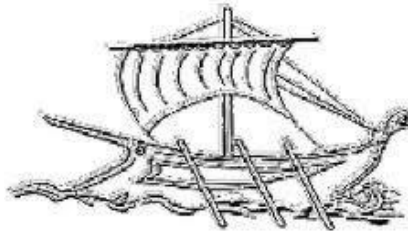


ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.



Α.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

**Βαθμονόμηση αισθητήρα θερμοκρασίας σε dry-well και σύγκρισή
του με αισθητήρα θερμοκρασίας εντός θερμαινόμενου κιβωτίου**

ΚΑΣΤΡΙΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2017

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ Π. Ράλλη & Θηβών 250, 12244 Αιγάλεω, Αθήνα – Ελλάδα Τηλ. 210-5381227

Περίληψη

Σκοπός της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι η δημιουργία της βασικής διάταξης για μία εργαστηριακή άσκηση, με αντικείμενο τη σύγκριση διαφορετικών τύπων θερμικών αισθητήρων με ένα βαθμονομημένο αισθητήρα υψηλής ακρίβειας. Η διάταξη αποτελείται από δύο υποσυστήματα:

1. Ένα κιβώτιο με δεδομένα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά το οποίο έχει τη δυνατότητα ταχείας θέρμανσης μέσω μιας θερμαντικής αντίστασης που είναι τοποθετημένη στο εσωτερικό του
2. Ένα δεύτερο υποσύστημα αποτελούμενο από θερμικό αισθητήριο τύπου PT100, με έλεγχο της βαθμονόμησής του με χρήση Dry-well και βαθμονομημένου αισθητηρίου.

Η πτυχιακή εργασία αυτή εξετάζει μερικούς από τους βασικούς τύπους θερμικών αισθητήρων καθώς και την υλοποίηση του μετρητικού υποσυστήματος με χρήση του PT100.

Δευτερεύων σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι στο να κατανοήσει ο αναγνώστης τον τρόπο λειτουργίας διαφορετικών θερμικών αισθητηρίων και να τεκμηριωθεί η χρήση του dry-well, για τον έλεγχο της βαθμονόμησης αισθητηρίων θερμοκρασίας.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ. στο εργαστήριο των Μετρήσεων Τεχνικών Μεγεθών υπό την επίβλεψη του Δρ. Ιωάννη Λεκάκη και του κ. Αντωνίου Μαϊτού.

ABSTRACT

The focus of my dissertation is the development of a device for a laboratory exercise. The exercise aims to compare common temperature sensors against a dry-well calibrated sensor within a heated box. In the context of the dissertation we will refer into the categories that the thermal sensors are divided, how they constructed, where they used, as well as their advantages and disadvantages. The procedure of checking the calibration of RTD sensors and utilizing a Dry-well for this purpose is documented.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
ABSTRACT	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	5
1.1 Θερμοκρασία	5
1.2 Αισθητήρες	5
1.3 Χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	7
1.4 Στατικά χαρακτηριστικά	7
1.5 Δυναμικά χαρακτηριστικά	10
1.6.1 Θερμοζεύγη.....	13
1.7 Τύποι θερμοζευγών σε σχέση με τη χρήση τους.....	15
1.8 Θερμοηλεκτρικές Αντιστάσεις (RTD)	15
1.9 Ολοκληρωμένο κύκλωμα LM35.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	21
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	21
2.1 Εισαγωγή στη Βαθμονόμηση	21
2.2. Τι είναι η βαθμονόμηση.....	22
2.2.1 Συγκρίσεις.....	23
2.3 Αβεβαιότητα στη βαθμονόμηση	24
2.3 ITS-90.....	25
2.4 Δυναμική και Στατική Βαθμονόμηση.....	27
2.5 Μέθοδοι Βαθμονόμησης αισθητήρων θερμοκρασίας.....	29
2.6 Βαθμονόμηση θερμοκού αισθητήρα (RTD)	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	33
3.1 Εργαστηριακή διάταξη.	33
3.2 Παραδοχές για την εργαστηριακή διαδικασία	35
3.3 Μορφοτροπέας USB για μετρήσεις με θερμοζεύγος (USB NI TC-01)	36
3.2 Αισθητήρας θερμοκρασίας RTD (Pt 100).....	37
3.4 Αισθητήρας θερμοκρασίας Semi Standard PRT	38
3.5 Οργανο ανάκτησης δεδομένων (ψηφιακό πολύμετρο υψηλής ακρίβειας).	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΙΚΟΝΟΡΓΑΝΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ LabVIEW	42
4.1 Εισαγωγή στο LabVIEW	42
4.2 Λήψη δεδομένων μέσω LabVIEW.....	42
4.3 Οδηγός/λογισμικό για λήψη δεδομένων DAQ assistant.....	43
4.4 Arduino	44
4.5 Σύνδεση LabVIEW/Arduino μέσω Linx	45
4.6 Επεξήγηση εικονοργάνου για την διεξαγωγή του πειράματος.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	50
5.1 Διαδικασία λήψης μετρήσεων από τις εργαστηριακές διατάξεις.....	50
5.2 Αποτελέσματα μετρήσεων των αισθητηρίων τύπου RTD.	50
5.3 Συγκριση των αποτελεσμάτων για τα RTDs και σχολιασμός.....	54
5.4 Μετρήσεις και πειραματικός προσδιορισμός της απόκρισης των αισθητηρίων. .	54
5.5 Σύγκριση των αισθητηρίων για χρήση με την πειραματική διάταξη.	58
Βιβλιογραφία.....	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΡΜΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

1.1 Θερμοκρασία

Θερμοκρασία είναι το φυσικό μέγεθος που μετρά την ενέργεια κίνησης ή ταλάντωσης της ύλης σε ατομικό επίπεδο και εκφράζει κατά πόσο ένα σύστημα ισορροπεί θερμικά με άλλα. Η ανταλλαγή της ενέργειας αυτής, όταν πιάνουμε κάτι με το χέρι για παράδειγμα, μας δίνει την αίσθηση του ζεστού και του κρύου, με την κατάσταση μεγαλύτερης ενέργειας να αντιστοιχεί στο «ζεστό» ή «θερμό», όταν συνολικά παίρνουμε ενέργεια, και της κατάστασης μικρότερης ενέργειας, κατά την οποία αντιλαμβανόμαστε να χάνουμε συνολικά ενέργεια, να αντιστοιχεί στο «κρύο».

Η θερμοκρασία στην πράξη είναι ακριβώς το μέτρο εκείνο με το οποίο προσδιορίζεται η "θερμική κατάσταση" των διαφόρων σωμάτων, είναι δηλαδή ένα φυσικό μέγεθος που συνδέεται με την μέση κινητική ενέργεια των σωματιδίων ενός συστατικού, το οποίο και χαρακτηρίζει πόσο θερμό ή πόσο ψυχρό είναι αυτό.

Το αίτιο που δημιουργεί το αίσθημα του θερμού ή ψυχρού είναι η θερμότητα, η οποία όταν χορηγείται ή αφαιρείται από ένα σώμα, προκαλεί "μεταβολή θερμοκρασίας" (ύψωση ή υποβιβασμό). Συνεπώς θερμότητα και θερμοκρασία είναι διαφορετικές έννοιες. Η μεν θερμότητα είναι μορφή ενέργειας, η δε θερμοκρασία ιδιότητα και μέγεθος

Ο ορισμός της θερμοκρασίας είναι ο ακόλουθος: Θερμοκρασία (T) είναι μια βαθμωτή ποσότητα που φέρουν τα σώματα και η οποία χαρακτηρίζει τον τρόπο που αλληλοεπιδρούν θερμικά μεταξύ τους. Έτσι, όταν οι θερμοκρασίες δυο σωμάτων που βρίσκονται σε θερμική επαφή διαφέρουν, θερμότητα μεταφέρεται από το σώμα υψηλότερης προς το σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Στην θερμική ισορροπία, τα δυο σώματα έχουν την ίδια θερμοκρασία. Συνεπώς μπορούμε να έχουμε κατά νου τον εξής αλγόριθμο για δυο σώματα A και B με θερμοκρασίες T_1 και T_2 : Τα A και B βρίσκονται σε θερμική ισορροπία; Εάν ναι, τότε $T_1 = T_2$. Εάν όχι, τότε $T_1 > T_2$ εάν θερμότητα ρέει από το A προς το B και $T_2 > T_1$ εάν ρέει αντίστροφα. (Κουζούδης 2011).

1.2 Αισθητήρες

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τους αισθητήρες γενικότερα και τα χαρακτηριστικά τους. Έμφαση θα δώσουμε σε αυτούς με τους οποίους μας δίνετε η δυνατότητα να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία του μετρούμενου αντικειμένου, τους οποίους και

ονομάζουμε θερμικούς αισθητήρες. Η λειτουργία των θερμικών αισθητήρων βασίζεται στην εξάρτηση κάποιας ιδιότητάς τους από τη θερμοκρασία.

Οι αισθητήρες είναι τα όργανα εκείνα, που μας επιτρέπουν να μετρήσουμε φυσικά μεγέθη, ώστε αφού πρώτα κατανοήσουμε το σύστημα στο οποίο μετράμε, να μπορούμε έπειτα να ελέγξουμε και να αυτοματοποιήσουμε τη λειτουργία τους. Οι αισθητήρες, ανάλογα με τον προορισμό του ο καθένας, ανιχνεύουν συγκεκριμένες πληροφορίες στο χώρο που επιτηρούν. (Καλοβρέκτης 2012)

Τις πληροφορίες αυτές, αρχικά τις μετατρέπουν στην κατάλληλη μορφή και στη συνέχεια τις μεταφέρουν στο αυτόματο σύστημα επεξεργασίας των πληροφοριών. Εκεί γίνεται η αξιολόγησή τους και λαμβάνονται οι απαραίτητες αποφάσεις, για την καλύτερη λειτουργία του συστήματος. Οι αισθητήρες ενός συστήματος επιτελούν καθένας, παρόμοιο έργο, με εκείνο που επιτελούν και τα αισθητήρια όργανα του ανθρώπου, δηλαδή η όραση, η αφή, η όσφρηση, η ακοή και η γεύση. Σήμερα, με την τεχνολογική ανάπτυξη, έχει κατασκευαστεί πλήθος αισθητήρων, που είναι κατάλληλοι για την ανίχνευση φυσικών και βιολογικών μεγεθών. Σε μηχανολογικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται συνήθως :

- ✓ Αισθητήρες θερμοκρασίας, π.χ. θερμοζεύγη, RTD, θερμίστορ, κ.λπ
- ✓ Αισθητήρες πίεσης, π.χ. μανόμετρα, πιεσόμετρα, κ.λπ.
- ✓ Αισθητήρες ροής, π.χ. παροχόμετρα, διακόπτες ροής.

Οι μετρήσεις των φυσικών μεγεθών γίνονται με τη βοήθεια αισθητηρίων (sensors). Αυτά είναι διατάξεις που διαθέτουν κάποια κατάλληλη ιδιότητα, η οποία μεταβάλλεται ως συνάρτηση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους (Λεκάκης 2009). Συνεπώς η μέτρηση της ιδιότητας του αισθητήρα επιτρέπει τον άμεσο ποσοτικό υπολογισμό της τιμής του φυσικού μεγέθους. Η μελέτη και εφαρμογή στην πράξη των αισθητήρων αποτελεί αντικείμενο της Οργανολογίας (Instrumentation).

Ένας αισθητήρας αποτελείται συνήθως από δύο διακριτά τμήματα το πρώτο, είναι αυτό που αντιλαμβάνεται και μετατρέπει τη μετρήσιμη φυσική ή χημική ποσότητα σε ηλεκτρικά μετρήσιμο σήμα κι ονομάζεται *Μετατροπέας (Transducer)*. Το δεύτερο, ηλεκτρονικό τμήμα, είναι αυτό που μετατρέπει το σήμα του μετατροπέα σε κάποιο τυποποιημένης μορφής σήμα κι ονομάζεται *Κύκλωμα Οδήγησης (Driving Circuit)*

Ο μετατροπέας είναι το κρισιμότερο μέρος ενός αισθητήρα. Η ποιότητά του και η αρχή κατασκευής του καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα (περιοχή λειτουργίας, ακρίβεια). Για να γίνει δυνατή η κατασκευή ενός μετατροπέα κάποιου μακροσκοπικού

μεγέθους, θα πρέπει να υλοποιηθεί μια δομή σύμφωνα με την οποία είναι δυνατόν οι μεταβολές του μακροσκοπικού μεγέθους να επιφέρουν μεταβολή σε ένα ηλεκτρικά μετρήσιμο μέγεθος.

Ένα ακόμα σημαντικό κομμάτι των αισθητήρων που αξίζει να αναφερθούμε είναι το περίβλημα μέσα στο οποίο συναρμολογείται. Καθορίζεται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο θα τοποθετηθεί και χρησιμοποιείται σαν μέσο προστασίας του αισθητήρα από το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται, (υψηλή θερμοκρασία, διαβρωτική ατμόσφαιρα, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές).

Κατά συνέπεια, τα χαρακτηριστικά του περιβλήματος ενός αισθητήρα δύναται να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση του ίδιου του αισθητήρα, ιδίως στον χρόνο απόκρισής του. Τελικό κριτήριο για την τελική διαμόρφωση του αισθητήρα είναι το περιβάλλον μέσα στο οποίο θα τοποθετηθεί και η κρισιμότητα των μετρήσεων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν.

1.3 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Για κάθε αισθητήρα είναι σημαντική η σχέση μεταξύ της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας A και της μεταβλητής Y που εκφράζει τη μεταβαλλόμενη ποσότητα που λαμβάνουμε στο σήμα εξόδου. Με βάση αυτή τη σχέση καθορίζονται τα χαρακτηριστικά του και γίνεται η βαθμονόμηση του αισθητήρα με εφαρμογή γνωστών φυσικών μεγεθών και παρατήρηση/καταγραφή της απόκρισης του σήματος. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθορίζουν την απόδοσή του, τη σταθερότητα της λειτουργίας του καθώς και την ταχύτητα απόκρισης στα ερεθίσματα που δέχεται.

Τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά των αισθητήρων λοιπόν διακρίνονται σε:

- Στατικά χαρακτηριστικά
- Δυναμικά χαρακτηριστικά

1.4 Στατικά χαρακτηριστικά

Τα στατικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα καθορίζουν την απόδοσή του σε μια σταθερή κατάσταση και είναι τα ακόλουθα (Καλόμοιρος, Μπουλαδάκης, και Πεταλάς 2002):

Ακρίβεια

Η ακρίβεια (accuracy) ισούται με το σφάλμα που περιέχει η τιμή που αποδίδει ο αισθητήρας στην έξοδο και δηλώνει την αβεβαιότητα που υπάρχει στην τιμή της εξόδου. Μπορεί να

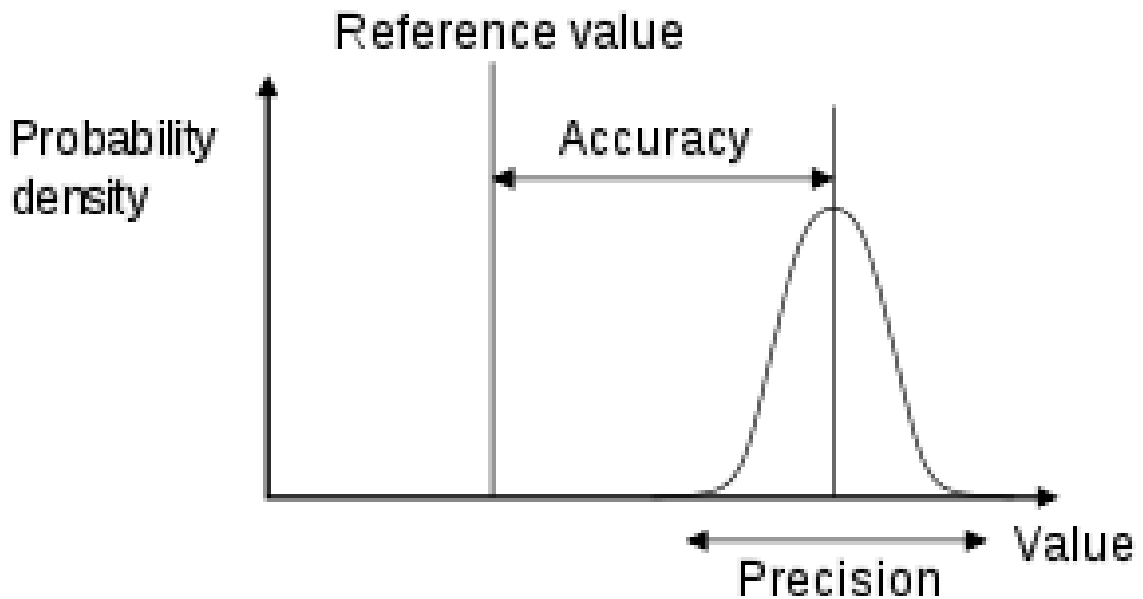
εκφράζεται σε απόλυτες τιμές (για παράδειγμα $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$) ή επί τοις εκατό (για παράδειγμα 1%). Στην πρώτη περίπτωση η ανακρίβεια είναι σταθερή και ανεξάρτητη της τιμής του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Στην ποσοστιαία έκφραση της, η ανακρίβεια είναι ανάλογη της τιμής εξόδου που παρέχει ο αισθητήρας.

Διακριτική Ικανότητα

Ορίζεται ως η ελάχιστη μεταβολή της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας που χρειάζεται για να παρατηρηθεί ανιχνεύσιμη μεταβολή στο σήμα εξόδου.

Πιστότητα

Είναι η ικανότητα ενός μετρητικού συστήματος να δίνει το ίδιο αποτέλεσμα όταν μετρά την ίδια φυσική ποσότητα υπό τις ίδιες συνθήκες. Σχετίζεται με τη στατιστική διακύμανση των μετρήσεων. Η πιστότητα είναι απαραίτητη αλλά όχι αρκετή συνθήκη για την ακρίβεια. Στην εικόνα 1.1, απεικονίζεται η διαφορά της έννοιας της πιστότητας (Precision), από την έννοια της Ακρίβειας (Accuracy), για μια κατανομή μετρήσεων.



Εικόνα 1.1 Βασικά στατικά χαρακτηριστικά αισθητήρων

Ικανότητα αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων

Είναι η πιστότητα των μετρήσεων σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, ή σε διαφορετικά εργαστήρια, ή χρησιμοποιώντας διαφορετικό εξοπλισμό.

Εναισθησία

Η εναισθησία ενός αισθητήρα είναι η παράγωγος της συνάρτησης μεταφοράς ως προς τη μετρήσιμη φυσική ποσότητα για μια ορισμένη τιμή της ποσότητας αυτής. Για μια γραμμική

συνάρτηση μεταφοράς, η ευαισθησία του αισθητήρα είναι σταθερή. Ένας αισθητήρας με ιδανικά χαρακτηριστικά έχει μεγάλη και σταθερή ευαισθησία.

Για παράδειγμα, εάν ένας αισθητήρας θερμοκρασίας έχει ευαισθησία $1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, συνεπάγεται ότι παράγει έξοδο ίση με 1 mV για κάθε βαθμό της μετρούμενης θερμοκρασίας και προφανώς είναι πιο ευαίσθητος από έναν άλλο αισθητήρα με ευαισθησία $0.5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, ο οποίος για κάθε θερμοκρασία παράγει ως έξοδο τη μισή τάση.

Ολίσθηση

Ολίσθηση (drift) είναι η αργή μεταβολή του σήματος εξόδου του αισθητήρα, ενώ το μετρούμενο φυσικό μέγεθος παραμένει σταθερό. Μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες, όπως η θερμοκρασία λειτουργίας, υγρασία κλπ. Η μακροχρόνια ολίσθηση (long-term drift) είναι η μεταβολή των χαρακτηριστικών του αισθητήρα με την πάροδο μεγάλου χρονικού διαστήματος και μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες, όπως η διάβρωση τμημάτων του αισθητήρα, η ρύπανση του αισθητήρα, η γήρανση των υλικών κατασκευής κλπ.

Πλήρης κλίμακα εισόδου

Ορίζεται ως η μέγιστη μεταβολή της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας την οποία μπορεί να μετρήσει ο αισθητήρας με σχετική ακρίβεια.

Πλήρης κλίμακα εξόδου

Ορίζεται ως η αλγεβρική διαφορά μεταξύ των τιμών εξόδου ενός αισθητήρα που αντιστοιχούν στην μέγιστη και την ελάχιστη ανιχνεύσιμη τιμή της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας.

Υστέρηση

Είναι η απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων του αισθητήρα σε μονοτονικά αυξανόμενες και ελαττωμένες τιμές εισόδου.

Σφάλμα μη γραμμικότητας

Ορίζεται μόνο για αισθητήρες με γραμμική συνάρτηση μεταφοράς, η οποία στην πράξη δεν είναι τελείως γραμμική. Για να έχει νόημα το σφάλμα αυτό, πρέπει να ορίσουμε την ευθεία γραμμή σε σχέση με την οποία θα το μετρήσουμε. Μια συνήθης επιλογή είναι η ευθεία που προκύπτει από την ανάλυση των τιμών των μετρήσεων με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Το σφάλμα μη γραμμικότητας υπολογίζεται ως ποσοστό του εύρους τιμών εξόδου.

Σφάλματα βαθμονόμησης

Τα σφάλματα βαθμονόμησης οφείλονται στην κακή βαθμονόμηση του αισθητήρα. Έτσι, αν η βαθμονόμηση δεν γίνει αναλυτικά (για κάθε σημείο της συνάρτησης μεταφοράς) αλλά για λίγα μόνο αντιπροσωπευτικά σημεία, προκύπτει ένα συστηματικό σφάλμα. Τα σφάλματα βαθμονόμησης μπορεί επίσης να σχετίζονται με την ανακρίβεια στη γνώση της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας κατά τη βαθμονόμηση ή την λανθασμένη καταγραφή της απόκρισης του αισθητήρα στην αλλαγή αυτής της ποσότητας.

Συστηματικά σφάλματα

Τα συστηματικά σφάλματα είναι αποτέλεσμα διάφορων παραγόντων όπως:

- Μεταβλητές που επηρεάζουν τη λειτουργία του αισθητήρα (π.χ. θερμοκρασία)
- Αλλαγές στη χημική σύνθεση ή μηχανική τάση εξαρτημάτων του αισθητήρα
- Επίδραση της μετρητικής διαδικασίας στη μετρήσιμη φυσική ποσότητα
- Φαινόμενα εξασθένησης του σήματος
- Τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να διορθωθούν με τεχνικές αντιστάθμισης όπως η ανάδραση και το φιλτράρισμα.

Τυχαίος θόρυβος

Τυχαίος θόρυβος είναι ένα σήμα που δε μεταφέρει δεδομένα. Ο λευκός θόρυβος περιγράφεται από μια ομοιόμορφη κατανομή (για θεωρητικά άπειρες μετρήσεις). Μπορεί να οφείλεται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες ή να σχετίζονται με τη μετρητική διαδικασία και τη μετάδοση του σήματος. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις του, θα πρέπει ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο να είναι πολύ μεγαλύτερος της μονάδας.

1.5 Δυναμικά χαρακτηριστικά

Η απόκριση ενός αισθητήρα σε ένα μεταβλητό σήμα εισόδου είναι διαφορετική από την απόκριση σε ένα σταθερό σήμα εισόδου. Η απόκριση χαρακτηρίζεται από μια δυναμική συμπεριφορά που δε μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο λόγος για αυτή τη δυναμική συμπεριφορά είναι η παρουσία εξαρτημάτων που συσσωρεύουν ενέργεια όπως μάζες, πυκνωτές, επαγωγικά ή θερμικά στοιχεία κ.α. (Davies 2012)

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα προσδιορίζονται εξετάζοντας την απόκριση του σε διάφορες κυματομορφές του σήματος εισόδου. Αυτές μπορεί να είναι κυματομορφές ώθησης, βήματος, γραμμικές, ημιτονοειδείς ή θορύβου (Σχήμα 1.2).



Εικόνα 1.2 Κυματομορφές σήματος εισόδου

Σε ένα πραγματικό αισθητήρα η συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά του πάντα αποκλίνουν από τον ιδανικό. Οι αιτίες είναι τόσο τα κατασκευαστικά προβλήματα που προκύπτουν όσο και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία του. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα που συνοδεύει έναν αισθητήρα μπορεί επίσης να επιβάλλει περιορισμούς στη λειτουργία του.

