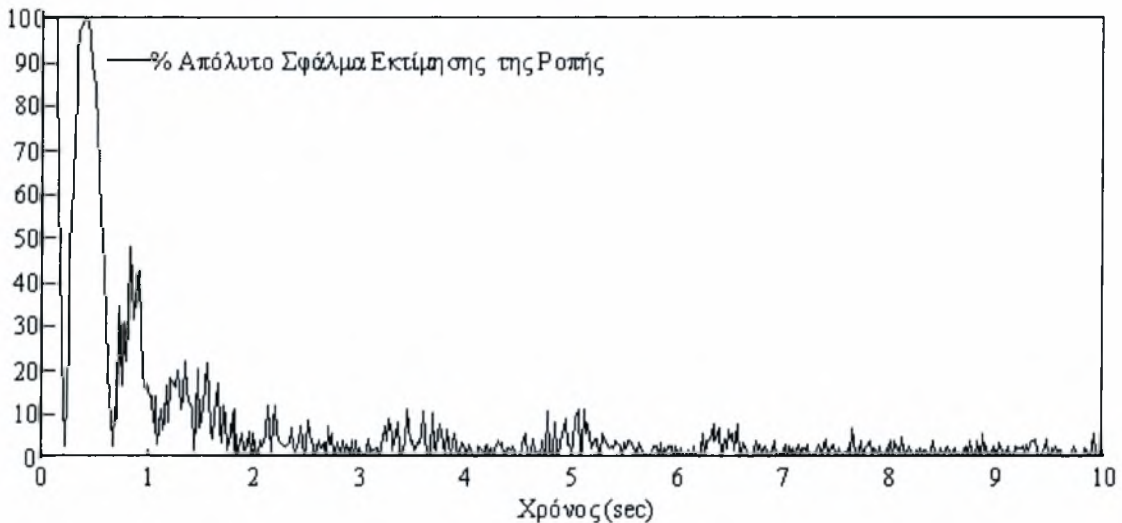
2 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε DC Κινητήρες

Στον κινητήρα σειριακής διέγερσης από το σύστημα κλειστού βρόγχου προκύπτει ότι το σφάλμα υλοποίησης της παραγώγου υπεισέρχεται και στο ηλεκτρικό ισοζύγιο του ρότορα και το σφάλμα εκτίμησης της ροπής προκύπτει από το σύστημα των εξισώσεων (2.5.11a-2.5.11b) με είσοδο το T_l .

$$rg \frac{dw}{dt} + L_r r \frac{de_d}{dt} = -\frac{B_m}{J} (rgw + L_r r e_d) + \frac{\kappa_1}{J} L_s i_r i_s - \frac{r}{J} T_l \quad (2.5.11a)$$

$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{R_s}{N_s L_s} i_s + \frac{R_p}{N_s L_s} (i_r - i_s) \quad (2.5.11b)$$

Στο Σχήμα 2.5.2 παρουσιάζεται το % απόλυτο σφάλμα που προκύπτει για την εκτίμηση της ροπής σε κινητήρα με σειριακή διέγερση.



Σχήμα 2.5.2 Απόλυτο % σφάλμα εκτίμησης της ροπής για κινητήρα σειριακής διέγερσης

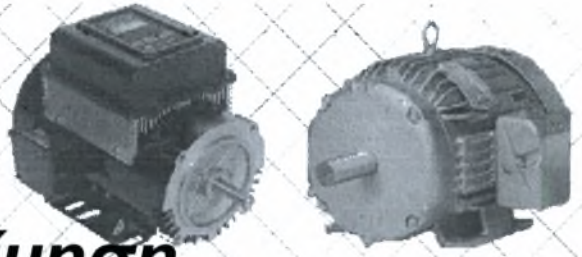
Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 2.5.1 και 2.5.2 αρχικά το απόλυτο % σφάλμα εκτίμησης της ροπής φτάνει το 700% και 1100% αντίστοιχα το οποίο όμως μειώνεται και σταθεροποιείται σε ένα επίπεδο 5%-10%. Η σταθεροποίηση επιτυγχάνεται μέσα σε χρονικό διάστημα μικρότερο από 1sec και το μεγάλο ποσοστό σφάλματος οφείλεται στο ότι το σύστημα κλειστού βρόγχου δεν έχει φτάσει σε μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, η ταχύτητα του κινητήρα δεν έχει ακολουθήσει ακόμη πλήρως την εξωτερική εντολή και μεταβάλλεται πολύ γρήγορα.



Βιβλιογραφία-Αρθρογραφία

- [1] Leonard W. *Control of electrical drives 2nd edition*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996.
- [2] Σ. Ν. Βασιλακόπουλος: *Ηλεκτρικές Μηχανές*, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα 1983
- [3] Lyshevski S. E.(1998) Nonlinear control of mechatronic systems with permanent-magnet DC motors. *Mechatronics*, vol. 9, 539-552.
- [4] David M. Alter and Tsu-Chin Tsao: “Control of Linear Motors for Machine Tool Feed Drives: Experimental Investigation of Optimal Feedforward Tracking Control”, *Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.120, pp.137-142, March 1998
- [5] Ahmed Rubaai and Raj Kotaru: “Neural Net-Based Robust Controller Design for Brushless DC Motor Drives”, *IEEE Transactions on Systems Man, and Cybernetics*, Vol. 29, No. 3, pp. 460-474, August 1999
- [6] Seok-Hee Han, Young-Hoon Kim, and In-Joong Ha: “ Iterative Identification of State-Dependent Disturbance Torque for High-Precision Velocity Control of Servo Motors”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 43, No. 5, pp. 724-729 May 1998
- [7] M.D. Minkova, D. Minkov, J. L. Rodgerson and R. G. Harley: “Adaptive neural speed controller of a DC motor”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 47 pp.123-132, 1998
- [8] Chee W. Lu: “ Torque Controller for Brushless DC Motors”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 46, No. 2, pp.471-473, April 2000
- [9] Chern T. L.,Chuang C. W. and Rong L. J. (1996) Design of discrete integral variable structure control systems and application to a brushless DC motor control. *Automatica* Vol.32, No. 5,pp 773-779.
- [10] Wander G. da Silva, Paul P. Acarnley and John W. Finch: “Application of Genetic Algorithms to the Online Tuning of Electric Drive Speed Controllers”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 1, pp.217-219, February 2000
- [11] Φ. Ν. Κουμπουλής: “Βιομηχανικός Έλεγχος”, Αθήνα 1999

- [12] P. N. Paraskevopoulos, F. N. Koumboulis and C. J. Zervas, "Perfect output control for non square generalized state space systems", *IEE Proceedings, Part D, Control Theory and Applications*, vol.142, pp. 119-122, 1995
- [13] F. N. Koumboulis and B. G. Mertzios, "Feedback Controlling Against Chaos", *Chaos Solitons and Fractals*, vol. 11, pp. 351-358, 2000
- [14] Β. Γ. Μέρτζιος: "Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου", Ξάνθη 1997
- [15] H. K. Khalil: *Nonlinear Systems*, Prentice-Hall, New Jersey, 1996



Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε AC Κινητήρες

3

Ονοματολογία Συμβόλων

F : Συντελεστής τριβής

i_d, i_q : Ρεύματα του στάτορα σε dq σύστημα συντεταγμένων

i_{sa}, i_{sb} : Ρεύματα στον στάτορα

J : Ροπή αδράνειας του κινητήρα

L_d, L_q : Αυτεπαγωγή του στάτορα σε dq σύστημα συντεταγμένων

L_r, L_s, M : Αυτεπαγωγή του ρότορα, του στάτορα και η αμοιβαία επαγωγή

P : Ο αριθμός των ζευγών πόλων

R : Αντίσταση του στάτορα

R_r, R_s : Αντίσταση του ρότορα και του στάτορα

T_l : Εξωτερικά ασκούμενη ροπή

\hat{T}_l, \hat{T}_l' : Εκτιμώμενη ροπή φορτίου και εκτιμώμενη ροπή φορτίου συμπεριλαμβανομένης της τριβής

V_{sa}, V_{sb} : Τάσεις στον στάτορα σε ab σύστημα συντεταγμένων

V_d, V_q : Τάσεις του στάτορα σε dq σύστημα συντεταγμένων

Φ : Μαγνητική ροή

ψ_{ra}, ψ_{rb} : Μαγνητικές ροές του ρότορα

$\hat{\psi}_{ra}, \hat{\psi}_{rb}$: Μαγνητικές ροές του ρότορα όπως προκύπτουν από τον παρατηρητή

ω_m : Γωνιακή ταχύτητα του φορτίου και του άξονα του κινητήρα

3.1 Εισαγωγικά Στοιχεία για AC Κινητήρες

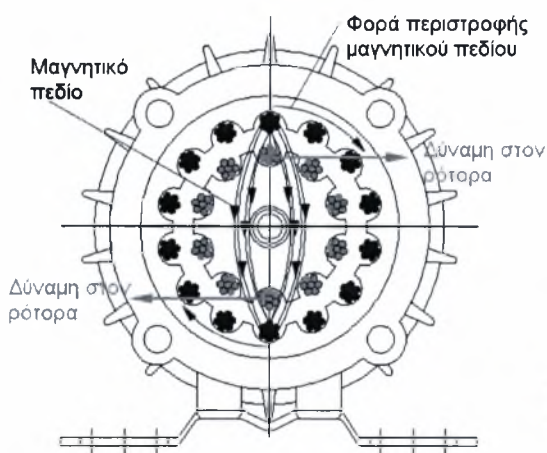
3.1.1 Γενικά Στοιχεία-Εφαρμογές

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (Alternating Current, AC), είναι ευρύτερα διαδεδομένοι τόσο σε βιομηχανικές εφαρμογές, όσο και σε οικιακές συσκευές, εξαιτίας της άμεσης σύνδεσής τους με το ηλεκτρικό δίκτυο. Σε βιομηχανικές κυρίως εφαρμογές αξίζει να σημειωθεί τείνουν να επικρατήσουν οι τριφασικοί AC κινητήρες [1], [2]. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ευρύτερα σε διατάξεις που τροφοδοτούνται απευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο καθώς και όπου υπάρχει ανάγκη για απόδοση μεγάλης ισχύος. Με τους κινητήρες AC που τροφοδοτούνται στα 220[V] δεν είναι απαραίτητη η χρήση διατάξεων μετασχηματισμού του ηλεκτρικού ρεύματος μειώνοντας πολύ το κόστος. Η απλούστερη κατασκευή τους (συνήθως χωρίς διάταξη εναλλαγής πολικότητας, που μειώνει σημαντικά την στιβαρότητα), η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους, και η μικρότερη ανάγκη για συντήρηση ενισχύουν την θέση τους σε σχέση με τους DC κινητήρες [2]. Η απουσία συλλέκτη στους επαγωγικούς κινητήρες επιτρέπει την χρήση τους σε εύφλεκτο περιβάλλον και σε περιβάλλον υψηλής υγρασίας. Οι κινητήρες AC παρουσιάζουν πολύ καλά χαρακτηριστικά ανάλογα με τον τύπο τους. Οι σύγχρονοι κινητήρες χαρακτηρίζονται από ευκολία ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής τους. Όλοι οι κινητήρες AC έχουν μεγάλη ονομαστική ισχύ που φτάνει μερικές φορές μέχρι και 300[HP] και έχουν καλό βαθμό αποδόσεως σε μεγάλο εύρος στροφών. Τέλος οι σύγχρονοι κινητήρες έχουν την δυνατότητα να βελτιώνουν τον συντελεστή ισχύος μιας εγκατάστασης ή γενικότερα ενός δικτύου. Στην περίπτωση αυτή γίνεται εκμετάλλευση της ιδιότητας τους να φορτίζουν το δίκτυο χωρητικά και στην περίπτωση αυτή ονομάζονται σύγχρονοι πυκνωτές ή σύγχρονοι αντισταθμιστές [1], [2]. Για όλους τους παραπάνω λόγους οι εφαρμογές τους είναι ευρύτατες.

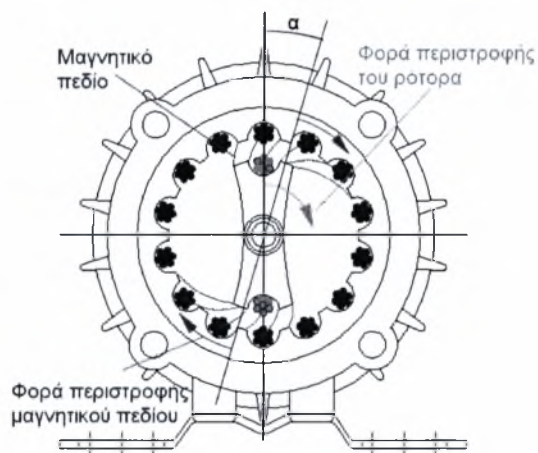
Το κυριότερο μειονέκτημα των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος εμφανίζεται σε περιπτώσεις όπου είναι αναγκαία σημαντική ακρίβεια στην περιστροφική τους ταχύτητα. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος μεγάλου κόστους και υψηλής ποιότητας [2], [3].

3.1.2 Αρχές Λειτουργίας- Περιγραφή

Η λειτουργία των ασύγχρονων κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα (induction motors) βασίζεται στο φαινόμενο της δημιουργίας ηλεκτρεγερτικής δύναμης από επαγωγή στους αγωγούς του ρότορα. Όταν τροφοδοτηθεί ο στάτορας με εναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργείται περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με ένα ζεύγος πόλων. Οι μαγνητικές γραμμές τέμνουν τα τυλίγματα του ρότορα όπου δημιουργείται ηλεκτρεγερτική δύναμη με φορά που δίνεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού. Εξαιτίας των ρευμάτων που δημιουργούνται στα τυλίγματα του ρότορα δημιουργείται ζεύγος δυνάμεων που ασκείται στον ρότορα όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.1. Το ζεύγος δυνάμεων προκαλεί την ροπή που τελικά θα περιστρέψει τον κινητήρα [1]-[3].



Σχήμα 3.1.1 Τομή ασύγχρονου κινητήρα



Σχήμα 3.1.2 Τομή σύγχρονου κινητήρα

Τα ρεύματα που δημιουργούνται στον ρότορα είναι εναλλασσόμενα αλλά έχουν τέτοια φορά ώστε η ροπή να είναι πάντα ομόρροπη. Το ίδιο συμβαίνει και για τους υπόλοιπους αγωγούς στον ρότορα και αν ο στάτορας έχει περισσότερους πόλους. Στους κινητήρες με δακτυλίους η αρχή λειτουργίας είναι παρόμοια. Ο ρότορας περιστρέφεται εξαιτίας της ροπής που του ασκείται και επιταχύνεται μέχρι να φτάσει σε μια σταθερή ταχύτητα πάντα μικρότερη από την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (σύγχρονη ταχύτητα) [2]. Η διαφορά ταχύτητας οφείλεται στο φορτίο που ασκείται εξαιτίας των τριβών ή στο εξωτερικά ασκούμενο φορτίο και αυξάνεται με αυτό [1], [2].

Οι σύγχρονοι κινητήρες (synchronous motors) τροφοδοτούνται στον στάτορα με εναλλασσόμενο ρεύμα και στον ρότορα με συνεχές. Στον στάτορα σχηματίζεται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο όπως παριστάνεται στο Σχήμα 3.1.2. Το

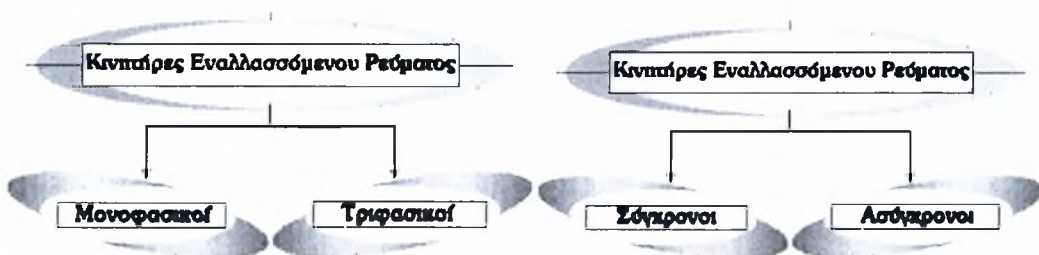
3 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε AC Κινητήρες

περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο έλκει το σταθερό μαγνητικό πεδίο του ρότορα που περιστρέφεται μόνο σε ταχύτητα ίση με την σύγχρονη ταχύτητα. Οι δυνάμεις αυτές προκαλούν την ροπή η οποία ασκείται στον ρότορα [2]. Η γωνία α που σχηματίζεται μεταξύ του ρότορα και του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου αυξάνει με το φορτίο και για μηδενικό φορτίο είναι αμελητέα. Αν όμως η γωνία αυξηθεί σε τιμή περίπου ίση με το μισό της αποστάσεως μεταξύ δυο μαγνητικών πόλων λόγω αύξησης του φορτίου τότε ο δρομέας σταματά απότομα και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται απαγκίστρωση. Οι σύγχρονοι κινητήρες μπορούν δηλαδή να λειτουργήσουν σε ταχύτητα ίση με την σύγχρονη ταχύτητα. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι κινητήρες αυτού του τύπου δεν μπορούν να ξεκινήσουν μόνοι τους [1], [2].

Για την εκκίνηση τους συνήθως χρησιμοποιείται ή ένας ασύγχρονος κινητήρας και μία διάταξη συγχρονισμού με την συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου ή με μια διάταξη τυλίγματος κλωβού στον ρότορα για την εκκίνηση του σαν ασύγχρονο κινητήρα. Μόλις η ταχύτητα φτάσει τιμή μικρότερη κατά 2-5% της σύγχρονης ταχύτητας ο ρότορας τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα και αυτοσυγχρονίζεται. Η διάταξη αυτή είναι προτιμότερη για την εκκίνηση των σύγχρονων κινητήρων μιας και εκτός του μειωμένου κόστους και της απλούστερης κατασκευής υπάρχει η δυνατότητα εκκίνησης τους και με φορτίο [1].

3.1.3 Κατηγορίες AC κινητήρων

Οι AC κινητήρες μπορούν να χωριστούν με δύο κριτήρια σε τέσσερις βασικές κατηγορίες [1], [2]. Οι κατηγορίες αυτές παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 3.1.3.



Σχήμα 3.1.3 Κατηγορίες AC κινητήρων

Ο διαχωρισμός σε μονοφασικούς και τριφασικούς γίνεται με βάση την τροφοδοσία τους και κατά συνέπεια τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους [2].



Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και διφασικοί κινητήρες οι οποίοι όμως χρησιμοποιούνται αρκετά σπάνια. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο δεν αναφέρονται στο Σχήμα 3.1.3. Οι σύγχρονοι κινητήρες συναντώνται σπανιότερα από τους ασύγχρονους σε εξειδικευμένες εφαρμογές και συνήθως χρησιμοποιούνται οι τριφασικοί σύγχρονοι κινητήρες, ισχύος μεγαλύτερης από 100kW, όταν απαιτείται ακριβής έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής. Οι σύγχρονοι κινητήρες χωρίζονται σε διπολικούς τριπολικούς κτλ ανάλογα με τον αριθμό των μαγνητικών πόλων [1]. Στο Σχήμα 3.1.2 παρουσιάζεται ένας διπολικός σύγχρονος κινητήρας [2]. Οι ασύγχρονοι ή επαγωγικοί μονοφασικοί κινητήρες συναντώνται συχνότερα σε οικιακές συσκευές και οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες έχουν επικρατήσει στις βιομηχανικές εφαρμογές [2]. Οι ασύγχρονοι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω με βάση τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους σε κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα, απλού ή διπλού κλωβού, κινητήρες βαθιάς αύλακος και σε κινητήρες με δακτυλίους [2].

3.1.4 Έλεγχος AC Κινητήρων

Το πρόβλημα του ελέγχου των AC κινητήρων παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και οι νόμοι έλεγχου που έχουν σχεδιαστεί αποσκοπούν συνήθως στον έλεγχο ταχύτητας (ή θέσης) [1], [3]-[9], και σπανιότερα συνολικής μαγνητικής ροής [3], [8] ή ρεύματος [9]. Μετά την δεκαετία του 70 έντονο ενδιαφέρον παρουσιάζει η έρευνα στην εφαρμογή μη γραμμικών νόμων ελέγχου [3], [6], [8] και την τελευταία κυρίως δεκαετία η χρήση ελεγκτών βασισμένων σε νευρωνικά δίκτυα [10]. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει τέλος και η εκτίμηση του φορτίου του κινητήρα [3], [5], [8]-[10], [11]. Ειδικά στους σύγχρονους κινητήρες χρησιμοποιούνται νόμοι ελέγχου που αποσκοπούν κυρίως στον έλεγχο της ταχύτητας τους [5], [6]. Όπως σημειώθηκε η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ένας σύγχρονος κινητήρας εξαρτάται από την συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας του. Έτσι με την χρήση νόμων ελέγχου είναι δυνατή η κατάλληλη μεταβολή της συχνότητας για την ακολούθηση της επιθυμητής εντολής ταχύτητας. Στην παρούσα εργασία εφαρμόζονται μη γραμμικοί νόμοι ελέγχου ανατροφοδότησης τύπου P-D. Σχεδιαστικός στόχος είναι κατά κύριο λόγο ο έλεγχος της ταχύτητας, και κατά δεύτερο της συνολικής μαγνητικής ροής και του ρεύματος για τον επαγωγικό και τον σύγχρονο κινητήρα αντίστοιχα.

3.2 P-D Ελεγκτής σε Επαγωγικό AC Κινητήρα

3.2.1 Περιγραφή του Μοντέλου και του P-D Ελεγκτή

Το μοντέλο ενός ασύγχρονου τριφασικού επαγωγικού κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να εκφραστεί με ένα πέμπτης τάξης σύστημα μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων. [1], [3], [8] Το σύστημα μπορεί να απλοποιηθεί σε ένα σύστημα 2 φάσεων, με τον μετασχηματισμό της εξίσωσης (3.2.1)

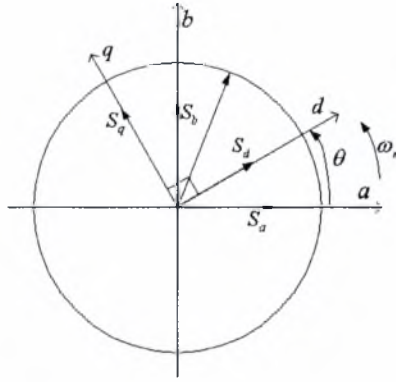
$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{sa} \\ S_{sb} \\ S_{s0} \end{bmatrix} \quad (3.2.1)$$

όπου S_a, S_b, S_c και S_{sa}, S_{sb}, S_{s0} οι ποσότητες του στάτορα ή του ρότορα σε τρεις και δυο φάσεις αντίστοιχα και $S_{s0} = 0$. Το μοντέλο του κινητήρα σε σύστημα δύο φάσεων ab παίρνει την μορφή που περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_m \\ \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3\mu}{2}(\psi_{ra}i_{sb} - \psi_{rb}i_{sa}) - \frac{F}{J}\omega_m \\ -\alpha\psi_{ra} - P\omega_m\psi_{rb} + \alpha Mi_{sa} \\ P\omega_m\psi_{ra} - \alpha\psi_{rb} + \alpha Mi_{sb} \\ \alpha\beta\psi_{ra} + P\beta\omega_m\psi_{rb} - \gamma i_{sa} \\ -P\beta\omega_m\psi_{ra} + \alpha\beta\psi_{rb} - \gamma i_{sb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{J} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} T_L + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \end{bmatrix} \quad (3.2.2)$$

$$\text{όπου } \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}, \quad a = \frac{R_r}{L_r}, \quad \mu = \frac{PM}{JL_r}, \quad \gamma = \frac{M^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma L_s}, \quad \beta = \frac{M}{\sigma L_s L_r}.$$

Το μοντέλο μπορεί να περιγραφεί και σε σύστημα συντεταγμένων dq με παρόμοιες σχέσεις. Η μετατροπή από το σύστημα ab στο σύστημα dq και αντίστροφα βασίζεται στο Σχήμα (3.2.1).



Σχήμα 3.2.1 Μετατροπή μεταξύ των συστημάτων συντεταγμένων ab , dq

Εφαρμόζοντας στο μοντέλο του επαγωγικού AC κινητήρα τον ακόλουθο P-D νόμου ελέγχου [3], [8]:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \end{bmatrix} = \sigma L_s \begin{bmatrix} i_{sa}(t) \\ i_{sb}(t) \end{bmatrix} - \sigma L_s \begin{bmatrix} \alpha \beta \psi_{ra}(t) + P \beta \omega_m(t) \psi_{rb}(t) - \gamma i_{sa}(t) \\ -P \beta \omega_m(t) \psi_{ra}(t) + \alpha \beta \psi_{rb}(t) - \gamma i_{sb}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_m(t) \\ \psi_{ra}^2(t) + \psi_{rb}^2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} \quad (3.2.3)$$

όπου $v_1(t)$ και $v_2(t)$ είναι οι εξωτερικές εντολές για την ταχύτητα και την μαγνητική ροή αντίστοιχα το σύστημα κλειστού βρόγχου που προκύπτει παίρνει την μορφή [3], [8]:

$$\begin{bmatrix} \omega_m \\ \hat{\psi}_{ra}^2 + \hat{\psi}_{rb}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3.2.4a)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_1 \\ \hat{\psi}_{ra} \\ \hat{\psi}_{rb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3\mu}{2} (\hat{\psi}_{ra} i_{sb} - \hat{\psi}_{rb} i_{sa}) - \frac{F}{J} v_1 \\ \alpha \hat{\psi}_{ra} - P v_1 \hat{\psi}_{rb} + \alpha M i_{sa} \\ P v_1 \hat{\psi}_{ra} - \alpha \hat{\psi}_{rb} + \alpha M i_{sb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} T_L \quad (3.2.4b)$$

όπου η εκτίμηση της μαγνητικής ροής προκύπτει με βάση την ακόλουθη εξίσωση του παρατηρητή [3], [8]:

$$\begin{bmatrix} \hat{\psi}_{ra} \\ \hat{\psi}_{rb} \end{bmatrix} = \frac{1}{\beta(\alpha^2 + P^2 \omega_m^2)} \begin{bmatrix} \alpha & -P \omega_m \\ P \omega_m & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sa}}{dt} + \gamma i_{sa} - \frac{1}{\sigma L_s} V_{sa} \\ \frac{di_{sb}}{dt} + \gamma i_{sb} - \frac{1}{\sigma L_s} V_{sb} \end{bmatrix} \quad (3.2.5)$$

Είναι φανερό ότι έχει γίνει τέλειος έλεγχος της ταχύτητας και της συνολικής μαγνητικής ροής [3], [8], [12], [13].

3.2.2 Εκτίμηση της Ροπής

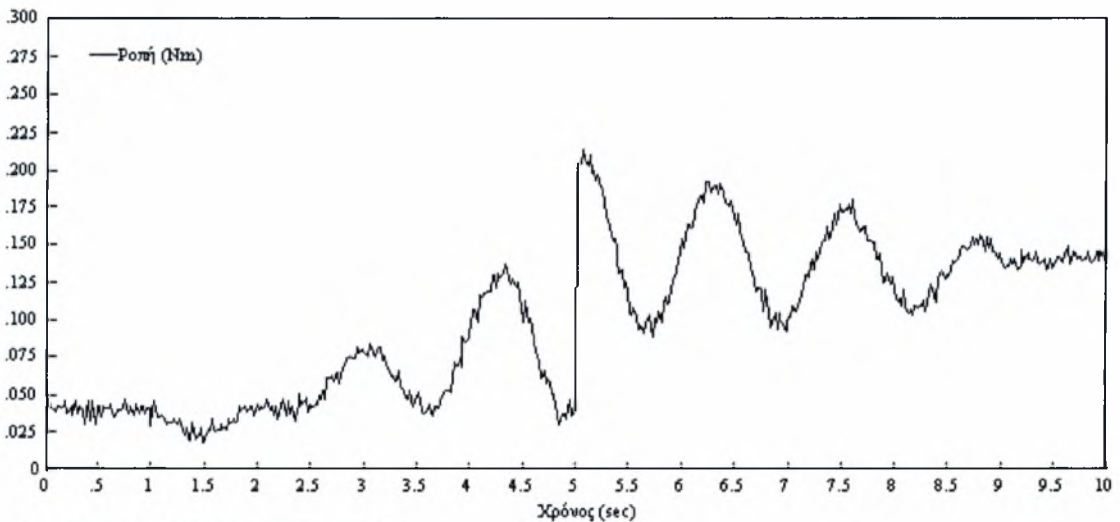
Από το σύστημα κλειστού βρόγχου η εκτιμώμενη ροπή έστω \hat{T}_l μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση [3], [8]

$$\hat{T}_L = -\frac{dv_1}{dt} - Fv_1 + \text{sign}[\hat{\psi}_{ra}i_{sb} - \hat{\psi}_{rb}i_{sa}] \frac{3\mu}{2} \sqrt{v_2(i_{sa}^2 + i_{sb}^2) - \frac{1}{M^2} \left(\frac{1}{2a} \frac{dv_2}{dt} + v_2 \right)^2} \quad (3.2.6)$$

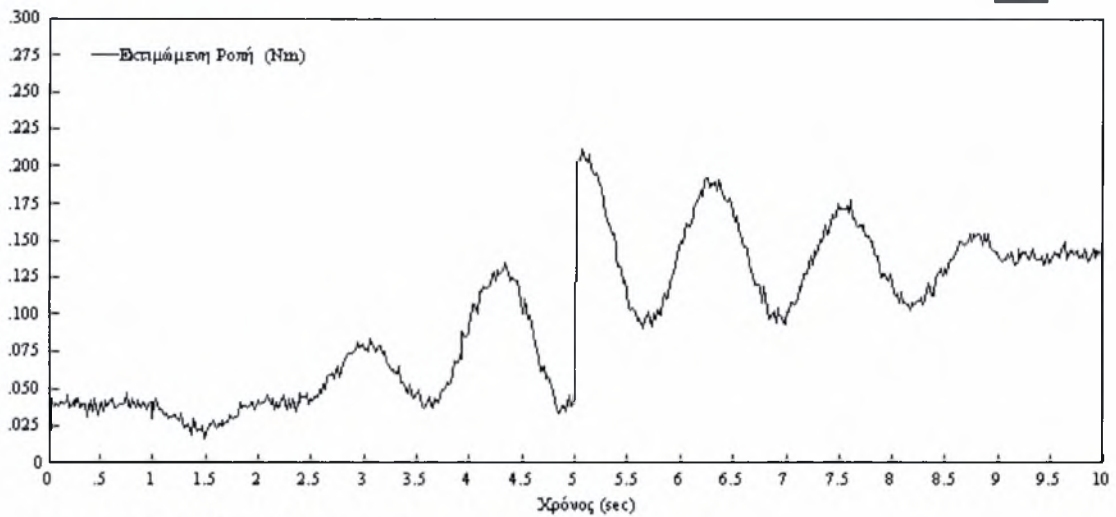
Στην σχέση (3.2.6) η συνάρτηση $\text{sign}[x]$ ορίζεται ως εξής:

$$\text{sign}[x] = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

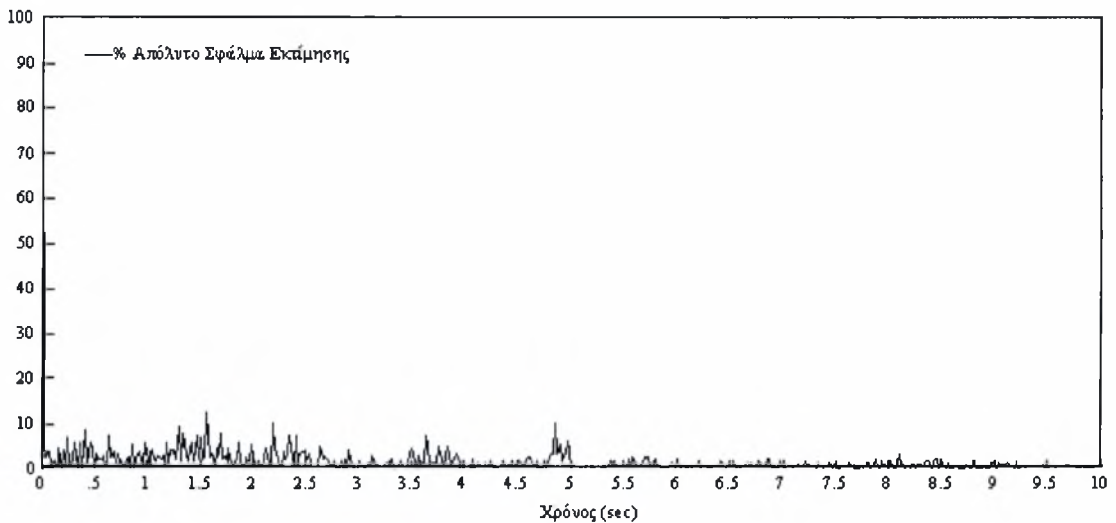
Τα προηγούμενα αποτελέσματα εφαρμόστηκαν για τον έλεγχο ενός κινητήρα Baldor M3541. Η άγνωστη ροπή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.2 και οι παράμετροι του κινητήρα είναι: $P=1$, $R_s=3.05[\Omega]$, $R_r=2.12[\Omega]$, $L_s=0.243[H]$, $L_r=0.306[H]$, $M=0.225[H]$, $F=0.002[N \cdot m \cdot s \cdot \text{rad}^{-1}]$ και $J=2 \times 10^{-4}[kg \cdot m^2]$ [3]. Η εκτιμώμενη ροπή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.3. Από την πραγματική ροπή φορτίου και την εκτιμώμενη ροπή προκύπτει το απόλυτο σφάλμα της εκτίμησης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.4.



Σχήμα 3.2.2 Άγνωστη ροπή



Σχήμα 3.2.3 Εκτιμώμενη ροπή



Σχήμα 3.2.4 Επί τις εκατό σφάλμα εκτίμησης της ροπής

Αν θεωρηθεί ότι ο κινητήρας λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση με σταθερή και διάφορη του μηδενός ταχύτητα περιστροφής και συνολική μαγνητική ροή, τότε από το μοντέλο του κινητήρα (3.2.2) προκύπτει ότι η ροπή μπορεί να εκτιμηθεί για σταθερή φορά της εξωτερικά ασκούμενης ροπής σύμφωνα με την σχέση:

$$\hat{T}_L = -Fv_1 + \frac{3\mu}{2} \sqrt{v_2 (i_{sa}^2 + i_{sb}^2)} - \frac{1}{M^2} v_2^2 \quad (3.2.7)$$

Η παραπάνω σχέση προέρχεται από την σχέση (3.2.6) αν ληφθεί υπόψη και το μηχανικό ισοζύγιο του κινητήρα (3.2.2). Προκύπτει ότι για σταθερή ταχύτητα περιστροφής ο όρος

3 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε AC Κινητήρες

$\psi_{ra}i_{sb} - \psi_{rb}i_{sa}$ έχει το πρόσημο της συνολικά ασκούμενης ροπής αν συμπεριλάβουμε σε αυτή και την τριβή.

Αν όμως ο συντελεστής τριβής αποτελεί άγνωστη ποσότητα τότε η ροπή που οφείλεται στην τριβή μπορεί να συμπεριληφθεί στην άγνωστη ροπή και η σχέση εκτίμησης της ροπής θα πάρει την μορφή:

$$\hat{T}_L = \frac{3\mu}{2} \sqrt{v_2 (i_{sa}^2 + i_{sb}^2) - \frac{1}{M^2} v_2^2} \quad (3.2.8)$$

Από τις σχέσεις αυτές προκύπτει το συμπέρασμα ότι η άγνωστη ροπή είναι ευθέως ανάλογη με το άθροισμα τετραγώνων των ρευμάτων i_{sa} , i_{sb} και της ταχύτητας του κινητήρα για λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση με σταθερή φορά της ροπής.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι αν η γωνιακή ταχύτητα και η συνολική ροή δεν ακολουθούν επακριβώς τις εντολές τότε στην σχέση (3.2.6) πρέπει αντί των v_1 και v_2 να χρησιμοποιηθούν τα ω_m και $\psi_{ra}^2 + \psi_{rb}^2$ αντίστοιχα.

3.3 P-D Ελεγκτής σε Σύγχρονο AC Κινητήρα

3.3.1 Περιγραφή του Μοντέλου

Το μαθηματικό μοντέλο του σύγχρονου (AC) κινητήρα περιγράφεται μαθηματικά από ένα σύστημα τριών μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων σε σύστημα συντεταγμένων dq [4]-[6],[11]. Η μετατροπή από το σύστημα συντεταγμένων abc στο σύστημα d,q μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση του μετασχηματισμού της εξίσωσης (3.3.1) [5].

