



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

**Μελέτη και Κατασκευή Ελεγκτή Θέρμανσης με Λειτουργία  
Αντιστάθμισης Εξωτερικής Θερμοκρασίας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Κουτσοκέρης Ν. Μιχαήλ

**Επιβλέπων :** Ιωάννης Ν. Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015





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

**Μελέτη και Κατασκευή Ελεγκτή Θέρμανσης με Λειτουργία  
Αντιστάθμισης Εξωτερικής Θερμοκρασίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κουτσοκέρης Ν. Μιχαήλ

**Επιβλέπων :** Ιωάννης Ν. Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015





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

**Μελέτη και Κατασκευή Ελεγκτή Θέρμανσης με Λειτουργία  
Αντιστάθμισης Εξωτερικής Θερμοκρασίας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Κουτσοκέρης Ν. Μιχαήλ

**Επιβλέπων :** Ιωάννης Ν. Αβαριτσιώτης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14<sup>η</sup> Ιουλίου 2015.

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

.....  
Κωνσταντίνος Δέρβος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Παπανάνος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....  
Μιχαήλ Ν. Κουτσοκέρης  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μιχαήλ Ν. Κουτσοκέρης, 2015.  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, 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 κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσοι με βοήθησαν κατά την εκπόνηση της. Η συμβολή τους ήταν πολύτιμη και αναγκαία για την περάτωση της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή μου κ. Ιωάννη Αβαριτσιώτη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δεχόμενος την επιλογή μου στο θέμα αυτό, αλλά και για την πολύτιμη βοήθειά του, την επίβλεψη της εργασίας και την άψογη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής.

Ευχαριστώ επίσης ιδιαίτερα τον κύριο Απόστολο Ψαρρό μέλος του Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού στον Τομέα Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής ο οποίος ήταν πάντα διαθέσιμος για να με συμβουλέψει και να με καθοδηγήσει καθώς και να επιλύσει όλες τις απορίες μου.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που με στήριξε όλα τα χρόνια της φοίτησής μου στη σχολή και μου έδωσε τη δυνατότητα να ολοκληρώσω ένα απαιτητικό πρόγραμμα σπουδών .

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου, για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση όλα αυτά τα χρόνια. Οπότε ευχαριστώ τους Κοσμά, Γιώργο, Δημήτρη, Νίκο, Σεβαστιανό, Αντώνη, Αλέξη, Αντρέα, Γιάννη, Βασίλη, Αγγελική, Κατερίνα, Λένια. Ευχαριστώ επίσης τους παιδικούς μου φίλους Παναγιώτη, Νίκο, Μιχάλη, Λιανό οι οποίοι είναι πάντα στο πλευρό μου όποτε και αν τους χρειαστώ.





## Περίληψη

Η θέρμανση των χώρων διαμονής αποτελεί βασική ανάγκη του ανθρώπου από τα πρώτα κιόλας χρόνια της εγκατάστασής του σε κατοικίες. Η ανάγκη αυτή καθώς και τα μεγάλα ποσά ενέργειας που καταναλώνονται ετησίως για το σκοπό αυτό, έχει οδηγήσει τις βιομηχανίες κατασκευής συστημάτων θέρμανσης ειδικότερα από το 1980 και μετά, στην εξεύρεση αποδοτικότερων μορφών θέρμανσης αλλά και βελτιστοποίηση του τρόπου ελέγχου και λειτουργίας τους. Επίσης τα τελευταία χρόνια οι μηχανικοί που απασχολούνται στον τομέα της θέρμανσης και του εξαερισμού-κλιματισμού κτιρίων αποτελούν ξεχωριστό κλάδο στην παγκόσμια κοινότητα (HVAC engineers).

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή ενός ελεγκτή θέρμανσης με λειτουργία αντιστάθμισης της εξωτερικής θερμοκρασίας.

Η κατασκευή αυτή θα ελέγχει μια εγκατάσταση θέρμανσης μέσω αισθητήρων θερμοκρασίας τοποθετημένων στα απαραίτητα σημεία και ενός κατάλληλα προγραμματισμένου μικροελεγκτή. Επίσης ενδείξεις των αισθητήρων, η κατάσταση λειτουργίας του συστήματος καθώς και σημαντικές παράμετροι που πρέπει να εισάγει ο χρήστης θα εμφανίζονται σε μία οθόνη.

Εφαρμόζοντας τη λειτουργία αντιστάθμισης της εξωτερικής θερμοκρασίας και χρησιμοποιώντας κάποιες προκαθορισμένες καμπύλες θέρμανσης, η θερμοκρασία προσαγωγής του νερού στα θερμαντικά σώματα ή σε ένα ενδοδαπέδιο σύστημα καθορίζεται συναρτήσει και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Η εγκατάσταση του ελεγκτή θα βελτιώσει την ενεργειακή αποδοτικότητα ενός συστήματος θέρμανσης και θα δώσει στον χρήστη τη δυνατότητα να ελέγχει αποτελεσματικότερα τις παραμέτρους λειτουργίας του.

## Λέξεις Κλειδιά

Αισθητήρας Θερμοκρασίας, Ενίσχυση Σήματος, Προγραμματισμός Μικροελεγκτή, Σύστημα Θέρμανσης, Αντιστάθμιση Εξωτερικής Θερμοκρασίας, Εξοικονόμηση Ενέργειας.



## **Abstract**

The heating of living space is a basic human need in the earliest years of his establishment in homes. This need and the large amount of energy annually consumed for this purpose has led to the construction of heating systems, particularly from 1980 onwards Industries, finding efficient forms of heating and optimize control and operation mode. Also in recent years engineers working in the heating and ventilation-air conditioning of buildings are unique in the global community sector (HVAC engineers).

The scope of this diploma thesis is the construction of a heating controller with weather compensation function.

This construction would control a heating system via temperature sensors located at appropriate points, and a suitably programmed microcontroller. Also indications of sensors, the system status and important parameters to be entered by the user will be displayed on one screen.

Applying the operation of external temperature compensation and using some predefined heating curves, the flow temperature of water in radiators or underfloor heating system depends on the ambient temperature.

The installation of the controller will improve the energy efficiency of a heating system and will grant the user the ability to effectively control the operating parameters.

## **Keywords**

Temperature Sensor, Signal Amplification, Programming Microcontroller, Heating System, Weather Compensation, Energy Saving.



# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	7
Abstract .....	9
Περιεχόμενα.....	11
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	17
1.1 Ιστορική Αναδρομή .....	17
1.2 Θερμική Άνεση .....	18
1.3 Σκοπός .....	19
1.4 Δομή .....	19
2 ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ .....	21
2.1 Εισαγωγή .....	21
2.2 Η έννοια της αντιστάθμισης.....	21
2.3 Κατανομή θερμοκρασιών και ενεργειακών απαιτήσεων κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου. ....	24
2.4 Καμπύλες Θέρμανσης .....	29
2.5 Συστήματα Ελέγχου Θερμοκρασίας Προσαγωγής Νερού .....	34
2.5.1 Έλεγχος της λειτουργίας του καυστήρα.....	35
2.5.2 Έλεγχος μέσω τρίοδης βάνας. ....	36
2.5.3 Έλεγχος μέσω τετράοδης βάνας αναμίξεως. ....	39
3 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ .....	41
3.1 Αισθητήρια Θερμοκρασίας Μεταβλητής Αντίστασης .....	41
3.1.1 Θερμίστορ .....	42
3.1.2 Αισθητήρες αντίστασης (resistance temperature detectors -RTDs).....	45
3.2 Θερμοζεύγος (thermocouple).....	50
4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ .....	53
4.1 Η Γέφυρα Wheatstone .....	53
4.2 Ρυθμιστές Τάσης .....	55
4.2.1 Εισαγωγή .....	55
4.2.2 Η σειρά L78XX της εταιρείας ST. ....	55
4.2.3 Η σειρά LM79XX. ....	59
4.3 Ενισχυτής Διαφορών (Differential Amplifier).....	61
4.4 Ενισχυτής Οργάνων (Instrumentation Amplifier) .....	62
4.4.1 Κέρδος .....	63

4.4.2	CMRR .....	64
4.4.3	Χαμηλή τάση εκτροπής και χαμηλή ολίσθηση της τάσης εκτροπής σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. ....	67
4.4.4	Χαμηλός θόρυβος.....	67
4.5	Ο τελεστικός ενισχυτής OPA2604. ....	68
4.5.1	Εισαγωγή .....	68
4.5.2	Χαρακτηριστικά του OPA2604. ....	68
5	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ.....	73
5.1	Ο μικροελεγκτής.....	73
5.1.1	Η έννοια του μικροελεγκτή. ....	73
5.1.2	Τα συστατικά μέρη ενός μικροελεγκτή.....	74
5.1.3	Ο μικροελεγκτής ATMega32A. ....	78
5.1.4	Χαρακτηριστικά των μικροελεγκτών AVR της Atmel. ....	80
5.1.5	Η μονάδα του μετατροπέα τάσης (ADC).....	81
5.2	Η Οθόνη LCD.....	82
5.3	Ο Κώδικας.....	84
6	ΣΧΗΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.....	93
6.1	Σχηματικά διαγράμματα .....	93
6.1.1	Πλήρες σχηματικό διάγραμμα .....	93
6.1.2	Σχηματικό διάγραμμα του ενισχυτή οργάνων .....	94
6.2	Προσομοιώσεις .....	95
6.2.1	Προσομοιώσεις τάσεων εξόδου.....	95
6.2.2	Προσομοιώσεις στον αισθητήρα Pt100.....	98
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	101
7.1	Συμπεράσματα .....	101
7.2	Προοπτικές .....	101
8	Βιβλιογραφία.....	103

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχ. 1.1 Το “Υπόκαυστον” όπως ονομαζόταν, σύστημα θέρμανσης στην Αρχαία Ρώμη. ....	17
Σχ. 2.1: Διακύμανση θερμοκρασίας δωματίου, με και χωρίς τη χρήση αντιστάθμισης. ....	22
Σχ. 2.2: Μελέτη Θερμικών Απωλειών κτιρίου. [2] .....	24
Σχ. 2.3: Μεταβολή θερμικών απωλειών κτιρίου συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας. [2] .....	25
Σχ. 2.4: Κατανομή θερμοκρασιών χειμώνα κλιματικής ζώνης Β. [2] .....	26
Σχ. 2.5: Απαιτούμενη θερμική ισχύς συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας. [2] .....	27
Σχ. 2.6: Κατανομή ενεργειακών αναγκών θέρμανσης συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας σε kWh. [2] .....	28
Σχ. 2.7: Βαθμός απόδοσης λεβήτων στο μερικό φορτίο. [2] .....	29
Σχ. 2.8: Καμπύλες Θέρμανσης.....	34
Σχ. 2.9: Έλεγχος της λειτουργίας του καυστήρα. ....	35
Σχ. 2.10: Έλεγχος παροχής μέσω τρίοδης βάνας. ....	36
Σχ. 2.11: Λειτουργία τρίοδης για έλεγχο παροχής.....	37
Σχ. 2.12: Έλεγχος θερμοκρασίας μέσω τρίοδης βάνας. ....	38
Σχ. 2.13: Λειτουργία τρίοδης για έλεγχο θερμοκρασίας. ....	38
Σχ. 2.14: Έλεγχος θερμοκρασίας μέσω τετράοδης βάνας. ....	39
Σχ. 2.15: : Λειτουργία τετράοδης βάνας για έλεγχο θερμοκρασίας.....	39
Σχ. 3.1: Καμπύλες μεταβολής της αντίστασης διαφόρων υλικών. ....	41
Σχ. 3.2: Φαινόμενο Αυτοθέρμανσης. ....	42
Σχ. 3.3: Χαρακτηριστικές καμπύλες PTC και NTC θερμίστορ και RTD. ....	43
Σχ. 3.4: Μεταβολή της ωμικής αντίστασης διάφορων μετάλλων συναρτήσει της θερμοκρασίας. [3] .....	45
Σχ. 3.5: Σύνδεση μέσω δύο αγωγών. ....	48
Σχ. 3.6: Σύνδεση μέσω τριών αγωγών.....	48
Σχ. 3.7: Ο αισθητήρας Pt100 τριών αγωγών. ....	49
Σχ. 3.8: Χρωματικός κώδικας ακροδεκτών του αισθητήρα Pt100 τριών αγωγών.....	49
Σχ. 4.1: Η γέφυρα Wheatstone.....	53
Σχ. 4.2: Ρυθμιστής Τάσης L7805CV της εταιρίας ST. [6] .....	55
Σχ. 4.3: Σχηματικό διάγραμμα ρυθμιστή τάσης. [6] .....	56
Σχ. 4.4: Τοπολογία ακροδεκτών του ρυθμιστή τάσης. [6] .....	56
Σχ. 4.5: Συνδεσμολογία πυκνωτών. [6] .....	57
Σχ. 4.6: Ο ρυθμιστής τάσης LM7909 της εταιρείας Fairchild Semiconductor. [7] .....	59
Σχ. 4.7: Σχηματικό διάγραμμα του ρυθμιστή LM7909. [7] .....	59
Σχ. 4.8: Ο ενισχυτής διαφορών. ....	61
Σχ. 4.9: Κλασσικό κύκλωμα Ενισχυτή Οργάνων Μέτρησης (Instrumentation Amplifier, IA)..	62
Σχ. 4.10: Ανάλυση της επίδρασης των αντιστάσεων ανάδρασης του δεύτερου σταδίου στο CMRR. ....	66
Σχ. 4.11: Ο τελεστικός ενισχυτής OPA2604 της εταιρείας Burr-Brown. [9] .....	68
Σχ. 4.12: Σχηματικό διάγραμμα του OPA2604. [9].....	69
Σχ. 4.13: Οι ακροδέκτες του τελεστικού ενισχυτή OPA2604. [9].....	70
Σχ. 5.1: Τυπικό διάγραμμα ενός μικροελεγκτή. ....	77
Σχ. 5.2: Ο μικροελεγκτής AtMega32A. [11] .....	78

Σχ. 5.3: Οι ακροδέκτες του ATmega32A. [11] .....	80
Σχ. 5.4: ADC (Analog to Digital Converter). .....	81
Σχ. 5.5: Η οθόνη Winstar wh1602b. [12].....	82
Σχ. 6.1: Το πλήρες σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας. ....	93
Σχ. 6.2: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του αισθητήρα.....	94
Σχ. 6.3: Τάση εξόδου της γέφυρας Wheatstone. ....	95
Σχ. 6.4: Τάση εξόδου μετά το πρώτο στάδιο ενίσχυσης του ενισχυτή οργάνων.....	96
Σχ. 6.5: Τάση εξόδου μετά το δεύτερο στάδιο ενίσχυσης του ενισχυτή οργάνων.....	97
Σχ. 6.6: Ρεύμα που διαρρέει τον αισθητήρα θερμοκρασίας. ....	98
Σχ. 6.7: Ισχύς που καταναλώνεται στον αισθητήρα θερμοκρασίας. ....	99



## Κατάλογος Πινάκων

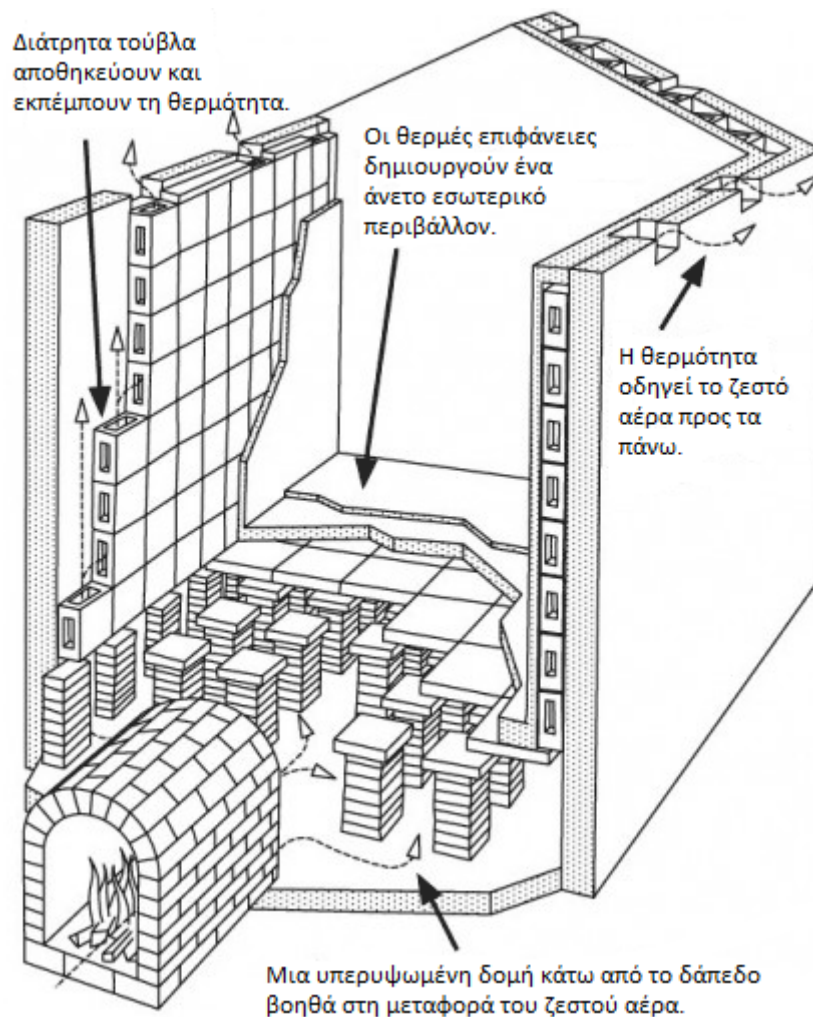
Πίν. 2.1: Θερμοκρασία του νερού προσαγωγής για κλίσεις από 0,2 – 1,6. ....	31
Πίν. 2.2: Θερμοκρασία του νερού προσαγωγής για κλίσεις από 1,6 – 3,4. ....	32
Πίν. 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμίστορ. [3] .....	44
Πίν. 3.2: Αντίσταση αισθητήρα Pt100.....	47
Πίν. 3.3: Κλάσεις αισθητήρων Pt100.....	47
Πίν. 3.4: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα Pt100 τριών αγωγών. ....	50
Πίν. 3.5: Κυριότεροι τύποι θερμοζευγών και περιοχές λειτουργίας. [3].....	51
Πίν. 4.1: Μέγιστες τιμές και θερμικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή L7805. [6] .....	57
Πίν. 4.2: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή L7805. [6] .....	58
Πίν. 4.3: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή L7809C. [6] .....	58
Πίν. 4.4: Μέγιστες τιμές λειτουργίας του ρυθμιστή LM7909. [7].....	60
Πίν. 4.5: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή LM7909. [7] .....	60
Πίν. 4.6: Μέγιστες τιμές λειτουργίας του τελεστικού ενισχυτή OPA2604. [9] .....	71
Πίν. 4.7: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του τελεστικού ενισχυτή OPA2604. [9] .....	72
Πίν. 5.1: Χαρακτηριστικά μικροελεγκτή ATMega32A. [11].....	79
Πίν. 5.2: Μέγιστες τιμές λειτουργίας οθόνης Winstar wh1602b. [12] .....	83
Πίν. 5.3: Ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά της οθόνης Winstar wh1602b. [12] .....	84



# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η προσπάθεια κάθε ζωντανού οργανισμού να προστατευθεί από ακραίες και επικίνδυνες θερμοκρασιακές μεταβολές είναι αναπόσπαστα συνδεδεμένη με τη φυσική – βιολογική προσπάθεια για επιβίωση. Για το λόγο αυτό ο άνθρωπος, από τα πανάρχαια χρόνια προσπαθούσε να εξασφαλίσει μια ευχάριστη κατάσταση περιβάλλοντος στους χώρους παραμονής και διαμονής του. Η επιλογή περιοχών και χώρων εγκαταστάσεως των ανθρώπων, αλλά και όλη η οικονομική, κοινωνική, πολιτική και πολιτιστική διαμόρφωση της ζωής τους, είναι στενά συνδεδεμένη με το κλίμα και τις συνθήκες που επικράτησαν στο άμεσο φυσικό περιβάλλον τους.



Σχ. 1.1 Το “Υπόκαυστον” όπως ονομαζόταν, σύστημα θέρμανσης στην Αρχαία Ρώμη.

Η φωτιά, η κατοικία και η θέρμανση αποτέλεσαν βασικά στοιχεία πολιτισμού και συνετέλεσαν σημαντικά στη διαφοροποίηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς από αυτή των άλλων έμβιων όντων. Η ικανότητα του ανθρώπου να αντιμετωπίζει την περιστασιακά εχθρική φύση και μερικές φορές να την προσαρμόζει στις ανάγκες του, βασίστηκε στη νοημοσύνη και εφευρετικότητα του, καλλιέργησε τη γνώση και δημιούργησε τον πολιτισμό. [1]

## 1.2 Θερμική Άνεση

Οι πρώτες προσπάθειες για θέρμανση με στόχο την “άνεση”, έγιναν βαθμιαία όταν το πρόβλημα της επιβίωσης στο ψυχρό περιβάλλον είχε πια ξεπεραστεί. Κάθε τόσο ο άνθρωπος είχε νέες απαιτήσεις και αυτό βέβαια είχε ως αποτέλεσμα αναζητήσεις και νέες βελτιώσεις, που οδήγησαν σε εντυπωσιακά πρωτοποριακής κατασκευής πρωτόγονα συστήματα κεντρικής θέρμανσης.

Σήμερα, με την κεντρική θέρμανση των κτιρίων, επιδιώκεται να επιτευχθούν και να διατηρηθούν συνθήκες, που να ανταποκρίνονται με πληρότητα, ασφάλεια, αξιοπιστία και προσιτό κόστος στις απαιτήσεις του ανθρώπου για άνετη και υγιεινή διαβίωση στους κλειστούς χώρους, έστω και αν στο εξωτερικό περιβάλλον επικρατούν χαμηλές χειμερινές θερμοκρασίες.

Η σύγχρονη τεχνολογία και οι οικονομικές δυνατότητες των ανθρώπων, έχουν διαμορφώσει ένα πολύπλευρο πλέγμα απαιτήσεων, οι οποίες πρέπει να καλύπτονται από κάθε σύστημα θέρμανσης. Η αναγκαία συνθήκη για την πλήρη κλιματική άνεση, περιλαμβάνει σήμερα τη θερμοκρασία και υγρασία των χώρων, την καθαρότητα, τον τρόπο και την ταχύτητα κινήσεως του αέρα, την ένταση των θορύβων και το επίπεδο του φωτισμού, τη λειτουργικότητα και αισθητική των χώρων, τις ακτινοβολίες, τα χρώματα κ.α. Δηλαδή η άνεση στην ευρεία της έννοια, περιλαμβάνει και τομείς που υπερβαίνουν κατά πολύ ακόμα και τις καλύτερες εγκαταστάσεις.

Τα επιθυμητά επίπεδα “ανέσεως” σχετίζονται σε σημαντικό βαθμό με υποκειμενικούς παράγοντες και επηρεάζονται από φυσιολογικά αίτια τα οποία εξαρτώνται από το κάθε άτομο και παραμέτρους όπως η υγεία, η ηλικία και η δραστηριότητα που αναπτύσσει τη δεδομένη χρονική στιγμή.

Εκτεταμένες μελέτες και στατιστικές έρευνες, απέδειξαν ότι το αίσθημα της άνεσης αν και παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις από άτομο σε άτομο εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το συνδυασμό θερμοκρασίας και υγρασίας που επικρατεί σε ένα χώρο. [1]

### 1.3 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός ελεγκτή θέρμανσης με λειτουργία αντιστάθμισης της εξωτερικής θερμοκρασίας. Ο ελεγκτής αυτός θα τοποθετηθεί σε ένα ήδη εγκατεστημένο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με λέβητα χαμηλών θερμοκρασιών. Το υπάρχον σύστημα είναι διαστασιολογημένο έτσι ώστε να καλύπτει τις θερμικές απαιτήσεις του κτιρίου στις πιο ακραίες καιρικές συνθήκες που είναι πιθανόν να εμφανιστούν δηλαδή  $-10^{\circ}\text{C}$  θερμοκρασία περιβάλλοντος με  $20^{\circ}\text{C}$  επιθυμητή θερμοκρασία χώρου. Η λειτουργία του ελεγκτή και της αντισταθμισμένης πλέον εγκατάστασης θα μας δώσει τη δυνατότητα να εκμεταλλευτούμε τις ηπιότερες καιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη χειμερινή περίοδο και κατά συνέπεια τις μειωμένες θερμικές απώλειες του κτιρίου.

### 1.4 Δομή

Στα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται αρχικώς αναφορά στην λειτουργία της αντιστάθμισης εξωτερικής θερμοκρασίας, επίσης στη συνέχεια αναλύεται και εξηγείται διεξοδικά κάθε τμήμα που απαρτίζει την τελική κατασκευή και παρουσιάζονται κάποιες προσομοιώσεις που έγιναν.

Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται η λειτουργία της αντιστάθμισης της εξωτερικής θερμοκρασίας. Εξηγείται η χρησιμότητα της λειτουργίας αυτής παρουσιάζοντας κατάλληλα διαγράμματα για την κατανομή των θερμοκρασιών και των ενεργειακών απαιτήσεων κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου και αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος μέσω των καμπυλών θέρμανσης και των διάφορων διατάξεων ελέγχου της θερμοκρασίας προσαγωγής του νερού.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι των αισθητήρων θερμοκρασίας όπως θερμίστορ, αισθητήρες αντίστασης και θερμοζεύγη και γίνεται λεπτομερής αναφορά στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του αισθητήρα Pt100 που επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε στην κατασκευή μας.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύεται εκτενώς το συνολικό κύκλωμα των αισθητήρων θερμοκρασίας με όλα τα επιμέρους τμήματα που το απαρτίζουν όπως η γέφυρα Wheatstone και ο ενισχυτής οργάνων καθώς και τα ηλεκτρονικά στοιχεία που τοποθετήσαμε όπως ρυθμιστές τάσεις και τελεστικοί ενισχυτές.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά στο στάδιο του προγραμματισμού της πλακέτας. Παρουσιάζεται λεπτομερώς το μοντέλο του μικροελεγκτή που τοποθετήθηκε στην πλακέτα και περιγράφονται οι δυνατότητες και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του καθώς επίσης και το μοντέλο οθόνης που χρησιμοποιήσαμε. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάζεται ο κώδικας που κατασκευάσαμε.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα σχηματικά διαγράμματα της κατασκευής όπως τα κατασκευάσαμε στην πλατφόρμα OrCAD της εταιρείας Cadence καθώς και όλες οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε.

Στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της εργασίας καθώς και οι προοπτικές για περαιτέρω βελτίωση.

Τέλος στο 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήσαμε κατά τη συγγραφή της εργασίας.

## 2 ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

### 2.1 Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή, η ενεργειακή απεξάρτηση από τρίτες χώρες και η αναγκαιότητα αναβάθμισης του υπάρχοντος κτιριακού αποθέματος οδήγησαν την Ευρώπη στην έκδοση της Κοινοτικής Οδηγίας 2002/91/EK περί ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων. Η Χώρα μας, ως όφειλε απέναντι στις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης και κυρίως απέναντι στους Πολίτες της, εναρμόνισε την εθνική μας νομοθεσία με την Κοινοτική Οδηγία, σύμφωνα με τον Νόμο 3661/2008.

Προϋπόθεση για την εφαρμογή του Νόμου υπήρξε η έκδοση του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κ.Εν.Α.Κ) και το Προεδρικό Διάταγμα που θα καθόριζε τις προδιαγραφές και τις διαδικασίες εφαρμογής του συστήματος των Ενεργειακών Επιθεωρητών των Κτηρίων. Η προσπάθεια έκδοσής τους διήρκησε συνολικά τρία χρόνια και έχει πια ολοκληρωθεί. Σε αυτήν τη μακρά πορεία δοκιμάστηκαν πολλά διαφορετικά μοντέλα επιστημονικής μεθοδολογίας και άλλαξαν αμέτρητες φορές οι επιμέρους διατάξεις.

Η αναβάθμιση των συστημάτων θέρμανσης είναι μείζονος σημασίας για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων, τη συμμόρφωσή τους με τους νέους κανονισμούς και κατά συνέπεια την κατάταξη τους σε υψηλότερη ενεργειακή κλάση όπως απαιτείται.

### 2.2 Η έννοια της αντιστάθμισης

Με τον όρο αντιστάθμιση εξωτερικής θερμοκρασίας αναφερόμαστε στη ρύθμιση της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής στα θερμαντικά σώματα ή κάποιο άλλο σύστημα ανάλογα με την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στις παλαιότερες εγκαταστάσεις θέρμανσης, κυρίως σε πολυκατοικίες χωρίς συστήματα αυτονομίας, ο έλεγχος της λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης γίνεται με χρονοδιακόπτες όπου προκαθορίζεται ποιες συγκεκριμένες ώρες της ημέρας θα λειτουργεί η θέρμανση ταυτοχρόνως για όλα τα διαμερίσματα.

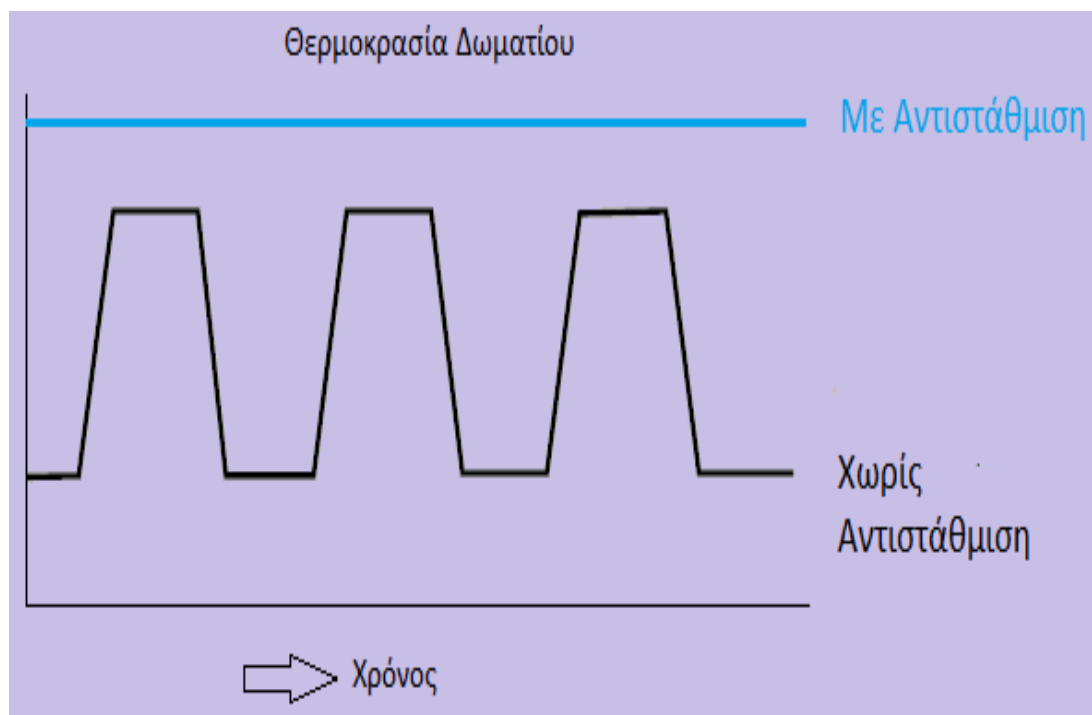
Ο τρόπος αυτός λειτουργίας έχει σαν αποτέλεσμα όταν ανεβαίνει η εξωτερική θερμοκρασία, κυρίως κατά την περίοδο της άνοιξης, η εσωτερική θερμοκρασία χώρου να υπερβαίνει τα όρια άνεσης των ενοίκων. Αιτία αυτής της υπερθέρμανσης των χώρων είναι η υψηλή θερμοκρασία προσαγωγής του

νερού που προσδίδει στον χώρο πολλαπλάσια θερμότητα σε σχέση με αυτή που απαιτείται.

