

**ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΚΑΤΣΟΥΛΑΚΗΣ ΜΑΝΟΥΣΟΣ**



**ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2012**

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>Περίληψη.....</b>	<b>4</b>
<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>6</b>
<b>Κεφάλαιο πρώτο - Αισθητήρες &amp; Μετατροπείς</b>	
1.1 Σχέση αισθητήρων και μετατροπένων.....	8
1.2 Μετατροπείς.....	8
1.3 Αισθητήρες.....	9
1.3.1 Εφαρμογές αισθητήρων.....	10
1.3.2 Κριτήρια επιλογής αισθητήρων.....	12
1.4 Ταξινόμηση αισθητήρων και μετατροπένων.....	13
1.4.1 Χρήση ή μη εξωτερικής πηγής ενέργειας.....	14
1.4.2 Ένδειξη εξόδου.....	15
1.4.3 Σημείο αναφοράς.....	15
1.4.4 Μορφή σήματος διέγερσης.....	16
1.4.5 Επαφή αισθητήρα με το μετρούμενο μέγεθος.....	16
1.4.6 Τύποι μετατροπένων σύμφωνα με την αρχή μετατροπής τους.....	17

1.5 Χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	24
1.5.1 Στατικά χαρακτηριστικά.....	25
1.5.2 Δυναμικά χαρακτηριστικά.....	29
1.6 Χαρακτηριστικά ιδανικού αισθητήρα.....	30

## **Κεφάλαιο δεύτερο - Μέτρηση ταχύτητας**

2.1 Ταχύτητα και γωνιακή ταχύτητα.....	32
2.2 Μέθοδοι μέτρησης ταχύτητας.....	34
2.3 Υπολογισμός της μέσης ταχύτητας σαν λόγο μετατόπισης - χρόνου.....	36
2.4 Υπολογισμός ταχύτητας με χρήση μετατροπών ταχύτητας.....	36
2.5 Υπολογισμός ταχύτητας χρησιμοποιώντας τη στροβοσκοπική μέθοδο.....	38
2.6 Υπολογισμός ταχύτητας με ταχογεννήτρια.....	39
2.7 Υπολογισμός ταχύτητας με χρήση κωδικοποιητών.....	40
2.8 Μέτρηση ταχύτητας απομακρυσμένου κινούμενου σώματος.....	43

## **Κεφάλαιο τρίτο - Μέθοδοι μέτρησης γωνιακής ταχύτητας**

3.1 Μέτρηση γωνιακής ταχύτητας με χρήση κωδικοποιητών.....	45
3.2 Μέτρηση γωνιακής ταχύτητας με χρήση ποτενσιόμετρου.....	50
3.3 Μέτρηση γωνιακής ταχύτητας με χρήση ταχύμετρου.....	53
3.3.1 Ταχογεννήτριες.....	54
3.3.2 Φωτοηλεκτρικό ή οπτικό ταχύμετρο.....	58

3.3.3 Ταχύμετρο μαγνητικού τύπου.....	60
3.3.4 Ταχύμετρο με αισθητήρες πίεσης.....	61
3.3.5 Ταχύμετρο με διακόπτη.....	62
3.3.6 Φυγοκεντρικό ταχύμετρο.....	63
3.4 Αισθητήρας φαινομένου Hall.....	64
3.5 Οπτικός αισθητήρας.....	66
3.6 Αισθητήρας Wiegand.....	67
3.7 Στροβοσκοπική μέθοδος.....	70
3.8 Μέτρηση γωνιακής ταχύτητας με επιταχυνσιόμετρα.....	71
3.9 Γυροσκοπικά αισθητήρια ή γυροσκόπια.....	77
3.9.1 Μηχανικά γυροσκόπια.....	78
3.9.2 Οπτικά γυροσκόπια.....	80
3.9.2.α Γυροσκόπια με δακτύλιο Laser.....	81
3.9.2.β Γυροσκόπια οπτικής ίνας.....	82
3.9.3 Γυροσκόπια ταλάντωσης.....	84
3.9.3.α Γυροσκόπια απλού ταλαντωτή.....	86
3.9.3.β Γυροσκόπια ισορροπημένου ταλαντωτή.....	86
3.9.3.γ Γυροσκόπια ταλαντευόμενου πλαισιακού φορέα.....	88
<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>90</b>

**Βιβλιογραφία..... 91**

## Περίληψη

Η μέτρηση της ταχύτητα ενός κινούμενου σώματος έχει ιδιαίτερη σημασία τόσο στον έλεγχο της λειτουργίας ενός συστήματος, όσο και ως μέσο για τον υπολογισμό άλλων φυσικών μεγεθών. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αναλυθούν οι μέθοδοι μέτρησης ταχύτητας, τόσο σε ευθύγραμμη όσο και σε περιστροφική κίνηση, με τη βοήθεια αισθητήρων και μετατροπέων. Για να γίνει αυτό, η εργασία χωρίζεται σε τρία κύρια μέρη. Αρχικά εξετάζεται η θεωρία των αισθητήρων και των μετατροπέων, όπου και αναλύονται οι χρήσεις, τα χαρακτηριστικά τους, τα είδη στα οποία ταξινομούνται, καθώς και τα κριτήρια επιλογής τους ανάλογα με την εφαρμογή που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Στη συνέχεια αναλύονται οι μέθοδοι μέτρησης της ταχύτητας ενός σώματος όταν εκτελεί ευθύγραμμη κίνηση. Τέλος παρουσιάζονται οι κυριότερες μορφές αισθητήρων και μετατροπέων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας περιστρεφόμενου σώματος, καθώς και η λειτουργία τους.

## **Abstract**

Velocity measurement is of great importance for the control of the operation of a system consisting of moving parts. Moreover it can be used as a means of indirectly measuring of other physical quantities. The scope of this thesis is to analyze the ways of measuring the velocity of an object in linear motion or the angular velocity of a rotating object, using sensors and transducers. At first, the theory concerning sensors and transducers is examined, describing their applications, types, characteristics and the criteria that have to be taken under consideration in order to choose the right sensor that will optimize the results of the measurement according to the system's needs. The second chapter describes the methods used more often to measure the velocity of an object which performs linear motion, emphasizing in using sensors. Finally, the last part of the thesis is dedicated to angular velocity and its measurement with devices that base their operation on sensors and transducers.



## Εισαγωγή

Είναι εμφανές ότι από μέρα σε μέρα η τεχνολογία των ηλεκτρονικών παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη. Υπολογιστές, μικροεπεξεργαστές και συσκευές με ολοένα και πιο εξειδικευμένες χρήσεις μπαίνουν τόσο στις υπηρεσίες της βιομηχανίας, όσο και στην καθημερινότητά μας. Για να υπάρχει ο καλύτερος δυνατός έλεγχος και η βέλτιστη λειτουργία των πολύπλοκων αυτών συσκευών απαιτούνται εξίσου πολύπλοκα συστήματα ελέγχου και λήψεως αποφάσεων, με τους αυτοματισμούς να έχουν πλέον σημαντικό ρόλο στη λειτουργία τους. Οι αυτοματισμοί αφού πρώτα λάβουν δεδομένα, τα επεξεργάζονται και προχωρούν στις κατάλληλες ενέργειες ανάλογα με τη λειτουργία του συστήματος όπου χρησιμοποιούνται. Τα στοιχεία που δίνονται ως δεδομένα μπορούν να εισάγονται στο κύκλωμα μέσω προγραμματισμού. Μπορούν όμως και να συλλέγονται αυτόνομα από αυτό, από το ίδιο το περιβάλλον λειτουργίας. Στην πρώτη περίπτωση η συσκευή θα ακολουθεί μια σειρά συγκεκριμένων προκαθορισμένων βημάτων, ενώ στη δεύτερη θα αποτελεί ένα αυτόνομο αυτόματο σύστημα που θα λειτουργεί σύμφωνα με τα δεδομένα που επικρατούν στο περιβάλλον του. Το αυτόματο σύστημα είναι εμφανές ότι πλεονεκτεί, καθώς έχει τη δυνατότητα να προχωράει σε διορθώσεις ώστε να προσαρμόζεται σε ενδεχόμενες μεταβολές παραμέτρων στο περιβάλλον λειτουργίας του. Η σύνδεση των ηλεκτρονικών συστημάτων με το φυσικό περιβάλλον επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των αισθητήρων και των μετατροπέων που αναλαμβάνουν να λειτουργήσουν σαν «διερμηνέας». Το γεγονός αυτό αρκεί για να αναδείξει την αναγκαιότητα και την αξία της χρήσης και της ανάπτυξής τους. Εξ' ορισμού, ο αισθητήρας είναι μια συσκευή που ανιχνεύει ένα φυσικό μέγεθος και το μετατρέπει σε ένα ηλεκτρικά



μετρήσιμο μέγεθος με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αντίστοιχα, ο μετατροπέας είναι συσκευή που απορροφά ενέργεια από ένα σύστημα και αφού τη μετατρέψει σε ενέργεια άλλης μορφής τη μεταφέρει σε ένα άλλο σύστημα. Θα ασχοληθούμε παρακάτω με την αναλυτικότερη περιγραφή τους.

Μερικά από τα φυσικά μεγέθη που μας ενδιαφέρει η μέτρηση και ο έλεγχός τους είναι: η θέση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση αντικειμένων, η δύναμη, η θερμοκρασία, η πίεση, η ροπή, η ροή και η στάθμη υγρών. Στην εργασία αυτή θα εστιάσουμε στη μέτρηση της ταχύτητας και της γωνιακής ταχύτητας. Η μέτρηση της ταχύτητας είναι σημαντική εξαιτίας του ότι πολλά συστήματα έχουν είσοδο ή έξοδο υπό μορφή ταχύτητας. Έτσι μέσω της ταχύτητας και της σχέσης της με κάποια άλλη παράμετρο μπορούν παραδείγματος χάριν μετρώντας την ταχύτητα να υπολογίσουν τη μετατόπιση ή μετρώντας ως προς το χρόνο να υπολογίσουν ταχύτητα ή επιτάχυνση. Η γωνιακή ταχύτητα εμφανίζεται πολύ συχνά σε συσκευές και μηχανήματα με τη μέτρησή της να είναι σημαντική στην αξιολόγηση της απόδοσής τους. Πιο αναλυτικά θα αναφερθούμε στα φυσικά αυτά μεγέθη στη συνέχεια.

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Αισθητήρες - Μετατροπείς

### 1.1 Σχέση αισθητήρων και μετατροπέων

Όπως είδαμε στην εισαγωγή, οι μετατροπείς είναι συσκευές που μετατρέπουν ενέργεια από μια μορφή σε μια άλλη, ενώ οι αισθητήρες μετατρέπουν μια μη ηλεκτρικής μορφής ενέργεια σε ηλεκτρικό σήμα μετρώντας, ανιχνεύοντας ή καταγράφοντας ένα σήμα ή μία διέγερση. Μπορεί να δίνουν την εικόνα εξειδικευμένων συσκευών, αλλά στην πραγματικότητα μπορούν να συναντηθούν οπουδήποτε και η ποικιλία τους είναι ουσιαστικά ανεξάντλητη. Ως έννοιες συχνά συγχέονται, γενικά όμως ισχύει ότι οι αισθητήρες είναι συνήθως μετατροπείς, αλλά δεν είναι όλοι οι μετατροπείς αισθητήρες. Για παράδειγμα, το μεγάφωνο είναι ένας μετατροπέας που μετατρέπει ηλεκτρικό σήμα σε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και τελικά σε ηχητικό σήμα. Διαδικασία που δε σχετίζεται με ανίχνευση ή καταγραφή σήματος/διέγερσης αλλά αποκλειστικά με μετατροπή μιας μορφής ενέργειας σε άλλη. Επομένως αν και είναι μετατροπέας δεν μπορεί να χαρακτηριστεί αισθητήρας.

### 1.2 Μετατροπείς



Οι μετατροπείς, ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιούνται διακρίνονται σε μετατροπείς εισόδου ή μέτρησης και μετατροπείς εξόδου ή ενεργοποιητές. Οι μετατροπείς εισόδου παρέχουν την κατάλληλη μορφή ενέργειας στην είσοδο μιας συσκευής ή ενός κυκλώματος. Διεγείρονται δηλαδή από μια φυσική ποσότητα όπως η θερμοκρασία ή η πίεση και τη μετατρέπουν στην έξοδό τους σε ένα σήμα (συνήθως ηλεκτρικό), το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αντίστοιχης φυσικής ποσότητας. Απλό παράδειγμα τέτοιου μετατροπέα αποτελεί το μικρόφωνο, το οποίο συνδέεται στην είσοδο του ενισχυτή. Αντίστοιχα, ένας μετατροπέας εξόδου χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μιας μορφής ενέργειας (που συνήθως είναι η ηλεκτρική) σε κάτι που μπορεί να γίνει άμεσα αντιληπτό, όπως είναι ο ήχος ή η εικόνα, δηλαδή σε μία άλλης μορφής ενέργεια. Για την ακρίβεια, παρατηρώντας τον τρόπο της μετατροπής θα λέγαμε ότι αποτελεί ένα τύπο μετατροπέα που κάνει ακριβώς το αντίστροφο από ότι θα έκανε ένας αισθητήρας. Μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε ενέργεια άλλης μορφής. Οι μετατροπείς τέτοιου τύπου λέγονται και ενεργοποιητές (actuators) όταν χρησιμοποιούνται σε συστήματα ελέγχου. Παράδειγμα ενεργοποιητή που χρησιμοποιείται ευρέως αποτελεί ο ηλεκτροκινητήρας, ο οποίος μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική.

Κάποιοι μετατροπείς έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούνται εναλλακτικά είτε ως είσοδοι είτε ως έξοδοι σε ένα σύστημα. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η ηλεκτρογεννήτρια, η οποία συνήθως λειτουργεί ως μετατροπέας εισόδου για την παροχή ρεύματος σε ένα κύκλωμα, αλλά αν τροφοδοτηθεί η ίδια με την ισχύ που συνήθως παράγει τότε λειτουργεί σαν κινητήρας, που είναι μετατροπέας εξόδου.

Μερικά παραδείγματα μετατροπέων είναι τα ακόλουθα :

- κεραία: μετατρέπει ηλεκτρομαγνητικά σήματα σε ηλεκτρικό ρεύμα και το αντίθετο
- διμεταλλικό έλασμα: μετατρέπει μεταβολή θερμοκρασίας σε φυσική μετατόπιση



- δίοδος LED: μετατρέπει ηλεκτρικό ρεύμα σε φως
- μικρόφωνο: μετατρέπει ακουστικά κύματα σε εναλλασσόμενο ρεύμα
- ηχείο: μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε ακουστικά κύματα
- θερμοζεύγος: μετατρέπει θερμική ενέργεια σε ηλεκτρικό ρεύμα
- πιεζοαντίσταση: επιτρέπει τη ρύθμιση του ηλεκτρικού ρεύματος ανάλογα με την πίεση που ασκείται σε μια επιφάνεια
- μπαταρία: μετατρέπει χημική ενέργεια σε ηλεκτρική

### 1.3 Αισθητήρες

Υπάρχουν δύο τύποι αισθητήρων, οι απλοί ή άμεσοι και οι σύνθετοι. Άμεσος χαρακτηρίζεται ένας αισθητήρας όταν μετατρέπει μια διέγερση σε ένα ηλεκτρικό σήμα ή όταν μεταβάλλει ένα ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιώντας το κατάλληλο φυσικό μέγεθος. Αντίστοιχα, ένας σύνθετος αισθητήρας απαρτίζεται από ένα συνδυασμό ενός ή περισσότερων μετατροπών με ένα άμεσο αισθητήρα προκειμένου να δώσει ως έξοδο ηλεκτρικό σήμα. Για παράδειγμα, ένας χημικός αισθητήρας μπορεί να αποτελείται από το συνδυασμό ενός μετατροπέα που θα μετατρέπει την ενέργεια της χημικής αντίδρασης σε θερμότητα και μιας θερμοπύλης που θα μετατρέπει τη θερμότητα αυτή σε ηλεκτρικό σήμα.

#### 1.3.1 Εφαρμογές αισθητήρων

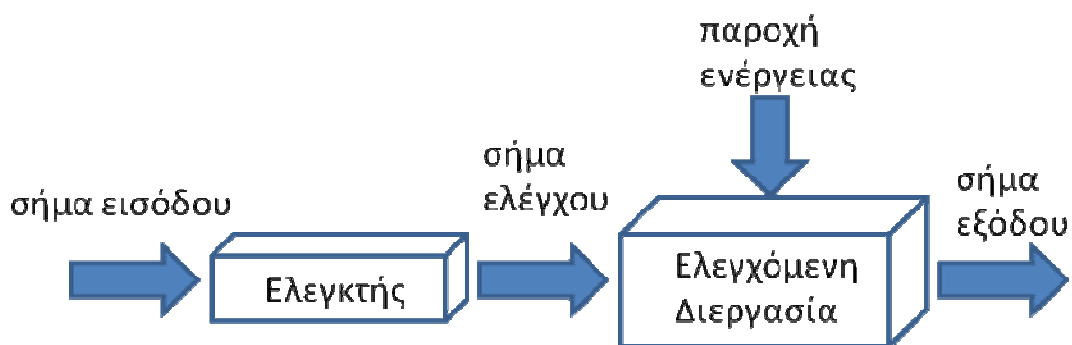
Η τεχνολογία των αισθητήρων εφαρμόζεται συνήθως σε δύο ξεχωριστές περιοχές, στη συλλογή πληροφορίας και στον έλεγχο συστημάτων. Στην πρώτη περίπτωση παρέχουν δεδομένα ώστε να μπορούμε να αντιλαμβανόμαστε κάθε στιγμή την κατάσταση των παραμέτρων ενός συστήματος, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με το ταχύμετρο ενός αυτοκινήτου. Επίσης χρησιμοποιούνται για να



παρέχουν μια εικόνα της εξέλιξης των παραμέτρων ενός συστήματος, όπως ο ταχογράφος στα φορτηγά. Στην περίπτωση του ελέγχου συστημάτων διαφέρει ο τρόπος που γίνεται η αξιοποίηση της πληροφορίας. Εκεί, το σήμα του αισθητήρα τροφοδοτείται ως σήμα εισόδου σε ένα ελεγκτή, ο οποίος παράγει μια έξοδο που ρυθμίζει την τιμή της μετρούμενης παραμέτρου. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η μέτρηση της ταχύτητας των στροφών στους τροχούς ενός οχήματος με σκοπό τη λειτουργία του αντιολισθητικού συστήματος φρένων (ABS).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι αισθητήρες εφαρμόζονται σε δύο κατηγορίες συστημάτων, στα συστήματα μέτρησης και στα συστήματα ελέγχου. Στα συστήματα μέτρησης ισχύουν όσα προαναφέρονται για τους αισθητήρες και τη χρήση τους στη συλλογή πληροφορίας. Εμφανίζουν δηλαδή ή καταγράφουν μια ποσοτική έξοδο, χωρίς όμως να ελέγχουν την τιμή της μετρούμενης ποσότητας εισόδου. Τα συστήματα ελέγχου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα συστήματα ελέγχου ανοικτού βρόγχου και στα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόγχου.

Στα συστήματα ελέγχου ανοικτού βρόγχου χρησιμοποιείται κάποια διάταξη ή ελεγκτής για τον απ' ευθείας έλεγχο μιας διεργασίας δίχως την παρουσία ανάδρασης. Η λειτουργία των συστημάτων αυτών στηρίζεται στον έλεγχο τους από ένα σήμα προκαθορισμένης τιμής. Η μορφή τους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :

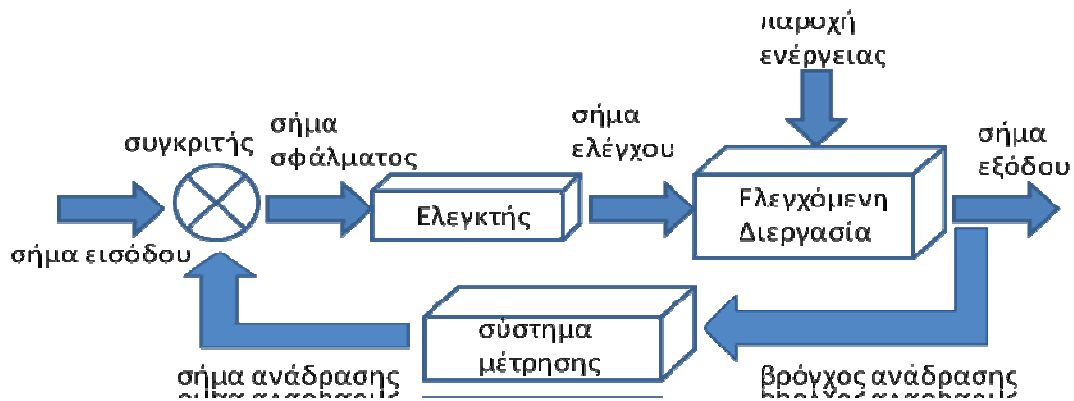


Σχήμα 1 – σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόγχου



Ως σήμα εισόδου χρησιμοποιείται η προκαθορισμένη τιμή της μεταβλητής που μας ενδιαφέρει, ενώ η παρεχόμενη ενέργεια εισάγει την παράμετρο που πρέπει να ελέγχεται. Με τη διάταξη αυτή επιτυγχάνεται ο έλεγχος της παραμέτρου που μας ενδιαφέρει σε σχέση με το σήμα εισόδου, χωρίς να επιδρά σε αυτή το σήμα εξόδου του συστήματος. Τα συστήματα αυτού του τύπου είναι απλά, χαμηλού κόστους και δίχως προβλήματα αστάθειας, πλην όμως ευαίσθητα σε διαταραχές και μεταβολές των στοιχείων τους και συχνά απαιτούν ρύθμιση.

Τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόγχου διαφέρουν στο ότι το σήμα εξόδου με τη βοήθεια ανάδρασης επιστρέφει στην είσοδο του συστήματος και συγκρίνεται με την προκαθορισμένη τιμή (σήμα αναφοράς). Η διαφορά μεταξύ του σήματος αναφοράς και του σήματος ανάδρασης καλείται σήμα σφάλματος και τροποποιείται για τη ρύθμιση της απόδοσης του συστήματος. Το τροποποιημένο σήμα (σήμα ελέγχου) οδηγείται στη συνέχεια στην έξοδο του συστήματος, έτσι ώστε το σήμα ανάδρασης να πλησιάσει σε τιμή εκείνη του σήματος αναφοράς. Όταν η διαφορά τους μηδενιστεί (σήμα σφάλματος = 0) θα επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή. Η μορφή τους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 2 – σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου

Τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόγχου χάρη στη χρήση της ανάδρασης ρυθμίζονται αυτόνομα και διορθώνουν το σήμα τους, γεγονός που μειώνει την ευαισθησία τους ως προς διαταραχές και εσωτερικές μεταβολές των

παραμέτρων τους. Επιτυγχάνουν έτσι έλεγχο υψηλής ακρίβειας με υλικά χαμηλού κόστους.

Γενικά, στα συστήματα ελέγχου προτιμάται η πληροφορία να είναι σε ηλεκτρική μορφή, καθώς είναι εύκολο να μεταφερθεί, να επεξεργαστεί και να τροφοδοτηθεί σε ποικιλία συσκευών.

### **1.3.2 Κριτήρια επιλογής αισθητήρων**

Κατά την σχεδίαση ενός συστήματος ελέγχου, μετά τον καθορισμό των στόχων του και την αναγνώριση των μεταβλητών που θα είναι υπό έλεγχο, φτάνουμε στον καθορισμό των επιμέρους τμημάτων του συστήματος. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει και η ακριβής επιλογή του πλέον κατάλληλου μετατροπέα/αισθητήρα, ώστε να δώσει στο σύστημα τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια και ποιότητα. Για να βρεθεί ο καταλληλότερος μέσα από μια τόσο μεγάλη ποικιλία επιλογών εξετάζονται μια σειρά από κριτήρια. Η απόφαση αρχικά εξαρτάται από τη φύση των παραμέτρων που πρέπει να ελέγξουμε ή να μετρήσουμε. Από εκεί καθορίζεται η εμβέλεια που απαιτείται να έχει ο αισθητήρας. Στη συνέχεια θα πρέπει να εξεταστούν τα επιμέρους χαρακτηριστικά των αισθητήρων με γνώμονα τη λειτουργία του συστήματος και την αξιοποίηση της παρεχόμενης πληροφορίας. Σημαντική παράμετρο επομένως αποτελεί το περιβάλλον όπου θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες και η κρισιμότητα των μετρήσεων που θα πραγματοποιούν. Για παράδειγμα, ένα θερμόμετρο που καταγράφει τη θερμοκρασία σε ένα δωμάτιο κατασκευάζεται με έμφαση σε διαφορετικά χαρακτηριστικά από ότι ένα θερμόμετρο που αποτελεί τμήμα ενός βηματοδότη. Συχνά, το περιβάλλον που καλείται να γίνει μέτρηση ή έλεγχος είναι απομακρυσμένο ή ακόμα και επικίνδυνο, αφού μπορεί να υπάρχουν για παράδειγμα υψηλές θερμοκρασίες ή ακτινοβολία. Επομένως, τόσο για την προστασία του αισθητήρα όσο και για την αποφυγή σφαλμάτων η μορφή του έχει μεγάλη σημασία. Το περίβλημά του θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να



διευκολύνει τη λειτουργία του, αλλά ταυτόχρονα να τον προστατεύει από ενδεχόμενη διάβρωση και παρεμβολές. Συνοψίζοντας, παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή ενός αισθητήρα (και αποτελούν χαρακτηριστικά του) είναι η ακρίβεια, η επαναληψιμότητα, η διακριτική ικανότητα και η αξιοπιστία, τα οποία και δίνουν την ποιότητα στην απαιτούμενη πληροφορία. Αναλυτικότερη αναφορά γίνεται για αυτά στη συνέχεια του κεφαλαίου. Εξίσου σημαντικοί παράγοντες κατά την επιλογή είναι το μέγεθος, η κατανάλωση ενέργειας καθώς και η καταλληλότητα της μορφής του, στοιχεία που καθορίζουν την απαιτούμενη συμβατότητα με το περιβάλλον χρήσης. Τέλος καθοριστικό ρόλο παίζει το κόστος, το οποίο εξαρτάται από τα υλικά και την ποιότητα κατασκευής, αλλά και από τη συχνότητα της απαιτούμενης συντήρησης του μετατροπέα.

#### **1.4 Ταξινόμηση αισθητήρων και μετατροπέων**

Οι αισθητήρες μπορούν να ταξινομηθούν σε πολλές διαφορετικές κατηγορίες με γνώμονα κάποιο προεπιλεγμένο κάθε φορά κριτήριο. Η διαδικασία αυτή εκτός του ότι βοηθάει στην κατανόηση της λειτουργίας τους, διευκολύνει και στη διαδικασία επιλογής τους. Οι κυριότερες κατηγορίες τους ανά κριτήριο αφορούν το διαχωρισμό τους ανάλογα με τις ενεργειακές τους ανάγκες, τη μορφή της ένδειξης στην έξοδο, το σημείο αναφοράς που χρησιμοποιούν, τη μορφή του σήματος διέγερσης, την αρχή μετατροπής τους και το αν έρχονται ή όχι σε επαφή με το μετρούμενο μέγεθος. Οι κατηγορίες αυτές εξετάζονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

##### **1.4.1 Χρήση ή μη εξωτερικής πηγής ενέργειας**

Ως προς την ανάγκη ή όχι χρήσης εξωτερικής πηγής ενέργειας για τη λειτουργία τους οι αισθητήρες χωρίζονται σε **παθητικούς** και **ενεργούς**. Οι παθητικοί αισθητήρες δε χρειάζονται επιπλέον ενέργεια και παράγουν απ'



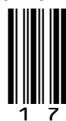


ευθείας ένα ηλεκτρικό μέγεθος στην έξοδο αντιδρώντας σε διέγερση στην είσοδό τους. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το θερμοζεύγος. Βασίζονται σε φυσικά φαινόμενα που προκαλούν μετατροπή της ενέργειας του προς μέτρηση μεγέθους σε ηλεκτρική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για το φαινόμενο της επαγωγής, το φαινόμενο Hall, το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και το μαγνητοϋδροδυναμικό φαινόμενο. Οι περισσότεροι παθητικοί αισθητήρες είναι άμεσοι (απλοί).

Αντίστοιχα, ενεργοί χαρακτηρίζονται οι αισθητήρες που απαιτούν εξωτερική διάταξη τροφοδοσίας για να λειτουργήσουν. Η παρεχόμενη ενέργεια, η οποία λέγεται και σήμα διέγερσης, τροποποιείται από τον αισθητήρα για να παραχθεί το σήμα εξόδου. Παρατηρείται μια μεταβολή στα φυσικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα (πχ μεταβολή στις διαστάσεις ή στις ηλεκτρικές ιδιότητες των συστατικών υλικών του) σε συνάρτηση με το μετρήσιμο μέγεθος. Η μεταβολή αυτή τροποποιεί το σήμα διέγερσης έχοντας σαν αποτέλεσμα να μεταφέρει στη νέα του μορφή την πληροφορία για την μετρούμενη ποσότητα. Παράδειγμα ενεργού αισθητήρα αποτελεί το θερμίστορ (thermistor), ένα από τα δημοφιλή αισθητήρια θερμοκρασίας. Όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα (όταν δηλαδή δεχτεί σήμα διέγερσης) η αντίστασή του μεταβάλλεται και μπορεί εύκολα να μετρηθεί μετρώντας τις μεταβολές της έντασης του ρεύματος ή της τάσης στο θερμίστορ. Η αντίστασή του όμως είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, οπότε το τροποποιημένο σήμα μεταφέρει ως πληροφορία την τιμή της αντίστασης, από την οποία υπολογίζεται η προς μέτρηση θερμοκρασία.

#### 1.4.2 Ένδειξη εξόδου

Ως προς την επιλογή εμφάνισης του σήματος στην έξοδο, οι αισθητήρες διακρίνονται σε **αναλογικούς** και **ψηφιακούς**. Όπως είναι προφανές, αναλογικοί είναι οι αισθητήρες που παράγουν αναλογικά σήματα εξόδου. Σήματα που μεταβάλλονται διαρκώς και έχουν μεγάλη ποικιλία τιμών. Το μέγεθος της



μετρούμενης μεταβλητής είναι ανάλογο του πλάτους της τάσης του σήματος στην έξοδο. Μειονεκτούν στο ότι το ηλεκτρικό σήμα που δίνουν μπορεί να αλλοιωθεί από θόρυβο ή παράσιτα, επιρρεάζοντας την πληροφορία. Αντιστοίχως, οι ψηφιακοί αισθητήρες παράγουν ψηφιακή έξοδο, σήμα που έχει διακριτές τιμές. Το μέγεθος του μετρούμενου μεγέθους δίνεται είτε με τη μορφή δυαδικού αριθμού, είτε με σειρά παλμών. Στην περίπτωση λοιπόν αυτή η πληροφορία δεν είναι στο πλάτος της τάσης, άρα ακόμα και αν αυτό αλλοιωθεί λίγο η πληροφορία διατηρείται ακέραια.