Πίνακας 1.1 Ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά αισθητήρα

Χαρακτηριστικό	Σημασία
Μη γραμμικότητα	Η απόκριση δεν είναι ανάλογη προς το σήμα εισόδου.
Αργή απόκριση	Η έξοδος αργεί να φτάσει στην τιμή μόνιμης κατάστασης (αισθητήριο με μεγάλη χρονική σταθερά).
Εύρος λειτουργίας	Η περιοχή λειτουργίας περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό.
Χαμηλή ευαισθησία	Ο αισθητήρας αποκρίνεται μόνο σε μεγάλες αλλαγές του σήματος εισόδου
Σφάλμα ολίσθησης	Η έξοδος μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τις εξωτερικές συνθήκες, πχ. θερμοκρασία περιβάλλοντος.
Σφάλμα αντιστάθμισης (offset).	Το συστηματικό σφάλμα εξόδου που διαθέτει ο αισθητήρας σε σχέση με την πραγματική τιμή εξόδου
Ολίσθηση αντιστάθμισης	Μετατόπιση του συστηματικού λάθους στην έξοδο ως προς το χρόνο.

Γήρανση	Η έξοδος του αισθητήρα μεταβάλλεται μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα.
Παρεμβολή	Η έξοδος είναι ευαίσθητη σε εξωτερικές πηγές (π.χ. παρασιτική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία).
Υστέρηση	Η έξοδος εξαρτάται από προηγούμενες τιμές εξόδου.
Θόρυβος	Η έξοδος περιλαμβάνει ένα ανεπιθύμητο τυχαίο σήμα.

Πίνακας 1.2. Επιθυμητά χαρακτηριστικά αισθητήρα

Χαρακτηριστικά	Ιδανική τιμή
Απόκριση Δy	Γραμμική και χωρίς "θόρυβο".
Χρόνος απόκρισης τ	Μηδενικό για στιγμιαία απόκριση
Εύρος συχνοτήτων	Άπειρο
Χρόνος ως το 90 % της τελικής τιμής, t_{90}	Μηδέν για στιγμιαία απόκριση
Ένδειξη πλήρους κλίμακας, y_{max}	Βαθμονομημένη μέγιστη έξοδος
Περιοχή λειτουργίας, $y_{max} - y_{min}$	Άπειρη
Ευαισθησία, S	Υψηλή και σταθερή σε όλη την περιοχή λειτουργίας
Διακριτική ικανότητα	Άπειρη

1.6 Βασικά είδη αισθητήρων θερμοκρασίας

Ένα από τα βασικότερα αισθητήρια μέτρησης της θερμοκρασίας είναι τα θερμόμετρα και η λειτουργία τους στηρίζεται στην αλλαγή κάποιας χαρακτηριστικής ιδιότητας ενός επιλεγμένου υλικού. Οι ιδιότητες που μπορούν να αξιοποιηθούν για την μέτρηση της θερμοκρασίας είναι οι παρακάτω:

1. Η γραμμική διαστολή ενός υγρού (θερμόμετρα υδραργύρου)
2. Η γραμμική διαστολή ενός μετάλλου (μεταλλικά θερμόμετρα)
3. Η ηλεκτρική αντίσταση ενός μετάλλου (RTDs)
4. Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο (θερμοζεύγη)
5. Η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα θερμό σώμα (πυρόμετρα)

1.6.1 Θερμοζεύγη

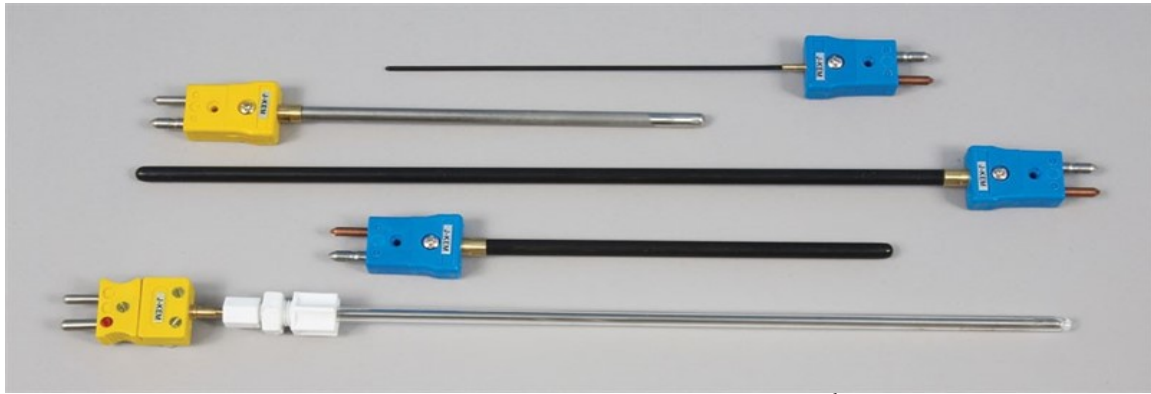
Η αρχή λειτουργίας των θερμοζευγών στηρίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο Seebeck, το οποίο ανακαλύφθηκε το 1821. Ένα θερμοζεύγος αποτελείται από δύο αγωγούς, διαφορετικών μετάλλων ή κραμάτων μετάλλων. Όταν δυο διαφορετικά μέταλλα έρθουν σε επαφή αναπτύσσεται μεταξύ τους μια διαφορά δυναμικού E (Seebeck) που εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας ΔT και το είδος των μετάλλων. Για μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας ΔT ισχύει ο τύπος $E = \alpha \cdot \Delta T$, όπου α ο συντελεστής Seebeck σε $\mu V/^{\circ}C$.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας με το θερμοζεύγος γίνεται τοποθετώντας το στην περιοχή ή το σώμα που θέλουμε να μετρήσουμε και μετρώντας την τάση στα άκρα του, με κατάλληλο όργανο. Η επαφή των αγωγών της συσκευής μέτρησης της τάσης, με τους αγωγούς του θερμοζεύγους δημιουργεί ένα επιπλέον δυναμικό επαφής.

Η λύση του προβλήματος της δημιουργίας νέων δυναμικών επαφής λύνεται με ένα από τους παρακάτω τρόπους:

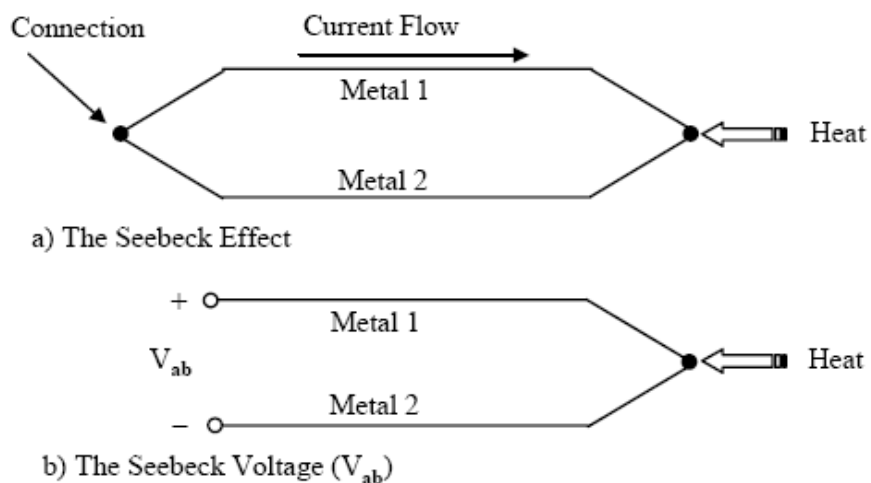
1. Διατηρώντας τη θερμοκρασία στις άλλες επαφές σταθερή (συνήθως στους $0^{\circ}C$), ώστε να έχουμε σταθερό σφάλμα. Τις επαφές σε σταθερή γνωστή θερμοκρασία τις ονομάζουμε επαφές αναφοράς.
2. Με λογισμική αντιστάθμιση. Μετράμε την θερμοκρασία στις επαφές αναφοράς, υπολογίζουμε την τάση E_1 στις επαφές αναφοράς μέσω πινάκων, μετράμε την τάση E_2 στο θερμοζεύγος και αφαιρώντας την τάση E_2 από την E_1 , παίρνουμε την τάση μέσω της οποίας υπολογίζουμε την θερμοκρασία που μας ενδιαφέρει.
3. Με ηλεκτρονική αντιστάθμιση.

Η μέτρηση θερμοκρασίας με θερμοζεύγος είναι αρκετά διαδεδομένη. Ένα θερμοζεύγος αποτελείται από δύο ανόμοια μέταλλα που συνδέονται μεταξύ τους σε δύο σημεία και σχηματίζουν ένα κλειστό κύκλωμα στο οποίο η μία επαφή είναι τοποθετημένη σε μια προστατευτική θήκη και αποτελεί το μετρητή του οργάνου μας, γιατί έρχεται σε επαφή με το σώμα άγνωστης θερμοκρασίας. Εάν μια επαφή διατηρείται σε διαφορετική θερμοκρασία από την άλλη, τότε θα υπάρχει ροή ρεύματος στο κύκλωμα. Το μέγεθος και η κατεύθυνση αυτού εξαρτώνται από το είδος των μετάλλων και τη διαφορά θερμοκρασίας των επαφών. Το μέγεθος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που προκύπτει είναι μικρό, της τάξης των μερικών mV.



Εικόνα 1.3 Θερμοζεύγη εντός περιβλήματος.¹

Έστω ότι συνδέονται τα άκρα δύο συρμάτων από διαφορετικό υλικό, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4. Αν η ένωση 1 βρίσκεται σε θερμοκρασία T_1 , και η ένωση 2 σε θερμοκρασία T_2 θα κυκλοφορήσει ένα ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από τα σύρματα το οποίο θα προσδιορίζεται από τον νόμο του Ohm.



Εικόνα 1.4 Θερμοηλεκτρικό κύκλωμα

Τα θερμοζεύγη έχουν μεγάλη περιοχή μέτρησης, το οποίο αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η γρήγορη απόκρισή τους, η οποία μπορεί να είναι της τάξεως των msec. Η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως:

- από την θερμοκρασία λειτουργίας
- το περιβάλλον λειτουργίας και τη διάμετρο των καλωδίων τους
- από τον τύπο του θερμοστοιχείου.

¹<http://www.jkem.com/temperature-controllers/accessories/thermocouples/thermocouples>

1.7 Τύποι θερμοζευγών σε σχέση με τη χρήση τους

1. Το θερμοζεύγος τύπου T είναι κατάλληλο για υγρό περιβάλλον καθώς και για ελαφρά οξειδωτικό περιβάλλον. Συνιστάται για μετρήσεις χαμηλών θερμοκρασιών.
2. Το θερμοζεύγος τύπου E μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κενό καθώς και σε ελαφρά οξειδωτικό περιβάλλον. Σε χαμηλές θερμοκρασίες δεν υφίσταται διάβρωση.
3. Το θερμοζεύγος J είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στην βιομηχανία.
4. Το θερμοζεύγος K μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οξειδωτικό περιβάλλον.
5. Τα θερμοζεύγη με λευκόχρυσο έχουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση και οξείδωση. Το υδρογόνο, ο άνθρακας και ατμοί μετάλλων (π.χ. σιδήρου) επιδρούν στο θερμοζεύγος σε υψηλές θερμοκρασίες.

Θερμοζεύγη και εύρος λειτουργίας:

- ΤΥΠΟΥ B (0 - 1820°C)
- ΤΥΠΟΥ C (0 - 2320°C)
- ΤΥΠΟΥ D (0 - 2320°C)
- ΤΥΠΟΥ E (-270-1000°C)
- ΤΥΠΟΥ G (0 - 2320°C)
- ΤΥΠΟΥ J (-210 - 1200°C)
- ΤΥΠΟΥ K (-270 - 1370°C)
- ΤΥΠΟΥ R (-50 - 1768°C)
- ΤΥΠΟΥ S (-50 - 1768°C)
- ΤΥΠΟΥ T (-270 - 400°C)

Πλεονεκτήματα θερμοζευγών:

- Μεγάλο εύρος τιμών
- Γρήγορη απόκριση
- Λειτουργούν και σε θερμοκρασίες κοντά στις 2500°C
- Μεγάλες αντοχές σε καιρικές συνθήκες και πολύ δύσκολα οξειδώνουν
- Τα θερμοζεύγη από ευγενή μέταλλα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής

1.8 Θερμοηλεκτρικές Αντιστάσεις (RTD)

Όπως είναι γνωστό, η ηλεκτρική αντίσταση των μετάλλων αυξάνει καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Άρα, είναι δυνατό να κατασκευαστεί μια διάταξη μέτρησης της θερμοκρασίας,

μετρώντας την ηλεκτρική αντίσταση ενός πρότυπου μετάλλου, καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία του. Έτσι, κατασκευάζονται οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις (RTDs). Η μέτρηση της αντίστασης ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου γίνεται με τη βοήθεια γέφυρας Wheatstone ή με τη βοήθεια πηγής ρεύματος, που διεγείρει κατάλληλα τη θερμοηλεκτρική αντίσταση.

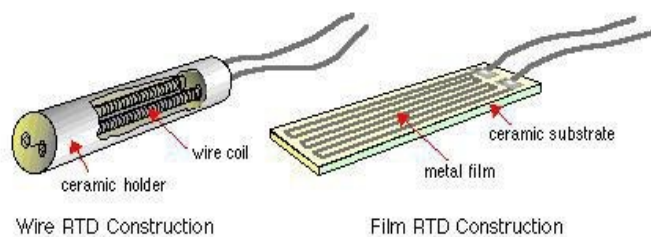
Οι θερμοηλεκτρικές αντιστάσεις έχουν καλύτερη γραμμικότητα και είναι γενικά πιο ακριβείς από τα θερμοζεύγη, καθώς έχουν διακριτική ικανότητα μικρότερη του ενός βαθμού Κελσίου. Εξαρτώνται από την απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας και όχι απλώς από τη θερμοκρασιακή μεταβολή, όπως συμβαίνει στα θερμοζεύγη, άρα δεν έχουν ανάγκη από θερμοκρασίες αναφοράς. Όμως απαιτούν εξωτερική διέγερση.



Εικόνα 1.5 RTD τύπου PT100

Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργαστηριακές και βιομηχανικές εφαρμογές ακριβείας. Τυπικό μέταλλο για την κατασκευή θερμοηλεκτρικών αντιστάσεων είναι η πλατίνα. Τα θερμομέτρα αντίστασης κατασκευάζονται σε δυο κυρίως τύπους, σε μορφή σύρματος ή λεπτού μεταλλικού φιλμ:

1. Στη μορφή σύρματος χρησιμοποιείται σύρμα σε διπλή περιέλιξη, για να αποφεύγονται τα ηλεκτρομαγνητικά παράσιτα, σε πυρήνα από κεραμικό υλικό, με ίδιο συντελεστή διαστολής με το σύρμα.
2. Στη μορφή λεπτού φιλμ το μέταλλο στερεώνεται σε μορφή λεπτού φιλμ επάνω σε κεραμικό υλικό και είναι σφραγισμένο.



Εικόνα 1.6²

Οι θερμοαντιστάτες είναι παθητικοί μετατροπείς, όταν διαρρέονται από ρεύμα, η θερμοκρασία τους αυξάνεται ανάλογα με την θερμική αγωγιμότητα αντίστασης-περιβάλλοντος, οπότε δίνουν σφάλματα λόγω αυτοθέρμανσης. Για να μειωθούν τα σφάλματα χρησιμοποιείται το μικρότερο δυνατό ρεύμα μέτρησης, η μεγαλύτερη σε μέγεθος αντίσταση, με αποδεκτό χρόνο απόκρισης και γίνεται συχνά βαθμονόμηση. Επιπλέον, επειδή συνήθως ο συντελεστής α και η απόλυτη τιμή της αντίστασης είναι μικροί αριθμοί, οδηγούν σε σφάλματα εξαιτίας της αντίστασης των αγωγών σύνδεσης. Αυτό το πρόβλημα λύνεται με χρήση γέφυρας Wheatstone και μεταλλάκτη τριών αγωγών ή με την τεχνική των τεσσάρων αγωγών, στην οποία μετράμε την πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης.

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Άρα η μέτρηση της ειδικής αντίστασης μπορεί να οδηγήσει στην μέτρηση της θερμοκρασίας. Θεωρητικά οι αντιστάσεις – θερμομέτρα μπορούν να κατασκευαστούν από πληθώρα υλικών. Επειδή όμως η συνάρτηση ειδικής αντίστασης και θερμοκρασίας δεν είναι ίδια για όλα τα υλικά στην θερμότητα χρησιμοποιείται συνήθως λευκόχρυσος, νικέλιο και χαλκός. Οι αντιστάσεις λευκόχρυσου θεωρούνται η καλύτερη επιλογή για αισθητήρα επαφής, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις θερμοκρασίας από 14K έως και 960K, με ακρίβεια που αγγίζει το 1mK.

Ο ίδιος αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες περιοχές θερμοκρασιών χωρίς να εμφανίσει φαινόμενα υστέρησης. Τα χαρακτηριστικά του παραμένουν ιδιαίτερα σταθερά, ακόμη και μετά από πολλούς κύκλους χρήσης. Υπάρχουν διάφορες μορφές PRTs, αλλά σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων ακρίβειας χρησιμοποιούνται κατά αποκλειστικότητα.

Είναι σημαντικό σε αυτή την ενότητα να αναφέρουμε την βασική εξίσωση όσο αφορά αυτό το είδος των αισθητήρων. Η εξίσωση Callendar-Van Dusen περιγράφει τη σχέση μεταξύ

²http://www.thermocouplertd.com/introduction_rtds.html

της αντίστασης (R) και θερμοκρασίας (T). Η πιο απλοποιημένη της μορφή καταδεικνύεται στην (1.1). και ισχύει για θερμοκρασίες από 0°C έως και 660°C .

$$R(T) = R(0) (1+AT+BT^2) (1.1)$$

Όπου οι σταθερές A και B προέρχονται από τον πειραματικό προσδιορισμό παραμέτρων χρησιμοποιώντας μετρήσεις που έχουν γίνει στους 0°C στους 100°C και στους 260°C . Η συγκεκριμένη εξίσωση είναι η βασική που συσχετίζει τη θερμοκρασία με την αντίσταση και απευθύνεται ιδανικά για θεرمόμετρα μεταβαλλόμενης αντίστασης κατασκευασμένα από πλατίνα των οποίων όμως οι παράμετροι έχουν διαπιστωθεί πειραματικά.

1.9 Ολοκληρωμένο κύκλωμα LM35

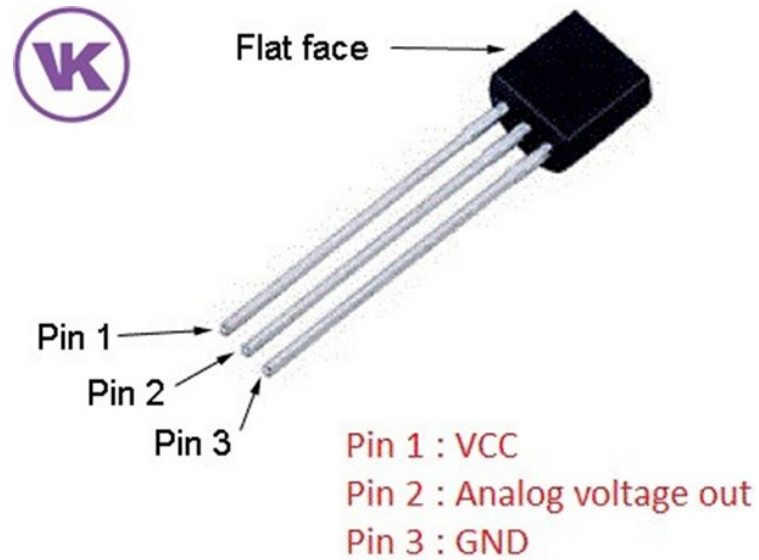
Η σειρά LM 35 είναι μια συλλογή αισθητηρίων θερμοκρασίας ενσωματωμένου κυκλώματος υψηλής ακρίβειας, η τάση των οποίων είναι γραμμικά ανάλογη με τη μονάδα μέτρησης θερμοκρασίας σε Celsius.

Το LM 35 έχει το πλεονέκτημα έναντι άλλων γραμμικών αισθητηρίων θερμοκρασίας που μετράνε σε Kelvin ότι δεν απαιτεί από το χρήστη την αφαίρεση μιας μεγάλης σταθεράς από τη μετρήσιμη τιμή για να λάβει μια βολική Centigrade τιμή. Το LM 35 δεν απαιτεί κάποια εξωτερική ρύθμιση για να δώσει τις τυπικές ακρίβειές του $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$ σε θερμοκρασία δωματίου και του $\pm 3/4^{\circ}\text{C}$ πάνω σε ένα εύρος από -55°C έως και $+150^{\circ}\text{C}$ [7]

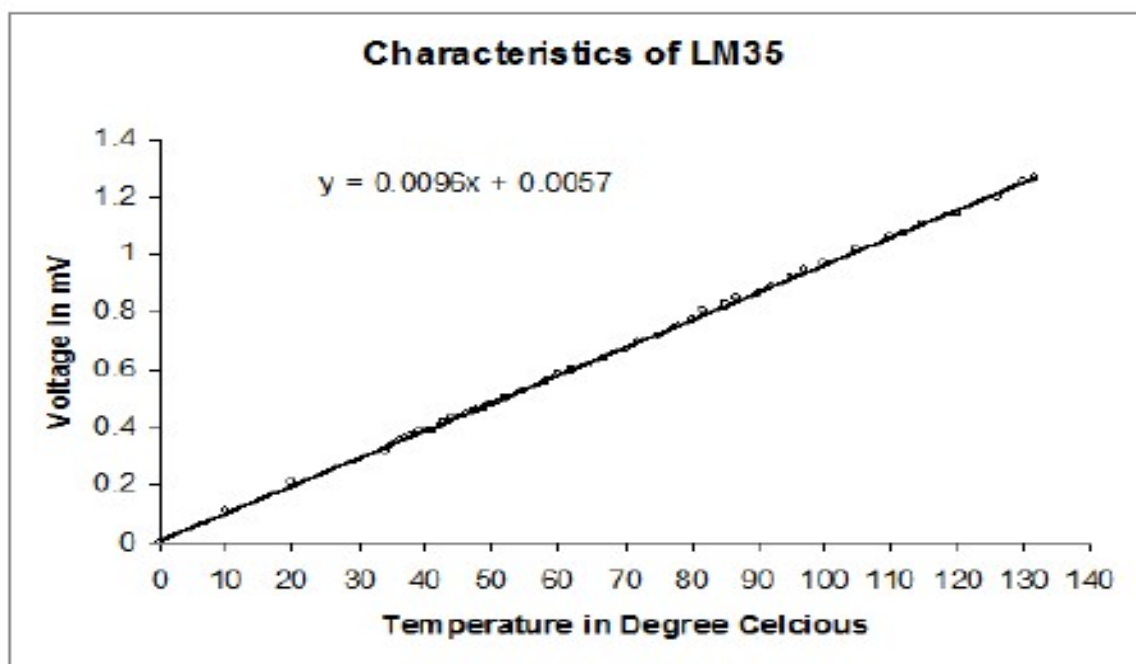
Τα Χαρακτηριστικά του LM 35, αναλύονται παρακάτω:

- Ρυθμισμένο απευθείας σε $^{\circ}\text{C}$
- Γραμμικό με σταθερό όρο κλίμακας $+ 10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$
- Εγγυημένη ακρίβεια 0.5°C στους 25°C
- Εύρος λειτουργίας από -55°C έως και $+150^{\circ}\text{C}$
- Λειτουργία από 4 έως και 30 Volts
- Λιγότερη από $60\mu\text{A}$ κατανάλωση ρεύματος
- Χαμηλή αυτοθέρμανση 0.08°C σε κενό αέρος.
- Μη γραμμικότητα μόνο στο $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$
- Χαμηλή αντίσταση εξόδου, 0.1 W για 1mA φορτίο.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ένας τυπικός αισθητήρας LM 35, η γραμμικότητα της τάσης του σε σχέση με τη θερμοκρασία καθώς και ο τρόπος σύνδεσης με έναν αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα. Πχ. τον Arduino.

