



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Γραμμικός βηματικός κινητήρας με σερβοελεγκτή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ Α. ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Μαρία Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Γραμμικός βηματικός κινητήρας με σερβοελεγκτή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ Α. ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Μαρία Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Μαρτίου 2013.

.....
Μαρία Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

.....

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Α. ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © 2013 ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Α. ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η περιγραφή του μοντέλου ενός γραμμικού βηματικού κινητήρα που ως σύστημα ελέγχου του χρησιμοποιεί τον σερβοελεγκτή. Ο γραμμικός βηματικός κινητήρας που χρησιμοποιείται για αυτή τη μετατροπή είναι σχεδιασμένος από τον Sawyer 1969 και επιλέχθηκε διότι παρουσιάζει απόλυτη ακρίβεια θέσης και υψηλή αξιοπιστία.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας θα γίνει λόγος για τις θεωρητικές γνώσεις που αποτελούν κύριο συστατικό για την κατανόηση του κινητήρα που εξετάζεται. Συγκεκριμένα θα αναλυθεί το μοντέλο ενός γραμμικού βηματικού κινητήρα, τα δομικά μέρη του και οι βασικές αρχές λειτουργίας του συμπεριλαμβανομένων των φυσικών/μηχανικών υπολογισμών. Στη συνέχεια θα περιγραφεί το μοντέλο ενός σερβοκινητήρα γραμμικής κίνησης. Η περιγραφή αφορά δύο είδη σερβοκινητήρα, τον αναλογικό και τον ψηφιακό σέρβο. Επίσης θα γίνει εκτενής αναφορά στην μονάδα ελέγχου που χρησιμοποιούν και τελικά θα γίνει μια σύγκριση μεταξύ των δύο ειδών σέρβο. Μετά την ανάλυση των δύο ειδών κινητήρα (γραμμικός κινητήρας και σερβοκινητήρας) θα ακολουθήσει μια σύγκριση μεταξύ τους. Στην τελευταία ενότητα του πρώτου κεφαλαίου θα αναπτυχθεί η θεωρία των αισθητήρων. Συγκεκριμένα θα γίνει λόγος για τους αισθητήρες χωρητικότητας, τους οπτικούς αισθητήρες θέσης, τους αισθητήρες αντίστασης και τους επαγωγικούς αισθητήρες. Τέλος θα γίνει μια σύγκριση μεταξύ των αισθητήρων ως προς την αξιοπιστία της θέσης τους.

Το δεύτερο κεφάλαιο θα ασχοληθεί αποκλειστικά με τον κεντρικό πυρήνα του θέματος που είναι όπως προαναφέρθηκε η περιγραφή του μοντέλου ενός βηματικού κινητήρα με σερβοελεγκτή. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί αρχικά ο σχεδιασμός και η εξέλιξη του αισθητήρα που χρησιμοποιεί ο εν λόγω κινητήρας, στη συνέχεια θα περιγραφεί αναλυτικά ο σχεδιασμός του συστήματος καθώς επίσης η λειτουργία του και τέλος θα δοθεί μια πλήρη περιγραφή του λογισμικού που χρησιμοποιείται.

Λέξεις κλειδιά

Βηματικός κινητήρας, σερβοελεγκτής, σερβοκινητήρας, αναλογικό και ψηφιακό σέρβο, αισθητήρες, περιγραφή μοντέλου, σχεδιασμός συστήματος, περιγραφή λογισμικού

ABSTRACT

The scope of this thesis is the description of the model of a linear stepper motor which using servo control as control system The linear stepper motor which is used for this conversion is designed by Sawyer 1969 and was chosen because it presents absolute position accuracy and high reliability.

In the first section of this thesis becomes reason for the theoretical knowledge which is the main ingredient for the understanding of the engine. In particular the model of a linear stepper motor, the components and the basic operation principles, including physical/mechanical calculations are analyzed .Then description of the model linear servo motor drive is placed based on two kinds of servomotors, the analog and digital Servo. Extensive reference it is made to the control unit which is using and eventually a comparison between them. After the analysis of the two kinds (linear motor and servo motor) it is followed by a comparison between them. The last section of the first chapter, the theory of sensors is discussed. Specifically capacity sensors, the optical sensors position sensors, resistance and the inductive sensors. Finally, it is developed a comparison between the sensors as to their position reliability.

The second section will deal exclusively with the core of the matter which is, as mentioned above the description of the model of a stepping motor with servo control. In this section it is analyzed the initial design and the development of the sensor used in this engine, then it is described in detail the design of the system as well as the operation and closing will be given a full description of the software used.

Keywords

Stepper motor, servo motor, servo control ,analog and digital servo, sensors ,model description, system design ,software description

Περιεχόμενα

σελ.

Περίληψη	5
ABSTRACT	6
1. Βασικές θεωρητικές γνώσεις	9
1.1 Γραμμικοί βηματικοί κινητήρες	9
1.1.1 Ορισμός και δομικά μέρη	9
1.1.2 Βασικές γνώσεις λειτουργίας	11
1.1.3 Θεωρητικό πλαίσιο λειτουργίας	14
1.2 Σερβοκινητήρες γραμμικής κίνησης	16
1.2.1 Εισαγωγή	17
1.2.2 Έλεγχος σερβοκινητήριων συστημάτων	18
1.2.3 Λειτουργία ψηφιακού σέρβο	20
1.2.4 Σύγκριση μεταξύ ψηφιακού και αναλογικού σέρβο	22
1.3 Σύγκριση μεταξύ σερβοκινητήρα και βηματικού κινητήρα	23
1.4 Θεωρία αισθητήρων	24
1.4.1 Εισαγωγή	25
1.4.2 Αισθητήρες χωρητικότητας	25
1.4.3 Οπτικοί αισθητήρες θέσης	26
1.4.3.1 Φωτοανιχνευτές	27
1.4.3.2 Οπτικοί κωδικοποιητές	28
1.4.3.3 Συμβολόμετρα ή Ιντερφερόμετρα	28
1.4.4 Αισθητήρες αντίστασης	29
1.4.5 Επαγωγικοί αισθητήρες	30
1.4.6 Σύγκριση μεταξύ αισθητήρων ως προς την αξιοπιστία της θέσης	33
2. Χρήση γραμμικού βηματικού κινητήρα ως σερβοκινητήρα	35
2.1 Σχεδιασμός και εξέλιξη του αισθητήρα	35
2.2 Σχεδιασμός και λειτουργία του συστήματος	42

2.3 Περιγραφή λογισμικού	47
3. Συμπέρασμα	52
4. Βιβλιογραφία	54

1. Βασικές θεωρητικές γνώσεις

Το πρώτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας αναφέρεται αποκλειστικά στο θεωρητικό πλαίσιο του θέματος. Σκοπός του είναι η ανάλυση των απαραίτητων θεωρητικών αρχών που θα βοηθήσουν στην κατανόηση του δεύτερου κεφαλαίου. Αρχικά θα αναλυθούν οι γραμμικοί βηματικοί κινητήρες και οι σερβοκινητήρες γραμμικής κίνησης, στην συνέχεια θα γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο ειδών και τέλος θα γίνει εκτενής αναφορά στην θεωρία των αισθητήρων.

1.1 Γραμμικοί βηματικοί κινητήρες

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναπτυχθεί η θεωρία του γραμμικού βηματικού κινητήρα. Αρχικά θα δοθεί ο ορισμός του και θα αναλυθούν τα δομικά μέρη του, στην συνέχεια θα γίνει λόγος για τις βασικές γνώσεις της λειτουργίας του και τέλος θα αναφερθεί το θεωρητικό πλαίσιο λειτουργίας του.

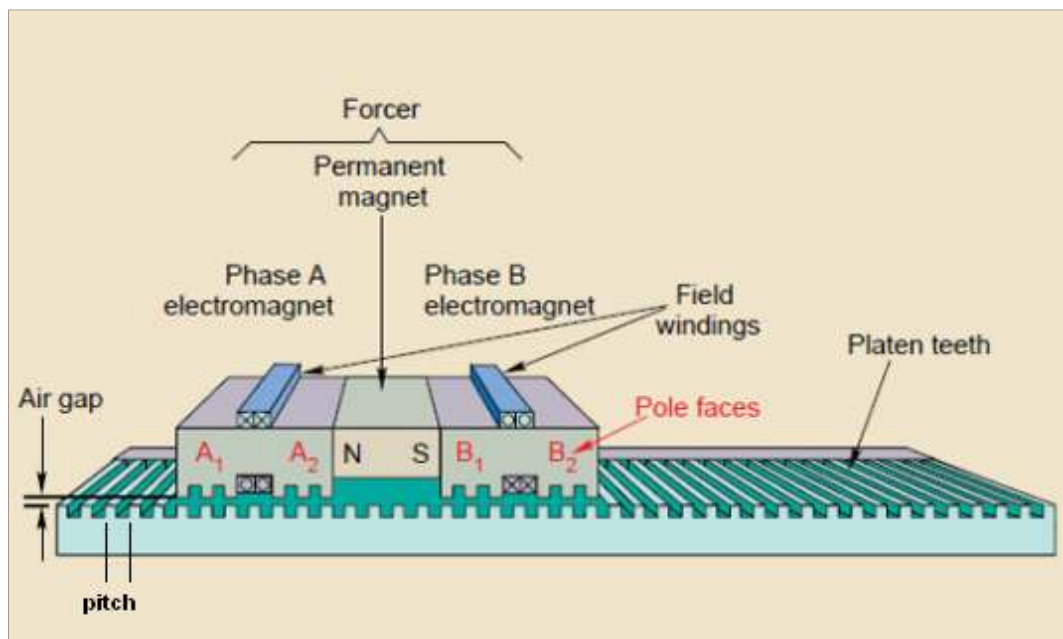
1.1.1 Ορισμός και δομικά μέρη

Οι βηματικοί κινητήρες, σε γενικό πλαίσιο, σύμφωνα με τον Bishop (2002) είναι σύγχρονοι ηλεκτρικοί κινητήρες που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Ειδικότερα ως βηματικός κινητήρας ορίζεται μια ηλεκτρομηχανική συσκευή η οποία μετατρέπει τους ηλεκτρικούς παλμούς σε ιδιαίτερες μηχανικές κινήσεις, δηλαδή σε πολλαπλά μηχανικά βήματα. Οι κινήσεις αυτές μπορεί να είναι είτε κυκλικές (περιστροφικός κινητήρας) είτε γραμμικές (γραμμικός κινητήρας). Αναφορικά υπάρχουν διαφορετικοί τύποι βηματικών κινητήρων (που εκτελούν είτε κυκλικές είτε γραμμικές κινήσεις). Οι τρεις βασικότεροι κατά τον Bishop (2002) είναι οι εξής: κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης (περιστροφικοί ή γραμμικοί), κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (περιστροφικοί ή γραμμικοί) και υβριδικοί κινητήρες (περιστροφικοί ή γραμμικοί)

Οι γραμμικοί βηματικοί κινητήρες ακολουθούν μια γραμμική πορεία και αποτελούνται από έναν στάτη (stator) και έναν επιταχυντή¹ ή αλλιώς κινούμενο στοιχείο (forcer) (βλ. εικόνα 1). Ο στάτης είναι ένα κομμάτι μετάλλου, το οποίο έχει την μορφή διαδοχικών, ίσων σε διαστάσεις «δοντιών», η απόσταση των οποίων ονομάζεται Pitch και είναι ευρέως γνωστός ως «πλάκα στερέωσης» (platen

¹ Ο επιταχυντής (forcer) συναντάται στους γραμμικούς κινητήρες. Αντιστοίχως στους περιστροφικούς κινητήρες στην θέση του επιταχυντή βρίσκεται ο ρότορας (rotor).

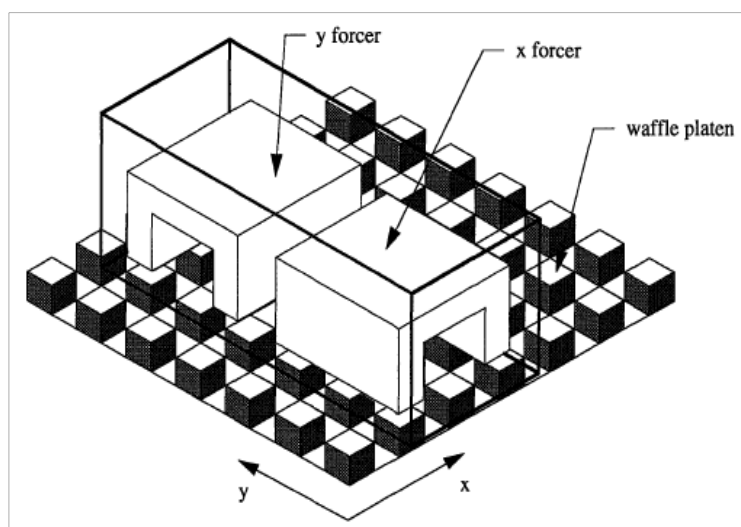
teeth). Έχει συγκεκριμένο μήκος με αποτέλεσμα να οδηγεί τον κινητήρα σε περιορισμένες κινήσεις. Ανάλογα με την εκάστοτε χρήση του κινητήρα έχουν κατασκευαστεί στάτες που ποικίλουν στο μήκος (κατασκευαστική εταιρεία στατών (αναφορικά): AMETEK precision motion control). Ο επιταχυντής αποτελείται από έναν μόνιμο μαγνήτη (permanent magnet) και δύο ηλεκτρομαγνήτες (πυρήνες) „Phase A“ και „Phase B“. Οι ηλεκτρομαγνήτες είναι μεταλλικά στοιχεία που έχουν σχήμα ορθογωνίου και στο σημείο που έρχονται σε επαφή με τον στάτη έχουν επίσης την μορφή δοντιών (όπως δηλαδή ο στάτης). Επιπλέον κατά την επαφή τους με τον στάτη υπάρχει ένα κενό αέρος (air gap) που διατηρείται με ρουλεμάν αέρος (air bearing). Η ύπαρξη του κενού αέρος είναι απαραίτητη διότι διευκολύνει την δημιουργία κίνησης και αποφεύγονται πρόσθετες τριβές. Ο κάθε ηλεκτρομαγνήτης περιέχει σπείρες τυλιγμάτων (field windings), τις οποίες διαπερνά ρεύμα δημιουργώντας μαγνητική ροή, η οποία με την βοήθεια των μαγνητικών πόλων (σύμφωνα με την εικόνα 1: A_1, A_2, B_1, B_2) κατευθύνεται στην πλάκα στερέωσης με αποτέλεσμα την παραγωγή κίνησης.



Εικόνα 1: Βασική μορφή γραμμικού βηματικού κινητήρα (Pelta, 1987)

Η επέκταση της βασικής ιδέας ενός γραμμικού βηματικού κινητήρα έχει αποτυπωθεί από τον Sawyer (1969) και διατηρείται έως σήμερα χωρίς σημαντικές αλλαγές. Ο Sawyer (1969) βασίστηκε

στην ιδέα του μονοαξονικού γραμμικού βηματικού κινητήρα και δημιούργησε την εξελιγμένη μορφή του που αποτελείται από δύο άξονες x, y (planar 2D) (βλ. εικόνα 2). Οι δομικές διαφορές του διαξονικού μοντέλου από το μονοαξονικό είναι κυρίως η ύπαρξη δύο επιταχυντών αντί ενός καθώς επίσης η διαφορετική μορφή της πλάκας στερέωσης. Η πλάκα στερέωσης στην περίπτωση του διαξονικού μοντέλου έχει την μορφή «βάφλας» (waffle platen) για να εξυπηρετεί την ομαλή κίνηση των δύο επιταχυντών. Τα «δόντια» πάνω στην πλάκα έχουν διαστάσεις $0,50 \times 0,50 \text{mm}$ και η απόσταση μεταξύ τους είναι 1mm (Pitch = 1mm).

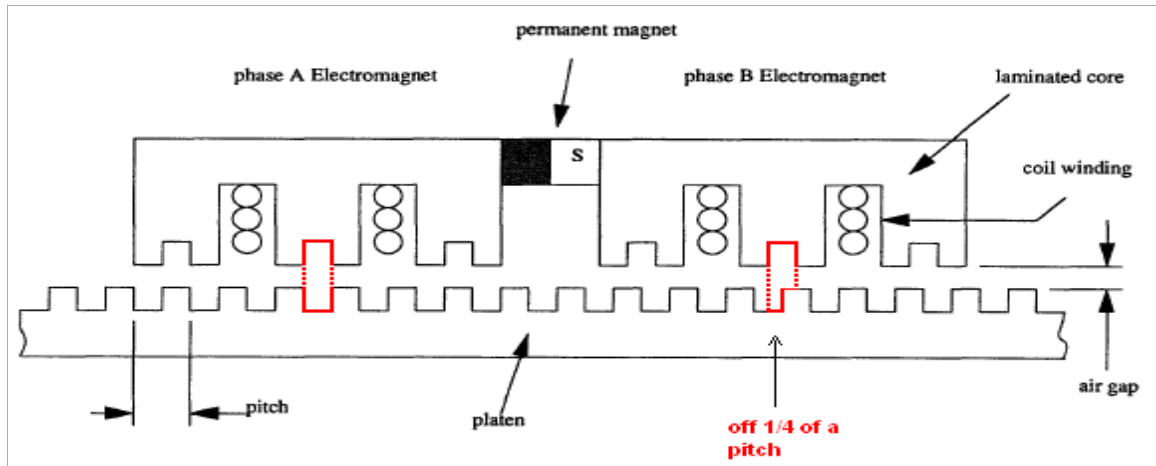


Εικόνα 2: Γραμμικός βηματικός κινητήρας 2 αξόνων (Sawyer, 1969)

1.1.2 Βασικές γνώσεις λειτουργίας

Η ανάλυση της λειτουργίας του γραμμικού βηματικού κινητήρα θα βασιστεί στο μονοαξονικό μοντέλο, διότι δεν παρατηρείται καμία ουσιαστική διαφορά λειτουργίας μεταξύ μονοαξονικού και διαξονικού μοντέλου.

Ως δεδομένο ομαλής λειτουργίας του κινητήρα θεωρείται η τοποθέτηση των δύο ηλεκτρομαγνητών (Phase A και Phase B) με τέτοιον τρόπο, ώστε αν το δόντι του μεσαίου ποδαριού του Phase A-ηλεκτρομαγνήτη είναι ευθυγραμμισμένο ακριβώς με ένα από τα δόντια της πλάκας στερέωσης, τότε το δόντι του μεσαίου ποδαριού του Phase B-ηλεκτρομαγνήτη θα απέχει σε απόσταση $\frac{1}{4}$ του Pitch με το αντίστοιχο δόντι της πλάκας στερέωσης. Ουσιαστικά όπως φαίνεται και στην εικόνα 3, δεν μπορούν συγχρόνως να είναι ευθυγραμμισμένα ακριβώς και τα δύο δόντια των ηλεκτρομαγνητών με τα αντίστοιχα δόντια της πλάκας στερέωσης.