### 1.4.3 Σημείο αναφοράς

Έχοντας ως κριτήριο την επιλογή σημείου αναφοράς για τη μέτρηση, οι αισθητήρες μπορούν να χωριστούν σε **απόλυτους** και **σχετικούς**. Οι πρώτοι ανιχνεύουν μια διέγερση σε σχέση με μια απόλυτα φυσική κλίμακα, ανεξάρτητη από τις συνθήκες της μέτρησης, ενώ οι δεύτεροι παράγουν σήμα που συνδέεται με μια συγκεκριμένη κατάσταση. Το θερμίστορ αποτελεί παράδειγμα απόλυτου αισθητήρα, καθώς η αντίστασή του συνδέεται άμεσα με την κλίμακα της θερμοκρασίας. Αντίθετα, το θερμοζεύγος είναι σχετικός αισθητήρας, καθώς η έξοδος που παράγει έχει τιμή ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των δύο διαφορετικών μετάλλων που το αποτελούν. Τιμή που στην περίπτωση αυτή εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες της μέτρησης. Μπορούμε να πούμε ότι για τους σχετικούς αισθητήρες το σημείο αναφοράς βρίσκεται στο περιβάλλον της μέτρησης, ενώ στους απόλυτους είναι ανεξάρτητο από αυτό.

### 1.4.4 Μορφή του σήματος διέγερσης

Οι αισθητήρες ταξινομούνται σύμφωνα με τη μορφή του σήματος διέγερσης. Οι διάφορες μορφές ενέργειας γίνονται στην περίπτωση αυτή



κατηγορίες κατάταξης. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότερες από αυτές σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικότερα μετρούμενα μεγέθη:

- **Μηχανική ενέργεια:** χρησιμοποιείται για μέτρηση θέσης, επιτάχυνσης, ροής, δύναμης, ταχύτητας, μάζας, ροπής
- **Ηλεκτρική ενέργεια:** χρησιμοποιείται για μέτρηση έντασης, τάσης, πόλωσης αντίστασης, αγωγιμότητας, συχνότητας
- **Ακουστική ενέργεια:** χρησιμοποιείται για μέτρηση φάσης, μήκους κύματος, πόλωσης, φάσματος, ταχύτητας κύματος
- **Βιολογική ενέργεια:** χρησιμοποιείται για μέτρηση (τύπου, κατάστασης και συγκέντρωσης) βιομάζας, σάκχαρα, πρωτεΐνες
- **Χημική ενέργεια:** χρησιμοποιείται για μέτρηση υγρασίας, pH, συγκέντρωσης και ιδιοτήτων συστατικών, συγκέντρωση αερίων και ατμών
- **Μαγνητική ενέργεια:** χρησιμοποιείται για μέτρηση μαγνητικού πεδίου και ροής, μαγνητικής διαπερατότητας
- **Οπτική ενέργεια:** χρησιμοποιείται για μέτρηση μήκους κύματος, φάσης, πόλωσης, φάσματος, απορρόφησης
- **Ακτινοβολία:** χρησιμοποιείται για μέτρηση ενέργειας, μικροκυμάτων, φωτεινότητας
- **Θερμική ενέργεια:** χρησιμοποιείται για μέτρηση θερμοκρασίας, θερμότητας, ροής θερμότητας, θερμικής αγωγιμότητας

#### 1.4.5 Επαφή του αισθητήρα με το μετρούμενο μέγεθος

Ως προς την ύπαρξη φυσικής επαφής του αισθητήρα με το μετρούμενο μέγεθος οι αισθητήρες διακρίνονται σε **επαφής** και **μη επαφής**. Οι πρώτοι αφορούν τους αισθητήρες που προκειμένου να ανιχνεύσουν ή να μετρήσουν το μέγεθος απαιτείται να έρθουν σε πραγματική επαφή μαζί του. Το θερμοζεύγος και οι μετατροπείς τύπου πιεζοαντίστασης αποτελούν τέτοια παραδείγματα.



Αντίθετα, οι αισθητήρες μη επαφής στηρίζουν τη λειτουργία τους σε φαινόμενα που δεν απαιτούν επαφή με το μετρούμενο μέγεθος. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι οπτικοί, οι μαγνητικοί και οι ηλεκτρομαγνητικοί μετατροπείς και πλεονεκτούν κυρίως λόγω του ότι δεν υπάρχουν τριβές κατά τη μέτρηση.

#### 1.4.6 Τύποι μετατροπέων σύμφωνα με την αρχή μετατροπής τους

Κάθε τύπος μετατροπέα χαρακτηρίζεται από μία αρχή μετατροπής, οι οποίες όπως έχει ήδη αναφερθεί στηρίζονται σε φυσικά φαινόμενα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένοι τύποι, καθώς και ο τρόπος λειτουργίας των φαινομένων αυτών:

- **Ηλεκτρομηχανικός τύπος:** η λειτουργία του στηρίζεται στο νόμο επαγωγής του Faraday. Έστω για παράδειγμα ένα πηνίο που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Θα αναπτυχθεί σε αυτό ηλεκτρικό πεδίο, με την επαγόμενη στο πηνίο τάση να είναι ανάλογη της ταχύτητας κίνησής του. Χρησιμοποιούνται είτε ως αισθητήρες, είτε ως ενεργοποιητές για τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και το αντίστροφο.
- **Πιεζοηλεκτρικός τύπος:** η λειτουργία του στηρίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο αν ασκηθεί πίεση σε έναν κρύσταλλο εμφανίζονται ηλεκτρικά φορτία με αντίθετο πρόσημο στις απέναντι επιφάνειές του. Χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι (όπως ο κρύσταλλος Quartz) που υπό πίεση παράγουν ηλεκτρικό φορτίο, φορτίζοντας έτσι τις επιφάνειες του κρυστάλλου. Στα άκρα του πυκνωτή που σχηματίζεται με τον τρόπο αυτό αναπτύσσεται τάση ανάλογη της πίεσης που ασκείται στον κρύσταλλο. Οι μετατροπείς αυτοί είναι παθητικοί και μπορούν να λειτουργήσουν και αντίστροφα. Αν δηλαδή παρουσιαστεί στα άκρα τους μια διαφορά δυναμικού, τότε το σχήμα τους μεταβάλλεται (συστέλλονται ή διαστέλλονται).



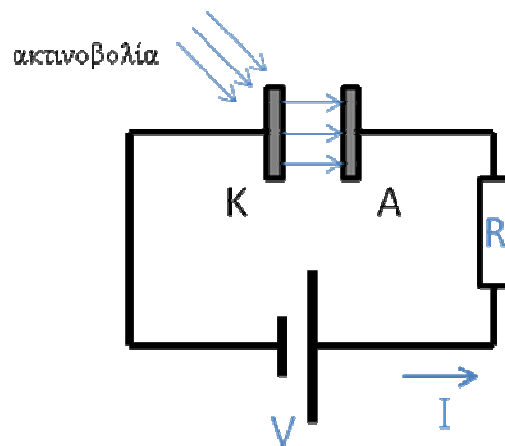
- **Φωτοηλεκτρικός τύπος:** στηρίζεται στα ηλεκτρικά φαινόμενα που παρατηρούνται όταν προσπέσει φως σε φωτοευαίσθητα υλικά τροποποιώντας την αγωγιμότητά τους. Τα φαινόμενα αυτά είναι η φωτοαγωγιμότητα, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η φωτοεκπομπή. Κατά την πρόσπτωση σε μια επιφάνεια, το φως είτε ανακλάται, είτε τη διαπερνά, είτε απορροφάται από το υλικό της. Οι ημιαγωγοί όμως έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια που απορροφούν από τα φωτόνια σε ηλεκτρική ενέργεια. Η αντίσταση των ημιαγωγών υλικών μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τη φωτεινή ένταση. Στο φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας τα φωτόνια που πέφτουν σε ένα ημιαγωγό διεγείρουν τα ηλεκτρόνια και τους μεταφέρουν την ενέργειά τους, αυξάνοντας την αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Τέτοιος τύπος μετατροπέα είναι για παράδειγμα η φωτοαντίσταση ή οι φωτοφωρατές πολλαπλών κβαντικών φρεατίων QWIP (Quantum Well Infrared Photodetectors).

Στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο η απορρόφηση της ενέργειας των φωτονίων που προσπίπτουν σε μια δίοδο ημιαγωγών διεγείρει τους ηλεκτρικούς φορείς, οδηγώντας στην εμφάνιση ηλεκτρικής πόλωσης στα άκρα της. Η πόλωση αυτή ονομάζεται φωτοβολταϊκή τάση. Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε σχέση με την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια συμβολίζει το συντελεστή απόδοσης του υλικού. Η απόδοση αυτή περιορίζεται από το γεγονός ότι κάθε ημιαγωγό υλικό αντιδρά σε διαφορετικά μήκη κύματος της ακτινοβολίας. Έτσι ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υλικό εκμεταλλευόμαστε μόνο το φάσμα της ακτινοβολίας που αυτό αντιδράει. Παραδείγματα τέτοιων μετατροπέων αποτελούν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και η φωτοδίοδος.

Τέλος, το φαινόμενο της φωτοεκπομπής (photoemissivity) αναφέρεται στην απελευθέρωση ηλεκτρονίων από κάποιο υλικό λόγω της πρόσπτωσης φωτεινής ακτινοβολίας. Ο τρόπος λειτουργίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αρχικά, εφαρμόζεται τάση  $V$  ώστε το ηλεκτρόδιο της ανόδου (A) να βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό από το ηλεκτρόδιο της καθόδου (K). Η πρόπτωση



ακτινοβολίας στη μεταλλική επιφάνεια της καθόδου απελευθερώνει ηλεκτρόνια, τα οποία συλλέγονται από την άνοδο. Δημιουργείται με τον τρόπο αυτό ένα ρεύμα στο κύκλωμα που ονομάζεται και φωτορεύμα. Το φωτορεύμα είναι ανάλογο της έντασης του φωτός. Όμως διατηρώντας σταθερές την ένταση και τη συχνότητα του φωτός παρατηρείται ότι το φωτορεύμα ελαττώνεται με την αύξηση της ανοδικής τάσης  $V$  και μηδενίζεται όταν θα γίνει  $V = V_0$ , όπου  $V_0$  ονομάζεται τάση αποκοπής. Η τάση αποκοπής εξαρτάται από τη συχνότητα του φωτός, αλλά είναι ανεξάρτητη από την έντασή του και



Σχήμα 3 – φαινόμενο φωτοεκπομπής

επομένως από το φωτορεύμα. Η φωτολυχνία αποτελεί μετατροπέα τέτοιου τύπου.

- **Χωρητικός τύπος:** πρόκειται για μετατροπείς που αποτελούνται από δύο ηλεκτρικά αγώγιμες πλάκες που σχηματίζουν ένα πυκνωτή. Η τιμή της χωρητικότητάς του εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ τους, την επιφάνεια κάθε πλάκας και φυσικά το διηλεκτρικό υλικό που χρησιμοποιείται. Είναι λοιπόν προφανές ότι αν με το προς μέτρηση μέγεθος μεταβληθεί κάποιο από τα τρία αυτά χαρακτηριστικά του πυκνωτή, τότε είναι εφικτό να υπολογιστεί η τιμή του με βάση τη μεταβολή της χωρητικότητας. Οι χωρητικοί μετατροπείς χρησιμοποιούνται συνήθως σαν στοιχεία γέφυρας εναλλασσόμενου ρεύματος



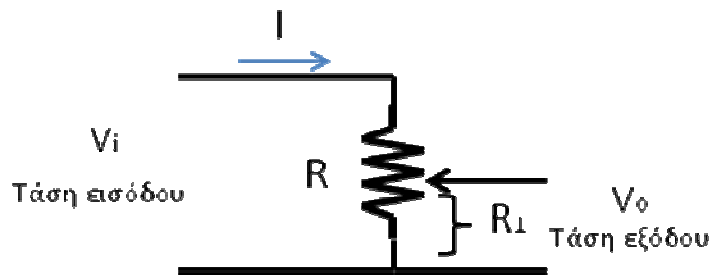
- Τύπος διαφορικού μετασχηματιστή:** ο μετατροπέας του τύπου αυτού αποτελείται από δύο πηνία, πρωτεύον και δευτερεύον που βρίσκονται σε μαγνητική σύζευξη. Το δευτερεύον αποτελείται από δύο τυλίγματα, τυλιγμένα κατά αντίθετη φορά. Η εφαρμογή μιας εναλλασσόμενης τάσης στο πρωτεύον δημιουργεί λόγω επαγωγής μια τάση στο δευτερεύον με μέγεθος που εξαρτάται από τη σύζευξη των δύο πηνίων. Η λειτουργία τους στηρίζεται στη μετατροπή της μετακίνησης ενός αντικειμένου σε μετακίνηση ενός σιδηρομαγνητικού υλικού στο εσωτερικό των πηνίων (γνωστό ως πυρήνας). Όταν ο πυρήνας κινείται, αλλάζει η μαγνητική αντίσταση του διάκενου έχοντας ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της μαγνητικής ροής στα τυλίγματα του δευτερεύοντος πηνίου. Έτσι αλλάζει η σύζευξη μεταξύ των δύο πηνίων και εμφανίζεται μια εναλλασσόμενη τάση στην έξοδο. Το πλάτος της τάσης αυτής εξαρτάται από το μέγεθος της μετακίνησης και η φάση της από τη φορά της. Οι μετατροπείς αυτοί έχουν το πλεονέκτημα ότι δίνουν ισχυρό σήμα εξόδου, όμως επιρρεάζονται αρκετά από τη θερμοκρασία και τους κραδασμούς. Επίσης σε υψηλές συχνότητες τροφοδοσίας η ισχύς της εξόδου μειώνεται λόγω της υστέρησης.
- Επαγωγικός τύπος:** στηρίζονται στη μεταβολή της αυτεπαγωγής ενός πηνίου με πυρήνα όταν η θέση του πυρήνα αλλάζει. Λειτουργούν όπως και οι μετατροπείς διαφορικού μετασχηματιστή. Όταν δηλαδή ο πυρήνας κινείται υπό την επίδραση του μετρούμενου μεγέθους η αυτεπαγωγή του πηνίου μεταβάλλεται. Επιρρεάζονται από τη θερμοκρασία και χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανίχνευση μεταλλικών αντικειμένων.
- Τύπος ποτενσιόμετρου:** Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην

εξίσωση που υπολογίζει την αντίσταση ενός αντιστάτη :  $R = \rho \times \frac{L}{S}$ , όπου R

η τιμή της αντίστασης, ρ η ειδική αντίσταση η οποία εξαρτάται από το υλικό



κατασκευής,  $\frac{\rho L}{S}$  το μήκος του αντιστάτη και  $S$  η διατομή του. Η αντίσταση επομένως εξαρτάται γραμμικά από το μήκος του αντιστάτη. Ένας τέτοιος τύπος μετατροπέα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 4 – μετατροπέας ποτενσιόμετρου

Η τάση εξόδου του δίνεται όπως είναι γνωστό από τη σχέση  $V_o = V_i \times R_1 / R$

Έτσι, αν είναι  $L$  το μήκος του αντιστάτη και  $\frac{\rho L_1}{S}$  το μήκος της  $R_1$  θα ισχύει ότι

$R = \rho \times L / S$  ενώ  $R_1 = \rho \times \frac{\rho L_1}{S} / S$ . Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις μεταξύ

τους προκύπτει ότι

$$V_o = V_i \times \frac{\rho L_1}{S} / L$$

που αποδεικνύει ότι η τάση εξόδου είναι ανάλογη του μήκους της αντίστασης  $R_1$ . Η σχέση μεταξύ τους είναι γραμμική αν στην έξοδο του ποτενσιόμετρου δε συνδέεται κάποιο φορτίο. Σε αντίθετη περίπτωση η γραμμικότητα



καταστρέφεται και για το λόγο αυτό στο αισθητήριο δημιουργείται ηλεκτρική αντιστάθμιση. Οι μετατροπείς αυτού του τύπου έχουν στα υπέρ τους το χαμηλό κόστος, το ισχυρό σήμα εξόδου και το ότι λειτουργούν τόσο σε συνεχές όσο και σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Μειονεκτούν όμως στο ότι επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, είναι ευαίσθητοι σε σκόνη, υγρασία ή κραδασμούς και έχουν μικρό εύρος ζώνης συχνοτήτων. Επίσης, κυρίως λόγω της τριβής στο σημείο επαφής της μεταβλητής αντίστασης, με την πάροδο του χρόνου παρουσιάζουν προβλήματα θορύβου.

- **Θερμοηλεκτρικός τύπος:** οι μετατροπείς αυτού του τύπου παράγουν απευθείας ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου. Κύριος εκπρόσωπος αυτής της κατηγορίας είναι το θερμοζεύγος. Η λειτουργία τους στηρίζεται στα φαινόμενα Seebeck και Peltier, σύμφωνα με τα οποία όταν δύο διαφορετικά μέταλλα βρίσκονται σε επαφή και το σημείο της ένωσης βρίσκεται σε κάποια θερμοκρασία, τότε ηλεκτρόνια περνάνε μέσα από την επαφή. Το θερμοζεύγος (thermocouple) αποτελείται από δύο διαφορετικά μέταλλα που βρίσκονται σε επαφή στο ένα άκρο ενώ τα άλλα τους άκρα είναι ελεύθερα. Αν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο κοινό άκρο και στα ελεύθερα άκρα, τότε στα ελεύθερα άκρα θα εμφανιστεί μια διαφορά δυναμικού, ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας. Τα θερμοζεύγη είναι μετατροπείς χαμηλού κόστους και έχουν γρήγορη απόκριση, αλλά δεν παρέχουν μεγάλη ακρίβεια.
- **Τύπος Hall και μαγνητοαντίστασης:** όπως είναι προφανές, η λειτουργία του στηρίζεται στο φαινόμενο Hall, σύμφωνα με το οποίο αν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα  $I$  και τοποθετηθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο επαγωγής  $B$ , τότε δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο που είναι κάθετο στα επίπεδα των  $I$  και  $B$ , εμφανίζοντας μια διαφορά δυναμικού στα άκρα του αγωγού. Η τάση αυτή ισούται με  $V = h \times I \times B \times \eta \mu \alpha$ , όπου ο συντελεστής  $h$  εξαρτάται από την επιφάνεια, το υλικό και τη γεωμετρία του μετάλλου, ενώ η γωνία  $\alpha$  είναι εκείνη



μεταξύ του διανύσματος επαγωγής  $B$  και του επιπέδου του αγωγού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της μαγνητικής επαγωγής (για σταθερό ρεύμα  $I$ ), της έντασης ρεύματος (σε σταθερό μαγνητικό πεδίο) ή της γωνίας στροφής ενός αντικειμένου (λόγω της γραμμικότητας της τάσης σε σχέση με τη γωνία  $\alpha$ ). Συνήθως όμως, τα αισθητήρια Hall τα συναντάμε κυρίως σε μετρήσεις ή έλεγχο μικρών μετακινήσεων ή περιστροφών. Υπάρχουν δύο τύποι αισθητηρίων Hall, τα γραμμικά και τα αισθητήρια Hall κατωφλίου. Τα γραμμικά αισθητήρια δίνουν μια dc έξοδο και είναι κατάλληλα για μέτρηση. Λειτουργούν σε ευρεία περιοχή τάσεων και δεν επηρεάζονται από θόρυβο. Δεν είναι όμως απόλυτα γραμμικά με το μαγνητικό πεδίο, οπότε για ακριβείς μετρήσεις χρειάζονται ρύθμιση. Τα αισθητήρια κατωφλίου παρουσιάζουν μια on/off λειτουργία που τα κάνει ακατάλληλα για μέτρηση, οπότε προτιμάται να χρησιμοποιούνται μόνο για ανίχνευση.

Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης στηρίζεται στη μεταβολή της αντίστασης ενός κρυστάλλου (κρύσταλλος Hall) που διαρρέεται από ρεύμα υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Τόσο οι μετατροπείς τύπου μαγνητοαντίστασης, όσο και οι μετατροπείς Hall επηρεάζονται από τη θερμοκρασία.

- **Τύπος πιεζοαντίστασης:** βασίζονται στην ιδιότητα των υλικών να μεταβάλλουν την ειδική τους αντίσταση όταν ασκηθεί σε αυτά κάποια δύναμη. Αν ασκηθεί μια δύναμη σε ένα σύρμα μήκους  $L$  μεταβάλλοντας το μήκος του

κατά  $\Delta L$ , θα έχει ως αποτέλεσμα να αλλάξει η ηλεκτρική του αντίσταση  $R$

κατά  $\Delta R$ . Ισχύει όμως ότι  $\Delta R/R = \Delta L/L \times G$ , όπου το  $G$  λέγεται συντελεστής

μεταβολής και εκφράζει τη μεταβολή της αντίστασης λόγω του μήκους του σύρματος, της μεταβολής της διατομής του και της μεταβολής της ειδικής του αντίστασης εξαιτίας του φαινομένου της πιεζοαντίστασης. Οι μετατροπείς αυτού του τύπου χωρίζονται σε μεταλλικούς και ημιαγωγικούς. Οι μεταλλικοί μετατροπείς διακρίνονται με τη σειρά τους σε προσκολλημένης και ελεύθερης πιεζοαντίστασης. Οι πρώτοι (προσκολλημένης πιεζοαντίστασης) αποτελούνται από λεπτό σύρμα σε διάφορα σχήματα ώστε να εμφανίζουν ευαισθησία κατά μία, δύο ή τρεις διευθύνσεις. Για να επιτευχθεί η μετατροπή της μεταβολής της τιμής της αντίστασης σε ηλεκτρική τάση χρησιμοποιείται μια γέφυρα Wheatstone. Η πιεζοαντίσταση αντικαθιστά μία από τις αντιστάσεις της γέφυρας, οπότε αν ασκηθεί σε αυτή δύναμη αλλάζει η αντίστασή της και η γέφυρα οδηγείται σε κατάσταση μη ισορροπίας. Οι μετατροπείς ελεύθερης πιεζοαντίστασης αποτελούνται από πιεζοαντιστάσεις των οποίων τα άκρα στηρίζονται σε δύο βάσεις με τη μία από αυτές να είναι σταθερή και την άλλη ικανή να κινηθεί αν ασκηθεί δύναμη. Τα άκρα τους συνδέονται μέσω τεσσάρων συρμάτων σε γέφυρα Wheatstone, που με τη χρήση ρυθμιστικών αντιστάσεων βρίσκεται σε ισορροπία όταν δεν ασκείται κάποια δύναμη. Όταν ασκηθεί δύναμη οι αντιστάσεις των συρμάτων μεταβάλλονται και η γέφυρα δίνει μια τάση εξόδου ανάλογη της παραμόρφωσης που προκλήθηκε στα σύρματα.

Οι ημιαγωγικοί μετατροπείς πιεζοαντίστασης διακρίνονται σε προσκολλημένης πιεζοαντίστασης και μετατροπείς διάχυσης. Οι πρώτοι χρησιμοποιούν τέσσερις κρυστάλλους πυριτίου με προσμίξεις σαν πιεζοαντιστάσεις, οι οποίοι συνδέονται ως γέφυρα Wheatstone και τοποθετούνται πάνω στην επιφάνεια της οποίας η παραμόρφωση είναι προς μέτρηση. Οι μετατροπείς του δεύτερου τύπου χρησιμοποιούν το πυρίτιο ως μηχανική βάση και μέσα σε αυτό γίνεται η διάχυση της πιεζοαντίστασης. Είναι σταθεροί στη λειτουργία τους, σε αντίθεση με εκείνους της προσκολλημένης πιεζοαντίστασης που επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και παρουσιάζουν μειωμένη ακρίβεια όσο περνάει ο καιρός.



Γενικά οι μετατροπείς πιεζοαντίστασης παρουσιάζουν πολύ καλή στατική και δυναμική συμπεριφορά και μεγάλη ακρίβεια.

- **Τύπος μεταβλητής ηλεκτρικής αντίστασης:** έχουν ως βασικό στοιχείο μια αντίσταση με τιμή που εξαρτάται από ένα φυσικό μέγεθος. Όταν η αντίσταση διαρρέεται από ρεύμα μια μεταβολή της τιμής της μετρούμενης ποσότητας θα οδηγήσει σε αλλαγή της τάσης στα άκρα του υλικού, λόγω της αντίστοιχης μεταβολής της αντίστασης. Για παράδειγμα μεταβολή της θερμοκρασίας θα οδηγούσε σε αντίστοιχη αύξηση ή μείωση της τιμής της αντίστασης. Μετατροπείς τέτοιου τύπου που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι το θερμίστορ και οι ανιχνευτές θερμοκρασίας μεταβλητής αντίστασης RTD (Resistance Temperature Detectors). Το πρώτο παρουσιάζει μείωση (εκθετικής μορφής) της αντίστασής του αντιδρώντας σε αύξηση της θερμοκρασίας, σε αντίθεση με τα RTDs που η αντίστασή τους αυξάνεται γραμμικά.
- **Τύπος θερμοδιαστολής:** η λειτουργία τους στηρίζεται στη μεταβολή του όγκου ενός υλικού λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας του. Χρησιμοποιούνται για το λόγο αυτό κυρίως υγρά καθώς παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή όγκου σε μεταβολή της θερμοκρασίας, συγκριτικά με τα στερεά σώματα. Ένας από τους πιο διαδεδομένους τύπους τέτοιου μετατροπέα είναι τα θερμόμετρα διαστολής. Το ποσό κατά το οποίο διαστέλλεται ένα υγρό μπορεί να μετρηθεί σε μονάδες θερμοκρασίας. Εκτός από υγρά, ως μέσο διαστολής μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αέρια. Στην περίπτωση αυτή αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της πίεσης, που μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια κάποιου μετατροπέα πίεσης.
- **Τύπος ταλαντωτή:** χρησιμοποιεί μια διάταξη ταλαντωτή με πηνίο και πυκνωτή (κύκλωμα LC) για το μετασχηματισμό ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενου ρεύματος. Το μετρούμενο μέγεθος μεταβάλλει τη χωρητικότητα του πυκνωτή ή την αυτεπαγωγή του πηνίου αλλάζοντας τη



συχνότητα ταλάντωσης. Η πληροφορία της μέτρησης λαμβάνεται από τις μεταβολές της συχνότητας ταλάντωσης.

## 1.5 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Όπως προαναφέρεται, σημαντικό ρόλο στην επιλογή του κατάλληλου μετατροπέα έχουν τα χαρακτηριστικά του γνωρίσματα σε συνδυασμό με την εφαρμογή και το περιβάλλον που θα χρησιμοποιηθεί. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθορίζονται από τη σχέση μεταξύ της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας και του σήματος εξόδου του μετατροπέα. Διακρίνονται σε στατικά και δυναμικά χαρακτηριστικά και μπορούν να εφαρμόζονται και στα επιμέρους τμήματα του συστήματος μέτρησης. Κάθε εφαρμογή απαιτεί την επιλογή αισθητήρα με την καλύτερη δυνατή ανταπόκριση σε ένα ή περισσότερα από αυτά.

### 1.5.1 Στατικά χαρακτηριστικά

Τα στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων αναφέρονται στην κατάσταση κατά την οποία υπάρχει ισορροπία μεταξύ αισθητήρα και μετρούμενου μεγέθους. Αυτό συμβαίνει όταν το μετρούμενο μέγεθος είναι σταθερό ή η μεταβολή του είναι τόσο μικρή που ο αισθητήρας δεν μπορεί να την αντιληφθεί. Τα στατικά χαρακτηριστικά εξετάζονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

- **Ακρίβεια:** η ακρίβεια (accuracy) είναι η απόκλιση της τιμής της μέτρησης του αισθητήρα από την πραγματική τιμή του εξωτερικού ερεθίσματος. Ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την ανακρίβεια της μέτρησης, αφού πρακτικά κάθε συσκευή παράγει κάποιο σφάλμα, όσο μικρό κι αν είναι αυτό. Μπορεί να εκφραστεί ως απόλυτη τιμή του σφάλματος μέτρησης, ποσοστό της κλίμακας εισόδου ή ποσοστό της κλίμακας εξόδου.

- **Ανοχή:** η ανοχή (tolerance) ορίζεται ως το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα που μπορεί να προκύψει κατά τη μέτρηση μιας τιμής. Ουσιαστικά δεν αποτελεί



στατικό χαρακτηριστικό για έναν αισθητήρα, αλλά συμπεριλαμβάνεται σε αυτά επειδή συχνά αναφέρεται στις προδιαγραφές τους αντί της ακρίβειας.

- **Αξιοπιστία:** η αξιοπιστία (reliability) ενός αισθητήρα είναι η ικανότητά του να λειτουργεί εντός των πλαισίων των τεχνικών προδιαγραφών του, όταν χρησιμοποιείται κάτω από καθορισμένες συνθήκες για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Εκφράζει δηλαδή τη σταθερότητα που παρουσιάζεται στην παραγωγή αποδεκτών σημάτων στην έξοδο του αισθητήρα. Αναφέρεται και ως χρόνος λειτουργίας της συσκευής.

- **Απόκριση:** ως απόκριση (response) μιας συσκευής ορίζεται η χρονική διάρκεια που απαιτείται να περάσει μέχρι να ληφθεί η τελική τιμή εξόδου, για μια δεδομένη τιμή εισόδου. Συνήθως εκφράζεται σε δευτερόλεπτα ή κλάσματα του δευτερολέπτου και η τιμή της είναι σημαντική σε εφαρμογές που απαιτείται ταχύτητα στη μέτρηση του μετατροπέα.

- **Βαθμονόμηση:** βαθμονόμηση (calibration) είναι η διαδικασία που πραγματοποιείται ώστε η κλίμακα καταγραφής ή εμφάνισης των τιμών της εξόδου μιας συσκευής να συνδέεται με κάποιο γνωστό πρότυπο μέτρησης. Επιτυγχάνεται με την καταγραφή των τιμών των ενδείξεων εξόδου για δεδομένες τιμές εισόδου. Από τη γραφική παράσταση της εισόδου συναρτήσει της εξόδου που προκύπτει από τις παραπάνω τιμές μπορούν να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά σφάλματος του αισθητήρα. Με κατάλληλη βαθμονόμηση η τιμή του μεγέθους στην έξοδο μπορεί να εκφράζεται σε μονάδες που συνδέονται με κάποιο άλλο φυσικό μέγεθος. Για παράδειγμα, ενώ ο δείκτης σε ένα ταχύμετρο κινείται ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται σε αυτόν, η θέση του δίνεται σε τιμές ταχύτητας και όχι τάσης. Είναι δηλαδή βαθμονομημένος ως προς την ταχύτητα.

- **Γραμμικότητα:** η γραμμικότητα (linearity) ενός αισθητήρα σχετίζεται με το κατά πόσον η σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου του είναι γραμμική σε όλο το εύρος των τιμών εισόδου. Δηλαδή πόσο η γραφική παράσταση της μιας



συναρτήσει της άλλης προσεγγίζει ευθεία γραμμή. Αναφέρεται και ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας όταν εκφράζεται ως προς το μέγιστο βαθμό απόκλισης από την ευθεία γραμμή, για όλο το εύρος των τιμών εισόδου.

