

ΣΥΛΛΟΓΗ, ΜΕΤΑΦΟΡΑ & ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

(Θεωρία)

ΒΙΒΛΙΟ ΜΑΘΗΤΗ

Β΄ & Γ΄ ΤΑΞΗ ΕΠΑ.Λ.

ΣΥΛΛΟΓΗ, ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

ΟΜΑΔΑ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ

- 1.- Γιαννακόπουλος Κωνσταντίνος, Φυσικός Ραδιοηλεκτρολόγος, MSc, Υποψήφιος PhD Πανεπιστημίου Πατρών, Τμήμα Φυσικής
- 2.- Ζυγούρης Ευάγγελος, Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών, Τμήμα Φυσικής
- 3.- Τσελές Δημήτριος, Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Τμήμα Αυτοματισμού

ΟΜΑΔΑ ΚΡΙΣΗΣ

- 1.- Γεωργάκης Θεόδωρος, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, Καθηγητής Δ/θμιας Εκπαίδευσης ΠΕ-12
- 2.- Πυρομάλης Δημήτριος, Πτυχιούχος Τμήμα Αυτοματισμού Τ.Ε.Ι. Πειραιά, MSc Open University της Αγγλίας
- 3.- Μουστάκας Γεώργιος, Ηλεκτρονικός, Καθηγητής Δ/θμιας Εκπαίδευσης ΠΕ-17

ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ

Γεωργάκης Θεόδωρος, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, Καθηγητής Δ/θμιας Εκπαίδευσης ΠΕ-12

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΚΔΟΣΗΣ

Γεωργάκης Θεόδωρος, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, Καθηγητής Δ/θμιας Εκπαίδευσης ΠΕ-12

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΕΙΜΕΝΟΥ

Παπαμαύρου Ευθυμία, Φιλόλογος

ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ

Παπαμαύρου Ευθυμία, Φιλόλογος

ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ

Επιστημονικός Υπεύθυνος του Τομέα «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ»,
Δρ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΔΗΜ. ΚΑΝΕΛΛΟΠΟΥΛΟΣ (Ph.D)
(Σύμβουλος του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου)

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΝΕΚΔΟΣΗΣ

Η επανέκδοση του παρόντος βιβλίου πραγματοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων «Διόφαντος» μέσω ψηφιακής μακέτας.

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

Κ. Γιαννακόπουλος, Ε. Ζυγούρης, Δ. Τσελές

Η συγγραφή και η επιστημονική επιμέλεια του βιβλίου πραγματοποιήθηκε
υπό την αιγίδα του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου

ΣΥΛΛΟΓΗ, ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

(Θεωρία)

ΒΙΒΛΙΟ ΜΑΘΗΤΗ

Β΄ ΤΑΞΗ ΕΠΑ.Λ.

&

Γ΄ ΤΑΞΗ ΕΠΑ.Λ.

Ειδικότητα: Τεχνικός Ηλεκτρονικών και Υπολογιστικών Συστημάτων,
Εγκαταστάσεων, Δικτύων και Τηλεπικοινωνιών

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ
«ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»

Πρόλογος

Η συγγραφή του παρόντος βιβλίου έγινε με βάση την ύλη του προγράμματος σπουδών, που καθόρισε το Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων για τη διδασκαλία του μαθήματος **Συλλογή, Μεταφορά και Έλεγχος Δεδομένων** στην Α΄ τάξη του 2ου κύκλου της ειδικότητας Ηλεκτρονικού Υπολογιστικών Συστημάτων και Δικτύων του Ηλεκτρονικού Τομέα. Το βιβλίο αυτό απευθύνεται σε μαθητές, που έχουν διδαχθεί τις βασικές έννοιες των ηλεκτρονικών σε μικρότερες τάξεις. Εντούτοις, όπου κρίνεται σκόπιμο, γίνεται αναδρομή σε έννοιες, που μπορεί να είναι γνωστές στον επιμελή μαθητή, αλλά χρειάζεται να επαναληφθούν για το λιγότερο επιμελή.

Η ύλη του βιβλίου εκτείνεται από τη συλλογή σήματος από το φυσικό του περιβάλλον, τη μετατροπή του έως και τη μεταφορά του στο χώρο επεξεργασίας και την αξιοποίησή του. Είναι ευνόητο, ότι περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρονικών εφαρμογών, που μπορεί κάποιος να συναντήσει. Ταυτόχρονα, αναφέρεται σε σύγχρονα αντικείμενα της ηλεκτρονικής, που ξεφεύγουν από την παραδοσιακή μελέτη των ηλεκτρονικών. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την αναγνώριση της **σπουδαιότητας** του βιβλίου, ελπίζουμε και της **ποιότητάς** του. Ταυτόχρονα, όμως, αποτελεί και δείκτη της **δυσκολίας** του. Παρόλα αυτά, έχει καταβληθεί προσπάθεια να παρουσιαστούν οι βασικές έννοιες με όσο γίνεται απλούστερο τρόπο και όσο το δυνατό λιγότερους μαθηματικούς τύπους, χωρίς βέβαια αυτό να είναι εφικτό σε όλες τις περιπτώσεις. Πράγματι, σε ορισμένες περιπτώσεις προτιμήθηκε να παρουσιαστούν αναλυτικά κάποιες έννοιες και εναπόκειται στην κρίση του καθηγητή και του επιπέδου της τάξης το πόσο θα εμβαθύνουν σε αυτές.

Η συγγραφή του βιβλίου ήταν αρκετά δύσκολη υπόθεση, αν αναλογιστεί κανείς, ότι ουσιαστικά είναι η πρώτη φορά, που παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αντικείμενα σε σχολικά βιβλία. Ένας από τους λόγους γι' αυτό, ήταν η προσπάθεια που έγινε έτσι ώστε το περιεχόμενο του βιβλίου **να συμβαδίζει με την εξέλιξη της τεχνολογίας** και ειδικά των ηλεκτρονικών (το αποδεικνύει, άλλωστε, και η βιβλιογραφία, που χρησιμοποιήθηκε).

Είναι γεγονός, ότι στο σημερινό ηλεκτρονικό και μάλιστα στον ηλεκτρονικό υπολογιστικών συστημάτων και δικτύων δεν αρκεί μόνο η καλή γνώση του παλμογράφου ή και της τηλεόρασης, αλλά και η καλή γνώση της δόμησης, διασύνδεσης και επικοινωνίας των υπολογιστικών συστημάτων γενικά, είτε αυτά είναι υπολογιστές, είτε απλοί μικροελεγκτές και μικροϋπολογιστές, επειδή το απαιτούν οι ανάγκες της αγοράς. Εξαιτίας όλων των παραπάνω μπορούν να δικαιολογηθούν και οι όποιες αδυναμίες ή πιθανές δυσκολίες, που παρουσιάζει το βιβλίο στη σημερινή του μορφή. Ένας επιπρόσθετος λόγος, χωρίς να χρησιμοποιείται, όμως, ως δικαιολογία, είναι και ο μικρός χρόνος που μας διατέθηκε για τη συγγραφή του. Οποιοσδήποτε, λοιπόν, υποδείξεις για διόρθωση φραστικού ή άλλου χαρακτήρα, που αφορούν τον τρόπο παρουσίασης ορισμένων εννοιών είναι ευπρόσδεκτες, τόσο από καθηγητές όσο και από μαθητές.

Τέλος, οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν όλους όσους συντέλεσαν στη συγγραφή του παρόντος βιβλίου και κυρίως τον κύριο Δ. Πυρομάλη για την πολύτιμη συνεργασία του.

Οι συγγραφείς
Οκτώβριος 2000

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο:Συστήματα Μέτρησης - Χαρακτηριστικά

1.1	Εισαγωγή.....	15
1.2	Τύποι Μετρήσεων	16
1.3	Τυπικό Σύστημα Μετρήσεων	18
1.4	Τύποι Συστημάτων Μετρήσεων.....	23
1.5	Χαρακτηριστικά Συστημάτων Μετρήσεων	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο:Αισθητήρια

2.1	Εισαγωγή.....	31
2.2	Ταξινόμηση Αισθητηρίων	32
2.3	Χαρακτηριστικά Αισθητηρίων	33
2.4	Αισθητήρια Θερμοκρασίας	35
2.5	Αισθητήρια Πίεσης, Ροής και Στάθμης	43
2.6	Αισθητήρια Κίνησης, Δόνησης και Δύναμης.....	48
2.7	Αισθητήρια Φωτός	55
2.8	Διατάξεις Πυρηνικής και Χημείας.....	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο:Τελεστικοί Ενισχυτές - Ενισχυτές Μετρήσεων

3.1	Εισαγωγή.....	67
3.2	Διαφορικός Ενισχυτής	68
3.3	Τελεστικός Ενισχυτής.....	69
3.4	Χαρακτηριστικά DC και AC Λειτουργίας Τελεστικού Ενισχυτή	71
3.5	Βασικά Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών.....	78
3.6	Ενισχυτές Μετρήσεων	82
3.7	Θόρυβος Ενισχυτών.....	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο:Διευθέτηση Σημάτων

4.1	Εισαγωγή.....	97
4.2	Τύποι Φίλτρων	98
4.3	Φίλτρα Χαμηλών Συχνοτήτων	100
4.4	Παθητικά Φίλτρα	109
4.5	Ενεργά Φίλτρα.....	115
4.6	Φίλτρα Ζώνης	120
4.7	Μετατροπείς Ρεύματος - Τάσης.....	125
4.8	Γειώσεις - Θωράκιση - Τερματισμός.....	128

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο: Μετατροπή Σημάτων

5.1	Συστήματα Συλλογής και Μετατροπής Δεδομένων.....	137
5.2	Πολυπλέκτες	140
5.3	Κυκλώματα Δειγματοληψίας-Κράτησης.....	142
5.4	Κώδικες Αναπαράστασης και Σφάλματα Μετατροπών	143
5.5	Μετατροπείς Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό	151
5.6	Ολοκληρωμένοι DACs.....	154
5.7	Μετατροπείς Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό	155
5.8	Μετατροπείς και Μικροεπεξεργαστές/Μικροελεγκτές	163
5.9	Δειγματοληπτημένα Δεδομένα.....	167
5.10	Θόρυβος Αλίσας.....	168
5.11	Σφάλματα σε Σχέση με τη Δειγματοληψία	169
5.12	Επιλογή Κατάλληλου Μετατροπέα, S/H	170

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο:Συστήματα Μετρήσεων και Μικροϋπολογιστές

6.1	Εισαγωγή.....	177
6.2	Τεχνικές Μεταφοράς Δεδομένων	178
6.3	Προγραμματισμένη Μεταφορά Δεδομένων.....	180
6.4	Μεταφορά Δεδομένων με Άμεση Προσπέλαση στη Μνήμη... ..	184
6.5	Θύρες Εισόδου/Εξόδου	186
6.6	Εσωτερικοί Δίαυλοι Διακίνησης Πληροφοριών.....	188
6.7	Εξωτερικοί Δίαυλοι Διακίνησης Πληροφοριών	190
6.8	Διασύνδεση Συσκευών I/O σε Μικροϋπολογιστή.....	202
6.9	Λογισμικό Συστημάτων Μετρήσεων.....	207
6.10	Πρακτικά Συστήματα Συλλογής Δεδομένων.....	209

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο:Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές (PLCs)

7.1	Εισαγωγή.....	217
7.2	Δομή και Λειτουργία PLC.....	219
7.3	Διασύνδεση PLC	226
7.4	Προγραμματισμός PLC	227
7.5	Παραδείγματα Προγραμματισμού PLC	232
7.6	Η Οικογένεια PLCs LOGO! της Siemens	236
7.7	Πρακτικές Εφαρμογές LOGO!.....	243

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο:Μεταφορά Δεδομένων

8.1	Εισαγωγή.....	251
8.2	Τύποι Δικτύων-Δίκτυα Μετρήσεων	252
8.3	Πρότυπα Δικτύων Μετρήσεων	254
8.4	Μέσα Μετάδοσης.....	256
8.5	Γραμμές Μεταφοράς.....	258

8.6	Οπτικές Ίνες.....	256
8.7	Μετάδοση Ψηφιακού Σήματος	272
8.8	Κωδικοποίηση	273
8.9	Διαμόρφωση.....	275
8.10	Επικοινωνίες Βασικής-Ευρείας Ζώνης.....	279
8.11	Τηλεφωνική Γραμμή	281
8.12	Modems	283
8.13	Τοπικά Δίκτυα Μετρήσεων.....	287

10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Συστήματα μέτρησης- χαρακτηριστικά

- Εισαγωγή
- Τύποι Μετρήσεων
- Τυπικό Σύστημα Μετρήσεων
- Τύποι Συστημάτων Μετρήσεων
- Χαρακτηριστικά Συστημάτων Μετρήσεων

Σκοπός

Όταν ολοκληρώσεις το κεφάλαιο αυτό, θα μπορείς:

- Να αναφέρεις τους διάφορους τύπους μέτρησης φυσικών μεγεθών.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις από τι αποτελείται ένα τυπικό σύστημα μέτρησης.
- Να περιγράφεις τα συγκεντρωτικά και αποκεντρωμένα συστήματα μέτρησης.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις τα διάφορα χαρακτηριστικά των συστημάτων μέτρησης.

Η μελέτη των διαφόρων φυσικών φαινομένων γίνεται εφικτή, όταν έχουμε πληροφορίες, δηλαδή δεδομένα ή περιγραφές, που σχετίζονται με τα διάφορα αντικείμενα ή γεγονότα. Τις πληροφορίες αυτές μεταφέρουν τα διάφορα **σήματα** ή **φυσικά μεγέθη**. Η σύγκριση ενός φυσικού μεγέθους με άλλο ομοειδές, το οποίο αυθαίρετα ή με συμφωνία λαμβάνουμε σα μονάδα, ονομάζεται **μέτρηση** του μεγέθους αυτού.

Οι μετρήσεις (measurements) είναι πολύ σημαντικές για την εξέλιξη των σύγχρονων επιστημών και των τεχνολογιών αιχμής. Βασικός στόχος τους είναι η ακριβής παρακολούθηση της εξέλιξης οποιασδήποτε μορφής φαινομένου με φυσικά ή όχι μεγέθη, που αναφέρονται άμεσα ή έμμεσα στις ανθρώπινες αισθήσεις, όπως για παράδειγμα η γωνιακή επιτάχυνση, το ΡΗ διαλύματος ή η ροπή. Πολλές φορές χρειαζόμαστε πληροφορία για τη ταχύτητα αυτοκινήτου, τη θερμοκρασία στο χώρο εργασίας ή την ποσότητα μιας χημικής ουσίας κατά την εξέλιξη μιας χημικής αντίδρασης. Αυτό επιτυγχάνεται με ειδικές μετρητικές διατάξεις, τα **αισθητήρια**, τα οποία συνδυασμένα με κατάλληλα στοιχεία επεξεργασίας δεδομένων εκτελούν τις επιθυμητές μετρήσεις.

Το φυσικό σύστημα, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ενός μεγέθους, ονομάζεται **σύστημα μέτρησης**. Παράδειγμα συστήματος μέτρησης αποτελεί η παρακολούθηση της σεισμικής συμπεριφοράς κάποιων περιοχών ή ηφαιστειών, με σκοπό την πρόβλεψη, ίσως, κάποιου σεισμού ή την προφύλαξη από την έκρηξη ενός ηφαιστείου.

1.2 Τύποι Μετρήσεων

Ανάλογα με τις απαιτήσεις ακρίβειας και τις ιδιομορφίες ενός συστήματος, διακρίνουμε διάφορους τύπους μετρήσεων. Οι κλασικοί τύποι μετρήσεων είναι:

- Μετρήσεις, που βασίζονται στη **διαφορά** μεταξύ δύο όμοιων μεγεθών ή αντικειμένων, όπως η διάκριση αντικειμένων με βάση το χρώμα τους ή την οσμή τους.
- Μετρήσεις σχετικών μεγεθών και **διάταξη** σε αύξουσα ή φθίνουσα τάξη, όπως η στοίχιση μαθητών από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο ύψος.
- Μετρήσεις, που βασίζονται στην **κατάταξη** μεγεθών σε διαστήματα, που είναι και οι πιο ακριβείς. Αν η μεγαλύτερη μέτρηση ληφθεί ως μονάδα και οι υπόλοιπες μετατραπούν σε κλάσματά της (διαιρώντας τις με τη μέγιστη), λέμε ότι **κανονικοποιούμε** τις μετρήσεις. Παράδειγμα τέτοιων μετρήσεων έχουμε στα δοσομετρικά δοχεία, που χρησιμοποιούμε στην μαγειρική και βασίζονται, κυρίως, σε υποδιαιρέσεις του λίτρου.

Τα τελευταία χρόνια, αφ' ενός, οι απαιτήσεις εξαιτίας της αλματώδους ανάπτυξης της παραγωγικής ικανότητας και, αφ' ετέρου, οι δυνατότητες, που προσφέρει η τεχνολογία, οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων τύπων συστημάτων μετρήσεων:

- Συστήματα μετρήσεων με χρήση **ηλεκτρονικών** εξαρτημάτων.
- Συστήματα μετρήσεων, που την κεντρική θέση κατέχει κάποιου είδους **υπολογιστής**.

Η τάση, που κυριαρχεί στη σημερινή εποχή, είναι η αυτοματοποίηση των μετρήσεων. Επίσης, η ανάπτυξη νέων εργαλείων για την ανάλυση, σύνθεση, αποτίμηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων οδηγεί στην αύξηση της απόδοσης των συστημάτων μετρήσεων.

Για τις μετρήσεις των διαφόρων φυσικών μεγεθών έχουν καθιερωθεί διάφορες **μονάδες**. Προκειμένου να απλοποιηθεί η μελέτη των φυσικών φαινομένων και να παγιωθεί παγκόσμια ενιαία έκφραση των μετρήσεων, έχει καθιερωθεί διεθνώς, ως αποδεκτό σύστημα μονάδων το **Διεθνές Σύστημα Μονάδων (S.I.)**. Σύμφωνα με αυτό το σύστημα, ορισμένα μεγέθη ορίζονται ως θεμελιώδη και οι αντίστοιχες μονάδες μέτρησής τους ως θεμελιώδεις μονάδες, ενώ άλλα μεγέθη και μονάδες, που προκύπτουν μέσω διαφόρων σχέσεων από τα θεμελιώδη, ως παράγωγα. Τα μεγέθη αυτά εμφανίζονται στους πίνακες 1.2.1 και 1.2.2.

Θεμελιώδες Μέγεθος	Μονάδα	Ονομασία
Χρόνος	s	Δευτερόλεπτο
Μήκος	m	Μέτρο
Μάζα	kg	Χιλιόγραμμα
Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος	A	Αμπέρ
Θερμοκρασία	K	Κέλβιν
Ποσότητα ύλης	mol	Μολ
Φωτεινή ένταση	cd	Κανδέλα

Πίνακας 1.2.1. Θεμελιώδη μεγέθη στο S.I.

Παράγωγο Μέγεθος	Μονάδα	Ονομασία
Εμβαδόν	m ²	Τετραγωνικό μέτρο
Όγκος	m ³	Κυβικό μέτρο
Ταχύτητα	m/sec	Μέτρο ανά δευτερόλεπτο
Επιτάχυνση	m/sec ²	Μέτρο ανά τετραγωνικό δευτερόλεπτο
Πυκνότητα	kg/m ³	Χιλιόγραμμα ανά κυβικό μέτρο
Πίεση	Pa	Πασκάλ
Έργο	J	Τζάουλ
Ισχύς	W	Βατ
Ηλεκτρικό φορτίο	C	Κουλόμπ
Ηλεκτρική τάση	V	Βολτ
Ηλεκτρική αντίσταση	Ω	Ωμ
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	S	Ζίμενς
Συχνότητα	Hz	Χερτζ
Δύναμη	N	Νιούτον
Χωρητικότητα	F	Φαράντ
Αυτεπαγωγή	H	Ανρί
Θερμοκρασία Celsius	°C	Βαθμός κελσίου

Πίνακας 1.2.2. Παράγωγα μεγέθη στο S.I.

Ειδικά για τις τεχνικές μετρήσεις υπάρχουν, κατά γεωγραφικές περιοχές, και άλλες μονάδες, με αντιστοιχία προς το S.I., που διευκολύνουν ως προς την έκφραση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων ή έχουν καθιερωθεί ιστορικά, όπως π.χ. η χρήση της ίντσας ως μονάδα μέτρησης του μήκους στην Αγγλία.

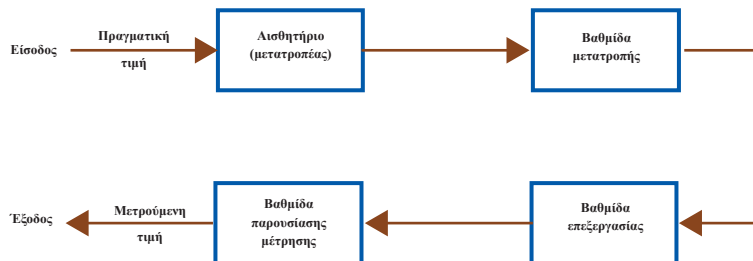
1.3 Τυπικό Σύστημα Μετρήσεων

Ο σκοπός ενός συστήματος μετρήσεων είναι να παρουσιάζει στον παρατηρητή, σε επιλεγμένες χρονικές στιγμές, αριθμητική τιμή, που να ανταποκρίνεται στην μεταβλητή, που μελετάται. Η **μετρούμενη τιμή**, που παίρνει ο παρατηρητής, δεν είναι ίδια με την **πραγματική τιμή** της μεταβλητής, σχήμα 1.3.1, διότι το όργανο μέτρησης εισάγει σφάλμα μέτρησης στην όλη διαδικασία.



Σχήμα 1.3.1. Μεγέθη συστήματος μέτρησης

Κατά κανόνα, ένα τυπικό σύστημα μέτρησης (measurement system) μπορεί να θεωρηθεί, ότι αποτελείται από τέσσερις βασικές βαθμίδες, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.2.



Σχήμα 1.3.2. Δομή τυπικού συστήματος μέτρησης

Με βάση τη σημερινή τεχνολογία, όμως, τα όρια μεταξύ των βαθμίδων αυτών είναι δυσδιάκριτα έως ανύπαρκτα, αφού κυριαρχεί η χρήση των ολοκληρωμένων εξαρτημάτων. Για παράδειγμα, πάνω στο αισθητήριο προσαρμόζεται ο μετατροπέας σήματος και ο επεξεργαστής, καθώς και ότι άλλο χρειάζεται. Πολλές φορές συμβαίνει να λείπει κάποια βαθμίδα ή οι ανάγκες της εφαρμογής να απαιτούν κάποιες άλλες. Ας εξετάσουμε, όμως, πιο αναλυτικά το παραπάνω βασικό δομικό (block) διάγραμμα ενός τυπικού συστήματος μετρήσεων. Αυτό αποτελείται από:

- α) Το **αισθητήριο** (sensing element ή sensor) ή τον **μετατροπέα** (transducer)

Παρά το γεγονός ότι και οι δύο λέξεις (αισθητήριο και μετατροπέας) αποδίδουν την κυρίως βαθμίδα, που αντιλαμβάνεται τις μεταβολές της ελεγχόμενης μεταβλητής (measurant), αυτές παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές. Πρώτα απ' όλα, το αισθητήριο περιγράφει τη συσκευή, που εκτελεί απ' ευθείας τη μέτρηση, χωρίς να αλλάζει το ενεργειακό περιεχόμενο του σήματος, π.χ. το θερμόμετρο, ενώ ο μετατροπέας περιγράφει την αρχή της μέτρησης του σήματος και της μετατροπής του από μία μορφή ενέργειας σε άλλη. Περιγράφει, δηλαδή, τη διάταξη (το σύνολο των διατάξεων μαζί με το αισθητήριο), που μετατρέπει μια μη ηλεκτρική παράμετρο σε ηλεκτρικό σήμα προς επεξεργασία. Οι μεταβολές της ηλεκτρικής παραμέτρου εξόδου είναι συνάρτηση της παραμέτρου εισόδου. Το μικρόφωνο, για παράδειγμα, είναι ηλεκτρακουστικός μετατροπέας, που μετατρέπει ηχητικό σήμα σε ηλεκτρικό, σχήμα 1.3.3, ενώ, το μεγάφωνο είναι ηλεκτρακουστικός μετατροπέας, που μετατρέπει ηλεκτρικό σήμα σε ηχητικό, σχήμα 1.3.4.



α)



β)

Σχήμα 1.3.3. (α) Πυκνωτικά μικρόφωνα, (β) διάφοροι τύποι μικροφώνων



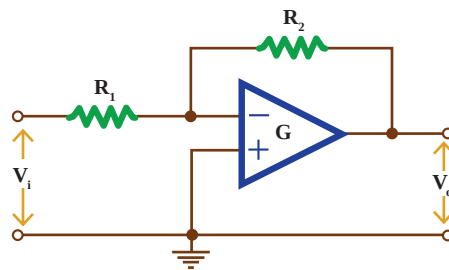
Σχήμα 1.3.4. Μεγάφωνα (Speakers)

Οι μετατροπείς αποτελούνται από διάφορα χωρητικά, επαγωγικά, ηλεκτρομηχανικά, ηλεκτρομαγνητικά, φωτοβολταϊκά, πιεζοηλεκτρικά και άλλα στοι-

χεία. Τα περισσότερα από αυτά χρειάζονται εξωτερική ηλεκτρική διέγερση, με εξαίρεση τα πιεζοηλεκτρικά, τα φωτοηλεκτρικά και τα ηλεκτρομαγνητικά. Τέλος, οι μετατροπείς, που τίθενται στην έξοδο των συστημάτων, προκειμένου να εκτελεστεί μια λειτουργία, ονομάζονται **δράστες** (actuators).

β) Η βαθμίδα μετατροπής σήματος

Η βαθμίδα μετατροπής σήματος λαμβάνει την έξοδο του αισθητηρίου και τη μετατρέπει σε μορφή κατάλληλη για περαιτέρω επεξεργασία, όπως συνεχή τάση, συνεχές ρεύμα ή σήμα, που είναι συνάρτηση της συχνότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ενισχυτές. Οι ενισχυτές εκτελούν διάφορες λειτουργίες, κυρίως, όμως, απλή ενίσχυση, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.5. Η σχέση (1.3.1) δίνει το λόγο της τάσης εξόδου του παρακάτω ενισχυτή προς τη τάση εισόδου. Στη βαθμίδα μετατροπής περιλαμβάνεται, συνήθως, και ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC: analog-to-digital converter), που προετοιμάζει το αναλογικό σήμα για ψηφιακή επεξεργασία. Αν έχουμε πολλά κανάλια εισόδου (multiple-input), χρησιμοποιούμε πολυπλέκτες, που είναι πολλές φορές τμήμα του ίδιου του ADC.

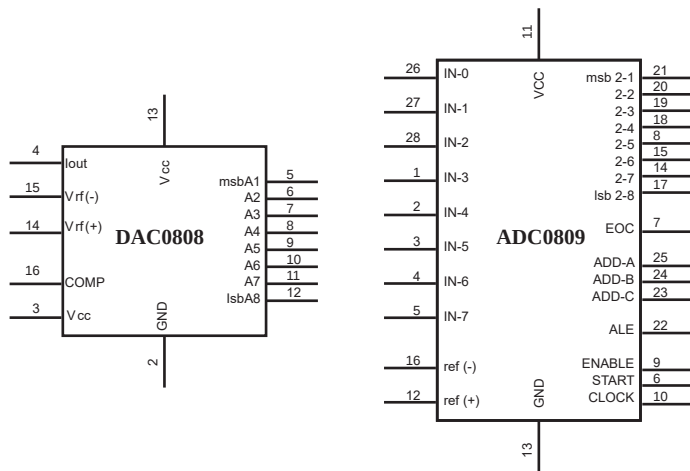


Σχήμα 1.3.5. Αναστρέφων ενισχυτής

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (1.3.1)$$

γ) Η βαθμίδα επεξεργασίας σήματος

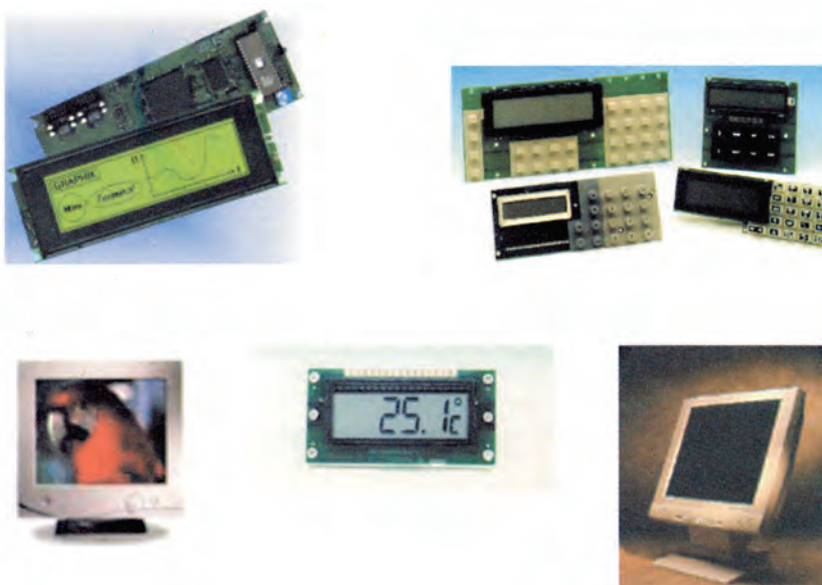
Η βαθμίδα επεξεργασίας σήματος λαμβάνει την έξοδο του στοιχείου μετατροπής σήματος σε ψηφιακή μορφή (από τον ADC), την επεξεργάζεται κατά υλικό και λογισμικό (hardware-software), την επαναφέρει σε αναλογική μορφή με μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC: digital-to-analog converter) και τη διοχετεύει στην επόμενη βαθμίδα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα βαθμίδας επεξεργασίας είναι ο μικροϋπολογιστής PIC ή και οι διάφοροι μικροελεγκτές (μCs) ή και οι επεξεργαστές ψηφιακών σημάτων (DSPs). Αν έχουμε πολλά κανάλια εξόδου (multiple-output) χρησιμοποιούμε αποπλέκτες. Στο σχήμα 1.3.6 βλέπουμε τη διάταξη ακροδεκτών μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC0809) και μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC0808).



Σχήμα 1.3.6. Διατάξεις ακροδεκτών ενός DAC και ενός ADC

δ) Η βαθμίδα παρουσίασης μέτρησης και διανομής δεδομένων

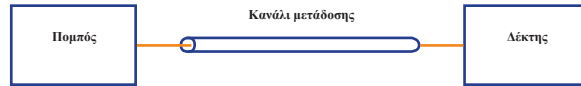
Η βαθμίδα παρουσίασης απεικονίζει τη μετρούμενη τιμή σε μορφή εύκολα αναγνωρίσιμη από τον παρατηρητή, όπως το στοιχείο επίδειξης με χρήση 7-γραμμών (seven segment display), οι οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCD), κ.ά., σχήμα 1.3.7.



Σχήμα 1.3.7. Διάφοροι τύποι οθονών

Όταν η βαθμίδα επεξεργασίας βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τη βαθμίδα μέτρησης, όπως π.χ. γίνεται στις σεισμολογικές μετρήσεις, τότε γίνεται

χρήση των **τηλεμετρικών συστημάτων**. Τα συστήματα αυτά, εκτός των βαθμίδων, που αναφέρθηκαν, περιλαμβάνουν και τμήματα αποστολής και λήψης της πληροφορίας σε μακρινές αποστάσεις. Στο τμήμα που παρέχει την πληροφορία, υπάρχει πομπός και στο τμήμα, που δέχεται την πληροφορία, υπάρχει δέκτης (π.χ. FM πομποδέκτες). Το κανάλι μετάδοσης μεταξύ πομπού και δέκτη μπορεί να είναι ραδιοφωνικός δίαυλος, τηλεφωνικό κανάλι, ομοαξονικό καλώδιο ή οπτική ίνα, σχήμα 1.3.8.

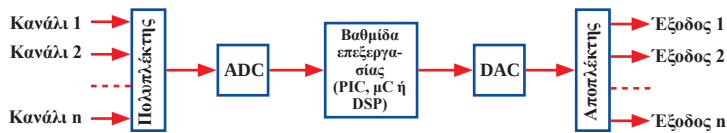


Σχήμα 1.3.8. Διάταξη τηλεμετρικού συστήματος με χρήση πομπού και δέκτη

Ανάλογα με τον αριθμό των μετατροπών αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) και ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC), καθώς και το είδος των πολυπλεκτών, που χρησιμοποιούνται σε σύστημα μέτρησης, τα συστήματα αυτά διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

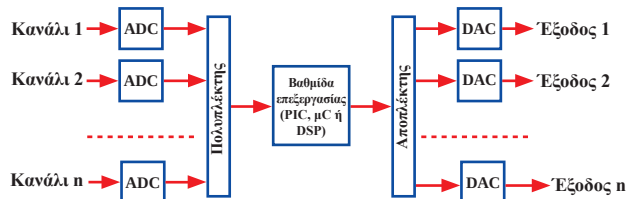
1.4 Τύποι Συστημάτων Μετρήσεων

- **Συγκεντρωτικό σύστημα** απόκτησης δεδομένων, όταν περιλαμβάνει αναλογικούς πολυπλέκτες/αποπλέκτες, ένα ADC καθώς και ένα DAC για όλα τα κανάλια, σχήμα 1.4.1



Σχήμα 1.4.1. Συγκεντρωτικό σύστημα

- **Αποκεντρωμένο σύστημα** απόκτησης δεδομένων, όταν περιλαμβάνει πολλούς ADC και DAC (π.χ. ένας για κάθε κανάλι) και ο πολυπλέκτης/αποπλέκτης είναι ψηφιακός, άμεσα συνδεδεμένος με τη βαθμίδα επεξεργασίας (μέσω θύρας εισόδου/εξόδου), σχήμα 1.4.2.



Σχήμα 1.4.2. Αποκεντρωμένο σύστημα

1.5 Χαρακτηριστικά Συστημάτων Μετρήσεων

Έως τώρα εξετάστηκε το τυπικό σύστημα μέτρησης και η δομή του. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά τέτοιου συστήματος. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι εκείνα, που περιγράφουν ουσιαστικά το σύστημα και προκύπτουν από τις αποκρίσεις των βαθμίδων του συστήματος, με στατιστικές μεθόδους των οποίων η μαθηματική ανάλυση παραλείπεται.

- **Απόλυτο σφάλμα** ή απλά **σφάλμα** (error): Η απόκλιση της μέτρησης, δηλαδή, η διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη και στην πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους, που διατυπώνεται με τη μορφή:

$$E = (\text{μετρούμενη τιμή}) - (\text{πραγματική τιμή}) = (\text{έξοδος}) - (\text{είσοδος}) \quad (1.5.1)$$

- **Σχετικό σφάλμα** ή **ακρίβεια** (accuracy): Ο λόγος του απόλυτου σφάλματος προς την πραγματική τιμή του μεγέθους εκφραζόμενος επί τοις εκατό:

$$\frac{(\text{μετρούμενη τιμή}) - (\text{πραγματική τιμή})}{(\text{πραγματική τιμή})} 100\% \quad (1.5.2.)$$

- **Ανάλυση** (resolution) ή **διακριτική ικανότητα** συστήματος: Η μικρότερη μεταβολή της εισόδου, που μπορεί να γίνει αντιληπτή από το σύστημα, ώστε αυτή να το διεγείρει σε επεξεργασία. Είναι, δηλαδή, η ελάχιστη ποσότητα, με την οποία μία παράμετρος μπορεί να μετρηθεί.
- **Περιοχή μέτρησης** (range): Είναι η περιοχή μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής, που μπορεί να λάβει ένα μέγεθος.
- **Δυναμική περιοχή**: Είναι ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη τιμή του σήματος εισόδου, που μπορεί να διεγείρει το σύστημα και να υποστεί επεξεργασία με την καθορισμένη ακρίβεια.

- Οι τύποι μετρήσεων βασίζονται στη διαφορά, διάταξη και κατάταξη των μεγεθών. Ως ενιαίο σύστημα μονάδων χρησιμοποιείται, κυρίως, το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (S.I.), ενώ τα διάφορα μεγέθη διακρίνονται σε θεμελιώδη και παράγωγα.
- Ένα τυπικό σύστημα μετρήσεων αποτελείται από το αισθητήριο (μετατροπέας), τη βαθμίδα μετατροπής, τη βαθμίδα επεξεργασίας και τη βαθμίδα παρουσίασης μέτρησης, χωρίς να υπάρχει απόλυτος διαχωρισμός μεταξύ τους.
- Τα συστήματα μετρήσεων διακρίνονται σε συγκεντρωτικά και αποκεντρωμένα συστήματα.
- Το σφάλμα, η ακρίβεια, η διακριτική ικανότητα, η περιοχή μέτρησης και η δυναμική περιοχή αποτελούν μερικά από τα χαρακτηριστικά των συστημάτων μετρήσεων.

Αξιολόγηση • Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

1. Η στοίχιση των μαθητών είναι μέτρηση που βασίζεται:
 - α) στη διαφορά των μεγεθών
 - β) στη διάταξη των μεγεθών
 - γ) στην κατάταξη των μεγεθών
 - δ) στη διαφορά και κατάταξη των μεγεθών
2. Ένα αποκεντρωμένο σύστημα μέτρησης περιλαμβάνει:
 - α) ένα ADC και ένα DAC για όλα τα κανάλια
 - β) πολλούς ADC και DAC (ένα για κάθε κανάλι)
 - γ) ADC και DAC, που οδηγούνται σε ομοαξονικό καλώδιο
 - δ) ένα ADC στην είσοδο και πολλούς DAC στην έξοδο
3. Ανάλυση ή διακριτική ικανότητα συστήματος ονομάζεται:
 - α) η περιοχή μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής, που μπορεί να λάβει ένα μέγεθος
 - β) η μικρότερη μεταβολή εισόδου, που μπορεί να γίνει αντιληπτή από το σύστημα
 - γ) ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη τιμή του σήματος εισόδου
 - δ) η μέγιστη διακύμανση ενός μεγέθους

• Ερωτήσεις του τύπου Σωστό/Λάθος

1. Η ίντσα είναι μονάδα μέτρησης, που ανήκει στο S.I.
2. Η μετρούμενη τιμή, που παίρνει ο παρατηρητής από ένα σύστημα μέτρησης, είναι ίδια με την πραγματική τιμή της μεταβλητής.
3. Ένα τυπικό σύστημα μέτρησης αποτελείται από τέσσερις βαθμίδες, χωρίς αυτός ο διαχωρισμός να είναι απόλυτος.
4. Το μικρόφωνο είναι ηλεκτροακουστικός μετατροπέας, που μετατρέπει ηλεκτρικό σήμα σε ηχητικό.
5. Το τηλεμετρικό σύστημα χρησιμοποιείται, όταν η βαθμίδα επεξεργασίας βρίσκεται κοντά στη βαθμίδα μέτρησης.

• Ερωτήσεις συμπλήρωσης κενού

1. Το μικρόφωνο είναι _____, που μετατρέπει _____ σήμα σε _____, ενώ το μεγάφωνο είναι _____ που μετατρέπει _____ σήμα σε _____.
2. Όταν η βαθμίδα _____ βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τη βαθμίδα _____, όπως π.χ. γίνεται στις _____ μετρήσεις, τότε γίνεται χρήση των _____.

• Ερωτήσεις αντιστοίχισης

1. Να αντιστοιχίσετε τα στοιχεία της πρώτης στήλης με αυτά της δεύτερης στήλης:

χρόνος	Pa (Πασκάλ)
ταχύτητα	παράγωγο μέγεθος
πίεση	W (Βατ)
ηλεκτρικό φορτίο	θεμελιώδες μέγεθος
ισχύς	C (Κουλόμπ)

• Ερωτήσεις ανοικτού τύπου

1. Περιγράψτε τους κλασικούς τύπους μετρήσεων. Τι είναι το S.I.;
2. Περιγράψτε και αναλύστε τις βαθμίδες, από τις οποίες αποτελείται ένα τυπικό σύστημα μέτρησης.
3. Τι είναι και πότε χρησιμοποιείται ένα τηλεμετρικό σύστημα;
4. Περιγράψτε και αναλύστε τους τύπους συστημάτων μετρήσεων.
5. Ποια είναι τα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων μετρήσεων;

20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Αισθητήρια

- Εισαγωγή
- Ταξινόμηση Αισθητηρίων
- Χαρακτηριστικά Αισθητηρίων
- Αισθητήρια Θερμοκρασίας
- Αισθητήρια Πίεσης, Ροής και Στάθμης
- Αισθητήρια Κίνησης, Δόνησης και Δύναμης
- Αισθητήρια Φωτός
- Διατάξεις Πυρηνικής και Χημείας

Σκοπός

Όταν ολοκληρώσεις το κεφάλαιο αυτό, θα μπορείς:

- Να εξηγείς την έννοια του μετατροπέα και την ολοκλήρωσή του σε αισθητήριο.
- Να αναφέρεις διάφορους τρόπους ταξινόμησης των αισθητηρίων.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις τα διάφορα χαρακτηριστικά των αισθητηρίων.
- Να κατονομάζεις διάφορα αισθητήρια θερμοκρασίας, πίεσης, ροής, στάθμης, κίνησης, δόνησης, δύναμης, φωτός, πυρηνικής και χημείας και να περιγράφεις την αρχή λειτουργίας τους καθώς και να αναφέρεις τις χρήσεις τους.
- Να αναλύεις και να περιγράφεις διάφορες διατάξεις με αισθητήρια.

Κατά το σχεδιασμό μιας εφαρμογής μετρήσεων επιλέγονται τα διάφορα εξαρτήματα και ηλεκτρονικά κυκλώματα, με βάση τα οποία θα υλοποιηθεί το σύστημα μέτρησης. Ο σημαντικότερος, όμως, παράγοντας, στον οποίο στηρίζεται η όλη εφαρμογή, είναι το αισθητήριο. Αυτό γίνεται, επειδή στην αγορά διατίθενται συγκεκριμένοι τύποι αισθητηρίων, σχήμα 2.1.1, με συγκεκριμένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενώ όλα τα άλλα δομικά στοιχεία ενός συστήματος βρίσκονται σε μεγάλη ποικιλία και αφθονία. Προσαρμόζεται, λοιπόν, όλο το σύστημα, πάνω στα χαρακτηριστικά του αισθητηρίου. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι βασικότερες κατηγορίες αισθητηρίων.

2.1

Εισαγωγή



Σχήμα 2.1.1. Διάφορα αισθητήρια της Watlow Gordon

2.2 Ταξινόμηση Αισθητηρίων

Τα αισθητήρια θα μπορούσαν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη λειτουργία, που επιτελούν (π.χ. μέτρηση πίεσης ή θερμοκρασίας), τη φυσική αρχή, στην οποία στηρίζεται η λειτουργία τους (π.χ. πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο), ή τη μορφή ενέργειας, που μεταφέρει το σήμα (π.χ. μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, θερμικής ενέργειας, κ.ά.). Ο πίνακας 2.2.1 δείχνει τις διάφορες μορφές ενέργειας, που χρησιμοποιούνται, συνήθως, για τη ταξινόμηση των αισθητηρίων καθώς και μερικά τυπικά μεγέθη, που μετράμε με τη βοήθειά τους.

Τύπος σήματος	Μέγεθος προς μέτρηση
Θερμικό	θερμοκρασία, θερμότητα, ροή θερμότητας, εντροπία κ.ά.
Ακτινοβολία	ακτίνες γ, ακτίνες Χ, υπεριώδη, ορατή, υπέρυθρη, μικροκύματα, ραδιοκύματα κ.α.
Μηχανικό	μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση, δύναμη, στρέψη, πίεση, μάζα, ροή κ.α.
Μαγνητικό	μαγνητικό πεδίο, μαγνητική ροπή, μαγνήτιση, μαγνητική διαπερατότητα κ.α.
Χημικό	υγρασία, ΡΗ, συγκέντρωση αερίων, ατμοί, τοξικά και εύφλεκτα υλικά κ.α.
Βιολογικό	πρωτεΐνες, ορμόνες κ.α.
Ηλεκτρικό	φορτίο, ρεύμα, τάση, αντίσταση, αγωγιμότητα, χωρητικότητα, επαγωγή, πόλωση, συχνότητα κ.α.

Πίνακας 2.2.1. Ταξινόμηση αισθητηρίων ανάλογα με τον τύπο σήματος

Το βιολογικό σύστημα μέτρησης του ανθρώπου έχει πέντε βασικές αισθήσεις: όραση, ακοή, αφή, οσμή και γεύση. Αυτές μπορούν να περιγραφούν ανάλογα με τον τύπο του σήματος, με το οποίο μεταφέρεται η ενέργεια, το μέγεθος, που μετρούν, ή το όργανο αισθήσεως. Αυτές οι ταξινομήσεις δείχνονται όλες μαζί στον πίνακα 2.2.2, καθώς και κάποιες ηλεκτρονικές συσκευές, που είναι ισοδύναμες με τα βιολογικά όργανα.

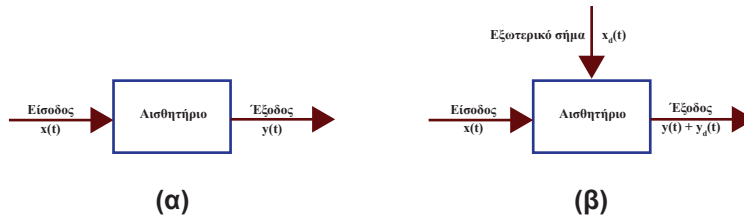
Ανθρώπινη αίσθηση	Σήμα	Μετρούμενο μέγεθος	Βιολογικό αισθητήριο	Ισοδύναμο αισθητήριο
όραση	Ακτινοβολία	ένταση και μήκος κύματος φωτός	αμφιβληστροειδής χιτώνας	φωτογραφικό φιλμ
ακοή	Μηχανικό	ένταση και συχνότητα ήχου	κοχλίας αυτιού	μικρόφωνο
αφή	Μηχανικό	πίεση, δύναμη	νεύρα	ποτενσιόμετρα
οσμή	Χημικό	ευωδιά	οσφραντικά κύτταρα μύτης	ηλεκτρονική μύτη
γεύση	Βιολογικό	πρωτεΐνες	γλώσσα	

Πίνακας 2.2.2. Ταξινόμηση ανθρώπινων αισθήσεων

2.3

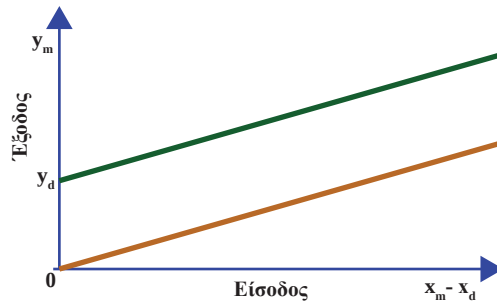
Χαρακτηριστικά
Αισθητηρίων

Ένα αισθητήριο, στην πιο απλή του μορφή, μπορεί να θεωρηθεί ως σύστημα με είσοδο $x(t)$ και έξοδο $y(t)$. Το σχήμα 2.3.1 δείχνει την αναπαράσταση συστήματος α) **αυτοδιεγερόμενου** (self-exciting) αισθητηρίου και β) **διαμορφούμενου** (modulating) αισθητηρίου. Στο αυτοδιεγερόμενο αισθητήριο, η έξοδος είναι συνάρτηση αποκλειστικά της εισόδου (π.χ. θερμοζεύγος ή πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος). Στο διαμορφούμενο αισθητήριο υπάρχει και εξωτερικό σήμα $x_d(t)$ (π.χ. σταθερό ρεύμα οδήγησης ή τάση αναφοράς).



Σχήμα 2.3.1. (α) Αυτοδιεγερόμενο αισθητήριο και (β) διαμορφούμενο αισθητήριο

Σε ιδανικό αισθητήριο το σήμα εξόδου πρέπει να είναι εντελώς ανάλογο με το σήμα εισόδου. Η χαρακτηριστική εξόδου-εισόδου ενός ιδανικού αισθητηρίου (αυτοδιεγερόμενου ή διαμορφούμενου) δείχνεται στο σχήμα 2.3.2.



Σχήμα 2.3.2. Ιδανική χαρακτηριστική εξόδου-εισόδου αυτοδιεγερόμενου (πορτοκαλί) και διαμορφούμενου (πράσινο) αισθητηρίου

Για ιδανικό αισθητήριο ισχύει: $y(t) = S \cdot x(t)$ (2.3.1)

όπου S η κλίση της χαρακτηριστικής εξόδου-εισόδου. Έχει σταθερή τιμή για γραμμικό αισθητήριο και συχνά αναφέρεται ως ευαισθησία. Στην πράξη, βέβαια, κανένα αισθητήριο δεν μπορεί να ανταποκριθεί ακαριαία σε κάποια αλλαγή του σήματος εισόδου, αλλά χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα. Παρακάτω ορίζουμε μερικές πολύ σημαντικές παραμέτρους ενός ιδανικού αισθητηρίου.

- **Απόκριση** (response) Δy αισθητηρίου είναι η μεταβολή του σήματος εξόδου.
- **Ευαισθησία** (sensitivity) S αισθητηρίου είναι ο λόγος της μεταβολής της απόλυτης τιμής εξόδου προς τη μεταβολή της απόλυτης τιμής εισόδου:

$$S = \frac{dy}{dx} \quad (2.3.2)$$

- **Χρόνος ανόδου και καθόδου** (rise and fall time) τ ή **χρόνος απόκρισης** αισθητηρίου είναι ο χρόνος, που χρειάζεται το σήμα στην έξοδο του αισθητηρίου, για να φτάσει το 90% της τελικής του τιμής. Είναι επιθυμητό να είναι λιγότερο από μερικά δευτερόλεπτα, για να έχει πρακτική αξία.
- **Περιοχή μετρήσεων** (range) αισθητηρίου είναι η περιοχή όλων των δυνατών μετρήσεων, που μπορεί να κάνει (από το μηδέν ως το άπειρο). Στην πράξη, βέβαια, η περιοχή λειτουργίας (working range) ενός αισθητηρίου είναι περιορισμένη.

Ο πίνακας 2.3.1 δείχνει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά αισθητηρίου και δίνει τις ιδανικές τιμές τους.

Χαρακτηριστικά	Ιδανική τιμή
Απόκριση Δy	απολύτως γραμμική και χωρίς θόρυβο
Χρόνος απόκρισης τ	μηδέν
Εύρος συχνοτήτων	άπειρο
Περιοχή εργασίας	άπειρη
Ευαισθησία S	υψηλή και σταθερή σε όλη την περιοχή εργασίας
Ανάλυση (resolution)	άπειρη

Π. 2.3.1. Επιθυμητά χαρακτηριστικά αισθητηρίου

Όταν θεωρούμε ιδανικά πραγματικά αισθητήρια και όχι ιδανικά βρίσκουμε ότι υπάρχουν ορισμένα κοινά αλλά ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά, που πρέπει να λάβουμε υπόψη. Αυτά δείχνονται στον πίνακα 2.3.2.

Χαρακτηριστικά	Εξήγηση
Μη γραμμικότητα	απόκριση μη ανάλογη του σήματος εισόδου
Αργή απόκριση	μεγάλη τιμή του χρόνου απόκρισης
Μικρή περιοχή εργασίας	περιορισμένη περιοχή λειτουργίας
Χαμηλή ευαισθησία	ανταπόκριση μόνο σε μεγάλα σήματα εισόδου
Μετατόπιση ευαισθησίας	η έξοδος διαφέρει με το χρόνο, π.χ. λόγω αλλαγής θερμοκρασίας
Γήρανση	η έξοδος αλλάζει με το χρόνο
Παρεμβολή	επίδραση από εξωτερικές συνθήκες, π.χ. ακτινοβολία
Θόρυβος	η έξοδος περιέχει ανεπιθύμητο τυχαίο σήμα

Πίνακας 2.3.2. Ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά αισθητηρίου

Η μέτρηση της θερμοκρασίας στηρίζεται, κυρίως, στην αποκατάσταση θερμικής ισορροπίας ανάμεσα στο θερμομετρούμενο σώμα και το αισθητήριο. Ως αισθητήρια θερμοκρασίας σε συστήματα συλλογής δεδομένων χρησιμοποιούνται, κυρίως, τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη, τα θερμίστορ, οι θερμικές αντιστάσεις (RTD), τα διμεταλλικά ελάσματα καθώς και τα οπτικά πυρόμετρα. Μερικά από αυτά δείχνονται στο σχήμα 2.4.1.

2.4

Αισθητήρια Θερμοκρα- σίας



(α)



(β)

Σχήμα 2.4.1. (α) Διάφορα αισθητήρια θερμοκρασίας και (β) αισθητήρια θερμοκρασίας της Watlow Gordon

Τα αισθητήρια θερμοκρασίας βρίσκουν εφαρμογή στην προστασία των κινητήρων από υπερφόρτωση, στην προστασία ημιαγωγών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, στην αντιστάθμιση θερμοκρασίας, στη ρύθμιση θερμοκρασίας, στον έλεγχο θερμοκρασίας αέρα και λαδιού στα αυτοκίνητα, κ.α. Παρακάτω θα γνωρίσουμε ορισμένα τυπικά αισθητήρια θερμοκρασίας.

α) Τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη (thermocouples)

Τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη ή θερμοζεύγη αποτελούνται από δύο σύρματα διαφορετικών μετάλλων (πχ. χαλκός και κωνσταντάνη), που ενώνονται σε ένα σημείο. Αν η επαφή αυτή βρίσκεται στο χώρο της μετρούμενης θερμοκρασίας και τα άλλα δύο ελεύθερα άκρα σε γνωστή θερμοκρασία, τότε η διαφορά θερμοκρασίας δημιουργεί θερμοηλεκτρική τάση, που είναι περίπου ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας, και ονομάζεται **δυναμικό επαφής**. Έτσι, η θερμοηλεκτρική τάση στα άκρα του στοιχείου θα δίνεται από την εξίσωση:

$$E_{T_1, T_2} = E_{T_1} - E_{T_2} = \alpha_1 (T_1 - T_2) + \alpha_2 (T_1^2 - T_2^2) + \alpha_3 (T_1^3 - T_2^3) + \dots \quad (2.4.1)$$

όπου $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ είναι σταθερές, T_1 η μετρούμενη θερμοκρασία και T_2 η γνωστή θερμοκρασία.

Το σχήμα 2.4.2 δείχνει το κύκλωμα θερμοζεύγους, καθώς και το πώς είναι κατασκευασμένο θερμοζεύγος με μεταλλική μόνωση. Η μόνωση γίνεται με υλικό, που είναι καλός αγωγός της θερμότητας και κακός αγωγός του ηλεκτρισμού.



Σχήμα 2.4.2. (α) Κύκλωμα θερμοζεύγους και (β) θερμοζεύγος με μεταλλική μόνωση

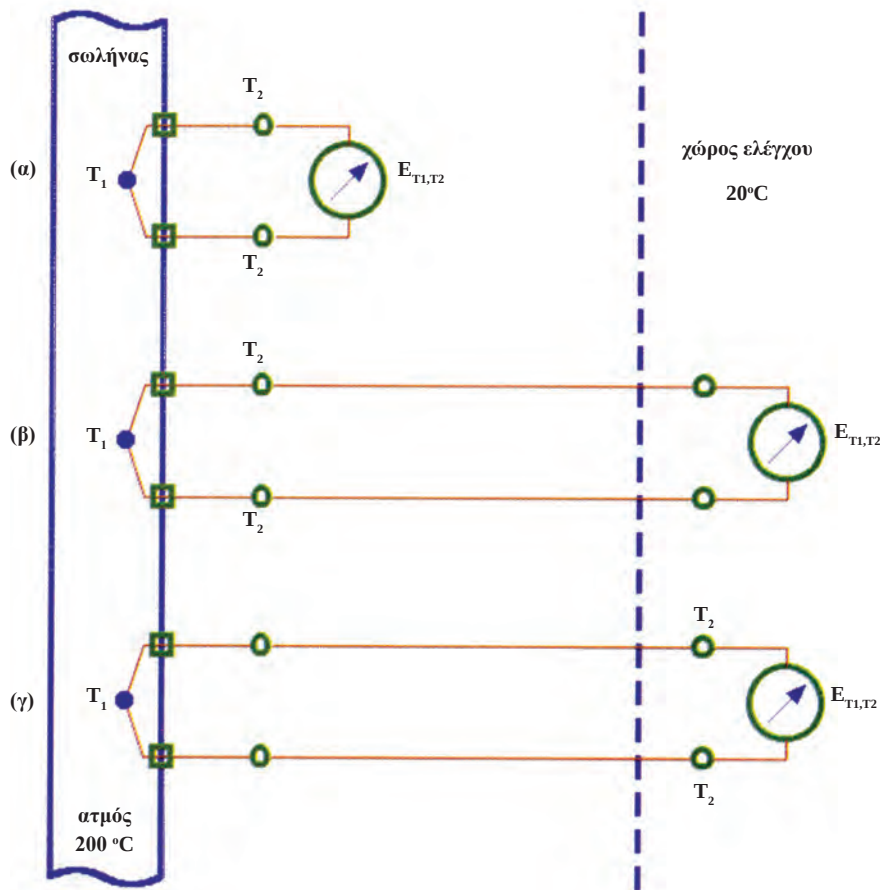
Τα θερμοζεύγη βρίσκουν εφαρμογή σε φαινόμενα τήξης, στην επεξεργασία ημιαγωγών, στη διαχείριση θερμότητας, στα ιατρικά όργανα, στους φούρνους, στη μέτρηση καυσαερίων, κ.α. Στο σχήμα 2.4.3 βλέπουμε ορισμένα θερμοζεύγη του εμπορίου.



Σχήμα 2.4.3. Θερμοζεύγη της Watlow Gordon

Η σωστή εγκατάσταση των θερμοζευγών αποτελεί πολύ σημαντικό πρόβλημα και μπορούμε να το διαπιστώσουμε με τη βοήθεια του σχήματος 2.4.4. Επιθυμούμε να μετρήσουμε τη θερμοκρασία ατμού υπό υψηλή πίεση μέσα σε σωλήνα. Η εγκατάσταση (α), με το θερμοζεύγος και το μετρητή δίπλα στο σωλήνα, είναι εντελώς άχρηστη γιατί η θερμοκρασία T_2 μπορεί να μεταβάλλεται από τιμές κάτω από το μηδέν (σε κρύο καιρό) μέχρι $+50^{\circ}\text{C}$, αν υπάρχει διαρροή ατμού. Η εγκατάσταση (β), με το μετρητή στο χώρο ελέγχου, εξακολουθεί

να μην είναι η σωστή, αφού το θερμοζεύγος είναι πάλι δίπλα στο σωλήνα. Η εγκατάσταση (γ), με το θερμοζεύγος και το μετρητή μέσα στο χώρο ελέγχου, είναι πιο σωστή, γιατί η θερμοκρασία T_2 μπορεί να μεταβάλλεται το πολύ 10°C .



Σχ. 2.4.4. Εγκαταστάσεις θερμοζευγών

Ο πίνακας 2.4.1 παρουσιάζει το χρωματικό κώδικα των θερμοζευγών, σύμφωνα με τον κώδικα ANSI (American National Standard Institute) και τις προδιαγραφές British BS1843 και International IEC 584-3 (από την Precision Engineering Ltd).

ANSI CODE	Θετικός Ακροδέκτης	Αρνητικός Ακροδέκτης	British BS1843	International IEC 584-3
E	Νικέλιο-χρώμιο	Κωνσταντάνη		
J	Σίδηρος	Κωνσταντάνη		
K	Νικέλιο-χρώμιο	Νικέλιο-αλουμίνιο		
N	Nicrosil	Nisil		
T	Χαλκός	Χαλκός-νικέλιο		

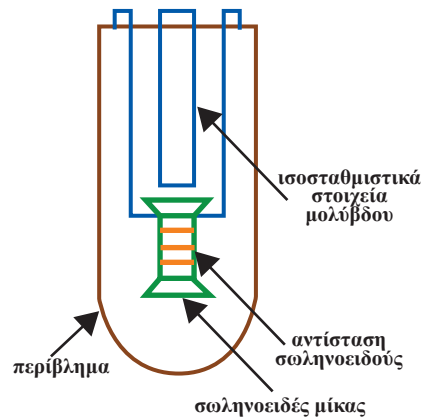
Πίνακας 2.4.1. Χρωματικός κώδικας θερμοζευγών

β) Οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις (RTDs: resistance-thermometer-devices)

Η θερμοηλεκτρική αντίσταση ή RTD είναι ηλεκτρικό θερμόμετρο, το οποίο χρησιμοποιεί τη μεταβολή της αντίστασης αγωγού συναρτήσει της θερμοκρασίας για να μετρήσει τη θερμοκρασία του εκάστοτε περιβάλλοντος. Οι RTDs παρέχουν μεγαλύτερη ανάλυση από τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη, που ορίζεται κατά προσέγγιση στον 1°C . Αποτελούνται από μικρό σωληνοειδές με σύρμα (συνήθως από πλάτινα και άλλα μέταλλα που χρησιμοποιούνται σε χαμηλές θερμοκρασίες), το οποίο περιβάλλεται από πορσελάνη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.5.

Η αλλαγή της τιμής της αντίστασης με την αλλαγή της θερμοκρασίας πιστοποιείται τοποθετώντας το σωληνοειδές σε κλάδο γέφυρας Wheatstone. Οι RTDs έχουν κλίμακα μέτρησης από -200°C έως 1200°C . Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι RTDs χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση σε συνδυασμό με γέφυρα, πράγμα που σημαίνει, ότι απαιτούν διέγερση, για να λειτουργήσουν.

Οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις μεταβάλλονται συναρτήσει της απόλυτης θερμοκρασίας, σε αντίθεση με τα θερμοζεύγη, που μπορούν να μετρήσουν μόνο σχετικές θερμοκρασίες (διαφορές θερμοκρασίας). Οι RTDs χρησιμοποιούνται στα ιατρικά όργανα, στην παραγωγή υφασμάτων, στην επεξεργασία πλαστικών, στην επεξεργασία πετροχημικών, στην κατασκευή ημιαγωγών, κ.α. Στο σχήμα 2.4.6 δείχνονται διάφορες θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις.



Σχήμα 2.4.5. Θερμοηλεκτρική αντίσταση με σωληνοειδές από μίκας



(α)

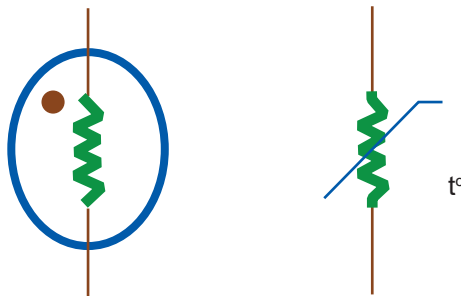


(β)

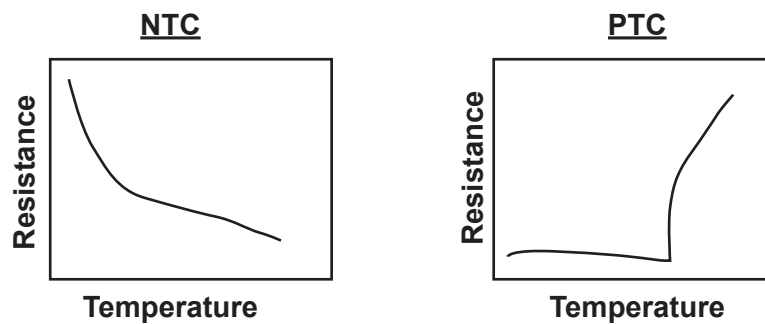
Σχήμα 2.4.6. RTDs της (α) Wako Electronics Inc. και (β) Watlow Gordon

γ) Τα θερμίστορ (thermistor)

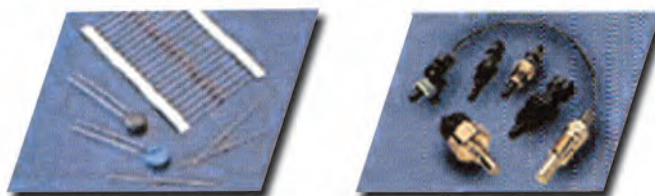
Παραλλαγή της θερμοηλεκτρικής αντίστασης είναι τα θερμίστορ. Οι παθητικές αυτές αντιστάσεις, ανάλογα με το είδος της μεταβολής της αντίστασης σε σχέση με τη θερμοκρασία, δηλαδή αύξηση ή μείωση, ορίζονται ως PTC (positive temperature coefficients) ή NTC (negative temperature coefficients) αντίστοιχα. Σε σχέση με τις αντιστάσεις μεταλλικού φιλμ, που έχουν πιο εκτεταμένη και γραμμική κλίμακα μέτρησης, τα θερμίστορ είναι δέκα φορές πιο ευαίσθητα. Στο σχήμα 2.4.7 βλέπουμε δύο σύμβολα, που χρησιμοποιούμε, για να παραστήσουμε τα θερμίστορ, ενώ στο σχήμα 2.4.8 δείχνεται η εξάρτηση της αντίστασης από τη θερμοκρασία τόσο για NTC όσο και για PTC. Στα σχήματα 2.4.9 και 2.4.10 βλέπουμε διάφορους τύπους NTC και PTC θερμίστορ.



Σχήμα 2.4.7. Σύμβολα των θερμίστορ



Σχήμα 2.4.8. Εξάρτηση της αντίστασης από τη θερμοκρασία για NTC και PTC



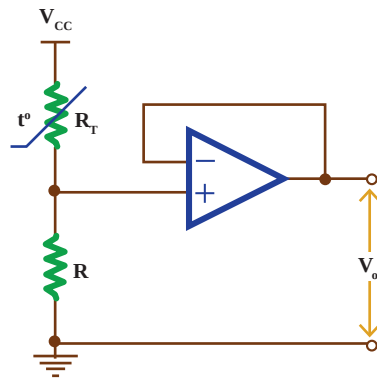
Σχήμα 2.4.9. NTC θερμίστορ της Therm-O-Disc



Σχήμα 2.4.10. PTC θερμίστορ της Therm-O-Disc

Η έντονη μεταβολή της αντίστασης με την αλλαγή της θερμοκρασίας επιτρέπει τη συνεργασία των θερμίστορ με διατάξεις τελεστικών ενισχυτών. Μια βασική συνδεσμολογία θερμίστορ με τελεστικό ενισχυτή δείχνεται στο σχήμα 2.4.11. Σε αυτό το κύκλωμα, η μεταβολή της αντίστασης με τη θερμοκρασία επηρεάζει την έξοδο σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_o = \frac{R}{R + R_T} \cdot V_{cc} \quad (2.4.2)$$



Σχήμα 2.4.11. Βασικό κύκλωμα για θερμίστορ

δ) Τα διμεταλλικά ελάσματα

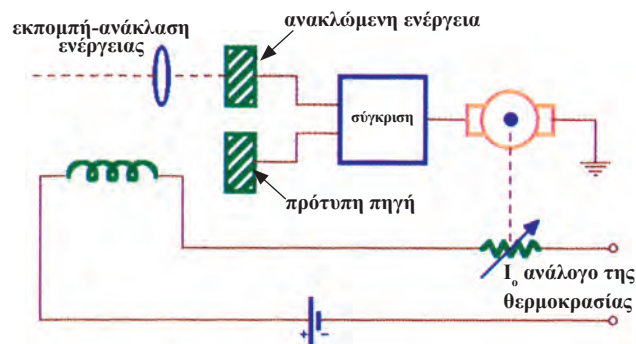
Τα διμεταλλικά ελάσματα, όταν θερμαίνονται, παραμορφώνονται, καθώς τα μέταλλα, που τα απαρτίζουν, έχουν διαφορετικούς συντελεστές γραμμικής διαστολής. Η παραμόρφωση είναι δυνατόν να παρασύρει μια βελόνη πάνω σε βαθμονομημένη κλίμακα, ώστε να προκύψουν άμεσες ενδείξεις μέτρησης, να ανοιγοκλείσει επαφές (ενεργοποίηση σειρήνας) ή να διεγείρει αισθητήριο θέσης. Μερικά διμεταλλικά ελάσματα δείχνονται στο σχήμα 2.4.12.



Σχήμα 2.4.12. Διμεταλλικά ελάσματα της Therm-O-Disc

ε) Τα **οπτικά πυρόμετρα** (optical pyrometer)

Τα οπτικά πυρόμετρα χρησιμοποιούνται για μετρήσεις θερμοκρασίας, όταν η φυσική επαφή του αισθητήριου με την όλη διαδικασία είναι αδύνατη, αλλά είναι εφικτή η οπτική επαφή. Το πυρόμετρο εκπέμπει ενέργεια προς την πηγή, που θέλουμε να ελέγξουμε, ένα μέρος της οποίας ανακλάται από την πηγή αυτή και επιστρέφει στο πυρόμετρο. Η ανάκλαση αυτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία της πηγής. Η σύγκριση της ενέργειας, που επιστρέφει στο πυρόμετρο, με την ενέργεια μιας πρότυπης βαθμονομημένης πηγής, δίνει ως αποτέλεσμα ρεύμα, που ανταποκρίνεται στη μεταβολή της θερμοκρασίας. Τα αυτόματα πυρόμετρα χρησιμοποιούν σερβομηχανισμό με κλειστό βρόχο ελέγχου, για να πετύχουν τη σύγκριση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.13. Τα πυρόμετρα μπορούν να λειτουργούν μέχρι τους 5000°C.



Σχήμα 2.4.13. Αυτόματο πυρόμετρο με σερβομηχανισμό για τον έλεγχο της παραγωγής

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί πίεσης, ανάλογα με τη φύση του σώματος, που εξετάζουμε (στερεό, υγρό, αέριο) καθώς και διάφοροι τρόποι μέτρησης αυτής. Ως πίεση ρευστού ορίζεται η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας, που ασκείται από υγρό ή αέριο στα τοιχώματα του δοχείου, που το περιέχει:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.5.1)$$

Η πίεση εκφράζει το εσωτερικό ενεργειακό περιεχόμενο των υδραυλικών υγρών. Η υδροστατική πίεση αναφέρεται στην εσωτερική πίεση, που ασκείται σε κάθε σημείο ενός υγρού και είναι ανάλογη με το ύψος h του υγρού μέσα στο δοχείο, που βρίσκεται, ανεξάρτητα από το σχήμα του, και ανάλογη με την πυκνότητα ρ του υγρού:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.5.2)$$

όπου $g=9.81 \text{ N/kg}$.

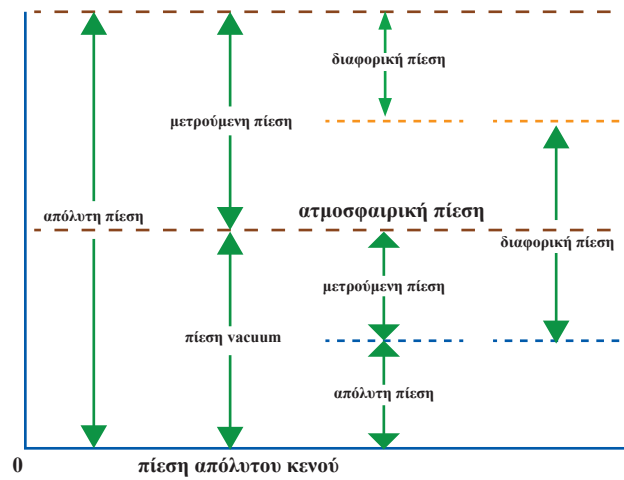
Μερικές από τις μονάδες μέτρησης της πίεσης είναι τα Pascal ($1\text{Pa}= 1\text{N/m}^2$), η φυσική ατμόσφαιρα Atm ($1\text{Atm}=76\text{cmHg}=760\text{Torr}=1.033\text{kp/cm}^2$), η τεχνητή ατμόσφαιρα at ($1\text{at}= 1\text{kp/cm}^2$), τα psi (pounds per square inch= $\text{lb/in}^2=6895\text{Pa}$), κ.ά. Η άμεση μέτρηση της πίεσης γίνεται με τα γνωστά μανόμετρα και η έμμεση με σωλήνες, διαφράγματα κ.α.

Κάθε πίεση που είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική, θεωρείται ως πίεση **κενού (vacuum)** και αν είναι μηδενική, ονομάζεται πίεση απόλυτου κενού (perfect vacuum). Τα αισθητήρια πίεσης μετρούν πάντοτε πίεση σε σχέση με πίεση αναφοράς. Αν η πίεση αναφοράς είναι η πίεση του απόλυτου κενού, τότε μετράμε **απόλυτη** πίεση (absolute pressure). Άρα, απόλυτη πίεση ονομάζεται η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης πίεσης και της πίεσης του απόλυτου κενού. Οι μονάδες της απόλυτης πίεσης είναι psia (pounds per square inch absolute). Αν η πίεση αναφοράς είναι η ατμοσφαιρική, τότε παίρνουμε τη **μετρούμενη** πίεση (gage pressure). Άρα, μετρούμενη πίεση ονομάζεται η διαφορά ανάμεσα στην πίεση, που πραγματικά μετράμε και την ατμοσφαιρική. Οι μονάδες της μετρούμενης πίεσης είναι psig (pounds per square inch gage). Αν η πίεση αναφοράς είναι τυχαία πίεση, τότε μετράμε **διαφορική** πίεση. Άρα, διαφορική πίεση ονομάζεται η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης πίεσης και της δοσμένης πίεσης αναφοράς. Στο σχήμα 2.5.1 φαίνονται οι παραπάνω περιπτώσεις μέτρησης πίεσης.

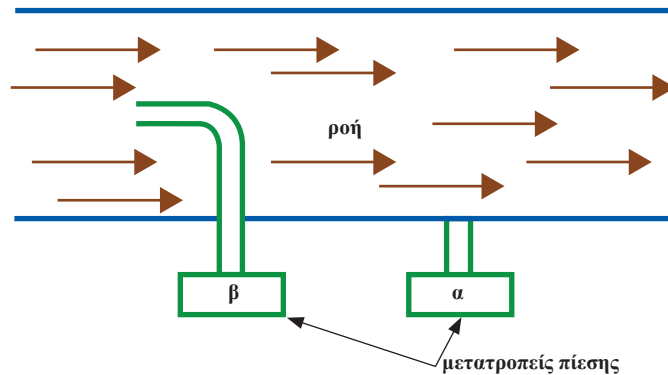
Σε κινούμενο ρευστό μπορούν να μετρηθούν δύο μορφές πίεσης. Έτσι, ορίζουμε τη **στατική** (static) και τη **δυναμική** (total ή impact) πίεση. Η δυναμική πίεση είναι η πίεση του ρευστού, αν το θεωρήσουμε ισοτροπικό και μετράται δειγματοληπτώντας τη ροή του ρευστού με τη χρήση ενός σωλήνα Pitot, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.2 (ο μετατροπέας πίεσης β). Εμπειρικά, η στατική πίεση είναι η πίεση, που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής, όταν κινείται κατά μήκος της ροής του ρευστού (μετατροπέας πίεσης α).

2.5

Αισθητήρια Πίεσης, Ροής και Στάθμης

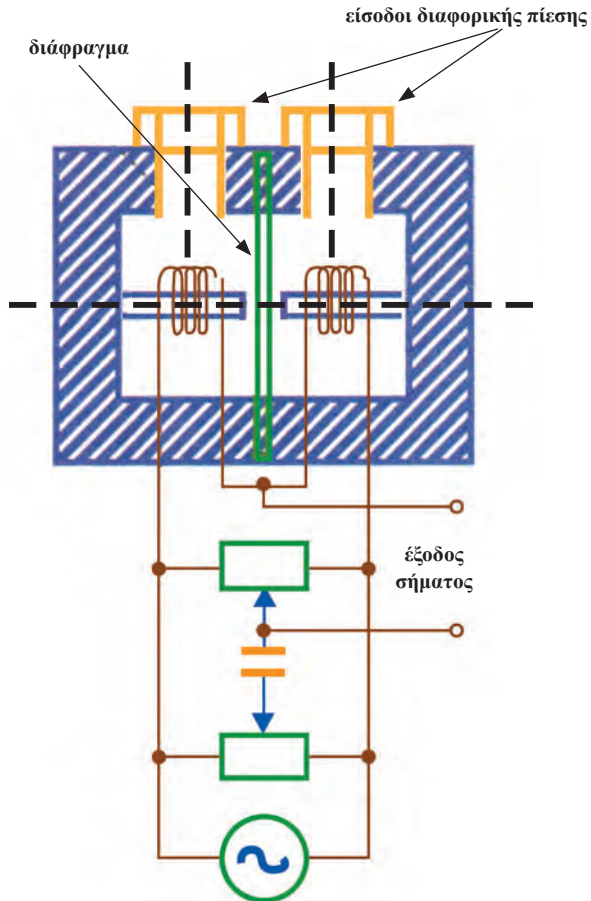


Σχήμα 2.5.1. Σχέσεις μεταξύ των διαφόρων ειδών πίεσης



Σχήμα 2.5.2. Μέτρηση στατικής (α) και δυναμικής πίεσης (β)

Ένας τυπικός αισθητήρας **πίεσης επαγωγικού χαρακτήρα** ανιχνεύει πίεση και παρέχει αναλογικό σήμα, ανάλογο με την ασκούμενη δύναμη-πίεση. Ένα τέτοιο όργανο υλοποιείται με διάφραγμα ή πιεζοηλεκτρική αντίσταση (piezoresistor) συνδεδεμένο σε ηλεκτρικό κύκλωμα, όπως δείχνει το σχήμα 2.5.3.

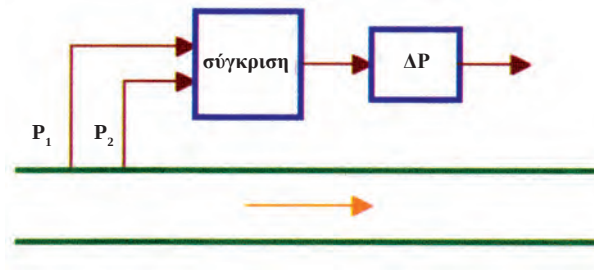


Σχήμα 2.5.3. Κύκλωμα μετρητή πίεσης με διάφραγμα επαγωγικού χαρακτήρα

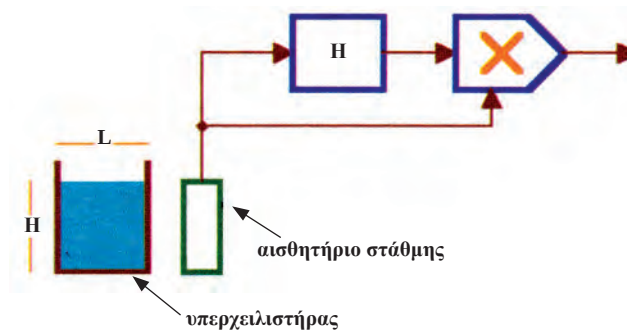
Η μέτρηση της ροής των ρευστών επιτυγχάνεται είτε με τη βοήθεια διαφορικής πίεσης (διαφορά της στατικής πίεσης από τη δυναμική), είτε με τη βοήθεια μηχανολογικών αισθητήριων. Τρία είναι τα βασικά μεγέθη, με τα οποία μετράμε τη ροή:

- Ο **ρυθμός ροής** (flow velocity), που ορίζεται σαν τη χρονική μεταβολή της κίνησης του ρευστού και μετριέται σε m/sec και m/min.
- Η **ογκομετρική ροή** (volume flow rate), που ορίζεται ως ο όγκος του ρευστού ανά μονάδα χρόνου και μετριέται m^3/sec ή lt/sec (λίτρα ανά δευτερόλεπτο).
- Η **ροή μάζας** (mass flow), που ορίζεται σαν τη μάζα ή το βάρος της ύλης, που μεταφέρεται στη μονάδα χρόνου και μετριέται σε kg/sec και kg/min .

Τα σχήματα 2.5.4 και 2.5.5 δείχνουν, πως υπολογίζεται ο ρυθμός ροής και η ογκομετρική ροή ενός ρευστού. Για τον υπολογισμό του ρυθμού ροής μετράμε τη διαφορική πίεση στο σωλήνα, ενώ για την ογκομετρική ροή μας ενδιαφέρει ο όγκος, που μεταβάλλεται.



Σχήμα 2.5.4. Μέτρηση ροής ρευστού

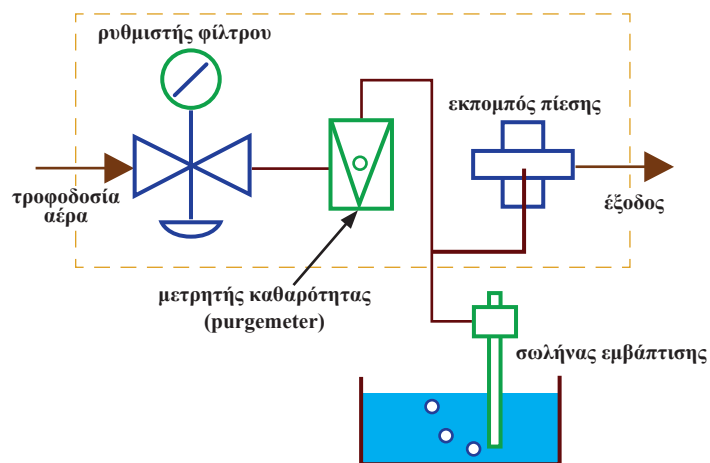


Σχήμα 2.5.5. Μέτρηση ογκομετρικής ροής

Η μέτρηση του ύψους της στάθμης υγρού μέσα σε δοχεία και δεξαμενές επιτελείται με διάφορες τεχνικές, όπως χρησιμοποιώντας επιπλέουσες συσκευές (φλοτέρ), διαφορική πίεση, συσκευές υπερήχων και εξαρτήματα δημιουργίας φυσαλίδων (bubblers). Η μέτρηση στάθμης γίνεται ή άμεσα με παρακολούθηση της στάθμης επιφάνειας ενός υγρού ή έμμεσα με μέτρηση κάποιας μεταβλητής (π.χ. πίεση), που εξαρτάται από τη στάθμη ή τον όγκο του υγρού.

Τα **φλοτέρ** (float devices) προσφέρουν απλότητα και πολλαπλούς τρόπους μετατροπής της κίνησης της φούσκας σε μέτρηση στάθμης. Ένας μετατροπέας διαφορικής πίεσης, επίσης, μπορεί να μετρήσει τη στάθμη υγρού, όταν είναι γνωστό το ειδικό βάρος του υγρού και το αντίστοιχο αισθητήριο βρίσκεται στον πυθμένα του δοχείου.

Τα **συστήματα υπερήχων** χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε ογκώδεις δεξαμενές, αφού δεν απαιτούν άμεση επαφή με το υγρό. Οι συσκευές δημιουργίας **φυσαλίδων** μετρούν, ουσιαστικά, την υδροστατική πίεση στο σημείο ακριβώς που δημιουργούνται οι φυσαλίδες αέρα, σχήμα 2.5.6. Η βασική ιδέα είναι, ότι κατά τη δημιουργία της φυσαλίδας μέσα στο σωλήνα επιστρέφεται πίεση, η οποία είναι ίση με την υδροστατική πίεση του υγρού στο συγκεκριμένο βάθος.



Σχήμα 2.5.6. Σύστημα δημιουργίας φυσαλίδων

Στο σχήμα 2.5.7 δείχνονται ορισμένα αισθητήρια πίεσης, ρυθμού ροής και στάθμης.



(α)



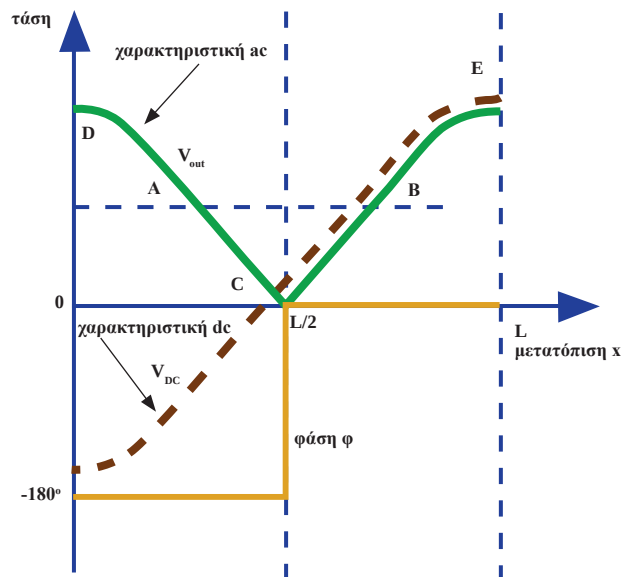
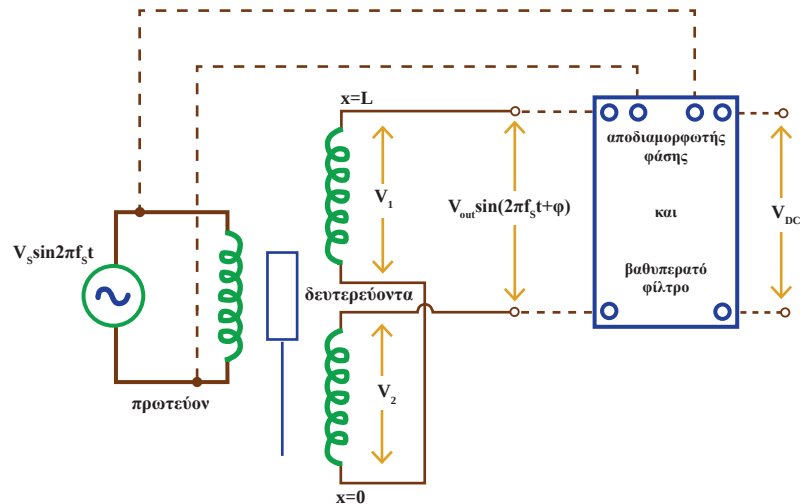
(β)



(γ)

Σχήμα 2.5.7. Αισθητήρια (α) πίεσης της Motorola, (β) ρυθμού ροής και (γ) στάθμης της Fine Automation Co., Ltd.

2.6

Αισθητήρια
Κίνησης,
Δόνησης
και Δύναμης

Σχήμα 2.6.1. LVDT και η χαρακτηριστική του

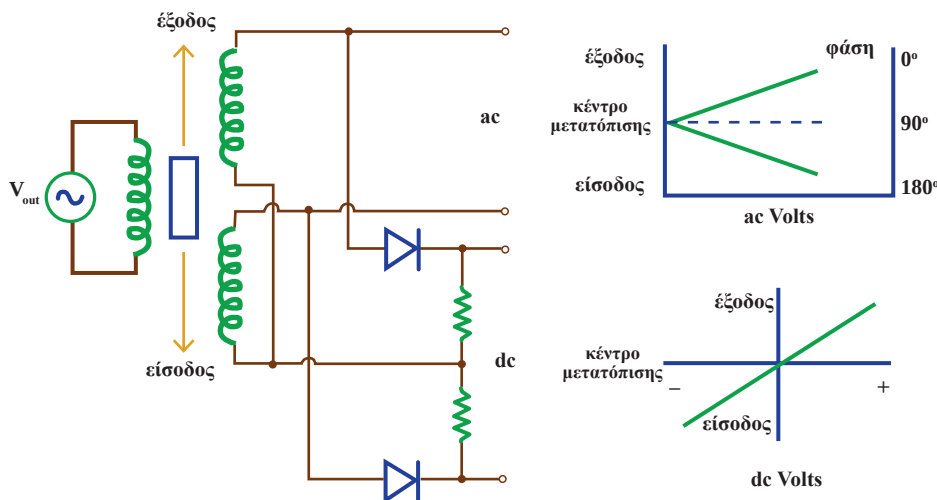
Η ακριβής αίσθηση της κίνησης, της θέσης, της γωνίας αξόνων και της γραμμικής μετατόπισης είναι δυνατή με το **γραμμικό μετασχηματιστή μεταβλητής μετατόπισης LVDT** (linear variable displacement transformer). Αυτός ο μετατροπέας έχει ως κύριο στοιχείο του μετασχηματιστή με απλό πρωτεύον τύλιγμα και δύο πανομοιότυπα δευτερεύοντα τυλίγματα γύρω από σιδηρομαγνητικό πυρήνα, σχήμα 2.6.1. Το πρωτεύον τύλιγμα διεγείρεται από εναλλασσόμενη τάση:

$$V_{\text{ext}} = V_S \sin 2\pi f_S t \quad (2.6.1)$$

Τα δύο δευτερεύοντα τυλίγματα είναι συνδεδεμένα σε σειρά, έτσι ώστε η τάση εξόδου να προκύπτει από τη διαφορά των τάσεων, που παράγονται στα τυλίγματα του δευτερεύοντος:

$$V_1 - V_2 = V_{\text{out}} \sin(2\pi f_S t + \varphi) \quad (2.6.2)$$

Ανάμεσα στα τυλίγματα τοποθετείται πυρήνας από σιδηρομαγνητικό υλικό του οποίου, η κίνηση αλλάζει την αμοιβαία επαγωγή και η τελική θέση καθορίζει την τάση εξόδου, σχήμα 2.6.1. Με τον πυρήνα απομακρυσμένο από τα τυλίγματα, οι τάσεις στα άκρα τους είναι ίσες, οπότε η τάση εξόδου είναι μηδέν. Όταν ο πυρήνας είναι μέσα στο μετασχηματιστή, οι τάσεις μεταβάλλονται ανάλογα με τη θέση του x , οπότε αλλάζει και η τάση εξόδου καθώς και η φάση της. Η σχέση φ ανάμεσα στην μετατόπιση x , τη φάση φ και την τάση εξόδου δείχνεται στο σχήμα 2.6.1. Η τάση εξόδου μηδενίζεται πάλι, όταν ο πυρήνας βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο C ανάμεσα στα δύο τυλίγματα, δηλαδή όταν $x=L/2$. Στο σημείο αυτό, η σύζευξη του πρωτεύοντος με τα δευτερεύοντα είναι τέτοια, ώστε $V_1=V_2$. Στα σημεία A και B , τα οποία ισαπέχουν από το C , η τάση εξόδου λαμβάνει ακριβώς την ίδια τιμή V_o . Ωστόσο στο A υπάρχει διαφορά φάσης -180° με την τάση του πρωτεύοντος, ενώ στο B δεν υπάρχει διαφορά φάσης. Στα άκρα D και E της χαρακτηριστικής παύει να υπάρχει γραμμικότητα.

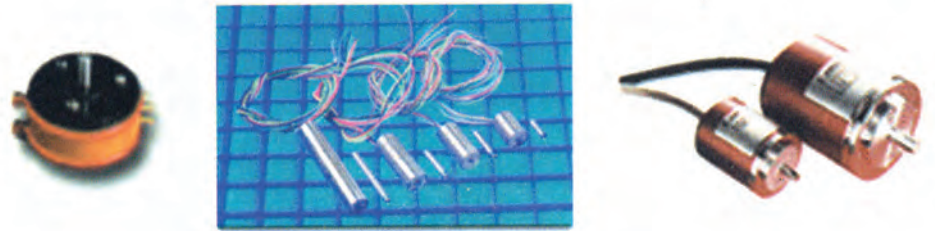


Σχήμα 2.6.2. Βασικό κύκλωμα LVDT

Το εναλλασσόμενο σήμα που προκύπτει στην έξοδο του LVDT, μετατρέπεται σε συνεχές με χρήση διόδων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6.2, ή και με άλλες ανορθωτικές διατάξεις, έχοντας όμως κατά νου, ότι η dc χαρακτηριστική πρέπει να κυμαίνεται ανάμεσα στα σημεία A και B , δηλαδή, πρέπει να έχει σταθερό πλάτος V_o και μεταβαλλόμενη φάση ως 180° . Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να

αναφερθεί, ότι το LDVT χρησιμοποιείται κατά κόρο με αποδιαμορφωτή φάσης (phase sensitive demodulator), όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6.1, ο οποίος ανιχνεύει τη διαφορά φάσης και δίνει αρνητική τάση στο σημείο Α και θετική στο σημείο Β.

Ως προς τις τεχνικές δυνατότητες, οι μετατροπείς αυτού του είδους είναι ικανοί να καλύψουν περιοχές μετατόπισης αντικειμένων (σιδηροπυρήνων) από $\pm 0.25\text{cm}$ ως $\pm 25\text{cm}$. Για τυπικό αισθητήρα της κλίμακας $\pm 2.5\text{cm}$ προτείνεται πλάτος διέγερσης $V_s=4-6\text{V}$ και $f_s=5\text{kHz}$ (400Hz minimum, 50kHz maximum). Εκτός από τα LDVT η αίσθηση της κίνησης γίνεται με τα ποτενσιόμετρα και τους κωδικοποιητές (encoders) (Σχ. 2.6.3).



Σχήμα 2.6.3. (α) Σερβο-ποτενσιόμετρο, (β) LDVT και (γ) περιστρεφόμενος κωδικοποιητής

Τα ποτενσιόμετρα χρησιμοποιούν μεταβλητή αντίσταση, για να μετατρέψουν γωνία ή μετατόπιση σε αντίσταση-τάση. Λειτουργούν μετακινώντας έναν δρομέα πάνω σε αντίσταση, για να παραχθεί τάση ανάλογη με τη μετατόπιση.

Οι κωδικοποιητές είναι αισθητήρια μηχανικής κίνησης. Μετατρέπουν την κίνηση (όπως θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση) σε ηλεκτρικά σήματα. Διακρίνονται σε **απόλυτους** (absolute) και **αυξητικούς** (incremental) κωδικοποιητές. Οι απόλυτοι κωδικοποιητές έχουν μοναδική τιμή για κάθε μηχανική θέση. Έτσι, δε χάνεται ποτέ η πληροφορία της θέσης και είναι στη στιγμή διαθέσιμη σε ψηφιακή λέξη στην παροχή ισχύος. Στους αυξητικούς κωδικοποιητές κάθε μηχανική θέση δεν ορίζεται μοναδικά. Η κάθε θέση ανιχνεύεται αυξητικά από τη θέση, που είχε τελευταία ανιχνευτεί δηλαδή, ξεκινώντας από την τελευταία ανίχνευση και με διαδοχικές αυξήσεις προσπαθούν να προσεγγίσουν τη νέα θέση.

Οι μετρήσεις επιτάχυνσης ή δύναμης (αφού η δύναμη είναι ανάλογη με την επιτάχυνση, σύμφωνα με το θεμελιώδη νόμο της φυσικής) στηρίζονται σε **κραδασμικά** αισθητήρια. Όλες οι συνηθισμένες μορφές μετατροπών έχουν εκτοπισθεί από τους **πιεζοηλεκτρικούς** μετατροπείς. Στο σημείο αυτό, θα αναφερθούμε σύντομα στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Αν μια δύναμη εφαρμοστεί σε κρύσταλλο, τότε τα άτομα του κρυστάλλου μετατοπίζονται ελαφρώς από τις κανονικές τους θέσεις στο πλέγμα. Η μετατόπιση x είναι ανάλογη με την εφαρμοζόμενη δύναμη F στη σταθερή κατάσταση:

$$x = \frac{1}{k} \cdot F \quad (2.6.3)$$

όπου k η σκληρότητα του κρυστάλλου, με μονάδες N/m.