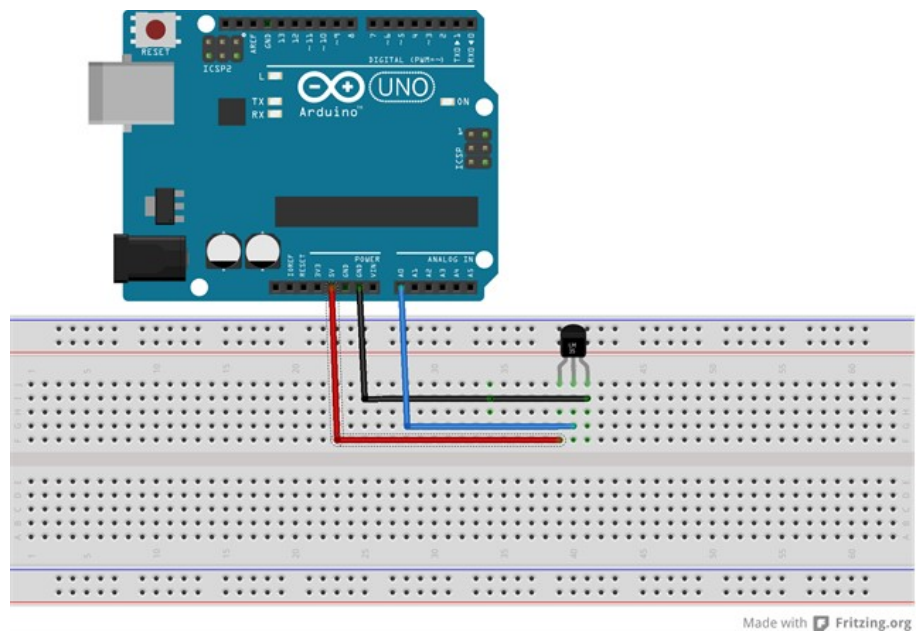


Εικόνα 1.7 Αισθητήρας LM35³



Εικόνα 1.8 Διάγραμμα Τάσης Θερμοκρασίας για το ARDUINOLM35.

³<http://vinduino.blogspot.gr/2013/07/how-to-sense-temperature-lm-35.html>



Εικόνα 1.9 Σύνδεση Arduino με lm35⁴

³<https://arduino.stackexchange.com/questions/20734/arduino-to-breadboard-with-lm35-temp-sensor/20736>
⁴https://www.researchgate.net/figure/229066236_fig5_Figure-5-Graph-for-the-characteristics-of-the-LM35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

2.1 Εισαγωγή στη Βαθμονόμηση

Στο κεφάλαιο αυτό θα συζητηθεί η βαθμονόμηση, τι είναι, για ποιους λόγους γίνεται και με ποιες μεθόδους πραγματοποιείται η συγκεκριμένη διαδικασία.

Από το ξεκίνημα των εμπορικών συναλλαγών δημιουργήθηκε αμέσως η ανάγκη να βρεθεί ο τρόπος με τον οποίο οι ενδιαφερόμενοι θα μπορούσαν να ανταλλάσσουν προϊόντα και έτσι χρησιμοποιήθηκε το νόμισμα που κατά μια γενική έννοια είναι ένα είδος βαθμονόμησης της αξίας των προϊόντων. Με την έννοια αυτή αν ένα αγαθό Α κοστίζει 5€ και ένα αγαθό Β κοστίζει 10€, δίνεται άμεσα στον ενδιαφερόμενο να καταλάβει τη σχέση της τιμής με το προϊόν.

Αντίστοιχο παράδειγμα για την έννοια της βαθμονόμησης είναι να αναρωτηθεί κανείς «τι ώρα είναι;». Οι περισσότεροι άνθρωποι συντονίζουν/βαθμονομούν τα ρολόγια τους από μια πηγή την οποία θεωρούν αξιόπιστη. (π.χ. ηλεκτρονικά ρολόγια, χρήση του ιντερνέτ) χρησιμοποιώντας τα επί της ουσίας σαν σημείο αναφοράς, ώστε να μπορούν να έχουν όλοι την ίδια εκτίμηση για το χρόνο.

Συνεπώς καταλαβαίνουμε ότι ακόμα και η διόρθωση της ώρας σε ένα ρολόι είναι ένας τρόπος βαθμονόμησης του ρολογιού μας σε σχέση με ένα άλλο το οποίο χρησιμοποιήσαμε σαν ρολόι που εμπιστευόμαστε την ορθότητα της ένδειξής του. Συνεπώς καταλαβαίνουμε πως η βαθμονόμηση είναι μια διαδικασία, η οποία αφενός μπορεί να λάβει χώρα σε εργαστήρια και χρησιμοποιώντας ακριβά και πιστοποιημένα όργανα, αλλά μπορεί να γίνει ακόμα και στο σπίτι ένα είδος διόρθωσης/βαθμονόμησης όσον αφορά μεγέθη τα οποία είναι τόσο διαδεδομένα όπως ο χρόνος. Η τόσο μεγάλη ανάγκη για την χρησιμοποίηση της ένδειξης του χρόνου και με τη συμβολή πάντα της ανάπτυξης της τεχνολογίας έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν σχεδόν παντού αξιόπιστες πηγές όσον αφορά την μέτρηση του χρόνου.

Στο παρελθόν η μέτρηση του χρόνου βασιζόταν στην περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της (μια πλήρης περιστροφή είναι μια μέρα). Όμως επειδή ο πλανήτης μας εμφανίζει διαχρονικά μια αστάθεια στον άξονα της περιστροφής του, μερικές μέρες μπορεί να είναι μικρότερες από άλλες.

Η δημιουργία το 1955 των ατομικών ρολογιών, που μετρούν τον χρόνο με βάση τις «ταλαντώσεις» των ατόμων (όταν αυτά μεταπίπτουν από την μια ενεργειακή κατάσταση σε μια άλλη), έλυσε αυτό το πρόβλημα, καθώς πλέον ο χρόνος δεν μετρείται με βάση ένα αστρονομικό γεγονός. Ένα «νέφος» ατόμων καισίου εκτίθεται σε ακτινοβολία μικροκυμάτων, με συνέπεια την ταλάντωσή τους, που μετρά τον χρόνο. Η νέα τεχνική χρησιμοποιείται από το 1967 για τον ορισμό του δευτερολέπτου στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων.

Ας εξετάσουμε όμως την έννοια της βαθμονόμησης από την σκοπιά που μας ενδιαφέρει και είναι η βαθμονόμηση της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τα είδη της βαθμονόμησης. Θα επεξηγηθεί ο τρόπος με τον βαθμονομούνται τα αισθητήρια Pt100. Οι θερμο-αντιστάσεις (RTDs) τύπου Pt100, θα χρησιμοποιηθούν κατόπιν σαν αισθητήρια όργανα για τη λήψη μετρήσεων εντός θερμαινόμενου κιβωτίου.

2.2. Τι είναι η βαθμονόμηση

Βαθμονόμηση ενός μετρητικού οργάνου είναι η ρύθμιση που κάνει ο χειριστής του οργάνου πριν από μια μέτρηση για να εξασφαλίσει ορθότητα στην τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η έννοια της βαθμονόμησης σχετίζεται με τον όρο της «Ιχνηλασιμότητας», και συχνά χρησιμοποιείται με την έννοια της Διακρίβωσης.

Ιχνηλασιμότητα είναι η ιδιότητα ενός αποτελέσματος μιας μέτρησης ή η τιμή μιας σταθεράς που μπορούν να συσχετιστούν με δηλωθέντες αναφορές συνήθως εθνικές ή εθνικά πρότυπα, διαμέσου μιας αλυσίδας συγκρίσεων καθεμιά των οποίων έχει δηλωμένη αβεβαιότητα. Βαθμονομήσεις είναι οι συγκρίσεις οι οποίες εγκαθιδρύουν τους "συνδέσμους στην αλυσίδα της ιχνηλασιμότητας.

Με τον όρο βαθμονόμηση, εννοούμε μια σειρά διαδικασιών που καθιστούν -κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες- τη σχέση μεταξύ των ποσοτικών τιμών που μας δίνει η ένδειξη του μετρούμενου οργάνου ή συστήματος, ή τιμές αντιπροσωπευτικές από μία μέτρηση υλικού (material measure) ή από ένα υλικό αναφοράς και τις αντίστοιχες τιμές που καθορίζονται από τα πρότυπα.(J.V Nicholas και D.R. White 2001)

Από τον παραπάνω ορισμό γίνεται σαφές ότι ο κύριος λόγος της βαθμονόμησης είναι να παρέχει το σύνδεσμο μεταξύ της μετρητικής κλίμακας του οργάνου και τον ορισμό της κλίμακας από το SI (International System). Ένας πίνακας με διορθώσεις ή με εξισώσεις που συνδέουν τις ενδείξεις των μετρήσεων του οργάνου με την κλίμακα του SI δεν είναι από μόνο του αρκετό. Πρέπει να αναλογιστούμε και το σφάλμα που έχουμε στις διορθωμένες ενδείξεις

του οργάνου, το οποίο σφάλμα μπορεί μόνο να καθοριστεί μέσω της σύγκρισης του οργάνου με ένα πιο ακριβές όργανο. Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι 3 είναι οι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να υπάρχουν σε μία διαδικασία βαθμονόμησης.

1. Η σύνδεση στο SI, για θερμομέτρα η σύνδεση με το “ITS- 90 temperature scale”
2. Η αβεβαιότητα στις ενδείξεις του οργάνου
3. Η αξιοπιστία του οργάνου

2.2.1 Συγκρίσεις

Σύγκριση ενός σημείου: είναι η πιο απλή διαδικασία και περιλαμβάνει τη σύγκριση μίας μέτρησης του θερμομέτρου και της θερμοκρασίας αναφοράς από τη διεθνή θερμοκρασιακή κλίμακα (ITS-90). Το αποτέλεσμα της σύγκρισης είναι η διόρθωση της ένδειξης του θερμομέτρου. Όμως για να ταξινομηθεί αυτή η διαδικασία σαν βαθμονόμηση θα πρέπει να γίνει εκτίμηση της αβεβαιότητας στην τιμή της διορθωμένης ένδειξης. Σε περίπτωση που κάτι τέτοιο δεν γίνει αυτή η διαδικασία θα πρέπει να λαμβάνεται σαν επαλήθευση των μετρήσεων και όχι σαν βαθμονόμηση.

Συγκρίσεις μικρού εύρους: Παίρνοντας ένα μεγάλο αριθμό μετρήσεων σε μία θερμοκρασία, αμέσως παρέχονται πληροφορίες για την διασπορά των ενδείξεων του προς βαθμονόμηση θερμομέτρου και μας επιτρέπει τον υπολογισμό της αβεβαιότητας. Για να μπορούμε να έχουμε ένα ασφαλές συμπέρασμα της αβεβαιότητας οι μετρήσεις δεν πρέπει να είναι ακριβώς στην ίδια θερμοκρασία αλλά να ληφθούν με γνώμονα το εύρος των θερμοκρασιών που είναι κοντά στις θερμοκρασίες που το όργανο μας θα μετρήσει. Αυτή η διαδικασία είναι χρήσιμη για την βαθμονόμηση θερμομέτρων αναφοράς. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να ληφθούν αρκετές μετρήσεις ώστε να χαρακτηριστεί με ακρίβεια η συμπεριφορά του θερμομέτρου στο επιθυμητό εύρος θερμοκρασίας. Οι διορθώσεις για τις ενδείξεις που λαμβάνουμε μεταξύ των σημείων της βαθμονόμησης μπορούν να προσδιοριστούν μέσω μιας παρεμβολής. Η γραμμική παρεμβολή είναι ένας κοινός τρόπος να το δείξουμε αυτό, αλλά για να το επιτύχουμε θα πρέπει τα σημεία να είναι κοντά μεταξύ τους. Παραδείγματος χάρη ένα καλό θερμομέτρο αναφοράς χρειάζεται 10 με 12 σημεία βαθμονόμησης σε καθένα από τα οποία θα πρέπει να γίνονται 6 μετρήσεις. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζονται 60 με 70 διαφορετικές μετρήσεις για να βαθμονομηθεί ένα θερμομέτρο αναφοράς.

Συγκρίσεις μεγάλου εύρους: Υπάρχει ακόμα ένας διαφορετικός τρόπος με τον οποίο μπορούμε να προσεγγίσουμε τη βαθμονόμηση τόσο σε θερμομέτρα αναφοράς, όσο και σε

θερμόμετρα εργασίας, με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ο τρόπος αυτός αν και είναι πιο δύσκολος και πιο περίπλοκος όσον αφορά τη μαθηματική επεξεργασία των αποτελεσμάτων αλλά είναι αρκετά χρήσιμος μιας και μας επιτρέπει να μειώσουμε τον αριθμό των σημείων βαθμονόμησης. Τα πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων είναι ότι έχουμε ένα καλύτερο «ταίριασμα» της εξίσωσης της βαθμονόμησης τονίζοντας το σφάλμα παρεμβολής και παρέχει την αβεβαιότητα για όλες τις θερμοκρασίες στο εύρος της βαθμονόμησης. Οι μετρήσεις θα πρέπει να γίνονται σε ισαπέχοντα σημεία θερμοκρασίας στο εύρος του οργάνου. Τα αποτελέσματα συνήθως εκφράζονται σαν μία διορθωμένη εξίσωση με ορισμένη αβεβαιότητα. Η χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων στην εξίσωση της βαθμονόμησης είναι ο πλέον κατάλληλος τρόπος για την βαθμονόμηση μη γραμμικών αισθητήρων όπως τα RTD's και θερμοζεύγη.

2.3 Αβεβαιότητα στη βαθμονόμηση

Είναι πλέον αντιληπτό πως δεν μπορεί να υπάρξει μέτρηση, ότι είδους και να είναι χωρίς σφάλμα. Για αυτό το λόγο και στη βαθμονόμηση είναι απαραίτητο ο προσδιορισμός αυτού του σφάλματος. Στη θερμομετρία υπάρχουν τουλάχιστον 4 παράγοντες που συμβάλουν στην αβεβαιότητα της βαθμονόμησης.

1. Αβεβαιότητα στις ενδείξεις του θερμομέτρου αναφοράς.
2. Αλλαγές στη σταθερότητα και την ομοιομορφία του αισθητήρα
3. “ Τυχαίες” αποκλίσεις από την καθορισμένη σχέση του ITS-90
4. Αβεβαιότητα λόγω της υστέρησης

Αβεβαιότητα στις ενδείξεις του θερμομέτρου αναφοράς

Το θερμόμετρο αναφοράς είναι στην ουσία ο σύνδεσμος μεταξύ του θερμομέτρου προς βαθμονόμηση και του ITS-90. Κάθε σφάλμα ανάγνωσης στη κλίμακα του θερμομέτρου αναφοράς μεταφέρεται και στο προς βαθμονόμηση αισθητήρα μας. Για αυτό είναι πολύ σημαντικό να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη σωστή λήψη των μετρήσεων έτσι ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν πιο έγκυρα αποτελέσματα γίνεται.

Αλλαγές στη σταθερότητα και την ομοιομορφία του αισθητήρα

Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης θεωρούμε ότι το θερμόμετρο αναφοράς και το προς βαθμονόμηση θερμόμετρο βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία. Όμως στην πράξη όσο καλά και να ρυθμίζουμε το μέσο στο οποίο θα κάνουμε τη βαθμονόμηση (μπάνια, φούρνοι,) πάντα θα υπάρχει μια μικρή διαφορά στις θερμοκρασίες των θερμομέτρων.

“ Τυχαίες” αποκλίσεις από την καθορισμένη σχέση του ITS-90

Όλα τα θερμομέτρα έχουν τουλάχιστον μία αποδεχτή εξίσωση βαθμονόμησης. Αυτές οι εξισώσεις αποτελούν καλές περιγραφές της απόκρισης του αισθητήρα. Για παράδειγμα τα RTD's σε θερμοκρασίες πάνω από τους 0 βαθμούς έχουν τετραγωνική σχέση μεταξύ αντίστασης και θερμοκρασίας και είναι συνήθως κοντά στα πρότυπα.

Αβεβαιότητα λόγω της υστέρησης

Η υστέρηση είναι η ιδιότητα του θερμομέτρου της οποίας η ένδειξη εξαρτάται από την προηγούμενη έκθεση του σε διαφορετική θερμοκρασία. Δυστυχώς αυτή την ιδιότητα τη συναντάμε σχεδόν σε όλα τα θερμομέτρα και είναι δύσκολο να εξαλείψουμε το φαινόμενο αυτό από τις μετρήσεις μας. Για αυτό το λόγο καλό είναι να κάνουμε τις μετρήσεις μας από τις χαμηλότερες θερμοκρασίες προς τις υψηλότερες. Παρόλα αυτά το φαινόμενο της υστέρησης δεν μπορεί να εξαλειφθεί . Ένας τρόπος με τον οποίον μπορούμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα όσο αφορά το μέγεθος της αβεβαιότητας λόγω της υστέρησης είναι να εξετάσουμε τη διαφορά στους 0 βαθμούς πριν και μετά τις διορθώσεις από τα πρότυπα του ITS-90.

Συνολική αβεβαιότητα

Είναι πλέον κατανοητό πως για να έχουμε αξιοπιστία στις μετρήσεις μας θα πρέπει να συνυπολογίσουμε όλους τους παράγοντες που συντελούν στη συνολική αβεβαιότητα του συστήματος. Η πιο απλή προσέγγιση είναι με την παρακάτω εξίσωση

$$U_{cal}^2 = U_{ref}^2 + U_{bath}^2 + U_{fit}^2 + U_{hys}^2 + \dots$$

Στην οποία κάθε μία από τις αβεβαιότητες είναι καθορισμένη στο ίδιο διάστημα εμπιστοσύνης, με το διάστημα εμπιστοσύνης 95 % να είναι συνήθως το καταλληλότερο.

2.3 ITS-90

Το ITS – 90 (International Temperature Scale of 1990) εκδόθηκε από τη Committee for Thermometry (CCT) και είναι ένα εργαλείο το οποίο χρησιμοποιούμε για τις βαθμονομήσεις όταν κάνουμε μετρήσεις σε κλίμακες K (Kelvin) και C (Celsius). Το ITS-90 αποτελεί μια προσέγγιση της θερμοδυναμικής θερμοκρασιακής κλίμακας που διευκολύνει τη συγκρισιμότητα, τη συμβατότητα των θερμοκρασιακών μετρήσεων παγκοσμίως. Παρόλο που στην κλίμακα του Kelvin και του Celsius προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας τα σημεία της τριφασικής ισορροπίας του νερού καταλαβαίνουμε πως δεν είναι πρακτικό για θερμοκρασίες που διαφέρουν πολύ από αυτή. Για αυτό το λόγο το ITS-90 ορίζει διάφορα σημεία τα οποία

είναι βασισμένα σε καταστάσεις ισορροπίας 14 καθαρών χημικών στοιχείων καθώς και τη χημική ένωση του νερού. Πολλά από τα καθορισμένα σημεία βασίζονται στη μετάπτωση φάσης ιδιαίτερα στο σημείο τήξης/πήξης καθαρών από προσμίξεων στοιχείων.

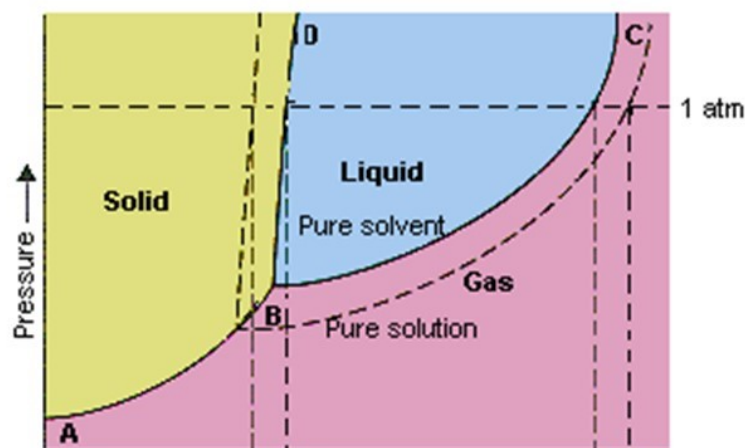
Αφού λοιπόν αναφερθήκαμε στο τι είναι το ITS-90 μπορούμε πιο εύκολα να κατανοήσουμε αυτή τη σύνθετη έννοια της βαθμονόμησης που κατά βάση κύριος σκοπός της είναι να προσδιορίζει τη σχέση της ένδειξης του θερμομέτρου και της θερμοκρασιακής κλίμακας του ITS-90. Για θερμοόμετρα τα οποία μας επιτρέπουν άμεση ανάγνωση της ένδειξης της μέτρησης όπως πχ (θερμόμετρο υδραργύρου) η συσχέτιση συνήθως είναι ένας πίνακας με διορθώσεις. Για αισθητήρες θερμοκρασίας από την άλλη όπως RTD's (Resistance Temperature Detectors) υπάρχει εξίσωση που συσχετίζει την αντίσταση ή την τάση με την θερμοκρασία.

Το βασικό ζητούμενο στη βαθμονόμηση θερμομέτρων είναι να συλλέξουμε αρκετά από τα χαρακτηριστικά του θερμομέτρου έτσι ώστε να είμαστε σε θέση να βρούμε τη σωστή εξίσωση και το μέτρο της ακρίβειάς της. Μαθηματικά για να εκφραστεί η συσχέτιση των μετρήσεων μας με τα σταθερά σημεία από το ITS-90 είναι η διαδικασία ορισμού μιας εξίσωσης παρεμβολής.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ώστε να προσεγγίσουμε τη βαθμονόμηση των ενδείξεων των μετρήσεων που έχουμε διεξάγει. Με σκοπό τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τα θερμοκρασιακά σημεία στο SI.

Στα σταθερά σημεία της διεθνούς θερμοκρασιακής κλίμακας σημαντικό ρόλο αν όχι τον σημαντικότερο κατέχει το θερμοκρασιακό σημείο της τριφασικής ισορροπίας του νερού. Είναι το απόλυτο σημείο που συνδέει τη θερμοδυναμική κλίμακα του Kelvin και του ITS-90. Οι προκαθορισμένες τιμές σε αυτές τις κλίμακες είναι 273.16 K και 0.01 °C αντίστοιχα. Είναι το πιο ακριβές σημείο από όλα τα άλλα σταθερά σημεία και με τη σωστή χρήση του μπορούμε να αντιληφθούμε μια ακρίβεια της τάξης της +0.0 , -0.00015 °C.

Ακόμα η τριφασική ισορροπία του νερού είναι η θερμοκρασία στην οποία αναφέρονται οι πίνακες αντίστασης – αναλογίας στους πίνακες βαθμονόμησης των αισθητηρίων οργάνων SPRT. Όπου σύμφωνα με το IPTS-68 (The International Practice Temperature Scale of 1968) ήταν στους 0 °C και σύμφωνα με το ITS-90 στους 0.01 °C. Ακόμα το σημείο αυτό παρέχει ένα χρήσιμο, ποιοτικό έλεγχο που πιστοποιεί την κατάσταση του θερμομέτρου.



5

Εικόνα 2.1 (τριφασικό σημείο ισορροπίας νερού)

2.4 Δυναμική και Στατική Βαθμονόμηση

Υπάρχει η στατική βαθμονόμηση, στην οποία οι τιμές της μετρούμενης μεταβλητής παραμένουν σταθερές σε σχέση με το χρόνο και η δυναμική βαθμονόμηση, όπου οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν είναι συνάρτηση του χρόνου και αυτή η χρονική συμπεριφορά είναι το ζητούμενο.

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας θα πραγματοποιηθεί στατική βαθμονόμηση. Οι μετρήσεις που θα ληφθούν θα είναι όλες ακριβώς ανά ίδια χρονικά διαστήματα (λήψη 20 μετρήσεων με καθυστέρηση 1 sec της μίας από την άλλη στην ίδια σταθεροποιημένη θερμοκρασία αναφοράς κάθε 30 min. Το χρονικό διάστημα των 30 λεπτών, είναι ο απαραίτητος χρόνος για να σταθεροποιηθεί το Drywell σε κάθε θερμοκρασία. Έτσι με αυτόν τον τρόπο η μετρούμενη μεταβλητή -η θερμοκρασία- είναι σταθερή σε συνάρτηση με το χρόνο και άρα ανεξάρτητη.

Αφού παραθέσαμε παραπάνω τον ορισμό της βαθμονόμησης καλό είναι να δούμε και τις διεθνείς κλίμακες που υπάρχουν πάνω σε αυτό τον τομέα.