- **Διακριτική ικανότητα:** η διακριτική ικανότητα (resolution) εκφράζει τη μικρότερη δυνατή διέγερση που μπορεί να γίνει αντιληπτή από τον αισθητήρα. Εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό επί τοις εκατό και όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο μικρότερο είναι το μέτρο της τιμής της μεταβολής της διέγερσης που μπορεί να μετρηθεί από τον αισθητήρα.

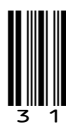
- **Επαναληψιμότητα:** η επαναληψιμότητα (repeatability) εκφράζει το βαθμό στον οποίο κάθε φορά που μια συσκευή που τροφοδοτείται με την ίδια τιμή εισόδου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές παράγει την ίδια έξοδο. Δεν μπορεί να αποτελέσει από μόνη της κριτήριο για την πιστότητα της λειτουργίας ενός αισθητήρα, καθώς μπορεί να παρουσιάζεται υψηλή επαναληψιμότητα, αλλά το σήμα εξόδου να περιέχει σημαντικό σφάλμα, οπότε η μέτρηση δε θα είναι ακριβής.

- **Ευαισθησία:** η ευαισθησία (sensitivity) ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής της εξόδου ( $\Delta E_{\xi}$ ) προς την αντίστοιχη μεταβολή εισόδου ( $\Delta E_{\epsilon\iota\varsigma}$ ) κατά τη μόνιμη κατάσταση. Είναι δηλαδή ίση με  $\Delta E_{\xi} / \Delta E_{\epsilon\iota\varsigma}$  ή αναλυτικότερα με :

$$\frac{\text{μΧγιστη τιμΨ εξόδου} - \text{ελΦχιστη τιμΨ εξόδου}}{\text{μΧγιστη τιμΨ εισόδου} - \text{ελΦχιστη τιμΨ εισόδου}}$$

Οι μονάδες στις οποίες εκφράζεται η ευαισθησία ποικίλουν, ανάλογα με τη μετρούμενη ποσότητα και τη φύση του αισθητήρα. Ορίζεται επίσης ως η παράγωγος της συνάρτησης μεταφοράς ως προς τη μετρήσιμη ποσότητα για μια ορισμένη τιμή της. Αν η συνάρτηση μεταφοράς είναι ευθεία γραμμή τότε η ευαισθησία παραμένει σταθερή σε όλο το εύρος μέτρησης. Ένας αισθητήρας με ιδανικά χαρακτηριστικά θα έχει μεγάλη και σταθερή ευαισθησία. Το γεγονός αυτό εξηγεί και ενισχύει τη σημασία της γραμμικότητας που προαναφέρεται.

- **Εύρος λειτουργίας:** το εύρος λειτουργίας ενός αισθητήρα (operating range) αναφέρεται στα όρια μεταξύ των οποίων μπορεί αυτός να λειτουργεί



αξιόπιστα. Τα όρια αυτά καθορίζονται τόσο από την ποιότητα της πληροφορίας και την ακρίβεια στη λειτουργία του, όσο και από τα φυσικά χαρακτηριστικά και τις ανοχές του (πχ τη μέγιστη ή ελάχιστη θερμοκρασία που μπορεί να λειτουργεί χωρίς να αλλοιώνεται). Ως όρια λαμβάνονται συνήθως η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή που μπορεί να μετρήσει.

- **Καθυστέρηση:** η καθυστέρηση (delay ή lag) εκφράζει το χρόνο που χρειάζεται να περάσει ώστε να αλλάξει η τιμή εξόδου από τη στιγμή που μεταβάλλεται η είσοδος. Έχει καθοριστική σημασία σε συστήματα ελέγχου, καθώς η τιμή της επιρρεάζει την απόδοσή τους. Μετριέται σε μονάδες χρόνου, κυρίως σε δευτερόλεπτα και υποδιαιρέσεις τους (ms, μs).

- **Ολίσθηση:** με την πάροδο του χρόνου τα χαρακτηριστικά μιας συσκευής τείνουν να μεταβάλλονται. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε φθορά τμήματος της συσκευής, εξαιτίας για παράδειγμα της διάβρωσης ή της οξειδωσης που έχει υποστεί, είτε σε αλλαγές στο περιβάλλον λειτουργίας της, όπως η αλλαγή θερμοκρασίας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ολίσθηση (drift).

- **Ονομαστική τιμή:** η ονομαστική τιμή (rating) μιας συσκευής καταγράφει το σύνολο των καλύτερων δυνατών συνθηκών, υπό τις οποίες θα παρουσιαζόταν η βέλτιστη λειτουργία της, εξασφαλίζοντας παράλληλα μέγιστη προστασία για τη συσκευή.

- **Σταθερότητα:** η σταθερότητα μιας συσκευής (stability) εκφράζει ποσοτικά τη μεταβολή στο σήμα εξόδου κατά τη διάρκεια μεγάλης χρονικής περιόδου, όταν τόσο το σήμα εισόδου όσο και οι συνθήκες παραμένουν σταθερά.

- **Σφάλμα:** το σφάλμα (defect) αποτελεί τη διαφορά μεταξύ μετρούμενης και πραγματικής τιμής μιας ποσότητας. Υπάρχουν δύο τύποι σφάλματος, τα συστηματικά σφάλματα και τα τυχαία. Τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να προκύψουν λόγω της επίδρασης παραγόντων όπως η εσφαλμένη βαθμονόμηση του αισθητήρα, η ολίσθηση, η επίδραση της διαδικασίας μέτρησης στη μετρούμενη ποσότητα ή οι μεταβολές του περιβάλλοντος.





Μπορούν να διορθωθούν με τεχνικές αντιστάθμισης, όπως είναι η ανάδραση. Τα τυχαία σφάλματα είναι πιο γνωστά ως θόρυβος και αφορούν σήματα που υπεισέρχονται στη διαδικασία της μέτρησης χωρίς όμως να μεταφέρουν πληροφορία. Πιο γνωστό παράδειγμα είναι ο λευκός θόρυβος. Οφείλονται είτε σε περιβαλλοντολογικούς παράγοντες, είτε στη διαδικασία της μέτρησης και τον τρόπο μετάδοσης του σήματος.

- **Στατικό σφάλμα:** το στατικό σφάλμα (static error) έχει σταθερή τιμή και υπεισέρχεται στη μέτρηση σε όλο το εύρος των τιμών εισόδου. Γνωρίζοντας την τιμή του μπορεί να αντισταθμιστεί και να μην επιρρεάσει την ακρίβεια του συστήματος.

- **Υστέρηση:** η υστέρηση (hysteresis) εκφράζει την απόκλιση της τιμής εξόδου για συγκεκριμένη τιμή του σήματος εισόδου, όταν η κατεύθυνση της μεταβολής στην είσοδο αντιστραφεί. Όπως για παράδειγμα συμβαίνει σε ένα αισθητήρα μετατόπισης όταν το αντικείμενο κινείται αρχικά δεξιόστροφα και μετά αριστερόστροφα. Το σφάλμα που παράγεται με αυτόν τον τρόπο επιρρεάζει την ακρίβεια της συσκευής. Παράγοντες που προκαλούν φαινόμενο υστέρησης είναι συνήθως η τριβή, η μηχανική τάση και οι αλλαγές στη δομή των χρησιμοποιούμενων υλικών.

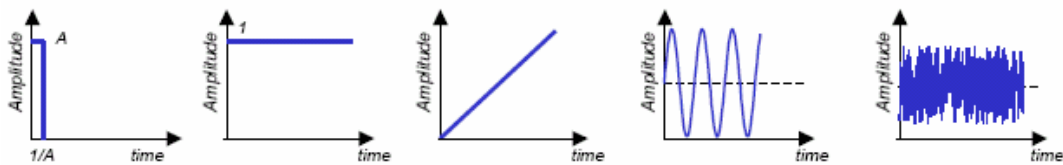
- **Νεκρή ζώνη:** ως νεκρή ζώνη (dead-band) αναφέρεται το εύρος τιμών του σήματος εισόδου, για το οποίο δεν προκαλείται αλλαγή στο σήμα εξόδου. Στο εύρος αυτό το σήμα στην έξοδο διατηρεί μια σταθερή τιμή, που συνήθως είναι το μηδέν. Οι νεκρές ζώνες προκαλούνται κυρίως εξαιτίας της υστέρησης ή της στατικής τριβής.

- **Χρόνος λειτουργίας:** η μέγιστη χρονική διάρκεια κατά την οποία ένας αισθητήρας αναμένεται να λειτουργεί εντός των προδιαγραφών του καλείται χρόνος λειτουργίας (operating time). Εκτός από μονάδες χρόνου μπορεί να εκφραστεί και με τον αριθμό των κύκλων λειτουργίας που αναμένεται να πραγματοποιηθούν με επιτυχία.



### 1.5.2 Δυναμικά χαρακτηριστικά

Όπως είδαμε, όταν το μετρούμενο μέγεθος είναι σταθερό ή ο ρυθμός μεταβολής του είναι τόσο μικρός που ο αισθητήρας δεν μπορεί να την αντιληφθεί, τότε η λειτουργία του αισθητήρα περιγράφεται από τα παραπάνω στατικά χαρακτηριστικά. Στην περίπτωση όμως που το σήμα εισόδου είναι μεταβλητό, η απόκριση του αισθητήρα δεν ανταποκρίνεται με ακρίβεια. Ο λόγος είναι ότι ο αισθητήρας δεν μπορεί να αντιδρά στιγμιαία στο σήμα διέγερσης, οπότε τα χαρακτηριστικά αυτά δεν μπορούν να τον περιγράψουν ικανοποιητικά. Στην πράξη αυτό οφείλεται στην παρουσία εξαρτημάτων που λειτουργούν ως συσσωρευτές ενέργειας, όπως οι πυκνωτές και τα επαγωγικά ή θερμικά στοιχεία. Επομένως η περιγραφή της λειτουργίας του αισθητήρα γίνεται από τα δυναμικά του χαρακτηριστικά. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά περιγράφουν την συμπεριφορά του αισθητήρα από τη στιγμή που το σήμα εισόδου μεταβάλλεται έως και τη στιγμή που το σήμα εξόδου σταθεροποιείται. Ισχύουν για συγκεκριμένο εύρος συνθηκών λειτουργίας και μεταβάλλονται όταν ο αισθητήρας λειτουργεί έξω από αυτό. Μπορούν να προσδιοριστούν εξετάζοντας την απόκριση του αισθητήρα σε διάφορες μορφές του σήματος εισόδου, όπως φαίνεται για παράδειγμα στις παρακάτω κυματομορφές. Πρόκειται αντιστοίχως για κυματομορφή ώθησης, βήματος, γραμμική, ημιτονοειδής και λευκού θορύβου :



Σχήμα 5 – κυματομορφές του σήματος στην είσοδο



Στην περίπτωση που η είσοδος είναι βαθμωτή η απόκριση του μετατροπέα χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω μεγέθη:

- τη σταθερά χρόνου, που αντιστοιχεί στο χρόνο που απαιτείται να περάσει μέχρι η έξοδος να φτάσει στο 63% της τελικής τιμής της
- το χρόνο απόκρισης, που αναφέρεται στο χρόνο που απαιτείται για να υπάρξει σταθεροποίηση της τιμής στην έξοδο μέσα σε ένα ορισμένο εύρος τιμών
- το χρόνο ανόδου, που αντιστοιχεί στο χρόνο που απαιτείται να περάσει ώστε να φτάσει η έξοδος από το 10% στο 90% της τελικής τιμής της.

### **1.6 Χαρακτηριστικά ιδανικού αισθητήρα**

Η καλύτερη δυνατή λειτουργία ενός αισθητήρα πραγματοποιείται όταν αυτός διαθέτει χαρακτηριστικά που λαμβάνουν ιδανικές τιμές. Τα ιδανικά αυτά χαρακτηριστικά και οι τιμές τους είναι :

- γραμμική και δίχως θόρυβο απόκριση
- αρχική τιμή εξόδου (σημείο αναφοράς) ίση με μηδέν
- μηδενικός χρόνος απόκρισης (για στιγμιαία απόκριση)
- άπειρο εύρος συχνοτήτων
- μηδενικός χρόνος προσέγγισης του 90% της τελικής τιμής σήματος
- μέγιστη έξοδος ως ένδειξη πλήρους κλίμακας
- περιοχή λειτουργίας άπειρη
- υψηλή και σταθερή ευαισθησία σε όλο το εύρος λειτουργίας
- άπειρη τιμή διακριτικής ικανότητας

Στην πράξη επιδιώκεται τα χαρακτηριστικά αυτά να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις ιδανικές τους τιμές, παρόλο που αποκλίνουν από αυτές. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της κατασκευής τους και λόγω επιρροών από το περιβάλλον λειτουργίας ή ακόμα και από άλλα τμήματα του κυκλώματος. Επιπλέον, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν και οι ατέλειες που δημιουργούνται



από χαρακτηριστικά που έχουν ανεπιθύμητες τιμές, επιρρεάζοντας έτσι την ποιότητα της μέτρησης. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα :

- έλλειψη γραμμικότητας, που ισοδυναμεί με απόκριση που δεν είναι ανάλογη του σήματος εισόδου
- μεγάλη απόκριση, που σημαίνει ότι η έξοδος αργεί να φτάσει σε τιμή μόνιμης κατάστασης
- μικρή περιοχή λειτουργίας, γεγονός που περιορίζει τις μετρήσεις
- χαμηλή ευαισθησία, που σημαίνει ότι απαιτούνται μεγάλες τιμές του σήματος εισόδου ώστε να υπάρχει έξοδος
- ολίσθηση της ευαισθησίας, φαινόμενο που προκαλεί μεταβολές στην έξοδο με την πάροδο του χρόνου
- ολίσθηση της αναφοράς, που σημαίνει ότι η τιμή του σήματος εξόδου (σήμα αναφοράς) μεταβάλλεται με το χρόνο
- αντιστάθμιση (offset), που οδηγεί σε συστηματικό λάθος στην έξοδο του αισθητήρα
- ολίσθηση της αντιστάθμισης, δηλαδή μετατόπιση της αντιστάθμισης με την πάροδο του χρόνου
- γήρανση, που μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολή της εξόδου σε σχέση με το χρόνο
- παρεμβολή, η οποία αναφέρεται σε ευαισθησία της εξόδου σε εξωτερικές συνθήκες, όπως είναι η ακτινοβολία ή η θερμοκρασία
- υστέρηση, η οποία λόγω της απόκλισης τιμών που προκαλείται παράγει συστηματικό σφάλμα στην καμπύλη εισόδου – εξόδου
- θόρυβος, σήμα δηλαδή που υπεισέρχεται στη διαδικασία της μέτρησης χωρίς να μεταφέρει πληροφορία και περιλαμβάνεται στο σήμα εξόδου

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>



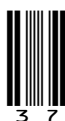
# Μέτρηση Ταχύτητας

Όπως προαναφέρεται, στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε με τη μέτρηση της ταχύτητας και της γωνιακής ταχύτητας. Πριν όμως περάσουμε σε μεθόδους μέτρησης ας δούμε πιο αναλυτικά τι είναι και πώς ορίζεται το φυσικό αυτό μέγεθος.

## 2.1 Ταχύτητα και γωνιακή ταχύτητα

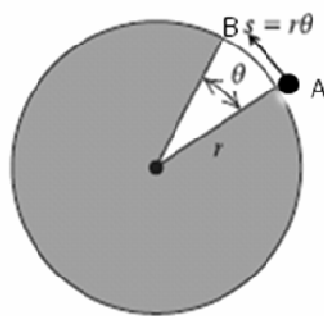
Σύμφωνα με τη θεωρία της κινηματικής, οποιαδήποτε κίνηση ενός στερεού μπορεί να θεωρηθεί ως επαλληλία μιας μεταφορικής κίνησης και μιας περιστροφικής κίνησης. Η μεταφορική κίνηση χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι για κάθε χρονική στιγμή όλα τα υλικά σημεία του στερεού έχουν ίση ταχύτητα, η οποία και αποτελεί την ταχύτητα του μεταφερόμενου σώματος. Στην περίπτωση της περιστροφικής κίνησης θεωρούμε έναν άξονα περιστροφής και κάθε υλικό σημείο του σώματος εκτελεί κυκλική κίνηση το κέντρο της οποίας βρίσκεται στον άξονα αυτό. Επομένως τα υλικά σημεία του σώματος δεν έχουν την ίδια ταχύτητα, δεδομένου του ότι πρόκειται για ένα διανυσματικό μέγεθος. Η έννοια λοιπόν της ταχύτητας στρεφόμενου σώματος δεν μπορεί να υπάρξει. Ο λόγος αυτός οδήγησε στον ορισμό της γωνιακής ταχύτητας. Και στις δύο περιπτώσεις είναι εμφανές ότι η κίνηση ενός στερεού σώματος περιγράφεται από την ταχύτητά του. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί τη σημασία του ελέγχου και της μέτρησής της.

Η ταχύτητα ( $U$ ) είναι το φυσικό μέγεθος που εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της μετακίνησης ( $\Delta x$ ) ενός σώματος ως προς το χρόνο ( $t$ ). Δείχνει δηλαδή πόσο γρήγορα και προς τα που κινείται το σώμα αυτό, σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς που θεωρείται ακίνητο. Είναι διανυσματικό μέγεθος με το διάνυσμά



της να δηλώνει την κατεύθυνση της κίνησης. Το μέτρο της δίνεται από τη σχέση  $U = \Delta x / \Delta t$ , όπου  $x$  η μετατόπιση και στο σύστημα SI έχει μονάδες τα μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/sec), αλλά συχνά τη συναντάμε και με άλλες μονάδες μήκους και χρόνου, όπως τα χιλιόμετρα ανά ώρα (km/h) ή τα μίλια ανά ώρα (mph).

Αντίστοιχα, σε ένα περιστρεφόμενο σύστημα όταν μια σημειακή μάζα κινείται όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα από το A στο B τότε διαγράφει τόξο  $S$ , ενώ η επιβατική της ακτίνα διαγράφει γωνία  $\theta$ . Ισχύει δε ότι  $\theta = S/r$ , όπου  $r$  η ακτίνα του κύκλου περιστροφής.



Σχήμα 6 – κυκλική κίνηση σημειακής μάζας

Η γωνιακή ταχύτητα ( $\omega$ ) ορίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας  $\theta$  ως προς το χρόνο. Η μέση γωνιακή ταχύτητα έχει μέτρο που δίνεται από τη σχέση  $\omega = \Delta\theta / \Delta t$  και μονάδες στο SI τα ακτίνια ανά δευτερόλεπτο (rad/sec), παρόλο που συχνά δίνεται έχοντας ως μονάδες τις μοίρες ανά δευτερόλεπτο ή τις στροφές ανά λεπτό. Η διεύθυνση του διανύσμά της είναι κάθετη στο επίπεδο της τροχιάς κίνησης και η φορά του ακολουθεί τον κανόνα του δεξιού χεριού. Η στιγμιαία γωνιακή ταχύτητα ορίζεται ως το όριο της μέσης όταν το  $\Delta t$  τείνει στο

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta\theta / \Delta t$$

μηδέν, δηλαδή ως  $\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta\theta / \Delta t$ . Αν η κίνηση είναι ομαλή κυκλική η τιμή του τόξου που διαγράφεται, οπότε και της γωνίας που



διαγράφει η επιβατική ακτίνα θα είναι ανάλογη του χρόνου. Τότε η ταχύτητα της σημειακής μάζας θα είναι ίση με  $v$ . Αντικαθιστώντας στη σχέση  $\theta = \frac{s}{r}$  το  $s$  από τη σχέση  $s = v \cdot t$  και το  $\theta$  αφού  $\theta = \omega \times t$ , προκύπτει ότι  $\omega = \frac{v}{r}$  ή  $v = \omega \times r$ , σχέση που συνδέει το μέτρο της ταχύτητας και της γωνιακής ταχύτητας σημειακής μάζας σε ομαλή κυκλική κίνηση ακτίνας  $r$ . Επίσης για διάρκεια μίας περιόδου θα είναι  $\theta = 2\pi$  και  $t = T$ , οπότε προκύπτει ότι  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  ή  $\omega = 2\pi f$ . Δηλαδή στην ομαλή κυκλική κίνηση η γωνιακή ταχύτητα είναι ανάλογη της συχνότητας. Ομοίως επειδή  $s = 2\pi r$  για  $t = T$  προκύπτει ότι είναι  $v = \frac{2\pi r}{T}$  ή  $v = 2\pi r f$ . Η ταχύτητα ενός αντικειμένου μπορεί να υπολογιστεί και από την πρώτη παράγωγο της μετατόπισής του ως προς το χρόνο ή από την ολοκλήρωση της επιτάχυνσής του. Ομοίως, η γωνιακή ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί από την παράγωγο της γωνιακής μετατόπισης ως προς το χρόνο ή την ολοκλήρωση της γωνιακής επιτάχυνσης του στρεφόμενου σώματος. Βέβαια όσα προαναφέρονται δεν ισχύουν μόνο για την περίπτωση που διαγράφεται κυκλική πορεία, αλλά και για κάθε περίπτωση που διαγράφεται πορεία υπό τη μορφή καμπύλης ή τόξου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση στρεφόμενου στερεού σώματος η γωνιακή ταχύτητα αντιστοιχεί στην κοινή γωνιακή ταχύτητα όλων των υλικών σημείων που το αποτελούν. Το διάνυσμά της αντιμετωπίζεται σαν διάνυσμα στο χώρο και εκφράζεται μέσω τριών διανυσματικών ποσοτήτων ( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ).

## 2.2 Μέθοδοι μέτρησης ταχύτητας

Χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας η μέτρηση της ταχύτητας ενός μεγάλου μεγέθους κινούμενου σώματος (πχ αυτοκινήτου ή σκάφους) μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια με τη βοήθεια του συστήματος GPS (Global Positioning System). Πρόκειται για ένα σύστημα που αποτελείται από 24 δορυφόρους που σχηματίζουν ένα «πλέγμα» γύρω από τη Γη, οι οποίοι παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για την θέση, το υψόμετρο, την ταχύτητα και την κατεύθυνση ενός



σημείου. Λειτουργεί με τη λήψη ραδιοσημάτων από τους δορυφόρους και τον υπολογισμό της καθυστέρησης του σήματος που λαμβάνεται από ένα δορυφόρο σε σύγκριση με τους άλλους. Κάθε χρονική στιγμή ο επίγειος δέκτης λαμβάνει σήμα από κάθε δορυφόρο που είναι ορατός σε αυτόν, το οποίο περιέχει ως πληροφορία τη χρονική στιγμή της μετάδοσής του και τη θέση του αντίστοιχου δορυφόρου τότε. Ο δέκτης διαθέτει ρολόι συγχρονισμένο με εκείνα στους δορυφόρους οπότε μπορεί να υπολογιστεί η μεταξύ τους απόσταση. Προσδιορίζοντας στην ίδια χρονική στιγμή την απόσταση του δέκτη από τρεις δορυφόρους με τον τρόπο αυτό, λαμβάνεται η απόλυτη θέση του δέκτη (γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος και υψόμετρο). Αν ο δέκτης βρίσκεται σε κινούμενο σώμα, συγκρίνοντας περιοδικά την απόλυτη θέση του μεταξύ δύο χρονικών στιγμών είναι εφικτός ο προσδιορισμός της ταχύτητας κίνησής του. Βέβαια, σε κλειστό χώρο ή για μικρού μεγέθους κινούμενα σώματα και μικρές αποστάσεις το GPS δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί. Απαιτείται λοιπόν η χρήση διαφορετικών μεθόδων.

Όπως προαναφέρεται, η ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί μέσω της διαφόρισης της μετατόπισης ως προς το χρόνο. Αυτό μπορεί να γίνει τόσο αριθμητικά, όσο και ηλεκτρικά. Όμως είναι γεγονός ότι σε κάθε σήμα υπάρχει θόρυβος που είτε υπεισέρχεται από το περιβάλλον, είτε δημιουργείται από τη μη ιδανική φύση και λειτουργία των χρησιμοποιούμενων υλικών και στοιχείων του κυκλώματος. Δεδομένου του ότι η διαφόριση ενισχύει τον υπάρχοντα θόρυβο είναι εμφανές ότι η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα στη μέτρηση της ταχύτητας. Επομένως επιβάλλεται η χρήση πολύπλοκων ρυθμιστικών συστημάτων και φίλτρων ώστε να ελαχιστοποιηθεί κατά το δυνατόν ο θόρυβος. Επίσης για το λόγο αυτό συχνά προτιμάται η εξαγωγή της ταχύτητας μέσω της ολοκλήρωσης της επιτάχυνσης, καθώς με την ολοκλήρωση μειώνεται ο υψηλής συχνότητας θόρυβος.

Το πρόβλημα με τη μέτρηση της ταχύτητας που την κάνει να διαφέρει από τη μέτρηση άλλων φυσικών μεγεθών είναι ότι δεν υπάρχουν πολλοί





αισθητήρες/μετατροπείς που να μπορούν να πραγματοποιήσουν άμεση μέτρηση για αυτήν. Έτσι συχνά η μέτρησή της πραγματοποιείται έμμεσα με τη βοήθεια της μέτρησης άλλων φυσικών μεγεθών. Σε πολλές περιπτώσεις, ως μέγεθος αναφοράς για τη μέτρηση της ταχύτητας λαμβάνεται η μετατόπιση ενός σώματος ως προς ένα σημείο αναφοράς. Έτσι πολλοί αισθητήρες θέσης ή μετατόπισης αποτελούν μέρη σύνθετων αισθητήρων ταχύτητας ή επιτάχυνσης. Ένα εξίσου μεγάλο μειονέκτημα στη μέτρηση γραμμικής ταχύτητας είναι ότι για μεγάλες αποστάσεις είναι αδύνατον να πραγματοποιηθεί η μέτρησή της βάση ενός σταθερού σημείου αναφοράς. Στην περίπτωση αυτή πραγματοποιείται μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας με τη χρήση κατάλληλων μετατροπών και στη συνέχεια υπολογισμός με τις κατάλληλες διατάξεις της γραμμικής ταχύτητας, διαδικασία απλή λόγω της αναλογικής σχέσης που τις συνδέει.

Οι βασικότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ταχύτητας είναι :

- Ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας σαν λόγος της μετατόπισης με το χρόνο
- Η χρήση μετατροπών ταχύτητας
- Η στροβοσκοπική μέθοδος
- Οι ταχογεννήτριες
- Η μέτρηση με τη χρήση κωδικοποιητών

Στις μεθόδους αυτές γίνεται αναλυτικότερη αναφορά στις παραγράφους που ακολουθούν.

### **2.3 Υπολογισμός της μέσης ταχύτητας σαν λόγο μετατόπισης - χρόνου**

Για την ταχύτητα είδαμε ότι ισχύει  $U = \Delta x / \Delta t$ . Οπότε, μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα  $U$  αν για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα  $\Delta t$  μετρηθεί η απόσταση  $\Delta x$  ή αν αντιστοίχως γνωρίζοντας την απόσταση  $\Delta x$  μετρηθεί ο χρόνος που



απαιτείται για να καλυφθεί η απόσταση αυτή. Η μέτρηση πραγματοποιείται με την ανίχνευση της μετατόπισης του κινούμενου σώματος μέσα σε ένα χρονικό διάστημα. Αυτό μπορεί να γίνει είτε οπτικά είτε με ανιχνευτή αντικειμένου. Στην πρώτη περίπτωση η ανίχνευση γίνεται με τη διακοπή ή την ανάκλαση μιας φωτεινής δέσμης πάνω στο αντικείμενο. Αντίστοιχα, οι ανιχνευτές αντικειμένου στηρίζουν τη λειτουργία τους στο ότι όταν ένα αντικείμενο βρεθεί μέσα στην ενεργό περιοχή τους δημιουργεί μια μεταβολή σε ένα φυσικό μέγεθος - όπως είναι για παράδειγμα η χωρητικότητα ή η αυτεπαγωγή - την οποία και ανιχνεύουν.

## 2.4 Υπολογισμός ταχύτητας με χρήση μετατροπών ταχύτητας

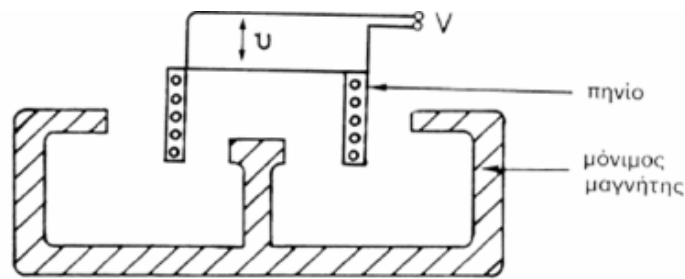
Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται ηλεκτρομηχανικού τύπου μετατροπείς, δηλαδή κινητού πηνίου ή κινητού μαγνήτη. Όπως προαναφέρεται στο πρώτο κεφάλαιο, η λειτουργία τους στηρίζεται στο νόμο επαγωγής του Faraday. Βασίζονται στην επαγωγική τάση που αναπτύσσεται στο πηνίο όταν υπάρχει σχετική κίνηση αυτού ως προς τον πυρήνα που είναι ένας μόνιμος μαγνήτης. Η

τάση αυτή έχει μέτρο που δίνεται από τη σχέση:  $V = B \times \frac{dL}{dt} \times U$ , όπου B είναι

η μαγνητική επαγωγή και  $\frac{dL}{dt}$  το μήκος του πηνίου, ενώ U είναι η σχετική

ταχύτητα μεταξύ πηνίου και μαγνήτη. Δεδομένου του ότι το μήκος του πηνίου και η μαγνητική επαγωγή του είναι σταθερά μεγέθη, διαπιστώνουμε ότι η επαγωγική τάση είναι ανάλογη μόνο της ταχύτητας. Ο μετατροπέας κινητού πηνίου έχει την παρακάτω μορφή.

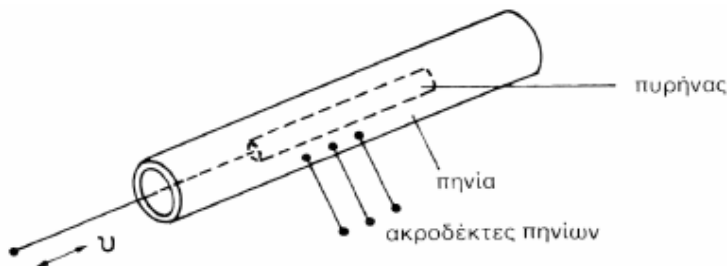




Σχήμα 7 - μετατροπέας ταχύτητας κινητού πηνίου

Χρησιμοποιείται πηνίο από λεπτό σύρμα ώστε να αυξηθεί η ευαισθησία του μετατροπέα, ενώ χάρη στην ύπαρξη μόνιμου μαγνήτη δημιουργείται η μέγιστη δυνατή μαγνητική επαγωγή. Στην περίπτωση αυτή, διατηρώντας ακίνητο το μόνιμο μαγνήτη η μετακίνηση του πηνίου οδηγεί στην εμφάνιση της επαγωγικής τάσης  $V$  στα άκρα του.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση του μετατροπέα ταχύτητας κινητού μαγνήτη η κατασκευή διαφοροποιείται, έτσι ώστε το κινητό μέρος πλέον να είναι ο μαγνήτης και όχι το πηνίο. Η μορφή του μετατροπέα αυτού φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 8 - μετατροπέας ταχύτητας κινητού μαγνήτη

## 2.5 Υπολογισμός ταχύτητας χρησιμοποιώντας τη στροβοσκοπική μέθοδο

Η στροβοσκοπική μέθοδος στηρίζει τη λειτουργία της στο στροβοσκοπικό φαινόμενο, το οποίο παρατηρείται εξαιτίας του τρόπου που συλλαμβάνουμε και αντιλαμβανόμαστε οπτικά την κίνηση ενός σώματος. Το οπτικό νεύρο μεταφέρει στον εγκέφαλο μια σειρά από διαδοχικές εικόνες που ενώνονται μεταξύ τους



δημιουργώντας μέσω της διαφορετικής θέσης του παρατηρούμενου αντικειμένου την εικόνα της κίνησής του. Στην περίπτωση μιας περιοδικής κίνησης αν η συχνότητα της κίνησης είναι ίδια με εκείνη της λήψης των εικόνων από το οπτικό νεύρο, τότε το αντικείμενο που κινείται θα φαίνεται ακίνητο, καθώς δε θα παρατηρείται καμία διαφορά στην κατάστασή του.

