

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ, ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ


ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ »

“ SIGNAL CONDITIONING TECHNIQUES “

ΦΟΙΤΗΤΗΣ : *ΑΛΑΜΑΝΙΩΤΗΣ ΜΙΛΤΙΑΔΗΣ*

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: κ. ΜΟΥΣΤΑΚΙΔΗΣ Γ.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 3402/1

Ημερ. Εισ.: 10-05-2006

Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ- ΜΗΥΤΔ

2005

ΑΛΑ

Τεχνικές Μορφοποίησης Σήματος

Signal Conditioning Techniques

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ</u>	<u>ΣΕΛΙΔΑ</u>
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	1
1.1.1 Σημασία της μορφοποίησης σήματος.....	1
1.1.2 Ορισμός.....	2
1.1.3 Τεχνολογίες μορφοποίησης.....	3
1.2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ.....	5
1.2.1 Μετατροπείς και αισθητήρες.....	5
1.2.2 Κατάταξη αισθητήρων.....	5
1.2.3 Χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	6
1.2.4 Σφάλματα.....	9
1.2.5 Αξιοπιστία.....	10
1.2.6 Αντιστοιχία φυσικών ποσοτήτων με αισθητήρες.....	11
1.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	12
1.3.1 Βασικό σύστημα ανάκτησης.....	12
1.4 ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	13
1.4.1 Ενδεικτικές μετρήσεις.....	13
1.4.2 Μετρήσεις ελέγχου.....	14
1.4.3 Περιβαλλοντικές μετρήσεις.....	14
1.4.4 Μετρήσεις ασφάλειας.....	14
2.ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	15
2.1 ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΤΑΞΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	15
2.2 ΠΡΩΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	15
2.3 ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	16
3.ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ	22
3.1 ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	22
3.2 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΤΕΣ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	24
3.2.1 Διαφορικός ενισχυτής.....	24
3.2.2 Ενισχυτής επιφόρτισης.....	27

3.2.3 Κύκλωμα μορφοποίησης για χωρητικούς αισθητήρες.....	28
3.2.4 Μετατροπείας χωρητικότητας σε χρόνο για μορφοποίηση σήματος σε χωρητικούς αισθητήρες.....	30
3.2.5 Κύκλωμα μορφοποίησης για χωρητικούς αισθητήρες συνδυάζοντας την συχνότητα και την duty – cycle διαμόρφωση του ίδιου σήματος εξόδου.....	31
3.2.6 Κύκλωμα μορφοποίησης για αισθητήρες πίεσης.....	36
3.2.7 Μορφοποίηση σήματος με μεταβλητό ρυθμό παλμών εξόδου.....	38
4.ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	43
4.1 ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ.....	43
4.2 ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	44
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	46

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

ΑΛΑΜΑΝΙΩΤΗΣ ΜΙΛΤΙΑΔΗΣ
Α.Μ. : 1700027
e-mail: malaman@inf.uth.gr

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μετρήσεις διαπερνούν την ζωή μας. Η βιομηχανία, το εμπόριο, η ιατρική και η επιστήμη γενικότερα στηρίζονται πάνω σε μετρήσεις. Οι αισθητήρες (sensors) ευνοούν τις μετρήσεις διότι ‘παράγουν’ ηλεκτρικά σήματα τα οποία έχουν ενσωματωμένη πληροφορία για την μετρούμενη ποσότητα. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα επεξεργάζονται αυτά τα σήματα με σκοπό να ‘βγάλουν’ αυτήν την πληροφορία. Όταν αυτή η πληροφορία έχει μετρηθεί από τον αισθητήρα, πρέπει να αλλαχθεί σε μια μορφή κατάλληλη που θα αποτελέσει είσοδο σε ένα σύστημα ανάκτησης δεδομένων (Data Acquisition System ή DAQ). Στις περισσότερες εφαρμογές αυτό σημαίνει ότι η έξοδος του αισθητήρα θα μετατραπεί σε τάση (εάν δεν είναι ήδη).

Τα συστήματα μέτρησης βασισμένα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (Computer-based measurement systems) χρησιμοποιούνται σε μια πλειάδα εφαρμογών. Σε εργαστήρια και σε διάφορα μέρη εργασίας αυτά τα συστήματα συμπεριφέρονται σαν εργαλεία μέτρησης γενικού σκοπού, τα οποία όμως ταιριάζουν άριστα και στη μέτρηση σημάτων τάσης. Παρόλα αυτά, πολλοί αισθητήρες πραγματικού κόσμου και μετατροπείς (transducers) χρειάζονται ένα είδος μορφοποίησης σήματος (signal conditioning), πριν τα συστήματα μέτρησης μπορέσουν αποτελεσματικά και με ακρίβεια να ανακτήσουν το σήμα.

1.1 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ

1.1.1 Σημασία της Μορφοποίησης Σήματος

Η Μορφοποίηση Σήματος είναι ένα από τα πιο σημαντικά συστατικά για κάθε σύστημα ανάκτησης δεδομένων. Αποτελεί την διασύνδεση μεταξύ των πραγματικού κόσμου αναλογικών σημάτων (real-world analog signals) και του υπόλοιπου

συστήματος. Εάν ο μορφοποιητής σήματος και οι διασυνδέσεις με τα άλλα τμήματα του συστήματος δεν έχουν οριστεί σωστά, το πιο πιθανό είναι στην έξοδο του DAQ να έχουμε λανθασμένη και ασαφή πληροφορία. Αναλυτικότερα το τμήμα της μορφοποίησης του σήματος παρέχει κάποια βασικά κυκλώματα ανάμεσα στον αισθητήρα και στο σύστημα ανάκτησης δεδομένων. Υποδεικνύει μια ορισμένη διασύνδεση σε έναν αισθητήρα, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει διάφορες λειτουργίες όπως ερεθισμό (excitation), κλιμάκωση (scaling) και αποθήκευση (buffering). Ένα παράδειγμα ερεθισμού αισθητήρα είναι ότι οι μετρητές πίεσης (strain gauge) χρειάζονται μια σταθερή πηγή ρεύματος.

1.1.2 Ορισμός

Οι μορφοποιητές σήματος είναι τμήματα συστήματος μέτρησης τα οποία ξεκινούν με ένα ηλεκτρικό σήμα που προέρχεται από την έξοδο του αισθητήρα και στην συνέχεια δίνουν ένα σήμα το οποίο είναι κατάλληλο για μετάδοση, επεξεργασία ή εγγραφή, η ακόμη καλύτερα είναι εναρμονισμένο με τις ανάγκες της συσκευής και του εξοπλισμού που ακολουθεί. Συνήθως αποτελούνται από ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία διεκπεραιώνουν ορισμένες από τις παρακάτω λειτουργίες : ενίσχυση, φιλτράρισμα, διαμόρφωση, αποδιαμόρφωση καθώς και άλλες λειτουργίες που εξηγούνται σε παρακάτω κεφάλαιο.

Συνεπώς δίνοντας έναν γενικό ορισμό έχουμε ότι :

Η Μορφοποίηση Σήματος αλλάζει το σήμα που δίνει ένας αισθητήρας έτσι ώστε ένας μετατροπέας από Αναλογικό σε Ψηφιακό, να μπορεί να μετρήσει το σήμα. Στην διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες.

Στο σημείο αυτό ας αναφέρουμε τον όρο μορφοποίηση σήματος από την αρχή ως το τέλος (front-end signal conditioning) που αναφέρεται στη διαδικασία που γίνεται πριν από το σύστημα DAQ. Όπως επίσης και το γεγονός ότι μερικά πρότυπα (standards) αποκαλούν τον αισθητήρα μαζί με το τμήμα μορφοποίησης transmitter.

Εκτός από την αναλογική μορφοποίηση υπάρχει και η ψηφιακή μορφοποίηση και αναφέρεται σε σήματα διακριτού χρόνου (digital signal conditioning).

1.1.3 Τεχνολογίες Μορφοποίησης

Όπως έχει αναφερθεί και από τον παραπάνω ορισμό τα περισσότερα σήματα χρειάζονται ένα είδος προετοιμασίας πριν ψηφιοποιηθούν. Για παράδειγμα τα θερμικά σήματα είναι πολύ χαμηλής τάσης και πρέπει να ενισχυθούν. Άλλοι αισθητήρες όπως οι μετρητές πίεσης και οι μετρητές επιτάχυνσης απαιτούν την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για να λειτουργήσουν. Ακόμη και τα πιο απλά σήματα μπορεί να χρειαστούν ειδικές τεχνολογίες κυρίως για την μέτρηση τους με ακρίβεια. Όλες αυτές οι τεχνολογίες ή λειτουργίες είναι μορφές Μορφοποίησης Σήματος. Υπάρχει μια εκτενής ποικιλία από τεχνολογίες Μορφοποίησης , ο ρόλος και η ανάγκη για κάθε μία μπορεί να γίνει πολύπλοκος. Παρακάτω , παρατίθεται μια λίστα με τις πιο διαδεδομένες και κοινές τεχνολογίες...

- **Ενίσχυση (amplification)** – Όταν τα επίπεδα τάσης που μετριοούνται είναι πολύ μικρά , η ενίσχυση χρησιμοποιείται για την μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας του ψηφιοποιητή. Με την ενίσχυση του σήματος εισόδου, το μορφοποιημένο σήμα χρησιμοποιεί περισσότερο από το εύρος του μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό και αυξάνει την ακρίβεια και την ανάλυση της μέτρησης. Αισθητήρες οι οποίοι έχουν ανάγκη ενίσχυσης είναι αυτοί που μετράνε θερμότητα και πίεση.
- **Απόσβεση (attenuation)** – Η απόσβεση είναι το αντίθετο της ενίσχυσης. Είναι αναγκαία όταν οι τάσεις που θα ψηφιοποιηθούν είναι μεγαλύτερες από το εύρος εισόδου του ψηφιοποιητή. Αυτή η μορφή μορφοποίησης ελαττώνει το πλάτος του σήματος εισόδου έτσι ώστε το νέο σήμα να βρίσκεται στο εύρος του μετατροπέα. Η απόσβεση είναι απαραίτητη για την μέτρηση υψηλών τάσεων.
- **Απομόνωση (isolation)** – Τα σήματα τάσης που βρίσκονται εκτός του εύρους του ψηφιοποιητή μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στο σύστημα μέτρησης. Γι αυτό το λόγο , η απομόνωση χρειάζεται μαζί με την απόσβεση για την προστασία του συστήματος και του χρήστη από επικίνδυνες τάσεις. Οι απομονωμένοι μορφοποιητές μεταφέρουν το σήμα από την πηγή στη

συσκευή μέτρησης χωρίς φυσική σύνδεση. Επιπρόσθετα, για να σπάσουν τα κυκλώματα μέσω του εδάφους, η τεχνική αυτή σταματά τα 'κύματα' υψηλών τάσεων και απορρίπτει τις υψηλές τάσεις κοινού σήματος και συμβάλει στην προστασία του συστήματος.

- **Πολυπλεξία (multiplexing)** – Τυπικά, ο ψηφιοποιητής είναι το πιο ακριβό τμήμα ενός DAQ. Με την πολυπλεξία, είναι δυνατή η δρομολόγηση πολλών σημάτων μέσα σε έναν ψηφιοποιητή. Είναι αναγκαία για κάθε εφαρμογή υψηλού αριθμού καναλιών.
- **Φιλτράρισμα (filtering)** – Το φιλτράρισμα είναι αναγκαίο για την απομάκρυνση παρασιτικών συχνοτήτων και για την μείωση του θορύβου. Για παράδειγμα, οι μετρήσεις θερμοκρασίας χρειάζονται χαμηλοπερατά φίλτρα. Οι παλμικές μετρήσεις κανονικά χρειάζονται φίλτρο αντιαναδίπλωσης για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων συχνοτήτων, έξω από το εύρος του συστήματος.
- **Ερεθισμός (excitation)** – Πολλοί αισθητήρες έχουν ανάγκη από κάποια μορφή ενέργειας για να ολοκληρώσουν μια μέτρηση. Με την τεχνολογία αυτή παρέχεται η αναγκαία ενέργεια. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με μια πηγή ρεύματος ή τάσης, ανάλογα τον αισθητήρα.
- **Γραμμικοποίηση (linearization)** – Μερικοί τύποι αισθητήρων παράγουν σήματα τάσης, τα οποία όμως δεν σχετίζονται γραμμικά με τις φυσικές ποσότητες που μετράνε. Η λειτουργία αυτή μπορεί να επιτευχθεί και με την χρήση λογισμικού και όχι μόνο κυκλωμάτων.
- **Cold-Junction Compensation** – Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρειάζεται για την μέτρηση θερμοκρασίας. Κάθε φορά που ο ανάλογος αισθητήρας συνδέεται με το DAQ, η θερμοκρασία της σύνδεσης πρέπει να είναι γνωστή ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της πραγματικής θερμοκρασίας που μετρά ο σένσορας.
- **Ταυτόχρονη δειγματοληψία** : Όταν είναι αναγκαία η μέτρηση δύο ή περισσότερων σημάτων την ίδια στιγμή, τότε η παρούσα λειτουργία επιβάλλεται. Η ταυτόχρονη δειγματοληψία μπορεί να αποτελέσει πιο αποτελεσματική τεχνική από την ανάθεση σε κάθε κανάλι ενός ψηφιοποιητή. Μια εφαρμογή αυτής της τεχνικής είναι στην μέτρηση των δονήσεων.