Σε πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, αυτή η παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος έχει σαν αποτέλεσμα ο κρύσταλλος να αποκτήσει καθαρό φορτίο q ανάλογο με τη μετατόπιση x :

$$q = K \cdot x \quad (2.6.4)$$

όπου K σταθερά με μονάδες C/m. Τότε, από τις σχέσεις 2.6.3 και 2.6.4 παίρνουμε:

$$q = \frac{K}{k} \cdot F = d \cdot F \quad (2.6.5)$$

όπου $d=K/k$ (με μονάδες C/N) είναι η ευαισθησία του φορτίου ως προς τη δύναμη.

Έτσι, ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος δίνει απευθείας ηλεκτρική έξοδο ανάλογη με την εφαρμοζόμενη δύναμη, χωρίς να απαιτείται δεύτερος αισθητήρας μετατόπισης. Η σχέση 2.6.5 παρουσιάζει το **ορθό πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο** (direct piezoelectric effect). Υπάρχει και το **αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο** (inverse piezoelectric effect), όταν τάση V , που εφαρμόζεται σε κρύσταλλο, προκαλεί μηχανική μετατόπιση x :

$$x = d \cdot V \quad (2.6.6)$$

Το αντίστροφο φαινόμενο είναι σημαντικό στους υπερηχητικούς πομπούς (ultrasonic transmitters). Οι διαστάσεις του d στη σχέση 2.6.5 (C/N) είναι ισοδύναμες με τις διαστάσεις, που έχει στη σχέση 2.6.6 (m/V).

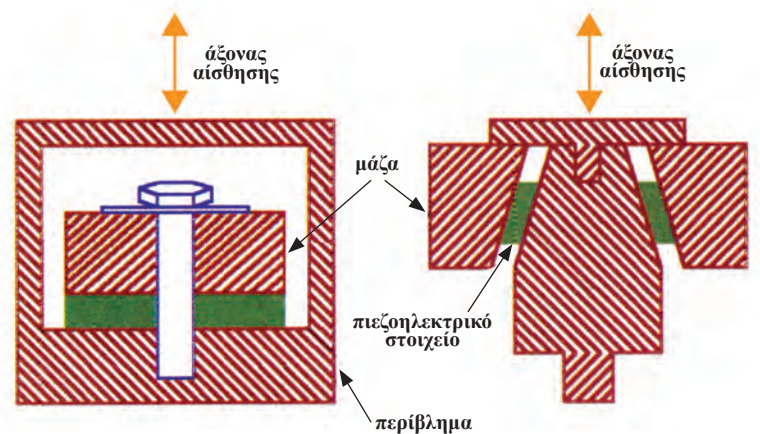
Για να μετρηθεί το φορτίο q , μεταλλικά ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κρυστάλλου, για να προκύψει πυκνωτής. Τότε η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι:

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{l} \quad (2.6.7)$$

όπου l το πάχος του κρυστάλλου, S το εμβαδόν των πλακών των ηλεκτροδίων, ε η διηλεκτρική σταθερά του κρυστάλλου και ε_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού.

Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία χρησιμοποιούνται ευρέως στη μέτρηση επιτάχυνσης (acceleration) και δόνησης (vibration). Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μάζα m . Αν δοθεί επιτάχυνση a στο περίβλημα του επιταχυνσιόμετρου (accelerometer), τότε προκύπτει δύναμη αδράνειας F , που ενεργεί στη μάζα και στον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο. Έτσι, ο κρύσταλλος αποκτά το φορτίο της σχέσης 2.6.5. Στο σχήμα 2.6.4 δείχνεται επιταχυνσιό-

μετρο συμπίεσης (compression mode accelerometer) και επιταχυνσιόμετρο διάτμησης (shear mode accelerometer).



Σχήμα 2.6.4. Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα (α) συμπίεσης και (β) διάτμησης

Στο επιταχυνσιόμετρο συμπίεσης το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο βρίσκεται ανάμεσα στη μάζα και το περίβλημα. Τα τρία αυτά επίπεδα είναι κατά κάποιο τρόπο βιδωμένα μεταξύ τους και το σύνολο βρίσκεται κλεισμένο κάτω από υψηλή στατική πίεση. Έτσι, η παραμικρή ασκούμενη δύναμη ή επιτάχυνση στην εξωτερική επιφάνεια προκαλεί ευθέως ανάλογη διέγερση του κρυστάλλου. Στο επιταχυνσιόμετρο διάτμησης το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο έχει το σχήμα κόλουρου κωνικού σωλήνα και βρίσκεται ανάμεσα σε κεντρικό στύλο, που μικραίνει βαθμιαία και στην εξωτερική μάζα. Στο σχήμα 2.6.5 δείχνονται διάφορα επιταχυνσιόμετρα.

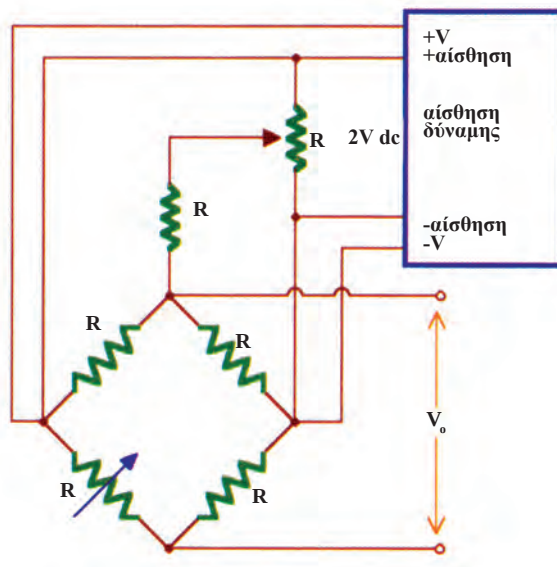


Σχήμα 2.6.5. Επιταχυνσιόμετρα

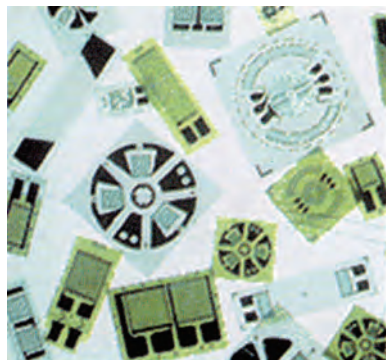
Η τελική λήψη του αρχικού σήματος του κρυστάλλου λαμβάνεται ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία. Αυτό σημαίνει, ότι ο κρύσταλλος παράγει πολύ ασθε-

νές ρεύμα εξόδου, οπότε για κάθε εφαρμογή χρησιμοποιούνται πολλοί κρύσταλλοι συνοδευόμενοι από ενισχυτή ρεύματος ασθενούς σήματος.

Ενδιαφέρον, επίσης, παρουσιάζει η περίπτωση της μέτρησης αποκλειστικά και μόνο δύναμης με αισθητήρια, που αντιλαμβάνονται δύναμη-τάση στην επιφάνειά τους (strain gage transducers). Η βασική αρχή λειτουργίας είναι, ότι με την αλλαγή του μέτρου της δύναμης, που ασκείται πάνω τους, αλλάζει και η αντίσταση του συνοδευτικού ηλεκτρονικού κυκλώματος (όπως η γέφυρα wheatstone). Στο σχήμα 2.6.6 φαίνεται ένα τέτοιο κλασσικό παράδειγμα, ενώ στο σχήμα 2.6.7 βλέπουμε διάφορους τέτοιους μετατροπείς.

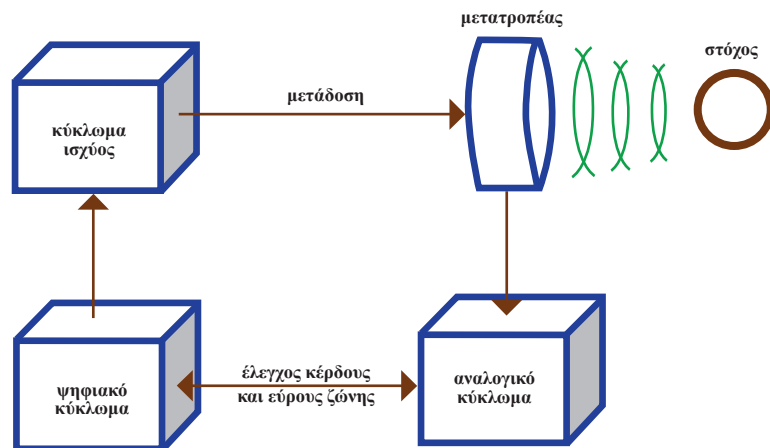


Σχήμα 2.6.6. Κύκλωμα μέτρησης επιφανειακής τάσης

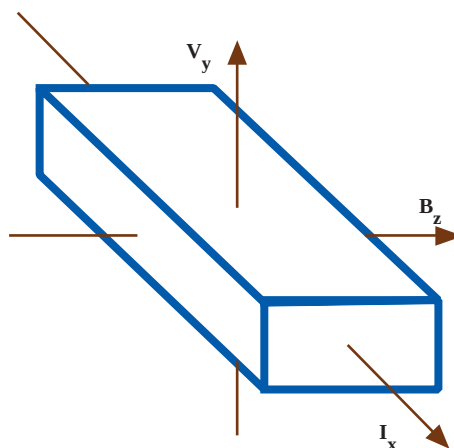


Σχήμα 2.6.7. Strain gage μετατροπείς

Τα συστήματα μέτρησης απόστασης με **υπερήχους** εφαρμόζονται ευρέως σε βιομηχανικούς και ιατρικούς σκοπούς. Στο σχήμα 2.6.8 φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα, αποτελούμενο από το μετατροπέα και το απαιτούμενο κύκλωμα επεξεργασίας σήματος. Ένας παλμός εκπέμπεται προς το στόχο, ανακλάται σε αυτόν και ανιχνεύεται ο ανακλώμενος παλμός. Ο χρόνος, που χρειάστηκε, για να επιστρέψει ο ανακλώμενος παλμός, μετατρέπεται σε απόσταση ανάλογα με τη διάδοση του ήχου στο συγκεκριμένο μέσο διάδοσης της εφαρμογής. Τέλος, οι μετατροπείς **φαινομένου-Hall** ελέγχουν την ένταση μαγνητικού πεδίου. Η αρχή λειτουργίας τους περιγράφεται στο σχήμα 2.6.9. Όταν μαγνητικό πεδίο B_z εφαρμοστεί κάθετα σε αγώγιμο υλικό, ασκείται δύναμη, που δημιουργεί μεταβολή στη ροή του ρεύματος I_x που είναι ανάλογη με διαφορά δυναμικού.



Σχήμα 2.6.8. Σύστημα μέτρησης απόστασης με υπερήχους



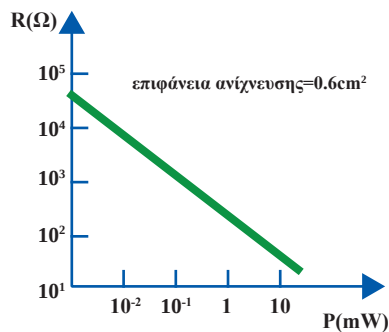
Σχήμα 2.6.9. Αρχή λειτουργίας μετατροπέα φαινομένου-Hall

Αισθητήρια Φωτός

Οι **ανιχνευτές φωτός** (photon detectors) είναι ημιαγώγιμες διατάξεις, στις οποίες, όταν προσπίπτει φως, δηλαδή ορατή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, προκαλείται διέγερση των ηλεκτρονίων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα αυτά να μεταπίπτουν από τη στοιβάδα σθένους στη στοιβάδα αγωγιμότητας, παράγοντας έτσι μετρήσιμη ηλεκτρική ροή. Αυτοί οι ανιχνευτές διεγείρονται μόνο, όταν η ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας έχει μια κατάλληλη τιμή. Οι αισθητήρες φωτός διακρίνονται σε δύο βασικά είδη, ανάλογα με την ατομική τους συμπεριφορά στην ορατή ακτινοβολία.

- **Φωτοαγώγιμοι αισθητήρες** (photoconductive detectors)

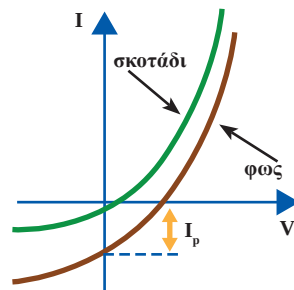
Το ουσιαστικό φαινόμενο, που παρατηρείται εδώ είναι, ότι η παρουσία των διεγερμένων ηλεκτρονίων στη στοιβάδα αγωγιμότητας αυξάνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα και την ισχύ P , που καταναλώνεται από το στοιχείο, μειώνοντας παράλληλα την αντίστασή του R , σχήμα 2.7.1.



Σχήμα 2.7.1. Γραφική παράσταση αντίστασης-ισχύος για αισθητήρια θειούχου καδμίου

- **Φωτοβολταϊκοί αισθητήρες** (photovoltaic detectors)

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι **φωτοδιόδοι**, που δημιουργούνται από επαφή εξωγενών ημιαγωγών τύπου-N και τύπου-P. Στο σχήμα 2.7.2 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές φωτοδιόδου στο φως και το σκοτάδι. Από την μελέτη τους προκύπτει το συμπέρασμα ότι, η παρουσία του φωτός μετατοπίζει προς τα κάτω ολόκληρη τη χαρακτηριστική κατά ποσότητα ίση με το **φωτορεύμα** i_p :



Σχήμα 2.7.2. Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος φωτοδιόδου

$$i_p = K_D \cdot P \quad (2.7.2)$$

όπου K_D (με μονάδες A/W) η ευαισθησία και P η συνολική ισχύς, που καταναλώνεται. Αυτός ο τύπος ανιχνευτή βρίσκει εφαρμογή στις υπέρυθρες διόδους.

Εκτός από την PN δίοδο, μεγάλη διάδοση στα αισθητήρια φωτός γνωρίζει και η δίοδος PIN, που επιπλέον των γνωστών τύπων ημιαγωγών P και N, συμπληρώνεται από μη εμπλουτισμένο στρώμα I τοποθετημένο ανάμεσα στα δύο προηγούμενα. Όταν, λοιπόν, προσπίπτουν πάνω σε αυτό τα φωτόνια, παράγονται επιπρόσθετα ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων στην περιοχή αυτή με αύξηση του φωτορεύματος ανάλογη της πραγματικής δόδου PN. Μία τυπική PIN δίοδος έχει πολύ μικρό μέγεθος και αυτό την καθιστά ιδανική, για να χρησιμοποιηθεί στις οπτικές ίνες. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί η διαφορά μεταξύ φωτοδίοδου χιονοστιβάδας και PIN δόδου. Η PIN δίοδος για κάθε φωτόνιο, που προσπίπτει στην επιφάνειά της, διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο, ενώ η κοινή φωτοδίοδος διεγείρει πολλά περισσότερα.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για πυρηνικές μετρήσεις, δηλαδή, μέθοδοι, που ανιχνεύουν την πυρηνική ακτινοβολία βασιζόμενες στα φαινόμενα του ιονισμού, που προκαλούν αυτές οι ακτινοβολίες. Διακρίνουμε δύο κατηγορίες:

- τους **παλμικούς ανιχνευτές φαινομένων ιονισμού** και
- τους **ανιχνευτές συνεχούς παρακολούθησης φαινομένων**, που, ουσιαστικά, παρέχουν τα αποτελέσματα της μέσης ακτινοβολίας.

Ως παράδειγμα της πρώτης κατηγορίας θεωρούνται οι σωλήνες Geiger- Mueller, όπου θέλουμε να παρακολουθήσουμε συγκεκριμένο φάσμα ακτινοβολίας, π.χ. ακτίνες Χ, που μεταβάλλονται με ταχύτατους ρυθμούς. Για τη δεύτερη κατηγορία μπορούμε να αναφέρουμε τον υπέρυθρο διασκορπιστικό αναλυτή και τον αναλυτή οξυγόνου. Χρησιμοποιούνται, κυρίως, για on-line παρακολούθηση συνεχούς παραγωγικής διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο.

Για την ανίχνευση χημικών και αερίων, υπάρχουν πολλοί τύποι αισθητηρίων. Οι πιο σημαντικοί είναι οι παρακάτω:

- Οι **αισθητήρες υπέρυθρου** (infrared sensors)
Αυτοί ανιχνεύουν αέρια όπως, διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, διοξείδιο του θείου κ.α., ενώ δεν μπορούν να ανιχνεύσουν οξυγόνο, υδρογόνο και χλώριο. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι το γεγονός, ότι δεν απαιτείται η παρουσία οξυγόνου. Ωστόσο είναι αρκετά ακριβοί και πολύπλοκοι.
- Οι **ηλεκτροχημικοί-καταλυτικοί αισθητήρες** (electrochemical-catalytic sensors), σχήμα 2.8.1.



Σχήμα 2.8.1. Καταλυτικοί αισθητήρες

Κάθε αέριο, που μπορεί να οξειδωθεί ή να ελαττωθεί ηλεκτροχημικά, μπορεί να ανιχνευτεί μέσω ηλεκτροχημικού αισθητήρα, που βασίζεται **σε στοιχείο μετατροπής καύσιμης ύλης σε ηλεκτρική ενέργεια** (fuel cell). Άλλα αέρια μπορούν να ανιχνευτούν με **γαλβανικούς ηλεκτροχημικούς αισθητήρες**. Οι fuel cell αισθητήρες είναι ηλεκτρικές μπαταρίες, που καταναλώνουν αέριο από το εξωτερικό περιβάλλον και οξυγόνο παρά στερεά ή υγρά υλικά από το εσωτερικό τους. Οι αισθητήρες αυτοί, αφού δεν χρησιμοποιούν

2.8

Διατάξεις Πυρηνικής και Χημείας

εσωτερικά υλικά, θα έπρεπε να έχουν άπειρη διάρκεια ζωής. Στην πράξη, όμως, διαρκούν τρία με τέσσερα χρόνια.

Στους γαλβανικούς ηλεκτροχημικούς αισθητήρες χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια ή ηλεκτρολύτες. Το μέταλλο βαθμιαία καταναλώνεται και, έτσι, περιορίζεται ο χρόνος ζωής τους. Με τον τρόπο αυτό ανιχνεύουμε αμμωνία και υδροκυάνιο.

- Οι **αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας** (thermal conductivity sensors)

Οι ανιχνευτές αυτοί λειτουργούν συγκρίνοντας τη θερμική αγωγιμότητα του δείγματος με αυτή ενός αερίου αναφοράς, που είναι συνήθως ο αέρας. Χρησιμοποιούνται, συνήθως, για μέτρηση υδρογόνου, ηλίου, μεθανίου, νέου, φρέον και διοξειδίου του άνθρακα.

- Οι **αισθητήρες διόδου laser** (diode laser based sensors)

Οι αισθητήρες αυτοί ανιχνεύουν αέρια όπως, υδροφθόριο, υδροχλώριο, υδρατμούς, διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και αμμωνία.

Οι κατηγορίες αισθητηρίων, που γνωρίσαμε σε αυτό το κεφάλαιο, δεν είναι οι μοναδικές αλλά σίγουρα οι σημαντικότερες. Υπάρχουν πολλές ακόμα κατηγορίες όπως, τα αισθητήρια υγρασίας, σχήμα 2.8.2, τα ηχητικά αισθητήρια κ.α.



Σχήμα 2.8.2. Αισθητήρια υγρασίας

- Ένας τρόπος ταξινόμησης των αισθητηρίων είναι ανάλογα με τη μορφή ενέργειας, που μεταφέρει το σήμα.
- Τα αισθητήρια διακρίνονται σε αυτοδιεγειρόμενα και διαμορφούμενα. Στα πρώτα η έξοδος είναι συνάρτηση αποκλειστικά της εισόδου, ενώ στα δεύτερα υπάρχει και ένα εξωτερικό σήμα οδήγησης. Στο ιδανικό αισθητήριο, το σήμα εξόδου πρέπει να είναι εντελώς ανάλογο με το σήμα εισόδου. Η απόκριση, η ευαισθησία, ο χρόνος ανόδου και καθόδου και η περιοχή μέτρησης είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά των αισθητηρίων.
- Τυπικά αισθητήρια θερμοκρασίας είναι τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη, οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις (RTDs), τα θερμίστορ, τα διμεταλλικά ελάσματα και τα οπτικά πυρόμετρα. Τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη βασίζονται στη μέτρηση του δυναμικού επαφής, που είναι ανάλογο με τη διαφορά θερμοκρασίας. Οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις βασίζονται στη μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας. Τα θερμίστορ διακρίνονται σε NTC και PTC, ανάλογα με το αν η αντίσταση ελαττώνεται ή αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Τα διμεταλλικά ελάσματα βασίζονται στους διαφορετικούς συντελεστές γραμμικής διαστολής των μετάλλων.
- Τα αισθητήρια πίεσης μετρούν στατική και δυναμική πίεση και διακρίνονται σε αυτά, που χρησιμοποιούν σωλήνα Pitot και σε αισθητήρια πίεσης επαγωγικού χαρακτήρα. Τα αισθητήρια ροής μετρούν ρυθμό ροής, ογκομετρική ροή και ροή μάζας. Η μέτρηση στάθμης γίνεται με φλοτέρ, συστήματα υπερήχων και συσκευές δημιουργίας φουσαλίδων.
- Ο γραμμικός μετασχηματιστής μεταβλητής μετατόπισης LVDT, τα ποτενσιόμετρα και οι κωδικοποιητές είναι τυπικά αισθητήρια κίνησης. Τα αισθητήρια δύναμης και δόνησης βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.
- Τα αισθητήρια φωτός διακρίνονται σε φωτοαγώγιμα και φωτοβολταϊκά.
- Στις πυρηνικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται οι παλμικοί ανιχνευτές ιονισμού και οι ανιχνευτές συνεχούς παρακολούθησης φαινομένων. Οι αισθητήρες υπέρυθρου, οι ηλεκτροχημικοί-καταλυτικοί αισθητήρες, οι αισθητήρες θερμοκλής αγωγιμότητας και οι αισθητήρες διόδου laser χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση χημικών αερίων.

Αξιολόγηση • Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

1. Σε ιδανικό αισθητήριο το σήμα εξόδου πρέπει να είναι:
 - α) αντιστρόφως ανάλογο με το σήμα εισόδου
 - β) ανάλογο με το σήμα εισόδου
 - γ) ανάλογο με το τετράγωνο του σήματος εισόδου
 - δ) αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο του σήματος εισόδου
2. Μια ομάδα τυπικών αισθητηρίων θερμοκρασίας είναι:
 - α) τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη, τα οπτικά πυρόμετρα και τα επιταχυνσιόμετρα
 - β) τα θερμίστορ, τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη και τα διμεταλλικά ελάσματα
 - γ) τα θερμίστορ, τα LVDT και οι ανιχνευτές υπέρυθρου
 - δ) οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις, τα οπτικά πυρόμετρα και ο σωλήνας Pitot
3. Η λειτουργία των διμεταλλικών ελασμάτων βασίζεται:
 - α) στη μέτρηση του δυναμικού επαφής
 - β) στη μέτρηση της ογκομετρικής ροής
 - γ) στους διαφορετικούς συντελεστές γραμμικής διαστολής των μετάλλων
 - δ) στη μέτρηση της θερμοκρασίας από απόσταση
4. Πίεση Vacuum ονομάζεται η πίεση που είναι:
 - α) μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση
 - β) ίση με την ατμοσφαιρική πίεση
 - γ) ίση με την πίεση απόλυτου κενού
 - δ) μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση

• Ερωτήσεις του τύπου Σωστό/Λάθος

1. Αυτοδιεγειρόμενο είναι το αισθητήριο, η έξοδος του οποίου είναι συνάρτηση αποκλειστικά της εισόδου.
2. Τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη βασίζονται στη μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας.
3. Στα θερμίστορ NTC η αντίσταση μειώνεται, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία.
4. Σύμφωνα με το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όταν εφαρμόζεται τάση σε κρύσταλλο, προκαλεί μηχανική μετατόπιση.
5. Η διαφορά της διόδου PIN από την απλή PN είναι, ότι η πρώτη, για κάθε φωτόνιο, που προσπίπτει στην επιφάνειά της, διεγείρει πολλά περισσότερα, ενώ η δεύτερη μόνο ένα.

• Ερωτήσεις αντιστοίχισης

1. Να αντιστοιχίσετε τα στοιχεία της πρώτης στήλης με αυτά της δεύτερης στήλης:

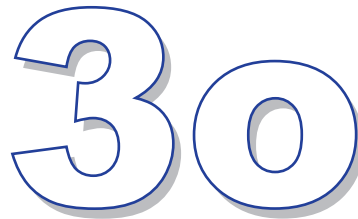
διμεταλλικό έλασμα	κίνηση
LVDT	στάθμη
αισθητήριο διόδου laser	θερμοκρασία
φωτοδίοδος	φως
φλοτέρ	χημικό αέριο

• Ερωτήσεις συμπλήρωσης κενού

1. Η μέτρηση της _____ στηρίζεται κυρίως στην αποκατάσταση _____ ισορροπίας ανάμεσα στο _____ σώμα και το _____.
2. Το LVDT έχει ως κύριο στοιχείο του έναν _____ με απλό _____ τυλίγμα και δύο πανομοιότυπα _____ τυλίγματα γύρω από _____ πυρήνα.

• Ερωτήσεις ανοικτού τύπου

- Με βάση ποια αρχή ταξινομούνται τα διάφορα αισθητήρια;
- Περιγράψτε τις βασικές παραμέτρους ενός αισθητηρίου.
- Ποια είναι τα αισθητήρια θερμοκρασίας και σε ποιες αρχές βασίζεται η λειτουργία τους;
- Αναλύστε τις έννοιες της πίεσης κενού, της απόλυτης πίεσης, της μετρούμενης πίεσης και της διαφορικής πίεσης.
- Ποια είναι τα αισθητήρια πίεσης, ροής και στάθμης και σε ποιες αρχές βασίζεται η λειτουργία τους;
- Περιγράψτε αναλυτικά τη λειτουργία ενός LVDT.
- Αναλύστε το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Ποια επιταχυνσιόμετρα γνωρίζετε;
- Ποια είναι τα αισθητήρια φωτός και σε ποιες αρχές βασίζεται η λειτουργία τους;
- Ποια είναι τα αισθητήρια, που ανιχνεύουν πυρηνική ακτινοβολία;



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Τελεστικοί ενισχυτές - Ενισχυτές μετρήσεων

- Εισαγωγή
- Διαφορικός Ενισχυτής
- Τελεστικός Ενισχυτής
- Χαρακτηριστικά DC και AC Λειτουργίας Τελεστικού Ενισχυτή
- Βασικά Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών
- Ενισχυτές Μετρήσεων
- Θόρυβος Ενισχυτών

Σκοπός

Όταν ολοκληρώσεις το κεφάλαιο αυτό, θα μπορείς:

- Να περιγράφεις τη λειτουργία του διαφορικού ενισχυτή, να κατονομάζεις και να περιγράφεις τα βασικά μεγέθη, που τον περιγράφουν.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις τις βαθμίδες από τις οποίες αποτελείται ο τελεστικός ενισχυτής.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις διάφορα χαρακτηριστικά των τελεστικών ενισχυτών, που χαρακτηρίζουν την απόκρισή τους.
- Να αναφέρεις και να σχεδιάζεις βασικά κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών και να αναφέρεις τη χρησιμότητά τους.
- Να εξηγείς τη χρησιμότητα ενός ενισχυτή μετρήσεων και τη διαφορά του από έναν τελεστικό ενισχυτή.
- Να συγκρίνεις τους διάφορους ενισχυτές μετρήσεων και να μπορείς να κρίνεις, ποιος είναι κατάλληλος για κάθε εφαρμογή.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις τις βασικές πηγές θορύβου σε έναν ενισχυτή.

3.1

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάμε εκείνη τη κατηγορία ενισχυτών, που χρησιμοποιείται, κυρίως, σε διατάξεις μετρήσεων. Οι ενισχυτές αυτοί έχουν ιδιαίτερα υψηλές προδιαγραφές και ονομάζονται ενισχυτές μετρήσεων (instrumentation amplifiers). Είναι απαραίτητο να τονίσουμε, ότι ο **ενισχυτής μετρήσεων δεν είναι τελεστικός ενισχυτής**. Ο ολοκληρωμένος τελεστικός ενισχυτής έχει χαμηλό κόστος και επαρκεί για απλή ενίσχυση, αλλά όχι για εφαρμογές με αυξημένες απαιτήσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις, θα έπρεπε να προστεθούν ειδικής κατασκευής ηλεκτρονικά στοιχεία στο κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή και θα χρειαζόνταν εξειδικευμένοι σχεδιαστές κυκλωμάτων. Αλλά αντί αυτού χρησιμοποιούμε ενισχυτές μετρήσεων. Προτού, όμως, δούμε τι ακριβώς είναι ένας ενισχυτής μετρήσεων, πότε και σε ποιες εφαρμογές προτιμάται έναντι του τελεστικού ενισχυτή, θα περιγράψουμε το διαφορικό ενισχυτή, που αποτελεί βασική βαθμίδα τόσο των τελεστικών ενισχυτών όσο και των ενισχυτών μετρήσεων. Έπειτα, θα μελετήσουμε τους τελεστικούς ενισχυτές και θα παρουσιάσουμε σύντομα τους παράγοντες, που επηρεάζουν την ιδανική τους λειτουργία, τόσο στο συνεχές όσο και στο εναλλασσόμενο. Τέλος, θα παρουσιάσουμε ορισμένες κατηγορίες ενισχυτών μετρήσεων, καθώς και την επίδραση του θορύβου σε αυτούς.

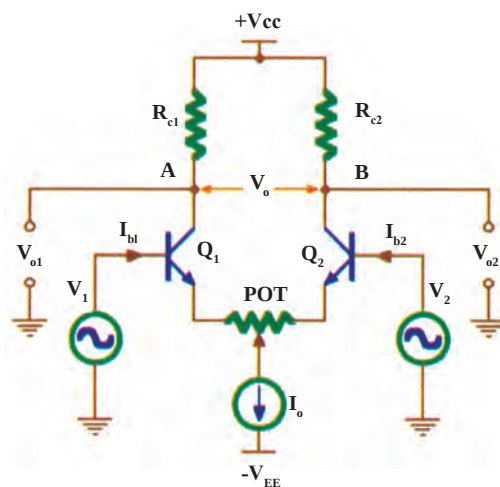
3.2 Διαφορικός Ενισχυτής

Ο διαφορικός ενισχυτής αποτελεί, συνήθως, το πρώτο ηλεκτρονικό κύκλωμα σε σύστημα συλλογής δεδομένων (DAS: data acquisition system), που επεξεργάζεται το σήμα αισθητηρίου. Είναι βαθμίδα dc σύζευξης και συνιστά την πρώτη βαθμίδα εισόδου τυπικού ενισχυτή μετρήσεων. Μερικά από τα **πλεονεκτήματα** του διαφορικού ενισχυτή είναι η υψηλή διαφορική ενίσχυση, η απόρριψη σημάτων κοινού τρόπου, η ενίσχυση συνεχούς, η υψηλή αντίσταση εισόδου, η αποφυγή πυκνωτή διαρροής, η δυνατότητα διαφορικής εξόδου, η σταθερότητα του σημείου λειτουργίας και η καταλληλότητά του για ολοκληρωμένο κύκλωμα.

Ο ενισχυτής του σχήματος 3.2.1 είναι **συμμετρικός διαφορικός ενισχυτής** με δύο εισόδους V_1 και V_2 . Ονομάζεται συμμετρικός, γιατί αποτελείται από δύο όμοια τρανζίστορ Q_1 και Q_2 (**ταιριασμένα**, matched), σε σύζευξη κοινού εκπομπού και από δύο όμοιες αντιστάσεις συλλέκτη R_{c1} και R_{c2} ($R_{c1}=R_{c2}$). Ονομάζεται δε διαφορικός, γιατί έχει δύο εισόδους, των οποίων ενισχύει τη διαφορά τάσης. Η σταθερή πηγή ρεύματος θεωρείται ως αντίσταση φορτίου του εκπομπού της τάξης των ΜΩ. Αν είναι το μέτρο της ενίσχυσης του διαφορικού ενισχυτή, τότε η τάση εξόδου V_o , μεταξύ των συλλεκτών, είναι:

$$V_o = A_v \cdot (V_1 - V_2) \quad (3.2.1)$$

Η τάση εισόδου V_1 ονομάζεται **μη αναστρέφουσα είσοδος**, επειδή βρίσκεται σε φάση με την τάση εξόδου. Η τάση εισόδου V_2 ονομάζεται **αναστρέφουσα είσοδος**, επειδή παρουσιάζει διαφορά φάσης 180° με την τάση εξόδου. Όταν $V_1 > V_2$, το σημείο Α του σχήματος 3.2.1 έχει αρνητικό δυναμικό σε σχέση με το σημείο Β. Το αντίστροφο ισχύει, όταν $V_2 > V_1$. Ο διαφορικός ενισχυτής τροφοδοτείται, συνήθως, με συμμετρικά σήματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.1. Είναι προφανές ότι, όταν στις δύο εισόδους εφαρμόζονται ίσες τάσεις, αυτές αλληλοαναιρούνται λόγω της συμμετρίας του κυκλώματος.



Σχήμα 3.2.1. Συμμετρικός διαφορικός ενισχυτής

Η **διαφορική ενίσχυση** του διαφορικού ενισχυτή προσδιορίζεται, αν θεωρήσουμε αντίθετα σήματα στις εισόδους του, $V_1 = -V_2$. Θεωρώντας ως έξοδο του ενισχυτή την τάση συλλέκτη του τρανζίστορ Q_1 , V_{o1} , τότε η διαφορική ενίσχυση δίνεται από τη σχέση:

$$A_d = \frac{V_{o1}}{V_1 - V_2} = -\frac{h_{fe} R_c}{2(h_{ie} + R_s)} = -\frac{h_{fe} R_c}{2R_b} \quad (3.2.2)$$

όπου h_{ie} η ενίσχυση ρεύματος του τρανζίστορ σε συνδεσμολογία CE, h_{ie} η αντίσταση εισόδου του τρανζίστορ σε συνδεσμολογία CE, R_s η εσωτερική αντίσταση της πηγής σήματος και $R_b = h_{ie} + R_s$.

Η **ενίσχυση κοινού τρόπου** του διαφορικού ενισχυτή προσδιορίζεται αν θεωρήσουμε ίδια σήματα στις εισόδους του, $V_1 = V_2$. Θεωρώντας ως έξοδο του ενισχυτή την τάση συλλέκτη του τρανζίστορ Q_1 , V_{o1} , τότε η ενίσχυση κοινού τρόπου δίνεται από τη σχέση:

$$A_{cm} = \frac{V_{o1}}{V_1} = -\frac{h_{fe} R_c}{R_b + 2(1 + h_{fe})R_E} \approx -\frac{R_c}{2R_E} \quad (3.2.3)$$

όπου R_E η αντίσταση εκπομπού. Στη σχέση 3.2.3 θεωρήσαμε ότι $h_{fe} \gg 1$ και $R_b \ll h_{fe} R_E$.

Η **διαφορική αντίσταση εισόδου** του διαφορικού ενισχυτή, όταν λειτουργεί με αντίθετα σήματα (διαφορικός τρόπος λειτουργίας), είναι της τάξης των kΩ, ενώ η **αντίσταση εισόδου κοινού τρόπου**, όταν λειτουργεί με ίδια σήματα (κοινός τρόπος λειτουργίας), είναι της τάξης των MΩ. Ο **λόγος απόρριψης κοινού τρόπου** (CMRR: common mode rejection ratio) ορίζεται ως το πηλίκο της διαφορικής ενίσχυσης προς την ενίσχυση κοινού τρόπου:

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}} \quad (3.2.4)$$

Ένας καλός διαφορικός ενισχυτής δεν επιτρέπει στα σήματα που είναι κοινά και στις δύο εισόδους του, όπως τα σήματα παρεμβολής και ο θόρυβος, να εμφανίζονται στην έξοδό του. Αυτό είναι εφικτό, όταν η ενίσχυση κοινού τρόπου είναι πολύ μικρότερη από τη διαφορική ενίσχυση, οπότε τα κοινά σήματα ουσιαστικά υποβαθμίζονται και απορρίπτονται. Έτσι, σύμφωνα με τη σχέση 3.2.4, όσο μεγαλύτερη τιμή έχει ο λόγος απόρριψης κοινού τρόπου CMRR, που είναι αδιάστατο μέγεθος, τόσο καλύτερος είναι ο ενισχυτής.

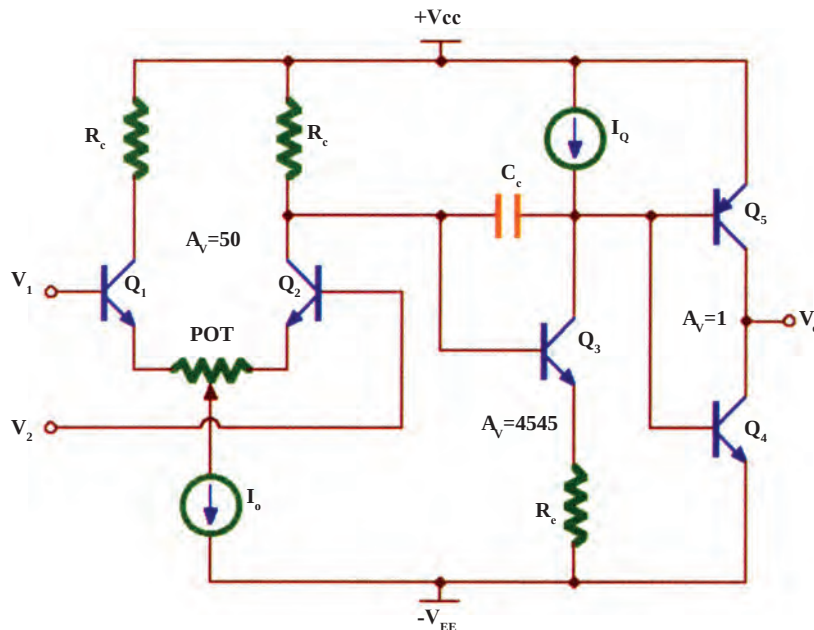
Ο διαφορικός ενισχυτής, εκτός από την απόρριψη του θορύβου και των τυχαίων παρεμβολών, προσφέρει και σημαντική dc σταθεροποίηση και ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων εισόδου. Τα σφάλματα εισόδου διαφορικού ενισχυτή, τα οποία εξαλείφονται με ρυθμίσεις πάνω στα εξαρτήματα του ίδιου του ενισχυτή, είναι κυρίως το **ρεύμα μετατόπισης εισόδου** I_{os} (input offset current) και η **αντισταθμιστική τάση μετατόπισης εισόδου** V_{io} (input offset voltage)

που εμφανίζεται στην έξοδο του ενισχυτή όταν και οι δύο εισοδοί είναι σε δυναμικό μηδέν. Τα μεγέθη αυτά περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο 3.4. Η ρύθμιση της αντισταθμιστικής τάσης μετατόπισης εισόδου πραγματοποιείται με την εισαγωγή του ποτενσιόμετρου POT στο σχήμα 3.2.1. Τα τρανζίστορ Q_1 και Q_2 μοιράζονται, τότε, κοινή αντίσταση εκπομπού και το ποτενσιόμετρο δίνει τη δυνατότητα ισοστάθμισης των τάσεων των εκπομπών, ώστε σε κατάσταση ηρεμίας να έχουμε μηδενική τάση εξόδου.

3.3

Τελεστικός
Ενισχυτής

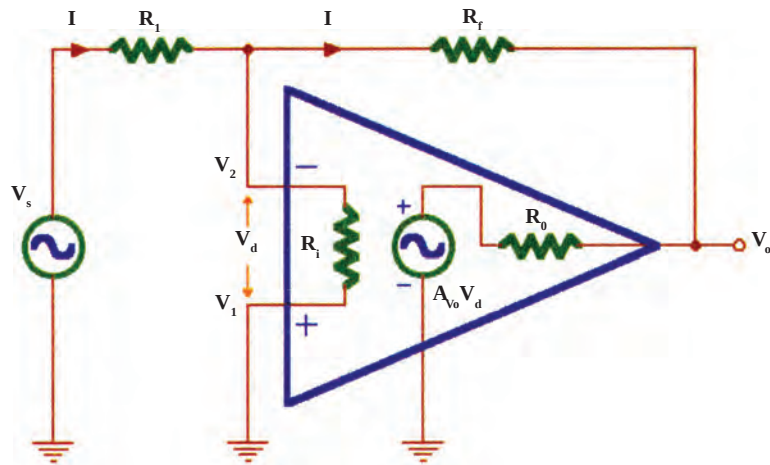
Οι περισσότεροι **τελεστικοί ενισχυτές** Τ.Ε. (operational amplifier - opamp) έχουν κοινή σχεδίαση, που φαίνεται στο σχήμα 3.3.1. Συγκεκριμένα αποτελούνται από βαθμίδα εισόδου, υλοποιούμενη από διαφορικό ενισχυτή, σε διαδοχή με υψηλής ενίσχυσης ενδιάμεση βαθμίδα, που ακολουθείται από βαθμίδα ισχύος στην έξοδο. Οι τελεστικοί ενισχυτές χαρακτηρίζονται από υψηλή dc ενίσχυση, ζώνη διέλευσης συχνοτήτων από 0Hz έως 1MHz ρυθμιζόμενη κατά περίπτωση με εξωτερικές αντιστάσεις και ομοιόμορφη μείωση (roll-off) της ενίσχυσης με τη συχνότητα.



Σχήμα 3.3.1. Στοιχειώδης τελεστικός ενισχυτής

Στο σχήμα 3.3.2 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα **αναστρέφοντος τελεστικού ενισχυτή**. Η ενδιάμεση βαθμίδα ενίσχυσης παρέχει ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου A_{V_o} της τάξης του 227250, τιμή, που σχεδόν επιτρέπει την πραγματοποίηση του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή. Υπενθυμίζεται, ότι ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής παρουσιάζει άπειρη αντίσταση εισόδου, με αποτέλεσμα να μην εισέρχεται ρεύμα στην είσοδό του, καθώς και μηδενική αντίσταση εξόδου. Επίσης, ο ιδανικός Τ.Ε. παρουσιάζει άπειρη ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου A_{V_o} , όταν δέχεται ίδια σήματα στις εισόδους του:

$$V_1 = V_2 \Leftrightarrow V_d = 0 \Leftrightarrow A_{V_o} = \frac{V_o}{V_d} \rightarrow \infty \quad (3.3.1)$$



Σχήμα 3.3.2. Αναστρέφων τελεστικός ενισχυτής

Στην πράξη, η ενίσχυση τάσης δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς ανάδραση, λόγω της αστάθειας του ανοικτού βρόχου και της μη γραμμικότητας, που παρουσιάζεται. Η εισαγωγή της αρνητικής ανάδρασης, στο σχήμα 3.3.2, προκαλεί ανάμεσα στην αναστρέφουσα και μη αναστρέφουσα είσοδο του Τ.Ε. **εικονική γη** (virtual ground) στο V_2 , οπότε παίρνουμε τελικά $V_d = V_1 - V_2 = 0$. Τότε, η ενίσχυση τάσης του αναστρέφοντος τελεστικού ενισχυτή είναι:

$$\frac{V_s - V_2}{R_1} = \frac{V_2 - V_o}{R_f} \Leftrightarrow \frac{V_s - 0}{R_1} = \frac{0 - V_o}{R_f} \Leftrightarrow \frac{V_o}{V_s} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (3.3.2)$$

3.4

Χαρακτηριστικά DC και AC Λειτουργίας Τελεστικού Ενισχυτή

Στις dc εφαρμογές υπάρχουν ορισμένα χαρακτηριστικά του τελεστικού ενισχυτή, που μπορεί να εισάγουν λανθασμένες συνιστώσες στην τάση εξόδου του. Αν η ιδανική τάση εξόδου είναι μεγάλη σε σχέση με τη λανθασμένη συνιστώσα, μπορούμε να αγνοήσουμε την αιτία δημιουργίας της. Αν, όμως, η συνιστώσα αυτή είναι συγκρίσιμη ή και μεγαλύτερη από την ιδανική τάση εξόδου, πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε το σφάλμα. Τα χαρακτηριστικά του Τ.Ε., που εισάγουν λανθασμένες συνιστώσες στην dc τάση εξόδου, είναι:

- Τα ρεύματα πόλωσης εισόδου (input bias currents)
- Το ρεύμα μετατόπισης εισόδου (input offset current)
- Η αντισταθμιστική τάση μετατόπισης εισόδου (input offset voltage)
- Η ολίσθηση (drift)

Στις ac εφαρμογές, οι πυκνωτές σύζευξης ελαχιστοποιούν τα σφάλματα της dc τάσης εξόδου. Έτσι, τα σφάλματα, που εισάγονται από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, είναι ασήμαντα στις ac εφαρμογές. Υπάρχουν, όμως νέα προβλήματα, όπως:

- Η απόκριση συχνότητας (frequency response)
- Ο ρυθμός μεταβολής σήματος εξόδου (slew rate)

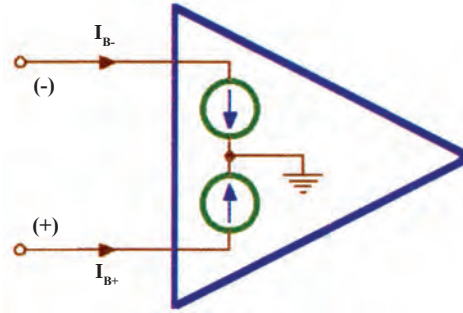
Η απόκριση συχνότητας περιγράφει τη μεταβολή της ενίσχυσης τάσης με τη συχνότητα με τη βοήθεια διαγράμματος. Οι κατασκευαστές Τ.Ε. δίνουν τέτοια διαγράμματα για την ενίσχυση ανοικτού βρόχου ως προς τη συχνότητα. Ένα επιπλέον σφάλμα, που εισάγει ο ίδιος ο Τ.Ε., είναι το πόσο γρήγορα μπορεί να αλλάξει η τάση εξόδου. Αν το σήμα εισόδου αναγκάζει την έξοδο του Τ.Ε. να αλλάξει τιμή γρηγορότερα από ότι μπορεί, τότε η έξοδος του Τ.Ε. παραμορφώνεται. Υπεύθυνη για αυτό το σφάλμα είναι η εσωτερική χωρητικότητα του Τ.Ε. Το σφάλμα αυτό ονομάζεται ρυθμός μεταβολής σήματος εξόδου (slew rate). Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στον πίνακα 3.4.1.

Χαρακτηριστικά τελεστικού ενισχυτή που εισάγουν σφάλματα	DC εφαρμογή		AC εφαρμογή	
	Μικρή Έξοδος	Μεγάλη Έξοδος	Μικρή Έξοδος	Μεγάλη Έξοδος
Ρεύμα πόλωσης εισόδου	Ναι	Πιθανή	Όχι	Όχι
Ρεύμα μετατόπισης εισόδου	Ναι	Πιθανή	Όχι	Όχι
Αντισταθμιστική τάση μετατόπισης εισόδου	Ναι	Πιθανή	Όχι	Όχι
Ολίσθηση	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι
Απόκριση συχνότητας	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι
Ρυθμός μεταβολής σήματος εξόδου	Όχι	Ναι	Όχι	Ναι

Πίνακας 3.4.1. Εισαγωγή σφαλμάτων από τα χαρακτηριστικά του Τ.Ε. ανάλογα με την εφαρμογή και την έξοδο.

Τα τρανζίστορ στο εσωτερικό του Τ.Ε. είναι πολωμένα σωστά, πριν εφαρμοστεί οποιοδήποτε σήμα στην είσοδο. Η εφαρμογή του σήματος εισόδου δεν επηρεάζει την πόλωσή τους, αν πρόκειται για ιδανικό Τ.Ε., αφού δεν εισέρχεται

ρεύμα από τις εισόδους. Στον πραγματικό Τ.Ε., όμως, εισέρχεται μικρό dc ρεύμα, που επηρεάζει την πόλωση. Το ισοδύναμο αυτών των ρευμάτων πόλωσης εισόδου (input bias currents) φαίνεται στο σχήμα 3.4.1.

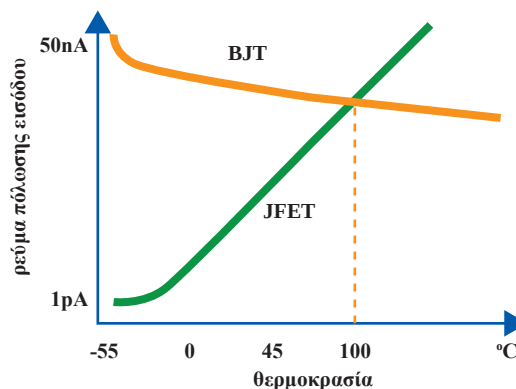


Σχήμα 3.4.1. Ισοδύναμο dc ρευμάτων πόλωσης εισόδου

Το ρεύμα πόλωσης I_{B-} δεν είναι συνήθως ακριβώς ίσο με το I_{B+} . Οι κατασκευαστές καθορίζουν ένα μέσο **ρεύμα πόλωσης εισόδου** I_B , που είναι η μέση τιμή των μέτρων των I_{B-} και I_{B+} :

$$I_B = \frac{|I_{B+}| + |I_{B-}|}{2} \quad (3.4.1)$$

Το I_B είναι της τάξης του $1\mu\text{A}$ για γενικού σκοπού Τ.Ε. και 1pA ή και λιγότερο για Τ.Ε. με FET στο εσωτερικό τους. Επίσης, είναι λιγότερο από 60fA ($1\text{fA} = 10^{-15}\text{A}$) σε Τ.Ε., που χρησιμοποιούνται σε ειδικά κυκλώματα διευθέτησης σημάτων, όπως είναι οι μετρήσεις ΡΗ. Στο σχήμα 3.4.2 φαίνεται η χαρακτηριστική του ρεύματος πόλωσης εισόδου σε σχέση με τη θερμοκρασία τόσο για τρανζίστορ BJT όσο και για JFET. Στις χαμηλές θερμοκρασίες το τυπικό JFET πλεονεκτεί του BJT, αφού προϋποθέτει μικρότερο ρεύμα πόλωσης, ενώ πάνω από τους 100°C πλεονεκτεί το BJT.



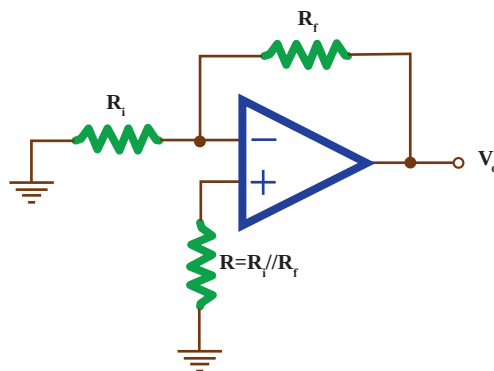
Σχήμα 3.4.2. Χαρακτηριστική ρεύματος πόλωσης εισόδου συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η διαφορά των μέτρων των I_{B+} και I_{B-} ορίζεται ως **ρεύμα μετατόπισης εισόδου** I_{os} (input offset current):

$$I_{os} = |I_{B+}| - |I_{B-}| \quad (3.4.2)$$

Οι κατασκευαστές καθορίζουν το I_{os} στην περίπτωση, που η έξοδος του κυκλώματος είναι 0V και η θερμοκρασία 25°C. Ένα τυπικό I_{os} είναι 25% μικρότερο από το μέσο ρεύμα πόλωσης εισόδου. Ένας γενικού σκοπού Τ.Ε., όπως ο OP-77, έχει τυπικές τιμές $I_B=1,2nA$ και $I_{os}=0,3nA$.

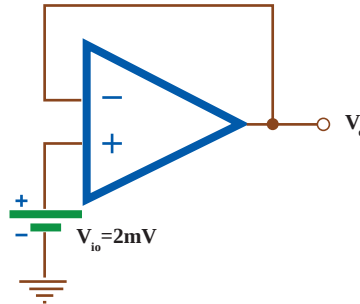
Τα ρεύματα πόλωσης και μετατόπισης έχουν σαν αποτέλεσμα να παρουσιάζεται τάση στην έξοδο του Τ.Ε., ενώ δεν υπάρχει σήμα εισόδου. Στην ιδανική περίπτωση θα έπρεπε να ήταν μηδενική. Για να αντιμετωπίσουμε το σφάλμα αυτό θέτουμε πάντα **αντίσταση αντιστάθμισης** R (compensation) σε σειρά με τη μη αναστρέφουσα είσοδο του Τ.Ε. (εκτός από Τ.Ε. με FET). Η αντίσταση αυτή ισούται με τον παράλληλο συνδυασμό όλων των αντιστάσεων, που συνδέονται με την αναστρέφουσα είσοδο. Η εσωτερική αντίσταση της πηγής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Στο σχήμα 3.4.3 φαίνεται, πως αντισταθμίζεται ένας αναστρέφων ή μη αναστρέφων ενισχυτής. Σε κυκλώματα, που περισσότερες από μια αντιστάσεις συνδέονται στην μη αναστρέφουσα είσοδο, ακολουθούμε τον εξής κανόνα: Η dc αντίσταση, που φαίνεται από τη μη αναστρέφουσα είσοδο προς τη γη, πρέπει να είναι ίση με την dc αντίσταση, που φαίνεται από την αναστρέφουσα είσοδο προς τη γη. Για να εφαρμοστεί αυτός ο κανόνας, οι πηγές σήματος αντικαθίστανται από τις εσωτερικές τους dc αντιστάσεις και η έξοδος του Τ.Ε. θεωρείται, ότι βρίσκεται σε δυναμικό μηδέν.



Σχ. 3.4.3. Αντιστάθμιση αναστρέφοντος ή μη αναστρέφοντος ενισχυτή

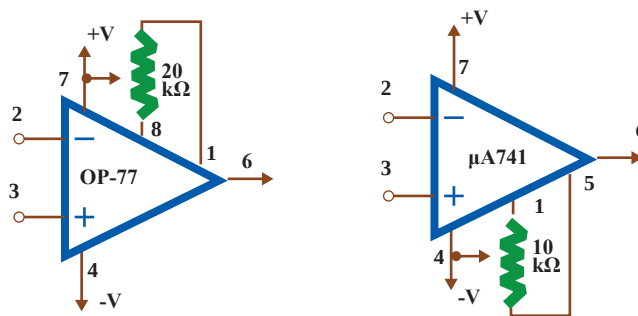
Άλλη αιτία εμφάνισης τάσης στην έξοδο του Τ.Ε. (της τάξης των μV ως mV), χωρίς να υπάρχει τάση στην είσοδο, είναι η ύπαρξη μικρών, αλλά αναπόφευκτων ανισορροπιών στο εσωτερικό του Τ.Ε. Αυτές μελετώνται εύκολα με την τοποθέτηση μικρής dc πηγής τάσης, η οποία ονομάζεται **αντισταθμιστική τάση μετατόπισης εισόδου** V_{io} , σε σειρά με μια από τις εισόδους του Τ.Ε., όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.4. Δεν υπάρχει διαφορά,

αν η πηγή αυτή τοποθετηθεί στην αναστρέφουσα ή μη αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή.



Σχ. 3.4.4. Ισοδύναμο dc αντισταθμιστικής τάσης μετατόπισης εισόδου

Το πρόβλημα της V_{io} αντιμετωπίζεται με κατάλληλα κυκλώματα ελαχιστοποίησης των σφαλμάτων αυτών, που προτείνονται στο φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.4.5.



Σχήμα 3.4.5. Κυκλώματα ελαχιστοποίησης σφαλμάτων λόγω της V_{io} για τον OP-77 και τον $\mu A741$

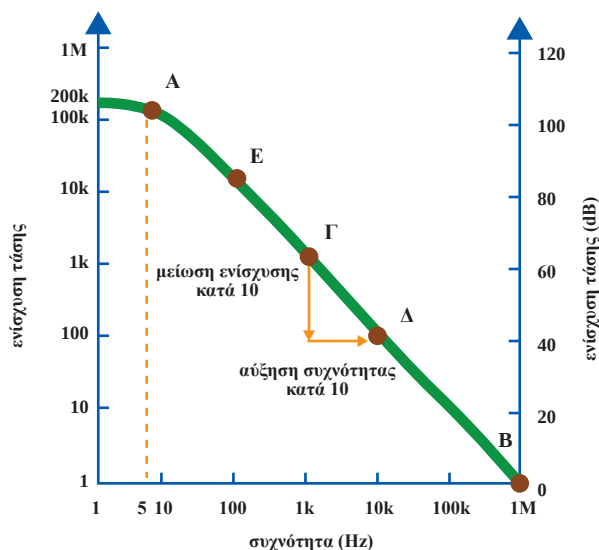
Το ρεύμα μετατόπισης εισόδου και η αντισταθμιστική τάση μετατόπισης εισόδου μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου λόγω γήρανσης των στοιχείων του Τ.Ε. Επίσης, μεταβάλλονται με την αλλαγή της θερμοκρασίας ή της τάσης τροφοδοσίας. Καλά σταθεροποιημένη τάση τροφοδοσίας περιορίζει τα σφάλματα, που οφείλονται σε αυτή. Οι αλλαγές, λόγω της θερμοκρασίας, ελαχιστοποιούνται, αν α) διατηρούμε σταθερή τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ή β) επιλέγουμε Τ.Ε., των οποίων τα I_{os} και V_{io} μεταβάλλονται πολύ λίγο με τις αλλαγές της θερμοκρασίας.

Οι αλλαγές στο ρεύμα μετατόπισης εισόδου και στην αντισταθμιστική τάση μετατόπισης εισόδου, λόγω αλλαγών της θερμοκρασίας, περιγράφονται με τον όρο **ολίσθηση** (drift). Η **ολίσθηση του ρεύματος μετατόπισης εισόδου**, $\Delta I_{os}/\Delta T$, μετρείται σε nA/°C και η **ολίσθηση της αντισταθμιστικής τάσης**

μετατόπισης εισόδου, $\Delta V_{io}/\Delta T$, σε $\mu V/^{\circ}C$. Οι ολισθήσεις μπορεί να διαφέρουν σε διαφορετικές θερμοκρασίες και να είναι και αντίθετες. Για παράδειγμα, στις χαμηλές θερμοκρασίες η V_{io} μπορεί να ολισθαίνει κατά $+20\mu V/^{\circ}C$ (αύξηση) και στις υψηλές να αλλάζει κατά $-10\mu V/^{\circ}C$ (μείωση). Για το λόγο αυτό, οι κατασκευαστές ορίζουν μέση ή μέγιστη ολίσθηση μεταξύ δύο ακραίων θερμοκρασιών. Μερικές τυπικές μέγιστες τιμές ολίσθησης είναι $0.1nA/^{\circ}C$ και $20\mu V/^{\circ}C$ για το $\mu A741$ και $1.5pA/^{\circ}C$ και $0.1\mu V/^{\circ}C$ για τον OP-77.

Ο Τ.Ε. είναι εσωτερικά ισοσταθμισμένος, καθώς ο κατασκευαστής τοποθετεί έναν μικρό πυκνωτή, συνήθως 30pF, στο εσωτερικό του. Αυτός ο πυκνωτής δεν επιτρέπει στον Τ.Ε. να ταλαντώνει στις υψηλές συχνότητες. Οι ταλαντώσεις αποφεύγονται μειώνοντας την ενίσχυση του Τ.Ε. με την αύξηση της συχνότητας. Σε αντίθετη περίπτωση, θα υπήρχε ικανοποιητική ενίσχυση και ολίσθηση φάσης, ώστε μεγάλο μέρος από το σήμα εξόδου να επιστρέφει, μέσω ανάδρασης, στην είσοδο και να προκαλεί ταλαντώσεις. Όσο αυξάνει η συχνότητα, μειώνεται η εμπέδηση του πυκνωτή. Έτσι, δεν είναι τυχαίο, ότι η ενίσχυση τάσης του Τ.Ε. μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα του σήματος εισόδου. Μεταβολή της συχνότητας κατά 10 ονομάζεται **δεκάδα** (decade). Οι κατασκευαστές παραθέτουν καμπύλη, που δείχνει, πως μεταβάλλεται η ενίσχυση ανοικτού βρόχου με τη συχνότητα του σήματος εισόδου και ονομάζεται **απόκριση μικρών σημάτων** (small signal response).

Τυπική καμπύλη για το $\mu A741$ Τ.Ε. φαίνεται στο σχήμα 3.4.6. Στις χαμηλές συχνότητες η ενίσχυση είναι πολύ υψηλή. Τυπική τιμή είναι 200000 (106dB) για το $\mu A741$ και 107 (140dB) για τον OP-77. Το σημείο Α δηλώνει τη συχνότητα, που η ενίσχυση τάσης έχει μειωθεί στο 0.707 της τιμής, που είχε στις χαμηλές συχνότητες και ονομάζεται **συχνότητα αποκοπής**.

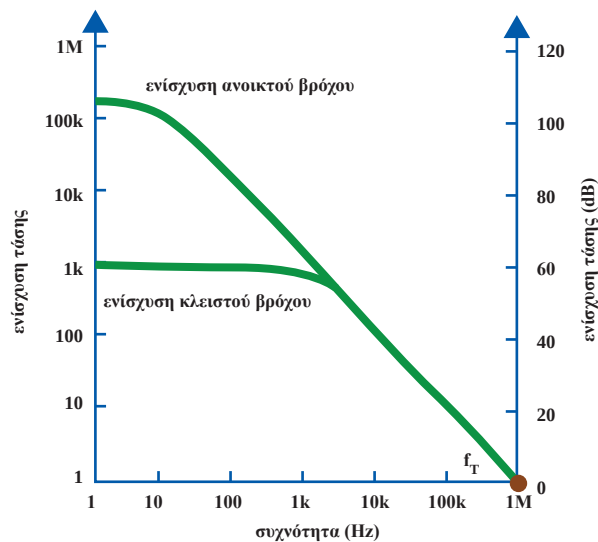


Σχήμα 3.4.6. Ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου $\mu A741$ Τ.Ε.

Τα σημεία Γ και Δ δείχνουν, πως η ενίσχυση μειώνεται κατά ένα παράγοντα 10 (ή 20dB), όταν η συχνότητα αυξάνει κατά έναν παράγοντα 10 (μια δεκάδα). Έτσι, η καμπύλη απόκρισης συχνότητας από το Α ως το Β χαρακτηρίζεται από μείωση κατά 20dB/δεκάδα. Εναλλακτική περιγραφή είναι 6dB/οκτάβα, όπου η λέξη **οκτάβα** δηλώνει αλλαγή της συχνότητας κατά 2.

Το βασικό χαρακτηριστικό ενός Τ.Ε. είναι η συχνότητα, όπου η ενίσχυσή του είναι μονάδα (unity) και ονομάζεται **συχνότητα μοναδιαίας ενίσχυσης** f_T . Υπάρχουν δύο τρόποι να πληροφορηθούμε τη συχνότητα αυτή: Ο πρώτος είναι από την απόκριση ενίσχυσης τάσης ανοικτού βρόχου βρίσκοντας τη συχνότητα, που η ενίσχυση είναι μοναδιαία (σημείο Β, 1MHz στο σχήμα 3.4.6). Ο δεύτερος, αν γνωρίζουμε την ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου σε συχνότητα, οπότε απλά πολλαπλασιάζουμε τη τιμή της ενίσχυσης με την αντίστοιχη συχνότητα. Για παράδειγμα, αν η ενίσχυση είναι 1000 σε συχνότητα 1500Hz, τότε $f_T = 1500 \times 1000 = 1.5\text{MHz}$.

Στο σχήμα 3.4.7 φαίνεται γραφική μέθοδος, για να πάρουμε την απόκριση συχνότητας μη αναστρέφοντος ενισχυτή. Το **γινόμενο ενίσχυσης-εύρους ζώνης συχνοτήτων** (gain-bandwidth) είναι πάντα ίσο με τη συχνότητα μοναδιαίας ενίσχυσης f_T . Έτσι, αν αυξηθεί η ενίσχυση κλειστού βρόχου, θα μειωθεί το εύρος ζώνης συχνοτήτων και το αντίστροφο.



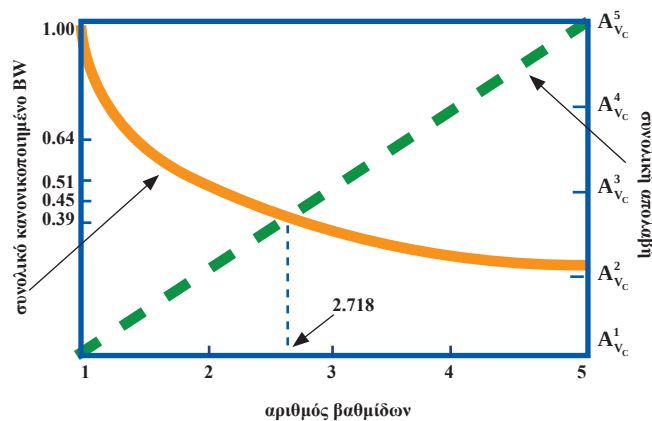
Σχήμα 3.4.7. Ενίσχυση τάσης ανοικτού και κλειστού βρόχου

Ο **ρυθμός μεταβολής σήματος εξόδου** SR (slew rate) Τ.Ε. περιγράφει το πόσο γρήγορα μπορεί να αλλάξει η τάση εξόδου του. Για το $\mu A741$ ο μέγιστος ρυθμός είναι $0.5\text{V}/\mu\text{s}$. Ο ρυθμός αυτός εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ενίσχυση, οι πυκνωτές αντιστάθμισης ακόμα και το γεγονός αν η τάση

εξόδου γίνεται θετική ή αρνητική. Η χειρότερη περίπτωση, δηλαδή το μικρότερο slew rate, εμφανίζεται στην μοναδιαία ενίσχυση. Αν I είναι το μέγιστο ρεύμα με το οποίο Τ.Ε. μπορεί να εφοδιάσει τον εσωτερικό του πυκνωτή ισοστάθμισης C , τότε το slew rate ορίζεται ως:

$$SR = \frac{I}{C} \quad (3.4.3)$$

Για το $\mu A741$ έχουμε $I=15\mu A$ και $C=30pF$, οπότε $SR=0.5V/\mu s$. Από την παραπάνω σχέση φαίνεται, ότι για μεγάλο slew rate απαιτείται μεγαλύτερο ρεύμα ή μικρότερος πυκνωτής. Οι Τ.Ε. με slew rate μεγαλύτερο από $100V/\mu s$ χαρακτηρίζονται ως Τ.Ε. υψηλής ταχύτητας. Σε ειδικές εφαρμογές, όπως συστήματα video, χρησιμοποιούμε Τ.Ε. με slew rate μεγαλύτερο από $1000V/\mu s$. Πολύ σημαντικό φαινόμενο για τους ενισχυτές αποτελεί η **μεγιστοποίηση του εύρους ζώνης** με ταυτόχρονη επίτευξη της επιθυμητής ενίσχυσης τάσης. Για το σκοπό αυτό, συνδέουμε πολλές βαθμίδες σε διαδοχή. Όμως, ο μεγάλος αριθμός βαθμίδων, που απαιτείται, για να επιτευχθεί η ζητούμενη ενίσχυση τάσης, καθιστά αναποτελεσματική αυτή τη μέθοδο, αφού ελαττώνεται το εύρος ζώνης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.4.8. Από το σχήμα αυτό φαίνεται, ότι ο βέλτιστος αριθμός όμοιων βαθμίδων σε διαδοχή, για μέγιστο ολικό BW, είναι $e=2.718$ (μόνο 2 με 3 βαθμίδες).



Σχήμα 3.4.8. Εύρος ζώνης και ενίσχυση όμοιων βαθμίδων σε διαδοχή

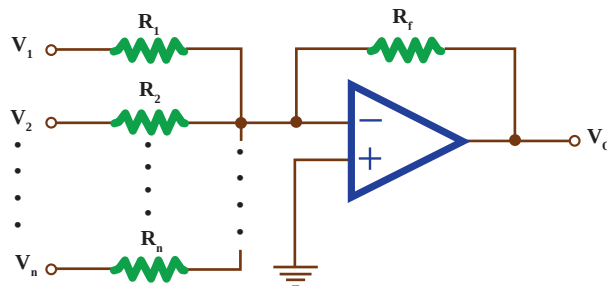
3.5 Βασικά Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών

Στη συνέχεια θα γνωρίσουμε, σύντομα, ορισμένα βασικά κυκλώματα με τελεστικούς ενισχυτές, που χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση συστημάτων μετρήσεων. Αυτά είναι κυρίως ο αθροιστής, ο λογαριθμικός ενισχυτής, ο εκθετικός ενισχυτής, ο φωρατής κορυφής και ο συγκριτής.

• Αθροιστής τάσεων

Ο αναστρέφων αθροιστής τάσεων είναι ουσιαστικά αναστρέφων ενισχυτής με περισσότερες από μία εισόδους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.1. Χρησιμοποιείται για την πρόσθεση δύο ή περισσότερων τάσεων. Η έξοδος του δίνεται από τη σχέση:

$$V_o = - \left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \dots + \frac{R_f}{R_n} V_n \right) \quad (3.5.1)$$

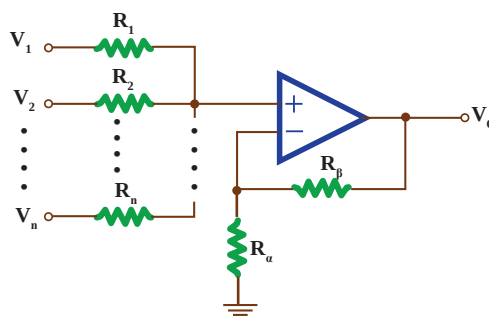


Σχήμα 3.5.1. Αναστρέφων αθροιστής τάσεων

Ρυθμίζοντας τους λόγους των αντιστάσεων μπορούμε να προσθέσουμε, να αφαιρέσουμε, να πολλαπλασιάσουμε ή να διαιρέσουμε δύο ή περισσότερα σήματα. Αν, για παράδειγμα, είχαμε $R_1=R_2=R_3=3R_f$, τότε η τάση εξόδου θα ήταν ο μέσος όρος των τριών εισόδων.

Στο σχήμα 3.5.2 φαίνεται ένας μη αναστρέφων αθροιστής τάσεων. Η έξοδος του, στην περίπτωση που $R_1=R_2=\dots=R_n$, δίνεται από τη σχέση:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_\beta}{R_\alpha} \right) \cdot \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n}{n} \quad (3.5.2)$$



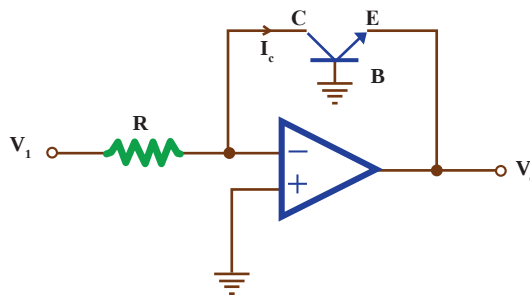
Σχήμα 3.5.2. Μη αναστρέφων αθροιστής τάσεων

- **Λογαριθμικός ενισχυτής**

Ο λογαριθμικός ενισχυτής χρησιμοποιείται, όταν θέλουμε να ανιχνεύσουμε και καταγράψουμε τάσεις ή ρεύματα με τιμές που κείνται μέσα σε μεγάλα όρια. Ο ενισχυτής αυτός προκύπτει συνδυάζοντας ένα τελεστικό ενισχυτή με δίοδο ή τρανζίστορ, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5.3. Για το κύκλωμα αυτό ισχύει:

$$V_o = -V_T \cdot \ln \frac{V_i}{R I_s} \quad (3.5.3)$$

όπου V_T σταθερά, που ονομάζεται θερμική τάση (thermal voltage) και I_s το ανάστροφο ρεύμα κόρου του τρανζίστορ.

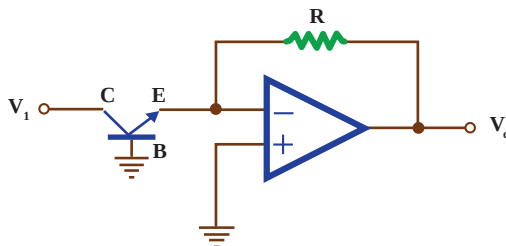


Σχήμα 3.5.3. Λογαριθμικός ενισχυτής

- **Εκθετικός ενισχυτής**

Ο εκθετικός ενισχυτής προκύπτει, αν εναλλάξουμε τον αντιστάτη με το τρανζίστορ ή τη δίοδο του λογαριθμικού ενισχυτή, του σχήματος 3.5.3. Έτσι, προκύπτει ο εκθετικός ενισχυτής του σχήματος 3.5.4, για τον οποίο ισχύει:

$$V_o = R \cdot I_s \cdot e^{\frac{V_i}{V_T}} \quad (3.5.4)$$

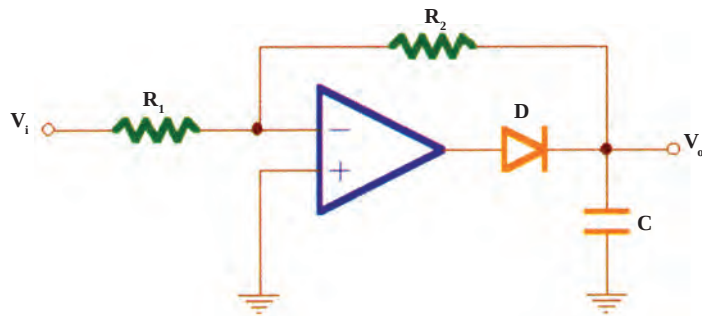


Σχήμα 3.5.4. Εκθετικός ενισχυτής

- **Φωρατής κορυφής**

Σε ac μετρήσεις, όταν θέλουμε να υπολογίσουμε την ενεργό τιμή ενός ημιτονικού σήματος, αρκεί να βρούμε τη τιμή κορυφής (πλάτος) και να την

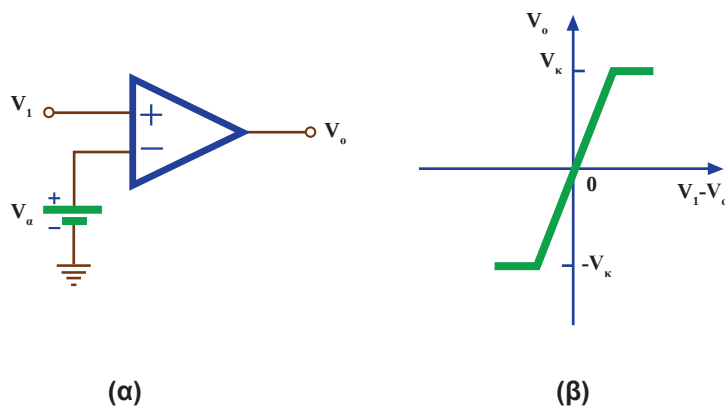
πολλαπλασιάσουμε επί 0.707. Για τη φώραση κορυφής (peak detection) χρησιμεύει το κύκλωμα του σχήματος 3.5.5. Η έξοδος του συγκρατεί τη μεγαλύτερη τιμή, όταν $R_1=R_2$, ενώ δείχνει ενεργό τιμή, όταν $R_2/R_1=0.707$.



Σχήμα 3.5.5. Φωρατής κορυφής

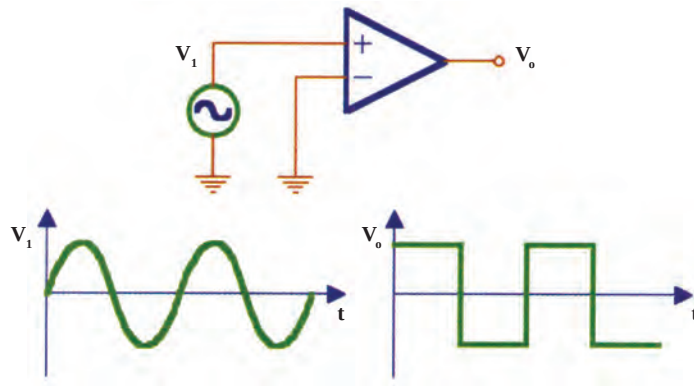
- **Συγκριτής τάσης**

Η χρήση του τελεστικού ενισχυτή ως συγκριτή (comparator) δύο τάσεων βασίζεται στην υψηλή ενίσχυση ανοικτού βρόχου, που διαθέτει και την περιορισμένη μέγιστη τάση εξόδου του. Σε ανοικτό βρόχο, ελάχιστη διαφορά στις τάσεις εισόδων του θα οδηγήσει τον τελεστικό ενισχυτή σε κόρο. Έτσι, στο σχήμα 3.5.6, αν $V_1 > V_a$ θα ισχύει $V_o = V_k$, ενώ αν $V_1 < V_a$ θα ισχύει $V_o = -V_k$, όπου V_k η τάση κόρου.



Σχήμα 3.5.6. (α) Συγκριτής τάσης και (β) χαρακτηριστική εισόδου εξόδου συγκριτή

Ουσιαστικά, η διάταξη αυτή ανιχνεύει, αν η τάση V_1 είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση V_a . Άρα, μπορεί να χρησιμεύσει και στην ανίχνευση της χρονικής στιγμής, κατά την οποία μεταβαλλόμενη τάση παίρνει την τιμή τάσης αναφοράς, που περιλαμβάνει και την μηδενική τάση. Εφαρμογή στην ανίχνευση διόδου της τάσης από την μηδενική τιμή έχουμε στην παραγωγή τετραγωνικών παλμών από ημιτονικό σήμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5.7.



Σχ. 3.5.7. Παραγωγή τετραγωνικών παλμών από ημιτονικό σήμα εισόδου

3.6 Ενισχυτές Μετρήσεων

Ο **ενισχυτής μετρήσεων** είναι στοιχείο ενίσχυσης διαφορικής τάσης μεγάλης ακρίβειας, που χρησιμοποιείται για μετρήσεις στις περιπτώσεις, που είναι δύσκολο να έχουμε ακρίβεια με τους συνηθισμένους τελεστικούς ενισχυτές. Στις πραγματικές συνθήκες έχουμε αποκλίσεις από τις ιδανικές συνθήκες λόγω διακυμάνσεων της θερμοκρασίας, ύπαρξης ηλεκτρικού θορύβου και πτώσης τάσης πάνω στους αγωγούς. Επιπλέον, οι πραγματικοί μετατροπείς σπάνια παρουσιάζουν μηδενική εμπέδηση εξόδου. Πάντα εμφανίζονται διαρροές και επαγωγικές ή συζευγμένες ηλεκτρικές παρεμβολές (**θόρυβος**).

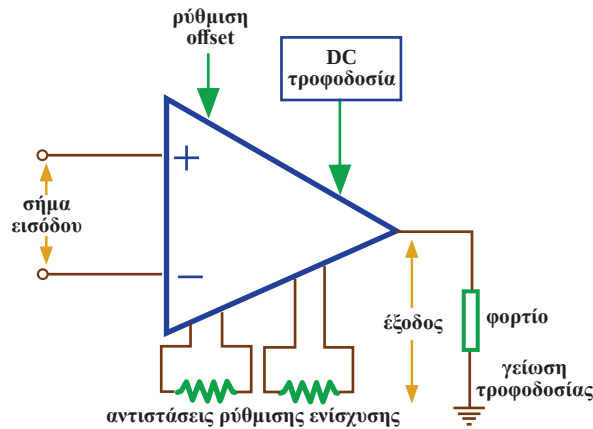
Οι ενισχυτές μετρήσεων χρησιμοποιούνται για την καλύτερη λήψη (acquisition) ενός σήματος. Πρέπει να έχουν **υψηλή εμπέδηση εισόδου**, επειδή οι εμπειδότητες των πηγών μπορεί να είναι υψηλές και/ή μη ισοσταθμισμένες. Τα ρεύματα **πόλωσης** και **μετατόπισης** είναι **μικρά** και σχετικά σταθερά, έτσι ώστε η εμπέδηση της πηγής να μην απαιτείται να είναι σταθερή. Παρέχουν **συμμετρικές διαφορικές εισόδους**, έτσι ώστε το σήμα της πηγής να μπορεί να αναφέρεται ως προς οποιοδήποτε σημείο, ανεξάρτητα από το σημείο αναφοράς του φορτίου εξόδου του ενισχυτή. Παρουσιάζουν **υψηλή απόρριψη κοινού τρόπου** και, επομένως, **ελαχιστοποίηση** του **θορύβου**, που χαρακτηρίζει τις εφαρμογές με απομακρυσμένους αισθητήρες. Παρέχουν **υψηλή ευστάθεια** σε κρίσιμες παραμέτρους κάτω από διάφορες θερμοκρασίες και τάσεις τροφοδοσίας. Τέλος, όλα τα εξαρτήματα που είναι κρίσιμα για τις καλές επιδόσεις του ενισχυτή μετρήσεων βρίσκονται ολοκληρωμένα στο εσωτερικό του (με εξαίρεση μια αντίσταση ή ένα ζεύγος αντιστάσεων που ρυθμίζει την ενίσχυση).

Ο ενισχυτής μετρήσεων δεν χρησιμοποιείται για απλή ολοκλήρωση, διαφόριση, ανόρθωση ή οποιαδήποτε άλλη συνάρτηση μη ενίσχυσης τάσης. Αν και είναι δυνατό να υλοποιηθούν αυτές οι συναρτήσεις με ενισχυτή μετρήσεων, υλοποιούνται κυρίως από τελεστικούς ενισχυτές.

Για να χρησιμοποιήσουμε ενισχυτή μετρήσεων, δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την εσωτερική του κατασκευή. Στο σχήμα 3.6.1, το διάγραμμα λειτουργίας βασικού ενισχυτή μετρήσεων παρέχει ικανοποιητική πληροφορία για πολλές εφαρμογές. Οι δύο είσοδοι επιτρέπουν άμεση σύνδεση με **επιπλέουσες** (floating) πηγές σήματος (δηλαδή, μη γειωμένες πηγές). Ο ενισχυτής μετρήσεων, όντας διαφορικός, ανιχνεύει μόνο τη διαφορά τάσης ανάμεσα στις εισόδους. Τα σήματα κοινού τρόπου, όπως ο θόρυβος και οι πτώσεις τάσης στις γραμμές γείωσης, αφαιρούνται και αναιρούνται στις εισόδους προτού ενισχυθούν. Απλώς αντιστάτης ή ζεύγος αντιστάσεων χρησιμοποιείται για να **ρυθμίσει** την ενίσχυση. Ο κατασκευαστής παρέχει στο χρήστη τη συνάρτηση μεταφοράς ή την εξίσωση ενίσχυσης, που του επιτρέπει, να υπολογίσει τις τιμές των αντιστάσεων για επιθυμητή ενίσχυση. Η έξοδος είναι απλή (**single-ended**) και σχεδιασμένη να οδηγεί φορτία με αναφορά στη γη, που είναι και τα πιο συνηθισμένα στα συστήματα μετρήσεων. Το σημείο αναφοράς του φορτίου είναι κοινό με την τάση τροφοδοσίας.

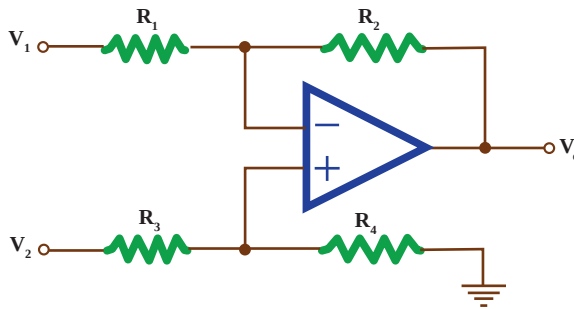
Οι ενισχυτές μετρήσεων τροφοδοτούνται, όπως και οι τελεστικοί ενισχυτές, από συμμετρική διαφορική τάση. Οι περισσότεροι ενισχυτές μετρήσεων παρέχουν μέσα για τη ρύθμιση της αντισταθμιστικής τάσης μετατόπισης εισόδου (input offset voltage). Αυτή η ρύθμιση γίνεται με τη βοήθεια εξωτερικού

ποτενσιόμετρο. Παρακάτω θα παρουσιαστούν ορισμένες βασικές κατηγορίες ενισχυτών μέτρησης και θα εξεταστούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα 3.6.1. Διάγραμμα λειτουργίας βασικού ενισχυτή μετρήσεων

- Ενισχυτής μέτρησης με ένα τελεστικό ενισχυτή



Σχήμα 3.6.2. Ενισχυτής μέτρησης με έναν Τ.Ε.

Ο πιο απλός ενισχυτής μέτρησης, που περιέχει ένα Τ.Ε. (ονομάζεται και ενισχυτής αφαίρεσης), φαίνεται στο σχήμα 3.6.2. Για ιδανικό Τ.Ε. η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot V_2 \quad (3.6.1)$$

και ο λόγος απόρριψης κοινού τρόπου είναι:

$$\text{CMRR} = \frac{A_d}{A_{cm}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_1 R_4 + R_2 R_3 + 2 R_2 R_4}{R_1 R_4 - R_2 R_3} \quad (3.6.2)$$

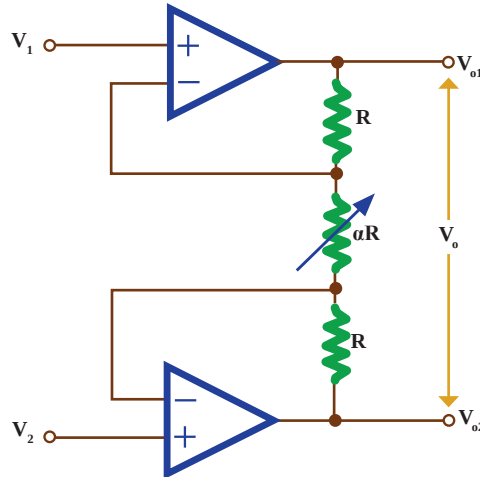
Από τη στιγμή, όμως, που επιθυμούμε να ενισχύσουμε τη διαφορά των σημάτων και όχι τα σήματα κοινού τρόπου, πρέπει να θέσουμε $A_{cm}=0$, που σημαίνει:

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} = k \quad (3.6.3)$$

Σύμφωνα με τη σχέση 3.6.2, Ο CMRR θα έπρεπε να γίνεται άπειρος. Στην πράξη, βέβαια, είναι πεπερασμένος, γιατί δεν είναι δυνατό πετύχουμε ακριβή ισότητα των λόγων της σχέσης 3.6.3. Ο CMRR ενισχυτή μέτρησης με ένα Τ.Ε. λαμβάνει τυπικές τιμές της τάξης του 10^4 . Η υλοποίηση ενός τέτοιου ενισχυτή είναι ιδιαίτερα οικονομική, χάρη στη χρήση ενός μόνο τελεστικού ενισχυτή αλλά η απόδοσή του είναι χαμηλή αφού, όπως είδαμε, είναι δύσκολο να επιτευχθεί η ακριβής ισότητα της σχέσης 3.6.3. Βελτίωση της απόδοσης του ενισχυτή μέτρησης με ένα Τ.Ε. επιτυγχάνεται με τη χρήση υψηλής απόδοσης διπολικών ενισχυτών, όπως ο AD 0P-07.

- **Ενισχυτής μέτρησης με δύο τελεστικούς ενισχυτές**

Η ανάλυση ενισχυτή μέτρησης με δύο τελεστικούς ενισχυτές (ή και με τρεις, όπως θα δούμε παρακάτω) παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, γιατί ένας τέτοιος ενισχυτής μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα και γρήγορα χρησιμοποιώντας φθηνά διακριτά στοιχεία. Η βασική δομή ενός τέτοιου ενισχυτή μέτρησης φαίνεται στο σχήμα 3.6.3.



Σχήμα 3.6.3. Ενισχυτής μέτρησης με δύο Τ.Ε.

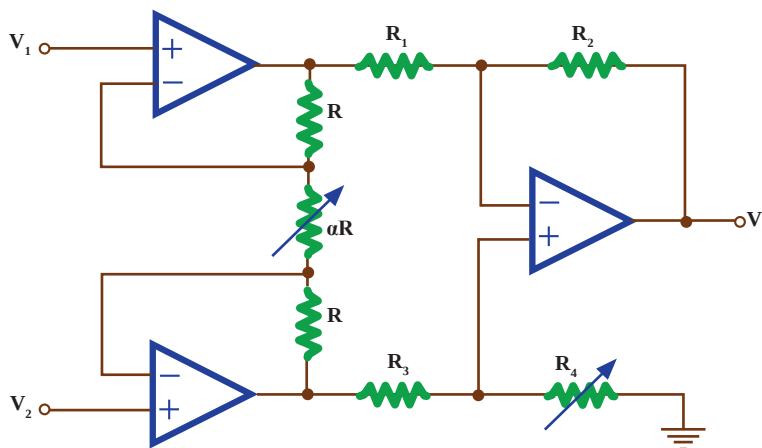
Ο ενισχυτής μέτρησης με ένα Τ.Ε. παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση εισόδου και δεν είναι εύκολο να ρυθμιστεί η ενίσχυσή του, αφού, όπως είδαμε, οι λόγοι των αντιστάσεων πρέπει να είναι ταιριασμένοι (matched). Ο ενισχυτής μέτρησης με δύο Τ.Ε. εξαλείφει τα μειονεκτήματα αυτά. Για να αντιμετωπίσει τη χαμηλή αντίσταση εισόδου, **απομονώνει** (buffers ή isolates) τις εισόδους με τη χρήση

ακολουθητών τάσης (voltage followers), που υλοποιούνται από τους δύο Τ.Ε. Βέβαια, ο ενισχυτής μέτρησης με δύο Τ.Ε. παρουσιάζει διαφορική έξοδο, που αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα. Το πρόβλημα της ρύθμισης της ενίσχυσης αντιμετωπίζεται με τη χρήση των τριών αντιστάσεων του σχήματος 3.6.3. Η αντίσταση αR ρυθμίζεται με ποτενσιόμετρο και, έτσι, ρυθμίζεται η ενίσχυση στην τιμή που επιθυμούμε. Η τάση εξόδου, όταν $V_1 > V_2$, δίνεται από την παρακάτω σχέση, όπου βλέπουμε την εξάρτηση από το α :

$$V_o = (V_1 - V_2) \cdot \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \quad (3.6.4)$$

• Ενισχυτής μέτρησης με τρεις τελεστικούς ενισχυτές

Το πρόβλημα της διαφορικής εξόδου του ενισχυτή μέτρησης με δύο Τ.Ε. αντιμετωπίζεται από τον ενισχυτή μέτρησης με τρεις Τ.Ε., που φαίνεται στο σχήμα 3.6.4. Αυτός είναι ένας από τους πιο χρήσιμους και ακριβείς ενισχυτές, που υπάρχουν σήμερα. Υπάρχει τουλάχιστον ένας σε κάθε σύστημα συλλογής δεδομένων. Αποτελείται από τρεις Τ.Ε. και επτά αντιστάσεις. Στην ουσία είναι ένας ενισχυτής μέτρησης με δύο Τ.Ε. συνδεδεμένος με ενισχυτή μέτρησης με ένα Τ.Ε. Σύμφωνα, λοιπόν, με τα προηγούμενα, πρέπει να ισχύει η σχέση 3.6.3 για τις αντιστάσεις R_1 , R_2 , R_3 και R_4 , ενώ η ενίσχυση ρυθμίζεται από την αντίσταση αR .



Σχήμα 3.6.4. Ενισχυτής μέτρησης με τρεις Τ.Ε.

Τελικά, λοιπόν, συνδυάζοντας τις προηγούμενες σχέσεις παίρνουμε:

$$V_o = k \cdot (V_1 - V_2) \cdot \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \quad (3.6.5)$$

Όπως έχουμε αναφέρει και στον ενισχυτή μέτρησης με ένα Τ.Ε., υπάρχει το πρόβλημα του σωστού ταιριάσματος των αντιστάσεων της δεύτερης βαθμίδας.

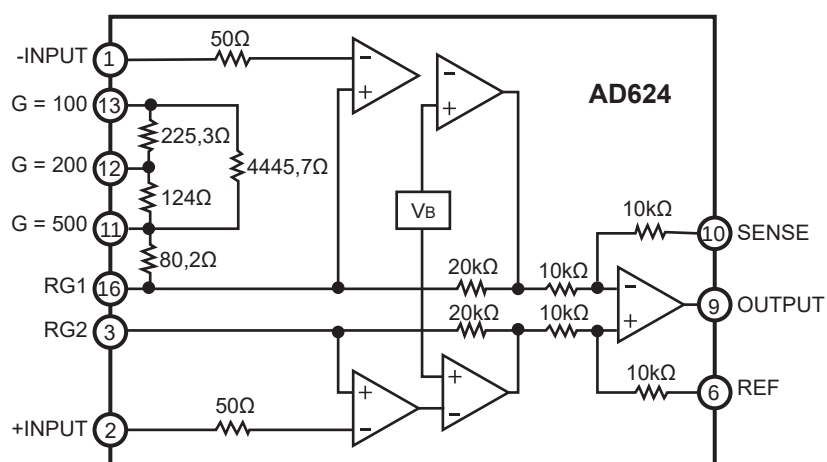
Για το λόγο αυτό, φροντίζουμε, συνήθως, να ρυθμίζουμε εξωτερικά τη μια αντίσταση, και συνήθως τη R_4 (σχήμα 3.6.4), για να πετύχουμε την ακριβή ισότητα στη σχέση 3.6.3.

Υπάρχουν πολλοί ολοκληρωμένοι ενισχυτές μετρήσεων, που βασίζονται στη δομή του σχήματος 3.6.4. Τέτοιοι είναι οι INA 101, INA 102, INA 104 και INA 110 της εταιρίας Burr-Brown και ο AD 522 της εταιρίας Analog Devices. Με αυτούς είναι εύκολο να πετύχουμε ένα CMRR της τάξης των 90dB, στα 60Hz με μοναδιαία διαφορική ενίσχυση. Μερικοί κατασκευαστές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων κατασκευάζουν ενισχυτές, που περιλαμβάνουν κύκλωμα αντιστάσεων, το οποίο μερικές φορές προγραμματίζεται ψηφιακά, παίζοντας, έτσι, το ρόλο της aR . Έτσι, μπορούμε να αλλάξουμε την ενίσχυση με ψηφιακό τρόπο. Αυτοί οι ενισχυτές ονομάζονται **ενισχυτές μετρήσεων προγραμματισμένης ενίσχυσης**.

- **Μονολιθικός ενισχυτής μέτρησης**

Οι τεχνικές μονολιθικής ολοκλήρωσης επιτρέπουν τη μείωση του κόστους παραγωγής διαφόρων κυκλωμάτων. Ένας από τους πρώτους μονολιθικούς ενισχυτές μετρήσεων ήταν ο AD 520 της εταιρίας Analog Devices. Αυτός έχει αντικατασταθεί από βελτιωμένους ενισχυτές, όπως ο AMP-01 της εταιρίας Precision Monolithics, οι AD524 και AD624 της Analog Devices και ο LM363 της National Semiconductors.