Το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιείται σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, όπου χρησιμοποιούνται ειδικά όργανα που λέγονται στροβοσκόπια (stroboscopes ή strobes). Υπάρχουν δύο τύποι στροβοσκοπίων, τα μηχανικά και τα ηλεκτρονικά. Τα μηχανικά αποτελούνται συνήθως από ένα δίσκο στην περιφέρεια του οποίου υπάρχουν σχισμές ίδιου μεγέθους και σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις. Ο δίσκος παρεμβάλλεται στο οπτικό πεδίο του παρατηρητή και περιστρέφεται με τη βοήθεια ενός άξονα. Η παρατήρηση του αντικειμένου γίνεται μέσω των οπών στο δίσκο, ενώ αν δεν υπάρχει ευθυγράμμιση μεταξύ σχισμής, ματιού και κινούμενου αντικειμένου αυτό δεν είναι ορατό. Στα ηλεκτρονικά στροβοσκόπια αντί του δίσκου χρησιμοποιείται μια πηγή φωτός που μπορεί να αναβοσβήνει με μεγάλη συχνότητα. Συνήθως προτιμούνται λάμπες αερίου (gas-discharge lamps) ή LEDs (light emitting diodes), γιατί ανάβουν και σβήνουν σχεδόν στιγμιαία (χωρίς να υπάρχει καθυστέρηση) όταν εφαρμόζεται σε αυτές τάση και όταν σταματάει να εφαρμόζεται αντίστοιχα. Έστω ένα σώμα το οποίο περιστρέφεται ή δονείται με συχνότητα περιστροφής  $f_{\pi}$  και φωτίζεται από ένα ηλεκτρονικό στροβοσκόπιο με λάμπα που αναβοσβήνει με συχνότητα  $f$ . Όταν η πηγή φωτός αποκτήσει συχνότητα εκπομπής ίση ή ακέραιο πολλαπλάσιο της  $f_{\pi}$  ( $f = k f_{\pi}$ , όπου  $k$  ακέραιος αριθμός) τότε το σώμα αυτό θα φαίνεται ακίνητο. Η μέτρηση της ταχύτητας πραγματοποιείται με τη μεταβολή της συχνότητας  $f$  έως ότου κάποιο σημάδι (που ορίζεται για το λόγο αυτό) στο κινούμενο σώμα φανεί ακίνητο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν είναι  $f > f_{\pi}$  δημιουργείται οπτικά η ψευδαίσθηση ότι το σώμα κινείται αντίστροφα, ενώ αν είναι  $f \ll f_{\pi}$  το σώμα φαίνεται να κινείται σε αργή κίνηση (slow motion). Άλλες εφαρμογές που συναντάμε το στροβοσκοπικό φαινόμενο είναι για παράδειγμα οι ακόλουθες:



- στον έλεγχο της κατάστασης περιστρεφόμενου σώματος, όπως είναι ένας κινητήρας, ακόμα και σε λειτουργία σε μεγάλες ταχύτητες (πχ 9000 rpm), καθώς μπορεί με κατάλληλη ρύθμιση της συχνότητας  $f$  να φαίνεται ακίνητος.
- στην ιατρική, στη μέθοδο της στροβοσκόπησης, η οποία εφαρμόζεται για την εξέταση των φωνητικών χορδών, κάνοντας την παλλόμενη κίνησή τους να φαίνεται με μικρότερη ταχύτητα από την πραγματική ώστε να μπορεί να παρατηρηθεί.
- στον έλεγχο της ταχύτητας της περιστροφής ενός σώματος, όπου αρκεί η χρήση ενός ηλεκτρονικού στροβοσκοπίου με πηγή φωτός που αναβοσβήνει με συχνότητα ίση με εκείνη που θέλουμε να έχει κατά την περιστροφή του το σώμα. Αν η ταχύτητα του σώματος είναι η επιθυμητή, τότε αυτό θα φαίνεται ακίνητο.

## 2.6 Υπολογισμός ταχύτητας με ταχογεννήτρια

Οι γεννήτριες, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι μετατροπείς που μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Οι ταχογεννήτριες ακολουθούν παρόμοια λειτουργία. Είναι δηλαδή συσκευές που οδηγούμενες από μια μηχανική δύναμη παράγουν μια τάση ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του άξονά τους. Συνδέονται με το κινούμενο σώμα που η ταχύτητά του απαιτείται να μετρηθεί, είτε με άμεση ζεύξη, είτε με χρήση ιμάντων ή γραναζιών. Διακρίνονται σε εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος.

Οι ταχογεννήτριες συνεχούς ρεύματος παρέχουν τάση εξόδου συνεχούς ρεύματος ανάλογη της ταχύτητας του άξονά τους και επομένως εκείνης του κινούμενου σώματος. Προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια και η ευαισθησία τους αντί του τυλίγματος διέγερσης χρησιμοποιείται ένας μόνιμος μαγνήτης. Επίσης, ενδεχόμενη αλλαγή της φοράς περιστροφής του άξονα οδηγεί σε αλλαγή της πολικότητας της τάσης εξόδου. Τέλος, είναι σημαντικό η ροπή που απαιτείται για



την κίνηση της ταχογεννήτριας να είναι κατά πολύ μικρότερη εκείνης του μετρούμενου άξονα, ώστε να μην τον επιβαρύνει.

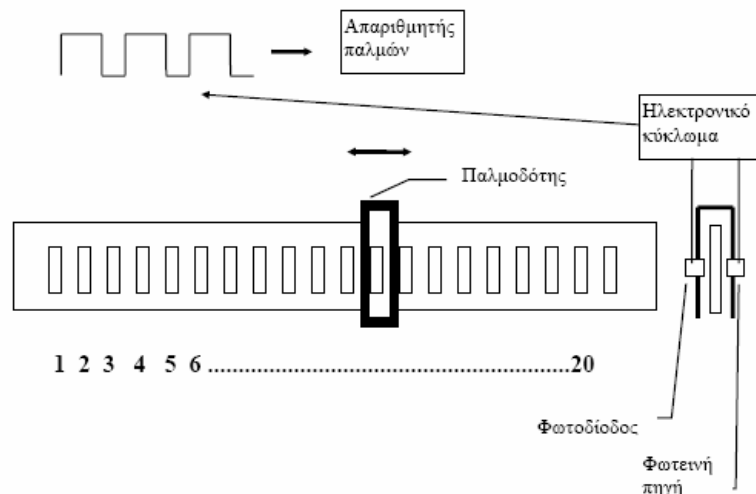
Οι ταχογεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι συνήθως κινητήρες κλωβού δύο τυλιγμάτων. Όταν το ένα τύλιγμα τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα εμφανίζεται στο άλλο τύλιγμα μια επαγωγική εναλλασσόμενη τάση λόγω της περιστροφής. Το πλάτος της είναι και σε αυτή την περίπτωση ανάλογο της ταχύτητας περιστροφής. Η συχνότητα ισούται με εκείνη της τάσης τροφοδοσίας, ενώ ανάλογα με τη φορά περιστροφής η φάση είναι  $0^\circ$  ή  $180^\circ$  σε σχέση με τη φάση της τάσης τροφοδοσίας.

## 2.7 Υπολογισμός ταχύτητας με χρήση κωδικοποιητών

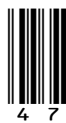
Για τον υπολογισμό της γραμμικής ταχύτητας με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται κυρίως οπτικοί γραμμικοί κωδικοποιητές θέσης. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι τέτοιων κωδικοποιητών, οι κωδικοποιητές αυξητικού τύπου και απόλυτου τύπου. Οι πρώτοι αποτελούνται από μία πηγή φωτός, μια μακρόστενη μεταλλική πλάκα και ένα αισθητήριο που χρησιμοποιείται σαν δέκτης και είναι συνήθως μια φωτοδίοδος ή ένα φωτοτρανζίστορ. Η μεταλλική πλάκα έχει κατά μήκος οπές ίσες σε μέγεθος και σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις. Κατά μήκος της πλάκας ολισθαίνει ο παλμοδότης, ενώ αυτή παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής φωτός και του αισθητηρίου. Το φωτοευαίσθητο υλικό συνδέεται κατάλληλα με κύκλωμα στην έξοδο του οποίου ελέγχεται η τάση. Έτσι όταν η πηγή φωτός εκπέμπει μια λεπτή δέσμη φωτός, αν ο παλμοδότης βρίσκεται μπροστά από οπή το αισθητήριο θα άγει δίνοντας υψηλή τάση εξόδου, ενώ αν βρίσκεται σε συμπαγές σημείο της πλάκας η τάση εξόδου θα είναι χαμηλή. Επομένως με την κίνηση του παλμοδότη κατά μήκος της πλάκας, στην έξοδο θα δίνεται μια τάση με τη μορφή παλμών. Αφού κάθε παλμός αντιστοιχεί σε πέρασμα του παλμοδότη από μία οπή, τότε το σύνολο των παλμών στην έξοδο αντιστοιχεί στον αριθμό των οπών που κινήθηκε αυτός. Δεδομένου του ότι η μεταξύ των οπών απόσταση



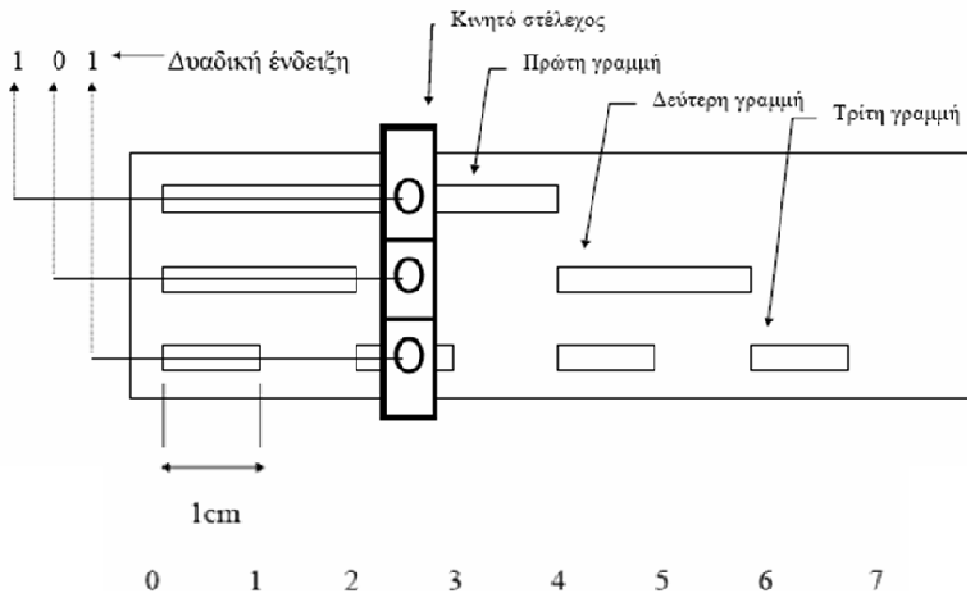
είναι γνωστή, η συνολική απόσταση που διανύθηκε ισούται με το γινόμενο του αριθμού των παλμών με το μέτρο της απόστασης μεταξύ των οπών. Η διακριτική ικανότητα της διάταξης ισούται με την μεταξύ δύο οπών απόσταση και έχει καλύτερη τιμή όσο μικρότερη είναι αυτή. Για να είναι εφικτός ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης της κίνησης χρησιμοποιείται και ένα δεύτερο σύστημα πηγής φωτός-αισθητήριου το οποίο είναι μετατοπισμένο σε σχέση με το πρώτο κατά  $1/4$  της απόστασης των οπών. Έτσι έχουμε και μια δεύτερη παλμοσειρά στην έξοδο με διαφορά φάσης  $90^\circ$  από την πρώτη, η οποία είτε προηγείται είτε ακολουθεί την πρώτη, ανάλογα με την κατεύθυνση της κίνησης του παλμοδότη. Η πληροφορία της κατεύθυνσης τροφοδοτείται στον απαριθμητή παλμών και αξιοποιείται για τη μέτρηση της μετατόπισης με αφαίρεση παλμών από τη μέτρηση στην περίπτωση που αλλάζει η φορά της κίνησης. Η μέτρηση της ταχύτητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους. Είτε μετρώντας τη μετατόπιση σε ορισμένο χρονικό διάστημα, είτε μετρώντας την περίοδο μιας εκ των δύο παλμοσειρών, αφού είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μορφή ενός τέτοιου κωδικοποιητή.



**Σχήμα 9** - γραμμικός κωδικοποιητής θέσης αυξητικού τύπου



Η διάταξη για τον γραμμικό κωδικοποιητή απόλυτου τύπου ενώ έχει παρόμοια λειτουργία παρουσιάζει κάποιες μεγάλες διαφορές. Η πρώτη έχει να κάνει με το σχεδιασμό της πλάκας, η οποία χαράζεται με πιο πολύπλοκο τρόπο. Η μορφή της φαίνεται στο σχήμα 10. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές οριζόντιες γραμμές εγκοπών κάθετα στις οποίες κινείται ένα κινητό στέλεχος με τρεις οπές (οφθαλμούς). Σε κάθε θέση η δέσμη φωτός που εκπέμπεται δημιουργεί ένα παλμό που εκφράζεται σαν τριψήφιος δυαδικός αριθμός δίνοντας για κάθε γραμμή ένδειξη 1 ή 0 ανάλογα με το αν το κινητό στέλεχος βρίσκεται σε οπή ή όχι της γραμμής αυτής. Έτσι, η κάθε θέση αντιστοιχίζεται με ένα διαφορετικό



**Σχήμα 10** - γραμμικός κωδικοποιητής θέσης απόλυτου τύπου

δυαδικό αριθμό, ο οποίος εκφράζει και τη μετατόπιση του κινητού στελέχους από την αρχή της πλάκας. Ο αριθμός αυτός διαβάζεται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η μέτρηση της ταχύτητας πραγματοποιείται μέσω της τιμής της μετατόπισης σε ορισμένο χρονικό διάστημα.

Στον κωδικοποιητή του σχήματος 10 στη θέση του κινητού στελέχους αντιστοιχεί ο δυαδικός αριθμός "1 0 1". Για τη βελτίωση της διακριτικής





ικανότητας του αισθητηρίου απαιτείται η εισαγωγή και άλλης/άλλων γραμμής εγκοπών. Γενικά ισχύει ότι διακριτική του ικανότητα είναι ίση με το λόγο του μήκους μέτρησης προς  $2^v$ , όπου  $v$  ο αριθμός των οφθαλμών που χρησιμοποιούνται. Επομένως ο αισθητήρας αυτός χρησιμοποιείται μόνο για μικρές αποστάσεις, αφού για την επίτευξη μέτρησης με μεγάλη διακριτική ικανότητα σε μεγάλη απόσταση απαιτείται η χρήση πολλών οφθαλμών, κάνοντας το όργανο πολύπλοκο και μεγαλώνοντας το κόστος και τις διαστάσεις του. Αυτός είναι και ο λόγος που προτιμούνται οι κωδικοποιητές αυξητικού τύπου.

## 2.8 Μέτρηση ταχύτητας απομακρυσμένου κινούμενου σώματος

Σε κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους μέτρησης μετράται η ταχύτητα του κινούμενου σώματος ενώ αυτό βρίσκεται σε μικρή απόσταση ως προς το σύστημα μέτρησης που χρησιμοποιείται. Για τη μέτρηση της ταχύτητας ενός κινούμενου σώματος που είναι απομακρυσμένο από το σύστημα μέτρησης, η συχνότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος στηρίζεται στο φαινόμενο Doppler. Το φαινόμενο αυτό (Doppler effect ή Doppler shift) αναφέρεται στη μεταβολή της συχνότητας ενός κύματος που πραγματοποιείται κατά την ανάκλαση αυτού σε ένα σώμα, όταν η πηγή των κυμάτων και το σώμα αυτό βρίσκονται σε κίνηση μεταξύ τους. Ισχύει γενικά για όλα τα είδη κυμάτων (ήχου, φωτός, μικροκύματα κτλ). Όταν η πηγή των κυμάτων κινείται προς το σώμα αναφοράς, τότε κάθε διαδοχικό κύμα θα εκπέμπεται από μια θέση που βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση από αυτό σε σχέση με το προηγούμενο κύμα. Επομένως κάθε κύμα θα χρειάζεται λιγότερο χρόνο για να φτάσει στο σώμα αναφοράς συγκριτικά με το αμέσως προηγούμενο. Άρα η συχνότητα των κυμάτων αυξάνει. Αντιθέτως, όταν η πηγή των κυμάτων απομακρύνεται από το σώμα αναφοράς, κάθε διαδοχικό κύμα θα εκπέμπεται από μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με το προηγούμενο και θα χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να φτάσει σε αυτό. Άρα η συχνότητα των κυμάτων θα μειώνεται. Η σχετική ταχύτητα μεταξύ σώματος αναφοράς και



πηγής εξαρτάται από το μέσο διάδοσης του κύματος. Το φαινόμενο Doppler μπορεί να προκύψει είτε από την κίνηση του σώματος αναφοράς, είτε από την κίνηση της πηγής του κύματος, είτε ακόμα από ταυτόχρονη κίνηση και των δύο τους ως προς το μέσο διάδοσης του κύματος.

Για τη μέτρηση της ταχύτητας ενός κινούμενου σώματος με τη μέθοδο αυτή εκπέμπεται από ένα ραντάρ ένα ραδιοσήμα μικρού μήκους κύματος  $\lambda$  και συχνότητας  $f$ . Το σήμα αυτό ανακλάται πάνω στο κινούμενο σώμα και επιστρέφει

με νέα συχνότητα  $f'$ . Ισχύει τότε ότι :

$$f' = \frac{U + U\sigma}{\lambda}$$

όπου  $U$  η ταχύτητα διάδοσης του κύματος και  $U\sigma$  η ταχύτητα του κινούμενου σώματος, η οποία θα έχει θετικό πρόσημο αν το σώμα κινείται προς την πηγή

$$f = \frac{U}{\lambda}$$

(ραντάρ) και αρνητικό αν απομακρύνεται από αυτή. Όμως είναι , άρα από τη διαφορά των δύο συχνοτήτων έχουμε ότι

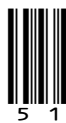
$$\Delta f = f' - f = \frac{U + U\sigma}{\lambda} - \frac{U}{\lambda} = \frac{U\sigma}{\lambda} \quad \text{ή} \quad U\sigma = \lambda \times \Delta f$$

που σημαίνει ότι η ταχύτητα του κινούμενου σώματος είναι ανάλογη του μήκους κύματος και της διαφοράς μεταξύ της συχνότητας του ανακλώμενου και του εκπεμπόμενου σήματος. Όμως το μήκος κύματος είναι γνωστή ποσότητα, οπότε μετρώντας τη διαφορά  $\Delta f$  μπορεί να υπολογιστεί η ζητούμενη ταχύτητα. Η κατεύθυνση της κίνησης (οπότε και η φορά του διανύσματος της ταχύτητας)



μπορεί να προσδιοριστεί επίσης μέσω της συχνότητας, καθώς αυτή έχει μεγαλύτερη τιμή στο σήμα που λαμβάνεται από εκείνο που εκπέμπεται αν το σώμα πλησιάζει το ραντάρ και μικρότερη αντιστοίχως όταν αυτό απομακρύνεται. Προφανώς όταν το σώμα πάψει να κινείται ( $U_{\sigma} = 0$ ) ισχύει ότι  $f' = f$ .

Η μέθοδος αυτή είναι πολύ αποτελεσματική και παρέχει ακριβείς μετρήσεις. Χρησιμοποιείται για παράδειγμα στον έλεγχο της ταχύτητας οχημάτων (όπως συμβαίνει με τα ραντάρ που χρησιμοποιεί η τροχαία), στα αεροδρόμια για τον έλεγχο της ταχύτητας των αεροπλάνων ή ακόμα και στη μέτρηση της ταχύτητας μιας μπάλας σε ένα άθλημα (πχ τένις).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### Μέθοδοι μέτρησης γωνιακής ταχύτητας

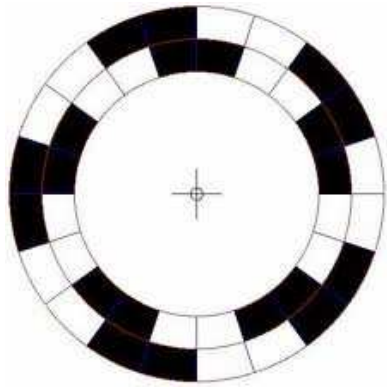
Σε γενικές γραμμές ισχύει ότι για κάθε αισθητήριο γραμμικής θέσης ή ταχύτητας υπάρχει το αντίστοιχο για τη γωνιακή θέση ή ταχύτητα. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται πώς με μεθόδους αντίστοιχες εκείνων που αναφέρονται στο προηγούμενο κεφάλαιο μπορεί να μετρηθεί η γωνιακή ταχύτητα. Επίσης εξετάζονται και άλλες μέθοδοι μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας με τη βοήθεια αισθητήρων ή μετατροπών.

#### 3.1 Μέτρηση γωνιακής ταχύτητας με χρήση κωδικοποιητών

Για τη μέτρηση γωνιακής ταχύτητας με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται κυρίως οπτικοί κωδικοποιητές γωνιακής θέσης (rotary shaft encoders) σαν τμήματα πιο σύνθετων αισθητήρων. Όπως συμβαίνει και με τους αντίστοιχους γραμμικούς, διακρίνονται και αυτοί σε απόλυτου και αυξητικού τύπου.

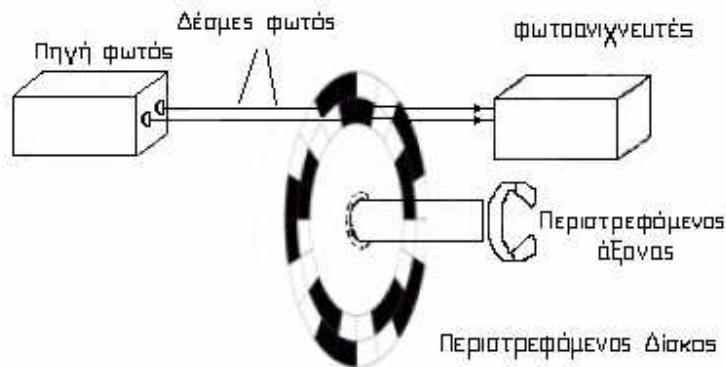
Οι κωδικοποιητές αυξητικού τύπου χρησιμοποιούν ένα γυάλινο δίσκο ο οποίος χωρίζεται με ομόκεντρους κύκλους που ονομάζονται ίχνη (tracks). Κάθε ίχνος αποτελείται από ίσο αριθμό διαδοχικών διαφανών και αδιαφανών τομέων, που προκύπτουν με κατάλληλη απόθεση μεταλλικού φιλμ. Η εικόνα ενός τέτοιου δίσκου με δύο ίχνη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Ο δίσκος προσαρμόζεται στον άξονα του οποίου θέλουμε να μετρηθεί η γωνιακή ταχύτητα και ακολουθεί την περιστροφή του. Όπως και στην αντίστοιχη περίπτωση του γραμμικού, ο δίσκος ευθυγραμμίζεται με μία πηγή φωτός που αποτελείται από δύο διόδους φωτοεκπομπής, καθώς και με δύο ανιχνευτές φωτός που συνήθως είναι



**Σχήμα 11-** δίσκος με δύο ίχνη

φωτοδίοδοι ή φωτοτρανζίστορες. Και σε αυτή την περίπτωση το δεύτερο σύστημα πηγής φωτός-αισθητηρίου είναι μετατοπισμένο κατά  $1/4$  της απόστασης μεταξύ των οπών σε σχέση με το πρώτο. Συνήθως χρησιμοποιείται και ένα επιπλέον ίχνος με έναν μόνο αδιαφανή τομέα για λόγους αρχικοποίησης του μετρητή. Η διάταξη έχει την παρακάτω μορφή:



**Σχήμα 12 -** κωδικοποιητής γωνιακής θέσης αυξητικού τύπου

Κατά την περιστροφή του άξονα, την οποία ακολουθεί ο δίσκος, οι δέσμες του φωτός διακόπτονται από τις αδιαφανείς περιοχές, οπότε στην έξοδο των φωτοανιχνευτών παράγονται και πάλι παλμοί όπως συνέβαινε και στην περίπτωση του αντίστοιχου γραμμικού κωδικοποιητή. Δεδομένου του ότι κατά τη μετάβαση του κωδικοποιητή από αδιαφανή σε διαφανή τομέα παράγεται ένας παλμός. Η διαδοχή των περιοχών αντίθεσης στα ίχνη είναι σχεδιασμένη ώστε να

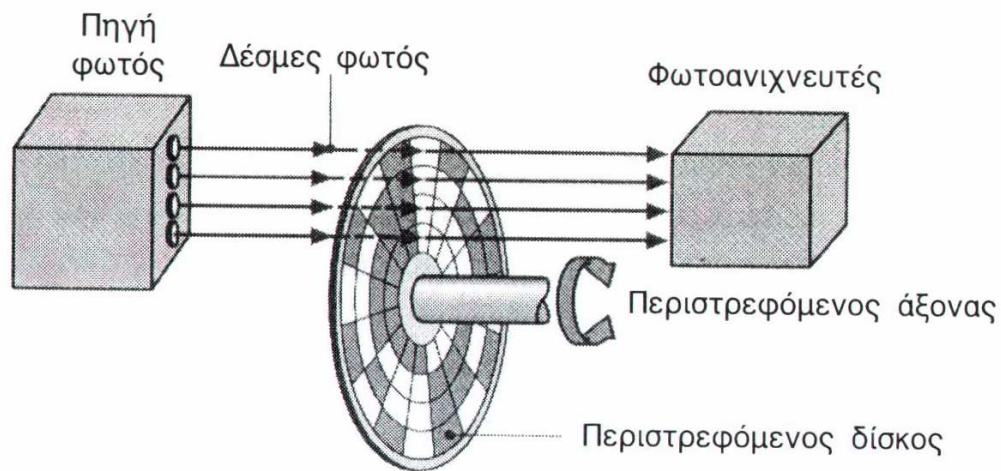


παρουσιάζει διαφορά  $90^\circ$ , χάρη στην οποία προσδιορίζεται η φορά περιστροφής. Ο αριθμός των παραγόμενων παλμών είναι ανάλογος της γωνιακής μετατόπισης και μπορεί να υπολογιστεί από το ίδιο γινόμενο (όπως συμβαίνει με τους αντίστοιχους γραμμικούς κωδικοποιητές), αφού η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών οπών είναι γνωστή. Η διακριτική ικανότητα του δίσκου εξαρτάται από τον αριθμό των οπών σε ένα ίχνος και μπορεί να μετρηθεί από το λόγο  $2\pi/n$ , όπου  $n$  ο αριθμός των οπών. Η γωνιακή ταχύτητα μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια ενός επιπλέον κυκλώματος με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- Μετρώντας ψηφιακά τη συχνότητα των παλμών που παράγονται, μέθοδος που προτιμάται για υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Η στιγμιαία γωνιακή ταχύτητα μπορεί τότε να υπολογιστεί, καθώς είναι ανάλογη της στιγμιαίας συχνότητας.
- Μετρώντας ψηφιακά την περίοδο των παραγόμενων παλμών, μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαμηλές ταχύτητες περιστροφής. Η περίοδος είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας και κατά συνέπεια και της γωνιακής ταχύτητας.

Οι κωδικοποιητές γωνιακής θέσης απόλυτου τύπου διαφέρουν από τους αυξητικού τύπου, καθώς παράγουν σήμα στην έξοδο σε κωδικοποιημένη μορφή. Όπως και οι αυξητικού τύπου, χρησιμοποιούν ένα γυάλινο δίσκο που φέρει ομόκεντρους κύκλους (ίχνη) και προσαρμόζεται στον άξονα του οποίου η γωνιακή ταχύτητα μετρίεται, ακολουθώντας την περιστροφή του. Διαφέρουν στο ότι ενώ τα ίχνη φέρουν και πάλι διαδοχικούς διαφανείς και αδιαφανείς τομείς, η μορφή τους είναι πολύ πιο πολύπλοκη. Σε κάθε ίχνος εκπέμπεται μια δέσμη φωτός ευθυγραμμισμένη με ένα φωτοτρανζίστορ ή μία φωτοδίοδο στην άλλη πλευρά του δίσκου. Η διάταξη έχει τη μορφή του παρακάτω σχήματος:





**Σχήμα 13** - κωδικοποιητής γωνιακής θέσης απόλυτου τύπου

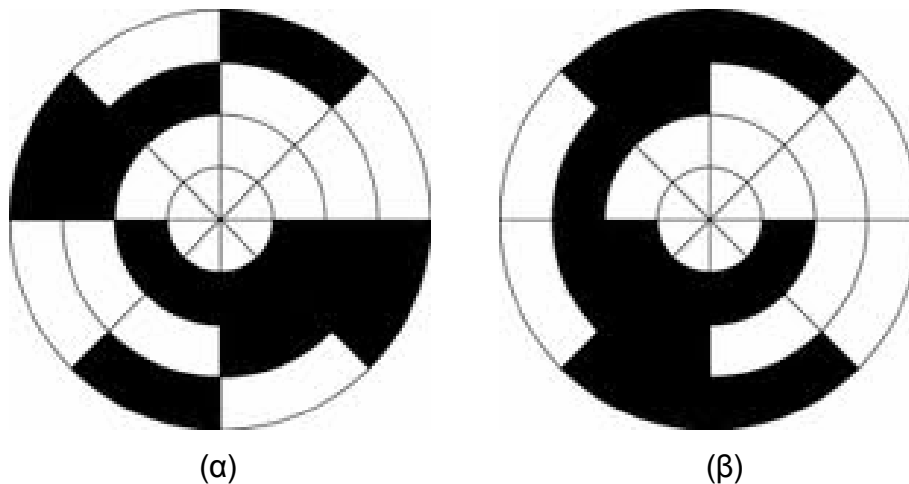
Σε αντιστοιχία με τους γραμμικούς κωδικοποιητές του ίδιου τύπου, οι εναλλαγές των διαφανών και αδιαφανών τομέων στα ίχνη σχεδιάζονται ώστε κάθε θέση να κωδικοποιείται από ένα μοναδικό δυαδικό αριθμό. Έτσι το σήμα εξόδου σε κάθε θέση αντιστοιχεί στη γωνιακή μετατόπιση του περιστρεφόμενου άξονα. Για κάθε θέση οι δέσμες φωτός που δε διακόπτονται από τους αδιαφανείς τομείς του δίσκου άγουν τους φωτοανιχνευτές δίνοντας για το σχηματισμό του ψηφιακού αριθμού την τιμή "1", ενώ όπου η δέσμη διακόπτεται δίνουν την τιμή "0". Είναι λοιπόν προφανές ότι ο αριθμός των ίχνων είναι ίσος με τον αριθμό των ψηφίων του παραγόμενου δυαδικού αριθμού της κωδικοποίησης, οπότε και καθορίζει την ανάλυση του κωδικοποιητή. Δηλαδή αύξηση του αριθμού των ομόκεντρων κύκλων κατά ένα, ουσιαστικά θα διπλασιάζει την ανάλυση του κωδικοποιητή. Ο συνδυασμός σε κάθε θέση διαφανών και αδιαφανών περιοχών, ανάλογα με το πλήθος των ίχνων ( $n$ ) μπορεί να κωδικοποιήσει μέχρι  $2^n$  διαφορετικές γωνιακές θέσεις. Η γωνιακή ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση ενός κυκλώματος που σε ορισμένο χρονικό διάστημα θα μετράει τη γωνιακή μετατόπιση του άξονα μεταξύ των δύο θέσεων αναφοράς. Δηλαδή για το χρονικό διάστημα  $\Delta t = t_2 - t_1$  θα συγκρίνει τη γωνιακή μετατόπιση μεταξύ της θέσης του

άξονα τη χρονική στιγμή  $t_2$  (ένδειξη εξόδου για  $t=t_2$ ) και της αντίστοιχης τη χρονική στιγμή  $t_1$ .