Οι περισσότεροι αισθητήρες έχουν ανάγκη από συνδυασμό κάποιων από των παραπάνω τεχνολογιών. Ας αναφέρουμε ένα παράδειγμα και αφορά τους αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας αφού το “signal conditioning” τμήμα τους περιλαμβάνει ενίσχυση , γραμμικοποίηση, φιλτράρισμα, cold – junction compensate και ορισμένες φορές απομόνωση. Στην ιδεατή περίπτωση μια πλατφόρμα πρέπει να αφήνει στον χρήστη την επιλογή καθορισμού των τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν για την μορφοποίηση του σήματος και ο οποίος θα την προσαρμόζει ανάλογα με το είδος της εφαρμογής.

1.2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

1.2.1 Μετατροπείς και Αισθητήρες

Ο μετατροπέας (transducer) είναι μια συσκευή που μετατρέπει ένα σήμα από μία φυσική μορφή σε ένα σήμα το οποίο έχει μια διαφορετική φυσική μορφή. Συνεπώς είναι ένας ενεργειακός μετατροπέας. Υπάρχουν 6 είδη διαφορετικών σημάτων – μηχανικά, θερμικά, μαγνητικά, ηλεκτρικά, χημικά, ραδιενεργά. Κάθε συσκευή που μετατρέπει ένα σήμα από μια μορφή σε μια άλλη από τις παραπάνω αποτελεί έναν transducer.

Συγκεκριμένα οι μετατροπείς που στην έξοδο τους δίνουν ηλεκτρικά σήματα ονομάζονται *αισθητήρες*.

Τις περισσότερες φορές οι αισθητήρες και οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται σαν συνώνυμοι όροι. Ένας transducer υπαινίσσεται ότι η ποσότητα εισόδου και η ποσότητα εξόδου δεν είναι η ίδια. Ένας αισθητήρας μπορεί να μην είναι transducer.

1.2.2 Κατάταξη Αισθητήρων

Ένας μεγάλος αριθμός από αισθητήρες είναι διαθέσιμος για διαφορετικές φυσικές ποσότητες. Ο διαχωρισμός τους μπορεί να γίνει με ορισμένα κριτήρια.

Ως πρώτο κριτήριο ας πάρουμε την ανάγκη παροχή ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση οι αισθητήρες κατατάσσονται σε διαμορφωτές (modulating) και σε αυτοδημιούργητους (self-generating). Στους διαμορφωτές (ή αλλιώς ενεργούς), το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του σήματος εξόδου προέρχεται από μια βοηθητική πηγή ενέργειας. Η είσοδος απλά ελέγχει την έξοδο. Αντίθετα στους αυτοδημιούργητους (ή αλλιώς παθητικούς) η ενέργεια προέρχεται από την είσοδο.

Θεωρώντας ως κριτήριο το σήμα εξόδου χωρίζουμε τους σένσορες σε αναλογικούς και σε ψηφιακούς. Στους αναλογικούς η έξοδος μεταβάλλεται σε συνεχή μορφή σε κάποιο μακροσκοπικό επίπεδο και η πληροφορία ανακτάται από το πλάτος του σήματος. Αντίθετα η έξοδος στους ψηφιακούς παίρνει την μορφή διακριτών 'σκαλοπατιών'. Οι ψηφιακοί αισθητήρες δεν χρειάζονται μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό και η έξοδος τους είναι πιο εύκολο να μεταδοθεί. Το σήμα εξόδου σε αυτής της κατηγορίας αισθητήρες είναι πιο αξιόπιστο και συχνά πιο ακριβές από ότι στους αναλογικούς. Το μεγάλο μειονέκτημα τους είναι ότι δεν μπορούν να μετρήσουν πολλές φυσικές ποσότητες.

Με βάση τον τρόπο λειτουργίας τους, οι αισθητήρες χωρίζονται σε αυτούς που λειτουργούν με την μέθοδο της παρέκκλισης (deflection mode) και σε αυτούς που λειτουργούν με τη μηδενική μέθοδο (null mode). Στην πρώτη περίπτωση η μετρούμενη ποσότητα παράγει μια φυσική επίδραση η οποία σε κάποιο μέρος του οργάνου παράγει ένα ανάλογο αλλά αντίθετο αποτέλεσμα, το οποίο σχετίζεται με μια γνωστή μεταβλητή. Στην δεύτερη κατηγορία οι αισθητήρες προσπαθούν να αποτρέψουν την παρέκκλιση από το αρχικό σημείο χρησιμοποιώντας ένα γνωστό αποτέλεσμα που αντιτίθεται στο παραγόμενο από την μετρούμενη ποσότητα. Οι μετρήσεις με την μηδενική μέθοδο έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια διότι μπορούμε να παίζουμε με την τιμή τους γύρω από μια τιμή αναφοράς.

Ένα ακόμη κριτήριο είναι και η σχέση εισόδου – εξόδου, και οι σένσορες μπορούν να διαχωριστούν σε μηδενικής, πρώτης, δεύτερης ή και παραπάνω τάξης. Η τάξη σχετίζεται με τον αριθμό των ανεξάρτητων αντικειμένων που αποθηκεύουν ενέργεια μέσα στον αισθητήρα.

1.2.3 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Ξεκινώντας ως αναφέρουμε ότι οι αισθητήρες έχουν στατική και δυναμική συμπεριφορά. Η διαφοροποίηση γίνεται από το γεγονός ότι ορισμένες ποσότητες αλλάζουν με πολύ αργό ρυθμό και συνεπώς μιλάμε για στατική συμπεριφορά. Όταν η μετρούμενη ποσότητα αλλάζει γρήγορα και σε συνάρτηση με το χρόνο τότε μιλάμε για δυναμική συμπεριφορά.

Γενικότερα για τους αισθητήρες υπάρχουν κάποια χαρακτηριστικά τα οποία είναι εξαιρετου ενδιαφέροντος. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα από αυτά τα χαρακτηριστικά.

- **Άνοιγμα (span)** – Το χαρακτηριστικό αυτό αναφέρεται στο εύρος εισόδου του αισθητήρα. Για παράδειγμα, ένας ηλεκτρονικός ενισχυτής τυπικά επιτρέπει μόνο τις εισόδους από την θετική στην αρνητική παροχή. Οι εισοδοι που δεν συμπεριλαμβάνονται στο span είναι πολύ πιθανό να καταστρέψουν την συσκευή.
- **Μεγάλης κλίμακας έξοδος (full scale output)** - Η ιδιότητα(σε συντομογραφία FSO) αυτή αναφέρεται στο εύρος της εξόδου από την συσκευή. Ένα πολύ απλό παράδειγμα είναι ένας ενισχυτής που έχει έξοδο μόνο μέσα στο διάστημα 1 – 4 Volt.
- **Ακρίβεια (accuracy)** – Ακρίβεια είναι ένα μέτρο πόσο κοντά είναι μία έξοδος στην σωστή τιμή. Η σωστή τιμή θα προέρχεται από μία πρότυπη πηγή. Χάριν παραδείγματος, ένα θερμόμετρο σπιτιού μπορεί να διαβάξει 75 βαθμούς Κελσίου , αλλά η πραγματική θερμοκρασία , λένε από την τηλεόραση , είναι 74 βαθμοί. Έτσι η ακρίβεια είναι 1 βαθμός Κελσίου. Συχνά η ακρίβεια δίνεται σαν εύρος ± 1 , ή ± 0.05 .
- **Επαναληψιμότητα (repeatability)** – Η επαναληψιμότητα είναι κάπως σχετική με την ακρίβεια. Ο ορισμός της είναι ο εξής : Με την ίδια είσοδο , η μέτρηση είναι η ίδια . Αναφέροντας και πάλι το παράδειγμα της θερμοκρασίας , εάν ένα θερμόμετρο σπιτιού δείχνει 75 βαθμούς , και την επόμενη μέρα έχει την ίδια τιμή , με τις ίδιες συνθήκες να επικρατούν , τότε ο αισθητήρας έχει την ιδιότητα της επαναληψιμότητας.
- **Υστέρηση (Hysteresis)** – Υστέρηση είναι η διαφορά στην απάντηση, εξαρτώμενη από την πορεία της εισόδου. Ένας θερμοστάτης στο σπίτι

χρησιμοποιεί την υστέρηση για να ξεκινήσει να παράγει θερμότητα. Για παράδειγμα με την θερμοκρασία κάτω από τους 75 βαθμούς η θερμότητα είναι ανοιχτή, ενώ την θερμοκρασία πάνω από τους 77 βαθμούς Κελσίου, η θερμότητα είναι «κλειστή». Στο μεταξύ τους διάστημα, η θερμότητα είναι ανοιχτή ή κλειστή ανάλογα με την πορεία της θερμοκρασίας εάν ανεβαίνει ή πέφτει.

- **Γραμμικότητα (linearity)** – Γραμμικότητα είναι η παρέκκλιση της εξόδου ενός αισθητήρα από μια ευθεία γραμμή.
- **Κορεσμός (saturation)** – Κορεσμός είναι η έλλειψη της δυνατότητας από τον σένσορα να συνεχίζει να αλλάζει η έξοδος του, δίνοντας ακόμη περισσότερες τιμές στην είσοδο του. Για παράδειγμα, ένας ενισχυτής τυπικά δεν έχει την δυνατότητα για την έξοδο του να προσπεράσει την γραμμή παροχής και συνεπώς όσο περισσότεροι είσοδοι και να δίνονται, η έξοδος θα έχει σταματήσει σε αυτό το όριο (γραμμή παροχής).
- **Αντιστάθμιση (offset)** – Η αντιστάθμιση είναι η επαναληπτική διαφορά ανάμεσα στην πραγματική συνθήκη και τις μετρήσεις. Πάλι από το παράδειγμα της θερμοκρασίας, εάν ένα θερμόμετρο είναι πάντα 3 βαθμούς υψηλότερα από την πραγματικότητα, τότε υπάρχει μία αντιστάθμιση των 3 βαθμών Κελσίου.
- **Αποτελεσματικότητα (resolution)** – Το χαρακτηριστικό αυτό έχει να κάνει με την μικρότερη ποσότητα για την αλλαγή της εισόδου, ώστε να ρυθμιστεί η έξοδος.
- **Νεκρή ζώνη (dead band)** – Η νεκρή ζώνη είναι ένα εύρος της εισόδου μέσα στο οποίο η έξοδος δεν είναι ευαίσθητη στις αλλαγές της εισόδου.
- **Αντίσταση (impedance)** – Αντίσταση, εισόδου και εξόδου, είναι η ηλεκτρική μέτρηση ενός αισθητήρα.
- **Ευαισθησία (sensitivity)** – Η ευαισθησία είναι η κλίση της γραφικής παράστασης της συνάρτησης εισόδου – εξόδου του σένσορα. Εάν η έξοδος y σχετίζεται με τη είσοδο x μέσω της εξίσωσης $y = f(x)$, η ευαισθησία $S(x_a)$ στο σημείο x_a είναι :

$$S(x_a) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_a}$$

Είναι επιθυμητό οι αισθητήρες να έχουν υψηλή και εάν είναι δυνατόν σταθερή ευαισθησία. Για έναν σένσορα με απόκριση $y = kx + b$ η ευαισθησία είναι $S = k$ για όλο το εύρος των τιμών x . Για σένσορα με απόκριση $y = k^2x + b$ η ευαισθησία είναι $2kx$ και μεταβάλλεται από το ένα σημείο στο άλλο στο εύρος της μέτρησης.

1.2.4 Σφάλματα

Στους αισθητήρες έχουμε 2 ειδών σφάλματα. Τα συστηματικά σφάλματα (systematic errors) και τα τυχαία (random errors).

- **Συστηματικά σφάλματα** – Ένα σφάλμα αποκαλείται συστηματικό όταν σε μια σειρά μετρήσεων της ίδιας τιμής μιας δεδομένης ποσότητας υπό τις ίδιες συνθήκες, παραμένει σταθερό κατά απόλυτη τιμή και αλλάζει ακολουθούμενο συγκεκριμένους κανόνες όταν αλλάζουν και οι συνθήκες μέτρησης. Τα σφάλματα αυτά προκαλούνται συνήθως από τα όργανα μέτρησης και από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται.
- **Τυχαία σφάλματα** – Τυχαία σφάλματα είναι αυτά τα οποία παραμένουν μετά την εξάλειψη των αιτιών των συστηματικών σφαλμάτων. Εμφανίζονται όταν η ίδια τιμή της ίδιας ποσότητας μετριέται επαναλαμβανόμενα με τα ίδια όργανα και με την ίδια μέθοδο. Η παρουσία τυχαίων σφαλμάτων δείχνει ότι το αποτέλεσμα της μέτρησης n φορές μιας μετρήσιμης ποσότητας x είναι ένα σετ τιμών $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Αν δεν υπάρχει συστηματικό σφάλμα τότε η καλύτερη εκτίμηση της πραγματικής τιμής του μετρούμενου είναι η μέση τιμή των αποτελεσμάτων :

$$\hat{x}_n = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Αν το n είναι άπειρο η παραπάνω εξίσωση θα δώσει μια συμβατική πραγματική τιμή για το x . Όταν είναι πεπερασμένο κάθε σετ μετρήσεων δίνει διαφορετικό x_i και

διαφορετική μέση τιμή. Αυτοί οι μέσοι όροι ακολουθούν Gaussian κατανομή με διασπορά $\frac{\sigma^2}{n}$ όπου σ^2 είναι η διασπορά του x . Τότε

$$Pr ob = \left[-k \leq \frac{\hat{x} - x}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \leq +k \right] = 1 - a$$

όπου k και a μπορούν να βρεθούν από τους πίνακες της κανονικής κατανομής. Επεξεργάζοντας την παραπάνω ισότητα παίρνουμε την

$$Pr ob = \left[\hat{x} - k \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq x \leq \hat{x} + k \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] = 1 - a$$

η οποία μας δίνει το διάστημα εμπιστοσύνης με πιθανότητα $1-a$ να συμπεριλαμβάνει την πραγματική τιμή x . Ο όρος $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ καλείται αβεβαιότητα.

