



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Σερβοκινητήρες και Σερβοκινητήρια Συστήματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άκης Α. Τζιάμαλης

Επιβλέπων : Μαρία Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Ιανουάριος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Σερβοκινητήρες και Σερβοκινητήρια Συστήματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άκης Α. Τζιάμαλης

Επιβλέπων : Μαρία Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Ιανουαρίου 2012.

.....
Μαρία Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Νικόλαος Θεοδώρου
Καθηγήτης ΕΜΠ

.....
Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιανουάριος 2012

.....
Άκης Α. Τζιάμαλης

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

Copyright © Άκης Τζιάμαλης 2012

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.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και κυρίως την επιβλέποντα καθηγήτριά μου κ. Μαρία Ιωαννίδου, για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτή τη διπλωματική εργασία, αλλά και την καθοδήγηση και την βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της.

θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συμφοιτητές μου και τους φίλους μου για την συμπαράστασή τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στον παππού μου Γεώργιο Κύρου, στην γιαγιά μου Ελένη Κύρου, αλλά και στην Μαρίνα Χριστοφόρου, των οποίων η υποστήριξη και η βοήθεια σε διάφορες δυσκολίες, ήταν καθοριστική.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, Βάσω Κύρου και Αριστείδη Τζιάμαλη, στην αδελφή μου Έλενα, στις ξαδέλφες μου Μαριλένα και Γεωργία και σε όλους τους συγγενείς μου για την αγάπη τους και την συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τζιάμαλης Άκης
Ιανουάριος 2012

Περίληψη

Η απαίτηση για υψηλής ποιότητας έλεγχο ροπής, ταχύτητας και θέσης της ηλεκτρικής κίνησης οδήγησε στην ραγδαία ανάπτυξη των σερβοκινητήρων και των σερβοκινητήριων συστημάτων. Οι σερβοκινητήρες είναι νέας τεχνολογίας κινητήρες οι οποίοι ενσωματώνουν σύστημα ανάδρασης και μαζί με το σερβομηχανισμό οδήγησης (servodrive) εξασφαλίζουν απόλυτη ακρίβεια κίνησης. Χρησιμοποιούνται κυρίως στα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου.

Η διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί μια παρουσίαση στις αρχές λειτουργίας, τα χαρακτηριστικά και τις βασικές εφαρμογές των σερβοκινητήρων και των σερβοκινητήριων συστημάτων.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μία γενική εισαγωγή στους σερβοκινητήρες, τα κύρια μέρη τους και τα βασικά τους χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους, οι κατηγορίες τους και τα κριτήρια επιλογής τους.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση των βασικών τύπων ηλεκτρικών σερβοκινητήρων όπως οι επαγωγικοί κινητήρες, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, οι υβριδικοί σερβοκινητήρες, αλλά και οι σερβομηχανισμοί *R/C servos* και *digital servos*.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα σερβοκινητήρια συστήματα και κυρίως στο λειτουργικό διάγραμμα, τις διατάξεις ανάδρασης, το κόστος, τους σερβοενισχυτές και τα συστήματα οδήγησης κινητήρων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους τομείς εφαρμογών των σερβοκινητήρων και των σερβοκινητήριων συστημάτων. Η δυνατότητα που προσφέρουν οι σερβοκινητήρες στα συστήματα ελέγχου κίνησης με τον παράλληλο έλεγχο ταχύτητας και θέσης με πολύ μεγάλη ακρίβεια και χωρίς περιορισμούς μηχανικής ισχύος τους καθιστά κατάλληλους για μια τεράστια γκάμα βιομηχανικών εφαρμογών. Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύονται αρκετά τέτοια παραδείγματα, με σκοπό την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας τους.

Λέξεις Κλειδιά

Σερβοκινητήρες, Σερβοκινητήρια Συστήματα, Ηλεκτροκινητήρες, Σερβομηχανισμοί, Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Έλεγχος Κίνησης

Abstract

The requirement for high torque, speed and position control of the electric drive, led to the rapid development of servomotors and the servomotor systems. Servomotors are new technology motors which incorporate feedback device and with the help of the servodrive system they can ensure precision movement. Usually they are used in automation control systems.

Generally speaking this diplomatic paper is a presentation on operating principles, characteristics and main applications of servomotors and servosystems.

The *first chapter* provides a general introduction to the servomotors, main parts, basic characteristics, advantages and disadvantages, categories and selection criteria for the applications.

The *second chapter* provides an analysis of the basic types of electric servomotors such as induction motors, direct current motors, permanent magnet synchronous motors, hybrid servos, R/C servos and digital servos.

The *third chapter* refers to the servomotor systems, the functional diagram, the feedback devices, the cost, the servo amplifiers and DC - AC motors servodrive systems.

The *fourth chapter* refers to the application areas of the servomotors and generally of the servosystems. Servomotors offered to motion control systems the possibility for parallel control of velocity and position with great accuracy. This makes them suitable for a wide range of industrial applications. In this chapter we analyze several such examples in order to fully understand their function.

Keywords

Servomotors, Servosystems, Electromotors, Servomechanisms, Automation Control Systems, Movement Control

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	7
Abstract.....	9
Περιεχόμενα.....	11
Κατάλογος Σχημάτων και Πινάκων.....	13

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στους Σερβοκινητήρες

1.1 Ιστορική αναδρομή.....	17
1.2 Γενικά χαρακτηριστικά σερβοκινητήρων.....	18
1.3 Κατηγορίες σερβοκινητήρων.....	20
1.3.1 Ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες.....	22
1.3.1.1 Ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες περιστροφικής κίνησης.....	22
1.3.1.2 Ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες γραμμικής κίνησης.....	23
1.4 Κριτήρια επιλογής σερβοκινητήρων.....	25
1.4.1 Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά.....	26
1.4.2 Ηλεκτρομηχανικά χαρακτηριστικά.....	26
1.4.3 Σύγκριση βασικών τύπων σερβοκινητήρων.....	27
1.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σερβοκινητήρων.....	31
1.6 Σύγκριση σερβοκινητήρων και βηματικών κινητήρων.....	32

Κεφάλαιο 2: Βασικοί Τύποι Ηλεκτρικών Σερβοκινητήρων

2.1 Επαγωγικοί σερβοκινητήρες.....	35
2.1.1 Δομή του επαγωγικού κινητήρα.....	35
2.1.2 Ο επαγωγικός κινητήρας στα συστήματα οδήγησης.....	36
2.1.3 Βασικές έννοιες και σχέσεις στους επαγωγικούς κινητήρες.....	37
2.1.4 Έλεγχος της ταχύτητας με τη μεταβολή της συχνότητας.....	42
2.2 Σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος.....	45
2.2.1 Τύποι σερβοκινητήρων συνεχούς ρεύματος.....	45
2.2.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη.....	46
2.2.3 Σερβοκινητήρας ΣΡ ελεγχόμενος από τον δρομέα (armature control).....	48
2.2.4 Σερβοκινητήρας ΣΡ ελεγχόμενος από τον στάτη (field control).....	49
2.3 Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.....	51
2.4 Βηματικοί Σερβοκινητήρες.....	54
2.4.1 Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα.....	54
2.4.2 Ο υβριδικός σερβοκινητήρας.....	56

2.5 Ψηφιακοί σερβομηχανισμοί (digital servos).....	57
2.5.1 Λειτουργία ψηφιακού σέρβο.....	57
2.5.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του ψηφιακού σέρβο.....	59
2.6 R/C servos.....	61

Κεφάλαιο 3: Σερβοκινητήρια Συστήματα

3.1 Εισαγωγή.....	65
3.2 Γενικό λειτουργικό διάγραμμα σερβοκινητήριου συστήματος.....	66
3.3 Διατάξεις ανάδρασης σερβοκινητήριων συστημάτων.....	68
3.3.1 Ταχογεννήτρια.....	69
3.3.2 Ηλεκτρομαγνητικός μετρητής θέσης (resolver).....	70
3.3.3 Οπτικός κωδικοποιητής θέσης (optical encoder).....	73
3.3.3.1 Οπτικός κωδικοποιητής σχετικής θέσης.....	74
3.3.3.2 Οπτικός κωδικοποιητής απόλυτης θέσης.....	75
3.3.3.3 Γραμμικός οπτικός κωδικοποιητής θέσης (linear encoder).....	77
3.3.4 Αισθητήρες θέσης Hall (Hall-effect transducers).....	78
3.3.5 Συστήματα ελέγχου χωρίς αισθητήρες θέσης.....	80
3.4 Δυναμική απόκριση σερβοκινητήριου συστήματος.....	80
3.5 Σερβοενισχυτές - Συστήματα οδήγησης σερβοκινητήρων.....	82
3.5.1 Συστήματα οδήγησης κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....	86
3.5.2 Συστήματα οδήγησης κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος.....	89
3.5.2.1 Στατικός μετατροπέας συχνότητας με ανορθωτή-αντιστροφέα.....	90
3.5.2.2 Κυκλομετατροπέας.....	93
3.6 Συνολικό κόστος σερβοκινητήριου συστήματος.....	95

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογές Σερβοκινητήρων και Σερβοκινητήριων Συστημάτων

4.1 Τομείς εφαρμογών σερβοκινητήρων.....	97
4.2 Εφαρμογές σερβοκινητήρων στην ρομποτική.....	98
4.3 Χρήση σερβοκινητήρων σε βιομηχανικούς μηχανισμούς.....	100
4.4 Εφαρμογή σερβοκινητήρων στο πολεμικό ναυτικό.....	108
4.5 Σύστημα ανάγνωσης σκληρού δίσκου.....	109
4.6 Εφαρμογή σερβοκινητήρων σε μηχανισμούς εκτύπωσης.....	111
4.7 Εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά και αιολικά συστήματα.....	112
4.8 Ηλεκτρικό σύστημα υποβοήθησης τιμονιού.....	114
Συμπεράσματα.....	117
Παράρτημα.....	119
Βιβλιογραφία.....	123

Κατάλογος Σχημάτων και Πινάκων

Σχήμα 1.1	<i>Σερβοκινητήρας με σύστημα ψηκτρών-συλλέκτη και ενσωματωμένο κωδικοποιητή, ταχογεννήτρια και φρένο.....</i>	19
Σχήμα 1.2	<i>Σερβοκινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος Μόνιμου Μαγνήτη.....</i>	20
Σχήμα 1.3	<i>(α) Σερβοκινητήρας Συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (brushless.).....</i> <i>(β) Σερβοκινητήρες Συνεχούς Ρεύματος.....</i>	21 21
Σχήμα 1.4	<i>Σύγχρονος σερβοκινητήρας μόνιμου μαγνήτη (i) περιστροφικής και (ii) γραμμικής κίνησης.....</i>	23
Σχήμα 1.5	<i>Σερβοκινητήρας γραμμικής κίνησης (linear servo motor).....</i>	24
Σχήμα 1.6	<i>Διάγραμμα του όγκου(μεγέθους)-ισχύος για τους διάφορους τύπους σερβοκινητήρων.....</i>	28
Σχήμα 1.7	<i>Διάγραμμα αδράνειας δρομέα-ισχύος για τους διάφορους τύπους σερβοκινητήρων.....</i>	29
Σχήμα 1.8	<i>Διάγραμμα χρόνου ανόδου-ισχύος για τους διάφορους τύπους σερβοκινητήρων χωρίς αδράνεια φορτίου.....</i>	30
Πίνακας 1.1	<i>Σύγκριση σερβοκινητήρα ΣΡ με ψήκτρες και υβριδικού βηματικού κινητήρα.....</i>	33
Σχήμα 2.1	<i>Εξωτερικά τμήματα ενός επαγωγικού σερβοκινητήρα.....</i>	36
Σχήμα 2.2	<i>(α) Ισοδύναμο κυκλώμα του κινητήρα.....</i> <i>(β) Ισοδύναμο κατά Thevenin.....</i>	38 38
Σχήμα 2.3	<i>Πλήρης χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, όπου περικλείονται οι περιοχές πέδησης και γεννήτριας.....</i>	39
Σχήμα 2.4	<i>Χαρακτηριστική ισοδύναμης αντίστασης – ροπής για διάφορες τιμές συχνοτήτων.....</i>	40
Σχήμα 2.5	<i>Χαρακτηριστική επαγωγής – ροπής για διάφορες τιμές συχνοτήτων.....</i>	41
Σχήμα 2.6	<i>Χαρακτηριστική ρεύματος – ροπής για διάφορες τιμές συχνοτήτων.....</i>	41
Σχήμα 2.7	<i>Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας, σε τιμές μικρότερες από τη βασική, με σταθερή τη μαγνητική ροή.....</i>	43
Σχήμα 2.8	<i>Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας, σε τιμές μεγαλύτερες από τη βασική, με σταθερή την τάση.....</i>	43
Σχήμα 2.9	<i>Κυκλωματική δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.....</i>	44
Σχήμα 2.10	<i>Κυματομορφές της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα. Διακρίνεται ακόμη η θεμελιώδης συνιστώσα των τάσεων, με συχνότητα f_e.....</i>	45
Σχήμα 2.11	<i>Κινητήρας συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη.....</i>	47
Σχήμα 2.12	<i>Ισοδύναμο κύκλωμα σερβοκινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη.....</i>	47
Σχήμα 2.13	<i>Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα με διέγερση από το δρομέα.....</i>	48
Σχήμα 2.14	<i>Χαρακτηριστική Ροπής M – Γωνιακής ταχύτητας ω.....</i>	49
Σχήμα 2.15	<i>Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα με διέγερση από το στάτη.....</i>	49
Σχήμα 2.16	<i>Χαρακτηριστική Ροπής M – Γωνιακής ταχύτητας ω.....</i>	50
Σχήμα 2.17	<i>Σύγχρονος σερβοκινητήρας μόνιμου μαγνήτη.....</i>	51

Σχήμα 2.18	Διατομή βηματικού κινητήρα.....	54
Σχήμα 2.19	Έλεγχος θέσης βηματικού κινητήρα σε σύστημα κλειστού βρόχου.....	55
Σχήμα 2.20	Υβριδικός σερβοκινητήρας με ανάδραση ηλεκτρομαγνητικού μετρητή θέσης (resolver).....	56
Σχήμα 2.21	«Αναλογικό Servo» με προσαρμοσμένα τσιπ λογικής.....	58
Σχήμα 2.22	«Ψηφιακό Servo» με ελεγχόμενο μικροεπεξεργαστή και FET ενισχυτή.....	58
Σχήμα 2.23	Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν δύο κύκλους των παλμών on/off ισχύος: Διάγραμμα.1: σε κατάσταση αδράνειας..... Διάγραμμα.2: μικρής διάρκειας παλμός, δηλαδή χαμηλή ισχύς στον κινητήρα... Διάγραμμα.3: μεγαλύτερης διάρκειας παλμός, περισσότερη ισχύς στον κινητήρα.....	59 59 59
Σχήμα 2.24	Σύγκριση “νεκρού διαστήματος” (deadband) μεταξύ ενός ψηφιακού και ενός αναλογικού servo με τις ίδιες προδιαγραφές. Παρατηρούμε ότι το ψηφιακό servo έχει πολύ μικρότερο νεκρό διάστημα και δεσμεύει σε λιγότερο χρόνο μεγαλύτερη ισχύ απ’ό,τι το αναλογικό servo.....	60
Σχήμα 2.25	Σερβομηχανισμός με ευθύγραμμη κίνηση (αριστερά) και περιστροφική κίνηση (δεξιά).....	61
Σχήμα 2.26	Τα βασικά τμήματα ενός R/C servo.....	61
Σχήμα 2.27	Οι παλμοί ορίζουν την θέση του κινητήρα Servo.....	62
Σχήμα 2.28	Λειτουργία R/C servo.....	63
Σχήμα 3.1	Γενικό λειτουργικό διάγραμμα σερβοκινητήριου συστήματος.....	66
Σχήμα 3.2	Γενικό λειτουργικό διάγραμμα του σερβοκινητήριου ελέγχου με συναρτήσεις Laplace.....	68
Σχήμα 3.3	Απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα του σχήματος 3.2.....	68
Σχήμα 3.4	Σύνδεση της ταχογεννήτριας στον άξονα της μηχανής.....	69
Σχήμα 3.5	Ταχογεννήτρια τύπου άξονα κομπλαρισμένη στον άξονα του κινητήρα.....	69
Σχήμα 3.6	Στροφόμετρο (Ταχομετρητής laser).....	70
Σχήμα 3.7	Resolver ενσωματωμένου τύπου (built-in type resolver).....	70
Σχήμα 3.8	Κατασκευαστικά μέρη του brushless transmitter resolver: (α) τύπου άξονα και (β) ενσωματωμένου τύπου.....	71
Σχήμα 3.9	Σύγκριση μεγεθών του “brushless transmitter resolver” και του “variable reluctance resolver”.....	72
Σχήμα 3.10	Συνδεσμολογία τυλιγμάτων του resolver μαγνητικής αντίστασης.....	73
Σχήμα 3.11	Βασικά στοιχεία ενός οπτικού κωδικοποιητή θέσης.....	74
Σχήμα 3.12	Οπτικός κωδικοποιητής σχετικής θέσης.....	75
Σχήμα 3.13	Αναπαράσταση 4-bit Absolute Encoder.....	76
Σχήμα 3.14	Αναπαράσταση 4-bit Absolute Encoder με κωδικοποίηση Gray.....	76
Σχήμα 3.15	Absolute Encoder με ανάλυση 10-bits.....	76
Σχήμα 3.16	Τρόπος λειτουργίας του γραμμικού οπτικού κωδικοποιητή θέσης.....	77
Σχήμα 3.17	Στιγμιότυπο φωτοαισθητηρίου με σκοτεινές και φωτεινές περιοχές.....	77
Σχήμα 3.18	Τομή κινητήρα ΣΡ χωρίς ψήκτρες με στοιχεία φαινομένου Hall.....	78

Σχήμα 3.19	<i>Μέτρηση της θέσης του δρομέα τριφασικής στρεφόμενης μηχανής με αισθητήρες Hall.....</i>	<i>79</i>
Σχήμα 3.20	<i>Μέτρηση της θέσης του δρομέα στρεφόμενης μηχανής με αισθητήρες Hall (χρησιμοποιώντας οδοντωτό τροχό με μαγνήτες, στερεωμένο στον άξονα της μηχανής).....</i>	<i>79</i>
Σχήμα 3.21	<i>Δυναμική απόκριση του συστήματος σε βηματική μεταβολή της εισόδου.....</i>	<i>80</i>
Σχήμα 3.22	<i>Δυναμική απόκριση του συστήματος σε βηματική είσοδο διαταραχής.....</i>	<i>81</i>
Σχήμα 3.23	<i>Σερβοενισχυτής με τρανζίστορ σε διάταξη καταγραφής.....</i>	<i>82</i>
Σχήμα 3.24	<i>Σύνδεση σερβοκινητήρα και σερβοενισχυτή.....</i>	<i>84</i>
Σχήμα 3.25	<i>Λειτουργικό διάγραμμα κινητήριου συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος: (α) σταθερής διέγερσης και (β) ελεγχόμενης διέγερσης.....</i>	<i>87</i>
Σχήμα 3.26	<i>Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα (ac-dc μετατροπέας ισχύος) για οδήγηση κινητήρα ΣΡ με δυνατότητα στα δύο τεταρτημόρια.....</i>	<i>88</i>
Σχήμα 3.27	<i>Ac-dc μετατροπέας ισχύος για οδήγηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος με δυνατότητα λειτουργίας στα τέσσερα τεταρτημόρια: (α) αποτελείται από δύο τριφασικές πλήρως ελεγχόμενες αντιπαράλληλες ανορθωτικές γέφυρες και (β) μετατροπέας ισχύος.....</i>	<i>88</i>
Σχήμα 3.28	<i>Λειτουργικό διάγραμμα κινητήριου συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με ηλεκτροκινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος.....</i>	<i>89</i>
Σχήμα 3.29	<i>Λειτουργικό διάγραμμα στατικού μετατροπέα συχνότητας με ανορθωτή Αντιστροφή.....</i>	<i>90</i>
Σχήμα 3.30	<i>Κύκλωμα ισχύος στατικού μετατροπέα συχνότητας πηγής τάσης.....</i>	<i>90</i>
Σχήμα 3.31	<i>Αρχή λειτουργίας του ημιτονοειδούς PWM διαμορφωτή.....</i>	<i>91</i>
Σχήμα 3.32	<i>Γενικό κύκλωμα ισχύος στατικού μετατροπέα συχνότητας πηγής ρεύματος.....</i>	<i>92</i>
Σχήμα 3.33	<i>(α) Ιδανικές κυματομορφές ρεύματος εξόδου (β) η σειρά έναυσης και σβέσης των θυρίστορ σε τριφασικό μετατροπέα συχνότητας πηγής ρεύματος.....</i>	<i>93</i>
Σχήμα 3.34	<i>Αρχή λειτουργίας PWM διαμορφωτή ελέγχου ρεύματος σε βρόχο υστέρησης.....</i>	<i>93</i>
Σχήμα 3.35	<i>Λειτουργικό διάγραμμα κυκλομετατροπέα.....</i>	<i>94</i>
Σχήμα 3.36	<i>Κύκλωμα ισχύος μονοφασικού κυκλομετατροπέα.....</i>	<i>94</i>
Σχήμα 3.37	<i>(α)-(β)διαγράμματα της τάσης εξόδου για κυκλομετατροπέα μείωσης συχνότητας (γ) διάγραμμα τάσης εξόδου για κυκλομετατροπέα ανύψωσης συχνότητας.....</i>	<i>95</i>
Σχήμα 4.1	<i>Ρομποτικός βραχίονας τεσσάρων αξόνων με χρήση RC servo.....</i>	<i>99</i>
Σχήμα 4.2	<i>Ρομποτικό σύστημα υποβοήθησης χειρουργικών επεμβάσεων PUMA 200.....</i>	<i>100</i>
Σχήμα 4.3	<i>Μηχανισμός κοπής μεταλλικών σωλήνων με χρήση σερβοκινητήριου συστήματος.....</i>	<i>101</i>
Σχήμα 4.4	<i>Μηχανισμός τοποθέτησης ετικετών σε φυάλες με χρήση σερβοκινητήριου συστήματος.....</i>	<i>102</i>
Σχήμα 4.5	<i>Μηχανισμός περιτυλίξεως νήματος (filament winding).....</i>	<i>103</i>
Σχήμα 4.6	<i>Μηχανισμός συσκευασίας - τοποθέτηση προϊόντων σε κιβώτια.....</i>	<i>104</i>
Σχήμα 4.7	<i>Μηχανισμός χύτευσης με έγχυση για μορφοποίηση πλαστικού.....</i>	<i>105</i>
Σχήμα 4.8	<i>Μηχανισμός αυτόματης γέμισης φιάλων με χρήση σερβοκινητήρα.....</i>	<i>106</i>
Σχήμα 4.9	<i>Μηχανή κοπής ακρίβειας με σερβοκινητήριο σύστημα.....</i>	<i>107</i>

Σχήμα 4.10	Σύστημα αυτόματα καθοδηγούμενου οχήματος (AGV) με χρήση σερβοκινητήρα.....	108
Σχήμα 4.11	Μηχανισμός ελέγχου κίνησης πυργίσκου του πολεμικού ναυτικού.....	109
Σχήμα 4.12	Κύρια μέρη σκληρού δίσκου ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.....	110
Σχήμα 4.13	Κεφαλή ανάγνωσης δίσκου στην οποία φαίνεται και το εύκαμπτο μεταλλικό στέλεχος.....	110
Σχήμα 4.14	Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος ανάγνωσης σκληρού δίσκου.....	111
Σχήμα 4.15	Σύστημα παρακολούθησης ηλιακής πορείας με ταυτόχρονη προσαρμογή γωνίας και κατεύθυνσης των φωτοβολταικών πλακών για μέγιστη αξιοποίηση ενέργειας.....	112
Σχήμα 4.16	Ανεμογεννήτρια με σύστημα ελέγχου της κατεύθυνσης του ανέμου.....	113
Σχήμα 4.17	Φωτοβολταικό πάρκο με πάνελ πάνω σε περιστρεφόμενες πλατφόρμες, οι οποίες περιστρέφονται ανάλογα με τη πορεία του ήλιου, με χρήση σερβοκινητήριου συστήματος για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.....	113
Σχήμα 4.18	Σύστημα υποβοήθησης τιμονιού με χρήση σερβοκινητήρα.....	114
Σχήμα 4.19	Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος υποβοήθησης τιμονιού με ηλεκτρικό σερβοκινητήρα.....	115
Σχήμα 4.20	Ο δέκτης πιάνει το σήμα του πομπού, το επεξεργάζεται και δίνει εντολή στο αντίστοιχο servo να κινήσει το πηδάλιο.....	115
Σχήμα Π1	Σύγχρονος Σερβοκινητήρας (SEW EURODRIVE)	120
Σχήμα Π2	Βασική δομή του σύγχρονου σερβοκινητήρα CMD.....	121

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΣΕΡΒΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η προέλευση της λέξης Σερβοκινητήρας προέρχεται από το γαλλικό *Le Servomoteur* που στα ελληνικά μεταφράζεται ως “ δούλος κινητήρας”. Συγκεκριμένα η λέξη *servo* προέρχεται από τη Λατινική γλώσσα στην οποία *servus* σημαίνει “υπηρέτης” και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον J.L. Farcot το 1868 για να περιγράψει την χρήση υδραυλικών κινητήρων και ατμοκίνητων μηχανών στο πηδάλιο ενός πλοίου. Ο πρώτος ηλεκτροκίνητος σερβομηχανισμός κατασκευάστηκε το 1898 από τον Άγγλο H. Calendar.

Οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετά χρόνια στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου και κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται έλεγχος ταχύτητας, θέσης και ροπής του άξονα του κινητήρα. Κλασσικά παραδείγματα είναι η χρησιμοποίηση τους σε ρομποτικούς βραχίονες, αυτόματες εργαλειομηχανές, τηλεκατευθυνόμενα μοντέλα και σε αυτόματα συστήματα πλοήγησης πλοίων και αεροπλάνων.

Με την εξέλιξη των σερβοκινητήρων, η τεχνολογία πέρασε από τον κλασσικό έλεγχο ταχύτητας (speed control) στο συνολικό έλεγχο κίνησης (motion control). Αυτή η εφαρμογή ήταν καθοριστική τόσο για την εξέλιξη της ρομποτικής όσο και πολλών άλλων νέων τεχνολογιών.

1.2 Γενικά χαρακτηριστικά σερβοκινητήρων

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των σερβοκινητήρων είναι τα βελτιωμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους, όπως η πυκνότητα ισχύος, η ροπή αδράνειας, ο βαθμός απόδοσης και χρησιμοποιούνται σε κινητήρια συστήματα υψηλών απαιτήσεων, όπου υπάρχει ανάγκη για μεγάλη ακρίβεια και γρήγορη ταχύτητα απόκρισης του συστήματος σε έλεγχο ροπής, ταχύτητας και θέσης. Ο σερβοκινητήρας ουσιαστικά μας δίνει τη δυνατότητα, εκτός από την απλή ρύθμιση των στροφών και της ταχύτητας που γίνονται και στους συνήθεις κινητήρες με ρυθμιστές στροφών και inverters, να γίνεται πραγματικός έλεγχος της θέσης του άξονα του κινητήρα (positioning). Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη στο σώμα του κινητήρα ενός συγκεκριμένου αισθητηρίου (resolver ή encoder) που ελέγχει με συγκεκριμένες διαδικασίες την ταχύτητα και τη θέση του άξονα του κινητήρα. Τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε σερβοκινητήρα συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος είναι:

- Η ροπή του κινητήρα που είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης τάσης ελέγχου, η οποία αναπτύσσεται από τον ενισχυτή λόγω του σφάλματος στην είσοδο του.
- Η φορά της ροπής που καθορίζεται από την πολικότητα (στιγμιαία) της τάσης ελέγχου.

Ένας σερβοκινητήρας πρέπει να αναπτύσσει υψηλή ροπή ώστε να αλλάζει γρήγορα η ταχύτητα του, να περιστρέφεται σταθερά σε μεγάλη περιοχή ταχυτήτων και να έχει υψηλή ταχύτητα απόκρισης στις εντολές του συστήματος ελέγχου.

Οι σερβοκινητήρες δεν μπορούν να επιτελέσουν την τόσο σημαντική λειτουργία τους λειτουργώντας μεμονωμένα, αλλά αποτελούν το βασικό στοιχείο ενός συνολικού συστήματος αυτοματισμού που επιτελεί έλεγχο κίνησης. Στο συνολικό σερβοσύστημα εντάσσονται εκτός από τον σερβοκινητήρα, η μονάδα ελέγχου που στην πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι ένα PLC και ο σερβοενισχυτής (servodrive) που αποτελεί τον ενδιάμεσο κρίκο μεταξύ της μονάδας ελέγχου και του σερβοκινητήρα.

Οι σερβοκινητήρες κατασκευαστικά μοιάζουν πολύ με τους κοινούς κινητήρες, παρ'όλα αυτά δεν είναι οι ίδιοι. Διαφέρουν στο ότι ενσωματώνουν διατάξεις μέτρησης και σύστημα ανάδρασης το οποίο χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ένα σερβομηχανισμό οδήγησης με σκοπό να ελεγχθεί είτε η ροπή, είτε η ταχύτητα του, είτε η θέση του. Μερικές φορές μάλιστα, έχουμε σύνδεση ειδικών ανεμιστήρων ώστε να εξασφαλίζεται η ψύξη του κινητήρα στις χαμηλές στροφές. Οι διατάξεις μέτρησης και ανάδρασης συνήθως ελέγχουν τις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος που οδηγούν το κινητήρα μέσω διαφόρων σημάτων και σε τυχόν εξωτερικές διαταραχές των παραμέτρων ταχύτητας, ροπής και θέσης ο σερβοκινητήρας αποκρίνεται ανάλογα και με γρήγορη ταχύτητα. Επίσης, η χρήση της ανάδρασης κάνει το σύστημα μας σχετικά ανεπηρέαστο σε πιθανές εξωτερικές διαταραχές και εσωτερικές μεταβολές των παραμέτρων του συστήματος.

Ο σερβομηχανισμός οδήγησης συνίσταται στο σερβοενισχυτή που αποτελεί ένα ξεχωριστό στοιχείο του σερβοσυστήματος. Ωστόσο το σύστημα ανάδρασης είναι ενσωματωμένο στο σερβοκινητήρα. Οι περισσότεροι σερβοκινητήρες φέρουν ενσωματωμένη μια παλμογεννήτρια αυξητικού ή απόλυτου τύπου και άλλα εξαρτήματα και συσκευές όπως: διάταξη απόσβεσης ταλαντώσεων, φρένο και κωδικοποιητή, σχήμα 1.1 (λεπτομερέστερη ανάλυση για τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένας σερβοκινητήρας, γίνεται στα σχήματα του παραρτήματος). Αν η παλμογεννήτρια είναι αυξητικού τύπου τότε παράγουν ένα συγκεκριμένο αριθμό παλμών ανά περιστροφή του άξονα του σερβοκινητήρα, ενώ αν είναι απόλυτου θέσεως τότε δίνουν στην έξοδό τους συγκεκριμένο αριθμό ως αποτέλεσμα μιας ακολουθίας bit. Και στις δύο περιπτώσεις τα σήματα μπορούν να μεταφερθούν στη μονάδα ελέγχου, όπου με τον κατάλληλο προγραμματισμό να επιτευχθεί ο βέλτιστος έλεγχος του σερβοκινητήρα. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να αφορά είτε στη θέση περιστροφής του άξονα ως προς τις 360 μοίρες που συνιστούν μια πλήρη περιστροφή, είτε στην ταχύτητα περιστροφής του άξονα, είτε στην αναπτυσσόμενη σε αυτόν ροπή.



Σχήμα 1.1: Σερβοκινητήρας με σύστημα ψηκτρών-συλλέκτη και ενσωματωμένο κωδικοποιητή, ταχογεννήτρια και φρένο.

Αν εξετάσει κανείς τους σερβοκινητήρες από τη σκοπιά των ηλεκτροκινητήρων, από λειτουργική άποψη κύριο γνώρισμα τους είναι η ικανότητά τους να αναπτύσσουν μεγάλες επιταχύνσεις, όταν ξεκινάμε από πλήρη ακινησία δηλαδή να έχει μικρή ροπή αδράνειας και μεγάλη ροπή στρέψης. Για να πετύχουμε αυτά τα δύο πρέπει:

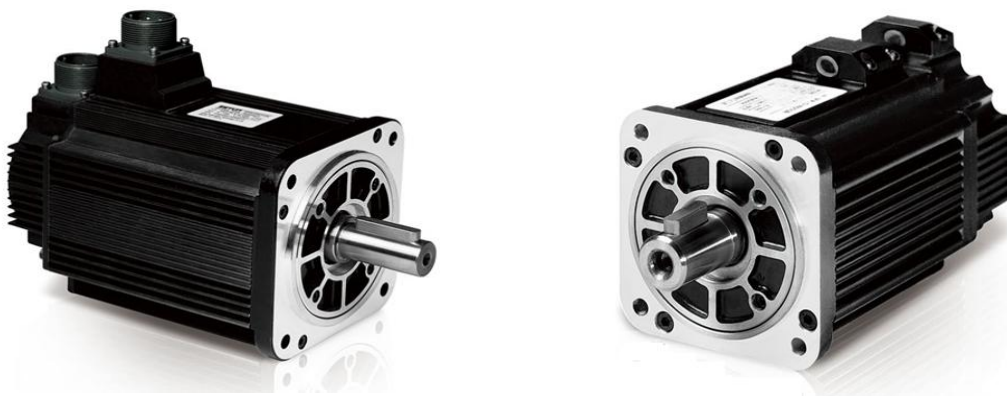
- Ο δρομέας να έχει μεγάλο μήκος και μικρή διάμετρο.
- Να υπάρχουν περιελίξεις αντισταθμίσεως οι οποίες επιτρέποντας ανάπτυξη μεγαλύτερων ρευμάτων αυξάνουν τη ροπή στρέψης.

- Για μικρής ισχύος κινητήρες προβλέπεται μόνιμος μαγνήτης μέσα στους πόλους του οποίου και γύρω από ένα μόνιμο στέλεχος (όπως στα όργανα κινητού πλαισίου) περιστρέφεται το τυλίγμα του ρότορα.
- Να είναι μειωμένη η σταθερά χρόνου L/R του τυλίγματος του ρότορα.

1.3 Κατηγορίες σερβοκινητήρων

Οι σερβοκινητήρες διακρίνονται στις πιο κάτω κατηγορίες:

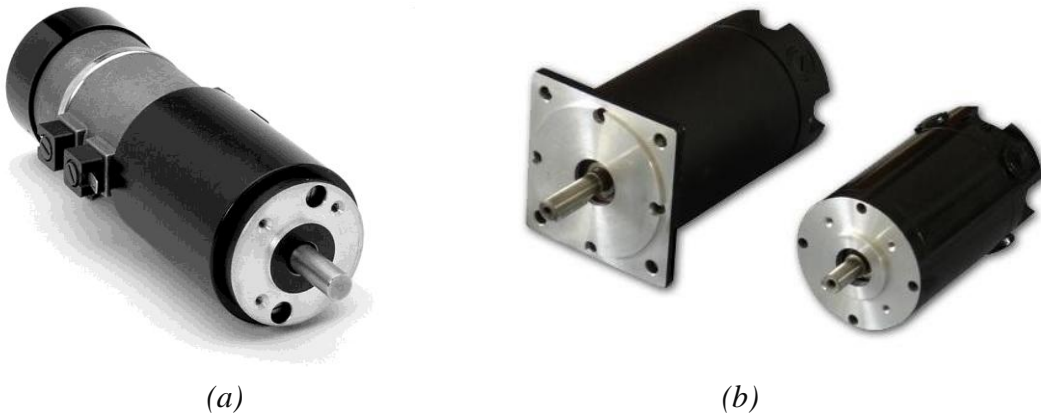
- Πνευματικοί: κάνουν χρήση της πνευματικής ενέργειας που παρέχεται από ένα συμπιεστή και τη μετασχηματίζουν σε μηχανική ενέργεια με τη βοήθεια πιστονιών ή στροβίλων. Οι κινητήρες αυτοί παρουσιάζουν ιδιαίτερες δυσκολίες στον έλεγχο, εξαιτίας της αναπόφευκτης συμπιεστότητας του χρησιμοποιούμενου ρευστού. Για το λόγο αυτό και δεν χρησιμοποιούνται συχνά, εκτός από εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλή ακρίβεια, όπως το άνοιγμα και το κλείσιμο της αρπάγης του εργαλείου.
- Υδραυλικοί: μετασχηματίζουν την υδραυλική ενέργεια μίας δεξαμενής σε μηχανική, με χρήση κατάλληλων αντλιών. Οι κινητήρες αυτοί μπορούν να υλοποιήσουν τόσο μεταφορική (χρήση ενός εμβόλου) όσο και περιστροφική κίνηση (χρήση αξονικών ή ακτινικών εμβόλων).
- Ηλεκτρικοί: μετασχηματίζουν την ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου διανομής ηλεκτρισμού σε μηχανική. Τα πιο συνηθισμένα είδη ηλεκτρικών κινητήρων είναι οι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος που διακρίνονται σε μονοφασικούς και



Σχήμα 1.2: Σερβοκινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος Μόνιμου Μαγνήτη.

τριφασικούς, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς σύστημα ψήκτρών-συλλέκτη (*brushless dc servomotors*), οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης και οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών (*permanent-magnet servomotors*). Οι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται στους σερβοκινητήρες είναι οι κεραμικοί μαγνήτες, οι μαγνήτες AlNiCo (αλουμινίου- νικελίου -κοβαλτίου), Σαμαρίου Κοβαλτίου και Νεοδύμιου (*rare*

earth). Απαραίτητα συνοδευτικά εξαρτήματα αυτών των κινητήρων είναι ένας μετασχηματιστής, ένας ανορθωτής τάσης και ένας πυκνωτής. Τα εξαρτήματα αυτά μετασχηματίζουν την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή κατάλληλου μεγέθους και στη συνέχεια την αποθηκεύουν.



Σχήμα 1.3: (α) Σερβοκινητήρας Συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (*brushless*)
(β) Σερβοκινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

Οι υδραυλικοί και ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες παρουσιάζουν ποικίλα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τη χρήση τους στις διάφορες εφαρμογές.

Σε επίπεδο εγκατάστασης οι ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες εμφανίζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- ευρεία διάθεση της χρησιμοποιούμενης ηλεκτρικής ενέργειας,
- χαμηλό κόστος και μεγάλη ποικιλία προϊόντων,
- υψηλός συντελεστής μετατροπής ισχύος,
- εύκολη συντήρηση,
- δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον εργασίας,
- είναι διαθέσιμοι σ' ένα ευρύτερο φάσμα τιμών ισχύος.

Ταυτόχρονα όμως παρουσιάζουν τους παρακάτω περιορισμούς:

- χρειάζονται ειδική προστασία, ειδικά όταν λειτουργούν σε εύφλεκτο περιβάλλον,
- εξαιτίας της επίδρασης της βαρύτητας (π.χ. σε ένα ρομποτικό βραχίονα) μπορεί να προκληθεί βραχυκύκλωμα. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται η χρήση ειδικών φρένων.

Από την άλλη πλευρά οι υδραυλικοί σερβοκινητήρες παρουσιάζουν αρκετά αξιοσημείωτα μειονεκτήματα. Τα πιο σημαντικά είναι:

- η ανάγκη ύπαρξης πηγής υδραυλικής ισχύος,
- το υψηλό κόστος, μικρή ποικιλία προϊόντων και με ιδιαίτερες δυσκολίες κατασκευής τους σε μικρές διαστάσεις,

- ο χαμηλός συντελεστής μετατροπής ισχύος,
- οι αυξημένες ανάγκες συντήρησης,
- η ρύπανση του περιβάλλοντος εργασίας εξαιτίας διαρροών υδραυλικού ρευστού.

Παρόλα αυτά οφείλουμε να σημειώσουμε ότι οι υδραυλικοί κινητήρες:

- δεν παρουσιάζουν προβλήματα βραχυκυκλώσεων,
- είναι αυτολυπαινόμενοι, με το υδραυλικό ρευστό να εκτελεί εκτός των άλλων χρέη ψυκτικού μέσου,
- είναι ιδιαίτερος ασφαλείς σε επικίνδυνα περιβάλλοντα,
- παρουσιάζουν πολύ υψηλές σχέσεις ισχύος-βάρους.

Αν εξετάσουμε τις δύο παραπάνω κλάσεις κινητήρων από πλευράς λειτουργίας θα διαπιστώσουμε ότι και οι δύο τύποι σερβοκινητήρων παρουσιάζουν καλή δυναμική συμπεριφορά, αν και οι ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες εμφανίζουν μεγαλύτερη ευκολία ελέγχου. Η παρατήρηση αυτή σχετίζεται με την άμεση εξάρτηση της δυναμικής συμπεριφοράς των υδραυλικών σερβοκινητήρων από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το χρησιμοποιούμενο ρευστό. Επίσης οι ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες δίνουν χαμηλές ροπές σε υψηλές ταχύτητες, γι' αυτό και σε διάφορες εφαρμογές που απαιτούνται υψηλές ροπές σε χαμηλές ταχύτητες είναι αναγκαία η χρήση μειωτήρων. Απ' την άλλη, οι υδραυλικοί σερβοκινητήρες είναι σε θέση να δημιουργήσουν μεγάλες ροπές σε μικρές ταχύτητες, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η ενδιάμεση χρήση μειωτήρων.

1.3.1 Ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες

1.3.1.1 Ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες περιστροφικής κίνησης

Οι βασικότεροι τύποι ηλεκτρικών σερβοκινητήρων περιστροφικής κίνησης είναι οι εξής:

Κινητήρες συνεχούς ρεύματος: απαιτούν πιο απλό κι οικονομικό έλεγχο προσφέροντας ικανοποιητική δυναμική συμπεριφορά. Ωστόσο, έχουν μικρή πυκνότητα ισχύος, υψηλό κατασκευαστικό κόστος και κυρίως, υψηλό κόστος συντήρησης. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται ακόμη σε πολλά σερβοκινητήρια συστήματα, αλλά αντικαθίστανται συνεχώς από τους σημαντικά πλεονεκτικότερους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη χωρίς συλλέκτη.

Σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης: αντέχουν σε θερμικές καταπονήσεις, έχουν μικρή αδράνεια και μικρό κόστος κατασκευής. Ωστόσο, μειονεκτούν ως προς το βαθμό απόδοσης και την πυκνότητα ισχύος σε σύγκριση με τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη και συνεπώς έχουν περιορισμένη εφαρμογή ως σερβοκινητήρες. Οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης έχουν απλή κατασκευή, μπορούν να αναπτύξουν πολύ

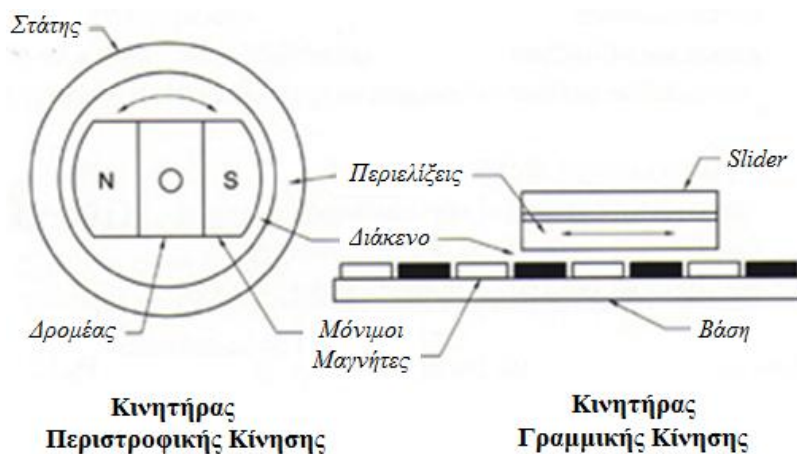
μεγάλες ταχύτητες, έχουν απλό κι οικονομικό έλεγχο κι ανοχή σε σφάλματα φάσεων. Ωστόσο, παράγουν ταλαντώσεις ροπής κι έντονο ακουστικό θόρυβο με αποτέλεσμα η χρησιμοποίησή τους σε σερβοκινητήρια συστήματα να δικαιολογείται μόνο όταν τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν σε σύγκριση με τα μειονεκτήματα είναι σημαντικά για την εφαρμογή.

Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη: είναι οι κινητήρες που συγκεντρώνουν τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά που απαιτεί ένα σερβοκινητήριο σύστημα, όπως μεγάλη πυκνότητα ισχύος, μικρή αδράνεια, σταθερή ροπή κι υψηλό βαθμό απόδοσης. Η τεχνική που χρησιμοποιείται συνήθως για τον έλεγχο των σερβοκινητήρων είναι η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου, γιατί επιτυγχάνει ανεξάρτητο έλεγχο της διέγερσης ως προς τον έλεγχο του ρεύματος φορτίου. Έτσι, έχουμε άμεσο έλεγχο της ροπής με πολύ γρήγορη απόκριση του κινητήρα σε μεταβατικά φαινόμενα (γρήγορες επιταχύνσεις κι επιβραδύνσεις του κινητήρα) καθώς κι ακρίβεια σε έλεγχο ταχύτητας και θέσης.

Επαγωγικοί ή ασύγχρονοι κινητήρες: έχουν μικρό κόστος κατασκευής και σχετικά μικρή ροπή αδράνειας, αλλά κυρίως μειονεκτούν ως προς τη πυκνότητα ισχύος σε σύγκριση με τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Επίσης, στους επαγωγικούς κινητήρες είναι περισσότερο πολύπλοκη η εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου κι η υλοποίησή του εξαρτάται από τις παραμέτρους της μηχανής. Οι επαγωγικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα μεταβλητής ταχύτητας βαθμωτού ελέγχου V/f, ενώ η χρήση τους ως σερβοκινητήρες είναι περιορισμένη.

1.3.1.2 Ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες γραμμικής κίνησης

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τους πιο πάνω τύπους ηλεκτρικών σερβοκινητήρων περιστροφικής κίνησης, υπάρχουν οι αντίστοιχοι σερβοκινητήρες γραμμικής κίνησης, *σχήμα 1.4 και 1.5.*



Σχήμα 1.4: Σύγχρονος σερβοκινητήρας μόνιμου μαγνήτη (i) περιστροφικής και (ii) γραμμικής κίνησης.

Συνήθως, οι μηχανές γραμμικής κίνησης χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις ευθύγραμμης κίνησης περιορισμένου μήκους, όπως μηχανές διαλογής προϊόντων, ειδικοί ανελκυστήρες, μηχανές κατεργασίας υλικών, οχήματα μεταφοράς, σχεδιαστικά όργανα ακριβείας, εργαλειομηχανές κλπ.



Σχήμα 1.5: Σερβοκινητήρας γραμμικής κίνησης (linear servo motor).