Στις νεότερες εγκαταστάσεις θέρμανσης είτε αναφερόμαστε σε μονοκατοικίες είτε σε πολυκατοικίες πολλών διαμερισμάτων με συστήματα αυτονομίας, ο έλεγχος της λειτουργίας της εγκατάστασης θέρμανσης γίνεται μέσω ενός απλού θερμοστάτη χώρου.

Στην περίπτωση αυτή η θέρμανση λειτουργεί δεχόμενη εντολή από έναν θερμοστάτη χώρου που είναι ρυθμισμένος σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία ανέσεως. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία υπολείπεται της απαιτούμενης ο θερμοστάτης δίνει εντολή στον καυστήρα να ξεκινήσει η λειτουργία του συστήματος θέρμανσης και αντιστοίχως όταν επιτευχθεί η απαιτούμενη εσωτερική θερμοκρασία διακόπτεται η λειτουργία του καυστήρα.

Ελέγχοντας με αυτό τον τρόπο την εγκατάσταση δημιουργούνται διακυμάνσεις στην εσωτερική θερμοκρασία χώρου αφού, από τη στιγμή που θα δεχθεί εντολή εκκίνησης ο καυστήρας και μέχρι να αποδώσει στο κτίριο την απαιτούμενη θερμότητα, η εσωτερική θερμοκρασία συνεχίζει να μειώνεται. Επίσης όταν σημειωθεί η ζητούμενη εσωτερική θερμοκρασία διακόπτεται η λειτουργία του καυστήρα, αλλά η θερμοκρασία χώρου συνεχίζει να αυξάνεται αφού τα μέταλλα του λέβητα διατηρούν σημαντικά ποσά θερμότητας και μετά τη διακοπή της λειτουργίας του.



Σχ. 2.1: Διακύμανση θερμοκρασίας δωματίου, με και χωρίς τη χρήση αντιστάθμισης.



Εφαρμόζοντας τη λειτουργία αντιστάθμισης σε ένα σύστημα θέρμανσης έχουμε τη δυνατότητα να μεταβάλλουμε συνεχώς την ισχύ των θερμαντικών σωμάτων ρυθμίζοντας κατάλληλα την θερμοκρασία προσαγωγής του νερού σε αυτά ώστε να καλύπτονται οι θερμικές απώλειες του κτιρίου κάθε χρονική στιγμή και να διατηρείται σταθερή η εσωτερική θερμοκρασία.

Πιο συγκεκριμένα:

$$P = P_s \cdot \left( \frac{T_i - T_o}{49.32 \cdot \ln \left( \frac{T_i - T_r}{T_o - T_r} \right)} \right)^n \quad (2.1)$$

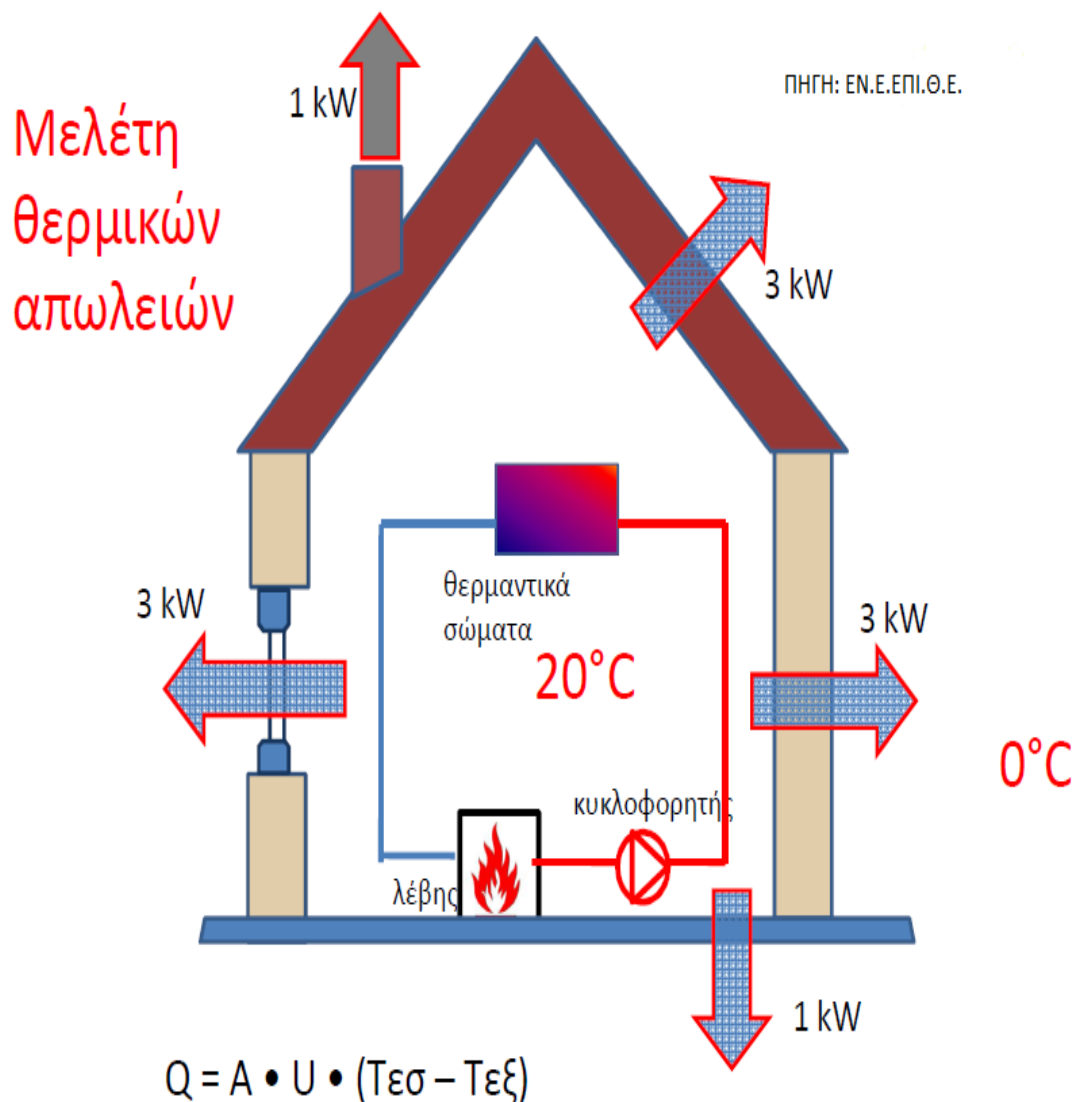
Στην εξίσωση (2.1) δίνεται η ισχύς της εκπεμπόμενης θερμότητας ενός θερμαντικού σώματος όπου:

- $P$ , είναι η εκπεμπόμενη ισχύς σε Watt.
- $P_s$ , είναι η ονομαστική ισχύς σε Watt του σώματος που δίνεται από τον κατασκευαστή για συγκεκριμένη διαφορά της μέσης θερμοκρασίας σώματος και της θερμοκρασίας χώρου. Συνήθως αυτή η διαφορά είναι  $50^\circ\text{C}$ . Δηλαδή  $80^\circ\text{C}$  θερμοκρασία προσαγωγής και  $60^\circ\text{C}$  θερμοκρασία επιστροφής οπότε μέση θερμοκρασία σώματος  $70^\circ\text{C}$  και θερμοκρασία χώρου  $20^\circ\text{C}$ .
- $T_i$ , είναι η θερμοκρασία προσαγωγής του νερού στα θερμαντικά σώματα σε  $^\circ\text{C}$ .
- $T_o$ , είναι η θερμοκρασία επιστροφής του νερού στα θερμαντικά σώματα σε  $^\circ\text{C}$ .
- $T_r$ , είναι η θερμοκρασία χώρου σε  $^\circ\text{C}$ .
- $n$ , είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τον τύπο του θερμαντικού σώματος και κυμαίνεται από 1.3 – 1.6. (1.33 για τα κλασσικά θερμαντικά σώματα τύπου πάνελ)

Εφαρμόζοντας αυτήν την εξίσωση σε ένα θερμαντικό σώμα ονομαστικής ισχύος 1000W (Για  $80^\circ\text{C}$  θερμοκρασία προσαγωγής και  $60^\circ\text{C}$  θερμοκρασία επιστροφής οπότε μέση θερμοκρασία σώματος  $70^\circ\text{C}$  και θερμοκρασία χώρου  $20^\circ\text{C}$ ) για θερμοκρασία προσαγωγής  $60^\circ\text{C}$  οπότε  $T_i = 60$ , θερμοκρασία επιστροφής  $40^\circ\text{C}$  οπότε  $T_o = 40$  και θερμοκρασία χώρου  $20^\circ\text{C}$  οπότε  $T_r = 20$  προκύπτει  $P = 490\text{W}$  οπότε μειώνοντας κατά  $20^\circ\text{C}$  τη μέση θερμοκρασία σώματος η ισχύς του υποδιπλασιάστηκε.

### 2.3 Κατανομή θερμοκρασιών και ενεργειακών απαιτήσεων κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου.

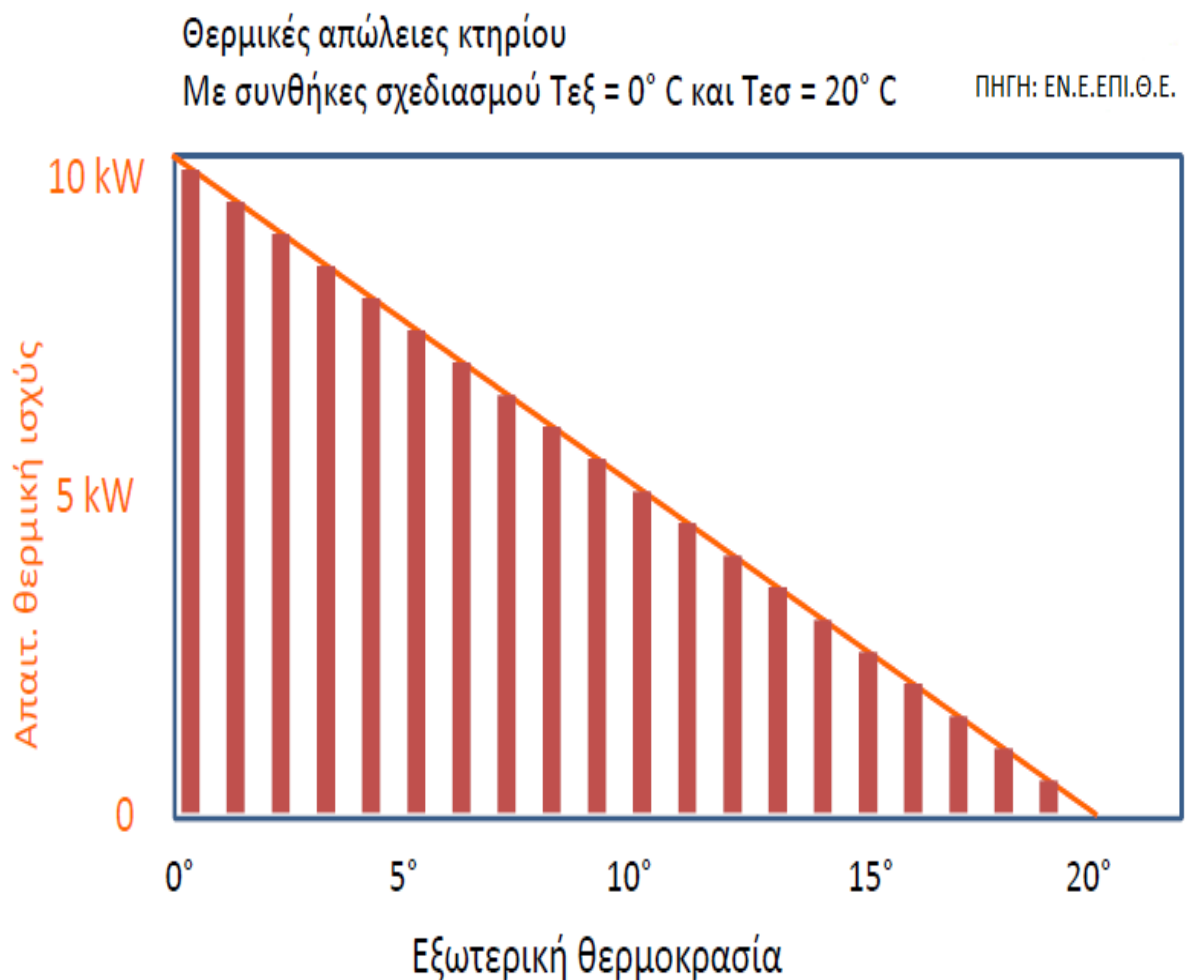
Η μελέτη θερμικών απωλειών και η μελέτη μιας εγκατάστασης θέρμανσης (θερμική ισχύς λέβητα και θερμαντικών σωμάτων) έχουν σκοπό να καλύψουν τις θερμικές απώλειες ενός κτιρίου κατά την εμφάνιση αντίξων συνθηκών στο εξωτερικό περιβάλλον οι οποίες είτε εμφανίζονται σπανίως κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου ή και καθόλου. Επίσης είναι σύνηθες φαινόμενο η υπερδιαστασιολόγηση τόσο των θερμαντικών σωμάτων όσο και του λέβητα πετρελαίου ή φυσικού αερίου ή κάποιου άλλου συστήματος παραγωγής και κατά συνέπεια η αυξημένη κατανάλωση πετρελαίου, φυσικού αερίου ή ρεύματος.



Σχ. 2.2: Μελέτη Θερμικών Απωλειών κτιρίου. [2]

Με την αντιστάθμιση της εξωτερικής θερμοκρασίας μπορούμε να εκμεταλλευτούμε σε μεγάλο βαθμό τις ευνοϊκές καιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά κύριο λόγο στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας και να μειώσουμε καταλλήλως τη θερμοκρασία του νερού προσαγωγής πετυχαίνοντας μεγαλύτερη οικονομία στην κατανάλωση καυσίμου αλλά και αίσθημα ανέσεως στους ενοίκους.

Στο σχήμα 2.2 βλέπουμε τις ενεργειακές απώλειες ενός κτιρίου σύμφωνα με τη μελέτη θερμικών απωλειών για συγκεκριμένες θερμοκρασίες στο εξωτερικό και εσωτερικό περιβάλλον. Σύμφωνα με την εικόνα η κατοικία εμφανίζει απώλειες ισχύος 10kW όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι 0°C και η εσωτερική 20°C. Επίσης βλέπουμε τον γενικό τύπο που μας δίνει την ισχύ των θερμικών απωλειών συναρτήσει της θερμοπερατότητας  $U$  των δομικών στοιχείων του κτιρίου και της θερμοκρασιακής διαφοράς.



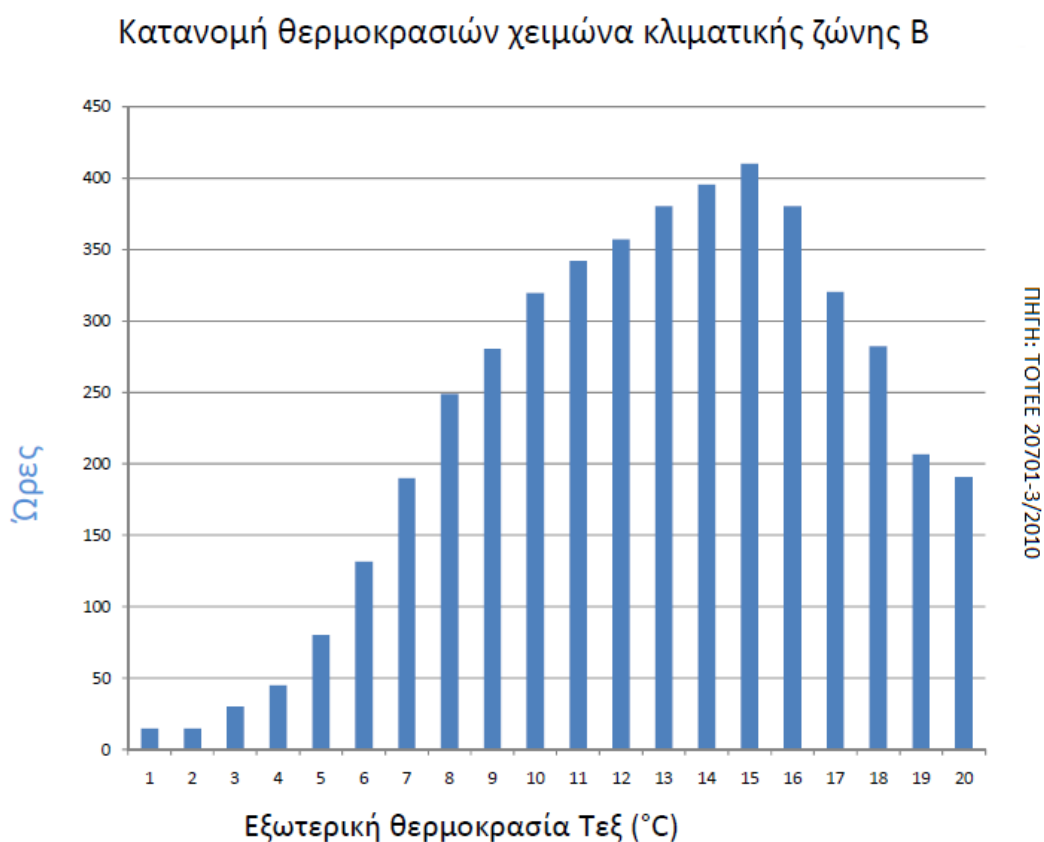
Σχ. 2.3: Μεταβολή θερμικών απωλειών κτιρίου συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας. [2]

Στο γράφημα 2.3 παρατηρούμε τη μεταβολή της απαιτούμενης θερμικής ισχύος σε σχέση με τη μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας από 0°C έως και 20°C όπου το προαναφερθέν κτίριο δεν ανταλλάσει πλέον θερμότητα με το εξωτερικό περιβάλλον.

Η Τεχνική οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος 20701-3 του 2010 αναφέρεται στα κλιματολογικά δεδομένα Ελληνικών περιοχών και στις συνθήκες σχεδιασμού για την διαστασιολόγηση των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού στις κτιριακές εγκαταστάσεις.

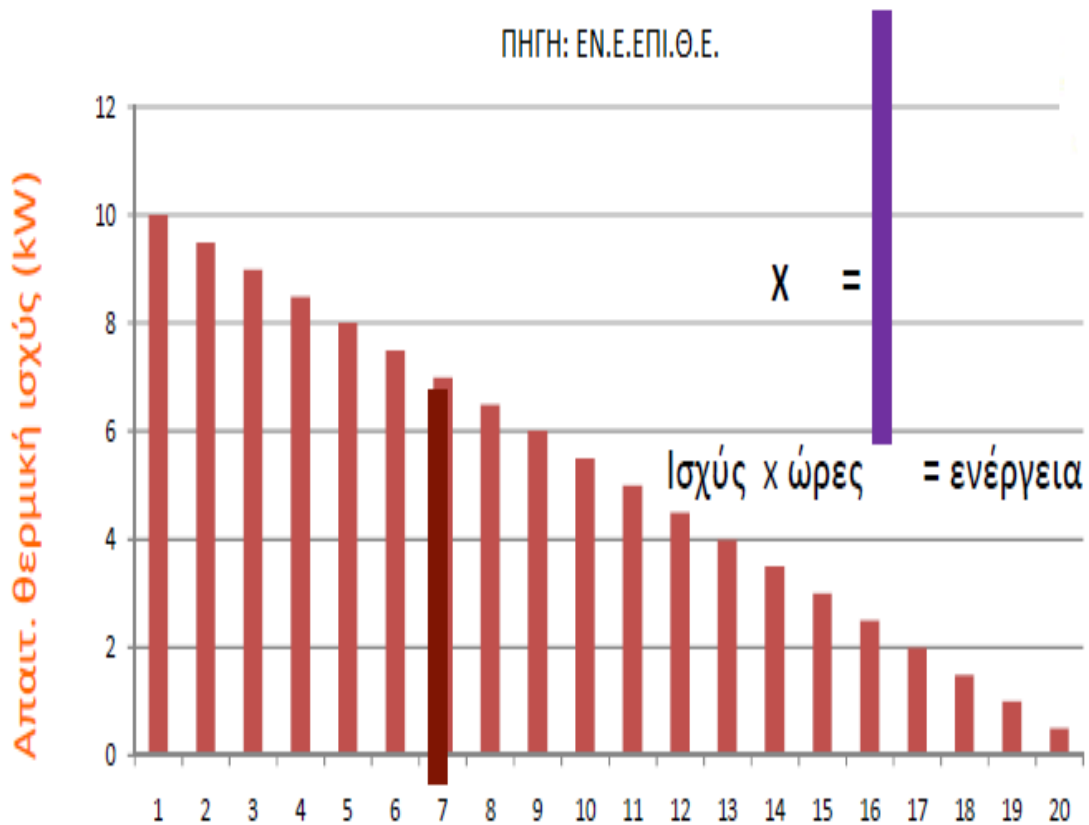
Επίσης δίνονται κλιματολογικά δεδομένα, σε επίπεδο μέσων μηνιαίων τιμών, για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων – Κ.Εν.Α.Κ (ΦΕΚ 407/ 9.4.2010). Από κλιματολογικά δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) και με την χρήση κατάλληλων εμπειρικών και θεωρητικών μαθηματικών μοντέλων, εκτιμήθηκαν όλες οι απαραίτητες για τον σκοπό της Τεχνικής Οδηγίας κλιματικές τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων.

Τα δεδομένα της ΕΜΥ αφορούν μακροχρόνιες μετρήσεις σε συγκεκριμένους μετεωρολογικούς σταθμούς.



Σχ. 2.4: Κατανομή θερμοκρασιών χειμώνα κλιματικής ζώνης Β. [2]

Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά προκύπτει το ραβδόγραμμα του σχήματος 2.4 όπου κατανέμονται οι θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου στην κλιματική ζώνη Β. Συγκεκριμένα καταγράφεται η ωριαία εμφάνιση της κάθε θερμοκρασίας περιβάλλοντος από 1°C – 20°C.

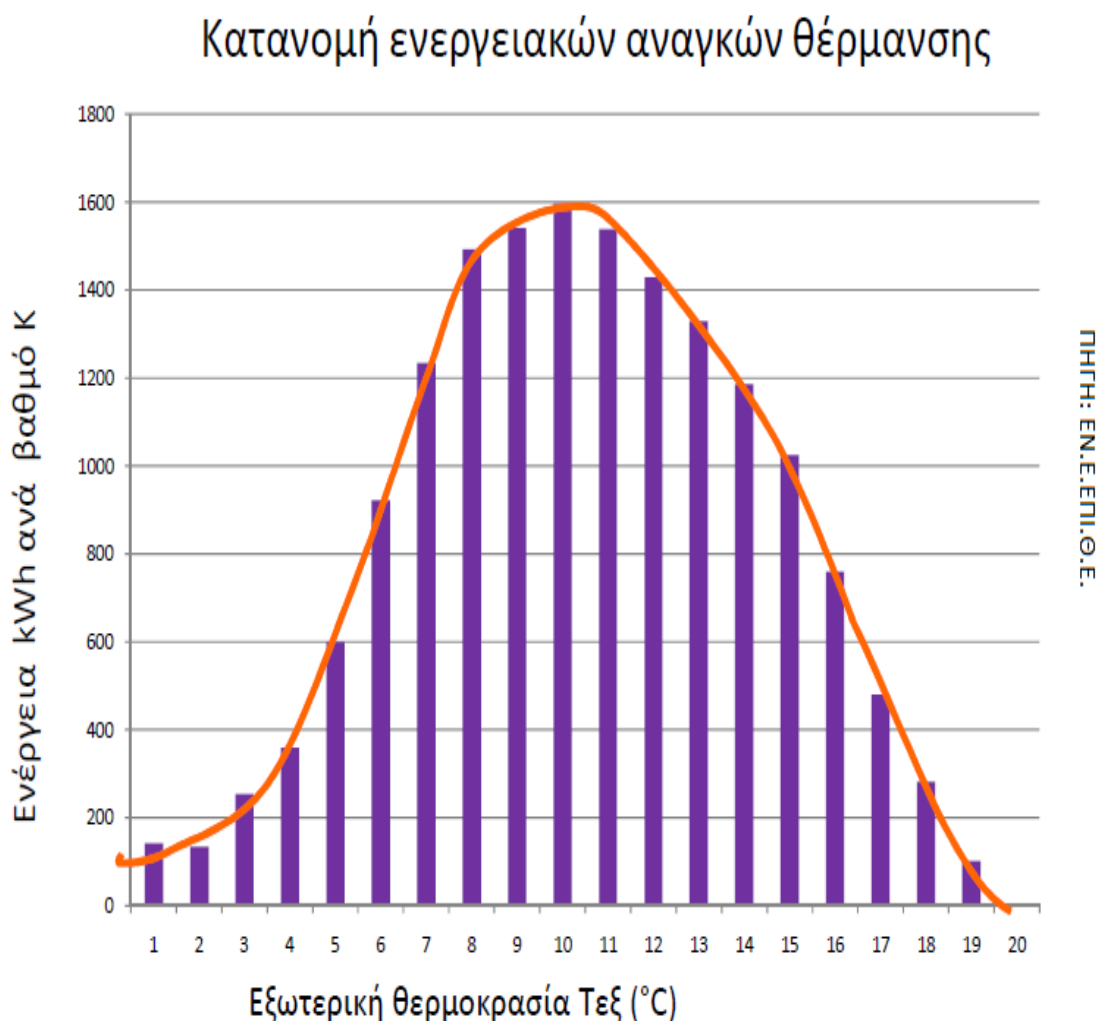


Σχ. 2.5: Απαιτούμενη θερμική ισχύς συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας. [2]

Στη συνέχεια στο σχ. 2.5 εμφανίζεται η θερμική ισχύς που απαιτείται για την κάλυψη των ενεργειακών απωλειών του κτιρίου στο ίδιο εύρος θερμοκρασιών με το σχ. 2.4 δηλαδή από 1°C – 20°C.

Έπειτα συνδυάζοντας τα δύο προηγούμενα γραφήματα προκύπτει το γράφημα 2.6 όπου απεικονίζεται η κατανομή των καταναλώσεων θερμικής ενέργειας.

Πολλαπλασιάζοντας για κάθε δεδομένη θερμοκρασία περιβάλλοντος που εμφανίζεται, την απαιτούμενη θερμική ισχύ με το πλήθος των ωρών εμφάνισης αυτής, προκύπτουν οι ενεργειακές ανάγκες θέρμανσης συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας.



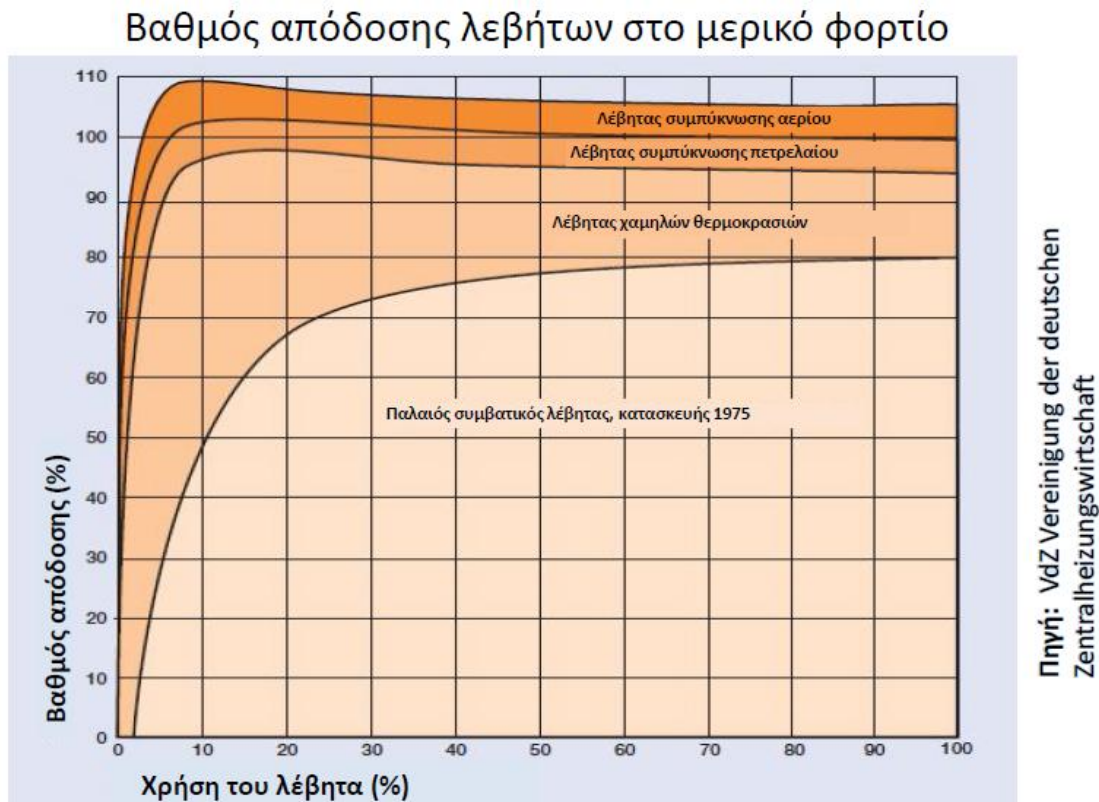
Σχ. 2.6: Κατανομή ενεργειακών αναγκών θέρμανσης συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας σε kWh. [2]

Παρατηρούμε ότι σχεδόν το 75% των συνολικών αναγκών ενέργειας καταναλώνεται σε θερμοκρασίες από 7°C και άνω, ενώ το 50% σε θερμοκρασίες μεταξύ 7°C και 13°C.

Το σχ. 2.6 καταδεικνύει την χρησιμότητα ύπαρξης και λειτουργίας των συστημάτων αντιστάθμισης της εξωτερικής θερμοκρασίας στις εγκαταστάσεις θέρμανσης.

Βάσει όλων των ανωτέρω γίνεται κατανοητό ότι το σύστημα θέρμανσης θα λειτουργεί ως επί το πλείστον σε συνθήκες μερικού φορτίου και μακριά από τα ονομαστικά του μεγέθη.

Συνεπώς είναι σημαντικό ο λέβητας της εγκατάστασης να λειτουργεί με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης σε αυτές τις συνθήκες.



Σχ. 2.7: Βαθμός απόδοσης λέβητων στο μερικό φορτίο. [2]

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται ο βαθμός απόδοσης των λέβητων διαφόρων τεχνολογιών συναρτήσει του φορτίου.

## 2.4 Καμπύλες Θέρμανσης

Από όσα έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα γίνεται κατανοητό ότι για την λειτουργία ενός συστήματος αντιστάθμισης της εξωτερικής θερμοκρασίας απαιτείται η τοποθέτηση ενός αισθητήρα μέτρησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος αλλά και ενός ελεγκτή θέρμανσης. Επίσης απαιτείται ένας αισθητήρας θερμοκρασίας στον λέβητα ή στην προσαγωγή του ζεστού νερού στην εγκατάσταση. Ο θερμοστάτης εσωτερικού χώρου είναι προαιρετικός ωστόσο στην κατασκευή μας έχει τοποθετηθεί. Ο ελεγκτής θα παρακολουθεί τους αισθητήρες, θα πραγματοποιεί τους απαραίτητους υπολογισμούς και θα δίνει τις κατάλληλες εντολές σε όλες τις περιφερειακές συσκευές (καυστήρας, κυκλοφορητής κ.τ.λ.).

