



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

*Μοντελοποίηση θερμοσίφωνα σε MATLAB,  
Κατασκευή θερμομετρικής διάταξης με θερμίστορ  
και  
πειραματική αξιολόγηση του μοντέλου*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΠΥΡΙΔΩΝ Κ. ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ**

Επιβλέπων: Ιωάννης Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2008





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

*Μοντελοποίηση θερμοσίφωνα σε MATLAB,  
Κατασκευή θερμομετρικής διάταξης με θερμίστορ  
και  
πειραματική αξιολόγηση του μοντέλου*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΠΥΡΙΔΩΝ Κ. ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ**

Επιβλέπων: Ιωάννης Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18<sup>η</sup> Ιουλίου 2008

.....  
Ιωάννης Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Βασίλειος Λούμος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ελευθέριος Καγιάφας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2008

.....  
Σπυρίδων Κ. Σταυρόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών  
Ε.Μ.Π.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικούς σκοπούς, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για οποιονδήποτε κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στο συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που εμπεριέχονται στο παρόν έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και μόνο, και δεν πρέπει να ερμηνευθούν ως επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αθήνα, Ιούλιος 2008

## Περίληψη

Η μοντελοποίηση ενός συστήματος είναι πλέον κάτι το σύνηθες στην επιστήμη μας. Προσφέρει ένα ποσοτικό τρόπο κατανόησης της λειτουργίας ενός συστήματος και των νόμων που τη διέπουν. Άλλοτε κρίνεται ως επιτυχής και άλλοτε ως όχι επιτυχής. Στη δεύτερη περίπτωση απλά αλλάζουμε τρόπο προσέγγισης.

Στην εργασία αυτή θα επιχειρήσουμε να μοντελοποιήσουμε ένα σύστημα θέρμανσης νερού, το γνωστό σε όλους μας ως θερμοσίφωνα, στηριζόμενοι στην πλατφόρμα Matlab για την επίτευξη αυτού του στόχου. Θα διερευνήσουμε το σύστημα από θεωρητικής απόψεως και θα προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε, κατόπιν λήψεως των αντίστοιχων μετρήσεων, τις πιθανές αποκλίσεις του μοντέλου από τη συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος.

Ως ενδιαμέσο επίπεδο, και με γνώμονα τη δυνατότητα λήψης των μετρήσεων του προηγούμενου σταδίου, θα εστιάσουμε την προσοχή μας στην κατασκευή μια διάταξης κατάλληλης να μας δώσει την απαραίτητη ευελιξία και αξιοπιστία στη λήψη μετρήσεων. Θα βασιστούμε στην τεχνολογία των θερμίστορ και θα δούμε τα απαραίτητα κυκλώματα, καθώς και τις ρυθμίσεις που πρέπει να κάνουμε σε αυτά, ώστε να έχουμε μια πλήρως λειτουργική θερμομετρική διάταξη.

Λέξεις κλειδιά: μοντελοποίηση, Matlab, θερμοσίφωνα, θερμίστορ, γέφυρα Wheatstone

## **Abstract**

Systems modelling is a quite common procedure nowadays in science. It offers a more practical way of understanding the way a system works, as well as the laws that come into place. It can be considered either as an effective or an ineffective. In the latter situation, we simply change the way of approach.

In this study we will try to make a model of a water heater with tank, by using the Matlab platform as a means to that end. We will analyse the system from a theoretic point of view and, after conducting the proper experiments and taking the corresponding measurements, we shall try to give a reasonable explanation of the possible variations between our model and the actual system.

As an intermediary step, and having in view the aforementioned need of measurements from our system, we will focus our efforts in constructing a device, such as to provide us with the level of agility and reliability needed to conduct our experiments. To that end, we shall move towards the thermistor technology and shall seek the circuitry and modifications needed, so that we achieve a fully operational thermometric device.

Keywords: modelling, Matlab, water heater, thermistor, Wheatstone bridge

## Ευχαριστίες

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου, κ. Ιωάννη Αβαριτσιώτη επειδή ήταν ακριβώς αυτό που έπρεπε, επιβλέποντας με όλη τη σημασία της λέξης, αλλά και επειδή αφιέρωσε τόσο χρόνο σε μένα και την εργασία μου. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω όλους τους εμπλεκόμενους στα εργαστήρια Μικροηλεκτρονικής και Αισθητήρων και ιδιαίτερα τους κυρίους Απόστολο Ψαρρό και Ιωάννη Θανασόπουλο για την αμέριστη βοήθεια και την διατήρηση ενός ευχάριστου και παραγωγικού κλίματος για ένα καλό αποτέλεσμα. Τελευταία, αλλά όχι σε μικρότερο βαθμό, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συμπαράσταση και βοήθεια όλα αυτά τα χρόνια, αλλά και τους φίλους και συνεργάτες, με ειδική αναφορά στους Αντώνη Λιάπη και Παναγιώτη Προκοπίου για τη κατανόηση και τη στήριξη που μου προσέφεραν. Ευχαριστώ.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	5
Abstract .....	6
Ευχαριστίες.....	7
Περιεχόμενα.....	8
1. Εισαγωγή	
1.1 Σκοπός.....	10
1.2 Σκιαγράφηση της εργασίας.....	10
1.3 Σκοπιμότητα.....	11
2. Περιγραφή κύριων διατάξεων	
2.1 Πειραματική διάταξη.....	13
2.2 Μοντέλο σε Matlab.....	14
3. Θεωρητική προσέγγιση	
3.1 Ενεργειακές μετατροπές – Απώλειες.....	18
3.1.1 Ενέργεια στην αντίσταση.....	19
3.1.2 Μετάδοση ενέργειας στη μάζα νερού.....	19
3.1.3 Θερμικές απώλειες.....	21
3.1.4 Εσωτερική ανταλλαγή ενέργειας στη δεξαμενή.....	22
3.2 Δευτερεύοντα στοιχεία θεωρητικής ανάλυση	
3.2.1 Μεταβολή πυκνότητας νερού.....	23
3.2.2 Υπολογισμός παροχής εξόδου.....	25
3.3 Θεωρητική προσέγγιση θερμίστορ	
3.3.1 Γενικά.....	30
3.3.2 NTC θερμίστορ.....	30
3.3.3 PTC θερμίστορ.....	31
3.3.4 NTC θερμίστορ – Μια πιο ενδεδειγμένη.....	31
4. Πειραματική διάταξη ηλεκτρονικού θερμομέτρου	
4.1 Γενικά.....	34
4.2 Σχεδιασμός διάταξης.....	35
4.2.1 Παρουσίαση βασικών στοιχείων γέφυρας Wheatstone.....	35
4.2.2 Γέφυρα με ένα ενεργό κλάδο.....	38
4.2.3 Γραμμικοποίηση γέφυρας με ένα ενεργό κλάδο.....	38
4.2.4 Γέφυρα Wheatstone με θερμίστορ.....	42
4.2.5 Στάδιο ενίσχυσης εξόδου γέφυρας.....	48
4.3 Υλοποίηση της θερμομετρικής διάταξης.....	49
5. Βαθμονόμηση θερμομετρικής διάταξης	
5.1 Προετοιμασία – Επιλογή μέσου βαθμονόμησης.....	54
5.2 Διαδικασία βαθμονόμησης – Μετρήσεις.....	57



6. Παρατηρήσεις και υπολογισμοί πριν το πειραματικό στάδιο.....	63
6.1 Υπολογισμός όγκου απορριπτόμενου νερού.....	64
6.2 Τοποθέτηση αισθητήρα.....	64
7. Παρουσίαση μετρήσεων – Πορίσματα – Προτάσεις	
7.1 Διαδικασία μετρήσεων.....	66
7.1.1 Α' Σενάριο – Θέρμανση νερού.....	67
7.1.2 Β' Σενάριο – Πτώση θερμοκρασίας χωρίς απόρριψη νερού.....	71
7.1.3 Γ' Σενάριο – Πτώση θερμοκρασίας με απόρριψη νερού.....	73
7.2 Σύγκριση πραγματικής διάταξης – μοντέλου	
7.2.1 Α' Σενάριο.....	75
7.2.2 Β' Σενάριο.....	75
7.2.3 Γ' Σενάριο.....	76
7.3 Βελτιώσεις.....	79
7.4 Προτάσεις.....	80
Πηγές.....	81

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΣΚΟΠΟΣ

Σε αυτή την εργασία θα αποπειραθούμε να κατασκευάσουμε ένα μαθηματικό μοντέλο τέτοιο ώστε να εξομοιώνει την πλήρη λειτουργία, σε κάθε επίπεδο, ενός κοινού θερμοσίφωνα εμπορίου. Ο στόχος μας θα είναι να μπορέσουμε να εντοπίσουμε όλα τα απαραίτητα στοιχεία που στοιχειοθετούν τη λειτουργία μιας τέτοιας συσκευής και να προσαρτήσουμε στο μοντέλο μας ώστε να έχουμε όσο δυνατόν ρεαλιστικότερη συμπεριφορά.

### 1.2 ΣΚΙΑΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ως εργαλείο για αυτή την προσέγγιση διαλέγουμε την πασίγνωστη πλατφόρμα υπολογισμών Matlab και συγκεκριμένα την έκδοση 2008α αυτής. Ο λόγος είναι ότι μέσω αυτής της πλατφόρμας έχουμε εύκολη και άμεση πρόσβαση σε όλα τα ενδιαμέσα στοιχεία όταν το ζητήσουμε, διαχειρίζεται σε πολύ καλό βαθμό δομές πινάκων τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε λόγω της πληθώρας των μετρήσεων που θα χρειαστεί να αποκομίσουμε, ενώ ενσωματώνει και ένα απλοϊκό μεν αλλά ικανοποιητικό τρόπο απεικόνισης των διαδραματιζόμενων διαδικασιών, έτσι ώστε να έχουμε και μια οπτική επαφή με την εξομοίωση κατά την εκτέλεσή της.

Ως δευτερεύον κομμάτι αυτής της εργασίας προκύπτει η κατασκευή ενός ηλεκτρονικού θερμομέτρου. Η ανάγκη για κάτι τέτοιο προκύπτει από το γεγονός ότι θα χρειαστεί να δούμε και την πραγματική συμπεριφορά που έχει ο αληθινός θερμοσίφοντας, ώστε να είμαστε σε θέση να κρίνουμε τη μοντελοποίηση μας επιτυχή ή αποτυχημένη και να κάνουμε τις αναγκαίες ρυθμίσεις, ώστε να πετύχουμε βελτίωση σε τυχόν παρεκκλίσεις από τα πραγματικά μεγέθη.

Για τις ανάγκες λοιπόν αυτού του θερμομέτρου θα μελετήσουμε εκτενέστερα στα αντίστοιχα μέρη της εργασίας, το ενεργό αυτό στοιχείο που θα αποτελέσει τον δείκτη θερμοκρασίας, το γνωστό σε κάποιους από μας θερμίστορ. Θα δούμε τις ιδιότητες, του τη συμπεριφορά του τόσο όταν βρίσκεται μόνο του όσο και πως αυτή μεταβάλλεται όταν θα ενταχθεί στην ευρύτερη κυκλωματική διάταξη μετρήσεων, καθώς και διάφορους τρόπους βαθμονόμησής του.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας θα παραθέσουμε όλα τα αποτελέσματα που λάβαμε, θεωρητικά και πειραματικά, θα δούμε τις πιθανές αποκλίσεις και τους πιθανούς λόγους για τους οποίους εμφανίζονται και θα προτείνουμε λύσεις τόσο για το μοντέλο μας όσο και βελτίωση του συνολικού θέματος.

### 1.3 ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ

Ένα ερώτημα που χρειάζεται να απαντηθεί αφορά τη χρησιμότητα μιας τέτοιας εργασίας. Γιατί κανείς να ασχοληθεί με ένα τέτοιο θέμα και σε τι ακριβώς μπορεί να βοηθήσει ένα μοντέλο που απλά εξομοιώνει τη συμπεριφορά ενός απλού θερμοσίφωνα;

Μια πρώτη εκδοχή θα ήταν γενικά η γνώση που θα αποκομίσουμε από μια ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος. Η αλήθεια είναι πως παρότι ο θερμοσίφωνα είναι πλέον ένα αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής μας ζωής και υπάρχει σε κάθε σπίτι ανεξαιρέτως (με τη μία μορφή ή την άλλη), εντούτοις πολύ λίγοι γνωρίζουμε βασικά πράγματα όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας του, αλλά, κυρίως, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν για τη σωστή του χρήση.

Πόση ώρα χρειάζεται ένας θερμοσίφωνα για να ζεστάνει το νερό; Πόση ώρα νωρίτερα πρέπει να τον ανάψω πριν θελήσω να κάνω μπάνιο; Γιατί έχω ακόμα ζεστό νερό, αφού δεν τον άναψα σήμερα τον θερμοσίφωνα; Αυτά και άλλα συναφή ερωτήματα έρχεται να απαντήσει η εργασία αυτή, αλλά αι όχι μόνο.

Ο ρόλος της εργασίας θα ήταν λίγο πεζός, αν δεν αποσκοπούσε και λίγο παραπέρα. Το μοντέλο που φιλοδοξούμε να αναπτύξουμε θα μπορεί να παρακολουθήσει με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά ενός θερμοσίφωνα. Αυτό συνεπάγεται πως θα μπορεί να σταθεί αυτούσιο ως αντιπρόσωπος του θερμοσίφωνα σε περιπτώσεις, όπου θέλουμε πληροφορία για την κατάσταση και τη λειτουργία του θερμοσίφωνα, χωρίς όμως να μπορούμε να είμαστε παρόντες και να δούμε το θερμόμετρο του θερμοσίφωνα ή να βάλουμε το χέρι μας κάτω από τη βρύση και να δούμε αν έχουμε ζεστό νερό.

Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση ενός τέτοιου μοντέλου, θα μπορούμε να γνωρίζουμε κάθε στιγμή πόση θερμοκρασία έχει το νερό του θερμοσίφωνα, χωρίς καν να είμαστε σπίτι. Αρκεί να γνωρίζουμε για πόση ώρα τον άναψαμε ή πόση ώρα αφήσαμε την βρύση ανοιχτή. Και όλα αυτά χωρίς καν την ανάγκη για κάποιο μηχανισμό μέτρησης.

Τέτοιες ανάγκες προκύπτουν με την έρευνα για τα 'έξυπνα σπίτια', τα οποία σχεδιάζονται έτσι ώστε να αυτοματοποιούν ένα μεγάλο φάσμα της ανθρώπινης οικιακής δραστηριότητας και που έχουν την ανάγκη να ελέγχουν μια ποικιλία διαφορετικών ηλεκτρονικών συσκευών και να τις χρησιμοποιούν ανάλογα με τις ανάγκες των ιδιοκτητών τους.

Έτσι πλέον, με μοντέλα σαν και αυτό της εργασίας μας θα μπορεί να αυτοματοποιηθεί πολύ εύκολα η λειτουργία του θερμοσίφωνα και, πλέον, ο άνθρωπος, γυρνώντας σπίτι από τη δουλειά για παράδειγμα, θα μπορεί να έχει ζεστό νερό χωρίς περαιτέρω δαπάνη χρόνου.

Παράλληλα, η ύπαρξη τέτοιων μοντέλων είναι που μπορεί να καταστήσει την ύπαρξη θερμομετρικών αισθητήρων σε διάφορες συσκευές μη απαραίτητη. Δεν θα απαιτείται η ύπαρξη αισθητήρα στον θερμοσίφωνα για την εύρυθμη λειτουργία του. Το μοντέλο θα μπορεί να γνωρίζει ικανοποιητικά καλά πόση θερμοκρασία έχει ο θερμοσίφοντας και να βοηθά άλλα κυκλώματα να κάνουν καλύτερη διαχείρισή του, μειώνοντας την ενεργειακή δαπάνη κτλ.

Εξάλλου μην ξεχνάμε πως οι αισθητήρες λειτουργούν υπό αντίξοες συνθήκες, σε μεγάλες θερμοκρασίες κτλ., με αποτέλεσμα τη φθορά και συχνά την καταστροφή τους. Ένα τέτοιο μοντέλο που μπορεί να βρίσκεται τοποθετημένο σε κάποια κεντρική επεξεργαστική μονάδα έχει λιγότερες πιθανότητες να πάθει βλάβη ενώ είμαστε σίγουροι πως, αν δουλεύει η μονάδα, το μοντέλο θα αποδίδει το ίδιο καλά όσο και την πρώτη μέρα.

Ακόμη, ως παραπροϊόν της εργασίας, θα έχουμε την κατασκευή ενός ηλεκτρονικού θερμόμετρου με βάση το θερμίστορ. Θα δούμε πώς μπορεί κάτι τέτοιο να σχεδιαστεί, να μετρηθεί/βαθμονομηθεί και θα επιβεβαιώσουμε την σωστή του λειτουργία. Έτσι αυτή η εργασία μπορεί κάλλιστα να αποτελέσει έναν ολοκληρωμένο οδηγό για την κατασκευή μιας τέτοιας διάταξης, η οποία έχει πάμπολλες εφαρμογές και η οποία, αλλάζοντας είδος θερμίστορ, μπορεί να καλύψει οποιαδήποτε θερμομετρική ανάγκη μπορεί να προκύψει σε ολόκληρο τον τομέα της ανθρώπινης δραστηριότητας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Θα ξεκινήσουμε την ανάλυσή μας κάνοντας μια σύντομη αναφορά στα κομμάτια που θα χρησιμοποιήσουμε για να φτιάξουμε το οικοδόμημα αυτής της εργασίας.

#### 2.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για τις ανάγκες της μελέτης μας, χρησιμοποιούμε ένα κοινό ηλεκτρικό θερμοσίφωνα εμπορίου εξοπλισμένο με δεξαμενή αποθήκευσης του νερού. Ο συγκεκριμένος θερμοσίφοντας είναι της εταιρείας Wilco, ελληνικής κατασκευής, ισχύος 4000W και συνολικής χωρητικότητας 80lt νερού.

Είναι κάθετου τύπου και βασικά αποτελείται από το θερμαντικό στοιχείο, τη δεξαμενή, το περίβλημα της και την ενδιάμεση μονωτική επένδυση, η οποία απαρτίζεται από επίστρωση διογκούμενης πολυουρεθάνης χωρίς CFC (χλωρο-φθορο-ανθρακικά συστατικά, απαγορευμένα λόγω βλαβερών επιπτώσεων στο στρώμα όζοντος της ατμόσφαιράς μας με κανονιστική διάταξη του πρωτόκολλου του Μοντρεάλ), ενώ παρέχει ένδειξη της τρέχουσας θερμοκρασίας μέσω ενσωματωμένου θερμομέτρου. Ακόμη είναι εφοδιασμένο με θερμοστάτη για προστασία και εξοικονόμηση ενέργειας με ρύθμιση της ανώτερης θερμοκρασίας στο πεδίο τιμών από 30 έως 80 °C. Στοιχεία γεωμετρίας καθώς και δευτερεύοντα στοιχεία παρουσιάζονται παρακάτω στον πίνακα του κατασκευαστή.



ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΑΣ WILCO ΚΑΘΕΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ 80lt

Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμοσίφωνων δαπέδου - οριζοντίων - καθέτων Ferro Glass									
Χωρητικότητα Lt	Ηλεκτρική ισχύς watt	Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος Ampere	Τάση λειτουργίας 50-60Hz Volt	Διατομή καλωδίου mm <sup>2</sup>	Διαστάσεις mm		Μόνωση διογκούμενης πολυουρεθάνης χωρίς CFC-cm	Μαx πίεση λειτουργίας BAR	Μόνωση υαλοβάμβακα cm
					L	Φ			
10	2.000	10	230	2,5	410	275	OXI	10	5
20	2.000	10	230	2,5	575	275	OXI	10	5
40	4.000	20	230	4	510	422	3	10	OXI
60	4.000	20	230	4	710	422	3	10	OXI
80	4.000	20	230	4	840	422	3	10	OXI
100	4.000	20	230	4	960	422	3	10	OXI
120	4.000	20	230	4	1045	422	3	10	OXI

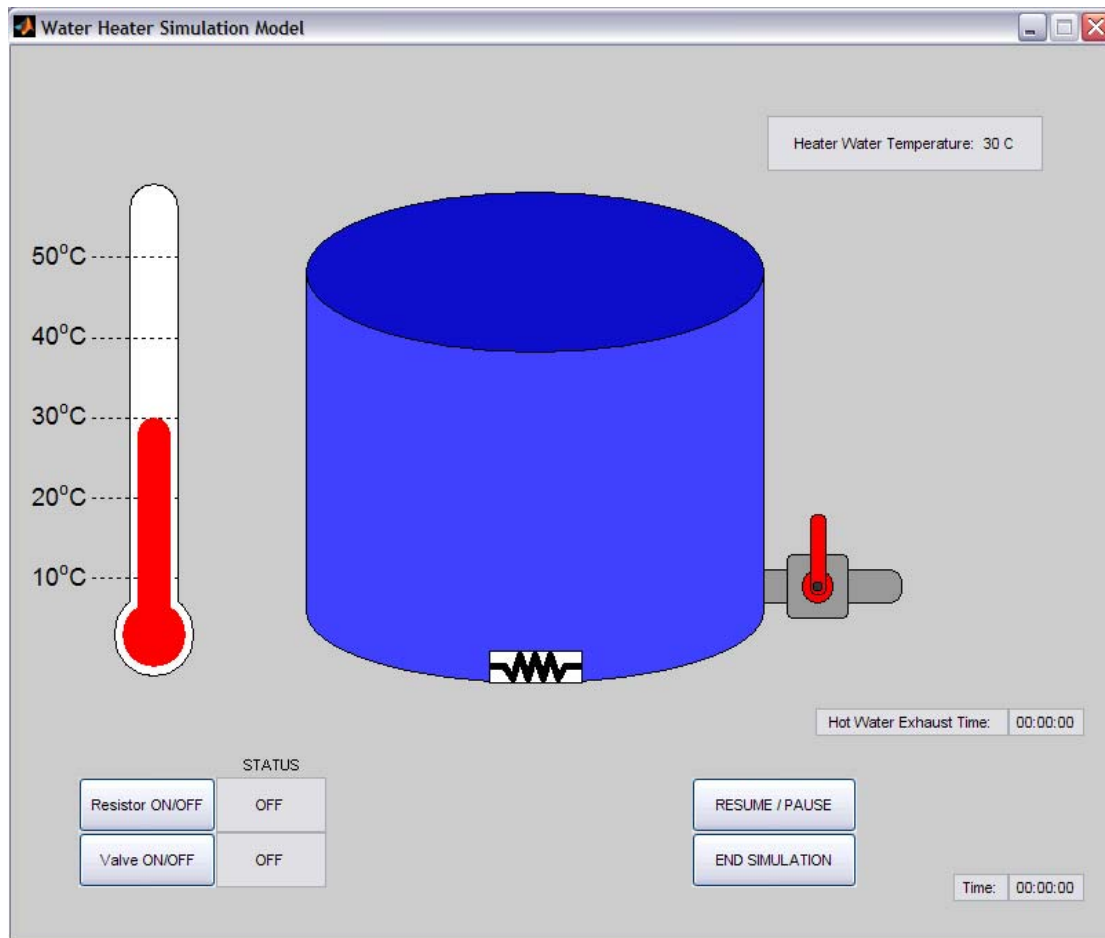
Θερμοστάτης : Περιοχή ελέγχου από 30οC - 80οC

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, κατά την πειραματική διαδικασία, η θερμομέτρηση της δεξαμενής του νερού δε θα βασιστεί στο ενσωματωμένο θερμόμετρο, αλλά σε διάταξη δικής μας κατασκευής με βασικό θερμομετρικό μέσο ένα θερμίστορ, περιγραφή της οποίας ακολουθεί στον αντίστοιχο μέρος της ανάλυσης των επιμέρους διατάξεων.

## 2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΑ ΣΕ MATLAB

Ο πυρήνας αυτής της εργασίας είναι η υλοποίηση ενός μοντέλου του παραπάνω θερμοσίφωνα, το οποίο να συμπεριφέρεται με τρόπο πανομοιότυπο με το πραγματικό. Βασιστήκαμε στο απλά εργαλεία σχεδίασης που διαθέτει ο πυρήνας του Matlab ώστε να αναπαράγουμε μια υποτυπώδη οπτική αναπαράσταση της εικόνας του πραγματικού συστήματος. Επίσης, τοποθετήθηκαν και πλήκτρα άμεσης ενέργειας για αλληλεπίδραση με το σύστημα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης προσομοίωσης για αυτές τις μεταβλητές που εμπεριέχονται στο σύστημα και μπορούν να αλλάξουν τη διεύθυνση ροής της προσομοίωσης. Το συνολικό οπτικό αποτέλεσμα είναι αυτό που παρουσιάζεται στην εικόνα 1.

Στην οπτικοποίηση αυτή παρατηρούμε τα κυρίως μέρη του θερμοσίφωνα, δηλαδή την δεξαμενή νερού, την αντίσταση ισχύος και τη βαλβίδα διαφυγής του ζεστού νερού. Και τα τρία αυτά στοιχεία αλλάζουν μορφή, καθώς μεταβαίνουν από μια κατάσταση λειτουργίας σε μια άλλη.



Εικόνα 1: Παρουσίαση οπτικής αναπαράστασης μοντέλου στο Matlab

Έτσι :

A. Η αντίσταση θέρμανσης έχει ως δυνατές καταστάσεις της (on/off) να αναπαριστούνται από δύο χρώματα (κόκκινο/μαύρο αντίστοιχα)

B. Η βαλβίδα αλλάζει θέση, βρισκόμενη κατακόρυφα όταν είναι κλειστή και παράλληλη με την σωλήνα εξόδου όταν επιτρέπει τη διέλευση νερού προς την έξοδο

Γ. Η δεξαμενή αποθήκευσης του νερού, μιας και οι δυνατές καταστάσεις που μπορεί να πάρει είναι όσες και οι διαφορετικές θερμοκρασίες, στις μπορεί να βρεθεί το νερό, αποφασίστηκε να αποκτήσει διαφορετική απόχρωση.

Δευτερευόντως, παρατηρούμε πως υπάρχουν δύο ενδείξεις της θερμοκρασίας που προκύπτει από την προσομοίωση του μοντέλου. Έχουμε την αναλογική ένδειξη υπό μορφή θερμομέτρου αριστερά, καθώς και την ψηφιακή ένδειξη θερμοκρασίας πάνω δεξιά.

