

# **ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ**

# **ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ**

**Β' ΤΕΥΧΟΣ**

**Δρ. Ιωάννης Π. Μακρής**



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**  
**ΧΑΝΙΑ 2005**

## 5<sup>η</sup> ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

### ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

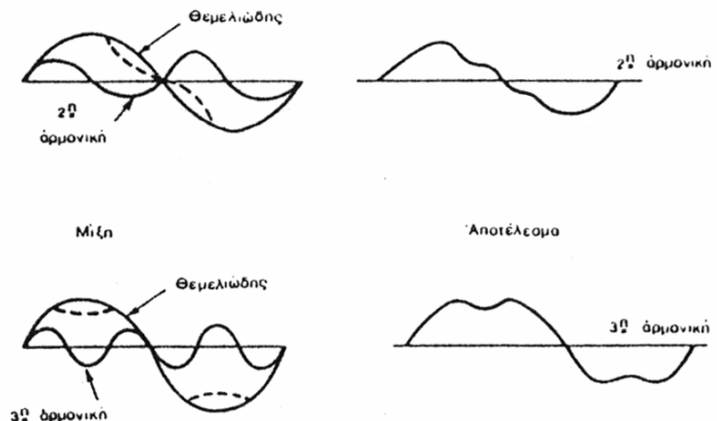
#### 1. Σκοπός της άσκησης

Η άσκηση συνίσταται στη μέτρηση αρμονικών παραμορφώσεων που δημιουργούνται από ένα κύκλωμα ενισχυτή ή/και μία γεννήτρια σήματος, το ποσοστό ύπαρξης των οποίων στο σήμα εξόδου της διάταξης αποτελεί θεμελιώδες σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση της πιστότητάς της αλλά και για τον προσδιορισμό άλλων βασικών χαρακτηριστικών, π.χ. μέγιστη ισχύς εξόδου.

Οι σπουδαστές ενθαρρύνονται να εντρυφήσουν στο θέμα ανατρέχοντας σε σχετική βιβλιογραφία.

#### 2. Συνοπτική θεωρία

Ανεξάρτητα από το πόσο σωστά έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί μια κυκλωματική διάταξη, πάντα υπάρχει πιθανότητα να εμφανίζονται περιττές και άρτιες αρμονικές μαζί με τη θεμελιώδη συχνότητα. Οι αρμονικές αυτές συνδυάζονται με τη θεμελιώδη και παράγουν παραμόρφωση, όπως στην περίπτωση που συνδυάζονται δύο τυχαία σήματα. Μια επίδειξη των παραμορφωτικών συνεπειών από τη μίξη της θεμελιώδους συχνότητας με τη δεύτερη και την τρίτη αρμονική αντίστοιχα, αποδίδεται στο Σχήμα 1.



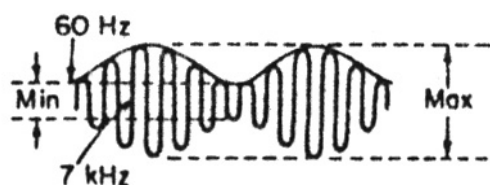
**Σχήμα 1:** Παράδειγμα αρμονικής παραμόρφωσης της θεμελιώδους συχνότητας από ανώτερες περιττές αρμονικές.

Οι μετρητές της αρμονικής παραμόρφωσης που κυκλοφορούν στο εμπόριο έχουν ως κατασκευαστική αρχή λειτουργίας την καταστολή της θεμελιώδους. Εάν στην είσοδο της προς έλεγχο κυκλωματικής διάταξης εφαρμόζεται μία ημιτονική κυματομορφή στην έξοδο της τοποθετείται ο μετρητής T.H.D (Total Harmonic Distortion) ο οποίος διαθέτει ρυθμιζόμενο φίλτρο (γιατί:) που καταπνίγει τη θεμελιώδη συχνότητα. Επομένως, ό,τι σήμα παρέχεται στην έξοδο του φίλτρου είναι το παραμορφωτικό αποτέλεσμα των ανώτερων αρμονικών. Η έξοδος αυτή οδηγείται συνήθως σε ένα ενσωματωμένο όργανο μέτρησης, είναι δυνατόν όμως να χρησιμοποιηθεί και εξωτερικός παλμογράφος. Η χρήση παλμογράφου πλεονεκτεί, γιατί:

Όταν ένα κύκλωμα ελέγχεται για αρμονική παραμόρφωση σε μία ευρεία ζώνη συχνοτήτων, τα αποτελέσματα αποδίδονται σε διάγραμμα (ποσοστό συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης T.H.D., Hz). Σημειώστε ότι η αρμονική παραμόρφωση μπορεί να μεταβάλλεται με τη συχνότητα και την ισχύ εξόδου.

Στην περίπτωση όπου δύο σήματα διαφορετικής συχνότητας αναμειγνύονται σε οποιοδήποτε κύκλωμα, υπάρχει πιθανότητα το σήμα της χαμηλότερης συχνότητας να διαμορφώνει κατά πλάτος (A.M.) το σήμα της υψηλότερης συχνότητας. Το φαινόμενο αυτό παράγει μια μορφή παραμόρφωσης που είναι γνωστή ως παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης.

Οι μετρητές παραμόρφωσης ενδοδιαμόρφωσης του εμπορίου αποτελούνται από μια γεννήτρια σήματος και ένα φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (HP). Το τμήμα του μετρητή που αποτελεί τη γεννήτρια σήματος, παράγει ένα σήμα υψηλής συχνότητας (~kHz) που διαμορφώνεται από ένα σήμα χαμηλής συχνότητας (~Hz) αλλά πολλαπλάσιου πλάτους. Τα αναμιχθέντα σήματα εφαρμόζονται στην είσοδο της προς έλεγχο κυκλωματικής διάταξης. Η έξοδος του κυκλώματος οδηγείται στο φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων που αφαιρεί το σήμα χαμηλής συχνότητας. Αν οποιαδήποτε χαμηλόσυχη συνιστώσα



$$\text{Ποσοστό ενδοδιαμόρφωσης} = 100 \times \frac{\text{Max} - \text{Min}}{\text{Max} + \text{Min}}$$

**Σχήμα 2:** Παράδειγμα ανάλυσης παραμόρφωσης ενδοδιαμόρφωσης υψίσυχνου σήματος 7kHz από σήμα χαμηλής συχνότητας 60Hz.

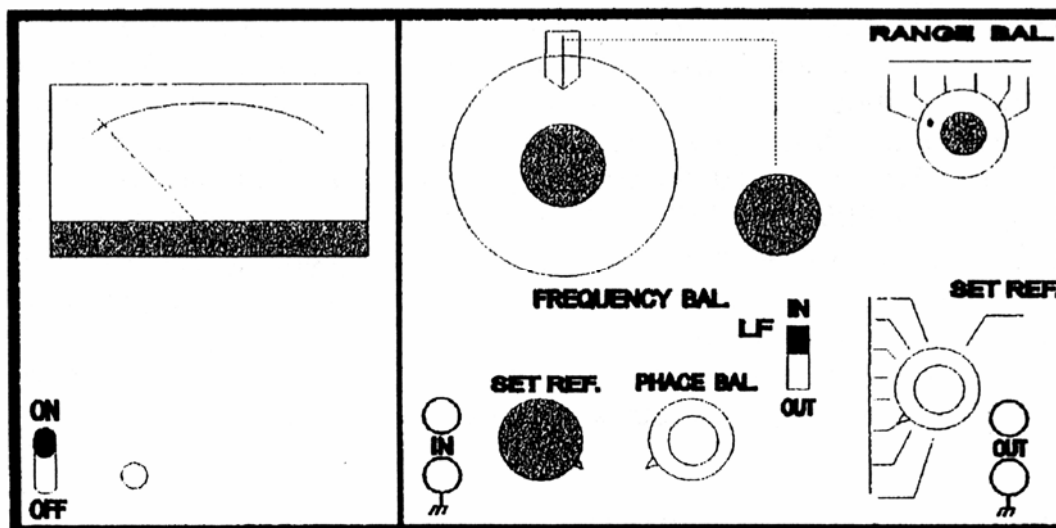
παρατηρείται στην έξοδο του φίλτρου, οφείλεται στη διαμόρφωση του υψίσυχνου σήματος (παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης). Επιπροσθέτως, η έξοδος του φίλτρου είναι δυνατόν να οδηγηθεί σε παλμογράφο, το ποσοστό της ενδοδιαμόρφωσης υπολογίζεται με τη μέθοδο που εμφανίζεται στο Σχήμα 2.

#### Περιγραφή της αρχής λειτουργίας του μετρητή παράγοντα παραμόρφωσης

Το όργανο αυτό (βλ. Σχήμα 3) μετρά συνολικό θόρυβο και παραμόρφωση σήματος σε κυκλώματα ακουστικών συχνοτήτων (AF). Η αρχή λειτουργίας του είναι αυτή της απόρριψης, με χρήση ενεργού φίλτρου, της κυρίας συνιστώσας και της μέτρησης των εναπομένοντων σε ένα κατάλληλα βαθμονομημένο βολτόμετρο. Για το σκοπό αυτό το κύκλωμά του περιλαμβάνει ένα υψηλής απόδοσης συντονιζόμενο φίλτρο απόρριψης, τύπου γέφυρας Wien, με ποσοστό απόρριψης μεγαλύτερο από 80dB στην θεμελιώδη συχνότητα. Η εξασθένηση της 2ης αρμονικής είναι μικρότερη από 0.5dB στα 2kHz και μικρότερη από 1dB για θεμελιώδεις από 2-6kHz και τέλος μικρότερη από 2dB για θεμελιώδεις από 6-20kHz.

Η συσκευή τίθεται σε λειτουργία (διακόπτης στη θέση ON) και αφήνεται να προθερμανθεί για περίπου 5 λεπτά ώστε το κύκλωμα του οργάνου να αποκτήσει την κανονική θερμοκρασία λειτουργίας.

Εφαρμόζετε το σήμα εξόδου της προς έλεγχο διάταξης στην είσοδο του οργάνου έχοντας το βηματικό διακόπτη **Distortion %** στη θέση **SET REF**.