Μια πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να καθοριστεί είναι ο υπολογισμός της κατάλληλης θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής ανάλογα με την εξωτερική θερμοκρασία. Η θερμοκρασία αυτή του νερού υπολογίζεται μέσω των λεγόμενων καμπυλών θέρμανσης.

Οι καμπύλες θέρμανσης αντιστοιχίζουν την θερμοκρασία περιβάλλοντος με την θερμοκρασία του νερού προσαγωγής. Ονομάζονται καμπύλες καθότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των δύο θερμοκρασιών. Ο λόγος είναι ότι τα θερμαντικά σώματα εκ κατασκευής δεν εμφανίζουν γραμμική συμπεριφορά. Στην εξίσωση (2.1) παρατηρούμε ότι η ισχύς της εκπεμπόμενης θερμότητας ενός θερμαντικού σώματος μεταβάλλεται εκθετικά σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής.

Οπότε αν θεωρήσουμε ότι οι θερμικές απώλειες ενός κτιρίου έχουν γραμμική σχέση με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος προκύπτει ότι η θερμοκρασία του νερού προσαγωγής πρέπει να μεταβάλλεται μη γραμμικά συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας.

Επίσης στον καθορισμό της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής πρέπει να δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέγει την επιθυμητή κλίση της καμπύλης θέρμανσης λαμβάνοντας υπ' όψιν τα εξής:

- τα κατασκευαστικά στοιχεία του κτιρίου (ύπαρξη μόνωσης, ποιότητα εξωτερικών κουφωμάτων κ.τ.λ. )
- το είδος του συστήματος θέρμανσης όπως ενδοδαπέδιο σύστημα ή τα κλασσικά θερμαντικά σώματα
- τις προσωπικές του ανάγκες

Συνυπολογίζοντας όλες τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν κατασκευάσαμε τη συνάρτηση υπολογισμού της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής έχοντας σαν βάση ότι η επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού χώρου είναι 20°C.

$$T_c = 20 + 3 \cdot s \cdot (20 - T_o)^{\frac{2}{3}} \quad (2.2)$$

Όπου:

- $T_c$  είναι η υπολογιζόμενη θερμοκρασία του νερού προσαγωγής.
- $s$  είναι η κλίση της καμπύλης που εισάγεται από τον χρήστη και παίρνει τιμές από 0,2 έως 3,4.
- $T_o$  είναι η εξωτερική θερμοκρασία σε °C.

Με βάση την εξίσωση 2.2 προκύπτουν οι αναλυτικοί πίνακες της υπολογιζόμενης θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής για εξωτερικές θερμοκρασίες από -30°C έως και 20°C για όλες τις πιθανές κλίσεις από 0,2 – 3,4.



Slope=	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
$T_o$	$T_c$							
-30	28,1	36,3	44,4	52,6	60,7	68,9	77,0	85,1
-28	27,9	35,8	43,8	51,7	59,6	67,5	75,5	83,4
-26	27,7	35,4	43,1	50,8	58,5	66,2	73,9	81,6
-24	27,5	35,0	42,4	49,9	57,4	64,9	72,3	79,8
-22	27,2	34,5	41,7	49,0	56,2	63,5	70,7	78,0
-20	27,0	34,0	41,1	48,1	55,1	62,1	69,1	76,1
-18	26,8	33,6	40,3	47,1	53,9	60,7	67,5	74,3
-16	26,5	33,1	39,6	46,2	52,7	59,2	65,8	72,3
-14	26,3	32,6	38,9	45,2	51,5	57,8	64,1	70,4
-12	26,0	32,1	38,1	44,2	50,2	56,3	62,3	68,4
-10	25,8	31,6	37,4	43,2	49,0	54,8	60,6	66,3
-8	25,5	31,1	36,6	42,1	47,7	53,2	58,7	64,3
-6	25,3	30,5	35,8	41,1	46,3	51,6	56,9	62,1
-4	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	54,9	59,9
-2	24,7	29,4	34,1	38,8	43,6	48,3	53,0	57,7
0	24,4	28,8	33,3	37,7	42,1	46,5	50,9	55,4
2	24,1	28,2	32,4	36,5	40,6	44,7	48,8	53,0
4	23,8	27,6	31,4	35,2	39,0	42,9	46,7	50,5
6	23,5	27,0	30,5	33,9	37,4	40,9	44,4	47,9
8	23,1	26,3	29,4	32,6	35,7	38,9	42,0	45,2
10	22,8	25,6	28,4	31,1	33,9	36,7	39,5	42,3
12	22,4	24,8	27,2	29,6	32,0	34,4	36,8	39,2
14	22,0	24,0	25,9	27,9	29,9	31,9	33,9	35,8
16	21,5	23,0	24,5	26,0	27,6	29,1	30,6	32,1
18	21,0	21,9	22,9	23,8	24,8	25,7	26,7	27,6
20	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0

Πίν. 2.1: Θερμοκρασία του νερού προσαγωγής για κλίσεις από 0,2 – 1,6.

Κεφάλαιο 2: ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Slope=	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,2	3,4
T <sub>o</sub>	T <sub>c</sub>								
-30	93,3	101,4	109,6	117,7	125,9	134,0	142,1	150,3	158,4
-28	91,3	99,2	107,2	115,1	123,0	130,9	138,9	146,8	154,7
-26	89,3	97,0	104,7	112,4	120,1	127,8	135,5	143,2	150,9
-24	87,3	94,8	102,3	109,7	117,2	124,7	132,2	139,6	147,1
-22	85,2	92,5	99,7	107,0	114,2	121,5	128,7	136,0	143,2
-20	83,2	90,2	97,2	104,2	111,2	118,2	125,3	132,3	139,3
-18	81,0	87,8	94,6	101,4	108,2	114,9	121,7	128,5	135,3
-16	78,9	85,4	92,0	98,5	105,0	111,6	118,1	124,7	131,2
-14	76,7	83,0	89,3	95,6	101,9	108,2	114,5	120,8	127,0
-12	74,4	80,5	86,5	92,6	98,6	104,7	110,7	116,8	122,8
-10	72,1	77,9	83,7	89,5	95,3	101,1	106,9	112,7	118,5
-8	69,8	75,3	80,9	86,4	91,9	97,5	103,0	108,5	114,1
-6	67,4	72,7	77,9	83,2	88,5	93,7	99,0	104,3	109,5
-4	64,9	69,9	74,9	79,9	84,9	89,9	94,9	99,9	104,9
-2	62,4	67,1	71,8	76,5	81,2	86,0	90,7	95,4	100,1
0	59,8	64,2	68,6	73,1	77,5	81,9	86,3	90,7	95,2
2	57,1	61,2	65,3	69,5	73,6	77,7	81,8	85,9	90,1
4	54,3	58,1	61,9	65,7	69,5	73,3	77,1	81,0	84,8
6	51,4	54,9	58,3	61,8	65,3	68,8	72,3	75,8	79,2
8	48,3	51,4	54,6	57,7	60,9	64,0	67,2	70,3	73,5
10	45,1	47,8	50,6	53,4	56,2	59,0	61,8	64,6	67,3
12	41,6	44,0	46,4	48,8	51,2	53,6	56,0	58,4	60,8
14	37,8	39,8	41,8	43,8	45,8	47,7	49,7	51,7	53,7
16	33,6	35,1	36,6	38,1	39,7	41,2	42,7	44,2	45,7
18	28,6	29,5	30,5	31,4	32,4	33,3	34,3	35,2	36,2
20	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0

Πίν. 2.2: Θερμοκρασία του νερού προσαγωγής για κλίσεις από 1,6 – 3,4.

Όπως επισημάνθηκε προηγουμένως η ύπαρξη ενός θερμοστάτη χώρου είναι προαιρετική για τη λειτουργία της αντιστάθμισης καθώς η θερμοκρασία του νερού προσαγωγής μπορεί να καθοριστεί συναρτήσει μόνο της εξωτερικής θερμοκρασίας και της κλίσης της καμπύλης όπως φαίνεται και στην εξίσωση 2.2.

Η κατασκευή που υλοποιήσαμε ωστόσο διαθέτει έναν αισθητήρα εσωτερικής θερμοκρασίας και επίσης την δυνατότητα εισαγωγής της επιθυμητής θερμοκρασίας χώρου από τον χρήστη.

Έτσι μπορούμε να εισάγουμε έναν νέο παράγοντα στην υπολογιζόμενη θερμοκρασία του νερού προσαγωγής ο οποίος θα εξαρτάται από την απόκλιση της πραγματικής εσωτερικής θερμοκρασίας με την επιθυμητή θερμοκρασία χώρου αλλά και την κλίση που έχει επιλεγεί. Ο νέος αυτός παράγοντας θα έχει την μορφή:

$$T_N = (T_s - T_i) \cdot (s + 1) \quad (2.3)$$

Όπου:

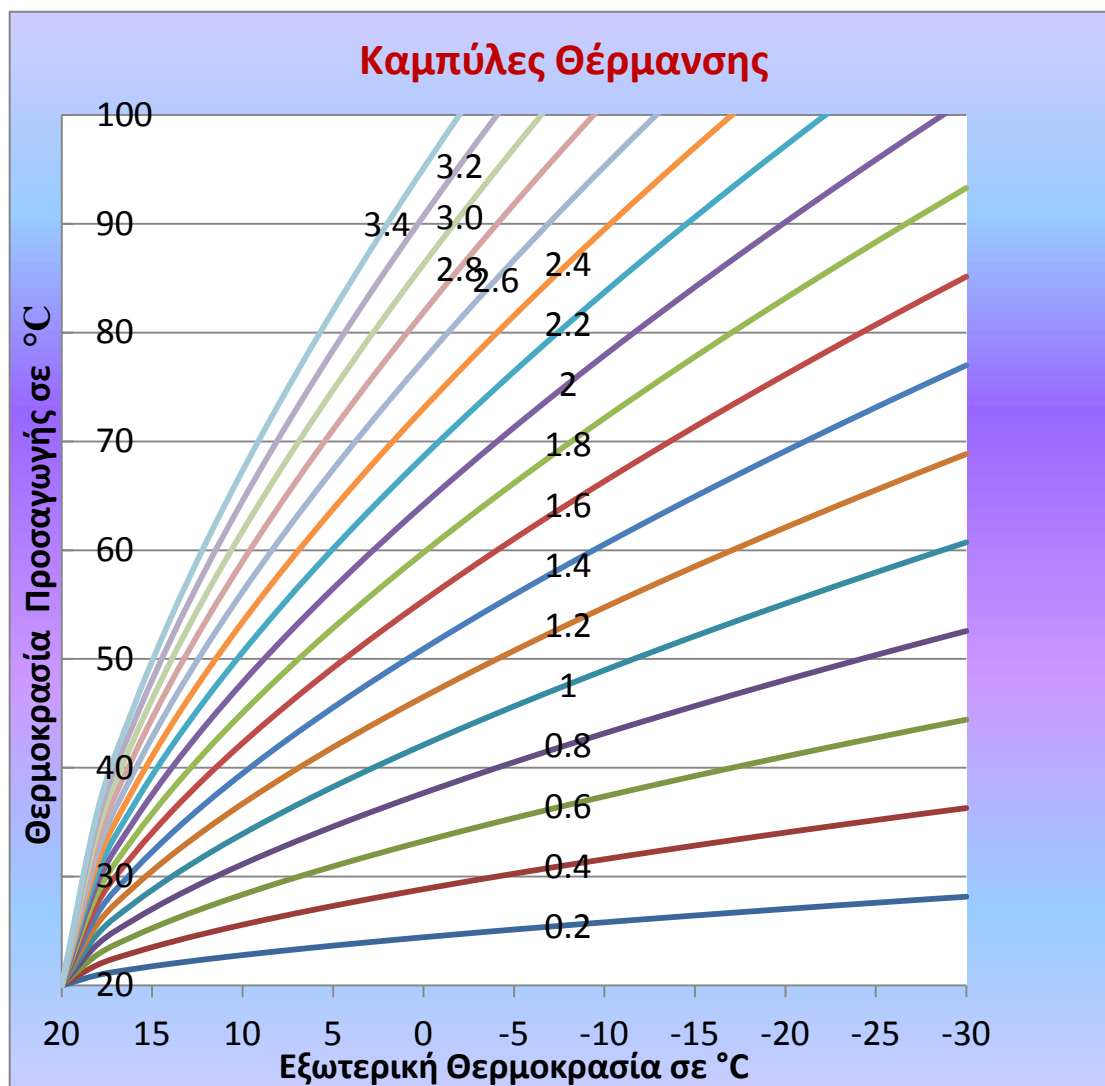
- $T_N$  είναι ο νέος παράγοντας που υπεισέρχεται στους υπολογισμούς.
- $s$  είναι η κλίση της καμπύλης που εισάγεται από τον χρήστη και παίρνει τιμές από 0,2 έως 3,4.
- $T_s$  είναι η επιθυμητή θερμοκρασία χώρου σε °C.
- $T_i$  είναι η πραγματική θερμοκρασία χώρου σε °C.

Συνεπώς προκύπτει η τελική συνάρτηση υπολογισμού της θερμοκρασίας προσαγωγής του νερού βάσει των συναρτήσεων 2.2 και 2.3.

Οπότε:

$$T_C = 20 + 3 \cdot \left( s \cdot (20 - T_o)^{\frac{2}{3}} + (T_s - T_i) \cdot (s + 1) \right) \quad (2.4)$$

Στο σχήμα 2.8 παρακάτω απεικονίζονται και οι 17 διαφορετικές καμπύλες θέρμανσης μεταξύ των οποίων μπορεί να επιλέξει ο χρήστης.



Σχ. 2.8: Καμπύλες Θέρμανσης

## 2.5 Συστήματα Ελέγχου Θερμοκρασίας Προσαγωγής Νερού

Στην προηγούμενη ενότητα περιγράψαμε τον τρόπο που υπολογίζεται η απαραίτητη θερμοκρασία προσαγωγής του νερού μέσω των καμπυλών θέρμανσης. Προκειμένου να επιτύχουμε την επιθυμητή θερμοκρασία

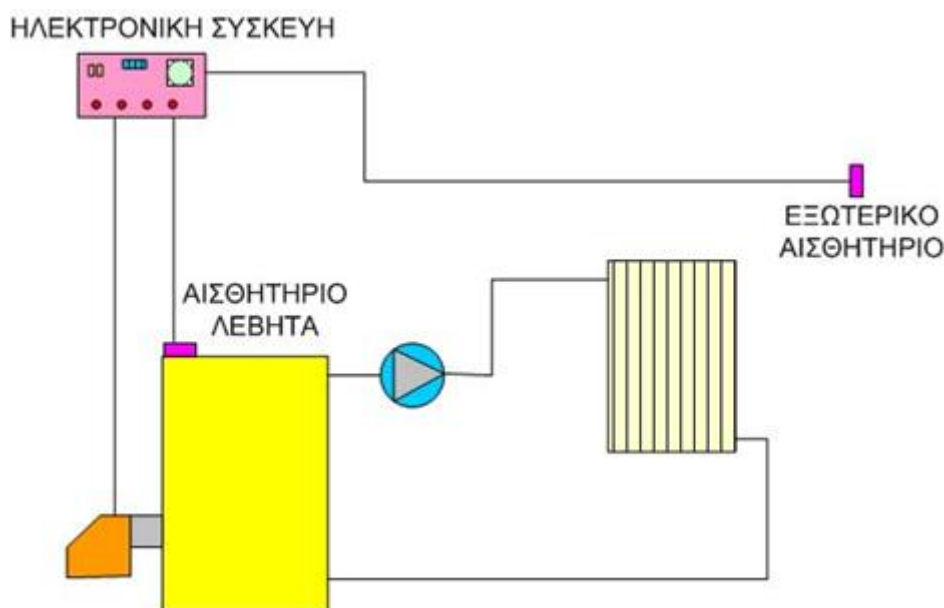
προσαγωγής πρέπει να εφαρμόσουμε κάποιες διατάξεις ελέγχου στο κύκλωμα θέρμανσης. Οι διατάξεις αυτές είναι οι εξής:

- Έλεγχος της λειτουργίας του καυστήρα.
- Έλεγχος μέσω τρίοδης βάνας.
- Έλεγχος μέσω τετράοδης βάνας.

### 2.5.1 Έλεγχος της λειτουργίας του καυστήρα.

Στη διάταξη αυτή ο ελεγκτής θέρμανσης ελέγχει τη λειτουργία του καυστήρα μέσω του αισθητήρα θερμοκρασίας που είναι τοποθετημένος στον λέβητα της εγκατάστασης και κατά αυτόν τον τρόπο έχει επιλεχθεί να λειτουργεί και η κατασκευή μας. Συγκρίνοντας ο ελεγκτής τη θερμοκρασία του νερού στον λέβητα και την επιθυμητή θερμοκρασία προσαγωγής του νερού όπως αυτή έχει υπολογιστεί μέσω της αντιστάθμισης, επενεργεί στη λειτουργία του λέβητα διατηρώντας την απαιτούμενη θερμοκρασία.

Όστόσο σε αυτή τη διαμόρφωση απαιτείται η προστασία του καυστήρα από αλλεπάλληλες ενεργοποιήσεις οπότε πρέπει να υπάρχει χρονική καθυστέρηση μεταξύ δύο διαδοχικών ενεργοποιήσεων. Επίσης ενδεχόμενη λειτουργία του λέβητα σε χαμηλές θερμοκρασίες προσαγωγής ευνοεί τη δημιουργία συμπυκνωμάτων στα τοιχώματα του και κατά συνέπεια μείωση της απόδοσης και της διάρκειας ζωής του. Για τον λόγο αυτό ο απευθείας έλεγχος της λειτουργίας του καυστήρα προτιμάται σε συστήματα θέρμανσης όπου χρησιμοποιείται λέβητας χαμηλών θερμοκρασιών όπως και στο δικό μας σύστημα.

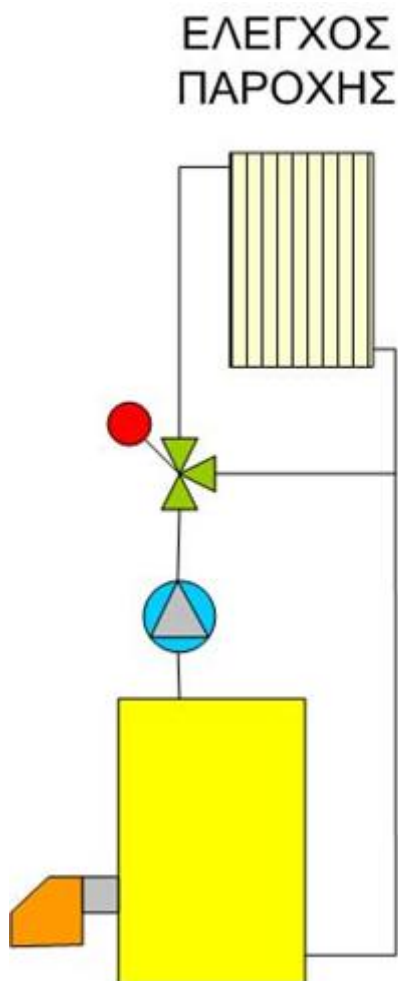


Σχ. 2.9: Έλεγχος της λειτουργίας του καυστήρα.

### 2.5.2 Έλεγχος μέσω τρίοδης βάνας.

Ο έλεγχος της θερμοκρασίας προσαγωγής μέσω τρίοδης βάνας μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους:

- Με έλεγχο της παροχής του νερού προσαγωγής.
- Με έλεγχο της θερμοκρασίας του νερού προσαγωγής.

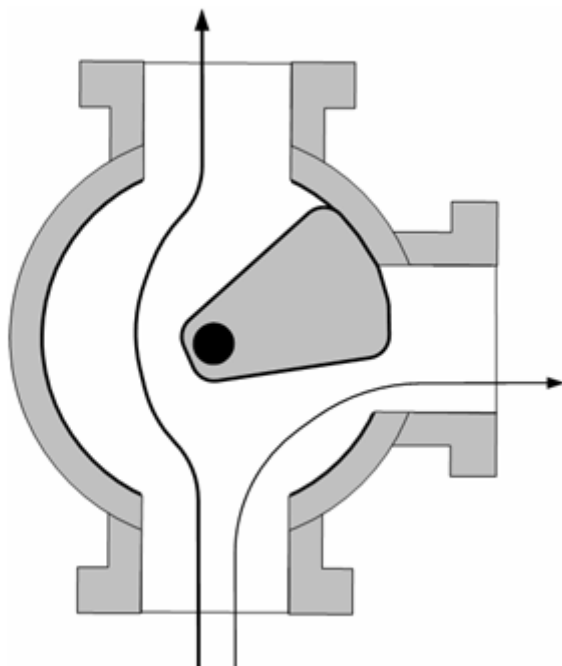


Σχ. 2.10: Έλεγχος παροχής μέσω τρίοδης βάνας.

Όταν εφαρμόζεται έλεγχος της παροχής η τρίοδη βάνα τοποθετείται μετά τον κυκλοφορητή της εγκατάστασης και ο ελεγκτής ρυθμίζοντας την ακριβή θέση της βάνας ελέγχει την παροχή του νερού προς το κύκλωμα θέρμανσης ούτως ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία προσαγωγής.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε πως λειτουργεί η τρίοδη βάνα όταν πραγματοποιείται έλεγχος παροχής του νερού προσαγωγής.

#### Λειτουργία τρίοδης για έλεγχο παροχής



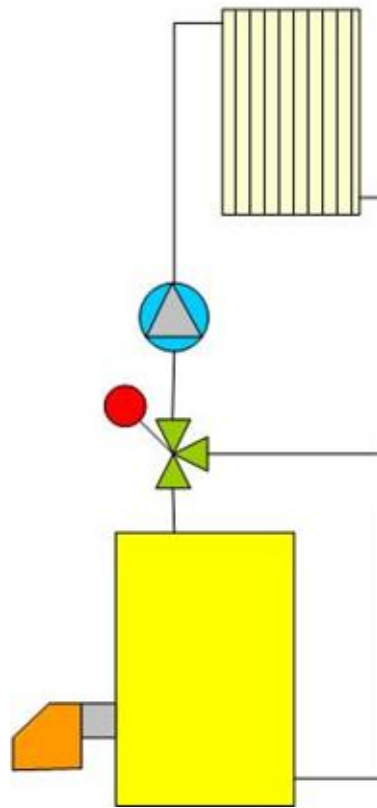
Σχ. 2.11: Λειτουργία τρίοδης για έλεγχο παροχής.

Όταν χρησιμοποιείται η τρίοδη βάνα για έλεγχο της θερμοκρασίας το νερό της γραμμής προσαγωγής προς τα σώματα αναμειγνύεται με αυτό της γραμμής επιστροφής. Ο ελεγκτής της θέρμανσης παρατηρώντας συνεχώς τη θερμοκρασία του νερού προσαγωγής και συγκρίνοντάς την με την επιθυμητή θερμοκρασία όπως αυτή έχει υπολογιστεί, ρυθμίζει την ακριβή θέση του άξονα της βάνας. Το ποσοστό της ανάμειξης καθορίζει και την τελική θερμοκρασία που θα αποκτήσει το νερό που προσάγεται στα θερμαντικά σώματα η στο ενδοδαπέδιο σύστημα.

Στην λειτουργία αυτή η παροχή του νερού προς τα σώματα παραμένει σταθερή. Επίσης ενώ μπορούμε να ελέγχουμε με μεγάλη ακρίβεια τη θερμοκρασία του νερού προσαγωγής ο λέβητας λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες που δεν επιτρέπουν την δημιουργία συμπυκνωμάτων και επομένως επιμηκύνεται η διάρκεια ζωής του.

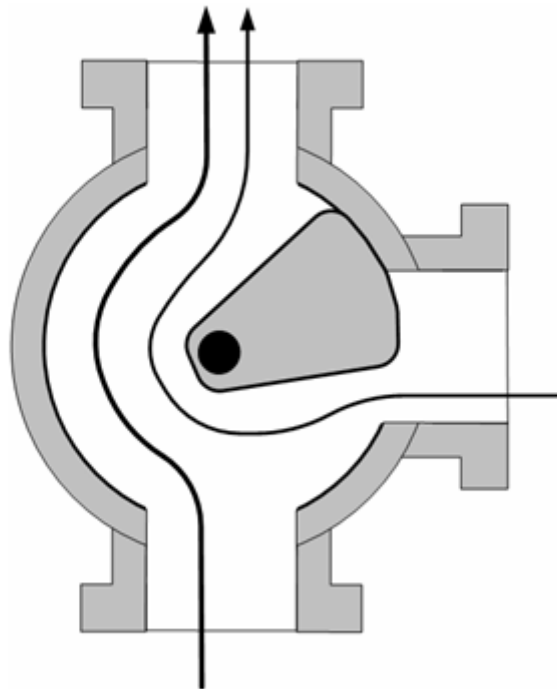
Όταν πραγματοποιείται έλεγχος θερμοκρασίας ο κυκλοφορητής τοποθετείται ανάμεσα στην τρίοδη βάνα και τα θερμαντικά σώματα της εγκατάστασης.

## ΕΛΕΓΧΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ



Σχ. 2.12: Έλεγχος θερμοκρασίας μέσω τρίοδης βάννας.

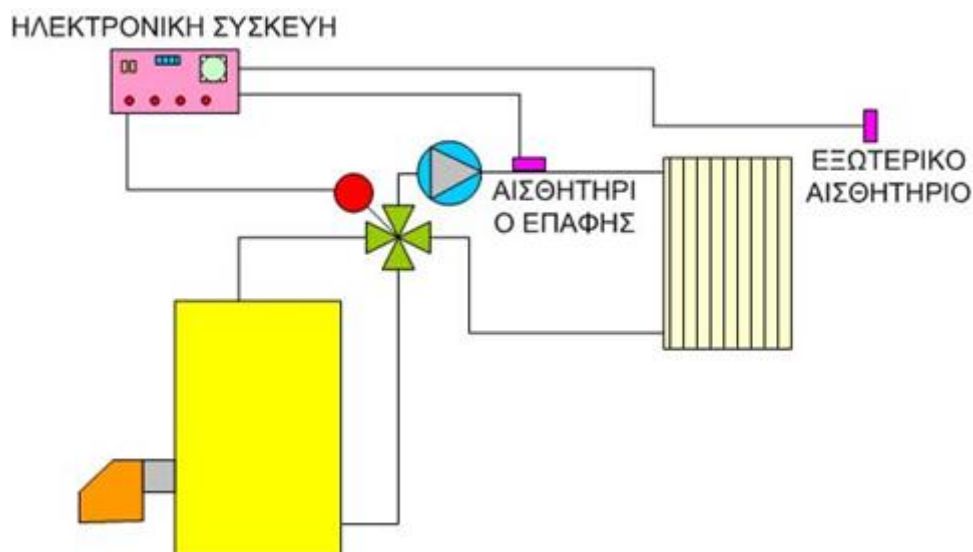
## Λειτουργία τρίοδης για έλεγχο θερμοκρασίας



Σχ. 2.13: Λειτουργία τρίοδης για έλεγχο θερμοκρασίας.

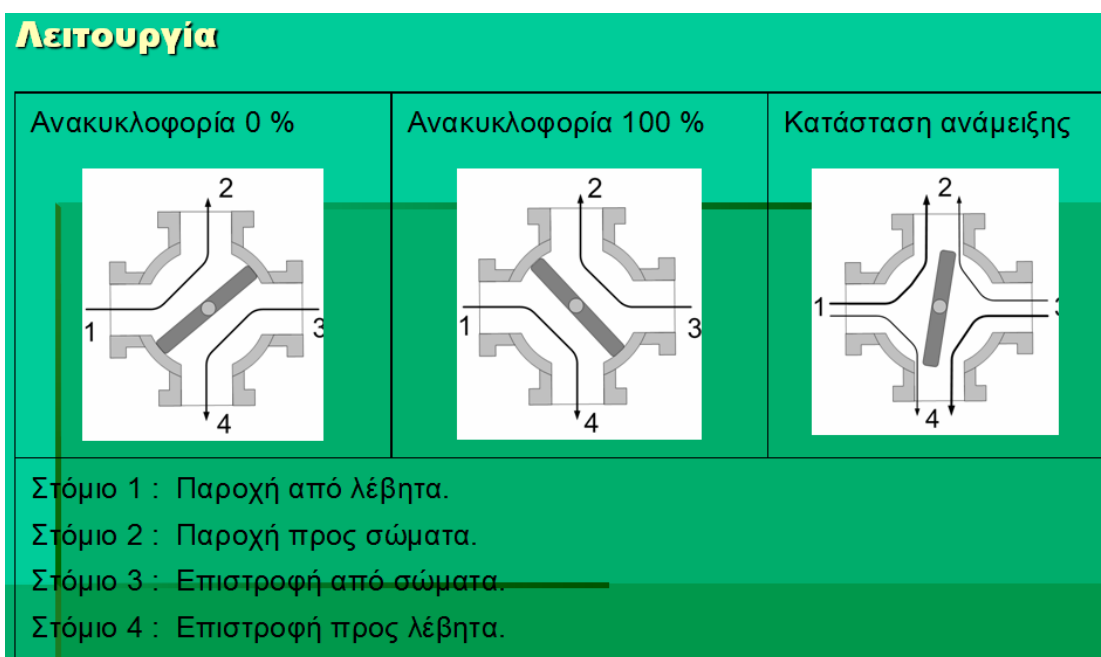


### 2.5.3 Έλεγχος μέσω τετράοδης βάνας αναμίξεως.



Σχ. 2.14: Έλεγχος θερμοκρασίας μέσω τετράοδης βάνας.

Ελέγχοντας την θερμοκρασία μέσω τετράοδης βάνας έχουμε την δυνατότητα να πραγματοποιήσουμε μόνο ανάμειξη μεταξύ εισαγωγής και επιστροφής και όχι έλεγχο παροχής του νερού. Οι διάφορες καταστάσεις λειτουργίας της τετράοδης βάνας φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 2.15: : Λειτουργία τετράοδης βάνας για έλεγχο θερμοκρασίας.



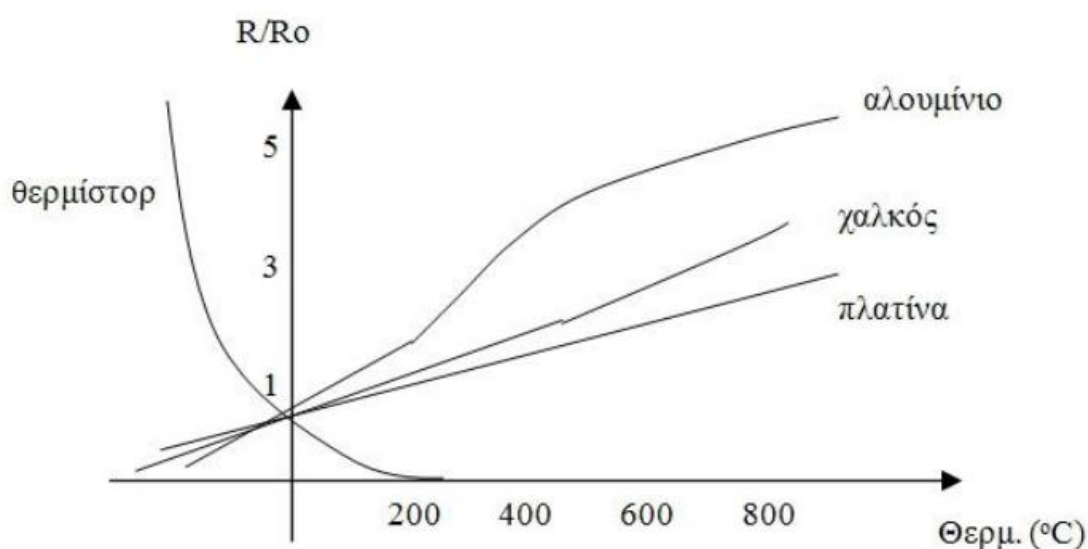
### 3 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

#### 3.1 Αισθητήρια Θερμοκρασίας Μεταβλητής Αντίστασης

Πρόκειται για αισθητήρια στα οποία εκμεταλλευόμαστε την μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού, καθώς αλλάζει η θερμοκρασία του . Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι :

- τα θερμίστορ (thermistors)
- και τα αισθητήρια αντίστασης (resistance temperature detectors - RTDs).