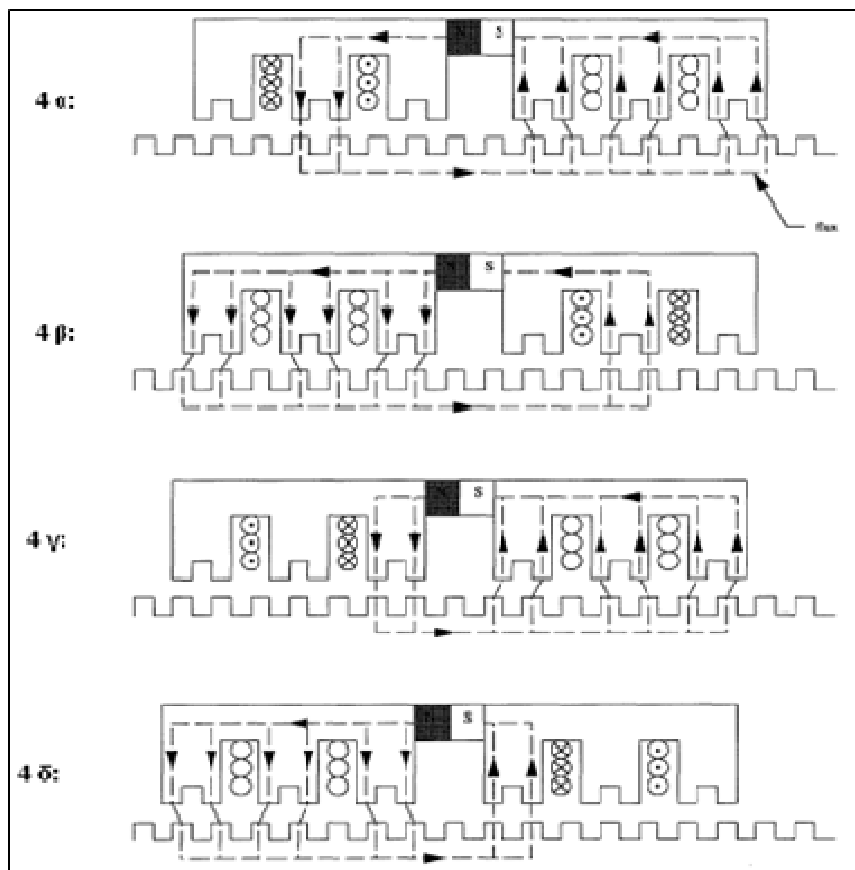


Εικόνα 3: Απλοποιημένη μορφή ενός μονοαξονικού γραμμικού βηματικού κινητήρα

Η διαδικασία που ακολουθείται για να λειτουργήσει ο κινητήρας έχει ως εξής: Αρχικά όταν ένα ρεύμα με θετικό πρόσημο $+I$ (πλάτος) περνά από τις σπείρες τυλιγμάτων του ηλεκτρομαγνήτη A, το δόντι του μεσαίου ποδιού του προσπαθεί να ευθυγραμμιστεί με αυτό της πλάκας στερέωσης, ώστε να μειωθούν τα ανεπιθύμητα κενά αέρος στο ελάχιστο, όπως φαίνεται στην εικόνα 4α.

Στην συνέχεια όταν αποσυνδέεται το ρεύμα $+I$ από τον ηλεκτρομαγνήτη A και επιτρέπεται η είσοδος του στον ηλεκτρομαγνήτη B, το δόντι του μεσαίου ποδιού του ευθυγραμμίζεται με το δόντι της πλάκας στερέωσης (βλ. εικόνα 4β). Έτσι μετατοπίζεται με εμπρόσθια κίνηση ο επιταχυντής κατά $\frac{1}{4}$ του Pitch. Αν στην συνέχεια επαναληφθεί η πρώτη διαδικασία, δηλαδή αν δοθεί ρεύμα $+I$ στον ηλεκτρομαγνήτη A, θα επανέλθει ο κινητήρας στην αρχική του θέση.

Αν όμως στη συνέχεια εισαχθεί ρεύμα $-I$ στον ηλεκτρομαγνήτη A, τα δόντια των δύο ακριανών ποδιών του θα ευθυγραμμιστούν με αυτά της πλάκας στερέωσης (βλ. εικόνα 4γ). Έπειτα αν διακοπεί το ρεύμα $-I$ από τον ηλεκτρομαγνήτη A και εισαχθεί στον ηλεκτρομαγνήτη B, θα ευθυγραμμιστούν τα δόντια των δύο ακριανών ποδιών του με αυτά της πλάκας στερέωσης, με αποτέλεσμα να μετατοπιστεί ο κινητήρας ακόμα $\frac{1}{4}$ του Pitch μπροστά (βλ. εικόνα 4δ)



Εικόνα 4: Αρχή λειτουργίας μαγνητικής ροής σε απλοποιημένη μορφή κινητήρα Sawyer (Sawyer,1969)

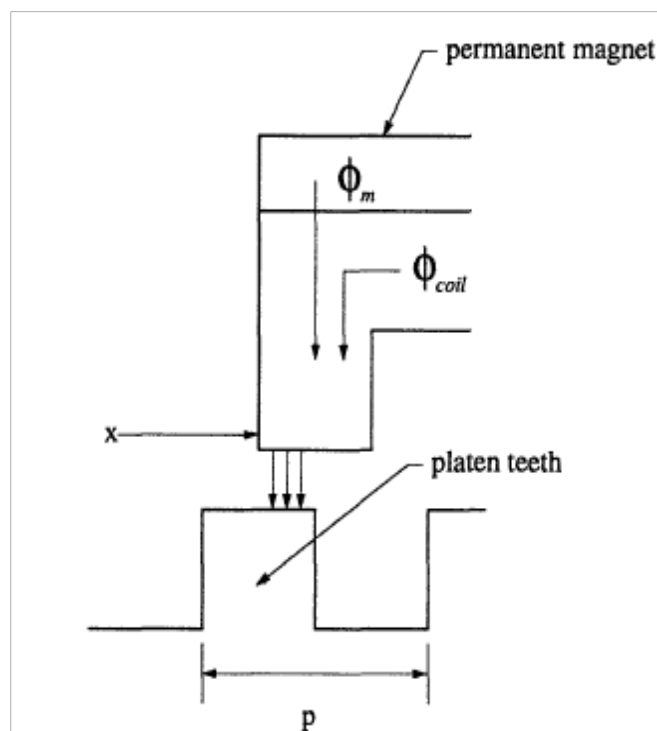
Συνοψίζοντας με το να επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία εναλλαγής ρεύματος μεταξύ των σπειρών τυλίγματος στους ηλεκτρομαγνήτες και συνεπώς η μετατόπιση ηλεκτρομαγνητικής ροής, όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, επιτυγχάνεται η κίνηση του κινητήρα βήμα προς βήμα. Αυτή η κίνηση ονομάζεται «βασικό βήμα».

Αν το ρεύμα που εισέρχεται στους ηλεκτρομαγνήτες A και B είναι εναλλασσόμενο (ημιτονοειδές) με διαφορά φάσης 90° , δηλαδή ένα sine και ένα cosine σήμα, τότε ο κινητήρας φαίνεται να κινείται συνεχόμενα πάνω στην πλάκα στερέωσης, χωρίς δηλαδή να είναι εμφανής οι διακοπτόμενες βηματικές του κινήσεις. Με άλλα λόγια παρατηρούμε μια συνεχόμενη κίνηση που οφείλεται σε κινήσεις micro-stepping. Αυτό συμβαίνει διότι το κάθε δόντι της πλάκας στερέωσης αντικαθίσταται με έναν αριθμό μικρότερων δοντιών. Πιο συγκεκριμένα η διάσταση του Pitch είναι 1mm και το κενό αέρος μεταξύ της πλάκας στερέωσης και του επιταχυντή 0,02mm. Ακόμα ο αριθμός των θέσεων που μπορεί να «κάτσει» ο κινητήρας μέσα σε ένα Pitch εξαρτάται από την ανάλυση του ημιτονοειδούς και συνημιτονοειδούς σήματος (εναλλασσόμενου). Παραδείγματος χάριν αν το

ημιτονοειδές σήμα αναλυθεί σε 125 σημεία, τότε ο κινητήρας θα πετύχει βήμα με ακρίβεια μόνο 1/125 του Pitch.

1.1.3 Θεωρητικό πλαίσιο λειτουργίας

Για να κατανοηθεί η λειτουργία του γραμμικού βηματικού κινητήρα, θα επιλεγθεί τυχαία ένας από τους μαγνητικούς πόλους του (βλ. εικόνα 5) και θα αναλυθεί με τύπους φυσικής και μηχανικής, οι οποίοι αφορούν το δόντι της πλάκας και του ποδιού της μηχανής (πόλου).



Εικόνα 5: Απεικόνιση μαγνητικής ροής σε έναν πόλο του κινητήρα

Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο κενό αέρος μεταξύ της πλάκας στερέωσης και της μηχανής μετατρέπεται σε έργο λόγω της δύναμης που προκαλείται την στιγμή της μετατόπισης του επιταχυντή. Αυτή η ενέργεια δίνεται από τους ακόλουθους τύπους:

$$Fdx = dE \quad (1)$$

$$F = \frac{\partial E}{\partial x} \quad (2)$$

Η ενέργεια E του κενού αέρος είναι το χρονικό ολοκλήρωμα του αποτελέσματος αυτής της μαγνητοκινητήριας δύναμης (mmF) και του χρόνου αλλαγής της μαγνητικής ροής Φ .

$$E = \int' M \frac{d\phi}{dt} dt = \int^\phi M d\phi \quad (3)$$

Η μαγνητοκινητήρια δύναμη σχετίζεται με την μαγνητική ροή:

$$M = R(x)\phi \quad (4)$$

Όπου $R(x)$ είναι η αντίσταση του μαγνητικού πεδίου στο κενό αέρος και ακολούθως η ενέργεια δίνεται ως εξής:

$$E = \int^\phi R(x)\phi d\phi = \frac{1}{2} R(x)\phi^2 \quad (5)$$

Αντικαθιστώντας την (3) στην (1) δίνεται ο εξής τύπος:

$$F = \frac{1}{2} \frac{dR}{dx} \phi^2 \quad (6)$$

Η τιμή της αντίστασης δίνεται περίπου από την παρακάτω σχέση (Guzman, 1993):

$$R(x) = \frac{1}{2}(R_{\max} + R_{\min}) - \frac{1}{2}(R_{\max} - R_{\min}) \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (7)$$

Απλοποιώντας αυτή την εξίσωση παίρνουμε τον τύπο:

$$R(x) = R_0 \left[1 - k \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right] \quad (8)$$

Και παραγωγίζοντας τον τύπο (8) έχουμε:

$$\frac{dR}{dx} = R_0 k \frac{2\pi}{p} \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (9)$$

Επομένως αντικαθιστώντας την (9) στην (6) έχουμε:

$$F = \frac{R_0 k \pi}{p} \phi^2 \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (10)$$

Η μαγνητική ροή Φ στην πραγματικότητα είναι το άθροισμα της μαγνητικής ροής του μόνιμου μαγνήτη Φ_m με τη ροή των τυλιγμάτων Φ_{coil} , δηλαδή:

$$\Phi = \phi_m + \phi_{coil} \quad (11)$$

Οπότε η δύναμη που δημιουργείται σε έναν πόλο είναι:

$$F = \frac{R_0 k \pi}{p} (\phi_m + \phi_{coil})^2 \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (12)$$

Αθροίζοντας τις δυνάμεις από όλους τους πόλους των Α και Β ηλεκτρομαγνητών παίρνουμε την ολική δύναμη F_{total} (Κυο,1972-1973):

$$F_{total} = \frac{R_0 k \pi}{p} \phi_m \left[\phi_{cA} \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) - \phi_{cB} \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right] \quad (13)$$

Υποθέτοντας ότι οι ροές των τυλιγμάτων Α και Β, Φ_{cA} και Φ_{cB} , είναι ανάλογες στα ρεύματα των Α και Β τότε η ροή των τυλιγμάτων γράφεται ως εξής:

$$\phi_{cA} = \phi_c \sin(\omega t) \quad (14)$$

$$\phi_{cB} = \phi_c \cos(\omega t) \quad (15)$$

Αντικαθιστώντας την (14) και (15) στην (13) παίρνουμε:

$$F_{total} = \frac{R_0 k \pi}{p} \phi_m \phi_c \left[\sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) - \cos(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right] \quad (16)$$

$$F_{total} = \frac{R_0 k \pi}{p} \phi_m \phi_c \cos \psi \quad (17)$$

Όπου ψ συμβολίζεται η γωνιακή δύναμη. Από τον τύπο (17) παρατηρείται ότι η δύναμη του κινητήρα είναι ανάλογη της ροής του μόνιμου μαγνήτη Φ_m , της μέσης τιμής της αντίστασης του κενού αέρος R_o , της σταθεράς k , της ροής τυλίγματος Φ_c , και αντιστρόφως ανάλογη του Pitch.

1.2 Σερβοκινητήρες γραμμικής κίνησης

Οι σερβοκινητήρες είναι κινητήρες μεγάλης ακρίβειας και χωρίζονται όπως οι βηματικοί κινητήρες (κεφ. 1.1) σε γραμμικούς και περιστροφικούς. Αυτό το υποκεφάλαιο θα ασχοληθεί με τους σερβοκινητήρες γραμμικής κίνησης. Αρχικά θα γίνει μια εισαγωγή στο θέμα, στην συνέχεια θα γίνει αναφορά στον έλεγχο ενός σερβοκινητήριου συστήματος, στην λειτουργία ενός ψηφιακού σέρβο και τέλος θα γίνει σύγκριση μεταξύ ψηφιακού και αναλογικού σέρβο.

1.2.1 Εισαγωγή

Οι σερβοκινητήρες ανήκουν στην κατηγορία των συστημάτων αυτόματου ελέγχου κλειστού βρόγχου ή αλλιώς των συστημάτων ελέγχου με ανάδραση. Η βασική ιδέα λειτουργίας των σερβοκινητήρων γραμμικής κίνησης δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με αυτή των βηματικών κινητήρων γραμμικής κίνησης (κεφ. 1.1). Εντούτοις παρατηρεί κανείς στους σερβοκινητήρες μια ενσωμάτωση διατάξεων μέτρησης και συστήματος ανάδρασης. Το σύστημα ανάδρασης χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ένα σερβομηχανισμό οδήγησης, με σκοπό να ελεγχθεί είτε αναλογικά είτε ψηφιακά η ροπή των σερβοκινητήρων, η ταχύτητα τους και η θέση τους.

Κύρια χαρακτηριστικά των σερβοκινητήρων είναι η υψηλή ροπή, η γρήγορη απόκριση στις εντολές του συστήματος ελέγχου και το υψηλό εύρος ελέγχου της ταχύτητας. Επίσης μπορούν να λειτουργήσουν με μηδενική ταχύτητα, έχοντας αρκετή ροπή για να διατηρήσουν ένα φορτίο σε μια δεδομένη θέση. Επιπλέον οι εκκινητές τους προσφέρουν τον ακριβέστερο έλεγχο της κίνησης. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να προσαρμόσουν τις σύνθετες εντολές και τα σχεδιαγράμματα κινήσεων ευκολότερα.

Υπάρχουν δύο βασικά είδη σερβοκινητήρων, οι σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC servomotor) και οι σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, τριφασικοί ή μονοφασικοί (AC servomotor). Οι τελευταίοι (AC) που είναι πιο διαδεδομένοι, συνοδεύονται με τα εξής εξαρτήματα: ένα μετασχηματιστή, έναν ανορθωτή τάσης και έναν πυκνωτή. Ο μετασχηματιστής παίρνει την τάση του δικτύου AC και τη μετασχηματίζει με τη βοήθεια του ανορθωτή σε τάση DC κατάλληλου μεγέθους και έπειτα η τάση αποθηκεύεται στον πυκνωτή.

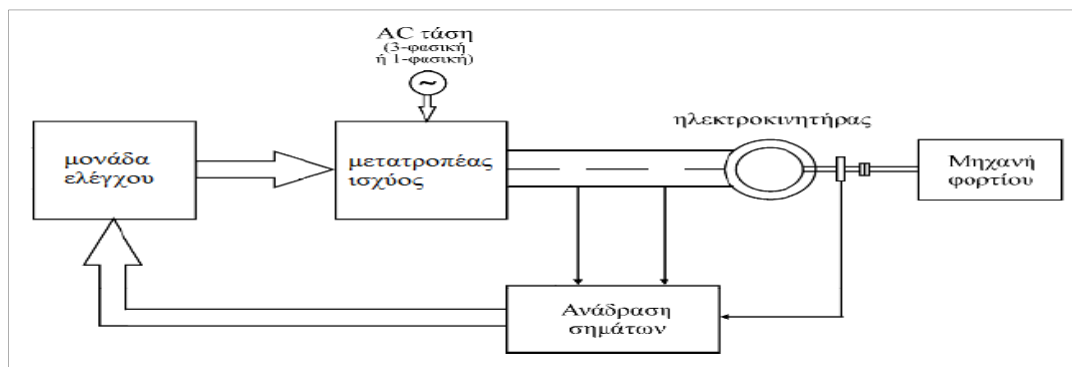
Η χρήση των σερβοκινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος δεν συνιστάται σε συστήματα ελέγχου θέσης ή ταχύτητας λόγω της ροπής αδράνειας αλλά και των επιπρόσθετων απωλειών από τα εξαρτήματα τους. Ωστόσο οι σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές όπως: σερβοσυστήματα καθορισμού θέσης (positioning), συστήματα ελέγχου ταχύτητας, συστήματα ελέγχου βραχίονα (π.χ. ρομπότ) και μοντελισμό (RC-servo).

1.2.2 Έλεγχος σερβοκινητήριων συστημάτων

Η επιλογή του συστήματος ελέγχου ενός σερβοκινητήρα γίνεται σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Έτσι μπορεί να επιλεγθεί σύστημα αυτόματου ελέγχου κλειστού ή ανοιχτού βρόγχου. Στην περίπτωση που η εφαρμογή δεν απαιτεί μεγάλη ακρίβεια και απόκριση συστήματος χρησιμοποιείται η μέθοδος ελέγχου ανοιχτού βρόγχου επειδή είναι πιο οικονομική και πιο απλή στην εγκατάσταση. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και γρήγορη απόκριση στα σήματα εντολής, ταχύτητας και θέσης του δρομέα επιλέγεται η μέθοδος ελέγχου κλειστού βρόγχου.

Για να κατανοηθεί καλύτερα η έννοια του ελέγχου ενός σερβοκινητήριου συστήματος, είναι σημαντικό να γίνει μια σύντομη περιγραφή του (βλ. εικόνα 6). Ένα σερβοκινητήριο σύστημα αποτελείται από τον φυσικό κινητήρα, τον μετατροπέα ισχύος, τη μονάδα ελέγχου και τις μετρητικές διατάξεις. Το φυσικό σύστημα είναι ο κινητήρας μέσω του οποίου ελέγχεται η ροπή και η ταχύτητα. Ο μετατροπέας ισχύος (converter) είναι η μονάδα που τροφοδοτεί τον κινητήρα με πηγή τάσης ή με πηγή ρεύματος και αποτελείται από τον ανορθωτή τάσης και τον αντιστροφέα ισχύος (inverter). Επίσης ο μετατροπέας ισχύος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της ανάδρασης του σερβοσυστήματος και του κινητήρα. Η μονάδα ελέγχου σε συνεργασία με τον συγκριτή του σήματος αναφοράς και του σήματος ανάδρασης δημιουργούν τον κλειστό βρόγχο. Ένας ή περισσότεροι ελεγκτές PI διαμορφώνουν την μονάδα ελέγχου και εκείνη με την σειρά της διαμορφώνει την δυναμική απόκριση του συστήματος. Η σχεδίαση της μονάδας ελέγχου και συγκεκριμένα η ρύθμιση των παραμέτρων των ελεγκτών αποτελούν θεμέλιο λίθο για τη βέλτιστη δυναμική συμπεριφορά ολόκληρου του σερβοκινητήριου συστήματος.