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα του ευθύγραμμου κινητήρα έναντι του περιστροφικού είναι τα εξής :

- *Υψηλές ταχύτητες:* Η μέγιστη ταχύτητα ενός ευθύγραμμου κινητήρα , περιορίζεται μόνο από την τάση δικτύου και την ταχύτητα των ηλεκτρονικών έλεγχου. Οι χαρακτηριστικότερες ταχύτητες για τους ευθύγραμμους κινητήρες είναι 3 m/s και ορισμένες φορές πάνω από 5 m/s.
- *Γρήγορη απόκριση:* Το ποσοστό απόκρισης ενός συστήματος οδήγησης ευθύγραμμου κινητήρα, μπορεί να είναι 100 φορές μεγαλύτερο από αυτό μιας μηχανικής μετάδοσης. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερες επιταχύνσεις και μικρότερους χρόνους αποκατάστασης, και κατά συνέπεια μεγαλύτερη απόδοση.
- *Ακαμψία:* Επειδή δεν υπάρχει κανένας μηχανικός σύνδεσμος, η αύξηση της ακαμψίας είναι απλά θέμα κέρδους και φορτίου. Το εύρος κίνησης μπορεί να είναι μεγαλύτερο από αυτό ενός φορτίου οδηγούμενου από σύστημα τροχών. Ωστόσο , εξαρτάται από τις δυνατότητες της ιπποδύναμης του συστήματος, το διαθέσιμο φορτίο και τις συσκευές ανατροφοδότησης.
- *Μηδενικοί κραδασμοί:* Χωρίς μηχανικούς συνδέσμους δεν υπάρχουν κραδασμοί. Ωστόσο , σε περιπτώσεις διόρθωσης της πορείας ενός οχήματος, υπάρχουν αναπόφευκτες αναταράξεις.
- *Ελεύθερη συντήρηση:* Επειδή οι σύγχρονοι ευθύγραμμοι κινητήρες δεν έχουν συνδεδεμένα εξαρτημένα μέρη, η συντήρηση και η επισκευή τους μπορεί να είναι ανεξάρτητη.

Εξίσου, βασικά μειονεκτήματα υπάρχουν και είναι επιγραμματικά τα εξής :

- α) μεγάλο κόστος,

- β) υψηλών απαιτήσεων και πολυπλοκότητας συστήματα οδήγησης και έλεγχου
- γ) μεγαλύτερη δύναμη / μονάδα φορτίου
- δ) μεγάλες θερμικές απώλειες , άρα αναγκαιότητα συστημάτων ψύξης και διαχείρισης θερμοκρασίας
- ε) Ελάχιστη (έως καθόλου) τριβή , ούτως ώστε να δυσκολεύει η πέδηση και ο έλεγχος της ταχύτητας.

Αν και η παρουσίαση τους στο παρόν σύγγραμμα είναι συνοπτική, η καινοτόμα τεχνολογία και οι μεγάλες δυνατότητες εξέλιξης και εφαρμογής στην καθημερινή ζωή των ευθύγραμμων κινητήρων, είναι φανερή. Για το λόγο αυτό, σχεδόν όλες οι προηγμένες τεχνολογικά χώρες στον κόσμο, επενδύουν σημαντικό κομμάτι της μελλοντικής τους ανάπτυξης, βασιζόμενες στην τεχνολογία του ευθύγραμμου κινητήρα.

1.4 Κριτήρια επιλογής σερβοκινητήρων

Οπώς έχουμε ήδη αναφέρει, τα είδη των σερβοκινητήρων ποικίλλουν. Κατά την επιλογή του κατάλληλου κινητήρα για την υλοποίηση μίας συγκεκριμένης εφαρμογής, υπάρχουν κάποια κριτήρια τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Για παράδειγμα, η ταχύτητα απόκρισης, η ακρίβεια και το σφάλμα που οφείλεται σε εξωτερική διαταραχή, σε συνδιασμό με το κόστος, τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία του κινητήρα. Επίσης, η επιλογή ενός σερβοκινητήρα γίνεται έχοντας υπόψη ότι η ισχύς του θα πρέπει να καλύπτει την ισχύ του φορτίου (ωφέλιμη) αλλά και τις τριβές (απώλειες) της διάταξης. Πέραν αυτού ο σερβοκινητήρας πρέπει να λειτουργεί στις επιθυμητές ταχύτητες και να μπορεί να δίνει την απαραίτητη επιτάχυνση στο δρομέα και στο φορτίο. Η κατηγοριοποίηση των σερβοκινητήρων, γίνεται συνήθως βάση της ταχύτητας και του βάρους τους.

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει σημαντική προσπάθεια για βελτίωση της απόδοσης των σερβοκινητήρων και γι' αυτό το λόγο δημιουργήθηκε μία ευρεία ποικιλία, με συγκρίσιμα μεταξύ τους χαρακτηριστικά και για διάφορες τιμές ισχύος. Στο παρελθόν οι υδραυλικοί σερβοκινητήρες μονοπωλούσαν το ενδιαφέρον, κυρίως λόγω της υψηλής ισχύος που είχαν σε σχέση με το βάρος ή το μέγεθος τους. Όμως τα διάφορα προβλήματα και απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα η ανάγκη υδραυλικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής, οδήγησαν τους κατασκευαστές στους ηλεκτρικούς κινητήρες. Ο καλύτερος σχεδιασμός και κατασκευή, η αντοχή σε μεγαλύτερες υπερφόρτωσεις για εύλογα χρονικά διαστήματα, καθώς και πολλά άλλα πλεονεκτήματα, έχουν καταστήσει τους ηλεκτρικούς κινητήρες πιο ελκυστικούς για τον χρήστη.

Σε πλήθος εφαρμογών πρέπει να επιλέγει όχι μόνο ο σερβοκινητήρας, αλλά και το σύστημα σερβοκίνησης του οποίου τμήματα είναι η διάταξη ανάδρασης (της θέσης,

ταχύτητας, ροπής) και η διάταξη τροφοδοσίας. Χρησιμοποιούνται διάφορα κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου συστήματος σερβοκίνησης για κάθε εφαρμογή.

1.4.1 Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά

Το μέγεθος, το βάρος και η αδράνεια του κινητήρα: Πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν οι περιορισμοί που αφορούν τη διάμετρο, το μήκος και το βάρος του κινητήρα. Πολλές φορές το μέγεθος (όγκος) ενός σερβοκινητήρα παίζει καθοριστικό ρόλο σε μία εφαρμογή, γι'αυτό και είναι ένα από τα κριτήρια επιλογής που πρέπει να εξετάζουμε. Σε περίπτωση εφαρμογών μικρής ισχύος, όπου ταυτόχρονα απαιτείται μικρό μήκος και βάρος, επιλέγεται συνήθως ένας κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (συνεχούς ρεύματος ή σύγχρονος).

Η τοποθέτηση του κινητήρα και ο τρόπος σύνδεσής του με τον κινούμενο μηχανισμό. Υπάρχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ κλασικών «εγκιβωτισμένων» κινητήρων με δικό τους κέλυφος και άξονα και κινητήρων «απ' ευθείας οδήγησης» οι οποίοι είτε είναι συναρμολογούμενοι, δηλαδή χωρίς κέλυφος, είτε με κέλυφος, αλλά προσαρμόζονται στον άξονα του κινούμενου μηχανισμού. Ένας εγκιβωτισμένος κινητήρας έχει το πλεονέκτημα της απλής και φθηνής κατασκευής αλλά η σύνδεση του άξονά του με τον κινούμενο μηχανισμό συνεπάγεται απώλειες κατά τη μετάδοση κίνησης και μειωμένη αξιοπιστία και ταχύτητα απόκρισης. Το αντίθετο συμβαίνει με τους κινητήρες «απευθείας οδήγησης» (direct drive).

1.4.2 Ηλεκτρομηχανικά χαρακτηριστικά

Απαιτούμενη ισχύς και συγκέντρωση ισχύος του κινητήρα (λόγος ισχύος προς μάζα): Η συγκέντρωση ισχύος εξαρτάται από τη δυνατότητα απαγωγής της θερμότητας απωλειών του κινητήρα. Όσο μικρότερες είναι οι απώλειες ή όσο καλύτερη είναι η ψύξη του κινητήρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση ισχύος. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν άμεσα το τύπο κινητήρων οι οποίοι μπορούν να επιλεγούν. Κατ' επέκταση και τους τύπους διατάξεων ανάδρασης και τροφοδοσίας. Για παράδειγμα εάν η ονομαστική ισχύς είναι μεγαλύτερη από 15 kW, τότε, για οικονομικούς λόγους, δεν προτείνεται η χρήση κινητήρων μόνιμου μαγνήτη.

Απαιτούμενη ροπή και η χαρακτηριστική της: Ο λόγος της ροπής προς την αδράνεια αποτελεί ένα από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά ενός συστήματος σερβοκίνησης. Επίσης η παρουσία βηματικής συνιστώσας ροπής λόγω ανισότροπης μαγνητικής αντίδρασης του δρομέα (cogging torque), ή η παρουσία παροδικών διακυμάνσεων (ripple) με το χρόνο είναι στοιχεία άμεσα συνδεδεμένα με τον τύπο του κινητήρα. Επομένως, μια χαρακτηριστική ροπής που δεν είναι επιθυμητή σε μία εφαρμογή, οδηγεί στην απόρριψη κάποιων τύπων κινητήρων.

Εύρος ταχύτητας και απόκριση σε μεταβολές της: Για παράδειγμα ένας κινητήρας μόνιμου μαγνήτη αναμένεται να έχει σημαντικά μεγαλύτερες επιταχύνσεις (μικρότερους χρόνους απόκρισης) από ένα ασύγχρονο κινητήρα, λόγω της μεγαλύτερης συγκέντρωσης ισχύος και μικρότερου λόγου ροπής / αδράνεια.

Εναισθησία σε μεταβολές, των παραμέτρων του σερβοκινητήρα: Οι εσωτερικές παράμετροι κάθε ηλεκτρικής μηχανής, όπως οι αντιστάσεις, οι αντιδράσεις των τυλιγμάτων και η πυκνότητα μαγνητικής ροής των μονίμων μαγνητών, αλλάζουν με τη θερμοκρασία, την ένταση του ρεύματος και τη συχνότητα. Για παράδειγμα στους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη υπάρχει περιορισμός τόσο στη θερμοκρασία όσο και στο μαγνητικό πεδίο του στάτη για να αποφευχθεί περίπτωση απομαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών.

1.4.3 Σύγκριση βασικών τύπων σερβοκινητήρων

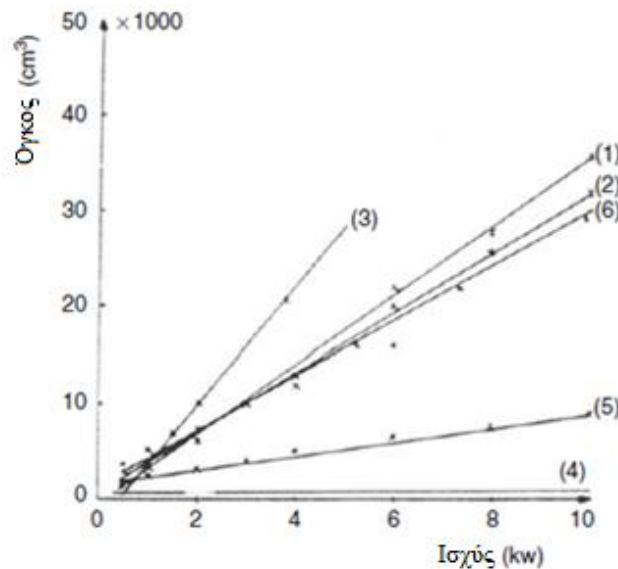
Η επιλογή του σερβοκινητήρα εξαρτάται από κάποια συγκεκριμένα κριτήρια και την προτεραιότητα τους στην εφαρμογή όπου θα χρησιμοποιηθεί, συμπεριλαμβανομένης της ταχύτητας απόκρισης, της επίδρασης σε εξωτερική ροπή, του μεγέθους, του κόστους, του κόστους λειτουργίας, της αξιοπιστίας και της διαθεσιμότητας. Όπως θα δούμε και πιο κάτω, απαραίτητο κριτήριο στην επιλογή ενός συγκεκριμένου κινητήρα για την κάλυψη των απαιτήσεων της εφαρμογής ως προς τη δυναμική συμπεριφορά, είναι η σύγκριση της ταχύτητας απόκρισης και της επίδρασης της εξωτερικής ροπής μεταξύ των διαφόρων τύπων σερβοκινητήρων. Στα διαγράμματα που ακολουθούν οι αριθμοί αντιστοιχούν στους πιο κάτω τύπους σερβοκινητήρων:

1. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος κεραμικού μαγνήτη
2. Επαγωγικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος
3. Βηματικοί σερβοκινητήρες
4. Ηλεκτροϋδραυλικοί σερβοκινητήρες
5. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος με μαγνήτη Νεοδυμίου (rare earth magnet)
6. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (brushless)

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι στα διαγράμματα αυτά θεωρείται κοινή ονομαστική ταχύτητα 1500 ΣΑΛ (Στροφές Ανά Λεπτό) και ονομαστική ισχύς μέχρι 10KW για όλους τους τύπους σερβοκινητήρων.

Στο πρώτο διάγραμμα (σχήμα 1.6), φαίνεται η μεταβολή του όγκου σε σχέση με την ονομαστική ισχύ του κάθε σερβοκινητήρα. Παρατηρούμε ότι οι υδραυλικοί κινητήρες έχουν τον μικρότερο όγκο για μια δεδομένη ισχύ, χωρίς να περιλαμβάνεται ο όγκος του τροφοδοτικού. Επίσης, η ευθεία γραμμή δείχνει ότι ο μικρότερος υδραυλικός κινητήρας μπορεί να παράγει ισχύ μέχρι 10 KW, κάτι το οποίο μπορεί να αποτελεί μειονέκτημα για τους υδραυλικούς σερβοκινητήρες. Όσο αφορά τους ηλεκτρικούς σερβοκινητήρες, την

μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με το μέγεθος, παράγουν οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με μαγνήτη Νεοδυμίου. Δεν περιλαμβάνεται ούτε εδώ ο όγκος της μονάδας ισχύος, η οποία δεν πρέπει να είναι πάρα πολύ μεγάλη. Στην συνέχεια ακολουθούν οι σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (*brushless*) και οι επαγωγικοί σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.

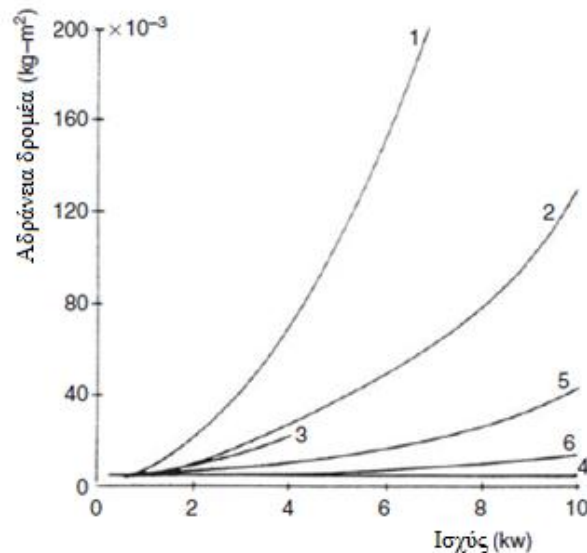


Σχήμα 1.6: Διάγραμμα του όγκου(μεγέθους)-ισχύος για τους διάφορους τύπους σερβοκινητήρων.

Αμέσως μετά έχουμε τους σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος κεραμικού μαγνήτη που έχουν μεγαλύτερο όγκο σε σχέση με την ονομαστική ισχύ, απ'ότι οι επαγωγικοί σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι βηματικοί κινητήρες δεν είναι πολύ αποτελεσματικοί αφού όσο αυξάνεται η ισχύς αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό και το όγκος και μόνο σε μικρές τιμές ονομαστικής ισχύος μπορούν να συναγωνιστούν με τους άλλους τύπους κινητήρες. Σε πολύ χαμηλές τιμές ονομαστικής ισχύος, η αναλογία όγκου και ισχύος είναι παρόμοια για όλους τους τύπους σερβοκινητήρες και σε αυτές τις περιπτώσεις η επιλογή του κινητήρα εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα απόκρισης και την επίδραση εξωτερικής ροπής.

Η ταχύτητα απόκρισης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την αδράνεια του σερβοσυστήματος, σχήμα. 1.7. Στο σχήμα αυτο συγκρίνεται η αδράνεια του κάθε σερβοκινητήρα χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η αδράνεια στον άξονα του. Παρατηρούμε ότι για διάφορες τιμές ισχύος οι υδραυλικοί κινητήρες έχουν τη μικρότερη αδράνεια. Από τους ηλεκτρικούς κινητήρες, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες είναι αυτοί που έχουν την μικρότερη αδράνεια και αποτελούν την αντικατάσταση των υδραυλικών κινητήρων όταν λαμβάνεται υπόψη η ταχύτητα απόκρισης, αφού όταν έχουμε μικρότερη αδράνεια αυξάνεται η δυνατότητα για γρήγορη απόκριση.

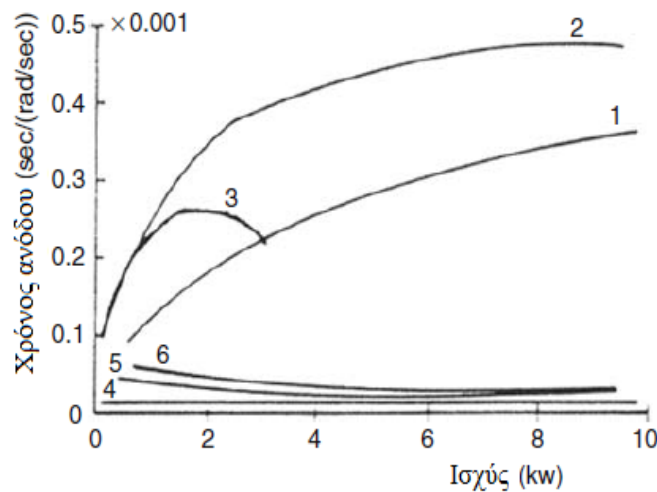
Οι βηματικοί σερβοκινητήρες είναι διαθέσιμοι μόνο για χαμηλές τιμές ονομαστικής ισχύος και η αδράνεια τους είναι υψηλότερη από αυτή των υδραυλικών κινητήρων, των κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς σύστημα ψυκτρών-συλλέκτη και των κινητήρων συνεχούς ρεύματος με 'rare earth' μαγνήτη.



Σχήμα 1.7: Διάγραμμα αδράνειας δρομέα-ισχύος για τους διάφορους τύπους σερβοκινητήρων.

Η αδράνεια των επαγωγικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος για μικρές τιμές ονομαστικής ισχύος είναι μικρή και αυξάνεται ραγδαία καθώς αυξάνεται και η ονομαστική ισχύς. Η αδράνεια των σερβοκινητήρων συνεχούς ρεύματος κεραμικού μαγνήτη, για χαμηλές τιμές ισχύος, είναι παρόμοια με την αδράνεια των άλλων σερβοκινητήρων αλλά αυξάνεται ραγδαία καθώς αυξάνεται η ονομαστική τιμή ισχύος.

Στο διάγραμμα του σχήματος 1.8 παρουσιάζεται ο χρόνος ανόδου (*saturated settling time*) των σερβοκινητήρων σε σχέση με την ισχύ, χωρίς αδράνεια φορτίου. Χρόνος ανόδου είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε η έξοδος να αποκτήσει για πρώτη φορά την τιμή της μόνιμης κατάστασης ισορροπίας, δηλαδή την τιμή του βηματικού σήματος εισόδου. Παρατηρώντας το σχήμα, διαπιστώνουμε ότι οι υδραυλικοί σερβοκινητήρες έχουν μικρότερο χρόνο ανόδου σε σχέση με τους ηλεκτρικούς σερβοκινητήρες. Η αντικατάσταση των υδραυλικών κινητήρων από ηλεκτρικούς κινητήρες θα είναι καλύτερη για εφαρμογές με χαμηλές τιμές ισχύος. Όσο αφορά τους ηλεκτρικούς κινητήρες, τον ταχύτερο χρόνο απόκρισης έχουν οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη Νεοδυμίου και οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες και στη συνέχεια ακολουθούν οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος κεραμικού μαγνήτη, οι βηματικοί κινητήρες και οι επαγωγικοί σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχήμα 1.8: Διάγραμμα χρόνου ανόδου-ισχύος για τους διάφορους τύπους σερβοκινητήρων, χωρίς αδράνεια φορτίου.

Όπως είναι αναμενόμενο, κανένας σερβοκινητήρας δεν υπερέχει σε όλα τα πιο πάνω χαρακτηριστικά και η καταλληλότητα του εξαρτάται κυρίως από την εφαρμογή που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Όσο αφορά το φορτίο αδρανείας και την απαιτούμενη ισχύ της εφαρμογής, διακρίνουμε τις πιο κάτω γενικές περιπτώσεις:

1. *Μικρό φορτίο αδρανείας και χαμηλή ισχύς:* Γι' αυτούς τους τύπους εφαρμογών, οι υδραυλικοί κινητήρες παρέχουν την υψηλότερη ταχύτητα απόκρισης. Οι πιο ανταγωνιστικοί κινητήρες, ως προς τον υδραυλικό κινητήρα, είναι οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με μαγνήτες Νεοδυμίου και οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς σύστημα ψύκτρων-συλλέκτη. Η επίδραση της εξωτερικής ροπής σχετικά με την ταχύτητα ενός υδραυλικού κινητήρα είναι μεγαλύτερη από ότι τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος και συνεχούς ρεύματος κεραμικού μαγνήτη και οι βηματικοί κινητήρες έχουν χαμηλότερη ταχύτητα απόκρισης από τους υδραυλικούς κινητήρες και τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με μαγνήτες Νεοδυμίου.

2. *Μεγάλο φορτίο αδρανείας και χαμηλή ισχύς:* Υπό αυτές τις συνθήκες, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος παρέχουν την καλύτερη ταχύτητα απόκρισης. Ακολουθούν οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, οι υδραυλικοί κινητήρες και μετά οι βηματικοί κινητήρες. Η επίδραση εξωτερικής ροπής είναι μικρότερη στους υδραυλικούς απ'ότι στους ηλεκτρικούς κινητήρες.

3. *Μικρό φορτίο αδρανείας και υψηλή ισχύς:* Σε αυτή τη περίπτωση οι υδραυλικοί κινητήρες παρέχουν την μεγαλύτερη ταχύτητα απόκρισης. Ακολουθούν οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος και οι βηματικοί κινητήρες οι οποίοι έχουν την μικρότερη ταχύτητα αντίδρασης. Όταν όμως έχουμε υψηλά ποσοστά ισχύος, τότε οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος συναγωνίζονται τους συμβατικούς

κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Η επίδραση εξωτερικής ροπής είναι μικρότερη στους ηλεκτρικούς κινητήρες, απο ό,τι στους υδραυλικούς κινητήρες.

4. *Μεγάλο φορτίο αδρανείας και υψηλή ισχύς:* Υπό αυτές τις συνθήκες, οι ηλεκτρικοί κινητήρες παράγουν μεγαλύτερη ταχύτητα απόκρισης απο ό,τι οι υδραυλικοί κινητήρες, ενώ ακολουθούν οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος μαζί με τους συμβατικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Η επίδραση εξωτερικής ροπής είναι μικρότερη στους υδραυλικούς κινητήρες.

Εάν για μία συγκεκριμένη εφαρμογή, η χρήση σερβοκινητήρων ικανοποιεί τις απαιτήσεις δυναμικής συμπεριφοράς, τότε η τελική απόφαση εξαρτάται συνήθως από το κόστος, την αξιοπιστία, και τη διαθεσιμότητα του κάθε κινητήρα.

1.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σερβοκινητήρων

Πλεονεκτήματα:

- Ο σερβοκινητήρας έχει την ικανότητα να προσδίδει μεγάλη ροπή (ή επιτάχυνση) κατά τη στιγμή της εκκίνησης και έχει πολύ μικρή ροπή αδράνειας. Δηλαδή στους σερβοκινητήρες ο λόγος “ροπή εκκίνησης/ροπή αδράνειας” είναι πολύ μεγάλος πράγμα που δεν συμβαίνει στους κοινούς κινητήρες.
- Δυνατότητα περιστροφής σε υψηλές ταχύτητες.
- Δυνατότητα παραγωγής μεγάλων τιμών ροπής.
- Η μεγάλη αυτή μηχανική ροπή τον καθιστά ικανό να οδηγήσει βαριά φορτία.
- Έχει μικρή καθυστέρηση το οποίο συνεπάγεται γρήγορο χρόνο αντίδρασης.
- Έχει αρνητική ανατροφοδότηση η οποία εξασφαλίζει καλύτερο έλεγχο της λειτουργίας του (μείωση της ευαισθησίας του συστήματος σε μεταβολές των παραμέτρων ή σε ανεπιθύμητες διαταραχές – αυτό βέβαια είναι για ελεγκτες)
- Ελέγχεται εύκολα από τους σύγχρονους ελεγκτές ρομποτικών εφαρμογών.
- Υψηλή αποδοτικότητα. Σε μικρά φορτία μπορεί να πλησιάσει και το 90%.
- Μεγάλη ποικιλία εμπορικών μοντέλων και σε διάφορα μεγέθη.
- Δεν παρουσιάζουν προβλήματα κραδασμών και παράγουν ελάχιστο θόρυβο σε σχέση με άλλους κινητήρες.

Μειονεκτήματα:

- Χρειάζεται μεγάλη ένταση ρεύματος για να εκκινήσει.
- Το κόστος του συστήματος σερβοκίνησης είναι υψηλό. Περιλαμβάνει το κόστος του σερβοκινητήρα, της διάταξης τροφοδοσίας και της διάταξης ελέγχου.
- Υπάρχει πιθανότητα δυσλειτουργίας, εφόσον υπερφορτωθεί μηχανικά.

- Υψηλή κατανάλωση.
- Δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε σύστημα ανοικτού βρόχου αφού απαιτείται ανατροφοδότηση. Το σύστημα κλειστού βρόχου μπορεί να αποτελέσει μειονέκτημα για τον κινητήρα, σε περιπτώσεις όπου ένα φυσικό εμπόδιο εμποδίζει την πορεία της κίνησης.
- Η πολυπλοκότητα του ελέγχου σε σχέση με άλλους κινητήρες.

1.6 Σύγκριση σερβοκινητήρων και βηματικών κινητήρων

Σε αρκετές εφαρμογές αυτομάτου ελέγχου οι κύριοι “ανταγωνιστές” των σερβοκινητήρων είναι οι βηματικοί κινητήρες. Και οι δύο τύποι κινητήρων έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Άρκετές από τις διαφορές τους αφορούν την κυρίως απόδοση τους και οφείλονται στον τρόπο σχεδίασής τους. Για παράδειγμα οι πόλοι ενός βηματικού κινητήρα είναι πολύ περισσότεροι πόλους από τους πόλους ενός σερβοκινητήρα και έτσι για μία περιστροφή απαιτείται ροή μεγαλύτερου ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τα τυλίγματα του. Επίσης, ο βηματικός κινητήρας σε υψηλές ταχύτητες υποβαθμίζει την ροπή του, φαινόμενο το οποίο μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη τάση τροφοδοσίας. Αντίθετα, ο μεγάλος αριθμός πόλων ενός βηματικού κινητήρα έχει ευεργετική επίδραση σε χαμηλότερες ταχύτητες, δίνοντας του έτσι ένα “πλεονέκτημα ροπής” σε σχέση με ένα σερβοκινητήρα ίδιου μεγέθους.

Μια άλλη διαφορά είναι ο τρόπος με τον οποίο ελέγχεται ο κάθε τύπος κινητήρα. Για τον έλεγχο των βηματικών κινητήρων χρησιμοποιείται η μέθοδος ανοικτού βρόχου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους, δεδομένου ότι δεν απαιτείται διάταξη ανάδρασης (π.χ. κωδικοποιητής, για τις περισσότερες εφαρμογές εντοπισμού θέσης). Ωστόσο, στα συστήματα με βηματικούς κινητήρες συνήθως έχουμε μετατροπή της περίσσειας ισχύος σε θερμότητα, δημιουργώντας έτσι μία σημαντική ποσότητα θερμότητας στο κινητήρα και στο μηχανισμό οδήγησης, κάτι το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις διάφορες εφαρμογές. Ο έλεγχος του σερβοσυστήματος λύνει αυτό το πρόβλημα τροφοδοτώντας τον κινητήρα με το ρεύμα που απαιτείται για να μετακινηθεί ή να κρατήσει το φορτίο. Μπορεί επίσης να παρέχει μέγιστη ροπή για επιτάχυνση, που πολλές φορές είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη συνεχή ροπή του κινητήρα. Ωστόσο, ένας βηματικός κινητήρας μπορεί επίσης να ελεγχθεί σ’ένα πλήρες σερβόςυστημα κλειστού βρόχου με την προσθήκη ενός κωδικοποιητή.

Οι βηματικοί κινητήρες, όσο αφορά τον εξοπλισμό τους είναι απλούστεροι από τους σερβοκινητήρες. Η συντήρησή τους είναι πολύ πιο εύκολη και το κόστος τους, κυρίως σε μικρές κινητήριες εφαρμογές, είναι μικρότερο. Όταν λειτουργούν εντός των παραμέτρων του σχεδιασμού τους δεν χάνουν τα βήματα τους και δεν απαιτούν κωδικοποιητές, ενώ όταν βρίσκονται σε κατάσταση ηρεμίας παραμένουν σταθεροί, κρατώντας τη θέση τους

χωρίς καμία διακύμανση, ειδικά σε δυναμικά φορτία. Γενικά, οι βηματικοί κινητήρες λειτουργούν καλύτερα για ταχύτητες κάτω των 2.000 ΣΑΛ, για χαμηλότερες τιμές της επιτάχυνσης και για υψηλή ροπή συγκράτησης. Οι σερβοκινητήρες είναι καλύτεροι σε εφαρμογές που απαιτούν ταχύτητες άνω των 2.000 ΣΑΛ και μεγάλη ροπή στις υψηλές ταχύτητες ή όπου απαιτείται υψηλή δυναμική απόκριση.

Συμπέρασμα: τα σερβοκινητήρια συστήματα ελέγχου ανταποκρίνονται καλύτερα στις υψηλές ταχύτητες και σε εφαρμογές υψηλής ροπής που περιλαμβάνουν δυναμικές μεταβολές φορτίου. Τα συστήματα ελέγχου με βηματικούς κινητήρες έχουν λιγότερο κόστος από τα αντίστοιχα σερβοκινητήρια και είναι ιδανικά κυρίως για εφαρμογές που απαιτούν σχετικά χαμηλές τιμές επιτάχυνσης, υψηλή ροπή συγκράτησης και ευελιξία για λειτουργία σε ανοιχτού ή κλειστού βρόχου σύστημα.

Για μία πλήρέστερη εικόνα των διαφορών μεταξύ των σερβοκινητήρων και των βηματικών κινητήρων, παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα τα χαρακτηριστικά ενός σερβοκινητήρα συνεχούς ρεύματος με σύστημα ψηκτρών-συλλέκτη και ενός υβριδικού βηματικού κινητήρα (πίνακας 1.1). Θεωρούμε ότι οι δύο κινητήρες είναι ίδιας ποιότητας και έχουν την ίδια ονομαστική ισχύ.

Χαρακτηριστικά	Σερβοκινητήρας ΣΡ (Brushed)	Βηματικός Κινητήρας (Hybrid)
Κόστος	Το κόστος ενός σερβοκινητήρα ή ενός σερβοσυστήματος είναι μεγαλύτερο από το κόστος ενός συστήματος βηματικού κινητήρα με την ίδια ονομαστική ισχύ.	Οι βηματικοί κινητήρες είναι γενικά φθηνότεροι από σερβοκινητήρες που έχουν την ίδια ονομαστική τιμή ισχύος.
Αξιοπιστία	Εξαρτάται από το περιβάλλον και το πόσο καλά προστατεύεται ο κινητήρας.	Υπερτερεί ελάχιστα επειδή δεν απαιτεί κωδικοποιητή ο οποίος μπορεί να αποτύχει.
Μέγεθος	Είναι διαθέσιμοι σε μια ευρεία ποικιλία μεγεθών, από μικροί έως πολύ μεγάλοι κινητήρες και μπορούν να λειτουργούν τεράστια μηχανήματα.	Στους βηματικούς κινητήρες δεν υπάρχουν και πολλές επιλογές μεγεθών όπως στους σερβοκινητήρες και κυρίως για μεγάλα μεγέθη.
Θόρυβος	Οι σερβοκινητήρες παράγουν πολύ λίγο θόρυβο σε σχέση με τους βηματικούς κινητήρες.	Παράγουν ένα μικρό βουητό λόγω της διαδικασίας ελέγχου. Ωστόσο ένα υψηλής ποιότητας σύστημα οδήγησης μειώνει το επίπεδο του θορύβου αυτού.
Παραγωγή Θερμότητας	Δεδομένου ότι το ρεύμα που αντλεί ο σερβοκινητήρας είναι ανάλογο με το φορτίο, η παραγωγή θερμότητας είναι πολύ χαμηλή.	Οι βηματικοί κινητήρες αντλούν μεγάλα ποσά ρεύματος ανεξάρτητα από το φορτίο. Η περίσσεια ισχύος μετατρέπεται θερμότητα.

Εφεδρική Ισχύς	Ένας σερβοκινητήρας μπορεί να παρέχει περίπου το 200% της συνεχούς ισχύος για μικρά χρονικά διαστήματα.	Οι βηματικοί κινητήρες δεν έχουν εφεδρική ισχύ.
Εύρος Ισχύος	Είναι διαθέσιμοι σε κινητήρες συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος και έτσι έχουν ένα πολύ ευρύ φάσμα διαθέσιμης ισχύος.	Το εύρος διαθέσιμης ισχύος στους βηματικούς κινητήρες είναι μικρότερο σε σχέση με τους σερβοκινητήρες.
Δονήσεις	Δεν δονούνται και δεν παρουσιάζουν προβλήματα κραδασμών.	Δονούνται ελαφριά, κυρίως λόγω του τρόπου λειτουργίας του κινητήρα.
Απόδοση	Γενικά οι σερβοκινητήρες είναι πολύ αποδοτικοί κινητήρες. Σε μικρά φορτία κυρίως, έχουμε απόδοση 80-90%.	Οι βηματικοί κινητήρες καταναλώνουν αρκετή ισχύ πολλή από την οποία μετατρέπεται σε θερμότητα. Συνήθως η απόδοσή τους είναι 70% και εξαρτάται από το σύστημα οδήγησης.
Διάρκεια Ζωής	Οι ψύκτρες κάθε 2000 ώρες λειτουργίας πρέπει να αντικαθίστανται. Αντικατάσταση μπορεί επίσης να χρειαστούν και οι κωδικοποιητές.	Το μοναδικό μέρος που φθείρεται είναι το ρουλεμάν. Αυτό δίνει στους βηματικούς κινητήρες ένα μικρό προβάδισμα.
Υπερφόρτωση	Υπάρχει πιθανότητα δυσλειτουργίας, εφόσον υπερφορτωθεί μηχανικά.	Στους βηματικούς κινητήρες είναι απίθανο να προκληθεί ζημια από μηχανική υπερφόρτωση.
Χαμηλή ταχύτητα υψηλή ροπή	Λειτουργούν πολύ καλά σε εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων, κυρίως λόγω της πολύ χαμηλής τριβής.	Παρέχουν περισσότερη ροπή σε χαμηλές ταχύτητες (RPM).
Υψηλή ταχύτητα υψηλή ροπή	Διατηρούν ονομαστική ροπή, στο 90% περίπου της ταχύτητας τους χωρίς φορτίο.	Οι βηματικοί κινητήρες χάνουν έως και 80% της μέγιστης ροπής τους, στο 90% της μέγιστης ταχύτητας τους.
Αναλογία ισχύος ως προς βάρος/μέγεθος	Οι σερβοκινητήρες, δεδομένου και της αποτελεσματικότητά τους, έχουν άριστη αναλογία ισχύος ως προς το βάρος και το μέγεθος τους.	Οι βηματικοί κινητήρες είναι λιγότερο αποτελεσματικοί από τους σερβοκινητήρες, Αυτό συνήθως σημαίνει και μικρότερη αναλογία ισχύος - βάρους/μεγέθους του κινητήρα.

Πίνακας 1.1: Σύγκριση σερβοκινητήρα ΣΡ με ψήκτρες και υβριδικού βηματικού κινητήρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΕΡΒΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

2.1 Επαγωγικοί σερβοκινητήρες

2.1.1 Δομή του επαγωγικού κινητήρα

Σε μια επαγωγική μηχανή η τάση στο δρομέα, που παράγει το ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα, ουσιαστικά επάγεται στα τυλίγματα του αντί να προσφέρεται σ' αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση. Η ειδοποιός διαφορά ενός επαγωγικού κινητήρα, είναι το γεγονός ότι για να κινηθεί δεν είναι απαραίτητο να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα διέγερσης.

Αναλυτικά, στο στάτη του κινητήρα εφαρμόζεται τριφασικό σύστημα τάσεων με αποτέλεσμα οι αγωγοί του στάτη να διαρρέονται από τριφασικό σύστημα ρευμάτων. Τα ρεύματα αυτά παράγουν το πεδίο του στάτη. Η τάση στα άκρα των αγωγών του δρομέα προκαλείται από την σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Επειδή οι αγωγοί του δρομέα συνθέτουν ένα επαγωγικό φορτίο, η μέγιστη τιμή του ρεύματος του δρομέα καθυστερεί σε σχέση με τη μέγιστη τιμή της τάσης του. Αν η ταχύτητα του δρομέα ήταν ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα, δε θα υπήρχε σχετική κίνηση των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη και δε θα αναπτυσσόταν τάση εξ'επαγωγής στα άκρα τους. Τελικά, ένας επαγωγικός κινητήρας μπορεί να

περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, αλλά δεν είναι ποτέ δυνατό να περιστρέφεται με ταχύτητα ακριβώς ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα.

Ο στάτης του επαγωγικού κινητήρα έχει την ίδια δομή με μια σύγχρονη μηχανή, ενώ ο δρομέας του έχει διαφορετική δομή. Οι τύποι των δρομέων που τοποθετούνται στο εσωτερικό του στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα είναι δύο. Ο ένας από αυτούς ονομάζεται δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού (*squirrel-cage rotor*) και ο άλλος δακτυλιοφόρος δρομέας (*wound rotor*). Οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού είναι χωρίς ψήκτρες, ενώ οι δακτυλιοφόροι δρομέα έχουν ολισθαίνουσες επιφάνειες στο δρομέα (δακτύλιους ολίσθησης και ψήκτρες). Ο τριφασικός επαγωγικός ηλεκτροκινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα χρησιμοποιείται στο 80% περίπου των εφαρμογών ηλεκτρικής κίνησης.



Σχήμα 2.1: Εξωτερικά τμήματα ενός επαγωγικού σερβοκινητήρα.

2.1.2 Ο επαγωγικός κινητήρας στα συστήματα οδήγησης

Οι επαγωγικοί κινητήρες τροφοδοτούνται με, σταθερή ή μη, εναλλασσόμενη ημιτονοειδή τάση και μπορούν να λειτουργούν συνδεδεμένοι απευθείας στο δίκτυο τροφοδοσίας. Συνεπώς οι επαγωγικοί κινητήρες ανήκουν στην κατηγορία των “κλασικών” κινητήρων στους οποίους δεν απαιτείται κάποια ηλεκτρική μονάδα οδήγησης, σε σύγκριση με τους “σύγχρονους” κινητήρες, η λειτουργία των οποίων απαιτεί την ύπαρξη μιας τέτοιας μονάδας. Οι επαγωγικοί κινητήρες κυρίως χρησιμοποιούνται σε απευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο ενώ για έλεγχο ταχύτητας χρησιμοποιούνται σε κινητήρια συστήματα βαθμωτού ελέγχου ταχύτητας V/f ανοικτού ή κλειστού βρόχου. Ως σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται σε κινητήρια συστήματα ανυσματικού ελέγχου σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν σημαντικές απαιτήσεις από την εφαρμογή ή επιβάλλεται χαμηλό κόστος εγκατάστασης.

Ο επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού είναι ο μόνος χωρίς ολισθαίνουσες επιφάνειες για την αγωγή σύνδεση του στρεφόμενου δρομέα με ακίνητα σημεία

τροφοδοσίας. Το χαρακτηριστικό αυτό του προσφέρει τα πλεονεκτήματα της μικρότερης ανάγκης για συντήρηση και της αξιοπιστίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος κατασκευής του, τον ανέδειξαν ως τον πιο ευρύ χρησιμοποιούμενο είδος κινητήρα στη σύγχρονη εποχή και έχει κυριαρχήσει στις μη ελεγχόμενες εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Η χρήση του δεν περιορίζεται μόνο σε αυτές τις εφαρμογές. Με τα χαρακτηριστικά που διαθέτει ξεχωρίζει σε σχέση με τους υπόλοιπους “κλασσικούς κινητήρες” και στα ελεγχόμενα κινητήρια συστήματα. Διαθέτει πολύ μικρότερη σταθερά χρόνου και μικρότερη ροπή αδράνειας από τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται καλύτερη δυναμική συμπεριφορά.

Τα χαρακτηριστικά όμως αυτά δεν επαρκούν για να συναγωνιστούν τους σύγχρονους κινητήρες σε σερβοκινητήρια συστήματα ειδικών εφαρμογών, όπου προτεραιότητα δίνεται στην μεγάλη ακρίβεια, στην ταχύτητα απόκρισης και στο βαθμό απόδοσης. Κύριος εκπρόσωπος αυτής της κατηγορίας είναι οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.

2.1.3 Βασικές έννοιες και σχέσεις στους επαγωγικούς κινητήρες

Όταν εφαρμοστεί στο τύλιγμα του στάτη ένα τριφασικό σύστημα τάσεων, αναπτύσσεται σε αυτό ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, το οποίο προκαλεί το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο B_s . Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα και ορίζεται από την σχέση:

$$\omega_s = \frac{\omega_e}{p} = \frac{2\pi f_e}{p} \quad [\text{rad/s}] \quad (2.1)$$

ή

$$n_s = \frac{60f_e}{p} \quad [\text{ΣΑΛ}] \quad (2.2)$$

όπου, ω_e η κυκλική συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας του στάτη [rad/s], f_e η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας του στάτη [Hz] και p ο αριθμός που αντιστοιχεί στα ζεύγη πόλων του κινητήρα.

Η διαφορά της ταχύτητας περιστροφής του άξονα από την σύγχρονη ταχύτητα n_{msync} ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης της επαγωγικής μηχανής:

$$n = n_s - n_m \quad (2.3)$$

Ένα δεύτερο μέγεθος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της σχετικής κίνησης είναι η ολίσθηση s , η οποία εκφράζει ουσιαστικά τη σχετική ταχύτητα ολίσθησης:

$$s = \frac{n}{n_s} = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (2.4)$$

Αν ο δρομέας της μηχανής είναι ακινητοποιημένος, τότε έχουμε $s=1$, ενώ στην περίπτωση που αυτός περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα, η ολίσθηση είναι μηδενική ($s=0$). Επιπλέον η ταχύτητα περιστροφής μπορεί να εκφραστεί ως ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας με τη βοήθεια της ολίσθησης, αφού προκύπτει εύκολα ότι

$$\omega_m = (1-s)\omega_s \quad (2.5)$$

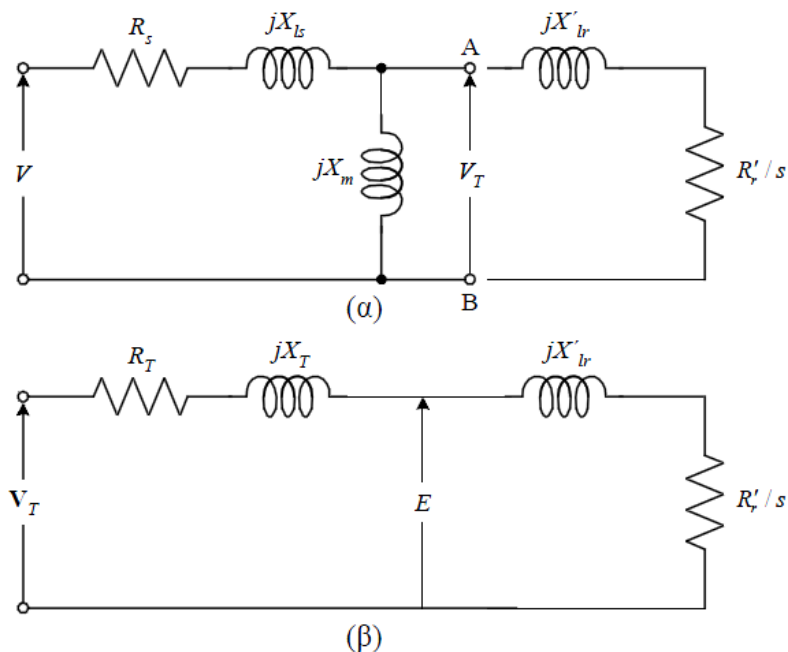
Η συχνότητα στο δρομέα σχετίζεται με την ηλεκτρική συχνότητα στο στάτη μέσω της σχέσης :

$$f_R = sf_e \quad (2.6)$$

Για τον υπολογισμό της ροπής που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας, απαιτείται η γνώση της ισχύος διακένου:

$$T_e = \frac{(1-s)P_{ag}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (2.7)$$

Ο υπολογισμός της ισχύος διακένου προϋποθέτει τον υπολογισμό του ρεύματος στο δρομέα. Για τον υπολογισμό του ρεύματος δρομέα στο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα (Σχήμα 2.2α), αντικαθιστούμε το τμήμα του κυκλώματος αριστερά των σημείων Α-Β, με το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin.