Στο σχήμα βλέπουμε τις καμπύλες μεταβολής της αντίστασης διαφόρων υλικών, συναρτήσει της θερμοκρασίας. Στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τον λόγο  $R/R_0$ , όπου  $R$  η αντίσταση του υλικού σε κάποια θερμοκρασία και  $R_0$  η αντίσταση στους  $0^\circ\text{C}$ .

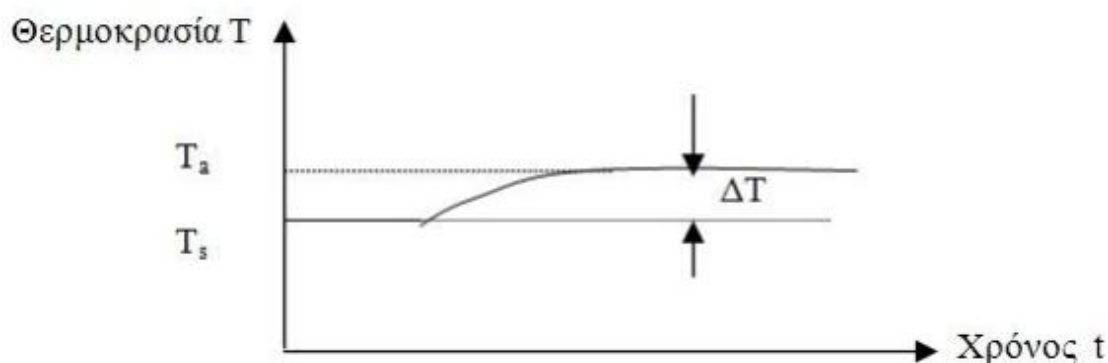


Σχ. 3.1: Καμπύλες μεταβολής της αντίστασης διαφόρων υλικών.

Μια σημαντική παράμετρος των αισθητηρίων αυτών είναι ο θερμικός συντελεστής τους, που εξαρτάται από τη μεταβολή της αντίστασης του αισθητηρίου σε σχέση με την θερμοκρασία. Αρνητικός θερμικός συντελεστής σημαίνει ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας η αντίσταση μειώνεται, ενώ αντιστρόφως θετικός ότι η αντίσταση αυξάνει.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των αισθητηρίων θερμοκρασίας μεταβλητής αντίστασης είναι το φαινόμενο της αυτοθέρμανσης. Κατά την λειτουργία του ένα αισθητήριο αντίστασης διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Λόγω όμως του φαινομένου Joule μια αντίσταση που διαρρέεται από ρεύμα θερμαίνεται. Έτσι

το αισθητήριο θερμαίνεται λόγω του ρεύματος που το διαρρέει. Αυτό είναι μια πηγή σφάλματος, αφού η θερμοκρασία του αισθητηρίου δεν επηρεάζεται μόνο από την θερμότητα του αντικειμένου ή του χώρου (του οποίου μετρά την θερμοκρασία) αλλά και από την θερμότητα που αναπτύσσεται σε αυτό λόγω του φαινομένου Joule. Επειδή η απόκριση του θερμίστορ είναι εξαιρετικά γρήγορη, η τιμή που αυτό μετρά, αρχικά σταθεροποιείται στην πραγματική τιμή. Με την πάροδο του χρόνου όμως, λόγω του φαινομένου της αυτοθέρμανσης, έχουμε μια ελαφρά αύξηση της θερμοκρασίας αυτής. [3], [4]



Σχ. 3.2: Φαινόμενο Αυτοθέρμανσης.

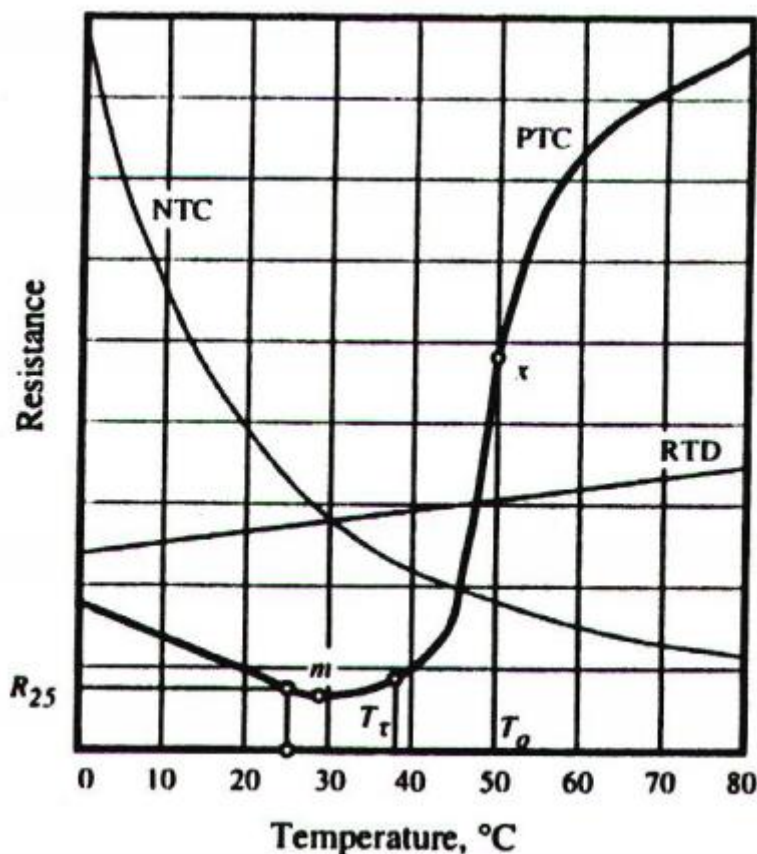
### 3.1.1 Θερμίστορ

Πρόκειται για αντιστάτες, η τιμή των οποίων εξαρτάται από την θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται. Κατασκευάζονται από την μίξη οξειδίων μετάλλων με χαρακτηριστικά ημιαγωγών και έχουν σχήμα κυλινδρικό, σφαιρικό, ορθογώνιο και λεπτού φιλμ. Διαιρούνται σε δύο κατηγορίες :

- αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας (negative temperature coefficient - NTC)
- και θετικού συντελεστή θερμοκρασίας (positive temperature coefficient - PTC).

Στα NTC θερμίστορ η αντίσταση μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, παρουσιάζουν δηλαδή αρνητικό θερμικό συντελεστή. Η σχέση μεταξύ της αντίστασης και της θερμοκρασίας είναι ισχυρά μη γραμμική.

Στα PTC θερμίστορ για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, η αντίστασή τους αυξάνει καθώς αυξάνει και η θερμοκρασία, παρουσιάζουν δηλαδή θετικό θερμικό συντελεστή. Όλα τα μέταλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή PTC, τα περισσότερα όμως παρουσιάζουν χαμηλό θερμικό συντελεστή, αντιθέτως τα κεραμικά υλικά παρουσιάζουν υψηλό συντελεστή και γι' αυτό χρησιμοποιούνται κατά κόρον.



Σχ. 3.3: Χαρακτηριστικές καμπύλες PTC και NTC θερμίστορ και RTD.

Ένα υλικό που παρουσιάζει αρνητικό συντελεστή θερμικής αντίστασης, όταν συνδεθεί σε πηγή με μικρή αντίσταση εξόδου, ελαττώνει την αντίστασή του, λόγω του φαινομένου της αυτοθέρμανσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος που το διαρρέει, άρα και τη μεγαλύτερη θέρμανσή του. Αν δεν υπάρχει απαγωγή θερμότητας από το αισθητήριο, τότε η αυτοθέρμανση θα οδηγήσει σε υπερθέρμανση και πιθανόν καταστροφή του.

Αντίθετα, ένα υλικό με θετικό συντελεστή θερμικής αντίστασης δεν παρουσιάζει υπερθέρμανση, όταν συνδέεται σε πηγή με μικρή αντίσταση εξόδου. Και αυτό γιατί αύξηση της θερμοκρασίας λόγω αυτοθέρμανσης, θα οδηγήσει σε αύξηση της αντίστασης, άρα σε μείωση του ρεύματος που τη διαρρέει, επομένως και της θερμότητας που αναπτύσσεται σ' αυτή. Υπάρχει δηλαδή μια δράση αυτοπεριορισμού.

Η δράση αυτή δίνει τη δυνατότητα στα PTC θερμίστορ (προτιμούνται τα PTC από τους αισθητήρες αντίστασης RTD που θα παρουσιαστούν πιο κάτω, γιατί παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβολή της αντίστασης με την θερμοκρασία) να χρησιμοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές όπως προστασία κυκλωμάτων από υψηλά ρεύματα, δημιουργία μικρο-θερμοστατών για εφαρμογές στην

μικροηλεκτρονική όπου το σημείο σταθεροποίησης της θερμοκρασίας εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού από το οποίο κατασκευάζεται ο θερμοστάτης, δημιουργία κυκλωμάτων χρονικής υστέρησης, σχεδίαση ροομέτρων και ανιχνευτών στάθμης υγρών κ.τ.λ.

Τα θερμίστορ (PTC ή NTC) δεν παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά και γι αυτό δεν χρησιμοποιούνται ευρέως στην βιομηχανία για μέτρηση θερμοκρασίας. Είναι όμως 10 φορές πιο ευαίσθητα σε αλλαγές της θερμοκρασίας από τα θερμοζεύγη και παρουσιάζουν πολύ καλύτερη σταθερότητα στην συμπεριφορά τους κατά την διάρκεια μακρόχρονης χρήσης τους. Επίσης έχουν μικρές διαστάσεις και δεν χρειάζονται ειδική συρμάτωση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασιακές περιοχές από - 100°C έως 400°C. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός θερμίστορ, φαίνονται στον επόμενο πίνακα. [4], [3]

<b>Θερμίστορ</b>
<i>Αντίσταση</i>
Σε 20 °C (περίπου): 2 kΩ Σε 25 °C (τυπικά): 1680 Ω ± 20% Σε 200 °C (περίπου): 37 Ω
<i>Ελάχιστη αντίσταση λειτουργίας</i>
37Ω
<i>Χαρακτηριστική θερμοκρασία</i>
25 °C έως 85 °C (τυπικά): 3050 K ± 5%
<i>Διαστάσεις</i>
Μήκος: 76.2 έως 3.2 mm Διάμετρος: 4 mm
<i>Αυτοθέρμανση στον αέρα</i>
Η θερμοκρασία του θερμίστορ αυξάνει κατά 1 °C για κάθε 1.3 mW καταναλισκόμενης ισχύος
<i>Μέγιστη θερμοκρασία κάψουλας</i>
200 °C (εφόσον δεν η μέγιστη ισχύς δεν υπερβαίνεται)
<i>Μέγιστη συνεχής κατανάλωση ισχύος στον ελεύθερο αέρα και θερμοκρασία 20 °C</i>
230 mW κατά μέσο όρο, σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα 20 ms
<i>Σταθερά χρόνου ψύξης T στον ελεύθερο αέρα από την κατάσταση αυτοθέρμανσης</i>
20 s
<i>Μάζα (τυπική)</i>
1.8 g

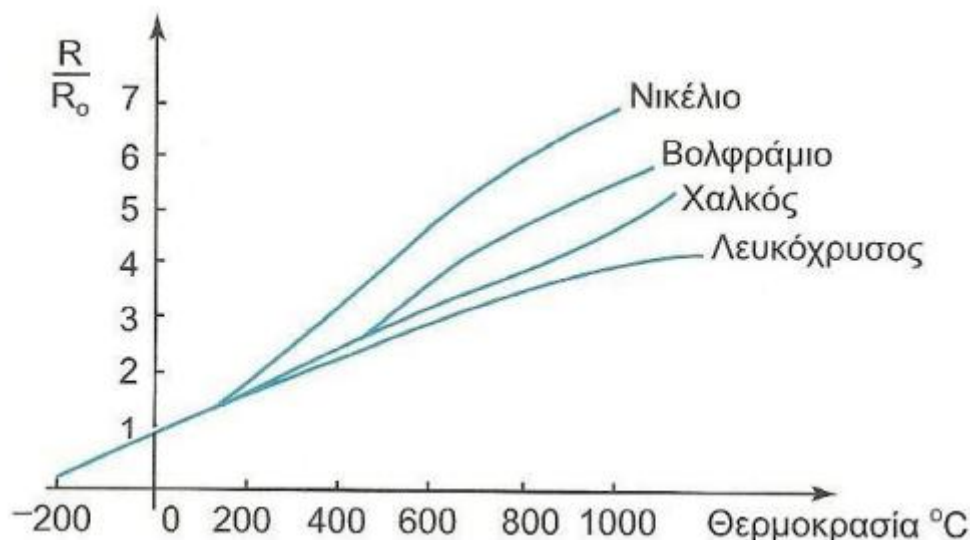
Πίν. 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμίστορ. [3]

### 3.1.2 Αισθητήρες αντίστασης (resistance temperature detectors -RTDs)

Από τον προηγούμενο αιώνα είχε παρατηρηθεί ότι η αντίσταση κάποιων υλικών άλλαζε με την αλλαγή της θερμοκρασίας τους. Μάλιστα ο Callendar το 1887 περιέγραψε την λειτουργία ενός αισθητήρα από πλατίνα, η αντίσταση του οποίου άλλαζε γραμμικά με την θερμοκρασία. Σήμερα οι αισθητήρες RTD κατασκευάζονται από διάφορα μέταλλα, σε σχήμα σύρματος ή λεπτού φίλμ. Όλα τα μέταλλα μπορούν να αποκριθούν σε μεταβολή της θερμοκρασίας, όμως σχεδόν αποκλειστικά χρησιμοποιείται η πλατίνα, λόγω γραμμικής συμπεριφοράς και σταθερότητας της λειτουργίας της. Όλοι πάντως οι RTDs παρουσιάζουν θετικό θερμικό συντελεστή αντίστασης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις θερμοκρασιών από  $-200^{\circ}\text{C}$  έως και  $600^{\circ}\text{C}$ , αλλά ειδικές κατασκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πέρα από την περιοχή αυτή. Η εξάρτηση της αντίστασης από τη θερμοκρασία περιγράφεται κατά προσέγγιση από τη σχέση:

$$R_T = R(0^{\circ}\text{C}) \cdot (1 + a \cdot T) \quad (3.1)$$

Όπου  $a$  είναι ο θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης του εκάστοτε μετάλλου και  $T$  η θερμοκρασία σε  $^{\circ}\text{C}$ . Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου  $R_T / R_{0^{\circ}\text{C}}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας για νικέλιο, βολφράμιο, χαλκός και λευκόχρυσος.



Σχ. 3.4: Μεταβολή της ωμικής αντίστασης διάφορων μετάλλων συναρτήσει της θερμοκρασίας. [3]

Στο σχήμα παρατηρείται η πολύ καλή γραμμικότητα της μεταβολής της αντίστασης του λευκόχρυσου σε σχέση με τα άλλα μέταλλα του διαγράμματος. Η μη γραμμική συμπεριφορά του νικελίου και του χαλκού οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη προσμίξεων και σε ατέλειες του πλέγματός τους.

Ο λευκόχρυσος παρουσιάζει επίσης αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες, είναι χημικώς αδρανής και μπορεί να βρεθεί εύκολα σε χημικώς καθαρή μορφή. Οι ιδιότητες αυτές απαιτούνται έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μέταλλο ως αισθητήρας θερμοκρασίας και έτσι ερμηνεύεται η ευρεία χρήση του λευκόχρυσου στις εφαρμογές αυτές.

Τα τελευταία χρόνια έχει γενικευτεί η χρήση των αισθητηρίων αυτών. Ο πιο γνωστός τύπος είναι το Pt100 (αντίσταση 100Ω στους 0°C) το οποίο και επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε. Τα χαρακτηριστικά του αισθητηρίου αυτού είναι η μεγάλη σταθερότητά, η υψηλή ακρίβεια και η σχεδόν γραμμική συμπεριφορά που παρουσιάζει. Ωστόσο έχει σχετικά αργή απόκριση και είναι ευαίσθητο στους κραδασμούς.

Η εξίσωση 3.1 ισχύει γενικά για τα περισσότερα μέταλλα ωστόσο για τις αντιστάσεις πλατίνας, που επιλέγονται συνήθως για την κατασκευή των αισθητηρίων, χρησιμοποιείται η ακριβέστερη σχέση Callendar – van Dusen:

$$R_T = R(0^\circ\text{C}) \cdot (1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3) \quad (3.2)$$

Όπου τυπικές τιμές των συντελεστών είναι:

- $A = 3.9083 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$
- $B = -5.775 \cdot 10^{-7} / ^\circ\text{C}^2$
- $C = -4.23225 \cdot 10^{-12} / ^\circ\text{C}^3$

Ο συντελεστής C λαμβάνει την τιμή 0 για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 0°C.

Η παράμετρος  $\alpha$  της σχέσης 3.1 ονομάζεται τιμή  $\alpha$  του αισθητήρα και ορίζεται ως εξής:

$$\alpha = \frac{R(100^\circ\text{C}) - R(0^\circ\text{C})}{100 \cdot R(0^\circ\text{C})} \quad (3.3)$$

Οπότε η παράμετρος αυτή προκύπτει μετρώντας την αντίσταση στο σημείο τήξης και στο σημείο βρασμού του νερού. Διάφοροι τρόποι αναγραφής της παραμέτρου  $\alpha$  για τον αισθητήρα Pt100 είναι:

- $0.3851\Omega / ^\circ\text{C}$
- $3.851 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$
- $0.3851\% / ^\circ\text{C}$

Σύμφωνα με τη σχέση 3.3 και την τιμή της παραμέτρου  $\alpha$  όπως προκύπτει για τον αισθητήρα Pt100 η σχέση 3.1 μετασχηματίζεται ως εξής:



$$R_T = 100 + 0.3851 \cdot T \quad (3.4)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.2 και 3.4 μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση του αισθητήρα σε διάφορες θερμοκρασίες. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι τιμές για θερμοκρασίες από -50°C έως 100°C.

T (°C)	R(Ω) από εξ.(3.4)	R(Ω) από εξ.(3.2)
-50	80,75	80,31
-40	84,60	84,27
-30	88,45	88,22
-20	92,30	92,16
-10	96,15	96,09
0	100,00	100,00
10	103,85	103,90
20	107,70	107,79
30	111,55	111,67
40	115,40	115,54
50	119,26	119,40
60	123,11	123,24
70	126,96	127,08
80	130,81	130,90
90	134,66	134,71
100	138,51	138,51

Πίν. 3.2: Αντίσταση αισθητήρα Pt100.

Η ανοχή των αισθητήρων, που χαρακτηρίζει το αναμενόμενο σφάλμα κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης σειράς μετρήσεων ενός οργάνου που ακολουθούν το πρότυπο IEC751, ταξινομείται σε τέσσερις κλάσεις, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα:

Κλάση	Εξίσωση Ανοχής (°C)
A	$\pm(0.15+0.002 \cdot  t )$
B	$\pm(0.30+0.005 \cdot  t )$
C	$\pm(0.40+0.009 \cdot  t )$
D	$\pm(0.60+0.0018 \cdot  t )$

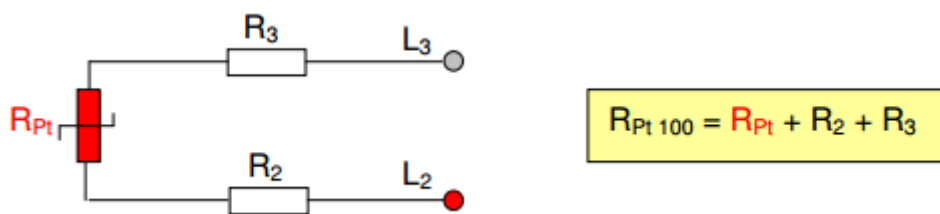
Πίν. 3.3: Κλάσεις αισθητήρων Pt100.

Όπου το σύμβολο  $|t|$  υποδηλώνει την απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας σε °C.

Όπως αναφέραμε νωρίτερα η παράμετρος  $\alpha$  ενός αισθητήρα θερμοκρασίας Pt100 είναι  $0.3851 \Omega / ^\circ\text{C}$ . Για να μετρήσουμε την αντίσταση του αισθητήρα και επομένως τη θερμοκρασία πρέπει να τον ενώσουμε σε μια κατάλληλη διάταξη. Η ένωση του αισθητήρα στη διάταξη γίνεται μέσω χάλκινων αγωγών, η αντίσταση των οποίων μπορεί να κυμαίνεται από μερικά  $\Omega$  έως μερικές δεκάδες  $\Omega$  αναλόγως το μήκος των αγωγών.

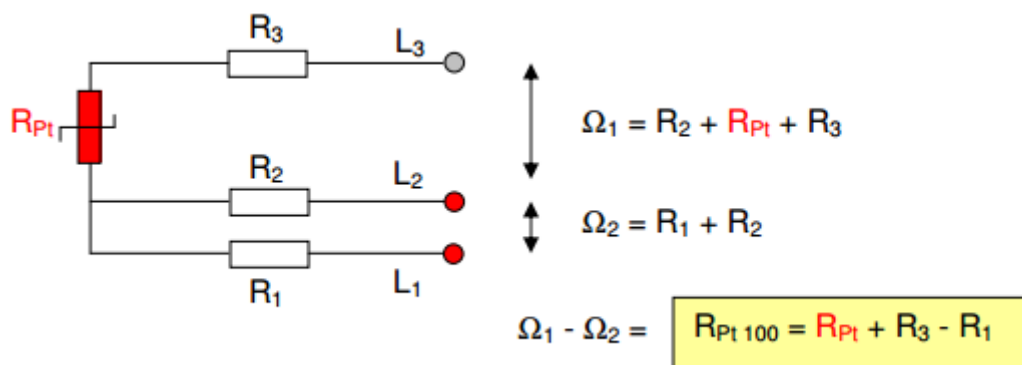
Παρατηρώντας ότι η τιμή της παραμέτρου  $\alpha$  είναι σχετικά μικρή συμπεραίνουμε ότι ακόμα και μία μικρή πρόσθετη αντίσταση των αγωγών μπορεί να εισάγει σημαντικό σφάλμα στη μέτρηση. [4], [3]

Η απλούστερη σύνδεση είναι αυτή με δύο αγωγούς όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Στην περίπτωση αυτή η τιμή της μετρούμενης αντίστασης του αισθητήρα περιέχει και τις αντιστάσεις  $R_2$  και  $R_3$ . Αν υποθέσουμε ότι οι αντιστάσεις των αγωγών έχουν τιμή  $5\Omega$  έκαστη τότε εισάγεται πρόσθετη αντίσταση  $10\Omega$  στη μέτρηση. Άρα σύμφωνα με την παράμετρο  $\alpha$  θα έχουμε σφάλμα στη μέτρηση  $10\Omega / (0.3851\Omega / ^\circ\text{C}) = 26^\circ\text{C}$  που είναι αρκετά μεγάλο.



Σχ. 3.5: Σύνδεση μέσω δύο αγωγών.

Η τεχνική που χρησιμοποιείται για την αποφυγή του παραπάνω σφάλματος είναι η σύνδεση του αισθητήρα μέσω τριών αγωγών. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.6 αν οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_3$  έχουν την ίδια τιμή τότε αλληλοαναιρούνται και η μετρούμενη τιμή είναι η πραγματική αντίσταση του αισθητήρα. Επίσης ιδανικά και η τιμή της αντίστασης  $R_2$  πρέπει να είναι ίση με τις υπόλοιπες.



Σχ. 3.6: Σύνδεση μέσω τριών αγωγών.

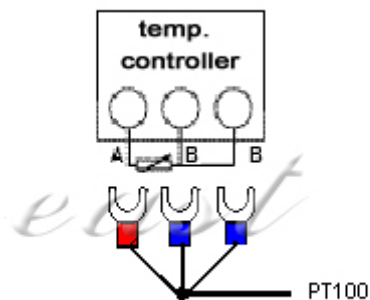
Οι αισθητήρες τριών αγωγών λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών είναι ευρέως διαδομένοι και χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε πολλές εφαρμογές που απαιτούν ακριβείς μετρήσεις της θερμοκρασίας.

Για το λόγο αυτό επιλέξαμε να τοποθετήσουμε στην κατασκευή μας αισθητήρες θερμοκρασίας Pt100 τριών αγωγών. Ο αισθητήρας απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχ. 3.7: Ο αισθητήρας Pt100 τριών αγωγών.

Ο χρωματικός κώδικας των ακροδεκτών του αισθητήρα απεικονίζεται παρακάτω.



Σχ. 3.8: Χρωματικός κώδικας ακροδεκτών του αισθητήρα Pt100 τριών αγωγών

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν.

<b>Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά</b>	
Τύπος	Pt100
Θερμοκρασιακό Εύρος	-50 ~ 400 °C (-58 ~ 752 °F)
Μήκος Καλωδίου	1m
Μήκος probe	50mm
Διάμετρος probe	5mm

Πίν. 3.4: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα Pt100 τριών αγωγών.

### 3.2 Θερμοζεύγος (thermocouple)

Τα αισθητήρια αυτά κατασκευάζονται με τη σύνδεση δύο διαφορετικών μετάλλων γι' αυτό και ονομάζονται θερμοζεύγη. Στη μία άκρη τα μέταλλα είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα και η επαφή αυτή αποτελεί την επαφή μέτρησης ή «θερμή επαφή». Οι άλλες δύο άκρες δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένες ωστόσο πρέπει να διατηρούνται στην ίδια θερμοκρασία. Αυτή η ισόθερμη σύνδεση των επαφών ονομάζεται επαφή αναφοράς ή «ψυχρή επαφή».

Η έξοδος του θερμοζεύγους είναι μια απευθείας ηλεκτρική τάση που αποτελεί συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της «θερμής επαφής» και της «ψυχρής επαφής». Απαιτείται όμως να θέσουμε την επαφή αναφοράς σε μια δεδομένη θερμοκρασία και αυτό αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα κυρίως όταν η ακρίβεια των μετρήσεων παίζει σημαντικό ρόλο. Για το λόγο αυτό έχουν κατασκευαστεί ολοκληρωμένα κυκλώματα, ώστε να αντισταθμίζεται ηλεκτρικά η επαφή αναφοράς. Επίσης τα θερμοζεύγη παρουσιάζουν μη γραμμική σχέση μεταξύ τάσης εξόδου και θερμοκρασίας οπότε απαιτούνται ηλεκτρονικές διατάξεις ώστε να γραμμικοποιείται αυτή η σχέση και να μεταφράζεται το σήμα εξόδου στη σωστή θερμοκρασία.

Κύρια χαρακτηριστικά των θερμοζευγών είναι τα εξής:

- Εύχρηστα
- Οικονομικά
- Αξιόπιστα
- Ακριβή
- Μεγάλη περιοχή μέτρησης
- Γρήγορη απόκριση της τάξεως των msec
- Δεν απαιτούν τροφοδοσία

Η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται από την θερμοκρασία λειτουργίας, το περιβάλλον λειτουργίας, τον τύπο του θερμοζεύγους και τη διάμετρο των καλωδίων. Επίσης υπόκεινται σε διάβρωση και οξειδωση. Τα θερμοζεύγη που κατασκευάζονται από ευγενή μέταλλα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής ενώ τα υπόλοιπα μπορούν να λειτουργήσουν για μερικές χιλιάδες ώρες σε θερμοκρασίες κοντά στο ανώτερο σημείο ανοχής τους.

Τα θερμοζεύγη κατασκευάζονται από επιλεγμένα μέταλλα ή κράματα μετάλλων τα οποία αναπτύσσουν θερμοηλεκτρική τάση που μεταβάλλεται ισχυρά με τη θερμοκρασία αλλά δεν εμφανίζουν υψηλή απόλυτη τιμή τάσης. Ονομάζονται από τα ονόματα των δύο μετάλλων ή κραμάτων και αναφέρεται πρώτο το μέταλλο που αποτελεί το θετικό πόλο της θερμοηλεκτρικής τάσης. [4], [3], [5]

Οι κυριότεροι τύποι θερμοζευγών και οι αντίστοιχες περιοχές λειτουργίας φαίνονται στον επόμενο πίνακα:

Τύπος	Υλικό κατασκευής	Περιοχή λειτουργίας (σε °C)	Ακρίβεια	Παρατηρήσεις
E	Cr/Con	-200 έως 900	±1.5 °C ή 0.5%	Υψηλή ΗΕΔ (56mV στους 750°C)
J	Fe/Con	0 έως 750	±3 °C ή 0.75%	Φθηνό Μέτρια ΗΕΔ (42mV στους 750°C)
K	Cr/Al	-200 έως 1260	±3 °C ή 0.75%	Σταθερό, Μεγάλη γραμμικότητα Χαμηλή ΗΕΔ (30mV στους 750°C)
R	Rt/Rh & Pt	0 έως 1400	±2 °C ή 0.3%	Πολύ σταθερό Εξαιρετικά μικρή ΗΕΔ (7mV στους 750°C)
S	Rt/Rh & Pt	0 έως 1400	±2 °C ή 0.3%	Πολύ σταθερό Εξαιρετικά μικρή ΗΕΔ (6.6mV στους 750°C) Οξειδώνεται στις υψηλές θερμοκρασίες
T	Cu/Con	-250 έως 400	±2 °C ή 0.75%	Μέτρια ΗΕΔ (20mV στους 400°C)
B	Pt/Rh	0 έως 1700	±3 °C ή 0.3%	Εξαιρετικά μικρή ΗΕΔ (8.4mV στους 1000°C)

Πίν. 3.5: Κυριότεροι τύποι θερμοζευγών και περιοχές λειτουργίας. [3]



## 4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

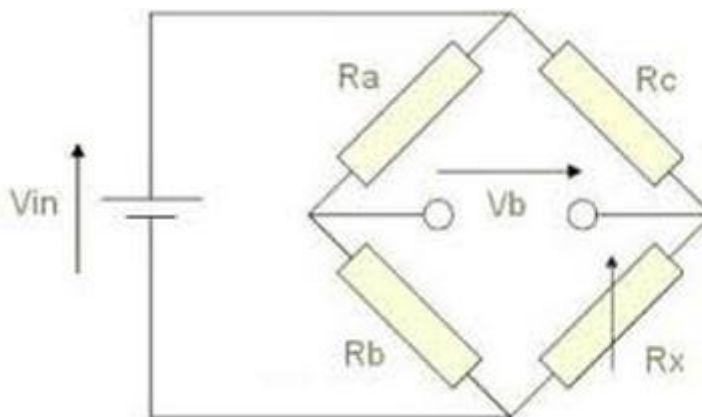
### 4.1 Η Γέφυρα Wheatstone

Προκειμένου να μετρήσουμε την αντίσταση ενός αισθητήρα θερμοκρασίας και επομένως και τη θερμοκρασία πρέπει να τον συνδέσουμε σε μια κατάλληλη διάταξη.

Υπάρχουν κυρίως δύο τρόποι με τους οποίους μπορεί να μετρηθεί η θερμοκρασία και αυτοί είναι:

1. Σύνδεση του αισθητήρα με μια σταθερή πηγή ρεύματος και μέτρηση της πτώσης τάσεως που προκαλείται στον αισθητήρα.
2. Σύνδεση του αισθητήρα σε μια γέφυρα Wheatstone.