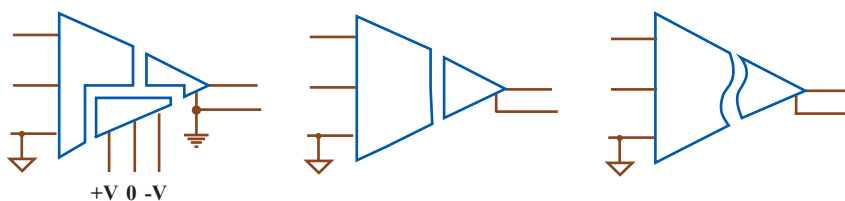
Στο σχήμα 3.6.5 φαίνεται ένα απλοποιημένο εσωτερικό διάγραμμα λειτουργίας του AD624 ενισχυτή μετρήσεων. Ο μαθητής ενθαρρύνεται να μελετήσει, σε συνεργασία με τον καθηγητή του, το φύλλο δεδομένων (data sheet) του AD624, που μπορεί να βρει στην ιστοσελίδα της εταιρίας Analog Devices. Έτσι, θα μπορέσει να διαπιστώσει και μόνος του τις βελτιώσεις του ενισχυτή αυτού έναντι του απλού ενισχυτή μετρήσεων με τρεις Τ.Ε. Ταυτόχρονα, θα μπορέσει να εμπεδώσει όλα τα χαρακτηριστικά ενός ενισχυτή, που ήδη έχουν αναφερθεί ή πρόκειται να αναφερθούν.



Σχ. 3.6.5. Εσωτερικό διάγραμμα λειτουργίας του AD 624 ενισχυτή μετρήσεων

• Ενισχυτής απομόνωσης

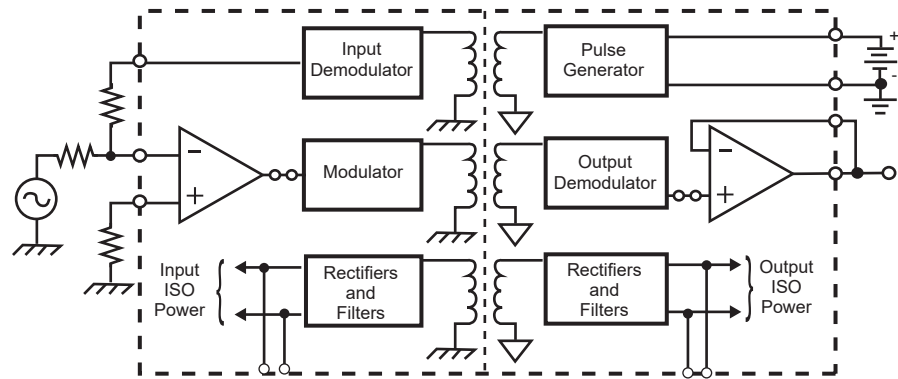
Πολλές φορές οι διαφορετικές συνθήκες, ανάμεσα σε διαφορετικά κυκλώματα μέτρησης της ίδιας εφαρμογής, προκαλούν την ανάπτυξη μεγάλων δυναμικών. Αυτό μπορεί να συμβεί, αν χρησιμοποιούμε συσκευές υψηλής τάσης, αν ένα αισθητήριο τροφοδοτηθεί με περισσότερο από 20V, ή αν υπάρξουν δύο σημεία γείωσης με διαφορά δυναμικού μερικές δεκάδες volts. Τα **μεγάλα δυναμικά** αντιμετωπίζονται ικανοποιητικά μόνο με ενισχυτές απομόνωσης (isolation amplifiers). Ο ενισχυτής απομόνωσης είναι ενισχυτής, που προσφέρει ωμική απομόνωση ανάμεσα στην είσοδο και στην έξοδο. Η απομόνωση αυτή πρέπει να έχει υψηλή αντίσταση και μικρή χωρητικότητα. Τυπικές τιμές είναι 10TΩ ($1\text{T}\Omega=10^{12}\Omega$) και 10pF. Στους ενισχυτές απομόνωσης υπάρχει ωμική ασυνέχεια ανάμεσα στη γείωση της εισόδου και στη γείωση της εξόδου. Επίσης, η γείωση της εισόδου είναι ανεξάρτητη από τη γείωση της τροφοδοσίας. Σε μερικές περιπτώσεις, μάλιστα, η γείωση της τροφοδοσίας είναι ανεξάρτητη από τη γείωση της εξόδου. Στο σχήμα 3.6.6 δίνονται ορισμένα σύμβολα, που χρησιμοποιούνται για τους ενισχυτές απομόνωσης.



Σχήμα 3.6.6. Διάφοροι συμβολισμοί για ενισχυτές απομόνωσης

Τα σήματα και η τάση τροφοδοσίας συνδέονται μέσω μετασχηματιστή στο εσωτερικό του ενισχυτή απομόνωσης. Τα σήματα αυτά μπορούν να συνδεθούν και με οπτικά ή χωρητικά μέσα, όπως φωτοζεύκτες και χωρητικότητες. Η ικανότητα απόρριψης σημάτων, που εμφανίζονται μεταξύ της γείωσης της εισόδου και των άλλων γειώσεων, μετριέται με το γνωστό μας λόγο απόρριψης κοινού τρόπου CMRR και το λόγο απόρριψης απομονώσιμου σήματος IMRR, που ορίζεται με παρόμοιο τρόπο με το CMRR.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι οι ενισχυτές απομόνωσης δεν είναι τελεστικοί ενισχυτές ούτε ενισχυτές μέτρησης. Είναι ενισχυτές, που η βαθμίδα εισόδου τους μπορεί να είναι ένας T.E. ή ενισχυτής μέτρησης με δύο ή τρεις T.E. Οι ενισχυτές απομόνωσης διατίθενται σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος. Συνήθως, δεν είναι συσκευές ακριβείας. Εντούτοις, όμως, χρησιμοποιούνται σε μεγάλης ακρίβειας διευθετήσεις σημάτων από αισθητήρια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενισχυτή απομόνωσης είναι ο 3656 της Burr Brown, που το διάγραμμα λειτουργίας του φαίνεται στο σχήμα 3.6.7. Στην ιστοσελίδα της εταιρίας Burr Brown, υπάρχει το πλήρες φύλλο δεδομένων του 3656 ενισχυτή απομόνωσης.



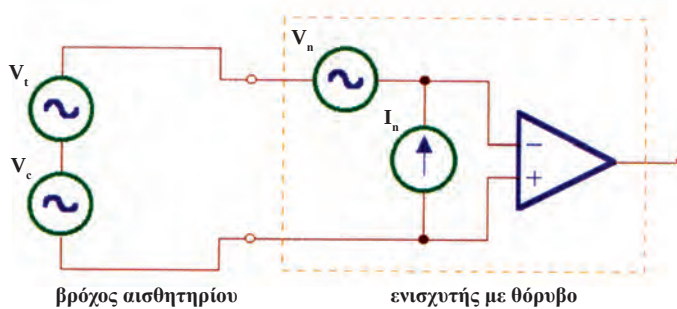
Σχήμα 3.6.7. Εσωτερικό διάγραμμα λειτουργίας του 3656 ενισχυτή απομόνωσης

3.7

Θόρυβος
Ενισχυτών

Η εφαρμογή ενισχυτή σε σύστημα διευθέτησης σήματος αισθητήρα απαιτεί την επίτευξη χαμηλού θορύβου, ειδικά στην περίπτωση ενίσχυσης σημάτων πολύ χαμηλής στάθμης. Ως θόρυβο μπορούμε να ορίσουμε την ενέργεια, η οποία, όταν προστίθεται σε κάποιο σήμα, **αλλοιώνει το πληροφοριακό περιεχόμενό του**. Η ποσότητα του θορύβου της εισόδου δεν πρέπει να υπερβαίνει κάποιο συγκεκριμένο πλάτος, το οποίο καθορίζεται από την ελάχιστη τιμή του πλάτους του σήματος εισόδου. Τα στοιχεία, που είναι υπεύθυνα για την παραγωγή του θορύβου, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Στοιχεία, που παρεμβάλλουν θόρυβο στον ενισχυτή, αλλά ανήκουν στο κύκλωμα του αισθητήρα.
- Στοιχεία ή μέρη εσωτερικά του ίδιου του ενισχυτή, τα οποία λειτουργούν ως πηγές θορύβου με αναφορά προς την είσοδό του, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7.1.



Σχήμα 3.7.1. Πηγές θορύβου σε ενισχυτή

Στο σχήμα 3.7.1, V_t είναι ο θερμικός θόρυβος, V_c ο θόρυβος επαφής, I_n το ρεύμα θορύβου ενισχυτή και V_n η τάση θορύβου ενισχυτή. Ο τυχαίος θόρυβος απεικονίζεται σα γεννήτρια τάσης.

Πολύ σημαντική κατηγορία θορύβου, που παρουσιάζεται σε όλα τα στοιχεία, που περιέχουν αντίσταση, είναι ο **θερμικός θόρυβος**. Ο θερμικός θόρυβος (thermal noise) V_t ορίζεται ως η ενεργός τιμή της τάσης, που αναπτύσσεται στα άκρα της κάθε αντίστασης, λόγω τυχαίας κίνησης των ηλεκτρονίων στην αντίσταση αυτή στην απόλυτη θερμοκρασία και περιγράφεται από τη σχέση:

$$V_t = \sqrt{4kTR_s} \quad \left(\text{Volt} / \sqrt{\text{Hz}} \right) \quad (3.7.1)$$

Είναι προφανές, ότι, για να μειωθεί ο θερμικός θόρυβος, είναι απαραίτητο να ελαχιστοποιηθεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος T και η αντίσταση της πηγής R_s . Η παραπάνω σχέση ονομάζεται και τύπος του **Johnson**.

Η ροή συνεχούς ρεύματος στο βρόχο του αισθητήρα έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση **θορύβου επαφής** ή θορύβου **Schottky**, όταν συναντάει εμπόδιο με τη μορφή σύνδεσης αγωγών ή επαφής p-n. Ο θόρυβος αυτός οφείλεται στη με-

ταβολή της αγωγιμότητας και έχει το μοναδικό χαρακτηριστικό, ότι μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με τη συχνότητα του σήματος f και ευθέως ανάλογα με το συνεχές ρεύμα I_{dc} . Αξίζει να σημειωθεί, ότι η ροή αυτής της διακύμανσης μέσα από την αντίσταση του βρόχου του αισθητηρίου, ο οποίος αντιμετωπίζεται ως πηγή, παράγει **τάση θορύβου επαφής**.

Οι κατασκευαστές των ενισχυτών μετρήσεων, προκειμένου να εντοπίσουν τις εσωτερικές πηγές θορύβου του ενισχυτή, θεωρούν πηγή θορύβου τάσης V_n και πηγή θορύβου έντασης ρεύματος I_n , όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7.1. Η ισοδύναμη **ενεργός τάση θορύβου με βραχυκυκλωμένη την είσοδο** (short-circuit input rms noise voltage) V_n είναι η τυχαία διαταραχή, που εμφανίζεται στην είσοδο αθόρυβου ενισχυτή, για να πιστοποιήσει, ότι οι ακροδέκτες εισόδου είναι βραχυκυκλωμένοι. Η ισοδύναμη **ενεργός τιμή ρεύματος θορύβου ανοικτού κυκλώματος** (open-circuit rms noise current) I_n είναι ο θόρυβος ο οποίος εμφανίζεται στην είσοδο αθόρυβου ενισχυτή και οφείλεται στα εσωτερικά ρεύματα θορύβου. Αυτό μπορεί να καταλήξει σε υπολογίσιμη διαταραχή στην είσοδο, όταν υπάρχουν στο κύκλωμα μεγάλες αντιστάσεις πηγής. Είναι αμελητέα για συσκευές τεχνολογίας FET.

Ορίζουμε ως **λόγο σήματος προς θόρυβο SNR** (signal-to-noise ratio) ενισχυτή το λόγο της ισχύος του σήματος στην είσοδο του ενισχυτή προς την ισχύ του θορύβου. Για την ποσοτική περιγραφή διάταξης από πλευράς θορύβου χρησιμοποιείται ο **δείκτης θορύβου NF** (noise figure). Ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ισχύος θορύβου στην έξοδο, προς την ισχύ θορύβου στην έξοδο, η οποία οφείλεται μόνο στο θερμικό θόρυβο της αντίστασης της πηγής του σήματος. Ο δείκτης θορύβου εκφράζεται σε decibels, είναι δε μηδέν, όταν η ενισχυτική διάταξη είναι απαλλαγμένη από θόρυβο. Εκφράζεται ως:

$$NF = 10 \cdot \log \frac{N_{po}}{G_p N_{pi}} \quad (3.7.2)$$

όπου N_{po} η ολική ισχύς θορύβου στην έξοδο, N_{pi} η ισχύς θορύβου στην είσοδο, η οποία οφείλεται στην αντίσταση της πηγής του σήματος και G_p η ενίσχυση ισχύος του σήματος. Θέτοντας $G_p = S_{po}/S_{pi}$, όπου S_{pi} και S_{po} η ισχύς του σήματος στην είσοδο και έξοδο αντίστοιχα, βρίσκουμε:

$$NF = 10 \cdot \log \frac{S_{pi} / N_{pi}}{S_{po} / N_{po}} \quad (3.7.3)$$

Άρα, ο δείκτης θορύβου δίνει σε dB το πηλίκο του λόγου σήματος προς θόρυβο στην είσοδο δια του λόγου σήματος προς θόρυβο στην έξοδο του ενισχυτή.

Ανακεφα- λαίωση

- Ο διαφορικός ενισχυτής είναι η πρώτη βαθμίδα τυπικού ενισχυτή μετρήσεων. Χαρακτηριστικά μεγέθη του είναι η διαφορική ενίσχυση, η ενίσχυση κοινού τρόπου και ο λόγος απόρριψης κοινού τρόπου CMRR. Ο καλός διαφορικός ενισχυτής δεν επιτρέπει στα σήματα, που είναι κοινά και στις δύο εισόδους του, όπως ο θόρυβος, να εμφανίζονται στην έξοδό του. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει ο CMRR, τόσο καλύτερος είναι ο ενισχυτής.
- Ο τελεστικός ενισχυτής αποτελείται από βαθμίδα εισόδου, υλοποιούμενη από διαφορικό ενισχυτή, ενδιάμεση βαθμίδα υψηλής ενίσχυσης και βαθμίδα ισχύος στην έξοδο. Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής παρουσιάζει άπειρη αντίσταση εισόδου, με αποτέλεσμα να μην εισέρχεται ρεύμα στην είσοδό του. Έτσι, οι δύο εισοδοί του βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό, με αποτέλεσμα στις περισσότερες εφαρμογές να εμφανίζεται εικονική γείωση στη μια είσοδο, όταν η άλλη βρίσκεται στην πραγματική γείωση. Για τη μεγιστοποίηση του εύρους ζώνης με ταυτόχρονη επίτευξη του επιθυμητού κέρδους τάσης, συνδέουμε πολλές βαθμίδες σε διαδοχή.
- Τα χαρακτηριστικά, που επηρεάζουν τη dc λειτουργία τελεστικού ενισχυτή, είναι τα ρεύματα πόλωσης εισόδου, το ρεύμα μετατόπισης εισόδου, η αντισταθμιστική τάση μετατόπισης εισόδου και οι ολισθήσεις τους. Τα χαρακτηριστικά, που επηρεάζουν την ac λειτουργία, είναι η απόκριση συχνότητας και ο ρυθμός μεταβολής σήματος εξόδου (slew rate).
- Βασικά κυκλώματα με τελεστικούς ενισχυτές, που χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση συστημάτων μετρήσεων, είναι ο αθροιστής, ο λογαριθμικός ενισχυτής, ο εκθετικός ενισχυτής, ο φωρατής κορυφής και ο συγκριτής.
- Οι ενισχυτές μετρήσεων είναι ενισχυτές υψηλών προδιαγραφών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή εμπέδηση εισόδου, μικρά ρεύματα πόλωσης και μετατόπισης, συμμετρικές διαφορικές εισόδους, υψηλή απόρριψη κοινού τρόπου, ελαχιστοποίηση θορύβου και υψηλή ευαισθησία. Σημαντικές κατηγορίες ενισχυτών μέτρησης είναι οι ενισχυτές με ένα T.E., οι ενισχυτές με δύο T.E., οι ενισχυτές με τρεις T.E., οι μονολιθικοί ενισχυτές και οι ενισχυτές απομόνωσης.
- Ο θόρυβος σε ένα ενισχυτή μπορεί να είναι εξωτερικός ή εσωτερικός. Σημαντικές κατηγορίες εξωτερικού θορύβου είναι ο θερμικός θόρυβος και ο θόρυβος επαφής. Για την ποσοτική περιγραφή μιας διάταξης από πλευράς θορύβου χρησιμοποιείται ο δείκτης θορύβου NF.

Αξιολόγηση • Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

1. Για να είναι καλός ένας διαφορικός ενισχυτής, πρέπει να χαρακτηρίζεται από:
 - α) πολύ μικρό CMRR
 - β) πολύ υψηλό CMRR
 - γ) μοναδιαίο CMRR
 - δ) χαμηλή διαφορική ενίσχυση και υψηλή ενίσχυση κοινού τρόπου
2. Στον τελεστικό ενισχυτή:
 - α) προηγείται η βαθμίδα υψηλής ενίσχυσης, ακολουθεί η βαθμίδα ισχύος και μετά η βαθμίδα του διαφορικού ενισχυτή
 - β) προηγείται η βαθμίδα ισχύος, ακολουθεί η βαθμίδα υψηλής ενίσχυσης και μετά η βαθμίδα του διαφορικού ενισχυτή
 - γ) προηγείται η βαθμίδα του διαφορικού ενισχυτή, ακολουθεί η βαθμίδα υψηλής ενίσχυσης και μετά η βαθμίδα ισχύος
 - δ) προηγείται η βαθμίδα υψηλής ενίσχυσης, ακολουθεί η βαθμίδα του διαφορικού ενισχυτή και μετά η βαθμίδα ισχύος
3. Ο βέλτιστος αριθμός όμοιων βαθμίδων σε διαδοχή για τη μεγιστοποίηση του εύρους ζώνης με ταυτόχρονη επίτευξη της επιθυμητής ενίσχυσης τάσης είναι:
 - α) όσο το δυνατό περισσότερες
 - β) μία
 - γ) δέκα
 - δ) δύο με τρεις

• Ερωτήσεις του τύπου Σωστό/Λάθος

1. Η αντισταθμιστική τάση μετατόπισης εισόδου εμφανίζεται στην έξοδο συμμετρικών κυκλωμάτων δύο εισόδων, όταν και οι δύο είσοδοι είναι σε δυναμικό μηδέν.
2. Η διαφορική ενίσχυση του διαφορικού ενισχυτή προσδιορίζεται, αν θεωρήσουμε ίδια σήματα στις εισόδους του.
3. Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής παρουσιάζει μηδενική αντίσταση εισόδου και άπειρη αντίσταση εξόδου.
4. Οι ενισχυτές μετρήσεων χαρακτηρίζονται από χαμηλή σταθερότητα και υψηλό θόρυβο.
5. Ο θερμικός θόρυβος και ο θόρυβος επαφής είναι εσωτερικοί θόρυβοι ενισχυτή.

• Ερωτήσεις αντιστοίχισης

1. Να αντιστοιχίσετε τα στοιχεία της πρώτης στήλης με αυτά της δεύτερης στήλης:

Συχνότητα αποκοπής	A_d
Διαφορική ενίσχυση	CMRR
Slew rate	SR
Ενίσχυση κοινού τρόπου	f_c
Συντελεστής απόρριψης κοινού τρόπου	A_{cm}

• **Ερωτήσεις συμπλήρωσης κενού**

1. Ο _____ θόρυβος ορίζεται ως η ενεργός τάση, που αναπτύσσεται στα άκρα της κάθε _____ λόγω _____ κίνησης των _____.
2. Ο _____ ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής _____ θορύβου στην έξοδο προς την _____ θορύβου στην έξοδο, που οφείλεται μόνο στο _____ θόρυβο της αντίστασης της πηγής του σήματος.

• **Ερωτήσεις ανοικτού τύπου**

1. Περιγράψτε τα βασικά χαρακτηριστικά του διαφορικού ενισχυτή.
2. Περιγράψτε τις βαθμίδες, από τις οποίες αποτελείται ο τελεστικός ενισχυτής.
3. Εξάγετε από βασικές εξισώσεις την ενίσχυση τάσης του αναστρέφοντος τελεστικού ενισχυτή. Τι είναι η εικονική γη;
4. Τι είναι το slew rate;
5. Τι είναι ο συγκριτής τάσης και που χρησιμοποιείται;
6. Ποια είναι τα χαρακτηριστικά των ενισχυτών μέτρησης;
7. Περιγράψτε δύο κατηγορίες ενισχυτών μέτρησης.

Ασκήσεις

- Έστω ένας τελεστικός ενισχυτής 741, που έχει $I_{B+}=0.4\mu A$ και $I_{B-}=0.3\mu A$. Να βρεθεί το μέσο ρεύμα πόλωσης I_B και το ρεύμα μετατόπισης εισόδου I_{os} .
(0.35μA, 0.1μA)
- Έστω το κύκλωμα του σχήματος 3.4.3. Να υπολογιστεί η αντίσταση αντιστάθμισης R , αν α) $R_f=100k\Omega$ και $R_i=10k\Omega$ και β) $R_f=100k\Omega$ και $R_i=100k\Omega$.
(9.1kΩ, 50kΩ)
- Ποια είναι η ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου T.E. σε συχνότητα 1kHz, αν παρουσιάζει συχνότητα μοναδιαίας ενίσχυσης 1,5MHz;
(1500)
- Η είσοδος αναστρέφοντος ενισχυτή μοναδιαίας ενίσχυσης μεταβάλλεται ακαριαία κατά 10V. Αν χρησιμοποιείται T.E. μΑ741 με slew rate 0.5V/μs, πόσο χρόνο θα χρειαστεί η τάση εξόδου, για να αλλάξει κατά 10V;
(20μs)
- Σχεδιάστε μη αναστρέφοντα αθροιστή δύο τάσεων V_1 και V_2 , που να εκτελεί την πράξη $V_o=V_1+V_2$.
($R_1=R_2$, $R_a=R_b$)
- Σχεδιάστε αναστρέφοντα αθροιστή τριών τάσεων V_1 , V_2 και V_3 , που να εκτελεί την πράξη $V_o=-(2V_1+3V_2+4V_3)$, αν $R_f=60k\Omega$.
($R_1=30k\Omega$, $R_2=20k\Omega$, $R_3=15k\Omega$)
- Να βρεθεί η τάση εξόδου ενισχυτή μέτρησης με δύο T.E., αν $R=9k\Omega$, $\alpha R=2k\Omega$, $V_1=10mV$ και $V_2=5mV$.
(50mV)
- Να υπολογιστεί η ενίσχυση τάσης του ενισχυτή του σχήματος 3.6.4 αν $\alpha=0.002$ και $k=1$.
(1001)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Διευθέτηση σημάτων

- Εισαγωγή
- Τύποι Φίλτρων
- Φίλτρα Χαμηλών Συχνοτήτων
- Παθητικά Φίλτρα
- Ενεργά Φίλτρα
- Φίλτρα Ζώνης
- Μετατροπείς Ρεύματος - Τάσης
- Γειώσεις - Θωράκιση - Τερματισμός

Σκοπός

Όταν ολοκληρώσεις το κεφάλαιο αυτό, θα μπορείς:

- Να κατονομάζεις τους διάφορους τύπους φίλτρων, να περιγράφεις τα βασικά μεγέθη που τα περιγράφουν και να επιλέγεις το σωστό τύπο φίλτρου ανάλογα με την εφαρμογή.
- Να σχεδιάζεις και να υπολογίζεις τις τιμές των στοιχείων ενός παθητικού φίλτρου.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις τους διάφορους τύπους ενεργών φίλτρων και να υπολογίζεις τις συναρτήσεις μεταφοράς τους.
- Να αναφέρεις και να περιγράφεις διάφορους μετατροπείς ρεύματος σε τάση και τάσης σε ρεύμα.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις διάφορες τεχνικές γείωσης, θωράκισης και τερματισμού.

Σ' ένα σύστημα μέτρησης το αισθητήριο αποτελεί το συνδετικό κρίκο του συστήματος με το περιβάλλον. Είναι αυτό, που «αφουγκράζεται» τις φυσικές και μη μεταβολές και στέλνει κάποιας μορφής σήμα προς επεξεργασία. Τις περισσότερες φορές, όμως, το σήμα αυτό περιέχει διάφορες συνιστώσες, όπως θόρυβο και παρεμβολές, που δεν επιτρέπουν ή καθιστούν δύσκολη την ανάλυση των δεδομένων, που περιέχει. Επίσης, πολλές φορές η μορφή του σήματος απαιτεί μεγάλο κόστος επεξεργασίας. Για τους λόγους αυτούς, χρησιμοποιούνται φίλτρα, πριν ή μετά από τους ενισχυτές μετρήσεων, ώστε να λαμβάνονται μόνο οι κατάλληλες συχνότητες, τεχνικές γειώσεων και θωράκισης σε όλο το μήκος του αγωγού καθώς και τεχνικές τερματισμού γραμμών. Τέλος, χρησιμοποιούνται μέθοδοι διευθέτησης αναλογικών και ψηφιακών σημάτων, ώστε το σήμα να μετατραπεί σε μορφή της επιλογής μας.

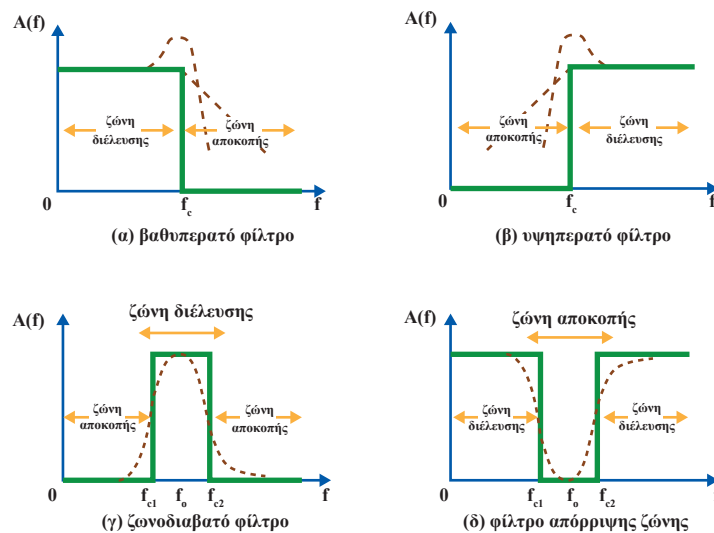
4.1

Εισαγωγή

4.2 Τύποι Φίλτρων

Το **φίλτρο** είναι ένα κύκλωμα σχεδιασμένο να επιτρέπει τη διέλευση μιας συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων και να εξασθενεί όλα τα άλλα σήματα, που βρίσκονται έξω από αυτή τη ζώνη. Τα φίλτρα βρίσκονται στο εσωτερικό ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές από κυκλώματα audio μέχρι συστήματα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος. Τα φίλτρα μπορεί να είναι είτε ενεργά, είτε παθητικά. Τα **παθητικά φίλτρα** (passive filters) περιέχουν μόνο αντιστάσεις, πηνία και πυκνωτές. Τα **ενεργά φίλτρα** (active filters) αποτελούνται από τρανζίστορ ή τελεστικούς ενισχυτές μαζί με αντιστάσεις, πηνία και πυκνωτές. Τα πηνία, συνήθως, δεν χρησιμοποιούνται στα ενεργά φίλτρα, επειδή είναι ογκώδη, ακριβά και έχουν μεγάλες εσωτερικές αντιστάσεις.

Υπάρχουν τέσσερις τύποι φίλτρων: βαθυπερατά (lowpass), υψηπερατά (highpass), ζωνοδιαβατά (bandpass) και απόρριψης ζώνης (bandreject ή bandelimination ή notch) φίλτρα. Στο σχήμα 4.2.1 φαίνονται οι αποκρίσεις μέτρου $A(f)$ των παραπάνω φίλτρων σε σχέση με τη συχνότητα.



Σχήμα 4.2.1. Απόκριση μέτρου των τεσσάρων κατηγοριών φίλτρων

Τα **βαθυπερατά φίλτρα** (ή φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων) είναι κυκλώματα, που παρουσιάζουν σταθερή τάση εξόδου από το dc ως τη **συχνότητα αποκοπής** f_c (cutoff frequency). Καθώς η συχνότητα αυξάνει πάνω από τη f_c , η τάση εξόδου εξασθενεί (μειώνεται). Στο σχήμα 4.2.1(α), η συνεχής γραμμή παριστάνει το ιδανικό βαθυπερατό φίλτρο, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές τις καμπύλες των πρακτικών βαθυπερατών φίλτρων. Η ζώνη των συχνοτήτων, που διέρχεται χωρίς εξασθένιση, είναι γνωστή ως **ζώνη διέλευσης** (passband). Η ζώνη συχνοτήτων, που εξασθενείται, είναι γνωστή ως **ζώνη αποκοπής** (stopband). Η συχνότητα αποκοπής ονομάζεται, επίσης, 0.707 συχνότητα, -3dB συχνότητα ή οριακή συχνότητα (break frequency).

Τα **υψηπερατά φίλτρα** εξασθενούν τη τάση εξόδου για όλες τις συχνότητες κάτω από τη συχνότητα αποκοπής. Πάνω από τη f_c η τάση εξόδου είναι σταθερή. Στο σχήμα 4.2.1 (β), η συνεχής γραμμή παριστάνει το ιδανικό υψηπερατό φίλτρο, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές τις καμπύλες των πρακτικών υψηπερατών φίλτρων.

Τα **ζωνοδιαβατά φίλτρα** επιτρέπουν τη διέλευση μόνο μιας ζώνης συχνοτήτων, ενώ εξασθενούν όλες τις άλλες συχνότητες έξω από αυτή τη ζώνη. Στο σχήμα 4.2.1 (γ), η συνεχής γραμμή παριστάνει το ιδανικό ζωνοδιαβατό φίλτρο, ενώ η διακεκομμένη γραμμή την καμπύλη του πρακτικού ζωνοδιαβατού φίλτρου. Το φίλτρο παρουσιάζει μέγιστη ενίσχυση στην **κεντρική συχνότητα** f_o . Στην κατώτερη συχνότητα αποκοπής f_{c1} και στην ανώτερη συχνότητα αποκοπής f_{c2} η ενίσχυση πέφτει στο 0.707 της μέγιστης τιμής της. Η ζώνη συχνοτήτων μεταξύ f_{c1} και f_{c2} ονομάζεται **εύρος ζώνης B** (bandwidth):

$$B = f_{c2} - f_{c1} \quad (4.2.1)$$

Αν είναι γνωστή η κατώτερη και η ανώτερη συχνότητα αποκοπής, τότε η κεντρική συχνότητα δίνεται από τη σχέση:

$$f_o = \sqrt{f_{c1} \cdot f_{c2}} \quad (4.2.2)$$

Αν είναι γνωστή η κεντρική συχνότητα f_o και το εύρος ζώνης B, τότε οι συχνότητες αποκοπής δίνονται από τις σχέσεις:

$$f_{c1} = \sqrt{\frac{B^2}{4} + f_o^2} - \frac{B}{2} \quad f_{c2} = \sqrt{\frac{B^2}{4} + f_o^2} + \frac{B}{2} \quad (4.2.3)$$

Ο **παράγοντας ποιότητας Q** ορίζεται ως ο λόγος της κεντρικής συχνότητας προς το εύρος ζώνης του φίλτρου:

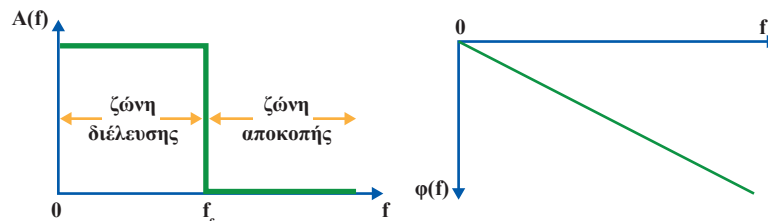
$$Q = \frac{f_o}{B} \quad (4.2.4)$$

Ο παράγοντας Q είναι δείκτης **επιλεκτικότητας** (selectivity) ζωνοδιαβατού φίλτρου. Υψηλός παράγοντας Q δηλώνει, ότι το φίλτρο επιλέγει μικρότερη ζώνη συχνοτήτων. Ένα φίλτρο ευρείας ζώνης (wideband) έχει εύρος ζώνης δύο και περισσότερες φορές μεγαλύτερο από την κεντρική συχνότητα. Αυτό σημαίνει ότι $Q \leq 0.5$. Γενικά, τέτοια φίλτρα κατασκευάζονται θέτοντας σε διαδοχή ένα βαθυπερατό και ένα υψηπερατό φίλτρο. Ένα φίλτρο στενής ζώνης (narrowband) κατασκευάζεται, συνήθως, με απλή βαθμίδα και παρουσιάζει $Q > 0.5$.

Τα **φίλτρα απόρριψης ζώνης** λειτουργούν με τον αντίθετο ακριβώς τρόπο. Δηλαδή, απορρίπτουν μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων, ενώ επιτρέπουν τη διέλευση όλων των άλλων συχνοτήτων έξω από αυτή τη ζώνη. Στο σχήμα 4.2.1 (δ), η συνεχής γραμμή παριστάνει το ιδανικό φίλτρο απόρριψης ζώνης, ενώ η διακεκομμένη γραμμή την καμπύλη του πρακτικού φίλτρου.

4.3 Φίλτρα Χαμηλών Συχνοτήτων

Τα φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων χρησιμεύουν στον περιορισμό του εύρους ζώνης των μετρουμένων σημάτων, ώστε να καθίσταται δυνατή η λήψη των προεπιλεγμένων χαμηλών συχνοτήτων. Το ιδανικό βαθυπερατό φίλτρο, το οποίο προσπαθούμε να προσεγγίσουμε όσο το δυνατό περισσότερο, φαίνεται στο σχήμα 4.3.1., όπου $A(f)$ είναι η **απόκριση μέτρου** και $\varphi(f)$ η **απόκριση φάσης** του φίλτρου αυτού. Υπενθυμίζεται ότι η απόκριση φάσης ενός φίλτρου παριστάνει τη φάση σε σχέση με τη συχνότητα. Το ιδανικό βαθυπερατό φίλτρο πετυχαίνει απόλυτη αποκοπή των ανεπιθύμητων συχνοτήτων χωρίς μεταβολή του φάσματος ή πρόσθεση σφαλμάτων στη ζώνη διέλευσης. Όμως, είναι αδύνατο να υλοποιηθεί στην ιδανική του μορφή, αλλά κάθε φορά το προσεγγίζουμε σε κάποιο βαθμό τελειότητας, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τους διατιθέμενους οικονομικούς πόρους. Ο λόγος για τον οποίο είναι ανέφικτη η υλοποίηση του τέλει φίλτρου, είναι, ότι αυτά παριστάνονται από συντελεστές πολυωνύμων, που δεν μπορούν να απεικονίσουν την ασυνέχεια της αποκοπής, δηλαδή δεν μπορούν να υλοποιήσουν την κάθετη πτώση του φάσματος στη συχνότητα αποκοπής f_c .



Σχήμα 4.3.1. Απόκριση μέτρου και φάσης ιδανικού βαθυπερατού φίλτρου

Η **συνάρτηση μεταφοράς** ενός φίλτρου ορίζεται ως το πηλίκο της τάσης εξόδου προς τη τάση εισόδου και είναι της μορφής:

$$H(s) = K \cdot \frac{N(s)}{D(s)} \quad (4.3.1)$$

όπου, K πραγματικός αριθμός, που ονομάζεται **σταθερά ενίσχυσης**, $N(s)$ το πολυώνυμο του αριθμητή, του οποίου οι ρίζες ονομάζονται **μηδενισμοί** της συνάρτησης, $D(s)$ το πολυώνυμο του παρανομαστή, του οποίου οι ρίζες ονομάζονται **πόλοι** της συνάρτησης και s μιγαδική ποσότητα εξαρτώμενη από τη συχνότητα. Γνωρίζοντας τους πόλους και τους μηδενισμούς μπορούμε να ορίσουμε πλήρως τη συνάρτηση μεταφοράς ενός φίλτρου. Υπάρχουν πολλοί τύποι φίλτρων με περισσότερο διαδεδομένα, τα φίλτρα Butterworth, Chebyshev και Bessel. Τα φίλτρα αυτά έχουν συναρτήσεις μεταφοράς, που αποτελούνται μόνο από πόλους και γι' αυτό ονομάζονται φίλτρα **μόνο πόλων**.

- **Φίλτρα Butterworth**

Η απόκριση μέτρου ενός φίλτρου Butterworth είναι:

$$A(f) = \frac{K}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}}} \quad (4.3.2)$$

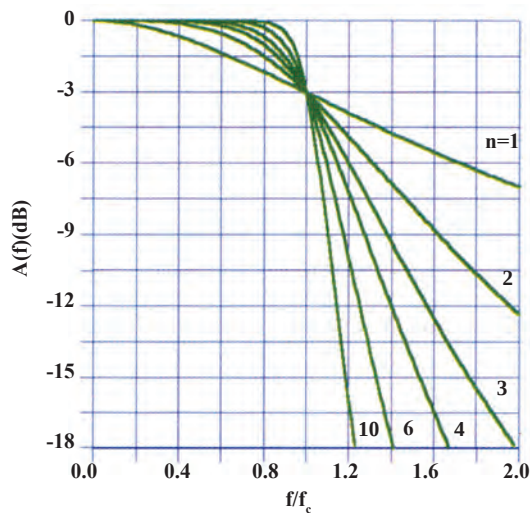
όπου, ε μια σταθερά και n ο βαθμός του πολυωνύμου, που φανερώνει και το πλήθος των πόλων του φίλτρου. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός φίλτρου Butterworth για $K=1$ είναι:

$$H(s) = \frac{1}{s^n + b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \dots + b_1s + b_0} \quad (4.3.3)$$

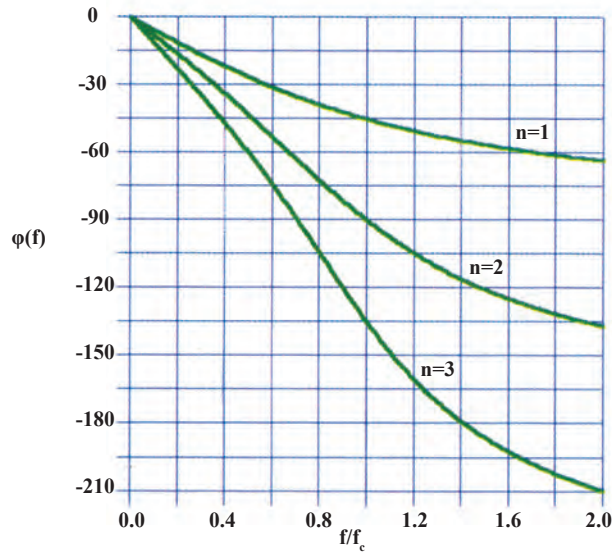
όπου, $b_i, i=0,1,\dots,n-1$ οι συντελεστές του πολυωνύμου Butterworth, οι οποίοι φαίνονται στον πίνακα 4.3.1. Στα σχήματα 4.3.2 και 4.3.3 φαίνονται οι αποκρίσεις μέτρου και φάσης, αντίστοιχα, των φίλτρων Butterworth για διάφορα n .

n	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇
1	1.000							
2	1.000	1.414						
3	1.000	2.000	2.000					
4	1.000	2.613	3.414	2.613				
5	1.000	3.236	5.236	5.236	3.236			
6	1.000	3.864	7.464	9.141	7.464	3.864		
7	1.000	4.494	10.098	14.592	14.592	10.098	4.494	
8	1.000	5.126	13.137	21.846	25.688	21.846	13.137	5.126

Πίνακας 4.3.1. Συντελεστές πολυωνύμων Butterworth



Σχήμα 4.3.2. Απόκριση μέτρου βαθυπερατού φίλτρου Butterworth



Σχήμα 4.3.3. Απόκριση φάσης βαθυπερατού φίλτρου Butterworth

Τα βαθυπερατά φίλτρα Butterworth χαρακτηρίζονται από **επίπεδη** (flat) απόκριση μέτρου στην περιοχή διέλευσης, που εκτείνεται προς την περιοχή της συχνότητας αποκοπής f_c , καθώς το n αυξάνει. Επίσης, η μείωση του πλάτους των συνιστωσών υψηλών συχνοτήτων του σήματος αυξάνει σημαντικά με την αύξηση της τάξης του φίλτρου δίνοντας παράλληλα και μία ελαφρά μη γραμμική απόκριση φάσης.

- **Φίλτρα Chebyshev ή φίλτρα ίσης κυμάτωσης**

Στο φίλτρο Chebyshev η απόκριση μέτρου διατηρεί μέγιστη τιμή σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων διέλευσης, παρουσιάζει **κυμάτωση** (ripple) ίσου ύψους στη ζώνη διέλευσης και μέγιστο ρυθμό πτώσης πέρα από τη συχνότητα αποκοπής. Η απόκριση μέτρου δίνεται από τη σχέση (για $K=1$):

$$A(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2\left(\frac{f}{f_c}\right)}} \quad (4.3.4)$$

όπου, ε μια σταθερά και $C_n(f/f_c)$ τα πολυώνυμα Chebyshev. Τα πολυώνυμα αυτά φαίνονται στον πίνακα 4.3.2 για διάφορες τιμές του n . Το ύψος της κυμάτωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = 10 \cdot \log(1 + \varepsilon^2) \quad (\text{dB}) \quad (4.3.5)$$

n	$C_n(f/f_c)$
0	1
1	(f/f_c)
2	$2(f/f_c)^2 - 1$
3	$4(f/f_c)^3 - 3(f/f_c)$
4	$8(f/f_c)^4 - 8(f/f_c)^2 + 1$
5	$16(f/f_c)^5 - 20(f/f_c)^3 + 5(f/f_c)$
6	$32(f/f_c)^6 - 48(f/f_c)^4 + 18(f/f_c)^2 - 1$
7	$64(f/f_c)^7 - 112(f/f_c)^5 + 56(f/f_c)^3 - 7(f/f_c)$
8	$128(f/f_c)^8 - 256(f/f_c)^6 + 160(f/f_c)^4 - 32(f/f_c)^2 + 1$

Πίνακας 4.3.2. Πολυώνυμα Chebyshev

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός φίλτρου Chebyshev μπορεί να παρασταθεί με την ίδια μορφή, που παριστάνεται και η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου Butterworth, σύμφωνα με τη σχέση 4.3.3. Ο πίνακας 4.3.3 παρουσιάζει τους συντελεστές των πολυωνύμων Chebyshev για διάφορες κυματώσεις.

n	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
1	6.552							
2	3.313	2.372						
3	1.638	2.623	1.939					
4	0.829	2.026	2.627	1.804				
5	0.450	1.436	2.397	2.771	1.744			
6	0.207	0.902	2.048	2.779	2.966	1.712		
7	0.102	0.562	1.483	2.705	3.169	3.184	1.693	
8	0.052	0.326	1.067	2.159	3.419	3.565	3.413	1.681

(α) κυμάτωση 0.1 dB

n	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
1	2.863							
2	1.516	1.426						
3	0.716	1.535	1.253					
4	0.379	1.025	1.717	1.197				
5	0.179	0.753	1.310	1.937	1.172			
6	0.095	0.432	1.172	1.590	2.171	1.159		
7	0.043	0.282	0.756	1.648	1.869	2.413	1.151	
8	0.024	0.153	0.574	1.149	2.184	2.149	2.657	1.146

(β) κυμάτωση 0.5dB

n	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇
1	1.965							
2	1.103	1.098						
3	0.491	1.238	0.988					
4	0.276	0.743	1.454	0.953				
5	0.123	0.581	0.974	1.689	0.937			
6	0.069	0.307	0.939	1.202	1.931	0.928		
7	0.031	0.214	0.549	1.358	1.429	2.176	0.923	
8	0.017	0.107	0.448	0.847	1.837	1.655	2.423	0.920

(γ) κυμάτωση 1dB

n	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇
1	1.308							
2	0.823	0.804						
3	0.327	1.022	0.738					
4	0.206	0.517	1.257	0.716				
5	0.082	0.459	0.693	1.450	0.706			
6	0.051	0.210	0.771	0.867	1.746	0.701		
7	0.020	0.166	0.383	1.144	1.039	1.993	0.698	
8	0.013	0.073	0.360	0.598	1.580	1.212	2.242	0.696

(δ) κυμάτωση 2dB

n	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇
1	1.002							
2	0.708	0.645						
3	0.251	0.928	0.597					
4	0.177	0.405	1.169	0.582				
5	0.063	0.408	0.549	1.415	0.574			
6	0.044	0.163	0.699	0.691	1.663	0.571		
7	0.016	0.146	0.300	1.052	0.831	1.912	0.568	
8	0.011	0.056	0.321	0.472	1.467	0.972	2.161	0.567

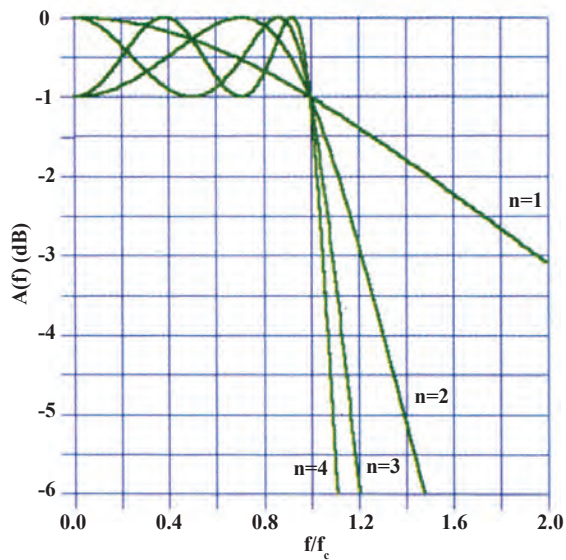
(ε) κυμάτωση 3dB

Πίνακας 4.3.3. Συντελεστές πολυωνύμων Chebyshev

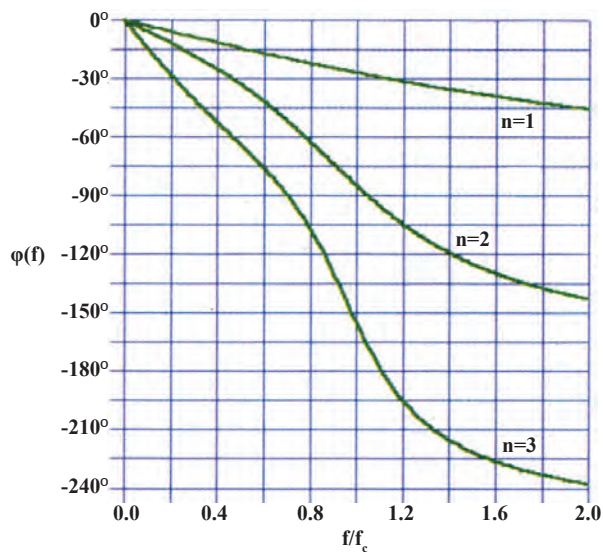
Στα σχήματα 4.3.4 και 4.3.5 φαίνονται οι αποκρίσεις μέτρου και φάσης, αντίστοιχα, των φίλτρων Chebyshev για διάφορα n και για κυμάτωση 1dB. Από τις σχέσεις 4.3.4 και 4.3.5 παρατηρούμε ότι:

- Αυξάνοντας το ε, για συγκεκριμένη τιμή του n, αυξάνει ο ρυθμός της εξασθένησης στη ζώνη μετάβασης και κατά συνέπεια η απόδοση της ζώνης αποκοπής. Από την άλλη, προκαλείται μεγαλύτερη κυμάτωση στη ζώνη διέλευσης.

- Αυξάνοντας τη τάξη του φίλτρου n , για σταθερή τιμή του ϵ , βελτιώνεται η απόδοση της ζώνης αποκοπής χωρίς μεγάλη κυμάτωση, αλλά με κόστος πολυπλοκότητας.



Σχήμα 4.3.4. Απόκριση μέτρου βαθυπερατού φίλτρου Chebyshev με 1dB κυμάτωση



Σχήμα 4.3.5. Απόκριση φάσης βαθυπερατού φίλτρου Chebyshev με 1dB κυμάτωση

Συγκρίνοντας τις δύο οικογένειες φίλτρων, που εξετάσαμε μέχρι τώρα, για δεδομένη τάξη n , προκύπτει, ότι το βαθυπερατό φίλτρο Chebyshev παρέχει

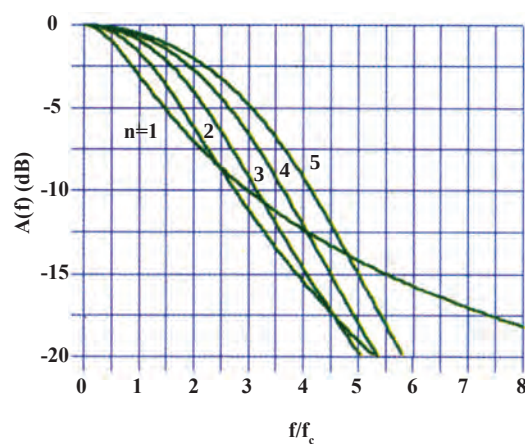
καλύτερη προσέγγιση του ιδανικού φίλτρου στη συχνότητα αποκοπής και στη ζώνη αποκοπής, μολονότι υστερεί στην ομαλότητα της ζώνης διέλευσης έναντι του βαθυπερατού φίλτρου Butterworth.

- **Φίλτρα Bessel**

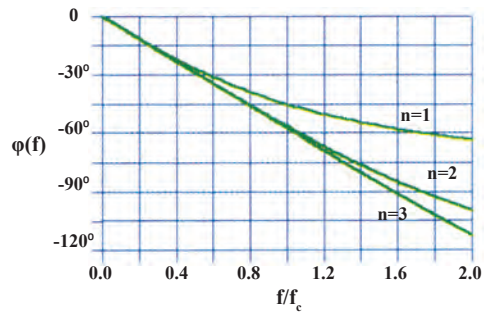
Μια τρίτη κατηγορία φίλτρων, που χαρακτηρίζεται **από γραμμική καθυστέρηση φάσης**, που εκτείνεται από το συνεχές μέχρι και μετά τη συχνότητα αποκοπής ως συνάρτηση της τάξης του φίλτρου, είναι τα βαθυπερατά φίλτρα Bessel. Τα φίλτρα Bessel χρησιμοποιούνται για χρονικές καθυστερήσεις, για φιλτράρισμα σημάτων μετρήσεων παλμικού τύπου (μετατροπής τάσης-συχνότητας) και σε φίλτρα εξομάλυνσης. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός φίλτρου Bessel μπορεί να παρασταθεί με την ίδια μορφή, που παριστάνεται και η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου Butterworth, σύμφωνα με τη σχέση 4.3.3, θέτοντας $K=b_0$. Ο πίνακας 4.3.4 παρουσιάζει τους συντελεστές των πολυωνύμων Bessel. Στα σχήματα 4.3.6 και 4.3.7 φαίνονται οι αποκρίσεις μέτρου και φάσης, αντίστοιχα, των φίλτρων Bessel για διάφορα n .

n	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
1	1				
2	3	3			
3	15	15	6		
4	105	105	45	10	
5	945	945	420	105	15

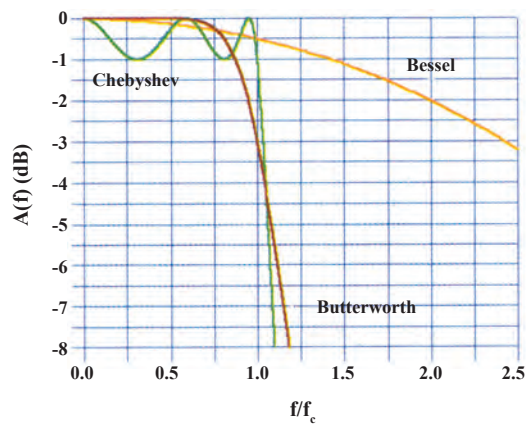
Πίνακας 4.3.4. Συντελεστές πολυωνύμων Bessel



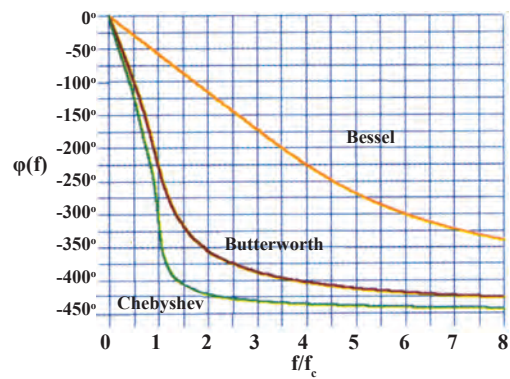
Σχήμα 4.3.6. Απόκριση μέτρου βαθυπερατού φίλτρου Bessel



Σχήμα 4.3.7. Απόκριση φάσης βαθυπερατού φίλτρου Bessel



Σχήμα 4.3.8. Απόκριση μέτρου βαθυπερατών φίλτρων Butterworth, Chebyshev (με 1dB κυμάτωση) και Bessel πέμπτης τάξης



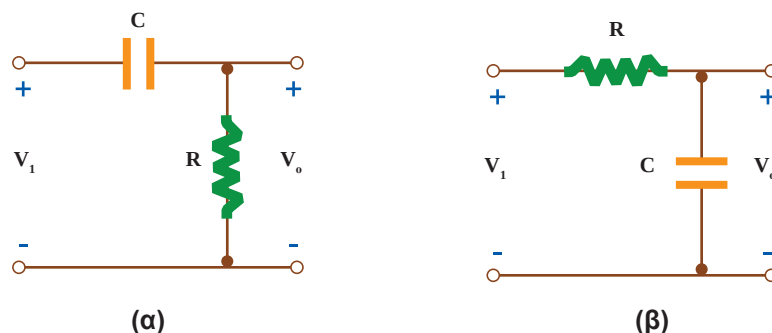
Σχήμα 4.3.9. Απόκριση φάσης βαθυπερατών φίλτρων Butterworth, Chebyshev (με 1dB κυμάτωση) και Bessel πέμπτης τάξης

Στα σχήματα 4.3.8 και 4.3.9 απεικονίζονται συγκριτικά οι αποκρίσεις μέτρου και φάσης, αντίστοιχα, των βαθυπερατών φίλτρων Butterworth, Chebyshev (με κυμάτωση 1 dB) και Bessel πέμπτης τάξης.

4.4

Παθητικά
Φίλτρα

Η πιο παλιά τεχνολογία για την υλοποίηση των φίλτρων χρησιμοποιεί διακριτά στοιχεία όπως, αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία και τα κυκλώματα, που προκύπτουν, ονομάζονται **παθητικά φίλτρα**. Αυτά τα φίλτρα δουλεύουν ικανοποιητικά στις υψηλές συχνότητες, ωστόσο στις εφαρμογές χαμηλών συχνοτήτων (100kHz) τα απαιτούμενα πηνία είναι ογκώδη και ακριβά, ενώ τα χαρακτηριστικά τους είναι εντελώς μη ιδανικά. Επίσης, τέτοια πηνία είναι αδύνατο να κατασκευαστούν σε μονολιθική μορφή και δεν είναι συμβατά με τις νέες τεχνικές κατασκευής ηλεκτρονικών συστημάτων. Για τους λόγους αυτούς υπάρχει ενδιαφέρον για την εύρεση δομών υλοποίησης φίλτρων, που δεν απαιτούν πηνία. Τέτοια φίλτρα είναι τα ενεργά φίλτρα, που θα γνωρίσουμε παρακάτω.



Σχήμα 4.4.1. Κυκλώματα (α) διαφορίσης και (β) ολοκλήρωσης με παθητικά στοιχεία

Βασικά κυκλώματα για την υλοποίηση των φίλτρων είναι τα κυκλώματα **διαφορίσης** και **ολοκλήρωσης**. Στο σχήμα 4.4.1 φαίνεται, πως υλοποιούνται τα κυκλώματα αυτά με παθητικά στοιχεία. Το κύκλωμα διαφορίσης επιτρέπει τη διέλευση των υψηλών συχνοτήτων, οπότε είναι ουσιαστικά υψηπερατό φίλτρο πρώτης τάξης, με συνάρτηση μεταφοράς:

$$H(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{s}{s + \frac{1}{RC}} \quad (4.4.1)$$

Η απόκριση μέτρου του είναι:

$$A(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (4.4.2)$$

όπου, $f_c = 1/2\pi RC$ η συχνότητα αποκοπής. Η ενίσχυση στη ζώνη διέλευσης είναι μοναδιαία. Η απόκριση χρόνου του διαφοριστή είναι (αν δεχθούμε $V_i(t) \gg V_o(t)$):

$$V_o(t) = RC \frac{dV_i(t)}{dt} \quad (4.4.3)$$

Αντίστοιχα, το κύκλωμα ολοκλήρωσης είναι ουσιαστικά βαθυπερατό φίλτρο πρώτης τάξης, με συνάρτηση μεταφοράς:

$$H(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (4.4.4)$$

Η απόκριση μέτρου του είναι:

$$A(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \quad (4.4.5)$$

όπου, $f_c = 1/2\pi RC$ η συχνότητα αποκοπής. Η ενίσχυση στη ζώνη διέλευσης είναι μοναδιαία. Η απόκριση χρόνου του ολοκληρωτή, αν δεχθούμε $V_i(t) > V_o(t)$, είναι:

$$V_o(t) = \frac{1}{RC} \int V_i(t) dt + V_o(0) \quad (4.4.6)$$

Αν ως απόκριση θεωρήσουμε το ρεύμα κάποιου πυκνωτή, στα άκρα του οποίου εφαρμόζεται ως διέγερση τάση, ισχύει:

$$i = C \frac{dV}{dt} \quad (4.4.7)$$

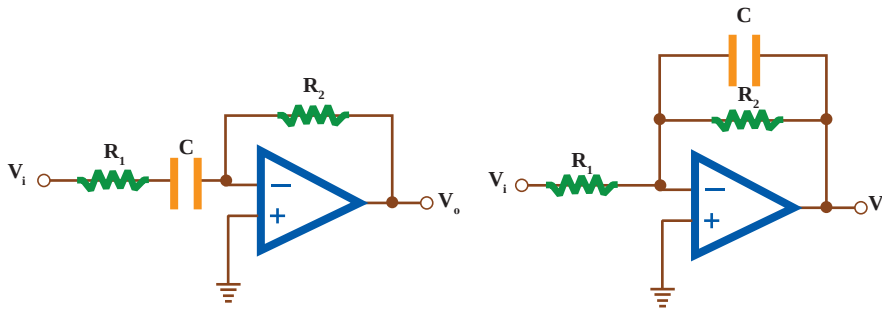
Δηλαδή, ο πυκνωτής δρα ως **ιδανικός διαφοριστής** της τάσης στα άκρα του. Αντίστοιχα, το πηνίο δρα ως **ιδανικός ολοκληρωτής** της τάσης στα άκρα του και ισχύει:

$$i = \frac{1}{L} \int V dt \quad (4.4.8)$$

Η υλοποίηση των κυκλωμάτων διαφορίσης και ολοκλήρωσης με τελεστικούς ενισχυτές φαίνεται στο σχήμα 4.4.2. Η συνάρτηση μεταφοράς του διαφοριστή αυτού του σχήματος είναι:

$$H(s) = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{s}{s + \frac{1}{R_1 C}} \quad (4.4.9)$$

Η συχνότητα αποκοπής του είναι $f_c = 1/2\pi R_1 C$ και η ενίσχυση στη ζώνη διέλευσης $-R_2/R_1$.



Σχήμα 4.4.2. Κυκλώματα (α) διαφόρισης και (β) ολοκλήρωσης με τελεστικούς ενισχυτές

Η συνάρτηση μεταφοράς του παραπάνω ολοκληρωτή είναι:

$$H(s) = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + sR_2C} \quad (4.4.10)$$

Η συχνότητα αποκοπής του είναι $f_c = 1/2\pi R_2C$ και η ενίσχυση στη ζώνη διέλευσης $-R_2/R_1$.

Για την υλοποίηση των παθητικών φίλτρων, υπάρχουν έτοιμοι πίνακες στη βιβλιογραφία, που δίνουν τις τιμές των στοιχείων, που απαιτούνται για την υλοποίηση του φίλτρου σε κανονικοποιημένη μορφή. Οι πίνακες 4.4.1 και 4.4.2 παρουσιάζουν τις κανονικοποιημένες τιμές στοιχείων για υλοποίηση ορισμένων φίλτρων Butterworth και Chebyshev αντίστοιχα.

Για την **αποκανονικοποίηση** των τιμών των στοιχείων χρειαζόμαστε την επιθυμητή συχνότητα αποκοπής του φίλτρου f_c και τη στάθμη εμπέδησης R_o . Υπενθυμίζεται, ότι η στάθμη εμπέδησης αναφέρεται στην αντίσταση τερματισμού, που τη θεωρούμε μονάδα, αλλά πρακτικά φανερώνει τη τάξη μεγέθους των αντιστάσεων, που χρησιμοποιούμε στο φίλτρο. Αν R_n , C_n και L_n είναι οι κανονικοποιημένες τιμές των στοιχείων, η αποκανονικοποίηση γίνεται ως εξής:

$$R \rightarrow R_n \cdot R_o \quad C \rightarrow \frac{C_n}{2\pi f_c \cdot R_o} \quad L \rightarrow \frac{L_n \cdot R_o}{2\pi f_c} \quad (4.4.11)$$

n	L_1	C_2	L_3	C_4	L_5	C_6	L_7	C_8
2	1.414	1.414						
3	1.000	2.000	1.000					
4	0.765	1.848	1.848	0.765				
5	0.618	1.618	2.000	0.618	0.618			
6	0.518	1.414	1.932	1.932	1.414	0.518		
7	0.445	1.247	1.802	2.000	1.802	1.247	0.445	
8	0.390	1.111	1.663	1.962	1.962	1.663	1.111	0.390

Πίνακας 4.4.1. Κανονικοποιημένα παθητικά φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων Butterworth

n	L_1	C_2	L_3	C_4	L_5	C_6	L_7
3	1.433	1.594	1.433				
5	1.301	1.556	2.241	1.556	1.301		
7	1.262	1.520	2.239	1.680	2.239	1.520	1.262

(α) κυμάτωση 0.1 db

3	1.864	1.280	1.864				
5	1.807	1.302	2.691	1.302	1.807		
7	1.790	1.296	2.718	1.382	2.718	1.296	1.790

(β) κυμάτωση 0.5 db

3	2.216	1.088	2.216				
5	2.207	1.128	3.102	1.128	2.207		
7	2.204	1.131	3.147	1.194	3.147	1.131	2.204

(γ) κυμάτωση 1 db

3	2.800	0.860	2.800				
5	2.864	0.909	3.827	0.909	2.864		
7	2.882	0.917	3.901	0.959	3.901	0.917	2.882

(δ) κυμάτωση 2 db

3	3.350	0.712	3.350				
5	3.482	0.762	4.538	0.762	3.482		
7	3.519	0.772	4.639	0.804	4.639	0.772	3.519

(ε) κυμάτωση 3 db

Πίνακας 4.4.2. Κανονικοποιημένα παθητικά φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων Chebyshev

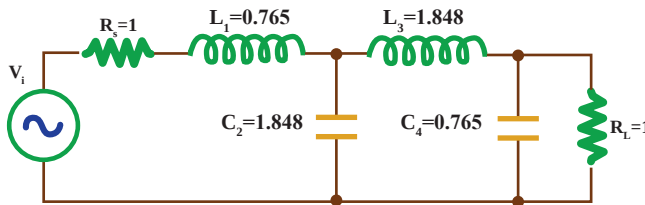
Ας δούμε, όμως, ένα παράδειγμα υπολογισμού των αποκανονικοποιημένων τιμών των στοιχείων ενός φίλτρου.

• Παράδειγμα

Να σχεδιαστεί βαθυπερατό φίλτρο Butterworth τέταρτης τάξης, με χρήση παθητικών στοιχείων, με συχνότητα αποκοπής 2kHz και στάθμη εμπέδησης 5kΩ.

Λύση:

Από τον πίνακα 4.4.1 βρίσκουμε, ότι το επιθυμητό φίλτρο έχει την κανονικοποιημένη μορφή του σχήματος 4.4.3



Σχήμα 4.4.3. Κανονικοποιημένο βαθυπερατό φίλτρο Butterworth τέταρτης τάξης

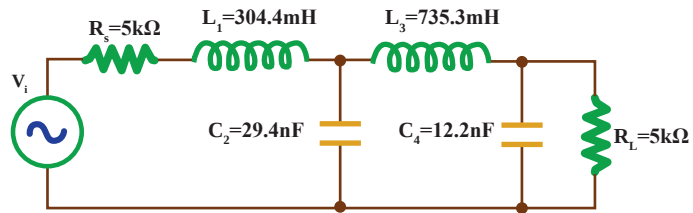
Για την αποκανονικοποίηση εφαρμόζουμε τις σχέσεις 4.4.11 και παίρνουμε:

$$L_1 = \frac{0.765 \cdot 5\text{k}\Omega}{2\pi \cdot 2\text{kHz}} = 304.4\text{mH} \quad C_2 = \frac{1.848}{2\pi \cdot 2\text{kHz} \cdot 5\text{k}\Omega} = 29.4\text{nF}$$

$$L_3 = \frac{1.848 \cdot 5\text{k}\Omega}{2\pi \cdot 2\text{kHz}} = 735.3\text{mH} \quad C_4 = \frac{0.765}{2\pi \cdot 2\text{kHz} \cdot 5\text{k}\Omega} = 12.2\text{nF}$$

$$R_s = R_L = 1 \cdot 5\text{k}\Omega = 5\text{k}\Omega$$

Το αποκανονικοποιημένο φίλτρο φαίνεται στο σχήμα 4.4.4.



Σχήμα 4.4.4. Αποκανονικοποιημένο βαθυπερατό φίλτρο Butterworth τέταρτης τάξης

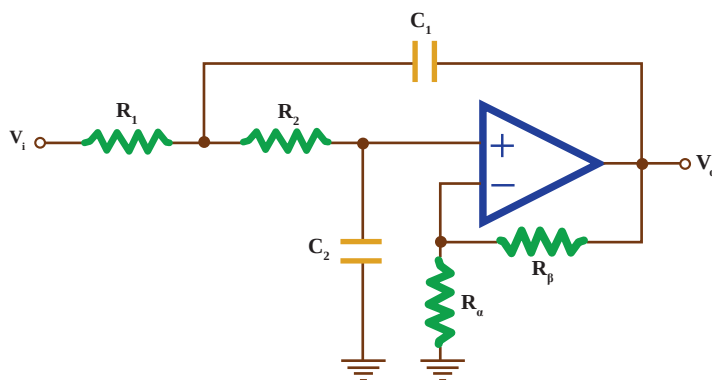
4.5 Ενεργά Φίλτρα

Ενεργά φίλτρα (active filters) είναι τα φίλτρα, που ενισχύουν το διερχόμενο σήμα, σε αντίθεση με τα παθητικά, που όχι μόνο δεν το ενισχύουν, αλλά πολλές φορές το εξασθενούν. Έχουν το πλεονέκτημα της απομόνωσης μεταξύ των διαφόρων βαθμίδων λόγω της υψηλής εμπέδησης εισόδου και χαμηλής εμπέδησης εξόδου του τελεστικού ενισχυτή. Η τάξη του φίλτρου καθορίζεται από τον αριθμό των πυκνωτών στην είσοδο και το βρόχο ανατροφοδότησης του ενισχυτή. Υπάρχουν τρεις βασικοί σχεδιασμοί ενεργών φίλτρων, που παρουσιάζουν χαμηλή ευαισθησία στις μεταβολές των εξαρτημάτων κατασκευής τους.

Η **ευαισθησία**, σε ένα κύκλωμα, αντιπροσωπεύει τις μεταβολές της εξόδου σε μεταβολές θερμοκρασίας των τιμών των εξαρτημάτων και γενικά οποιωνδήποτε παραγόντων, που μπορούν να επηρεάσουν το κύκλωμα. Για παράδειγμα, η μεταβολή της τιμής ενός παθητικού στοιχείου προκαλεί μεταβολή του παράγοντα Q και, κατά συνέπεια, της απόδοσης του κυκλώματος. Οι βασικές κατηγορίες ενεργών φίλτρων είναι:

- **Φίλτρα μοναδιαίας ενίσχυσης**

Τα φίλτρα μοναδιαίας ενίσχυσης (unity-gain filters) προσφέρουν εξαιρετική απόδοση ως βαθυπερατά και υψηπερατά φίλτρα και μπορούν να συνδεθούν σε διαδοχή για το σχηματισμό φίλτρων υψηλότερης τάξης. Στο σχήμα 4.5.1 φαίνεται ένα τυπικό φίλτρο μοναδιαίας ενίσχυσης. Τα φίλτρα αυτά είναι τα πιο διαδομένα ενεργά φίλτρα και παρουσιάζουν πολύ μικρές ευαισθησίες ως προς τα παθητικά στοιχεία. Παρουσιάζουν, όμως, υψηλή ευαισθησία ενίσχυσης σε υλοποιήσεις, που απαιτούν ενίσχυση μεγαλύτερη της μονάδας, με αποτέλεσμα να μην προτιμούνται σε αυτές τις περιπτώσεις.

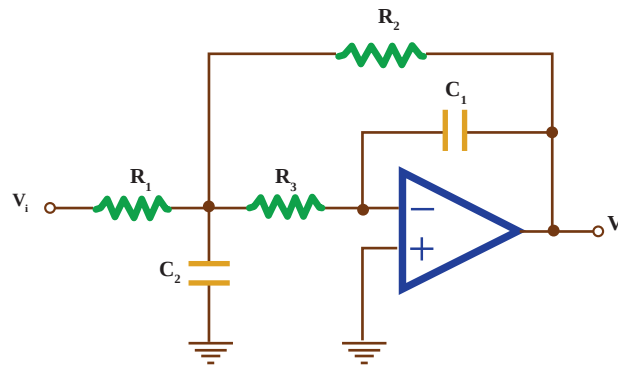


Σχήμα 4.5.1. Βαθυπερατό φίλτρο δεύτερης τάξης (φίλτρο Sallen-Key)

- **Φίλτρα πολλαπλής ανατροφοδότησης**

Τα φίλτρα πολλαπλής ανατροφοδότησης (multiple feedback filters), μαζί με τα φίλτρα μοναδιαίας ενίσχυσης, επιτυγχάνουν παράγοντες Q της τάξης του 10 και έχουν ιδιαίτερη αξία στην υλοποίηση βαθυπερατών και υψηπερατών φίλτρων. Ταυτόχρονα, το βασικότερο πλεονέκτημα των κυκλωμάτων

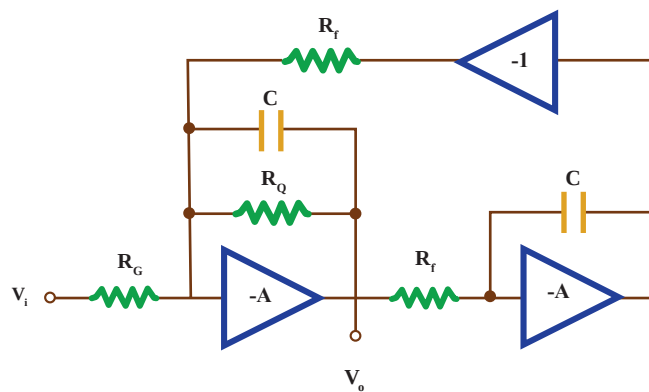
πολλαπλής ανατροφοδότησης είναι ότι μπορούν να σχηματίσουν ζωνοδιαβατά φίλτρα με ένα και μόνο τελεστικό ενισχυτή. Στο σχήμα 4.5.2 φαίνεται ένα τυπικό φίλτρο πολλαπλής ανατροφοδότησης.



Σχήμα 4.5.2. Βαθυπερατό φίλτρο δεύτερης τάξης

- **Biquad συντονιστές**

Οι biquad συντονιστές (biquad resonators) παρέχουν χαμηλή ευαισθησία και παράγοντες Q της τάξης του 200. Χρησιμοποιούνται σε ζωνοδιαβατά συστήματα υψηλού Q . Το υψηλό Q , όμως, δεν εξασφαλίζει σταθερότητα στα φίλτρα αυτά. Αυτή εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα επαρκούς ενίσχυσης βρόχου ενισχυτή στην κεντρική συχνότητα. Στο σχήμα 4.5.3 φαίνεται ένα τυπικό biquad φίλτρο.

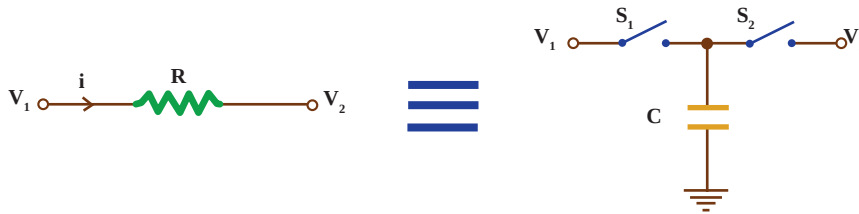


Σχήμα 4.5.3. Biquad φίλτρο

Πρόσφατη τεχνική, που κάνει χρήση της τεχνολογίας MOS, κατέστησε δυνατή την πραγματοποίηση ενεργών φίλτρων μοναδιαίας ενίσχυσης σε ολοκληρωμένο κύκλωμα, χωρίς την ανάγκη χρήσης εξωτερικών εξαρτημάτων.

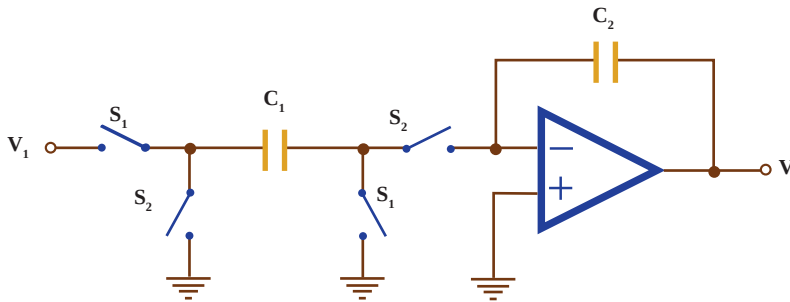
Πυκνωτές MOS μικρής χωρητικότητας και διακόπτες MOS χρησιμοποιούνται σε κύκλωμα **διακοπτόμενου πυκνωτή** (switched-capacitor filters) για την εξομοίωση αντιστατών μεγάλης αντίστασης, υπό τον έλεγχο ενός πολυφασικού ρολογιού. Η **συχνότητα λειτουργίας** f_c του πυκνωτή καθορίζει τη φόρτισή του σε τάση V_1 και την εκφόρτισή του σε τάση V_2 . Κατά συνέπεια, το μέσο ρεύμα i , από V_1 σε V_2 , καθορίζει ισοδύναμη αντίσταση R , όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.5.4. Η αντίσταση αυτή ορίζεται ως:

$$R = \frac{V_1 - V_2}{i} = \frac{1}{C \cdot f_c} \quad (4.5.1)$$



Σχήμα 4.5.4. Ισοδυναμία αντιστάτη με διακοπτόμενο πυκνωτή

Η συχνότητα λειτουργίας f_c είναι συνήθως πολύ υψηλότερη από τις συχνότητες του σήματος, ώστε ο χρόνος δειγματοληψίας του σήματος να μπορεί να παραβλεφθεί σε πιο απλοποιημένη ανάλυση. Σε τελική ανάλυση, η ακρίβεια του φίλτρου καθορίζεται από τη σταθερότητα της συχνότητας f_c και την ακρίβεια της υλοποίησης των συντελεστών των MOS πυκνωτών. Στο σχήμα 4.5.5 φαίνεται ένας τυπικός μη αναστρέφων ολοκληρωτής με διακοπτόμενους πυκνωτές.



Σχήμα 4.5.5. Μη αναστρέφων ολοκληρωτής με διακοπτόμενους πυκνωτές

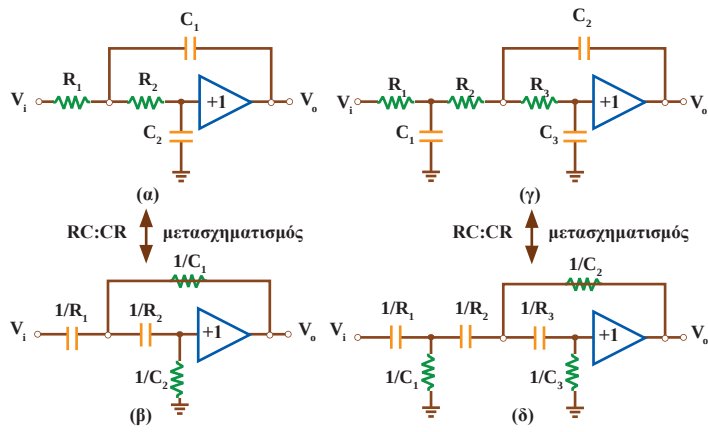
Η πιο σημαντική παράμετρος στην επιλογή τελεστικού ενισχυτή για ενεργά φίλτρα είναι η **ενίσχυση ανοικτού βρόχου** (openloop gain). Ο λόγος της ενίσχυσης ανοικτού βρόχου προς την ενίσχυση κλειστού βρόχου πρέπει να είναι της τάξης του 100 ή και μεγαλύτερος, για σταθερή απόδοση στις υψηλές συχνότητες. Αυτός ο περιορισμός είναι κρίσιμος στην υλοποίηση ζωνοδιαβατών φίλτρων, ώστε να είναι σίγουρο, ότι η υλοποίηση ακολουθεί τους υπολογισμούς της σχεδίασης. Όσον αφορά τη χρήση αντιστατών στα ενεργά φίλτρα, προτείνονται οι **αντιστάσεις μεταλλικού φιλμ** με θερμοκρασιακό συντελεστή 50ppm/°C. Οι αντιστάσεις άνθρακα πρέπει να αποφεύγονται, εκτός και αν ο ρόλος τους δεν είναι κρίσιμος.

Η επιλογή πυκνωτή είναι πιο δύσκολη λόγω των πολλών παραγόντων, που αλληλεπιδρούν. Στις περισσότερες εφαρμογές προτείνονται πυκνωτές πολυστερίνης λόγω του αξιόπιστου θερμοκρασιακού συντελεστή τους (-120ppm/°C). Για πυκνωτές πάνω από 0.1μF διατίθενται **πολυκαρβονικοί πυκνωτές** στο 1μF, με θερμοκρασιακό συντελεστή ±50ppm/°C. Οι **πυκνωτές μίκας** είναι πιο σταθεροί, με θερμοκρασιακό συντελεστή ±50ppm/°C, αλλά με χωρητικότητες από 100pF έως 5000pF.

Η επιλογή των ανοχών των αντιστατών και των πυκνωτών καθορίζει την ακρίβεια της υλοποίησης του φίλτρου και ιδιαίτερα της συχνότητας αποκοπής και της ομαλότητας της ζώνης διέλευσης. Το κόστος, συνήθως, υπαγορεύει επιλογή αντιστάσεων με ανοχή 1% και ανοχή πυκνωτών 2-5%. Σε κρίσιμες εφαρμογές, δηλαδή εφαρμογές υψηλού Q, πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για περαιτέρω ρυθμίσεις.

Ολοκληρώνοντας την περιγραφή των ενεργών φίλτρων, συνοψίζουμε σύντομα τα απαραίτητα βήματα για το σχεδιασμό βαθυπερατών και υψηπερατών φίλτρων μοναδιαίας ενίσχυσης, όπως αυτά που φαίνονται στο σχήμα 4.5.6. Πρώτα, επιλέγουμε την κατάλληλη προσέγγιση του φίλτρου, που δίνει την επιθυμητή απόκριση, με βάση τις χαρακτηριστικές των φίλτρων, που αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Έπειτα, επιλέγουμε το καταλληλότερο φίλτρο για την εφαρμογή από αυτά του σχήματος 4.5.6 και αποκανονικοποιούμε τις τιμές των στοιχείων του στις κατάλληλες συχνότητες και στάθμες εμπίεσης. Τέλος, υλοποιούμε το φίλτρο επιλέγοντας αντιστάσεις και πυκνωτές με όσο το δυνατόν μικρότερες ανοχές.

Στο σχήμα 4.5.6, αναφέρεται ο **μετασχηματισμός RC:CR**. Με τη βοήθεια του μετασχηματισμού αυτού εύκολα προκύπτει υψηπερατό φίλτρο από βαθυπερατό και το αντίστροφο. Αυτό γίνεται, αν αντικαταστήσουμε τις αντιστάσεις τιμής R με πυκνωτές τιμής 1/R και τους πυκνωτές τιμής C με αντιστάσεις τιμής 1/C.



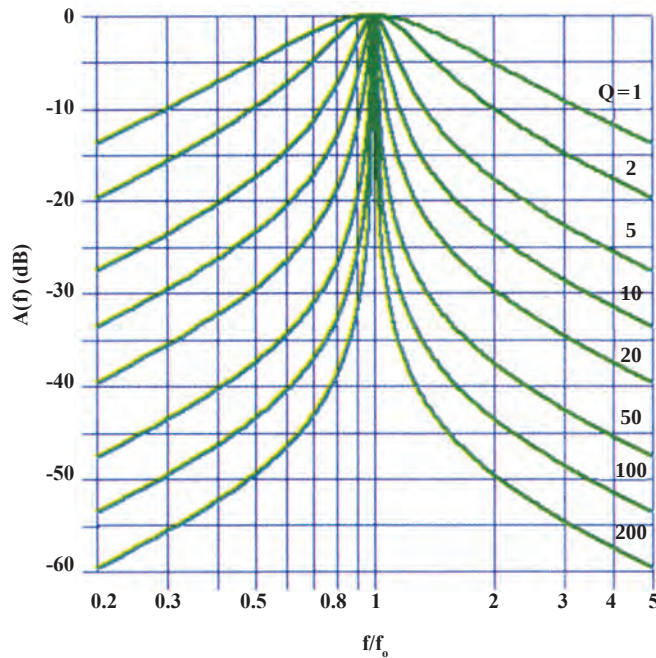
Σχήμα 4.5.6. Βαθυπερατά και υψηπερατά φίλτρα μοναδιαίας ενίσχυσης με δύο και τρεις πόλους, συνδεδεμένα με τον $RC:CR$ μετασχηματισμό

4.6 Φίλτρα Ζώνης

Τα φίλτρα ζώνης ή **ζωνοδιαβατά** φίλτρα επιτρέπουν, όπως είδαμε, τη διέλευση ζώνης συχνοτήτων με εύρος B και κεντρική συχνότητα f_o , ενώ εξασθενούν όλες τις άλλες συχνότητες. Η συνάρτηση μεταφοράς ζωνοδιαβατού φίλτρου είναι της μορφής:

$$H(s) = K \cdot \frac{\frac{2\pi f_o}{Q} \cdot s}{s^2 + \frac{2\pi f_o}{Q} \cdot s + (2\pi f_o)^2} \quad (4.6.1)$$

όπου Q ο παράγοντας ποιότητας του φίλτρου. Η απόκριση μέτρου ζωνοδιαβατού φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 4.6.1 (για $K=1$). Για όλες τις τιμές του Q , παρουσιάζεται μείωση πλάτους -12dB/octave , μια οκτάβα πάνω και μια οκτάβα κάτω από την κεντρική συχνότητα f_o . Υπενθυμίζεται, ότι ως **οκτάβα** ορίζεται το διάστημα για το διπλασιασμό της συχνότητας. Μεγαλύτερες εξασθενήσεις μπορούν να επιτευχθούν συνδέοντας σε διαδοχή τέτοια φίλτρα. Η απόκριση φάσης ζωνοδιαβατού φίλτρου είναι ισοδύναμη με την απόκριση υπερπαρατού και βαθυπαρατού συνδεδεμένα σε διαδοχή. Αυτή η φάση έχει κλίση, της οποίας η μεταβολή είναι μονοτονική και έχει τιμή μηδέν στην κεντρική συχνότητα.

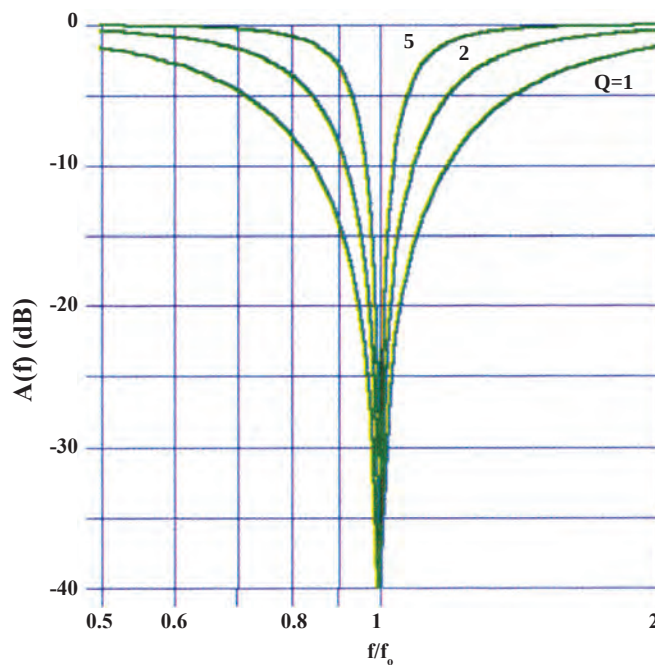


Σχήμα 4.6.1. Απόκριση μέτρου ζωνοδιαβατού φίλτρου

Εκτός από το ζωνοδιαβατό φίλτρο, χρησιμοποιείται ευρέως και το φίλτρο **απόρριψης ζώνης** (bandreject ή band-elimination ή notch filter), το οποίο επιτρέπει τη διέλευση όλων των συχνοτήτων εκτός από αυτές, που βρίσκονται γύρω από την κεντρική συχνότητα. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός τέτοιου φίλτρου είναι της μορφής:

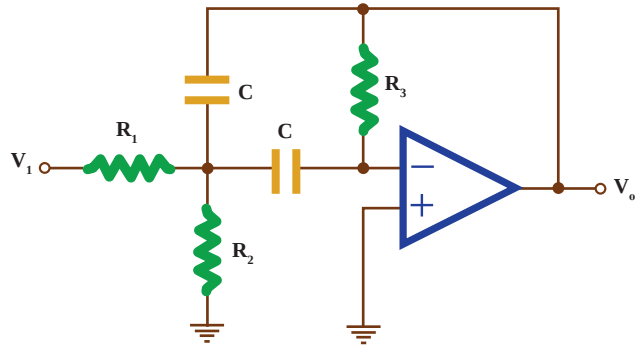
$$H(s) = K \cdot \frac{s^2 + (2\pi f_o)^2}{s^2 + \frac{2\pi f_o}{Q} \cdot s + (2\pi f_o)^2} \quad (4.6.2)$$

Η απόκριση μέτρου ενός φίλτρου απόρριψης ζώνης φαίνεται στο σχήμα 4.6.2 (για $K=1$). Η απόκριση φάσης έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτή του ζωνοδιαβατού φίλτρου.



Σχήμα 4.6.2. Απόκριση μέτρου φίλτρου απόρριψης ζώνης

Στη συνέχεια εξετάζουμε ορισμένα χαρακτηριστικά φίλτρα, που αποτελούν εφαρμογές ή και ειδικές περιπτώσεις των παραπάνω. Στο σχήμα 4.6.3 φαίνεται ένα **ζωνοδιαβατό φίλτρο πολλαπλής ανατροφοδότησης**.



Σχήμα 4.6.3. Ζωνοδιαβατό φίλτρο πολλαπλής ανατροφοδότησης

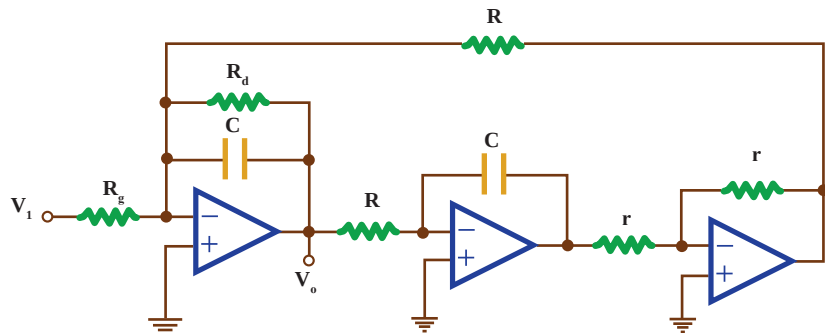
Οι τιμές των στοιχείων του παραπάνω φίλτρου δίνονται από τις σχέσεις:

$$R_1 = \frac{Q}{2\pi f_o C} \quad R_2 = \frac{R_1}{2Q^2 - 1} \quad R_3 = 2R_1 \quad (4.6.3)$$

Η τιμή του πυκνωτή C επιλέγεται, συνήθως, με το σκεπτικό, ότι οι τιμές των αντιστάσεων πρέπει να έχουν λογικές τιμές και ανοχή 1%. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το κύκλωμα αυτό παρέχει αντιστροφή σήματος.

Για υψηλότερο παράγοντα Q προτείνεται το **biquad ζωνοδιαβατό φίλτρο** του σχήματος 4.6.4 (Tow-Thomas biquad). Παρά το γεγονός ότι απαιτεί τρεις τελεστικούς ενισχυτές, παρέχει τη δυνατότητα **ανεξάρτητης ρύθμισης** της κεντρικής συχνότητας f_o , του παράγοντα Q και της ενίσχυσης K . Οι τιμές των στοιχείων του φίλτρου αυτού σχετίζονται ως εξής:

$$C = \frac{1}{2\pi f_o R} \quad R_d = Q \cdot R \quad R_g = \frac{R_d}{K} \quad (4.6.4)$$



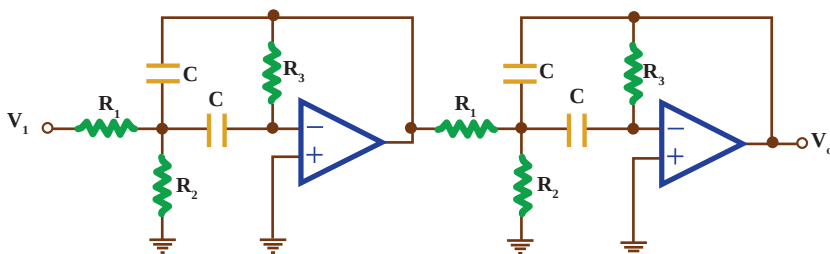
Σχήμα 4.6.4. Biquad ζωνοδιαβατό φίλτρο

Ο πίνακας 4.6.1 δείχνει τις τιμές των στοιχείων του φίλτρου του παραπάνω σχήματος για διάφορα f_o , Q , K και για $R=10k\Omega$. Οι τιμές των αντιστάσεων r είναι αυθαίρετες, αλλά ίδιες μεταξύ τους.

f_o (Hz)	Q	K	C (nF)	R_d (M Ω)	R_g (k Ω)
10	10	$Q/100$	1600	0.1	1000
100	50	$Q/50$	160	0.5	500
1000	100	$Q/10$	16	1	100
10000	200	Q	1.6	2	10

Πίνακας 4.6.1. Τιμές των στοιχείων του φίλτρου του σχήματος 4.6.4

Τα περισσότερα συστήματα μετρήσεων στηρίζονται στη μέτρηση του πλάτους των εξόδων των μετατροπέων, με αποτέλεσμα να επιδιώκουμε, σε αυτές τις περιπτώσεις, τη διατήρηση της ομαλότητας και του πλάτους στη ζώνη διέλευσης του σήματος. Στα προηγούμενα φίλτρα η απόκριση μέτρου ελαττώνεται απότομα αριστερά και δεξιά από την κεντρική συχνότητα. Για το λόγο αυτό, κρίνονται ανεπαρκή για σήματα με εκτεταμένο φασματικό περιεχόμενο. Στη θέση τους χρησιμοποιούνται φίλτρα με εκτεταμένη και ομαλή (χωρίς μεγάλη κυμάτωση) ζώνη διέλευσης. Τέτοιο φίλτρο είναι το **φίλτρο συντονισμένων βαθμίδων** (stagger tuned filter), που αποτελείται από πολλά ζωνοδιαβατά φίλτρα απλού συντονισμού (single tuned bandpass filter) σε διαδοχή, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.5. Σε τέτοιο φίλτρο συνδέουμε σε διαδοχή συντονισμένα κυκλώματα με παραπλήσιες συχνότητες συντονισμού, ώστε η τελική απόκριση να παρουσιάζει μεγάλο εύρος ζώνης με απότομη κλίση στα όρια της αποκοπής.



Σχήμα 4.6.5. Ζωνοδιαβατό φίλτρο συντονισμένων βαθμίδων
πολλαπλής ανατροφοδότησης

Στον πίνακα 4.6.2 παρουσιάζονται οι κεντρικές συχνότητες f_{oi} και το εύρος ζώνης B_i , που πρέπει να έχουν τα απλά συντονισμένα φίλτρα, για να πετύχουμε την επιθυμητή κεντρική συχνότητα f_o και το επιθυμητό εύρος ζώνης B του φίλτρου συντονισμένων βαθμίδων συναρτήσει του αριθμού των βαθμίδων.

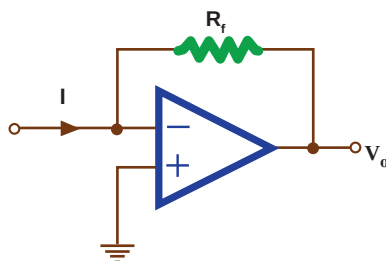
Αριθμός Βαθμίδων	B_i	f_{oi}
1	B	f_o
2	0.71B	$f_o+0.35B$
	0.71B	$f_o-0.35B$
3	0.5B	$f_o+0.43B$
	0.5B	$f_o-0.43B$
	B	f_o
4	0.38B	$f_o+0.46B$
	0.38B	$f_o-0.46B$
	0.93B	$f_o+0.19B$
	0.93B	$f_o-0.19B$

Πίνακας 4.6.2. Κεντρικές συχνότητες και εύρη ζώνης κάθε βαθμίδας ενός φίλτρου συντονισμένων βαθμίδων

Το βασικότερο μειονέκτημα των φίλτρων συντονισμένων βαθμίδων είναι η απώλεια ενίσχυσης. Βέβαια, η απώλεια αυτή μπορεί να ισοσταθμιστεί για κάθε βαθμίδα χωριστά.