Σχήμα 2.2: (α) Ισοδύναμο κυκλώμα του κινητήρα
(β) Ισοδύναμο κατά Thevenin

Η τάση και η σύνθετη αντίσταση Thevenin ορίζονται από τις σχέσεις:

$$V_T = \frac{jX_m}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} V \quad (2.8)$$

$$Z_T = \frac{jX_m(R_s + jX_{ls})}{R_s + j(X_{ls} + X_m)} = R_T + jX_T \approx R_s + jX_{ls} \quad (2.9)$$

Το νέο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα εικονίζεται στο Σχήμα. 2.2β. Το μέτρο του ρεύματος στο δρομέα είναι ίσο με:

$$I'_r = \frac{V_T}{\sqrt{(R_T + R'_r/s)^2 + (X_T + X'_{lr})^2}} \quad (2.10)$$

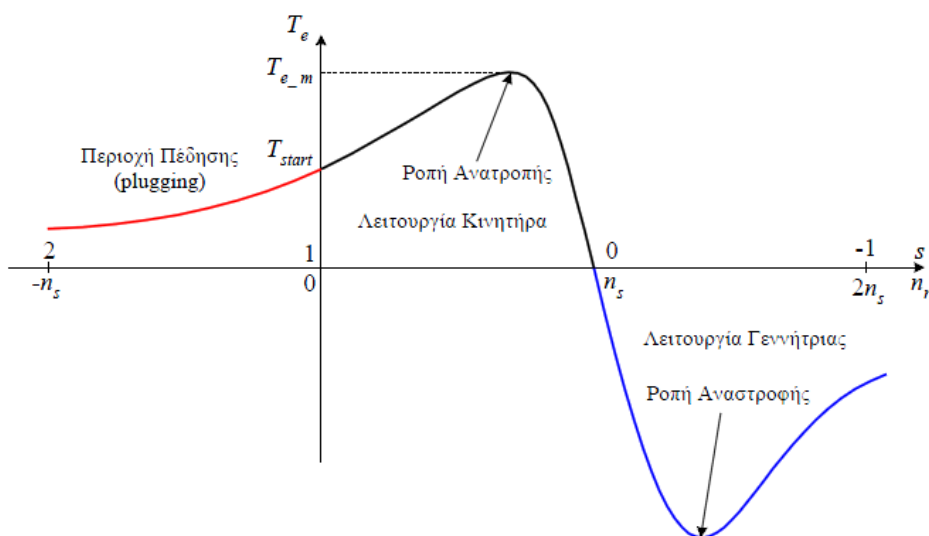
Η ισχύς διακένου είναι

$$P_{ag} = 3I'_r{}^2 \cdot \frac{R'_r}{s} = \frac{3V_T^2}{(R_T + R'_r/s)^2 + (X_T + X'_{lr})^2} \cdot \frac{R'_r}{s} \quad (2.11)$$

και η ροπή

$$T_e = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{3V_T^2}{(R_T + R'_r/s)^2 + (X_T + X'_{lr})^2} \cdot \frac{R'_r}{s\omega_s} \quad (2.12)$$

Από την εξίσωση 2.12 προκύπτει ότι, η ροπή του κινητήρα μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της τάσης τροφοδοσίας. Επομένως, μια μικρή μεταβολή στην τάση V , προκαλεί σημαντική μεταβολή στην αναπτυσσόμενη ροπή.



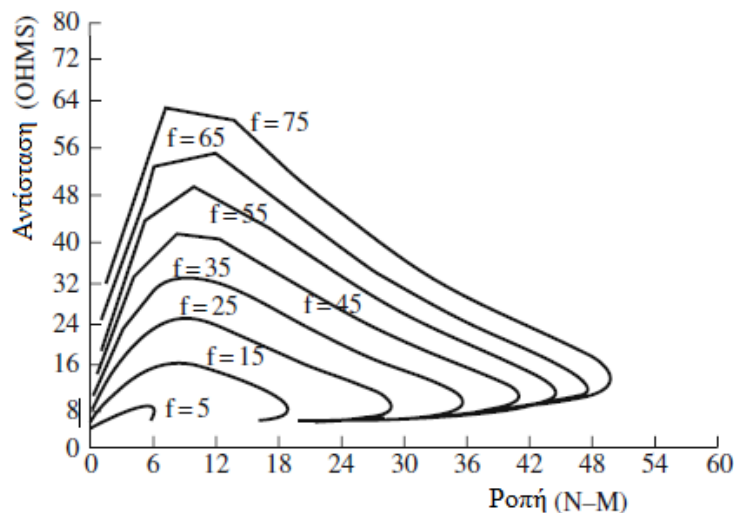
Σχήμα 2.3: Πλήρης χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, όπου περικλείονται οι περιοχές πέδησης και γεννήτριας

Στο σχήμα 2.3 εικονίζεται η πλήρης χαρακτηριστική ροπής- ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, από την εξίσωση 2.12. Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι μεγαλύτερη από τη σύγχρονη, οπότε η ολίσθηση γίνεται αρνητική. Η ολίσθηση είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα στο δεύτερο τεταρτημόριο, όπου η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά του στρεφόμενου πεδίου του στατη. Η λειτουργία με $s > 1$ επιτυγχάνεται με την αλλαγή της σύνδεσης δύο φάσεων στα τυλίγματα του στάτη, οπότε αντιστρέφεται η φορά των μαγνητικών πεδίων και ο κινητήρας υφίσταται πέδηση (*plugging*).

Η τιμή της ολίσθησης s_m που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής προκύπτει:

$$s_m = \frac{R'_r}{\sqrt{R_T^2 + (X_T + X'_{lr})^2}} \approx \frac{R'_r}{X_{ls} + X'_{lr}} \quad (2.13)$$

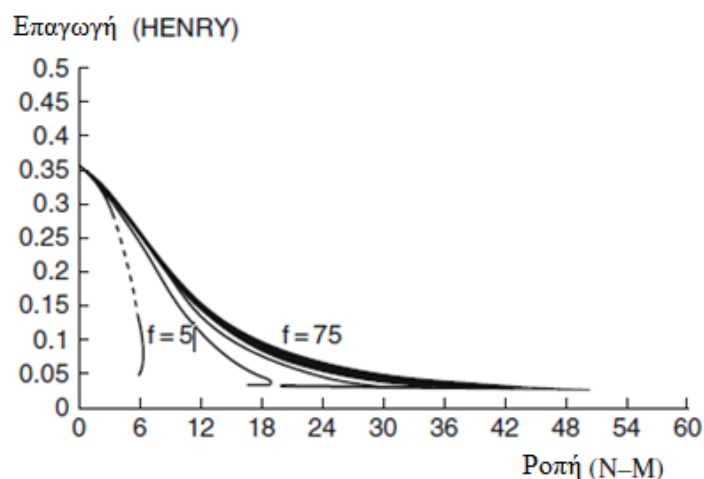
Το σχήμα 2.4 δείχνει την μεταβολή της ισοδύναμης αντίστασης σε σχέση με τη ροπή για διαφορετικές τιμές συχνοτήτων. Υποδεικνύει ότι σε συνθήκες που δεν έχουμε φορτίο, η αντίσταση είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να έχουμε ροή μεγαλύτερου ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από την αντίσταση του κινητήρα. Καθώς η ροπή αυξάνεται, αυξάνεται και η αντίσταση, φθάνοντας σε μία μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται και πάλι. Επίσης παρατηρούμε ότι σε χαμηλές συχνότητες η αντίσταση μειώνεται γρηγορότερα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο σε χαμηλές συχνότητες, η τιμή της τάσης πρέπει να μειωθεί, για την αποφυγή μεγάλων τιμών ρεύματος το οποίο ρέει μέσα από την αντίσταση των τυλιγμάτων του κινητήρα.



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστική ισοδύναμης αντίστασης – ροπής για διάφορες τιμές συχνοτήτων.

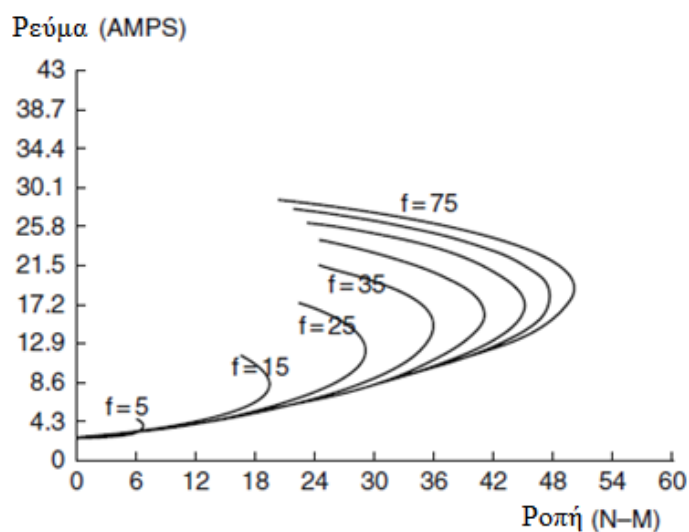
Η ισοδύναμη αυτεπαγωγή μπορεί επίσης να υπολογίζεται με παρόμοιο τρόπο όπως και η αντίσταση. Αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5. Παρατηρούμε ότι σε χαμηλές τιμές

ροπής η αυτεπαγωγή είναι πολύ μεγάλη, ενώ όταν η ροπή αυξάνεται, η ισοδύναμη αυτεπαγωγή μειώνεται. Επίσης για χαμηλότερες τιμές συχνότητας, η αυτεπαγωγή μειώνεται γρηγορότερα καθώς αυξάνει η ροπή.



Σχήμα 2.5: Χαρακτηριστική επαγωγής – ροπής για διάφορες τιμές συχνότητας.

Και στα δύο σχήματα, 2.4 και 2.5, παρατηρούμε ότι για τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος υπάρχει ένα σημείο λειτουργίας. Είναι επίσης το σημείο, όπου η αντίσταση και η αυτεπαγωγή έχουν τέτοιες τιμές, που ο κινητήρας παράγει επαρκή ροπή ώστε να ξεπεράσει την εφαρμοζόμενη ροπή. Η ροπή δεν πρέπει να είναι πολύ μικρή έτσι ώστε η αντίσταση να είναι χαμηλή, αλλά και ταυτόχρονα δεν πρέπει να είναι πάρα πολύ μεγάλη. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει το πως μεταβάλλεται το ρεύμα σε σχέση με τη ροπή. Καθώς η ροπή αυξάνεται η μεταβολή του ρεύματος μπορεί να υπολογιστεί από τις μεταβολές της αντίστασης και της αυτεπαγωγής. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Χαρακτηριστική ρεύματος – ροπής για διάφορες τιμές συχνότητας.

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα αυξάνεται, σχεδόν γραμμικά, καθώς αυξάνεται και η ροπή. Για μεγάλες τιμές όμως του ρεύματος, η ροπή μειώνεται με ταχείς ρυθμούς. Αυτό είναι ένα από τα μειονεκτήματα των σερβοκινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος και ως εκ τούτου, οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος δεν έχουν μεγάλες ροπές εκκίνησης. Γενικά, η ισοδύναμη αντίσταση και επαγωγή μπορεί να υπολογιστεί από τα στοιχεία που παρέχονται από τους κατασκευαστές. Στην συνέχεια υπολογίζοντας το ρεύμα τότε μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε και την ροπή. Η μεταβολή μεταξύ ροπής και ρεύματος για διάφορες τιμές της συχνότητας φαίνεται στο σχήμα 2.6. Η εξίσωση της ροπής μπορεί να θεωρηθεί γραμμική και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως μπορεί να γραφτεί ως:

$$T_m = K_t I \quad (2.14)$$

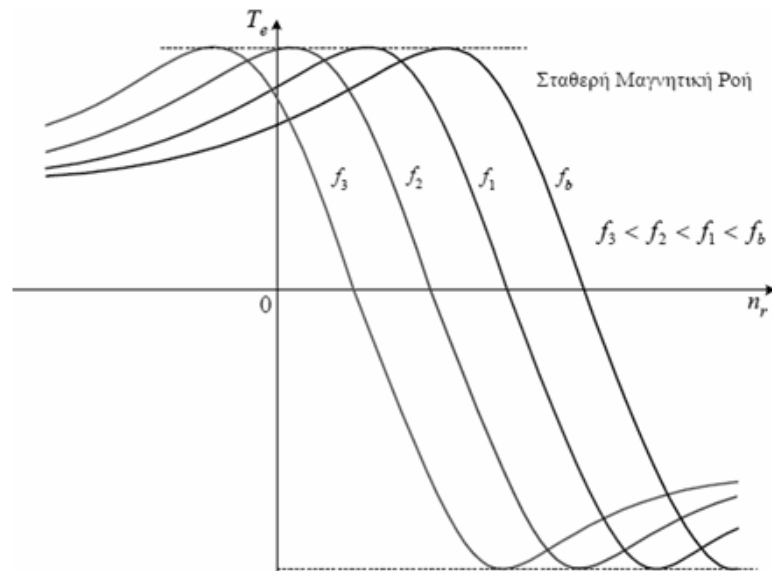
2.1.4 Έλεγχος της ταχύτητας με τη μεταβολή της συχνότητας

Η βέλτιστη μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων κάθε είδους, είναι με τη ρύθμιση της συχνότητας τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι, μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων και μαζί τους η ταχύτητα του κινητήρα. Η σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ονομαστική συχνότητα f_b , ονομάζεται βασική (*base*).

Καθώς η συχνότητα των τάσεων τροφοδοσίας μπορεί να ρυθμιστεί σε τιμές μικρότερες αλλά και μεγαλύτερες της ονομαστικής, η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να μεταβληθεί από το μηδέν, μέχρι μια τιμή πολλαπλάσια της βασικής. Το άνω όριο της ταχύτητας περιορίζεται από τη μηχανική αντοχή του κινητήρα. Εκτός από την ευρεία περιοχή ρύθμισης της ταχύτητας, η μέθοδος εξασφαλίζει τη λειτουργία του κινητήρα με μικρή ολίσθηση σε κάθε ταχύτητα. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης διατηρείται υψηλός. Όταν η ταχύτητα του κινητήρα ρυθμίζεται σε τιμές μικρότερες της βασικής, η μείωση της συχνότητας συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της τάσης. Ειδικότερα, ο λόγος της τάσης προς τη συχνότητα V/f_e διατηρείται σταθερός. Με τον τρόπο αυτό η μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα παραμένει περίπου σταθερή ($\phi_m = E / f_e$).

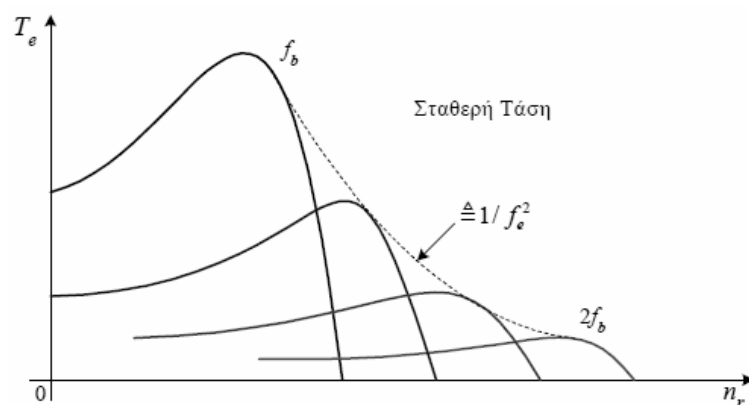
Στο σχήμα 2.8 εικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας του κινητήρα, σε διάφορες συχνότητες μικρότερες από τη βασική, όταν μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή. Παρατηρούμε ότι η ροπή ανατροπής (μέγιστη ροπή), δεν μεταβάλλεται με τη μεταβολή της συχνότητας. Έτσι, ο κινητήρας μπορεί να ελέγξει φορτία, τα οποία απαιτούν μεγάλη ροπή σε μικρές ταχύτητες. Επιπλέον, η δυναμική συμπεριφορά του κινητήρα είναι εξαιρετική. Στην ονομαστική ταχύτητα, ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και τη βασική συχνότητα. Για την αύξηση της ταχύτητας, σε τιμές πέρα από την ονομαστική, η συχνότητα γίνεται μεγαλύτερη από τη βασική. Όμως, η τάση

τροφοδοσίας διατηρείται σταθερή στην ονομαστική τιμή, για την προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων.



Σχήμα 2.7: Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας, σε τιμές μικρότερες από τη βασική, με σταθερή τη μαγνητική ροή.

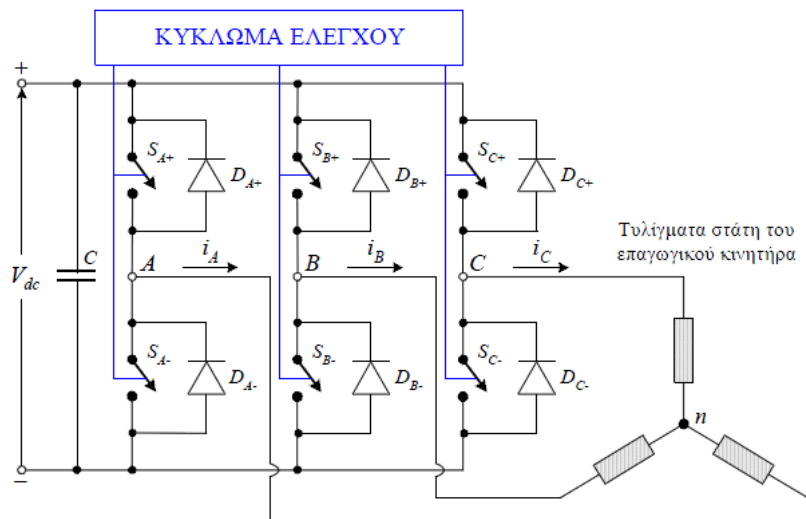
Επειδή η τάση δεν ακολουθεί την αύξηση της συχνότητας, η μαγνητική ροή μειώνεται καθώς η συχνότητα αυξάνει. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της μέγιστης ροπής ανατροπής με το τετράγωνο της συχνότητας, όπως εικονίζεται στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.8: Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας, σε τιμές μεγαλύτερες από τη βασική, με σταθερή την τάση.

Αν και η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη ρύθμιση της συχνότητας προσφέρει πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας απ' όλες τις άλλες μεθόδους, η χρήση της έχει γενικευτεί μόλις τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στην κατασκευή των κατάλληλων μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται *αντιστροφείς (inverters)*, με λογικό κόστος

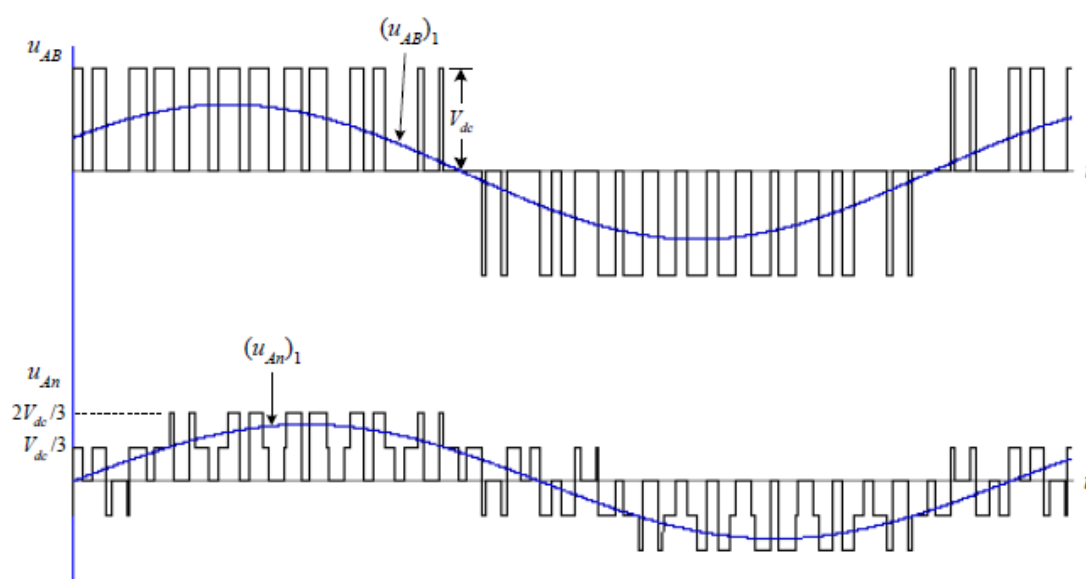
και υψηλή αξιοπιστία. Στο σχήμα 2.10 εικονίζεται η δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.



Σχήμα 2.9: Κυκλωματική δομή του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης

Ο αντιστροφέας ονομάζεται πηγής τάσης, επειδή τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Η συνεχής τάση εισόδου του αντιστροφέα V_{dc} , προέρχεται από την ανόρθωση της τάσης του δικτύου, την οποία εξομαλύνει ο πυκνωτής C . Οι αντιστροφέες που τροφοδοτούνται από πηγές συνεχούς ρεύματος ονομάζονται αντιστροφέες πηγής ρεύματος και χρησιμοποιούνται στον έλεγχο κινητήρων μεγάλης ισχύος. Οι έξι διακόπτες του αντιστροφέα πηγής τάσης, είναι συνήθως MOSFET ισχύος (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ή IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Αντιπαράλληλα με κάθε διακόπτη συνδέεται μια διόδος, η οποία εξασφαλίζει την αμφίδρομη ροή της ισχύος μεταξύ της dc εισόδου και της ac εξόδου. Οι διακόπτες οδηγούνται από το κύκλωμα ελέγχου, με κάποια από τις πολλές τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμού PWM (*Pulse Width Modulation*).

Το χαρακτηριστικό όλων των τεχνικών PWM είναι η ρύθμιση εκτός από τη συχνότητα και της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Όμως, οι διακόπτες του αντιστροφέα λειτουργούν με μια συχνότητα f_s , η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από τη θεμελιώδη f_e . Η συχνότητα f_s ονομάζεται συχνότητα μετάβασης (*switching frequency*). Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζεται ενδεικτικά η κυματομορφή της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα, όταν τροφοδοτείται από ένα PWM αντιστροφέα. Ο κινητήρας εξαιτίας της επαγωγικής συμπεριφοράς του, φιλτράρει τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας των ρευμάτων και ανταποκρίνεται μόνο στη θεμελιώδη συνιστώσα τους. Τα μικρά αρμονικά ρεύματα αυξάνουν τις απώλειες χαλκού και σιδήρου του κινητήρα.



Σχήμα 2.10: Κυματομορφές της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα. Διακρίνεται ακόμη η θεμελιώδης συνιστώσα των τάσεων, με συχνότητα f_e .

2.2 Σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος

2.2.1 Τύποι σεβροκινητήρων συνεχούς ρεύματος

Οι βασικοί τύποι των σεβροκινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι οι εξής:

- Ένας ιδιαίτερα σημαντικός τύπος σεβροκινητήρας είναι αυτός με μόνιμο μαγνήτη. Ο σεβροκινητήρας του τύπου αυτού έχει αντί για τυλίγματα στάτη, μόνιμο μαγνήτη, ενώ ο δρομέα έχει κανονικό τύλιγμα μέσα από το οποίο ελέγχεται ο κινητήρας. Μοιάζει πολύ με τους ασύγχρονους κινητήρες παράλληλης διέγερσης και λόγω του μικρού όγκου του χρησιμοποιείται σε Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου πάνω σε αεροπλάνα. Ο μικρός όγκος του κινητήρα πετυχαίνεται με ειδικό κράμα μόνιμου μαγνήτη.
- Ο δεύτερος τύπος είναι αυτός που τα τυλίγματα του στάτη τροφοδοτούνται από πηγή σταθερής τάσεως ή ρεύματος, ενώ το τύλιγμα του δρομέα από μια τάση ελέγχου. Οι σεβροκινητήρες αυτοί είναι γνωστοί σαν ελεγχόμενοι από το δρομέα. Σε αυτούς τους σεβροκινητήρες αν διατηρούμε σταθερή την τάση ελέγχου V_e η ροπή στρέψης μικραίνει γραμμικά σε συνάρτηση με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας ω του κινητήρα.
- Ο τρίτος τύπος σεβροκινητήρα είναι ο ελεγχόμενος από το στάτη. Σ' αυτόν τον τύπο το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτείται από μια πηγή σταθερής τάσεως ή ρεύματος ενώ το τύλιγμα του στάτη από μια τάση ελέγχου. Σε αυτούς τους σεβροκινητήρες η ροπή στρέψης είναι ανεξάρτητη από τη γωνιακή ταχύτητα του στάτη και εξαρτάται

μόνο από τη σταθερά K και το ρεύμα του στάτη. Ωστόσο αν το μαγνητικό υλικό εργάζεται στον κόρο η ροπή στρέψης επηρεάζεται και από τη γωνιακή ταχύτητα του στάτη και μάλιστα σε πολύ μεγάλες γωνιακές ταχύτητες η ροπή μικραίνει γιατί αυξάνει πάρα πολύ η αντηλεκτρεγερτική δύναμη.

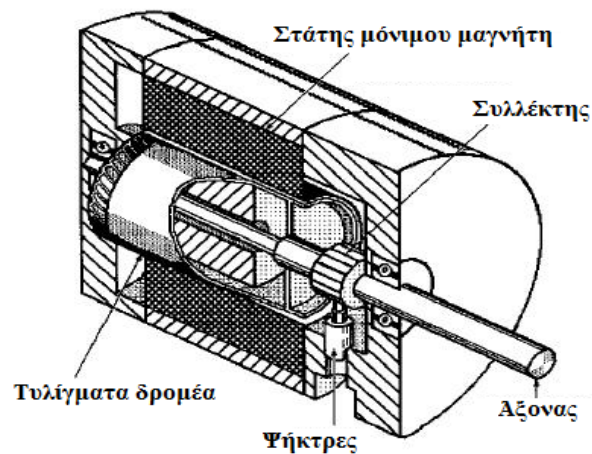
- Ο τέταρτος τύπος είναι ο σερβοκινητήρας με τα τυλίγματα στάτη και δρομέα σε σύνδεση σειράς: Οι σερβοκινητήρες αυτοί έχουν διπλό τύλιγμα στο στάτη έτσι που το καθένα να συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα με τη βοήθεια ηλεκτρονόμων. Η ροπή στρέψης του κινητήρα μεταβάλλεται εκθετικά και εξαρτάται από τα μεγέθη του ρεύματος ελέγχου και της γωνιακής ταχύτητας. Είναι πολύ μεγάλη κατά την εκκίνηση οπότε η γωνιακή ταχύτητα είναι μικρή, ενώ μικραίνει απότομα όταν η γωνιακή ταχύτητα μεγαλώνει. Χρησιμοποιείται κυρίως εκεί όπου απαιτείται μεγάλη ροπή κατά την εκκίνηση (όπου έχουμε περιστροφή μαζών) αφού η γραμμικότητα δεν παίζει κανένα ρόλο.

2.2.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη το τύλιγμα διέγερσης στο στάτη έχει αντικατασταθεί από μόνιμο μαγνήτη. Με τον τρόπο αυτό δεν μπορούμε να μεταβάλλουμε τη διέγερση με αποτέλεσμα ο έλεγχος της ταχύτητάς τους να γίνεται μόνο από το τύλιγμα του δρομέα μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας τους. Ο δρομέας αποτελείται από σειρά ανεξάρτητων τυλιγμάτων, των οποίων τα άκρα συνδέονται στα ελάσματα του συλλέκτη. Οι κινητήρες αυτοί είναι συνήθως μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται σε μικροεργαλεία, ηλεκτρονικούς υπολογιστές, οικιακές συσκευές, διεγέρτριες σύγχρονων γεννητριών κλπ.

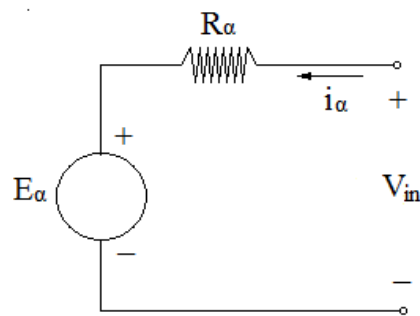
Κύριο χαρακτηριστικό των κινητήρων αυτών είναι ότι δεν έχουν ωμικές απώλειες στο στάτη και τα προβλήματα της μετάβασης είναι μειωμένα λόγω της μικρής τιμής της μαγνητικής διαπερατότητας του μαγνήτη. Επίσης, οι κινητήρες αυτοί έχουν μικρότερο όγκο στάτη λόγω του μικρότερου χώρου που καταλαμβάνει ο μαγνήτης σε σχέση με τα τυλίγματα χαλκού των κλασικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

Οι σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη, για εφαρμογές ελέγχου θέσης και ταχύτητας έχουν πολύ καλή χαρακτηριστική ροπής και το χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης σε σχέση με άλλους σερβοκινητήρες. Το μειονέκτημα τους είναι η περιορισμένη δυνατότητα για διακοπτόμενη λειτουργία σε υψηλή ισχύ, υψηλό ρεύμα και ταχύτητα υψηλότερη της ονομαστικής, λόγω των σπινθηρισμών που δημιουργούνται στο συλλέκτη και της αδυναμίας να μειωθεί η μαγνητική ροή. Έτσι τα συστήματα των σερβοκινητήρων αυτών μπορούν να λειτουργήσουν μέχρι τις ονομαστικές στροφές με σταθερή μέγιστη ροπή. Επίσης, ένα άλλο μειονέκτημα τους είναι η ανάγκη για τακτική επιθεώρηση και αντικατάσταση των ψηκτρών.



Σχήμα 2.11: Κινητήρας συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη παρουσιάζεται στο σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.12: Ισοδύναμο κύκλωμα σερβοκινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη.

Οι σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη έχουν σταθερό μαγνητικό πεδίο διέγερσης και σταθερή μαγνητική ροή Φ_f , ανεξάρτητα του ρεύματος τροφοδοσίας i_a . Λόγω της ύπαρξης του συλλέκτη, η μαγνητική ροή του πεδίου διέγερσης και του τυλίγματος τυμπάνου του δρομέα είναι κάθετες μεταξύ τους. Επομένως, η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή T είναι ανάλογη του γινομένου των ΜΕΔ διέγερσης (στάτη) και τυμπάνου (δρομέα):

$$T = K_a \cdot \Phi_a \cdot i_a \quad (2.15)$$

Με δεδομένη της απουσίας τυλιγμάτων διέγερσης, παραμένει μόνο μία εξίσωση τάσεων:

$$V_{in} = E_a + R_a \cdot i_a \quad (2.16)$$

όπου R_a είναι η ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου και V_{in} η τάση τροφοδοσίας του τυμπάνου. Η ΗΕΔ του τυμπάνου E_a είναι ανάλογη της ταχύτητας του δρομέα και της ροής του πεδίου διέγερσης:

$$E_a = K_a \cdot \Phi_f \cdot \omega_m = K_n \cdot \Phi_f \cdot n \quad (2.17)$$

Η σταθερά K_a είναι συνάρτηση των πόλων P και του λόγου των αγωγών Z_a προς τον αριθμό των παραλλήλων κλάδων του τυμπάνου.

$$K_a = \frac{PZ_a}{2\pi a} \quad (2.18)$$

Με τις παραπάνω εξισώσεις και με τη διαφορική μηχανική εξίσωση:

$$Jp\omega_m = T - T_m \quad (2.19)$$

συγκροτείται το σύστημα ελέγχου (ροπής, ταχύτητας, θέσης) του σερβοκινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη.

Εφόσον η ηλεκτρομαγνητική ροπή T είναι ανάλογη του ρεύματος, για τον έλεγχο της θέσης και της ταχύτητας πρέπει να ελέγχεται το ρεύμα. Η αύξηση της ροπής του φορτίου μειώνει την γωνιακή ταχύτητα και επομένως μειώνει την ΗΕΔ E_a . Για σταθερή τάση τροφοδοσίας V_{in} , αυτό θα οδηγήσει σε αύξηση του ρεύματος i_a .

2.2.3 Σερβοκινητήρας ΣΡ ελεγχόμενος από τον δρομέα (armature control)

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του δρομέα έχουμε:

$L_a =$ αμελητέο

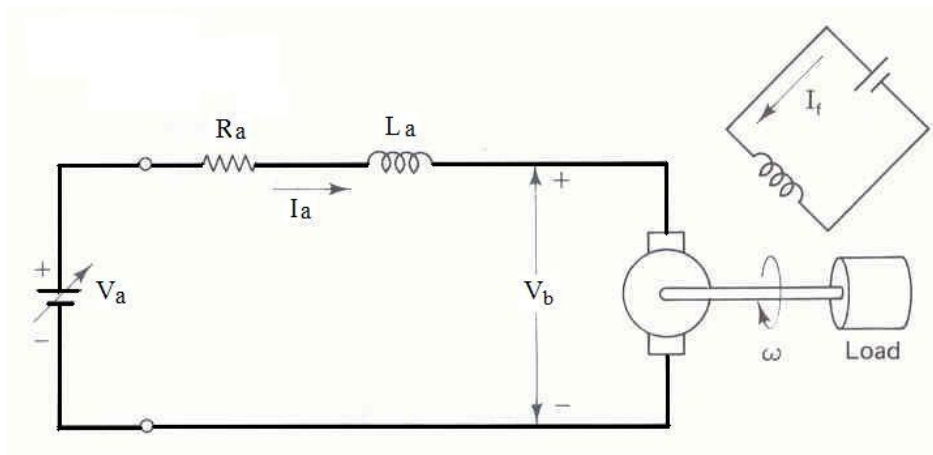
$$V_a = V_b + R_a i_a \quad (2.20)$$

Όμως,

$$V_b = K_1 \omega \quad (2.21)$$

$$T = K_2 i_a \quad (2.22)$$

όπου M η ροπή του κινητήρα και K_1, K_2 σταθερές εξαρτώμενες από τη γεωμετρία του κινητήρα.



Σχήμα 2.13: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα με διέγερση από το δρομέα.

Αντικαθιστώντας έχουμε:

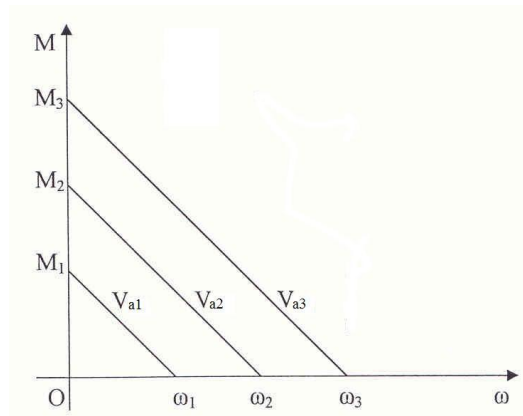
$$V_a = K_1 \omega + \frac{R_a}{K_2} T \quad (2.23)$$

Για μια ορισμένη τιμή της τάσης ελέγχου V_a η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$T = \frac{K_2}{R_a} (V_a - K_1 \omega) \Rightarrow T = K_3 (V_a - K_1 \omega) \quad (2.24)$$

$$\text{όπου} \quad K_3 = \frac{K_2}{R_a} \quad (2.25)$$

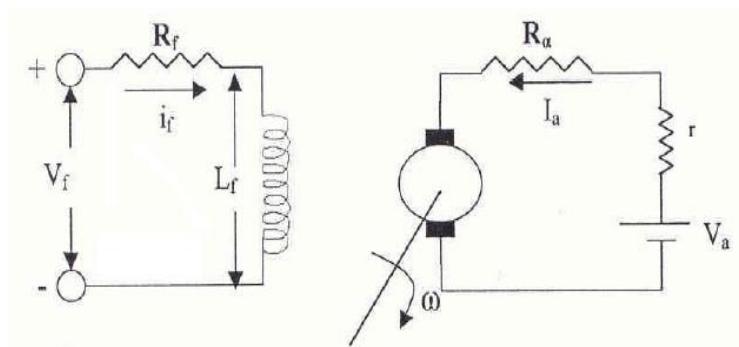
Από τη σχέση αυτή μπορούμε να κάνουμε τη $T=f(\omega)$ για σταθερές τιμές τάσεις ελέγχου $V_{a1} > V_{a2} > V_{a3}$. Παρατηρούμε ότι για σταθερή τάση η ροπή ελαττώνεται γραμμικά σε συνάρτηση της αύξησης της γωνιακής ταχύτητας ω (σχήμα 2.15).



Σχήμα 2.14: Χαρακτηριστική Ροπής T – Γωνιακής ταχύτητας ω .

2.2.4 Σερβοκινητήρας ΣΡ ελεγχόμενος από τον στάτη (field control)

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του στάτη έχουμε:



Σχήμα 2.15: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα με διέγερση από το στάτη

L_a = αμελητέο και $V_b = A.H.E.Δ.$ έχουμε:

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (2.26)$$

$$V_a = rI_a + R_a I_a + V_b \quad (2.27)$$

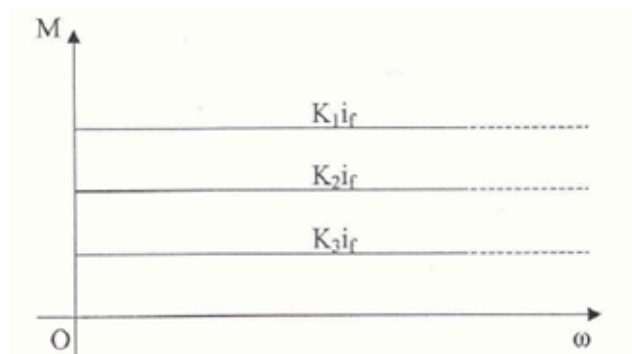
Λόγω του ότι η πηγή που τροφοδοτεί τον στάτη είναι πηγή σταθερού ρεύματος και συνεπώς έχει πολύ μεγάλη τιμή η εσωτερική αντίσταση r , το άθροισμα $R_a I_a + V_b$ είναι αμελητέο σε σχέση με το rI_a . Έτσι παίρνουμε:

$$V_a = rI_a = r \text{ (σταθερό ρεύμα)} \quad (2.28)$$

Η ροπή δίνεται από τη σχέση:

$$T = K_1 I_a i_f \Rightarrow T = K_2 i_f \quad (2.29)$$

Δηλαδή η ροπή είναι ανεξάρτητη της γωνιακής ταχύτητας. Για μεγάλες ταχύτητες η ροπή T ελαττώνεται (διακεκομμένη γραμμή), γιατί πλέον δεν είναι αμελητέος ο όρος $V_b = K \cdot \omega$.



Σχήμα 2.16: Χαρακτηριστική Ροπής T – Γωνιακής ταχύτητας ω .

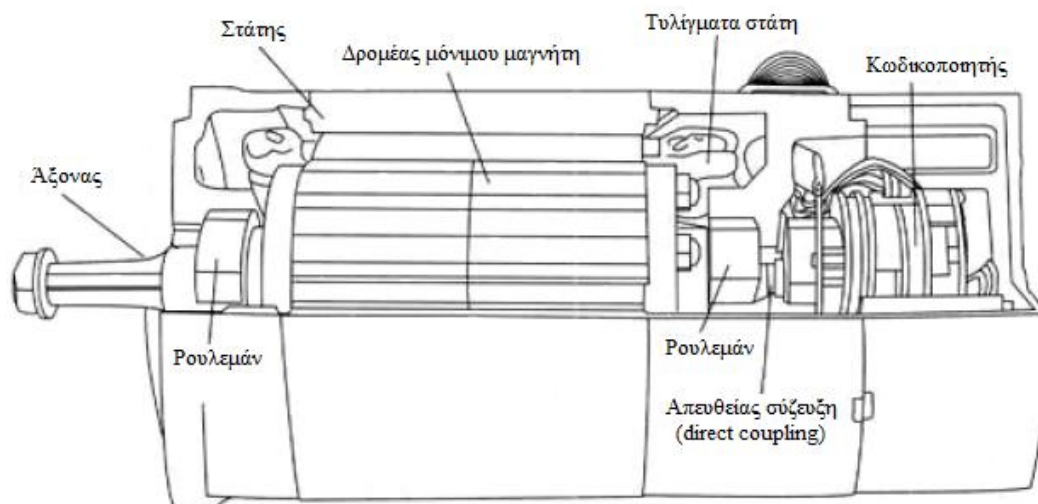
Σύγκριση χαρακτηριστικών κινητήρων Σ.Ρ. με έλεγχο από τον στάτη και δρομέα (ή από πεδίο και οπλισμό):

- Βασικό πλεονέκτημα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ελεγχόμενου πεδίου (στάτης) είναι ότι χρειάζεται απλός – μικρός ενισχυτής λόγω της απαιτούμενης μικτής ισχύος που χρειάζεται στο πεδίο ελέγχου.
- Μεγάλο μειονέκτημα όμως είναι η απαίτηση σταθερής πηγής ρεύματος (αντίθετα είναι εύκολη η προμήθεια πηγής σταθερής τάσης).
- Επίσης στον κινητήρα συνεχούς ρεύματος ελεγχόμενου οπλισμού, η Α.Η.Ε.Δ. δρα σαν παράγοντας απόσβεσης, ενώ στον κινητήρα συνεχούς ρεύματος ελεγχόμενου πεδίου δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο.

- Η χαμηλή απόδοση της διάταξης ελεγχόμενου πεδίου μπορεί να δημιουργήσει επιπλέον προβλήματα εξαιτίας της εκλυόμενης θερμότητας.
- Οι χρονικές σταθερές του κινητήρα ελεγχόμενου πεδίου είναι μεγάλες σε σχέση με τις αντίστοιχες του κινητήρα ελεγχόμενου σπλισμού.

2.3 Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν τριφασικό τύλιγμα στο στάτη και μόνιμο μαγνήτη στο δρομέα. Έτσι, όπως και στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη, δεν μπορούμε να ελέγξουμε (τουλάχιστον άμεσα) το πεδίο διέγερσης. Σημαντικό πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι δεν έχουν ωμικές απώλειες στο δρομέα και συνεπώς παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και μεγαλύτερο λόγο ροπής προς όγκο μηχανής (μεγάλη πυκνότητα ροπής) σε σύγκριση με τους επαγωγικούς κινητήρες. Ωστόσο, οι μαγνήτες βρίσκονται στο εσωτερικό της μηχανής (στο δρομέα) και μάλιστα σε σημείο που είναι δύσκολη η απαγωγή θερμότητας. Επειδή οι ιδιότητες των μαγνητών επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία (μεταβολή της καμπύλης απομαγνήτισης), επιβάλλεται η θερμοκρασία λειτουργίας των μηχανών αυτών να είναι χαμηλή.



Σχήμα 2.17: Σύγχρονος σερβοκινητήρας μόνιμου μαγνήτη.

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη χωρίζονται σε ημιτονοειδείς και τραπεζοειδείς ή τετραγωνικού παλμού, ανάλογα με την τεχνική ελέγχου και τη μορφή της μαγνητεγερτικής δύναμης των τυλιγμάτων τους. Οι ημιτονοειδείς κινητήρες ονομάζονται σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (*brushless PM ac synchronous motors* ή *sinewave PM brushless motors*), τα ρεύματα τροφοδοσίας του στάτη είναι τριφασικά ημιτονοειδή

κι η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή τους στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Αντίθετα, οι σύγχρονοι κινητήρες τετραγωνικού παλμού (*brushless PM dc synchronous motors* ή *square-wave PM brushless motors*) τροφοδοτούνται με τριφασικά ρεύματα τετραγωνικής μορφής στο στάτη, κι επειδή προσεγγίζουν την αρχή λειτουργίας των κλασικών μηχανών συνεχούς ρεύματος, είναι γνωστοί ως brushless dc κινητήρες.

Στους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη οι μαγνήτες μπορεί να είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα (*surface type*) ή στο εσωτερικό του πυρήνα του δρομέα (*interior type*). Ως κινητήρες τετραγωνικού παλμού χρησιμοποιούνται οι σύγχρονες μηχανές με μαγνήτες τοποθετημένους στην επιφάνεια του δρομέα. Ως ημιτονοειδείς κινητήρες μπορεί να είναι και δύο οι τύποι σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη και μάλιστα ανάλογα με τη θέση των μαγνητών στο δρομέα, η λειτουργία τους προσεγγίζει τη λειτουργία ενός συμβατικού σύγχρονου κινητήρα με τύλιγμα διέγερσης είτε κυλινδρικών είτε έκτυπων πόλων. Οι σύγχρονοι κινητήρες επιφανειακής θέσης μαγνητών προσεγγίζουν τη λειτουργία των σύγχρονων κινητήρων κυλινδρικών πόλων, ενώ οι σύγχρονοι κινητήρες εσωτερικής θέσης μαγνητών στο δρομέα προσεγγίζουν τη λειτουργία των σύγχρονων κινητήρων έκτυπων πόλων.

Οι βασικότεροι τύποι μόνιμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται στους σερβοκινητήρες και γενικότερα στις ηλεκτρικές μηχανές, είναι οι εξής:

- *Κεραμικοί μαγνήτες ή φερριτές*, οι οποίοι συνίστανται από οξείδιο του σιδήρου και καρβίδιο του βαρίου ή του στροντίου. Οι μαγνήτες αυτοί παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερο συνεκτικό πεδίο σε σύγκριση με τους AlNiCo (κατά συνέπεια μεγαλύτερη αντοχή σε πεδία απομαγνήτισης) αλλά έχουν μικρότερη τιμή παραμένοντα μαγνητισμού. Η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία λειτουργίας είναι υψηλή ωστόσο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες οι μαγνητικές τους ιδιότητες σε μεταβολές της θερμοκρασίας (οι συντελεστές θερμοκρασίας έχουν μεγάλες τιμές). Τα σημαντικά πλεονεκτήματα των κεραμικών μαγνητών είναι το πολύ χαμηλό κόστος ανά μονάδα ενέργειας και η μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση με αποτέλεσμα οι απώλειες δινορρευμάτων στο εσωτερικό τους να είναι σχεδόν αμελητέες. Οι κεραμικοί μαγνήτες χρησιμοποιούνται σε κινητήρες μικρής σχετικά ισχύος για μη ενεργοβόρες διαδικασίες ελέγχου.
- *Μαγνήτες AlNiCo*, δηλαδή οι μαγνήτες αλουμινίου, νικελίου, κοβαλτίου, οι οποίοι είναι δυνατόν να περιέχουν ίχνη από σίδηρο, χαλκό και τιτάνιο. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα τους είναι η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, ο μεγάλος παραμένων μαγνητισμός και η μικρή μεταβολή της καμπύλης απομαγνήτισης λόγω θερμοκρασίας. Συνεπώς, οι ηλεκτρικές μηχανές με μαγνήτες AlNiCo παρουσιάζουν μεγάλη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο και επιτρέπουν υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Ωστόσο, η ένταση του συνεκτικού πεδίου είναι αρκετά χαμηλή με αποτέλεσμα να έχουν πολύ μικρή αντοχή σε εξωτερικά πεδία απομαγνήτισης. Σήμερα δε

περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό των καινούργιων κινητήρων εξαιτίας του υψηλού κόστους τους και της σχετικά εύκολης απομαγνήτισής τους σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος.

- *Μαγνήτες Νεοδύμιου Σιδήρου Βορίου (NdFeB)*, είναι η πιο σύγχρονη γενιά μαγνητών. Τα μαγνητικά χαρακτηριστικά τους είναι πολύ ικανοποιητικά, ωστόσο η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι σχετικά χαμηλή και αυτό είναι ένας περιορισμός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη χρήση τους στις ηλεκτρικές μηχανές (ιδιαίτερα στο σύστημα ψύξης της μηχανής). Οι εξαιρετικές μαγνητικές τους ιδιότητες τους καθιστούν παράλληλα κατάλληλους και για συμπαγείς κατασκευές σε χρήσεις που απαιτούν μικρότερα κόστη κατασκευής. Το μεγάλο τους μειονέκτημα είναι ότι διαβρώνονται πολύ εύκολα.
- *Μαγνήτες Σαμαρίου Κοβαλτίου (SmCo)*, έχουν μικρότερους στελεστές θερμοκρασίας και υψηλότερη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας σε σύγκριση με τους μαγνήτες NdFeB, ωστόσο έχουν μικρότερες τιμές παραμένοντα μαγνητισμού και συνεκτικού πεδίου. Λόγω του μεγάλου κόστους τους χρησιμοποιούνται μόνο σε εφαρμογές στις οποίες η υψηλή θερμοκρασία και η αντοχή σε διάβρωση αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους.