1.2.5 Αξιοπιστία

Σκοπός αυτού του υποκεφαλαίου είναι να ορίσει ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων την αξιοπιστία.

Ένας αισθητήρας είναι αξιόπιστος όταν η λειτουργία του γίνεται κανονικά χωρίς καμία αποτυχία κάτω από συγκεκριμένες και καλά ορισμένες συνθήκες για μια ορισμένη χρονική περίοδο.

Μιλώντας στατιστικά, υψηλή αξιοπιστία σημαίνει ότι η πιθανότητα εκτέλεσης της επιθυμητής λειτουργίας του αισθητήρα είναι πολύ κοντά στη μονάδα (1). Ο λόγος αποτυχίας είναι ο αριθμός των αποτυχιών ενός αντικειμένου προς την μονάδα μέτρησης της ζωής (χρόνος, κύκλοι), κανονικοποιημένος στο αριθμό των επιζώντων μονάδων. Εάν σε ένα χρονικό διάστημα dt , $N_f(t)$ μονάδες από ένα σύνολο N

μονάδων αποτύχουν και $N_s(t)$ επιζήσουν και η ζωή μετριέται σε χρονικές μονάδες, τότε ο λόγος αποτυχίας εκφράζεται από

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_s(t)} \frac{dN_f}{dt} \quad (I)$$

Η αξιοπιστία σε κάθε χρονική στιγμή t σαν πιθανότητα δίνεται από

$$R(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_s(t)}{N} \quad (II)$$

Το N θα είναι πάντα πεπερασμένο στην πράξη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το $R(t)$ να μπορεί μόνο να εκτιμηθεί. Σε ένα διάστημα μεταξύ $t=0$ και οποιασδήποτε μετέπειτα χρονικής στιγμής t , οι μονάδες είτε επιβιώνουν είτε αποτυγχάνουν και έτσι έχουμε

$$N = N_s(t) + N_f(t)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (II), παραγωγίζοντας και εφαρμόζοντας το αποτέλεσμα στην (I), τότε παίρνουμε

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{N} \frac{dN_f(t)}{dt} = -\frac{\lambda(t)N_s(t)}{N} = -\lambda(t)R(t)$$

Λύνοντας ως προς $R(t)$, προκύπτει

$$R(t) = e^{-\int \lambda(t) dt}$$

Ακόμη μπορούμε να δούμε ότι η αξιοπιστία είναι εφικτό να μετρηθεί και από τον ρυθμό αποτυχίας, που υπολογίζεται από πειράματα τα οποία ορίζουν τον μέσο χρόνο μεταξύ αποτυχιών (*Mean Time Between Failures – MTBF*):

$$MTBF = m = \frac{1}{\lambda}$$

1.2.6 Αντιστοιχία φυσικών ποσοτήτων με αισθητήρες

Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας ο οποίος μας δίνει τις φυσικές ποσότητες και ποιοι αισθητήρες – transducers χρησιμοποιούνται για την μέτρηση τους. Έτσι έχουμε:

ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ
θερμοκρασία	thermocouple, RTDs, thermistors, integrated circuit sensors
φως	photoconductive cells, vacuum tube photosensors
ήχος	microphone
δύναμη & πίεση	strain gauge, piezoelectric transducers
θέση/τοποθέτηση	potentiometers, optical encoder, linear voltage diff/tial transformer
ροή ρευστών	head meters, rotational flowmeters, ultrasonic flowmeters
επίπεδα pH	pH electrodes

1.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Σκοπός ενός συστήματος ανάκτησης δεδομένων είναι να μετρήσει ένα φυσικό φαινόμενο όπως το φως, η θερμοκρασία, η πίεση ή ο ήχος. Τα κομμάτια που αποτελούν ένα τέτοιο σύστημα είναι τα εξής :

- Μετατροπέας
- Σήμα
- Μορφοποίηση σήματος
- Συσκευή ανάκτησης δεδομένων
- Επίπεδο οδήγησης και λογισμικό εφαρμογής

Μέσα από αυτά τα 5 μέρη φέρνουμε το φυσικό φαινόμενο που θέλουμε να μετρήσουμε μέσα στον υπολογιστή για ανάλυση και παρουσίαση.

1.3.1 Βασικό σύστημα ανάκτησης

Η είσοδος στο σύστημα είναι μια φυσική ποσότητα όπως έχει ήδη αναφερθεί (θερμοκρασία, πίεση, επιτάχυνση, ροή και άλλες) και η οποίες είναι αναλογικές ποσότητες. Το πρώτο πράγμα είναι η παράμετρος της εισόδου να μετατραπεί σε

ηλεκτρικό σήμα από τον αισθητήρα , και αφού έχει γίνει όλο αυτό στη συνέχεια η περαιτέρω διαδικασία διεκπεραιώνεται από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Στη συνέχεια ,ένας ενισχυτής αυξάνει το πλάτος ώστε να το φτάσει σε ένα χρήσιμο επίπεδο για περαιτέρω επεξεργασία. Ο ενισχυτής συχνά ακολουθείται από ένα ενεργό βαθυπερατό φίλτρο το οποίο κόβει τις ανεπιθύμητες συχνότητες , δηλαδή συχνότητες που μπορεί να προέρχονται από ηλεκτρονικές παρεμβολές ή από θόρυβο του σήματος. Μερικές φορές ενός ενισχυτή μπορεί αν έπεται ένα μη γραμμικό αναλογικό κύκλωμα το οποίο τελεί μια ειδική μη – γραμμική λειτουργία στο υψηλής συχνότητας σήμα. Τέτοιες λειτουργίες μπορεί να είναι τετραγωνοποίηση (squaring), διαχωρισμό (division), λογαριθμική αντιστροφή (log conversion) ή γραμμικοποίηση (linearization).

Το επεξεργασμένο αναλογικό σήμα στη συνέχεια φτάνει σε έναν αναλογικό πολυπλέκτη , ο οποίος αλλάζει σειριακά συνεχώς ανάμεσα σε έναν αριθμό από διαφορετικά αναλογικά κανάλια. Κάθε είσοδος είναι με τη σειρά της συνδεδεμένη με την έξοδο του πολυπλέκτη για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος ένα κύκλωμα δειγματοληψίας και συγκράτησης ανακτά την τάση του σήματος και συγκρατεί την τιμή του όσο ένας A/D converter μετατρέπει την τιμή αυτή σε ψηφιακή μορφή. Η ψηφιακή λέξη που προκύπτει εισέρχεται στον διάυλο ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή ή στην είσοδο κάποιου ψηφιακού κυκλώματος.

Ο έλεγχος και ο καταμερισμός χρόνου στο παραπάνω σύστημα είναι αρμοδιότητα ενός ψηφιακού κυκλώματος το οποίο καλείται προγραμματιστικός ακόλουθος (programmer – sequencer). Η παραπάνω μορφή είναι η πιο διαδεδομένη αλλά υπάρχουν κι άλλες πολλές εναλλακτικές.

1.4 ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

1.4.1 Ενδεικτικές μετρήσεις

Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται μόνο για να δείξουν την κατάσταση των διαφόρων κομματιών μίας διαδικασίας. Είναι χρήσιμες κυρίως για την άμεση

παρακολούθηση των γεγονότων και μπορούν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες σε περιπτώσεις αποτυχίας.

1.4.2 Μετρήσεις ελέγχου

Οι μετρήσεις αυτές επιδεικνύουν τον έλεγχο στα χαρακτηριστικά μιας φυσικής ή και συνθετικής ποσότητας.

1.4.3 Περιβαλλοντικές μετρήσεις

Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και τον έλεγχο βλαβερών υλικών όλων των ειδών.

1.4.4 Μετρήσεις ασφαλείας

Ο τύπος αυτών των μετρήσεων έχει ως σκοπό την επίβλεψη και τον περιορισμό επικίνδυνων καταστάσεων. Περιέχουν παραμέτρους που υποδεικνύουν μη ασφαλή λειτουργία και ενδεχόμενο κίνδυνο.

2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο μπορούμε να διαχωρίσουμε τους αισθητήρες ανάλογα με το πόσα αποθηκευτικά μέσα έχουν. Τον αριθμό αυτόν τον αποκαλέσαμε τάξη του σένσορα. Στο κεφάλαιο αυτό θα συζητηθούν τα συστήματα μέτρησης βασισμένα σε αισθητήρες από μια γενικότερη σκοπιά. Άξονας αυτής της επισκόπησης των συγκεκριμένων συστημάτων θα είναι η τάξη τους.

2.1 ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΤΑΞΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Η έξοδος από έναν μηδενικής τάξης αισθητήρα σχετίζεται με την είσοδο του μέσω της εξίσωσης που έχει γενικό τύπο

$$y(t) = k \cdot x(t)$$

Η συμπεριφορά της χαρακτηρίζεται από την ευαισθησία k και παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την συχνότητα εισόδου.

Μια σχέση εισόδου – εξόδου όπως η παραπάνω υποδεικνύει ότι ο αισθητήρας δεν περιλαμβάνει κανένα αποθηκευτικό στοιχείο ενέργειας. Μοντέλα αυτού του τύπου αποτελούν πάντα μια μαθηματική αφαίρεση διότι δεν μπορούμε να αποφύγουμε την παρουσία ατελειών, οι οποίες περιορίζουν την ικανότητα εφαρμογής του μοντέλου. Για παράδειγμα, στο ποτενσιόμετρο, δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε γρήγορες και ποικίλες μετακινήσεις εξαιτίας της τριβής του κέρσορα.

2.2 ΠΡΩΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Στους πρώτης τάξης αισθητήρες υπάρχει ένα στοιχείο που αποθηκεύει ενέργεια και ένα άλλο το οποίο την σκορπά. Η σχέση μεταξύ εισόδου και $x(t)$ και εξόδου $y(t)$ περιγράφεται από την εξίσωση

$$x(t) = a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t)$$

και η συνάρτηση μεταφοράς είναι

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau s + 1}$$

όπου $k = \frac{1}{a_0}$ που είναι η ευαισθησία του συστήματος και $\tau = \frac{a_1}{a_0}$ που αποτελεί την χρονική σταθερά του συστήματος. Η γωνιακή συχνότητα είναι $\omega_c = \frac{1}{\tau}$.

Συνεπώς για τον χαρακτηρισμό ενός συστήματος μας είναι χρήσιμο να προσδιορίσουμε 2 παραμέτρους. Το k για την στατική απόκριση και το ω_c ή το τ για την δυναμική απόκριση.

Για να τεστάrouμε τέτοιου τύπου συστήματα χρησιμοποιούμε κάποια γνωστά σήματα στην είσοδο και παρατηρούμε την έξοδο. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι εισοδοι και οι έξοδοι σε συστήματα πρώτης τάξης. Τα σήματα που έχουμε στην είσοδο είναι η Step $u(t)$, η ramp Rt και η Sinusoid A, ω .

ΕΙΣΟΔΟΣ -----	ΈΞΟΔΟΣ
Step $u(t)$	$k(1 - e^{-t/\tau})$
Ramp Rt	$Rkt - rk\tau \cdot u(t) + Rk\tau e^{-t/\tau}$
Sinusoid A, ω	$\frac{kA\tau\omega e^{-t/\tau}}{1 + \omega^2\tau^2} + \frac{kA}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}} \sin(\omega t + \theta)$
	Με $\theta = \arctan(-\omega\tau)$

2.3 ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Ο αισθητήρας δεύτερης τάξης περιλαμβάνει 2 στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας και ένα που την σκορπά. Η είσοδος και η έξοδος ενός τέτοιου συστήματος σχετίζονται μέσω μιας γραμμικής διαφορικής εξίσωσης της μορφής

$$x(t) = a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t)$$

και η συνάρτηση μεταφοράς είναι η εξής :

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

όπου k είναι η ευαισθησία, ζ είναι το damping ratio, και ω_n είναι το natural undamped angular frequency για τον σένσορα (δηλαδή $\omega_n = 2\pi f_n$).

Από την εξίσωση του συστήματος διακρίνουμε και τρεις παραμέτρους οι οποίες είναι

$$k = \frac{1}{a_0}$$

$$\omega_n^2 = \frac{a_0}{a_2}$$

$$\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$$

Παρατηρούμε ότι αυτές οι τρεις μεταβλητές σχετίζονται και μια αλλαγή σε μία από αυτές θα επηρεάσει και τις άλλες. Μόνο οι a_0, a_1, a_2 είναι ανεξάρτητες.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και στα συστήματα αυτού του τύπου εφαρμόζουμε κάποια σήματα ελέγχου (test signals) βλέπουμε την έξοδο τους. Στο παρακάτω πίνακα δείχνουμε τις εξόδους για την κάθε είσοδο. Πρέπει να αναφερθεί ότι η συμπεριφορά του συστήματος διαφέρει ανάλογα με την τιμή του ζ . Διακρίνουμε ότι το ζ κυμαίνεται σε τρεις διαφορετικές περιοχές τιμών ($0 < \zeta < 1$, $\zeta = 1$, $\zeta > 1$) και τα παρακάτω αποτελέσματα είναι προσαρμοσμένα στο γεγονός αυτό.