Όπως αναφερθήκαμε και παραπάνω η θερμοδυναμική θερμοκρασία [Thermodynamic Temperature] (T₉₀) είναι μία από τις βασικές μονάδες στο παγκόσμιο σύστημα μονάδων [International System of units] (SI) και το Kelvin (K) μία βασική μονάδα όπου 1K = όπου T_{tp}: η θερμοδυναμική θερμοκρασία στη τριφασική κατάσταση του νερού.

Όμως καταλαβαίνουμε ότι, η θερμοδυναμική θερμοκρασία από μόνη της δεν είναι πρακτική μονάδα μέτρησης και έτσι η αντίληψη της θερμοκρασίας γίνεται χρησιμοποιώντας την

⁵<http://rebrn.com/re/cyclohexane-boiling-and-freezing-at-the-same-time-triple-point-x-19260>

Παγκόσμια Θερμοκρασιακή Κλίμακα. [International Temperature Scale] (ITS-90). Η κλίμακα αυτή είναι βασισμένη σε αυτά που αποκαλούμε σταθερά σημεία (fixed points) όπως για παράδειγμα η τριφασική κατάσταση, στο σημείο τήξης/πήξης καθαρών από προσμίξεις υλικών. Η θερμοδυναμική θερμοκρασία σε αυτά τα σημεία καθορίζεται πειραματικά και οι τιμές αυτές είναι συμφωνημένες και καθολικά αποδεκτές όσους χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη κλίμακα. Για να μετρηθεί η θερμοκρασία ανάμεσα σε αυτά τα σημεία χρησιμοποιούνται εξοπλισμοί οι οποίοι ονομάζονται εξοπλισμοί παρεμβολής. Σε εύρος από -259°C έως 962°C ένα θερμόμετρο αντίστασης πλατίνας [Standard Platinum Thermometer] (SPRT) χρησιμοποιείται από την ITS-90.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους πραγματοποιείται μία βαθμονόμηση αλλά σημαντικό θέμα είναι ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός. Παραδείγματος χάρη στην περίπτωση της βαθμονόμησης ενός σημείου (one point calibration) χρειαζόμαστε μόνο ένα θερμόμετρο αναφοράς. Για να μπορούμε όμως να χρησιμοποιήσουμε αυτό τον τρόπο βαθμονόμησης θα πρέπει ο αισθητήρας μας να έχει γραμμική συμπεριφορά καθώς και σωστή κλίση στο μετρητικό εύρος. Έτσι ένα σημείο αρκεί για τη διόρθωση του λάθους του αισθητήρα μας.

Αντίθετα στην περίπτωση των σταθερών σημείων βαθμονόμησης (fixed points calibration) την οποία επιλέξαμε και για την εργασία μας χρειάζεται μία γεννήτρια θερμοκρασίας τριών σημείων, τον ρόλο της οποίας θα έχει το 9141 drywell calibrator (Σχήμα 1).



Εικόνα 2.2 Γεννήτρια για βαθμονόμηση τριών σημείων (drywell calibrator)

2.5 Μέθοδοι Βαθμονόμησης αισθητήρων θερμοκρασίας

Η βαθμονόμηση των αισθητήρων θερμοκρασίας, όπως αναφερθήκαμε παραπάνω, μπορεί να γίνει είτε με τα σταθερά σημεία βαθμονόμησης, είτε με συγκριτική βαθμονόμηση. Στη δεύτερη περίπτωση οι τιμές αναφοράς και οι λαμβάνουσες τιμές από το προς βαθμονόμηση αισθητήριο όργανο συγκρίνονται σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες. Η διαδικασία της βαθμονόμησης μπορεί να διεξαχθεί σαν βαθμονόμηση ενός σημείου (one point calibration) ή σαν βαθμονόμηση πλήρους εύρους (full range calibration).

Στη βαθμονόμηση σταθερών σημείων, η αναφορά, η οποία ονομάζεται fixed point cell όταν λειτουργεί σωστά παράγει μία σταθερή τιμή θερμοκρασίας. Η τιμή αυτή διαβάζεται από το αισθητήριο το οποίο είναι τοποθετημένο εκεί. Έτσι μπορεί να μετρηθούν διάφορες σταθερές τιμές, οι οποίες θα συγκριθούν και θα διορθωθούν βάση των πινάκων της κλίμακας ITS-90 (Πίνακας 2.1,2.2).

Όπως προαναφέρθηκε αυτό το είδος βαθμονόμησης βασίζεται στα τριφασικά σημεία καθαρών στοιχείων, δηλαδή χωρίς προσμίξεις από το διεθνές σύστημα μονάδων SI.

Τα σταθερά αυτά σημεία προσδιορίζουν θερμοκρασίες στις οποίες οι ουσίες μεταβάλλονται, δηλαδή αλλάζουν κατάσταση. Το πιο σημαντικό σταθερό σημείο στη Διεθνή Κλίμακα είναι η τριφασική κατάσταση του νερού. σε θερμοκρασία 0.010°C , όπου η φυσική κατάσταση του στοιχείου αλλάζει συνεχώς από υγρή σε στερεά και σε αέρια. Παραθέτουμε στη συνέχεια τον πίνακα 2.2, με σταθερά σημεία, σύμφωνα με το ITS-90.

Γενικά αυτή η διαδικασία βαθμονόμησης γίνεται από εξειδικευμένα εργαστήρια επί της διαδικασίας και με υψηλό κόστος. Σαν θερμόμετρο αναφοράς χρησιμοποιούνται συνήθως υψηλής σταθερότητας PRT (High Stable PRTs), τα οποία εισάγονται σε κλειστά κελιά που κρατάνε τη θερμοκρασία σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα, όπως το Drywell που διαθέτει το εργαστήριο (Παράρτημα).

Στη βαθμονόμηση ενός σημείου χρησιμοποιείται η τιμή των 0°C σαν ρυθμιστικό σημείο για μερικά θερμόμετρα, η σταθερότητα των οποίων ελέγχεται από συχνά σημεία ψύξης και τους απαραίτητους διορθωτικούς υπολογισμούς. Σε αυτό το είδος βαθμονόμησης προϋπόθεση είναι το προς βαθμονόμηση αισθητήριο όργανο να βρίσκεται κοντά στο αισθητήριο αναφοράς, όπως επίσης και τα δύο να βρίσκονται σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτός ο τρόπος αν δεν συνοδεύεται από εκτίμηση σφάλματος δεν μπορεί να θεωρηθεί σαν βαθμονόμηση αλλά σαν ένα τρόπος να ελέγξουμε αν το όργανο μετράει ορθά.

Για να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση των Pt100, χρειάζεται απαραίτητως μία γεννήτρια θερμοκρασίας. Αυτή μπορεί να είναι μία συσκευή τύπου Drywell. Σε αυτό το είδος βαθμονόμησης τα μετρούμενα σημεία (συνήθως δύο ή πέντε σημεία) επιλέγονται ισομερώς από το μετρητικό εύρος του αισθητήρα ξεκινώντας από τη μικρότερη τιμή και καταλήγοντας στην μεγαλύτερη τιμή του εύρους.

Με αυτή λοιπόν τη λογική είναι δυνατή η χρήση θερμομέτρου αναφοράς στο Drywell και για κάθε αισθητήριο Pt100 που θα βαθμονομείται σε κάθε ένα από τα σημεία (set points) θα συγκρίνονται οι αποκλίσεις του αισθητήριου Pt100 σε σχέση με το θερμομέτρο αναφοράς.

Πίνακας 2.1 Τιμές αντίστασης σε Ohms, για θερμοκρασίες -200°C έως 0°C, σύμφωνα με το ITS-90, για αισθητήρες τύπου Pt100, με βήμα 5°C⁶

°C	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
-200	18.520	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-190	22.825	22.397	21.967	21.538	21.108	20.677	20.247	19.815	19.384	18.952
-180	27.096	26.671	26.245	25.819	25.392	24.965	24.538	24.110	23.682	23.254
-170	31.335	30.913	30.490	30.067	29.643	29.220	28.796	28.371	27.947	27.552
-160	35.543	35.124	34.704	34.284	33.864	33.443	33.022	32.601	32.179	31.757
-150	39.723	39.306	38.889	38.472	38.055	37.637	37.219	36.800	36.382	35.963
-140	43.876	43.462	43.048	42.633	42.218	41.803	41.388	40.972	40.556	40.140
-130	48.005	47.593	47.181	46.769	46.356	45.944	45.531	45.117	44.704	44.290
-120	52.110	51.700	51.291	50.881	50.470	50.060	49.649	49.239	48.828	48.416
-110	56.193	55.786	55.378	54.970	54.562	54.154	53.746	53.337	52.928	52.519
-100	60.256	59.850	59.445	59.039	58.633	58.227	57.821	57.414	57.007	56.600
-90	64.300	63.896	63.492	63.088	62.684	62.280	61.876	61.471	61.066	60.661
-80	68.325	67.924	67.522	67.120	66.717	66.315	65.912	65.509	65.106	64.703
-70	72.335	71.934	71.534	71.134	70.733	70.332	69.931	69.530	69.129	68.727
-60	76.328	75.929	75.530	75.131	74.732	74.333	73.934	73.534	73.134	72.735
-50	80.306	79.909	79.512	79.114	78.717	78.319	77.921	77.523	77.125	76.726
-40	84.271	83.875	83.479	82.083	82.687	82.290	81.894	81.497	81.100	80.703
-30	88.222	87.827	87.432	87.038	86.643	86.248	85.853	85.457	85.062	84.666
-20	92.160	91.767	91.373	90.980	90.586	90.192	89.798	89.404	89.010	88.616
-10	96.086	95.694	95.302	94.909	94.517	94.124	93.732	93.339	92.946	92.553
0	100.000	99.609	99.218	98.827	98.436	98.044	97.653	97.261	96.870	96.478

⁶http://www.uteco.gr/images/reference_values_according_to_en_60751-ITS90-for_pt100_temperature_sensors_1.jpg

Πίνακας 2.2 Πίνακας σταθερών σημείων θερμοκρασίας στοιχείων σε K και °C

Description	K	°C
Vapor pressure (VP) point of helium	3 to 5	-270.15 to -268.15
Equilibrium hydrogen at triple point (TP)	13.8033	259.3467
Equilibrium hydrogen at VP point	≈17	≈-256.15
Equilibrium hydrogen at VP point	≈ 20.3	≈-252.85
Neon at TP	24.5561	248.5939
Oxygen at TP	54.3584	218.7916
Argon at TP	83.8058	189.3442
Mercury at TP	234.3156	38.8344
Water at TP	273.16	0.01
Gallium at melting point (MP)	302.9146	29.7646
Indium at freezing point (FP)	429.7485	156.5985
Tin at FP	505.078	231.928
Zinc at FP	692.677	419.527
Aluminum at FP	933.473	660.323
Silver at FP	1234.93	961.78
Gold at FP	1337.33	1064.18
Copper at FP	1357.77	1084.62

7

2.6 Βαθμονόμηση θερμικού αισθητήρα (RTD)

Σε αυτή την ενότητα θα ασχοληθούμε εκτενέστερα με τη διαδικασία της βαθμονόμησης όσον αφορά τους θερμικούς αισθητήρες τους οποίους η αντίσταση είναι το χαρακτηριστικό που μεταβάλλεται συναρτήσει της απόλυτης τιμής της θερμοκρασίας. Ένας τυπικός αισθητήρας θερμοηλεκτρικής αντίστασης έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

Σύμφωνα με εγχειρίδια διαφόρων μεγάλων κατασκευαστών αισθητήρων θερμικών και όχι μόνο, υπάρχουν δύο διαφορετικές διαδικασίες όσον αφορά τη βαθμονόμηση των θερμοηλεκτρικών αντιστάσεων.

1. Χαρακτηριστική διαδικασία (Characterization)
2. Έλεγχος Ανοχής (Tolerance Testing)

Κατά τη πρώτη διαδικασία του χαρακτηρισμού μετράμε την αντίσταση του προς βαθμονόμηση αισθητήρα, τη συγκρίνουμε με αυτή του αισθητήρα αναφοράς και προχωράμε σε μία μαθηματική διόρθωση ώστε να προσδιορίσουμε τη νέα σχέση αντίστασης και θερμοκρασίας. Ενώ κατά τη διαδικασία ελέγχου ανοχής μετράμε τη θερμοκρασία του προς

⁷<http://www.instrumentation.co.za/article.aspx?pkarticleid=1958>

βαθμονόμηση αισθητήρα, τη συγκρίνουμε στη συνέχεια με αυτή του αισθητήρα αναφοράς και καθορίζουμε την κατάσταση ανοχής συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τις εκάστοτε απαιτήσεις της βαθμονόμησης. Η σύγκριση των τιμών της θερμοκρασίας γίνεται όπως αναφερθήκαμε και παραπάνω από τα σταθερά σημεία (fixed points) που χρησιμοποιούνται από τη διεθνή θερμοκρασιακή κλίμακα. Ο έλεγχος ανοχής πραγματοποιείται με τα ακόλουθα βήματα:

- Σύγκριση του προς βαθμονόμηση αισθητηρίου με ένα πρότυπο αισθητήριο
- Ανάγνωση της θερμοκρασίας του προς βαθμονόμηση αισθητηρίου
- Σύγκριση των τιμών της θερμοκρασίας με τα fixed points του ITS-90
- Καθορισμός για το εύρος ανοχής που συνεπάγεται και την κλάση του αισθητήρα .

Ο καθορισμός της κλάσης του αισθητήρα γίνεται από πίνακες και εξισώσεις της διεθνής θερμοκρασιακής κλίμακας.Συνοψίζοντας συμπεραίνουμε πως και στις δύο διαδικασίες

- Χρησιμοποιείται ο ίδιος εργαστηριακός εξοπλισμός
- Διαφέρει ο τρόπος με τον οποίο εξάγεται το αποτέλεσμα
- Η δοκιμή ανοχής είναι συνήθως γρηγορότερη
- Για βιομηχανικού τύπου αισθητήρες είναι η μόνη επιλογή

Ο πίνακας 2.3, δείχνει τις ανοχές για τις κλάσεις A και B των αισθητήρων Pt100, σύμφωνα με το DIN 43760

Πίνακας 2.3 Πίνακας κλάσεων Pt100⁸

Tolerance for Pt100's (± °C)				
Temp (°C)	Class B	Class A	1/3DIN	1/10DIN
-200	1.30	—	—	—
-100	0.80	—	—	—
-50	0.55	0.25	0.18	—
0	0.30	0.15	0.10	0.03
100	0.80	0.35	0.27	0.08
200	1.30	0.55	0.43	—
250	1.55	0.65	0.52	—
300	1.80	0.75	—	—
350	2.05	0.85	—	—
400	2.30	0.95	—	—
450	2.55	1.05	—	—
500	2.80	—	—	—
600	3.30	—	—	—

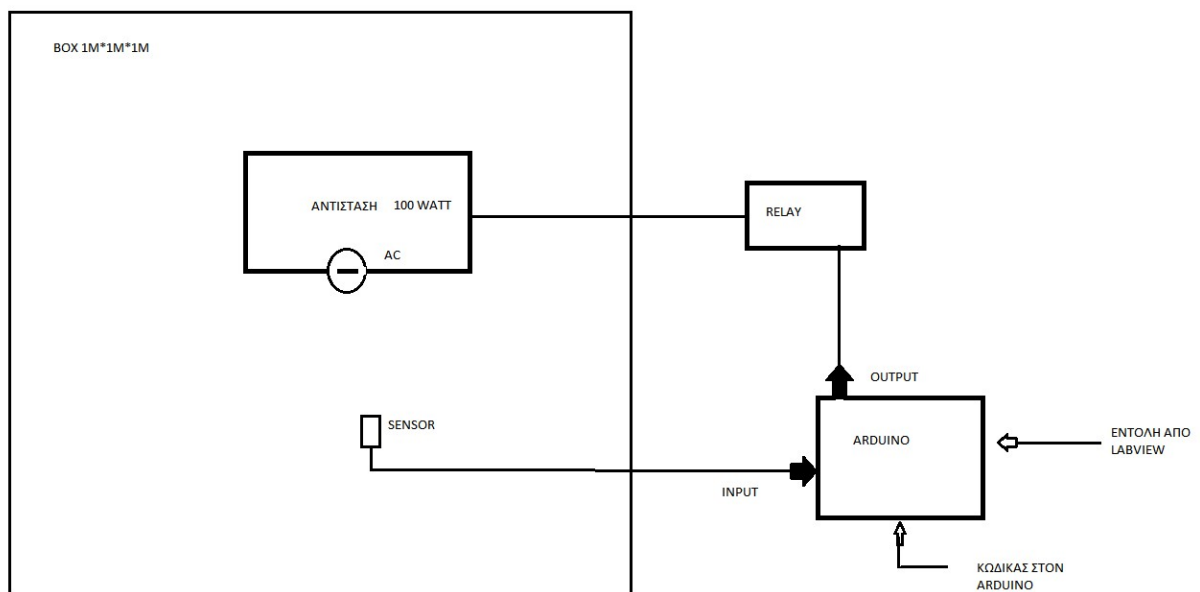
⁸<https://www.sterlingsensors.co.uk/rtds>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

3.1 Εργαστηριακή διάταξη.

Στο τρίτο κεφάλαιο καταγράφεται η διαδικασία που υλοποιήθηκε στο εργαστηριακό τμήμα της πτυχιακής. Η σχεδίαση της διαδικασίας βασίσθηκε στην υλοποίηση δύο υποσυστημάτων: ενός υποσυστήματος ανίχνευσης και ενός υποσυστήματος ελέγχου. Το υποσύστημα ανίχνευσης αποτελείται από μία διάταξη ανίχνευσης θερμοκρασίας USB TC-01 (National Instruments). Το υποσύστημα ελέγχου υλοποιείται με τη βοήθεια ηλεκτρονόμου ισχύος και αναλογικοψηφιακού μετατροπέα τύπου Arduino, και απεικονίζεται στην εικόνα 3.1.

Η λειτουργία της εργαστηριακής διάταξης βασίζεται στη χρήση του NI LabVIEW. Υλοποιήθηκε αλγόριθμος στο NI LabVIEW, ούτως ώστε η εργαστηριακή διάταξη να επιτηρεί το πείραμα. Ο αλγόριθμος καταγράφει τιμές θερμοκρασίας μέσω του υποσυστήματος ανίχνευσης και ελέγχει την έναρξη και λήξη της διαδικασίας μέσω του υποσυστήματος ελέγχου



Εικόνα 3.1 Σχεδιάγραμμα υποσυστήματος ελέγχου

Για την υλοποίηση του πειράματος, χρησιμοποιήθηκαν αρκετά εργαστηριακά όργανα και εξαρτήματα. Για τα όργανα αυτά πρώτα έγινε ανάγνωση εγχειριδίων και κατόπιν εξάσκηση σε βαθμονομήσεις, ούτως ώστε να γίνει κατανοητή η διαδικασία λειτουργίας του κάθε οργάνου καθώς και οι δυνατότητες και όρια του. Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν, ανήκουν γενικά σε δύο κατηγορίες, και έχουν καταχωρηθεί στον πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1 Οργανα εργαστηριακής διάταξης

A/A	ΕΙΔΟΣ	ΔΙΑΤΑΞΗ
1	Όργανο μέτρησης θερμοκρασίας	USB TC-01
2		Θερμοζεύγος τύπου J
3	Όργανο ελέγχου θερμικής αντίστασης	ARDUINO UNO
4		Μηχανικός ηλεκτρονόμος (relay)
5		Θερμική αντίσταση 1kW

Το λογισμικό LabVIEW δεν περιλαμβάνεται στον πίνακα 3.1, γιατί δεν αποτελεί φυσικό όργανο. Η σχεδίαση της εργαστηριακής διάταξης αποσκοπεί στο να πραγματοποιούνται λήψεις μετρήσεων από διαφορετικά κοινά αισθητήρια εντός του θερμαινόμενου κιβωτίου (εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2. Διαμόρφωση κιβωτίου

3.2 Παραδοχές για την εργαστηριακή διαδικασία

Η λογική της εργαστηριακής άσκησης ήταν να γίνεται θέρμανση του χώρου του κιβωτίου σε ένα χρονικό διάστημα, το οποίο θα επέτρεπε την διεξαγωγή της άσκησης σε ένα τυπικό εργαστηριακό δάωρο. Για το λόγο αυτό αρχικά υπολογίσθηκε ο ζητούμενος όγκος του κιβωτίου και με βάση τον όγκο αυτό, υπολογίσθηκε η απαιτούμενη ισχύς.

Υπολογίζοντας ως χρονικά ικανοποιητικό έναν όγκο της τάξης του 1m^3 επιλέχθηκε να τοποθετηθεί μία θερμαντική αντίσταση ισχύος 1000 Watt, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3.. Υπολογίσθηκε πως με τη συγκεκριμένη ισχύ θα ήταν δυνατή ή άνοδος της θερμοκρασίας τουλάχιστον 10°C σε μικρό χρονικό διάστημα, της τάξης των 10 λεπτών. Ο σκοπός ήταν να δημιουργείται μια διαφορά θερμοκρασίας ΔT της τάξης των 10°C κατ'ελάχιστον σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος του κιβωτίου. Το εύρος λειτουργίας της τάξης των $10-15^{\circ}\text{C}$, θεωρήθηκε ότι είναι ρεαλιστικές συνθήκες για να εξετασθούν τα χαρακτηριστικά τους και να εξαχθούν συμπεράσματά μετά το πέρας των μετρήσεων.



Εικόνα 3.3 Θερμαντική αντίσταση ισχύος 1kW, ενεργοποιούμενη από ARDUINO.

Το κουτί κατασκευάστηκε από μοριοσανίδα, επειδή το υλικό είναι γνωστών τεχνικών χαρακτηριστικών. Ο συγκεκριμένος εσωτερικός όγκος επιλέχθηκε επίσης διότι είναι εύκολα μοντελοποιήσιμος για προσομοιώσεις. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.3 η αντίσταση που χρησιμοποιήθηκε ήταν απλού βιομηχανικού τύπου. Για να μην υπάρχει κίνδυνος διαρροής ρεύματος στερεώθηκε σε 2 μονωμένους αποστάτες. Με τυπικό καλώδιο ρεύματος συνδέθηκε το πρώτο άκρο στην μία άκρη της αντίστασης και το δεύτερο στον ηλεκτρονόμο. Από την έξοδο του ηλεκτρονόμου συνδέθηκε ακόμα ένα καλώδιο στην άλλη άκρη της αντίστασης. Η συνδεσμολογία δοκιμάστηκε ότι λειτουργεί πριν τοποθετηθεί μέσα στο κουτί.

Στη σχεδίαση της εργαστηριακής άσκησης είχε αποφασισθεί το σύστημα ελέγχου να ελέγχει τη λειτουργία αντίστασης και για αυτό το λόγο συμπεριλήφθηκε ηλεκτρονόμος στη συνδεσμολογία. Ο έλεγχος του ηλεκτρονόμου πραγματοποιείται με τη βοήθεια τύπου Arduino Uno. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής ήταν:

- το μικρό κόστος,
- η σχετικά εύκολη επικοινωνία με το μηχανικό ηλεκτρονόμο
- η δυνατότητα του ηλεκτρονόμου να λειτουργεί σαν διακόπτης.
- η δυνατότητα επικοινωνίας του με το λογισμικό LabVIEW.

Αφού ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός και η κατασκευή της διάταξης του υποσυστήματος συστημάτων ελέγχου επιλέχθηκαν τελικά δύο τύποι θερμικών αισθητηρίων, με βασικά κριτήρια την ικανοποιητική απόκριση και την ακρίβεια.

Οι θερμικοί αισθητήρες που επιλέχθηκαν ήταν ένα θερμοζεύγος τύπου J, , και δύο θερμοαντιστάσεις (RTD) τύπου Pt100 και SPRT για την μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας.. Οι μετρήσεις από τα τρία αισθητήρια θα οπτικοποιούνται σε εικονόγραμμα στο LabVIEW σε πραγματικό χρόνο. Στο LabVIEW γίνεται επίσης η αποθήκευση των μετρητικών δεδομένων καθώς και ο έλεγχος της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου.