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.3.1)$$

όπου S_a , S_b , S_c οι ποσότητες του στάτορα σε τρεις φάσεις και S_d , S_q οι ποσότητες του στάτορα σε περιστρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων dq . Με την χρήση του μετασχηματισμού αυτού η μαθηματική διατύπωση του μοντέλου του σύγχρονου κινητήρα γίνεται:



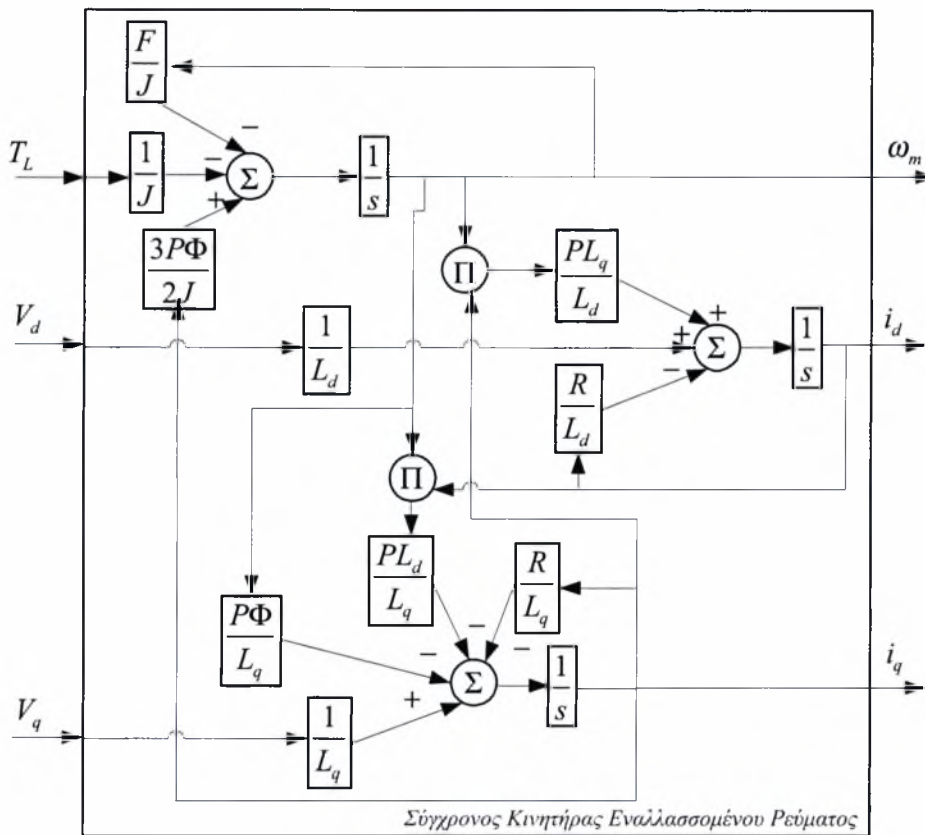
$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3P\Phi}{2J} i_q - \frac{F}{J} \omega_m - \frac{T_l}{J} \quad (3.3.2a)$$

$$\frac{di_d}{dt} = P \frac{L_q}{L_d} i_q \omega_m - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{1}{L_d} V_d \quad (3.3.2b)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L_q} i_q - P \frac{L_d}{L_q} i_d \omega_m - \frac{P\Phi}{L_q} \omega_m + \frac{1}{L_q} V_q \quad (3.3.2c)$$

και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.1.

Οι μεταβλητές απόδοσης του συστήματος επιλέγονται να είναι η γωνιακή ταχύτητα ω_m και το ρεύμα i_d .



Σχήμα 3.3.1 Γραφική παρουσίαση του μοντέλου του σύγχρονου AC κινητήρα

3.3.2 Έλεγχος Ταχύτητας και Ρεύματος

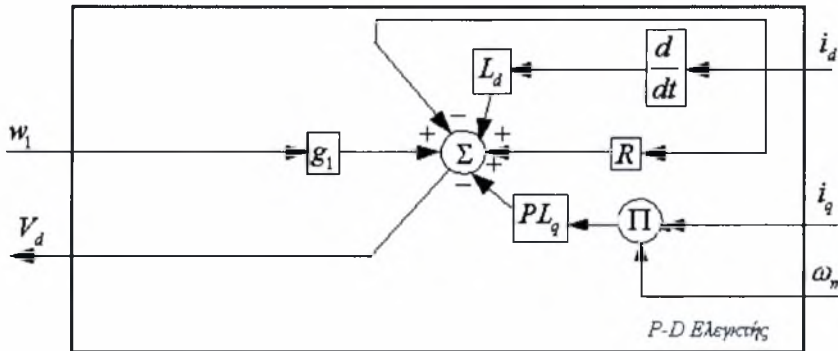
Στο σύστημα (3.3.2a-3.3.2c) εφαρμόζεται ο ακόλουθος P-D νόμος ελέγχου:

$$V_d = L_d \frac{di_d}{dt} - PL_q i_q \omega_m + Ri_d - i_d + g_1 \omega_1 \quad (3.3.3a)$$

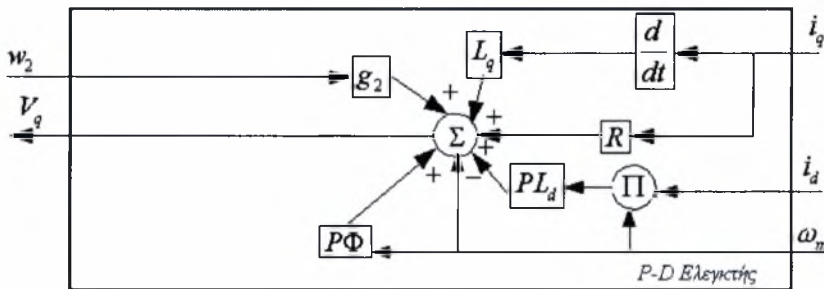
3 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε AC Κινητήρες

$$V_q = L_q \frac{di_q}{dt} + Ri_q + PL_d i_d \omega_m + P\Phi \omega_m - \omega_m + g_2 w_2 \quad (3.3.3b)$$

που παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.3.2 και 3.3.3



Σχήμα 3.3.2 P-D Ελεγκτής για έλεγχο ρεύματος



Σχήμα 3.3.3 P-D Ελεγκτής για έλεγχο ταχύτητας

αντικαθιστώντας την εξίσωση του ελεγκτή (3.3.3a-3.3.3b) στο μοντέλο του σύγχρονου AC κινητήρα (3.3.2a-3.3.2c) το σύστημα κλειστού βρόγχου που προκύπτει έχει την μορφή:

$$\frac{g_2 dw_2}{dt} = \frac{3P\Phi}{2J} i_q - \frac{F}{J} g_2 w_2 - \frac{T_l}{J} \quad (3.3.4a)$$

$$i_d = g_1 w_1 \quad (3.3.4b)$$

$$\omega_m = g_2 w_2 \quad (3.3.4c)$$

Από τις σχέσεις (3.3.4b-3.3.4c) γίνεται φανερό ότι με την χρήση του νόμου ανατροφοδότησης (3.3.2a-3.3.2b) έχει επιτευχθεί τέλειος έλεγχος εξόδου για έλεγχο ταχύτητας και ρεύματος στον στάτορα. [12], [13]



Μελετώντας την ευστάθεια BIBO του συστήματος κλειστού βρόγχου, προκύπτει ότι αν οι εξωτερικές εντολές $w_1(t)$, $w_2(t)$ είναι φραγμένες, τότε οι μεταβλητές εξόδου ω_m , i_d είναι φραγμένες. Επιπλέον αν η πρώτη παράγωγος της εντολής $w_2(t)$ είναι φραγμένη τότε, σύμφωνα με την σχέση (3.3.4a) εξασφαλίζεται ότι και το ρεύμα i_q είναι φραγμένο $\forall t > 0$ [14].

Μελετώντας την ασυμπτωτική ευστάθεια δηλαδή για $w_1(t) = w_2(t) = 0$ προκύπτει ότι:

$$\omega_m = 0, i_d = 0, i_q(t) = \frac{2}{3P\Phi} T_1(t) \quad (\forall t > 0)$$

Για την ευρωστία του συστήματος κλειστού βρόγχου διαπιστώνονται δυο τύποι αβεβαιοτήτων. Η πρώτη αβεβαιότητα είναι ο συντελεστής τριβής F και η δεύτερη είναι το σφάλμα της παραγωγού των ρευμάτων i_d , i_q , έστω $e_{d1}(t)$, $e_{d2}(t)$. Αν ληφθούν υπόψη τα σφάλματα $e_{d1}(t)$, $e_{d2}(t)$ οι παράγωγοι των ρευμάτων $\frac{di_d}{dt}$ και $\frac{di_q}{dt}$ που υλοποιούνται στον ελεγκτή γίνονται $\frac{di_d}{dt} + e_{d1}(t)$ και $\frac{di_q}{dt} + e_{d2}(t)$ αντίστοιχα. Τα σφάλματα αυτά μπορούν να θεωρηθούν αβεβαιότητες έντονα χρονομεταβλητές.

Συμπεριλαμβάνοντας αυτά τα σφάλματα ο ελεγκτής παίρνει τη μορφή:

$$V_d = L_d \frac{di_d}{dt} + L_q e_{d1} - PL_q i_q \omega_m + Ri_d - i_d + g_1 w_1 \quad (3.3.5a)$$

$$V_q = L_q \frac{di_q}{dt} + L_q e_{d2} + Ri_q + PL_d i_d \omega_m + P\Phi \omega_m - \omega_m + g_2 w_2 \quad (3.3.5b)$$

Αντικαθιστώντας τον νόμο ελέγχου (3.3.5a-3.3.5b) στο σύστημα (3.3.2a-3.3.2c), το σύστημα κλειστού βρόγχου παίρνει την μορφή: $\omega_m = g_2 w_2 + L_q e_{d2}$, $i_d = g_1 w_1 + L_d e_{d1}$. Το σφάλμα των μεταβλητών απόδοσης εξόδου $|\omega_m - g_2 w_2(t)|$ και $|i_d - g_1 w_1(t)|$ είναι ίσα με $|L_q e_{d2}|$ και $|L_d e_{d1}|$ αντίστοιχα και παρουσιάζουν γραμμική μεταβολή με τα e_{d2} , e_{d1} ενώ είναι ανεξάρτητα του F . Σημειώνεται ότι το σύστημα κλειστού βρόγχου συμπεριφέρεται εύρωστα για κάθε F και για μικρό σφάλμα υλοποίησης της παραγωγού των ρευμάτων του ρότορα και του στάτορα.

Για την υλοποίηση του νόμου ελέγχου, γίνονται μετρήσεις των μεταβλητών ω_m , i_d και i_q που μπορεί να γίνουν με ένα οπτικό κωδικοποιητή για και με αμπερόμετρα αντίστοιχα.

3.3.3 Προσομοίωση Σύγχρονου AC Κινητήρα με Έλεγχο Ταχύτητας και Ρεύματος

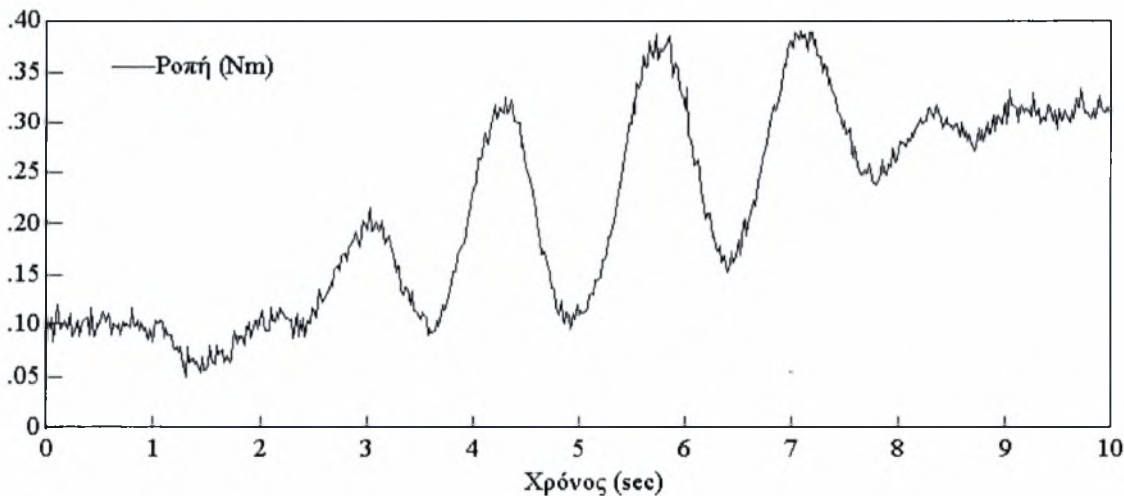
Τα παραπάνω αποτελέσματα εφαρμόζονται για έναν σύγχρονο AC κινητήρα που περιγράφεται από το μαθηματικό μοντέλο (3.3.2a-3.3.2c). Οι παράμετροι του κινητήρα είναι: $F = 0.02[\text{N m s rad}^{-1}]$, $J = 0.001314[\text{N m s}^2]$, $\Phi = 0.167[\text{Wb}]$, $L_d = 0.007[\text{H}]$, $R = 3[\Omega]$, $P = 2$, $L_q = 0.007[\text{H}]$ [6]. Ο κινητήρας αποδίδει μέγιστη ισχύ $400[\text{W}]$ με στροφές λειτουργίας $3000[\text{RPM}]$. Η άγνωστη εξωτερικά ασκούμενη ροπή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.4.

Επιλέγοντας $g_1 = 1$, $g_2 = 10$, $w_1 = 0.7$ και εντολή w_2 όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.5 ο P-D νόμος ελέγχου γίνεται:

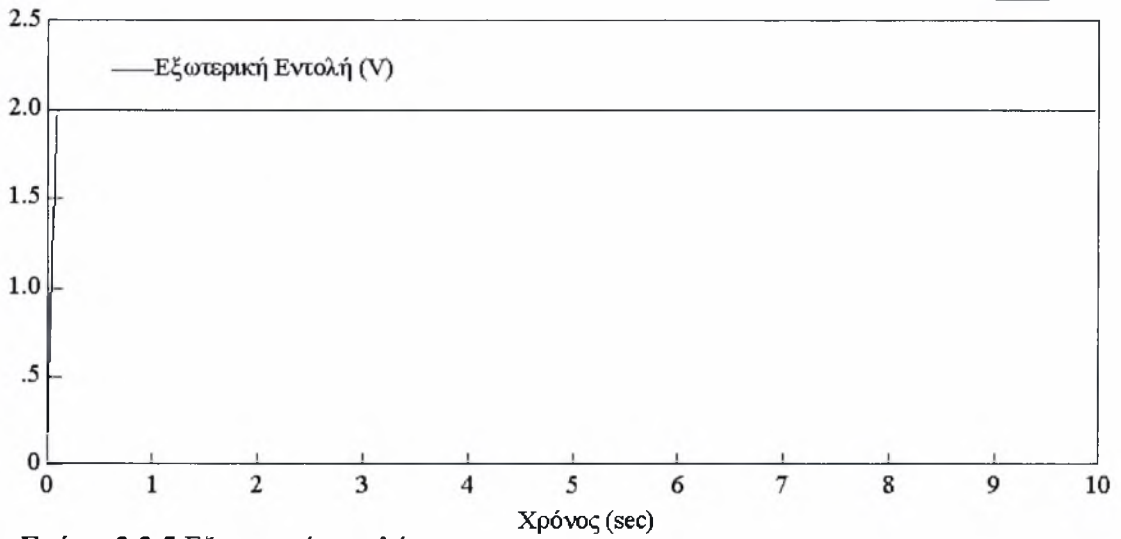
$$V_d = 0.007 \frac{di_d}{dt} - 0.014i_q\omega_m + 3i_d - i_d + w_1$$

$$V_q = 0.007 \frac{di_q}{dt} + 3i_q + 0.014i_d\omega_m - 0.666\omega_m + 10w_2$$

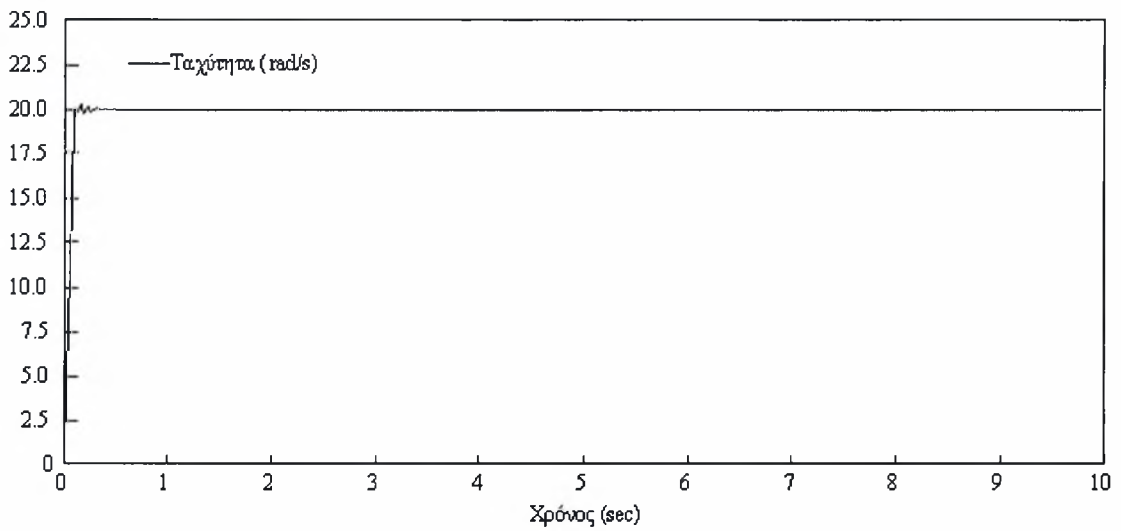
Οι όροι της παραγώγου στον ελεγκτή υλοποιήθηκε με χρήση οπισθόδρομης διακριτοποίησης (sample και hold) με περίοδο δειγματοληψίας ίση με $0.00001[\text{s}]$. Η απόδοση των μεταβλητών του σύγχρονου AC κινητήρα παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.3.6-3.3.12 όπου παρουσιάζονται όλες οι μεταβλητές του κινητήρα.



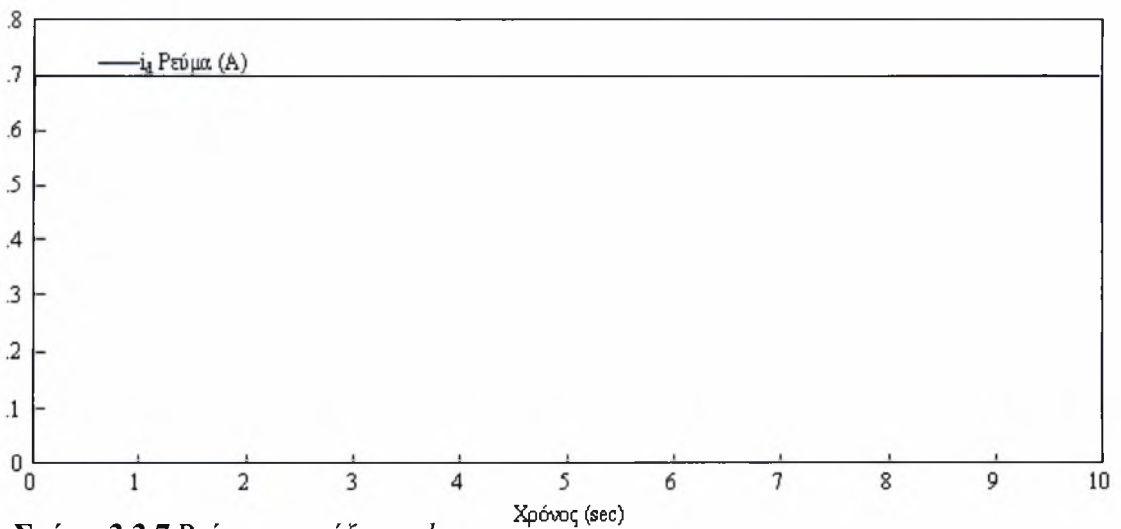
Σχήμα 3.3.4 Άγνωστη ροπή



Σχήμα 3.3.5 Εξωτερική εντολή

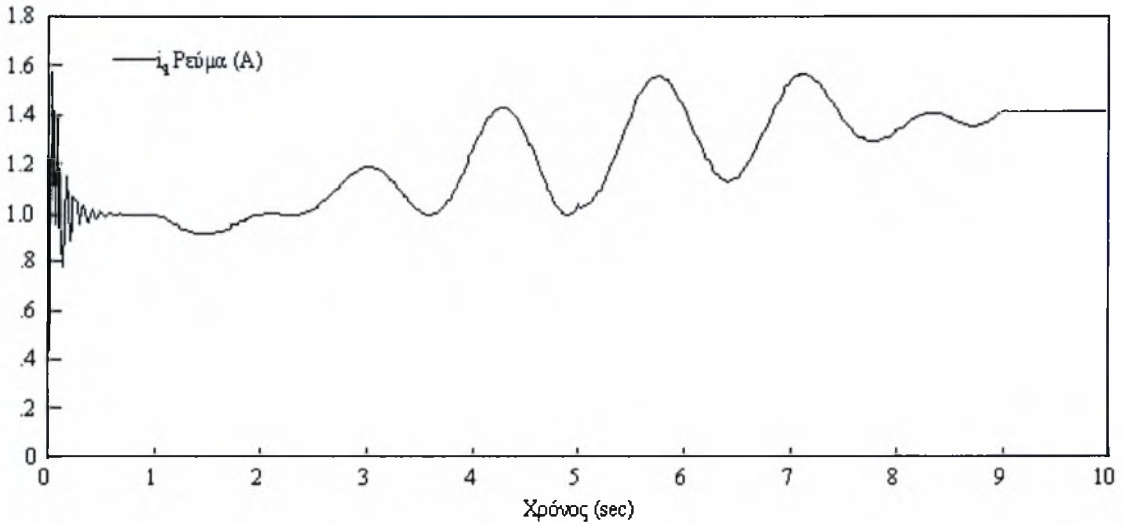


Σχήμα 3.3.6 Ταχύτητα κινητήρα

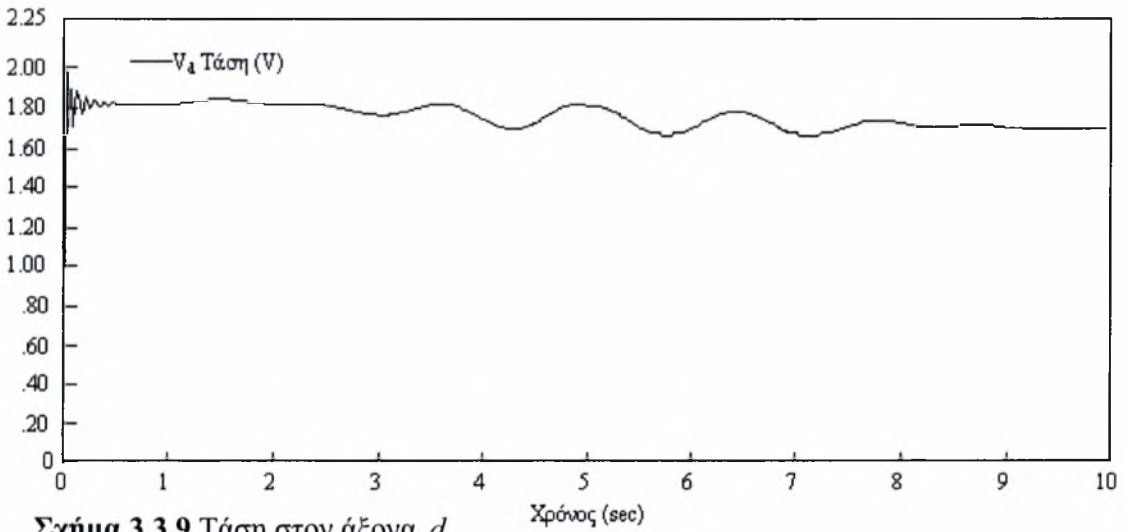


Σχήμα 3.3.7 Ρεύμα στον άξονα d

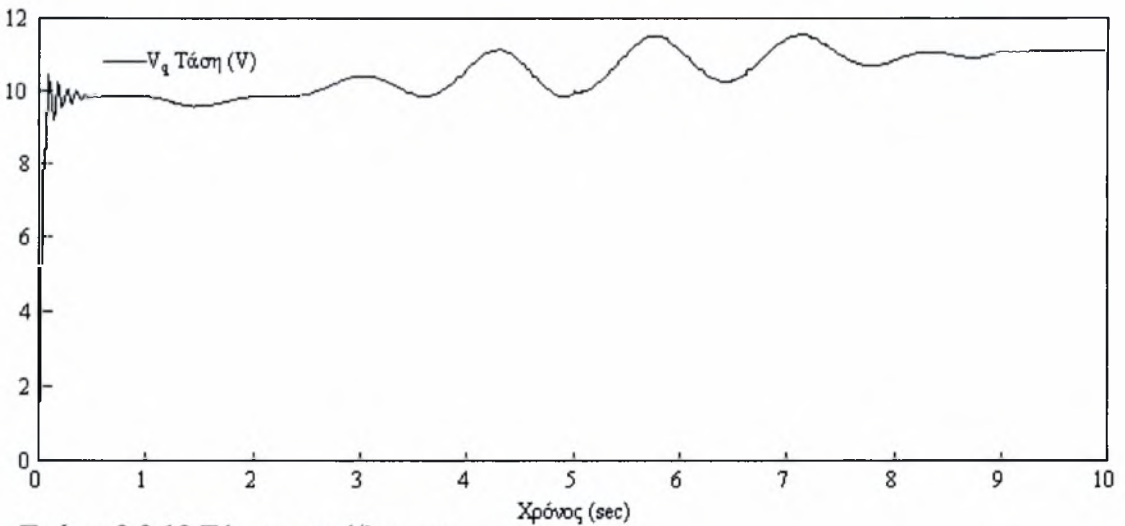
3 Έλεγχος και Εκτίμηση Ροπής σε AC Κινητήρες



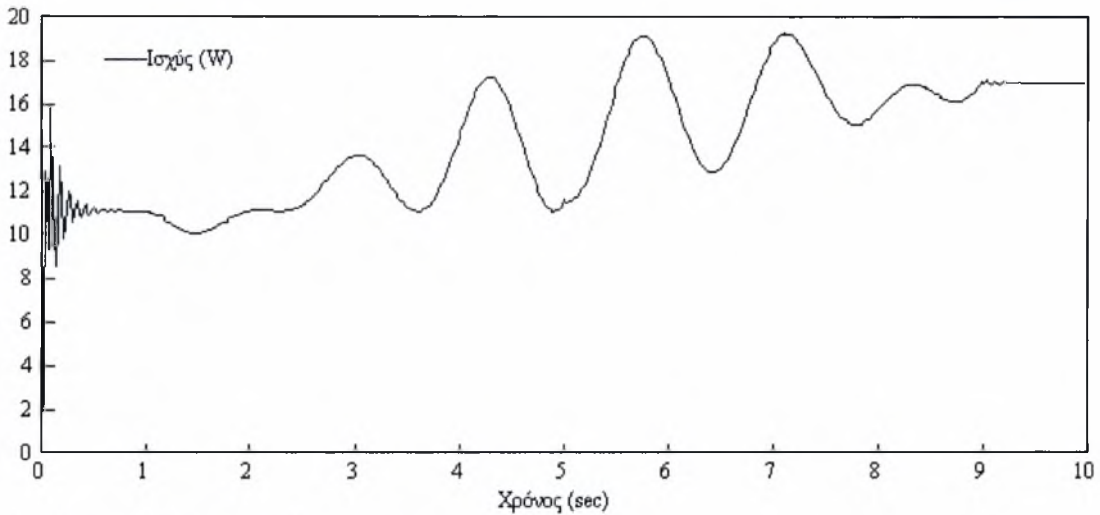
Σχήμα 3.3.8 Ρεύμα στον άξονα q



Σχήμα 3.3.9 Τάση στον άξονα d



Σχήμα 3.3.10 Τάση στον άξονα q



Σχήμα 3.3.11 Καταναλισκόμενη ισχύς

3.3.4 Σχέσεις Εκτίμησης της Ροπής Φορτίου

Αν χρησιμοποιηθούν τα παραπάνω αποτελέσματα από σύστημα κλειστού βρόγχου που προκύπτει είναι δυνατό να γίνει υπολογισμός του άγνωστου εξωτερικά ασκούμενου φορτίου στον κινητήρα με την μέτρηση του ρεύματος i_q . Το εξωτερικό φορτίο θα προκύψει με την επίλυση της σχέσης (3.3.4a) ως προς T_l . Για σταθερή εντολή ταχύτητας και ρεύματος επειδή $\frac{dw_2}{dt} = 0$ προκύπτει από το σύστημα κλειστού βρόγχου (3.3.4a-3.3.4c) ότι:

$$\hat{T}_l(t) = \frac{3P\Phi}{2} i_q - Fg_2 w_2 \quad (3.3.6)$$

Αν θεωρηθεί η τριβή (όρος $Fg_2 w_2$) σαν αβεβαιότητα και συμπεριληφθεί στην άγνωστη εξωτερικά ασκούμενη ροπή $\hat{T}_l'(t)$ τότε η παραπάνω σχέση θα πάρει την μορφή:

$$\hat{T}_l'(t) = \frac{3P\Phi}{2} i_q \quad (3.3.7)$$

Από τις σχέσεις αυτές προκύπτει το συμπέρασμα ότι η άγνωστη ροπή είναι ευθέως ανάλογη με το ρεύμα i_q για σταθερή ταχύτητα περιστροφής και σταθερό ρεύμα i_d .

3.3.5 Σφάλμα Εκτίμησης της Ροπής Φορτίου

Με την χρήση των προτεινομένων P-D νόμων ελέγχου για τον σύγχρονο κινητήρα μπορεί να γίνει όπως διαπιστώθηκε εκτίμηση του άγνωστου εξωτερικά ασκούμενου φορτίου με μέτρηση του ρεύματος i_q . Το σφάλμα της εκτίμησης προκύπτει αν αντικατασταθεί στο μαθηματικό μοντέλο του κινητήρα ο νόμος ελέγχου με το σφάλμα υλοποίησης της παραγωγού. Οι μεταβλητές εξόδου γίνονται τότε:

$$\omega_m = g_2 w_2 + L_q e_{d2} \text{ και } i_d = g_1 w_1 + L_d e_{d1} \quad (3.3.8)$$

Με αντικατάσταση των παραπάνω σχέσεων στο μηχανικό ισοζύγιο για τον σύγχρονο κινητήρα (3.3.2a) προκύπτει ότι το απόλυτο σφάλμα εκτίμησης της ροπής $|e_T|$ είναι:

$$|e_T| = \left| J L_q \frac{de_{d2}}{dt} + F L_q e_{d2} \right| \quad (3.3.9)$$



Βιβλιογραφία-Αρθρογραφία

- [1] Leonard W. *Control of electrical drives 2nd edition*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996.
- [2] Σ. Ν. Βασιλακόπουλος: *Ηλεκτρικές Μηχανές*, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα 1983
- [3] Θ. Μπούκας: Διπλωματική Εργασία “Μη Γραμμικός Έλεγχος Επαγωγικών Ηλεκτροκινητήρων”, Βόλος 1998
- [4] S. P. Srivastava, V. K. Verma and Bhim Singh: “Steady-state analysis of a self-controlled synchronous motor”, *Electric Power Systems Research* Vol. 36 pp. 211-216, 1996
- [5] Guchuan Zhu, Louis-A. Dessaint, Ouassima Akhrif and Azeddine Kaddouri: “Speed Tracking Control of a Permanent-Magnet Synchronous Motor with State and Load Torque Observer”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 2, pp. 346-355 April 2000
- [6] In-Cheol Baik, Kyeong-Hwa Kim and Myung-Joong Youn: ‘Robust Nonlinear Speed Control of PM Synchronous Motor Using Boundary Layer Integral Sliding Mode Control Technique’, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 47-54, January 2000
- [7] Ortega R., Nicjlasson P. J. and G. Espinoza-Perez, “On Speed Control of Induction Motors”, *Automatica*, Vol. 32 pp.455-460, 1996
- [8] Koumboulis F. N. and Boukas T., “Towards Perfect Output Control for Induction Motors”, submitted.
- [9] Seok-Hee Han, Young-Hoon Kim and In-Joong Ha: “Iterative Identification of State-Dependent Disturbance Torque for High-Precision Velocity Control of servo Motors”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 43, No. 5, pp. 724-728, May 1998
- [10] Chich-Yi Huang, Tien-Chi Chen, and Ching-Lien Huang: “Robust Control of Induction Motor with A Neural-Network Load Torque Estimator and A Neural-Network identification”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 46, No. 5, pp. 990-998, October 1999
- [11] Kyeong-Hwa Kim, In-Cheol Baik, Gun-Woo Moon, and Myung-Joong Youn: “A Current Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor with a Simple

- Disturbance Estimation Scheme”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 7, No. 5, pp. 630-633, September 2000
- [12] P. N. Paraskevopoulos, F. N. Koumboulis and C. J. Zervas, “Perfect output control for non square generalized state space systems”, *IEEE Proceedings, Part D, Control Theory and Applications*, Vol.142, pp. 119-122, 1995
- [13] F. N. Koumboulis and B. G. Mertzios, “Feedback Controlling Against Chaos”, *Chaos Solutions and Fractals*, Vol. 11, pp. 352-358, 2000
- [14] Β. Γ. Μέρτζιος: “Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου”, Ξάνθη 1997

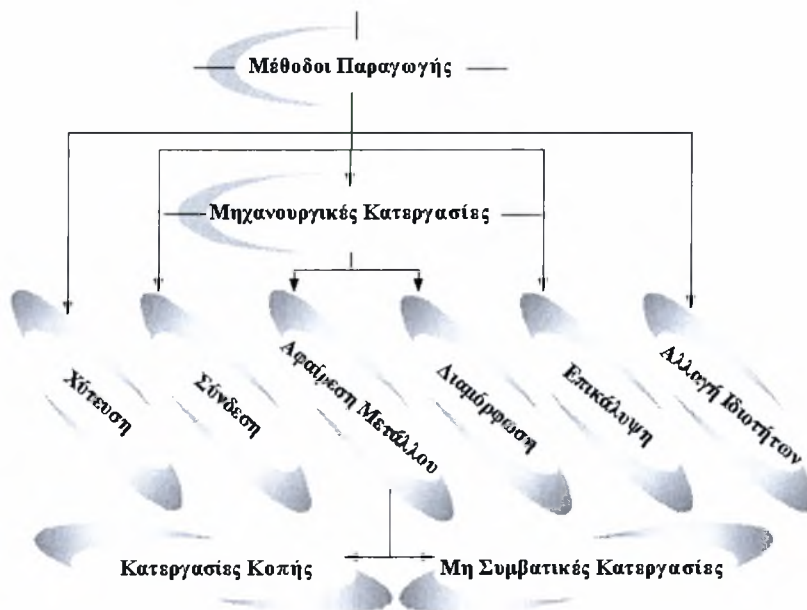
Διάγνωση Σφαλμάτων κατά την Κατεργασία Υλικών

4

4.1 Εισαγωγικά στοιχεία κατεργασιών

4.1.1 Γενικά Στοιχεία

Οι μηχανουργικές κατεργασίες είναι μέθοδοι βιομηχανικής παραγωγής, που μορφοποιούν μεταλλικά ακατέργαστα τεμάχια σε τελικά η ενδιάμεσα προϊόντα προς πώληση και χρησιμοποίηση. Οι μέθοδοι βιομηχανικής παραγωγής μπορούν να ταξινομηθούν με βάση το Σχήμα 4.1.1 [1], [2].



Σχήμα 4.1.1 Κατηγορίες μεθόδων παραγωγής μεταλλικών τεμαχίων

Η επιλογή της μεθόδου παραγωγής που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την μορφή του ακατέργαστου και του κατεργασμένου κομματιού, τις ιδιότητες της κάθε μεθόδου και τις προδιαγραφές του κατεργασμένου τεμαχίου. Ταυτόχρονα θα πρέπει να ελαχιστοποιείται κατά το δυνατό και το κόστος παραγωγής. Συνήθως τα προϊόντα που προκύπτουν από τις παραπάνω μεθόδους συναρμολογούνται για να σχηματιστεί το τελικό προϊόν. Σύμφωνα με τις μεθόδους κατεργασίας του Σχήματος 4.1.1 φαίνεται ότι οι κατεργασίες αφαιρέσεως υλικού και διαμόρφωσης αποτελούν τις μηχανικές κατεργασίες μορφοποίησεως των μετάλλων ή συνηθέστερα μηχανουργικές κατεργασίες. Οι κατεργασίες αφαιρέσεως υλικού ομαδοποιούνται στις κατεργασίες κοπής ή συμβατικές κατεργασίες κοπής και στις μη συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσης μετάλλου. Στις μη συμβατικές κατεργασίες η αφαίρεση υλικού δεν πραγματοποιείται με μηχανική επαφή δύο στερεών υλικών, του ακατέργαστου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου, αλλά θερμικά, ηλεκτρικά, χημικά, με νερό υψηλής πίεσης ή με άλλον τρόπο [2], [3].