INPUT	OUTPUT
Step $u(t)$	
$0 < \zeta < 1$	$1 - \frac{e^{-\delta t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t + \phi) \quad , \quad \delta = \zeta \omega_n, \quad \omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ $\phi = \arcsin \frac{\omega_d}{\omega_n}$
$\zeta = 1$	$1 - e^{-\delta t} (1 + \omega_d t + \phi)$
$\zeta > 1$	$1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2-1}} \left(\frac{e^{-at}}{a} - \frac{e^{-bt}}{b} \right), \quad \alpha = \omega_n (\zeta + \sqrt{\zeta^2-1}),$ $b = \omega_n (\zeta - \sqrt{\zeta^2-1})$
Ramp Rt	
$0 < \zeta < 1$	$R \left\{ t - \frac{2\zeta}{\omega_n} \left[1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{2\zeta \sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t + \phi) \right] \right\},$ $\phi = \arctan \left(\frac{2\zeta \sqrt{1-\zeta^2}}{2\zeta^2-1} \right)$
$\zeta = 1$	$R \left\{ t - \frac{2\zeta}{\omega_n} \left[1 - \left(1 + \frac{\omega_n t}{2} \right) e^{-\omega_n t} \right] \right\}$
$\zeta > 1$	$R \left\{ t - \frac{2\zeta}{\omega_n} \left[1 + \frac{2\zeta(-\zeta - \sqrt{\zeta^2-1} + 1)}{4\zeta \sqrt{\zeta^2-1}} e^{-at} + \frac{2\zeta(-\zeta - \sqrt{\zeta^2-1} - 1)}{4\zeta \sqrt{\zeta^2-1}} e^{-bt} \right] \right\}$
Sinusoid A, ω	$\frac{kA}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}} \sin(\omega t - \phi), \quad \phi = \arctan \frac{2\zeta\omega / \omega_n}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$

Το δυναμικό σφάλμα και η καθυστέρηση σε ένα δεύτερης τάξης σύστημα εξαρτάται όχι μόνο από την μορφή της εισόδου αλλά επίσης από τα ω_n και το ζ .

Στην περίπτωση που η είσοδος είναι η βηματική συνάρτηση, εάν ισχύει $\zeta > 1$ ή $\zeta = 1$ τότε δεν εμφανίζεται δυναμικό σφάλμα στην απόκριση αλλά ούτε και υπέρβαση (overshooting).

Ο χρόνος ανόδου είναι ο χρόνος που ξοδεύεται για να φτάσει το σύστημα από το 10% στο 90% της τελικής εξόδου και δίνεται από

$$t_r = \frac{\arctan(-\omega_d / \delta)}{\omega_d}$$

όπου $\delta = \zeta\omega$ και καλείται απόσβεση (attenuation) και $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ είναι το λεγόμενο natural damped angular frequency. Ο χρόνος μέχρι την πρώτη κορυφή δίνεται από

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d}$$

και η μέγιστη υπέρβαση (overshooting)

$$M_p = e^{-(\delta/\omega_d)\pi}$$

Ο χρόνος που κάνει η έξοδος να φτάσει μέσα σε ένα ορισμένο διάστημα (band) γύρω από τον τελικό χρόνο t_s (settling time) εξαρτάται από το πλάτος αυτής του διαστήματος. Για $0 < \zeta < 0.9$, για $a = \pm 2\%$ διάστημα ανοχής, τότε $t_s = \frac{4}{\delta}$ και είναι ελάχιστο όταν το ζ είναι 0.76. Για $a = \pm 5\%$ band, τότε $t_s = \frac{3}{\delta}$, και είναι ελάχιστο όταν το ζ ισούται με 0.68. Η ταχύτητα απόκρισης είναι βέλτιστη όταν ισχύει $0.5 < \zeta < 0.8$.

Στην περίπτωση που η είσοδος μας είναι μια συνάρτηση ράμπας με κλίση R τότε το δυναμικό σφάλμα είναι $e_d = \frac{2\zeta R}{\omega_n}$ και η καθυστέρηση είναι $\frac{2\zeta}{\omega_n}$.

Γενικότερα για να περιγράψουμε την απόκριση συχνότητας ενός δεύτερης τάξης συστήματος όπου $0 < \zeta < 0.707$, τονίζουμε ότι η συχνότητα αντήχησης (frequency of resonance) είναι η ίδια με την natural damped frequency

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$$

και το πλάτος αυτής της αντήχησης στο $\omega = \omega_d$ είναι M_r

$$M_r = \frac{1}{2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

Παραδείγματα για underdamped συστήματα (όπου $0 < \zeta < 1$) είναι τα μάζας-ελατηρίου συστήματα τα οποία βρίσκουν εφαρμογή στην μέτρηση του εκτοπίσματος ταχύτητας, επιτάχυνσης σε παλμικές κινήσεις. Επίσης αποτελούν την ‘καρδιά’ των σειсмоγράφων και των μικροεπιταχυντών για την ανάπτυξη των αερόσακων στα αυτοκίνητα.

Πιο συγκεκριμένα ας αναφερθεί μια εφαρμογή. Στην μέτρηση του εκτοπίσματος x_0 της μάζας M ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την μέτρηση εμφανίζει μια επιτάχυνση \ddot{x}_i . Τότε η δύναμη πάνω στην μάζα υπολογίζεται μέσω της απόκλισης του ελατηρίου (Newton ‘s law). Έτσι η ισότητα της δύναμης που μετρά το σύστημα είναι

$$M(\ddot{x}_i - \ddot{x}_0) = Kx_0 + B\dot{x}_0 \quad M(\ddot{x}_i - \ddot{x}_0) = Kx_0 + B\dot{x}_0$$

όπου K είναι η σταθερά του ελατηρίου και B το ιξώδης συντελεστής τριβής. Τα K και B αποτελούν διαφορετικές φυσικές ποσότητες. Αν πάρουμε τον μετασχηματισμό Laplace της παραπάνω ισότητας έχουμε

$$Ms^2 X_i(s) = X_0(s)[K + Bs + Ms^2] .$$

Οπότε μπορούμε να υπολογίσουμε την συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{X_0(s)}{\ddot{X}_i(s)} = \frac{M}{K} \frac{K/M}{s^2 + s(B/M) + K/M}$$

με τις διευκρινίσεις ότι ισχύουν

$$k = M / K, \quad \zeta = B / 2\sqrt{KM} \quad \text{και} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} .$$

Μια μεγάλη μάζα αυξάνει την ευαισθησία αλλά ελαττώνει την natural frequency και τον damping ratio. Οι μικροεπιταχυντές έχουν πολύ μεγάλο natural frequency αλλά μικρή ευαισθησία και damping ratio.

3. ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν ορισμένα κυκλώματα και τεχνικές για μορφοποίηση σήματος. Αξίζει να ειπωθεί ότι όταν αναφερόμαστε στον όρο μορφοποίηση σήματος μιλάμε κυρίως για αναλογικό χώρο. Έτσι κι εδώ οι τεχνικές που θα αναλυθούν αφορούν τον αναλογικό κόσμο.

3.1 ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

Στην μορφοποίηση σήματος χρησιμοποιούνται βασικά ηλεκτρικά στοιχεία για την σύνθεση των απαραίτητων κυκλωμάτων. Τα στοιχεία αυτά με τη σειρά τους συνθέτουν διάφορα επίπεδα επεξεργασίας του σήματος. Το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα είναι το συνολικό κύκλωμα που θα σχεδιαστεί να «κάνει» την λειτουργία για την οποία το θέλουμε και που είναι απαραίτητη για την μορφοποίηση του σήματος πριν παραδοθεί στην συσκευή ανάκτησης των δεδομένων.

Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένα βασικά συστατικά που θα τα συναντήσουμε όσο προχωρούμε στο κεφάλαιο.

- Τελεστικοί ενισχυτές ... Πολλοί αισθητήρες παράγουν πολύ χαμηλά σήματα και χρειάζονται ενίσχυση για να προχωρήσουν. Από αυτούς έχουμε 2 διαφορετικά επίπεδα ενίσχυσης. Το αναστρέψιμο και το μη αναστρέψιμο.

Παράδειγμα αναστρέψιμου με συνάρτηση μεταφοράς.

$$V_0 = -V_{in}(R_f / R_i),$$

όπου

V_o = σήμα εξόδου

V_{in} = σήμα εισόδου

R_f = αντίσταση ανάδρασης

R_i = αντίσταση εισόδου

Ενώ μια μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία έχει συνάρτηση μεταφοράς (παράδειγμα)...

$$V_o = V_{in}(R_f + R_i) / R_i$$

Επίσης υπάρχουν πολλά κυκλώματα που ενισχύουν και που περιέχουν τελεστικούς ενισχυτές.

- Φίλτρα... Υπάρχουν 3 είδη φίλτρων – Butterworth, Chebychev, Bessel- και το κάθε φίλτρο έχει τα δικά του χαρακτηριστικά. Είναι είτε βαθυπερατά, είτε χαμηλοπερατά, είτε παθητικά ,είτε ενεργητικά ή κάτι άλλο.
- Για την απόσβεση ή καλύτερα άμβλυνση χρησιμοποιούνται κυρίως διαιρέτες τάσης.
- Για την απομόνωση του σήματος χρησιμοποιούνται 3 μέθοδοι . Η *μαγνητική* που χρησιμοποιείται ένας μεταμορφωτής (transformer). Η *οπτική* που χρησιμοποιείται κυρίως για ψηφιακά σήματα και η μέθοδος της βασίζεται στο ότι ένα led θα παράγει φως όταν δεχτεί ένα συγκεκριμένο φορτίο και συνεπώς το φως αυτό θα περάσει μέσα από έναν οπτικό διάδρομο. Στο τέλος του διαδρόμου ο δέκτης θα παράγει φορτίο ανάλογα με το ένταση του φωτός. Έτσι θα παραχθεί το νέο σήμα που θα έχει απομονοποιηθεί. Τρίτο η *χωρητική* απομόνωση αφού από έναν πυκνωτή περνάνε μόνο τα εναλλασσόμενα ρεύματα και κόβονται τα συνεχή.
- Η γραμμικότητα μπορεί να υλοποιηθεί είτε σε επίπεδο hardware , είτε σε επίπεδο software.
- Ακόμη υπάρχουν και τα κυκλώματα προστασίας κυρίως από υπερφόρτωση.

3.2 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΤΕΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

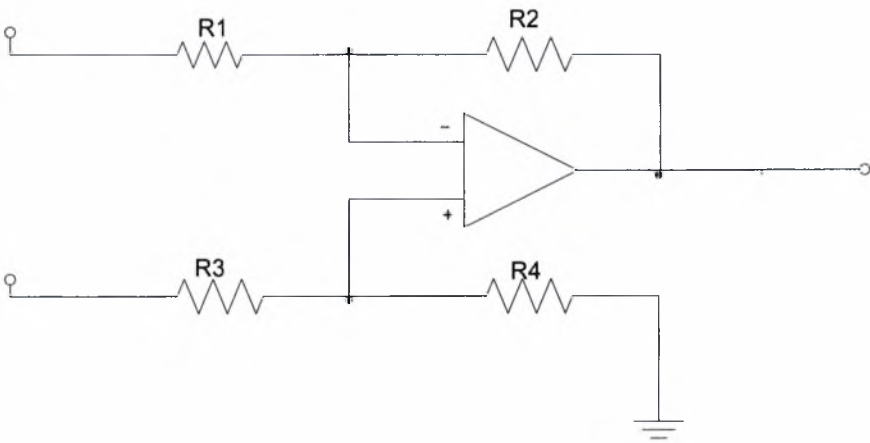
Θα ξεκινήσουμε με απλά κυκλώματα για signal conditioning και θα προχωρήσουμε και σε πιο πολύπλοκα στη συνέχεια.

3.2.1 Διαφορικός Ενισχυτής

Παρακάτω γίνεται αναφορά σε ένα απλό κύκλωμα στον λεγόμενο διαφορικό ενισχυτή. Ένας διαφορικός ενισχυτής επεξεργάζεται την διαφορά τάσης μεταξύ δύο τερματικών εισόδου, όπου κανένα δεν είναι συνδεδεμένο με την παροχή ενέργειας του ενισχυτή.

Το σχήμα που φαίνεται είναι ένας απλός διαφορικός ενισχυτής ο οποίος στηρίζεται σε έναν τελεστικό ενισχυτή.

Σχήμα . . .



Υποθέτουμε ότι ο τελεστικός ενισχυτής έχει ανεξαρτήτου συχνότητας διαφορικό κέρδος A_d και μηδαμινό κέρδος κοινού σήματος ($A_c=0$) οπότε ο μετασχηματισμός Laplace της εξόδου είναι

$$V_o = \frac{1}{1 + \frac{1}{A_d \beta}} \left[V_2 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_1 \frac{R_2}{R_1} \right] \quad (I)$$

όπου $\beta = \frac{R_1}{(R_1 + R_2)}$ που ονομάζεται παράγοντας ανάδρασης (feedback factor) του τελεστικού. Για να μπορέσουμε να τονίσουμε τις διαφορικές ιδιότητες του κυκλώματος ας γράψουμε την έξοδο ως συνάρτηση της διαφορικής εισόδου δηλαδή $v_d = v_2 - v_1$. Με βάση την ισότητα αυτή κάνουμε τις αντικαταστάσεις στην (I), δηλαδή ...

$$v_d = v_2 - v_1$$

$$v_c = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

όπου v_c είναι η τάση κοινού σήματος. Το αποτέλεσμα είναι :

$$V_o = \frac{1}{1 + \frac{1}{A_d \beta}} \left\{ v_d \frac{1}{2} \left[\frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + \frac{R_2}{R_1} \right] + v_c \frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)} \right\}$$

Ο παράγοντας που πολλαπλασιάζει το v_d είναι το διαφορικό κέρδος και ο αντίστοιχος του v_c είναι το κέρδος κοινού σήματος. Έτσι έχουμε

$$G_d = \frac{V_o}{V_d} \Big|_{v_c=0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{A_d \beta}} \frac{1}{2} \left[\frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + \frac{R_2}{R_1} \right]$$

$$G_c = \frac{V_o}{V_c} \Big|_{v_d=0} = \frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)}$$

Για να ενισχύσουμε το v_d και όχι το v_c πρέπει να έχουμε $G_c = 0$ το οποίο το παίρνουμε όταν ισχύει η εξής ισότητα

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} = k \quad (II)$$

και τότε

$$G_d = \frac{k}{1 + \frac{1}{A_d \beta}} = \frac{k}{1 + \frac{k+1}{A_d}}$$

και $G_d \approx k$ όταν $A_d \gg k+1$. Για κέρδη χαμηλότερα από 1000 οι περισσότεροι τελεστικοί δίνουν αυτή την συνθήκη σε χαμηλές συχνότητες.