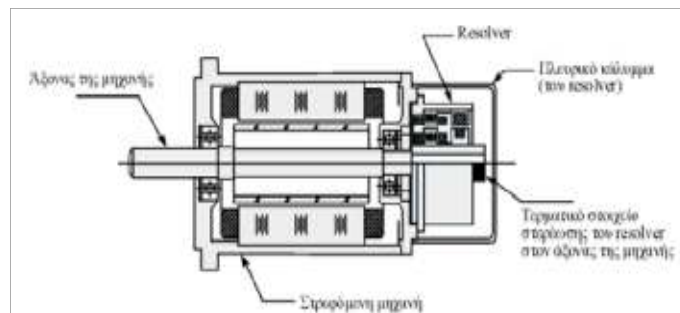
Τέλος οι μετρητικές διατάξεις χρειάζονται για την δημιουργία σημάτων ανάδρασης των μεταβλητών ελέγχου, τα οποία οδηγούνται στην μονάδα ελέγχου. Επιπλέον πριν την οδήγηση τους στη μονάδα ελέγχου φιλτράρονται για να απομακρυνθούν τυχών θόρυβοι που έχουν δημιουργηθεί κατά την μέτρηση ή που ήδη υπάρχουν στους μετρητές ελέγχου. Επίσης οι μετρητικές διατάξεις συναντούνται στην βιβλιογραφία και ως «μετατροπείς σημάτων» (transducers) διότι μετατρέπουν τις μεταβλητές ελέγχου (π.χ. τάση, ρεύμα, ταχύτητα, θέση) σε σήματα τάσης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί η μονάδα ελέγχου να τα επεξεργαστεί.



Εικόνα 6: Αναπαράσταση λειτουργίας ενός σερβοκινητήριου συστήματος

Ακόμα οι μετρητές θέσης (διατάξεις ανάδρασης) συντελούν στον έλεγχο ενός σερβοκινητήριου συστήματος. Γι' αυτό το λόγο θα γίνει μια σύντομη αναφορά σε δύο είδη μετρητών θέσης (ή ταχύτητας), στους ηλεκτρομαγνητικούς μετρητές θέσης (resolvers) και στους οπτικούς κωδικοποιητές θέσης (optical encoders). Εκτενής αναφορά στις διατάξεις ανάδρασης (αισθητήρες) θα γίνει στο υποκεφάλαιο 1.4.

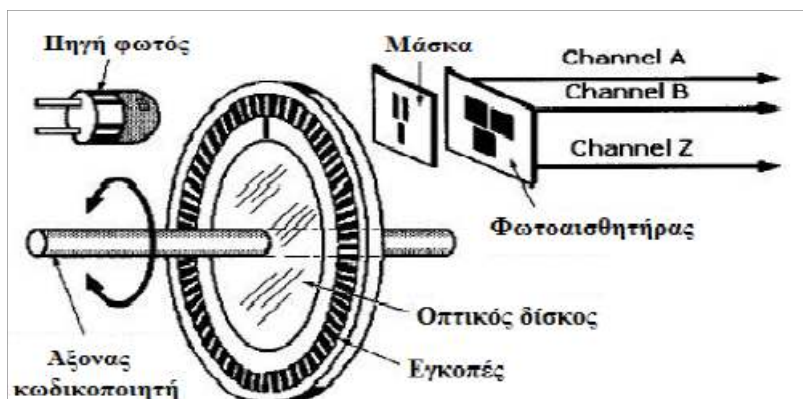
Ο ηλεκτρομαγνητικός μετρητής θέσης (resolver) είναι ένας στρεφόμενος μετασχηματιστής. Η γωνία στροφής του άξονα του κινητήρα, πάνω στον οποίο βρίσκεται, καθορίζει την μεταβολή του πλάτους της τάσης εξόδου του. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του ορίζουν το περιβάλλον λειτουργίας του. Αφ' ενός μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών διότι δεν περιέχει μαγνήτες και αφ' εταίρου σε εφαρμογές με μεγάλες ταχύτητες περιστροφής διότι δεν έχει ψήκτρες για την αγωγή σύνδεση του κυκλώματος του δρομέα. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι ηλεκτρομαγνητών μετρητών θέσης, οι οποίοι διαφέρουν στον τρόπο έδρασης τους στον άξονα του κινητήρα, στον τρόπο που τροφοδοτούν την τάση και στον τρόπο της παραγωγής της τάσης εξόδου. Ονομαστικά υπάρχουν οι «τύπου άξονα resolver» (shaft type resolver), οι «ενσωματωμένου τύπου resolver» (built-in type resolver), οι «brushless transmitter resolver» και οι resolver μαγνητικής αντίστασης (variable reluctance resolver). Αναφορικά παραθέτεται στην παρακάτω εικόνα ένας ηλεκτρομαγνητικός μετρητής θέσης ενσωματωμένου τύπου:



Εικόνα 7: Ηλεκτρομαγνητικός μετρητής θέσης (ενσωματωμένου τύπου) (built-in type resolver)

Οι οπτικοί κωδικοποιητές (κωδικοποιητές σχετικής θέσης ή απόλυτης θέσης) μεταφράζουν την πληροφορία της θέσης σε μια σειρά από ψηφιακούς παλμούς με αποτέλεσμα να προσδιορίζεται η θέση του δρομέα. Όπως παρατηρείται στην εικόνα 8 αποτελούνται από έναν οπτικό δίσκο που στην επιφάνεια του φέρει εγκοπές και ένα σύστημα που περιλαμβάνει έναν φωτοαισθητήρα. Αυτό το σύστημα ονομάζεται «σύστημα φωτεινής πηγής» (infrared emitter).

Όσον αφορά τη λειτουργία τους ακολουθείται η εξής διαδικασία: Μια δέσμη φωτός πέφτει πάνω στις εγκοπές του περιστρεφόμενου δίσκου και έτσι δημιουργούνται διαδοχικές σκοτεινές και φωτεινές εναλλαγές διαστημάτων. Τα φωτοαισθητήρια που βρίσκονται πίσω από τον δίσκο, αντιλαμβάνονται αυτές τις εναλλαγές και μετατρέπουν την παλμοσειρά του φωτεινού σήματος σε παλμοσειρά τάσης.



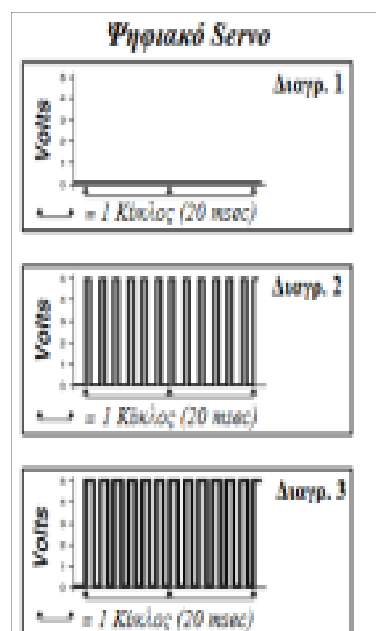
Εικόνα 8: Εξαρτήματα ενός οπτικού κωδικοποιητή θέσης

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η λειτουργία ανάδρασης σε ένα σερβοκινητήρα έχει ως στόχο τον συνεχή έλεγχο των εντολών θέσης και ταχύτητας του συστήματος. Σε αυτό βοηθά και ο ενισχυτής του σερβοσυστήματος, ο οποίος είναι μια μονάδα που βρίσκεται μεταξύ της μονάδας ελέγχου και του σερβοκινητήρα και τροφοδοτεί με ισχύ τον κινητήρα. Υπάρχουν διαφορετικές κατηγορίες ενισχυτών που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες είτε εναλλασσόμενου είτε συνεχούς ρεύματος. Έτσι προκύπτουν οι εξής κατηγορίες ενισχυτών: ηλεκτρονικοί, μαγνητικοί, ενισχυτές ηλεκτρονόμων, στρεφόμενοι, πνευματικοί και υδραυλικοί.

1.2.3 Λειτουργία ψηφιακού σέρβο

Η πιο εξελιγμένη μορφή σερβομηχανισμού είναι το ψηφιακό σέρβο, το οποίο χρησιμοποιείται σε γενικές γραμμές στα συστήματα αυτόματου ελέγχου καθώς επίσης στον μοντελισμό (RC-servo) και στην ρομποτική.

Όσον αφορά τη λειτουργία του ψηφιακού σέρβο παρατηρούνται τα εξής στάδια: Αρχικά το σέρβο βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας, συνεπώς δεν υπάρχει ούτε ροή ηλεκτρικού ρεύματος, ούτε ισχύ στον σερβοκινητήρα. Την χρονική στιγμή που δίνεται εντολή για εκκίνηση στον κινητήρα, το σέρβο τροφοδοτεί με ισχύ και τάση τον σερβοκινητήρα. Η ισχύς είναι παλμική και έχει συχνότητα 50 κύκλους ανά δευτερόλεπτο (μέγιστη τάση), γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μικρών παλμών. Στην συνέχεια αυξάνεται το μήκος του κάθε παλμού ισχύος και επηρεάζεται ο έλεγχος της ταχύτητας, ώσπου εφαρμόζεται η πλήρης τάση στον κινητήρα η οποία επιταχύνει σε νέα θέση τον άξονα του σερβοσυστήματος. Όταν ο άξονας πλησιάζει στην επιθυμητή θέση, το μήκος των παλμών μειώνεται με αποτέλεσμα να επιβραδύνει και τελικά να μηδενιστεί η ισχύς και συνεπώς να σταματήσει ο σερβοκινητήρας.



Εικόνα 9: Κύκλοι των παλμών on/off ισχύος

Τα ψηφιακά σέρβο έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα παρά μειονεκτήματα σύμφωνα με τον Athani (1997). Συγκεκριμένα ο Athani (1997) αναφέρεται στον μικροεπεξεργαστή τους, ο οποίος μπορεί να λαμβάνει το εισερχόμενο σήμα και να του εφαρμόζει παραμέτρους, πριν την αποστολή παλμών στον σερβοκινητήρα. Με άλλα λόγια το πρόγραμμα του μικροεπεξεργαστή έχει την

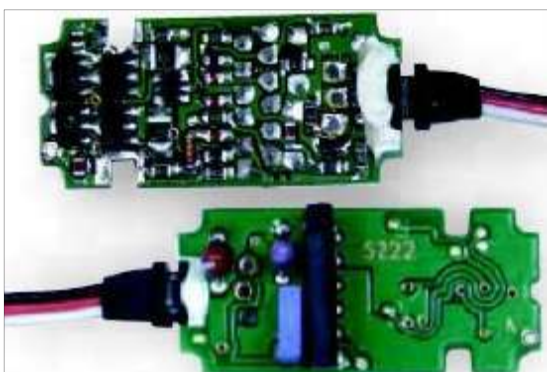
δυνατότητα να ρυθμίζει το μήκος του παλμού ισχύος και συνεπώς το ποσό της ενέργειας που θα αποσταλεί για την ενεργοποίηση του κινητήρα. Το γεγονός αυτό συμβάλει στην βέλτιστη απόδοση του σέρβο. Ακόμα ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η υψηλή συχνότητα, με την οποία το ψηφιακό σέρβο στέλνει παλμούς στον κινητήρα (300 παλμοί/λεπτό). Με την αύξηση της συχνότητας αυξομειώνεται πιο γρήγορα η ισχύς στον κινητήρα και έτσι περιστρέφεται πιο γρήγορα (στην περίπτωση ενός περιστροφικού ψηφιακού σέρβο). Ακόμα οι αυξομειώσεις της ισχύς (επιτάχυνση ή επιβράδυνση) διαβιβάζονται με μεγαλύτερη συχνότητα στον σερβοκινητήρα. Το παραπάνω πλεονέκτημα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το ψηφιακό σέρβο έχει βελτιωμένο νεκρό διάστημα (deadband), πιο γρήγορη απόκριση, ταχύτερη και ομαλότερη επιτάχυνση (ή επιβράδυνση) καθώς επίσης καλύτερη ακρίβεια και επαναφορά στην αρχική θέση (ανάλογα με το σήμα ελέγχου που δέχεται).

Τέλος ως μοναδικό μειονέκτημα χαρακτηρίζει ο Athani (1997) την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας (ρεύματος) που απαιτείται για την λειτουργία του συστήματος καθώς επίσης το υψηλό κόστος.

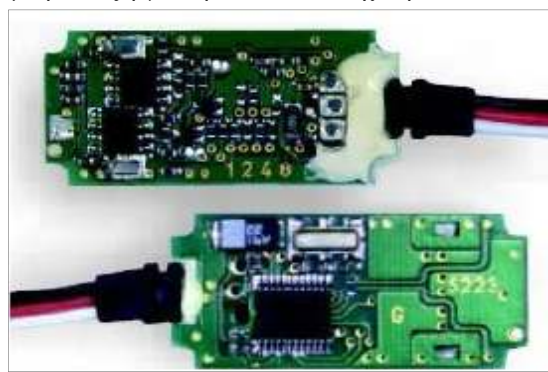
1.2.4 Σύγκριση μεταξύ ψηφιακού και αναλογικού σέρβο

Από άποψη εμφάνισης και σχεδιασμού τα δύο είδη σέρβο (ψηφιακό και αναλογικό) είναι σχεδόν όμοια (βλ. εικόνα 10). Επίσης ελέγχουν τους ίδιους κινητήρες και έχουν το ίδιο σύστημα ανάδρασης με μεταβλητή αντίσταση (ποτενσιόμετρο).

Εικόνα 10α: Αναλογικό σέρβο με προσαρμοσμένα τσιπ



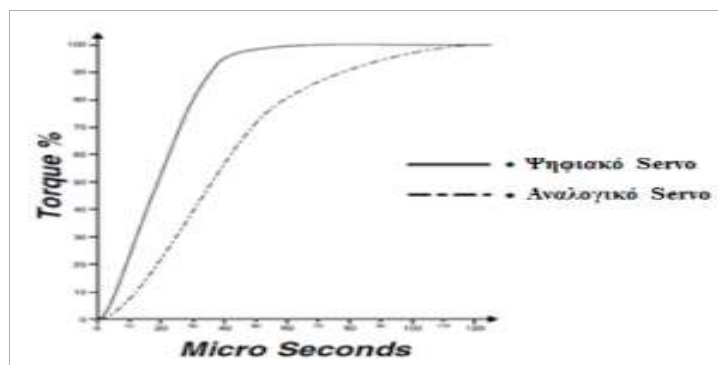
Εικόνα 10β: Ψηφιακό σέρβο με ελεγχόμενο μικροεπεξεργαστή και FET ενισχυτή



Η κύρια διαφορά τους έγκειται στην ύπαρξη μικροεπεξεργαστή του ψηφιακού σέρβο, ο οποίος αναλύει τα σήματα που εισέρχονται, ελέγχει την αρχική ισχύ του κινητήρα, μειώνει το νεκρό

διάστημα και αυξάνει την ακρίβεια.

Ακόμα μια διαφοροποίηση είναι ότι στο αναλογικό σέρβο εκτελείται ένας μικρός έλεγχος κίνησης με αποτέλεσμα να στέλλονται παλμοί μικρής διάρκειας στον κινητήρα. Συγκεκριμένα η μηχανή ενός αναλογικού σέρβο δέχεται ένα σήμα, το οποίο καθορίζει τη θέση της μηχανής από τον ενισχυτή με συχνότητα 30 φορές το δευτερόλεπτο. Αντίθετα σε ένα ψηφιακό σέρβο χρησιμοποιείται ένας μεγαλύτερης συχνότητας ενισχυτής που αναμεταδίδει την θέση της μηχανής 300 φορές το δευτερόλεπτο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη επιτάχυνση και την μεγαλύτερη απόκριση της μηχανής. Αυτός ο «ελλιπής» έλεγχος από πλευράς αναλογικού σέρβο χαρακτηρίζεται από τους Schulze-Lauen et al. (1994) αναποτελεσματικός διότι ενισχύει την δημιουργία «νεκρού διαστήματος». Στην εικόνα 11 φαίνεται ξεκάθαρα ότι το ψηφιακός σέρβο έχει πολύ μικρότερο νεκρό διάστημα και δεσμεύει σε λιγότερο χρόνο μεγαλύτερη ισχύ απ' ό τι το αναλογικός. Ως «νεκρό διάστημα» δε χαρακτηρίζεται η αργή ή η ανύπαρκτη κίνηση γύρω από το κέντρο του τυποποιημένου σέρβο.



Εικόνα 11: Σύγκριση «νεκρού διαστήματος» (deadband) μεταξύ ενός ψηφιακού και ενός αναλογικού Σέρβο με τις ίδιες προδιαγραφές.

Σύμφωνα με τα παραπάνω καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι το ψηφιακός σέρβο είναι πιο εξελιγμένο, έχοντας περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με το αναλογικό.

1.3 Σύγκριση μεταξύ σερβοκινητήρα και βηματικού κινητήρα

Οι βηματικοί κινητήρες και οι σερβοκινητήρες παρουσιάζουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους. Αρχικά υπάρχουν διαφορές ως προς την σχεδίαση τους, από όπου επηρεάζεται σημαντικά η απόδοσή τους. Συγκεκριμένα εξαιτίας του μεγαλύτερου αριθμού πόλων του βηματικού κινητήρα,

απαιτείται για μια κίνηση μεγαλύτερη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τα τυλίγματα του σε σχέση με έναν σερβοκινητήρα. Γεγονός το οποίο σε χαμηλότερες ταχύτητες λειτουργεί ευεργετικά από άποψη ροπής, καθιστώντας τον βηματικό κινητήρα να έχει πλεονέκτημα σε σχέση με έναν σερβοκινητήρα ίδιου μεγέθους. Πιο αναλυτικά οι βηματικοί κινητήρες λειτουργούν καλύτερα σε ταχύτητες κάτω των 2.000 ΣΑΛ. Αντίθετα σε περιπτώσεις υψηλών ταχυτήτων ο βηματικός κινητήρας υποβαθμίζει την ροπή του, θέτοντας τον σερβοκινητήρα να έχει το πλεονέκτημα. Ειδικότερα ο σερβοκινητήρας λειτουργεί καλύτερα σε εφαρμογές που απαιτούν ταχύτητες πάνω από 2.000 ΣΑΛ και υψηλή δυναμική απόκριση.