Ο δεύτερος τρόπος είναι αυτός που επιλέξαμε να εφαρμόσουμε στην κατασκευή μας. Μια γέφυρα Wheatstone απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχ. 4.1: Η γέφυρα Wheatstone.

Η γέφυρα αποτελείται από τέσσερις αντιστάσεις τοποθετημένες όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα και τροφοδοτείται από μια πηγή  $V_{in}$  συνεχούς τάσης. Στη θέση της αντίστασης  $R_x$  τοποθετείται ο αισθητήρας θερμοκρασίας. Έξοδος της γέφυρας είναι η τάση  $V_b$  η οποία μεταβάλλεται καθώς αλλάζει η αντίσταση του αισθητήρα.

Η αντίσταση  $R_b$  καθορίζει το σημείο ισορροπίας της γέφυρας αφού όταν η αντίσταση  $R_b$  ταυτίζεται με την αντίσταση  $R_x$  η τάση εξόδου  $V_b$  θα ισούται με 0. Για τις απαιτήσεις της κατασκευής μας επιλέξαμε να ισορροπεί η γέφυρα όταν η θερμοκρασία βρίσκεται στους  $-10^{\circ}\text{C}$  οπότε σύμφωνα και με τον Πίν. 3.2

η αντίσταση  $R_b$  θα έχει τιμή περίπου στα  $96\Omega$  την οποία θα επιτύχουμε χρησιμοποιώντας μια μεταβλητή αντίσταση των  $100\Omega$  (trimmer).

Οι αντιστάσεις  $R_a$  και  $R_c$  θα έχουν την ίδια τιμή ωστόσο η επιλογή αυτής της τιμής έχει ιδιαίτερη σημασία.

Συγκεκριμένα αύξηση της τιμής των αντιστάσεων συνεπάγεται μείωση του ρεύματος που διαπερνά τον αισθητήρα, αύξηση της γραμμικότητας στη σχέση της τάσης εξόδου και της θερμοκρασίας και μείωση του εύρους του σήματος εξόδου.

Αντίθετα μείωση της τιμής των αντιστάσεων  $R_a$  και  $R_c$  οδηγεί σε αύξηση του ρεύματος στον κλάδο του αισθητήρα, μείωση της γραμμικότητας της τάσης εξόδου συναρτήσει της θερμοκρασίας και αύξηση του εύρους του σήματος εξόδου.

Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι για την κατάλληλη επιλογή της τιμής των αντιστάσεων χρειάζεται να βρεθεί η χρυσή τομή ούτως ώστε να επιτύχουμε:

- Ικανοποιητικό εύρος τάσης εξόδου ώστε να υπάρχει διακριτότητα μεταξύ των τιμών και να μπορούμε με σχετικά μικρό σφάλμα να αποκωδικοποιήσουμε το σήμα και να το εκφράσουμε σε θερμοκρασία.
- Όσο το δυνατόν καλύτερη γραμμικότητα μεταξύ τάσης εξόδου και θερμοκρασίας και κατά συνέπεια ευκολότερη διαδικασία μετατροπής της τάσης εξόδου σε θερμοκρασία.
- Χαμηλή τιμή ρεύματος στον κλάδο του αισθητήρα ώστε να μειώσουμε το φαινόμενο αυτοθέρμανσης του και να μην υπερβαίνουμε τις προδιαγραφές λειτουργίας του αισθητήρα.

Πραγματοποιώντας αρκετές δοκιμές και προσομοιώσεις καταλήξαμε να χρησιμοποιήσουμε αντιστάσεις που κυμαίνονται κοντά στα  $4k\Omega$  και συγκεκριμένα  $3,9k\Omega$  μιας και είναι οι πλησιέστερες στα  $4k\Omega$  που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Με την επιλογή αυτή ικανοποιούμε βέλτιστα τις παραπάνω απαιτήσεις αφού:

- λαμβάνουμε εύρος τάσης εξόδου κοντά στα  $50mV$  εφαρμόζοντας τάση τροφοδοσίας  $5V$ .
- Επιτυγχάνουμε σχεδόν τέλεια γραμμικότητα μεταξύ τάσης εξόδου και θερμοκρασίας για θερμοκρασιακό εύρος από  $-10$  έως  $90$  °C.
- Η τιμή του ρεύματος που διαρρέει τον αισθητήρα κυμαίνεται στα επίπεδα του  $1mA$  όπως και απαιτείται από τις λειτουργικές προδιαγραφές του αισθητήρα.

Οι προσομοιώσεις που απεικονίζουν όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικώς στην αντίστοιχη υποενότητα (6.2.1).



## 4.2 Ρυθμιστές Τάσης


### 4.2.1 Εισαγωγή

Ένας ρυθμιστής τάσης είναι σχεδιασμένος για να διατηρεί ένα επίπεδο σταθερής τάσης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρομηχανικών μηχανισμών ή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Ανάλογα με το σχεδιασμό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ρυθμίσει μία ή περισσότερες AC ή DC τάσεις. Μερικές από τις παραμέτρους που επηρεάζουν την τάση εξόδου του ρυθμιστή είναι :

- Η θερμοκρασία
- Το τροφοδοτούμενο φορτίο
- Το σφάλμα του ρυθμιστή
- Η ελάχιστη διαφορά μεταξύ της τάσης τροφοδοσίας και της ονομαστικής τάσης εξόδου
- Ο λόγος της μεταβολής της τάσης εξόδου προς την μεταβολή της τάσης εισόδου

### 4.2.2 Η σειρά L78XX της εταιρείας ST.

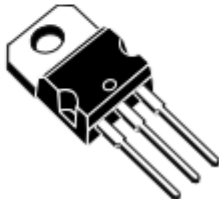
Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιούμε καθώς και η οθόνη τροφοδοτούνται με τάση 5V. Επίσης οι γέφυρες στις οποίες έχουμε τοποθετήσει τους αισθητήρες θερμοκρασίας απαιτούν 5V τάση τροφοδοσίας. Επομένως για τα τμήματα αυτά της κατασκευής θα χρησιμοποιηθεί ένας κοινός ρυθμιστής τάσης και συγκεκριμένα το μοντέλο L7805CV της εταιρείας ST.



**L7800  
SERIES**

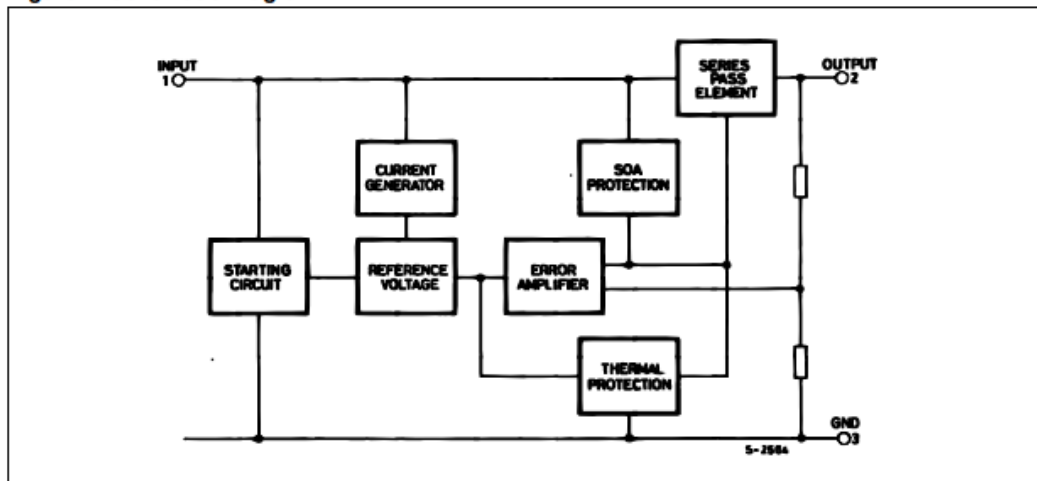
**POSITIVE VOLTAGE REGULATORS**

- OUTPUT CURRENT TO 1.5A
- OUTPUT VOLTAGES OF 5; 5.2; 6; 8; 8.5; 9; 10; 12; 15; 18; 24V
- THERMAL OVERLOAD PROTECTION
- SHORT CIRCUIT PROTECTION
- OUTPUT TRANSITION SOA PROTECTION



Σχ. 4.2: Ρυθμιστής Τάσης L7805CV της εταιρείας ST. [6]

Figure 1: Schematic Diagram

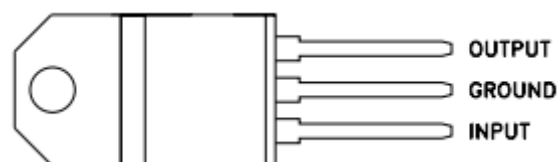


Σχ. 4.3: Σχηματικό διάγραμμα ρυθμιστή τάσης. [6]

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, για την ομαλή λειτουργία του ρυθμιστή απαιτείται να τοποθετηθούν πυκνωτές ανάμεσα στην είσοδο και τη γείωση και μεταξύ εξόδου και γείωσης επίσης.

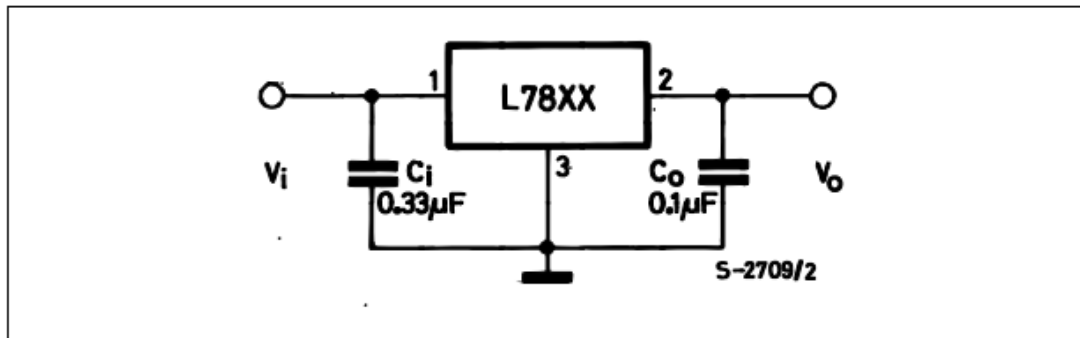
Η λειτουργία του πυκνωτή ανάμεσα στην είσοδο και τη γείωση είναι να τροφοδοτεί με ρεύμα το ρυθμιστή εάν αυτός αποκοπεί στιγμιαία από την τάση τροφοδοσίας.

Ο δεύτερος πυκνωτής που βρίσκεται ανάμεσα στην έξοδο και τη γείωση τροφοδοτεί το φορτίο στιγμιαία υπό σταθερή τάση ώστε να ανταπεξέλθει ο ρυθμιστής στις μεταβολές της τάσης εισόδου του. Επίσης αποκόβει τις ταλαντώσεις που δημιουργούνται στην έξοδο του ρυθμιστή.



Σχ. 4.4: Τοπολογία ακροδεκτών του ρυθμιστή τάσης. [6]

Ο πρώτος πυκνωτής απαιτείται να είναι 0.33  $\mu\text{F}$  και ηλεκτρολυτικός, ενώ ο δεύτερος 0.1  $\mu\text{F}$  και μπορεί να είναι κεραμικός ή ηλεκτρολυτικός.



Σχ. 4.5: Συνδεσμολογία πυκνωτών. [6]

Παρακάτω αναγράφονται στοιχεία για τις μέγιστες τιμές λειτουργίας, τα θερμικά χαρακτηριστικά αλλά και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή L7805CV.

**Table 1: Absolute Maximum Ratings**

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_i$	DC Input Voltage	for $V_o = 5$ to 18V	V
		for $V_o = 20, 24\text{V}$	
$I_o$	Output Current	Internally Limited	
$P_{tot}$	Power Dissipation	Internally Limited	
$T_{stg}$	Storage Temperature Range	-65 to 150	$^{\circ}\text{C}$
$T_{op}$	Operating Junction Temperature Range	for L7800	$^{\circ}\text{C}$
		for L7800C	

Absolute Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation under these condition is not implied.

**Table 2: Thermal Data**

Symbol	Parameter	D <sup>2</sup> PAK	TO-220	TO-220FP	TO-220FM	TO-3	Unit
$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-case Max	3	5	5	5	4	$^{\circ}\text{C/W}$
$R_{thj-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient Max	62.5	50	60	60	35	$^{\circ}\text{C/W}$

Πίν. 4.1: Μέγιστες τιμές και θερμικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή L7805. [6]

**Table 4: Electrical Characteristics Of L7805** (refer to the test circuits,  $T_J = -55$  to  $150^\circ\text{C}$ ,  $V_I = 10\text{V}$ ,  $I_O = 500$  mA,  $C_I = 0.33$   $\mu\text{F}$ ,  $C_O = 0.1$   $\mu\text{F}$  unless otherwise specified).

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_O$	Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	4.8	5	5.2	V
$V_O$	Output Voltage	$I_O = 5$ mA to 1 A $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 8$ to 20 V	4.65	5	5.35	V
$\Delta V_{O(*)}$	Line Regulation	$V_I = 7$ to 25 V $T_J = 25^\circ\text{C}$		3	50	mV
		$V_I = 8$ to 12 V $T_J = 25^\circ\text{C}$		1	25	
$\Delta V_{O(*)}$	Load Regulation	$I_O = 5$ mA to 1.5 A $T_J = 25^\circ\text{C}$			100	mV
		$I_O = 250$ to 750 mA $T_J = 25^\circ\text{C}$			25	
$I_d$	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			6	mA
$\Delta I_d$	Quiescent Current Change	$I_O = 5$ mA to 1 A			0.5	mA
		$V_I = 8$ to 25 V			0.8	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Drift	$I_O = 5$ mA		0.6		mV/ $^\circ\text{C}$
eN	Output Noise Voltage	B = 10Hz to 100KHz $T_J = 25^\circ\text{C}$			40	$\mu\text{V}/V_O$
SVR	Supply Voltage Rejection	$V_I = 8$ to 18 V $f = 120\text{Hz}$	68			dB
$V_d$	Dropout Voltage	$I_O = 1$ A $T_J = 25^\circ\text{C}$		2	2.5	V
$R_O$	Output Resistance	$f = 1$ KHz		17		m $\Omega$
$I_{sc}$	Short Circuit Current	$V_I = 35$ V $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.75	1.2	A
$I_{scp}$	Short Circuit Peak Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$	1.3	2.2	3.3	A

(\*) Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

Πίν. 4.2: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή L7805. [6]

Για τη θετική τάση τροφοδοσίας των ενισχυτών απαιτείται ρυθμιστής τάσης των +9V. Θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο L7809C της ίδιας εταιρείας. Τα βασικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά είναι ίδια με το προηγούμενο μοντέλο αφού ανήκουν στην ίδια σειρά.

**Table 17: Electrical Characteristics Of L7809C** (refer to the test circuits,  $T_J = 0$  to  $125^\circ\text{C}$ ,  $V_I = 15\text{V}$ ,  $I_O = 500$  mA,  $C_I = 0.33$   $\mu\text{F}$ ,  $C_O = 0.1$   $\mu\text{F}$  unless otherwise specified).

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_O$	Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	8.64	9	9.36	V
$V_O$	Output Voltage	$I_O = 5$ mA to 1 A $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 11.5$ to 26 V	8.55	9	9.45	V
$\Delta V_{O(*)}$	Line Regulation	$V_I = 11.5$ to 26 V $T_J = 25^\circ\text{C}$			180	mV
		$V_I = 12$ to 18 V $T_J = 25^\circ\text{C}$			90	
$\Delta V_{O(*)}$	Load Regulation	$I_O = 5$ mA to 1.5 A $T_J = 25^\circ\text{C}$			180	mV
		$I_O = 250$ to 750 mA $T_J = 25^\circ\text{C}$			90	
$I_d$	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			8	mA
$\Delta I_d$	Quiescent Current Change	$I_O = 5$ mA to 1 A			0.5	mA
		$V_I = 11.5$ to 26 V			1	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Drift	$I_O = 5$ mA		-1		mV/ $^\circ\text{C}$
eN	Output Noise Voltage	B = 10Hz to 100KHz $T_J = 25^\circ\text{C}$		70		$\mu\text{V}/V_O$
SVR	Supply Voltage Rejection	$V_I = 12$ to 23 V $f = 120\text{Hz}$	55			dB
$V_d$	Dropout Voltage	$I_O = 1$ A $T_J = 25^\circ\text{C}$		2		V
$R_O$	Output Resistance	$f = 1$ KHz		17		m $\Omega$
$I_{sc}$	Short Circuit Current	$V_I = 35$ V $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.40		A
$I_{scp}$	Short Circuit Peak Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		2.2		A

(\*) Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

Πίν. 4.3: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή L7809C. [6]

### 4.2.3 Η σειρά LM79XX.

Για τη αρνητική τάση τροφοδοσίας των ενισχυτών απαιτείται ρυθμιστής τάσης των  $-9V$ . Θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο L7909 της εταιρείας Fairchild Semiconductor. Ο ρυθμιστής αυτός απαιτεί τη σύνδεση δύο πυκνωτών, έναν στην είσοδο και ένα στην έξοδό του. Ο πρώτος πρέπει να είναι  $2.2\mu F$  και ο δεύτερος  $1\mu F$  αντίστοιχα. Τα βασικά κατασκευαστικά και θερμικά χαρακτηριστικά του καθώς και οι μέγιστες τιμές λειτουργίας και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του αναφέρονται παρακάτω.



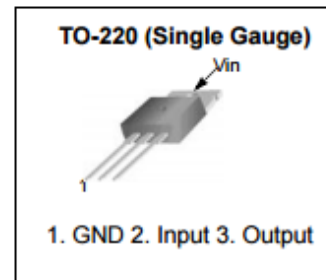
www.fairchildsemi.com

## LM79XX

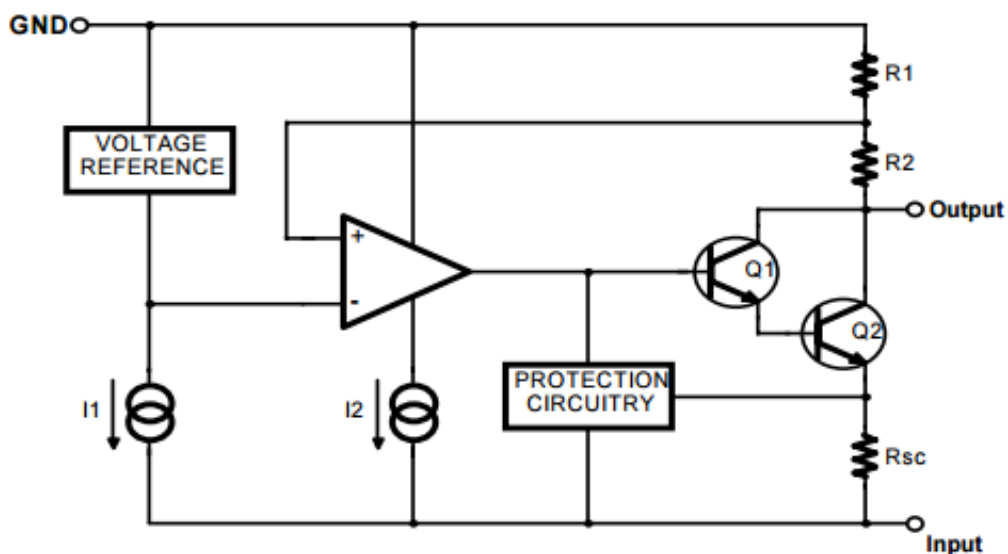
### 3-Terminal 1A Negative Voltage Regulator

#### Features

- Output Current in Excess of 1A
- Output Voltages of  $-5, -6, -8, -9, -10, -12, -15, -18$  and  $-24V$
- Internal Thermal Overload Protection
- Short Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Compensation



Σχ. 4.6: Ο ρυθμιστής τάσης LM7909 της εταιρείας Fairchild Semiconductor. [7]



Σχ. 4.7: Σχηματικό διάγραμμα του ρυθμιστή LM7909. [7]

### Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Input Voltage	$V_I$	-35	V
Thermal Resistance Junction-Case (Note1)	$R_{\theta JC}$	5	°C/W
Thermal Resistance Junction-Air (Note1, 2)	$R_{\theta JA}$	65	
Operating Temperature Range	$T_{OPR}$	0 ~ +125	°C
Storage Temperature Range	$T_{STG}$	-65 ~ +150	°C

**Note:**

- Thermal resistance test board  
Size: 76.2mm \* 114.3mm \* 1.6mm(1S0P)  
JEDEC standard: JESD51-3, JESD51-7
- Assume no ambient airflow

Πίν. 4.4: Μέγιστες τιμές λειτουργίας του ρυθμιστή LM7909. [7]

### Electrical Characteristics (LM7909) (Continued)

( $V_I = -15V$ ,  $I_O = 500mA$ ,  $0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$ ,  $C_I = 2.2\mu F$ ,  $C_O = 1\mu F$ , unless otherwise specified.)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Output Voltage	$V_O$	$T_J = +25^\circ C$	-8.7	-9.0	-9.3	V	
		$I_O = 5mA$ to $1A$ , $P_O \leq 15W$ $V_I = -1.5V$ to $-23V$	-8.6	-9.0	-9.4		
Line Regulation (Note1)	$\Delta V_O$	$T_J = +25^\circ C$	$V_I = -11.5V$ to $-26V$	-	10	180	mV
			$V_I = -12V$ to $-18V$	-	5	90	
Load Regulation (Note1)	$\Delta V_O$	$T_J = +25^\circ C$ $I_O = 5mA$ to $1.5A$	-	12	180	mV	
		$T_J = +25^\circ C$ $I_O = 250mA$ to $750mA$	-	4	90		
Quiescent Current	$I_Q$	$T_J = +25^\circ C$	-	3	6	mA	
Quiescent Current Change	$\Delta I_Q$	$I_O = 5mA$ to $1A$	-	0.05	0.5	mA	
		$V_I = -11.5V$ to $-26V$	-	0.1	1		
Temperature Coefficient of $V_D$	$\Delta V_O/\Delta T$	$I_O = 5mA$	-	-0.6	-	mV/°C	
Output Noise Voltage	$V_N$	$f = 10Hz$ to $100kHz$ $T_A = +25^\circ C$	-	175	-	$\mu V$	
Ripple Rejection	RR	$f = 120Hz$ $\Delta V_I = 10V$	54	60	-	dB	
Dropout Voltage	$V_D$	$T_J = +25^\circ C$ $I_O = 1A$	-	2	-	V	
Short Circuit Current	$I_{SC}$	$T_J = +25^\circ C$ , $V_I = -35V$	-	300	-	mA	
Peak Current	$I_{PK}$	$T_J = +25^\circ C$	-	2.2	-	A	

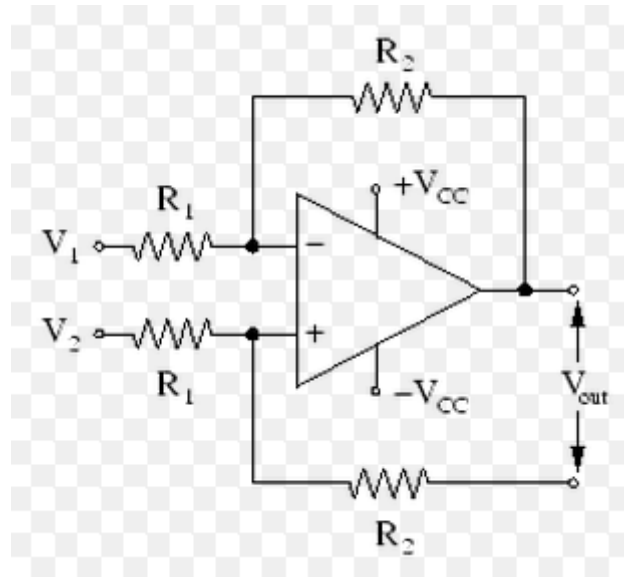
**Note:**

- Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty is used.

Πίν. 4.5: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή LM7909. [7]

### 4.3 Ενισχυτής Διαφορών (Differential Amplifier)

Ο ενισχυτής διαφορών είναι ένα κύκλωμα που υλοποιείται όταν σε έναν τελεστικό ενισχυτή χρησιμοποιούμε ταυτόχρονα την ενίσχυση της αναστρέφουσας και μη αναστρέφουσας συνδεσμολογίας.



Σχ. 4.8: Ο ενισχυτής διαφορών.

Το σύστημα αυτό ανιχνεύει τις τάσεις στα δύο τερματικά εισόδου και ενισχύει τη διαφορά τους. Παρ' όλα αυτά, ο ενισχυτής διαφορών έχει πολύ μικρή αντίσταση εισόδου.

Η μικρή αντίσταση εισόδου του ενισχυτή επιφέρει εισροή ρεύματος στον ενισχυτή που με τη σειρά της αλλοιώνει, αποσβένοντας το σήμα εισόδου. Ειδικά για πολύ μικρά σήματα όπως της διάταξης του αισθητήρα θερμοκρασίας το χαρακτηριστικό αυτό του ενισχυτή διαφορών είναι ιδιαίτερα αποθαρρυντικό για τη χρήση του.

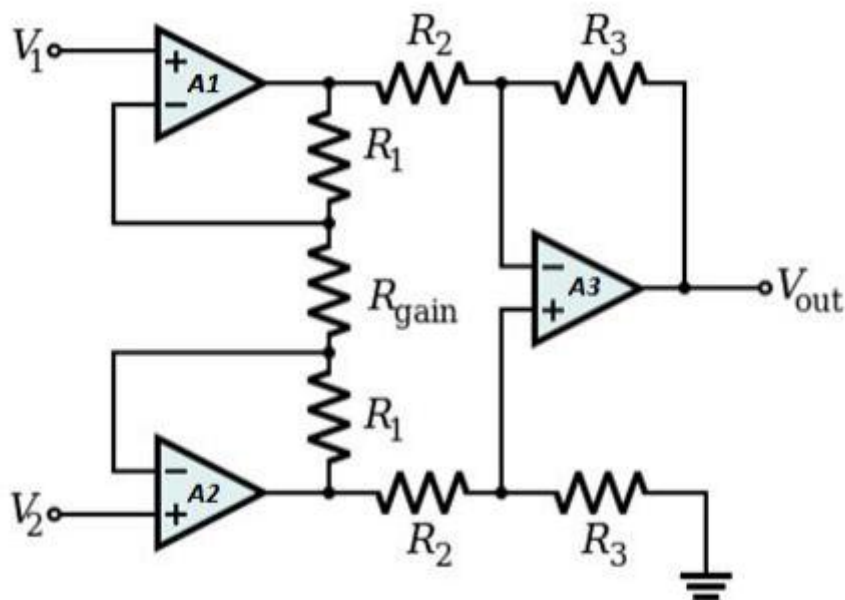
Ο ενισχυτής οργάνων μέτρησης έρχεται να αναπληρώσει αυτό το κενό προσθέτοντας ένα στάδιο ενίσχυσης πριν τον ενισχυτή διαφορών με τη χρήση δύο ακόλουθων τάσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται πολύ μεγάλες αντιστάσεις εισόδου και στα δύο τερματικά εισόδου.

#### 4.4 Ενισχυτής Οργάνων (Instrumentation Amplifier)

Ο ενισχυτής οργάνων μέτρησης έρχεται να αναπληρώσει το κενό του ενισχυτή διαφορών προσθέτοντας ένα στάδιο ενίσχυσης πριν τον ενισχυτή διαφορών με τη χρήση δύο ακόλουθων τάσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται πολύ μεγάλες αντιστάσεις εισόδου και στα δύο τερματικά εισόδου. Ο ενισχυτής οργάνων μέτρησης (IA) είναι ένας ειδικός τύπος διαφορικού ενισχυτή που πρέπει να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις.

- Το σήμα που εισέρχεται στην είσοδο του ενισχυτή δε θα πρέπει να επηρεάζεται από τον ίδιο τον ενισχυτή.
- Ο ενισχυτής δε θα πρέπει να παραμορφώνει το προς ενίσχυση σήμα.
- Ο ενισχυτής θα πρέπει να προσφέρει τον καλύτερο δυνατόν διαχωρισμό του σήματος πληροφορίας και του θορύβου.
- Οι αντιστάσεις εισόδου της αναστρέφουσας και της μη αναστρέφουσας εισόδου του ενισχυτή οργάνων μέτρησης πρέπει να είναι μεγάλες και όσο γίνεται ταιριασμένες μεταξύ τους. Επίσης, τα ρεύματα πόλωσης εισόδου θα πρέπει να είναι πολύ μικρά, της τάξης των  $\mu\text{A}$ .

Με βάση τις παραπάνω προϋποθέσεις θα οριστούν στη συνέχεια διάφορες παράμετροι ή χαρακτηριστικά του ενισχυτή οργάνων μέτρησης. Το κατεξοχήν κύκλωμα που υλοποιεί έναν ενισχυτή οργάνων μέτρησης παρουσιάζεται στην εικόνα [8] :



Σχ. 4.9: Κλασικό κύκλωμα Ενισχυτή Οργάνων Μέτρησης (Instrumentation Amplifier, IA).



#### 4.4.1 Κέρδος

Στο σχ. 4.9 παρουσιάζονται τα δύο στάδια του ενισχυτή οργάνων μέτρησης. Το πρώτο στάδιο αποτελείται από τους τελεστικούς ενισχυτές A1, A2 και τις αντιστάσεις ανάδρασης  $R_G$  και  $R_1$ . Το δεύτερο στάδιο αποτελείται από τον τελεστικό ενισχυτή A3 και τις αντιστάσεις ανάδρασης  $R_2$  και  $R_3$ . Οι δύο τελεστικοί ενισχυτές του πρώτου σταδίου είναι σε συνδεσμολογία ακόλουθων τάσης. Με αυτήν την συνδεσμολογία επιτυγχάνεται πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου. Επίσης, το διαφορικό κέρδος του πρώτου σταδίου είναι :

$$G_1 = 1 + \frac{2R_1}{R_G} \quad (4.1)$$

Η ανάλυση έχει ως εξής: Τα εικονικά βραχυκυκλώματα στις εισόδους των τελεστικών A1 και A2 προκαλούν την εμφάνιση των τάσεων εισόδου στους ακροδέκτες της αντίστασης  $R_G$ . Έτσι, η διαφορική τάση εισόδου εμφανίζεται στα άκρα της  $R_G$  προκαλώντας ροή ρεύματος  $i = U_{id} / R_G$  το οποίο διαρρέει και τις δύο αντιστάσεις ανάδρασης  $R_1$ .

Συνεπώς, αυτό το ρεύμα προκαλεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις εξόδους των τελεστικών ενισχυτών A1 και A2 ίση με:

$$\Delta U_1 = i \cdot (2R_1 + R_G) = \left(1 + \frac{2R_1}{R_G}\right) \cdot U_{id} \quad (4.2)$$

Στο δεύτερο στάδιο, ο ενισχυτής διαφορών που υλοποιείται με τον τελεστικό ενισχυτή A3 και τις αντιστάσεις ανάδρασης  $R_2$  και  $R_3$ . Η διαφορά δυναμικού που δέχεται στην είσοδο του το δεύτερο στάδιο είναι η έξοδος του πρώτου σταδίου. Το κέρδος του δεύτερου σταδίου δίνεται προφανώς από τον τύπο:

$$G_2 = \frac{R_3}{R_2} \quad (4.3)$$

Συνολικά λοιπόν το διαφορικό κέρδος του ενισχυτή οργάνων μέτρησης είναι:

$$G = G_1 \cdot G_2 = \frac{R_3}{R_2} \left(1 + \frac{2R_1}{R_G}\right) \quad (4.4)$$

Είναι συνήθης πρακτική να λαμβάνεται το απαιτούμενο συνολικό κέρδος ή τουλάχιστον ένα μεγάλο ποσοστό του διαφορικού κέρδους στο πρώτο στάδιο του ενισχυτή και να επιτελείται η διαφορική λειτουργία στο δεύτερο στάδιο του ενισχυτή.