**Σχήμα 3:** Απεικόνιση της πρόσοψης του μετρητή αρμονικής παραμόρφωσης.

Μεταβάλετε το ποτενσιόμετρο **SET REF.** μέχρις ότου η βελόνα του βολτομέτρου τοποθετηθεί στο μέγιστο της διαθέσιμης κλίμακας, γιατί:

Μετακινήστε τον διακόπτη κλίμακας **Distortion %** από την θέση **SET REF** στην ένδειξη **100%**.

Επιλέγεται με το διακόπτη θέσης **RANGE Hz** στο κατάλληλο εύρος συχνοτήτων και με την αντίγα συχνότητας επιχειρείτε να ελαχιστοποιήσετε την ένδειξη του βολτομέτρου, γιατί:

Όταν πλέον έχει χαμηλώσει η ένδειξη του βολτομέτρου, ελέγχετε και τη θέση του ρυθμιστικού διακόπτη **PHASE-BAL.** επιδιώκοντας ακόμη μικρότερη ένδειξη στο βολτόμετρο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για περισσότερες από μία φορές έτσι ώστε η ένδειξη του βολτομέτρου να γίνει όσο το δυνατόν μικρότερη.

Τελικά, μετακινείτε διαδοχικά το διακόπτη **Distortion %** ώστε να επιτύχετε την αρτιότερη μέτρηση, γιατί:

Ο διακόπτης **LF** εισάγει ενεργό φίλτρο που αποκόπτει τις χαμηλές συχνότητες για τη μέτρηση της παραμόρφωσης ενδοδιαμόρφωσης.

### 3. Πειραματική διαδικασία

**α)** Αναγνωρίστε την οργανολογία της άσκησης και πραγματοποιήστε τη συνδεσμολογία της.

**β)** Θέτοντας τον διακόπτη **LF** στη θέση **LF In**, μετρήστε για την υπό έλεγχο γεννήτρια συχνοτήτων την Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (T.H.D.) για τις συχνότητες:

100Hz, 200Hz, 500Hz, 800Hz, 1kHz, 2kHz, 5kHz, 10kHz, 15kHz, 20kHz.

**γ)** Επαναλάβετε τη διαδικασία του βήματος β) με το διακόπτη **LF** στη θέση **LF Out** και μετρήστε για την υπό έλεγχο γεννήτρια συχνοτήτων την παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης για τις ίδιες συχνότητες.

#### 4. Επεξεργασία

- i) Αποδώστε σε πίνακες τα αποτελέσματα των μετρήσεών σας με τα σφάλματα που τα επιβαρύνουν. Εκφράστε τα και σε dB.
- ii) Αποδώστε σε διαγράμματα συναρτήσει της συχνότητας τις παραμορφώσεις που μελετήσατε. Διατυπώστε τις παρατηρήσεις σας.
- iii) Απαντήστε στα «γιατί;» που εμφανίζονται στο κείμενο της άσκησης.
- iv) Σύνοψη και συμπεράσματα.

#### Βιβλιογραφία

- Εργαστηριακές Ασκήσεις και Κατασκευές Ηλεκτρονικής, Δ. Μαυράκης, 1982, Αθήνα.
- Ηλεκτροακουστική, Γ. Παπανικολάου, 1985, University Studio Press.
- Ηλεκτρονικά Όργανα και Μετρήσεις, Σ. Πακτίτης, 1989, Εκδόσεις Ίων.
- Ηλεκτρονικές Κατασκευές, Δ. Ρήγας, 2000, Εκδόσεις Τζιόλα.
- Ηλεκτρονικά Συστήματα Μετρήσεων, T.T. Lang, 2000, Εκδόσεις Τζιόλα.

## 6<sup>η</sup> ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

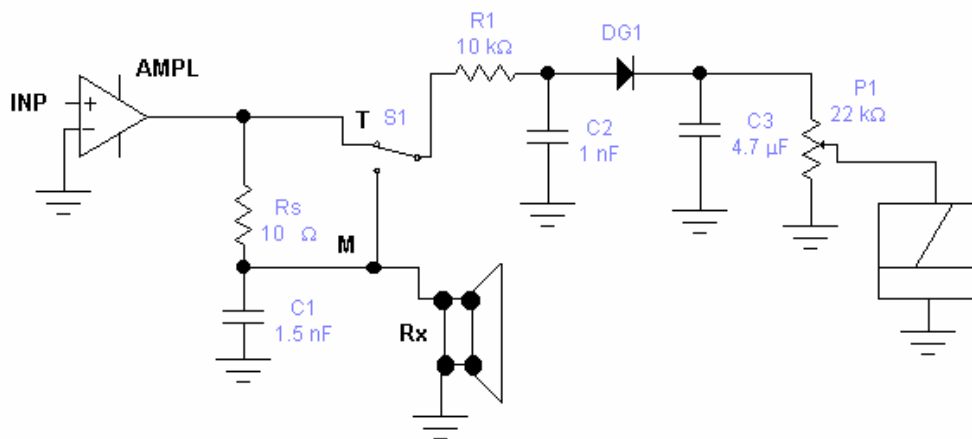
### ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕΓΑΦΩΝΟΥ

#### 1. Σκοπός της άσκησης

Η άσκηση αυτή, όπως και όλες οι εργαστηριακές ασκήσεις των ηλεκτρονικών μετρήσεων, έχουν σαν ουσιαστικό στόχο την εξοικείωση του σπουδαστή με εργαστηριακές διατάξεις και μετρητικές διαδικασίες που αποτελούν βασικότατα εργαλεία στην Ηλεκτρονική. Με τη βοήθεια οργάνων όπως ο παλμογράφος, το πολύμετρο, η γεννήτρια κλπ, σκοπός του πειράματος είναι να μελετηθεί η μεθοδολογία μέτρησης της αντίστασης ενός μεγαφώνου καθώς αυτή δεν είναι καθαρά ωμική για να μπορεί να μετρηθεί απευθείας αλλά είναι σύνθετη και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.

#### 2. Συνοπτική θεωρία

(α) Ανάλυση του κυκλώματος της άσκησης:



Σχήμα 1

Το σήμα εξόδου του audio-ενισχυτή (με είσοδο ένα ημιτονικό σήμα) αφού υποστεί κατάλληλη επεξεργασία οδηγείται σε ένα αμπερόμετρο (μΑ). Το όργανο αυτό χρησιμεύει τόσο για τη ρύθμιση της τάσης αναφοράς, όσο και για την μέτρηση την τάσης πάνω στο διαιρέτη τάσης ( $R_S$  - μεγάφωνο) ώστε, εφαρμόζοντας κατάλληλη σχέση ή κάνοντας χρήση ορισμένων πινάκων να βρίσκουμε την  $R_X$  (φαινόμενη αντίσταση μεγαφώνου).

Για το διαιρέτη τάσης  $R_S$  και  $R_X$  ισχύουν:

$$R_S = \frac{V_{R_S}}{I} \text{ και } R_X = \frac{V_{R_X}}{I}$$

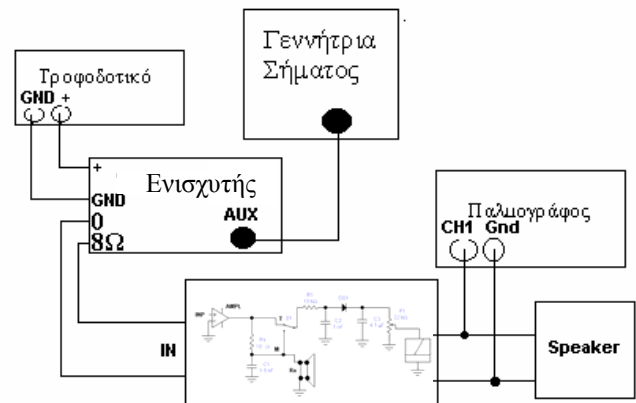
Επίσης, ισχύει η σχέση:  $\frac{V_{tot}}{V_{R_X}} = \frac{R_S + R_X}{R_X}$

Θέτοντας:  $\frac{V_{tot}}{V_{R_X}} = \frac{1}{V}$  βρίσκουμε:

$$\frac{V_{tot}}{V_{R_X}} = \frac{R_S + R_X}{R_X} = \frac{1}{V} \Leftrightarrow V \cdot R_S + V \cdot R_X = R_X \Leftrightarrow R_X = \frac{R_S \cdot V}{1 - V}$$

Γνωρίζουμε όμως ότι  $R_S = 10\Omega$  και η  $V_{tot}$  αντιστοιχεί στην τιμή που μας δείχνει το μικρο-αμπερόμετρο, π.χ.  $100\mu A$ , ενώ η  $V_{R_X}$  θα αντιστοιχεί σε μικρότερη ένδειξη, π.χ.  $36\mu A$ , οπότε το  $V$  σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις θα είναι:  $V = 36/100 = 0.36$ .

Στη συγκεκριμένη άσκηση θα ασχοληθούμε μόνο με τη μέτρηση της ωμικής αντίστασης (dc) εισόδου του μεγαφώνου. Γνωρίζουμε ότι η αντίσταση εισόδου ενός μεγαφώνου (ηχείου) δεν είναι καθαρά ωμική, αλλά είναι μια σύνθετη αντίσταση η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Ως τέτοιοι μπορούν να αναφερθούν ενδεικτικά η διάμετρος της μπομπίνας, το σχήμα της, ο αριθμός των σπειρών από τις οποίες αποτελείται, τα χαρακτηριστικά του πηνίου φωνής, η μηχανική αντίσταση της μεμβράνης, η συχνότητα κλπ. Για να μετρήσουμε σωστά την φαινόμενη αντίσταση ενός ηχείου πρέπει να εφαρμόσουμε μια εναλλασσόμενη τάση με τρόπο ώστε να μιμηθούμε τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Όπως θα διαπιστωθεί, το μεγάφωνο συνδέεται σε σειρά με μια αντίσταση  $R_S = 10\Omega$ , με αποτέλεσμα να σχηματίζεται ένας διαιρέτης τάσης που συνίσταται από την αντίσταση της μπομπίνας του μεγαφώνου και από την αντίσταση  $R_S$ . Ένας κατάλληλος διακόπτης  $S$  φροντίζει να μεταβιβάσει την εναλλασσόμενη τάση από το σημείο  $T$  στο σημείο  $M$  -για να την εφαρμόσει στο κύκλωμα ένδειξης- και αντίστροφα. Το κύκλωμα ένδειξης αυτό είναι κατασκευασμένο από τα DG1 και C3 και η μέτρηση του μέγιστου παλμού θα γίνει μέσω του μικρο-αμπερομέτρου, που είναι συνδεδεμένο με το ποτενσιόμετρο P1, ώστε κάθε φορά να ρυθμίζεται η τάση αναφοράς.