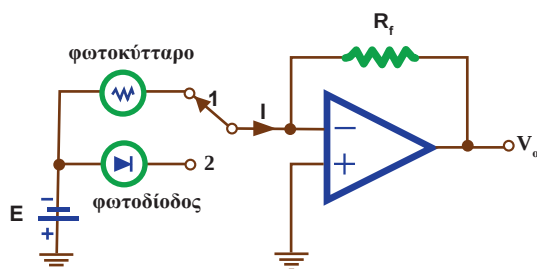
Η μετατροπή ρεύματος σε τάση είναι χρήσιμη, όταν το ρεύμα πρέπει να μετρηθεί, χωρίς να επηρεαστεί από την εισαγωγή αντίστασης στο κύκλωμα, καθώς και όταν είναι επιθυμητή η μέτρηση ρεύματος μιας πραγματικής πηγής ρεύματος, όπως π.χ. ενός φωτοκύτταρου. Εξάλλου χρησιμεύει για τη μετατροπή του ρεύματος εξόδου ενός DAC σε τάση. Στο σχήμα 4.7.1 φαίνεται ένα κύκλωμα κατάλληλο για τη μετατροπή ρεύματος σε τάση. Στην ιδανική περίπτωση η αντίσταση εισόδου του είναι μηδέν. Η τάση εξόδου του είναι:

$$V_o = -R_f \cdot I \quad (4.7.1)$$



Σχήμα 4.7.1. Μετατροπέας ρεύματος σε τάση (current-to-voltage converter)

Στο σχήμα 4.7.2 φαίνεται η χρήση του παραπάνω μετατροπέα ρεύματος σε τάση για τη μέτρηση ρεύματος από φωτοανιχνευτές (photodetectors), όπως είναι το φωτοκύτταρο και η φωτοδίοδος. Όταν ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση 1, συνδέεται το φωτοκύτταρο. Η αντίστασή του είναι πολύ υψηλή στο σκοτάδι ($>500k\Omega$) και πολύ χαμηλή όταν φωτίζεται ($\sim 5k\Omega$). Αν $E=5V$, τότε το ρεύμα στο φωτοκύτταρο είναι $10\mu A$ στο σκοτάδι και $1mA$ σε ηλιοφάνεια. Όταν ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση 2, η φωτοδίοδος συνδέεται ανάστροφα. Στο σκοτάδι η φωτοδίοδος άγει μικρό ρεύμα διαρροής της τάξης των nA , αλλά ανάλογα με την ακτινοβολία, που προσπίπτει πάνω της, μπορεί να γίνει $50\mu A$ και περισσότερο. Έτσι, το ρεύμα εξαρτάται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία και όχι από την τάση E .



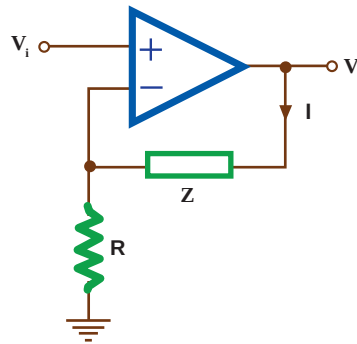
Σχήμα 4.7.2. Μέτρηση ρεύματος εξόδου από φωτοανιχνευτές

4.7

Μετατροπείς Ρεύματος - Τάσης

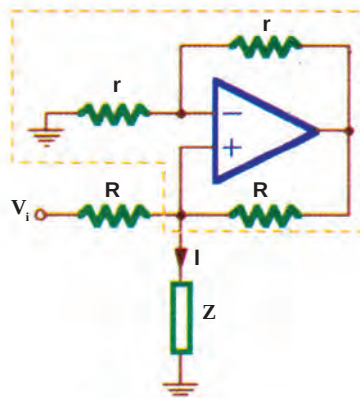
Στο σχήμα 4.7.3 φαίνεται κύκλωμα κατάλληλο για τη μετατροπή τάσης σε ρεύμα, που διέρχεται μέσα από το στοιχείο Z. Για ιδανικό τελεστικό ενισχυτή το ρεύμα στο στοιχείο Z δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{V_i}{R} \quad (4.7.2)$$



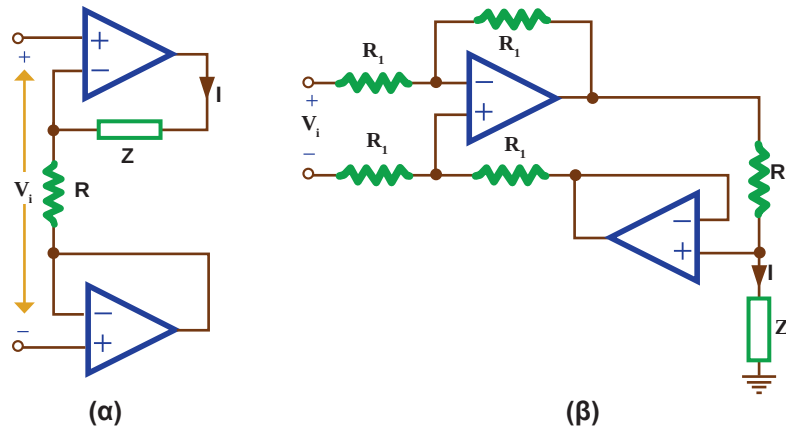
Σχήμα 4.7.3. Μετατροπέας τάσης σε ρεύμα

Το παραπάνω κύκλωμα είναι χρήσιμο στις περιπτώσεις, όπου φορτίο μικρής αντίστασης (π.χ. ένα πηνίο) πρέπει να τροφοδοτηθεί από πηγή τάσης υψηλής σχετικά αντίστασης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το παραπάνω κύκλωμα ενεργεί και ως πηγή σταθερού ρεύματος, αφού η έξοδος είναι **ανεξάρτητη από το φορτίο Z**. Στο σχήμα 4.7.4 φαίνεται ένας εναλλακτικός μετατροπέας τάσης σε ρεύμα, που κάνει χρήση της έννοιας της αρνητικής αντίστασης. Πράγματι, το κύκλωμα εντός των διακεκομμένων γραμμών ονομάζεται **μετατροπέας αρνητικής εμπέδησης** (NIC: negative impedance converter) και υλοποιεί την αρνητική αντίσταση $-R$. Για το συνολικό κύκλωμα ισχύει η σχέση 4.7.2.



Σχήμα 4.7.4. Μετατροπέας τάσης σε ρεύμα με τη χρήση αρνητικής αντίστασης

Στα σχήματα 4.7.5(α) και (β) φαίνονται εναλλακτικοί μετατροπείς τάσης σε ρεύμα, στην περίπτωση που η τάση εισόδου δεν αναφέρεται ως προς τη γείωση.



Σχήμα 4.7.5. Μετατροπείς τάσης σε ρεύμα

4.8 Γειώσεις - Θωράκιση - Τερματισμός

Ως **γείωση** (grounding) ορίζεται το τμήμα ηλεκτρικού ή ηλεκτρονικού κυκλώματος, που βρίσκεται σε μηδενικό δυναμικό σε σχέση με τη γη. Ο τρόπος, που θα γειωθεί ένα κύκλωμα, του εξασφαλίζει ή όχι προστασία απέναντι σε διάφορες μορφές θορύβου. Την προστασία αυτής της μορφής προσπαθούμε να εξασφαλίσουμε και σε κυκλώματα εισόδου συστημάτων μέτρησης, που βασίζονται σε υπολογιστή (computer based).

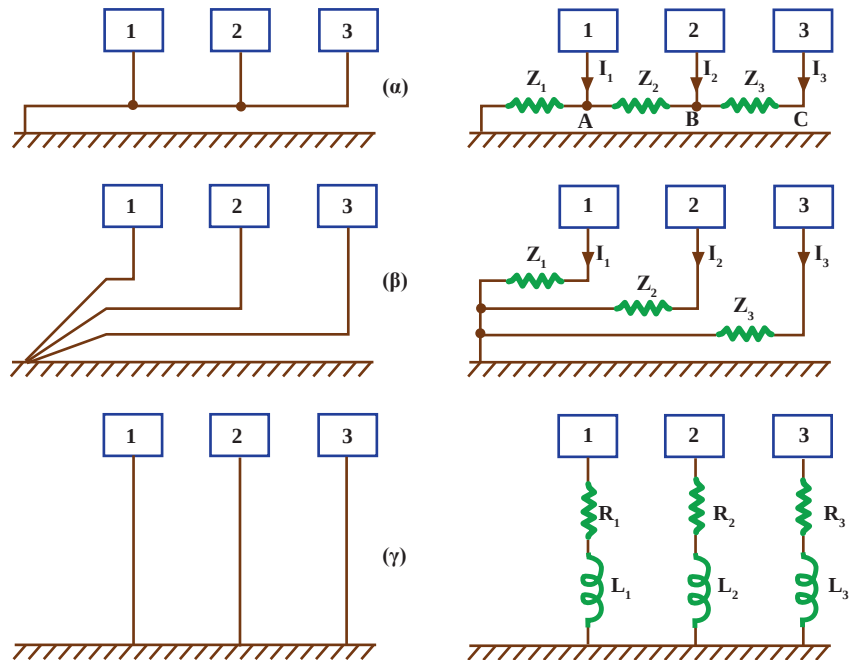
Στο σχήμα 4.8.1 φαίνονται τρεις διαφορετικοί τρόποι γείωσης και τα αντίστοιχα ισοδύναμα κυκλώματα, που τους αναλύουν. Η μέθοδος σύνδεσης με σειριακή γείωση μονού σημείου έχει σαν αποτέλεσμα τα ρεύματα τροφοδοσίας των κυκλωμάτων να δημιουργούν πτώσεις τάσης, που καταλήγουν σε διαφορετική τάση αναφοράς σε κάθε κύκλωμα:

$$V_A = (I_1 + I_2 + I_3)Z_1 \quad (4.8.1)$$

$$V_B = (I_1 + I_2 + I_3)Z_1 + (I_2 + I_3)Z_2 \quad (4.8.2)$$

$$V_C = (I_1 + I_2 + I_3)Z_1 + (I_2 + I_3)Z_2 + I_3Z_3 \quad (4.8.3)$$

Επειδή τα σήματα εξόδου του κάθε κυκλώματος αναφέρονται σε διαφορετικές τάσεις αναφοράς, αυτή η πηγή παρεμβολής μπορεί να είναι πολύ σημαντική. Έτσι, αυτή η μέθοδος δεν πρέπει να χρησιμοποιείται, αν τα κυκλώματα έχουν παρόμοια ρεύματα τροφοδοσίας.



Σχήμα 4.8.1. Τρόποι γείωσης και ισοδύναμα κυκλώματα: α) σειριακή μονού σημείου, β) παράλληλη μονού σημείου και γ) παράλληλη πολλαπλών σημείων

Σε κάθε περίπτωση, οι πιο ευαίσθητες βαθμίδες πρέπει να τοποθετούνται κοντά στο κοινό σημείο αναφοράς. Το πρόβλημα της σειριακής γείωσης μονού σημείου αντιμετωπίζεται με την παράλληλη γείωση μονού σημείου, που είναι η καλύτερη μέθοδος γείωσης στις χαμηλές συχνότητες. Στις υψηλές συχνότητες ($>10\text{MHz}$), οι γειώσεις πολλαπλών σημείων είναι καλύτερες γιατί εισάγουν μικρότερη εμπέδηση.

Η **θωράκιση** (shielding) αγωγού είναι υλικό κατάλληλα μορφοποιημένο, για να εμποδίζει ή να ελαττώνει την επιρροή από ηλεκτρικό ή από μαγνητικό πεδίο, που υπάρχει στον περιβάλλοντα χώρο. Όταν πρόκειται για θωρακισμένο καλώδιο, αυτό είναι καλυμμένο με μεταλλικό μονό ή διπλό πλέγμα συρμάτων ή άλλου υλικού. Ειδικότερα, η εξωτερική παρεμβολή, που επιδρά σε κυκλώματα χαμηλού επιπέδου σήματος, είναι κοινό πρόβλημα σε βιομηχανικές εφαρμογές, με αποτέλεσμα να έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές αντιμετώπισης, με σπουδαιότερη αυτή της θωράκισης. Ο θόρυβος, που επιδρά σε καλώδια σήματος και σε ενεργειακούς διαύλους εισόδου, έχει ως αιτία δημιουργίας, όπως ήδη αναφέρθηκε, τις τοπικές πηγές ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Για παράδειγμα, ένα μη θωρακισμένο καλώδιο σήματος δέχεται παρεμβολή (interference) 1 mV, για κάθε kW φορτίου 60Hz και για κάθε 30cm περίπου καλωδίου, που βρίσκεται σε απόσταση 30cm από γειτονικό αγωγό ισχύος. Οι περισσότερες παρεμβολές προέρχονται από γειτονικές πηγές ηλεκτρικών πεδίων, όπου ο αποτελεσματικότερος μηχανισμός εξασθένησής τους είναι η **ανάκλαση** από μη μαγνητικό υλικό, όπως ο χαλκός ή το αλουμίνιο. Τα καλώδια, που είναι θωρακισμένα με αυτά τα υλικά, προσφέρουν εξασθένηση παρεμβολής 90dB τάσης στα 60Hz. Ωστόσο, η δυνατότητα εξασθένησης μειώνεται κατά 20dB/decade, όταν η συχνότητα αυξάνεται.

Για μαγνητικά πεδία, η **απορρόφηση** είναι αποτελεσματικός μηχανισμός, που πραγματοποιείται με ατσαλένια ή μεταλλική θωράκιση. Η παρεμβολή μαγνητικού πεδίου παρουσιάζει τις μεγαλύτερες δυσκολίες στην αντιμετώπιση της με θωράκιση, γιατί όταν αυξάνεται η συχνότητα, η αποτελεσματικότητα της θωράκισης ελαττώνεται. Εφαρμογές, που απαιτούν μαγνητική θωράκιση, υλοποιούνται συνήθως με την εγκατάσταση καλωδίων σήματος σε ατσαλένιους οδηγούς με το απαραίτητο πάχος τοιχωμάτων.

Ως **τερματισμός** (termination) γραμμής ορίζεται η συνδεδεμένη εμπέδηση φορτίου στην έξοδο γραμμής μεταφοράς ή μετατροπέα, που κλείνει το κύκλωμα, ενώ εξασφαλίζει **προσαρμογή** εμπεδήσεων για την **αποφυγή ανακλάσεων**. Ο τερματισμός έχει πολύ μεγάλη σημασία σε συστήματα συλλογής δεδομένων (DAS: data acquisition systems) και, ειδικότερα, στον τρόπο, που τα αισθητήρια λαμβάνουν τα σήματα από το περιβάλλον. Συνήθως, τα DAS συνδέονται με το φυσικό περιβάλλον μέσω πίνακα (panel) σύνδεσης, όπως το screw-terminal barrier strip.

Ανακεφαλαίωση

- Τα φίλτρα διακρίνονται σε βαθυπερατά, υψηπερατά, ζωνοδιαβατά και απόρριψης ζώνης. Χαρακτηριστικά φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων μόνο πόλων είναι τα φίλτρα Butterworth με επίπεδη απόκριση μέτρου στην περιοχή διέλευσης, τα φίλτρα Chebyshev με κυμάτωση στη ζώνη διέλευσης και τα φίλτρα Bessel με γραμμική καθυστέρηση φάσης.
- Τα παθητικά φίλτρα υλοποιούνται με τη βοήθεια πινάκων, που δίνουν τις κανονικοποιημένες τιμές των στοιχείων τους. Οι τιμές αυτές αποκανονικοποιούνται στην επιθυμητή συχνότητα αποκοπής και στην ανάλογη στάθμη εμπίεξης.
- Τα ενεργά φίλτρα διακρίνονται σε φίλτρα μοναδιαίας ενίσχυσης, πολλαπλής ανατροφοδότησης και biquad. Σημαντικά είναι τα κυκλώματα διακοπτόμενου πυκνωτή. Για τη μετατροπή βαθυπερατών φίλτρων σε υψηπερατά, χρησιμοποιείται ο RC:CR μετασχηματισμός.
- Τα ζωνοδιαβατά φίλτρα υλοποιούνται με φίλτρα πολλαπλής ανατροφοδότησης, biquad φίλτρα και φίλτρα συντονισμένων βαθμίδων.
- Οι μετατροπείς ρεύματος σε τάση και τάσης σε ρεύμα είναι πολύ σημαντικοί στην μέτρηση σημάτων.
- Οι γειώσεις διακρίνονται σε σειριακές μονού σημείου, παράλληλες μονού σημείου και παράλληλες πολλαπλών σημείων. Στη θωράκιση χρησιμοποιείται η ανάκλαση για τις παρεμβολές από ηλεκτρικά πεδία και η απορρόφηση για παρεμβολές από μαγνητικά. Ο τερματισμός γραμμής εξασφαλίζει προσαρμογή εμπεδήσεων για την αποφυγή ανακλάσεων.

• Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

1. Τα φίλτρα Butterworth παρουσιάζουν:
 - α) κυμάτωση στην περιοχή διέλευσης
 - β) επίπεδη απόκριση μέτρου στην περιοχή διέλευσης
 - γ) γραμμική καθυστέρηση φάσης
 - δ) όλα τα παραπάνω
2. Το κύκλωμα διαφόρισης είναι ουσιαστικά:
 - α) βαθυπερατό φίλτρο
 - β) υψηπερατό φίλτρο
 - γ) ζωνοδιαβατό φίλτρο
 - δ) φίλτρο απόρριψης ζώνης
3. Με τον RC:CR μετασχηματισμό προκύπτει:
 - α) υψηπερατό φίλτρο από βαθυπερατό
 - β) ζωνοδιαβατό φίλτρο από υψηπερατό
 - γ) βαθυπερατό φίλτρο από ζωνοδιαβατό
 - δ) τίποτα από τα παραπάνω
4. Για να αποφύγουμε τις παρεμβολές από ηλεκτρικά πεδία χρησιμοποιούμε:
 - α) θωράκιση με ανάκλαση
 - β) θωράκιση με απορρόφηση
 - γ) θωράκιση με ανάκλαση και απορρόφηση
 - δ) τίποτα από τα παραπάνω

• Ερωτήσεις του τύπου Σωστό/Λάθος

1. Τα παθητικά φίλτρα αποτελούνται από τρανζίστορ ή τελεστικούς ενισχυτές μαζί με αντιστάσεις, πηνία και πυκνωτές.
2. Το ζωνοδιαβατό φίλτρο πολλαπλής ανατροφοδότησης παρέχει τη δυνατότητα ανεξάρτητης ρύθμισης της κεντρικής συχνότητας και της ενίσχυσης.
3. Η μέθοδος σύνδεσης με σειριακή γείωση μονού σημείου έχει σαν αποτέλεσμα τα ρεύματα τροφοδοσίας των κυκλωμάτων να δημιουργούν πτώσεις τάσης που καταλήγουν σε διαφορετική τάση αναφοράς σε κάθε κύκλωμα.
4. Ο τερματισμός γραμμής εξασφαλίζει προσαρμογή εμπεδήσεων για την αποφυγή ανακλάσεων.

• Ερωτήσεις αντιστοίχισης

1. Να αντιστοιχίσετε τα στοιχεία της πρώτης στήλης με αυτά της δεύτερης στήλης:

Βαθυπερατό φίλτρο	Αποκόπτονται χαμηλές συχνότητες
Υψηπερατό φίλτρο	Διέρχονται χαμηλές συχνότητες
Ζωνοδιαβατό φίλτρο	Αποκόπτεται ζώνη συχνοτήτων
Φίλτρο απόρριψης ζώνης	Διέρχεται ζώνη συχνοτήτων

• **Ερωτήσεις συμπλήρωσης κενού**

1. Τα _____ φίλτρα εξασθενούν τη τάση εξόδου για όλες τις συχνότητες κάτω από τη συχνότητα _____.
2. Η απόκριση μέτρου του φίλτρου _____ παρουσιάζει κυμάτωση ίσου ύψους στη ζώνη _____ και μέγιστο ρυθμό _____ πέρα από τη συχνότητα αποκοπής.
3. Για την _____ των τιμών των στοιχείων ενός _____ φίλτρου χρειαζόμαστε την επιθυμητή συχνότητα _____ του φίλτρου και τη στάθμη _____.
4. Σε ζωνοδιαβατό φίλτρο _____ βαθμίδων συνδέουμε σε _____ συντονισμένα κυκλώματα με παραπλήσιες συχνότητες _____, ώστε η τελική απόκριση να παρουσιάζει μεγάλο _____ ζώνης με απότομη κλίση στα όρια της _____.

• **Ερωτήσεις ανοικτού τύπου**

1. Περιγράψτε τους τύπους φίλτρων, που γνωρίζετε.
2. Συγκρίνετε τα φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων Butterworth, Chebyshev και Bessel.
3. Πώς σχεδιάζουμε ένα παθητικό βαθυπερατό φίλτρο;
4. Περιγράψτε τους τύπους των ενεργών φίλτρων, που γνωρίζετε.
5. Περιγράψτε την υλοποίηση ζωνοδιαβατού φίλτρου με τη μέθοδο συντονισμένων βαθμίδων.
6. Σχεδιάστε και αναλύστε έναν μετατροπέα ρεύματος σε τάση. Που χρησιμοποιείται;
7. Περιγράψτε τους τύπους γείωσης, που γνωρίζετε.

1. Ένα ζωνοδιαβατό φίλτρο έχει κατώτερη συχνότητα αποκοπής 300Hz και ανώτερη 3kHz. Να βρεθεί το εύρος ζώνης και η κεντρική συχνότητα του φίλτρου.
(2.7kHz, 948.7Hz)
2. Ένα ζωνοδιαβατό φίλτρο έχει κεντρική συχνότητα 950Hz και εύρος ζώνης 2.7kHz. Να βρεθεί η ανώτερη και κατώτερη συχνότητα αποκοπής.
(3kHz, 300Hz)
3. Να βρεθεί ο παράγοντας Q ενός ζωνοδιαβατού φίλτρου με κεντρική συχνότητα 950Hz και εύρος ζώνης 2.7kHz.
(0.35)
4. Να βρεθεί το ρεύμα εισόδου του κυκλώματος του σχήματος 4.7.1, αν η τάση εξόδου είναι 5V και $R_f = 100k\Omega$.
(50μA)
5. Στο κύκλωμα του σχήματος 4.7.2, ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση 1 και $R_f = 10k\Omega$. Αν το ρεύμα στο φωτοκύτταρο είναι 10μA στο σκοτάδι και 1mA σε ηλιοφάνεια, να βρεθεί η τάση εξόδου στην κάθε περίπτωση.
(0.1V, 10V)
6. Στο κύκλωμα του σχήματος 4.7.2, ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση 2 και $R_f = 100k\Omega$. Να βρεθεί η τάση εξόδου, όταν το ρεύμα στη φωτοδίοδο είναι 1μA και 50μA.
(0.1V, 5V)
7. Να σχεδιαστεί βαθυπερατό φίλτρο Butterworth τρίτης τάξης, με χρήση παθητικών στοιχείων, με συχνότητα αποκοπής 5kHz και στάθμη εμπίδσης 10kΩ.
8. Να σχεδιαστεί βαθυπερατό φίλτρο Chebyshev τρίτης τάξης κυμάτωσης 0.1 dB, με χρήση παθητικών στοιχείων, με συχνότητα αποκοπής 5kHz και στάθμη εμπίδσης 10kΩ.

50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Μετατροπή σημάτων

- Συστήματα Συλλογής και Μετατροπής Δεδομένων
- Πολυπλέκτες
- Κυκλώματα Δειγματοληψίας-Κράτησης
- Κώδικες Αναπαράστασης και Σφάλματα Μετατροπών
- Μετατροπείς Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό
- Ολοκληρωμένοι DACs
- Μετατροπείς Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό
- Μετατροπείς και Μικροεπεξεργαστές/Μικροελεγκτές
- Δειγματοληπτημένα Δεδομένα
- Θόρυβος Αλίσιας
- Σφάλματα σε Σχέση με τη Δειγματοληψία
- Επιλογή Κατάλληλου Μετατροπέα, Πολυπλέκτη, S/H

Σκοπός

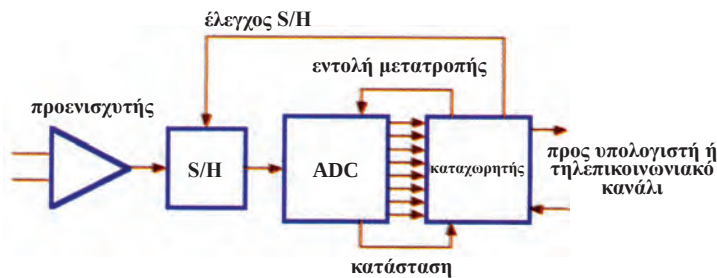
Όταν ολοκληρώσεις το κεφάλαιο αυτό, θα μπορείς:

- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις τις βασικές δομικές μονάδες (ολοκληρωμένα κυκλώματα) από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα συλλογής και μετατροπής σημάτων.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις τους βασικότερους κώδικες που χρησιμοποιούνται στις μετατροπές σημάτων, καθώς και τα σφάλματα που απαντώνται στους μετατροπείς.
- Να σχεδιάζεις και να περιγράφεις κυκλώματα μετατροπής ψηφιακού σήματος σε αναλογικό.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις τη λειτουργία διαφόρων κυκλωμάτων μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.
- Να κατονομάζεις πρακτικά ολοκληρωμένα κυκλώματα μετατροπών και να περιγράφεις τη διασύνδεσή τους με μικροεπεξεργαστές/μικροελεγκτές.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις τα σημαντικότερα σφάλματα σε σχέση με τη δειγματοληψία σημάτων.
- Να κατονομάζεις τρόπους ανασύνθεσης σημάτων.
- Να αποφασίζεις ποιο κύκλωμα μετατροπέα, πολυπλέκτη ή δειγματοληψίας κράτησης είναι κατάλληλο για κάθε εφαρμογή.

Τα συστήματα συλλογής και μετατροπής δεδομένων χρησιμοποιούνται για τη συλλογή αναλογικών σημάτων από μια ή περισσότερες πηγές και τη μετατροπή αυτών των σημάτων σε ψηφιακή μορφή για ανάλυση ή επεξεργασία από υπολογιστές ή μετάδοση μέσω τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Αυτά τα αναλογικά σήματα προέρχονται, συνήθως, από αισθητήρια, τα οποία μετατρέπουν πραγματικές φυσικές παραμέτρους, όπως π.χ. πίεση, θερμοκρασία και ροή, σε ισοδύναμα ηλεκτρικά σήματα. Τα ισοδύναμα ηλεκτρικά σήματα μετατρέπονται, στη συνέχεια, από το σύστημα συλλογής δεδομένων και χρησιμοποιούνται από τις συσκευές, στις οποίες καταλήγουν, σε ψηφιακή μορφή. Η ικανότητα του ηλεκτρονικού συστήματος να διατηρεί την ακρίβεια του αρχικού σήματος, αποτελεί και τον κύριο παράγοντα ποιότητας του συστήματος.

Τα κύρια στοιχεία, που απαιτούνται για ένα σύστημα συλλογής και μετατροπής αναλογικών σημάτων σε ισοδύναμη ψηφιακή μορφή και αντίστροφα, είναι τα ακόλουθα:

- Αναλογικός/ψηφιακός πολυπλέκτης
- Κύκλωμα δειγματοληψίας κράτησης
- Μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό / ψηφιακού σήματος σε αναλογικό
- Λογική χρονισμού/διαχείρισης της όλης διαδικασίας



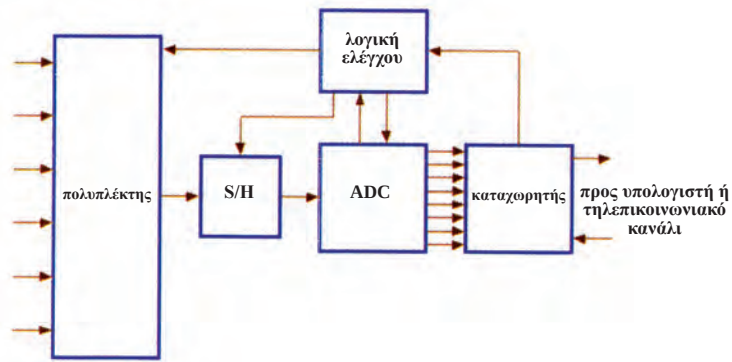
Σχήμα 5.1.1. Μετατροπή δεδομένων μονού καναλιού

Τα σημερινά συστήματα συλλογής δεδομένων περιέχουν, συνήθως, όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τη συλλογή και μετατροπή, εκτός, ίσως, από το φιλτράρισμα της εισόδου και τη διευθέτηση του σήματος πριν την αναλογική πολυπλεξία. Σε τέτοιο σύστημα, τα αναλογικά σήματα πολυπλέκονται από τον αναλογικό πολυπλέκτη, το σήμα εξόδου, του οποίου εφαρμόζεται σε ένα κύκλωμα δειγματοληψίας κράτησης S/H. Το κύκλωμα αυτό είναι προγραμματισμένο να συλλέγει και να κρατά κάθε δείγμα πολυπλεγμένων δεδομένων, το οποίο μετατρέπεται σε ψηφιακή μορφή από μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC). Το δείγμα, που έχει μετατραπεί, παρουσιάζεται, στη συνέχεια, στην έξοδο του ADC σε παράλληλη ή/και σειριακή ψηφιακή μορφή για περαιτέρω επεξεργασία. Στο σχήμα 5.1.1 φαίνονται τα παραπάνω στοιχεία για τη μετατροπή δεδομένων σε ένα μονό κανάλι, οπότε δεν απαιτείται και η

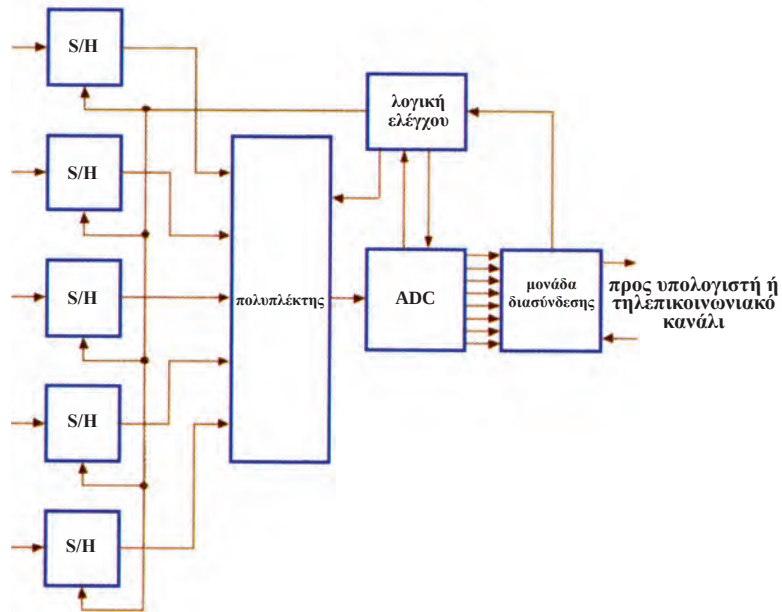
5.1

Συστήματα Συλλογής και Μετατροπής Δεδομένων

σχετική πολυπλεξία. Ο μετατροπέας ADC ενημερώνει τον καταχωρητή για την κατάσταση, στην οποία βρίσκονται τα δεδομένα, ενώ ο καταχωρητής ενημερώνει το κύκλωμα δειγματοληψίας κράτησης για το πότε πρέπει να αρχίσει τη δειγματοληψία και τον ADC για το πότε να ξεκινήσει τη μετατροπή.



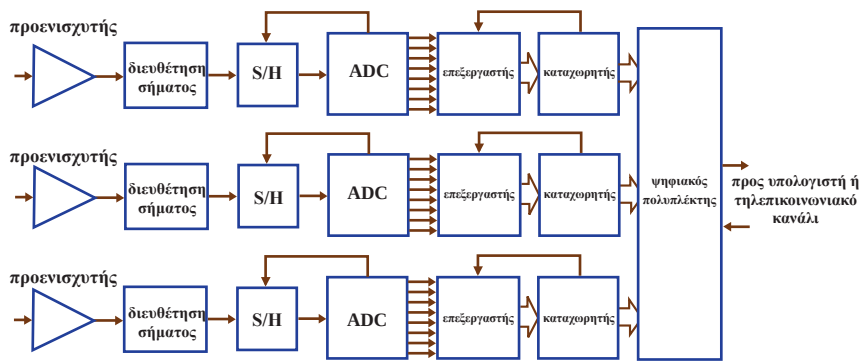
Σχήμα 5.1.2. Μετατροπή πολλών καναλιών με πολυπλεξία πριν τη δειγματοληψία



Σχήμα 5.1.3. Μετατροπή πολλών καναλιών με πολυπλεξία μετά τη δειγματοληψία

Στο σχήμα 5.1.2 φαίνεται ένα άλλο σχήμα μετατροπής με πολλά κανάλια, όπου η πολυπλεξία προηγείται της δειγματοληψίας. Όταν μια μετατροπή ολοκλη-

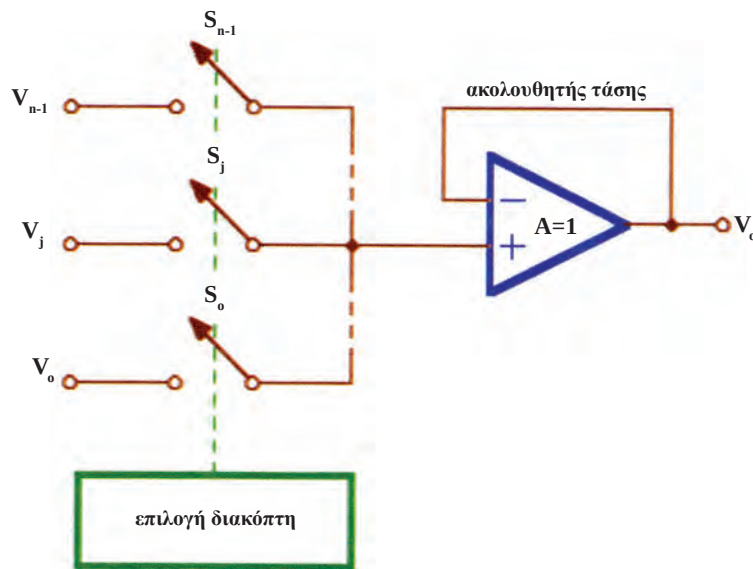
ρώνεται, η γραμμή κατάστασης από τον ADC αναγκάζει το S/H να ξεκινήσει νέα δειγματοληψία και να συλλέξει το επόμενο κανάλι. Όταν ολοκληρωθεί η συλλογή, το S/H περνάει σε κατάσταση κράτησης, νέα μετατροπή ξεκινά και ο κύκλος συνεχίζεται. Το σχήμα 5.1.3 δείχνει σχήμα μετατροπής με πολλά κανάλια όπου, όμως, η πολυπλεξία γίνεται μετά τη δειγματοληψία. Όλα τα κανάλια δειγματοληπτούνται ταυτόχρονα, γεγονός, που αυξάνει τον αριθμό των κυκλωμάτων S/H και την ταχύτητα της όλης μετατροπής. Το σχήμα 5.1.4 δείχνει εναλλακτική μετατροπή με πολλά κανάλια, όπου η πολυπλεξία γίνεται μετά τη μετατροπή, οπότε και είναι ψηφιακή. Ο τρόπος αυτός εφαρμόζεται συχνά τον τελευταίο καιρό, επειδή έχει μειωθεί πολύ το κόστος των ADCs και των υπολοίπων κυκλωμάτων.



Σχήμα 5.1.4. Μετατροπή πολλών καναλιών με ψηφιακή πολυπλεξία πριν τη μετάδοση

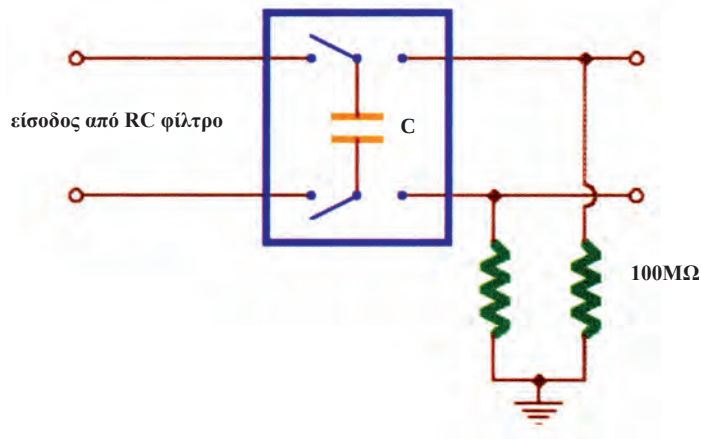
5.2 Πολυπλέκτες

Ο **αναλογικός πολυπλέκτης** (AMUX) είναι κύκλωμα, που χρησιμοποιείται για να κατανέμει πολλά και διαφορετικά μετρούμενα σήματα σε μια και μόνο είσοδο συστήματος μετατροπής δεδομένων. Το κύκλωμα αυτό επιλέγει ένα από τα διαθέσιμα σήματα εισόδου, σύμφωνα με κάποια διαδικασία επιλογής, πετυχαίνοντας έτσι, οικονομία, αφού η μετατροπή πολλών σημάτων γίνεται μέσω ενός και μόνο μετατροπέα. Ο αναλογικός πολυπλέκτης αποτελείται από διάταξη **διακοπών μεταγωγής** που επιτρέπουν τη ροή σήματος και προς τις δύο κατευθύνσεις, τόσο για εφαρμογές πολυπλεξίας όσο και απόπλεξης κάτω από σχετικό έλεγχο (σχήμα 5.2.1). Οι διακόπτες σχεδιάζονται να ανοίγουν γρηγορότερα από ότι κλείνουν. Κατά τη διάρκεια της πολυπλεξίας, μόνο ένας διακόπτης είναι κλειστός κάθε φορά.



Σχήμα 5.2.1. Αναλογικός πολυπλέκτης

Στο παρελθόν, οι αναλογικοί πολυπλέκτες κατασκευάζονταν με μηχανικούς διακόπτες, όπως οι ηλεκτρονόμοι ακίδας (reed relay). Αυτοί χρησιμοποιούνται και σήμερα σε εφαρμογές με μικρό ρυθμό δεδομένων και συχνότητες δειγματοληψίας μικρότερες των 200Hz. Επίσης, όταν έχουν επαφές επικαλυμμένες με υδράργυρο, προτιμούνται για σήματα μικρότερα του mV, γιατί ελαχιστοποιούν τα διάφορα σφάλματα. Όταν απαιτείται υψηλή απομόνωση, χρησιμοποιούμε τους διαφορικούς πολυπλέκτες με **πυκνωτή επιστροφής** (differential flying-capacitor multiplexer). Ο πυκνωτής επιστροφής, που φαίνεται στο σχήμα 5.2.2, μεταφέρεται ανάμεσα στα κυκλώματα εισόδου και εξόδου, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα πολυπλεξία και απομόνωση τάσεων μερικών εκατοντάδων Volt. Υπάρχουν διακόπτες με πυκνωτή επιστροφής στερεάς κατάστασης, αλλά δεν παρέχουν υψηλή απομόνωση.



Σχήμα 5.2.2. Διαφορικός διακόπτης με πυκνωτή επιστροφής

Σήμερα, οι πιο διαδεδομένοι διακόπτες είναι τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (CMOS και JFET). Οι CMOS διακόπτες πλεονεκτούν, γιατί παρουσιάζουν λιγότερες ηλεκτρικές ανωμαλίες και μπορούν να πολυπλέκουν σήματα της τάξης της τάσης τροφοδοσίας.

Στον πίνακα 5.2.1 συγκρίνονται οι παραπάνω τύποι διακοπών πολυπλεκτών, όπου φαίνονται οι αντιστάσεις, που παρουσιάζουν στην κατάσταση αγωγής ή όχι, καθώς και οι ρυθμοί δειγματοληψίας, στους οποίους χρησιμοποιούνται.

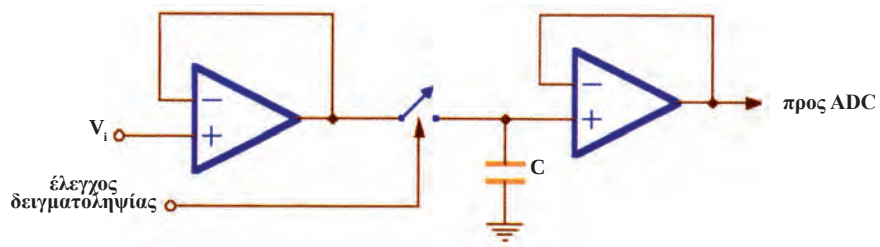
Τύπος	Αντίσταση Κατάστασης ON	Απομόνωση Κατάστασης OFF	Συχνότητα Δειγματοληψίας
CMOS	100Ω	70dB	1MHz
JFET	50Ω	70dB	1MHz
Reed Relay	0.1Ω	90dB	250Hz

Πίνακας 5.2.1. Χαρακτηριστικά διακοπών πολυπλεκτών

Οι **ψηφιακοί πολυπλέκτες** είναι συνδυαστικά κυκλώματα χωρίς μνήμη, οι οποίοι ελέγχονται από τη διεύθυνση του επιλογέα και καθοδηγούν ένα από τα σήματα εισόδου στην έξοδο. Μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμοι των διακοπών πολλαπλών θέσεων ή των ημιαγώγιμων διακοπών.

5.3 Κυκλώματα Δειγματοληψίας Κράτησης

Τα κυκλώματα δειγματοληψίας-κράτησης S/H (sample-and-hold circuits) δίνουν τη δυνατότητα 'προσωρινής αναλογικής μνήμης' συνεχώς μεταβαλλόμενων σημάτων, που χρησιμοποιούνται σε συστήματα συλλογής και μετατροπής δεδομένων. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τέτοιων κυκλωμάτων ανάλογα με τις απαιτήσεις ταχύτητας και ακρίβειας. Στο σχήμα 5.3.1 γίνεται αναφορά σε ένα τέτοιο κύκλωμα. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από δύο τελεστικούς ενισχυτές, ένα πυκνωτή κράτησης (της τάξης του 1nF) και έναν αναλογικό διακόπτη υψηλής ταχύτητας. Το κύκλωμα αυτό συνδέεται ανάμεσα σε μια αναλογική είσοδο και ένα μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ADC.



Σχήμα 5.3.1. Κύκλωμα δειγματοληψίας-κράτησης

Όταν το κύκλωμα βρίσκεται σε κατάσταση δειγματοληψίας, ο διακόπτης είναι κλειστός και ο πυκνωτής κράτησης φορτίζεται σύμφωνα με την τάση εισόδου. Μια εντολή κράτησης ανοίγει το διακόπτη και ο πυκνωτής κρατάει ένα φορτίο, που ισοδυναμεί με την τάση εισόδου τη στιγμή ανοίγματος του διακόπτη. Έτσι, το κύκλωμα S/H κρατάει την τάση εισόδου 'την αποθηκεύει στον πυκνωτή', τη στιγμή, που ο ADC εκτελεί μια μετατροπή.

Μεγάλη σημασία στην ποιότητα κυκλώματος S/H έχει ο **χρόνος διανοίγματος** (aperture time), ο οποίος είναι συνήθως μικρότερος από το χρόνο μετατροπής. Πρόκειται για το χρόνο, που μεσολαβεί ανάμεσα στην εντολή κράτησης και το πραγματικό άνοιγμα του διακόπτη. Είναι φανερό, σε αυτό το σημείο, το γιατί ο διακόπτης πρέπει να είναι υψηλής ταχύτητας. Τα κυκλώματα δειγματοληψίας κράτησης του εμπορίου έχουν χρόνους διανοίγματος μικρότερους από 50nsec.

Εκτός από το χρόνο διανοίγματος, στα κυκλώματα S/H εμφανίζονται και άλλα σφάλματα με σημαντικότερα αυτά, που προέρχονται από τη συνεχή μείωση του φορτίου του πυκνωτή (capacitor charge droop), την απορρόφηση του διηλεκτρικού του πυκνωτή (dielectric absorption), την ολίσθηση της αντισταθμιστικής τάσης μετατόπισης (offset voltage drift) και την ανεπιθύμητη μετάδοση σημάτων, όταν βρισκόμαστε σε κατάσταση κράτησης.

Οι ψηφιακοί αριθμοί είναι δυαδικοί. Αυτό σημαίνει, ότι κάθε ψηφίο (bit) αντιστοιχεί σε μία μόνο από δύο πιθανές καταστάσεις. Οι καταστάσεις αυτές είναι 'off', 'λάθος' ή '0' και 'on', 'σωστό' ή '1'. Η πιο διαδεδομένη λογική, που χρησιμοποιείται και στην τεχνολογία TTL (λογική τρανζίστορ-τρανζίστορ), θεωρεί ως '1' το υψηλό επίπεδο τάσης και ως '0' το χαμηλό. Μια ομάδα τέτοιων ψηφίων ή ένας **κώδικας** (code) αντιστοιχεί σε μια αναλογική τιμή. Ένας τέτοιος ψηφιακός κώδικας θα ήταν:

101110101

Αυτός αποτελείται από εννέα ψηφία. Το '1' στα αριστερά ονομάζεται **περισσότερο σημαντικό ψηφίο (MSB: Most Significant Bit)** και το '1' στα δεξιά ονομάζεται **λιγότερο σημαντικό ψηφίο (LSB: Less Significant Bit)**. Η ερμηνεία του κώδικα, είτε ως αριθμού είτε ως αναπαράστασης αναλογικής μεταβλητής, είναι αδύνατη, αν δεν οριστεί ο κώδικας και η σχέση μετατροπής. Ας δούμε, στη συνέχεια, διάφορους κώδικες.

- **Δυαδικός κώδικας**

Είναι ο πιο γνωστός κώδικας και γι' αυτό ονομάζεται και **φυσικός**. Αν ένας τέτοιος κλασματικός κώδικας περιλαμβάνει η ψηφία, τότε το **MSB** έχει βάρος 2^{-1} , το δεύτερο ψηφίο έχει βάρος 2^{-2} , κ.τ.λ., ενώ το **LSB** έχει βάρος 2^{-n} . Η τιμή ενός δυαδικού αριθμού προσδιορίζεται με την άθροιση όλων των βαρών των μη μηδενικών ψηφίων. Για παράδειγμα, ο πίνακας 5.4.1 δείχνει τις δυνατές τιμές μιας λέξης 4-bit μαζί με τα δυαδικά βάρη και τους ισοδύναμους αριθμούς εκφρασμένους σε δεκαδικά και δυαδικά κλάσματα.

Δεκαδικό κλάσμα	Δυαδικό κλάσμα	Δυαδικός κώδικας			
		MSBx1/2	Bit2x1/4	Bit3x1/8	LSBx1/16
0	0.0000	0	0	0	0
1/16=2 ⁻⁴ (LSB)	0.0001	0	0	0	1
2/16=1/8	0.0010	0	0	1	0
3/16=1/8+1/16	0.0011	0	0	1	1
4/16=1/4	0.0100	0	1	0	0
5/16=1/4+1/16	0.0101	0	1	0	1
6/16=1/4+1/8	0.0110	0	1	1	0
7/16=1/4+1/8+1/16	0.0111	0	1	1	1
8/16=1/2 (MSB)	0.1000	1	0	0	0
9/16=1/4+1/16	0.1001	1	0	0	1
10/16=1/2+1/8	0.1010	1	0	1	0
11/16=1/2+1/8+1/16	0.1011	1	0	1	1
12/16=1/2+1/4	0.1100	1	1	0	0
13/16=1/2+1/4+1/8	0.1101	1	1	0	1
14/16=1/2+1/4+1/8	0.1110	1	1	1	0
15/16=1/2+1/4+1/8+1/16	0.1111	1	1	1	1

Πίνακας 5.4.1. Κλασματικοί δυαδικοί κώδικες

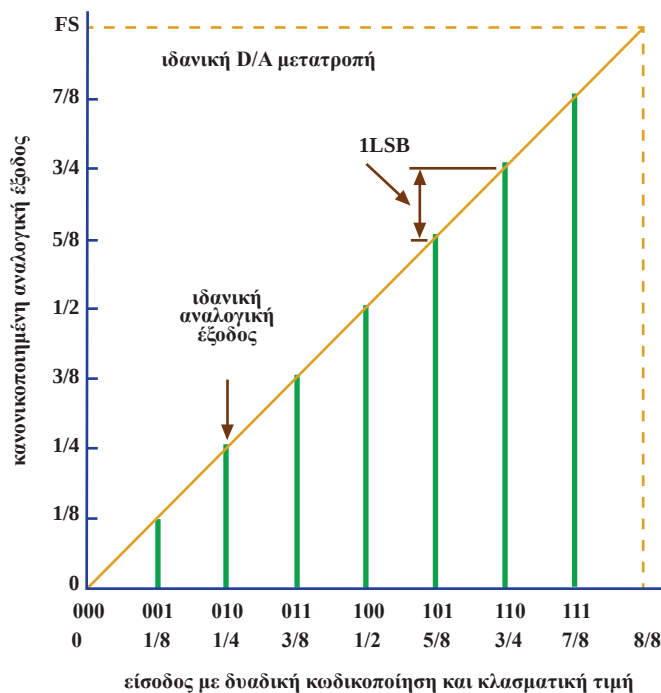
5.4

Κώδικες Αναπαράστασης και Σφάλματα Μετατροπών

Όταν όλα τα ψηφία είναι '1', η τιμή του αριθμού είναι $1-2^{-n}$ ή σε κανονικοποιημένη μορφή **FS-1LSB** (full scale - 1LSB, πλήρης κλίμακα - 1LSB). Στο παράδειγμα έχουμε $1-1/16=15/16$. Ο αριθμός, που πραγματικά αναπαριστάνεται, είναι ο 0.1111, αλλά πρακτικά γράφουμε απλά 1111. Το βάρος, που αντιστοιχεί στο LSB, ονομάζεται **διακριτική ικανότητα** (resolution). Έτσι, σε κώδικες με n ψηφία, η διακριτική ικανότητα είναι 2^{-n} ή $1/2^n$.

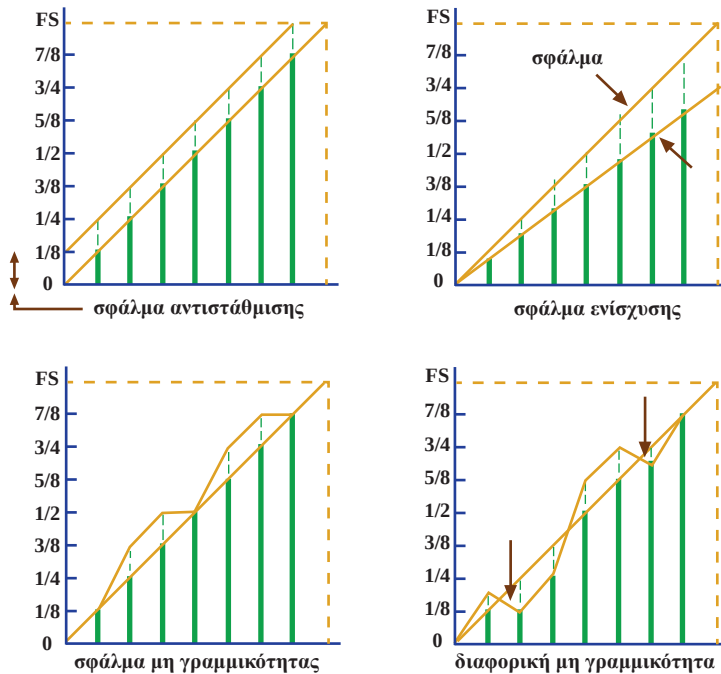
Ο πιο εύκολος και κατανοητός τρόπος για να δείξουμε τη σχέση ανάμεσα στις αναλογικές και ψηφιακές ποσότητες, που συμμετέχουν σε μετατροπή, είναι να σχεδιάσουμε ένα γράφημα. Από τη στιγμή, που μας απασχολούν δύο συμπληρωματικές μετατροπές, πρέπει να σχεδιάσουμε δύο γραφήματα, ένα για τη μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D) και ένα για τη μετατροπή ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (D/A).

Το σχήμα 5.4.1 δείχνει το γράφημα για ιδανικό 3-bit μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC). Ένας μετατροπέας 3-bit έχει οκτώ διακριτές κωδικοποιημένες στάθμες, δηλαδή, οκτώ διαφορετικές εισόδους και οκτώ αντίστοιχες εξόδους, που κυμαίνονται από το 0 ως τα 7/8 της πλήρους κλίμακας (FS). Από τη στιγμή, που δεν υπάρχουν άλλες στάθμες, σχεδιάζεται σε ραβδόγραμμα.



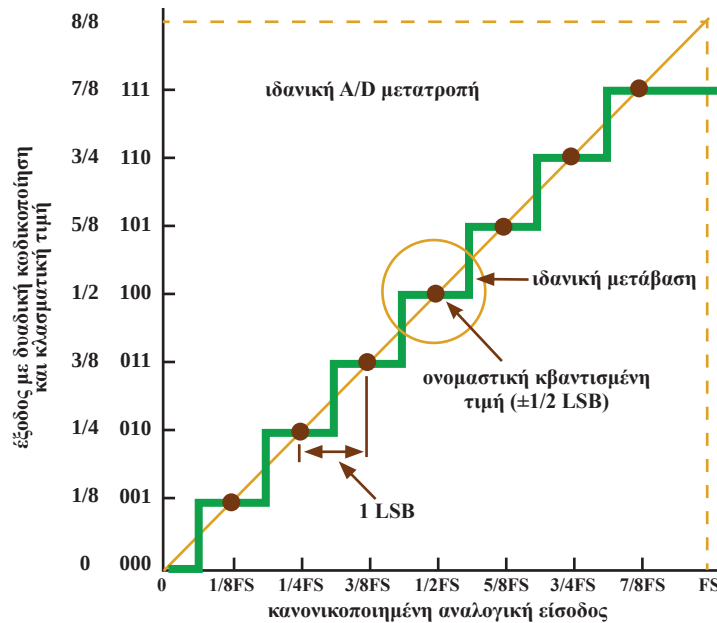
Σχήμα 5.4.1. Ιδανική σχέση εισόδου-εξόδου ενός 3-bit DAC

Στους πραγματικούς DACs, η ράβδος του μηδενός μπορεί να μην είναι ακριβώς μηδέν, οπότε μιλάμε για **σφάλμα αντιστάθμισης** (offset error). Η κλίμακα από το μηδέν μέχρι τα $7/8$ FS μπορεί να μην είναι ακριβώς, όπως έχει προσδιοριστεί στην ιδανική περίπτωση, οπότε μιλάμε για **σφάλμα ενίσχυσης** (gain error). Οι διαφορές στα ύψη των ράβδων μπορεί να μην είναι ίδιες, οπότε μιλάμε για **σφάλμα μη γραμμικότητας** (nonlinearity). Αν, μάλιστα, η μη γραμμικότητα είναι αρκετά μεγάλη, μερικές τιμές της αναλογικής εξόδου μπορεί να είναι μικρότερες από αυτές που προβλέπει ο κώδικας και τότε έχουμε **σφάλμα διαφορικής μη γραμμικότητας** (differential nonlinearity). Το σχήμα 5.4.2 περιγράφει γραφικά όλα τα παραπάνω σφάλματα.



Σχήμα 5.4.2. Τυπικά σφάλματα στις σχέσεις μετατροπής ενός 3-bit DAC

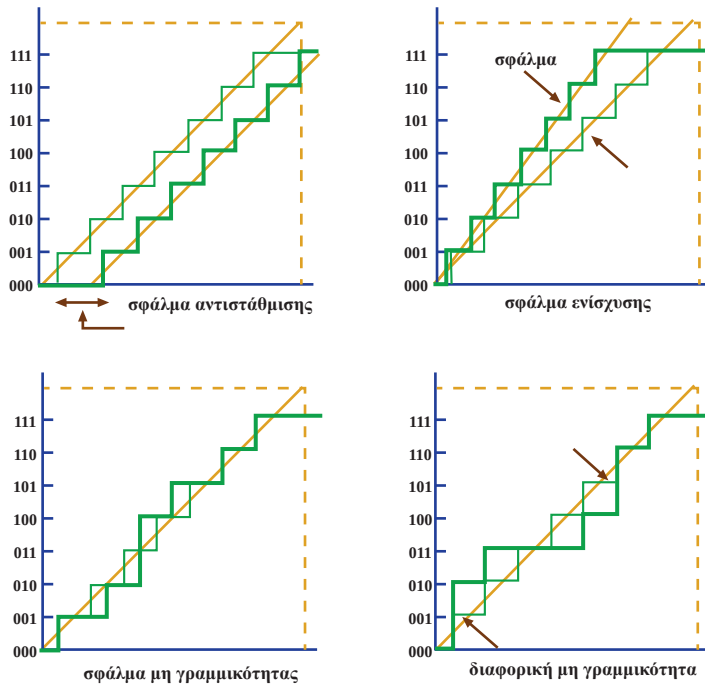
Το σχήμα 5.4.3 δείχνει το γράφημα για ένα 3-bit μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC). Από τη στιγμή, που οι αναλογικές εισοδοί μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή, πρέπει να κβαντιστούν παίρνοντας τιμές σε οκτώ διακριτές ζώνες. Όλες οι αναλογικές τιμές, που βρίσκονται μέσα σε δοσμένη ζώνη, αναπαριστώνται με τον ίδιο ψηφιακό κώδικα, ο οποίος αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή του μέσου της ζώνης αυτής. Αυτές οι ονομαστικές τιμές αντιστοιχούν στα ύψη των ράβδων του DAC.



Σχήμα 5.4.3. Ιδανική σχέση εισόδου-εξόδου ενός 3-bit ADC

Και στην A/D μετατροπή, όπως και στη D/A, εμφανίζεται σφάλμα αντιστάθμισης, αφού η πρώτη μετάβαση μπορεί να μη συμβεί στο $+1/2\text{LSB}$. Επίσης, εμφανίζεται σφάλμα ενίσχυσης, αφού η διαφορά ανάμεσα στις τιμές, που συμβαίνει η πρώτη και η τελευταία μετάβαση, δεν είναι $\text{FS}-2\text{LSB}$. Υπάρχει και σφάλμα μη γραμμικότητας, επειδή οι διαφορές ανάμεσα στις τιμές μετάβασης δεν είναι ίδιες. Επίσης, υπάρχει και σφάλμα διαφορικής μη γραμμικότητας, το οποίο, αν είναι αρκετά μεγάλο, μπορεί να προκαλέσει τον αφανισμό ορισμένων από τους κώδικες. Όλα τα παραπάνω σφάλματα φαίνονται στο σχήμα 5.4.4. Ωστόσο, εδώ εμφανίζεται και ένα επιπλέον σφάλμα, το **σφάλμα κβάντισης $\pm 1/2\text{LSB}$** (σχήμα 5.4.3). Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι μια αναλογική είσοδος είναι υποχρεωμένη να αναπαρασταθεί με την τιμή του μέσου της ζώνης, στην οποία αντιστοιχεί. Αν η τιμή αυτή ήταν ακριβώς στο μέσο, το σφάλμα θα ήταν μηδενικό. Αν, όμως, είναι στο άκρο της ζώνης το σφάλμα κβάντισης παίρνει τη μέγιστη τιμή του $+1/2\text{LSB}$ ή $-1/2\text{LSB}$. Ο μόνος σίγουρος τρόπος, για να μειωθεί το σφάλμα αυτό, είναι να αυξηθεί ο αριθμός των ψηφίων.

Αν και ο δυαδικός κώδικας είναι ο πιο διαδεδομένος, υπάρχουν και πολύ άλλοι δημοφιλείς κώδικες, που χρησιμοποιούνται σε διασυνδέσεις συστημάτων ανάλογα με το εύρος του σήματος και την πολικότητά του, την τεχνική μετατροπής, κ.ά. Αυτοί οι κώδικες είναι:



Σχήμα 5.4.4. Τυπικά σφάλματα στις σχέσεις μετατροπής ενός 3-bit ADC

- **Κώδικας BCD (binary-coded decimal)**

Σύμφωνα με αυτόν, κάθε δεκαδικό ψηφίο αναπαριστάται από ομάδα τεσσάρων δυαδικά κωδικοποιημένων ψηφίων. Το LSB της πιο σημαντικής ομάδας έχει βάρος 0.1, το LSB της επόμενης ομάδας έχει βάρος 0.01, το LSB της επόμενης ομάδας έχει βάρος 0.001, κ.ο.κ. Ο πίνακας 5.4.2 δείχνει την κωδικοποίηση BCD για ποικιλία αριθμών από το 0 ως το 0.99.

Μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό με κώδικα BCD χρησιμοποιούνται, κυρίως, στα ψηφιακά βολτόμετρα και στους πίνακες μετρήσεων, αφού η έξοδος από κάθε ομάδα μπορεί να αποκωδικοποιηθεί, ώστε να «οδηγήσει» μια αριθμητική μονάδα απεικόνισης χρησιμοποιώντας τους γνωστούς δεκαδικούς αριθμούς. Ο κώδικας BCD είναι κατά κάποιο τρόπο «σπάταλος», αφού με τον ίδιο αριθμό ψηφίων πετυχαίνει μικρότερη διακριτική ικανότητα από το δυαδικό κώδικα. Ο πίνακας 5.4.3 δείχνει σύγκριση των διακριτικών ικανοτήτων των δύο κωδίκων.

Μερικοί μετατροπείς απαιτούν ή χρησιμοποιούν κώδικες, όπως ο δυαδικός και ο BCD, τα ψηφία των οποίων αναπαριστώνται από τα συμπληρωματικά τους (το 0 από το 1 και το 1 από το 0). Αυτοί οι κώδικες ονομάζονται συμπληρωματικοί κώδικες. Έτσι, στον 4-bit **συμπληρωματικό δυαδικό**

Δεκαδικό κλάσμα	Κώδικας BCD	
	Πιο σημαντική ομάδα	Δεύτερη ομάδα
	x0.1 (x8 x4 x2 x1)	x0.01 (x8 x4 x2 x1)
0.00=0.00+0.00	0000	0000
0.01=0.00+0.01	0000	0001
0.02=0.00+0.02	0000	0010
0.03=0.00+0.03	0000	0011
0.04=0.00+0.04	0000	0100
0.05=0.00+0.05	0000	0101
0.06=0.00+0.06	0000	0110
0.07=0.00+0.07	0000	0111
0.08=0.00+0.08	0000	1000
0.09=0.00+0.09	0000	1001
0.10=0.10+0.00	0001	0000
0.11=0.10+0.01	0001	0001
...	...	...
0.20=0.20+0.00	0010	0000
...	...	...
0.30=0.30+0.00	0011	0000
...	...	...
0.90=0.90+0.00	1001	0000
0.91=0.90+0.01	1001	0001
...	...	...
0.98=0.90+0.08	1001	1000
0.99=0.90+0.09	1001	1001

Πίνακας 5.4.2. Παράδειγμα κώδικα BCD για δύο ψηφία

μετατροπεία το μηδέν αναπαριστάται με 1111 και το FS-1LSB με 0000. Ομοίως, στο **συμπληρωματικό BCD** το μηδέν αναπαριστάται με 1111 και το εννέα με 0110.

Αριθμός bit	Δυαδικό LSB	BCD LSB
4	0.062	0.1
8	0.0039	0.01
12	0.00024	0.001
16	0.000015	0.0001
20	0.000001	0.00001
24	0.0000002	0.000001

Πίνακας 5.4.3. Διακριτική ικανότητα BCD και δυαδικού κώδικα

Ως τώρα, οι κώδικες, που αναφέρθηκαν, είναι **μονοπολικοί** (unipolar), επειδή αναπαριστούν μόνο το μέτρο αναλογικών μεταβλητών και όχι και το πρόσημό τους. Ένας μονοπολικός ADC μετατρέπει μόνο αναλογικά σήματα μιας πολικότητας και ένας μονοπολικός DAC παράγει αναλογικά σήματα μόνο μιας πολικότητας. Για την μετατροπή αναλογικών σημάτων, τόσο θετικών όσο και αρνητικών, απαιτείται ένα επιπλέον **ψηφίο πρόσημου** (sign bit), για να διατηρήσει ο ψηφιακός κώδικας και την πληροφορία του πρόσημου. Σε αυτή την περίπτωση, το πιο σημαντικό ψηφίο διπλασιάζει την αναλογική κλίμακα και υποδιπλασιάζει τη διακριτική ικανότητα. Σε μερικές περιπτώσεις, το ψηφίο πρόσημου παρέχεται από το υπάρχον MSB, με αποτέλεσμα να διπλασιάζεται πάλι η αναλογική κλίμακα αλλά και η διακριτική ικανότητα. Για παράδειγμα, αν η διακριτική ικανότητα ενός 10-bit μετατροπέα είναι 1/1024 σε κλίμακα 0-10V, χρησιμοποιώντας 11-bit **διπολικό** κώδικα, η διακριτική ικανότητα γίνεται 1/2048 σε κλίμακα $\pm 10V$. Αν διατηρήσουμε τα 10-bits και επεκτείνουμε την κλίμακα στα $\pm 10V$, τότε η διακριτική ικανότητα παραμένει 1/1024, οπότε ουσιαστικά διπλασιάζεται σε σχέση με τη τιμή, που είχε πριν, και την κλίμακα, στην οποία αναφέρεται τώρα. Πρέπει να σημειωθεί, ότι, επειδή το ψηφίο πρόσημου διπλασιάζει και την κλίμακα και τον αριθμό των σταθμών, ο λόγος του LSB προς την πλήρη κλίμακα παύει να είναι 2^{-n} και γίνεται $2^{-(n-1)}$ για κάθε πολικότητα. Οι πιο σημαντικοί διπολικοί κώδικες αναλύονται παρακάτω και αναφέρονται στον πίνακα 5.4.4 εκφρασμένοι ως 4-bit (3 bit και το πρόσημο).

Δεκαδικό κλάσμα	Μέτρου-πρόσημου	Δυαδικός αντιστάθμισης	Συμπλήρωμα ως προς 2	Συμπλήρωμα ως προς 1
+7/8	0111	1111	0111	0111
+6/8	0110	1110	0110	0110
+5/8	0101	1101	0101	0101
+4/8	0100	1100	0100	0100
+3/8	0011	1011	0011	0011
+2/8	0010	1010	0010	0010
+1/8	0001	1001	0001	0001
+0	0000	1000	0000	0000
-0	1000	(1000)	(0000)	1111
-1/8	1001	0111	1111	1110
-2/8	1010	0110	1110	1101
-3/8	1011	0101	1101	1100
-4/8	1100	0100	1100	1011
-5/8	1101	0011	1011	1010
-6/8	1110	0010	1010	1001
-7/8	1111	0001	1001	1000
-8/8		(0000)	(1000)	

Πίνακας 5.4.4. Σημαντικοί διπολικοί κώδικες

- **Κώδικας μέτρου-προσήμου (sign-magnitude)**

Είναι ο πιο άμεσος τρόπος, για να εκφραστούν ψηφιακά αναλογικές ποσότητες με πρόσημο. Απλά καθορίζεται ο κώδικας για το μέτρο και προστίθεται το bit πρόσημου. Χρησιμοποιείται, κυρίως, σε DACs, που λειτουργούν στην περιοχή του μηδενός, οπότε απαιτούνται ομαλές και γραμμικές μεταβάσεις από μικρές θετικές τάσεις σε μικρές αρνητικές. Ο **BCD κώδικας μέτρου-προσήμου** κυριαρχεί στα διπολικά ψηφιακά βολτόμετρα (ADCs). Παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα, με κυριότερο το γεγονός, ότι το μηδέν αντιστοιχεί σε δύο κώδικες (1000 και 0000 στο παράδειγμα του πίνακα 5.4.4). Αυτό κάνει δύσκολη τη ψηφιακή διασύνδεση και απαιτείται επιπλέον λογισμικό και εξαρτήματα.

- **Δυαδικός κώδικας αντιστάθμισης (offset binary)**

Είναι ο πιο εύκολος κώδικας για ενσωμάτωση στα κυκλώματα μετατροπής. Πρόκειται, απλά, για το δυαδικό κώδικα, με τη διαφορά, ότι το 0000 δεν αντιστοιχεί στο μηδέν, αλλά στην αρνητική πλήρη κλίμακα. Το MSB αλλάζει στο αναλογικό μηδέν. Είναι ο πιο εύκολος στην υλοποίηση, συμβατός με τις εισόδους και εξόδους των υπολογιστών, μετατρέπεται εύκολα στον κώδικα συμπληρώματος ως προς δύο, που αναφέρεται παρακάτω, και έχει ένα μόνο κώδικα για το μηδέν. Το βασικό του μειονέκτημα είναι, ότι η πιο μεγάλη αλλαγή ψηφίων γίνεται στο μηδέν (αλλάζουν όλα από 0111 σε 1000), γεγονός, που μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα γραμμικότητας και μη σωστή κωδικοποίηση.

- **Κώδικας συμπληρώματος ως προς 1**

Ο κώδικας αυτός είναι ο γνωστός δυαδικός για τα θετικά, ενώ για τα αρνητικά παίρνουμε το συμπλήρωμα ως προς ένα, που είναι το απλό συμπλήρωμα των θετικών (το '1' γίνεται '0' και το '0' γίνεται '1'). Έτσι, το συμπλήρωμα ως προς ένα του 3/8 (0011) είναι 1100. Αυτός ο κώδικας βοηθάει στις αφαιρέσεις, μόνο που το επιπλέον κρατούμενο, που προκύπτει, δεν αγνοείται, αλλά προστίθεται στο αποτέλεσμα. Έτσι, η αφαίρεση του 3/8 από το 4/8 γίνεται $0100 + 1100 = 0000 + 0001 = 0001$, δηλαδή 1/8. Και εδώ παρουσιάζεται το πρόβλημα της ύπαρξης δύο κωδίκων για το μηδέν.

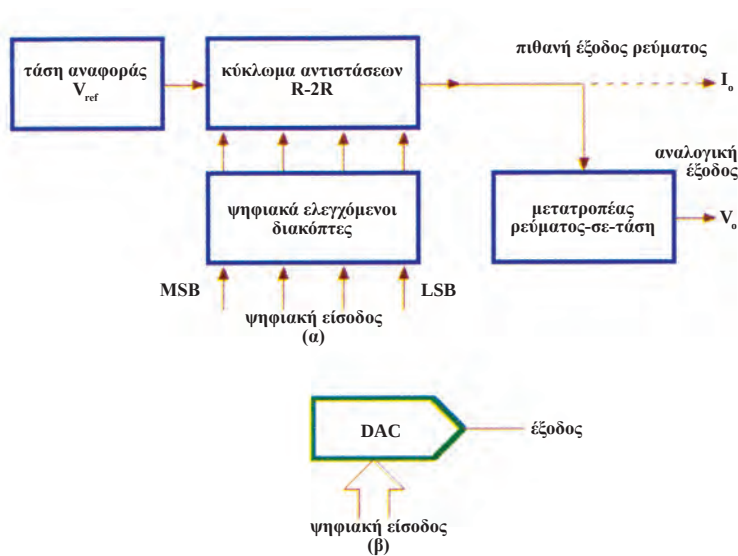
- **Κώδικας συμπληρώματος ως προς 2**

Ο κώδικας αυτός αποτελείται από το δυαδικό κώδικα για τους θετικούς αριθμούς (το θετικό πρόσημο αναπαριστάνεται με 0) και το συμπλήρωμα ως προς δύο κάθε θετικού αριθμού για τον αντίστοιχο αρνητικό. Το συμπλήρωμα ως προς δύο βρίσκεται παίρνοντας το συμπληρωματικό ενός αριθμού και προσθέτοντας 1LSB. Για παράδειγμα, το συμπλήρωμα ως προς δύο του 3/8 (0011) θα είναι το συμπληρωματικό του συν 1LSB, δηλαδή $1100 + 0001 = 1101$. Ο κώδικας αυτός είναι πολύ χρήσιμος σε διάφορους υπολογισμούς, γιατί μπορούμε να κάνουμε πρόσθεση αντί για αφαίρεση. Για παράδειγμα, προκειμένου να αφαιρέσουμε το 3/8 από το 4/8, προσθέτουμε το 4/8 στο -3/8, δηλαδή το 0100 στο 1101. Το αποτέλεσμα είναι 0001 (αγνοώντας το κρατούμενο, που προκύπτει), δηλαδή 1/8. Ο κώδικας αυτός παρουσιάζει τα ίδια μειονεκτήματα με το δυαδικό κώδικα αντιστάθμισης.

Οι μετατροπείς ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DACs) μετατρέπουν τα ψηφιακά σήματα διακριτού χρόνου σε αναλογικά και χρησιμοποιούνται στην έξοδο υπολογιστών για την ανασύνθεση δεδομένων, σε μονάδες απεικόνισης (displays), σε συνθέτες σημάτων (signal synthesizers), κ.ά. Η αναφορά στους DACs προηγείται εκείνης των μετατροπών αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADCs), γιατί πολλά κυκλώματα των ADCs χρησιμοποιούν DACs στην υλοποίηση τους. Ένας DAC μπορεί να θεωρηθεί ως ένα **ψηφιακά ελεγχόμενο ποτενσιόμετρο**, που παρέχει τάση ή ρεύμα εξόδου κανονικοποιημένο ως προς την τιμή της πλήρους κλίμακας.

5.5

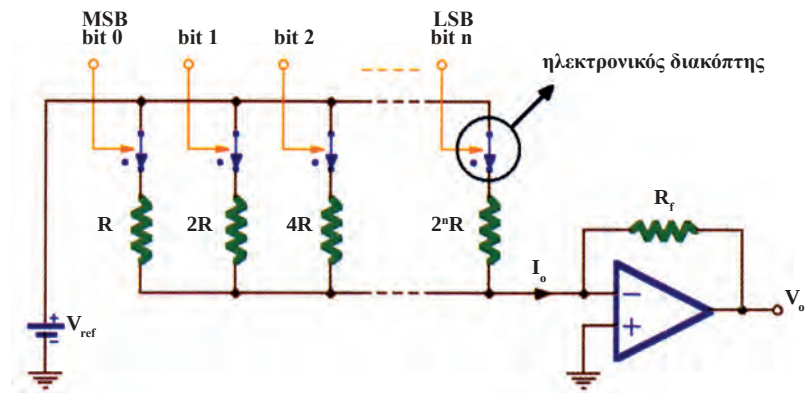
Μετατροπείς Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό



Σχήμα 5.5.1. (α) Βασική δομή και (β) σύμβολο ενός DAC

Η βασική δομή ενός τυπικού DAC δείχνεται στο σχήμα 5.5.1. Η τάση αναφοράς συνδέεται σε κύκλωμα αποτελούμενο από αντιστάσεις. Μια ψηφιακή είσοδος συνδέεται στο κύκλωμα αυτό μέσω κυκλώματος ελέγχου, που βασίζεται σε διακόπτες. Το κλείσιμο κάθε διακόπτη συνεισφέρει στην αύξηση του ρεύματος εξόδου ανάλογα με το δυαδικό βάρος, που του αναλογεί. Η έξοδος του κυκλώματος των αντιστάσεων είναι με τη μορφή ρεύματος, το οποίο μπορεί να μετατραπεί σε τάση με μετατροπέα ρεύματος σε τάση. Τόσο το ρεύμα όσο και η τάση αποτελούν αναλογικές αναπαραστάσεις της ψηφιακής εισόδου. Από τα πολλά κυκλώματα μετατροπών ψηφιακού σήματος σε αναλογικό, που έχουν προταθεί, τα παρακάτω δύο θεωρούνται τα βασικότερα:

- **Μετατροπείς με βάρη αντιστάσεων** (weighted-resistor converters)



Σχήμα 5.5.2. Μετατροπέας D/A με βάρη αντιστάσεων

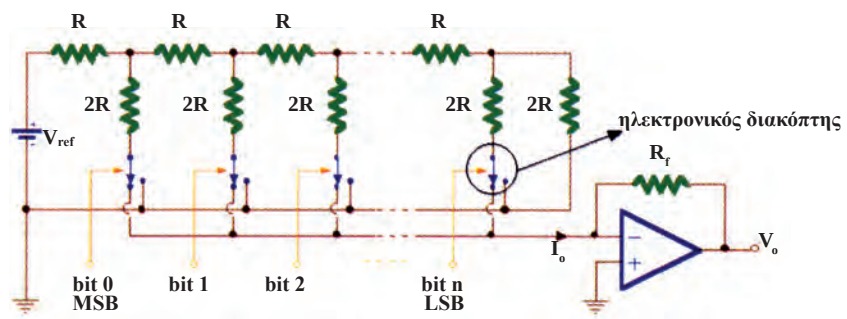
Οι μετατροπείς αυτοί, που φαίνονται στο σχήμα 5.5.2, χρησιμοποιούνταν αρχικά, όταν οι DACs κατασκευάζονταν με διακριτά στοιχεία. Οι διακόπτες ελέγχονται από τη ψηφιακή είσοδο και ανοίγουν για '0', ενώ κλείνουν για '1'. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι, ότι απαιτούνται πολλές διαφορετικές τιμές αντιστάσεων, για να προκαλέσουν ρεύματα με τα ανάλογα βάρη. Η τάση εξόδου σε τέτοιο μετατροπέα δίνεται από τη σχέση:

$$V_o = -I_o \cdot R_f = -\frac{R_f}{R} \cdot V_{ref} \cdot \sum_{i=0}^n 2^{-i} \quad (5.5.1)$$

όπου:

$$\sum_{i=0}^n 2^{-i} = 1 + 2^{-1} + 2^{-2} + \dots + 2^{-n}$$

- **Μετατροπείς R-2R** (R-2R resistor converters)



Σχήμα 5.5.3. R-2R μετατροπέας D/A

Οι μετατροπείς R-2R, που φαίνονται στο σχήμα 5.5.3, σε αντίθεση με τους μετατροπείς με βάρη αντιστάσεων, είναι παγκόσμια αποδεκτοί, λόγω της σχετικής ευκολίας με την οποία επιτυγχάνονται οι λόγοι των αντιστάσεων με μονολιθική τεχνολογία. Κάθε διακόπτης ελέγχεται από το αντίστοιχο bit της ψηφιακής εισόδου δίνοντας, έτσι, το κατάλληλο βάρος στο ρεύμα, που περνά από την αντίστοιχη αντίσταση 2R. Αν το bit είναι '1', συνδέει τον ακροδέκτη της αντίστασης 2R με την είσοδο του τελεστικού ενισχυτή και αν είναι '0' τον προσγειώνει. Η τάση εξόδου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_o = -I_o \cdot R_f = -\frac{R_f}{4R} \cdot V_{ref} \cdot \sum_{i=0}^n 2^{-i} \quad (5.5.2)$$

όπου:

$$\sum_{i=0}^n 2^{-i} = 1 + 2^{-1} + 2^{-2} + \dots + 2^{-n}$$

- **Μετατροπείς τύπου πολλαπλασιασμού (multiplying converters)**

Οι μετατροπείς αυτοί δέχονται μεταβλητή τάση αναφοράς και είναι χρήσιμοι στις τηλεπικοινωνίες και στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Αν D είναι η ψηφιακή είσοδος, η τάση εξόδου τους δίνεται από τη σχέση:

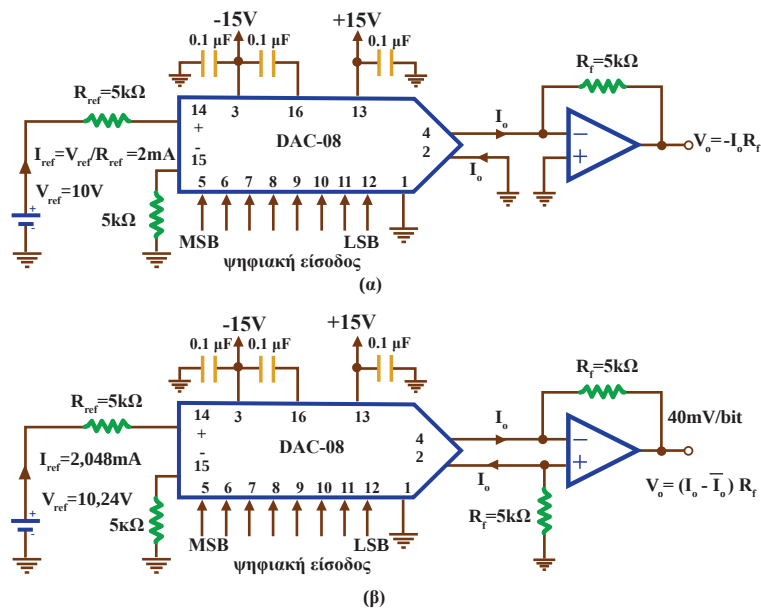
$$V_o = (\text{σταθερά}) \cdot V_{ref} \cdot D \quad (5.5.3)$$

Τέλος, σε εφαρμογές, που απαιτείται υψηλή ταχύτητα χρησιμοποιούνται DACs, που ως έξοδο παρέχουν ρεύμα, οπότε δεν χρησιμοποιούν το μετατροπέα ρεύματος σε τάση. DACs με έξοδο ρεύμα χρησιμοποιούνται σε συστήματα ελέγχου κίνησης και ρομποτικής.

5.6 Ολοκληρωμένοι DACs

Ο DAC-08, που φαίνεται στο σχήμα 5.6.1, είναι φθηνός ολοκληρωμένος μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό. Παρουσιάζει ευελιξία στο γεγονός, ότι διαθέτει δύο εισόδους αναφοράς (ακίδες 14 και 15), που επιτρέπουν και θετικές και αρνητικές τάσεις αναφοράς. Στο σχήμα 5.6.1 βλέπουμε θετική τάση αναφοράς, η οποία μπορεί να εξασφαλίσει ρεύμα αναφοράς από 4mA ως 4mA με τυπική τιμή τα 2mA. Στις ακίδες 5-12 συνδέονται τα οκτώ ψηφία της ψηφιακής εισόδου. Διαθέτει δύο ακροδέκτες για το ρεύμα εξόδου, όπου παρέχει το I_o και το συμπληρωμά του. Η διακριτική ικανότητα του LSB σε τιμή ρεύματος είναι $2^{-n}I_{ref}$. Αν D η δεκαδική τιμή της ψηφιακής εισόδου, το ρεύμα εξόδου είναι:

$$I_o = I_{ref} \cdot 2^{-n} \cdot D \quad (5.6.1)$$



Σχήμα 5.6.1. Σύνδεση DAC-08 για (α) θετική έξοδο και (β) θετική και αρνητική έξοδο

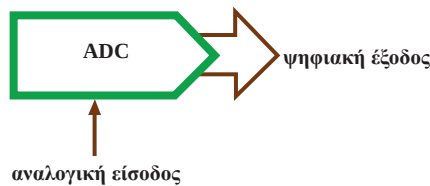
Αν I_{FS} το ρεύμα εξόδου, που αντιστοιχεί σε είσοδο 11111111, το συμπληρωματικό ρεύμα εξόδου είναι:

$$\bar{I}_o = I_{FS} - I_o \quad (5.6.2)$$

Ο DAC-08 δίνει τη δυνατότητα λήψης μονοπολικής (unipolar) εξόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6.1(α), καθώς και εξόδου, τόσο θετικής όσο και αρνητικής, δηλαδή διπολικής (bipolar), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6.1(β). Στη δεύτερη περίπτωση, όταν η ψηφιακή είσοδος αυξάνει κατά 1 bit, το ρεύμα εξόδου αυξάνει κατά 1LSB και το συμπληρωματικό ρεύμα εξόδου μειώνεται κατά 1LSB, με αποτέλεσμα το συνολικό διαφορικό ρεύμα εξόδου να αλλάζει κατά 2LSBs.

Οι μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADCs) μετατρέπουν τα αναλογικά σήματα σε ψηφιακά (σχήμα 5.7.1), ώστε οι λαμβανόμενες τιμές μέτρησης να μπορούν να τύχουν περαιτέρω επεξεργασίας από ένα υπολογιστή. Υπάρχουν τρεις τρόποι ταξινόμησης των μετατροπών αναλογικού σήματος σε ψηφιακό:

- Ανάλογα με το αν είναι **προγραμματιζόμενοι** ή **μη προγραμματιζόμενοι**. Στους προγραμματιζόμενους ADCs η μετατροπή εκτελείται σε χρονικά δοσμένο αριθμό βημάτων.
- Ανάλογα με το αν είναι τύπου **ανατροφοδότησης** ή **ανοικτού βρόχου**. Στους ADCs ανοικτού βρόχου γίνεται απευθείας σύγκριση μεταξύ της αναλογικής εισόδου και μιας τάσης αναφοράς. Στους ADCs ανατροφοδότησης η αναλογική τάση εισόδου συγκρίνεται με αναλογική τάση, που δημιουργείται εσωτερικά ως συνάρτηση της ψηφιακής εξόδου και ανατροφοδοτεί τη μια είσοδο του συγκριτή.
- Ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν μεθόδους **σύγκρισης** τάσεων ή μεθόδους **ολοκλήρωσης**. Κάθε μια από αυτές τις δύο μεθόδους μετατροπής πραγματοποιείται με τρεις τουλάχιστον διαφορετικές τεχνικές, που είναι εμπορικά διαθέσιμες και φαίνονται στον πίνακα 5.7.1, όπου με f_s δηλώνεται η συχνότητα δειγματοληψίας.



Σχήμα 5.7.1. Σύμβολο ενός ADC

Μέθοδος	Ταχύτητα	Τεχνική	12-bit f_s	8-bit f_s
Σύγκριση τάσης	1ms - 10ns	Διαδοχική προσέγγιση	500kHz	8MHz
		Ανίχνευση	250Hz	4kHz
		Ταυτόχρονα		100MHz
Ολοκλήρωση	0.4s - 1ms	Διπλή κλίση	100Hz	1.6kHz
		Εξισορρόπηση φορτίου	60Hz	1kHz
		Μετατροπή τάσης-συχνότητας	2.5Hz	40Hz

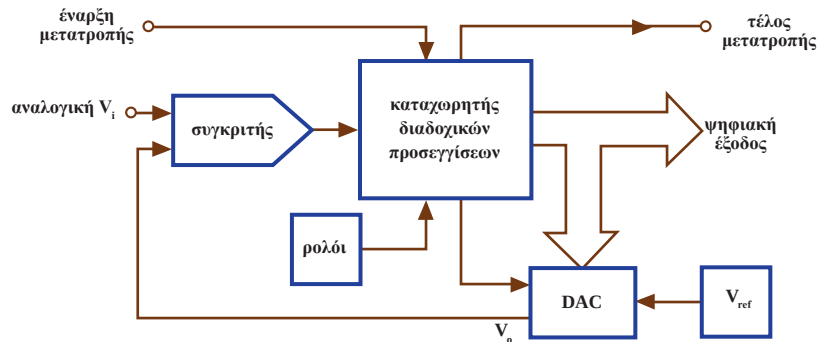
Πίνακας 5.7.1. Μέθοδοι μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

Από τη μέθοδο μετατροπής τάσεων, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τεχνική της **διαδοχικής προσέγγισης** (successive approximation). Ένας τέτοιος μετατροπέας δείχνεται στο σχήμα 5.7.2. Αποτελείται από DAC, συγκριτή και κύκλωμα λογικής, που τα συνδέει. Ένας ακροδέκτης απαιτείται αναλογική τάση

5.7

Μετατροπείς Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό

εισόδου, ενώ η ψηφιακή έξοδος μπορεί να ληφθεί είτε σειριακά είτε παράλληλα. Οι ακροδέκτες έναρξης της μετατροπής και τέλος της μετατροπής δηλώνουν αντίστοιχα πότε αρχίζει και πότε τελειώνει η μετατροπή. Ένα εξωτερικό ρολόι θέτει το χρόνο για την ολοκλήρωση κάθε μετατροπής.

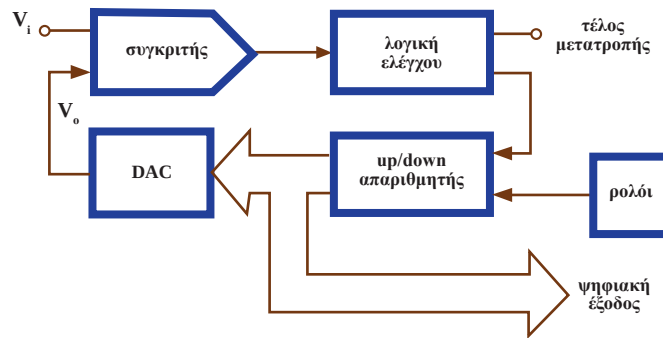


Σχήμα 5.7.2. Διάγραμμα μονάδων μετατροπέα διαδοχικής προσέγγισης

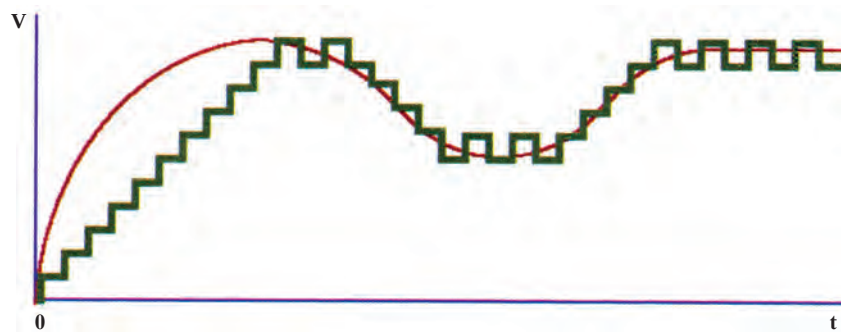
Όσον αφορά τη λειτουργία του παραπάνω κυκλώματος, η εντολή έναρξης της μετατροπής αρχικοποιεί, κατ' αρχήν, τον κύκλο μετατροπής A/D. Το κύκλωμα λογικής, στη συνέχεια, συνδέει ακολουθία ψηφιακών αριθμών στις εισόδους του DAC. Ο DAC μετατρέπει κάθε ψηφιακό αριθμό σε αναλογική έξοδο V_o . Ο συγκριτής συγκρίνει τη V_o με την αναλογική είσοδο V_i και αναφέρει στο κύκλωμα της λογικής, αν η V_i είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από τη V_o . Οι συγκρίσεις ξεκινούν από το MSB και τελειώνουν με το LSB. Με το τέλος της σύγκρισης του LSB, το κύκλωμα της λογικής στέλνει το σήμα τέλους μετατροπής, οπότε και η ψηφιακή έξοδος αναπαριστά την αναλογική είσοδο.

Παράδειγμα μετατροπής δείχνεται στο σχήμα 5.7.3. Η αναλογική είσοδος των 6.5V θα μετατραπεί σε ψηφιακή των 3-bit. Το κάθε bit έχει βάρος 1LSB, 2LSB και 4LSB, όπου το LSB αντιστοιχεί στην τιμή 1Volt. Πρώτα συγκρίνεται η είσοδος με το βάρος 4LSB. Αν είναι μεγαλύτερη, το MSB παίρνει την τιμή 1 διαφορετικά την τιμή 0 και συνεχίζεται η ίδια διαδικασία με τα άλλα ψηφία. Με την έντονη πράσινη γραμμή φαίνεται η λύση για τα 6.5V. Επίσης, φαίνεται, ότι χρειάζεται ένας παλμός ρολογιού για τη σύγκριση κάθε ψηφίου. Ωστόσο, στην περίπτωση μας, χρειάζεται άλλος ένας για την αρχικοποίηση της μετατροπής. Έτσι, αν n ο αριθμός των ψηφίων και T η περίοδος του ρολογιού, ο χρόνος T_c που απαιτείται για τη μετατροπή A/D είναι:

$$T_c = T \cdot (n + 1) \quad (5.7.1)$$

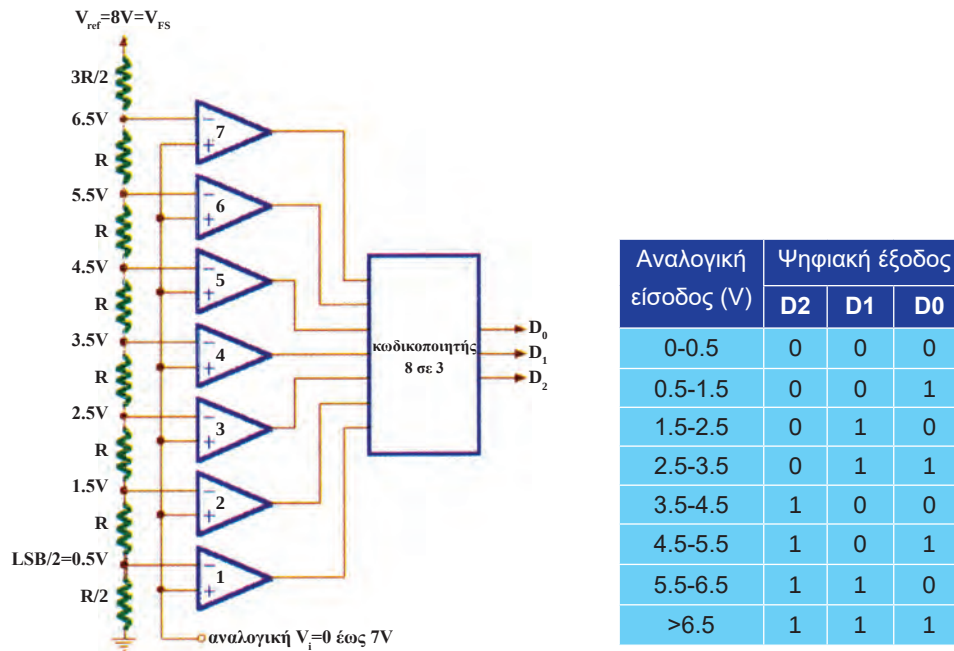


Σχήμα 5.7.4. A/D μετατροπή ανίχνευσης

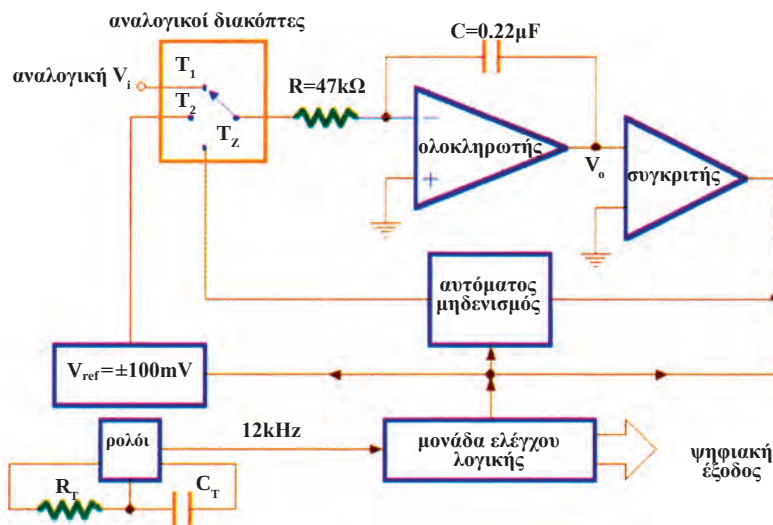


Σχήμα 5.7.5. Διαδικασία ανίχνευσης σε έναν ADC ανίχνευσης

Οι **ταυτόχρονοι** μετατροπείς (flash converters) είναι οι ταχύτεροι από όλους τους ADCs, γιατί όλα τα bits παίρνουν τιμή ταυτόχρονα. Τέτοιος μετατροπέας σύγκρισης τάσης φαίνεται στο σχήμα 5.7.6. Ο διαιρέτης τάσης διανέμει την τάση αναφοράς. Η αναλογική είσοδος τάσης εφαρμόζεται στις εισόδους όλων των συγκριτών. Οι έξοδοί τους καταλήγουν σε κωδικοποιητή 8 γραμμών σε 3. Η λογική του κωδικοποιητή δίνει δυαδική λέξη, που αναπαριστάει την αναλογική είσοδο. Η πολυπλοκότητά τους αυξάνει με γεωμετρική πρόοδο, καθώς αυξάνει το μήκος λέξης της ψηφιακής εξόδου, γιατί η υλοποίησή τους απαιτεί 2^{n-1} συγκριτές για n-bit μετατροπή. Οι μετατροπείς αυτοί διατίθενται σε ολοκληρωμένη μορφή με συχνότητες μετατροπής στα 125MHz για 6 bits και μικρότερες για μεγαλύτερα μήκη λέξεων.