Οι μετρητές που παρατηρούνται στο κάτω δεξί μέρος της οθόνης, αρχίζοντας από τον κατώτερο, είναι:

A. Ο βασικός μετρητής χρόνου (Time) από την αρχή της διεξαγωγής της προσομοίωσης. Είναι το χρονόμετρο μπορούμε να παρατηρούμε, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, χρονικούς σταθμούς όπως την επίτευξη μιας θερμοκρασίας που μας ενδιαφέρει, ή αντιστρόφως να βασιστούμε σε αυτό για να δούμε σε ποια θερμοκρασία φτάνει το σύστημα μετά από κάποιο προκαθορισμένο χρόνο

B. Ο μετρητής στον οποίο βλέπουμε μια εκτίμηση του χρόνου, μετά την παρέλευση του οποίου υπολογίζεται μέσω του μοντέλου πως θα έχουμε θερμοκρασία νερού κάτω από τους 40°C (Hot Water Exhaust Time). Θυμίζουμε πως οι συνθήκες για να θεωρείται το νερό ζεστό είναι να βρίσκεται μεταξύ 40-50 °C. Επομένως το χρονόμετρο αυτό είναι αντιστροφής μέτρησης και έχουμε θεωρήσει ως προϋποθέσεις λειτουργίας του να μην έχουμε ενεργό το θερμαντικό στοιχείο του θερμοσίφωνα, μιας και σε αυτή την περίπτωση δεν θεωρούμε πως μας ενδιαφέρει σε πόση ώρα θα πέσει η θερμοκρασία του νερού κάτω από το επιτρεπτό όριο ώστε να θεωρείται ζεστό.

Στο κάτω αριστερό μέρος της οθόνης έχουμε τον πίνακα ενδείξεων, ο οποίος καταδεικνύει την τρέχουσα κατάσταση των δύο μεταβλητών στις οποίες έχουμε τη δυνατότητα παρέμβασης, δηλαδή την κατάσταση (Status) του θερμαντικού στοιχείου (Resistor) και της βαλβίδας διαφυγής (Valve).

Η μετάβαση των δύο αυτών στοιχείων από τη μία θέση λειτουργίας στην άλλη μπορεί να γίνει είτε πατώντας το αντίστοιχο κουμπί αλληλεπίδρασης στον πίνακα ενδείξεων, είτε πατώντας με το mouse πάνω στην οπτική αναπαράσταση του κάθε στοιχείου, πατώντας για παράδειγμα πάνω στην ίδια την αντίσταση.

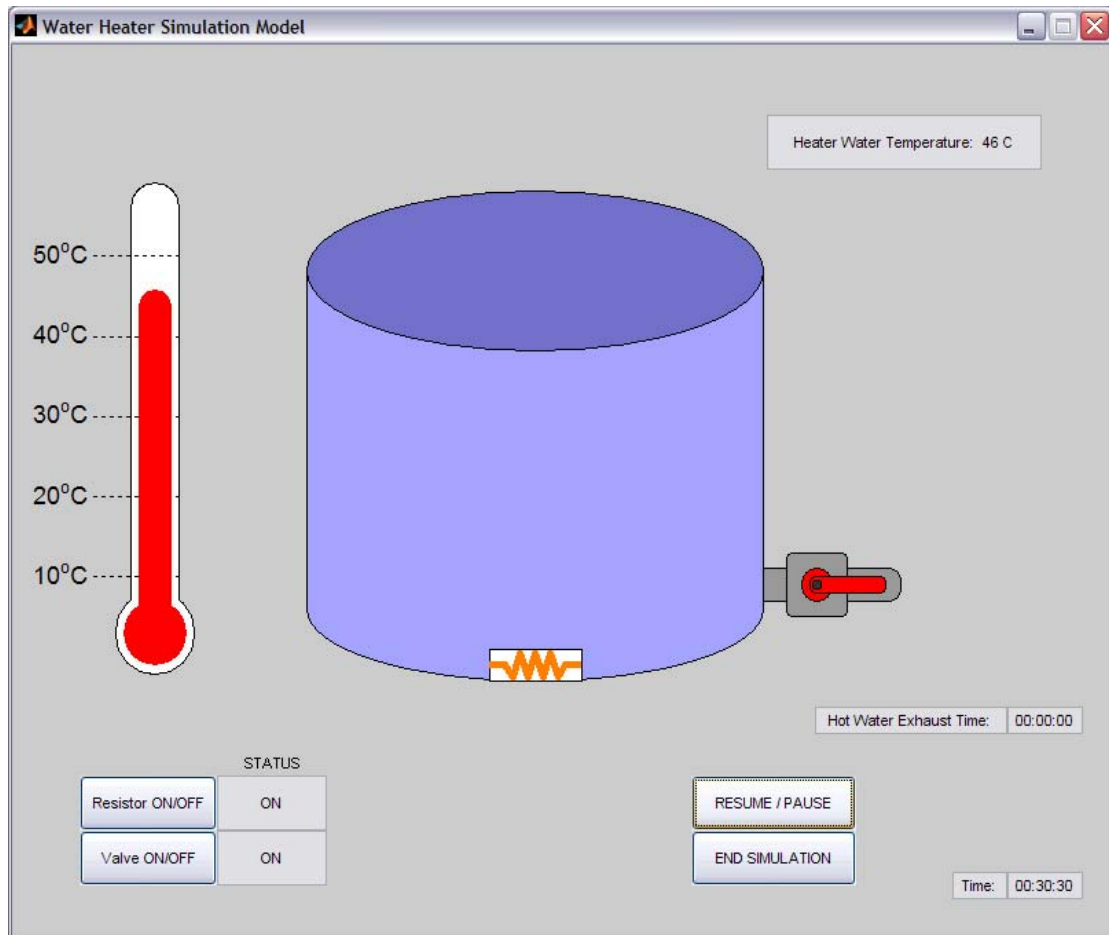
Τέλος παρατηρούμε και τα βασικά πλήκτρα ελέγχου αυτής καθαρής της διεξαγωγής της προσομοίωσης. Έτσι έχουμε :

A. Το πλήκτρο Pause/Resume για την περίπτωση που θέλουμε να σταματήσουμε προσωρινά για κάποιο χρονικό διάστημα την εκτέλεση του πειράματος για να καταγράψουμε κάποιο στοιχείο, μετά την παρέλευση του οποίου διαστήματος θα θελήσουμε να συνεχίσουμε τη διεξαγωγή της εξομοίωσης από το τελευταίο σημείο της ξαναπατώντας το ίδιο πλήκτρο.

B. Το πλήκτρο End Simulation το οποίο, όπως είναι εύκολο κανείς να συμπεράνει, τερματίζει την προσομοίωση διατηρώντας τις ενδιάμεσες μεταβλητές και πίνακες στον χώρο εργασίας του Matlab για πιο εξειδικευμένες μελέτες.



Στη συνέχεια βλέπουμε ένα στιγμιότυπο σε μια τυχαία στιγμή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης εξομοίωσης, στην οποία έχουμε επιβάλλει της εναλλαγή της κατάστασης λειτουργίας θερμαντικού στοιχείου και βαλβίδας εξόδου, ενώ έχει επιτευχθεί σε προηγούμενο χρονικό σημείο επίτευξη θερμοκρασίας νερού εντός της επιθυμητής ζώνης των 40-50 °C.



Εικόνα 2 : Αναπαράσταση μοντέλου σε τυχαία χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης προσομοίωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο της εργασίας, επιχειρούμε να αποσαφηνίσουμε όλα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία ενός θερμοσίφωνα. Με τη μελέτη αυτή θα μπορέσουμε να εντοπίσουμε τις μεταβλητές αυτές που υπεισέρχονται στο πρόβλημα και στη συνέχεια θα πρέπει να βρούμε ένα τρόπο να τις συνθέσουμε όλες μαζί σε ένα γενικότερο αλγόριθμο. Αυτός ο αλγόριθμος θα καλείται να συναθροίσει ποσοτικά όλες αυτές τις επιδράσεις και να κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς, ώστε να καθιστά το μοντέλο μας τουλάχιστον ικανοποιητικό όσο αφορά την συμπεριφορά του συγκριτικά με τον πραγματικό σύστημα.

Τα βασικά στοιχεία που μας ενδιαφέρουν είναι που αφορούν το ενεργειακό επίπεδο, τόσο, δηλαδή, οι μηχανισμοί μεταφοράς της ενέργειας όσο και η πιθανή μετατροπή ενέργειας από μια μορφή σε κάποια άλλη. Αν η προσέγγιση που κάνουμε σε αυτό τον κλάδο είναι αρκετά ρεαλιστική, τότε οι προσομοιώσεις μέσω του μοντέλου μας θα είναι πολύ παρεμφερείς με την πραγματική συμπεριφορά του θερμοσίφωνα μας.

Επίσης στο συγκεκριμένο μέρος, θα αναπτύξουμε κάποια δευτερεύοντα θεωρητικά στοιχεία, πέρα της ενεργειακής πλευράς του ζητήματος, τα οποία θα μας χρειαστούν αργότερα κατά την κατασκευή τόσο του μοντέλου αλλά και κατά την σχεδίαση και υλοποίηση του θερμομετρικού κυκλώματος που θα πρέπει να κατασκευάσουμε για την λήψη των μετρήσεων θερμοκρασίας κατά την πειραματική επιβεβαίωση του μοντέλου.

#### 3.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ - ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα προσπαθήσουμε να εντοπίσουμε το πλήθος και τα χαρακτηριστικά των μετατροπών ενέργειας, οι οποίες λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός θερμοσίφωνα, είτε αυτές συμβαίνουν ταυτόχρονα είτε με τη μία μεταβολή να διαδέχεται την προηγούμενη, και, σε ένα επόμενο στάδιο, να βρούμε τρόπους υπολογισμού τους ώστε να τις εντάξουμε στο μοντέλο του θερμοσίφωνα που θα υλοποιήσουμε στο Matlab για να πετύχουμε καλύτερη και όσο γίνεται πιο ρεαλιστική προσομοίωση. Έτσι διαχωρίζουμε τις παρακάτω ενεργειακές μετατροπές:

### 3.1.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Αρχικά, η θεμελιώδης ενεργειακή μετατροπή, απουσία της οποίας δεν θα είχε κανένα νόημα η ύπαρξη θερμοσίφωνα με την γνωστή και παγκοσμίως τυποποιημένη μορφή, είναι η ενεργειακή μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου σε θερμική μέσω του θερμαντικού στοιχείου. Αυτή η μεταβολή βασίζεται στην γενική ιδιότητα της οποιασδήποτε αντίστασης να εκπέμπει θερμότητα ανάλογη τόσο της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα της όσο και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που την διαρρέει, ενώ μέσω του νόμου του Ohm λαμβάνει διάφορες μορφές, οι οποίες αποτυπώνονται στον τύπο 1:

$$Q_R = VI = \frac{V^2}{R} = I^2 R \quad (1)$$

όπου V η τάση, R η τιμή της αντίστασης του θερμαντικού στοιχείου και I η ένταση του ρεύματος που το διαρρέει κάθε στιγμή.

Προφανώς στις περιπτώσεις των θερμοσιφώνων δεν χρησιμοποιούνται απλές αντιστάσεις, αλλά αντιστάσεις μικρής τιμής εμπέδησης και με την επιπλέον ιδιότητα πως μπορούν, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ομότιμές τους αντιστάσεις, να διαρρέονται από ρεύματα υψηλής εντάσεως της τάξεως των πολλών Amperes χωρίς να καταστρέφονται. Άμεσο αποτέλεσμα από τη χρήση τέτοιων αντιστάσεων είναι προφανώς, με μια απλή διερεύνηση του παραπάνω τύπου, η μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος και συνεπακόλουθα η πιο ταχύρρυθμη μεταβολή στη θερμοκρασία του νερού, δηλαδή η ταχύτερη επίτευξη του στόχου μας. Για το λόγω αυτό προέκυψε και η ιδιαίτερη ονομασία αυτών των αντιστάσεων, οι οποίες μας είναι γνωστές ως αντιστάσεις ισχύος.

Στην δική μας περίπτωση, πρόκειται για μια αντίσταση η οποία τροφοδοτούμενη απευθείας από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης, δηλαδή με σταθερή τάση 220V, αποδίδει ονομαστικά ισχύ 4000W. Αυτό μέσω του τύπου (1) συνεπάγεται πως είναι μία αντίσταση τιμής περίπου 12Ω, με την ένταση του ρεύματος που τη διαρρέει να κυμαίνεται στα επίπεδα των 18A.

### 3.1.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΜΑΖΑ ΝΕΡΟΥ

Η επόμενη, στη χρονική σειρά, μεταβολή στην ενέργεια, μετά την παραγωγή θερμότητας στο θερμαντικό στοιχείο, είναι η μεταφορά της θερμότητας αυτής και η μετάδοσή της στον όγκο του νερού που βρίσκεται αποθηκευμένος στην δεξαμενή του θερμοσίφωνα. Αξίζει να παρακολουθήσουμε λίγο τους μηχανισμούς με τους οποίους γίνεται αυτή η μεταφορά ενέργειας.

Στο συγκεκριμένο στάδιο λοιπόν, μικροσκοπικά, τα μόρια του νερού που βρίσκονται πλησίον του θερμαντικού σώματος δέχονται τη θερμότητα λόγω

εγγύτητας, αυξάνοντας έτσι την ενέργειά τους (αύξηση που γίνεται αντιληπτή μακροσκοπικά ως αύξηση της θερμοκρασίας του συγκεκριμένου όγκου νερού). Στη συνέχεια και λόγω της φυσικής 'συνήθειας' που έχει το θερμό νερό να βρίσκεται πάνω από το κρύο εξ'αίτιας της διαφοράς στην πυκνότητά τους, οι θερμότερες μάζες νερού, που βρίσκονταν κοντά στο θερμαντικό σώμα δίνουν τη θέση τους σε ψυχρότερες, οι οποίες με τη σειρά τους λαμβάνουν την εκλυόμενη θερμότητα κοκ.

Ακόμη, λόγω τόσο αυτής της κίνησης που εκτελούν κρύες και ζεστές μάζες νερού, αλλά κυρίως λόγω εντοπιότητας, ποσότητες νερού διαφορετικής θερμοκρασίας έρχονται σε επαφή, με αποτέλεσμα να έχουμε ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ τους. Έτσι αυτή η ανάμιξη βοηθά επιπλέον στην επίτευξη θερμικής ομοιογένειας στο σύνολο της μάζας του νερού, μετά βέβαια από αρκετό χρονικό διάστημα.

Αυτός ο τελευταίος μηχανισμός παραμένει ενεργός και μετά την σβέση του διακόπτη λειτουργίας του θερμοσίφωνα και είναι η μοναδική αιτία που οδηγεί το αποθηκευμένο νερό στην επίτευξη νέας θερμοκρασιακής ισορροπίας κάθε φορά που ανοίγουμε το διακόπτη στο νιπτήρα μας και απομακρύνουμε μια ποσότητα ζεστού νερού, η οποία αντικαθίσταται αυτομάτως από μια ισόποση μάζα κρύου νερού από το δίκτυο ύδρευσης.

Παρόλα αυτά, επειδή αυτό που μας ενδιαφέρει είναι το ποσό της ενέργειας που προσδίδεται στον συνολικό όγκο του νερού και πώς αυτή μετατρέπεται σε άνοδο της θερμοκρασίας του νερού, επικεντρωνόμαστε στη μακροσκοπική προσέγγιση του ζητήματος και θεωρούμε πως όλη η ενέργεια που προσφέρεται από το θερμαντικό σώμα μεταφέρεται σε όλη τη μάζα του νερού και μάλιστα με τη θερμοκρασιακή ομοιογένεια να επιτυγχάνεται στιγμιαία. Η σύμβαση αυτή αποτελεί υπεραπλούστευση της πραγματικής διαδικασίας, παρόλα αυτά θα θεωρήσουμε αρχικά πως είναι ικανοποιητική και αποδίδει την όλη διαδικασία χωρίς να αποτελεί παράγοντα σφαλμάτων που θα καθιστούσαν την εξομοίωσή μας ουτοπική.

#### ➤ Ποσοτικοποίηση

Η μετατροπή της ενέργειας που εκπέμπει το θερμαντικό στοιχείο σε ανύψωση της θερμοκρασιακής στάθμης της μάζας του νερού στη δεξαμενή του θερμοσίφωνα δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$\Delta Q = mC\Delta T = dVC\Delta T \quad (2)$$

Όπου :

$\Delta Q$ : είναι το συνολικό ποσό ενέργειας που γενικά προσδίδεται στον όγκο του νερού. Θα δούμε στο επόμενο μέρος της ανάλυσης ότι δεν ισούται ακριβώς με

την ενέργεια που παρέχει το θερμαντικό σώμα αλλά και τις πιθανές απώλειες θερμότητας προς το εξωτερικό περιβάλλον

$m$  : η μάζα του νερού

$C$  : η ειδική θερμοαγωγιμότητα του νερού, η οποία είναι σταθερή και ίση προς 4186 με μονάδες  $J / (Kg \text{ } ^\circ C)$

$\Delta T$  : η μεταβολή στην τιμή της θερμοκρασίας του συνολικού όγκου του νερού στη δεξαμενή

$d$  : η πυκνότητα του νερού στην τρέχουσα θερμοκρασία. Υπάρχει συγκεκριμένο σημείο στη συνέχεια αυτής της ανάπτυξης, στο οποίο κάνουμε εκτενέστερη μελέτη του φαινομένου μεταβολής της πυκνότητας του νερού με τη θερμοκρασία και του αντίκτυπου που μπορεί να έχει το φαινόμενο αυτό στη μοντελοποίηση που θα επιχειρήσουμε.

$V$  : ο όγκος του νερού

Όπως είπαμε και παραπάνω, θεωρούμε πως στο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας από την αντίσταση στη αποθηκευμένη μάζα λαμβάνει μέρος το σύνολο του νερού και όχι μόνο το κλάσμα αυτού που βρίσκεται κοντά στην αντίσταση ισχύος. Επομένως, με βάση αυτή τη θεώρηση, κατά τη διάρκεια όλης της εξομοίωσης όταν έχουμε υπολογισμό που αφορά αυτό το μηχανισμό, ως μάζα νερού στον τύπο πάντα θα θεωρούμε τη συνολική χωρητικότητα της δεξαμενής.

### 3.1.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Μία άλλη μεταβολή ενέργειας είναι αυτή που συναντάται με τη μορφή των θερμικών απωλειών της δεξαμενής και ως τελική μορφή έχει την ακτινοβολούμενη θερμότητα προς το εξωτερικό περιβάλλον. Ο τρόπος και ο μηχανισμός με τον οποίο παράγεται αυτή η ακτινοβολία έχει μελετηθεί εκτενώς και ποσοτικοποιείται από την παρακάτω εξίσωση, γνωστή και ως εξίσωση Stefan – Boltzmann:

$$P = A \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

Όπου:

$A$  : το εμβαδό της συνολικής επιφάνειας εκπομπής

$\varepsilon$  : η σταθερά εκπομπής του υλικού του σώματος

$T_1, T_2$  : οι θερμοκρασίες σώματος και περιβάλλοντός του αντίστοιχα σε  $^\circ K$  και

$\sigma$  : η σταθερά Stefan-Boltzmann που ισούται με

$$\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ Js}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Εμάς ευτυχώς -και στα πλαίσια της εξομοίωσης- δεν θα μας απασχολήσει η μορφή και τα ειδικά χαρακτηριστικά αυτών των θερμικών απωλειών. Αυτό όμως που μας ενδιαφέρει είναι ο υπολογισμός του μέρους της ενέργειας, η οποία, όντας αποθηκευμένη στα μόρια του νερού υπό μορφή θερμότητας, διαφεύγει των τοιχωμάτων της δεξαμενής και καταλήγει, μέσω του μηχανισμού αυτού της ακτινοβολούμενης ενέργειας, στο περιβάλλον.

Οι απώλειες αυτές έχουν να κάνουν άμεσα με το είδος του μονωτικού που επιλέγει ο κατασκευαστής ως επένδυση της δεξαμενής. Αποτέλεσμα είναι, όπως είναι φυσικό η ενέργεια απωλειών να εξαρτάται τόσο από το μέγεθος της δεξαμενής, το είδος και το πάχος της επένδυσης, καθώς επίσης, όπως θα ήταν φυσικό, και από τη διαφορά θερμοκρασίας που παρατηρείται την εκάστοτε χρονική στιγμή μεταξύ εσωτερικού της δεξαμενής και εξωτερικού περιβάλλοντος.

Ο μαθηματικός τύπος που θέτει μια πιο ποσοτική έκφραση σε όσα περιγράψαμε παραπάνω και μας δίνει την προσέγγιση των απωλειών της δεξαμενής την κάθε χρονική στιγμή είναι ο παρακάτω<sup>[4]</sup>:

$$Q_{\text{απωλ}} = A \frac{\Delta T}{R_{\text{value}}} \quad (4)$$

Όπου

$Q_{\text{απωλ}}$  : το ποσό της ενέργειας απωλειών σε Joule

A: είναι η εξωτερική επιφάνεια της δεξαμενής σε  $\text{m}^2$

$\Delta T$  : η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού

$R_{\text{value}}$  : σταθερά μόνωσης του υλικού ανά μονάδα πάχους

### 3.1.4 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ

Τέλος, μεταβολές έχουμε και κατά την περίπτωση στην οποία η έξοδος του θερμοσίφωνα είναι ανοιχτή και επομένως ζεστό νερό που εξέρχεται αντικαθίσταται από νέο κρύο νερό. Στην περίπτωση αυτή και ακολουθώντας την μακροσκοπική σκοπιά που αναλύθηκε και στην περίπτωση της θέρμανσης του νερού από το

θερμαντικό στοιχείο, θεωρούμε πως η μίξη αυτή ζεστού και κρύου νερού γίνεται με την τελική μέση θερμοκρασία του συνόλου της μάζας να επιτυγχάνεται στιγμιαία.

Προφανώς η νέα θερμοκρασιακή ισορροπία επιτυγχάνεται σε μια θερμοκρασία που υπολογίζεται ως απλός μέσος όρος των δύο θερμοκρασιών των διαφορετικών μαζών (ζεστής και κρύας) με βάρη τους σχετικούς όγκους των δύο αυτών ποσοτήτων, δηλ.:

$$T_{final} = \frac{(V_{total} - V_{out}) \cdot T_{hot} + V_{out} \cdot T_{cold}}{V_{total}} \quad (5)$$

Και πάλι τονίζουμε πως αυτό αποτελεί υπεραπλούστευση της πραγματικότητας και μένει να δούμε πως θα αντιδράσει το μοντέλο μας εφοδιασμένο με αυτή την απλή έκφραση σε σχέση με το πραγματικό μοντέλο που επιδέχεται διαφοροποιήσεις από την αναμενόμενη συμπεριφορά.

## 3.2 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

### 3.2.1 Μεταβολή της πυκνότητας του νερού

Όπως αναφέραμε κατά τη προηγούμενη ανάλυση, η πυκνότητα του νερού αλλάζει ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται αυτό. Συγκεκριμένα, από την τιμή:

$$d_{20} = 998.2336 \frac{Kg}{m^3}$$

τιμή την οποία έχει στην θερμοκρασία των 20 °C, η τιμή της πυκνότητας μικραίνει καθώς ανερχόμαστε σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, φτάνοντας τελικά στην τιμή:

$$d_{80} = 971.7224 \frac{Kg}{m^3}$$

στη θερμοκρασία των 80°C.

Ο υπολογισμός της τιμής της πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας γίνεται με βάση τον παρακάτω τύπο<sup>[2]</sup>:

$$d(T) = 1000 \cdot \left(1 - \frac{T + 25.9414}{508929.2 \cdot (T - 204,87037)}\right) \cdot (T - 276.9863)^2 \quad (6)$$

όπου η θερμοκρασία  $T$  είναι σε  $^{\circ}\text{C}$ .

Η τελική επιδίωξή μας είναι η κατασκευή ενός ικανοποιητικού μοντέλου που να ακολουθεί όσο γίνεται ακριβέστερα τις μεταβολές του πραγματικού συστήματος, προσπαθώντας ταυτόχρονα όμως να το κρατήσουμε όσο γίνεται πιο απλό. Για το λόγο αυτό (και σε μια προσπάθεια αποφυγής της πολυπλοκότητας που εισάγει αυτή η φυσική ιδιότητα του νερού) υπολογίσαμε το σφάλμα, στο οποίο θα υποπίπταμε σε περίπτωση που διαλέγαμε να το αγνοήσουμε, για μια άνοδο της θερμοκρασίας του νερού από τους 20 στους 80  $^{\circ}\text{C}$ , με τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Θερμοκρασία	Πυκνότητα ( $\text{Kg/m}^3$ )
20	998,2336
30	995,6783
40	992,2473
50	988,0633
60	983,2106
70	977,7491
80	971,7224

Πίνακας 1 : Μεταβολή πυκνότητας νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας

$^{\circ}\text{C}$	Ενέργεια Μοντέλου (J)	Πραγματική Ενέργεια (J)	Συσσωρευμένο Ποσοστό Σφάλματος %
20	334288,47	334288,48	-3,629e-06
30	3677173,15	3672730,17	0,120
40	7020057,83	7000960,86	0,272
50	10362942,51	10316287,35	0,450
60	13705827,19	13616351,47	0,652
70	17048711,87	16899029,49	0,877
80	20391596,55	20162366,71	1,124

Πίνακας 2: Υπολογισμός ενέργειας με- και χωρίς συνυπολογισμό της αλλαγής της πυκνότητας του νερού

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παραπάνω έδειξαν πως μια τέτοια παραδοχή θα μας οδηγούσε σε συνολικό σφάλμα της απαιτούμενης ενέργειας περίπου της τάξης του 1%, ενώ αν αρκετούμε στο πεδίο τιμών 20-50  $^{\circ}\text{C}$ , το οποίο θα είναι και το πεδίο τιμών του πειράματος, το σφάλμα πέφτει περαιτέρω στο ποσοστό του 0.46%.



Ακόμη, από τον πίνακα 1 και δεδομένου πως η συνολική χωρητικότητα της δεξαμενής είναι μόνο 80lt. , βλέπουμε πως η μεταβολή της μάζας του νερού δεν είναι μεγάλη και επομένως ούτε από αυτή την άποψη η αλλαγή της πυκνότητας μεταβάλλει σημαντικά το σύστημά μας.

Από τα παραπάνω, θεωρήσαμε πως τα σφάλματα που υπεισέρχονται από την μη λήψη υπόψη μας της μεταβολής της πυκνότητας του νερού είναι αμελητέα και προχωρήσαμε στην αποδοχή της σταθερότητας της πυκνότητας του νερού σε όλο το θερμοκρασιακό φάσμα της προσομοίωσης.

### 3.2.2 Υπολογισμός της παροχής εξόδου

Άλλο ένα σημείο που πρέπει να δώσουμε ιδιαίτερη προσοχή είναι στον υπολογισμό του όγκου νερού που διαφεύγει από τη δεξαμενή αποθήκευσης στην περίπτωση που ανοίξουμε τη βαλβίδα απόρριψης νερού.