Σχήμα 2: Όργανα μέτρησης: (α) Παλμογράφος, (β) Τροφοδοτικά, (γ) Γεννήτρια σήματος.

### 3. Οργανολογία

Τα εργαστηριακά όργανα που απαρτίζουν την άσκηση είναι αυτά που φαίνονται στο διπλανό σχηματικό διάγραμμα. Επίσης, απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται τα όργανα με το κύκλωμα της άσκησης το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.

#### 4. Πειραματική διαδικασία

- α) Να πραγματοποιήσετε με προσοχή το κύκλωμα του Σχήματος 1 και να συνδέσετε κατάλληλα τα όργανα μέτρησης όπως δείχνει το Σχήμα 2.
- β) Μεταβάλλοντας τη συχνότητα της γεννήτριας μετρήστε τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του απαραμόρφωτου ημιτονικού σήματος.
- γ) Με κατάλληλη σύνδεση του παλμογράφου μετρήστε την αντίσταση του μεγαφώνου για διάφορες συχνότητες της γεννήτριας (10 μετρήσεις τουλάχιστον).

#### 5. Επεξεργασία μετρήσεων

- i) Καταγράψτε τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του απαραμόρφωτου ημιτονικού σήματος..
- ii) Αποδώστε τη γραφική παράσταση της αντίστασης του μεγαφώνου σε συνάρτηση με τη συχνότητα.
- iii) Ποια είναι η συχνότητα συντονισμού του μεγαφώνου και η φαινόμενη αντίστασή του;
- iv) Ποιος ο ρόλος κάθε εξαρτήματος στο κύκλωμα;
- v) Τι θα συμβεί εάν αλλάξουμε την  $R_s$  από  $10\Omega$  σε  $15\Omega$ ;
- vi) Βρείτε πληροφορίες σχετικά με τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα ηχείο και περιλάβετε μία σύντομη περιγραφή στην αναφορά σας.
- vii) Δώστε μια σύντομη ανάλυση της λειτουργίας του κυκλώματος ένδειξης της πειραματικής διάταξης.
- viii) Σύνοψη και συμπεράσματα.



## 7<sup>η</sup> ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

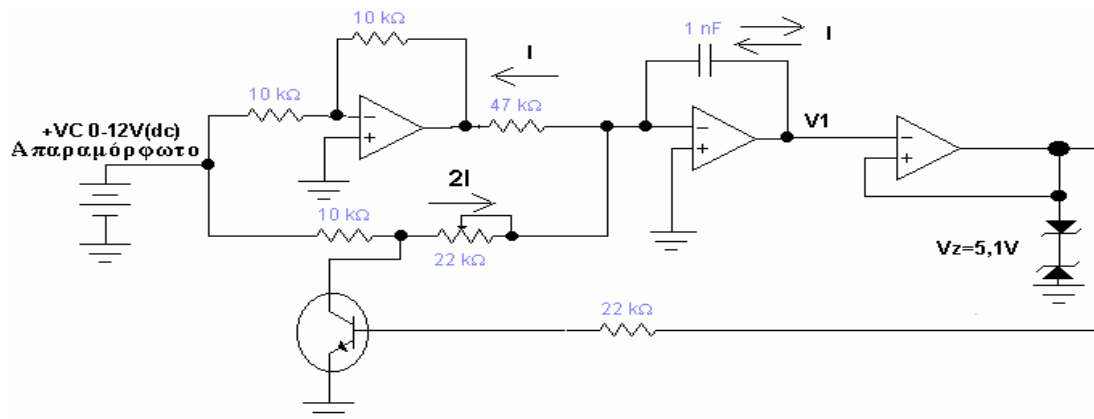
### ΤΑΛΑΝΤΩΤΗΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΣ ΑΠΟ ΤΑΣΗ

#### 1. Σκοπός της άσκησης

Γενικός σκοπός της εργαστηριακής άσκησης είναι η εξοικείωση των σπουδαστών με εργαστηριακά όργανα όπως: παλμογράφος, πολύμετρο, γεννήτρια σήματος, τροφοδοτικό κλπ. (τα οποία ουσιαστικά αποτελούν τα εργαλεία ενός ηλεκτρονικού) και η εφαρμογή τους στη λήψη μετρήσεων. Ειδικότερος σκοπός της άσκησης είναι να γνωρίσουν και να κατανοήσουν οι σπουδαστές τον τελεστικό ενισχυτή μέσα από τις βασικές συνδεσμολογίες του που αποτελούν πάρα πολύ συχνά μέρη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων όπως και την πολύ χρήσιμη συνδεσμολογία του transistor ως διακόπτη. Επίσης, σε αυτή την άσκηση οι σπουδαστές θα έχουν την δυνατότητα να δομήσουν και να συναρμολογήσουν αυτόνομα ένα ηλεκτρονικό σύστημα παραγωγής σημάτων.

#### 2. Συνοπτική θεωρία

##### (α) Ανάλυση του κυκλώματος της άσκησης



Σχήμα 1

Στην παρούσα άσκηση θα χρησιμοποιήσουμε τις βασικές συνδεσμολογίες του τελεστικού ενισχυτή LM741 με την προσθήκη ενός transistor που λειτουργεί ως διακόπτης. Θα πετύχουμε έτσι μια λειτουργία ταλαντωτή τετραγωνικών και τριγωνικών κυματομορφών συναρτήσει της τάσης  $V_C$ .

Συνοπτικά η λειτουργία του κυκλώματος έχει ως εξής: Ο πρώτος ενισχυτής λειτουργεί ως αναστροφέας. (Ποια η σχέση εισόδου-εξόδου ενός τελεστικού ενισχυτή σε συνδεσμολογία αναστροφείας; Ποια η απολαβή του στην συγκεκριμένη εφαρμογή; Με ποιο τρόπο αυτή δύναται να μεταβληθεί;)

Συνεπώς, ένα ρεύμα,  $I$ , θα περάσει μέσα από την αντίσταση  $47k\Omega$  και θα διευθύνεται προς τον αναστροφέα, ενώ ένα ίσο ρεύμα (κατόπιν ειδικής επιλογής της αντίστασης  $47k\Omega$ ) θα φτάσει στον πυκνωτή  $C=1nF$  και έτσι το ρεύμα που θα διαρρέει την αντίσταση  $10k\Omega$  θα είναι  $2I$  (όταν δεν λειτουργεί το transistor).

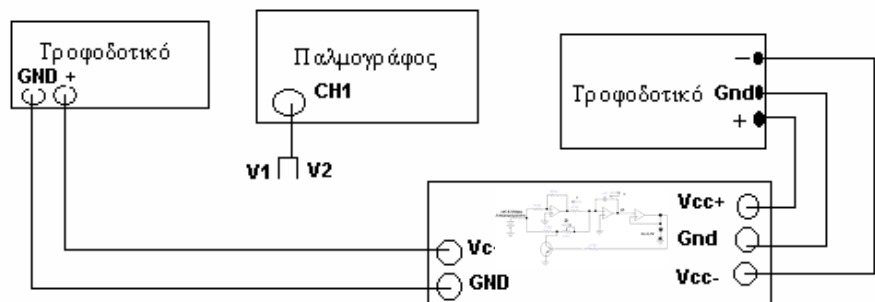
Ο πυκνωτής φορτίζεται όταν  $V_C = 2 \cdot I \cdot R$  όπου  $R = 10k\Omega + 22k\Omega$  και ο ολοκληρωτής έχει έξοδο  $V_1$ . Αυτή εφαρμοζόμενη στην είσοδο του ενισχυτή κόρου και λαμβανόμενου υπόψη ότι στην (+) είσοδό του παραμένουν όχι παραπάνω από +5.8Volt, τότε στην έξοδο παρουσιάζεται τάση μεγαλύτερη από 5.8Volt και θα αλλάξει ο κόρος από θετικό σε αρνητικό ή από αρνητικό σε θετικό. Στη συνέχεια, η έξοδος του ολοκληρωτή οδηγείται στη βάση του transistor και έτσι με θετικό παλμό θα το κάνει να άγει γεγονός που σημαίνει ότι θα εκφορτιστεί και ο πυκνωτής μέσω αυτού. Ακολουθώντας, θα φορτιστεί με ανάστροφη τάση μέσω της αντίστασης  $47k\Omega$  μέχρι να φτάσει η τάση  $V_1$  την τιμή  $V_Z + V_d$  και να τείνει να την ξεπεράσει. Μόλις την ξεπεράσει θα αλλάξει ο κόρος και αυτό θα διακόψει το transistor οπότε ο πυκνωτής θα εκφορτιστεί και πάλι μέσω του transistor και θα φορτιστεί σε μια μεγαλύτερη αλλά αντιθέτου πολικότητας τάση που εφαρμόζεται μέσω των  $10k\Omega$  και  $22k\Omega$ , έτσι ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται. Η συχνότητα υπολογίζεται ως εξής:

$$V_1 = -\frac{1}{C} \int I \cdot dt + V_1(0) = -\frac{1}{C} \int \frac{V_C}{R} \cdot dt + V_1(0). \text{ Εάν } \Delta V_1 = V_1 - V_1(0) \text{ τότε:}$$

$$\frac{V_C}{R \cdot C} \cdot \Delta t = \frac{V_C}{R \cdot C} \cdot \frac{T}{2} \Rightarrow T = \frac{2 \cdot R \cdot C \cdot \Delta V_1}{V_C} = \frac{4 \cdot R \cdot C \cdot (V_Z + V_d)}{V_C} \Rightarrow f = \frac{V_C}{4 \cdot R \cdot C \cdot (V_Z + V_d)}$$

### 3. Οργανολογία

Τα εργαστηριακά όργανα που απαρτίζουν την άσκηση είναι αυτά που φαίνονται στο διπλανό σχηματικό διάγραμμα. Επίσης, φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται τα όργανα με το κύκλωμα της άσκησης το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



**Σχήμα 2: Ηλεκτρονικά στοιχεία:** (α) Αντιστάσεις:  $3 \times 10k\Omega$ ,  $1 \times 47k\Omega$  και  $1 \times 22k\Omega$ , (β) Ποτενσιόμετρο  $22k\Omega$ , (γ) 3 LM741, (δ) Πυκνωτής  $1nF$ , (ε) 2 δίοδοι Zener. **Όργανα:** (α) Παλμογράφος, (β) 2 τροφοδοτικά.