Επίσης τα δύο είδη κινητήρα διαφέρουν στον τρόπο ελέγχου τους. Στους βηματικούς κινητήρες χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος ανοιχτού βρόγχου, ενώ στους σερβοκινητήρες η μέθοδος κλειστού βρόγχου. Έτσι οι βηματικοί κινητήρες δεν χρειάζονται πρόσθετο σύστημα κωδικοποίησης για περισσότερες εφαρμογές εντοπισμού θέσης και συνεπώς είναι πιο οικονομικοί. Ακόμα στους βηματικούς κινητήρες παρατηρείται το φαινόμενο μεταβολής της περισσευόμενης ισχύος σε θερμότητα, γεγονός που δημιουργεί περισσότερη θερμότητα στον κινητήρα. Αντιθέτως στους σερβοκινητήρες δεν συμβαίνει αυτό διότι η μονάδα ελέγχου τους σε συνεργασία με τους ενισχυτές τροφοδοτεί τον κινητήρα μόνο με το απαιτούμενο ρεύμα.

Όσον αφορά την αξιοπιστία τους παρατηρείται μεγαλύτερη αξιοπιστία στον βηματικό κινητήρα διότι δεν απαιτεί κωδικοποιητή που μπορεί να αποτύχει, σε σχέση με τον σερβοκινητήρα που διαθέτει κωδικοποιητή.

Ακόμα οι δύο κινητήρες διαφέρουν στα ποσοστά απόδοσης τους. Ο σερβοκινητήρας εμφανίζει καλύτερη απόδοση με ποσοστά 80-90% σε μικρά φορτία, έναντι του βηματικού που η απόδοση του κυμαίνεται στο 70%.

Τέλος στους βηματικούς κινητήρες δεν υπάρχει κίνδυνος υπερφόρτωσης, σε σχέση με τους σερβοκινητήρες που λόγω υπερφόρτωσης υπάρχει πιθανότητα δυσλειτουργίας.

1.4 Θεωρία αισθητήρων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναλυθεί η θεωρία των αισθητήρων διότι αποτελούν σημαντικό εξάρτημα στους βηματικούς και σερβοκινητήρες που χρησιμοποιούν τη μέθοδο ελέγχου κλειστού βρόγχου. Αρχικά θα γίνει μια γενική εισαγωγή στο θέμα και στην συνέχεια θα αναπτυχθεί η θεωρία των αισθητήρων χωρητικότητας, των οπτικών αισθητήρων θέσης, των αισθητήρων αντίστασης και

των επαγωγικών αισθητήρων. Τέλος θα γίνει μια σύγκριση μεταξύ των προαναφερόμενων αισθητήρων σχετικά με την αξιοπιστία θέσης που παρέχουν.

1.4.1 Εισαγωγή

Όταν η εντολή επιτάχυνσης που λαμβάνει ο κινητήρας υπερβαίνει το δυναμικό του όριο (dynamic force) υπάρχει κίνδυνος ξεσυγχρονισμού και απώλειας βήματος του κινητήρα. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιούνται συσκευές ανατροφοδότησης (π.χ. αισθητήρες).

Στην περίπτωση ενός μονοαξονικού κινητήρα είθισται να χρησιμοποιείται ως συσκευή ανατροφοδότησης ένας γραμμικός κωδικοποιητής ή μια μαγνητική κλίμακα για να παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την θέση του κινητήρα. Ενώ στην περίπτωση ενός γραμμικού κινητήρα δύο αξόνων δεν είναι εφικτή η παραπάνω μέθοδος λόγω της δομής του. Έτσι η επιλογή της συσκευής ανατροφοδότησης επιλέγεται σύμφωνα τις ανάγκες και τον σκοπό της εκάστοτε κατασκευής.

Οι συσκευές ανατροφοδότησης είναι αρμόδιες για τον έλεγχο της κίνησης στον κινητήρα. Έτσι αποφεύγονται λάθη και επιτυγχάνεται η ακρίβεια θέσης² και η επανάληψη της ακρίβειας αυτής (αν χρειαστεί) με την καλύτερη δυνατή ανάλυση³.

1.4.2 Αισθητήρες χωρητικότητας

Ο χωρητικός μετατροπέας επεξεργάζεται την αλλαγή της χωρητικότητας με σκοπό να υπολογίσει την αλλαγή της απόστασης. Η χωρητικότητα μεταξύ δύο πλακών δίνεται από τον τύπο:

$$C = \frac{q}{V} = k\epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (18)$$

Όπου C συμβολίζεται η χωρητικότητα, q το φορτίο σε Columb, V η διαφορά δυναμικού μεταξύ των πλακών, k η διηλεκτρική σταθερά, ϵ_0 η σταθερά διαπερατότητας, A η περιοχή επίδρασης και d η απόσταση μεταξύ των πλακών.

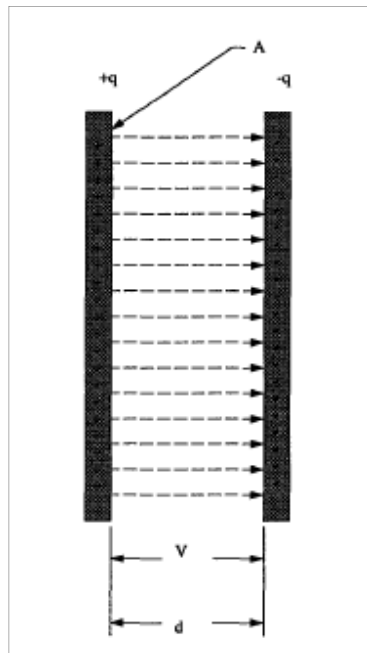
Συνεπώς οποιαδήποτε αλλαγή γίνει στις παραπάνω παραμέτρους θα αλλάξει την τιμή της χωρητικότητας. Η μέτρηση μετατόπισης μπορεί να πραγματοποιηθεί μετακινώντας τη μια πλάκα πάνω από την άλλη με αποτέλεσμα την αλλαγή της περιοχής επίδρασης A . Με αυτόν τον τρόπο

2 Ως ακρίβεια θέσης ορίζουμε την διαφορά μεταξύ της μετρούμενης τιμής και της πραγματικής.

3 Ως ανάλυση ορίζουμε την παραμικρή εντοπίσιμη από τον αισθητήρα αλλαγή.

μπορεί να υπολογιστεί εκ νέου η χωρητικότητα C σύμφωνα με τον τύπο (18). Επίσης εκτός από τη σχετική κίνηση μεταξύ δύο πλακών υπάρχει και χωρητικός αισθητήρας με μεταβλητή διηλεκτρική σταθερά, γεγονός το οποίο αλλάζει με τη σειρά του τη μέτρηση της χωρητικότητας.

Μια άλλου είδους προσέγγιση έδωσαν οι Fertner και Sjölund (1989), Kosel, Munro και Vaughan (1981) ως προς τη μέτρηση της αλλαγής χωρητικότητας. Συγκεκριμένα πρότειναν την τοποθέτηση δύο διαφορετικών αισθητήρων θέσης αντί ενός μεταξύ των ηλεκτροδίων.

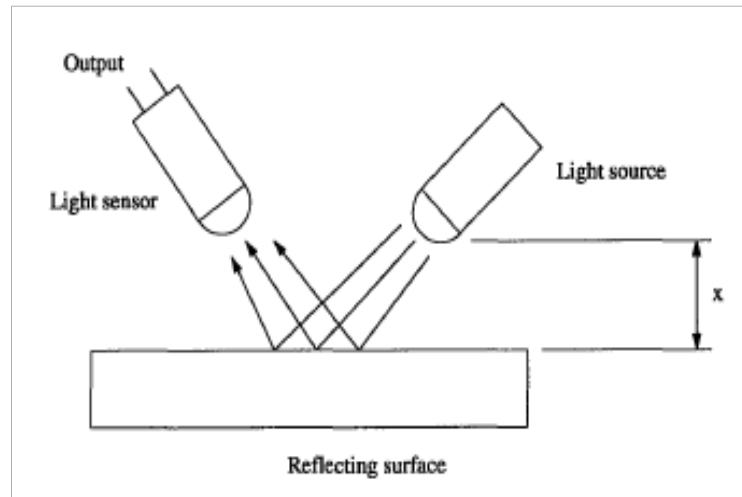


Εικόνα 12: Παράλληλες-πλάκες, πυκνωτής

Επίσης σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί η προσπάθεια του Miller (1990) να σχεδιάσει έναν κινητήρα χρησιμοποιώντας ως συσκευή ανατροφοδότησης τους ίδιους τους ηλεκτρομαγνήτες του κινητήρα.

1.4.3 Οπτικοί αισθητήρες θέσης

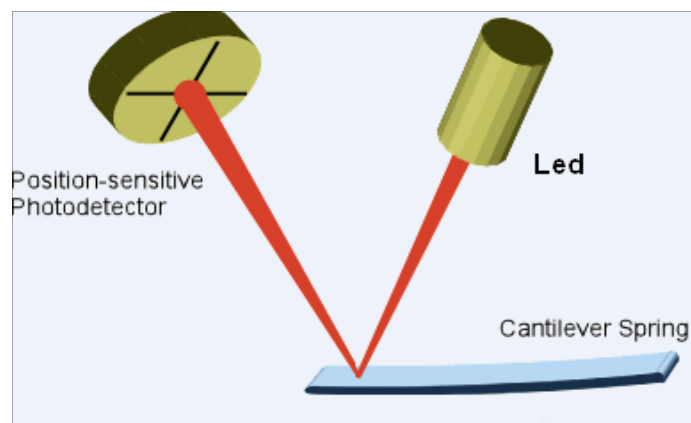
Οι οπτικοί αισθητήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τους φωτοανηχνευτές (Photo Detectors) και τους οπτικούς κωδικοποιητές (Optical Encoders), όπου χρησιμοποιείται φωτοηλεκτρικό υλικό για να μετρηθεί η μετατόπιση ή ακόμα και η αλλαγή της μετατόπισης. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα συμβολόμετρα (Interferometers) που βασικό συστατικό της λειτουργίας τους είναι οι ιδιότητες κυμάτων του φωτός, οι οποίες βοηθούν στη μέτρηση απόστασης. Στην συνέχεια θα αναλυθούν οι δύο κατηγορίες αισθητήρων ξεχωριστά.



Εικόνα 13: Φωτο-αισθητήρας ανίχνευσης μετατόπισης (θέσης)

1.4.3.1 Φωτοανιχνευτές

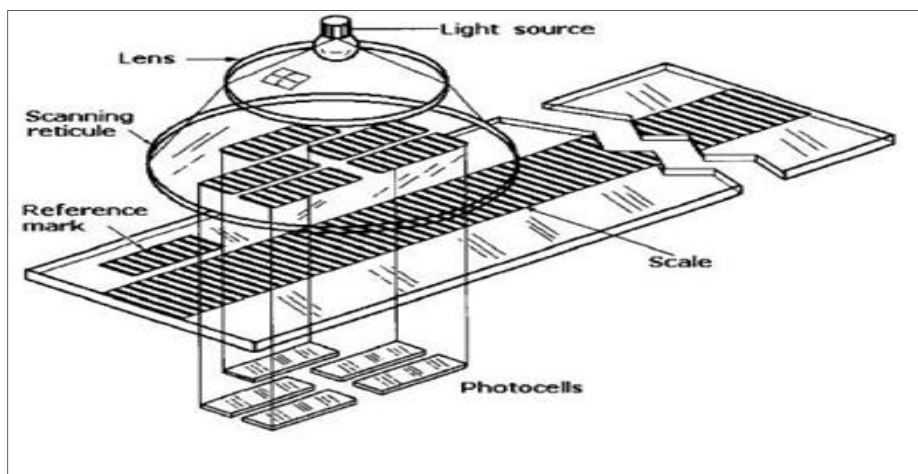
Βασικό στοιχείο ενός φωτοανιχνευτή είναι το led, το οποίο διαπερνά ρεύμα με αποτέλεσμα να φωτίζεται. Το φως που διαχέεται, αντανακλάται στην επιφάνεια του αισθητήρα και στη συνέχεια στον φωτοανιχνευτή (βλ. εικόνα 14). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να μετρηθεί η μετατόπιση του κινητήρα. Ακόμα οι φωτοανιχνευτές χρησιμοποιούνται συνήθως ως δυαδικοί διακόπτες.



Εικόνα 14: Φωτοανιχνευτής ,led και αντικείμενο αντανάκλασης

1.4.3.2 Οπτικοί κωδικοποιητές

Οι οπτικοί κωδικοποιητές θέσης προσδιορίζουν τη θέση του κινητήρα αποκωδικοποιώντας μια σειρά ψηφιακών παλμών. Αποτελείται από την κλίμακα ή αλλιώς ταινία με γραμμικές εγκοπές (scale) που έχει εναλλασσόμενα διαφανή και αδιαφανή τμήματα και ένα σύστημα φωτεινής πηγής (light source) με φωτοαισθητήρια. Όταν κινείται ο φωτοανιχνευτής ανοίγει ή κλείνει λόγω της διακοπόμενης μετάδοσης φωτός που γίνεται αντιληπτό από τα αισθητήρια. Αυτοί οι κωδικοποιητές είναι συνήθως εγκαταστημένοι επάνω στο κινούμενο μέρος του κινητήρα ώστε να ακολουθούν την κίνηση του και να μετρούν την ακριβή θέση του. Το σήμα εξόδου από τον ανιχνευτή είναι μια αλυσίδα από κύματα τετραγωνικού παλμού (παλμοσειρά τάσης) (βλ. εικόνα 15).



Εικόνα 15: Οπτικός κωδικοποιητής, κλίμακα χαραγμένη με εγκοπές, με διαφανή και μη τμήματα τα οποία «σκανάρονται» από τα φωτοαισθητήρια

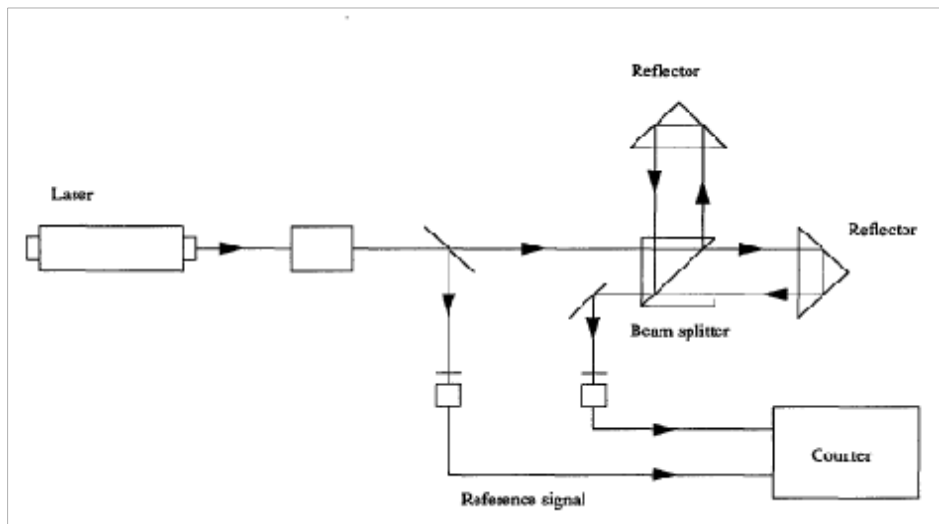
1.4.3.3 Συμβολόμετρα ή Ιντερφερόμετρα

Τα συμβολόμετρα είναι όργανα μικροκυμάτων που χρησιμοποιούν τα περιθώρια παρέμβασης για να κάνουν ακριβείς μετρήσεις του μήκους κύματος, της ταχύτητας κύματος, της απόστασης κτλ. Μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας τους δίνεται παρακάτω:

Μια ακτίνα laser χωρίζεται σε δύο ορθογώνιες ακτίνες μέσω ενός «θραύστη» ακτινών. Η μια ακτίνα κατευθύνεται σε έναν καθρέφτη προς το αντικείμενο του αισθητήρα για να μετρηθεί και στην συνέχεια επιστρέφει και επανενώνεται με την άλλη ακτίνα. Τέλος τα αποτελέσματα αυτής της μέτρησης συγκρίνονται με αυτά μιας ακτίνας αναφοράς. Όταν η διαφορά μεταξύ των δύο πορειών των ακτινών είναι ακέραια πολλαπλάσια του μήκους κύματος τους, σημαίνει ότι η μέτρηση είναι

αποδεκτή. Όταν όμως αυτή η διαφορά είναι ένα «περίεργο» πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος τους σημαίνει μια μη αποδεκτή μέτρηση.

Έτσι καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι αυτή η μέθοδος μέτρησης απόστασης (δηλαδή χρησιμοποιώντας μήκος κύματος φωτός) είναι πολύ ακριβής.



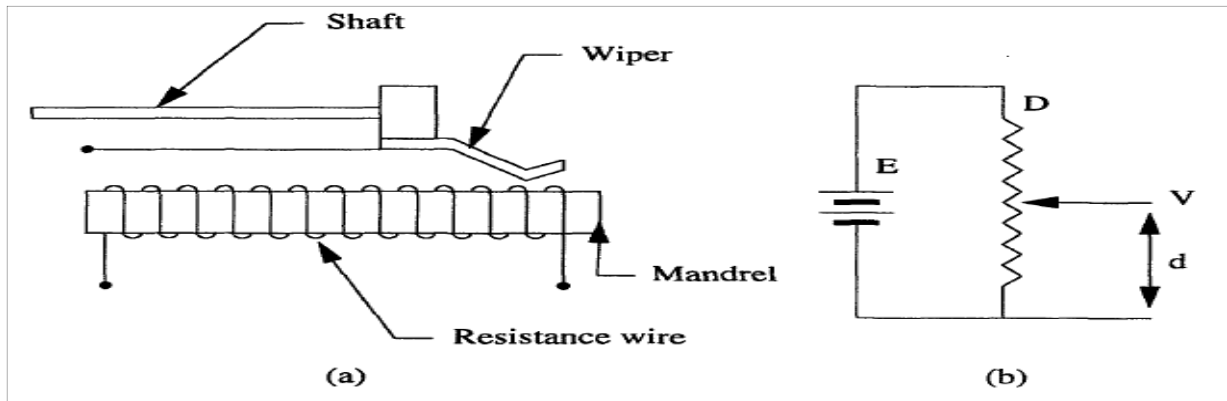
Εικόνα 16: Απεικόνιση ενός laser συμβολόμετρου και της εικονικής λειτουργίας του

1.4.4 Αισθητήρες αντίστασης

Το πιο γνωστό είδος αισθητήρα αντίστασης βρίσκεται στα ποτενσιόμετρα (Potentiometers). Τα ποτενσιόμετρα είναι σχετικά απλοί ανθεκτικοί μετατροπείς. Υπάρχουν πολλά είδη ποτενσιόμετρων, όμως τα πιο διαδεδομένα στο εμπόριο είναι τα γραμμικά και τα γωνιακά. Η εξίσωση που δίνει το σήμα εξόδου τους V δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V = E \frac{d}{D} \quad (19)$$

Όπου E συμβολίζεται η πηγή τάσης, όπου D και d η απόσταση του τυλίγματος και του ακροδέκτη που ακουμπάει στο τυλίγμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 17:



Εικόνα 17: Ποτενσιόμετρο (ως αισθητήρας θέσης). (α) γραμμικό ποτενσιόμετρο και (β) ηλεκτρονικό κύκλωμα. “Shaft” ονομάζεται ο άξονας του ποτενσιόμετρου, “Wiper” ο ακροδέκτης, “Mandrel” η μεταλλική βέργα στήριξης τυλιγμάτων και “Resistance wire” το πηνίο.