#### ➤ Παράγοντες εξάρτησης

Ο όγκος αυτός θα πρέπει, διαισθητικά και σε πρώτη φάση, να σχετίζεται με την διάμετρο της σωλήνας που χρησιμεύει ως δίοδος εξόδου. Είναι λογικό πως όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή του αγωγού, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα νερού μπορεί να περνά από μια διατομή του στη μονάδα του χρόνου.

Επίσης πρέπει να εξαρτάται από την απόσταση, τόσο στον οριζόντιο όσο και στον κατακόρυφο άξονα, που θα πρέπει να διανύσει το νερό ώστε να εξέλθει. Η υψομετρική διαφορά μεταξύ πηγής (δηλαδή της δεξαμενής) και προορισμού (δηλαδή της οριστικής εξόδου) δημιουργεί μια διαφορά πίεσης που μεταφράζεται σε ένα ποσό πίεσης στη μάζα του νερού, ωθώντας το γρηγορότερα μέσα στον αγωγό, ενώ αντίθετα όσο μεγαλύτερη είναι η συνολική διαδρομή που θα πρέπει να διανύσει το νερό μέσα στους σωλήνες τόσο οι προσκρούσεις αλλά και η γενικότερη εκτόνωση του συστήματος θα επιβραδύνουν την όλη διαδικασία.

Ακόμη, η διαφορά πίεσης μεταξύ δεξαμενής και ατμόσφαιρας, δηλαδή στα άκρα του αγωγού παίζει μεγάλο ρόλο καθορίζοντας σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα κίνησης του νερού μέσα στους σωλήνες.

Τέλος, δεν θα πρέπει να ξεχνάμε πως η ταχύτητα κίνησης ενός υγρού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από το υγρό αυτό καθαυτό και τις φυσικές του ιδιότητες και μάλιστα στην περίπτωσή μας στην συγκεκριμένη ιδιότητα που ακούει στο όνομα ιξώδες. Όσο πιο παχύρευστο είναι ένα υγρό, τόσο πιο δύσκολη είναι και η κίνησή του. Αυτό οφείλεται στον τρόπο που είναι κατασκευασμένο και πιο ειδικά στην μορφή και την ισχύ των ενδομοριακών δυνάμεων μέσα στην ύλη του.

Στη δική μας περίπτωση, το ιξώδες του νερού είναι ένας παράγοντας που αλλάζει ανάλογα με τη θερμοκρασία και επομένως μεταβάλλει την ταχύτητα με την οποία μια ποσότητα νερού ρέει μέσα σε έναν αγωγό. Κατ'επέκταση λοιπόν μεταβάλλει και τη συνολική ροή του συστήματος. Ο τύπος που μας δίνει τον

συντελεστή του ιξώδους  $\eta$  για την περίπτωση του νερού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται (και τον οποίο θα χρησιμοποιήσουμε και στο μοντέλο μας) είναι ο παρακάτω<sup>[3]</sup>:

$$\eta = A \cdot 10^{\frac{B}{T-C}} \text{ (Pa} \cdot \text{sec)} \quad (7)$$

Όπου:

$$A = 2.414 \cdot 10^{-5} \text{ (Pa} \cdot \text{sec)}$$

$$B = 247.8 \text{ (}^\circ\text{K)}$$

$$C = 140 \text{ (}^\circ\text{K)}$$

➤ Μαθηματικός υπολογισμός ροής

Όλα τα παραπάνω διαισθητικά στοιχεία, που αναπτύξαμε όσον αφορά τους παράγοντες που μπορούν να μεταβάλλουν τη συνολική ροή του νερού μας κατά την έξοδό του από το σύστημα, τους συνυπολογίζει η εξίσωση ροής που είναι γνωστή με το όνομα εξίσωση Hagen-Poiseuille<sup>[4]</sup>.

Η εξίσωση Hagen-Poiseuille είναι ένας φυσικός νόμος που περιγράφει την ιξώδη ασυμπίεστη ροή ενός υγρού ή ρευστού μέσω μιας σταθερής και ομοιόμορφης κυκλικής διατομής. Είναι επίσης γνωστή ως νόμος Hagen-Poiseuille, νόμος Poiseuille ή εξίσωση Poiseuille και έχει την έκφραση:

$$\Phi = \frac{dV}{dt} = u \cdot \pi \cdot R^2 = \frac{\pi \cdot R^4}{8\eta} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (8)$$

Όπου:

**V** : ο όγκος του υγρού που διέρχεται από τον σωλήνα (σε m<sup>3</sup>)

**t** : ο χρόνος (σε sec)

**u** : η μέση ταχύτητα κατά μήκος του μήκους του σωλήνα (σε m/sec)

**x** : η απόσταση στην κατεύθυνση της ροής (σε m)

**R** : η εσωτερική ακτίνα του σωλήνα (σε m)

**ΔP** : η συνολική\* διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο ακρών του σωλήνα (σε Pascal)

**η** : το δυναμικό ρευστό ιξώδες (σε Pascal·sec)

**L** : το συνολικό μήκος του σωλήνα στην οριζόντια κατεύθυνση x (σε m)

\*με τον όρο *συνολική* εννοούμε το συνδυασμό τόσο της σχετικής πίεσης που υπάρχει μεταξύ εσωτερικού της δεξαμενής και εξωτερικού, όσο και της διαφοράς πίεσης που υπεισέρχεται λόγω των χαρακτηριστικών του δικτύου απόρριψης από την δεξαμενή μέχρι το τελικό σημείο εξόδου, όπως περιγράψαμε παραπάνω. Συγκεκριμένα η διαφορά αυτή πίεσης παίρνει την αναλυτική μορφή

$$\Delta P = (P_{in} - P_{out}) + dgh$$

Όπου:

$P_{in}$ ,  $P_{out}$ : οι συνθήκες πίεσης που επικρατούν στο εσωτερικό τη δεξαμενής και στο τελικό σημείο απόληξης της εξόδου

$d$  : η πυκνότητα του νερού

$g$  : η επιτάχυνση της βαρύτητας

$h$  : η κατακόρυφη υψομετρική διαφορά μεταξύ δεξαμενής και τελικού σημείου απόληξης.

Προφανώς ο τελευταίος όρος του αθροίσματος έχει μονάδες σε Pascal και αποδίδει την υψομετρική πίεση που προστίθεται στην ήδη υπάρχουσα διαφορά πίεσης στα άκρα του συστήματος εξόδου του νερού.

Στη συνέχεια παραθέτουμε τη θεωρητική πορεία που ακολουθείται για την παραγωγή της εξίσωσης Hagen-Poiseuille ξεκινώντας από την πασίγνωστη ομάδα εξισώσεων Navier-Stokes.

➤ Εξαγωγή της εξίσωσης Hagen-Poiseuille

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή Hagen-Poiseuille στη μηχανική ρευστών μπορούν να προέλθουν από τις εξισώσεις των Navier-Stokes στις κυλινδρικές συντεταγμένες με το ακόλουθο σύνολο υποθέσεων:

1. Η ροή είναι σταθερή, δηλαδή η μερική παράγωγος ως προς το χρόνο είναι μηδέν

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0$$

2. Οι ακτινικές συνιστώσες καθώς και οι συνιστώσες στροβιλισμού της ταχύτητας του ρευστού είναι μηδέν, δηλαδή

$$u_r = u_\theta = 0$$

3. Η ροή είναι συμμετρική ως προς τον άξονα ροής, δηλαδή

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$$

και ισχύει ότι

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

Έχοντας τα παραπάνω να πληρούνται, ικανοποιούνται ταυτόχρονα τόσο η δεύτερη εξίσωση ορμής των Navier-Stokes όσο και η εξίσωση συνέχειας. Η πρώτη εξίσωση ορμής εκφυλίζεται στο απλό :

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0$$

δηλ., η πίεση  $P$  είναι συνάρτηση μόνο της συνιστώσας  $z$ . Η τρίτη εξίσωση ορμής απλοποιείται ως:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z}$$

Η λύση που προκύπτει με λύση της παραπάνω διαφορικής είναι η :

$$u_z = \frac{1}{4\eta} \frac{\partial P}{\partial z} r^2 + c_1 \ln r + c_2$$

Επειδή η  $u_z$  πρέπει να είναι πεπερασμένη στο  $r = 0$ , αποφαινόμεστε ότι  $c_1 = 0$ .

Επίσης, η οριακή συνθήκη για να μην έχουμε ολίσθηση στο τοίχωμα των σωλήνων απαιτεί ότι  $u_z(r=R) = 0$ , από όπου βρίσκουμε τη σταθερά  $c_2$  ως:

$$c_2 = -\frac{1}{4\eta} \frac{\partial P}{\partial z} R^2$$

Κατά συνέπεια έχουμε τελικά την ακόλουθη έκφραση για την ταχύτητα:

$$u_z = -\frac{1}{4\eta} \frac{\partial P}{\partial z} (R^2 - r^2)$$

με τη μέγιστη ταχύτητα να εμφανίζεται στην κεντρική γραμμή σωλήνων (για  $r = 0$ ):

$$u_{z \max} = \frac{R^2}{4\eta} \left( -\frac{\partial P}{\partial z} \right)$$

Η μέση ταχύτητα μπορεί να ληφθεί με την ολοκλήρωση εντός της διατομής του σωλήνα:

$$u_{z \text{avg}} = \frac{1}{\pi \cdot R^2} \int_0^R u_z \cdot 2\pi \cdot r dr = 0.5 u_{z \max}$$

Η εξίσωση Hagen-Poiseuille συσχετίζει την πτώση πίεσης  $\Delta P$  κατά μήκος ενός κυκλικού σωλήνα μήκους  $L$  με τη μέση ταχύτητα ροής στο σωλήνα  $u_{z \text{avg}}$  και με άλλες παραμέτρους. Υποθέτοντας ότι η πίεση μειώνεται γραμμικά κατά μήκος του σωλήνα, έχουμε:

$$-\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\Delta P}{L} = \text{σταθ}$$

Αντικαθιστώντας αυτό και την έκφραση για την  $u_{z \max}$  στην έκφραση για την  $u_{z \text{avg}}$ , παίρνουμε:

$$u_{z \text{avg}} = \frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta P}{L}$$

Η τελευταία αυτή έκφραση της μέσης ταχύτητας μας δίνει και την τελική εξίσωση Hagen-Poiseuille:

$$\Phi = \frac{\pi \cdot R^4}{8\eta} \left( \frac{\Delta P}{L} \right)$$

### 3.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΕΡΜΙΣΤΟΡ

#### 3.3.1 Γενικά

Το θερμίστορ, όπως προδίδει και το όνομά του, είναι ένα εξάρτημα που έχει συγκεκριμένη σχέση με τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται. Το εν λόγω εξάρτημα συγκεκριμένα μεταβάλλει την τιμή της ωμικής αντίστασής του ανάλογα με τη θερμοκρασία με την οποία έρχεται σε επαφή, είτε πρόκειται για την ατμοσφαιρική θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται είτε πρόκειται για οποιαδήποτε επιφάνεια, σώμα κτλ. με το οποίο θα το φέρουμε σε θερμική επαφή.

Πρόκειται για κεραμικά υλικά, φτιαγμένα από κράματα οξειδίων μετάλλων και χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο αντιδρούν στην αλλαγή της θερμοκρασίας. Έτσι έχουμε τα PTC και τα NTC θερμίστορ και υπάρχουν διάφοροι τύποι και τρόποι πακεταρίσματος, ανάλογα με τον τρόπο και τις προδιαγραφές χρήσης. Θα κάνουμε μια σύντομη αναφορά στις δύο αυτές κατηγορίες, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στην πρώτη κατηγορία, μέλος της οικογένειας της οποίας επιστρατεύσαμε για να κατασκευάσουμε τη θερμομετρική διάταξή μας.

#### 3.3.2 NTC Θερμίστορ

Τα NTC θερμίστορ παίρνουν το όνομά τους από τα αρχικά της έκφρασης Negative Temperature Coefficient (Αρνητικό Θερμοκρασιακό Ανάλογο) και, ως υλικά, αντιδρούν στην αύξηση της θερμοκρασίας με την μείωση της τιμής της δικής τους ωμικής αντίστασης. Γενικότερα τόσο τα NTC όσο και τα PTC θερμίστορ διακρίνονται για την ταχύτατη μετάβασή τους σε νέα κατάσταση, καθιστώντας τα αναντικατάστατα, ιδίως σε περιπτώσεις όπου η μεταβολές θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα ταχείς και άλλα συστήματα δεν είναι σε θέση να τις παρακολουθήσουν. Επίσης η απλότητα, το μικρό τους κόστος καθώς και η αμεσότητα με την οποία μας δίνουν μετρήσεις τα καθιστούν απλούς και λειτουργικούς συνεργάτες σε κάθε είδους εφαρμογή που εμπλέκει θερμοκρασία και μέτρησή της για περαιτέρω ανάλυση.

Τα NTC θερμίστορ βρίσκουν ιδιαίτερη εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε συστήματα ελέγχου όπως αυτά του εισερχόμενου αέρα, των υγρών του συστήματος μετάδοσης κίνησης, της θερμοκρασίας του κινητήρα κτλ. όπως και σε οικιακές συσκευές ψύξης και θέρμανσης όπως τα κλιματιστικά, αλλά και σε πλυντήρια ρούχων και πιάτων, φούρνους, ενώ μερικές από τις πιο εξεζητημένες εφαρμογές τους αποτελούν οι αισθητήρες πυρκαγιάς, η ανίχνευση της θερμοκρασίας της κεφαλής σε εκτυπωτές ψεκασμού μελάνης (inkjet printers) και η θερμική προστασία συστημάτων φόρτισης και διαχείρισης μπαταριών.

### 3.3.3 PTC Θερμίστορ

Τα PTC θερμίστορ, ως πλήρως δυικά στοιχεία των προηγούμενων και προερχόμενα από τα αρχικά Positive Temperature Coefficient (Θετικό Θερμοκρασιακό Ανάλογο), ίσως κάνουν πλέον σαφή, λόγω του ονόματός τους, την έμφυτη, αντίστροφη με τα NTCs, τάση τους να αυξάνουν την αντίστασή τους με την άνοδο της θερμοκρασίας ( επιγραμματικά αναφέρουμε πως, σε αντιδιαστολή με τους αρνητικούς συγγενείς τους που παρουσιάζουν πάντοτε πτώση της αντίστασής τους, τα PTCs καταφέρνουν να έχουν αυτή την ανοδική σχέση με τη θερμοκρασία μόνο εντός κάποιας θερμοκρασιακής περιοχής, εκτός των ορίων της οποίας συμπεριφέρονται παρόμοια με τα NTCs).

Λόγω της συμπεριφοράς τους αυτής βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε περιπτώσεις όπου θέλουμε προστασία ευαίσθητων (κυρίως όσο αφορά την ένταση ρεύματος) κυκλωμάτων από υπερφόρτωση και γενικότερα σε εφαρμογές όπου η θερμοκρασία καθορίζεται πρωτίστως από το ρεύμα που διαρρέει το θερμίστορ. Ενδεικτικά, ανάμεσα στις εφαρμογές των PTC θερμίστορ βρίσκονται οι μετασχηματιστές και φορτιστές, διάφορες συσκευές μετρήσεων, οι μηχανισμοί των ηλεκτρικών παραθύρων και απόψυξης κλειδαριών στην αυτοκινητοβιομηχανία, ενώ τα PTC βρίσκουν τη θέση τους ακόμη σε οπτικοακουστικές συσκευές όπως κάμερες, CD players, έγχρωμες τηλεοράσεις κτλ.

### 3.3.4 NTC Θερμίστορ – Μια πιο ενδεδειγμένη ματιά

Όπως είπαμε και παραπάνω, τα NTCs είναι κεραμικά υλικά που μειώνουν την ωμική τους αντίσταση ανάλογα με την θερμοκρασία στην οποία υποβάλλονται. Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλουν την αντίστασή τους, όπως θα μπορούσε κανείς να μαντέψει αν αναλογιστεί πως λειτουργούν τα περισσότερα πράγματα στη φύση, δεν είναι γραμμική. Πιο συγκεκριμένα, ένα NTC θερμίστορ παρουσιάζει μια χαρακτηριστική καμπύλη μεταβολής της αντίστασής του σε συνάρτηση με την θερμοκρασία παρόμοια με αυτή που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.

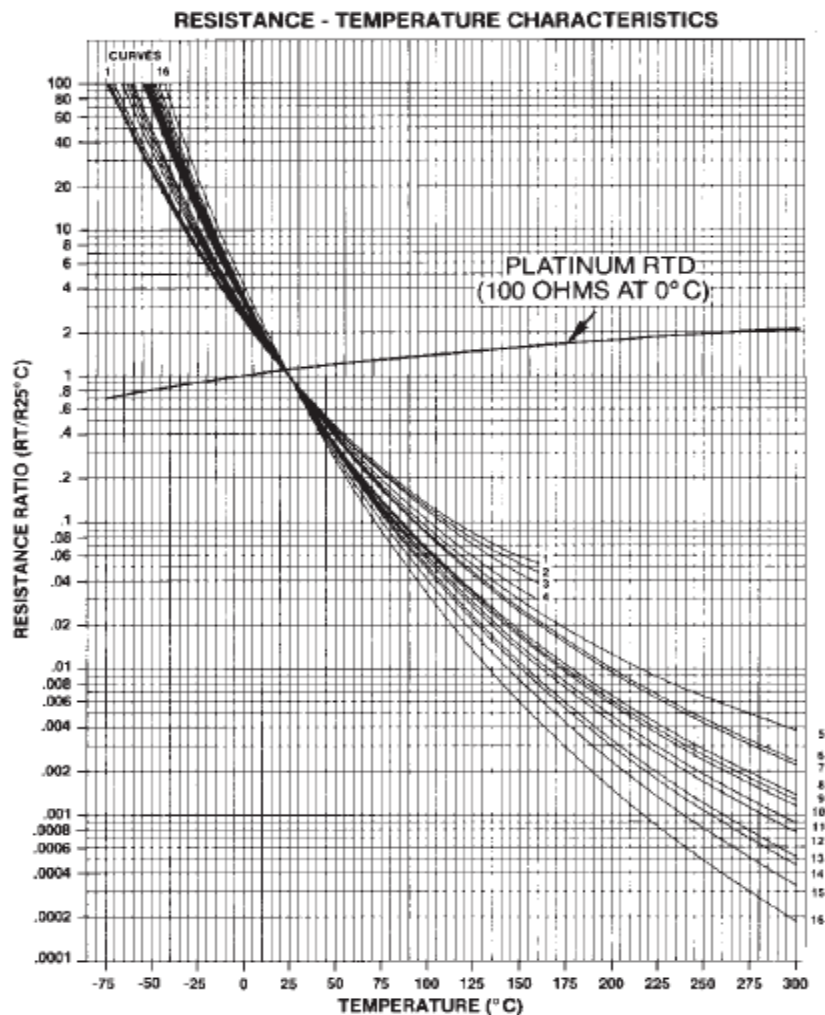
Η εξίσωση που απεικονίζεται στο παραπάνω διάγραμμα είναι της μορφής

$$R_T = R_{25} \exp \left\{ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right\}$$

Όπου:

T : η τρέχουσα θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το θερμίστορ  
R<sub>25</sub>: η αντίσταση αναφοράς του θερμίστορ, ληφθείσα στους 25oC

B : σταθερά του θερμίστορ που σχετίζεται με την κλίση της R-T χαρακτηριστικής του και οφείλεται στο υλικό αλλά και τον ακριβή τρόπο κατασκευής



Διάγραμμα 1 : Χαρακτηριστική R-T NTC θερμίστορ

Προφανώς λοιπόν τα είδη των NTCs είναι πολλά και η επιλογή ενός θερμίστορ γίνεται ανάλογα με την επιθυμητή  $R_{25}$ , από την ανοχή στην τιμή της αντίστασης, από την τιμή της σταθεράς B και την αντίστοιχη ανοχή της, από το πεδίο τιμών των θερμοκρασιών για το οποίο προορίζεται, ενώ επιπλέον υπάρχουν διαφορές ανάλογα με τον τύπο πακεταρίσματός του, αλλά και το περιβάλλον για το οποίο προορίζεται (π.χ. υδάτινο ή τοξικό περιβάλλον).

Παρακάτω παρουσιάζουμε την οικογένεια θερμίστορ από την οποία πήραμε αυτό που χρησιμοποιήσαμε για τις ανάγκες αυτής της μελέτης.





Εικόνα 3. Οικογένεια στοιχείων NTC θερμίστορ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟΥ

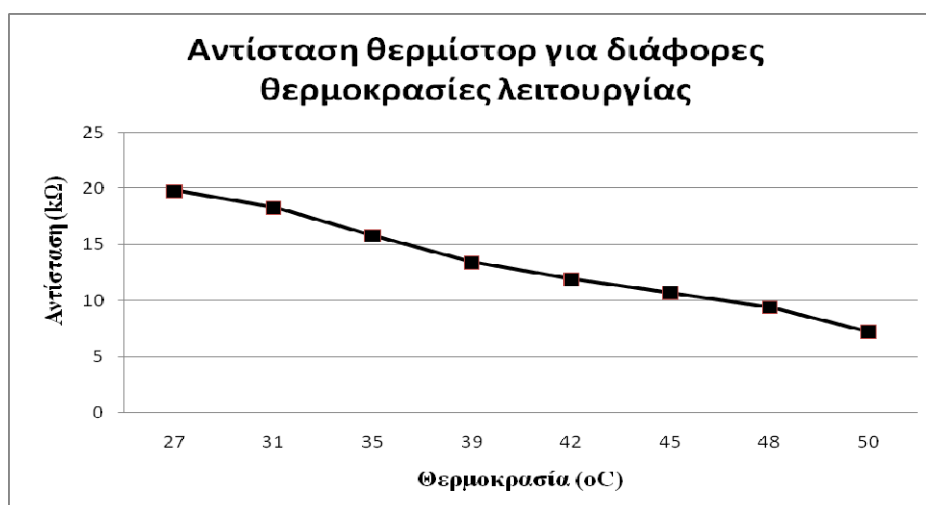
#### 4.1 Γενικά

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας εντός της δεξαμενής νερού του θερμοσίφωνα, επιλέξαμε να υλοποιήσουμε μια διάταξη, η οποία με τη βοήθεια θερμίστορ και του συμπαρομαρτούντος κυκλώματος του, θα μας προσφέρει ιδιαίτερα αξιόπιστες αλλά και συνάμα ταχείες μετρήσεις θερμοκρασίας του νερού.

Επιλέξαμε ένα θερμίστορ NTC με ονομαστική τιμή αντίστασης 20kΩ σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας ( 25 °C) και σε πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της αντίστασης του θερμίστορ για διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας με τη βοήθεια πολυμέτρου και χρησιμοποιώντας μια θερμαντική πλάκα καλύπτοντας το θερμίστορ με θερμομονωτικό υλικό για όσο δυνατό μικρότερες απώλειες θερμότητας (και επομένως απόκλισης των μετρήσεων μας από τις πραγματικές). Τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω στον Πίνακα 3 .

Ένδειξη Θερμοκρασίας Πλάκας (°C)	Τιμή Αντίστασης Θερμίστορ (kΩ)
27	19.8
31	18.3
35	15.8
39	13.4
42	11.9
45	10.7
48	9.4
50	7.2

Πίνακας 3 : Τιμές αντίστασης θερμίστορ για διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας



Διάγραμμα 2. Αντίσταση θερμίστορ συναρτήσει θερμοκρασίας

Από την γραφική αναπαράσταση, παρατηρούμε πως η συμπεριφορά του θερμίστορ, στο συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών που μελετάται, εμφανίζεται -πολύ προσεγγιστικά- γραμμική, αν λάβουμε υπόψη πως πρέπει να συνυπολογίσουμε τις ανοχές που υπεισέρχονται λόγω της μη ακρίβειας στη μέτρηση της θερμοκρασίας μέσω του ενσωματωμένου στην πλάκα θερμομέτρου, χωρίς όμως τα παραπάνω να το καθιστούν ικανοποιητικό για την ακρίβεια των μετρήσεων για την οποία το προορίζουμε. Το σύστημα της πλάκας δεν είναι κλειστό και, επομένως, είναι ευάλωτο σε απότομες και μη αναγνωρίσιμες θερμοκρασιακές μεταβολές με πιθανότατο αποτέλεσμα τη μεγάλη απόκλιση από τα πραγματικά μεγέθη.

Σε μετέπειτα στάδιο της εργασίας θα παρουσιάσουμε τη διαδικασία που ακολουθήσαμε, ώστε να έχουμε καλύτερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα στις μετρήσεις θερμοκρασιών. Είναι σαφώς βελτιωμένη από την περίπτωση της θερμαινόμενης πλάκας και είναι οι μετρήσεις αυτής της διαδικασίας που κατέληξαν να αποτελούν τη βάση κατά τη βαθμονόμηση της θερμομετρικής μας διάταξης.

## 4.2 Σχεδιασμός Διάταξης

Η ανάγκη της λήψης μετρήσεων θερμοκρασίας μας οδηγεί στην ανάγκη να σχεδιάσουμε ένα συμπληρωματικό κύκλωμα (εκτός του θερμίστορ), το οποίο να μας δίνει αξιόπιστες μετρήσεις τάσης, οι οποίες κατόπιν της διαδικασίας της βαθμονόμησης, θα μας παρέχουν πλέον ένδειξη της τρέχουσας θερμοκρασίας. Ακόμη θέλουμε να έχουμε μηδενισμό της τάσεως εξόδου σε κάποια θερμοκρασία που εμείς θα θεωρήσουμε ως ελάχιστη θερμοκρασία του συστήματος, μιας και πρόκειται για σύστημα που λειτουργεί σε περιορισμένη περιοχή θερμοκρασιών.

Με βάση τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασιακή συμπεριφορά του NTC θερμίστορ (δηλαδή την πτώση της αντίστασής του με την άνοδο της θερμοκρασίας ) οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως μονόδρομο αποτελεί, σε πρώτη φάση ανάλυσης, η ένταξη του θερμίστορ σε ένα κύκλωμα γέφυρας Wheatstone, γεγονός που καθιστά σκόπιμη μια επιγραμματική αναφορά των βασικών στοιχείων της συγκεκριμένης γέφυρας.

### 4.2.1 Παρουσίαση βασικών στοιχείων γέφυρας Wheatstone

Η γέφυρα Wheatstone είναι ένα ολόκληρο κεφάλαιο στην ιστορία των κυκλωμάτων, λόγω της μεγάλης χρησιμότητας που έχει και της απλότητας τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο.