### 4. Πειραματική διαδικασία

**α)** Αναγνωρίστε τα όργανα της άσκησης.

**β)** Να κατασκευάσετε με προσοχή το κύκλωμα του Σχήματος 1 και να το τροφοδοτήσετε όπως δείχνει το Σχήμα 2. Στο παράρτημα του φυλλαδίου των ασκήσεων μπορείτε να βρείτε λεπτομέρειες σχετικά με το πως μπορείτε να συνδέσετε τον τελεστικό ενισχυτή LM741 στην άσκηση και σχετικά με το transistor που χρησιμοποιείται.

**γ)** Πάρτε κατάλληλες μετρήσεις (10 τουλάχιστον) για χρονικό εύρος μιας περιόδου στα σημεία  $V_1$  και  $V_2$ .

**δ)** Για 12 τιμές (0-12V) της τάσεως  $V_C$  μετρήστε την περίοδο T.

## 5. Επεξεργασία

- ix) Αποτυπώστε τις κυματομορφές μαζί με τα σφάλματα που προκύπτουν από το βήμα γ) της πειραματικής διαδικασίας. Φτιάξτε ένα πίνακα που θα εμπεριέχονται οι σχετικές μετρήσεις μαζί με τα σφάλματα τους.
- x) Να χαραχθεί η  $F=f(V_C)$ .
- xi) Να δικαιολογήσετε την έξοδο  $V_2$  όταν  $V_C=0\text{V}$ olt.
- xii) Να δικαιολογήσετε την  $V_2$  όταν η μεταβλητή αντίσταση  $R$  παίρνει οριακές τιμές (μέγιστη και ελάχιστη).
- xiii) Να διαπιστώσετε από ποιες βασικές συνδεσμολογίες τελεστικών ενισχυτών αποτελείται το κύκλωμα και να γράψετε δυο λόγια για κάθε μια από αυτές.
- xiv) Βρείτε πληροφορίες σχετικά με το πώς λειτουργεί το transistor σαν διακόπτης.
- xv) Ποιος ο ρόλος των δύο Zener στο κύκλωμα;
- xvi) Απαντήστε στις «ερωτήσεις» της άσκησης.
- xvii) Σύνοψη και συμπεράσματα.

## Βιβλιογραφία

- Ηλεκτρονικά: «Αναλογικά και ψηφιακά κυκλώματα», Θ. Α. Δεληγιάννη (Βιβλιοθήκη Π.Κ.).
- Op-Amp Handbook (Third Edition), Frederick W. Hughes (Βιβλιοθήκη Π.Κ.).
- Introduction to Operational Amplifiers. Theory & Applications, 2<sup>η</sup> Έκδοση, John V. Wait, Lawrence P. Huelsman & Granino A. Korn (Βιβλιοθήκη Π.Κ.).
- Ηλεκτρονική διεύθυνση για πληροφορίες: <http://www.philips.com>

## 8<sup>η</sup> ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

### ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΩΝ

#### 1. Σκοπός της άσκησης

Στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση επιχειρείται η συγκριτική μελέτη διαφόρων τύπων θερμοζευγών (thermocouples) και η βαθμονόμησή τους στην περιοχή θερμοκρασιών 0°C-100°C. Επίσης, μελετάται η εφαρμογή τους σε ολοκληρωμένη και αυτοματοποιημένη διαδικασία μέτρησης θερμοκρασίας με σύστημα συλλογής δεδομένων.

#### 2. Συνοπτική Θεωρία

##### *Βασικές Αρχές Θερμικών Αισθητήρων*

Οι θερμικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση διαφόρων ποσοτήτων που σχετίζονται με την θερμότητα, όπως είναι η ειδική θερμότητα, η θερμοκρασία και η πυκνότητα ροής θερμότητας. Η ποσότητα θερμότητας  $Q$  σ' ένα σώμα είναι ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία του  $T$ :

$$Q = m \cdot c \cdot T$$

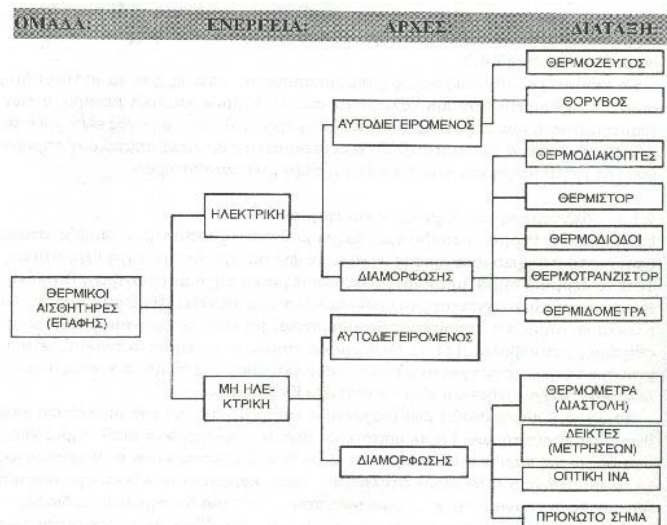
όπου  $m$  είναι η μάζα και  $c$  η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μάζας ή ειδική θερμότητα (J/kg°C). Η θερμοχωρητικότητα ενός σώματος δρα ως μέτρο της ικανότητας του σώματος να αποθηκεύει θερμότητα. Ο ρυθμός,  $dQ/dt$ , με τον οποίο η θερμότητα ρέει διαμέσου μίας περιοχής, καθορίζεται από τη διαφορική κλίση της θερμοκρασίας καθώς και από την θερμική αγωγιμότητα,  $k$ , της περιοχής.

$$Q = \frac{dQ}{dt} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

όπου  $A$  το εμβαδόν διατομής της περιοχής διαμέσου της οποίας ρέει η θερμότητα. Η θερμική αντίσταση,  $R_T$ , είναι μέτρο της ικανότητας ενός σώματος να προβάλλει αντίσταση στην ροή θερμότητας που το διαπερνά:

$$R_T = \frac{1}{k} \cdot \frac{L}{A}$$

όπου  $L$  το μήκος του σώματος. Η θερμοκρασία και η θερμική ροή είναι θεμελιώδεις μεταβλητές που ισοδυναμούν με την τάση και το ρεύμα αντίστοιχα ενός ηλεκτρικού συστήματος. Επίσης, η θερμοχωρητικότητα και η θερμική αντίσταση είναι ισοδύναμες με τη χωρητικότητα και την ηλεκτρική αντίσταση. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η πραγματική φυσική συμπεριφορά ενός

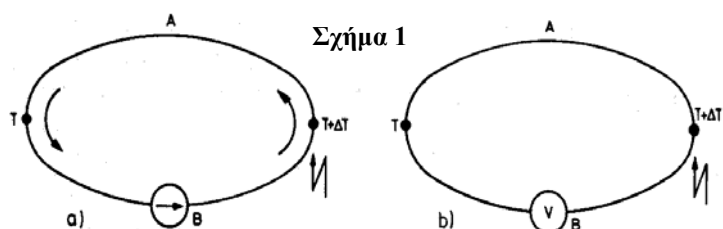


θερμικού συστήματος είναι μη γραμμική, καθώς τόσο η ειδική θερμότητα όσο και η θερμική αντίσταση είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας.

Οι θερμικοί αισθητήρες ταξινομούνται ως αισθητήρες επαφής (το στοιχείο ανίχνευσης «αγγίζει» με φυσικό τρόπο την θερμική πηγή) όπου το θερμικό σήμα διαδίδεται με αγωγή θερμότητας και σε ως αισθητήρες ακτινοβολίας (ή μη επαφής) όπου ανιχνεύουν την εκπομπή θερμικής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από την θερμική πηγή (πυροηλεκτρικός ανιχνευτής). Περαιτέρω, διακρίνονται σε διαμόρφωσης και αυτοδιεγερόμενους. Οι περισσότεροι θερμικοί αισθητήρες ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, ενώ το θερμοζεύγος (ή θερμοστοιχείο ή θερμική στήλη) αποτελεί εξαίρεση, καθώς παράγει ηλεκτρεγερτική δύναμη (e.m.f) ανάμεσα σε δύο επαφές που διατηρούνται σε διαφορετική θερμοκρασία.

### Θερμοηλεκτρικά Φαινόμενα. Φαινόμενο Seebeck

Οι θερμοηλεκτρικοί αισθητήρες βασίζονται σε δύο φαινόμενα που είναι αντιστρεπτά (σε αντίθεση με το μη αντιστρεπτό φαινόμενο Joule): το φαινόμενο Peltier και το φαινόμενο



Thomson. Ιστορικά, το 1822 ο Thomas J. Seebeck ανακάλυψε ότι ένα κύκλωμα με δύο ανόμοια μέταλλα Α και Β που έχουν δύο επαφές σε διαφορετικές θερμοκρασίες διαρρέεται (βλ. σχήμα). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι λαμβάνει χώρα μετατροπή ενέργειας από θερμική σε ηλεκτρική. Αν το κύκλωμα είναι ανοικτό, εμφανίζεται μια θερμοηλεκτρική ηλεκτρεγερτική δύναμη (e.m.f) που εξαρτάται από τα μέταλλα και τις θερμοκρασίες των επαφών. Ένα ζεύγος διαφορετικών μετάλλων με μια ένωση σε ένα σημείο ή μία ζώνη συνθέτει τον αισθητήρα που καλείται θερμοζεύγος (thermocouple).