Για το λόγο αυτό, το δεύτερο στάδιο του ενισχυτή οργάνων μέτρησης συνήθως σχεδιάζεται για αρκετά μικρό διαφορικό κέρδος. Είναι επίσης συνήθης τακτική των σχεδιαστών ενισχυτών οργάνων μέτρησης να υλοποιούν τις αντιστάσεις ανάδρασης  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  μέσα στο ολοκληρωμένο ενώ η

αντίσταση  $R_G$  υλοποιείται με εξωτερική αντίσταση ώστε να ρυθμίζεται εύκολα το κέρδος του ενισχυτή.

Παρ' όλα αυτά, όταν η αντίσταση  $R_G$  παίρνει τιμές μέσα σε ένα συνεχές εύρος τιμών είναι αρκετά δύσκολο να πετύχουμε ένα συγκεκριμένο κέρδος όταν αυτό επιθυμείται. Για το λόγο αυτό, συχνότερα η αντίσταση  $R_G$  παίρνει μερικές διακριτές τιμές ώστε το κέρδος να ορίζεται στις αντίστοιχες προκαθορισμένες από τον σχεδιαστή τιμές. [8]

#### 4.4.2 CMRR

Ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος στην είσοδο (Common Mode Rejection Ration, CMRR) ορίζεται ως ο λόγος του κέρδους του διαφορικού σήματος στην είσοδο ως προς το κέρδος του κοινού σήματος στην είσοδο.

$$CMRR = \frac{A_D}{A_{CM}} \quad (4.5)$$

Όπου  $A_D$  είναι το διαφορικό κέρδος και  $A_{CM}$  είναι το κέρδος κοινού σήματος. Ενδεικτικές τιμές του κέρδους κοινού σήματος είναι της τάξης του 1/1000. Το διαφορικό κέρδος εξαρτάται από το εύρος του σήματος που θέλουμε να ενισχύσουμε και τα όρια της τάσης εξόδου του ενισχυτή.

Στην παρούσα εργασία, το διαφορικό σήμα που θέλουμε να ενισχύσουμε είναι το πολύ 47mV p-p ενώ το εύρος τάσης εξόδου είναι 5V p-p. Για να έχουμε όσο το δυνατόν καλύτερη ανάλυση του προς ενίσχυση σήματος στην έξοδο θα πρέπει να εκμεταλλευτούμε όλο το εύρος της τάσης εξόδου. Το γεγονός αυτό ορίζει το διαφορικό κέρδος γύρω στο  $A_D = 106$ .

Πολλές φορές ο λόγος απόρριψης του κοινού σήματος εκφράζεται σε dB μέσω της έκφρασης:

$$CMR = 20 \log \left( \frac{A_D}{A_{CM}} \right) \quad (4.6)$$

Ικανοποιητικές τιμές για το CMR είναι πάνω από 90dB. Σε αυτό το σημείο όμως πρέπει να μελετηθεί η σημασία του όρου  $A_D$  στις εξισώσεις (4.5) και (4.6).

Παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το διαφορικό κέρδος τόσο αυξάνει και ο λόγος απόρριψης του κοινού σήματος. Αυτό σημαίνει ότι αν δύο ενισχυτές έχουν ίδιο κέρδος κοινού σήματος ενώ ο ένας έχει μεγαλύτερο διαφορικό κέρδος από τον άλλον τότε θα είναι διαφορετικοί και οι λόγοι απόρριψης κοινού σήματος.

Το γεγονός αυτό δημιουργεί ένα πρόβλημα καθώς και οι δύο ενισχυτές αποσβένουν το κοινό σήμα στην είσοδό τους με τον ίδιο τρόπο όμως έχουν διαφορετικούς λόγους απόρριψης κοινού σήματος.

Καλό θα ήταν λοιπόν, όταν είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει μεγάλη απόρριψη κοινού σήματος από έναν ενισχυτή, να εξετάζεται ξεχωριστά το κέρδος κοινού σήματος. Ικανοποιητικές τιμές για το κέρδος κοινού σήματος ACM μικρότερες από -50dB ή με άλλα λόγια η απόσβεση του κοινού σήματος στην είσοδο να είναι μεγαλύτερη από 50dB.

Κοινό σήμα στην είσοδο του ενισχυτή σημαίνει ότι και στις δύο εισόδους του ενισχυτή θα παρουσιαστεί το ίδιο ακριβώς σήμα. Το σήμα αυτό συνήθως είναι θόρυβος και πρέπει να αποσβεστεί σημαντικά ώστε να εμφανίζεται στην έξοδο του ενισχυτή ένα ελάχιστο κλάσμα του αρχικού κοινού σήματος.

Ανάλογα με την ανάλυση για το διαφορικό κέρδος, τα εικονικά βραχυκυκλώματα στις εισόδους των τελεστικών A1 και A2 προκαλούν την εμφάνιση της κοινής τάσης εισόδου στους ακροδέκτες της αντίστασης  $R_G$ . Επειδή οι δύο αυτές τάσεις είναι ίδιες δε διαρρέεται ρεύμα διαμέσω των αντιστάσεων ανάδρασης του πρώτου σταδίου.

Έτσι, οι τάσεις εξόδου των τελεστικών A1 και A2 θα είναι ίσες με τις κοινές τάσεις εισόδου. Ουσιαστικά, το κοινό σήμα στην είσοδο του ενισχυτή οργάνων μέτρησης δεν ενισχύεται από το πρώτο στάδιο αλλά μεταφέρεται στην έξοδό του με μοναδιαίο κέρδος. Στην περίπτωση αυτή, το δεύτερο στάδιο δέχεται ένα διαφορικό σήμα ενισχυμένο με κέρδος  $G_1$  και το αρχικό κοινό σήμα, οπότε οι συνθήκες είναι σαφώς καλύτερες.

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, το δεύτερο στάδιο του ενισχυτή έχει αρκετά μικρό διαφορικό κέρδος ή και καθόλου οπότε η σημαντικότερη λειτουργία του είναι η απόσβεση του κοινού σήματος που δέχεται στην είσοδο. Η διαφορική λειτουργία του δεύτερου σταδίου βασίζεται στο καλό ταίριασμα των αντιστάσεων  $R_2$  και  $R_3$ . Μάλιστα, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ισχύει η εξίσωση:

$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{R'_3}{R'_2} \quad (4.7)$$

με βάση το σχ. 4.10. Οι τιμές των αντιστάσεων  $R_2$  και  $R_3$  και  $R'_2$  και  $R'_3$  δεν έχουν επίδραση στη λειτουργία του κυκλώματος αρκεί να ικανοποιούν την εξίσωση (4.7).

Η επίδραση των αντιστάσεων ανάδρασης του δεύτερου σταδίου στην απόρριψη κοινού σήματος θα φανούν καλύτερα με ένα παράδειγμα. Έστω ότι επιλέγονται αντιστάσεις με 1% ανοχή για την υλοποίηση του δεύτερου

σταδίου. Αν η απόκλιση της πραγματική τιμής της αντίστασης είναι 0.1% και αν ισχύει  $R_2 = R_3$  τότε ο λόγος απόρριψης του κοινού σήματος είναι 66dB.

Αν, στη χειρότερη περίπτωση, μία από τις αντιστάσεις αποκλίνει από την ονομαστική της τιμή κατά 1% τότε ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος μειώνεται στα 46dB.

Είναι λοιπόν προφανές ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν αντιστάσεις με πολύ μικρή ανοχή. Ο τύπος που συνδέει τον λόγο απόρριψης κοινού σήματος και την ανοχή των αντιστάσεων ανάδρασης του δεύτερου σταδίου δίνεται από την εξίσωση:

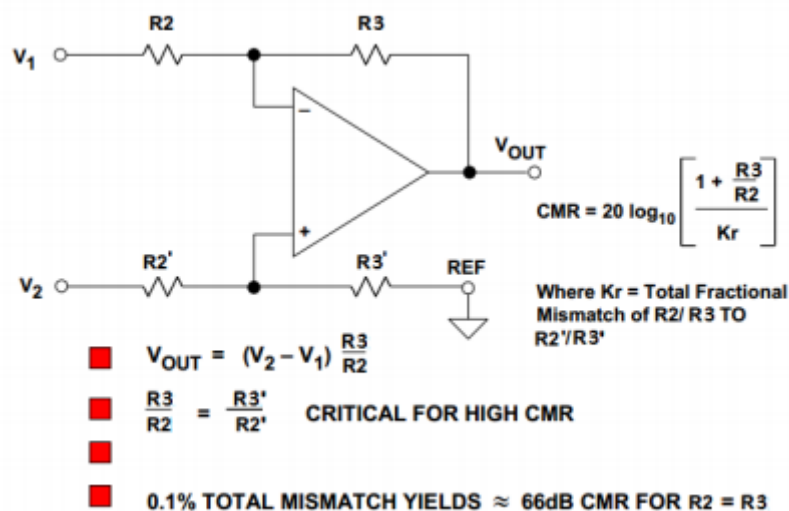
$$CMR(dB) = 20 \log \left( \frac{G_1 \cdot G_2}{4K_r} \right) \quad (4.8)$$

Όπου  $G_1$  και  $G_2$  είναι το διαφορικό κέρδος του πρώτου και του δεύτερου σταδίου αντίστοιχα και  $K_r$  είναι η ανοχή της κάθε αντίστασης.

Για βελτίωση του ταιριάσματος των αντιστάσεων ανάδρασης του δεύτερου σταδίου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα έτοιμο δίκτυο αντιστάσεων. Στην περίπτωση αυτή η σχέση (7.8) γίνεται:

$$CMR(dB) = 20 \log \left( \frac{G_1 \cdot G_2}{K_r} \right) \quad (4.9)$$

όπου  $K_r$  είναι η ανοχή του δικτύου. Σε κάθε περίπτωση ενδείκνυται η χρήση αντιστάσεων με ανοχή της τάξης του 0.01%. [8]



Σχ. 4.10: Ανάλυση της επίδρασης των αντιστάσεων ανάδρασης του δεύτερου σταδίου στο CMRR.

#### 4.4.3 Χαμηλή τάση εκτροπής και χαμηλή ολίσθηση της τάσης εκτροπής σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

Όπως όλοι οι ενισχυτές έτσι και ο ενισχυτής οργάνων μέτρησης θα πρέπει να έχει πολύ μικρή τάση εκτροπής. Επίσης, καθώς αλλάζει η θερμοκρασία η τάση εκτροπής αλλάζει παράλληλα. Τυπικές τιμές της τάσης εκτροπής είναι  $1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  έως  $10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

Γεγονός είναι ότι παρόλο που η αρχική τάση εκτροπής μπορεί να μειωθεί δραματικά καθώς αλλάζει η θερμοκρασία λειτουργίας του ενισχυτή θα αλλάζει και η τάση εκτροπής. Ο σχεδιαστής θα πρέπει να μεριμνήσει ώστε η ολίσθηση της τάσης εκτροπής σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία να παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. [8]

#### 4.4.4 Χαμηλός θόρυβος.

Από τη στιγμή που ο ενισχυτής οργάνων μέτρησης ανιχνεύει στους ακροδέκτες εισόδου του πολύ μικρά σήματα πληροφορίας ταυτόχρονα με πολύ μεγαλύτερα σήματα θορύβου δε θα πρέπει να εισάγει ο ίδιος ο ενισχυτής εγγενή θόρυβο.

Ο υπολογισμός του θορύβου που εισάγει ένας ενισχυτής γίνεται βραχυκυκλώνοντας τις πηγές τάσης στην είσοδό του. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται να μετρηθεί στην έξοδο το λεγόμενο Output Referred Noise. Το μέτρο αυτό εξαρτάται από το κέρδος του συγκεκριμένου ενισχυτή. Έτσι, αν χρειάζεται να συγκριθεί ο εγγενής θόρυβος δύο ενισχυτών με διαφορετικά κέρδη πρέπει να επινοηθεί ένα νέο αντικειμενικό μέτρο.

Αυτό είναι το Input Referred Noise και η ιδέα είναι να απεικονιστεί ο πραγματικός θόρυβος του κυκλώματος στην είσοδο του. Με τον τρόπο αυτό, ο πραγματικός θόρυβος του ενισχυτή (Output Referred Noise) είναι το Input Referred Noise πολλαπλασιασμένο με το διαφορικό κέρδος του ενισχυτή. Έτσι, είναι δυνατόν να γίνουν αντικειμενικές συγκρίσεις των θορύβων των ενισχυτών. [8]

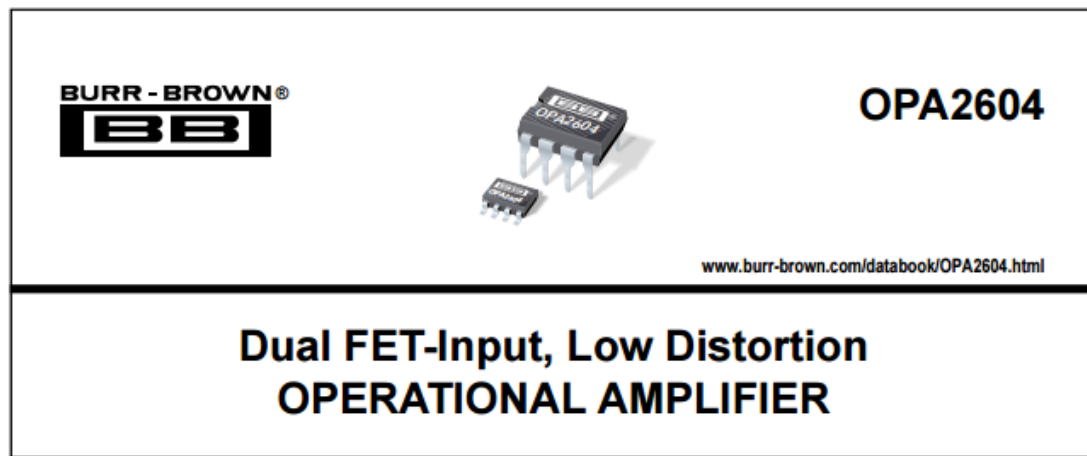
## 4.5 Ο τελεστικός ενισχυτής OPA2604.

### 4.5.1 Εισαγωγή

Το σήμα που προέρχεται από τους αισθητήρες θερμοκρασίας και που πρέπει να ενισχύσουμε είναι στο εύρος 0 – 47mV. Λόγω του μικρού πλάτους του σήματος έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ένας τελεστικός ενισχυτής που να διατηρεί καλή γραμμικότητα στις χαμηλές εισόδους.

Οι περισσότεροι ενισχυτές με τους οποίους πειραματιστήκαμε δεν είχαν καλή απόκριση στις εισόδους έως 5mV. Ο τελεστικός που επιλέξαμε συμπεριφέρεται άψογα σε όλο το φάσμα των σημάτων εισόδου. Επίσης χρησιμοποιείται κατά κόρον σε εφαρμογές ενίσχυσης ηχητικών σημάτων τα οποία επίσης έχουν μικρό εύρος.

Πρόκειται για το διπλό τελεστικό ενισχυτή OPA2604 της εταιρείας Burr-Brown ο οποίος απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

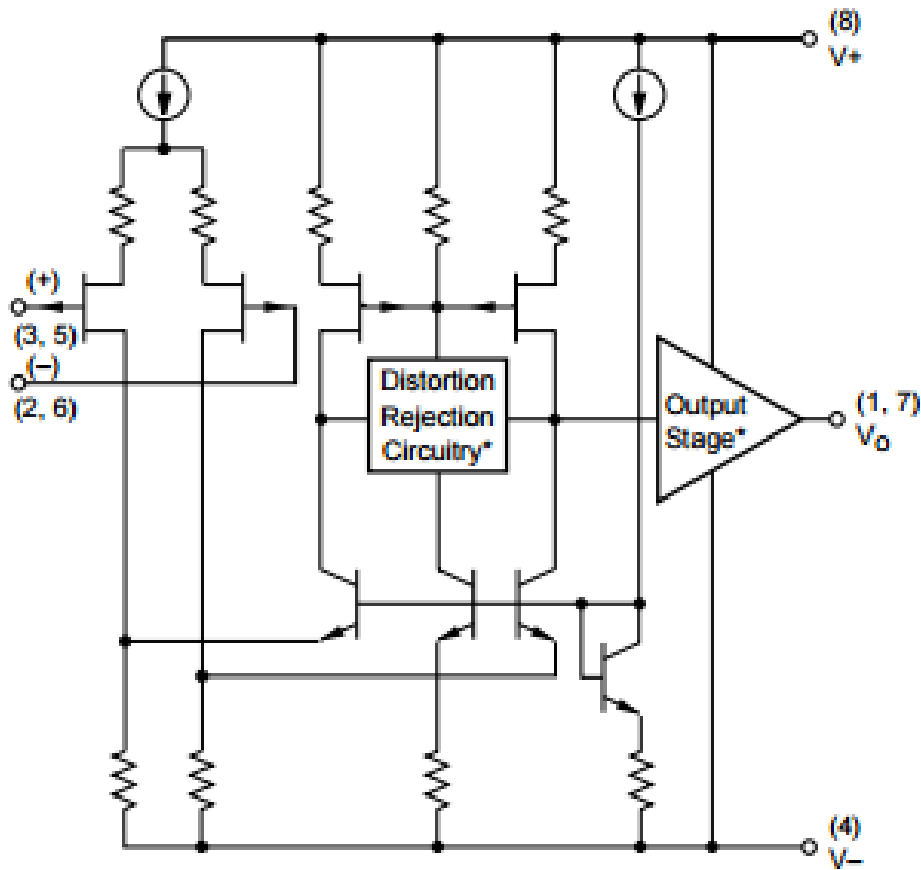


Σχ. 4.11: Ο τελεστικός ενισχυτής OPA2604 της εταιρείας Burr-Brown. [9]

### 4.5.2 Χαρακτηριστικά του OPA2604.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Χαμηλή παραμόρφωση: 0.0003% στο 1kHz
- Χαμηλό θόρυβο:  $10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Υψηλό μέγιστο ρυθμό μεταβολής: 25V/μs
- Μεγάλο εύρος ζώνης ενίσχυσης: 20MHz
- Σταθερή ενίσχυση
- Μεγάλο εύρος τροφοδοσίας:  $V_S \pm 4.5\text{V}$  μέχρι  $\pm 24\text{V}$
- Μπορεί να τροφοδοτήσει μέχρι 600Ω φορτία



Σχ. 4.12: Σχηματικό διάγραμμα του OPA2604. [9]

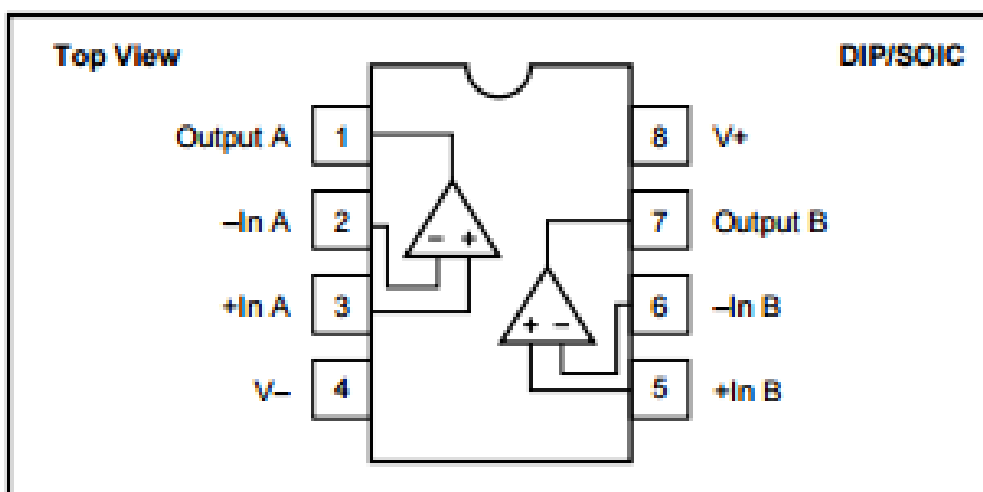
Ο OPA2604 είναι ένας διπλός τελεστικός ενισχυτής σχεδιασμένος και για λειτουργία σε AC σήματα. Ο συγκεκριμένος τελεστικός ενισχυτής επιλέχθηκε λόγω της πολύ καλής γραμμικής απόκρισης του σε πολύ χαμηλές εισόδους καθώς και πολύ μικρές μεταβολές της τάξης των  $10^{-5}$  V.

Επίσης έχει πολύ μικρή παραμόρφωση σήματος, χαμηλό θόρυβο και ευρύ bandwidth (εύρος ζώνης). Έτσι μπορούμε να ενισχύσουμε αλλά και να μεταφέρουμε σχεδόν αναλλοίωτο το σήμα από τους αισθητήρες στην είσοδο του μικροελεγκτή.

Οι 8 ακροδέκτες του διπλού τελεστικού ενισχυτή OPA2604 βρίσκονται στις εξής θέσεις σύμφωνα και με το σχήμα 5.16:

1. Ακροδέκτης εξόδου 1<sup>ου</sup> τελεστικού ενισχυτή.
2. Αναστρέφον ακροδέκτης εισόδου 1<sup>ου</sup> τελεστικού ενισχυτή.
3. Μη αναστρέφον ακροδέκτης εισόδου 1<sup>ου</sup> τελεστικού ενισχυτή.
4. Ακροδέκτης αρνητικής τάσης τροφοδοσίας.
5. Ακροδέκτης εξόδου 2<sup>ου</sup> τελεστικού ενισχυτή.
6. Αναστρέφον ακροδέκτης εισόδου 2<sup>ου</sup> τελεστικού ενισχυτή.
7. Μη αναστρέφον ακροδέκτης εισόδου 2<sup>ου</sup> τελεστικού ενισχυτή.
8. Ακροδέκτης θετικής τάσης τροφοδοσίας.

## PIN CONFIGURATION



Σχ. 4.13: Οι ακροδέκτες του τελεστικού ενισχυτή OPA2604. [9]



Οι μέγιστες τιμές λειτουργίας του τελεστικού ενισχυτή αναγράφονται στην παρακάτω εικόνα.

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS<sup>(1)</sup>

Power Supply Voltage .....	±25V
Input Voltage .....	(V <sub>-</sub> ) -1V to (V <sub>+</sub> ) +1V
Output Short Circuit to Ground .....	Continuous
Operating Temperature .....	-40°C to +100°C
Storage Temperature .....	-40°C to +125°C
Junction Temperature .....	+150°C
Lead Temperature (soldering, 10s) AP .....	+300°C
Lead Temperature (soldering, 3s) AU .....	+260°C

NOTE: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage.

Πίν. 4.6: Μέγιστες τιμές λειτουργίας του τελεστικού ενισχυτή OPA2604. [9]

Χαρακτηριστικά αναφέρεται:

- Μέγιστη τάση τροφοδοσίας ± 25V.
- Εύρος τάσης εισόδου -1V μέχρι +1V.
- Θερμοκρασία λειτουργίας -40°C μέχρι +100°C.
- Θερμοκρασία αποθήκευσης -40°C μέχρι +125°C.
- Θερμοκρασία ενώσεων +125°C.

Τα λεπτομερή ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του τελεστικού ενισχυτή OPA2604 φαίνονται στον παρακάτω πίνακα προδιαγραφών.

## SPECIFICATIONS

### ELECTRICAL

At  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = \pm 15\text{V}$ , unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITION	OPA2604P, AU			UNITS
		MIN	TYP	MAX	
<b>OFFSET VOLTAGE</b> Input Offset Voltage Average Drift Power Supply Rejection	$V_S = \pm 5$ to $\pm 24\text{V}$	70	$\pm 1$ $\pm 8$ 80	$\pm 5$ mV $\pm 5$ mV/°C	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ dB
<b>INPUT BIAS CURRENT</b> Input Bias Current Input Offset Current	$V_{CM} = 0\text{V}$ $V_{CM} = 0\text{V}$		100 $\pm 4$ pA		pA
<b>NOISE</b> Input Voltage Noise Noise Density: $f = 10\text{Hz}$ $f = 100\text{Hz}$ $f = 1\text{kHz}$ $f = 10\text{kHz}$ Voltage Noise, BW = 20Hz to 20kHz Input Bias Current Noise Current Noise Density, $f = 0.1\text{Hz}$ to 20kHz			25 15 11 10 1.5 6	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ $\mu\text{Vp-p}$ $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$	
<b>INPUT VOLTAGE RANGE</b> Common-Mode Input Range Common-Mode Rejection	$V_{CM} = \pm 12\text{V}$	$\pm 12$ 80	$\pm 13$ 100		V dB
<b>INPUT IMPEDANCE</b> Differential Common-Mode			10 $\Omega$    8 10 $\Omega$    10		$\Omega$    pF $\Omega$    pF
<b>OPEN-LOOP GAIN</b> Open-Loop Voltage Gain	$V_O = \pm 10\text{V}$ , $R_L = 1\text{k}\Omega$	80	100		dB
<b>FREQUENCY RESPONSE</b> Gain-Bandwidth Product Slew Rate Settling Time: 0.01% 0.1% Total Harmonic Distortion + Noise (THD+N) Channel Separation	$G = 100$ 20Vp-p, $R_L = 1\text{k}\Omega$ $G = -1$ , 10V Step $G = 1$ , $f = 1\text{kHz}$ $V_O = 3.5\text{Vrms}$ , $R_L = 1\text{k}\Omega$ $f = 1\text{kHz}$ , $R_L = 1\text{k}\Omega$	15	20 25 1.5 1 0.0005 142	MHz V/ $\mu\text{s}$ $\mu\text{s}$ $\mu\text{s}$ % dB	
<b>OUTPUT</b> Voltage Output Current Output Short Circuit Current Output Resistance, Open-Loop	$R_L = 600\Omega$    11 $V_O = \pm 12\text{V}$		$\pm 12$ $\pm 35$ $\pm 40$ 25		V mA mA $\Omega$
<b>POWER SUPPLY</b> Specified Operating Voltage Operating Voltage Range Current, Total Both Amplifiers	$I_O = 0$	$\pm 4.5$	$\pm 15$ $\pm 10.5$	$\pm 24$ $\pm 12$	V V mA
<b>TEMPERATURE RANGE</b> Specification Storage Thermal Resistance $\theta_{JA}$		-25 -40		085 +125	$^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C}/\text{W}$

NOTES: (1) Typical performance, measured fully warmed-up. (2) Soldered to circuit board—see text.

Πίν. 4.7: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του τελεστικού ενισχυτή OPA2604. [9]

## 5 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ

### 5.1 Ο μικροελεγκτής

#### 5.1.1 Η έννοια του μικροελεγκτή.

Οι έννοιες του μικροελεγκτή, του μικροεπεξεργαστή και του μικροϋπολογιστή έχουν διακριτή σημασία και σημαντικές διαφορές, ωστόσο έχουμε συνηθίσει να ακούμε τους όρους αυτούς χωρίς κανέναν ιδιαίτερο διαχωρισμό.

Ένας μικροεπεξεργαστής είναι ουσιαστικά μια μονάδα κεντρικής επεξεργασίας (ή CPU) υλοποιημένη μέσα σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Πριν από πολλά χρόνια, μια τέτοια μονάδα επεξεργασίας σχεδιαζόταν με τη βοήθεια πολλών διακριτών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεσαίας και μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (MSI και LSI). Η γνωστή εταιρεία Intel, παρουσιάζοντας το 4004, έθεσε όλες τις απαραίτητες μονάδες που περιλαμβάνει τυπικά μια CPU, όπως την αριθμητική λογική μονάδα (Arithmetic Logic Unit ή ALU), τον αποκωδικοποιητή εντολών, τους καταχωρητές, τα κυκλώματα ελέγχου διαύλων κ.τ.λ., εντός ενός απλού ολοκληρωμένου κυκλώματος (chip) και έτσι “γεννήθηκε” ο μικροεπεξεργαστής.

Όταν μια τέτοια διάταξη, όπως ο μικροεπεξεργαστής, μαζί με τα απαραίτητα κυκλώματα υποστήριξης (περιφερειακές μονάδες εισόδου – εξόδου και μνήμη προγράμματος και δεδομένων), τοποθετηθούν μαζί στο ίδιο υλικό, έτσι ώστε να σχηματίσουν έναν στοιχειώδη υπολογιστή, ειδικότερα σε εφαρμογές ελέγχου και λήψης δεδομένων, η διάταξη που προκύπτει καλείται μικροϋπολογιστής.

Επεκτείνοντας την παραπάνω λογική, όταν όλες οι παραπάνω διακριτές μονάδες που αποτελούν έναν μικροϋπολογιστή τοποθετηθούν μέσα στο σώμα του ίδιου ολοκληρωμένου κυκλώματος, η διάταξη που προκύπτει καλείται μικροελεγκτής.

Σήμερα πλέον έχουν εμφανιστεί πολλές και διαφορετικές οικογένειες μικροελεγκτών, όπως οι μικροελεγκτές της σειράς 8048 και 8051 της Intel, η σειρά 68HC11 της Motorola, η σειρά μικροελεγκτών Z8 της Zilog, οι μικροελεγκτές PIC της Microchip, η σειρά H8 της Hitachi και πρόσφατα οι οικογένεια των μικροελεγκτών AVR της Atmel. Μια συγκεκριμένη οικογένεια μικροελεγκτών προσδιορίζει ένα σύνολο πολλών διαφορετικών μικροελεγκτών, οι οποίοι διαθέτουν τον ίδιο κεντρικό πυρήνα αλλά κάθε ένας από αυτούς διατίθεται σε διαφορετική συσκευασία, περιλαμβάνει διαφορετικές περιφερειακές μονάδες, λειτουργεί σε διαφορετικές ταχύτητες, κ.τ.λ. [10]

### 5.1.2 Τα συστατικά μέρη ενός μικροελεγκτή.

Τα βασικά μέρη ενός μικροελεγκτή είναι :

- 1. Μονάδα κεντρικής επεξεργασίας:** Η μονάδα κεντρικής επεξεργασίας ή Central Processing Unit (CPU), αποτελεί την “καρδιά” ενός μικροελεγκτή. Εκτελεί ανάκληση δεδομένων (fetch) από τη μνήμη προγράμματος υπό μορφή εντολών, αποκωδικοποιεί τις εντολές αυτές και στη συνέχεια τις εκτελεί. Η μονάδα CPU αποτελείται από καταχωρητές (registers), την αριθμητική λογική μονάδα (Arithmetic Logic Unit ή ALU), τον αποκωδικοποιητή εντολών (instruction decoder) και διάφορα κυκλώματα ελέγχου.
- 2. Μνήμη προγράμματος:** Στη μνήμη προγράμματος αποθηκεύονται οι εντολές που σχηματίζουν τον κορμό του προγράμματος. Για τη χρήση μεγαλύτερων σε μήκος προγραμμάτων, το είδος της μνήμης αυτής μπορεί να χωριστεί σε εσωτερική μνήμη προγράμματος και εξωτερική μνήμη προγράμματος, όπως συμβαίνει σε μερικούς τύπους ελεγκτών. Η μνήμη προγράμματος είναι μια μη-πτητική μνήμη (non-volatile memory) και μπορούμε να την συναντήσουμε σε διάφορους τύπους όπως αυτόν της EEPROM (Ηλεκτρικά Επαναπρογραμματιζόμενη Μνήμη Ανάγνωσης Μόνο ή Electrically Erasable Read Only Memory), την EPROM (Επαναπρογραμματιζόμενη Μνήμη Ανάγνωσης Μόνο ή Erasable Read Only Memory), τη Μνήμη Ταχείας Αποθήκευσης (flash memory), τη μνήμη ROM τύπου μάσκας (Mask ROM) και τη Μνήμη Μη Αναστρέψιμου Προγραμματισμού (On-Time Programmable ή OTP).
- 3. Μνήμη RAM:** Η Μνήμη Τυχαίας Προσπέλασης (Random Access Memory ή RAM), αποτελεί τη μνήμη δεδομένων του ελεγκτή, δηλαδή χρησιμοποιείται από τον ελεγκτή για την αποθήκευση δεδομένων. Η CPU χρησιμοποιεί τη μνήμη RAM για την αποθήκευση μεταβλητών καθώς επίσης και την λεγόμενη στοίβα (Stack). Η στοίβα χρησιμοποιείται από την CPU για την προσωρινή αποθήκευση των λεγόμενων διευθύνσεων επιστροφής, με σκοπό να συνεχίσει την εκτέλεση του προγράμματος που είχε διακοπεί για την εξυπηρέτηση κάποιας υπορουτίνας (Subroutine) ή κάποιας ρουτίνας διακοπής (Interrupt Routine).
- 4. Ταλαντωτής Χρονισμού:** Ο μικροελεγκτής εκτελεί ένα πρόγραμμα όπως αυτό εμφανίζεται μέσα στην μνήμη προγράμματος, με έναν καθορισμένο ρυθμό. Ο ρυθμός αυτός καθορίζεται από την συχνότητα λειτουργίας του ταλαντωτή χρονισμού. Ο ταλαντωτής χρονισμού (Clock Oscillator) μπορεί να είναι ένας εσωτερικός ταλαντωτής τύπου RC ή ένας ταλαντωτής που υλοποιείται με κάποιο εξωτερικό στοιχείο χρονισμού, όπως για παράδειγμα ένας κρύσταλλος χαλαζία (Quartz), ένα κύκλωμα συντονισμού LC ή ακόμα και ένα απλό κύκλωμα RC. Η

λειτουργία του ταλαντωτή ξεκινά σχεδόν αμέσως μετά την εφαρμογή της τάσης τροφοδοσίας.