Στην ουσία μια γέφυρα Wheatstone δεν είναι τίποτε άλλο από ένα συνδυασμό από δύο διαιρέτες τάσεως που τροφοδοτούνται από την ίδια τάση με την τελική τάση εξόδου να διαμορφώνεται ως η διαφορική τάση μεταξύ των δύο αυτών διαιρετών τάσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.

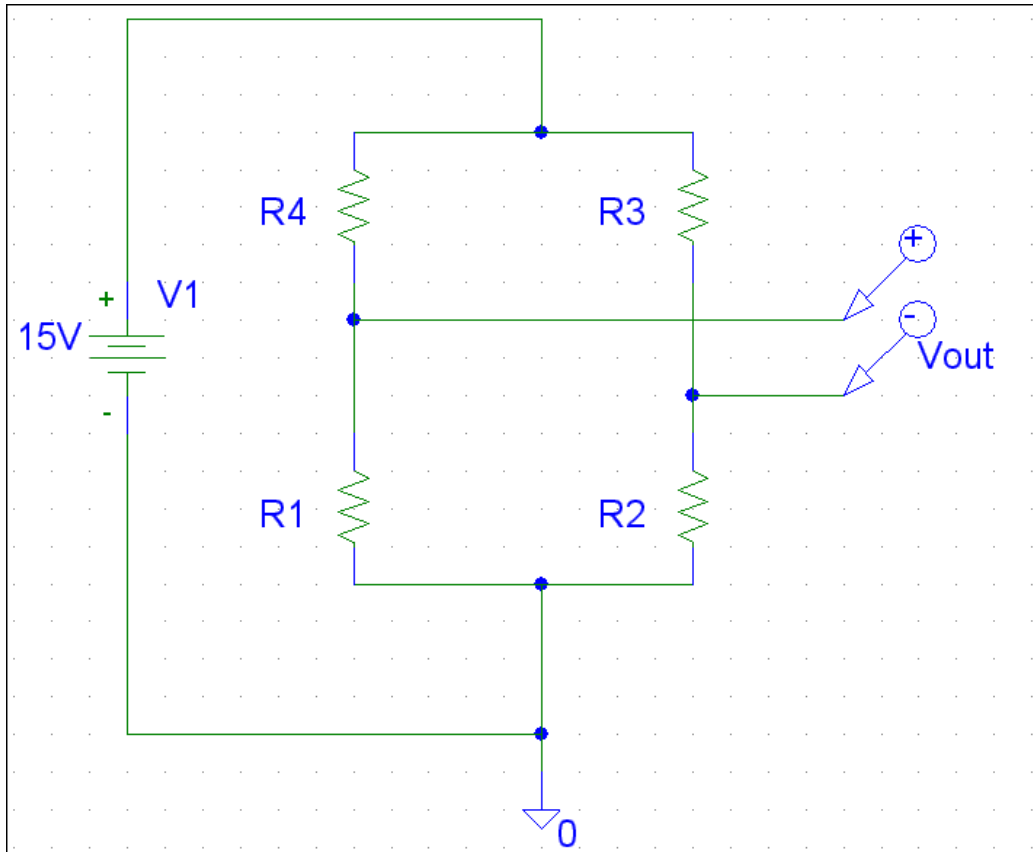
Το γεγονός που κάνει αυτή τη γέφυρα τόσο ξεχωριστή είναι η ιδιότητες που έχει και που μας επιτρέπει να την χρησιμοποιούμε σε πληθώρα εφαρμογών.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1, η τάση εξόδου της γέφυρας διαμορφώνεται ως εξής:

$$V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_4} V_C - \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_C \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{out} = \frac{\frac{R_1}{R_4} - \frac{R_2}{R_3}}{\left(1 + \frac{R_1}{R_4}\right) \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)} V_C \Rightarrow \quad (7a)$$

$$\Rightarrow V_{out} = \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} V_C \quad (7b)$$



Σχήμα 1. Κυκλωματική διάταξη γενικευμένης γέφυρας Wheatstone

Η πιο χαρακτηριστική ιδιότητα της γέφυρας μας είναι πως στην περίπτωση που οι αντιστάσεις που συμμετέχουν στο κύκλωμα τηρούν μια συγκεκριμένη αναλογία, τότε η έξοδος μας μηδενίζεται και τότε λέμε πως η γέφυρα ισορροπεί.

Πράγματι ο παραπάνω τύπος για:

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} = a$$

μας δίνει έξοδο  $V_{out} = 0$ .

#### 4.2.2 Γέφυρα με ένα ενεργό κλάδο

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση στην οποία η γέφυρα απαρτίζεται από τρεις σταθερούς κλάδους (δηλαδή κλάδους με σταθερές αντιστάσεις  $R_1=R_3=R_4=R_0$ ) ενώ ο τέταρτος κλάδος εμπεριέχει ένα ενεργό στοιχείο με τιμή αντίστασης  $R_2=R_0+\Delta R$ . Ο λόγος προφανώς που μας ενδιαφέρει αυτή η περίπτωση είναι ότι ανταποκρίνεται στην δική μας διάταξη, με τον ενεργό στοιχείο να μην είναι άλλο από το θερμίστορ.

Από τον τύπο (7b) για  $R_2=R_0+\Delta R$  έχουμε :

$$V_{out} = \frac{R_0 \Delta R}{4R_0^2 + 2R_0 \Delta R} V_C \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_{out} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{2R_0 + \Delta R} V_C = \frac{1}{2} \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{2 + \frac{\Delta R}{R_0}} V_C \xrightarrow{\Delta R \ll R_0}$$
$$\Rightarrow V_{out} \approx \frac{1}{4} V_C \frac{\Delta R}{R_0} \quad (8)$$

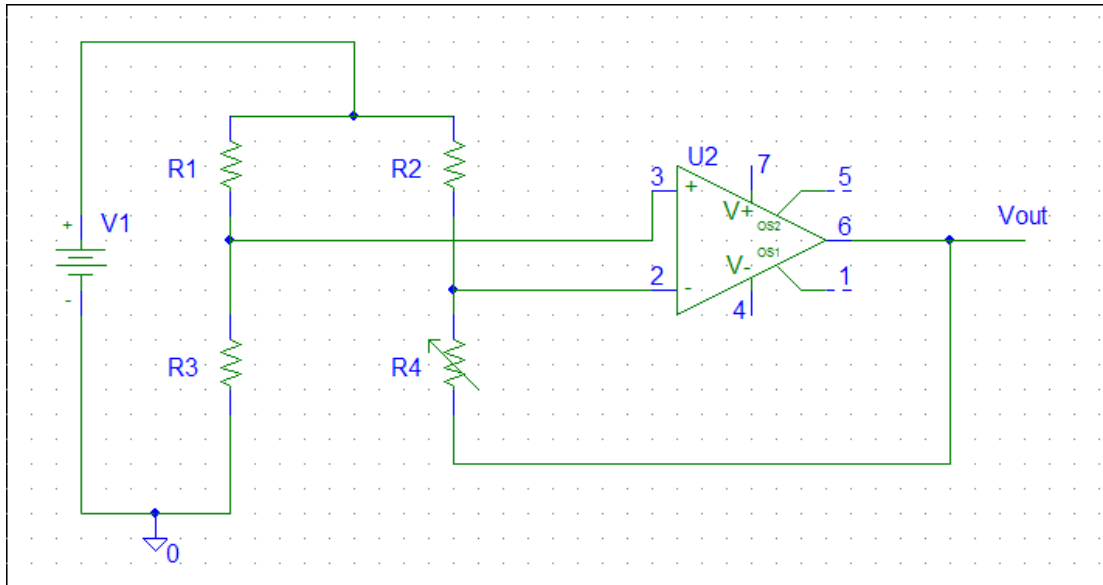
Από τη σχέση αυτή βλέπουμε πως η έξοδος είναι προσεγγιστικά εξαρτώμενη από γραμμικά από τη μεταβολή  $\Delta R$ .

#### 4.2.3 Γραμμικοποίηση γέφυρας με ένα ενεργό κλάδο

Για την περίπτωση γέφυρας με ένα ενεργό κλάδο, έχουν αναπτυχθεί κάποιες τεχνικές ώστε να επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη γραμμικότητα. Παρουσιάζουμε τους δύο επικρατέστερους τρόπους, καθένας από τους οποίους βασίζεται σε διαφορετικές προσεγγίσεις.

##### A. Χρήση τελεστικού ενισχυτή

Στη συγκεκριμένη τεχνική κάνουμε χρήση ενός τελεστικού ενισχυτή στην έξοδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Χρήση τελεστικού ενισχυτή για γραμμικοποίηση γέφυρας ενός ενεργού κλάδου

Ο λόγος είναι απλός. Εκμεταλλευόμαστε την ιδιότητα του τελεστικού ενισχυτή να απαγορεύει τη διέλευση ρεύματος προς αυτόν. Αυτό σημαίνει αυτόματα πως έχουμε διατήρηση σταθερού του ρεύματος που διαρρέει το ενεργό στοιχείο ( $R_4$  στην προκειμένη περίπτωση).

Αν θεωρήσουμε ότι όλες οι αντιστάσεις είναι σταθερές και ίσες προς  $R_0$  και το θερμίστορ έχει αντίσταση  $R_0 + \Delta R$ , τότε το ρεύμα  $I_{R2}$  που διαρρέει την  $R_2$  είναι ίσο με το  $I_\theta$  που διαρρέει το ενεργό στοιχείο. Επίσης η κοινή τάση ισορροπίας στην είσοδο του τελεστικού καθορίζεται από το διαιρέτη τάσης  $R_1, R_3$  και επειδή αυτές οι δύο αντιστάσεις είναι ίδιες θα έχουμε ότι :

$$V_+ = \frac{V_1}{2}$$

και επομένως η ισότητα των δύο ρευμάτων στο δεξί κλάδο γράφεται:

$$I_{R2} = I_\theta \Rightarrow \frac{V_+}{R} = \frac{V_+ - V_{out}}{R + \Delta R} \Rightarrow \frac{V_1}{2R} = \frac{\frac{V_1}{2} - V_{out}}{R + \Delta R} \Rightarrow$$

$$V_1(R + \Delta R) = V_1 - 2RV_{out} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{out} = -V_1 \frac{\Delta R}{2R}$$

Από την τελευταία αυτή σχέση βλέπουμε πως έχουμε μια γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου της γέφυρας και της μεταβολής  $\Delta R$  του μεταβαλλόμενου στοιχείου.

Το πρόβλημα με τη συγκεκριμένη συνδεσμολογία είναι πως επειδή συνήθως χρησιμοποιείται και ένα επιπλέον κομμάτι ενίσχυσης της εξόδου της γέφυρας για τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, υπάρχει ανάγκη πλέον για δύο συμμετρικές τροφοδοσίες (μία για κάθε τελεστικό ενισχυτή) ενώ επίσης η ταύτιση μεταξύ των αντιστάσεων πρέπει να είναι ακριβής ώστε να μην έχουμε αποκλίσεις από τη μαθηματική εκδοχή.

Όλα αυτά προσδίδουν επιπλέον ρίσκο και δυσκολία στην υλοποίηση του κυκλώματος. Για το λόγο αυτό εμείς επιλέξαμε μια άλλη τεχνική, πολύ πιο απλή και αρκετά ικανοποιητική, όσο αφορά τα αποτελέσματα που μας δίνει.

## B. Χρήση παράλληλης αντίστασης

Το σκεπτικό αυτής της τεχνικής είναι να τοποθετήσουμε, παράλληλα με το ενεργό στοιχείο, μια αντίσταση τέτοιας τιμής, ώστε, για την περιοχή που πραγματεύεται η εφαρμογή, η συνολική αντίσταση που προκύπτει από τον παράλληλο συνδυασμό τους να μεταβάλλεται όσο δυνατό πιο ομαλά.

Έτσι έχοντας καθορίσει τα όρια λειτουργίας (στην περίπτωση μας θερμοκρασιακά όρια, έστω  $T_1$  και  $T_3$ ) βρίσκουμε σε πρώτη φάση τις οριακές τιμές που λαμβάνει το ενεργό στοιχείο σε αυτά τα όρια λειτουργίας (για την περίπτωση του θερμίστορ δηλαδή, ανατρέχουμε στο αντίστοιχο διάγραμμα όμοιο του Διαγράμματος 1 που ανταποκρίνεται στο θερμίστορ που χρησιμοποιούμε).

Στη συνέχεια βρίσκουμε την τιμή αντίστασης του ενεργού στοιχείου στο μέσο του πεδίου λειτουργίας, το οποίο για εμάς θα είναι η μέση θερμοκρασία του πεδίου, δηλαδή στην θερμοκρασία  $T_2$ :

$$T_2 = \frac{T_1 + T_3}{2}$$

Έστω λοιπόν πως στις θερμοκρασίες αυτές έχουμε τιμές για την αντίσταση του θερμίστορ  $R_{t1}, R_{t2}$  και  $R_{t3}$  αντίστοιχα.

Αυτό που μας αρκεί είναι να βρούμε μια τιμή σταθερής αντίστασης  $R_x$ , η οποία τοποθετούμενη παράλληλα με το θερμίστορ να μας δίνει συνολική ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση  $R_p$  που να έχει το εξής χαρακτηριστικό:



$$R_{p1} - R_{p2} = R_{p2} - R_{p3}$$

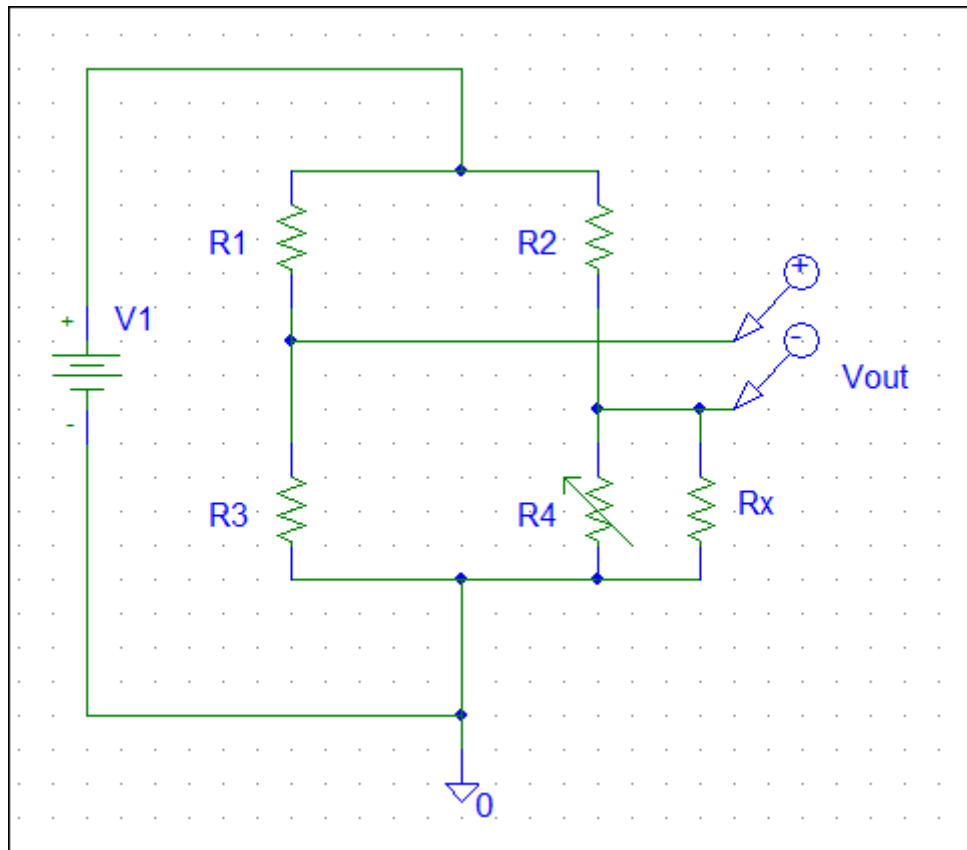
δηλαδή να έχουμε ομοιόμορφη μεταβολή της τιμής της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας στο πεδίο λειτουργίας.

Η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$\frac{R_{t1}R_x}{R_{t1} + R_x} - \frac{R_{t2}R_x}{R_{t2} + R_x} = \frac{R_{t2}R_x}{R_{t2} + R_x} - \frac{R_{t3}R_x}{R_{t3} + R_x}$$

Από τη σχέση αυτή με απλές πράξεις προκύπτει και η τελική εξίσωση υπολογισμού της αντίστασης  $R_x$  ως:

$$R_x = \frac{R_{t2}(R_{t1} + R_{t3}) - 2R_{t1}R_{t3}}{R_{t1} + R_{t3} - 2R_{t2}} \quad (9)$$



Σχήμα 3. Κύκλωμα γραμμικοποίησης με χρήση παράλληλης αντίστασης

Στα θετικά της συγκεκριμένης τεχνικής είναι πως, εκτός από τους επιπρόσθετους υπολογισμούς που είμαστε επιφορτισμένοι να κάνουμε προκειμένου να καθορίσουμε την αντίσταση που πρέπει να τοποθετήσουμε παράλληλα, κατά τα άλλα δεν χρειαζόμαστε τίποτε το ιδιαίτερο. Μας αρκεί μία τροφοδοσία για το κύκλωμα κ το πιθανό υποκύκλωμα ενίσχυσης στη συνέχεια, γεγονός που βοηθά τόσο στην σχεδίαση του κυκλώματος όσο και στο κόστος μιας τέτοιας υλοποίησης, αν προοριζόταν να κατασκευαστεί σε μαζικές ποσότητες.

Από την άλλη είναι πιο πρακτική, βασισμένη περισσότερο σε εμπειρικούς τρόπους, γεγονός που μπορεί να γεννά κάποιες αμφιβολίες σε μερικούς, ενώ ταυτόχρονα δεν έχει ίσως το απόλυτο όσον αφορά την δυνατή επιτεύξιμη γραμμικότητα. Παρόλα αυτά, τα πλεονεκτήματα που προσδίδει είναι αρκετά ώστε να την προτιμήσουμε.

#### 4.2.4 Γέφυρα Wheatstone με θερμίστορ

Έχοντας αναλύσει τα βασικά στοιχεία της γέφυρας Wheatstone, προχωράμε στο σχεδιασμό της κυκλωματικής διάταξης μιας τέτοιας γέφυρας με τη χρήση του ενεργού στοιχείου, το οποίο δεν είναι άλλο από το θερμίστορ μας.

Δεδομένου πως η αντίσταση του NTC θερμίστορ μικραίνει με την άνοδο της θερμοκρασίας, ενώ η αντίστοιχη ένδειξη που θέλουμε να παίρνουμε ως έξοδο της γέφυρας πρέπει να αυξάνεται, είναι σχετικά εύκολο να καταλάβουμε πως το θερμίστορ θα λάβει τη θέση της αντίστασης  $R_4$  του Σχήματος 3. Έτσι η διαφορική τάση θα αυξάνεται με την μείωση της αντίστασης του θερμίστορ, μιας και ο θετικός ακροδέκτης είναι πάντοτε σταθερής τάσης λόγω ύπαρξης μόνο σταθερών αντιστάσεων στον αριστερό κλάδο της γέφυρας.

Όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα και η αντίσταση γραμμικοποίησης που τοποθετείται παράλληλα στο θερμίστορ με σκοπό την γραμμικότερη έξοδο της γέφυρας. Μετρήσαμε τις τιμές που εμφανίζει το θερμίστορ στο εν λόγω διάστημα θερμοκρασιών, τα οποία και παρουσιάζουμε στον Πίνακα 5. Η τιμή της παράλληλης αντίστασης προκύπτει, όπως καταδείξαμε παραπάνω, θεωρώντας ως αρχική και τελική θερμοκρασία λειτουργίας τους 27 και 50 °C αντίστοιχα και θεωρώντας τις αντίστοιχες τιμές αντίστασης του θερμίστορ για τους υπολογισμούς μας στις θερμοκρασίες 27, 29 και 50 °C αντίστοιχα.

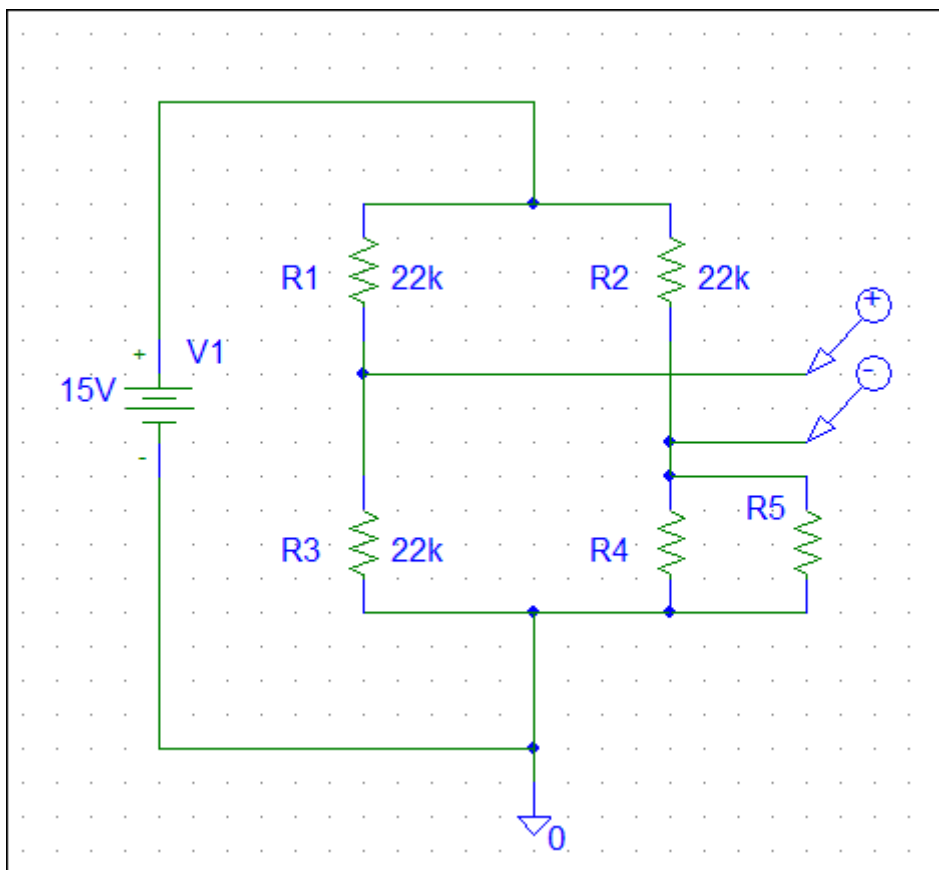
Η παράλληλη αντίσταση στην περίπτωση μας υπολογίστηκε μέσω του τύπου (9) και βρέθηκε ίση με :

$$R_x \cong 383k\Omega$$

Θερμοκρασία (°C)	Αντίσταση θερμίστορ (kΩ)
27	19,8
31	18,3
35	15,8
39	13,4
42	11,9
45	10,7
48	9,4
50	7,2

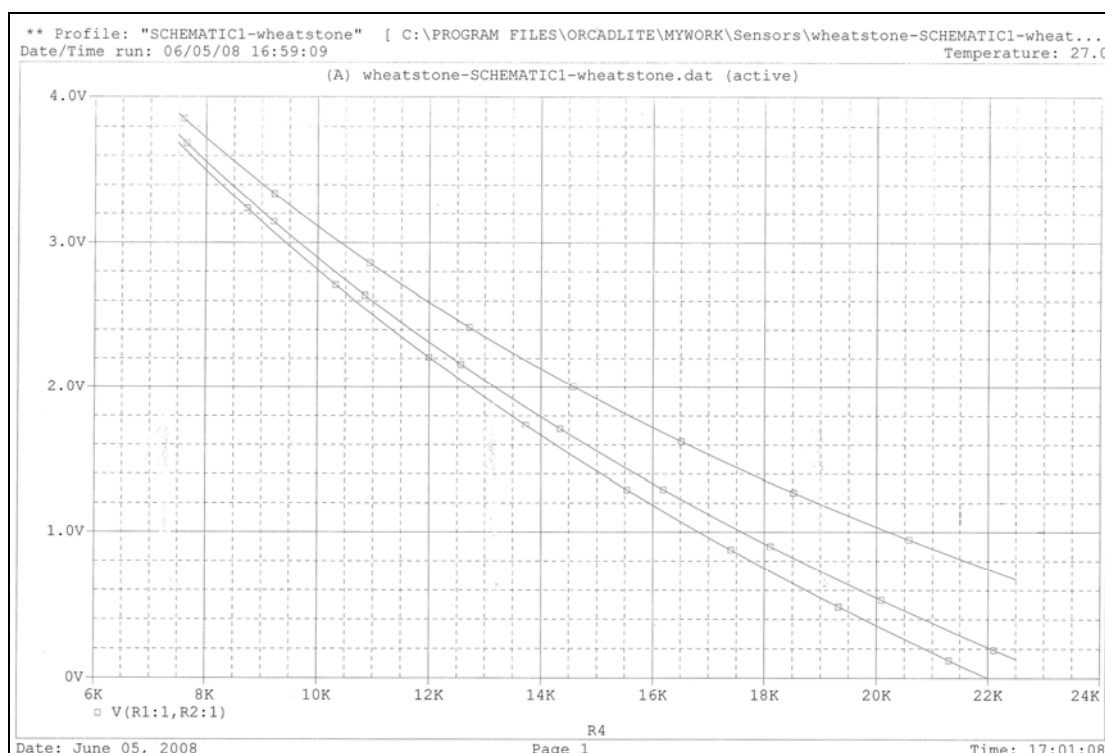
Πίνακας 5. Τιμή αντίστασης θερμίστορ για διάφορες θερμοκρασίες

Σε μια αρχική προσέγγιση και βασιζόμενοι στη θεωρία της γέφυρας Wheatstone, αποφασίζουμε να εκτελέσουμε προσομοίωση του υποτιθέμενου κυκλώματος (Σχήμα 4) της γέφυρας στο πρόγραμμα προσομοίωσης Spice με όλες τις υπόλοιπες αντιστάσεις της γέφυρας να είναι σταθερές και ίσες με την πιο κοντινή τιμή αντίστασης στην ονομαστική τιμή  $R_{25}$ .



Σχήμα 4. Κύκλωμα γέφυρας με αντιστάσεις κλάδων ίσες με  $22k\Omega$

Το αποτέλεσμα που λαμβάνουμε, εκτελώντας παραμετρική εξομοίωση και χρησιμοποιώντας τις τιμές της αντίστασης του θερμίστορ από τον Πίνακα 5, είναι αυτό που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 7.