Αν μια τάση E διαπεράσει το τύλιγμα (πηνίο) του ποτενσιόμετρου, η έξοδος V από τον ακροδέκτη είναι η αναλογία μεταξύ του μήκους του τυλίγματος και του ακροδέκτη.

1.4.5 Επαγωγικοί αισθητήρες

Για να γίνει κατανοητή η θεωρία των επαγωγικών αισθητήρων θεωρείται σημαντικό να αναφερθούν ορισμένες βασικές θεωρητικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού και συνεπώς της επαγωγικής συμπεριφοράς.

Ο νόμος του Faraday (1831) (ηλεκτρομαγνητισμός) δηλώνει ότι η τάση στο περιτύλιγμα N είναι ίση με την τιμή αλλαγής της μαγνητικής ροής Φ_B . Αυτό φαίνεται από τον εξής τύπο:

$$V = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad (20)$$

Το V στον τύπο (20) αντιπροσωπεύει την επαγωγική τάση, το N τον αριθμό των τυλιγμάτων και το Φ_B την μαγνητική ροή.

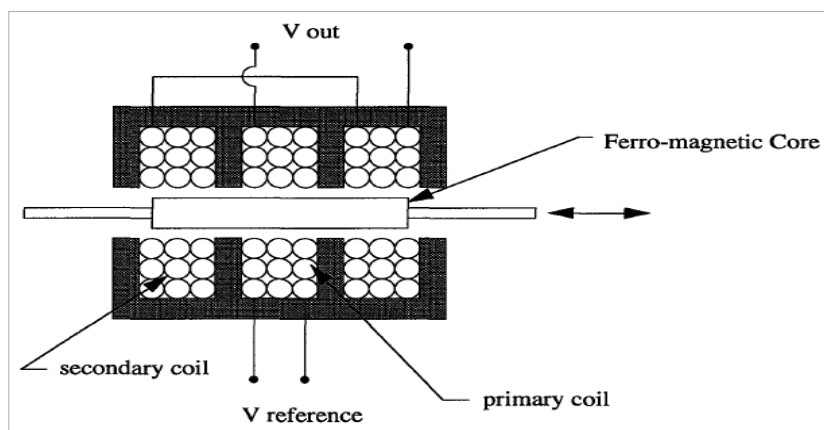
Επίσης σύμφωνα με τον Fraden (1993) ο παραπάνω τύπος μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$V = -N \frac{d(BA)}{dt} \quad (21)$$

Όπου B συμβολίζεται το μαγνητικό πεδίο και A η διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-τυλίγματος. Από τον τύπο (21) παρατηρούμε ότι η τάση V εξαρτάται από την κίνηση της πηγής του μαγνητικού

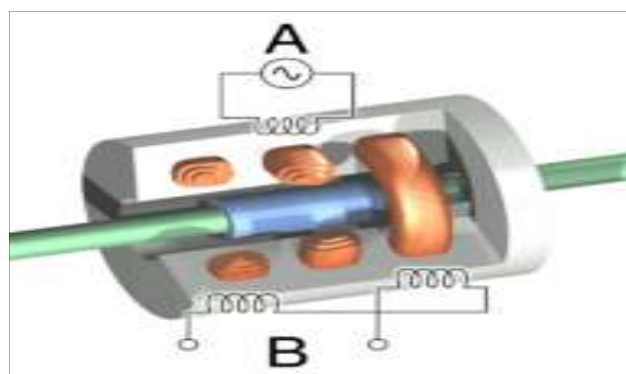
πεδίου, μεταβάλλοντας έτσι το ρεύμα που παράγεται απ' αυτό.

Ως παράδειγμα επαγωγικών αισθητήρων συναντώνται οι μεταβλητοί γραμμικοί διαφορικοί μετασχηματιστές LVDT (linear variable differential transformers). Πρόκειται για μετατροπείς μετατόπισης, των οποίων η τάση εξόδου είναι ανάλογη ως προς την θέση του μαγνητικού πυρήνα (βλ. εικόνα18).



Εικόνα 18: Ηλεκτρονικό κύκλωμα ενός διαφορικού μετασχηματιστή

Όταν ο πυρήνας (magnetic core) βρίσκεται στο κέντρο η τάση που επάγεται στα δύο δευτερεύον (τυλίγματα) είναι ίδια, συνεπώς η τελική τάση εξόδου (V_{out}) είναι μηδέν. Αν μετακινηθεί ο πυρήνας, η τάση του ενός από τα δύο δευτερεύον (τυλίγματα) είναι μεγαλύτερη από αυτή του άλλου. Αυτό συμβαίνει διότι ο πυρήνας τροφοδοτεί το ένα δευτερεύον (τύλιγμα) με μεγαλύτερη μαγνητική ροή από ότι το άλλο.



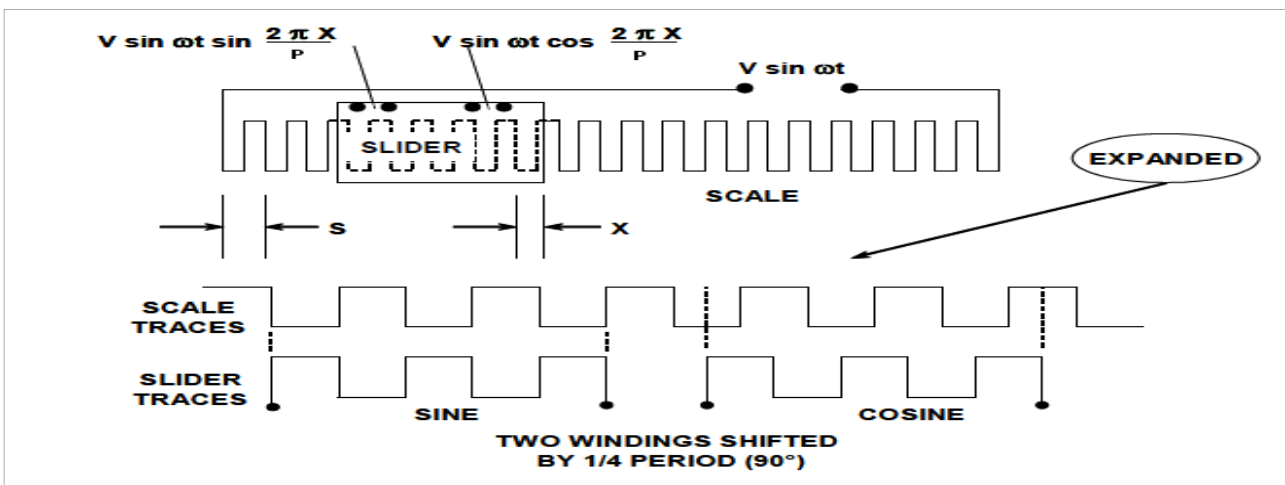
Εικόνα 19: Διαφορικός μετασχηματιστής (LVDT)(wikipedia)

Ένα άλλο είδος επαγωγικού αισθητήρα είναι ο μετατροπέας επαγωγικής συμπεριφοράς ή αλλιώς επαγωγικός κωδικοποιητής (inductosyn), ο οποίος αποτελείται από το scale και τον ρυθμιστή ολίσθησης. Ο scale αποτελείται από μια λωρίδα καλωδίου, γνωστή ως πρωτεύον τύλιγμα. Ο ρυθμιστής ολίσθησης έχει δύο σετ τυλιγμάτων τοποθετημένα μηχανικά με διαφορά φάσης 90° μεταξύ τους. Το πρωτεύον τύλιγμα συνδέεται με έναν ταλαντωτή και η τάση προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο του πρωτεύον τυλίγματος. Πάνω στον ρυθμιστή ολίσθησης η τάση των δύο τυλιγμάτων δίνεται από τους εξής τύπους:

$$V_1 = A_1 \sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (22)$$

$$V_2 = A_2 \sin(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (23)$$

Όπου ω συμβολίζεται η συχνότητα του ταλαντωτή και όπου p το πλάτος του scale.



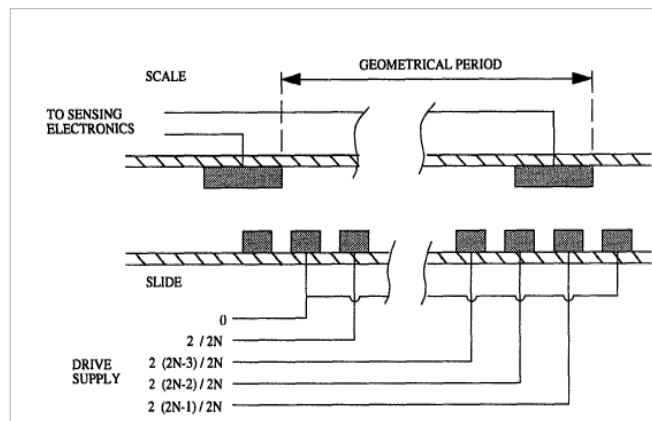
Εικόνα 20: Γραμμικός επαγωγικός κωδικοποιητής (Slocum 1992)

Η τάση εξόδου από τα δευτερεύον τυλίγματα επέρχεται μέσω του inductosyn και κατευθύνεται σε ένα ψηφιακό μετατροπέα για να διατυπωθεί η θέση του ρυθμιστή ολίσθησης από έναν μικροεπεξεργαστή ελέγχου κίνησης ή από μια συσκευή απεικόνισης.

1.4.6 Σύγκριση μεταξύ αισθητήρων ως προς την αξιοπιστία της θέσης

Οι επαγωγικοί αισθητήρες κρίνονται ως οι καταλληλότεροι αισθητήρες θέσης σε κινητήρες δύο αξόνων σε σχέση με τους υπόλοιπους αισθητήρες που περιγράφηκαν σε αυτό το κεφάλαιο.

Αρχικά το σύστημα που χρησιμοποιείται στους αισθητήρες χωρητικότητας δεν καταστεί εύκολη την παρέμβαση σε αυτούς διότι είναι πολύ ευαίσθητοι στην υγρασία και στις μεταβολές θερμοκρασίας και επιπλέον το σύστημα τους είναι αρκετά πολύπλοκο. Συγκεκριμένα απαιτούνται περισσότερες και διαφορετικές παροχές φάσεων από το σύστημα οδήγησης (ενισχυτή), οι οποίες πρέπει να είναι συνδεδεμένες με τους πόλους της πλάκας στερέωσης (βλ. εικόνα 21).



Εικόνα 21:Κύκλωμα ενός χωρητικού αισθητήρα θέσης

Σχετικά με τους οπτικούς αισθητήρες θέσης και συγκεκριμένα με τα συμβολόμετρα, η χρήση άνω του ενός κινητήρα στην ίδια πλάκα στερέωσης μπορεί να μπλοκάρει την μετάδοση της ακτίνας (π.χ. σστου laser) με αποτέλεσμα την διακοπή της πληροφορίας θέσης. Επίσης στην περίπτωση των φωτοαισθητήρων η μικρή εμβέλεια της ακτινοβολίας των αισθητήρων πάνω στην μεγάλων διαστάσεων πλάκα στερέωσης οδηγεί σε χαμηλή ανάλυση και δεν επιτρέπει την ακριβής γνώση θέσης του κινητήρα.

Το ποτενσιόμετρο (αισθητήρας αντίστασης) εμφανίζει και αυτό με την σειρά του ενδείξεις αναξιοπιστίας σχετικά με τον εντοπισμό της θέσης του κινητήρα. Οι λόγοι είναι κυρίως κατασκευαστικοί. Αν λάβουμε ως δεδομένο ότι ο αριθμός τυλιγμάτων είναι 360 και ο ακροδέκτης ακουμπά στο 180° , τότε σίγουρα περιμένουμε ότι ακουμπάει και στο 181° τύλιγμα. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία βραχυκυκλωμάτων, ανεπιθύμητων τριβών, αυξημένης θερμότητας και τέλος φθοράς. Άρα και η θέση του κινητήρα δεν μπορεί με ακρίβεια να

προσδιοριστεί.

Συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι επαγωγικοί αισθητήρες είναι πιο αξιόπιστοι καθώς είναι πιο ανθεκτικοί, αντέχουν σε περιβάλλον υψηλής πίεσης και σύμφωνα με την έρευνα του (Guzman, 93) μπορούν να τροποποιηθούν ευκολότερα, για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαξονικά συστήματα κινητήρων.

2. Χρήση γραμμικού βηματικού κινητήρα ως σερβοκινητήρα

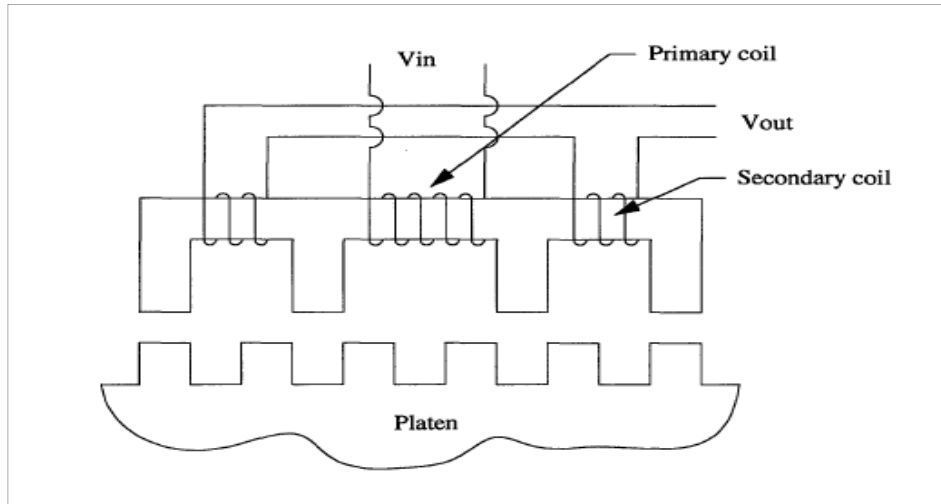
Το δεύτερο κεφάλαιο αυτής της εργασίας ασχολείται με την περιγραφή ενός γραμμικού βηματικού κινητήρα που δεν χρησιμοποιεί την κλασσική μέθοδο ελέγχου του (ανοιχτού βρόγχου) αλλά στην θέση αυτής έναν τύπο σερβοελεγκτή (μέθοδος κλειστού βρόγχου). Αυτό είναι ένα πρωτοποριακό μοντέλο ελέγχου ενός βηματικού κινητήρα.

Η αλλαγή της μεθόδου ελέγχου του βηματικού κινητήρα γίνεται με την προσθήκη της διάταξης ανάδρασης. Με άλλα λόγια διατίθενται άλλων ειδών αισθητήρες. Παρ' όλα αυτά δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή στη μονάδα του κινητήρα. Επίσης ο σερβοελεγκτής που χρησιμοποιείται δεν είναι το κλασσικό μοντέλο σερβοελεγκτή που περιγράφηκε στο κεφ. 1.2, αλλά μια παραλλαγή του. Όλα αυτά τα στοιχεία θα αναλυθούν μεμονωμένα σ' αυτό το κεφάλαιο (2.1). Επίσης θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή του συνολικού μοντέλου (βηματικός κινητήρας με σερβοέλεγχο) στο τρίτο μέρος αυτού του κεφαλαίου (2.3).

2.1 Σχεδιασμός και εξέλιξη του αισθητήρα

Πριν ξεκινήσει η συνολική περιγραφή του μοντέλου «βηματικός κινητήρας με σερβοέλεγχο» είναι σημαντικό να αναλυθεί η διάταξη ανάδρασης του. Η διάταξη ανάδρασης είναι η συσκευή ανατροφοδότησης πληροφοριών, η οποία αποτελείται από αισθητήρες που είναι συνδεδεμένοι με τον κινητήρα και είναι υπεύθυνη για τη λήψη, την επεξεργασία και την αποστολή των πληροφοριών θέσης/ταχύτητας του κινητήρα. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται είναι κατά βάση επαγωγικού τύπου (1.4.5), στον οποίο έχουν εφαρμοστεί κάποιες τροποποιήσεις για να μπορεί να ανταποκρίνεται στις ανάγκες ενός διαξονικού συστήματος (X,Y).

Η βασική ιδέα σχεδιασμού αυτού του αισθητήρα βασίζεται στην έρευνα του Guzman (1993). Ενώ ένας κλασσικός επαγωγικός αισθητήρας έχει δύο δευτερεύοντα τυλίγματα που είναι τοποθετημένα μηχανικά με διαφορά φάσης 90° , στον αισθητήρα που πρότεινε ο Guzman (1993) τα δύο δευτερεύοντα τυλίγματα είναι τοποθετημένα με διαφορά φάσης 180° , γεγονός το οποίο δημιουργεί μεταβολή της μαγνητικής αντίδρασης.



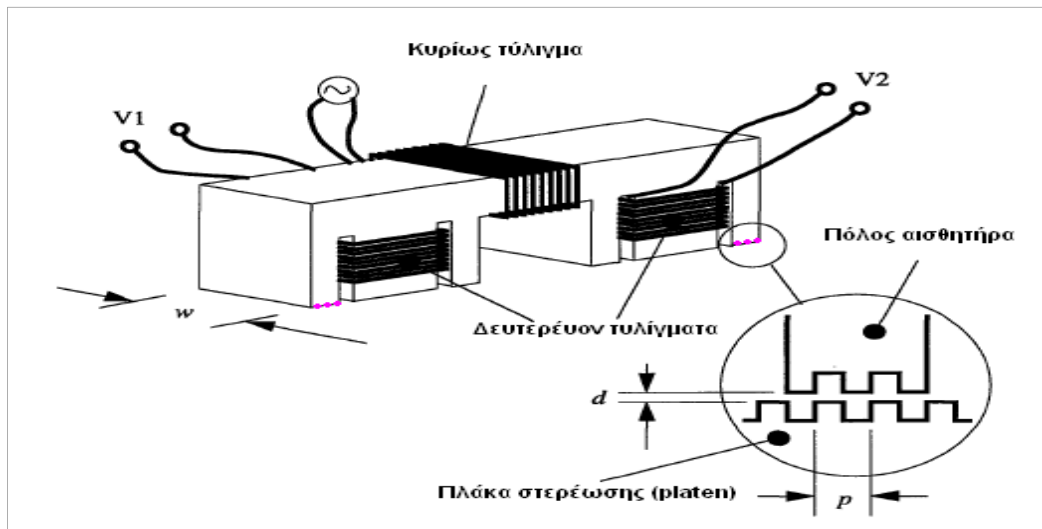
Εικόνα 22: Σχεδίαση προηγούμενου επαγωγικού αισθητήρα

Σε αυτό του το πείραμα παρατηρήθηκε μέγιστη αλλαγή στη μαγνητική αντίδραση ή αντίσταση (reluctance), γεγονός που δεν άφηνε να προσδιορισθεί η κατεύθυνση κίνησης του κινητήρα. Γι' αυτόν το λόγο ο Guzman (1993) πρότεινε να προστεθεί στο ήδη υπάρχον μοντέλο του ένας δεύτερος πανομοιότυπος αισθητήρας κατά 90° εκτός φάσης από τον αρχικό προς την ίδια κατεύθυνση. Ο πυρήνας του καινούριου πλέον αισθητήρα είναι φτιαγμένος από υλικό τοποθετημένο σε στρώματα (φύλλα) για μείωση απωλειών ενέργειας, οι οποίες δημιουργούνται λόγω ανεξέλεγκτων ρευμάτων. Επιπλέον αποτελείται από δύο οπλισμούς, τα δόντια των οποίων βρίσκονται μηχανικά 90° εκτός φάσης, δηλαδή αν ένα δόντι είναι ευθυγραμμισμένο με αυτό της πλάκας στερέωσης, τότε το άλλο είναι $\frac{1}{4}$ εκτός του Pitch. Επίσης σ' αυτούς τους δύο οπλισμούς βρίσκονται τα δύο δευτερεύοντα τυλίγματα. Ακόμα ένα χαρακτηριστικό είναι ότι σ' αυτή την περίπτωση το κυρίως τύλιγμα που βρίσκεται πάνω στον μαγνήτη και συνεπώς λειτουργεί ως ηλεκτρομαγνήτης, διεγείρεται από μια ημιτονοειδούς ελικοειδούς τάση, δημιουργώντας ένα χρονομεταβλητό μαγνητικό πεδίο.