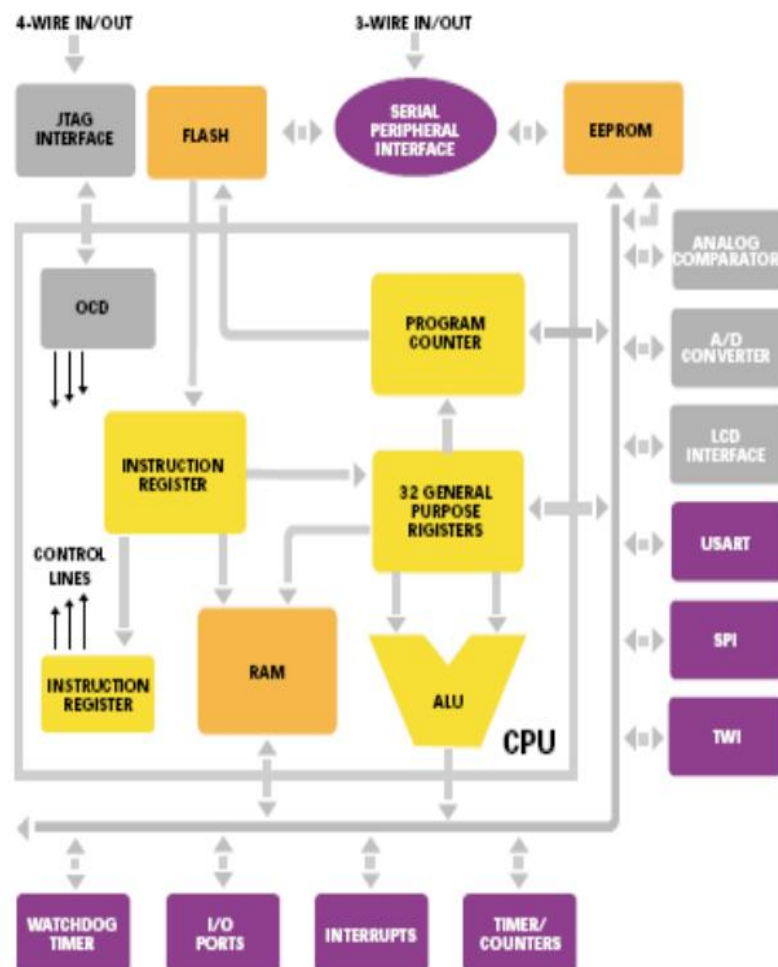
- 5. Σύστημα Επανατοποθέτησης και Κύκλωμα Ανίχνευσης Βυθίσεων Τάσης:** Το κύκλωμα επανατοποθέτησης ή μηδενισμού ή απλά reset, που διαθέτει ένας μικροελεγκτής, εξασφαλίζει το γεγονός ότι όλες οι εσωτερικές μονάδες και τα κυκλώματα ελέγχου του μικροελεγκτή θα ξεκινήσουν να λειτουργούν κατά την εφαρμογή της τροφοδοσίας, από κάποια προκαθορισμένη αρχική κατάσταση ενώ όλοι οι καταχωρητές του συστήματος βρίσκονται σε κατάλληλες αρχικές τιμές. Από την άλλη πλευρά, το κύκλωμα ανίχνευσης βύθισης της τάσης τροφοδοσίας (Brownout Detector), είναι ένα επίσης εσωτερικό κύκλωμα ελέγχου το οποίο παρακολουθεί συνεχώς το επίπεδο της τάσης τροφοδοσίας και εφόσον ανιχνευθεί κάποια στιγμιαία βύθιση στην τάση αυτή, τότε αυτόματα θέτει τον μικροελεγκτή σε λειτουργία επανατοποθέτησης, έτσι ώστε να προστατευτούν τα περιεχόμενα των καταχωρητών και της μνήμης από πιθανή καταστροφή ή αλλοίωση, πράγμα που θα οδηγούσε τον μικροελεγκτή σε εσφαλμένη λειτουργία.
- 6. Σειριακή Θύρα Επικοινωνίας:** Ένα από τα πλέον εύχρηστα συστατικά ενός μικροελεγκτή, αποτελεί η σειριακή θύρα επικοινωνίας. Η θύρα αυτή χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του ελεγκτή με διάφορες εξωτερικές διατάξεις υπό την μορφή σειριακής μετάδοσης δεδομένων. Η θύρα αυτή μπορεί να λειτουργήσει σε οποιαδήποτε ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων τυχόν απαιτηθεί. Η λειτουργία της βασίζεται στο ότι λαμβάνει δεδομένα από τον μικροελεγκτή, τα οποία ολισθαίνει προς την έξοδο υπό μορφή ενός δυαδικού ψηφίου (bit) τη φορά. Παρόμοια, λαμβάνει δεδομένα από την αντίστοιχη είσοδο της και πάλι με τη μορφή ενός bit τη φορά, σχηματίζοντας έτσι με 8 τέτοια bits, μία λέξη του ενός byte, την οποία και αντιγράφει στο εσωτερικό του ελεγκτή. Οι σειριακές θύρες απαντώνται σε δύο τύπους, την ασύγχρονη σειριακή θύρα και τη σύγχρονη σειριακή θύρα. Για την λειτουργία μιας σύγχρονης σειριακής θύρας, απαιτείται και η παρουσία ενός πρόσθετου σήματος συγχρονισμού (clock), αντίθετα με την ασύγχρονη σειριακή θύρα στην οποία δεν απαιτείται η ύπαρξη τέτοιου σήματος, διότι οι απαραίτητες πληροφορίες συγχρονισμού και χρονισμού γενικότερα, ενσωματώνονται στο σύνολο των δεδομένων που μεταδίδονται σειριακά με τη μορφή της διάρκειας εμφάνισης των εκάστοτε bits που αποτελούν την πληροφορία, καθώς επίσης και με τη χρήση πρόσθετων bits με τα οποία σηματοδοτείται η έναρξη και η παύση μιας συγκεκριμένης μετάδοσης.
- 7. Ψηφιακή Θύρα Εισόδου-Εξόδου:** Ο μικροελεγκτής χρησιμοποιεί τις ψηφιακές θύρες εισόδου-εξόδου με σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων από και προς το εξωτερικό περιβάλλον. Σε σύγκριση με μια σειριακή θύρα, με την οποία τα δεδομένα ανταλλάσσονται υπό την μορφή συρμού με εκπομπή ενός bit τη φορά, η ψηφιακή θύρα εισόδου-εξόδου

ανταλλάσει δεδομένα υπό τη μορφή ομάδων των 8 bits ή διαφορετικά του ενός byte.

- 8. Αναλογική Θύρα Εισόδου-Εξόδου:** Γενικά μπορούμε να έχουμε αναλογικές εισόδους χρησιμοποιώντας Μετατροπείς Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό (Analog to Digital Converter ή ADC). Ένας τυπικός μικροελεγκτής μπορεί να διαθέτει μια ενσωματωμένη μονάδα μετατροπής ADC ή ακόμα και σε μερικές περιπτώσεις, έναν απλό ενσωματωμένο αναλογικό συγκριτή, ο οποίος χρησιμοποιείται μαζί με κατάλληλο λογισμικό έτσι ώστε να μπορεί να εκτελεί μετατροπές αναλογικού σε ψηφιακό. Οι Μετατροπείς Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό χρησιμοποιούνται για την ανάγνωση δεδομένων από αισθητήρες, όπως για παράδειγμα αισθητήρες πίεσης και θερμοκρασίας. Οι αισθητήρες αυτοί συνήθως παράγουν μία τάση η οποία είναι ανάλογη της μετρούμενης φυσικής παραμέτρου. Επίσης, μπορούμε να έχουμε και αναλογικές εξόδους, χρησιμοποιώντας κάποιες μονάδες οι οποίες καλούνται, Μετατροπείς Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό (Digital to Analog ή Converter DAC). Ακόμη οι περισσότεροι μικροελεγκτές είναι εφοδιασμένοι με Διαμορφωτές Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulators ή PWM), με τη βοήθεια των οποίων μπορούμε να λάβουμε αναλογικές τάσεις μέσα από κατάλληλα φίλτρα τύπου RC. Οι Μετατροπείς Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό χρησιμοποιούνται για την οδήγηση κινητήρων, ειδικών μονάδων απεικόνισης (όπως οι παλαιότερες οθόνες με μπάρα από LED, γνωστές και με την ονομασία VU-Meter), για την αναπαραγωγή σημάτων ήχου ή μουσικής γενικότερα.
- 9. Χρονιστής:** Ένας χρονιστής (Timer) χρησιμοποιείται από τον μικροελεγκτή για τον χρονισμό ή και την σηματοδότηση διάφορων γεγονότων, για παράδειγμα, είναι πιθανό να επιθυμούμε να αποστείλουμε δεδομένα σε μια εξωτερική οθόνη με έναν συγκεκριμένο ρυθμό. Ο χρονιστής χρησιμοποιείται από τον μικροελεγκτή για να παράγει αυτόν τον ζητούμενο ρυθμό. Ένας χρονιστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για την καταμέτρηση γεγονότων, τα οποία μπορούν να είναι είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά. Σε μια τέτοια περίπτωση, ο χρονιστής καλείται και απλά, Μετρητής (Counter).
- 10. Χρονιστής Επιτήρησης:** Ένας χρονιστής ειδικού σκοπού, τον οποίο συναντούμε συχνά στους σύγχρονους μικροελεγκτές, είναι και ο Χρονιστής Επιτήρησης (WatchDog Timer ή WDT). Ο χρονιστής αυτός χρησιμοποιείται συνήθως για την αποφυγή της πιθανής κατάρρευσης του συστήματος (crash). Η λειτουργία του χρονιστή επιτήρησης έχει ως εξής. Από την στιγμή που θα ενεργοποιηθεί (ή όπως λέγεται, θα “οπλιστεί”), λειτουργεί αυξανόμενα ένας εσωτερικός μετρητής σε κάποιον συγκεκριμένο ρυθμό. Αν το πρόγραμμα δεν μηδενίσει (ή επαναθέσει) τον μετρητή αυτόν, τότε κάποια στιγμή θα επέλθει η λεγόμενη Υπερχείλιση (Overflow) του παραπάνω μετρητή και θα

επανατοποθετηθεί ο μικροελεγκτής (λειτουργία reset). Έτσι όταν χρησιμοποιείται ο Χρονιστής Επιτήρησης, το πρόγραμμα χρήσης θα πρέπει να είναι εφοδιασμένο με κατάλληλες εντολές, έτσι ώστε σε τακτά χρονικά διαστήματα να μπορεί να μηδενίζει τον χρονιστή WDT, πληροφορώντας τον έτσι ότι το σύστημα εργάζεται και δεν έχει καταρρεύσει. Η λογική αυτής της τεχνικής ελέγχου στηρίζεται στην υπόθεση, ότι αν το πρόγραμμα χρήσης δεν μηδενίσει τον χρονιστή WDT, αυτό πιθανότατα σημαίνει ότι το πρόγραμμα έχει αποτύχει σε κάποια προσπάθειά του είτε εξαιτίας πιθανής κατάρρευσης ή γενικότερα κάποιας απρόβλεπτης συμπεριφοράς, οπότε είναι προτιμότερο να ξεκινήσει διαδικασία επανατοποθέτησης.

- 11. Ρολόι Πραγματικού Χρόνου:** Ένας ακόμη ειδικού σκοπού χρονιστής είναι και το λεγόμενο Ρολόι Πραγματικού Χρόνου (Real Time Clock ή RTC), του οποίου σκοπός είναι η μέτρηση και η διατήρηση της τρέχουσας ώρας, της ημέρας, της ημερομηνίας, κ.τ.λ. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σηματοδότηση συγκεκριμένων γεγονότων με γνώμονα την τρέχουσα ώρα. [10]



Σχ. 5.1: Τυπικό διάγραμμα ενός μικροελεγκτή.

### 5.1.3 Ο μικροελεγκτής ATmega32A.



Σχ. 5.2: Ο μικροελεγκτής AtMega32A. [11]

Στην κατασκευή που υλοποιήσαμε επιλέξαμε να τοποθετήσουμε τον μικροελεγκτή AtMega32A που ανήκει στην οικογένεια των μικροελεγκτών AVR της εταιρείας Atmel. Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής είναι ιδιαίτερα αποδοτικός και καλύπτει τις απαιτήσεις της κατασκευής μας.





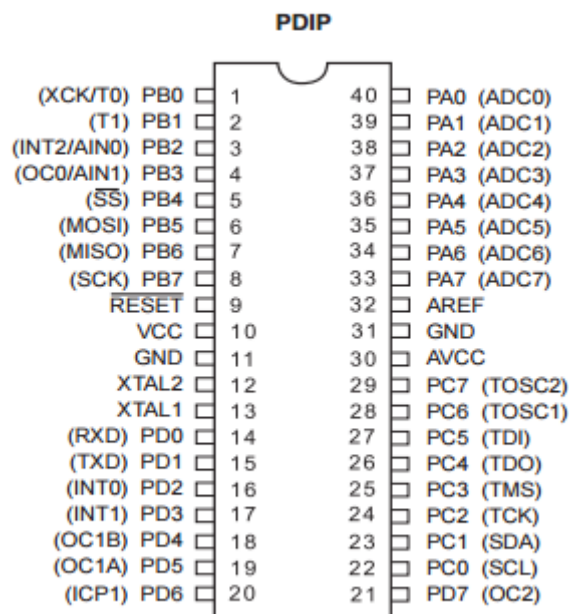
## 8-bit Microcontroller with 32KBytes In-System Programmable Flash

### ATmega32A

#### Features

- High-performance, Low-power Atmel® AVR® 8-bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
  - 131 Powerful Instructions – Most Single-clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General Purpose Working Registers
  - Fully Static Operation
  - Up to 16MIPS Throughput at 16MHz
  - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory segments
  - 32Kbytes of In-System Self-programmable Flash program memory
  - 1024Bytes EEPROM
  - 2Kbytes Internal SRAM
  - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
  - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C<sup>(1)</sup>
  - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
    - In-System Programming by On-chip Boot Program
    - True Read-While-Write Operation
  - Programming Lock for Software Security
- JTAG (IEEE std. 1149.1 Compliant) Interface
  - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
  - Extensive On-chip Debug Support
  - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface
- Atmel QTouch® library support
  - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
  - Atmel QTouch and QMatrix acquisition
  - Up to 64 sense channels
- Peripheral Features
  - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescalers and Compare Modes
  - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
  - Real Time Counter with Separate Oscillator
  - Four PWM Channels
  - 8-channel, 10-bit ADC
    - 8 Single-ended Channels
    - 7 Differential Channels in TQFP Package Only
    - 2 Differential Channels with Programmable Gain at 1x, 10x, or 200x
  - Byte-oriented Two-wire Serial Interface
  - Programmable Serial USART
  - Master/Slave SPI Serial Interface
  - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
  - On-chip Analog Comparator
- Special Microcontroller Features
  - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
  - Internal Calibrated RC Oscillator
  - External and Internal Interrupt Sources
  - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby and Extended Standby
- I/O and Packages
  - 32 Programmable I/O Lines
  - 40-pin PDIP, 44-lead TQFP, and 44-pad QFN/MLF
- Operating Voltages
  - 2.7V - 5.5V
- Speed Grades
  - 0 - 16MHz
- Power Consumption at 1MHz, 3V, 25°C
  - Active: 0.6mA
  - Idle Mode: 0.2mA
  - Power-down Mode: < 1µA

Πίν. 5.1: Χαρακτηριστικά μικροελεγκτή ATmega32A. [11]



Σχ. 5.3: Οι ακροδέκτες του ATmega32A. [11]

#### 5.1.4 Χαρακτηριστικά των μικροελεγκτών AVR της Atmel.

Συνοπτικά οι μικροελεγκτές AVR της Atmel παρουσιάζουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Συνδυάζουν την αρχιτεκτονική RISC με ως επί το πλείστον σταθερού μήκους εντολές, διαδικασίες αποθήκευσης – φόρτωσης στη μνήμη και 32 καταχωρητές γενικής χρήσης.
- Μηχανισμό συνεχούς διοχέτευσης εντολών (instruction pipeline) σε δύο στάδια, που επιταχύνει σημαντικά την διαδικασία εκτέλεσης.
- Οι περισσότερες από τις εντολές που περιλαμβάνει το ρεπερτόριο τους εκτελούνται στη διάρκεια μιας περιόδου του κεντρικού ρολογιού.
- Λειτουργούν σε συχνότητες χρονισμού μέχρι 20 Mhz.
- Διαθέτουν μεγάλη ποικιλία σε ό,τι αφορά ενσωματωμένες περιφερειακές μονάδες όπως, ψηφιακές εισόδους – εξόδους (I/O), μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ή ADC, μνήμη τύπου EEPROM, χρονιστές, μονάδες ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας ή UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter), ρολόγια πραγματικού χρόνου (RTC ή Real Time Clock), μονάδες διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM ή Pulse Width Modulation), κ.τ.λ.
- Ενσωματωμένες μνήμες προγράμματος και δεδομένων.
- Δυνατότητα προγραμματισμού εντός του συστήματος (ISP ή In – System Programmable).

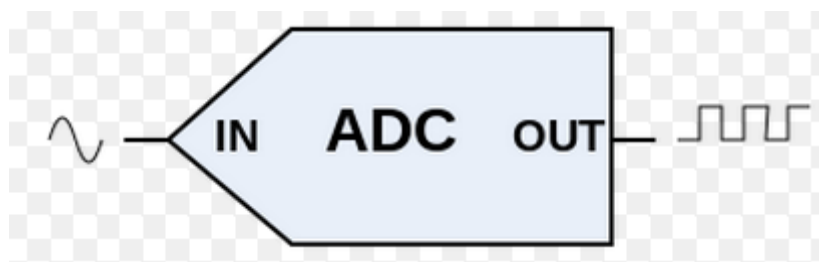
- Διατίθενται σε συσκευασίες των 8 έως 64 ακροδεκτών οπότε κρίνονται κατάλληλοι για έναν μεγάλο αριθμό διαφορετικών εφαρμογών.
- Είναι περίπου 12 φορές ταχύτεροι και πιο αποδοτικοί σε σχέση με τους ελεγκτές κλασσικής αρχιτεκτονικής CISC (Complex Instruction Set Computer).\
- Ευρεία περιοχή τάσεων λειτουργίας από 2.7V έως 6V.
- Η σχετικά απλή αρχιτεκτονική τους δίνει το πλεονέκτημα του μικρού σε απαίτηση κύκλου εκμάθησης στους αρχάριους. [10]

### 5.1.5 Η μονάδα του μετατροπέα τάσης (ADC)

Σε αντίθεση με τους μικροελεγκτές, που αποτελούν ψηφιακά συστήματα, η φύση λειτουργεί αναλογικά. Οι μικροελεγκτές μπορούν να χειρίζονται αναλογικά σήματα, αφού προηγουμένως τα μετατρέψουν σε ψηφιακά. Ένας μικροελεγκτής AVR εμπεριέχει μια μονάδα μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (analog to digital conversion peripheral), καθώς επίσης και μία μονάδα αναλογικής σύγκρισης (analog comparator peripheral). Οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούν μετατροπείς ADC για να μετατρέψουν αναλογικές ποσότητες, όπως η τάση στην παρούσα εργασία (που αντιστοιχεί σε κάποια θερμοκρασία), σε ψηφιακή μορφή, όπως επίσης για μετατροπή ηχητικού σήματος σε ψηφιακό και πληθώρα άλλων αντίστοιχων εφαρμογών.

Η μονάδα ADC έχει τη δυνατότητα να παράγει ανάλυση μέχρι 10 bit, καθώς και να λειτουργεί σε ταχύτητες έως 15ksps (kilo samples per second). Μπορεί να διαβάζει την τάση σε ένα από τα 8 διαφορετικά pin εισόδου του μικροελεγκτή κάθε φορά, πράγμα που σημαίνει πως μπορεί να χρησιμοποιήσει έως 8 διαφορετικές εισόδους διαδοχικά. Για τη λειτουργία του ο ADC, απαιτεί η συχνότητα ρολογιού που θα τρέχει να κυμαίνεται από 50Khz έως 200Khz για να έχει μέγιστη ανάλυση στις τιμές του. Μεγαλύτερες τιμές από 200Khz επιτρέπονται, αλλά η ανάλυση του ADC μειώνεται.

Η διαδικασία της ψηφιοποίησης ενός σήματος στηρίζεται στην αναλογία. Το αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης ενός σήματος από τον ADC είναι ένας δυαδικός αριθμός 8 ή 10 bit, ο οποίος είναι ανάλογος με την τάση πλήρους κλίμακας. Στην κατασκευή μας η πλήρης κλίμακα είναι 5V, έτσι αν φτάσει ένα



Σχ. 5.4: ADC (Analog to Digital Converter).

σήμα 2V σε μια είσοδο του ADC, η ψηφιακή λέξη που θα προκύψει θα ισούται με τα 2/5 ή το 40% της πλήρους κλίμακας.

Ένας μετατροπέας των 8 bit θα μας παρέχει εξόδους από 0 μέχρι  $2^8-1$  ή 255, ενώ ένας μετατροπέας των 10 bit θα μας παρέχει εξόδους από 0 μέχρι  $2^{10}-1$  ή 1023. Στην εφαρμογή μας χρησιμοποιήσαμε τον μετατροπέα των 10 bit επομένως για το σήμα 2V ο ADC θα διαβάσει το 40% του 1023 ήτοι 409. Η σχέση τάσης εισόδου με την ψηφιακή τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{V_{\text{εισόδου}}}{V_{\text{πλήρους κλίμακας}}} = \frac{x}{2^n - 1} \quad (5.1)$$

Όπου  $x$  είναι η ψηφιακή έξοδος και  $n$  είναι ο αριθμός των bits. Ένα πολύ σημαντικό μέγεθος που πρέπει να παίρνουμε υπ' όψιν μας είναι η τάση ανάλυσης η οποία δίνεται από τον τύπο [10]:

$$V_{\text{ανάλυσης}} = \frac{V_{\text{πλήρους κλίμακας}}}{2^n - 1} \quad (5.2)$$

Στην περίπτωση μας η τάση ανάλυσης είναι  $V_{\text{ανάλυσης}} = 5/1023 = 4.9 \text{ mV}$ . Ο αισθητήρας θερμοκρασίας είναι ισορροπημένος στους  $-10^\circ\text{C}$  όπου και μας δίνει έξοδο 0V, ενώ στους  $90^\circ\text{C}$  μετά και το κύκλωμα ενίσχυσης θα παίρνουμε την πλήρη τάση των 5 V. Ο αισθητήρας λοιπόν καλύπτει ένα εύρος  $100^\circ\text{C}$  και με βάση την τάση ανάλυσης που προκύπτει από τον ADC, η διακριτικότητα του συστήματός μας θα είναι της τάξης των  $0.1^\circ\text{C}$  όπως και επιθυμούσαμε.

## 5.2 Η Οθόνη LCD

Η οθόνη που επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε στην κατασκευή μας είναι η Winstar wh1602b.



Σχ. 5.5: Η οθόνη Winstar wh1602b. [12]

Είναι μία οθόνη που αποτελείται από 2 γραμμές των 16 χαρακτήρων έκαστη. Επίσης έχει τη δυνατότητα φωτισμού από μια λάμπα LED. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι μέγιστες τιμές λειτουργίας της.

### ***Absolute Maximum Rating***

Item	Symbol	Standard Value			Unit
		min.	typ.	max.	
Power Supply	VDD-VSS	-0.3	---	7.0	V
Input Voltage	VI	-0.3	---	VDD	V

Note : VSS=0 Volt, VDD=5.0 Volt.

Πίν. 5.2: Μέγιστες τιμές λειτουργίας οθόνης Winstar wh1602b. [12]

Η οθόνη αποτελείται από 16 ακροδέκτες οι οποίοι είναι οι εξής:

1. **V<sub>SS</sub>**: Σύνδεση της γείωσης.
2. **V<sub>DD</sub>**: Τροφοδοσία 5V.
3. **V<sub>0</sub>**: Ρύθμιση αντίθεσης.
4. **RS**: Είναι το Register Select Signal που καθορίζει αν θα αποσταλεί στην οθόνη εντολή ή πληροφορία προς εμφάνιση.
5. **R/W**: Είναι το Read/Write της οθόνης που καθορίζει αν θα γραφτεί κάτι στην οθόνη ή αν θα διαβαστεί κάτι από αυτήν.
6. **E**: Το Enable pin ενεργοποιεί και απενεργοποιεί την οθόνη έως ότου δεχτεί την εκάστοτε εντολή.
7. **DB0**: Data Bus 0
8. **DB1**: Data Bus 1
9. **DB2**: Data Bus 2
10. **DB3**: Data Bus 3
11. **DB4**: Data Bus 4
12. **DB5**: Data Bus 5
13. **DB6**: Data Bus 6
14. **DB7**: Data Bus 7
15. **A**: Τροφοδοσία για ενεργοποίηση φωτισμού Led.
16. **K**: Γείωση φωτισμού Led.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα πλήρη ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της οθόνης.