Διάγραμμα 3. Εξομοίωση κυκλώματος του σχήματος 4

όπου βλέπουμε τη μεταβολή της διαφορικής τάσης στην έξοδο της γέφυρας σε συνάρτηση με την αντίσταση του NTC θερμίστορ. Επίσης είναι ορατή και η μεταβολή λόγω της παράλληλης αντίστασης  $R_x$  με την πραγματική τιμή της να απεικονίζεται στην υψηλότερη καμπύλη, τη δεύτερη καμπύλη να σχηματίζεται για  $R_x=100k\Omega$  και την χαμηλότερη καμπύλη για  $R_x$  πολύ μεγαλύτερη της αντίστασης του θερμίστορ.

Σε μια πρώτη προσέγγιση, βλέπουμε πως η έξοδος της γέφυρας για την περιοχή θερμοκρασιών που πραγματευόμαστε δεν εμφανίζεται να μεταβάλλεται με πολύ ταχείς ρυθμούς, γεγονός ενθαρρυντικό. Ως αρνητικό όμως όρισμα, παρατηρούμε πως η τάση συναρτήσει της αντίστασης δεν εκφράζεται με τόσο γραμμικό τρόπο όσο θα θέλαμε.

Σε μια επόμενη απόπειρα λοιπόν αναζητούμε να μεταβάλλουμε το κύκλωμά μας έτσι ώστε να πετύχουμε μεγαλύτερη γραμμικότητα. Η επόμενη κατεύθυνση που μπορούμε να πάρουμε είναι να πειραματιστούμε με τον κοινό λόγο των αντιστάσεων της γέφυρας (βλ θεωρητική προσέγγιση παραπάνω), πιστεύοντας πως κάτι τέτοιο μπορεί να μας οδηγήσει σε πιο γραμμική απόκριση. Η προσπάθεια αυτή πηγάζει από

προσεκτικότερη παρατήρηση του μαθηματικού τύπου (8) όπως αυτός προέκυψε στην ανάλυση της γέφυρας, τον οποίο και επαναλαμβάνουμε για ευκολία παρακάτω:

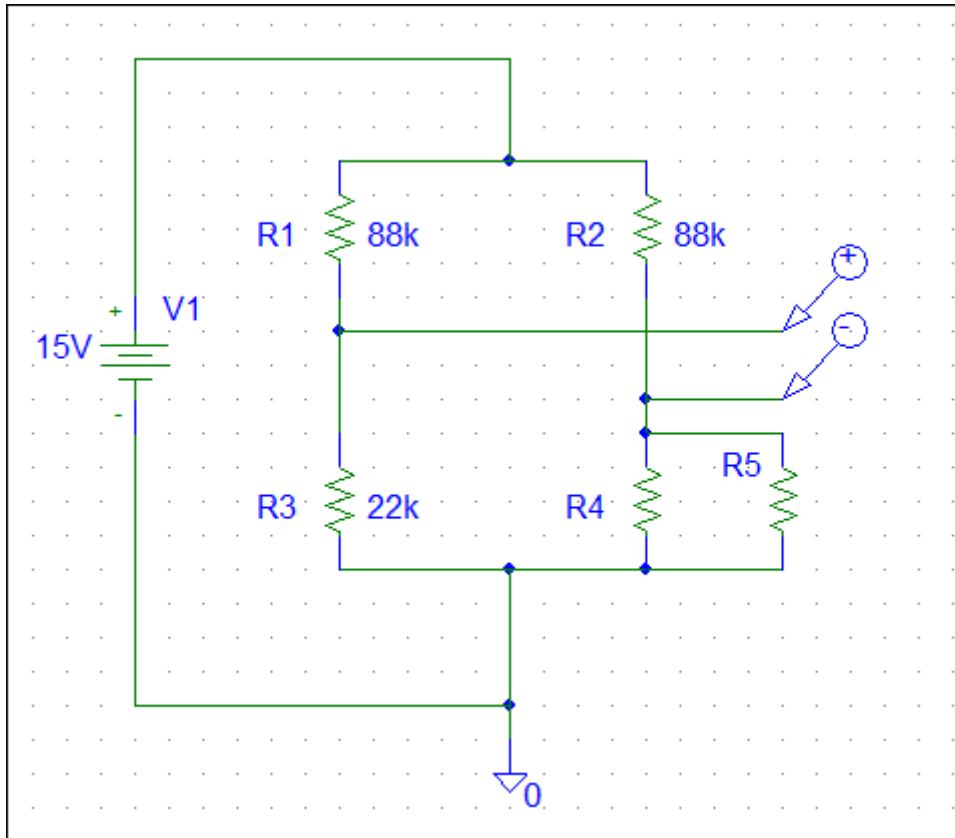
$$V_{out} \approx \frac{1}{4} V_C \frac{\Delta R}{R_0} \quad (8)$$

Από τον τύπο αυτό βλέπουμε πως η έξοδος της γέφυρας εξαρτάται από τον όρο:

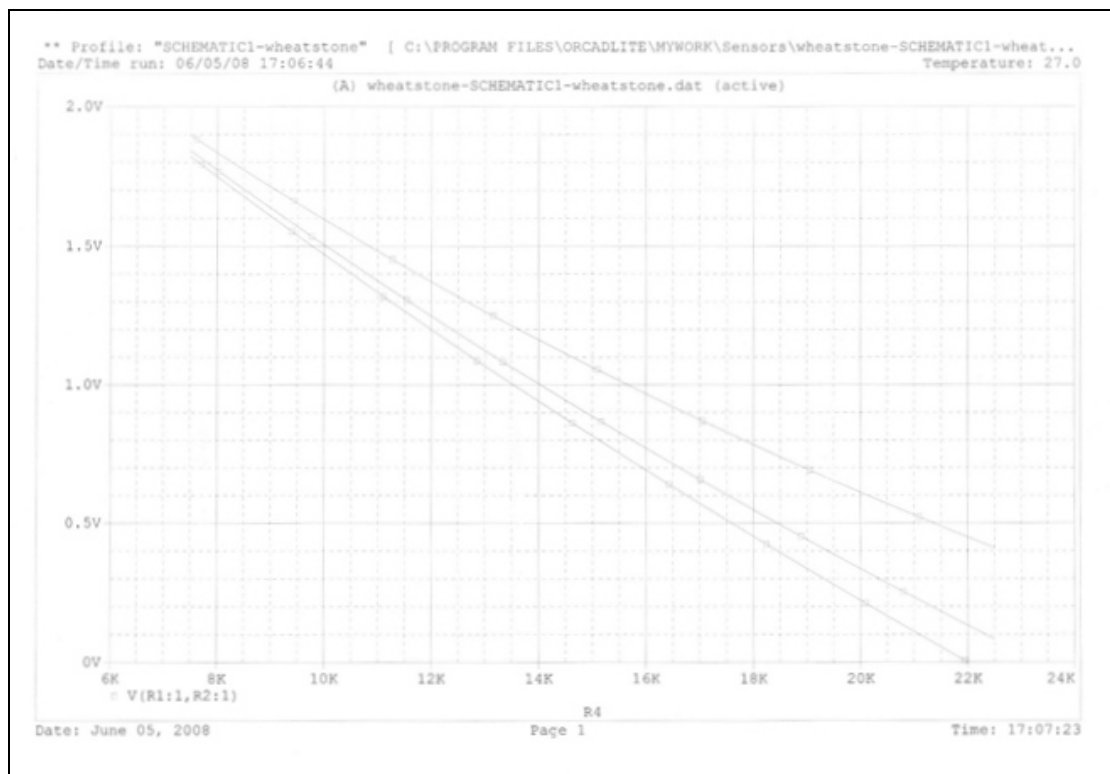
$$r = \frac{\Delta R}{R_0}$$

Σκεπτόμενοι πως αυτό που θέλουμε είναι τη μικρότερη δυνατή επίδραση της μη-γραμμικής μεταβολής  $\Delta R$  στον καθορισμό της τάσεως εξόδου, αν αυξήσουμε την κοινή τιμή αντίστασης  $R_0$  κάνοντάς την μεγαλύτερη, τότε ίσως επιτύχουμε μεγαλύτερη γραμμικότητα από προηγούμενα.

Έτσι σαν μια δεύτερη απόπειρα, υλοποιούμε το κύκλωμα του Σχήματος 5, και εκτελούμε και πάλι όμοια εξομοίωση με πριν, στο Spice. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.



Σχήμα 5. Κύκλωμα γέφυρας με διαφορετικό λόγο αντιστάσεων



Διάγραμμα 4. Εξομοίωση κυκλώματος του Σχήματος 5

Αυτό που διαφαίνεται με την πρώτη ματιά είναι πως η γραμμικότητα έχει βελτιωθεί σημαντικά συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση και επομένως αποφαινόμεστε πως μια αλλαγή του λόγου αντιστάσεων πράγματι μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην προσπάθειά μας να γραμμικοποιήσουμε μια γέφυρα ενός ενεργού κλάδου με την τεχνική της παράλληλης αντίστασης.

Από την άλλη, μια πιο προσεκτική ματιά μας δίνει την παρατήρηση πως έχει μειωθεί η ευαισθησία. Συγκεκριμένα, ενώ από το Διάγραμμα 3 είχαμε την τάση εξόδου να έχει ως ανώτερη τιμή περίπου τα 3.9V, εντούτοις στη νέα αυτή περίπτωση η μέγιστη τιμή τάσης εξόδου δεν ξεπερνά τα 2.8V.

Η εξήγηση πηγάζει και αυτή από τον τύπο (8). Όπως μπορούμε να δούμε χαρακτηριστικά η τάση εξόδου σχετίζεται με το λόγο του  $\Delta R$  προς  $R_0$ . Εμείς αυξάνοντας το  $R_0$  καταφέραμε να βελτιώσουμε τη γραμμικότητα, αλλά ταυτόχρονα μειώσαμε αυτό το λόγο και επομένως και τη μέγιστη δυνατή τάση εξόδου.

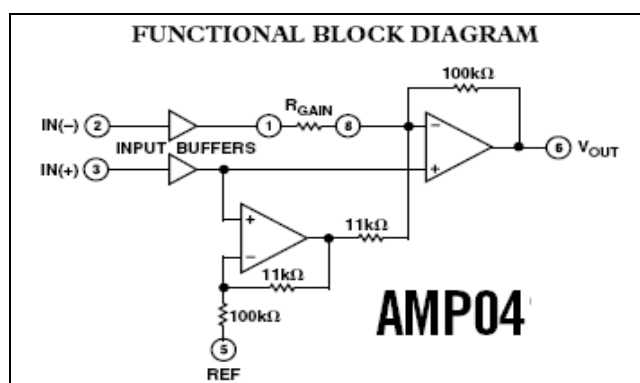
Αυτό μπορεί εκ πρώτης να ακούγεται ανησυχητικό, εντούτοις αν αναλογιστούμε πως μετά το κύκλωμα της γέφυρας θα ακολουθεί στάδιο ενίσχυσης, καταλαβαίνουμε πως με την κατάλληλη ρύθμιση του κέρδους αυτού του τελευταίου σταδίου η μείωση της ευαισθησίας δεν θα μας απασχολήσει.

#### 4.2.5 Στάδιο ενίσχυσης εξόδου της γέφυρας

Για το στάδιο ενίσχυσης της εξόδου της γέφυρας θα μπορούσαμε να διαλέξουμε έναν οποιονδήποτε τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία διαφορικής ενίσχυσης.

Δεδομένου όμως πως το να πετύχουμε μεταβλητή διαφορική ενίσχυση θα σήμαινε πως θα πρέπει να μεταβάλλουμε ταυτόχρονα τρεις αντιστάσεις ώστε να πετύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα κάθε φορά που θέλουμε άλλο επίπεδο ενίσχυσης, επιλέξαμε έναν ευκολότερο τρόπο.

Αντί του οποιουδήποτε ενισχυτή, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε τον ενισχυτή AMP04 της Analog Devices. Αυτό που αποκομίζουμε με τη χρήση του συγκεκριμένου ενισχυτή είναι πως το κέρδος της διάταξης μεταβάλλεται με τη ρύθμιση μίας και μόνο αντίστασης ( $R_{gain}$ ). Αυτό οφείλεται στην εσωτερική δομή και σχεδίαση του ενισχυτή, κυκλωματικό σχέδιο του οποίου παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 6. Κυκλωματική διάταξη ενισχυτή AMP04

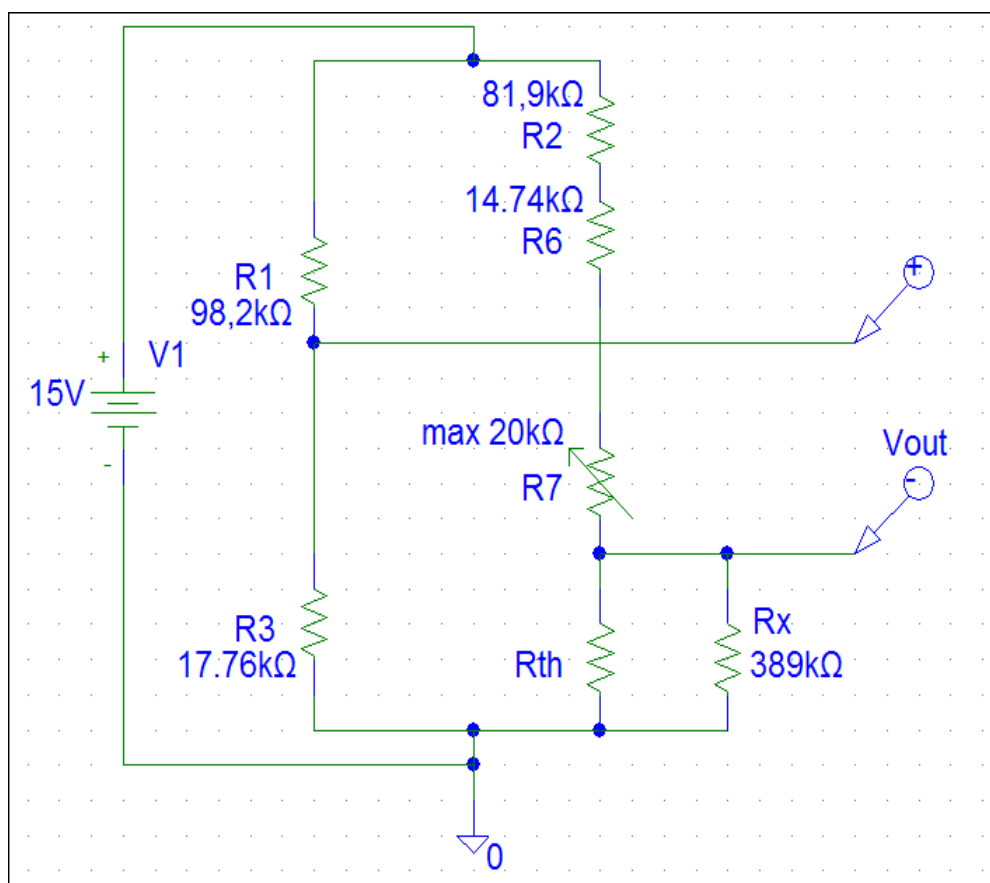


### 4.3 Υλοποίηση της θερμομετρικής διάταξης

Έχοντας λοιπόν τα παραπάνω στοιχεία και πορίσματα υπόψη, προχωρούμε στην υλοποίηση της θερμομετρικής μας διάταξης.

Δυστυχώς η πραγματικότητα είναι κάπως διαφορετική από την θεωρητική προσέγγιση. Ο κύριος λόγος είναι η τυποποίηση στις τιμές των αντιστάσεων που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Επομένως, θα χρειαστεί να κάνουμε κάποιες μικρές αλλαγές και παραχωρήσεις όσο αφορά τις τιμές των αντιστάσεων, πράγμα που θα μεταβάλλει ελαφρώς τη μορφή του κυκλώματός μας.

Το τελικό κύκλωμα της γέφυρας, το οποίο και υλοποιήθηκε, είναι αυτό του Σχήματος 7.



Σχήμα 7. Κύκλωμα υλοποίησης γέφυρας στη διάτρητη πλακέτα

Όπως μπορούμε να δούμε και κυκλωματικά, έχουμε κάποιες αποκλίσεις όσον αφορά τις τιμές των αντιστάσεων που θα θέλαμε. Επομένως αποφασίσαμε ο κλάδος

της  $R_2$  πλέον να απαρτίζεται από μια συστοιχία αντιστάσεων με βασική προσθήκη αυτή του μεταβλητού πολύτροφου ποτενσιόμετρου ( $R_7$ ).

Ο λόγος ύπαρξης του ποτενσιόμετρου είναι πλέον απαραίτητος μιας και οι μικροδιαφορές στις τιμές των αντιστάσεων καθώς και η πιθανή διαφορά της αντίστασης του θερμίστορ λόγω της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας θα έχει ως αποτέλεσμα την μη επίτευξη μηδενισμού στη γέφυρα σε συνθήκες ισορροπίας.

Έτσι χρησιμοποιούμε σε πρώτη φάση το ποτενσιόμετρο, προσπαθώντας να επιτύχουμε μηδενισμό της εξόδου της γέφυράς μας. Έχοντας στη διάθεσή μας μηδενίσαμε την γέφυρά μας σε θερμοκρασία δωματίου  $22^{\circ}\text{C}$  (σε όσο δυνατό κλειστό δωμάτιο με έναν υποτυπώδη έλεγχο θερμοκρασίας).

Ως αποτέλεσμα είχαμε το θερμίστορ να αντιλαμβάνεται την μεταβολή της θερμοκρασίας δωματίου ικανοποιητικά. Συγκεκριμένα τα αυτόματα συστήματα ψύξης άρχιζαν να ψύχουν το χώρο όταν η γέφυρα είχε έξοδο περίπου  $4\text{mV}$ .

Στη συνέχεια πήραμε μια πρώτη εκτίμηση της εξόδου της γέφυρας για διάφορες θερμοκρασίες, κάνοντας χρήση της θερμαντικής πλάκας. Σκοπός μας είναι να εκτιμήσουμε τη μέγιστη δυνατή τιμή τάσεως εξόδου για το πεδίο θερμοκρασιών που μας ενδιαφέρει ώστε να ρυθμίσουμε το κέρδος του σταδίου ενίσχυσης όσο γίνεται πιο κοντά στις ανάγκες μας.

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε την έξοδο της γέφυρας σε διάφορες τιμές θερμοκρασίας της θερμαντικής πλάκας χρησιμοποιώντας ως ένδειξη το ενσωματωμένο θερμόμετρο της πλάκας.

Θερμοκρασία Πλάκας ( $^{\circ}\text{C}$ )	Έξοδος Γέφυρας ( $\text{mV}$ )
22	~0
32	357
40	880
50	1285
60	1550
70	1750

*Πίνακας 6. Έξοδος της γέφυρας σε διάφορες θερμοκρασίες της θερμαντικής πλάκας*

Βλέπουμε λοιπόν πως η έξοδος δεν ξεπερνά τα  $2\text{V}$  για μια μέγιστη θερμοκρασία κοντά στους  $70^{\circ}\text{C}$ . Επομένως θεωρούμε μια επαρκή ενίσχυση του σήματος να είναι της τάξης του πενταπλασιασμού της εξόδου της γέφυρας.

Στην επιλογή αυτή μας οδηγεί και το σκεπτικό πως η συσκευή που θα μεσολαβήσει μεταξύ εξόδου της θερμομετρικής διάταξής μας και του υπολογιστή στον οποίο θα αποθηκεύουμε τις ενδιάμεσες μετρήσεις έχει μέγιστη τάση εισόδου περίπου στα 10V, και περαιτέρω ενίσχυση του σήματος εισόδου του θα ήταν άσκοπη και ίσως επικίνδυνη για την ίδια τη συσκευή.

Παρακάτω παρουσιάζεται η οπτική εικόνα της κατασκευής της θερμομετρικής διάταξης, όπως αυτή υλοποιήθηκε με διακριτά στοιχεία σε διάτρητη πλακέτα βακελίτη.



Εικόνα 4. Συνολική παρουσίαση πλακέτας θερμομετρικής διάταξης

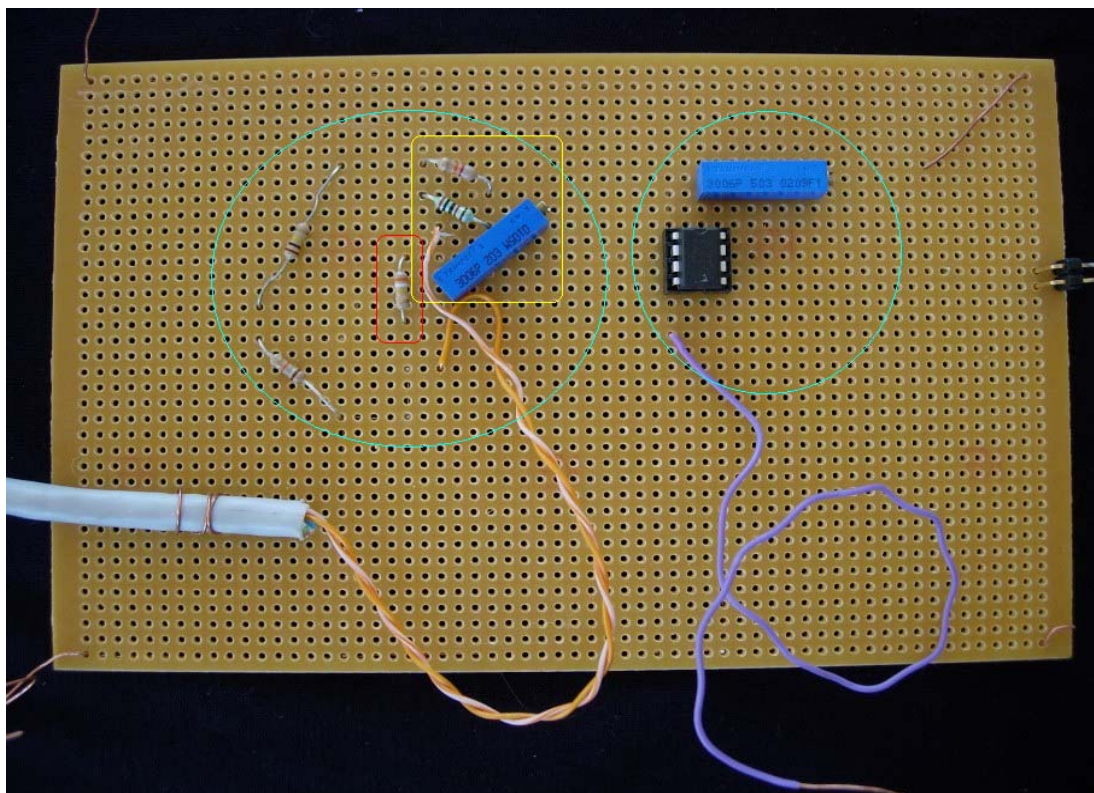
Στην Εικόνα 4 μπορούμε να διακρίνουμε την πλακέτα που υποστηρίζει την κυκλωματική διάταξή μας ενώ βλέπουμε το θερμίστορ πάνω αριστερά, στο τέλος της επέκτασης μέσω αγωγού μήκους περίπου 3m. Ο λόγος είναι προφανώς για την ύπαρξη μεγαλύτερης ευχέρειας στην λήψη μετρήσεων αφού αναμένεται ο θερμοσίφωνας να μη βρίσκεται σε θέση τέτοια ώστε να βολεύει την τοποθέτηση όλου του απαραίτητου εξοπλισμού για τη εκτέλεση των πειραμάτων.

Η Εικόνα 5 μας δίνει μια προσεχτικότερη ματιά στην πλακέτα αυτή καθαυτή. Μέσω της εικόνας αυτής μπορούμε να διακρίνουμε στα γαλάζια περιγράμματα τα δύο υποκυκλώματα της όλης διάταξης, αυτό της γέφυρας αριστερότερα και κατόπιν το στάδιο ενίσχυσης με κύριο και δεσπόζον στοιχείο το ολοκληρωμένο κύκλωμα του

ενισχυτή AMP04 και την μεταβλητή αντίσταση καθορισμού του κέρδους του σταδίου.

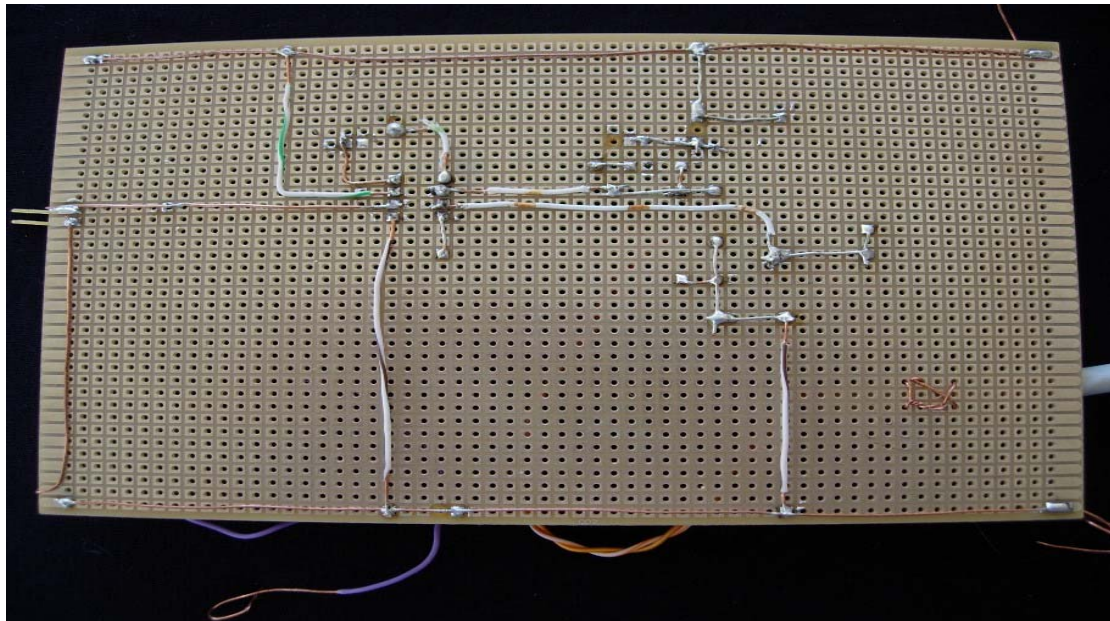
Ακόμα, μπορούμε στο κίτρινο πλαίσιο να δούμε τη συστοιχία των αντιστάσεων που απαρτίζουν τον άνω δεξί κλάδο της γέφυρας με το ποτενσιόμετρο που χρησιμοποιήσαμε για την επίτευξη του μηδενισμού της γέφυρας.

Επίσης, με το κόκκινο περίγραμμα δείχνουμε την αντίσταση που τοποθετείται παράλληλα με το θερμίστορ με στόχο την γραμμικοποίηση της εξόδου.