Χρησιμοποιώντας για την κωδικοποίηση και αρίθμηση των θέσεων τις διαφανείς και αδιαφανείς περιοχές ώστε να σχηματίζουν διαδοχικούς δυαδικούς αριθμούς μπορεί να δημιουργηθεί ένα σημαντικό πρόβλημα. Κατά την αλλαγή της θέσης του άξονα, στο δυαδικό αριθμό μπορεί να αλλάζουν ταυτόχρονα πολλά ψηφία. Έτσι υπάρχει ο κίνδυνος σε περίπτωση που κάποιο από αυτά λόγω σφάλματος λάβει λανθασμένη τιμή να έχουμε στη έξοδο μια τιμή για τη γωνιακή μετατόπιση που θα απέχει πάρα πολύ από την πραγματική, δημιουργώντας σοβαρό σφάλμα στη μέτρηση. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιείται κωδικοποίηση των θέσεων σύμφωνα με τον κώδικα Gray. Σύμφωνα με αυτόν, κατά τη μετάβαση μεταξύ δύο διαδοχικών θέσεων του άξονα αλλάζει μονάχα ένας τομέας (διαφανής ή αδιαφανής), οπότε και στον δυαδικό αριθμό θα αλλάζει κατάσταση ένα και μόνο ένα ψηφίο. Οι διαφορές στη μορφή του δίσκου για ένα κωδικοποιητή με τρία ίχνη κλασικής ψηφιακής κωδικοποίησης και του αντίστοιχου με κωδικοποίηση Gray φαίνονται παρακάτω (σχήμα 14). Όσο περισσότερες γωνιακές θέσεις χρειάζεται να κωδικοποιηθούν, τόσο αυξάνει και ο αριθμός των ιχνών αυξάνοντας παράλληλα και την πολυπλοκότητα και το κόστος του αισθητήρα. Ενδεικτικά, δίνεται στο σχήμα 15 η μορφή του δίσκου για ένα οπτικό κωδικοποιητή γωνιακής θέσης των 10- bits.







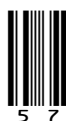
**Σχήμα 14** - κωδικοποιητής 3-bit κλασικής ψηφιακής κωδικοποίησης (α) και με κωδικοποίηση Gray (β)



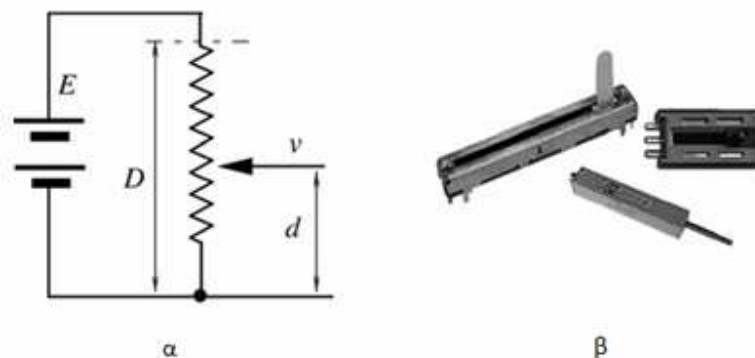
**Σχήμα 15** - απόλυτος οπτικός κωδικοποιητής γωνιακής θέσης των 10- bits

Λόγω της πιο απλής μορφής της κατασκευής του, ο κωδικοποιητής αυξητικού τύπου έχει περισσότερες εφαρμογές. Οι οπτικοί κωδικοποιητές χρησιμοποιούνται κυρίως σε μηχανές που ελέγχονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή και σε πολλές εφαρμογές στη ρομποτική.

### 3.2 Μέτρηση γωνιακής ταχύτητας με χρήση ποτενσιόμετρου



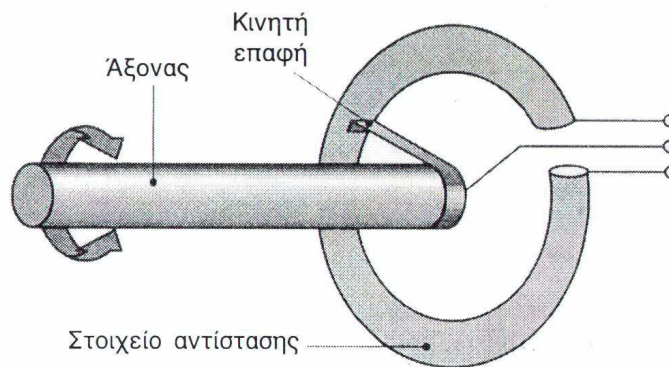
Το ποτενσιόμετρο είναι ένας από τους απλούστερους αισθητήρες μετακίνησης λόγω του τρόπου λειτουργίας και της κατασκευής του. Αποτελείται από μια αντίσταση κατά μήκος της οποίας μπορεί να ολισθαίνει μια επαφή. Επειδή η αντίσταση είναι ανάλογη του μήκους του σύρματος, αν χρησιμοποιηθεί ένα σώμα έτσι ώστε με την κίνησή του να μεταβάλλει τη θέση της κινούμενης επαφής ενώ το ποτενσιόμετρο τροφοδοτείται από συνεχή τάση, τότε η τάση εξόδου που προκύπτει θα είναι ανάλογη της απόστασης που διένυσε η επαφή, αφού η τάση εξόδου είναι ανάλογη της αντίστασης στα άκρα της οποίας μετράται. (Όπως φαίνεται και στο πρώτο κεφάλαιο, παράγραφος 1.4.6). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπολογιστεί η γραμμική μετατόπιση. Το γεγονός ότι απαιτείται για τη λειτουργία του να τροφοδοτηθεί από ηλεκτρική ενέργεια κατατάσσει το ποτενσιόμετρο στους ενεργούς μετατροπείς.



**Σχήμα 16** - παραδείγματα γραμμικών ποτενσιόμετρων

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζονται το διάγραμμα ενός γραμμικού ποτενσιόμετρου (α), καθώς και δείγματα της μορφής του (β). Αντίστοιχα, για τη μέτρηση της γωνιακής μετατόπισης χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι περιστροφικών ποτενσιόμετρων. Με τη βοήθειά τους όμως μπορεί να μετρηθεί έμμεσα και η γωνιακή ταχύτητα. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην ίδια αρχή με τα αντίστοιχα γραμμικά, ενώ για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται τα ίδια υλικά. Η κύρια

διαφορά είναι ότι το στοιχείο αντίστασης έχει σε αυτά τη μορφή τόξου, επάνω στο οποίο μπορεί να ολισθαίνει η κινητή επαφή. Η επαφή συνδέεται στον άξονα εισόδου και κινείται ανάλογα με την κίνηση του σώματος του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε τη γωνιακή ταχύτητα. Η μορφή ενός τέτοιου ποτενσιόμετρου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

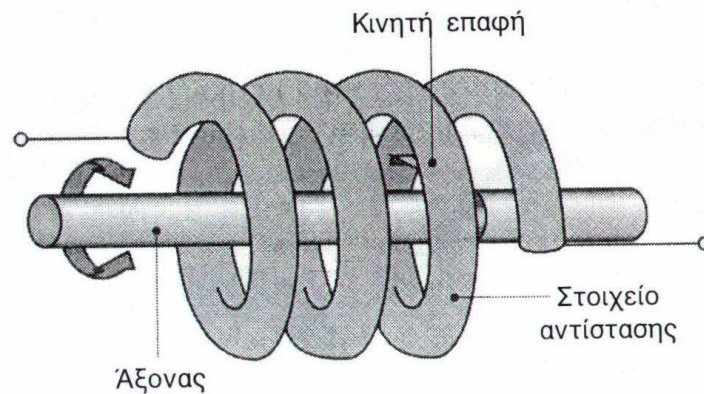


**Σχήμα 17** - περιστροφικό ποτενσιόμετρο μίας στροφής

Η τάση εξόδου είναι ανάλογη της αντίστασης. Η αντίσταση όμως στα άκρα της οποίας μετράται η τάση εξόδου είναι ανάλογη της γωνιακής μετατόπισης του άξονα, επομένως και η τάση εξόδου θα είναι ανάλογη της γωνιακής μετατόπισης του άξονα. Συνήθως για τη μέτρηση της τάσης αυτής χρησιμοποιείται στην έξοδο ένα βολτόμετρο που έχει βαθμονομηθεί σε μονάδες γωνιακής μετατόπισης και όχι τάσης. Είναι προφανές ότι με τη διάταξη αυτή δεν μπορούν να μετρηθούν γωνιακές μετατοπίσεις μεγαλύτερες από μια πλήρη περιστροφή ( $360^\circ$ ). Έτσι για μεγαλύτερες μετατοπίσεις χρησιμοποιούνται ποτενσιόμετρα πολλών στροφών που ονομάζονται σπειροειδή ή ελικοειδή. Το στοιχείο αντίστασης έχει στην περίπτωση αυτή τη μορφή σπείρας. Η κινητή επαφή συνδέεται και πάλι στον άξονα εισόδου και με τη βοήθεια ενός μηχανικού συστήματος ολισθαίνει πάνω στην έλικα ακολουθώντας την περιστροφή του. Η τάση εξόδου είναι ανάλογη της γωνιακής μετατόπισης και δίνεται σε αναλογική μορφή, ενώ μετριέται και πάλι με

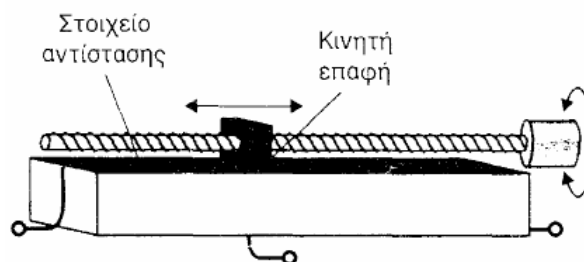


κατάλληλα βαθμονομημένο βολτόμετρο. Γενικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι πρόκειται για ένα ενεργό αισθητήρα επαφής, αναλογικής εξόδου. Η μορφή του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα ποτενσιόμετρα αυτού του τύπου μπορούν να μετρούν γωνιακές μετατοπίσεις μέχρι και 60 στροφών.



**Σχήμα 18** - σπειροειδές/ελικοειδές ποτενσιόμετρο

Για τη μέτρηση ακόμα μεγαλύτερων γωνιακών μετατοπίσεων χρησιμοποιείται τύπος ποτενσιόμετρου πολλαπλών στροφών. Διαφέρει στο ότι αντί για σπείρες διαθέτει ένα στοιχείο αντίστασης με τη μορφή ράβδου. Η κινητή επαφή συνδέεται με ένα κοχλιοειδή άξονα και κατά την κίνησή του ολισθαίνει πάνω στο στοιχείο αντίστασης. Η τάση εξόδου στα άκρα της αντίστασης που προκύπτει κάθε φορά είναι όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις ανάλογη της γωνιακής μετατόπισης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μορφή αυτού του τύπου ποτενσιόμετρου.



**Σχήμα 19** - ποτενσιόμετρο πολλαπλών στροφών



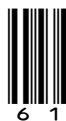
Σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις θεωρούμε ότι δεν υπάρχει επιπλέον φορτίο κατά τη μέτρηση της τάσης στην έξοδο, καθώς και ότι η τάση εισόδου διατηρείται σταθερή. Διαφορετικά η τάση εξόδου δε θα είχε την ίδια γραμμική σχέση αναλογίας με την αντίσταση που ορίζει η θέση της κινητής επαφής.

Η γωνιακή ταχύτητα μπορεί και πάλι να μετρηθεί έμμεσα, χάρη στην αναλογία της τάσης εξόδου με τη γωνιακή μετατόπιση, μετρώντας για δύο δεδομένες χρονικές στιγμές τη διαφορά των τάσεων που στην ουσία αποτελεί και το πόσο έχει περιστραφεί ο άξονας εισόδου. Είναι προφανές ότι εξαιτίας του τρόπου κατασκευής τους οι μετατροπείς αυτού του τύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τη μέτρηση χαμηλών ταχυτήτων.

Όπως προαναφέρεται στο πρώτο κεφάλαιο (παράγραφος 1.4.6), οι μετατροπείς τύπου ποτενσιόμετρου πλεονεκτούν λόγω απλής κατασκευής, χαμηλού κόστους και δυνατότητας χρήσης τόσο σε συνεχές όσο και σε εναλλασσόμενο ρεύμα, παρουσιάζουν όμως κάποια αρκετά σοβαρά μειονεκτήματα. Είναι ευαίσθητοι στη σκόνη, την υγρασία και τους κραδασμούς, επιρρεάζονται από τη θερμοκρασία, έχουν μικρό εύρος ζώνης συχνοτήτων και φθείρονται εξαιτίας των τριβών παρουσιάζοντας θόρυβο με την πάροδο του χρόνου. Η ακρίβειά τους εξαρτάται από την ποιότητα και τις διαστάσεις του χρησιμοποιούμενου σύρματος.

### **3.3 Μέτρηση γωνιακής ταχύτητας με χρήση ταχύμετρου**

Ο όρος ταχύμετρο χαρακτηρίζει κάθε συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση γωνιακής ταχύτητας κατά την περιστροφή κάποιου άξονα. Περιλαμβάνει αρκετούς διαφορετικούς τύπους μετατροπέων με κυριότερο εκείνον της ταχογεννήτριας, ο οποίος συναντάται πιο συχνά σε εφαρμογές. Γενικά για τις ταχογεννήτριες έχει γίνει ήδη αναφορά στο προηγούμενο κεφάλαιο (παράγραφος 2.6), αλλά εδώ θα δούμε μια πιο αναλυτική προσέγγιση. Στις παραγράφους που

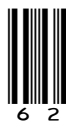


ακολουθούν εξετάζονται οι σημαντικότεροι τύποι ταχύμετρων, καθώς και η χρήση τους στη μέτρηση γωνιακής ταχύτητας. Λειτουργούν είτε ως μετατροπείς επαφής είτε ως μη επαφής, με τους τελευταίους να πλεονεκτούν καθώς χρειάζονται λιγότερη συντήρηση, δεν επιρρεάζονται από τριβές και είναι ακριβείς στις μετρήσεις τους ακόμα και σε πολύ υψηλές ταχύτητες.

### 3.3.1 Ταχογεννήτριες

Όπως προαναφέρεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι ταχογεννήτριες ανάλογα με τη λειτουργία τους χωρίζονται σε συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος. Συνδέονται με άμεση ζεύξη, ιμάντες ή με τη βοήθεια γραναζιών με τον περιστρεφόμενο άξονα που η ταχύτητά του απαιτείται να μετρηθεί και παράγουν μία τάση στην έξοδο ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του. Είναι σημαντικό να έχουν όσο γίνεται ελαφρότερη κατασκευή ώστε να μην επιρρεάζουν την ταχύτητα του συστήματος που μετράνε. Υπάρχουν δε ακόμα και φορητού τύπου ταχογεννήτριες, οι οποίες λαμβάνουν μέτρηση για την ταχύτητα με τον άξονά τους να εφάπτεται στον άξονα που μας ενδιαφέρει για χρονικό διάστημα αρκετό ώστε να πραγματοποιηθεί η μέτρηση.

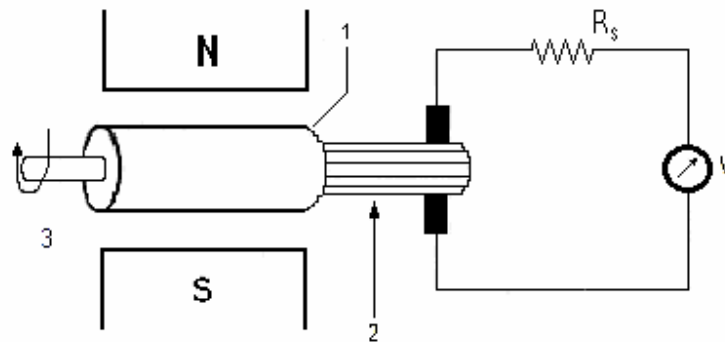
Οι ταχογεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι ειδικά σχεδιασμένες γεννήτριες ώστε να παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια στην τάση εξόδου. Όπως είναι γνωστό, οι γεννήτριες ανάλογα με τον τρόπο που δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο στο στάτορα διακρίνονται σε μόνιμου μαγνήτη, ανεξάρτητης διέγερσης και αυτοδιεγχειρόμενες, με τις τελευταίες να διαχωρίζονται σε γεννήτριες παράλληλης διέγερσης, διέγερσης σειράς και σύνθετης διέγερσης. Οι ταχογεννήτριες ακριβείας χρησιμοποιούν μόνιμο μαγνήτη αντί του τυλίγματος διέγερσης στο στάτορα, ενώ ο ρότορας έχει κανονικό τύλιγμα μέσα από το οποίο πραγματο-



ποιείται ο έλεγχος. Ο μικρός όγκος επιτυγχάνεται με τη χρήση μόνιμου μαγνήτη κατασκευασμένου από ειδικό κράμα. Αυτό συνήθως αποτελείται από :

- οξειδίο του σιδήρου και καρβίδιο του βαρίου (Ba) ή του στροντίου (Sr)
- Σαμάριο (Sm) και Κοβάλτιο (Co), το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες ή όπου υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης, καθώς το κόστος του είναι μεγάλο
- Σίδηρο (Fe), Βόριο (B) και Νεοδύμιο (Nd), με τους μαγνήτες αυτούς (NdFeB) να παρουσιάζουν εξαιρετικές μαγνητικές ιδιότητες, να έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής, αλλά να είναι επιρρεπείς στη διάβρωση.

Η μορφή της εξόδου της διάταξης φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 20 - μορφή κυκλώματος με ταχογεννήτρια συνεχούς ρεύματος

Ο ρότορας (1) βρίσκεται σε ζεύξη με τον άξονα του οποίου πρέπει να μετρηθεί η ταχύτητα περιστροφής (θέση 3 του σχήματος), ενώ βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο μόνιμος μαγνήτης. Όταν ο άξονας αυτός περιστρέφεται, τότε εξαιτίας της ζεύξης περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα και ο ρότορας μέσα στο μαγνητικό πεδίο, οπότε αναπτύσσεται ρεύμα στο τύλιγμα του ρότορα. Παράγεται τότε μια ηλεκτροκινητική δύναμη (electromotive force ή emf) ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής, καθώς το μαγνητικό πεδίο έχει σταθερή ροή. Η ηλεκτροκινητική δύναμη μετριέται σε Volts (και όχι σε newtons) και εκφράζει την τάση που παράγεται στη γεννήτρια και "αντιστέκεται" στο ρεύμα που διαπερνά την περιέλιξή της. Η γωνιακή ταχύτητα μπορεί να μετρηθεί έμμεσα λόγω της



αναλογικής της σχέσης με την τάση αυτή. Αυτό μπορεί να γίνει με μέτρηση της τάσης με τη χρήση βολτόμετρου κατάλληλα βαθμονομημένου ώστε να δίνει ενδείξεις απευθείας σε μονάδες ταχύτητας. Ο μετατροπέας ηλεκτρικού ρεύματος (2) μετατρέπει την τάση αυτή σε dc, ενώ η αντίσταση  $R_s$  χρησιμοποιείται για τον περιορισμό του ρεύματος στο κύκλωμα εξόδου ανάλογα με τις απαιτήσεις του. Βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι dc ταχογεννήτριες είναι ότι η πολικότητα της τάσης εξόδου αποτελεί ένδειξη της φοράς περιστροφής του άξονα, καθώς επίσης και ότι η τάση εξόδου έχει τιμές αρκετά χαμηλές ώστε να μπορούν να μετρηθούν από απλά dc βολτόμετρα. Στον αντίποδα, έχουν ως μειονέκτημα το ότι απαιτούν περιοδική συντήρηση, κυρίως του τμήματος του μετατροπέα ηλεκτρικού ρεύματος, ώστε να αποφευχθούν σφάλματα στην τιμή της τάσης εξόδου λόγω μεταβολών στις αντιστάσεις επαφής. Επιπλέον, εξαιτίας της τιμής του διερχόμενου ρεύματος από το ρότορα προκαλούνται διαταραχές στη ροή του μαγνητικού πεδίου του μόνιμου μαγνήτη επιρρεάζοντας τη γραμμικότητα στην έξοδο της ταχογεννήτριας. Για το λόγο αυτό η αντίσταση του οργάνου μέτρησης θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερης τιμής από εκείνη στην έξοδο της ταχογεννήτριας.

Οι ταχογεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος έχουν τα τυλίγματα των πηνίων πάνω στο στάτορα και το μαγνητικό πεδίο είναι αυτό που περιστρέφεται. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός μόνιμου μαγνήτη ή ενός ηλεκτρομαγνήτη τοποθετημένου στο ρότορα. Ο ρότορας βρίσκεται και σε αυτή την περίπτωση σε ζεύξη με τον άξονα του οποίου μετράται η ταχύτητα περιστροφής. Έτσι, όπως και με τις ταχογεννήτριες συνεχούς ρεύματος, περιστροφή του προς μέτρηση άξονα οδηγεί σε περιστροφή με την ίδια γωνιακή ταχύτητα του ρότορα και συνεπώς και του μαγνήτη. Λόγω του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, εμφανίζεται στο τύλιγμα του στάτορα ηλεκτροκινητική δύναμη που έχει πλάτος και συχνότητα ανάλογα της γωνιακής ταχύτητας. Η γωνιακή ταχύτητα μπορεί λοιπόν να μετρηθεί και σε αυτή την περίπτωση έμμεσα από τον υπολογισμό του πλάτους της τάσης με τη βοήθεια και πάλι κατάλληλα βαθμονομημένου βολτόμετρου. Για



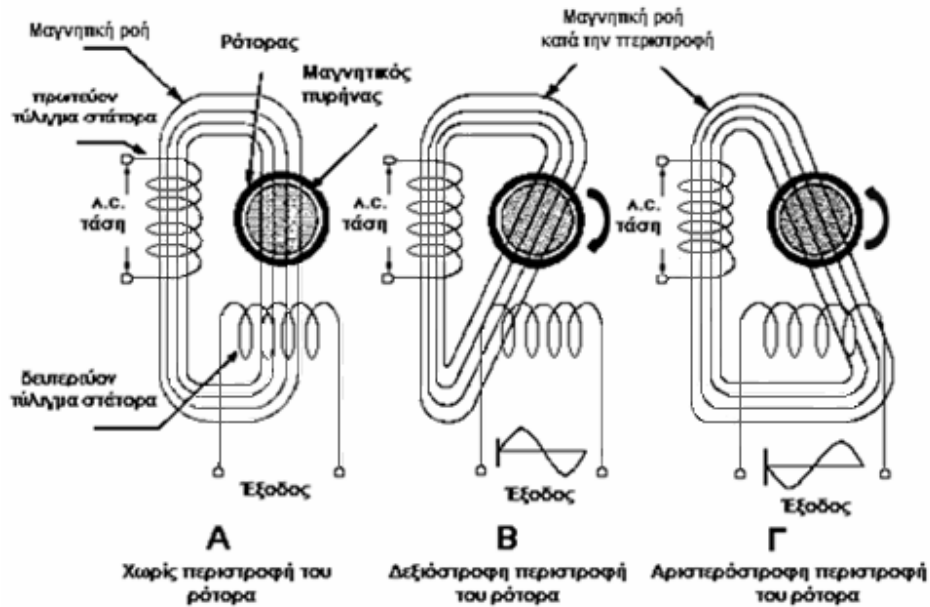


να γίνει αυτό απαιτείται η μετατροπή της εναλλασσόμενης αυτής τάσης (ac) σε συνεχή (dc) και πραγματοποιείται με τη βοήθεια ανορθωτή και κατάλληλων φίλτρων. Εναλλακτικά, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέτρηση της συχνότητας της τάσης αυτής και μέσω της αναλογικής της σχέσης με τη γωνιακή ταχύτητα να προσδιορίζεται κάθε φορά η τιμή της στιγμιαίας γωνιακής ταχύτητας. Πλεονέκτημα της χρήσης ταχογεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελεί η δυνατότητα μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας συναρτήσει δύο διαφορετικών μεγεθών. Όμως παρατηρείται ότι αν η ταχύτητα περιστροφής είναι χαμηλή, τότε και η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι χαμηλή, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο κυματισμός στο σήμα εξόδου. Για να αποφευχθεί αυτό ο αριθμός των πόλων του στάτορα αυξάνεται, ώστε ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής η συχνότητα της παραγόμενης τάσης να είναι αρκετά μεγάλη. Αντίστοιχα, αν η ταχύτητα περιστροφής είναι πολύ υψηλή τότε και η συχνότητα της εφαρμοζόμενης τάσης θα είναι πολύ υψηλή, γεγονός που αυξάνει την επαγωγική αντίσταση και επιρρεάζει τη γραμμικότητα στην έξοδο. Το όργανο μέτρησης θα πρέπει επομένως να έχει επαγωγική αντίσταση στην είσοδο αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη του πηνίου του τυλίγματος για να διασφαλίζεται η γραμμικότητα στην έξοδο ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο (παράγραφος 2.6) περιγράφεται επιγραμματικά η λειτουργία μιας διαφορετικής μορφής ταχογεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος που είναι αρκετά δημοφιλής στη χρήση. Πρόκειται για την ταχογεννήτρια με ρότορα τύπου drag cup. Ο ρότορας είναι κατασκευασμένος στην περίπτωση αυτή από χαλκό ή αλουμίνιο και έχει κυλινδρική μορφή ενώ είναι κούφιος όσων αφορά το εσωτερικό του. Συνδέεται και πάλι με τον προς μέτρηση άξονα και στο εσωτερικό του υπάρχει ένας μαγνητικός πυρήνας. Ο στάτορας έχει δύο τυλίγματα τοποθετημένα έτσι ώστε να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 90 μοιρών. Στο ένα από αυτά (πρωτεύον ή τύλιγμα αναφοράς) εφαρμόζεται μία ac τάση αναφοράς και το άλλο (δευτερεύον ή τύλιγμα ελέγχου) χρησιμοποιείται για τη λήψη του σήματος εξόδου. Όταν στο πρωτεύον εφαρμοστεί ac τάση



δημιουργείται μαγνητικό πεδίο που οδηγεί στην ανάπτυξη ηλεκτροκινητικής δύναμης στο δευτερεύον τύλιγμα λόγω επαγωγής.



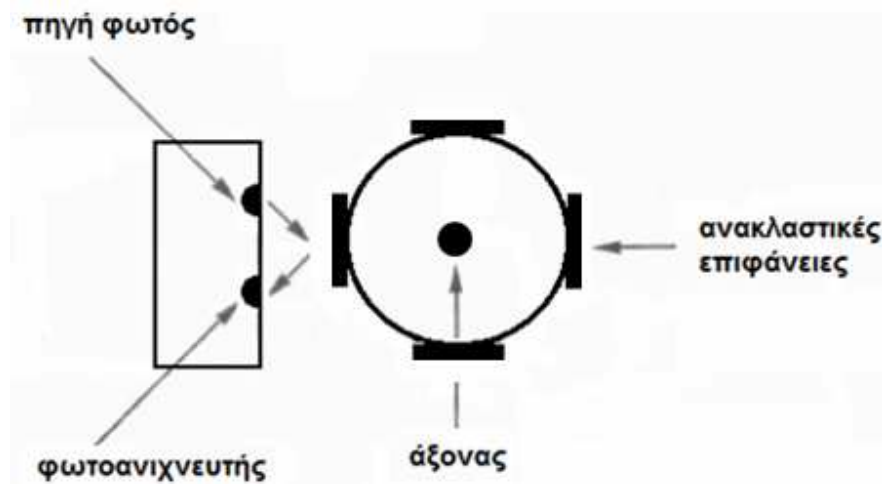
Σχήμα 21 - λειτουργία ac ταχογεννήτριας με drag cup ρότορα

Όταν ο ρότορας είναι ακίνητος (A - σχήμα 21) η μαγνητική ροή τέμνει κάθετα το δευτερεύον τύλιγμα με αποτέλεσμα να μην υπάρχει τάση στην έξοδο ( $V_o = 0$ ). Όταν όμως ο ρότορας περιστρέφεται ακολουθώντας την κίνηση του άξονα (του οποίου η ταχύτητα μετριέται) τότε οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου εκτρέπονται δίνοντας στο δευτερεύον τύλιγμα του στάτορα μια εναλλασσόμενη τάση, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα (B και Γ). Ο βαθμός εκτροπής του μαγνητικού πεδίου καθορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, οπότε το πλάτος της επαγόμενης τάσης είναι ανάλογο με τη στιγμιαία ταχύτητα. Η συχνότητά της είναι ίδια με εκείνη της ac τάσης που εφαρμόζεται στο πρωτεύον τύλιγμα, ενώ ανάλογα με τη φορά περιστροφής του ρότορα είτε είναι σε φάση με την τάση στο πρωτεύον (διαφορά φάσης ίση με  $0^\circ$ ) είτε έχει διαφορά φάσης  $180^\circ$  με αυτήν. Επομένως και σε αυτή την περίπτωση η στιγμιαία γωνιακή ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί μέσω του πλάτους της τάσης στην έξοδο με τον τρόπο που

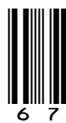
προαναφέρεται για τις ac ταχογεννήτριες, με τη σημαντική διαφορά ότι μέσω της διαφοράς φάσης μεταξύ των τάσεων στα τυλίγματα του στάτορα μπορεί να προσδιοριστεί και η φορά περιστροφής του ρότορα. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η απλή και χαμηλού κόστους κατασκευή, οι μικρές απαιτήσεις συντήρησης και η έλλειψη κυματισμού στο σήμα εξόδου. Απαιτείται όμως διαρκής τροφοδότηση του πρωτεύοντος τυλίγματος, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολύ υψηλές συχνότητες χάνεται η γραμμικότητα στην αναλογική σχέση ταχύτητας και τάσης εξόδου.