Σχήμα 5.7.6. 3-bit ταυτόχρονη A/D μετατροπή (flash converter)



Σχήμα 5.7.7. Απλοποιημένο διάγραμμα μονάδων μετατροπέα διπλής κλίσης

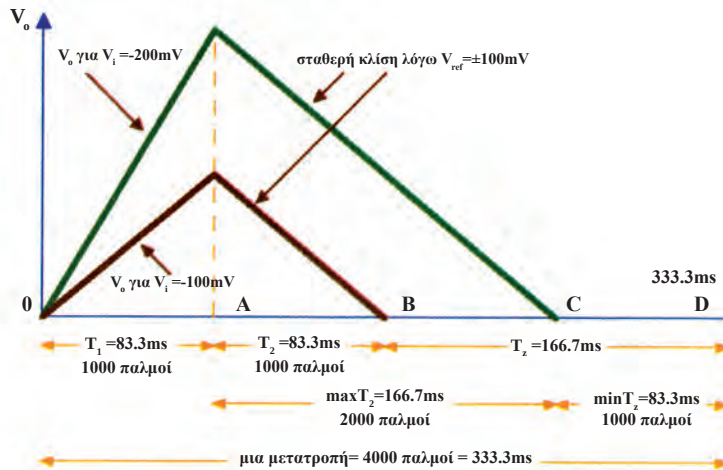
Τυπικός μετατροπέας **διπλής κλίσης** (dual slope) φαίνεται στο σχήμα 5.7.7. Χαρακτηριστικό του είναι τόσο η αυτορρύθμιση, που τον κάνει αναισθητο στη μεταβολή της θερμοκρασίας, όσο και η χρήση φθηνών εξαρτημάτων. Η μονάδα ελέγχου χρησιμοποιεί ρολόι συχνότητας 12kHz, η οποία τίθεται από το χρήστη μέσω της εξωτερικής αντίστασης R_T και του πυκνωτή C_T . Πρέπει να είναι πολλαπλάσια της συχνότητας της τοπικής γραμμής (50 ή 60Hz) για απαλλαγή από το θόρυβο. Η μετατροπή A/D γίνεται σε τρεις φάσεις και διαρκεί χρόνο περίπου 1/3 του δευτερολέπτου. Οι φάσεις αυτές είναι:

- **Φάση ολοκλήρωσης σήματος, T_1 :** Η μονάδα ελέγχου συνδέει την αναλογική τάση εισόδου στον ολοκληρωτή. Η τάση εξόδου του ολοκληρωτή ανεβαίνει ή κατεβαίνει ανάλογα με την πολικότητα της V_i και σε χρόνο, που εξαρτάται από την αντίσταση R και τον πυκνωτή C . Αν η V_i είναι αρνητική, η V_o ανεβαίνει, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7.8. Ο χρόνος T_1 καθορίζεται από την μονάδα ελέγχου στους 1000 παλμούς ρολογιού. Το ρολόι των 12kHz έχει περίοδο 83.3μs, οπότε $T_1=83.3ms$. Αν $V_i=-100V$, η V_o ανεβαίνει από τα 0 στα 833mV. Αν $V_i=-200V$, η V_o ανεβαίνει από τα 0 στα 1666mV. Είναι φανερό, ότι η V_o είναι ανάλογη με τη V_i . Στο τέλος των 1000 παλμών ρολογιού, η μονάδα ελέγχου αποσυνδέει τη V_i και συνδέει την τάση αναφοράς στον ολοκληρωτή, για να αρχίσει η επόμενη φάση.
- **Φάση ολοκλήρωσης αναφοράς, T_2 :** Στη διάρκεια της φάσης T_1 , η μονάδα ελέγχου καθόρισε την πολικότητα της V_i και φόρτισε πυκνωτή (δεν φαίνεται στο σχήμα) σε τάση αναφοράς $V_{ref}=100mV$. Στην αρχή της φάσης T_2 , η μονάδα ελέγχου συνδέει τον πυκνωτή στον ολοκληρωτή, έτσι ώστε η V_{ref} να έχει αντίθετη πολικότητα από τη V_i . Τότε, η V_{ref} αρχίζει να κατεβάζει την έξοδο του ολοκληρωτή προς το μηδέν, όπως δείχνει και το σχήμα 5.7.8. Από τη στιγμή που η τάση αναφοράς είναι σταθερή και η κλίση της πτώσης είναι σταθερή. Ταυτόχρονα, οι παλμοί του ρολογιού αθροίζονται, για να αναπαραστήσουν το πλάτος του σήματος εισόδου. Όταν η V_o φτάσει στο μηδέν, ο συγκριτής ενημερώνει την μονάδα ελέγχου και τελειώνει η δεύτερη φάση, για να αρχίσει η επόμενη. Ο χρόνος T_2 είναι ανάλογος με την V_o και, επομένως, με τη V_i . Η ακριβής σχέση είναι η 5.7.2.

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{V_i}{V_{ref}} \quad (5.7.2)$$

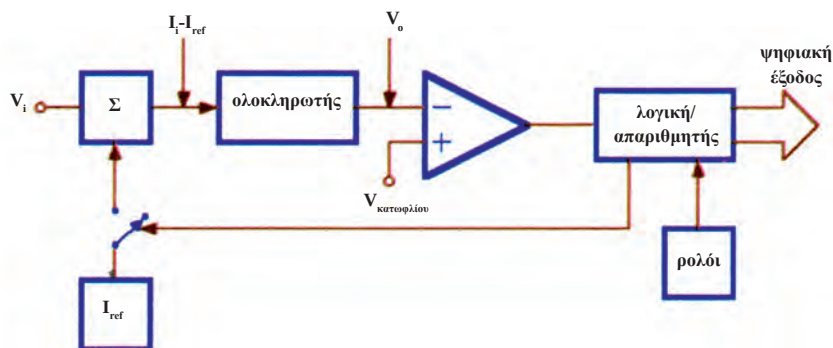
Με αντικατάσταση βρίσκεται $T_2=83.3ms$

- **Φάση αυτόματου μηδενισμού, T_3 :** Στη διάρκεια της τρίτης φάσης, η μονάδα ελέγχου συνδέει πυκνωτή αυτόματου μηδενισμού (δεν φαίνεται στο σχήμα). Ο πυκνωτής αυτός φορτίζεται σε τάση περίπου ίση με το σφάλμα τάσης λόγω των τάσεων αντιστάθμισης. Στη διάρκεια των φάσεων T_1 και T_2 , το σφάλμα τάσης, που αποθηκεύτηκε σε αυτό τον πυκνωτή αναιρεί το όποιο σφάλμα στον πυκνωτή αναφοράς. Έτσι, ο ADC αυτόματα αρχικοποιείται για την επόμενη μετατροπή.



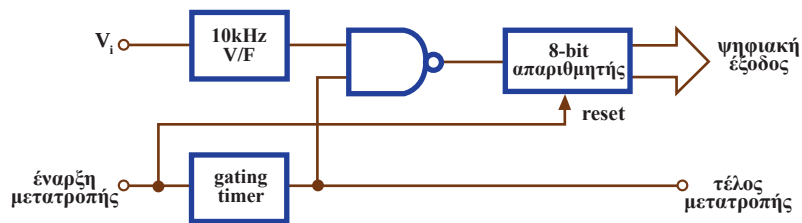
Σχήμα 5.7.8. Χρονισμός φάσεων T_1 , T_2 και T_z

Οι μετατροπείς **εξισορρόπησης φορτίου** (charge balancing) χρησιμοποιούν κύκλωμα μετατροπής τάσης σε συχνότητα, για να μετατρέψουν σήμα εισόδου σε ρεύμα I_i από το οποίο αφαιρείται ρεύμα αναφοράς I_{ref} . Το ρεύμα διαφοράς, που προκύπτει ολοκληρώνεται σε διαδοχικά διαστήματα, που καθορίζονται από συγκριτή κατωφλίου (threshold comparator) και από τις μετρήσεις απαριθμητή. Ο μετατροπέας αυτός παρουσιάζει παρόμοια ταχύτητα και πολυπλοκότητα με το μετατροπέα διπλής κλίσης. Ωστόσο, ο ADC εξισορρόπησης φορτίου είναι περισσότερο συμβατός και, επομένως, περισσότερο πιθανό να βρεθεί σε ολοκληρωμένη μορφή μέσα σε μικροελεγκτές και συσκευές που σχετίζονται με μικροεπεξεργαστές. Στο σχήμα 5.7.9 περιγράφεται η λειτουργία μετατροπέα εξισορρόπησης φορτίου.



Σχήμα 5.7.9. A/D μετατροπή εξισορρόπησης φορτίου

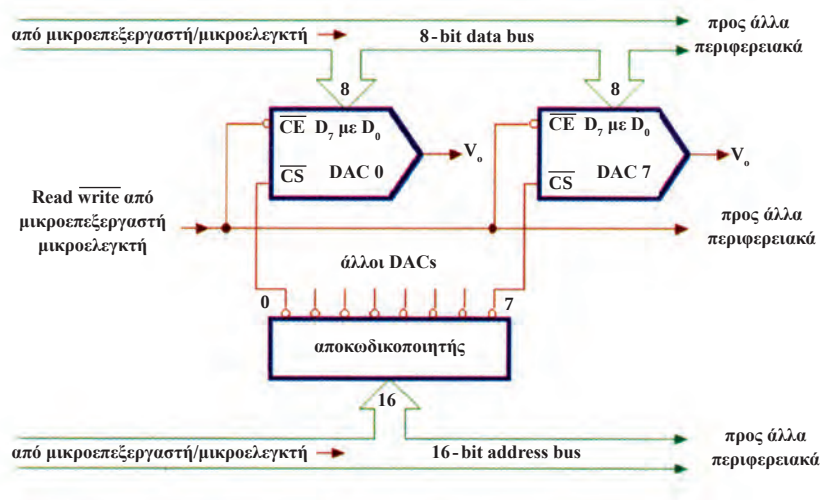
Οι ADCs, που βασίζονται σε **μετατροπή τάσης-συχνότητας** (V/F: voltage-to-frequency) χρησιμοποιούνται σε φθηνά και χαμηλού ρυθμού μετάδοσης συστήματα συλλογής δεδομένων από μεγάλες αποστάσεις, ενσωματώνοντας απομόνωση (isolation). Διάγραμμα βαθμίδων πλήρους 8-bit V/F ADC φαίνεται στο σχήμα 5.7.10. Ο V/F μπορεί να παρέχει έξοδο συχνότητας παλμών 0-10kHz για σήμα εισόδου 1mV-10V. Οι παλμοί αυτοί απλά απαριθμούνται για καθορισμένο χρονικό διάστημα (gating time) από απαριθμητή. Ο χρόνος αυτός είναι 25.6ms για 8-bit μετατροπή και 0.41s για 12-bit μετατροπή. Σε κάθε περίοδο λαμβάνεται η μέση τιμή του σήματος εισόδου, οπότε πρόκειται για μετατροπέα ολοκλήρωσης.



Σχήμα 5.7.10. A/D μετατροπή V/F

Η διασύνδεση των μετατροπών με μικροεπεξεργαστές/μικροελεγκτές διέπεται από κάποιες αρχές. Οι καταχωρητές ενός DAC ή οποιουδήποτε άλλου περιφερειακού βλέπονται συνήθως ως διεύθυνση μνήμης ή I/O. Οι DACs διαθέτουν μόνο καταχωρητές εγγραφής. Αυτό σημαίνει, ότι ο DAC έχει έναν καταχωρητή, στον οποίο ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να στείλει δεδομένα μέσω του διαύλου δεδομένων. Οι ADCs διαθέτουν μόνο καταχωρητές ανάγνωσης, τα περιεχόμενα των οποίων διαβάζονται από το μικροεπεξεργαστή μέσω του διαύλου δεδομένων. Και οι DACs και οι ADCs διαθέτουν λογική, που επιτρέπει την επιλογή τους.

Τόσο οι καταχωρητές ανάγνωσης όσο και εκείνοι της εγγραφής έχουν δύο καταστάσεις λειτουργίας: την κατάσταση **προσπέλασης** (transparent) και την κατάσταση **ασφάλισης** (latching). Όταν ένας καταχωρητής είναι ανενεργός, θυμάται (latches) την τελευταία ψηφιακή λέξη, που γράφτηκε σε αυτόν και μπορεί να αποσυνδεθεί από το δίαυλο δεδομένων. Όταν ο καταχωρητής είναι συνδεδεμένος στο δίαυλο δεδομένων, τότε είναι προσπελάσιμος (transparent). Για παράδειγμα, 8-bit καταχωρητής ενός DAC (σχήμα 5.8.1) μπορεί να διαβάσει τα bits D_7 ως D_0 από το δίαυλο δεδομένων, όπου τα έχει τοποθετήσει ο μικροεπεξεργαστής. Πώς, όμως, ένας μικροεπεξεργαστής ενημερώνει ένα DAC ή έναν ADC, ότι έχει επιλεγεί;



Σχήμα 5.8.1. Διασύνδεση DAC με διαύλους δεδομένων και διευθύνσεων

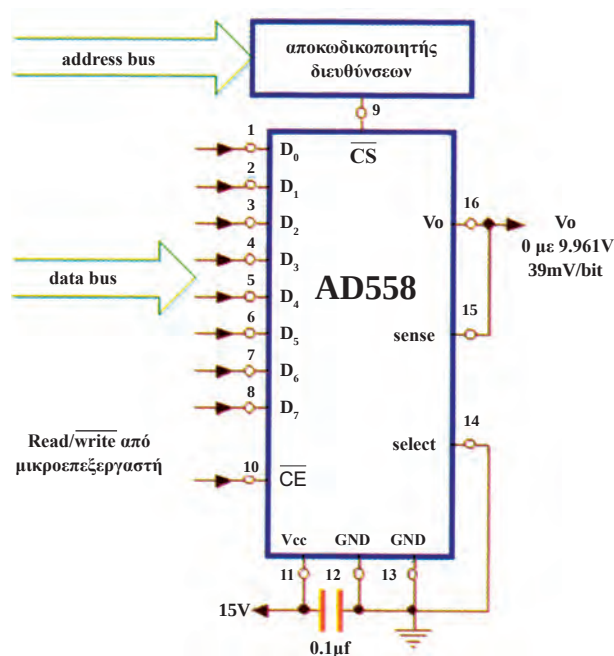
Κάθε καταχωρητής ενός DAC ή ADC έχει μια διεύθυνση, όπως οποιαδήποτε θέση μνήμης ή θέση I/O μικροεπεξεργαστή. Για να γίνει εγγραφή σε συγκεκριμένο DAC, ο μικροεπεξεργαστής τοποθετεί τη διεύθυνση αυτού του DAC στο δίαυλο διευθύνσεων (σχήμα 5.8.1). Μια από τις εξόδους ενός αποκωδικοποιητή γίνεται μηδέν, για να ενεργοποιηθεί ο ακροδέκτης επιλογής $\overline{CS}$ του επιλεγόμενου DAC. Ο καταχωρητής του DAC δεν είναι, ακόμα, προσπελάσιμος. Για να επιλεγεί πλήρως ο μικροεπεξεργαστής θέτει μηδέν στον ακροδέκτη

5.8

Μετατροπείς και Μικροεπεξεργαστές/Μικροελεγκτές

ενεργοποίησης $\overline{CE}$ του DAC. Αυτό γίνεται μέσα από τη γραμμή ελέγχου $\overline{read/write}$, που μπορεί να αναφέρεται και ως $R/\overline{W}$. Όταν και το $\overline{CS}$ και το $\overline{CE}$ βρίσκονται σε στάθμη '0', μόνο τότε ένας DAC μπορεί να επικοινωνήσει με το μικροεπεξεργαστή. Τότε, ο εσωτερικός του καταχωρητής γίνεται προσπελάσιμος και δέχεται δεδομένα από το δίαυλο δεδομένων. Ο DAC μετατρέπει, τότε, τα ψηφιακά δεδομένα σε αναλογική τάση εξόδου V_o . Έτσι, ολοκληρώνεται η διαδικασία εγγραφής. Όταν και το $\overline{CS}$ και το $\overline{CE}$ βρίσκονται σε στάθμη '1', ο καταχωρητής του DAC εισέρχεται σε κατάσταση ασφάλισης και αποθηκεύει τα δεδομένα, που γράφτηκαν σε αυτόν. Η επιλογή ADC είναι παρόμοια. Δηλαδή, και εδώ πρέπει και το $\overline{CS}$ και το $\overline{CE}$ να βρίσκονται σε στάθμη '0'. Τότε, ο καταχωρητής του ADC γίνεται προσπελάσιμος και μπορεί να διαβαστεί από το μικροεπεξεργαστή μέσω του διαύλου δεδομένων.

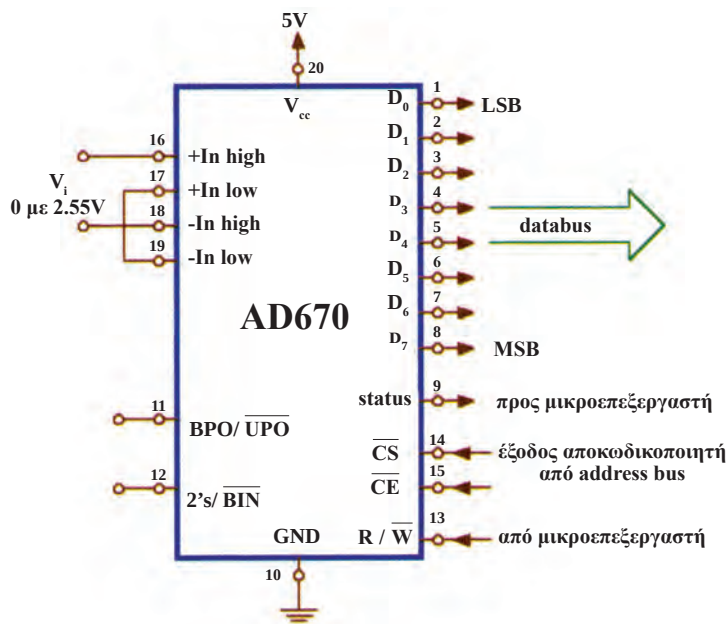
Παράδειγμα 8-bit DAC, συμβατού με μικροεπεξεργαστή, αποτελεί ο **AD558**, που φαίνεται στο σχήμα 5.8.2. Περιέχει τελεστικό ενισχυτή, για να δίνει αναλογική τάση εξόδου, που μπορεί να προγραμματιστεί να παίρνει τιμές από 0 έως 2.56V ή από 0 έως 9.961V. Απαιτεί τροφοδοσία μεταξύ 4.5V και 16.5V. Διαθέτει ψηφιακή και αναλογική γείωση (ακροδέκτες 12 και 13 αντίστοιχα), 8 ακροδέκτες για τη ψηφιακή είσοδο με το D_0 να είναι το LSB και το D_7 το MSB. Οι ακροδέκτες αυτοί συνδέουν το δίαυλο δεδομένων στον εσωτερικό καταχωρητή του AD558, όταν επιλέγεται ο AD558. Όταν το $\overline{CS}$ και το $\overline{CE}$ είναι '1', οι ψηφιακές είσοδοι βρίσκονται σε κατάσταση ασφάλισης και αποσυνδέονται από το δίαυλο δεδομένων. Αν και το $\overline{CS}$ και το $\overline{CE}$ είναι '0', οι είσοδοι βρίσκονται σε κατάσταση προσπέλασης και συνδέονται με το δίαυλο δεδομένων. Τότε, εκτελείται η μετατροπή D/A, που διαρκεί περίπου 200nsec.



Σχήμα 5.8.2. Διάταξη ακροδεκτών του DAC AD558 για $V_o=0$ με 9.961V

Η αναλογική έξοδος εμφανίζεται μεταξύ των ακροδεκτών 16 και 13. Ο ακροδέκτης 14 επιλέγει (select) το πόσο υψηλή θα είναι η έξοδος. Όταν συνδέεται, όπως στο σχήμα 5.8.2, παρέχει τάση 0 με 9.961V. Όταν βραχυκυκλώνεται με τους ακροδέκτες 15 και 16, παρέχει τάση 0 με 2.56V. Ο ακροδέκτης 15 (sense) χρησιμοποιείται για επικοινωνία με φορτία, που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση.

Παράδειγμα ADC 8-bit διαδοχικής προσέγγισης συμβατού με μικροεπεξεργαστή αποτελεί ο **AD670**, που φαίνεται στο σχήμα 5.8.3. Εκτός από τα βασικά χαρακτηριστικά που έχουν ήδη περιγραφεί, ο ADC διαδοχικής προσέγγισης περιέχει ρολόι, ενισχυτή μέτρησης (instrumentation amplifier) και χρειάζεται μόνο 5V τροφοδοσία. Οι αναλογικές εισοδοί 16-19 είναι εισοδοί στον ενισχυτή μέτρησης. Μπορούν να προγραμματιστούν, για να πετύχουμε την επιθυμητή διακριτική ικανότητα. Το σχήμα 5.8.3 δείχνει τη σύνδεση για είσοδο 0 με 2.55V διακριτικής ικανότητας 10mV/LSB. Για είσοδο από 0 έως 255mV πρέπει να βραχυκυκλωθεί ο ακροδέκτης 16 με τον 17 και ο 18 με τον 19. Η ψηφιακή έξοδος λαμβάνεται από τους ακροδέκτες 1-8. Όταν ο μικροεπεξεργαστής δίνει εντολή στον AD670 να εκτελέσει μια μετατροπή, το αποτέλεσμα αποθηκεύεται στον καταχωρητή του ADC μέχρι να λάβει εντολή ανάγνωσης. Επομένως, συνήθως, ο καταχωρητής του ADC είναι αποσυνδεδεμένος από το δίαυλο δεδομένων. Ο ακροδέκτης 11 επιτρέπει στο μικροεπεξεργαστή να ενημερώσει τον AD670, αν θα δεχθεί είσοδο μονοπολική ή διπολική. Αν βρίσκεται σε στάθμη '0', επιλέγεται η μονοπολική είσοδος. Ο ακροδέκτης 12 επιτρέπει στο μικροεπεξεργαστή να ενημερώσει τον AD670, αν πρέπει να παρουσιάσει την έξοδο με δυαδικό κώδικα ή κώδικα συμπληρώματος ως προς 2.



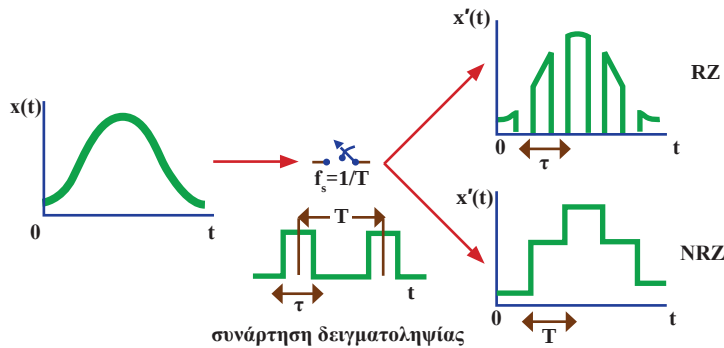
Σχήμα 5.8.3. Διάταξη ακροδεκτών του AD670 για διακριτική ικανότητα 10mV/bit

Η λειτουργία των ακροδεκτών 13-15 είναι ήδη γνωστή. Αν και οι τρεις αυτοί ακροδέκτες είναι '0', ο ADC μετατρέπει συνεχώς κάνοντας μια μετατροπή κάθε 10μsec, ενώ είναι αποσυνδεδεμένος από το δίαυλο δεδομένων. Αν και οι τρεις ακροδέκτες είναι '1', ο AD670 είναι μη επιλεγμένος. Ο ακροδέκτης κατάστασης 9 παραμένει σε στάθμη '1' κατά τη διάρκεια μιας μετατροπής. Όταν η μετατροπή ολοκληρώνεται, γίνεται '0' για να ενημερωθεί ο μικροεπεξεργαστής, ότι τα δεδομένα είναι διαθέσιμα στον καταχωρητή. Για να διαβάσει τα δεδομένα, ο μικροεπεξεργαστής θέτει το $R / \overline{W}$ '1' και τα status, $\overline{CS}$ και $\overline{CE}$ '0', οπότε αυτά συνδέονται στο δίαυλο δεδομένων. Θα παραμείνουν εκεί μέχρι τα $\overline{CS}$ και $\overline{CE}$ να γίνουν '1' ή το $R / \overline{W}$ '0'.

Τα συστήματα, που χρησιμοποιούν δειγματοληπτημένα δεδομένα, παρέχουν διακριτά σήματα πεπερασμένης ακρίβειας από συνεχή σήματα, που, θεωρητικά, έχουν την πραγματική ακρίβεια. Αυτό, που παρουσιάζει ενδιαφέρον στις διαδικασίες δειγματοληψίας είναι το μέγεθος της πληροφορίας, που χάνεται κατά τη δειγματοληψία και η ακρίβεια, με την οποία μπορεί να γίνει η ανασύνθεση του αρχικού σήματος από τις δειγματοληπτημένες τιμές του. Μπορούμε να διακρίνουμε δύο κατηγορίες περιοδικής δειγματοληψίας: τη **δειγματοληψία χωρίς επιστροφή στο μηδέν** (NRZ: nonreturn-to-zero) και τη **δειγματοληψία με επιστροφή στο μηδέν** (RZ: return-to-zero). Στο σχήμα 5.9.1 παρουσιάζονται οι δύο αυτές κατηγορίες. Ο όρος T παριστάνει το εύρος της δειγματοληψίας σε κάθε περίοδο δειγματοληψίας T . Η δειγματοληψία RZ χρησιμοποιείται κυρίως για πολυπλεξία σημάτων πολλών καναλιών σε ένα μονό κανάλι, όπως σε συστήματα τηλεμετρίας. Η δειγματοληψία NRZ γίνεται εσωτερικά στη λειτουργία όλων των συσκευών μετατροπής δεδομένων, που αφορούν συστήματα εισόδου και εξόδου υπολογιστών.

5.9

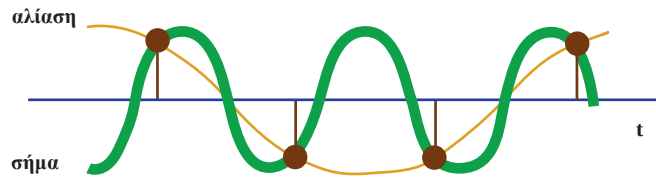
Δειγματοληπτημένα Δεδομένα



Σχήμα 5.9.1. Παράσταση δειγματοληπτημένων δεδομένων

5.10 Θόρυβος Αλίσιας

Υπενθυμίζεται, ότι, σύμφωνα με το **θεώρημα Nyquist**, η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από τη συχνότητα του αναλογικού σήματος, ώστε η ανασύνθεση του σήματος να μπορεί να γίνει με ικανοποιητική προσέγγιση.

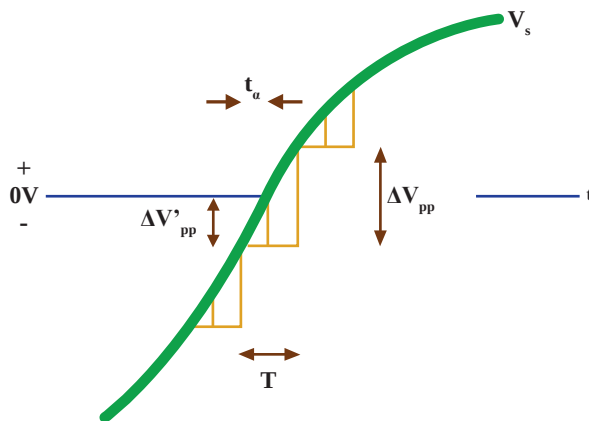


Σχήμα 5.10.1. Υποδειγματοληψία - Αλίσια

Το φαινόμενο της **υποδειγματοληψίας** (undersampling) συνεχούς σήματος παριστάνεται στο σχήμα 5.10.1. Αυτό δείχνει, ότι το σήμα, που ανασυνθέτουμε από ένα υποδειγματοληπτημένο αρχικό σήμα, δεν είναι πανομοιότυπο με αυτό, αλλά παρουσιάζει παραμόρφωση. Τα παραμορφωμένα σήματα εμφανίζονται με μικρότερη συχνότητα (aliases) από το αρχικό, όταν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μικρότερη από το διπλάσιο της συχνότητας του σήματος, δηλαδή όταν δεν ισχύει το θεώρημα Nyquist. Όσο μειώνεται η συχνότητα δειγματοληψίας, εμφανίζονται επικαλύψεις στο φάσμα του δειγματοληπτημένου σήματος και παρατηρείται το φαινόμενο της αλίσιας. Τα αποτελέσματα της **αλίσιας** συνοψίζονται στην παραγωγή της παραμόρφωσης της **ενδοδιαμόρφωσης** (intermodulation distortion). Ως ενδοδιαμόρφωση ορίζεται το φαινόμενο της διαμόρφωσης συνιστώσας σύνθετου σήματος από άλλη συνιστώσα του ίδιου σήματος. Ως **συχνότητα αναδίπλωσης** f_o (folding frequency) ορίζεται η μεγαλύτερη δυνατή συχνότητα, στην οποία μπορεί να υπάρχουν δειγματοληπτημένα δεδομένα, χωρίς να έχουν υποδειγματοληπτηθεί. Συνεπώς, η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να επιλέγεται μεγαλύτερη από το διπλάσιο της συχνότητας του σήματος, για να αποφεύγεται η εμφάνιση της αλίσιας, πράγμα που είναι δύσκολο να επιτευχθεί στην πράξη. Όλα τα παραπάνω προβλήματα, μαζί με θόρυβο λόγω συνιστωσών εκτός της βασικής ζώνης του κύριου σήματος, όπως η **σύμφωνη παρεμβολή** (coherent interference), είτε **τυχαίο θόρυβο** (random noise spectra), που παρουσιάζεται πάνω από τη συχνότητα f_o , οπότε και υποδειγματοληπτείται, αποτελούν το **θόρυβο αλίσιας** (noise aliasing) στα συστήματα δειγματοληψίας.

Η λήψη διακριτών τιμών από σήμα συνεχούς χρόνου με μέθοδο δειγματοληψίας, όπως είδαμε στο σχήμα 5.9.1, προσφέρει ακριβή αναπαράσταση του σήματος μόνο μέσα στο διάστημα δειγματοληψίας. Η αναπαράσταση δεδομένων στη NRZ δειγματοληψία, που φαίνεται στο σχήμα 5.9.1, αναπαριστάται με την πορτοκαλί γραμμή στο σχήμα 5.11.1. και δηλώνει τον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα τυγχάνουν διαχείρισης στους υπολογιστές. Δηλαδή, το παρόν δείγμα είναι το τρέχον δεδομένο μέχρι να αποκτηθεί νέο δείγμα. Σε αυτή την εξέλιξη εμφανίζεται το **σφάλμα μεταξύ δειγμάτων** ΔV_{pp} (intersample) και το **σφάλμα διανοίγματος** $\Delta V'_{pp}$ (aperture), που είναι ουσιαστικά σχέσεις χρόνου και πλάτους. Το intersample και το aperture σφάλμα είναι σφάλματα του συστήματος, σε αντίθεση με το σφάλμα κβάντισης, που είναι σφάλμα του ADC. Το intersample σφάλμα ΔV_{pp} για ημιτονικό σήμα V_s παίρνει τη μέγιστη τιμή του, όταν η V_s έχει τη μέγιστη κλίση, δηλαδή κατά το πέρασμα από τη μηδενική τάση (σχήμα 5.11.1). Γενικά, το σφάλμα αυτό παριστάνει την απόκλιση των δεδομένων στην έξοδο του A/D από τις αντίστοιχες τιμές του συνεχούς σήματος εισόδου, ως συνέπεια της δειγματοληψίας, κβάντισης και κωδικοποίησης του σήματος.

Ο χρόνος διανοίγματος (aperture) t_a παρέχει το πεπερασμένο πλάτος αβεβαιότητας $\Delta V'_{pp}$, μέσα στο οποίο αποκτάται δειγματοληπτημένο σήμα (σχήμα 5.11.1). Το σφάλμα διανοίγματος πρέπει να ελαχιστοποιείται στα συστήματα δειγματοληψίας δεδομένων. Η μεταβολή του χρόνου διανοίγματος t_a δεν επηρεάζει το intersample σφάλμα. Για παράδειγμα, ένα γρήγορο κύκλωμα S/H, που προηγείται ενός A/D μετατροπέα, παρέχει μικρό σφάλμα διανοίγματος, αλλά το intersample σφάλμα εξακολουθεί να καθορίζεται από την περίοδο δειγματοληψίας T .



Σχήμα 5.11.1. Αναπαράσταση intersample και aperture σφάλματος

5.11

Σφάλματα σε Σχέση με τη Δειγματοληψία

5.12 Επιλογή Κατάλληλου Μετατροπέα, Πολυπλέκτη, S/H

Όπως είναι γνωστό, στην αγορά υπάρχει μεγάλος αριθμός D/A και A/D μετατροπέων, πολυπλεκτών και S/H κυκλωμάτων από διάφορους κατασκευαστές, γεγονός που κάνει δύσκολη την επιλογή των κατάλληλων κυκλωμάτων για συγκεκριμένη εφαρμογή. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιαστής συστήματος συλλογής και μετατροπής δεδομένων πρέπει να έχει πλήρη γνώση των απαιτήσεων της εφαρμογής, που θέλει να υλοποιήσει, τόσο σε σχέση με το μετατροπέα, όσο και σε σχέση με τον πολυπλέκτη και το S/H, για να προβεί στην κατάλληλη επιλογή. Έτσι, θα πρέπει για κάθε μια από τις περιπτώσεις να γνωρίζει:

- **Επιλογή μετατροπέα**

- ▶ Τι διακριτική ικανότητα απαιτείται, πόσα bit εισόδου πρέπει να μετατραπούν και με πόση ακρίβεια σε ένα DAC; Ποιο είναι το εύρος της αναλογικής εισόδου ενός ADC;
- ▶ Τι κώδικα πρέπει να χρησιμοποιήσει; Η ψηφιακή είσοδος είναι σειριακή ή παράλληλη;
- ▶ Τι σήμα εξόδου χρειάζεται, ρεύμα ή τάση; Ποιο πρέπει να είναι το εύρος της πλήρους κλίμακας;
- ▶ Τι τάση αναφοράς απαιτείται, σταθερή ή μεταβλητή (MDAC);
- ▶ Τι είδους ψηφιακή διασύνδεση επιθυμεί; Τι απαιτήσεις ταχύτητας υπάρχουν; Πόσο χρόνο πρέπει να περιμένει το σύστημα για να αποκατασταθεί το σήμα εξόδου στον DAC; Γενικά, σε πόσο χρόνο πρέπει να ολοκληρώνεται μια μετατροπή D/A ή A/D;
- ▶ Σε τι περιοχές θερμοκρασίας πρέπει να λειτουργεί ο μετατροπέας;
- ▶ Πόσο σταθεροποιημένες είναι οι τάσεις τροφοδοσίας, που θα χρησιμοποιηθούν;
- ▶ Τι χαρακτηριστικά έχει το σήμα εισόδου; Είναι θορυβώδες, δειγματοληπτημένο, φιλτραρισμένο, μεταβάλλεται γρήγορα ή αργά; Τι είδους A/D μετατροπή πρέπει να επιλέξει;

- **Επιλογή πολυπλέκτη**

- ▶ Πόσα κανάλια εισόδου απαιτούνται;
- ▶ Πόσος χρόνος απαιτείται για την αποκατάσταση της επιθυμητής ακρίβειας όταν μεταβαίνει από το ένα κανάλι στο άλλο; Ποιος είναι ο μέγιστος ρυθμός εναλλαγής;
- ▶ Ο ρυθμός εναλλαγής θα είναι σταθερός ή θα πρέπει να είναι προσαρμόσιμος στις εκάστοτε συνθήκες της εφαρμογής;

- **Επιλογή S/H**

- ▶ Ποιο είναι το εύρος του σήματος εισόδου;
- ▶ Τι ακρίβεια απαιτείται;
- ▶ Τι διαρροές επιτρέπεται να υπάρχουν στη διάρκεια της κράτησης;
- ▶ Πόσο επηρεάζει η θερμοκρασία και οι διακυμάνσεις της τάσης τροφοδοσίας;

- Τα βασικότερα στοιχεία συστήματος συλλογής και μετατροπής δεδομένων είναι ο αναλογικός πολυπλέκτης, το κύκλωμα δειγματοληψίας κράτησης και ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ADC.
- Απαραίτητοι στη μετατροπή δεδομένων είναι οι κώδικες, με σημαντικότερο τον δυαδικό. Άλλοι σημαντικοί κώδικες είναι ο BCD, συμπληρωματικός δυαδικός, συμπληρωματικός BCD, μέτρου πρόσημου, δυαδικός αντιστάθμισης, συμπληρώματος ως προς 2 και συμπληρώματος ως προς 1. Κατά τη χρήση των μετατροπέων εμφανίζονται ορισμένα σφάλματα, όπως το σφάλμα αντιστάθμισης, ενίσχυσης, μη γραμμικότητας και διαφορικής μη γραμμικότητας. Στους ADCs εμφανίζεται επίσης το σφάλμα κβάντισης
- Οι σημαντικότεροι μετατροπείς ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DACs) είναι οι μετατροπείς με βάρη αντιστάσεων και οι μετατροπείς R-2R. Σε ολοκληρωμένη μορφή, μετατροπέας που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως είναι ο DAC-08.
- Οι μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADCs) βασίζονται είτε στην τεχνική της σύγκρισης είτε της ολοκλήρωσης. Χαρακτηριστικοί τέτοιοι μετατροπείς είναι οι διαδοχικής προσέγγισης, διπλής κλίσης, εξισορρόπησης φορτίου, μετατροπής τάσης-συχνότητας, ανίχνευσης και οι ταυτόχρονοι μετατροπείς (flash converters).
- Οι μετατροπείς, που είναι συμβατοί με μικροεπεξεργαστές/μικροελεγκτές, διαθέτουν τόσο εσωτερικούς καταχωρητές όσο και σχετική λογική διασύνδεσης.
- Βασικές κατηγορίες δειγματοληψίας είναι η δειγματοληψία χωρίς επιστροφή στο μηδέν NRZ και η δειγματοληψία με επιστροφή στο μηδέν RZ.
- Για να αποφεύγονται τα προβλήματα υποδειγματοληψίας και αλίσιας πρέπει να ικανοποιείται το θεώρημα Nyquist. Σημαντικά σφάλματα σε σχέση με τη δειγματοληψία είναι το σφάλμα μεταξύ δειγμάτων (intersample) και το σφάλμα διανοίγματος (aperture).
- Για τη σωστή επιλογή μετατροπέα, πολυπλέκτη και S/H σε μια εφαρμογή απαιτείται καλή γνώση των απαιτήσεων της εφαρμογής.

Αξιολόγηση • Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

1. Το σφάλμα κβάντισης κυμαίνεται μεταξύ:
 - α) -LSB και +LSB
 - β) -MSB και + MSB
 - γ) -1/2LSB και +1/2LSB
 - δ) -1/2MSB και +1/2MSB
2. Ο δεκαδικός αριθμός 0.91 κωδικοποιείται σε κώδικα BCD ως:
 - α) 1010 0010
 - β) 1001 0001
 - γ) 0110 1110
 - δ) 0010 0001
3. Το συμπληρωματικό ρεύμα εξόδου DAC-08 είναι:
 - α) αντίθετο του ρεύματος εξόδου
 - β) το μισό του ρεύματος εξόδου
 - γ) το διπλάσιο του ρεύματος εξόδου
 - δ) το ρεύμα πλήρους κλίμακας μείον το ρεύμα εξόδου
4. Η A/D μετατροπή διπλής κλίσης γίνεται σε:
 - α) δύο φάσεις
 - β) μία φάση
 - γ) τρεις φάσεις
 - δ) τέσσερις φάσεις

• Ερωτήσεις του τύπου Σωστό/Λάθος

1. Διακριτική ικανότητα ονομάζεται το βάρος, που αντιστοιχεί στο MSB.
2. Οι διπολικοί κώδικες κωδικοποιούν αριθμούς ενός μόνο πρόσημου.
3. Οι DACs τύπου πολλαπλασιασμού δέχονται σταθερή τάση αναφοράς.
4. Η A/D μετατροπή διαδοχικής προσέγγισης βασίζεται σε ολοκλήρωση.
5. Οι μετατροπείς, που είναι συμβατοί με μικροεπεξεργαστές, εμπεριέχουν εσωτερικούς καταχωρητές.
6. Κατά την ενδοδιαμόρφωση, συνιστώσα σύνθετου σήματος διαμορφώνεται από άλλη συνιστώσα του ίδιου σήματος.

• Ερωτήσεις αντιστοίχισης

1. Να αντιστοιχίσετε τους παρακάτω αριθμούς σύμφωνα με τον κώδικα μέτρου πρόσημου:

+5/8	1101
+4/8	0101
-3/8	1100
-4/8	0100
-5/8	1011

• Ερωτήσεις συμπλήρωσης κενού

1. Οι τεχνικές μετατροπής από _____ σήμα σε _____ βασίζονται σε δυο κατηγορίες, από τις οποίες η πρώτη χρησιμοποιεί μεθόδους _____, ενώ η δεύτερη μεθόδους _____ τάσεων.
2. Οι _____ μετατροπείς (flash converters) είναι οι _____ από όλους τους ADCs γιατί όλα τα bits παίρνουν τιμή _____.
3. Σύμφωνα με το θεώρημα _____, η συχνότητα _____ πρέπει να είναι τουλάχιστον _____ από τη συχνότητα του αναλογικού σήματος, ώστε η _____ του σήματος να μπορεί να γίνει με ικανοποιητική προσέγγιση.

• Ερωτήσεις ανοικτού τύπου

1. Περιγράψτε τα είδη των αναλογικών πολυπλεκτών.
2. Πώς λειτουργεί το κύκλωμα δειγματοληψίας κράτησης;
3. Τι είδους σφάλματα παρουσιάζουν οι μετατροπείς A/D και D/A;
4. Περιγράψτε τη λειτουργία του βασικού κυκλώματος DAC.
5. Περιγράψτε τη λειτουργία του ADC διαδοχικής προσέγγισης.
6. Περιγράψτε τη λειτουργία του ADC διπλής κλίσης.
7. Περιγράψτε τις βασικές αρχές διασύνδεσης μετατροπών με μικροεπεξεργαστή.
8. Ποια είναι τα προβλήματα από την μη ικανοποίηση του θεωρήματος του Nyquist;

Ασκήσεις

1. Να υπολογιστεί το ρεύμα αναφοράς του DAC-08, του σχήματος 5.6.1 (α), και η διακριτική ικανότητα που αντιστοιχεί στο 1LSB.
(2mA, 7.8125μA)
2. Να υπολογιστεί το ρεύμα εξόδου και το συμπληρωματικό ρεύμα εξόδου του DAC-08, του σχήματος 5.6.1(α), για ψηφιακή είσοδο 00000001, 10000000 και 11111111.
(7.8125μA, 1.984mA, 1mA, 0.992mA, 1.992mA, 0)
3. Να υπολογιστεί η τάση εξόδου του DAC-08, του σχήματος 5.6.1(α), για ψηφιακή είσοδο 00000001 και 11111111.
(39.0625mV, 9.961V)
4. Ένας 8-bit ADC διαδοχικής προσέγγισης ελέγχεται από ρολόι 1MHz. Να υπολογιστεί ο χρόνος της μετατροπής A/D.
(9μsec)
5. Για τον ADC, του σχήματος 5.7.3, να υπολογιστεί ο χρόνος T_2 για $V_i = 100\text{mV}$ και $V_r = 200\text{mV}$.
(83.33msec, 166.6msec)

60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Συστήματα μετρήσεων και μικροϋπολογιστές

- Εισαγωγή
- Τεχνικές Μεταφοράς Δεδομένων
- Προγραμματισμένη Μεταφορά Δεδομένων
- Μεταφορά Δεδομένων με Άμεση Προσπέ-
λαση στη Μνήμη
- Θύρες Εισόδου/Εξόδου
- Εσωτερικοί Δίαυλοι Διακίνησης Πληροφοριών
- Εξωτερικοί Δίαυλοι Διακίνησης Πληροφοριών
- Διασύνδεση Συσκευών I/O σε Μικροϋπολογιστή
- Λογισμικό Συστημάτων Μετρήσεων
- Πρακτικά Συστήματα Συλλογής Δεδομένων

Σκοπός

Όταν ολοκληρώσεις το κεφάλαιο αυτό, θα μπορείς:

- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις διάφορες τεχνικές μεταφοράς δεδομένων, τόσο προγραμματιζόμενες όσο και άμεσης προσπέλασης στη μνήμη.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις τα είδη διαύλων διακίνησης δεδομένων, τόσο εσωτερικών όσο και εξωτερικών.
- Να εξηγείς έννοιες σχετικές με τη μετάδοση δεδομένων, όπως σειριακή και παράλληλη, ασύγχρονη και σύγχρονη, μονόδρομη, ημι-αμφίδρομη και αμφίδρομη.
- Να περιγράφεις τη διασύνδεση μερικών τυπικών συσκευών I/O σε μικροϋπολογιστή.
- Να περιγράφεις τις γενιές του λογισμικού των συστημάτων μετρήσεων.
- Να περιγράφεις πρακτικό σύστημα συλλογής δεδομένων.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται διάφορες τεχνικές μεταφοράς δεδομένων και γίνεται αναφορά στους διαύλους διακίνησης πληροφοριών των υπολογιστών, τη διασύνδεση συσκευών εισόδου-εξόδου και στις γλώσσες προγραμματισμού συστημάτων συλλογής δεδομένων και ελέγχου. Στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφεται πρακτικό σύστημα συλλογής δεδομένων ανακεφαλαιώνοντας, ουσιαστικά, τα όσα αναφέρονται στα πρώτα έξι κεφάλαια.

6.1

Εισαγωγή

6.2 Τεχνικές Μεταφοράς Δεδομένων

Η διασύνδεση των συσκευών εισόδου-εξόδου και περιφερειακών (I/O: Input/Output devices-peripherals) σε ένα μικροεπεξεργαστή παρουσιάζει αρκετά προβλήματα, σε αντίθεση με τη διασύνδεση μνημών, οι οποίες, επειδή κατασκευάζονται με την ίδια τεχνολογία, που κατασκευάζονται και οι μικροεπεξεργαστές, είναι συμβατές μαζί του, τόσο σε επίπεδο ταχύτητας όσο και σε επίπεδο ηλεκτρικών χαρακτηριστικών. Οι κύριοι λόγοι εμφάνισης προβλημάτων στη διασύνδεση συσκευών I/O είναι οι παρακάτω:

- **Η μεγάλη ποικιλία των κατηγοριών των συσκευών εισόδου-εξόδου**, όπως μηχανικές, ηλεκτρικές, ηλεκτρομηχανικές και ηλεκτρονικές. Σαν αποτέλεσμα αυτού, σπάνια υπάρχει συμβατότητα όσον αφορά τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους και γι' αυτό πρέπει να χρησιμοποιούνται κατάλληλα κυκλώματα διασύνδεσής τους για την επίλυση της ηλεκτρικής ασυμβατότητας με το μικροεπεξεργαστή (CPU). Σε μερικές περιπτώσεις πρέπει να χρησιμοποιηθούν μετατροπείς (transducers), μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADCs) ή μετατροπείς ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DACs).
- **Το εύρος της περιοχής ταχυτήτων ποικίλει πάρα πολύ**, με ρυθμό μεταφοράς (transfer rate) από μερικά bytes ανά λεπτό μέχρι αρκετές εκατοντάδες kbytes το δευτερόλεπτο. Για παράδειγμα, ένας άνθρωπος, ο οποίος χειρίζεται ένα υπολογιστή μπορεί να μεταδώσει μερικά bytes με την πίεση των πληκτρών του πληκτρολογίου, ένα τηλέτυπο μεταδίδει 110 bytes ανά δευτερόλεπτο, ένα σύστημα μαλακού δίσκου (floppy disk) μεταφέρει δεδομένα με ρυθμό 250 kbytes/sec και ένα σύστημα δίσκου Winchester μεταφέρει δεδομένα με ρυθμό 5000 kbytes/sec.
- **Η μεγάλη ποικιλία στο format των δεδομένων**. Υπάρχουν πολλά περιφερειακά, τα οποία είναι εκ φύσης σειριακά, δηλαδή ανταλλάσσουν δεδομένα σειριακά. Για παράδειγμα, οι κασέτες ήχου, τα συστήματα μαλακού δίσκου, κ.ά. ανήκουν στην κατηγορία αυτή. Για τη μετατροπή από τη σειριακή μορφή της λέξης σε παράλληλη, πρέπει να κατασκευαστεί κατάλληλο κύκλωμα διασύνδεσης και αντίστροφα. Από την άλλη μεριά μερικά περιφερειακά παράγουν δεδομένα με τέτοια μορφή, η οποία δεν είναι αποδεκτή από τη CPU. Για παράδειγμα, σε μικροεπεξεργαστικό σύστημα, οι χαρακτήρες, συνήθως, αναπαρίστανται σε κώδικα ASCII των 7-bit, ενώ ο «αναγνώστης» καρτών (card reader) παράγει κώδικα Hollerith των 12-bit για κάθε χαρακτήρα. Έτσι, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μετατροπέας κώδικα για τη διασύνδεση του «αναγνώστη» καρτών με CPU.

Εξαιτίας των παραπάνω πηγών ασυμβατότητας, κάθε περιφερειακό αντιπροσωπεύει μοναδικό πρόβλημα, το οποίο πρέπει να λυθεί με τη σχεδίαση κατάλληλου κυκλώματος διασύνδεσης. Εκτός από την αποκωδικοποίηση διέυθυνσης και τη διασύνδεση, που αφορά συνήθως τη μνήμη, πρέπει να χρησιμοποιηθούν επίσης κατάλληλες τεχνικές για το συμβιβασμό του τεράστιου εύρους ταχυτήτων των περιφερειακών. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει επινοηθεί αριθμός τεχνικών μεταφοράς δεδομένων για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος. Οι τεχνικές μεταφοράς δεδομένων μπορούν γενικά να κα-

ταταχτούν σε δύο κατηγορίες, την **προγραμματισμένη μεταφορά δεδομένων** και την **μεταφορά δεδομένων με άμεση προσπέλαση στην μνήμη (DMA)**.

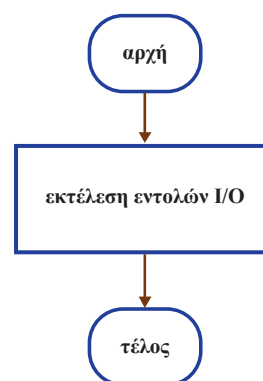
6.3 Προγραμματισμένη Μεταφορά Δεδομένων

Το κύριο χαρακτηριστικό της τεχνικής προγραμματισμένης μεταφοράς δεδομένων είναι ότι η μεταφορά δεδομένων πραγματοποιείται κάτω από τον έλεγχο προγράμματος, που βρίσκεται στην κύρια μνήμη του μικροϋπολογιστικού συστήματος. Για τη μεταφορά ενός byte δεδομένων ανάμεσα στη μνήμη και στις συσκευές I/O απαιτείται η εκτέλεση μερικών εντολών. Σαν αποτέλεσμα αυτού, η προγραμματισμένη μεταφορά δεδομένων είναι εν γένει αργή και κατάλληλη για μεταφορά δεδομένων της τάξης ενός μικρού αριθμού bytes με σχετικά αργά περιφερειακά.

Για την ικανοποίηση των διαφορετικών απαιτήσεων του κάθε περιφερειακού, χρησιμοποιούνται μερικές τεχνικές προγραμματισμένης μεταφοράς δεδομένων, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: **σύγχρονος τρόπος** (synchronous mode), **ασύγχρονος τρόπος** (asynchronous mode) και **τρόπος οδηγούμενος από διακοπή** (interrupt driven mode).

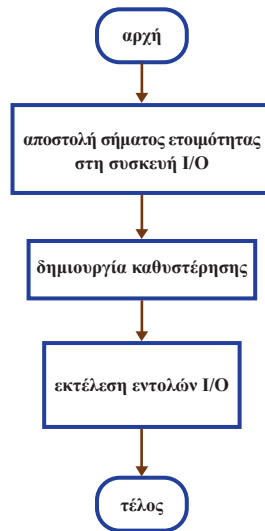
• Σύγχρονος τρόπος

Ο σύγχρονος τρόπος μεταφοράς δεδομένων χρησιμοποιείται για συσκευές I/O, των οποίων τα χαρακτηριστικά χρονισμού τους είναι ακριβώς καθορισμένα, ή είναι αρκετά γρήγορες, έτσι ώστε να είναι συμβατές σε επίπεδο ταχύτητας με τη CPU, με την οποία επικοινωνούν. Η κεντρική ιδέα είναι, ότι η κατάσταση της συσκευής I/O, δηλαδή αν η συσκευή είναι σε ετοιμότητα ή όχι, δεν ελέγχεται πριν γίνει η μεταφορά των δεδομένων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της μεταφοράς δεδομένων προς και από τη μνήμη, η CPU εκτελεί την εντολή STORE ή LOAD και υποθέτει, ότι η μνήμη είναι έτοιμη να δεχτεί ή να δώσει δεδομένα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις χρονισμού της CPU. Σωστή μεταφορά δεδομένων μπορεί να συμβεί μόνο, όταν η μνήμη είναι συμβατή σε ταχύτητα με τη CPU. Η μεταφορά δεδομένων με τις συσκευές I/O μπορεί να πραγματοποιηθεί με παρόμοιο τρόπο, απλά σε αυτή την περίπτωση εκτελούνται είτε εντολές εισόδου και εξόδου είτε εντολές ανάγνωσης/εγγραφής στη μνήμη ανάλογα με το εάν η συσκευή I/O απεικονίζεται στο μικροϋπολογιστικό σύστημα σαν συσκευή I/O ή μνήμη (σχήμα 6.3.1).



Σχήμα 6.3.1. Διάγραμμα ροής σύγχρονου τρόπου μεταφοράς δεδομένων συμβατού σε ταχύτητα με τη CPU

Ο σύγχρονος τρόπος μπορεί να εφαρμοστεί και σε αργές συσκευές I/O, αν τα χαρακτηριστικά χρονισμού των διατάξεων αυτών είναι επακριβώς γνωστά. Στην περίπτωση αυτή, η μεταφορά δεδομένων ξεκινά με την αίτηση προς τις συσκευές I/O να τεθούν σε ετοιμότητα στη συνέχεια, η CPU περιμένει για κάποιο προκαθορισμένο χρόνο και, μετά, εκτελεί την εντολή I/O για την ολοκλήρωση της μεταφοράς δεδομένων. Το διάγραμμα ροής δείχνεται στο σχήμα 6.3.2.

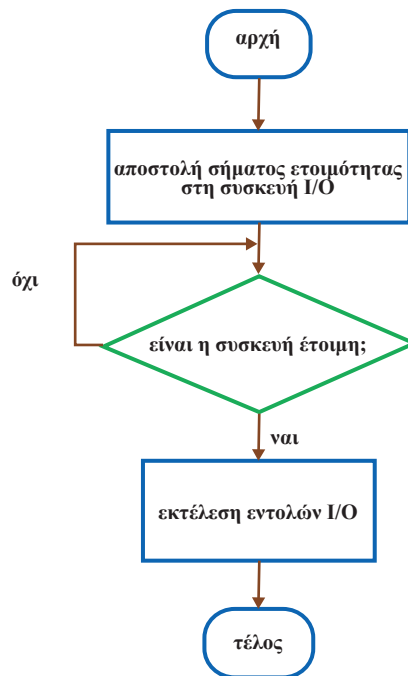


Σχήμα 6.3.2. Διάγραμμα ροής σύγχρονου τρόπου μεταφοράς δεδομένων για συσκευές I/O με γνωστά χαρακτηριστικά ταχύτητας

Ο σύγχρονος τρόπος είναι πολύ απλός στην υλοποίησή του. Ωστόσο, συσκευές I/O με γνωστές παραμέτρους χρονισμού ή συμβατές σε ταχύτητα με τη CPU απαντώνται σπάνια. Έτσι, πρέπει να χρησιμοποιούνται κατάλληλες μέθοδοι για τέτοιες περιπτώσεις. Οι ακόλουθοι τρόποι χρησιμοποιούνται για τη διευθέτηση του προβλήματος αυτού.

- **Ασύγχρονος τρόπος**

Κάθε φορά, που τα χαρακτηριστικά χρονισμού συσκευής I/O δεν μπορούν να προβλεφθούν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ασύγχρονη μέθοδος. Το κύριο χαρακτηριστικό του τρόπου αυτού είναι, ότι η CPU ξεκινά τη μεταφορά των δεδομένων ζητώντας από τη συσκευή να τεθεί σε ετοιμότητα και στη συνέχεια, συνεχίζει με τον έλεγχο της κατάστασής της. Η εντολή I/O εκτελείται μόνο, όταν η συσκευή I/O είναι έτοιμη να δεχθεί ή να δώσει δεδομένα. Έτσι, δημιουργείται σήμα «αίτησης ετοιμότητας» (request ready signal) από τη CPU και σήμα επιβεβαίωσης (acknowledge signal), το οποίο προέρχεται από τη συσκευή I/O, πριν από κάθε μεταφορά δεδομένων. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή σα **μέθοδος χειραψίας** (handshaking mode) μεταφοράς δεδομένων, καθώς μοιάζει με την κίνηση των χεριών μπρος και πίσω, που συμβαίνει σε μια χειραψία, για το συντονισμό της μεταφοράς



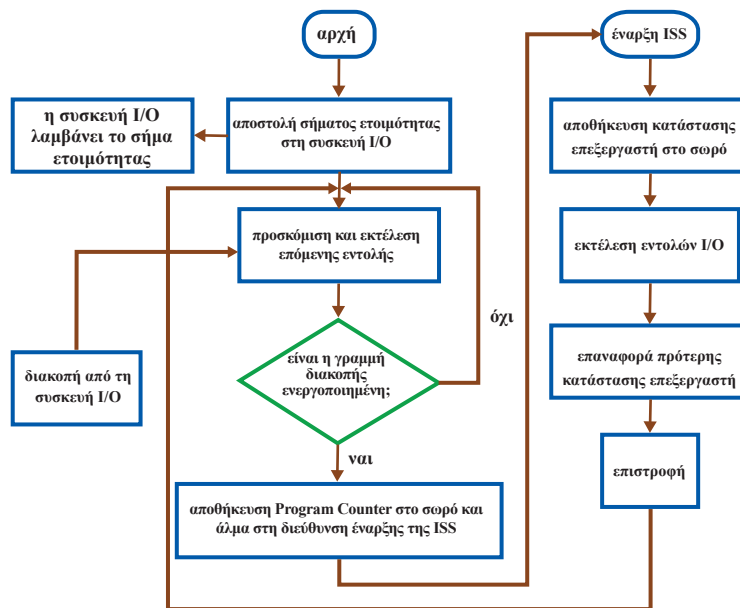
Σχήμα 6.3.3. Διάγραμμα ροής ασύγχρονου τρόπου μεταφοράς δεδομένων

των δεδομένων. Τα παραπάνω δείχνονται στο σχήμα 6.3.3. Ο ασύγχρονος τρόπος είναι ιδανικός για τη διευθέτηση των διαφορών στους χρονισμούς ανάμεσα στη CPU και στις συσκευές I/O. Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημα είναι, ότι μεγάλο ποσό χρόνου καταναλώνεται από τη CPU για τον έλεγχο της κατάστασης της συσκευής I/O. Η σπατάλη του χρόνου της CPU μπορεί να είναι απαγορευτική ή μη πρακτική σε αρκετές περιπτώσεις.

- **Τρόπος οδηγούμενος από διακοπή**

Για την υπερπήδηση των μειονεκτημάτων των δύο προηγούμενων τρόπων μεταφοράς δεδομένων, έχει σχεδιαστεί άλλη τεχνική προγραμματισμένης μεταφοράς δεδομένων, η οποία ονομάζεται τρόπος οδηγούμενος από διακοπή (interrupt driven mode). Η βασική φιλοσοφία της μεθόδου αυτής είναι, ότι ο επεξεργαστής ξεκινά τη μεταφορά δεδομένων ζητώντας από τη συσκευή να τεθεί σε ετοιμότητα και συνεχίζει την εκτέλεση του αρχικού προγράμματος, αντί να χάνει χρόνο παρακολουθώντας συνεχώς την κατάσταση της συσκευής I/O. Όταν η συσκευή είναι έτοιμη να δεχθεί ή να δώσει δεδομένα, πληροφορεί τον επεξεργαστή διαμέσου ειδικής γραμμής ελέγχου, η οποία ονομάζεται **γραμμή αίτησης διακοπής** (interrupt line). Σε απάντηση αυτού, ο επεξεργαστής ολοκληρώνει την εκτέλεση της τρέχουσας εντολής. Στη συνέχεια, αντί να εκτελέσει την επόμενη εντολή, αποθηκεύει το μετρητή προγράμματος (Program Counter) και ενδεχόμενα και σειρά άλλων καταχωρητών, όπως αυτό επιβάλλεται από

την αρχιτεκτονική της εκάστοτε CPU, στο σωρό (stack) και κάνει «άλλα» σε προκαθορισμένη θέση, η οποία είναι η διεύθυνση έναρξης της υπορουτίνας, που καλείται **υπορουτίνα εξυπηρέτησης διακοπής** (ISS: interrupt service subroutine). Η ISS με τη σειρά της αποθηκεύει την κατάσταση του επεξεργαστή στο σωρό, ολοκληρώνει τη μεταφορά των δεδομένων προς ή από τη συσκευή I/O, που είναι υπεύθυνη για τη διακοπή, αποκαθιστά την προτέρα κατάσταση στον επεξεργαστή και, στη συνέχεια, επιστρέφει στο αρχικό πρόγραμμα, το οποίο εκτελούσε η CPU πριν από τη διακοπή. Το σχήμα 6.3.4 δείχνει το διάγραμμα ροής αυτού του τρόπου μεταφοράς δεδομένων.



Σχήμα 6.3.4. Μεταφορά δεδομένων με τρόπο οδηγούμενο από διακοπή (η πορτοκαλί γραμμή υπονοεί μεταφορά υπό τον έλεγχο hardware)

Μπορεί να παρατηρηθεί στο σημείο αυτό, ότι ο χρόνος, που απαιτείται από τη συσκευή I/O, για να τεθεί σε ετοιμότητα έπεται από τη λήψη του σήματος «θέσεως σε ετοιμότητα» (get ready signal), χρησιμοποιείται από την CPU. Ωστόσο, χρειάζεται επιπλέον χρόνο για την αποθήκευση και την αποκατάσταση της κατάστασης (status) του επεξεργαστή από και προς το σωρό. Ο τρόπος αυτός έχει ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα. Αντί να ξεκινά από την CPU η μεταφορά δεδομένων, μπορεί να ξεκινήσει από τη συσκευή I/O. Αυτό δεν είναι δυνατό να συμβεί σε περιπτώσεις άλλων τρόπων προγραμματισμένης μεταφοράς δεδομένων.

6.4 Μεταφορά Δεδομένων με Άμεση Προσπέλαση στη Μνήμη

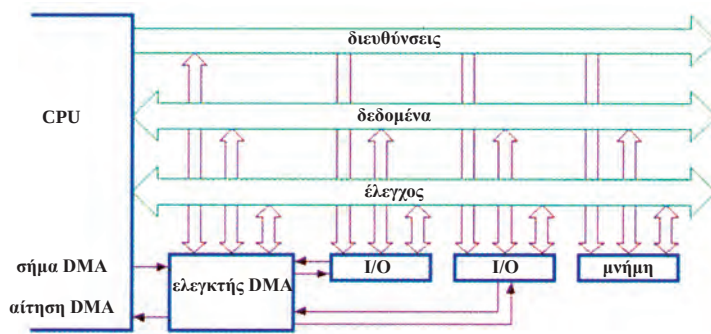
Αν κοιτάξει κανείς το σύνολο των εντολών μιας CPU, θα παρατηρήσει, ότι υπάρχουν εντολές για τη μεταφορά δεδομένων από τη μνήμη ή τη συσκευή I/O στους καταχωρητές της CPU και αντίστροφα. Όμως, δεν υπάρχει καμία εντολή για μεταφορά δεδομένων ανάμεσα στη μνήμη και στις συσκευές I/O άμεσα. Επομένως, χρησιμοποιώντας οποιονδήποτε από τους τρόπους προγραμματισμένης μεταφοράς, η μεταφορά δεδομένων ανάμεσα στη μνήμη και στις συσκευές I/O μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δύο βήματα, χρησιμοποιώντας έναν από τους καταχωρητές της CPU (συνήθως το συσσωρευτή) σαν ενδιάμεσο μέσο. Το γεγονός αυτό κάνει τους τρόπους μεταφοράς δεδομένων με προγραμματισμό της I/O εν γένει αργούς. Αν χρειάζεται μάλιστα να μεταφερθεί μεγάλο κομμάτι δεδομένων ανάμεσα στην μνήμη και σε μια γρήγορη συσκευή I/O, η καθυστέρηση, που δημιουργείται από αυτή την αργή διαδικασία, μπορεί να είναι απαγορευτική. Για την υπερπήδηση του προβλήματος αυτού έχει σχεδιαστεί ο τρόπος μεταφοράς δεδομένων με άμεση προσπέλαση στην μνήμη ή τρόπος μεταφοράς δεδομένων DMA (direct memory access). Η κεντρική ιδέα, που αποτελεί τη βάση της μεθόδου είναι, ότι η CPU απομακρύνεται από τη διαδικασία μεταφοράς δεδομένων με την τοποθέτηση σε τρίτη κατάσταση (tristated) του διαύλου διευθύνσεων, του διαύλου δεδομένων και των γραμμών ελέγχου της μνήμης και των συσκευών I/O. Εγκαθίσταται άμεση σύνδεση ανάμεσα στη μνήμη και στη συσκευή I/O και η μεταφορά δεδομένων ελέγχεται από εξωτερικό κύκλωμα γνωστό σαν **ελεγκτής άμεσης προσπέλασης μνήμης** ή για συντομία ελεγκτής DMA (DMA controller). Στην περίπτωση αυτή, ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων περιορίζεται μόνο από την ελάχιστη ταχύτητα των δύο συσκευών. Ωστόσο, για να διευκολυνθεί ο τρόπος μεταφοράς δεδομένων με DMA, η CPU πρέπει να είναι εξοπλισμένη με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Γραμμή ελέγχου εισόδου, με τη βοήθεια της οποίας η συσκευή I/O, διαμέσου του ελεγκτή DMA, ζητά από την CPU μεταφορά δεδομένων με DMA.
- Γραμμή ελέγχου εξόδου, με τη βοήθεια της οποίας η CPU αποδέχεται την μεταφορά με DMA.
- Η CPU πρέπει να είναι ικανή να θέτει σε τρίτη κατάσταση (tristate) τις γραμμές διευθύνσεων, δεδομένων και απαραίτητων γραμμών ελέγχου κατά τη διάρκεια της μεταφοράς δεδομένων με DMA.

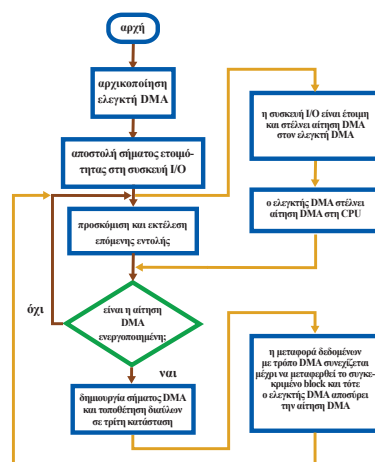
Σχεδόν όλες οι CPUs διαθέτουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Ο ελεγκτής DMA θα πρέπει επίσης να εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Διασύνδεση των διαύλων της CPU με τη συσκευή I/O.
- Δημιουργία του σήματος αίτησης μεταφοράς DMA (DMA request signal).
- Προς απάντηση του σήματος αποδοχής DMA από την CPU, πρέπει να ελέγχει τον δίαυλο δεδομένων και τις γραμμές ελέγχου, που απαιτούνται για τη μεταφορά δεδομένων.
- Πρέπει να διατηρεί πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των bytes, που θα μεταφερθούν, καθώς και τη διεύθυνση έναρξης των δεδομένων στη μνήμη, έτσι ώστε να μπορεί να παράγει ακολουθιακά τις διευθύνσεις της RAM μια προς μια και να αποσύρει την αίτηση για μεταφορά με DMA, όταν τελειώσει η μεταφορά και του τελευταίου byte δεδομένων.

Το σχηματικό διάγραμμα μικροϋπολογιστικού συστήματος για τρόπο μεταφοράς δεδομένων με DMA δείχνεται στο σχήμα 6.4.1. Η ακολουθία των γεγονότων, που συμβαίνουν, δείχνεται από το διάγραμμα ροής του σχήματος 6.4.2. Είναι δυνατόι δύο διαφορετικοί τύποι μεταφοράς με DMA. Στην πρώτη περίπτωση, από τη στιγμή, που ξεκινά η διαδικασία μεταφοράς δεδομένων, δεν σταματά παρά μόνο μετά τη μεταφορά ολόκληρου του συνόλου (block) των δεδομένων. Για το λόγο αυτό είναι γνωστός σαν **τρόπος block DMA**. Αν, ωστόσο, η CPU δεν μπορεί να κρατηθεί αδρανής για τη μεγάλη χρονική διάρκεια, που απαιτείται για τη μεταφορά ολόκληρου του συνόλου των δεδομένων, ή υπάρχει σημαντική καθυστέρηση ανάμεσα στην δημιουργία των διαδοχικών δεδομένων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί άλλη τεχνική, η οποία είναι γνωστή σαν **τρόπος DMA «κλοπής» κύκλου** (cycle stealing DMA mode). Στην περίπτωση αυτή, ένα ή δύο bytes δεδομένων μεταφέρονται, μόλις η CPU επιτρέψει την DMA, και μετά ο ελεγκτής DMA αποσύρει την αίτηση (request). Έπειτα από καθορισμένο χρονικό διάστημα, ο ελεγκτής DMA διακόπτει την CPU, υποδεικνύοντας το τέλος της μεταφοράς DMA.



Σχήμα 6.4.1. Σχηματικό διάγραμμα μικροϋπολογιστικού συστήματος που χρησιμοποιεί μεταφορά δεδομένων με DMA



Σχήμα 6.4.2. Διάγραμμα ροής της μεταφοράς δεδομένων με DMA (όπου η πορτοκαλί γραμμή υπονοεί τη μεταφορά υπό τον έλεγχο hardware)

6.5 Θύρες Εισόδου/Εξόδου

Η μνήμη συνδέεται άμεσα στους διαύλους του συστήματος και επιλέγεται η κατάλληλη θέση μνήμης για τη μεταφορά δεδομένων εφόσον και όταν απαιτείται. Οι συσκευές I/O δεν μπορούν να διασυνδεθούν με τον ίδιο τρόπο, γιατί οι συσκευές I/O δεν είναι εξοπλισμένες με τα κατάλληλα λογικά κυκλώματα, που απαιτούνται για την άμεση διασύνδεσή τους στους διαύλους του συστήματος. Συνήθως, διασυνδέονται με τη βοήθεια κάποιων επιπλέον κυκλωμάτων (διατάξεων) γνωστών ως **θύρες I/O** (I/O ports). Οι θύρες I/O μπορούν να υλοποιηθούν, είτε χρησιμοποιώντας πύλες TTL είτε χρησιμοποιώντας ειδικά κυκλώματα (chips), τα οποία κατασκευάζονται από τους κατασκευαστές των μικροεπεξεργαστών. Μια θύρα I/O αναμένεται εν γένει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- **Λογική επιλογής διάταξης** (device selection logic). Η λογική επιλογής της διάταξης είναι ουσιώδης για την επιλογή της επιθυμητής συσκευής I/O και την αποσύνδεση των άλλων διατάξεων για δεδομένη διεύθυνση I/O, που δημιουργείται στο δίαυλο διευθύνσεων της CPU.
- **Απομονωτές δεδομένων** (data buffers). Οι συσκευές I/O μπορούν να δώσουν ή να δεχθούν δεδομένα για σύντομη χρονική διάρκεια και σε χρονικές στιγμές τελείως ασυσχέτιστες με το ρολόι (clock) της CPU. Επίσης, μπορεί να υπάρχουν ασυμβατότητες χρονισμού. Για να υπερνικηθούν όλα αυτά τα προβλήματα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί καταχωρητής απομόνωσης (latch) για να διατηρεί προσωρινά τα δεδομένα, είτε από συσκευή I/O είτε από την CPU.
- **Οδηγούς διαύλου** (bus drivers). Εφόσον εν γένει αρκετές συσκευές I/O μπορούν να συνδεθούν φυσικά στο δίαυλο του συστήματος και μόνο μια πρέπει να είναι λογικά συνδεδεμένη σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, πρέπει να χρησιμοποιηθούν απομονωτές τρίτης κατάστασης για τη λογική αποσύνδεση εκείνων των συσκευών I/O, στις οποίες δεν απευθύνεται το σύστημα.
- **Καταχωρητής κατάστασης** (status register). Πρέπει να ληφθεί πρόνοια για την υπενθύμιση της κατάστασης της μεταφοράς δεδομένων με τη χρήση bits σημαίας (flag bits) ή καταχωρητών.
- **Γραμμές ελέγχου** (control lines). Τέλος, η θύρα πρέπει να είναι εξοπλισμένη με κατάλληλες γραμμές ελέγχου εισόδου και εξόδου για την υλοποίηση τόσο του ασύγχρονου τρόπου μεταφοράς δεδομένων όσο και του τρόπου μεταφοράς δεδομένων οδηγούμενου από διακοπή.

Οι θύρες I/O είναι διαθέσιμες σε μεγάλη ποικιλία. Οι απλούστερες από αυτές είναι οι **μη-προγραμματιζόμενες** (non-programmable), οι οποίες μπορούν να διαμορφωθούν, για ένα περιορισμένο αριθμό τρόπων, με την κατάλληλη αλλαγή των καλωδιώσεων. Από την άλλη πλευρά, οι **προγραμματιζόμενες** (programmable) θύρες I/O μπορούν, επίσης, να διαμορφωθούν για ποικιλία τρόπων με την εγγραφή κατάλληλων κωδικών ελέγχου σε ένα ή περισσότερους καταχωρητές μέσα στο chip (on-chip registers).

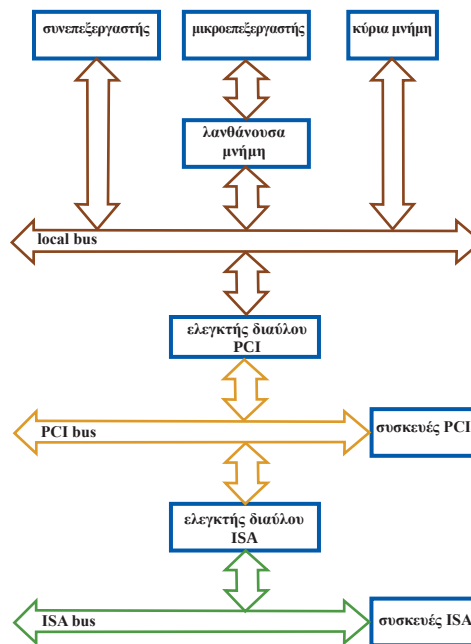
Οι μη-προγραμματιζόμενες θύρες I/O έχουν το μειονέκτημα, ότι αφ' ενός είναι απαραίτητη η τροποποίηση στις συνδέσεις των κυκλωμάτων, που χρησιμοποιούν, για την ικανοποίηση των διαφορετικών απαιτήσεων για I/O και αφ' ετέρου

δεν μπορούν να υλοποιηθούν όλοι οι δυνατοί τρόποι μεταφοράς δεδομένων. Τα μειονεκτήματα αυτά μπορούν να ξεπεραστούν με τη χρήση ολοκληρωμένων προγραμματιζόμενων θυρών I/O, τα οποία είναι ειδικά κατασκευασμένα από τους κατασκευαστές της CPU στα πλαίσια της υποστήριξης, που παρέχουν για τα συστήματά τους. Μια προγραμματιζόμενη θύρα I/O έχει τις ακόλουθες δυνατότητες:

- Δυνατότητα για άμεση διασύνδεση με τους διαύλους της CPU, για την οποία έχει σχεδιαστεί.
- Απομονωτές τριών καταστάσεων (tristate buffers) για τη λογική αποσύνδεση του διαύλου δεδομένων της CPU, όταν η διάταξη I/O, που ενδιαφέρει δεν χρησιμοποιείται.
- Λογική επιλογής διάταξης (device selection logic) για την επιλογή συγκεκριμένης θύρας I/O, όταν είναι αναγκαίο.
- Γραμμές ελέγχου για τη διευκόλυνση της «χειραψίας» (handshaking) και του τρόπου μεταφοράς δεδομένων οδηγούμενου από διακοπή.
- Καταχωρητές απομόνωσης (buffer registers) ή μανταλωτές (latches) για την προσωρινή «κράτηση» των δεδομένων κατά την διαδικασία μεταφοράς τους.
- Καταχωρητές εντολών ελέγχου (control command registers), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του τρόπου λειτουργίας και της κατεύθυνσης των γραμμών θύρας (port lines).
- Καταχωρητή κατάστασης (status register) για την ένδειξη της πορείας της μεταφοράς δεδομένων για τους διάφορους τρόπους.
- Λογική ανάγνωσης/εγγραφής και ελέγχου για την εκτέλεση της ανάγνωσης και εγγραφής των διάφορων καταχωρητών μέσα στο chip.

6.6 Εσωτερικοί Δίαυλοι Διακίνησης Πληροφοριών

Οι εσωτερικοί δίαυλοι σε υπολογιστή (δίαυλος διευθύνσεων, δεδομένων και ελέγχου) μεταφέρουν διευθύνσεις, δεδομένα και σήματα ελέγχου ανάμεσα στον μικροεπεξεργαστή, στη λανθάνουσα μνήμη (cache memory), στη στατική και δυναμική μνήμη RAM, στους οδηγούς δίσκων (disk drives), στις σχισμές επέκτασης (expansion slots) καθώς και άλλες εσωτερικές διατάξεις. Οι περισσότεροι σημερινοί προσωπικοί υπολογιστές αποτελούνται από τρεις τύπους εσωτερικών διαύλων: τον τοπικό δίαυλο (local bus), το δίαυλο PCI και το δίαυλο ISA. Στο σχήμα 6.6.1 δείχνεται η βασική δομή συστήματος εσωτερικών διαύλων.



Σχήμα 6.6.1. Απλοποιημένο σύστημα διαύλων σε προσωπικό υπολογιστή

- **Τοπικός δίαυλος (local bus)**

Αυτός ο δίαυλος ενώνει απευθείας το μικροεπεξεργαστή με τη λανθάνουσα μνήμη, την κύρια μνήμη, το συνεπεξεργαστή και τον ελεγκτή διαύλου PCI. Πρόκειται για το μοναδικό εσωτερικό δίαυλο, που ενώνεται απευθείας με το μικροεπεξεργαστή. Εν γένει, περιέχει το δίαυλο διευθύνσεων, το δίαυλο δεδομένων και το δίαυλο ελέγχου, που επιτρέπουν στο μικροεπεξεργαστή να επικοινωνεί με τις άλλες διατάξεις. Ο τοπικός δίαυλος μπορεί να θεωρηθεί ως ο πρωταρχικός δίαυλος σε υπολογιστικό σύστημα. Για παράδειγμα, ο τοπικός δίαυλος Pentium προσωπικού υπολογιστή αποτελείται από 32 γραμμές διευθύνσεων, 64 γραμμές δεδομένων και πολυάριθμες γραμμές ελέγχου.

- **Δίαυλος PCI (peripheral control interconnect)**

Ο δίαυλος PCI χρησιμεύει στη διασύνδεση του μικροεπεξεργαστή με εξωτερικές διατάξεις μέσω των σχισμών επέκτασης (expansion slots). Ο PCI αναπτύχθηκε από την Intel και πρωτοπαρουσιάστηκε το 1993. Έχει καθιερωθεί ως ο υποδειγματικός δίαυλος διασύνδεσης σε προσωπικό υπολογιστή αντικαθιστώντας όλες τις προηγούμενες τυποποιήσεις. Ο PCI είναι δίαυλος 64-bit, αν και συνήθως υλοποιείται ως δίαυλος 32-bit, όπου οι δίαυλοι διευθύνσεων και δεδομένων είναι πολυπλεγμένοι. Μπορεί να λειτουργήσει σε ταχύτητες 33MHz ή 66MHz. Απομονώνεται από τον τοπικό δίαυλο μέσω μονάδας ελεγκτή διαύλου (σχήμα 6.6.1), που ενεργεί ως γέφυρα ανάμεσα στους δύο διαύλους. Ο PCI θεωρείται, ως ο δευτερεύων δίαυλος και δέχεται χρονισμό ανεξάρτητα από το μικροεπεξεργαστή. Ο PCI μπορεί να συνδέσει το μικροεπεξεργαστή με περιφερειακές συσκευές, όπως για παράδειγμα σκληρό δίσκο, μέσω των σχισμών επέκτασης με χρήση καρτών προσαρμογής. Ο PCI υποστηρίζει «plug-and-play», δηλαδή την ικανότητα του υπολογιστή να «βλέπει» αυτόματα κάρτες επέκτασης (expansion boards) και άλλες συσκευές. Έτσι, μια συσκευή μπορεί να συνδεθεί σε υπολογιστή χωρίς να χρειάζεται να τοποθετηθούν κάποιοι διακόπτες κατάλληλα, να αλλάξουν κάποιες διασυνδέσεις (jumper) ή να διαφοροποιηθούν κάποια άλλα στοιχεία.

- **Δίαυλος ISA (industry standard architecture)**

Πρόκειται για δίαυλο επέκτασης, που αναπτύχθηκε από την IBM για τους AT προσωπικούς υπολογιστές της. Ο δίαυλος ISA είναι ενσωματωμένος, σήμερα, στους περισσότερους μοντέρνους προσωπικούς υπολογιστές, ως συνεργάτης του PCI, για σκοπούς συμβατότητας. Τελικά, ο δίαυλος PCI θα αντικαταστήσει, πιθανώς, το δίαυλο ISA. Ο ISA έχει δίαυλο δεδομένων είτε 8-bit είτε 16-bit και λειτουργεί στα 8MHz. Αν δεχθούμε, ότι η μεταφορά των δεδομένων απαιτεί δύο με οκτώ κύκλους, τότε ο μέγιστος, θεωρητικά, ρυθμός δεδομένων είναι 64Mbps (8MHz x 16bits / 2 κύκλους). Έκδοση επέκτασης, ο EISA, παρέχει δίαυλο δεδομένων 32-bit, αλλά δεν χρησιμοποιείται ιδιαίτερα λόγω μικρής ταχύτητας και αντικαθίσταται από τον PCI.

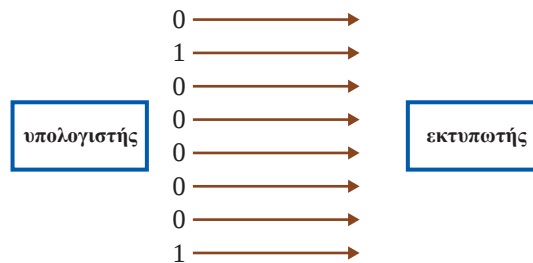
6.7 Εξωτερικοί Δίαυλοι Διακίνησης Πληροφοριών

Πριν γίνει αναφορά στους εξωτερικούς διαύλους δεδομένων, είναι σκόπιμο, να γίνει σύντομη παρουσίαση ορισμένων βασικών εννοιών μετάδοσης δεδομένων.

• Παράλληλη και σειριακή μετάδοση

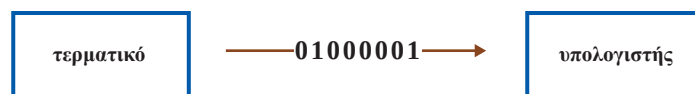
Έστω ότι χρειάζεται να μεταδοθεί πληροφορία των 8 bits, π.χ. η 01000001. Το σύνολο αυτών των ψηφίων τυχαίνει να αναπαριστάνουν το γράμμα 'Α' σε κώδικα ASCII. Πώς μεταδίδονται αυτά τα '0'ς και '1'ς;

Ένας τρόπος είναι να μεταδοθούν ταυτόχρονα και τα 8 bit, οπότε μιλάμε για **παράλληλη μετάδοση**, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.7.1. Αυτός ο τρόπος απαιτεί τουλάχιστον 8 γραμμές για μετάδοση, μία για κάθε ψηφίο. Επίσης, απαιτούνται και επιπρόσθετες γραμμές για άλλες λειτουργίες. Το βασικό πλεονέκτημα της παράλληλης μετάδοσης είναι, ότι ολόκληρο το byte λαμβάνεται ταυτόχρονα ενώ το μειονέκτημα ο μεγάλος αριθμός καλωδίων, που απαιτείται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας μετάδοσης έχουμε στην επικοινωνία προσωπικών υπολογιστών με εκτυπωτές. Συνήθως η απόσταση δεν ξεπερνά τα 3 ή 6 μέτρα, οπότε το κόστος των επιπλέον καλωδίων, που απαιτούνται, για την παράλληλη μετάδοση, εξισορροπείται από την αύξηση της ταχύτητας.



Σχήμα 6.7.1. Παράλληλη μετάδοση δεδομένων

Άλλος τρόπος είναι να μεταδοθούν τα 8 bit το ένα κατόπιν του άλλου, οπότε απαιτείται μόνο ένα καλώδιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.7.2. Τότε μιλάμε για **σειριακή μετάδοση**. Το πλεονέκτημά της είναι, ότι ελαχιστοποιείται ο αριθμός των καλωδίων, αλλά αυξάνει ο χρόνος μετάδοσης. Η σειριακή μετάδοση χρησιμοποιείται για μεγάλες αποστάσεις, οπότε το κόστος των καλωδίων αυτό καθ' αυτό κάνει απαγορευτική τη χρήση της παράλληλης μετάδοσης.

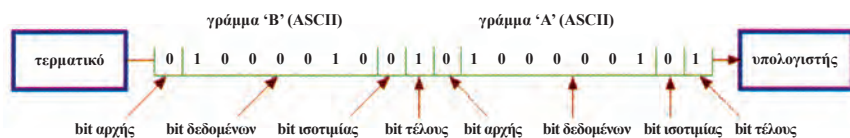


Σχήμα 6.7.2. Σειριακή μετάδοση δεδομένων

- **Ασύγχρονη και σύγχρονη σειριακή μετάδοση**

Σήμερα, επικρατούν δύο τρόποι στο χρονισμό της σειριακής μετάδοσης: η ασύγχρονη και η σύγχρονη μετάδοση.

Κατά την **ασύγχρονη μετάδοση**, πρέπει να ορίζεται σε κάθε συσκευή ο ρυθμός, με τον οποίο θα μεταδίδει και θα λαμβάνει δεδομένα (bps). Η μετάδοση ενός byte ξεκινά με την αποστολή ενός bit αρχής (start bit), που είναι πάντα το '0', ακολουθεί η μετάδοση των 8 bit του byte και τέλος μεταδίδεται ένα ή δύο bit τέλους (stop bit), που είναι πάντα το '1'. Έτσι, δημιουργείται πακέτο των 10 ή 11-bit για μετάδοση. Η ασύγχρονη μετάδοση του γράμματος 'Α', ακολουθούμενου από το γράμμα 'Β' σε κώδικα ASCII, φαίνεται στο σχήμα 6.7.3. Το πρώτο bit του κάθε byte είναι το 0 και χρησιμοποιείται ως bit ισοτιμίας (parity bit), σύμφωνα με τον κώδικα ASCII. Έστω ότι το τερματικό έχει οριστεί να μεταδίδει ένα bit ανά δευτερόλεπτο. Πρώτα στέλνει το bit αρχής (0), μετά από ένα δευτερόλεπτο στέλνει το πρώτο bit δεδομένων (1), μετά το δεύτερο, κ.ο.κ. μέχρι να σταλεί και το bit (τα bits) τέλους. Από τη στιγμή, που ο υπολογιστής λαμβάνει το bit αρχής, αναμένει επτά bit δεδομένων, ένα bit ισοτιμίας και ένα bit τέλους ανά ένα δευτερόλεπτο. Ουσιαστικά το bit αρχής ενεργοποιεί το εσωτερικό ρολόι του υπολογιστή, ώστε να αναμένει τα υπόλοιπα εννέα bit ανά ένα δευτερόλεπτο. Το bit τέλους σταματά το ρολόι. Αν ληφθούν λιγότερα από δέκα bits ή το bit τέλους δεν έρθει τη χρονική στιγμή, που αναμένεται, έχουμε λανθασμένη μετάδοση.



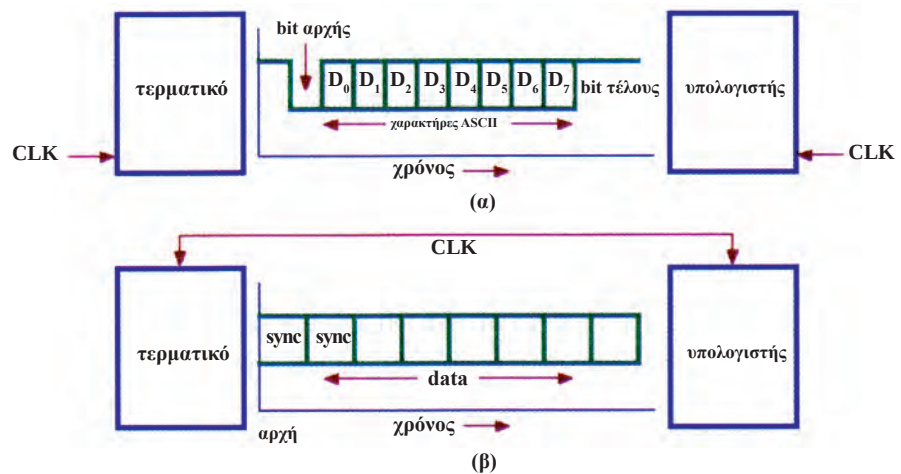
Σχήμα 6.7.3. Ασύγχρονη μετάδοση δεδομένων

Η ασύγχρονη μετάδοση είναι γνωστή και ως μετάδοση έναρξης-διακοπής (start-stop transmission), λόγω των bit αρχής και τέλους. Οι πραγματικοί ρυθμοί δεδομένων δεν είναι προφανώς 1 bps, όπως στο παράδειγμα, αλλά συνήθως 110bps, 300bps, 1200bps, 2400bps, 4800bps, 9600bps, 19200bps. Είναι σαφές, ότι και η συσκευή μετάδοσης και η συσκευή λήψης πρέπει να τίθενται στην ίδια ταχύτητα.



Σχήμα 6.7.4. Σύγχρονη μετάδοση δεδομένων

Εκτός από την ασύγχρονη μετάδοση, υπάρχει και η **σύγχρονη μετάδοση** (σχήμα 6.7.4). Σε αυτήν δεν χρησιμοποιούνται bit αρχής και τέλους, αλλά ο χρονισμός γίνεται με δύο άλλους τρόπους. Οι δύο αυτοί τρόποι χρησιμοποιούν **χαρακτήρες χρονισμού** (sync characters) ή **σήματα ρολογιού** (clock signals) και χρησιμοποιούνται είτε ανεξάρτητα είτε σε συνδυασμό μεταξύ τους. Ο πρώτος τρόπος χρησιμοποιείται, όταν μεταδίδονται μεγάλα πακέτα δεδομένων, οπότε ειδικοί χαρακτήρες συγχρονισμού στέλνονται στην αρχή αυτών των πακέτων. Πρόκειται για ειδική ακολουθία ψηφίων που χρησιμοποιεί η συσκευή λήψης, για να συγχρονιστεί με τη ταχύτητα της συσκευής μετάδοσης. Ο δεύτερος τρόπος χαρακτηρίζεται από μετάδοση και λήψη σημάτων ρολογιού. Ξεχωριστά καλώδια ή κανάλια στέλνουν πληροφορία σχετικά με το χρονισμό των δεδομένων, που μεταδίδονται. Η σύγχρονη μετάδοση πλεονεκτεί, όταν μεταδίδονται μεγάλα πακέτα δεδομένων, αφού δεν σπαταλάται χρόνος, για να μεταδοθούν bit αρχής και τέλους για κάθε χαρακτήρα. Το σχήμα 6.7.5 δείχνει συγκριτικά την ασύγχρονη και σύγχρονη μετάδοση δεδομένων.



Σχήμα 6.7.5. Σύγχρονη μετάδοση δεδομένων

- **Μονόδρομη, ημι-αμφίδρομη και αμφίδρομη επικοινωνία**

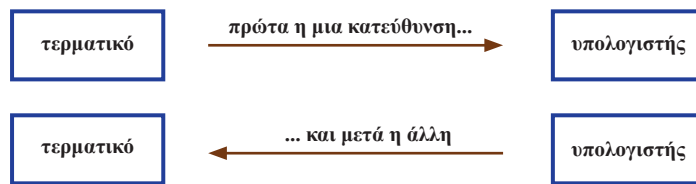
Κατά τη **μονόδρομη επικοινωνία** (simplex communication), η μια συσκευή μεταδίδει και η άλλη λαμβάνει, π.χ. ο υπολογιστής στέλνει πληροφορία στο τερματικό, αλλά το τερματικό δεν στέλνει στον υπολογιστή (σχήμα 6.7.6).



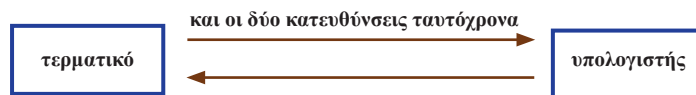
Σχήμα 6.7.6. Μονόδρομη επικοινωνία

Η **ημι-αμφίδρομη επικοινωνία** (half-duplex communication) αποτελεί εναλλακτική μετάδοση, όπου υπάρχουν δύο δρόμοι, αλλά μόνο μια κατεύθυνση κάθε φορά. Ο χρήστης του τερματικού στέλνει κάποια πληροφορία στον υπολογιστή και ο υπολογιστής απαντά (σχήμα 6.7.7). Μόνο μια συσκευή μεταδίδει δεδομένα κάθε φορά.

Κατά την **αμφίδρομη επικοινωνία** (full-duplex communication) ο υπολογιστής και το τερματικό μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν ταυτόχρονα. Το τερματικό δεν είναι υποχρεωμένο να περιμένει, πότε θα σταματήσει να μεταδίδει ο υπολογιστής, για να μεταδώσει το ίδιο. Το ίδιο ισχύει και για τον υπολογιστή (σχήμα 6.7.8).



Σχήμα 6.7.8. Ημι-αμφίδρομη επικοινωνία



Σχήμα 6.7.8. Αμφίδρομη επικοινωνία

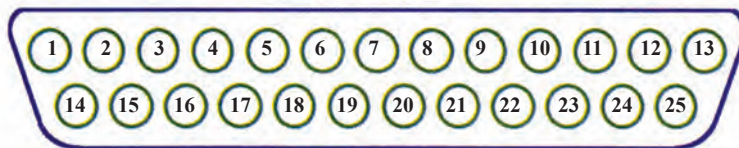
Οι εξωτερικές συσκευές συνδέονται σε υπολογιστή μέσω διασύνδεσης εισόδου/εξόδου (I/O), που ονομάζεται θύρα. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι θυρών σε έναν υπολογιστή, η **σειριακή θύρα** και η **παράλληλη θύρα**. Οι περισσότεροι υπολογιστές διαθέτουν μια παράλληλη και τουλάχιστον μια σειριακή θύρα για σύνδεση modems, εκτυπωτών, ποντικιού και άλλων περιφερειακών συσκευών.