Στις κατεργασίες κοπής, με τις οποίες ασχολείται η παρούσα εργασία, η αφαίρεση υλικού γίνεται με την διαδοχική αφαίρεση όγκων μετάλλου με την χρήση εργαλείου με σφηνοειδές σχήμα (cutting tool). Το υλικό αφαιρείται υπό την μορφή αποβλίτων (γρεζιών), με τρόπο ώστε η γεωμετρία του ακατέργαστου τεμαχίου να μορφοποιηθεί προς την γεωμετρία του τελικού τεμαχίου. Η ακρίβεια διαστάσεων μορφής και θέσης καθώς και η ποιότητα της επιφανείας του τελικού τεμαχίου εξαρτώνται άμεσα από το είδος της κατεργασίας και πρέπει να καλύπτουν τις προδιαγραφές των λειτουργικών απαιτήσεων κατά την χρήση του [1].

Το κοπτικό εργαλείο μπορεί να έχει διάφορες μορφές και να είναι κατασκευασμένο από διαφορετικά υλικά ανάλογα με την γεωμετρία που επεξεργάζεται. Το υλικό του επίσης μπορεί να ποικίλει αλλά θα πρέπει πάντα να είναι σκληρότερο από το υλικό που θα κατεργαστεί ώστε να προκαλείται όσο το δυνατόν μικρότερη μηχανική καταπόνηση στο εργαλείο [2]. Για την επίτευξη της απαραίτητης σχετικής κίνησης του κατεργαζόμενου κομματιού ως προς το εργαλείο μπορεί να υπάρχει κίνηση μόνο του εργαλείου ή μόνο του κομματιού ή ταυτόχρονη κίνηση του εργαλείου και του κομματιού. Η απαιτούμενη ισχύς για την επίτευξη σχετικής κίνησης και κατ' επέκταση κοπής προσδίδεται από την εργαλειομηχανή [1], [2].

4.1.2 Κατεργασίες Κοπής

Οι κατεργασίες κοπής των μετάλλων διαχωρίζονται με βάση το σχήμα του εργαλείου κοπής, όπου η μορφή του είτε είναι γεωμετρικά καθορισμένη κατά την κατασκευή του (τόρνος, φρέζα, δράπανο) είτε είναι ακαθόριστη (λείανση). Επιπλέον το εργαλείο μπορεί να έχει μία κόψη (τόρνος) ή περισσότερες (τρυπάνι, φρέζα, λειαντικός τροχός) [1], [2]. Γενικά οι κατεργασίες κοπής εκτός από την κατάταξη με βάση την μορφή του εργαλείου μπορούν να καταταγούν σε βασικές και ειδικές κατεργασίες κοπής και τέλος χωρίζονται με την μορφή των επιφανειών που μπορούν να κατεργαστούν. Η κατάταξη των κατεργασιών κοπής παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.1 [1].

		<i>Είδος κατεργασίας</i>					
		<i>Κατεργασία</i>	<i>Βασικές κατεργασίες</i>		<i>Ειδικές κατεργασίες</i>		
			<i>Επίπεδες επιφάνειες</i>	<i>Κυλινδρικές επιφάνειες</i>	<i>Επιφάνειες με ειδική μορφή</i>	<i>Ελικοειδείς επιφάνειες</i>	
<i>Κατεργασίες αφαίρεσης μετάλλου</i>	<i>Κατεργασίες κοπής</i>	<i>Γεωμετρικά καθορισμένη μορφή εργαλείου</i>	<i>Τόρνευση</i>	Μετωπική τόρνευση	Διαμήκης τόρνευση	Τόρνευση μορφής και αντιγραφής	Τόρνευση σπειρώματος
			<i>Τρυπάνισμα</i>		Διάνοιξη τρύπας	Τρυπάνισμα μορφής	Κοπή σπειρωμάτων με σπειροτόμο
			<i>Φρεζάρισμα</i>	Φρεζάρισμα ομόρροπο-αντίρροπο		Φρεζάρισμα μορφής κοπή οδοντώσεων	Φρεζάρισμα σπειρωμάτων
			<i>Πλάνισμα</i>	Πλάνισμα επίπεδων επιφανειών		Πλάνισμα μορφής και αντιγραφής	Κοπή οδοντώσεων
	<i>Ακαθόριστη γεωμετρική μορφή εργαλείου</i>	<i>Λείανση</i>	Επιφανειακή λείανση	Λείανση εσωτερικών και εξωτερικών κυλινδρικών επιφανειών	Λείανση μορφής και αντιγραφής	Λείανση σπειρωμάτων και οδοντώσεων	
		<i>Χόνινγκ</i>					
		<i>Λάμπινγκ</i>					
		<i>Υπερλείανση</i>					

Πίνακας 4.1.1 Κατηγοριοποίηση των κατεργασιών κοπής σε βασικές, ειδικές και οι επιφάνειες που μπορούν να κατεργαστούν

Τέλος οι κατεργασίες κοπής μπορούν να διαχωριστούν με βάση το συνδυασμό κινήσεων εργαλείου-κομματιού κατά την κατεργασία. Για παράδειγμα στην τόρνευση, η περιστροφική πρωτεύουσα κίνηση προσδίδεται στο τεμάχιο και γραμμική πρωτεύουσα κίνηση στο εργαλείο. Η παρούσα εργασία μελετάει μόνο την τόρνευση και το

φρεζάρισμα που αποτελούν εξάλλου και τις κατεργασίες που έχουν επικρατήσει και εφαρμόζονται στην σύγχρονη παραγωγή [1], [2].

4.1.3 Τόρνευση

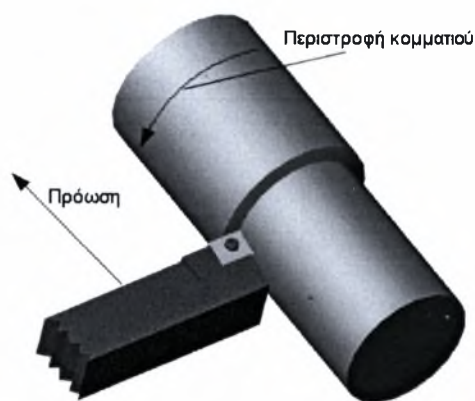
Η τόρνευση (turning) αποτελεί μια από τις παλαιότερες κατεργασίες που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος. Συνάμα είναι και μία απλή κινηματικά κατεργασία κοπής που πραγματοποιείται με περιστροφική κίνηση του τεμαχίου και γραμμική κίνηση του εργαλείου (Σχήμα 4.1.2). Με την τόρνευση μπορούν να αποδοθούν επιφάνειες εκ περιστροφής κυρτές και κοίλες, επίπεδες επιφάνειες και ελικοειδείς επιφάνειες [1]. Η κύρια κίνηση είναι περιστροφική και δίνεται στο κομμάτι, ενώ η δευτερεύουσα γραμμική κίνηση δίνεται στο εργαλείο που κινείται αποτυπώνοντας την μορφή του επάνω στο κομμάτι.

Ο τόρνος (lathe) μπορεί να κατεργάζεται όλα τα σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα και σχεδόν όλα τα στερεά μη μεταλλικά, φυσικά και τεχνητά, υλικά. Ο τόρνος, όταν είναι εφοδιασμένος με κοπτικό εργαλείο από σκληρομέταλλο ή κεραμικό, μπορεί με προσοχή και με μικρή ταχύτητα πρόωσης να επεξεργασθεί ακόμα και βαμμένο χάλυβα.

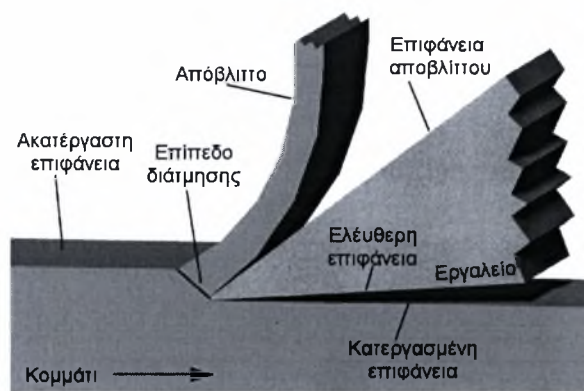
Οι κατεργασίες που μπορεί να κάνει ένας τόρνος γενικής χρήσεως είναι [2]:

- Τόρνευση εξωτερικών και εσωτερικών κυλινδρικών επιφανειών.
- Τόρνευση κωνικών επιφανειών.
- Τόρνευση επιπέδων επιφανειών (εγκάρσια τόρνευση).
- Διάνοιξη οπών μικρού ή μεγάλου βάθους.
- Κατεργασία επιφανειών μορφής.
- Έκκεντρη τόρνευση (έκκεντρα, στροφαλοφόροι άξονες).
- Κοπή εξωτερικών και εσωτερικών σπειρωμάτων, όλων των μορφών.
- Κατεργασία εξωτερικών και εσωτερικών σφαιρικών επιφανειών (με σχετική ιδιοσυσκευή).
- Λείανση με ιδιοσυσκευές επάνω στο εργαλειοφορείο.
- Περιέλιξη ελατηρίων, ρικνώματα (κανελάζ) κλπ.

Οι τόρνοι μπορούν να χωριστούν ανάλογα με το είδος της κατεργασίας που εκτελούν, το μέγεθος τους, τον αριθμό των αξόνων τους και τον βαθμό αυτοματισμού τους [2].



Σχήμα 4.1.2 Κινηματική τόννευσης



Σχήμα 4.1.3 Ορθογωνική κοπή

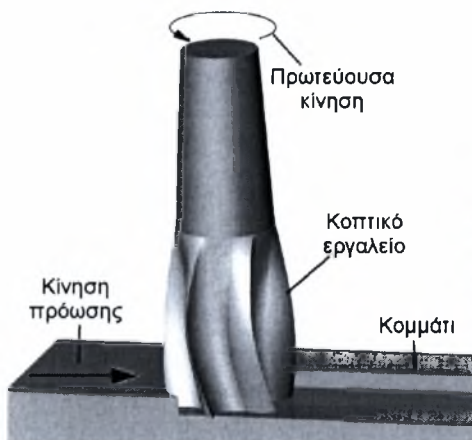
Το εργαλείο του τόννου έχει μία μόνο κόψη η οποία βρίσκεται σε συνεχή επαφή με το κατεργαζόμενο κομμάτι (Σχήμα 4.1.3). Για λόγους απλότητας μπορεί να θεωρηθεί ότι η κόψη του εργαλείου είναι ευθεία κάθετη προς την διεύθυνση κοπής, σύμφωνα με το πρότυπο της ορθογωνικής κοπής [1]. Το υλικό που περνάει από το επίπεδο διάτμησης παραμορφώνεται πλαστικά σχηματίζοντας το απόβλιττο (chip). Εξαιτίας της παραμόρφωσης το πάχος του αποβλίττου είναι μεγαλύτερο από το βάθος κοπής και καθώς απομακρύνεται βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου. Αξίζει να αναφερθεί ότι όλη η ισχύς της κοπής αποδίδεται γύρω από σημεία επαφής του εργαλείου με το κομμάτι με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες στο εργαλείο και το απόβλιττο [1], [4]. Δημιουργούνται συνθήκες που σε συνδυασμό με την έντονη και συνεχή τριβή του εργαλείου με το απόβλιττο κατά κύριο λόγο και με την κατεργασμένη επιφάνεια σε πολύ μικρότερο βαθμό, φθείρουν το κοπτικό εργαλείο. Η φθορά εξαρτάται βέβαια από όλες τις παραμέτρους της κοπής (υλικό εργαλείου, υλικό τεμαχίου, πρόωση, ταχύτητα, υγρό κοπής, ταλαντώσεις κτλ) [1], [4].

4.1.4 Φρεζάρισμα

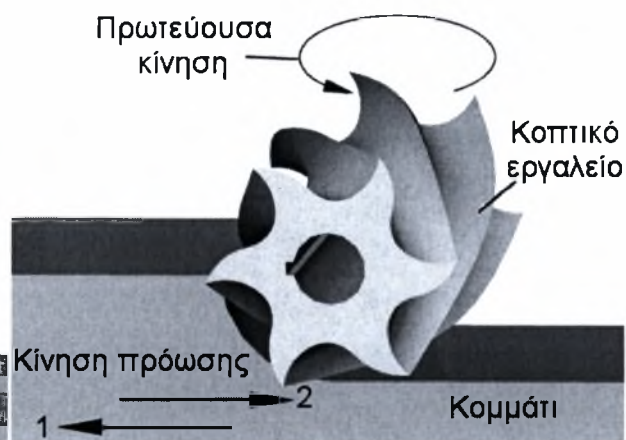
Το φρεζάρισμα (milling) πραγματοποιείται με ένα περιστρεφόμενο εργαλείο με πολλές κύριες κόψεις όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.1.4-4.1.5. Χαρακτηριστικό του φρεζαρίσματος είναι η μη συνεχή επαφή του κοπτικού εργαλείου με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Κάθε κοπτική αιχμή του εργαλείου διακόπτει την επαφή της με το τεμάχιο τουλάχιστον μια φορά σε κάθε περιστροφή. Το απόβλιττο είναι κατά συνέπεια διακοπτόμενο και έχει μεταβαλλόμενο πάχος [1], [4]. Την ίδια στιγμή μπορεί

4 Διάγνωση Σφαλμάτων κατά την Κατεργασία Υλικών

να κόβουν περισσότερες από μια κόψεις και η κίνηση πρόωσης μπορεί να δίνεται από το κομμάτι (συνηθέστερα) ή από το εργαλείο (σε φρεζοδράπανα και boring) [2]. Δύο βασικές κατηγορίες φρεζαρίσματος είναι το περιφερικό και το μετωπικό. Στο μετωπικό φρεζάρισμα όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.1.4 ο άξονας περιστροφής του εργαλείου είναι κάθετος προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια και με αυτόν τον τρόπο αποδίδονται επίπεδες επιφάνειες. Στο περιφερικό φρεζάρισμα (Σχήμα 4.1.5) ο άξονας περιστροφής του εργαλείου είναι παράλληλος προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια και μπορούν να αποδοθούν επίπεδες και καμπύλες ευθειογενείς επιφάνειες. Το περιφερικό φρεζάρισμα, αν η κίνηση της κόψης του δοντιού που κόβει έχει την ίδια φορά με την πρόωση ονομάζεται ομόρροπο αλλιώς ονομάζεται αντίρροπο [1], [2].



Σχήμα 4.1.4 Κινηματική μετωπικού φρεζαρίσματος



Σχήμα 4.1.5 Κινηματική περιφερικού φρεζαρίσματος
1 αντίρροπο, 2 ομόρροπο

Με τη μια κύρια κίνηση και το συνδυασμό των δύο από τις τρεις δυνατές κινήσεις του τραπεζιού καθώς και την κατάλληλη επιλογή του είδους του κοπτικού εργαλείου, η φρέζα μπορεί να κάνει τις παρακάτω κατεργασίες αποδίδοντας [2], [4] :

- Επίπεδες και καμπύλες επιφάνειες.
- Ευθύγραμμες αυλακώσεις σε επίπεδες και κυλινδρικές επιφάνειες (εκσκαφές, σφηνόδρομους κλπ.).
- Ελικοειδείς αυλακώσεις σε κυλινδρικές επιφάνειες.
- Σπειρώματα ακριβείας, τραπεζοειδή, τριγωνικά κλπ. με μια ή περισσότερες αρχές.
- Διαμόρφωση κανονικών πολυγωνικών μορφών (τρίγωνα, τετράγωνα, εξάγωνα, κλπ).



- Διαίρεση περιφερειακά σε ίσα μέρη εξαρτήματος (π.χ. ισομοιρασμένες τρύπες σε μία φλάντζα).
- Κατασκευή οδοντωτού κανόνα (κρεμαγιέρα).
- Κοπή δοντιών σε οδοντωτούς τροχούς με ευθύγραμμο ή ελικοειδή δόντια.

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί η φρέζα μπορεί να κατεργαστεί κομμάτια σημαντικά πολυπλοκότερης γεωμετρίας από τον τόρνο, χωρίς όμως να μπορεί να τον υποκαταστήσει. Έχει όμως καταφέρει λόγο της μεγάλης ευελιξίας της να υποκαταστήσει το δράπανο, και την πλάνη. Οι φρέζες μπορούν να χωριστούν ανάλογα με το είδος της κατεργασίας που εκτελούν (φρεζοδράπανα φρεζοπλάνες), το μέγεθος τους, τον αριθμό των αξόνων τους και τον βαθμό αυτοματισμού τους [2].

4.1.5 Εργαλειομηχανές Αριθμητικού Ελέγχου

Αρχικά καθώς οι εργαλειομηχανές εξελίσσονταν τοποθετήθηκαν σε αυτές μετρητικές διατάξεις όπως είναι οι οπτικοί ή ηλεκτρομαγνητικοί κωδικοποιητές που μπορούσαν να απεικονίζουν ανά πάσα στιγμή τις συντεταγμένες στις οποίες βρίσκεται το κοπτικό εργαλείο. Στην συνέχεια προστέθηκαν δυνατότητες απεικόνισης και άλλων μετρίσιμων μεγεθών με στόχο την διευκόλυνση του χειριστή της εργαλειομηχανής [5].

Αργότερα εμφανίστηκαν και οι εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (numerical control, NC) που αποτελούν εξέλιξη των εργαλειομηχανών που αναφέρθηκαν προωύτερα. Προστέθηκε μια μονάδα ελέγχου της μηχανής (machine control unit, MCU) ή οποία έχει την δυνατότητα να δέχεται μια σειρά από εντολές τις οποίες μετατρέπει σε κατάλληλους παλμούς ηλεκτρικού ρεύματος προς τους κινητήρες της εργαλειομηχανής, ώστε να πραγματοποιούνται οι κατεργασίες με βάση τις εντολές αυτές [5]. Οι βασικές αρχές όμως της λειτουργίας των εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου παραμένουν αυτές που περιγράφηκαν αναλυτικότερα για τις συμβατικές εργαλειομηχανές. Η μονάδα ελέγχου της μηχανής είναι ουσιαστικά ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής ενσωματωμένος επάνω στην εργαλειομηχανή που δέχεται εντολές θέσης, ταχύτητας και λειτουργικές εντολές με την μορφή ενός δομημένου προγράμματος. Οι εντολές θέσης επεξεργάζονται από τον γεωμετρικό επεξεργαστή της μονάδας και μετατρέπονται σε μορφή συντεταγμένων σε καρτεσιανό σύστημα. Οι εντολές περιγράφουν είτε την γεωμετρία της διαδρομής του κοπτικού εργαλείου σημείο προς σημείο είτε με συνεχή διαδρομή. Τα συστήματα με τα οποία μπορεί να γίνει ο

προγραμματισμός είναι το βαθμωτό, όπου το ένα σημείο προγραμματίζεται σε σχέση με το προηγούμενο και το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων, όπου το κάθε σημείο προγραμματίζεται με βάση ένα σταθερό σημείο [5], [6].

Οι εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου επικράτησαν πολύ γρήγορα επειδή κατάφεραν να αυξήσουν τους κύριους χρόνους κοπής από 20% σε περίπου 80% αυξάνοντας κατακόρυφα την παραγωγικότητα. Επίσης αύξησαν την επαναληψιμότητα των κατεργασιών, μειώνοντας τα ανθρώπινα λάθη, και μείωσαν τα εργατικά ατυχήματα. Συγχρόνως άνοιξαν τον δρόμο για την κατασκευή γεωμετρικά συνθετότερων κομματιών που θα ήταν αδύνατο να κατασκευαστούν με ακρίβεια σε συμβατικές εργαλειομηχανές. Η δυνατότητα ταυτόχρονης κίνησης σε πολλούς άξονες με ακρίβεια αποτέλεσε και το πρώτο βήμα για την δημιουργία κέντρων κατεργασίας με προσθήκη δυνατοτήτων κίνησης σε 5 ή και περισσότερους άξονες ταυτόχρονα. Τέλος καθιερώθηκε η δυνατότητα αυτόματης αλλαγής κοπτικών εργαλείων που βρίσκονται προρυθμισμένα σε ειδική διάταξη. Η διάταξη αλλαγής κοπτικού εργαλείου (tool changer) μπορεί να πάρει ακόμη και περισσότερα από 60 εργαλεία που αποθηκεύονται σε κατάλληλη κινούμενη διάταξη και ο χρόνος αλλαγής είναι για τις σύγχρονες μηχανές CNC της τάξης των 1-2 δευτερολέπτων [5], [6].

Στις πρώτες εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου το πρόγραμμα εισαγόταν με την χρήση διάτρητης ταινίας στην MCU της εργαλειομηχανής και οι δυνατότητες ελέγχου των προγραμματιστικών σφαλμάτων ήταν λίγες. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού αναπτύχθηκε ο απευθείας αριθμητικός έλεγχος (direct numerical control DNC) όπου ένας υπολογιστής συνδέθηκε απευθείας με την MCU ώστε τα προγράμματα να μεταφέρονται απευθείας σε μια ή περισσότερες μηχανές. Αργότερα με την αμφίδρομη επικοινωνία της εργαλειομηχανής με τον υπολογιστή το πρόγραμμα μπορούσε να επιστρέψει, με τυχόν διορθώσεις από τον χειριστή της εργαλειομηχανής, στον υπολογιστή και να διορθωθεί και στις υπόλοιπες εργαλειομηχανές που εκτελούσαν την ίδια κατεργασία [5].

Τον απόγονο του DNC αποτελεί ο αριθμητικός έλεγχος με υπολογιστή (Computer Numerical Control, CNC) που ουσιαστικά αποτελεί την ενσωμάτωση του υπολογιστή στην μονάδα MCU της εργαλειομηχανής. Τα χαρακτηριστικά του DNC εξελίσσονται και η δυνατότητα ελέγχου μίας ή περισσότερων μηχανών από έναν κεντρικό υπολογιστή παραμένει. Επιπλέον έχουν προστεθεί διαγνωστικές λειτουργίες για αναγνώριση και διόρθωση σφαλμάτων στην λειτουργία της μηχανής, χρήση



μετρικού και αγγλοσαξονικού συστήματος μέτρησης, διατύπωση ακόμη και περιγραφικών εντολών και οι ταχύτητες επεξεργασίας των δεδομένων αυξήθηκαν σημαντικά. Σήμερα οι εργαλειομηχανές CNC έχουν δυνατότητες αυτόματης δημιουργίας του προγράμματος σε κομμάτια εύκολης γεωμετρίας, γραφική επαλήθευση του και δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων όπως παλαιά προγράμματα, βιβλιοθήκες υποπρογραμμάτων και πίνακες με ενδείξεις για την διάρκεια ζωής εργαλείων [5].

Με την εξέλιξη των προγραμμάτων σχεδίασης με ηλεκτρονικό υπολογιστή (Computer Aided Drafting, CAD) δόθηκε η δυνατότητα στον σχεδιαστή να δημιουργεί σύντομα μηχανολογικά σχέδια σε δυο ή και σε τρεις διαστάσεις και να τα τροποποιεί γρήγορα στον υπολογιστή. Σε πιο εξελιγμένα συστήματα δίνεται η δυνατότητα πλήρους παραμετρικής σχεδίασης, συναρμολόγησης πολλών εξαρτημάτων και μελέτη αντοχής με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis, FEA) για την βελτιστοποίηση της κατασκευής. Το CAD συνδέθηκε με τις κατεργασίες γρήγορα εξαιτίας της πολυπλοκότητας της γεωμετρικής μορφής που μπορούσαν πλέον και να σχεδιαστούν με υπολογιστή και να κατασκευαστούν με εργαλειομηχανές CNC απαιτούσε την σύνδεση τους και την διευκόλυνση του δύσκολου έργου της μελέτης των απαιτούμενων κινήσεων του κοπτικού εργαλείου για την παραγωγή των προγραμμάτων για τις εργαλειομηχανές CNC. Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι η εξέλιξη των σαρωτών τριών διαστάσεων (3D scanners) έχει βοηθήσει πολύ στην κατασκευή τρισδιάστατων μηχανολογικών σχεδίων από έτοιμα κομμάτια κυρίως όταν αυτά έχουν σύνθετο γεωμετρικό σχήμα (reverse engineering) [5].

Η σύνδεση των σχεδιαστικών πακέτων με τις εργαλειομηχανές CNC επιτεύχθηκε με την δημιουργία προγραμμάτων κατασκευής με την βοήθεια υπολογιστή (Computer Assisted Manufacturing, CAM). Με την χρήση του CAM, τα δεδομένα που προέρχονται από τα σχεδιαστικά πακέτα επεξεργάζονται με σκοπό την αυτόματη παραγωγή του προγράμματος για την εργαλειομηχανή CNC. Συγκεκριμένα το πρόγραμμα με βάση το ακατέργαστο τεμάχιο, το τελικό κομμάτι και την γεωμετρία των διαθέσιμων κοπτικών εργαλείων υπολογίζει τις διαδρομές των κοπτικών εργαλείων (toolpaths) ώστε να παραχθεί το επιθυμητό κομμάτι όσο το δυνατόν πιο σύντομα, δηλαδή με τις μικρότερες διαδρομές. Τα προγράμματα CAM συνήθως παράγουν αρχεία σε μια γλώσσα στην οποία είναι δυνατό να γίνει και απευθείας ο προγραμματισμός. Οι συνηθέστερες γλώσσες προγραμματισμού αυτού του τύπου είναι οι: APT (Automatic Programming of Tools), ADAPT (ADAPTation), EXAPT (EXtended subset of APT), UNIAPT, NUFORM, SPLIT, GNC και COMPACT II [5], [6]. Οι διαφορές που

παρουσιάζουν μεταξύ τους είναι ελάχιστες και η βασική τους φιλοσοφία είναι η δυνατότητα απόδοσης πολύπλοκων γεωμετρικών σχημάτων. Οι εντολές τους είναι σύντομες και περιγράφουν την διαδρομή του κοπτικού εργαλείου, σημείο προς σημείο ή με συνεχή διαδρομή και τις βοηθητικές λειτουργίες της εργαλειομηχανής. Το αρχείο αυτό επεξεργάζεται με κατάλληλο πρόγραμμα μεταγλώττισης (Preprocessor) που παράγει ένα αρχείο με δεδομένα για την θέση του κοπτικού εργαλείου (Cutter Location, CL). Το αρχείο αυτό (CL File) επεξεργάζεται με την σειρά του από ένα πρόγραμμα που ονομάζεται μετεπεξεργαστής (Postprocessor). Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες των λειτουργιών και του προγραμματισμού κάθε εργαλειομηχανής παράγει τον τελικό κώδικα του προγράμματος που θα σταλεί στην MCU. Η τελική μορφή του προγράμματος που μεταφέρεται στην μηχανή ονομάζεται κώδικας G.

Οι κώδικες G, ή κώδικες όδευσης (Go Commands), αποτελούν ένα σύνολο εντολών με καθορισμένη σημασία για κάθε μηχανή και είναι αυτές που επεξεργάζεται και απεικονίζει στην οθόνη της η MCU καθώς η εργαλειομηχανή λειτουργεί. Οι κώδικες G00- G10 είναι συνήθως κοινοί σε όλες τις εργαλειομηχανές και οι υπόλοιποι αλλάζουν ανάλογα με την εταιρία κατασκευής της. Εκτός από τους κώδικες G υπάρχουν και οι κώδικες M, ή πρόσθετες λειτουργίες (Miscellaneous Commands). Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι κώδικες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.2 [5], [6].

Σήμερα υπάρχει μια τάση ενοποίησης των σχεδιαστικών πακέτων με τα προγράμματα CAM έτσι ώστε να χαρακτηρίζονται πλέον ως προγράμματα CAD/CAM. Εκτός από τις συμβατικές εργαλειομηχανές δυνατότητες προγραμματισμού έχουν και μηχανές μη συμβατικές όπως οι πρέσες, οι μηχανές κοπής με τόξο, νερό, πλάσμα και laser, μηχανές ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος, και τέλος υπάρχει δυνατότητα προγραμματισμού μηχανών που δεν πραγματοποιούν κατεργασίες κοπής όπως αυτόματες μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης, μετρητικές μηχανές ακόμη και μηχανές κάμψης σωλήνων.

Η τάση στην εξέλιξη των εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου στοχεύει σε δυο βασικές κατευθύνσεις. Η πρώτη αποτελεί την προσπάθεια για ενοποίηση των μηχανών που ελέγχονται με υπολογιστή κάτω από ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών (Computer Integrated Manufacturing, CIM). Το σύστημα αυτό προβλέπει σύνδεση όλων των μηχανών μέσω τοπικού δικτύου (Local Area Network, LAN) σε ένα κεντρικό υπολογιστικό σύστημα που συντονίζει όλες τις μηχανές (εργαλειομηχανές, Ρομπότ, μεταφορικές ταινίες,



μηχανές συσκευασίας). Με βάση ρουτίνες προγραμματισμού της παραγωγής, επιβλέπει τις γραμμές παραγωγής και να υπάρχει η δυνατότητα να παρθούν αποφάσεις στην περίπτωση παρουσίας κάποιας ανωμαλίας στην λειτουργία τους [5].

Η δεύτερη τάση στοχεύει στην εξέλιξη συστημάτων προσαρμοστικού ελέγχου (Adaptive Control, AC) που θα μπορούν να αναπροσαρμόζουν το πρόγραμμα το οποίο εκτελούν οι εργαλειομηχανές για βελτιστοποίηση των συνθηκών κατεργασίας. Με μια σειρά από αισθητήρες είναι δυνατή η μέτρηση των συνθηκών της κοπής όπως η θερμοκρασία του κοπτικού εργαλείου, η φθορά του, η ανάπτυξη ταλαντώσεων, η ροπή των κινητήρων κτλ. Με κατάλληλη επεξεργασία των σημάτων προκύπτουν μεγέθη από τα οποία μπορούν να προσδιορισθούν τυχόν σφάλματα κατά την κατεργασία. Με κατάλληλη αναπροσαρμογή του προγράμματος που εκτελεί η εργαλειομηχανή μπορεί τέλος να επιτευχθεί και πλήρης αντιμετώπιση τους. Η συνεχής αναπροσαρμογή του προγράμματος με βάση μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο βοηθά στην επίτευξη μεγαλύτερης παραγωγικότητας με την μικρότερη καταπόνηση της εργαλειομηχανής.

<i>Εντολές Όδευσης</i>		<i>Πρόσθετες Λειτουργίες</i>	
<i>Κώδικας G</i>	<i>Λειτουργία</i>	<i>Κώδικας M</i>	<i>Λειτουργία</i>
G00	Γρήγορη μετακίνηση σε θέση	M00	Διακοπή προγράμματος
G01	Γραμμική παρεμβολή	M01	Προαιρετική διακοπή προγράμματος
G02	Κυκλική παρεμβολή CW	M02	Τέλος προγράμματος
G03	Κυκλική παρεμβολή CCW	M03	Εκκίνηση ατράκτου (προς τα εμπρός CW)
G04	Καθυστέρηση	M04	Εκκίνηση ατράκτου (προς τα πίσω CCW)
G20	Στοιχεία σε Αγγλοσαξονικό σύστημα (in)	M05	Διακοπή λειτουργίας ατράκτου
G21	Στοιχεία σε Δεκαδικό σύστημα (mm)	M06	Αλλαγή εργαλείου
G28	Επιστροφή στο σημείο αναφοράς	M07	Ψυκτικό σε μορφή ομίχλης
G40	Ακύρωση αντιστάθμισης κοπτικού	M08	Ψυκτικό σε ροή
G41	Αντιστάθμιση κοπτικού αριστερά	M09	Διακοπή ψυκτικού
G42	Αντιστάθμιση κοπτικού δεξιά	M19	Προσανατολισμός ατράκτου
G43	Αντιστάθμιση μήκους εργαλείου σε θετική κατεύθυνση	M30	Τέλος προγράμματος (επιστροφή στην αρχή της μνήμης)
G44	Αντιστάθμιση μήκους εργαλείου σε αρνητική κατεύθυνση	M98	Μεταφορά σε υποπρόγραμμα
G49	Ακύρωση αντιστάθμισης μήκους κοπτικού	M99	Μεταφορά στο κύριο πρόγραμμα (τέλος υποπρογράμματος)
G90	Απόλυτος τρόπος προγραμματισμού		
G91	Βαθμωτός τρόπος προγραμματισμού		
G92	Τοποθέτηση του σημείου μηδέν του προγράμματος		
G94	Πρώση ανά λεπτό		

Πίνακας 4.1.2 Συνήθεις κώδικες όδευσης και πρόσθετων λειτουργιών για NC προγραμματισμό

4.1.6 Διατάξεις Κινήσεως και Μέτρησης σε Εργαλειομηχανές

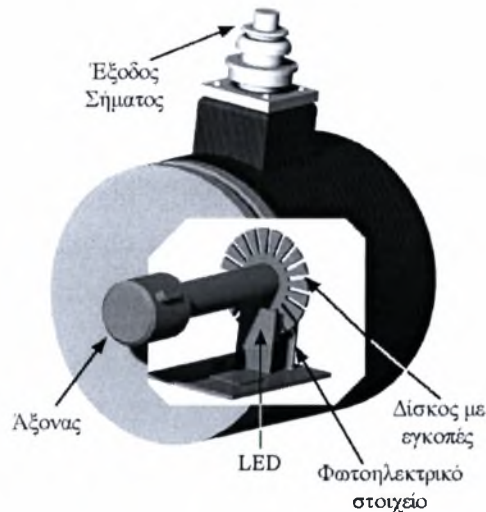
Οι μηχανισμοί κίνησης μετατρέπουν τις εντολές του χειριστή ή του NC προγράμματος σε κινήσεις του εργαλειοφορείου, του τραπεζιού και ρύθμιση στις στροφές της πρωτεύουσας κίνησης με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια θέσεως και ταχύτητας. Τα στενά όρια των ανοχών θα πρέπει να τηρούνται σε όλο το μήκος των διαδρομών σε κάθε άξονα. Οι κινητήρες θα πρέπει να είναι σε θέση να παραλαμβάνουν και τα δυναμικά φορτία που αναπτύσσονται κατά την κοπή και τις μεταθέσεις. Οι απαιτήσεις σε ακρίβεια και ταυτόχρονα σε ισχύ στους κινητήρες της εργαλειομηχανής αυξάνονται ακόμη περισσότερο για τις ψηφιακά καθοδηγούμενες εργαλειομηχανές [6].

Στις εργαλειομηχανές χρησιμοποιούνται κινητήρες συνεχούς ρεύματος με μόνιμο μαγνήτη ή ηλεκτρική διέγερση εξαιτίας της ακρίβειας στον έλεγχο των στροφών τους. Οι κινητήρες αυτοί μπορεί να ενσωματώνουν ηλεκτρομαγνητικό σύστημα πεδήσεως, ανεμιστήρα ψύξεως και μερικές φορές και μειωτήρα στροφών. Χρησιμοποιούνται επίσης τριφασικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος για την κίνηση του εργαλείου σε φρέζες και του κομματιού σε τόννους και κυρίως σε εργαλειομηχανές βαρέως τύπου. Επίσης ιδιαίτερα συχνά χρησιμοποιούνται τριφασικοί σύγχρονοι κινητήρες για τις περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στις στροφές που αποδίδει ο κινητήρας. Τέλος αρκετά μεγάλη εφαρμογή έχουν βρει και οι βηματικοί κινητήρες μικρής γωνίας βηματισμού για μικρότερες όμως απαιτήσεις σε ροπή και ταχύτητα, εξαιτίας της μεγάλης ακρίβειας θέσης και της επαναληψιμότητας των κινήσεων τους [2], [7].