Οι δύο τελευταίοι τύποι αποτελούν την κατηγορία μόνιμων μαγνητών σπάνιων γαιών και χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές μηχανές από μερικά Watt μέχρι και πολλά KW, σε μεγάλο εύρος εφαρμογών και τύπων μηχανών. Κυρίως προτιμούνται εκεί όπου απαιτούνται υψηλοί δείκτες λειτουργίας: ισχύς/όγκο, βαθμός απόδοσης και δυναμική συμπεριφορά. Οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη προορίζονται κυρίως για εφαρμογές μικρής και μεσαίας ισχύος. Αντίθετα για εφαρμογές μεγάλης ισχύος, πάνω από 200KW, προτιμούνται ηλεκτρικές μηχανές με ηλεκτρομαγνητική διέγερση (π.χ. επαγωγικοί ή συμβατικοί σύγχρονοι κινητήρες) γιατί γι' αυτή την τάξη ισχύος το κόστος των μηχανών μόνιμου μαγνήτη είναι πολύ υψηλό.

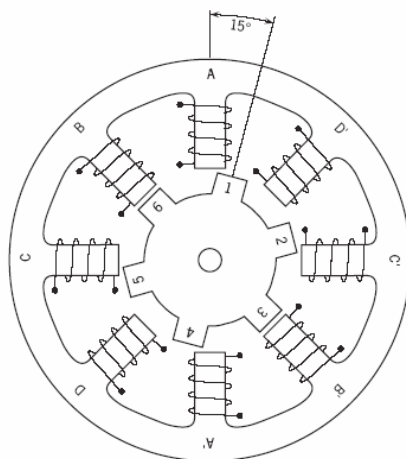
Τα πλεονεκτήματα των σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης, η μεγάλη πυκνότητα ροπής ανά όγκο μηχανής, η μικρή αδράνεια κι η σχετικά ικανοποιητική τιμή του συντελεστή ισχύος. Η υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου στους κινητήρες αυτούς είναι ευκολότερη σε σχέση με τους επαγωγικούς κινητήρες κι επιπλέον δεν εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου της μηχανής. Ένα κινητήριο σύστημα διανυσματικού ελέγχου με σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχει πολύ καλή δυναμική απόκριση σε μεταβολές των σημάτων εντολής ταχύτητας και θέσης γιατί αναπτύσσει πολύ γρήγορες και κυρίως ελεγχόμενες επιταχύνσεις κι επιβραδύνσεις. Ωστόσο, οι κινητήρες αυτοί έχουν υψηλό κόστος αγοράς (κυρίως λόγω του μαγνήτη) και δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες γιατί επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά των μαγνητών.

2.4 Βηματικοί Σερβοκινητήρες

2.4.1 Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα

Οι βηματικοί κινητήρες αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι στον τομέα της ηλεκτρομηχανικής κίνησης. Είναι σύγχρονοι ηλεκτρικοί κινητήρες, οι οποίοι μπορούν να χωρίσουν μια πλήρη περιστροφή σε ένα μεγάλο πλήθος από βήματα. Η θέση του κινητήρα μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια, χωρίς την χρήση μηχανισμών ανατροφοδότησης. Όπως όλοι οι κινητήρες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Συγκεκριμένα μετατρέπουν έναν ηλεκτρικό παλμό στην ισοδύναμή του κυκλική κίνηση. Η κίνηση αυτή είναι ακριβής, ιδιότητα που τους κάνει πολύ αποτελεσματικούς σε εργασίες που απαιτούν ακρίβεια στον έλεγχο θέσης μιας μηχανής.

Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούν συνδυασμό ηλεκτρικών παλμών για την κίνησή τους. Ο κινητήρας του σχήματος 2.19 αποτελείται από δρομέα μαλακού σιδήρου με οδοντώσεις και στάτη με τέσσερα ζεύγη ηλεκτρομαγνητών: A και A', B και B', C και C', D και D'. Για να κινηθεί ο δρομέας εφαρμόζεται διαδοχικά σε κάθε ένα από τα παραπάνω ζεύγη μια τάση ηλεκτρικού ρεύματος. Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται από το ένα ζεύγος ηλεκτρομαγνητών στο διπλανό του ο δρομέας μετατοπίζεται κατά 15° λόγω των μαγνητικών δυνάμεων που εφαρμόζονται σε αυτόν. Η γωνία αυτή ονομάζεται βήμα του κινητήρα.

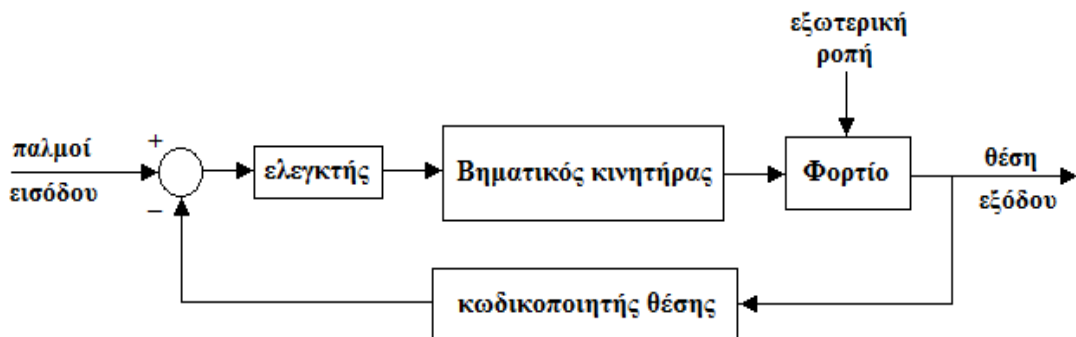


Σχήμα 2.18: Διατομή βηματικού κινητήρα.

Πιο αναλυτικά, στο σχήμα 2.19 βλέπουμε τη θέση του κινητήρα όταν το ηλεκτρικό ρεύμα εφαρμόζεται στο ζεύγος B και B'. Τότε οι οδοντώσεις 6 και 3 ευθυγραμμίζονται, λόγω της μαγνητικής έλξης, με τους ηλεκτρομαγνήτες B και B' αντίστοιχα. Στην συνέχεια εάν πάψει η εφαρμογή του ρεύματος στο ζεύγος B, B' και μεταφερθεί στο C και C' τότε το αποτέλεσμα θα είναι η ευθυγράμμιση των οδοντώσεων 5 και 2 μετα C και C' και έτσι ο δρομέας στρέφεται 15° κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Εάν στη συνέχεια το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφερθεί στο ζεύγος D και D' τότε τα πηνία αυτά θα

ευθυγραμμιστούν με τις οδοντώσεις 4 και 1 αντίστοιχα και ο δρομέας θα περιστραφεί κατά 15° ακόμη. Για τη συνεχή κίνηση του κινητήρα αρκεί η ανάλογη εναλλαγή της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος σε διαδοχικά ζεύγη πηνίων. Όσο πιο γρήγορα γίνεται η εναλλαγή αυτή τόσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Για να αντιστραφεί η φορά περιστροφής του κινητήρα αρκεί να αντιστραφεί η σειρά με την οποία εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση στα ζεύγη των ηλεκτρομαγνητών.

Για τον έλεγχο των βηματικών κινητήρων χρησιμοποιείται η μέθοδος ανοικτού βρόχου. Μετρώντας τον αριθμό και τις εναλλαγές των παλμών που αποστέλλονται από τον ελεγκτή προς τον κινητήρα, μπορεί να υπολογιστεί η θέση του σε κάθε χρονική στιγμή. Δεν χρειάζεται να υπάρχει ανάδραση πληροφορίας από κάποιο αισθητήρα θέσης προς τον ελεγκτή, κάτι που είναι απαραίτητο στον έλεγχο κλειστού βρόχου. Παρ'όλα αυτά, κατά τη λειτουργία των βηματικών κινητήρων σε σύστημα ανοικτού βρόχου υπάρχει ο κίνδυνος απώλειας βημάτων. Για να επιτυγχάνεται ορθά ο έλεγχος του κινητήρα ο συντελεστής αλλαγής πρέπει να είναι αρκετά μικρός. Αντιθέτως, όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε σύστημα κλειστού βρόχου αυτό το πρόβλημα δεν παρουσιάζεται. Η θέση εξόδου συνήθως μετράτε από έναν κωδικοποιητή θέσης και οι πληροφορίες αποστέλλονται πίσω στον ελεγκτή, σχήμα 2.20. Η απαιτούμενη θέση συγκρίνεται με την θέση εξόδου και βάση του σφάλματος εφαρμόζεται ο συντελεστής αλλαγής.



Σχήμα 2.19: Έλεγχος θέσης βηματικού κινητήρα σε σύστημα κλειστού βρόχου.

Αν και οι θέσεις εισόδου και εξόδου είναι σε ψηφιακή μορφή, μπορούν να γραφτούν και σε αναλογική μορφή. Η έξοδος του ελεγκτή μπορεί να γραφτεί ως:

$$V = K (\Theta_i - \Theta_o) \quad (2.30)$$

όπου V είναι η τάση εξόδου που καθορίζει τον συντελεστή αλλαγής, K το κέρδος και Θ_i , Θ_o είναι η ζητούμενη και πραγματική θέση εξόδου αντίστοιχα. Όταν ο βηματικός κινητήρας λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο συντελεστή αλλαγής, τότε η εξίσωση της τάσης λαμβάνοντας υπόψη την αυτεπαγωγή L , μπορεί να γραφτεί ως εξής:

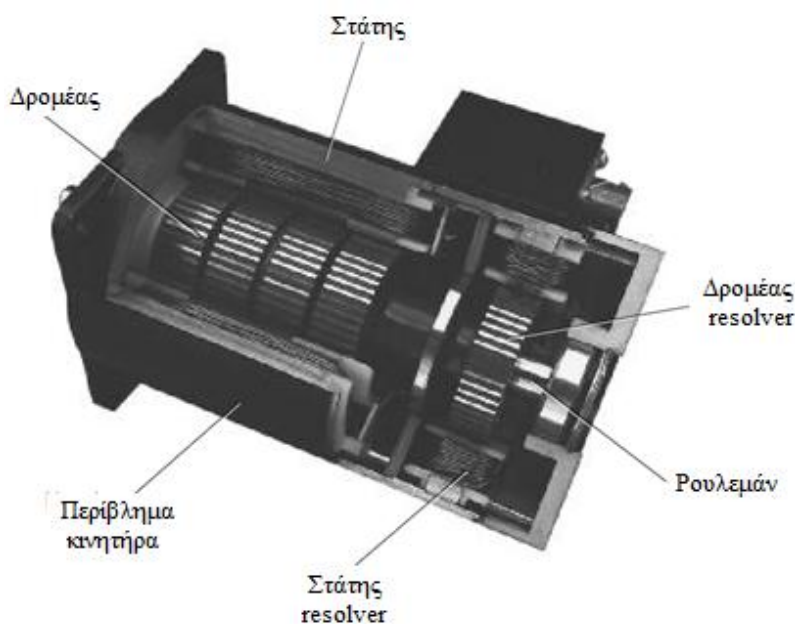
$$V = RI + LsI \quad (2.31)$$

Η εξίσωση ροπής, όπως και στους σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι:

$$T_m = K_t \cdot I \quad (2.32)$$

2.4.2 Ο υβριδικός σερβοκινητήρας

Οι βασικές λειτουργίες των βηματικών κινητήρων και των σερβοκινητήρων χωρίς σύστημα ψηκτρών-συλλέκτη (brushless) είναι πανομοιότυπες. Και οι δύο κατηγορίες κινητήρων διαθέτουν σύστημα περιστρεφόμενου μαγνήτη με τυλίγματα στο στάτη. Η μόνη διαφορά τους είναι στον αριθμό των πόλων. Συνήθως οι σερβοκινητήρες χωρίς σύστημα ψηκτρών-συλλέκτη έχουν δύο ή τρία ζεύγη πόλων, ενώ οι βηματικοί πενήντα. Θα μπορούσαμε λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε ένα σερβοκινητήρα brushless ως βηματικό κινητήρα, όμως το αποφεύγουμε αφού η γωνία του βήματος θα είναι πολύ μεγάλη. Αντίθετα όμως, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα βηματικό κινητήρα ως σερβοκινητήρα brushless, με την εγκατάσταση μίας συσκευής ανάδρασης (π.χ. ενός κωδικοποιητή ή resolver), η οποία ουσιαστικά θα εκτελεί την μετατροπή. Εξ' ου και ο "υβριδικός σερβοκινητήρας", που ονομάζεται έτσι επειδή βασίζεται σε ένα υβριδικό βήματικό κινητήρα (σχήμα 2.21).



Σχήμα 2.20: Υβριδικός σερβοκινητήρας με ανάδραση ηλεκτρομαγνητικού μετρητή θέσης (resolver).

Επίσης ονομάζονται και βηματικοί σερβοκινητήρες ή βηματικοί κινητήρες κλειστού βρόχου. Παρ' όλα αυτά χρησιμοποιούμε την ονομασία 'υβριδικός σερβοκινητήρας', αφού ένας τέτοιος κινητήρας δεν παρουσιάζει κανένα από τα χαρακτηριστικά

λειτουργίας ενός βηματικού κινητήρα. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του κινητήρα αυτού είναι ότι μπορεί να λειτουργεί σε σύστημα ανοιχτού βρόχου. Ξεκινά να λειτουργεί σε σύστημα κλειστού βρόχου μόνο όταν το σφάλμα θέσης του δρομέα γίνει πολύ μεγάλο και έτσι επιτρέπει στο σύστημα να αποφύγει τυχόν ανεπιθύμητες ταλαντώσεις (συχνό πρόβλημα σερβοσυστημάτων).

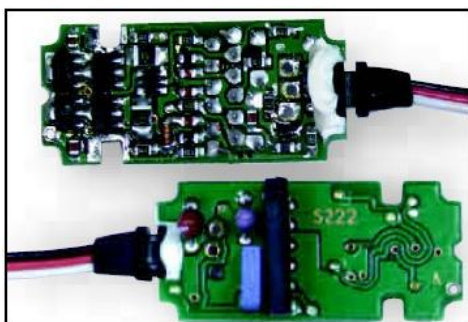
Ο έλεγχος κίνησης ενός υβριδικού σερβοκινητήρα γίνεται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, όπως και στον κινητήρα χωρίς σύστημα ψήκτρων-συνδέκτη. Ο υβριδικός σερβοκινητήρας παράγει, για τις ίδιες τιμές ρεύματος και τάσης τροφοδοσίας, την ίδια περίπου ροπή με τον αντίστοιχο βηματικό κινητήρα. Ωστόσο, η δυνατότητα του κινητήρα για λειτουργία πλήρους ροπής γίνεται όταν το σύστημα είναι κλειστού βρόχου (για βηματικό κινητήρα ανοιχτού βρόχου, επιτρέπεται μόνο ένα κατάλληλο περιθώριο ροπής). Το υβριδικό σερβόσυστημα είναι πιο ακριβό από το αντίστοιχο συστήμα των βηματικών κινητήρων, όμως είναι φθηνότερο από ένα σύστημα με σερβοκινητήρες χωρίς σύστημα ψηκτρών-συνδέκτη. Όπως και στο βηματικό κινητήρα, η συνεχής λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες δεν συνιστάται, καθώς λόγω του μεγάλου αριθμού των πόλων, σε υψηλές ταχύτητες έχουμε μεγαλύτερες απώλειες σιδήρου. Επίσης ο υβριδικός σερβοκινητήρας δεν θερμένεται τόσο όσο ο αντίστοιχος βηματικός και είναι πιο αθόρυβος, αφού σαν σερβοκινητήρας, η ισχύς του καταναλώνεται όταν απαιτείται ροπή και δεν έχουμε ροή ρεύματος όταν είναι σε στάση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο υβριδικός σερβοκινητήρας είναι εντελώς διαφορετικός από τον σερβοκινητήρα ανοιχτού βρόχου που λειτουργεί σε «κλειστό βρόχο» ή σε λειτουργία «ανίχνευσης θέσης». Στη λειτουργία ανίχνευσης θέσης, ένας κωδικοποιητής μέτρα την κίνηση του φορτίου και η τελική θέση καθορίζεται από ανάδραση του κωδικοποιητή. Ο υβριδικός σερβοκινητήρας μπορεί και προσφέρει υψηλή ακρίβεια θέσης και εξαλείφει την μη ανιχνευθήσα απώλεια θέσης. Παρ' όλα αυτά δεν επιτρέπει την λειτουργία πλήρους ροπής και δεν μειώνει την θερμότητα στον κινητήρα.

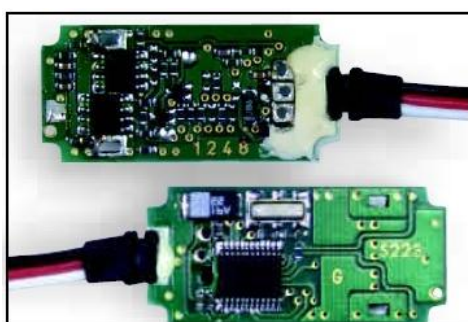
2.5 Ψηφιακοί σερβομηχανισμοί (digital servos)

2.5.1. Λειτουργία ψηφιακού σέρβο

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, τα servo ή αλλιώς οι σερβομηχανισμοί, έχουν εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό καθώς το μέγεθος, η ταχύτητα και η ροπή τους βελτιώνονται συνεχώς. Η τελευταία εξέλιξη που είναι γνωστή ως "ψηφιακό σέρβο" είναι ακόμα ένα βήμα μπροστά, έχοντας σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το αναλογικό σέρβο. Τα ψηφιακά σέρβο έχουν μεγάλη εφαρμογή κυρίως στον μοντελισμό, την ρομποτική και γενικά στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.



Σχήμα 2.21: «Αναλογικό σέρβο» με προσαρμοσμένα τσιπ λογικής.

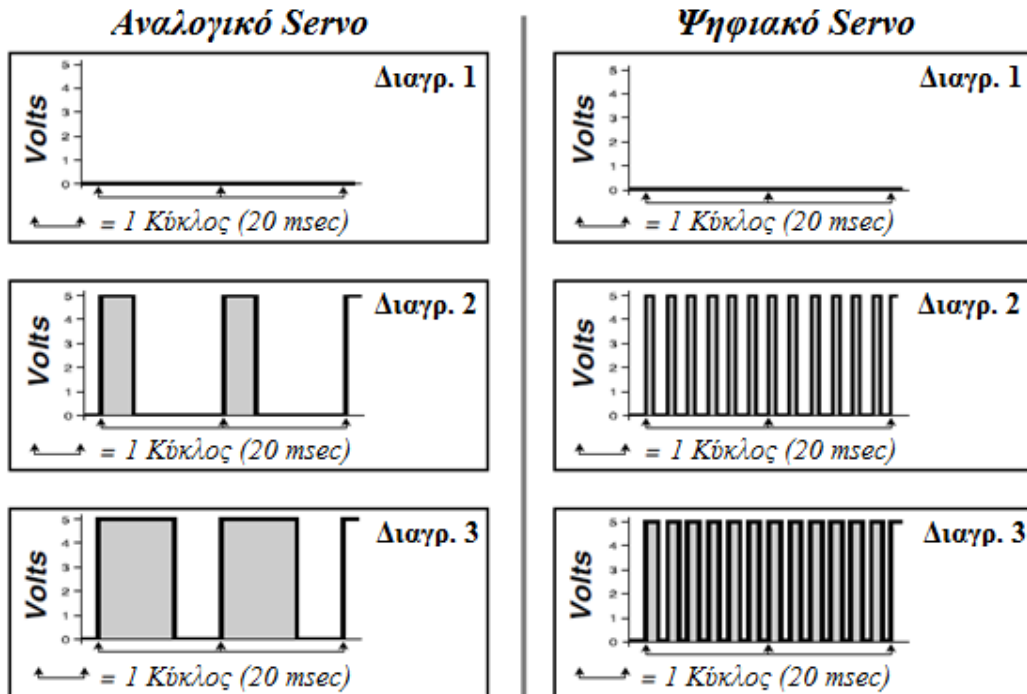


Σχήμα 2.22: «Ψηφιακό σέρβο» με ελεγχόμενο μικροεπεξεργαστή και FET ενισχυτή.

Κατ'αρχάς, το «ψηφιακό σέρβο» είναι πανομοιότυπο με ένα αναλογικό σέρβο. Δεν διαφέρει πολύ στο σχεδιασμό, εκτός από ένα μικροεπεξεργαστή που περιέχει, ο οποίος αναλύει τα εισερχόμενα σήματα και ελέγχει τον κινητήρα. Ελέγχουν τους ίδιους κινητήρες και το σημαντικότερο, έχουν ίδιο σύστημα ανάδρασης με μεταβλητή αντίσταση (ποτενσιόμετρο), όπως ακριβώς και τα κανονικά σέρβο. Εκεί που διαφέρει το ψηφιακό σέρβο είναι στον τρόπο που επεξεργάζεται τις εισερχόμενες πληροφορίες, με αποτέλεσμα τον έλεγχο της αρχικής ισχύς στο σερβοκινητήρα, τη μείωση του νεκρού διαστήματος (deadband), την αύξηση της ακρίβειας κατά τον έλεγχο και την καλύτερη εκμετάλλευση της ισχύος.

Σ'ένα servo που βρίσκεται σε αδράνεια, δεν έχουμε ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο σερβοκινητήρα, άρα ούτε και ισχύ. Όταν ληφθεί σήμα για κίνηση του κινητήρα, τότε το σέρβο ανταποκρίνεται δίνοντας ισχύ/τάση στο σερβοκινητήρα. Η ισχύς αυτή, η οποία στην πραγματικότητα είναι η μέγιστη τάση, είναι παλμική με συχνότητα 50 κύκλους ανά δευτερόλεπτο, δημιουργώντας έτσι μικρούς παλμούς (ή αλλιώς μικρά τμήματα on/off), όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.24. Με την αύξηση του μήκους του κάθε παλμού ισχύος, έχουμε επίδραση στον έλεγχο της ταχύτητας, μέχρι που εφαρμόζεται πλήρης ισχύς/τάση στον κινητήρα που επιταχύνει τον άξονα του σερβοσυστήματος προς τη νέα θέση του. Όταν ο άξονας κοντεύει στην επιθυμητή του θέση τότε το μήκος των παλμών μειώνεται

ώστε να έχουμε επιβράδυνση, μέχρι που μηδενίζεται η ισχύς και ο σερβοκινητήρας σταματά.



Σχήμα 2.23: Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν δύο κύκλους των παλμων on/off ισχύος.

Διάγραμμα.1: σε κατάσταση αδράνειας.

Διάγραμμα.2: μικρής διάρκειας παλμός, δηλαδή χαμηλή ισχύς στον κινητήρα.

Διάγραμμα.3: μεγαλύτερης διάρκειας παλμός, περισσότερη ισχύς στον κινητήρα.

Στο αναλογικό servo, ένας μικρής διάρκειας παλμός (on) που ακολουθείται από μια παύση (off) δεν θα δώσει ώθηση στον κινητήρα για να κινηθεί, ενώ ένας μεγαλύτερης διάρκειας παλμός το κάνει. Αυτό σημαίνει ότι ένας μικρός έλεγχος κίνησης, ο οποίος στέλνει μικρής διάρκειας παλμούς στον κινητήρα, είναι πολύ αναποτελεσματικός, και κυρίως γιατί δημιουργεί αυτό που χαρακτηρίζεται με τον όρο "νεκρό διάστημα", δηλαδή, αργή ή ουσιαστικά καμία κίνηση γύρω από το κέντρο του τυποποιημένου σέρβο.

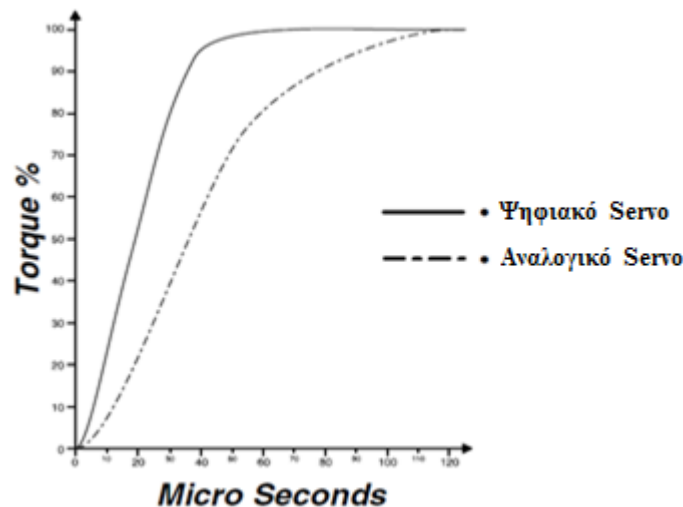
2.5.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του ψηφιακού σέρβο

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του ψηφιακού σέρβο είναι τα εξής:

- Μέσω του μικροεπεξεργαστή είναι σε θέση να λαμβάνει το εισερχόμενο σήμα και να εφαρμόζει διάφορους παραμέτρους στο σήμα αυτό, πριν την αποστολή των παλμών στο σερβοκινητήρα. Αυτό σημαίνει ότι το μήκος του παλμού ισχύος, και ως εκ

τούτου το ποσό της ενέργειας που αποστέλλεται για την ενεργοποίηση του κινητήρα, μπορεί να ρυθμιστεί από το πρόγραμμα του μικροεπεξεργαστή για να ταιριάζει με τις απαιτήσεις λειτουργίας του και ως εκ τούτου να βελτιστοποιεί την απόδοση του servo.

- Το ψηφιακό σέρβο στέλνει παλμούς στο κινητήρα με υψηλότερη συχνότητα. Αυτό σημαίνει ότι, σε αντίθεση με πριν που ο κινητήρας λάμβανε 50 παλμούς/sec, τώρα λαμβάνει 300 παλμούς/sec. Αν και το μήκος των παλμών μειώνεται ανάλογα με την αύξηση της συχνότητας, η ισχύς στον κινητήρα αυξομειώνεται πιο γρήγορα (δηλαδή η απόσταση των παλμών on/off μειώνεται) και έτσι ο κινητήρας ωθείται πιο εύκολα στην περιστροφή. Αυτό σημαίνει επίσης ότι, όχι μόνο ο σερβοκινητήρας ανταποκρίνεται πιο γρήγορα στις εντολές, αλλά ότι οι αυξομειώσεις της ισχύς για επιτάχυνση ή επιβράδυνση διαβιβάζονται πολύ πιο συχνά στον σερβοκινητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε ένα ψηφιακό σέρβο με βελτιωμένο νεκρό διάστημα (deadband), ταχύτερη απόκριση, ταχύτερη και ομαλότερη επιτάχυνση/επιβράδυνση, καλύτερη ακρίβεια και και επαναφορά στην αρχική θέση ανάλογα με το σήμα ελέγχου που δέχεται το σέρβο.

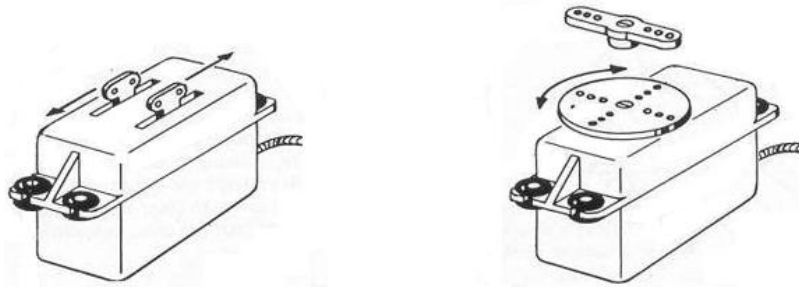


Σχήμα 2.24: Σύγκριση “νεκρού διαστήματος” (deadband) μεταξύ ενός ψηφιακού και ενός αναλογικού σέρβου με τις ίδιες προδιαγραφές. Παρατηρούμε ότι το ψηφιακό σέρβο έχει πολύ μικρότερο νεκρό διάστημα και δεσμεύει σε λιγότερο χρόνο μεγαλύτερη ισχύ απ’ ό,τι το αναλογικό servo.

Το μοναδικό μειονέκτημα, σε όλα αυτά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που έχουν τα ψηφιακά σέρβο, είναι η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, αφού για να πετύχουν τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν χρειάζεται να καταναλώσουν περισσότερο ρεύμα. Επίσης όσο αφορά το κόστος, το ψηφιακό σέρβο ενδέχεται να είναι πιο ακριβό από το αναλογικό.

2.6 R/C servos

Τα *RC (Remote Control) servos* είναι ειδικοί σερβομηχανισμοί μικρού μεγέθους οι οποίοι περιλαμβάνουν ένα ολοκληρωμένο σερβόσύστημα που αποτελείται από τον κινητήρα, το κιβώτιο ταχυτήτων, τη συσκευή ανάδρασης και το κύκλωμα ελέγχου και οδήγησης. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε τηλεκατευθυνόμενα μοντέλα αλλά και σε διάφορες ρομποτικές εφαρμογές.

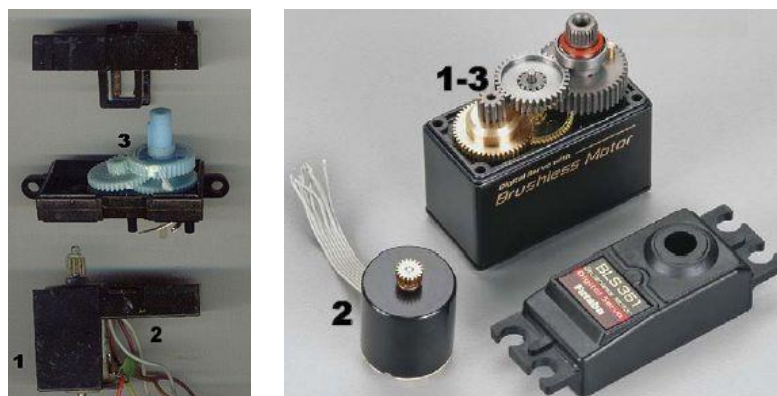


Σχήμα 2.25: Σερβομηχανισμός με ευθύγραμμη κίνηση (αριστερά) και περιστροφική κίνηση (δεξιά).

Τα RC servos περιέχουν 3 καλώδια: το καλώδιο τροφοδοσίας, γείωσης και ελέγχου. Το σήμα ελέγχου είναι ένας παλμός με συχνότητα γύρω στα 50Hz. Το πλάτος του παλμού καθορίζει τη θέση στην έξοδο του σερβοκινητήρα. Ο έλεγχος τους μπορεί να υλοποιηθεί αρκετά εύκολα μέσω ενός ψηφιακού ελεγκτή.

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα R/C servo (σχήμα 2.26) είναι τα εξής:

1. έναν ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος,
2. ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που ελέγχει τη θέση του τελικού άξονα κίνησης και
3. ένα κιβώτιο υποβιβασμού της σχέσης μετάδοσης του κινητήρα.



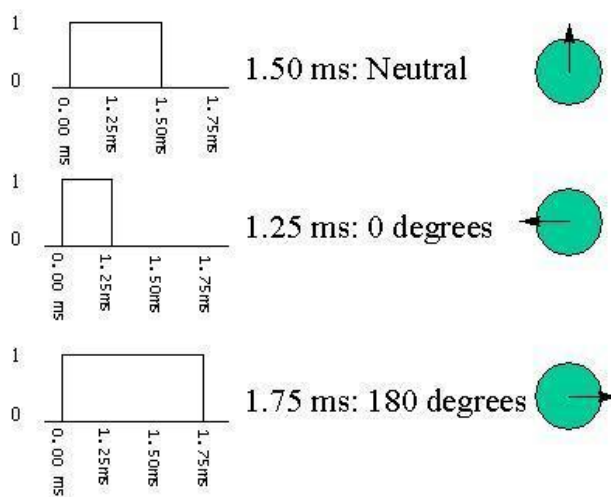
Σχήμα 2.26: Τα βασικά τμήματα ενός R/C servo.



Ο τελικός άξονας κίνησης δεν εκτελεί πλήρεις περιστροφές, αλλά περιστρέφεται μεταξύ δύο ακραίων θέσεων A, B. Για τη λειτουργία του σέρβο απαιτείται η παροχή της κατάλληλης ηλεκτρικής τάσης αλλά και ενός σήματος ελέγχου που καθορίζει τη θέση περιστροφής του τελικού άξονα.

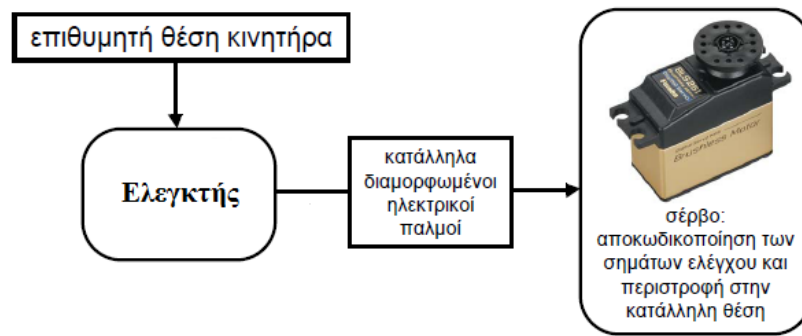
Για τον έλεγχο του σέρβο απαιτείται εξειδικευμένος ελεγκτής και χρησιμοποιείται η μέθοδος ελέγχου ανοιχτού βρόχου. Πιο συγκεκριμένα, ο ελεγκτής διαμορφώνει και μεταδίδει στο σέρβο ηλεκτρικούς παλμούς, ανάλογα με τη θέση στην οποία πρέπει να περιστραφεί ο άξονας του σέρβο. Οι ηλεκτρικοί παλμοί λαμβάνονται και αποκωδικοποιούνται από το σέρβο, με τη βοήθεια του κυκλώματος ελέγχου που περιλαμβάνεται σε αυτό. Στη συνέχεια, μετά την αποκωδικοποίηση του ηλεκτρικού σήματος των παλμών, το κύκλωμα ελέγχου του σέρβο οδηγεί τον κινητήρα του στην κατάλληλη θέση.

Το πόσο θα γυρίσει ο κινητήρας καθορίζεται από το χρονικό πλάτος (μήκος) του παλμού. Ένας παλμός για παράδειγμα της τάξεως του 1.5 millisecond, θα αναγκάσει τον κινητήρα να στραφεί στην θέση των 90 μοιρών. Αν ο παλμός είναι μικρότερος του 1.5 millisecond τότε ο κινητήρας θα στραφεί προς την θέση των 0° μοιρών. Αν ο παλμός που θα σταλεί είναι μεγαλύτερος του 1.5 millisecond τότε ο κινητήρας θα στραφεί σε κάποια θέση κοντινότερα στην θέση των 180° μοιρών.



Σχήμα 2.27: Οι παλμοί ορίζουν την θέση του κινητήρα Servo.

Στη μέθοδο ελέγχου ανοιχτού βρόχου υπάρχει επικοινωνία μιας κατεύθυνσης, από τον ελεγκτή προς το σύστημα που πρόκειται να ελεγχθεί. Δεν υπάρχει ανατροφοδότηση πληροφορίας από το σύστημα προς τον ελεγκτή. Για το λόγο αυτό η μέθοδος ανοιχτού βρόχου δεν χρησιμοποιεί αισθητήρες όπως η μέθοδος κλειστού βρόχου.



Σχήμα 2.28: Λειτουργία R/C servo.

Το κύριο μειονέκτημα των RC servos είναι η αδυναμία εκτέλεσης πλήρους και συνεχούς περιστροφής. Παρ'όλα αυτά οι σερβομηχανισμοί αυτοί έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής:

- Χαμηλό κόστος.
- Μικρές διαστάσεις και εύχρηστο σχήμα: όλα τα τμήματά ενός σέρβο περιβάλλονται από ένα συμπαγές περίβλημα από το οποίο εξέρχει μόνο ο τελικός άξονας κίνησης.
- Παράγουν υψηλές τιμές ροπής.
- Δεν απαιτείται χρήση αισθητήρων και κυκλωμάτων ανάδρασης για τον προσδιορισμό της θέσης του άξονα κίνησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΕΡΒΟΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.1 Εισαγωγή

Τα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου αντιστοιχούν σε ένα σύνολο κατάλληλα συνδεδεμένων στοιχείων με τέτοια μορφή ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή απόκριση. Χωρίζονται σε συστήματα ανοικτού και κλειστού βρόγχου. Τα σερβοκινητήρια συστήματα, όπως θα δούμε πιο κάτω, εντάσσονται στην κατηγορία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόγχου ή αλλιώς συστημάτων ελέγχου με ανάδραση. Σε τέτοια συστήματα χρησιμοποιείται ένα σήμα το οποίο προέρχεται από την μέτρηση της πραγματικής εξόδου και το οποίο με την βοήθεια ανάδρασης επιστρέφει στην είσοδο του συστήματος όπου συγκρίνεται με ένα σήμα αναφοράς που αντιστοιχεί στην επιθυμητή έξοδο. Η προσθήκη ανάδρασης μας δίνει την δυνατότητα ελέγχου της επιθυμητής απόκρισης εξόδου, κάνει το σύστημα μας σχετικά ανεπηρέαστο σε πιθανές εξωτερικές διαταραχές και εσωτερικές μεταβολές, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια του συστήματος.

Ο έλεγχος της ηλεκτρικής κίνησης είναι έλεγχος ροπής, ταχύτητας και θέσης. Σημαντικό ρόλο σε ένα ηλεκτροκινητήριο σύστημα παίζουν:

- 1) η επιλογή του συστήματος ελέγχου (ανοικτού ή κλειστού βρόγχου), της τεχνικής ελέγχου (ψηφιακή ή αναλογική τεχνική) και της μεθόδου διαμόρφωσης των παλμών ελέγχου των ηλεκτρονικών διακοπών του αντιστροφέα
- 2) τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής μηχανής (πυκνότητα ισχύος, λόγος

ροπής προς το ρεύμα φορτίου, ροπή αδράνειας, ταλαντώσεις στην παραγόμενη ροπή και μέγιστο εύρος ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής)

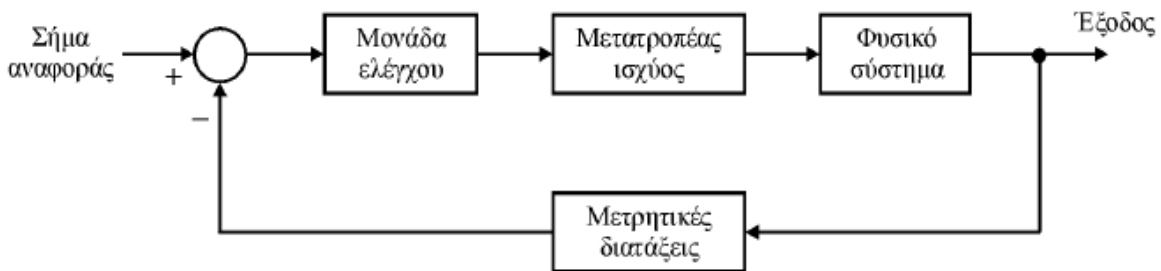
3) το συνολικό οικονομικό κόστος του συστήματος (κόστος αγοράς, κόστος λειτουργίας και συντήρησης)

Η επιλογή του συστήματος και του ελέγχου γίνεται ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής, τις απαιτήσεις σε ποιότητα κι αξιοπιστία ελέγχου και σε σχέση με το συνολικό κόστος της εγκατάστασης. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές όπου ο χρόνος κι η ακρίβεια απόκρισης του συστήματος δεν παίζουν σημαντικό ρόλο και δεν απαιτείται έλεγχος θέσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα ελέγχου ανοιχτού βρόχου το οποίο είναι απλό στην κατασκευή, εύκολο στην εγκατάσταση και οικονομικό. Αντίθετα, σε εφαρμογές όπου απαιτείται ακρίβεια και γρήγορη απόκριση στα σήματα εντολής ταχύτητας και θέσης του δρομέα (δηλαδή απαιτούνται γρήγορες κι ελεγχόμενες επιταχύνσεις κι επιβραδύνσεις) επιλέγεται σερβοκινητήριο σύστημα (servo system) με έλεγχο κλειστού βρόχου. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται η εγκατάσταση αισθητήρα ταχύτητας και θέσης στο δρομέα. Ένα σερβοκινητήριο σύστημα προϋποθέτει το βέλτιστο συνδυασμό κινητήρα και τεχνικής ελέγχου. Αυτή η τεχνική ελέγχου είναι περισσότερο πολύπλοκη κι απαιτεί ρύθμιση των παραμέτρων της ώστε να προσαρμοστεί στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας της εφαρμογής.

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά του κινητήριου συστήματος. Συνεπώς, η απάντηση στην ερώτηση ποιο είναι το καλύτερο σύστημα οδήγησης σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει να προκύπτει από το συνδυασμό της τεχνικής ελέγχου και του είδους του κινητήρα.

3.2 Γενικό λειτουργικό διάγραμμα σερβοκινητήριου συστήματος

Ένα τυπικό σερβοκινητήριο σύστημα αποτελείται από τα εξής τμήματα: το φυσικό σύστημα, τον μετατροπέα ισχύος, τη μονάδα ελέγχου και τις μετρητικές διατάξεις, σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Γενικό λειτουργικό διάγραμμα σερβοκινητήριου συστήματος.

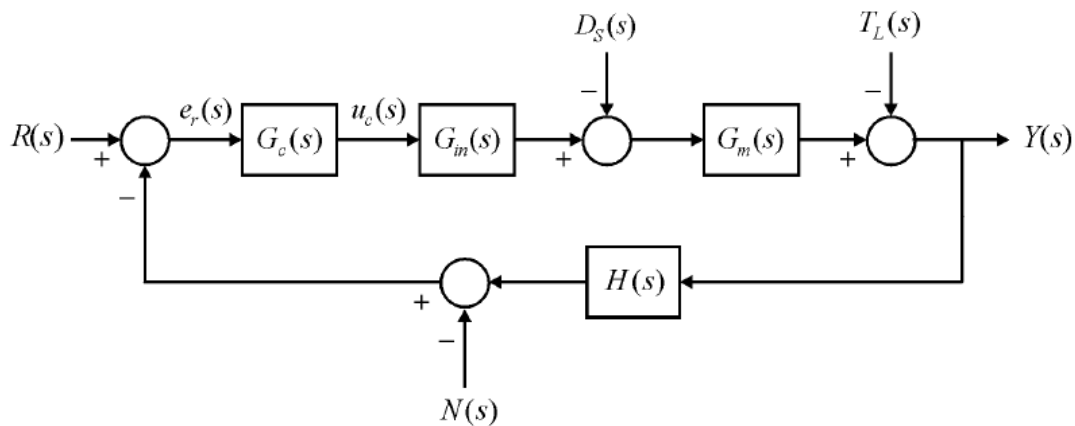
α) *Φυσικό σύστημα*: είναι ο κινητήρας του οποίου θα μπορεί να ελέγχεται η ροπή, η ταχύτητα και η θέση του δρομέα. Ο κινητήρας που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι επαγωγικός, σύγχρονος μόνιμου μαγνήτη, μαγνητικής αντίστασης, κλπ.

β) *Μετατροπέας ισχύος (converter)*: είναι η μονάδα που τροφοδοτεί τον κινητήρα με τάση (πηγή τάσης) ή ρεύμα (πηγή ρεύματος). Ο μετατροπέας ισχύος αποτελείται από την ανορθωτική διάταξη και τον αντιστροφέα ισχύος (inverter). Στα σερβοκινητήρια συστήματα χρησιμοποιούνται αντιστροφείς πηγής τάσης και η τεχνική διαμόρφωσης μπορεί να είναι PWM πηγής τάσης, PWM ελέγχου ρεύματος (με βρόχο υστέρησης, δέλτα διαμόρφωση, κλπ) και διαμόρφωση διανύσματος χώρου.

γ) *Μονάδα ελέγχου*: μαζί με το συγκριτή του σήματος αναφοράς με το σήμα ανάδρασης η μονάδα ελέγχου είναι αυτή που ουσιαστικά δημιουργεί τον κλειστό βρόχο του συστήματος. Η είσοδος στη μονάδα ελέγχου είναι το σήμα σφάλματος που προκύπτει από τη διαφορά του σήματος αναφοράς ως προς το σήμα ανάδρασης. Η μονάδα ελέγχου, ανάλογα με την τεχνική που εφαρμόζεται, υλοποιείται από έναν ή περισσότερους ελεγκτές PI και έτσι είναι εκείνη που τελικά διαμορφώνει τη δυναμική απόκριση του συστήματος. Ο σχεδιασμός της μονάδας ελέγχου και ακόμη περισσότερο η ρύθμιση των παραμέτρων των ελεγκτών έχει πολύ μεγάλη σημασία για τη βέλτιστη δυναμική συμπεριφορά του σερβοκινητήριου συστήματος.

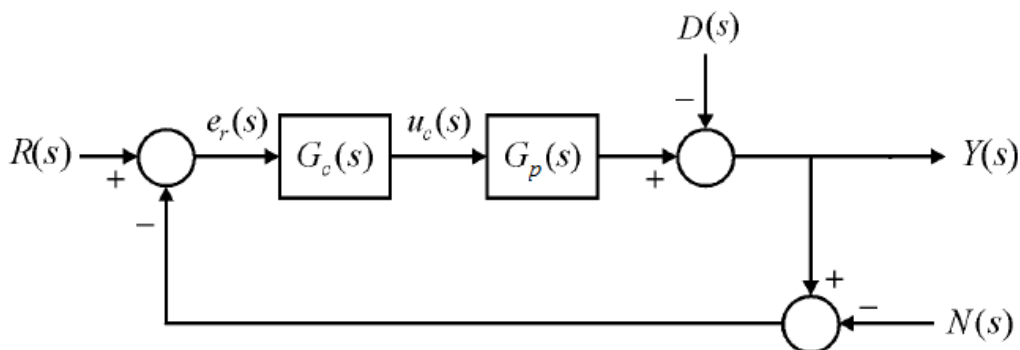
δ) *Μετρητικές διατάξεις*: είναι απαραίτητες για να δημιουργηθούν τα σήματα ανάδρασης των μεταβλητών ελέγχου, τα οποία θα οδηγηθούν στη μονάδα ελέγχου. Συνήθως χαρακτηρίζονται ως ‘μετατροπείς σημάτων’ (transducers) γιατί μετατρέπουν τις μεταβλητές ελέγχου (π.χ. τάσεις, ρεύματα, ταχύτητα, θέση, κλπ) σε σήματα τάσης, ώστε να μπορεί η μονάδα ελέγχου να τα επεξεργαστεί. Επειδή είναι πιθανόν, είτε οι μεταβλητές ελέγχου να έχουν πολύ θόρυβο είτε να εισάγεται θόρυβος κατά τη μέτρηση (δηλαδή, κατά τη μετατροπή των σημάτων μέτρησης σε σήματα τάσης), σε πολλές περιπτώσεις και εκεί όπου δεν επηρεάζεται η τιμή της μέτρησης, τα σήματα αυτά φιλτράρονται πριν οδηγηθούν στη μονάδα ελέγχου.

Κάθε ένα από τα παραπάνω τέσσερα τμήματα του σερβοκινητήριου συστήματος ελέγχου μπορεί να περιγραφεί από μία συνάρτηση μεταφοράς. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το γενικό λειτουργικό διάγραμμα του σερβοκινητήριου συστήματος χρησιμοποιώντας συναρτήσεις Laplace. Ως εισόδοι παρουσιάζονται οι τρεις διαταραχές: $T_L(s)$ η διαταραχή της ροπής, $D(s)$ η διαταραχή της dc τάσης τροφοδοσίας του αντιστροφέα ισχύος και $N(s)$ ο θόρυβος στα σήματα ανάδρασης που προέρχεται από τις μετρήσεις. Οι συμβολισμοί των συναρτήσεων μεταφοράς για τα τέσσερα τμήματα του συστήματος ελέγχου είναι: $G_m(s)$ για τον κινητήρα, $G_{in}(s)$ για τον αντιστροφέα ισχύος, $G_c(s)$ για τον ελεγκτή και $H(s)$ για τις μετρητικές διατάξεις.