Η σχέση που συνδέει την e.m.f  $E_{AB}$  και τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο επαφών, ορίζει τον συντελεστή Seebeck,  $S_{AB}$ :

$$S_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT} = S_A - S_B$$

όπου  $S_A$  και  $S_B$  είναι οι απόλυτες θερμοηλεκτρικές ισχύεις για τα μέταλλα Α και Β αντίστοιχα. Η απόλυτη θερμοηλεκτρική ισχύς ενός μετάλλου υπολογίζεται από ένα θερμοζεύγος με ένα μέταλλο αναφοράς (π.χ. πλατίνα) σε συγκεκριμένη διαφορά θερμοκρασίας (βλ. σχετικό πίνακα).

Υλικό	$\Delta V$ (mV)	$P_s$ ( $\mu V/K$ )	Υλικό	$\Delta V$ (mV)	$P_s$ ( $\mu V/K$ )
Αντιμόνιο	+10.14	+50.7	Pt-10% Rh	+1.44	+7.20
Chromel	+5.96	+29.8	Αργίλιο	+1.06	+5.30
Σίδηρος	+3.54	+17.7	Ταντάλιο	+0.93	+4.65
Μολυβδαίνιο	+3.19	+16.0	Πλατίνα	0.00	0.00
Βολφράμιο	+2.62	+13.1	Ασβέστιο	-0.51	-2.55
Κάδμιο	+2.35	+11.8	Παλλάδιο	-1.23	-6.15
Χρυσός	+1.84	+9.20	Alumel	-2.17	-10.85
Χαλκός	+1.83	+9.15	Κοβάλτιο	-3.08	-15.40
Άργυρος	+1.77	+8.85	Νικέλιο	-3.10	-15.50
Ρόδιο	+1.61	+8.05	Constantan	-7.45	-37.25
Pt-13% Rh	+1.47	+7.35	Βισμούθιο	-13.57	-67.85

Θερμοηλεκτρική ισχύς και δύναμη και θερμοηλεκτρική ηλεκτρεγερτική δύναμη διαφόρων μετάλλων και πρότυπων κραμάτων θερμοζεύγους στους 200 °C σε σχέση με την πλατίνα στους 0 °C.

Ο συντελεστής Seebeck,  $S_{AB}$ , δεν είναι γενικά σταθερός αλλά εξαρτάται από τη θερμοκρασία, και συνήθως αυξάνεται με το  $T$ . Υπογραμμίζεται ότι ενώ το ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα εξαρτάται από την αντίσταση των αγωγών, η θερμοηλεκτρική ηλεκτρεγερτική δύναμη (e.m.f) δεν εξαρτάται από την αντίσταση, ούτε από την διατομή των αγωγών ή από την κατανομή ή τη βαθμίδα της θερμοκρασίας. Εξαρτάται μόνον από τη διαφορά της θερμοκρασίας των δύο επαφών και το είδος των μετάλλων. Συνήθως σχετίζεται με αλλαγές της ενέργειας Fermi  $E_F$  και του δυναμικού διάχυσης. Το δυναμικό Fermi παρέχεται από την έκφραση:

$$\Delta V_F = \frac{\Delta E_F}{e}$$

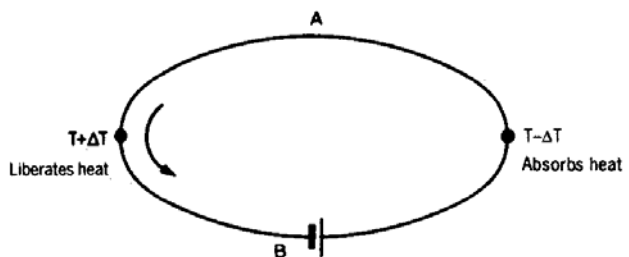
όπου  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου. Το ενεργειακό επίπεδο Fermi,  $E_F$ , ενός μετάλλου εξαρτάται από τη θερμοκρασία  $T$  και την πυκνότητα των καταστάσεων  $N(E)$  και δίδεται από τη σχέση:

$$E_F(T) = E_F(0) - \pi^2 \frac{(KT)^2}{6} \cdot \frac{d[\ln N(E)]}{dE}$$

όπου  $E_F(0)$  το επίπεδο Fermi του μετάλλου στο απόλυτο μηδέν και  $K$  η σταθερά Boltzmann. Η μείωση του επιπέδου Fermi στη θερμή επαφή οδηγεί τα ηλεκτρόνια να ρέουν προς αυτήν. Η διαφορά της θερμοκρασίας επηρεάζει τις μέσες ταχύτητες τόσο των ηλεκτρονίων όσο και των φωνονίων στο μέταλλο. Οι διαφορές των πυκνοτήτων ηλεκτρονίων και φωνονίων έχουν ως συνέπεια την ανάπτυξη δυναμικού διάχυσης που αντισταθμίζεται στην ηλεκτρομαγνητική δύναμη και έτσι μειώνει το συνολικό παρατηρούμενο φαινόμενο. Η εμφάνιση της θερμοηλεκτρικής ηλεκτρεγερτικής δύναμης οφείλεται στα φαινόμενα Peltier και Thomson.

Το φαινόμενο Peltier (Jean C. A. Peltier, 1834), συνίσταται στη θέρμανση ή ψύξη μιας επαφής

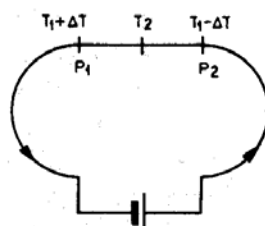
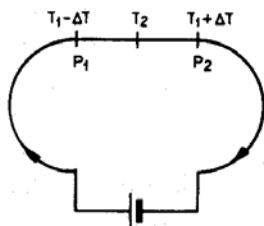
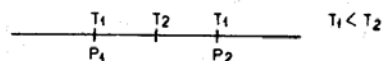
δύο διαφορετικών μετάλλων καθώς διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Όταν η διεύθυνση του ρεύματος αλλάζει φορά, το ίδιο κάνει και η ροή θερμότητας. Εάν μια επαφή θερμαίνει (απελευθέρωση θερμότητας), όταν το ρεύμα αναστραφεί ψύχει (απορρόφηση θερμότητας) και το αντίστροφο. Το φαινόμενο είναι αντιστρεπτό και δεν εξαρτάται από το σχήμα και τις διαστάσεις των αγωγών αλλά μόνον από τη σύνθεση της επαφής και τη θερμοκρασία. Επιπλέον, αυτή η εξάρτηση είναι γραμμική και περιγράφεται από το



συντελεστή Peltier,  $\pi_{AB}$ , που ορίζεται ως η ενέργεια που απελευθερώνεται στην επαφή μεταξύ A και B για κάθε μονάδα ρεύματος (θετικού φορτίου) που ρέει από το B στο A. Για επαφή θερμοκρασίας  $T$  ισχύει:

$$\pi_{AB} = T \cdot (S_B - S_A) = -\pi_{BA}$$

Το γεγονός ότι η ποσότητα της μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας στην επαφή είναι ανάλογη του ρεύματος αντί του



τετραγώνου του, διαφοροποιεί το φαινόμενο Peltier από το φαινόμενο Joule. Στο τελευταίο, η ροή θερμότητας εξαρτάται από το τετράγωνο του ρεύματος και δεν αλλάζει όταν η φορά του ρεύματος αντιστρέφεται. Το φαινόμενο Peltier είναι επίσης ανεξάρτητο από την πηγή του ρεύματος, που μπορεί να είναι ακόμη και θερμοηλεκτρική οπότε σε αυτή την περίπτωση οι επαφές αποκτούν θερμοκρασία διαφορετική από εκείνη του περιβάλλοντος και αυτό μπορεί να αποτελεί ένα σφάλμα.

Το φαινόμενο Thomson (William Thomson, αργότερα Λόρδο Kelvin, 1847-54), συνίσταται στην απορρόφηση ή απελευθέρωση θερμότητας σε έναν ομογενή αγωγό με μη-ομογενή θερμοκρασία όταν διαρρέεται από ρεύμα. Η ροή θερμότητας είναι ανάλογη με το ρεύμα και όχι με το τετράγωνο του, επομένως αλλάζει φορά όταν το ρεύμα αναστρέφεται. Θερμότητα απορροφάται όταν ρεύμα κυκλοφορεί από ψυχρότερα σε θερμότερα σημεία και αντίστροφα, απελευθερώνεται όταν ρέει από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα. Με άλλα λόγια, θερμότητα απορροφάται όταν ρεύμα και θερμότητα ρέουν προς αντίθετες κατευθύνσεις, και απελευθερώνεται όταν ρέουν προς την ίδια κατεύθυνση.

Η ροή θερμότητας ανά μονάδα όγκου,  $q$ , σε έναν αγωγό αντίστασης  $r$ , με διαμήκη βαθμίδα θερμοκρασίας  $dT/dx$ , που διαρρέεται από πυκνότητα ρεύματος,  $j$ , δίδεται από τη σχέση:

$$q = j^2 r - j \sigma \left( \frac{dT}{dx} \right)$$

όπου  $\sigma$  είναι ο συντελεστής Thomson. Ο πρώτος όρος στο δεξιό μέλος της εξίσωσης περιγράφει το μη-αντιστρεπτό φαινόμενο Joule και ο δεύτερος το αντιστρεπτό φαινόμενο Thomson.