Σχετικά με την λειτουργία του νέου αισθητήρα η μαγνητική ροή περνά μέσα από τον οπλισμό και μέσω του κενού αέρος (διάκενο) περνά στην πλάκα στερέωσης (platen). Επίσης η μαγνητική αντίσταση (reluctance) αλλάζει καθώς μετακινείται ο αισθητήρας σε σχέση με το Pitch, γι' αυτό η μαγνητική ροή που περνά μέσω των δευτερευόντων τυλιγμάτων (επαγωγική τάση στα τυλίγματα) είναι ανάλογη με την θέση του αισθητήρα.

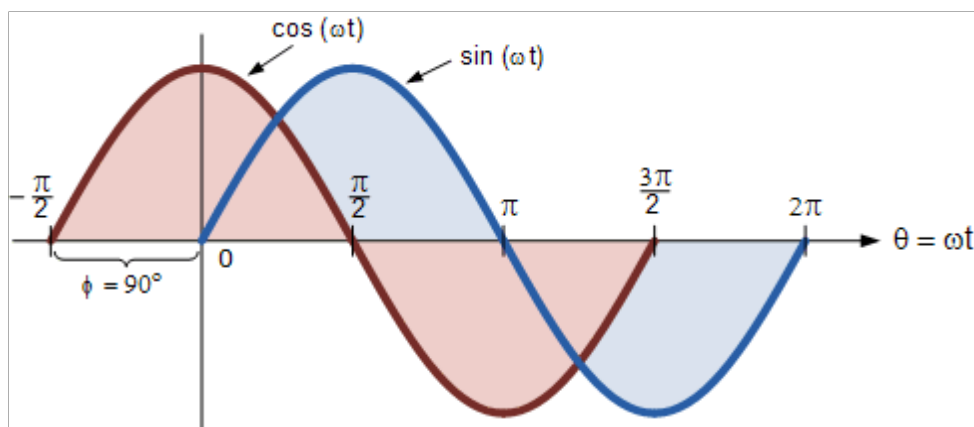
Για να επιτυγχάνεται ο ακριβής εντοπισμός της θέσης του κινητήρα, ο Guzman (1993) ισχυρίστηκε ότι το πάχος του αισθητήρα πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του Pitch. Έτσι οποιαδήποτε

κίνηση θα γινόταν γίνει η περιοχή επικάλυψης (overlap area) μεταξύ του πόλου του αισθητήρα και της πλάκας στερέωσης θα παρέμενε παραμένει ίδια. Επομένως και η μαγνητική αντίσταση παραμένει σταθερή (βλ. εικόνα 23).



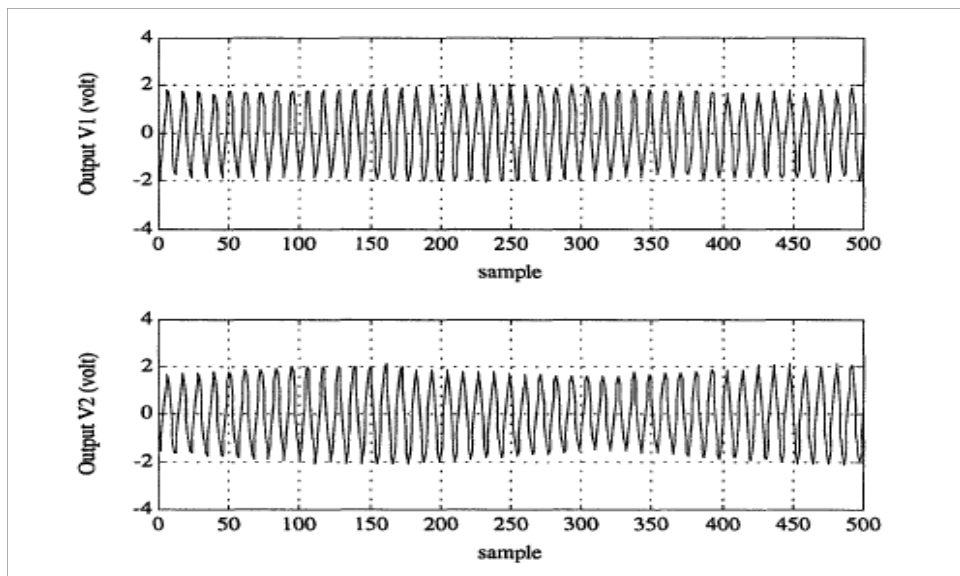
Εικόνα 23: Πρωτότυπο σχέδιο ενός πειραματικού επαγωγικού αισθητήρα

Το σήμα που μεταδίδει το νέο μοντέλο επαγωγικού αισθητήρα του Guzman (1993) είναι ημιτονοειδές (ελικοειδές) και διαφέρει από αυτό ενός κλασσικού επαγωγικού αισθητήρα, εξαιτίας της νέας θέσης των τυλιγμάτων. Ο νέος σχεδιασμός, όπως προαναφέρθηκε, απαιτεί τα τυλίγματα σε θέση 90° εκτός φάσης, οπότε και το διαμορφωμένο σήμα θα είναι 90° εκτός φάσης (ή αλλιώς $\pi/2$ της περιόδου).



Εικόνα 24: Διαφορά ενός ημιτόνου και ενός σήματος με $\pi/2$ διαφορά φάσης (συνημίτονο)

Σχετικά με τη φερόμενη συχνότητα αξίζει να σημειωθεί ότι είναι ίδια με αυτή της διέγερσης στο κυρίως τύλιγμα, με τη μόνη διαφορά της αλλαγής φάσης.



Εικόνα 25: Σήματα εισόδου και εξόδου ενός κινούμενου αισθητήρα ($\omega t - \varphi$, με $\varphi = +90^\circ$)

Από τη χρονική στιγμή που προσδιορίζεται η θέση του κινητήρα από τον αισθητήρα, η οποία είναι κωδικοποιημένη στην κυματομορφή, ακολουθεί η αποκωδικοποίηση του σήματος και η επεξεργασία του μέσω της ανάδρασης με τελικό προορισμό τον έλεγχο. Κατά την διαδικασία της αποκωδικοποίησης «ξεδιπλώνονται» οι κυματομορφές (των τάσεων εξόδου των δύο τυλιγμάτων), γεγονός που επιτυγχάνεται με συνδυασμό μαθηματικών αλγορίθμων και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Όσον αφορά τους μαθηματικούς αλγορίθμους το σήμα μπορεί να προσδιοριστεί από τους παρακάτω τύπους:

$$V_1 = \sin(\omega t) \left[K_1 + A_1 \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right] \quad (24)$$

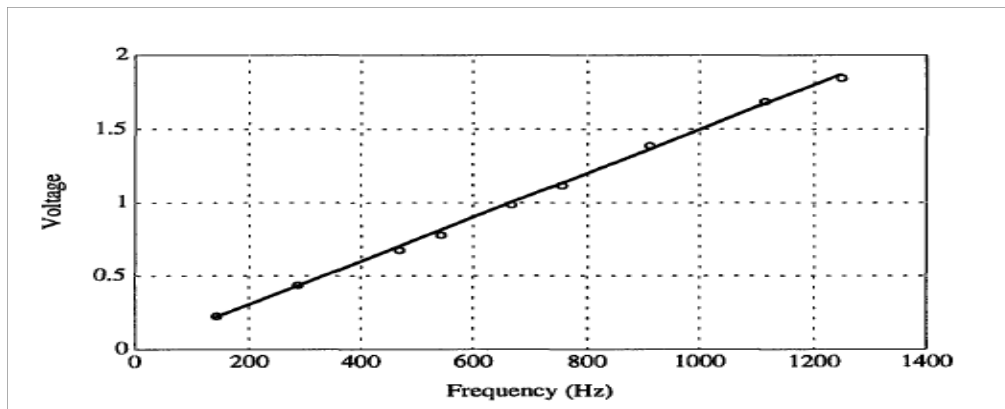
$$V_2 = \sin(\omega t) \left[K_2 + A_2 \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right] \quad (25)$$

Όπου ω ορίζεται η συχνότητα διέγερσης, K_1 και K_2 το διαδιδόμενο σήμα των δύο τυλιγμάτων, x η θέση του αισθητήρα και p το μήκος του Pitch.

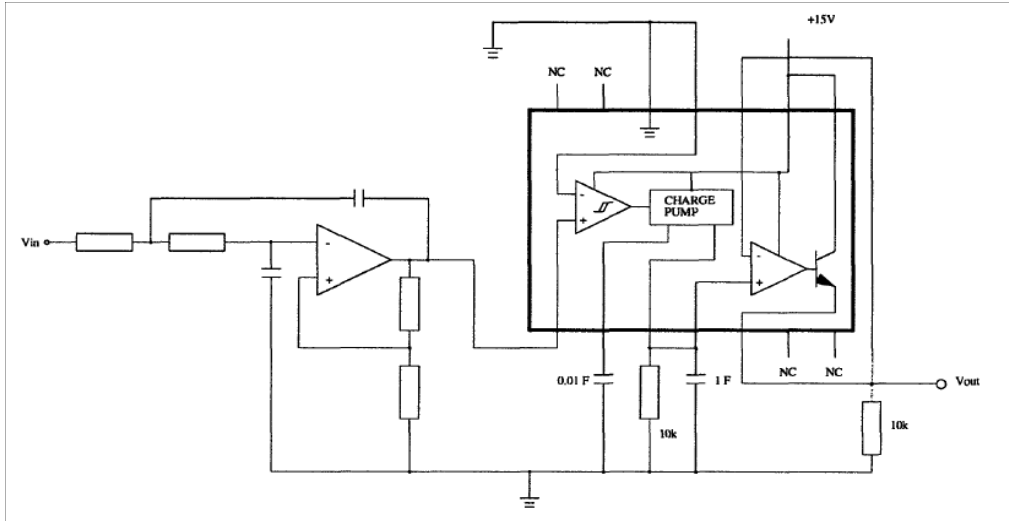
Στην περίπτωση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων χρησιμοποιείται ένα βαθυπερατό φίλτρο, το οποίο απομονώνει τα φερόμενα σήματα (carrier signals) υψηλών συχνοτήτων. Σε μια μετέπειτα έρευνα ο

Κυο (1973) πρότεινε να χρησιμοποιηθεί ένα ψηφιακό βαθυπερατό φίλτρο. Το ψηφιακό αυτό φίλτρο θα τοποθετούνταν στον «εγκέφαλο» της μονάδας ελέγχου μέσα σε μια μονάδα ψηφιακού επεξεργαστή σήματος, ο οποίος λειτουργεί με μαθηματικούς αλγόριθμους (DSP-Digital Signal Processor). Με αυτόν τον τρόπο θα υπολογιζόταν με ακρίβεια το σήμα. Γεγονός που δεν επαληθεύτηκε πλήρως διότι τα $K1$ και $K2$ δεν έδιναν σταθερές τιμές όλες τις φορές που μετρήθηκαν. Εντούτοις παρουσίασε καλύτερη απόδοση (αποτελέσματα) σε σχέση με την αρχική μέθοδο.

Στην συνέχεια με περαιτέρω έρευνες προσπάθησε να βελτιώσει το ηλεκτρονικό κύκλωμα του προστίθοντας έναν μετατροπέα συχνότητας τάσης (F/V converter). Έτσι θα δινόταν ένας επιπλέον κωδικοποιητής, ο οποίος όμως δεν θα ήταν κωδικοποιητής θέσης αλλά ταχύτητας. Αυτό επιτεύχθηκε διότι η συχνότητα της ημιτονοειδούς κυματομορφής είναι ίση με την ταχύτητα του κινητήρα σε Pitch ανά δευτερόλεπτο και συνεπώς ανάλογη ως προς την ταχύτητα του αισθητήρα. Παραδείγματος χάριν αν η εντολή ταχύτητας στον γραμμικό βηματικό κινητήρα είναι 300 Pitch το δευτερόλεπτο, τότε στην έξοδο από τον μετατροπέα συχνότητας τάσης θα παρατηρηθεί τάση 0,5V.

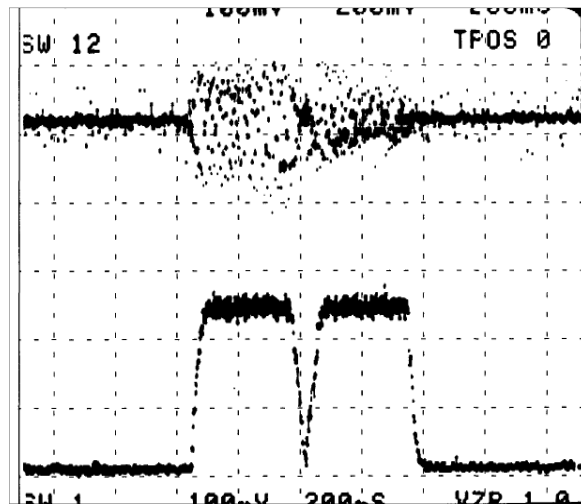


Εικόνα 26: Ηλεκτρονικό υλικό ψηφιακής επεξεργασίας σήματος



Εικόνα 27: Διάγραμμα καμπύλης συχνότητας-τάσης.

Παρ' όλα αυτά η έρευνα του Kuo (1973) δεν είχε υπολογίσει την παράμετρο του θορύβου που στην συνέχεια φάνηκε στην έξοδο του βαθυπερατού φίλτρου, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εντοπιστεί η ακριβή θέση του κινητήρα.



Εικόνα 28: Σήμα στην έξοδο του βαθυπερατού φίλτρου μετά την επεξεργασία του σήματος από τον μετατροπέα συχνότητας-τάσης (F/V converter)

Οι Crawford, Wong και Yousef-Toumi (1994) προσπάθησαν να βελτιώσουν το μοντέλο του αισθητήρα, λαμβάνοντας υπ' όψιν όλες τις παραμέτρους και τις ελλείψεις σχεδιασμού των προηγούμενων επιστημόνων. Έτσι χρησιμοποίησαν τον ίδιο αισθητήρα (που χρησιμοποίησαν και οι προηγούμενοι) και γνωρίζοντας τις επαγωγικές του ιδιότητες (inductosyn (1.4.5)), προσπάθησαν να τον μετατρέψουν σε ψηφιακό μετατροπέα.

Γενικά οι «ψηφιακοί μετατροπέες» μετατρέπουν το ημιτονοειδές σήμα ενός επαγωγικού αισθητήρα (inductosyn) σε δυαδικό σύστημα. Όμως επειδή το σήμα εξόδου του υπάρχων αισθητήρα είναι ελαφρώς διαφορετικό από αυτό ενός inductosyn πρότειναν την εξής λύση, για να αποφευχθούν ανεπιθύμητοι μαθηματικοί αλγόριθμοι:

Αν τοποθετούνταν σε θέση 180° εκτός φάσης από τον αρχικό αισθητήρα ένας δεύτερος παρόμοιος (μ' αυτόν) αισθητήρας, τότε το σήμα εξόδου των τυλιγμάτων του θα ήταν:

$$V_3 = \sin(\omega t) \left[K_3 - A_3 \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right] \quad (26)$$

$$V_4 = \sin(\omega t) \left[K_4 - A_4 \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right] \quad (27)$$

Πολλαπλασιάζοντας την (24) και την (25) με a_1 και a_2 και την (26) και (27) με την a_3 και a_4 , και ακολούθως αφαιρώντας την (24) και (26) θα προέκυπτε:

$$V_5 = \sin(\omega t) \left[(a_1 K_1 - a_3 K_3) + (a_1 A_1 + a_3 A_3) \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right] \quad (28)$$

$$V_6 = \sin(\omega t) \left[(a_2 K_2 - a_4 K_4) + (a_2 A_2 + a_4 A_4) \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right] \quad (29)$$

Στην συνέχεια απλοποιώντας και ρυθμίζοντας κέρδη a ώστε:

$$a_1 K_1 - a_3 K_3 = 0 \quad (30)$$

$$a_2 K_2 - a_4 K_4 = 0 \quad (31)$$

$$a_1 A_1 + a_3 A_3 = a_2 A_2 + a_4 A_4 = V \quad (32)$$

Εν τέλη προέκυψαν οι εξής τύποι:

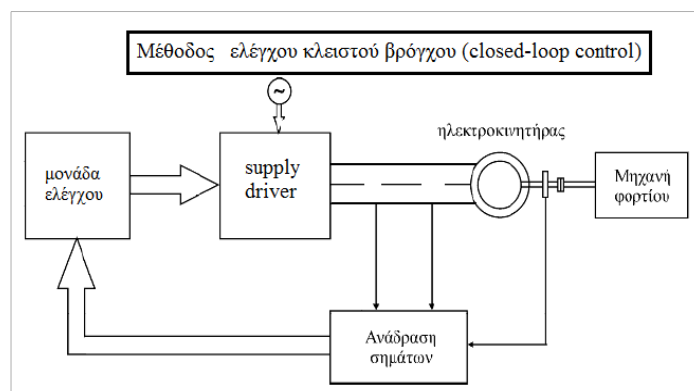
$$V_{\sin} = V \sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (33)$$

$$V_{\cos} = V \sin(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (34)$$

Με τον παραπάνω τρόπο (summer) κατάφεραν να απαλλαχθούν από την παρουσία των K (δηλαδή με τις απαραίτητες ρυθμίσεις των κερδών α_i) με αποτέλεσμα το τελικό σήμα εξόδου να είναι ακριβώς το ίδιο με αυτό ενός ημιτονικού επαγωγικού μετατροπέα inductosyn. Επομένως η μετατροπή του αισθητήρα σε ψηφιακό μετατροπέα κατάφερε να προσδιορίσει την ακριβή θέση του κινητήρα, γεγονός που στην συνέχεια συμβάλει στον ακριβή έλεγχο του κινητήρα.