Επειδή η ισότητα (II) είναι δύσκολο να ισχύει ακριβώς , η ικανότητα του κυκλώματος να απορρίπτει τα κοινά σήματα θα περιοριστεί. Και για αυτό ορίζουμε το λόγο απόρριψης κοινού σήματος (common mode rejection rate - CMMR) ο οποίος ορίζεται ως

$$CMMR_R = \frac{G_d}{G_c} = \frac{1}{2} \frac{R_1 R_4 + R_2 R_3 + 2R_2 R_4}{R_1 R_4 - R_2 R_3}$$

Ο δείκτης R υποδεικνύει ότι το πεπερασμένο CMMR προέρχεται μόνο από την μη ταύτιση των αντιστάσεων. Ο παραπάνω λόγος συνήθως εκφράζεται σε decibels. Εάν για τις αντιστάσεις έχουμε κάποια ανεκτικότητα , ως την πούμε t_R τότε στην χειρότερη περίπτωση ο λόγος γίνεται

$$CMMR_R = \frac{k(1-t_R^2)+1+t_R^2}{4t_R} \approx \frac{k+1}{4t_R} .$$

Σε περίπτωση που ο τελεστικός ενισχυτής έχει πεπερασμένο κέρδος κοινού σήματος

A_c και $CMMR_{oa} = \frac{A_d}{A_c}$ τότε ισχύει η εξής προσέγγιση για το ολικό CMMR

$$CMMR = \frac{1}{CMMR_R^{-1} + CMMR_{oa}^{-1}}$$

Εκφράζοντας την έξοδο σε σχέση με το ολικό CMMR , έχουμε ότι η τάση εισόδου είναι

$$v_o = G_d v_d + G_c v_c = G_d \left(v_d + \frac{v_c}{CMMR} \right)$$

Οι αντιστάσεις στις εισόδους είναι αντίστοιχα για την είσοδο 1 και είσοδο 2 .

$$Z_1 = \frac{R_1}{1 - \frac{V_2}{V_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4}}$$

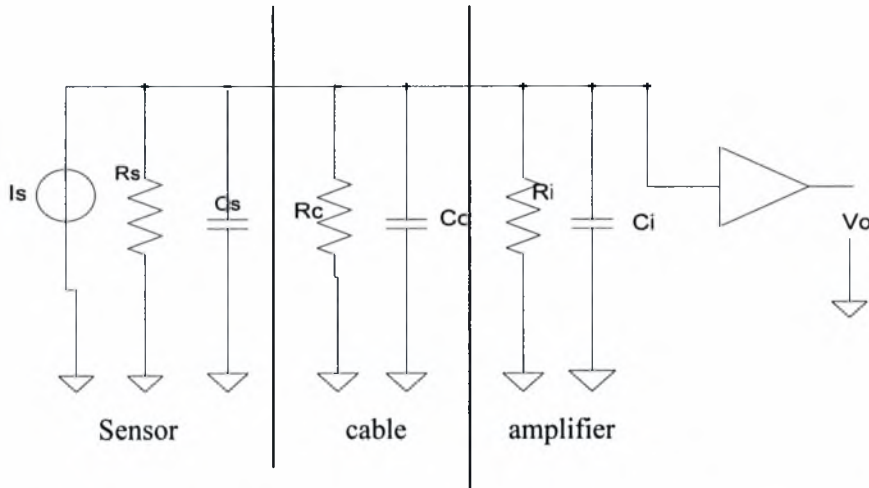
και

$$Z_2 = R_3 + R_4$$

3.2.2 Ενισχυτής επιφόρτισης (Charge amplifier)

Ένας charge amplifier είναι ένα κύκλωμα που η ισοδύναμη του αντίσταση είναι μια χωρητικότητα που έχει πολύ μεγάλη αντίσταση σε χαμηλές συχνότητες. Η λειτουργία του σε αντίθεση με αυτό που λέει το όνομα του, είναι να παίρνει μια τάση ανάλογη με αυτή την επιφόρτιση στην είσοδο και να δίνει μια χαμηλή αντίσταση εξόδου. Ο συγκεκριμένος αφορά self – generating αισθητήρες.

Σχήμα



όπου $I_s = \frac{dq_s}{dt}$. Το κύκλωμα αυτό αποκτά μεγάλο ενδιαφέρον όταν πρόκειται για την μέτρηση σήματος που έρχεται από αισθητήρα με μεγάλη αντίσταση εξόδου. Εάν ο αισθητήρας έχει charge sensitivity $S_q (C/g)$ τότε ο ενισχυτής δίνει

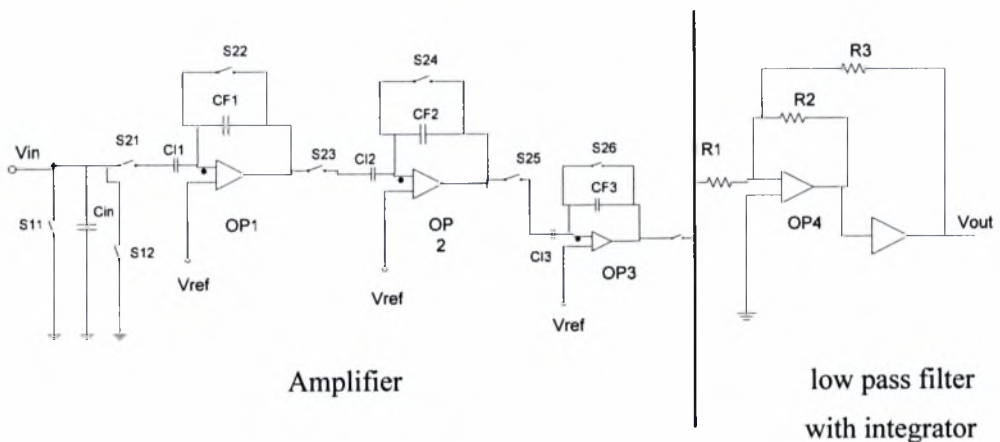
$$\frac{V_o(\omega)}{\alpha(\omega)} = \frac{S_q}{C} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

όπου $R = R_s \parallel R_c \parallel R_i$ και $C = C_s + C_c + C_i$, και οι δείκτες είναι s για τον σένσορα και c για την σύνδεση και i για τον ενισχυτή. Από την παραπάνω εξίσωση βλέπουμε ότι η ευαισθησία του αισθητήρα δέχεται μια μείωση που εξαρτάται από το μήκος της σύνδεσης (cable) και η απόκριση συχνότητα είναι υπερηχητική και έχει γωνιακή συχνότητα που εξαρτάται από και από το μήκος της σύνδεσης και από την απομόνωση. Αυτό μπορεί να αλλάξει με τη θερμοκρασία και από την περιεκτικόν υγρασία για ορισμένα μοντέλα αισθητήρων.

3.2.3 Κύκλωμα μορφοποίησης για χωρητικούς αισθητήρες

Οι χωρητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως για σε εφαρμογές μέτρησης δύναμης, πίεσης, επιτάχυνσης, ροής και πυκνότητας. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα κύκλωμα που μορφοποιεί το σήμα που δέχεται από τον ανάλογο αισθητήρα.

Σχήμα



Το παραπάνω σχήμα μορφοποίησης σήματος αποτελείται από έναν ενισχυτή για την μετατροπή της χωρητικότητας σε τάση, χαμηλοπερατό φίλτρο για την ανίχνευση σήματος στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων και μια γεννήτρια παλμών για την οδήγηση του αισθητήρα και του διακοπτόμενου πυκνωτή.

Τα κυκλώματα έχουν σχεδιαστεί για να έχουν γραμμική έξοδο τάσης σε ένα συγκεκριμένο εύρος αναφορικά με ένα offset σε μηδενική χωρητικότητα. Η έξοδος του αισθητήρα που αποτελεί την είσοδο στο κύκλωμα μας και αναφέρεται ως V_{in} , ενισχύεται από το πρώτο στάδιο με κέρδος $\frac{C_{I1}}{C_{F1}}$ και το σφάλμα της τάσης εξαιτίας του

offset δεν μας ενδιαφέρει. Για την ενίσχυση σημάτων της εξόδου του αισθητήρα που είναι πολύ μικρά, χρειάζονται πολλαπλά επίπεδα ενίσχυσης. Η τάση εξόδου V_{out} ενισχύεται από ένα δεύτερο στάδιο αναστρέφοντα ενισχυτή και από ένα τρίτο επίπεδο μη αναστρέφοντα ενισχυτή με κέρδος $\frac{C_{I2}}{C_{F2}}$ και $\frac{C_{I3}}{C_{F3}}$ αντίστοιχα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μπορούμε να πάρουμε την τελική τάση εξόδου (των τριών επιπέδων) V_{out3} . Η τάση V_{out3} δίνεται από την ισότητα

$$V_{out3} = \frac{C_{I1}C_{I2}C_{I3}}{C_{F1}C_{F2}C_{F3}} \frac{A_{01}A_{02}A_{03}}{(1 + A_{01} + \frac{C_{I1}}{C_{F1}})(1 + A_{02} + \frac{C_{I2}}{C_{F2}})(1 + A_{03} + \frac{C_{I3}}{C_{F3}})} V_{in} + \frac{A_{03}}{1 + A_{03}} V_{Ref}$$

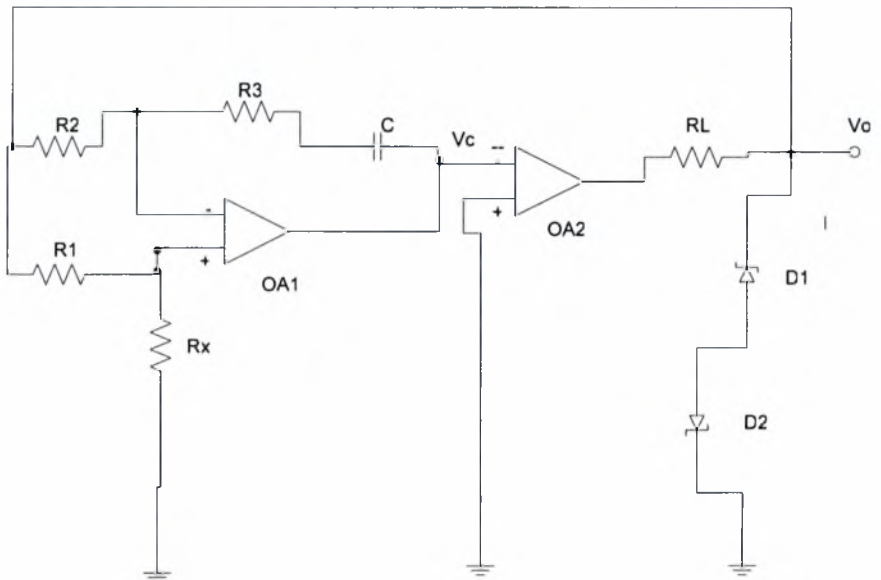
Αξίζει να αναφέρουμε ότι για την συμμετρία της κυματομορφής εξόδου ο συντελεστής κέρδους $\frac{C_{I1}}{C_{F1}}$ και ο $\frac{C_{I2}}{C_{F2}}$ έχουν τη ίδια τιμή. Το τρίτο επίπεδο ενίσχυσης είναι μοναδιαίου κέρδους buffer και το V_{out3} έχει την ανάστροφη κυματομορφή εξόδου από το V_{out2} .

Τώρα προχωράμε στο κύκλωμα του χαμηλοπερατού φίλτρου. Τα φίλτρα με διακοπόμενου πυκνωτή ξεπερνούν ορισμένα προβλήματα που δεν μπορούν τα ενεργά φίλτρα. Δεν χρειάζονται εξωτερικές χωρητικότητες και επαγωγές και οι συχνότητες αποκοπής τους, έχουν ακρίβεια 0.2% σε σχέση με μία εξωτερική παλμική συχνότητα (clock frequency). Η λειτουργία του διακοπόμενου πυκνωτή ορίζεται από έναν διακόπτη και έναν πυκνωτή. Το bandwidth του SC φίλτρου εξαρτάται από τον ρυθμό δειγματοληψίας και τον λόγο των χωρητικοτήτων. Η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη περίπου από 50 μέχρι 100 φορές από την συχνότητα αποκοπής έτσι ώστε να αποφευχθούν οι παρενέργειες της χρονικής

δειγματοληψίας. Βέβαια η χρήση του SC φίλτρου δίνει μεγαλύτερο σφάλμα στην έξοδο του από ένα ενεργό φίλτρο.

3.2.4 Μετατροπέας χωρητικότητας σε χρόνο για μορφοποίηση σήματος σε χωρητικούς αισθητήρες

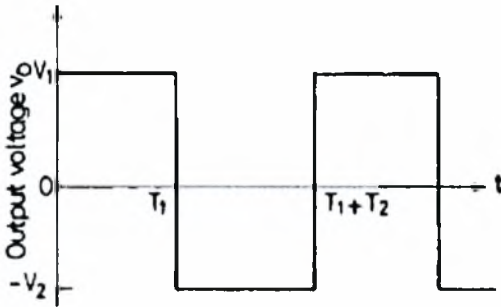
Σχήμα . . .