Σχήμα 3.2: Γενικό λειτουργικό διάγραμμα του σερβοκινητήριου ελέγχου με συναρτήσεις Laplace

Στις περιπτώσεις όπου χρειάζεται ένα πιο απλοποιημένο μοντέλο του σερβοκινητήριου συστήματος, αυτό μπορεί να προσεγγιστεί από το μοντέλο του πιο κάτω σχήματος. Τα σήματα των διαταραχών συμβολίζονται με $D(s)$ και του θορύβου με $N(s)$. Στο μοντέλο αυτό, η καθυστέρηση που εισάγουν οι μετρητικές διατάξεις έχει αγνοηθεί.



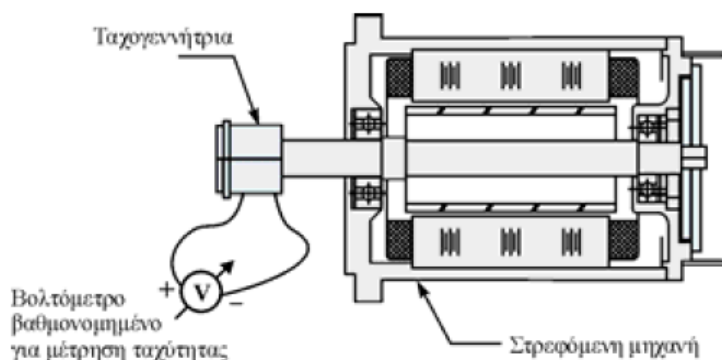
Σχήμα 3.3: Απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα του σχήματος 3.2.

3.3 Διατάξεις ανάδρασης σερβοκινητήριων συστημάτων

Η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής ή της θέσης του δρομέα μίας ηλεκτρικής μηχανής μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Η επιλογή του βέλτιστου τρόπου εξαρτάται από την τεχνική ελέγχου και τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Στο βαθμωτό έλεγχο V/f σε σύστημα κλειστού βρόχου αρκεί μία ταχογεννήτρια. Στο διανυσματικό έλεγχο, όπου απαιτείται συγχρονισμός του συστήματος που ελέγχει τις διακοπτικές εντολές του αντιστροφέα με τη θέση του δρομέα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μετρητές θέσης γρήγορης απόκρισης και μεγάλης ακρίβειας. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρομαγνητικοί μετρητές θέσης (*resolvers*), οπτικοί κωδικοποιητές θέσης (*optical encoders*) ή αισθητήρες θέσης τύπου Hall (*Hall-effect transducers*).

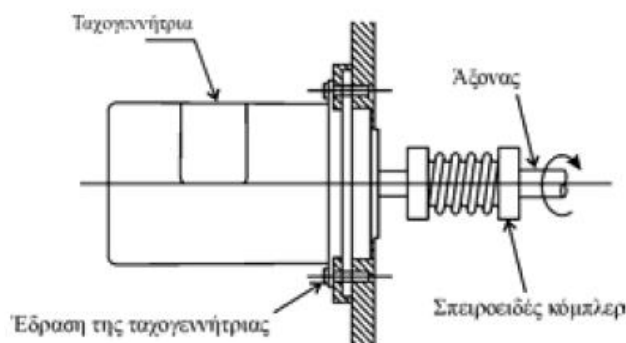
3.3.1 Ταχογεννήτρια

Η ταχογεννήτρια είναι μία μικρής ισχύος γεννήτρια (συνήθως συνεχούς ρεύματος – μόνιμου μαγνήτη) η οποία καθώς περιστρέφεται παράγει ένα σήμα ανάλογο της ταχύτητας περιστροφής της.



Σχήμα 3.4: Σύνδεση της ταχογεννήτριας στον άξονα της μηχανής.

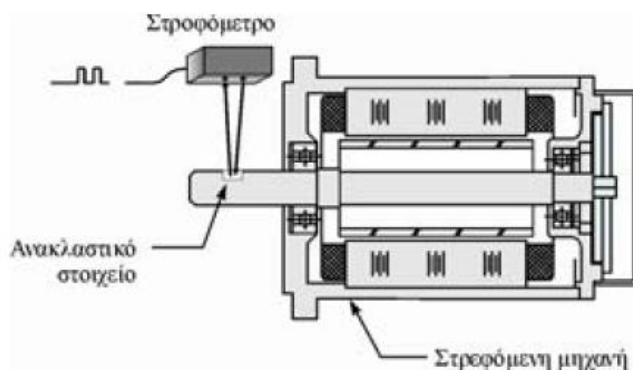
Η ταχογεννήτρια έχει συνήθως δικό της άξονα ο οποίος είναι κομπλαρισμένος στον άξονα του κινητήρα με ειδικό σπειροειδές κόμπλερ (σχήμα 3.5). Αυτό το κόμπλερ έχει την ικανότητα να αποσβένει τα τυχόν σφάλματα που υπάρχουν στην ευθυγράμμιση του άξονα του κινητήρα με τον άξονα της ταχογεννήτριας. Αν βαθμονομήσουμε την τάση του σήματος που παράγει η ταχογεννήτρια, μπορούμε να μετρούμε με ικανοποιητική ακρίβεια την ταχύτητα του κινητήρα. Επιπλέον, από την πολικότητα της τάσης εξόδου της ταχογεννήτριας μπορούμε να γνωρίζουμε τη φορά περιστροφής.



Σχήμα 3.5: Ταχογεννήτρια τύπου άξονα κομπλαρισμένη στον άξονα του κινητήρα.

Η ταχογεννήτρια είναι ο πιο απλός και οικονομικός τρόπος μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής μιας ηλεκτρικής μηχανής και χρησιμοποιείται σε συστήματα ελέγχου όπου δεν απαιτείται μέτρηση της θέσης του δρομέα. Σε ειδικές εφαρμογές και κυρίως εκεί που επιβάλλεται για λόγους ασφαλείας καθώς και σε φορητά όργανα μέτρησης της ταχύτητας χρησιμοποιούνται ταχομετρητές laser (στροφόμετρα). Οι ταχομετρητές laser φωτίζουν

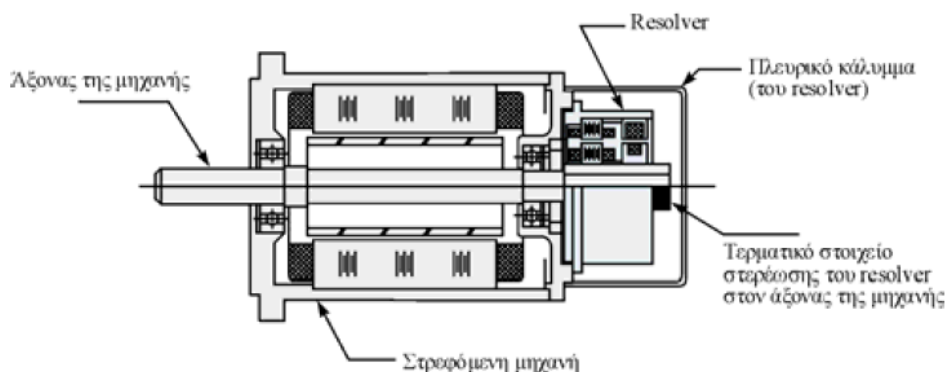
με ακτίνες laser ένα ειδικό ανακλαστικό χαρτί που κολλιέται πάνω στον άξονα της μηχανής και από την συχνότητα του ανακλώμενου σήματος προσδιορίζεται η ταχύτητα περιστροφής (σχήμα 3.6). Έτσι μπορούν να μετρούν την ταχύτητα από απόσταση και χωρίς να είναι κομπλαρισμένοι με τον άξονα του κινητήρα.



Σχήμα 3.6: Στροφόμετρο (Ταχομετρητής laser).

3.3.2 Ηλεκτρομαγνητικός μετρητής θέσης (resolver)

Ο ηλεκτρομαγνητικός μετρητής θέσης (*resolver*) χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου εκτός από την πληροφορία της ταχύτητας, απαιτείται η ακριβής θέση του δρομέα. Ο *resolver* είναι ακριβότερος σε σχέση με την ταχογεννήτρια και τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του είναι ότι έχει στιβαρή κατασκευή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών γιατί δεν έχει μαγνήτες. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές με μεγάλες ταχύτητες περιστροφής (μέχρι και 40.000 ΣΑΛ), γιατί δεν έχει ψήκτρες για την αγωγή σύνδεση του κυκλώματος του δρομέα.

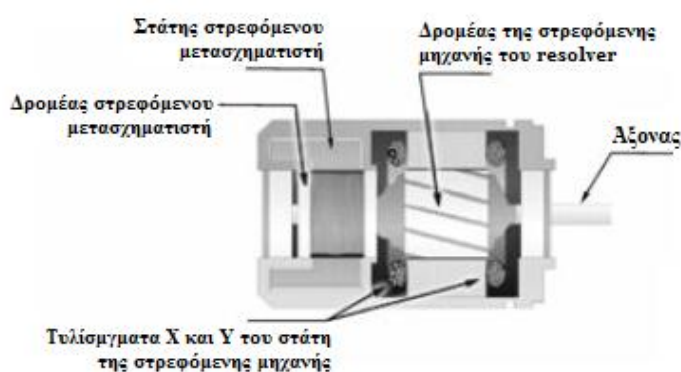


Σχήμα 3.7: Resolver ενσωματωμένου τύπου (*built-in type resolver*).

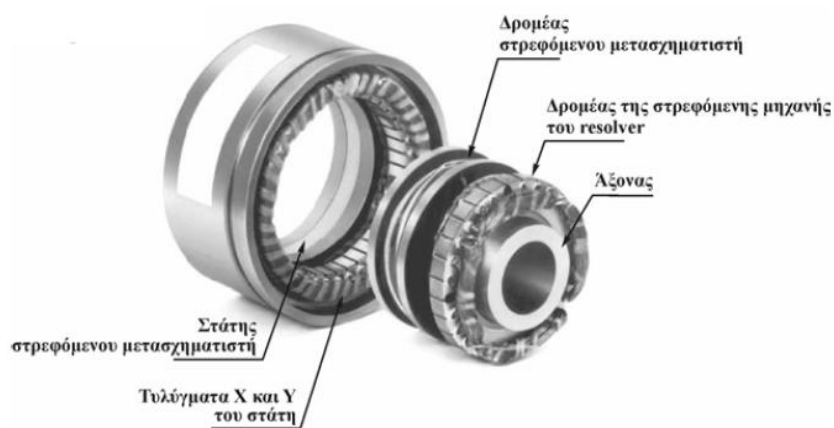
Ο *resolver* είναι ένας ειδικού τύπου στροφόμενος μετασχηματιστής όπου το πλάτος της τάσης εξόδου μεταβάλλεται ανάλογα με τη γωνία στροφής του άξονα του κινητήρα πάνω στον οποίο είναι εδρασμένος. Υπάρχουν διάφοροι τύποι resolver ανάλογα με τον τρόπο

έδρασης του στον άξονα του κινητήρα, τον τρόπο τροφοδοσίας της τάσης και τον τρόπο παραγωγής της τάσης εξόδου του.

Ο *resolver* που έχει δικό του άξονα ονομάζεται τύπου άξονα (*shaft type resolver*) και κομπλάρεται στον κινητήρα με εξωτερικό σπειροειδές κομπλέρ, όπως και στην περίπτωση της ταχογεννήτριας. Ωστόσο, περισσότερο συνηθισμένος είναι ο ενσωματωμένου τύπου (*built-in type resolver*), ο οποίος έχει τη μορφή δακτύλιου και περνιέται από μέσα ο άξονας του κινητήρα, σχήμα 3.7. Ο *resolver* ενσωματωμένου τύπου βρίσκεται κάτω από το πλευρικό κάλυμμα προς το πίσω τμήμα αυτού και συνεπώς δεν αυξάνεται το συνολικό μήκος της μηχανής. Σημαντικό μειονέκτημα και των δύο τύπων είναι ότι επειδή είναι ηλεκτρομαγνητικού τύπου ενδεχομένως να υπάρχουν παρεμβολές στις μετρήσεις λόγω της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου και της θερμότητας της μηχανής.



(α)



(β)

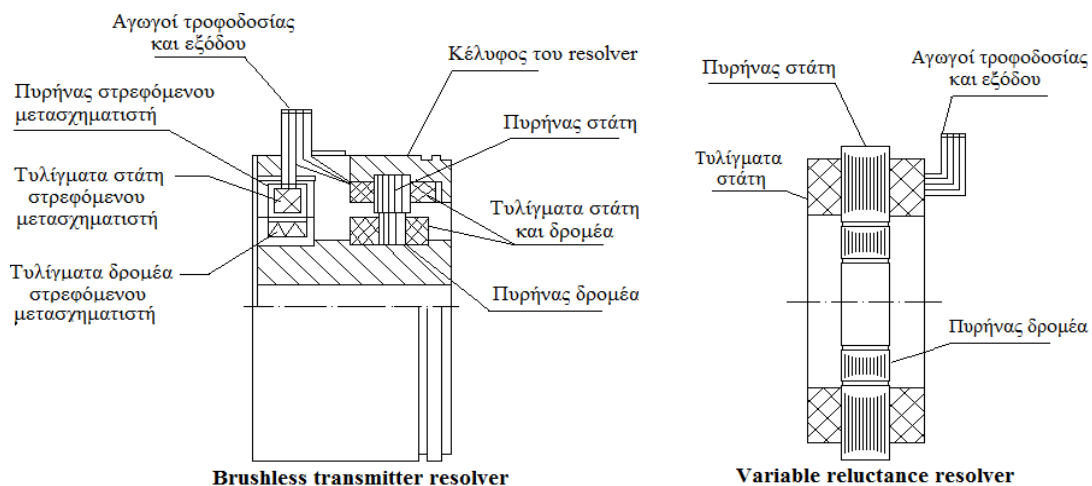
Σχήμα 3.8: Κατασκευαστικά μέρη του brushless transmitter resolver: (α) τύπου άξονα και (β) ενσωματωμένου τύπου.

Ο *resolver* αποτελείται από δύο τμήματα, ένα στροφόμενο μετασχηματιστή και μία επαγωγικού τύπου στροφόμενη διφασική ηλεκτρική μηχανή. Το ακίνητο μέρος των δύο τμημάτων αποτελεί το στάτη και το στροφόμενο μέρος το δρομέα. Τα κατασκευαστικά

μέρη των ηλεκτρομαγνητικών μετρητών θέσης τύπου άξονα και ενσωματωμένου τύπου φαίνονται στο σχήμα 3.8.α και 3.8.β αντίστοιχα.

Ο πιο συνηθισμένος τύπος *resolver* είναι γωστός ως *brushless transmitter resolver*. Ο *resolver* χαρακτηρίζεται ως μετρητής της απόλυτης θέσης του δρομέα, γιατί προσδιορίζει τη θέση του δρομέα ως συγκεκριμένη θέση και όχι σε σχέση με κάποια γνωστή αρχική θέση. Επίσης δίνει τη θέση του δρομέα σε οποιαδήποτε ταχύτητα περιστροφής ακόμη και στη μηδενική ταχύτητα. Η φορά περιστροφής προσδιορίζεται από το πρόσημο της διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο τάσεων εξόδου του *resolver*.

Η στρεφόμενη μηχανή του *resolver* που παρουσιάστηκε παραπάνω έχει κυλινδρικό πυρήνα δρομέα. Υπάρχει ένας τύπος *resolver* στον οποίο η τάση που επάγεται στο στάτη προκύπτει από το μεταβαλλόμενο πεδίο που παράγει ένας έκτυπων πόλων δρομέας. Ο *resolver* αυτός ονομάζεται μαγνητικής αντίστασης (*variable reluctance resolver*) και η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στη μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης του διακένου μεταξύ στάτη και δρομέα σε σχέση με τη του δρομέα. Συνήθως είναι ενσωματωμένου τύπου και μάλιστα είναι λεπτότερος σε σύγκριση με τον αντίστοιχο *brushless transmitter resolver*, με αποτέλεσμα να μειώνεται το συνολικό μήκος του συστήματος κίνησης, σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: Σύγκριση μεγεθών του “brushless transmitter resolver” και του “variable reluctance resolver”.

Η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του *resolver* παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10. Αν η τάση εισόδου στο πρωτεύον του στρεφόμενου μετασχηματιστή είναι:

$$E_{R1-R2} = E_0 \sin\omega t \quad (3.1)$$

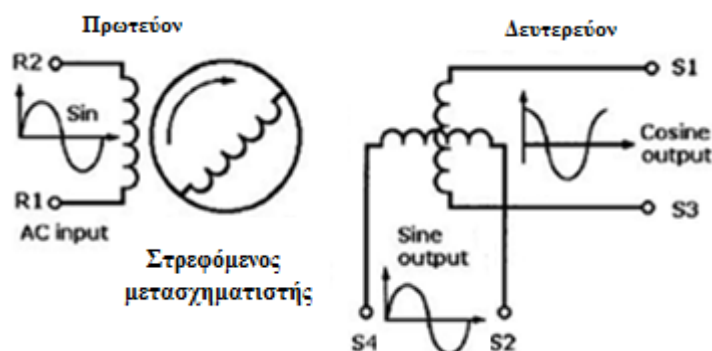
οι τάσεις εξόδου στους ακροδέκτες S1-S3 και S2-S4 είναι αντίστοιχα:

$$E_{S1-S3} = K_m E_{R1-R2} \cos\theta = K_m E_0 \sin\omega t \cos(X\theta) \quad (3.2)$$

και

$$E_{S2-S4} = K_m E_{R1-R2} \sin\theta = K_m E_0 \sin\omega t \sin(X\theta) \quad (3.3)$$

Όπου K_m ο λόγος μετασχηματισμού, θ η γωνία στροφής του δρομέα, $\omega = 2\pi f$, η κυκλική συχνότητα της τάσης εισόδου του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή, X ο συντελεστής έκτυπων πόλων του δρομέα και E_0 το πλάτος της τάσης εισόδου του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.10: Συνδεσμολογία τυλιγμάτων του resolver μαγνητικής αντίστασης.

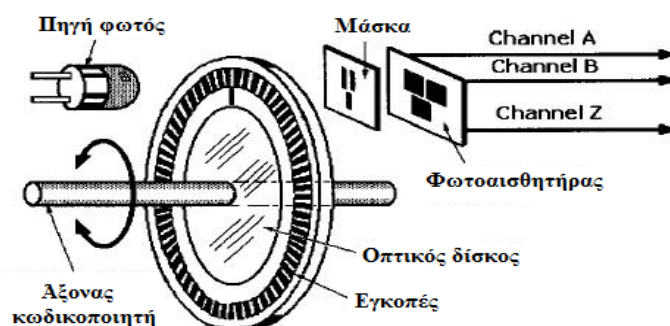
3.3.3 Οπτικός κωδικοποιητής θέσης (optical encoder)

Ο οπτικός κωδικοποιητής θέσης προσδιορίζει τη θέση του δρομέα μετατρέποντας απ'ευθείας την πληροφορία της θέσης σε μια σειρά ψηφιακών παλμών. Αποτελείται από ένα δίσκο με εγκοπές στην επιφάνεια του και ένα σύστημα φωτεινής πηγής (*infrared emitter*) με φωτοαισθητήρα (φωτοτρανζίστορ), σχήμα 11. Μία δέσμη φωτός πέφτει πάνω στις εγκοπές του δίσκου και καθώς ο δίσκος περιστρέφεται εναλλάσσονται τα διαστήματα από τα οποία μπορεί να περάσει το φως μέσα από τις εγκοπές. Αυτή η εναλλαγή φωτεινών και σκοτεινών διαστημάτων γίνεται αισθητή από τα φωτοαισθητήρια, που βρίσκονται πίσω από το δίσκο και τα οποία μετατρέπουν την παλμοσειρά του φωτεινού σήματος σε παλμοσειρά τάσης.

Οι οπτικοί κωδικοποιητές διακρίνονται σε κωδικοποιητές σχετικής θέσης (*incremental encoders* ή *relative encoders*) και κωδικοποιητές απόλυτης θέσης (*absolute encoders*). Με τους οπτικούς κωδικοποιητές σχετικής θέσης μπορεί να προσδιοριστεί η θέση ανά περιστροφή σε σχέση με κάποιο σημείο αναφοράς της περιφέρειας του δίσκου (*index* σήμα), ενώ οι οπτικοί κωδικοποιητές απόλυτης θέσης δίνουν την απόλυτη θέση απ'ευθείας σε ψηφιακή μορφή χωρίς να χρειάζεται να παρεμβληθεί κάποιος ψηφιακός μετατροπέας. Οι οπτικοί κωδικοποιητές σχετικής θέσης χρησιμοποιούνται ευρύτατα αφού είναι πιο απλοί στην κατασκευή και οικονομικότεροι σε σύγκριση με τους οπτικούς κωδικοποιητές απόλυτης θέσης.

3.3.3.1 Οπτικός κωδικοποιητής σχετικής θέσης

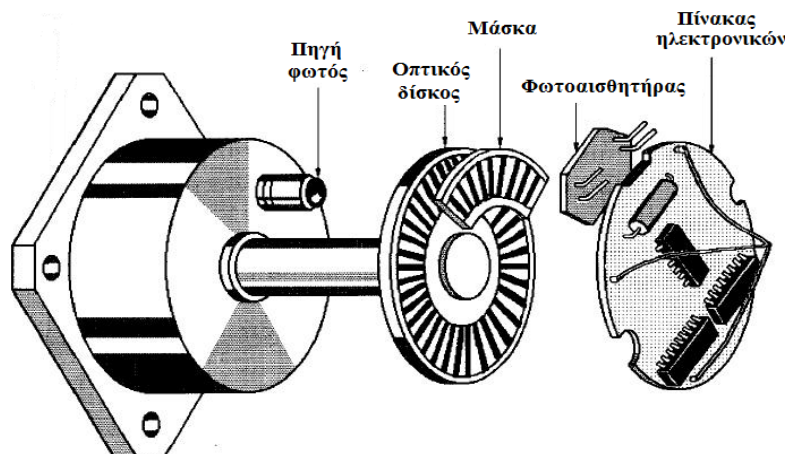
Οι οπτικοί κωδικοποιητές σχετικής θέσης είναι πιο απλοί στην κατασκευή και οικονομικότεροι σε σύγκριση με τους οπτικούς κωδικοποιητές απόλυτης θέσης. Ο δίσκος των κωδικοποιητών σχετικής θέσης αποτελείται από μία σειρά εγκοπών (όπως στο σχήμα 3.11) ή δύο σειρές εγκοπών στην περιφέρεια του και δύο φωτοαισθητήρια των οποίων οι εξόδοι ονομάζονται κανάλια A και B. Στις εξόδους των δύο καναλιών παράγονται ισάριθμες παλμοσειρές τάσης των οποίων η συχνότητα είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του άξονα. Τα σήματα των δύο καναλιών έχουν διαφορά φάσης μεταξύ τους 90° (ή $\frac{1}{4}$ της περιόδου) και χαρακτηρίζονται ως κάθετα σήματα. Ανάλογα με το ποιο από τα δύο σήματα προηγείται μπορεί να προσδιοριστεί η φορά περιστροφής του κινητήρα.



Σχήμα 3.11: Βασικά στοιχεία ενός οπτικού κωδικοποιητή θέσης.

Σε κάποιο σημείο της περιφέρειας του δίσκου υπάρχει μία εγκοπή και από το αντίστοιχο φωτοαισθητήριο παράγεται το σήμα αναφοράς. Το κανάλι αυτό ονομάζεται δείκτης (*index σήμα*) και παράγει έναν παλμό ανά περιστροφή. Το σήμα αυτό είναι απαραίτητο γιατί μετρώντας τους παλμούς που παράγονται μετά από τη λήψη του *index σήματος* στη μονάδα του χρόνου, μπορούμε να προσδιορίσουμε τόσο την ταχύτητα όσο και τη θέση του δρομέα. Δηλαδή, ο κωδικοποιητής αυτός προσδιορίζει την απόσταση μεταξύ της θέσης δρομέα και του δείκτη, με άλλα λόγια τη σχετική θέση του δρομέα.

Για να προσδιοριστεί σε κάθε στιγμή η απόλυτη θέση του δρομέα, θα πρέπει να είναι γνωστή η θέση του *index σήματος* σε σχέση με κάποιο σταθερό σημείο του δρομέα ή να ευθυγραμμίσουμε το *index σήμα* με ένα σταθερό σημείο του δρομέα. Για παράδειγμα, στις σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη ευθυγραμμίζουμε το *index σήμα* με το μαγνητικό άξονα μέγιστης διέγερσης των μαγνητών. Ωστόσο, η εξάρτηση της μέτρησης από το *index σήμα* είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα του κωδικοποιητή σχετικής θέσης, γιατί κατά την εκκίνηση του πρέπει αρχικά να αναζητήσει τη θέση του *index* ώστε να μπορεί στη συνέχεια να υπολογίζει τη θέση του δρομέα. Με άλλα λόγια, δεν μπορεί μόλις εκκινήσει ο κινητήρας να προσδιορίσει αμέσως τη θέση του δρομέα.



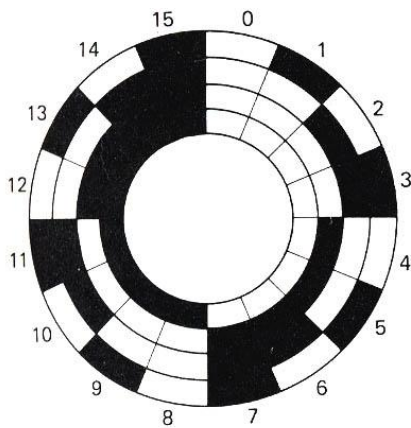
Σχήμα 3.12: Οπτικός κωδικοποιητής σχετικής θέσης.

3.3.3.2 Οπτικός κωδικοποιητής απόλυτης θέσης

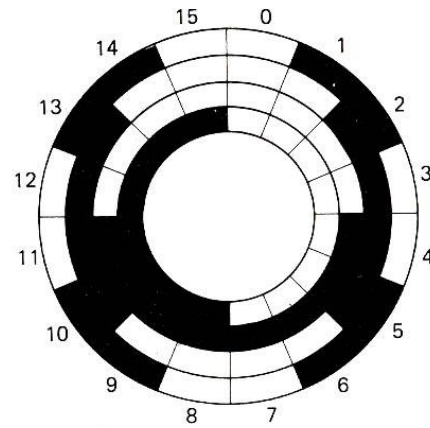
Ένας *absolute encoder* αποτελείται από έναν γυάλινο οπτικό δίσκο, ο οποίος φέρει ομόκεντρους κύκλους που ονομάζονται ίχνη (*tracks*). Κάθε ίχνος φέρει ένα σύνολο από διαδοχικούς διαφανείς και αδιαφανείς τομείς (*sectors*), οι οποίοι έχουν προκύψει με απόθεση μεταλλικού φιλμ. Σε κάθε ίχνος εκπέμπεται δέσμη φωτός, η οποία κατευθύνεται σε μία φωτοδίοδο ή ένα φωτοτρανζίστορ που βρίσκεται τοποθετημένο στην πίσω πλευρά του οπτικού δίσκου. Με κατάλληλη διαρρύθμιση των διαφανών και αδιαφανών τομέων του δίσκου είναι δυνατός ο μετασχηματισμός ενός πεπερασμένου πλήθους γωνιακών θέσεων σε ψηφιακά δεδομένα. Ο αριθμός των ιχνών καθορίζει το μήκος της προκύπτουσας ψηφιολέξης και κατά συνέπεια την ανάλυση του *encoder*.

Κατά τη χρήση της κλασικής ψηφιακής κωδικοποίησης και αρίθμησης για τις γωνιακές θέσεις είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένα πρόβλημα, το οποίο σχετίζεται με την ταυτόχρονη μετάβαση πολλών ιχνών από διαφανείς σε αδιαφανείς τομείς και αντίστροφα. Στην περίπτωση αυτή είναι πιθανό να υπάρξει ασάφεια στις μετρήσεις με αποτέλεσμα να πάρουμε λανθασμένα αποτελέσματα. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος συχνά γίνεται χρήση του κώδικα *Gray* με βάση τον οποίο σε κάθε διακεκριμένη μετάβαση έχουμε μία μόνο αλλαγή στην αντίθεση (*contrast*) του οπτικού δίσκου.

Στα παρακάτω σχήματα 3.13 και 3.14, δίνονται οι σχηματικές αναπαραστάσεις δύο *absolute encoders* με 4 ίχνη, οι οποίοι μπορούν να ορίσουν $2^4=16$ διαφορετικές γωνιακές θέσεις. Από αυτούς ο πρώτος χρησιμοποιεί κλασική ψηφιακή κωδικοποίηση ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιεί κωδικοποίηση *Gray*. Από απλή παρατήρηση των δύο σχημάτων μπορεί κανείς να διακρίνει τις υφιστάμενες διαφορές και τη φιλοσοφία στην οποία στηρίζεται ο κώδικας *Gray*.



Σχήμα 3.13: Αναπαράσταση 4-bit Absolute Encoder



Σχήμα 3.14: Αναπαράσταση 4-bit Absolute Encoder με κωδικοποίηση Gray

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των δίσκων κώδικα *Gray* είναι ότι από θέση σε θέση αλλάζει μόνο ένα bit, ενώ στο δυαδικό κώδικα αλλάζουν πολύ περισσότερα bit. Έτσι, το οποιοδήποτε σφάλμα στη μέτρηση οδηγεί σε μεγαλύτερο σφάλμα στο δυαδικό κώδικα σε σύγκριση με τον κώδικα *Gray*.

Τελειώνοντας κρίνεται σκόπιμο να σημειώσουμε ότι σύμφωνα με τις συνήθεις ανάγκες ελέγχου μία τυπική ανάλυση για *absolute encoder* είναι 12 τουλάχιστον bits (ίχνη). Στην περίπτωση αυτή μπορούν να κωδικοποιηθούν $2^{12}=4096$ διαφορετικές γωνιακές θέσεις, όμως η πολυπλοκότητα και το κόστος του αισθητήρα αυξάνονται σημαντικά.

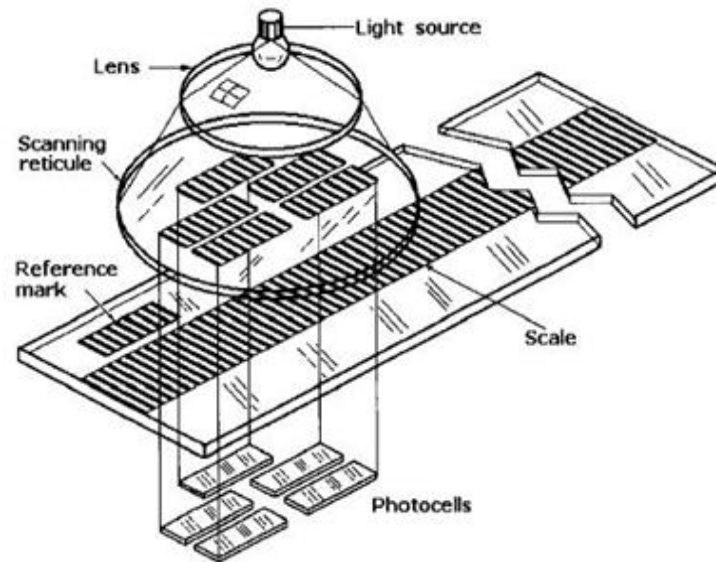


Σχήμα 3.15: Absolute Encoder με ανάλυση 10-bits.

Στο σχήμα 3.15 φαίνεται ένας *absolute encoder* με ανάλυση 10 bits. Ο αισθητήρας αυτός είναι σε θέση να κωδικοποιήσει $2^{10}=1024$ διακεκριμένες γωνίες της άρθρωσης στην οποία και τοποθετείται.

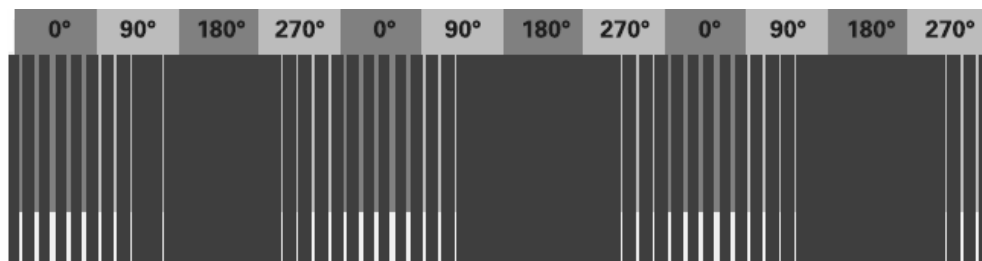
3.3.3.3 Γραμμικός οπτικός κωδικοποιητής θέσης (linear encoder)

Ο γραμμικός οπτικός κωδικοποιητής θέσης προσδιορίζει την θέση του δρομέα μετατρέποντας απ' ευθείας την πληροφορία της θέσης σε μια σειρά ψηφιακών παλμών. Αποτελείται από μία ταινία με εγκοπές (*scale*) στην επιφάνεια της και ένα σύστημα πηγής φωτεινού σήματος (*light source*) με φωτοαισθητήρια (*photocells*), σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.16: Τρόπος λειτουργίας του γραμμικού οπτικού κωδικοποιητή θέσης.

Μια δέσμη φωτός πέφτει πάνω στις εγκοπές της ταινίας και καθώς ο οπτικός κωδικοποιητής κινείται παράλληλα προς την ταινία εναλλάσσονται τα διαστήματα από τα οποία μπορεί να περάσει το φως μέσα από τις εγκοπές. Αυτή η εναλλαγή φωτεινών και σκοτεινών διαστημάτων γίνεται αισθητή από τα φωτοαισθητήρια (Σχήμα 3.17), που βρίσκονται πίσω από την ταινία και μετατρέπουν την παλμοσειρά του φωτεινού σήματος σε παλμοσειρά τάσης.

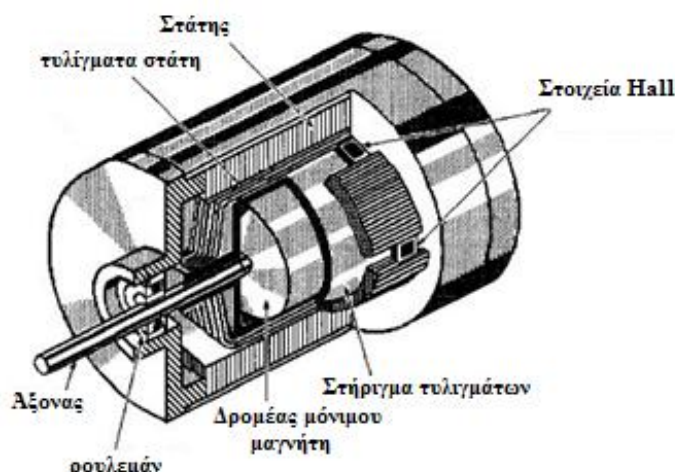


Σχήμα 3.17: Στιγμιότυπο φωτοαισθητηρίου με σκοτεινές και φωτεινές περιοχές.

Οι γραμμικοί οπτικοί κωδικοποιητές θέσης είναι συνήθως εγκατεστημένοι επάνω στο κινούμενο μέρος του κινητήρα ώστε να ακολουθούν την κίνηση του και να μετρούν κάθε στιγμή την ακριβή θέση του.

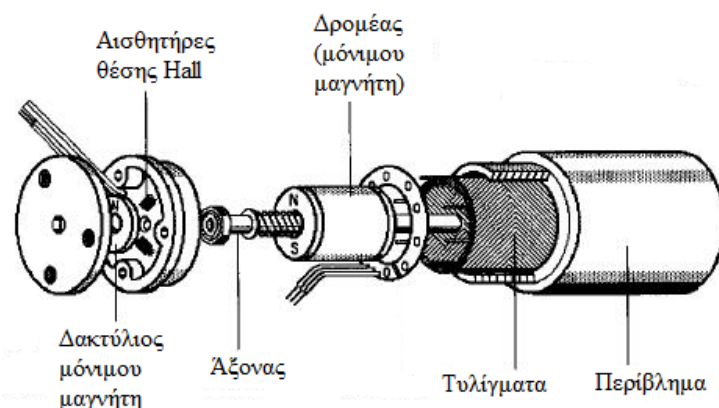
3.3.4 Αισθητήρες θέσης Hall

Ο αισθητήρας θέσης Hall (*Hall-effect transducer*) είναι ένας ημιαγωγικός διακόπτης, ο οποίος κλείνει (on) όταν βρεθεί σε ένα μαγνητικό πεδίο μεγαλύτερο από κάποια συγκεκριμένη τιμή (τιμή κατωφλίου) και ανοίγει (off) όταν η τιμή του πεδίου πέσει κάτω από τη τιμή κατωφλίου. Η λειτουργία των αισθητήρων Hall στηρίζεται στο ομώνυμο φαινόμενο Hall (από τον Edwin Hall που το πρωτοπαρατήρησε το 1879) βάση του οποίου όταν ένα ημιαγωγικό στοιχείο (στοιχείο Hall) βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο και διαρρέεται από ρεύμα τότε αναπτύσσεται τάση, η τιμή της οποίας είναι ανάλογη της μαγνητικής επαγωγής του πεδίου και έντασης του ρεύματος. Το στοιχείο Hall (*Hall-effect Element*), σχήμα 3.18, είναι το βασικό “συστατικό” ενός αισθητήρα Hall και ουσιαστικά μετατρέπει το μαγνητικό πεδίο σε ηλεκτρικό σήμα χαμηλότερου επίπεδου. Όταν χρησιμοποιείται μόνο του συνήθως αναφέρεται και ως *Hall effect generator*. Οι διευθύνσεις του πεδίου, του ρεύματος και της παραγόμενης τάσης είναι κάθετες μεταξύ τους.



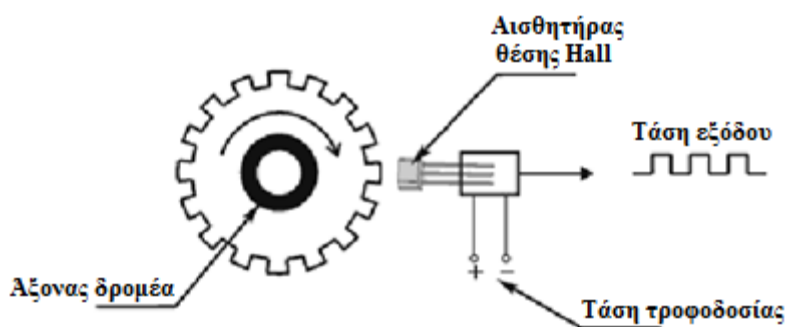
Σχήμα 3.18: Τομή κινητήρα ΣΡ χωρίς ψήκτρες με στοιχεία φαινομένου Hall.

Η εφαρμογή των αισθητήρων Hall για τη μέτρηση της θέσης σε έναν τριφασικό κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 3.19. Οι αισθητήρες τοποθετούνται σε γωνία 120^0 μεταξύ τους. Ένας δίσκος με μαγνήτες κατάλληλου προσανατολισμού μαγνήτισης τοποθετείται στον άξονα του δρομέα και σε μικρή απόσταση από τους αισθητήρες. Καθώς περιστρέφεται ο δρομέας, μεταβάλλεται η διεύθυνση του πεδίου που αναγνωρίζει ο κάθε αισθητήρας και έτσι προσδιορίζεται η θέση του δρομέα ως προς τον κάθε αισθητήρα Hall. Η χρήση τριών αισθητήρων Hall είναι επαρκής για να λειτουργήσει ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη τετραγωνικού παλμού, ωστόσο η πληροφορία αυτή δεν είναι αρκετή για την υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου. Στην περίπτωση κινητήρα με τρεις αισθητήρες Hall, ο παραπάνω σχηματισμός μπορεί να προσδιορίσει μέχρι τέσσερις διακριτές θέσεις του δρομέα (δηλαδή ο κάθε αισθητήρας μπορεί να προσδιορίσει θέσεις 90^0).



Σχήμα 3.19: Μέτρηση της θέσης του δρομέα τριφασικής στρεφόμενης μηχανής με αισθητήρες Hall.

Υπάρχουν σχεδιασμοί διατάξεων μέτρησης της θέσης του δρομέα με αισθητήρες hall, όπου ο αριθμός διακριτών θέσεων που μπορούμε να μετρήσουμε είναι πολύ μεγαλύτερος. Στο σχήμα 3.20, ο οδοντωτός τροχός έχει μαγνήτες στα άκρα του και είναι στερεωμένος πάνω στον άξονα του δρομέα. Καθώς περιστρέφεται ο δρομέας, περιστρέφεται μαζί του και ο οδοντωτός άξονας με τους μαγνήτες. Ο αισθητήρας Hall που βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την περιφέρεια του τροχού μετρά τη μεταβολή του πεδίου που περνά από μπροστά του και παράγει στην έξοδο του μια παλμοσειρά τάσης (όπως ο οπτικός κωδικοποιητής σχετικής θέσης) και έτσι εκτιμάται η θέση του δρομέα.



Σχήμα 3.20: Μέτρηση της θέσης του δρομέα στρεφόμενης μηχανής με αισθητήρες Hall (χρησιμοποιώντας οδοντωτό τροχό με μαγνήτες, στερεωμένο στον άξονα της μηχανής).

Η ανάλυση της διάταξης αυτής είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την εφαρμογή του σχήματος 3.19. Στην περίπτωση του σχήματος 3.20, ο αριθμός των διακριτών θέσεων είναι όσος ο αριθμός των δοντιών του τροχού ωστόσο το σήμα εξόδου απαιτεί επεξεργασία πριν οδηγηθεί στον ψηφιακό ελεγκτή. Επίσης, εκτός από την κατασκευή αισθητήρων θέσης, στην αρχή του φαινομένου Hall βασίζονται διάφορες διατάξεις μέτρησης του μαγνητικού πεδίου και του ηλεκτρικού ρεύματος.

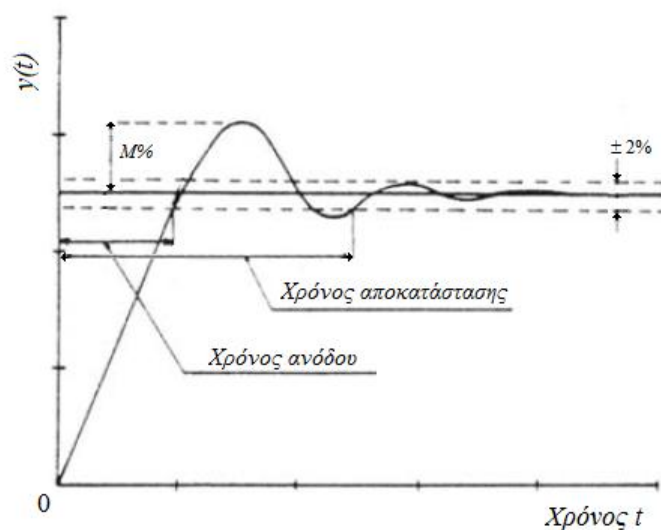
3.3.5 Συστήματα ελέγχου χωρίς αισθητήρες θέσης

Η μέτρηση της θέσης είναι απαραίτητη για την υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου στις στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές. Ωστόσο, οι αισθητήρες θέσης είναι εξαρτήματα που αυξάνουν το συνολικό κόστος της διάταξης, τον όγκο του σερβοκινητήριου συστήματος και σε πολλές περιπτώσεις απαιτούν ειδική προστασία ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σερβοκινητήριο σύστημα σε βιομηχανικό περιβάλλον. Τέλος, σε πολλές περιπτώσεις οι αισθητήρες θέσης μειώνουν την αξιοπιστία του συστήματος ελέγχου, γιατί είναι ευαίσθητοι και επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές ερευνητικές προσπάθειες σε πολλές τεχνικές ελέγχου ώστε τα σερβοκινητήρια συστήματα να μην χρειάζονται εξωτερικούς αισθητήρες θέσης. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως 'sensorless' συστήματα. Ωστόσο οι τεχνικές αυτές είναι πολύπλοκες και δεν έχουν ακόμη τελειοποιηθεί καθώς παρουσιάζουν προβλήματα στην εκκίνηση καθώς και προβλήματα αξιοπιστίας.

3.4 Δυναμική απόκριση σερβοκινητήριου συστήματος

Η αξιολόγηση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος γίνεται εφαρμόζοντας βηματικό σήμα εισόδου στο σύστημα και βηματικό σήμα διαταραχής. Αυτό είναι μία πιο γενική αντιμετώπιση, εκτός αν είναι ήδη γνωστά τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής και τα σήματα εισόδου και διαταραχών, οπότε τότε η ρύθμιση των παραμέτρων των ελεγκτών καθώς και η αξιολόγηση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος γίνεται βασιζόμενοι στα πραγματικά σήματα εισόδου και διαταραχών. Έστω ότι στο σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου του σχήματος 3.2 εφαρμόζεται χωριστά βηματική είσοδος $r(t)$ και βηματική είσοδος διαταραχής $T_L(t)$.



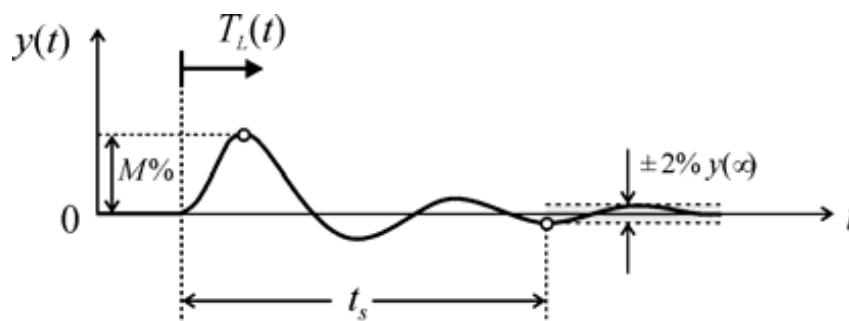
Σχήμα 3.21: Δυναμική απόκριση του συστήματος σε βηματική μεταβολή της εισόδου.

Η απόκριση του συστήματος στο πεδίο του χρόνου $y(t)$ θα έχει τη μορφή που φαίνεται στα σχήματα 3.21 και 3.22 για τη βηματική είσοδο και διαταραχή αντίστοιχα.

Οι παρακάτω δείκτες χρησιμοποιούνται για να περιγράψουμε και να αξιολογήσουμε τη δυναμική απόκριση του συστήματος:

- Υπερύψωση (Overshoot, $M\%$): Είναι το επί τοις εκατό ποσοστό μέγιστης αύξησης της απόκρισης του συστήματος σε σχέση με τη βηματική είσοδο.
- Χρόνος ανόδου (Rise time, t_r): Είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε η έξοδος να αποκτήσει για πρώτη φορά την τιμή της μόνιμης κατάστασης ισορροπίας $y(\infty)$, δηλαδή την τιμή του βηματικού σήματος εισόδου.
- Χρόνος αποκατάστασης (Settling time, t_s): Είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε η έξοδος να διαφέρει από τη τιμή της μόνιμης κατάστασης ισορροπίας $y(\infty)$ μικρότερο από $\pm 2\%$.