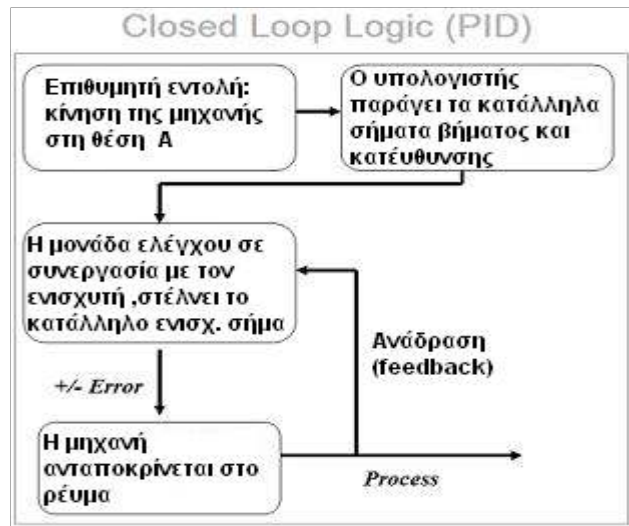
2.2 Σχεδιασμός και λειτουργία του συστήματος

Κατά το σχεδιασμό του γραμμικού βηματικού κινητήρα με σερβοέλεγχο χρησιμοποιείται αυτούσιος ο γραμμικός βηματικός κινητήρας όπως έχει περιγραφεί στο κεφ. 1.1, ο ενισχυτής ή αλλιώς το σύστημα οδήγησης (drive) (κεφ. 1.2.2), η διάταξη ανάδρασης, μέρος της οποίας αποτελεί ο αισθητήρας που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 2.1 και η μονάδα ελέγχου. Η μονάδα ελέγχου που χρησιμοποιείται σ' αυτό το σύστημα ακολουθεί το πρότυπο μιας μονάδας σερβοελέγχου. Εντούτοις δεν μπορεί να γίνει η αυτούσια χρήση της μονάδας ελέγχου ενός σερβοκινητήρα διότι δεν θα μπορέσει να λειτουργήσει στο βηματικό κινητήρα. Γι' αυτόν το λόγο θα γίνουν κάποιες μετατροπές, οι οποίες θα περιγραφούν στην συνέχεια του κεφαλαίου. Επιπλέον είναι σημαντικό να αναφερθεί σ' αυτό το σημείο ότι ολόκληρο το παραπάνω σύστημα ακολουθεί την μέθοδο ελέγχου κλειστού βρόγχου (closed loop).



Εικόνα 29: Απεικόνιση μεθόδου ελέγχου κλειστού βρόγχου

Η μονάδα ελέγχου εμφανίζεται σε διαφορετικά είδη, δύο από αυτά είναι οι τύποι PLC και PID. Ο τύπος PID είναι πιο αποδοτικός από τον PLC, επειδή παρουσιάζει γρηγορότερη απόκριση στις πληροφορίες που λαμβάνει (από την διάταξη ανάδρασης), στην επεξεργασία τους και τέλος στην αποστολή τους στο υπόλοιπο σύστημα.

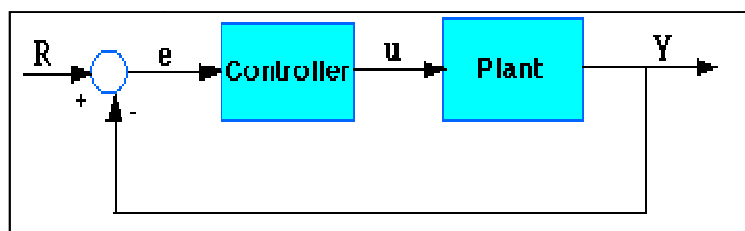


Εικόνα 30: Λογική σχεδίαση ενός PID ελεγκτή

Ο PID είναι ένας αναλογικός ελεγκτής των τριών εξής ελέγχων: P αναλογικού, I ολοκληρωτικού και D διαφορικού. Η συνάρτηση μεταφοράς του PID ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s^2 = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \quad (35)$$

Ως K_p ορίζεται το αναλογικό κέρδος, ως K_i το ολοκληρωτικό και ως K_d το διαφορικό.



Εικόνα 31: Plant: Το σύστημα που θα ελεγχθεί

Στην εικόνα 31 παρατίθεται ο ελεγκτής PID που «δουλεύει» σε σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου. Η μεταβλητή e αντιπροσωπεύει το σφάλμα παρακολούθησης, δηλαδή τη διαφορά ανάμεσα στην τιμή της επιθυμητής εισόδου R και σε εκείνη της πραγματικής εξόδου Y .

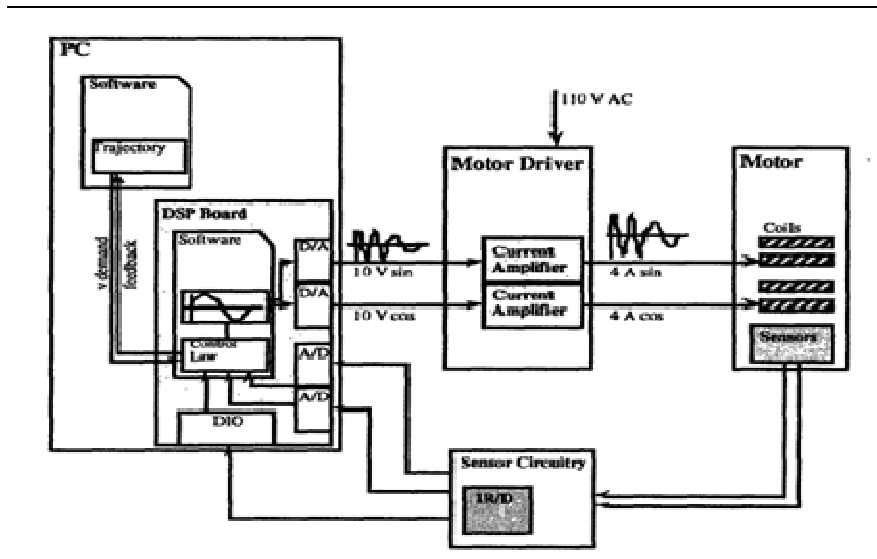
Το σήμα σφάλματος e στέλνεται στον ελεγκτή PID, όπου υπολογίζεται η παράγωγος του και το ολοκλήρωμα του. Το σήμα u δίνεται από τον τύπο:

$$u(t) = k_d e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de}{dt} \quad (36)$$

Το σήμα αυτό u στέλνεται στο σύστημα για έλεγχο και στη συνέχεια γίνεται λήψη ενός νέου σήματος εξόδου Y . Το σήμα της νέας εξόδου Y ξαναστέλνεται στο αισθητήριο για να ανιχνευθεί το νέο σήμα σφάλματος e . Ο ελεγκτής λαμβάνει το νέο σήμα σφάλματος και επαναυπολογίζει την παράγωγο και το ολοκλήρωμα του. Η ίδια διαδικασία θα επαναλαμβάνεται συνέχεια.

Τέτοιου είδους αναλογικές συσκευές χρησιμοποιούνταν κατά κύριο λόγο στο παρελθόν. Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι η χρήση αναλογικών φίλτρων και ελεγκτών διότι προκαλούν θόρυβο, η περιοδική συντήρηση συντονισμού που απαιτούν καθώς επίσης η περιορισμένη ευελιξία κατά την αλλαγή των συντελεστών τους. Τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελούνται παρουσιάζουν μια επιπρόσθετη ευαισθησία σε φθορές που οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες, παραδείγματος χάριν στη θερμοκρασία, στις τάσεις και στον χρόνο λειτουργίας τους.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω μειονεκτήματα ο Schulze-Lauen (1993) παρουσίασε έναν προγραμματιζόμενο ψηφιακό σερβοελεγκτή, χρησιμοποιώντας έναν ψηφιακό επεξεργαστή σήματος (Digital Signal Processor - DSP). Ο DSP είναι ένας μικροεπεξεργαστής, ο οποίος βρίσκεται σε μια υποδοχή (slot) προσωπικού υπολογιστή και μπορεί να διαχειριστεί πολλά δεδομένα σε μεγάλες ταχύτητες. Παρ' όλα αυτά επειδή ο DSP δεν ήταν σε θέση να παράγει σήμα (ή κυματομορφή) κατάλληλου ρεύματος, προτάθηκε από τον Schulze-Lauen (1993) να χρησιμοποιηθεί ένας ενισχυτής διαμόρφωσης πλάτους κύματος (PWM). Αφού λειτούργησε αυτή η μέθοδος και δημιουργήθηκε το επιθυμητό σήμα κατάφερε να το μετατρέψει από ψηφιακό σε αναλογικό μέσω ενός ψηφιακού-αναλογικού μετατροπέα (DAC) και εν τέλει να το οδηγήσει στον ενισχυτή (σύστημα οδήγησης). Είναι άξιο να σημειωθεί ότι στο σύστημα υπάρχουν συνολικά τρεις διαφορετικοί μετατροπείς με τους οποίους συνδέεται ο DSP: ο ψηφιακός αναλογικός μετατροπέας (DAC), ο αναλογικός ψηφιακός μετατροπέας (ADC) και ψηφιακή είσοδος/έξοδος (DIO).



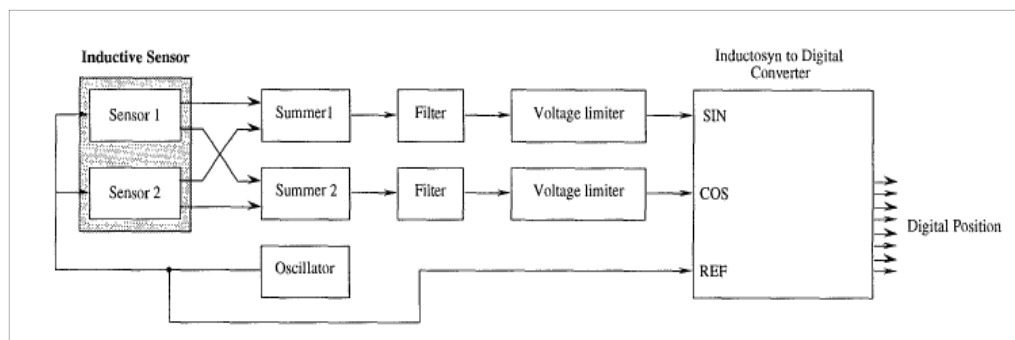
Εικόνα 32: Σχεδίαση ψηφιακού ελέγχου ενός γραμμικού κινητήρα

Μέσω των παραπάνω συσκευών πραγματοποιείται η λειτουργία του ελέγχου. Η διαδικασία λειτουργίας του ελέγχου μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Αρχικά υπάρχει μια συνεχόμενη επικοινωνία με τον χρήστη μέσω ενός εύχρηστου λογισμικού πολλαπλών επιλογών προγραμματισμού. Όταν δοθεί η εντολή από τον χρήστη, παράγονται οι κατάλληλες «τροχιές» κίνησης του κινητήρα και στέλνεται το σήμα στον κινητήρα. Στην συνέχεια το σήμα που υπάρχει στον αισθητήρα «φιλτράρεται» από την διάταξη ανάδρασης και κατευθύνεται πρώτα στον DIO και έπειτα στον ADC. Αφού δεχτεί την πληροφορία ο ADC, την στέλνει ψηφιακά στον ελεγκτή DSP και αυτός με την σειρά του την επεξεργάζεται και υπολογίζει με τους κατάλληλους μαθηματικούς αλγορίθμους την θέση του κινητήρα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του υπολογισμού της διαφοράς της μετρούμενης θέσης (της εισερχόμενης πληροφορίας) με την επιθυμητή. Στη συνέχεια εντοπίζει τυχών λάθη, μέσω μιας σύγκρισης με μια σταθερή αναφορά σήματος και τα επιδιορθώνει. Αυτά τα λάθη μπορεί να οφείλονται σε παράγοντες όπως π.χ. θόρυβος κυματομορφής ή συχνότητας. Εν κατακλείδι το τελικό σήμα στέλνεται από τον ψηφιακό αναλογικό μετατροπέα DAC στον ενισχυτή. Ο ενισχυτής είναι υπεύθυνος για την παραγωγή του κατάλληλου ρεύματος διέγερσης που θα διεγείρει τα τυλίγματα του κινητήρα.

$$i_A = I_o \sin(\omega t) \quad (37)$$

$$i_B = I_o \cos(\omega t) \quad (38)$$

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή αυτού του υποκεφαλαίου κύριο συστατικό της μεθόδου ελέγχου κλειστού βρόγχου είναι η διάταξη ανάδρασης, η οποία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

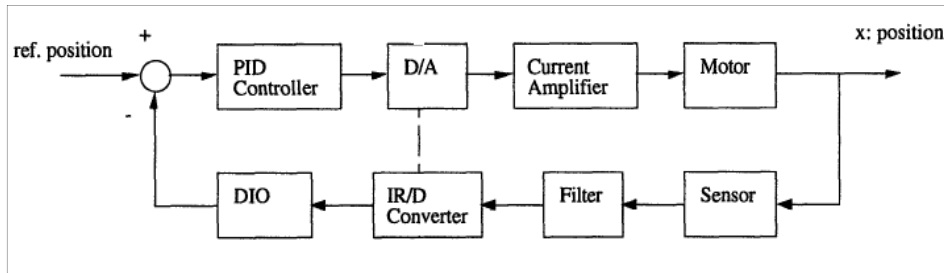


Εικόνα 33: Διάταξη ανάδρασης σημάτων

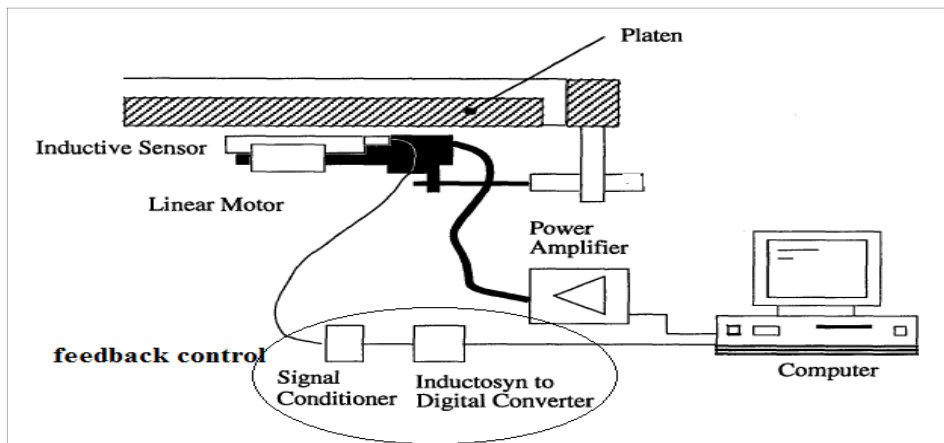
Όπως παρατηρεί κανείς η διάταξη ανάδρασης είναι υπεύθυνη για την αποστολή της ψηφιακής πληροφορίας θέσης του κινητήρα, καθώς μετράει τα Pitch που έχει διανύσει ο κινητήρας στη μονάδα ελέγχου (DSP, PLC, PID).

Ο ταλαντωτής (Oscillator) παρέχει μια συχνότητα διέγερσης στο κυρίως τυλίγμα του αισθητήρα και συγχρόνως ένα σήμα αναφοράς στον ψηφιακό μετατροπέα επαγωγικής ημιτονοειδής συμπεριφοράς (inductosyn to digital converter). Στη συνέχεια τα σήματα εξόδου από τα δευτερεύον τυλίγματα των αισθητήρων περνούν από τα summer. Με αυτόν τον τρόπο απομακρύνονται τα μεταφερόμενα σήματα (K1,K2,K3,K4 - κεφ. 2.2.1). Στην πορεία τα σήματα εξόδου φιλτράρονται και το διαμορφωμένο σήμα που προκύπτει συνδέεται με τη sine και cosine είσοδο του μετατροπέα (βλ. εικόνα 33). Το τελικό σήμα εξόδου είναι μια δυαδική «λέξη» που αντιπροσωπεύει τη θέση του αισθητήρα μέσα σε ένα Pitch.

Οι Schulze-Lauen, Wong, Yousef-Toumi (1994) βασισμένοι στη θεωρία του J.Abraham (1992) (Modeling the Sawyer Linear Motor) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι με τη διάταξη ανάδρασης (2.1) και τη μονάδα ελέγχου (DSP) (που εξετάστηκε παραπάνω) προκύπτει ένα αξιόπιστο σύστημα ελέγχου θέσης/ταχύτητας του κινητήρα. Βασισμένοι στα αποτελέσματα που έδωσε η τεχνική ελέγχου κλειστού βρόγχου θέλησαν να εξετάσουν τη λειτουργία του μοντέλου αυτού σε βηματικούς κινητήρες γραμμικής κίνησης και σε συστήματα δύο αξόνων (Sawyer). Εν τέλει διαπίστωσαν ότι τα αποτελέσματα που έπαιρναν από έναν απλό PID-Controller ήταν εξίσου εξαιρετικά, λαμβάνοντας όμως υπ' όψιν ότι πολλές παράμετροι και μεταβλητές μπορούσαν να επανεξεταστούν από το χρήστη.