Για μέτρηση χρησιμοποιούνται μετατροπείς μετρήσεως διαδρομής και ταχύτητας. Η λειτουργία τους βασίζεται στην μετατροπή μίας κινηματικής μεταβλητής στην είσοδο τους (διαδρομή, γραμμική και γωνιακή ταχύτητα, επιτάχυνση κλπ.) σε ηλεκτρικό σήμα. Στις εργαλειομηχανές χρησιμοποιούνται κυρίως μετατροπείς θέσεως και ταχύτητας. Οι μετατροπείς διακρίνονται σε άμεσης και έμμεσης λειτουργίας. Άμεσης λειτουργίας αποτελεί ο φωτοηλεκτρικός και ο ηλεκτρομαγνητικός μετατροπέας μετρήσεως διαδρομής, ενώ έμμεσης λειτουργίας είναι ο φωτοηλεκτρικός ή ηλεκτρομαγνητικός μετατροπέας θέσεως που προσαρμόζεται επάνω σε κινητήρες και μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε ηλεκτρικό σήμα από το οποίο με ηλεκτρονική μέθοδο υπολογίζεται η ταχύτητα. Μια από τις πιο συνήθεις διατάξεις μέτρησης θέσεως είναι ο οπτικός μετατροπέας θέσεως (οπτικός κωδικοποιητής) παρουσιάζεται στο Σχήμα



4.1.6 και αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο δίσκο με εγκοπές και μία διάταξη φωτοηλεκτρικών στοιχείων και διόδους εκπομπής φωτός (LED). Καθώς ο δίσκος περιστρέφεται το φως περνά αρκετές φορές μέσα από τις εγκοπές του δίσκου σε κάθε πλήρη περιστροφή. Έτσι δημιουργείται μια παλμοσειρά από την οποία υπολογίζεται η ταχύτητα και η θέση του άξονα του κινητήρα [6].



Σχήμα 4.1.6 Τομή οπτικού κωδικοποιητή

Με την ίδια αρχή λειτουργεί και ο ηλεκτρομαγνητικός κωδικοποιητής στον οποίο ο περιστρεφόμενος δίσκος αποτελείται από μαγνητικό υλικό και σε ένα πηνίο δημιουργείται διαφορά δυναμικού που μετατρέπεται σε παλμοσειρά κατά την περιστροφή του κινητήρα. Η ακρίβεια είναι σε αυτή την περίπτωση σημαντικά μεγαλύτερη επειδή μια πλήρη περιστροφή του κινητήρα μπορεί να αντιστοιχιστεί σε μεγαλύτερο αριθμό παλμών. Για την μέτρηση της ταχύτητας τέλος χρησιμοποιούνται ταχογεννήτριες τοποθετημένες ομοαξονικά στους κινητήρες [2], [6].

4.2 Βασικά Σφάλματα Κατά την Κοπή

Τα δύο βασικά σφάλματα που παρουσιάζονται κατά την διάρκεια συμβατικών κατεργασιών κοπής είναι η φθορά του κοπτικού εργαλείου και η αυτοδιεγείρομενη ταλάντωση ή αυτοδιέγερση. Η φθορά μπορεί να παρουσιαστεί είτε ως πρόωρη αστοχία του κοπτικού εργαλείου είτε να έχει σταδιακό χαρακτήρα. Η αυτοδιέγερση παρουσιάζεται ως βίαιη ταλάντωση (δυναμική αστάθεια) στο σύστημα εργαλείο-κατεργαζόμενο κομμάτι [8].

4 Διάγνωση Σφαλμάτων κατά την Κατεργασία Υλικών


Οι μορφές φθοράς του κοπτικού εργαλείου είναι:

- a) ο σχηματισμός ζώνης φθοράς στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου
- b) η φθορά κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου
- c) η φθορά της κόψης και της επιφάνειας αποβλίττου του εργαλείου με απολέπιση
- d) μικροθραύσεις της κόψης του εξαιτίας μεγάλων μηχανικών τάσεων ή κρουστικών φορτίων
- e) πλαστική παραμόρφωση της κόψης του εργαλείου εξαιτίας υψηλών θερμοκρασιών
- f) δημιουργία ρωγμών λόγω μεγάλων διαφορών θερμοκρασίας
- g) θραύση λόγω κρουστικών φορτίων

Από τις παραπάνω μορφές φθοράς οι δύο πρώτες (a, b) αποτελούν μορφές προοδευτικής και συνεχούς φθοράς τόσο στην ελεύθερη όσο και στην επιφάνεια αποβλίττου του εργαλείου. Το κοπτικό εργαλείο θα συνεχίσει να φθείρεται μέχρι να αστοχήσει είτε από στόμωση της κόψης του είτε από θραύση του. Η μορφή και ο ρυθμός φθοράς του κοπτικού εργαλείου εξαρτώνται από τις συνθήκες της κατεργασίας, την μορφή του κοπτικού εργαλείου και το υλικό του, το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, την μορφή της κατεργαζόμενης επιφάνειας και το είδος του υγρού κοπής που χρησιμοποιείται. Στις υπόλοιπες μορφές φθοράς (c-g) τα αποτελέσματα είναι περισσότερο καταστροφικής και όχι προοδευτικής μορφή [1], [4].

Η φθορά κρατήρα και η ζώνη φθοράς επηρεάζουν την λειτουργία του συστήματος κοπτικό εργαλείο-κατεργαζόμενο τεμάχιο-εργαλειομηχανή. Η φθορά κρατήρα εκτός από ορισμένες μόνο περιπτώσεις αυξάνει τις δυνάμεις κοπής. Η ζώνη φθοράς εκτός από την αύξηση των δυνάμεων κοπής λόγω τριβής, αυξάνει την τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας και μεταβάλλει την γεωμετρική μορφή του εργαλείου με αποτέλεσμα να μειώνεται η διαστατική ακρίβεια του τεμαχίου. Η ζώνη φθοράς ενισχύει τις ταλαντώσεις του εργαλείου προκαλώντας δυναμική αστάθεια. Για την προοδευτική φθορά η ροπή κοπής σε συνάρτηση με τον χρόνο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.1, όπου με T_0 συμβολίζεται η μέση τιμή της ροπής σε σταθερή κατάσταση για τόννευση. Σύμφωνα με το Σχήμα 4.2.1 η ροπή της κοπής αυξάνει συνεχώς και μπορεί να πάρει ανεπιθύμητες τιμές δημιουργώντας προβλήματα στο κατεργαζόμενο κομμάτι και στην εργαλειομηχανή [1].

Η ανίχνευσή της φθοράς γίνεται συνήθως με δύο μεθόδους, την απευθείας μέτρηση και την έμμεση εκτίμηση [9]. Στην απευθείας μέτρηση μπορούν να διαχωριστούν δύο βασικές κατευθύνσεις. Η πρώτη είναι η συνεχής μέτρηση της φθοράς



σε πραγματικό χρόνο κατά την διάρκεια της κατεργασίας και η δεύτερη είναι ή περιοδική μέτρηση της φθοράς. Στην πρώτη κατεύθυνση εστιάζονται μέθοδοι όπως είναι η ραδιογραφία, η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης και η χρήση οπτικών διατάξεων [10]. Για την περιοδική άμεση μέτρηση της φθοράς χρησιμοποιούνται μετρητικές διατάξεις όπου κατά περιόδους η κατεργασία διακόπτεται και γίνεται έλεγχος της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου. Η περιοδική μέτρηση έχει εφαρμοστεί σε σύγχρονες εργαλειομηχανές CNC. Η άμεση συνεχής μέτρηση της φθοράς βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, λόγω ιδιαίτερων προβλημάτων που προκύπτουν με την εφαρμογή της κάθε μεθόδου και εξαιτίας της μικρής αξιοπιστίας τους. Η έμμεση μέτρηση της φθοράς γίνεται με εκτίμηση της από μετρήσεις άλλων μεγεθών που σχετίζονται άμεσα με αυτή. Τέτοιες μέθοδοι είναι η μέτρηση των δυνάμεων κοπής και του ρυθμού μεταβολής τους [10]-[13], των διαστάσεων και της επιφανειακής τραχύτητας του κατεργασμένου κομματιού και τέλος της θερμοκρασίας και των ταλαντώσεων που αναπτύσσονται κατά την κοπή [14],[15].

Η αυτοδιέγερση ή αυτοδιεγερώμενη ταλάντωση (chatter) είναι μορφή δυναμικής αστάθειας και αποτελεί μια βίαιη ταλάντωση γύρω από μια ιδιοσυχνότητα του κοπτικού εργαλείου. Στην απλούστερη περίπτωση της τórνευσης το φαινόμενο περιγράφεται από το Σχήμα 4.2.2. Οι κυματισμοί έχουν δημιουργηθεί επάνω στην επιφάνεια του κομματιού εξαιτίας της ταλάντωσης κατά την κοπή στην προηγούμενη περιστροφή του κομματιού. Με την νέα περιστροφή οι κυματισμοί έχουν την ίδια περιοδικότητα με την ταλάντωση του εργαλείου. Αν το πλάτος της ταλάντωσης αυξάνει τότε παρουσιάζεται αστάθεια στην κατεργασία, ενώ αν μικραίνει το σύστημα χαρακτηρίζεται ως ευσταθές. Χαρακτηριστική ένδειξη αυτοδιέγερσης αποτελεί το σχήμα του αποβλίττου, το οποίο έχει μεταβλητό πάχος, σαν συνέπεια της κυμάτωσης της επιφάνειας του τεμαχίου. Οι χαρακτηριστικές περιοδικές χαραγές στην επιφάνεια του κομματιού υποδεικνύουν την ύπαρξη αυτοδιεγερόμενης ταλάντωσης. Το φαινόμενο είναι αρκετά πιο πολύπλοκο για την περίπτωση του φρεζαρίσματος όπου η κοπή είναι διακοπτόμενη για την κάθε κοπτική αιχμή. Στο φρεζάρισμα η αυτοδιέγερση του συστήματος ενισχύεται και από την περιοδική μεταβολή των δυνάμεων κοπής που οφείλεται στην διακοπτόμενη επαφή της κάθε κοπτικής αιχμής με το κατεργαζόμενο κομμάτι [8], [16]-[18].

Η δύναμη και το πλάτος της ταλάντωσης και κατά συνέπεια η κυμάτωση της επιφάνειας συνεχώς αυξάνει μέχρι να περιοριστεί (chatter threshold) από μη γραμμικότητες σε μια ανεπιθύμητη τιμή [17], [19]-[27]. Μια ενδεικτική μεταβολή της

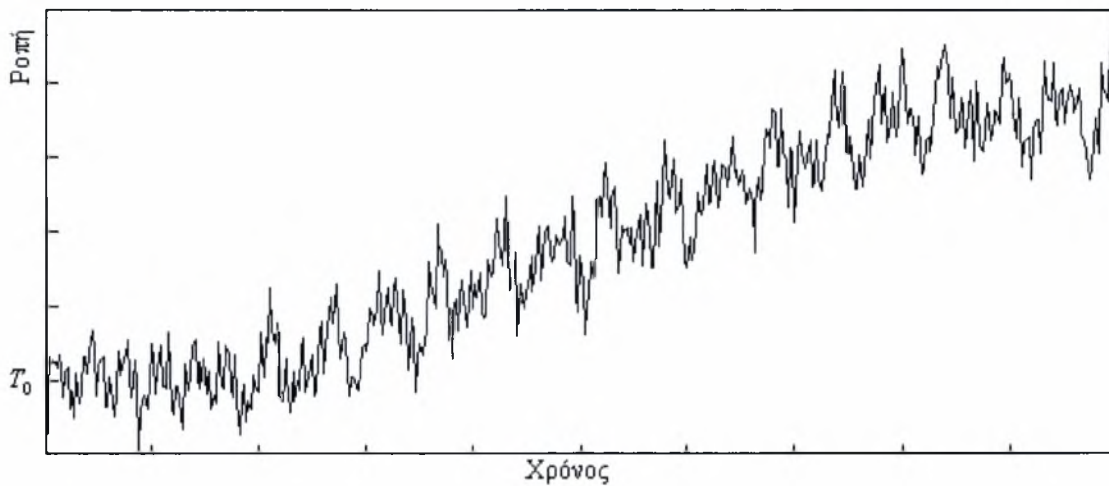
4 Διάγνωση Σφαλμάτων κατά την Κατεργασία Υλικών

ροπής κοπής σε συνάρτηση με τον χρόνο παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.2.3-4.2.4. Κατά την αυτοδιέγερση αναπτύσσονται δυνάμεις εξαιρετικά μεγάλων τιμών με αποτέλεσμα να καταπονείται το κοπτικό εργαλείο, το οποίο φτάνει πολλές συνήθως σε σημείο να υποστεί θραύση. Έχει αποδειχθεί [25] ότι μικρού πλάτους ταλαντώσεις δεν επιφέρουν σημαντικές μεταβολές στην διάρκεια ζωής του εργαλείου, στην περίπτωση όμως της αστάθειας οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μπορούν να προκαλέσουν ταχύτερη φθορά του εργαλείου αν δεν υποστεί θραύση. Στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, που υφίσταται έντονες καταπονήσεις, παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων και ρηγμάτωση της επιφάνειάς του. Σε κατασκευές υψηλής ακρίβειας τα προβλήματα που δημιουργούνται στην επιφάνεια των κομματιών, και ειδικά σε τεμάχια αεροπορικού αλουμινίου, είναι τόσο μεγάλα ώστε να απαιτούνται πολύωρες περαιτέρω θερμικές ή και μηχανουργικές κατεργασίες για την εξάλειψή τους [27]. Μεγάλες δυναμικές καταπονήσεις δέχεται και η εργαλειομηχανή με αποτέλεσμα να αυξάνεται η φθορά της. Για την βελτίωση των συνθηκών κατεργασίας και την καταστολή του φαινομένου αυτού χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως η περιοδική μεταβολή της ταχύτητας κοπής (Spindle Speed Variation, SSV) ή της πρόωσης [28], [29].

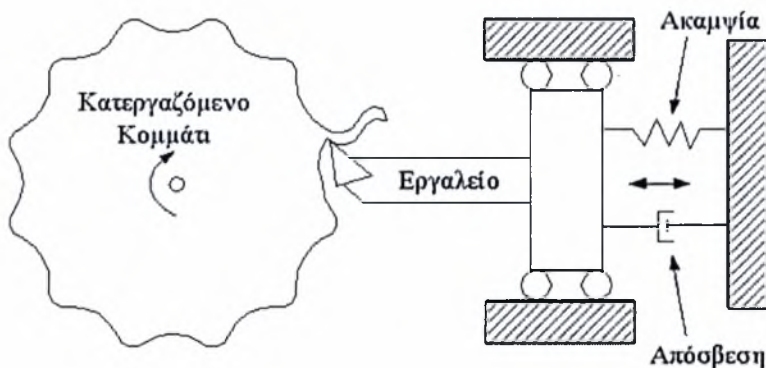
Η ροπή που αναπτύσσεται κατά την κοπή επηρεάζεται και από τα δύο σφάλματα. Σε συνήθεις καταστάσεις μπορεί να προσεγγιστεί από σχετικά μαθηματικά μοντέλα [27], [30]-[37] ή από τιμές σε βάσεις δεδομένων. Η επίδραση των σφαλμάτων αυτών στην απόδοση της κατεργασίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2.1.

	Αποτέλεσμα	Φθορά	Αυτοδιέγερση
1	Ανακρίβειες μορφής και διαστάσεων	•	•
2	Χειροτέρευση επιφανειακής τραχύτητας	•	
3	Περιορισμένη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου	•	•
4	Μείωση στην παραγωγικότητα	•	•
5	Δραστική αύξηση της ισχύος κοπής	•	•
6	Δημιουργία επιφανειακών τάσεων και ρηγμάτων		•
7	Ακουστικός Θόρυβος		•
8	Καταπόνηση της εργαλειομηχανής		•

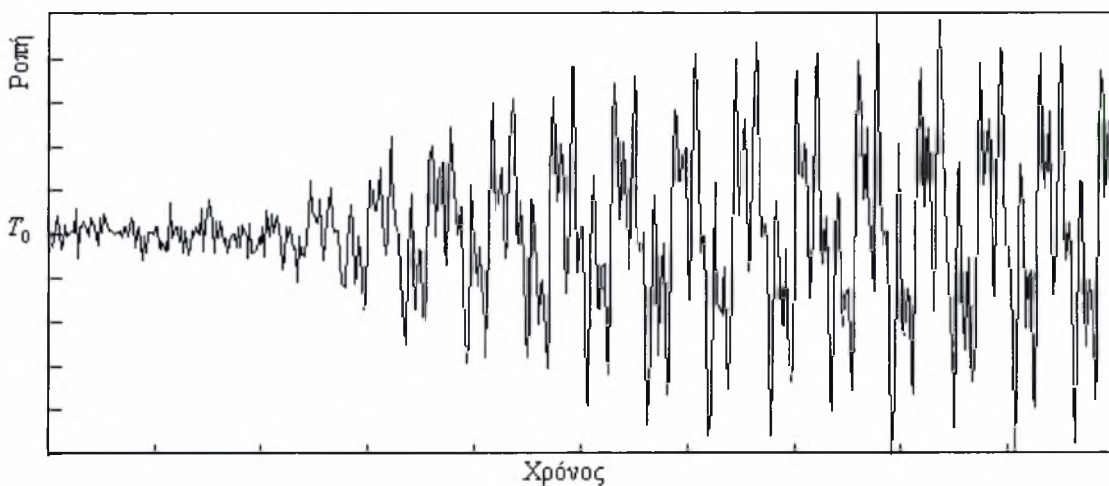
Πίνακας 4.2.1. Αποτελέσματα της φθοράς και της αυτοδιεγερόμενης ταλάντωσης στην απόδοση των κατεργασιών



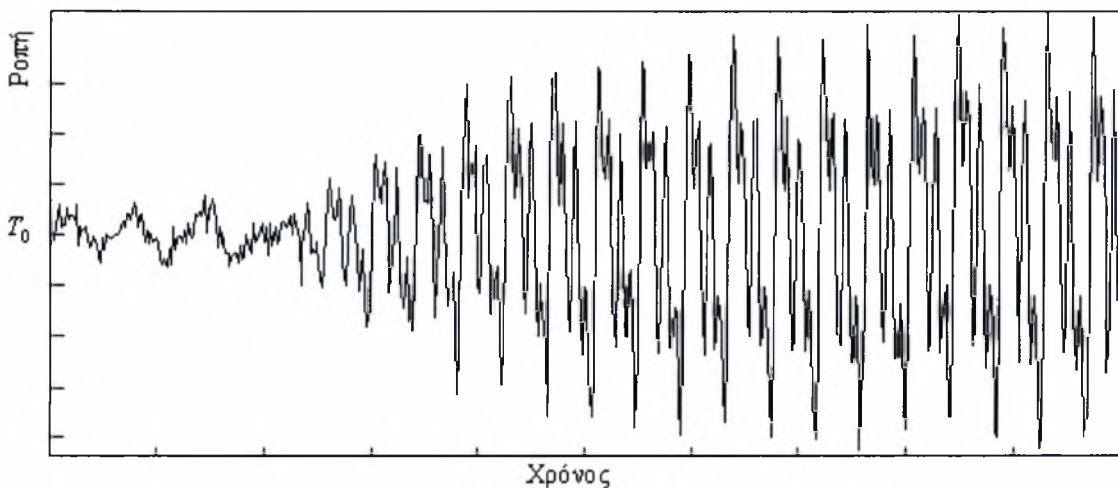
Σχήμα 4.2.1. Ροπή συναρτήσει του χρόνου για προοδευτική φθορά κοπτικού εργαλείου σε κατεργασία τόννευσης



Σχήμα 4.2.2. Απλοποιημένο μοντέλο αυτοδιέγερσης με ένα βαθμό ελευθερίας για την τόννευση



Σχήμα 4.2.3. Ροπή συναρτήσει του χρόνου για αυτοδιέγερση σε κατεργασία τόννευσης




Σχήμα 4.2.4. Ροπή συναρτήσει του χρόνου για αυτοδιέγερση σε κατεργασία φρεζαρίσματος

4.3 Εκτίμηση Σφαλμάτων

4.3.1 Εφαρμογή της Εκτίμησης Ροπής

Όμως προέκυψε από τα Κεφάλαια 2-3 με την χρήση των P-D νόμων ελέγχου επιτεύχθηκε εύρωστος τέλειος έλεγχος ταχύτητας (και θέσης για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος σταθερού μαγνήτη) με ταυτόχρονη αποκοπή διαταραχών. Με την εφαρμογή αυτών των ελεγκτών έγινε δυνατή και η εκτίμηση της εξωτερικά ασκούμενης ροπής με μέτρηση των ρευμάτων και της γωνιακής ταχύτητας, που μπορούν εύκολα να επιτευχθούν με την χρήση αμπερομέτρων και οπτικών ή ηλεκτρομαγνητικών κωδικοποιητών. Πρέπει να τονιστεί ότι η εκτίμηση της ροπής μπορεί να γίνει είτε αν είναι γνωστός ο συντελεστή τριβής για τον κινητήρα είτε αν είναι άγνωστος. Στην δεύτερη περίπτωση η ροπή λόγω τριβών μπορεί να συμπεριληφθεί στο εξωτερικά ασκούμενο φορτίο. Με αυτή την προσέγγιση δεν θα προκύψει ιδιαίτερα αξιόλογο σφάλμα στην εκτίμηση διότι ο συντελεστής τριβής συνήθως παίρνει πολύ μικρές τιμές και η τριβή είναι σίγουρα κατά πολύ μικρότερη από το εξωτερικά ασκούμενο φορτίο για κινητήρες μεγάλου μεγέθους. Ακόμη και αν η τριβή είναι σημαντική ή ο κινητήρας είναι κινητήρας μικρής ισχύος το σφάλμα θα είναι σταθερό για σταθερή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και επιτρέπει την εκτίμηση της συμπεριφοράς της ροπής. Πρέπει συγχρόνως να σημειωθεί η ροπή που υπολογίζεται με την χρήση των σχέσεων



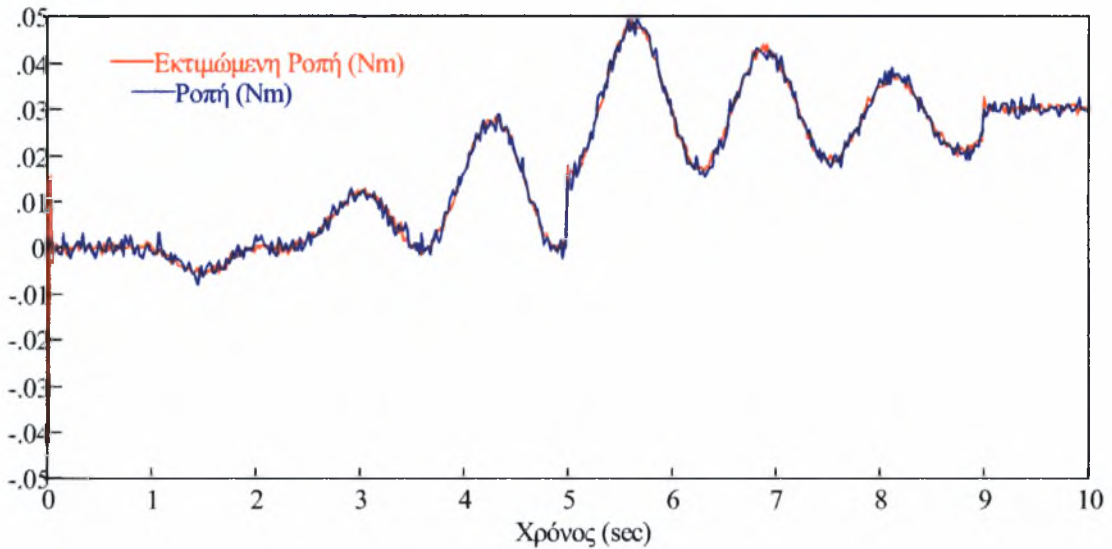
εκτίμησης θα περιλαμβάνει και τις τριβές των συστημάτων μετάδοσης της κίνησης της εργαλειομηχανής και δεν θα είναι επακριβώς η ροπή εξαιτίας της κοπής. Για σταθερές όμως ταχύτητες η τριβή μεταβάλλεται αμελητέα σε σχέση με τον χρόνο οπότε η εκτιμώμενη ροπή συμπεριφέρεται στις μεταβολές της όπως η ζητούμενη ροπή.

Διαπιστώθηκε ακόμη ότι και η φθορά του κοπτικού εργαλείου και η αυτοδιέγερση του συστήματος εργαλείο-κατεργαζόμενο κομμάτι επιδρούν άμεσα στην ροπή που ασκείται στους κινητήρες της εργαλειομηχανής. Είναι λοιπόν λογικό να χρησιμοποιηθεί η εκτίμηση της ροπής ως ένδειξη της κατάστασης φθοράς του κοπτικού εργαλείου ή της αυτοδιέγερσης του συστήματος. Προκύπτει λοιπόν ένας έμμεσος τρόπος εκτίμησης των συνθηκών κατεργασίας. Με επεξεργασία των δεδομένων που θα προκύψουν μπορεί να ληφθούν αποφάσεις για επίλυση των δημιουργούμενων προβλημάτων. Με κατάλληλη επέμβαση σε μεταβλητές όπως είναι η πρόωση, η ταχύτητα κοπής και η διάταξη αλλαγής κοπτικού εργαλείου είναι δυνατή η βελτίωση των συνθηκών κατεργασίας και την αντιμετώπιση των σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν με άμεση επενέργεια στο κομμάτι το εργαλείο και την ίδια την εργαλειομηχανή.

4.3.2 Εκτίμηση Σφαλμάτων σε DC Κινητήρες

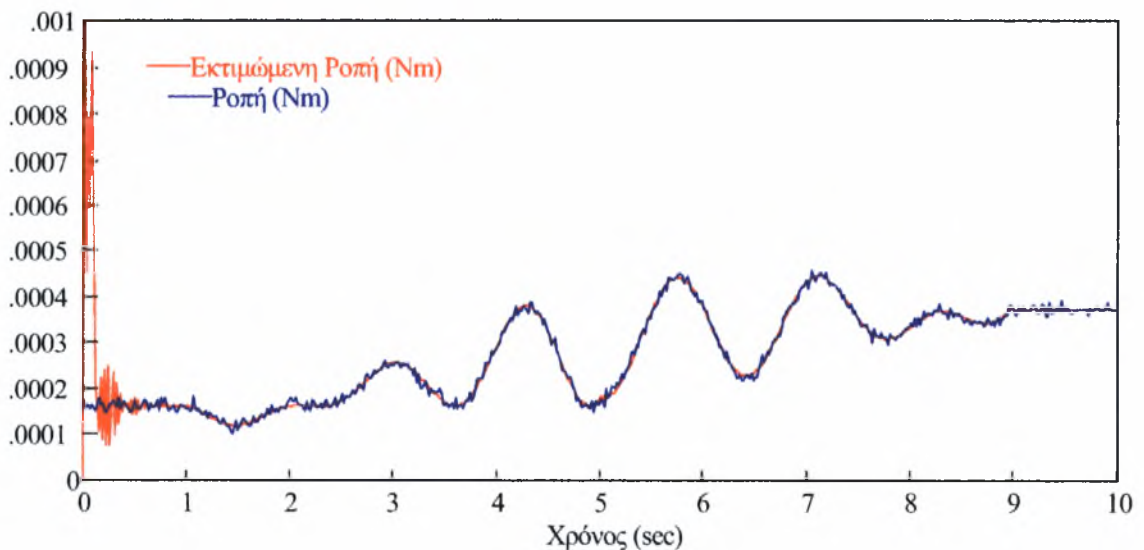
Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος σταθερού μαγνήτη η εκτίμηση της ροπής προκύπτει από την σχέση 2.5.1 και για άγνωστο συντελεστή τριβής. Αν η τριβή συμπεριληφθεί στο εξωτερικά ασκούμενο φορτίο η ροπή προκύπτει από την σχέση 2.5.2, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.5.1. Για τον κινητήρα σταθερού μαγνήτη που μελετήθηκε στην Παραγράφου 2.2.3 και αν ασκηθεί σε αυτόν η ροπή που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.2.4 η εκτίμηση της ροπής \hat{T}_l μαζί με την πραγματική ροπή T_l παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3.1.

4 Διάγνωση Σφαλμάτων κατά την Κατεργασία Υλικών



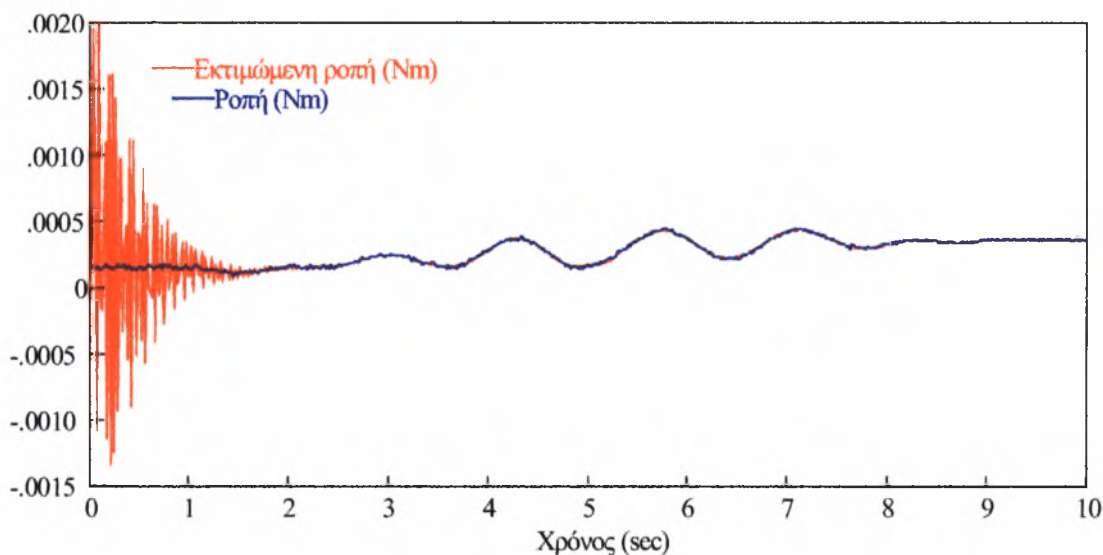
Σχήμα 4.3.1. Εξωτερικά ασκούμενη και εκτιμώμενη ροπή συναρτήσεϊ του χρόνου για κινητήρα σταθερού μαγνήτη με έλεγχο ταχύτητας

Για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον ρότορα η εκτιμώμενη ροπή προκύπτει από την σχέση 2.5.3 και για άγνωστο συντελεστή τριβής από την σχέση 2.5.4. Στο Σχήμα 4.3.2 παρουσιάζεται η εκτίμηση της ροπής \hat{T}_l μαζί με την εξωτερικά ασκούμενη ροπή T_l για τον κινητήρα που μελετήθηκε στην Ενότητα 2.3.3. Το σφάλμα της εκτίμησης παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.5.1.



Σχήμα 4.3.2. Εξωτερικά ασκούμενη και εκτιμώμενη ροπή συναρτήσεϊ του χρόνου για κινητήρα παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον ρότορα και με έλεγχο ταχύτητας

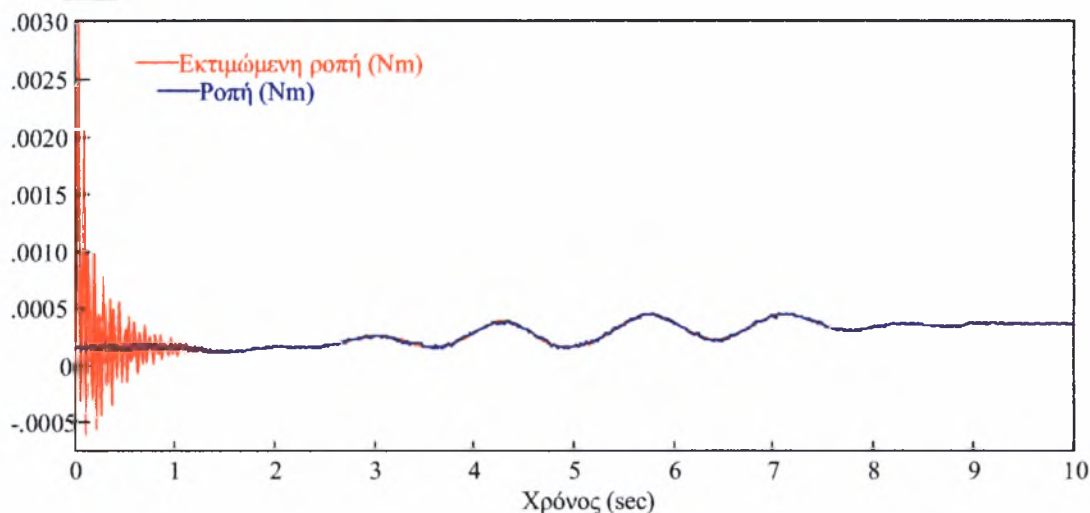
Για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον στάτορα η εκτιμώμενη ροπή δίνεται από τις ίδιες σχέσεις 2.5.3-2.5.4. Στο Σχήμα 4.3.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα της μεταβολής της εκτίμησης της ροπής \hat{T}_l και της εξωτερικά ασκούμενης ροπής T_l σε συνάρτηση με τον χρόνο για τον ίδιο κινητήρα.



Σχήμα 4.3.3. Εξωτερικά ασκούμενη και εκτιμώμενη ροπή συναρτήσεως του χρόνου για κινητήρα παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον στάτορα και με έλεγχο ταχύτητας

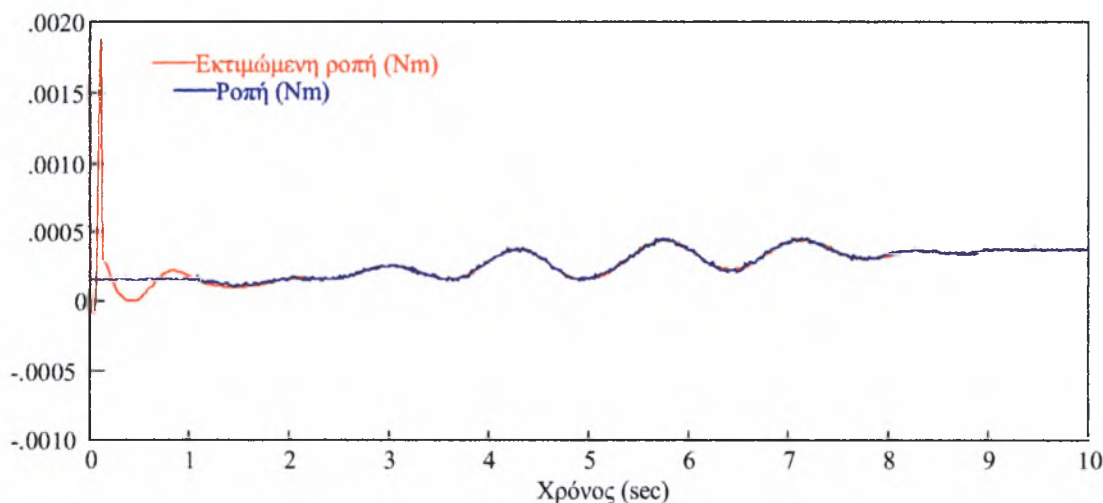
Για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης με έλεγχο ταχύτητας και του ρεύματος του ρότορα η εκτιμώμενη ροπή δίνεται από τις ίδιες σχέσεις 2.5.5-2.5.6. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης της ροπής σε αντιπαράθεση με την άγνωστη εξωτερικά ασκούμενη ροπή παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3.4.

4 Διάγνωση Σφαλμάτων κατά την Κατεργασία Υλικών



Σχήμα 4.3.4. Εξωτερικά ασκούμενη και εκτιμώμενη ροπή συναρτήσει του χρόνου για κινητήρα παράλληλης διέγερσης με έλεγχο ταχύτητας και ρεύματος του ρότορα

Για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος σειριακής διέγερσης τέλος η εκτιμώμενη ροπή σύμφωνα με την παράγραφο 2.5.1 προκύπτει από τις σχέσεις 2.5.3 και 2.5.4 για γνωστό και άγνωστο συντελεστή τριβής αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4.3.5 συγκρίνεται η εκτιμώμενη ροπή \hat{T}_l με την εξωτερικά ασκούμενη ροπή T_l σε συνάρτηση με τον χρόνο. Στο Σχήμα 2.5.2 παρουσιάστηκε το απόλυτο εκατοστιαίο σφάλμα εκτίμησης της ροπής για αυτόν τον τύπο κινητήρα.