Οι παραπάνω τρεις δείκτες πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότεροι ώστε η απόκριση του συστήματος να είναι γρήγορη, να παρακολουθεί την είσοδο χωρίς μεγάλη υπερύψωση κατά τη διάρκεια του μεταβατικού και να αποσβένει γρήγορα τις διαταραχές. Για να ικανοποιούνται τα παραπάνω κριτήρια θα πρέπει να ρυθμιστούν σωστά οι παράμετροι των ελεγκτών. Ωστόσο, η προσπάθεια μείωσης ενός από τους παραπάνω δείκτες ώστε να πετύχουμε ακόμη καλύτερη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ενδεχομένως να οδηγήσει στην αύξηση των τιμών των υπόλοιπων δεικτών.



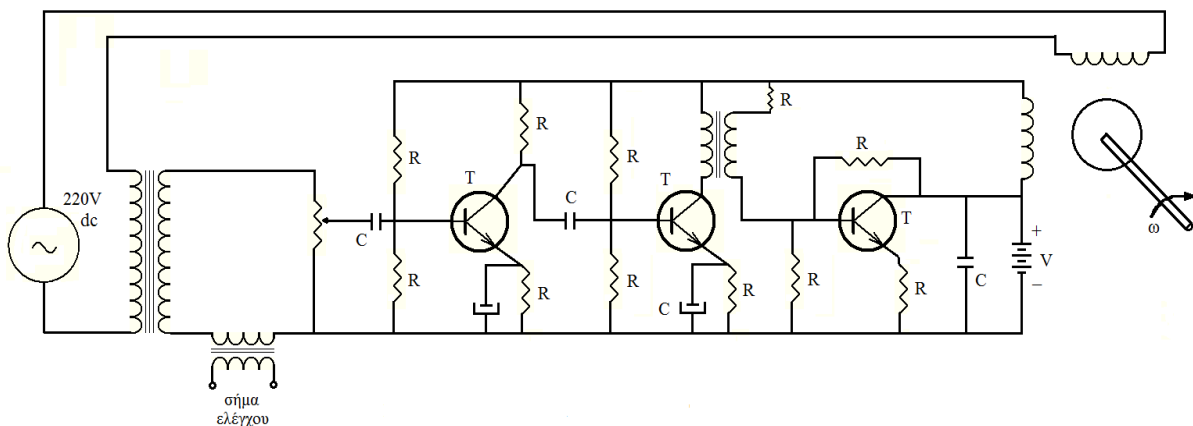
Σχήμα 3.22: Δυναμική απόκριση του συστήματος σε βηματική είσοδο διαταραχής.

Γενικά, η σωστή ρύθμιση των παραμέτρων των ελεγκτών έχει πολύ μεγάλη σημασία σε ένα σερβοκινητήριο σύστημα. Ωστόσο, πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν και τα διάφορα τμήματα που απαρτίζουν το σερβοκινητήριο σύστημα, όπως είναι ο κινητήρας, η τεχνική έλεγχου που εφαρμόζεται στο μετατροπέα ισχύος και η κατασκευή μετρητικών διατάξεων. Για παράδειγμα, η δυναμική απόκριση ενός σερβοκινητήριου συστήματος με σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη είναι πολύ γρηγορότερη σε σύγκριση με ένα σερβοκινητήριο σύστημα με επαγωγικό κινητήρα της ίδιας ισχύος λόγω της μικρότερης ροπής αδράνειας του σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.

3.5 Σερβοενισχυτές - Συστήματα οδήγησης σερβοκινητήρων

Η λειτουργία ανάδρασης σε ένα σερβοκινητήρα αποσκοπεί στο συνεχή έλεγχο των εντολών θέσης και ταχύτητας που δίνονται προς τον κινητήρα. Αυτό επιτυγχάνεται από τον ενισχυτή του σερβοσυστήματος που αποτελεί και το σύστημα οδήγησης του σερβοκινητήρα (servodriven). Με τον όρο σερβοενισχυτές εννοούμε τους ενισχυτές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Είναι η μονάδα η οποία αποτελεί ενδιάμεσο σταθμό μεταξύ μονάδας ελέγχου και σερβοκινητήρα και παρέχει την απαραίτητη ισχύ για τη λειτουργία του τελευταίου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κινητήρες συνεχούς αλλά και εναλλασσόμενου ρεύματος και με την βοήθεια κατάλληλων συνδέσεων μπορούμε να πετύχουμε έλεγχο του κινητήρα από το ρότορα ή από το στάτη. Διακρίνονται στις πιο κάτω κατηγορίες:

- α) Ηλεκτρονικοί ενισχυτές
- β) Μαγνητικοί ενισχυτές
- γ) Ενισχυτές ηλεκτρονόμων
- δ) Στρεφόμενοι ενισχυτές
- ε) Πνευματικοί ενισχυτές
- στ) Υδραυλικοί ενισχυτές



Σχήμα 3.23: Σερβοενισχυτής με τρανζίστορ σε διάταξη καταγραφής.

Ένα απλό παράδειγμα είναι ο ηλεκτρονικός σερβοενισχυτής με τρανζίστορ του σχήματος 3.23, ο οποίος χρησιμοποιείται σε καταγραφικούς μηχανισμούς που συνδιάζονται με διάφορα επιστημονικά όργανα, (π.χ. φασματογράφους, εγκεφαλογράφους, ηλεκτροκαρδιογράφους, μετρητές θερμοκρασίας, μετρητές ταχύτητας, σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, κτλ). Ο σερβοενισχυτής αυτός είναι αποκλειστικά από τρανζίστορ και τροφοδοτεί διφασικό κινητήρα ο οποίος μετακινεί τη γραφίδα πάνω σε βαθμολογημένο χαρτί. Αποτελείται από δύο βαθμίδες ενισχύσεως τάσεως, τρανζίστορ T_1 και T_2 , μία βαθμίδα ενισχύσεως ισχύος τρανζίστορ T_3 , τον διφασικό κινητήρα και το κύκλωμα εισόδου, μετασχηματιστής M/Σ_1 . Ο κινητήρας με τη βοήθεια ειδικού συστήματος

τροχαλιών μετακινεί την γραφίδα πάνω σε βαθμολογημένο χαρτί. Η όλη διάταξη ρυθμίζεται με ποτενσιόμετρο έτσι ώστε η γραφίδα να βρίσκεται στην επιθυμητή θέση. Όταν δοθεί σήμα ελέγχου αυτό ενισχύεται από τα τρανζίστορ T1 και T2 και στη συνέχεια από το T3 και δίνεται σαν τάση ελέγχου στο τύλιγμα του σερβοκινητήρα, ο οποίος περιστρέφεται και μετακινεί την γραφίδα για χρόνο τόσο όσο διαρκεί το σήμα. Η μετακίνηση της γραφίδας εξαρτάται από το μέγεθος του σήματος. Όταν πάψει να επενεργεί σήμα τότε ο κινητήρας επανέρχεται σε κατάσταση ηρεμίας και η γραφίδα στην αρχική της θέση.

Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία των ενισχυτών του σερβοκινητήρα αποσκοπεί στο να διατηρεί σταθερές τις απαιτούμενες στροφές, να διατηρεί σταθερή τη ροπή σε όλη την περιοχή στροφών του κινητήρα, αλλά ταυτόχρονα να δίνει τη δυνατότητα της βηματικής κίνησης με απόλυτο έλεγχο των δύο προηγούμενων παραμέτρων. Στην πραγματικότητα το σύστημα οδήγησης σερβοκινητήρα είναι ένα ειδικού τύπου *inverter*, το οποίο χρησιμοποιείται αποκλειστικά για έλεγχο σερβοκινητήρων και γι' αυτό έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτελεί μια πολύ ειδική λειτουργία. Αναλυτικότερα τα συστήματα οδήγησης σερβοκινητήρων επιτελούν τρεις βασικές λειτουργίες:

- Τον έλεγχο της ανάδρασης του σερβοσυστήματος.
- Τον έλεγχο του κινητήρα.
- Τη μετατροπή ισχύος.

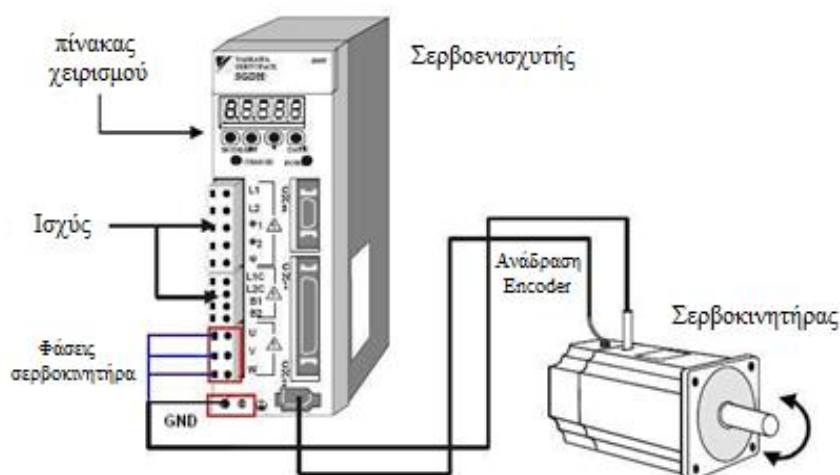
Ο έλεγχος ενός σερβοσυστήματος συνίσταται στη ρύθμιση της ταχύτητας και της θέσης ενός κινητήρα. Η ρύθμιση αυτή βασίζεται σε ένα σήμα ανάδρασης. Το βασικότερο «σερβοκύκλωμα» είναι το κύκλωμα της ταχύτητας, του οποίου ο ρόλος είναι να παράγει μια εντολοδότηση για τη ροπή με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ της αρχικής εντολοδότησης για την ταχύτητα και την ταχύτητα που λαμβάνεται από το σήμα ανάδρασης. Επειδή στους σερβοκινητήρες κατά κανόνα απαιτείται να υπάρχει και έλεγχος θέσης συνήθως προστίθεται ένα κύκλωμα ελέγχου θέσης σε σειρά με το κύκλωμα ελέγχου ταχύτητας.

Στα κυκλώματα ελέγχου ενός σερβοσυστήματος σημαντική παράμετρος είναι και η ρύθμιση της έντασης του σήματος ανάδρασης. Αν αυτή η ρύθμιση γίνει σε υψηλή στάθμη τότε αφενός μεν τα αποτελέσματα είναι καλύτερα, αφετέρου το συνολικό σερβοσύστημα καθίσταται πιο ασταθές. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται φίλτρα που συνδέονται σε σειρά με τα κυκλώματα ελέγχου ταχύτητας.

Ο έλεγχος του κινητήρα συνίσταται στην παραγωγή μιας ροπής κινητήρα που να ανταποκρίνεται στην εντολοδότηση ροπής που στέλνεται από το κύκλωμα ελέγχου του σερβοσυστήματος. Στους κινητήρες που φέρουν ψήκτρες (κατά κύριο λόγο είναι οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος) ο έλεγχος του κινητήρα συνίσταται απλά στον έλεγχο του ρεύματος των τυλιγμάτων καθώς η ροπή του κινητήρα είναι περίπου ανάλογη του ρεύματος των τυλιγμάτων. Τα κυκλώματα ελέγχου ρεύματος είναι όμοια με αυτά του

ελέγχου ταχύτητας με τη μόνη διαφορά ότι εργάζονται σε ψηλότερες συχνότητες. Ένα κύκλωμα ελέγχου ρεύματος λαμβάνει την εντολοδότηση ρεύματος και τη συγκρίνει με την τιμή του ρεύματος που λαμβάνεται από το σήμα ανάδρασης και παράγει μια έξοδο που είναι ένα σήμα ρύθμισης τάσης. Αν ο κινητήρας χρειάζεται να δουλέψει με μεγαλύτερη ροπή τότε αυξάνεται η εφαρμοζόμενη σ' αυτόν τάση μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό ρεύμα τυλιγμάτων. Τέλος αναφορικά με τη μετατροπή της ταχύτητας υπάρχουν αλγόριθμοι που στηρίζονται στην ικανότητα της πηγής ισχύος να παράγει το ρεύμα εκείνο που θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις που προκύπτουν από τα κυκλώματα ελέγχου ταχύτητας και θέσης.

Η σύνδεση του σερβοενισχυτή με το συνολικό σερβοσύστημα γίνεται συνήθως με μια σειρά θυρών επικοινωνίας που διαθέτει ο ειδικός αυτός inverter, σχήμα 3.24. Μια θύρα μπορεί να χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του servodrive με την παλμογεννήτρια του σερβοσυστήματος που συνιστά το τοπικό αισθητήριο του στο ελεγχόμενο σημείο της παραγωγικής ή κατασκευαστικής διαδικασίας. Μια άλλη θύρα μπορεί να συνδέεται με H/Y, μέσω του οποίου μπορεί να προγραμματίζεται ο σερβοενισχυτής, έτσι ώστε με τον καθορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων να επιτυγχάνεται ο βέλτιστος έλεγχος του κινητήρα.



Σχήμα 3.24: Σύνδεση σερβοκινητήρα και σερβοενισχυτή.

Σε περίπτωση που το ο κεντρικός έλεγχος του σερβοσυστήματος υποστηρίζεται από PLC ή DCS, τότε ο σερβοενισχυτής μπορεί να διαθέτει κι άλλες θύρες για την εισαγωγή σημάτων από το PLC ή το DCS. Υπάρχει και η περίπτωση οι σχεδιαστικές επιλογές να απαιτούν τη μεταφορά τοπικών σημάτων μέσω άλλων αισθητηρίων, τερματικών ή ακόμα και μπουτόν στο servodrive χωρίς αυτά προηγουμένως να περνάνε από το PLC ή το DCS. Και σε αυτήν την περίπτωση χρειάζεται ο σερβοενισχυτής να είναι εφοδιασμένος με κατάλληλο αριθμό θυρών. Η χρήση εξελιγμένων σερβοκινητήρων είναι δυνατό να μετατρέψει συμβατικές εργαλειομηχανές σε σύγχρονες εργαλειομηχανές CNC.

Οι ενισχυτές που χρησιμοποιούνται στα σερβοκινητήρια συστήματα μπορεί να είναι είτε αναλογικοί είτε ψηφιακοί, τόσο για τους σερβοκινητήρες με ψήκτρες, όσο και για τους σερβοκινητήρες χωρίς σύστημα ψηκτρών-συλλέκτη. Το αναλογικό σύστημα οδήγησης χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια, ενώ το ψηφιακό είναι σχετικά μία πρόσφατη καινοτομία. Και οι δύο τύποι έχουν τα πλεονεκτήματά και τα μειονεκτήματά τους.

Οι προσαρμογές που απαιτούνται για να ρυθμιστεί ένα αναλογικό σύστημα οδήγησης, συνήθως γίνονται με ποτενσιόμετρα, ενώ στο ψηφιακό σύστημα οδήγησης με την αποστολή δεδομένων από ένα υπολογιστή ή τερματικό. Οι περισσότεροι αναλογικοί ενισχυτές μπορούν εύκολα να ρυθμιστούν είτε ως ενισχυτές ταχύτητας, είτε ως ενισχυτές ροπής μέσω ενός διακόπτη. Στην πράξη, το σήμα εισόδου στέλνεται στο ίδιο σημείο αλλά ο ενισχυτής ταχύτητας παρακάμπτεται. Το σήμα εισόδου στο ψηφιακό σύστημα οδήγησης μπορεί να είναι μία αναλογική τάση, αλλά μπορεί επίσης να λάβει τη μορφή βήματικού σήματος. Χρησιμοποιούνται περισσότερο σε σερβοκινητήρες χωρίς ψήκτρες. Τέτοια συστήματα είναι σχεδόν εξ' ολοκλήρου ψηφιακά, με εξαίρεση το στάδιο όπου αποδίδεται ρεύμα στον κινητήρα. Η ταχύτητα ανάδρασης δίνεται συνήθως είτε από έναν κωδικοποιητή ή από έναν αναλυτή (resolver) σε ψηφιακή μορφή.

Τα πλεονεκτήματα του αναλογικού συστήματος είναι το χαμηλότερο κόστος και στην περίπτωση ανάδρασης με ταχογεννήτρια, η πολύ υψηλή απόδοση. Το μεγάλο εύρος ζώνης της ταχογεννήτριας με ψήκτρες επιτρέπει υψηλά κέρδη που θα χρησιμοποιηθούν χωρίς να προκαλούν "jitter", με αποτέλεσμα ένα πιο αξιόπιστο σύστημα. Το jitter είναι ένα από τα πλέον ακαθόριστα προβλήματα των ψηφιακών συστημάτων και εκφράζει τις στιγμιαίες αποκλίσεις καθοριστικών τμημάτων ενός ψηφιακού σήματος σε σχέση με τις ιδανικές θέσεις τους στον χρόνο. Το ψηφιακό σύστημα, έστω και αν είναι πιο ακριβό, έχει σχετικά πιο εύκολη εγκατάσταση και έχει το πλεονέκτημα της αυτόματης ρύθμισης, όπου οι παράμετροι του φορτίου είναι άγνωστοι ή είναι δύσκολο να μετρηθούν. Το ψηφιακό σύστημα οδήγησης προσφέρει επίσης τη δυνατότητα δυναμικής ρύθμισης (μερικές φορές είναι ζωτικής σημασίας, ειδικά σε περιπτώσεις όπου το φορτίο αδράνειας αλλάζει δραματικά κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μηχανής).

Στο ψηφιακό σύστημα οδήγησης οι πληροφορίες ανάδρασης παρέχονται συνήθως από ένα κωδικοποιητή ο οποίος είναι συνδεδεμένος στον άξονα του κινητήρα. Ο κωδικοποιητής παράγει παλμούς από τους οποίους ο επεξεργαστής μπορεί να καθορίσει την απόσταση που διανύθηκε και υπολογίζοντας τη συχνότητα των παλμών αυτών, είναι δυνατό να υπολογισθεί η ταχύτητα. Το ψηφιακό σύστημα οδήγησης εκτελεί τις ίδιες λειτουργίες με το αναλογικό σύστημα, αλλά το κάνει επιλύοντας μία σειρά από εξισώσεις. Ο μικροεπεξεργαστής είναι προγραμματισμένος με ένα μαθηματικό μοντέλο (ή αλγόριθμο) του αντίστοιχου αναλογικού συστήματος. Το μοντέλο αυτό καθορίζει τη συμπεριφορά του συστήματος. Λαμβάνει επίσης υπόψη του και άλλες πληροφορίες, όπως η ταχύτητα εξόδου, το ποσοστό αλλαγής της εισόδου, κλπ.

Για να λυθούν όλες οι εξισώσεις χρειάζεται ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ακόμα και με ένα γρήγορο επεξεργαστή, συνήθως 100ms μέχρι 2ms. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, η ροπή ζήτησης πρέπει να διατηρηθεί σταθερή στην τιμή όπου έχει υπολογιστεί προηγουμένως και δεν θα υπάρξει καμία αντίδραση σε αλλαγή της είσοδου ή της εξόδου. Το χρονικό αυτό διάστημα είναι πολύ σημαντικός παράγοντας στην λειτουργία ενός ψηφιακού σερβομηχανισμού και σε ένα σύστημα υψηλής απόδοσης θα πρέπει να περιορίζεται στο ελάχιστο.

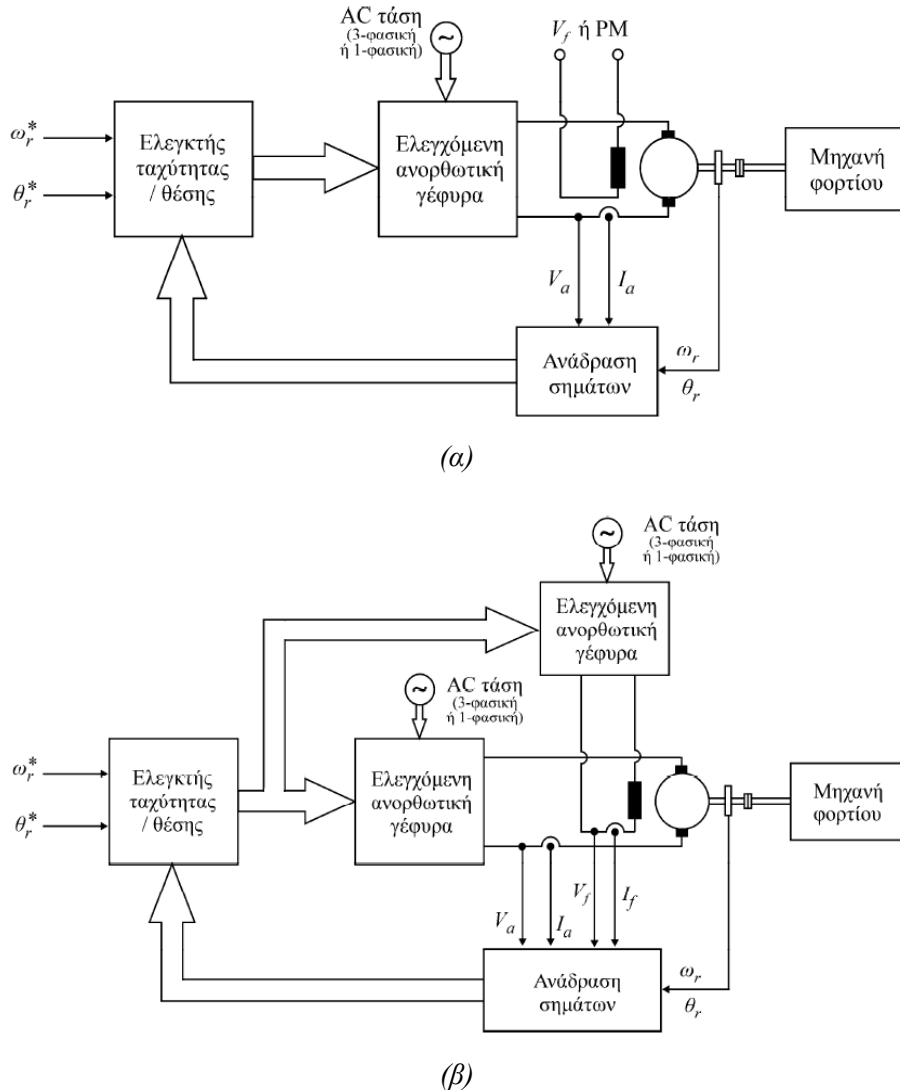
Η ρύθμιση του ψηφιακού σερβοενισχυτή γίνεται είτε μέσω διαφόρων πλήκτρων ή με την αποστολή αριθμητικών δεδομένων μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, χωρίς να χρειάζονται ρυθμίσεις στο ποτενσιόμετρο. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για να ρυθμιστούν διάφοροι συντελεστές του αλγορίθμου και ως εκ τούτου, να καθοριστεί η συμπεριφορά του συστήματος. Σε ορισμένες εφαρμογές η αδράνεια του φορτίου μπορεί να μεταβάλλεται μεταξύ μεγάλου εύρους τιμών, όπως για παράδειγμα σε ένα ρομποτικό βραχίονα που ξεκινά χωρίς φορτίο, ενώ στη συνέχεια μπορεί να μεταφέρει ένα βαρύ φορτίο σε πλήρη επέκταση. Σε αλλαγή της αδράνειας το σύστημα οδήγησης πρέπει να είναι εκ νέου ρυθμισμένο, ώστε να μπορεί διατηρήσει σταθερή απόδοση. Αυτό επιτυγχάνεται απλά με την αποστολή των νέων τιμών ρύθμισης στο κατάλληλο σημείο του κύκλου λειτουργίας.

Η επιλογή του συστήματος οδήγησης και της τεχνικής ελέγχου εξαρτάται από το είδος του κινητήρα και κυρίως τις απαιτήσεις της εφαρμογής σε εύρος ταχύτητας λειτουργίας κι ακριβείας απόκρισης του κινητήρα στα σήματα εντολής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα συστήματα οδήγησης κινητήρων συνεχούς κι εναλλασσόμενου ρεύματος.

3.5.1 Συστήματα οδήγησης κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Στο Σχήμα 3.25 παρουσιάζεται το λειτουργικό διάγραμμα ενός κινητήριου συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος. Η μηχανή λειτουργεί με έλεγχο κλειστού βρόχου ταχύτητας ή και θέσης. Η ταχύτητα του κινητήρα ελέγχεται μέσω της τάσης τροφοδοσίας του δρομέα.

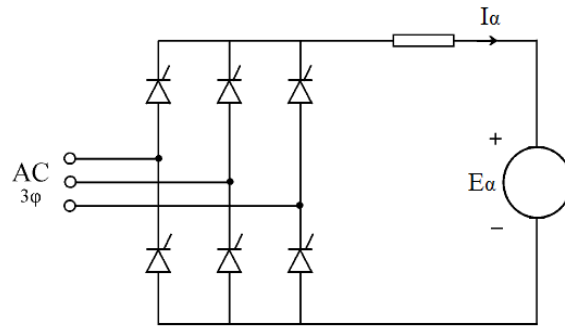
Στο Σχήμα 3.25.α ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερή διέγερση (μη-ελεγχόμενη τάση διέγερσης ή σταθερή διέγερση από μόνιμους μαγνήτες) κι η περιοχή ελέγχου ταχύτητας είναι $0 < \omega_r < \omega_b$ (όπου ω_b η ταχύτητα βάσης). Στο Σχήμα 3.25.β η τάση διέγερσης ελέγχεται μέσω ελεγχόμενης ανορθωτικής γέφυρας κι επιτυγχάνεται έλεγχος σε όλη τη περιοχή ταχυτήτων (δηλαδή επιπρόσθετα έχουμε έλεγχο ταχύτητας μέσω της τάσης διέγερσης και συνεπώς λειτουργία σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ταχύτητας βάσης, $\omega_r > \omega_b$).



Σχήμα 3.25: Λειτουργικό διάγραμμα κινητήριου συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος: (α) σταθερής διέγερσης και (β) ελεγχόμενης διέγερσης.

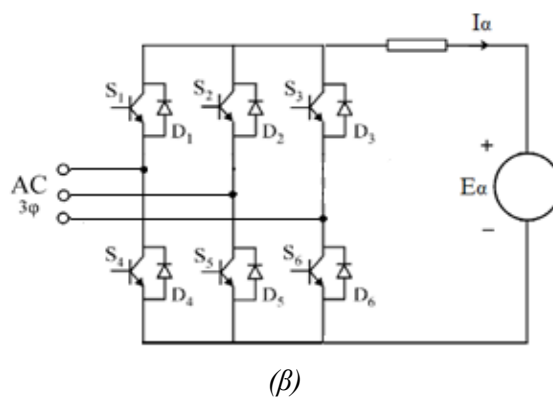
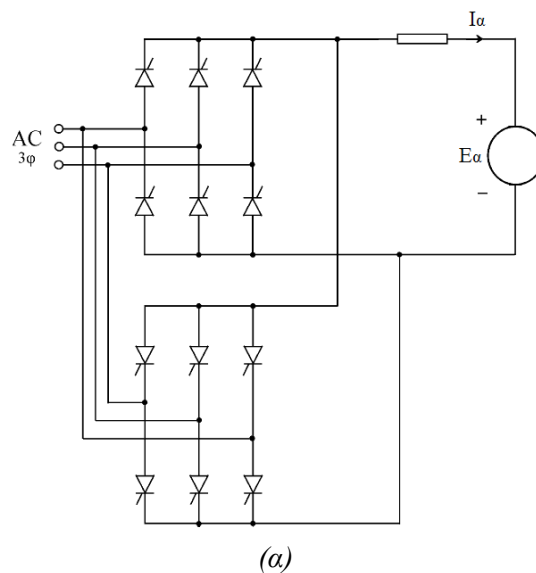
Και τα δυο συστήματα περιλαμβάνουν τον ελεγκτή ταχύτητας (ή και θέσης) ο οποίος δέχεται τα σήματα εντολής (ταχύτητας ω_r^* και θέσης θ_r^* του δρομέα αντίστοιχα) τα οποία συγκρίνει με τα αντίστοιχα σήματα ανάδρασης από το μετρητή ταχύτητας/θέσης και υπολογίζει τις γωνίες έναυσης των θυρίστορ στις ανορθωτικές γέφυρες. Στα συστήματα οδήγησης κινητήρων συνεχούς ρεύματος ο μετατροπέας ισχύος είναι η ανορθωτική γέφυρα (rectifier), η οποία μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή.

Στο Σχήμα 3.26 δίνεται το κύκλωμα του τριφασικού πλήρως ελεγχόμενου ανορθωτή με θυρίστορ. Μέσω της γωνίας έναυσης των θυρίστορ επιτυγχάνεται έλεγχος στα δυο τεταρτημόρια (*two quadrant*), δηλαδή έλεγχος και στη θετική και στην αρνητική ταχύτητα. Αυτό σημαίνει ότι η συνεχής τάση εξόδου μπορεί να αλλάζει πολικότητα, ενώ το ρεύμα έχει πάντα σταθερή φορά, δηλαδή δεν επιτρέπεται πέδηση του κινητήρα με ανάκτηση ισχύος. Επίσης έχει μεγάλο νεκρό χρόνο με αποτέλεσμα να είναι αργή η απόκρισή του στον έλεγχο ταχύτητας.



Σχήμα 3.26: Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα (ac-dc μετατροπέας ισχύος) για οδήγηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος με δυνατότητα στα δυο τεταρτημόρια.

Για να έχουμε πλήρη έλεγχο της μηχανής συνεχούς ρεύματος, δηλαδή λειτουργία του κινητήρα με δυνατότητα επιστροφής ισχύος στην πηγή κατά την πέδηση, απαιτούνται δυο ανορθωτικές διατάξεις σε αντιπαράλληλες θέσεις (Σχήμα 3.27.α) ή ένας ac-dc μετατροπέας ισχύος (Σχήμα 3.27.β).

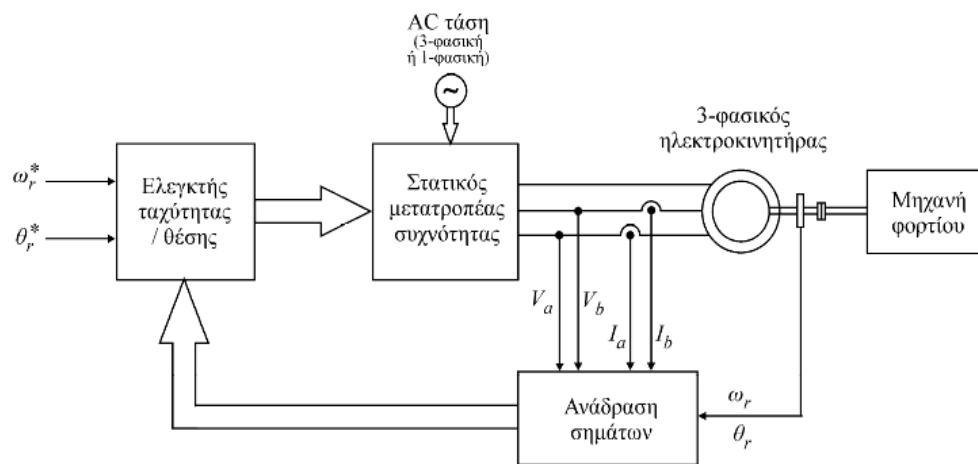


Σχήμα 3.27: Ac-dc μετατροπέας ισχύος για οδήγηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος με δυνατότητα λειτουργίας στα τέσσερα τεταρτημόρια: (α) αποτελείται από δύο τριφασικές πλήρως ελεγχόμενες αντιπαράλληλες ανορθωτικές γέφυρες και (β) μετατροπέας ισχύος.

Μάλιστα, ο μετατροπέας ισχύος που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.27.β έχει πιο γρήγορη απόκριση στον έλεγχο ταχύτητας κι η κυμάτωση στο ρεύμα είναι μικρότερη γιατί αποτελείται από υψηλής συχνότητας διακοπτικά στοιχεία. Το κύκλωμα του Σχήματος 3.27.β είναι γενικό και με το συμβολισμό των τρανζίστορ ισχύος δηλώνεται ο οποιοσδήποτε τύπος υψηλής συχνότητας ηλεκτρονικός διακόπτης.

3.5.2 Συστήματα οδήγησης κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος

Στο Σχήμα 3.28 παρουσιάζεται το λειτουργικό διάγραμμα ενός κινητήριου συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με τριφασικό ηλεκτροκινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος (επαγωγικό, σύγχρονο ή κινητήρα μαγνητικής αντίστασης). Η μηχανή λειτουργεί με έλεγχο ταχύτητας (ή και θέσης) κλειστού βρόχου. Όπως και για τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος, το σύστημα περιλαμβάνει τον ελεγκτή ταχύτητας (ή και θέσης), τη βαθμίδα των σημάτων ανάδρασης και το μετατροπέα ισχύος.



Σχήμα 3.28: Λειτουργικό διάγραμμα κινητήριου συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με ηλεκτροκινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος.

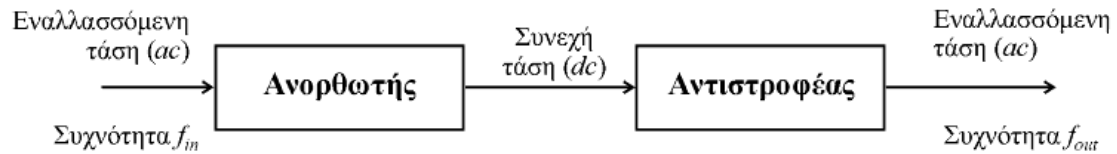
Στα συστήματα οδήγησης κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος ο μετατροπέας ισχύος ονομάζεται και στατικός μετατροπέας συχνότητας γιατί μετατρέπει την εναλλασσόμενη ισχύ εισόδου σε εναλλασσόμενη ισχύ διαφορετικής συχνότητας.

Υπάρχουν δύο τεχνικές υλοποίησης του στατικού μετατροπέα συχνότητας:

- (1) σύστημα ανορθωτή-αντιστροφέα (*rectifier-inverter*)
- (2) κυκλομετατροπέας

3.5.2.1 Στατικός μετατροπέας συχνότητας με ανορθωτή-αντιστροφή

Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από έναν ανορθωτή που μετατρέπει την εναλλασσόμενη ισχύ εισόδου σε συνεχή και στη συνέχεια ένας αντιστροφέας μετατρέπει την συνεχή ισχύ σε εναλλασσόμενη διαφορετικής συχνότητας από την αρχική (σχήμα 3.29)



Σχήμα 3.29: Λειτουργικό διάγραμμα στατικού μετατροπέα συχνότητας με ανορθωτή-αντιστροφή.

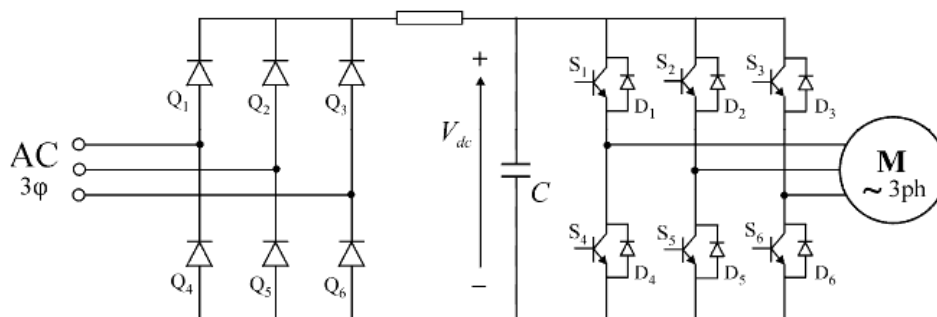
Οι στατικοί μετατροπέες συχνότητας διακρίνονται σε :

- (α) πηγής τάσης (*voltage source*)
- (β) πηγής ρεύματος (*current source*),

όταν η είσοδος στον αντιστροφέα είναι σταθερή συνεχής τάση ή ρεύμα αντίστοιχα. Επίσης, οι στατικοί μετατροπέες συχνότητας χαρακτηρίζονται από τον τρόπο μετάβασης των ελεγχόμενων ηλεκτρονικών διακοπών του αντιστροφέα σε:

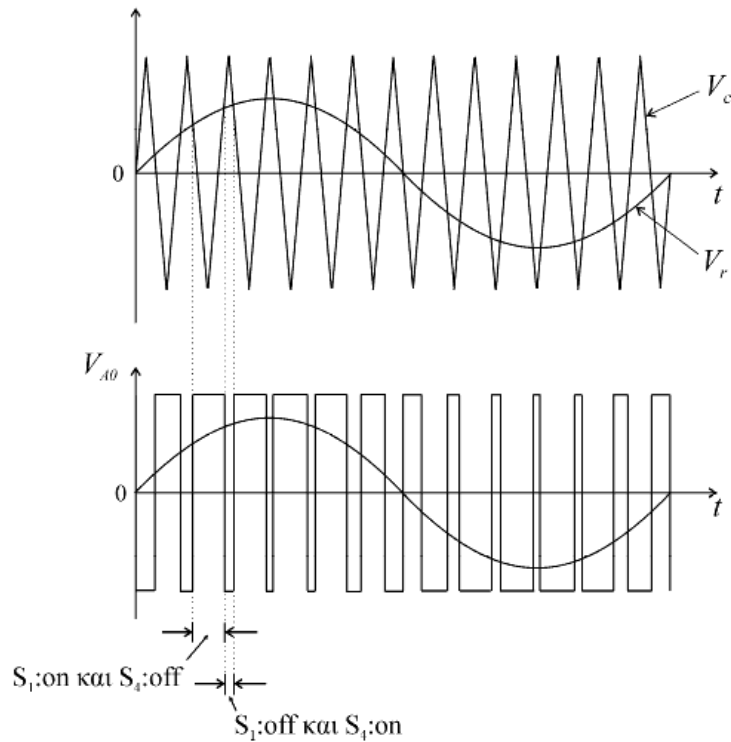
- (α) αυτομετάβασης, όταν είναι άμεσα ελεγχόμενη η έναυση κι η σβέση των ηλεκτρονικών διακοπών χωρίς να απαιτείται εξωτερικό κύκλωμα
- (β) μετάβαση από το φορτίο, όταν η σβέση των ηλεκτρονικών διακοπών επιτυγχάνεται από την ηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα
- (γ) εξαναγκασμένη μετάβαση, όταν απαιτούνται κυκλώματα από πυκνωτές μετάβασης για τη σβέση των ηλεκτρονικών διακοπών

Στους στατικούς μετατροπέες συχνότητας πηγής τάσης, η μονάδα αντιστροφής τροφοδοτείται με σταθερή συνεχή τάση, η οποία προέρχεται από την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης με μη-ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα ή απ' ευθείας από πηγές συνεχούς τάσης, όπως μπαταρία και γεννήτρια συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 3.30: Κύκλωμα ισχύος στατικού μετατροπέα συχνότητας πηγής τάσης.

Στο Σχήμα 3.30 παρουσιάζεται το κύκλωμα ισχύος του στατικού μετατροπέα συχνότητας πηγής τάσης με μη-ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα κι αντιστροφέα αποτελούμενο από τρανζίστορ ισχύος κι αντιπαράλληλες διόδους ελεύθερης ροής. Το κύκλωμα είναι γενικό και με το συμβολισμό των τρανζίστορ ισχύος δηλώνεται ο οποιοσδήποτε τύπος υψηλής συχνότητας ηλεκτρονικός διακόπτης.

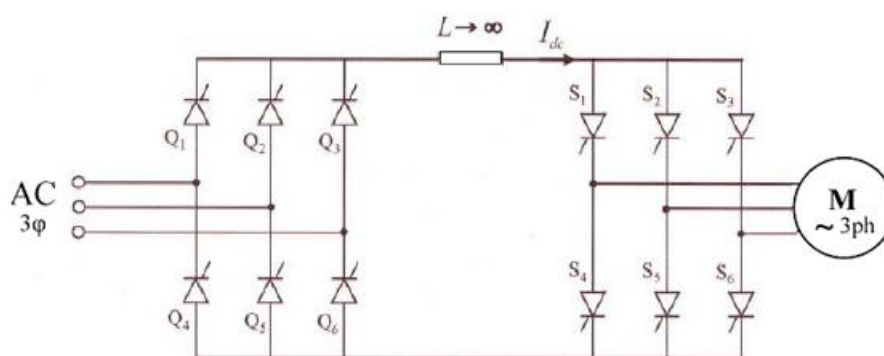


Σχήμα 3.31: Αρχή λειτουργίας του ημιτονοειδούς PWM διαμορφωτή.

Ο πιο απλός τύπος μετατροπέα συχνότητας πηγής τάσης είναι τετραγωνικών παλμών. Ωστόσο, οι μετατροπείς αυτοί εμφανίζουν αρμονικές χαμηλής συχνότητας με αποτέλεσμα να αυξάνονται σημαντικά οι απώλειες της μηχανής και να προκαλούνται ταλαντώσεις στη ροπή. Ο μετατροπέας συχνότητας πηγής τάσης που συνήθως χρησιμοποιείται είναι διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation, PWD). Ο μετατροπέας αυτός αν κι εμφανίζει μεγαλύτερες απώλειες στα διακοπτικά στοιχεία λόγω της μεγαλύτερης διακοπτικής συχνότητας, αυξάνει σημαντικά την τάξη των αρμονικών της τάσης εξόδου του με αποτέλεσμα να μειώνεται η επίδραση τους στη λειτουργία της μηχανής. Ακόμη, απαιτεί πολύ γρήγορα διακοπτικά στοιχεία, γι' αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται MOSFETs και IGBTs.

Η αρχή λειτουργίας του PWM διαμορφωτή στηρίζεται στη σύγκριση ενός τριγωνικού φέροντος σήματος υψηλής συχνότητας V_c (συνήθως μεταξύ 5 και 10 kHz) με ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς V_r συχνότητας ίση με τη συχνότητα τάσης με την οποία θέλουμε να οδηγήσουμε τον κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος (Σχήμα 3.31). Όταν η στιγμιαία τιμή του V_r είναι μεγαλύτερη της V_c , η έξοδος του συγκριτή είναι θετικός

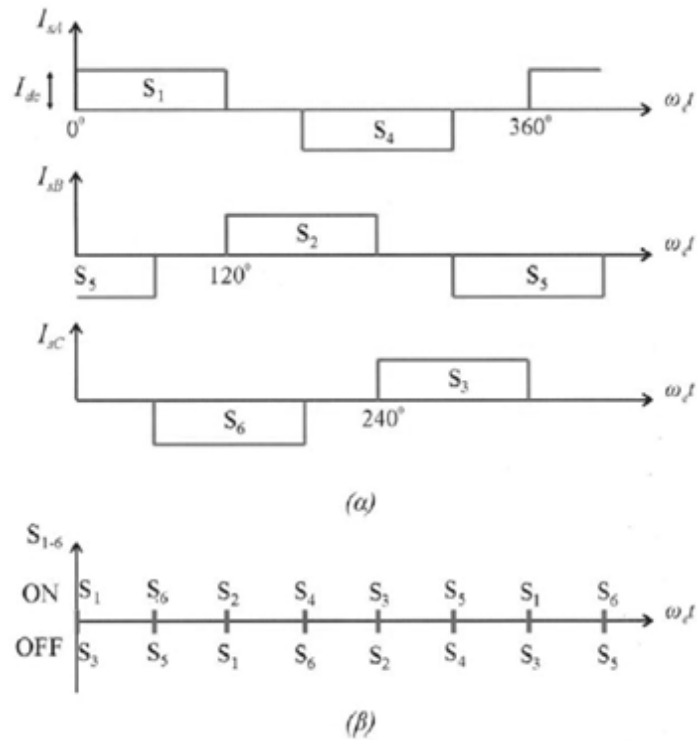
παλμός ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι αρνητικός παλμός. Μέσω του ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς ελέγχεται το πλάτος κι η συχνότητα του σήματος εξόδου του διαμορφωτή. Αυξομειώνοντας το πλάτος του σήματος V_r , ρυθμίζεται η διάρκεια των παλμών εξόδου του διαμορφωτή και έτσι ελέγχεται το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής της τάξης εξόδου του αντιστροφέα, ενώ μεταβάλλοντας τη συχνότητα του V_r ρυθμίζεται η συχνότητα τη τάσης εξόδου του αντιστροφέα.



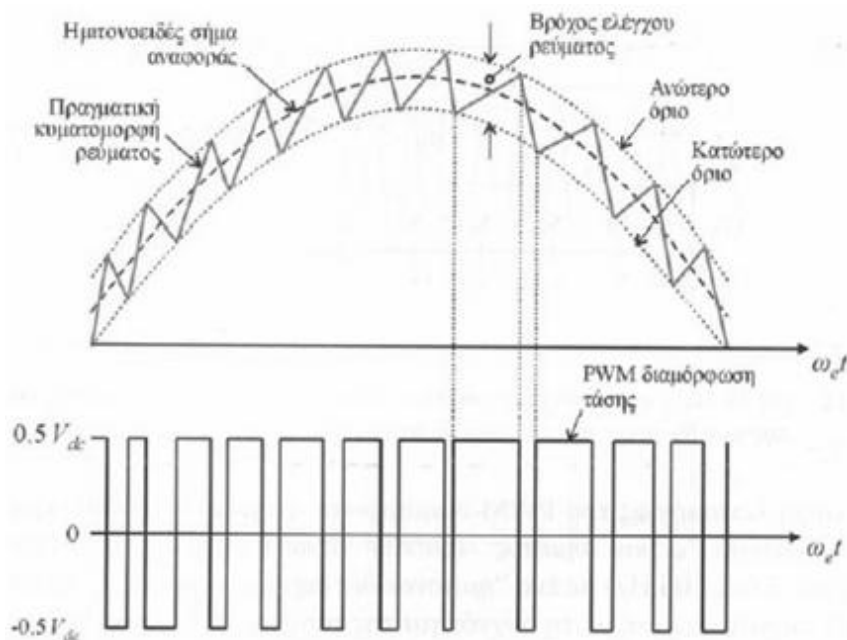
Σχήμα 3.32: Γενικό κύκλωμα ισχύος στατικού μετατροπέα συχνότητας πηγής ρεύματος.

Η τοπολογία του κυκλώματος ισχύος των μετατροπέων συχνότητας πηγής ρεύματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.32. Μεταβλητή ελέγχου είναι η ένταση του ρεύματος, η οποία ελέγχεται μέσω της συνεχούς τάσης εισόδου του αντιστροφέα. Δηλαδή, ο αντιστροφέας τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα I_{dc} μεταβλητού πλάτους, το οποίο ρυθμίζεται από την πλήρως ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα, και στη συνέχεια ο έλεγχος των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα δημιουργεί το τριφασικό σύστημα ρευμάτων του Σχήματος 3.33.α. Επειδή τα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα πρέπει να αντέχουν σε ανάστροφη τάση, χρησιμοποιούνται θυρίστρος. Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος είναι συνήθως εξαναγκασμένης μετάβασης και μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει δυνατότητα μετάβασης από το φορτίο, όπως για παράδειγμα κατά την οδήγηση σύγχρονων κινητήρων.