Εικόνα 34: Αναπαράσταση μεθόδου ελέγχου κλειστού βρόγχου

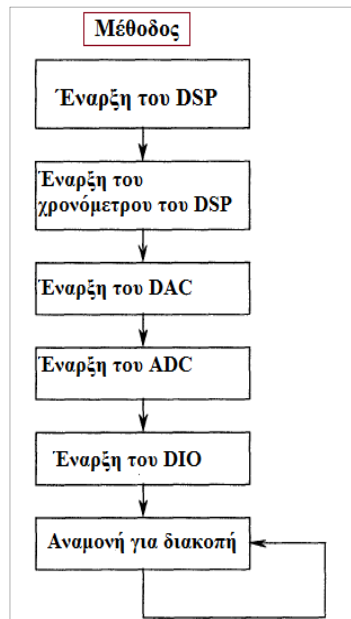


Εικόνα 35: Σχεδίαση συστήματος 2-Axis Sawyer linear motor with servo control (feedback)

2.3 Περιγραφή λογισμικού

Το λογισμικό διαιρείται σε δύο κώδικες: τον κώδικα που βρίσκεται στο DSP ο οποίος γράφεται στη γλώσσα προγραμματισμού «assembly» και τον κώδικα που βρίσκεται στο PC και είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού «C». Ο κώδικας του DSP καλύπτει όλες τις διαδικασίες πραγματικού χρόνου, δηλαδή τις αλλαγές σε μεταβλητές και παραμέτρους που πραγματοποιούνται από το χρήστη. Ο κώδικας στο PC εκτελεί δύο λειτουργίες. Αφ' ενός επικοινωνεί μέσω ενός συνόλου ρουτινών με τον DSP και αφ' εταίρου φροντίζει για την ενδοεπικοινωνία με τον χρήστη και για την παραγωγή τροχιάς. Οι ρουτίνες επικοινωνίας παρέχουν ένα υψηλό επίπεδο διεπαφής που διατηρεί την εφαρμογή σταθερή στις αλλαγές του χαμηλού επιπέδου ελέγχου στο λογισμικό και άνετο προγραμματισμό των εφαρμογών. Επίσης καθιστούν το λογισμικό εύχρηστο.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν τα βασικά στοιχεία της μεθόδου του λογισμικού του DSP. Η δομή του κώδικα DSP παρουσιάζεται ως εξής:



Εικόνα 36: Έναρξη λογισμικού DSP

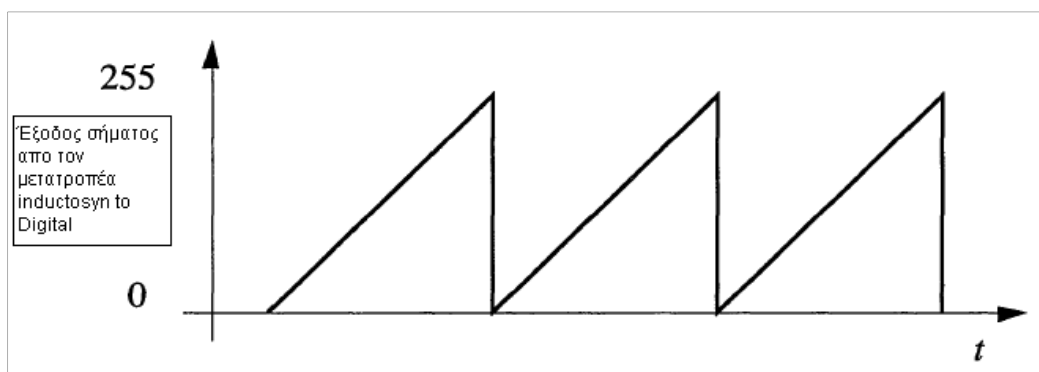
Το λογισμικό του DSP ακολουθεί μια σειρά ενεργειών. Κάποιες από αυτές είναι η επανεκκίνηση, η επαναφορά στην αρχική θέση, η οδηγία και η εκτέλεση της τροχιάς του κινητήρα. Επίσης το λογισμικό διακρίνεται από κάποιες διακοπές που προέρχονται από τα IRQ. Τα IRQ (interrupt requests) είναι αιτήματα διακοπής ή αλλιώς γραμμές σήματος υλικού (hardware IRQ lines) που στέλνονται στον επεξεργαστή. Ο επεξεργαστής σταματά προσωρινά να «τρέχει» το πρόγραμμα και επιτρέπει σε ένα άλλο ειδικό πρόγραμμα, που ονομάζεται χειριστής διακοπής (interrupt handler) να τρέξει αντί αυτού. Η διακοπή χρησιμοποιείται για να προλάβει ο επεξεργαστής μέσω του DIO να παραλάβει στοιχεία από το διαμορφωτή ή από τη διάταξη ανάδρασης (στη συγκεκριμένη περίπτωση). Η διακοπή του αιτήματος που εκτελείται ακολουθεί μια σειρά προτεραιότητας που ονομάζεται επίπεδο αιτήματος (IRQ Level).

Οι διακοπτόμενες γραμμές (γραμμές σήματος υλικού) προσδιορίζονται συχνά από τον συμβολισμό IRQ, ο οποίος ακολουθείται από έναν αριθμό. Παραδείγματος χάριν σε ένα σύνολο γραμμών που αποτελείται από IRQ0 έως IRQ2, ο IRQ0 (Level 0) οδηγείται από το χρονόμετρο του περιφερειακού εξαρτήματος ADC (πλακέτα) παρέχοντας την συχνότητα αναφοράς (oscillator) στα ADC και DIO. Στη συνέχεια ο IRQ1 (Level 1) οδηγείται από το χρονόμετρο του DSP και χρησιμοποιείται στον ενσωματωμένο ελεγκτή του βηματικού κινητήρα κατά την διάρκεια του καλιμπραρίσματος. Ο IRQ2 (Level 2) παράγεται από το χρήστη, όταν γράφεται μια καινούρια

τροχιά (mode) του κινητήρα σε μια καταχώρηση στον πίνακα DSP. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η ροή του προγράμματος.

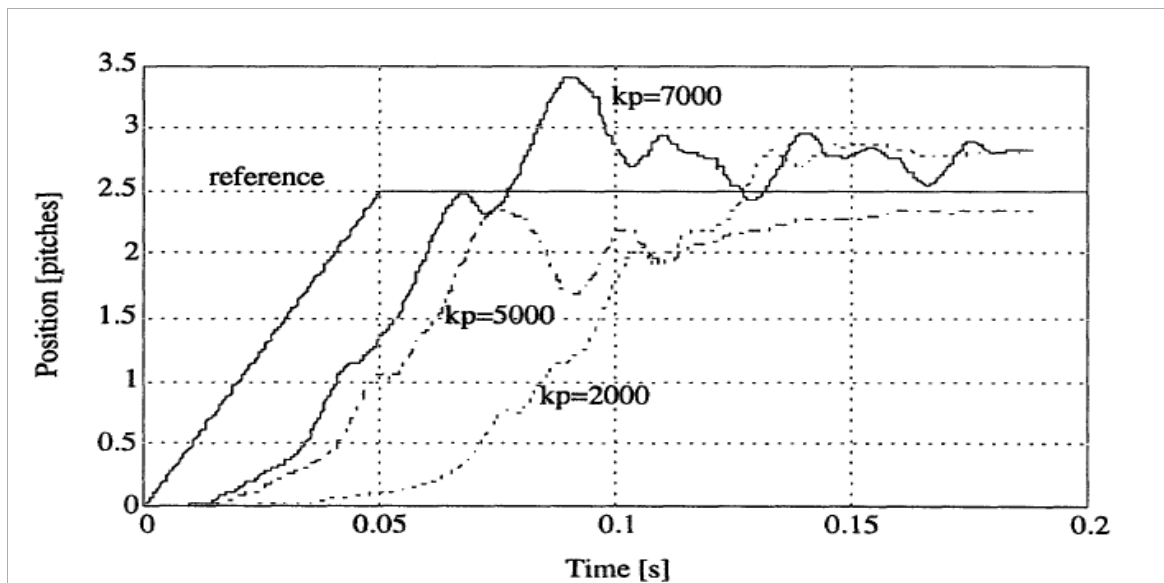
Η επιθυμητή τροχιά του κινητήρα αποθηκεύεται σε έναν πίνακα που λειτουργεί σαν αρχείο ταχύτητας και μεταφορτώνεται στον πίνακα DSP. Η αποθήκευση της ταχύτητας δίνει το πλεονέκτημα μιας καταγραφής στοιχείων, από την οποία μπορεί να αποκρυπτογραφηθεί πιο εύκολα η θέση του κινητήρα, αν αθροιστούν όλες οι ταχύτητες μαζί.

Από την DIO συσκευή διαβάζεται μόνο η θέση του κινητήρα μέσα σε ένα Pitch, ενώ η μετατόπιση υπολογίζεται από έναν αλγόριθμο (που μετράει Pitch). Η θέση του αισθητήρα μέσα σε ένα Pitch αντιπροσωπεύεται από μια λέξη των 8 bit ή νούμερο (0-255). Αν παραδείγματος χάριν ο κινητήρας λειτουργεί σε εύρος 1000 Pitch ανά δευτερόλεπτο, η απόσταση που θα διανύσει μέσα σε συγκεκριμένη και ορισμένη περίοδο είναι 0,025 Pitch. Αν η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης και της πραγματικής τιμής είναι μεγαλύτερη από 0,025 Pitch, τότε ο αισθητήρας θα έχει υπερπηδήσει ένα Pitch μπροστά ή θα έχει παραμείνει ένα Pitch πίσω.

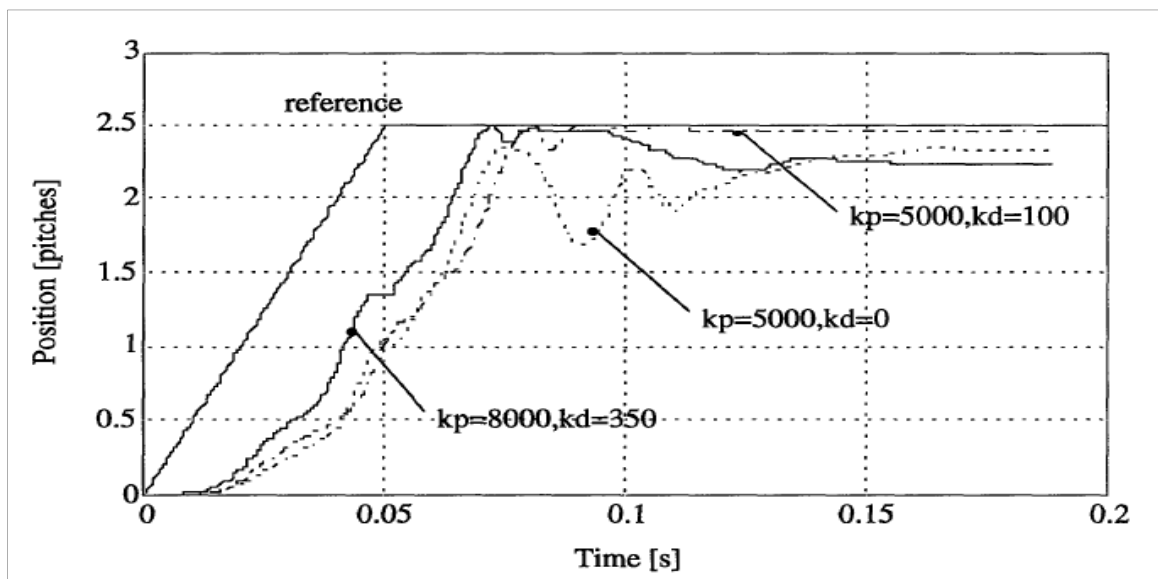


Εικόνα 37: Τυπικό σχήμα σήματος εξόδου που κάθε κορυφή από το 0 -255 ή και το αντίστροφο απεικονίζει και μια υπερπήδηση του ενός Pitch.

Βασισμένοι στην έρευνα του Abraham (1992) και του Pablo (1993), οι Schulze-Lauen, Wong, Yousef-Toumi (1994) απέδειξαν ότι υπάρχουν κάποιες διαφορές στα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την θέση, τον χρόνο απόκρισης και διόρθωσής (του χρόνου απόκρισης) του διαξονικού βηματικού κινητήρα του Sawyer (1969) σε σχέση με έναν συμβατικό βηματικό κινητήρα. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι διαφορές στην θέση ως προς το χρόνο σύμφωνα με τις τεχνικές αναλογικού και διαφορικού ελέγχου.



Εικόνα 38: Λειτουργία σερβοελέγχου με αναλογική τεχνική (P control)



Εικόνα 39: Λειτουργία σερβοελέγχου με τεχνική διαφορικού ελέγχου (PD control)

Στην εικόνα 38 παρατηρεί κανείς ότι σε κάποια κέρδη K_p ο χρόνος απόκρισης ξεφεύγει από την τροχιά αναφοράς (reference) με αποτέλεσμα να μην είναι σταθερός ο έλεγχος εκείνη τη στιγμή. Αντίθετα στην εικόνα 39 παρατηρείται ότι τα κέρδη K_p, K_d καθιστούν το σύστημα σε σύγκριση με τον έλεγχο P κατά ελάχιστο βαθμό πιο σταθερό.

Λόγω του λογισμικού και του προσαρμοσμένου σερβοελέγχου μειώνονται οι δονήσεις στον κινητήρα όταν λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες. Ενώ εφαρμόζοντας τον κλασσικό έλεγχο των βηματικών κινητήρων, λόγω των υψηλών ταχυτήτων, πολλές φορές χάνονταν βήματα ή ακόμα έφταναν σε σημείο ξεσυγχρονισμού. Όσον αφορά τις χαμηλές ταχύτητες, ο σερβοέλεγχος παρέχει στον κινητήρα ομαλή κίνηση (ακολουθώντας την τροχιά που έχει προσδιοριστεί από τον χρήστη), που οδηγεί σε μια βελτιωμένη απόδοση του κινητήρα.

Όλες παραπάνω λειτουργίες εντάσσονται στο λογισμικό δημιουργώντας στον χρήστη ένα δυναμικό, ευέλικτο αλλά και φιλικό περιβάλλον.

3. Συμπέρασμα

Σε αυτήν την εργασία παρουσιάστηκε ένας ψηφιακός σέρβο-έλεγχος για τις γραμμικές μηχανές δύο-αξόνων. Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια εκτενής αναφορά στις βασικές θεωρητικές γνώσεις του θέματος. Αυτή η αναφορά περιλάμβανε την περιγραφή των μοντέλων ενός γραμμικού βηματικού κινητήρα και ενός σερβοκινητήρα γραμμικής κίνησης. Συγκεκριμένα αναπτύχθηκαν τα δομικά μέρη και η λειτουργία των δύο κινητήρων καθώς επίσης πραγματοποιήθηκε μια σύγκριση μεταξύ τους. Ως συμπέρασμα της σύγκρισης προέκυψε ότι ο σερβοκινητήρας λειτουργεί καλύτερα σε υψηλές ταχύτητες και έχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τον βηματικό κινητήρα. Ο βηματικός κινητήρας αντιθέτως λειτουργεί καλύτερα σε χαμηλές ταχύτητες και δεν υπάρχει κατά την λειτουργία του κίνδυνος υπερφόρτωσης.

Μέρος της ανάλυσης των θεωρητικών αρχών αποτέλεσαν τα διαφορετικά είδη αισθητήρων που περιγράφηκαν στο τελευταίο μέρος του πρώτου κεφαλαίου καθώς αποτελούν σημαντικό εξάρτημα στον έλεγχο κλειστού βρόγχου που χρησιμοποιούν (κυρίως) οι σερβοκινητήρες. Συγκεκριμένα βασικό άξονα της ανάλυσης αποτελούν οι επαγωγικοί αισθητήρες που σε ένα πρωτοποριακό μοντέλο δύο-αξόνων αποτελούν το κλειδί για τον ακριβή προσδιορισμό θέσης του βηματικού κινητήρα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκε και αναλύθηκε το μοντέλο ενός σύγχρονου βηματικού κινητήρα Sawyer (1969) γραμμικής κίνησης δύο-αξόνων με την μέθοδο κλειστού βρόγχου (ή αλλιώς με σερβοέλεγχο). Συγκεκριμένα περιγράφηκαν οι τεχνικές ελέγχου που καθιστούν το σύστημα συμβατό με τον γραμμικό επαγωγικό κινητήρα και συμβάλουν στην ομαλή λειτουργία του συστήματος, όπως οι τροποποιήσεις του αισθητήρα επαγωγικής συμπεριφοράς, η διάταξη ανάδρασης, η μονάδα ελέγχου και ο επαναπροσδιορισμός του απαραίτητου λογισμικού.

Ως συμπέρασμα προκύπτει ότι ο βηματικός κινητήρας με την εφαρμογή σερβοελέγχου υπόκειται σε σημαντικές βελτιώσεις απόδοσης, συμπεριλαμβανομένου της μικρής κατανάλωσης ισχύος και της αποφυγής μεγάλων τιμών θερμότητας. Επίσης ο προσδιορισμός θέσης αποδεικνύεται πιο αξιόπιστος και η κίνηση πιο ομαλή. Ο τροποποιημένος ελεγκτής λογισμικού που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2.3 φαίνεται να προσφέρει μεγάλη ευελιξία και παρέχει μια άνετη και υψηλού επιπέδου διεπαφή με τον χρήστη. Η εισαγωγή ενός διαφορικού ελέγχου (PD control) μειώνει αισθητά την δόνηση του κινητήρα σε υψηλές ταχύτητες, που είναι από τα βασικότερα μειονεκτήματα των βηματικών κινητήρων οδηγούμενοι από την μέθοδο ανοικτού βρόγχου.

Ο πίνακας DIO που χρησιμεύει ως το μέγεθος διεπαφών αισθητήρα-υπολογιστή περιορίζει τη ψηφιακή λέξη που αντιπροσωπεύει τη θέση του κινητήρα ως προς την επιλογή μονάδας ελέγχου. Η ανάλυση του σήματος των αισθητήρων που περιορίζεται λόγω ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μπορεί να ερευνηθεί και να εξελιχθεί περαιτέρω ώστε να παρέχει υψηλότερη ανάλυση. Όταν είναι διαθέσιμη η υψηλότερη ανάλυση και η γρηγορότερη απόκριση (εντόπιση λάθους) ακολουθούμενη από ένα μετατροπέα Inductosyn to Digital, ενδείκνυται να παρατηρηθεί σημαντική βελτίωση στην απόδοση της μηχανής.

Το πρωτοποριακό σύστημα δύο-αξόνων με βηματικούς κινητήρες θεωρείται κατάλληλο για αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές, με βασικό παράδειγμα την αυτοματοποίηση. Επίσης μερικά παραδείγματα εφαρμογής είναι ορισμένα σχεδιαστικά μέσα (plot, printer), τα αυτόματα συστήματα πακεταρίσματος προϊόντων καθώς επίσης οι κοπτικές μηχανές βιομηχανικού τύπου.

4. Βιβλιογραφία

- Abraham, J. (1992). Modeling the Sawyer Linear Motor. Massachusetts: Institute of Technology.
- Athani, V.V. (1997). Stepper motors. Fundamentals Applications and Design. New Delhi: New age International ltd publishers.
- Bishop, R.H. (2002). The Mechatronics Handbook. Washington D.C.: CRC Press.
- Crawford, D., Wong, F.Y., Youcef-Toumi, K. (1994). Modeling and Design of a Sensor for Two dimensional Linear Motors. Massachusetts: Cambridge.
- Faraday, M. (1831). Experimentals researches in Electricity. London: Philosophical transactions.
- Fertner, A. and Sjölund, A. (1989). Analysis of the Performance of the Capacitive Displacement Transducer. Massachusetts: IEEE Transactions.
- Fraden, J. (1993). AIP Handbook of Modern Sensors. New York: American institute of physics. Technical report.
- Guzman, M. (1993). Design and Implementation of an Induction Sensor for Linear Stepper Motor System Applications. Massachusetts: Cambridge.
- Kosel, P.B., Munro, G.S. and Vaughan, R. (1981). Capacitive Transducer for Accurate Displacement Control. In: Australasian science magazine.
- Kuo, B. (1972-1973). Theory and Application of Stepper Motors. Incremental Motion Control System and Devices. Illinois: West Publishing Co.
- Miller, G.L. (1990). Capacitively Commuted Brushless DC Servomotors. N. Jersey: US Patent.
- Pelta, E.R. (1987). Two-axis Sawyer motor for motion systems. In: IEEE Control Systems magazine, pp. 20 24.
- Rodriguez, P. (1993). Development of an Enhancer Linear Motor Model for Computer Simulation. Massachusetts: Cambridge.
- Sawyer, B.A. (1969). Magnetic positioning device. CA, USA: US Patent.

- Schulze-Lauren, H. (1993). Development of an Enhancer Linear Motor Drive for High Speed Flexible Automation System. Massachusetts.
- Schulze-Lauen, H., Wong, F.Y., Youcef-Toumi, K. (1994). Modelling and Digital Servo Control of a Two-Axis Linear Motor. Massachusetts: Institute of Technology.
- Slocum, Alexander H. (1992). Precision machine design. USA: Michigan copyright by society of Manufacturing Engineers.