Η σειριακή θύρα χρησιμοποιείται για σειριακή μετάδοση δεδομένων, όπου μόνο ένα bit μεταφέρεται κάθε φορά. Τα modems και το ποντίκι είναι παραδείγματα τυπικών σειριακών συσκευών. Επίσης, οι σειριακές θύρες χρησιμοποιούνται μερικές φορές για διασύνδεση συσκευών ελέγχου και μέτρησης με υπολογιστή. Η παράλληλη θύρα χρησιμοποιείται για παράλληλη μετάδοση δεδομένων, όπου τουλάχιστον ένα byte (8 bit) μεταφέρεται κάθε φορά. Υπάρχουν αρκετές τυποποιήσεις διαύλων, που χρησιμοποιούνται σήμερα τόσο για σειριακές όσο και για παράλληλες θύρες. Οι πιο σημαντικές περιγράφονται παρακάτω.

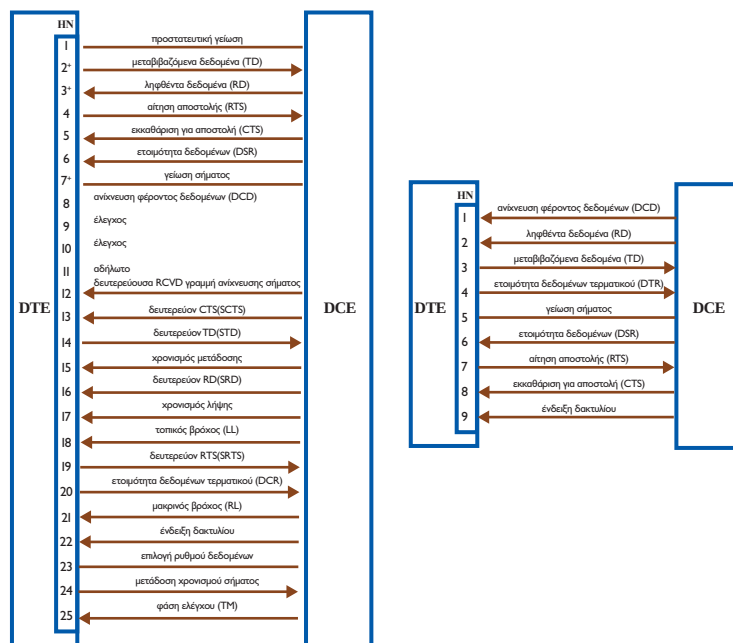
► Δίαυλοι διασύνδεσης εξωτερικών σειριακών συσκευών I/O

• RS-232C

Πρόκειται για το πιο παλιό και συνηθισμένο πρότυπο για σειριακή διασύνδεση, που αποδέχεται ο Σύνδεσμος Ηλεκτρονικών Βιομηχανιών (EIA: electronics industries association). Για το λόγο αυτό, το RS-232C αναφέρεται και ως EIA-232. Σχεδόν όλα τα modems συμμορφώνονται με το πρότυπο EIA-232 και οι περισσότεροι προσωπικοί υπολογιστές διαθέτουν θύρα RS-232C. Το ποντίκι, μερικές οθόνες απεικόνισης και οι σειριακοί εκτυπωτές, μαζί με τα modems, σχεδιάζονται έτσι, ώστε να συνδέονται στη θύρα RS-232C. Το RS-232C χρησιμοποιείται, συνήθως, για διασύνδεση τερματικών (**DTE: Data Terminal Equipment**) με συσκευές μετάδοσης δεδομένων (**DCE: Data Communications Equipment**). Για παράδειγμα, ένας υπολογιστής θεωρείται ως DTE, ενώ ένα modem DCE.



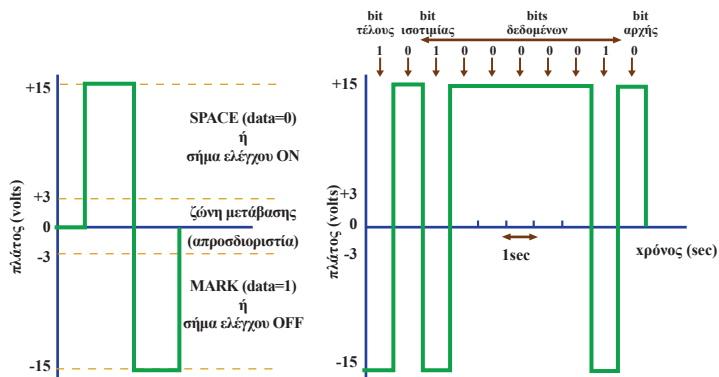
Σχήμα 6.7.9. RS-232C 25-pin βύσμα



Σχήμα 6.7.10. Σήματα και επεξηγήσεις ακίδων βυσμάτων RS-232C 25-pin και 9-pin

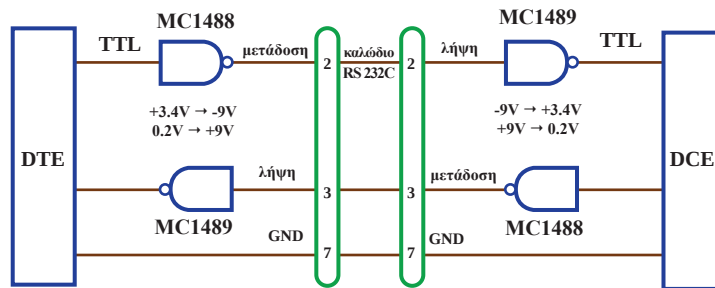
Το πρότυπο EIA-232 καθορίζει 25 γραμμές μεταξύ ενός DTE και ενός DCE, που απαιτούν βύσμα 25-pin (DB-25), όπως δείχνεται στο σχήμα 6.7.9. Σε εφαρμογές προσωπικού υπολογιστή δεν χρειάζονται όλα τα σήματα του RS-232C. Συνήθως χρησιμοποιούνται από τρία ως έντεκα σήματα. Για το λόγο αυτό, σύνδεσμος 9-pin (DB-9) ορίστηκε από την IBM για τις σειριακές της διασυνδέσεις. Στο σχήμα 6.7.10 δείχνονται τα σήματα και οι επεξηγήσεις των ακίδων βύσματος 25-pin RS-232C και βύσματος 9-pin. Τα τρία βασικότερα σήματα δηλώνονται με αστερίσκο (ακίδες 2,3,7).

Τι σημαίνει, όμως, η μετάδοση του '1' ή του '0'; Στο RS-232C τα '1'ς και τα '0'ς μεταδίδονται χρησιμοποιώντας αρνητικές και θετικές τάσεις. Η αποστολή του '1' είναι γνωστή ως **mark** και ορίζεται ως ηλεκτρικό σήμα μεταξύ -3V και -15V. Η αποστολή του '0' είναι γνωστή ως **space** και ορίζεται ως ηλεκτρικό σήμα μεταξύ +3V και +15V. Τα σήματα, που βρίσκονται έξω από αυτές τις ζώνες, θεωρούνται απροσδιόριστα και αγνοούνται από το λήπτη. Αυτός ο ορισμός των σημάτων δείχνεται στο σχήμα 6.7.11. Έτσι, ένα τερματικό, που επικοινωνεί με RS-232C, πρέπει να είναι σε θέση να στέλνει και να λαμβάνει τάση στην περιοχή -15V με +15V. Για παράδειγμα, για να μεταδοθεί το γράμμα 'Α' (σε κώδικα ASCII) με 0 ως bit ισοτιμίας (01000001) και 0 ως bit αρχής και 1 ως bit τέλους, πρέπει να μεταδοθούν οι παλμοί που φαίνονται στο σχήμα 6.7.11.



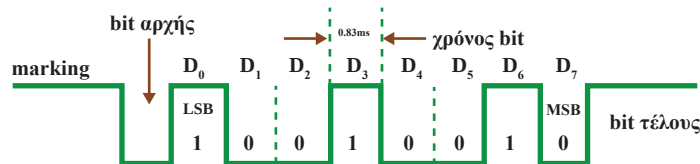
Σχήμα 6.7.11. Επίπεδα τάσης RS-232C και μετάδοση του χαρακτήρα 'Α' (ASCII)

Οι γραμμές δεδομένων δεν είναι συμβατές με τη λογική TTL. Για το λόγο αυτό απαιτούνται «μεταφραστές» τάσης, οι οποίοι ονομάζονται **οδηγοί γραμμής** (line drivers) και **δέκτες γραμμής** (line receivers), για διασύνδεση της TTL λογικής με τα σήματα RS-232, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.7.12. Ο οδηγός γραμμής MC1488 μετατρέπει το '1' σε περίπου -9V και το '0' σε περίπου +9V. Πριν παραληφθεί από το DCE, μετατρέπεται πάλι από το δέκτη γραμμής MC1489 σε λογική συμβατή με την TTL.



Σχήμα 6.7.12. Τυπική διασύνδεση σημάτων RS-232C και σταθμών τάσης

Ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδονται τα bit (bits/sec) ονομάζεται **baud**. Από τεχνικής πλευράς ορίζεται ως ο αριθμός αλλαγών του σήματος ανά δευτερόλεπτο. Η κάθε συσκευή έχει τις δικές της απαιτήσεις σε baud. Ωστόσο, στα περισσότερα τερματικά και εκτυπωτές το baud είναι ρυθμιζόμενο, συνήθως μεταξύ 50 και 9600baud. Στο σχήμα 6.7.13, φαίνεται πως μεταδίδεται ο ASCII χαρακτήρας I με 1200baud. Ο χρόνος για κάθε bit, δηλαδή η καθυστέρηση μεταξύ δύο διαδοχικών bit, είναι 0.83msec και καθορίζεται από το baud ως εξής: για τα 1200bit απαιτείται χρόνος 1sec, για το 1bit $1/1200=0.83\text{msec}$.



Σχήμα 6.7.13. Σειριακή μετάδοση του ASCII χαρακτήρα 'I' στα 1200 Baud

Το μέγιστο μήκος καλωδίου για το RS-232C είναι 15 μέτρα με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 20kbaud. Η χρησιμοποίηση μικρότερου καλωδίου επιτρέπει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί του RS-232C, αναπτύχθηκαν δύο άλλα πρότυπα, το **RS-422** και το **RS-423**. Τα πρότυπα αυτά καθορίζουν πολύ μεγαλύτερα μήκη καλωδίων και πολύ υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Για παράδειγμα, και τα δύο αυτά πρότυπα επιτρέπουν μέγιστο μήκος καλωδίου 1200 μέτρα. Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων στη RS-422 είναι 10Mbaud για 12 μέτρα καλώδιο και 100kbaud για 1200 μέτρα καλώδιο. Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων στη RS-423 είναι 100kbaud για 9 μέτρα καλώδιο και 1kbaud για 1200 μέτρα καλώδιο. Ωστόσο, το RS-232C εξακολουθεί να παραμένει το πιο συνηθισμένο. Σύγκριση των προτύπων RS-232C, RS-422 και RS-423 δίνεται στον πίνακα 6.7.1.

Προδιαγραφές	RS-232C	RS-422	RS-423
Ταχύτητα	20kbaud	10Mbaud στα 12m 100kbaud στα 1200m	100kbaud στα 9m 1kbaud στα 1200m
Απόσταση	15m	4000m	4000m
Τάση εισόδου λήπτη	±15V	±7V	±12V

Πίνακας 6.7.1. Σύγκριση προτύπων σειριακών I/O

- **IEEE-1394**

Πρόκειται για σχετικά νέο και πολύ γρήγορο πρότυπο εξωτερικού σειριακού διαύλου, που υποστηρίζει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων ως και 400Mbps και χρησιμοποιείται, συνήθως, για διασύνδεση με περιφερειακά γραφικών και video, όπως οι ψηφιακές κάμερες. Το IEEE-1394 αναπτύχθηκε από την Apple. Τα αρχικά IEEE δηλώνουν το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Στο IEEE-1394 μπορούν να συνδεθούν μέχρι και 63 συσκευές. Το IEEE-1394 αποτελείται από έξι καλώδια, δύο συνεστραμμένα ζεύγη για δεδομένα και δύο για τροφοδοσία. Επίσης, αυτό το πρότυπο επιτρέπει **ενεργό σύνδεση** (hot plugging) δηλαδή, σύνδεση και αποσύνδεση συσκευών σε υπολογιστή κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.

- **USB (Universal Serial Bus)**

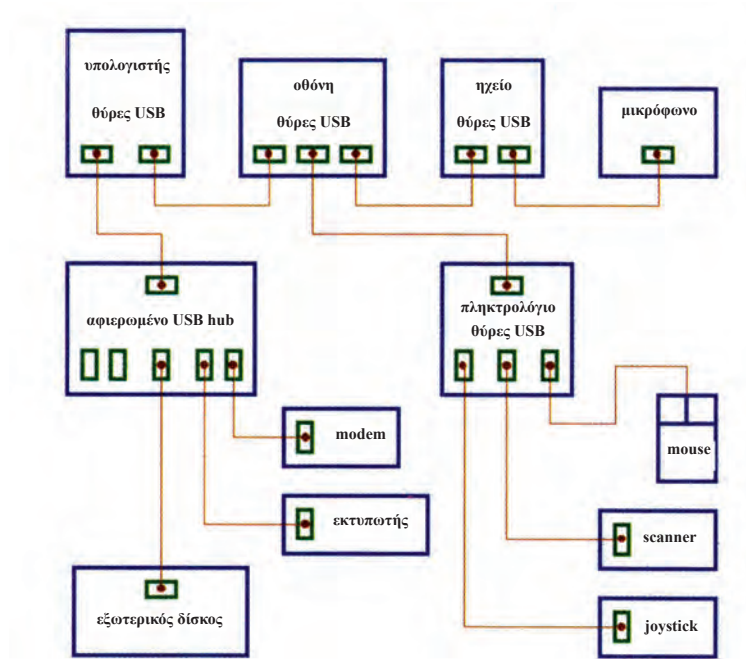
Αυτό το σχετικά νέο πρότυπο για εξωτερικούς σειριακούς διαύλους μπορεί να αντικαταστήσει τα περισσότερα από τα υπάρχοντα πρότυπα για χαμηλές ως μέσες ταχύτητες με εξαίρεση, ίσως, το IEEE-1394 το οποίο είναι σχεδιασμένο να ικανοποιεί υψηλές ταχύτητες και να συνεργάζεται με το USB. Το USB υποστηρίζει δύο ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, μια υψηλή στα 12Mbps και μια χαμηλή στο 1.5Mbps. Μια θύρα USB μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύνδεση ως και 127 περιφερειακών συσκευών και επιτρέπει τόσο plug-and-play όσο και hot plugging. Το καλώδιο USB έχει τέσσερα καλώδια, δύο για δεδομένα και δύο για τροφοδοσία, και συνδέει τον υπολογιστή στα USB περιφερειακά, καθένα από τα οποία μπορεί να ενεργεί ως σύνδεσμος (hub) για σύνδεση με άλλα USB περιφερειακά. Στο σχήμα 6.7.14 δείχνεται υπολογιστικό σύστημα με διασύνδεση USB.

► **Δίαυλοι διασύνδεσης εξωτερικών παράλληλων συσκευών I/O**

- **IEEE-488**

Αυτό το πρότυπο διαύλου χρησιμοποιείται για πολλά χρόνια και είναι γνωστό και ως δίαυλος διασύνδεσης γενικού σκοπού **GPIB** (general-purpose interface bus) (σχήμα 6.7.15). Αναπτύχθηκε από την Hewlett-Packard στη δεκαετία του 1960 και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ελέγχου και μετρήσεων. Το IEEE-488 αποτελείται από 24 γραμμές, που χρησιμοποιούνται για την παράλληλη μεταφορά οκτώ ψηφίων δεδομένων κάθε φορά και παρέχουν οκτώ σήματα ελέγχου, που περιλαμβάνουν τρεις γραμμές χειραψίας

και πέντε γραμμές διαχείρισης διαύλου. Επίσης, περιλαμβάνονται οκτώ γραμμές γείωσης για γείωση και θωράκιση. Σήμερα, ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων είναι 1Mbyte/sec και τείνει να αυξηθεί στα 8Mbytes/sec.

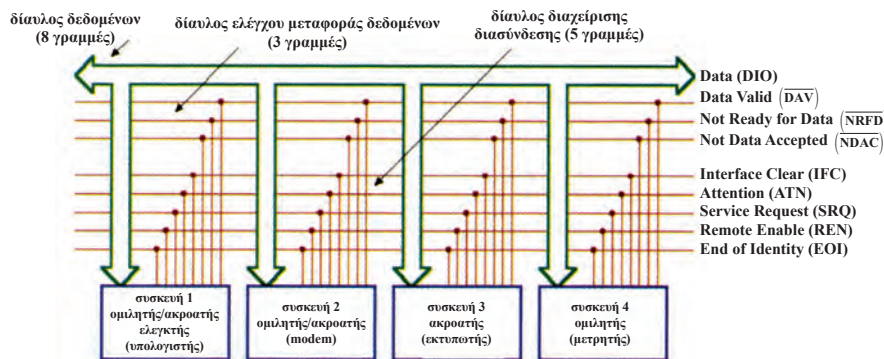


Σχήμα 6.7.14. Παράδειγμα υπολογιστικού συστήματος με διασύνδεση USB



Σχήμα 6.7.15. Καλώδιο IEEE-488 (GPIB)

Για να συνδεθούν ελεγχόμενες συσκευές σε υπολογιστή μέσω του διαύλου IEEE-488, εγκαθίσταται κάρτα διασύνδεσης στον υπολογιστή, που μετατρέπει τον υπολογιστή σε **ελεγκτή** (controller). Σε τυπική GPIB εγκατάσταση μπορούν να συνδεθούν έως και 14 ελεγχόμενες συσκευές (όργανα ελέγχου και μέτρησης) σε έναν ελεγκτή. Όταν ο ελεγκτής δίνει εντολή σε ελεγχόμενη συσκευή, για να εκτελέσει συγκεκριμένη λειτουργία, όπως η μέτρηση συχνότητας, τότε ο ελεγκτής «μιλάει» και η ελεγχόμενη συσκευή «ακούει». Ο **ακροατής** (listener) είναι όργανο ικανό να λαμβάνει δεδομένα από το GPIB, όταν διευθυνσιοδοτείται από τον ελεγκτή. Παραδείγματα ακροατών είναι οι εκτυπωτές, οι οθόνες καθώς και οι προγραμματιζόμενες πηγές τροφοδοσίας και γεννήτριες σημάτων. Ο **ομιλητής** (talker) είναι όργανο ικανό να στέλνει δεδομένα μέσω GPIB. Παράδειγμα αποτελεί ο μετρητής συχνότητας, που μπορεί να δώσει στην έξοδο δεδομένα συμβατά με το δίαυλο. Μερικά όργανα μπορούν να στείλουν και να λάβουν δεδομένα και ονομάζονται **ομιλητές/ακροατές**. Τέτοια όργανα είναι οι υπολογιστές, τα modems και ορισμένα όργανα μετρήσεων. Ο ελεγκτής μπορεί να ορίσει κάθε ένα από τα άλλα όργανα στο δίαυλο ως ομιλητή ή ακροατή για τη μεταφορά των δεδομένων. Ο ελεγκτής είναι συνήθως ομιλητής/ακροατής. Μια τυπική GPIB διευθέτηση φαίνεται στο σχήμα 6.7.16. Τα σήματα ομαδοποιούνται σε τρεις βασικούς διαύλους: το δίαυλο δεδομένων, το δίαυλο ελέγχου μεταφοράς δεδομένων, το δίαυλο διαχείρισης διασύνδεσης.



Σχήμα 6.7.16. Τυπική σύνδεση IEEE-488 (GPIB)

Τα πέντε σήματα του διαύλου διαχείρισης διασύνδεσης ελέγχουν τη σωστή ροή των δεδομένων. Η γραμμή προσοχής ATN (attention) παρακολουθείται από όλες τις συσκευές που βρίσκονται συνδεδεμένες στο δίαυλο. Όταν η ATN είναι ενεργή, ο ελεγκτής επιλέγει κάποια από τις λειτουργίες διασύνδεσης, ορίζει τους ομιλητές και τους ακροατές και παρέχει τις απαραίτητες διευθύνσεις για τους ακροατές. Κάθε συσκευή GPIB έχει διεύθυνση αναγνώρισης, που δίνεται από τον ελεγκτή. Ο πίνακας 6.7.2 περιγράφει τις γραμμές διαχείρισης διασύνδεσης και τις λειτουργίες τους.

Όνομα	Περιγραφή
ATN	Προσοχή: αναγκάζει όλες τις συσκευές στο δίαυλο να ερμηνεύσουν τα δεδομένα ως εντολή του ελεγκτή και ενεργοποιεί τη διαδικασία χειραψίας
IFC	Αρχικοποιεί το δίαυλο
SRQ	Ενημερώνει τον ελεγκτή ότι κάποια συσκευή ζητάει επικοινωνία
REN	Δίνει τη δυνατότητα στις συσκευές να ανταποκριθούν σε έλεγχο από απομακρυσμένο πρόγραμμα
EOI	Δηλώνει το τελευταίο byte δεδομένων που μεταφέρεται

Πίνακας 6.7.2. Γραμμές διαχείρισης GPIB

Το GPIB περιορίζεται σε μέγιστο μήκος καλωδίου 15 μέτρα και δεν μπορεί να υπάρξει παραπάνω από ένα όργανο ανά μέτρο με μέγιστη χωρητικότητα φορτίου 50pF το καθένα. Ο περιορισμός του μήκους ξεπερνιέται με επεκτάσεις διαύλου και modems.

- **SCSI (Small Computer System Interface)**

Πρόκειται για ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο για διασύνδεση προσωπικών υπολογιστών με περιφερειακά, που προφέρεται ως **scuzzy** (σκάζι). Αν και το SCSI είναι πρότυπο του Αμερικανικού Εθνικού Ινστιτούτου Τυποποίησης **ANSI** (American National Standards Institute) υπάρχουν πολλές παραλλαγές από ποικιλία κατασκευαστών. Ο ένας τύπος SCSI μπορεί να μην είναι συμβατός με τον άλλο. Το **SCSI-1** είναι σύνδεσμος 25-pin, που παρέχει δίαυλο δεδομένων 8-bit και υποστηρίζει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων 4Mbytes/sec. Άλλοι τύποι προτύπων SCSI είναι:

- ▶ **SCSI-2.** Είναι το ίδιο με το SCSI-1, αλλά χρησιμοποιεί σύνδεσμο 50-pin και υποστηρίζει πολλαπλές συσκευές.
- ▶ **Εκτεταμένο SCSI** (wide SCSI). Χρησιμοποιεί ευρύτερο σύνδεσμο από το SCSI-2, για να υποστηρίξει μεταφορές δεδομένων 16-bit.
- ▶ **Γρήγορο SCSI** (fast SCSI). Παρέχει μεταφορά δεδομένων 8-bit, αλλά υποστηρίζει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων 10Mbytes/sec.
- ▶ **Γρήγορο εκτεταμένο SCSI** (fast wide SCSI). Αυτή η έκδοση επιτρέπει μεταφορά δεδομένων 16-bit στα 20Mbytes/sec.
- ▶ **Έξτρα SCSI** (ultra SCSI). Μεταφέρει δεδομένα 8-bits στα 20Mbytes/sec.
- ▶ **SCSI-3.** Έχει 16 γραμμές δεδομένων και τρέχει στα 40Mbytes/sec.
- ▶ **Έξτρα SCSI-2** (ultra SCSI-2). Μεταφέρει 8-bits στα 40Mbytes/sec.
- ▶ **Έξτρα εκτεταμένο SCSI-2** (wide ultra SCSI-2). Αυτή η έκδοση παρέχει μεταφορά δεδομένων 16-bits και λειτουργεί στα 80Mbytes/sec.

Οι περιγραφές των σημάτων συνδέσμου SCSI 25-pin φαίνονται στον πίνακα 6.7.3.

Αριθμός pin	Όνομα σήματος	Περιγραφή σήματος	Αριθμός pin	Όνομα σήματος	Περιγραφή σήματος
1	REQ	Αίτηση	14	GND	Γείωση σήματος
2	MSG	Μήνυμα	15	C/D	Εντολή/δεδομένα
3	I/O	Είσοδος/έξοδος	16	GND	Γείωση σήματος
4	RST	Αρχικοποίηση	17	ATN	Προσοχή
5	ACK	Επιβεβαίωση	18	GND	Γείωση σήματος
6	BSY	Απασχολημένο	19	SEL	Επιλογή
7	GND	Γείωση σήματος	20	DBP	Bit ισοτιμίας
8	DB0	Bit 0	21	DB1	Bit 1
9	GND	Γείωση σήματος	22	DB2	Bit 2
10	DB3	Bit 3	23	DB4	Bit 4
11	DB5	Bit 5	24	GND	Γείωση σήματος
12	DB6	Bit 6	25	TPWR	Τροφοδοσία
13	DB7	Bit 7			

Πίνακας 6.7.3. Σήματα SCSI

6.8 Διασύνδεση Συσκευών I/O σε Μικροϋπο- λογιστή

Πολλές εφαρμογές σε υπολογιστικά συστήματα απαιτούν κατάλληλη διασύνδεση (digital interface) συσκευών εισόδου/εξόδου. Ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ της συσκευής και του επεξεργαστή λαμβάνει χώρα μόνο με την έγκριση του επεξεργαστή και με την προϋπόθεση, ότι ικανοποιούνται οι απαιτήσεις χρονισμού. Η χρήση **θύρας εισόδου-εξόδου I/O** κάνει ευκολότερη την υλοποίηση αυτών των απαιτήσεων με τη χρήση λογικής, η οποία παρέχει ελεγχόμενη πρόσβαση στο δίαυλο μέσω αποκωδικοποίησης διευθύνσεων, συγχρονισμού επεξεργαστή και μεταφοράς δεδομένων, όπως ειπώθηκε στην αρχή του κεφαλαίου. Μερικά από τα πιο συνήθη σήματα ελέγχου του επεξεργαστή είναι το $\overline{RD}$ (read) και $\overline{WR}$ (write), η κατάσταση των οποίων καθορίζει και το χρονισμό των ανταλλαγών στο δίαυλο. Στη συνέχεια, γίνεται εκτενέστερη αναφορά στη διασύνδεση μερικών συνήθων συσκευών I/O σε μικροϋπολογιστικό σύστημα.

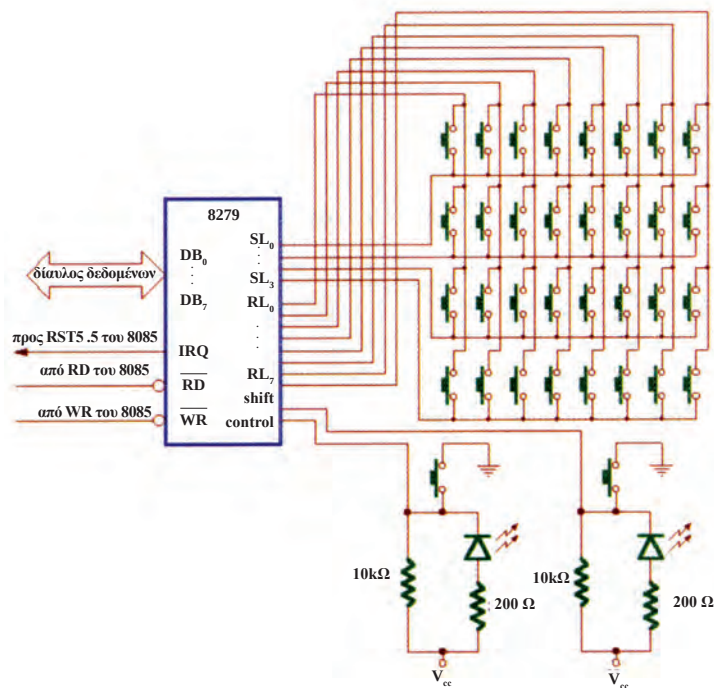
- **Διασύνδεση πληκτρολογίου**

Σε τυπικό μικροϋπολογιστικό σύστημα για λήψη και καταγραφή μετρήσεων, η ύπαρξη αλφαριθμητικού πληκτρολογίου δίνει στο σύστημα αυτονομία και στο χρήστη πολλές δυνατότητες, αφού το σύστημα μπορεί να καταστεί υπό ορισμένες προϋποθέσεις πλατφόρμα ανάπτυξης ποικίλων εφαρμογών χωρίς τον περιορισμό της εξάρτησης από κάποιο τερματικό σταθμό. Οι δυνατότητες αυτές αυξάνονται περαιτέρω με τη διασύνδεση στο σύστημα οθόνης υγρών κρυστάλλων (LCD: Liquid Crystal Display). Ένα προτεινόμενο πληκτρολόγιο για σύνδεση έχει τα πλήκτρα του υπό μορφή πίνακα 8 στηλών και 4 γραμμών, σχήμα 6.8.1, καθώς και τα ειδικά πλήκτρα control και shift.

ESC	A	B	C	D	E	F	Back Space
Q	W	R	T	Y	U	I	O
P	S	1 G	2 H	3 J	4 K	· L	SPACE
5 X	6 V	7 N	8 M	9 Z	0	.	Enter
Shift	Control					Control	Shift

Σχήμα 6.8.1. Διάταξη πληκτρολογίου

Η διασύνδεση του πληκτρολογίου στο υπολογιστικό σύστημα γίνεται με χρήση του προγραμματιζόμενου ολοκληρωμένου 8279 της Intel, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.8.2. Η λειτουργία του 8279 είναι, εν συντομία, η ακόλουθη: Με τις 4 γραμμές εξόδου SL3-SL0 (γραμμές σάρωσης) σαρώνει τις 4 γραμμές του πίνακα του πληκτρολογίου, ενώ οι γραμμές εισόδου RL7-RL0 (γραμμές



Σχήμα 6.8.2. Διασύνδεση του πληκτρολογίου μέσω του 8279 με τον μικροεπεξεργαστή

επιστροφής) συνδέονται στις 8 στήλες της μήτρας του πληκτρολογίου. Αν πατηθεί κάποιο πλήκτρο, βραχυκυκλώνει η αντίστοιχη γραμμή σάρωσης με την αντίστοιχη γραμμή επιστροφής, οπότε το 8279 αναγνωρίζει ποιο πλήκτρο πατήθηκε. Το πρόβλημα των αναπηδήσεων των πλήκτρων αντιμετωπίζεται με δυο τρόπους:

- Είτε με χρήση του αμοιβαίου αποκλεισμού δυο πλήκτρων, οπότε με τον τρόπο αυτό, αν πατηθούν περισσότερα από ένα πλήκτρα δεν μπορούν να αναγνωριστούν. Αυτό που πατήθηκε πρώτο, αναγνωρίζεται και καταγράφεται, αν τα υπόλοιπα πλήκτρα ελευθερωθούν πριν από αυτό. Αν δεν υπάρχει πρώτο πλήκτρο, επειδή περισσότερα από ένα πατήθηκαν ταυτόχρονα, αναγνωρίζεται και καταγράφεται όποιο από αυτά εξακολουθεί να παραμένει πατημένο, αφού όλα τα υπόλοιπα αφεθούν ελεύθερα.
- Είτε με χρήση της επικάλυψης πολλαπλών πλήκτρων, όπου με τον τρόπο αυτό κάθε πλήκτρο καταγράφεται με τη σειρά που πατιέται, ανεξάρτητα από το αν κατά τη διάρκεια, που είναι πατημένο, πιεστούν και άλλα πλήκτρα. Αν πιεστούν ταυτόχρονα περισσότερα από ένα πλήκτρα,

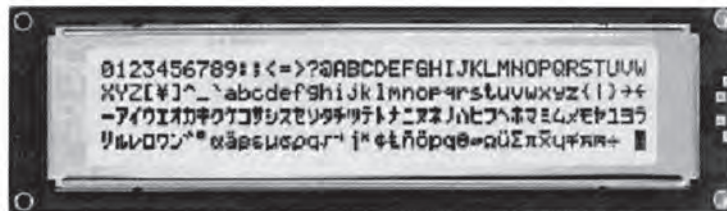
καταγράφονται με τη σειρά με την οποία τα βρίσκει το 8279 πάνω στον πίνακα του πληκτρολογίου.

Η εξυπηρέτηση του 8279 από το μικροεπεξεργαστή (8085) του συστήματος γίνεται με τη μέθοδο της διακοπής. Χρησιμοποιείται η είσοδος διακοπών RST5.5 του μικροεπεξεργαστή, όταν υπάρχει αίτηση διακοπής IRQ από το 8279.

- **Διασύνδεση οθόνης υγρών κρυστάλλων (LCD)**

Η διασύνδεση της οθόνης υγρών κρυστάλλων M4024 της Seiko αποτελεί δεύτερο παράδειγμα (σχήμα 6.8.3). Πρόκειται για οθόνη LCD 4 γραμμών με 40 χαρακτήρες ανά γραμμή, πίνακα 5x7 στιγμών για την εμφάνιση του κάθε χαρακτήρα και cursor. Διαθέτει 8 pins (DB7-DB0) για σύνδεση με το δί-αυλο δεδομένων. Τα pins E1-E2 αποτελούν σήματα εκκίνησης λειτουργίας (E1 για τις πάνω δύο γραμμές και E2 για τις κάτω δύο), το R/W για εγγραφή και ανάγνωση, το RS για επιλογή καταχώρησης, το V_{ic} για μεταβολή του contrast της οθόνης, το V_{ss} για γείωση και το V_{dd} για τροφοδοσία.

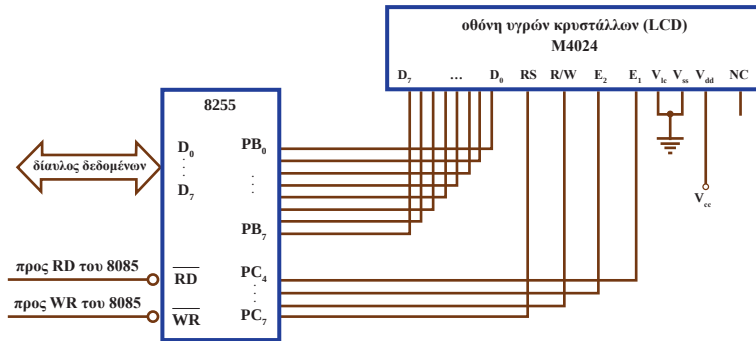
Η επικοινωνία του LCD με το μικροϋπολογιστικό σύστημα γίνεται παράλληλα μέσω προγραμματιζόμενης θύρας εισόδου/εξόδου του 8255 (σχήμα 6.8.4). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οι θύρες B και C του 8255. Οι συνδέσεις είναι τέτοιες, ώστε ο μικροεπεξεργαστής να στέλνει και να διαβάζει δεδομένα σε (από) μια θύρα. Εκτός από τα 8 bit του διαύλου δεδομένων της οθόνης (DB7-DB0), τα οποία συνδέονται στη θύρα B του 8255, υπάρχουν ακόμα 4 σήματα (pins), τα οποία είναι σήματα ελέγχου και οδηγούνται από τις εξόδους PC7-PC4 της θύρας C.



Σχήμα 6.8.3. Η οθόνη M4024

- **Διασύνδεση μετατροπέα A/D**

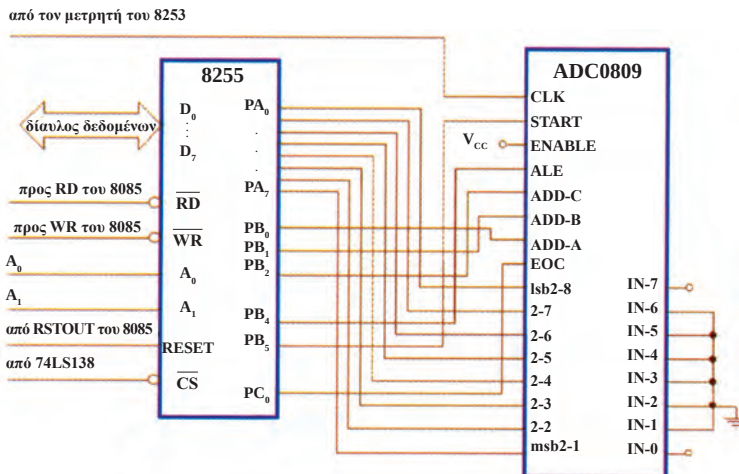
Στο σχήμα 6.8.5 φαίνεται η διασύνδεση του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, ADC0809, με το υπόλοιπο κύκλωμα του μικροϋπολογιστή μέσω της προγραμματιζόμενης θύρας I/O, 8255. Ο ADC0809 διαθέτει οκτώ πολυπλεγμένες εισόδους IN7-IN0. Η ενεργοποίηση κάθε εισόδου καθορίζεται από τους ακροδέκτες ADD A, ADD B και ADD C. Η είσοδος CLOCK συνδέεται με την έξοδο μετρητή του χρονιστή 8253, ο οποίος έχει προγραμματιστεί να δίνει παλμούς συχνότητας 500kHz. Για την ανάγνωση των δεδομένων χρησιμοποιείται η θύρα A του 8255, για τα σήματα ελέγχου



Σχήμα 6.8.4. Διασύνδεση της οθόνης με το υπόλοιπο κύκλωμα του μικροϋπολογιστή μέσω της προγραμματιζόμενης θύρας I/O

ADD A, ADD B, ADD C, ALE και START χρησιμοποιείται η θύρα B και για το σήμα τέλους μετατροπής EOC η θύρα C. Η είσοδος OUTPUT ENABLE έχει τεθεί σε '1' καθ' όλη τη διάρκεια της μετατροπής. Μια τυπική διαδικασία μετατροπής έχει ως εξής:

- ▶ Από τη θύρα B (από όπου θα σταλεί εντολή) καθορίζεται, ότι θα χρησιμοποιηθεί η είσοδος IN0 (ADD A=ADD B=ADD C=0) για μετατροπή της.
- ▶ Μετά ενεργοποιείται το σήμα START, ενώ το σήμα ALE παραμένει ενεργό.
- ▶ Απενεργοποιείται το ALE.



Σχήμα 6.8.5. Διασύνδεση του μετατροπέα ADC0809 με το υπόλοιπο κύκλωμα του μικροϋπολογιστή μέσω της προγραμματιζόμενης θύρας I/O

- ▶ Απενεργοποιείται το START. Η διαδικασία μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό αρχίζει. Η μετατροπή διαρκεί οκτώ περιόδους και η ψηφιακή λέξη μανταλώνεται στην έξοδο, με άνοδο του σήματος START. Το σήμα EOC είναι σε '0'.
- ▶ Μετά από συνολικά 64 περιόδους το σήμα EOC ανέρχεται και είναι έτοιμη η ψηφιακή λέξη για ανάγνωση.

6.9

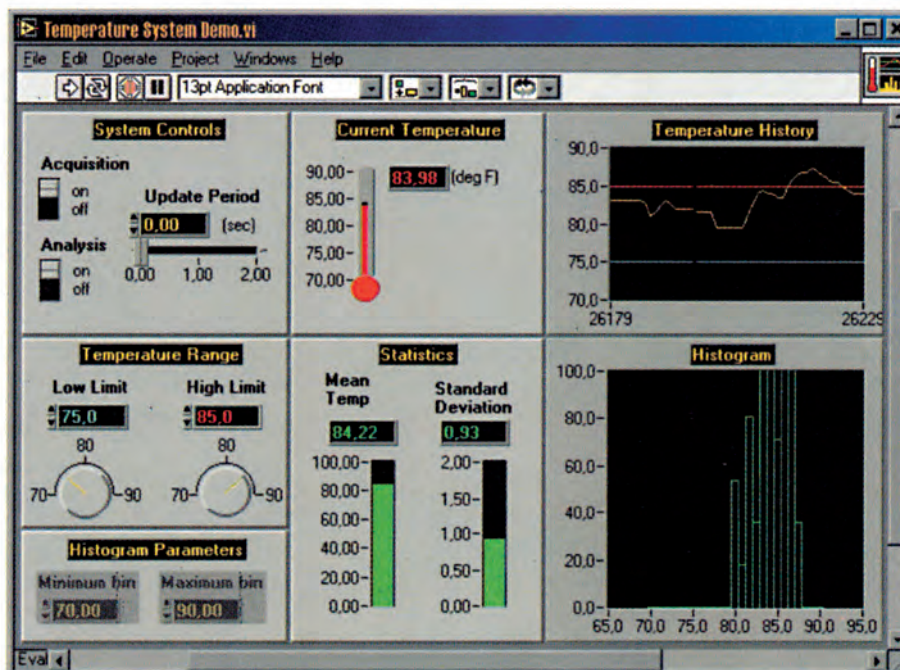
Λογισμικό
Συστημάτων
Μετρήσεων

Το λογισμικό (software), που χρησιμοποιείται σήμερα στα συστήματα μετρήσεων, καλύπτει ευρύτατο φάσμα, ξεκινώντας από απλά **προγράμματα οδηγών διατάξεων** (device drivers) και φθάνοντας σε **αναπτυξιακά συστήματα υψηλού επιπέδου**. Τα προγράμματα οδηγών συσκευών βοηθούν το χρήστη στον έλεγχο των συσκευών του συστήματός του, απαλλάσσοντάς τον από την υποχρέωση να έχει σαφή αντίληψη του υφιστάμενου hardware ή του λειτουργικού συστήματος του υπολογιστή. Αυτά αποτέλεσαν και την πρώτη γενιά προγραμμάτων μετρήσεων.

Οι ανάγκες, όμως, των χρηστών δεν περιορίζονται μόνο στον έλεγχο των συσκευών του συστήματος, αλλά εκτείνονται και σε άλλα επίπεδα. Έτσι, χρειάζονται προγράμματα για την ανάλυση των δεδομένων (επεξεργασία σήματος, στατιστική μελέτη, προσαρμογή καμπυλών, εξομοίωση, υλοποίηση ελεγκτών, κ.ά.) καθώς και τη διαχείριση και παρουσίαση των δεδομένων αυτών (γραφήματα, επικοινωνία αρχείων, κ.ά.).

Η δεύτερη γενιά προγραμμάτων στηρίζεται στη δημιουργία πυρήνα υψηλού επιπέδου για την ανάπτυξη **προγραμμάτων εφαρμογών** (application programs), στον οποίο εμπεριέχονται συναρτήσεις οδηγών συσκευών και μετρήσεων. Οι συναρτήσεις αυτές μπορούν να καλούνται από το πρόγραμμα εφαρμογής, που γράφεται σε γλώσσα **υψηλού επιπέδου**. Τυπικό παράδειγμα αυτής της γενιάς είναι το LOTUS 1-2-3, το οποίο τείνει να καταστεί πρότυπο (DIF: data interchange format).

Άλλη τάση, που αναπτύχθηκε, ήταν ο εμπλουτισμός γλωσσών υψηλού επιπέδου (Visual Basic, C++, κ.ά.) με συναρτήσεις μετρήσεων σε μορφή βιβλιοθηκών.



Σχήμα 6.9.1. Επίδειξη συστήματος θερμοκρασίας με το LabVIEW

Άλλη τάση είναι η πρόσθεση σε γνωστές γλώσσες «εντολών» μετρήσεων. Παράδειγμα, εδώ, αποτελεί το ASYST, το οποίο στηρίχθηκε στη γλώσσα FORTH. Τρίτη τάση αποτελεί η σύνταξη λογισμικού (software), που δίνει δυνατότητες μετρήσεων σε γνωστό **φύλλο εργασίας** (spreadsheet). Τυπικό παράδειγμα, εδώ, αποτελεί το Measure, το οποίο προσθέτει ρουτίνες μετρήσεων στο Lotus 1-2-3 ή στο Symphony σε μορφή **μακροεντολών**.

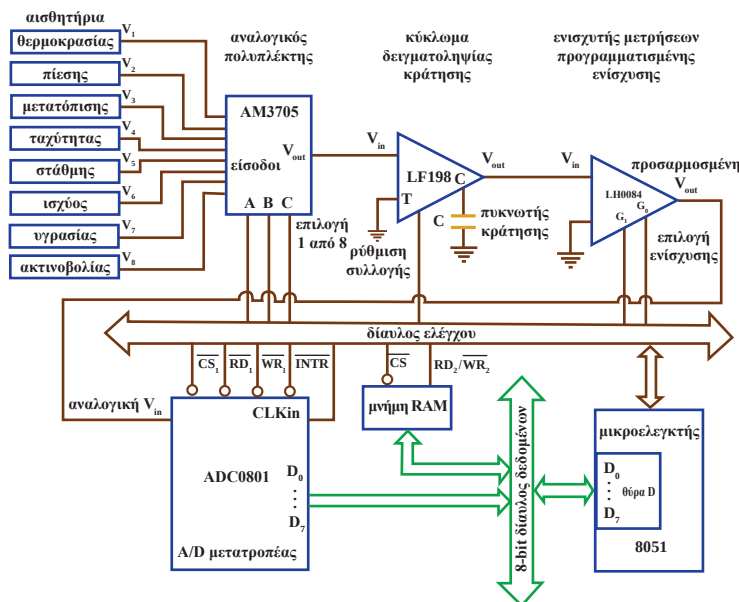
Η τρίτη γενιά προγραμμάτων δίνει τη δυνατότητα σχεδίασης του συστήματος μετρήσεων και προγραμματισμού των λειτουργιών του με **γραφικό τρόπο**. Έτσι, απαλλάσσεται ο τεχνικός από την καταπόνηση της σύνταξης προγραμμάτων, ενώ του προσφέρεται συμπαγές, ευέλικτο και φιλικό πλαίσιο ανάπτυξης. Τυπικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το **LabVIEW** (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) (σχήμα 6.9.1).

Το LabVIEW είναι αναπτυξιακό περιβάλλον, που βασίζεται σε γραφική γλώσσα προγραμματισμού την G. Είναι πλήρως ολοκληρωμένο για επικοινωνία με hardware, όπως το GPIB, VXI, PXI, RS-232 και RS-485. Έχει ενσωματωμένες βιβλιοθήκες για τη χρήση λογισμικών προτύπων, όπως TCP/IP δικτύωση. Με το LabVIEW μπορεί κάποιος να δημιουργήσει 32-bit μεταγλωττισμένα προγράμματα (compiled programs), που προσφέρουν μεγάλες ταχύτητες εκτέλεσης για συλλογή δεδομένων, έλεγχο και μέτρηση. Επίσης, μπορεί να δημιουργήσει εκτελέσιμα αρχεία, αφού το **LabVIEW** είναι το ίδιο ένας 32-bit μεταγλωττιστής (compiler).

Στο σχήμα 6.10.1 φαίνεται ένα τυπικό σύστημα συλλογής δεδομένων οκτώ καναλιών. Το όλο σύστημα επικοινωνεί μέσω δύο διαύλων, του διαύλου δεδομένων και του διαύλου ελέγχου. Στο δίαυλο δεδομένων συνδέονται όλες εκείνες οι συσκευές, που θέλουν να στείλουν ή να λάβουν παράλληλα δεδομένα των 8-bit σε ή από οποιοδήποτε εντός του συστήματος. Στο παράδειγμα υπάρχουν τρεις τέτοιες συσκευές στο σύστημα: ο A/D μετατροπέας, ο μικροελεγκτής και η μνήμη. Ο δίαυλος ελέγχου παρέχει σήματα ελέγχου προς και από τις διάφορες συσκευές για περιπτώσεις επιλογής ολοκληρωμένου, ενεργοποίησης εξόδου, χρονισμού και ρυθμίσεις. Κάθε ένα από τα οκτώ αισθητήρια δίνει ως έξοδο τάση, που εξαρτάται από το αναλογικό μέγεθος, που μετράει. Καθήκον του μικροελεγκτή είναι να σαρώνει όλες αυτές τις εξόδους σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα και να αποθηκεύει τα ψηφιακά δεδομένα στη μνήμη για μελλοντική χρήση. Από τη στιγμή, που οι αναλογικές ποσότητες μεταβάλλονται πολύ αργά, το σάρωμα (διάβασμα) των μεταβλητών σε διαστήματα ενός δευτερολέπτου είναι αρκετά γρήγορο, για να έχουμε ακριβή εικόνα των τιμών τους. Αυτό εύκολα διορθώνεται με μικροελεγκτές, που έχουν ρυθμούς ρολογιού της τάξης των μsecs . Για να γίνει αυτό, ο μικροελεγκτής πρέπει να στείλει κατάλληλα σήματα ελέγχου σε κάθε μια από τις συσκευές, ξεκινώντας από τον πολυπλέκτη και καταλήγοντας στον A/D μετατροπέα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται χειραψία (**handshaking**) ή επιλογή (**polling**) και γίνεται με τη βοήθεια λογισμικού. Η διασύνδεση και η χειραψία, που γίνεται μεταξύ του μικροελεγκτή και των αισθητηρίων, γίνεται κατανοητή με προσεκτικότερη ματιά σε κάθε μια από τις διατάξεις του συστήματος.

6.10

Πρακτικά Συστήματα Συλλογής Δεδομένων



Σχήμα 6.10.1. Σύστημα συλλογής δεδομένων

Ο αναλογικός πολυπλέκτης μειώνει την πολυπλοκότητα του κυκλώματος και τον αριθμό των καλωδίων, αφού η έξοδος του κάθε αισθητηρίου δε συνδέεται σε κάθε διάταξη. Ο μικροελεγκτής επιλέγει ένα από τα αισθητήρια την κατάλληλη στιγμή, θέτοντας τον κατάλληλο δυαδικό κώδικα στις εισόδους A, B, C μέσω του διαύλου ελέγχου. Έτσι, το σήμα του επιλεγμένου αισθητηρίου περνάει στην επόμενη διάταξη.

Οι αναλογικές ποσότητες μπορεί να μεταβάλλονται, οπότε πρέπει να επιλέγεται συγκεκριμένη χρονική στιγμή για να λαμβάνεται η μέτρηση. Το κύκλωμα δειγματοληψίας/κράτησης, μαζί με τον εξωτερικό πυκνωτή κράτησης, επιτρέπει στο σύστημα να πάρει δείγμα και να το κρατήσει σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, που ο μικροελεγκτής εισάγει τη ρύθμιση συλλογής.

Κάθε ένα από τα οκτώ αισθητήρια δίνει έξοδο διαφορετικού εύρους. Για παράδειγμα, το αισθητήριο θερμοκρασίας μπορεί να δίνει έξοδο από 0V ως 5V, ενώ το αισθητήριο πίεσης από 0V ως 500mV. Ο ενισχυτής προγραμματισμένης ενίσχυσης προγραμματίζεται μέσω των εισόδων επιλογής ενίσχυσης για ενισχύσεις 1,2,5 ή 10. Όταν διαβάζεται το αισθητήριο πίεσης, ο μικροελεγκτής ρυθμίζει την ενίσχυση στο 10, έτσι ώστε να παίρνουμε έξοδο από 0V ως 5V, που ταιριάζει με τα υπόλοιπα αισθητήρια. Έτσι, ο A/D μετατροπέας μπορεί να εργάζεται πάντα σε κλίμακα 0V ως 5V.

Ο ADC λαμβάνει την προσαρμοσμένη αναλογική τάση και τη μετατρέπει σε ψηφιακή 8-bit. Για να γίνει αυτό, ο μικροελεγκτής επιλέγει τον ADC ($\overline{CS}_1$) και ξεκινά τους παλμούς μετατροπής ($\overline{WR}_1$). Όταν το τέλος μετατροπής ($\overline{INTR}$) γίνει '0', ο μικροελεγκτής ενεργοποιεί την έξοδο ($\overline{RD}_1$) για να περάσουν τα δεδομένα (D_0 ως D_7), μέσω του διαύλου δεδομένων, πρώτα στο μικροελεγκτή και έπειτα στην μνήμη RAM.

- Οι τεχνικές μεταφοράς δεδομένων μπορούν γενικά να καταταχθούν σε δύο κατηγορίες, στην προγραμματισμένη μεταφορά δεδομένων και στη μεταφορά δεδομένων με άμεση προσπέλαση στην μνήμη (DMA). Οι τεχνικές προγραμματισμένης μεταφοράς δεδομένων μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: σύγχρονος τρόπος, ασύγχρονος τρόπος και τρόπος οδηγούμενος από διακοπή. Σύμφωνα με την τεχνική DMA, η CPU απομακρύνεται από τη διαδικασία μεταφοράς δεδομένων, εγκαθίσταται άμεση σύνδεση ανάμεσα στη μνήμη και στην συσκευή I/O και η μεταφορά δεδομένων ελέγχεται από εξωτερικό κύκλωμα, γνωστό σαν ελεγκτής άμεσης προσπέλασης μνήμης ή για συντομία ελεγκτής DMA. Η διασύνδεση των συσκευών I/O στους διαύλους του συστήματος γίνεται με τη βοήθεια των θυρών I/O.
- Οι περισσότεροι σημερινοί προσωπικοί υπολογιστές αποτελούνται από τρεις τύπους εσωτερικών διαύλων: τον τοπικό δίαυλο (local bus), το δίαυλο PCI και το δίαυλο ISA.
- Η μετάδοση δεδομένων διακρίνεται σε παράλληλη και σειριακή. Σειριακή ασύγχρονη και σύγχρονη, μονόδρομη, ημι-αμφίδρομη και αμφίδρομη. Τυπικά πρότυπα διαύλων διασύνδεσης εξωτερικών σειριακών συσκευών I/O είναι το RS-232C, το RS-422, το RS-423, το IEEE1394 και το USB. Τυπικά πρότυπα διαύλων διασύνδεσης εξωτερικών παράλληλων συσκευών I/O είναι το IEEE488 (GPIB) και το SCSI.
- Χαρακτηριστικές περιπτώσεις διασύνδεσης συσκευών I/O αποτελούν η διασύνδεση πληκτρολογίου μέσω του 8279, η διασύνδεση οθόνης υγρών κρυστάλλων μέσω του 8255 και η διασύνδεση του ADC0809 μέσω του 8255.
- Το λογισμικό των συστημάτων μετρήσεων ξεκινά από απλά προγράμματα οδηγών συσκευών, επεκτείνεται σε αναπτυξιακά συστήματα υψηλού επιπέδου και προγράμματα εφαρμογών και καταλήγει σε γλώσσες υψηλού επιπέδου.

Αξιολόγηση • Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

1. Η προγραμματισμένη μεταφορά δεδομένων διακρίνεται σε:
 - α) σύγχρονο τρόπο, ασύγχρονο τρόπο και DMA
 - β) σύγχρονο τρόπο, ασύγχρονο τρόπο και τρόπο οδηγούμενο από διακοπή
 - γ) τρόπο οδηγούμενο από διακοπή και DMA
 - δ) τίποτα από τα παραπάνω
2. Εσωτερικοί δίαυλοι διακίνησης πληροφοριών είναι οι:
 - α) τοπικός δίαυλος, δίαυλος PCI και δίαυλος ISA
 - β) τοπικός δίαυλος, δίαυλος ISA και SCSI
 - γ) δίαυλος PCI, SCSI και RS-232C
 - δ) δίαυλος ISA, RS-232C και IEEE488
3. Κατά τη μετάδοση με ρυθμό 1200baud κάθε bit διαρκεί:
 - α) 0.42msec
 - β) 0.21msec
 - γ) 0.83msec
 - δ) 0.63msec

• Ερωτήσεις του τύπου Σωστό/Λάθος

1. Η μεταφορά δεδομένων με άμεση προσπέλαση στη μνήμη απασχολεί τη CPU.
2. Στην παράλληλη μετάδοση τα bit μεταδίδονται το ένα μετά το άλλο.
3. Η σύγχρονη μετάδοση χρησιμοποιεί bit αρχής και τέλους.
4. Το bit αρχής είναι πάντα '1'.
5. Στο RS-232C τα '1' μεταδίδονται με αρνητικές τάσεις.

• Ερωτήσεις αντιστοίχισης

1. Να αντιστοιχίσετε τα:

ISA	Δίαυλος διασύνδεσης παράλληλων συσκευών
USB	Εσωτερικός δίαυλος διακίνησης πληροφοριών
DMA	Μεταφορά δεδομένων με άμεση προσπέλαση στη μνήμη
IEEE488	Ρυθμός μετάδοσης
Baud	Δίαυλος διασύνδεσης σειριακών συσκευών

• Ερωτήσεις συμπλήρωσης κενού

1. Όταν η συσκευή είναι έτοιμη να δεχθεί ή να δώσει _____, πληροφορεί τον _____ διαμέσου ειδικής γραμμής _____, η οποία ονομάζεται γραμμή _____ (interrupt line).
2. Η αποστολή του '1' είναι γνωστή ως _____ και ορίζεται ως ηλεκτρικό σήμα μεταξύ _____ V και _____ V. Η αποστολή του '0' είναι γνωστή ως _____ και ορίζεται ως ηλεκτρικό σήμα μεταξύ _____ V και _____ V.

- **Ερωτήσεις ανοικτού τύπου**

1. Τι είναι η μέθοδος χειραψίας;
2. Περιγράψτε τον τρόπο block DMA και τον τρόπο DMA «κλοπής» κύκλου.
3. Τι είναι οι προγραμματιζόμενες και τι οι μη προγραμματιζόμενες θύρες;
4. Συγκρίνετε τη σύγχρονη και ασύγχρονη μετάδοση δεδομένων.
5. Τι είναι η μονόδρομη, ημι-αμφίδρομη και αμφίδρομη επικοινωνία;
6. Ποιες είναι οι γενιές λογισμικών συστημάτων μετρήσεων;
7. Περιγράψτε τη διασύνδεση πληκτρολογίου μέσω του 8279 με μικροεπεξεργαστή.

Ασκήσεις

1. Δεδομένα μεταδίδονται με ρυθμό 4800baud. Πόσο χρόνο διαρκεί κάθε bit;
(0.21msec)
2. Ο χρόνος, που διαρκεί κάθε bit σε μετάδοση δεδομένων, είναι 0.42msec.
Με τι ρυθμό (baud) μεταδίδονται;
(2400baud)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLCs)

- Εισαγωγή
- Δομή και Λειτουργία PLC
- Διασύνδεση PLC
- Προγραμματισμός PLC
- Παραδείγματα Προγραμματισμού PLC
- Η Οικογένεια PLCs LOGO! της Siemens
- Πρακτικές Εφαρμογές LOGO!

Σκοπός

Όταν ολοκληρώσεις το κεφάλαιο αυτό, θα μπορείς:

- Να κατονομάζεις τα πλεονεκτήματα της χρήσης των PLCs και να περιγράφεις πιθανές εφαρμογές τους.
- Να περιγράφεις την αρχή λειτουργίας των PLCs και τις βασικές μονάδες από τις οποίες αποτελούνται.
- Να κατονομάζεις τρόπους προγραμματισμού των PLCs και να περιγράφεις τουλάχιστον μία γλώσσα προγραμματισμού αυτών.
- Να περιγράφεις τη λειτουργία τουλάχιστον ενός PLC της αγοράς και να αναφέρεις μερικές εφαρμογές του.

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για αυτοματοποίηση της παραγωγής οδήγησε την πλειοψηφία των βιομηχανιών στην υιοθέτηση σύγχρονων ανταγωνιστικών τεχνικών εύκολα εφαρμόσιμων και ικανών να προσαρμόζονται στις απαιτήσεις των καιρών. Η σπουδαιότερη από αυτές βασίζεται στη χρήση των **προγραμματιζόμενων λογικών ελεγκτών (PLC: programmable logic controllers)**. Τα PLCs είναι ελεγκτές με δυνατότητα προγραμματισμού της μνήμης, εύκολης προσαρμογής με αλλαγή του προγράμματός τους και εύκολοι στη χρήση. Επίσης, διαθέτουν ποικιλία δυνατοτήτων επικοινωνίας με άλλες συσκευές και δίκτυα μετρήσεων. Τα PLCs αποτελούν τους κύριους εκπροσώπους της τεχνολογίας του βιομηχανικού αυτοματισμού.

Στο παρελθόν, οι λύσεις σε προβλήματα αυτοματισμού δίνονταν με καλωδιωμένη λογική. Δηλαδή, οι μηχανικοί σχεδίαζαν το κύκλωμα της εκάστοτε εφαρμογής ελέγχου, προμηθεύονταν τα απαραίτητα υλικά και εξαρτήματα, τα τοποθετούσαν και τα συνέδεαν πάνω σε πίνακα ή πλακέτα και τέλος εγκαθιστούσαν το σύστημα στο χώρο εφαρμογής. Όλα αυτά συνέβαιναν σε απλές εφαρμογές, που, συνήθως, αφορούσαν έλεγχο διακοπών. Αν σε μια εφαρμογή χρειαζόταν να μετρηθεί χρόνος ή να γίνει κάποια απαρίθμηση, τότε η σχεδίαση και ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου γινόταν πολύπλοκη, γιατί απαιτείτο η χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, όπως πύλες, χρονιστές και απαριθμητές. Όλη αυτή η διαδικασία απαιτούσε χρόνο και κόστος. Δεν υπήρχε ευελιξία στην ανίχνευση λαθών, παρά μόνο όταν γινόταν η εγκατάσταση του συστήματος στο χώρο εφαρμογής. Επίσης, στην περίπτωση αναβάθμισης ή μετατροπής του συστήματος, έπρεπε να επαναληφθεί η διαδικασία σχεδίασης, ανάπτυξης και εγκατάστασης.

Η εμφάνιση των PLCs έδωσε διέξοδο στα παραπάνω προβλήματα. Τα συστήματα αυτά μπορούν να δεχθούν εισόδους (διακόπτες, μπουτόν, κ.ά.) και να οδηγήσουν εξόδους (ρελέ, πηνία, κ.ά.). Οι εργασίες, που εκτελούνται με αυτές τις εισόδους, περιγράφονται στο εσωτερικό των PLCs με τη μορφή προγραμμάτων. Οποιοσδήποτε αλλαγές ή τροποποιήσεις σημαίνουν, απλά, αλλαγές ή τροποποιήσεις στο πρόγραμμα του ελεγκτή.

Έτσι, τα πλεονεκτήματα, που απορρέουν από τη χρήση των PLCs, σε σχέση με τα συστήματα καλωδιωμένης λογικής, συνοψίζονται στα εξής:

- Η σχεδίαση και ανάπτυξη γίνεται με τη μορφή προγραμματισμού.
- Τροποποιήσεις και αλλαγές στο πρόγραμμα του PLC μπορούν να γίνουν ακόμα και όταν αυτό είναι εγκατεστημένο στο χώρο εφαρμογής.
- Μικρότερο κόστος ανάπτυξης νέων εφαρμογών ή επεκτάσεων.
- Μικρότερος όγκος.
- Εύκολη ανίχνευση σφαλμάτων μέσω υπολογιστή.
- Λειτουργίες αυτοδιάγνωσης για σωστή λειτουργία.
- Δεν απαιτούνται εξειδικευμένες γνώσεις ηλεκτρονικών σε επίπεδο σχεδίασης συστημάτων, αφού όλα είναι έτοιμα στο εσωτερικό του PLC.
- Δυνατότητα διασύνδεσης και επικοινωνίας με άλλα ίδια ή διαφορετικά συστήματα.

Οι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές συναντώνται στη βιομηχανία, τόσο σε συστήματα παραγωγής όσο και στα ίδια τα παραγόμενα προϊόντα, αλλά και σε οικιακές εφαρμογές. Ενδεικτικά αναφέρονται:

Οικιακές εφαρμογές και εφαρμογές κτιριακών εγκαταστάσεων, όπως:

- φωτισμός σε διαμερίσματα, κλιμακοστάσια, βιτρίνες καταστημάτων
- συστοιχίες λαμπτήρων φθορισμού
- περσίδες, τέντες
- συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού
- συστήματα συναγερμών και κουδουνιών
- συστήματα άρδευσης σε θερμοκήπια

Βιομηχανικές εφαρμογές, όπως:

- ανυψωτικά μηχανήματα
- μηχανές λύγισης καλωδίων
- βιομηχανικά ψαλίδια και πλάνες
- μηχανές κοπής
- κλίβανοι
- συστήματα ψύξης
- σιλό
- μεταφορικές ταινίες
- διατάξεις μέτρησης στάθμης
- έλεγχος για κινητήρες, αντλίες και βαλβίδες
- συμπιεστές
- συστήματα διαχείρισης ενέργειας
- συστήματα ελέγχου χώρων στάθμευσης αυτοκινήτων
- αυτόματες μπάρες και πόρτες

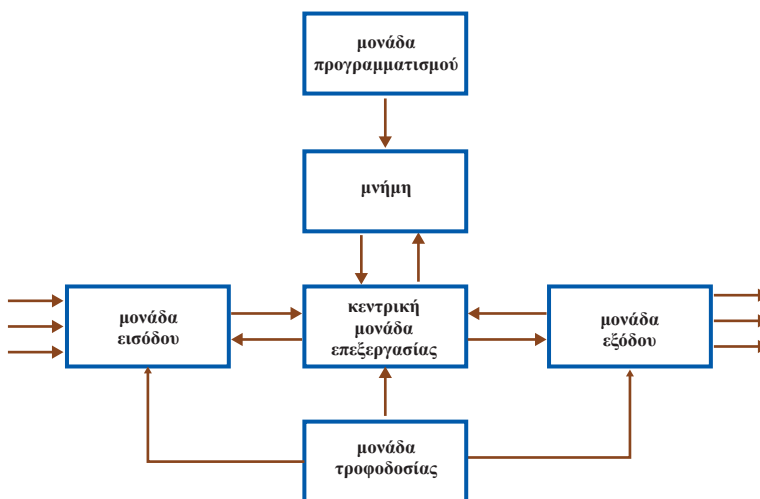
7.2

Δομή και
Λειτουργία
PLC

Ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής είναι ελεγκτής βιομηχανικού (σήμε-
ρα δε και οικιακού) περιβάλλοντος, που στηρίζει τη λειτουργία του σε μικροε-
πεξεργαστή/μικροελεγκτή, εκτελώντας το από πριν αποθηκευμένο στη μνήμη
πρόγραμμα, που έχει γραφεί για κάθε εφαρμογή. Έτσι, σύμφωνα με τον επί-
σημο ορισμό του προτύπου BS EN 61134, το PLC είναι ψηφιακό σύστημα
σχεδιασμένο για χρήση σε βιομηχανικό περιβάλλον, το οποίο χρησιμοποιεί
μνήμη για την αποθήκευση εντολών. Οι εντολές αυτές υλοποιούν ειδικές λει-
τουργίες, όπως π.χ. λογική, χρονισμό, μετρήσεις και αριθμητικές πράξεις, για
έλεγχο ποικίλων μηχανών και διαδικασιών και όλα αυτά μέσω των ψηφιακών ή
αναλογικών εισόδων-εξόδων. Η σχεδίαση των περισσότερων PLCs στηρίζεται
στην ίδια φιλοσοφία με τη σχεδίαση υπολογιστή.

Αν και τόσο τα PLCs όσο και οι υπολογιστές προγραμματίζονται, η διαφορά
τους βρίσκεται στο, ότι τα πρώτα απευθύνονται σε εργασίες ρύθμισης και
ελέγχου βιομηχανικού-οικιακού περιβάλλοντος, ενώ οι δεύτεροι εκτελούν κατ'
εξοχήν εργασίες υπολογισμών και απεικόνισης. Έτσι, τα PLCs εξετάζουν τα
σήματα εισόδου και αφού τα επεξεργαστούν κατάλληλα, με βάση τα προγράμ-
ματα, που είναι αποθηκευμένα στη μνήμη τους, παράγουν σήματα εξόδου που
οδηγούν μηχανήματα ή ολόκληρες βιομηχανικές διεργασίες. Η τυποποιημένη
διασύνδεση στο εσωτερικό των PLCs τους επιτρέπει να συνδέονται απευθείας
με δράστες και μετατροπείς. Επίσης, τα PLCs είναι πιο απλά στη χρήση και
εκτελούν συνήθως ένα και μόνο πρόγραμμα.

Τα PLCs, εν γένει, διαθέτουν ελάχιστα κινητά μέρη και υπόκεινται σε διεθνείς
κανόνες τυποποίησης, όπως ISO, BS, κ.ά. Διαθέτουν μονάδες σειριακής, πα-
ράλληλης και δικτυακής επικοινωνίας, που τα καθιστούν ικανά να ενταχθούν
σε ευρύτερο δίκτυο μετρήσεων και ελέγχου, όπως το MAP και το AS-Interface
της Siemens.



Σχήμα 7.2.1. Διάγραμμα μονάδων ενός PLC

Ως προς τη δομή ενός PLC, που φαίνεται και στο σχήμα 7.2.1, μπορούμε να διακρίνουμε τα παρακάτω βασικά μέρη:

- Την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU)
- Τη μνήμη
- Τη μονάδα εισόδου-εξόδου I/O
- Τη μονάδα τροφοδοσίας
- Τη μονάδα στήριξης
- Τη μονάδα προγραμματισμού

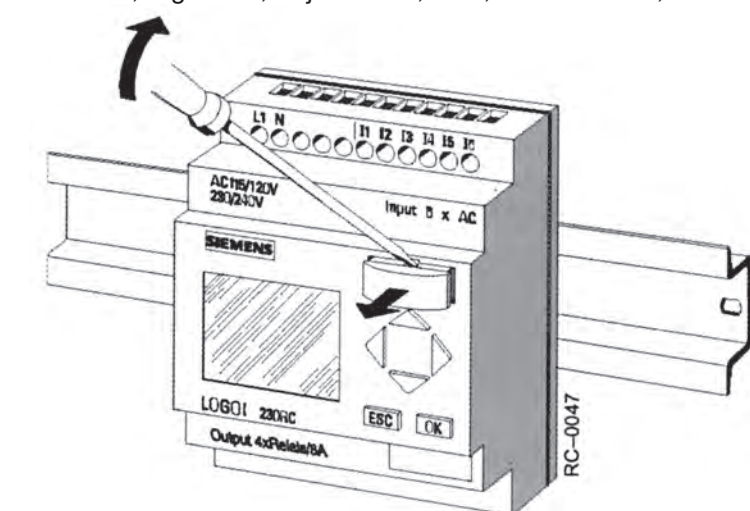
Η **κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU: central processing unit)** είναι ο «εγκέφαλος» του PLC και αντιπροσωπεύεται από μικροϋπολογιστή/μικροελεγκτή και κύκλωμα χρονισμού, που καθορίζει τη ταχύτητα του ελεγκτή. Η λειτουργία της CPU συνίσταται στον έλεγχο των διατάξεων εισόδου-εξόδου I/O και της μνήμης, ώστε τα δεδομένα που εισέρχονται στο PLC, να τυγχάνουν επεξεργασίας, σύμφωνα με το πρόγραμμα και να δίνουν ως εξόδους κατάλληλα σήματα ελέγχου. Επίσης, είναι επιφορτισμένη με πλήθος αυτοδιαγνωστικών λειτουργιών.

Για να εκτελεστούν οι παραπάνω διαδικασίες αλλά και για να τροφοδοτηθούν και τα υπόλοιπα εξαρτήματα, απαιτείται **μονάδα τροφοδοσίας**, που να παράγει χαμηλού επιπέδου συνεχείς τάσεις. Αποτελείται από μετασχηματιστή, ανορθωτή και σταθεροποιητή τάσης και παρέχει τις τάσεις λειτουργίας των εσωτερικών κυκλωμάτων ενός PLC. Επίσης, το τροφοδοτικό δίνει και τις τάσεις στις κλέμες εισόδου. Η μονάδα τροφοδοσίας μπορεί να βρίσκεται ενσωματωμένη στο PLC ή σε ξεχωριστή συσκευή ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος.

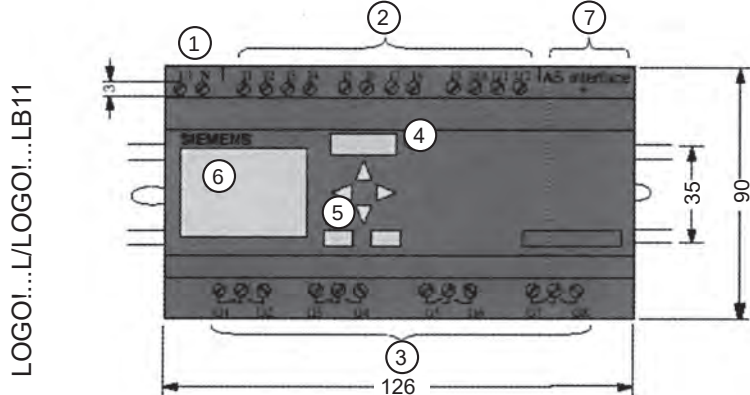
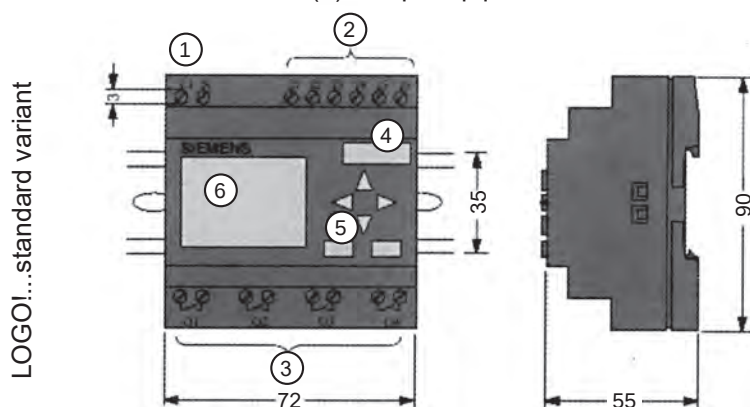
Η **μονάδα εισόδου-εξόδου (I/O)** χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση του ελεγκτή με το εξωτερικό περιβάλλον. Αποτελείται από ακροδέκτες εισόδου και εξόδου, που μπορούν να υλοποιήσουν παράλληλη, σειριακή και δικτυακή επικοινωνία καθώς και από ακροδέκτες τροφοδοσίας. Στους ακροδέκτες εισόδου μπορούν να συνδεθούν αισθητήρες, μετατροπείς, διακόπτες, πληκτρολόγια, χρονιστές, καθώς επίσης, ηλεκτρονικά κυκλώματα μετατροπών ADC, AC-DC, DC-AC, κ.ά., ώστε να πραγματοποιείται κάθε μορφής επικοινωνία και σηματοδότηση. Αντίστοιχα, στους ακροδέκτες εξόδου μπορούν να συνδέονται ρελέ, μετατροπείς DAC, βαλβίδες, δράστες και φωτεινοί σηματοδότες. Τόσο οι ακροδέκτες εισόδου όσο και εξόδου παρέχουν στη CPU ηλεκτρική απομόνωση και προσαρμογή τάσεων. Τέλος, οι ακροδέκτες τροφοδοσίας χρησιμεύουν για τη σύνδεση του ελεγκτή με το δίκτυο τάσης.

Στο σχήμα 7.2.2 φαίνεται ένα τυπικό PLC της εταιρίας Siemens, στο οποίο θα γίνει αναλυτικότερη αναφορά παρακάτω στο κεφάλαιο αυτό. Στο σχήμα αυτό διακρίνονται οι κλέμες (σύνδεσμοι συγκράτησης με βίδα) για την υποδοχή των καλωδίων των στοιχείων εισόδου (διακόπτες, κ.ά.) και εξόδου (πηνία, ρελέ, ενδεικτικές λυχνίες, κ.ά.). Επίσης, στα σχήματα 7.2.3 ως και 7.2.6 δείχνονται το Simatic S7-200 Micro PLC της Siemens, το T1 Micro PLC της Toshiba, τα CPM1A, CPM1 και CPM2A Micro PLCs της Omron και ένας τύπος PLC της SoftPLC. Άλλες γνωστές εταιρίες κατασκευής PLCs είναι οι

ABB, Allen-Bradley, GE-Fanuc, Klockner-Moeller, Honeywell, Mitsubishi, Moore Products, Sigmatek, Fuji Electric, Idec, Kirchner Soft, κ.ά.



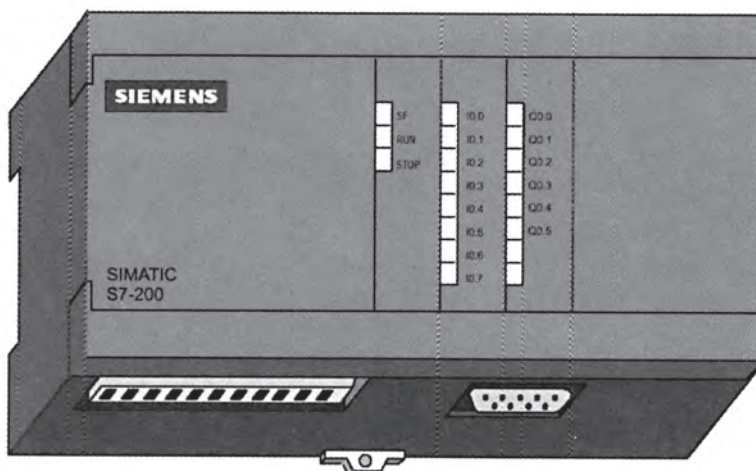
(α) πλάγια όψη



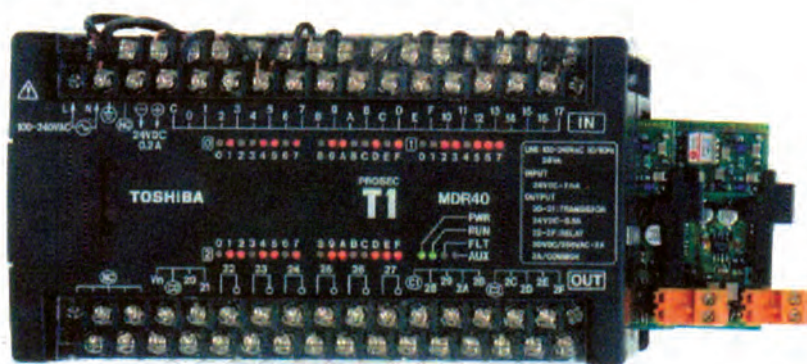
(β) κάτοψη

1: τροφοδοσία	2: είσοδοι	3: έξοδοι	4: module
5: πίνακας ελέγχου	6: LCD	7: σύνδεση με AS-interface	

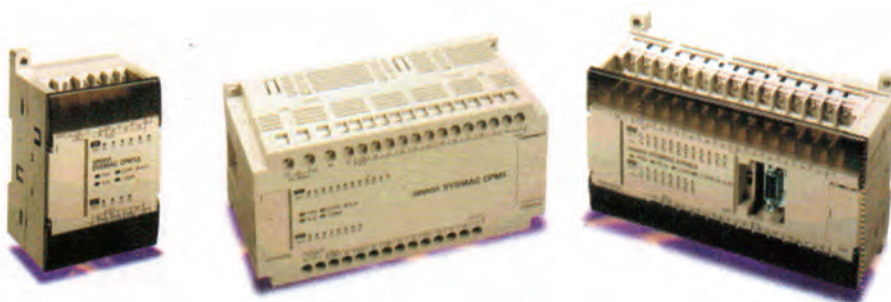
Σχήμα 7.2.2. PLC LOGO! της Siemens (από το LOGO! Manual της Siemens)



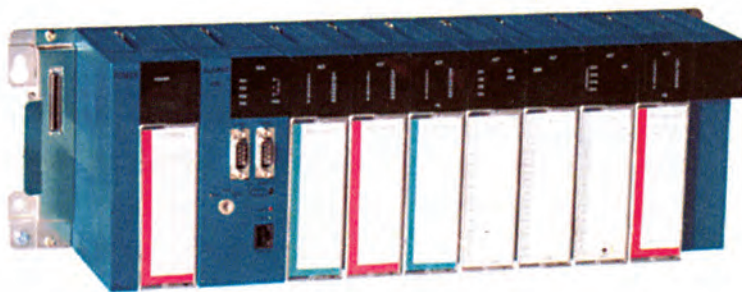
Σχήμα 7.2.3. Simatic S7-200 Micro PLC της Siemens
(από το S7-200 Programmable Controller System Manual της Siemens)



Σχήμα 7.2.4. T1 Micro PLC της Toshiba (από την ιστοσελίδα της εταιρίας Toshiba)



Σχήμα 7.2.5. CPM1A, CPM1 και CPM2A Micro PLCs της Omron
(από την ιστοσελίδα της εταιρίας Omron)



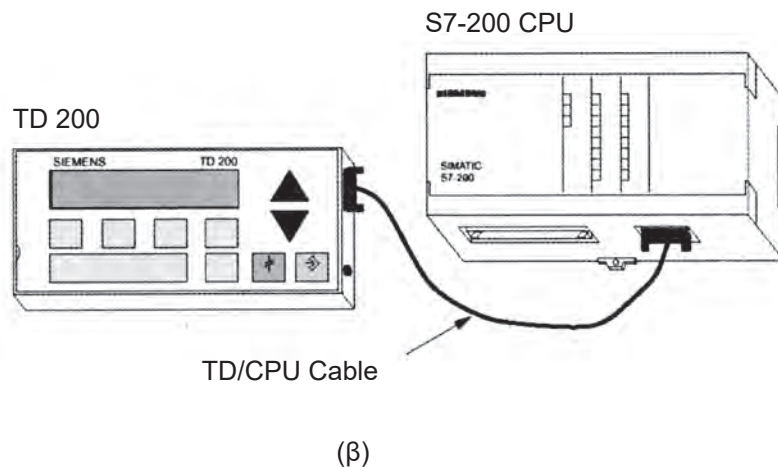
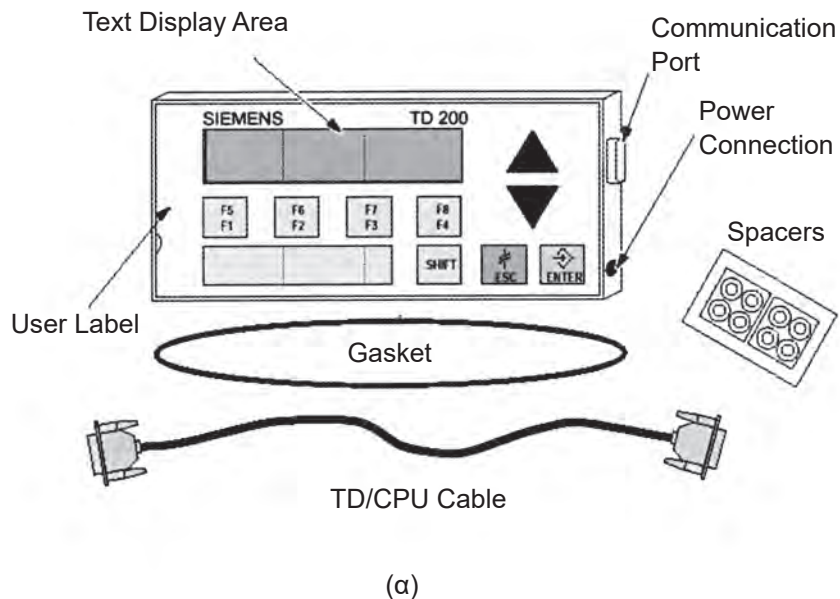
Σχήμα 7.2.6. PLC της SoftPLC (από την ιστοσελίδα της εταιρίας SoftPLC)

Η **μονάδα στήριξης** PLC συναντάται σε δύο εκδοχές. Σύμφωνα με την πρώτη, υπάρχει πλαίσιο ειδικά διαμορφωμένο με συνδέσμους στήριξης και επαφής (connectors), πάνω στο οποίο τοποθετούνται με τη μορφή modules η κεντρική μονάδα επεξεργασίας, οι μονάδες εισόδου-εξόδου και το τροφοδοτικό. Όλα αυτά επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω των συνδέσεων των επαφών τους. Σύμφωνα με τη δεύτερη, υπάρχει ράγα, πάνω στην οποία συγκρατούνται η μονάδα κεντρικής επεξεργασίας, το τροφοδοτικό και οι μονάδες εισόδου-εξόδου. Στο σχήμα 7.2.2(α) διακρίνεται τέτοια ράγα πίσω από το PLC.

Ο ρόλος της **μνήμης** είναι ήδη γνωστός και συνίσταται, κυρίως, στην αποθήκευση των προγραμμάτων του μικροεπεξεργαστή/μικροελεγκτή. Χρησιμοποιούνται συνήθως μνήμες τυχαίας προσπέλασης (**RAM**: random access memory), στατικές **SRAM** ή δυναμικές **DRAM**, όπου αποθηκεύεται το πρόγραμμα διαχείρισης της διεργασίας καθώς και τα δεδομένα. Αυτές είναι μνήμες, που χρειάζονται τάση, για να διατηρούν τα περιεχόμενά τους. Για το λόγο αυτό, συνοδεύονται πάντα από μπαταρίες ή ειδικούς πυκνωτές. Το πλεονέκτημά τους είναι η μεγάλη ταχύτητα εγγραφής και ανάγνωσης. Επίσης, χρησιμοποιούνται μνήμες μόνο ανάγνωσης (**ROM**: read only memory), όπου αποθηκεύεται το λειτουργικό σύστημα μικροϋπολογιστικού συστήματος. Οι πιο συνηθισμένες προγραμματιζόμενες μνήμες ROM είναι οι ηλεκτρικά επαναπρογραμματιζόμενες ROM (**EEPROM**: electrically erasable programmable read only memory) και οι απλές επαναπρογραμματιζόμενες ROM (**EPROM**: erasable programmable read only memory). Το ποιος τύπος μνήμης θα χρησιμοποιηθεί σε PLC έχει να κάνει με τη φιλοσοφία και τις αντιλήψεις περί κόστους και απόδοσης της κατασκευάστριας εταιρίας.

Ταυτόχρονα, όλες οι **συσκευές προγραμματισμού** των PLCs (συνήθως πληκτρολόγια με οθόνη υγρών κρυστάλλων) ενσωματώνουν αρκετή RAM, που επιτρέπει την ανάπτυξη και τον έλεγχο του προγράμματος στην ίδια τη συσκευή. Αν η συσκευή (panel) προγραμματισμού είναι φορητή, η RAM μνήμη της είναι συνήθως τύπου CMOS με μπαταρίες, ώστε να διατηρείται το πρόγραμμα σε όλη την διάρκεια μεταφοράς του από PLC σε PLC σε μια βιομηχανία. Το πρόγραμμα μεταφέρεται στο PLC, μόνο όταν είναι απολύτως ελεγ-

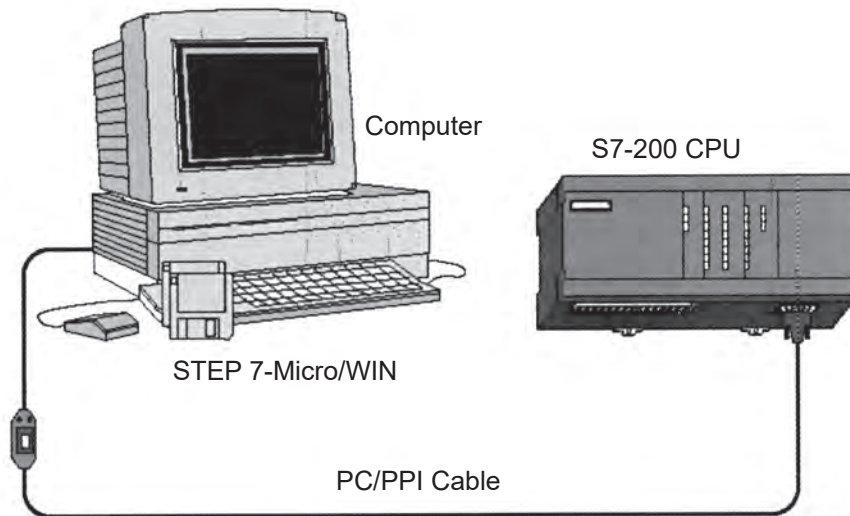
μένο. Βέβαια, υπάρχουν και περιπτώσεις, που συσκευές προγραμματισμού παρέχουν έλεγχο και διόρθωση προγράμματος σε πραγματικό χρόνο (on-line real-time). Η διασύνδεση, που συνήθως χρησιμοποιείται μεταξύ PLC και της συσκευής προγραμματισμού, είναι η RS-232. Τον τελευταίο καιρό οι κατασκευαστές PLCs έχουν αναπτύξει λογισμικό για εξομίωση της λειτουργίας των ελεγκτών σε υπολογιστή και τον ευκολότερο προγραμματισμό τους σε αυτά. Η λειτουργία του PLC μπορεί να γίνει κατανοητή μέσα από τον προγραμματισμό του και τα παραδείγματα λειτουργίας του.



Σχήμα 7.2.7. (α) TD-200 της Siemens και (β) διασύνδεση του TD-200 με το S7-200 PLC (από το TD-200 Operator Interface User Manual της Siemens)

Στο σχήμα 7.27 φαίνεται ειδική φορητή συσκευή προγραμματισμού ενός PLC (TD-200 της Siemens) και η διασύνδεσή της με το PLC. Στο σχήμα 7.2.8 φαί-

νεται η διασύνδεση PLC με προσωπικό υπολογιστή για τον προγραμματισμό του.



Σχήμα 7.2.8. Διασύνδεση του S7-200 PLC με προσωπικό υπολογιστή (από το S7-200 Programmable Controller System Manual της Siemens)

7.3 Διασύνδεση PLC

Για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ PLC και υπολογιστή, εφαρμόζονται οι γνωστοί τύποι διασύνδεσης σημείο προς σημείο (point-to-point). Όταν πρόκειται για την επικοινωνία πολλών και διαφορετικών συσκευών υλοποιείται η διασύνδεση δικτύου. Η παράλληλη διασύνδεση χρησιμοποιεί σύνολο δυαδικών γραμμών, για να συνδέσει PLC με συσκευή εισόδου-εξόδου I/O. Συνήθως, χρησιμοποιείται το πρότυπο Centronics, για να μεταφέρονται δεδομένα με υψηλό ρυθμό προς μια κατεύθυνση και σε μικρή απόσταση από PLC σε εκτυπωτή. Μια άλλη διασύνδεση σημείο προς σημείο είναι η σειριακή RS-232. Αυτή επιτρέπει ασύγχρονη μετάδοση δεδομένων με ρυθμούς μετάδοσης 19.2Kbps.

Από την άλλη πλευρά, κατανεμημένο σύστημα ελέγχου (δικτυακό) είναι αυτό, στο οποίο πολλοί ελεγκτές λειτουργούν ταυτόχρονα και με συνεργασία. Τέτοια συστήματα μπορούν να διαιρεθούν σε υποσυστήματα υπολογιστών με ισχυρή ζεύξη, που μοιράζονται κοινό δίαυλο δεδομένων και σε υποσυστήματα με χαλαρή ζεύξη, που είναι τοποθετημένα στο σημείο του ελέγχου και ανταλλάσσουν πληροφορίες διαμέσου θύρας εισόδου (I/O). Ένα σύστημα χαλαρά συνδεδεμένων υπολογιστικών συστημάτων διασυνδεδεμένων μεταξύ τους ονομάζεται δίκτυο. Το δίκτυο μπορεί να είναι τοπολογίας αστέρα, δακτυλίου, κ.ά., όπως μπορεί κανείς να δει και στο όγδοο κεφάλαιο. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιείται ευρέως το πρότυπο OSI, το Ethernet, το πρότυπο IEC 1131-5 και τα συστήματα SCADA.

Τελευταία έχουν εμφανιστεί «μικρά» και εύχρηστα PLCs, που συνδέονται στο δίκτυο ως έξυπνοι slave σταθμοί, αφού δεν χρειάζονται ειδικό προγραμματισμό και ρυθμίσεις για τις επικοινωνίες. Στην περίπτωση προβλημάτων δικτύου ή του επιβλέποντος κεντρικού ελεγκτή, αυτά συνεχίζουν απρόσκοπτα και αυτόνομα τη λειτουργία τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το εξελεγμένο «μικρό» PLC της Siemens, LOGO!Bus, που συνδέεται σε δίκτυο AS-Interface, ανταλλάσσοντας σήματα και πληροφορίες με μεγαλύτερες κεντρικές συσκευές ελέγχου, όπως τα PLC Simatic S7-200 της Siemens.

Ένας ελεγκτής μπορεί να προγραμματιστεί κάνοντας εν γένει χρήση διάφορων γλωσσών προγραμματισμού. Είναι γνωστό, βέβαια, ότι στην αγορά υπάρχει μεγάλη ποικιλία ελεγκτών με μικρή ή μεγάλη διαφοροποίηση ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες τους. Κατά συνέπεια και οι γλώσσες προγραμματισμού, που διατίθενται με το κάθε PLC, θα διαφέρουν λίγο ή πολύ από τις υπόλοιπες. Για το λόγο αυτό, η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC: International Electrotechnical Commission) εξέδωσε το 1993 την τυποποίηση των γλωσσών προγραμματισμού των PLCs, που είναι η **IEC 1131-3**. Η τυποποίηση αυτή στοχεύει να δημιουργήσει προγραμματιστικές φόρμες, που θα χρησιμοποιηθούν από τους μελλοντικούς ελεγκτές. Πριν γίνει σύντομη αναφορά στις γλώσσες προγραμματισμού, αξίζει να λεχθεί, ότι οι κατασκευαστές των PLCs συνηθίζουν να εφοδιάζουν την κάθε συσκευή με παραπάνω από μια γλώσσες. Η επιλογή της γλώσσας από το χειριστή εξαρτάται από την εφαρμογή, που θέλει να υλοποιήσει.

Η IEC έχει τυποποιήσει πέντε γλώσσες για τα PLCs. Από αυτές δύο είναι **κειμενοστραφείς** (text-based), δύο **γραφικές** (graphical), και μία γλώσσα **υψηλού επιπέδου**, που στηρίζεται σε διαγράμματα ροής (flow-chart type). Αναλυτικά:

- Δομημένο κείμενο (**ST: Structured Text**), κειμενοστραφής
- Λίστα εντολών (**IL: Instruction List**), κειμενοστραφής
- Διάγραμμα κλίμακας (**LD: Ladder Diagram**), γραφικό
- Λογικό διάγραμμα λειτουργίας (**FBD: Function Block Diagram**), γραφική
- Διάγραμμα ακολουθιακών λειτουργιών (**SFC: Sequential Function Chart**), υψηλού επιπέδου με διαγράμματα ροής

Για τον πρωτόπειρο χρήστη, οι πιο βαθές από τις παραπάνω γλώσσες είναι η γλώσσα λίστας εντολών (IL) και η γλώσσα διαγράμματος κλίμακας (LD).

- Η γλώσσα δομημένου κειμένου **ST** είναι γλώσσα με μορφή κειμένου με ιδιαίτερες επιδόσεις στον έλεγχο. Η γλώσσα αυτή χρησιμοποιεί δομές, όπως FOR, CASE, WHILE, IF ... THEN, REPEAT. Παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με τις γλώσσες PASCAL και BASIC. Η δομή του προγράμματος σε γλώσσα ST έχει ως εξής:

PROGRAM όνομα προγράμματος

VAR_INPUT

(αναφέρονται όλες οι μεταβλητές εισόδου και οι τύποι δεδομένων τους)

END_VAR

VAR_OUTPUT

(αναφέρονται όλες οι μεταβλητές εξόδου και οι τύποι δεδομένων τους)

END_VAR

VAR

(αναφέρονται όλες οι εσωτερικές μεταβλητές και οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα)

END_VAR

(κυρίως πρόγραμμα)

END_PROGRAM

- Η γλώσσα λίστας εντολών **IL** είναι γλώσσα χαμηλού επιπέδου στηριγμένη στους μνημονικούς κώδικες, που χρησιμοποιούν τα σημερινά PLC. Κάθε εντολή σχηματίζεται από τελεστή ακολουθούμενο από έναν ή περισσότερους τελεστέους, που αποτελούν το μέγεθος πάνω στο οποίο επιδρά η εντολή. Είναι γλώσσα τύπου συμβολικής με εντολές διακλάδωσης. Μόνο μια εντολή μπορεί να εκτελείται σε κάθε γραμμή. Η γλώσσα αυτή χρησιμοποιείται σε μικρές εφαρμογές. Ένα παράδειγμα σε κώδικα IL δίνεται αμέσως παρακάτω, ενώ στον πίνακα 7.4.1 δίνεται η τυποποίηση των εντολών της γλώσσας.