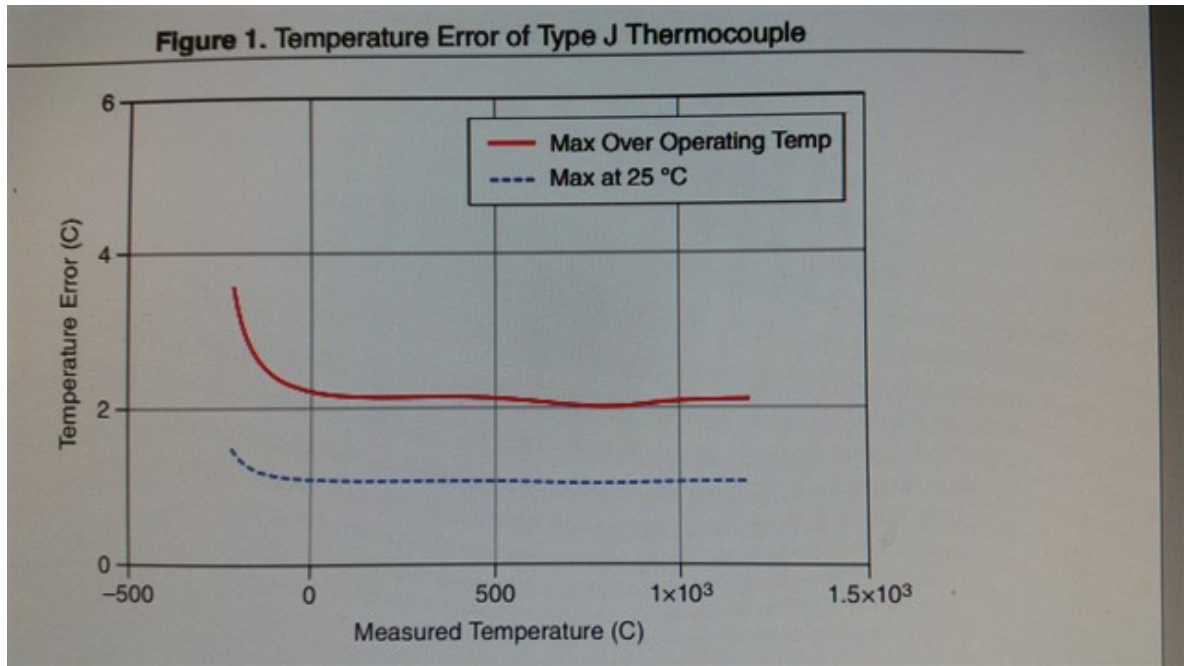
3.3 Μορφοτροπέας USB για μετρήσεις με θερμοζεύγος (USB NI TC-01)

Το USB TC 01 από την National Instrument είναι μια συσκευή λήψης δεδομένων και εύκολης απεικόνισης μέσω της θύρας USB από ένα μοναδικό κανάλι θερμοζεύγους.



Εικόνα 3.4 USB TC-01

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4, η συσκευή αυτή αποτελείται από 2 επι μέρους διατάξεις.: από τον αναλογικοψηφιακό μετατροπέα (ADC) και από το θερμοστοιχείο τύπου J, το οποίο συνήθως συνοδεύει τον συγκεκριμένο. Η ανάλυση (resolution) του αναλογικό-ψηφιακού μετατροπέα είναι 20 bits, ο ρυθμός δειγματοληψίας στα 4 δείγματα το δευτερόλεπτο. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του οργάνου, το θερμοκρασιακό σφάλμα για θερμοζεύγος τύπου J, φαίνεται στην εικόνα 3.5. Βάσει του πίνακα αβεβαιοτήτων των συνηθισμένων θερμοζεύγων κατά NIST, η συνήθης ακρίβεια ενός θερμοζεύγους J είναι $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$.



Εικόνα 3.5 Σφάλμα θερμοζεύγους J σύμφωνα με τη ΝΙ⁹

Χρησιμοποιώντας τη διαδικασία στατικής βαθμονόμησης του Drywell, ελέγχθηκε η ακρίβεια του οργάνου, και οι ενδείξεις του συγκρίθηκαν με τις ενδείξεις του θερμομέτρου αναφοράς τύπου SPRT. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ καλά για το σύνηθες εύρος θερμοκρασιών 0-100°C. Ο έλεγχος βαθμονόμησης όμως στον οποίον υποβλήθηκε το θερμοζεύγος μέσω του Drywell ήταν μόνο στατικός και όχι δυναμικός.

3.2 Αισθητήρας θερμοκρασίας RTD (Pt 100)

Μία συνηθισμένη θερμοαντίσταση είναι ένας αισθητήρας πλατίνας, τύπου Pt100. Ο αισθητήρας RTD τύπου Pt100, καλείται γιατί διαθέτει αντίσταση 100Ω, στους 0 °C. Η

⁹ <http://www.ni.com/pdf/manuals/374918a.pdf>

μικρή αντίσταση που διαθέτουν οι αισθητήρες PRT και η μικρή τους ευαισθησία ($0.385\text{Ohm}/^{\circ}\text{C}$) δυσκολεύει την ακρίβεια στη μέτρηση, λόγω των αντιστάσεων των αγωγών. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας που χρησιμοποιήθηκε στην εργαστηριακή διάταξη είναι τύπου RTD. Οι συνήθισμένες θερμοαντιστάσεις RTD διαθέτουν ονομαστική αντίσταση 100 Ohm σε θερμοκρασία 0°C , οπότε και αναφέρονται ως αισθητήρες Pt100. Ο αισθητήρας στην εικόνα 3.6, διαθέτει ακρίβεια κλάσης B

Πίνακας 3.1 Συνήθη Χαρακτηριστικά αισθητήρα RTD, τύπου PT 100

Measurement Insert	1 x Pt100 / 1 x Pt1000
Cable Length	1.5m / 2m / 5m
Resistance type and tolerances	Resistance thermometer PT100 or PT1000, Class B (single or twin) Accuracy: $\pm 0,20^{\circ}\text{C}$ to 0°C , DIN IEC 606751, 2 or 3 or 4 wire circuit
Probe Diameter	6mm or 8mm
Probe Length	50mm / 150mm / 160mm
Cable Insulation	Fiber Glass – Fiber Glass - Braided ($3 \times 0,5\text{mm}^2$)
Sheath Material	St.St. 1.4571
Temperature Range	from -50°C to $+350^{\circ}\text{C}$



Εικόνα 3.6 Αισθητήρας PT-100

3.4 Αισθητήρας θερμοκρασίας Semi Standard PRT

Η δεύτερη θερμοαντίσταση που χρησιμοποιήθηκε και θεωρήθηκε ως θερμομέτρο αναφοράς είναι ένας αισθητήρας SPRT (semi standard PRT). Ο συγκεκριμένος αισθητήρας θερμοκρασίας είναι κατασκευασμένος από πλατίνα και διαθέτει ακρίβεια κλάσης A, δηλαδή πολύ καλή ακρίβεια της τάξης των $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας τοποθετήθηκε σε διάταξη τύπου DRYWELL (χαρακτηριστικά του drywell στο παραρτημα) για τον έλεγχο της ακρίβειας του.



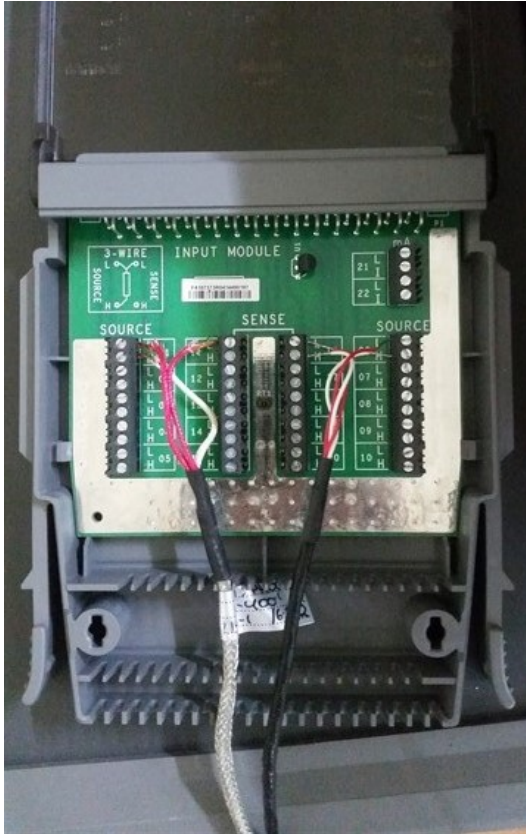
Εικόνα 3.7 Αισθητήρας θερμοκρασίας SPRT

3.5 Οργανο ανάκτησης δεδομένων (ψηφιακό πολύμετρο υψηλής ακρίβειας).

Το όργανο ανάκτησης των σημάτων εξόδου από τα αισθητήρια τύπου θερμοαντίστασης ήταν το ψηφιακό πολύμετρο υψηλής ακρίβειας (6.5 ψηφίων), της εταιρείας Fluke. Τα βασικά χαρακτηριστικά του αναφέρονται στο παράρτημα. Χρησιμοποιώντας ένα ειδικό εξάρτημα του οργάνου που φαίνεται στην εικόνα 3.8, διασυνδέθηκαν οι θερμοαντιστάσεις με αυτό. Συνδέθηκαν οι αισθητήρες στην ειδική υποδοχή, και ρυθμίσθηκαν τα κανάλια ανάγνωσης των σημάτων εξόδου ανάλογα με τους αισθητήρες που έχουν διασυνδεθεί στο εξάρτημα, όπως φαίνεται στη εικόνα 3.8

Πριν εκκινήσει η διαδικασία των εργαστηριακών μετρήσεων έγινε προσπάθεια να ποσοτικοποιηθούν τα σφάλματα τα οποία εμπεριέχονται στις μετρήσεις του οργάνου μετρήσεων της Fluke. Χρησιμοποιήθηκε το εγχειρίδιο του κατασκευαστή στην ενότητα που αφορά μετρήσεις αισθητήρων θερμοκρασίας τύπου RTD για τα σφάλματα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν στις μετρήσεις. Το εγχειρίδιο παρέχει την αντίστοιχη ακρίβεια του οργάνου, για ένα εύρος λειτουργίας των αισθητήρων.

Χρησιμοποιώντας το εγχειρίδιο του οργάνου της FLUKE και τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής υπολογίσθηκε η ακρίβεια του οργάνου για το θερμοκρασιακό εύρος του πειράματος. Με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής βρήκαμε πως η ακρίβεια του οργάνου για τους 35 °C είναι ± 0.042 °C.



Εικόνα 3.8 Σύνδεση SPRT και Pt-100 σε ειδικό υποδοχέα του οργάνου ανάκτησης.

Να σημειωθεί πως το παραπάνω σφάλμα αφορά μόνο το όργανο. Για τον υπολογισμό του συνολικού σφάλματος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο τύπος της σύνδεσης του αισθητήριου με το όργανο. Για τον υπολογισμό του σφάλματος του αισθητήρα Pt100 και SPRT, χρησιμοποιήθηκαν οι τυπικές εξισώσεις για αισθητήρες κλάσης A και B

$$\text{Class A} = 0,15 + 0,002 |T| \text{ (} ^\circ\text{C)} \quad (3.1)$$

$$\text{Class B} = 0,3 + 0,005 |T| \text{ (} ^\circ\text{C)} \quad (3.2).$$

Οι μετρήσεις με αντιστάσεις διαθέτουν μεγαλύτερη ακρίβεια όταν χρησιμοποιούνται απολήξεις με 4 καλώδια από συνδέσεις με απολήξεις 3 καλωδίων. Συνυπολογίζοντας τις αβεβαιότητες του οργάνου μαζί με τον τρόπο σύνδεσης των αισθητήρων, και την κλάση τους, διαμορφώνεται ο πίνακας 3.3, για τις συνολικές αβεβαιότητες των διατάξεων.

Πίνακας 3.3 Σφάλματα RTD συνδεδεμένου σε όργανο ακρίβειας 61/2 ψηφίων FLUKE.

Θερμοκρασία (οC)	Αβεβαιότητα	Δειγματοληψία (μετρία/γρήγορη)	Αβεβαιότητα οργάνου U _d		Συνολική αβεβαιότητα
0	0,038				
35	0,042	0,02	0,046518		
Για δειγματοληψία με τρία καλώδια		0,015			0,048877
			Pt100 Class B	0,45	0,45264
			SPRT Class A	0,21	0,21561

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΙΚΟΝΟΡΓΑΝΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ LabVIEW

4.1 Εισαγωγή στο LabVIEW

Το LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) είναι μια γλώσσα προγραμματισμού, ελέγχου και ανάλυσης για υπολογιστές σχεδιασμένο από την National Instruments. Το LabVIEW έχει προχωρήσει πέρα από την παραδοσιακή φύση των γλωσσών προγραμματισμού που κάνουν χρήση λεκτικών εντολών, εισάγοντας το χρήστη σε ένα γραφικό περιβάλλον περιλαμβάνοντας εργαλεία για συλλογή μετρήσεων, έλεγχο αυτόνομων οργάνων, ανάλυση και παρουσίαση των μετρήσεων. Ένα πρόγραμμα LabVIEW ονομάζεται εικονικό όργανο (Virtual Instrument – VI). Ένα VI αντικαθιστά με λογισμικό ένα μεγάλο μέρος ενός παραδοσιακού οργάνου. (Kalonrektis 2014)

Τα βασικά στοιχεία ενός Εικονικού Οργάνου LabVIEW είναι η Διεπιφάνεια χρήστη (front panel) και το μπλοκ διάγραμμα (Block Diagram). Η Εμπρόσθια Επιφάνεια ενός εικονικού οργάνου είναι η γραφική διασύνδεση του χρήστη με το VI και παίζει το ρόλο της διεπαφής με το όργανο.

Το μπλοκ διάγραμμα ενός VI είναι ο γραφικός κώδικας του προγράμματος. Αυτός ο γραφικός κώδικας καθορίζει τη ροή των δεδομένων από τις εισόδους της εμπρόσθιας επιφάνειας και τους αισθητήρες ή τους μετατροπείς μέσω των διαφόρων βαθμίδων της επεξεργασίας αυτών των δεδομένων ως την εμφάνιση των τιμών στις ενδείξεις της εμπρόσθιας επιφάνειας και την αποθήκευση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων καθώς και για τον τυχόν υπάρχον έλεγχο. Οι γραφικές διασυνδέσεις για τη ροή των δεδομένων σε ένα δομικό διάγραμμα ενός VI αντικαθιστούν τα καλώδια για τη μεταφορά του ηλεκτρικού σήματος στα παραδοσιακά όργανα.

4.2 Λήψη δεδομένων μέσω LabVIEW

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του LabVIEW είναι δυνατότητα της λήψης δεδομένων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η Λήψη Δεδομένων (Data Acquisition – DAQ) περιλαμβάνει τη συλλογή των σημάτων από τις πηγές μέτρησης και την ψηφιοποίησή τους για αποθήκευση, ανάλυση και παρουσίαση σε ένα PC. Τα συστήματα DAQ διατίθενται σε πάρα πολλές τεχνολογίες υπολογιστών: PCI, PXI, PCI Express, PXI Express, PCMCIA, USB, ασύρματα (wireless) και Ethernet, προσφέρουν μεγάλη ευελιξία και μπορούν να

χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ελέγχου, μετρήσεων ή αυτοματισμού. Η υλοποίηση ενός συνηθισμένου συστήματος ανάκτησης δεδομένων (DAQ), συνίσταται στην εξέταση των παρακάτω πέντε συνιστωσών:

1. Μετατροπείς.
2. Σήματα.
3. Επεξεργασία Σήματος.
4. Συσκευή DAQ.
5. Οδηγός και Λογισμικό Εφαρμογών.

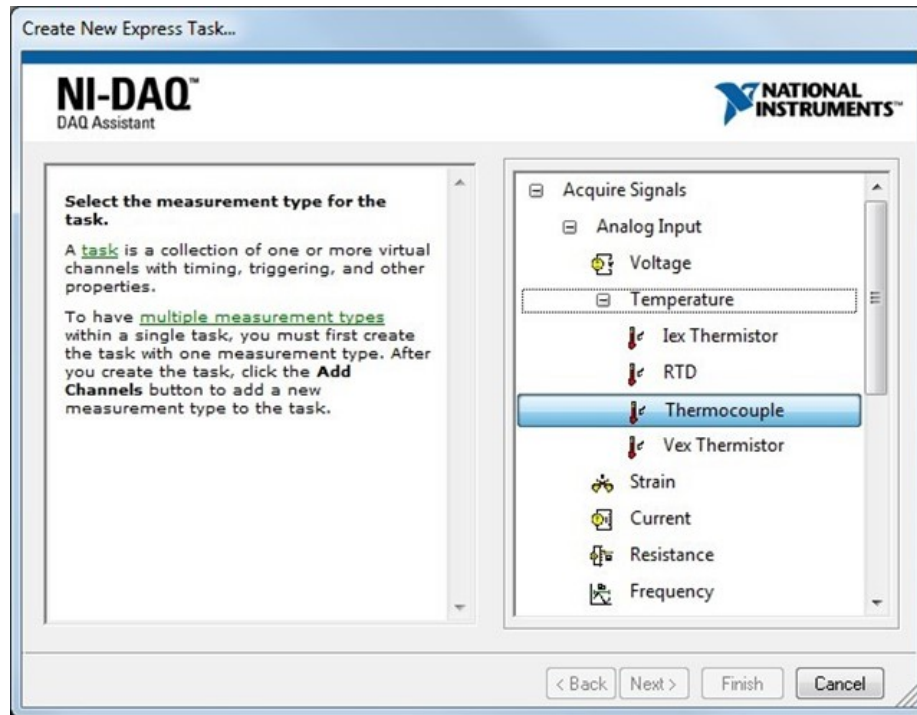
Στη περίπτωση μας και για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε το USB TC-01 της National Instruments. Το αισθητήριο όργανο είναι ένα θερμοζεύγος τύπου J του οποίου οι απολήξεις συνδέονται στην συσκευή DAQ που επικοινωνεί με το PC μέσω της θήρας USB.

4.3 Οδηγός/λογισμικό για λήψη δεδομένων DAQ assistant

Το λογισμικό μετατρέπει το PC και τη συσκευή DAQ σε ένα πλήρες εργαλείο λήψης, ανάλυσης και παρουσίασης δεδομένων. Το λογισμικό επιτρέπει τον έλεγχο της συσκευής DAQ. Το λογισμικό οδήγησης της συσκευής (ή απλά, ο οδηγός) είναι το επίπεδο του λογισμικού για την ανταλλαγή μηνυμάτων με τη συσκευή. Ο οδηγός αποτελεί το ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ του λογισμικού των εφαρμογών και της συσκευής. Ο οδηγός, επίσης, αποτρέπει τον προγραμματιστή από την ανάγκη να ασχοληθεί με εντολές σε επίπεδο καταχωρητών ή να συντάξει εντολές για πρόσβαση στις λειτουργίες της συσκευής. Στα πλαίσια της εργαστηριακής διαδικασίας και για τον ευκολότερο τρόπο καθοδήγησης της μετρητικής συσκευής μας χρησιμοποιήσαμε τον οδηγό NI-DAQmx της National Instruments.

Αρκετοί κατασκευαστές συνοδεύουν τις συσκευές τους με αλγόριθμους γρήγορης διαμόρφωσης της διεπικοινωνίας μεταξύ του λογισμικού και της συσκευής. Οι αλγόριθμοι γρήγορης διαμόρφωσης είναι ευρέως γνωστοί ως wizards. Ένας τέτοιος αλγόριθμος που συνοδεύει τις συσκευές της National Instruments, ονομάζεται DAQ Assistant. Ο DAQ Assistant είναι ένα εργαλείο διαμόρφωσης που οδηγεί σε στάδια τη διαμόρφωση και τις συνδέσεις για την μέτρηση. Στην εικόνα 4.2, διαφαίνεται ένα από τα στάδια του αλγόριθμου DAQ Assistant, στο οποίο ενημερώνει ο χρήστης το είδος του αισθητηρίου που θα συνδεθεί στη συσκευή

Το βασικότερο ίσως πλεονέκτημα συσκευών όπως η USB-TC 01 της National Instruments, και η USB-TC της Measurement Computing, είναι ότι τα χαρακτηριστικά που διαθέτουν), επιτρέπουν σε χρήστες χωρίς σημαντικές τεχνικές γνώσεις, να μετρήσουν απλά φαινόμενα και να αποθηκεύσουν τα μετρητικά δεδομένα εύκολα.



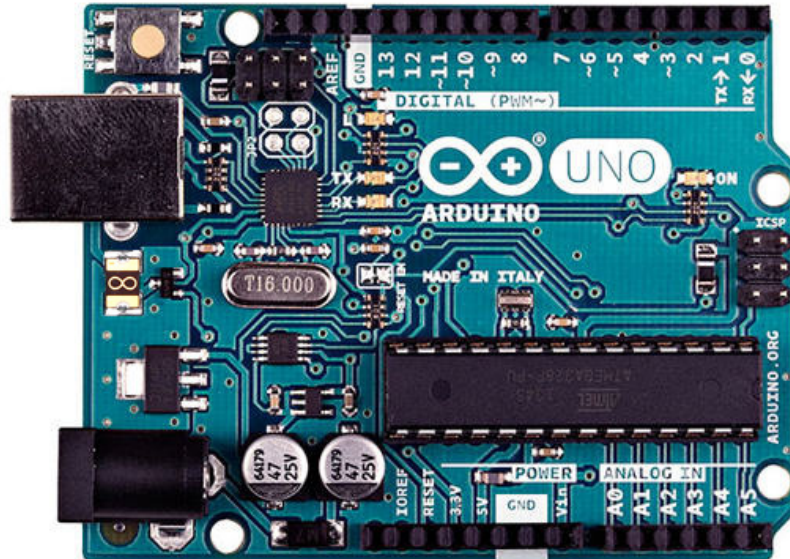
Εικόνα 4.1 DAQ assistant

4.4 Arduino

Το Arduino Uno είναι μία πλακέτα που βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega328. Έχει 14 ψηφιακές εισόδους/ 6 αναλογικές εισόδους, , USB, θύρα υποδοχής ρεύματος, και κουμπί επανεκκίνησης. Το Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ανεξάρτητων διαδραστικών αντικειμένων αλλά και να συνδεθεί με υπολογιστή μέσω προγραμμάτων.

Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής χρησιμοποιείται σε μεγάλη πληθώρα εφαρμογών και μπορούν να συνδεθούν σε αυτόν διάφορων ειδών αισθητήρες για λήψη των δεδομένων τους. Αισθητήρες φωτός και αισθητήρες πίεσης συνηθίζουμε να βλέπουμε σε πολλές εφαρμογές. Ακόμα συνηθίζεται να συνδέονται με αυτόν σερβοκινητήρες καθώς και βηματικοί κινητήρες. Συνήθης διεπαφή λογισμικού με το Arduino είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE), η οποία είναι μια εφαρμογή σε JAVA. Ο μικροελεγκτής

διαθέτει δυνατότητα επικοινωνίας με τα δημοφιλέστερα λειτουργικά περιβάλλοντα σήμερα (Windows, Linux, Android, κλπ)



Εικόνα 4.2 Arduino Uno¹⁰

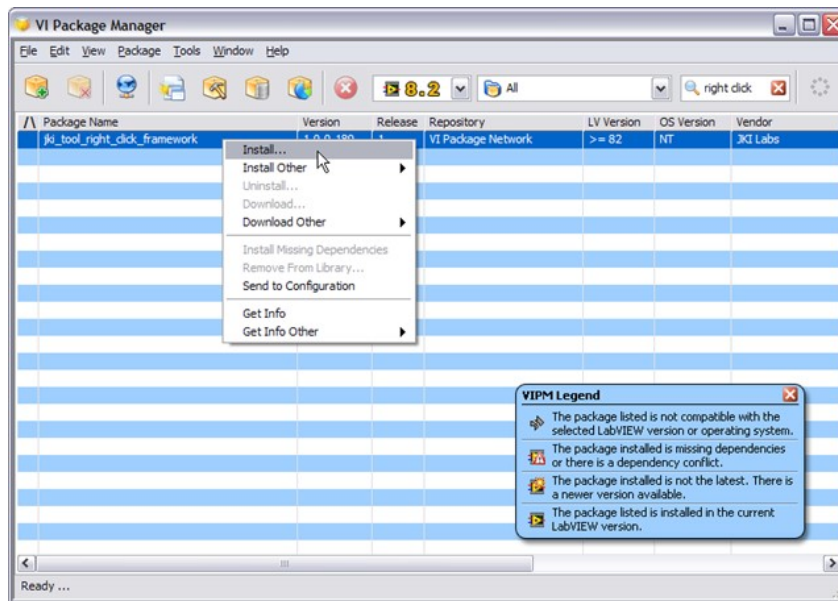
4.5 Σύνδεση LabVIEW/Arduino μέσω Linc

Για τις ανάγκες του πειράματος έχουν συνεπώς ενταχθεί στη εργαστηριακή διάταξη ένας μικροελεγκτής τύπου ARDUINO UNO και ένας συνδεδεμένος μηχανικός ηλεκτρονόμος. Ο ηλεκτρονόμος, θα λειτουργεί ως η βασική επαφή ελέγχου του κύκλωματος. Η εντολή ON/OFF, για το κύκλωμα θα δίνεται μέσω του αλγόριθμου που αναπτύχθηκε στο LabVIEW. Ο αλγόριθμος αυτός μέσω του ARDUINO UNO, ελέγχει τον ηλεκτρονόμο και τελικά τη λειτουργία της αντίστασης ισχύος 1kW.