### 3.3.2 Φωτοηλεκτρικό ή οπτικό ταχύμετρο

Η λειτουργία του στηρίζεται στην καταμέτρηση παλμών, που παράγονται κατά την ανάκλαση μιας δέσμης φωτός πάνω στον άξονα του οποίου μετράται η ταχύτητα περιστροφής. Η πηγή του φωτός (LED) - που μπορεί να είναι είτε ορατό είτε υπέρυθρο - βρίσκεται στο ίδιο σύστημα με το φωτοανιχνευτή (φωτοτρανζίστορ). Στον άξονα τοποθετούνται σε ίσες αποστάσεις ανακλαστικές επιφάνειες και η πηγή του φωτός ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε το ανακλώμενο φως να προσπίπτει στο φωτοανιχνευτή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 22 - μέτρηση παλμών με ανάκλαση φωτός

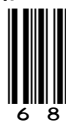


Η πηγή φωτός εκπέμπει σταθερά φως προς την κατεύθυνση του άξονα ενώ αυτός περιστρέφεται. Κάθε φορά που η δέσμη φωτός ανακλάται σε μία από τις ανακλαστικές επιφάνειες ανιχνεύεται φως από τον φωτοανιχνευτή και σύμφωνα με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παράγεται από αυτόν ένα ηλεκτρικό σήμα υπό τη μορφή παλμού. Ο χρόνος  $\Delta t$  κατά τον οποίο μετρείται ο αριθμός των παλμών εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του άξονα και τον αριθμό των ανακλαστικών επιφανειών που χρησιμοποιούνται. Για την ταχύτητα περιστροφής ισχύει ότι ισούται με τον αριθμό των παλμών ανά δευτερόλεπτο προς των αριθμό των ανακλαστικών επιφανειών (σε rps). Έτσι χρησιμοποιώντας ένα καταμετρητή παλμών και μία κατάλληλα ρυθμισμένη υπολογιστική διάταξη ως έξοδο μπορούμε να λαμβάνουμε απευθείας την τιμή της γωνιακής ταχύτητας σε rpm (και μάλιστα σε ψηφιακή μορφή).

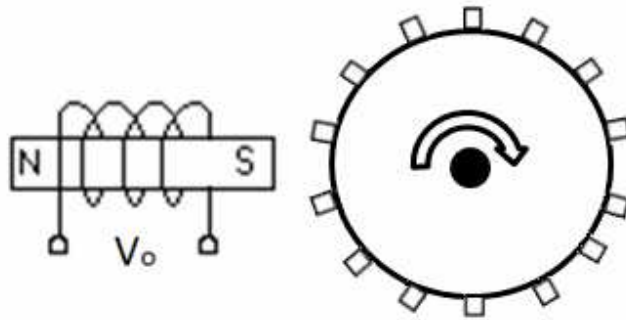
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση του φωτοηλεκτρικού ταχύμετρου είναι η απλή κατασκευή, οι εξαιρετικής ακρίβειας μετρήσεις και η περιορισμένη ανάγκη συντήρησης αφού δεν απαιτείται επαφή για τη λήψη μέτρησης, οπότε περιορίζεται η φθορά. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μέτρηση με ακρίβεια και ασφάλεια σε πολύ υψηλές ταχύτητες περιστροφής, καθώς η μέτρηση πραγματοποιείται από απόσταση.

### 3.3.3 Ταχύμετρο μαγνητικού τύπου

Η λειτουργία του στηρίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικού σήματος κατά τη μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης του πεδίου που δημιουργεί ένας μόνιμος μαγνήτης. Η κυρίως διάταξη αποτελείται από ένα μόνιμο μαγνήτη γύρω από τον οποίο τυλίγουμε ένα πηνίο και από έναν οδοντωτό δίσκο από σιδηρομαγνητικό υλικό που προσαρμόζεται στον άξονα την ταχύτητα στροφών του οποίου μετράμε, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 23. Καθώς περιστρέφεται ο άξονας τα



δόντια και τα μεταξύ τους διάκενα αέρα περνούν διαδοχικά μπροστά από το σύστημα μαγνήτη-πηνίου το οποίο λειτουργεί σαν γεννήτρια παραγωγής παλμών. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αέρας έχει πολύ μεγάλη μαγνητική αντίσταση και δεν επιτρέπει τη διέλευση πολλών μαγνητικών γραμμών σε αντίθεση με το



**Σχήμα 23** - σύστημα οδοντωτού δίσκου - μαγνήτη

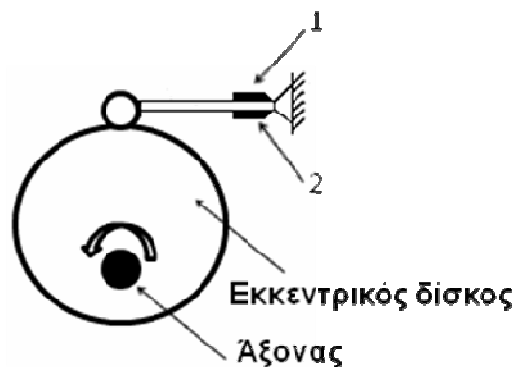
σιδηρομαγνητικό υλικό που όχι μόνο ευνοεί τη διέλευσή τους αλλά επιπλέον τις συγκεντρώνει. Έτσι κάθε φορά που το σιδηρομαγνητικό υλικό παρεμβάλλεται στις μαγνητικές γραμμές μεταβάλλεται η μαγνητική ροή με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται στα άκρα του πηνίου μια εναλλασσόμενη τάση από επαγωγή. Η συχνότητα της είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας του άξονα, η οποία μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια μικροϋπολογιστή ως ο λόγος του αριθμού των παλμών προς τον αριθμό των δοντιών του δίσκου σε μία περίοδο. Απαιτείται επομένως η μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό με χρήση αντίστοιχου μετατροπέα για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η μέτρηση αυτή.

Το ταχύμετρο αυτού του τύπου λειτουργεί σαν παθητικός αισθητήρας μη επαφής, έχει μικρό μέγεθος και μπορεί να δώσει αξιόπιστες μετρήσεις αν η ταχύτητα δεν έχει πολύ χαμηλές ή πολύ υψηλές τιμές. Για να παραχθεί υπολογίσιμη τάση εξόδου πρέπει η απόσταση από το σιδηρομαγνητικό υλικό να είναι πολύ μικρή (μικρότερη των τριών χιλιοστών). Μειονεκτεί καθώς μπορεί να επηρεαστεί από ανεπιθύμητα σήματα θορύβου.



### 3.3.4 Ταχύμετρο με αισθητήρες πίεσης

Πρόκειται για ένα είδος ταχύμετρου που δε χρησιμοποιείται πολύ συχνά λόγω του τρόπου λειτουργίας του. Αποτελείται από μια λεπτή ράβδο το ένα άκρο της οποίας είναι σταθερό, ενώ το άλλο φέρει ένα μικρό τροχό. Ο τροχός αυτός εφάπτεται σε ένα εκκεντρικό δίσκο που προσαρμόζεται στον άξονα του οποίου μετράται η ταχύτητα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



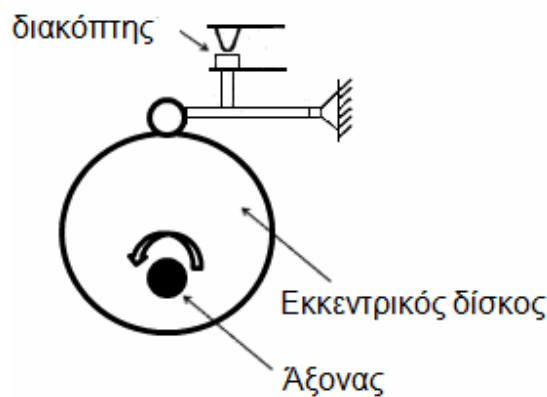
Σχήμα 24 - ταχύμετρο με αισθητήρες πίεσης

Στο σταθερό άκρο της ράβδου προσαρμόζονται οι αισθητήρες πίεσης (θέσεις 1 και 2 του σχήματος). Ο εκκεντρικός δίσκος ακολουθώντας την περιστροφή του άξονα ασκεί πίεση στη ράβδο σπρώχνοντάς την προς τα επάνω ή αναγκάζοντάς την να κινηθεί προς τα κάτω. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της αντίστασης στο σύστημα των αισθητηρίων και την παραγωγή ενός ημιτονοειδούς σήματος τάσης στην έξοδο με συχνότητα ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας του άξονα. Επομένως και σε αυτή την περίπτωση από την τιμή της συχνότητας του σήματος εξόδου προκύπτει η τιμή της γωνιακής ταχύτητας.

### 3.3.5 Ταχύμετρο με διακόπτη



Πρόκειται για ένα ταχύμετρο που παρουσιάζει αρκετά κοινά ως προς τη μορφή και τη λειτουργία του με το ταχύμετρο με αισθητήρες πίεσης. Αποτελείται και πάλι από λεπτή ράβδο και εκκεντρικό δίσκο που προσαρμόζεται στον άξονα του οποίου μετράται η ταχύτητα. Η ράβδος φέρει και πάλι στο ένα άκρο ένα μικρό τροχό που εφάπτεται στο δίσκο, ενώ το άλλο άκρο της είναι κατάλληλα συνδεδεμένο ώστε να επιτρέπει την ελεύθερη κίνηση της ράβδου σε κατακόρυφο επίπεδο. Η μορφή του συστήματος ράβδου-δίσκου φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 25 - ταχύμετρο με διακόπτη

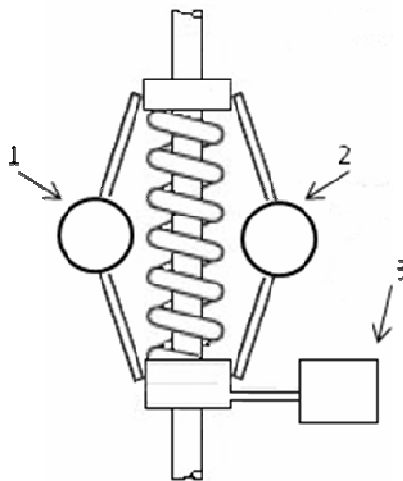
Ο δίσκος ακολουθώντας την περιστροφή του άξονα, οδηγεί τη ράβδο σε περιοδική κίνηση ανυψώνοντας το ελεύθερο άκρο της ή επιτρέποντάς του να κινηθεί προς τα κάτω. Την κίνηση της ράβδου ακολουθεί και ο ένας από τους δύο ακροδέκτες ενός διακόπτη που χρησιμοποιείται σαν έξοδος. Ο άλλος ακροδέκτης είναι σταθεροποιημένος σε κατάλληλη θέση ώστε όταν η ράβδος φτάσει στην ψηλότερη δυνατή θέση που μπορεί να λάβει κατά την περιστροφή του δίσκου ο διακόπτης να κλείνει στιγμιαία παράγοντας ένα παλμό στην έξοδο. Είναι προφανές ότι για κάθε μία πλήρη περιστροφή του δίσκου θα παράγεται από το κλείσιμο των επαφών του διακόπτη και ένας παλμός στην έξοδο. Η παλμοσειρά που παράγεται με τον τρόπο αυτό έχει συχνότητα ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας του άξονα. Οπότε, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις από την



τιμή της συχνότητας του σήματος εξόδου προκύπτει η τιμή της γωνιακής ταχύτητας. Όπως συμβαίνει και με το ταχύμετρο με αισθητήρες πίεσης αυτή η μορφή ταχύμετρου δε χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές.

### 3.3.6 Φυγοκεντρικό ταχύμετρο

Πρόκειται για ένα όργανο που στηρίζει τη λειτουργία του στο φυγοκεντρικό ρυθμιστή ή ρυθμιστή Watt, μία κατασκευή του James Watt που τελειοποιήθηκε το 1788. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε στον έλεγχο ταχύτητας στις ατμομηχανές, ενώ εξακολουθεί να χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα για τον έλεγχο της ταχύτητας, κυρίως στους πετρελαιοκινητήρες. Αποτελείται από δύο εκκρεμή στα άκρα των οποίων συνδέεται από μία μάζα και το σύστημά τους προσαρμόζεται στον άξονα που θέλουμε να μετρήσουμε την ταχύτητα, όπως για παράδειγμα στο παρακάτω σχήμα. Οι μάζες (1 και 2 στο σχήμα) συνδέονται στον άξονα με τη βοήθεια μοχλών που καταλήγουν σε δύο προσαρμοσμένα τμήματα εκ των οποίων το ένα



Σχήμα 26 - φυγοκεντρικό ταχύμετρο

είναι ακλόνητα στερεωμένο (το επάνω στην προκειμένη περίπτωση) ενώ το άλλο μπορεί να κινείται ελεύθερα επάνω ή κάτω. Μεταξύ των τμημάτων αυτών





(κολάρα) παρεμβάλλεται ένα ελατήριο με γνωστά χαρακτηριστικά. Όταν ο άξονας αρχίσει να περιστρέφεται θα ξεκινήσουν να περιστρέφονται και οι μάζες παίρνοντας διάφορες θέσεις ακτινικά ως προς τον άξονα, ανάλογα με την κεντρομόλο δύναμη που δέχονται. Όσο μεγαλώνει η ταχύτητα περιστροφής του άξονα, τόσο οι μάζες θα περιστρέφονται ολοένα και πιο μακριά από αυτόν. Η ακτινική τους μετατόπιση οδηγεί σε κίνηση του ελεύθερου κολάρου προς τα επάνω και συσπίρωση του ελατηρίου. Σε κατάσταση ισορροπίας οι μάζες θα περιστρέφονται σε απόσταση τέτοια ώστε η δύναμη που ασκεί το ελατήριο στο κολάρο θα ισούται με την κεντρομόλο δύναμη. Η δύναμη  $F_{ελ}$  που ασκεί το ελατήριο είναι ανάλογη με την παραμόρφωσή του  $x$ , άρα  $F_{ελ} = K_{ελ} \times x$ . Αντίστοιχα, η ασκούμενη κεντρομόλος δύναμη  $F_k$  είναι ανάλογη της ακτίνας περιστροφής  $R$  και του τετραγώνου της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$ , οπότε  $F_k = K \times R \times \omega^2$ , όπου  $K_{ελ}$  και  $K$  σταθερές. Στην κατάσταση ισορροπίας ισχύει ότι  $F_{ελ} = F_k$  επομένως είναι:

$$K_{ελ} \times x = K \times R \times \omega^2 \quad \text{οπότε προκύπτει ότι } x = (K/K_{ελ}) \times R \times \omega^2$$

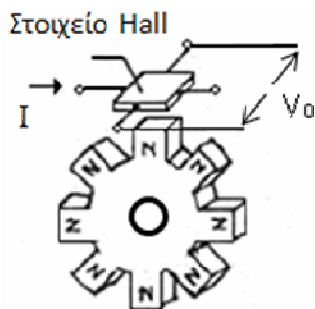
Αξίζει να σημειωθεί ότι ανάλογα με το μηχανικό σχεδιασμό του συστήματος τα  $R$  και  $x$  σχετίζονται μεταξύ τους, οπότε στην τελευταία σχέση θα είναι πιο σωστό να αντικατασταθεί το  $R$  με  $R(x)$ . Η τελευταία εξίσωση αποδεικνύει ότι η σχέση της παραμόρφωσης του ελατηρίου, η οποία εκφράζει και τη μετατόπιση του κολάρου, με τη γωνιακή ταχύτητα του άξονα είναι μη γραμμική. Η γωνιακή ταχύτητα λαμβάνεται μέσω της κίνησης του κολάρου, με κατάλληλα ρυθμισμένο σύστημα που συνδέεται σε αυτό (θέση 3 στο σχήμα) και οδηγεί απευθείας ένα δείκτη σε όργανο απεικόνισης βαθμονομημένο σε μονάδες ταχύτητας. Αν απαιτείται ως έξοδος ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιείται στην έξοδο αισθητήρας μετατόπισης που μετατρέπει τη μετατόπιση του δείκτη σε ανάλογο ηλεκτρικό σήμα.

Ο τύπος αυτός ταχύμετρου είναι αρκετά ακριβής, έχει γρήγορη απόκριση και εύρος μέτρησης από 0 έως 50000 στροφές ανά λεπτό (ΣΑΛ). Υπάρχουν ακόμη και φορητά φυγοκεντρικά ταχύμετρα, τα οποία λειτουργούν συνήθως σε τρεις κλίμακες χαμηλή (50-500 ΣΑΛ), μέση (500-5000 ΣΑΛ) και υψηλή (5000-50000 ΣΑΛ).



### 3.4 Αισθητήρας φαινομένου Hall

Ο αισθητήρας φαινομένου Hall έχει λειτουργία παρόμοια με εκείνη του ταχύμετρου μαγνητικού τύπου. Η μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας γίνεται μέσα από τη μεταβολή της μαγνητικής ροής με τη βοήθεια ενός στοιχείου Hall. Η μορφή της διάταξης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 27** - διάταξη μέτρησης γωνιακής ταχύτητας με χρήση φαινομένου Hall

Σε αυτή, αντί για οδοντωτό δίσκο χρησιμοποιείται δίσκος με μαγνητικούς πόλους που εξέχουν. Ένα στοιχείο Hall που διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I$  τοποθετείται κατάλληλα ώστε η ροή του ρεύματος να τέμνει κάθετα τις μαγνητικές γραμμές του πεδίου που δημιουργεί ο μόνιμος μαγνήτης. Κατά

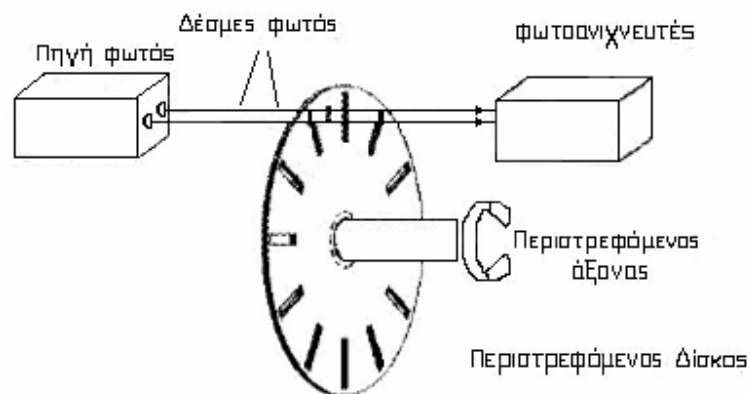
την περιστροφή του δίσκου, κάθε φορά που ένας από τους μαγνητικούς πόλους περνάει δίπλα από το στοιχείο Hall, θα αναπτύσσεται σύμφωνα με το φαινόμενο Hall μια διαφορά δυναμικού  $V_0$  στα άκρα του και ηλεκτρικό πεδίο που θα είναι κάθετο στα επίπεδα των  $I$  και  $B$  (όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 1). Η τάση αυτή έχει τιμή ανάλογη των  $I$  και  $B$ , οπότε διατηρώντας την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το στοιχείο Hall σταθερή θα εξαρτάται μόνο από τη μαγνητική επαγωγή  $B$ . Για κάθε μαγνητικό πόλο που περνάει παράγεται στην έξοδο ( $V_0$ ) ένας παλμός και το πλήθος των παλμών αυτών καταγράφεται μέσω ενός μετρητή. Η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι και πάλι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας του περιστρεφόμενου άξονα, η οποία μπορεί και πάλι να υπολογιστεί ως ο λόγος του αριθμού των παλμών προς τον αριθμό των μαγνητικών πόλων του δίσκου σε μία περίοδο. Η διάταξη μέτρησης γωνιακής ταχύτητας με αισθητήρα φαινομένου Hall δίνει αξιόπιστες μετρήσεις, χρειάζεται



ελάχιστη συντήρηση, δεν επηρεάζεται από σκόνη και θόρυβο, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ακραίες θερμοκρασίες (από  $-40^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $165^{\circ}\text{C}$ ). Βέβαια, όπως συμβαίνει με κάθε μετατροπέα που χρησιμοποιεί ως αρχή λειτουργίας το φαινόμενο Hall, μεταβολές στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος λειτουργίας επηρεάζουν τις τιμές της εξόδου.

### 3.5 Οπτικός αισθητήρας

Η μέτρηση γωνιακής ταχύτητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια διάταξης που χρησιμοποιεί οπτικό αισθητήρα. Ανήκει στην ίδια κατηγορία με το φωτοηλεκτρικό ταχύμετρο αλλά η μέθοδος λειτουργίας του είναι διαφορετική. Ο αισθητήρας αυτός τόσο με τη μορφή του, όσο και με τον τρόπο που λειτουργεί θυμίζει τους αυξητικούς οπτικούς κωδικοποιητές γωνιακής θέσης. Η διάταξη του φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 28 - διάταξη οπτικού αισθητήρα

Αποτελείται από ένα δίσκο με ισαπέχουσες οπές, μία πηγή φωτός για την οποία χρησιμοποιείται και σε αυτή την περίπτωση ένα ζεύγος διόδων φωτοεκπομπής καθώς και από ένα ζεύγος φωτοτρανζίστορς πυριτίου ως φωτοανιχνευτές. Συνήθως χρησιμοποιείται και μία επιπλέον οπή στο δίσκο διαφορετικού μεγέθους



για λόγους αρχικοποίησης του μετρητή. Το εκπεμπόμενο φως μπορεί να είναι οπτικό ή και υπέρυθρο, με το οπτικό να καθιστά εύκολη την εγκατάσταση και τη συντήρηση, αλλά το υπέρυθρο να επιρρεάζεται πολύ λιγότερο από το φαινόμενο της συμβολής που μπορεί να προκληθεί από άλλες κοντινές πηγές φωτός. Ο δίσκος προσαρμόζεται στον άξονα του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε την γωνιακή ταχύτητα και ακολουθεί την κίνησή του, ενώ ευθυγραμμίζεται κατάλληλα ώστε να παρεμβάλλεται στις δέσμες φωτός επιτρέποντας τους να φτάσουν στους φωτοανιχνευτές μόνο όποτε βρίσκεται στην πορεία τους κάποια από τις οπές. Το ένα σύστημα πηγής φωτός και φωτοανιχνευτή είναι μετατοπισμένο σε σχέση με το άλλο κατά  $1/4$  της απόστασης μεταξύ των οπών του δίσκου. Κάθε φορά που μία από τις οπές βρίσκεται κατά την περιστροφή του δίσκου στην πορεία μιας δέσμης φωτός, φτάνει στιγμιαία φως στον αντίστοιχο φωτοανιχνευτή δίνοντας ένα παλμό ως έξοδο. Μεταξύ των δύο παλμοσειρών στην έξοδο θα υπάρχει μια διαφορά φάσης  $90^\circ$  εξαιτίας της απόστασης μεταξύ των συστημάτων εκπομπής και λήψης φωτός από την οποία μπορεί να προσδιοριστεί η φορά περιστροφής του δίσκου (επομένως και του άξονα). Ισχύει ότι και για τους αυξητικούς κωδικοποιητές, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.1 . Ο αριθμός των παραγόμενων παλμών δηλαδή είναι και πάλι ανάλογος της γωνιακής μετατόπισης και η στιγμιαία γωνιακή ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί μέσω της συχνότητας ή της περιόδου των παλμών αυτών, για υψηλές και χαμηλές ταχύτητες περιστροφής αντίστοιχα.

### 3.6 Αισθητήρας Wiegand

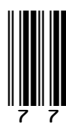
Οι αισθητήρες αυτού του τύπου στηρίζουν τη λειτουργία τους στο φαινόμενο Wiegand. Πρόκειται για ένα μη γραμμικό μαγνητικό φαινόμενο που παρατηρείται σε ειδικά επεξεργασμένο σύρμα, το οποίο φέρει επίσης το όνομα του ερευνητή που το ανακάλυψε, του John R. Wiegand. Κατά το φαινόμενο αυτό, το μαγνητικό πεδίο ειδικά επεξεργασμένου φερομαγνητικού σύρματος (σύρματος Wiegand)

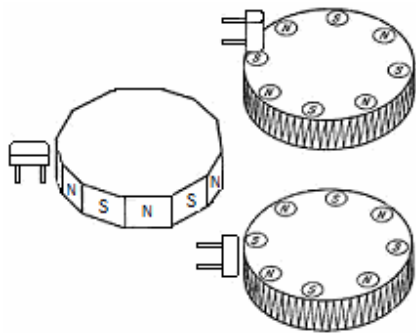


οδηγείται σε περιοδικές στιγμιαίες αντιστροφές πολικότητας, παράγοντας μια ομοιόμορφη σειρά παλμών τάσης. Οι αισθητήρες αυτοί αποτελούνται από σύρμα Wiegand μικρού μήκους, ένα πηνίο και μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο που συνήθως παράγεται από μικρούς μόνιμους μαγνήτες.

Το σύρμα έχει μικρή διάμετρο (0,01 in ή 254 μm) ενώ είναι κατασκευασμένο από vicalloy που είναι κράμα από κοβάλτιο (cobalt), σίδηρο (iron) και βανάδιο (vanadium) και έχει μαγνητικές ιδιότητες. Προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή του το σύρμα περνάει μια διαδικασία κατά την οποία θερμαίνεται και ψύχεται αργά, πράγμα που αυξάνει τη σκληρότητά του, ώστε παρά τη μικρή του διάμετρο να μην είναι εύθραυστο. Κατά την κατασκευή του, προκειμένου να αποκτήσει τις ιδιαίτερες μαγνητικές του ικανότητες το σύρμα συστρέφεται και επαναφέρεται στην αρχική του κατάσταση δεχόμενο αυξανόμενη πίεση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το εσωτερικό του (πυρήνας) να αποκτά μικρότερη αντίσταση στον απομαγνητισμό από το εξωτερικό του μέρος (περίβλημα). Η διαφορά αυτή είναι καταλυτική για το σχηματισμό των παλμών του αισθητήρα. Έτσι όταν ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εφαρμοστεί στο σύρμα Wiegand, τότε το περίβλημα αντιδρά και το αποτρέπει από το να επιρρεάσει τη μαγνητική κατάσταση στον πυρήνα. Έως ότου φτάσει στο όριο όπου κάμπτεται η μαγνητική του αντίσταση, οπότε τόσο το περίβλημα όσο και ο πυρήνας αλλάζουν στιγμιαία πολικότητα. Οι αντιστροφές πραγματοποιούνται σε χρόνο της τάξης των λίγων μs οπότε χρησιμοποιώντας ένα σύρμα Wiegand μπορούμε να πάρουμε με αυτόν τον τρόπο στην έξοδο μια τάση με τη μορφή παλμών με τιμή αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί εύκολα να μετρηθεί ηλεκτρονικά.

Η διάταξη μπορεί να έχει μία από τις μορφές του παρακάτω σχήματος :



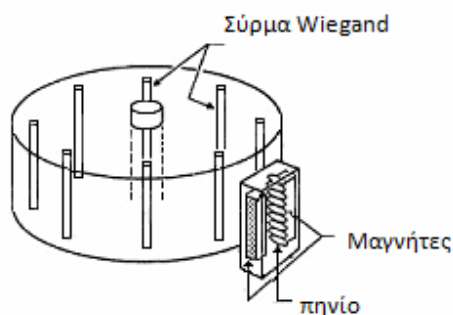


**Σχήμα 29** - χρήση αισθητήρα Wiegand για την παραγωγή παλμών

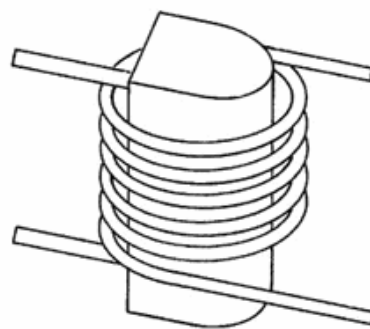
Ένα μικρό κομμάτι σύρματος Wiegand βρίσκεται μέσα στο πηνίο, ενώ ένας δακτυλιοειδής μόνιμος μαγνήτης που αποτελείται από πόλους διαφορετικής πολικότητας που εναλλάσσονται μεταξύ τους συνδέεται στον άξονα που θέλουμε να μετρήσουμε την γωνιακή ταχύτητα και ακολουθεί την κίνησή του. Το κενό αέρα μεταξύ αισθητήρα και

μαγνήτη μπορεί να είναι μέχρι και μία ίντσα ανάλογα με τη δύναμη του μαγνήτη. Κάθε φορά που ένας από τους πόλους του μαγνήτη πλησιάζει το πηνίο η πολικότητα στο σύρμα Wiegand θα αλλάζει και θα αντιστρέφεται, δίνοντας ένα παλμό στα άκρα του πηνίου που ανάλογα με τον πόλο που τον προκάλεσε (S ή N) θα είναι αρνητικός ή θετικός αντίστοιχα. Το πλάτος της τάσης στην έξοδο μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τη μορφή της διάταξης, όμως κάθε παλμός θα έχει διάρκεια ίση με περίπου 10  $\mu$ s.

Εναλλακτικά, το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί είτε χρησιμοποιώντας ακίνητη κεφαλή ανάγνωσης και κινούμενα σύρματα Wiegand, είτε μέσω ενός πεδίου εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως φαίνεται στα (α) και (β) του παρακάτω σχήματος:



(α)



(β)



**Σχήμα 30** - διάταξη για την παραγωγή μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου α) με κινούμενα σύρματα Wiegand και β) μέσω πεδίου εναλλασσόμενου ρεύματος

Στην πρώτη περίπτωση, ένα σύστημα από σύρματα Wiegand προσαρμόζεται στον άξονα και περιστρέφεται με αυτόν ενώ οι μαγνήτες και το πηνίο είναι ακίνητα και αποτελούν την κεφαλή ανάγνωσης. Κατά την περιστροφή του άξονα, κάθε φορά που ένα από τα σύρματα περνάει μπροστά από τους μαγνήτες αλλάζει στιγμιαία πολικότητα δίνοντας ένα παλμό στα άκρα του πηνίου. Το κενό διάστημα μεταξύ μαγνητών και συρμάτων είναι της τάξης των 0,05 in. Το πλάτος των παραγόμενων παλμών τάσης είναι μικρότερο από εκείνο με την μέθοδο του περιστρεφόμενου μαγνήτη, καθώς το πηνίο δεν είναι τυλιγμένο γύρω από το σύρμα. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να γίνει αντιληπτή η φορά περιστροφής του άξονα. Αυτό συμβαίνει καθώς περιστρεφόμενος προς τη μία κατεύθυνση ο άξονας οδηγεί σε παραγωγή μόνο θετικών παλμών στην έξοδο, ενώ προς την αντίθετη κατεύθυνση η παλμοσειρά αποτελείται μόνο από αρνητικούς παλμούς.

Στη δεύτερη περίπτωση, αντί για μόνιμους μαγνήτες χρησιμοποιείται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για να ενεργοποιήσει τον αισθητήρα. Αυτό μπορεί να γίνει είτε τυλίγοντας γύρω από τον αισθητήρα ένα πηνίο και τροφοδοτώντας με εναλλασσόμενο ρεύμα, είτε χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρομαγνήτη.