### *Electronical Characteristics*

Item	Symbol	Condition	Standard Value			Unit
			min.	typ.	max.	
Input Voltage	VDD	VDD=+5V	4.7	5.0	5.3	V
Supply Current	IDD	VDD=5V	—	1.2	1.5	mA
Recommended LC Driving Voltage for Normal Temp. Version module	VDD-V0	-20°C	—	—	5.2	V
		0°C	—	—	4.2	
		25°C	—	3.8	—	
		50°C	3.5	—	—	
		70°C	3.2	—	—	
LED Forward Voltage	V <sub>F</sub>	25°C	—	4.2	4.6	V
LED Forward Current	I <sub>F</sub>	25°C	Array	—	100	mA
			Edge	—	20	
EL Power Supply Current	I <sub>EL</sub>	V <sub>e</sub>  =110VAC;400Hz	—	—	5.0	mA

Πίν. 5.3: Ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά της οθόνης Winstar wh1602b. [12]

## 5.3 Ο Κώδικας

```

1 #include <avr/io.h>
2 #include <util/delay.h>
3 #include <stdlib.h>
4 #include <math.h>
5 #include <avr/interrupt.h>
6
7 #define MrLCDsCrib PORTB

```

```
8 #define DDRCrib    DDRB
9 #define MrLCDsControl PORTD
10 #define DDRControl  DDRD
11 #define LightSwitch  5
12 #define ReadWrite  7
13 #define BipolarMood  2
14 #define button    6
15 #define BurnerControl  4
16 char firstposition[2] = {0, 40};
17
18 static volatile float Ti = 0;
19 static volatile float To = 0;
20 static volatile float Tw = 0;
21 static volatile float Tc = 0;
22 static volatile float Ts = 0;
23 static volatile float slope,A = 0;
24
25 static volatile char LCD1 = 0;
26 static volatile int pressed, state = 0;
27 int a , b , c , d , e ;
28
29 void InitializeLCD(void);
30 void CheckBusy(void);
31 void Boo(void);
32 void SendCommand(unsigned char command);
33 void SendCharacter(unsigned char character);
34 void SendString(char *stringofcharacters);
35 void GoLocation(uint8_t x, uint8_t y);
36 void SendLCDInt(uint8_t x, uint8_t y, int intdisplay , char digits);
37 void SendLCDString(uint8_t x, uint8_t y, char *stringofcharacters);
38 void SendLCDfloat(uint8_t x, uint8_t y, float floatdisplay);
39
40 int main(void)
41 {
42     DDRControl &= ~1<<button; // For button DDRD pin as input
43     DDRControl |=1<< BurnerControl // For BurnerControl DDRD pin as output
44     MrLCDsControl |=1<<button |=1<< BurnerControl; // PORTD button and
        BurnerControl pins set to high
45
46     InitializeLCD();
47
```

```
48 ADCSRA |= 1<<ADEN;    // enable ADC
49 ADCSRA |= 1<<ADPS2;    //enable prescaler (1MHZ/16)
50 ADCSRA |= 1<<ADIE;    //ADC interrupt
51 //ADMUX |=1<<ADLAR;    8-bit mode
52 ADMUX |=1<<REFS0;    //voltage reference
53
54 sei();                //global interrupts
55
56 ADCSRA |= 1<<ADSC;    //ADC first conversion
57
58 while (1)
59 {
60
61 }
62 }
63
64 void CheckBusy()
65 {
66   DDRCrib = 0;
67   MrLCDsControl |= 1<<ReadWrite;
68   MrLCDsControl &= ~1<<BipolarMood;
69
70   while (MrLCDsCrib >= 0x80)
71   {
72     Boo();
73   }
74   DDRCrib = 0xFF; // 0b11111111
75 }
76
77 void Boo()
78 {
79   MrLCDsControl |= 1<<LightSwitch;
80   asm volatile("nop");
81   asm volatile("nop");
82   MrLCDsControl &= ~1<<LightSwitch;
83 }
84
85 void SendCommand(unsigned char command)
86 {
87   CheckBusy();
88   MrLCDsCrib = command;
```



```
89 MrLCDsControl &= ~ (1<<ReadWrite | 1<<BipolarMood);
90 Boo();
91 MrLCDsCrib = 0;
92 }
93
94 void SendCharacter(unsigned char character)
95 {
96   CheckBusy();
97   MrLCDsCrib = character;
98   MrLCDsControl &= ~ (1<<ReadWrite);
99   MrLCDsControl |= 1<<BipolarMood;
100     Boo();
101     MrLCDsCrib = 0;
102   }
103
104   void SendString(char *stringofcharacters)
105   {
106     while(*stringofcharacters > 0)
107     {
108       SendCharacter(*stringofcharacters++);
109     }
110   }
111
112   void GoLocation(uint8_t x, uint8_t y)
113   {
114     SendCommand(0x80 + firstposition[y-1] + (x-1));
115   }
116
117   void InitializeLCD()
118   {
119     DDRControl |= 1<< LightSwitch | 1<<ReadWrite | 1<<BipolarMood;
120     _delay_ms(15);
121
122     SendCommand(0x01); //clear screen
123     _delay_ms(2);
124     SendCommand(0x38);
125     _delay_us(50);
126     SendCommand(0b00001110);
127     _delay_us(50);
128   }
129
```

```
130 void SendLCDInt(uint8_t x, uint8_t y, int intdisplay , char digits)
131 {
132     char inttostring[digits];
133     itoa(intdisplay, inttostring, 10);
134     for (int i=0; i<digits; i++) SendString(" ");
135     SendLCDString(x, y, inttostring);
136
137 }
138
139 void SendLCDfloat(uint8_t x, uint8_t y, float floatdisplay)
140 {
141     if (floatdisplay < 0)
142     {
143         a = -floatdisplay *10;
144         SendLCDString(x, y, "-");
145         b = a/10;
146         c = b/10;
147         d = b - c*10;
148         e = a - b*10;
149         if (c==0)
150             SendLCDString(x+1, y, " ");
151         else
152             SendLCDInt(x+1, y, c, 1);
153             SendLCDInt(x+2, y, d, 1);
154         SendLCDString(x+3, y, ".");
155         SendLCDInt(x+4, y, e, 1);
156     }
157     else
158     {
159         a = floatdisplay *10;
160         b = a/10;
161         c = b/10;
162         d = b - c*10;
163         e = a - b*10;
164         if (c==0)
165             SendLCDString(x, y, " ");
166         else
167             SendLCDInt(x, y, c, 1);
168             SendLCDInt(x+1, y, d, 1);
169         SendLCDString(x+2, y, ".");
170         SendLCDInt(x+3, y, e, 1);
```

```
171         SendLCDString(x+4, y, " ");
172     }
173 }
174
175 void SendLCDString(uint8_t x, uint8_t y, char *stringofcharacters)
176 {
177     GoLocation(x, y);
178     SendString(stringofcharacters);
179 }
180
181 ISR(ADC_vect)
182 {
183     uint8_t thelow = ADCL;
184     uint16_t tenbit = ADCH << 8 | thelow;
185
186     switch (ADMUX)
187     {
188     case 0x40:
189         Ti = -10+tenbit*0.09775;// tenbit * v/tenbit(5/1024)
190         *c/v(100/5)
191         ADMUX = 0x41;
192         break;
193     case 0x41:
194         To = -10+tenbit*0.09775;
195
196         ADMUX = 0x42;
197         break;
198     case 0x42:
199         Tw = -10+tenbit*0.09775;
200
201         ADMUX = 0x43;
202         break;
203     case 0x43:
204         Ts = 15+tenbit*0.01955;
205
206         ADMUX = 0x44;
207         break;
208     case 0x44:
209         A = tenbit;
210         slope = 0; // 0.2 - 3.4
```

```
211         int j = 0;
212         while (j < A)
213         {
214             slope=slope+0.2;
215             j = j +61;
216         }
217         ADMUX = 0x40;
218         break;
219     default:
220         break;
221 }
222
223 Tc = 20+3*(slope* pow((20-To), (2/3)) + (Ts-Ti)*(slope+1));
224
225 if ((Tw>=Tc + 2) | (Ti>=Ts ))
226 {
227     state = 0;
228     MrLCDsControl &= ~1<<BurnerControl;
229     _delay_s(240);
230 }
231 else
232 {
233     state = 1;
234     MrLCDsControl |= 1<<BurnerControl;
235 }
236
237 if (bit_is_clear(PIND, button))
238 {
239     if (pressed == 0)
240     {
241         if (LCD1 == 0)
242             LCD1=1;
243         else
244             LCD1=0;
245         SendCommand(0x01);
246         pressed = 1;
247     }
248 }
249 else
250     pressed = 0;
251
```

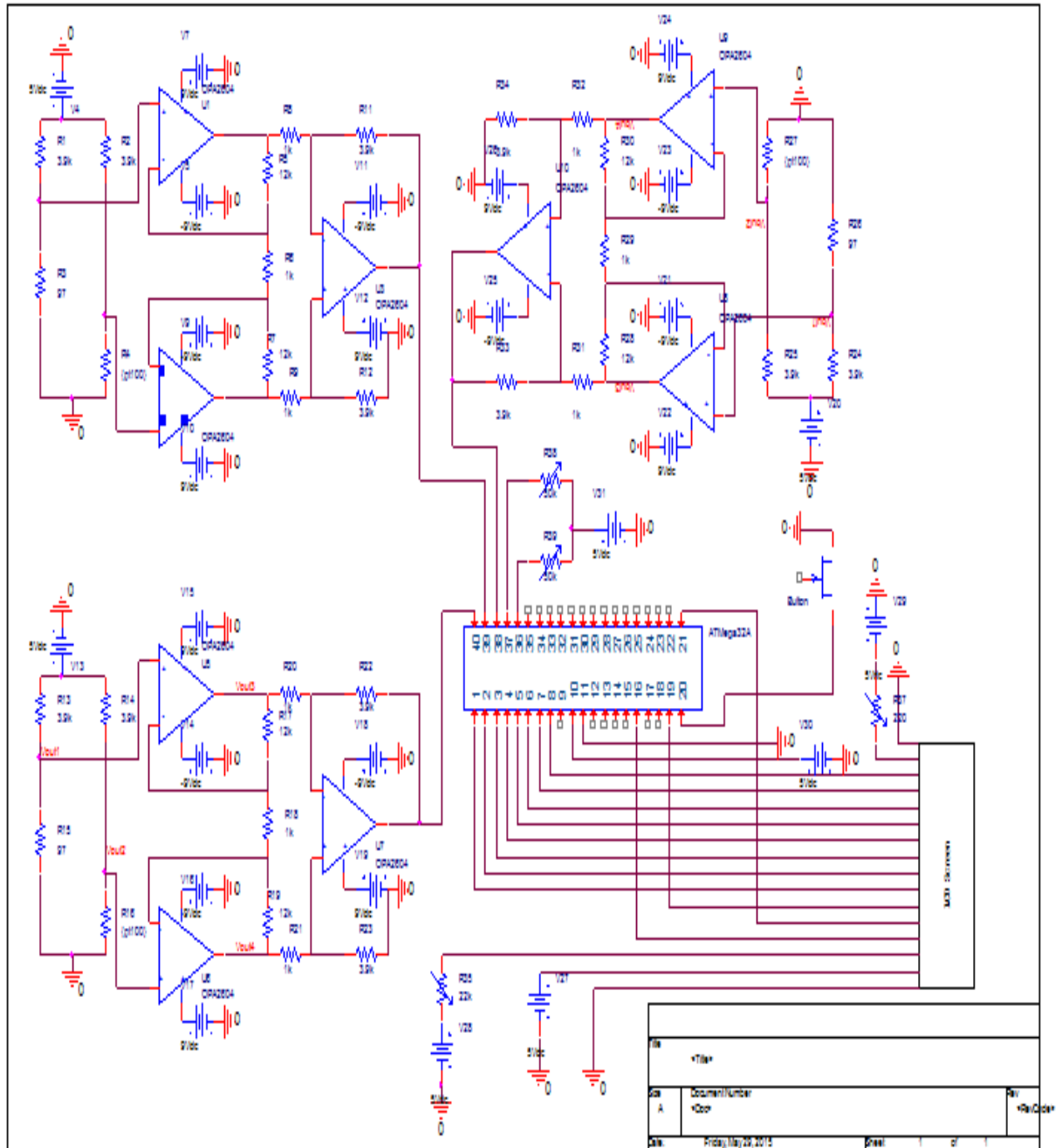
```
252     if (LCD1 == 0)
253     {
254         SendLCDString(1, 1, "Ti=");
255         SendLCDfloat(4, 1, Ti);
256         SendLCDString(9, 1, "Tc=");
257         SendLCDfloat(12, 1, Tc);
258         SendLCDString(1, 2, "To=");
259         SendLCDfloat(4, 2, To);
260         SendLCDString(10, 2, "slo=");
261         a = slope *10;
262         b = a/10;
263         c = a - b*10;
264         SendLCDInt(14, 2, b, 1);
265         SendLCDString(15, 2, ".");
266         SendLCDInt(16, 2, c, 1);
267     }
268     else
269     {
270         SendLCDString(1, 1, "Tw=");
271         SendLCDfloat(4, 1, Tw);
272         SendLCDString(9, 1, "Ts=");
273         SendLCDfloat(12, 1, Ts);
274         SendLCDString(1, 2, "state=");
275         if (state==0)
276             SendLCDString(7, 2, "off");
277         else
278             SendLCDString(7, 2, " on");
279     }
280
281     ADCSRA |= 1<<ADSC;
282
283 }
```



## 6 ΣΧΗΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

### 6.1 Σχηματικά διαγράμματα

#### 6.1.1 Πλήρες σχηματικό διάγραμμα



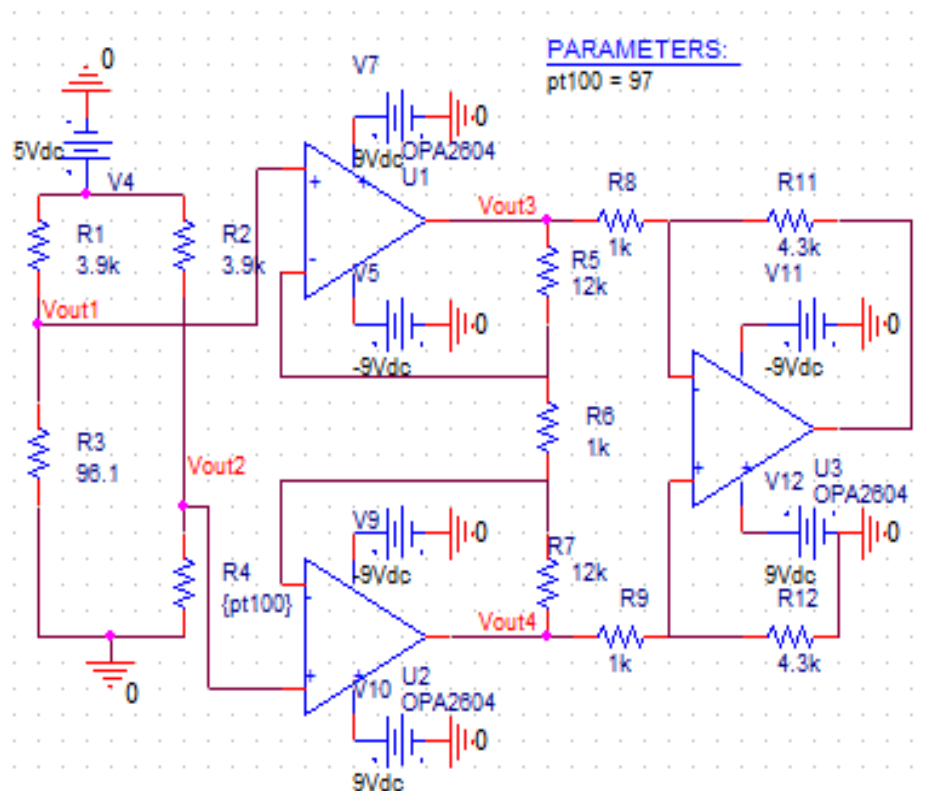
Σχ. 6.1: Το πλήρες σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας.

Αφού επιλέχθηκαν οι τελικές τιμές όλων των στοιχείων που απαρτίζουν την πλακέτα που κατασκευάσαμε υλοποιήσαμε ολόκληρη την κατασκευή στη σουίτα OrCAD της εταιρείας Cadence ώστε να πραγματοποιήσουμε τις απαραίτητες προσομοιώσεις.

Η συνολική κυκλωματική διάταξη απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα. Μπορούμε να διακρίνουμε τη συνδεσμολογία των κυκλωμάτων των τριών αισθητήρων θερμοκρασίας, την οθόνη LCD καθώς και τον μικροελεγκτή με όλες τις απαραίτητες συνδέσεις.

### 6.1.2 Σχηματικό διάγραμμα του ενισχυτή οργάνων

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η διάταξη του κυκλώματος του ενισχυτή οργάνων όπως σχεδιάστηκε στο OrCAD. Μπορούμε να παρατηρήσουμε τη γέφυρα Wheatstone καθώς και τα δύο στάδια ενίσχυσης του ενισχυτή οργάνων.



Σχ. 6.2: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του αισθητήρα.



## 6.2 Προσομοιώσεις

### 6.2.1 Προσομοιώσεις τάσεων εξόδου

Στο επόμενο σχήμα προσομοιώνεται η τάση εξόδου της γέφυρας Wheatstone συναρτήσει της μεταβολής της αντίστασης του αισθητήρα θερμοκρασίας Pt100.

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.2 του κυκλώματος του ενισχυτή οργάνων η τάση εξόδου της γέφυρας αντιστοιχεί στην τιμή της διαφοράς των τάσεων  $V_{out2} - V_{out1}$ .

Στην προσομοίωση είναι εμφανής η πολύ καλή γραμμικότητα που υπάρχει στη σχέση της τάσης εξόδου με την αντίσταση του αισθητήρα σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο θα χρησιμοποιείται η διάταξή μας.



Σχ. 6.3: Τάση εξόδου της γέφυρας Wheatstone.

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται η τάση εξόδου μετά το πρώτο στάδιο ενίσχυσης του ενισχυτή οργάνων.

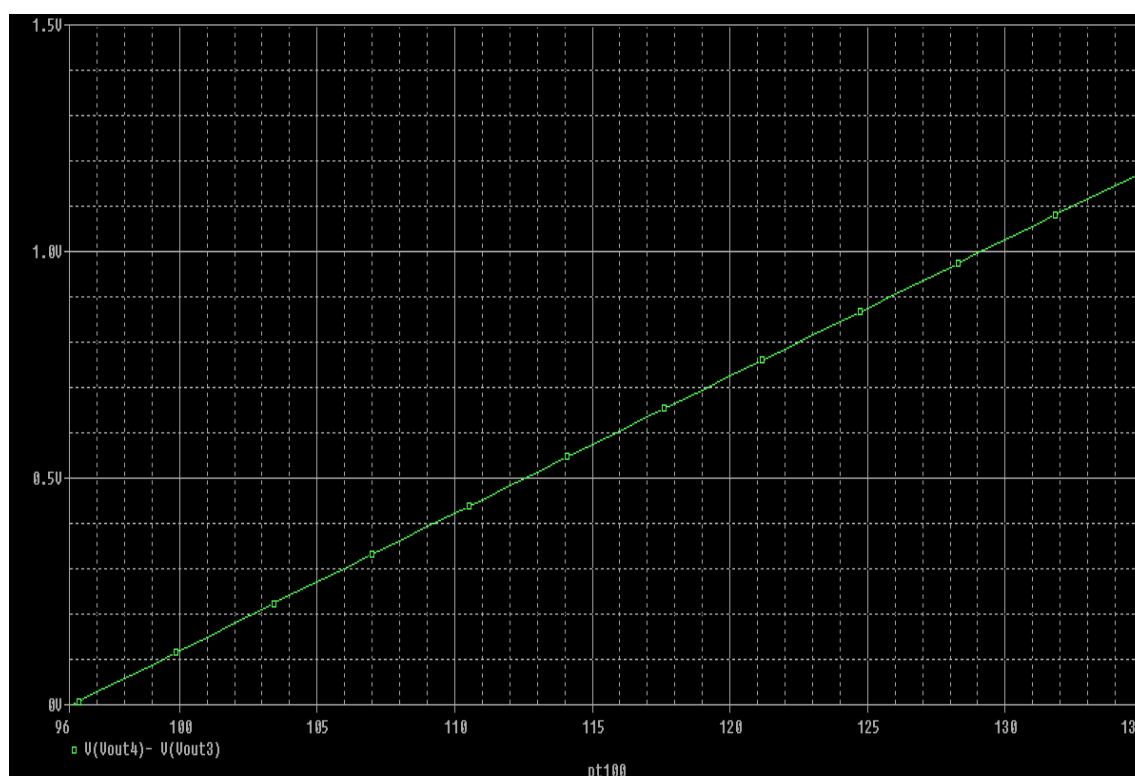
Η τάση αυτή αντιστοιχεί στη διαφορά των τάσεων  $V_{out4} - V_{out3}$  στους ακροδέκτες εξόδου των τελεστικών ενισχυτών του πρώτου σταδίου ενίσχυσης όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.2.

Στο πρώτο στάδιο ενίσχυσης του ενισχυτή οργάνων λαμβάνεται το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού κέρδους που απαιτείται.

Συγκεκριμένα σύμφωνα με τις τιμές των αντιστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν το κέρδος του πρώτου σταδίου είναι  $A = 25$ .

Στην προσομοίωση που πραγματοποιήσαμε διακρίνεται εμφανώς η πολύ καλή απόκριση των τελεστικών ενισχυτών OPA2604 που επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε.

Ειδικότερα όταν η διαφορά στην τάση εισόδου των ακροδεκτών των τελεστικών είναι ελάχιστα mV διατηρείται άριστη γραμμικότητα της τάσεως εξόδου κάτι που ήταν δύσκολο να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας άλλα μοντέλα τελεστικών ενισχυτών.



Σχ. 6.4: Τάση εξόδου μετά το πρώτο στάδιο ενίσχυσης του ενισχυτή οργάνων.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συνολική τάση εξόδου που λαμβάνουμε μετά και το δεύτερο στάδιο ενίσχυσης της διάταξης του ενισχυτή οργάνων.

Στο στάδιο αυτό επιτελείται κυρίως η διαφορική λειτουργία και δεν λαμβάνουμε μεγάλο κέρδος ενίσχυσης αφού σχεδόν τετραπλασιάζεται η διαφορική τάση που λαμβάνει στους δύο ακροδέκτες εισόδου του ο τελευταίος ενισχυτής που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα του ενισχυτή οργάνων.

Στην προσομοίωση παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης εξόδου του τελεστικού ενισχυτή συναρτήσει της διαφοράς των τάσεων που διαβάσει μεταξύ του αναστρέφον και μη-αναστρέφον ακροδέκτη του.

Τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν από την προηγούμενη προσομοίωση του πρώτου σταδίου ενίσχυσης αφού η πολύ καλή απόκριση και γραμμικότητα διατηρείται.

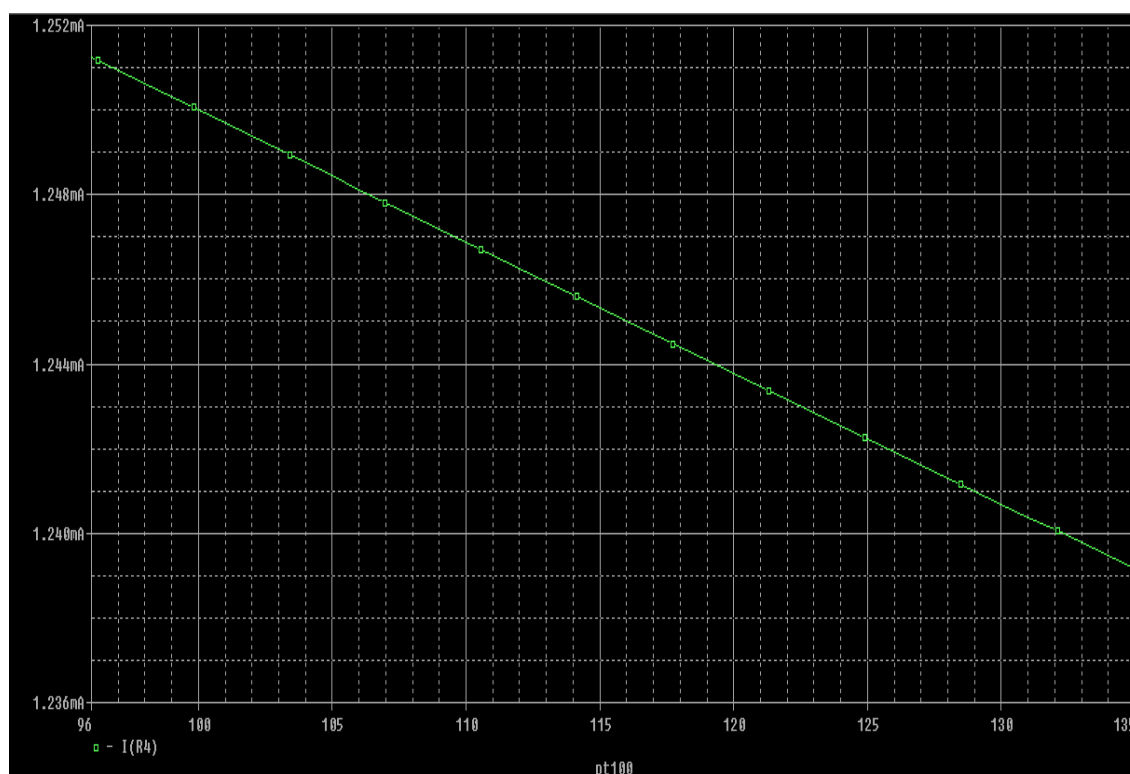


Σχ. 6.5: Τάση εξόδου μετά το δεύτερο στάδιο ενίσχυσης του ενισχυτή οργάνων.

### 6.2.2 Προσομοιώσεις στον αισθητήρα Pt100.

Τελικώς πραγματοποιήσαμε και κάποιες προσομοιώσεις στα άκρα του αισθητήρα Pt100 ώστε να διαπιστώσουμε τις συνθήκες κάτω από τις οποίες θα λειτουργεί ο αισθητήρας και να ελέγξουμε ότι διασφαλίζονται τα όρια ανοχής που έχει ορίσει ο κατασκευαστής.

Σύμφωνα λοιπόν με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή το ρεύμα που διαρρέει τον αισθητήρα πρέπει να είναι της τάξεως του 1mA ώστε να μην υπερθερμαίνεται ο αισθητήρας και να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία και απρόσκοπτη λειτουργία του σε βάθος χρόνου.



Σχ. 6.6: Ρεύμα που διαρρέει τον αισθητήρα θερμοκρασίας.

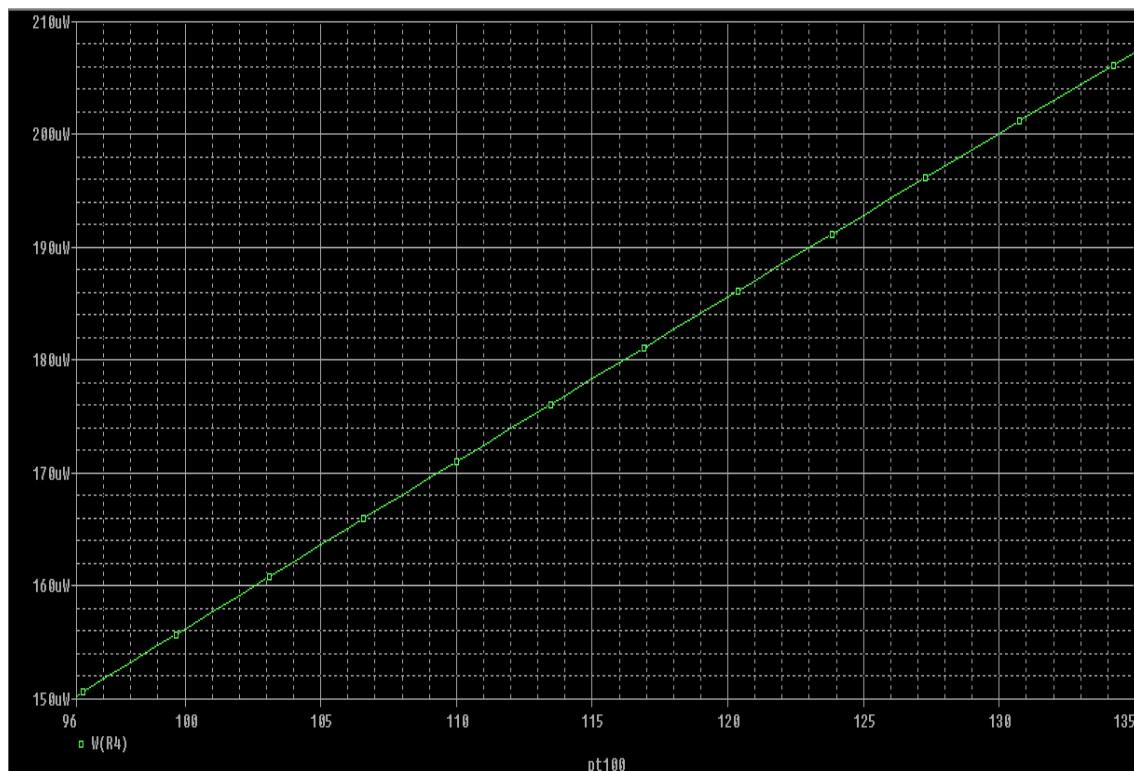
Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα το ρεύμα που διαρρέει τον αισθητήρα βρίσκεται στα επίπεδα του 1.2mA σε όλο το εύρος διακύμανσης της αντίστασης του.

Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας λειτουργίας του αισθητήρα είναι η ισχύς που καταναλώνεται μεταξύ των ακροδεκτών του.

Όσο αυξάνεται η ισχύς αυτή τόσο αυξάνεται και η αυτοθέρμανση του αισθητήρα και κατά συνέπεια εισάγεται σφάλμα στην θερμοκρασία που αντιλαμβάνεται ο αισθητήρας.

Σύμφωνα με τα κατασκευαστικά στοιχεία του αισθητήρα η αυτοθέρμανσή του είναι της τάξεως των  $0.5^{\circ}\text{C} / \text{mW}$ .

Όπως φαίνεται στην προσομοίωση η ισχύς που καταναλώνεται στην αντίσταση του αισθητήρα κυμαίνεται από  $150 - 210 \mu\text{W}$  οπότε η αυτοθέρμανση του δεν θα υπερβαίνει τους  $0.1^{\circ}\text{C}$ .



Σχ. 6.7: Ισχύς που καταναλώνεται στον αισθητήρα θερμοκρασίας.



## 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 7.1 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή αρχικώς μελετήθηκε και στη συνέχεια υλοποιήθηκε η κατασκευή μιας πλακέτας που θα επιτελεί τον έλεγχο της λειτουργίας ενός συστήματος θέρμανσης εφαρμόζοντας λειτουργία αντιστάθμισης της εξωτερικής θερμοκρασίας.

Τα επιμέρους τμήματα της κατασκευής όπως, οι αισθητήρες θερμοκρασίας που χρησιμοποιήθηκαν και οι πλήρεις κυκλωματικές διατάξεις των, καθώς και ο προγραμματισμός του μικροελεγτή της πλακέτας, που αποτελεί ίσως το σημαντικότερο κομμάτι της κατασκευής, παρουσιάζονται και αναλύονται εκτενώς στα αντίστοιχα κεφάλαια της εργασίας.

Καθ' όλη τη διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής του συστήματος αλλά και κατά την πραγματοποίηση μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων κάναμε αρκετές παρατηρήσεις και εξάγαμε κρίσιμα συμπεράσματα όσον αφορά τη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία της κατασκευής μας.

Κάποιοι βασικοί στόχοι που είχαμε θέσει κατά το ξεκίνημα της εργασίας, κυρίως όσον αφορά την συνολική ακρίβεια και απόδοση του συστήματός μας, αποτέλεσαν βασικό οδηγό κατά τη διάρκεια εκπόνησής της και μπορούμε να πούμε ότι εκπληρώθηκαν με αξιοσημείωτη επιτυχία.

Ωστόσο η απολύτως εύρυθμη λειτουργία της κατασκευής μας δεν μπορεί να εξακριβωθεί και να εξασφαλιστεί πλήρως στο πλαίσιο μιας σειράς προσομοιώσεων και μετρήσεων κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Με την εγκατάσταση και μακρόχρονη λειτουργία του ελεγκτή σε πραγματικές συνθήκες θα μπορούμε να εκτιμήσουμε αξιόπιστα την απόδοση της κατασκευής και να εντοπίσουμε πιθανές παρεκκλίσεις στη λειτουργία της.

### 7.2 Προοπτικές

Η κατασκευή μας, όσον αφορά το κύκλωμα των αισθητήρων, υλοποιήθηκε και λειτουργεί με αξιοσημείωτη επιτυχία εμφανίζοντας σχετικά μικρά σφάλματα. Ωστόσο υπάρχουν αρκετά περιθώρια βελτίωσης της πλακέτας τοποθετώντας ηλεκτρονικά εξαρτήματα που εμφανίζουν καλύτερα τεχνικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αντιστάσεις με μικρότερη ανοχή ώστε να επιτύχουμε πιο ακριβή αποτελέσματα στο στάδιο της ενίσχυσης του σήματος ή αισθητήρες θερμοκρασίας καλύτερης ποιότητας

κατασκευής μεταβάλλοντας όμως αισθητά το συνολικό κόστος κατασκευής του ελεγκτή.

Επίσης υπάρχουν προοπτικές αναβάθμισης της λειτουργίας της πλακέτας εισάγοντας νέες παραμέτρους λειτουργίας και βελτιώνοντας τον κώδικα του μικροελεγκτή.

Συγκεκριμένα θα μπορούσαμε να πραγματοποιούμε έλεγχο της εγκατάστασης χρησιμοποιώντας κάποιο μοντέλο πρόβλεψης (MPC, Model Predictive Control) συνυπολογίζοντας δηλαδή και κάποια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτιρίου σε συνδυασμό με την μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας. Με τη χρήση τέτοιων μοντέλων μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας [13] .

Μια άλλη βελτιωμένη εκδοχή της κατασκευής μας θα είχε τη δυνατότητα να παρατηρεί και να αποθηκεύει την απόκριση του συστήματος σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας δημιουργώντας κάποια δεδομένα και στη συνέχεια βασισμένη σε αυτά τα δεδομένα να βελτιώνει διαχρονικά την αποδοτικότητα του ελεγκτή.



## 8 Βιβλιογραφία

- [1] Β. Η. Σελλούντος, ΘΕΡΜΑΝΣΗ & ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ, Εκδόσεις ΦΟΙΒΟΣ, Αθήνα, 1995.
- [2] Σ. Κατσιμίχας, *Ετήσια Απόδοση Συστημάτων Θέρμανσης με Λέβητες και Αντλίες Θερμότητας*, 2013.
- [3] Δ. Καράλης, *Αρχές Λειτουργίας και Εφαρμογές Αισθητήρων Θερμοκρασίας*, Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης.
- [4] Ι. Ν. Αβαριτσιώτης, *Τεχνολογία Αισθητήρων και Μικροσυστημάτων με Εργαστηριακές Ασκήσεις*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2011.
- [5] Ι. Ν. Αβαριτσιώτης, *Τεχνολογία Πολυψηφιδικών Πακέτων*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 1997.
- [6] «STMicroelectronics Home Page,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.st.com>.
- [7] «Fairchild Semiconductor Home Page,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.fairchildsemi.com>.
- [8] Χ. Σαρίγγελος, *Σχεδίαση Ενισχυτή Οργάνων Μετρήσεων (Instrumentation Amplifier) για Ενίσχυση Ηλεκτρικού Σήματος σε Φορητό Καρδιογράφο*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2014.
- [9] «Burr-Brown Home Page,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.burr-brown.com>.
- [10] Α. Καλαμάρας, *Ανάπτυξη Εφαρμογών με την Σειρά Μικροελεγκτών Mega της ATMEL*, Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2009.
- [11] «Atmel Corporation Home Page,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.atmel.com>.
- [12] «Winstar Display Home Page,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.winstar.com>.
- [13] S. Prívará, J. Siroky, L. Ferkl και J. Cigler, «Model predictive control of a building heating system: The first experience,» *Energy and Buildings* 43, pp 564–572, 2011 .