Για την υλοποίηση της επικοινωνίας του ARDUINO αρχικά με LabVIEW έγιναν οι ακόλουθες διαδικασίες::

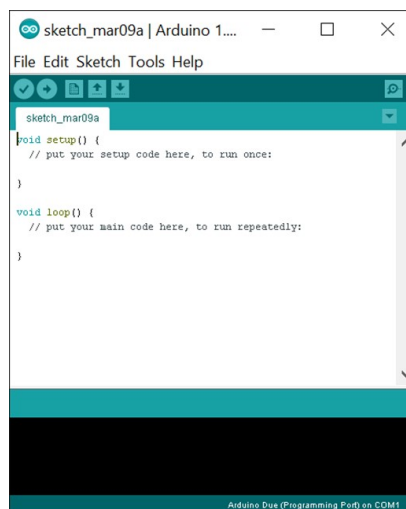
1. Εγκατάσταση του Visual Package Manager του LabVIEW Το LabView υποστηρίζει το συγκεκριμένο πακέτο μέσα από το οποίο παρέχονται όλα τα εργαλεία και τα εξαρτήματα που μπορούν να επαυξήσουν τις δυνατότητες επικοινωνίας του LabVIEW.

¹⁰ <http://www.arduino.org/products/boards/arduino-uno>



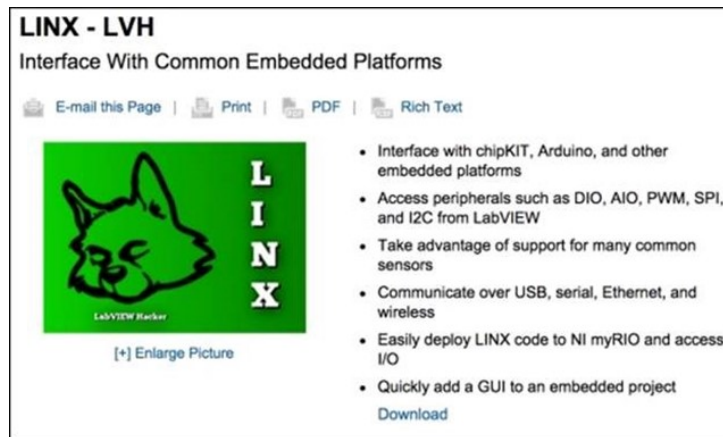
Εικόνα 4.3 VI Package Manage

2. Εγκατάσταση του ARDUINO IDE. Ο οδηγός επικοινωνίας του ARDUINO για την επικοινωνία με έναν HY είναι το ARDUINO IDE.



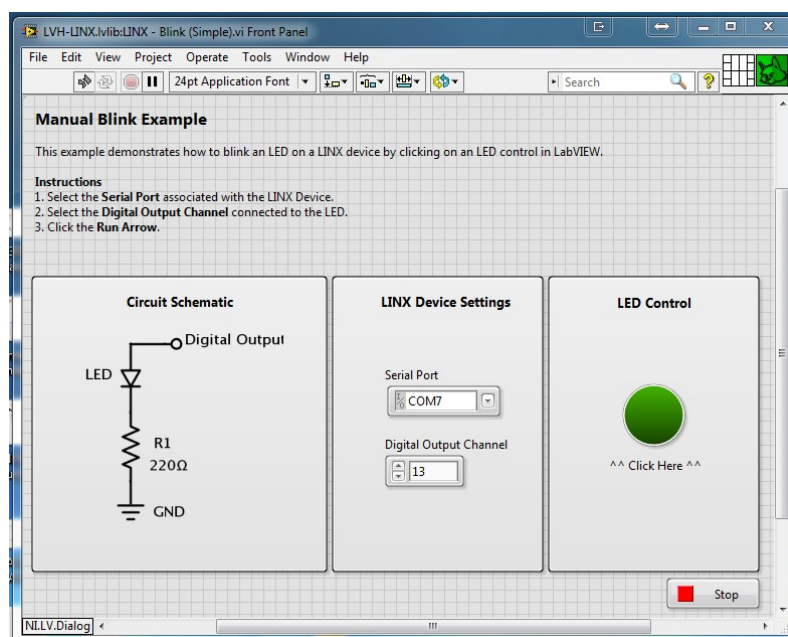
Εικόνα 4.4 Arduino IDE

3. Εγκατάσταση του LINX Αφού λοιπόν έχουμε εγκαταστήσει στον υπολογιστή μας τα παραπάνω πακέτα, μέσω του VIPM αναζητούμε και εγκαθιστούμε το LINX. Το Linx είναι ένα πρόγραμμα” ανοιχτής πηγής” (open source) από την Digilent που παρέχει εύκολη χρήση και διαδραστικότητα μεταξύ των εικονοργάνων του LabVIEW. Ακόμα το Linx περιλαμβάνει πάνω από 30 έτοιμα εικονόργανα για τους πιο διαδεδομένους αισθητήρες που μπορεί να είναι ενσωματωμένοι σε πλατφόρμες τύπου Arduino καθώς και σε πολλές άλλες.



Εικόνα 4.5 LINX

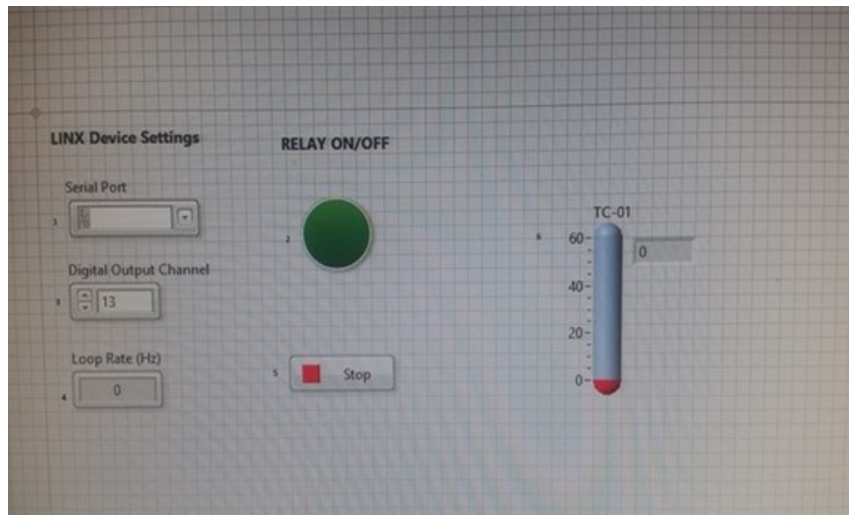
Το LINX είναι ένα καινούργιο σχετικά πακέτο οδηγών λογισμικού που αντικατέστησε το παλιό (LIFA) LabVIEW Interface for Arduino. Με το οποίο μπορούμε να επικοινωνήσουμε το LabVIEW με τον ARDUINO. Ιλέγοντας το LINX Firmware Wizard μας εμφανίζει το παραπάνω πρότυπο



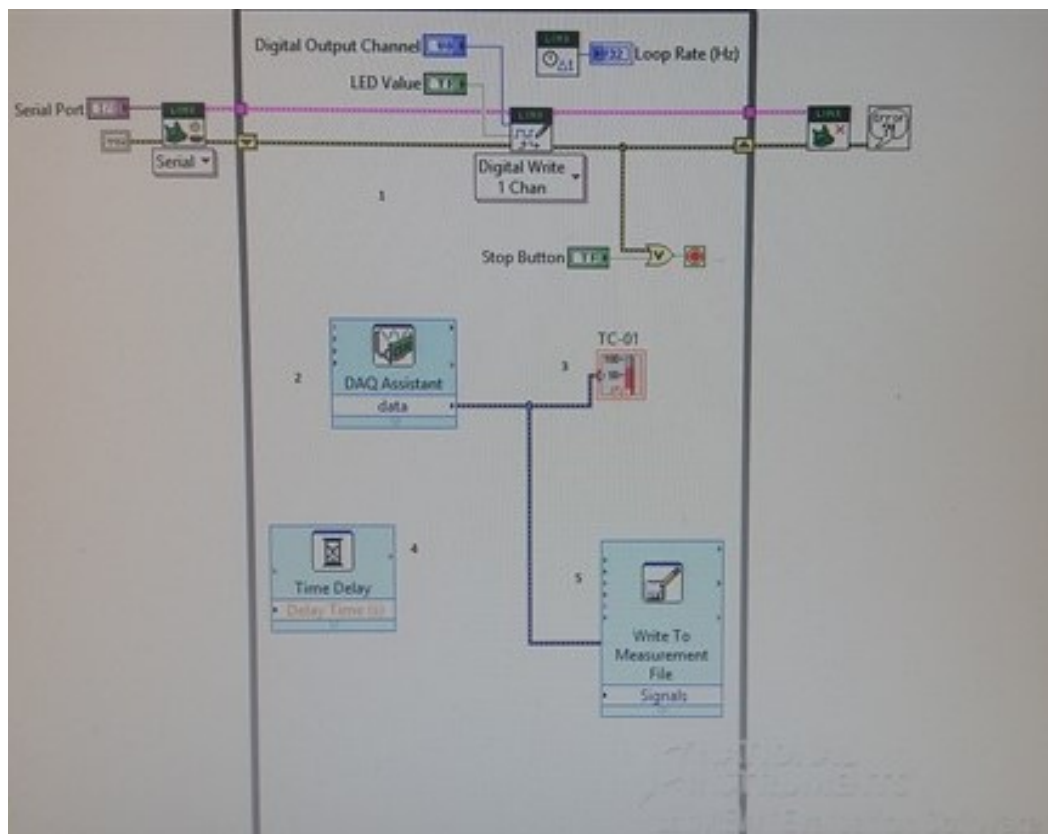
Εικόνα 4.6 Manual Blink Examp

4.6 Επεξήγηση εικονοργάνου για την διεξαγωγή του πειράματος

Για τον έλεγχο της θερμικής αντίστασης και την καταγραφή των μετρήσεων από το USB TC-01, συντάχθηκε αλγόριθμος στο λογισμικό LabVIEW. Η διεπιφάνεια χρήστη και το διαγραμμα ροής του αλγόριθμου, εμφανίζονται στις εικόνες 4.7 και 4.8



Εικόνα 4.7 εικονόργανο Πειράματος



Εικόνα 4.8 κώδικας εικονοργάνου

Στη εικόνα (4.7) φαίνεται το front panel του εικονόργανου και στην εικόνα (4.8) το block diagram. Τα εικονίδια και το μπλοκ διάγραμμα είναι διατεταγμένα με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε να μπορεί ο αναγνώστης που έχει μερική γνώση του λογισμικού, να κατανοεί τη λειτουργία του αλγορίθμου

Διεπιφάνεια χρήσης (Front panel)

1. Επιλογή της θύρας στην οποία είναι συνδεδεμένο το θερμοζεύγος τύπου USB TC 01
2. Κουμπί ενεργοποίησης/απενεργοποίησης ηλεκτρονόμου
3. Επιλογή της θήρας εξόδου το μικροελεγτή (σύνδεση arduino με ηλεκτρονόμο
4. Ο ρυθμός επανάληψης του κώδικα του προγράμματός μας
5. Κουμπί τερματισμού προγράμματος.
6. Ένδειξη θερμοκρασίας USB TC-01

Διάγραμμα μπλοκ (Block diagram)

1. Η επικοινωνία του labview και του arduino
2. Οδηγός επικοινωνίας με το αισθητήριο TC-01
3. Απεικόνιση θερμοκρασιακής ένδειξης του TC-01
4. Ο χρόνος καθυστέρησης στον οποίο γινόταν καταγραφή των δεδομένων
5. Η εντολή με την οποία αποθηκεύαμε τις μετρήσεις μας σε πίνακες

Οι λειτουργίες του παραπάνω εικονοργάνου είναι ο έλεγχος του ηλεκτρονόμου που επιτρέπει το ρεύμα να διαρρέει τη εργαστηριακή διάταξη, η αναγραφή της ένδειξης της θερμοκρασίας από το USB TC-01 καθώς και η αποθήκευση όλων των μετρήσεων σε πίνακες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές

5.1 Διαδικασία λήψης μετρήσεων από τις εργαστηριακές διατάξεις

Οι μετρήσεις εντός του κιβωτίου υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια δύο διαφορετικών μετρητικών διατάξεων. Η πρώτη μετρητική διάταξη σύστημα αποτελείται από τον Hydra logger και τους δύο αισθητήρες τύπου θερμοαντίστασης (PT-100 και SPRT). Η δεύτερη μετρητική διάταξη αποτελείται από τον αναλογικοψηφιακό μετατροπέα USB TC-01 με ένα αισθητήριο τύπου θερμοζεύγους J. Η πρώτη διάταξη καταγράφει τις μετρήσεις σε αυτόνομη κάρτα μνήμης που διαθέτει, ενώ η δεύτερη διάταξη καταγράφει τις μετρήσεις μέσω αλγόριθμου LabVIEW σε H/Y (εικόνες 4.7, 4.8)

Σκοπός της εκτέλεσης του πειράματος είναι η επίδειξη του τρόπου λειτουργίας διαφορετικών τύπων αισθητήριων οργάνων οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι μέσα σε ένα κιβώτιο στο οποίο βρίσκεται το θερμαντικό στοιχείο.

Πριν από την εκκίνηση της διαδικασίας γίνεται χειροκίνητος συγχρονισμός της ώρας λειτουργίας στον datalogger (HYDRA) με το ρολόι του H/Y. Κατόπιν ρυθμίζεται η δειγματοληψία στον datalogger και στο εικονόργανο του LabVIEW, ώστε οι μετρήσεις να αποθηκεύονται με τον ίδιο ρυθμό.

Συνδέεται η αντίσταση στο ηλεκτρονόμο και στην τροφοδοσία και τοποθετούνται εντός του κιβωτίου τα 3 αισθητήρια όργανα σε ίση απόσταση το καθένα από την αντίσταση. Κλείνει το κιβώτιο και ξεκινά ταυτόχρονα η καταγραφή από το logger και από το εικονόργανο. Όταν η θερμοκρασιακή διαφορά ανέρχεται στους 10 °C μέσω του εικονόργανου ανοίγει το κύκλωμα ηλεκτρονόμο. Διακόπτεται η τροφοδοσία της αντίστασης και ανοίγει το επάνω μέρος του κιβωτίου ώστε σταδιακά η θερμοκρασία να “κατέλθει” στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

5.2 Αποτελέσματα μετρήσεων των αισθητηρίων τύπου RTD.

Η εξίσωση που διασυνδέει την αντίσταση R_t στη θερμοκρασία t και στη θερμοκρασία των 0° (R_0) είναι ως εξής. Για το εύρος τιμών $-200^\circ\text{C} / 0^\circ\text{C}$ ισχύει:

$$R(T) = R(0) [1 + AT + BT^2 + C (T - 100) T^3] [5.1]$$

Για το εύρος τιμών 0 °C / 660 °C ισχύει για τη θεωρητική τιμή της αντίστασης του αισθητήρα Pt100 η απλοποιημένη σχέση Callendar Van Dusen:

$$R(T) = R(0) (1+AT+BT^2) [5.2]$$

Σε αυτήν την περιοχή οι σταθερές A, B έχουν τις τιμές:

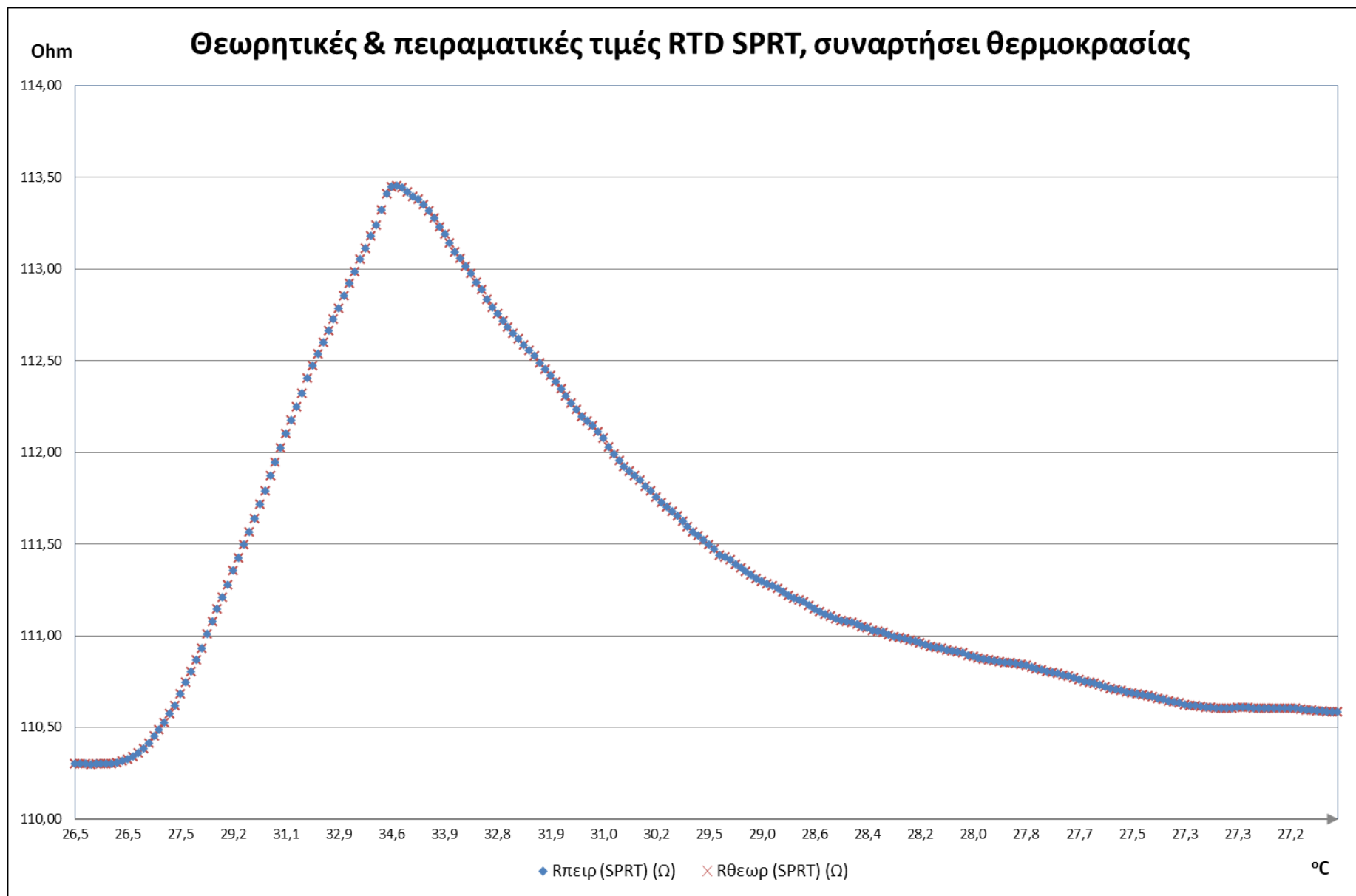
$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \quad B = -5,775 \times 10^{-7}$$

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τη διαδικασία θέρμανσης και αποθέρμανσης για ένα μικρό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας μεταξύ 26 και 36 βαθμών Κελσίου, απεικονίζεται στις εικόνες 5.1 και 5.2, οι θεωρητικές και πειραματικές τιμές που μετρούν οι δύο αισθητήρες τύπου RTD.. Οι πειραματικές τιμές έχουν μετρηθεί με τη χρήση του πολυμέτρου ακριβείας FLUKE HYDRA. Οι θεωρητικές με βάση την απλοποιημένη σχέση Callendar Van Dusen της (5.2). Ο πίνακας με τις απεικονισθείσες μετρήσεις έχει καταχωρηθεί στο Παράρτημα ως πίνακας Π-2.

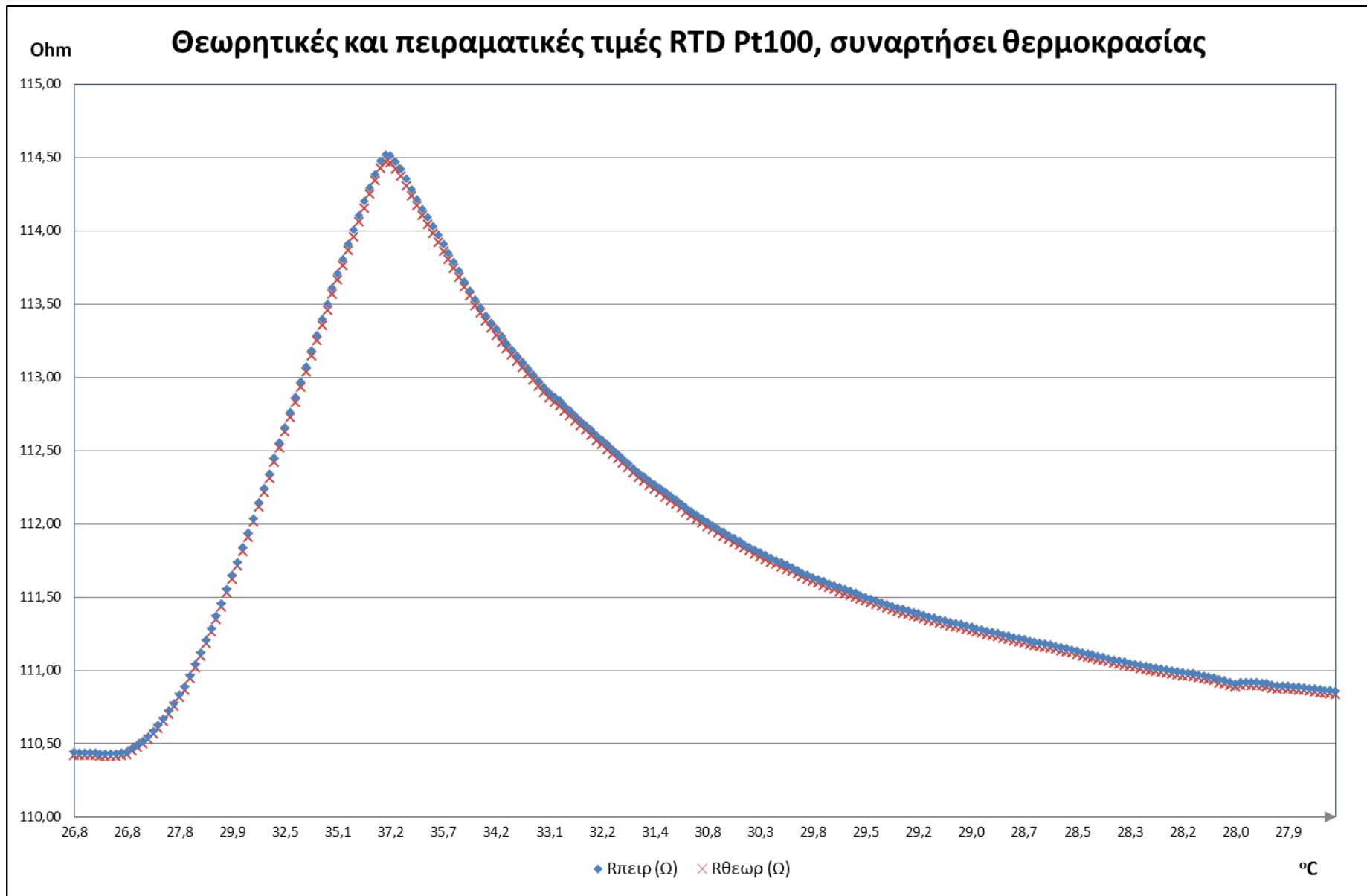
Στην εικόνα 5.1 έχει απεικονισθεί η μεταβολή της μετρούμενης αντίστασης συνάρτησε θερμοκρασίας για τον αισθητήρα SPRT. Στην εικόνα 5.2 έχει απεικονισθεί η μεταβολή της μετρούμενης αντίστασης συνάρτησε θερμοκρασίας για τον αισθητήρα SPRT.