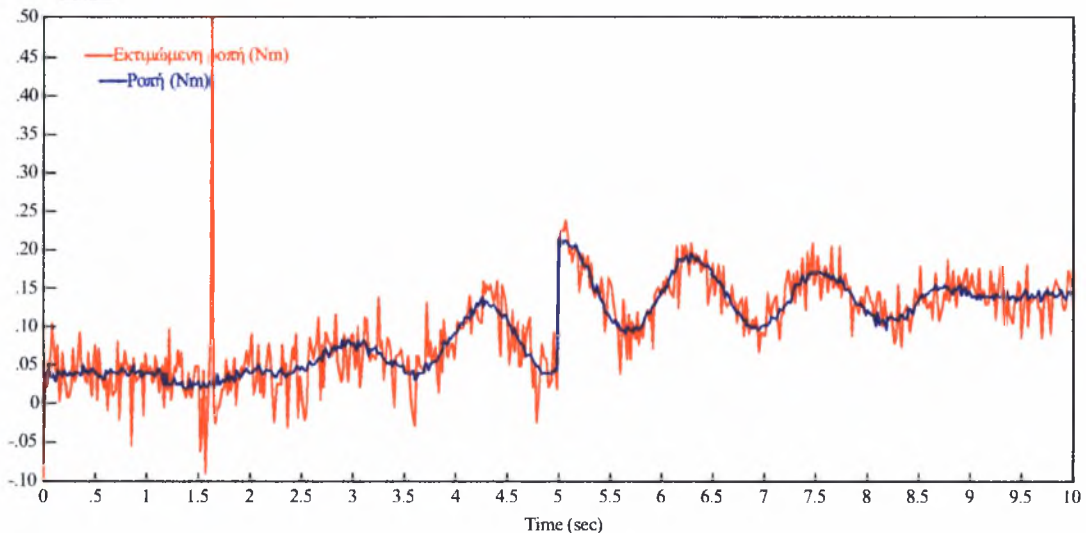
Σχήμα 4.3.5. Εξωτερικά ασκούμενη και εκτιμώμενη ροπή συναρτήσει του χρόνου για κινητήρα σειριακής διέγερσης με έλεγχο ταχύτητας

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα η εκτίμηση της ροπής γίνεται με μεγάλη ακρίβεια για όλους τους τύπους κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Παρουσιάζεται όμως μια έντονη απόκλιση από τις τιμές της πραγματικής ροπής για τις αρχικές χρονικές στιγμές. Η απόκλιση όμως μειώνεται σε χρόνο το πολύ 1 sec σε αποδεκτά επίπεδα. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο μεταβατικό στάδιο στο οποίο βρίσκεται το σύστημα κινητήρας-ελεγκτής. Στις σχέσεις υπολογισμού της ροπής η ταχύτητα λαμβάνεται σταθερή. Στην πράξη όμως μεταβάλλεται έντονα όταν ενεργοποιείται το σύστημα. Καθώς αυτό προσεγγίζει την λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η ροπή. Τα σφάλμα εκτίμησης σε μόνιμη κατάσταση συζητήθηκαν στην Ενότητα 2.5.2. Στον κινητήρα σταθερού μαγνήτη το σύστημα έχει την ταχύτερη απόκριση και η εκτιμώμενη ροπή πλησιάζει αμέσως την πραγματική τιμή της ροπής. Αν μελετηθεί η περίπτωση όπου ο συντελεστής τριβής θεωρείται ως μια άγνωστη παράμετρος η εκτιμώμενη ροπή θα είναι πάντα μεγαλύτερη κατά μια σταθερή ποσότητα. Στην περίπτωση όμως των κινητήρων συνεχούς ρεύματος που μελετήθηκαν η απόκλιση θα είναι σημαντική διότι οι κινητήρες είναι πολύ μικρής ισχύος και η ροπή της τριβής είναι σημαντική αν συγκριθεί με την εξωτερικά ασκούμενη ροπή.

4.3.3 Εκτίμηση Σφαλμάτων σε Επαγωγικούς AC Κινητήρες

Στον επαγωγικό AC κινητήρα η εκτιμώμενη ροπή δίνεται από τις σχέσεις (3.2.6) και (3.2.7) για γνωστό και άγνωστο συντελεστή τριβής αντίστοιχα. Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν για μόνιμη κατάσταση με σταθερή και διάφορη του μηδενός ταχύτητα περιστροφής και συνολική μαγνητική ροή. Η εκτίμηση της ροπής για γνωστό συντελεστή τριβής μαζί με την πραγματική ροπή παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3.6. Όπως φαίνεται από αυτό για τον επαγωγικό κινητήρα το σφάλμα εκτίμησης της ροπής είναι μικρό και ακολουθεί την εξωτερικά ασκούμενη ροπή ικανοποιητικά. Ο θόρυβος οφείλεται σε μικρές αποκλίσεις της ταχύτητας από την επιθυμητή τιμή.

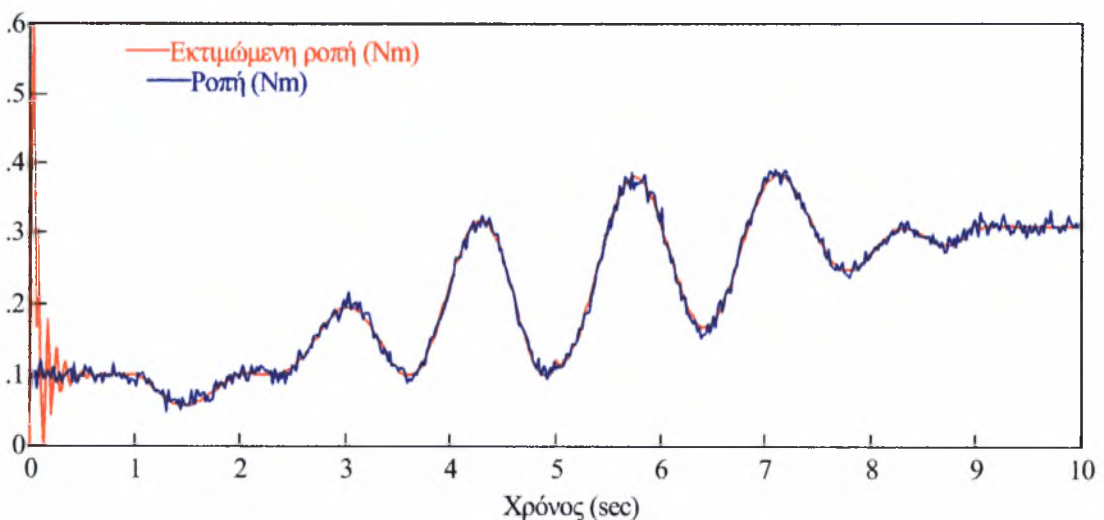
4 Διάγνωση Σφαλμάτων κατά την Κατεργασία Υλικών



Σχήμα 4.3.6. Εξωτερικά ασκούμενη και εκτιμώμενη ροπή συναρτήσεσι του χρόνου για τριφασικό επαγωγικό κινητήρα με έλεγχο ταχύτητας

4.3.4 Εκτίμηση Σφαλμάτων σε Σύγχρονους AC Κινητήρες

Στους τριφασικούς σύγχρονους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερού μαγνήτη η εκτίμηση της ροπής προκύπτει από την σχέση (3.3.6). Για άγνωστο συντελεστή τριβής, αν η τριβή θεωρηθεί ως εξωτερικά ασκούμενο φορτίο, η ροπή προκύπτει από την σχέση (3.3.7) όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.3.4. Για τον σύγχρονο κινητήρα που προσομοιώθηκε στην Ενότητα 3.3.3 η εκτίμηση της ροπής \hat{T}_l μαζί με την πραγματική ροπή T_l παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3.7.



Σχήμα 4.3.7. Εξωτερικά ασκούμενη και εκτιμώμενη ροπή συναρτήσεσι του χρόνου για τριφασικό σύγχρονο κινητήρα σταθερού μαγνήτη με έλεγχο ταχύτητας



Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.7 και για τον σύγχρονο τριφασικό κινητήρα, όπως και στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, το σφάλμα της εκτίμησης της ροπής είναι μικρό και η εκτιμώμενη ροπή προσεγγίζει ταχύτητα (0.5[s]) την εξωτερικά ασκούμενη ροπή.

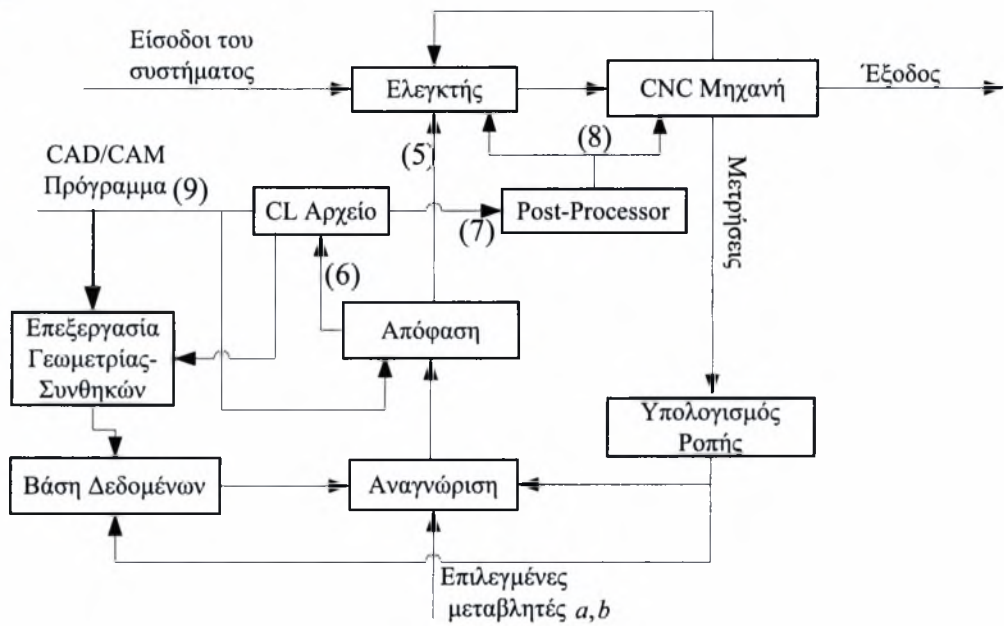
4.4 Προσαρμοστικός Αλγόριθμος Διάγνωσης και Αναίρεσης Σφαλμάτων

4.4.1 Προσαρμοστικός Αλγόριθμος

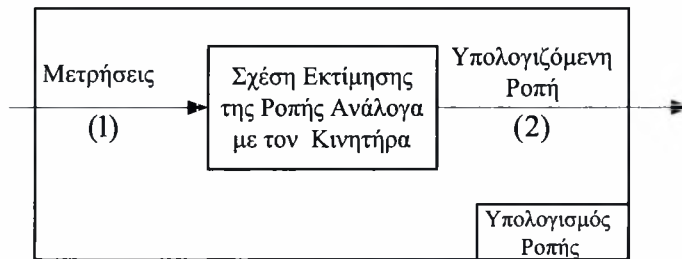
Ο εκτιμητής σε πραγματικό χρόνο της ροπής, διευκολύνει την ανάπτυξη των κατάλληλων ενεργειών που συμβάλουν στην αντιμετώπιση των σφαλμάτων. Για να επιτευχθεί η αντιμετώπιση τους αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος προσαρμοστικού έλεγχου. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα που αποτελεί την βασική αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου. Η αρίθμηση στο κείμενο αντιστοιχεί στις διαδρομές του αλγορίθμου. Τα σύμβολα Π^{-1} και \cap που χρησιμοποιούνται παριστάνουν διαίρεση και τομή αντίστοιχα. Με την χρήση του αλγορίθμου γίνεται ανάλυση των μετρήσεων και η λήψη απόφασης σε πραγματικό χρόνο για να διατηρηθούν οι συνθήκες κατεργασίας σε επιθυμητά επίπεδα.

Ο αλγόριθμος βασίζεται σε μετρήσεις των ρευμάτων και της γωνιακής ταχύτητας (1), που πραγματοποιούνται σε πραγματικό χρόνο, και με την κατάλληλη σχέση εκτίμησης της ροπής για το είδος του κινητήρα ο οποίος χρησιμοποιείται, υπολογίζεται μια εκτιμώμενη ροπή (2) (Σχήμα 4.4.2). Η ροπή καταχωρείται αυτόματα σε μία βάση δεδομένων (3) (Σχήμα 4.4.4) και ανάλογα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ροπής λαμβάνεται απόφαση η οποία αλλάζει τις συνθήκες κατεργασίας. Οι συνθήκες αλλάζουν μεταβάλλοντας την εντολή στον ελεγκτή ανατροφοδότησης (5) ή η μεταβολή γίνεται στην εντολή της εργαλειομηχανής. Η αλλαγή μπορεί να γίνει είτε απευθείας στο εκτελούμενο πρόγραμμα είτε στο CL αρχείο (6) το οποίο επεξεργάζεται από τον μετεπεξεργαστή (Post-Processor) (7) και παράγεται το εκτελέσιμο πρόγραμμα (8). Ο προσαρμοστικός έλεγχος επεξεργάζεται και γεωμετρικά δεδομένα από το πρόγραμμα CAD/CAM (9).

4 Διάγνωση Σφαλμάτων κατά την Κατεργασία Υλικών



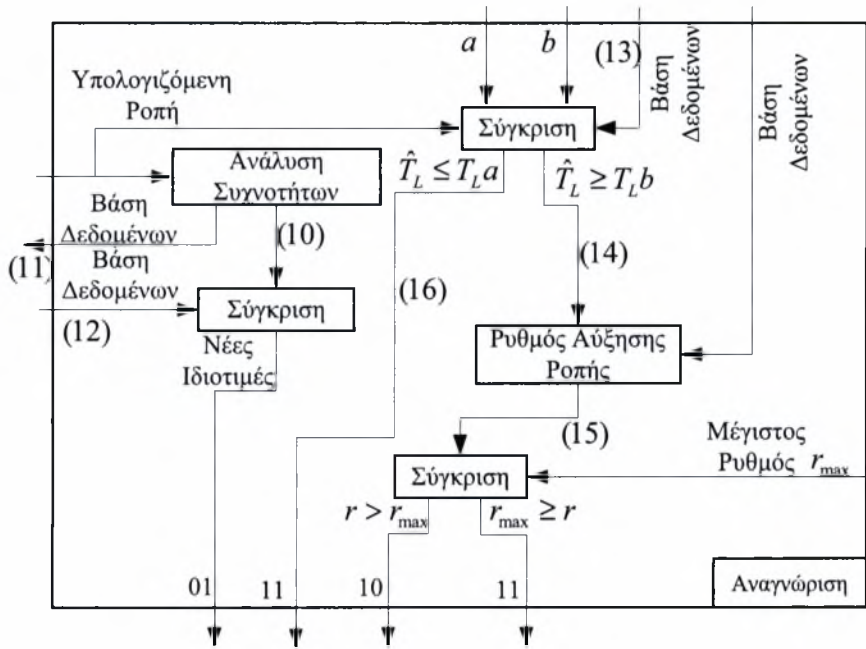
Σχήμα 4.4.1. Προσαρμοστικός αλγόριθμος αντιμετώπισης σφαλμάτων κατά τις κατεργασίες κοπής



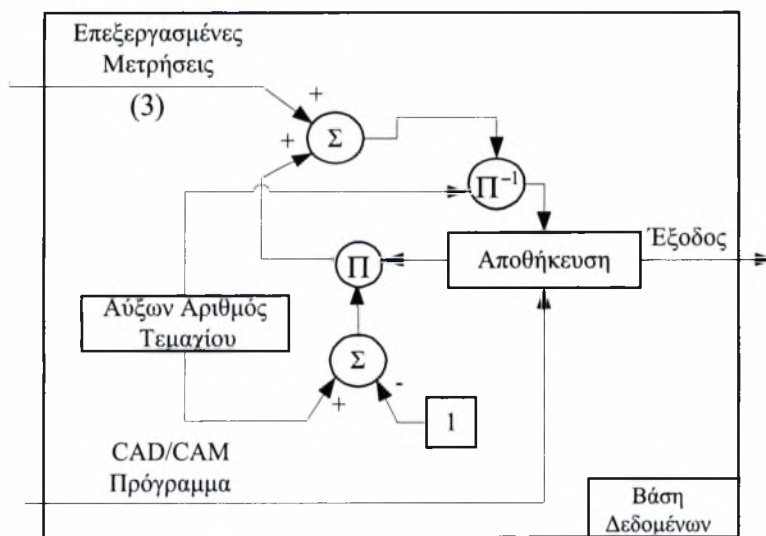
Σχήμα 4.4.2. Υπολογισμός της εκτιμώμενης ροπής

Στην συνέχεια, όταν γίνει ανάλυση των συχνοτήτων (10) τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων (11). Κατόπιν γίνεται σύγκριση των τιμών των συχνοτήτων στη βάση δεδομένων (12) με τις συχνότητες της τρέχουσας τιμής της ροπής. Αν υπάρχουν νέες ιδιοτιμές τότε επιλέγεται ως επίλυση του προβλήματος η μεταβολή της εντολής της ταχύτητας στον κινητήρα (SSV) [28], [29]. Η εντολή αντιστοιχεί στην απόφαση 01 με την οποία αντιμετωπίζεται η αυτοδιέγερση. Αν δεν υπάρχουν νέες ιδιοτιμές τότε το πλάτος της ροπής συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από την βάση δεδομένων (13), σύμφωνα με το Σχήμα 4.4.4 και αποθηκεύεται σε αυτή. Αν διαπιστωθεί αύξηση της ροπής μεγαλύτερη από ένα ποσοστό b (14) που μπορεί να μεταβληθεί (αντιστοιχία με έντονη φθορά του εργαλείου) ελέγχεται ο ρυθμός αύξησης της ροπής (15). Αν είναι μεγαλύτερος από ένα μέγιστο ρυθμό r_{\max} που επιλέγεται

ανάλογα με τις συνθήκες κοπής, σημαίνει ότι το κοπτικό εργαλείο δεν έχει την απαιτούμενη σκληρότητα για το κατεργαζόμενο υλικό, οπότε γίνεται αλλαγή του τύπου του εργαλείου (εντολή 10), ενώ αν είναι μικρότερος από το ποσοστό αυτό, απλώς αντικαθίσταται το εργαλείο (εντολή 11). Η μείωση της ροπής κατά ένα ποσοστό a εκτιμάται ότι οφείλεται σε θραύση του εργαλείου και αντιμετωπίζεται με αντικατάσταση του (εντολή 11).



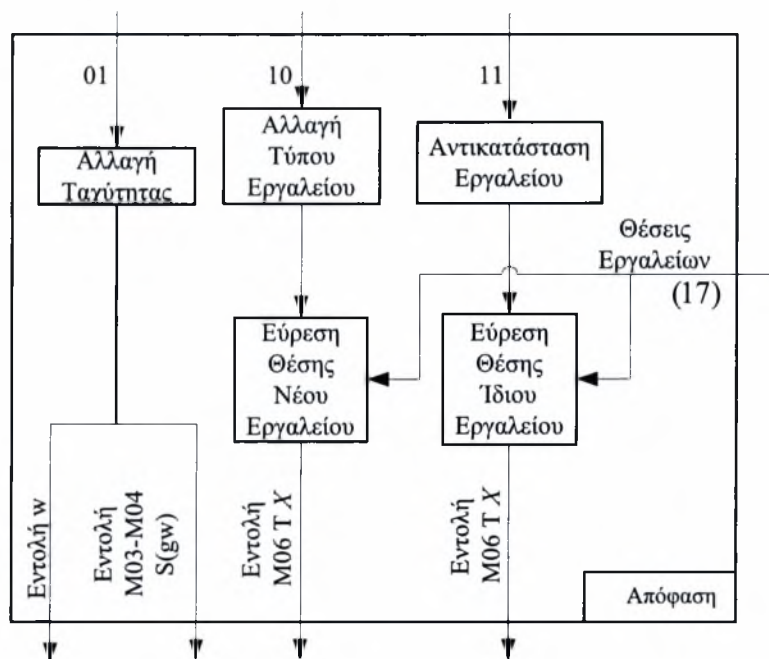
Σχήμα 4.4.3. Τμήμα αναγνώρισης του σφάλματος



Σχήμα 4.4.4. Βάση Δεδομένων για τιμές της ροπής

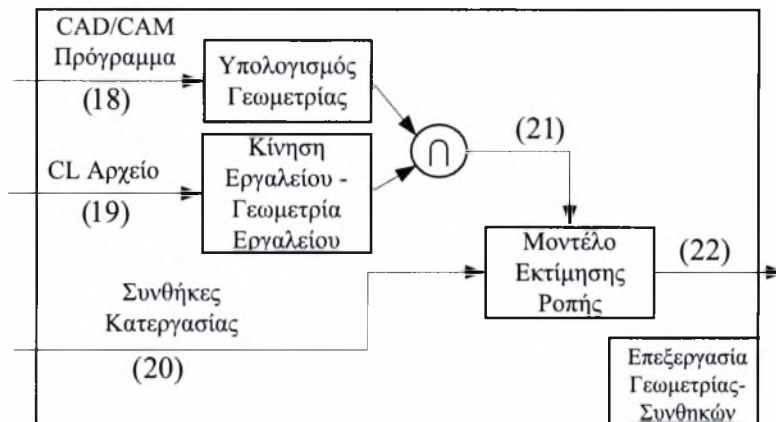
4 Διάγνωση Σφαλμάτων κατά την Κατεργασία Υλικών

Μετά την επιλογή εντολής, ο αλγόριθμος συνεχίζει στο τμήμα της απόφασης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.5. Στο τμήμα αυτό οι εντολές (01-11) μετατρέπονται σε εντολές κώδικα G ή εντολές του αρχείου CL και εντολή στον ελεγκτή. Στο σχήμα παρουσιάζεται η περίπτωση που ως έξοδο προκύπτει απευθείας κώδικας G. Γίνεται αναζήτηση της θέσης του εργαλείου (17) μέσω της ειδικής διάταξης που έχουν οι βάσεις των εργαλείων και ενημερώνουν συνεχώς την MCU για την θέση του κάθε [2], [5]. Με X συμβολίζεται η θέση του επιθυμητού εργαλείου.



Σχήμα 4.4.5. Λήψη απόφασης για την αντιμετώπιση του σφάλματος

Κατά την εκκίνηση της εκτέλεσης του προγράμματος δημιουργείται το πρόβλημα της έλλειψης στοιχείων στην βάση δεδομένων, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση με την εκτιμώμενη τιμή. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται δεδομένα από το CAD/CAM πρόγραμμα (18), το εξαγόμενο CL αρχείο (19) και τις υπόλοιπες συνθήκες κατεργασίας (20), όπως είναι η σκληρότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου. Στο Σχήμα 4.4.6 παρουσιάζεται το τμήμα επεξεργασίας της γεωμετρίας και των συνθηκών κοπής.



Σχήμα 4.4.6. Υπολογισμός αρχικής ροπής για την βάση δεδομένων με επεξεργασία της γεωμετρίας και των συνθηκών κοπής

Από την γεωμετρία του ακατέργαστου τεμαχίου, όπως έχει σχεδιαστεί στο CAD/CAM πρόγραμμα και την κίνηση του κοπτικού εργαλείου υπολογίζεται η τομή (intersection) των δύο σωμάτων κατά την σχετική τους κίνηση. Υπολογίζεται με αυτόν τον τρόπο ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού (21). Το αποτέλεσμα αυτό μαζί με τις υπόλοιπες συνθήκες κατεργασίας εισάγονται σε ένα κατάλληλο μοντέλο εκτίμησης της ροπής κατά την κοπή και το αποτέλεσμα εισέρχεται στη βάση δεδομένων σαν πρώτο στοιχείο (22). Η βάση δεδομένων (Σχήμα 4.4.4) δίνει σαν έξοδο μια συνεχώς μεταβαλλόμενη τιμή για την ροπή καθώς υπολογίζει συνεχώς τον μέσο όρο των τιμών που δέχεται. Με τον τρόπο αυτό σφάλματα που μπορεί να προκύπτουν από κακή χρήση του μοντέλου εκτίμησης της ροπής κατά την κατεργασία διορθώνονται συνεχώς από τις τιμές που προκύπτουν από την εξέλιξη της κατεργασίας. Συνοψίζοντας παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος προσεγγίζει ασυμπτωτικά μια σταθερή κατάσταση λειτουργίας.

Επιτεύχθηκε λοιπόν η δημιουργία ενός προσαρμοστικού αλγόριθμου που επιτυγχάνει μέσα από τις σχέσεις εκτίμησης της ροπής που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια να επιλύσει το πρόβλημα της διάγνωσης και αντιμετώπισης σφαλμάτων στις εργαλειομηχανές με ψηφιακή καθοδήγηση. Τα σφάλματα που αντιμετωπίζει είναι η θραύση, η φθορά και η αυτοδιεγείρομενη ταλάντωση του συστήματος.

4.4.2 Υπολογισμός της Ροπής κατά την Κοπή

Για τον υπολογισμό της ροπής για τις κατεργασίες κοπής έχουν γίνει [1],[4] και συνεχώς γίνονται νέες προσπάθειες για την πληρέστερη περιγραφή της με μια αναλυτική σχέση [27], [30]-[37]. Η πολυπλοκότητα του φαινομένου και οι έντονες αβεβαιότητες κάνουν όμως σχεδόν αδύνατη την πλήρη μοντελοποίηση του. Παρά τα προβλήματα υπάρχουν αρκετές σχέσεις στην βιβλιογραφία που περιγράφουν μεμονωμένες περιπτώσεις κατεργασιών κοπής, εξετάζοντας τις ιδιαιτερότητες της κάθε μιας ξεχωριστά [27], [30]-[32], [37]. Είναι δυνατό λοιπόν σχεδόν πάντα να προσδιορισθεί μια εμπειρική ή πειραματική σχέση για την εκτίμηση της ροπής που θα ασκείται στον κινητήρα και κατά συνέπεια να ενημερωθεί η βάση δεδομένων του Σχήματος 4.4.4, διάμεσο της επεξεργασίας των δεδομένων για τις συνθήκες εκτέλεσης της κατεργασίας (Σχήμα 4.4.6). Στην συνέχεια παρουσιάζονται εμπειρικές και πειραματικές σχέσεις για τις συνήθεις κατεργασίες κοπής.

Για την διαμήκη τόνρευση μπορεί για παράδειγμα να υπολογιστεί η συνισταμένη δύναμη κοπής από την πειραματική σχέση 4.4.1 (σχέση Kienzle-Victor) [1].

$$F_T = b_1 k_{ST} h^{(1-Z_T)} K_\gamma K_\nu K_\epsilon K_\phi [\text{daN}] \quad (4.4.1)$$

όπου h το πάχος του αποβλίττου, K_{ST} ειδική αντίσταση κοπής (σταθερά Kienzle-Victor), b_1 το θεωρητικό πλάτος του αποβλίττου, Z_T εκθέτης οι τιμές του οποίου προσδιορίζονται πειραματικά, $K_\gamma = 1 - \frac{\gamma - \gamma_0}{66.7}$ όπου γ η γωνία αποβλίττου και γ_0 σταθερά που εξαρτάται από το κατεργαζόμενο υλικό, K_ν συντελεστής που εξαρτάται από την ταχύτητα κοπής, K_ϵ συντελεστής που εξαρτάται από το υλικό του εργαλείου και K_ϕ διορθωτικός συντελεστής φθοράς του κοπτικού εργαλείου. Από την παραπάνω σχέση εύκολα μπορεί να προκύψει η ροπή που ασκείται στον ηλεκτροκινητήρα, αν η δύναμη πολλαπλασιαστεί με την ακτίνα της κατεργαζόμενης επιφάνειας του τεμαχίου.

Για την πλήρη διάτρηση η ροπή στρέψεως θα είναι:

$$M_d = F_{Tz} \frac{D}{20} [\text{cmdaN}] \quad (4.4.2)$$

όπου η D η διάμετρος της οπής και F_{Tz} είναι η κύρια συνιστώσα της δυνάμεως κοπής και προκύπτει από την σχέση:



$$F_{T_z} = \frac{D}{2 \sin(\omega/2)} k_{ST} h_z^{1-z} [\text{daN}] \quad (4.4.3)$$

Οι σταθερές k_{ST} και Z προκύπτουν από πίνακες. Για την περίπτωση της διάνοιξης οπής αρκεί να αντικατασταθεί στην σχέση 4.4.2 το D με $D+d$ όπου d η διάμετρος της υπάρχουσας οπής και στην σχέση 4.4.3 το D με $D-d$ και οι συντελεστές προκύπτουν από πίνακες για διεύρυνση οπής.

Για το φρεζάρισμα τέλος η μέση κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ισχύει:


$$F_{T_{zm}} = \frac{114.6}{\varphi_s^0} s_z \sin(\kappa) \frac{B}{D} b k_{ST} [\text{daN}] \quad (4.4.4)$$

όπου φ_s^0 η γωνία πλήρους αποκοπής, s_z η πρόωση ανά οδόντα, B το πλάτος του τεμαχίου, D η ονομαστική διάμετρος του εργαλείου, b το αξονικό βάθος κοπής και k_{ST} η ειδική αντίσταση κοπής. Η ροπή μπορεί να προκύψει με τον πολλαπλασιασμό της δύναμης με μια ενεργό ακτίνα για την κοπή [1].

Εκτός από αυτές τις σχέσεις έχει προταθεί και πληθώρα άλλων σχέσεων που έχουν προκύψει από πειραματικά κυρίως αποτελέσματα και σπανιότερα από θεωρητική αντιμετώπιση του μοντέλου της κοπής [33], [37], [39].

Βιβλιογραφία-Αρθρογραφία

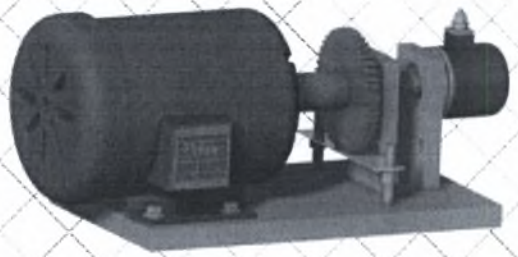
- [1] Π. Πετρόπουλος: “Μηχανουργική Τεχνολογία Τόμος II-1”, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1998
- [2] Ε. Παπαδανιήλ και Μ. Σφαντζικόπουλος: “Μηχανουργική Τεχνολογία Εργαστήριο II”, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα, 1994
- [3] Μ. Hashish: “Controlled-Depth Milling of Isogrid Structures With AWJs”, *Trans. of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 120, pp.21-27, February 1998
- [4] Boothroyd, G. and W. Knight: *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Marcel Dekker, Inc., 1989
- [5] Steve Krar and Arthur Gill: “CNC Technology and Programming”, MacMillan/McGraw-Hill, 1990
- [6] S. Dietmar, N. Gottfried, P. Heinz, K. Herbert and B. Herwig: “*Steuern und Regein im Maschinenbau, 6 Auflage*”, Verlag Europa, Haan-Gruiten-Germany, 1997
- [7] Leonard W.: *Control of Electrical Drives*, Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- [8] Tobias, S. A.: *Machine Tool Vibration*, Blackie & Son, Ltd., 1995
- [9] A. M Shawky and M. A. Elbestawi: “Model-Based Control of workpiece Accuracy in Bar Turning”, *Trans. of ASME Jour. Of Manuf. Science and Engineering*, Vol. 120, pp. 57-67, February 1998
- [10] J. I. El Gomayel and K. D. Bregger: "On-Line Tool Wear Sensing for Turning Operations", *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*, vol. 108, pp. 44-47
- [11] D. Cuppini, G. Dérrico and G. Rutelli: “Tool wear Monitoring based on cutting power measurement” *Wear*, vol.139, 303-311, 1990
- [12] Y. Altintas and I. Yellowley: “In-Process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models”, *Trans. of ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 149-157, May 1989
- [13] Koenig, W., Langhammer, K., and Schemmel, H. U. : "Correlations Between Cutting Force Components and Tool Wear", *Annals of the C.I.R.P.*, vol.21, pp. 19-20, 1972

-
- 
- [14] P. J. A. Lever, M. M. Marefat and T. Ruwani: "A Machine Learning Approach to Tool Wear Behavior Operational zones", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 33, No. 1, January/February 1997
- [15] X. Q. Li, Y. S. Wong and A. Y. C. Nee: "A Comprehensive Identification of Tool Failure and Chatter Using a Parallel Multi-ART2 Neural Network", *Trans. of ASME Jour. Of Manuf. Science and Engineering*, Vol. 120, pp. 433-442, May 1998
- [16] Fu Julian, Yuan Zhejun and Yao Yingxue: "A Unified System Model Of Cutting Chatter and its Transformation Function", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 29, No. 4 pp. 601-609, 1989
- [17] J. Tlusty and F. Ismail: "Special Aspects of chatter in Milling", *Trans. of ASME Jour. Of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, Vol. 105, pp. 24-32, January 1983
- [18] Opitz, H. and F. Bernardi: "Investigation and Calculation of the Chatter Behavior of Lathes and Milling machines" *Annals of the C.I.R.P.*, Vol. 118, 1970
- [19] Tlusty, J. and Isamil, F. "Basic Nonlinearity in Machining Chatter" *Annals of the C.I.R.P.*; vol.30, pp.21-25, 1981
- [20] Minis, I., Yanushevsky, R. and Tembo, A.: "Analysis of Linear and Nonlinear Chatter in Milling" *Annals of the C.I.R.P.*, vol.39, pp.459-462, 1990
- [21] Bouzakis, K-D and G. Petropoulos: "A time domain simulation of chatter in face turning operations", *Proceedings of the 6th International Conference on computer aided production engineering*, London Proc. Pp. 469-474, 1990
- [22] S. Braun: "Signal Processing for the Determination of Chatter Threshold", *Annals of the CIRP*, Vol. 24, pp.315-320, 1975
- [23] E. Budak, Y. Altintas: "Analytical Prediction of chatter stability in Milling-Part I: General Formulation", *Trans. of ASME Jour. Of Dynamic Systems Measurement, and Control*, Vol. 120, pp. 22-30, March 1998
- [24] E. Budak, Y. Altintas: "Analytical Prediction of chatter stability in Milling-Part II: Application of the General Formulation to common Milling systems", *Trans. of ASME Jour. Of Dynamic Systems Measurement, and Control*, Vol. 120, pp. 31-36, March 1998
- [25] R. A. Thompson: "Chatter Growth-Tests to Evaluate the Theory", *Trans. of ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 110, pp. 344-351, November 1988

- [26] Jemielniak, K. and A Widota: "Numerical Simulation of Non-Linear Chatter Vibration in Turning" *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 29, No2 ,1989
- [27] J. Tlusty: "Dynamics of high Speed Milling", *Trans. of ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 108, pp. 59-67, May 1986
- [28] Y. S. Liao and Y. C. Young: "A new on-line spindle speed regulation strategy for chatter control", *J. Int. Mach. Tools Manufact.* Vol. 36, No. 5, pp. 651-660, 1996
- [29] K. Jemielniak and A. Widota: "Suppression of Self-Excited Vibration by the Spindle Speed Variation Method", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 24, pp. 207-214, 1984
- [30] F. M. Kolarits and W. R. DeVries: "A Mechanistic Dynamic Model for End Milling for Process Controller Simulation", *Trans. of ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 176-183, May 1991
- [31] J. A. Arsecularatne, R. F. Fowle, P. Mathew: "Prediction of Chip Flow Direction, Cutting Forces and Surface Roughness in Finish Turning", *Trans. of ASME Jour. Of Manuf. Science and Engineering*, Vol. 120, pp. 1-12, February 1998
- [32] Li Zheng, S. Y. Liang and S. N. Melkote: "Angle Domain Analytical Model for End Milling Forces", *Trans. of ASME Jour. Of Manuf. Science and Engineering*, Vol. 120, pp. 252-258, May 1998
- [33] L. K. Lauderbaugh, A. G. Ulsoy: "Dynamic Modeling for Control of the Milling Process", *Trans. of ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 110, pp. 367-375, November 1988
- [34] S. Smith and J. Tlusty: "An overview of Modeling and Simulation of the Milling Process", *Trans. of ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 169-175, May 1991
- [35] K. Danai, R. Nair, S. Malkin: "An Improved Model for Force Transients in Turning", *Trans. of ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 114, pp. 400-403, November 1992
- [36] H. El Mounayri, A. D. Spence and M. A. Elbestawi: "Milling Process Simulation- A Generic Solid Modeler Based Paradigm", *Trans. of ASME Jour. Of Manuf. Science and Engineering*, Vol. 120, pp. 213-221, May 1998



-
- [37] V. Chandrasekharan, S. G. Kapoor and R. E. DeVor: "A Mechanistic Model to Predict the Cutting Force System for Arbitrary Drill Point Geometry", *Trans. of ASME Jour. Of Manuf. Science and Engineering*, Vol. 120, pp. 563-570, August 1998
- [38] Koumboulis F. N. and Boukas T., "Towards Perfect Output Control for Induction Motors", submitted.
- [39] Srinivasan, K. and Tsu Chin Tsao: "Machine Tool Feed Drives and Their Control-A Survey of the State of the Art" *Trans. of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 119, pp.743-748, 1997



Πειραματικά Αποτελέσματα

5

5.1 Γενικά Στοιχεία

Με την χρήση των νόμων ελέγχου ταχύτητας τόσο για τους DC όσο και για τους επαγωγικούς και σύγχρονους AC κινητήρες, προκύπτουν σχέσεις με βάση τις οποίες είναι εύκολο να γίνει εκτίμηση της εξωτερικά ασκούμενης ροπής (Κεφάλαια 2-3). Για την εκτίμηση γίνονται μετρήσεις των ρευμάτων και της ταχύτητας που είναι εύκολο να πραγματοποιηθούν με την χρήση αμπερομέτρων και οπτικού κωδικοποιητή αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μπορούν να εφαρμοστούν για την εκτίμηση της ροπής σε πολλές εφαρμογές, μία από τις οποίες είναι και η μηχανουργικές κατεργασίες. Είναι δυνατό με βάση την ροπή που αναπτύσσεται κατά τις συμβατικές κατεργασίες κοπής να διαγνωστούν σφάλματα όπως είναι η φθορά του κοπτικού εργαλείου και η αυτοδιεγερόμενη ταλάντωση του συστήματος εργαλείο-κατεργαζόμενο τεμάχιο-εργαλειομηχανή (Κεφάλαιο 4).