Με αναφορά στο σχήμα 1.α), αν η ροή του ρεύματος είναι αρκετά μικρή ώστε το φαινόμενο Joule να είναι αμελητέο, τότε λαμβάνονται υπόψη μόνο τα αντιστρεπτά φαινόμενα. Σε αυτή τη περίπτωση, η θερμοηλεκτρική ισχύς που προκύπτει  $(dE_{AB}/dT)\Delta T$ , πρέπει να ισούται με την τελική θερμική ενέργεια που μετατράπηκε. Στο σχήμα 1.α) η μία επαφή βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T+\Delta T$  και η άλλη σε  $T$ . Η θερμότητα που απορροφάται στη θερμή επαφή είναι  $\pi_{AB}(T+\Delta T)$ , ενώ η θερμότητα που απελευθερώνεται στην ψυχρή επαφή είναι  $-\pi_{AB}(T)$ . Από το φαινόμενο Thomson, κατά μήκος του  $A$  μία ποσότητα θερμότητας  $-\sigma_A(\Delta T)$  απελευθερώνεται, ενώ κατά μήκος του  $B$  μία ποσότητα θερμότητας  $\sigma_B(\Delta T)$  απορροφάται. Συνεπώς, το ισοζύγιο θερμοηλεκτρικής ισχύος προκύπτει:

$$\left( \frac{dE_{AB}}{dT} \right) \Delta T = \pi_{AB}(T + \Delta T) - \pi_{AB}(T) + (\sigma_B - \sigma_A) \Delta T$$

Διαιρώντας και τα δύο μέλη με  $\Delta T$  και παίρνοντας όρια όταν το  $\Delta T$  τείνει στο μηδέν, γίνεται:

$$\frac{dE_{AB}}{dT} = \frac{d\pi_{AB}}{dT} + \sigma_B - \sigma_A$$

γεγονός που αποδεικνύει ότι το φαινόμενο Seebeck είναι στην πραγματικότητα το αποτέλεσμα των φαινομένων Peltier και Thomson και αποτελεί το βασικό θεώρημα του θερμοηλεκτρισμού.

Οι προαναφερθείσες σχέσεις ερμηνεύουν την εφαρμογή των θερμοζευγών στη μέτρηση θερμοκρασίας. Αν σε ένα κύκλωμα με θερμοζεύγη διατηρείται μια επαφή σε σταθερή θερμοκρασία (επαφή αναφοράς, reference junction), η e.m.f θα είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας της άλλης επαφής (επαφή μέτρησης, measuring junction).

Η εφαρμογή των θερμοζευγών για τη μέτρηση θερμοκρασίας εξαρτάται από πολλούς περιοριστικούς παράγοντες: (i) Η εκλογή του τύπου του θερμοζεύγους για τη μέτρηση πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μη λιώσει στο πεδίο εφαρμογής. (ii) Το περιβάλλον στο οποίο θα τοποθετηθεί να μη διαβρώνει τα μέταλλα του θερμοστοιχείου. (iii) Μικρή ροή ρεύματος διαμέσου του θερμοζεύγους (*γιατί*). (iv) Μια από τις επαφές ευρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία, αν πρόκειται να μετρηθεί η θερμοκρασία της άλλης. Κάθε μεταβολή στην επαφή αναφοράς θα έχει ως αποτέλεσμα σημαντικό σφάλμα καθώς η τάση εξόδου είναι πολύ μικρή (τυπικά 6~75μV/°C). (v) Επιπροσθέτως, αν η θερμοκρασία αναφοράς δεν είναι κοντά στην προς μέτρηση θερμοκρασία, το σήμα εξόδου θα έχει μια σχετικά υψηλή σταθερή τιμή που θα υφίσταται μόνο πολύ μικρές αλλαγές λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών που ενδιαφέρει να μετρηθούν. (vi) Όταν μεγάλη ακρίβεια είναι επιθυμητή, η μη-γραμμικότητα της σχέσης μεταξύ της e.m.f και της T μπορεί να γίνει σημαντική. Ένας προσεγγιστικός τύπος για όλα τα θερμοζεύγη είναι:

$$E_{AB} \approx C_1(T_1 - T_2) + C_2(T_1^2 - T_2^2)$$

όπου  $T_1$  και  $T_2$  είναι οι απόλυτες θερμοκρασίες για κάθε επαφή αντίστοιχα και  $C_1$  και  $C_2$  είναι σταθερές που εξαρτώνται από τα υλικά A και B. Ο αριθμός των χρήσιμων θερμοζευγών που είναι διαθέσιμα είναι περιορισμένος, διότι μας ενδιαφέρουν πολύ μικρές τιμές του  $C_2$ , έτσι μειώνονται οι πιθανές επιλογές. Για π.χ. Cu-Constantan, παραδείγματος χάρη, προκύπτει:

$$E_{AB} \approx 62.1(T_1 - T_2) - 0.045(T_1^2 - T_2^2)\mu V$$

Η ύπαρξη μη-γραμμικότητας αναιρείται σε πολλές περιπτώσεις από τη μονάδα ρύθμισης σήματος (S.C.U.).

Παρ' όλους τους παραπάνω περιοριστικούς παράγοντες, τα θερμοζεύγη είναι οι πιο διαδεδομένοι αισθητήρες για μέτρηση θερμοκρασίας. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματά τους είναι το μεγάλο εύρος μέτρησης (ως σύνολο, -270°C έως 3000°C). Επίσης, παρουσιάζουν αποδεκτή και μεγάλης διάρκειας σταθερότητα, καθώς και μεγάλη αξιοπιστία. Στις χαμηλές θερμοκρασίες έχουν υψηλότερη ακρίβεια από αισθητήρες R.T.D. Το μικρό τους μέγεθος επιτρέπει μια μεγάλης ταχύτητας απόκριση της τάξης των ms.

### Τύποι Θερμοζευγών

Στα θερμοζεύγη υπάρχουν πολλαπλές απαιτήσεις για μικρή ειδική αντίσταση, μεγάλο θερμοκρασιακό συντελεστή, όσο το δυνατόν μεγαλύτερη γραμμικότητα και αντοχή στο περιβάλλον που θα εργαστούν. Για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιούνται στην κατασκευή

Παράμετρος	Τύπος J	Τύπος K	Τύπος N	Τύπος T	Τύπος E
Ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	-40	-200	-230	-250	-50
Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	+850	+1,100	+1,230	+400	+1,350
Ακρίβεια, Τάξη 2 (°C)	±2.5	±2.5	±2.5	±1	±2
Περιοχή θερμ. Τάξη 2 (°C)	-40 to +750	-40 to +750	-40 to +750	-40 to +750	-15 to +1,760
Σύσταση βραχίονα + ve	Σίδηρος	Chromel	Nicrosil	Χαλκός	Πλατίνα
Σύσταση βραχίονα - ve	41% Ni/ 55% Al	Alumel	Nisil	Constantan	87% Pt/ 13% Rh

τους ειδικά κράματα: chromel (Ni90%, Cr10%), constantan (Cu55%, Ni45%), alumel (Ni95%, Al2%, Mn2%, Si1%), nicrosil (Ni71-86%, Cr14%, Fe0-15%), nisil (Ni95%, Si4.5%). Η χρωματική κωδικοποίηση

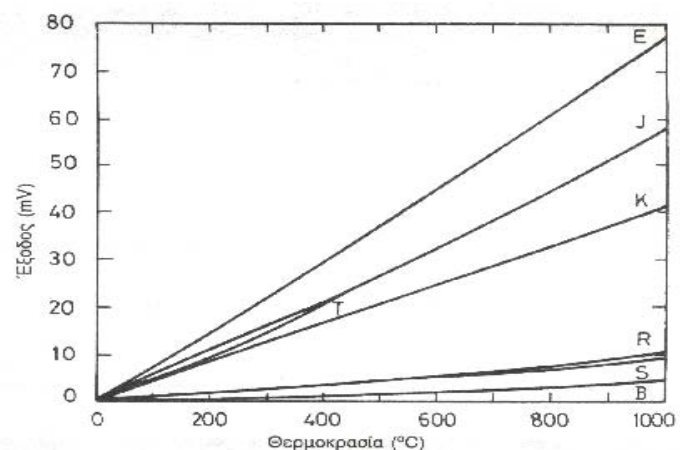


των θερμοζευγών και οι τύποι J, K, N, T, R έχουν ειδικά καθοριστεί στο βρετανικό πρότυπο BS 1843 ('52) με βάση την ακρίβεια, τη σύσταση, την περιοχή θερμοκρασίας κλπ. Το αμερικανικό πρότυπο ANSI MC 96 ('75) έχει διαφορετική χρωματική κωδικοποίηση με παρόμοιους κώδικες. Στον πίνακα παρατίθενται οι προδιαγραφές των θερμοζευγών μετάλλου-κράματος σύμφωνα με το βρετανικό πρότυπο.

Πίνακες παρέχουν τις διαφορές δυναμικού που λαμβάνονται με δεδομένα θερμοζεύγη ως συνάρτηση της θερμοκρασίας στην επαφή μέτρησης, όταν η επαφή αναφοράς ευρίσκεται στους 0°C. Αυτό όμως δε σημαίνει ότι όταν μια επαφή μέτρησης τοποθετείται στους 0°C πάντα δίνει 0V έξοδο για κάθε θερμοζεύγος. Η διαδικασία παράθεσης τιμών τάσης εξόδου σε πίνακες δεν είναι παρά μια διευκόλυνση που σχετίζεται με το γεγονός ότι για να μετρηθεί η τάση που παράγει μια επαφή, δεν μπορεί να αποφευχθεί η εισαγωγή μιας άλλης επαφής. Επομένως, είναι πιο ορθό να αναφερόμαστε σε διαφορές τάσεων μεταξύ επαφών σε διαφορετικές θερμοκρασίες από το να θεωρούμε τη τάση μιας μόνης επαφής για κάθε δεδομένη θερμοκρασία. Για λόγους τυποποίησης, έχει συμφωνηθεί να λαμβάνονται ως θερμοκρασία αναφοράς οι 0°C. Ενδιάμεσες τάσεις ή θερμοκρασίες λαμβάνονται με γραμμική παρεμβολή. Είναι επίσης εφικτό να χρησιμοποιηθούν πολυώνυμα της μορφής:

$$T = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \dots$$

όπου  $x$  είναι η μετρούμενη τάση, που προσεγγίζουν τις τιμές στους πίνακες με μια ακρίβεια που εξαρτάται από την τάξη τους. Όταν το εύρος μέτρησης είναι πολύ μεγάλο, τότε αντί να χρησιμοποιούνται πολυώνυμα μεγάλης τάξης, είναι προτιμότερο να διαιρείται όλο το εύρος σε μικρότερους τομείς και μετά να χρησιμοποιούνται μικρότερης τάξης πολυώνυμα για κάθε τομέα.