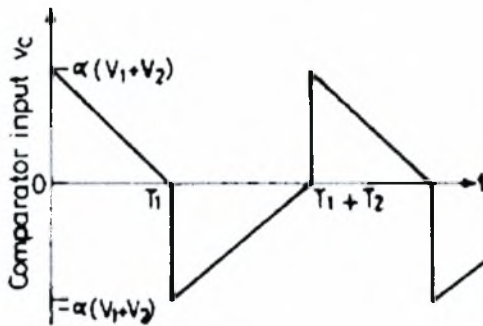
Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ένας μετατροπέας χωρητικότητας σε χρόνο. Βασικά είναι ένας ταλαντωτής, ο οποίος αποτελείται από έναν ενισχυτή γέφυρας και έναν συγκριτή. Οι τρεις αντιστάσεις R_1, R_2, R_x και ο συνδυασμός σε σειρά των R_3 και C αποτελούν τα τέσσερα χέρια μιας γέφυρας, όπου μαζί με το τελεστικό ενισχυτή 1 σχηματίζουν μια γέφυρα ενισχυτή. Θεωρώντας τους τελεστικούς ιδανικούς μπορεί να δειχθεί ότι το κύκλωμα θα δουλέψει σαν ένας ταλαντωτής όταν η R_x παίρνει τιμές μεγαλύτερες από $\frac{R_1 R_2}{R_3}$.

Οι κυματομορφές της εισόδου του συγκριτή v_c και της εξόδου v_o φαίνονται παρακάτω.

Κυματομορφή εξόδου v_o :



Κυματομορφή εισόδου συγκριτή v_c :



T_1 και T_2 θεωρούμε τα χρονικά διαστήματα στα οποία το v_o αγγίζει τα επίπεδα V_1 και $-V_2$ αντίστοιχα. Η τάση v_c κυμαίνεται μεταξύ $\pm a(V_1 + V_2)$ με το a να εκφράζει την παράσταση $\frac{R_2 R_x - R_1 R_3}{R_2(R_1 + R_x)}$. Από τις παραπάνω κυματομορφές η περίοδος των ταλαντώσεων μπορεί ναδειχθεί ότι είναι

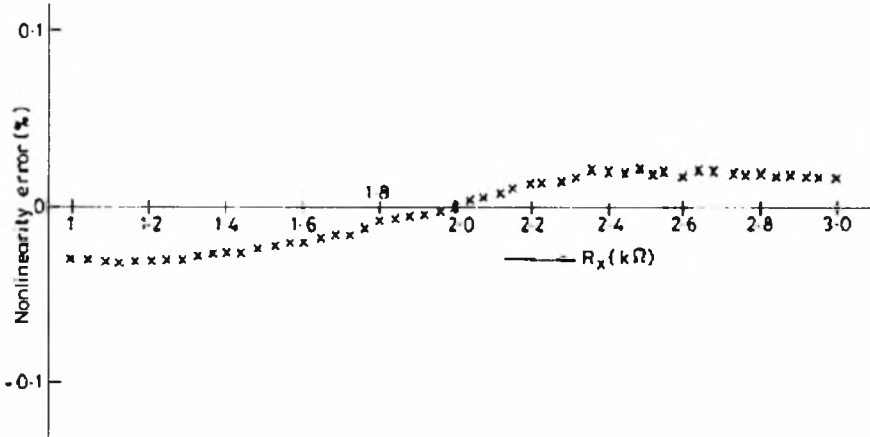
$$T = \frac{(1 + \mu)^2 (R_2 R_x - R_1 R_3) C}{\mu R_1} \quad \text{με} \quad \mu = \frac{V_2}{V_1} .$$

Από την παραπάνω ισότητα, όταν η ανιχνεύουσα αντίσταση αλλάζει κατά δR_x από μία offset τιμή R_0 , τότε παίρνουμε μια παρέκκλιση της περιόδου στην έξοδο από την offset τιμή, ας την πούμε T_0 και η οποία υπολογίζεται από

$$\delta T = \frac{(1 + \mu)^2 R_2 C \delta R_x}{\mu R_1}$$

Η παραπάνω ισότητα υποδεικνύει ότι μια χωρητική παρέκκλιση δR_x μετατρέπεται σε μια ανάλογη αλλαγή στην χρονική περίοδο, στην δT .

Γραφική παράσταση για τα μη γραμμικά λάθη του κυκλώματος



Το παραπάνω σχεδιάγραμμα αποτελεί μια ευκαιρία για να γίνει αναφορά για τα σφάλματα. Μια πηγή σφάλματος που επηρεάζει την απόδοση του κυκλώματος είναι το offset τάσης των τελεστικών που χρησιμοποιούνται. Εάν τα offset τάσης στην είσοδο του κάθε τελεστικού είναι v_{o1} και v_{o2} αντίστοιχα για τους τελεστικούς 1 και 2, τα χρονικά διαστήματα T_1' και T_2' κατά τη διάρκεια των οποίων το v_o είναι V_1 και V_2 αντίστοιχα υπολογίζονται από

$$T_1' = \frac{T_1}{1 - \varepsilon} \quad , \quad T_2' = \frac{T_2}{1 + \frac{\varepsilon}{\mu}}$$

και

$$\varepsilon = \frac{v_{o1} \left(1 + \frac{R_x}{R_1}\right)}{V_1}$$

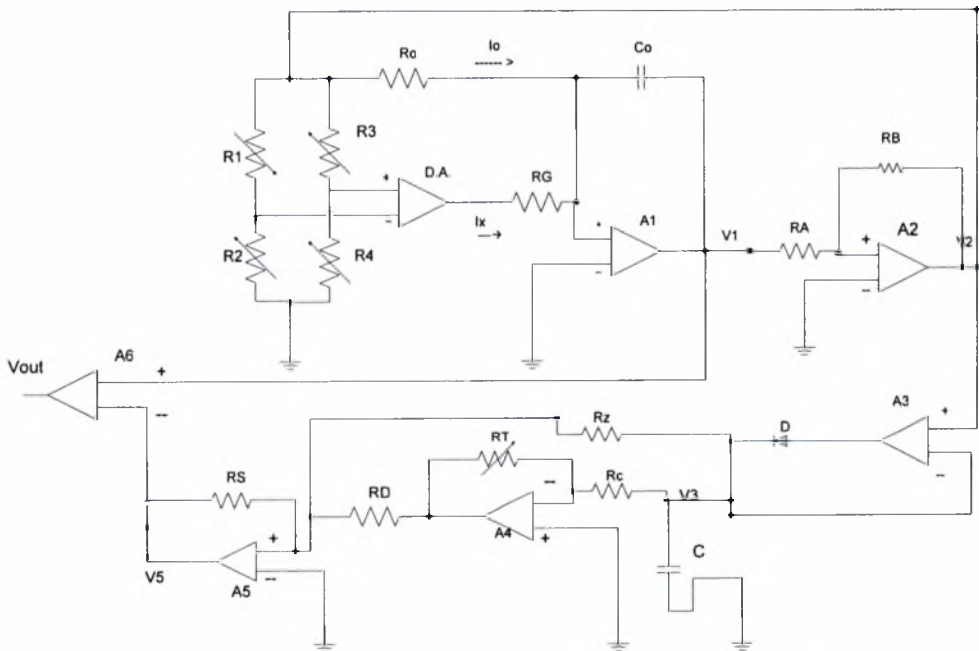
Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι η offset τάση του δεύτερου τελεστικού δεν επηρεάζει την έξοδο του μετατροπέα, ενώ το άλλο του πρώτου τελεστικού εναλλάσσει τα 2 χρονικά διαστήματα με αντίθετο τρόπο και έτσι τελικά η ολική περίοδος δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου.

Σφάλμα μπορεί να προκληθεί και από την αλλαγή των τάσεων κατά μήκος των διόδων (για παράδειγμα από την περικλείουσα θερμότητα) και να έχουμε απόκλιση στην περίοδο η οποία είναι $S_{\mu} = \frac{T(\mu-1)}{\mu+1}$, όπου μ η παράμετρος της διόδου Ζενερ .

3.2.5 Κύκλωμα μορφοποίησης για χωρητικούς αισθητήρες συνδυάζοντας την συχνότητα και την duty – cycle διαμόρφωση του ίδιου σήματος εξόδου

Ξεκινάμε την παρουσίαση αυτής της μεθόδου από το σχήμα το οποίο βασίζεται σε τελεστικούς ενισχυτές.

Σχήμα . . .



Η προσέγγιση της συχνότητας εξόδου στην μορφοποίηση σήματος που προέρχεται από αισθητήρα προσφέρει πλεονεκτήματα συγκρινόμενη με την με κυκλώματα τάσης στην έξοδο. Τέτοια είναι η υψηλότερη ανοσία στον θόρυβο και υψηλά αποτελέσματα είτε σε χαμηλές παροχές τάσης. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιεί ταυτόχρονη συχνοτική και duty cycle διαμόρφωση χωρίς αμοιβαία συσχέτιση ανάμεσα στα δύο.

Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος φαίνεται παραπάνω. Από αυτό βλέπουμε ότι το κύκλωμα αποτελείται από ταλαντωτή ο οποίος 'χτίστηκε' γύρω από τον τελεστικό ενισχυτή A1 και τον συγκριτή A2. Οι αντιστάσεις $R_1 - R_4$ συνθέτουν την γέφυρα του αισθητήρα η οποία διεγείρεται από την τετραγωνικής μορφής τάση V_2 που πηγάζει από την έξοδο του A2. Η τάση εξισορρόπησης της γέφυρας τροφοδοτεί τον διαφορικό ενισχυτή (DA) και έχει κέρδος G και μετασχηματίζεται σε ένα τετραγωνικής μορφής ρεύμα I_x , που προστίθεται αλγεβρικά στον αθροιστικό κόμβο του ολοκληρωτή, στο φορτίο I_0 που διαπερνά από την R_0 . Θεωρώντας ότι τα επίπεδα κορεσμού V_s^+ και V_s^- του συγκριτή A2 είναι συμμετρικά, για παράδειγμα $|V_s^+| = |V_s^-| = V_s$, η τάση εξόδου V_1 του ολοκληρωτή είναι μια τριγωνική κυματομορφή με πλάτος από κορυφή σε κορυφή $2V_s \frac{R_A}{R_B}$ που δίνεται από την από την υστέρηση του συγκριτή. Ανεξάρτητα από την τιμή του V_s , η V_1 έχει 50% duty - cycle και η συχνότητα f δίνεται από

$$f = \frac{1}{4R_0C_0} \frac{R_B}{R_A} \left[1 + \left(\frac{R_4}{R_4 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) G \frac{R_0}{R_G} \right]$$

$$= f_0 \left(1 + kG \frac{R_0}{R_G} \right)$$

με $f_0 = \frac{R_B}{4R_A R_0 C_0}$ να αποτελεί την κεντρική συχνότητα και το k να είναι ο παράγοντας εξισορρόπησης της γέφυρας. Για μια ισορροπημένη γέφυρα το k είναι μηδέν και υποθέτοντας ότι $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, τότε είναι ίσο με $\frac{\Delta R}{R}$ και $\frac{\Delta R}{2R}$ για ολόκληρης και μισής γέφυρας ρυθμίσεις αντίστοιχα.

Στο δεύτερο μέρος του κυκλώματος η τριγωνική μορφή της τάσης V_1 συγκρίνεται με την τάση V_5 από τον συγκριτή A6 του οποίου η έξοδος ισοδυναμεί με την έξοδο του όλου μορφοποιητή σήματος. V_5 είναι μια συνεχής τάση που είναι ανάλογη του V_S και της R_T με χρησιμοποίηση του επανορθωτή (rectifier) που βασίζεται στους A3 και A4, A5. Με αυτόν τον τρόπο, η duty cycle dc της V_{out} σχετίζεται με την R_T από την ακόλουθη έκφραση :

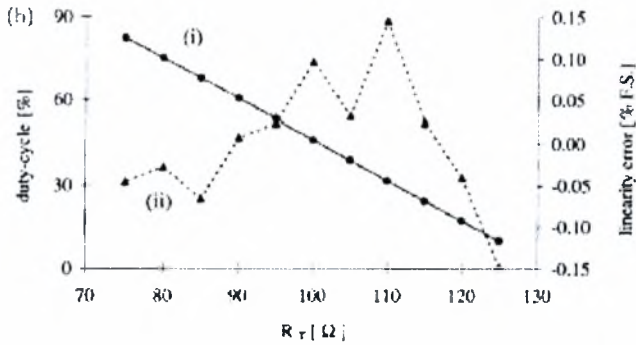
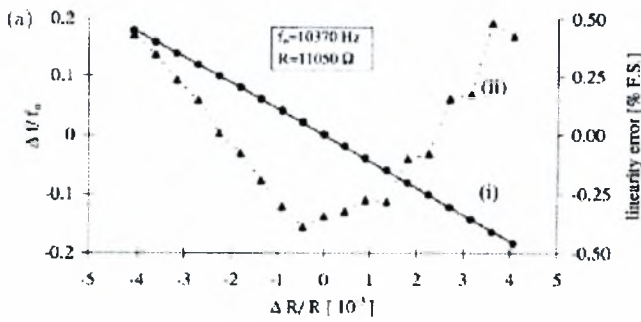
$$dc = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{R_B R_S}{R_A} \left(\frac{R_T}{R_C R_D} - \frac{1}{R_Z} \right) \right]$$

Σαν συνέπεια το σήμα εξόδου V_{out} είναι τετραγωνικής κυματομορφής της οποίας η συχνότητα και η duty – cycle αντίστοιχα εξαρτώνται από τον συντελεστή εξισορρόπησης k και από το R_T χωρίς αμοιβαία συσχέτιση ανάμεσα στις ευαισθησίες (sensitivities) $\frac{|f - f_0|}{k}$ και $\frac{\Delta(dc)}{\Delta R_T}$. Οι παραπάνω εξισώσεις τόσο για την συχνότητα f όσο και το dc δεν εξαρτώνται από το V_S .