Η εκτίμηση της ροπής μελετάται πειραματικά για έναν τριφασικό επαγωγικό κινητήρα με έλεγχο ταχύτητας. Η πειραματική διάταξη κατασκευάστηκε το 1998 από το Θ. Μπούκα στις εργαστηριακές ασκήσεις συστημάτων του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας [1]. Για την εκτέλεση των πειραμάτων αναπτύχθηκε διάταξη άσκησης σταθερής και μεταβαλλόμενης ροπής. Ως εξωτερικό φορτίο ασκούνται σταθερή ροπή με τρία διαφορετικά πλάτη και περιοδικά μεταβαλλόμενη ροπή με επίσης τρία διαφορετικά πλάτη για δύο διαφορετικές ταχύτητες. Γίνεται μέτρηση των ρευμάτων και της ταχύτητας για χρονικό διάστημα 5.1sec και με κατάλληλη επεξεργασία προκύπτει μια εκτίμηση της ροπής για το

συνολικό φαινόμενο από την εκκίνηση του κινητήρα έως μία μόνιμη κατάσταση. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους και προκύπτει ότι η εκτιμώμενη ροπή συμπεριφέρεται ανάλογα με το πραγματικό εξωτερικά ασκούμενο φορτίο.

5.2 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας επαγωγικός κινητήρας Baldor M3541. Είναι ένας κινητήρας δύο πόλων με μέγιστη ταχύτητα 3450[rpm], μέγιστη τάση λειτουργίας 230V και μέγιστο ρεύμα λειτουργίας 2.7A. Οι παράμετροι του μοντέλου του κινητήρα είναι: Ο αριθμός ζευγών πόλων $n_p = 1$, οι αντιστάσεις και οι αυτεπαγωγές στον στάτορα και στον ρότορα αντίστοιχα $R_s = 3.05[\Omega]$, $L_s = 0.243[H]$, $R_r = 2.12[\Omega]$, $L_r = 0.306[H]$ και η αμοιβαία επαγωγή $M = 0.225[H]$. Η ροπή αδράνειας του κινητήρα είναι $J = 2 \cdot 10^{-4} [kg \cdot m^2]$ και ο συντελεστής τριβής είναι για τον κινητήρα $D = 0.002 [N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}]$. Στον άξονα του κινητήρα είναι προσαρμοσμένος ο οπτικός κωδικοποιητής BEC 735-LI που λειτουργεί με δίοδο εκπομπής φωτός (LED) και έχει την δυνατότητα να παράγει 2000 παλμούς ανά περιστροφή. Ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 1[kHz], οπότε προκύπτει ότι το σφάλμα μέτρησης της ταχύτητας θα είναι $\pm\pi$ [rad]. Η ροπή εκκίνησης του οπτικού κωδικοποιητή δίνεται να είναι $0.002 [N \cdot m]$, οπότε η ροπή κατά την σταθερή περιστροφή του θα είναι σημαντικά μικρότερη και ασήμαντη σε σχέση ακόμη και με την τριβή του κινητήρα ($F\omega_m$ με $F = 0.002$ και την γωνιακή ταχύτητα να παίρνει τιμές για ταχύτητες λειτουργίας συνήθως $100 [rad \cdot s^{-1}] \leq \omega \leq 361 [rad \cdot s^{-1}]$).

Ο ελεγκτής είναι ένας P-D ελεγκτής που ανατροφοδοτεί το σφάλμα της ταχύτητας. Ο συντελεστής ενίσχυσης του αναλογικού όρου επιλέγεται (P gain) να είναι: $pg = 10$ και του διαφορικού όρου (D gain): $dg = 0$. Ο ελεγκτής δηλαδή χρησιμοποιείται ως ελεγκτής τύπου P. Σαν είσοδο δέχεται την επιθυμητή γωνιακή ω_d ταχύτητα και την πραγματική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα ω_m (όρος ανατροφοδότησης που προέρχεται από τον οπτικό κωδικοποιητή) και έχει σαν εξόδους το πλάτος της τάσης V_0 και την συχνότητα της ω . Οι εξόδοι του ελεγκτή αποτελούν εισόδους γεννήτριας ημιτονοειδούς τάσης που παράγει της τρεις ημιτονοειδείς τάσεις U , V , W με την



απαραίτητη διαφορά φάσης μεταξύ τους. Οι τάσεις αυτές μετατρέπονται σε παλμικά σήματα με διάταξη PWM, ενισχύονται σε μονάδα ισχύος και τροφοδοτούν τον κινητήρα [1].

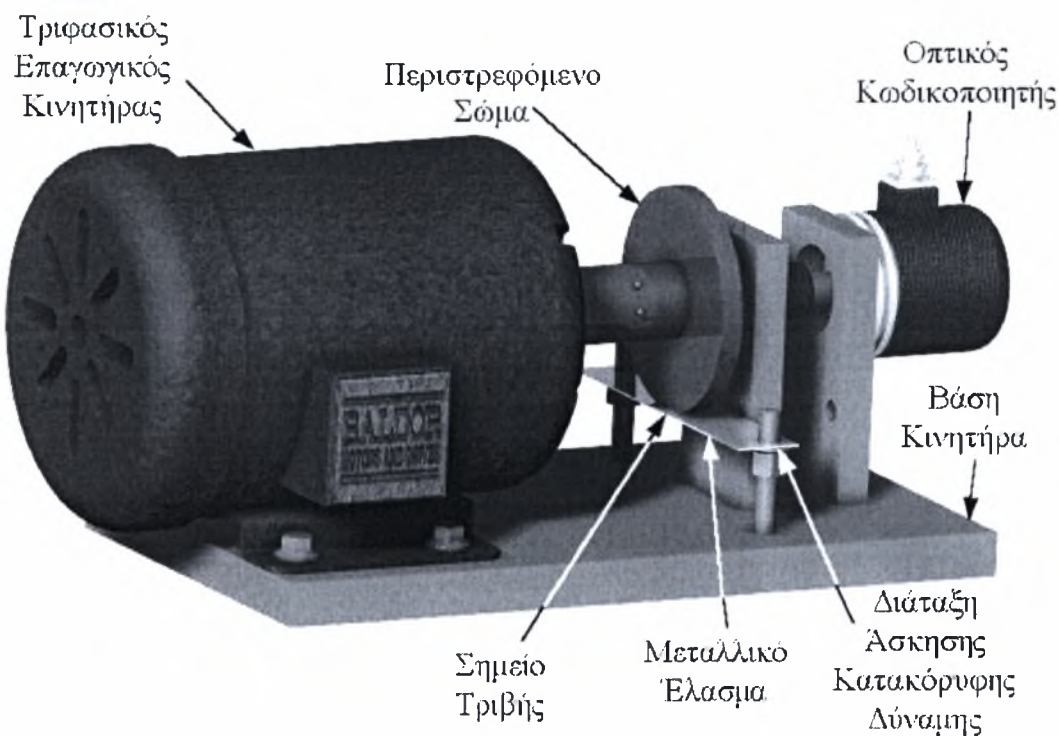
Ο χρησιμοποιούμενος μικροελεγκτής είναι ο 80C196MC της INTEL προσαρμοσμένος πάνω σε πειραματική πλακέτα αποτίμησης (Evaluation Board EV80C196MC). Η πειραματική πλακέτα είναι συνδεδεμένη σειριακά (RS232) με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι παράμετροι του ελεγκτή καθώς και οι εξωτερικές εντολές δίνονται στο πρόγραμμα το οποίο γράφεται στον υπολογιστή μεταγλωττίζεται και μεταφέρεται σειριακά στην μνήμη της πλακέτας αποτίμησης. Το πρόγραμμα εκτελείται ανεξάρτητα του υπολογιστή και στην μνήμη της πλακέτας αποτίμησης μεταφέρονται τα αποτελέσματα της μέτρησης των ρευμάτων ή της ταχύτητας. Λόγω του περιορισμένου μεγέθους της μνήμης της πλακέτας αποτίμησης αποθηκεύεται σε αυτή η μέτρηση για τα πρώτα 5.1[s] και μόνο για το ένα από τα ρεύματα i_{sa} , i_{sb} ή την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα ω_m κάθε φορά. Η επιλογή της μεταβλητής που θα αποθηκευθεί γίνεται ανάλογα με τις εντολές του προγράμματος [1].

Με το τέλος της εκτέλεσης του προγράμματος τα αποτελέσματα των μετρήσεων μεταφέρονται σειριακά από την μνήμη της πλακέτας αποτίμησης σε δυαδική μορφή στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αφού μετατραπούν σε δεκαδική μορφή με χρήση κατάλληλου προγράμματος τότε γίνεται δυνατή η επεξεργασία τους. Για την επίλυση του προβλήματος που δημιουργείται λόγω της μικρής μνήμης της πλακέτας αποτίμησης και της αδυναμίας να γίνουν μετρήσεις και για την ταχύτητα και για τα δύο ρεύματα ταυτόχρονα σε ικανοποιητικά μεγάλο χρονικό διάστημα, το πείραμα εκτελέστηκε τρεις φορές για κάθε περίπτωση εξωτερικά ασκούμενης ροπής χωρίς μεταβολές στην πειραματική διάταξη. Αν θεωρηθεί ότι οι συνθήκες της επαφής τριβής, που παρουσιάζονται στην συνέχεια, παραμένουν σταθερές τότε αυτή αποτελεί μια καλή παραδοχή.

5.3 Διάταξη Μεταβολής της Ροπής

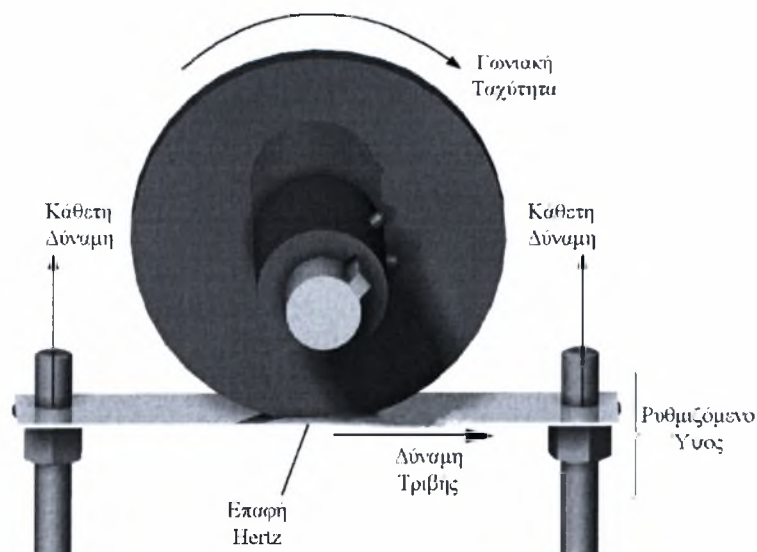
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.1. Στον άξονα του κινητήρα είναι συνδεδεμένο ένα περιστρεφόμενο κυλινδρικό σώμα και ο οπτικός κωδικοποιητής.

5 Πειραματικά Αποτελέσματα



Σχήμα 5.3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Καθώς ο κινητήρας περιστρέφεται το κυλινδρικό σώμα εφάπτεται επάνω σε έλασμα ανοξειδωτου χάλυβα. Η ακτινική δύναμη η οποία ασκείται από το έλασμα στο κυλινδρικό σώμα περιγράφεται με το μοντέλο επαφής του Hertz [2], και ρυθμίζεται με την διάταξη μεταβολής της ροπής του Σχήματος 5.3.2 που είναι κατάλληλα προσαρμοσμένη στην βάση του κινητήρα.



Σχήμα 5.3.2 Διάταξη άσκησης σταθερής ροπής



Μεταβάλλοντας το ύψος των περικοχλίων, μεταβάλλεται και το βέλος κάμψης του ελάσματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το βέλος κάμψης τόσο μεγαλύτερη είναι η κάθετη (ακτινική) δύναμη και η επιφάνεια επαφής του ελάσματος με το κυλινδρικό σώμα. Επιτεύχθηκε με την χρήση αυτής της απλής διάταξης η άσκηση μεταβαλλόμενης ροπής στον άξονα του κινητήρα.

Για την δημιουργία περιοδικά μεταβαλλόμενης δύναμης χρησιμοποιήθηκε παρόμοια διάταξη (Σχήμα 5.3.3) όπου αντί για περιστρεφόμενο κυλινδρικό σώμα έχει τοποθετηθεί στην θέση του ένα γρανάζι.



Σχήμα 5.3.3 Διάταξη δημιουργίας περιοδικά μεταβαλλόμενης ροπής

Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ταλάντωση με μεταβαλλόμενο πλάτος, μεταβάλλοντας την κάμψη του ελάσματος και τις στροφές του κινητήρα. Η συχνότητα της ταλάντωσης ν [Hz] θα δίνεται από την Σχέση (5.3.1).

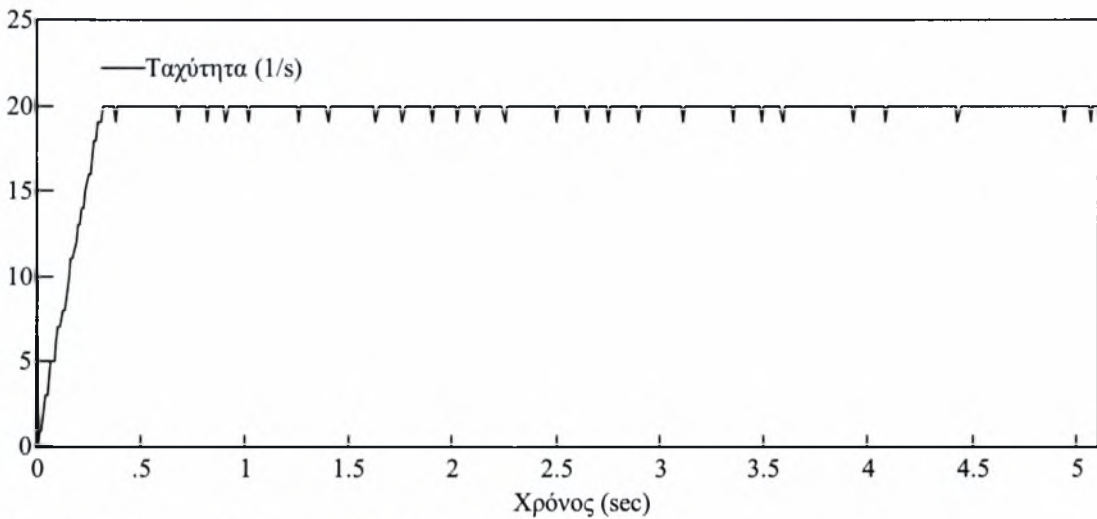
$$\nu = n_g \frac{\omega_m}{2\pi} \quad (5.3.1)$$

όπου n_g ο αριθμός των οδόντων του γραναζιού και ω_m [rad · s⁻¹] η ταχύτητα του κινητήρα.

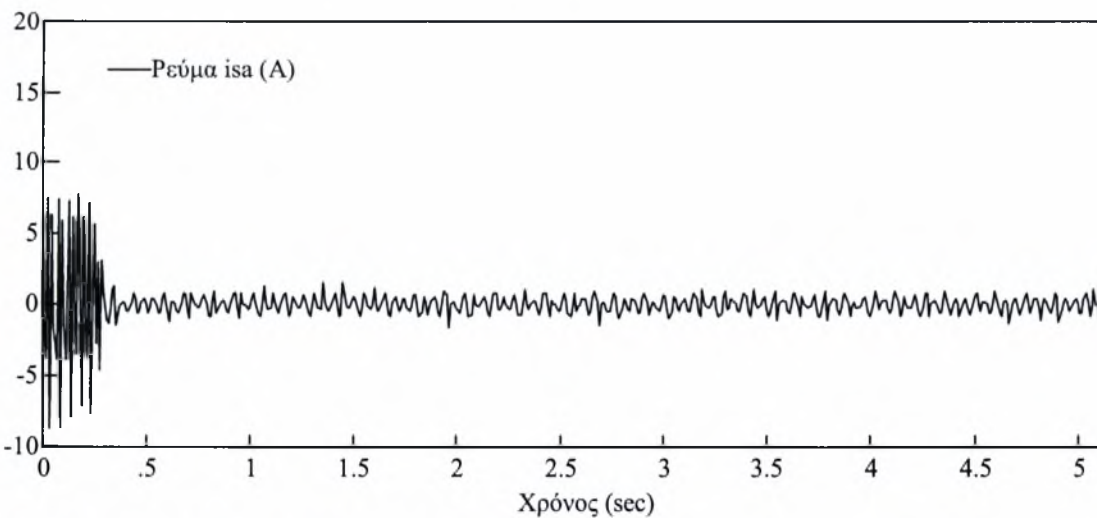
5.4 Πειραματικά Αποτελέσματα

5.4.1 Αποτελέσματα για Σταθερή Ροπή

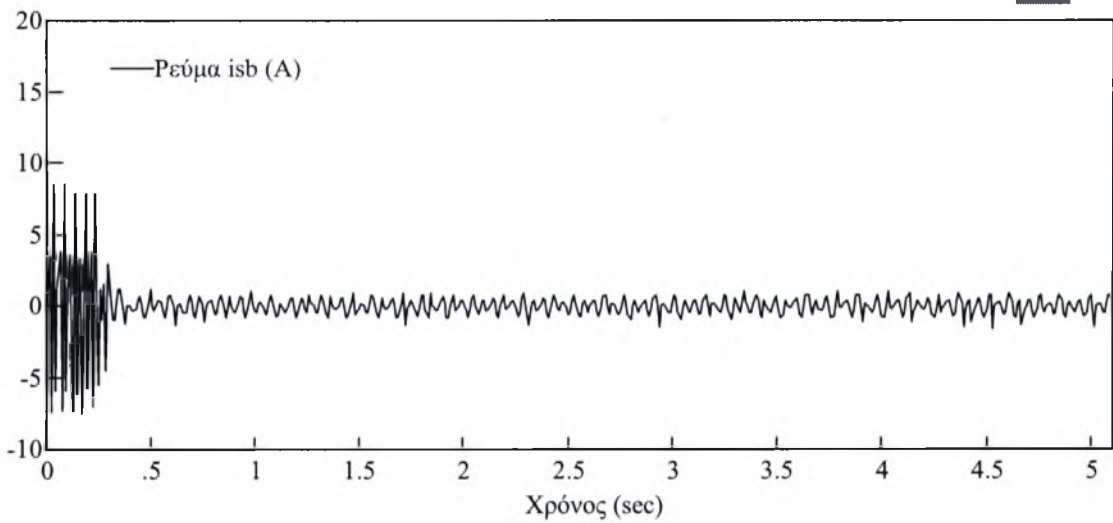
Με την χρήση της διάταξης άσκησης σταθερής ροπής εκτελέστηκε μια σειρά από τρία πειράματα με διαφορετική τιμή της ροπής για το καθένα. Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα επιλέχθηκε να είναι $20 [s^{-1}]$. Για μηδενική ασκούμενη ροπή από την διάταξη στον κινητήρα προέκυψαν οι παρακάτω μετρήσεις της ταχύτητας και των δύο ρευμάτων i_{sa} , i_{sb} .



Σχήμα 5.4.1 Ταχύτητα χωρίς εξωτερικό φορτίο

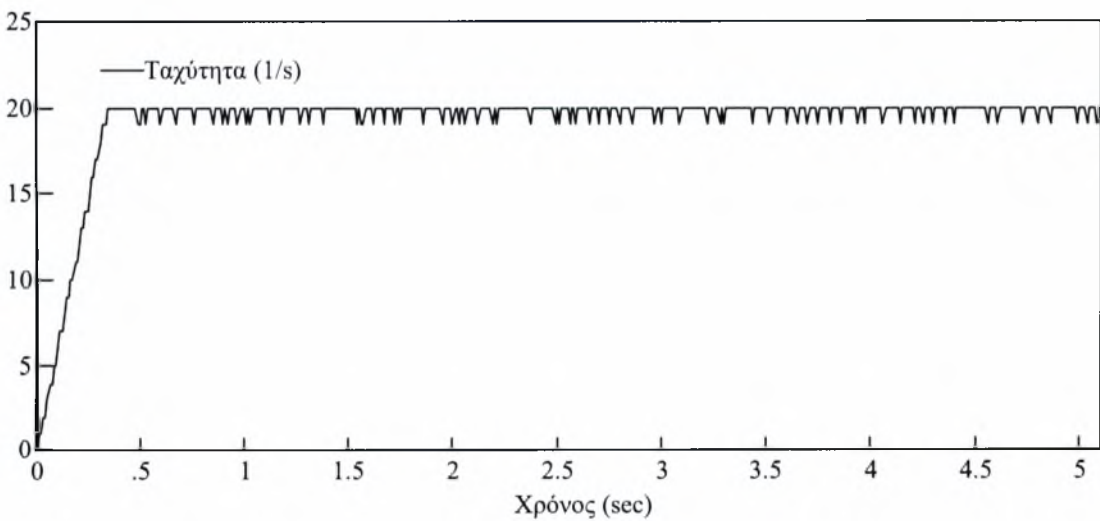


Σχήμα 5.4.2 Ρεύμα i_{sa} χωρίς εξωτερικό φορτίο



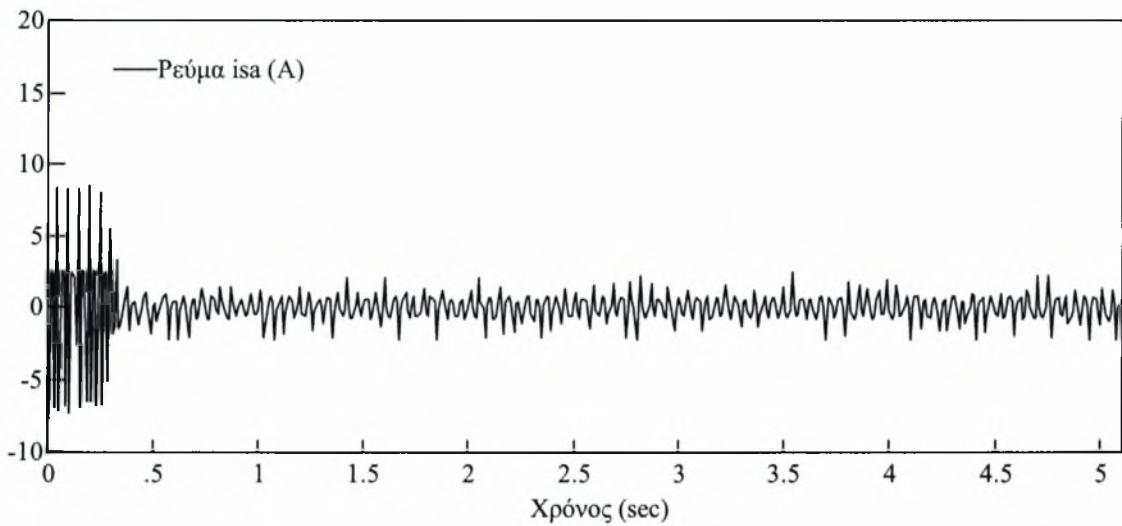
Σχήμα 5.4.3 Ρεύμα i_{sb} χωρίς εξωτερικό φορτίο

Με την μετατόπιση των περικοχλίων κατά 2[mm] πάνω από το σημείο στο οποίο παρατηρείται επαφή του ελάσματος με το κυλινδρικό σώμα, προέκυψαν οι παρακάτω μετρήσεις της ταχύτητας και των δύο ρευμάτων i_{sa} , i_{sb} .

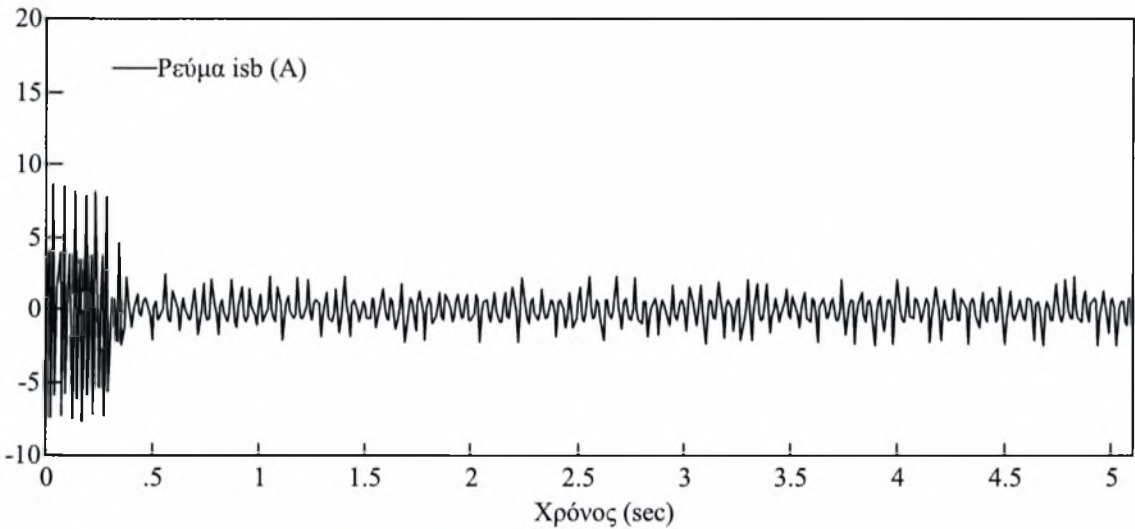


Σχήμα 5.4.4 Ταχύτητα για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 2[mm]

5 Πειραματικά Αποτελέσματα

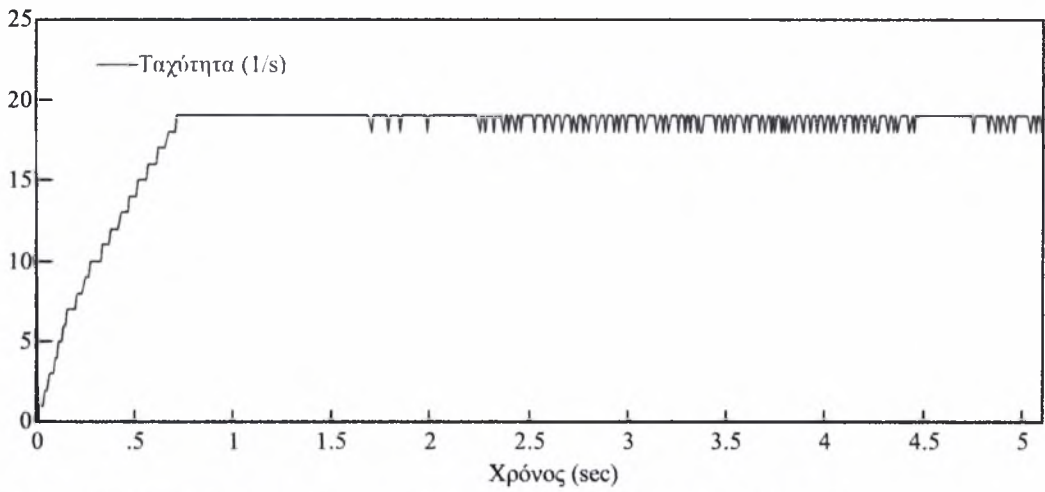


Σχήμα 5.4.5 Ρεύμα i_{sa} για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 2[mm]

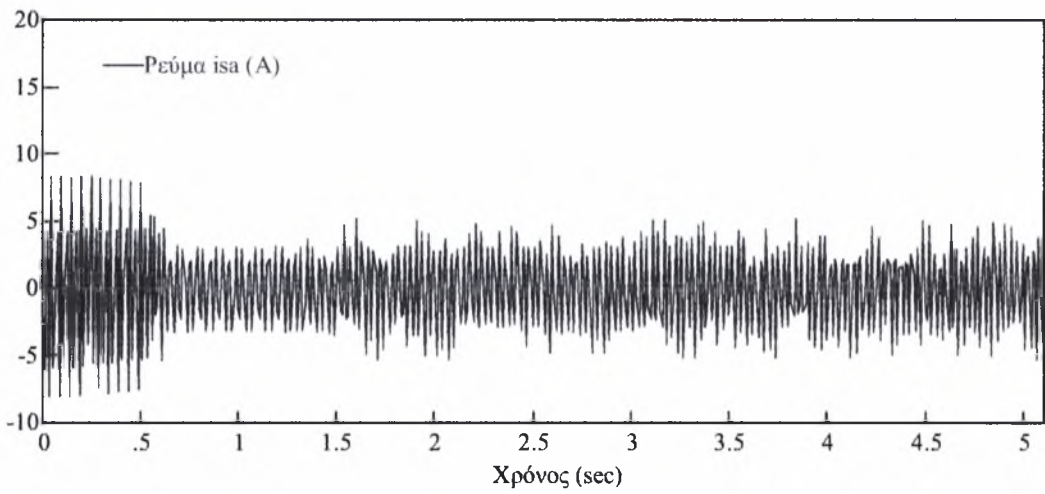


Σχήμα 5.4.6 Ρεύμα i_{sb} για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 2[mm]

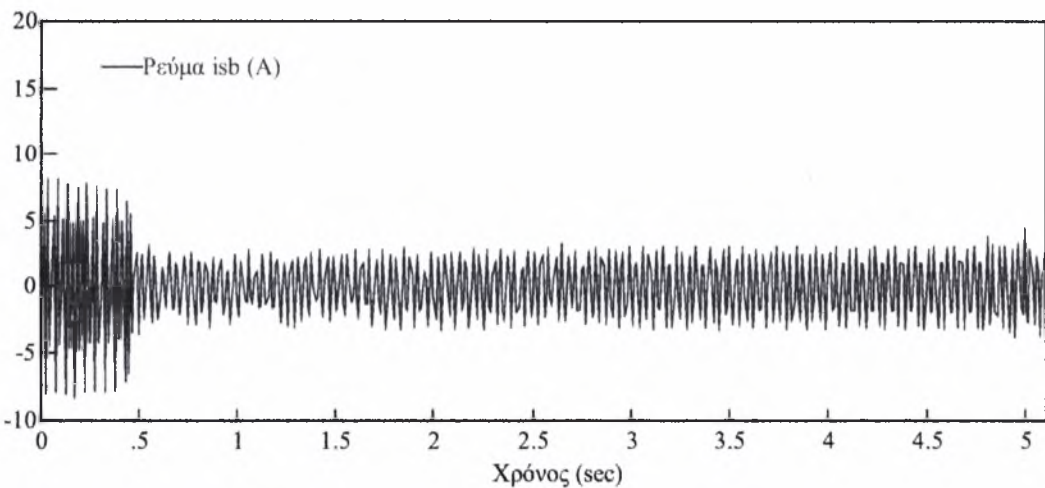
Με την μετατόπιση των περικοχλίων κατά 4[mm] πάνω από το σημείο στο οποίο παρατηρείται επαφή του ελάσματος με το κυλινδρικό σώμα, προέκυψαν οι παρακάτω μετρήσεις της ταχύτητας και των δύο ρευμάτων i_{sa} , i_{sb} .



Σχήμα 5.4.7 Ταχύτητα για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 4[mm]



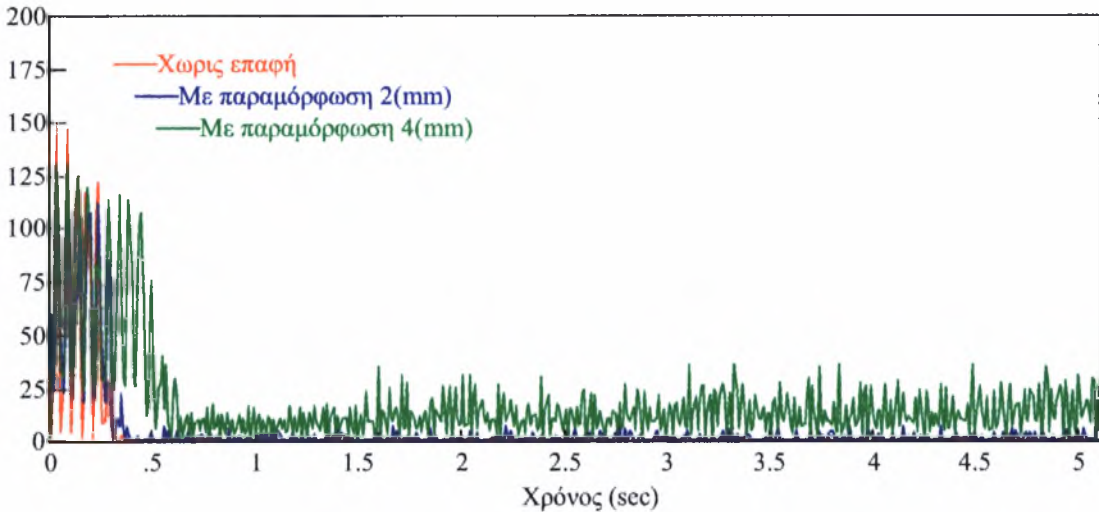
Σχήμα 5.4.8 Ρεύμα i_{sa} για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 4[mm]



Σχήμα 5.4.9 Ρεύμα i_{sb} για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 4[mm]

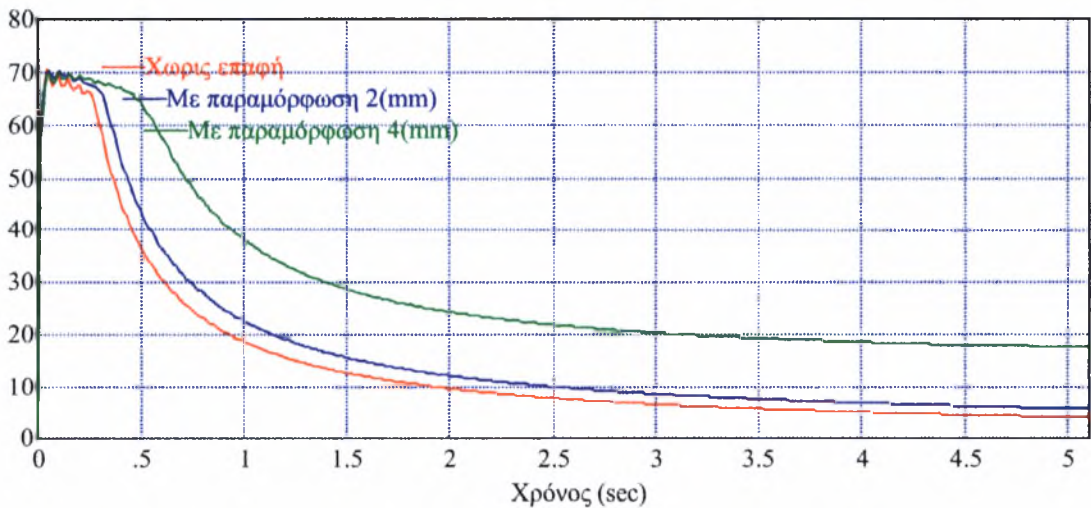
5 Πειραματικά Αποτελέσματα

Με τον υπολογισμό του αθροίσματος των τετραγώνων των ρευμάτων για την κάθε περίπτωση προκύπτει το παρακάτω συγκεντρωτικό γράφημα.