Εύκολα παρατηρείται από την εικόνα 5.2, αλλά και από τον πίνακα Π-2 ότι ο αισθητήρας Pt100, διαθέτει πολύ καλή ακρίβεια στο συγκεκριμένο πεδίο λειτουργίας . Για τον αισθητήρα αναφοράς SPRT, όπως προκύπτει από το γράφημα 5.1, η ακρίβεια είναι εξαιρετική. Βέβαια επειδή το εύρος λειτουργίας είναι πολύ μικρό τα συμπεράσματα αυτά δεν είναι γενικά, αλλά αφορούν μόνο το εύρος αυτό.

Το θερμοζεύγος τύπου J, διαθέτει μεγάλη αβεβαιότητα της τάξης των 2.2 °C, συνεπώς δεν κρίνεται σκόπιμη η σύγκριση των θεωρητικών με τις πειραματικές τιμές. .



Εικόνα 5.1 Θεωρητικές και πειραματικές τιμές αντίστασης για τον αισθητήρα SPRT, συναρτήσει θερμοκρασίας.



Εικόνα 5.2 Θεωρητικές και πειραματικές τιμές αντίστασης για τον αισθητήρα κλάσης B Pt100, συναρτήσει θερμοκρασίας

5.3 Συγκριση των αποτελεσμάτων για τα RTDs και σχολιασμός.

Όπως προκύπτει από το γράφημα της εικόνας 5.1, η αβεβαιότητα που διαθέτει ο αισθητήρας αναφοράς τύπου SPRT, είναι αμελητέα στο σύνηθες εύρος λειτουργίας για το οποίο τον χρησιμοποιήσαμε. Οι πειραματικές τιμές επιβεβαίωσαν την υψηλή του ακρίβεια.

Στο γράφημα της εικόνας 5.2, εμφανίζεται η ακρίβεια του αισθητήρα Pt100. Το σφάλμα που διαθέτει η διάταξη είναι της τάξης των 0.45 °C, ενώ το σφάλμα του αισθητήρα ο οποίος είναι κλάσης B, δίνεται από τη σχέση (3.1). Για το σύνηθες εύρος λειτουργίας το σφάλμα του αισθητήρα είναι ελάχιστο και πιθανώς συστηματικό. Για τον έλεγχο της συστηματικότητας του σφάλματος θα απαιτείτο μεγαλύτερη επεξεργασία των δεδομένων και αναλυτικότερη βαθμονόμηση. Μία τέτοια βαθμονόμηση όμως θα απαιτούσε διαπιστευμένα όργανα, τα οποία δεν διαθέτει το εργαστήριο.

5.4. Μετρήσεις και πειραματικός προσδιορισμός της απόκρισης των αισθητηρίων.

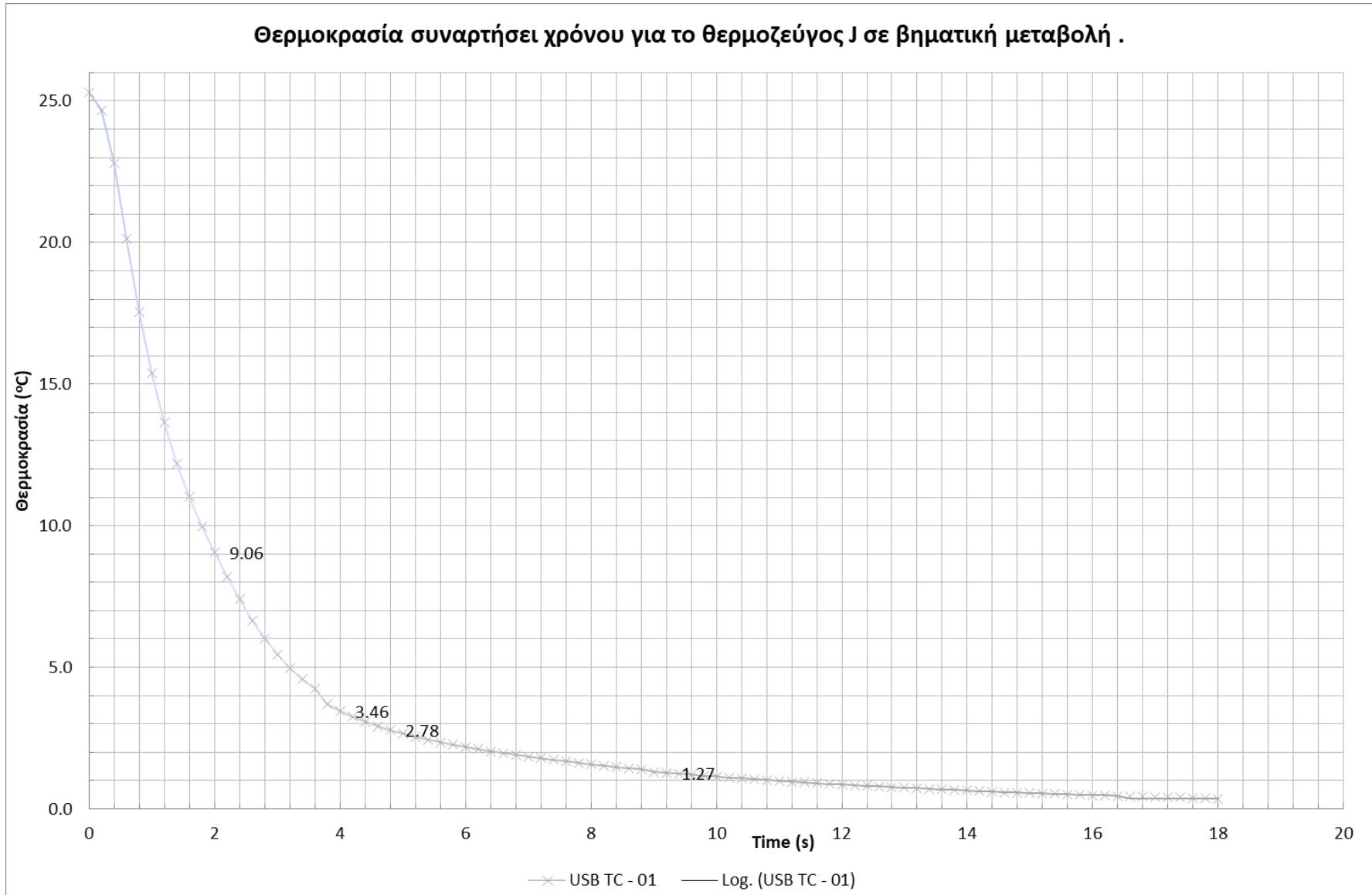
Για την ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας, ήταν ζητούμενο να τεκμηριωθεί ποιο από τα αισθητήρια είναι θα έχει ικανοποιητική απόκριση στις συνήθεις συνθήκες του πειράματος. Για να διαπιστωθεί η απόκριση των αισθητηρίων, υλοποιήθηκε πείραμα με σημαντική βηματική μεταβολή της θερμοκρασίας.

Για να δημιουργηθεί η βηματική είσοδος, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένα λουτρό πάγου, θερμοκρασίας T_f . Η βηματική είσοδος θα ήταν μια μεταβολή της τάξης των 25°C, η οποία θα δημιουργείτο με την απότομη κατάδυση των αισθητηρίων σε λουτρό πάγου $T_f = 0^\circ\text{C}$, με αρχική θερμοκρασιακή κατάσταση $T_i = 25^\circ\text{C}$. Δημιουργήθηκε λοιπόν ένα απλό λουτρό πάγου ικανού όγκου και επομένως θερμοχωρητικότητας, και μία διαδικασία γρήγορης εμφύσησης των αισθητηρίων Pt100, SPRT και RTD, προκειμένου να εισέρχονται την ίδια χρονική στιγμή στο λουτρό.

Από τις πειραματικές τιμές, μπορεί να προσδιορισθεί η χρονική σταθερά κάθε αισθητηρίου.

Ο υπολογισμός φαίνεται στον Πίνακα 5.1, για το αισθητήριο J, συνδεδεμένο στο usb tc-01

Βάσει λοιπόν των μετρήσεων η σταθερά χρόνου για το αισθητήριο τύπου J σε $\tau_{TC}=2s$, εκτιμάται περίπου στα 2s. Το θερμοζεύγος δείχνει να έχει πολύ γρήγορη απόκριση στη συγκεκριμένη διαδικασία. Για τον ακριβέστερο όμως πειραματικό προσδιορισμό της σταθεράς χρόνου θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η απεικόνιση του κλάσματος του σφάλματος Γ συναρτήσει του χρόνου t



Εικόνα 5.3. Απεικόνιση της ανιχνευόμενης θερμοκρασίας από θερμοζεύγος J με A/Δ τύπου USB tc01, σε βηματική μεταβολή με λουτρό πάγου.

Πίνακας 5.1. Μετρήσεις σταθεράς χρόνου για το θερμοζεύγος τύπου J.

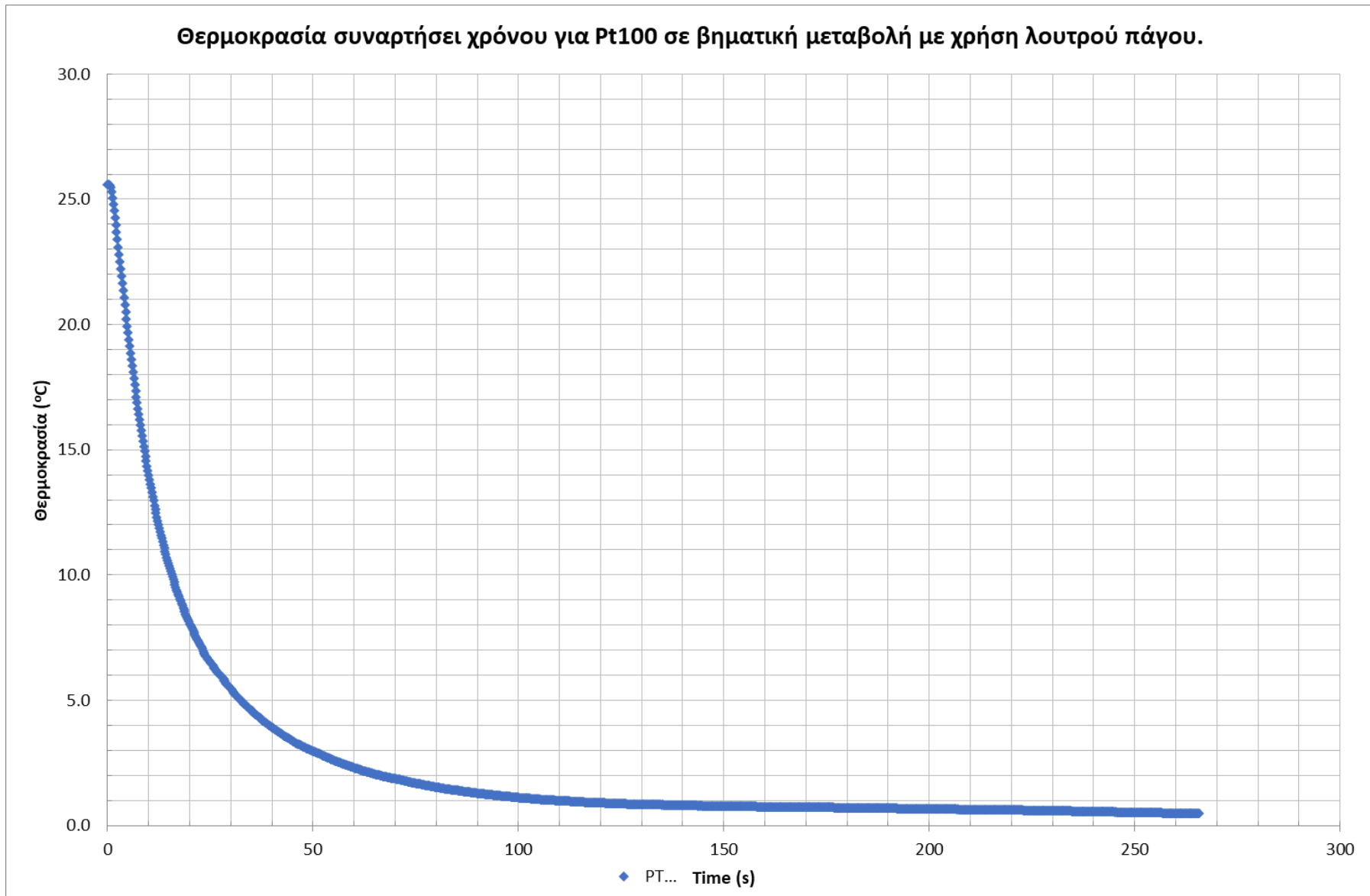
USB TC-01			
% Απόκριση	t/τ (θεωρητικά)	T _{measured} (°C)	t _{measured} (s)
0,00	0,00	25,31	0,00
63,20	1,00	9,31	1,95
86,50	2,00	3,42	4,05
90,00	2,30	2,53	5,21
95,00	3,00	1,27	9,20
99,30	5,00	0,18	21,80

Η πειραματική απεικόνιση του κλάσματος του σφάλματος Γ δείχνει τη σταθερά χρόνου να απέχει σημαντικά από την τιμή των 1.95s, βάσει των μετρήσεων. Η σημαντική διαφορά της σταθεράς τ, από τις τιμές των χρονοσειρών, οφείλεται είτε στο σημαντικό σφάλμα ακρίβειας του θερμοζεύγους (>2°C), είτε σε λανθασμένη εκτέλεση της διαδικασίας είτε και στους δύο παραπάνω λόγους. Ο πίνακας με τις τιμές του κλάσματος του σφάλματος ευρίσκεται στο παράρτημα.

Πίνακας 5.2. Μετρήσεις σταθεράς χρόνου για το RTD τύπου Pt100.

Pt100			
% Απόκριση	t/τ (θεωρητικά)	T _{measured} (oC)	t _{measured} (s)
0,00	0,00	25,08	0,00
63,20	1,00	9,41	17,20
86,50	2,00	3,39	44,40
90,00	2,30	2,51	55,70
95,00	3,00	1,25	90,60

Υπάρχει διαφορά μεταξύ της πειραματικά υπολογιζόμενης χρονικής σταθεράς και αυτής που υπολογίζεται από το γράφημα του κλάσματος του σφάλματος για το θερμοστοιχείο Pt100. Ο πίνακας με τις τιμές του κλάσματος του σφάλματος ευρίσκεται στο παράρτημα.



Εικόνα 5.5. Απεικόνιση της ανιχνευόμενης θερμοκρασίας από RTD Pt100 κλάσης B, σε βηματική μεταβολή με λουτρό πάγου

Πίνακας 5.3. Μετρήσεις σταθεράς χρόνου για το SPRT.

SPRT					
% Απόκριση	t/τ (θεωρητικά)	T _{measured} (oC)	t measured (s)	t/τ	Γ
0,00	0,00	25,31	0,00	0	1
63,20	1,00	9,31	4,03	1	0,368
86,50	2,00	3,42	7,50	1,861042	0,135
90,00	2,30	2,53	8,70	2,158809	0,1
95,00	3,00	1,27	12,40	3,076923	0,05
98,20	4,00	0,46	24,90	6,17866	0,018

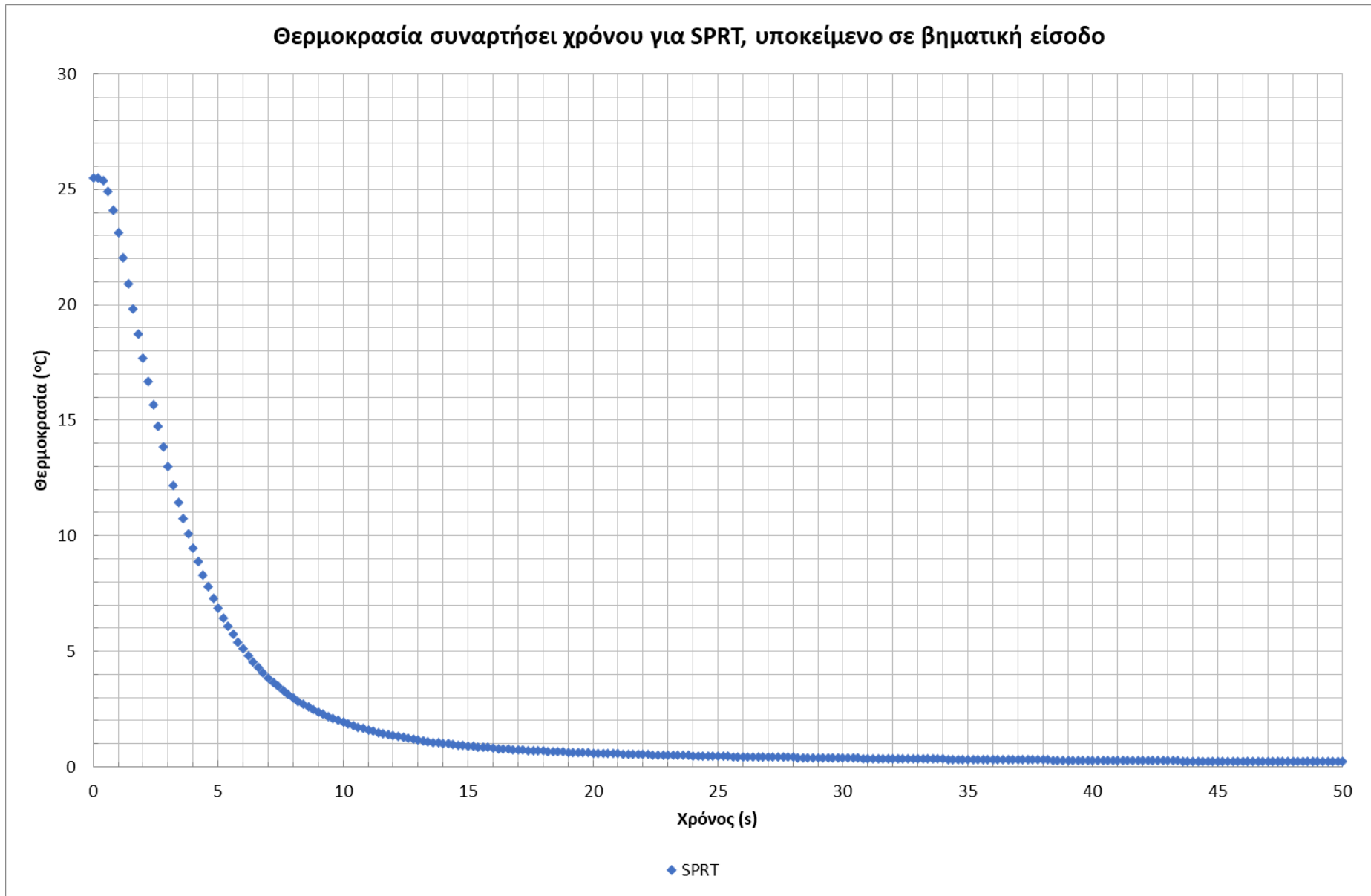
Η χρησιμοποίηση του θερμοστοιχείου τύπου Πλατίνας (SPRT), κλάσης A είχε ως συνέπεια καλύτερα αποτελέσματα τα οποία επιτρέπουν τον προσδιορισμό της σταθεράς χρόνου του αισθητηρίου SPRT στα 4s περίπου.

5.5 Σύγκριση των αισθητηρίων για χρήση με την πειραματική διάταξη.

Η απόκριση του SPRT κλάσης A, είναι ικανοποιητική αφού δεν είναι ούτε πολύ γρήγορη όπως του θερμοζεύγους J, ούτε πολύ αργή όπως του RTD Pt100 (κλάσης B). Ταυτόχρονα το SPRT διαθέτει πολύ καλή ακρίβεια, την οποία έχουμε ελέγξει με στατική βαθμονόμηση (οπως και για τα άλλα αισθητήρια).

Το θερμοζεύγος τύπου J έχει πολύ γρήγορη απόκριση, διαθέτει όμως μεγάλη αβεβαιότητα. Τέλος το RTD Pt100, δεν διαθέτει ικανοποιητική απόκριση, ενώ έχει μέτρια αβεβαιότητα. Συνεπώς για τη συγκριμένη πειραματική διάταξη, το βέλτιστο αισθητήριο είναι το αισθητήριο αναφοράς SPRT.

Στην περίπτωση που βασικό κριτήριο είναι η γρήγορη απόκριση το θερμοζεύγος J διαθέτει πολύ γρήγορη απόκριση, με ακρίβεια όμως μη ικανοποιητική. Συνεπώς για να χρησιμοποιείται στην πειραματική διάταξη, θα πρέπει οπωσδήποτε να βαθμονομείται πριν από την χρήση.



Εικόνα 5.6. Απεικόνιση της ανιχνευόμενης θερμοκρασίας από RTD SPRT κλάσης A, σε βηματική μεταβολή με λουτρό πάγου

Βιβλιογραφία

1. Αργυρίου, Αθανάσιος. ‘*Αισθητήρες Ημιαγωγών, Αισθητήρες Θερμικοί, μηχανικοί, μαγνητικοί, αισθητήρες ακτινοβολίας και χημικοί αισθητήρες.*’ Πανεπιστήμιο Πατρών, 2004.
2. Καλοβρέκτης, Κωνσταντίνος. *Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου*. Τζιόλας, 2012.
3. Καλόμοιρος, Ι, Σ Μπουλταδάκης, και Ι Πεταλάς. *Ελεγχος Κυκλωμάτων και Μετρήσεων με χρήση H/Y*, 2002.
4. Κουζούδης, Δημήτριος. ‘*Θερμοδυναμική για Μηχανικούς*’. Πάτρα, Φεβρουάριος 2011.
5. Λεκάκης, Ιωάννης. ‘*Ασκήσεις Μετρήσεων Τεχνικών Μεγεθών*’. Πειραιάς 2009.
6. Acromag. ‘*Criteria for Temperature Sensor Selection of T/C and RTD Sensor Types.*’
7. Davies, Ikewete. ‘*A seminar presentation on Temperature Sensors (The difference between LM35 and a Thermocouple)*’. 2012.
8. Figliola, R.S., και Donald Beasley. *Theory and design for mechanical measurements*. Hoboken, N.J.: John Wiley., 2006.
9. Fluke, Calibration ‘*How to Calibrate an RTD or Platinum Resistance Thermometer*’. FLUKE Corporation.
10. Jones, Deric P. *Biomedical Sensors*. Momentum Press, 2010.
11. Kalovrektis, Konstantinos. *LabVIEW για Μηχανικούς*. Tziolas, 2014.
12. Mangum, T, και G Furukawa. ‘*Guidelines for Realizing the ITS-90*’. NIST Technical Note.
13. National Instruments ‘*Calibration procedure for NI usb tc01*’.
14. Nicholas, και White. ‘*Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration*’ 2nd Edition. Wiley Publishers, 2002
15. Preston-Thomas, H. ‘*The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*’. *Metrologia*, τχ. 27 (1990): 3–10.
16. Recktenwals, Gerald. ‘*Conversion of Thermocouple Voltage to Temperature*’. *Mechanical and Materials Engineering Department, Portland State University, Portland, Oregon, 2010.
17. Sostmann, Henry, και John Tavener. ‘*Fundamentals of Thermometry, Part II, Fixed Points.*’ *Isotech Journal of Thermometry*, Fundamentals of Thermometry, 1, τχ. 2 (1990).
18. Vaisala. *Calibration Book*. T. 1. 1 τ. VAISALA, 2010.