Εικόνα 5. Κοντινότερη απεικόνιση της πλακέτας

Στη συνέχεια βλέπουμε την οπίσθια άποψη της πλακέτας στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6. Οπίσθια άποψη της υλοποίησης της θερμομετρικής μας διάταξης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

#### 5.1 Προετοιμασία – Επιλογή μέσου για βαθμονόμηση

- Προβλήματα με τη διάταξη θερμαινόμενης πλάκας

Ένα από τα κυριότερα προβλήματα που παρουσίαζε η διάταξη της θερμαινόμενης πλάκας για την λήψη έμπιστων μετρήσεων είναι η ευμετάβλητη φύση της.

Αρχικά το γεγονός ότι η πλάκα δεν είναι καλυμμένη από την πάνω πλευρά της οδηγεί στο αβίαστο συμπέρασμα ότι υπάρχουν θερμικές απώλειες. Παρά το γεγονός ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε θερμομονωτικό υλικό ως καλύπτρα της πλάκας, το γεγονός των απωλειών δεν εξαλείφεται.

Ακόμη, οι θερμοκρασιακές μεταβολές στην πλάκα είναι απότομες με ανυψώσεις (overshoots) και άλλα παρόμοια φαινόμενα κατά τις μεταβάσεις μεταξύ των θερμοκρασιακών σταθμών στους οποίους επιθυμούμε να λάβουμε μετρήσεις της συμπεριφοράς της διάταξής μας, με άμεσο αποτέλεσμα να υπεισέρχεται σχετική ασάφεια σχετικά με την πραγματική θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί η διάταξη, με αποκλίσεις που μπορεί να φτάνουν μέχρι και τον  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Τέλος, το σύνολο μετρήσεών μας είναι ισχυρά εξαρτώμενο από την ακριβή θέση του θερμίστορ στην πλάκα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το θερμαντικό στοιχείο της πλάκας δεν διατρέχει όλη την επιφάνεια της πλάκας ομοιόμορφα με αποτέλεσμα να υπάρχουν περιοχές της πλάκας με υψηλότερη και περιοχές με χαμηλότερη θερμοκρασία. Επομένως, δε μπορούμε να γνωρίζουμε με απόλυτη βεβαιότητα αν η ένδειξη του ενσωματωμένου ηλεκτρονικού θερμομέτρου της πλάκας ανταποκρίνεται στην θερμοκρασία που επικρατεί στην ακριβή θέση στην οποία έχουμε τοποθετήσει το θερμίστορ μας.

Λαμβάνοντας υπόψη μας όλα τα παραπάνω μειονεκτήματα, οδηγούμαστε στην διερεύνηση άλλης διάταξης για την βαθμονόμηση του θερμομέτρου μας, μιας διάταξης που να διασφαλίζει μεγαλύτερη σταθερότητα και κύρος στις μετρήσεις.

- Βαθμονόμηση με μέσο τη γλυκερίνη

Η διάταξη στην οποία βασιζόμαστε τελικά για τη βαθμονόμηση της θερμομετρικής διάταξης του θερμίστορ βασίζεται στις θερμικές ιδιότητες κάποιων

φυσικών υλών και συγκεκριμένα της γλυκερίνης. Πολλά υλικά που απαντώνται στη φύση δεν επιτρέπουν την εύκολη και απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας της μάζας τους λόγω των ισχυρότερων δεσμών που κυριαρχούν μεταξύ των μορίων τους σε σχέση με άλλα υλικά. Η ισχύς αυτών των ενδομοριακών δεσμών απεικονίζεται μαθηματικά στην γνωστή φυσική σταθερά που ακούει στον όνομα ειδική θερμότητα και χαρακτηρίζει το κάθε υλικό.

Ένα από αυτά τα «δύστροπα» υλικά, το οποίο και θα χρησιμοποιήσουμε για τις ανάγκες της βαθμονόμησης, είναι και η γλυκερίνη, τις οποίας τα μόρια σχετίζονται με πολύ ισχυρούς δεσμούς. Αυτό φαίνεται με μια πρώτη ματιά σε ένα δοχείο που περιέχει 100% καθαρή γλυκερίνη στη φυσική της μορφή (δηλ. σε θερμοκρασία περιβάλλοντος), αφού μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι βρίσκεται σε σχετικά ρευστή μορφή. Σε δεύτερη φάση η ισχύς των δεσμών αυτών φαίνεται και από το υψηλό σημείο βρασμού της, που εντοπίζεται κοντά στους 260°C.

Ο λόγος που επιλέγουμε ένα τέτοιο υλικό είναι για να αποφύγουμε το πρόβλημα της απότομων μεταβολών στο υλικό, του οποίου τη θερμοκρασία θα κληθεί το θερμίστορ να λάβει μετρήσεις. Μπορεί να χρειάζεται περισσότερος χρόνος για τη μετάβαση από μια θερμοκρασιακή στάθμη στην επόμενη, αλλά η στάθμη θα διατηρείται πολύ ευκολότερα και ασφαλέστερα ώστε να μας εξασφαλίζει καλύτερη ποιότητα μετρήσεων. Συγκεκριμένα η ειδική θερμότητα αυτού του υλικού είναι η μισή περίπου ( $c_{\text{γλυκερίνης}} = 0,58 \text{ cal } ^\circ\text{C}/\text{gr}$ ) σε σχέση με αυτή του νερού ( $c_{\text{νερού}} = 1 \text{ cal } ^\circ\text{C}/\text{gr}$ ), διαφορά που ποσοτικοποιεί το γεγονός ότι στην περίπτωση όμοιων μαζών γλυκερίνης και νερού, η γλυκερίνη χρειάζεται περισσότερη ενέργεια - και συγκεκριμένα σχεδόν τη διπλάσια - από ότι το νερό για να υψώσει την θερμοκρασία της μάζας της κατά τους ίδιους βαθμούς.

Για την θέρμανση του όγκου της γλυκερίνης θα χρησιμοποιήσουμε έναν απλό βραστήρα νερού που απαντάται σε μεγάλο αριθμό οικιών, μιας και αποτελεί σύνηθες μέρος του εξοπλισμού της κάθε κουζίνας. Ο συγκεκριμένος βραστήρας έχει μέγιστη χωρητικότητα 1.5lt και η αντίσταση ισχύος του έχει ονομαστική ισχύ 2-2.4kW με 220V τροφοδοσίας, με τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας από το θερμαντικό στοιχείο προς το υγρό να γίνεται μέσω θερμαντικής πλάκας. Με μια μικρή διερεύνηση αντίστοιχη με αυτή που κάναμε για το θερμοσίφωνα βρίσκουμε πως η αντίσταση ισχύος με την οποία είναι εφοδιασμένος ο βραστήρας έχει αντίσταση της τάξεως των 22Ω και διαρρέεται με ρεύματα της τάξης των 10A.

Η παρουσία και μόνο της θερμαντικής πλάκας εμπεριέχει τον ίδιο παράγοντα κινδύνου που περιγράψαμε προηγουμένως, όμως θα δούμε πως, με την απαραίτητη προσοχή κατά το στήσιμο της πειραματικής διάταξης, ξεπερνάμε αυτό το πρόβλημα. Από πλευράς μόνωσης, έχει διπλό περίβλημα αρχικά αλουμινίου και στη συνέχεια πλαστικού. Ως αποτέλεσμα, παρέχει ικανοποιητική μόνωση από το περιβάλλον και έτσι μειώνει σε μεγάλο βαθμό το ρυθμό των θερμικών απωλειών, συμβάλλοντας επιπρόσθετα στην επίτευξη ακόμη σταθερότερης θερμοκρασίας για μεγαλύτερη

χρονική διάρκεια, γεγονός που δίνει ακόμη μεγαλύτερη πιστότητα στις μετρήσεις που θα ληφθούν.



Εικόνα 7. Βραστήρας εμπορίου που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση της διάταξης

Επίσης, ως θερμοκρασιακή ένδειξη αναφοράς θα χρησιμοποιηθεί ένα απλό ηλεκτρονικό θερμόμετρο χώρου. Πρόκειται για θερμόμετρο με ονομαστικό πεδίο λειτουργίας από τους  $-50^{\circ}\text{C}$  έως τους  $+70^{\circ}\text{C}$ . Αποτέλεσμα της χρήσης του συγκεκριμένου εξαρτήματος είναι ότι η θερμομετρική διάταξή μας θα συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο όπως και αυτό το θερμόμετρο αναφοράς με όλα τα θετικά και αρνητικά με τα οποία αυτό συνεπάγεται.

Συγκεκριμένα ο χρόνος απόκρισης του ηλεκτρονικού θερμομέτρου καθώς και η ευαισθησία του, κυρίως όσο πλησιάζουμε στα όρια λειτουργίας του, θα κληρονομηθεί μοιραία και από τη διάταξη του θερμίστορ μας. Θα δούμε στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων, πώς αυτά μπορεί να επηρεάσουν την συμπεριφορά του στην πράξη.





Εικόνα 8. Πρότυπο ηλεκτρονικό θερμόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά

## 5.2 Διαδικασία Βαθμονόμησης - Μετρήσεις

Σε αυτό το σημείο της εργασίας παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη βαθμονόμηση της διάταξης, η διαδικασία δηλαδή ώστε να εξάγουμε όσο το δυνατό ακριβέστερα ζεύγη μετρήσεων θερμοκρασίας-τάσης εξόδου της διάταξης. Τελικός στόχος είναι η εξαγωγή κάποιας μαθηματικής σχέσης που να συνδέει αυτά τα δύο μεγέθη έτσι ώστε τροφοδοτώντας αυτή τη σχέση στο πρόγραμμα του υπολογιστή να έχουμε αυτόματα ένδειξη για τη θερμοκρασία που μετρά το θερμίστορ.

- Ζεύξη πλακέτας – υπολογιστή

Αναφέρουμε πως για τη ζεύξη υπολογιστή-πλακέτας κάναμε χρήση της τυποποιημένης ηλεκτρονικής συσκευής NI-DAQ9006 της National Instruments. Η συγκεκριμένη συσκευή λαμβάνει ως είσοδο έως και 8 απλές εισόδους (ή εναλλακτικά 4 διαφορικές) αναλογικού σήματος και μετατρέπει την είσοδο αυτή σε ψηφιακό σήμα, το οποίο μεταδίδει μέσω μιας συνήθους θύρας USB για επεξεργασία από τον υπολογιστή.

Προϋπόθεση για την επεξεργασία αυτή είναι η πρότερη εγκατάσταση στον υπολογιστή μας του λογισμικού LabView με τους κατάλληλους οδηγούς λογισμικού για τη συγκεκριμένη συσκευή. Από εκεί και πέρα μέσω διαφόρων objects που παρέχει το LabView μπορούμε να εκτελέσουμε οποιαδήποτε επεξεργασία σήματος επιλέξουμε, ώστε να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

- Απαραίτητος εξοπλισμός – Τοποθέτηση

Για να μπορέσουμε να λάβουμε μετρήσεις τόσο κατά το στάδιο βαθμονόμησης όσο και αργότερα για την εκτέλεση του κυρίου πειράματος παρουσία του θερμοσίφωνα, θα χρειαστούμε κάποιο περιφερειακό εξοπλισμό. Κάποιο μέρος βέβαια αυτού του εξοπλισμού δε θα μας είναι απαραίτητος στη συνέχεια μετά την βαθμονόμηση της θερμομετρικής διάταξης.

Προφανώς βασικά στοιχεία στο στάδιο της βαθμονόμησης θα είναι η πλακέτα μας με τον υπολογιστή και τη συσκευή ζεύξης τους, ο βραστήρας με μια ικανοποιητική ποσότητα γλυκερίνης και το θερμόμετρο αναφοράς.

Ακόμη, θα χρειαστούμε ένα απλό τροφοδοτικό τάσης με δυνατότητα παροχής τάση εξόδου  $\pm 15V$ . Η συγκεκριμένη συσκευή είναι αυτή που θα δίνει την τροφοδοσία λειτουργίας τόσο στη γέφυρα όσο και τη συμμετρική απαραίτητη τροφοδοσία για την λειτουργία του ενισχυτή ώστε να έχουμε τελικά έξοδο εντός των επιθυμητών επιπέδων.

Επιπρόσθετα, από πλευράς τροφοδοσίας στο συγκεκριμένο και μόνο στάδιο βαθμονόμησης, θα χρειαστούμε και άλλο ένα τροφοδοτικό μεταβαλλόμενης εξόδου για να μπορούμε να χειριστούμε το βραστήρα που θα χρησιμοποιήσουμε για τη θέρμανση της μάζας γλυκερίνης.

Δυστυχώς δεν είναι τόσο απλή η λύση να θέσουμε το βραστήρα κατευθείαν στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης των 220V διότι δεν έχουμε καλό έλεγχο του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας, και επομένως δεν θα έχουμε σωστή βαθμονόμηση.

Έτσι, θα χρειαστούμε ένα επιπλέον τροφοδοτικό το οποίο χρησιμοποιούμε μάλιστα ως πηγή ρεύματος. Με αυτό τον τρόπο θα μπορέσουμε να επιτύχουμε σταθερό και βολικό ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας της γλυκερίνης έτσι ώστε να είμαστε βέβαιοι ότι επιτυγχάνεται πρώτα θερμική ισορροπία (έστω και τοπικά στην θέση που θα βρίσκεται ο αισθητήρας μας) ώστε να έχουμε πιο αξιόπιστες μετρήσεις.

Στην επίτευξη πιο αξιόπιστων μετρήσεων θα μας βοηθήσει ακόμη περισσότερο να είμαστε ιδιαίτερα προσεχτικοί στον τρόπο τοποθέτησης των αισθητήρων, τόσο του θερμίστορ όσο και του θερμομέτρου αναφοράς. Πρέπει να είμαστε όσο γίνεται σίγουροι πως οι δύο αισθητήρες βρίσκονται σε μέρος της μάζας της γλυκερίνης που να έχει την ίδια θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό πρέπει να προσέξουμε δύο βασικά πράγματα όσον αφορά την τοποθέτηση των δύο αισθητήρων.

Το πρώτο είναι να βρίσκονται επαρκώς βυθισμένοι αμφότεροι μέσα στην γλυκερίνη για προφανείς λόγους. Σε αντίθετη περίπτωση αυξάνεται δραματικά η πιθανότητα το περιβάλλον να επηρεάζει σε καταστρεπτικό για την αξιοπιστία των μετρήσεων βαθμό.

Το δεύτερο είναι η όσο δυνατόν σταθερότερη και κοντινότερη μεταξύ τους θέση μέσα στη γλυκερίνη. Η τοποθέτηση που θεωρήσαμε ως την καλύτερη είναι να δέσουμε τους δύο αισθητήρες στο ίδιο ύψος κάτω από την επιφάνεια της γλυκερίνης

και όσο γίνεται πιο κοντά στο κέντρο της επιφάνειας της. Δένοντας τους μαζί ξεπερνάμε τον κίνδυνο να βρίσκονται σε διαφορετικά βάθη με αυτόν που βρίσκεται χαμηλότερα να δέχεται μεγαλύτερη θερμότητα από την πλάκα, παρότι το φαινόμενο φιμώνεται αρκετά από την αντικατάσταση του νερού με τη γλυκερίνη. Φέρνοντάς τους προς το κέντρο απομακρυνόμαστε από τον κίνδυνο εκδήλωσης οριακών φαινομένων που μπορεί να παρουσιάζονται στα τοιχώματα του βραστήρα με αποτέλεσμα να υπεισέρχονται σφάλματα μετρήσεων.

Έχοντας τοποθετήσει πλέον τους αισθητήρες μας σε όσο δυνατόν ασφαλή θέση, προχωράμε στην σταδιακή αύξηση της έντασης στο ρεύμα που διοχετεύει η πηγή ρεύματος στην αντίσταση ισχύος του βραστήρα.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για τις λεπτομέρειες εκτέλεσης της βαθμονόμησης. Αρχικά, μπορούμε για παράδειγμα να ανεβαίνουμε σε μια θερμοκρασιακή ζώνη, να περιμένουμε να σταθεροποιηθεί στην θερμοκρασία αυτή και μετά να σημειώνουμε τη μέτρηση. Το πρόβλημα με τη συγκεκριμένη τεχνική είναι πως υπάρχει έντονο το φαινόμενο του overshooting με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να καθορίσουμε με ακρίβεια τη θέση της ισορροπίας και ακόμη περισσότερο να μας προεξοφλήσει πως θα έχουμε παρόμοια κριτήρια στον καθορισμό της επόμενης ισορροπίας.

Μια δεύτερη κατεύθυνση που μπορούμε να ακολουθήσουμε είναι να θερμάνουμε τη γλυκερίνη μέχρι την υψηλότερη θερμοκρασία και κατόπιν να παίρνουμε μετρήσεις κατά την πτωτική θερμοκρασιακά πορεία της γλυκερίνης. Μια τέτοια απόπειρα αποδείχθηκε άκαρπη μιας και δεν έχουμε σταθερό ρυθμό στην πτώση της θερμοκρασίας. Όσο είμαστε μακριά από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι απώλειες είναι μεγαλύτερες μιας και είναι ευθέως ανάλογες της θερμοκρασιακής διαφοράς. Έτσι όσο πλησιάζουμε στη θερμοκρασία περιβάλλοντος έχουμε μείωση του ρυθμού. Ως αποτέλεσμα έχουμε προφανώς αλλαγή στην συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνεται η δειγματοληψία, πράγμα που έχει άμεσο αντίκτυπο στην αξιοπιστία των μετρήσεων μας.

Η τρίτη και προτιμητέα των λύσεων που σκεφτήκαμε ήταν να γίνεται η δειγματοληψία κατά την ανοδική θερμοκρασιακή πορεία. Κρατώντας το ρυθμό ανόδου σταθερό και σχετικά μικρό είμαστε πιο σίγουροι πως οι μετρήσεις μας θα είναι πιο ακριβείς και ρεαλιστικές, δεδομένου πως όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές, όπως η θέση των αισθητήρων, παραμένουν σταθερές.

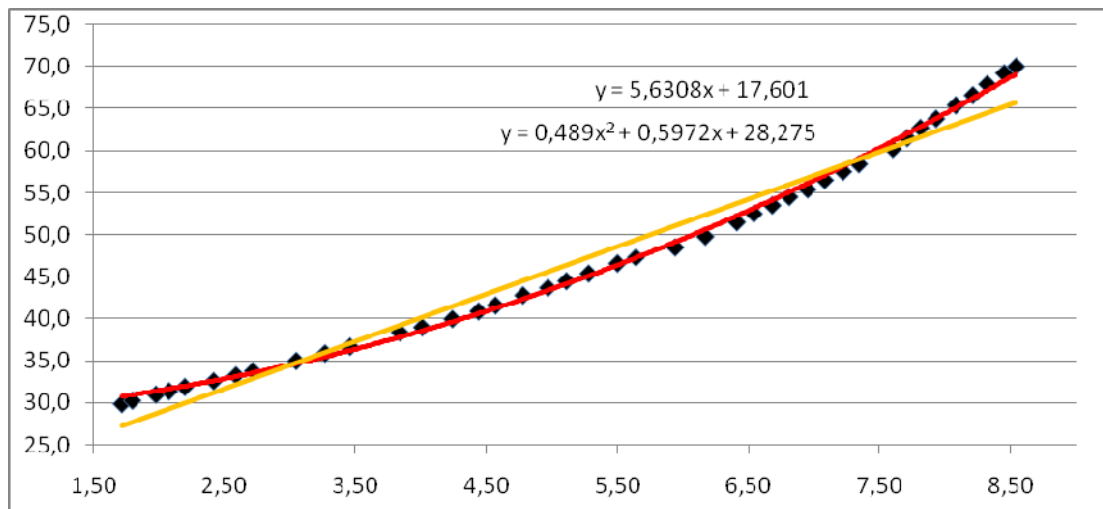
Συγκεκριμένα, μεταβάλλαμε την ένταση του ρεύματος τροφοδοσίας στο βραστήρα έτσι ώστε να παρατηρείται καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων μεταβολή 60-80mV για χρονικό παράθυρο 100 δειγμάτων (που ισοδυναμούσαν σε χρόνο 100 δευτερολέπτων). Οι μετρήσεις που λάβαμε παρατίθενται παρακάτω στον πίνακα 6.

Βασιζόμενοι στον πίνακα αυτό θα προσπαθήσουμε να βρούμε μια μαθηματική σχέση μεταξύ τάσης εξόδου και θερμοκρασίας ώστε να την τροφοδοτήσουμε στο μοντέλο του LabView ώστε να έχουμε κατευθείαν μετρήσεις της θερμοκρασίας. Ο τρόπος που θα θέλαμε να προσεγγίσουμε αυτή την αντιστοίχιση προφανώς θα ήταν ο γραμμικός. Αυτό που μένει είναι να δούμε πράγματι αν μια τέτοια θεώρηση θα ήταν ρεαλιστική.

<b>Θερμοκρασία (οC)</b>	<b>Voltage (V)</b>
29,9	1,72
30,3	1,80
31,0	1,98
31,4	2,08
31,9	2,20
32,6	2,42
33,3	2,59
33,8	2,72
35,0	3,05
35,9	3,27
36,7	3,46
38,4	3,84
39,0	4,01
40,0	4,24
40,9	4,44
41,6	4,57
42,8	4,78
43,7	4,97
44,5	5,11
45,4	5,28
46,6	5,50
47,3	5,64
48,5	5,94
49,8	6,17
51,5	6,41
52,5	6,54
53,5	6,68
54,5	6,81
55,4	6,95
56,5	7,08
57,5	7,22
58,4	7,34
60,2	7,60
61,5	7,71
62,7	7,81
63,8	7,93
65,4	8,08
66,6	8,21
67,9	8,32
69,2	8,45
70,0	8,54

*Πίνακας 6. Πίνακας για τη βαθμομέτρηση του θερμίστορ*

Με τον παρακάτω πίνακα ως οδηγό κατασκευάζουμε τη γραφική αναπαράσταση του Διαγράμματος 5.



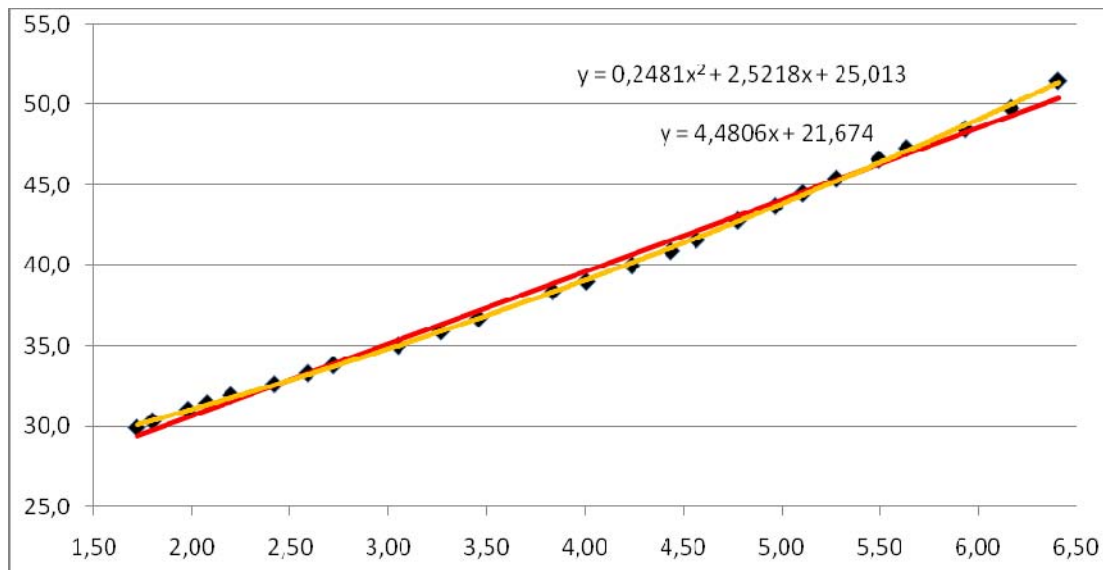
*Διάγραμμα 5. Ζεύγη Θερμοκρασίας-Τάσης Εξόδου μέχρι τους 70 οC με τις προσεγγιστικές συναρτήσεις τους*

Πρώτο πόρισμα που μπορούμε να εξάγουμε από το Διάγραμμα 5 είναι πως τελικά η έξοδος μας δεν είναι όσο γραμμική θα θέλαμε. Βέβαια ήταν αναμενόμενο πως η ‘καλή’ μορφή που είχαμε στην εξομοίωση του Spice θα χάλαιγε ελαφρώς στην πραγματικότητα, αλλά και επιπρόσθετα, το στάδιο της ενίσχυσης που ακολούθησε θα άμβλυνε τη διαφοροποίηση της συμπεριφοράς της γέφυρας ακόμη περισσότερο από ότι φαινόταν. Είναι το τμήμα που πληρώσαμε για να έχουμε μεγαλύτερη ευαισθησία.

Από το Διάγραμμα 5 λοιπόν βλέπουμε πως η γραμμική προσέγγιση δεν πλησιάζει ούτε κατά φαντασία την συμπεριφορά του θερμομέτρου μας. Αντίθετα, αν προσπαθούσαμε να κάνουμε μια προσέγγιση με ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού, μπορούμε να δούμε πως δεν έχουμε και πολύ μεγάλες αποκλίσεις από την πραγματικότητα και έτσι θα μπορούσαμε άνετα να χρησιμοποιήσουμε αυτή την προσέγγιση για να προχωρήσουμε στη βαθμονόμηση.

Όμως το Διάγραμμα 5 μας δίνει και μία άλλη πληροφορία. Μπορούμε να δούμε πως τα ζεύγη μέχρι τη θερμοκρασία των 50°C δεν απέχουν και πολλή από τη γραμμική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα φαίνεται πως τη μη γραμμική συμπεριφορά την αποκτά το σύστημά μας μετά την παρέλευση του ορίου αυτού των 50°C και όσο απομακρυνόμαστε, η απόκλιση γίνεται πιο έντονη.

Στηριζόμενοι σε αυτή την παρατήρηση προχωράμε την ανάλυση ένα βήμα ακόμη, περιορίζοντας τα ζεύγη μέχρι τη θερμοκρασία των 50°C, από τα οποία λαμβάνουμε το Διάγραμμα 6.