Εκτός από τους δύο παραπάνω τύπους στατικών μετατροπέων συχνότητας, υπάρχει κι ο μετατροπέας ελέγχου σε βρόχο υστέρησης (hysteresis band current control inverter). Σ' αυτόν εφαρμόζεται PWM διαμόρφωση τάσης αλλά ελέγχεται κυματομορφή του ρεύματος, παρόλο που η τοπολογία του κυκλώματος ισχύος είναι ίδια με του αντιστροφέα πηγής τάσης. Στο Σχήμα 3.34 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της τεχνικής διαμόρφωσης PWM με έλεγχο ρεύματος σε βρόχο υστέρησης στιγμιαίο ρεύμα ανάδρασης κάθε φάσης συγκρίνεται με το αντίστοιχο ημιτονοειδές σήμα αναφοράς, ώστε η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου να βρίσκεται πάντοτε στο εύρος υστέρησης που ορίζεται από το ανώτερο και κατώτερο όριο σφάλματος. Επειδή ελέγχεται η στιγμιαία τιμή του ρεύματος, η τεχνική PWM ελέγχου ρεύματος σε βρόχο υστέρησης χρησιμοποιείται σε συστήματα οδήγησης σερβοκινητήρων διανυσματικού ελέγχου.



Σχήμα 3.33: (α) Ιδανικές κυματομορφές ρεύματος εξόδου (β) η σειρά έναυσης και σβέσης των θυρίστωρ σε τριφασικό μετατροπέα συχνότητας πηγής ρεύματος.

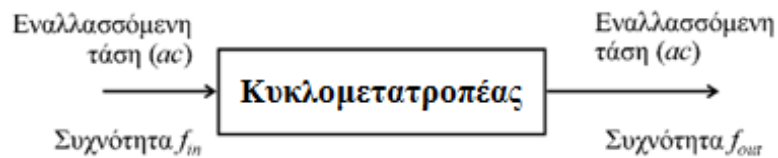


Σχήμα 3.34: Αρχή λειτουργίας του PWM διαμορφωτή ελέγχου ρεύματος σε βρόχο υστέρησης.

3.5.2.2 Κυκλομετατροπέας

Ο κυκλομετατροπέας μετατρέπει απ' ευθείας την εναλλασσόμενη ισχύ της αρχικής συχνότητας σε εναλλασσόμενη επιθυμητής συχνότητας χωρίς να απαιτείται η ενδιάμεση

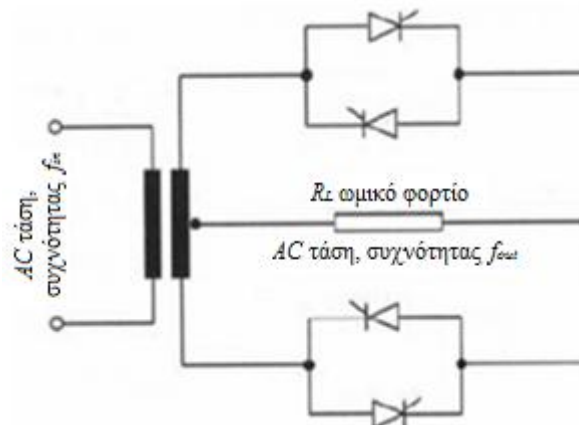
μετατροπή της σε dc (Σχήμα 3.35). Συγκρίνοντας τους κυκλομετατροπείς με τους αντίστοιχους μετατροπείς συχνότητας με ανορθωτή-αντιστροφέα προκύπτει ότι οι κυκλομετατροπείς πολύ περισσότερους ηλεκτρονικούς διακόπτες (συνήθως θυρίστορ) κι έχουν πολύπλοκότερο σύστημα ελέγχου. Λόγω του υψηλού τους κόστους, συνήθως προτιμούνται για τον έλεγχο ηλεκτροκινητήριων συστημάτων μεγάλης ισχύος.



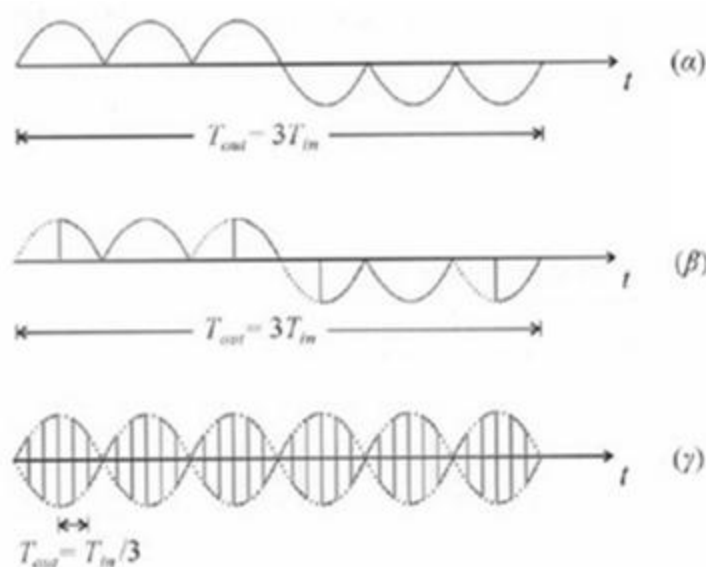
Σχήμα 3.35: Λειτουργικό διάγραμμα κυκλομετατροπέα.

Αν η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι μικρότερη της συχνότητας της τάσης εισόδου, τότε έχουμε κυκλομετατροπέα μείωσης συχνότητας (step-down cycloconverter), ενώ αντίθετα αν αυξάνεται η συχνότητα της τάσης εξόδου έχουμε κυκλομετατροπέα ανύψωσης (step-up cycloconverter). Η αρχή λειτουργίας των κυκλομετατροπέων βασίζεται στο συνδυασμό των γωνιών έναυσης των θυρίστορ στο διάστημα μιας ή περισσότερων διαδοχικών περιόδων της τάσης εισόδου, ώστε να επιτύχουμε η θεμελιώδης αρμονική της τάσης εξόδου να έχει την επιθυμητή τιμή πλάτους και συχνότητας.

Η υλοποίηση του συστήματος ελέγχου ενός κυκλομετατροπέα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη κι η εφαρμογή τους στον έλεγχο σερβοκινητήριων συστημάτων είναι πολύ περιορισμένη. Για να γίνει κατανοητή η αρχή λειτουργίας των κυκλομετατροπέων, θα χρησιμοποιηθεί το παράδειγμα ενός απλού κυκλομετατροπέα μονοφασικής εισόδου – μονοφασικής εξόδου του Σχήματος 3.36.



Σχήμα 3.36: Κύκλωμα ισχύος μονοφασικού κυκλομετατροπέα.



Σχήμα 3.37: (α)-(β) διαγράμματα της τάσης εξόδου για κυκλομετατροπέα μείωσης συχνότητας, (γ) διάγραμμα της τάσης εξόδου για κυκλομετατροπέα αύξησης συχνότητας.

Στα σχήματα 3.37.α-β δίνονται τα διαγράμματα της τάσης εξόδου του κυκλομετατροπέα για μείωση συχνότητας. Η κυματομορφή της τάσης εξόδου του σχήματος 3.37.α προέκυψε από τον έλεγχο των γωνιών έναυσης των θυρίστορ κι η συχνότητα της θεμελιώδους της τάσης μειώνεται κι είναι $f_{out} = f_{in}/n$, όπου n είναι ο αριθμός των περιόδων της τάσης εισόδου που χρειάστηκαν για το σχηματισμό μιας περιόδου της τάσης εξόδου. Η κυματομορφή του σχήματος 3.37.β έχει την ίδια συχνότητα θεμελιώδους αρμονικής με αυτήν του σχήματος 3.37.α, ωστόσο με κατάλληλο των γωνιών έναυσης των θυρίστορ μειώνεται το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης. Στο σχήμα 3.37.γ έχουμε κυκλομετατροπέα αύξησης συχνότητας και γίνονται διαδοχικές εναύσεις και σβέσεις των θυρίστορ στο διάστημα μιας περιόδου της αρχικής συχνότητας f_{in} της τάσης εισόδου. Συνεπώς, η συχνότητα της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου αυξάνεται και στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι $f_{out} = 3 f_{in}$.

3.6 Συνολικό κόστος σερβοκινητήριου συστήματος

Το συνολικό κόστος ενός σερβοκινητήριου συστήματος είναι πολύ σημαντικό κριτήριο κι εξαρτάται από τον τύπο του κινητήρα και την τεχνική έλεγχου που επιλέγεται για την κάθε εφαρμογή. Αποτελείται από το κόστος αγοράς των συσκευών (κινητήρας, μονάδα οδήγησης, αισθητήρες, μετρικές διατάξεις, καταγραφικά όργανα κλπ.), το κόστος συντήρησης, αλλά και το κόστος λειτουργίας για όλη τη διάρκεια ζωής του σερβοκινητήριου συστήματος (εξαρτάται σημαντικά από το βαθμό απόδοσης της διάταξης). Σε σύγκριση με ένα κινητήριό σύστημα ανοιχτού βρόχου, το συνολικό κόστος ενός αντίστοιχου σερβοκινητήριου συστήματος συνήθως είναι μεγαλύτερο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕΡΒΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΣΕΡΒΟΚΙΝΗΤΗΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

4.1 Τομείς εφαρμογών σερβοκινητήρων

Η δυνατότητα που προσφέρουν οι σερβοκινητήρες στα συστήματα ελέγχου κίνησης με τον παράλληλο έλεγχο ταχύτητας και θέσης, με πολύ μεγάλη ακρίβεια και χωρίς περιορισμούς μηχανικής ισχύος, δηλαδή αναγκαίας ροπής, τους καθιστά κατάλληλους για μια τεράστια γκάμα βιομηχανικών εφαρμογών. Οι περισσότερες από αυτές αναφέρονται σε εξελιγμένη αυτοματοποίηση κατασκευαστικών διαδικασιών και στη μεταφορά και συσκευασία υλικών και προϊόντων. Οι σερβομηχανισμοί χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στον ναυτικό εξοπλισμό πλοήγησης και σε στρατιωτικές εφαρμογές ελέγχου πυρός. Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως σε αυτόματες εργαλειομηχανές, σε δορυφορικές κεραιές ανίχνευσης, στον απομακρυσμένο έλεγχο αεροπλάνων, σε αυτόματα συστήματα πλοήγησης σε πλοία και αεροπλάνα (cruise control), καθώς και σε αντιαεροπορικά οπλικά συστήματα ελέγχου. Ένα παράδειγμα εφαρμογής στα αεροσκάφη, είναι τα συστήματα “fly-by-wire” που χρησιμοποιούν τους σερβομηχανισμούς για να ενεργοποιούν τις επιφάνειες ελέγχου του αεροσκάφους. Τα τηλεκατευθυνόμενα μοντέλα στις αντίστοιχες εφαρμογές χρησιμοποιούν RC servos.

Οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται επίσης σε διάφορους βιομηχανικούς μηχανισμούς ώστε να εκτελούν περίπλοκες κινήσεις. Οι αισθητήρες κίνησης που είναι ενσωματωμένοι στους κινητήρες αυτούς, τους καθιστούν κατάλληλους σε εφαρμογές όπου απαιτείται ελεγχόμενη κίνηση.

Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη του τομέα της ρομποτικής οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται διαρκώς σε διάφορες ρομποτικές εφαρμογές (π.χ. ρομποτικοί βραχίονες) αλλά και σε αυτόνομους ρομποτικούς μηχανισμούς ή ρομποτικά συστήματα. Τα ρομποτικά συστήματα μπορούν να υποστηρίξουν μεταξύ άλλων εξελιγμένες εργαλειομηχανές κατεργασιών υλικών και μηχανές συγκόλλησης και βαφής μετάλλων, αλλά και συστήματα συναρμολόγησης σε κατασκευαστικές βιομηχανίες. Στην κατεργασία των υλικών, οι σερβοκινητήρες κατέχουν εξέχοντα ρόλο στην αναβάθμιση των παραδοσιακών εργαλειομηχανών σε εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (CNC). Χρησιμοποιούνται στις κοπές μετάλλων οποιασδήποτε μορφής. Βρίσκουν ιδιαίτερες εφαρμογές σε τριαξονικά συστήματα κοπής, σε σύγχρονες κοπές εν κινήση πολλαπλών σταθμών και μπορούν να επιτύχουν κοπές εν κινήση με συγχρονισμό μέχρι 12 αξόνων. Ιδιαίτερη εφαρμογή συναντούν στις μηχανές συρματοουργίας.

Μία άλλη συχνή εφαρμογή των σερβοκινητήρων είναι η χρησιμοποίησή τους στις φωτογραφικές μηχανές αυτόματης εστίασης, όπου κινούν με ακρίβεια το φακό, και ως εκ τούτου να ρυθμίζουν την εστίαση. Επίσης, βρίσκουν εφαρμογή σε οτιδήποτε έχει να κάνει με τηλεχειριζόμενη κίνηση, από απλά παιχνίδια μικρών παιδιών μέχρι πιο προηγμένα και πολύπλοκα μοντέλα. Συγκεκριμένα, οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται σε τηλεχειριζόμενα οχήματα ώστε να κινούν με ακρίβεια τις επιφάνειες ελέγχου. Για παράδειγμα μπορούν να ελέγχουν την κλίση ενός αεροσκάφους και το πηδάλιο ενός πλοίου ή στα τηλεχειριζόμενα αυτοκίνητα, να ελέγχουν το γκάζι, τα φρένα, τη διεύθυνση και τις ταχύτητες.

Οι σερβοκινητήρες διευρύνουν την εφαρμογή τους στον κατασκευαστικό τομέα της βιομηχανίας χρησιμοποιούμενοι σε μηχανές που κάνουν επεξεργασία χαρτιού, ξύλου και μαρμάρου. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο παίζουν στις μηχανές παραγωγής πλαστικών προϊόντων (extruders, μηχανές blow, κ.λ.π). Ειδικές εφαρμογές βρίσκουν και σε άλλες βιομηχανίες, όπως στην καπνοβιομηχανία και στην τυπογραφία.

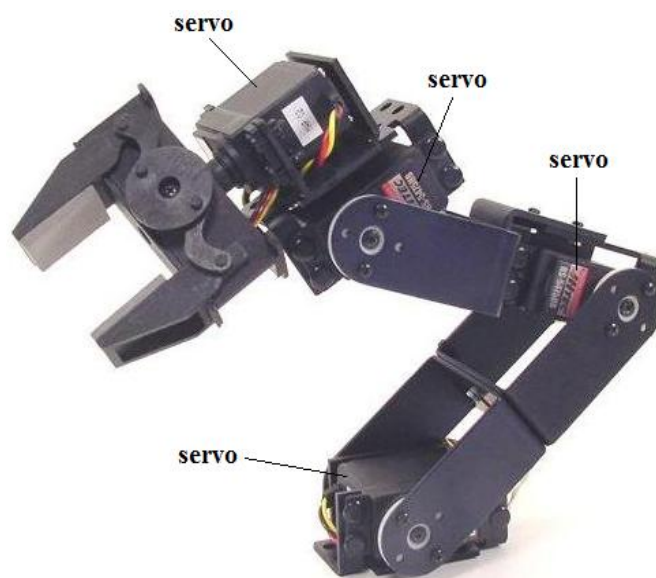
Στον τομέα της μεταφοράς και συσκευασίας υλικών και προϊόντων βρίσκουν μαζική εφαρμογή. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται σε εγκιβωτιστικά συστήματα, σε παλετοποιητικά συστήματα διαφόρων προϊόντων και σε συστήματα 'pick and place'. Τέλος, χρησιμοποιούνται σε μηχανές συσκευασίας, σε καρτονέττες, σε ετικετζέες και σε γεμιστικά μηχανήματα χύδην, στερεών και υγρών προσόντων.

4.2 Εφαρμογές σερβοκινητήρων στην ρομποτική

Για την πραγματοποίηση της επιθυμητής κίνησης ενός ρομποτικού μηχανισμού απαιτείται η συνδυασμένη κίνηση των αρθρώσεών του. Αυτή επιτυγχάνεται με την χρήση σερβοκινητήρων, οι οποίοι και κινούν συνολικά ένα μηχανικό σύστημα. Οι σερβοκινητήρες που χρησιμοποιούνται στις συνήθειες ρομποτικές εφαρμογές αποτελούν

εξέλιξη των κινητήρων που επί σειρά ετών χρησιμοποιούνταν σε εφαρμογές βιομηχανικού αυτοματισμού. Στις ρομποτικές εφαρμογές οι κινητήρες χρειάζεται να πληρούν ορισμένες επιπλέον απαιτήσεις σε σχέση πάντα με τις συμβατικές βιομηχανικές εφαρμογές. Απαιτήσεις για χαμηλή αδράνεια και μεγάλη σχέση ισχύος-βάρους, ικανότητα ανάπτυξης υψηλών επιταχύνσεων, δυνατότητα λειτουργίας σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων, ακρίβεια, παρακολούθηση της επιβαλλόμενης τροχιάς και συνεχή περιστροφή ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες λειτουργίας. Οι σερβοκινητήρες πληρούν όλες αυτές τις απαιτήσεις και είναι οι καταλληλότεροι κινητήρες για εφαρμογές στον τομέα της ρομποτικής.

Οι σερβοκινητήρες έχουν πολύ μεγάλη σημασία στον τομέα της ρομποτικής, καθώς διευκολύνουν την ευφυή και φυσική κίνηση. Χρησιμοποιούνται σε ρομποτικά συστήματα όλων των ειδών και μπορούν να διαβιβάζουν πληροφορίες σχετικά με την περιστροφή του κινητήρα στον άξονά του, με αποτέλεσμα το ρομπότ να μπορεί να 'γνωρίζει' τις κινήσεις των διαφόρων μερών του. Για εφαρμογές μικρότερης κλίμακας μεγέθους χρησιμοποιούνται συνήθως οι RC servos και παρόλο που είναι πολύ μικροί είναι εξαιρετικά ισχυροί, κάτι που τους καθιστά ιδανικούς για χρήση στα διάφορα ρομποτικά μοντέλα, όπως για παράδειγμα στους ρομποτικούς βραχίονες, σχήμα 4.1. Η κατανάλωση ενέργειας ενός σερβοκινητήρα είναι γενικά χαμηλή, εφόσον καταναλώνει μόνο ενέργεια σε σχέση με το μηχανικό του φορτίο, καθιστώντας τον έτσι ιδανικό και για χρήση σε ρομποτικά συστήματα που λειτουργούν με μπαταρία.



Σχήμα 4.1: Ρομποτικός βραχίονας τεσσάρων αξόνων με χρήση RC servo.

Οι σερβοκινητήρες που χρησιμοποιούνται στις ρομποτικές εφαρμογές μπορεί να είναι τριών ειδών: πνευματικοί, υδραυλικοί ή ηλεκτρικοί σερβοκινητήρες. Στους ρομποτικούς βραχίονες που είναι επιφορτισμένοι με τη διακίνηση μεγάλων ωφέλιμων φορτίων, συνήθως κρίνεται απαραίτητη η χρήση υδραυλικών σερβοκινητήρων. Στην περίπτωση

αυτή οι υδραυλικοί σερβοκινητήρες όχι μόνο είναι πιο κατάλληλοι από τους αντίστοιχους ηλεκτρικούς, αλλά επιπλέον το κόστος της υδραυλικής εγκατάστασης αποτελεί ένα σχετικά μικρό ποσοστό της συνολικής επένδυσης του ρομποτικού συστήματος. Πάντως σε όλες εκείνες τις εφαρμογές που δεν έχουμε μεγάλα ωφέλιμα φορτία, προτιμάται η χρήση ηλεκτρικών σερβοκινητήρων. Οι τελευταίοι μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκουν στο μηχανολογικό υποσύστημα του ρομπότ, είναι όμως εύλογο να θεωρηθεί ότι αποτελούν ένα ξεχωριστό υποσύστημα.

Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη της βιοϊατρικής τεχνολογίας, οι σερβοκινητήρες έχουν μεγάλη εφαρμογή στην ιατρική και συγκεκριμένα στα ιατρικά ρομποτικά συστήματα. Πάραδειγμα ενός τέτοιου συστήματος είναι το σύστημα υποβοήθησης χειρουργικών επεμβάσεων PUMA, σχήμα 4.2, το οποίο διαθέτει έξι βαθμούς ελευθερίας και οι κινήσεις του εκτελούνται από σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος. Το PUMA είναι ένα προγραμματιζόμενο, ελεγχόμενο από υπολογιστή ρομπότ που σχεδιάστηκε για να υποβοηθά το χειρουργό κατά τη διάρκεια επεμβάσεων νευροχειρουργικής. Παρέχει ακριβή, λεπτή εργασία και την απαιτούμενη σταθερότητα με τη βοήθεια στερεοτακτικού πλαισίου και εικόνων αξονικής τομογραφίας. Είναι ένα ασφαλές σύστημα με ειδικούς μηχανισμούς ασφαλείας για την περίπτωση μηχανικού ή ηλεκτρικού σφάλματος.



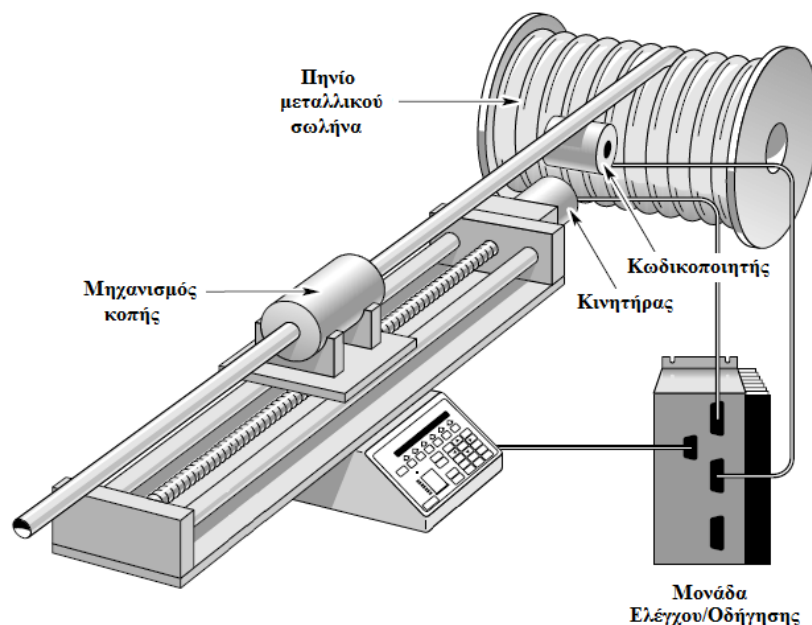
Σχήμα 4.2: Ρομποτικό σύστημα υποβοήθησης χειρουργικών επεμβάσεων PUMA 200.

4.3 Χρήση σερβοκινητήρων σε βιομηχανικούς μηχανισμούς

Μηχανισμός κοπής μεταλλικών σωλήνων:

Στην πιο κάτω εφαρμογή, σχήμα 4.3, παρουσιάζεται ένας κόπτης μετάλλων του οποίου ο μηχανισμός κίνησης ελέγχεται από ένα σερβοκινητήριο σύστημα. Όπως παρατηρούμε, ένας μηχανισμός κοπής τροφοδοτείται διαρκώς με μεταλλικούς σωλήνες μέσω ενός ειδικού “πηνίου”. Η περιστρεφόμενη λεπίδα του μηχανισμού κοπής, προκειμένου να

ολοκληρώσει μία κοπή πρέπει να περιστραφεί αρκετές φορές γύρω από τον σωλήνα. Για να έχουμε όμως μέγιστη απόδοση του μηχανήματος, ο μεταλλικός σωλήνας δεν πρέπει να σταματά όταν γίνεται ο τεμαχισμός. Έτσι για να έχουμε ένα καθαρό τεμαχισμό, η λεπίδα θα πρέπει να προχωράει παράλληλα με το μεταλλικό σωλήνα, ενώ η κοπή διεξάγεται.



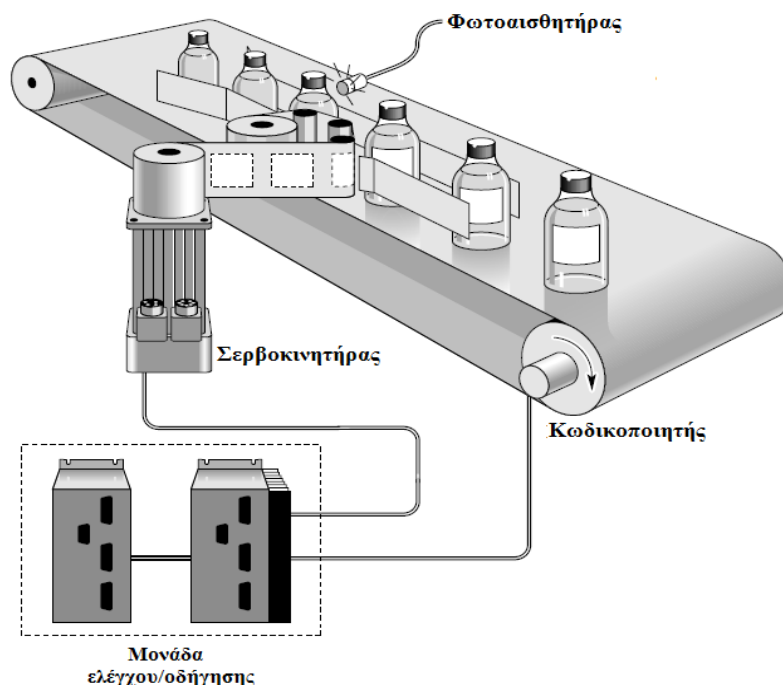
Σχήμα 4.3: Μηχανισμός κοπής μεταλλικών σωλήνων με χρήση σερβοκινητήριου συστήματος.

Η μονάδα ελέγχου λαμβάνει πληροφορίες για την κίνηση του σωλήνα από ένα εξωτερικό κωδικοποιητή και ταυτόχρονα καταγράφει το μήκος του σωλήνα που περνάει απ' την περιστρεφόμενη λεπίδα. Μόλις καταγραφεί το απαιτούμενο μήκος για κοπή, το σερβοκινητήριο σύστημα επιταχύνει το κοπτικό μηχανισμό μέχρι να αποκτήσει ίση ταχύτητα με αυτή του σωλήνα και στέλνει σήμα για να ξεκινήσει η κοπή.

Ετικετέζα – τοποθέτηση ετικετών σε φυάλες:

Η εφαρμογή αυτή είναι ένας μηχανισμός σήμανσης που εφαρμόζει ετικέτες πάνω σε φυάλες, οι οποίες κινούνται πάνω σε ένα ιμάντα μεταφοράς, σχήμα 4.4. Η απόσταση μεταξύ των φυάλων δεν είναι σταθερή και γι' αυτό ο ιμάντας μπορεί να επιβραδύνει, να επιταχύνει ή να σταματήσει οποιαδήποτε στιγμή. Ο μηχανισμός αυτός πρέπει να είναι σε θέση να εφαρμόζει με ακρίβεια τις ετικέτες πάνω στις κινούμενες φυάλες και να λειτουργεί για όλες τις ταχύτητες. Για την υλοποίηση του μηχανισμού της ετικετέζας αυτής, είναι απαραίτητη η χρήση μίας μονάδας ελέγχου η οποία θα μπορεί να δεχτεί είσοδο από ένα κωδικοποιητή αναρτημένο στον ιμάντα μεταφοράς και να λαμβάνει όλες τις ταχύτητες και τις αποστάσεις από το ρολό των ετικετών.

Το σερβοσύστημα είναι απαραίτητο γιατί παράγει κατάλληλη ροπή και ταχύτητα, ώστε να ξεπεραστούν οι υψηλές τριβές κατά την εφαρμογή των ετικετών αλλά και η αδράνεια των μεγάλων ρολών.



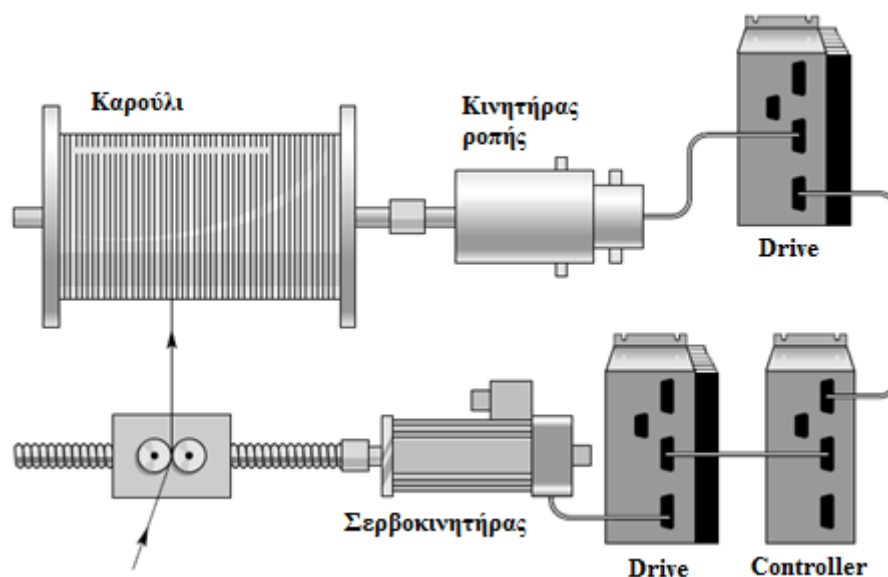
Σχήμα 4.4: Μηχανισμός τοποθέτησης ετικετών σε φιάλες με χρήση σερβοκινητήριου συστήματος.

Οι θέσεις των φιάλων πάνω στον μιάντα μεταφοράς καταγράφονται από φωτοαισθητήρα ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τη μονάδα ελέγχου. Μόλις η πρώτη άκρια της ετικέτας έρθει σε επαφή με τη φιάλη, η μονάδα ελέγχου δίνει εντολή στον σερβοκινητήρα να επιταχυνθεί με ταχύτητα ίση με αυτήν της γραμμής μεταφοράς. Ο σερβοκινητήρας συνεχίζει να κινείται με αυτή τη ταχύτητα μέχρι να εφαρμοστεί πλήρως η ετικέτα και στη συνέχεια επιβραδύνει ως ένα σημείο περιμένοντας την επόμενη φιάλη.

Μηχανισμός περιτυλίξεως νήματος:

Μία άλλη συχνή εφαρμογή των σερβοκινητήρων είναι στον μηχανισμό περιτυλίξεως νήματος (*filament winding*), σχήμα 4.5. Το προϊόν τυλίγεται σε ένα καρούλι που περιστρέφεται με μέγιστη ταχύτητα 2000 rpm και σταθερό ρυθμό. Στον συγκεκριμένο μηχανισμό (*Parker Motion & Control application*), η ένταση στο νήμα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,2 lbs και 0,6 lbs ώστε να μην είναι τεντωμένο και η διάμετρος περιτυλίξεως κυμαίνεται μεταξύ 2" και 4". Το νήμα τυλίγεται πάνω στο καρούλι με τη βοήθεια ενός ειδικού βραχίονα, ο οποίος ταλαντώνεται μπρος-πίσω με σταθερή ταχύτητα

και αντιστρέφεται στο τέλος της κάθε κίνησης. Η απαιτούμενη ταχύτητα του κοχλία κίνησης (*ballscrew*) είναι 60 rpm.

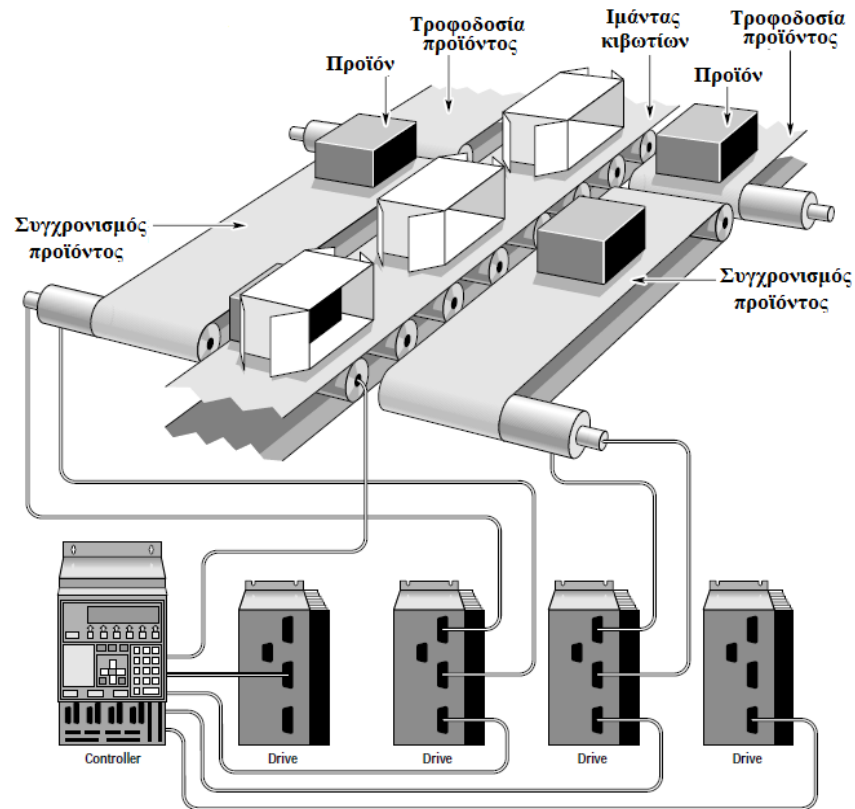


Σχήμα 4.5: Μηχανισμός περιτυλίξεως νήματος (*filament winding*).

Η πρωταρχική απαίτηση της κίνησης της μπομπίνας (καρούλι), είναι να παρέχει μια ελεγχόμενη ένταση, που σημαίνει ότι είναι απαραίτητος ο έλεγχος ροπής και όχι ο έλεγχος ταχύτητας. Αν ο κινητήρας παράγει σταθερή ροπή, η ένταση στο νήμα θα είναι αντιστρόφως ανάλογη με την διάμετρο περιτυλίξεως. Δεδομένου ότι η διάμετρος περιτυλίξεως είναι 2:1, η ένταση από την αρχή μέχρι το τέλος θα μειωθεί κατά 50%. Για να είναι αποδεκτή η λειτουργία σταθερής ροπής, η 3:1 ένταση είναι αρκετή. (Για να διατηρηθεί σταθερή ένταση, η ροπή πρέπει να αυξάνεται ανάλογα με την διάμετρο περιτυλίξεως). Η απαίτηση αυτή οδηγεί στη χρήση σερβοκινητήρα με λειτουργία ροπής (η ανάγκη για σταθερή ταχύτητα λειτουργίας κάνει το βηματικό κινητήρα ακατάλληλο). Εάν κατά τη λειτουργία της μηχανής το νήμα σπάει, η ταχύτητα θα μειωθεί και θα πάρει την προγραμματισμένη της τιμή.

Μηχανισμός συσκευασίας:

Μία άλλη συχνή εφαρμογή των σερβοκινητήρων είναι στους διάφορους μηχανισμούς συσκευασίας. Στο πιο κάτω παράδειγμα απεικονίζεται ένα σύστημα συσκευασίας κιβωτίων, σχήμα 4.6. Ο ιμάντας μεταφοράς των κιβωτίων κινείται μεταξύ δύο άλλων ιμάντων οι οποίοι μεταφέρουν το προϊόν που πρέπει να τοποθετηθεί με ακρίβεια μέσα στα κουτιά χωρίς να σταματήσει η λειτουργία τους.



Σχήμα 4.6: Μηχανισμός συσκευασίας - τοποθέτηση προϊόντων σε κιβώτια.

Η ταχύτητα του ιμάντα μεταφοράς των κιβωτίων μπορεί να διαφέρει σε κάθε συσκευασία. Όταν το προϊόν είναι έτοιμο τότε ο ελεγκτής πρέπει να αποφασίσει σε ποιο κιβώτιο μπορεί να το τοποθετήσει και στη συνέχεια το μεταφέρει σε ευθυγράμμη θέση με το κινούμενο κουτί. Το προϊόν πρέπει να κινείται κατά μήκος της πλευράς του πλαισίου τον κατάλληλο χρόνο, έτσι ώστε να μεταφερθεί με επιτυχία μέσα στο κιβώτιο.

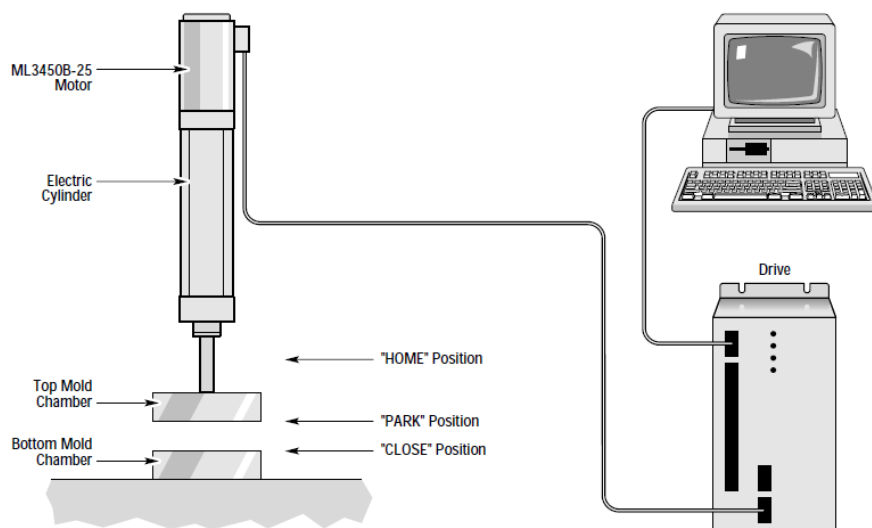
Για τον έλεγχο της συγκεκριμένης εφαρμογής απαιτείται ένας αυτόνομος ελεγκτής πολλαπλών αξόνων (*standalone multiple-axis controller*). Ο ελεγκτής μπορεί να εκτελέσει προφίλ κίνησης βασίζομενος από εξωτερικό κωδικοποιητή που είναι τοποθετημένος στο κεντρικό ιμάντα μεταφοράς των κιβωτίων. Οι δύο ιμάντες μεταφοράς του προϊόντος οδηγούνται από ειδικούς σερβοκινητήρες για υψηλές ταχύτητες και επιταχύνσεις. Ο ελεγκτής μέσω του σήματος που λαμβάνει από τον αισθητήρα που βρίσκεται στον ιμάντα μεταφοράς των προϊόντων βλέπει αν ένα προϊόν είναι έτοιμο και στη συνέχεια κάνει κίνηση με βάση την κατάσταση των κιβωτίων στον ιμάντα μεταφοράς των κιβωτίων και την κατάσταση του προϊόντος από τον άλλο ιμάντα μεταφοράς. Ο ελεγκτής χειρίζεται τον έλεγχο των δύο ιμάντων μεταφοράς των προϊόντων και την είσοδο του εξωτερικού κωδικοποιητή, καθώς και ένα αισθητήρα εισόδου για την παρακολούθηση την κατάσταση των κουτιών. Έτσι ο ελεγκτής μπορεί άμεσα να αποφασίσει σε ποιο κιβώτιο πρέπει να τοποθετηθεί το προϊόν αλλά και σε ποια θέση βρίσκεται. Στη συνέχεια επιταχύνει το προϊόν σε ευθύγραμμη θέση με το αντίστοιχο

κιβώτιο προς συσκευασία, το τοποθετεί στο πλαίσιο, και συνεχίζει να παρακολουθεί το υπόλοιπο προϊόν και τις θέσεις των κουτιών.

Μορφοποίηση πλαστικού με μηχανισμό χύτευσης με έγχυση:

Οι μηχανές χύτευσης με έγχυση (*injection molding machines*) είναι από τους πιο κοινούς μηχανισμούς μορφοποίησης πλαστικών. Στον πιο κάτω μηχανισμό, σχήμα 4.7, χρησιμοποιείται ένα σύστημα το οποίο κλείνει το θάλαμο χύτευσης, εφαρμόζει πίεση σε αυτόν για 5 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια ανοίγει το καλούπι με το μορφοποιημένο πλαστικό. Οι λειτουργίες όμως αυτές, συγχρονίζονται και με άλλες ενέργειες της μηχανής. Για παράδειγμα, όταν ο θάλαμος χύτευσης είναι ανοιχτός τότε ο κινητήρας πρέπει να είναι «παρκαρισμένος» σε μία προκαθορισμένη θέση, ούτως ώστε να μην εμποδίζεται η εξαγωγή του μορφοποιημένου πλαστικού.

Ο έλεγχος κίνησης σε αυτή την εφαρμογή απαιτεί σειριακή σύνδεση με υπολογιστή, έλεγχο θέσης και ροπής και δυνατότητα αλλαγής πίεσης. Ο κινητήρας οδηγώντας τη ράβδο που βρίσκεται μέσα στο κύλινδρο, επεκτείνει ή μαζεύει το πάνω μέρος του θαλάμου χύτευσης. Κατά τη διάρκεια αυτής της λειτουργίας της μηχανής, ο σερβοενισχυτής πρέπει να ελέγχει τη θέση του κινητήρα. Όταν το πάνω μέρος του θαλάμου χύτευσης κλείνει με το κάτω μέρος τότε πρέπει να εφαρμοστεί πίεση.



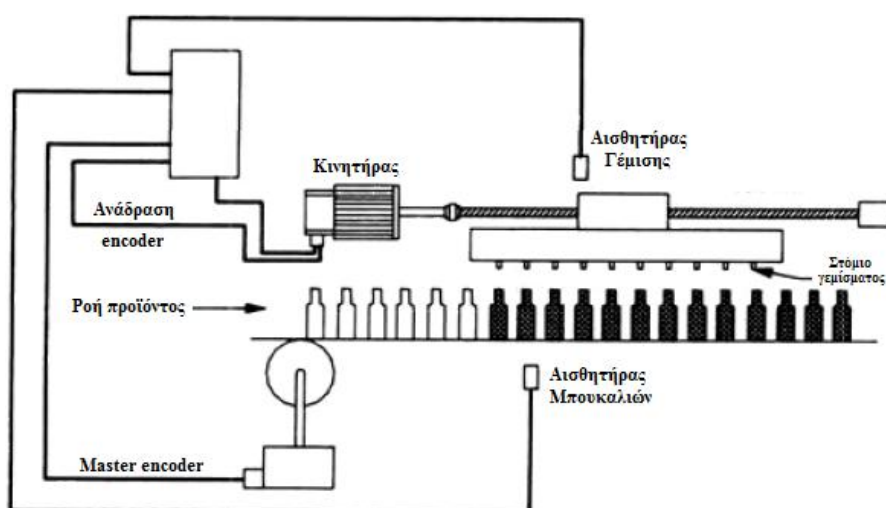
Σχήμα 4.7: Μηχανισμός χύτευσης με έγχυση για μορφοποίηση πλαστικού.

Καθώς εφαρμόζεται η πίεση αυτή στο καλούπι, η θέση του κινητήρα δεν είναι σημαντική. Ωστόσο, πρέπει να γίνεται έλεγχος της πίεσης στο θάλαμο χύτευσης, εφαρμόζοντας ροπή από τον κινητήρα. Ένας κοινός σερβοκινητήρας θέσης μπορεί να εφαρμόσει ροπή μόνο δημιουργώντας ένα σφάλμα θέσης. Ο έλεγχος της ροπής μέσω της θέσης, δεν είναι πολύ ακριβής και μπορεί να δημιουργήσει αστάθειες. Στην

συγκεκριμένη εφαρμογή είναι καλύτερο να επιλεγθεί ένα σερβοςύστημα που θα μπορεί να κάνει εναλλαγή μεταξύ του έλεγχου θέσης και του έλεγχου ροπής χωρίς αστάθεια και στη συνέχεια, ενώ βρίσκεται σε κατάσταση έλεγχου ροπής, να ελέγχει άμεσα τη ροπή του κινητήρα.

Μηχανισμός αυτόματης γέμισης φιάλων:

Σε αυτή την εφαρμογή, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8, έχουμε αυτόματη γέμιση φιάλων μέσω ειδικών στομίων καθώς κινούνται κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς. Κάθε ένα από τα στόμια γέμισης πρέπει να ακολουθεί μία φιάλη και να κινείται παράλληλα από αυτή, αφού το προϊόν εκχύεται κατά την διάρκεια της κίνησης. Τα στόμια γέμισης είναι τοποθετημένα σε ένα κινούμενο φορείο που οδηγείται μέσω ενός σερβομηχανισμού. Όταν ο κινητήρας γυρίζει τον άξονα, στον οποίο βρίσκεται το φορείο με τα στόμια γέμισης, τότε το φορείο κινείται οριζόντια κατά μήκος του άξονα αυτού. Αυτή η κίνηση θα είναι λεία, ώστε τα στόμια γέμισης να μπορούν να μεταφέρουν το προϊόν στις φιάλες με όσο το δυνατόν μικρότερη διαρροή.



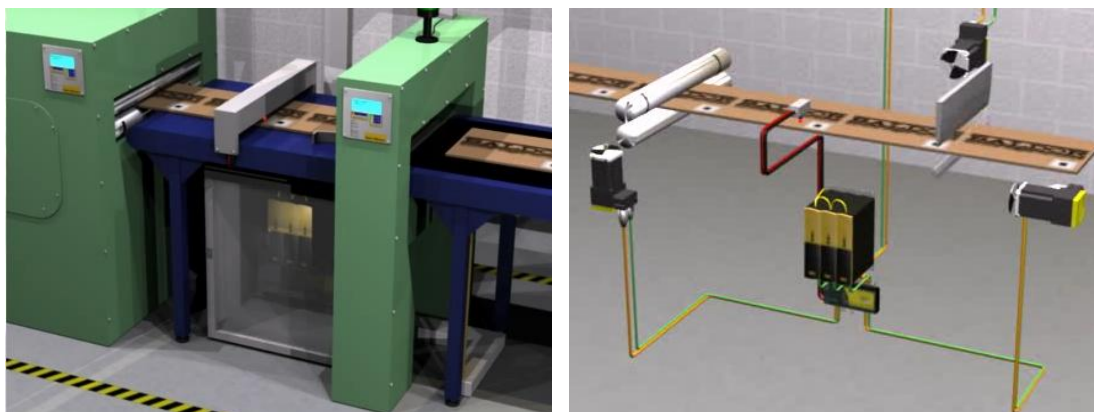
Σχήμα 4.8: Μηχανισμός αυτόματης γέμισης φιάλων με χρήση σερβοκινητήρα.

Το σερβοκινητήριο σύστημα χρησιμοποιεί έναν ελεγκτή θέσης που επιτρέπει την ανίχνευση της θέσης και της ταχύτητας καθώς οι φιάλες κινούνται επάνω στην γραμμή μεταφοράς. Ο κύριος κωδικοποιητής (master encoder) ανιχνεύει τις φιάλες καθώς κινούνται κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς. Για την τοποθέτηση των φιάλων στην γραμμή μεταφοράς και τον καθορισμό της απόστασης μεταξύ τους, χρησιμοποιείται ένα άλλο σερβοκινητήριο σύστημα. Έτσι η απόσταση μεταξύ των φιάλων καθώς παρνοούν το σημείο γέμισης είναι καθορισμένη με ακρίβεια, ώστε η απόσταση μεταξύ των λαιμών της κάθε φιάλης να ταιριάζει με την απόσταση μεταξύ των στομίων γέμισης. Το σύστημα περιέχει επίσης ένα ανιχνευτή ο οποίος εμποδίζει την έκχυση του προϊόντος από το

στόμιο γέμισης σε περίπτωση που μία φιάλη λείπει ή εμφανίζονται μεγάλα κενά διαστήματα μεταξύ των φιάλων. Το σερβοκινητήριο σύστημα συγκρίνει τη θέση των φιαλών από τον κύριο κωδικοποιητή, με το σήμα ανάδρασης που δηλώνει τη θέση του κινούμενου φορίου με τα στόμια γέμισης. Έτσι ο σερβοενισχυτής θα αυξήσει ή θα μειώσει την ταχύτητα του μηχανισμού του φορίου ώστε τα στόμια γεμίματος να κινούνται ακριβώς με την ταχύτητα των φιαλών.