Παράρτημα Α- Συντομες προδιαγραφές εργαστηριακού εξοπλισμού

USB TC-01

Common-mode rejection ratio (0 to 60 Hz)	
Common-to-USB ground	>145 dB
Noise rejection (50/60 Hz)	>80 dB
Temperature measurement ranges	Works over temperature ranges defined by NIST (J, K, R, S, T, N, E, and B thermocouple types; E type has a maximum of 900 °C.)
Conversion time	250 ms
Sample rate	4 samples per second, maximum, software timed
Input bandwidth (-3 dB)	1 Hz
Differential input impedance	20 MΩ between isolated 3.3 V and ground
Input noise	2 μVpp
Open thermocouple bias voltage.....	3.3 V
Cold-junction compensation sensor accuracy, 0 to 65 °C	1.25 °C maximum, 0.6 °C typical
Cold-junction compensation sensor Resolution	0.0625 °C typical
Overvoltage protection	30 V max between TC+ and TC

	Pt100
Series	CB/13
Measurement Insert	1 x Pt100 / 1 x Pt1000
Cable Length	1.5m / 2m / 5m
Resistance type and tolerances	Resistance thermometer PT100 or PT1000, Class B (single or twin) Accuracy: ±0,20° C to 0 °C ,DIN IEC 606751,2 or 3 or 4 wire circuit
Probe Diameter	6mm or 8mm
Probe Length	50mm / 150mm / 160mm
Cable Insulation	Fiber Glass – Fiber Glass - Braided (3 x 0,5mm ²)

Sheath Material St.St. 1.4571
Temperature Range from -50°C to +350°C

SPRT

Series 935-14-13
Range -196 °C to 250 °C
Diameter 6 mm
Length 350 mm
Sensing length 25 mm
Cable 2 m
Typical Uncertainty at 0 °C = 50 mK

Fluke Dry Well

Range -25 °C to 150 °C

Display accuracy ± 0.2 °C

Stability ± 0.01 °C

Heating time (max) 23 min

Cooling time 15 min to -25 °

Weight 8.2 kg (18 lbs)

Process version accuracy ± 0.01 °C at -25 °C ± 0.02 °C at 155°C

RTD inputs (process version) 2-, 3-, 4-wire RTD. Resistance range of 0 to 400 ohms. Ni-120, PT-100 (385),

PT-100 (3926), PT-100 (JIS), or Ω

TC inputs (process version) Type J, K, T, E, R, S, B, L, U, N, C, and mV

mA specs (process version) Range: 0-24 mA with 24-28 VDC loop power

mA accuracy: 0.02% of rdg + 0.002 mA

Fluke Πολύμετρο ακριβείας.

DC volts

Range 100 mV to 300 V

Resolution 0.1 μ V to 1 mV

Accuracy 0.0024%

AC volts

Range 100 mV to 300 V

Resolution 0.1 μ V to 1 mV

Accuracy 0.11%

Resistance

Range 100 Ω to 100 M Ω

Resolution 0.1 m Ω to 100 Ω

Accuracy 0.01%

Frequency

Range 20 Hz to 1 MHz

Accuracy 0.01%

RTD (Pt 100)

Range -200°C

Resolution 0.001°C

Accuracy 0.016°C

J thermocouples

Range -200°C to 1,000°C

Resolution 0.01°C

Accuracy 0.53°C

Παράρτημα Β - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Πίνακας Π-1

Time	TC-01	PT 100	SPRT
16:38:07	26.38	26.77	26.47
16:38:12	26.36	26.76	26.47
16:38:17	26.33	26.76	26.46
16:38:22	26.38	26.76	26.46
16:38:27	26.36	26.75	26.46
16:38:32	26.35	26.75	26.46
16:38:37	26.42	26.75	26.47
16:38:42	26.42	26.75	26.47
16:38:47	26.43	26.75	26.48
16:38:52	26.44	26.76	26.50
16:38:57	26.48	26.78	26.53
16:39:02	26.58	26.84	26.57
16:39:07	26.63	26.90	26.62
16:39:12	26.69	26.97	26.69
16:39:17	26.76	27.04	26.76
16:39:22	26.83	27.14	26.85
16:39:27	26.92	27.24	26.94
16:39:32	27.01	27.36	27.05
16:39:37	27.19	27.49	27.17
16:39:42	27.23	27.62	27.29
16:39:47	27.41	27.78	27.46
16:39:52	27.53	27.91	27.61
16:39:57	27.65	28.11	27.76
16:40:02	27.78	28.31	27.93
16:40:07	27.93	28.50	28.09
16:40:12	28.07	28.72	28.29
16:40:17	28.21	28.93	28.47
16:40:22	28.36	29.15	28.64
16:40:27	28.59	29.38	28.81
16:40:32	28.74	29.62	28.99
16:40:37	28.84	29.86	29.18
16:40:42	29.07	30.09	29.36
16:40:47	29.25	30.35	29.55
16:40:52	29.40	30.60	29.73
16:40:57	29.56	30.86	29.92
16:41:02	29.73	31.13	30.12
16:41:07	29.90	31.39	30.31
16:41:12	30.06	31.64	30.51
16:41:17	30.22	31.93	30.71

16:41:22	30.39	32.18	30.90
16:41:27	30.58	32.46	31.11
16:41:32	30.74	32.71	31.30
16:41:37	30.91	32.98	31.49
16:41:42	31.09	33.25	31.68
16:41:47	31.26	33.52	31.89
16:41:52	31.44	33.80	32.07
16:41:57	31.61	34.06	32.22
16:42:02	31.78	34.34	32.39
16:42:07	31.93	34.61	32.56
16:42:12	32.11	34.89	32.72
16:42:17	32.28	35.14	32.87
16:42:22	32.45	35.40	33.04
16:42:27	32.62	35.66	33.22
16:42:32	32.78	35.91	33.39
16:42:37	32.94	36.17	33.57
16:42:42	33.03	36.40	33.72
16:42:47	33.08	36.65	33.89
16:42:52	33.01	36.89	34.04
16:42:57	32.99	37.12	34.25
16:43:02	32.93	37.23	34.49
16:43:07	32.88	37.21	34.59
16:43:12	32.80	37.10	34.59
16:43:17	32.74	36.97	34.57
16:43:22	32.67	36.80	34.51
16:43:27	32.58	36.62	34.45
16:43:32	32.51	36.45	34.41
16:43:37	32.43	36.28	34.33
16:43:42	32.34	36.12	34.24
16:43:47	32.26	35.97	34.14
16:43:52	32.18	35.81	34.02
16:43:57	32.04	35.65	33.92
16:44:02	32.03	35.50	33.78
16:44:07	31.89	35.34	33.67
16:44:12	31.87	35.19	33.57
16:44:17	31.76	35.01	33.46
16:44:22	31.68	34.85	33.36
16:44:27	31.61	34.69	33.23
16:44:32	31.46	34.55	33.13
16:44:37	31.39	34.41	33.00
16:44:42	31.32	34.28	32.89
16:44:47	31.24	34.17	32.80
16:44:52	31.16	34.04	32.70
16:44:57	31.08	33.93	32.61

16:45:02	31.01	33.82	32.53
16:45:07	30.94	33.70	32.44
16:45:12	30.92	33.59	32.36
16:45:17	30.79	33.49	32.28
16:45:22	30.73	33.38	32.20
16:45:27	30.67	33.27	32.11
16:45:32	30.62	33.16	32.01
16:45:37	30.57	33.06	31.93
16:45:42	30.50	32.99	31.84
16:45:47	30.44	32.92	31.74
16:45:52	30.37	32.83	31.64
16:45:57	30.31	32.74	31.54
16:46:02	30.25	32.65	31.44
16:46:07	30.17	32.57	31.35
16:46:12	30.09	32.49	31.29
16:46:17	30.08	32.40	31.22
16:46:22	30.01	32.31	31.13
16:46:27	29.93	32.23	31.05
16:46:32	29.86	32.15	30.92
16:46:37	29.78	32.07	30.82
16:46:42	29.70	31.99	30.74
16:46:47	29.69	31.91	30.65
16:46:52	29.62	31.83	30.58
16:46:57	29.54	31.74	30.51
16:47:02	29.47	31.66	30.45
16:47:07	29.45	31.59	30.37
16:47:12	29.37	31.52	30.31
16:47:17	29.31	31.45	30.22
16:47:22	29.24	31.39	30.14
16:47:27	29.25	31.32	30.08
16:47:32	29.18	31.25	30.02
16:47:37	29.16	31.18	29.96
16:47:42	29.08	31.11	29.88
16:47:47	29.02	31.05	29.80
16:47:52	29.03	30.98	29.73
16:47:57	28.96	30.92	29.67
16:48:02	28.95	30.86	29.61
16:48:07	28.89	30.79	29.55
16:48:12	28.81	30.74	29.48
16:48:17	28.81	30.68	29.41
16:48:22	28.74	30.62	29.37
16:48:27	28.73	30.56	29.33
16:48:32	28.67	30.51	29.28
16:48:37	28.66	30.46	29.22

16:48:42	28.58	30.41	29.17
16:48:47	28.58	30.36	29.12
16:48:52	28.51	30.31	29.07
16:48:57	28.50	30.26	29.03
16:49:02	28.43	30.21	28.99
16:49:07	28.43	30.17	28.97
16:49:12	28.36	30.13	28.93
16:49:17	28.37	30.08	28.89
16:49:22	28.30	30.04	28.84
16:49:27	28.32	30.00	28.80
16:49:32	28.33	29.96	28.77
16:49:37	28.27	29.91	28.74
16:49:42	28.22	29.87	28.70
16:49:47	28.23	29.83	28.64
16:49:52	28.17	29.79	28.60
16:49:57	28.19	29.76	28.57
16:50:02	28.14	29.72	28.54
16:50:07	28.08	29.68	28.50
16:50:12	28.10	29.65	28.48
16:50:17	28.05	29.61	28.46
16:50:22	28.06	29.58	28.45
16:50:27	28.01	29.55	28.43
16:50:32	28.03	29.52	28.40
16:50:37	27.99	29.48	28.37
16:50:42	28.02	29.45	28.35
16:50:47	27.98	29.42	28.33
16:50:52	27.95	29.39	28.31
16:50:57	27.98	29.36	28.28
16:51:02	27.94	29.33	28.26
16:51:07	27.90	29.30	28.24
16:51:12	27.92	29.27	28.23
16:51:17	27.87	29.25	28.20
16:51:22	27.83	29.22	28.19
16:51:27	27.86	29.20	28.16
16:51:32	27.82	29.17	28.14
16:51:37	27.79	29.14	28.12
16:51:42	27.82	29.12	28.10
16:51:47	27.78	29.10	28.09
16:51:52	27.76	29.07	28.07
16:51:57	27.78	29.05	28.05
16:52:02	27.74	29.03	28.04
16:52:07	27.70	29.00	28.02
16:52:12	27.73	28.98	28.00
16:52:17	27.69	28.97	27.98

16:52:22	27.66	28.94	27.96
16:52:27	27.62	28.92	27.94
16:52:32	27.65	28.89	27.93
16:52:37	27.61	28.87	27.91
16:52:42	27.58	28.85	27.90
16:52:47	27.54	28.82	27.90
16:52:52	27.57	28.80	27.89
16:52:57	27.53	28.78	27.87
16:53:02	27.50	28.76	27.86
16:53:07	27.53	28.74	27.85
16:53:12	27.51	28.72	27.83
16:53:17	27.48	28.70	27.81
16:53:22	27.45	28.68	27.79
16:53:27	27.49	28.67	27.77
16:53:32	27.46	28.65	27.75
16:53:37	27.43	28.63	27.74
16:53:42	27.40	28.61	27.72
16:53:47	27.38	28.59	27.70
16:53:52	27.36	28.56	27.68
16:53:57	27.41	28.54	27.65
16:54:02	27.39	28.51	27.63
16:54:07	27.37	28.49	27.62
16:54:12	27.35	28.47	27.60
16:54:17	27.34	28.45	27.58
16:54:22	27.32	28.43	27.55
16:54:27	27.31	28.41	27.53
16:54:32	27.29	28.39	27.51
16:54:37	27.29	28.37	27.49
16:54:42	27.28	28.35	27.47
16:54:47	27.28	28.33	27.46
16:54:52	27.27	28.31	27.45
16:54:57	27.28	28.29	27.44
16:55:02	27.28	28.27	27.42
16:55:07	27.27	28.26	27.41
16:55:12	27.28	28.24	27.39
16:55:17	27.29	28.22	27.37
16:55:22	27.29	28.21	27.35
16:55:27	27.30	28.20	27.33
16:55:32	27.24	28.18	27.32
16:55:37	27.26	28.17	27.30
16:55:42	27.27	28.16	27.29
16:55:47	27.28	28.14	27.28
16:55:52	27.29	28.13	27.28
16:55:57	27.31	28.11	27.27

16:56:02	27.26	28.09	27.26
16:56:07	27.27	28.08	27.25
16:56:12	27.29	28.03	27.25
16:56:17	27.31	28.02	27.25
16:56:22	27.33	27.99	27.25
16:56:27	27.29	27.97	27.26
16:56:32	27.30	27.99	27.26
16:56:37	27.32	28.00	27.26
16:56:42	27.27	27.99	27.25
16:56:47	27.29	27.99	27.25
16:56:52	27.30	27.98	27.24
16:56:57	27.33	27.97	27.24
16:57:02	27.28	27.94	27.25
16:57:07	27.29	27.93	27.25
16:57:12	27.31	27.93	27.25
16:57:17	27.27	27.93	27.24
16:57:22	27.29	27.92	27.24
16:57:27	27.31	27.91	27.24
16:57:32	27.26	27.90	27.23
16:57:37	27.28	27.89	27.22
16:57:42	27.29	27.88	27.21
16:57:47	27.25	27.87	27.21
16:57:52	27.27	27.86	27.20
16:57:57	27.22	27.85	27.20
16:58:02	27.24	27.84	27.20

ΠΙΝΑΚΑΣ Π-2. Θερμοαντίσταση RTD τύπου pt100

A/A	T(οC)	Rπειρ (Ω)	Rθεωρ (Ω)
1	26,77	110,4390364	110,4198773
2	26,76	110,4380302	110,4188769
3	26,76	110,4358735	110,4167327
4	26,76	110,4352612	110,416124
5	26,75	110,4335881	110,4144606
6	26,75	110,4321451	110,4130259
7	26,75	110,4324883	110,4133671
8	26,75	110,4311311	110,4120178
9	26,75	110,4318448	110,4127274
10	26,76	110,4354991	110,4163605
11	26,78	110,4428818	110,4237004
12	26,84	110,4683488	110,4490194
13	26,90	110,4923767	110,4729072
14	26,97	110,5171729	110,4975584
15	27,04	110,5459666	110,5261831
16	27,14	110,5835509	110,5635458
17	27,24	110,623561	110,6033189
18	27,36	110,669932	110,6494137
19	27,49	110,7215641	110,7007363
20	27,62	110,7734224	110,7522818
21	27,78	110,8335799	110,8120738
22	27,91	110,8860154	110,8641884
23	28,11	110,9617105	110,9394167
24	28,31	111,0390553	111,01628
25	28,50	111,116248	111,0929877
26	28,72	111,2020051	111,1782006
27	28,93	111,2824855	111,2581652
28	29,15	111,3703564	111,3454673
29	29,38	111,4571353	111,4316788
30	29,62	111,5511721	111,5250942
31	29,86	111,6468976	111,6201803
32	30,09	111,7369057	111,7095808
33	30,35	111,8363986	111,808395
34	30,60	111,9343198	111,9056408
35	30,86	112,036804	112,0074103
36	31,13	112,14109	112,1109609
37	31,39	112,2438901	112,213028
38	31,64	112,3392217	112,3076727
39	31,93	112,4511361	112,4187719

40	32,18	112,5517834	112,5186779
41	32,46	112,6574656	112,6235735
42	32,71	112,7575903	112,7229451
43	32,98	112,8634051	112,8279558
44	33,25	112,9665094	112,9302683
45	33,52	113,0737477	113,0366746
46	33,80	113,1825967	113,1446701
47	34,06	113,2846714	113,2459363
48	34,34	113,3924869	113,3528892
49	34,61	113,4967261	113,456286
50	34,89	113,6057233	113,5643935
51	35,14	113,704522	113,662378
52	35,40	113,8051654	113,7621844
53	35,66	113,9065966	113,8627642
54	35,91	114,0029539	113,9583055
55	36,17	114,1046542	114,0591369
56	36,40	114,1973689	114,1510526
57	36,65	114,294475	114,2473149
58	36,89	114,3856297	114,337671
59	37,12	114,4776502	114,4288789
60	37,23	114,5206828	114,4715292
61	37,21	114,5114749	114,4624032
62	37,10	114,4699438	114,4212408
63	36,97	114,4192204	114,3709658
64	36,80	114,3536419	114,3059641
65	36,62	114,2817142	114,2346654
66	36,45	114,2143807	114,1679171
67	36,28	114,1474723	114,1015868
68	36,12	114,0882157	114,0428394
69	35,97	114,0268843	113,9820322
70	35,81	113,9665669	113,9222275
71	35,65	113,9053642	113,8615422
72	35,50	113,8445437	113,8012331
73	35,34	113,7842068	113,7414007
74	35,19	113,7238231	113,6815192
75	35,01	113,6539858	113,6122592
76	34,85	113,5924204	113,5511997
77	34,69	113,5276687	113,4869769
78	34,55	113,4750889	113,4348243
79	34,41	113,4207775	113,3809519
80	34,28	113,3707054	113,3312826
81	34,17	113,3248921	113,2858362
82	34,04	113,2774174	113,23874
83	33,93	113,2309996	113,1926906
84	33,82	113,1897415	113,1517586

85	33,70	113,1444859	113,1068591
86	33,59	113,1010555	113,0637691
87	33,49	113,0607295	113,0237578
88	33,38	113,01625	112,9796241
89	33,27	112,9737049	112,9374083
90	33,16	112,9313314	112,8953614
91	33,06	112,8927916	112,8571174
92	32,99	112,864423	112,8289659
93	32,92	112,8375598	112,8023077
94	32,83	112,8034855	112,7684926
95	32,74	112,7698987	112,7351604
96	32,65	112,7337613	112,699296
97	32,57	112,7018593	112,6676342
98	32,49	112,6716343	112,6376361
99	32,40	112,6376575	112,6039135
100	32,31	112,6012978	112,5678248
101	32,23	112,5712756	112,5380257
102	32,15	112,5381997	112,5051947
103	32,07	112,5056737	112,4729088
104	31,99	112,4744074	112,4418725
105	31,91	112,4448844	112,412566
106	31,83	112,413037	112,3809514
107	31,74	112,3784908	112,3466569
108	31,66	112,3478563	112,3162448
109	31,59	112,320022	112,2886119
110	31,52	112,2919732	112,2607655
111	31,45	112,2654376	112,2344209
112	31,39	112,2409261	112,2100853
113	31,32	112,2142813	112,1836312
114	31,25	112,1868019	112,1563479
115	31,18	112,1620681	112,1317901
116	31,11	112,1347993	112,1047148
117	31,05	112,109149	112,0792461
118	30,98	112,0837249	112,0540014
119	30,92	112,0583008	112,0287562
120	30,86	112,0341832	112,0048079
121	30,79	112,0092349	111,9800343
122	30,74	111,9880774	111,9590245
123	30,68	111,963445	111,9345637
124	30,62	111,94336	111,9146183
125	30,56	111,9198157	111,8912372
126	30,51	111,9002533	111,8718101
127	30,46	111,8800045	111,851701
128	30,41	111,8599741	111,8318085
129	30,36	111,8419444	111,8139027

130	30,31	111,8211262	111,7932273
131	30,26	111,8015014	111,7737367
132	30,21	111,7821184	111,754486
133	30,17	111,7647829	111,7372686
134	30,13	111,7489645	111,7215578
135	30,08	111,7323037	111,70501
136	30,04	111,7156351	111,6884544
137	30,00	111,6992902	111,67222
138	29,96	111,6829219	111,6559622
139	29,91	111,6650599	111,6382205
140	29,87	111,6489295	111,6221986
141	29,83	111,6343513	111,6077182
142	29,79	111,6198511	111,5933152
143	29,76	111,6058969	111,5794543
144	29,72	111,5906713	111,5643304
145	29,68	111,577072	111,5508218
146	29,65	111,5621857	111,5360346
147	29,61	111,5496901	111,5236221
148	29,58	111,5374753	111,5114884
149	29,55	111,5249368	111,499033
150	29,52	111,5113258	111,485512
151	29,48	111,4978162	111,4720917
152	29,45	111,4849891	111,4593492
153	29,42	111,4740067	111,4484392
154	29,39	111,4623652	111,4368743
155	29,36	111,4501465	111,4247359
156	29,33	111,4387195	111,4133839
157	29,30	111,4261615	111,4009082
158	29,27	111,4156042	111,39042
159	29,25	111,4062052	111,3810824
160	29,22	111,3964825	111,3714232
161	29,20	111,3862528	111,3612602
162	29,17	111,3772438	111,3523099
163	29,14	111,3661093	111,3412479
164	29,12	111,3573304	111,332526
165	29,10	111,3471202	111,3223821
166	29,07	111,3382477	111,3135672
167	29,05	111,3292894	111,3046669
168	29,03	111,3214075	111,296836
169	29,00	111,311443	111,2869359
170	28,98	111,3028552	111,2784036
171	28,97	111,2965216	111,2721109
172	28,94	111,2853481	111,2610094
173	28,92	111,2772088	111,2529225
174	28,89	111,2668894	111,2426694

175	28,87	111,2576893	111,2335285
176	28,85	111,2506771	111,2265613
177	28,82	111,241243	111,2171876
178	28,80	111,2328502	111,2088486
179	28,78	111,2250619	111,2011101
180	28,76	111,2164156	111,1925191
181	28,74	111,2087326	111,1848852
182	28,72	111,200761	111,1769644
183	28,70	111,1935733	111,1698225
184	28,68	111,1865182	111,1628124
185	28,67	111,1794163	111,1557557
186	28,65	111,1718347	111,1482223
187	28,63	111,1640425	111,1404796
188	28,61	111,1561489	111,1326361
189	28,59	111,148696	111,1252304
190	28,56	111,1397494	111,1163405
191	28,54	111,1299526	111,1066057
192	28,51	111,1203469	111,0970607
193	28,49	111,1116655	111,0884341
194	28,47	111,1042477	111,0810631
195	28,45	111,0939595	111,0708397
196	28,43	111,0859138	111,0628446
197	28,41	111,0781216	111,0551014
198	28,39	111,0706336	111,0476605
199	28,37	111,0631339	111,0402078
200	28,35	111,0553105	111,0324335
201	28,33	111,0480916	111,0252598
202	28,31	111,0422494	111,0194542
203	28,29	111,0339658	111,0112224
204	28,27	111,0268639	111,0041648
205	28,26	111,0194656	110,9968127
206	28,24	111,0135376	110,9909217
207	28,22	111,0064981	110,9839261
208	28,21	111,002407	110,9798605
209	28,20	110,996518	110,9740081
210	28,18	110,9913661	110,9688883
211	28,17	110,9857696	110,9633265
212	28,16	110,9809843	110,958571
213	28,14	110,9757895	110,9534084
214	28,13	110,9688553	110,9465172
215	28,11	110,9629975	110,9406958
216	28,09	110,9566951	110,9344324
217	28,08	110,9510323	110,9288046
218	28,03	110,9332522	110,9111344
219	28,02	110,9289427	110,9068515

220	27,99	110,9152342	110,8932276
221	27,97	110,9079412	110,8859795
222	27,99	110,9146804	110,8926772
223	28,00	110,9185336	110,8965066
224	27,99	110,9179876	110,895964
225	27,99	110,9154643	110,8934563
226	27,98	110,9127304	110,8907392
227	27,97	110,9086471	110,886681
228	27,94	110,8971187	110,8752235
229	27,93	110,8934176	110,8715452
230	27,93	110,8939987	110,8721227
231	27,93	110,8926493	110,8707816
232	27,92	110,8894942	110,8676459
233	27,91	110,8847128	110,8628938
234	27,90	110,8816396	110,8598395
235	27,89	110,8765969	110,8548277
236	27,88	110,8720144	110,8502733
237	27,87	110,868091	110,8463739
238	27,86	110,864191	110,8424978
239	27,85	110,8601701	110,8385015
240	27,84	110,8566601	110,835013

USB TC 01					
% Απόκριση	t/τ (θεωρητικά)	T _{measured} (οC)	t _{measured}	t/τ	Γ
0,00	0,00	25,31	0,00	0	1
63,20	1,00	9,31	1,90	1	0,368
86,50	2,00	3,42	4,05	2,1315789	0,135
90,00	2,30	2,53	5,21	2,7421053	0,1
95,00	3,00	1,27	9,20	4,8421053	0,05

Pt100					
% Απόκριση	t/τ (θεωρητικά)	T _{measured} (οC)	t _{measured}	t/τ	Γ
0,00	0,00	25,08	0,00	1	0,368
63,20	1,00	9,41	17,20	2,58139535	0,135
86,50	2,00	3,39	44,40	3,23837209	0,1
90,00	2,30	2,51	55,70	5,26744186	0,05
95,00	3,00	1,25	90,60		

SPRT					
% Απόκριση	t/τ (θεωρητικά)	T _{measured} (οC)	t _{measured}	t/τ	Γ
0,00	0,00	25,31	0,00	0	1
63,20	1,00	9,31	4,03	1	0,368
86,50	2,00	3,42	7,50	1,861042	0,135
90,00	2,30	2,53	8,70	2,158809	0,1
95,00	3,00	1,27	12,40	3,076923	0,05
98,20	4,00	0,46	24,90	6,17866	0,018