*Διάγραμμα 6. Ζεύγη Θερμοκρασίας-Τάσης Εξόδου μέχρι τους 51.5οC με τις προσεγγιστικές συναρτήσεις τους*

Μέσω του Διαγράμματος 6 έχουμε μια πολύ καλή ιδέα του τι συμβαίνει. Βλέπουμε οι λοιπών πως και πάλι μια πολυωνμική προσέγγιση δευτέρου βαθμού είναι μια πολύ καλή εκτιμήτρια, αλλά παρόλα αυτά και η γραμμική εκτίμηση είναι αρκετά καλή έως και ικανοποιητική και θα μπορούσε, αν θέλαμε να φτιάξουμε ένα κύκλωμα που να παίρνει την τάση εξόδου και να την μετατρέπει απευθείας σε θερμοκρασία, να αποτελέσει μια οικονομική και ικανοποιητική λύση, μειώνοντας το κόστος της κατασκευής.

Αυτό συμβαίνει διότι όλη η ανάλυση που κάναμε και τα μέτρα προς γραμμικοποίηση της γέφυρας που πήραμε ήταν όλα με γνώμονα το τέλος του πεδίου θερμοκρασιών να είναι στους 50°C. Επομένως είναι φυσιολογικό να έχουμε καλύτερη συμπεριφορά σε αυτό το πεδίο θερμοκρασιών.

Ακόμη, υποψιαζόμαστε πως ευθύνη για την παρέκκλιση μετά από κάποιο σημείο υψηλών θερμοκρασιών μπορεί να φέρει και το πρότυπο θερμόμετρο που χρησιμοποιούμε ως ένδειξη αναφοράς. Μπορεί το ονομαστικό πεδίο λειτουργίας του να είναι μέχρι τους 70°C, αυτό όμως δε σημαίνει πως λειτουργεί το ίδιο καλά και όσο πλησιάζουμε προς τα άκρα αυτά. Επομένως μπορεί να εισάγει σφάλματα στη συμπεριφορά του δικού μας θερμομέτρου.

Σε κάθε περίπτωση, επειδή δεν έχουμε υπολογιστικό πρόβλημα, θα προτιμήσουμε να κερδίσουμε σε ακρίβεια και, έτσι, επιλέγουμε να εφοδιάσουμε το μοντέλο του LabView με την πολυωνμική εκτιμήτρια του Διαγράμματος 6, η οποία ακολουθεί πιστότερα την συμπεριφορά του συστήματος από αυτή του Διαγράμματος 5 και επίσης καλύπτει το πεδίο θερμοκρασιών που πραγματεύεται αυτή η εργασία στον αέρα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΡΙΝ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ

Πριν προχωρήσουμε στο πειραματικό στάδιο, όπου θα αναμετρηθούν εικονικός και πραγματικός θερμοσίφωνας, κρίνεται σκόπιμος ο υπολογισμός κάποιων σταθερών που υπεισέρχονται στους διάφορους υπολογισμούς μας.

Επίσης σε αυτό το σημείο θα γίνει και η περιγραφή οποιασδήποτε λεπτομέρειας σχετίζεται με την τοποθέτηση του αισθητήρα μας στην πειραματική διάταξή μας ώστε να μπορούμε να έχουμε μια σαφή εικόνα του τι ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση που έχουμε κάποια παρέκκλιση, να μπορούμε να την αποδώσουμε σε κάποια άτυχη επιλογή στην τοποθέτηση, αν κρίνουμε πως παίζει σημαντικό ρόλο στη λανθασμένη αυτή έκβαση.

- Υπολογισμός της σταθεράς μόνωσης

Ξεκινούμε τον προσδιορισμό αυτών των σταθερών με τον καθορισμό της σταθεράς απωλειών του θερμοσίφωνα μας. Είναι η σταθερά αυτή που κρίνει σε μεγάλο βαθμό το ρυθμό με τον οποίο εκλύεται θερμότητα από το εσωτερικό της δεξαμενής στον περιβάλλοντα χώρο.

Στην περίπτωσή μας, η διογκούμενη πολυουρεθάνη έχει μια σταθερά μόνωσης<sup>[5]</sup>:

$$R_{\text{value}} = 8 \frac{ft^2 \cdot hr \cdot ^\circ F}{Btu} \text{ ανά ίντσα πάχους}$$

Με τα 3cm=1.2inch πάχους μόνωσης που διαθέτει το μοντέλο θερμοσίφωνα μας, η σταθερά μόνωσης λαμβάνει την τελική τιμή:

$$R_{\text{value}} = 9.6 \frac{ft^2 \cdot hr \cdot ^\circ F}{Btu} = 3.0432 \frac{m^2 \cdot sec \cdot ^\circ F}{J}$$

Αυτή είναι και η τιμή της σταθεράς που θα χρησιμοποιήσουμε για να υπολογίζουμε μαθηματικά τις θεωρητικές απώλειες του θερμοσίφωνα μας κατά τη διάρκεια των εξομοιώσεων.

## 6.1 Υπολογισμός του όγκου απορριπτόμενου νερού

Σε μια προσπάθειά μας να καθορίσουμε όλες αυτές τις σταθερές που θα μας έδιναν μια εκτίμηση του όγκου που διαφεύγει από το θερμοσίφωνα στη μονάδα του χρόνου, συναντήσαμε πολλά και ποικίλα εμπόδια.

Το κυριότερο πρόβλημα είχε να κάνει με τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά των σωληνώσεων που μεσολαβούν από την έξοδο του θερμοσίφωνα μέχρι την απόληξη από όπου και λαμβάνουμε το ζεστό νερό. Έτσι δεν είχαμε εκτίμηση ούτε για το συνολικό μήκος των σωληνώσεων, ούτε για τις πιθανές αλλαγές κατεύθυνσης που μπορεί να περιέχει και οι οποίες θα προσέθεταν επιπλέον εμπόδια και επιβράδυνση στο νερό.

Άλλο ένα σοβαρό πρόβλημα που είχαμε είναι πως η ροή του νερού εξαρτάται σε πολύ μεγάλο και δύσκολα υπολογίσιμο βαθμό από τις ενδιάμεσες βαλβίδες και διακόπτες καθώς και από το πόσο στρέφουμε το τελικό διακόπτη στη μπαταρία του νιπτήρα μας, γεγονός που επιδέχεται στοχαστική προσέγγιση.

Έτσι, αποφασίσαμε να εγκαταλείψουμε αυτή την προσέγγιση και να εκτελέσουμε όσα μέρη της πειραματικής διαδικασίας εμπλέκουν απόρριψη νερού από τη δεξαμενή, σε πρώτη φάση στο πραγματικό σύστημα. Έτσι θα είχαμε την ευκαιρία να μετράμε τον εκάστοτε ρυθμό απόρριψης νερού και να εκτελούμε επιλεκτικά εξομοίωση με αυτόν ακριβώς το ρυθμό απόρριψης και στο μοντέλο μας. Έτσι σιγουρεύουμε πως τα αποτελέσματα δεν θα έχουν σφάλματα από πιθανές αποκλίσεις σε αυτό το μέγεθος.

## 6.2 Τοποθέτηση αισθητήρα

Αυτό που κρίνεται σκόπιμο να αναφέρουμε είναι ο τρόπος με τον οποίο ο αισθητήρας θερμοκρασίας μας έρχεται σε επαφή και εν τέλει παίρνει μετρήσεις της θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής.



Εικόνα 9. Θέση εισαγωγής του αισθητήρα μας για τη λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας



Επιλέξαμε ως θέση για τον αισθητήρα μας το σημείο στο οποίο είναι, από κατασκευής εργοστασίου, τοποθετημένος το ενσωματωμένο θερμόμετρο του θερμοσίφωνα (βλ. Εικόνα 9).

Αφαιρέσαμε το ενσωματωμένο θερμόμετρο και εισάγαμε τον δικό μας αισθητήρα. Βεβαιωθήκαμε πως βρίσκεται σε συνεχή επαφή με το εσωτερικό τοίχωμα της δεξαμενής και κλείσαμε την εσοχή αυτή με τέτοιο τρόπο, ώστε απλά να μην είναι δυνατή η μετακίνησή του. Η θέση του αισθητήρα βρίσκεται περίπου στο μέσο του συνολικού ύψους του θερμοσίφωνα, γεγονός που κρατάμε υπόψη μας για περαιτέρω ανάλυση και επεξήγηση πιθανών αποκλίσεων των μετρήσεων από τα θεωρητικώς προσδοκώμενα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΠΟΡΙΣΜΑΤΑ

#### 7.1 Διαδικασία Μετρήσεων

Μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε το χρόνο απόκρισης του συστήματος στις διάφορες μεταβολές της κατάστασής του. Από εκεί και γνωρίζοντας τους μηχανισμούς και τις αρχές λειτουργίας που το διέπουν, θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε με σχετική ευκολία τα διάφορα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν σε ενεργειακό επίπεδο. Η λήψη επομένως των μετρήσεων για τη σύγκριση με το κατασκευασμένο μοντέλο ακολούθησε την παρακάτω πορεία.

Διαχωρίζουμε τρία διαφορετικά σενάρια ή αλλιώς στάδια λειτουργίας του θερμοσίφωνα:

1. Το πρώτο είναι η θερμοκρασιακή άνοδος του αποθηκευμένου νερού από θερμοκρασία περιβάλλοντος στη θερμοκρασία των 50°C η οποία είναι και το άνω κατώφλι που έχουμε θεωρήσει ως επιθυμητό για την εύρυθμη λειτουργία της διάταξης. Κατά το συγκεκριμένο στάδιο και δεδομένου ότι η έξοδος του θερμοσίφωνα είναι κλειστή και η αντίσταση ισχύος του θερμοσίφωνα παράγει και αποδίδει ενέργεια με πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς από αυτούς με τους οποίους ενέργεια χάνεται στο περιβάλλον μέσω των θερμικών απωλειών, ο μοναδικός μας στόχος είναι ο έλεγχος ορθότητας της μοντελοποίησης μόνο στο επίπεδο της ενεργειακής μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική μέσω της αντίστασης και η μετάδοση αυτού του ποσού ενέργειας στη μάζα του αποθηκευμένου νερού.
2. Το δεύτερο είναι η περίπτωση κατά την οποία, έχοντας ήδη επίτευξη της θερμοκρασίας των 50°C, ανοίγουμε την έξοδο του θερμοσίφωνα και αφήνουμε ζεστό νερό να διαφύγει. Στην περίπτωση αυτή μας ενδιαφέρει να δούμε το ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλεται η θερμοκρασία του νερού και η σχέση της με το ρυθμό ροής εξόδου. Ο στόχος αυτή μεταφέρεται στον έλεγχο ορθότητας του μοντέλου όσο αφορά τη μεταβολή που προέρχεται από την απότομη μεταβολή της αναλογίας ζεστού και κρύου νερού εντός της αποθηκευτικής δεξαμενής. Η αλλαγή αυτής της αναλογίας έχει ως αποτέλεσμα πολύ εντονότερες ενεργειακές μεταβολές σε σχέση με τις πιθανές απώλειες του συστήματος προς το περιβάλλον και επομένως, στο εν λόγω σενάριο λειτουργίας, δεν θα λάβουμε υπόψη μας τις θερμικές απώλειες της διάταξης.
3. Τρίτο και τελευταίο σενάριο λειτουργίας είναι η επίτευξη θερμοκρασίας 50°C και η σύγκριση θεωρητικών και πραγματικών απωλειών ενέργειας του συστήματος προς το περιβάλλον. Για της ανάγκες αυτού του σταδίου θα θερμάνουμε αρχικά το αποθηκευμένο νερό και έπειτα θα το αφήσουμε εντός της δεξαμενής (δεν θα ανοίξουμε την έξοδο δηλαδή) αφήνοντάς το σε

αλληλεπίδραση με το περιβάλλον του και θα δούμε τον τρόπο και το ρυθμό με τον οποίο η ενέργεια διαφεύγει από τη διάταξη.

Για λόγους ευκολίας στην αντιπαράθεση των πρακτικών αποτελεσμάτων με αυτά που παράγονται μέσω του μοντέλου που κατασκευάσαμε στο Matlab, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα γίνεται ταυτόχρονα για κάθε διαφορετικό στάδιο/σενάριο λειτουργίας.

### 7.1.1 Α' ΣΕΝΑΡΙΟ: Θέρμανση του αποθηκευμένου νερού

Σε αυτό το πρώτο στάδιο, μας ενδιαφέρει να δούμε πόσο χρόνο χρειάζεται ο θερμοσίφωνας ώστε να επιτύχουμε ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού από θερμοκρασία περιβάλλοντος στο άνω κατώφλι που έχουμε θέσει ως ζώνη ζεστού νερού, δηλαδή στους 50°C.

Δεδομένου πως η αντίσταση παράγει σταθερή ενέργεια στη μονάδα του χρόνου και λαμβάνοντας υπόψη πως οι απώλειες είναι μηδαμινές σχετικά με την αποδιδόμενη ενέργεια, αναμένουμε το σύστημα να έχει ένα σταθερό ρυθμό ανόδου της θερμοκρασίας που προφανώς θα σχετίζεται με το ρυθμό που παράγει ενέργεια η αντίσταση ισχύος. Μην ξεχνάμε και τον μαθηματικό τύπο στον οποίο βασίζεται η φυσική αυτή διεργασία, τον οποίο αναπαράγουμε για λόγους ευκολίας:

$$\Delta Q = mC \Delta T = dVC \Delta T$$

Από τη στιγμή λοιπόν που η ισχύς της αντίστασης είναι σταθερή και έχουμε θεωρήσει τις απώλειες μηδαμινές, το ποσό συνολικής ενέργειας που αλληλεπιδρά στη μάζα του αποθηκευμένου νερού είναι:

$$\Delta Q = \text{σταθ}.$$

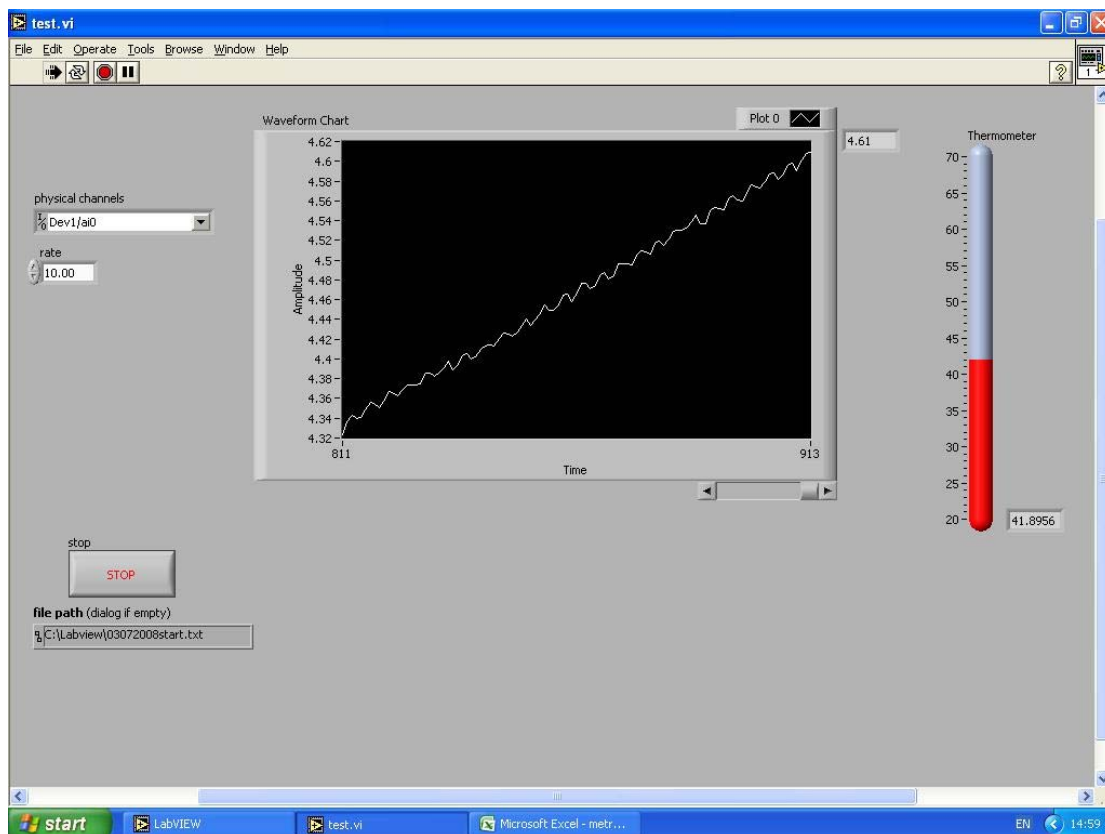
Ακόμα θυμίζουμε πως έχουμε θεωρήσει, μετά από την αντίστοιχη πειραματική ανάλυση, πως η πυκνότητα του νερού  $d$  δεν αλλάζει στο πεδίο θερμοκρασιών που πραγματεύεται το συγκεκριμένο σενάριο.

Επομένως, συνδυάζοντας τα παραπάνω βλέπουμε πως η μεταβολή στη θερμοκρασία του νερού αναμένεται να είναι γραμμική συνάρτηση της ισχύος που παράγει το θερμαντικό στοιχείο του θερμοσίφωνα.

## Πραγματική Διάταξη

Έχοντας ήδη περιγράψει τη πειραματική διάταξη και τον τρόπο λήψης των μετρήσεων, προχωρούμε στην αντιπαράθεση των πειραματικών μετρήσεων του πραγματικού συστήματος έχοντας μετρήσει το νερό του δικτύου στη θερμοκρασία των 30°C.

Κατά την ανύψωση της θερμοκρασιακής στάθμης παρατηρήσαμε πως όντως, όπως ήταν φυσικό, ο ρυθμός αύξησης της μετρούμενης θερμοκρασίας είναι σχετικά σταθερός και ανεξάρτητος της εκάστοτε τρέχουσας θερμοκρασίας, με ένα στιγμιότυπο της διαδικασίας να παρουσιάζεται παρακάτω (Εικόνα 10). Αυτό επιβεβαιώνει το γεγονός πως οποιεσδήποτε απώλειες είναι αμελητέες συγκρινόμενες με την ενέργεια που εκλύει η αντίσταση ισχύος.



Εικόνα 10. Τυχαίο δείγμα κατά την ανύψωση από 30 σε 50°C του μοντέλου στο LabView

Ως τελικό αποτέλεσμα από το συγκεκριμένο στάδιο λειτουργίας του θερμοσίφωνα, λάβαμε ως συνολικό χρόνο επίτευξης της θερμοκρασίας των 50°C :

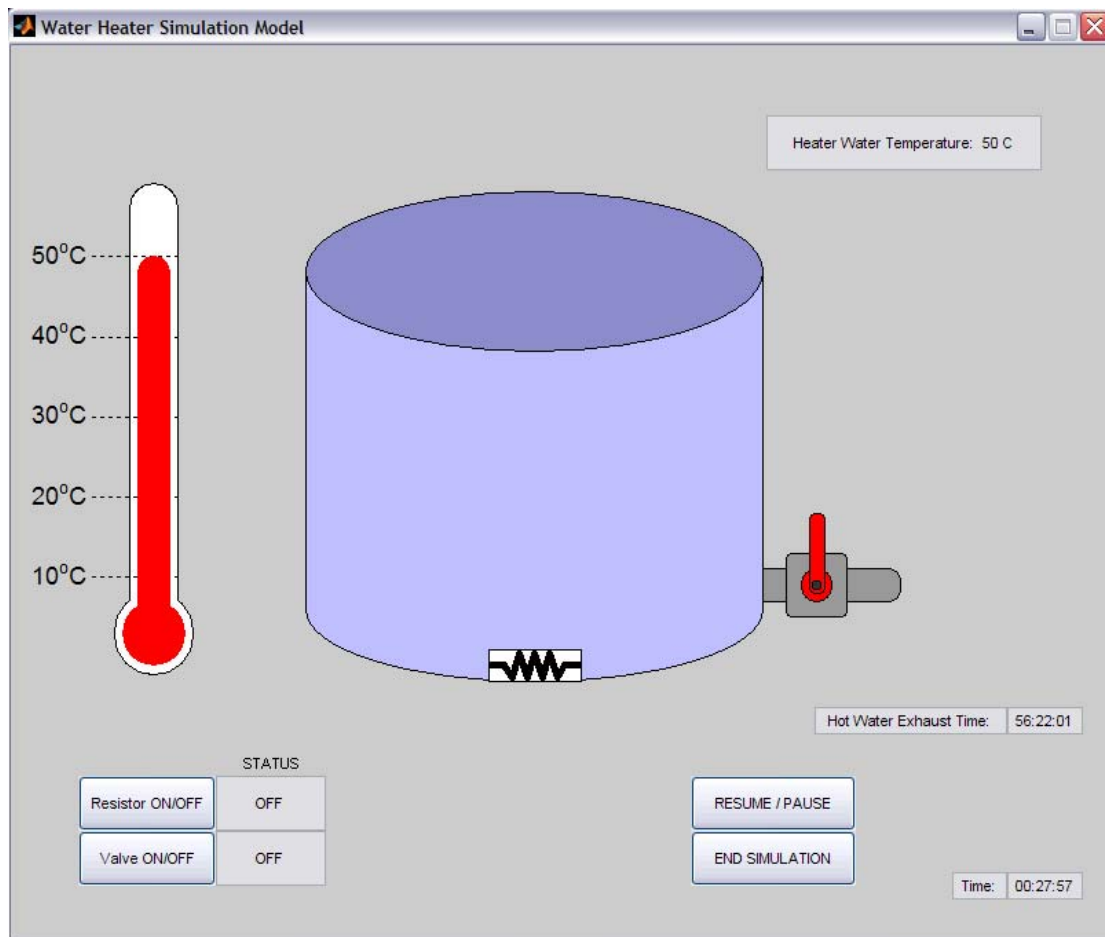
$$T_{real}^{up} = 27': 20''$$

## Μοντέλο Εξομοίωσης

Ας δούμε πως συμπεριφέρεται σε αυτό το στάδιο λειτουργίας η μοντελοποιημένη διάταξη. Θυμίζουμε πως μετρήσαμε την πραγματική θερμοκρασία του νερού και την βρήκαμε ίση με 30oC, επομένως αυτή θα θεωρήσουμε πως είναι η θερμοκρασιακή αφετηρία της εξομοίωσης με τελικό στόχο τους 50oC.

Εκτελούμε λοιπόν την εξομοίωση με αρχική θερμοκρασίας τους 30oC και ως αποτέλεσμα έχουμε, όπως φαίνεται και από στο Στιγμιότυπο εξομοίωσης 1 που φαίνεται παρακάτω, το αποθηκευμένο νερό να φτάνει τους 50oC μετά από χρόνο:

$$T_{sim}^{up} = 27':57''$$



Εικόνα 11: Επίτευξη 50°C με αφετηρία τους 30°C

### Σημειώσεις - Παρατηρήσεις:

Αυτό που παρατηρήθηκε από την πειραματική εμπειρία είναι πως η θερμοκρασία που μετρήθηκε μέσω της διάταξης του θερμίστορ είχε μια μικρή υπερπήδηση κοντά στην περιοχή των 50°C. Πιο συγκεκριμένα, θέτοντας ως δείκτη της θερμοκρασιακής κατάστασης της δεξαμενής τη διάταξή μας, περιμέναμε έως ότου αυτή μας δώσει μέτρηση θερμοκρασίας ίση με 50°C και έπειτα προχωρήσαμε στη σβέση της αντίστασης ισχύος. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν μετά τη σβέση της αντίστασης, η θερμοκρασία συνέχισε να ανεβαίνει. Τελικά η μέγιστη τιμή που επετεύχθη μετά από λίγα λεπτά (2-2.5 λεπτά μεταξύ των διαφόρων επαναλήψεων που εκτελέσαμε) ήταν οι 51°C.

Αυτό μας δίνει την πληροφορία πως η θερμότητα που εκπέμπει η αντίσταση ισχύος δεν διαδίδεται στιγμιαία μεταξύ αντίστασης-νερού, αλλά –επιπρόσθετα- ούτε μεταξύ νερού και τοιχώματος της δεξαμενής, στο οποίο έχουμε προσαρτήσει τον αισθητήρα μας. Αποτέλεσμα είναι να έχουμε μια μικρή καθυστέρηση μεταξύ πραγματικής και μετρούμενης θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται στην έμφυτη αδράνεια των φυσικών υλών και έχει ως αποτέλεσμα την μη απότομη μεταβολή κάποιων μακροσκοπικών μεγεθών. Επομένως ως παρατήρηση αναφέρουμε πως, ενώ η ισχύς της αντίστασης που χρησιμοποιείται θεωρείται ιδανική για τη γρήγορη θέρμανση μεγάλων ποσοτήτων νερού σαν και αυτή της δεξαμενής, εντούτοις στην περίπτωση που θέλουμε να κάνουμε λεπτομερείς μετρήσεις ή σε μια επόμενη φάση να εφαρμόσουμε αυτόματο έλεγχο, απλές μεθοδολογίες όπως άνοιγμα/σβέση της αντίστασης με απλή τροφοδότηση της μετρούμενης θερμοκρασίας πάντα θα εισάγουν παράγοντες υπερπήδησης από την επιθυμητή συμπεριφορά. Επομένως, στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει ο λεπτομερής έλεγχος, θα πρέπει να καταφύγουμε σε πιο εκλεπτυσμένες μεθόδους (στην πιο απλή περίπτωση σε PID έλεγχο).

### 7.1.2 Β' ΣΕΝΑΡΙΟ: Πτώση θερμοκρασίας χωρίς απόρριψη ζεστού νερού

Στο στάδιο αυτό και έχοντας επιτευχθεί θερμοκρασία 50°C, αφήνουμε το θερμοσίφωνα και το μοντέλο στο έλεος των απωλειών. Δεν επιτρέπουμε οποιαδήποτε άλλη μεταβολή, όπως την ενεργοποίηση της αντίστασης ισχύος ή το άνοιγμα της βαλβίδας παροχής ζεστού νερού.

Στόχος είναι η διερεύνηση του κατά πόσο οι θεωρητικές θερμικές απώλειες ανταποκρίνονται σε αυτές που συμβαίνουν στην πραγματικότητα. Αυτό που περιμένουμε, σε περίπτωση μη ταύτισης, να παρατηρήσουμε είναι της πραγματικές απώλειες να είναι μεγαλύτερες από τις θεωρητικές και επομένως ποσοτικά να δούμε το χρόνο που χρειάζεται το μοντέλο μας για να πέσει από τους 50 στους 40 °C να είναι μεγαλύτερο από το χρόνο στον οποίο συμβαίνει η ίδια μεταβολή στον πραγματικό θερμοσίφωνα.

#### **Πραγματική Διάταξη**

Ανεβάζουμε τη θερμοκρασία στους 50 °C με τη βοήθεια της αντίστασης ισχύος και έπειτα την απενεργοποιούμε. Το σύστημα πλέον αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του και μόνο με το περιβάλλον. Έχουμε τοποθετήσει και ένα εξωτερικό θερμόμετρο χώρου στο χώρο στον οποίο βρίσκεται ο θερμοσίφοντας ώστε να έχουμε ενδείξεις όσον αφορά την εξωτερική θερμοκρασία.