Η έκφραση της συχνότητας είναι γραμμική με το k και επιτρέπει στον καθένα να διαλέξει όλες τις βασικές παραμέτρους που ορίζουν την κεντρική συχνότητα και την ευαισθησία βέλτιστα και ανεξάρτητα. Η μείωση στην ευαισθησία και η αλλαγή στην μηδενική συχνότητα μπορούν να ξαναεξισορροπηθούν, για μια δεδομένη τιμή C_0 , με μια προσεκτική επιλογή των R_C και R_0 αντίστοιχα.

Όσο το τμήμα του κυκλώματος που διαμορφώνει το duty – cycle σαν συνάρτηση του R_T υπάρχει, η ρύθμιση με τους A4 και A5 επιτρέπει σε κάποιον να ρυθμίσει ανεξάρτητα την ευαισθησία και το μηδέν με το αλλάζει τις τιμές των αντιστάσεων R_5 και R_X . Εάν για παράδειγμα R_T είναι ένα ευαίσθητο στη θερμοκρασία στοιχείο, μια 50% duty – cycle είναι εφικτή σε μια θερμοκρασία – αναφοράς T_0 , ταλαντεύοντας την R_Z , όπου ρυθμίζοντας την R_S , το span στο duty – cycle μπορεί «φτιαχτεί» ανάλογα με το εύρος της θερμοκρασίας στο οποίο είναι δυνατή η εργασία.

Στο γράφημα (a) δείχνονται η ευαισθησία συχνότητας και στο δεύτερο (b) η ευαισθησία duty – cycle.



Τα δύο σχεδιαγράμματα υπολογίζονται κάτω από ορισμένες υποθέσεις. Άξιο προσοχής είναι οι τιμές που εκφράζουν οι άξονες.

3.2.6 Κύκλωμα μορφοποίησης για αισθητήρες πίεσης

Δίνουμε το παρακάτω κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείται για μορφοποίηση σήματος που προέρχεται από αισθητήρες πίεσης. Το κύκλωμα έχει μια σταθερή πηγή ρεύματος για την διέγερση του αισθητήρα και έναν ενισχυτή μετρήσεων με το κέρδος του να προγραμματίζεται από την αντίσταση ανάδρασης r .

Η πηγή ρεύματος ελέγχεται από την $\pm 1\%$ απόκλιση δίοδο αναφοράς. Το ρεύμα αναφοράς ορίζεται ως

$$I_o = \frac{(E_o - e_o)}{R_2}$$

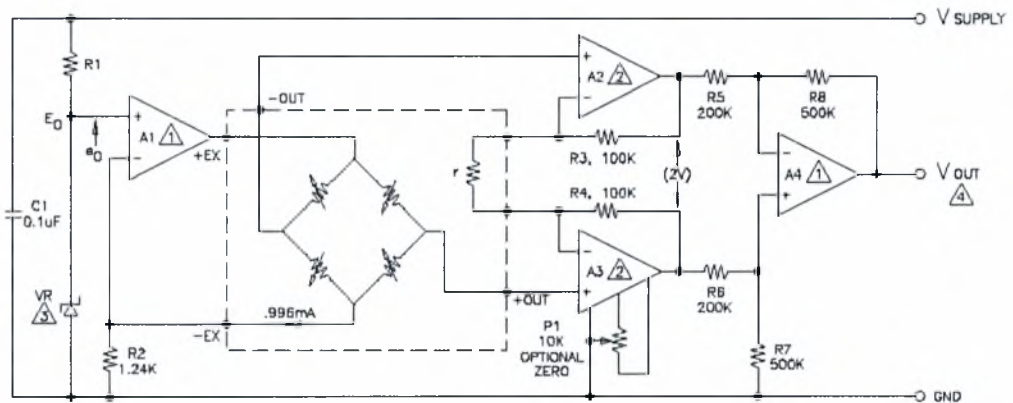
όπου E_o είναι η διόδος αναφοράς , e_o είναι το offset του ενισχυτή και R_2 η αντίσταση – ρυθμιστής του φορτίου.

Το επίπεδο εξόδου του ενισχυτή μετρήσεων παρέχει επιπρόσθετη ενίσχυση $\frac{R_8}{R_5}$ και μετατρέπει την διαφορική έξοδο του πρώτου επιπέδου σε μια απλή τάση εξόδου. Η ολική έξοδος δίνεται από την ισότητα . . .

$$V_{out} = 2 \cdot A \cdot \frac{R_8}{R_5}$$

Πρέπει να διευκρινιστεί ότι A είναι ο λόγος μεταξύ του πραγματικού φορτίου διέγερσης και του ορισμένου φορτίου.

Σχήμα. . .



Στη συνέχεια μιλάμε για την διασπορά του ανοίγματος της εξόδου (output span variation) το οποίο συμβολίζουμε με s_o . Η αντίσταση r δίνεται από την ακόλουθη ισότητα :

$$r = \frac{2R_F}{\frac{V_{amp}}{S_i} - 1}$$

με S_i = τιμή ανοίγματος του αισθητήρα σε ένα φορτίο διέγερσης που το παίρνουμε ως αναφορά , r = αντίσταση , R_F είναι η αντίσταση ανάδρασης και V_{amp} είναι η ενισχυμένη έξοδος .

Το span εξόδου στην έξοδο του διαφορικού ενισχυτή των ενισχυτών $A_3 - A_2$ για κάθε αντίσταση ανάδρασης R δίνεται από

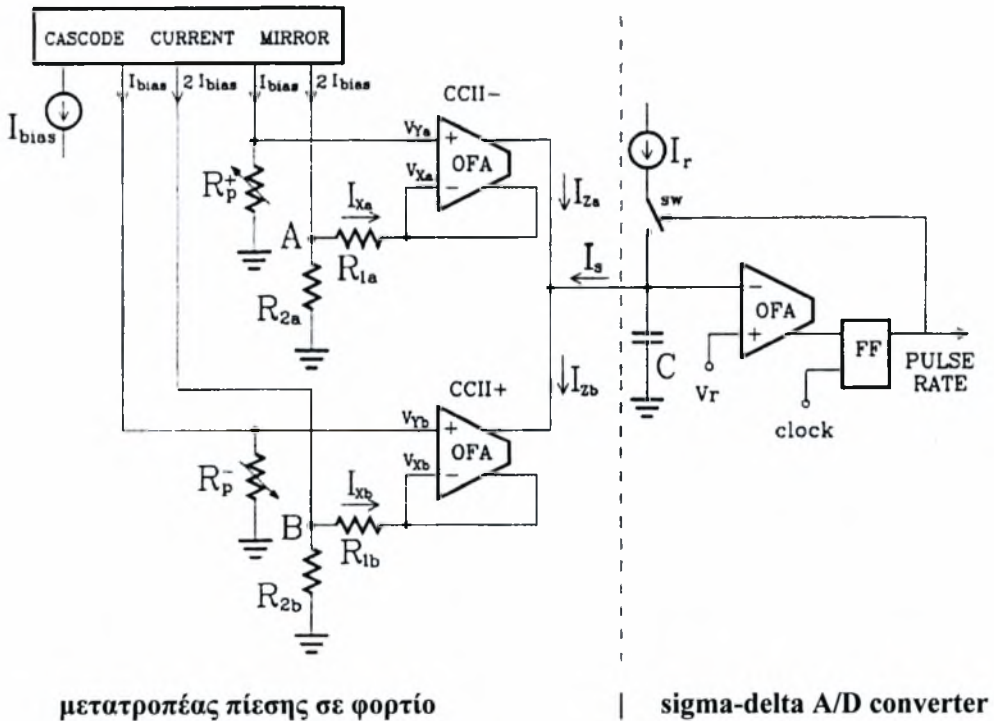
$$S_o = AS \left(\frac{r + 2R}{r} \right) = 2A \left[\frac{R}{100} + S_i \frac{(100 - R)}{200} \right]$$

και ισχύει ότι $A = \frac{I}{I_o}$ που αποτελεί τον λόγο του φορτίου διέγερσης I προς το αναφορικό φορτίο I_o .

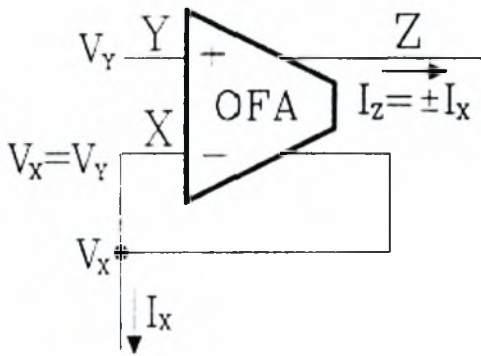
3.2.7 Μορφοποίηση σήματος με μεταβλητό ρυθμό παλμών εξόδου

Το κύκλωμα που μας ενδιαφέρει σε αυτήν την τεχνική είναι το παρακάτω και χρησιμοποιείται κυρίως σε αισθητήρες πίεσης :

Σχήμα :



Το παραπάνω κύκλωμα έχει υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας operational floating amplifier (OFA). Το OFA είναι στην πραγματικότητα ένας ενισχυτής και προσφέρει υψηλό κέρδος και 2 εξόδους φορτίου. Η βασική εξίσωση που περιγράφει την λειτουργία του είναι η $I_+ = -I_- = A_g(V_+ - V_-)$. Το A_g είναι το μεταχωρητικό κέρδος (transconductance gain). Για πολύ μεγάλο το A_g , η διαφορά τάσης μεταξύ των εισόδων μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζει το μηδέν. Έτσι αποτελεί μια ενεργή συσκευή που έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά ενός τελεστικού ενισχυτή. Αντίθετα οι δύο εξοδοί έχουν υψηλή εμπέδηση (floating output port) με την ικανότητα πηγής φορτίου. Το OFA δίνει την δυνατότητα σχεδίασης οποιουδήποτε τύπου ανάδρασης. Εδώ δείχνεται το OFA σε δεύτερης γενιάς μεταφορέα φορτίου ρύθμιση (second generation current conveyor configuration - CCII).



Το CCII έχει τρεις εισόδους X, Y, Z και μπορεί να λειτουργήσει και με σήματα φορτίου και σήματα τάσης στη είσοδο , παρέχοντας σήμα φορτίου στην έξοδο.

Το ολικό κύκλωμα για την μορφοποίηση φαίνεται στην αρχή της παραγράφου χωρισμένο στα επίπεδα του. Το πρώτο επίπεδο είναι ένας ενισχυτής μετρήσεων που λειτουργεί με φορτίο και δομείται από 2 OFAs. Το φορτίο εξόδου από αυτό το επίπεδο είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης πίεσης.

Οι 2 piezoresistors με αντίθετες αλλαγές στη αντίσταση R_p^+, R_p^- χρησιμοποιούνται για να “καταλαβαίνουν” την πίεση. Ο κάθε piezoresistor τροφοδοτείται με ένα φορτίο I_{bias} , δημιουργώντας κάτι σαν γέφυρα. Η τάση $V_{\chi a, b}$ η οποία είναι ίση με την $V_{\gamma a, b}$ δίνεται από

$$V_{\chi a, b} = I_{bias} R_p^\pm$$

Ο cascade καθρέπτης ρεύματος έχει λόγο ρεύματος 2 : 1 . Ένα φορτίο $2I_{bias}$ τροφοδοτεί τις αντιστάσεις $R_{1a,b}, R_{2a,b}$ και στους κόμβους A και B διασπάται σε 2 φορτία. Το ένα μέρος περνά από την $R_{2a,b}$ και το άλλο από την $R_{1a,b}$ που συμβολίζεται ως I_x . Η τάση στους κόμβους A και B εκφράζεται από την

$$V_{A,B} = (2I_{bias} - I_{x_{a,b}})R_{2a,b} \quad (I)$$

και τα ρεύματα $I_{x_{a,b}}$ δίνονται από

$$I_{x_{a,b}} = \frac{V_{A,B} - V_{x_{a,b}}}{R_{1a,b}} \quad (II)$$

Συνδυάζοντας τις ισότητες (I) και (II) τα ρεύματα $I_{x_{a,b}}$ του μεταφορέα φορτίου δίνονται από

$$I_{x_{a,b}} = \frac{I_{bias}}{1 + \frac{R_{1a,b}}{R_{2a,b}}} \frac{2R_{2a,b} - R_p^+}{R_{2a,b}}$$

Οι τιμές των piezoresistor είναι

$$R_p^+ = R_o \left(1 + \frac{\Delta R}{R_o} \right)$$

$$R_p^- = R_o \left(1 - \frac{\Delta R}{R_o} \right)$$

και αντίστοιχα τα ρεύματα

$$I_{x_{a,b}} = \frac{I_{bias}}{1 + \frac{R_{1a,b}}{R_{2a,b}}} \left[2 - \frac{R_o}{R_{2a,b}} \left(1 \pm \frac{\Delta R}{R_o} \right) \right]$$

Εάν $R_{1a,b} = R_{2a,b} = R_o$ τότε η προηγούμενη ισότητα γίνεται

$$I_{xb,a} = \frac{I_{bias}}{2} \left(1 \pm \frac{\Delta R}{R_o} \right)$$

Γνωρίζουμε ότι ισχύει $\frac{\Delta R}{R_o} = S \cdot P$ όπου η ευαισθησία πίεσης του piezoresistor και P είναι η ασκούμενη πίεση. Τα φορτία στην είσοδο Z των CCIH δίνονται από τις ισότητες

$$I_{Za} = I_{Xa} = \frac{I_{bias}}{2} (1 - S \cdot P)$$

και

$$I_{Zb} = I_{Xb} = \frac{I_{bias}}{2} (1 + S \cdot P)$$

αντίστοιχα. Το φορτίο εξόδου του πρώτου επιπέδου που είναι η διαφορά μεταξύ των I_{Zb} και I_{Za} ισούται με

$$I_S = I_{Zb} - I_{Za} = I_{bias} S \cdot P$$

Είναι προφανές ότι το φορτίο εξόδου είναι ανάλογο του απευθείας ανάλογο της ασκούμενης πίεσης.