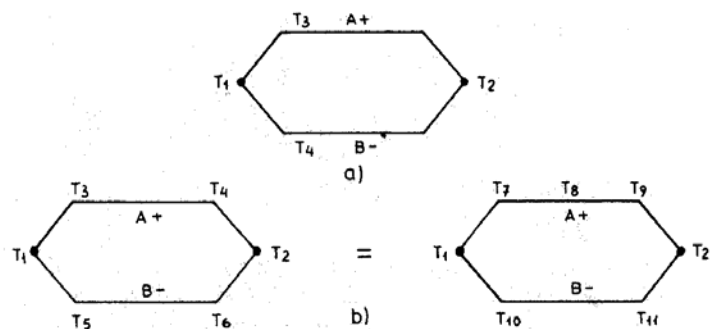


Στο διπλανό σχήμα αποδίδεται η τάση εξόδου σε περιοχή θερμοκρασιών 0°C έως 1000°C που παράγεται από τα θερμοζεύγη κατά πρότυπο ANSI τύπου E(chromel-constantan), J(Fe-constantan), K(chromel-alumel), T (Cu-constantan), R(Pt13%/Rh-Pt), S(Pt10%/Rh-Pt), και B(Pt6%/Rh-Pt30%/Rh).

### Νόμοι Εφαρμογής Θερμοζευγών –

#### Πολλαπλές Συνδεσμολογίες

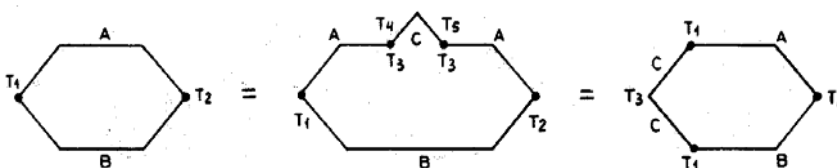
Νόμος ομογενών κυκλωμάτων. Δεν είναι δυνατόν να υπάρξει θερμοηλεκτρικό ρεύμα σε κύκλωμα ενός μόνο ομογενούς αγωγού είτε θερμαίνοντάς τον είτε τροποποιώντας τη διατομή του. Το διπλανό σχήμα παρέχει μια επεξήγηση του νόμου. Οι θερμοκρασίες  $T_3$  και  $T_4$  δε



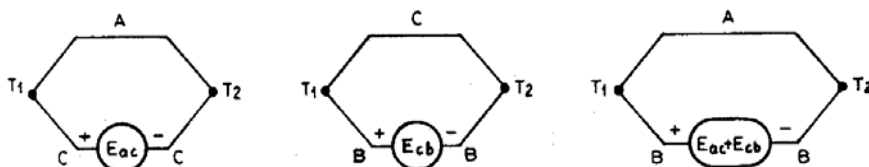
μεταβάλλουν τη θερμοηλεκτρική e.m.f. που οφείλεται στις  $T_1$  και  $T_2$ . Αν  $T_1=T_2$  και ο Α ή ο Β θερμανθεί, δε θα διαρρεύσει καθόλου ρεύμα. Άρα, ενδιάμεσες θερμοκρασίες κατά μήκος ενός αγωγού δεν μεταβάλλουν τη θερμοηλεκτρική e.m.f. που δημιουργείται από μια δεδομένη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επαφών. Δεν είναι όμως αναγκαίο αν ενδιάμεσως υπάρχουν διαφορετικές θερμοκρασίες να χρησιμοποιούνται μεγάλου μήκους αγωγοί όμοιοι με εκείνους του θερμοζεύγους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αγωγοί αντιστάθμισης από μέταλλα που δεν παρουσιάζουν υπολογίσιμη θερμοηλεκτρική e.m.f. και επιπλέον είναι οικονομικότερα από τα σύρματα των θερμοζευγών.

Νόμος ενδιαμέσων μετάλλων. Το αλγεβρικό άθροισμα όλων των θερμοηλεκτρικών e.m.f σε ένα κύκλωμα που αποτελείται από διαφορε-

τικά μέταλλα παραμένει μηδέν εφόσον ολόκληρο το κύκλωμα είναι σε ομοιόμορφη θερμοκρασία. Το γεγονός αυτό υπο-



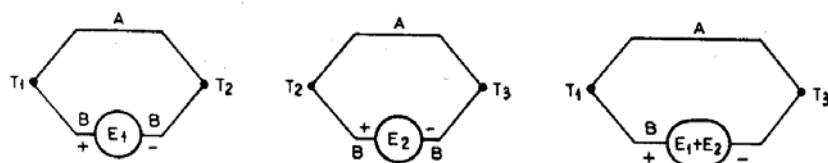
δεικνύει ότι ένα μετρητικό σύστημα δύναται να παρεμβληθεί στο κύκλωμα (είτε σε ένα σημείο ενός αγωγού, είτε σε μια επαφή) χωρίς να επιφέρει πρόσθετα σφάλματα με την προϋπόθεση οι νέες επαφές που εισάγει να ευρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία (βλ. παραπάνω σχήμα).



Πόρισμα του νόμου είναι ότι αν η θερμική σχέση μεταξύ δύο υλικών και ενός τρίτου είναι γνωστή, τότε μπορεί να βρεθεί η σχέση

μεταξύ των δύο πρώτων (βλ. σχήμα). Επομένως, αρκεί η βαθμονόμηση ενός δεδομένου θερμοζεύγους ως προς ένα μέταλλο αναφοράς (για το σκοπό αυτό έχει επιλεγεί η πλατίνα) για προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία που αντιστοιχεί σε δεδομένη θερμοηλεκτρική e.m.f. του θερμοζεύγους.

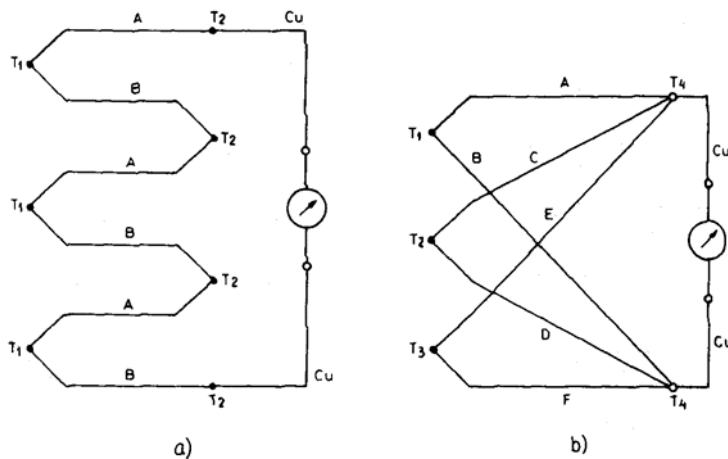
Νόμος διαδοχικών ή ενδιαμέσων θερμοκρασιών. Αν δύο ομογενή μέταλλα παρέχουν θερμοηλεκτρική e.m.f.



$E_1$  όταν οι επαφές τους είναι σε θερμοκρασίες  $T_1$  και  $T_2$ , και  $E_2$  όταν είναι σε  $T_2$  και  $T_3$ , τότε η θερμοηλεκτρική e.m.f. όταν οι επαφές τους είναι σε

θερμοκρασίες  $T_1$  και  $T_3$  θα είναι  $E_1+E_2$  (βλ. σχήμα). Συνεπώς, δεν είναι αναγκαίο για την επαφή αναφοράς να είναι στους  $0^\circ\text{C}$ . Κάθε άλλη θερμοκρασία αναφοράς είναι αποδεκτή.

Η περίπτωση α) του παρακάτω σχήματος παρουσιάζει θερμοζεύγη συνδεδεμένα σε σειρά. Η προκύπτουσα διάταξη ονομάζεται θερμική στήλη (thermopile) και χρησιμοποιείται όταν απαιτείται υψηλή τάση εξόδου, ενώ είναι προφανές ότι αυξάνει η ευαισθησία. Στην περίπτωση β) αποδίδεται μια παράλληλη σύνδεση, η



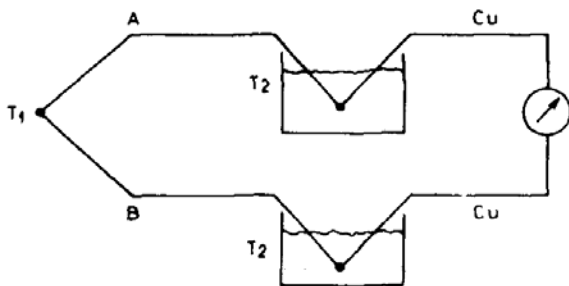
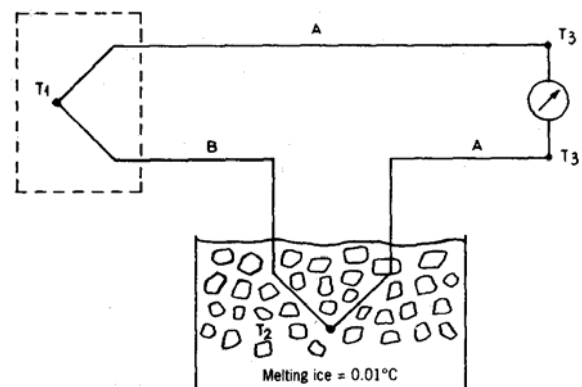
οποία παρέχει τη μέση θερμοκρασία, αν όλα τα θερμοζεύγη είναι γραμμικά στο εύρος μέτρησης και έχουν την ίδια αντίσταση.