Ετικέτα (label)	Τελεστής (operator)	Τελεστέος (operand)	Περιγραφή
Loop 1	LD	Count	(φόρτωσε την τρέχουσα τιμή στο συσσωρευτή)
	ADD	1	(αύξησε κατά 1)
	NE	10	(έλεγε, αν είναι 10)
	JMP	Loop 1	(αν δεν είναι, πήγαινε στην ετικέτα Loop 1)

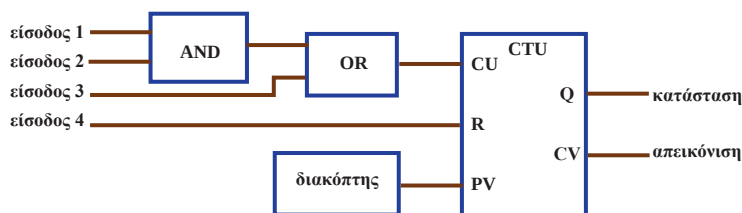
Τελεστής (operator)	Τελεστέος(operand)	Περιγραφή
LD	Οτιδήποτε	Φόρτωσε τον τελεστέο στο συσσωρευτή
ST	Οτιδήποτε	Αποθήκευσε το συσσωρευτή στον τελεστέο
S	BOOLE	Θέσε 1 στον τελεστέο (σωστό)
R	BOOLE	Θέσε 0 στον τελεστέο (λάθος)
AND	BOOLE	Εφάρμοσε λογική πρόσθεση
OR	BOOLE	Εφάρμοσε λογικό ή
XOR	BOOLE	Εφάρμοσε λογικό αποκλειστικό ή
ADD	Οτιδήποτε	Πρόσθεσε
SUB	Οτιδήποτε	Αφαίρεσε
MUL	Οτιδήποτε	Πολλαπλασίασε
DIV	Οτιδήποτε	Διαίρεσε
GT	Οτιδήποτε	Μεγαλύτερο από τον τελεστέο σύγκρισης
GE	Οτιδήποτε	Μεγαλύτερο ή ίσο από τον τελεστέο σύγκρισης
EQ	Οτιδήποτε	Ίσο με τον τελεστέο σύγκρισης
NE	Οτιδήποτε	Όχι ίσο με τον τελεστέο σύγκρισης
LE	Οτιδήποτε	Μικρότερο ή ίσο από τον τελεστέο σύγκρισης
LT	Οτιδήποτε	Μικρότερο από τον τελεστέο σύγκρισης
JMP	Ετικέτα	Πήγαινε σε αυτή την ετικέτα
CAL	Όνομα	Κάλεσε τη συνάρτηση με αυτό το όνομα
RET		Επέστρεψε από τη συνάρτηση

Πίνακας 7.4.1. Οι εντολές της γλώσσας λίστας εντολών IL

- Η γλώσσα διαγράμματος κλίμακας **LD** είναι γραφική γλώσσα προγραμματισμού ανεπτυγμένη πάνω στα λογικά κυκλώματα των ηλεκτρονόμενων και ιδανική για την ανάπτυξη προγραμμάτων μικρού και μεσαίου μεγέθους. Σύμβολα, τα οποία αντιπροσωπεύουν τα διάφορα στοιχεία του προγράμ-

ματος, συντάσσονται σε οριζόντιους και κάθετους δεσμούς για να δημιουργήσουν τις απαιτούμενες λειτουργίες ελέγχου. Ο προγραμματισμός αυτός απαιτεί σημαντική προσπάθεια μετάφρασης από το τερματικό, το οποίο πρέπει να είναι πολύ «έξυπνο», ακριβό και βέβαια ακριβό σε σχέση με κάποιο, που είναι σχεδιασμένο για προγραμματισμό λίστας εντολών. Το IEC πρότυπο αυτής της γλώσσας βασίζεται στην ορολογία και στα σύμβολα, που χρησιμοποιούνται από την πλειοψηφία των σημερινών PLC. Το πρότυπο περιλαμβάνει σύμβολα για SET και RESET των πηνίων, γεγονός που επιτρέπει σε μια μεταβλητή να αποθηκεύεται προσωρινά και κατόπιν να μηδενίζεται. Επίσης, υπάρχουν και πηνία retentive, που συγκρατούν τις δυαδικές μεταβλητές, σε περίπτωση διακοπής του ρεύματος. Ταυτόχρονα με τις άλλες διαδικασίες, τα LD διαθέτουν ENABLE INPUT/OUTPUT και εντολές διακλάδωσης. Παραδείγματα προγραμματισμού σε γλώσσα LD θα δοθούν σε επόμενη παράγραφο. Στον πίνακα 7.4.2 δίνονται τα τυποποιημένα σύμβολα της γλώσσας LD.

- Η γλώσσα λογικού διαγράμματος λειτουργίας **FBD** είναι και αυτή γραφική γλώσσα προγραμματισμού βασισμένη σε λειτουργικά blocks (function blocks), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιούνται πολλές φορές σε διαφορετικά σημεία μιας εφαρμογής. Κάθε λειτουργικό block παριστάνεται σαν παραλληλόγραμμο με τις εισόδους σχεδιασμένες στην αριστερή πλευρά και τις εξόδους στα δεξιά. Η ροή του σήματος έχει κατεύθυνση από τις εξόδους του προηγούμενου προς τις εισόδους του επόμενου λειτουργικού block. Η δομή του FBD ταιριάζει στη δυαδική λογική και στις εφαρμογές συνεχούς ελέγχου. Στο σχήμα 7.4.1 φαίνεται παράδειγμα προγραμματισμού σε γλώσσα FBD, όπου το δεξιό block συμβολίζει έναν απαριθμητή προς τα πάνω CTU (up-counter). Ο απαριθμητής απαριθμεί την είσοδο CU (count-up input), μέχρι να φτάσει σε προκαθορισμένη τιμή PV (preset value). Τότε η έξοδος Q γίνεται αληθής και η απαρίθμηση σταματά. Με την είσοδο εκκαθάρισης R (reset) αρχίζει από την αρχή η απαρίθμηση. Η έξοδος CV παρέχει τη τρέχουσα τιμή (current count value).



Σχήμα 7.4.1. Παράδειγμα προγραμματισμού σε γλώσσα FBD

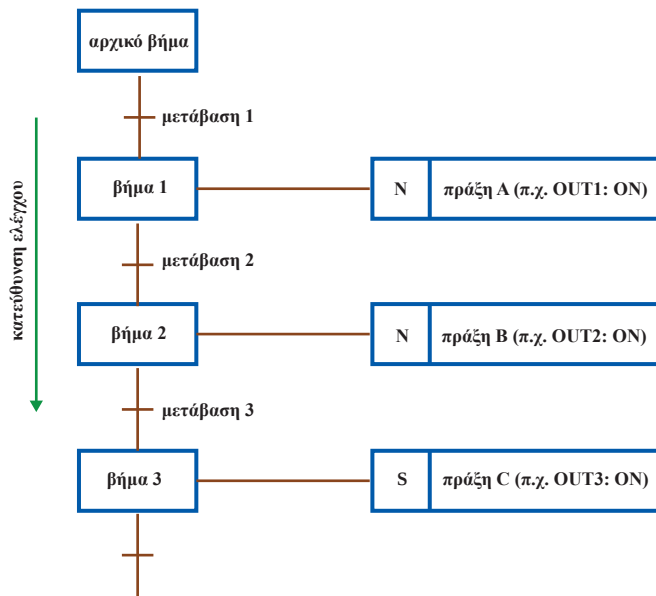
- Η γλώσσα διαγράμματος ακολουθιακών λειτουργιών **SFC** είναι και αυτή γραφική γλώσσα, που συναντάται, όμως, με ακολουθιακό χαρακτήρα.

Βασίζεται σε μια άλλη γραφική γλώσσα, την Grafset, που χρησιμοποιείται ευρέως από την Telemecanique και έχει καταστεί γαλλικό εθνικό πρότυπο. Σε αντίθεση με αυτό το πρότυπο, τα σημαντικότερα PLC διαθέτουν δική τους γλώσσα ακολουθιακού προγραμματισμού. Ως προς τη μορφή της γλώσσας SFC, μια ακολουθία μπορεί να οριστεί σαν σειρά από βήματα, που εκτελούνται με προκαθορισμένη σειρά. Κάθε βήμα παριστάνεται με παραλληλόγραμμο και συνδέεται με την πράξη ελέγχου (action control), που παριστάνεται με τον ίδιο τρόπο. Κάθε ακολουθία ξεκινά με αρχικό βήμα, το οποίο χρησιμεύει στο να διατηρεί το σύστημα έτοιμο για λειτουργία. Η ένωση των βημάτων με γραμμές διακόπτεται από οριζόντια μικρή μπάρα, που παριστάνει τη μετάβαση. Δηλαδή, όταν η συνθήκη μετάβασης αληθεύει, το βήμα πριν τη μετάβαση απενεργοποιείται και το βήμα μετά τη

Σύμβολο	Περιγραφή
	Ανοικτή επαφή
	Κλειστή επαφή
	Επαφή ανίχνευσης θετικής μετάβασης (ο δεξιός σύνδεσμος είναι ON όταν ανιχνεύεται αλλαγή από 0 σε 1)
	Επαφή ανίχνευσης αρνητικής μετάβασης (ο δεξιός σύνδεσμος είναι ON όταν ανιχνεύεται αλλαγή από 1 σε 0)
	Πηνίο, που ελέγχεται από τον αριστερό σύνδεσμο
	Πηνίο, που τίθεται στην αντίθετη κατάσταση από αυτή που ορίζει ο αριστερός σύνδεσμος
	Το πηνίο γίνεται ON (set), όταν ο αριστερός σύνδεσμος είναι ON και παραμένει ON, μέχρι να γίνει εκκαθάριση (reset)
	Το πηνίο γίνεται OFF (reset), όταν ο αριστερός σύνδεσμος είναι ON και παραμένει OFF, μέχρι να τεθεί πάλι σε κατάσταση ON (set).
	Πηνίο, που διατηρεί την κατάστασή του, ακόμα και σε διακοπή της παροχής ισχύος
	Ίδιο με το πηνίο S, αλλά διατηρεί την κατάστασή του, ακόμα και σε διακοπή της παροχής ισχύος
	Ίδιο με το πηνίο R, αλλά διατηρεί την κατάστασή του, ακόμα και σε διακοπή της παροχής ισχύος
	Πηνίο ανίχνευσης θετικής μετάβασης (γίνεται ON, όταν ανιχνεύεται αλλαγή από 0 σε 1 στον αριστερό σύνδεσμο)
	Πηνίο ανίχνευσης αρνητικής μετάβασης (γίνεται ON, όταν ανιχνεύεται αλλαγή από 1 σε 0 στον αριστερό σύνδεσμο)

Πίνακας 7.4.2. Τα σύμβολα της γλώσσας διαγράμματος κλίμακας (LD)

μετάβαση ενεργοποιείται. Στο σχήμα 7.4.2 φαίνεται παράδειγμα σε γλώσσα SFC. Στο παράδειγμα αυτό τα N(one) και S(et) απεικονίζουν τη δράση της ακολουθίας.

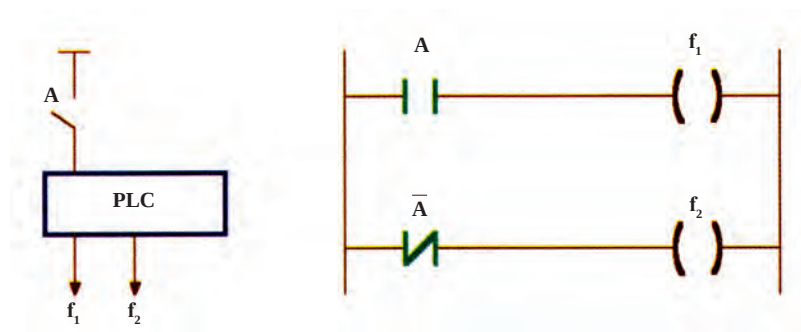


Σχήμα 7.4.2. Παράδειγμα ακολουθιακού λειτουργικού διαγράμματος

7.5 Παραδείγματα Προγραμματισμού PLC

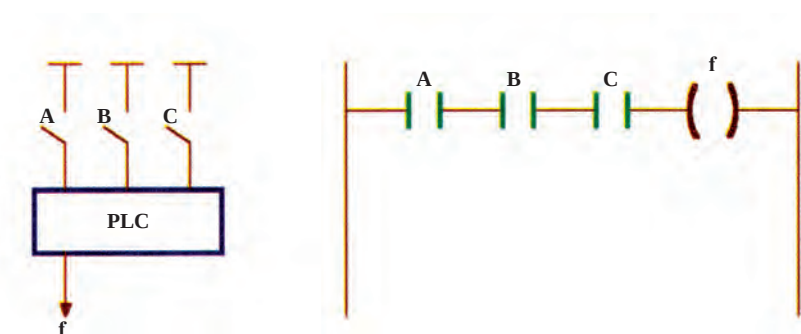
Στην παράγραφο αυτή δίνονται παραδείγματα προγραμματισμού PLCs σε γλώσσα ladder. Η γλώσσα αυτή προήλθε από τα παραδοσιακά κυκλώματα ελέγχου με ρελέ και σε πολλά σημεία ακολουθείται η ίδια λογική. Το ladder είναι το ίδιο με το σχεδιασμό δικτύου με διακοπτικά στοιχεία. Ειδικότερα, το διάγραμμα αυτό έχει ως τροφοδοσία μια κάθετη γραμμή στην αριστερή πλευρά του. Η γραμμή τροφοδοτεί με τάση τις επαφές, που βρίσκονται σε όλες τις βαθμίδες του διαγράμματος και όταν βρίσκονται όλες σε κατάσταση ON, η τάση τροφοδοσίας διασχίζει τις οριζόντιες βαθμίδες επενεργώντας πάνω στο πηνίο, που βρίσκεται στο τέλος κάθε οριζόντιας γραμμής. Γενικά, στον προγραμματισμό ladder οι επαφές θεωρούνται ως είσοδοι και τα πηνία ως έξοδοι. Ως παραδείγματα παρατίθενται οι υλοποιήσεις σε γλώσσα διαγράμματος των λογικών συναρτήσεων NOT, AND, OR, XOR, οι δύο νόμοι του DE MORGAN, ένας χρονιστής και ένας μετρητής.

- Η λογική συνάρτηση **NOT** με είσοδο A και έξοδο $f_2 = \bar{A}$ (σχήμα 7.5.1).



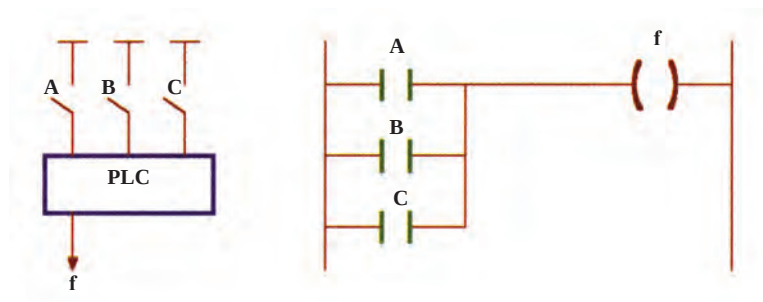
Σχήμα 7.5.1. Υλοποίηση συνάρτησης NOT σε γλώσσα κλίμακας

- Η λογική συνάρτηση **AND** με εισόδους A, B, C και έξοδο $f=ABC$ (σχήμα 7.5.2).



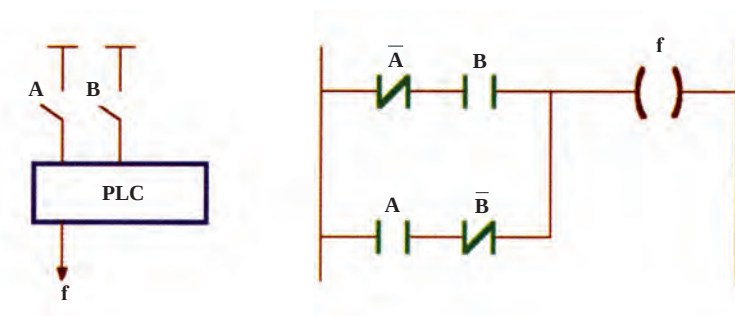
Σχήμα 7.5.2. Υλοποίηση συνάρτησης AND σε γλώσσα κλίμακας

- Η λογική συνάρτηση **OR** με εισόδους A, B, C και έξοδο $f=A+B+C$ (σχήμα 7.5.3).



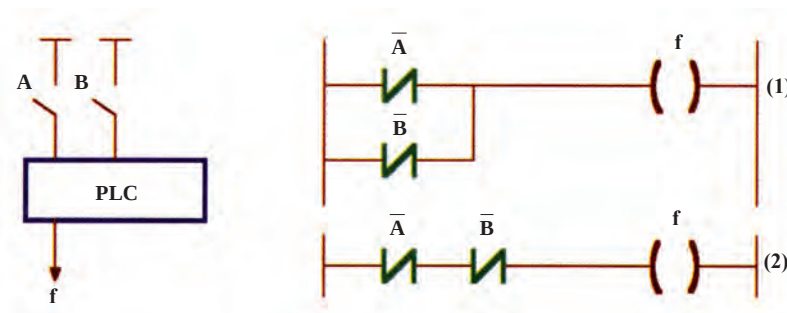
Σχήμα 7.5.3. Υλοποίηση συνάρτησης OR σε γλώσσα κλίμακας

- Η λογική συνάρτηση **XOR** με εισόδους A, B και έξοδο $f = \bar{A}B + A\bar{B}$ (σχήμα 7.5.4).



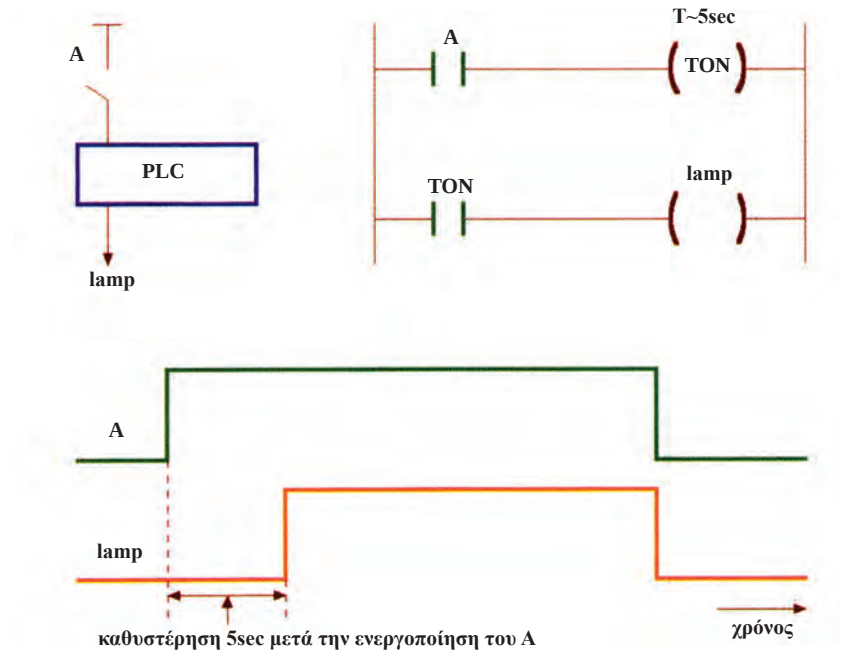
Σχήμα 7.5.4. Υλοποίηση συνάρτησης XOR σε γλώσσα κλίμακας

- Οι δύο νόμοι του **DE MORGAN** $f = \overline{AB} = \bar{A} + \bar{B}$ (NAND) (1), $f = \overline{A+B} = \bar{A} \bar{B}$ (NOR) (2), (σχήμα 7.5.5).



Σχήμα 7.5.5. Υλοποίηση νόμων DE MORGAN σε γλώσσα κλίμακας

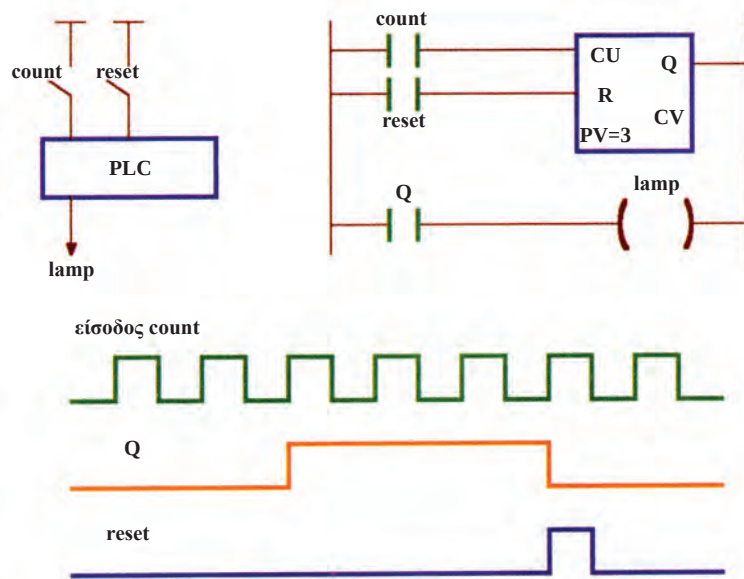
- Η υλοποίηση **χρονιστή** με καθυστέρηση (on-delay timer) (σχήμα 7.5.6). Στο παράδειγμα έχει τεθεί χρόνος 5sec. Όταν ενεργοποιείται η είσοδος A, ενεργοποιείται και ο χρονιστής και όταν περάσει ο προκαθορισμένος χρόνος των 5sec, ενεργοποιείται η έξοδος. Ο χρονιστής αρχικοποιείται, όταν η είσοδος A απενεργοποιείται.



Σχήμα 7.5.6. Υλοποίηση χρονιστή σε γλώσσα κλίμακας

- Η υλοποίηση **μετρητή προς τα πάνω** (up counter), (σχήμα 7.5.7). Εφαρμόζεται θετικός παλμός χρησιμοποιώντας την επαφή εκκαθάρισης (reset) και ο απαριθμητής εκκαθαρίζεται, ώστε να απενεργοποιηθεί η έξοδος Q και ορίζεται η προκαθορισμένη τιμή 3 (PV). Αν εφαρμοστούν τρεις θετικοί παλμοί χρησιμοποιώντας την επαφή μέτρησης (count), ενεργοποιείται η έξοδος με την άνοδο του τρίτου παλμού. Επιπλέον παλμοί στην επαφή μέτρησης αγνοούνται, μέχρι να γίνει εκκαθάριση του απαριθμητή (reset).

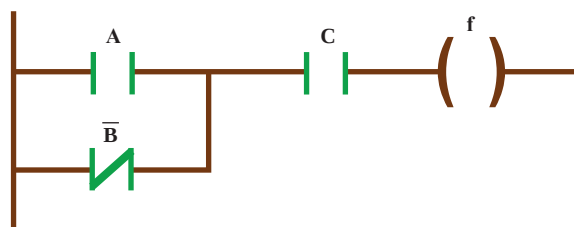
Ας δούμε, όμως, πως μπορούμε να εξάγουμε διάγραμμα κλίμακας από πίνακα αληθείας. Έστω, ο πίνακας αληθείας του πίνακα 7.5.1. Αρχικά θεωρούμε όλες τις γραμμές, που εμφανίζουν 1 στην έξοδο. Για κάθε μια από αυτές τις γραμμές εφαρμόζουμε πράξη AND μεταξύ των αντίστοιχων εισόδων, θέτοντας την άρνηση της εισόδου, όποτε η είσοδος είναι 0. Στο τέλος εφαρμόζουμε πράξη OR μεταξύ των αποτελεσμάτων των πράξεων AND. Τότε, η συνάρτηση της εξόδου είναι $f = \bar{A}\bar{B}C + A\bar{B}C + ABC$. Απλοποιώντας τη συνάρτηση αυτή μπορεί να γίνει $f = (A + \bar{B})C$ και υλοποιείται, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.5.8.



Σχήμα 7.5.7. Υλοποίηση μετρητή προς τα πάνω σε γλώσσα κλίμακας

A	B	C	f
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

Πίνακας 7.5.1. Παράδειγμα πίνακα αληθείας



Σχήμα 7.5.8. Υλοποίηση της συνάρτησης του πίνακα αληθείας του πίνακα 7.5.1

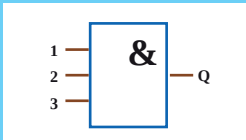
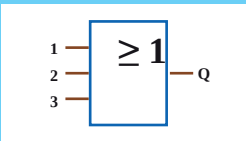
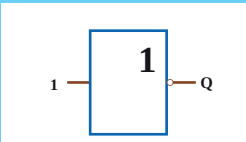
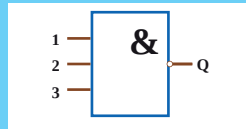
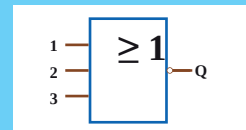
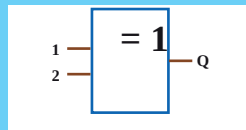
7.6 Η Οικογένεια PLCs LOGO! της Siemens

Τα PLCs της σειράς LOGO! αποτελούν τη «μικρή» και πρωτοποριακή μονάδα λογικής της Siemens. Βρίσκουν εφαρμογή τόσο στη βιομηχανία (διατάξεις μέτρησης στάθμης, κλίβανοι, συμπιεστές, βιομηχανικά ψαλίδια και πλάνες, μικροί κινητήρες, αντλίες και βαλβίδες, κ.ά.), όσο και σε περιβάλλοντα κτιρίων και οικιών (φωτισμός κτιρίων, πόρτες γκαράζ, συστήματα συναγερμών, μηχανές υδρομασάζ, solarium, κ.ά.). Τα εξελιγμένα χαρακτηριστικά τους τα έχουν καθιερώσει παγκοσμίως.

Τα LOGO! PLCs, ως λογικοί ελεγκτές, ενσωματώνουν όλα τα πλεονεκτήματα των PLCs, όπως γρήγορη, εύκολη και οικονομική υλοποίηση εφαρμογών, αντικατάσταση από τον ελεγκτή μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρολογικού υλικού (ρελέ, χρονικά, καλωδιώσεις, κ.ά.). Επομένως, καθιερώνουν τη χρήση μικρότερων πινάκων με λιγότερα παρελκόμενα. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα επέκτασης του συστήματος μέσω των δεκαεννέα ενσωματωμένων λειτουργιών τους και η δυνατότητα δικτύωσής τους. Επιπλέον, τα LOGO! υπόκεινται σε διεθνείς κανόνες τυποποίησης (VDE, IEC, UL, FM CSA, πιστοποιήσεις για χρήση σε πλοία), γεγονός που τα καθιστά αξιόπιστα και με μικρό κόστος συντήρησης. Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε κραδασμούς, υγρασία, υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες, ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) και είναι εφοδιασμένα με προστασία από ραδιοσυχνότητες.

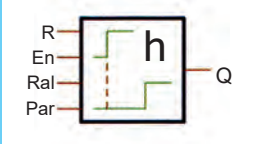
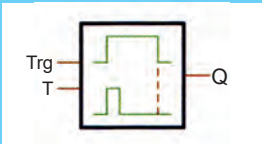
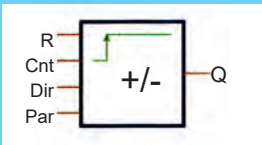
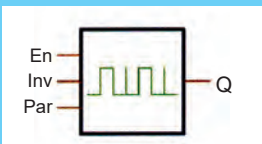
Όλα τα LOGO! προγραμματίζονται σε γραφική γλώσσα προγραμματισμού βασισμένη σε 19 λειτουργικά μπλοκ διαγράμματα (6 βασικά και 13 ειδικά) που αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένες λειτουργίες. Επομένως, πρόκειται για γλώσσα προγραμματισμού FBD με τις ανάλογες διαφοροποιήσεις προσαρμοσμένες στις επιδιώξεις του κατασκευαστή. Η μονάδα λογικής προγραμματίζεται από τα πλήκτρα χειρισμών της και παρέχει ενδείξεις στο χρήστη από ενσωματωμένη οθόνη υγρών κρυστάλλων, όπως ήδη γνωρίσαμε στο σχήμα 7.2.2. Υπάρχει, βέβαια, η δυνατότητα εξομοίωσης σε υπολογιστή με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού της Siemens και η μεταφορά του προγράμματος στο LOGO! με ειδικό καλώδιο σειριακής σύνδεσης με προσωπικό υπολογιστή. Η κάθε συσκευή διαθέτει μνήμη χωρητικότητας 56 μπλοκ λειτουργιών. Τα βήματα, που ακολουθούνται, για τον προγραμματισμό ενός LOGO! είναι τα παρακάτω:

- Σχεδιασμός της λογικής λύσης της εφαρμογής.
- Τοποθέτηση της συσκευής και σύνδεση εισόδων-εξόδων. Η σύνδεση εισόδων-εξόδων I/O πριν τον προγραμματισμό είναι εφικτή, αφού για μετατροπές, αντικαταστάσεις, επεκτάσεις και εκσυγχρονισμό της διαδικασίας αλλάζει μόνο το πρόγραμμα και όχι η καλωδίωση.
- Επιλογή και συνδυασμός με τη βοήθεια του πληκτρολογίου των κατάλληλων λειτουργιών του LOGO!.
- Τελικός έλεγχος με δοκιμές και εκκίνηση του συστήματος από το χρήστη.

Αναπαράσταση διαγράμματος κυκλώματος	Αναπαράσταση LOGO!	Περιγραφή
 σειριακή σύνδεση ανοικτών διακοπών		AND
 παράλληλη σύνδεση ανοικτών διακοπών		OR
 αντιστροφή		NOT
 παράλληλη σύνδεση κλειστών διακοπών		NAND
 σειριακή σύνδεση κλειστών διακοπών		NOR
 διπλή αναστροφή (change-over)		XOR

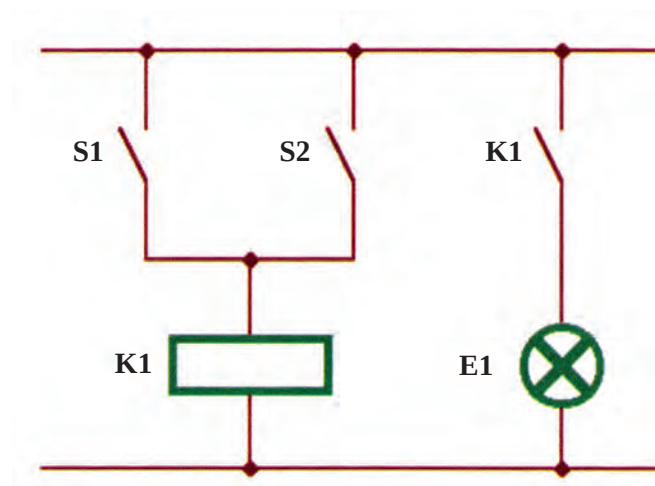
Πίνακας 7.6.1. Βασικά λειτουργικά διαγράμματα προγραμματισμού των LOGO!
 (από το LOGO! Manual της Siemens)

Αναπαράσταση διαγράμματος κυκλώματος	Αναπαράσταση LOGO!	Περιγραφή
		On delay
		Off delay
		Current impulse relay
		Time switch
		Latching relay
		Clock pulse relay
		Retentive on delay

Αναπαράσταση διαγράμματος κυκλώματος	Αναπαράσταση LOGO!	Περιγραφή
		Operating hours counter
		Interval time delay relay
		Up and down counter
		Threshold switch
		Asynchronous pulse generator
		Year time switch

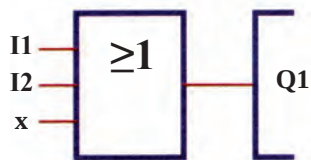
Πίνακας 7.6.2. Ειδικά λειτουργικά διαγράμματα προγραμματισμού των LOGO!
(από το LOGO! Manual της Siemens)

Είναι γνωστό, ότι οι ενσωματωμένες λειτουργίες του LOGO! συμβολίζονται με μπλοκ διαγράμματα. Απλά γίνεται επιλογή και συνδυασμός των μπλοκ λειτουργιών και δημιουργείται διάγραμμα λειτουργιών, δηλαδή διάγραμμα προγράμματος LOGO!. Το διάγραμμα αυτό στηρίζεται στη λογική των κλασικών διαγραμμάτων ηλεκτρικού κυκλώματος, γεγονός που το καθιστά εύχρηστο στους περισσότερους μηχανικούς. Τα 19 μπλοκ λειτουργιών διακρίνονται σε έξι βασικά και δεκατρία ειδικά. Τα έξι βασικά δείχνονται και περιγράφονται στον πίνακα 7.6.1. Για παράδειγμα, η έξοδος της AND αντιστοιχεί σε κατάσταση λογικής μονάδας, όταν όλες οι εισοδοί βρίσκονται σε κατάσταση λογικής μονάδας ή όταν όλοι οι διακόπτες κλείσουν. Η έξοδος της OR αντιστοιχεί σε κατάσταση λογικής μονάδας, όταν μια τουλάχιστον από τις εισόδους βρίσκεται σε κατάσταση λογικής μονάδας, ή όταν ένας τουλάχιστον διακόπτης κλείσει. Στον πίνακα 7.6.2 δείχνονται και περιγράφονται τα λειτουργικά διαγράμματα των υπόλοιπων δεκατριών ειδικών λειτουργιών προγραμματισμού των LOGO!. Ας δούμε, όμως, ένα μικρό παράδειγμα προγράμματος LOGO! συνδυάζοντας μερικά από τα μπλοκ διαγράμματα των πινάκων. Θα προσπαθήσουμε να συνδέσουμε δύο διακόπτες παράλληλα. Σε διάγραμμα κυκλώματος, το κύκλωμα αναπαριστάται όπως φαίνεται στο σχήμα 7.6.1.



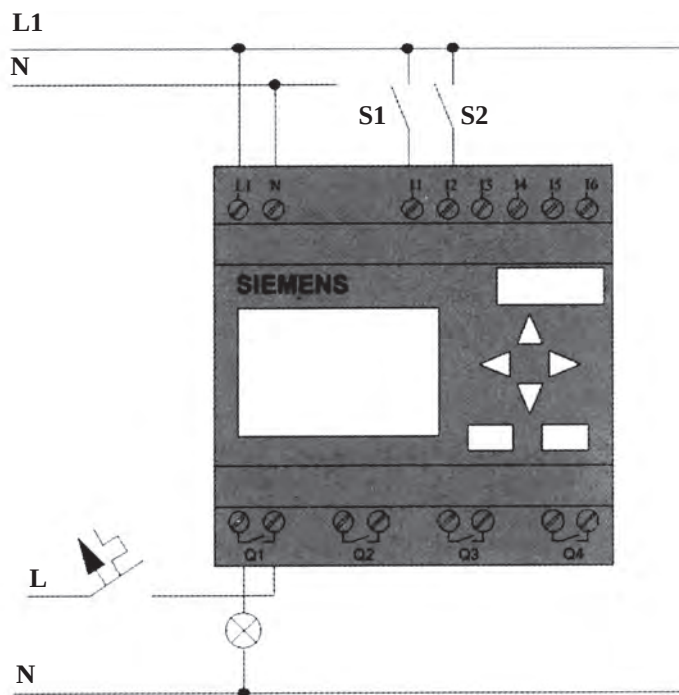
Σχήμα 7.6.1. Διάγραμμα κυκλώματος (από το LOGO! Manual της Siemens)

Ο καταναλωτής τίθεται σε λειτουργία με το διακόπτη S1 ή το διακόπτη S2. Όσον αφορά το LOGO!, η παράλληλη σύνδεση διακοπών αποτελεί λειτουργικό διάγραμμα (block) πράξης OR. Μεταφρασμένο αυτό σε πρόγραμμα LOGO! σημαίνει, ότι ο ηλεκτρονόμος K1 ελέγχεται από μπλοκ OR. Τα I1 και I2 συνδέονται στην είσοδο του μπλοκ OR, το S1 στο I1 και το S2 στο I2. Έτσι, το πρόγραμμα για το LOGO! φαίνεται στο σχήμα 7.6.2.



Σχήμα 7.6.2. Πρόγραμμα LOGO! (από το LOGO! Manual της Siemens)

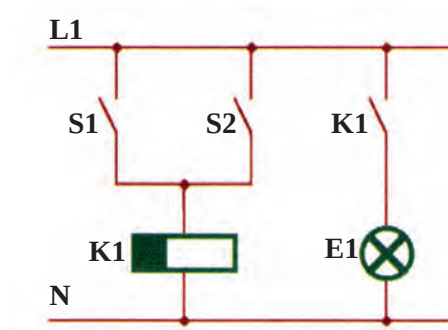
Η καλωδίωση του LOGO!, τότε, δείχνεται στο σχήμα 7.6.3. Ο διακόπτης S1 δρα στην είσοδο I1 και ο διακόπτης S2 στην είσοδο I2, ενώ ο καταναλωτής συνδέεται στον ηλεκτρονόμο Q1.



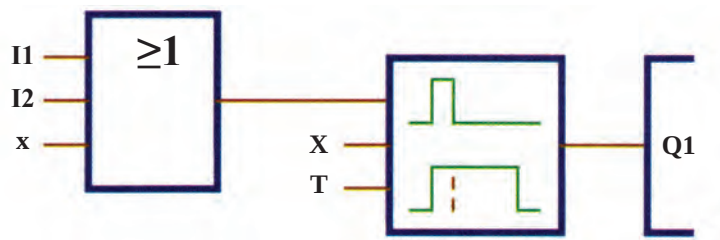
Σχήμα 7.6.3. Καλωδίωση LOGO! (από το LOGO! Manual της Siemens)

Σαν δεύτερο παράδειγμα μπορούμε να θεωρήσουμε μια επέκταση του προηγούμενου. Οι διακόπτες S1 και S2 ελέγχουν ένα ηλεκτρονόμο, ο οποίος θέτει σε λειτουργία ένα καταναλωτή E1 και διακόπτει τη λειτουργία ύστερα από καθυστέρηση 12 λεπτών (σχήμα 7.6.4). Το πρόγραμμα LOGO! δείχνεται στο σχήμα 7.6.5, όπου απλά έχει προστεθεί ένα μπλοκ off-delay στο ήδη υπάρχον. Η οικογένεια των LOGO! αποτελείται από αρκετά μοντέλα και παρελκόμενα αυτών. Το LOGO!Basic, το οποίο είναι η βασική μονάδα λογικής της οικογένειας, ενσωματώνει όλα τα χαρακτηριστικά της και κάποια ειδικά (χρονικά διαφόρων τύπων, διακόπτη συχνότητας) εκτός από τη δυνατότητα δικτύωσης.

Το LOGO!Long δεν αποτελεί διαφορετικό τύπο ελεγκτή, αλλά επεκτείνει τις δυνατότητες του LOGO!Basic. Παρέχει 12 εισόδους και 8 εξόδους, δηλαδή διπλάσιες από το μικρό LOGO!Basic. Το LOGO!Bus είναι η δικτυακή έκδοση του LOGO!Long. Συνδέεται με το δίκτυο AS-Interface, στο οποίο είναι δυνατό να συνδεθούν μπουτόν, διακόπτες, τερματοδιακόπτες, διακόπτες προσέγγισης, ρελέ, κινητήρες αλλά και σταθμοί ελέγχου master και έξυπνοι σταθμοί ελέγχου slave. Ενδείκνυται, δηλαδή, για καταναμεμημένο έλεγχο.



Σχήμα 7.6.4. Διάγραμμα κυκλώματος (από το LOGO! Manual της Siemens)

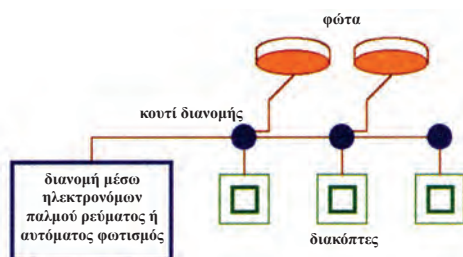


Σχήμα 7.6.5. Πρόγραμμα LOGO! (από το LOGO! Manual της Siemens)

7.7

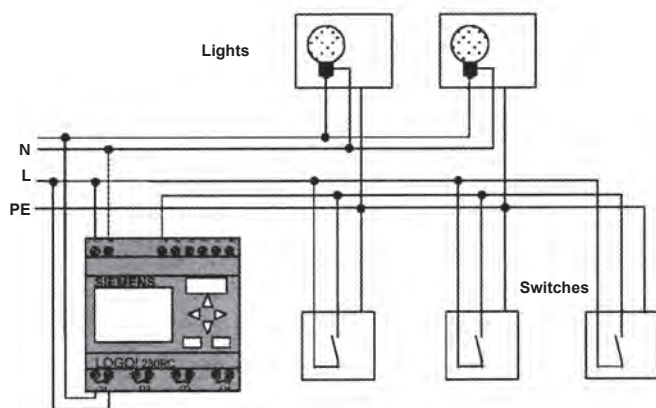
Πρακτικές
Εφαρμογές
LOGO!

Στην παράγραφο αυτή θα γνωρίσουμε ορισμένες απλές πρακτικές εφαρμογές των LOGO!. Σημαντική εφαρμογή αποτελεί ο **φωτισμός διαδρόμων και διαφόρων κοινόχρηστων χώρων**. Η βασική απαίτηση από τέτοια εφαρμογή είναι, όταν κάποιος βρίσκεται στο διάδρομο, τα φώτα να είναι αναμμένα και όταν δεν βρίσκεται κανείς, να είναι σβηστά. Για τη λύση του προβλήματος υπάρχουν δύο τρόποι, είτε να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρονόμοι παλμού ρεύματος (current impulse relay) είτε συσκευές αυτόματου φωτισμού. Και στις δύο περιπτώσεις, η συνδεσμολογία είναι η ίδια και φαίνεται στο σχήμα 7.7.1.

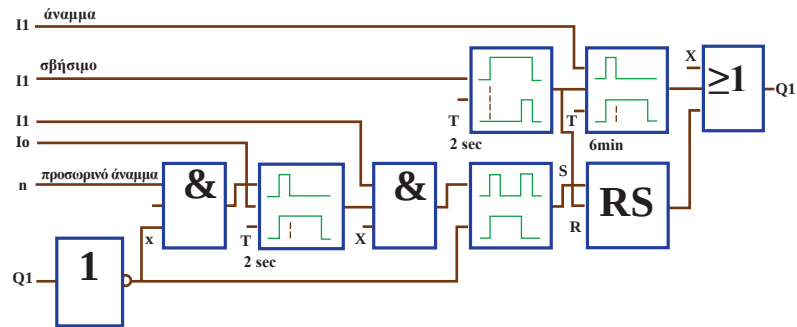


Σχήμα 7.7.1. Συνδεσμολογία φωτισμού διαδρόμου (από το LOGO! Manual της Siemens)

Στην περίπτωση των ηλεκτρονόμων παλμού ρεύματος, όταν πατάμε το διακόπτη, ανάβει το φως και όταν τον ξαναπατάμε, τότε σβήνει. Το μειονέκτημα, όμως, σε αυτή την περίπτωση είναι, ότι οι άνθρωποι ξεχνούν να σβήσουν και πάλι το φως. Στην περίπτωση, όμως, αυτόματης συσκευής, όταν πατάμε το διακόπτη ανάβει το φως και σβήνει πάλι μόνο του, ύστερα από ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει το μειονέκτημα, ότι το φως δεν μπορεί να μένει για πολύ ώρα αναμμένο, όπως π.χ. όταν απαιτείται να γίνουν εργασίες συντήρησης. Τα μειονεκτήματα των παραπάνω λύσεων μπορεί να αντιμετωπιστούν με τη χρήση PLC, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.7.2. Στο σχήμα 7.7.3 φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα προγράμματος.



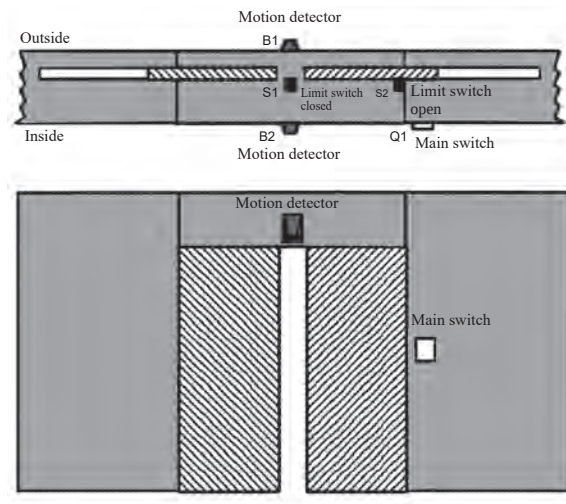
Σχήμα 7.7.2. Φωτισμός διαδρόμου με PLC (από το LOGO! Manual της Siemens)



Σχήμα 7.7.3. Διάγραμμα φωτισμού διαδρόμου (από το LOGO! Manual της Siemens)

Το παραπάνω διάγραμμα λειτουργεί ως εξής: Όταν πιέζεται ο διακόπτης, το φως ανάβει και σβήνει αυτόματα ύστερα από 6 λεπτά. Όταν ο διακόπτης πιέζεται δύο φορές, το φως ανάβει μόνιμα. Όταν διατηρήσουμε τον διακόπτη πιεσμένο για δύο δευτερόλεπτα, τότε το φως σβήνει πάλι.

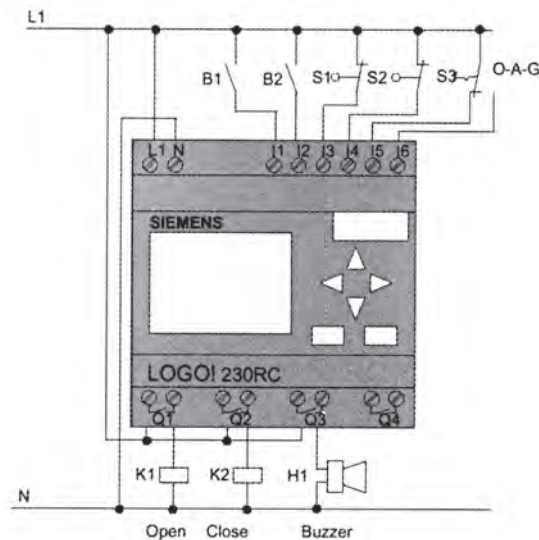
Άλλη σημαντική εφαρμογή είναι η **αυτόματη πόρτα**, που βρίσκουμε σε τράπεζες, νοσοκομεία, super-markets, κ.ά. Οι απαιτήσεις σε τέτοια εφαρμογή είναι η πόρτα να ανοίγει, όταν πλησιάζει κάποιος, να παραμένει ανοιχτή, όσο τη διαβαίνει και να κλείνει, όταν δεν υπάρχει κανείς (σχήμα 7.7.4).



Σχήμα 7.7.4. Αυτόματη πόρτα (από το LOGO! Manual της Siemens)

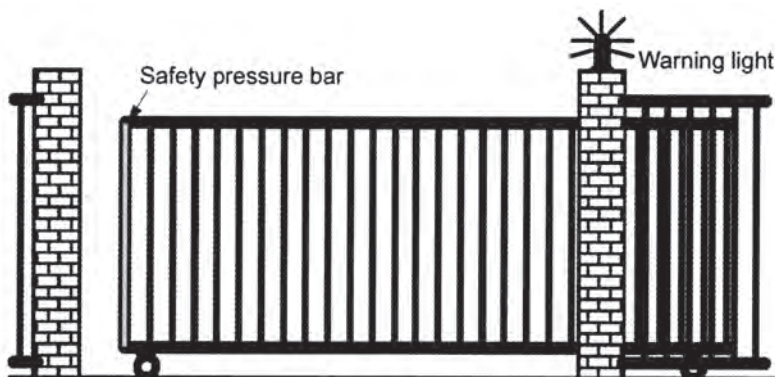
Στο σχήμα 7.7.5 φαίνεται η υλοποίηση του ελέγχου της αυτόματης πόρτας με PLC. Κατά την ώρα λειτουργίας του super-market, ο ανιχνευτής κίνησης B1 ανοίγει την πόρτα, όταν κάποιος θέλει να εισέλθει από τα έξω και ο ανιχνευτής B2 ανοίγει την πόρτα, όταν κάποιος θέλει να βγει. Μετά την ώρα κλεισίματος του super-market, ο ανιχνευτής B2 συνεχίζει να ανοίγει την πόρτα για επι-

πλέον 1 ώρα, για να μπορούν να φύγουν οι πελάτες. Η έξοδος Q1 τίθεται σε λειτουργία και ανοίγει την πόρτα, όταν ο διακόπτης ελέγχου I5 ενεργοποιηθεί (η πόρτα, τότε, μένει συνεχώς ανοιχτή), όταν οι ανιχνευτές κίνησης αντιληφθούν κάποιον να πλησιάζει ή όταν η πόρτα δεν είναι ακόμη πλήρως ανοικτή (διακόπτης περιορισμού I4). Η έξοδος Q2 τίθεται σε λειτουργία και κλείνει την πόρτα, όταν ο διακόπτης ελέγχου I6 ενεργοποιηθεί (η πόρτα, τότε, μένει συνεχώς κλειστή), όταν οι ανιχνευτές κίνησης δεν αντιλαμβάνονται κανένα να πλησιάζει, ή όταν η πόρτα δεν είναι ακόμη πλήρως κλειστή (διακόπτης περιορισμού I3).



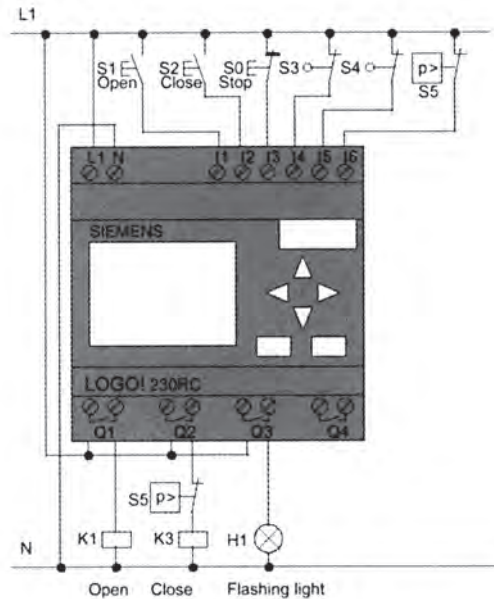
Σχήμα 7.7.5. Αυτόματη πόρτα με PLC (από το LOGO! Manual της Siemens)

Τρίτο παράδειγμα είναι ο έλεγχος μιας **πύλης σε βιομηχανία** για την είσοδο και έξοδο των οχημάτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.7.6. Σε τέτοια εφαρμογή,



Σχήμα 7.7.6. Βιομηχανική πύλη (από το LOGO! Manual της Siemens)

οι απαιτήσεις είναι η πύλη να ανοίγει και να κλείνει με ένα διακόπτη, να επιβλέπεται η είσοδος και έξοδος με κάμερα, να ανοίγει και να κλείνει πλήρως, αλλά και να μπορεί να διακόπτεται αυτή η κίνηση ανά πάσα στιγμή, κάποιο φως να αναβοσβήνει 5 δευτερόλεπτα πριν αρχίσει να κινείται και σε όλη τη διάρκεια της κίνησης και μια μπάρα ασφαλείας να εξασφαλίζει ότι κανένα ατύχημα δεν θα συμβεί κατά τη διάρκεια κλεισίματος. Στο σχήμα 7.7.7 φαίνεται η υλοποίηση του ελέγχου της αυτόματης πόρτας με PLC.



Σχήμα 7.7.7. Βιομηχανική πύλη με PLC (από το LOGO! Manual της Siemens)

- Οι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές δέχονται εισόδους και οδηγούν εξόδους εκτελώντας εργασίες που περιγράφονται στο εσωτερικό τους με τη μορφή προγραμμάτων. Χρησιμοποιούνται τόσο σε βιομηχανικές όσο και σε οικιακές εφαρμογές.
- Τα PLCs αποτελούνται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU), τη μνήμη, τη μονάδα εισόδου-εξόδου I/O, τη μονάδα τροφοδοσίας, τη μονάδα στήριξης και τη μονάδα προγραμματισμού.
- Υπάρχουν πέντε σημαντικές γλώσσες προγραμματισμού των PLCs: δομημένο κείμενο ST, λίστα εντολών IL, διάγραμμα κλίμακας LD, λογικό διάγραμμα λειτουργίας FBD και διάγραμμα ακολουθιακών λειτουργιών SFC.
- Ένα PLC της αγοράς που χρησιμοποιείται ευρέως είναι το LOGO! PLC της Siemens. Πιθανές εφαρμογές του είναι ο φωτισμός διαδρόμων και διαφόρων κοινόχρηστων χώρων, ο έλεγχος αυτόματης πόρτας και ο έλεγχος πύλης σε βιομηχανία.

Αξιολόγηση • Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

1. Γραφικές γλώσσες είναι οι:
 - α) LD και FBD
 - β) ST και IL
 - γ) ST και LD
 - δ) ST και FBD
2. Κειμενοστραφείς γλώσσες είναι οι:
 - α) LD και FBD
 - β) ST και IL
 - γ) ST και LD
 - δ) ST και FBD

• Ερωτήσεις του τύπου Σωστό/Λάθος

1. Τα PLCs χρησιμοποιούνται μόνο σε βιομηχανικές εφαρμογές.
2. Η γλώσσα λίστας εντολών είναι κειμενοστραφής γλώσσα.
3. Η γλώσσα διαγράμματος κλίμακας είναι κειμενοστραφής.
4. Η γλώσσα λίστας εντολών είναι κειμενοστραφής.

• Ερωτήσεις αντιστοίχισης

1. Να αντιστοιχίσετε τα:

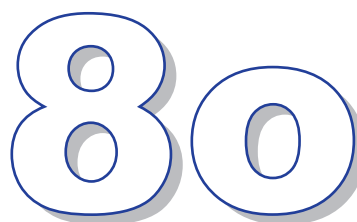
ST	Λίστα εντολών
IL	Λογικό διάγραμμα λειτουργίας
LD	Δομημένο κείμενο
FBD	Διάγραμμα ακολουθιακών λειτουργιών
SFC	Διάγραμμα κλίμακας

• Ερωτήσεις συμπλήρωσης κενού

1. Όλες οι συσκευές _____ των PLCs ενσωματώνουν αρκετή _____, που επιτρέπει την ανάπτυξη και τον έλεγχο του _____ στην ίδια τη συσκευή.

• Ερωτήσεις ανοικτού τύπου

1. Από ποιες βασικές μονάδες αποτελούνται τα PLCs;
2. Πώς πραγματοποιείται μια πράξη AND με γλώσσα διαγράμματος κλίμακας;
3. Πώς πραγματοποιείται μια πράξη OR με γλώσσα διαγράμματος κλίμακας;
4. Πώς μπορούμε να συνδέσουμε δύο διακόπτες παράλληλα με ένα LOGO! PLC;
5. Πώς βρίσκουν εφαρμογή τα LOGO! PLC στο φωτισμό διαδρόμων και διαφόρων κοινόχρηστων χώρων;



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Μεταφορά δεδομένων

- Εισαγωγή
- Τύποι Δικτύων-Δίκτυα Μετρήσεων
- Πρότυπα Δικτύων Μετρήσεων
- Μέσα Μετάδοσης
- Γραμμές Μεταφοράς
- Οπτικές Ίνες
- Μετάδοση Ψηφιακού Σήματος
- Κωδικοποίηση
- Διαμόρφωση
- Επικοινωνίες Βασικής-Ευρείας Ζώνης
- Τηλεφωνική Γραμμή
- Modems
- Τοπικά Δίκτυα Μετρήσεων

Σκοπός

Όταν ολοκληρώσεις το κεφάλαιο αυτό, θα μπορείς:

- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις διάφορους τύπους δικτύων.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις τα διάφορα μέσα μετάδοσης.
- Να περιγράφεις τα χαρακτηριστικά μιας γραμμής μεταφοράς και τη διαδικασία προσαρμογής της με το φορτίο ή με άλλες γραμμές μεταφοράς.
- Να περιγράφεις την αρχή λειτουργίας της οπτικής ίνας και να κατονομάζεις τις βασικές συνιστώσες ενός συστήματος επικοινωνίας με οπτικές ίνες.
- Να κατονομάζεις και να εξηγείς διάφορους τρόπους κωδικοποίησης.
- Να κατονομάζεις και να περιγράφεις τα είδη της διαμόρφωσης, τόσο αναλογικής όσο και ψηφιακής.
- Να περιγράφεις τα χαρακτηριστικά της επικοινωνίας ευρείας και βασικής ζώνης.
- Να περιγράφεις τα χαρακτηριστικά μιας τηλεφωνικής γραμμής.
- Να εξηγείς τη λειτουργία ενός modem και να περιγράφεις τα χαρακτηριστικά επικοινωνίας με modems.
- Να κατονομάζεις μερικά βασικά τοπικά δίκτυα μετρήσεων.

8.1

Εισαγωγή

Η μεταφορά δεδομένων από τα σημεία, που λαμβάνονται οι μετρήσεις, μέχρι τους τόπους επεξεργασίας πραγματοποιείται, συνήθως, με τοπικά δίκτυα μετρήσεων, που υποστηρίζονται από ειδικά πρωτόκολλα, όπως π.χ. το πρωτόκολλο βιομηχανικού αυτοματισμού MAP (manufacturing automation protocol) ή, όταν πρόκειται για απλές εφαρμογές, με σειριακές διασυνδέσεις, όπως η RS-232. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το ψηφιακό σήμα διαμορφώνεται και κωδικοποιείται με τη βοήθεια modem, πριν αποσταλεί για επεξεργασία και ρύθμιση, ώστε να φτάνει χωρίς παραμορφώσεις στον προορισμό του. Ταυτόχρονα, σπουδαίο ρόλο στη μεταφορά των δεδομένων διαδραματίζει το μέσο μεταφοράς. Η ποιότητα και τα χαρακτηριστικά του μέσου αυτού καθορίζουν και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του δικτύου.

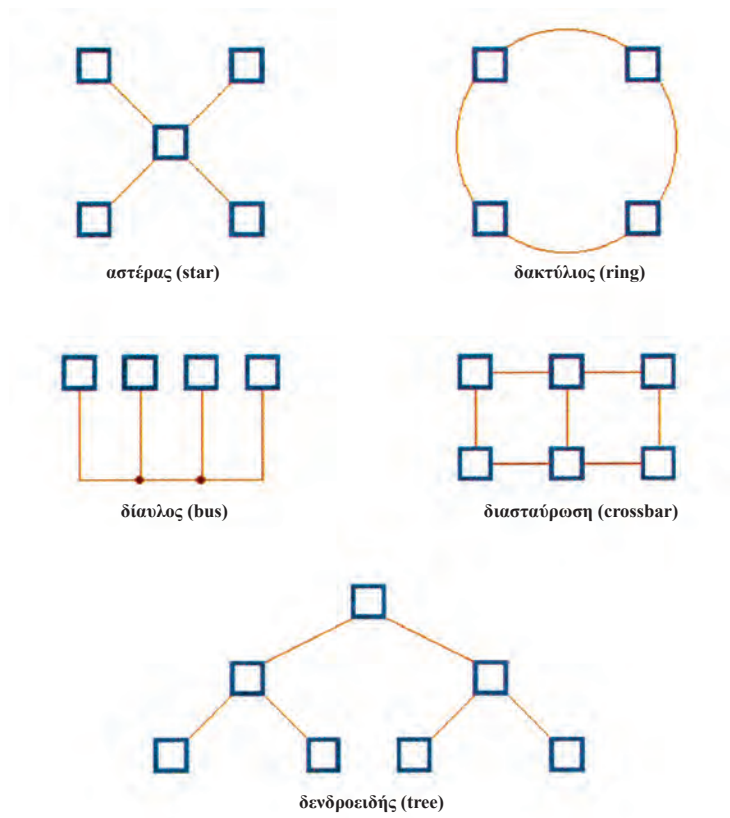
Τελευταία, ως ιδανικότερη γραμμή μεταφοράς έχει καθιερωθεί η οπτική ίνα.

8.2 Τύποι Δικτύων- Δίκτυα Μετρήσεων

Ως **δίκτυο υπολογιστών** (computer network) νοείται σύνολο υπολογιστών, που συνδέονται μεταξύ τους επιτυγχάνοντας ανταλλαγή πληροφοριών και επικοινωνίας. Οι υπολογιστές, που συγκροτούν το δίκτυο, ονομάζονται **κόμβοι** (nodes) και το μέσο σύνδεσης τους ονομάζεται **φορέας** (medium). Η επικοινωνία μεταξύ των υπολογιστών επιτυγχάνεται είτε με πραγματικές ζεύξεις, με ομοαξονικά καλώδια και οπτικές ίνες, είτε με ραδιοζεύξεις και δορυφορικές συνδέσεις. Η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων διαφέρει από δίκτυο σε δίκτυο ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής και τη μετράμε σε bits/sec (bps). Συνήθως, έχουμε ταχύτητες 45-150bps στο χαμηλό φάσμα συχνοτήτων, 1800-9600bps στο φάσμα φωνής και περισσότερο από 500000bps στο φάσμα ευρείας ζώνης. Στην περίπτωση των συστημάτων μέτρησης, τα δίκτυα υπολογιστών χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν τις πληροφορίες από τα αισθητήρια στα κεντρικά σημεία ελέγχου, ώστε να ρυθμιστούν οι παράγοντες, που διέπουν τη διεργασία, που βρίσκεται σε εξέλιξη. Έπειτα, τόσο τα ρυθμισμένα σήματα όσο και οι αρχικές μετρήσεις στέλνονται στο κεντρικό υπολογιστικό σύστημα για περαιτέρω επεξεργασία. Βέβαια, τα αισθητήρια δεν απαιτούν συνδέσεις του τύπου «όλοι με όλους», σε αντίθεση με τα συστήματα πολλαπλών επεξεργασιών, που μοιράζονται τις ίδιες πηγές. Αυτό έχει σαν συνέπεια η υλοποίηση της τοπολογίας κατανεμημένου συστήματος I/O να καθίσταται πιο απλή. Εν γένει, η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας γίνεται με τα παρακάτω κριτήρια:

- τον αριθμό των κόμβων κατανομής και συλλογής δεδομένων
- τη γεωγραφική τους συγκέντρωση
- το εύρος ζώνης των σημάτων, που συλλέγονται

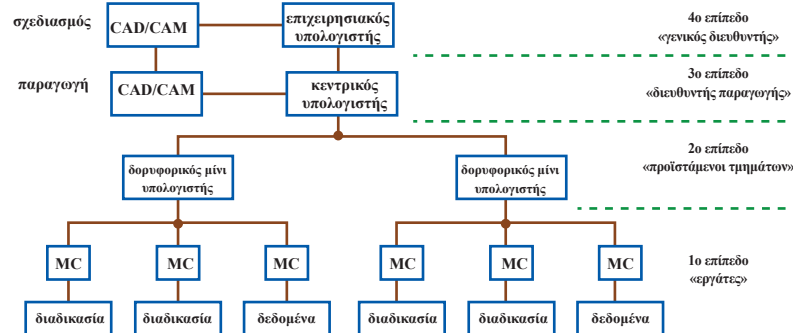
Στο σχήμα 8.2.1 φαίνονται οι πιο συνηθισμένοι τύποι δικτύων, που συναντώνται σε χώρους παραγωγής. Η τοπολογία **δένδρου** (tree topology) εφαρμόζεται σε συστήματα I/O πραγματικού χρόνου, που εκτείνονται σε μεσαία έκταση. Η τοπολογία **αστέρα** (star topology) είναι στοιχειώδης τύπος της τοπολογίας δένδρου. Για μεγαλύτερα και πιο εκτεταμένα δίκτυα, οι τοπολογίες **διαύλου** (bus topology) προσφέρουν εξαιρετική αξιοπιστία και μικρή πολυπλοκότητα, αν και η ύπαρξη αισθητήρων ευρείας ζώνης αυτόματα περιορίζει το δίκτυο σε λίγους κόμβους. Ο ίδιος περιορισμός ισχύει και για την τοπολογία δακτυλίου (ring topology). Ωστόσο, η τοπολογία διαύλου είναι λιγότερο πολύπλοκη. Τέλος, οι τοπολογίες **διασταύρωσης** (crossbar) προσφέρουν εξίσου καλή αξιοπιστία. Για μεγάλο αριθμό κόμβων προσφέρουν μεγαλύτερη χωρητικότητα στη διακίνηση πληροφορίας ή εύρος ζώνης. Το μόνο μειονέκτημα των τοπολογιών αυτών συνίσταται στις υψηλές απαιτήσεις διασύνδεσής τους.



Σχήμα 8.2.1. Τοπολογίες κατανεμημένων I/O δικτύων

8.3 Πρότυπα Δικτύων Μετρήσεων

Στο σημερινό βιομηχανικό περιβάλλον η υλοποίηση ενός συστήματος μέτρησης πραγματοποιείται με βάση την **ιεραρχική δομή** και όχι ένα κεντρικό υπολογιστή, στον οποίο συνδέονται απευθείας όλες οι παραγωγικές διαδικασίες. Σε τέτοιο σύστημα οι υπολογιστές συνδέονται μεταξύ τους με τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις, ώστε να δημιουργείται σύστημα υπολογιστών με **κατανεμημένη επεξεργασία** (distributed computer system) και αποτελούν δίκτυο υπολογιστών. Στο σχήμα 8.3.1 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα ιεραρχικού συστήματος, όπου διακρίνονται τέσσερα ιεραρχικά επίπεδα. Οι υπολογιστές του πρώτου επιπέδου είναι μικροί υπολογιστές «εργάτες» (MC) προσαρμοσμένοι στην ελεγχόμενη διαδικασία και βοηθούν στην επικοινωνία με τα υψηλότερα επίπεδα ιεραρχίας. Ουσιαστικά, πρόκειται για ειδικού σκοπού μικροϋπολογιστές, που συνδέονται απευθείας με αισθητήρια, ελεγκτές, δράστες, PLCs και γενικά ρυθμίζουν την όλη διαδικασία και δίνουν αναφορά προς τα πάνω.



Σχήμα 8.3.1. Τυπικό διάγραμμα ιεραρχικού συστήματος ελέγχου και μετρήσεων

Στο δεύτερο επίπεδο δραστηριοποιούνται οι μίνι υπολογιστές, με αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες, που χρησιμεύουν σαν ελεγκτές περιοχής, δηλαδή, εποπτεύουν τη διαδικασία μέσω των υπολογιστών του πρώτου επιπέδου. Θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν σαν «προϊστάμενοι τμημάτων» των υπολογιστών-εργατών του πρώτου επιπέδου. Στο τρίτο επίπεδο κυριαρχεί ο κεντρικός υπολογιστής (central plant computer), όπου συλλέγει δεδομένα από τους δορυφορικούς υπολογιστές και παράγει πληροφόρηση για το ανώτερο επίπεδο. Ο κεντρικός υπολογιστής, που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σαν «διευθυντής παραγωγής», συνεπικοινωνεί από τον ειδικό υπολογιστή CAD/CAM στην εφαρμογή τεχνικών CIM (computer integrated manufacture), δηλαδή από τον «υποδιευθυντή παραγωγής». Στο τέταρτο επίπεδο υπάρχει ο επιχειρησιακός (corporate) υπολογιστής, που ελέγχει την απόδοση του συστήματος, και ο ειδικός υπολογιστής για σχεδιασμό. Ο «γενικός διευθυντής», λοιπόν, και ο «διευθυντής σχεδιασμού και έρευνας» μπορούν να επικοινωνούν μέσω τηλεφωνικών γραμμών, δορυφορικών ζευξέων, οπτικών ινών, κ.ά.

Η διάρθρωση αυτή του πρότυπου βιομηχανικού δικτύου μετρήσεων και ελέγ-

χου δεν είναι υποχρεωτική. Εξαρτάται αποκλειστικά από το σχεδιαστή και την ελεγχόμενη διαδικασία. Ωστόσο, η ιεραρχική δομή προσφέρει μεγάλη ευελιξία και παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την κλασική αντίληψη της διασύνδεσης σε ένα και μόνο υπολογιστή, όπως:

- δυνατότητα σταδιακής ανάπτυξης του συστήματος
- πλεονασμό (redundancy) του συστήματος και αλληλοκάλυψη, αφού σε περίπτωση βλάβης ενός υπολογιστή υπάρχουν άλλοι να συμπληρώσουν το κενό
- ελεγχόμενο κόστος ανάπτυξης λογισμικού, αφού κάθε εφαρμογή μπορεί να αναπτυχθεί ξεχωριστά χωρίς διακοπές στη συνήθη λειτουργία του συστήματος

Ένα από τα προβλήματα στη σχεδίαση και ανάπτυξη δικτύων είναι, ότι οι διάφοροι υπολογιστές και συσκευές, που συνεργάζονται με αυτούς, πρέπει να είναι συμβατοί μεταξύ τους, δηλαδή να μπορούν να επικοινωνούν σωστά μεταξύ τους. Αν και η επικοινωνία τους βασίζεται σε παλμοσειρές, που αναπαριστούν τα δεδομένα, ο τύπος και το περιεχόμενο των παλμοσειρών διαφέρει από υπολογιστή σε υπολογιστή. Εκείνο, που χρειάζεται, είναι καθορισμένες διαδικασίες κατά την ανταλλαγή των δεδομένων, που θα ακολουθούνται από όλες τις συσκευές και θα υποστηρίζονται από όλους τους κατασκευαστές. Μια ομάδα τέτοιων εντολών και διαδικασιών ορίζει ένα **τηλεπικοινωνιακό πρωτόκολλο**. Στη δεκαετία του '80 αναπτύχθηκε και καθιερώθηκε το **πρωτόκολλο βιομηχανικού αυτοματισμού** (MAP: manufacturing automation protocol), επιταχύνοντας την υιοθέτηση μοναδικού πρωτοκόλλου για όλες τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Το MAP είναι ομάδα προτύπων για το σχεδιασμό τοπικών δικτύων σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, που έχουν ιεραρχική δομή, όπως αυτή, που περιγράφηκε παραπάνω. Χρησιμοποιεί τοπολογία διαύλου (bus), εκπομπή ευρείας ζώνης και ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 10Mbits/sec. Το MAP βασίζεται στις προδιαγραφές του διεθνούς οργανισμού τυποποίησης ISO, που αναφέρονται ως OSI (open system interconnection) και αποτελούν καθιερωμένο πρότυπο αναφοράς.

8.4 Μέσα Μετάδοσης

Ως μέσο μετάδοσης ορίζεται το μέσο δια του οποίου διαδίδεται το οποιοδήποτε σήμα. Μπορεί να είναι τηλεφωνικό καλώδιο, ομοαξονικό καλώδιο, οπτική ίνα ή και ραδιοζεύξεις. Πολλές φορές γίνεται σύγχυση μεταξύ του καναλιού και του μέσου. Ως **κανάλι** θεωρούμε εκείνο το υποσύστημα του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, που δέχεται, στην είσοδό του, σύμβολα από τον πομπό (input symbols) και δίνει, στην έξοδο, σύμβολα στο δέκτη (output symbols). Σε ιδανική ζεύξη, η διέλευση του σήματος μέσα από οποιοδήποτε κανάλι πρέπει να το αφήνει ανεπηρέαστο. Στην πραγματικότητα, όμως, το κανάλι διαφοροποιεί το σήμα. Έτσι, το κανάλι μειώνει την ισχύ του σήματος, γεγονός που αποδίδεται με τον όρο **εξασθένηση** (attenuation).

Τα μέσα μετάδοσης διακρίνονται σε **περιορισμένα** (bounded media), όπως είναι οι γραμμές μεταφοράς και σε **μη περιορισμένα**, όπως είναι ο αέρας, το νερό και το διάστημα. Ανάλογα με το φάσμα συχνοτήτων των σημάτων χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα μετάδοσης αυτών:

- Για ακουστικά σήματα (της τάξης των 3kHz) χρησιμοποιούνται τα **τηλεφωνικά καλώδια** ή **συνεστραμμένα ζεύγη**. Επίσης, χρησιμοποιούνται και για μεταφορά σημάτων πολύ χαμηλών συχνοτήτων (VLF: very low frequency, μέχρι 30kHz) και χαμηλών συχνοτήτων (LF: low frequency, μέχρι 300kHz).
- Για σήματα μεσαίων συχνοτήτων (MF: medium frequency, μέχρι 3MHz), υψηλών συχνοτήτων (HF: high frequency, μέχρι 30MHz), πολύ υψηλών συχνοτήτων (VHF: very high frequency, μέχρι 300MHz) και εν μέρει υπερύψων συχνοτήτων (UHF: ultra high frequency, μέχρι 3GHz) υιοθετείται η λύση του **ομοαξονικού καλωδίου**.
- Για ακόμα πιο υψηλές συχνότητες (SHF: super high frequency, μέχρι 30GHz) και μέχρι την περιοχή του υπέρυθρου εφαρμόζεται η λύση των **κυματοδηγών**.
- Για τη ζώνη του υπέρυθρου, ορατού και υπεριώδους φάσματος χρησιμοποιούνται οι **οπτικές ίνες** (optical fibers).

Για τη ζώνη των μακρών κυμάτων (από μερικά kHz ως μερικά MHz) χρησιμοποιείται ο αέρας ως μέσο μετάδοσης, αφού εδώ συναντώνται σήματα ναυσιπλοΐας, AM ραδιοφωνίας και ραδιοερασιτεχνικά κανάλια. Τα ίδια ισχύουν και για τη ζώνη των βραχέων, όπου εκπέμπουν ραδιοερασιτέχνες, αυτοκίνητα (μερικές δεκάδες MHz), FM ραδιοφωνία και VHF τηλεόραση (περίπου 100MHz), αεροναυσιπλοΐα (μερικές εκατοντάδες MHz) και UHF τηλεόραση (μέχρι 1GHz). Πάνω από το 1GHz οι επικοινωνίες στηρίζονται στις μικροκυματικές και δορυφορικές ζεύξεις. Όσον αφορά τα μέσα, που χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη τοπικών δικτύων, με συχνότητες από 100kHz μέχρι 1GHz, συνήθως είναι τα τηλεφωνικά ζεύγη, τα ομοαξονικά καλώδια, ο αέρας αλλά και οι οπτικές ίνες. Το διαδιδόμενο σήμα είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα που, ανάλογα με τη συχνότητά του, παρουσιάζει ιδιομορφίες στη συμπεριφορά του ως προς το μέσο μετάδοσης. Έτσι, με άλλο τρόπο μελετούμε το φωτεινό σήμα, που διαδίδεται, μέσα από οπτικούς κυματοδηγούς και με άλλο τρόπο το εκπεμπόμενο σήμα από κεραία προς τον αέρα. Στην περίπτωση της κεραίας μας ενδιαφέρει η κατευθυντικότητα και η απολαβή της, ενώ στα οπτικά επικεντρώνεται το ενδιαφέρον σε απώλειες από διαθλάσεις, κ.ά.

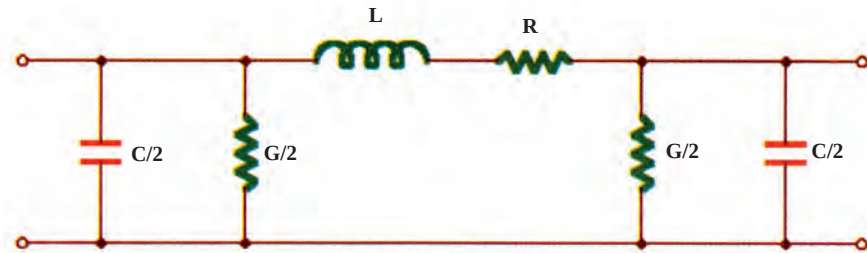
Τα μέσα, που χρησιμοποιούνται, συνήθως, για τα **βιομηχανικά δίκτυα** είναι οι γραμμές μεταφοράς (συνεστραμμένα ζεύγη και ομοαξονικά καλώδια) και οι οπτικοί κυματοδηγοί. Τελευταία αναπτύσσονται και συστήματα με μέσο και τον αέρα (κυρίως συστήματα διάχυτου φάσματος - spread spectrum).

8.5 Γραμμές Μεταφοράς

Οι ψηφιακοί παλμοί δέχονται τις παρακάτω επιδράσεις από τα συστήματα μεταφοράς:

- Εξασθενούν κατά μήκος της γραμμής
- Η γραμμή μεταφοράς ενεργεί σα βαθυπερατό φίλτρο, αποκόπτοντας, έτσι, τις υψηλές συχνότητες
- Οι διαφορετικές συχνότητες, που υπάρχουν στους παλμούς, ταξιδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες προκαλώντας, έτσι, παραμόρφωση φάσης στον παλμό
- Διασκορπίζονται, με αποτέλεσμα να αναμιγνύονται με άλλους παλμούς
- Κακές προσαρμογές στη γραμμή προκαλούν ανακλάσεις (reflections) και, έτσι, φανταστικούς παλμούς (ghost pulses)

Μια **γραμμή μεταφοράς** μεταφέρει ηλεκτρικά σήματα από μια πηγή σε ένα δέκτη. Μπορεί να είναι ομοαξονικό καλώδιο, συνεστραμμένα ζεύγη, κυματοδηγός, κ.ά. Από πλευράς κυκλώματος, οι αγωγοί μιας γραμμής μεταφοράς παρουσιάζουν ωμική αντίσταση και αυτεπαγωγή σε σειρά και αγωγιμότητα και χωρητικότητα παράλληλα μεταξύ των αγωγών.



Σχήμα 8.5.1. Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς

Αν ένα δεδομένο μήκος της γραμμής μεταφοράς χωριζόταν σε πάρα πολλά τμήματα, θα προέκυπτε ένα απειροστό τμήμα με τα βασικά στοιχεία ωμική αντίσταση R , αγωγιμότητα G , αυτεπαγωγή L και χωρητικότητα C . Το κύκλωμα που προκύπτει φαίνεται στο σχήμα 8.5.1. Οι παράμετροι R , L , G και C είναι γνωστές ως οι **κύριες σταθερές γραμμής** και ορίζονται ως:

R : ωμική αντίσταση σειράς (Ω/m)

L : αυτεπαγωγή σειράς (H/m)

G : παράλληλη αγωγιμότητα (S/m)

C : παράλληλη χωρητικότητα (F/m)

Η **χαρακτηριστική εμπέδηση Z_o** είναι ο λόγος τάσης προς ρεύμα για κάθε κύμα, που διαδίδεται κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς και δίνεται από τη σχέση:

$$Z_o = \frac{V}{I} \quad (\Omega) \quad (8.5.1)$$

Η χαρακτηριστική εμπέδηση μπορεί να μετρηθεί είτε χρησιμοποιώντας γραμμή μεταφοράς απείρου μήκους και μετρώντας την εμπέδηση εισόδου, είτε με κα-

τάλληλο τερματισμό της γραμμής, όπως δείχνεται στο σχήμα 8.5.2.



Σχήμα 8.5.2. Γραμμή μεταφοράς τερματισμένη με Z_o

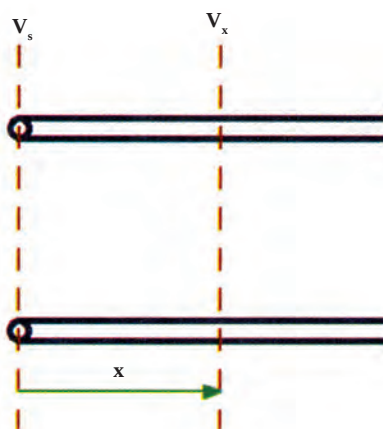
Η χαρακτηριστική εμπίεση μπορεί να προσεγγιστεί σε ορισμένες περιπτώσεις. Έτσι, όταν η συχνότητα είναι μεγάλη ($\omega L \gg R$ και $\omega C \gg G$) ή όταν πρόκειται για γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες ($R=0$ και $G=0$), ισχύει η σχέση:

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\Omega) \quad (8.5.2)$$

Ο **συντελεστής διάδοσης** γ (propagation coefficient) καθορίζει τη μεταβολή του ρεύματος ή της τάσης σε σχέση με την απόσταση x κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς, όπως δείχνεται στο σχήμα 8.5.3. Η κατανομή του ρεύματος και της τάσης κατά μήκος μιας προσαρμοσμένης γραμμής μεταβάλλεται εκθετικά με την απόσταση:

$$I_x = I_s e^{-\gamma x} \quad V_x = V_s e^{-\gamma x} \quad (8.5.3)$$

όπου I_s και V_s το ρεύμα και η τάση αντίστοιχα σε απόσταση $x=0$.



Σχήμα 8.5.3. Τάση σε απόσταση x

Στη γενική περίπτωση ο συντελεστής διάδοσης μπορεί να αναλυθεί σε δύο άλλους συντελεστές. Το **συντελεστή εξασθένισης α** (attenuation coefficient), που καθορίζει τη μεταβολή του μέτρου της τάσης ή του ρεύματος σε σχέση με την απόσταση κατά μήκος της γραμμής, και το **συντελεστή μετατόπισης φάσης β** (phase shift coefficient), που καθορίζει τη μεταβολή της φάσης της τάσης ή του ρεύματος σε σχέση με την απόσταση.

Η **ταχύτητα διάδοσης u** , σε γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες ή στις υψηλές συχνότητες, αποδεικνύεται ότι δίνεται από τη σχέση:

$$u = \lambda \cdot f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (8.5.4)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία πεδίων και τη γεωμετρία κανονικών γραμμών, η ταχύτητα διάδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$u = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (8.5.5)$$

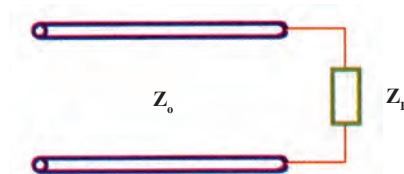
όπου, c η ταχύτητα του φωτός και ϵ η διηλεκτρική σταθερά της γραμμής μεταφοράς.

Όταν ένας παλμός συναντά σημείο κακής προσαρμογής (mismatch) σε ηλεκτρικό κύκλωμα, τότε προκαλείται **ανακλώμενος παλμός** προς τα πίσω από το σημείο αυτό. Αυτός ο **φανταστικός παλμός** (ghost pulse) διαδίδεται προς τα πίσω κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς. Οι παλμοί αυτοί προκαλούν, επίσης, απώλεια της ισχύος του σήματος.

Η χαρακτηριστική εμπίδηση των γραμμών μεταφοράς και οι τερματισμοί είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες για την ελαχιστοποίηση των ανακλάσεων και τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος. Τυπικές γραμμές μεταφοράς, όπως τα ομοαξονικά καλώδια, έχουν χαρακτηριστικές εμπεδήσεις 50Ω για ψηφιακή και 75Ω για αναλογική μετάδοση.

Προσαρμοσμένο τερματισμό έχουμε, όταν η γραμμή μεταφοράς τερματίζεται με αντίσταση ίση με τη χαρακτηριστική εμπίδηση Z_0 . Τότε, η γραμμή συμπεριφέρεται σαν να έχει άπειρο μήκος, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ανακλώμενη ενέργεια. Αν η γραμμή τερματιστεί με οποιαδήποτε άλλη αντίσταση, τότε ανακλάται ενέργεια από τον τερματισμό. Το μέγεθος του ανακλώμενου παλμού καθορίζεται από την εμπίδηση του φορτίου Z_L και τη χαρακτηριστική εμπίδηση Z_0 της γραμμής (σχήμα 8.5.4). Έτσι, ο **συντελεστής ανάκλασης ρ** ορίζεται ως:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (8.5.6)$$



Σχήμα 8.5.4. Προσαρμογή φορτίου σε γραμμή μεταφοράς

Αν $V_{\pi\rho}$ η τάση του προσπίπτοντος παλμού στο φορτίο, $V_{\alpha\nu}$ η τάση του ανακλώμενου παλμού από το φορτίο και $V_{\mu\epsilon\tau}$ η τάση του μεταφερόμενου παλμού, θα ισχύει:

$$V_{\mu\epsilon\tau} = V_{\pi\rho} + V_{\alpha\nu} \quad (8.5.7)$$

και

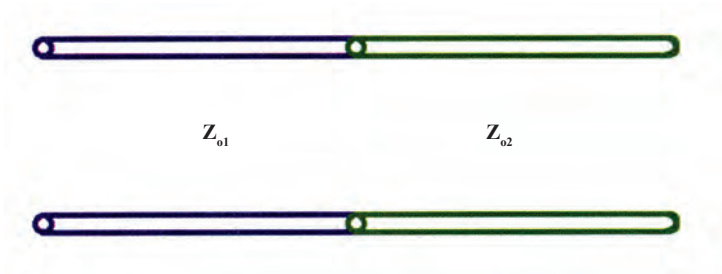
$$V_{\alpha\nu} = \rho \cdot V_{\pi\rho} \quad (8.5.8)$$

- Αν η εμπέδηση φορτίου είναι ίση με τη χαρακτηριστική εμπέδηση, θα έχουμε $\rho=0$ και δεν ανακλάται παλμός από το φορτίο. Τότε, $V_{\mu\epsilon\tau}=V_{\pi\rho}$.
- Αν η εμπέδηση φορτίου είναι μεγαλύτερη από τη χαρακτηριστική εμπέδηση, θα έχουμε $\rho>0$. Τότε, έχουμε ανακλώμενο παλμό, που ταξιδεύει πίσω κατά μήκος της γραμμής προς την πηγή και $V_{\mu\epsilon\tau}>V_{\pi\rho}$.
- Αν η εμπέδηση φορτίου είναι μικρότερη από τη χαρακτηριστική εμπέδηση θα έχουμε $\rho<0$. Τότε, έχουμε ανακλώμενο παλμό, που ταξιδεύει πίσω κατά μήκος της γραμμής προς την πηγή και $V_{\mu\epsilon\tau}<V_{\pi\rho}$.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι καθώς αυξάνεται ή μειώνεται η τάση, μεταβάλλεται και η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Καθώς αυξάνει η τάση και μειώνεται το ρεύμα, μπορεί να αποδειχθεί, ότι δεν υπάρχει αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος. Ουσιαστικά, ο ανακλώμενος παλμός είναι αυτός, που δημιουργεί την απώλεια της μεταφερόμενης ισχύος. Αποδεικνύεται, ότι ο συντελεστής ανάκλασης για το ρεύμα είναι αντίθετος με αυτόν της τάσης.

Αν δύο γραμμές μεταφοράς ενωθούν (σχήμα 8.5.5), μια με χαρακτηριστική εμπέδηση Z_{o1} και μια με χαρακτηριστική εμπέδηση Z_{o2} , τότε ο συντελεστής ανάκλασης για την ένωση των δύο γραμμών δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{Z_{o2} - Z_{o1}}{Z_{o2} + Z_{o1}} \quad (8.5.9)$$



Σχήμα 8.5.5. Ένωση δύο γραμμών μεταφοράς

Παράδειγμα

Έστω, παλμός 3V, που διαδίδεται κατά μήκος καλωδίου με $Z_{o1}=50\Omega$ και συναντά καλώδιο με χαρακτηριστική εμπέδηση $Z_{o2}=100\Omega$. Τότε, ο ανακλώμενος και μεταφερόμενος παλμός μπορούν να βρεθούν ως εξής:

$$\rho = \frac{Z_{o2} - Z_{o1}}{Z_{o2} + Z_{o1}} \Rightarrow \rho = \frac{100 - 50}{100 + 50} = \frac{1}{3}$$

$$V_{av} = \rho \cdot V_{\pi\rho} \Rightarrow V_{av} = \frac{1}{3} \cdot 3 = 1V$$

$$V_{μετ} = V_{\pi\rho} + V_{av} \Rightarrow V_{μετ} = 3 + 1 = 4V$$

Αν αλλάζουμε τα καλώδια, ώστε να είχαμε $Z_{o1}=100\Omega$ και $Z_{o2}=50\Omega$, θα παίρναμε:

$$\rho = \frac{Z_{o2} - Z_{o1}}{Z_{o2} + Z_{o1}} \Rightarrow \rho = \frac{50 - 100}{50 + 100} = -\frac{1}{3}$$

$$V_{av} = \rho \cdot V_{\pi\rho} \Rightarrow V_{av} = -\frac{1}{3} \cdot 3 = -1V$$

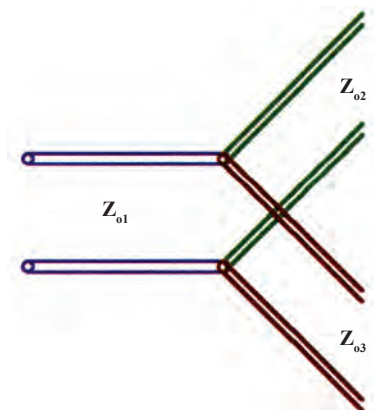
$$V_{μετ} = V_{\pi\rho} + V_{av} \Rightarrow V_{μετ} = 3 - 1 = 2V$$

Σε πολλές περιπτώσεις δύο ή περισσότερες γραμμές μεταφοράς συνδέονται παράλληλα στην αρχική απλή γραμμή μεταφοράς, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.5.6. Αν η αρχική γραμμή έχει χαρακτηριστική εμπίεση Z_{o1} και οι δύο παράλληλες γραμμές Z_{o2} και Z_{o3} , τότε η ισοδύναμη εμπίεση εισόδου στον τερματισμό είναι ο παράλληλος συνδυασμός των Z_{o2} και Z_{o3} . Έτσι, η ισοδύναμη εμπίεση φορτίου στην ένωση είναι:

$$Z_p = \frac{Z_{o2} Z_{o3}}{Z_{o2} + Z_{o3}} \quad (8.5.10)$$

και ο συντελεστής ανάκλασης:

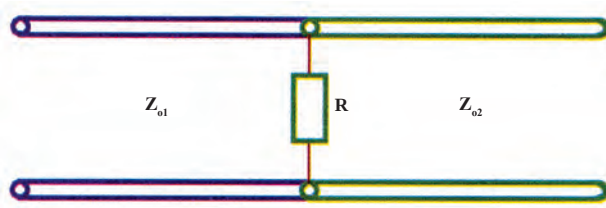
$$\rho = \frac{Z_p - Z_{o1}}{Z_p + Z_{o1}} \quad (8.5.11)$$



Σχήμα 8.5.6. Σύνδεση σε παράλληλες γραμμές μεταφοράς

Οι τερματισμοί μπορούν να **προσαρμοστούν** εισάγοντας μια αντίσταση είτε σε σειρά είτε παράλληλα. Αν η χαρακτηριστική εμπίεση της αρχικής γραμμής είναι μεγαλύτερη από τη συνδεόμενη χαρακτηριστική εμπίεση, τότε μια αντίσταση ίση με τη διαφορά τους συνδέεται σε σειρά με τη συνδεόμενη γραμμή. Έτσι, αν και υπάρχει απώλεια ισχύος, δεν θα έχουμε ανάκλαση από τη νέα γραμμή μεταφοράς, που συνδέουμε.

Αν η χαρακτηριστική εμπίεση της αρχικής γραμμής είναι μικρότερη από τη συνδεόμενη χαρακτηριστική εμπίεση, τότε μια αντίσταση συνδέεται παράλληλα με την ένωση. Για να προσαρμοστεί η ένωση, πρέπει η ισοδύναμη εμπίεση εισόδου του τερματισμού να είναι ίση με εκείνη της αρχικής γραμμής, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.5.7.



Σχήμα 8.5.7. Προσαρμογή τερματισμού

Άρα, αν γραμμή μεταφοράς με χαρακτηριστική εμπίεση Z_{o2} συνδεθεί σε γραμμή με Z_{o1} από την οποία προέρχεται ο παλμός, θα πρέπει να γίνει προσαρμογή με αντίσταση R , ως εξής:

- Αν $Z_{o1} > Z_{o2}$, η R συνδέεται σε σειρά, ώστε $Z_{o1} = Z_{o2} + R$, έτσι: $R = Z_{o1} - Z_{o2}$.
- Αν $Z_{o1} < Z_{o2}$, η R συνδέεται παράλληλα, ώστε $Z_{o1} = Z_{o2} // R$, έτσι:

$$R = Z_{o1} Z_{o2} / (Z_{o2} - Z_{o1}).$$

Ένα βραχυκύκλωμα παρουσιάζει μηδενική εμπίεση. Αν το βραχυκύκλωμα χρησιμοποιηθεί ως φορτίο, τότε ο συντελεστής ανάκλασης είναι $\rho = -1$. Η εμπίεση ανοικτού κυκλώματος είναι άπειρη και σε αυτή την περίπτωση έχουμε συντελεστή ανάκλασης $\rho = +1$. Έτσι, με ανοικτό κύκλωμα ως φορτίο ο ανακλώμενος παλμός είναι ίσος με τον προσπίπτοντα, ενώ με βραχυκύκλωμα ως φορτίο ο ανακλώμενος παλμός είναι αντίθετος του προσπίπτοντα.

Τυπική τεχνική για την **εύρεση σφαλμάτων σε υπόγεια καλώδια** είναι η παρακάτω. Στέλνουμε ένα παλμό κατά μήκος της γραμμής και μετρούμε το χρόνο, που χρειάζεται, για να επιστρέψει ένας ανακλώμενος παλμός. Από τη στιγμή που γνωρίζουμε τη ταχύτητα διάδοσης του παλμού, μπορούμε να βρούμε τη θέση του σφάλματος πολλαπλασιάζοντας τη ταχύτητα διάδοσης με το μισό του μετρούμενου χρόνου. Αν βρεθεί βραχυκύκλωμα στη γραμμή, τότε επιστρέφεται ένας ανεστραμμένος παλμός ($\rho = -1$). Αν υπάρξει ανοικτό κύκλωμα, τότε επιστρέφεται ένας θετικός παλμός ($\rho = +1$).

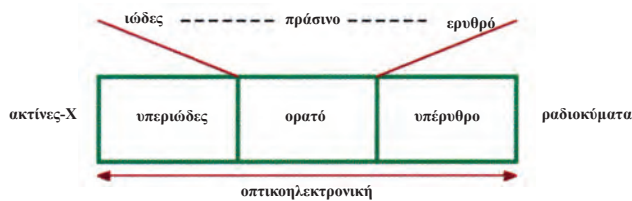
Όπως αποδεικνύεται, η εξασθένιση σε γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας του σήματος και αντιστρόφως ανάλογη με τις

διαστάσεις του αγωγού. Καθώς η συχνότητα αυξάνεται, όλο και λιγότερη ισχύς φθάνει στο δέκτη. Αν η συχνότητα είναι πάρα πολύ μεγάλη, τότε στο δέκτη δε θα φθάνει καθόλου ισχύς. Η συχνότητα, για την οποία η ισχύς, που φθάνει στο δέκτη είναι η μισή της ισχύος, που εκπέμπεται από τον πομπό, ονομάζεται **εύρος ζώνης μέσου** (medium bandwidth). Η συχνότητα αυτή δείχνει την ικανότητα του μέσου να επιτρέπει τη διάδοση κύματος μέχρι ορισμένη συχνότητα. Για να έχουμε ικανοποιητική διάδοση σε ένα μέσο, πρέπει το εύρος ζώνης του σήματος να είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του μέσου διάδοσης.