Η μέτρηση για τη γωνιακή ταχύτητα πραγματοποιείται με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που χρησιμοποιείται στο μαγνητικό ταχύμετρο ή τον αισθητήρα φαινομένου Hall. Με την καταμέτρηση δηλαδή των παραγόμενων παλμών σε μία περίοδο, δεδομένου του ότι και εδώ η συχνότητα της τάσης στην έξοδο είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας του περιστρεφόμενου άξονα, ενώ τόσο ο αριθμός των πόλων στη διάταξη με το δακτυλιοειδή μαγνήτη, όσο και ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων συρμάτων Wiegand στη διάταξη που αποτελείται από κινούμενα σύρματα και σταθερή κεφαλή ανάγνωσης είναι δεδομένοι. Τα κύρια πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι αισθητήρες Wiegand είναι ότι είναι μη



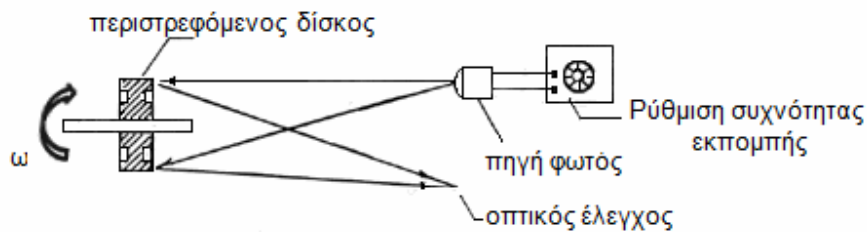
επαφής αποφεύγοντας φθορές, δε χρειάζεται να τροφοδοτηθούν, δίνουν τιμές τάσης στην έξοδο αρκετά μεγάλες ώστε να μπορούν να αναγνωστούν και να επεξεργαστούν, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλοντα με μεγάλο εύρος θερμοκρασιών από  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.7 Στροβοσκοπική μέθοδος

Για τη στροβοσκοπική μέθοδο και τη χρήση της στη μέτρηση ταχύτητας έχει ήδη γίνει αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο (παράγραφος 2.5). Σε αυτή την παράγραφο θα εξεταστεί η εφαρμογή της στη μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας. Για την πραγματοποίησή της χρησιμοποιείται ένα στροβοσκόπιο που συνήθως είναι ηλεκτρονικού τύπου. Αποτελείται από μια πηγή φωτός που είναι είτε LED είτε λάμπα αερίου, ένα σύστημα ρύθμισης της συχνότητας ακτινοβολίας της, καθώς και από ένα δίσκο που προσαρμόζεται στον άξονα του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε τη γωνιακή ταχύτητα και ακολουθεί την κίνησή του. Ο δίσκος φέρει έναν αριθμό από διακριτά σημάδια που χρησιμεύουν στο να μπορεί να παρατηρηθεί η περιστροφική του κίνηση. Εναλλακτικά, αντί να χρησιμοποιηθεί ο δίσκος μπορούν αντίστοιχα σημάδια να υπάρχουν επάνω στον ίδιο τον άξονα. Κατά την περιστροφή του άξονα, η πηγή φωτός αναβοσβήνει με μεγάλη συχνότητα εκπέμποντας φως προς τα διακριτά σημάδια. Η συχνότητα με την οποία αναβοσβήνει η πηγή φωτός μεταβάλλεται στη συνέχεια βαθμιαία έως ότου παρατηρώντας τα σημάδια ο περιστρεφόμενος άξονας να δίνει κατά τον οπτικό έλεγχο την εικόνα ότι είναι ακίνητος. Στην κατάσταση αυτή η συχνότητα εκπομπής φωτεινών λάμπσεων θα έχει γίνει ίση ή ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας περιστροφής του άξονα. Τότε, ο αριθμός των λάμπσεων ανά λεπτό θα αντιστοιχεί στον αριθμό των περιστροφών του άξονα ανά λεπτό, δίνοντας την τιμή της γωνιακής ταχύτητάς του. Η μορφή της χρησιμοποιούμενης διάταξης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:







Σχήμα 31 - στροβοσκοπική διάταξη μέτρησης γωνιακής ταχύτητας

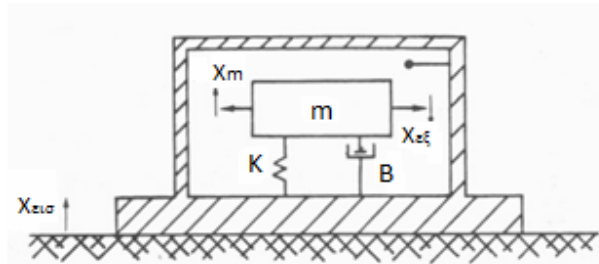
### 3.8 Μέτρηση γωνιακής ταχύτητας με επιταχυνσιόμετρα

Όπως προαναφέρεται στο δεύτερο κεφάλαιο η γωνιακή ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί με την ολοκλήρωση της γωνιακής επιτάχυνσης του στρεφόμενου σώματος. Αρκεί να χρησιμοποιηθεί ένας μετατροπέας που θα δίνει σαν έξοδο την τιμή της γωνιακής επιτάχυνσης και στη συνέχεια το σήμα εξόδου να οδηγηθεί σε έναν ολοκληρωτή. Οι μετατροπείς που μετρούν την επιτάχυνση ονομάζονται επιταχυνσιόμετρα (accelerometers). Το αποτέλεσμα της μέτρησης δίνεται συνήθως σε  $m/sec^2$  αλλά μερικές φορές εκφράζεται και σε  $g$  βάσει της βαρυτικής επιτάχυνσης. Τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μεγάλων επιταχύνσεων μικρής χρονικής διάρκειας (κρούσεις) ή μικρών και περιοδικά επαναλαμβανόμενων επιταχύνσεων (δονήσεις). Διακρίνονται σε ανοικτού και κλειστού βρόγχου, με τα πρώτα να στοχεύουν στον προσδιορισμό της δύναμης που μετατοπίζει τη μάζα από τη θέση ισορροπίας και τα δεύτερα στη μέτρηση της δύναμης που απαιτείται για τη διατήρηση της μάζας στη θέση ισορροπίας. Η λειτουργία τους μαζί με τις κυριότερες μορφές τους περιγράφονται στη συνέχεια της παραγράφου.

Τα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόγχου στηρίζουν τη λειτουργία τους στο

$$F = ma$$

δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, σύμφωνα με τον οποίο ισχύει ότι  $F = ma$ , οπότε υπολογίζουν την επιτάχυνση  $a$  μετρώντας τη δύναμη  $F$  που ασκείται σε σώμα γνωστής μάζας  $m$  εξαιτίας μεταβολής στην ταχύτητά του. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να μετρηθεί η δύναμη αυτή, όμως ο βασικότερος από αυτούς φαίνεται στο παρακάτω επιταχυνσιόμετρο που αποτελείται από ένα πλαίσιο στο εσωτερικό του οποίου στηρίζεται με τη βοήθεια ενός ελατηρίου και ενός αποσβεστήρα ένα σώμα μάζας  $m$ . Τόσο η μάζα  $m$  του σώματος, όσο και η σταθερά  $K$  του ελατηρίου και η σταθερά  $B$  του αποσβεστήρα έχουν γνωστές τιμές. Το πλαίσιο τοποθετείται σταθερά επάνω στην επιφάνεια της οποίας η επιτάχυνση θέλουμε να μετρηθεί ως προς ένα ακίνητο σύστημα αναφοράς, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 32** - κυριότερος τύπος επιταχυνσιόμετρου

Η δύναμη αντίδρασης του αποσβεστήρα είναι ανάλογη της ταχύτητας μετατόπισης. Ως  $X_{εισ}$  συμβολίζεται η μετατόπιση του πλαισίου και σαν  $X_m$  η μετατόπιση του σώματος μάζας  $m$  ως προς το σύστημα αναφοράς. Όταν το πλαίσιο επιταχυνθεί το σώμα μάζας  $m$  μετατοπίζεται ως προς αυτό αλλά προς αντίθετη από αυτό κατεύθυνση. Η έξοδος του συστήματος  $X_{εξ}$  αντιστοιχεί στη μετατόπιση του σώματος μάζας  $m$  ως προς το πλαίσιο. Έτσι για να μετρηθεί η δύναμη  $F$  αρκεί να μετρηθεί η μετατόπιση του σώματος  $X_{εξ}$ , αφού για τη δύναμη

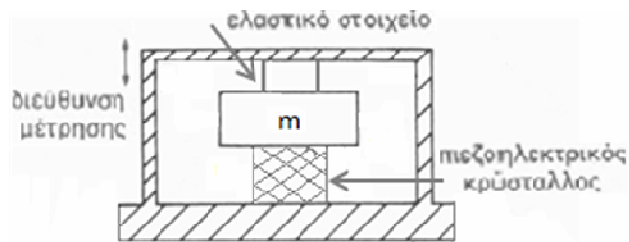


θα ισχύει ότι  $F = K \times X_{εξ}$ . Επομένως θα είναι  $F = ma$  ή  $a = F/m$ , οπότε  $a = K \times X_{εξ} / m$ . Για να δημιουργηθεί έξοδος σε ηλεκτρική μορφή χρησιμοποιείται μαζί με τον παραπάνω μετατροπέα και ένας μετατροπέας θέσης που δίνει τάση εξόδου ανάλογη της μετατόπισης. Το σύστημα των δύο μετατροπέων αποτελεί το επιταχυνσιόμετρο.

Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους και τον τρόπο κατασκευής του μετατροπέα θέσης τα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόγχου διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

#### α) Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα

Αποτελούν ένα από τα βασικότερα είδη. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο προκαλεί απ' ευθείας μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω ενός κρυσταλλικού υλικού. Ως αισθητήρας πίεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί κρύσταλλος quartz, όμως λόγω της χαμηλής ευαισθησίας που παρουσιάζει συνήθως προτιμάται κάποιο τεχνητά πολωμένο φεροηλεκτρικό κεραμικό υλικό, κατασκευασμένο για παράδειγμα από τιτανικό βάριο (barium titanate). Η επιλογή του υλικού εξαρτάται από το περιβάλλον λειτουργίας. Η κατασκευή γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο κρύσταλλος αυτός να εφάπτεται στο περίβλημα ενώ σώμα μάζας  $m$  τοποθετείται πάνω του και με τη βοήθεια ελαστικού στοιχείου του ασκεί πίεση, ακόμα και όταν το σύστημα βρίσκεται σε ακινησία ( $a=0$ ). Το περίβλημα

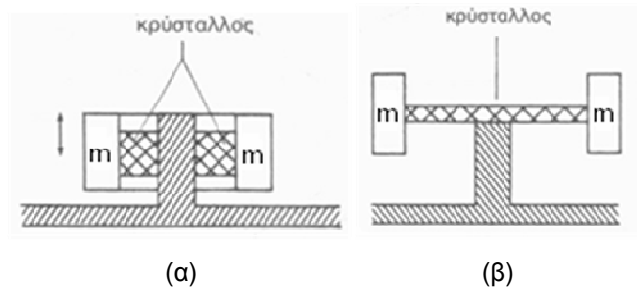


Σχήμα 33 - πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο

τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια που θέλουμε να μετρήσουμε την επιτάχυνση. Όταν αυτή επιταχύνει η μάζα  $m$  μετατοπίζεται ασκώντας πίεση στον κρύσταλλο και οι επιφάνειές του φορτίζονται. Το ηλεκτρικό φορτίο είναι ανάλογο της μηχανικής τάσης που ασκείται και η τάση εξόδου είναι ανάλογη της επιτάχυνσης.



Για λόγους βελτίωσης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών η κατασκευή μπορεί να διαφέρει, με τον κρύσταλλο να δέχεται πίεση ενώ βρίσκεται σε διάτμηση ή κάμψη όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Βελτιώνεται κυρίως η ευαισθησία που



**Σχήμα 34** - πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο με κρύσταλλο υπό πίεση σε α)διάτμηση, β)κάμψη παρουσιάζεται από το επιταχυνσιόμετρο σε επιταχύνσεις με διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση λειτουργίας του (ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης), ενώ στην περίπτωση (β) έχουμε μεγάλη τάση εξόδου και καλύτερη συμπεριφορά σε χαμηλές συχνότητες.

Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα έχουν χαμηλό κόστος, μικρό μέγεθος και βάρος, προσφέρονται για λειτουργία σε υψηλές συχνότητες (1-100 KHz) και είναι ανθεκτικά σε υψηλές επιταχύνσεις. Έχουν ακρίβεια κοντά στο 1% της πλήρους κλίμακας και ευαισθησία που μπορεί να φτάσει μέχρι τα 100mV/g, η οποία μεταβάλλεται κατά 10% λόγω της θερμοκρασίας σε ακραίες θερμοκρασίες λειτουργίας. Έχουν ως προτέρημα τη μεγάλη τάση εξόδου και την καλή απόκριση σε υψηλές συχνότητες, όμως δεν είναι εξίσου ικανοποιητικά σε χαμηλές συχνότητες, ενώ μειονεκτούν καθώς δεν μπορούν να μετρήσουν σταθερή επιτάχυνση και έχουν μεγάλη ευαισθησία στη θερμοκρασία.

### **β) Επιταχυνσιόμετρα με μετατροπέα πιεζοαντίστασης**

Σε αυτού του τύπου τα επιταχυνσιόμετρα η πιεζοαντίσταση λειτουργεί σαν μετρητής πίεσης. Όσο η μηχανική τάση που ασκείται σε αυτήν αλλάζει θα μεταβάλλεται και η αντίστασή της. Η αγωγιμότητα της πιεζοαντίστασης είναι γραμμικά ανάλογη της εφαρμοζόμενης δύναμης, ενώ αντίστοιχα η αντίστασή της είναι αντιστρόφως ανάλογη αυτής. Συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότερες



από μία πιεζοαντιστάσεις σε διάταξη κυκλώματος γέφυρας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ευαισθησία του κυκλώματος και μειώνονται οι διακυμάνσεις στη μέτρηση λόγω θερμότητας. Ως παράδειγμα λειτουργίας ας θεωρήσουμε μια σεισμική μάζα που είναι στερεωμένη στο ένα άκρο λεπτής ελαστικής ράβδου. Στο άλλο άκρο τοποθετούνται δύο ή τέσσερις πιεζοαντιστάσεις σε διάταξη γέφυρας Wheatstone. Η κάμψη της ράβδου μεταφράζεται από τη γέφυρα σε μέτρηση παραμόρφωσης. Έτσι όταν η μάζα επιταχύνεται η επιτάχυνση μετατρέπεται σε ηλεκτρική ποσότητα, καθώς το σήμα που παράγεται στην έξοδο της γέφυρας είναι ανάλογο με αυτήν.

Τα επιταχυνσιόμετρα αυτού του τύπου έχουν μικρό μέγεθος και βάρος και μπορούν να μετρήσουν επιταχύνσεις μέχρι μερικές εκατοντάδες g σε ένα εύρος συχνοτήτων από 0,1-10000 Hz. Η ακρίβειά τους είναι περίπου στο 1% της πλήρους απόκλισης. Τέλος, παρουσιάζουν ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης περίπου  $\pm 2\%$ .

#### **γ) Επιταχυνσιόμετρα με ποτενσιόμετρο**

Στην περίπτωση αυτή η σεισμική μάζα στηριζόμενη από δύο ελαστικά στοιχεία συνδέεται με την κινητή επαφή του ποτενσιόμετρου είτε άμεσα, είτε μέσω ενός συστήματος ενίσχυσης. Το στοιχείο αντίστασης του ποτενσιόμετρου στηρίζεται στο περίβλημα, το οποίο με τη σειρά του τοποθετείται σταθερά πάνω στην επιφάνεια που μετράμε την επιτάχυνσή της. Όταν η σεισμική μάζα κινείται η κινητή επαφή παρασύρεται από την κίνηση της. Έτσι με το ποτενσιόμετρο πραγματοποιείται μέτρηση της μετατόπισης της μάζας ως προς το περίβλημα, με την τάση στην έξοδο να είναι ανάλογη της επιτάχυνσης. Τα ποτενσιομετρικά επιταχυνσιόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για μέτρηση επιτάχυνσης με μικρό ρυθμό μεταβολής. Η επιλογή του ποτενσιόμετρου επιρρεάζει σημαντικά τη γραμμικότητα του μετατροπέα. Είναι ανθεκτικά και έχουν πολύ μικρό κόστος όμως εξαιτίας της τριβής στο ποτενσιόμετρο παρουσιάζουν σφάλματα υστέρησης και σχετικά χαμηλή απόδοση. Η ακρίβειά τους είναι περίπου 1% της πλήρους απόκλισης αλλά μειώνεται σε μεγάλες θερμοκρασίες. Η φυσική τους συχνότητα



είναι της τάξεως των μερικών δεκάδων Hz, ενώ έχουν ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης περίπου  $\pm 1\%$ .

#### **δ) Επιταχυνσιόμετρα χωρητικού τύπου**

Τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα ανιχνεύουν τη μεταβολή στη χωρητικότητα ενός πυκνωτή συναρτήσει της επιτάχυνσης σε σχέση με την τιμή της όταν η σεισμική μάζα βρίσκεται σε στατική κατάσταση. Η σεισμική μάζα στερεώνεται στο περίβλημα με τη βοήθεια δύο ελαστικών στοιχείων (μεμβράνες ή ελατήρια) και κινείται ανάλογα με την επιτάχυνση. Ο ένας οπλισμός του πυκνωτή συνδέεται στο ελεύθερο άκρο της μάζας ενώ ο άλλος τοποθετείται σταθερά στο περίβλημα. Όταν το επιταχυνσιόμετρο υπόκειται σε επιτάχυνση η σεισμική μάζα κινείται και η απόσταση μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή αλλάζει, προκαλώντας μεταβολή στη χωρητικότητά του. Η μεταβολή στη χωρητικότητα μετρείται με κατάλληλο ενσωματωμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα.

Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για απλός πυκνωτής ένας διπλός, διαφορικός πυκνωτής. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε δύο σταθερούς και ακίνητους οπλισμούς στους οποίους παρεμβάλλεται συμμετρικά ένας τρίτος, κινούμενος οπλισμός δημιουργώντας δύο ξεχωριστούς πυκνωτές. Οι πυκνωτές αυτοί έχουν τα ίδια στοιχεία στην κατάσταση ισορροπίας ( $\alpha=0$ ). Η επιτάχυνση που αναπτύσσει το σύστημα μεταβάλλει τις χωρητικότητες τους αντίστροφα, ανάλογα με την μετατόπιση του κινούμενου οπλισμού.

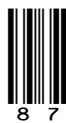
Τα χωρητικά επιταχυνσιόμετρα είναι απλά στην κατασκευή, έχουν μικρό μέγεθος, είναι ανθεκτικά και παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία και διακριτική ικανότητα. Έχουν επίσης αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας (αρκετά KHz). Παρουσιάζουν όμως χαμηλή γραμμικότητα και μεγάλη ευαισθησία στη θερμοκρασία.

Τα επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόγχου χρησιμοποιούν ένα σύστημα ανατροφοδότησης για τη διατήρηση ενός σώματος στη θέση ισορροπίας, ενώ ασκείται σε αυτό αδρανειακή δύναμη που τείνει να το μετακινήσει, με στόχο τον



προσδιορισμό της δύναμης που απαιτείται για να εξισορροπήσει την αδρανειακή δύναμη. Δε διαθέτουν ελατήριο ή άλλο ελαστικό υλικό, με τη μαγνητική ροπή να αντικαθιστά τη λειτουργία του. Αποτελούνται από σώμα μάζας  $m$  στο οποίο όταν εμφανιστεί επιτάχυνση  $a$  ασκείται αδρανειακή δύναμη  $F = ma$  που τείνει να το μετακινήσει από την αρχική θέση αναφοράς. Αυτή η μετακίνηση μετρείται από ένα μετατροπέα θέσης και μετατρέπεται σε ανάλογο μεγέθους ηλεκτρικό σήμα. Το σήμα στη συνέχεια ενισχύεται και τροφοδοτεί έναν ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα που το μετατρέπει σε δύναμη, η οποία ασκείται στο σώμα μάζας  $m$  και εξισορροπεί την αδρανειακή δύναμη  $F$ . Το ρεύμα που τροφοδοτεί τον ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα εξόδου θα έχει ένταση ανάλογη της επιτάχυνσης. Εξαιτίας του ότι δε χρησιμοποιείται ελατήριο το σύστημα παρουσιάζει μεγαλύτερη γραμμικότητα. Το πλεονέκτημα του κλειστού κύκλου λειτουργίας είναι ότι έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει και να εξομαλύνει τα σφάλματα του συστήματος και της διαδικασίας υπολογισμού με χρήση κατάλληλων διατάξεων, προσφέροντας κατά πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία. Για το λόγο αυτό τα επιταχυνσιόμετρα αυτού του τύπου είναι συγκριτικά ακριβότερα από τα αντίστοιχα ανοικτού βρόγχου και προτιμώνται για εφαρμογές σε συστήματα υψηλών απαιτήσεων. Έχουν εύρος συχνοτήτων λειτουργίας μέχρι 100 Hz και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μέτρηση επιταχύνσεων έως και αρκετές δεκάδες g. Η ακρίβειά τους είναι καλύτερη από 0,1% της πλήρους κλίμακας, ενώ έχουν ευαισθησία κάθετης διεύθυνσης από 0,01-0,1%. Η ευαισθησία τους επιρρεάζεται ελάχιστα από τη θερμοκρασία ενώ το βάρος τους φτάνει τις μερικές δεκάδες γραμμάρια.

Σε κάθε περίπτωση, τα επιταχυνσιόμετρα που αναφέρονται στην παράγραφο αυτή θεωρούνται ότι λειτουργούν ως συσκευές με ένα μόνο βαθμό ελευθερίας. Δίνουν δηλαδή το μέτρο της γωνιακής επιτάχυνσης σε ένα μόνο άξονα κίνησης, ενώ λαμβάνεται ως δεδομένο ότι η κίνηση του σώματος προς τις άλλες κατευθύνσεις δεν είναι δυνατή. Για την πραγματοποίηση της μέτρησης της



γωνιακής επιτάχυνσης ενός σώματος κινούμενου στο χώρο απαιτούνται τρία επιταχυνσιόμετρα, ένα για κάθε άξονα κίνησης.

### 3.9 Γυροσκοπικά αισθητήρια ή γυροσκόπια

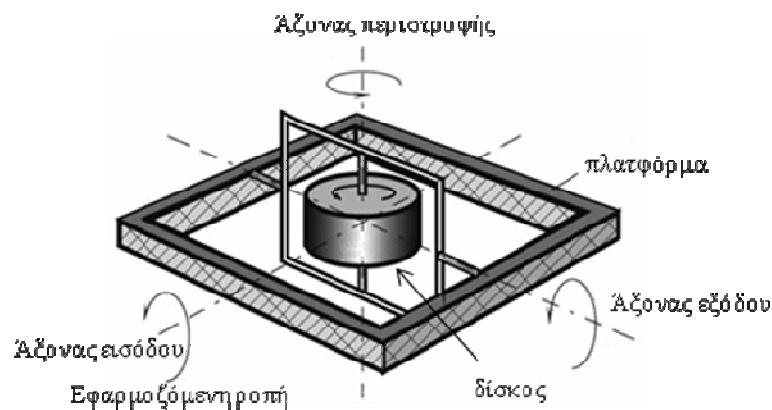
Στο πρώτο κεφάλαιο, κατά την ταξινόμηση των αισθητήρων είδαμε ότι ανάλογα με το σημείο αναφοράς τους χωρίζονται σε απόλυτους και σχετικούς. Όλα τα είδη των αισθητήρων που έχουν αναλυθεί ως τώρα ανήκουν στους σχετικούς αισθητήρες, καθώς κατά τη μέτρηση ως σημείο αναφοράς λαμβάνεται η βάση του προς μέτρηση σώματος. Για απόλυτη μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας χρησιμοποιούνται τα γυροσκόπια. Το σημείο αναφοράς σε αυτή την περίπτωση είναι η Γη. Τα γυροσκόπια είναι συσκευές που χρησιμοποιούν τις αρχές της αδράνειας και της διατήρησης της στροφορμής ώστε να διατηρήσουν σταθερό τον προσανατολισμό τους σε σχέση με μία προκαθορισμένη διεύθυνση. Είναι επομένως ιδανικά για τη μέτρηση γωνιακών περιστροφών, καθώς μπορούν να παρέχουν ακριβή και σταθερά δεδομένα για την κατεύθυνση και το ρυθμό περιστροφής ενός σώματος προς ένα άξονα. Συνδυάζοντας περισσότερα του ενός γυροσκόπια (ένα για κάθε άξονα κίνησης) μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για το ρυθμό της περιστροφής ενός σώματος στο χώρο. Εξαιτίας της σημασίας τους οι αισθητήρες αυτοί διαρκώς εξελίσσονται και βελτιώνονται. Κυρίως χάρη στη μικροτεχνολογία παρέχουν ολοένα και μεγαλύτερη ακρίβεια, γραμμικότητα και σταθερότητα, ενώ το μέγεθος, το κόστος και η ενεργειακή κατανάλωσή τους μειώνονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σημείο στήριξής τους θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα σταθερό ώστε να μην υπεισέρχονται σφάλματα στη μέτρηση. Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας τους και τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά τα γυροσκόπια μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: τα μηχανικά, τα οπτικά και τα γυροσκόπια ταλάντωσης.

#### 3.9.1 Μηχανικά γυροσκόπια





Τα μηχανικά γυροσκόπια ή γυροσκόπια περιστρεφόμενης μάζας ήταν τα πρώτα που κατασκευάστηκαν, με το Γάλλο φυσικό Jean Bernard Foucault να τους δίνει το όνομα αυτό το 1852. Αποτελούνται από ένα δίσκο που μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα προς ένα άξονα περιστροφής, ο οποίος στηρίζεται σε ένα πλαίσιο (συνήθως δακτυλιοειδές), που μπορεί επίσης να περιστρέφεται ελεύθερα προς ένα ή δύο άξονες. Ο αριθμός των αξόνων καθορίζει και τους βαθμούς ελευθερίας κίνησης του συστήματος. Τα δύο κυριότερα στοιχεία του μηχανικού γυροσκοπίου είναι ότι ο άξονας περιστροφής παραμένει σταθερός στο χώρο, με δεδομένο το ότι δεν ασκείται στο σύστημα κάποια εξωτερική δύναμη, καθώς και ότι το σύστημα μπορεί να δώσει ως έξοδο μια ροπή ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας σε ένα άξονα κάθετο προς τον άξονα περιστροφής.



**Σχήμα 35** - παράδειγμα μηχανικού γυροσκοπίου

Σύμφωνα με το νόμο του Νεύτωνα για την περιστροφική κίνηση, όταν η πλατφόρμα στήριξης του συστήματος περιστρέφεται ως προς τον άξονα εισόδου με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , θα αναπτυχθεί μια ροπή στον κάθετο προς αυτόν άξονα εξόδου ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας. Στη βάση στήριξης του πλαισίου (ή των πλαισίων για κίνηση με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας) προσαρμόζεται σερβομηχανισμός και η εκτροπή του πλαισίου μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο αφού ενισχυθεί τροφοδοτεί το σερβομηχανισμό. Ο μηχανισμός αυτός αναλαμβάνει να διορθώσει τη θέση του πλαισίου επαναφέροντάς το στην αρχική

θέση ισορροπίας του. Το ρεύμα που τον τροφοδοτεί είναι ανάλογο της ροπής που εφαρμόζεται. Η παραγόμενη τάση στο φορτίο εξόδου είναι ανάλογη του ρεύματος αυτού και επομένως και της γωνιακής ταχύτητας.

Η ακρίβεια των μηχανικών γυροσκοπίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από φαινόμενα που μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητες ροπές, όπως είναι τα μαγνητικά φαινόμενα ή οι τριβές. Κατά την κίνηση των μηχανικών τους τμημάτων προκαλούνται τριβές, ενώ σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής παράγεται θερμότητα που απαιτεί συμπληρωματική κατεργασία για να αντιμετωπιστεί. Το κυριότερο μειονέκτημα τους είναι ότι μικρά σφάλματα μέτρησης συσσωρεύονται με την πάροδο του χρόνου δημιουργώντας ολοένα αυξανόμενη απώλεια ακρίβειας, κάνοντας αναγκαία την επαναρύθμιση τους. Έτσι, ανάλογα και με την εφαρμογή που χρησιμοποιούνται, ο προτεινόμενος χρόνος διαρκούς λειτουργίας τους δεν υπερβαίνει τις μερικές εκατοντάδες ώρες. Επιπλέον τα μηχανικά γυροσκόπια είναι ογκώδη και απαιτούν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Για να αντιμετωπιστούν κάποια από τα παραπάνω προβλήματα αναπτύχθηκε ένα διαφορετικό είδος γυροσκοπίου όπου καταργείται το σύστημα ανάρτησης. Το σύστημα του δίσκου κλείνεται σε ένα θάλαμο και διατηρείται βυθισμένο σε ένα υγρό υψηλής πυκνότητας που έχει μεγάλο ιξώδες, το οποίο αναλαμβάνει να διατηρήσει τον προσανατολισμό του συστήματος. Στη διάταξη αυτή αν και βελτιώνονται κάποια από τα παραπάνω προβλήματα απαιτείται διαρκής θερμοκρασιακός έλεγχος του υγρού, μεγαλύτερο κόστος κατασκευής, ενώ παρουσιάζονται και φαινόμενα φθοράς με την πάροδο του χρόνου. Εναλλακτικοί τρόποι κατάργησης της τριβής είναι αντί για υγρό να χρησιμοποιηθεί για τη στήριξη του δίσκου ένα αέριο υπό υψηλή πίεση, όπως το ήλιο ή το υδρογόνο, ή ακόμα και να στηρίζεται αυτός στο κενό από ένα ηλεκτρικό πεδίο (ηλεκτροστατικό γυροσκόπιο). Τέλος, υπάρχει και το μαγνητικό γυροσκόπιο, όπου ο δίσκος στηρίζεται από ένα μαγνητικό πεδίο. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα ψύχεται κρουστατικά με αποτέλεσμα ο δίσκος να γίνεται υπεραγώγιμος και με κατάλληλα εφαρμοζόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο να επιπλέει στο κενό.