Τελικά η πολυπόθητη θερμοκρασία των 40 °C στο πραγματικό σύστημα επιτυγχάνεται μετά την παρέλευση περίπου χρόνου

$$T_{real}^{freefall} \approx 32h45 \text{ min}$$

Ο ακριβής χρόνος δεν μπορεί να εξευρεθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια διότι ο καθορισμός της ακριβούς στιγμής που το σύστημα βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία δεν είναι εύκολο να βρεθεί. Αυτό οφείλεται στο ότι η μεταβολή στην μονάδα του χρόνου είναι, όπως μπορούμε να καταλάβουμε από το εύρος του παραπάνω χρόνου, μηδαμινή και επομένως πότε ακριβώς πέφτει η θερμοκρασία από τους 40.11 στους 40.09 °C είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστεί.

## Μοντέλο Εξομοίωσης

Εκτελούμε την ίδια διαδικασία και με τον μοντέλο μας στο Matlab. Θυμίζουμε πως στο συγκεκριμένο μοντέλο έχουμε λάβει πρόνοια μόνο για τις απώλειες από την ίδια τη δεξαμενή μέσω της μονωτικής πολυουρεθάνης, με την σταθερά μονώσεως που μας έδωσε ο κατασκευαστής.

Ο χρόνος που χρειάζεται το μοντέλο μας για να πέσει από τους 50 °C στους 40 °C ανέρχεται στον αξιοσημειώτο θεωρητικό χρόνο :

$$T_{sim}^{freefall} = 72h07 \text{ min}$$

Δυστυχώς και για λόγους εξοικονόμησης χρόνου, έπρεπε να εκτελέσουμε την εξομοίωση χωρίς την παρουσία του γραφικού περιβάλλοντος, ώστε να μπορούμε να την κάνουμε σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο λείπει η αντίστοιχη εικόνα από αυτό το σημείο.

### Παρατηρήσεις:

Η θερμοκρασία του δωματίου στο οποίο βρίσκεται ο θερμοσίφωνα δεν μας απασχολεί για την εκτέλεση του πραγματικού πειράματος. Για τις ανάγκες όμως της εξομοίωσης και για να έχουμε συνθήκες πλησιέστερα στην αληθινές χρειαζόμαστε την θερμοκρασία αυτή του δωματίου. Αυτή βρέθηκε μέσω του ανεξάρτητου θερμομέτρου δωματίου το οποίο τοποθετήσαμε στο χώρο του θερμοσίφωνα.

Συγκεκριμένα, το εν λόγω θερμόμετρο είναι εφοδιασμένο με μνήμη, στην οποία είναι δυνατή η αποθήκευση της μέγιστης και ελάχιστης μετρούμενης θερμοκρασίας. Στην περίπτωση μας, αυτές οι δύο θέσεις μνήμης βρέθηκαν να έχουν τις τιμές 31.6 και 29.1 °C. Έτσι, παρότι είναι απλούστευση και δεν ισχύει στο ακέραιο η συνθήκη αυτή, θεωρήσαμε πως η εξωτερική θερμοκρασία που επικρατούσε κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν ο μέσος όρος των δύο ακραίων αυτών θερμοκρασιών, δηλαδή η θερμοκρασία 30.3 °C.

Ο λόγος που αυτή η θερμοκρασία προκύπτει από απλούστευση είναι προφανώς επειδή δε γνωρίζουμε τις ώρες για τις οποίες διατηρήθηκαν οι ακραίες θερμοκρασίες, ούτε τη συμβαίνει με τις ενδιάμεσες τους.



### 7.1.3 Γ' ΣΕΝΑΡΙΟ: Πτώση θερμοκρασίας με απόρριψη μέρους του αποθηκευμένου νερού

Στο συγκεκριμένο πειραματικό στάδιο και έχοντας προθερμάνει το νερό της δεξαμενής στους 50°C, θέλουμε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά των δύο συστημάτων, πραγματικού και εικονικού, στην περίπτωση που έχουμε απόρριψη ζεστού νερού από τη δεξαμενή με άμεσο αποτέλεσμα την πλήρωση της απορριπτόμενης μάζας από ισόποση μάζα κρύου νερού.

Σκοπός μας είναι να δούμε αν παρατηρείται ο ίδιος ρυθμός πτώσης της θερμοκρασίας και στα δύο συστήματα, παρά το γεγονός ότι το ένα βασίζεται ουσιαστικά μόνο στη θεωρία ανάμιξης δύο μαζών υγρού με διαφορετικές θερμοκρασίες η καθεμία, ενώ το δεύτερο σύστημα εμπεριέχει όλες τις πιθανές απροσδιοριστίες και μη γραμμικότητες που διακρίνουν οποιοδήποτε φυσικό σύστημα. Προφανώς οι απώλειες θερμότητας είναι αμελητέες σε σχέση με την απότομη μεταβολή που επιφέρει η έξοδος μιας μάζας ζεστού νερού και η πλήρωση του κενού αυτού από μια κρύα μάζα νερού, για αυτό και δε θα μας απασχολήσουν.

Για να έχουμε ένα κοινό παρονομαστή στην πραγματοποίηση των δύο διαδικασιών, εκτελούμε πρώτα το πείραμα με τον πραγματικό θερμοσίφωνα, έχοντας ήδη θερμάνει το νερό στους 50 °C. Ανοίγουμε το διακόπτη εξόδου ζεστού νερού ώστε να έχουμε μια σταθερή ροή εξόδου την οποία μετράμε έχοντας ένα δοχείο γνωστής χωρητικότητας και μετρώντας το χρόνο που θα χρειαστεί για να το γεμίσουμε με την παρούσα ροή. Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε την εκτίμηση αυτή της ροής εξόδου για να την τροφοδοτήσουμε το μοντέλο μας ως σταθερή πλέον ροή εξόδου.

Ο λόγος που χρησιμοποιούμε αυτή την εκτίμηση και όχι το νόμο Hagen-Poiseuille για τον υπολογισμό της ροής εξόδου είναι, όπως έχουμε αναφέρει και στο κομμάτι πριν την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων, το γεγονός ότι δεν έχουμε τις πλήρεις προδιαγραφές του δικτύου που μεσολαβεί μεταξύ εξόδου του θερμοσίφωνα και ορατής σε εμάς εξόδου στο νιπτήρα, καθώς και το γεγονός ότι δεν γνωρίζουμε ούτε την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το δίκτυο, ούτε μπορούμε λόγω της αναλογικότητας του διακόπτη εξόδου στο νιπτήρα να έχουμε απόλυτο έλεγχο της ροής.

Μετράμε λοιπόν το χρόνο που αρκεί ώστε να γεμίσουμε ένα δοχείο χωρητικότητας 500ml με ζεστό νερό και βρίσκουμε πως χονδρικά απαιτήθηκαν 5sec. Αυτό σημαίνει πως είχαμε ροή περίπου:

$$\Phi = 0.1 \frac{lt}{sec} = 10^{-4} \frac{m^3}{sec}$$

## Πραγματική Διάταξη

Παρατηρούμε λοιπόν, έχοντας την παραπάνω ροή εξόδου ζεστού νερού, την ένδειξη της θερμομετρικής διάταξής μας και παρατηρούμε πως η ένδειξη φτάνει στην θερμοκρασία των 40 °C μετά την παρέλευση μόλις χρόνου:

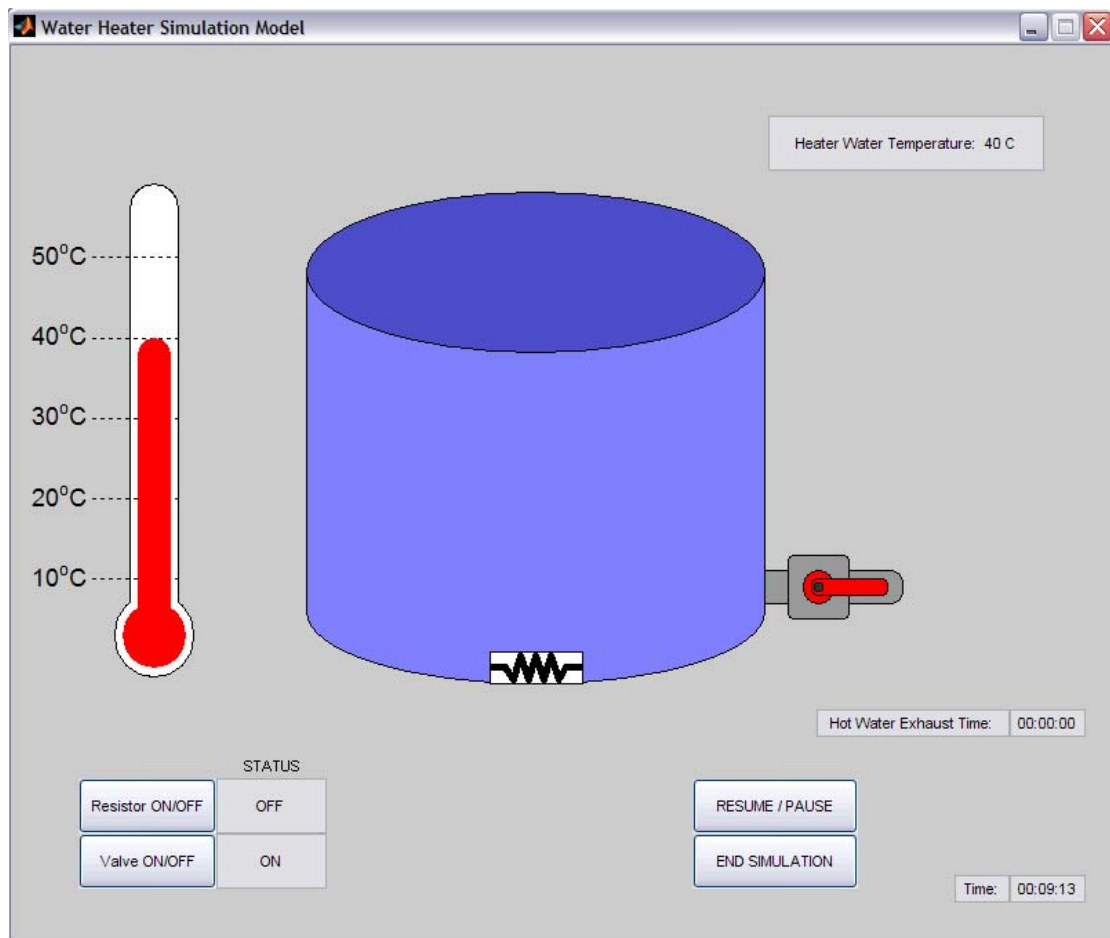
$$T_{real}^{purgedown} \approx 1 \text{ min } 30 \text{ sec}$$

## Μοντέλο Εξομοίωσης

Στην περίπτωση του μοντέλου μας, ο χρόνος που απαιτήθηκε για να πέσει η θερμοκρασία από τους 50 στους 40 °C βρέθηκε ίση με

$$T_{sim}^{purgedown} \approx 9 \text{ min } 13 \text{ sec}$$

Όπως διαφαίνεται και στην εικόνα



Εικόνα 12. Επίτευξη 40 °C ξεκινώντας από τους 50 με παράλληλη απώλεια νερού

## 7.2 Σύγκριση πραγματικής διάταξης – μοντέλου

### 7.2.1 Α' ΣΕΝΑΡΙΟ: Θέρμανση του αποθηκευμένου νερού

Όπως μπορούμε να δούμε, τα δύο συστήματα ανταποκρίνονται όμοια αναφορικά με το χρόνο που χρειάζονται αμφότερα για να καλύψουν το χάσμα 20 θερμοκρασιακών βαθμών (30-50°C). Με βάση αυτή την παρατήρηση μπορούμε να πούμε πως στο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό (δηλαδή τη μεταβολή και τον καθορισμό της θερμοκρασίας εντός της δεξαμενής κατά την συνεχή ανύψωση της μέσω της λειτουργίας της αντίστασης ισχύος) το μοντέλο μας αντικατοπτρίζει τη φυσική διεργασία επιτυχώς.

### 7.2.2 Β' ΣΕΝΑΡΙΟ: Πτώση θερμοκρασίας χωρίς απόρριψη ζεστού νερού

Είναι εμφανές από τους χρόνους που υπολογίστηκαν για τα δύο μοντέλα, πως έχουμε μια μεγάλη διαφοροποίηση όσον αφορά το μέγεθος των απωλειών που συμβαίνουν στην πραγματικότητα με αυτές που θεωρητικά είχαμε εισάγει στο μοντέλο μας. Το πόρισμα αυτό ήταν σχετικά αναμενόμενο και η εξήγηση προκύπτει σχετικά αβίαστα.

Αυτό που δεν εισάγαμε στο μοντέλο είναι οι θερμικές απώλειες που παρατηρούνται λόγω της σύνδεσης των αγωγών του δικτύου στο θερμοσίφωνα. Δε θα πρέπει να ξεχνάμε πως το νερό του θερμοσίφωνα δεν είναι θερμικά μονωμένο από το νερό που κυλάει στις σωληνώσεις και ούτε θα μπορούσε να είναι. Έτσι είναι λογική μια ανταλλαγή θερμότητας προς το νερό του βρίσκεται εκτός του θερμοσίφωνα, εκεί που διαμορφώνεται μια εντελώς διαφορετική κατάσταση, μονωτικά.

Συγκεκριμένα, στις σωληνώσεις δεν υπάρχει μόνωση κανενός είδους και επομένως το μόνο πράγμα που χωρίζει το ζεστό νερό και το εξωτερικό περιβάλλον είναι το μέταλλο της σωλήνωσης των οποίων είναι καλός αγωγός της θερμότητας. Επομένως οι απώλειες στους σωλήνες μεταφοράς ζεστού νερού είναι σαφώς υπολογίσιμοι και σαφώς ανάλογοι του συνολικού μήκους των σωληνώσεων καθώς και του υλικού που τους περιβάλλει, όταν κάτι τέτοιο υφίσταται π.χ. όταν βρίσκονται εντός των τοιχωμάτων.

Δυστυχώς στην περίπτωσή μας, όπως σημειώθηκε και παραπάνω, δεν μπορέσαμε να έχουμε καμία προσέγγιση του συστήματος αγωγών που μεταφέρει το ζεστό νερό, και επομένως μια μοντελοποίηση τέτοιου είδους κρίθηκε ανέφικτη.

Ακόμη, αυτό που συμβαίνει και εξηγεί ως ένα βαθμό επιπλέον αυτή την απόκλιση στο ρυθμό απωλειών είναι πως η μόνωση που χρησιμοποιείται στον

θερμοσίφωνα, έχει ενδιάμεσους χρόνους ζωής. Με τον όρο αυτό εννοούμε πως η πολυουρεθάνη μπορεί να έρχεται εφοδιασμένη με μια υψηλή σταθερά μόνωσης, ο χρόνος όμως μεταβάλλει αυτή τη σταθερά, μειώνοντάς την με την πάροδο του. Έτσι η πολυουρεθάνη που έχει αρχική σταθερά :

$$R_{\text{value}} = 8 \frac{ft^2 \cdot hr \cdot ^\circ F}{Btu} \text{ ανά ίντσα πάχους}$$

μπορεί με την πάροδο του χρόνου να μεταβάλλει αυτή τη σταθερά έως και την τιμή

$$R'_{\text{value}} = 2 \frac{ft^2 \cdot hr \cdot ^\circ F}{Btu} \text{ ανά ίντσα πάχους}$$

Δυστυχώς δεν υπάρχει κάποιος μαθηματικός τύπος που να εκφράζει αυτή τη μείωση της σταθεράς μόνωσης της πολυουρεθάνης με το χρόνο και επομένως ούτε και αυτή μπορούμε να μοντελοποιήσουμε για χρήση στο μοντέλο μας.

### 7.2.3 Γ' ΣΕΝΑΡΙΟ: Πτώση θερμοκρασίας με απόρριψη μέρους του αποθηκευμένου νερού

Σε αυτό το πειραματικό κομμάτι δεν περιμέναμε να έχουμε τέτοιο βαθμό απόκλισης μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών εξαγόμενων από το μοντέλο.

Αυτό που μπορούμε να υποθέσουμε, αναφορικά και με τον τρόπο εκτέλεσης του πειράματος είναι πως για κάποιο λόγο το τοίχωμα του θερμοσίφωνα στο οποίο έχουμε προσαρτήσει τον αισθητήρα είναι πιο ευαίσθητο στην εισαγωγή του κρύου νερού κατά την αναπλήρωση του ζεστού νερού, όταν αυτή γίνεται συνεχόμενα.

Επομένως θα προχωρήσουμε σε ένα δεύτερο πείραμα για να εξακριβώσουμε τι ακριβώς συμβαίνει.

#### 7.2.3.A Επιπλέον πείραμα για το Γ' Σενάριο

Αυτό που θα κάνουμε είναι να ζεστάνουμε το θερμοσίφωνα σε μια θερμοκρασία πάνω από τους 40 °C, να αφαιρέσουμε μια γνωστή συγκεκριμένη ποσότητα ζεστού νερού από τη δεξαμενή, να αφήσουμε ικανοποιητικό χρόνο ώστε να

επανέλθει θερμική ισορροπία και να δούμε τι θερμοκρασία έχουμε στο τέλος αυτής της διαδικασίας.

Ζεσταίνουμε το νερό και αυτό μετά από ώρα μετράται σε θερμοκρασία

$$T_{start} = 46.6^{\circ} C$$

ενώ αντίστοιχη μέτρηση του κρύου νερού μας δίνει

$$T_{cold} = 30^{\circ} C$$

Στη συνέχεια αφαιρούμε συγκεκριμένο όγκο νερού χρησιμοποιώντας ένα δοχείο γνωστής χωρητικότητας. Ο όγκος που αφαιρούμε συνολικά είναι ίσος με

$$V_{water\_out} = 23lt$$

Αφήνουμε το θερμοσίφωνα 2 ώρες ώστε να έχει αρκετό χρόνο να ισορροπήσει και έπειτα βλέπουμε και πάλι την ένδειξη του θερμομέτρου μας, το οποίο αυτή τη φορά δείχνει:

$$T_{end} = 37.3^{\circ} C$$

Από τον τύπο μίξης υγρών μαζών με διαφορετικές θερμοκρασίες υπολογίζουμε πόσο είναι η θεωρητική τιμή που θα περιμέναμε να βρούμε:

$$T'_{end} = \frac{(V_{total} - V_{water\_out}) \cdot T_{start} + V_{water\_out} \cdot T_{cold}}{V_{total}}$$

από όπου και προκύπτει ότι:

$$T'_{end} = 41.8^{\circ} C$$

Παρατηρούμε πως τα δεδομένα είναι αντιφατικά ακόμη και όταν εμπλέκουμε απλώς τη μαθηματική σχέση της μίξης. Επομένως δεν είναι κάποιο λάθος του μοντέλου. Επίσης η θερμομετρική διάταξή μας έχει επιβεβαιωθεί για την ορθότητα των μετρήσεων επομένως το πρόβλημα εντοπίζεται κάπου αλλού. Ο λόγος για το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε εντοπίζεται στη θέση του αισθητήρα καθώς και στον τρόπο λειτουργίας του θερμοσίφωνα.

Συγκεκριμένα, κατά τη λειτουργία του θερμοσίφωνα, όπως αναπτύξαμε και στη θεωρητική ανάλυση, οι ζεστές μάζες του νερού μετακινούνται προς τα ψηλά επίπεδα της δεξαμενής και δίνουν τη θέση τους στις ψυχρότερες μάζες. Αυτό δε δημιουργεί κάποιο πρόβλημα κατά τη θέρμανση του όγκου του νερού. Το ζήτημα

είναι τί γίνεται στην περίπτωση που έχουμε απώλεια ζεστού νερού και την αναπλήρωσή του από ίση ποσότητα κρύου.

Ο θερμοσίφοντας είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε το κρύο νερό να εισέρχεται από την κάτω πλευρά του. Η έξοδος του ζεστού είναι και αυτή φαινομενικά από την ίδια πλευρά, το γεγονός όμως είναι πως εσωτερικά η έξοδος της δεξαμενής βρίσκεται στο πάνω μέρος. Έτσι, όταν ανοίγουμε το διακόπτη του ζεστού νερού, η ζεστή μάζα που εξέρχεται λαμβάνεται από τα ανώτερα επίπεδα της δεξαμενής, ενώ το κρύο νερό που έρχεται να αναπληρώσει αυτή την απώλεια, εισέρχεται από την κάτω πλευρά.

Το ζήτημα έγκειται λοιπόν στο εάν και κατά πόσο γίνεται εσωτερική ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ της ήδη ζεστής μάζας και της νεοεισελθούσας κρύας μάζας νερού. Το γεγονός παραμένει ότι το ζεστό επικάθεται του κρύου και πως με τον τρόπο που λειτουργεί ο θερμοσίφοντας το κρύο πάντα μπαίνει κάτω από το ζεστό. Επομένως θέμα μίξης ζεστού με κρύο νερό δεν υπάρχει. Το μόνο θέμα που υπάρχει είναι στην τοπική ανταλλαγή θερμότητας του κρύου νερού με την ποσότητα του ζεστού που βρίσκεται σχετικά κοντά του.

Από την ίδια σχέση που υπολογίσαμε το  $T'_{end}$  παραπάνω βλέπουμε πως για να έχουμε ως αποτέλεσμα την θερμοκρασία  $T_{end}$  θα έπρεπε να έχουμε συνολικό όγκο

$$V_{total} = 41.05lt$$

Επίσης ρόλο παίζει και η θέση του αισθητήρα μας. Το γεγονός ότι είναι περίπου στη μέση του συνολικού ύψους σημαίνει ότι βρίσκεται κοντά στο επίπεδο στο οποίο έχει γίνει η μίξη ζεστού με κρύο, για αυτό το λόγο και έχει επηρεαστεί τόσο πολύ. Αν η θέση του ήταν παραπάνω ή παρακάτω, η ένδειξη που θα είχαμε θα διέφερε.

### 7.3 ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ

#### Απώλειες

Σε πρώτη φάση θέλουμε να βελτιώσουμε το θέμα υπολογισμού των θερμικών απωλειών που αναδείχθηκε με την εκτέλεση του Β' Σεναρίου των πειραματικών μετρήσεων.

Ελλείπει άλλων εναλλακτικών, είμαστε αναγκασμένοι να μεταβάλλουμε τη σταθερά μόνωσης της πολυουρεθάνης εμπειρικά ώστε να επιτύχουμε καλύτερη προσέγγιση στο ρυθμό απώλειας θερμότητας.

Έτσι μια ικανοποιητική τιμή για την τιμή της σταθεράς μόνωσης που μας δίνει καλά αποτελέσματα συγκριτικά πάντα με το πραγματικό σύστημα για το συγκεκριμένο πεδίο θερμοκρασιών είναι η:

$$R_{\text{value}} = 1,37 \frac{m^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ F}{J}$$

#### Πρόβλημα της μίξης

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα, και λόγω έλλειψης του απαιτούμενου χρόνου διερεύνησης του θέματος, απλώς προσθέσαμε μια σταθερά στο μοντέλο μας η οποία αντισταθμίζει αυτή τη διαφοροποίηση στην τιμή της θερμοκρασίας.

## 7.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο κομμάτι αυτό θα κάνουμε μια μικρή αναφορά σε κάποιες βελτιώσεις που μπορούμε να σκεφτούμε, ώστε να βελτιωθούν κάποια στοιχεία από το σύνολο του αντικειμένου της εργασίας.

### Γενικές προτάσεις

Έτσι, σε πρώτη ανάλυση, και δεδομένης της διαφοροποίησης που είχαμε μεταξύ πραγματικών και θεωρητικών απωλειών, προτείνεται, γενικότερα σε πρακτικό επίπεδο, η χρήση μόνωσης στις σωληνώσεις μεταφοράς ζεστού νερού όσο περισσότερο καθίσταται αυτό δυνατό από τη διαμόρφωση της κατασκευής. Παρατηρήθηκε, όπως είδαμε, πως τελικά οι απώλειες στις σωληνώσεις είναι τέτοιας τάξης μεγέθους ώστε γίνονται συγκρίσιμες με τις απώλειες του θερμοσίφωνα. Για τον λόγο αυτό συστήνεται η επιλογή κατάλληλων εμπορικών υλικών που χρησιμεύουν στη μόνωση των σωληνώσεων για εξοικονόμηση ενέργειας.

### Προτάσεις βελτίωσης της πειραματικής διαδικασίας

Κατά την πειραματική διαδικασία είδαμε πως η θέση στην οποία τοποθετούμε τον αισθητήρα στο θερμοσίφωνα παίζει πολύ μεγάλο ρόλο. Επομένως θα ήταν ενδιαφέρον αν μπορούσαμε να δούμε τη συμπεριφορά του συστήματος και από άλλες οπτικές γωνίες, τοποθετώντας τον σε διαφορετικές θέσεις, ακόμη και (γιατί όχι) μέσα στην ίδια τη δεξαμενή.

### Προτάσεις βελτίωσης του μοντέλου

Το μοντέλο βλέπουμε πως δεν μπορεί να παρακολουθήσει ακριβώς την ένδειξη του θερμομέτρου διότι το νερό εντός της δεξαμενής δεν είναι ομογενές θερμοκρασιακά. Αυτό δεν μπορεί να λυθεί με μαθηματικό τρόπο. Αυτό που μπορεί να γίνει είναι να βρεθεί μια συνάρτηση, η οποία θα μας δίνει, συναρτήσει του ύψους της δεξαμενής, τη θερμοκρασία που επικρατεί εκεί έστω και ως συνάρτηση και του χρόνου. Έτσι, παρά την θέση στην οποία μπορεί να τοποθετήσουμε τον αισθητήρα μας, το μοντέλο με μια μικρή αλλαγή μιας μεταβλητής να μπορεί να παρακολουθήσει εύστοχα την ένδειξη του θερμομέτρου.



## ΠΗΓΕΣ

- [1] [http://www.leaningpinesoftware.com/hot\\_water\\_heater\\_tank\\_insul.shtml](http://www.leaningpinesoftware.com/hot_water_heater_tank_insul.shtml)
- [2] McCutcheon, S.C., Martin, J.L, Barnwell, T.O. Jr. 1993. Water Quality in Maidment, D.R. (Editor). Handbood of Hydrology, McGraw-Hill, New York, NY (p. 11.3 )
- [3] [http://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity#Viscosity\\_of\\_water](http://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity#Viscosity_of_water)
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/Poiseuille's\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Poiseuille's_law)
- [5] <http://www.glacierbay.com/Heatprop.asp>