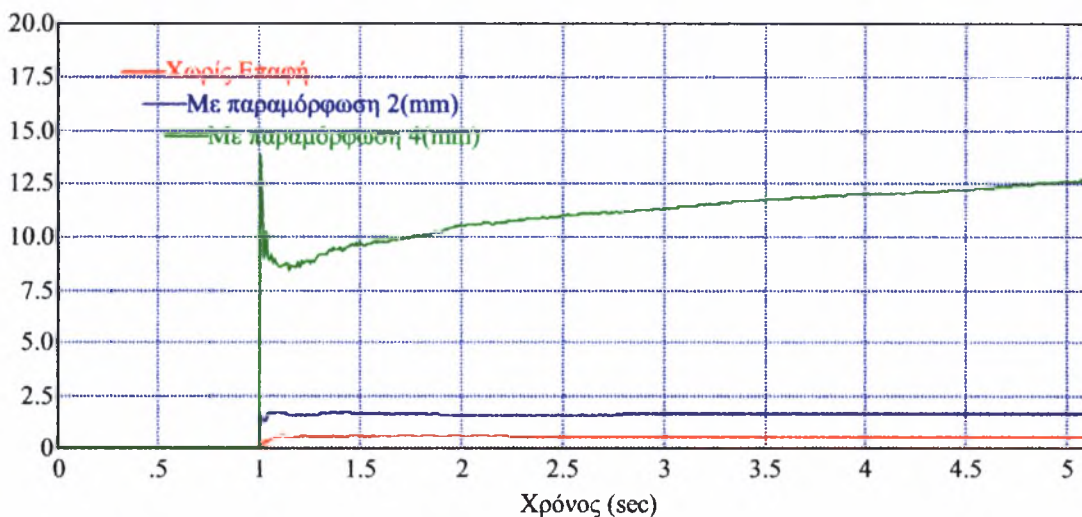
Σχήμα 5.4.10 Αθροισμα των τετραγώνων των ρευμάτων

Για την απομάκρυνση του θορύβου υπολογίζεται η μέση τιμή των τετραγώνων των ρευμάτων για τις τρεις περιπτώσεις, το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



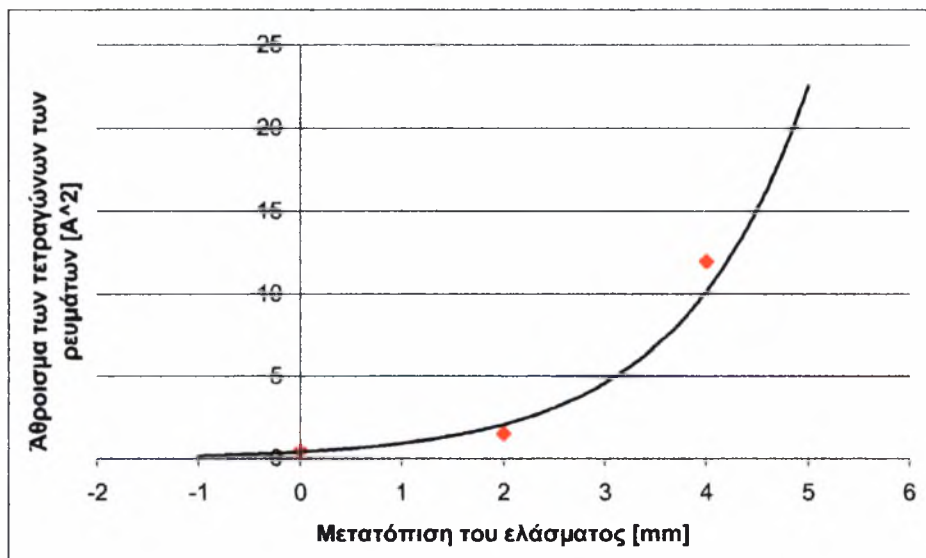
Σχήμα 5.4.11 Μέση τιμή του αθροίσματος των τετραγώνων των ρευμάτων

Αν αγνοηθεί το μεταβατικό στάδιο που παρουσιάζεται για χρόνο περίπου 1[sec] προκύπτει το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.4.12 Μέση τιμή του αθροίσματος των τετραγώνων των ρευμάτων

Προκύπτει τελικά ότι η αύξηση της ροπής προκαλεί αύξηση του αθροίσματος των τετραγώνων των ρευμάτων για σταθερή λειτουργία του κινητήρα. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συσχέτιση της μέσης τιμής του αθροίσματος των τετραγώνων των ρευμάτων με την μετατόπιση των περικοχλίων η οποία προσεγγίζει εκθετική συμπεριφορά.



Σχήμα 5.4.13 Συσχέτιση της μέσης τιμής του αθροίσματος των τετραγώνων των ρευμάτων με την μετατόπιση των περικοχλίων

5 Πειραματικά Αποτελέσματα

Η τιμή της ροπής μπορεί να προσεγγισθεί με βάση την σχέση

$$M = N\eta r \quad (5.4.1)$$

όπου M είναι η αναπτυσσόμενη ροπή, η είναι ο συντελεστής τριβής μεταξύ των δύο μετάλλων που μπορεί να βρεθεί σε κατάλληλα εγχειρίδια και r η ακτίνα του κυλινδρικού σώματος. Η κάθετη δύναμη μπορεί να προκύψει από τον νόμο του Hertz [2], [3] για ορθογωνική επαφή όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη σχέση:

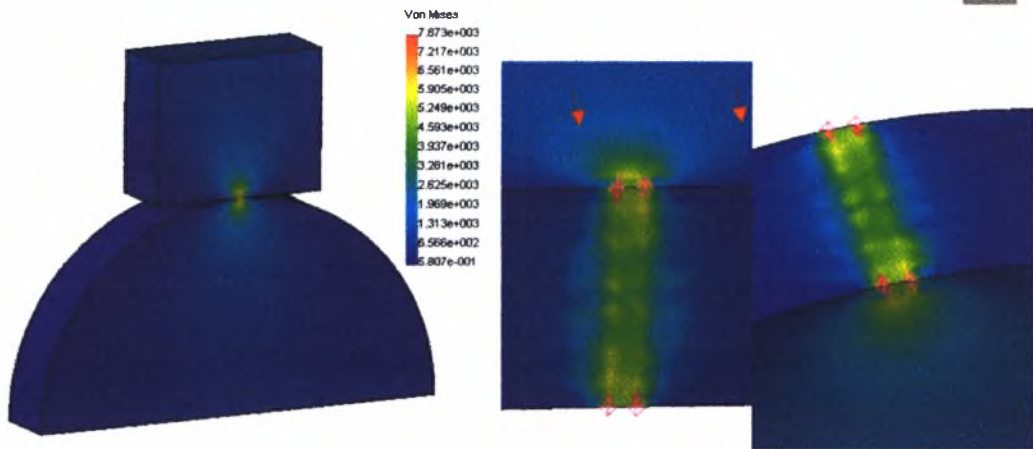
$$b_x = \left[4 \frac{F}{L} (k_1 + k_2) \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{21}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.4.2)$$

όπου b_x είναι το πλάτος της επαφής, $\frac{F}{L}$ είναι το φορτίο ανά μονάδα μήκους, k_1, k_2

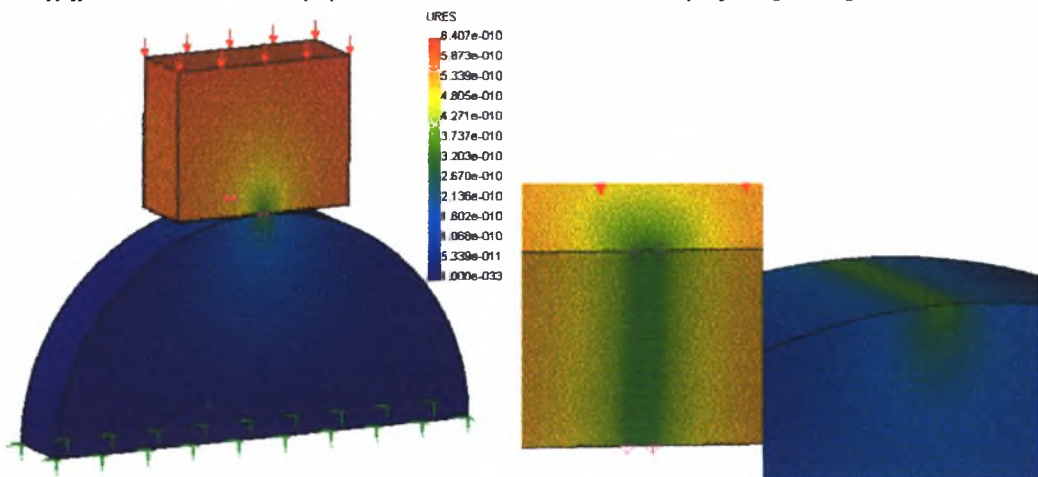
είναι ελαστική σταθερά του υλικού που προκύπτει από την σχέση: $k = \frac{1-\mu^2}{\pi E}$, όπου μ

η σταθερά Poisson και E το μέτρο ελαστικότητας του σώματος. Τέλος R_{11} και R_{21} είναι οι ακτίνες καμπυλότητας των δύο σωμάτων. Αν προσεγγιστεί το πλάτος της ζώνης επαφής τότε μπορεί να προκύψει η κάθετη δύναμη και από την σχέση (5.4.1) η ασκούμενη ροπή. Το πλάτος της ζώνης επαφής μετρήθηκε με παρεμβολή στρώματος μελάνης, για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 2[mm] και κατά 4[mm] να είναι: 3,5[mm] και 5[mm] αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η επιφάνεια επαφής που μετράται πειραματικά θα είναι μεγαλύτερη από την επιφάνεια που υπολογίζεται από τον νόμο του Hertz. Αυτό οφείλεται στην κάμψη του ελάσματος λόγω του ασκούμενου φορτίου στα άκρα του. Καθώς το έλασμα κάμπτεται αποκτά μια ακτίνα καμπυλότητας που αυξάνει την επιφάνεια επαφής του με το κυλινδρικό σώμα. Αν θεωρηθεί όμως ότι η κάμψη του ελάσματος είναι αρκετά μικρή τότε θα έχουμε αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας.

Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, όπου μελετάται η περίπτωση της επαφής ενός στερεού κυλινδρικού σώματος, διαμέτρου 120mm και ύψους 20mm, με μια επίπεδη επιφάνεια ενός δεύτερου σώματος. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τάσεις και οι παραμορφώσεις των σωμάτων για χάλυβα τύπου AISI 1020 με μέτρο ελαστικότητας $2 \cdot 10^{11} [\text{N} \cdot \text{m}^{-2}]$ και κάθετη πίεση $500 [\text{N} \cdot \text{m}^{-2}]$.



Σχήμα 5.4.14. Κατανομή τάσεων κατά Von Misses, τιμές σε $[N/m^2]$



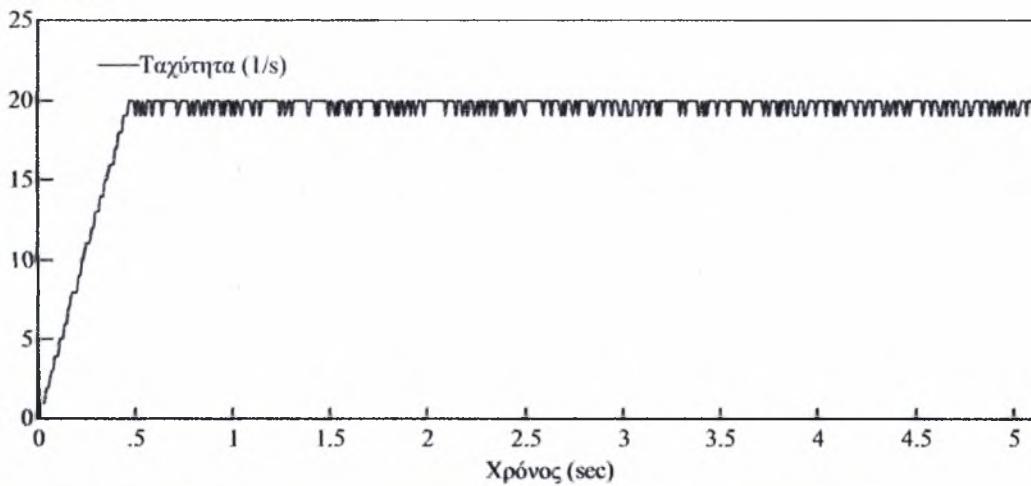
Σχήμα 5.4.15. Συνισταμένη μετατόπιση, τιμές σε $[m]$

5.4.2 Αποτελέσματα για Περιοδικά Μεταβαλλόμενη Ροπή

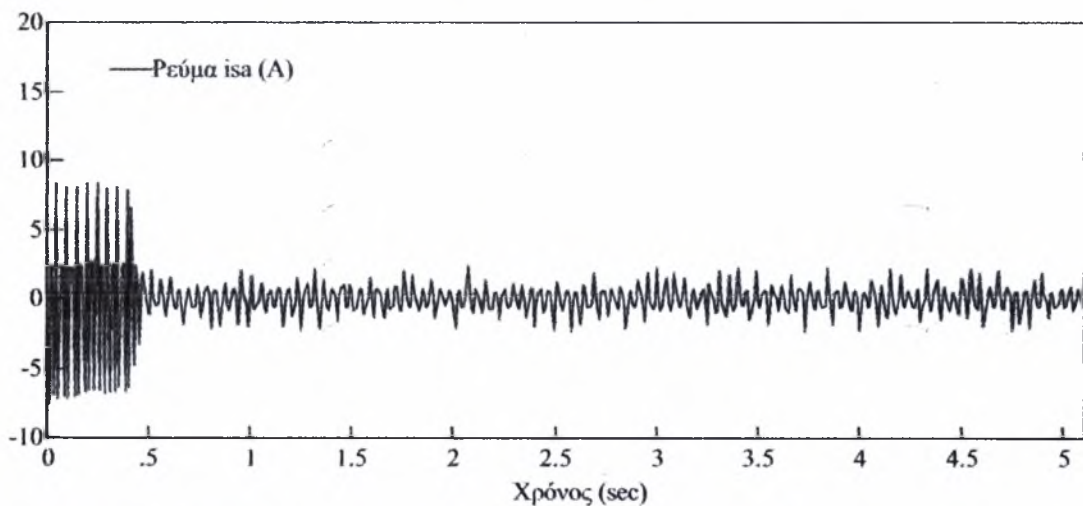
Με την χρήση της διάταξης άσκησης μεταβαλλόμενου φορτίου εκτελέστηκε μια σειρά από τριών πειραμάτων με διαφορετική τιμή της ροπής για το καθένα. Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα επιλέχθηκε να είναι $20[s^{-1}]$, οπότε και η συχνότητα της ταλάντωσης θα παραμείνει σχεδόν σταθερή. Για μηδενική ασκούμενη ροπή από την διάταξη στον κινητήρα προέκυψαν οι μετρήσεις για την ταχύτητα και τα δύο ρεύματα i_{sa} , i_{sb} που παρουσιάστηκαν στα Σχήματα (5.4.1-5.4.3).

Με την μετατόπιση των περικοχλίων κατά $2[mm]$ πάνω από το σημείο στο οποίο παρατηρείται επαφή του ελάσματος με το γρανάζι, προέκυψαν οι παρακάτω μετρήσεις της ταχύτητας και των δύο ρευμάτων i_{sa} , i_{sb} .

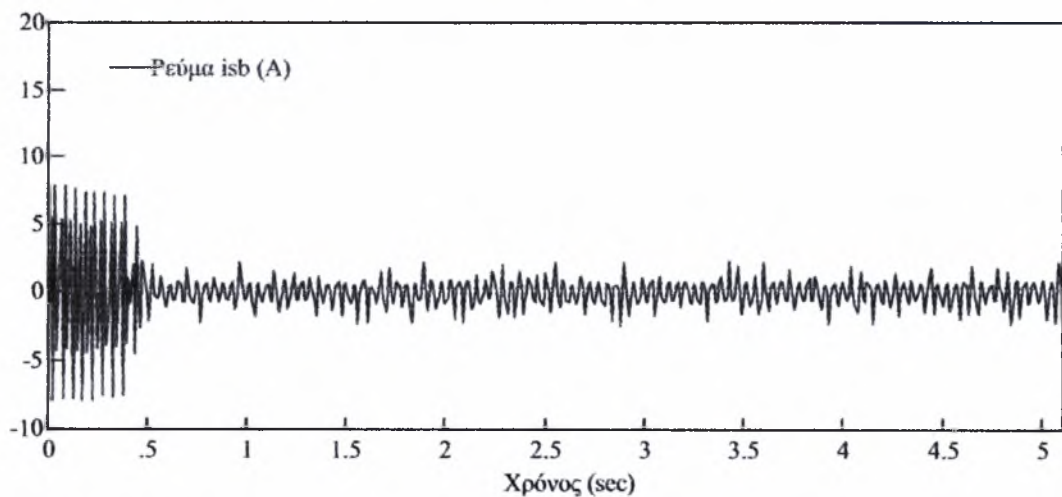
5 Πειραματικά Αποτελέσματα



Σχήμα 5.4.16 Ταχύτητα για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 2[mm]



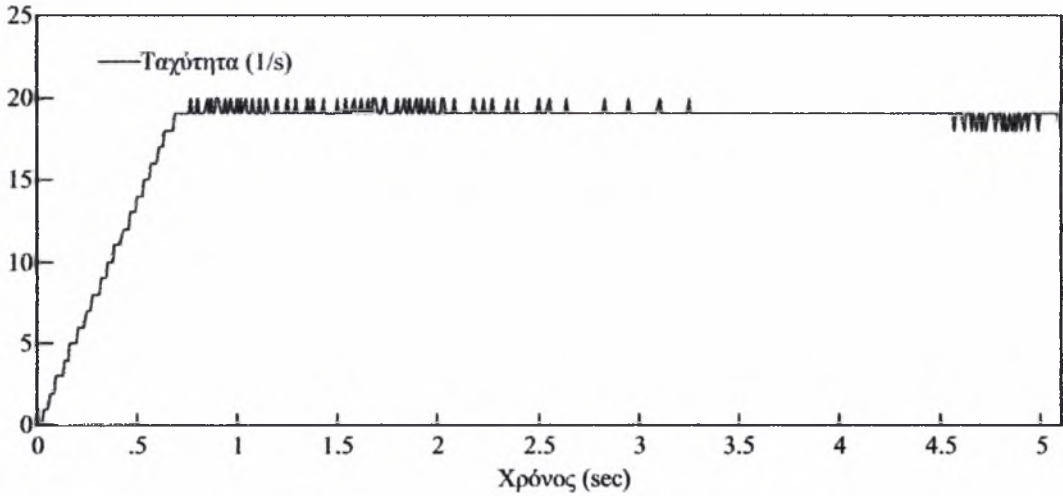
Σχήμα 5.4.17 Ρεύμα i_{sa} για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 2[mm]



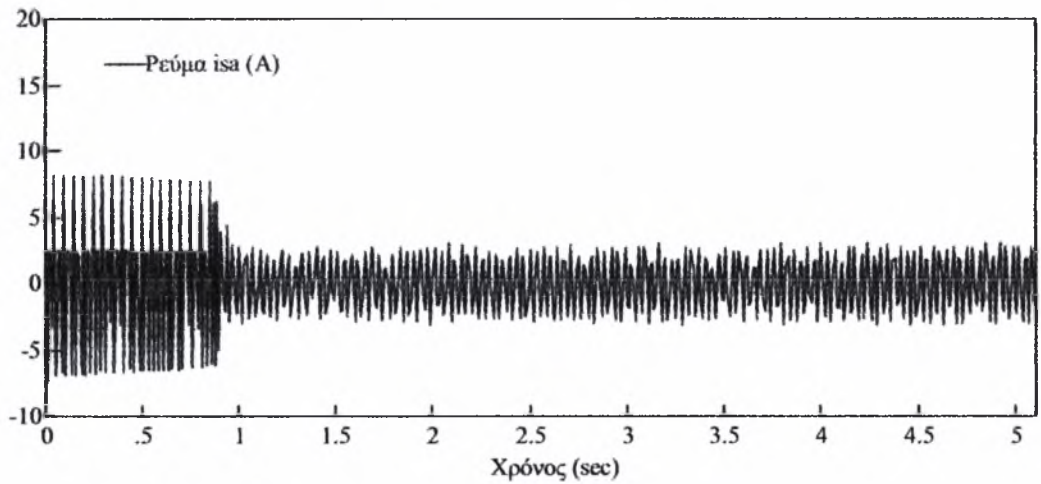
Σχήμα 5.4.18 Ρεύμα i_{sb} για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 2[mm]



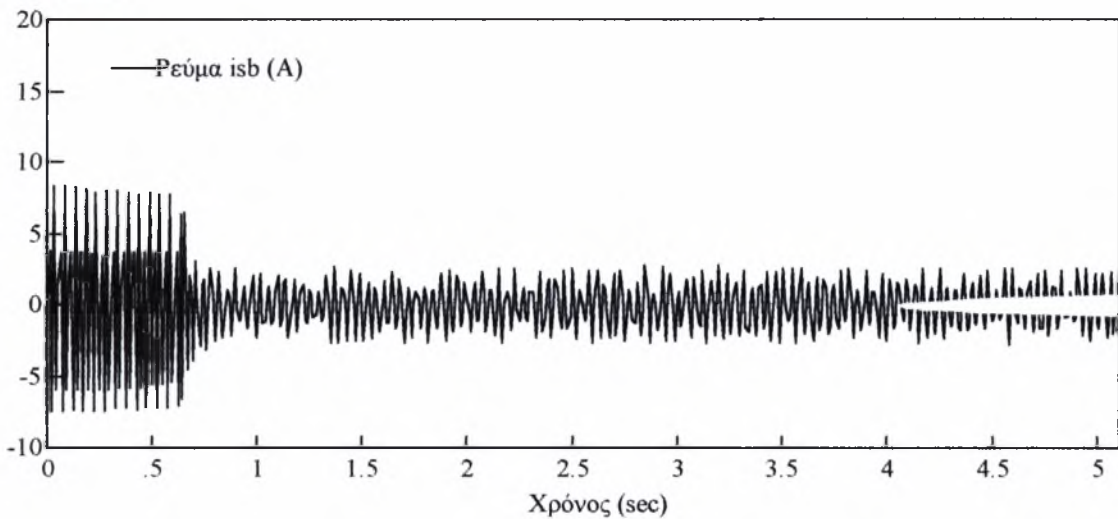
Με την μετατόπιση των περικοχλίων κατά 4[mm] πάνω από το σημείο στο οποίο παρατηρείται επαφή του ελάσματος με το γρανάζι, προέκυψαν οι παρακάτω μετρήσεις της ταχύτητας και των δύο ρευμάτων i_{sa} , i_{sb} .



Σχήμα 5.4.19 Ταχύτητα για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 4[mm]

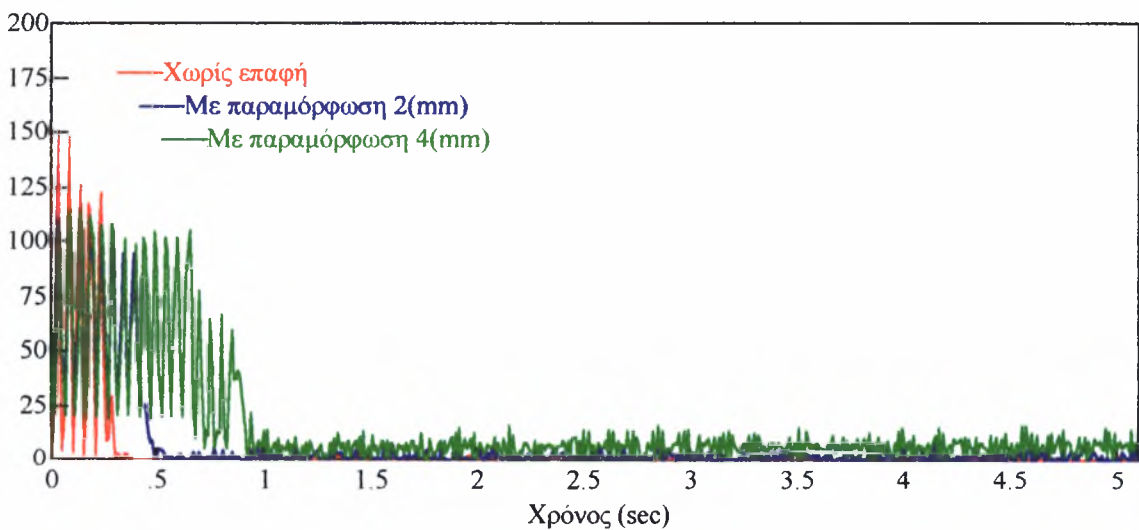


Σχήμα 5.4.20 Ρεύμα i_{sa} για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 4[mm]



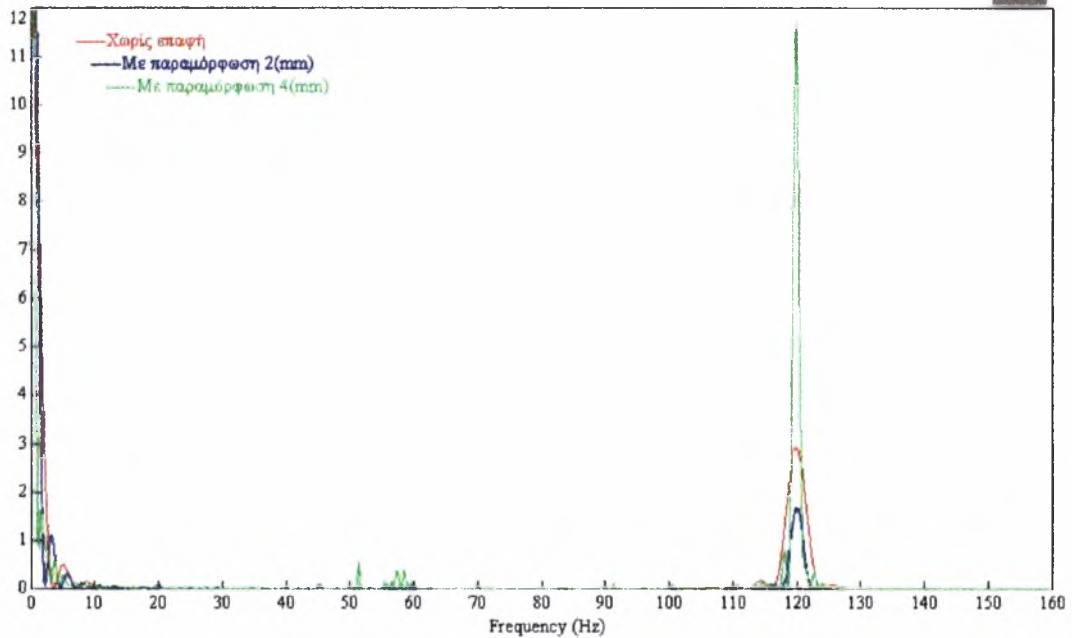
Σχήμα 5.4.21 Ρεύμα i_{sb} για μετατόπιση των περικοχλίων κατά 4[mm]

Με τον υπολογισμό του αθροίσματος των τετραγώνων των ρευμάτων για την κάθε περίπτωση προκύπτει το παρακάτω συγκεντρωτικό γράφημα.



Σχήμα 5.4.22 Άθροισμα των τετραγώνων των ρευμάτων

Με ανάλυση του αθροίσματος των τετραγώνων των ρευμάτων στο πεδίο της συχνότητας προκύπτει το παρακάτω γράφημα.

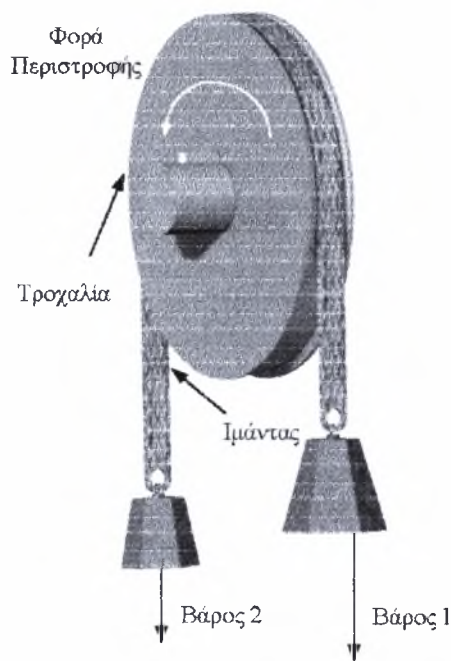


Σχήμα 5.4.23 Ανάλυση συχνοτήτων στο άθροισμα τετραγώνων των ρευμάτων

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα προκύπτει έντονη ανάδειξη για την μετατόπιση των περικοχλίων κατά 4[mm] της συχνότητας 120[Hz]. Επίσης παρατηρείται η δημιουργία νέων συχνοτήτων στην περιοχή 50-60[Hz]. Με την χρήση της σχέσης (5.3.1) θα περιμέναμε για το δεδομένο γρανάζι με $n_g = 70$ να προκύπτει ταλάντωση σε συχνότητα 1400[Hz]. Όμως εξαιτίας της έντονης απόσβεσης που προκαλεί το έλασμα, το σύστημα δεν ταλαντώνεται σε αυτή την συχνότητα αλλά σε πολύ μικρότερη. Θα μπορούσε δηλαδή να θεωρηθεί ότι το σώμα που εμπλέκεται με τα δόντια του γραναζιού λόγω της μεγάλης ταχύτητας δεν προλαβαίνει να παρακολουθήσει την ταλάντωση που θα δημιουργούσαν όλα τα δόντια του γραναζιού αλλά ταλαντώνεται σε μια υποπολλαπλάσια συχνότητα της. Για καλύτερα αποτελέσματα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί γρανάζι με μικρότερο αριθμό οδόντων.

5.5 Προτεινόμενη Διάταξη Άσκησης Σταθερής Ροπής

Για την άσκηση σταθερής εξωτερικής ροπής η οποία μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια προτείνεται η χρήση μιας διαφορετικής διάταξης [4]. Η βασική αρχή λειτουργίας της διάταξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5.1.



Σχήμα 5.3.4 Λεπτομέρεια προτεινόμενης διάταξης

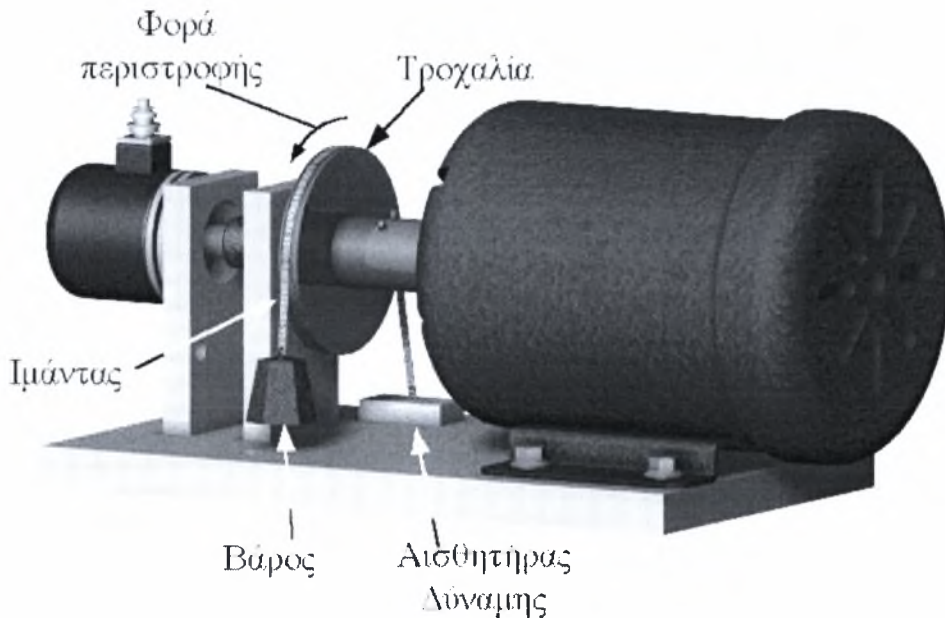
Στην θέση του περιστρεφόμενου κυλινδρικού σώματος τοποθετείται μια τροχαλία που περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Στόχος μας είναι να επιτευχθεί η ισορροπία πάνω στην τροχαλία, με την χρήση ενός ιμάντα και δυο ανόμοιων βαρών με το μεγαλύτερο προς την αντίθετη φορά περιστροφής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5.1. Τότε προκύπτει ότι όταν το σύστημα είναι σε ισορροπία η ροπή που θα ασκεί ο ιμάντας στον κινητήρα θα είναι σταθερή και θα προέρχεται από την τριβή του ιμάντα με την τροχαλία. Όμως από την ισορροπία του συστήματος του ιμάντα και των βαρών με την τροχαλία η ροπή που θα ασκείται στον κινητήρα θα προκύπτει ότι θα είναι ίση με την ροπή που προκαλούν τα δύο βάρη στην τροχαλία ανεξάρτητα του συντελεστή τριβής, δηλαδή:

$$T_L = (m_1 - m_2)gR \quad (5.5.1)$$

όπου m_1 και m_2 οι μάζες των σωμάτων με $m_1 > m_2$, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και R η ακτίνα της τροχαλίας. Η ροπή θα έχει πάντα αντίθετη φορά από την φορά περιστροφής της τροχαλίας και για να λειτουργήσει η διάταξη θα πρέπει το σύστημα να ισορροπήσει απόλυτα και η μεγαλύτερη μάζα να βρίσκεται στην αντίθετη πλευρά από την φορά περιστροφής του ιμάντα.

Η ισορροπία του ιμάντα πάνω στην περιστρεφόμενη τροχαλία είναι δύσκολο να επιτευχθεί και θα απαιτούσε αρκετούς πειραματισμούς με διαφορετικές μάζες. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος παρουσιάζεται η παρακάτω διάταξη που

προσαρμόζεται επάνω στον κινητήρα, με τρόπο ώστε να λύνονται τα προβλήματα των παραπάνω περιορισμών (Σχήμα 5.5.2).



Σχήμα 5.5.2 Λεπτομέρεια προτεινόμενης διάταξης

Αν αντικατασταθεί το ένα βάρος με έναν αισθητήρα δύναμης θα ήταν δυνατή η συνεχής άσκηση ροπής η οποία θα υπολογιζόταν από την Σχέση (5.5.1). Αν η Σχέση (5.5.1) τροποποιηθεί όπως παρουσιάζεται στην συνέχεια μπορεί να εφαρμοστεί στην συγκεκριμένη περίπτωση,

$$T_L = (B - B')R \quad (5.5.1)$$

όπου B η δύναμη που μετράται με τον αισθητήρα και B' το βάρος του σώματος που είναι στερεωμένο στον ιμάντα. Το πρόβλημα της ισορροπίας του ιμάντα λύνεται, με την προϋπόθεση της σταθερής φοράς περιστροφής του κινητήρα και ανεξάρτητα από την ταχύτητα του. Το βάρος B' δεν παίζει άλλο ρόλο στην διάταξη εκτός από την τάνυση του ιμάντα, και κατά συνέπεια δεν μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα το μέγεθος του. Μπορεί κατά συνέπεια να επιλεγεί αυθαίρετα.