### 3.9.2 Οπτικά γυροσκόπια

Τα οπτικά γυροσκόπια στηρίζουν τη λειτουργία τους στο φαινόμενο Sagnac, που φέρει το όνομα του Γάλλου George Sagnac ο οποίος και το έθεσε πρώτος σε πειραματική εφαρμογή το 1913. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, αν δύο ακτίνες φωτός εκπνευθούν από μία πηγή laser κατά αντίθετη κατεύθυνση εντός ακίνητου οπτικού δακτυλίου με δείκτη διάθλασης  $n$  και ακτίνα  $R$ , θα διανύσουν την ίδια απόσταση με την ίδια ταχύτητα, φτάνοντας ξανά στο σημείο από όπου ξεκίνησαν ταυτόχρονα. Ο χρόνος που χρειάζεται κάθε μία από τις

ακτίνες για να διανύσει την απόσταση αυτή θα είναι  $\Delta t = \frac{2\pi R}{nc}$ , όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός. Αν όμως ο δακτύλιος περιστρέφεται για παράδειγμα δεξιόστροφα με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , η ακτίνα που κινείται στην ίδια κατεύθυνση θα διανύει λίγο μεγαλύτερη απόσταση (έστω  $L_1$ ), ενώ η αντίθετα κινούμενη ακτίνα θα διανύει κατά λίγο μικρότερη απόσταση (έστω  $L_2$ ) στον ίδιο χρόνο. Θα είναι:

$$L_1 = 2\pi R + \omega R \Delta t \quad \text{και} \quad L_2 = 2\pi R - \omega R \Delta t$$

Προφανώς οι δύο ακτίνες θα συναντηθούν σε διαφορετικό από πριν σημείο, η θέση του οποίου θα εξαρτάται από τη γωνιακή περιστροφή του δακτυλίου. Η διαφορά στην απόσταση που διανύθηκε θα είναι:

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 2\pi R + \omega R \Delta t - (2\pi R - \omega R \Delta t) = 2\omega R \Delta t$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση την τιμή του  $\Delta t$  από την προηγούμενη εξίσωση παίρνουμε:

$$\Delta L = 2\omega R \Delta t = 2\omega R \cdot \frac{2\pi R}{nc} \quad \leftrightarrow \quad \Delta L = \frac{4\pi\omega R^2}{nc}$$

Παρατηρώντας την εξίσωση που προέκυψε είναι προφανές ότι για τη μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας το μόνο που χρειάζεται στα οπτικά γυροσκόπια είναι μία μέθοδος υπολογισμού της μετατόπισης  $\Delta L$ , δεδομένου του ότι όλα τα υπόλοιπα στοιχεία της εξίσωσης είναι γνωστά. Πρέπει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο ισχύει



για οποιοδήποτε σχήμα βρόγχου και όχι μόνο για δακτύλιο, με κατάλληλα τοποθετημένα κάτοπτρα να οδηγούν τις ακτίνες φωτός όποτε χρειάζεται. Στην κατηγορία των οπτικών γυροσκοπίων υπάρχουν δύο ευρέως χρησιμοποιούμενες μορφές γυροσκοπίων, τα γυροσκόπια με δακτύλιο Laser ή RLGs (Ring Laser Gyroscopes) και τα γυροσκόπια οπτικής ίνας ή FOGs (Fiber Optic Gyroscopes).

### **3.9.2.α Γυροσκόπια με δακτύλιο Laser**

Τα γυροσκόπια αυτά εκμεταλλεύονται όπως είδαμε το φαινόμενο Sagnac χρησιμοποιώντας δύο ακτίνες φωτός κινούμενες κατά αντίθετη διεύθυνση σε ένα κλειστό βρόγχο. Αποτελούνται γενικά από ένα laser με τριγωνική κοιλότητα που περιέχει μίγμα αερίων ηλίου και νέου υπό χαμηλή πίεση. Η παραγωγή των δύο ακτίνων laser πραγματοποιείται με τον ιονισμό του μίγματος των αερίων από υψηλή τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου του laser, σε συνδυασμό με διαδοχική ενίσχυσή τους μέσω διαδοχικών ανακλάσεων σε κάτοπτρα που είναι τοποθετημένα σε κάθε κορυφή της τριγωνικής κοιλότητας. Το μήκος της τριγωνικής διαδρομής είναι κατάλληλα ρυθμισμένο ώστε να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος του παραγόμενου φωτός (κατά τη μέγιστη ισχύ του laser). Όταν το γυροσκόπιο περιστραφεί γύρω από ένα άξονα κάθετο στο επίπεδό του θα αλλάξουν όπως είδαμε οι αποστάσεις που θα διανύσουν οι δύο ακτίνες και καθώς η ταχύτητα του φωτός είναι σταθερή θα δημιουργηθεί μια διαφορά  $\Delta f$  στις συχνότητές τους. Ένα μικρό ποσοστό φωτός από κάθε δέσμη περνάει μέσα από ένα από τα τρία κάτοπτρα που είναι ημιπερατό κατά ένα μικρό ποσοστό (μικρότερο του 0,2%). Οι δέσμες του φωτός στη συνέχεια συμβάλλουν και προσπίπτουν στην ανιχνευτική διάταξη (φωτοδίοδοι) που καταγράφει τις αλλαγές στην ένταση (Fringe Pattern) που προκαλεί η διαφορά φάσης. Η συχνότητα και η σχετική φάση στις δύο εξόδους της φωτοδίοδου δείχνουν τόσο το μέγεθος, όσο και τη διεύθυνση περιστροφής του γυροσκοπίου, δηλαδή την ένδειξη για τη γωνιακή ταχύτητά του. Για πολύ



χαμηλές γωνιακές ταχύτητες παρατηρείται σύζευξη των δύο δεσμών laser λόγω της πολύ μικρής διαφοράς στις συχνότητές τους. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου τοποθετείται στο κέντρο του δακτυλίου του laser ένας κινητήρας πιεζοηλεκτρικού τύπου που αναλαμβάνει να δονεί περιστροφικά το γυροσκόπιο. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι τέτοια ώστε να δίνουν μηδενική έξοδο του συστήματος κατά τον περιστροφικό αυτό κραδασμό, ώστε να μην επιρρεάζει τις μετρήσεις του αισθητήρα κατά τη λειτουργία του.

Γενικά, τα οπτικά γυροσκόπια υπερτερούν έναντι των μηχανικών. Το γεγονός ότι δεν έχουν μηχανικά μέρη περιορίζει τις τριβές, ενώ λόγω της κατασκευής τους έχουν μικρότερο όγκο, βάρος αλλά και ενεργειακές απαιτήσεις. Ειδικότερα, τα RLGs παρέχουν μεγάλη ακρίβεια και παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή σε επιδράσεις από εξωγενείς παράγοντες. Ως μειονεκτήματα μπορούν να αναφερθούν το συγκριτικά μεγαλύτερο κόστος κατασκευής, οι αυξημένες ανάγκες συντήρησης και η αδυναμία τους να δώσουν έξοδο για χαμηλές γωνιακές ταχύτητες χωρίς τη χρήση επιπλέον στοιχείων.

### **3.9.2.β Γυροσκόπια οπτικής ίνας**

Τα γυροσκόπια οπτικής ίνας ή FOGs έχουν παρόμοια λειτουργία. Αντί για δακτύλιο laser χρησιμοποιούν μία οπτική ίνα σε μορφή σπείρας. Σε αυτήν δρομολογούνται οι δύο ακτίνες φωτός, οι οποίες αφού διανύσουν την ίνα κατά μήκος και προς αντίθετη κατεύθυνση εξέρχονται και πραγματοποιείται η συμβολή που παράγει το στάσιμο κύμα από τη συχνότητα του οποίου προσδιορίζεται η γωνιακή ταχύτητα. Προκειμένου να βελτιωθεί η ευαισθησία του συστήματος ώστε να επιτυγχάνεται αξιόπιστη μέτρηση και για χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, αυξάνεται η ενεργή περιοχή με την προσθήκη περισσότερων του ενός σπειρών οπτικής ίνας (πηγίο Sagnac). Έχουν δημιουργηθεί δύο διαφορετικοί τύποι FOG με τον ένα να χρησιμοποιεί σύστημα ανοικτού και τον άλλο κλειστού βρόγχου.



Διαφέρουν ως προς τη μέθοδο εφαρμογής της διαμόρφωσης φάσης και ως προς την ηλεκτρονική επεξεργασία του σήματος.

Τα γυροσκόπια οπτικής ίνας ανοικτού βρόγχου αποτελούνται από μία πηγή εκπομπής φωτός (πχ laser) το φως της οποίας οδηγείται σε ένα διαχωριστή δέσμης (coupler) που χωρίζει τη δέσμη φωτός σε δύο ίσα μέρη. Το φως στη συνέχεια πολώνεται για να εξασφαλιστεί ότι κάθε δέσμη θα ακολουθήσει την επιθυμητή πορεία, ενώ ένας δεύτερος διαχωριστής κατευθύνει τις δύο δέσμες ταυτόχρονα μέσα στο πηνίο Sagnac σε αντίθετη κατεύθυνση κίνησης. Όπως έχει προαναφερθεί, όταν το γυροσκόπιο περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  γύρω από ένα άξονα κάθετο στο επίπεδο του θα αλλάξουν οι αποστάσεις που θα διανύσουν οι δύο ακτίνες. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι αν η διαφορά διαδρομής είναι ακριβώς το μισό του μήκους κύματος ( $\Delta L = \lambda/2$ ) οι δύο δέσμες θα συμβάλλουν καταστρέφοντας η μία την άλλη. Κατά την ταυτόχρονη έξοδό τους από το πηνίο Sagnac οι δύο δέσμες φωτός θα έχουν διαφορετική συχνότητα. Η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ακτίνων είναι ανάλογη του ρυθμού περιστροφής του γυροσκοπίου. Στη συνέχεια συμβάλλουν περνώντας από το διαχωριστή στην είσοδο του πηνίου και αφού περάσουν ξανά από τη διαδικασία της πόλωσης οδηγούνται στο φωτοανιχνευτή. Από τη συχνότητα του σήματος που λαμβάνεται εξάγεται η τιμή της γωνιακής ταχύτητας. Αν το σύστημα περιστρέφεται με πολύ χαμηλό ρυθμό η διαφορά  $\Delta L$  της απόστασης που θα διανύσουν οι δύο δέσμες φωτός θα είναι πολύ μικρή. Τότε η ένταση του φωτός που προσπίπτει στο φωτοανιχνευτή, η οποία είναι μη γραμμικά ανάλογη του  $\Delta L$ , δε θα είναι αρκετή για να έχουμε ακριβή αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα σύστημα διαμόρφωσης φάσης στο ένα άκρο του πηνίου που εξασφαλίζει μια επιπλέον διαφορά διαδρομής  $\lambda/4$  μεταξύ των δύο δεσμών για  $\omega=0$ . Στην πράξη αυτό γίνεται τυλίγοντας μέρος της οπτικής ίνας γύρω από ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό που διαστέλλεται και συστέλλεται όταν μια εναλλασσόμενη τάση εφαρμόζεται στα άκρα του. Κατά τη διαστολή η οπτική ίνα τεντώνεται εισάγοντας το επιπλέον μήκος στη διαδρομή των ακτίνων. Με τον τρόπο αυτό ουσιαστικά



μεταφέρεται το θεωρούμενο σημείο αναφοράς των μετρήσεων δίνοντας μεγαλύτερες τιμές για την ένταση του φωτός στην έξοδο και αυξάνοντας σημαντικά την ευαισθησία. Το δυναμικό εύρος των γυροσκοπίων αυτών είναι της τάξης του 1000-5000 και η ευαισθησία τους ποικίλει από 0,01-100 deg/h. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές χαμηλού κόστους, όπου το δυναμικό εύρος και η γραμμικότητα δεν έχουν μεγάλη κρισιμότητα.

Για να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του γυροσκοπίου οπτικής ίνας επιλέγεται μια παρόμοια διάταξη με σύστημα κλειστού βρόγχου. Η λειτουργία της είναι ίδια, αλλά εφαρμόζει διαφορετική μέθοδο για τη διαμόρφωση φάσης και την ηλεκτρονική επεξεργασία του σήματος. Χρησιμοποιείται όπως και πριν σύστημα διαμόρφωσης φάσης στο ένα άκρο του πηνίου. Όμως η μεταβολή που εμφανίζεται στη φάση των σημάτων των δύο δεσμών φωτός κατά την περιστροφή του γυροσκοπίου αντισταθμίζεται με μία ίση και αντίθετη τεχνητά εφαρμοζόμενη διαφορά φάσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η σχέση των φάσεων μεταξύ των δύο σημάτων να διατηρείται σταθερή σε μία συγκεκριμένη τιμή. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανατροφοδότηση ενός σήματος κατά τη διαμόρφωση φάσης που λειτουργεί σαν σήμα διόρθωσης σφάλματος. Όταν το γυροσκόπιο περιστρέφεται, το αρχικά παραγόμενο σήμα (σήμα πρώτης αρμονικής) θα έχει όπως είδαμε φάση ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας. Το σήμα αυτό ανιχνεύεται από τον φωτοανιχνευτή και με τη βοήθεια ενός συστήματος αποδιαμόρφωσης ολοκληρώνεται παράγοντας μια αντίστοιχη τάση. Η τάση οδηγείται ως είσοδος σε ένα ταλαντωτή και η συχνότητα του σήματος εξόδου του εφαρμόζεται στο πηνίο μαζί με τη διαμόρφωση φάσης ρυθμίζοντας εκείνες των δεσμών φωτός. Τα γυροσκόπια αυτού του τύπου παρουσιάζουν κατά πολύ βελτιωμένη γραμμικότητα, ενώ και το δυναμικό τους εύρος αυξάνει φτάνοντας σε τιμές της τάξης του  $10^6$ . Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μέσης και υψηλής ακρίβειας.

### 3.9.3 Γυροσκόπια ταλάντωσης



Η προσπάθεια δημιουργίας γυροσκοπικών αισθητηρίων με ακόμα καλύτερα χαρακτηριστικά από τις κατηγορίες που προαναφέρονται οδήγησε στην κατασκευή των γυροσκοπίων ταλάντωσης. Σε αυτό συνετέλεσε και η διαρκώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων ή MEMS (Microelectromechanical Systems) που έδωσε τη δυνατότητα για κατασκευές πολύ μικρού μεγέθους, υψηλής αξιοπιστίας, χαμηλού κόστους παραγωγής και με εξαιρετικά μεγάλη ανθεκτικότητα. Λόγω της χρήσης των MEMS τα γυροσκόπια ταλάντωσης συχνά αναφέρονται και ως μικροηλεκτρομηχανικά γυροσκόπια. Η λειτουργία τους στηρίζεται στο φαινόμενο Coriolis, που ανέλυσε πρώτος ο Gustave Gaspard Coriolis το 1835. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται σε μία αδρανειακή δύναμη (δύναμη Coriolis), η οποία περιγράφει τη φαινόμενη επιτάχυνση των σωμάτων όταν αυτά κινούνται γραμμικά σε ένα σύστημα που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  προς ένα άξονα κάθετο στην κίνησή τους. Η δύναμη δίνεται από την εξίσωση:

$$F = -2m(\omega \times U),$$

όπου  $m$  η μάζα του σώματος,  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του συστήματος και  $U$  η γραμμική ταχύτητα της κίνησης. Η φαινόμενη επιτάχυνση είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας και διανυσματικά τοποθετείται σε άξονα κάθετο στο επίπεδο που σχηματίζουν ο άξονας της γραμμικής κίνησης με εκείνον προς τον οποίο περιστρέφεται το σύστημα αναφοράς. Η δύναμη Coriolis εμφανίζεται σε κάθε περιστρεφόμενο σύστημα και είναι το αίτιο των πλευρικών επιταχύνσεων που εφαρμόζονται στα σώματα που κινούνται σε αυτά. Ο κυριότερος λόγος εφαρμογής της δύναμης αυτής είναι η περιστροφή της Γης, καθώς οτιδήποτε κινείται στην επιφάνειά της, ενώ η ίδια κινείται αριστερόστροφα (anticlockwise) με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα. Η αρχή λειτουργίας των γυροσκοπίων αυτού του τύπου βασίζεται στον υπολογισμό της επιτάχυνσης που οφείλεται στη δύναμη Coriolis και στον προσδιορισμό μέσω αυτής της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής. Χρησιμοποιούνται μικρομηχανισμοί (MEMS) οι οποίοι





τοποθετούνται κάθετα στον κύριο άξονα κίνησης και ανιχνεύουν τις δονήσεις που παράγονται λόγω των πλευρικών επιταχύνσεων που αναπτύσσονται από την περιστροφή. Στην πράξη υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι τέτοιων γυροσκοπίων που μπορούν όμως να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κύριες ομάδες:

- γυροσκόπια απλού ταλαντωτή
- γυροσκόπια ισορροπημένης ταλάντωσης
- γυροσκόπια ταλαντευόμενου πλαισιακού φορέα

Στις παραγράφους που ακολουθούν αναλύεται η λειτουργία των κυριότερων μορφών των γυροσκοπίων κάθε κατηγορίας.

### 3.9.3.α Γυροσκόπια απλού ταλαντωτή

Μία απλή μορφή γυροσκοπίου που ανήκει σε αυτή την ομάδα αποτελείται από μία μάζα που στηρίζεται από δύο αναρτήσεις (ελατήρια) που επιτρέπουν να κινείται προς δύο κατευθύνσεις παράλληλα προς τη βάση του γυροσκοπίου. Έστω  $x$  και  $y$  οι άξονες που ορίζουν τις κατευθύνσεις αυτές. Αρχικά η μάζα οδηγείται σε ταλάντωση στον ένα άξονα, που ονομάζεται άξονας οδήγησης (έστω στον άξονα  $x$ ). Καθώς βρίσκεται σε κίνηση, αν το γυροσκόπιο (και κατ' επέκταση το σώμα στο οποίο έχει προσαρμοστεί) αρχίσει να περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  προς ένα άξονα κάθετο στο σύστημα των αξόνων  $x$  και  $y$ , θα αναπτυχθεί λόγω της δύναμης Coriolis επιτάχυνση στον άξονα  $y$ . Η επιτάχυνση αυτή παράγει μια κίνηση Coriolis ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του γυροσκοπίου. Το μέτρο της δύναμης Coriolis θα δίνεται από τη σχέση:

$$F = 2mU\omega \sin \varphi t$$

όπου  $t$  ο χρόνος, ενώ το  $\varphi$  αντιστοιχεί στη συχνότητα ταλάντωσης της μάζας  $m$ . Η ταλάντωση που προκύπτει έχει δύο συνιστώσες, μία σε καθένα από τους άξονες  $x$  και  $y$ . Μετρώντας το πλάτος της ταλάντωσης στον άξονα  $y$  μπορεί να υπολογιστεί το μέτρο της γωνιακής ταχύτητας, ενώ από την παραμόρφωση της ταλάντωσης του σώματος μπορεί να προσδιοριστεί η κατεύθυνση της

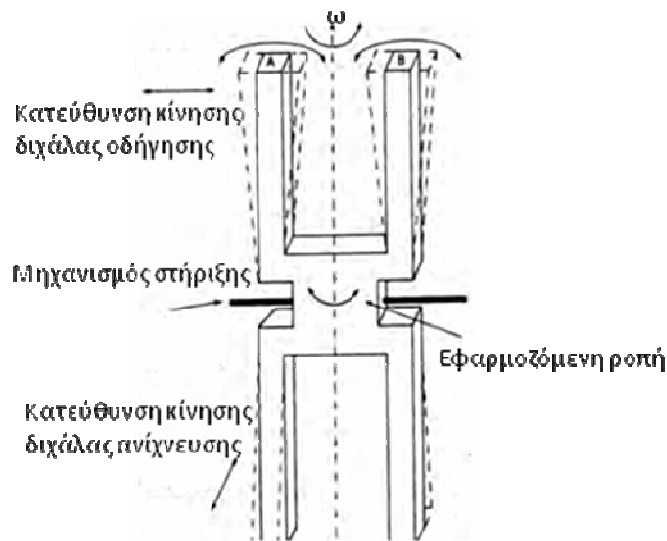


περιστροφής. Υπάρχουν διάφοροι τύποι γυροσκοπίων ταλαντευόμενης μάζας που ακολουθούν αυτή την αρχή λειτουργίας. Διαφέρουν ως προς τη γεωμετρία του αισθητηρίου και τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή και την ανίχνευση της ταλάντωσης.

### 3.9.3.β Γυροσκόπια ισορροπημένης ταλάντωσης

Ο κυριότερος εκφραστής αυτής της κατηγορίας είναι το πιεζοηλεκτρικό γυροσκόπιο ταλάντωσης διχάλας. Χρησιμοποιεί ένα ταλαντευόμενο στοιχείο που αποτελείται από δύο ζεύγη διχαλωτών δοντιών (fork tines) κατασκευασμένα από πιεζοηλεκτρικό υλικό. Τα δόντια της μίας διχάλας (διχάλα οδήγησης) οδηγούνται από ένα ταλαντωτή με αποτέλεσμα να πλησιάζουν και να απομακρύνονται το ένα από το άλλο με μεγάλη συχνότητα. Αν το γυροσκόπιο αρχίσει να περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  προς ένα άξονα κάθετο στη διεύθυνση κίνησης των δοντιών, θα αρχίσει να εφαρμόζεται στο καθένα από αυτά μια δύναμη Coriolis. Επειδή τα δόντια κινούνται κατά αντίθετες κατευθύνσεις οι ασκούμενες δυνάμεις Coriolis θα είναι κάθετες στο επίπεδό τους και με αντίθετη κατεύθυνση. Για το λόγο αυτό παράγεται μία ροπή στρέψης ανάλογη του ρυθμού περιστροφής. Τα δόντια της διχάλας ανίχνευσης αντιδρούν στη ροπή αυτή και κινούνται κάθετα προς τον άξονα κίνησης της διχάλας οδήγησης, αλλά και προς εκείνο που περιστρέφεται το σύστημα. Τα στοιχεία αυτά φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.





**Σχήμα 36** - πιεζοηλεκτρικό στοιχείο με μορφή ζευγών διχαλωτών δοντιών

Το σήμα που παράγεται κατά την κίνηση των δοντιών της διχάλας ανίχνευσης αφού ενισχυθεί αποδιαμορφώνεται δίνοντας ένα DC σήμα ανάλογο της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του γυροσκοπίου. Το πρόσημο της τάσης εξόδου παρέχει την πληροφορία για τη φορά περιστροφής. Είναι προφανές ότι η τάση εξόδου του συστήματος θα πρέπει να είναι ίση με το μηδέν αν αυτό δεν περιστρέφεται. Αυτό προϋποθέτει μεγάλη ακρίβεια στην κατασκευή του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου γιατί αν οι δονήσεις δεν είναι ακριβώς κάθετες στο επίπεδο του αισθητήρα θα έχουμε παραγωγή κίνησης μικρού πλάτους που θα μειώσει την τάση στην έξοδο σε τιμές της τάξης των λίγων mV. Επίσης το σύστημα ανίχνευσης μπορεί να επιρραστεί από σήματα θορύβου παραγόμενα από εξωτερικές δονήσεις. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η χρήση σύνθετων ηλεκτρονικών συστημάτων για το φιλτράρισμα του σήματος, τα οποία αυξάνουν το κόστος του αισθητήρα.

### 3.9.3.γ Γυροσκόπια ταλαντευόμενου πλαισιακού φορέα



Οι αρχές λειτουργίας αυτού του τύπου γυροσκοπίων αναλύθηκαν για πρώτη φορά από τον G.H.Bryan το 1890 μέσω της ταλάντωσης του χείλους ενός ποτηριού. Παρατήρησε ότι κατά την ταλάντωση το χείλος του ποτηριού δονείται κατά μία ελλειπτική κίνηση που ορίζεται από δύο νοητές διαμέτρους. Όταν το ποτήρι περιστρέφεται προς ένα άξονα κάθετο στο επίπεδο της ταλάντωσης, οι διάμετροι αυτοί περιστρέφονται με ρυθμό ανάλογο της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του. Μετρώντας τη μετατόπιση που παρατηρείται στη θέση των αξόνων της ταλάντωσης μπορεί να προσδιοριστεί η ζητούμενη γωνιακή ταχύτητα. Σε αυτό το φαινόμενο στηρίζεται η λειτουργία διαφόρων ειδών γυροσκοπίων ταλάντωσης, όπως είναι το δακτυλιοειδές, το κυλινδρικό και το ημισφαιρικό γυροσκόπιο ταλάντωσης (γνωστό και ως wine glass γυροσκόπιο).

Στην περίπτωση του δακτυλιοειδούς γυροσκοπίου χρησιμοποιείται ως στοιχείο ταλάντωσης ένας δακτύλιος κατασκευασμένος από σιλικόνη. Για τη σωστή λειτουργία του οργάνου είναι αναγκαίο να στηρίζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται η ταλάντωσή του με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ελευθερία. Για να επιτευχθεί αυτό, τη στήριξη του δακτυλίου αναλαμβάνουν 8 αναρτήρες τοποθετημένοι κατά ίσα διαστήματα εξωτερικά της περιφέρειάς του, με τον καθένα να ισαπέχει επομένως από τους διπλανούς του κατά  $\pi R/4$ , όπου R η ακτίνα του δακτυλίου. Το άλλο άκρο των αναρτήρων είναι στερεωμένο σε σταθερό εσωτερικό περίβλημα του οργάνου. Στο δακτύλιο προσαρμόζονται μία ομάδα από ηλεκτρόδια με σκοπό να παρέχουν το σήμα οδήγησης και ελέγχου της ταλάντωσης (ηλεκτρόδια οδήγησης) και μια ακόμα ομάδα από ηλεκτρόδια που παρακολουθούν την ταλάντωση αυτή (ηλεκτρόδια ανίχνευσης). Αρχικά, τα ηλεκτρόδια οδήγησης εφαρμόζουν μια σταθερή ηλεκτροστατική δύναμη στο δακτύλιο που συνδυαστικά με τα ελατήρια παράγει μια στάσιμη ταλάντωση. Όταν ο δακτύλιος περιστρέφεται γύρω από ένα άξονα κάθετο στο επίπεδο της ταλάντωσης από μια εξωτερική δύναμη θα ασκηθεί δύναμη Coriolis που θα παραμορφώνει την ταλάντωση. Η παραμόρφωση μπορεί να ανιχνευτεί από τα χωρητικά ηλεκτρόδια ανίχνευσης. Από το πλάτος του σήματος που παράγεται



από τα ηλεκτρόδια ανίχνευσης υπολογίζεται το μέτρο της γωνιακής ταχύτητας, ενώ από την παραμόρφωση της ταλάντωσης η κατεύθυνση περιστροφής του γυροσκοπίου. Το σήμα παραγωγής της ταλάντωσης μπορεί να εφαρμόζεται εναλλακτικά από μετατροπείς που ακολουθούν άλλα φαινόμενα λειτουργίας, όπως για παράδειγμα οπτικά, πιεζοηλεκτρικά ή ηλεκτρομαγνητικά. Το ίδιο ισχύει και για την ανίχνευση του σήματος στον έλεγχο της ταλάντωσης. Έτσι υπάρχουν αρκετά είδη γυροσκοπίων σε αυτή την κατηγορία που ακολουθούν όμως παρόμοια με αυτήν λειτουργία.

Η έμφυτη συμμετρία του συστήματος το κάνει ιδιαίτερα ανθεκτικό σε παρεμβολές από εξωτερικές ταλαντώσεις. Επίσης είναι ανθεκτικό σε μεταβολές στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος λειτουργίας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι εκτός από τα χαρακτηριστικά που έχουν ήδη αναφερθεί για τα γυροσκόπια ταλάντωσης και αφορούν το πολύ μικρό τους μέγεθος (σχεδόν ολοκληρωμένου κυκλώματος), την υψηλή τους αξιοπιστία και το χαμηλό κόστος παραγωγής το μεγάλο πλεονέκτημα των γυροσκοπίων ταλάντωσης είναι ότι μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθειά τους η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής προς δύο κατευθύνσεις με μία μόνο συσκευή. Το μειονέκτημα που παρουσιάζουν είναι η χαμηλή τους ευαισθησία.

## Συμπεράσματα



Όπως φαίνεται από όσα προαναφέρονται, παρόλο που η ταχύτητα έχει την ιδιαιτερότητα να μην υπάρχουν αρκετοί αισθητήρες και μετατροπείς που να μπορούν να πραγματοποιήσουν άμεση μέτρησή της, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός αυτών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έμμεση μέτρηση, μέσω κάποιου άλλου φυσικού μεγέθους. Πιο σύνηθες είναι να εκμεταλλευόμαστε για το σκοπό αυτό τη μέτρηση της μετατόπισης ή της συχνότητας. Οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται μπορούν να είναι απλοί ή να λειτουργούν ως μέρη πιο σύνθετων διατάξεων που θα περιλαμβάνουν περισσότερους μετατροπείς που εκτελούν διαφορετικές εργασίες. Για την επιλογή της καταλληλότερης διάταξης για την πραγματοποίηση της μέτρησης πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν αρχικά τα στατικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη κρισιμότητα σε σχέση με την εφαρμογή. Αν για παράδειγμα μας ενδιαφέρει να έχουμε κατά τη μέτρηση μεγάλη ευαισθησία και υψηλή ακρίβεια αυτόματα οι επιλογές φιλτράρονται και περιορίζονται, καθώς αρκετοί μετατροπείς παρουσιάζουν αδυναμίες στο ένα ή στο άλλο χαρακτηριστικό. Σημαντικό κριτήριο αποτελεί στη συνέχεια το περιβάλλον λειτουργίας, το οποίο καθορίζει τις συνθήκες που θα κληθεί να λειτουργήσει η διάταξη και τον όγκο της. Δεδομένου του ότι αρκετοί μετατροπείς όπως είδαμε επιρρεάζονται από τη θερμοκρασία, την υγρασία, τους κραδασμούς ή από κοντινά μαγνητικά πεδία κτλ. Πέρα από τη συμβατότητα με το περιβάλλον λειτουργίας για λόγους βελτιστοποίησης των μετρήσεων, αυτή η επιλογή χρησιμεύει και για την προστασία της ίδιας της διάταξης από τυχόν διάβρωση που θα αλλοιώσει τη λειτουργία της και θα μειώσει τη διάρκεια ζωής της. Καθοριστικό ρόλο τέλος παίζει το κόστος κατασκευής και συντήρησης. Με γνώμονα όλα τα παραπάνω κριτήρια, μπορούμε να καταλήξουμε στο ότι ενώ συγκριτικά μεταξύ τους οι μετατροπείς και οι αισθητήρες που αναλύσαμε παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, δεν μπορούμε να πούμε με ασφάλεια ποιος είναι καλύτερος από ποιον φτάνοντας στην επιλογή μίας ιδανικής



διάταξης, καθώς η καταλληλότητά τους κρίνεται και αποφασίζεται από την ίδια την εφαρμογή που χρησιμοποιούνται.

## Βιβλιογραφία

- Jacob Fraden: "Handbook of modern sensors", 4th Edition (2010)
- Pavel Ripka, Alois Típek: "Modern sensors handbook" (2007)
- Sabrie Soloman: "Sensors handbook", 2nd Edition (2010)
- Ian R. Sinclair: "Sensors and transducers", 3rd Edition (2001)
- Α. Γαστεράτος, Σπ. Μουρούτσος, Ι. Ανδρεάδης: "Τεχνική των μετρήσεων" (2006)
- U.A. Bakshi, A.V. Bakshi, K.A. Bakshi: "Electrical measurement and measuring instruments" (2009)
- Steven A. Dyer: "Survey of instrumentation and measurement" (2001)
- John Turner: "Automotive Sensors" (2009)
- Α. Χατζηευφραιμίδης: (σημειώσεις μαθήματος) "Τεχνολογία μετρήσεων"
- Στυλιανός Ανέστης: "Αυτοματισμοί και όργανα μέτρησης" (2010)
- "Measurement, instrumentation, and sensors handbook" (1999)