### Συνδεσμολογίες Αντιστάθμισης Ψυχρής Επαφής σε Κυκλώματα Θερμοζευγών.

Για να αξιοποιηθεί το φαινόμενο Seebeck στη μέτρηση θερμοκρασίας, η μια επαφή (επαφή αναφοράς) πρέπει να παραμένει σε σταθερή θερμοκρασία

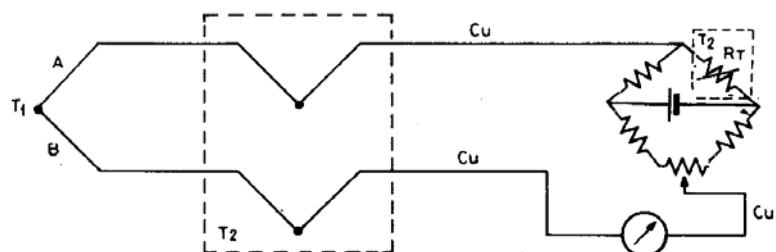
αναφοράς. Μια λύση τοποθετεί την επαφή αναφοράς μέσα σε λιωμένο πάγο (βλ. διπλανό σχήμα). Είναι εύκολη να υλοποιηθεί και είναι μια λύση ακριβείας, αλλά απαιτεί συχνή συντήρηση και σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιεί μεγάλο μήκος αγωγού για ένα εκ των στοιχείων του θερμοζεύγους και αυτό αυξάνει το κόστος. Εναλλακτική λύση αποτελεί εκείνη του σχήματος που ακολουθεί. Η λύση αυτή επιτρέπει τη χρήση ενός πιο οικονομικού συνδετικού αγωγού (π.χ. Cu), αλλά εξακολουθεί να είναι απαιτεί μια σταθερή θερμοκρασία αναφοράς.

Όταν το αναμενόμενο εύρος μεταβολής της θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι μικρότερο από την απαιτούμενη ανάλυση, μπορεί απλά να αφεθεί η σύνδεση αναφοράς εκτεθειμένη στο περιβάλλον.



Σε αυτή την τεχνική (ηλεκτρονική αντιστάθμιση) η επαφή αναφοράς υφίσταται τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, οι οποίες όμως

μετρώνται από έναν άλλο αισθητήρα θερμοκρασίας που τοποθετείται κοντά στην επαφή αναφοράς. Η τάση που παράχθηκε στην ψυχρή επαφή αφαιρείται από αυτή που παράχθηκε από το κύκλωμα (βλ. παρακάτω σχήμα). Η τροφοδοσία της γέφυρας πρέπει να είναι εξαιρετικά σταθεροποιημένη.



### 3. Πειραματική Διαδικασία

Η διάταξη της άσκησης διαθέτει τέσσερις τύπους θερμοζευγών: K, N, J και T. Για τη συνδεσμολογία τους υιοθετείται η αντιστάθμιση ψυχρής επαφής, με την επαφή αναφοράς σε λιωμένο πάγο (βλ. παραπάνω σχήμα). Τα αισθητήρια συνδέονται στις διαφορικές (differential) εισόδους του συστήματος μέτρησης 21X-Micrologger, της Campbell Scientific, με την εξής διάταξη:

<i>Micrologger's Differential Channel</i>	<i>Thermocouple Measurement</i>
1	Type K
2	Type N
3	Type J
4	Direct Temperature Measurement using type T*
5	Type T

\* Μελετήστε το επισυναπτόμενο κείμενο από το εγχειρίδιο λειτουργίας του 21X-Micrologger.

Με την οργανολογία της άσκησης λάβετε μετρήσεις θερμοκρασίας (ενδείξεις υδραργυρικού θερμομέτρου) και θερμοηλεκτρικής ηλεκτρεγερτικής δύναμης φαινομένου Seebeck για τα θερμοζεύγη που διατίθενται, στην περιοχή θερμοκρασιών 0°C έως 100°C με δειγματοληψία ανά 5sec. Η μέτρηση της θερμοκρασίας αναφοράς θα διενεργηθεί τόσο στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας όσο και στο τέλος αυτής και θα ληφθεί υπόψη ο μέσος όρος.

### 4. Επεξεργασία Δεδομένων

- Να αποδώσετε τις καμπύλες βαθμονόμησης των υπό μελέτη θερμοζευγών στην περιοχή θερμοκρασιών που διερευνήσατε.
- Να γίνει γραμμική ή/και πολυωνυμική προσαρμογή των δεδομένων για κάθε θερμοζεύγος. Διατυπώστε τα συμπεράσματά σας για τη συμπεριφορά των αισθητηρίων που μελετήσατε.
- Συγκρίνετε τα δεδομένα της απευθείας μέτρησης θερμοκρασίας με το 21X-Micrologger με εκείνα που συλλέξατε με τη διάταξη της άσκησης, για θερμοζεύγος τύπου T. Αφού μελετήσετε το κείμενο του εγχειριδίου λειτουργίας του 21X-Micrologger που επισυνάπτεται, διατυπώστε τα συμπεράσματά σας για τις δύο διαδικασίες μέτρησης και τα σφάλματα που τις επιβαρύνουν.
- Αιτιολογήστε την απόφαση για υιοθέτηση της συνδεσμολογίας αντιστάθμισης ψυχρής επαφής.

### Βιβλιογραφία

- Μικροαισθητήρες: Αρχές και Εφαρμογές, J. Gardner, Εκδόσεις. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2000.
- Sensors and Signal Conditioning, J.G. Webster, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- Experimental Methods for Engineers, J. Holman, McGraw-Hill, New York, 2001.
- 21X Micrologger Instruction Manual, Issue 1.4.92, Campbell Scientific.

## THERMOCOUPLE LIMITS OF ERROR

The standard reference which lists thermocouple output voltage as a function of temperature (reference junction at 0°C) is the National Bureau of Standards Monograph 125 (1974). The American National Standards Institute has established limits of error on thermocouple wire which is accepted as an industry standard (ANSI MC 96.1, 1975). Table 13.4-1 gives the ANSI limits of error for standard and special grade thermocouple wire of the types accommodated by the 21X.

When both junctions of a thermocouple are at the same temperature, there is no voltage produced (law of intermediate metals). A consequence of this is that a thermocouple cannot have an offset error; any deviation from a standard (assuming the wires are each homogeneous and no secondary junctions exist) is due to a deviation in slope. In light of this, the fixed temperature limits of error (e.g.,  $\pm 1.0^\circ\text{C}$  for type T as opposed to the slope error of 0.75 % of the temperature) in the table above are probably greater

than one would experience when considering temperatures in the environmental range. In other words, the reference junction, at 0°C, is relatively close to the temperature being measured, so the absolute error (the product of the temperature difference and the slope error) should be closer to the percentage error than the fixed error. Likewise, because thermocouple calibration error is a slope error, accuracy can be increased when the reference junction temperature is close to the measurement temperature. For the same reason, differential temperature measurements, over a small temperature gradient, can be extremely accurate.

In order to quantitatively evaluate thermocouple error when the reference junction is not fixed at 0°C, one needs limits of error for the Seebeck coefficient (slope of thermocouple voltage vs. temperature curve) for the various thermocouples. Lacking this information, a reasonable approach is to apply the percentage errors, with perhaps 0.25 % added on, to the difference in temperature being measured by the thermocouple.

TABLE 13.4-1. Limits of Error for Thermocouple Wire (Reference Junction at 0°C)

Thermocouple Type	Temperature Range °C	Limits of Error (Whichever is greater)	
		Standard	Special
T	-200 to 0	$\pm 1.0^\circ\text{C}$ or 1.5 %	
	0 to 350	$\pm 1.0^\circ\text{C}$ or 0.75 %	$\pm 0.5^\circ\text{C}$ or 0.4 %
J	0 to 750	$\pm 2.2^\circ\text{C}$ or 0.75 %	$\pm 1.1^\circ\text{C}$ or 0.4 %
E	-200 to 0	$\pm 1.7^\circ\text{C}$ or 1.0 %	
	0 to 900	$\pm 1.7^\circ\text{C}$ or 0.5 %	$\pm 1.0^\circ\text{C}$ or 0.4 %
K	-200 to 0	$\pm 2.2^\circ\text{C}$ or 2.0 %	
	0 to 1250	$\pm 2.2^\circ\text{C}$ or 0.75 %	$\pm 1.1^\circ\text{C}$ or 0.4 %

## ACCURACY OF THE THERMOCOUPLE VOLTAGE MEASUREMENT

The accuracy of a 21X voltage measurement is specified as 0.1 % (0.05 % 0 to 40°C) of the full scale range being used to make the measurement. The actual accuracy may be better than this as it involves a slope error (the error is proportional to the measurement being made though limited by the resolution). The error in the temperature due to inaccuracy in the measurement of the thermocouple voltage is worst at temperature extremes, where a relatively large scale is necessary to read the thermocouple output. For example, assume type K (chromel-alumel) thermocouples are used to measure temperatures at 1000°C. The TC output is of the order of 40mV, requiring the  $\pm 50\text{mV}$  input range. The accuracy specification of 0.05 % FSR is 25 $\mu\text{V}$  which is a temperature error of about 0.6°C. In the environmental temperature range with voltage measured on an appropriate scale, error in temperature due to the voltage measurements is a few hundredths of a degree.

## THERMOCOUPLE POLYNOMIALS: Voltage to Temperature

NBS Monograph 125 gives high order polynomials for computing the output voltage of a given thermocouple type over a broad range of temperatures. In order to speed processing and accommodate the 21X's mathematics and storage

TABLE 13.4-2. Limits of Error on 21X Thermocouple Polynomials (Relative to NBS Standards)

TC Type	Range °C	Limits of Error °C
T	-270 to 400	
	-270 to -200	+18 @ -270
	-200 to -100	$\pm 0.08$
	-100 to 100	$\pm 0.001$
J	100 to 400	$\pm 0.015$
	-150 to 760	$\pm 0.008$
	-100 to 300	$\pm 0.002$
E	-240 to 1000	
	-240 to -130	$\pm 0.4$
	-130 to 200	$\pm 0.005$
	200 to 1000	$\pm 0.02$
K	-50 to 1372	
	-50 to 950	$\pm 0.01$
	950 to 1372	$\pm 0.04$

capabilities, 4 separate 6th order polynomials are used to convert from volts to temperature over the range covered by each thermocouple type. Table 13.4-2 gives error limits for the thermocouple polynomials.