Ο αισθητήρας δύναμης είναι συνήθως ή ένα μηκυνσιόμετρο ή ένας αισθητήρας πιεζοκρυστάλλου. Το μηκυνσιόμετρο, ή επιμηκυνσιόμετρο, βασίζει την λειτουργία του στην χρήση συρμάτων επιμηκύνσεως (DMS). Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο ότι η αντίσταση ενός σύρματος αυξάνει με το μήκος και ελαττώνεται με την διατομή

του. Το σύρμα προσκολλάται επάνω σε υλικό γνωστού μέτρου ελαστικότητας όποτε με την μεταβολή της αντίστασης υπολογίζεται η μεταβολή του μήκους του σύρματος και κατά συνέπεια η παραμόρφωση του υλικού. Έτσι γίνεται δυνατός ο υπολογισμός της ασκούμενης δύναμης. Οι αισθητές δύναμης πιεζοκρυστάλλου, είναι κατασκευασμένοι από κρυστάλλους χαλαζία ή μολύβδου-αλάτων ζirkονίου-τιτανίου. Αυτοί οι κρύσταλλοι παράγουν μια ασθενή τάση με την άσκηση δυνάμεων πάνω τους. Και στις δύο περιπτώσεις η μέτρηση της δύναμης είναι εύκολη, προκύπτει σαν ηλεκτρικό σήμα κατευθείαν και κατά συνέπεια μπορεί να επεξεργαστεί άμεσα από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Βιβλιογραφία-Αρθρογραφία

- [1] Θ. Μπούκας και Θ. Παντελιός: “Πειραματική διάταξη ελέγχου και μετρήσεων επαγωγικού κινητήρα Baldor”, Εσωτερική αναφορά στις εργαστηριακές ασκήσεις συστημάτων, 1998
- [2] Σ. Σ. Αντωνίου: “Τριβολογία”, Πειραιάς, 1994
- [3] B. Armstrong-Helouvry, P. Dupont and C. Canudas De Wit: “A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction”, *Automatica*, Vol. 30, no. 7, pp. 1083-1138, 1994
- [4] Σ. Ν. Βασιλακόπουλος: “Ηλεκτρικές Μηχανές”, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα 1983

Συμπεράσματα- Μελλοντική Έρευνα



6

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρήχθησαν τα ακόλουθα πρωτότυπα αποτελέσματα:

- Σχεδιάστηκε P-D νόμος ελέγχου που επιτυγχάνει τέλειο έλεγχο ταχύτητας και θέσης, με ταυτόχρονη αποκοπή διαταραχών και μελετήθηκε η ασυμπτωτική ευστάθεια, η ευστάθεια φραγμένης εισόδου φραγμένης εξόδου και ευρωστία για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος σταθερού μαγνήτη.
- Σχεδιάστηκε P-D νόμος ελέγχου που επιτυγχάνει τέλειο έλεγχο ταχύτητας, με ταυτόχρονη αποκοπή διαταραχών για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον ρότορα.
- Σχεδιάστηκε P-D νόμος ελέγχου που επιτυγχάνει τέλειο έλεγχο ταχύτητας, με ταυτόχρονη αποκοπή διαταραχών για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον στάτορα.
- Σχεδιάστηκε P-D νόμος ελέγχου που επιτυγχάνει τέλειο έλεγχο ταχύτητας και ρεύματος στον ρότορα, με ταυτόχρονη αποκοπή διαταραχών και μελετήθηκε η ασυμπτωτική ευστάθεια, η ευστάθεια φραγμένης εισόδου φραγμένης εξόδου και ευρωστία για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης.
- Σχεδιάστηκε P-D νόμος ελέγχου που επιτυγχάνει τέλειο έλεγχο ταχύτητας, με ταυτόχρονη αποκοπή διαταραχών για τους DC κινητήρες σειριακής διέγερσης.
- Σχεδιάστηκε P-D νόμος ελέγχου που επιτυγχάνει τέλειο έλεγχο ταχύτητας και ρεύματος στον d άξονα, με ταυτόχρονη αποκοπή διαταραχών και μελετήθηκε η

6 Συμπεράσματα-Μελλοντική Έρευνα

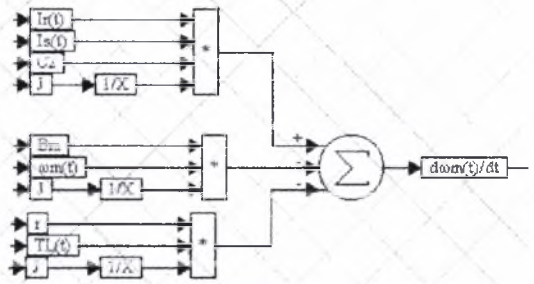
ασυμπτωτική ευστάθεια, η ευστάθεια φραγμένης εισόδου φραγμένης εξόδου και ευρωστία για τους σύγχρονους τριφασικούς AC κινητήρες.

- Αναπτύχθηκαν σχέσεις υπολογισμού της ροπής του εξωτερικού φορτίου για όλα τα παραπάνω είδη κινητήρων και για τους τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.
- Αναπτύχθηκε προσαρμοστικός αλγόριθμος διάγνωσης και αντιμετώπισης σφαλμάτων για εργαλειομηχανές με ψηφιακή καθοδήγηση, ο οποίος βασίζεται στην εκτίμηση της ροπής. Ο αλγόριθμος επιτυγχάνει διάγνωση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου και της αυτοδιεγερώμενης ταλάντωσης του συστήματος κοπτικό εργαλείο-εργαλειομηχανή-κατεργαζόμενο τεμάχιο. Η αντιμετώπιση των σφαλμάτων γίνεται με την αλλαγή του κοπτικού εργαλείου ή με την κατάλληλη αλλαγή των συνθηκών της κατεργασίας.
- Επαληθεύθηκαν με την χρήση πειραματικής διάταξης τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την εκτίμηση της ροπής σε τριφασικό επαγωγικό κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος.

Συνοψίζοντας, σύμφωνα με τα παραπάνω υλοποιήθηκε η βάση για ένα ολοκληρωμένο σύστημα διάγνωσης και αντιμετώπισης σφαλμάτων στις εργαλειομηχανές με ψηφιακή καθοδήγηση που αναμένεται να έχει πολύ σημαντικές ερευνητικές και αναπτυξιακές επιπτώσεις.

Στην συνέχεια των παραπάνω ενδιαφέρον είναι να μελετηθούν:

- Η επιλυσιμότητα και η ευστάθεια για το σύστημα κλειστού βρόγχου που προκύπτει με εφαρμογή των προτεινομένων νόμων ελέγχου για τους κινητήρες παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον ρότορα, παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον στάτορα και σειριακής διέγερσης.
- Να υλοποιηθεί η προτεινόμενη πειραματική διάταξη άσκησης σταθερής ροπής.
- Να υλοποιηθεί το τμήμα υπολογισμού της ασκούμενης ροπής στο κοπτικό εργαλείο με βάση τον ρυθμό αφαίρεσης μετάλλου σε πρόγραμμα CAD/CAM.
- Να εφαρμοστεί ο προτεινόμενος προσαρμοστικός αλγόριθμος διάγνωσης και αντιμετώπισης σφαλμάτων σε εργαλειομηχανή CNC.
- Να γίνει εκτίμηση της ροπής σε επαγωγικούς κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος με inverter, καθώς και σε άλλους τύπους κινητήρων.

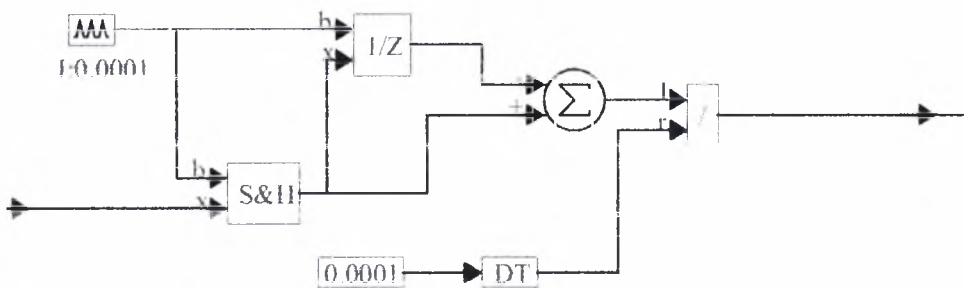


Παράρτημα



Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι κώδικες του προγράμματος VisSim/32 2.0h που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των DC και AC κινητήρων. Στην κάθε περίπτωση παρουσιάζονται και οι επιλογές για τον επαναληπτικό αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάστηκαν στα διαγράμματα των Κεφαλαίων 2 και 3.

Για όλες τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν όπου ήταν αναγκαίο τα παρακάτω:



Υλοποίηση της παραγώγου

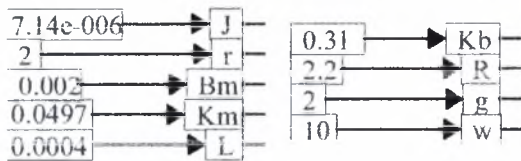


Σχέση μετάδοσης

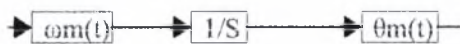
A.1 Κώδικες Προσομοίωσης για DC κινητήρες

A.1.1 DC Κινητήρας Σταθερού Μαγνήτη

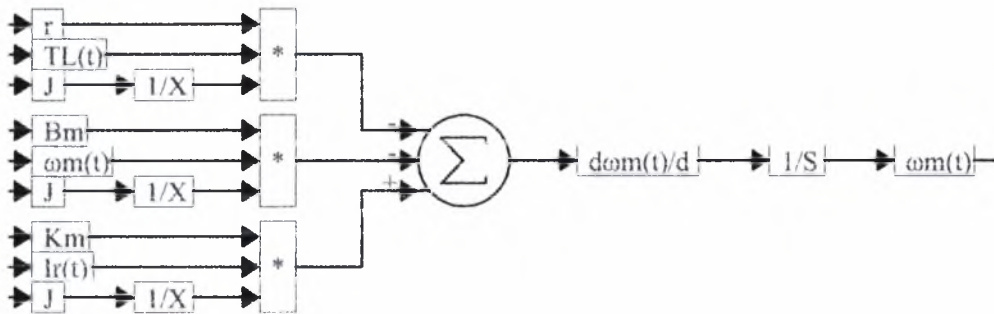
Η προσομοίωση έγινε με βήμα μεγέθους 10^{-5} [s] και χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ολοκλήρωσης Adaptive Runge Kutta 5^{ης} τάξης με ελάχιστο βήμα 10^{-5} [s], μέγιστο σφάλμα αποκοπής 0.002[s] και μέγιστο αριθμό επαναλήψεων 20.



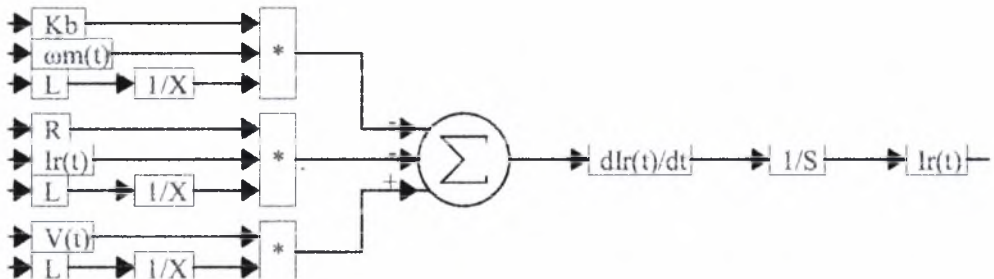
Τιμές των μεταβλητών του κινητήρα



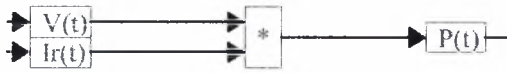
Σχέση ταχύτητας-θέσης



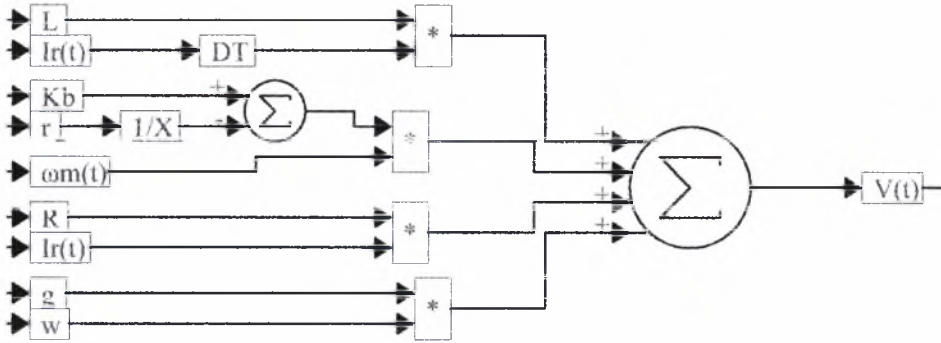
Μηχανικό ισοζύγιο



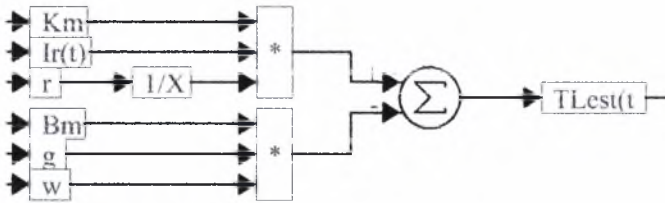
Ηλεκτρικό ισοζύγιο στον ρότορα



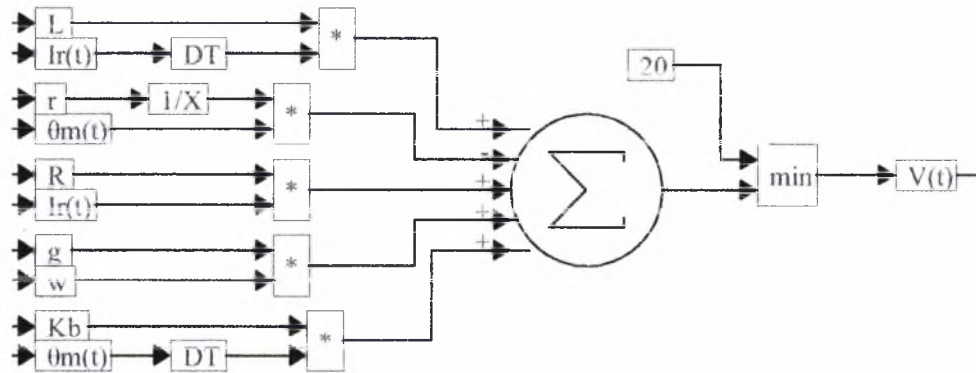
Καταναλισκόμενη ισχύς



Νόμος ελέγχου για έλεγχο ταχύτητας



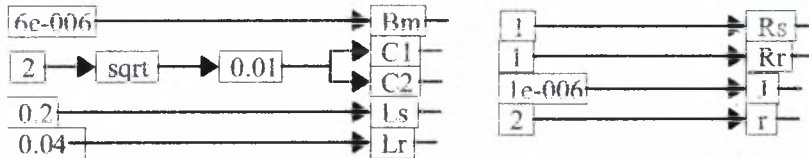
Εκτιμώμενη ροπή



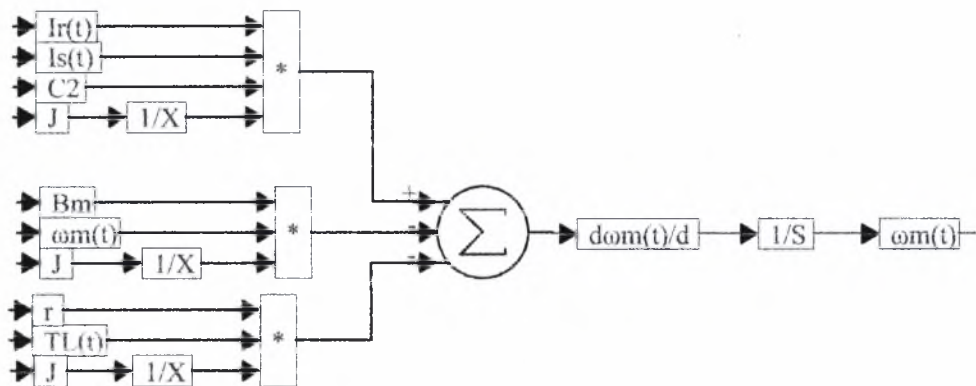
Νόμος ελέγχου για έλεγχο θέσης

A.1.2 DC Κινητήρας Παράλληλης Διέγερσης

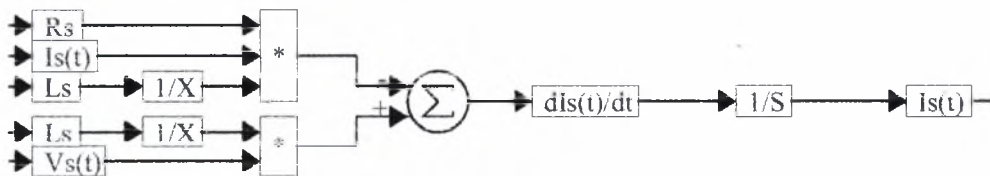
Η προσομοίωση έγινε με βήμα μεγέθους 10^{-5} [s] και χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ολοκλήρωσης Adaptive Runge Kutta 5^{ης} τάξης με ελάχιστο βήμα 10^{-3} [s], μέγιστο σφάλμα αποκοπής 0.005[s] και μέγιστο αριθμό επαναλήψεων 20.



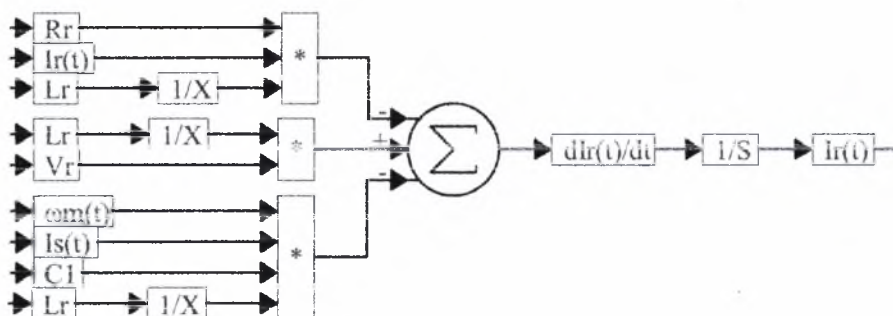
Τιμές των μεταβλητών του κινητήρα



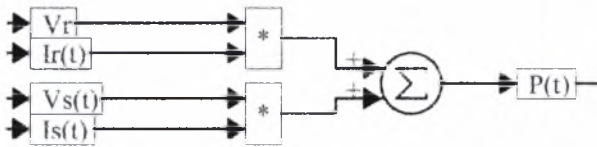
Μηχανικό ισοζύγιο



Ηλεκτρικό ισοζύγιο στον στάτορα



Ηλεκτρικό ισοζύγιο στον ρότορα

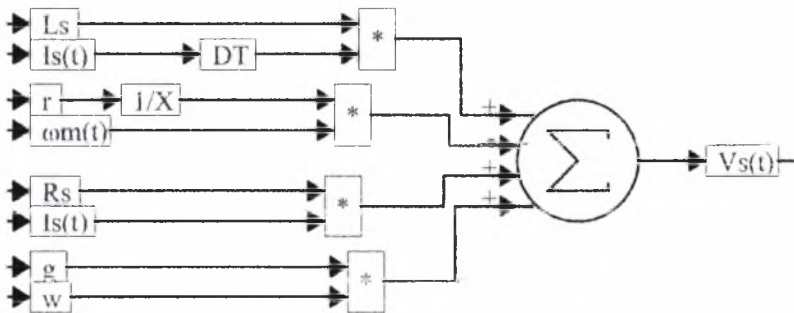


Καταναλισκόμενη ισχύς

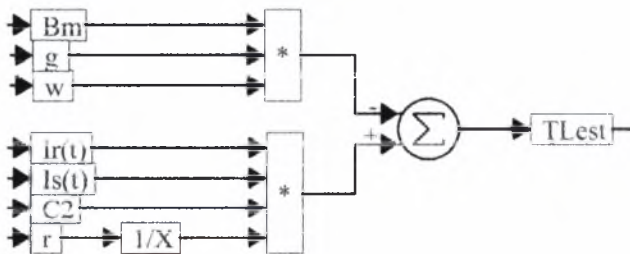
A.1.2.1 Έλεγχος ταχύτητας για Σταθερή Τάση στον Ρότορα



Τιμές μεταβλητών για σταεή τάση στον ρότορα



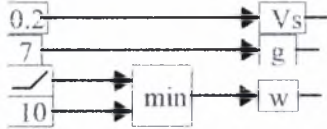
Νόμος ελέγχου για έλεγχο ταχύτητας



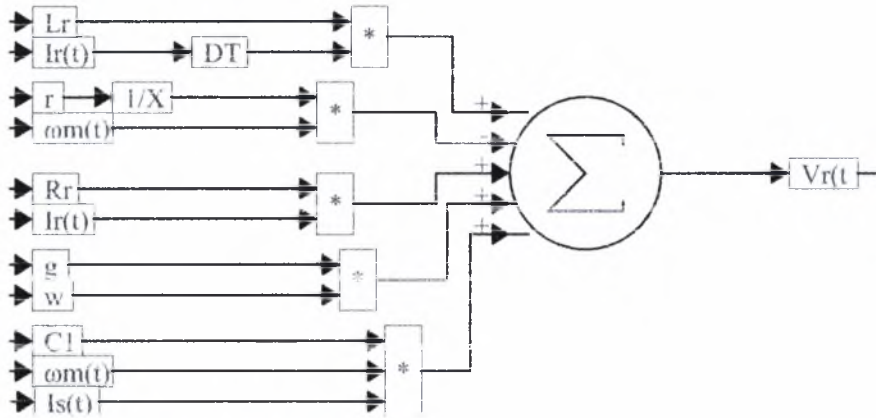
Έκτιμώμενη ροπή

A Παράρτημα

A.1.2.2 Έλεγχος ταχύτητας για Σταθερή Τάση στον Στάτορα



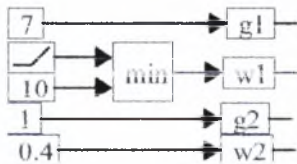
Τιμές των μεταβλητών του κινητήρα



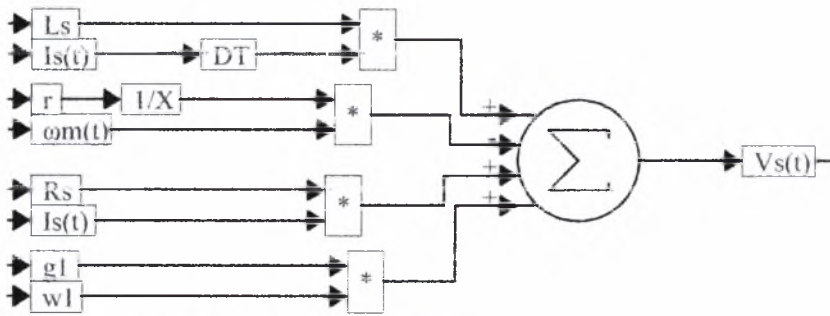
Νόμος ελέγχου για έλεγχο ταχύτητας

Η εκτιμώμενη ροπή προκύπτει όπως για τον κινητήρα με σταθερή τάση στον ρότορα

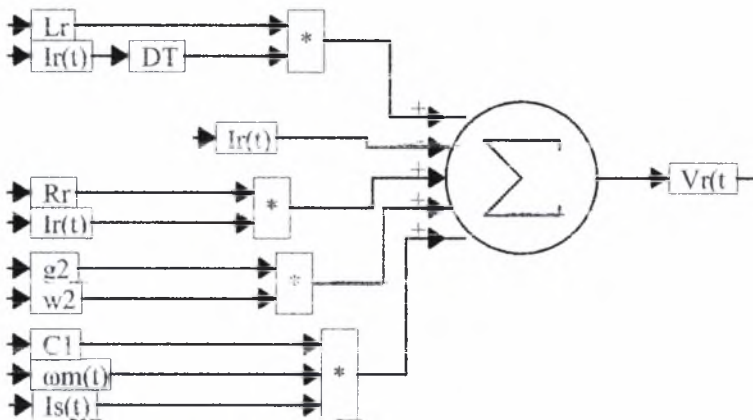
A.1.2.3 Έλεγχος ταχύτητας και Ρεύματος του Ρότορα



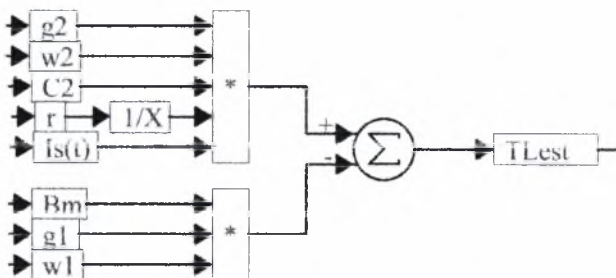
Τιμές των μεταβλητών του κινητήρα



Νόμος ελέγχου για έλεγχο ταχύτητας



Νόμος ελέγχου για έλεγχο ρεύματος

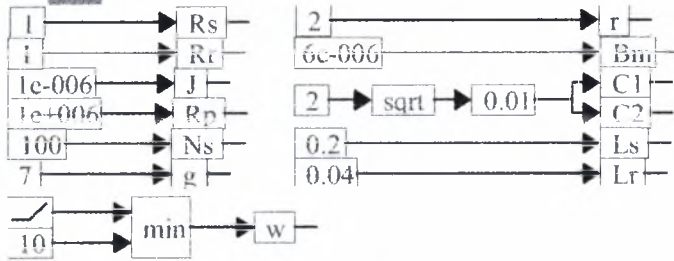


Εκτιμώμενη ροπή

A.1.3 DC Κινητήρας Σειριακής Διέγερσης

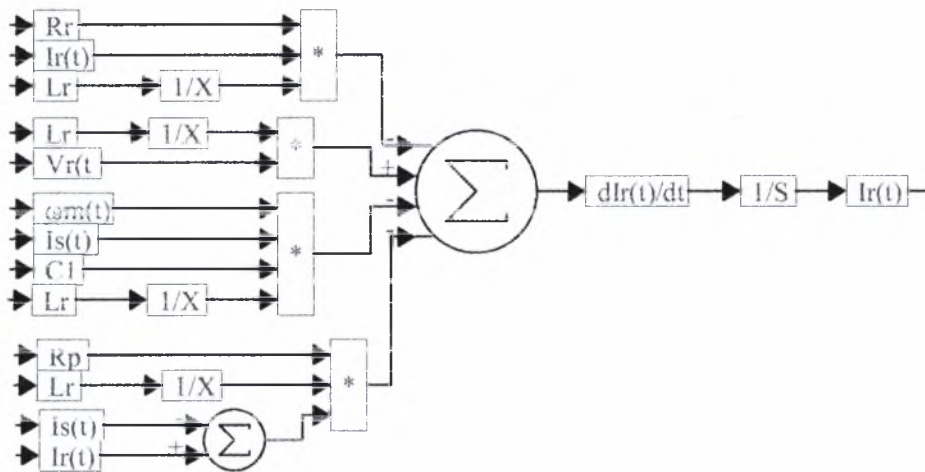
Η προσομοίωση έγινε με βήμα μεγέθους 10^{-5} [s] και χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ολοκλήρωσης Adaptive Runge Kutta 5^{ης} τάξης με ελάχιστο βήμα 10^{-5} [s], μέγιστο σφάλμα αποκοπής 0.005[s] και μέγιστο αριθμό επαναλήψεων 20.

A Παράρτημα

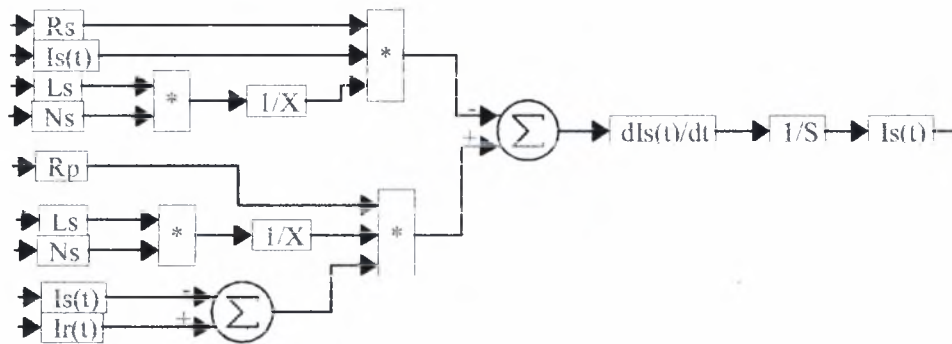


Τιμές των μεταβλητών του κινητήρα

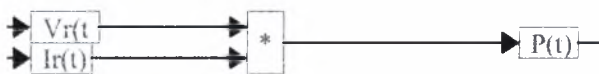
Το μηχανικό ισοζύγιο είναι το ίδιο με τον κινητήρα παράλληλης διέγερσης



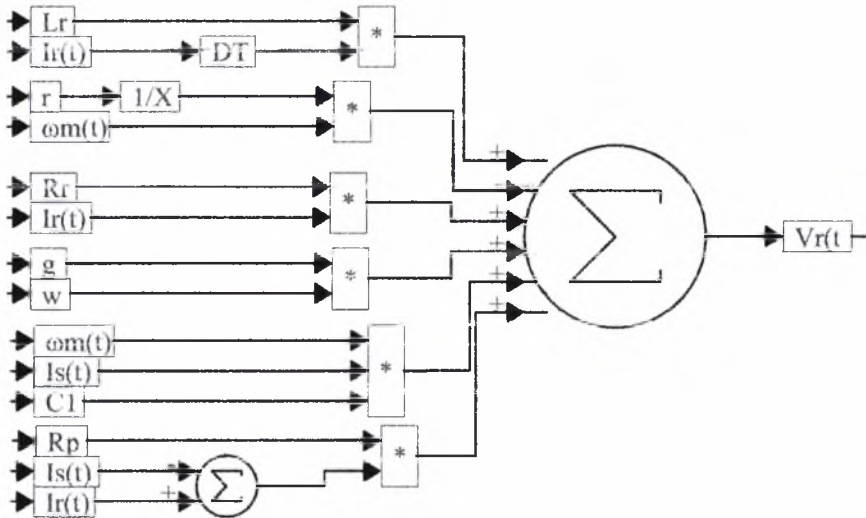
Ηλεκτρικό ισοζύγιο στον ρότορα



Ηλεκτρικό ισοζύγιο στον στάτορα



Καταναλισκόμενη ισχύς

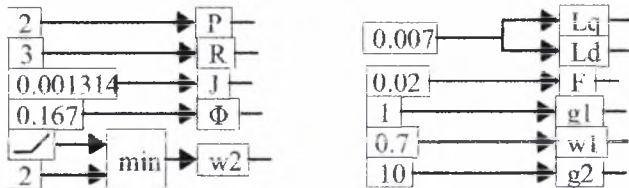


Νόμος ελέγχου για έλεγχο ταχύτητας

Η εκτιμώμενη ροπή είναι ίδια με τον κινητήρα παράλληλης διέγερσης με σταθερή τάση στον ρότορα

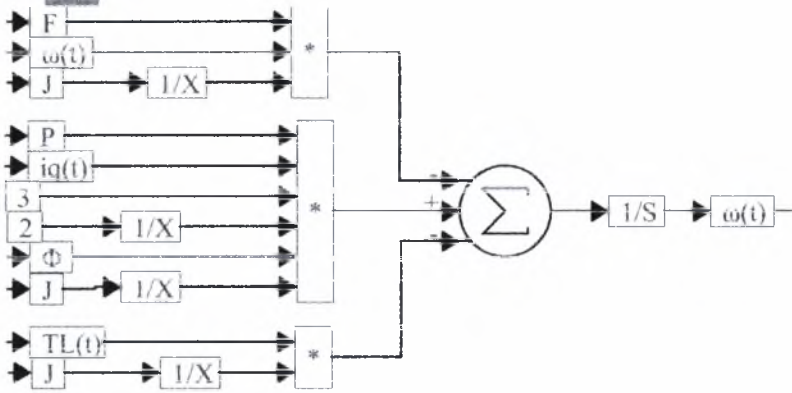
A.2 Κώδικες Προσομοίωσης για Σύγχρονους AC Κινητήρες

Η προσομοίωση έγινε με βήμα μεγέθους 10^{-6} [s] και χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ολοκλήρωσης Euler.

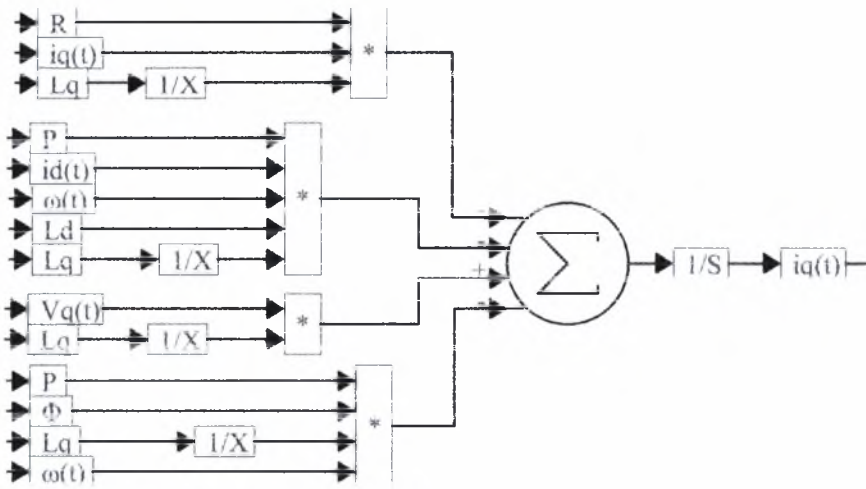


Τιμές των μεταβλητών του κινητήρα

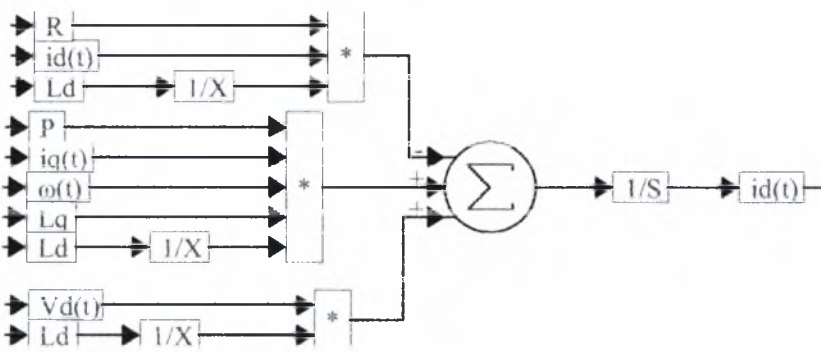
A Παράρτημα



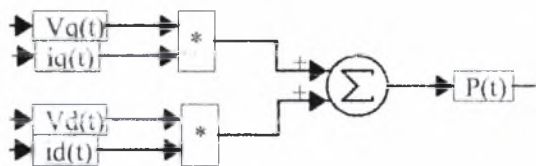
Μηχανικό ισοζύγιο



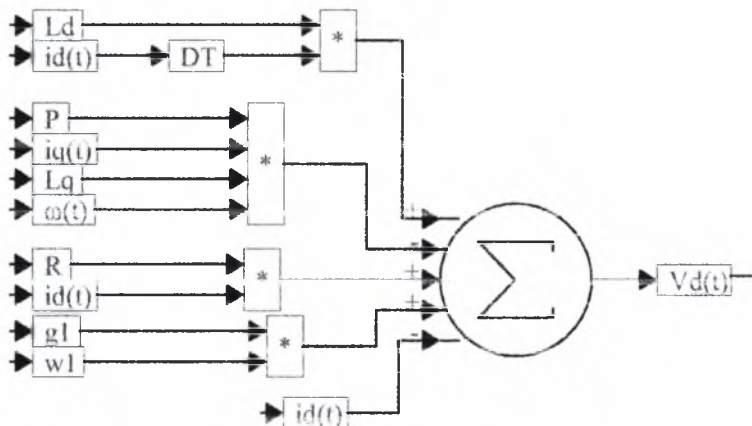
Ηλεκτρικό ισοζύγιο στον άξονα q



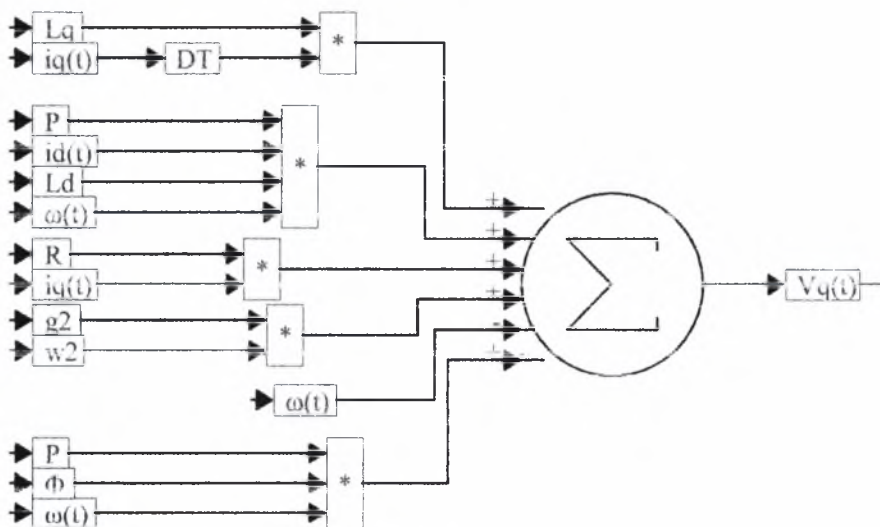
Ηλεκτρικό ισοζύγιο στον άξονα d



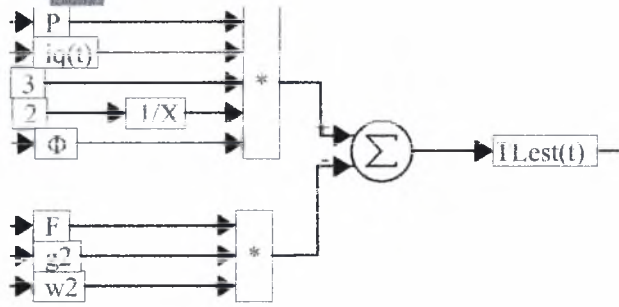
Καταναλισκόμενη ισχύς



Νόμος ελέγχου για έλεγχο ρεύματος



Νόμος ελέγχου για έλεγχο ταχύτητας



Εκτιμώμενη ροπή