8.6 Οπτικές Ίνες

Μια από τις μεγαλύτερες ανακαλύψεις στις επικοινωνίες δεδομένων είναι η χρήση του φωτός για μεταφορά ψηφιακών παλμών μέσα από οπτικές ίνες. Ένα τέτοιο σύστημα έχει σχεδόν απεριόριστη χωρητικότητα. Θεωρητικά, έχει 200000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από ένα δορυφορικό σύστημα τηλεόρασης. Η **οπτικοηλεκτρονική** είναι ο κλάδος των ηλεκτρονικών, που ασχολείται με τις οπτικές ίνες. Οι ηλεκτρονικές συσκευές, που χρησιμοποιούν φως, λειτουργούν στο οπτικό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος συχνοτήτων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.6.1. Υπάρχουν τρεις βασικές περιοχές στο οπτικό φάσμα συχνοτήτων:

- Η **υπέρυθρη περιοχή** περιλαμβάνει μεγάλα μήκη κύματος φωτός, που δεν μπορεί να δει το ανθρώπινο μάτι
- Η **ορατή περιοχή** περιλαμβάνει μήκη κύματος φωτός, που μπορεί να δει το ανθρώπινο μάτι
- Η **υπεριώδης περιοχή** περιλαμβάνει μικρά μήκη κύματος φωτός, που δεν μπορεί να δει το ανθρώπινο μάτι



Σχήμα 8.6.1. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα οπτικοηλεκτρονικής

Πριν περιγράψουμε την αρχή λειτουργίας της οπτικής ίνας, πρέπει να υπενθυμίσουμε την έννοια του δείκτη διάθλασης, που είναι γνωστή από τη φυσική, και να περιγράψουμε πηγές παραγωγής φωτός και τρόπους ανίχνευσής του. Ο **δείκτης διάθλασης** n δύο υλικών καθορίζει το μέγεθος της διάθλασης στην επαφή δύο υλικών με διαφορετικές πυκνότητες. Ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας διάδοσης μιας ακτίνας φωτός στο κενό c προς την ταχύτητα διάδοσης στο υλικό u και δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{c}{u} \quad (8.6.1)$$

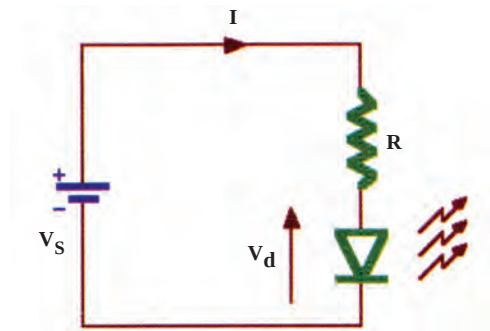
Στον πίνακα 8.6.1 δείχνονται μερικοί τυπικοί δείκτες διάθλασης.

Υλικό	Δείκτης διάθλασης
Αέρας	1.0003
Νερό	1.33
Γυαλί	1.5-1.9
Διαμάντι	2.0-2.42
Αρσενικούχο γάλλιο (GaAs)	3.6
Πυρίτιο	3.4

Πίνακας 8.6.1. Δείκτες διάθλασης ορισμένων υλικών

Μια **δίοδος φωτοεκπομπής LED** (light emitting diode) μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε φωτεινή ενέργεια. Το σχήμα 8.6.2 δείχνει ένα απλό κύκλωμα πόλωσης, όπου τάση εφαρμόζεται στη LED από πηγή συνεχούς τάσης. Η αντίσταση φορτίου περιορίζει το ρεύμα, που διέρχεται από τη δίοδο. Η τιμή της δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{V_s - V_d}{I} \quad (8.6.2)$$



Σχήμα 8.6.2. Πηγή φωτός LED

Συνήθως, το απαιτούμενο ρεύμα για την παραγωγή ικανοποιητικής έντασης φωτός είναι περίπου 10mA.

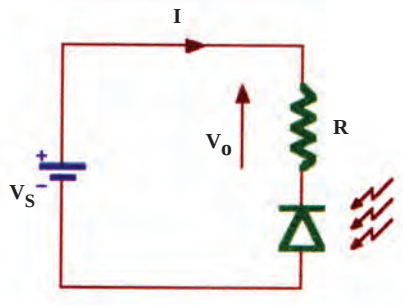
Το μήκος κύματος του φωτός, που εκπέμπεται από τη δίοδο, εξαρτάται από τον τύπο του ημιαγωγού, που χρησιμοποιείται. Το **αρσενικούχο γάλλιο GaAs** εκπέμπει στην υπέρυθρη περιοχή και έτσι, χρησιμοποιείται ως πηγή υπέρυθρου φωτός. Αν το εμπλουτίσουμε και με άλλα υλικά, μπορούμε να πάρουμε μεγαλύτερο εύρος μηκών κύματος. Το **φωσφορούχο γάλλιο GaP** εκπέμπει πράσινο φως και μπορεί να εκπέμψει ερυθρό ανάλογα με τον εμπλουτισμό. Το φωσφορούχο αρσενικούχο γάλλιο GaAsP εκπέμπει πορτοκαλί-ερυθρό ανάλογα με την ποσότητα του GaP στο υλικό. Με τη σωστή ποσότητα GaP μπορούμε να πάρουμε κίτρινο φως.

Άλλη πηγή φωτός, που χρησιμοποιείται στην οπτικοηλεκτρονική, είναι το **laser** (light amplification by stimulation emission of radiation). Μια **laser δίοδος έγχυσης ILD** (injection laser diode) είναι ηλεκτρονικό laser, που εκπέμπει μονοχρωματικό φως, δηλαδή, φως ενός μόνο μήκους κύματος. Οι ILDs πλεονεκτούν έναντι των LEDs επειδή:

- Παράγουν περισσότερο εστιασμένο φως
- Η ισχύς ακτινοβολίας εξόδου τους είναι μεγαλύτερη, συνήθως 5mW για τις ILDs και 0.5mW για τις LEDs
- Προσφέρουν υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, αφού μπορούν να μεταβούν γρηγορότερα από την κατάσταση ON στην κατάσταση OFF
- Παράγουν μονοχρωματικό φως

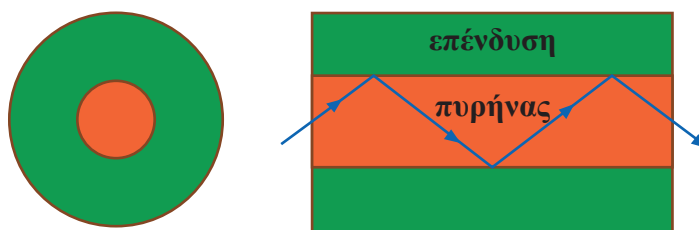
Από την άλλη μειονεκτούν, επειδή είναι ακριβότερες, έχουν μικρότερο χρόνο ζωής και εξαρτώνται περισσότερο από τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Οι **φωτοδίοδοι** και τα **φωτοτρανσίστορ** μετατρέπουν τη φωτεινή ενέργεια (φωτόνια) σε ηλεκτρική ενέργεια. Η λειτουργία τους βασίζεται στο γεγονός, ότι ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων, που δημιουργούνται σε ημιαγώγιμο υλικό είναι ανάλογος με την ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Η φωτοδίοδος πολώνεται ανάστροφα, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.6.3. Το ρεύμα, που δημιουργείται, είναι συνήθως πολύ μικρό, μόλις λίγες εκατοντάδες μA .



Σχήμα 8.6.3. Φωτοδίοδος

Οι **οπτικές ίνες** είναι διαφανείς, διηλεκτρικοί κύλινδροι, που περιβάλλονται από δεύτερο διηλεκτρικό κύλινδρο. Το φως μεταφέρεται με διαδοχικές ανακλάσεις στην επιφάνεια επαφής ενός **πυρήνα** (εσωτερικός κύλινδρος) (core) και της **επένδυσης** του (εξωτερικός κύλινδρος) (cladding). Στο σχήμα 8.6.4 φαίνεται μια τομή μιας οπτικής ίνας και ο τρόπος διάδοσης του φωτός μέσα σε αυτή.

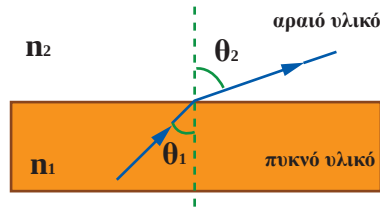


Σχήμα 8.6.4. Διάδοση φωτός σε οπτική ίνα

Οι ανακλάσεις συμβαίνουν, επειδή ο πυρήνας έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από την επένδυση και, επομένως, μεγαλύτερη πυκνότητα. Απότομες διαφορές στο δείκτη διάθλασης αναγκάζουν το φως να ανακλάται στα τοιχώματα μεταξύ πυρήνα και επένδυσης. Έτσι, το φως μεταφέρεται από την πηγή φωτός σε ανιχνευτή φωτός στο άλλο άκρο της οπτικής ίνας.

Οι οπτικές ίνες μεταφέρουν το φως με ολικές εσωτερικές ανακλάσεις. Οι ακτίνες φωτός, όταν περνούν από οπτικά διαφανές υλικό σε άλλο διαφορετικής πυκνότητας, παθαίνουν διάθλαση, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.6.5. Η αλλαγή της κατεύθυνσης προσδιορίζεται με το **νόμο του Snell**:

$$n_1 \eta \mu \theta_1 = n_2 \eta \mu \theta_2 \quad (8.6.3)$$



Σχήμα 8.6.5. Διάθλαση φωτός

Η γωνία πρόσπτωσης, για την οποία η ακτίνα αναγκάζεται να ταξιδέψει κατά μήκος της επιφάνειας επαφής, δηλαδή $\theta_2=90^\circ$, ονομάζεται **κρίσιμη γωνία θ_c** και δίνεται από τη σχέση:

$$\eta \mu \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (8.6.4)$$

Αποδεικνύεται ότι, όταν για τη γωνία πρόσπτωσης θ_1 ισχύει η σχέση 8.6.5, τότε η ακτίνα παθαίνει ολική ανάκλαση από την εξωτερική επένδυση. Έτσι, καταφέρει και διαδίδεται μέσω της οπτικής ίνας, όπως δείχνει και το σχήμα 8.6.4. Αυτή η γωνία ονομάζεται **γωνία αποδοχής** (acceptance angle).

$$\eta \mu \theta_1 < \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (8.6.5)$$

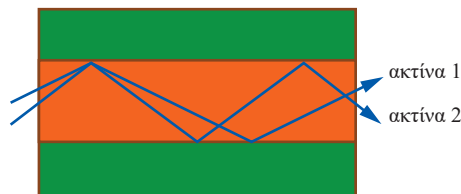
Οι απώλειες των οπτικών ινών έχουν σαν αποτέλεσμα την ελάττωση της μεταφερόμενης φωτεινής ισχύος. Αυτό μειώνει το εύρος ζώνης συχνοτήτων του συστήματος, το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας, την απόδοση και τη χωρητικότητα του όλου συστήματος. Οι βασικές απώλειες είναι:

- Απώλειες **απορρόφησης** (absorption), που οφείλονται σε προσμίξεις του γυαλιού της οπτικής ίνας, με αποτέλεσμα το μεταφερόμενο κύμα να απορροφάται και να μετατρέπεται σε θερμότητα.
- **Σκέδαση** του υλικού (material scattering), που οφείλεται σε πολύ μικρές ανωμαλίες στην κατασκευή της ίνας, με αποτέλεσμα να προκαλείται η διάθλαση του φωτός. Αυτό αναγκάζει το φως να απλώνεται σε πολλές κατευθύνσεις. Η απώλεια αυτή επηρεάζει περισσότερο το ορατό φως παρά το υπέρυθρο.
- **Χρωματική παραμόρφωση** (chromatic distortion), που οφείλεται στη διαφορετική ταχύτητα, με την οποία ταξιδεύει κάθε κύμα μέσα στην ίνα. Έτσι, τα κύματα φθάνουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στο δέκτη προκαλώντας παραμορφωμένο σχήμα παλμού. Η παραμόρφωση αυτή ελαττώνεται όταν χρησιμοποιούμε μονοχρωματικό φως.
- Απώλειες **ακτινοβολίας** (radiation), που οφείλονται σε μικρές κάμψεις της ίνας, με αποτέλεσμα να σκεδάζεται το κύμα.
- **Τροποποιητική διασπορά** (modal dispersion), που οφείλεται στους διαφορετικούς δρόμους, που ακολουθεί το φως μέσα στην ίνα. Κάθε δρόμος αντιστοιχεί σε διαφορετικό χρόνο διάδοσης μέσα στην ίνα. Αυτοί οι διαφο-

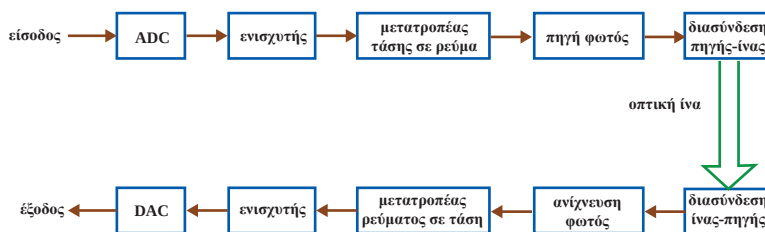
ρετικοί δρόμοι περιγράφονται ως **modes**. Στο σχήμα 8.6.6 φαίνονται δύο ακτίνες, που ακολουθούν διαφορετικούς δρόμους. Η ακτίνα 2 κάνει περισσότερο χρόνο να φτάσει στο δέκτη από την ακτίνα 1.

- Απώλειες **σύζευξης** (coupling), που οφείλονται σε κακές προσαρμογές σε τερματισμούς μεταξύ ίνας-ίνας, LED-ίνας, κ.ά.

Ένα σύστημα επικοινωνίας με χρήση οπτικής ίνας αποτελείται από τρεις βασικές συνιστώσες, τον πομπό (transmitter), το δέκτη (receiver) και την ίνα (fiber). Ο πομπός αποτελείται από μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ADC, μετατροπέα τάσης σε ρεύμα, πηγή φωτός και σύνδεσμο πηγής-ίνας. Η ίνα είναι κατασκευασμένη είτε από πάρα πολύ καθαρό γυαλί, είτε από πλαστικό. Ο δέκτης έχει σύνδεσμο ανίχνευσης ίνας-φωτός, φωτοανιχνευτή, μετατροπέα ρεύματος σε τάση, ενισχυτή και μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό DAC, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.6.7. Η πηγή φωτός είναι είτε LED είτε ILD και το φως, που εκπέμπεται, είναι ανάλογο με το ρεύμα που εφαρμόστηκε.



Σχήμα 8.6.6. Διάδοση φωτός σε διαφορετικά modes



Σχήμα 8.6.7. Επικοινωνία με οπτική ίνα

Ο πίνακας 8.6.2 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά δύο τυπικών οπτικών ινών. Είναι φανερό, ότι οι διάμετροι του πυρήνα και της επένδυσης είναι σχετικά μικρές και μάλιστα κλάσματα του χιλιοστού. Συνήθως, η επένδυση καλύπτεται από **κάλυμμα**, που με τη σειρά του έχει επικάλυψη που ονομάζεται **χιτώνιο** (jacket). Έτσι, η ίνα αποκτά μηχανική αντοχή και είναι πιο εύκολο να τη χρησι-

μποποιήσουμε. Στην περίπτωση της 50/125μm γυάλινης ίνας η εξωτερική διάμετρος είναι 3.2mm και η διάμετρος του πυρήνα μόλις 50μm. Συνήθως, οι γυάλινες ίνες έχουν καλύτερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά από τις αντίστοιχες πλαστικές, αλλά είναι πιο εύκολο να καταστραφούν. Η γυάλινη ίνα έχει βελτιωμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων και μικρότερη εξασθένηση.

	50/125μm glass	200μm PCS
Κατασκευή	Γυαλί	SiO ₂ με πλαστική επικάλυψη (plastic coated silica)
Διάμετρος πυρήνα	50μm	200μm
Διάμετρος επένδυσης	125μm	389μm
Διάμετρος καλύμματος	250μm	600μm
Υλικό χιτωνίου	Πολυαιθυλένιο	PVC
Ολική διάμετρος	3.2mm	4.8mm
Σύνδεση	9mm SMA	9mm SMA
Εύρος ζώνης συχνοτήτων	400MHz/km	25MHz/km
Ελάχιστη ακτίνα κάμψης	30mm	50mm
Περιοχή θερμοκρασιών	-15°C με +60°C	-10°C με +50°C
Εξασθένηση στα 820nm	3dB/km	7dB/km

Πίνακας 8.6.2. Χαρακτηριστικά τυπικών οπτικών ινών

Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα της χρήσης των οπτικών ινών είναι τα παρακάτω:

- Τα οπτικά συστήματα έχουν μεγαλύτερη **χωρητικότητα** εξαιτίας των μεγάλων οπτικών συχνοτήτων. Οι μεταλλικοί αγωγοί περιέχουν χωρητικότητα και αυτεπαγωγή, με αποτέλεσμα να ενεργούν ως βαθυτερατά φίλτρα και να περιορίζουν τα εύρη ζώνης συχνοτήτων και τη ταχύτητα διάδοσης.
- Τα οπτικά συστήματα δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο **crosstalk**, που εμφανίζεται μεταξύ των καλωδίων, λόγω μαγνητικής επαγωγής. Οι γυάλινες ίνες δεν είναι αγωγοί του ηλεκτρισμού, οπότε δεν αναπτύσσεται και μαγνητικό πεδίο. Στους μεταλλικούς αγωγούς, το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται, όταν οι αγωγοί βρίσκονται ο ένας κοντά στον άλλο.
- Τα οπτικά καλώδια δεν υποφέρουν από στατικές **παρεμβολές**, που προκαλούνται από έκθεση στο φως, ηλεκτρικούς κινητήρες, φθορισμό και άλλες πηγές ηλεκτρικού θορύβου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι οι ίνες δεν είναι αγωγοί του ηλεκτρισμού.
- Τα οπτικά συστήματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη **ηλεκτρική απομόνωση**, με αποτέλεσμα να προστατεύονται από εξωτερικές πηγές. Για παράδειγμα, αν ο δέκτης χτυπηθεί από υψηλό παλμό φωτός, μπορεί να καταστραφεί ο ίδιος, αλλά ο υψηλός παλμός δεν μπορεί να ταξιδέψει κατά μήκος της οπτικής ίνας και να καταστρέψει ευαίσθητα υλικά, όπως η πηγή του φωτός. Επίσης, ο ηλεκτρικός θόρυβος δεν μπορεί να ταξιδέψει προς τα πίσω από το δέκτη προς την πηγή.
- Τα οπτικά καλώδια δεν ακτινοβολούν ενέργεια και, επομένως, δεν αλληλεπιδρούν με άλλα επικοινωνιακά συστήματα.

- Τα οπτικά καλώδια είναι περισσότερο ανθεκτικά στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Λειτουργούν σε μεγαλύτερη περιοχή θερμοκρασιών, σε σχέση με τα χάλκινα καλώδια, και επηρεάζονται λιγότερο από διαβρωτικά υγρά και αέρια.
- Τα οπτικά καλώδια είναι ασφαλέστερα και ευκολότερα να εγκατασταθούν και να επισκευαστούν, καθώς το γυαλί και το πλαστικό δεν σχετίζονται με ηλεκτρικά ρεύματα και τάσεις. Οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοντά σε εύφλεκτα υγρά και αέρια χωρίς την ανησυχία έκρηξης ή πυρκαγιάς. Επίσης, είναι μικρότερα και ελαφρύτερα από τα χάλκινα καλώδια.

8.7 Μετάδοση Ψηφιακού Σήματος

Ένα ψηφιακό μήνυμα είναι διατεταγμένη ακολουθία συμβόλων από αλφάβητο πεπερασμένου μεγέθους M . Για δυαδικές επικοινωνίες, το αλφάβητο απαρτίζεται από τα ψηφία 0 και 1 ($M=2$). Το ψηφιακό μήνυμα μεταδίδεται με ρυθμό σηματοδότησης (signaling rate), ενώ την ποιότητα επικοινωνίας χαρακτηρίζει η πιθανότητα εμφάνισης λανθασμένου ψηφίου (**BER**: bit error probability).

Κάθε κανάλι με εύρος ζώνης συχνοτήτων BW έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει δεδομένα με **μέγιστο ρυθμό** (data rate ή signaling rate):

$$C_{\max} = 2 \cdot BW \cdot \log_2 M \quad (\text{bits/sec}) \quad (8.7.1)$$

Για παράδειγμα, κανάλι ομοαξονικού καλωδίου με εύρος ζώνης συχνοτήτων 6MHz μπορεί να μεταδώσει δυαδικά ψηφία ($M=2$) με μέγιστο ρυθμό δεδομένων 12Mbits/sec. Στην πράξη, ο μέγιστος ρυθμός είναι μικρότερος, καθώς η μετάδοση δέχεται την επίδραση θορύβου. Ο παραπάνω τύπος δόθηκε από τον Nyquist και διαμορφώθηκε από τον Shannon. Έτσι, υπό κατάλληλη κωδικοποίηση, η μέγιστη χωρητικότητα ενός καναλιού, σε συνδυασμό με το λόγο σήματος προς θόρυβο SNR, δίνεται από τη σχέση:

$$C_{\max} = BW \cdot \log_2 (1 + \text{SNR}) \quad (\text{bits/sec}) \quad (8.7.2)$$

Για παράδειγμα, σήμα video απαιτεί SNR γύρω στα 50dB (10^5) για σωστή μετάδοση. Υποθέτοντας, ότι εφαρμόζεται κατάλληλη διαμόρφωση, θα μπορούσαμε σε κανάλι ομοαξονικού καλωδίου με εύρος 6MHz να επιτύχουμε ρυθμό:

$$C_{\max} = 6 \cdot 10^6 \cdot \log_2 (1 + 10^5) \approx 99.6 \quad \text{Mbits/sec}$$

Στην πράξη, για κανάλι CATV (με χαρακτηριστική αντίσταση 75Ω και εύρος ζώνης 4MHz) ο θερμικός θόρυβος σε θερμοκρασία δωματίου είναι μεγάλος. Δεν μπορούμε, επομένως, να ενισχύουμε απεριόριστα το σήμα, χωρίς να ενισχύουμε και το θόρυβο, με σκοπό να επιτύχουμε πολύ μεγάλα SNR και να αυξήσουμε το ρυθμό δεδομένων μέσα από κανάλι με δοσμένο εύρος ζώνης. Αν είναι δυνατό, για υψηλότερους ρυθμούς χρησιμοποιούμε και κανάλι με μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων.

Για να επιτύχουμε ρυθμούς κοντά στη μέγιστη χωρητικότητα καναλιού, απαιτείται και κατάλληλη κωδικοποίηση. Από την άποψη αυτή, οι καθιερωμένες σημερινές κωδικοποιήσεις δεν είναι άριστες, οπότε και οι χωρητικότητες των καναλιών απέχουν αρκετά από τις μέγιστες. Για παράδειγμα, η προδιαγραφή IEEE802.4 για το MAP προβλέπει SNR στα 50dB σε ζώνη 12MHz. Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη χωρητικότητα του καναλιού θα ήταν περίπου 199.2Mbits/sec. Ο προβλεπόμενος, όμως, από το πρωτόκολλο ρυθμός είναι στα 10Mbits/sec, ο οποίος επιτυγχάνεται με διαμόρφωση AM/PSK και κωδικοποίηση duobinary. Στα διάφορα τοπικά δίκτυα, ανάλογα με τις εφαρμογές, που εξυπηρετούν, εφαρμόζονται για διάφορους λόγους διάφορες κωδικοποιήσεις, με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση του καναλιού και την αποφυγή λαθών.

8.8 Κωδικοποίηση

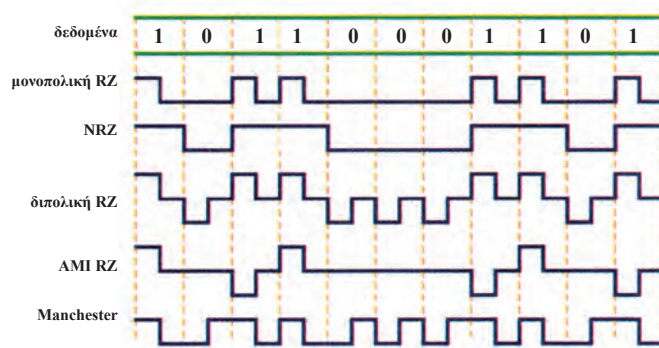
Ως **κωδικοποίηση** (coding) ορίζεται η διαδικασία της επεξεργασίας συμβόλων ('0' και '1'), που αποσκοπεί στη βελτίωση των τηλεπικοινωνιών, όταν η πληροφορία είναι ψηφιακή ή μπορεί να παρασταθεί με διακριτά σύμβολα. Επίσης, ως **διαμόρφωση** (modulation) ορίζεται η διαδικασία της επεξεργασίας σήματος, που αποσκοπεί στην αποτελεσματικότερη μετάδοση.

Ειδικότερα, η διαδικασία της κωδικοποίησης μετασχηματίζει ψηφιακό σήμα σε νέα ακολουθία συμβόλων, ενώ η **αποκωδικοποίηση** (decoding) μετατρέπει κωδικοποιημένη ακολουθία στο πραγματικό αρχικό μήνυμα. Οι περισσότερες μέθοδοι κωδικοποίησης στηρίζονται σε λογικά κυκλώματα και δυαδικά σύμβολα, που αντιστοιχούν στο '0' και το '1'.

Ας υποθέσουμε, ότι ένας υπολογιστής ή μια πηγή ψηφιακού σήματος διαθέτει μήνυμα προς αποστολή με περισσότερα από δύο σύμβολα ($M > 2$). Μια μη κωδικοποιημένη μετάδοση θα απαιτούσε από αυτή την πηγή M διαφορετικές κυματομορφές. Εναλλακτικά, κάθε σύμβολο θα μπορούσε να παρασταθεί με δυαδική λέξη αποτελούμενη από K ψηφία. Δεδομένου ότι υπάρχουν 2^K διαφορετικές λέξεις που σχηματίζονται από τα K ψηφία, χρειάζονται τουλάχιστον $K \log_2 M$ ψηφία, για να κωδικοποιηθούν τα M σύμβολα. Αν η πηγή συμβόλων παρήγαγε r σύμβολα ανά δευτερόλεπτο, τότε θα είχαμε $K \cdot r$ ψηφία ανά δευτερόλεπτο και οι απαιτήσεις μετάδοσης σε BW, θα ήταν κατά K φορές πολλαπλάσιες του BW του μη κωδικοποιημένου σήματος. Ως αντιστάθμισμα στο αυξανόμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων, η κωδικοποίηση προσφέρει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Απαιτείται λιγότερη πολυπλοκότητα εξαρτημάτων για το χειρισμό ενός δυαδικού σήματος.
- Ο θόρυβος έχει μικρότερη επίδραση σε δυαδικό σήμα παρά σε σήμα αποτελούμενο από M διαφορετικές κυματομορφές. Έτσι, το λαμβανόμενο κωδικοποιημένο σήμα στο δέκτη εμπεριέχει λιγότερα σφάλματα και η παραμόρφωση είναι πιο εύκολο να ανιχνευθεί.

Ουσιαστικά, λοιπόν, η κωδικοποίηση αποσκοπεί στην επιτυχημένη λήψη πληροφοριών. Υπάρχουν διάφορες μορφές κωδικοποίησης, μερικές από τις οποίες δίνονται αμέσως παρακάτω και περιγράφονται στο σχήμα 8.8.1.



Σχήμα 8.8.1. Τύποι ψηφιακής κωδικοποίησης

- **Μονοπολική επιστροφής στο μηδέν** (unipolar RZ), όπου το 1 αναπαριστάνεται με τετραγωνικό παλμό μισού εύρους (τάση στο μισό της περιόδου) και το 0 με ανυπαρξία παλμού. Είναι απλή κωδικοποίηση, αλλά ευαίσθητη στο θόρυβο, περιέχει dc συνιστώσα, έχει μεγάλες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης συχνοτήτων και δεν έχει δυνατότητα ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων.
- **Μη επιστροφής στο μηδέν** (NRZ), όπου το 1 αναπαριστάνεται με τετραγωνικό παλμό, που καλύπτει όλη την περίοδο και το 0 με ανυπαρξία παλμού.
- **Διπολική επιστροφής στο μηδέν** (bipolar RZ), όπου το 1 μεταφέρεται με κάποιον παλμό $p(t)$ και το 0 με $-p(t)$. Είναι καλύτερη από τη μονοπολική RZ ως προς την αναισθησία στο θόρυβο.
- **Εναλλακτικής πολικότητας επιστροφής στο μηδέν** (AMI RZ: alternate mark inversion), όπου το 1 μεταφέρεται ως παλμός $p(t)$ ή $-p(t)$, ανάλογα με το αν ο προηγούμενος παλμός ήταν $-p(t)$ ή $p(t)$ και το 0 αναπαρίσταται με ανυπαρξία παλμού. Παρέχει τη δυνατότητα ανίχνευσης απλού σφάλματος (μη αντιστροφή παλμού), αλλά απαιτεί περισσότερη ισχύ από τη διπολική.
- **Manchester** (split-phase), όπου το 1 μεταφέρεται με τετραγωνικό παλμό $p(t)$ και το 0 με τον αντίθετο παλμό $-p(t)$. Η τάση $p(t)$ για το πρώτο μισό της περιόδου είναι θετική (+1) και για το υπόλοιπο μισό αρνητική (-1). Χαρακτηριστικό της είναι η ανυπαρξία dc συνιστώσας και εφαρμόζεται στο δίκτυο Ethernet. Απαιτεί μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων και είναι ενδεδειγμένη για περιορισμένα χωρικά δίκτυα.

Οι παράγοντες, που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή ενός από τους παραπάνω τύπους κωδικοποίησης είναι:

- Η **φασματική πυκνότητα ισχύος** με την έννοια της προσαρμογής του φάσματος των σημάτων στην απόκριση συχνοτήτων του χρησιμοποιούμενου μέσου ή του εύρους ζώνης του καναλιού (π.χ. απόρριψη dc συνιστωσών).
- Ο **χρονισμός** (clocking), που αναφέρεται στην κατάλληλη επιλογή ρολογιού για το συγχρονισμό πομπού-δέκτη. Η τεχνική Manchester συνδυάζει την πληροφορία με το σήμα χρονισμού σε ένα σήμα.
- Η δυνατότητα **ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων** (error detection).
- Ο **θόρυβος**, την επίδραση του οποίου, σε συγκεκριμένης ισχύος και εύρους ζώνης σήμα, μπορούμε να εξουδετερώσουμε με κατάλληλη κωδικοποίηση.
- Το **κόστος** και η **πολυπλοκότητα**.

Η διαμόρφωση (modulation) χρησιμοποιείται κατά κόρο για τη μετάδοση πληροφορίας. Η έννοια της διαμόρφωσης συνίσταται στο γεγονός της διαφοροποίησης κάποιας παραμέτρου του ηλεκτρομαγνητικού κύματος του αρχικού μηνύματος από άλλο σήμα, που ονομάζεται **φέρων σήμα** ή **φορέας** (carrier wave). Αυτό είναι, συνήθως, σήμα υψηλών συχνοτήτων, καθώς η πραγματική πληροφορία βρίσκεται σε χαμηλές συχνότητες και είναι ακατάλληλη για μετάδοση σε απόσταση. Έτσι, με τη βοήθεια της διαμόρφωσης, η πληροφορία μετακινείται σε υψηλότερες συχνότητες και μπορεί να μεταδοθεί.

Σήμερα, υπάρχουν πολλά είδη διαμόρφωσης που διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, την **αναλογική** και τη **ψηφιακή διαμόρφωση**. Οι αναλογικές μέθοδοι, αν και έχουν ξεπεραστεί, εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται λόγω της μακρόχρονης και εξειδικευμένης εφαρμογής τους. Ανάμεσα στις αναλογικές μεθόδους, ως πιο σημαντικές διακρίνουμε τη διαμόρφωση πλάτους (AM: amplitude modulation), τη διαμόρφωση συχνότητας (FM: frequency modulation) και τη διαμόρφωση φάσης (PM: phase modulation).

Η **διαμόρφωση πλάτους AM** είναι η απλούστερη μορφή διαμόρφωσης, όπου το αρχικό σήμα μεταβάλλει το πλάτος του υψηλότερης συχνότητας φέροντος σήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.9.1. Ο **δείκτης διαμόρφωσης m** είναι ο λόγος του πλάτους του αρχικού σήματος προς το πλάτος του φέροντος. Είναι πάντοτε μικρότερος από τη μονάδα και δίνεται από τη σχέση:

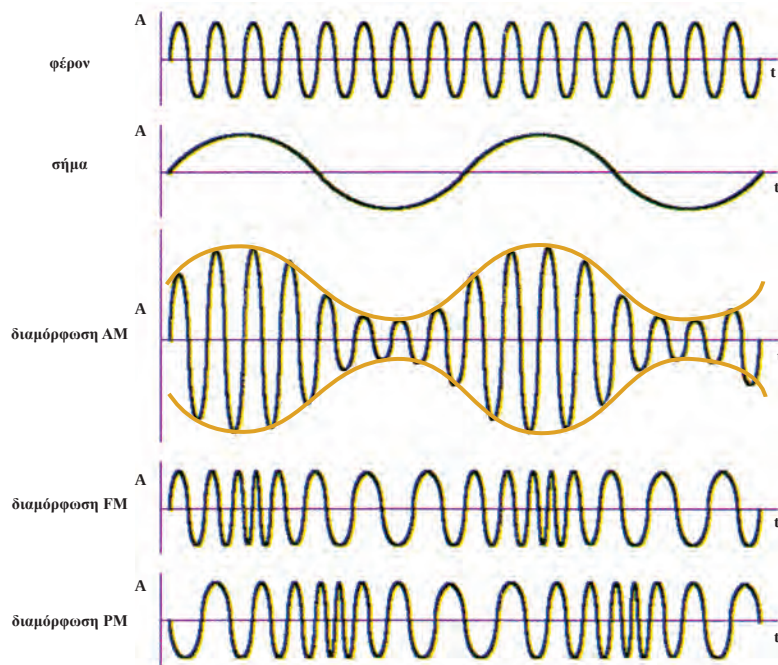
$$m = \frac{V_{\text{σήματος}}}{V_{\text{φέροντος}}} \quad (8.9.1)$$

Η διαμόρφωση AM είναι ευαίσθητη στο θόρυβο και την απόσβεση, καθώς εξαρτάται από το πλάτος του διαμορφωμένου σήματος.

Στη **διαμόρφωση συχνότητας FM**, το αρχικό σήμα μεταβάλλει τη συχνότητα του φέροντος σήματος (σχήμα 8.9.1). Η διαμόρφωση FM προτιμάται έναντι της AM, επειδή επηρεάζεται λιγότερο από το θόρυβο, αφού η πληροφορία περιέχεται στην μεταβολή της συχνότητας και όχι στο πλάτος, που μπορεί να εξασθενήσει. Έτσι, ο μόνος θόρυβος, που επηρεάζει το σήμα, περιορίζεται σε μικρή ζώνη συχνοτήτων, που περιέχονται στο φέρον. Ο **βρόχος κλειδώματος φάσης (PLL: phased-locked loop)** είναι τυπική συσκευή, που χρησιμοποιείται στην FM διαμόρφωση, η οποία μετατρέπει το λαμβανόμενο διαμορφωμένο κατά FM σήμα σε σήμα τάσης.

Η FM ραδιοφωνική εκπομπή απαιτεί πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων από την AM διαμόρφωση. Συνήθως, μεταδίδει από 88 ως 108MHz. Η απόκλιση συχνότητας σε κάθε σήμα είναι 75kHz, δηλαδή, η μικρότερη συχνότητα είναι 75kHz κάτω από τη συχνότητα του φέροντος και η μεγαλύτερη 75kHz πάνω από τη συχνότητα του φέροντος. Έτσι, το εύρος ζώνης συχνοτήτων του σήματος είναι 150kHz.

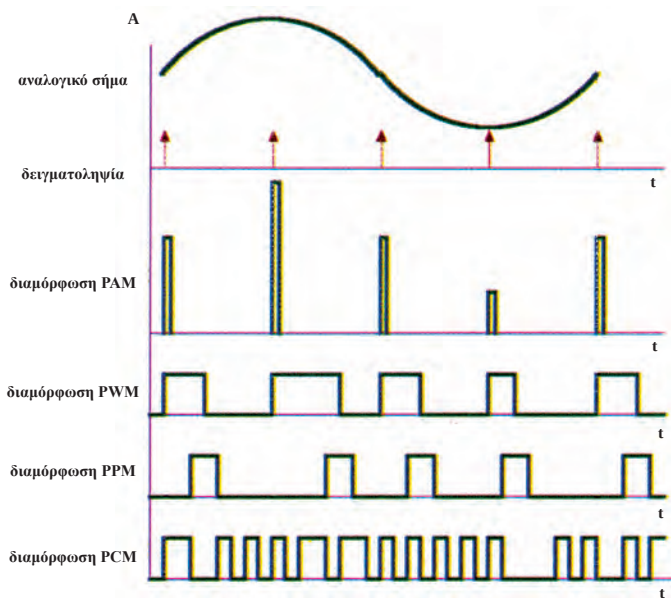
Στη **διαμόρφωση φάσης PM** το αρχικό σήμα μεταβάλλει τη φάση του φέροντος σήματος (σχήμα 8.9.1). Όπως η FM διαμόρφωση, έτσι και η PM επηρεάζεται λιγότερο από το θόρυβο, αφού η πληροφορία περιέχεται στη φάση και όχι στο πλάτος.



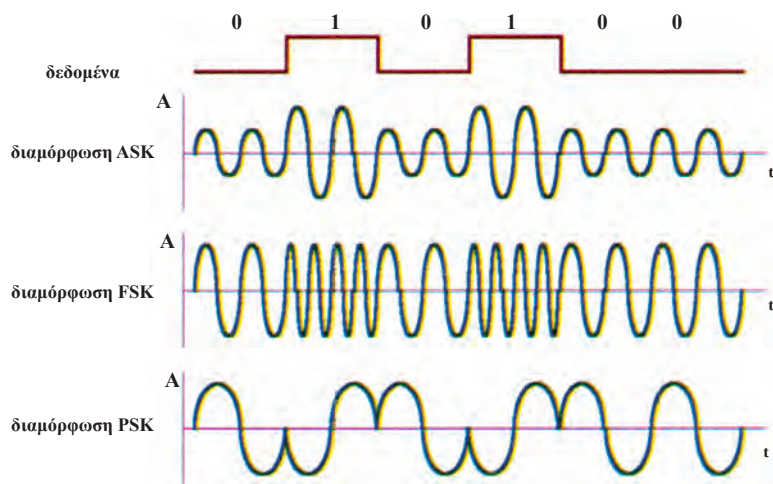
Σχήμα 8.9.1. Είδη αναλογικής διαμόρφωσης

Στα τοπικά δίκτυα εφαρμόζεται ψηφιακή διαμόρφωση, η οποία διακρίνεται σε **διαμόρφωση κατά παλμούς (PWM: pulse wave modulation)** και σε **διαμόρφωση συνεχούς κύματος (CWM: continuous wave modulation)**. Στη διαμόρφωση κατά παλμούς, η πληροφορία κωδικοποιείται σε σειρά παλμών με μεταβολή του πλάτους των παλμών (PAM: pulse amplitude modulation), του εύρους των παλμών (PWM: pulse width modulation) και της θέσης των παλμών (PPM: pulse position modulation). Όταν ο παλμός PAM κωδικοποιηθεί επιπλέον στο δυαδικό σύστημα, προκύπτει η **παλμοκωδική διαμόρφωση (PCM: pulse code modulation)**. Όλα τα παραπάνω δείχνονται στο σχήμα 8.9.2.

Στη διαμόρφωση συνεχούς κύματος, το ψηφιακό σήμα (modulating signal) επιδρά σε συνεχές φέρον ημιτονικής μορφής με τη βοήθεια διαμορφωτή, οπότε παράγεται το διαμορφωμένο σήμα. Ανάλογα με το χαρακτηριστικό μέγεθος του φέροντος, που μεταβάλλεται, διακρίνουμε **διαμόρφωση πλάτους (ASK: amplitude shift keying)**, **διαμόρφωση συχνότητας (FSK: frequency shift keying)** και **διαμόρφωση φάσης (PSK: phase shift keying)**, που φαίνονται στο σχήμα 8.9.3.



Σχήμα 8.9.2. Είδη διαμόρφωσης κατά παλμούς



Σχήμα 8.9.3. Είδη διαμόρφωσης συνεχούς κύματος

Στη διαμόρφωση ASK, το πλάτος του φέροντος μεταβάλλεται μεταξύ δύο καταστάσεων. Η FSK χρησιμοποιεί δύο συχνότητες για τη μεταφορά του 0 και του 1, δηλαδή, ανώτερη και κατώτερη συχνότητα. Στην PSK το 0 μεταφέρεται χωρίς αλλαγή της φάσης, ενώ το 1 αντιστοιχεί σε αλλαγή πρόσημου του πλάτους, δηλαδή, αλλαγή φάσης κατά 180° .

Στα τοπικά δίκτυα χρησιμοποιούνται, κυρίως, οι διαμορφώσεις PSK και FSK, λόγω της εύκολης πραγματοποίησης και του χαμηλού ρυθμού σφαλμάτων BER. Η μικρή πιθανότητα σφάλματος ή ο μικρός ρυθμός σφαλμάτων είναι από τα βασικά χαρακτηριστικά ποιότητας μιας διαμόρφωσης. Άλλο βασικό χαρακτηριστικό είναι η απόδοση εύρους ζώνης (BWE: bandwidth efficiency), που ορίζεται ως ο λόγος ρυθμού δεδομένων προς το εύρος ζώνης.

8.10

Επικοινωνίες
Βασικής-
Ευρείας
Ζώνης

Όταν σε κανάλι συστήματος μέτρησης, το σήμα μεταδίδεται χωρίς διαμόρφωση, η επικοινωνία χαρακτηρίζεται σα **βασικής ζώνης** (baseband), ενώ όταν χρησιμοποιείται διαμόρφωση, η επικοινωνία χαρακτηρίζεται ως **ευρείας ζώνης** (broadband). Στην περίπτωση της επικοινωνίας ευρείας ζώνης, όταν διατίθεται μόνο ένα κανάλι, η επικοινωνία χαρακτηρίζεται ως **φέρουσας ζώνης** (carrierband). Τυπικό παράδειγμα δικτύου με επικοινωνία βασικής ζώνης είναι το Ethernet, ενώ το MAP απαιτεί επικοινωνία ευρείας ζώνης με ένα ή πολλά κανάλια.

Οι επικοινωνίες βασικής ζώνης διακρίνονται σε αναλογικές και ψηφιακές ανάλογα με το είδος του σήματος, που μεταδίδεται. Στα τοπικά δίκτυα, οι περισσότερες περιπτώσεις επικοινωνιών βασικής ζώνης αφορούν ψηφιακές επικοινωνίες. Καθώς το μήκος του καναλιού αυξάνεται, μειώνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται **επαναλήπτες** (repeaters). Αυτοί μπορεί να είναι ενισχυτές ή αναγεννητές.

Στις επικοινωνίες βασικής ζώνης μεγάλο κλάσμα της ενέργειας διασκορπίζεται στις χαμηλές συχνότητες. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση, το φάσμα μετακινείται προς υψηλότερες συχνότητες, όπου μειώνονται οι επιδράσεις του θορύβου και των παρεμβολών, δίνεται η δυνατότητα πολυπλεξίας και καθίσταται δυνατή η καλύτερη αξιοποίηση των συσκευών μετάδοσης. Όταν το μέσο μετάδοσης είναι ο αέρας, η ισχύς του σήματος ακτινοβολείται με τη βοήθεια κεραιών. Το μέγεθος των κεραιών είναι της τάξης του $\lambda/10$, όπου λ το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου σήματος. Για την καλύτερη εκμετάλλευση του μέσου μετάδοσης διοχετεύονται σε αυτό πολλά σήματα με τη μέθοδο της πολυπλεξίας. Όταν το κάθε σήμα έχει στη διάθεσή του όλο το μέσο για καθορισμένο χρονικό διάστημα, αναφερόμαστε σε **χρονική πολυπλεξία** (TDM: time division multiplexing). Όταν το εύρος ζώνης του μέσου διανέμεται σε ζώνες, ώστε κάθε σήμα να εκπέμπεται σε καθορισμένη ζώνη, αναφερόμαστε σε **συχνοτική πολυπλεξία** (FDM: frequency division multiplexing). Στην TDM ο χρόνος διαιρείται σε χρονικά παράθυρα (time slots), στη διάρκεια των οποίων μόνο ένα σήμα διαβιβάζεται στο μέσο μετάδοσης.

Τα σήματα, που πολυπλέκονται χρονικά, είναι κατά κανόνα ψηφιακά και προέρχονται από ψηφιακούς κωδικοποιητές. Όταν τα χρονικά παράθυρα για κάθε σήμα είναι προκαθορισμένα, η πολυπλεξία ονομάζεται **σύγχρονη**. Όταν η κατανομή γίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις, η πολυπλεξία ονομάζεται **ασύγχρονη**.

Σήματα με τον ίδιο ρυθμό μπορούν να πολυπλεχθούν ανά bit ή ανά ομάδα bits, που έχει την έννοια της λέξης (word). Όταν διαβιβάζονται σήματα με διαφορετικούς ρυθμούς, στα σήματα με μεγαλύτερους ρυθμούς διατίθενται περισσότερα χρονικά παράθυρα μέσα σε έναν κύκλο πολυπλεξίας. Απαιτείται συγχρονισμός, ο οποίος επιτυγχάνεται με την πρόσθεση bits συγχρονισμού και έλεγχος, που επιτυγχάνεται με bits ελέγχου.

Για την εξουδετέρωση της εξασθένησης, που προκαλεί το μέσο εκπομπής χρησιμοποιούνται ενισχυτές. Όταν τα σήματα έχουν στάθμη μεγαλύτερη από την επιθυμητή, χρησιμοποιούνται **εξασθενητές** (attenuators). Για τη διάδοση του σήματος από μια γραμμή σε άλλη ή σε άλλες, χρησιμεύουν οι **συζεύκτες**

(couplers), οι **διαχωριστές** (splitters) και τα **taps**. Οι διαχωριστές διαιρούν την ισχύ του σήματος σε ίσα μεγέθη, για να τροφοδοτήσουν πολλές γραμμές. Οι συζεύκτες λειτουργούν παρόμοια, χωρίς να διαχωρίζουν σε ίσα τμήματα την ισχύ. Χρησιμοποιούν στη σύνδεση τερματικών μέσω μικρών καλωδίων (drop cables) με τα καλώδια, που μεταφέρουν την πληροφορία (trunk cables). Έτσι, το μέγιστο τμήμα της ισχύος συνεχίζει να διαδίδεται στο κεντρικό καλώδιο. Συνδυασμοί συζευκτών και διαχωριστών ονομάζονται taps ή multitaps και χρησιμοποιούν στη διανομή του σήματος σε διάφορα τερματικά.

Η επικοινωνία ευρείας ζώνης εισάγει τη μετάδοση σήματος με modem, μετατρέποντας σήματα βασικής ζώνης σε διαμορφωμένα σήματα, που μεταδίδονται μέσω ομοαξονικού καλωδίου σε μεγάλες αποστάσεις.

Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα σειριακής μετάδοσης βασικής ζώνης με ρυθμούς της τάξης των 19.2kbs σε υπολογιστές είναι η θύρα **UART** (universal asynchronous receiver and transitter).

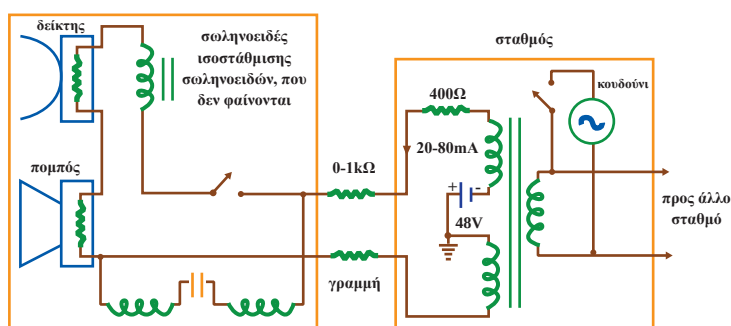
8.11

Τηλεφωνική
Γραμμή

Παρά το γεγονός, ότι στη σημερινή κοινωνία της πληροφορίας έχουν αναπτυχθεί ποικίλα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, πολλά από τα οποία είναι παγκόσμια, για τη μεταφορά δεδομένων σε μακρινές αποστάσεις συνεχίζεται η χρήση του τηλεφωνικού δικτύου. Το τηλεφωνικό δίκτυο αποτελεί μέχρι σήμερα τη βάση των τηλεπικοινωνιών, διότι είναι το μεγαλύτερο και πλέον εξαπλωμένο στον κόσμο. Βέβαια, στις μέρες μας, η τηλεφωνική γραμμή αντικαθίσταται από μικροκυματικές και δορυφορικές τηλεπικοινωνίες, αλλά η χρήση τους αναφέρεται κυρίως σε διακρατικές τηλεπικοινωνίες και την κινητή τηλεφωνία. Αυτό που πραγματικά συμβαίνει, είναι ο σταδιακός περιορισμός των κλασσικών επικοινωνιών.

Έτσι, όταν ο αριθμός των μεταφερόμενων δεδομένων δεν είναι μεγάλος, χρησιμοποιούμε **τηλεφωνικό κανάλι**, το οποίο μας διατίθεται μετά από κλήση, όπως όταν γίνεται τηλεφωνική κλήση (switched line). Όταν ο όγκος των δεδομένων είναι μεγάλος και υπάρχει ανάγκη για συνεχή και άμεση επικοινωνία, χρησιμοποιούνται **μισθωμένες γραμμές** (leased lines).

Στην επικοινωνία μεταξύ δυο ψηφιακών τερματικών συσκευών, η μεταφορά δεδομένων μπορεί να γίνει μόνο προς μια κατεύθυνση (**simplex** transmission) ή και προς τις δυο κατευθύνσεις (**duplex** transmission). Στη δεύτερη περίπτωση, όταν οι δυο σταθμοί, που είναι σε επικοινωνία, μπορούν να εκπέμπουν μόνο εναλλακτικά (κάθε χρονική στιγμή εκπέμπει μόνο ένας), αναφερόμαστε σε **half-duplex** επικοινωνία. Όταν και οι δυο μπορούν ταυτόχρονα να εκπέμπουν αναφερόμαστε σε full-duplex επικοινωνία. Στην περίπτωση της half-duplex επικοινωνίας απαιτείται δισύρματη σύνδεση, ενώ στη **full-duplex** απαιτείται τετρασύρματη σύνδεση.



Σχήμα 8.11.1. Απλοποιημένο κύκλωμα τηλεφώνου

Στο σχήμα 8.11.1 φαίνεται το απλοποιημένο κύκλωμα τηλεφώνου. Πηγή συνεχούς τάσης 48V με αντίσταση περιορισμού σε σειρά από το κέντρο τροφοδοτεί με ρεύμα το τηλέφωνο. Καθώς η αντίσταση του μικροφώνου μεταβάλλεται με την ομιλία (γενικότερα τις ακουστικές συχνότητες), το ρεύμα διαμορφώνεται και το ακουστικό σήμα διαβιβάζεται στο άλλο τηλέφωνο. Η συνήθης αντίσταση στο

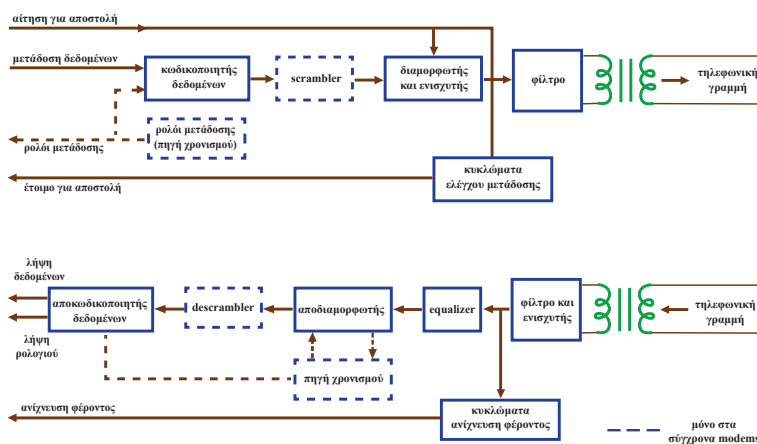
εναλλασσόμενο είναι 600Ω , αλλά αν το μήκος γραμμής είναι μεγάλο, μπορεί να είναι μεγαλύτερη και η πρόσθεση δεύτερης τηλεφωνικής συσκευής, μπορεί να τη μειώσει μέχρι και 50%. Όταν σηκώσουμε το ακουστικό και κλείσει ο διακόπτης η συνεχής τάση πέφτει κατά 6V περίπου και το συνεχές ρεύμα (20mA το ελάχιστο) ρέει μέσα στο κύκλωμα διεγείροντας το κέντρο, ώστε να στείλει το σήμα ελεύθερου ή κατειλημμένου. Στη συνέχεια ακολουθούν οι διαδικασίες επιλογής, κ.ά.

8.12 Modems

Η λέξη modem προκύπτει από τις λέξεις διαμορφωτής και αποδιαμορφωτής (**MO**dulator/**DE**Modulator). Το modem συνδέει ψηφιακές συσκευές σε τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Συνήθως, χρησιμοποιείται σε τηλεφωνικές γραμμές που έχουν εύρος ζώνης συχνοτήτων από 400Hz έως 3.4kHz. Αν οι ψηφιακοί παλμοί εφαρμόζονταν απευθείας στη γραμμή, θα τους παίρναμε παραμορφωμένους στην άλλη άκρη. Αν ένα modem συνδέεται στη δημόσια τηλεφωνική γραμμή θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτελεί τα παρακάτω:

- Να καλεί αυτόματα άλλο modem χρησιμοποιώντας τεχνική touch-tone ή παλμού.
- Να απαντά αυτόματα σε κλήσεις και να πραγματοποιεί σύνδεση με άλλο modem.
- Να αποσυνδέει τη τηλεφωνική σύνδεση, όταν η μεταφορά δεδομένων έχει ολοκληρωθεί ή, όταν παρουσιάζονται σφάλματα.
- Να μετατρέπει τα ψηφία σε μορφή κατάλληλη για τη γραμμή (διαμορφωτής).
- Να μετατρέπει τα λαμβανόμενα σήματα σε ψηφία (αποδιαμορφωτής).

Στο σχήμα 8.12.1 δείχνεται απλοποιημένο διάγραμμα των βασικών μονάδων, από τις οποίες αποτελείται ένα modem. Το τμήμα μετάδοσης περιλαμβάνει κωδικοποιητή δεδομένων, scrambler, ενισχυτή, πηγή χρονισμού και κυκλώματα ελέγχου μετάδοσης. Από αυτά τα στοιχεία, ο scrambler και η πηγή χρονισμού χρησιμοποιούνται μόνο στα σύγχρονα modems. Ο scrambler προετοιμάζει κατάλληλα τα δεδομένα, ώστε να διαμορφωθούν με προκαθορισμένο αλγόριθμο. Αντίστοιχα κυκλώματα περιλαμβάνει το τμήμα λήψης.



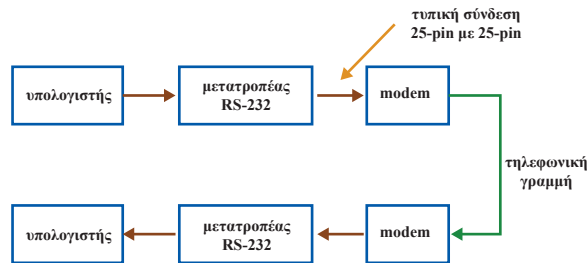
Σχήμα 8.12.1. Διάγραμμα βασικών μονάδων ενός modem

Το σχήμα 8.12.2 δείχνει πως συνδέονται δύο υπολογιστές χρησιμοποιώντας μετατροπείς RS-232 και modems. Το RS-232 είναι συνήθως εσωτερικό κομμάτι του υπολογιστή ενώ το modem μπορεί να βρίσκεται εσωτερικά ή εξωτερικά

του υπολογιστή. Υπάρχουν δύο τύποι κυκλωμάτων διαθέσιμοι από το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο:

- Άμεσης απόστασης επιλογή (DDD: direct distance dialing)
- Μισθωμένη γραμμή (leased line)

Το DDD είναι κύκλωμα επιλογής αριθμών (dial-up), όπου η σύνδεση γίνεται με τον ίδιο τρόπο με ένα συμβατικό τηλέφωνο. Με τις μισθωμένες γραμμές ο συνδρομητής έχει τηλεπικοινωνιακή γραμμή μόνιμα αφιερωμένη σε αυτόν.



Σχήμα 8.12.2. Επικοινωνία υπολογιστών με modem

Τα modems είναι είτε **σύγχρονα** είτε **ασύγχρονα**. Ένα σύγχρονο modem αποκαθιστά το ρολόι στο δέκτη. Δεν υπάρχει ανάγκη για bits αρχής και τέλους σε σύγχρονο modem. Τα ασύγχρονα modems είναι τα πιο διαδεδομένα από παλιά. Η ταχύτητα ενός modem μετράται με το **baud rate** ή **bps** (bits per second).

Τα modems, που χρησιμοποιούν διαμόρφωση FSK, μπορούν να αναπτύξουν μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 1800bps σε κανονική τηλεφωνική γραμμή. Έτσι, χρησιμοποιούνται, συνήθως, για μετάδοση μέχρι τα 1200bps. Για ρυθμούς άνω των 1200bps χρησιμοποιούνται modems με άλλους τύπους διαμορφώσεων.

Στον πίνακα 8.12.1 φαίνονται οι τυποποιήσεις, που έχουν οριστεί από τον οργανισμό CCITT ή ITU (International Telecommunications Union) και σχετίζονται με το RS-232 και τα modems. Τα πιο διαδεδομένα modems χρησιμοποιούν το V.21, V.22, V.22bis, V.23 και V.32.

Για να επικοινωνήσει ένας υπολογιστής με modem στέλνει την εντολή AT. Για παράδειγμα, ATDT είναι η εντολή κλήσης (dial command). Αρχικά, ένα modem βρίσκεται σε κατάσταση εντολών (command mode) και δέχεται εντολές από τον υπολογιστή. Οι εντολές αυτές στέλνονται στα 300bps ή 1200bps (το modem αυτόματα ανιχνεύει ποια ταχύτητα χρησιμοποιείται). Οι περισσότερες εντολές στέλνονται με το πρόθεμα AT. Κάθε εντολή ακολουθείται από χαρακτήρα επιστροφής. Εντολή χωρίς χαρακτήρα επιστροφής αγνοείται. Περισσότερες από μια εντολές μπορούν να τεθούν σε μια γραμμή και αν είναι απαραίτητο, μπορούν να τεθούν κενά, για να διαβάζονται πιο εύκολα. Οι εντολές στέλνονται είτε με μικρά είτε με κεφαλαία γράμματα. Παραδείγματα εντολών AT φαίνονται στον πίνακα 8.12.2.

CCITT	Περιγραφή
V.21	Full-duplex modem με μετάδοση στα 300bps
V.22	Half-duplex modem με μετάδοση στα 600bps και 1200bps
V.22bis	Full-duplex modem με μετάδοση στα 1200bps και 2400bps
V.23	Full-duplex modem με μετάδοση στα 1200bps και λήψη στα 75bps
V.24	Τυποποίηση για διασύνδεση RS-232
V.32	Full-duplex modem με μετάδοση στα 4800bps και 9600bps
V.25bis	Γλώσσα εντολών modem
V.32bis	Full-duplex modem με μετάδοση στα 7200bps, 12000bps και 14400bps
V.42	Πρωτόκολλο ελέγχου σφαλμάτων

Πίνακας 8.12.1. Τυποποιήσεις CCITT

Εντολή	Περιγραφή
ATDT12345	Καλεί αυτόματα τον αριθμό 12345 με touch-tone επιλογή.
ATPT12345	Καλεί αυτόματα τον αριθμό 12345 με επιλογή παλμού.
AT S0=2	Απαντά αυτόματα σε κλήση. Ο καταχωρητής S0 περιέχει τον αριθμό των κουδουνισμάτων, που χρησιμοποιεί το modem πριν απαντήσει την κλήση.
ATH	Κλείσιμο της τηλεφωνικής σύνδεσης.
+++	Αποσύνδεση γραμμής και επιστροφή σε κατάσταση εντολών.

Πίνακας 8.12.2. Παράδειγμα εντολών AT modem

Το modem μπορεί να βρεθεί σε δύο καταστάσεις, την κανονική κατάσταση (normal state) και την κατάσταση εντολών (command state). Στην κανονική κατάσταση το modem εκπέμπει και λαμβάνει χαρακτήρες από τον υπολογιστή. Στην κατάσταση εντολών οι χαρακτήρες, που στέλνονται στο modem, μεταφράζονται ως εντολές. Από τη στιγμή που μια εντολή μεταφράζεται, το modem εισέρχεται πάλι σε κανονική κατάσταση.

Το modem περιλαμβάνει διάφορους καταχωρητές κατάστασης που ονομάζονται S-καταχωρητές, οι οποίοι αποθηκεύουν τις προδιαγραφές (settings) του modem. Για παράδειγμα, ο καταχωρητής S0 αποθηκεύει τον αριθμό των κουδουνισμάτων, που λαμβάνει το modem, πριν απαντήσει στην κλήση. Τα περισσότερα modems έχουν μνήμη τυχαίας προσπέλασης, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί ηλεκτρονικά. Αυτή επιτρέπει στο modem να τίθεται αυτόματα σε λειτουργία σε μια εκ των προτέρων προγραμματιζόμενη κατάσταση.

Από τη στιγμή, που το modem έχει δεχθεί εντολή AT, απαντά με κώδικα επιστροφής. Παραδείγματα κώδικα επιστροφής φαίνονται στον πίνακα 8.12.3. Για παράδειγμα, αν ένα modem καλεί ένα άλλο, που είναι απασχολημένο, τότε επιστρέφει τον κώδικα 7. Modem που κάνει κλήση σε ένα άλλο, επιστρέφει τον κώδικα OK (όταν λαμβάνεται η εντολή ATDT), CONNECT (όταν συνδέεται με το άλλο modem) και CONNECT 1200 (όταν ανιχνεύει την ταχύτητα του άλλου modem).

Μήνυμα	Ψηφίο	Περιγραφή
OK	0	Εκτέλεση εντολής χωρίς σφάλματα
CONNECT	1	Επίτευξη σύνδεσης
RING	2	Ανίχνευση εισερχόμενης κλήσης
NO CARRIER	3	Μη ανίχνευση φέροντος
ERROR	4	Άκυρη εντολή
CONNECT 1200	5	Σύνδεση με modem 1200bps
NO DIALTONE	6	Μη ανίχνευση σήματος κλήσης
BUSY	7	Απασχολημένη γραμμή
NO ANSWER	8	Μη απάντηση από τη γραμμή
CONNECT 600	9	Σύνδεση με modem 600bps
CONNECT 2400	10	Σύνδεση με modem 2400bps
CONNECT 4800	11	Σύνδεση με modem 4800bps

Πίνακας 8.12.3. Παραδείγματα κώδικα επιστροφής

Τα περισσότερα εξωτερικά modems έχουν δείκτες κατάστασης για να πληροφορούν το χρήστη για την τρέχουσα κατάσταση της σύνδεσης. Συνήθως, οι δείκτες είναι:

- AA, είναι ON, όταν το modem είναι έτοιμο να δεχθεί κλήσεις αυτόματα. Αναβοσβήνει, όταν έρχεται κλήση. Είναι OFF, όταν δε λαμβάνει εισερχόμενες κλήσεις.
- CD, είναι ON, όταν το modem ανιχνεύει το φέρον (carrier) του άλλου modem, διαφορετικά είναι OFF.
- RD, αναβοσβήνει, όταν το modem λαμβάνει δεδομένα ή εντολή από τον υπολογιστή.
- SD, αναβοσβήνει, όταν το modem στέλνει δεδομένα.
- TR, δείχνει, ότι ο υπολογιστής είναι έτοιμος να στείλει ή να λάβει δεδομένα.
- MR, δείχνει, ότι το modem είναι ενεργοποιημένο.

8.13 Τοπικά Δίκτυα Μετρήσεων

Τα **τοπικά δίκτυα** (LAN: local area networks) αποτελούν σύστημα επικοινωνιών για την ενδοδιασύνδεση τοπικής ομάδας ψηφιακών συσκευών μέσω ομοαξονικών καλωδίων (50Ω) ή οπτικών ινών σε ρυθμούς έως 100Mbps. Οι συσκευές απέχουν μεταξύ τους από μερικά μέτρα μέχρι μερικά χιλιόμετρα και συνδέονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποτελέσουν ολοκληρωμένο σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει το μέσο μετάδοσης, τις μονάδες διασύνδεσης και το λογισμικό επικοινωνιών. Αυτά είναι δομημένα με βάση κανόνες, πρωτόκολλα και πρότυπα, ώστε διάφορες συσκευές να επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά και με άλλα δίκτυα. Ένα τοπικό δίκτυο παρέχει ολοκλήρωση υπηρεσιών και το πλεονέκτημα της κοινής εκμετάλλευσης των πόρων και της αυξανόμενης υπολογιστικής χωρητικότητας, που επιτρέπει η διασύνδεση υπολογιστών. Εντούτοις, δυσκολία στο σχεδιασμό τέτοιων δικτύων είναι ο προσδιορισμός ικανοποιητικής δομής, που να προβλέπει απόλυτη συμβατότητα σημάτων, καθώς και αντιστοιχία στις διαδικασίες ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των κόμβων. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε από το διεθνή οργανισμό τυποποίησης (ISO) το **πρότυπο OSI (Open System Interconnection)** ή πρότυπο ανοικτής διασύνδεσης συστημάτων. Το πρότυπο αυτό καθορίζει την αρχιτεκτονική στρωμάτωσης οποιουδήποτε τηλεπικοινωνιακού δικτύου, ώστε να μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους υπολογιστές διαφορετικών κατασκευαστών με διαφορετικά λειτουργικά συστήματα.

Η αποδοχή αυτών των δικτύων αντιπροσωπεύει επιτυχημένη υλοποίηση της ολοκλήρωσης συστήματος αποτελούμενο από εξαρτήματα διαφορετικών εταιριών. Τόσο η βασική ζώνη όσο και η ευρεία ζώνη μετάδοσης δεδομένων χρησιμοποιούνται από αυτά τα τοπικά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, το **Ethernet** ή IEEE802.3 είναι σύστημα διαύλου βασικής ζώνης, που έχει αναπτυχθεί από τις εταιρίες DEC-Xerox-Intel. Είναι περισσότερο κατάλληλο για δικτύωση γραφείων και σταθμών εργασίας παρά για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, επειδή η προσπέλαση των κόμβων δεν προσφέρει σταθερό χρόνο προσπέλασης. Η τεχνική προσπέλασης, που χρησιμοποιεί, είναι **CSMA/CD** (carrier sense multiple access/collision detection) και διατηρεί μήνυμα σε ετοιμότητα εκπομπής μέχρι 16 προσπάθειες, πριν απορριφθεί, ακολουθώντας την ανίχνευση σύγκρουσης με εκθετική αύξηση του χρόνου αναμονής μετά από κάθε σύγκρουση. Επιπρόσθετος περιορισμός είναι η απουσία της επαλήθευσης της ακρίβειας του λαμβανομένου σήματος. Γενικά, το Ethernet εισάγει το οικονομικό κύκλωμα μετάδοσης πακέτων με 32-bit έλεγχο και μοναδική 48-bit διεύθυνση κόμβου για όλο τον κόσμο.

Εκτός από το Ethernet, εκτεταμένη εφαρμογή σε βιομηχανικά περιβάλλοντα έχουν τα πρωτόκολλα MAP (που ήδη γνωρίσαμε) και Token Ring. Το πρωτόκολλο **MAP** (Manufacturing Automation Protocol) προτάθηκε από την General Motors. Περιγράφει ευρείας ζώνης token-bus δίκτυο, με υλοποίηση OSI για εφαρμογές πραγματικού χρόνου με πολλούς κομβικούς υπολογιστές και προγραμματιζόμενες συσκευές για την επίτευξη της επικοινωνίας, όπως απαιτείται σε βιομηχανικά δίκτυα.

Το MAP είναι εξελισσόμενο πρότυπο επικοινωνιών σημαντικής πολυπλοκότητας, που απαιτεί 100msec για μετάδοση μηνύματος από το έβδομο επίπεδο ενός τερματικού στο αντίστοιχο έβδομο επίπεδο άλλου τερματικού μέσω κόμ-

βου. Αξιόλογη παραλλαγή της αρχιτεκτονικής MAP περιέχει μόνο τα τέσσερα επίπεδα του μοντέλου OSI, γεγονός, που μειώνει το χρόνο μετάδοσης μηνύματος κατά πολύ. Διατίθεται για κρίσιμες εφαρμογές με περιορισμένο αριθμό κόμβων και μήκος μηνύματος. Ονομάζεται πρωτόκολλο **TOP** (technical office protocol) και σχεδιάστηκε από τη Boeing βασισμένο στο πρότυπο MAP και υιοθετείται, κυρίως, για χώρους εργασίας μηχανικών. Ανάμεσα στα άλλα, το TOP διαφέρει από το MAP στο πρώτο και έβδομο επίπεδο, το οποίο συμπεριλαμβάνει ανταλλαγή κειμένων και γραφικών με απόδοση ανάλογη της ανταλλαγής φακέλων.

Στο σημείο αυτό κρίνεται αναγκαίο, να αναφερθούν ορισμένοι όροι, που χρησιμοποιούνται κατά κόρο στις δικτυακές τηλεπικοινωνίες. Τα **gateways** είναι συσκευές, που συνδέουν διαφορετικές αρχιτεκτονικές δικτύων μεταφράζοντας το ένα πρωτόκολλο στο άλλο με τη συμμετοχή όλων των επιπέδων του OSI. Τα bridges ή **γέφυρες** είναι συσκευές, που χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν δύο διαφορετικά ή ξεχωριστά IEEE802 δίκτυα με τη συμμετοχή μόνο των δύο πρώτων επιπέδων του OSI. Συχνά χρησιμοποιείται γέφυρα, για να επεκτείνει τις δυνατότητες δικτύου πέρα από τους περιορισμούς σχεδίασης. Οι routers ή **δρομολογητές** είναι συσκευές, που συνδέουν μαζί σε κοινό σημείο στοιχεία δικτύων. Με τη συμμετοχή των τριών επιπέδων του OSI συνολικά ένα διασυνδεδεμένο σύνολο δικτύων με bridge, gateways και routers ονομάζεται catanetwork.

Τέλος, το τρίτο περισσότερο χρησιμοποιούμενο βιομηχανικό δίκτυο είναι το IBM Token Ring, που βασίζεται στο πρότυπο IEEE802.5.

Ανακεφα- λαίωση

- Οι βασικές τοπολογίες των δικτύων είναι η δένδροειδής, του αστέρα, του διαύλου, του δακτυλίου και της διασταύρωσης. Η υλοποίηση δικτύου μετρήσεων βασίζεται στη ιεραρχική δομή.
- Τα σημαντικότερα μέσα μετάδοσης είναι τα συνεστραμμένα ζεύγη, τα ομοαξονικά καλώδια, οι κυματοηγοί και οι οπτικές ίνες.
- Μια γραμμή μεταφοράς χαρακτηρίζεται από τη χαρακτηριστική της εμπέδηση. Σωστή προσαρμογή έχουμε, όταν η γραμμή τερματίζεται από φορτίο ίσης εμπέδησης με τη χαρακτηριστική, ώστε να μην προκύπτει ανακλώμενος παλμός. Αντίστοιχη προσαρμογή πρέπει να γίνεται, όταν συνδέονται μεταξύ τους διαφορετικές γραμμές μεταφοράς.
- Οι οπτικές ίνες αποτελούνται από τον πυρήνα, την επένδυση, το κάλυμμα και το χιτώνιο. Η διάδοση του φωτός, μέσω οπτικής ίνας, βασίζεται σε ανακλάσεις στην επιφάνεια επαφής πυρήνα και επένδυσης. Βασικές συνιστώσες ενός συστήματος επικοινωνίας με οπτικές ίνες είναι η πηγή φωτός, που είναι, συνήθως, δίοδος φωτοεκπομπής LED, laser ή δίοδος laser έκχυσης ILD και ο ανιχνευτής φωτός, που είναι φωτοδίοδος ή φωτοτρανσίστορ.
- Βασικοί τύποι κωδικοποίησης είναι η μονοπολική επιστροφής στο μηδέν (unipolar RZ), μη επιστροφής στο μηδέν (NRZ), διπολική επιστροφής στο μηδέν (bipolar RZ), εναλλακτικής πολικότητας επιστροφής στο μηδέν (AMI RZ) και η Manchester.
- Η διαμόρφωση διακρίνεται σε αναλογική και ψηφιακή. Βασικοί τύποι αναλογικής διαμόρφωσης είναι η κατά πλάτος AM, κατά συχνότητα FM και κατά φάση PM. Βασικοί τύποι ψηφιακής διαμόρφωσης είναι η διαμόρφωση κατά παλμούς PWM και η διαμόρφωση συνεχούς κύματος CWM. Η PWM διακρίνεται στις PAM, PPM και PCM. Η διαμόρφωση συνεχούς κύματος διακρίνεται σε κατά πλάτος ASK, κατά συχνότητα FSK και κατά φάση PSK.
- Η επικοινωνία με διαμόρφωση ονομάζεται ευρείας ζώνης, ενώ χωρίς διαμόρφωση ονομάζεται βασικής ζώνης.
- Το modem χρησιμοποιείται για τη σύνδεση ψηφιακών συσκευών σε τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Τα modems διακρίνονται σε σύγχρονα και ασύγχρονα και χαρακτηρίζονται από τη ταχύτητα μετάδοσης, που μπορούν να αναπτύξουν.
- Τυπικά τοπικά δίκτυα μετρήσεων είναι το Ethernet, το MAP και το TOP.

Αξιολόγηση • Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

1. Τα συνεστραμμένα ζεύγη χρησιμοποιούνται για μεταφορά σημάτων:
 - α) ακουστικών συχνοτήτων
 - β) υψηλών συχνοτήτων
 - γ) πολύ υψηλών συχνοτήτων
 - δ) τίποτα από τα παραπάνω
2. Οι αγωγοί γραμμής μεταφοράς εμφανίζουν:
 - α) αυτεπαγωγή σε σειρά
 - β) χωρητικότητα σε σειρά
 - γ) αυτεπαγωγή παράλληλα
 - δ) αυτεπαγωγή και χωρητικότητα σε σειρά
3. Προσαρμοσμένο τερματισμό έχουμε, όταν η γραμμή μεταφοράς τερματίζεται με αντίσταση:
 - α) μικρότερη από τη χαρακτηριστική εμπίεση
 - β) μεγαλύτερη από τη χαρακτηριστική εμπίεση
 - γ) διπλάσια από τη χαρακτηριστική εμπίεση
 - δ) τίποτα από τα παραπάνω
4. Μια δίοδος φωτοεκπομπής LED μετατρέπει την:
 - α) ηλεκτρική ενέργεια σε θερμική
 - β) φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική
 - γ) ηλεκτρική ενέργεια σε φωτεινή
 - δ) φωτεινή ενέργεια σε θερμική

• Ερωτήσεις του τύπου Σωστό/Λάθος

1. Ένα σύστημα μετρήσεων υλοποιείται με βάση την ιεραρχική δόμηση.
2. Οι κυματοδηγοί χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά σημάτων πολύ χαμηλών συχνοτήτων.
3. Μια laser δίοδος έκχυσης ILD εκπέμπει μονοχρωματικό φως.
4. Η επικοινωνία βασικής ζώνης χρησιμοποιεί διαμόρφωση.
5. Σε ένα σύγχρονο modem υπάρχει ανάγκη για bits αρχής και τέλους.

• Ερωτήσεις αντιστοίχισης

1. Να αντιστοιχίσετε τα:

AM	Ψηφιακή κατά πλάτος
FM	Ψηφιακή κατά συχνότητα
PM	Αναλογική κατά φάση
ASK	Αναλογική κατά πλάτος
FSK	Αναλογική κατά συχνότητα

• **Ερωτήσεις συμπλήρωσης κενού**

1. Οι _____ είναι διαφανείς, διηλεκτρικοί κύλινδροι που περιβάλλονται από δεύτερο διηλεκτρικό κύλινδρο. Το φως μεταφέρεται με διαδοχικές ανακλάσεις στην επιφάνεια επαφής ενός _____ και της _____ του.
2. Όταν δυο σταθμοί, που είναι σε επικοινωνία, μπορούν να εκπέμπουν μόνο _____ (κάθε χρονική στιγμή εκπέμπει μόνο ένας), αναφερόμαστε σε _____ επικοινωνία. Όταν και οι δυο μπορούν να εκπέμπουν _____ αναφερόμαστε σε _____ επικοινωνία.

• **Ερωτήσεις ανοικτού τύπου**

1. Ποιες τοπολογίες δικτύων μετρήσεων γνωρίζετε; Να τις περιγράψετε.
2. Τι είναι η χαρακτηριστική εμπέδηση γραμμής μεταφοράς; Με τι ισούται αν η γραμμή δεν παρουσιάζει απώλειες;
3. Τι ονομάζεται συντελεστής ανάκλασης σε γραμμή μεταφοράς και πώς επηρεάζει την προσαρμογή του τερματισμού;
4. Με ποιον τρόπο βρίσκουμε σφάλματα σε υπόγεια καλώδια;
5. Τι είναι η οπτικοηλεκτρονική;
6. Τι είναι η κρίσιμη γωνία και τι η γωνία αποδοχής;
7. Ποια είναι τα πλεονεκτήματα οπτικής ίνας;
8. Ποιους τύπους κωδικοποίησης γνωρίζετε;
9. Ποιους τύπους διαμόρφωσης γνωρίζετε;
10. Ποια τοπικά δίκτυα μετρήσεων γνωρίζετε;

Ασκήσεις

1. Μία γραμμή μεταφοράς έχει μήκος 100km και κύριες σταθερές γραμμής $R=0\Omega/\text{km}$, $L=40\text{mH}/\text{km}$, $C=7\mu\text{F}/\text{km}$ και $G=0\text{S}/\text{km}$. Αν ένας ψηφιακός παλμός 10V εφαρμοστεί στην είσοδο της γραμμής και η έξοδος έχει ισοδύναμο φορτίο 125Ω , να υπολογιστούν:

(α) η ταχύτητα διάδοσης του παλμού	(1890km/sec)
(β) ο χρόνος για να φτάσει ο παλμός στο φορτίο	(53msec)
(γ) η χαρακτηριστική εμπίεση της γραμμής	(75.6Ω)
(δ) το μέγεθος του ανακλώμενου παλμού	(2.5V)
(ε) ο μεταφερόμενος παλμός	(12.5V)
(στ) η απαιτούμενη αντίσταση για προσαρμογή φορτίου	(191.3Ω παράλληλα)
2. Ακτίνα φωτός προσπίπτει από γυαλί ($n=1.5$) σε χαλαζία ($n=1.38$) με γωνία πρόσπτωσης 35° . Να υπολογιστεί η γωνία διάθλασης.

(38.6°)
3. Υπολογίστε την κρίσιμη γωνία και τη γωνία αποδοχής της οπτικής ίνας της προηγούμενης άσκησης.

(66.9°, 36.0°)
4. Μια οπτική ίνα κατασκευασμένη από γυάλινο πυρήνα ($n=1.5$) και επένδυση λιωμένου χαλαζία ($n=1.46$). Υπολογίστε την κρίσιμη γωνία και την ελάχιστη γωνία αποδοχής.

(76.7°, 20.1°)

Χρήση του Electronics Workbench

- **Γενικά**

Για να εκτελεστούν οι ασκήσεις με το Electronics Workbench, απαιτείται να έχετε εγκαταστήσει στον υπολογιστή σας πρόσφατη έκδοση του προγράμματος αυτού (έκδοση 5.12 και πάνω). Αφού τρέξετε το πρόγραμμα, θα εμφανιστούν στο πάνω μέρος της οθόνης οι έξι κατάλογοι επιλογών (menus) που είναι διαθέσιμοι. Αυτοί είναι: File, Edit, Circuit, Analysis, Window και Help. Κάνοντας αριστερό κλικ σε καθένα από αυτούς, εμφανίζονται οι διαθέσιμες εντολές κάθε καταλόγου.

Κάτω από τους καταλόγους επιλογής εμφανίζεται η γραμμή εργαλείων κυκλώματος (circuit tool bar). Αυτή περιλαμβάνει εργαλεία, που αφορούν το κύκλωμα, που θα κατασκευάσετε. Η επόμενη γραμμή περιλαμβάνει τα ηλεκτρονικά στοιχεία ταξινομημένα σε διάφορες βιβλιοθήκες (electronic parts bins). Κάνοντας κλικ στην πρώτη βιβλιοθήκη (σύμβολο πηγής), εμφανίζεται μεγάλος αριθμός διαθέσιμων πηγών. Υπάρχει και ειδική βιβλιοθήκη, που ονομάζεται υποκυκλώματα (subcircuits), όπου μπορούν να αποθηκευτούν κυκλώματα ως πρότυπα (modules). Ο διακόπτης ON/OFF και το πλήκτρο παύσης/επανάληψης (pause/resume) βρίσκονται πάνω δεξιά στην οθόνη.

- **Εισαγωγή ηλεκτρονικών στοιχείων**

Για την εισαγωγή στοιχείου, ανοίγουμε την αντίστοιχη βιβλιοθήκη, που το περιλαμβάνει με αριστερό κλικ, κάνουμε κλικ στο επιθυμητό στοιχείο και το σύρουμε στην περιοχή κατασκευής του κυκλώματος. Όλα τα στοιχεία μπορούν να περιστραφούν με χρήση του εικονιδίου περιστροφής στη γραμμή εργαλείων κυκλώματος, ή κάνοντας δεξιό κλικ πάνω στο στοιχείο και επιλέγοντας περιστροφή. Για τα στοιχεία, που έχουν διάφορους τύπους, όπως τα τρανζίστορ, κάνουμε διπλό αριστερό κλικ, επιλέγουμε τον επιθυμητό τύπο και έπειτα το σύρουμε στην περιοχή εργασίας.

- **Τιμές ηλεκτρονικών στοιχείων**

Για να δώσετε τιμές (values) και ετικέτες (labels) στα στοιχεία, κάνετε διπλό κλικ πάνω τους, οπότε εμφανίζονται ανάλογες οδηγίες. Στις τιμές υπάρχουν πάνω και κάτω βελάκια, για να θέσετε τις επιθυμητές τιμές και μονάδες των στοιχείων.

- **Συναρμολόγηση κυκλώματος**

Με κλικ πάνω στα στοιχεία, που έχουμε φέρει στο χώρο εργασίας, μπορούμε να τα τοποθετήσουμε στις επιθυμητές θέσεις. Βεβαιωθείτε, ότι αφήνετε αρκετό χώρο ανάμεσα στα στοιχεία, ώστε να συνδεθούν αργότερα τα όργανα μέτρησης. Συνδέστε τα στοιχεία μεταξύ τους, τοποθετώντας τη μύτη του ποντικιού στο άκρο στοιχείου, κάνοντας κλικ και σύροντας καλώδιο από αυτό το στοιχείο στην άκρη του επόμενου. Ελευθερώστε με προσοχή, ώστε το καλώδιο να μη συνδεθεί κάπου αλλού. Αν δεν σας ικανοποιεί η θέση, που βρίσκεται όλο το κύκλωμα, ξεκινήστε από την πάνω αριστερή γωνία του κυκλώματος κάνοντας κλικ και δημιουργήστε ένα ορθογώνιο γύρω από

το κύκλωμα. Τότε, αγγίζοντας ένα στοιχείο με το ποντίκι, σύρετε όλο το κύκλωμα στην επιθυμητή θέση.

- **Εισαγωγή ηλεκτρονικών οργάνων**

Για να εισάγετε τα απαραίτητα όργανα, κάνετε αριστερό κλικ στη βιβλιοθήκη των οργάνων (instrument bin) και σύρετε τα επιθυμητά όργανα στην περιοχή εργασίας. Κάθε εικονίδιο οργάνου περιλαμβάνει δύο ακροδέκτες, για να συνδεθεί στο κύκλωμα. Αν οι ακροδέκτες είναι αρκετά μικροί και δυσκολεύεστε στις συνδέσεις, τότε κάνετε διπλό κλικ στο όργανο, για να το μεγεθύνετε. Όλα τα όργανα πρέπει να μεγεθύνονται, για να διακρίνονται οι λειτουργίες τους.

- **Μετρήσεις Οργάνων - Ανάλυση κυκλώματος**

Όταν το κύκλωμα έχει ολοκληρωθεί, κάνετε τις ρυθμίσεις όλων των οργάνων. Θέσετε το κύκλωμα σε λειτουργία πατώντας ON στο διακόπτη ON/OFF. Βεβαιωθείτε, ότι όλα τα όργανα είναι μεγενθυμένα για να βλέπετε τις ενδείξεις τους. Μπορείτε να διακόψετε τη λειτουργία του κυκλώματος πιέζοντας pause στο πλήκτρο παύσης/επανάληψης.

- **Αποθήκευση**

Όταν τελειώσετε την ανάλυση του κυκλώματος, πηγαίνετε στον κατάλογο επιλογής Analysis, για να σταματήσετε τη λειτουργία των οργάνων. Για το σκοπό αυτό, κάνετε κλικ στο Analysis menu, μετά στις επιλογές ανάλυσης (analysis options), έπειτα στα όργανα (instruments) και τέλος στο πλήκτρο παύσης (pause after each screen). Πηγαίνετε στο File menu και κάνετε κλικ στην αποθήκευση (save). Αποθηκεύσετε το κύκλωμα σε φάκελο της επιθυμίας σας.

Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις

Γιαννακόπουλος Κωνσταντίνος:
Ζυγούρης Ευάγγελος:
Τσελές Δημήτριος:

kgian1@physics.upatras.gr
ez@physics.upatras.gr
dtsel@teipir.gr

Βιβλιογραφία

- [1] Analog Devices, Analog-Digital Conversion Notes, 1980.
- [2] Analog Devices, Applications Reference Manual, 1993.
- [3] Bateman A., Digital Communications, Addison Wesley Longman, 1999.
- [4] Bentley J. P., Principles of Measurement Systems (3rd Edition), Longman Group Ltd, 1995.
- [5] Berlin H. M., Design of Op-Amp Circuits With Experiments, H. W. Sams & Co., Inc., 1979.
- [6] Berube R. H., Computer Simulated Experiments for Electronics Devices Using ELECTRONICS WORKBENCH, Prentice-Hall, Inc., 1996.
- [7] Borris J. P., Linear Integrated Circuit Applications - Hardware and Simulation Exercises Using Electronics Workbench, Prentice-Hall, Inc., 2000.
- [8] Γιαννακόπουλος Κ., Συμπληρωματικός Μετασχηματισμός, M.Sc. Thesis, Πανεπιστήμιο Πατρών - Τμήμα Φυσικής (No. UOP-DOP -EL. EEE002), Πάτρα, Ιανουάριος 1998.
- [9] Collins D. & Lane E., Μετάφραση Κωνσταντινίδης Ν. Κ., Προγραμματιζόμενοι Ελεγκτές, Εκδόσεις Α. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 1997.
- [10] Crispin A. J., Programmable Logic Controllers and Their Engineering Applications, McGraw-Hill, 1997.
- [11] Δεληγιάννης Θ., Ηλεκτρονικά Αναλογικά Κυκλώματα (Τόμος Β), Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 1989.
- [12] Δεληγιάννης Θ. & Χαριτάνης Ι., Εργαστηριακές Ασκήσεις Αναλογικών Ηλεκτρονικών, Πάτρα, 2000.
- [13] Deliyannis T., Sun Y. & Fidler J. K., Continuous-Time Active Filter Design, CRC Press LLC, 1999.
- [14] Dunning G., Introduction to Programmable Logic Controllers, Delmar Publishers, Inc., 1998.
- [15] Ζυγούρης Ε., Αρχιτεκτονική Υπολογιστών, Πάτρα, 1999.
- [16] Ζυγούρης Ε., Εισαγωγή στους μΡς, Αρχιτεκτονική, Προγραμματισμός, Διασύνδεση, Πάτρα, 1999.
- [17] Gaonkar R. S., Microprocessor Architecture, Programming and Applications With the 8085 (4th Edition), Prentice Hall, Inc., 1999.
- [18] Gardner J. W., Microsensors - Principles and Applications, John Wiley & Sons Ltd, 1994.
- [19] Garrett P. H., Advanced Instrumentation and Computer I/O Design: Real-Time System Computer Interface Engineering, IEEE Press, Inc., 1994.
- [20] Held G., The Complete MODEM Reference (2nd Edition), John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [21] Hnatek R. E., A User's Handbook of D/A and A/D Converters, John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [22] Kleitz W., Digital Electronics - A Practical Approach (5th Edition), Prentice Hall, Inc., 1999.
- [23] Μουσουρούλης Ν., Λιβανός Ν., Νικηταρής Ν. & Ζυγούρης Ε., Σχεδίαση και Ανάπτυξη Συστήματος Αυτοματοποιημένης Συλλογής Μετρήσεων, Υψηλών Προδιαγραφών, για Περιβαλλοντικές Εφαρμογές, Εσωτερική Αναφορά, Εργαστήριο Ηλεκτρονικής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, 1999.
- [24] Ohba R., Intelligent Sensor Technology, John Wiley & Sons Ltd, 1992.
- [25] Πακτίτης Σ. Α., Φίλτρα - LC, Ενεργά, Διακοπτόμενων Πυκνωτών (2η Έκδοση), Εκδόσεις ΙΩΝ, 1995.

- [26] Pallas-Areny R. & Webster J. G., Sensors and Signal Conditioning, John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [27] Πυρομάλης Δ., Τσελές Δ. & Μελίδης Ι., RISC Technology Microcontroller-Based Smart Measurement and Control Device, IEEE MELECON '96, 13-16 Μαΐου, Μπάρι, Ιταλία, 1996.
- [28] Πυρομάλης Δ. & Τσελές Δ., RISC Technology into Measurement and Control Devices, Circuits, Systems and Computers '96 International Conference, 15-17 Ιουλίου, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Πειραιάς, 1996.
- [29] Πυρομάλης Δ., LOGGERS IV: A Flexible Educational Toolkit of Measuring and Control Systems, Γ' Συνέδριο Τεχνολογίας & Αυτοματισμού, Πειραιάς, 14-16 Οκτωβρίου 2000.
- [30] Rashid M. H., Electronics Circuit Design Using ELECTRONICS WORKBENCH, PWS Publishing Company, 1998.
- [31] Sedra A. S. & Smith K. C., Microelectronic Circuits (3rd Edition), Oxford University Press, Inc. - New York, Oxford, 1991.
- [32] Siemens, LOGO! Manual.
- [33] Siemens, S7-200 Programmable Controller System Manual.
- [34] Siemens, TD-200 Operator Interface User Manual.
- [35] Staugaard A. C., Jr, Microprocessor Applications, Heathkit Educational Systems, Heath Company, Michigan, 1983.
- [36] Τσελές Δ. Ι., Συλλογή και Μεταφορά Δεδομένων, Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα, 1992.
- [37] Χαριτάντης Ι., Αναλογικά Ηλεκτρονικά - Κυκλώματα, Τεχνικές Σχεδιασμού και Εξομοίωσης, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2000.
- [38] Χαριτάντης Ι., SC Filters, Πάτρα, 1993

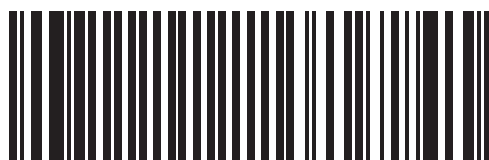
Στη συγγραφή του βιβλίου χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες και φωτογραφίες που πάρθηκαν από το διαδίκτυο και συγκεκριμένα από τις διευθύνσεις:

- [1] <http://www.flinthills.com/ramsdale/EngZone/...>
- [2] <http://www.precisioneng.demon.co.uk> (Precision Engineering Ltd, 1998)
- [3] <http://www.watlow.com> (Watlow Gordon)
- [4] <http://www.wako-usa.com> (Wako Electronics (USA), Inc.)
- [5] <http://www.thermodisc.com> (Therm-O-Disc)
- [6] <http://www.tradeserv.com.tw/ee/fineco/...> (Fine Automation Co., Ltd, 1999)
- [7] <http://www.softplc.com> (SoftPLC Corporation)
- [8] <http://www.tic.toshiba.com> (Toshiba)
- [9] <http://www.omron.com> (Omron)
- [10] <http://www.intel.com> (Intel)
- [11] <http://www.okisemi.com> (OKI)
- [12] <http://www.philips.com> (Philips Semiconductor)
- [13] <http://www.siemens.com> (Siemens)
- [14] <http://www.maxim-ic.com> (Maxim Integrated Products)
- [15] <http://www.mot.com> (Motorola)
- [16] <http://www.national.com> (National Semiconductor)
- [17] <http://www.st.com> (SGS-Thomson)
- [18] <http://www.ti.com> (Texas Instruments)
- [19] <http://www.analog.com> (Analog Devices)
- [20] <http://www.burr-brown.com> (Burr-Brown Co.)
- [21] <http://www.intersil.com> (Intersil)
- [22] <http://www.linear-tech.com> (Linear Technology Co.)
- [23] <http://www.ellab.physics.upatras.gr> (Εργαστήριο Ηλεκτρονικής Τμήματος Φυσικής Πανεπιστημίου Πατρών)

Βάσει του ν. 3966/2011 τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου, του Λυκείου, των ΕΠΑ.Λ. και των ΕΠΑ.Σ. τυπώνονται από το ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ και διανέμονται δωρεάν στα Δημόσια Σχολεία. Τα βιβλία μπορεί να διατίθενται προς πώληση, όταν φέρουν στη δεξιά κάτω γωνία του εμπροσθόφυλλου ένδειξη «ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΜΕ ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ». Κάθε αντίτυπο που διατίθεται προς πώληση και δεν φέρει την παραπάνω ένδειξη θεωρείται κλεψίτυπο και ο παραβάτης διώκεται σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 του νόμου 1129 της 15/21 Μαρτίου 1946 (ΦΕΚ 1946,108, Α').

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος αυτού του βιβλίου, που καλύπτεται από δικαιώματα (copyright), ή η χρήση του σε οποιαδήποτε μορφή, χωρίς τη γραπτή άδεια του Υπουργείου Παιδείας, Θρησκευμάτων και Αθλητισμού / ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ.

Κωδικός βιβλίου: 0-24-0320
ISBN Set 978-960-06-3150-0
Τ.Α΄ 978-960-06-3151-7



(01) 000000 0 24 0320 5