Το δεύτερο επίπεδο του κυκλώματος είναι ένας βασισμένος σε OFA ενός bit sigma - delta μετατροπέας. Ο sigma - delta είναι ένας συγχρονισμένος ισορροπημένης επιφόρτωσης μετατροπέας. Το OFA είναι ένας συγκριτής και η έξοδος του είναι είτε στην θετική είτε στην αρνητική κατάσταση κορεσμού.

Η λειτουργία του παραπάνω κυκλώματος περιγράφεται ως εξής : Εάν το φορτίο είναι μηδέν (δηλαδή δεν έχουμε πίεση) τότε ο πυκνωτής δεν θα φορτιστεί ή αποφορτιστεί και δεν παράγονται παλμοί στην έξοδο. Θεωρούμε τώρα ότι το OFA βρίσκεται σε αρνητικό κορεσμό. Ο διακόπτης Sw είναι ανοιχτός και το φορτίο I_S αποφορτίζει τον πυκνωτή C. Η τάση του πυκνωτή V_C μειώνεται μέχρι να φτάσει την

τάση αναφοράς V_r . Σε αυτό το σημείο το OFA θα περάσει στην κατάσταση του θετικού κορεσμού και μετά από εντολή του ρολογιού το flip – flop αναλαμβάνει την κατάσταση του OFA. Ταυτόχρονα η έξοδος του FF γίνεται υψηλή και το I_r ενεργοποιείται. Το φορτίο ($I_r - I_s$) όπου $I_r > I_s$, φορτίζει τον πυκνωτή και η V_c αγγίζει τον φτάνει σε μια τιμή τάσης μεγαλύτερη από την τάση αναφοράς V_r ενώ το OFA επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Στο επόμενο θετικό παλμό του ρολογιού το flip-flop θα κλείσει το I_r και ο C θα αποφορτιστεί από το φορτίο I_s .

Από την παραπάνω λειτουργία καταλάβαμε ότι ο αριθμός των παλμών επιφόρτισης αποτελεί ένα μέτρο του σήματος εισόδου. Έτσι έχουμε ότι ισχύει για τον αριθμό n των παλμών

$$\left[\frac{n}{T_{\text{int}}} \right] = \frac{I_s}{I_r}$$

και αν συνδυάσουμε και την και τις προηγούμενες εξισώσεις στην παραπάνω τότε έχουμε τελικά ότι

$$\left[\frac{n}{T_{\text{int}}} \right] = \frac{I_{\text{bias}} S}{I_r} P$$

όπου T_{int} ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Η εξίσωση που περιγράφει έναν piezoresistor είναι η

$$R_p(P, T) = R(T)[1 \pm S(T)P].$$

Όπου

$R(T)$ = ονομαστική τιμή σε μια πίεση αναφοράς

$S(T)$ = ευαισθησία πίεσης

P = ασκούμενη πίεση σε μια μεμβράνη

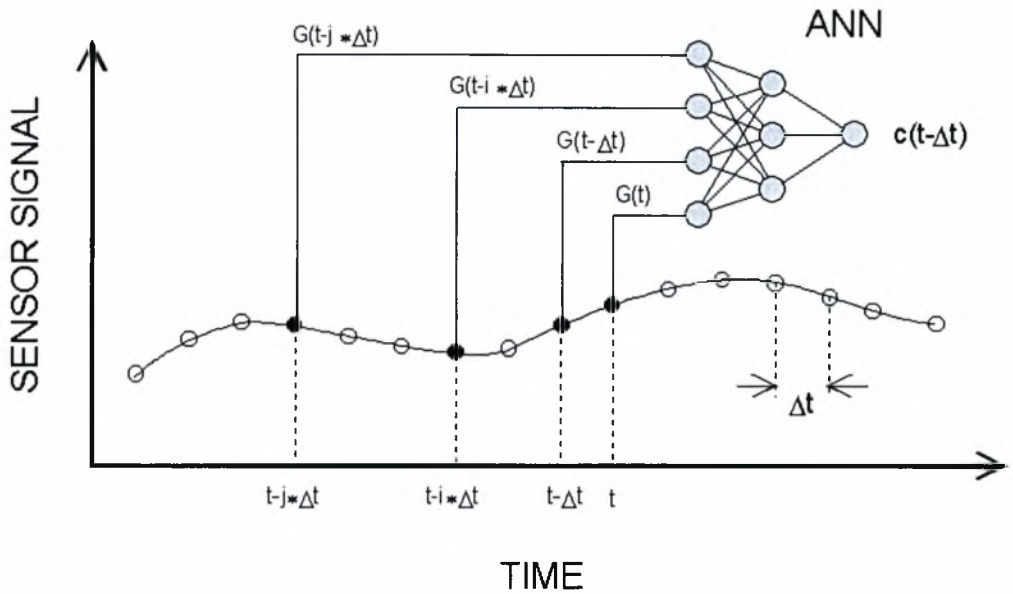
4. ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ορισμένα θέματα και τεχνικές που έχουν σχέση με τη μορφοποίηση σήματος ή τη χρησιμοποίησή του.

4.1 ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ

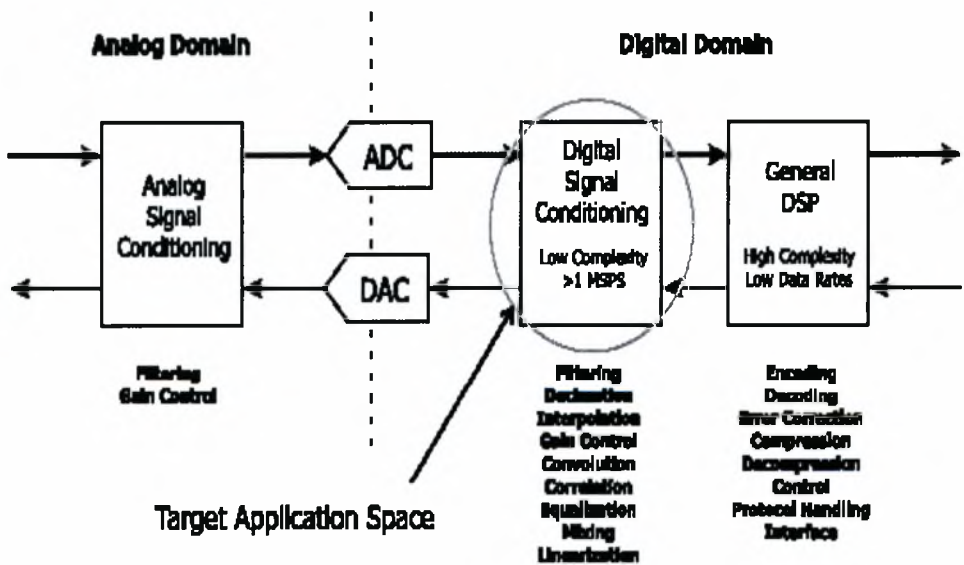
Εδώ θα δειχτεί η χρήση νευρωνικών δικτύων στη μορφοποίηση σήματος. Είναι γνωστό ότι ένα νευρωνικό δίκτυο για να μπορέσει να μας δώσει κάποια αποτελέσματα θα πρέπει να εκπαιδευτεί από κάποιο σετ δεδομένων. Μελετώντας την περίπτωση κατά την οποία θέλουμε να μετρήσουμε την τιμή κάποιας ποσότητας που μεταβάλλεται με το χρόνο φτάνουμε στο παρακάτω σχήμα (στο σχήμα που βρίσκεται στην αρχή της επόμενης σελίδας).

Στην περίπτωση που μας δείχνει το σχήμα έχουμε την δειγματοληψία ενός σήματος το οποίο προέρχεται από έναν αισθητήρα και τα δείγματα χρησιμοποιούνται ως είσοδο σε ένα δυναμικό νευρωνικό δίκτυο. Το νευρωνικό δίκτυο έχει εκπαιδευτεί από κάποια σετ δεδομένων σε προηγούμενη φάση. Το δίκτυο τροφοδοτείται με την πραγματική τιμή αλλά και με τιμές από το παρελθόν για να ορίσουν την τιμή που θα δοθεί προς τα έξω για την μετρούμενη ποσότητα. Το παρακάτω σχήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της ποσότητας ενός αερίου μέσα το οποίο εξαρτάται από την παρουσία κάποιου άλλου και έτσι η ποσότητα του αλλάζει συνεχώς σε σχέση με το χρόνο. Έτσι είναι δυνατό να εκτιμούμε την ποσότητα του αερίου ακόμα και σε περίοδο μετάβασης.



Αξίζει να τονιστεί ότι η αρχή (principle) του όλου σχήματος μπορεί να κατανοηθεί σαν μη γραμμικό FIR φίλτρο.

4.2 ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ



Στο παραπάνω σχέδιο φαίνεται η ψηφιακή μορφοποίηση σήματος (Digital Signal Conditioning) και ποιες μορφές παίρνει. Το όλο σχήμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως

μια αλυσίδα σήματος. Αυτή η αλυσίδα σήματος μπορεί να βρεθεί σε ασύρματα συστήματα , σε ραντάρ καθώς και σε πολλά συστήματα μέτρησης. Το σήμα λαμβάνεται από το αναλογικό πεδίο μέσω του ψηφιακού κόσμου που προήλθε από δειγματοληψία. Στην αναλογική άκρη του συστήματος γίνονται οι κύριες διεργασίες , δηλαδή το φιλτράρισμα και ελέγχου του κέρδους. Στο άλλο πεδίο τα δεδομένα εξορύσσονται με μεθόδους όπως η αποκωδικοποίηση και αποσυμπίεση. Τα σφάλματα των δεδομένων εντοπίζονται και διορθώνονται σε αυτό το επίπεδο.

Μεταξύ των δύο πεδίων υπάρχει μια σειρά από εργασίες που παίρνουν το ψηφιακό σήμα ανάμεσα από το ρυθμό δειγματοληψίας και το ρυθμό δεδομένων του χρήστη. Οι διεργασίες κλειδιά του τμήματος ψηφιακής μορφοποίησης του συστήματος, είναι να απομακρυνθεί ο θόρυβος και να αποκρυπτογραφηθούν τα δεδομένα. Αυτό περιλαμβάνει την απομάκρυνση του θορύβου που υπεισέρχεται από εξωτερικές πηγές , δειγματοληψία , και αλλαγές του ρυθμού των δειγμάτων. Επίσης μπορεί να χρειαστεί η διαμόρφωση και η αποδιαμόρφωση των δεδομένων με ένα φέρον. Το πεδίο αυτό της αλυσίδας του σήματος είναι ο 'στόχος' μίας εφαρμογής – συγκεκριμένα ενός DSP.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Sensors and Signal Conditioning, Second Edition, Ramon Pallas-Areny / John G. Webster.....
- [2] Signal conditioning & PC-based Data Acquisition Handbook.....
- [3] Analogue Signal Conditioning, Andrew Payne A.P.C.S. Pty Ltd.....
- [4] Industrial Signal Conditioning- A Tutorial, DATAFORTH.....
- [5] Handbook of modern sensors - Appendix C, J.Fraden.....
- [6] Typical Signals Arising in Measurement, Eugen Georg Woschni , Technical University Chemitz, Germany.....
- [7] Overview of Transducer, Signals, and Signal Conditioning, National Instruments Corporation.....
- [8] Data Acquisition Systems (DAS) in General, Gerd Wostenkuhler, Hochschule Harz, Wernigerode, Germany.....
- [9] 4.Signal Conditioning, Tim Stilton, Stanford.....
- [10] What is Signal Conditioning?-Products and services-National Instruments.....
- [11] Critical Technologies in front – end Signal Conditioning Systems, National Instruments.....
- [12] Signal Conditioning Fundamentals for PC-Based Data Acquisition Systems, National Instrument (The software is the instrument), Application note 048.....
- [13] Signal Conditioning Fundamentals for Computer-Based Measurement Systems, national Instruments, Application Note 048

- [14] ADCs for signal conditioning, Walt Kester, James Bryant, Joe Buxton.....
- [15] Signal Conditioning –Practical Instrumentation Techniques, university of Bath...
- [16] PulseDSP: A programmable Architecture for High Performance Digital Signal Conditioning, Gareth Jones.....
- [17] Just how important is Signal Conditioning? , Pat Vitale.....
- [18] Signal conditioning Tutorial, National Instruments.....
- [19] A signal Conditioning Circuit for Piezoresistive Pressure sensors with variable pulse – rate Output, S.Vlassis and S. Siskos, Department of Physics , Aristotle University, Greece.....
- [20] A signal Conditioning Circuitry for Capacitive Accelometers, B.N.Lee and H.D.Park, Korea electronics Technology Institute.....
- [21] A simple resistance-to-time converter for signal conditioning of resistive transducers, S.Kaliyugavaradan, Madras Institute of Technology, India.....
- [22] A conditioning circuit for resistive sensors combining frequency and duty cycle modulation of the same output signal, V Ferrari , C Ghildini, D Marioli and A Taroni , University of Brescia, Italy.....
- [23] Neural Networks for Signal Conditioning in Semiconductor Gas Sensor Arrays, Kohl, Blaser, Beling, Ruhl, Kelleter, Diehl, Univeritat Giessen.....



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074805