Μηχανισμός κοπής ακριβείας:

Ένα άλλο παράδειγμα χρήσης των σερβοκινητήριων συστημάτων είναι στους μηχανισμούς με ακρίβεια κοπής, σχήμα 4.9. Η λειτουργία ενός τέτοιου μηχανισμού είναι η κοπή (και η κόλληση) προεκτυπωμένου υλικού πλαστικού (όπως οι σακούλες των Super Market) ή χαρτιού (όπως τραπεζομάντιλο) σε προκαθορισμένο μήκος, έτσι ώστε το τυπωμένο τμήμα να είναι πάντα κεντραρισμένο στην ίδια θέση. Ο έλεγχος του σερβοκινητήρα των κύλινδρων που προωθούν το υλικό προς το μαχαίρι κοπής γίνεται από ένα ελεγκτή, ενώ το μαχαίρι, από ένα ψηφιακό σήμα εξόδου (επίσης από τον ελεγκτή).

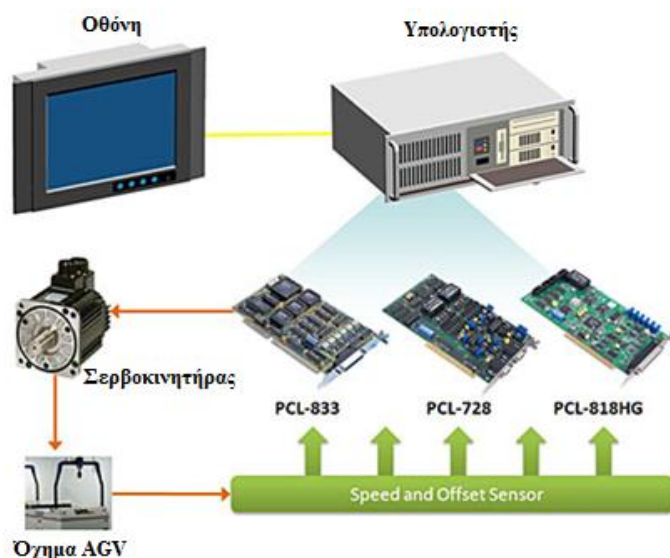


Σχήμα 4.9: Μηχανή κοπής ακριβείας με σερβοκινητήριο σύστημα.

Επειδή με τον κλασικό τρόπο ελέγχου του μήκους είναι αδύνατο να συγχρονιστεί η κοπή του υλικού με την εκτύπωση λόγω ολίσθησης, χρησιμοποιείται ένα φωτοκύτταρο χρώματος που ανιχνεύει ένα μικρό προεκτυπωμένο σημάδι που βρίσκεται μεταξύ των εκτυπωμένων τμημάτων του υλικού. Αυτό το φωτοκύτταρο συνδέεται με μια είσοδο πολύ υψηλής ταχύτητας του ελεγκτή (controller). Έτσι «κλειδώνει» αυτόματα τη θέση του άξονα του σερβοκινητήρα των κύλινδρων που προωθούν το υλικό σε σχέση με το προεκτυπωμένο σημάδι σε χρόνο μικρότερο από 1μs και υπολογίζει μια νέα θέση προώθησης (κατά τη διάρκεια της κίνησης) σε περίπτωση ολίσθησης, έτσι ώστε το υλικό να κοπεί πάντα στη σωστή θέση και πάντα ενδιάμεσα από τα προεκτυπωμένα σημάδια.

Αυτόματα καθοδηγούμενο οχήμα:

Ένα αυτόματα καθοδηγούμενο οχήμα (Automated Guided Vehicle) είναι ένα κινητό ρομπότ που ακολουθεί τους δείκτες ή τα καλώδια στο πάτωμα ή χρησιμοποιεί σύστημα όρασης ή λέιζερ. Η οδήγηση των οχημάτων αυτών γίνεται με την χρήση σερβοκινητήρων, σχήμα 4.10.

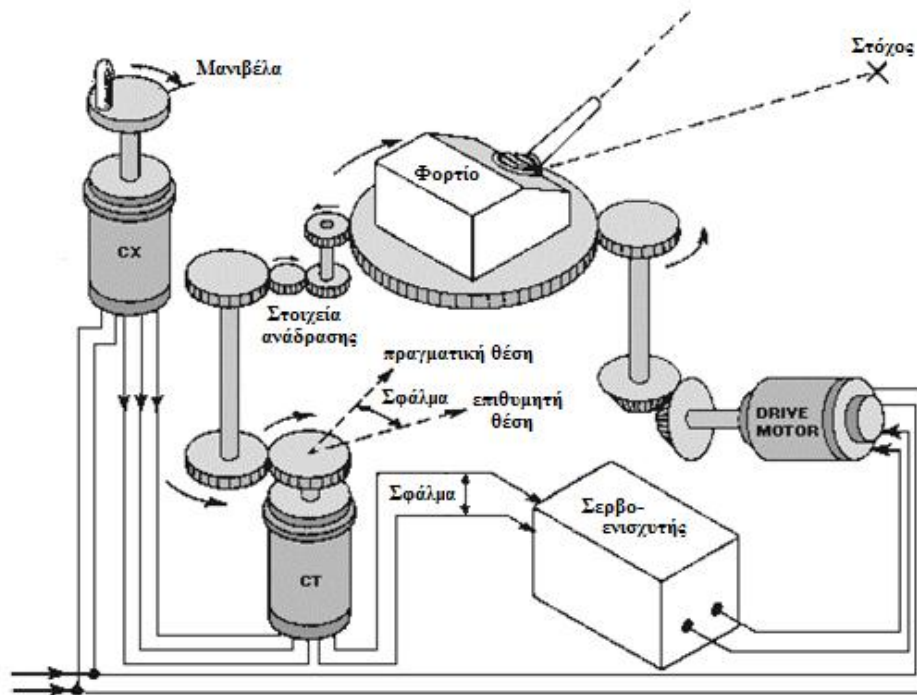


Σχήμα 4.10: Σύστημα αυτόματα καθοδηγούμενου οχήματος (AGV) με χρήση σερβοκινητήρα.

Χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές για να μετακίνηση υλικών γύρω από μια εγκατάσταση παραγωγής. Ένα τέτοιο όχημα μπορεί να ενσωματώσει ήχο, φως, και τεχνολογίες πληροφορικής που θα του δίνουν τη δυνατότητα να επικοινωνεί με άλλα ρομπότ, ώστε να εξασφαλίζεται η κυκλοφορία και ο προορισμός των υλικών σε όλη την εγκατάσταση.

4.4 Εφαρμογή σερβοκινητήρων στο πολεμικό ναυτικό

Η εφαρμογή αυτή δείχνει τη βασική λειτουργία ενός σερβοκινητήριου συστήματος με έλεγχο θέσης που χρησιμοποιείται ευρέως στο Πολεμικό Ναυτικό, σχήμα 4.11. Σ' ένα σερβοκινητήριο σύστημα ελέγχου θέσης, η εντολή εισόδου προσδιορίζει τη θέση στην οποία πρέπει να μετακινηθεί το φορτίο. Ο μηχανισμός του φορτίου σε αυτό το παράδειγμα είναι ένα πυροβόλο, το οποίο βρίσκεται πάνω σ' ένα πυργίσκο. Σκοπός του συστήματος είναι η μετακίνηση του πυροβόλου μέσω εντολής από μία απομακρυσμένη μανιβέλα.



Σχήμα 4.11: Μηχανισμός ελέγχου κίνησης πυργίσκου του πολεμικού ναυτικού.

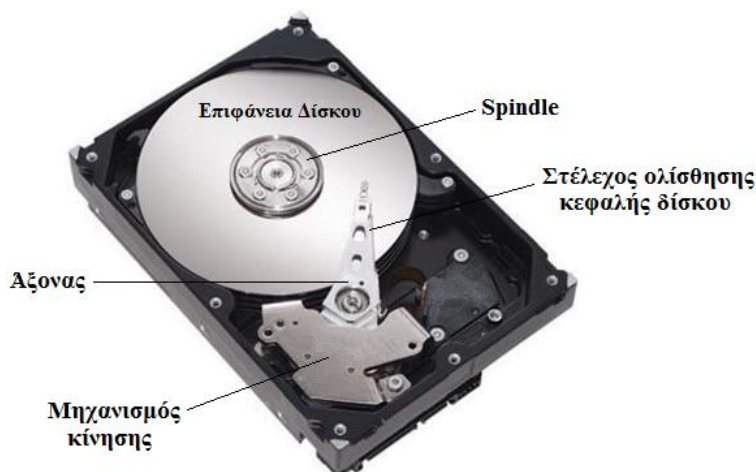
Το φορτίο είναι μηχανικά συνδεδεμένο μέσω ενός συστήματος μετάδοσης με τον δρομέα του CT, έτσι ώστε η θέση του πύργου να αντιπροσωπεύεται πάντα με ακρίβεια από τη θέση του δρομέα του CT. Η εντολή, η οποία σηματοδοτεί την επιθυμητή θέση του πυργίσκου, τροφοδοτείται στον σερβοκινητήρα μέσω της μετακίνησης του δρομέα του CX με τη μανιβέλα. Ένα αντίστοιχο σήμα εμφανίζεται αμέσως στον στάτη του κινητήρα CT. Αυτό το σήμα διαφέρει από την πραγματική θέση του πυργίσκου, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται ένα σφάλμα τάσης στο δρομέα του CT. Το σφάλμα τάσης τροφοδοτείται από τον δρομέα του CT στον σερβοενισχυτή. Στο σημείο αυτό μετατρέπεται σε ισχύ που οδηγεί τον κινητήρα προς την κατεύθυνση που απαιτείται, ώστε το φορτίο να μετακινηθεί στην επιθυμητή θέση.

Καθώς ο πυργίσκος κινείται, η μηχανική ανάδραση περιστρέφει τον δρομέα του CT σύμφωνα με τον δρομέα του CX. Καθώς το φορτίο πλησιάζει στη σωστή θέση, η παροχή ρεύματος στον κινητήρα όλο και μειώνεται, λόγω της μείωσης του σφάλματος τάσης που αναπτύχθηκε στο CT. Όταν η θέση του δρομέα του CT συμφωνεί με τη θέση του δρομέα του CX, το σφάλμα τάσης μηδενίζεται και η ισχύς στον κινητήρα μειώνεται. Σε αυτό το σημείο ο πυργίσκος είναι στην επιθυμητή θέση.

4.5 Σύστημα ανάγνωσης σκληρού δίσκου

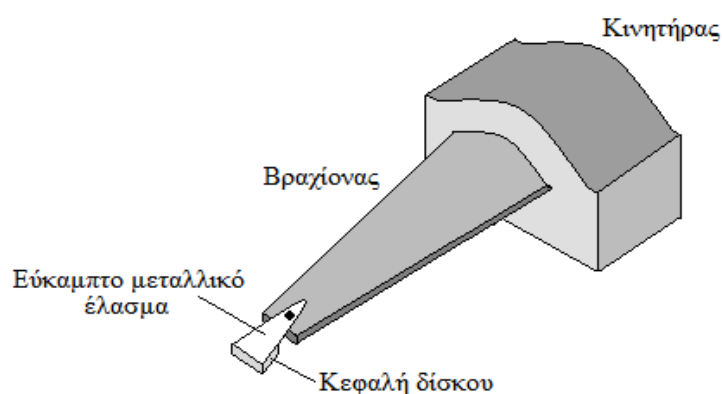
Οι σκληροί δίσκοι αποτελούν διατάξεις στις οποίες μπορούμε εύκολα και αποτελεσματικά να αποθηκεύσουμε και να διαβάσουμε διάφορες πληροφορίες. Τα κύρια

μέρη ενός σκληρού δίσκου φαίνονται στο σχήμα 4.12. Σκοπός του συστήματος ανάγνωσης ενός σκληρού δίσκου είναι η κατάλληλη τοποθέτηση της κεφαλής ανάγνωσης σε κάποιο επιθυμητό ίχνος πάνω στην επιφάνεια του δίσκου, με τέτοιο τρόπο ώστε να διαβαστούν τα δεδομένα που έχουν αποθηκευθεί στο συγκεκριμένο ίχνος, αλλά και η μετακίνηση της κεφαλής από ένα ίχνος σε ένα άλλο σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.



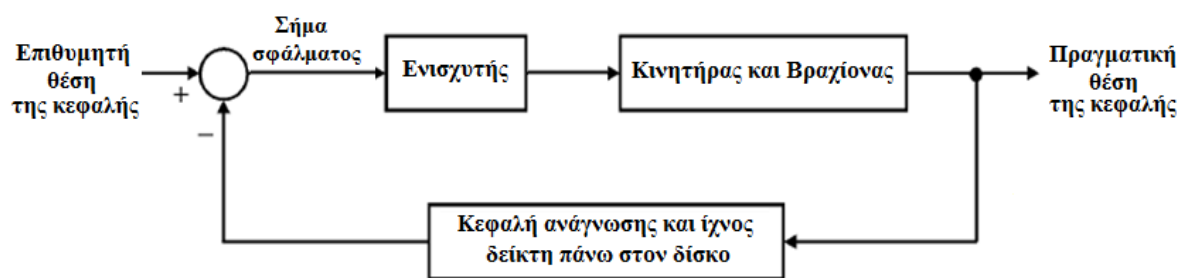
Σχήμα 4.12: Κύρια μέρη σκληρού δίσκου ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Για τον ακριβή έλεγχο της διάταξης αυτής, η μεταβλητή που επιλέγεται είναι η θέση της κεφαλής του δίσκου η οποία είναι τοποθετημένη σε ένα στέλεχος ολίσθησης που συνδέεται με τον βραχίονα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13.



Σχήμα 4.13: Κεφαλή ανάγνωσης δίσκου στην οποία φαίνεται και το εύκαμπτο μεταλλικό στέλεχος.

Το σύστημα ανάγνωσης του σκληρού δίσκου χρησιμοποιεί έναν κατάλληλο σερβομηχανισμό κίνησης, συνήθως με κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη ως πηγή του πεδίου διέγερσης, για την περιστροφή του βραχίονα ανάγνωσης και την μετακίνηση του προς την επιθυμητή θέση πάνω στην επιφάνεια του δίσκου.



Σχήμα 4.14: Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος ανάγνωσης σκληρού δίσκου.

4.6 Εφαρμογή σερβοκινητήρων σε μηχανισμούς εκτύπωσης

Η χρήση ενός σερβοκινητήρα σ'ένα εκτυπωτή εξυπηρετεί τόσο στην οδήγηση του μηχανισμού εκτύπωσης (οριζόντια κίνηση), όσο και στην τροφοδοσία δεδομένων από το προς εκτύπωση υλικό (κατακόρυφη κίνηση). Ο μηχανισμός εκτύπωσης είναι συνεχώς συνδεδεμένος με τον σερβοκινητήρα. Αντίθετα, η τροφοδοσία δεδομένων, κατά την διάρκεια της εκτύπωσης αποσυνδέεται από τον σερβοκινητήρα και στο τέλος της συνδέεται ξανά για την τροφοδοσία νέων δεδομένων στον μηχανισμό εκτύπωσης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται εκτύπωση από γραμμή σε γραμμή (*line-by-line*). Με το μηχανισμό εκτύπωσης να είναι συνεχώς συνδεδεμένος, η ακριβής οριζόντια θέση του είναι πάντα γνωστή και ελεγχόμενη.

Στα συμβατικά σερβοσυστήματα ταχύτητας για τον έλεγχο της κίνησης στον εκτυπωτή, χρησιμοποιείται ως συσκευή ανάδρασης ένα αναλογικό ταχύμετρο το οποίο παρέχει το σήμα που αντιπροσωπεύει την πραγματική ταχύτητα κίνησης. Αυτό το σήμα συγκρίνεται με ένα σήμα εντολής, παράγοντας έτσι το σήμα σφάλματος που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του κινητήρα. Το ταχύμετρο συνήθως είναι σχεδιασμένο για ένα συγκεκριμένο και σχετικά μικρό εύρος στροφών. Για διεύρυνση του φάσματος στροφών οι διάφορες μεταβολές στην ακρίβεια και τον χρόνο απόκρισης πρέπει να είναι αποδεκτές. Για την αποφυγή των ανωτέρω μεταβολών στην απόδοση, καλύτερη είναι η χρησιμοποίηση ενός ψηφιακού σερβοσυστήματος.

Οι εκτυπωτές αναλογικών σερβοσυστημάτων αποφεύγουν τα προαναφερθέντα με τη χρήση ειδικών σχεδιασμένων κυκλώματων. Ωστόσο, λόγω του αριθμού των τμημάτων και των απαραίτητων προσαρμογών που απαιτούνται για την κατασκευή ενός τέτοιου εκτυπωτή, η λύση αυτή έχει μεγαλύτερο κόστος. Επίσης, τα ειδικά αυτά σχεδιασμένα κυκλώματα καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο από τον επιθυμητό και η πολυπλοκότητα τους προκαλεί ανησυχία σε θέματα αξιοπιστίας. Τα πακέτα φθηνών ολοκληρωμένων κύκλωματων που είναι εμπορικά διαθέσιμα, είναι χρήσιμα για τον έλεγχο της ταχύτητας σε εκτυπωτές με σχετικά μικρή ταχύτητα. Πιο συγκεκριμένα, τα προαναφερθέντα πακέτα ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, είναι επαρκή σε ένα σερβόσυστημα για εκτυπωτές που λειτουργούν περίπου με 15 χαρακτήρες ανά δευτερόλεπτο και δεν προσφέρουν το εύρος

στροφών και την ακρίβεια που απαιτείται για υψηλότερης ταχύτητας εκτυπωτές (π.χ. άνω των 30 χαρακτήρων ανά δευτερόλεπτο).

4.7 Εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά και αιολικά συστήματα

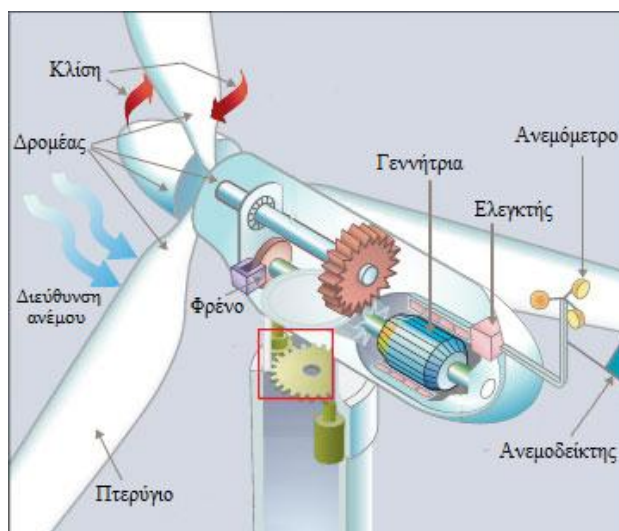
Οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα για την κίνηση των ηλιοσυλλεκτών σύμφωνα με τον αλγόριθμο παρακολούθησης της πορείας του ήλιου. Με άλλα λόγια, οι σερβοκινητήρες περιστρέφουν το μηχανικό σύστημα πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένα τα φωτοβολταϊκά και ρυθμίζουν την κλίση των πάνελ ανάλογα με την κίνηση του ήλιου, ώστε να έχουμε μεγαλύτερη δέσμευση ηλιακού φωτός (ηλιακή ενέργεια).

Ένα παράδειγμα είναι το σερβοκινητήριο σύστημα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.15. Το σύστημα αυτό παρακολουθεί τη πορεία του ήλιου και επιτρέπει στις ηλιακές κυψέλες να απορροφούν μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία, εφόσον αυτή είναι διαθέσιμη. Δηλαδή, ανιχνεύει την ένταση του ηλιακού φωτός σε διαφορετικές κατευθύνσεις και καθορίζει την καλύτερη δυνατή θέση με τη μεγαλύτερη ηλιακή ενέργεια. Το σύστημα αυτό προβλέπει πολυαξονικό έλεγχο κίνησης. Η μονάδα διεπαφής μέτρα το σήμα τάσης εισόδου από τους αισθητήρες ηλιακού φωτός, ανιχνεύει την κατεύθυνση με την μεγαλύτερη ηλιοφάνεια και ενημέρωνει τον ελεγκτή για το αποτέλεσμα. Ο ελεγκτής με τη σειρά του ελέγχει τους κινητήρες του συστήματος, οι οποίοι μετακινούν τους άξονες των φωτοβολταϊκών για την προσαρμογή της σωστής γωνίας και κατεύθυνσης, για την καλύτερη δυνατή απόδοση του.



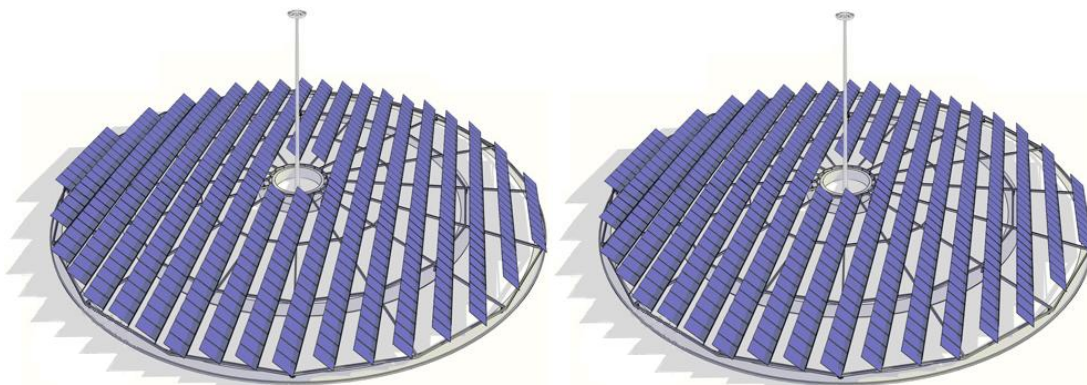
Σχήμα 4.15: Σύστημα παρακολούθησης ηλιακής πορείας με ταυτόχρονη προσαρμογή γωνίας και κατεύθυνσης των φωτοβολταϊκών πλακών για μέγιστη αξιοποίηση ενέργειας.

Εάν η ένταση του ηλιακού φωτός που ανιχνεύεται μεταξύ δύο αισθητήρων είναι διαφορετική, τότε ο ελεγκτής υπολογίζει τη διαφορά ένταση του ηλιακού φωτός και ρυθμίζει τους κινητήρες βρίσκοντας τη βέλτιστη θέση της ηλιακής μονάδας. Εάν δεν υπάρχει διαφορά έντασης ηλιακού φως ανάμεσα σε δύο πομπούς σημαίνει ότι η ηλιακή μονάδα βρίσκεται στη βέλτιστη κατεύθυνση του ηλιακού φωτός.



Σχήμα 4.16: Ανεμογεννήτρια με σύστημα ελέγχου της κατεύθυνσης του ανέμου.

Αντίστοιχα σερβοκινητήρια συστήματα χρησιμοποιούνται και στα αιολικά πάρκα και κυρίως σε ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους. Ο έλεγχος στα συστήματα αυτά γίνεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου, έτσι ώστε τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας να προσανατολίζονται κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου, σχήμα 4.16.



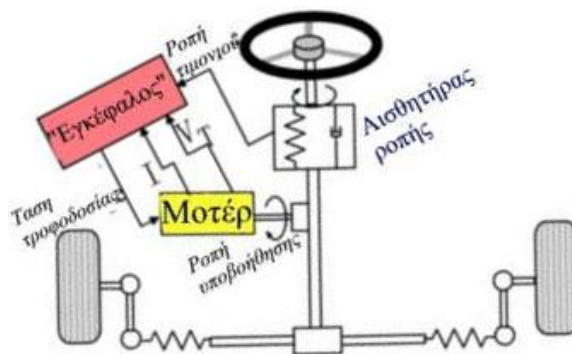
Σχήμα 4.17: Φωτοβολταϊκό πάρκο με πάνελ πάνω σε περιστρεφόμενες πλατφόρμες, οι οποίες περιστρέφονται ανάλογα με τη πορεία του ήλιου, με χρήση σερβοκινητήριου συστήματος για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.

Τόσο στα φωτοβολταϊκά όσο και στα αιολικά συστήματα είναι φανερό ότι η χρήση των σερβοκινητήρων είναι πάρα πολύ σημαντική. Δίνουν τη δυνατότητα στο σύστημα μας να

εκμεταλλεύεται μεγαλύτερα ποσά ηλιακής και αιολικής ενέργειας αντίστοιχα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόδοση αλλά και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τους συστήματος. Ειδικά σε φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα, όπως για παράδειγμα στο μικρό φωτοβολταϊκό πάρκο του σχήματος 4.17, η χρήση σερβοκινητήριων συστημάτων είναι απαραίτητη αφού το κέρδος και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε πολύ μεγαλύτερα επίπεδα.

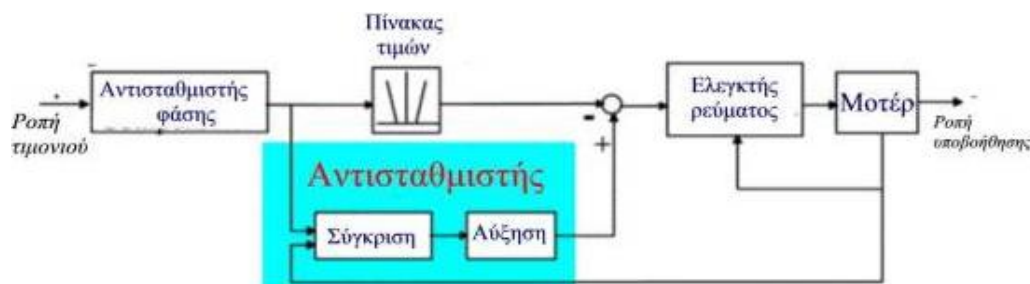
4.8 Ηλεκτρικό σύστημα υποβοήθησης τιμονιού

Η κατασκευή ενός ηλεκτρικού συστήματος υποβοήθησης είναι σχετικά απλή και δεν απαιτεί τίποτα παραπάνω από έναν ηλεκτρικό σερβοκινητήρα και ορισμένους αισθητήρες. Η οδήγηση του μηχανισμού υποβοήθησης γίνεται από τον σερβοκινητήρα, μέσω μειωτήρα (χωρίς αντλία και λάδια πίεσεως), κατευθείαν πάνω στην κολώνα του τιμονιού, σχήμα 4.18. Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι κινητήρων και μειωτήρων, ανάλογα με τον κατασκευαστή. Την υποβοήθηση ελέγχει μια ηλεκτρονική μονάδα με μικροεπεξεργαστή (εγκέφαλος), λαμβάνοντας σήματα εισόδου από αισθητήρες για την ταχύτητα του οχήματος, την ροπή του τιμονιού, την γωνία και τον ρυθμό στροφής του. Όταν χρειαστεί υποβοήθηση, ο εγκέφαλος υπολογίζει την αναγκαία ροπή και στέλνει ανάλογη τάση στον σερβοκινητήρα.



Σχήμα 4.18: Σύστημα υποβοήθησης τιμονιού με χρήση σερβοκινητήρα.

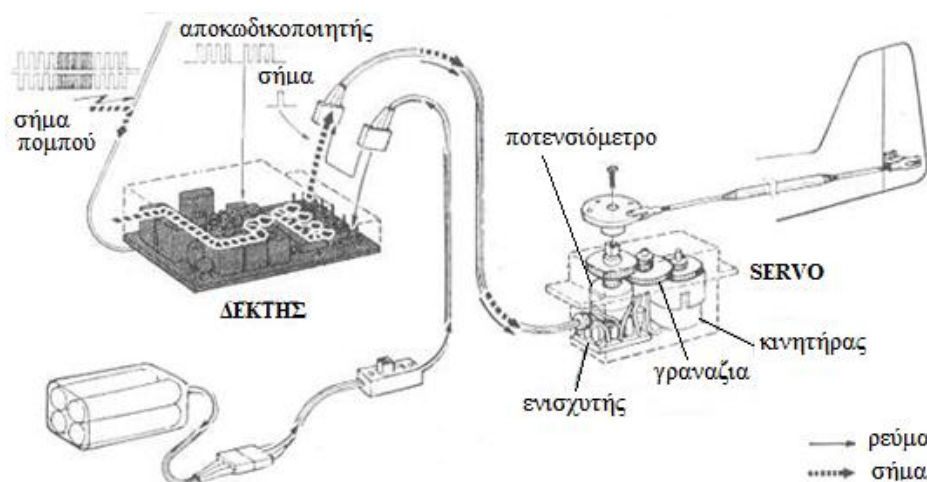
Όταν το αυτοκίνητο κινείται στην ευθεία ή όταν δεν υπάρχει ανάγκη υποβοήθησης του τιμονιού, ο σερβοκινητήρας απενεργοποιείται και έτσι δεν καταναλώνεται ενέργεια, ενώ όταν απαιτείται υποβοήθηση τότε το σύστημα ενεργοποιείται αυτόματα για όσο διάστημα είναι αναγκαίο. Γενικά, στο σύστημα αυτού του τύπου γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της ισχύος άρα και μικρότερη κατανάλωση. Το σύστημα είναι απλό, αξιόπιστο και με πολύ καλή αίσθηση του τιμονιού. Το μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι δεν παρέχει ικανοποιητική αίσθηση στον οδηγό, τουλάχιστον όσον αφορά τη γρήγορη οδήγηση, ενώ τα πλεονεκτήματα είναι ότι καταναλώνει μικρή ενέργεια, έχει μικρό όγκο και δεν επηρεάζει την απόδοση του κινητήρα.



Σχήμα 4.19: Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος υποβοήθησης τιμονιού με ηλεκτρικό σερβοκινητήρα.

4.9 Μοντελισμός

Οι τηλεχειριζόμενοι σερβομηχανισμοί (R/C servos) βρίσκουν τεράστια εφαρμογή στον μοντελισμό και κυρίως στον απομακρισμένο έλεγχο αεροπλάνων. Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός servo στον μοντελισμό είναι η ακρίβεια (*resolution*), δηλαδή η πιστή ανταπόκρισή του με πολύ μικρά βηματάκια στις μικροκινήσεις του χειριστηρίου του πομπού. Ένα «καλό» servo έχει ρουλεμάν, μεταλλικά γραναζία, έμμεση κίνηση του ποτενσιόμετρου (*indirect drive*) και στεγανότητα στο νερό και το λάδι. Επίσης, σημαντικό ρόλο σ' ένα μονέλο έχουν το μέγεθος και το βάρος του servo, τα οποία είναι αλληλένδετα.



Σχήμα 4.20: Ο δέκτης πιάνει το σήμα του πομπού, το επεξεργάζεται και δίνει εντολή στο αντίστοιχο servo να κινήσει το πηδάλιο.

Η λειτουργία του συστήματος κίνησης του πηδαλίου ενός μοντέλου αεροπλάνου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.20. Κάθε servo είναι συνδεδεμένο, μέσω μιας ντίζας, με ένα πηδάλιο ή άλλο ελεγχόμενο τμήμα το οποίο κινεί. Ο πομπός στέλνει συνεχώς ένα σήμα που πιάνει ο δέκτης και αποκωδικοποιεί για να το μεταβιβάσει στα αντίστοιχα servo.

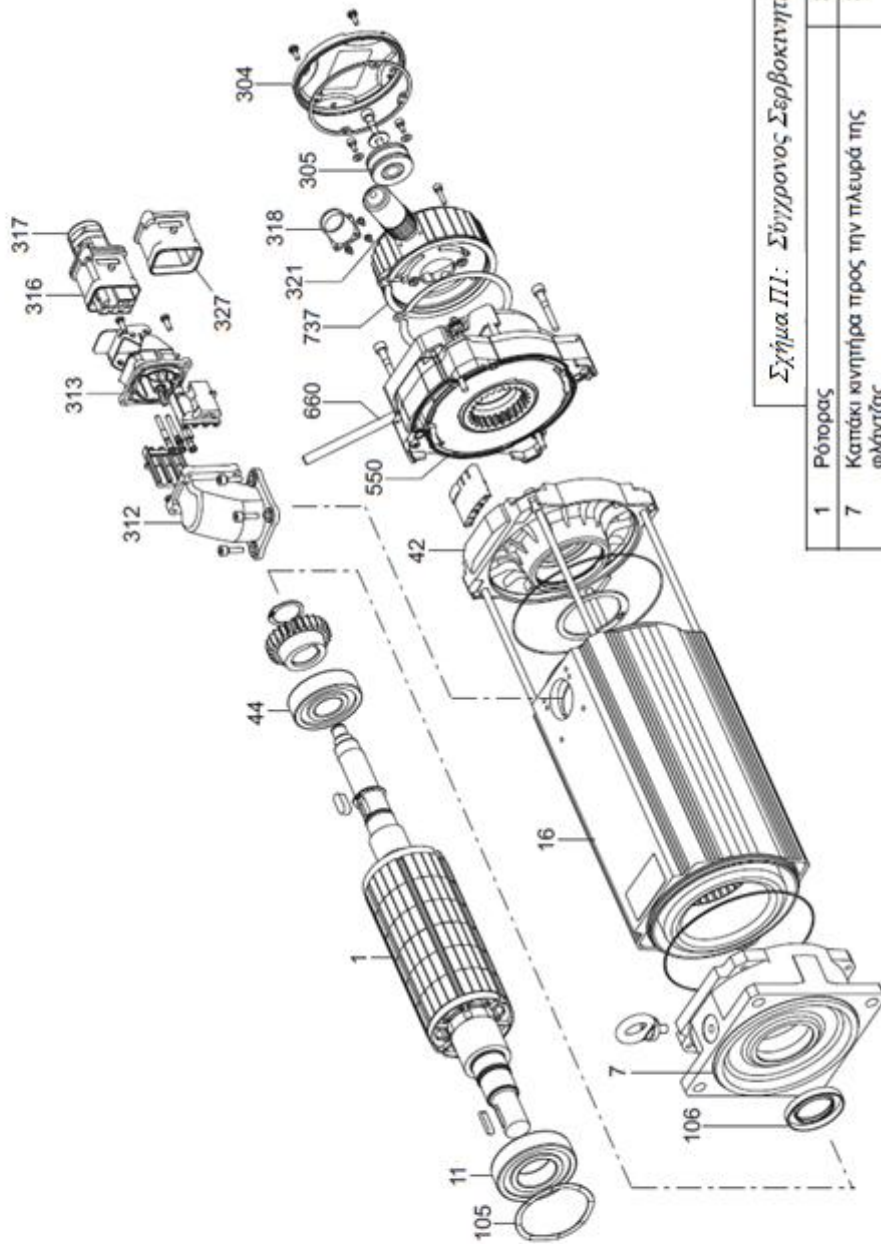
Όταν τα χειριστήρια του πομπού είναι στην ουδέτερη θέση τότε το σήμα που εκπέμπει αναγκάζει τα servo να παραμένουν κεντραρισμένα. Μετακινώντας ένα χειριστήριο προς μία κατεύθυνση, θα τροποποιηθεί το σήμα και θα στρίψει το αντίστοιχο servo προς την καθορισμένη φορά. Εάν το ίδιο χειριστήριο μετακινηθεί αντίθετα, θα κινήσει το ίδιο servo αλλά προς την αντίθετη φορά. Η κίνηση των servo ακολουθεί την κίνηση των χειριστηρίων με αναλογία. (*proportional*). Πράγματι αν κινήσουμε το χειριστήριο έως ένα ποσοστό της διαδρομής, τότε το servo θα κινηθεί ως το ίδιο ποσοστό της ολικής διαδρομής. Επίσης, όσο χρόνο κρατάμε το χειριστήριο σταθερό με μία κλίση, το servo θα μένει ακίνητο στην θέση με την αντίστοιχη εκτροπή.

Συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, οι σερβοκινητήρες έχουν βελτιωθεί σε τεράστιο βαθμό και εξελίσσονται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου. Είναι κινητήρες νέας γενιάς και φέρουν ενσωματωμένο σύστημα ανάδρασης με βελτιωμένα αρκετά χαρακτηριστικά σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες. Οι σημαντικότεροι λόγοι που επιβάλλουν την χρήση σερβοκινητήρων και σερβοκινητήριων συστημάτων είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, η βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς κι οι αυξανόμενες απαιτήσεις των διάφορων εφαρμογών για έλεγχο ροπής, ταχύτητας και θέσης. Ένα σερβοκινητήριο σύστημα απαιτεί κινητήρες με βελτιωμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά κι η τεχνική ελέγχου που εφαρμόζεται θα πρέπει να εξασφαλίζει λειτουργία σε μεγάλο εύρος ταχύτητας, άμεση απόκριση με γρήγορες επιταχύνσεις κι επιβραδύνσεις, σταθερότητα ροπής κι ακρίβεια στον έλεγχο ταχύτητας και θέσης. Κατά την επιλογή του κατάλληλου κινητήρα για την υλοποίηση μίας συγκεκριμένης εφαρμογής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ταχύτητα απόκρισης, η ακρίβεια και το σφάλμα που οφείλεται σε εξωτερική διαταραχή, το μέγεθος του κινητήρα, το κόστος, η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία ελέγχου του κινητήρα.

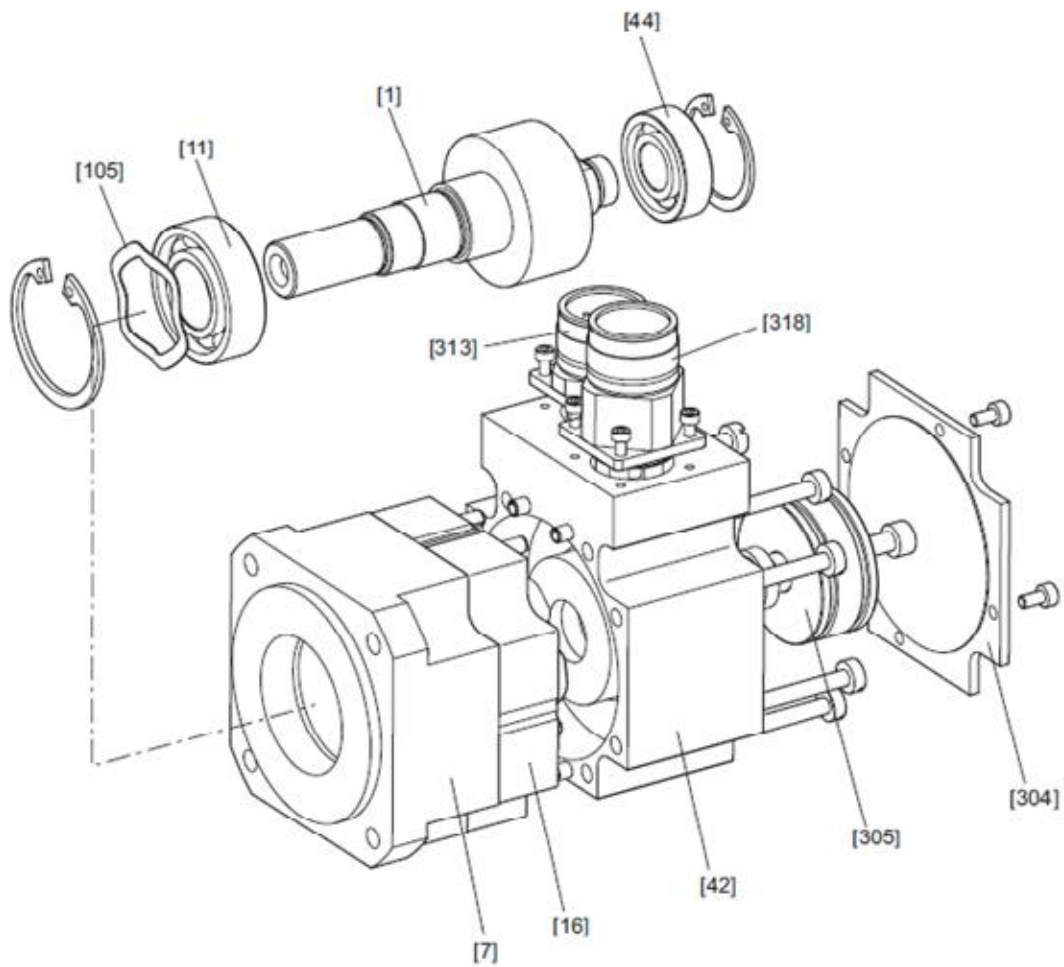
Στην σύγχρονη βιομηχανική εποχή η χρήση των σερβοκινητήρων είναι απαραίτητη και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε διάφορες εφαρμογές. Οι νέες μονάδες οδήγησης σερβοκινητήρων είναι πλέον οικονομικά προσιτές και προσφέρουν πολλαπλές δυνατότητες, ώστε να είναι πρακτικά δυνατή η αντιμετώπιση οποιουδήποτε σύνθετου προβλήματος ελέγχου. Όπως έχουμε προαναφέρει, οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλούς τομείς εφαρμογών, όπως για παράδειγμα σε μεταφορικά μέσα, σε οπτικά συστήματα, στο τηλεχειρισμό, σε αυτόματες εργαλειομηχανές, στη ρομποτική, στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και στη βιοϊατρική. Είναι λοιπόν προφανές ότι χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλους τους τομείς της τεχνολογίας και η γνώση της λειτουργίας τους στη σημερινή εποχή είναι απαραίτητη για κάθε μηχανικό.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Σχήμα III: Σύγχρονος Σερβοκινητήρας (SEW EURODRIVE)

1	Ρότορας	312	Κάλυμμα συνδέτρια
7	Καπάκι κινήτρια προς την πλευρά της φλάντζας	313	Ασφαλιστικό έλασμα
11	Αυλακωπό σφαιρικό ρουλεμάν	316	Βύσμα παροχής, πλήρες
16	Στάτορας	317	Επαφή βύσματος
42	Οπίσθιο καπάκι ηλεκτροκινήτρια	318	Βύσμα φλαντζωτής τοποθέτησης, πλήρες
44	Αυλακωπό σφαιρικό ρουλεμάν	321	Βύσμα σήματος, πλήρες
105	Δακτύλιος ισοστάθμισης	550	Φρένο, πλήρες
106	Τοιμούχα λαδιού	660	Μοχλός αποσυμπλέξης
304	Κάλυμμα	737	Περίβλημα κωδικοποιητή (encoder)
305	Αναλυτής (resolver)		



Σχήμα Π2: Βασική δομή του σύγχρονου σερβοκινητήρα CMD

- [1] Ρότορας
- [7] Καπάκι κινητήρα προς την πλευρά της φλάντζας
- [11] Αυλακωτό σφαιρικό ρουλεμάν
- [16] Στάτορας
- [42] Οπίσθιο καπάκι ηλεκτροκινητήρα
- [44] Αυλακωτό σφαιρικό ρουλεμάν
- [105] Δακτύλιος ισοστάθμισης
- [304] Κάλυμμα περιβλήματος
- [305] Αναλυτής
- [313] Βυσματικός σύνδεσμος σημάτων
- [318] Βυσματικός σύνδεσμος ισχύος

Βιβλιογραφία

- [1] Riazollah Firoozian, “*Servo Motors and Industrial Control Theory*”, © Springer Science + Business Media, New York, LLC 2009.
- [2] Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου, “*Συστήματα Ειδικών Ηλεκτρικών Κινητήρων*”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 2008.
- [3] Δημήτρης Φ. Ρήγα, “*Βιομηχανικά, Ηλεκτρονικά και Αυτοματισμοί*”, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη 1992.
- [4] Σπύρος Γ. Τζαφέστας, “*Εισαγωγή στον Κλασικό Αυτόματο Έλεγχο*”, Αθήνα 1998.
- [5] Parker Motion & Control, “*Step Motor & Servo Motor Systems and Controls*”, Compumotor 1996/1997.
- [6] Timothy J. Maloney, “*Modern Industrial Electronics - Third Edition*”, © Prentice Hall, New Jersey 1996.
- [7] Ι.Α. Τεγόπουλος, “*Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Β: Μόνιμη κατάσταση*”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- [8] Χρήστος Α. Μαδεμλής, “*Σερβοκινητήρια Συστήματα – Επαγωγικοί κινητήρες και σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη*”, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ 2010.
- [9] John C. West, “*Textbook of Servomechanisms*”, The English Universities Press LTD, London 1962.
- [10] SEW Eurodrive, “*Σύγχρονοι Σερβοκινητήρες CM - Οδηγίες λειτουργίας*”, Έκδοση 01/2003.
- [11] Thomas E. Kissell, “*Industrial Electronics*”, © Prentice Hall, New Jersey 2000.
- [12] Futaba, “*Digital FET Servos*”.
- [13] SEW Eurodrive, “*Σύγχρονοι Σερβοκινητήρες CMD55/70/93/138-Οδηγίες λειτουργίας*” Έκδοση 05/2005.
- [14] ETCS Richard J. Bliss, “*Navy Electricity and Electronics Training Series, Module 15 – Principles of Synchronos, Servos and Gyros*”, Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, September 1998.
- [15] T. Kenjo, “*Electric Motors and their Controls*”, Oxford University Press, Oxford 1991.
- [16] Richard C. Dorf and Robert H. Bishop, “*Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου*”, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 9^η Έκδοση 2008.
- [17] Hubert M. James, Nathaniel B. Nichols and Ralph S. Philips, “*Theory of Servomechanisms*”, McGraw-Hill Book Company, Inc, United States of America 1947.

Αναφορές στο διαδίκτυο

- [1] <http://www.cncroutersource.com/stepper-vs-servo.html>
- [2] <http://uniquemachines.blogspot.com/2010/10/servomotors-stepper-motorsand-actuators.html>
- [3] <http://www.alpha-motion.gr/>
- [4] <http://www.eetimes.com/design/industrial-control/4013767/Basics-of-the-Electric-Servomotor-and-Drive--Part-1-Basic-Magnetics-and-Motor-Control-Overview>
- [5] http://www.intellidrives.com/AppNotes_linear_actuators.htm
- [6] http://www.advantech.com.tw/sector/machine-automation/CaseStudies.aspx?doc_id={BF2DB1B4-D021-4779-99DE-5C1971A3C71
- [7] <http://13epal-esp-thess.thess.sch.gr/eps.htm>
- [8] http://www.advantech.gr/sector/machine-automation/CaseStudies.aspx-doc_id=%7BC994A9FA-784D-4530-9216-83E623F0F3F.htm
- [9] <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=83>
- [10] <http://www.compumotor.com/catalog/cataloga/A31-A33.pdf>
- [11] <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/234>
- [12] http://www.ehow.com/about_4706437_principles-behind-servo-motors.html
- [13] <http://www.microplanet.gr/perifereiaka/servo>
- [14] http://www.pc-control.co.uk/servo_control.htm